MPM3DPP 算例手册

清华大学航天航空学院
计算动力学研究室

2013 年 10 月 6 日

目录

1 引言 **3**

2 球沿斜面下滑过程模拟 **4**
2.1 问题描述 4
2.2 结果分析 5

3 Taylor 杆碰撞模拟 **6**
3.1 问题描述 6
3.2 结果分析 8

4 圆环碰撞问题模拟 **9**
4.1 问题描述 9
4.2 结果分析 10

5 二维爆炸气体膨胀模拟 **12**
5.1 问题描述 12
5.2 结果分析 13

6 标准圆筒试验 **26**
6.1 问题描述 26
6.2 结果分析 28

7 激波管问题模拟 **31**
7.1 问题描述 31
7.2 结果分析 32

8 一维板条 TNT 爆轰 **34**
8.1 问题描述 34
8.2 结果分析 35

9 聚能射流模拟 **44**
9.1 问题描述 44
9.2 结果分析 46

10 切削加工过程模拟 **49**
10.1 问题描述 49
10.2 结果分析 51

11 爆轰驱动飞片数值模拟 **54**
11.1 问题描述 54
11.2 结果分析 55

12 水下爆炸模拟 **60**
12.1 问题描述 60
12.2 结果分析 62

13 超高速碰撞问题模拟 **64**
13.1 问题描述 64
13.2 结果分析 65

14 卵形弹头钢弹侵彻铝板 **67**
14.1 问题描述 67
14.2 结果分析 67

15 杆式穿甲弹侵彻金属靶板 **73**
15.1 问题描述 73
15.2 结果分析 74

16 自然战斗部的破片模拟 **80**
16.1 问题描述 80
16.2 结果分析 82

17 卵形弹侵彻钢筋混凝土靶板 **87**
17.1 问题描述 87
17.2 结果分析 89

18 机场跑道爆炸毁伤效应模拟 **91**
18.1 问题描述 91
18.2 结果分析 92

19 弹体侵彻陶瓷靶板 **96**
19.1 问题描述 96
19.2 结果分析 98

1 引言

在开发 PeneBlast 仿真系统的过程中，我们设计了不同类型的算例进行程序测试。为了方便用户对 MPM3DPP 计算过的标准算例有个总体上的了解和采用不同的计算程序（版本）计算时进行比较和参照，在此把 MPM3DPP 计算过的算例进行具体说明，并对计算结果分析，形成较为详细的算例文档。

具体文档包含问题描述和结果分析两部分。问题描述中包含了问题背景，模型参数，材料模型，离散参数以及模拟时间和时间步长等基本设置。结果分析中将 mpm 的计算结果与实验值或理论值进行比较，分析了结果的可靠性、正确性。

2 球沿斜面下滑过程模拟

2.1 问题描述

Bardenhagen 等人[1] 在测试物质点的接触算法时模拟了弹性球体在斜面上的下滑过程。当斜面的倾角 θ 满足 $\tan\theta > 3.5\mu$ 时球既滚又滑，否则球只滚不滑（纯滚动），其中 μ 为球和斜面之间的摩擦系数。

球的半径 $R = 1.6$m，斜面板的长度为 20m，宽度为 4m，厚度为 0.8m，平板的底部固定，如图2.1所示。重力加速度取为 9.8m/s^2，球和平板均采用弹性模型，材料参数如表2.1所示（采用 m-kg-s 单位）。

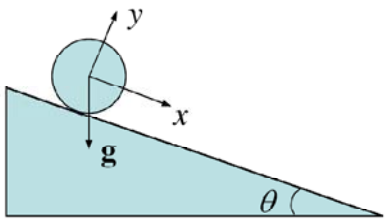


图 2.1: 模型示意图

表 2.1: 材料参数

	密度 (kg/m^3)	杨氏模量 (Pa)	泊松比
球	1×10^3	4.2×10^6	0.4
平板	1×10^4	4.2×10^7	0.4

共分析了两种情况。第一种情况下，斜面的倾角 $\theta = \pi/4$，摩擦系数取为 0.4，这时小球将会只滚不滑；第二种情况下，面的倾角 $\theta = \pi/3$，摩擦系数取为 0.2，这时小球将会既滚又滑。两种情况的输入数据文件分别为 Roll_stick.xmp 和 Roll_slip.xmp（位于目录 data/TestDatabase/Level-2 下），背景网格和质点离散参数列于表2.2中，质点离散模型如图2.2所示。

表 2.2: 离散参数

	Roll_stick	Roll_slip
背景网格	$20 \times 4 \times 5.4$	$20 \times 4 \times 5.4$
网格尺寸	$0.2 \times 0.2 \times 0.2$	$0.2 \times 0.2 \times 0.2$
球体质点数	17256	17256
平板质点数	64000	64000

模拟时间 (EndTime) 为 2s，时间步长因子 (TimeStep:factor) 取为 0.6。

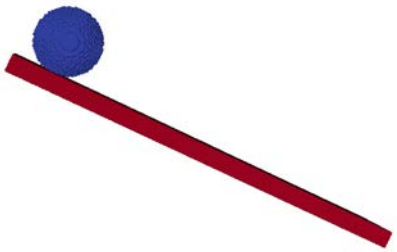


图 2.2: 质点离散

2.2　结果分析

对于一个初始时刻稳定的刚性球在斜面上的运动规律可以用它的质心的位移来描述，球质心位置的 x 分量应满足如下关系：

$$x_{\mathrm{cm}} = \begin{cases} x_0 + \frac{1}{2}gt^2(\sin\theta - \mu\cos\theta), & \tan\theta > 3.5\mu \quad \text{(slip)} \\ x_0 + \frac{5}{14}gt^2\sin\theta, & \tan\theta \leqslant 3.5\mu \quad \text{(stick)} \end{cases} \tag{2.1}$$

其中 x_0 为质心初始位置的 x 分量，g 为重力加速度。

图2.3给出了两种情况下分别采用 USF 格式和 MUSL 格式得到的质心位置随时间变化曲线，并和解析解进行了比较。结果表明，无论采用 MUSL 还是 USF 积分格式，数值结果均和理论解吻合很好。

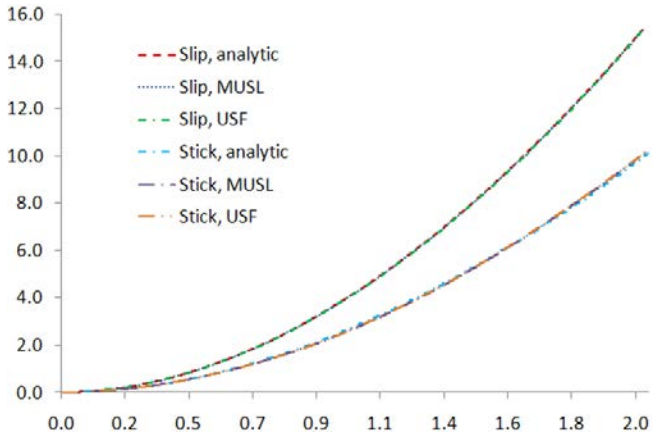


图 2.3: 模拟与理论解的比较

3 Taylor 杆碰撞模拟

3.1 问题描述

经典泰勒杆试验是由 G.I.Taylor 于 1948 年建立，它通过柱形平头弹垂直撞击刚性靶研究高应变率对材料动态屈服强度影响。该实验具有简单、经济、高效的特点。

取圆杆材料为 OFHC 铜，计算参数选自文献 [2]，并以其中的实验结果作为参照。杆的初始长度 $L_0 = 25.4\text{mm}$，直径 $D_0 = 7.6\text{mm}$，初速度 $v_0 = 190\text{m/s}$，初始构型如图3.1所示，碰撞示意图如图3.2所示。

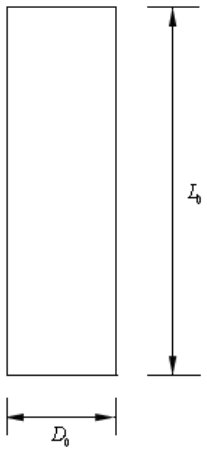


图 3.1: 泰勒杆初始构型

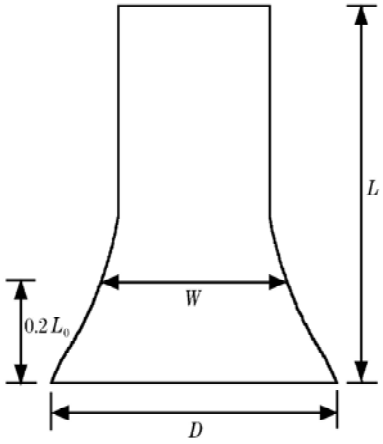


图 3.2: 泰勒杆最终构型

本算例采用 mm-g-ms 单位。铜的密度 $\rho = 8.93 \times 10^3\text{g/mm}^3$，弹性模量 $E = 1.17 \times 10^5$ MPa，泊松比 $\nu = 0.35$。分别采用了简化 Johnson-Cook 塑性模型（即不考虑温度效应）和 Johnson-Cook 塑性模型，其中简化 Johnson-Cook 塑性模型材料参数如表3.1所示[2]，Johnson-Cook 塑性模型的材料参数如表3.2所示，损伤模型参数如表3.3所示。在 Johnson-Cook 塑性模型中，室温 $T_{\text{Room}} = 293.0\text{K}$，溶化温度 $T_{\text{Melt}} = 1900\text{K}$，参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0 = 0.001$，比热容 $c_p = 385$。采用 Mie-Gruneisen 状态方程模拟铜在高温高压下的行为，其参数如表3.4所示。

表 3.1: 简化 Johnson-Cook 塑性模型材料参数

CASE	σ_y/MPa	B/MPa	C	n	epso
A-1	250.0	0.0	0.0	1.0	0.001
B-1	157.0	425.0	0.0	1.0	0.001

由于该模型具有对称性，利用对称边界条件取其四分之一进行计算，背景网格和物体的离散参数如表3.5所示，最终的质点离散如图3.3所示。输入数据文件在 “data/Validation/taylor88/input_data” 目录下。

模拟时间 (EndTime) 为 0.08ms，时间步长因子 (TimeStep:factor) 取为 0.6。

表 3.2: Johnson-Cook 塑性模型材料参数

CASE	σ_y/MPa	B/MPa	C	n	m
C-1	150.0	490.0	0.0	1.0	1.0
D-1	118.0	484.0	0.0	0.74	1.0
E-1	98.0	368.0	0.025	0.7	1.09

表 3.3: Johnson-Cook 损伤模型材料参数

D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
0.5	4.5	-3.03	0.014	1.12

表 3.4: Mie-Gruneisen 状态方程材料参数

c_0	c_1	c_2	c_3
3.94×10^3	1.3863×10^5	4.9×10^{-1}	3.4518×10^5

表 3.5: 离散参数

背景网格	$11.4 \times 11.4 \times 26.6$mm
网格尺寸	$0.76 \times 0.76 \times 0.76$mm
质点总数	5293
Taylor 杆质点数	5293

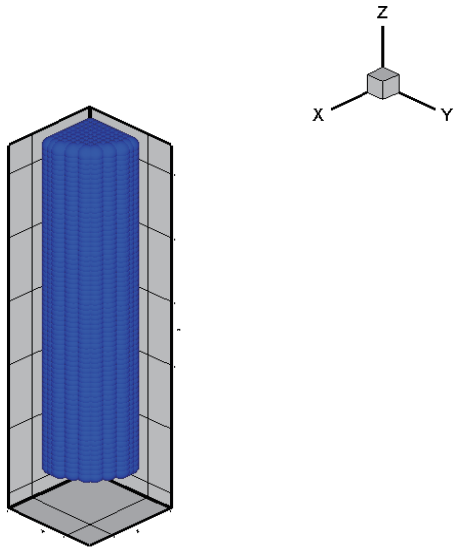


图 3.3: 质点离散

3.2 结果分析

文献 [2] 给出了考察计算结果与实验结果的误差的定义：

$$\Delta = \frac{1}{3}\left[\frac{|\Delta L|}{L_t} + \frac{|\Delta D|}{D_t}\frac{|\Delta W|}{W_t}\right]$$

式中 L 和 D 分别是撞击结束后的长度和撞击端的直径，W 是距离刚性墙 $0.2L_0$ 的直径。表3.6给出了 MPM3D® 对各种情况得到的计算结果和实验结果的比较。

表 3.6: 计算结果与实验结果的比较

	Case	L/mm	D/mm	W/mm	Δ
实验	-	16.2	13.5	10.1	-
MPM3D	A-1	15.9	20.1	8.1	0.235
	B-1	16.4	13.9	9.8	0.0239
	C-1	16.5	14.3	9.6	0.0391
	D-1	16.5	14.4	9.6	0.0449
	E-1	16.5	14.6	9.7	0.0464

4 圆环碰撞问题模拟

4.1 问题描述

弹性圆环的碰撞可以用来测试接触算法，这个问题被用来研究 SPH 的拉伸不稳定性和数值断裂 [1]。大变形的模拟对于测试程序而言是一个挑战，圆环碰撞之后应不会分解。
本算例采用单位制炸药采用 mm-g-ms 单位，圆环的内外半径分别为 30mm、40mm，即其厚度为 10mm。圆环采用可压 Neo-Hookean 材料模型，其体积模量 121.7MPa，剪切模量 26.1MPa，密度为 1.01g/cm^3。圆环的初始速度为 30m/s，所以碰撞相对速度为 60m/s。圆环间的，摩擦系数为 0.1。

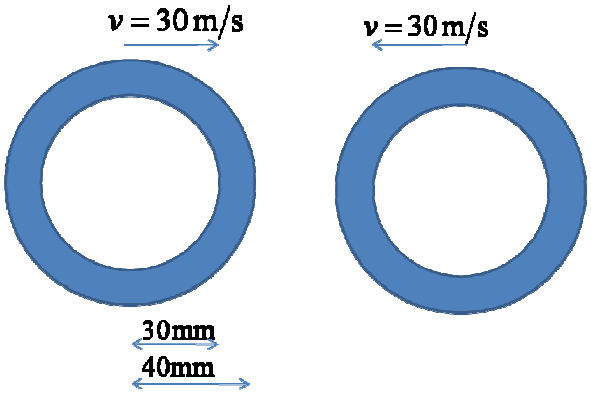


图 4.1: 模型示意图

圆环均采用弹性材料模型，参数如表4.1所示，离散参数如表4.2所示，离散模型如图4.2所示，该算例输入数据文件为 Rings.xmp（位于目录 data/TestDatabase/Level-2 下）。

表 4.1: 材料参数

密度 (kg/m^3)	杨氏模量 (Pa)	泊松比
1×10^{-3}	73.076	0.4

表 4.2: 离散参数

背景网格	$200 \times 120 \times 10$
网格尺寸	$2 \times 2 \times 2$
Body 0 质点数（圆环 1）	21960
Body 1 质点数（圆环 2）	21960

模拟时间 (EndTime) 为 5ms，时间步长因子 (TimeStep:factor) 取为 0.5。

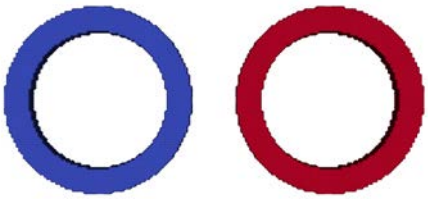
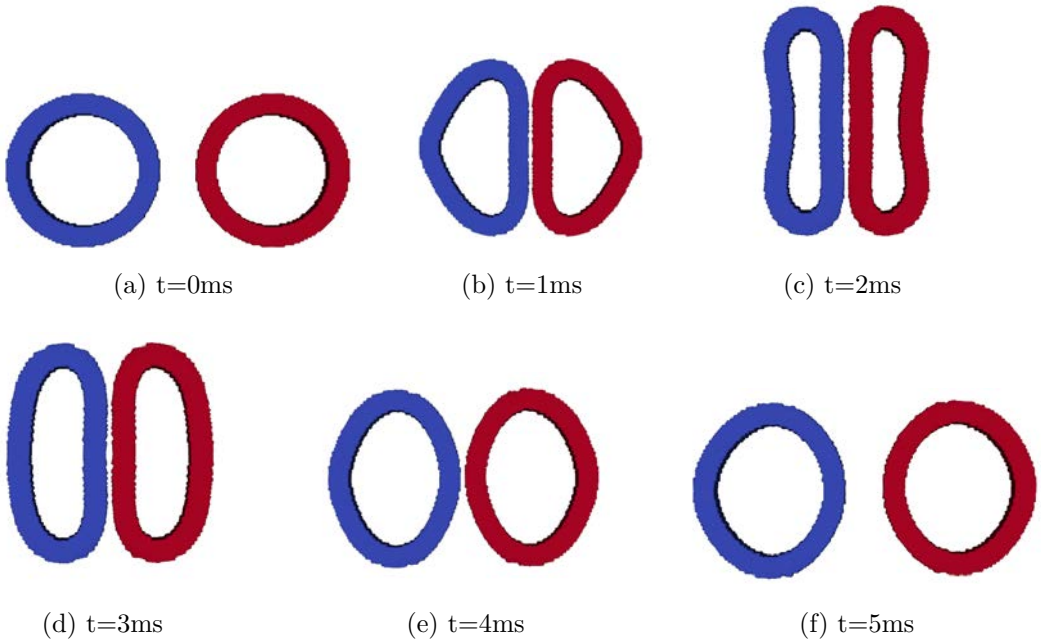


图 4.2: 离散示意图

4.2 结果分析

图4.3为各时刻的计算结果，采用时间步长因子为 0.5。图3(a)为物质点的初始构型，其他子图为圆环碰撞分离的过程。图4.4为不同时间步长下总能量的时间变化曲线，程序采用 musl 积分格式，此格式对总能量有一定的耗散，当时间不长 0.1 时，这种现象比较明显。随着时间步长的增加，总能量会不断升高。对比可见，当时间步长取 0.5，总能量保持比较稳定。



(a) t=0ms (b) t=1ms (c) t=2ms

(d) t=3ms (e) t=4ms (f) t=5ms

图 4.3: 弹性圆环碰撞过程

标准 mpm 的接触算法的接触探测算法会使得接触在实际接触之前发生 [1] ，即如果两个物体间的距离小于两倍背景网格尺寸时接触发生。在这里我们使用改进的接触探测方法来避免这种过早的接触。近距离接触的弹性圆环碰撞结果见图4.5所示。对比图4.3可见，这种改进的接触探测避免了碰撞时在两个圆环之间出现的缝隙。

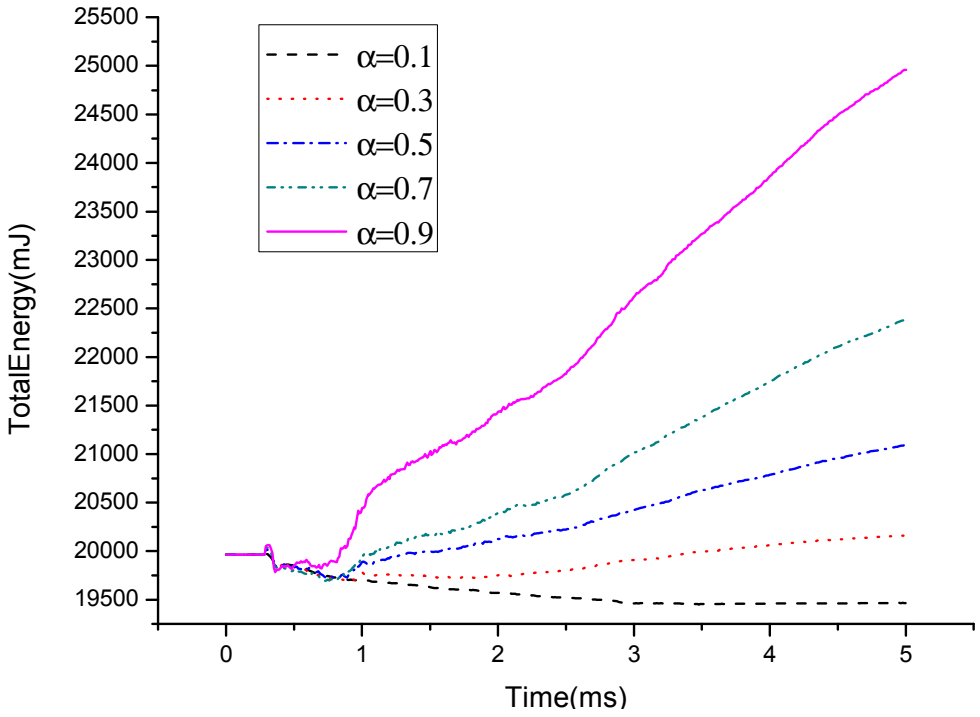
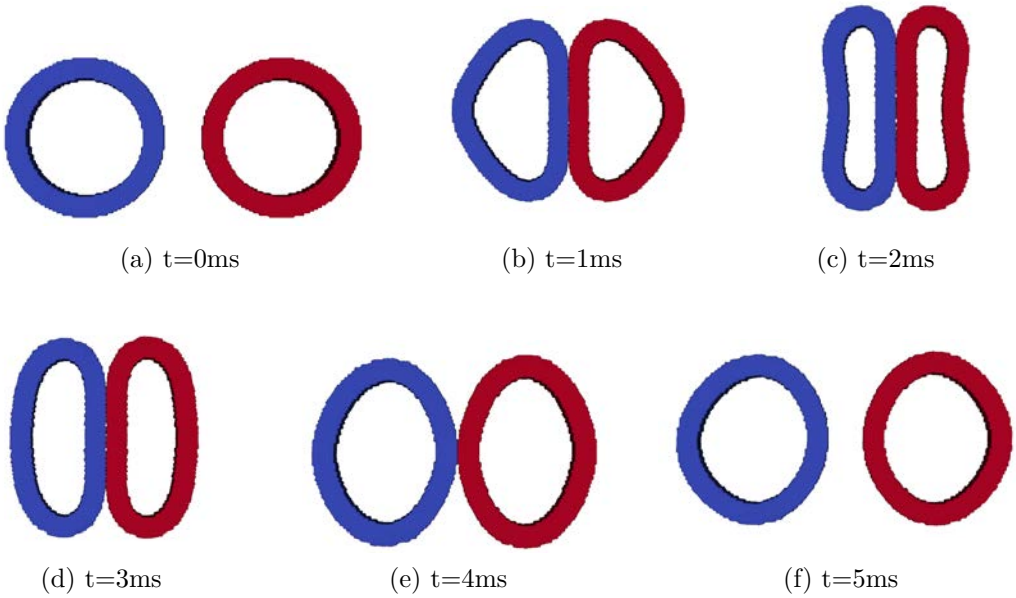


图 4.4: 不同时间步长下总能量的时间变化曲线



(a) t=0ms (b) t=1ms (c) t=2ms

(d) t=3ms (e) t=4ms (f) t=5ms

图 4.5: 改进接触探测的弹性圆环碰撞过程

5 二维爆炸气体膨胀模拟

5.1 问题描述

柱形 TNT 炸药的初始半径为 0.1m，假设炸药沿着中心对称轴在同一时间起爆且爆燃速度是无限的，故 HE 在瞬间转换为气体，并且气体占据初始 HE 空间。爆炸外部周围介质假设为真空。模型如图5.1所示。试模拟该问题中爆炸气体膨胀过程。详细描述见文献 [3]。由于假设炸药沿着中心对称轴在同一时间起爆，因此，变量与中心轴方向无关，故可将问题看做是 $x \sim y$ 平面内的二维问题，另外由于该平面问题具有对称性，取其 1/4 来建模。由于该问题只关注爆炸气体膨胀的过程，需要假设爆燃速度是无限的为实现改过程可使所有质点在同一时间起爆即可。

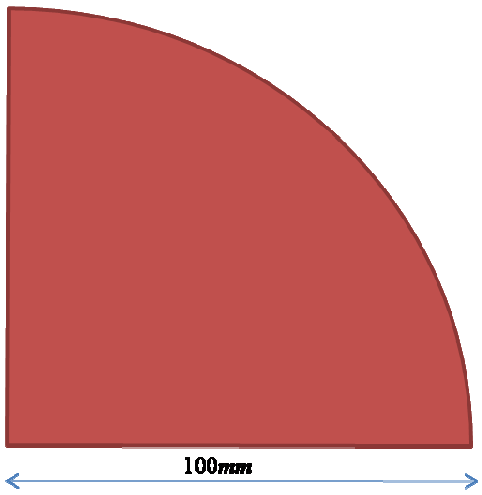


图 5.1: 模型示意图

本算例采用单位制炸药采用 mm-g-ms 单位，炸药采用高能炸药材料，参数分别如表5.1所示。这里采用面起爆方式，面的法线方向为 z 方向，原则是实现 HE 在瞬间转换为气体，即所有炸药同时起爆。

表 5.1: 高能炸药材料材料参数

密度 (g/mm^3)	爆速 (mm/ms)
1×10^{-3}	6930

采用 Jones-Wilkins-Lee 状态方程，各参数是由实验数据拟合所得到的系数，表5.2系数值取自 Autodyn 软件的材料库。

该算例输入数据文件为 2DTNTgas.xmp （位于目录 data/TestDatabase/Level-2 下）。模拟时间 (EndTime) 为 0.11ms，时间步长因子 (TimeStep:factor) 取为 0.1。

为比较采用不同初始质点数来模拟时对计算结果的影响，列出如下两种情况：离散参数如表5.3所示，CASE-A 的最终质点离散如图所示5.2。

表 5.2: JWL 状态方程材料参数

P_{CJ}(MPa)	A(MPa)	B(MPa)	R_1	R_2	ω	e_0(MJ/mm^3)
2.1×10^7	3.7377×10^5	3.7471×10^3	4.15	0.90	0.35	6000

表 5.3: 离散参数

	CASE-A	CASE-B	CASE-C
背景网格	$800 \times 800 \times 10$	$800 \times 800 \times 4$	$250 \times 250 \times 2$mm
网格尺寸	$10 \times 10 \times 10$	$4 \times 4 \times 4$	$10 \times 10 \times 2$
质点数	313	1961	313

同时为防止数值断裂，CASE-C 算例采用移动网格技术，移动网格时间因子为 0.8，并结合了自适应粒子分裂方法，自适应因子为 0.55，表5.3 中 CASE-C 的网格尺寸和质点数为初始时刻的值。

5.2 结果分析

为了对计算结果与其它算法进行对比，本文采用软件 Autodyn 提供的 SPH、Lagrange、Eulerian 算法分别对该问题进行模拟计算以便比较，另外为简略，前面三种算法的结果依次用 SPH-1、Lag、Eule 来标示。由于 Autodyn6.1 中提供了 TNT 的 JWL 状态方程参数中有一项为：Auto-convert to Ideal Gas，一般缺省值为 YES，本文也采用了缺省值，同时也用 SPH 计算了不打开此选项时的模拟过程，标记为 SPH-2。采用 Autodyn6.1 软件计算时，本文在建模时设置了间隔 10mm 的起爆圈以近似实现全面爆轰。从结果上来看，这点实现了。

需要说明的一点是，对于无网格的算法，由于粒子分布不均匀导致在取 profile 数据绘曲线时造成曲线的间断或者跳跃性很大。实际情况可仅参考各个峰值。

1. MPM3D 计算结果数据

图3(a)、图3(b)、图3(c)和图3(d)分别给出了使用 313 个初始质点数模拟时的以 1μs 的时间间隔模拟，由 0ms 至 11μs 时间内的密度、压力、比内能和速度沿膨胀气体的半径的曲线分布图。

2. 半径比较

为了对 TNT 膨胀后的外形进行比较，本文比较了各种算例计算后的半径见下表5.4。从比较结果来看，针对 MPM3D 算法来讲，不同的初始质点数对膨胀后的半径有很大的影响；与 Anutodyn6.1 提供的各算法来看，MPM 计算后的半径明显大于前者，另外 Autodyn6.1 各个算法的结果半径基本一致。

3. 压力比较

图4(a)、图4(b)、图4(c)、图4(d)给出了沿着径向瞬时压力分布图，图中画出了任意选取的四个瞬时 $t = 0.02$ms，0.04ms，0.08ms 和 0.11ms 的结果。由于密度的比较结果同压力的比较结果，故未列出密度的比较结果。

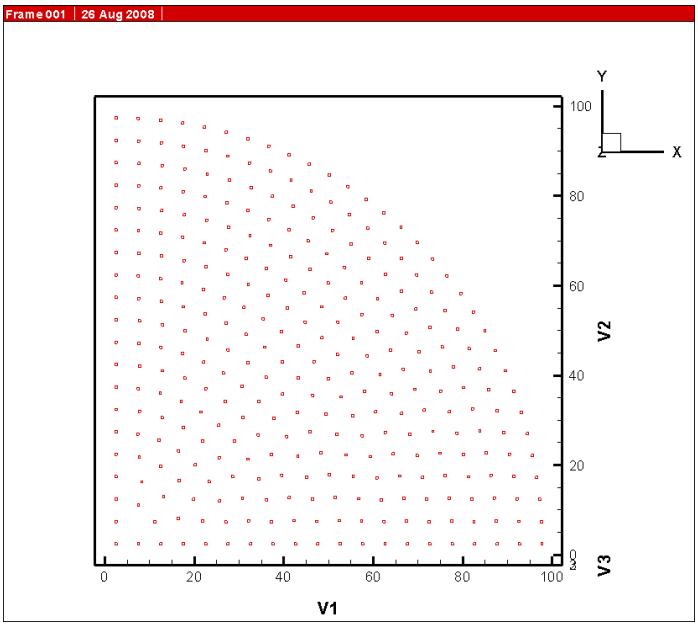


图 5.2: 离散示意图

从比较结果来看，各时刻的压力峰值从小到大依次排列为 Eule、Lagrange、MPM3D、SPH；前三者，各曲线的数量级和走向趋势一致，而 SPH 在 0.04ms 以前与其它算法基本一致，之后就基本不同了；针对 MPM3D，CASE-B 与 CASE-A 基本一致，但在后半阶段峰值 CASE-B 明显高于 CASE-A。

4. 指定点物理量比较

图5.7给出了中心点压力峰值的时间历程比较图。

5. 压力云图

为了考察程序中添加的 μ 设置项 (抗剪切作用)、质点随着半径梯度分布和添加空气材料分别对计算结果的影响，设计了相应的算例。图5.8给出了各算法在最后时刻的压力云图，其中 adap 表示采用自适应算法，后面参数为自适应分裂因子。

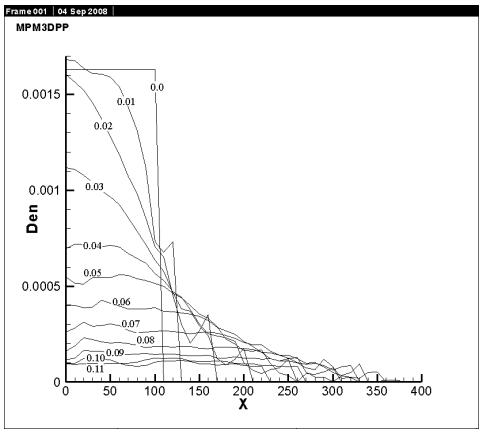
图5.9反应了质点沿半径梯度分布（即内疏外密）和 μ 对计算结果的影响

图5.10考察当 TNT 置于空气中时，添加空气材料和 MU 的设置对计算结果的影响：

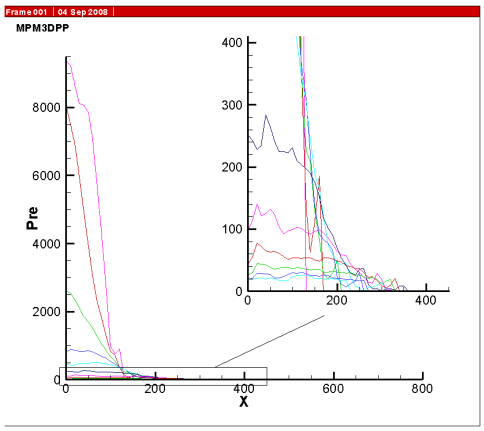
其中空气采用的材料的 $\mu = 1000$ 为定值，改变空气的 μ 会导致出现乱码，计算结果出错！

CASE-C 采用了自适应粒子分裂和移动背景网格技术，由表 2 膨胀半径可以发现使用这两种方法取得了较好的模拟效果，图5.11为各个时刻压力云图。1.1ms 时的压力云图如图5.12所示，根据图中的标尺可看出 TNT 传播的范围。

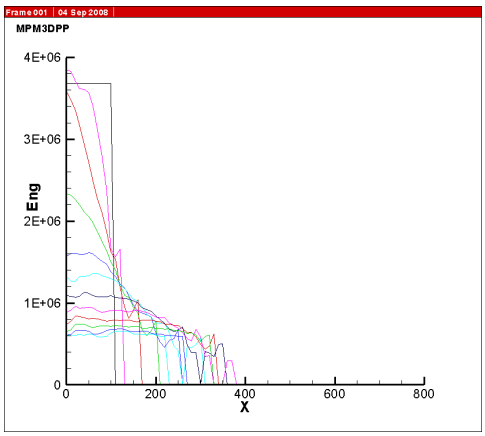
其余情况下的云图如图5.13所示。



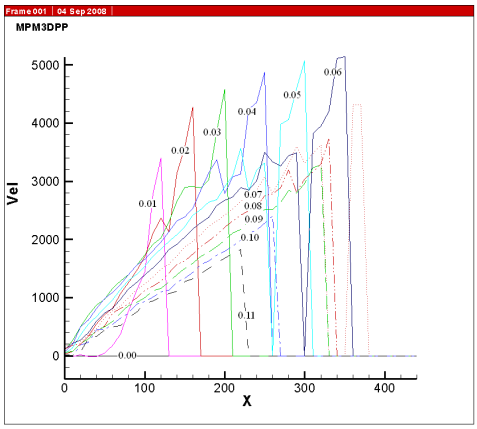
(a) 密度分布图



(b) 压力分布图



(c) 比内能分布图

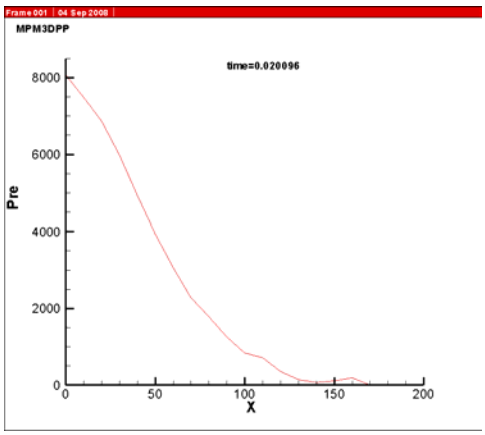


(d) 速度分布图

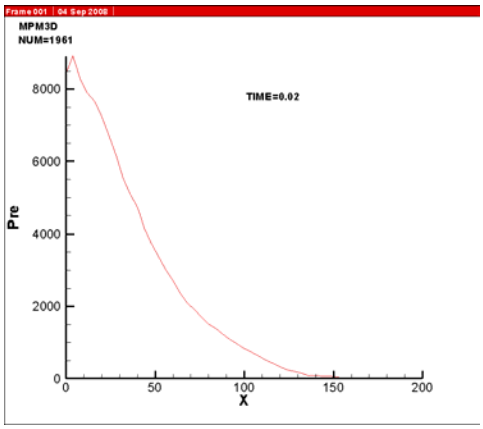
图 5.3: 爆炸过程相关变量的分布规律

表 5.4: 膨胀各时刻半径比较

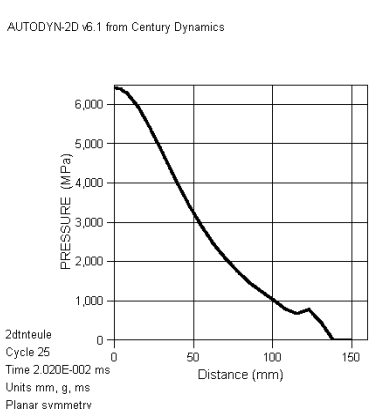
时间 (ms)	MPM3D			Autodyn6.1			
	CASE-A	CASE-B	CASE-C	Lag	Eule	SPH-1	SPH-2
0.0	100	100	100	100	100	100	100
0.01	116	136	120	119	113	131	131
0.02	154	192	165	150	138	171	171
0.03	199	257	215	187	174	211	211
0.04	247	325	255	219	207	251	251
0.05	296	394	300	268	243	291	291
0.06	349	463	350	302	281	331	331
0.07	399	531	385	341	332	371	371
0.08	452	606	420	388	375	411	411
0.09	504	664	475	414	418	451	451
0.10	561	745	505	475	466	491	491
0.11	618	801	550	510	512	531	531



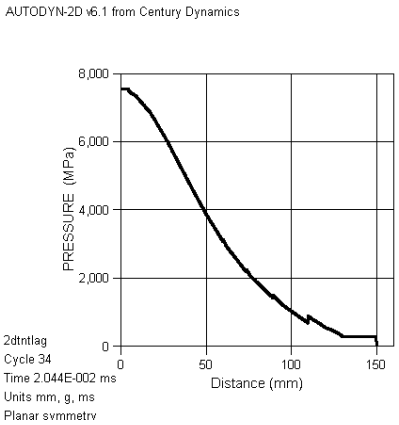
(a) CASE-A



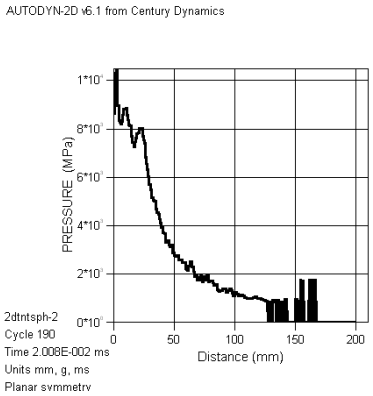
(b) CASE-B



(c) Euler

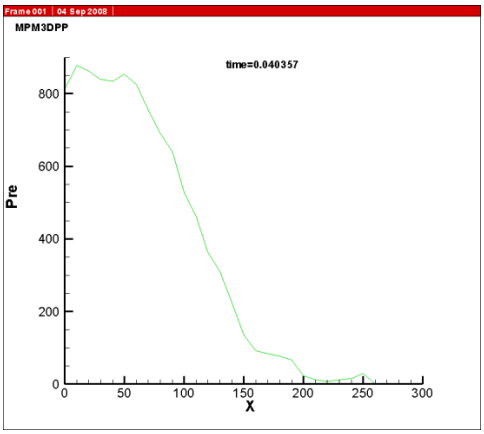


(d) LAGRANGE

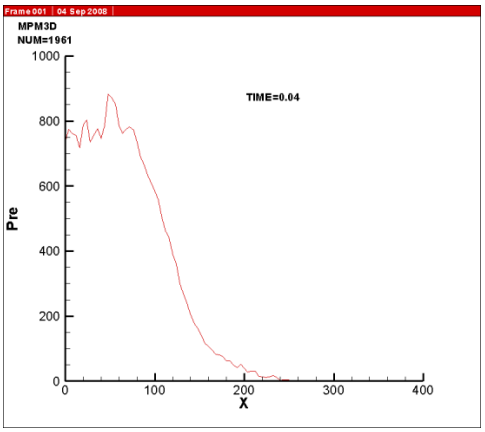


(e) SPH

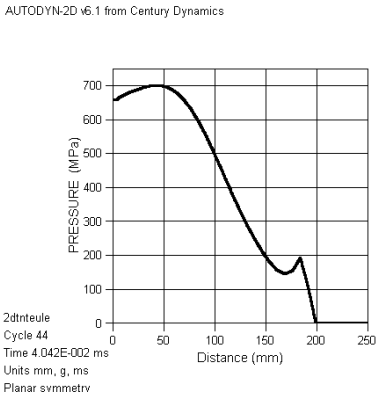
图 5.4: t=0.02ms 压力分布图



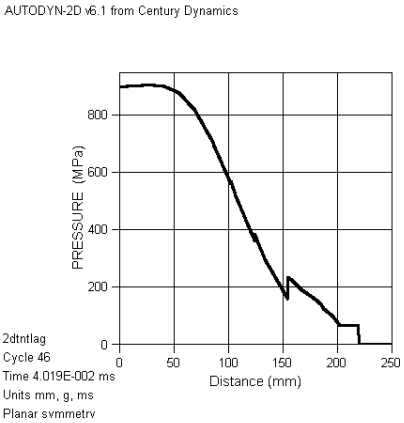
(a) CASE-A



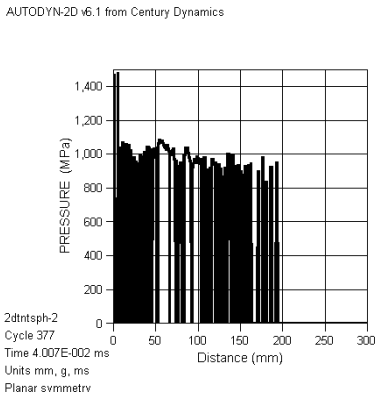
(b) CASE-B



(c) Euler

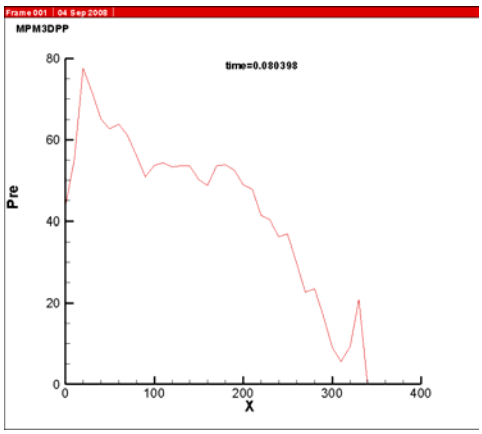


(d) LAGRANGE

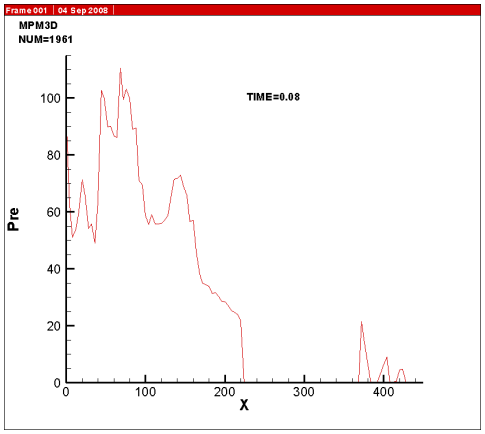


(e) SPH

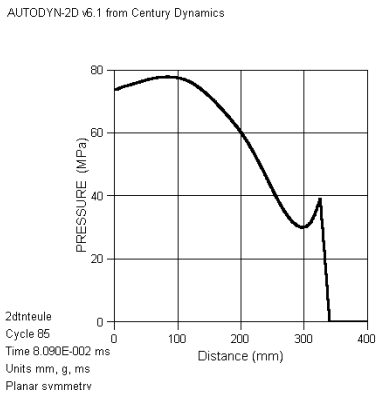
图 5.5: t=0.04ms 压力分布图



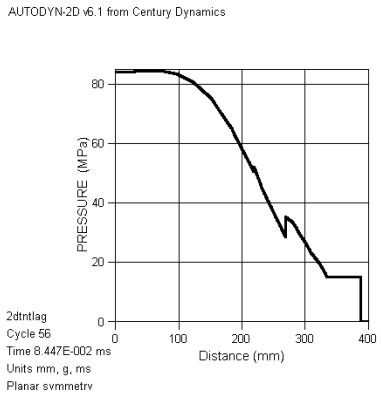
(a) CASE-A



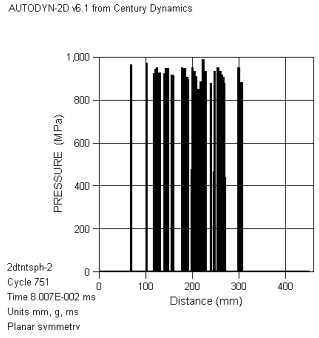
(b) CASE-B



(c) Euler

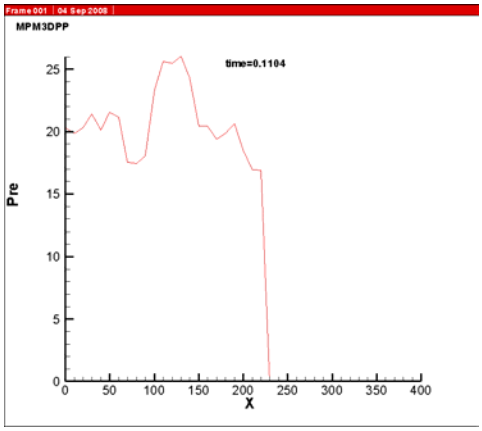


(d) LAGRANGE

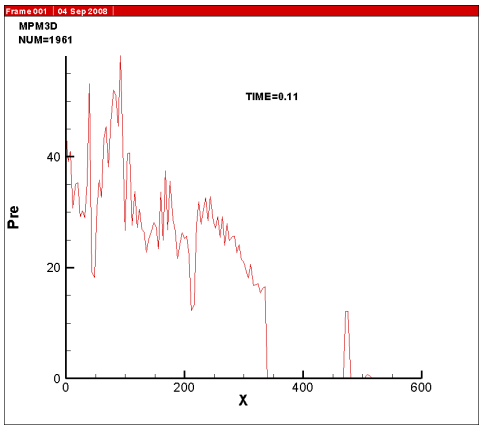


(e) SPH

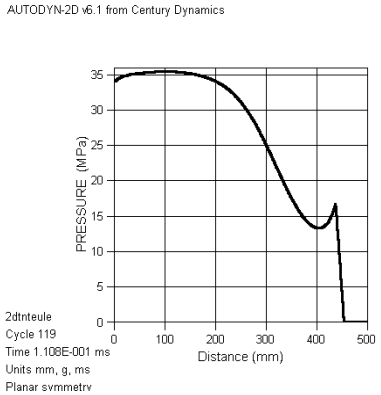
图 5.6: t=0.08ms 压力分布图



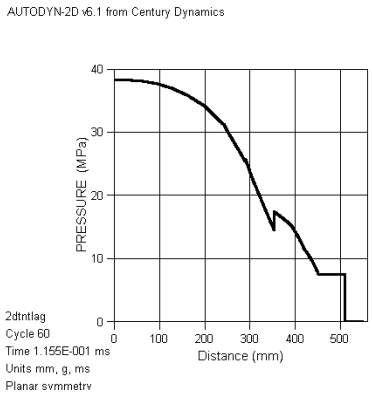
(a) CASE-A



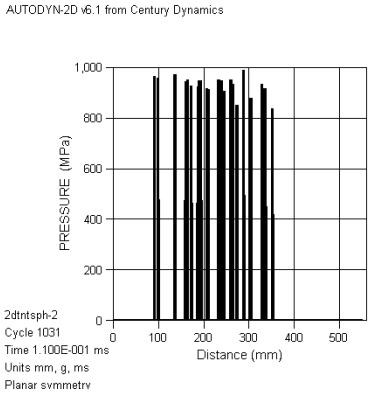
(b) CASE-B



(c) Euler

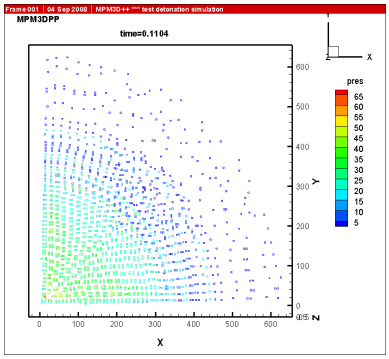


(d) LAGRANGE

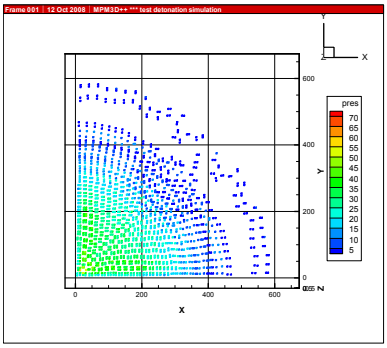


(e) SPH

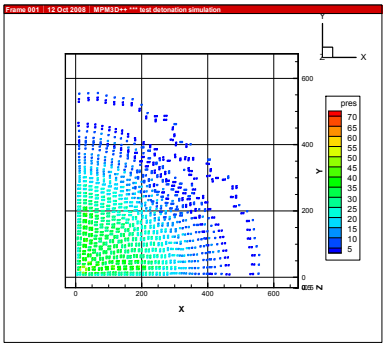
图 5.7: t=0.11ms 压力分布图



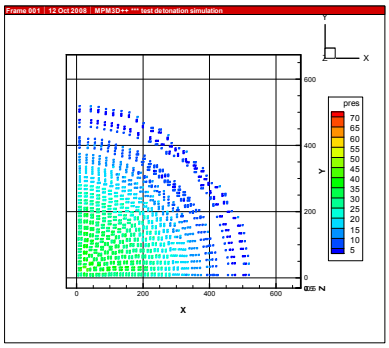
(a) CASE-A



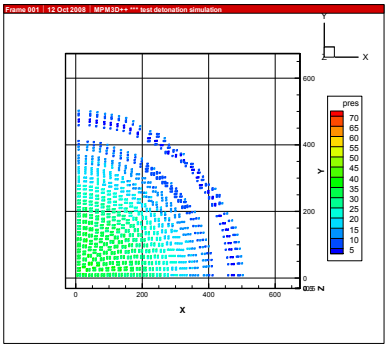
(b) $\mu = 1000$ adap=0.8



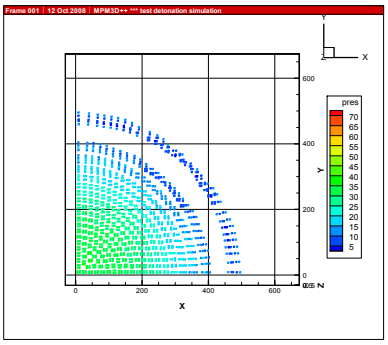
(c) $\mu = 2000$ adap=0.8



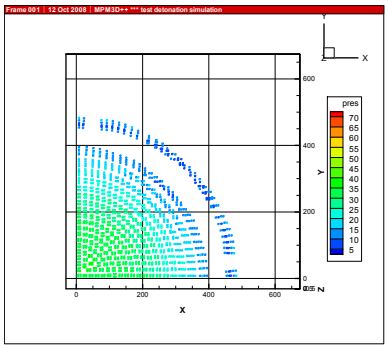
(d) $\mu = 5000$ adap=0.8



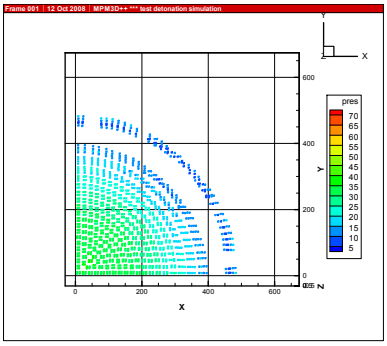
(e) $\mu = 8000$ adap=0.8



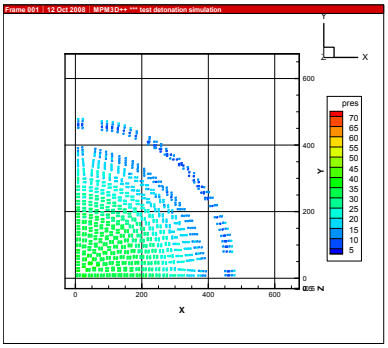
(f) $\mu = 12000$ adap=0.8



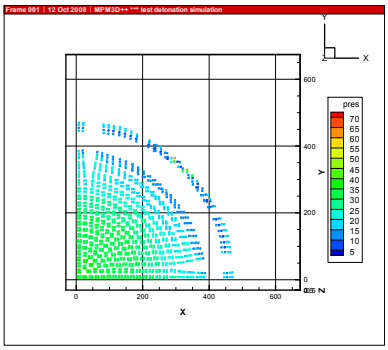
(g) $\mu = 18000$ adap=0.8



(h) $\mu = 19000$ adap=0.8

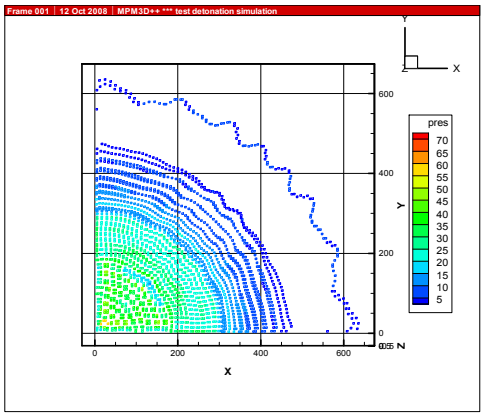


(i) $\mu = 21000$ adap=0.8

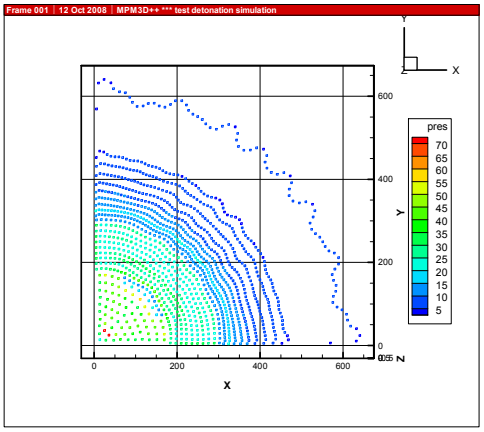


(j) $\mu = 26000$ adap=0.8

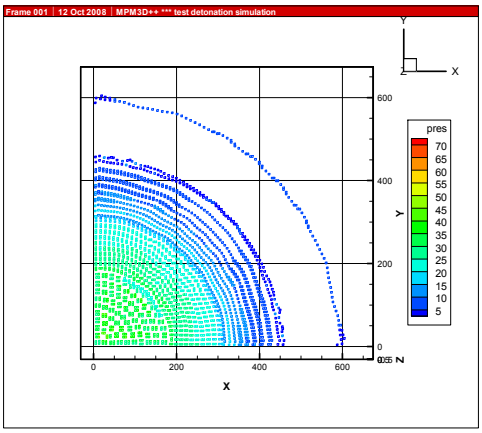
图 5.8: μ 的改变对结果的影响



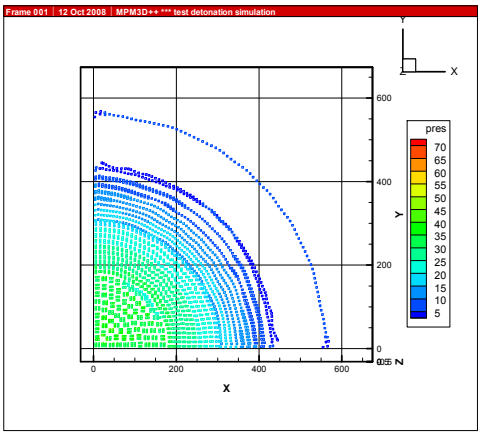
(a) $\mu = 1000$ adap=0.8



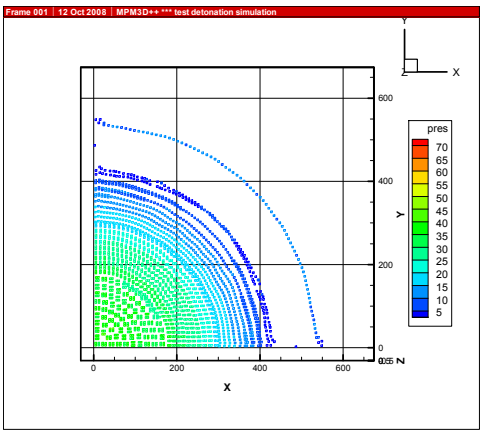
(b) $\mu = 1000$ adap=0



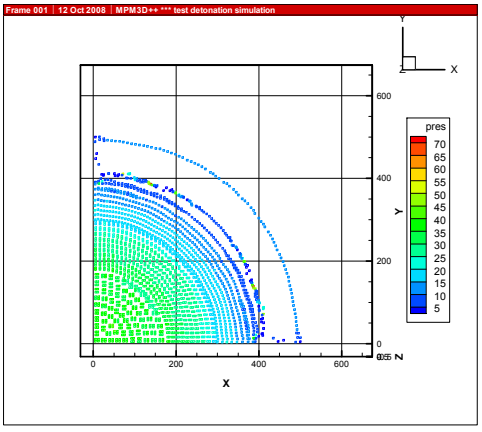
(c) $\mu = 5000$ adap=0.8



(d) $\mu = 10000$ adap=0.8

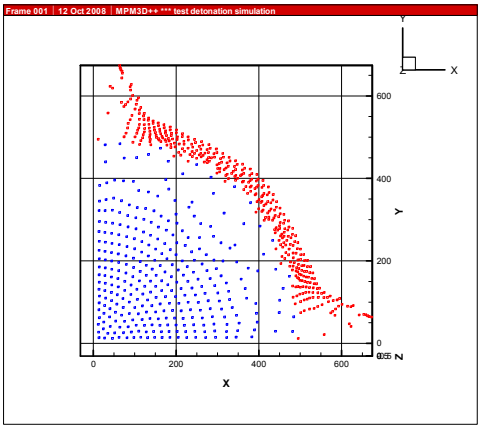


(e) $\mu = 15000$ adap=0.8

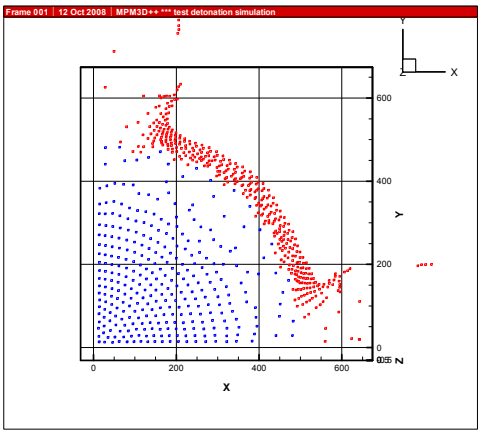


(f) $\mu = 25000$ adap=0.8

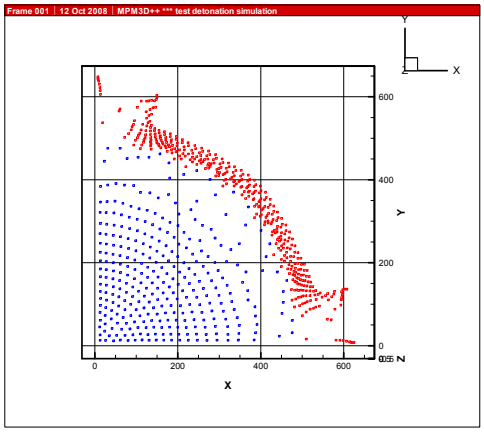
图 5.9: 质点沿半径梯度分布和 μ 对计算结果的影响



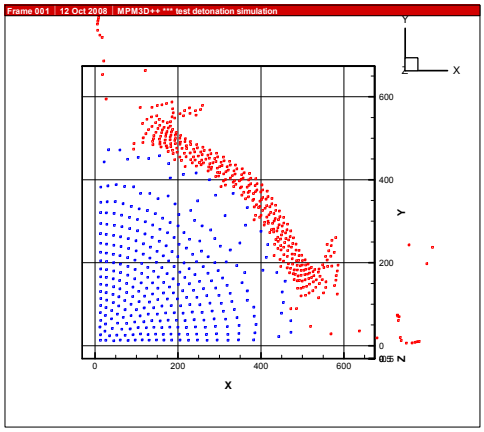
(a) $\mu = 1000$



(b) $\mu = 2000$

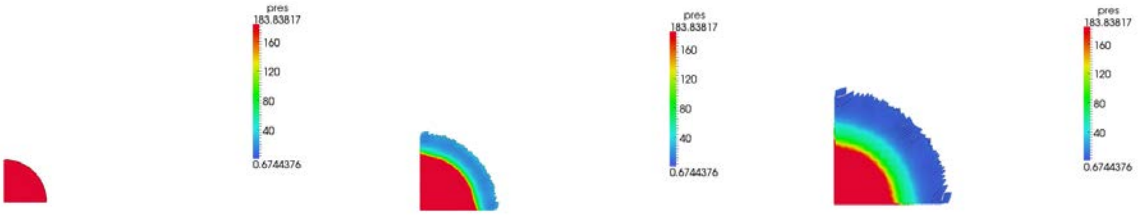


(c) $\mu = 6000$

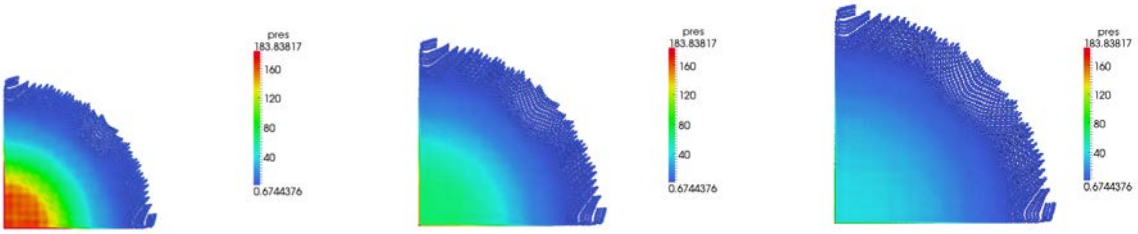


(d) $\mu = 10000$

图 5.10: 考虑空气介质和 μ 对结果的影响



(a) t=0.1ms (b) t=0.3ms (c) t=0.5ms



(d) t=0.7ms (e) t=0.9ms (f) t=1.0ms

图 5.11: CASE-C 各个时刻压力云图

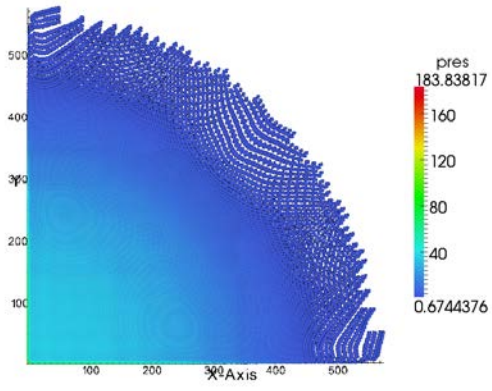
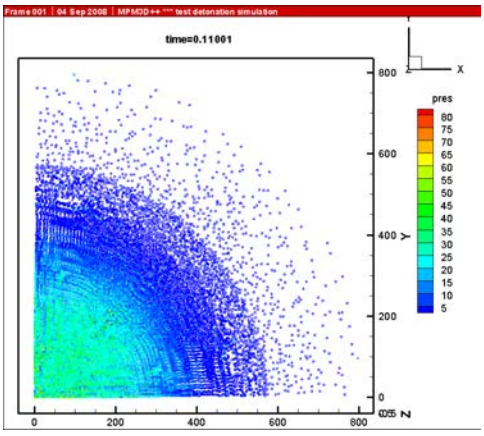
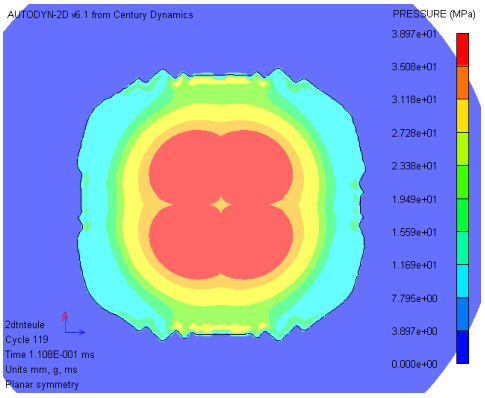


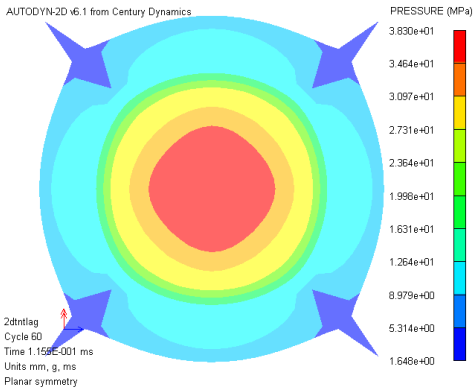
图 5.12: 1.1ms 时刻压力云图



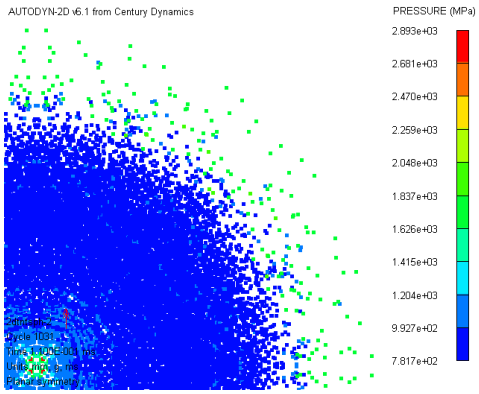
(a) CASE-B



(b) Euler



(c) Lagrange



(d) SPH

图 5.13: 其他情况云图

6 标准圆筒试验

6.1 问题描述

圆筒试验是美国劳伦斯－利弗莫尔实验室首创的。它用于直接比较炸药的动力学性能或推导爆轰的状态方程。测试时，将炸药装在一根内径为 25mm，外径为 30.12mm，长为 300mm 的 T_{2J} 紫铜管中，炸药与圆筒紧密结合，装药用一个 $\varphi 32 \times 11mm$ 的特屈儿药柱起爆。现多采用数值计算方法通过模拟该试验即模拟爆轰波及产物推动金属圆筒壁的运动，来拟和爆轰产物的 JWL 状态方程的参数。

为便于建立计算模型，对圆筒的尺寸有所改动，如图6.1所示，其中 OADE 区为含铝炸药区，ABCD 区为铜管部分，EDGF 区为圆筒端部起爆炸药部分；其中，FG 长为 12.5mm。EC 长为 15mm，FO 长为 325mm，EO 为 300mm。

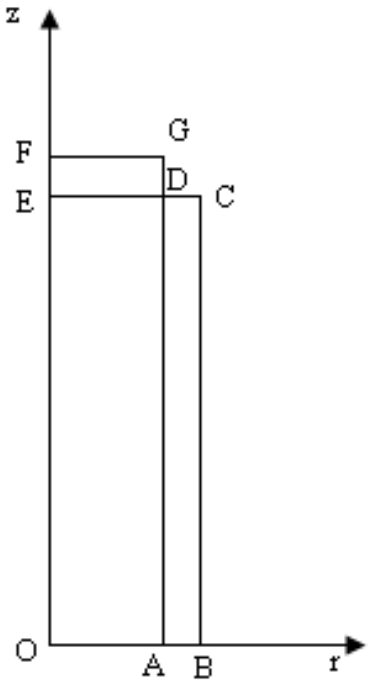


图 6.1: 模型示意图

本算例采用单位制炸药采用 cm-g-μs 单位。炸药采用高能炸药材料，参数如表6.1所示，其状态方程采用 JWL 状态方程，参数如表6.2所示。铜采用线性强化的弹塑性材料模型，参数如表6.3所示。模型离散参数如表6.4所示，离散模型如图6.2 所示。

表 6.1: 高能炸药材料材料参数

密度 (g/cm^3)	爆速 ($cm/\mu s$)
1.6	0.6827

表 6.2: JWL 状态方程材料参数

A(Pa)	B(Pa)	R_1	R_2	ω	e_0(J/cm^3)
3.7×10^{11}	0.032×10^{11}	4.15	0.95	0.3	0.07×10^{8}

表 6.3: 铜的材料参数

密度 (g/cm^3)	弹性模量 (Pa)	切线模量 (Pa)	泊松比	屈服极限 (Pa)
8.9	1.239×10^{11}	0.0001×10^{11}	0.35	0.00235×10^{11}

表 6.4: 离散参数

背景网格	$20 \times 20 \times 50$
网格尺寸	$0.2 \times 0.2 \times 0.2$
质点总数	76400
Body 0 质点数	19200
Body 1 质点数	57200



图 6.2: 离散示意图

该算例输入数据文件为 Tcylinder.xmp （位于目录 data/TestDatabase/Level-2 下）。模拟时间 (EndTime) 为 45μs，时间步长因子 (TimeStep:factor) 取为 0.5。

6.2 结果分析

为了进行验证, 同时使用商用软件 LS-DYNA 对该问题进行建模求解。模型的尺寸以及材料模型及参数均保持一致，起爆方式均采用点起爆。LS-DYNA 模拟时间为 30μs。图6.3给出了 MPM3DPP 与 DYNA 计算的铜壁膨胀规律比较，其中 MPM3DPP 采用开启接触和不开启接触分别进行了计算，结果表明采用接触算时能获得与 DYNA 更为一致的计算结果。

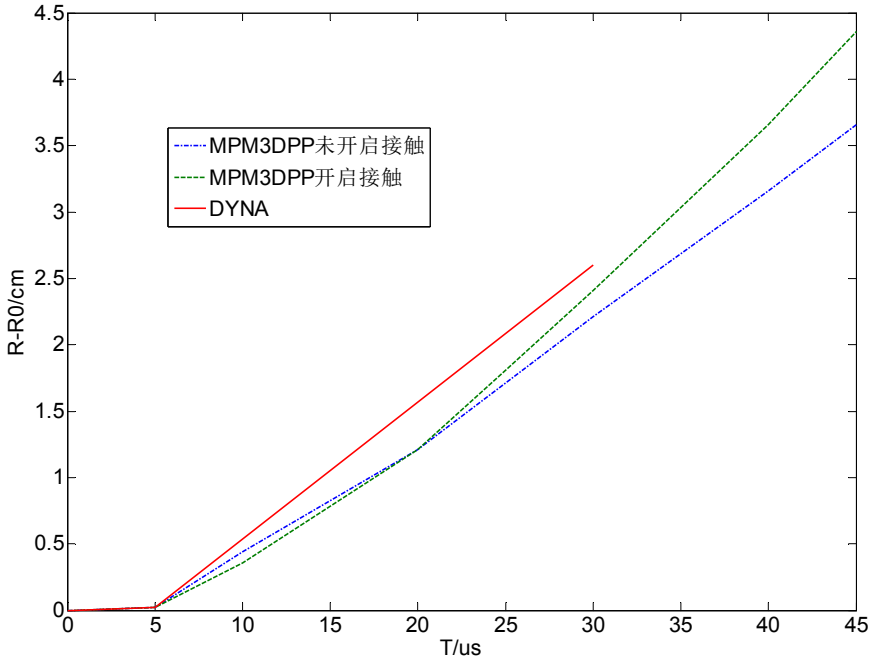


图 6.3: MPM3D 与 DYNA 计算的铜壁膨胀规律比较

结果分析：LS-DYNA 采样点坐标为（0，1.5，30），MPM3D 采样点坐标为（0.05，1.45，29.5）。首先，从曲线的走向趋势和数量级来看两者一致。之间的差异来源于两者采样的坐标不一致，这是由于 MPM3D 采样质点来离散模型，质点之间有一定的间距故不能取到坐标为（0，1.5，30）点，这一点有待改进。

图6.4到图6.7分别列出采用接触算法计算时各个时刻的变形图的比较，左图为 mpm 计算结果，右图为 LS-DYNA 计算结果。图6.8为最终时刻的整体构型。



图 6.4: Time=0.00 构型对比



图 6.5: Time=10 构型对比



图 6.6: Time=20 构型对比



图 6.7: Time=30 构型对比

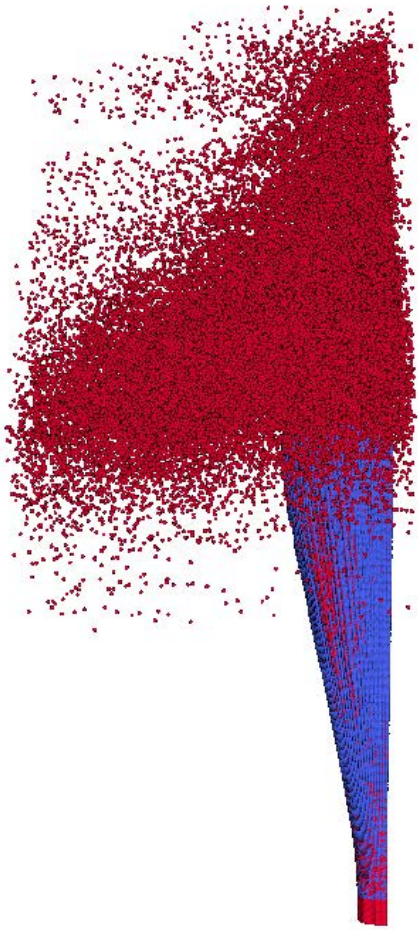


图 6.8: 最终时刻整体构型图

7 激波管问题模拟

7.1 问题描述

对激波的研究涉及到 Riemann 问题，即在初始时刻，给定一个物理量的间断面，进而研究这个初始间断随时间发展，逐步分解产生的解，如图7.1所示。一维的 Riemann 问题可以得到解析解 [4]，常用来对模拟可压缩流体问题的数值算法或程序进行测试和考核。通常所说的激波管问题是 Riemann 问题初始速度为 0 的特例。

Sod 曾通过对激波管问题的数值模拟研究几种不同差分格式的特性 [5]，他采用的模型问题被认为是一个标准测试，许多新的数值方法都要通过这个算例来验证其性能。在这个问题中，激波管的中部由薄膜分为两个具有不同密度和压力的区域，两个区域中的气体在初始状态下都是静止的。所有参数均无量纲，初始密度和压力分别为 $\rho_1 = 1.0$，$p_1 = 1.0$；$\rho_2 = 0.125$，$p_2 = 0.1$。间 $t > 0$ 时，薄膜破裂，激波和接触面会以不同的速度从左向右运动。通常观察 $t = 0.143$ 时，激波前进了大约 0.25 时刻的结果。

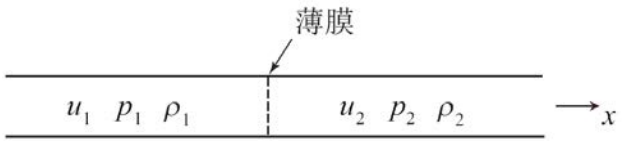


图 7.1: 模型示意图

气体均采用空材料模型，材料参数如表7.1所示，其中 q_1、q_2 为人工体积粘性系数。状态方程采用 LS-DYNA 多项式状态方程，相关参数如7.2所示。模型离散参数如表7.3所示，离散模型如图7.2所示。

表 7.1: 材料参数

	密度	q_1	q_2
气体 1	1.0	6.0	0.6
气体 2	0.125	6.0	0.6

表 7.2: 状态方程参数

	c0	c1	c2	c3	c4	c5	c6	e0
气体 1	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5
气体 2	0	0	0	0	0.4	0.4	0	0.25

该算例输入数据文件为 Sodshock.xmp （位于目录 data/TestDatabase/Level-2 下）。模拟时间 (EndTime) 为 0.143，时间步长因子 (TimeStep:factor) 取为 0.1。

表 7.3: 离散参数

背景网格	$0.005 \times 0.005 \times 1.0$
网格尺寸	$0.005 \times 0.005 \times 0.005$
Body 0 质点数（气体 1）	200
Body 1 质点数（气体 2）	200

图 7.2: 离散示意图

7.2 结果分析

图7.3和图7.4比较了采用自适应分裂质点方案和没有采用自适应分裂质点方案的速度分布结果。初始时，每个背景网格设置两个质点，总共 400 个质点均匀分布，应用了 GIMP 方法。设置自适应分裂因子为 0.55，在整个计算过程中，质点数从 400 增加到 556。在应用自适应分裂质点后，计算结果更加平滑，更接近解析解。对质点和网格加密后，可以得到更好的结果。初始布置 2000 质点在 1000 个背景网格中，在时间达到 $t = 0.143$ 后，经过自适应分裂，总质点数变为 2661 个质点。

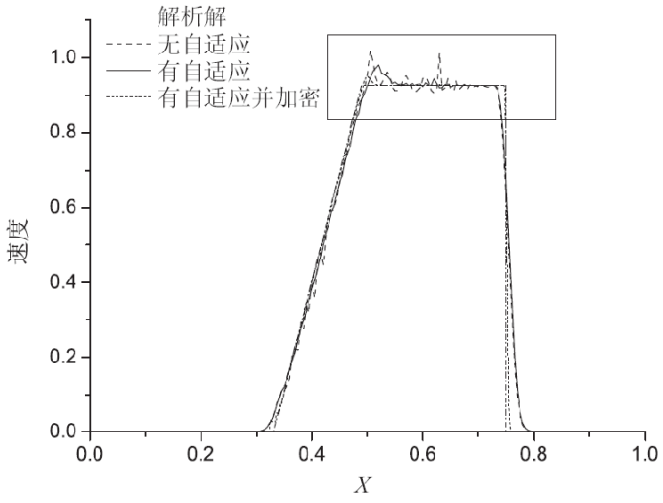


图 7.3: $t = 0.143$ 时激波管的速度分布

York 等 [6] 曾采用 MPM 模拟过此激波管问题，在他的结果中观察到显著的数值震荡。根据我们的模拟结果分析，这种数值震荡应该是由于跨网格噪音造成的。通过采用 GIMP 方法，这个问题可以得到解决。如图7.5所示，采用 GIMP 方法，当采用 1000 个背景网格，质点按上述方式布置时，得到的密度、速度、压力和比内能的分布曲线与解析解吻合的很好。

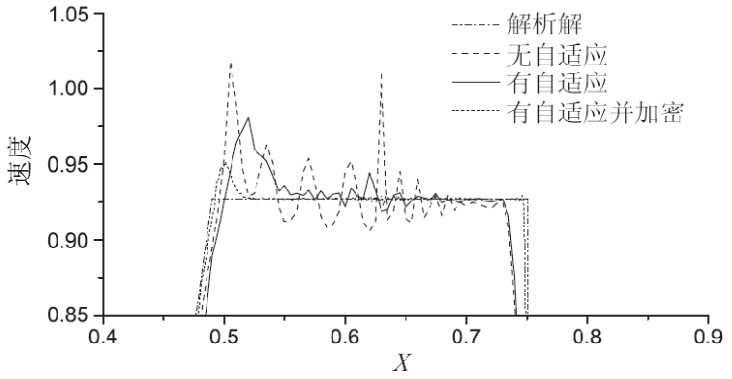


图 7.4: $t = 0.143$ 时激波管的速度分布 (局部放大图)

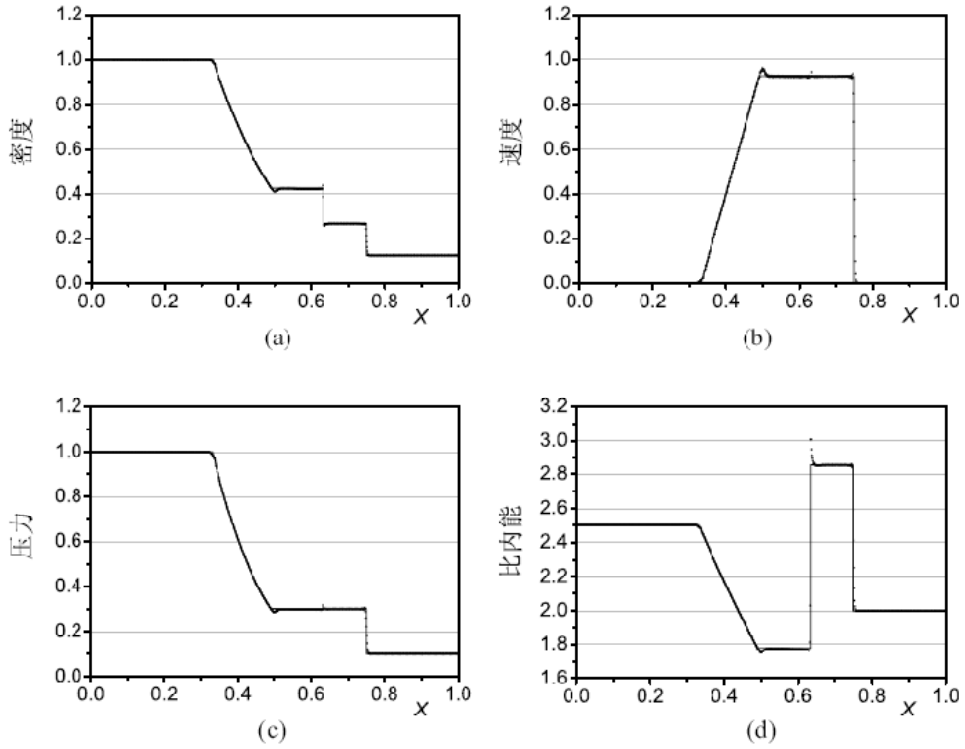


图 7.5: 密度、速度、压力和比内能的分布与解析解的比较，黑点为 GIMP 采用 1000 个背景网格结果

8 一维板条 TNT 爆轰

8.1 问题描述

一维板条爆轰的模拟非常有用，因为在早期假设球形炸药由炸药中心爆轰的模拟分析也简化为一维的问题。因此一维爆轰过程常被作为测试爆炸模拟的数值方法的基准检验问题。

本算例采用 mm-g-ms 单位制，长 0.1m 的板条 TNT 炸药在一端起爆，右端自由，左端固定。为便于比较采用与文献 [7] 模拟中相同的尺寸和参数。

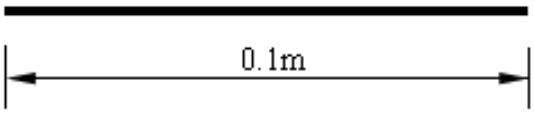


图 8.1: 模型示意图

高能炸药材料参数如表8.1所示。

表 8.1: 高能炸药材料参数

密度 (g/mm^3)	爆速 (mm/ms)
1.630×10^{-3}	6930

采用面起爆，面的法线方向为 x 方向，由于本文采用了不同的质点数来进行模拟，故起爆面的大小设置不一，总的原则是使板条从一端起爆。

采用 Jones-Wilkins-Lee 状态方程，各参数是由实验数据拟合所得到的系数，文献 [8] 给出了相应系数的值见表8.2所示：

表 8.2: JWL 状态方程材料参数

P_{CJ}(MPa)	A(MPa)	B(MPa)	R_1	R_2	ω	e_0(MJ/mm^3)
2.1×10^7	3.712×10^5	3.21×10^3	4.15	0.95	0.30	6993

文献中应用固壁边界条件来阻止物质向外迁移，在本文中采用对称边界条件来阻止物质向外迁移。同时为了研究用不同质点数目对求解结果的影响，在此分别使用了 500、1000、2000、4000 和 8000 个质点沿着板条分布进行分析，见表8.4：

各组离散模型基本相似，为此只给出 CASE-E 离散模型图片，如图8.2所示：

该算例输入数据文件为 Detolk.xmp （位于目录 data/TestDatabase/Level-2 下）。模拟时间 (EndTime) 为 0.015 ms，时间步长因子 (TimeStep:factor) 取为 0.1。

表 8.3: 离散参数

	背景网格	网格尺寸	质点数
CASE-A	$101 \times 0.4 \times 0.4$	$0.4 \times 0.4 \times 0.4$	500
CASE-B	$101 \times 0.2 \times 0.2$	$0.2 \times 0.2 \times 0.2$	1000
CASE-C	$101 \times 0.05 \times 0.05$	$0.1 \times 0.1 \times 0.1$	2000
CASE-D	$101 \times 0.05 \times 0.05$	$0.05 \times 0.05 \times 0.05$	4000
CASE-E	$101 \times 0.025 \times 0.025$	$0.025 \times 0.025 \times 0.025$	8000

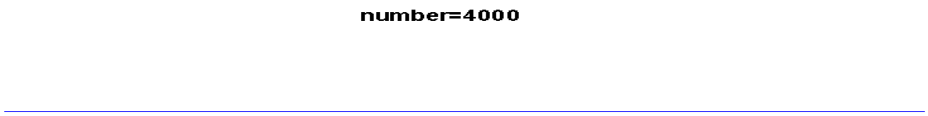


图 8.2: 离散示意图

8.2 结果分析

若假设起爆产物 —-高能炸药气体满足伽马定律（gammalaw）的状态方程，则可通过以下表达式，并取热膨胀系数 $\gamma = 3$ 来计算 C-J 点处的压力、密度和粒子速度的理论近似值 [9]:

$$p_{CJ} = \frac{1}{\gamma + 1}\rho_0 D^2$$

$$\rho_{CJ} = \frac{\gamma + 1}{\gamma}\rho_0$$

$$v_{CJ} = \frac{\gamma}{\gamma + 1}D$$

在 C-J 点处压力、密度和粒子速度的理论近似值分别为 1.957×10^4MPa，2.173×10^{-3}g/mm^3，1733mm/ms。

图8.3、图8.4、图8.5和图8.6分别给出了使用 40000 个粒子模拟时以 1μs 的时间间隔模拟，由 0 至 14μs 时间内的压力、密度、比内能和速度沿板条的曲线分布图，相应的理论近似值也都在各个图中用黑实线标出（需要说明的是由于程序本身并未设置输出内能分布曲线选项故只给出比内能分布，图8.5比内能分布与文献 [3] 提供的内能分布曲线相比较曲线走向趋势一致，峰值也在一个数量级上，说明 MPM 算法还是比较准确的）；图8.7-图8.11分别给出了采用不同质点数模拟得到的压力时间历程曲线图；同时表8.3给出了采用 40000 个粒子模拟所得到的压力、密度、速度峰值与理论值的比较情况；表8.4给出了采用不同质点数模拟时得到压力最大峰值与理论近似值的比较结果；表8.5给出了求解所得到的内能、动

能和总能量随时间的变化值，随着爆轰过程的推进，总动能逐渐增加，而总内能减少，总能量保持近似常量，其值一直保持在初始能量 6993 MJ 附近，表明了 MPM 方法有比较好的数值稳定性（与文献 [3] 提供的算法差些）。

对于此一维 TNT 起爆问题，若设左末端（起爆点）为自由边界，则在起爆后，气体产物将向左膨胀，伴随着有膨胀波紧跟爆炸波后向右传播。此问题存在解析解法 [9] 。在爆炸波后的爆炸气体的压力、密度和速度瞬时的解析式为：

$$p = \frac{16}{27}\frac{\rho_0}{D}(\frac{x}{2t} + \frac{D}{4})^3$$
$$\rho = \frac{16}{9}\frac{\rho_0}{D}(\frac{x}{2t} + \frac{D}{4})$$
$$v = \frac{x}{2t} - \frac{D}{4}$$

图8.12、图8.13和图8.14分别给出了采用 4000 个初始数目质点模拟所得到的压力、密度和速度在起爆后的第 1μs 和第 2μs 的分布。图中给出了由 MPM 方法和解析法所得到的结果以作比较 [3]。除了速度分布，结果相当吻合。观察图8.14可以看出，在 -5mm 到 -10mm 之间，结果吻合很差，经分析原因是气体膨胀质点间距过大，致使一些网格内没有粒子分布造成数值结果出现间断性，在其余的位置的结果吻合很好。

表 8.4: 采用 40000 个质点模拟所得结果与理论近似值比较

	压力 (MPa)	密度 (g/mm^{-3})	速度 (mm/ms^{-1})
理论近似值	19570	0.002173	1733
数值实验	20355	0.002100	1796
误差	0.040	0.034	0.036

表 8.5: 各组所得最大压力峰值与实验值比较

组别	实验值	CASE-A	CASE-B	CASE-C	CASE-D	CASE-E
压力峰值 (MPa)	21000	19808	20034	20154	20355	20344
误差	-	0.057	0.046	0.040	0.031	0.031

表 8.6: 能量平衡的时间历程

时间 (ms)	内能 (MJ)	动能 (MJ)	总能量 (MJ)	误差 (%)
0	6.9930e+03	0.0000e+000	6.9930e+003	0.00
1	6.9592e+03	3.3733e+001	6.9929e+003	0.00
2	6.9240e+03	1.0336e+002	6.9920e+003	0.01
3	6.8886e+03	1.0336e+002	6.9920e+003	0.01
4	6.8530e+03	1.3812e+002	6.9911e+003	0.03
5	6.8172e+03	1.7278e+002	6.9900e+003	0.04
6	6.7812e+03	2.0737e+002	6.9886e+003	0.06
7	6.7450e+03	2.4191e+002	6.9869e+003	0.09
8	6.7086e+03	2.7638e+002	6.9850e+003	0.11
9	6.6721e+03	3.1079e+002	6.9829e+003	0.14
10	6.6353e+03	3.4512e+002	6.9804e+003	0.18
11	6.5984e+03	3.7940e+002	6.9778e+003	0.22
12	6.5613e+03	4.1364e+002	6.9749e+003	0.08
13	6.5239e+03	4.4778e+002	6.9717e+003	0.30
14	6.4863e+03	4.8188e+002	6.9682e+003	0.35

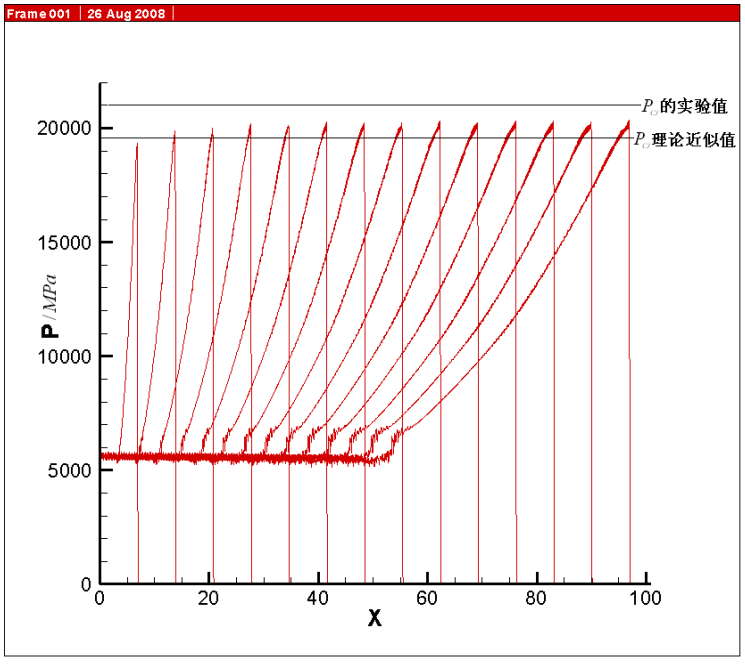


图 8.3: 在起爆过程中沿着一维板条 TNT 炸药的压力曲线

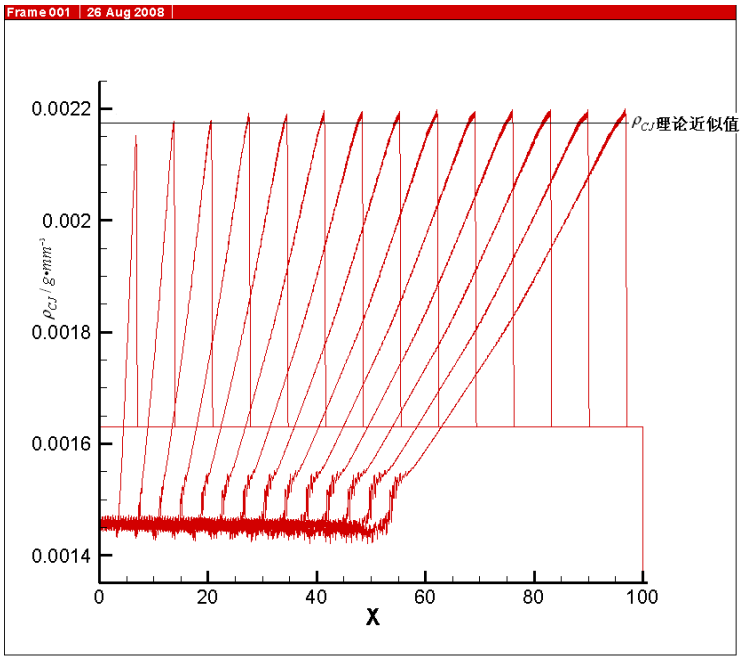


图 8.4: 在起爆过程中沿着一维板条 TNT 炸药的密度曲线

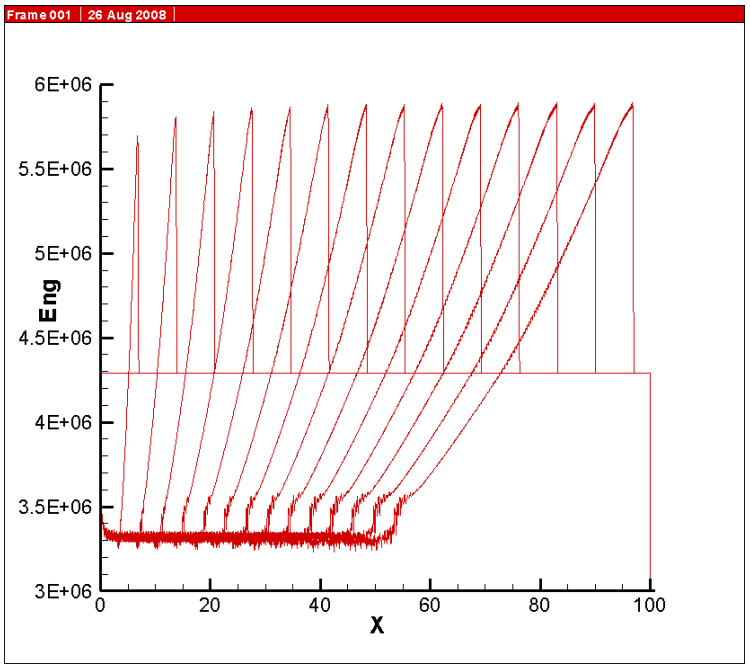


图 8.5: 在起爆过程中沿着一维板条 TNT 炸药的比内能曲线

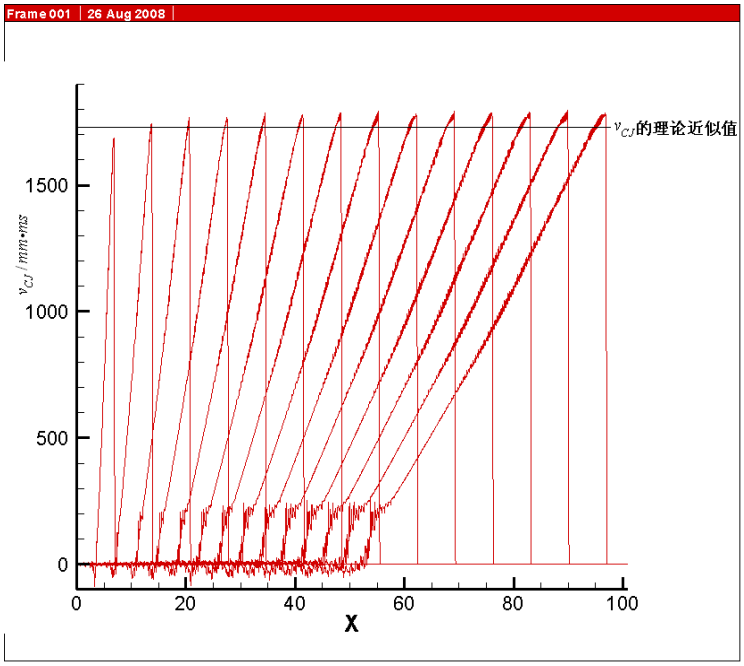


图 8.6: 在起爆过程中沿着一维板条 TNT 炸药的速度曲线

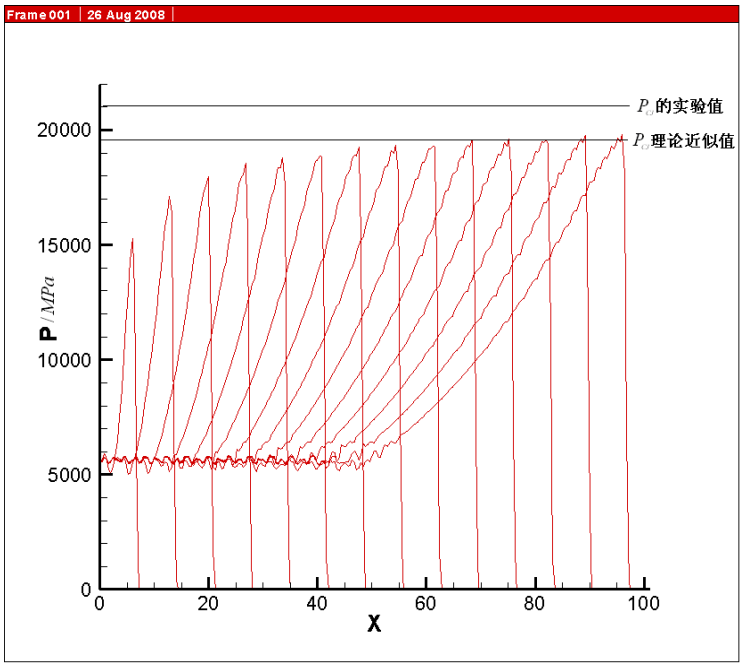


图 8.7: CASE-A 在起爆过程中沿着一维板条 TNT 炸药的压力曲线

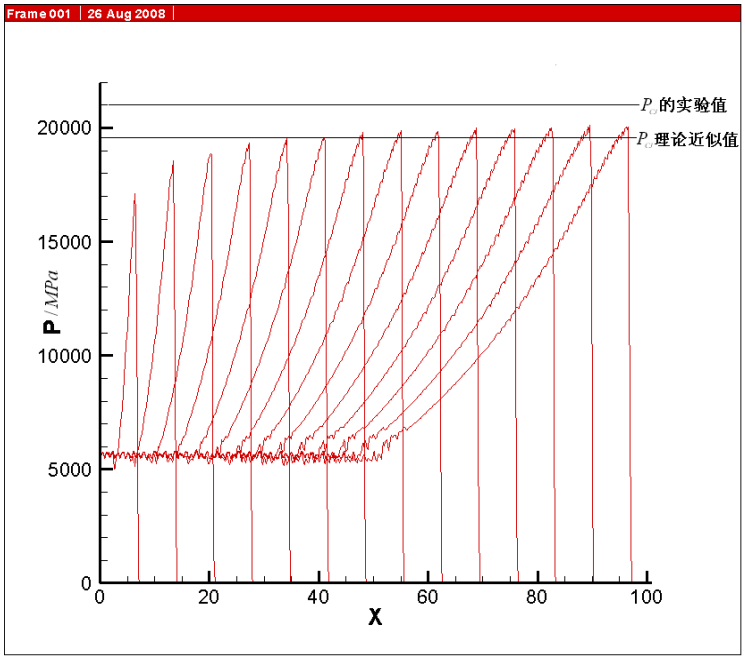


图 8.8: CASE-B 在起爆过程中沿着一维板条 TNT 炸药的压力曲线图

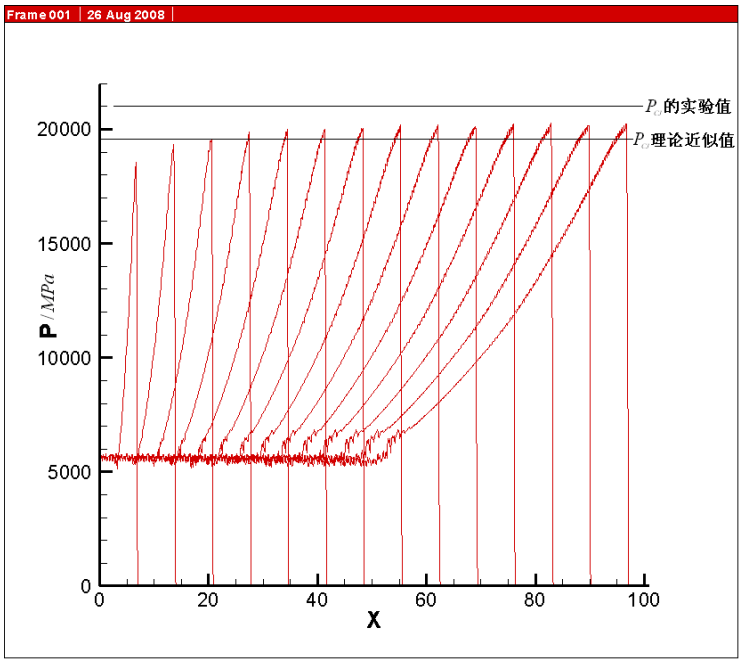


图 8.9: CASE-C 在起爆过程中沿着一维板条 TNT 炸药的压力曲线图

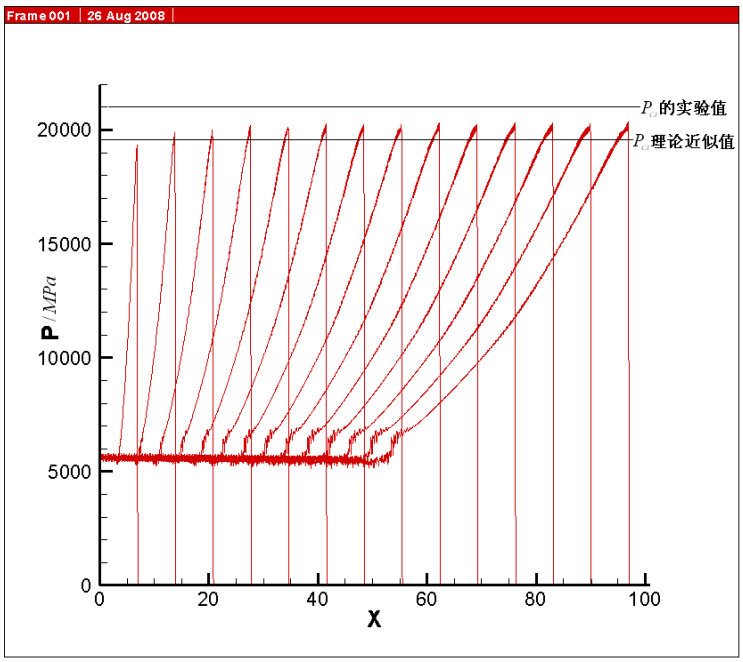


图 8.10: CASE-D 在起爆过程中沿着一维板条 TNT 炸药的压力曲线图

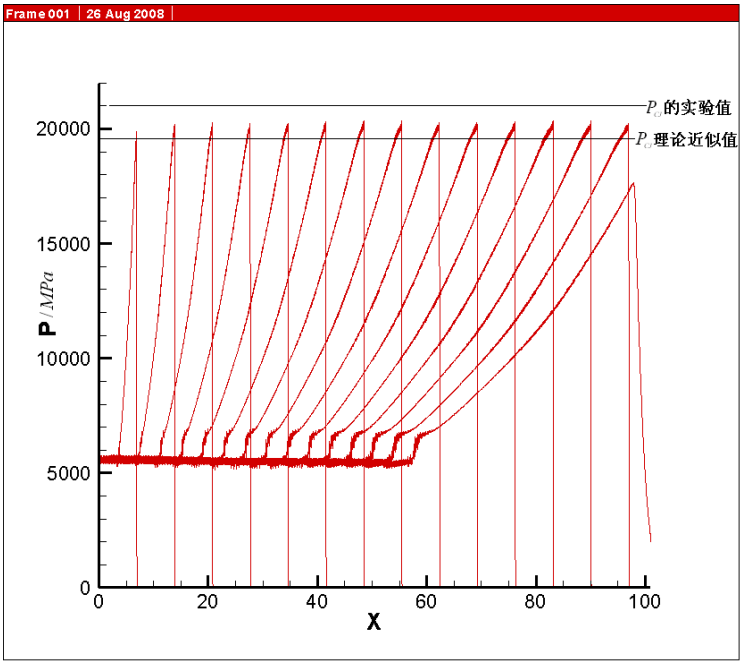


图 8.11: CASE-E 在起爆过程中沿着一维板条 TNT 炸药的压力曲线图

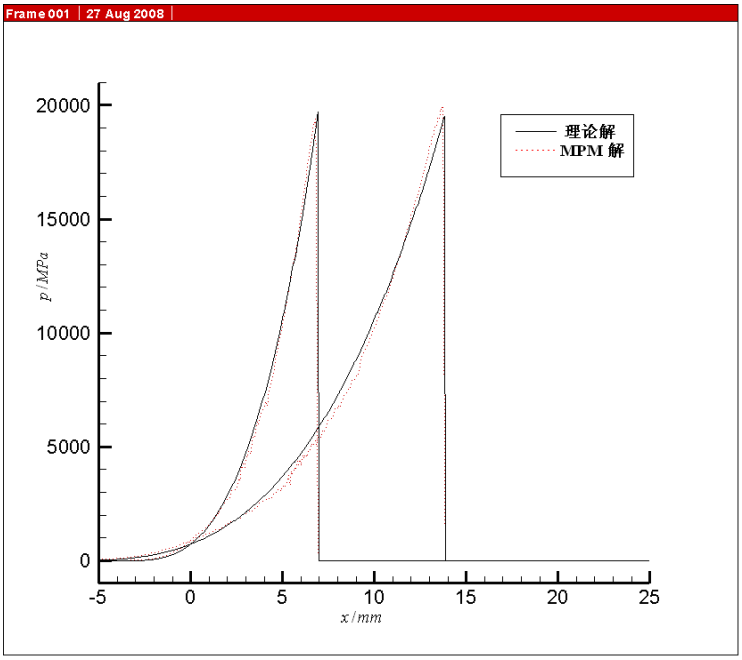


图 8.12: 一维板条 TNT 在左自由端起爆后第 1μs 和第 2μs 的压力分布

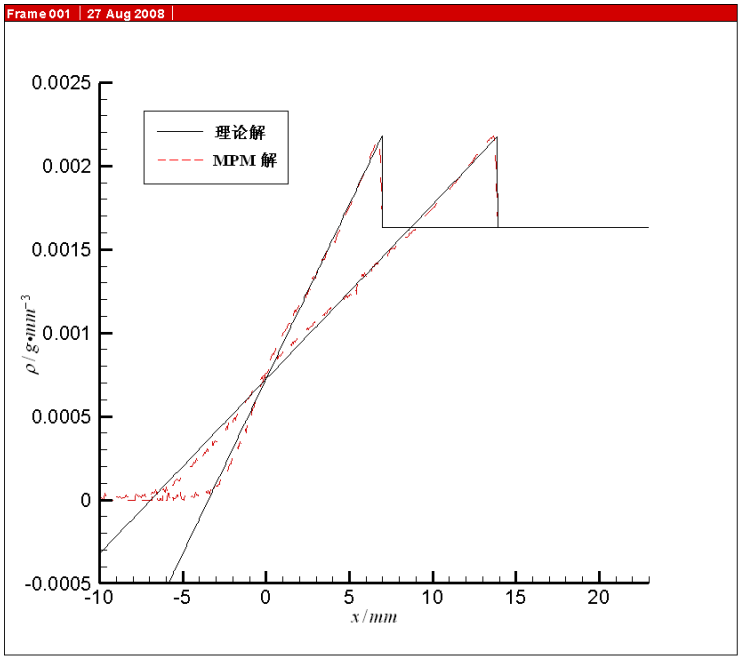


图 8.13: 一维板条 TNT 在左自由端起爆后第 1μs 和第 2μs 的密度分布

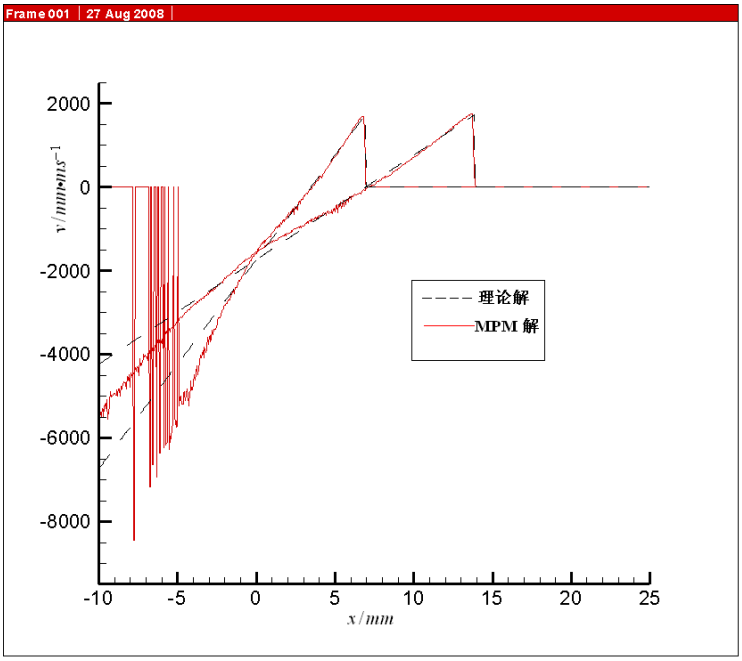


图 8.14: 一维板条 TNT 在左自由端起爆后第 1μs 和第 2μs 的速度分布

9 聚能射流模拟

9.1 问题描述

聚能效应是爆炸力学的重要应用之一。聚能效应通常指利用了一定的装药形状，通过爆炸驱动金属药型罩向小空间聚集，形成高能量密度的射流或弹丸的物理过程。线性聚能装药可以作为二维的平面应变问题来考虑。采用 MPM3DPP 程序来模拟，可以只使用一层背景网格，其中布置一层质点，在与之垂直的方向加以约束来模拟平面应变问题。聚能装药的初始构型如图9.1所示，半锥顶角 α 为 38 度。考虑对称性取一半进行模拟。炸药为 TNT，状态方程为 JWL。外壳和药型罩均为铜，采用 Johnson-Cook 材料模型参数和 Gruneisen 状态方程参数。炸药在没有药型罩的一端同时起爆。

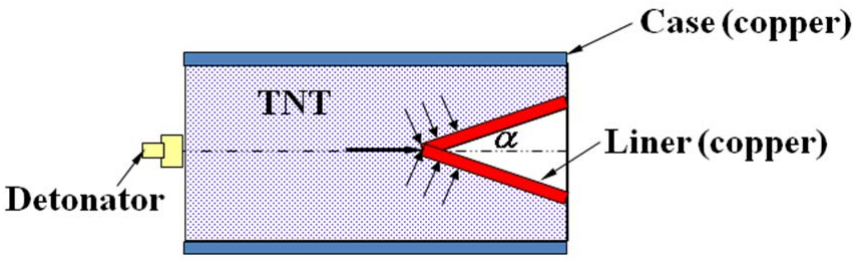


图 9.1: 模型示意图

本算例采用单位制炸药采用 mm-g-ms 单位, 铜采用 Johnson-Cook 材料模型，见表9.1，以及 Grun 状态方程，见表9.3. TNT 炸药采用高能炸药模型，见表9.2，以及 JWL 状态方程，见表9.4. 离散参数见表9.5。

表 9.1: 铜的强度模型参数

A(MPa)	B(MPa)	n	c	m	C(J/kgK)	T_m(K)	ρ(g/mm^3)	ν
90	292	0.31	0.25	1.09	383	1356	1×10^{-3}	0.35

表 9.2: TNT 的强度模型参数

符号	意义	值
dense	密度	1.63e-3g/mm^3
bulk	人工体积粘性	1.5 0.06
DV	拟合系数	6930mm/ms

模拟时间 (EndTime) 为 0.04ms，时间步长因子 (TimeStep:factor) 取为 0.2，自适应因子 0.6。

表 9.3: 铜的状态方程参数

c0(mm/ms)	s1	gamma
3940	1.49	1.96

表 9.4: TNT 的 JWL 状态方程参数

A(Mbar)	B(Mbar)	R_1	R_2	ω	e_0(mJ/mm^3)
3.712×10^5	3.21×10^3	4.15	0.95	0.30	6993

表 9.5: 离散参数

背景网格	$204 \times 42 \times 0.6$
网格尺寸	0.6
质点总数	20584
Body0 质点数 (TNT)	14330
Body1 质点数 (药形罩)	1760
Body2 质点数 (外壳)	4494

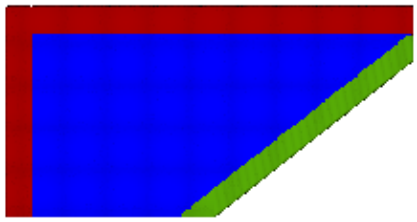


图 9.2: 离散示意图

9.2 结果分析

图9.3,9.4,9.5 比较了分别采用 MPM 和自适应 MPM 模拟射流过程的效果。通过自适应分裂质点的方案，避免了数值断裂。在这个算例中，是否采用 GIMP 方法对最终射流的构成没有显著的影响。对于炸药材料是否采用自适应分裂质点，也对最终射流构成没有显著的影响，因此只对金属药型罩应用了自适应算法。

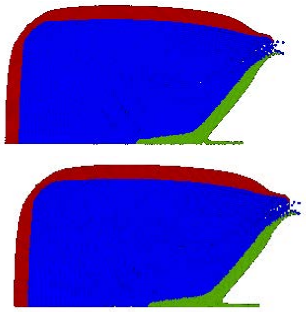


图 9.3: t=10μs

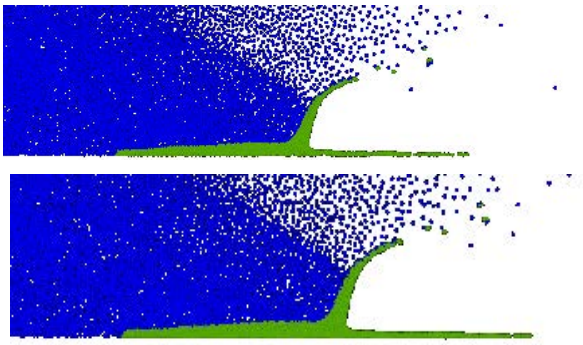


图 9.4: t=20μs

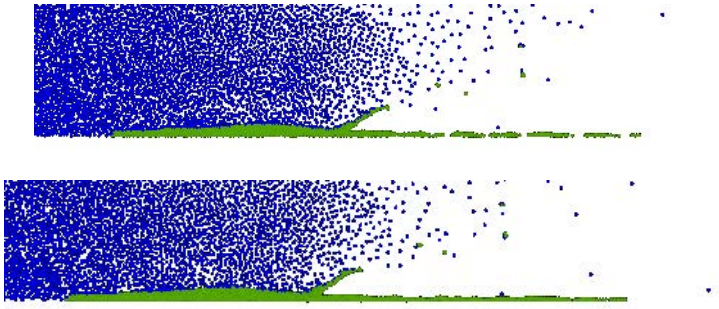


图 9.5: t=30μs

图9.3，9.4，9.5分别为 t=10,20,30μs 时刻的射流构型，上图为 MPM 计算结果，出现了数值断裂，而下图为使用自适应 MPM 的模拟结果数值断裂得以避免。

射流尖端的速度可以由 Brikhoff 等人 [10] 提出的理论模型进行估计。在他们的理论模型中，把药型罩视为无粘不可压的流体并假设药型罩稳态与装药的质量比和锥角来决定。根据理论估计，本例中射流尖端速度应为 3.7 km/s，杵的速度应为 0.6 km/s。图 4 显示了模拟得到的 21μs 时刻的 x 方向的速度分布。模拟得到的速度结果和理论估计基本吻合。图 5 显示了射流中温度的分布情况，射流尖端和射流柱体中心的部分变形最大，也是最高的温度出现的地方。最高温度可达到 1500 K 以上，根据计算的结果，铜射流的主要部分仍然保持为固体状态，但中心部分可能已经融化。

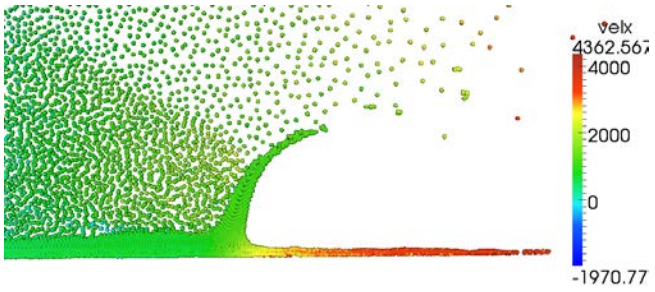


图 9.6: 21μs 时刻的 x 方向的速度分布

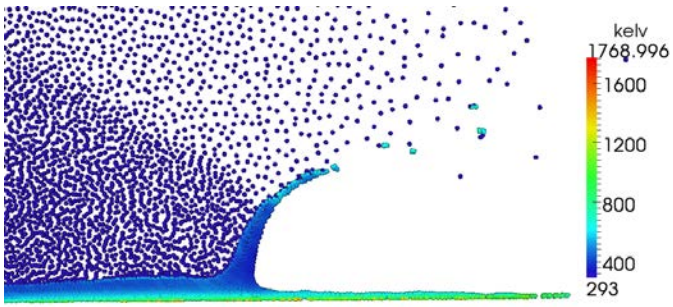
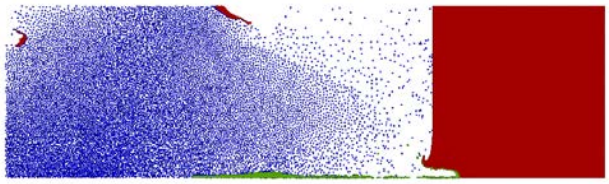


图 9.7: 21μs 时刻射流中温度的分布情况

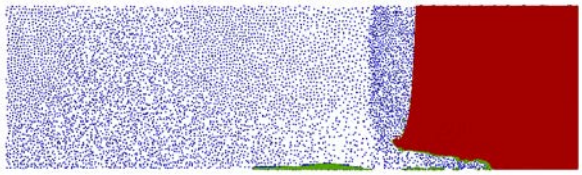
图9.8为在射流前方布置靶体时射流破坏力的模拟，靶体材料和外壳、药型罩为铜，采用 Johnson-Cook 材料模型参数和 Gruneisen 状态方程参数。



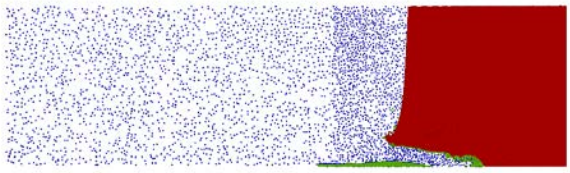
(a) t=0μs



(b) t=10μs



(c) t=20μs



(d) t=30μs

图 9.8: 射流穿甲模拟

10 切削加工过程模拟

10.1 问题描述

切削加工技术是工业装备过程中最为重要和普遍的技术之一，目前在工业发达国家的航空航天、汽车、模具等制造业中应用广泛，取得了巨大的经济效益。切削加工的突出优越性主要表现在其具有高生产率，减少切削力，提高加工精度和表面质量，降低生产成本并且可以加工高硬材料等 [11]。

根据工件材料和切削条件的不同，切削时通常形成四种类型的切削：带状切屑、锯齿状切屑、单元切屑和崩碎切屑。切削塑性金属时，一般形成带状或锯齿状切屑；而切削脆性材料时一般形成崩碎切屑。

简单的理论分析建立的模型成功解释了切削过程的力学机理。但是由于切削工具迎面工件的局部极端变形，很难获得金属流的可靠实验数据。大部分数值方法在这类问题上不具有完备预测的能力，许多经验参数需要被引入 [12]。数值模拟的难点主要有以下几点：1）切屑形成机制，常采用的方法有距离容许准则、应变能密度准则以及基于断裂力学的准则；2）拉格朗日有限单元法模拟时面临网格严重畸变的问题，需要引入网格重分或者自适应网格技术；3）对于有限元，当单元达损伤量达到临界值时需侵蚀单元，引入非物理的因素。

这里采用物质点法模拟切削加工过程，物质点法结合了欧拉和拉格朗日方法的优点，不存在网格畸变问题，同时物质点通过背景网格相互作用，当物质点间的距离跨越一个背景网格时（GIMP 时一个方向上 3 个网格）他们之间不再有相互作用，物质点被分开形成内部界面。

本算例采用 mm-g-ms 单位制，切削模型示意图如图10.1所示，相关尺寸已在图上标出。切削工具以恒定的速度 20 mm/ms 向左切削工件。

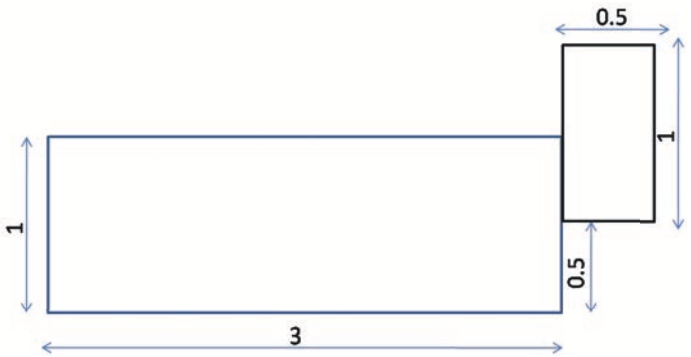


图 10.1: 模型示意图

切削工具采用刚体材料，其密度为 $7.8\times10^{-3}\mathrm{g/mm^3}$，工件材料为钢，采用 JohnsonCook 弹塑性模型，基本材料参数和 JohnsonCook 模型参数分别见表10.1, 10.2所示。

离散模型如图10.2所示，离散参数见表10.3所示

该算例输入数据文件为 cutting.xmp （位于目录 data/TestDatabase/Level-3 下）。模拟

表 10.1: 工件基本材料参数

密度 (g/mm^3)	杨氏模量 (MPa)	泊松比
7.8×10^{-3}	2.07×10^5	0.3

表 10.2: JohnsonCook 强度模型参数

A(MPa)	B(MPa)	n	m	比热容 (mJ/g K)	熔点 (K)	室温 (K)	应变率因子
792	510	0.26	1.03	526	1180	0	0.001



图 10.2: 离散示意图

表 10.3: 离散参数

背景网格	$3.99 \times 3 \times 0.01$mm
网格尺寸	$0.01 \times 0.01 \times 0.01$mm
切具质点数	20000
工件质点数	120000

时间 (EndTime) 为 0.1ms，时间步长因子 (TimeStep:factor) 取为 0.7，使用接触算法并打开 GIMP。

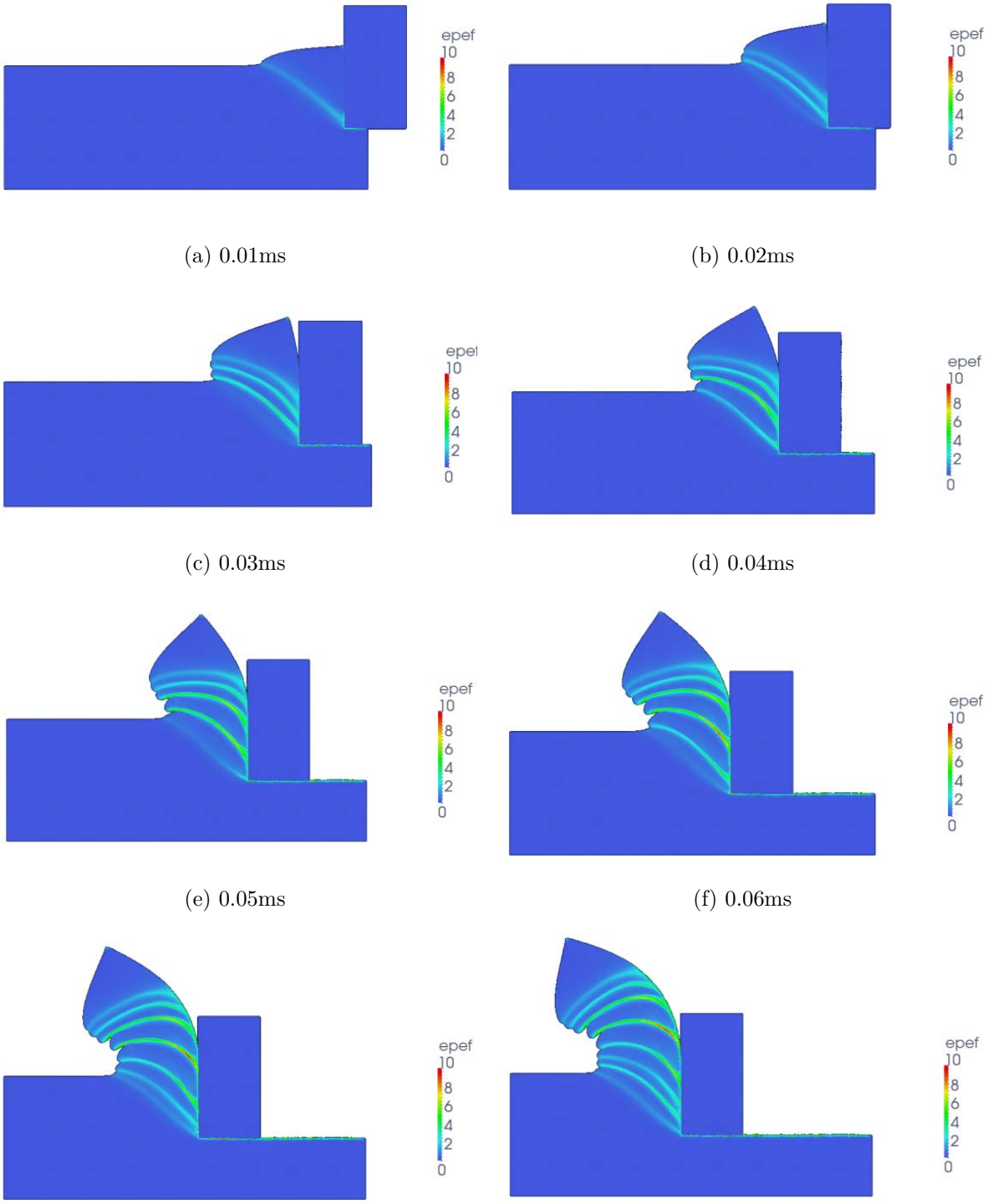
10.2 结果分析

图10.3为切削实验中所观察到的剪切带。图10.4为相应时刻的等效塑性应变分布，在 0.01ms 时第 1 条剪切带触发，随着更多的剪切带触发，锯齿状切屑形成。图10.5为相应时刻温度分布。R.Komanduri 等人 [13] 最早提出绝热剪切理论来解释切削时产生锯齿状切屑的原因。他们认为锯齿状切屑由于切削速度达到某一临界值时由切屑内部局部应力的突变所造成的。

切屑形成的过程实际上式极端迅速的过程，特别是在较高的切割速度下。切削工具进入到工件材料中，伴随产生了很大塑性变形，工具头部尖端将材料切开。在这个过程中工件材料会发生一些应变强化。随着切削的继续进行，工具头部继续挤压工件材料从而产生更大的塑性变形。巨大的压力伴随塑性变形和材料的断裂导致材料局部温度上升。由于切具的高速运动导致工件材料的应变率可达到 10^5 量级，工件材料遭到严重挤压以至于来不及沿着切具表面滑动。由于大量热量积聚和高应变率导致绝热剪切或准绝热剪切条件的形成。在本算例中切具头部附近的材料部分区域温度局部可非常高，导致进一步的热软化。这种软化降低了材料的应变强化能力，导致切屑窄带中发生材料不稳定，最终形成密集的剪切带。



图 10.3: 实验中观察到的剪切带



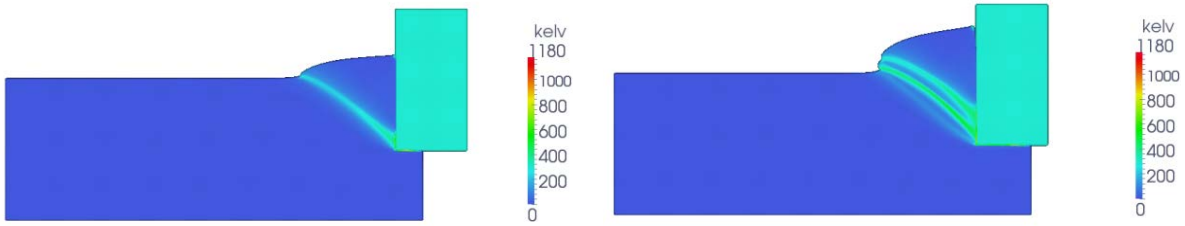
(a) 0.01ms (b) 0.02ms

(c) 0.03ms (d) 0.04ms

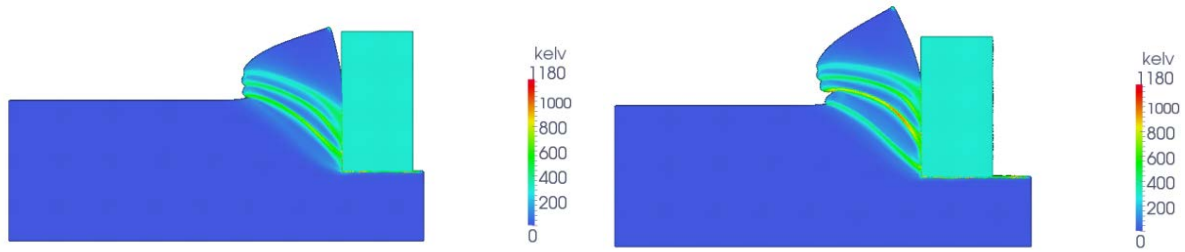
(e) 0.05ms (f) 0.06ms

(g) 0.07ms (h) 0.08ms

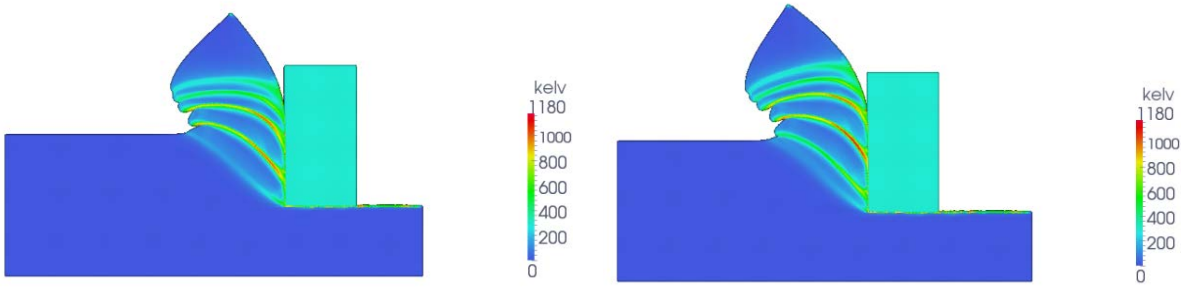
图 10.4: 等效塑性应变分布



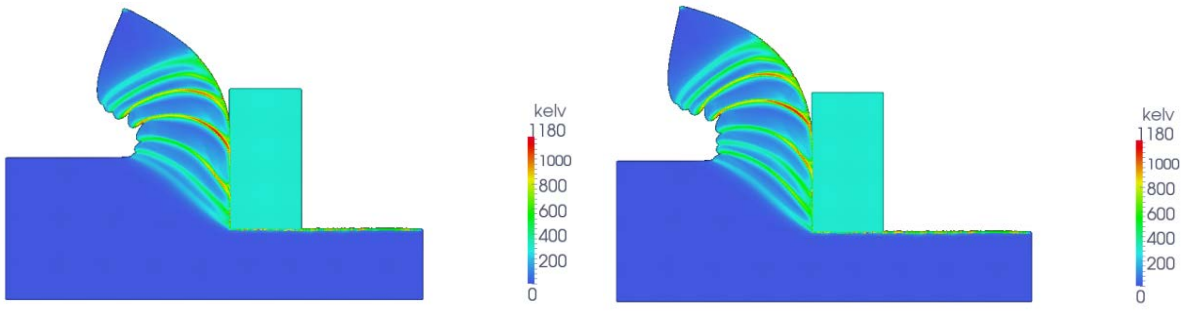
(a) 0.01ms (b) 0.02ms



(c) 0.03ms (d) 0.04ms



(e) 0.05ms (f) 0.06ms



(g) 0.07ms (h) 0.08ms

图 10.5: 温度分布

11 爆轰驱动飞片数值模拟

11.1 问题描述

1994 年 Gurney 提出了一种可以预测爆炸加速装置终态速度的简洁方法 [14]，假设炸药的化学能全部转化为爆炸产物与金属飞片的动能，假设速度分布呈线性。该模型称为 Gurney 模型 [15]。

不对称板型装药在飞板冲击试验（冲击硬化、冲击压实、爆炸焊接）中经常使用。炸药放在板的上部，并在顶部引爆或一端引爆。基于 Gurney 模型，Kennedy 对该情况进行了详细推导。给出了两种结构情况的预测公式，分别是：表面开放型和表面闭合型夹心结构。

该系列算例主要用来验证程序在爆炸方面计算的精度，可延伸于工程实际问题。分两种结构情况进行计算：表面开放型和表面闭合型夹心结构，每种结构又分一维和二维两种模型。每一类模型又设计了金属与炸药质量比从 0.04 ～ 3 一系列算例。其中，炸药采用 TNT，金属为钢。

对于表面开放型结构，其结构布置为金属 -炸药，如图11.1所示，右侧为金属，左侧为炸药。由于该模型对称，故建立离散模型时采用对称边界条件只建立一半模型进行计算。由于算例数量较多，具体尺寸不再赘述。对于表面闭合型夹心结构，其结构布置为金属 -炸药 -金属，如图11.2所示，中间为炸药，两端为金属。由于该模型对称，故建立离散模型时采用对称边界条件只建立四分之一模型进行计算。由于算例数量较多，具体尺寸不再赘述。

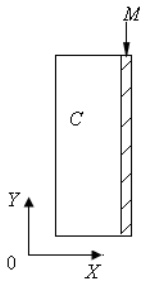


图 11.1: 表面开放型结构

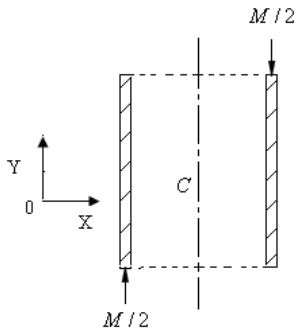


图 11.2: 表面闭合型夹心结构

本算例采用 cm-μs-g 单位制。模拟飞片采用简化的 Johnso-Cook（sjc）模型，其参数见表11.1；模拟炸药 TNT 材料采用高能炸药材料 HighExpBurn，具体参见见表11.2。

表 11.1: 钢的简化 Johnso-Cook 材料参数

ρ/g · mm^{-3}	E/MPa	υ	σ_y /MPa	B/MPa	n	c	epso
0.0078	200000	0.3	300	200	0.5	0.0	0.001

积分算法采用 MUSL，模拟时间见算例具体情况设定（保证飞片加速充分）。

表 11.2: TNT 的 JWL 参数

A(MPa)	B(MPa)	R_1	R_2	ω	e_0(MJ/mm^3)
3.712×10^5	3.21×10^3	4.15	0.95	0.30	6993

对于具体离散参数，特作如下说明：

1. 表面开放型结构

对于一维模型，在 y 和 z 向只布置 1 层背景网格，并在网格中心线上布置一排物质点。y 和 z 向的两端采用对称边界条件，x 向两端采用自由边界条件。质点间距为 0.1mm，背景网格边长为 0.5 mm。TNT 在 x 向的尺寸取为 20 mm，飞片在 x 向的尺寸依据不同的质量比取相应的值，如图11.3所示。

对于二维模型，根据对称性只需取模型的二分之一，在 z 向只布置一层背景网格。y 向的下端采用对称边界条件，上端自由；z 向两侧设置为对称边界条件，并在其中心面上布置一层物质点。TNT 在 x 向长度为 10mm，y 向宽为 20mm，飞片在 x 向的尺寸依据不同的质量比取相应的值。其它设置同一维模型，如图11.4 所示。

图 11.3: 一维模型离散图



图 11.4: 二维模型离散图

2. 表面闭合型夹心结构

对于一维模型，在 y 和 z 向只布置 1 层背景网格，并在网格中心线上布置一排物质点。由于对称性，只需取模型的一半。y 和 z 向的两端采用对称边界条件，x 向左端采用对称边界条件，右端采用自由边界条件。质点间距为 0.1mm，背景网格边长为 0.5 mm。TNT 在 x 向的尺寸取为 20mm，飞片在 x 向的尺寸依据不同的质量比取相应的值，从炸药的左侧进行起爆，离散模型示意图见图11.3。

对于二维模型，根据对称性只需取模型的四分之一，在 z 向只布置一层背景网格。y 向的下端采用对称边界条件，上端自由；z 向两侧设置为对称边界条件，并在其中心面上布置一层物质点，如图 5 所示。质点间距为 0.1mm，背景网格边长为 0.5 mm。TNT 在 x 向长度为 10mm，y 向宽为 20mm，飞片在 x 向的尺寸依据不同的质量比取相应的值。离散模型示意图见图11.4。

11.2 结果分析

1. 面开放型结构

a) 一维模型

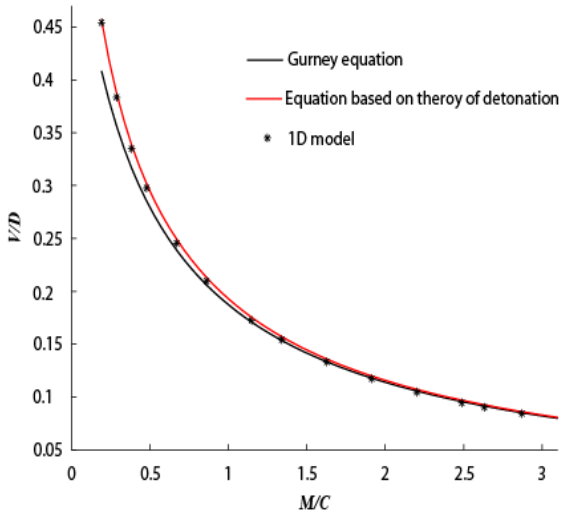


图 11.5: 表面开放型结构一维模型计算结果

由图11.5易知，表面开放型非对称板型装药一维模型计算结果与 Gurney 预测值相吻合。当 M/C 较小时，数值模拟结果高于 Gurney 预测值，随着增大，两者结果趋于一致。Gurney 公式是在一维假设下得到的，因此一维模型的模拟结果与 Gurney 公式预测结果吻合很好。

b) 二维模型

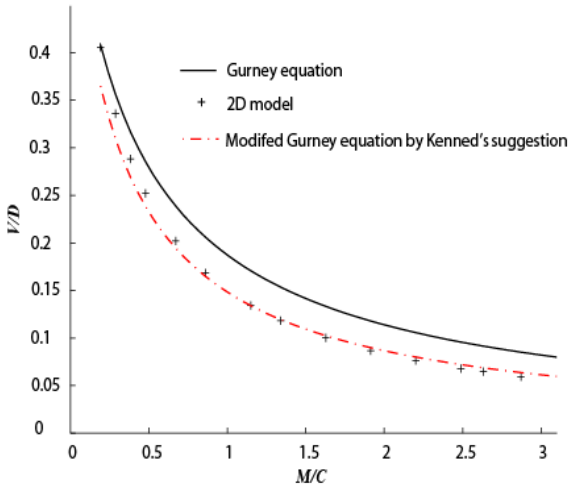


图 11.6: 表面开放型结构二维模型计算结果

图11.6给出了二维计算结果与 Gurney 公式的比较，当质量比较小时计算结果与 Gurney 预测值比较吻合，当质量比较大时，由图可知两者结果相差较大。这主要是由于 Gurney 预测公式是基于一维模型进行推导的，并没有考虑横向效应对计算结果的影响。实际上，问

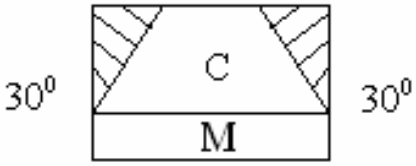


图 11.7: 模型修正示意图

题并不是一维问题，往往会在自由边界面上产生稀疏波，尤其是当质量比较大即飞片的加速时间较长时，这种由稀疏波产生的横向效应更为明显，因此，Gurney 预测公式计算的结果就会偏高，这点由图11.6也可得到验证。当然也有人通过采用较低的 Gurney 能使该经验公式和实验结果相吻合，因此 Gurney 能参数将是一个很重要的参数，本文基于此将采用固定的 Gurney 能进行研究。为了考虑横向效应的影响，需要对该预测公式进行修正，将炸药压力的侧向飞散所释放的能量从总能量中扣除 [16] 。对于不对称表面开放形装药的装置，Baum 等人基于实验数据给出了一个简易的扣除方法，如图11.7所示，炸药压力的侧向飞散使得炸药侧面的质量要扣除，不再计算阴影部分的炸药质量。本文运用此方法对 Gurney 公式进行了修正，与模拟计算结果对比见图11.6，结果吻合很好。

2. 表面闭合型夹心结构

a) 一维模型

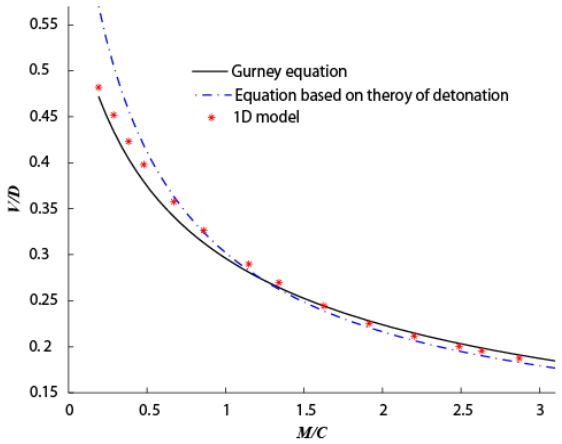


图 11.8: 面闭合型夹心结构一维模型计算结果曲线

图11.8给出了由物质点法得到的不同质量比 M/C 下一维模型的飞片速度，并与 Gurney 公式预测结果进行了比较。同样，一维模型的模拟结果与 Gurney 公式预测结果吻合很好。

b) 二维模型

由图11.9可知，数值模拟结果与 Gurney 预测结果差异较大。再次说明 Gurney 公式没有考虑有限尺寸带来的横向效应的影响，当采用大的金属炸药质量比时，其预测值偏高 [17]

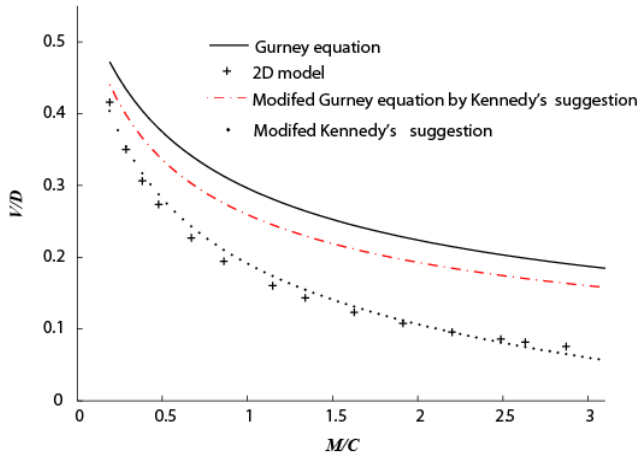


图 11.9: 表面闭合型夹心结构二维模型计算结果曲线

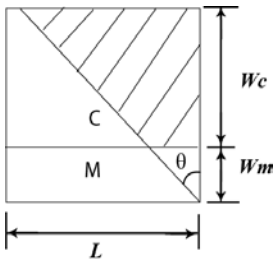


图 11.10: 模型修正示意图

。在此，仍采用 Baum 等人给出了对于不对称表面开放形装药的装置一个简易的扣除方法，所得结果比较见图11.9所示，误差比较大，最高达 100%，说明在此简单的套用 Baum 等人给出扣除方法是不合适的。但是通过质量扣除的方法来修正 Gurney 公式的思路是行之有效的，因为质量扣除方式是对二维板型装药横向效应的一个整体度量。由于 Baum 建议的扣除质量方式没有考虑板厚的影响，在此本文尝试在扣除质量的方式中引入板厚的影响，如图11.10所示，阴影区为需扣除的质量。同时不断调整 θ 的大小，当 θ=45 度时，修正的 Gurney 公式预测结果见图11.9所示，与模拟计算结果吻合很好。

3. 结论

a) 对于一维模型，当 M/C 值偏小时物质点法模拟结果高于 Gurney 预测值，随着 M/C 值的增大，结果趋于一致。总体上物质点法模拟结果与 Gurney 预测值相吻合。

b) Gurney 公式没有考虑有限尺寸带来的横向效应的影响，因此对于横向效应明显的二维模型预测值偏高。当采用 Baumet 等人提出的质量修正建议后，数值模拟结果与修正后的 Gurney 预测值吻合。对于对称构型装药，直接使用 Baumet 的质量修正方案的结果并不理想，本文沿用此思路提出了一种具体的修正方案，数值模拟结果与修正后的预测值相吻合。

c) 对于二维模型，当飞片的长厚比增加时数值模拟所得到的飞片速度趋于一维模拟结果。当该比值达到 50 时两者计算结果近似相等，此时二维模型近似等价于一维模型，横向效应不再起主要作用。

总体来讲，物质点法的数值模拟结果与 Gurney 公式及其修正后的公式预测结果吻合较好，说明物质点法具有很好模拟爆轰驱动飞片的能力。因此，物质点法在模拟爆轰类问题中具有广阔的应用前景。

12 水下爆炸模拟

12.1 问题描述

MPM 用于模拟由水下爆炸引起的冲击波。由于水下爆炸对临近的建筑结构产生一系列的破坏威胁，因而提出了水下爆炸（UNDEX）这一研究课题 [18] 。与水下爆炸相关的论点主要包括：高能炸药的起爆过程；起爆产生的爆炸气体进入周围的水介质时的膨胀过程；水下冲击和邻近结构的相互作用。

本算例中，我们研究二维空间下水下爆炸问题。一个正方形的 TNT 炸药（10mm×10mm）放在一个四周是固壁的正方形框架（100mm×100mm）内。计算时取 1/4 模型，采用（m-kg-s 单位），如图12.1所示：

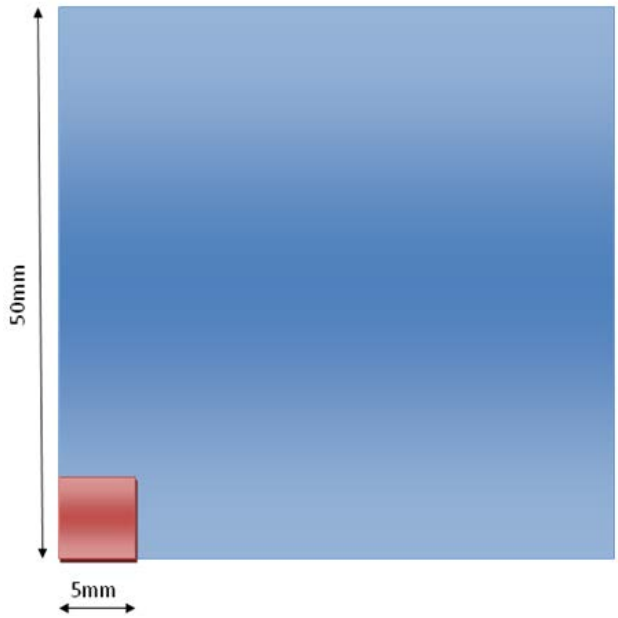


图 12.1: 模型示意图

表 12.1: 材料参数

	密度 (kg/m^3)	bq1	bq2	DV (m/s)
水	1×10^3	1.5	0.06	
TNT 炸药	1.63×10^4	1.5	0.06	6930

水采用 Gruneisen 状态方程：

表 12.2: 状态方程参数

	c0(m/s)	s1	gamma
水	1647	1.921	0.0

TNT 采用 JWL 状态方程：

表 12.3: 状态方程参数

	A(MPa)	B(MPa)	R1	R2	omega	e0(mJ/mm^3)
TNT	712×10^5	21×10^3	4.15	0.95	0.30	6993

表 12.4: 离散参数

背景网格	$50 \times 50 \times 1$
网格尺寸	1.0
质点总数	40000
Body 0 质点数（TNT）	400
Body 1 质点数（水）	39600

该算例输入数据文件为 ExplosiveUnderWater.xmp（位于目录 data/TestDatabase/Level-3/blast/ExplosiveUnderWater 下）。模拟时间 (EndTime) 为 0.1ms，时间步长因子 (TimeStep:factor) 取为 0.1。

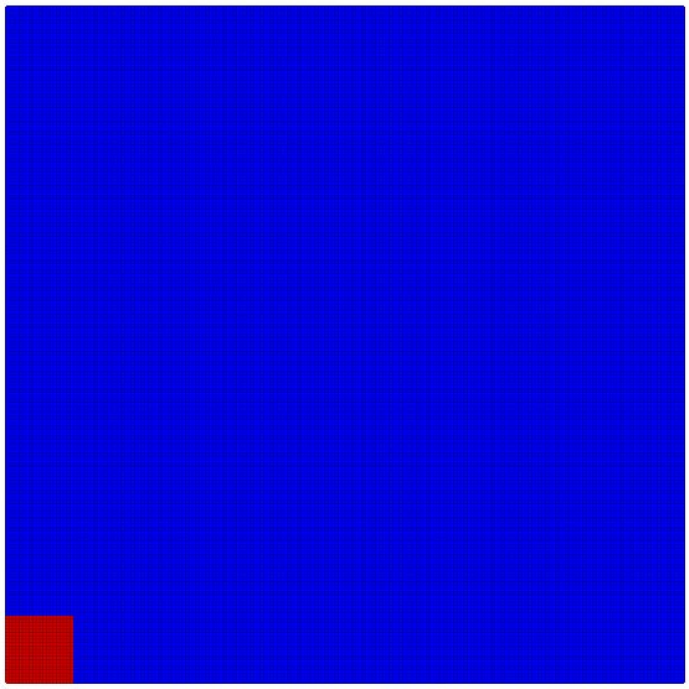


图 12.2: 离散示意图

12.2 结果分析

图12.3-图12.12给出了水下爆炸过程具有代表性瞬间的压力分布，从这些图中可以看到初始向外传播的冲击波、从固壁反射回来的反射波、爆炸气体膨胀和随后的压缩情况。炸药在刚引爆后就会在水中产生一个冲击波并向外传播。大约在 0.02ms 时冲击波到达固壁，然后从固壁反射回来。反射波向内传播并压缩正在膨胀的气体，大约在 0.04ms 时起爆到达最大尺寸，然后开始缩小。随着的冲击波不断地推进和爆炸气体的不断收缩，气泡达到最小尺寸，然后再次开始膨胀，如此往复多次后，整个过程将在一定时间内最终达到平衡状态。所得的结果与 Liu《光滑粒子流体动力学》p259 页 [3] 算例的结果一致。

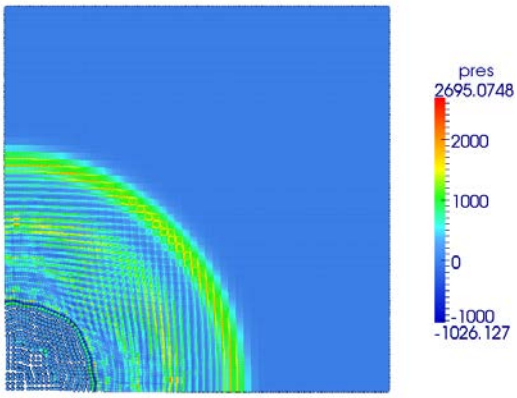


图 12.3: t=0.01ms

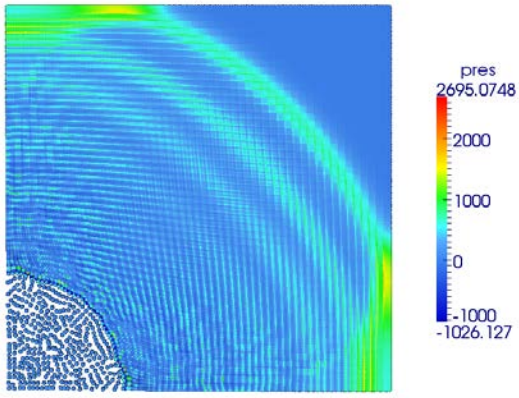


图 12.4: t=0.02ms

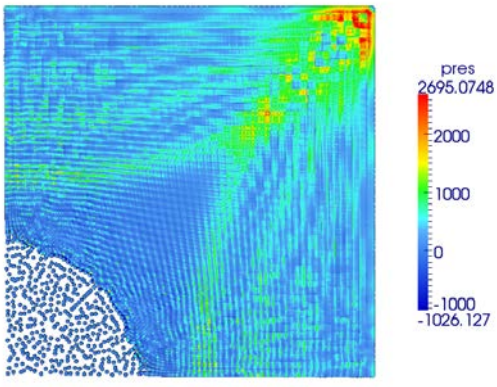


图 12.5: t=0.03ms

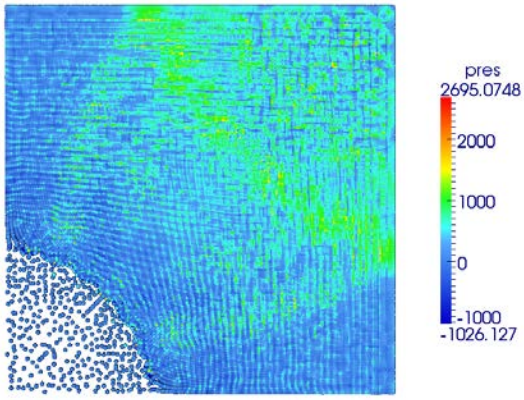


图 12.6: t=0.04ms

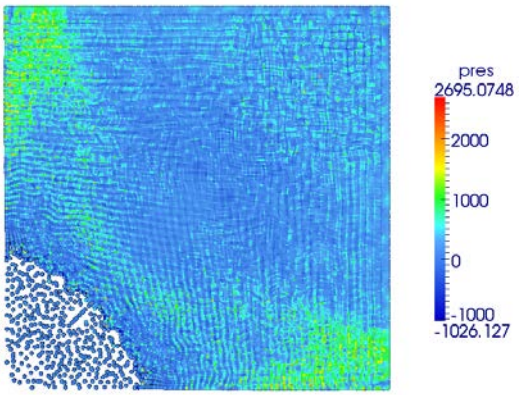


图 12.7: t=0.05ms

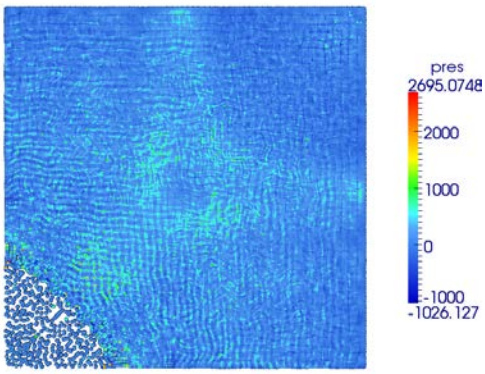


图 12.8: t=0.06ms

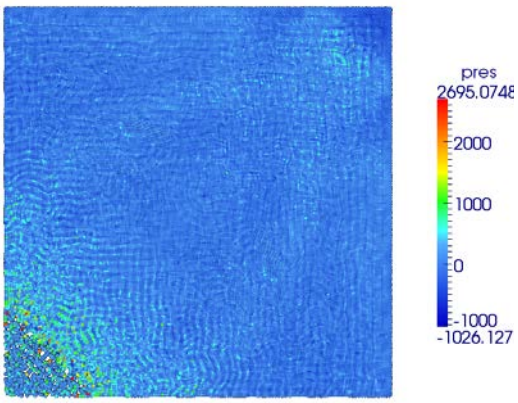


图 12.9: t=0.07ms

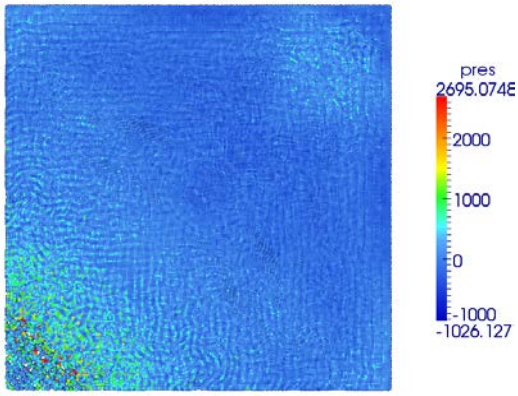


图 12.10: t=0.08ms

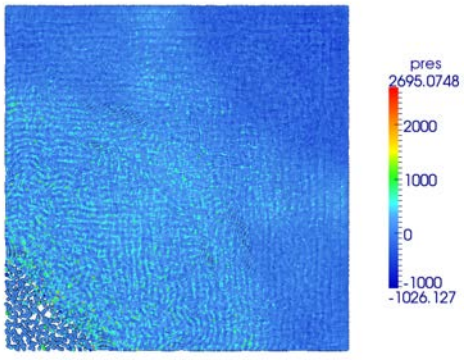


图 12.11: t=0.09ms

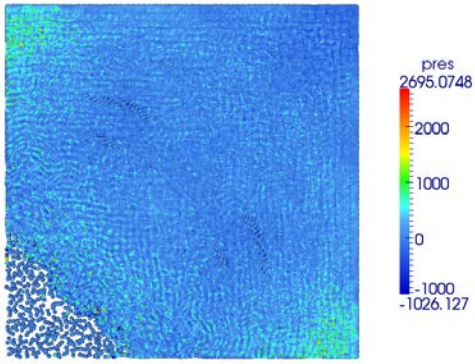


图 12.12: t=0.10ms

13 超高速碰撞问题模拟

13.1 问题描述

随着航天技术的发展，空间碎片是一个不可忽略的问题，空间碎片飞行速度极快，对航天器的安全造成了严重威胁，因此需要对空间碎片引起的破坏效应进行研究。

本算例中，我们对铅弹超高速撞击铅把问题进行模拟。

计算参数选自文献 [19]，铅弹半径为 7.5mm，质量为 20g，铅把厚度为 6.35mm，长 100mm，宽 60mm。弹丸的撞击速度 6.58km/s。初始构型如图13.1所示。

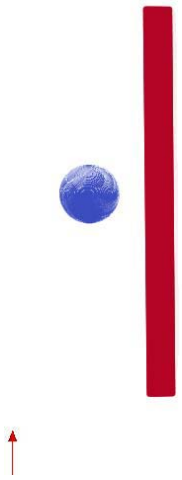


图 13.1: 铅球撞击铅靶初始构型

本算例采用 mm-g-ms 单位。铅的密度 $\rho = 1.135\times10^{-}2\mathrm{g/mm}^3$，弹性模量 $E = 2.24\times10^4$ MPa，泊松比 $\nu = 0.42$。采用简化 Johnson-Cook 塑性模型（即不考虑温度效应），材料参数如表13.1所示。失效模型参数如表13.2所示。采用 Mie-Gruneisen 状态方程模拟铅超高速碰撞下的行为，其参数如表13.3所示。

表 13.1: 简化 Johnson-Cook 塑性模型材料参数

	σ_y(MPa)	B(MPa)	C	n	epso
铅	12.0	125.0	0.0	1.0	0.001

表 13.2: 失效模型参数

	P_{min}(MPa)	$epso_{fail}$
铅	-1500	3.0

表 13.3: Mie-Gruneisen 状态方程参数

	c_0(m/s)	S_1	γ_0
铅	2092	1.45	2.0

由于该模型具有对称性，利用对称边界条件取其二分之一进行计算，背景网格和物体的离散参数如表13.4所示。输入数据文件在 “data/TestDatabase/Level-3/pene/PtImpact ” 目录下。

表 13.4: 离散参数

背景网格	$200 \times 100 \times 320$
网格尺寸	$0.5 \times 0.5 \times 0.5$
质点总数	1217454

模拟时间 (EndTime) 为 0.05ms，时间步长因子 (TimeStep:factor) 取为 0.4。

13.2 结果分析

文献 [19] 给出了实验结果，如图13.2所示。表13.5给出了实验结果和本算例 MPM 计算结果的比较。L 和 D 分别表示撞击 30μs 后碎片云前端距离靶板的距离 (约 200mm)，根据图片可得碎片云的最大宽度 (约 145mm)。

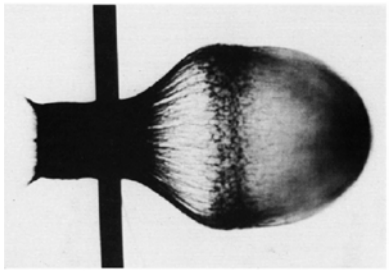


图 13.2: 铅球撞击铅靶 30μs 后的 X-射线图片

图13.3-图13.9给出了高速碰撞过程具有代表性瞬间的碎片云分布，
算例的结果与实验基本一致。

表 13.5: MPM 计算结果与实验结果的比较

	L（mm）	D（mm）
实验	200	145
本算例 MPM 计算	197	144



图 13.3: t=0.00 s



图 13.4: t=0.05 s

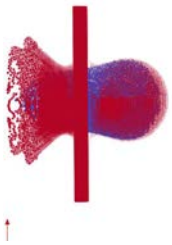


图 13.5: t=0.10 s

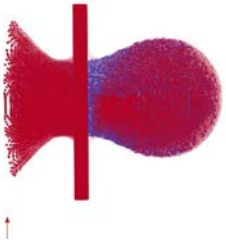


图 13.6: t=0.15 s

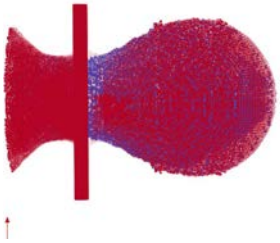


图 13.7: t=0.20 s

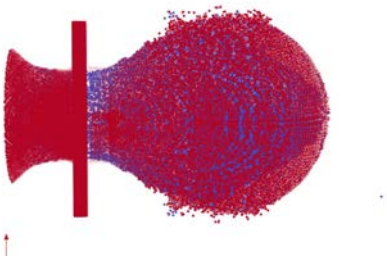


图 13.8: t=0.25 s

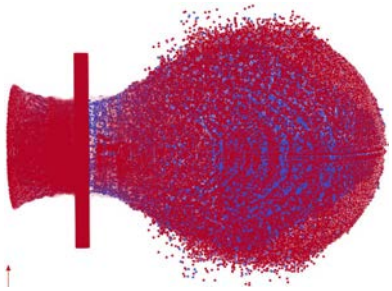


图 13.9: t=0.30 s

14 卵形弹头钢弹侵彻铝板

14.1 问题描述

本算例来自文章 [20]。原文主要针对卵形弹头的钢弹侵彻铝板进行了各种速度和入射角的实验，记录了初速和剩余速度，部分试验获取了侵彻过程的图像，通过数据拟合了剩余速度经验公式。本算例主要参照文章中的物理模型进行建模，材料参数引自现有商业软件和手册，通过调整失效参数拟合了实验数据。

算例中的靶板为面积 0.304 平方米，厚度 26.3mm 的铝板（如图14.1所示）。其中 $L = 67.5\text{mm}$,$l = 21.4\text{mm}$（弧长 22.67mm），$2a = 12.9\text{mm}$。

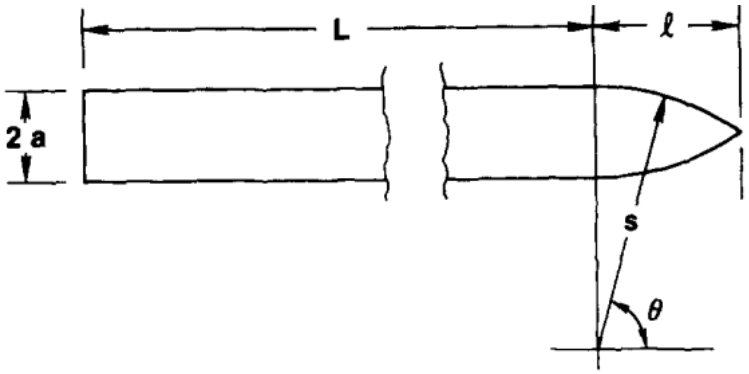


图 14.1: 靶弹外形图

本算例采用 mm-g-ms 单位。弹体为 4340 钢，采用弹性模型材料，参数如表14.1。靶体材料是 6061-T651 铝，采用 jc 模型，参数如表14.2。

表 14.1: 40 钢材料参数

密度	7800kg/m^3
杨氏模量	200GPa
泊松比	0.3

背景网格和物体的离散参数如表14.3所示，最终的质点离散如图14.2所示

模拟时间 (EndTime) 为 0.85ms，时间步长因子 (TimeStep:factor) 取为 0.7。

14.2 结果分析

考虑到金属材料的破坏模式主要为剪切失效，同时铝材具有一定的塑性，所以采用了最大剪应变失效和最大等效塑性应变失效两种模式分别计算，并且根据失效模型的计算结果调整了 jc 模型的应变率参数 cc 总共计算了 11 组，共计 121 个算例，取得了大量的数值实验数据。

表 14.2: 61-T651 铝材料参数

密度	2750kg/m^3
杨氏模量	75GPa
泊松比	0.33
屈服强度	270Gpa
Bb	114
nn	0.41
cc	0.002
mm	1.34
室温	293k
熔化温度	1220K
Spec	0.885
Epso	1e-3
D1	-0.77
D2	1.45
D3	-0.47
D4	0.0
D5	1.60

经过分析，程序计算高速撞击的效果要好于低速撞击，同一种失效参数可以保证 863m/s~396m/s 区间的八发靶弹的计算结果与试验结果误差小于 10%，但对于 341m/s 以下的三发弹撞击计算效果不好，与实际误差较大。经过分析，产生误差的原因可能与 T2412 号算例一致，对高速撞击与低速撞击对靶板应变率的变化影响考虑不够充分，在同一种失效模式下调整 jc 模型的应变率参数，可以看出结果有逐渐变好的趋势，但对比第 6 组和第 11 组数据，为了拉近低速和高速撞击之间的误差，将 jc 模型的应变率参数扩大了 50 倍并相应调整了失效参数，但是结果仍然存在较大误差，可见数值仿真结果对应变率参数 cc 并不十分敏感。

表 14.3: 模型离散参数

背景网格	$64 \times 64 \times 70$mm
网格尺寸	$4.3 \times 4.3 \times 4.3$mm
质点总数	196897
Body1 质点数	196608
Body2 质点数	248+81

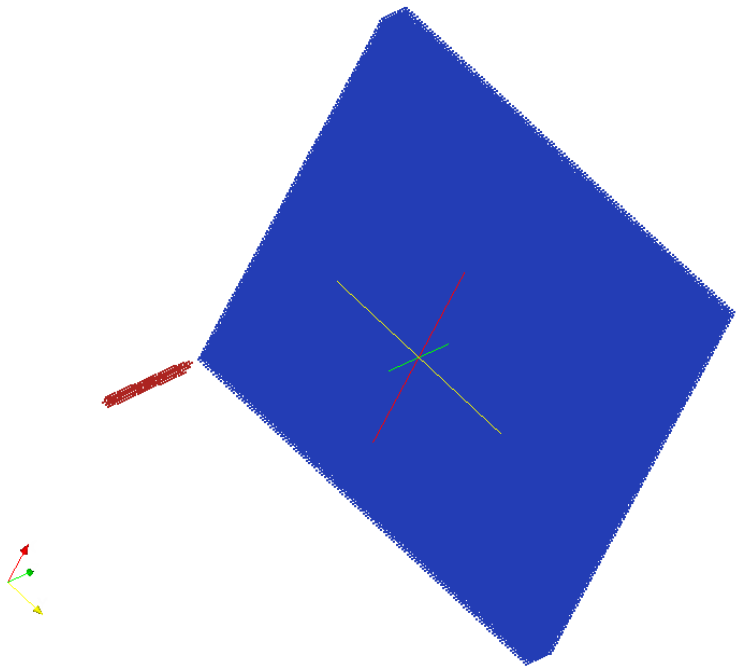
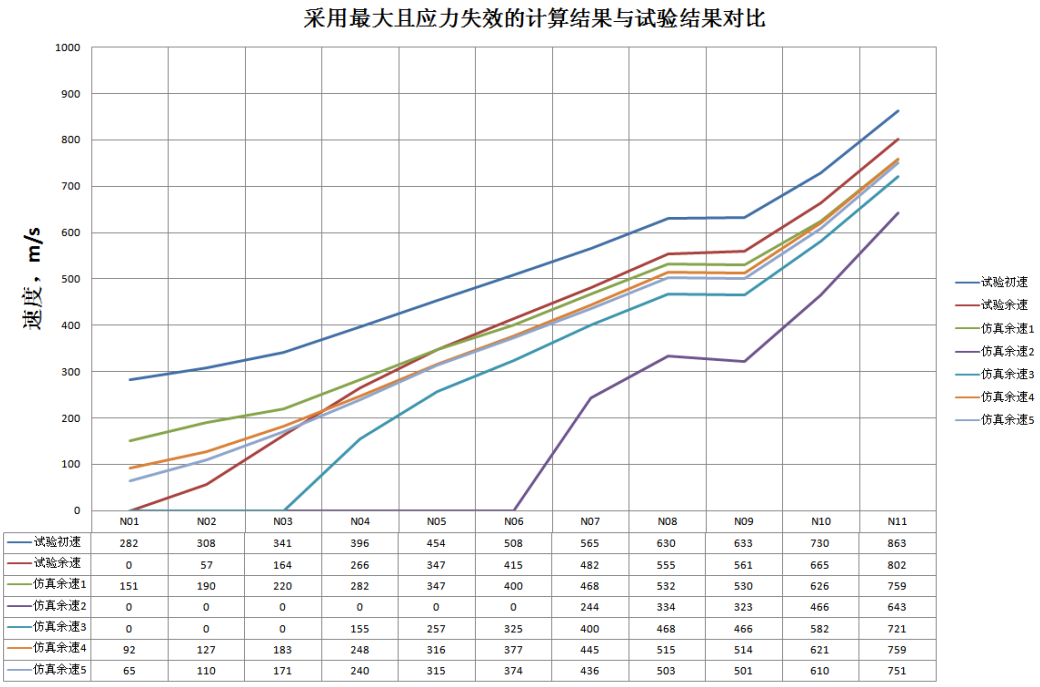


图 14.2: 离散示意图

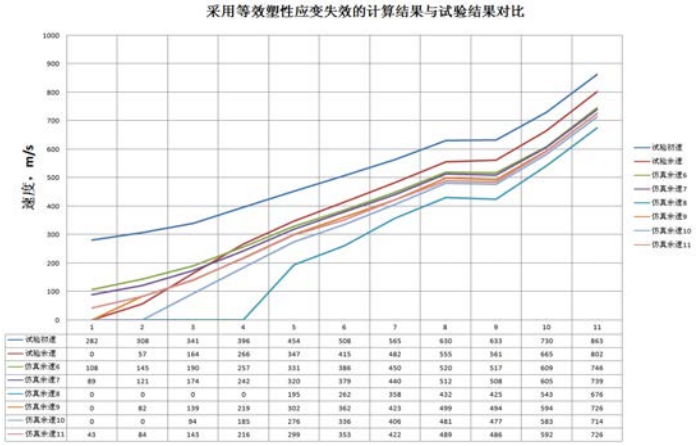
表 14.4: 不同失效模式下的计算结果和误差

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	备注
试验初速	282	308	341	396	454	508	565	630	633	730	863	
试验余速	0	57	164	266	347	415	482	555	561	665	802	
仿真余速 1	151	190	220	282	347	400	468	532	530	626	759	fopt 1,$\tau^{\max}$ 1.8e2,nr=10,c=0.002
	100%	233%	34%	6%	0%	-3%	-2%	-4%	-5%	-5%	-5%	
仿真余速 2	0	0	0	0	0	85	244	334	323	466	643	fopt 1,$\tau^{\max}$ 2.5e2 ,nr=10,c=0.002
	0%	-100%	-100%	-100%	-100%	-79%	-49%	-39%	-42%	-29%	-19%	
仿真余速 3	0	0	0	155	257	325	400	468	466	582	721	fopt 1,$\tau^{\max}$ 2.1e2 ,nr=10,c=0.002
	0%	-100%	-100%	-41%	-26%	-22%	-17%	-16%	-17%	-12%	-10%	
仿真余速 4	92	127	183	248	316	377	445	515	514	621	759	fopt 1,$\tau^{\max}$ 1.9e2 ,nr=10,c=0.002
	100%	123%	12%	-7%	-9%	-9%	-8%	-7%	-8%	-7%	-5%	
仿真余速 5	65	110	171	240	315	374	436	503	501	610	751	fopt 1,$\tau^{\max}$ 1.95e2 ,nr=18,c=0.002
	100%	93%	4%	-10%	-9%	-10%	-10%	-9%	-11%	-8%	-6%	
仿真余速 6	108	145	190	257	331	386	450	520	517	609	746	fopt 1,epmax 0.2 ,nr=18,c=0.002
	100%	154%	16%	-3%	-5%	-7%	-7%	-6%	-8%	-8%	-7%	
仿真余速 7	89	121	174	242	320	379	440	512	508	605	739	fopt 1,epmax 0.2 ,nr=18,c=0.02
	100%	112%	6%	-9%	-8%	-9%	-9%	-8%	-9%	-9%	-8%	
仿真余速 8	0	0	0	0	195	262	358	432	425	543	676	fopt 1,epmax 0.2 ,nr=18,c=0.2
	0.00%	-100%	-100%	-100%	-44%	-37%	-26%	-22%	-24%	-18%	-16%	
仿真余速 9	0	82	139	219	302	362	423	499	494	594	726	fopt 1,epmax 0.2 ,nr=18,c=0.05
	0%	44%	-15%	-18%	-13%	-13%	-12%	-10%	-12%	-11%	-9%	



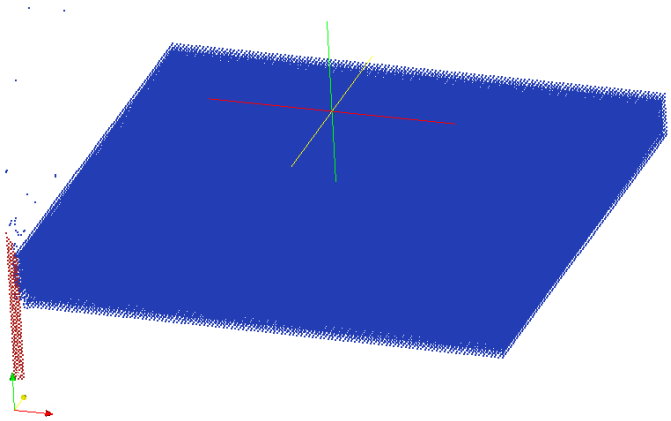
	N01	N02	N03	N04	N05	N06	N07	N08	N09	N10	N11
试验初速	282	308	341	396	454	508	565	630	633	730	863
试验余速	0	57	164	266	347	415	482	555	561	665	802
仿真余速1	151	190	220	282	347	400	468	532	530	626	759
仿真余速2	0	0	0	0	0	0	244	334	323	466	643
仿真余速3	0	0	0	155	257	325	400	468	466	582	721
仿真余速4	92	127	183	248	316	377	445	515	514	621	759
仿真余速5	65	110	171	240	315	374	436	503	501	610	751

(a) 图 2 最大应力失效模式的计算结果（仿真 3 设置失效值过大，仅供参考）

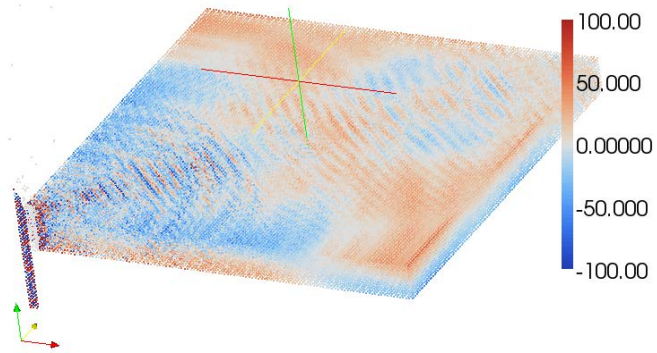


	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
试验初速	282	308	341	396	454	508	565	630	633	730	863
试验余速	0	57	164	266	347	415	482	555	561	665	802
仿真余速6	108	145	190	257	331	386	450	520	517	609	746
仿真余速7	89	121	174	242	320	379	440	512	508	605	739
仿真余速8	0	0	0	0	195	262	358	432	425	543	676
仿真余速9	0	82	139	219	302	362	423	499	494	594	726
仿真余速10	0	0	94	185	276	336	406	481	477	583	714
仿真余速11	43	84	143	216	299	353	422	489	486	592	726

(b) 等效塑性应变失效模式的计算结果



(c) 计算过程的截图（材料着色）



(d) 计算过程的截图（应力云图）

15 杆式穿甲弹侵彻金属靶板

15.1 问题描述

算例选自《杆式穿甲弹侵彻金属靶板的试验与数值模拟研究》，作者：武竞雄，何煌，曾首义 (国防科学技术大学，湖南长沙 410072)

原文主要对杆式穿甲弹侵彻金属靶板的问题进行了试验研究，并采用显式动力有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 对试验进行数值模拟，模拟的结果很好，但是原文并未说明失效参数的设置，不知是否采用统一的失效参数。在采用 MPM3DPP 进行计算的时候针对同一组仿真使用同样的失效参数，并针对不同的失效参数进行了大量的计算。

试验中弹体为圆柱体，材料为 45# 钢、弹径为 7.62mm、长为 23.8mm、质量为 8.5g；靶板材料为低碳钢、形状为方形、尺寸为 120mm×120min×2.86mm。弹着点为靶板中心。

本算例采用 mm-g-ms 单位。弹体为 ELASTIC_KINEMATIC 材料模型（如图15.1所示）；靶板为 JOHNSON_COOK 材料模型（如图15.2所示）。

$E(MP_a)$	ν	$\rho(kg/m^3)$	$\sigma_o(MPa)$	$E_t(MPa)$	ε_f (%)
204,000	0.29	7840	1600	15,000	2.15

图 15.1: 弹体 ELASTIC_KINEMATIC 材料模型参数

$\rho(kg/m^3)$	$E(GPa)$	ν	$A(MPa)$	$B(MPa)$	n	C	m
7800	200	0.28	490	807	0.73	0.0114	0.94
$C_p(J/kgK)$	$T_m(K)$	$T_o(K)$	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
52	1793	293	1.2	0.732	-0.24	-0.015	0

图 15.2: 靶板 JOHNSON_COOK 材料模型参数

背景网格和物体的离散参数如表15.1所示，最终的质点离散如图15.3所示。

表 15.1: 离散参数

背景网格	60 × 60 × 130mm
网格尺寸	0.8 × 0.8 × 0.8mm
质点总数	174360
Body1 质点数	157500
Body2 质点数	16860

模拟时间 (EndTime) 为 0.15ms，时间步长因子 (TimeStep:factor) 取为 0.7。

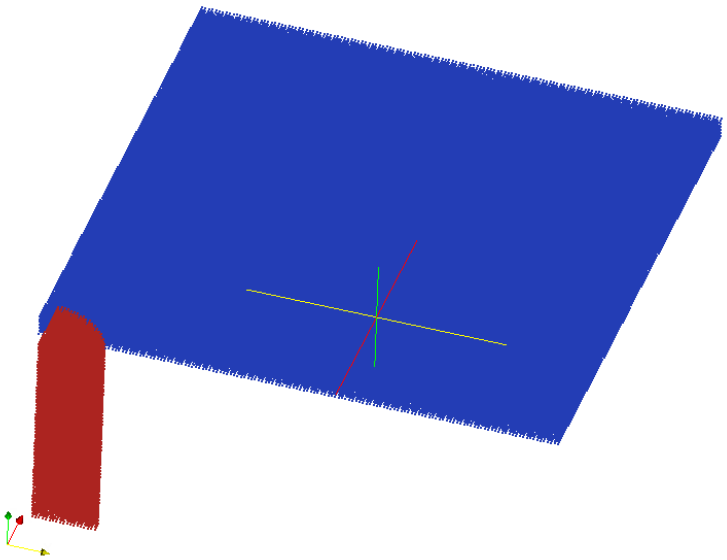


图 15.3: 模型离散示意图

15.2 结果分析

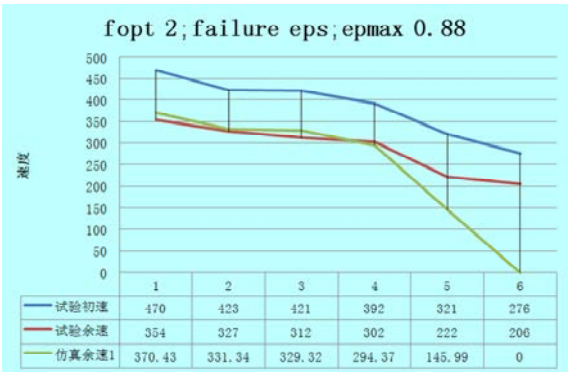
为了检验程序的计算结果，针对最大等效塑性应变失效、最大静水拉力失效、最大主应力/剪应力失效、最大主应变/剪应变失效等多种失效模式建立了模型，并且根据失效模型的计算结果调整了 JC 模型的应变率参数，总共计算了 18 组，共计 108 个算例，取得了大量的数值实验数据。经过分析，程序计算高速撞击的效果要好于低速撞击，同一种失效参数可以保证 470m/s~321m/s 区间的五发靶弹的计算结果与试验结果误差小于 10%，但对于 276m/s 的低速撞击计算效果不好，很多模式下都无法穿透靶板。

经过分析，估计产生误差的原因可能是高速撞击与低速撞击对靶板应变率的变化影响考虑不够充分，于是在同一种失效模式下调整了 JC 模型的应变率参数，可以看出结果有逐渐变好的趋势，但如果要拟合试验结果还具有一定的差距。现在得到的结果基本可以保证与试验结果误差保持在 10%左右，考虑到试验本身也存在一定的误差，这个结果还是可以接受的。同时考虑到 JC 模型不适合低速情况下侵彻，应当在低速时换用弹塑性模型。

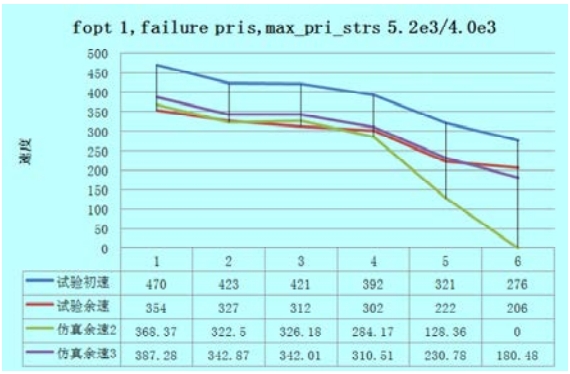
具体的计算结果和图表请参见表 4 ～表 6，图 2 ～图 3。

表 15.2: 不同失效模式下的计算结果和误差

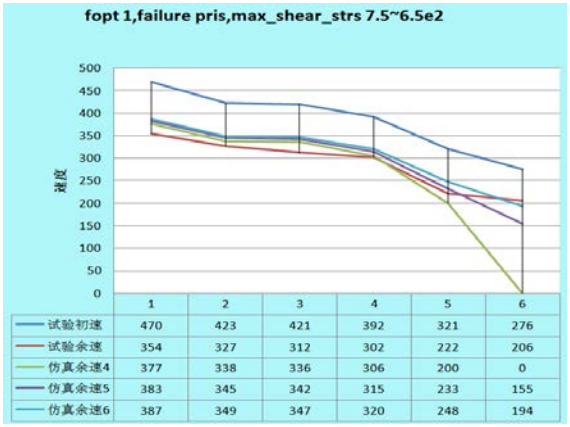
编号	1	2	3	4	5	6	仿真失效参数	仿真误差					
试验初速	470	423	421	392	321	276							
试验余速	354	327	312	302	222	206							
仿真余速 0	360	317	315	298	234	195	文献中未提及失效模式						
仿真余速 1	370	331	329	294	146	0	fopt 2,epmax 0.88	4.64%	1.33%	5.55%	-2.53%	-34.24%	-100.00%
仿真余速 2	368	323	326	284	128	0	fopt 1,max_pri_strs 5.2e3	4.06%	-1.38%	4.54%	-5.90%	-42.18%	-100.00%
仿真余速 3	387	343	342	311	231	180	fopt 1,max_pri_strs 4.0e3	9.40%	4.85%	9.62%	2.82%	3.95%	-12.39%
仿真余速 4	377	338	336	306	200	0	fopt 1,max_shear_strs 7.5e2	6.50%	3.36%	7.69%	1.32%	-9.91%	-100.00%
仿真余速 5	383	345	342	315	233	155	fopt 1,max_shear_strs 7.0e2	8.19%	5.50%	9.62%	4.30%	4.95%	-24.76%
仿真余速 6	387	349	347	320	248	194	fopt 1,max_shear_strs 6.5e2	9.32%	6.73%	11.22%	5.96%	11.71%	-5.83%
仿真余速 7	379	348	346	319	246	183	fopt 1,max_pri_strn 0.7	7.06%	6.42%	10.90%	5.63%	10.81%	-11.17%
仿真余速 8	390	351	348	323	256	210	fopt 1,max_shear_strn 0.4	10.17%	7.34%	11.54%	6.95%	15.32%	1.94%
仿真余速 9	387	348	346	319	246	181	fopt 1,max_shear_strn 0.5	9.32%	6.42%	10.90%	5.63%	10.81%	-12.14%
仿真余速 10	383	344	342	314	228	0	fopt 1,max_shear_strn 0.6	8.19%	5.20%	9.62%	3.97%	2.70%	-100.00%
仿真余速 11	379	339	337	307	193	0	fopt 1,max_shear_strn 0.7	7.06%	3.67%	8.01%	1.66%	-13.06%	-100.00%



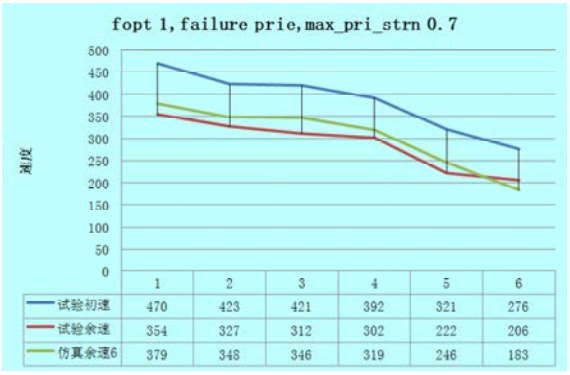
(a) 第 1 组仿真结果



(b) 第 2、3 组仿真结果



(c) 第 4、5、6 组仿真结果



(d) 第 7 组仿真结果



(e) 8、9 组仿真结果

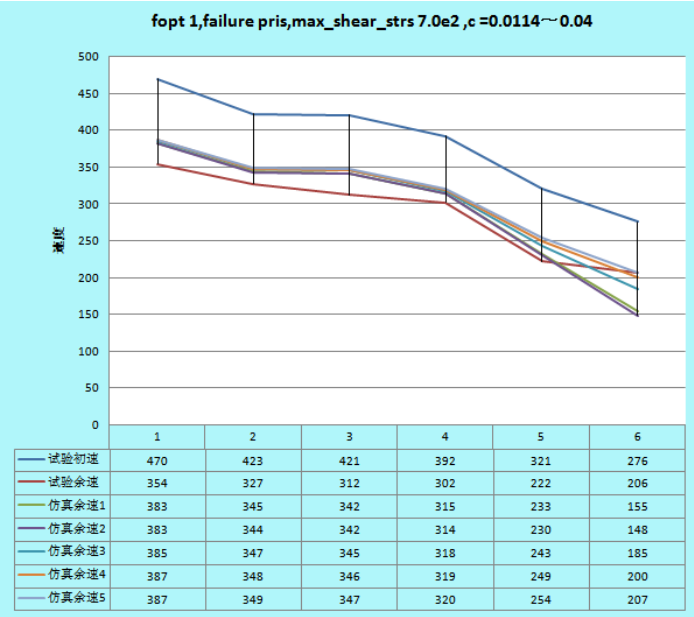


(f) 第 10、11 组仿真结果

图 15.4: 不同失效模式下的计算结果的对比图

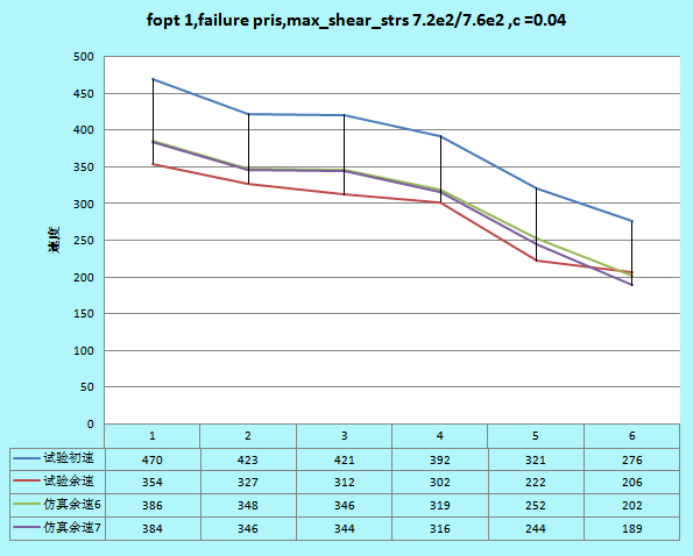
表 15.3: 切应力失效模式下调整 jc 模型应变率系数的计算结果（fopt 1,failure pris,max_shear_strs7.0e2）

编号	1	2	3	4	5	6	仿真失效参数	仿真误差					
试验初速	470	423	421	392	321	276							
试验余速	354	327	312	302	222	206							
仿真余速 0	360	317	315	298	234	195	文献中未提及失效模式						
仿真余速 1	383	345	342	315	233	155	C=0.0114	8.19%	5.50%	9.62%	4.30%	4.95%	-24.76%
仿真余速 2	383	344	342	314	230	148	C=0.01	8.19%	5.20%	9.62%	3.97%	3.60%	-28.16%
仿真余速 3	385	347	345	318	243	185	C=0.02	8.76%	6.12%	10.58%	5.30%	9.46%	-10.19%
仿真余速 4	387	348	346	319	249	200	C=0.03	9.32%	6.42%	10.90%	5.63%	12.16%	-2.91%
仿真余速 5	387	349	347	320	254	207	C=0.04	9.32%	6.73%	11.22%	5.96%	14.41%	0.49%
仿真余速 6	386	348	346	319	252	202	C=0.04,max_shear_strs=7.2e2	9.04%	6.42%	10.90%	5.63%	13.51%	-1.94%
仿真余速 7	384	346	344	316	244	189	C=0.04,max_shear_strs=7.6e2	8.47%	5.81%	10.26%	4.64%	9.91%	-8.25%



	1	2	3	4	5	6
试验初速	470	423	421	392	321	276
试验余速	354	327	312	302	222	206
仿真余速1	383	345	342	315	233	155
仿真余速2	383	344	342	314	230	148
仿真余速3	385	347	345	318	243	185
仿真余速4	387	348	346	319	249	200
仿真余速5	387	349	347	320	254	207

图 15.5: 同种失效模式下不同应变率系数的计算结果对比图



	1	2	3	4	5	6
试验初速	470	423	421	392	321	276
试验余速	354	327	312	302	222	206
仿真余速6	386	348	346	319	252	202
仿真余速7	384	346	344	316	244	189

图 15.6: 综合调整失效参数和应变率参数的计算结果对比图

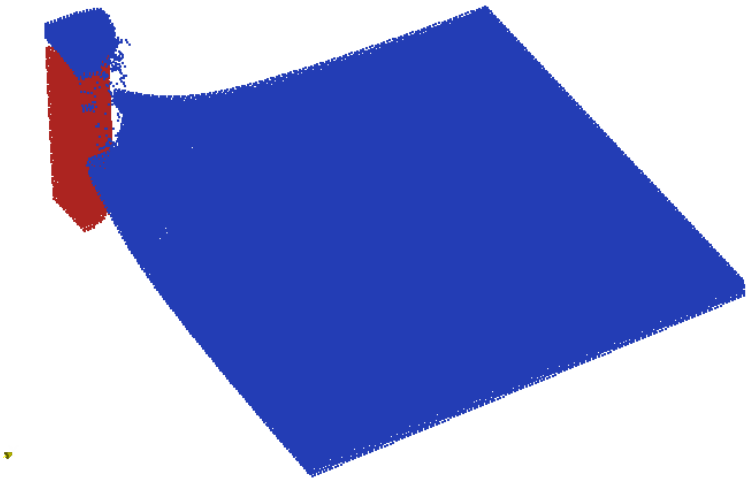


图 15.7: 计算过程输出的图片（根据材料上色）

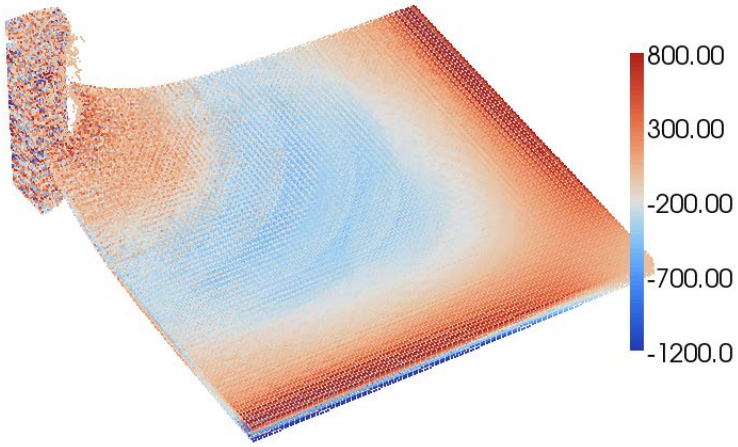


图 15.8: 计算过程输出的图片（应力云图），单位 MPa

16 自然战斗部的破片模拟

16.1 问题描述

破片杀伤战斗部是战斗部的主要类型之一，它利用破片的高速撞击、引燃和引爆作用毁伤目标 [21]。破片是由于材料破碎产生的，而破碎是连续断裂导致的现象，动态断裂最重要的表现之一就是材料在连续断裂的最后分裂成许多块体 [22]。自然破片战斗部是常见的破片生成途径，金属壳在内部装药爆炸驱动下猝然解体，破碎成不同大小、不同形状的破片向四周高速飞散，从而产生一种重要杀伤元素。自然破片战斗部中壳体既充当了容器又形成杀伤元素。本文主要的研究对象即为自然破片战斗部的破片。自然战斗部的破片具有大小不均匀，形状不规则的特点，表现出破碎的随机特性。这种随机性可表现在微观和宏观两个方面。微观方面为材料的初始微观缺陷分布具有随机性；而宏观方面为材料发生失效的阀值分布具有随机性。采用 Gurson 模型 [23] 来描述材料的微观缺陷，另一方面假设材料宏观失效阀值服从 Weibull[24][25] 随机分布。金属发生塑性变形导致的延性破坏往往伴随着微小裂缝处小孔洞的成核，生长以及合并的过程，这在高应变率的冲击 [26] 以及爆炸成形 [27] 等问题中起着重要作用；Weibull 统计理论能较好描述脆性断裂现象。金属破碎的过程往往表现为材料的延脆性转换过程。

汤铁钢等 [28] 研究了 RHT-901 炸药爆轰加载下 45 钢柱壳膨胀破裂过程，测得了高应变率下 45 钢的断裂失效应变。这里采用单位制 mm-mg-ms。物质点法模拟时采用文献 [28] 中的构型，炸药内径 40mm，柱壳内径 60mm，壁厚 4mm，同时将问题简化为平面应变问题，取 1/4 模型进行模拟。RHT-901 炸药材料参数如表16.1所示，JWL 状态方程如表16.2所示。

表 16.1: 高能炸药材料材料参数 [29]

密度 (g/mm^3)	爆速 (mm/ms)
0.001684	7790

表 16.2: JWL 状态方程材料参数 [29]

A(MPa)	B(MPa)	R_1	R_2	ω
524200	321000	4.15	0.95	0.3

算例中壳体为 45 钢，使用简化 Johnson-cook 材料模型，材料参数见表16.3所示，使用 Grüneisen 状态方程，参数见表16.4所示；当壳体使用 Gurson 模型，其相关参数见16.5所示，其中 f_{0e}，f_{0s} 分别为初始孔洞体积分数的均值和方差。文献 [28] 中指出当柱壳壁厚 4mm 时，断裂径向应变 $\varepsilon_c = 0.43$[28]，所以模拟中当采用失效阀值服从 Weibull 随机分布的方案时，粒子失效的等效塑性应变均值设为 0.43；当采用 Gurson 模型时，使用 TEPLA-F 失效准则，$f_f = 0.2109$[30]，$\varepsilon_p^f = 0.43$。

表 16.3: 45 钢 Johnson-Cook 材料模型参数 [31]

ρ (g/mm^3)	E(MPa)	ν	A(MPa)	B(MPa)	C	N
0.0078	210000	0.3	507	320	0.28	0.064

表 16.4: 45 钢 Grüneisen 状态方程参数

c_0(mm/ms)	s_1	γ
4.15	0.95	0.3

相关离散参数见16.6所示。离散模型分别如图16.1所示。

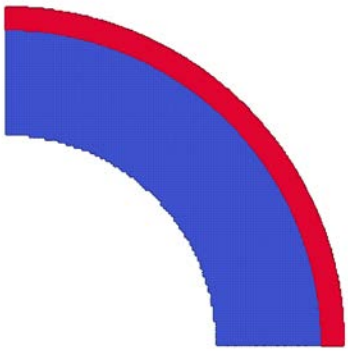


图 16.1: 模型示意图

相应输入数据文件分别位于为（位于目录 data/TestDatabase/Level-3/Fragmentation 下）。模拟时间 (EndTime) 为 0.05ms，时间步长因子 (TimeStep:factor) 取为 0.4。

16.2 结果分析

图16.2和图16.3分别为采用 Gurson 模型和 Weibull 随机方案的物质点法模拟得到的柱壳破碎过程，柱壳破碎之后碎片在爆轰的驱动下加速扩散，爆轰产物从碎片间的缝隙中逐渐溢出，柱壳不再产生新的碎片。模拟得到柱壳破碎时间和实验结果的对照如表16.7所示，三者较为一致。从整个断裂过程看，爆炸荷载作用下柱壳内壁面附近区域处于压应力状态，剪切失稳首先在此发生；而外壁面附近很快就处于环向拉应力状态，可能同时在外壁面形成拉伸裂纹，于是内壁的剪切失稳带和外壁的拉伸裂纹在壁内相遇，形成拉剪混合断裂。在爆炸荷载产生的高应变率下，柱壳壁内首先发生剪切局域化，在局域化区域发生剧烈的塑性变形，出现类似拉伸试验中的颈缩现象 (见图16.6)[28]。实验回收的破片形状如图16.7所示。

模拟中发现内壁的粒子首先失效，当继续膨胀时，外壁由于拉应力作用部分粒子失效，从而触发了沿着剪切带的裂纹，断裂处发生颈缩，形成中间大两头小的碎片。采用 Gurson 模型时，随着柱壳的膨胀，内壁粒子由于受压，孔洞减小，而外壁粒子受拉，孔洞生长成核

表 16.5: 45 钢 Gurson 模型参数 [30]

q_1	q_2	f_{0e}	f_{0s}	f_c	f_f	f_N	ε_N	s_N
1.5	1	0.005	0.0003	0.0021	0.2109	0.001	0.04	0.01

表 16.6: 离散参数

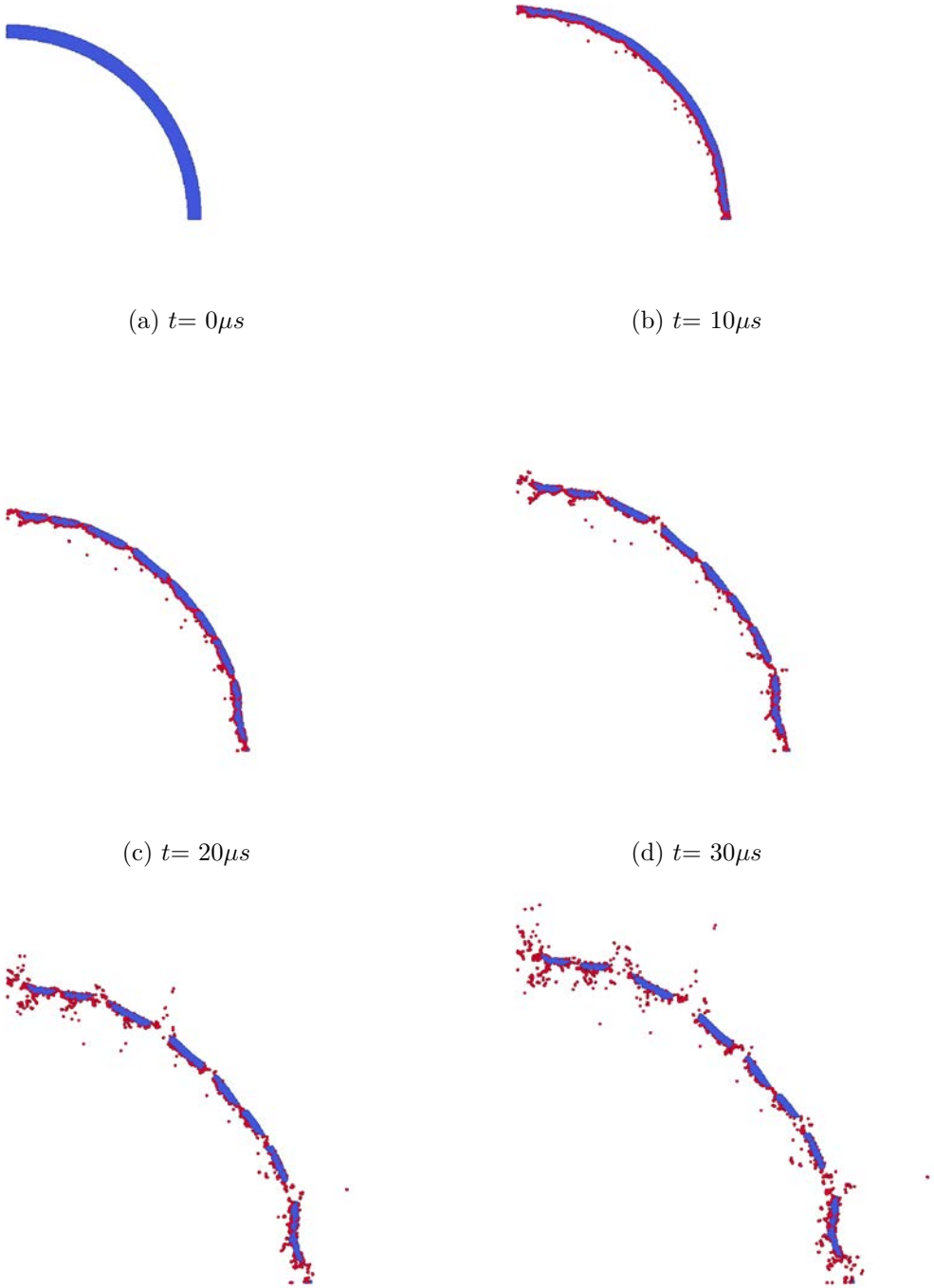
背景网格	网格尺寸	炸药质点数	壳体质点数
$200 \times 200 \times 0.5$	$0.5 \times 0.5 \times 0.5$	6284	19002

合并，最终部分粒子失效。图16.8是破碎发生时刻柱壳孔洞体积分数的分布。可见 Gurson 模型从微观损伤角度较好的描述了碎片产生的过程。另一方面，采用 Weibull 随机方案时，物质点的宏观失效阀值随机分布；采用 Gurson 模型时，物质点的微观孔洞体积分数随机分布，两种方案均能有效地模拟出自然破片的产生，同时表征破碎发生的随机性。

表 16.7: 柱壳破碎的时间

	实验	Weibull 方案	Gurson 模型
时间 (μs)	15.4	15	16.5

本算例基于物质点方法，从宏微观角度分别采用 Weibull 随机失效方案和初始孔隙率随机分布的 Gurson 模型，模拟了爆炸荷载作用下金属破碎的现象。结果表明结合物质点法分析大变形问题的优势，这两种方法均能有效模拟破片的产生。

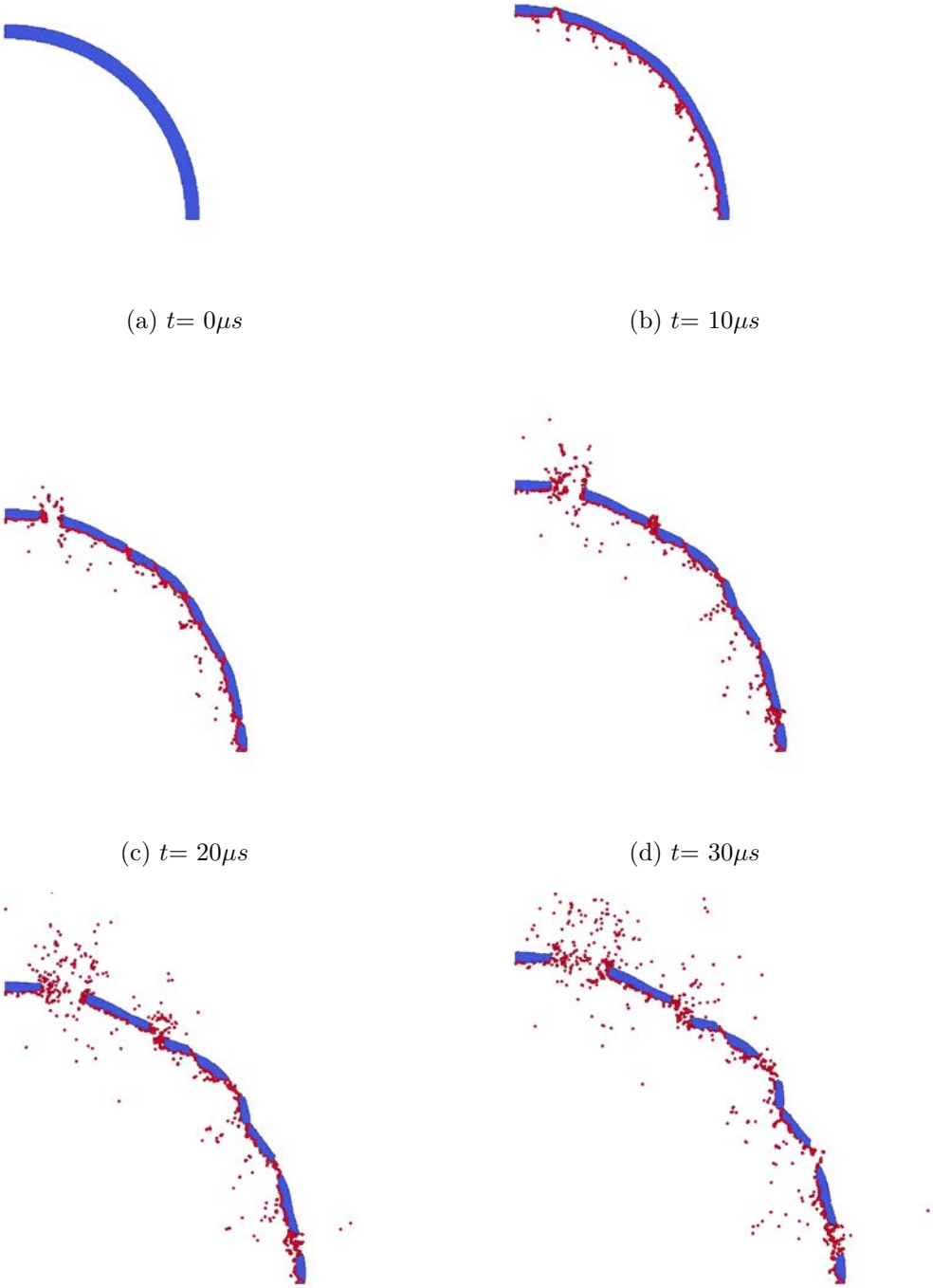


(a) t= 0μs (b) t= 10μs

(c) t= 20μs (d) t= 30μs

(e) t= 40μs (f) t= 50μs

图 16.2: 采用 Gurson 模型得到的柱壳破碎过程



(a) t= 0μs (b) t= 10μs

(c) t= 20μs (d) t= 30μs

(e) t= 40μs (f) t= 50μs

图 16.3: 采用 Weibull 随机失效方案得到的柱壳破碎过程

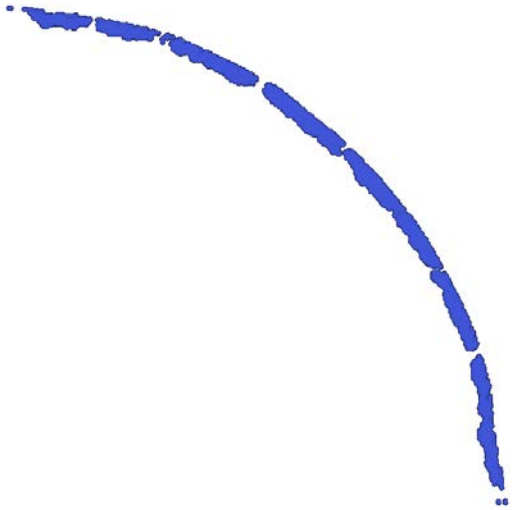


图 16.4: 采用 Gurson 模型时柱壳断裂时刻碎片分布

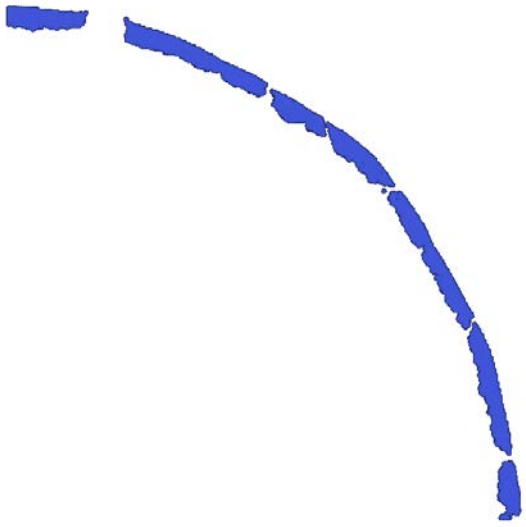


图 16.5: 用 Weibull 随机失效方案时柱壳断裂时刻碎片分布

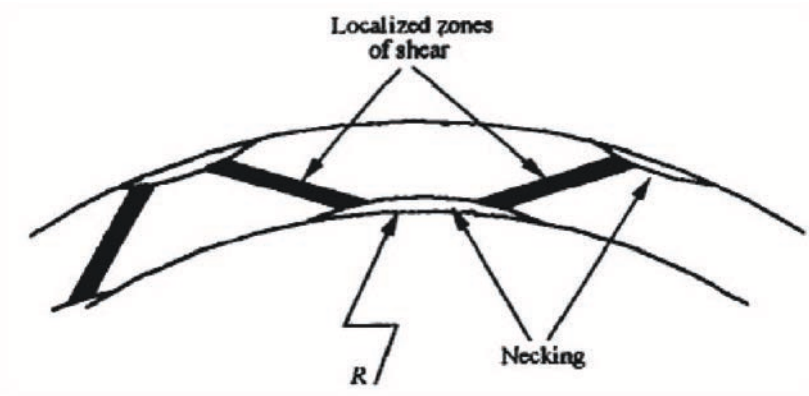


图 16.6: 柱壳剪切局域化与颈缩现象 [28]



图 16.7: 实验回收的破片形状 [28]

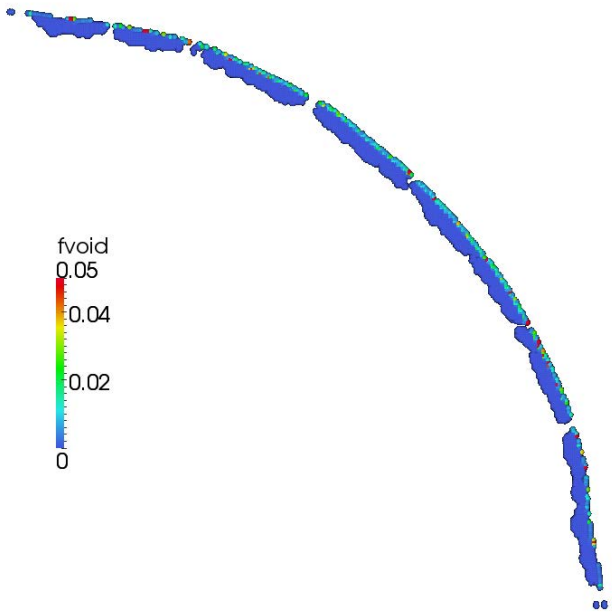


图 16.8: 采用 Gurson 模型时柱壳破碎时的孔洞分布

17 卵形弹侵彻钢筋混凝土靶板

17.1 问题描述

本算例根据文献 [32] 提供的系列实验编制，主要考察弹体对钢筋混凝土的侵彻效果，及其剩余弹速。弹体的形状及几何参数参见图17.1，靶体的几何材料信息参见表17.2。

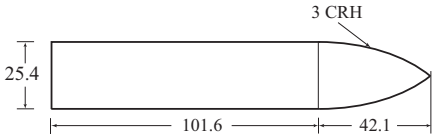


图 17.1: 弹体外形图

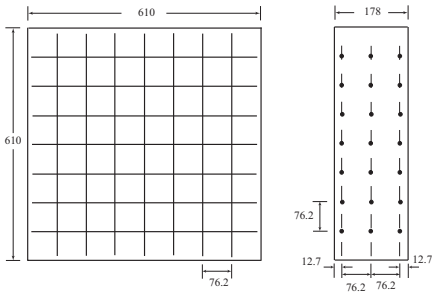


图 17.2: 靶体尺寸及钢筋布置方式

本算例采用的单位制为 mm-g-ms。考虑到实验中弹体贯穿后并无破坏性变形，此次假设弹体为弹性体，采用材料模型为 IsoElastic，相应的材料参数见表17.1。混凝土采用 HJC 材料模型模拟，材料参数取自文献 [33] 见表 17.2所示。

文 [33] 中并无给出钢筋的具体型号，此处假设钢筋为 Q235 钢材并采用理想弹塑性模型模拟钢筋。具体的材料参数见表17.3。为了模拟钢筋的断裂，启用等效塑性应变失效准则，取值为 0.26。

实验中，卵形弹并未打中钢筋。为了体现钢筋的作用，本文给出了三种工况的数值模拟：工况 1，卵形弹侵彻素混凝土；工况 2，卵形弹侵彻钢筋混凝土，但并未打中钢筋；工况 3，卵形弹侵彻钢筋混凝土且打中三层钢筋。由于该模型具有对称性，仅建立其四分之一模型进行计算，以节省计算时间。背景网格和材料区域的离散参数如表17.4所示，图17.3给出了工况 1 的离散模型。

模拟时间（EndTime）取为 0.5ms，时间步长因子 (TimeStepFactor) 取为 0.5。

三种工况的数值模拟输入文件，依次命名为：Impact48MPaPC1.xmp、Impact48MPaRC1.xmp、Impact48MPaRC2.xmp（位于目录 data/TestDatabase/Level-3/pene/PenetrateTo48MPaRC 下），其中 Impact48MPaPC1.xmp 为素混凝土靶体输入文件，另外两个文件为钢筋混凝土靶体的输入文件。

表 17.1: 弹体材料参数

密度 (g/mm^3)	弹性模量 (MPa)	泊松比
8.147×10^{-3}	212.42×10^{3}	0.3

表 17.2: Johnson-Holmquist 模型材料常数

无侧限抗压强度 f_c' (MPa)	44.4
密度 (g/mm^3)	2.44×10^{-3}
比热 (J/Kg · K)	654
A	0.79
B	1.60
n	0.61
C	0.007
f_c' (MPa)	48
$S_{\max}$	7.0
D_1	0.04
D_2	1.0
$E_{f\,\min}$	0.01
p_{crush} (MPa)	0.016
μ_{crush}	0.001
K_1 (MPa)	85000
K_2 (MPa)	-171000
K_3 (MPa)	208000
p_{lock} (MPa)	800
μ_{lock}	0.10
T (MPa)	4

表 17.3: 钢筋材料参数

密度 (g/mm^3)	弹性模量 (MPa)	泊松比	屈服强度 (MPa)
7.5×10^{-3}	210.0×10^{3}	0.3	235

表 17.4: 离散参数

背景网格间距 (mm)	0.4
质点间距 (mm)	0.2
杆单元长度 (mm)	0.4



图 17.3: 模型离散示意图

表 17.5: 数值模拟结果及其与实验数据对比

	实验值	工况 1	工况 2	工况 3
剩余弹速 (m/s)	615	585	585	556

17.2 结果分析

本算例主要考察靶体前后侵彻剖口的尺寸和弹体的剩余弹速，相应的数值计算结果和实验结果如表17.5所示。

通过对比实验结果与工况 1 及工况 2 的计算结果表明，剩余弹速吻合较好。此外，计算结果表明在该实验中若弹体未打中钢筋，钢筋的加入对剩余弹速的影响较小，但是通过观察图17.4及图17.5中工况 1 和工况 2 的损伤状况，表明钢筋的加入减少了混凝土的损伤范围。比较工况 2 和工况 3 的结果表明，在弹体打中钢筋的情况下，钢筋可以降低弹体的剩余弹速；通过比较图17.4、17.5和17.6表明，打中钢筋的情况下，混凝土的局部损伤较大，此为钢筋将载荷传递到了周边的混凝土所致。

图17.4、17.5分别列出了工况 1 素混凝土和工况 2 钢筋混凝土靶体的最终损伤状况。图17.6、17.7分别列出了工况 3 钢筋混凝土靶体的损伤状况和钢筋的应力分布。

总体而言，针对该实验状况，钢筋的加入提高了混凝土抗侵彻能力。

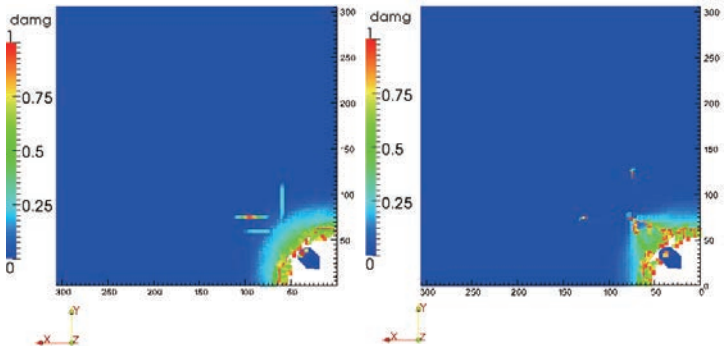


图 17.4: 靶体侵入端损伤状况：左侧为工况 1 侵彻素混凝土，右侧为工况 2 侵彻钢筋混凝土

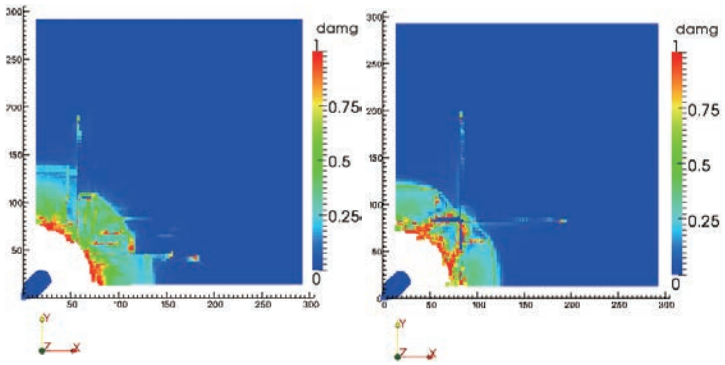


图 17.5: 靶体贯穿端损伤状况：左侧为工况 1 侵彻素混凝土，右侧为工况 2 侵彻钢筋混凝土

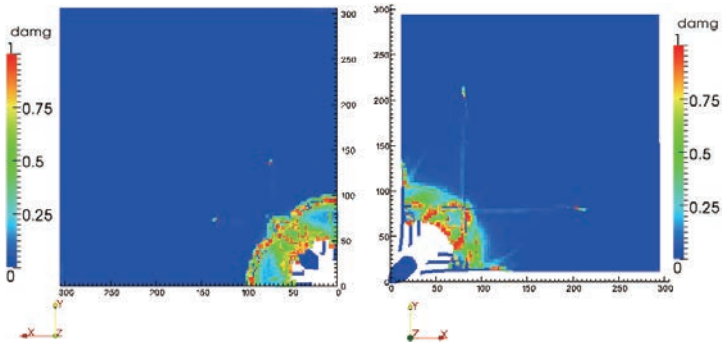


图 17.6: 工况 3 靶体损伤状况：左侧为侵入端，右侧为贯穿端

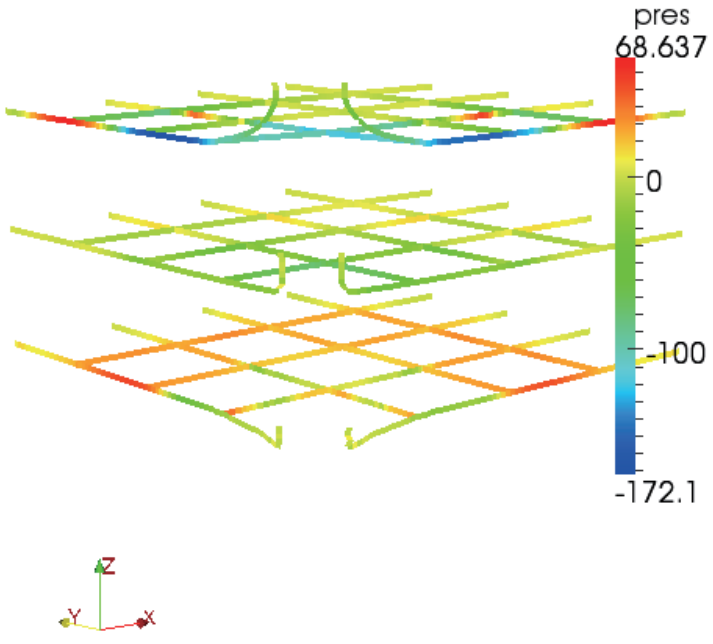


图 17.7: 工况 3 钢筋压力分布

18 机场跑道爆炸毁伤效应模拟

18.1 问题描述

本算例模拟在爆炸载荷作用下的机场跑道毁伤效应，分为 3 种工况，分别模拟炸药在三种不同深度起爆后对跑道的破坏作用。对于半无限体，机场跑道几何模型取为长方体（长 1050cm，宽 250cm），上下共分五层，各层厚度分别为 32、30、30、40、50（cm）；炸药量为 2kg，等效成为圆柱体（底面半径 3cm，高度 45cm），倾斜 45° 放置。三种工况下，炸药的中心高度分别位于跑道以下 40cm、80cm 和 120cm 处。由于该模型具有对称性，取其二分之一进行计算（如图18.1所示）。

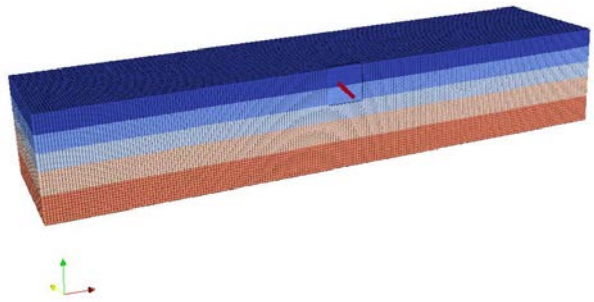


图 18.1: 模型示意图

本算例采用 cm-g-s 单位。机场跑道为混凝土，采用 HJC 材料模型。对于强度模型，除密度、抗压强度、抗拉强度外，各层混凝土的材料参数取值相同，如表18.1所示；各层混凝土的密度、抗压强度、抗拉强度取值如表18.2所示。对于状态方程，各层混凝土的材料参数取值相同，如表18.3所示。炸药爆速为 6.93e3m/s，采用 JWL 状态方程，参数如表18.4所示。

表 18.1: 各层混凝土强度模型中取值相同的材料参数

参数名称	Young	Poisson	A	B	N	C
取值	3.45e11	0.3	0.79	1.60	0.61	7.0e-3
参数名称	SMax	D1	D2	EFMin	epso	TensileFailure
取值	7.0	0.04	1.0	0.01	1.0	true

背景网格和物体的离散参数如表18.5所示，网格的边界条件分别为透射、透射、对称、透射、透射、自由。计算中开启动态网格。不启用接触选项即采用粘着接触条件。炸药在 t=0s 时刻起爆，起爆点均为炸药顶端。

表 18.2: 各层混凝土的密度、抗压强度、抗拉强度参数取值

跑道各层	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层
密度	2.45	2.35	2.25	2.35	2.45
抗压强度	35e7	30e7	30e7	25e7	35e7
抗拉强度	3.5e7	3.0e7	3.0e7	2.5e7	3.5e7

表 18.3: 各层混凝土 HJC 状态方程参数

参数名称	Poisson	PCrush	MuCrush	K1
取值	0.3	16e6	1.0e-3	85.0e9
参数名称	K2	K3	PLock	MuLock
取值	-171.0e9	208.0e9	0.8e9	0.1

因三种工况爆炸响应时间不同，模拟时间依次取 15ms、40ms、150ms，时间步长因子均为 0.5。

18.2 结果分析

工况 1（炸药深度为 40cm）时，15ms 时刻炸药与跑道的响应情况如图18.2所示，跑道的毁伤情况如图18.3所示。

工况 2（炸药深度为 80cm）时，40ms 时刻炸药与跑道的响应情况如图18.4所示，跑道的毁伤情况如图18.5所示。

工况 3（炸药深度为 120cm）时，150ms 时刻炸药与跑道的响应情况如图18.6所示，跑道的毁伤情况如图18.7所示。

对比工况 1-3 可以发现，炸药在不同的深度起爆，对机场跑道的破坏情况差别很大。另外通过图 18.2，18.4，18.6 可以看出，跑道有非常大的局部变形，有限元很难模拟此类问题，而物质点法是基于粒子来模拟材料的变形，避免了对网格的依赖，对于模拟此类问题有很大的优势。

表 18.4: 炸药 JWL 状态方程参数取值

参数名称	E0	A	B	R1	R2	w
取值	6.0e10	3.7377e12	3.7741e10	4.15	0.9	0.35

表 18.5: 离散参数

背景网格	$[-525, 525] \times [0, 250] \times [-182, 1000]$cm
网格尺寸	$10.0 \times 10.0 \times 10.0$cm
粒子尺寸	约为 35cm
质点总数	562837

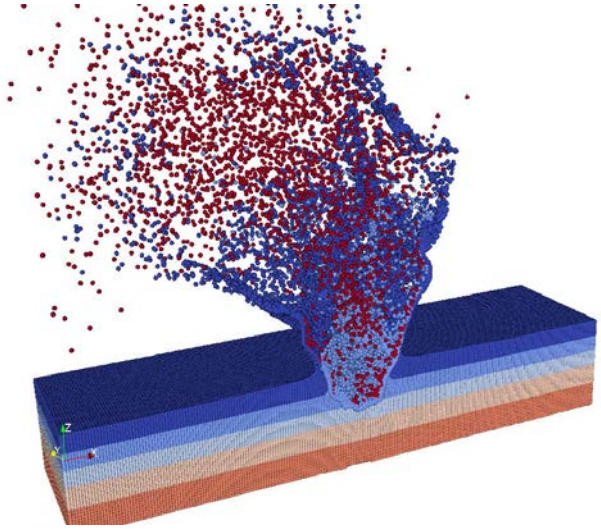


图 18.2: 工况 1 在 15ms 时刻的响应情况

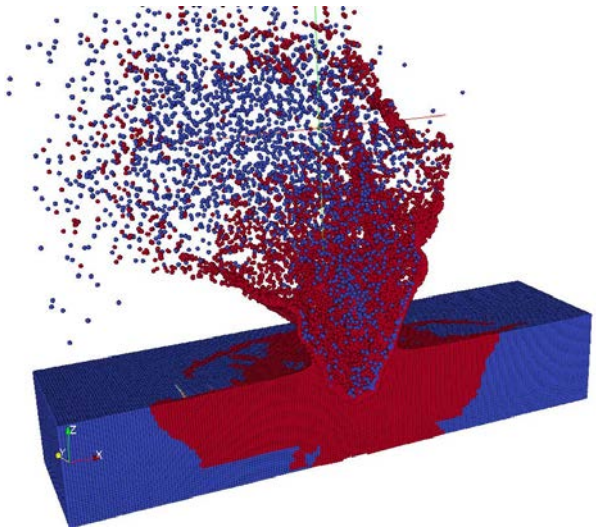


图 18.3: 工况 1 跑道的毁伤情况

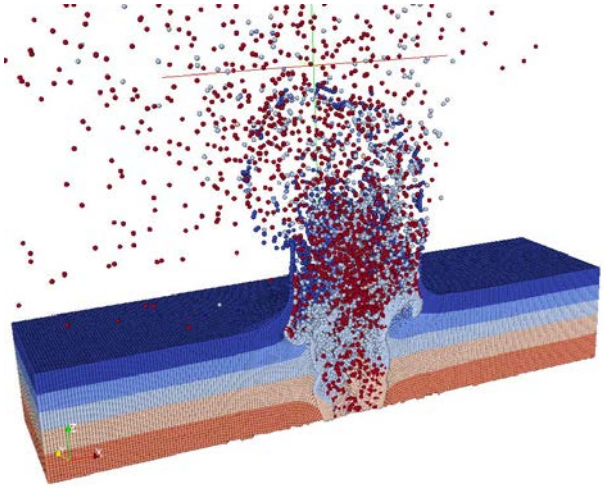


图 18.4: 工况 2 在 40ms 时刻的响应情况

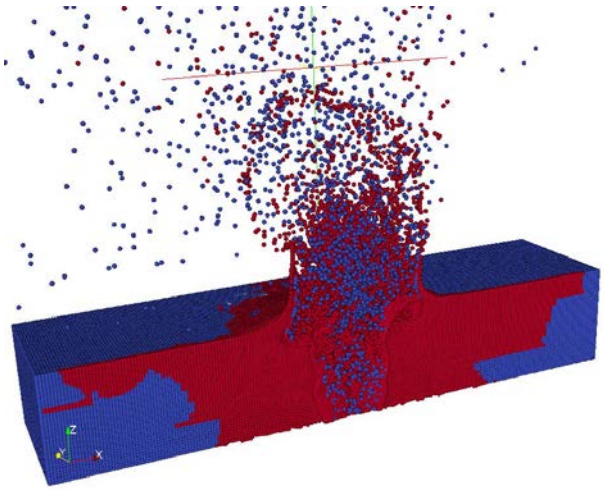


图 18.5: 工况 2 跑道的毁伤情况

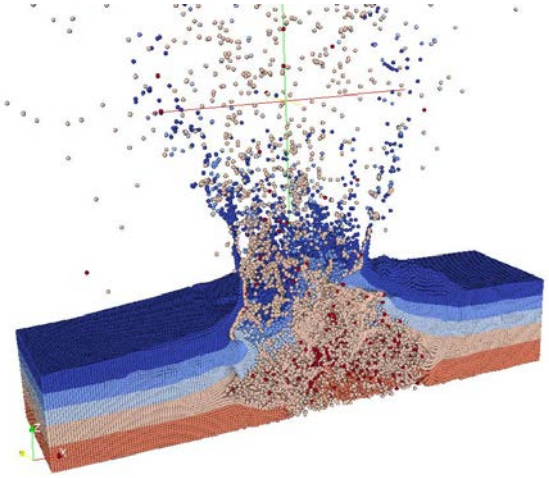


图 18.6: 工况 3 在 150ms 时刻的响应情况

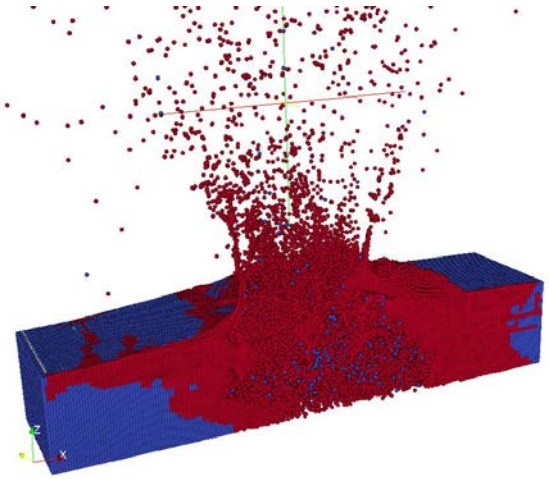


图 18.7: 工况 3 跑道的毁伤情况

19 弹体侵彻陶瓷靶板

19.1 问题描述

陶瓷是一种脆性材料，密度较金属要小很多，其在受压情况下具有很高的强度，因此陶瓷非常适于用做防护结构。本算例模拟弹体分别侵彻陶瓷靶板和混凝土靶板的过程，分析比较两种材料的防护性能。

模拟中弹体为弹性材料，弹体前端为卵形体，后部为圆柱体，半径为 15mm，整个弹体长 136mm；靶板为圆形陶瓷薄板，半径为 300mm，厚度为 30mm。弹体以 300m/s 的速度侵彻靶板，弹着点为靶板中心，靶的边界固定。由于该模型具有对称性，取其四分之一进行计算（如图19.1所示）。

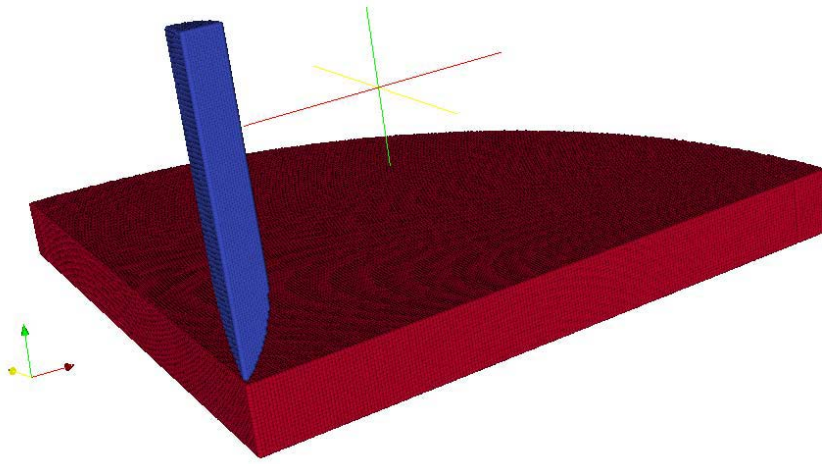


图 19.1: 模型示意图

本算例采用 mm-g-ms 单位。陶瓷材料采用 JH2 模型，其参数如表19.1所示。混凝土材料采用 HJC 模型，其强度模型和状态方程参数分别如表19.2和表19.3所示。弹体为弹性材料，其密度 $\rho = 7.85 \times 10^{-3}\mathrm{g/mm^3}$，弹性模量 $E = 202.0$ GPa，泊松比 $\nu = 0.295$。

背景网格和物体的离散参数如表19.4所示，网格的边界条件分别为对称、自由、对称、自由、自由、自由。计算中开启动态网格。

模拟时间 (EndTime) 为 0.7ms，时间步长因子 (TimeStep:factor) 取为 0.5。

表 19.1: JH2 模型材料参数

参数名称	Density	Young	Poisson	A	B	C
取值	3.226e-3	139.9e9	0.239	0.85	0.31	0.013
参数名称	M	N	T	Phel	Shel	SMax
取值	0.21	0.29	0.32e9	5.0e9	6.0e9	1.0e20
参数名称	epso	beta	D1	D2	K2	K3
取值	1.0	1.0	0.02	1.85	260.0e9	0.0

表 19.2: HJC 强度模型材料参数

参数名称	Density	Young	Poisson	A	B
取值	2.44e-3	38.636e9	0.3	0.79	1.60
参数名称	N	C	fc	SMax	D1
取值	0.61	7.0e-3	48e6	7.0	0.04
参数名称	D2	EFMin	T	epso	TensileFailure
取值	1.0	0.01	4e6	1.0	true

表 19.3: HJC 状态方程材料参数

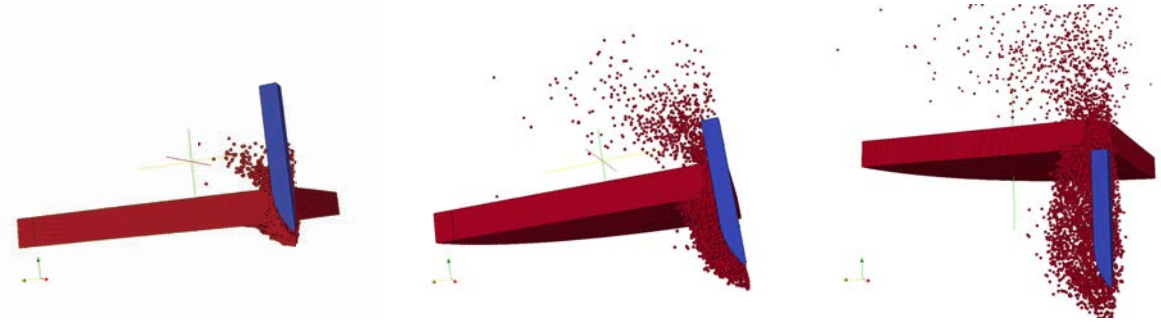
参数名称	Poisson	PCrush	MuCrush	K1
取值	0.3	16e6	1.0e-3	85.0e9
参数名称	K2	K3	PLock	MuLock
取值	-171.0e9	208.0e9	0.8e9	0.1

表 19.4: 离散参数

背景网格	$350 \times 350 \times 380$mm
网格尺寸	$3.0 \times 3.0 \times 3.0$mm
质点总数	649503
弹体质点数	21443
靶板质点数	628060

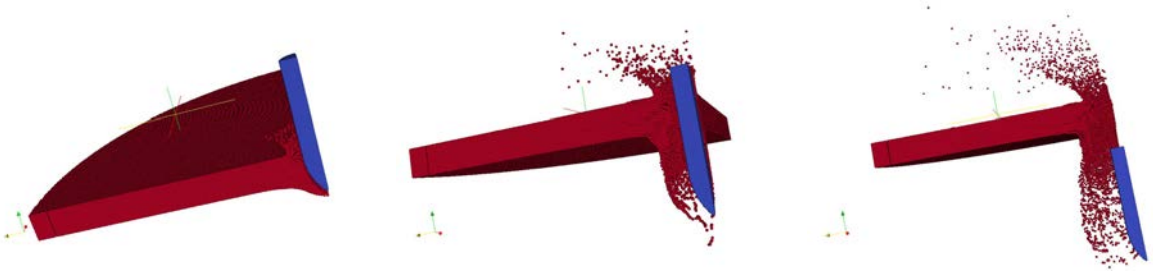
19.2 结果分析

弹体侵彻陶瓷靶板和混凝土靶板的过程分别如图19.2和图19.3所示。



(a) 0.16ms (b) 0.40ms (c) 0.70ms

图 19.2: 弹体侵彻陶瓷靶板



(a) 0.16ms (b) 0.40ms (c) 0.70ms

图 19.3: 弹体侵彻混凝土靶板过程

弹体侵彻陶瓷靶板的剩余弹速为 235.95m/s，穿透靶板所需要的时间为 0.625ms，平均加速度为 102.48mm/ms^2；弹体侵彻混凝土靶板的剩余弹速为 281.45m/s，穿透靶板所需要的时间为 0.23ms，平均加速度为 80.65mm/ms^2。两种靶板的损伤情况分别如图19.4和图19.5所示。可以看出，陶瓷的防护能力要明显高于混凝土。

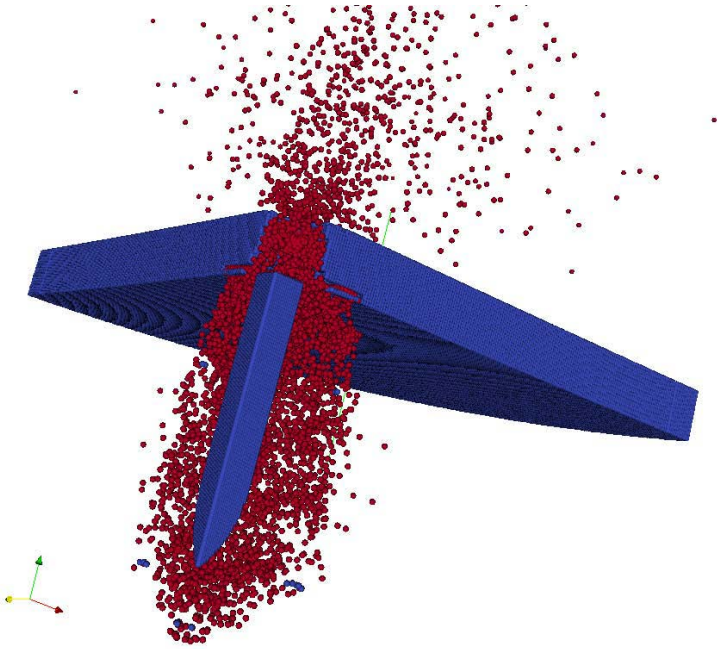


图 19.4: 陶瓷靶板损伤分布图

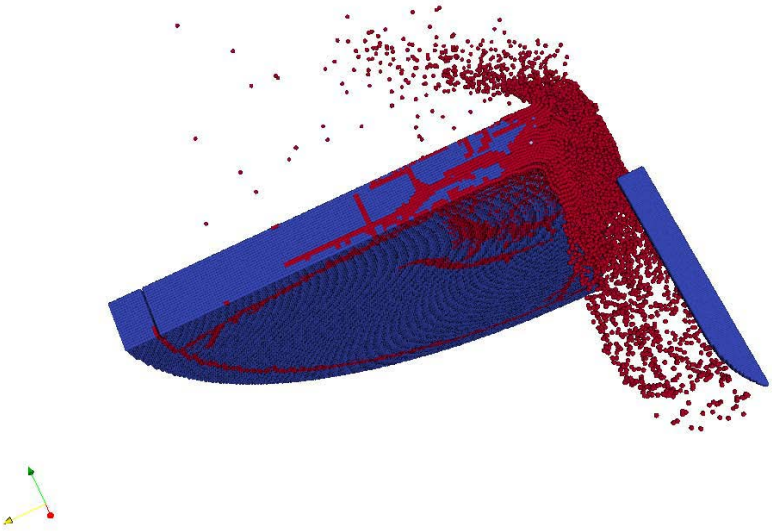


图 19.5: 混凝土靶板损伤分布图

参考文献

[1] Bardenhagen S G, Guilkey J E, Roessig K M, et al. An improved contact algorithm for the material point method and application to stress propagation in granular material. Cmes-Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2001, 2(4):509–522

[2] Johnson G R, Holmquist T J. Evaluation of cylinder-impact test data for constitutive model constants. Journal of Applied Physics, 1988, 64(8):3901–3910

[3] Liu G R L M B. ¹ c 嶄 f ¡ª¡ª ¸c ¨. º ³

[4] Moresi L, Dufour F, Muhlhaus H B. A Lagrangian integration point finite element method for large deformation modeling of viscoelastic geomaterials. Journal of Computational Physics, 2003, 184(2):476–497

[5] Knight D D. Elements of Numerical Methods for Compressible Flows. Cambridge University Press, 2006

[6] Guilkey J E, Weiss J A. Implicit time integration for the material point method: Quantitative and algorithmic comparisons with the finite element method. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2003, 57(9):1323–1338

[7] Shin Y S, Chisum J E. Modeling and simulation of underwater shock problems using a coupled Lagrangian-Eulerian analysis approach. Shock and Vibration, 1997, 4:1–10

[8] Shin L M L K Y a a. Modeling mitigation effects of watershield on shock waves. Shock and Vibration, 1998, 5:225–234

[9] Zhang S Z. Detonation and its applications. Press of National Defense Industry, 1976

[10] Wallstedt P C, Guilkey J E. Improved velocity projection for the material point method. Computer Modeling in Engineering Sciences, 2007, 19(3):223–232

[11] °¬ . ¸ ¤¼¼ . ¹ • 9¤ ³ , 2003

[12] Wangoner R, Chenot J L. Metal forming analysis. Cambridge University Press, 2001

[13] Komanduri R, Brown R. On the mechanics of chip segmentation in marching. J. of Eng. For Ind., ASME, 1981, 103:33–51

[14] Gurney R. The Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shells, and Grenades. Technical report, Ballistic Research Labortory, Aberdeen, MD, 1943

[15] Butz D J, Backofen J E. Fragment terminal Velocities from Low Metal to Explosive Mass Ratio Symmetric Sandwich Charges. Journal of Ballistics, 1986, 6:1304–1325

[16] Kennedy J E. Behavior and Utilization of Explosives in Engineering Design. Proceedings of 12th Annual Symposium, ASME, UNM, Albuquerque, 1972

[17] Bol J, Honcia G. Velocity of H.E. Accelerated Plates. Proceedings of 3th Int. Ballistics Symposium Karlsruhe, 1997

[18] Mader C L. Numerical modeling of explosive and propellants. CRC press,New York, 1998

[19] Povarnitsyn M, Khishchenko K, Levashov P. Hypervelocity impact modeling with different equations of state. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33:625¨C633

[20] Piekutowski A J. Perforation of aluminum plates with ogive-nose steel rods at normal and oblique impacts. International Journal of Impact Engineering, 1996, 18:877–887

[21] , ½¨ , ² . µ¯ ¸ . ¹ • 9¤ ³ , 2004

[22] Meyers M A. Dynamics Behavior of Materials. John Wiley & Sons, 1994

[23] Gurson A L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part 1. Yield criteria and flow rules for porous ductile media. J. Engg. Mater. Tech., 1977, 99:2–15

[24] Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability. J. Appl. Mech., 1951, 18:253

[25] Weibull W. A statistical theory of strength of materials. Royal Swedish Institute for Engineering Research, 1939. 1–45

[26] Gurran D R, Seaman L, Shockey D A. Dynamic failure of solids. Phys. Rep., 1987, 147:253

[27] Dumont C, Levaillant C. Ductile fracture of Cu-1Proceedings of Shock Wave and High-Strain-Rate Phenomena in Materials. Dekker, New York, 1990:

[28] ¸ . , ¹ . , . ±¬º ½ ¿ ³ ¿. ±¬ , 2003, 23:529—533

[29] ¶-º£ . ¸ ¼° . ±±¾©: ¿ ³ , 1989

[30] Lin X, Fong S C. Ductile crack growth-II. Void nucleation and geometry effects on macroscopic fracture behavior. J. Mech. Phys. Solids, 1995, 43(11):1953–1981

[31] ³¸ , ³ » , • ¼ . 45¸ J-C ² ¿. ±¬ , 2007, 27(2):131–135

[32] Hanchak S J, Forrestal M J, Young E R, et al. Perforation of concrete slabs with 48MPa (7ksi) and 140MPa (20ksi) unconfined compressive strengths. International Journal of Impact Engineering, 1992, 12(1):1–7

[33] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. Proceedings of 14th International Symposium on Ballistics, Quebec, Canada, 1993. 591-600