

MPM3D 用户手册

清华大学航天航空学院
计算动力学研究室

2012 年 2 月 17 日

目录

第一章 引言	1
第二章 程序运行方法	3
2.1 命令行执行方式	3
2.2 文件类型	5
2.3 单位	6
第三章 输入文件格式	7
3.1 标题 (Header)	9
3.2 材料模型定义 (Material)	10
3.2.1 强度模型 (StrengthModel)	10
3.2.1.1 弹性材料: IsoElastic	11
3.2.1.2 一维弹性材料: Elastic_1D	12
3.2.1.3 理想弹塑性材料: ElaPlastic	12
3.2.1.4 各向同性线性强化弹塑性材料: IsoHarden	12
3.2.1.5 一维线性强化弹塑性材料: LinHarElaPlastic_1D	12
3.2.1.6 Johnson-Cook 材料: JohnsonCook	12
3.2.1.7 简化的 Johnson-Cook 材料: SimJohnsonCook	13
3.2.1.8 空材料: Null	14
3.2.1.9 高能炸药材料: HighExpBurn	14
3.2.1.10 Holmquist Johnson-Cook 材料: HolmquistJohnsonCook	15
3.2.1.11 CauchyElastic 材料: CauchyElastic	16
3.2.1.12 不可压 Mooney-Rivlin 橡胶材料: MooneyRivlin	16
3.2.1.13 刚性材料: Rigid	17
3.2.1.14 RHT 材料: RHT	17
3.2.1.15 Johnson Holmquist Ceramics 材料: JH2	19
3.2.1.16 Drucker-Prager 模型: DruckerPrager	20
3.2.1.17 DeshpandeFleckFoam 金属泡沫模型: DFFoam	21
3.2.1.18 孔洞损伤材料模型: Gurson	22

3.2.2	状态方程 (EquationOfState)	24
3.2.2.1	LS-DYNA 多项式状态方程: Polynomial	24
3.2.2.2	AUTODYN 多项式状态方程: Polynomial2	24
3.2.2.3	JWL 状态方程: JWL	25
3.2.2.4	Grüneisen 状态方程: Gruneisen	25
3.2.2.5	P- α 状态方程: PAlpha	26
3.2.2.6	Holmquist Johnson-Cook 状态方程: HolmquistJohnsonCook	27
3.2.3	损伤失效模型 (FailureModel)	29
3.2.3.1	最大等效塑性应变失效模型: PlaStrain	29
3.2.3.2	最大静水拉力失效模型: Pmin	29
3.2.3.3	最大主应力/剪应力: PriStress	29
3.2.3.4	最大主应变/剪应变: PriStrain	29
3.2.3.5	瞬时几何应变: InstGeoStrain	30
3.2.4	随机失效设置 (RandomFailure)	31
3.3	摩擦系数 (Friction)	33
3.4	局部工作平面定义 (WorkPlane)	34
3.5	组件 (Component)	36
3.6	离散体设置 (Body)	37
3.6.1	Body 基本属性	37
3.6.2	Geometry 设置	38
3.6.2.1	Point	38
3.6.2.2	Block	39
3.6.2.3	Sphere	40
3.6.2.4	Cylinder	41
3.6.2.5	Ogive	42
3.6.2.6	PointForBar	43
3.6.2.7	LineForBar	44
3.6.2.8	NettyForBar	45
3.6.2.9	PointForMembrane	46
3.6.2.10	RectangluarForMembrane	46
3.6.2.11	CylinderForMembrane	46
3.6.2.12	PointForFEM	46
3.6.2.13	BlockForFEM	47
3.6.3	Bool 运算	47
3.6.4	初始速度设置 (InitialVelocity)	49
3.6.5	常速度设置 (PrescribedVelocity)	49
3.6.6	施加时间历程载荷 (PrescribedAcceleration)	49

3.6.7	谐激励 (HarmExcit)	50
3.6.8	指定刚体运动规律 (ConstrainRigidPosition)	51
3.6.9	自适应因子 (AdaptiveSplit)	51
3.6.10	碎片统计 (CountFragDp)	52
3.6.11	计算与输出控制 (BodyContrl)	52
3.6.12	有限元离散体的边界条件 (LocalBoundaryCond)	52
3.7	起爆点 (面) 设置 (Detonation)	53
3.8	背景网格设置 (Grid)	54
3.8.1	基本设置	54
3.8.2	网格基本参数设置 (Cell)	55
3.8.2.1	正交均匀网格参数设置	55
3.8.2.2	移动网格 (MovingGrid)	56
3.8.3	动态网格 (DynamicCell)	56
3.9	接触选项 (Contact)	58
3.10	求解控制 (Solution)	60
3.10.1	求解基本属性设置	60
3.10.2	物理模拟时间 (EndTime)	61
3.10.3	时间步长相关设置 (TimeStep)	61
3.10.4	最大速度限制 (LimitVelocity)	61
3.10.5	有关体积的设置 (Volume)	62
3.10.6	警告与报错输出设置 (Warn)	63
3.10.7	能量分数设置 (EnergyFraction)	63
3.10.8	动力松弛因子 (DynamicRelax)	63
3.10.9	加速度设置 (Gravity)	64
3.10.10	有限元求解设置 (FEMSetting)	64
3.10.11	OpenMP 并行设置 (OpenMP)	65
3.11	结果输出控制 (Output)	66
3.11.1	控制台监测设置 (Console)	66
3.11.2	后处理文件设置 (PostProcessing)	66
3.11.3	时间历程曲线设置 (TimeHistory)	67
3.11.4	输出物理量沿直线分布设置 (GridLineResults)	68
3.11.5	FEM 输出物理量沿直线分布设置 (FEMProfileResults)	69
3.11.6	重启动文件输出设置 (Restart)	69
3.11.7	统计信息输出设置 (Statistics)	69
3.12	并行分区设置	71

第五章 常用工具	74
5.1 checkXMP 程序	74
5.2 HJC 模型参数转换	75
第六章 常用材料参数列表	78
参考文献	83

第一章 引言

冲击碰撞问题是一个几何、材料和边界条件均为非线性的多物理场强耦合问题，涉及高速、高压、高温、相变和化学反应，气体、液体和固体等多种物质间相互耦合甚至混合。材料不但会发生严重扭曲和破碎，还会融化甚至汽化。拉格朗日法可以很方便地跟踪材料的界面和引入与变形历史相关的材料模型，但对于涉及特大变形的问题会因网格严重畸变而产生数值求解困难，且难以有效地模拟材料的破碎、融化和汽化等行为。欧拉法不存在网格畸变问题，适合于分析特大变形及流动问题，但不易跟踪材料界面，且非线性对流项也会导致数值求解困难。

由质点网格法 (particle in cell, PIC) 发展起来的物质点法 (material point method, MPM)^[1, 2] 采用拉格朗日和欧拉双重描述，将物体离散为一组在空间网格中运动的质点。质点携带了所有的物质信息，如质量、速度、应变和应力等，可很方便地跟踪材料的界面和引入与变形历史相关的材料模型。质点在空间网格中运动，运动方程在空间网格上求解，避免了网格畸变问题，适合于分析特大变形及流动问题。物质点法充分吸收了拉格朗日法和欧拉法的优点，是目前超高速碰撞和爆炸数值分析的最有前景的方法之一。

MPM3D[®] 是清华大学航天航空学院计算动力学研究室张雄教授课题组研发的冲击爆炸三维物质点法数值仿真软件（计算机软件著作权登记号为 2009SRBJ4761），可用于模拟超高速碰撞、冲击、侵彻和爆炸问题。MPM3D[®] 自 2004 年开始用 FORTRAN 90 语言研发，为了便于进一步扩充和维护，2007 年暑期，我们用 C++ 重写了 MPM3D[®]，称为 MPM3DPP，原 FORTRAN 90 版的 MPM3D[®] 停止开发。

目前 MPM3D[®] 程序仅具有显式积分求解器。具有如下材料模型：

1. 线弹性材料
2. 理想弹塑性材料
3. 各向同性线性强化弹塑性材料
4. Johnson-Cook 塑性材料
5. 简化的 Johnson-Cook 塑性材料
6. 高能炸药材料
7. 空材料
8. Holmquist Johnson-Cook 混凝土材料

9. RHT 混凝土材料
10. Holmquist Johnson Ceramics 材料
11. Drucker - Prager 岩土材料
12. Foam 铝金属泡沫材料
13. Mooney Rivlin 超弹性材料
14. 刚体材料

MPM3D[®] 具有如下状态方程:

1. 多项式状态方程
2. JWL 状态方程
3. Gruneisen 状态方程
4. $P-\alpha$ 状态方程
5. Holmquist Johnson-Cook 状态方程

MPM3D[®] 具有如下损伤失效模型:

1. 最大等效塑性应变失效模型
2. 最大静水拉力失效模型
3. 最大主应力/剪应力失效模型
4. 最大主应变/剪应变失效模型
5. 瞬时几何应变失效模型

本手册将全面介绍 MPM3D[®] 的功能及相应的关键字, 包括系统组成、材料模型、状态方程、失效模式、边界条件、载荷等。

第二章 程序运行方法

MPM3D[®] 从扩展名为.xml的输入文件 (如 JobName.xml) 中读取数据。该文件采用 xml 语言组织数据，经程序读取并解析后将相关数据传递给程序各计算模块，根据指定的宏命令执行相应的计算任务，并将计算结果按照规定的格式输出到相应的文件中，供 ParaView^①、Origin^②和 TecPlot^③等软件进行结果可视化处理。

MPM3D[®] 有两种运行方式，它既可以从 PeneBlast^[3] 的集成环境中执行，也可以直接以命令行方式执行。本章只介绍命令行执行方式，PeneBlast 集成环境执行方式请参见 PeneBlast 系统的用户手册^[3]。

2.1 命令行执行方式

在终端窗口（在 Windows 中为 DOS 窗口）中输入：

```
mpm3dpp [options] JobName
```

其中 JobName 为输入数据的文件名，它可以具有“xml”（输入数据文件）或“pe”（重启动状态文件）扩展名。如果 JobName 具有扩展名“xml”（可以省略），mpm3dpp 将从该文件中读入数据进行求解；如果 JobName 具有扩展名“pe”，则 mpm3dpp 从该状态文件（JobName.pe）中恢复原来的求解状态，并从该状态处继续求解（重启动）。

[options] 为可选命令行参数，包括：

- help 仅在屏幕上输出 mpm3dpp 使用帮助信息，然后退出；
- h5pt 仅将指定的重启动文件（pe 文件）转换为 H5Part 格式^④，然后退出；
- lsdyna 将物质点数据转换为 LS-DYNA 的 SPH 粒子数据，并继续运行；
- rt 从指定的重启动命令文件中读取并处理重启动命令，进行重启动计算；
- nsteps 指定结果统计 sta 文件中数据输出的步数，超过此步数程序停止计算。

MPM3D[®] 可能具有以下几种命令行运行方式：

1. mpm3dpp JobName 或 mpm3dpp JobName.xml

从 JobName.xml 中读入宏命令及相应的数据，进行分析计算。

^①<http://www.paraview.org/>

^②<http://www.originlab.com/>

^③<http://www.tecplot.com/>

^④<http://vis.lbl.gov/Research/AcceleratorSAPP/>

2. mpm3dpp JobName.xmp -lsdyna

从 JobName.mp 中读入宏命令及相应的数据，将物质点数据转换成 LS-DYNA 的 SPH 粒子数据文件，然后进行分析计算。此选项可将物质点模型数据转换为 LS-DYNA 的 SPH 模型数据，供 LS-DYNA 使用。

3. mpm3dpp JobName_120.pe

从重启动文件 JobName_120.pe (120 为时间步序号) 中读入上次计算保存的状态，并从该状态处继续计算 (重启动)。pe 文件的保存频率由关键字 Restart 设置 (参见第3.11节)。

4. mpm3dpp JobName_120.pe -h5pt

根据重启动状态文件 JobName_120.pe 生成 H5Part 文件 (供 ParaView 使用)，随即退出。

5. mpm3dpp JobName_120.pe -rt JobName_r.xmp

从重启动状态文件 JobName_120.pe (120 为时间步序号) 中读入上次计算保存的状态，并从文件 JobName_r.xmp 中读入模型数据，然后继续计算。JobName_r.xmp 文件的格式与 JobName.xmp 的格式完全相同，但它们的 Grid、Solution 以及 Output 等元素的属性可以不同，以便在重启动时采用不同的背景网格、求解策略和输出方式。另外，JobName_r.xmp 文件还支持在 Body 中设置其是否激活，以便在重启动时激活或者禁用某些 Body。

6. mpm3dpp JobName.xmp -nsteps 10

结果统计 sta 文件输出 10 步后，程序停止计算，一般在算例测试时使用，此时仅比较这 10 步的输出结果。

下面以 Body 的激活与禁用为例，说明重启动过程。JobName.xmp 文件中 Body 的设置为

```
<Body name="body0" material="cu" type="Point" density="8.93e-3">
```

在命令行输入

```
mpm3dpp JobName
```

后程序开始执行，并根据第3.11节中 Restart 元素设定的保存频率自动保存重启动状态文件 (pe 文件)。用户也可以在程序的执行过程中按下 Ctrl+C，强制程序将当前状态保存到重启动状态文件中后中止。此后用户可以利用

```
mpm3dpp JobName_XXX.pe
```

命令进行重启动，从用户中断的状态继续进行计算，其中XXX 为当用户按下 Ctrl+C 时程序正在计算的时间步。

为了在重启动时采用不同的背景网格、求解策略和输出方式，或者激活或禁用某些物体，可以将 JobName.xmp 文件拷贝到 JobName_r.xmp 文件中，修改 JobName_r.xmp 中的 Grid、Solution 以及 Output 等元素的属性，并修改其 Body 的属性，以激活或禁用该 Body。如为了禁用 body0，可将 JobName_r.xmp 中的 Body0 元素的 Deactive 属性的值改为 1，即

```
<Body name="body0" material="cu" type="Point" density="8.93e-3" Deactive="1">
```

此后用户可以利用

```
mpm3dpp JobName_XXX.pe -rt JobName.xmp
```

命令进行重启动，程序会重新初始化变量 Deactive 的值，从给定的状态继续进行计算。

2.2 文件类型

MPM3D[®] 使用以下类型的文件：

1. JobName.xmp 文件

输入数据文件。

2. JobName.pe 文件

重启动状态文件。

3. JobName.out 文件

日志文件，记录了求解过程中程序输出的模型基本信息、调试信息、警告信息和错误信息。其中 Elapsed time 是整个程序的运行的总时间，Solution time B 是求解时间，Solution time A 是不包括输出部分的求解时间；

4. JobName.sta 文件

包含了各时刻的时间步、时间、总动量、总能量、各个物体动量、各个物体能量、各个物体速度、各个材料动量、各个材料能量、各个材料速度，便于绘制曲线；此文件的输出时间间隔由 Console 元素的 print_time 属性 (参见第3.11节) 确定，即和控制台报告计算状态的时间间隔相同。此文件也是 MPM3D[®] 程序进行自动测试的基准数据文件 (参见 PeneBlast 系统的用户手册^[3])。

5. JobName_anim.dat 文件

按一定时间间隔输出质点位置坐标以及用户指定的变量在质点上的值。该文件可以用 Tecplot 来直接读取 (导入时选择 3D Cartesian)，绘制变形过程及各类变量云图的动画。Tecplot 数据可视化处理的速度极慢，因此推荐使用 ParaView 进行数据可视化处理。

6. JobName_curv.dat

输出指定变量在所有时间步的函数值，可用 Origin 或 Tecplot 等软件输出变量的时程曲线。缺省变量为总动能和总内能，用户可以指定其他变量。

7. JobName.h5part

以 H5Part 格式保存计算结果，可供 ParaView 进行后处理。

8. JobNameXXX.vtu

以 VTK UnstructuredGrid^①格式保存计算结果，每个时间步对应于一个文件，可供 ParaView 进行后处理。

另外用户可控制生成其他数据文件，详见关键字部分的介绍。

^①<http://www.vtk.org/>

2.3 单位

在利用 MPM3D[®] 进行数值模拟时，用户需确保所输入数据的单位协调，比如使用国际单位制 (m, kg, N, s, Pa)。超高速碰撞经常使用的单位制为 (mm, g, N, ms, MPa)，在爆炸问题中常用的单位制是 (cm, g, 10^7N , μs , Mbar)，其中 $1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$ ，约等于一个大气压。检验单位是否协调，可以用 $F = ma$ ，即 $(1 \text{ 力单位}) = (1 \text{ 质量单位}) \times (1 \text{ 加速度单位})$ 来验证。

第三章 输入文件格式

输入文件的格式为标准的 XML^①数据格式，具有良好的可扩展性。XML 是 eXtensible Markup Language 的简写，意为可扩展的标记语言，其存储机制为树形结构，适合表示复杂的数据结构。XML 文档有着严格的书写规范，较详细的规范可参见有关手册，这里仅简要介绍该数据格式书写的方式。

每个 XML 文件都由 XML 序言开始，用来声明版本号和字符集，如

```
<?xml version="1.0" encoding="gb2312"?>
```

如果不声明字符集，则可能会出现乱码。

XML 数据格式通常是由一个根元素 (root element) 和多个一级的元素 (element) 组合而成。元素由起始标签 (start-tag, 如 <Heading>) 开始，由结束标签 (end-tag, 如 </Heading>) 结束，他们之间的部分为元素的内容 (content)，例如

```
<Heading>Taylor bar impact</Heading>
```

就是一个元素，其中 <Heading> 是起始标签，</Heading> 是结束标签，“Taylor bar impact”是该元素的内容。一个元素也可以仅由空元素标签 (empty-element tag) 组成，如 <line-break/>。元素的内容也可以包含其他元素，称为子元素。通常，一个元素的内容由元素的属性及其属性值和子元素构成。

一个 XML 文件只有一个根元素 (Root Element)，其他所有元素可作为根元素的子元素，如果需要多个一级的并排的元素，我们可以通 <RootElement>... </RootElement> 把这些元素包含起来。如

```
<PeneBlast version="1.0">
  <Header>
    ...
  </Header>

  <Material name="Fe">
    ...
  </Material>

  <Solution algorithm="MUSL" Integration="expl">
    ...
  </Solution>
</PeneBlast>
```

本例中共有四个元素：PeneBlast、Header、Material 和 Solution，其中 PeneBlast 为根元素。元素 Material 具有属性 name，其值为“Fe”。属性 (attributes) 的值 (数值或字符串) 要用引号括起来，属

^①<http://www.w3.org/XML/>

性和属性的值之间用等号“=”连接。同一个元素下的属性与属性之间用空格分隔，排序不分先后。元素 Solution 具有两个属性：algorithm 和 Integration，他们的值分别为“MUSL”和“expl”。

在 MPM3D[®] 程序的输入文件中，根元素为 `<PeneBlast version="?">.....</PeneBlast>`，其中属性 version 的值表示程序的版本号，如“1.0”。根元素的各级子元素分别以关键字来命名，即 MPM3D[®] 程序的输入文件以关键字的形式组织，关键字的使用方法参照本文档的说明。

MPM3D[®] 程序的输入文件由以下 11 个一级元素组成：

1. `<Header>... </Header>` 定义待求解问题的标题；
2. `<Material >... </Material>` 定义材料信息，包括参考密度、强度模型、状态方程和失效模型。该元素可并行出现，以定义多个材料模型；
3. `<Friction>... </Friction>` 定义材料间的摩擦系数；
4. `<WorkPlane >... </WorkPlane>` 定义工作平面，可以并行出现；
5. `<Component >... </Component>` 以组件的形式定义物体信息，该元素可并行出现，以定义多个组件；
6. `<Detonation>... </Detonation>` 定义高能炸药材料的起爆点或者起爆面及其点火时间；
7. `<Grid> ... </Grid>` 定义背景网格类型及其区域和边界条件；
8. `<Contact>... </Contact>` 定义有关接触的一些设置；
9. `<Solution>... </Solution>` 定义求解时间及求解模式等求解控制信息；
10. `<Output>... </Output>` 定义结果输出内容及方式；
11. `<DomainDecomposition>... </DomainDecomposition>` 定义采用 MPI 并行计算的分区方式；

其中标签 Material、WorkPlane、Component 可并行出现，其中 Material、Component 元素下又可具有子元素；标签 Friction、Workplane、Detonation、Contact、DomainDecomposition 为可选一级元素。详细见本文档说明。

以下分别介绍这些关键字（元素的标签）的使用方法。方括号内的关键字为可选关键字，其他关键字为必填关键字。

实型数中可包含正负号、小数点或 E(e) 来表示指数部分，如 -123.456 或 123e-2。不允许使用 D(d) 来表示指数部分。

XML 文件中可以包含注释，增加文件的可读性。注释以 `<!--` 开头，以 `-->` 结尾，例如

```
<!-- catalog last updated 2000-11-01 -->。
```

3.1 标题 (Header)

该关键字及其以下关键字主要用来简短描述所模拟的物理问题，诸如模拟算例的名称、模拟的主要物理现象和使用的单位制等等。下面以 Taylorbar 算例为例进行介绍相应的下级关键字。

关键字说明：

Header：一级关键字，开启算例描述部分设置选项。它具有以下四个可选子关键字：

[Name]：本输入文件的文件名称，具有属性 value；

[Heading]：本算例的表头，具有属性 value；

[Description]：本算例的一些简短描述，诸如模拟的主要物理现象、参考文献等，具有属性 value；

[Unit]：本输入文件中使用的单位制，它具有 time、length 和 mass 三个属性，分别定义本算例所采用的时间单位、长度单位和质量单位。

使用规范：

```
<?xml verison="1.0" encoding="utf-8"?> <!-- 声明版本号及字符集 -->
<PeneBlast version="1.0"> <!-- 声明根元素 -->
  <Header> <!-- 声明 Header 元素，对本算例进行简短的描述 -->
    <Name value="Taylorbar" />
    <Heading value="Taylor bar imact, Johnson 1998 " />
    <Description value="Ref: G.R.Johnson 1988" />
    <Unit time="ms" length="mm" mass="g" />
  </Header> <!-- Header 元素定义完毕 -->
  .....
</PeneBlast>
```

使用须知：

- 尽量给出较完整的描述，便于迅速了解本算例模拟的问题。
- Unit 关键字只是用于说明本问题所使用的单位制，增加可读性，对程序的计算结果没有任何影响。用户需确保所输入数据的单位协调。

3.2 材料模型定义 (Material)

在 MPM3D® 中, 材料模型由强度模型 (描述材料的偏应力与偏应变之间的关系)、状态方程 (描述材料的压力和体积应变之间的关系) 和失效模型 (描述材料因损伤累积而导致的对应力承受能力的降低) 三部分组成。

关键字说明:

Material: 开启材料模型设置选项, 它具有属性 name, 用于定义材料模型名称, 用户可以使用自定义字符串来给使用的材料模型命名。Material 关键字具有以下四个子关键字:

ReferenceDensity: 定义材料参考密度, 它具有属性 value, 其值为材料的参考密度;

StrengthModel: 定义材料的强度模型, 它具有属性 type, 用于说明本材料强度模型的类型 (如弹性、理想弹塑性等);

EquationOfState: 定义材料的状态方程, 它具有属性 type, 用于说明本材料状态方程的类型 (如多项式状态方程、JWL 状态方程等);

FailureModel: 定义材料的失效模型, 它具有 type 属性, 用于说明本材料失效模型的类型 (如最大等效塑性应变失效模型、最大静水拉力失效模型等)。

RandomFailure: 定义材料的随机失效模型, 可以设置材料的失效阈值服从 Gauss 或 Weibull 随机分布。

使用规范:

```
<Material name="cu" >                                <!-- 声明 Material 元素, 定义一组材料 -->
  <ReferenceDensity value="8.93e-3" /> <!-- 材料密度; -->
  <StrengthModel type="SimJohnsonCook" <!-- 定义材简化的 JohnsonCook 模型; -->
  ...
  <EquationOfState type="Polynomial" <!-- 定义状态方程为多项式; -->
  ...
  <FailureModel type="none" /> <!-- 定义失效模型, none 表示不采用失效模型-->
  <RandomFailure enable="1" FailDistribution="2"/><!--启用 Weibull 随机失效模型-->
</Material>                                           <!-- Material 元素 (cu) 定义完毕-->
```

下面分别介绍 StrengthModel (强度模型)、EquationOfState (状态方程)、FailureModel (失效模型) 和 RandomFailure (随机失效) 四个关键字。

3.2.1 强度模型 (StrengthModel)

StrengthModel 关键字具有以下属性:

type: 定义强度模型类型, 目前程序可选具体模型将在后面分别说明。

[bq1]

[bq2]: 设置人工体积粘性系数, 用于处理激波问题, 可出现在任意一个材料模型中。bq1, bq2 分别为人工粘性力式(3.1)中的二次项和一次项的系数, 其缺省值分别为 1.5 和 0.06。

$$q = \begin{cases} \rho l (Q_1 l^2 \dot{\epsilon}_{kk}^2 - Q_2 c \dot{\epsilon}_{kk}) & \text{if } \dot{\epsilon}_{kk} < 0 \\ 0 & \text{if } \dot{\epsilon}_{kk} \geq 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

[FailedType]: 设置失效后压力处理方式, 其值可以取 0、1 或 2。

在允许质点失效的材料类型 (如 ElaPlastic, IsoHarden, JohnsonCook, SimJohnsonCook, RHT, HolmquistJohnsonCook, DruckerPrager, DFfoam, Gurson) 中均可以使用属性 FailedType 来设置失效后质点压力的处理方式。当质点失效时, 将质点的偏应力置为零 (某些本构方程中生死置为 0), 同时不再对其进行人工体积粘性的声速及压力修正。其压力的处理方式有以下几种情况:

0: 质点失效后能承受压力, 但不能承受拉力, 即 $p \geq 0$ (缺省方式)。

1: 质点失效后既不能承受压力也不能承受拉力, 即令 $p = 0$ 。

2: 质点失效后能承受压力, 也能承受一定拉力, 截断值 $p_{\min}$ 由下面的属性 TensileCutoff 设置, 即 $p \geq p_{\min}$ 。

[TensileCutoff]: 设置失效质点的拉伸截断应力, $p_{\min}$ 必须小于零 (表示拉应力)。当 fopt=2 时有效, 缺省值为 $p_{\min} = 0$ 。若失效质点处于受拉状态且 $p < p_{\min}$, 则令 $p = 0$ 。

[FailViscosity]: 设置失效质点的剪切粘性系数 μ , 缺省为 0。设置非零的剪切粘性系数可以使失效质点承受与偏应变率 $\dot{\epsilon}'_{ij}$ 相关的粘性, 即 $s_{ij} = \mu \dot{\epsilon}'_{ij}$ 。如果不设置失效质点的剪切粘性系数, 质点失效后将不能承受任何剪应力, 此时很小的剪切力均可能使质点产生很大的剪切变形, 从而导致求解过程不稳定。因此应尽量避免将失效质点的剪切粘性系数设置为 0。

[VarSoundspeed]: 设置在计算临界时间步长 Δt^{cr} 时是否采用常声速。若设为 1 则本材料在计算临界时间步长时不更新声速, 相当于在积分过程中使用常时间步长。缺省值为 0, 即在每一个时间步中都更新声速。

[FailureDamageThreshold]: 当 Grid 中的 fail_to_component 关键字开启后, 通过设置 FailureDamageThreshold 关键字来指定当粒子的损伤量 D 达到某个值时将该粒子归到失效组件中。

Young: 杨氏模量

Poisson: 泊松比

[TemperatureCoefficient]: 温度系数, 缺省为 0。

[roomt]: 室温, 缺省为 293.0K。

[CoefficientOfThermalConductivity]: 热传导系数, 缺省为 0。

[SpecHeat]: 设置比热容。

以上所有属性和材料类型无关, 可以在所有材料中使用。下面给出与材料类型 *type* 相关的属性。

3.2.1.1 弹性材料: IsoElastic

3.2.1.2 一维弹性材料: Elastic 1D

弹性材料和一维弹性材料均不需要额外的属性。

3.2.1.3 理想弹塑性材料: ElaPlastic

理想弹塑性材料继承了弹性材料的所有属性，另外还具有以下属性：

Yield0: 屈服极限。

[PlasticWorkCoefficient]: 塑性功转换分数 β ，即塑性功转化为热能的比例系数，对金属材料一般取为 $\beta = 0.9$ 。

3.2.1.4 各向同性线性强化弹塑性材料: IsoHarden

各向同性线性强化弹塑性材料继承了理想弹塑性材料的所有属性，并具有以下属性。

TangMod: 切线模量 $E^t = d\sigma/d\varepsilon$ 。

3.2.1.5 一维线性强化弹塑性材料: LinHarElaPlastic 1D

一维线性强化弹塑性材料同各向同性线性强化弹塑性材料属性一致，但不包含泊松比属性。

3.2.1.6 Johnson-Cook 材料: JohnsonCook

Johnson-Cook 模型的屈服应力为^[4]:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (3.2)$$

其中 ε 为等效塑性应变， $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 是无量纲塑性应变率， $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$ ， $T^* = (T - T_{\text{room}})/(T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}) \in [0, 1]$ 是无量纲温度。初始化时，所有质点的温度都设为室温。 A 、 B 、 n 、 C 、 m 是 Johnson-Cook 模型的参数。 B 也可以称作塑性切线模量 E_p ，即 $E_p = EE_t/(E - E_t)$ （据 LS-DYNA 理论手册 mat_012）。

在 Johnson-Cook 损伤破坏模型^[5] 中，破坏应变按下式计算

$$\varepsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*][1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*][1 + D_5 T^{*m}] \quad (3.3)$$

其中压力应力比 $\sigma^* = \sigma_m/\bar{\sigma}$ 也叫应力三轴度 (triaxiality)， σ_m 是平均应力， $\bar{\sigma}$ 是 von Mises 等效应力。损伤量在每一时间步中累加

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^f} \quad (3.4)$$

当 $D = 1.0$ 时，材料发生破坏。

Johnson-Cook 材料模型继承了理想弹塑性材料的所有属性（其中属性 Yield0 用于定义参数 A ），且具有如下属性：

B: 材料常数 B 。

n: 材料常数 n 。

C: 材料常数 C 。

m: 材料常数 m 。

roomt: 室温 T_{room} ，缺省为 293.0K。

melt: 融化温度 T_{melt} ，单位是开尔文 (K)。

SpecHeat: 设置比热容 c_p ，用于计算因塑性功增量 ΔW_p 而产生的温度增量 ΔT ，即

$$\Delta T = \frac{\beta}{\rho c_p} \Delta W_p \quad (3.5)$$

其中塑性功转换分数 β 由属性 PlasticWorkCoefficient 给定， ρ 为材料的密度。

epso: 应变率的归一化因子，也就是确保 $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$ 。故 epso 的值取决于用户选择的时间单位，若是秒 (s) 则设为 1，若是毫秒 (ms) 则设为 10^{-3} ，若是微秒 (μs) 则设为 10^{-6} 。

[D1]: 损伤模型材料常数 D_1 。

[D2]: 损伤模型材料常数 D_2 。

[D3]: 损伤模型材料常数 D_3 。

[D4]: 损伤模型材料常数 D_4 。

[D5]: 损伤模型材料常数 D_5 。

Johnson-Cook 材料模型和损伤破坏模型中常用参数参见表 6.2 和表 6.3。

3.2.1.7 简化的 Johnson-Cook 材料: SimJohnsonCook

简化的 Johnson-Cook 材料模型在 Johnson-Cook 模型中忽略温度项，即

$$\sigma_y = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (3.6)$$

简化的 Johnson-Cook 材料继承了理想弹塑性材料的所有属性（其中属性 Yield0 用于定义参数 A ），且具有以下属性：

B: 材料常数 B 。

n: 材料常数 n 。

C: 材料常数 C 。

epso: 应变率的归一化因子，取决于用户选择的时间单位，若是秒 (s) 则设为 1，若是毫秒 (ms) 则设为 10^{-3} ，若是微秒 (μs) 则设为 10^{-6} 。

3.2.1.8 空材料: Null

空材料与状态方程联合使用，可用于模拟牛顿流体材料、非牛顿流体材料和高能炸药爆轰产物。空材料的压力由状态方程确定，当模拟牛顿流体材料和高能炸药爆轰产物时偏应力由下式确定

$$s_{ij} = \mu \dot{\varepsilon}_{ij}' \quad (3.7)$$

式中 μ 为剪切粘性系数 (shear viscosity) 或动力粘性系数 (dynamic viscosity)， $\dot{\varepsilon}_{ij}'$ 为偏应变率。当 $\mu = 0$ 时，材料完全不具有抗剪切能力，在很小的剪力载荷（可能是由误差引起的）作用下都可能会产生极大的剪切变形，因此应尽可能避免取 $\mu = 0$ 。

当模拟非牛顿流体时偏应力由下式确定

$$s_{ij} = k \dot{\varepsilon}_{ij}'^n \quad (3.8)$$

式中， k 为稠度系数， n 为流性指数。当 $n < 1$ 时为假塑性流体，当 $n > 1$ 时为胀塑性流体。

空材料具有如下可选属性：

[**mu**]，用于输入牛顿流体的剪切粘性系数。

[**ck**]，用于输入非牛顿流体的稠度系数。

[**nm**]，用于输入非牛顿流体的流性指数。

3.2.1.9 高能炸药材料: HighExpBurn

高能炸药材料是将空材料和状态方程（如 JWL 状态方程）联合使用，模拟高能炸药材料的行为。

炸药起爆后，爆轰产物的压力 p 由状态方程给出的压力 p_{eos} 和燃烧分数（Burn fraction） F 的乘积确定^{[6][7]}，即

$$p = F p_{\text{eos}} \quad (3.9)$$

其中燃烧分数

$$F = \max(F_1, F_2) \quad (3.10)$$

控制了炸药的化学能的释放，

$$F_1 = \begin{cases} \frac{(t - t_L)D}{1.5h} & t > t_L \\ 0 & t \leq t_L \end{cases} \quad (3.11)$$

$$F_2 = \beta(1 - V) \quad (3.12)$$

t 是当前时间， t_L 是点火时间， D 是爆速， h 为质点的特征尺寸，现取为 d_c 。 V 是相对体积，

$$\beta = \frac{\rho_0 D^2}{p_{\text{CJ}}} = \frac{1}{1 - V_{\text{CJ}}} = \gamma + 1 \quad (3.13)$$

p_{CJ} 为 Chapman-Jouguet 压力 (由用户输入的材料参数), V_{CJ} 为 Chapman-Jouguet 相对体积。当 $F > 1$ 时令 $F = 1$ 。炸药起爆后, 炸药质点的燃烧分数 F 一般需要经过几个时间步后才能达到 1, 因此这种处理方法将不连续的爆轰波阵面扩展到一个狭窄的区域中, 光滑成一个快速变化但连续的波阵面, 有效地避免了不连续性所引入的数值振荡。

式(3.12)为 β 燃烧, 式(3.11)为程序燃烧。 β 燃烧能够描述炸药的冲击起爆过程。

高能炸药材料具有以下属性:

D: 输入炸药的爆速 D ;

[beta]: 指定起爆方式, 2 (缺省值) 为仅用程序燃烧, 爆轰波将从起爆点以爆速 D 传播; 1 为仅用 β 燃烧 (待进一步开发, 详见下述), 0 为程序燃烧 + β 燃烧。当采用 β 燃烧时, 需要用给出 CJ 爆压 P_{CJ} 。

[PCJ]: 定义 CJ 爆压 P_{CJ} , 用于 β 燃烧。

[mu]: 设置爆轰产物的的剪切粘性系数, 参见第3.2.1.8节中关于 null 材料的说明。

3.2.1.10 Holmquist Johnson-Cook 材料: HolmquistJohnsonCook

Holmquist Johnson-Cook 材料用于模拟混凝土。HJC 模型^[8] 中, 规一化屈服应力为

$$\sigma^* = [A(1 - D) + Bp^{*n}][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*] \quad (3.14)$$

式中 A, B, C, n 为材料常数, $\sigma^* = \sigma/f_c$ 为无量纲应力, σ 为混凝土的实际应力, $p^* = p/f_c$ 为无量纲压力, p 为实际静水压力, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ 无量纲应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率, D 为损伤因子 ($0 \leq D \leq 1$)。由上式可知, σ^* 随着 p^* 的增长而无穷增大, 事实上 σ^* 存在着一个极限值, 为此引入一个无量纲强度 $S_{\max}$, $\sigma^* \leq S_{\max}$ 。

损伤因子 D 为等效塑性应变引起的损伤和塑性体积应变引起的损伤之和, 其表达式为

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{\epsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (3.15)$$

其中 $\Delta \epsilon_p$ 和 $\Delta \mu_p$ 为一个计算循环内的等效塑性应变增量和塑性体积应变增量, $\epsilon_p^f + \mu_p^f$ 是在压力 p 下破碎的塑性应变

$$\epsilon_p^f + \mu_p^f = D_1(P^* + T^*)^{D_2} \quad (3.16)$$

式中 D_1, D_2 为常数; $T^* = T/f_c$, T 为混凝土的抗拉强度。为了避免当 $P^* + T^*$ 过小时, 引起损伤量 D 过大, 需定义一个最小损伤常数 $\epsilon_{f,\min}$, 即: $D_1(P^* + T^*)^{D_2} \geq \epsilon_{f,\min}$ 。

Holmquist Johnson-Cook 材料继承了理想弹塑性材料的所有属性, 并具有以下属性:

A: 材料常数 A ;

B: 材料常数 B ;

N: 材料常数 n ;

C: 材料常数 C ;

fc: 静态单轴抗压强度 f_c ;

SMax: 最大无量纲强度 $S_{\max}$;

D1: 材料常数 D_1 ;

D2: 材料常数 D_2 ;

EFMin: 材料常数 $\varepsilon_{f,\min}$;

T: 静态单轴抗拉强度 T ;

epso: 应变率的归一化因子;

[TensileFailure]: 若为 1 时, 则当静水拉力达到极限值 (即 $-p \geq T(1 - D)$) 时认为材料失效, 否则仅将静水拉力限制到其极限值。材料失效后的行为由属性 FailedType 控制。

[Threshold]: 若为 1, 在计算累积损伤 D 时, 若 $D_1(P^* + T^*)^{D_2} < \varepsilon_{f,\min}$ 时, 则不计入本时间步内产生的损伤增量。

[ErosionByDamage]: 若为 1, 累积损伤 D 达到 1 时, 将该粒子侵蚀, 否则仅设置失效。

[ErosionByPressure]: 若为 1, 静水拉力超过 T 时, 将该粒子侵蚀, 否则仅设置失效。

[TensileDamage]: 若为 1, 计算累计损伤 D 时, 破碎的塑性应变计算方式为 $\varepsilon_p^f + \mu_p^f = D_1(P^* + T^*(1 - D))^{D_2}$ 。

[DamageToFail]: 若为 1, 当累计损伤 D 达到相应阈值时, 粒子失效, 默认不开启。

3.2.1.11 CauchyElastic 材料: CauchyElastic

参数继承于各向同性材料。

3.2.1.12 不可压 Mooney-Rivlin 橡胶材料: MooneyRivlin

Mooney-Rivlin 材料模型是一种超弹性材料, 其第二类皮奥拉-基尔霍夫应力张量 S_{ij} 与格林应变张量 E_{ij} 之间的关系为

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} \quad (3.17)$$

其中 W 为应变能密度函数, 对于 Mooney-Rivlin 材料模型, 有

$$W(I_1, I_2, I_3) = A(I_1 - 3) + B(I_2 - 3) + C\left(\frac{1}{I_3} - 1\right) + D(I_3 - 1)^2 \quad (3.18)$$

其中 A, B, C 和 D 为材料常数, I_1, I_2 和 I_3 为应变不变量。对于不可压 Mooney-Rivlin 材料, 参数 C 和 D 可以由参数 A 和 B 得到, 即

$$C = \frac{A}{2} + B \quad (3.19)$$

$$D = \frac{A(5\nu - 2) + B(11\nu - 5)}{2(1 - 2\nu)} \quad (3.20)$$

其中 ν 为泊松比，一般取 $0.49 \sim 0.499$ 。

不可压 Mooney-Rivlin 橡胶材料具有以下属性：

Mr_A2 $v(r)$: 材料参数 A ;

Mr_B2 $v(r)$: 材料参数 B ;

Poisson $v(r)$ 泊松比 ν 。

3.2.1.13 刚性材料: Rigid

刚性材料只需要输入密度，无需其他参数。

3.2.1.14 RHT 材料: RHT

RHT 材料模型用于混凝土的模拟，该模型有失效面、弹性极限面、残余失效面。在材料失效（应力超出失效面）前，当前屈服应力在弹性极限面和失效面之间插值得到，材料失效（应力超出失效面）前，当前屈服应力在失效面和残余失效面之间插值得到。

失效面定义为：

$$Y_{\text{fail}}(p, \theta, \dot{\epsilon}) = f_c Y_{\text{TXC}}^*(p/F_{\text{rate}}) R_3(\theta) F_{\text{rate}}(\dot{\epsilon}) \quad (3.21)$$

其中，

$$F_{\text{rate}}(\dot{\epsilon}) = \begin{cases} (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^\alpha & p > f_c/3, \text{ with } \dot{\epsilon}_0 = 30 \times 10^{-6} s^{-1} \\ (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^\delta & p < -f_t/3, \text{ with } \dot{\epsilon}_0 = 3 \times 10^{-6} s^{-1} \\ interpolation & otherwise \end{cases} \quad (3.22)$$

$$R_3(\theta) = \frac{2(1 - Q_2^2) \cos \theta + (2Q_2 - 1)[4(1 - Q_2^2) \cos^2 \theta + 5Q_2^2 - 4Q_2]^{\frac{1}{2}}}{4(1 - Q_2^2) \cos^2 \theta + (1 - 2Q_2)^2} \quad (3.23)$$

$$\theta = \frac{1}{3} \arccos\left(\frac{27J_3}{2\sigma_{eq}^3}\right) = \frac{1}{3} \arccos\left(\frac{3\sqrt{3}J_3}{2J_2^{3/2}}\right), \quad Q_2 = Q_{2,0} + B_Q p^*, \text{ 且 } 0.5 \leq Q_2 \leq 1.$$

$$Y_{\text{TXC}}^*(p) = \begin{cases} \frac{p}{-f_t/3}(f_t/f_c) + \frac{p + f_t/3}{f_t/3}(f_s/f_c) & p \leq 0 \\ \frac{p - f_c/3}{-f_c/3}(f_s/f_c) + \frac{p}{f_c/3} & 0 < p < f_c/3 \\ A(p^* + HTL)^N & p \geq f_c/3, HTL = (1/A)^{1/N} - 1/3 \end{cases} \quad (3.24)$$

弹性极限面定义为：

$$Y_{\text{elastic}}(p, \theta, \dot{\epsilon}) = f_c Y_{\text{TXC}}^*(p/F_{\text{rate}}/F_{\text{elastic}}) R_3(\theta) F_{\text{rate}}(\dot{\epsilon}) F_{\text{elastic}} F_{\text{cap}} \quad (3.25)$$

其中，

$$F_{\text{elastic}} = \begin{cases} COMPRAAT & p > f_c/3 \\ TENSRAAT & p < -f_t/3 \\ interpolation & otherwise \end{cases} \quad (3.26)$$

$$F_{\text{cap}} = \begin{cases} 1 & p \leq p_u = f_c/3 \\ \sqrt{1 - \left(\frac{p-p_u}{p_o-p_u}\right)^2} & p_u < p < p_o \\ 0 & p \geq p_o = p_{\text{crush}} \end{cases} \quad (3.27)$$

残余失效面定义为:

$$Y_{\text{res}}(p) = f_c B (p^*)^M \leq f_c S F M a x \quad (3.28)$$

失效前屈服面定义为:

$$Y_{\text{hard}} = Y_{\text{elastic}} + \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_p^{\text{hard}}} (Y_{\text{failure}} - Y_{\text{elastic}}) \quad (3.29)$$

$$\varepsilon_p^{\text{hard}} = \frac{(Y_{\text{failure}} - Y_{\text{elastic}})}{3G} \left(\frac{G_{\text{elastic}}}{G_{\text{elastic}} - G_{\text{plastic}}} \right) \quad (3.30)$$

其中, $\frac{G_{\text{elastic}}}{G_{\text{elastic}} - G_{\text{plastic}}} = P R E F A C T$ 。

失效后屈服面定义为:

$$Y_{\text{frac}} = (1 - D) Y_{\text{failure}} + D Y_{\text{residual}} \quad (3.31)$$

损伤量 D 定义为 (当强化状态达到屈服面极限强度时开始统计损伤量 D):

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^{\text{failure}}} \quad (3.32)$$

$$\varepsilon_p^{\text{failure}} = D_1 (p^* + T^*)^{D_2} \geq \varepsilon_{f,\min} \quad (3.33)$$

剪切模量软化:

$$G_D = G_{D=0} (1 - D) + G_{D=1} D \quad (3.34)$$

其中 $G_{D=1} = G_{D=0} S H R A T D$, $S H R A T D$ 为残余剪切模量比。

RHT 材料继承了理想弹塑性材料的所有属性, 并具有以下属性:

fc: 材料常数抗压强度 f_c ;

ft_fc: 材料常数 f_t/f_c ;

fs_fc: 材料常数 f_s/f_c ;

A: 材料常数 A ;

N: 材料常数 N ;

Q20: 材料常数 $Q_{2,0}$;

BQ: 材料常数 B_Q ;

PREFACT: 材料常数 $P R E F A C T$;

TENSRAT: 材料常数 $T E N S R A T$;

COMPRAT: 材料常数 $C O M P R A T$;

B: 材料常数 B ;

M: 材料常数 M ;

alpha: 材料常数 α ;

delta: 材料常数 δ ;

epso: 应变率规一化因子 $1.0s^{-1}$;

[SFMax]: 材料常数 $SFMax$, 默认值为 $1.0e20$;

[CapFlag]: 求弹性极限时是否乘 F_{cap} , 默认开启。

D1: 材料常数 D_1 ;

D2: 材料常数 D_2 ;

EFMin: 材料常数 $EFMin$;

SHRATD: 材料常数残余剪切模量比 $SHRATD$;

3.2.1.15 Johnson Holmquist Ceramics 材料: JH2

Johnson 和 Holmquist 提出了两种非常类似的模型来描述脆性材料的本构关系, 一种是前面提到的模拟混凝土的 HolmquistJohnsonCook 模型 (也称为 JH1 模型), 另一种就是模拟陶瓷材料的 JH2 模型。JH2 模型同样包括强度、压力和损伤量。

JH2 模型中规一化的屈服应力为

$$\sigma^* = (1 - D)\sigma_i^* + D\sigma_f^* \quad (3.35)$$

式中 D 为损伤因子 ($0 \leq D \leq 1$), $\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)$ 为材料未损伤时的规一化屈服应力, $\sigma_f^* = B(P^*)^M(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \leq \sigma_{f \max}^*$ 为材料完全损伤时的规一化屈服应力。 σ^* , σ_i^* 和 σ_f^* 的规一化因子均为 Hugoniot 弹性极限对应的等效应力 σ_{HEL} 。

σ_i^* 和 σ_f^* 的表达式中 $P^* = P/P_{HEL}$, P 为实际压力, P_{HEL} 为 Hugoniot 弹性极限对应的压力; $T^* = T/P_{HEL}$, T 为材料能够承受的最大静水拉力; 因子 $(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)$ 表示材料的应变率效应, 无量纲数 $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$, $\dot{\epsilon}$ 为实际等效应变率, $\dot{\epsilon}_0 = 1.0s^{-1}$; A 、 B 、 C 、 M 、 N 、 T 、 $\sigma_{f \max}^*$ 为材料参数。

损伤因子 D 由等效塑性应变累积,

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_p^f} \quad (3.36)$$

式中 $\Delta \epsilon_p$ 为一个计算循环内的等效塑性应变增量, $\epsilon_p^f = D_1(P^* + T^*)^{D_2}$ 表示在当前压力下使材料完全破碎的等效塑性应变, P^* 和 T^* 的意义与前面相同, D_1 和 D_2 为材料参数。

当前时间步的静水压力 $P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 (\mu > 0)$, $P = K_1\mu (\mu < 0)$, 式中 $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ 。在材料开始损伤以后 ($D > 0$), 体积会发生膨胀, 导致压力增加, 所以当 $\mu > 0$, $P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 + \Delta P$, 其中 ΔP 是由体积膨胀引起的压力增量, 可通过能量转化来计算。由于 D 增加, 材料的屈服应力会下降, 材料的畸变能转化为体积应变能, 转化系数为 β 。最终求得

$$\Delta P_{t+\Delta t} = -K_1\mu_{t+\Delta t} + \sqrt{(K_1\mu_{t+\Delta t} + \Delta P_t)^2 + 2\beta K_1 \Delta U} \quad (\text{if } \mu_{t+\Delta t} > 0)$$

式中 K_1 为体积模量, K_2 、 K_3 、 β 为材料参数。

JH2 材料继承了理想弹塑性材料的所有属性，并具有以下属性：

A: 材料常数 A ;

B: 材料常数 B ;

C: 材料常数 C ;

M: 材料常数 M ;

N: 材料常数 N ;

epso: 应变率规一化因子 $\dot{\epsilon}_0 = 1.0s^{-1}$;

T: 材料能够承受的最大静水拉力 T ;

[SFMax]: 累无量纲最大破碎强度 $\sigma_{f\max}^*$, 默认值为 $1.0e20$;

Shel: Hugoniot 弹性极限对应的等效应力 S_{HEL} ;

Phel: Hugoniot 弹性极限对应的压力 P_{HEL} ;

beta: 能量转化系数 β ;

D1: 材料常数 D_1 ;

D2: 材料常数 D_2 ;

K2: 材料常数 K_2 ;

K3: 材料常数 K_3 ;

3.2.1.16 Drucker-Prager 模型: DruckerPrager

Drucker-Prager 模型包括剪切失效和拉伸失效。为了唯一确定拉伸失效区域和剪切失效区域，此处定义函数 $h(\sigma_m, \tau)$

$$h = \tau - \tau^P - \alpha^P (\sigma_m - \sigma^t)$$

τ 是等效剪应力

$$\tau = \sqrt{J_2}$$

σ_m 是球应力

$$\sigma_m = \frac{I_1}{3}$$

J_2 是偏应力张量第二不变量, I_1 是应力张量的第一不变量。 τ^P 和 α^P 为常数, 可以由下式定义为

$$\tau^P = k_\phi - q_\phi \sigma^t$$

$$\alpha^P = \sqrt{1 + q_\phi^2} - q_\phi$$

σ^t 是材料的抗拉强度。 k_ϕ, q_ϕ 是材料常数, 可由材料的内聚力以及摩擦角确定。当 $h > 0$ 时采用剪切失效, 此时屈服函数为

$$f^s = \tau + q_\phi \sigma_m - k_\phi$$

在 Drucker-Prager 模型中, 剪切势函数 g^s 采用非关联塑性流动法则。 g^s 表达式为

$$g^s = \tau + q_\psi \sigma_m$$

式中 q_ψ 为材料常数, 由剪胀角确定。如果 $q_\psi = q_\phi$, 则为关联塑性流动。当 $h \leq 0$ 时采用拉伸失效, 此时屈服函数为

$$f^t = \sigma_m - \sigma^t$$

拉伸失效采用了关联流动法则, 其势函数 g^t 为

$$g^t = \sigma_m$$

Drucker-Prager 材料模型继承了理想弹塑性材料的所有属性 (其中没有属性 Yield0), 且具有如下属性:

qfai : 材料参数 q_ϕ 。

kfai : 材料参数 k_ϕ 。

qpsi : 材料参数 q_ψ 。

ten_f : 材料参数 σ^t 。

3.2.1.17 DeshpandeFleckFoam 金属泡沫模型: DFFoam

DESHPANDE_FLECK_FOAM 模型的屈服函数为

$$\Phi = \hat{\sigma} - \sigma_y$$

等效应力 $\hat{\sigma}$ 的表达式:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(\sigma_e)^2 + (\alpha * \sigma_m)^2}{1 + \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2}$$

屈服函数 σ_y 的表达式:

$$\sigma_y = \sigma_p + \gamma \frac{\hat{\varepsilon}}{\varepsilon_D} + \alpha_2 \ln \left(\frac{1}{1 - \left(\frac{\hat{\varepsilon}}{\varepsilon_D}\right)^\beta} \right)$$

σ_e 是 von Mises 等效应力, σ_m 是球应力。 $\hat{\varepsilon}$ 是等效塑性应变。

α 是材料参数, 控制屈服面的形状, 取值范围 $0 \leq \alpha^2 \leq 4.5$ 。

σ_p 是材料参数, 代表初始的屈服强度。

α_2, γ, β 是与密度相关的材料参数。

ε_D 是压实应变。

ε_m 是质点的体积应变, ε_{cr} 是用户给定的极限应变值。模型中采用体积应变失效模型, 即当 $\varepsilon_m \geq \varepsilon_{cr}$ 时, 质点失效。

DESHPANDE_FLECK_FOAM 材料模型继承了理想弹塑性材料的所有属性 (其中属性 Yield0 用于定义参数 σ_p), 且具有如下属性:

alfa : 材料参数 α 。

epsud : 材料参数 ε_D 。

alal : 材料参数 α_2 。

gama : 材料参数 γ 。

bebe : 材料参数 β 。

vole : 材料参数 ε_{cr} 。

3.2.1.18 孔洞损伤材料模型: Gurson

在 Gurson 模型基础上, Tvergaard 和 Needleman^[9] 对其进行修正得到 GTN 模型, 其屈服函数表达式如下:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\bar{\sigma}_0} \right)^2 + 2q_1 f^* \cosh \left(\frac{3q_2 \sigma_m}{2\bar{\sigma}_0} \right) - (1 + q_1^2 f^{*2}) \quad (3.37)$$

其中 q_1, q_2 是由 Tvergaard 引入的参数使得模型更吻合周期性的空洞规律。 $\bar{\sigma}_0$ 是基体材料的屈服应力, 它是微观功等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}^p$ 的函数。屈服函数中 f^* 是孔洞体积分数 f 的函数, 它考虑了失效时孔洞的快速合并效应。

$$f^* = \begin{cases} f & \text{for } f \leq f_c \\ f_c + \frac{1/q_1 - f_c}{f_f - f_c} (f - f_c) & \text{for } f_c < f \leq f_f \\ 1/q_1 & \text{for } f > f_f \end{cases} \quad (3.38)$$

其中 f_c 是成核时的孔洞体积分数, f_f 是最大容许孔洞体积分数。

孔洞体积分数的增长由现有孔洞的膨胀和新孔洞的形成组成, 即

$$\dot{f} = \dot{f}_{\text{growth}} + \dot{f}_{\text{nucleation}} \quad (3.39)$$

由于孔洞间材料是不可压缩的, 现有孔洞增长率为

$$\dot{f}_{\text{growth}} = (1 - f) D^p : I \quad (3.40)$$

新孔洞的成核这里考虑为应变驱动类型, 采用 Chu 和 Needleman^[12] 提出的公式, 形核的应变服从均值为 ε_N , 方差为 s_N 的正态分布, 有

$$\dot{f}_{\text{nucleation}} = A_N(\bar{\varepsilon}^p) \dot{\bar{\varepsilon}}^p \quad (3.41)$$

$$A_N(\bar{\varepsilon}^p) = \frac{f_N}{s_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\varepsilon}^p - \varepsilon_N}{s_N} \right)^2 \right] \quad (3.42)$$

其中 f_N 是发生孔洞成核粒子的体积分数。

考虑微观孔隙时, 使用 TEPLA-F 失效模型来表征材料的破坏。TEPLA-F 失效模型是基于 Gurson 模型拉伸塑性和孔隙生长而提出的一种失效模型 [10]。塑性流动面定义了拉伸区的塑性应变, 材料失效的条件表述为塑性应变和孔隙率的形式:

$$\left(\frac{f}{f_f}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_p^f}\right)^2 = 1 \quad (3.43)$$

式中 f 为当前时刻的孔洞体积分数, f_f 是最大容许孔洞体积分数, ε_p 是当前塑性应变, ε_p^f 是失效应变。

对于基体材料程序中实现三种模型: 线性强化、软化材料、简化 Johnson-Cook 材料。三种基体材料模型选用时只能三选一。其中软化材料的屈服应力表达式为 ($N > 1$):

$$\bar{\sigma}_0 = \sigma_y \left(1 + \frac{E}{\sigma_y} \varepsilon^p\right)^{1/N}$$

Gurson 模型继承了理想弹塑性材料的所有属性, 具有如下属性:

q1: Gurson 模型常数 q_1 。

q2: Gurson 模型材料常数 q_2 。

f0: 初始孔洞体积分数 f_0 。

[Gauss_f0]: 初始孔洞体积分数均值。

[Gauss_sn]: 初始孔洞体积分数方差。

fc: 材料常数 f_c 。

ff: 材料常数 f_f 。

[fN]: 材料常数 f_N 。

[sN]: 材料常数 s_N 。

[eN]: 材料常数 e_N 。

[epmax]: Tepla-f 失效模型常数 ε_p^f 。

[TangMod]: 基体线性强化材料切线模量 $E^t = d\sigma/d\varepsilon$ 。

[N_hard]: 基体软化材料常数 N 。

[B]: 基体 Johnson-Cook 材料常数 B 。

[n]: 基体 Johnson-Cook 材料常数 n 。

[C]: 基体 Johnson-Cook 材料常数 C 。

[epso]: 基体 Johnson-Cook 材料应变率的归一化因子, 也就是确保 $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$ 。故 epso 的值取决于用户选择的时间单位, 若是秒 (s) 则设为 1, 若是毫秒 (ms) 则设为 10^{-3} , 若是微秒 (μs) 则设为 10^{-6} 。

3.2.2 状态方程 (EquationOfState)

状态方程关键字 EquationOfStation 为可选关键字，它具有以下属性：

type: 用于定义状态方程的类型。目前程序提供的状态方程类型将在后面分别说明。

[C0]: 定义材料的声速 c_0 。

[E0]: 定义材料初始单位体积内能。

以上属性和具体的状态方程类型无关，所有状态方程均具有这些属性。下面介绍各状态方程的特有属性。

3.2.2.1 LS-DYNA 多项式状态方程: Polynomial

线性多项式状态方程形式为

$$p = c_0 + c_1\mu + c_2\mu^2 + c_3\mu^3 + (c_4 + c_5\mu + c_6\mu^2)E \quad (3.44)$$

其中 $\mu = 1/V - 1 = \rho/\rho_0 - 1$ ， V 是相对体积， $c_0 \sim c_6$ 为材料常数。线性多项式状态方程也可用于描述符合 gamma 律状态方程的气体。只要设置

$$c_0 = c_1 = c_2 = c_3 = c_6 = 0$$

以及

$$c_4 = c_5 = \gamma - 1$$

则压力表示为：

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E$$

线性多项式状态方程具有以下属性：

c0: 材料常数 c_0 ；

c1: 材料常数 c_1 ；

c2: 材料常数 c_2 ；

c3: 材料常数 c_3 ；

c4: 材料常数 c_4 ；

c5: 材料常数 c_5 ；

c6: 材料常数 c_6 ；

3.2.2.2 AUTODYN 多项式状态方程: Polynomial2

该多项式状态方程形式为

$$p = \begin{cases} A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)E & \mu > 0 \\ T_1\mu + T_2\mu^2 + B_0E & \mu \leq 0 \end{cases} \quad (3.45)$$

$$(3.46)$$

其中 $\mu = 1/V - 1 = \rho/\rho_0 - 1$ 中, V 是相对体积。

该状态方程具有以下属性:

A1: 材料常数 A_1 ;

A2: 材料常数 A_2 ;

A3: 材料常数 A_3 ;

B0: 材料常数 B_0 ;

B1: 材料常数 B_1 ;

T1: 材料常数 T_1 ;

T2: 材料常数 T_2 ;

3.2.2.3 JWL 状态方程: JWL

JWL(Jones-Wilkins-Lee) 状态方程用于描述爆炸产物:

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1V})e^{-R_1V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2V})e^{-R_2V} + \frac{\omega E}{V} \quad (3.47)$$

其中 $V = v/v_0$ 是相对体积。 A, B, R_1, R_2, ω 是五个材料常数, 文献^[7] 的表 3.3 有多种炸药的 JWL 状态方程参数。表6.5给出了几种常用炸药的参数。

JWL 状态方程具有以下属性:

A: 材料常数 A ;

B: 材料常数 B ;

R1: 材料常数 R_1 ;

R2: 材料常数 R_2 ;

w: 材料常数 ω ;

3.2.2.4 Grüneisen 状态方程: Gruneisen

Grüneisen 状态方程是由热力学与统计力学方法得到的, 可以很好地描述绝大多数金属固体在冲击载荷作用下的热力学行为。Mie-Gruneisen 状态方程具有如下形式^[11]

$$p = p_H + \frac{\gamma}{v}(e - e_H) \quad (3.48)$$

其中 p_H 和 e_H 为 Hugoniot 曲线上的点的压力和单位质量内能，他们可由冲击波的关系式给出。 γ 是 Grüneisen 参数，满足关系式 $\gamma_0 \rho_0 = \gamma \rho$ 。具体推导参见理论手册，最终使用的形式为：

$$p = p_H \left(1 - \frac{\gamma \mu}{2}\right) + \gamma_0 E \quad (3.49)$$

其中

$$p_H = \begin{cases} \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1)\mu]^2} & \text{当 } \mu \geq 0 \\ \rho_0 c_0^2 \mu & \text{当 } \mu < 0 \end{cases} \quad (3.50)$$

其中， $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ 为体积压缩系数。这个形式的 Grüneisen 状态方程和 LS-DYNA 以及 AutoDyn 中采用的一致，

如果在 $\mu = 0$ 处进行 Taylor 展开，可以得到多项式形式的 Grüneisen 状态方程，也为许多程序所使用。

在本程序中可用简化的状态方程：

$$p_H = \begin{cases} \rho_0 c_0^2 [\mu + (2s - 1)\mu^2 + (s - 1)(3s - 1)\mu^3] & \text{当 } \mu \geq 0 \\ \rho_0 c_0^2 \mu & \text{当 } \mu < 0 \end{cases} \quad (3.51)$$

文献 [11] 的表 5.1 中给出了不同材料的参数 c_0 、 s 和 γ_0 ，表 6.6 摘录了几种常用材料的参数。

Grüneisen 状态方程具有以下属性：

S1：材料常数 s ；

gamma0：材料常数 γ_0 ；

simplified：取值 0 或 1。为 1 时采用简化的状态方程。

使用须知：

- 简化的状态方程为多项式拟合计算方式，为在压缩系数等于 0 的附近 Taylor 展开，因此对于 0 附近的值拟合较好，但当压缩系数较大时，结果与理论值相差较大；
- 对于涉及到压缩量较小的低速金属冲击问题，可采用简化的计算方式，但对于涉及高压压缩系数的金属冲击问题，则建议采用非简化的计算方式；
- 当采用简化的方式进行计算时，如果体积压缩值较大时易出现负数开根号。因此，当质点出现负数开根号，程序自动将该质点置为失效质点。

3.2.2.5 P- α 状态方程：PAlpha

该状态方程的形式为

$$p = \frac{1}{\alpha} f\left(\frac{v}{\alpha}, e\right) \quad (3.52)$$

其中， f 为调用的 eos 状态方程， α 定义为：

$$\alpha = 1 + (\alpha_p - 1) \left(\frac{p_s - p}{p_s - p_e} \right)^n$$

$$\alpha_p = \frac{\rho_s}{(p_e/K + 1)\rho_0}$$

P- α 状态方程主要用于多孔及疏松介质，它还需要借助其他的状态方程用来描述材料的行为。参数中的 ρ_0 为物质的实心密度，EOSID 为指定状态方程的标号，采用嵌套调用的方式，因此与在材料定义时相同，即：

Plock: 压实压力 p_s ;

Pcrush: 弹性极限压力 p_e ;

n: 材料常数 n ;

rho0s: 材物质的实心密度 ρ_0 ;

EOSID: 压实物质的状态方程标号：1-Polynomial, 2-Polynomial2, 3-Gruneisen。

3.2.2.6 Holmquist Johnson-Cook 状态方程: HolmquistJohnsonCook

目前 Holmquist Johnson-Cook 状态方程^[8] 用于混凝土的模拟，状态方程在压缩下的加载和卸载（包括反向加载）分为三个阶段计算：

(1). 弹性阶段 ($\mu \leq \mu_{\text{crush}}$ 且 $\mu_{\text{max}} \leq \mu_{\text{crush}}$)

$$p = K_{\text{elastic}}\mu \quad (3.53)$$

式中 $K_{\text{elastic}} = P_{\text{crush}}/\mu_{\text{crush}}$ 为混凝土的弹性体积模量， μ_{crush} 为弹性极限应变，对应压碎压力 P_{crush} ， $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ 为单元的体积应变， ρ 和 ρ_0 分别表示单元密度和初始密度。

(2). 过渡阶段 ($\mu < \mu_{\text{plock}}$ 且 $\mu_{\text{crush}} < \mu_{\text{max}} < \mu_{\text{plock}}$)

该阶段混凝土内部的气泡开始破裂，混凝土结构受到损伤，并开始产生破碎性裂纹，但混凝土还没有完全破碎。

加载时

$$p = P_{\text{crush}} + K_{\text{tran}}(\mu - \mu_{\text{crush}}) \quad (3.54)$$

其中 $K_{\text{tran}} = (P_{\text{lock}} - P_{\text{crush}})/(\mu_{\text{plock}} - \mu_{\text{crush}})$ ， μ_{plock} 为压实体积应变，对应压实压力 P_{lock} 。

卸载时

$$p = P_{\text{crush}} + K_{\text{tran}}(\mu_{\text{max}} - \mu_{\text{crush}}) + [(1 - F)K_{\text{elastic}} + FK_1](\mu - \mu_{\text{max}}) \quad (3.55)$$

其中 $F = (\mu_{\text{max}} - \mu_{\text{crush}})/(\mu_{\text{plock}} - \mu_{\text{crush}})$ ， μ_{max} 为混凝土卸载前达到的最大体应变 ($\mu_{\text{crush}} < \mu_{\text{max}} < \mu_{\text{plock}}$)，

$$\mu_{\text{plock}} = \frac{P_{\text{lock}}}{K_1}(1 + \mu_{\text{lock}}) + \mu_{\text{lock}} \quad (3.56)$$

(3). 压实阶段 ($\mu \geq \mu_{\text{plock}}$ 或 $\mu_{\text{max}} \geq \mu_{\text{plock}}$)

该阶段混凝土已经完全破碎。

加载时

$$p = K_1\bar{\mu} + K_2\bar{\mu}^2 + K_3\bar{\mu}^3 \quad (3.57)$$

其中 $\bar{\mu} = (\mu - \mu_{\text{lock}})/(1 + \mu_{\text{lock}})$, K_1, K_2, K_3 为混凝土的材料常数。

卸载时

$$p = K_1 \bar{\mu}_{\text{max}} + K_2 \bar{\mu}_{\text{max}}^2 + K_3 \bar{\mu}_{\text{max}}^3 + K_1 (\mu - \mu_{\text{max}}) \quad (3.58)$$

当混凝土处于拉伸状态时, 最大拉应力定义为

$$P_{\text{max}} = T(1 - D) \quad (3.59)$$

其中 D 为损伤因子, 参考 hjc 材料模型中的定义。

Holmquist Johnson-Cook 状态方程具有以下属性:

PCrush: 材料常数 P_{crush} ;

MuCrush: 材料常数 mu_{crush} ;

K1: 材料常数 K_1 ;

K2: 材料常数 K_2 ;

K3: 材料常数 K_3 ;

PLock: 材料常数 P_{lock} ;

MuLock: 材料常数 μ_{lock} ;

Poisson: 泊松比 ν 。

3.2.3 损伤失效模型 (FailureModel)

损伤失效模型关键字 FailureModel 为可选关键字。最多可以定义 10 个损伤失效条件，只要其中一个失效条件满足则该质点失效。它具有以下属性：

type: 用于定义损伤失效模型的类型。目前程序提供的损伤失效模型将在后面分别说明。

[Erosion]：是否启用侵蚀，即是否删除失效的质点。置为 1 时启用侵蚀，置为 0 时关闭侵蚀。缺省值为 0。

以上属性和具体的损伤失效模型无关，所有损伤失效模型均具有这些属性。下面介绍各损伤失效模型的特有属性。

3.2.3.1 最大等效塑性应变失效模型：PlaStrain

epmax: 指定失效时的等效塑性应变值 $\varepsilon_{\max}^p$ 。当质点等效塑性应变大于给定值 $\varepsilon^p > \varepsilon_{\max}^p$ 时，质点失效。

3.2.3.2 最大静水拉力失效模型：Pmin

pmin: 指定材料的最大静水拉力值 $p_{\min}$ 。当质点压力（压为正，拉为负）小于 $p_{\min}(r)$ 时，质点做失效处理。输入参数 $p_{\min}$ 必须小于零。

3.2.3.3 最大主应力/剪应力：PriStress

PriStressMax: 指定最大拉主应力 $\sigma_1^{\max}$ （必须大于 0）；

PriStressMin: 指定最小主应力 $\sigma_3^{\min}$ （必须小于 0，表示受压状态）；

ShearStressMax: 指定最大剪应力 $\tau^{\max}$ （必须大于 0）。

使用须知：

- 三个条件，任意一条满足，则质点失效；
- 若设置值为 0 则表示相应的失效条件不起作用。

3.2.3.4 最大主应变/剪应变：PriStrain

PriStrainMax: 指定最大拉主应变 $\varepsilon_1^{\max}(r)$ （必须大于 0）；

PriStrainMin: 指定最小主应变 $\varepsilon_3^{\min}(r)$ （必须小于 0，表示受压状态）；

ShearStrainMax: 指定最大剪应变 $\gamma^{\max}$ (必须大于 0)。

使用须知:

- 三个条件, 任意一条满足, 则质点失效;
- 若有设置为 0 则表示相应的失效条件不起作用。

3.2.3.5 瞬时几何应变: **InstGeoStrain**

ErosionStrain: 指定最大瞬时几何应变值 (必须大于 0)。若设置为 0 则失效条件不起作用。

3.2.4 随机失效设置 (RandomFailure)

实际情况中一般材料其属性在各个材料点并不完全一致，材料的随机特性导致其破坏时也表现出一定的随机性，采用随机失效方案可以模拟材料的这种随机破坏特性。目前程序中实现 Gauss 和 Weibull 两种随机分布模式，注意这里两种分布产生的随机数将作为系数乘到原来失效阈值上。

Gauss 分布的概率密度函数为

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}m} \exp\left[-\frac{(x - \sigma_0)^2}{2m^2}\right] \quad (3.60)$$

其中 P_f 为失效概率， σ_0 , m^2 分别为材料阈值系数均值和方差。

标准 Weibull 分布为三参数模型，对于单轴应力状态其表达式为

$$P_f = 1 - \exp \int \left[\frac{\sigma - \sigma_{th}}{\sigma_0} \right]^m \frac{dA}{a} \quad (3.61)$$

其中 P_f 为失效概率， A 是作用表面积， a 是对应的单位面积。 σ_0 , σ_{th} 和 m 分别为材料阈值系数均值、阈值限值和分布系数。程序中实现了二参数模型：

$$P_f = 1 - \exp \int \left[\frac{\sigma}{\sigma_0} \right]^m \frac{dA}{a} \quad (3.62)$$

它是对三参数模型的简化。Fok 等 [12] 指出当 $A = 1000$ 时， $\sigma_0 = 1.2549$, $m = 20.270$ 的二参数模型与对应的 $\sigma_0 = 1$, $\sigma_{th} = 0.3$, $m = 13$ 三参数模型较为吻合， $\sigma_0 = 0.8981$, $m = 19.887$ 的二参数模型与对应的 $\sigma_0 = 1$, $\sigma_{th} = 0.5$, $m = 3.4$ 三参数模型较为吻合。

[enable]：设定是否启用随机失效，enable 设为 1 时即启用，默认不启用。

[RandomType]：当 RandomType=1 时，随机数按粒子分布；当 RandomType=2 时，随机数按网格分布，即初始时刻处于同一背景网格内的粒子具有同一失效值。默认 RandomType=1。

[FailDistribution]：设定粒子失效值的分布规律，0 为常数分布，即所有粒子的失效值都一样；1 为 Gauss 分布；2 为 Weibull 分布。默认值为 0。

[GaussMean]：当随机分布为 Gauss 分布时，设定 σ_0 ，默认值为 1。

[GaussStd]：当随机分布为 Gauss 分布时，设定 m^2 ，默认值为 0.2。

[WeibMed]：当随机分布为 Weibull 分布时，设定 σ_0 ，默认值为 1.2549。

[WeibMod]：当随机分布为 Weibull 分布时，设定 m ，默认值为 20.270。

[WeibRefVol]：当随机分布为 Weibull 分布时，设定 a ，默认值为 1。

[WeibPartVol]：当随机分布为 Weibull 分布时，设定 A ，默认值为 1000。

[DamageRandom]：当 HJC 材料模型中开启 DamageToFail 时，用此关键字控制失效损伤量阈值是否随机。当 DamageRandom=0 时不开启，此时各粒子失效损伤量阈值受 FailureDamageThreshold 关键字控制；当 DamageRandom=1 时开启，此时各粒子损伤量失效阈值乘上相应生成的随机数，最终阈值不超过 1。默认不开启。

使用规范：

```
<RandomFailure enable="1" FailDistribution="1" RandomType="1" DamageRandom="1"/>
```

使用须知:

- 注意当采用随机失效时，粒子的实际失效值为原失效值乘上随机数后的结果。当某一材料中启用随机失效时，其材料模型中的损伤量和所有失效模型对应的粒子失效阈值均采用同一随机分布。

3.3 摩擦系数 (Friction)

摩擦系数关键字 Friction 为一级可选关键字，用来定义材料间的摩擦系数。它具有子关键字：

Coefficient: 用来设定两种材料之间的摩擦系数，具有以下属性：

value: 定义摩擦系数；

mat1: 设置定义摩擦系数的第一种材料名称；

mat2: 设置定义摩擦系数的第二种材料名称；

使用规范：

```
<Friction>      <!-- 定义材料摩擦系数 -->
    <Coefficient value="0.2" mat1="a" mat2="b" />
    <!-- a, b 两种材料之间摩擦系数为 0.2 -->
</Friction>     <!-- 定义材料摩擦系数完毕 -->
```

使用须知：

- 关键字 Coefficient 一次只定义两种材料之间的摩擦系数，可以使用该关键字以定义多个材料之间的摩擦系数。

3.4 局部工作平面定义 (WorkPlane)

局部工作平面定义关键字 WorkPlane 及其以下关键字主要用来定义一组局部坐标系，用户在这些局部坐标系中建立 Body 模型。在 MPM3D[®] 中，物质点坐标都是在全局坐标系下定义的。MPM3D[®] 在对局部坐标系中建立的 Body 离散时，自动通过坐标变换生成其物质点在全局坐标系中的坐标。利用局部工作平面可以实现对 Body 的旋转和平移。

每个局部工作平面包含了如下信息：

- (1) 局部坐标系 (WorkPlane) 原点相对于全局坐标系原点的偏移量 (r_{0x} , r_{0y} , r_{0z})；
- (2) 局部坐标系 (WorkPlane) 的 Z 轴矢量在全局系的方向矢量 (e_x , e_y , e_z)；
- (3) 局部坐标系 (WorkPlane) 的 X 轴矢量在全局系的方向矢量 (a_{11} , a_{21} , a_{31})。

关键字说明：

WorkPlane：一级可选关键字，它具有以下十个属性：

[name type(s)]: WorkPlane 的名称：

[r0x v(r)]: WorkPlane 原点相对于全局坐标系原点的偏移量 r_{0x} ；

[r0y v(r)]: WorkPlane 原点相对于全局坐标系原点的偏移量 r_{0y} ；

[r0z v(r)]: WorkPlane 原点相对于全局坐标系原点的偏移量 r_{0z} ；

[ex v(r)]: WorkPlane 的 Z 轴矢量在全局系下的 X 分量 e_x ；

[ey v(r)]: WorkPlane 的 Z 轴矢量在全局系下的 Y 分量 e_y ；

[ez v(r)]: WorkPlane 的 Z 轴矢量在全局系下的 Z 分量 e_z ；

[a11 v(r)]: WorkPlane 的 X 轴矢量在全局系下的 X 分量 a_{11} ；

[a21 v(r)]: WorkPlane 的 X 轴矢量在全局系下的 Y 分量 a_{21} ；

[a31 v(r)]: WorkPlane 的 X 轴矢量在全局系下的 Z 分量 a_{31} 。

使用规范：

```
<WorkPlane name="plane1"          <!-- 定义 WorkPlane 名称 -->
  r0x="1.1" r0y="2.2" r0z="3.3"    <!-- 定义 WorkPlane 相对于全局坐标系原点的偏移量 -->
  ex="3"    ey="1"    ez="1"      <!-- 定义 WorkPlane 的 Z 轴在全局系下的方向矢量 -->
  a11="0"   a21="-1"  a31="1"    /> <!-- 定义 WorkPlane 的 X 轴在全局系下的方向矢量 -->
```

使用须知：

- 矢量 (e_x , e_y , e_z) 和 (a_{11} , a_{21} , a_{31}) 分别用来指定局部坐标系的 Z 轴（主方向）和 X 轴在全局系下的分量，不要求一定为单位矢量（即不要求 $\sqrt{e_x^2 + e_y^2 + e_z^2} = 1$ 和 $\sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2 + a_{31}^2} = 1$ ），但必须保证这两个方向矢量正交，即 $e_x a_{11} + e_y a_{21} + e_z a_{31} = 0$ 必须严格满足；

- 局部坐标系的 Y 轴方向是通过向量 (e_x, e_y, e_z) 叉乘向量 (a_{11}, a_{21}, a_{31}) 自动得到的, 故 WorkPlane 的坐标架仍然保持为右手系。

3.5 组件 (Component)

离散体的定义及物体上所施加的约束是在 Component（组件）元素下设置，一个组件下可以定义多个离散体。在 MPM3D[®] 中接触算法是以组件为基本单元进行计算的，即处理隶属于不同组件的两个物体间发生的接触，位于同一组件中的物体若发生接触则不再单独处理。Component 为一级必选元素，该元素包含两个属性及一个子元素，具体如下：

name: 设置组件名称；

normal_vector_weight: 设置此组件接触面法向方向计算权值，仅当开启接触算法时有效；

Body: Component 的子元素，定义离散体及对该离散体施加的约束或载荷，详见3.6.

使用规范：

```
<Component name="Taylorbar" normal_vector_weight="1"> <!-- 定义离散体组件 -->
  <Body name="body0" ... > <!-- 定义该组件的一个 body，并命名为 body0 -->
    .....
  </Body> <!-- body0 的定义完毕 -->
  <Body name="body1" <!-- 继续定义该组件的另一个 body，并命名为 body1 -->
    .....
  </Body> <!-- body1 的定义完毕 -->
</Component> <!-- 该组件定义完毕 -->
```

使用须知：

- Component 可以多次使用以定义多个组件，一般若启用接触算法则需要定义多个组件；
- normal_vector_weight 两个组件接触时，接触面公法线方向取为权值大的组件的接触面法向（通常选取刚度相对较大、表面为凸面或者平面的物体的接触面法向作为接触面公法线方向）。若两个组件的权值相同，则接触面法线方向取两个组件接触面法线方向的平均值；

3.6 离散体设置 (Body)

在 MPM3D® 中，提供三种建模方式：参数化建模、逐点输入和读取数据文件方法。可以施加的载荷包括：速度、加速度、简谐激励等。这些均在元素 Body 中设置，该元素为 Component 元素的子元素，是二级元素，具有 5 个属性（参见3.6.1）和如下 8 个子元素：

Geometry: 设置当前物体的几何参数及离散参数，详细描述请见3.6.2;

[InitialVelocity]: 设置当前物体的初始速度，详细描述请见3.6.4;

[PrescribedVelocity]: 设置当前物体的常速度值，详细描述请见3.6.5;

[PrescribedAcceleration]: 设置施加在当前物体上的时间历程载荷，详细描述请见3.6.6;

[HarmExcit]: 设置施加在当前物体上的谐激励载荷，详细描述请见3.6.7;

[ConstrainRigidPosition]: 设置当前刚体的运动规律，详细描述请见3.6.8;

[AdaptiveSplit]: 设置当前物体自适应分裂的因子，详细描述请见3.6.9;

[CountFragDp]: 设置当前物体破碎后进行碎片统计，详细描述请见3.6.10;

[LocalBoundaryCond]: 设置当前物体的边界条件（适用于 FEM），详细描述请见3.6.12;

使用规范：

```
<Body name="body0" ... >  <!-- 定义该组件的一个 body，并命名为 body0 -->
.....
</Body>                    <!-- body0 的定义完毕 -->
```

使用须知：

- Body 元素可以多次使用以定义多个离散体。
- 同一个物体可以通过定义多个 Body 拼接组成，若开启接触算法，则这些 body 必须位于同一个组件下。

3.6.1 Body 基本属性

物体的基本属性包括：名称定义、材料类型、当前密度值、几何体类型及建模载入的工作平面，相应的关键字如下：

name: 指定该离散体的名称；

material: 指定该离散体采用的材料名称，该材料模型的名称为数据文件之前已经建好的材料模型名称；

[density]: 指定离散体的当前密度，此密度值若与所采用材料的密度值不一致则说明当前物体处于受压或者膨胀状态；

type: 指定当前物体的几何体类型，如长方体、圆柱体、球体等，则子元素 Geometry 中的属性对应于指定的类型；

[workPlane]: 指定当前物体建模时所采用工作平面的名称。

使用须知:

- 目前程序中支持的几何体建模类型有 Point、Block、Sphere、Cylinder、Ogive、PointForBar、LineForBar、NettyForBar、PointForMembrane、RectangluarForMembrane、CylinderForMembrane、PointForFEM、BlockForFEM 等，详见3.6.2节；
- 程序支持通过 body 间的 bool 运算来生成新的 body，这类定义为 Bool 类型的 body，详见3.6.3节；
- density 主要用来施加预压（拉）条件，如果此值小于该物体采用的材料密度则说明物体膨胀，如果此值大于物体采用材料的密度则说明物体受压。在开始计算之前，程序会先调用状态方程进行该物体的压力更新。

3.6.2 Geometry 设置

Geometry 子元素用来定义建模所需的各个参数：几何参数及离散参数。目前，在 MPM3D[®] 中，已经具有如下的建模类型：

Point、Block、Sphere、Cylinder、Ogive、PointForBar、LineForBar、NettyForBar、PointForMembrane、RectangluarForMembrane、CylinderForMembrane、PointForFEM、BlockForFEM。

下面一一介绍各个类型所对应的 Geometry 的属性。

3.6.2.1 Point

Point 类型利用一组离散质点生成物体，具体有两种方式：逐个质点信息写入和读取数据文件。

对于方式 1，**Geometry** 具有如下的属性：

Point: 用于定义物体中的一个质点，它具有以下属性：

mass: 质点的质量；

x: 质点的 x 坐标；

y: 质点的 y 坐标；

z: 质点的 z 坐标；

对于方式 2，**Geometry** 具有如下的属性：

file: 指定包含几何体离散后的物质点信息的文件名称，MPM3D[®] 将自动读入当前 xmp 输入文件所在路径下的该文件中的质点信息。

使用规范:

方式 1:

```
<Body ...>
  <Geometry >
    <Point mass="?" x="?" y="?" z="?" />
    <Point mass="?" x="?" y="?" z="?" />
    .....
    <Point mass="?" x="?" y="?" z="?" />
  </Geometry>
</Body>
```

方式 2:

```
<Body ...>
  <Geometry file="*.txt" />
</Body>
```

使用须知:

- 两种方式不可在同一个 body 中同时使用;
- 对于第 2 种方式, 文件中的数据组织方式为: 依次给出质量、x 坐标、y 坐标、z 坐标具体值, 中间用空格间隔;

3.6.2.2 Block

Block 类型用来生成一长方体模型, 如图3.1, 质点按照指定的间距正交排列。针对该几何体类型, Geometry 元素具有如下属性:

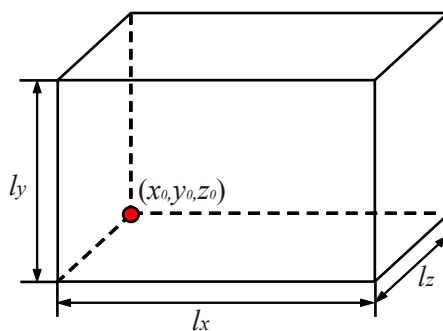


图 3.1: Block 示意图

dp: 质点间距;

x0 y0 z0: 该长方体的基点坐标;

lx ly lz: 三个坐标轴方向上的物体尺寸;

使用范例:

```
<Geometry x0="0" y0="0" z0="0"
  lx="5" ly="10" lz="20"
  dp="0.25" />
```

3.6.2.3 Sphere

Sphere 类型用来生成一球体或球壳，如图3.2，质点按照指定的间距和离散方式排列。针对该几何体类型，Geometry 元素具有如下属性：

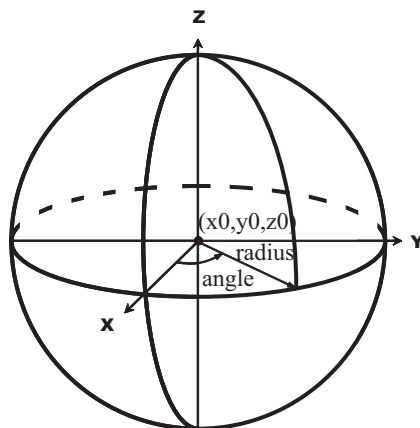


图 3.2: Sphere 示意图

dp: 质点间距；

x0、y0、z0: 该球体的球心坐标；

Outer_Radius: 圆球半径（球壳外径）；

[Inner_Radius]: 圆球壳内半径，默认为 0，内半径为 0 即生成圆球；

angle: xoz 面（0° 经线面）绕 Z 轴旋转的角度；

[half]: 是否启用生成第一卦限内的 1/8 球；

[discretization]: 离散方式，默认取值为 0（正交方式离散）；

使用范例：

```
<Geometry x0="0" y0="0" z0="0"
  Outer_Radius="5"
  angle="90" half="1"
  dp="0.25" discretization="0" />
```

使用须知：

- angle: 当 angle=90 时，生成 1/4 球；当 angle=180 时，生成 1/2 球；当 angle=360 时，生成一个整球。
- half: 只有当 angle=90 时，才可启用该属性，表示是否取该 1/4 球的上部分：half=0 时，生成一个 1/4 球；half=1 时，取该 1/4 球的上半部分，即生成第一卦限内的 1/8 球。
- discretization: bool 类型变量，取值为 0 表示采用正交方式离散；取值为 1 表示采用球坐标离散。

3.6.2.4 Cylinder

Cylinder 类型用来生成一（空心或实心）圆柱体、圆锥或圆台，Z 轴正向为圆柱的主轴方向 (生长方向)，如图3.3。质点按照指定的间距和离散方式排列。

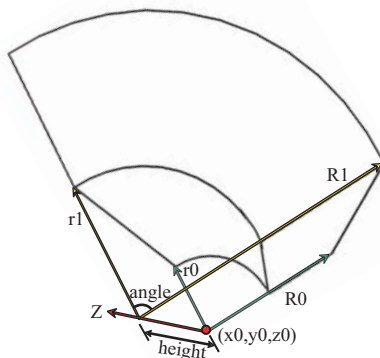


图 3.3: Cylinder 示意图

针对该几何体类型，Geometry 元素具有如下属性：

x0、y0、z0: 几何体的 Z 向的底面中心坐标；

dp_bottom: 底面质点间距；

dp_top: 上端面的质点间距；

Bottom_Inner_Radius: 底面内半径；

Bottom_Outer_Radius: 底面外半径；

Top_Inner_Radius: 上端面内半径；

Top_Outer_Radius: 上端面外半径；

height: 几何体主轴方向的长度；

angle: xoz 面 (0° 经线面) 绕 Z 轴旋转的角度。

[discretization]: 离散方式，默认取值为 0（正交方式离散）；

使用范例：

```
<Geometry x0="0" y0="0" z0="0"
  dp_top="0.5" dp_bottom="0.5"
  Bottom_Outer_Radius="5"
  Bottom_Inner_Radius="0"
  height="25.5"
  Top_Outer_Radius="5"
  Top_Inner_Radius="0"
  discretization="0"
  angle="90" />
```

使用须知:

- `dp_bottom`、`dp_top` 用来指定下端面、顶端的质点间距，沿高度方向（Z 轴正方向）的各层粒子，其间距按等比关系逐层变化。
- `discretization`: bool 类型变量，取值为 0 表示采用正交方式离散；取值为 1 表示采用环向布点方式离散。

3.6.2.5 Ogive

Ogive 类型用来生成一卵形体，Z 方向为主轴方向 (生长方向)，如图3.4，质点按照指定的间距和离散方式排列。

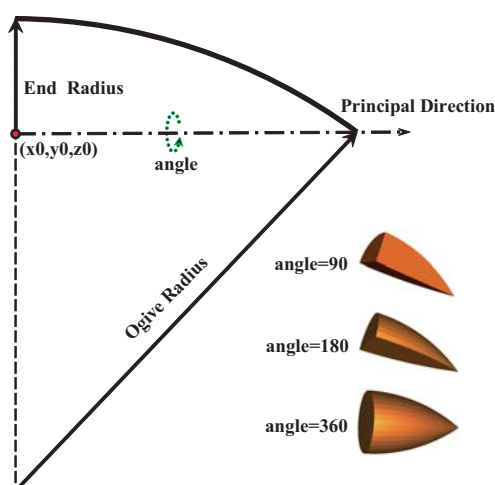


图 3.4: Ogive 示意图

针对该几何体类型，Geometry 元素具有的属性如下：

`x0`、`y0`、`z0`: 卵形体底面中心坐标；

`dp_bottom`: 底面质点间距；

`dp_top`: 上端面的质点间距；

`Ogive_Radius`: 卵形体圆弧半径；

`End_Radius`: 卵形体端部半径；

`angle`: xoz 面（0° 经线面）绕 Z 轴旋转的角度。

`[discretization]`: 离散方式，默认取值为 0（正交方式离散）；

使用范例:

```
<Geometry x0="0" y0="0" z0="0"
  dp_top="0.1" dp_bottom="0.5"
  Ogive_Radius="6" End_Radius="2"
  discretization="0"
  angle="90" />
```

使用须知:

- `dp_bottom`、`dp_top` 用来指定下端、顶端的质点间距，沿高度方向（Z 轴正方向）的各层粒子，其间距按等比关系逐层变化。
- `discretization`: bool 类型变量，取值为 0 表示采用正交方式离散；取值为 1 表示采用环向布点方式离散。

3.6.2.6 PointForBar

`PointForBar` 类型用来生成一个杆离散体，类似 `Point` 类型建模。如同 `Point` 建模方式，`PointForBar` 有两种建立方式：逐个结点和单元输入；读取结点和单元数据文件。

针对方法 1，`Geometry` 具有如下的子元素：

Point: 输入结点信息，对应于方式 1，具有如下 4 个属性：

node_id: 结点编号，从 1 开始；

x,y,z: 结点坐标；

Element: 输入单元信息，对应于方式 1，具有如下 4 个属性：

element_id: 单元编号，从 1 开始；

id0: 该单元左端结点编号 ID；

id1: 该单元右端结点编号 ID；

sectional_area: 该单元的横截面积；

针对方法 2，`Geometry` 具有如下的属性：

nb_nodes: 该离散体的总的结点数；

nb_elements: 该离散体总的单元数；

file: 数据文件名称

使用规范:**建模方法 1**

```
<Geometry >
  <Point node_id="?" x="?" y="?" z="?" />
  ...
  <Point node_id="?" x="?" y="?" z="?" />

  <Element element_id="?" id0="?" id1="?" />
  <Element element_id="?" id0="?" id1="?" />
  ...
  <Element element_id="?" id0="?" id1="?" />
</Geometry>
```


建模方法 2

```
<Geometry nb_nodes="?" nb_elements="?" file="?" />
```

使用须知:

- 两种方式不可用于同一 Body 中;
- file 为存储结点和单元数据的文件名称, 程序会从该文件顺序读取结点数据单元数据;
- 上述所说右端结点坐标需在 x, y, z 轴上投影大于左端结点坐标的投影值;
- 不建议使用工作平面;
- 该 body 采用的材料模型中若使用失效模型, 则必须在失效模型里面启用关键字`erod`。

3.6.2.7 LineForBar

LineForBar 建模, 利用所给的参数自动生成线形排布无交叉离散的杆, 各杆以相同的单元长度进行划分, 并具有相同的总长和横截面积。针对该建模方式, Geometry 元素具有如下的属性:

sectional_area: 设置杆的横截面积;

element_size: 设置杆单元的长度;

nb_lines: 指定线条总数;

extend_direction: 指定杆的生长方向, 取值范围为 0, 1, 2;

expand_direction: 指定杆的排列方向, 取值范围为 0, 1, 2, 但不可与 `extend_direction` 取相同值;

length: 指定杆的长度;

x0, y0, z0: 指定起始杆的起点坐标;

internal: 指定杆的排列间距, 在此采用均匀布置;

使用须知:

- 起始杆是指杆排列方向上的第一根杆;
- 不建议使用工作平面;
- 该 body 采用的材料模型中若使用失效模型, 则必须在失效模型里面启用关键字`erod`。

3.6.2.8 NettyForBar

NettyForBar 类型，用于自动生成网状桁架结构，各个单元具有统一的横截面积，并支持在两个方向的复制以形成阵列式桁架布置。针对该模型，Geometry 具有以下属性：

sectional_area 设置杆的横截面积；

x0, y0, z0：指定整个桁架布置的基点，即起始点；

element_size_x：指定 x 方向单元划分的尺寸；

element_size_y：指定 y 方向单元划分的尺寸；

element_size_z：指定 z 方向层间单元划分的尺寸，若为 0 则层间不连接；

nb_lines_x：设置平行于 x 坐标轴的条数；

nb_lines_y：设置平行于 y 坐标轴的条数；

nb_layers_z：设置 z 向布置的层数；

internal_x、internal_y、internal_z：设置三个方向上布线的间距，在一个平面上是等间距布线；

[line_direction]：设置阵列布置时行的方向；

[column_direction]：设置阵列布置时列的方向；

[column_nb_copy]：设置在 line_direction 上拷贝的份数；

[column_interval]：设置列间距；

[line_nb_copy]：设置在 column_direction 上拷贝的行数；

[line_interval]：设置行间距；

使用规范：

```
<Geometry x0="0" y0="0" z0="0"
  sectional_area="?"
  element_size_z="?" element_size_y="?" element_size_x="?"
  nb_lines_x="?" nb_lines_y="?" nb_layers_z="?"
  internal_x="?" internal_y="?" internal_z="?"
  line_direction="?" column_nb_copy="?" column_interval="?"
/>
```

使用须知：

- 不建议使用工作平面建模；
- 该 body 采用的材料模型中若使用失效模型，则必须在失效模型里面启用关键字`erod`；
- 在建立阵列模型时，首先使用 `column_nb_copy`，此处输入值应为实际数目减一（因为这里关键字采用了 `copy` 的含意），其次使用 `line_nb_copy`。

3.6.2.9 PointForMembrane

使用规范:

```
<Geometry />
```

使用须知:

-

3.6.2.10 RectangluarForMembrane

使用规范:

```
<Geometry />
```

使用须知:

-

3.6.2.11 CylinderForMembrane

使用规范:

```
<Geometry />
```

使用须知:

-

3.6.2.12 PointForFEM

PointForFEM 类型，针对六面体单元划分物体。该建模类型如同 Point，具体可分两种方式：逐结点逐单元输入、读取数据文件。

针对方法 1，Geometry 具有如下子元素:

Point: 输入结点信息，对应于方式 1，具有如下 4 个属性:

node_id: 结点编号，从 1 开始;

x,y,z: 结点坐标;

Element: 输入单元信息，对应于方式 1，具有如下 4 个属性:

element_id: 单元编号，从 1 开始;

id1、id2、id3、id4、id5、id6、id7、id8: 该单元八个结点编号 ID，按照逆时针排序;

针对方法 2，Geometry 具有如下的属性:

nb_nodes: 该离散体的总的结点数;

nb_elements: 该离散体总的单元数;

file: 数据文件名称

使用规范:

```
<Body ...>
  <Geometry >
    <Point node_id="?" x="?" y="?" z="?" />
    ...
    <Point node_id="?" x="?" y="?" z="?" />

    <Element element_id="?" id1="?" id2="?" id3="?" id4="?"
                                id5="?" id6="?" id7="?" id8="?" />
    <Element element_id="?" id1="?" id2="?" id3="?" id4="?"
                                id5="?" id6="?" id7="?" id8="?" />
    ...
    <Element element_id="?" id1="?" id2="?" id3="?" id4="?"
                                id5="?" id6="?" id7="?" id8="?" />

  </Geometry>
</Body>
<Body ...>
  <Geometry nb_nodes="?" nb_elements="?" file="?" />
</Body>
```

使用须知:

- 单元的结点顺序为逆时针。

使用须知:

- 两种方式不可在同一个 body 中同时使用;
- 采用第二种方法时, 数据组织方式如同第一种方法, 只是不需要关键字;
- 结点的编号从 1 开始, 单元信息中用到的结点编号为结点的全局编号;
- 建议单元的尺寸同背景网格的单元尺寸一致。

3.6.2.13 BlockForFEM

BlockForFEM 类型用来生成六面体单元划分的物体, 针对该几何体类型, Geometry 元素具有的属性同 Block 建模类型一致, 详见[3.6.2.2](#)

3.6.3 Bool 运算

当`type="Bool"`时，可通过进行 bool 运算来生成复杂构型的物体，目前程序仅支持 `subtract`(减)运算。由于物质点法的特点，只需两个物体靠在一起且不启用接触时等同于进行了加运算，程序不单独实现加运算功能。Bool 类型的 body 不具备 Geometry 元素，`Body` 的基本属性中增加了如下元素：

BoolType: bool 运算的类型，仅支持减操作，即值应为 `subtract`；

BoolBodyA: 被执行减法操作的 body 名称；

BoolBodyB: 进行减法操作的 body 名称；

以上三个元素定义的 bool 操作即为：`BoolBodyA-BoolBodyB`。具体使用 Bool 类型 body 时需先生成 `BoolBodyA`、`BoolBodyB`，Bool 类型的 body 生成后，程序会删除 `BoolBodyA` 和 `BoolBodyB`。

使用范例：

```
<Body name="Block1" material="?" type="Block" ForBoolBody="1">
  <Geometry dp="1" x0="20" y0="0" z0="25" lx="80" ly="20" lz="10"/>
</Body>
<Body name="Block2" material="?" type="Block" ForBoolBody="1">
  <Geometry dp="1" x0="16" y0="0" z0="20" lx="88" ly="25" lz="20"/>
</Body>
<Body name="?" material="?" type="Bool"
  BoolType="subtract" BoolBodyA="Block2" BoolBodyB="Block1">
</Body>
```

以上范例通过两个 Block 类型的 body，通过 `Block2-Block1` 生成了新的 body，建议将 `Block1` 和 `Block2` 的粒子间距设置一致，且注意需在参与 bool 运算的两个 body 基本属性中增加元素：

ForBoolBody: 值为 1 时即标记为做 bool 运算的物体，最后计算时该 body 会被删除。

使用须知：

- Bool 类型物体只能通过物质点模型间的运算生成，也就是说仅支持 Point, Block, Sphere, Cylinder, Ogive 类型的物体。

3.6.4 初始速度设置 (InitialVelocity)

[InitialVelocity] 子元素用于设置当前物体的初始速度，具有如下属性：

vx: 设置物体在 x 坐标方向的初始速度分量，若为负值表示沿 x 轴负向运动；

vy: 设置物体在 y 坐标方向的初始速度分量，若为负值表示沿 y 轴负向运动；

vz: 设置物体在 z 坐标方向的初始速度分量，若为负值表示沿 z 轴负向运动；

使用规范：

```
<InitialVelocity vx="?" vy="?" vz="?" />
```

3.6.5 常速度设置 (PrescribedVelocity)

[PrescribedVelocity] 子元素用于设置当前物体的常速度值，在任何时刻该物体均以该指定的常速度进行运动。如果对该物体指定的常速度值为 0，则该物体相当于固定的刚体。该元素具有如下属性：

vx: 设置物体在 x 坐标方向的常速度分量，若为负值表示沿 x 轴负向运动；

vy: 设置物体在 y 坐标方向的常速度分量，若为负值表示沿 y 轴负向运动；

vz: 设置物体在 z 坐标方向的常速度分量，若为负值表示沿 z 轴负向运动；

使用规范：

```
<PrescribedVelocity vx="?" vy="?" vz="?" />
```

3.6.6 施加时间历程载荷 (PrescribedAcceleration)

[PrescribedAcceleration] 子元素用于设置载荷：对当前 body 施加随时间变化的载荷 $f_i = A_i \times a_i$ 。在 MPM3D[®] 中，载荷是以施加加速度的形式实现的。该元素具有 6 个属性及一个子元素，这 6 个属性用来指定在三个坐标轴方向上的加速度及角加速度的幅值 A ，子元素用于给出在指定的时刻各个加速度的系数 a ，该系数乘以幅值作为程序使用的加速度值。具体介绍如下：

属性：

ax: 设置物体在 x 坐标方向的加速度幅值，若为负值表示沿 x 轴负向；

ay: 设置物体在 y 坐标方向的加速度幅值，若为负值表示沿 y 轴负向；

az: 设置物体在 z 坐标方向的加速度幅值，若为负值表示沿 z 轴负向；

arx: 设置物体在 x 坐标方向的角加速度幅值，若为负值表示沿 x 轴负向；

ary: 设置物体在 y 坐标方向的角加速度幅值，若为负值表示沿 y 轴负向；

arz: 设置物体在 z 坐标方向的角加速度幅值，若为负值表示沿 z 轴负向；

子元素：

Coefficient: 用来定义某时刻各个加速度乘以的系数；该元素具有以下 7 个属性：

time: 设置时间；

cx: 设置 ax 的系数；

cy: 设置 ay 的系数；

cz: 设置 az 的系数；

crx: 设置 arx 的系数；

cry: 设置 ary 的系数；

crz: 设置 arz 的系数；

使用规范：

```
<PrescribedAcceleration ax="?" ay="?" az="?" arx="?" ary="?" arz="?" >
  <Coefficient time="?" cx="?" cy="?" cz="?" crx="?" cry="?" crz="?" />
  .....
  <Coefficient time="?" cx="?" cy="?" cz="?" crx="?" cry="?" crz="?" />
</PrescribedAcceleration>
```

使用须知：

- 该时间历程的载荷曲线是通过离散的点进行描述的，对于相邻的离散点之间的函数值是通过线性插值获得，因此每个时间步都可以得到相应的时间函数值。对于最后一个时间点之后的时间，函数值均取 0，并给出提示；
- Coefficient 可多次使用以设置各个指定时刻各加速度对应的系数；
- 该类载荷不能与谐激励载荷在一个物体上同时施加；
- 角加速度仅对刚体有效。

3.6.7 谐激励 (HarmExcit)

[HarmExcit] 子元素用来设置谐激励载荷，对当前 body 施加载荷的函数形式如下：

$$f = A \sin(\omega t + \theta)$$

并可实现控制坐标轴三个方向载荷的幅值、频率、相位角和作用时间。该元素具有四个子元素，每个元素均具有三个属性，具体介绍如下：

子元素：

A: 设置施加于 **x**、**y**、**z** 三个方向上的谐激励幅值；

Omega: 设置施加于 **x**、**y**、**z** 三个方向上的谐激励的 ω 值；

Theta: 设置施加于 **x**、**y**、**z** 三个方向上的谐激励的 θ 值；

EndTime: 设置施加于 x、y、z 三个方向上的谐激励作用的停止时间;

每个元素具有的属性是 x、y、z，分别对应 x 轴、y 轴、z 轴方向的分量。

使用规范:

```
<HarmExcit>
  <A ax="0" ay="0" az="100000" />
  <Omega x="?" y="?" z="?" />
  <Theta x="?" y="?" z="?" />
  <EndTime x="?" y="?" z="?" />
</HarmExcit>
```

使用须知:

- 施加的载荷具有加速度的量纲;
- 在一个物体只允许使用一次;
- 不能在同一个物体上同时施加谐激励载荷和时间历程载荷施加。

3.6.8 指定刚体运动规律 (ConstrainRigidPosition)

[ConstrainRigidPosition] 子元素用来设置刚体是否始终按照指定的速度和载荷运动，当刚体按照指定的运动规律运动时，若与其它物体碰撞则刚体不受影响，其它物体变形和运动则会受到刚体影响。具有属性 value，取值为 0 表示否，取值为 1 表示是。

使用规范:

```
<ConstrainRigidPosition value="1" />
```

3.6.9 自适应因子 (AdaptiveSplit)

[AdaptiveSplit] 子元素用来设置自适应分裂因子，具有属性 value，取值范围为 0 至 1。

使用规范:

```
<AdaptiveSplit value="0.5" />
```

使用须知:

- 使用于易产生数值断裂的问题中;
- 一般建议自适应因子取 0.5 ~ 0.9，当质点变形后尺寸 $L_p > \alpha d_c$ 时，就将其分裂，其中 d_c 是背景网格的尺寸;
- 目前程序仅支持在三个坐标方向上的分裂。

3.6.10 碎片统计 (CountFragDp)

[CountFragDp] 子元素用来设置对该 body 进行碎片统计，具有属性 value，取值为此 body 的粒子间距。仅支持对一个 body 进行此设置，不支持有限元模型。

3.6.11 计算与输出控制 (BodyContrl)

[BodyContrl] 子元素用来设置 body 的状态，包含两个属性，分别是 Deactive 和 NoOutput，其中 Deactive 用于控制 body 是否参与运算，如果值为 0 则表示参与运算，为 1 则表示不参与运算，不参与运算的 body 不会进行输出；NoOutput 的用于控制 body 是否输出，如果值为 0 则表示输出，为 1 则表示不输出。

使用规范：

```
<BodyContrl Deactive="0" NoOutput="1" />
```

3.6.12 有限元离散体的边界条件 (LocalBoundaryCond)

[LocalBoundaryCond] 子元素用来设置当前 body 的边界条件，通过定义两个平面，将位于平面内的所有结点施加相应的边界条件。该子元素包含 4 个属性，介绍如下：

FixedDirection: 设置约束施加的方向。取值为 0 表示约束 x 向的位移；1 表示约束 y 向的位移；2 表示约束 z 向的位移；3 表示约束 x、y 和 z 向的位移；

Normal: 设置平面的法线方向；

Min: 设置下平面在与其法线平行的轴上的交点坐标值；

Max: 设置上平面在与其法线平行的轴上的交点坐标值；

使用规范：

```
<LocalBoundaryCond FixedDirection="?" Normal="0" Min="1" Max="5" />
```

使用须知：

- 该元素可同时对位于平面间的单元结点施加相同的边界条件；
- 建议两个平面间的距离设置以仅包含一层单元结点为宜；
- 目前仅能施加平移自由度的约束。

3.7 起爆点（面）设置 (Detonation)

Detonation 元素为可选一级元素，用来定义起爆点和/或起爆面。Detonation 元素具有子元素Item，用于定义一个起爆点或起爆面。子元素Item 具有以下属性：

time: 设置起爆时间；

type: 设置起爆点（面）的类型。type="point" 表示定义起爆点，type="plane" 表示定义起爆面；若 type="point"，则用以下属性来定义起爆点：

x,y,z: 用来设置起爆点在全局坐标系中的位置；

若 type=plane，则用以下属性来定义起爆面：

normal: 设置起爆面的法线，取值为 0、1、2，分别对应于 x、y 和 z 轴；

location: 设置起爆面在与其法线平行的坐标轴上的位置；

left: 设置起爆面左侧起始坐标值；

right: 设置起爆面右侧终止坐标值；

bottom: 设置起爆面底部起始坐标值；

top: 设置起爆面上部终止坐标值；

使用规范：

```
<Detonation>
  <Item type="point" time="0" x="?" y="?" z="?" />  <!-- 定义起爆点 -->

  <Item type="plane" time="0" normal="2" location="0.0"
    left="0" right="110" bottom="0.0" top="110.0" />
    <!-- 定义起爆面 -->
</Detonation>
```

使用须知：

- Item 可并行出现，以定义多个起爆点（面）。
- 若定义了多个起爆点（面），则炸药各点的起爆时间以距离最近的起爆点来计算其起爆时间；
- 起爆面是通过指定该面一对角点在该面所在坐标平面内投影的坐标值定义的，即 (left,bottom)、(right,top)。
- 起爆面左侧与右侧的说明：法线选为 x 时，平面的左侧与右侧垂直于 y 轴；法线选为 y 轴时，平面的左侧与右侧垂直于 x 轴；法线选为 z 轴时，平面的左侧与右侧垂直于 x 轴。

3.8 背景网格设置 (Grid)

Grid 元素为一级子元素，用于设置背景网格参数，主要包含网格基本参数、移动网格和动态网格的设置等。

典型输入文件片段：

```
<Grid mass_cutoff="0" gimp="0"> <!-- 定义背景网格及质量截断和 GIMP 开启与否 -->
  <Cell type="regular"> <!-- 定义单元类型; -->
    <XMin value="0" boundary="2"/>
    <XMax value="11.4" boundary="0"/>
    <!-- 定义背景网格区域 x 向大小及相应的边界条件; -->
    <YMin value="0" boundary="2"/>
    <YMax value="11.4" boundary="0"/>
    <!-- 定义背景网格区域 y 向大小及相应的边界条件; -->
    <ZMin value="0" boundary="2"/>
    <ZMax value="26.6" boundary="0"/>
    <!-- 定义背景网格区域 z 向大小及相应的边界条件; -->
    <DCell dx="0.76" dy="0.76" dz="0.76"/>
    <!-- 定义背景网格在三个方向上的单元尺寸; -->
  </Cell> <!-- 单元定义完毕 -->
</Grid> <!-- 背景网格定义完毕 -->
```

3.8.1 基本设置

Grid 元素具有以下可选属性：

[mass_cutoff]: 设置最小结点质量截断系数 c ，缺省值为系统所能表示的最小误差 DBL_EPSILON 或 FLT_EPSILON。

[gimp]: GIMP (Generalized Interpolation Material Point) 算法^[13] 选项。gimp="1" 时表示采用 GIMP 算法，gimp="0" 时表示不采用 GIMP 算法。

使用规范：

```
<Grid mass_cutoff="?" gimp="?">
.....
</Grid>
```

使用须知：

- 截断质量依据 $M_c = c\bar{\rho}(d_c)^3$ 计算，其中 $\bar{\rho}$ 是各组材料密度的平均值。当结点质量小于 M_c 时，这个结点将跳过不计算，以防止在计算结点动量时除以过小数值。如果跳过的结点太多计算也会出现问题，所以如有必要，可将此值改为更小；
- gimp 具体算法参见理论手册。在计算激波管、爆轰波传播以及其他比较关心应力或压力结果的问题时推荐使用；
- 当使用 gimp 时，对边界条件为非自由边界条件时，背景网格应该比实际的尺寸向外拓展一个网格的长度。

3.8.2 网格基本参数设置 (Cell)

Grid 元素具有子元素 Cell，用以设置均匀规则网格区域、边界条件以及网格单元尺寸等参数。元素 Cell 具有以下属性：

type: 设置背景网格类型，共有 regular、nonuniform 两种选择。type="regular" 对应正交均匀网格，type="nonuniform" 对应正交非均匀网格。不同类型的元素 Cell 具有不同的子元素，下面分别讨论。

3.8.2.1 正交均匀网格参数设置

对于正交均匀网格 (即 type="regular")，背景网格区域为一立方体 $[x_0, x_1] \times [y_0, y_1] \times [z_0, z_1]$ ，网格在三个方向上均匀分布，三个方向上的网格单元尺寸分别为 d_x , d_y 和 d_z 。

元素 Cell 具有以下子元素：

XMin: 设置背景网格在 $x = x_0$ 处的边界面参数，其属性 value 设置 x_0 的值，属性 boundary 设置该边界面的边界条件，可设为 (0/1/2/3/4)，分别表示：

boundary="0"-自由边界面；

boundary="1"-固定边界面，约束边界结点的所有自由度；

boundary="2"-对称边界面，约束边界结点的法向运动，另外两个方向自由；

boundary="3"-透射边界面，即采用无反射边界条件；

boundary="4"-刚性面，边界结点在法向上不能穿透边界，其余方向自由。

XMax: 设置背景网格在 $x = x_1$ 处的边界面参数，具有属性 value 和 boundary，分别设置 x_1 的值和边界条件。

YMin: 设置背景网格在 $y = y_0$ 处的边界面参数，具有属性 value 和 boundary，分别设置 y_0 的值和边界条件。

YMax: 设置背景网格在 $y = y_1$ 处的边界面参数，具有属性 value 和 boundary，分别设置 y_1 的值和边界条件。

ZMin: 设置背景网格在 $z = z_0$ 处的边界面参数，具有属性 value 和 boundary，分别设置 z_0 的值和边界条件。

ZMax: 设置背景网格在 $z = z_1$ 处的边界面参数，具有属性 value 和 boundary，分别设置 z_1 的值和边界条件。

DCell: 设置网格单元尺寸，具有属性 dx、dy 和 dz，用于分别设置 x 方向、 y 方向和 z 方向的网格单元尺寸 d_x , d_y 和 d_z 。

使用规范：

```
<XMin value=" " boundary=" " />
<XMax value=" " boundary=" " />
<YMin value=" " boundary=" " />
<YMax value=" " boundary=" " />
<ZMin value=" " boundary=" " />
```

```
<XMax value=" " boundary=" " />
<DCell dx=" " dy=" " dz=" " />
```

3.8.2.2 移动网格 (MovingGrid)

移动网格是指在保持网格数不变的前提下,背景网格随着物体的移动而移动,随着物体质点分布区域的变化而变化。若质点飞出背景网格区域,则自动扩大网格结点间距,保证背景网格能够覆盖所有质点。

移动网格由 Cell 的子元素 MovingGrid 设置,具有以下属性:

[enable]: 是否使用移动网格。enable="1" 时表示采用移动网格,enable="0" 时表示不采用。缺省采用固定大小的网格,即 enable="0"。

[consider_failure_particle]: 设置在统计质点所处区域时是否计入失效粒子。若为"1" 则表示计入失效粒子,为"0" 表示不计入失效例子。缺省为不计入失效粒子。

[time_step_factor]: 设置移动网格间隔步数因子 *factor*。考虑到每步都判断是否移动网格要耗费较多时间,所以通过计算预测在多少步之后再移动网格。程序将计算出的间隔步数乘以 $factor \times dt_{scale}$ 所得值作为程序中真正使用的间隔步数。*factor* 缺省值为 0.8。

[x_min]: 设置移动网格的 x 向最小移动边界;

[x_max]: 设置移动网格的 x 向最大移动边界;

[y_min]: 设置移动网格的 y 向最小移动边界;

[y_max]: 设置移动网格的 y 向最大移动边界;

[z_min]: 设置移动网格的 z 向最小移动边界;

[z_max]: 设置移动网格的 z 向最大移动边界。

使用规范:

```
<MovingGrid enable="1"
  consider_failure_particle="0" time_step_factor=" "
  x_min="?" x_max="?" y_min="?" y_max="?" z_min="?" z_max="?" />
```

使用须知:

- 设置移动网格的最大移动区域,可以避免移动网格扩大的范围太广使得精度降低过于严重。缺省为最大、最小浮点数,即网格的移动范围可以无限制。

3.8.3 动态网格 (DynamicCell)

在物质点法中,背景网格覆盖了整个求解区域。一般情况下,大部分网格单元中不包含任何质点,这些单元对计算没有任何贡献。采用动态网格技术后,程序只创建包含有质点的网格单元,可以大幅度地节省内存,提高计算效率。

动态网格由 Grid 元素的子元素 DynamicCell 设置,它具有如下属性:

[enable] : enable="1" 时表示采用动态网格, enable="0" 时表示不采用动态网格。缺省为不采用。

[clear_steps]: 设置清除原有网格和结点实例的时间步数。每间隔一定的时间步就清除原有的网格和节点的实例, 使用时再重新生成, 以便节省内存。缺省的时间步间隔为 10, 若该值设为小于等于 0, 则表示永不清除。

使用规范:

```
<DynamicCell enable="1" clear_steps="10" />
```

3.9 接触选项 (Contact)

Contact 为可选一级元素，用于设置接触算法，只有当存在多个组件时启用。该元素具有以下属性：

enable：是否启用接触算法。取值“0”表示不启用，“1”表示启用。

failure_to_component：是否将失效的粒子作为独立组件。取值“0”表示不启用，“1”表示启用，缺省为不启用。启用后，所有失效粒子将组成编号为 0 的组件，该组件和其他组件的相互作用通过接触算法计算。

auto_normal_vector_weight：是否自动计算各组件接触面法向计算权值。取值“0”表示不启用，“1”表示启用，缺省值为 0。

normal_vector_excluding_failure_particle：设置是否计算有失效质点的组件接触面法向。设为 1 时表示不计算有失效质点的组件的接触法向，除非相接触的两个组件都有失效粒子。缺省设为 0，表示不论组件是否有失效质点均计算其接触法向。

distance_type：设置计算最小接触间距的方法。取值“0”表示不特殊处理，“1”表示计算两物体最近的质点间距，distance_type=“2”表示计算两物体表面的间距。缺省值为 0。因为 distance_type=“2”考虑到了质点的体积，所以比 distance_type=“1”的计算量略大。

min_distance：设置最小接触间距计算系数 *dist*。该系数乘以背景网格间距作为距离的判据，即通过 distance_type=“2”或“3”计算得到的间距若大于该判据，则认为没有发生接触。

contact_time_step：是否根据接触算法修正显式积分的时间步长。取值“0”表示不修正，“1”表示根据接触算法对显式积分时间步长进行修正。缺省值为 0。接触算法将较显著地影响显式积分的临界时间步长，建议启用此选项。

contact_type：选择启用的接触算法。取值“0”表示启用 Pan 的接触算法，“1”表示启用 Bardenhagen 的接触算法，“2”表示启用改进的 Bardenhagen 的接触算法，默认取值为“0”。

record_contact_force：设置是否输出接触力。取值“0”表示不输出，“1”表示输出，默认取值为“0”。

使用规范：

```
<Contact enable="1"
  failure_to_component="0" auto_normal_vector_weight="0"
  distance_type="2"
  normal_vector_excluding_failure_particle="0"
  min_distance="0.01"
  contact_time_step="0" />
```

使用须知

- auto_normal_vector_weight：该方法根据弹性模量来确定权值，对于 Mooney Rivlin 材料，权值为最大，对于其它没有弹性模量的材料则设置为 -32767，对于失效组件（0 号组件）会自动设置为 -32768。

- 在物质点的标准接触算法中，当两个物体对同一个背景网格结点的质量和动量有贡献时，即认为两个物体发生了接触 (对应于 `distance_type=“0”`)，但此时两物体间的距离并不为零，而是小于网格单元尺寸的 2 倍。为了克服这一缺陷，可通过设置最小接触间距系数 *dist* 来判断是否发生接触。当两个物体对同一个背景网格节点的质量和动量有贡献且他们之间的距离小于 *dist* 乘以网格单元尺寸时，才认为两物体发生了接触，否则没有接触。`min_distance` 的缺省值为 0.0，不进行接触间距判断。
- 接触算法简介：接触算法 0，其求解思路为在背景网格初始化后对结点动量进行调整，接触力的计算通过背景网格结点力进行计算，并做为一种结点力累加到原有的结点力上；接触算法 1，其求解思路为假设没有发生接触，在背景网格结点动量更新完成后，进行接触检测，若满足接触条件则依照相应的公式计算接触力并调整结点的动量和结点力；接触算法 2，其求解思路同接触算法 0，区别在于将调整背景网格动量时的动量增量换算成力作为一种接触力并累加到后续计算的接触力上。
- 接触力的三个分量输出到了 `curve` 文件中，即该文件中的最后的三列数据。
- 输出接触力为组件 1 和 2 之间的接触力，即当有 3 个或其以上的组件存在时，程序仅输出组件 1 和 2 之间的接触力。

3.10 求解控制 (Solution)

Solution 为一级元素，主要包括有关求解的相关设置，诸如物理模拟时间、时间步长因子、体积更新方式等，具有三个属性（具体介绍见3.10.1）和以下 9 个子元素：

[EndTime]: 设置物理模拟时间，具体介绍见3.10.2；

[TimeStep]: 设置时间步长因子，具体介绍见3.10.3；

[LimitVelocity]: 设置速度极值限定，具体介绍见3.10.4；

[Volume]: 设置体积更新方式及体积限制等，具体介绍见3.10.5；

[Warn]: 设置计算过程中对非物理现象的警告及处理措施等，具体介绍见3.10.6；

[EnergyFraction]: 设置总能量相对误差分数，具体介绍见3.10.7；

[DynamicRelax]: 设置动力松弛因子，具体介绍见3.10.8；

[Gravity]: 设置加速度场，具体介绍见3.10.9；

[FEMSetting]: 设置有限元求解相关设置，具体介绍见3.10.10；

使用规范：

```
<Solution algorithm="MUSL" near_boundary_stop="0"> <!--定义求解控制元素及程序积分格式 -->
    <TimeStep factor="0.6" const="0" specified="0.0" /> <!--定义时间步长因子-->
    <EndTime value="0.04" /> <!-- 定义物理模拟结束时间-->
</Solution> <!-- 定义求解控制选项完毕-->
```

3.10.1 求解基本属性设置

Solution 基本属性可以定义算法格式和积分格式等，相应的属性如下：

[algorithm]: 设置算法格式，取值为“MUSL”、“USL”和“USF”三种格式，分别对应 MUSL、USL 和 USF 计算格式，缺省为“MUSL”。

[near_boundary_stop]: 设置当粒子接近边界时是否保存重启文件并退出。取值“0”表示禁用此功能“1”表示启用此功能，缺省值为 0。

[Integration]: 指定程序采用的积分方案。取值“expl”表示采用显式积分，“impl”表示采用隐式积分，缺省为“expl”。

使用规范：

```
<Solution algorithm="MUSL" near_boundary_stop="0" Integration="expl">
.....
</Solution>
```

使用须知：

- near_boundary_stop 主要在需要使用状态文件进行重启计算情况下考虑使用；
- 目前隐式积分求解器未完成，暂不可使用。

3.10.2 物理模拟时间 (EndTime)

EndTime 元素设置模拟结束的时间值（由其属性 value 设置）。

使用规范：

```
<EndTime value="?" />
```

3.10.3 时间步长相关设置 (TimeStep)

TimeStep 元素用于设置有关显式积分时间步长计算方法及其时间步长因子，具有以下属性：

[factor]：设置时间步长因子，其取值范围 0 ~ 1，缺省值 0.9。每个时间步的时间步长等于临界时间步长乘以系数 factor。

[const]：定义是否采用固定的时间步长。const="1" 表示采用固定时间步长，同时在各时间步中不再更新声速，此时时间步长等于初始临界时间步长乘以系数 factor；const="0" 表示采用变时间步长，时间步长在每个时间步都进行更新。缺省值为 0，即采用变时间步长；

[specified]：指定具体的时间步长并以此作为程序计算时的固定时间步长，便于程序员测试比较时使用。取值为实数，缺省不使用。

[NotConsiderVisForCp]：控制是否在计算声速考虑人工体积粘性的影响。取值“0”表示考虑，“1”表示不考虑，缺省值为 0。

使用规范：

```
<TimeStep factor="0.6" const="0" specified="0.0"
  NotConsiderVisForCp="1" />
```

使用须知：

- 在实际计算中，当采用变时间步长时，时间步长由下式计算：

$$\Delta t^{n+1} = \text{factor} * \min \{ \Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_N \} \quad (3.63)$$

其中 N 是所有质点的个数， Δt_i 是各个质点的临界时间步长。每个质点的临界时间步长根据 CFL 条件计算， $\Delta t_i = D_c / (C + u_i)$ ，其中 D_c 是背景网格间距， C 是声速， u_i 是质点 i 的速度；

- 当 specified 设置为 0 时表示仍采用变时间步长。

3.10.4 最大速度限制 (LimitVelocity)

LimitVelocity 元素设置最大速度限制值（由其属性 max 设置）。

使用规范：

```
<LimitVelocity max="?" />
```

使用须知:

- 在计算过程中, 个别质点可能会出现数值计算异常, 其速度过大, 进而大大地降低了时间步长。此时可采用此关键字限制质点的最大速度。

3.10.5 有关体积的设置 (Volume)

Volume 元素具有以下属性:

[update_type]: 设置更新质点体积的方式, 可取 0 ~ 4, 缺省值为 “0”。

[erode]: 设置侵蚀体积判据, 如果粒子体积小于 erode 时将其侵蚀 (即删除)。取值为实数。

[min]: 设置质点最小体积修正因子, 修正方式为将质点体积限制在一定范围内。取值为实数, 缺省为不修正。

[max]: 设置质点最大体积修正因子, 修正方式为将质点体积限制在一定范围内。取值为实数, 缺省为不修正。

使用规范:

```
<Volume update_type="0" erode="?" min="?" max="?" />
```

使用须知:

- 质点 p 的体积变化率为

$$\dot{V}_p = V_p \dot{\varepsilon}_{ii} \quad (3.64)$$

上式可改写成

$$\frac{dV_p}{V_p} = d\varepsilon_{iip} \quad (3.65)$$

因此可以有以下体积更新方式:

0: $V_p^{k+1} = V_p^k + \dot{V}_p^k \Delta t = V_p^k (1 + \Delta\varepsilon_{iip}^k)$, 其中 $\Delta\varepsilon_{iip} = \dot{\varepsilon}_{iip} \Delta t = v_{ip,i} \Delta t$ 。这是 MPM3D[®] 的缺省体积更新方式;

1: 计算每一步背景网格的体积变化, 按同样比例更新此网格内质点的体积。不推荐使用此更新方式;

2: 采用式(3.64)的积分形式: $V_p^{k+1} = V_p^k e^{\Delta\varepsilon_{iip}} = V_p^k e^{v_{ip,i} \Delta t}$ 。更新方式 0 实际上是本更新方式的一阶近似。

3: 采用变形梯度张量的行列式来更新: $V_p^{k+1} = |\Delta F_{ijp}^{k+1}| V_p^k$, 其中变形梯度张量增量 $\Delta F_{ijp}^{k+1} = (\delta_{ij} + v_{ip,j} \Delta t)$, 变形梯度张量 $F_{ijp}^{k+1} = \Delta F_{ijp}^{k+1} F_{ijp}^k$ 。

4: 采用累积应变的方式更新: $V_p^{k+1} = V_p^0 (1 + \varepsilon_{11})(1 + \varepsilon_{22})(1 + \varepsilon_{33})$, 其中 V_p^0 为质点的初始体积。

- 慎用 erode、min、max, 仅当程序计算时, 某些质点体积非正常变化导致程序不能进行或者时间步长很小时使用, 当然经过修改后应当不影响整体的求解精度。这些需要用户在使用中总结经验;
- min、max 可能会引起能量不守恒, 用户当慎重使用。

3.10.6 警告与报错输出设置 (Warn)

在程序计算过程中，由于个别质点出现非物理现象诸如负内能、负体积，程序应该终止计算。但是据以往的计算经验，个别质点的非物理现象并不会影响整体的计算精度，因此对这类计算现象采用先输出警告信息，并根据对具体情况采取相应的措施。这便是 Warn 元素的功能。

Warn 元素具有以下属性：

[type]：设置监控的物理量，取值为“ie”、“vol”或“grid”，分别控制输出负内能警告信息、负体积警告信息和质点飞出网格区域警告信息，若同时监控多项则可用 | 间隔列写即可；

[level]：设置警告等级，取值范围为 0、1、2，缺省值为 0。意义如下：

0：每个时间步输出一次警告信息；

1：质点变量一旦满足警告阈值，则发出警告；

2：质点变量一旦满足警告阈值，则报错并终止程序运行。

使用规范：

```
<Warn type="ie|vol|grid" level="0" />
```

3.10.7 能量分数设置 (EnergyFraction)

在程序计算过程中，如果没有质点飞出网格情况下，总能量应该保证不变即守恒，由于数值耗散或者计算误差，总能量会产生合理范围内的变化。若由于计算错误，当总能量的变化量比上总能量超过一定分数后，程序计算结果不可信，此时可终止计算。此分数可由元素 EnergyFraction 设定。EnergyFraction 元素具有以下属性：

[value]：设置能量分数 (Energyfraction)，当总能量的误差超过这一分数时，程序将报错并终止计算。取值为大于 0 的实数，缺省为不启动这一控制选项。

使用规范：

```
<EnergyFraction value="?" />
```

3.10.8 动力松弛因子 (DynamicRelax)

DynamicRelax 元素具有以下属性：

[damping]：设置粘性阻尼系数，取值为实数。

使用规范：

```
<DynamicRelax damping="?" />
```

使用须知：

- 该阻尼是通过计算节点外力时引入与各物质点速度大小成正比方向相反的项来实现，当然也可以直接利用节点的速度来引入。目前该项设置是在所有 body 上统一施加。

3.10.9 加速度设置 (Gravity)

Gravity 元素设置重力加速度，具有以下属性：

ax: 设置坐标轴 x 向加速度值；

ay: 设置坐标轴 y 向加速度值；

az: 设置坐标轴 z 向加速度值；

使用规范：

```
<Gravity ax="?" ay="?" az="?" />
```

使用说明：

- 正值表示加速度方向与相应的坐标轴正向一致，负值表示其方向沿相应的坐标轴负向。

3.10.10 有限元求解设置 (FEMSetting)

该元素用来设置有限元求解部分的参数，具有 2 个属性，三个子元素。两个属性包括：

CoupleFEM_MPM: 控制有限元物质点耦合算法，取值 1 为开启，0 表示不开启，默认取值为 0；

FEMContact: 控制有限元离散体间的接触，取值 1 为开启，0 表示不开启，默认取值为 0。

子元素: [**RigidWall**]

设置刚性墙参数，具有如下三个属性：

RigidnDir: 设置刚性墙的法线方向，取值为 1 表示坐标轴 x 正向，-1 表示负向；2 表示坐标轴 y 向；3 表示坐标轴 z 向；

RigidCoor: 设置刚性墙在与其法线方向平行的坐标轴上的坐标；

子元素: [**Hourglass**]

设置沙漏模态控制参数，具有如下三个属性：

HGMethod: 设置控制沙漏模态的方法。目前支持两种算法：取值为 1 采用标准算法；取值为 2 采用 Flangan-Belytschko 方法；

Qhg: 设置沙漏常数，通常取为 0.05-0.15。

子元素: [**GlobalBoundaryCond**]

设置边界条件，作用域为所有有限元离散体，使用方法同[3.6.12](#)。

使用规范：

```
<FESMSSetting FEMContact="?" CoupleFEM_MPM="?">
  <RigidWall RigidnDir="?" RigidCoor="?" />
  <Hourglass HGMethod="?" Qhg="?" />
  <GlobalBoundaryCond FixedDirection="?" Normal="0" Min="1" Max="5" />
</FEMSetting>
```

使用说明:

- 当采用有限元方法时，必须设置该元素；
- 当采用该设置时，积分格式仅支持 USF；
- 当有物质点离散体与有限元离散体相互作用时应将 CoupleFEM_MPM 值设为 1；
- 当输入文件仅包含有限元离散体并且发生接触时应将 FEMContact 值设为 1；
- RigidnDir 该项参数值为正表示沿坐标轴正向，负值表示沿坐标轴负向。

3.10.11 OpenMP 并行设置 (OpenMP)

OpenMPSetting 元素用于 OpenMP 并行计算设置，具有以下属性：

nthread: 设置需要的线程的数目；

directionofdecomposition: 设置分区的方向；

使用规范:

```
<OpenMPSetting nthread="?" directionofdecomposition="?" />
```

使用说明:

- nthread>0，为整数。
- directionofdecomposition 分别为 0, 1, 2 时表示沿 x, y, z 轴进行分区，OpenMP 并行计算只能沿某一方向进行分区。
- 默认值: nthread=2, directionofdecomposition=0
- OpenMP 并行只适用于标准 MPM，使用 OpenMP 时不能启用 GIMP。
- 由于自适应算法固有的串行性，开启自适应时会影响效率。
- 启用接触算法的时候，网格结点初始化不能够使用 OpenMP 并行，同样会影响效率。

3.11 结果输出控制 (Output)

Output 为一级元素，包括有关结果输出的设置，如控制台监测输出时间间隔、后处理文件类型、后处理观察的物理量等。它具有以下 6 个子元素：

Console: 设置在控制台输出计算状态的间隔等，具有两个属性，具体介绍见3.11.1。

PostProcessing: 设置后处理文件类型、输出时间间隔等，具有多种属性，具体介绍见下3.11.2。

[TimeHistory]: 设置时间历程曲线，具有一个子元素和定义物理量名称的属性 var，具体介绍见3.11.3。

[GridLineResults]: 定义一条直线并输出物理量沿该直线上的变化，具有多个属性，具体介绍见3.11.4。

[Restart]: 定义状态文件输出时间间隔，具有属性 time_interval，用来定义输出时间间隔，具体介绍见??。

[Statistics]: 统计内存和实际网格使用量，具体介绍见3.11.7。

使用规范：

```
<Output>                                <!-- 定义输出控制元素 -->
  <Console print_time="1.0e-3"
    print_momentum="0" />                <!-- 定义计算状态的时间步长 -->
  <PostProcessing h5part="0" vtk_data="1" <!-- 定义后处理输出文件类型 -->
    time_interval="1.0e-3"              <!-- 输出后处理文件的时间步长 -->
    var="damg|trial|epf|fail" />        <!-- 定义在后处理中观察的物理量 -->
</Output>                                <!-- 输出控制定义完毕 -->
```

3.11.1 控制台监测设置 (Console)

Console 子元素具有以下属性：

print_time: 设置控制台报告计算状态时间间隔。

[print_momentum]: 设置在控制台是否报告动量状态，取值“0”表示不报告，“1”表示报告。

使用规范：

```
<Console print_time="1.0e-3"
  print_momentum="0" />                <!-- 定义计算状态的时间步长 -->
```

使用须知：

- 控制台监测内容默认有当前时间、当前时间步长数、时间步长、总动能和总内能。

3.11.2 后处理文件设置 (PostProcessing)

PostProcessing 元素具有以下属性：

[h5part]: 输出 h5part 格式的数据文件, 可用 ParaView 读取。取值为“0”表示不输出该格式的后处理文件, “1”表示输出。

[vtk_data]: 输出 vtk 格式的数据文件, 取值为“0”表示不输出该格式的后处理文件, “1”表示每一个结果文件输出步产生一个 vtu 文件, 文件中包含各个 Body 的信息, 文件命名方式为: “输入文件名称_当前时间步数.vtu”, 取值为“2”表示每一个结果文件输出步按照 Body 依次输出多个 vtu 文件, 每个文件包含一个 Body 的信息, 文件命名方式为: “输入文件名称_Body 名称_当前时间步数.vtu”, 后缀为 vtu 的输出文件集中放置在当前目录下的“文件名称_vtu”子目录下。

[tecplot]: 输出文本格式的数据文件, 可用 Tecplot 读取。取值为“0”表示不输出该格式的后处理文件, “1”表示输出。

[cellresult]: 输出携带物理量的欧拉背景网格, 可用 Tecplot 读取。

time_interval: 定义输出后处理文件的时间间隔。

[OutGridData]: 输出背景网格的信息到 vtk 格式的数据文件中, 每一个结果文件输出步产生一个 vtu 文件, 文件命名方式为输入文件名称 + _cell_ + 当前时间步数 + 后缀.vtu, 可用 ParaView 读取。取值为 0 时不输出, 取值为 1 时仅输出网格结点的坐标信息, 取值为 2 时将质点的物理量映射到网格结点上输出, 默认取值为 0。

var: 设置在后处理文件中要观察的物理量, 各物理量之间用竖线隔开, 可供选择输出的变量见表 3.1。

[StaFragSize]: 输出碎片统计结果到文本格式的数据文件, 可用 Tecplot 读取。取值为 0 表示不输出该后处理文件, 取值为 1 表示输出。默认不输出。此关键字需和 3.6.10 的 CountFragDp 配合使用。

[StaFragTimeInterval]: 设置进行碎片统计时输出数据文件的时间间隔, 默认采用属性 time_interval 的值。

使用规范:

```
<PostProcessing
  h5art="1"
  vtk_data="0"
  time_interval="?"
  var="seqv|pres|cp" />
```

使用须知:

- **tecplot**、**h5part** 输出格式不支持杂交单元输出, 且该类型的结果文件为一个。
- **cellresult** 指定的输出格式一般会产生较大的数据文件, 不易进行高效的后处理, 不建议使用。
- 各处理文件中使用的物理量名称一致。

3.11.3 时间历程曲线设置 (TimeHistory)

TimeHistory 元素具有以下属性:

var: 设置观察的物理量名称, 各个物理量之间用竖线隔开, 可供选择输出的变量见表3.1;

TimeHistory 具有以下子元素:

[Particle]: 定义质点位置信息, 该关键字具有三个属性, 分别为 x、y、z, 用来定义观察点的在全局坐标系三个方向上的坐标。程序将记录初始时刻距离此位置最近质点的物理量时程曲线。

[Point]: 定义空间观察点位置信息, 该关键字具有三个属性, 分别为 x、y、z, 用来定义观察点的在全局坐标系三个方向上的坐标。程序将记录此空间点的物理量时程曲线。

使用规范:

```
<TimeHistory var="pres|seqv">
  <Particle x="?" y="?" z="?" />
  <Point x="?" y="?" z="?" />
</TimeHistory>
```

使用须知:

- 指定观察点坐标, 程序将自动搜索距离该指定点最近的质点, 作为最终观察点。如果指定点和所有质点的距离都过大, 则缺省的点为第一个 body 的第一质点;
- Particle, Point 关键字可在同一个 TimeHistory 元素中定义;
- 可设置多个 TimeHistory 元素。

3.11.4 输出物理量沿直线分布设置 (GridLineResults)

该元素用于控制输出某一条指定直线上 (相应的背景网格结点) 上的物理量 (密度、压力、比内能和沿该直线方向的速度) 值, 生成 Jobname_profile.dat 文件, 具有以下属性:

normal: 定义直线的方向, 取值范围为 0、1、2;

x, y: 定义与该直线垂直的平面上的坐标, 用于直线定位;

使用规范:

```
<GridLineResults normal="0" x="0" y="0">
```

使用须知:

- 最终输出的直线为距所定义直线最近的背景网格结点所连成的直线。
- 输出的时间间隔同输出后处理文件的时间间隔。
- 目前仅支持定义与全局坐标轴平行的直线, 且该元素只能定义一次。
- 不能自定义输出的物理量类型。
- 该元素仅在静态网格中使用。如果使用动态网格计算, 则自动取消该元素的定义。
- x, y 的取值顺序可通过如下法则给出: 当选定方向后把 (Globalx, Globaly, Globalz) 相应的坐标拿掉, 则对应定义用的 x 和 y。如若选 Globaly 为直线方向则 Globalx 对应 x, Globalz 对应 y。

3.11.5 FEM 输出物理量沿直线分布设置 (FEMProfileResults)

该元素用于控制输出某一条指定直线上（相应的 FEM 单元结点）上的物理量（密度、和沿该直线方向的速度）值，生成 Jobname_FEMprofile.dat 文件，具有以下属性：

normal: 定义直线的方向，取值范围为 0、1、2；

x, y: 定义与该直线垂直的平面上的坐标，用于直线定位；

使用规范：

```
<FEMProfileResults normal="0" x="0" y="0">
```

使用须知：

- 最终输出的直线为距所定义直线最近的 FEM 单元结点所连成的直线。
- 输出的时间间隔同输出后处理文件的时间间隔。
- 目前仅支持定义与全局坐标轴平行的直线，且该元素只能定义一次。
- 不能自定义输出的物理量类型。
- x, y 的取值顺序可通过如下法则给出：当选定方向后把（Globalx, Globaly, Globalz）相应的坐标拿掉，则对应定义用的 x 和 y。如若选 Globaly 为直线方向则 Gloabalx 对应 x, Globalz 对应 y。

3.11.6 重启动文件输出设置 (Restart)

Restart 元素具有以下属性：

time_interval: 定义状态文件输出时间间隔。

使用规范：

```
<Restart time_interval="?" />
```

使用须知：

- 该项设置输出后缀为 pe 的重启动文件；
- 由于 pe 文件较大，若不需要重启动则不建议开启该选项。

3.11.7 统计信息输出设置 (Statistics)

Statistics 元素具有以下属性：

memory: 是否在指定时间间隔输出内存耗费量到.sta 文件，该功能目前仅对 windows 下有效。memory="1" 表示输出，memory="0" 表示不输出。缺省为不输出；

cell_occupy: 是否在指定时间间隔输出有质点的网格的比例到.sta 文件。取值为“1”表示输出，“0”表示不输出。缺省为不输出。

使用规范:

```
<Statistics memory="1" cell_occupy="1" />
```

表 3.1: 输出控制选项

seqv	Mises 应力	velocity_0	x 速度	exx	x 方向累计应变
epef	等效塑性应变	velocity_1	y 速度	eyy	y 方向累计应变
pres	压力	velocity_2	z 速度	ezz	z 方向累计应变
density	密度	sigy	屈服应力	posx	x 向位置坐标
tria	应力三轴度 σ^*	damg	损伤度	posy	y 向位置坐标
fail	失效	engi	变形能	posz	z 向位置坐标
engk	动能	body	体编号	com	组件号
cp	声速	kelv	Kelvin 温度	mat	材料组
SigmaX	x 方向应力 σ_x	SigmaY	y 方向应力 σ_y	SigmaZ	z 方向应力 σ_z
SigmaXY	剪应力 τ_{xy}	SigmaYZ	剪应力 τ_{yz}	SigmaXZ	剪应力 τ_{xz}

3.12 并行分区设置

DomainDecomposition 元素为可选一级元素，用来使用 MPI 并行计算时的分区设置。该元素具有三个属性，分别用于定义在三个维度方向上所分割的份数。具体参数为：

dimension0: 设置在 X 方向上分割的份数

dimension1: 设置在 Y 方向上分割的份数

dimension2: 设置在 Z 方向上分割的份数

使用规范：

```
<DomainDecomposition dimension0="?" dimension1="?" dimension2="?" />
```

执行并行程序与串行程序有所区别，在命令行输入

```
mpirun -np nproc mpm3dpp JobName
```

其中 nproc 是希望执行的进程的数目。nproc 应该等于 dimension0*dimension1*dimension2 否则程序会报错，并退出。

使用须知：

- 在任何一个方向上分割的份数最小是 1，无上限。
- 程序根据背景网格均匀分区，采用静态分区的方式，其负载平衡有待改善。
- 并行程序支持接触算法，dynamic cell, moving grid, 自适应算法, 尚不支持 GIMP 形函数以及重启。
- 输出方面支持 h5part, vtk 并行输出

第四章 典型输入文件

```
<?xml verison="1.0" encoding="utf-8"?> <!-- 声明版本号及字符集 -->
<PeneBlast version="1.0"> <!-- 声明根元素 -->
  <Header> <!-- 声明 Header 元素, 对本算例进行简短的描述 -->
    <Name value="Taylorbar" />
    <Heading value="Taylor bar imact, Johnson 1998" />
    <Description value="Ref: G.R.Johnson 1988" />
    <Unit time="ms" length="mm" mass="g" />
  </Header> <!-- Header 元素 定义完毕 -->

  <Material name="cu" > <!-- 声明 Material 元素, 定义一组材料 -->
    <ReferenceDensity value="8.93e-3" /> <!-- 材料密度; -->
    <StrengthModel type="SimJohnsonCook" <!--定义材简化的 JohnsonCook 模型; -->
      bq1="1.5" bq2="0.06" <!-- 定义人工体积粘性; -->
      B="0.0" <!-- 定义材料常数; -->
      n="1.0" <!-- 定义材料常数; -->
      C="0" <!-- 定义材料常数; -->
      eps0="1e-3" <!-- 定义材料应变率归一化因子; -->
      Yield0="250.0" <!-- 定义材料的屈服强度; -->
      Young="117.0e3" <!-- 定义材料的杨氏模量; -->
      Poisson="0.35e0" /> <!-- 定义材料的泊松比; -->
    <EquationOfState type="Polynomial" <!-- 定义状态方程为多项式; -->
      c0="1" c1="4" c2="6" c3="8" <!-- 定义材料常数; -->
      c4="10" c5="23" c6="16" /> <!-- 定义材料常数; -->
    <FailureModel type="none" /> <!--定义失效模型, none 表示不采用失效模型 -->
  </Material> <!-- Material 元素 (cu) 定义完毕-->

  <Component name="Taylorbar"> <!-- 定义离散体组件, 该组件内可定义多个离散体 -->
    <Body name="body0" <!-- 定义该组件的第一个 body, 并命名为 body0; -->
      material="cu" <!-- 定义 body0 采用的材料模型, 见上定义; -->
      type="Point" <!-- 定义该 body 的建模方式为 Point; -->
      density="8.93e-3"> <!-- 定义该物体的当前材料密度; -->
      <Geometry file="F:\\Temp\\1.txt" />
      <!-- 定义 Point 型离散方式相应的参数, 此处为输入文件; -->
      <InitialVelocity vx="0" vy="0" vz="-190.0" /> <!-- 定义该 body 的初始速度; -->
    </Body> <!-- body0 的定义完毕 -->
  </Component> <!-- 该组件定义完毕 -->

  <Grid mass_cutoff="0" gimp="0"> <!-- 定义背景网格及质量截断和 GIMP 开启与否 -->
    <Cell type="regular"> <!-- 定义单元类型; -->
      <XMin value="0" boundary="2" /> <!-- 定义背景网格区域 $x$ 向大小及相应的边界条件; -->
      <XMax value="11.4" boundary="0" />
      <YMin value="0" boundary="2" /> <!-- 定义背景网格区域 $y$ 向大小及相应的边界条件; -->
      <YMax value="11.4" boundary="0" />
      <ZMin value="0" boundary="2" /> <!-- 定义背景网格区域 $y$ 向大小及相应的边界条件; -->
      <XMax value="26.6" boundary="0" />
      <DCell dx="0.76" dy="0.76" dz="0.76"/> <!-- 定义背景网格在三个方向上的单元尺寸; -->
    </Cell> <!-- 单元定义完毕 -->
  </Grid> <!-- 背景网格定义完毕 -->

  <Solution algorithm="MUSL" near_boundary_stop="0"> <!-- 定义求解控制元素及程序积分格式 -->
    <TimeStep factor="0.6" const="0" specified="0.0" /> <!-- 定义时间步长因子; -->
    <EndTime value="0.04" /> <!-- 定义物理模拟结束时间; -->
  </Solution> <!-- 定义求解控制选项完毕 -->

  <Output> <!-- 定义输出控制元素 -->
```

```

    <Console print_time="1.0e-3" print_momentum="0" />
    <PostProcessing h5part="0" vtk_data="1"
        time_interval="1.0e-3"
        var="damg|tria|epef|fail" />
</Output>
<PeneBlast>    <!-- 输入文件结束 -->
    <!-- 定义计算状态的时间步长 -->
    <!-- 定义后处理输出文件类型; -->
    <!-- 输出后处理文件的时间步长; -->
    <!-- 定义在后处理中观察的物理量; -->
<!-- 输出控制定义完毕 -->

```

第五章 常用工具

5.1 checkXMP 程序

mpm3dpp 程序的输入数据文件 (.xmp) 如果存在错误, 如元素的名称及其内容, 以及其属性的名称、取值等, 会导致程序运行意外终止。checkXMP 程序可以在 .xmp 被读入之前对其进行一些基本的检查。

checkXMP 程序先读入 Specification.xml 文件, Specification.xml 文件中对 .xmp 文件中可能出现的所有元素的名称、可出现的次数, 元素的所有属性的名称、取值、是否必须出现, 以及元素的内容等做了规定; checkXMP 程序读入 Specification.xml 文件后, 就可以按照其中的规定对 .xmp 文件进行检查。

如果 mpm3dpp 中新增加了关键字, 用户只需要在 Specification.xml 文件中按照其书写格式添加对新关键字的说明即可。以下对 Specification.xml 文件的书写格式做几点说明。

1. 每个元素必须有属性 spec、属性 attributeN (对 .xmp 文件中本元素中所有可能出现的属性进行说明)、以及所有可能出现的子元素的情况;
2. spec 的属性值包括三项, 各项用逗号 (,) 隔开;
3. 第一项为必填, 规定本元素在其父元素中可出现的次数, 用 REQUIRED、OPTIONAL、REQUIRED_MULTIPLE、OPTIONAL_MULTIPLE 分别表示出现一次、至多一次、至少一次、不限;
4. 第二项为选填, 规定本元素的内容的数据类型, 用 NO_DATA、STRING、DOUBLE、INTEGER、BOOLEAN, 分别表示没有内容、内容为字符串型、实型、整型、布尔型, 默认为 NO_DATA;
5. 第三项为选填, 规定本元素的内容的数据取值的范围, 当内容为字符串时, 用 A|B|C 限定字符串的取值范围为 (A,B,C), 当内容为实型或整型时, 用 positive 限定取值不小于零, 用 negative 限定取值不大于零, 用 m:n 限定取值范围为 [m,n], 不填表示没有限制;
6. attributeN 的属性值包括五项, 各项用逗号 (,) 隔开;
7. 第一项为必填, 说明本属性的名称;
8. 第二项为必填, 规定本属性是否必须出现以及是否有多个属性值, 用 REQUIRED、OPTIONAL、REQUIRED_MULTIPLE、OPTIONAL_MULTIPLE 分来标识。其中 REQUIRED、REQUIRED_MULTIPLE 表示该属性必须出现, OPTIONAL、OPTIONAL_MULTIPLE 表示该属性可以出现; REQUIRED、OPTIONAL 表示只有一个属性值, REQUIRED_MULTIPLE、OPTIONAL_MULTIPLE 表示可以有多个属性值, 此时程序在对 xmp 文件检查时, 将对由 "|" 分开的多个属性值分别进行检查。

9. 第三项为必填，规定本属性值的数据类型，用 STRING、DOUBLE、INTEGER、BOOLEAN，分别表示属性值为字符串型、实型、整型、布尔型；

10. 第四项为选填，规定本属性值的取值范围，具体说明请参考第 5 条；

11. 第五项为选填，说明本属性的限定类型，格式为 ForTypes:A|B|C，表示当与本属性关系最近的 type 属性的值为 (A,B,C) 时，本属性才有效，不填表示本属性有效。若本项不空，第四项为空，要空出第四项的位置；

12. spec, attributeN 的属性值的各项前后可有空格、回车键、tab 键；

13. 同一元素中不能出现同名的子元素。

示例：Specification.xml 文件中 <Detonation> 关键字

```
<Detonation spec="OPTIONAL_MULTIPLE, NO_DATA">
  <Item spec="REQUIRED, NO_DATA"
    attribute1="type, REQUIRED, STRING, point|plane"
    attribute2="time, REQUIRED, DOUBLE"
    attribute3="x, REQUIRED, DOUBLE, , ForTypes: point"
    attribute4="y, REQUIRED, DOUBLE, , ForTypes: point"
    attribute5="z, REQUIRED, DOUBLE, , ForTypes: point"
    attribute6="normal, REQUIRED, INTEGER, 0:2, ForTypes: plane"
    attribute7="location, REQUIRED, DOUBLE, , ForTypes: plane"
    attribute8="left, REQUIRED, DOUBLE, , ForTypes: plane"
    attribute9="right, REQUIRED, DOUBLE, , ForTypes: plane"
    attribute10="bottom, REQUIRED, DOUBLE, , ForTypes: plane"
    attribute11="top, REQUIRED, DOUBLE, , ForTypes: plane" />
</Detonation>
```

5.2 HJC 模型参数转换

HJC 是一种典型模拟高速、高温下混凝土动态力学性能的本构模型，参数较多，可分为三类：强度模型参数、动态损伤参数、状态方程参数，部分参数之间存在一定的关系。曲线参见图5.1、5.2、5.3。针对具体的混凝土材料，需要开展相关的参数确定实验来给出具体参数。下面，给出根据已知的参数来确定其余参数的公式：

首先将 HJC 需要的参数分类：

基本参数

无侧限抗压强度 f'_c ，密度 ρ ，比热 c_p

强度模型参数：

A （材料常数）、 B （材料常数）、 n （材料常数）、 C （材料常数）、 $S_{\max}$ （材料常数）、 G （剪切模型）。

损伤模型参数：

D_1 （材料常数）、 D_2 （材料常数）、 $E_{f\min}$ （材料常数）。

状态方程参数：

p_{crush} (材料常数)、 μ_{crush} (材料常数)、
 K_1 (材料常数)、 K_2 (材料常数)、 K_3 (材料常数)、
 p_{lock} (材料常数)、 μ_{lock} (材料常数)、 T (抗拉强度)。

参数关系:

$$T^* = T/f'_c \quad (5.1)$$

$$D_1 = \varepsilon_p / (P^* + T^*) \quad (5.2)$$

其中, $P^* = 1/3$ 。

$$p_{crush} = f'_c / 3 \quad (5.3)$$

$$\mu_{crush} = p_{crush} / K_{elastic} \quad (5.4)$$

其余参数需要根据参数实验给出, 或者直接取文献 [8]。

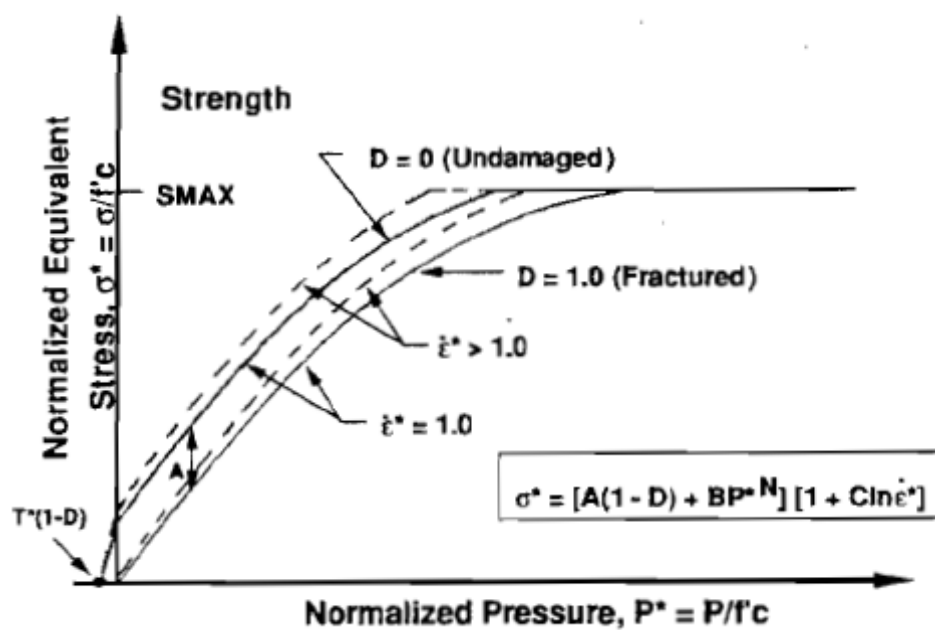


图 5.1: 强度模型

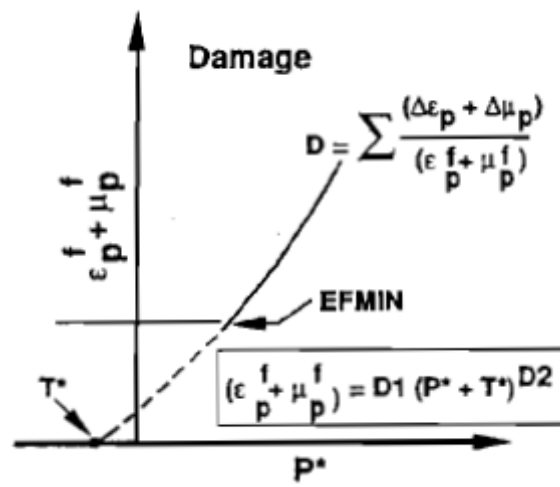


图 5.2: 动态损伤模型

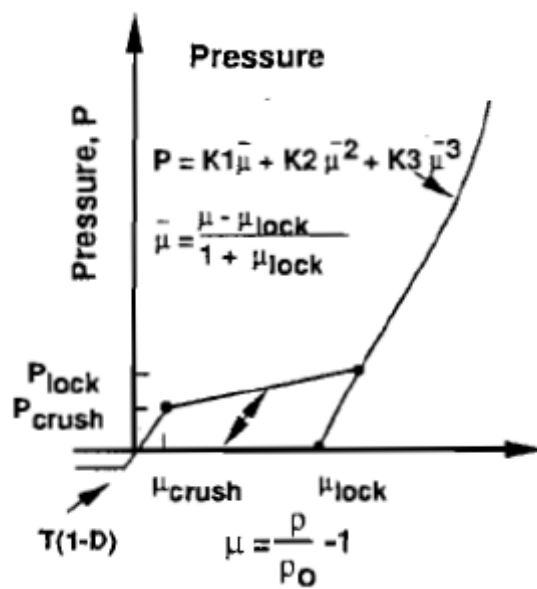


图 5.3: 状态方程模型

第六章 常用材料参数列表

剪切模量 G 和体积模量 K 的换算公式：

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$
$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

(6.1)

表 6.1: 几种常用材料的基本材料参数以及线性强化材料参数

材料	密度 ρ (g/cm ³)	杨氏模量 E (GPa)	泊松比 ν	屈服强度 σ_y (MPa)	切线强度 E_T (MPa)
OFHC 铜	8.9	117	0.35	150	500
4340 钢	7.83	210	0.3		
铝	2.75	75	0.33	290	

表 6.2: 各种材料的 JC 模型常数 ($\varepsilon_0 = 1\text{s}^{-1}$)^[14, 11]

材料	说明				本构常数				
	硬度/ (洛氏)	密度/ (kg/m ³)	比热容/ (J/kg K)	熔点/ K	A / MPa	B / MPa	n	C	m
OFHC 铜	F-30	8960	383	1356	90	292	0.31	0.025	1.09
弹壳黄铜	F-67	8520	385	1189	112	505	0.42	0.009	1.68
镍 200	F-79	8900	446	1726	163	648	0.33	0.006	1.44
工业纯铁	F-72	7890	452	1811	175	380	0.32	0.060	0.55
木工电铁	F-83	7890	452	1811	290	339	0.40	0.055	0.55
1006 钢	F-94	7890	452	1811	350	275	0.36	0.022	1.00
4340 钢	C-30	7830	477	1793	792	510	0.26	0.014	1.03
S-7 工具钢	C-50	7750	477	1763	1539	477	0.18	0.012	1.00
2024-T351 铝	B-75	2770	875	775	265	426	0.34	0.015	1.00
7039 铝	B-76	2770	875	877	337	343	0.41	0.010	1.00
6061-T6 铝 ^[15]	-	-	-	-	324	114	0.42	0.002	1.34
钨合金 (0.07Ni,0.03Fe)	C-47	17000	134	1723	1506	177	0.12	0.016	1.00
贫铀 -0.75% Ti	C-45	18600	117	1473	1079	1120	0.25	0.007	1.00

表 6.3: 几种常用材料的 JC 损伤模型参数^[5]

材料	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
OFHC 铜	0.54	4.89	-3.03	0.014	1.12
工业纯铁	-2.20	5.43	-0.47	0.016	0.63
4340 钢	0.05	3.44	-2.12	0.002	0.61
6061-T6 铝 ^[15]	-0.77	1.45	-0.47	0.0	1.60

表 6.4: 几种混凝土的 Johnson-Holmquist 模型材料常数

参数来源	Holmquist ^[8]	待补充
无侧限抗压强度 f'_c (MPa)	48	
密度 (Kg/m ³)	2440	
比热 (J/Kg · K)	654	
A	0.79	
B	1.60	
n	0.61	
C	0.007	
f'_c (GPa)	0.048	
$S_{\max}$	7.0	
剪切模量 G (GPa)	14.86	
D_1	0.04	
D_2	1.0	
$E_{f \min}$	0.01	
p_{crush} (GPa)	0.016	
μ_{crush}	0.001	
K_1 (GPa)	85	
K_2 (GPa)	-171	
K_3 (GPa)	208	
p_{lock} (GPa)	0.80	
μ_{lock}	0.10	
T (GPa)	0.004	

表 6.5: 各种炸药的 JWL 状态方程系数^[7]

炸药	CJ 参数				EOS 系数					
	ρ_0 (g/cm ³)	P (Mbar)	D (cm/ μ s)	Γ	E_0 ($\frac{\text{Mbar} \cdot \text{cm}^3}{\text{cm}^3}$)	A (Mbar)	B (Mbar)	R_1	R_2	ω
TNT	1.63	0.210	0.6930	2.727	0.070	3.712	0.0323	4.15	0.95	0.30
PBX9404	1.84	0.37	0.88	2.851	0.102	8.524	0.1802	4.55	1.30	0.38
Tetryl	1.73	0.285	0.7910	2.798	0.082	5.868	0.1067	4.4	1.20	0.28

表 6.6: 不同物质的冲击参数和热力学参数 ($u_s = c_0 + su_p$) (引自 [11] 的表 5.1)

材料	$\rho_0/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$c_0/(\text{mm}/\mu\text{s})$	s	$C_p/(\text{J}/\text{g} \cdot \text{K})$	γ_0
Cu	8.93	3.94	1.49	0.40	2.0
Fe	7.85	3.57	1.92	0.45	1.8
Pb	11.35	2.05	1.46	0.13	2.8
Sn	7.29	2.61	1.49	0.22	2.3
W	19.22	4.03	1.24	0.13	1.8
Al-2024	2.79	5.33	1.34	0.89	2.0
Al-6061	2.70	5.35	1.34	0.89	2.0
黄铜	8.45	3.73	1.43	0.38	2.0
水	1.00	1.65	1.92	4.19	0.1

表 6.7: 几种陶瓷、玻璃材料的 JH2 模型材料参数

材料名称	B_4C	SiC	AlN	Al_2O_3	$SilicaFloatGlass$
密度 (Kg/m^3)	2510	3163	3226	3700	2530
剪切模量 (GPa)	197	183	127	90.16	30.4
体积模量 (GPa)	233	204.785	201	130.95	45.4
杨氏模量 (GPa)	461.06	423	314.7	220	74.56
泊松比	0.17	0.156	0.239	0.22	0.226
A	0.927	0.96	0.85	0.93	0.93
B	0.7	0.35	0.31	0.31	0.082
C	0.005	0.0	0.013	0.0	0.003
M	0.85	1.0	0.21	0.6	0.35
N	0.67	0.65	0.29	0.6	0.77
T (GPa)	0.26	0.37	0.32	0.2	0.15
Shel (GPa)	15.4	13.0	6.0	2.0	4.5
Phel (GPa)	8.71	5.9	5.0	1.46	0.92
SFmax	0.2	0.8	-	-	0.5
D1	0.001	0.48	0.02	0.005	0.053
D2	0.5	0.48	1.85	1.0	0.85
K2 (GPa)	-593	0	260	0	-138
K3 (GPa)	2800	0	0	0	290
beta	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

表 6.8: AUTODYN 材料库中两种混凝土 (RHT & P-alpha) 材料参数

材料名称	C35	C140
密度 (Kg/m ³)	2314	2520
剪切模量 (GPa)	16.7	22.06
杨氏模量 (GPa)	40	53
泊松比	0.2	0.2
fc (MPa)	35	140
ft_fc	0.1	0.1
fs_fc	0.18	0.18
A	1.6	1.6
N	0.61	0.61
Q20	0.6805	0.6805
BQ	0.0105	0.0105
PREFACT	2.0	2.0
TENSRAT	0.7	0.7
COMPRAT	0.53	0.53
B	1.6	1.6
M	0.61	0.61
alpha	0.032	0.0091
delta	0.036	0.0125
epso (s ⁻¹)	1.0	1.0
SFMax	1.0e20	1.0e20
CapFlag	1.0	1.0
D1	0.04	0.04
D2	1.0	1.0
EFMin	0.01	0.01
SHRATD	0.13	0.13
Plock (MPa)	6.0e3	6.0e3
Pcrush (MPa)	23.3	93.3
n	3	3
rho0s (Kg/m ³)	2750	2750
EOSID	2	2
A1 (MPa)	35.27e3	35.27e3
A2 (MPa)	39.58e3	39.58e3
A3 (MPa)	9.04e3	9.04e3
B0	1.22	1.22
B1	1.22	1.22
T1 (MPa)	35.27e3	35.27e3
T2 (MPa)	0.0	0.0

参考文献

- [1] Sulsky D, Chen Z, Schreyer H L. A Particle Method for History-Dependent Materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1994, 118(1-2):179–196
- [2] Sulsky D, Zhou S J, Schreyer H L. Application of a Particle-in-Cell Method to Solid Mechanics. *Computer Physics Communications*, 1995, 87(1-2):236–252
- [3] PeneBlast 系统用户手册. Technical report, 清华大学航天航空学院计算动力学研究室, 2010
- [4] 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
- [5] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering fracture mechanics*, 1985, 21(1):31–48
- [6] Hallquist J O. LS-DYNA Keyword User's Manual. Livermore Software Technology Corporation, 2003
- [7] Wilkins M L. *Computer Simulation of Dynamic Phenomena*. Springer, 1999
- [8] 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
- [9] Tvergaard V, Needleman A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta Metall.*, 1984, 32:157–169
- [10] Johnson J N, Addessio F L. Tensile plasticity and ductile fracture. *J. Appl. Phys.*, 1988, 64(12):6699–6712
- [11] Meyers M A. *Dynamics Behavior of Materials*. John Wiley & Sons, 1994
- [12] Fok S L. A numerical study on the application of weibull theory to brittle materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68:1171–1179
- [13] Bardenhagen S G, Kober E M. The generalized interpolation material point method. *Cmes-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2004, 5(6):477–495

- [14] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures. Proceedings of Proc. of the 7th Intern. Symp. on Ballistics, 1983. 541–547
- [15] Lesuer D R, Kay G, LeBlanc M M. Modeling large-strain, high-rate deformation in metals. Technical Report UCRL-JC-134118, Lawrence Livermore National Laboratory, 2001