

液体飞溅及冲击壁面问题的分析

刘 闯, 张 雄, 陆明万

(清华大学 工程力学系, 北京 100084)

摘 要: 剧烈运动的液体中飞溅出来的液团对壁面冲击会引发容器的安全性问题, 为此该文对液体飞溅及冲击壁面问题的数值模拟方法进行了研究。综合各种运动界面数值模拟方法, 建立了液团飞溅的临界条件。基于动能定理以及弹性力学的 Boussinesq 解和 Flamant 解分别导出了三维和二维轴对称情况下壁面冲击载荷计算公式。将该方法应用于液态金属快中子增殖堆的假想堆芯破损事故分析, 结果与多个程序的计算结果较好吻合, 说明该方法是可行的。

关键词: 冲击载荷; 液体飞溅; 快中子增殖反应堆; 假想堆芯破损事故

中图分类号: O 347.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2005)05-0662-04

Analysis of liquid splash and its impact against a shell

LU Chuang, ZHANG Xiong, LU Mingwan

(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Vessel security can be compromised when liquid splashing strongly impacts the vessel shell. The force of the liquid splash impacting the shell was modeled numerically for the critical liquid splash conditions predicted in many numerical simulations of interface movements. The impacting loads due to 3-D and axisymmetric 2-D bodies were derived using the Boussinesq and Flamant functions in elastic mechanics and the theorem of kinetic energy. The method was used to analyze a hypothetical core disruptive accident in a liquid-metal fast breeder reactor. The results are identical to previously published analytical results, which verifies the usefulness of the method.

Key words: impact load; liquid splash; liquid-metal fast breeder reactor; hypothetical core disruptive accident

在液体内部爆炸载荷作用下液体剧烈运动而产生对容器壁面的冲击会引发严重的安全问题。例如以液态钠作为传热介质的液态金属快中子增殖反应堆(LM FBR)的快堆假想堆芯破损事故(HCDA)中, 堆芯熔化并形成高压气体爆炸, 产生冲击波和钠液

飞溅, 冲击顶盖(包括旋塞)和主容器。若顶盖、旋塞因此产生过量变形, 则燃料棒和控制棒的操作将失灵; 若主容器因此毁坏, 则放射性钠液将外流, 后果难以设想。

液体内部爆炸载荷对容器壁面的冲击分析包括两个方面。一方面, 在液体与容器壁面直接接触的界面处, 爆炸冲击波由液体通过该界面直接传向容器壁面。另一方面, 若液体未完全充满容器内腔, 则容器内将出现自由液面, 且自由液面与其上部容器壁面之间存在一个充满气体的空间(为防止不必要的化学反应, 在快堆的上部空间中充以惰性的氩气), 这时爆炸将导致液体飞溅, 液体穿过气体空间冲击到上部容器壁面, 产生冲击效应。本文重点研究液体飞溅-冲击分析的问题。

分析自由液面晃动与飞溅问题首先要有效地跟踪运动界面的运动和变形。由于液体表面的变形很大, 若采用 Lagrange 型贴体网格, 会出现严重的网格扭曲, 甚至网格相交, 因而导致数值计算不稳定, 甚至失败。为此人们发展了多种方法, 如 Harlow 和 Welch^[1]的 MAC 法, Hirt 和 Nichols^[2]的 VOF 法, Noh^[3]的 ALE 方法, Glimm 等人^[4]提出的波锋面捕捉法, Osher 等人^[5]提出的位标函数法等。这些方法在分析不同问题时具有各自的优势与缺点。针对 HCDA 的具体情况, 本文采用 ALE 方法来模拟运动界面。

1 液团飞溅过程的模拟

当出现堆芯破损事故时, 液态钠的自由液面运动非常剧烈, 并导致部分钠液从自由液面分离出去, 出现飞溅现象。分析飞溅现象首先要建立部分液体

收稿日期: 2004-04-16

基金项目: 国家“八六三”高技术项目(614-01-02)

作者简介: 刘闯(1975-), 男(汉), 黑龙江, 博士研究生。

通讯联系人: 陆明万, 教授, E-mail: lmw-dem@tsinghua.edu.cn

(简称液团)脱离自由液面的临界条件。考虑到流体能承受压力而不能承受拉力,可以借鉴固体力学中的拉伸断裂准则来建立飞溅临界条件:当流体中某微面元上的法向应力

$$\sigma = 0 \quad (1)$$

时,即相邻流体微元间的作用由压应力转为拉应力时,流体就在该微面元处分离。各微分离面的扩展和贯联就形成了宏观分离面,当液团被自由表面和分离面完全包围时就会从液体的整体中分离(飞溅)出去。这里表面张力对飞溅的影响与强烈的爆炸压力相比可以忽略。

根据质心运动定律,液团飞溅出来后的运动规律可以简化为一个质点,用牛顿第二定律

$$F = ma \quad (2)$$

来描述,其中 m 和 a 分别为液团的质量和质心加速度,在作用力 F 中仅考虑液团的重力,而忽略空气阻力的影响。液团在脱离自由液面时的初始速度就等于分离时刻液团所在位置的自由液面的运动速度。由此得到斜抛运动的解为

$$v_t = v_0 + gt, \quad (3)$$

其中: v_t 为现时速度, v_0 为初始速度, g 为重力加速度, t 为液团飞行时间。

当容器上顶盖和液态钠自由液面间的距离 h 与飞溅液团垂直方向分速度 v_0 满足

$$h = \frac{(v_0)^2}{2g} \quad (4)$$

时,液团将冲击到容器顶盖上。其中 $v_0 = v_0 \cdot j$, j 为垂直方向单位基矢量。

除了以质心运动为代表的整体平动外,液团还可能存在绕质心的转动。当液团冲击顶盖时,其冲击效应主要来自平动,而转动影响可以略而不计。

2 液团冲击容器壁面的分析

关于液团与顶盖冲击过程的分析虽然有些计算结果的报道,例如文[6,7],但都没有详细的理论推导和计算公式。下面利用弹性力学的解析解来导出液团对顶盖的冲击压力。

2.1 三维情况

假设液团冲击压力 q 均匀分布在半径为 a 的圆面积上,基于半空间问题的 Boussinesq 解^[8]给出了圆形区域内任意点 M 处的位移为(参见图 1)

$$u_z = \frac{4(1-\mu^2)qa}{\pi E_c} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2} \sin^2 \psi} d\psi \quad (5)$$

其中: E_c 、 μ 分别为弹性模量和 Poisson 比, r 为 M

距圆心的距离。

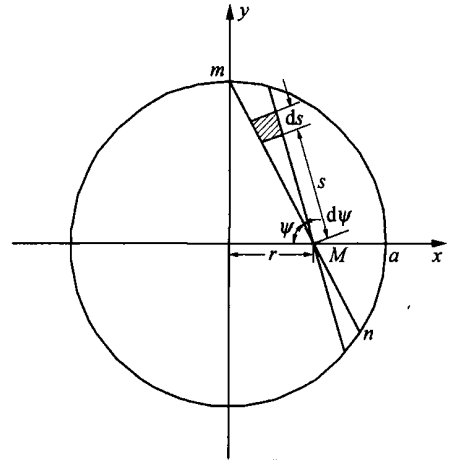


图 1 三维半空间中圆形区域的微元选取

作用在 M 点处微元上的力为

$$dF = qrd\theta dr \quad (6)$$

利用式(5)和(6),经过积分后可以得到圆内冲击压力所作的总功为

$$W = \int_0^a \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} qrd\theta dr \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2} \sin^2 \psi} d\psi d\theta = \frac{16(1-\mu^2)q^2a^3}{3E_c} \quad (7)$$

另一方面,球形液团的质量和动能为

$$m = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi a^3, \quad (8a)$$

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{2}{3} \rho \pi a^3 v^2. \quad (8b)$$

其中: ρ 为液体的密度, v 为液团的速率。

冲击前后能量并不一定守恒,假设能量传递系数为 k ,将式(7)和(8)代入动能定理 $W = kE$ 可以导出液团对容器壁面的冲击压力为

$$q = v \sqrt{\frac{\pi k \rho E_c}{8(1-\mu^2)}} \quad (9)$$

其中 k 为能量传递系数。

2.2 二维轴对称情况

对二维轴对称问题,假设液团冲击压力 q 均匀分布在从半径 a 到半径 b 的圆环面积上。基于半平面问题的 Flamant 解,弹性力学给出了轴对称变形情况下环内任意点 M 处的位移为(参见图 2)

$$u_z(r) = \frac{2q(1+\mu)(1-2\mu)}{\pi E_c(1-\mu)} \int_a^b \ln|r-\xi| d\xi \quad (10)$$

作用在 M 点处微元上的力为

$$dF = 2\pi q r dr, \quad (11)$$

所做总功为

$$W = \int u_c dF = \frac{4q^2(1+\mu)(1-2\mu)}{E_c(1-\mu)} \int_a^b r \ln|r-\xi| d\xi dr. \quad (12)$$

其中被积函数在 $r = \xi$ 处是奇异的, 积分过程中求 Cauchy 主值的推导比较冗长。

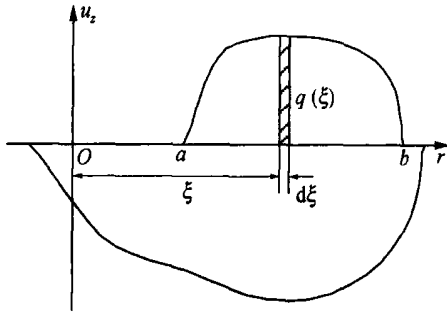


图2 直边界上任意铅直载荷

环形液团的质量和动能为:

$$m = \rho \cdot \frac{1}{4} \pi^2 (a + b) d^2, \quad (13a)$$

$$E = \frac{1}{2} m v^2. \quad (13b)$$

其中 $d = b - a$

代入动能定理, 完成式(12)中的积分, 整理后得到冲击压力为

$$q = \frac{\pi v}{4} \sqrt{\frac{k \rho E_c (1-\mu)(a+b)}{(1+\mu)(1-2\mu) \left[(a+b) \left(\ln d - \frac{1}{2} \right) - d \right]}}. \quad (14)$$

Hertz 基于上述 Boussinesq 解建立了接触理论公式, 并曾将其推广应用于弹性体的正碰撞动力学

问题, 试验表明, 该理论在其假设的弹性范围内可以应用于冲击问题的分析, 但超出了弹性范围就会出现明显的误差^[9]。本文研究的低速范围的液团冲击容器壁面问题, 与两个固体的碰撞问题相比, 弹性变形阶段所占的比例更大一些, 在没有更精确的冲击动力学公式的情况下, 可以先作上述近似处理。

3 液体飞溅过程计算实例

运用上述理论公式, 计算了欧共体委员会 (CEC) 容器专家组 (CONT) 拟定的、用于考核各国快堆计算程序的典型池式快堆标准考题 (图 3)。表 1 给出了 CONT 制定的标准考题的计算参数, 其中除了标准值以外还附有参数的可选变化范围^[10]。

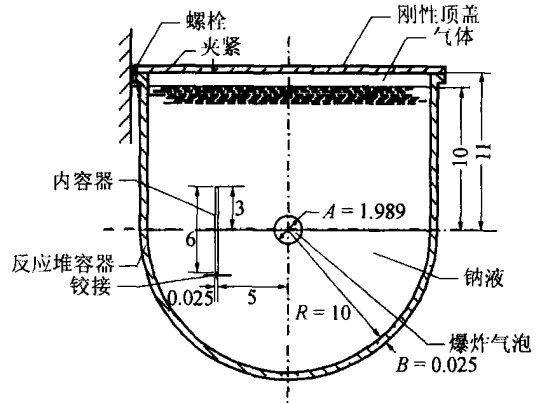


图3 CONT 拟定的典型池式快堆标准考题简图 (m)

分析计算了在 HCDA 过程中, 钠液通过飞溅和飙升冲击顶盖的情况。图 4 为 ALE 网格不同时刻的变化以及主容器的变形 (为了显示清楚, 将容器的位移放大 5 倍)。根据钠液冲击顶盖时能量传递系数 $k = 0.95$ 的情况计算出顶盖所受的冲击载荷。图 5 为得到的结果, 与国外的计算结果符合得很好。

表 1 CONT 制定的标准考题计算参数

参数	气泡能量 MJ	气泡压力 MPa	覆盖气体层高度 m	屈服应力 MPa	塑性模量 GPa
标准值	600	10	1	105	3
变化范围	200~1000	5~15	0.2~1.8	70~140	1.5~4.5

4 小结

1) 可以借鉴固体力学中的拉伸断裂准则来建立飞溅临界条件, 认为相邻流体微元间的作用由压应力转为拉应力时, 流体就在该微面元处分离。当液团被自由表面和分离面完全包围时就会从液体的整

体中分离出去。

2) 考虑能量传递系数后, 可以基于动能定理来处理液体对容器壁面的冲击问题, 并借助弹性力学的 Boussinesq 解和 Flamant 解分别导出计算三维和二维轴对称情况下壁面所受冲击载荷的公式。

3) 比较计算结果可以看到: 采用本文方法对

标准考题的计算结果和国外快堆 HCDA 分析程序的计算结果符合得较好, 因而方法是可行的, 程序也

是可靠的, 可以应用于实际问题的数值模拟。

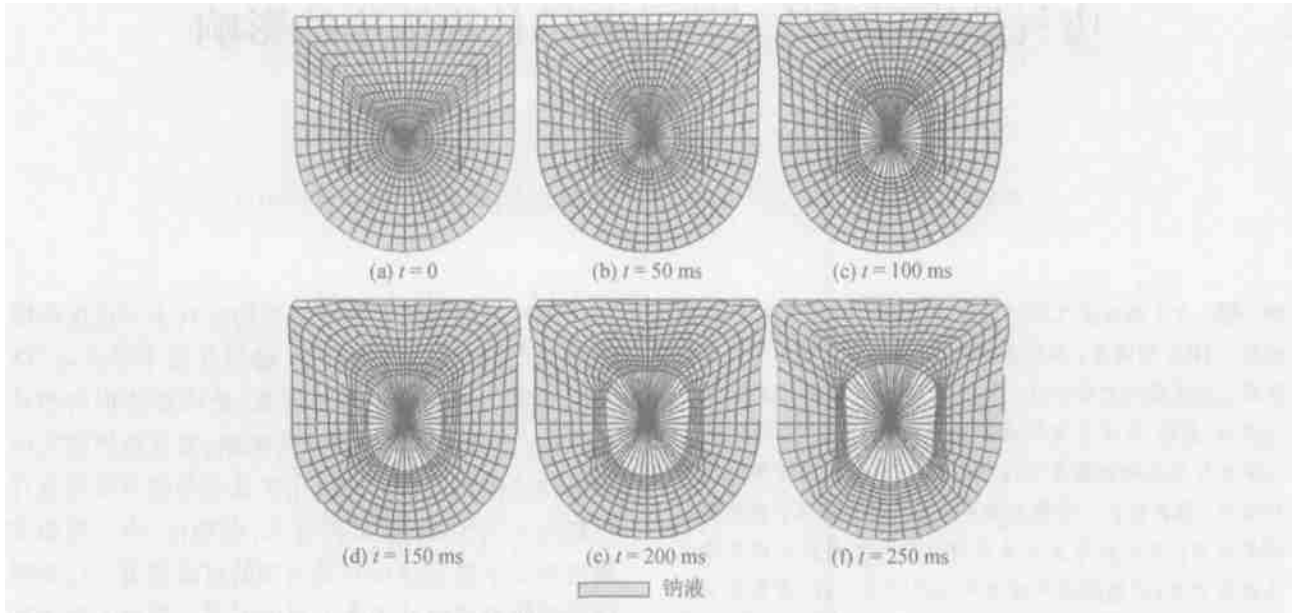


图 4 不同时刻网格变化及壳体变形

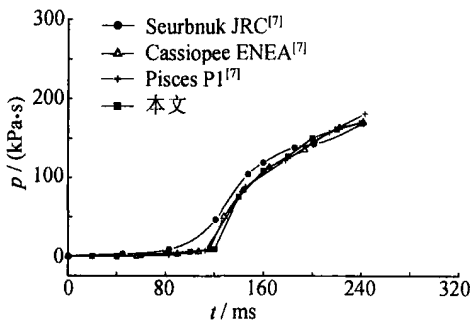


图 5 对顶盖的冲击载荷比较

参考文献 (References)

[1] Harlow F H, Welch J E. Numerical calculations of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface [J]. *Phys Fluids*, 1965, 8(12): 2182 ~ 2189.
 [2] Hirt CW, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. *J Comp Physics*, 1981, 39(1): 201 ~ 225.
 [3] Noh W. CEL: A time-dependent, two-space-dimensional coupled Eulerian-Lagrangian code [A]. Alder B, Fernbach S, Rotenberg M, et al Proc Methods in Computational Physics 3 [C]. New York: Academic Press, 1964 117 ~ 179.
 [4] Glimm IL, McBryan O, Plohr B, et al Front tracking for gas dynamics [J]. *J Comp Physics*, 1986, 62(1): 83 ~ 110

[5] Susman M, Smereka P, Osher S. A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow [J]. *J Comp Physics*, 1994, 114(9): 146 ~ 159.
 [6] Casadei F, Daneri A, Toselli G. Use of PLEXUS as a LMFR primary containment code for the CONT benchmark problem [A]. A sadour H H. Structural Mechanics in Reactor Technology: Transactions of the 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology [C]. Los Angeles: American Association for Structural Mechanics, 1989. E: 299 ~ 304.
 [7] Balz W, Dufresne J. Main results of activities performed by the CEC LMFR containment expert group [A]. A sadour H H. Structural Mechanics in Reactor Technology: Transactions of the 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology [C]. Los Angeles: American Association for Structural Mechanics, 1989. E: 269 ~ 292.
 [8] 铁摩辛柯, 古地尔. 弹性理论 [M]. 徐芝纶. 北京: 高等教育出版社, 1990.
 Timoshenko S P, Goodier J N. Theory of Elasticity [M]. XU Zhilun. Beijing: Higher Education Press, 1990 (in Chinese).
 [9] Fluegge W. Handbook of Engineering Mechanics [M]. New York: McGraw-Hill, 1962.
 [10] Stanley H F. Mechanics applications to fast breeder reactor safety [J]. *Nuclear Technology*, 1980, 51: 269 ~ 270.