



爆轰驱动金属铝界面不稳定性的数值分析

何长江*, 周海兵, 杭义洪

北京应用物理与计算数学研究所计算物理实验室, 北京 100088

* E-mail: hechangjiang@sina.com

收稿日期: 2009-06-28; 接受日期: 2009-07-08

国家重点基础研究专项基金(编号: 2005CB321703)、国家自然科学基金(批准号: 10676005)、中国工程物理研究院科学技术重点基金(编号: 2007A09001)和国防科技重点实验室基金(编号: 9140C6901010901)资助项目

摘要 采用自行研制的弹塑性流体动力学程序对爆轰驱动金属铝界面不稳定性进行了数值研究. 分别计算了将铝片作为流体或弹塑性固体来处理的情形, 并将计算结果与试验结果进行了比较. 研究结果表明: 对于爆轰驱动金属界面不稳定性的数值计算必须考虑弹塑性效应, 用纯流体模型计算结果与实验结果相差很大, 当考虑了弹塑性效应后计算结果与试验结果符合很好; 对于金属界面不稳定性发展存在截止波长; 当扰动波长由小变大时, 扰动从基本不发展变化到以指数规律增长.

关键词

界面不稳定性

弹塑性

数值计算

当低密度流体加速高密度流体时会发生 Rayleigh-Taylor(RT)不稳定性, 这种不稳定性使得两种流体界面处的扰动形成重流体的尖钉侵入轻流体, 同时形成轻流体气泡升入重流体. 对于固体来说也是这样, 固体被轻流体加速时在固体中也会发生 RT 不稳定性. 在固体状态下材料强度起着稳定的或减弱扰动增长的作用.

针对无黏流体、气体流动不稳定性研究已经非常全面. 这一领域的研究文章频繁发表. 对于 RT 不稳定性问题在理论研究、实验研究、数值研究方面已经取得了丰富的成果. 这些研究大多数集中较为简单的情况如在热力学性质不同的两种牛顿流体, 初始平面界面施加由轻流体指向重流体的加速度^[1]. 黏性、表面张力、密度梯度都将减缓经典的无黏流体界面扰动增长率^[2]. 然而到目前为止, 考虑材料强度、可压缩性、黏性、相变等物理特性的流动不稳定性过程仍然需要进一步研究. 在公开发表的文献中影响

不稳定性发展的各种因素的研究结果, 经常存在相反的结论^[3]. 这些因素包括扰动幅值、扰动波长、材料强度、加载历史等.

Miles 首先研究了有限厚度、展向无限的金属平板的 RT 不稳定性问题^[4]. Robinson 和 Swdgle^[4]回顾了 1989 年以前提出的弹塑性材料流动不稳定性问题研究方法, 阐述了控制扰动增长的基本过程和基本原则^[1]. Bakhrakh^[3]分析了金属与流体界面线性稳定性问题. 在二维扰动情况下, Bakhrakh 导出了扰动增长率与波长的关系.

上述研究集中在 Atwood 数接近 1 的情况. 对于高温情况, 温度软化将使得金属层的剪切模量减小. 当达到熔化温度的时候, 剪切模量将减小到很小的值. 固态金属与一层熔化金属的界面不稳定性问题有着其特殊性. 首先, Atwood 数不为 1; 其次熔化金属的黏性不能忽略^[1].

Barnes 等人^[5]用铝实现了固态 RT 试验. 在他们的

引用格式: 何长江, 周海兵, 杭义洪. 爆轰驱动金属铝界面不稳定性的数值分析. 中国科学 G 辑, 2009, 39(9): 1170—1173

He C J, Zhou H B, Hang Y H. Numerical study on the instability of metal Al driven by detonation. Sci China Ser G, doi: 10.1007/s11433-009-0261-4

试验中, 铝板被高能炸药(HE)爆轰产物膨胀经过一个空腔而无冲击地加速, 从最初加速开始经过 $1.5 \mu\text{s}$ 达到峰值压力约 100 kbar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$). 在第一次冲击试验中, 使用厚度为 2.54 mm 的 1100-0 铝板, 正弦扰动波长为 5.08 mm, 初始振幅为 $100 \mu\text{m}$, 他们测量了扰动的增长. 第二次试验中, 使波长减半并且初始振幅也减半, 则扰动的增长显著减小. 第三试验中只是使第一次试验中的扰动初始振幅减半, 结果扰动的增长也很小.

本文采用自行研制的流体弹塑性动力学程序 CHAP^[6]对爆轰驱动金属铝界面不稳定性进行了数值研究.

本文首先计算了只采用状态方程, 不考虑材料本构方程影响, 即将铝片作为流体来处理的情形. 然后计算了同时考虑状态方程和本构方程, 即将铝片作为弹塑性固体来处理的情形. 计算结果表明: 当考虑了弹塑性效应后计算结果与试验结果符合很好; 对于爆轰驱动金属界面不稳定性的数值计算, 必须考虑弹塑性效应, 用纯流体模型计算结果与实验结果相差很大; 对于金属界面不稳定性发展存在截止波长. 当扰动波长由小变大时, 扰动从基本不发展变化到以指数规律增长.

1 数值实验和分析

1.1 物理模型

如图 1 所示, 铝片一侧表面被加工成正弦曲面(扰动表面), 另一侧为平面. 爆轰产物经过一段空隙作用在扰动表面上. 考察扰动表面随时间的演化规律. 铝片厚度为 h , 正弦曲线波长为 λ , 幅值为 A . 考察两种扰动尺度:

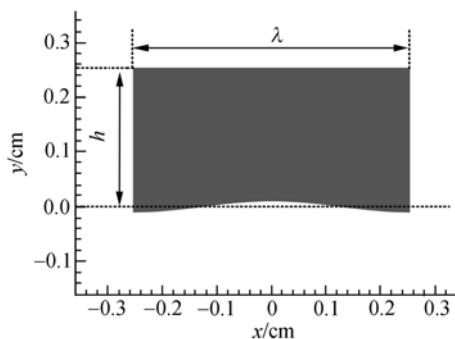


图 1 铝片模型

模型 I: $h=2.54 \text{ mm}$, $\lambda=5.08 \text{ mm}$, $A=0.102 \text{ mm}$;

模型 II: $h=2.54 \text{ mm}$, $\lambda=2.54 \text{ mm}$, $A=0.050 \text{ mm}$.

1.2 数值方法

本文的数值模拟计算采用 CHAP 程序. CHAP 是一个大型流体弹塑性动力学程序, 空间离散方法采用相容性拉氏计算方法; 时间离散采用预报校正方法; 采用考虑子网格压力的方法解决沙漏变形问题; 为有效模拟激波传播及相互作用的问题, 采用张量人工黏性方法. 综合考虑了流体弹塑性和炸药反应过程. 大量数值模拟计算结果表明, CHAP 具有较为完整的解决工程实际问题的计算能力.

流体界面不稳定性问题的计算一般采用欧拉方法, 这是因为流体界面不稳定性一般属于大变形问题. 但本文研究的是金属固体的界面不稳定性, 在本文考虑的压力范围内, 金属材料的变形不大, 因此可以用拉氏程序 CHAP 进行计算. 这样做的好处是界面计算更加精确. CHAP 程序运用主从滑移面技术在界面处设置了滑移面进行计算.

1.3 计算模型

爆轰加载过程采用在扰动表面施加压力的方法来模拟. 压力加载历程如图 2 所示.

材料模型单位制采用厘米、克、微秒制. 铝密度取 2.78.

铝的状态方程取 Gruneisen 形式:

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + a\mu)E,$$

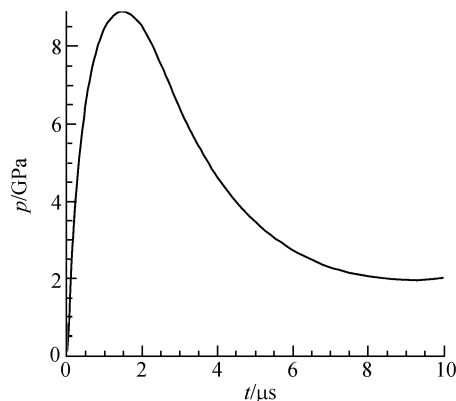


图 2 铝板表面压力加载历程

其中 μ 为相对压缩度, $\mu = \frac{1}{V} - 1$; V 为比体积(当前体积与初始体积的比); E 为比初始体积内能; ρ_0 为初始密度; 多项式系数 $c=0.5328$; $S_1=1.338$; $S_2=0.0$; $S_3=0.0$; $\gamma_0=2.0$; $a=0.0$.

本构方程采用 Steinberg 形式:

$$G = G_0 \left[1 + bpV^{1/3} - h \left(\frac{E - E_c}{3R'} - 300 \right) \right] e^{-\frac{fE}{E_m - E}},$$
$$\sigma_y = \sigma'_0 \left[1 + b'pV^{1/3} - h \left(\frac{E - E_c}{3R'} - 300 \right) \right] e^{-\frac{fE}{E_m - E}},$$
$$\sigma'_0 = \sigma_0 \left[1 + \beta(\gamma_i + \varepsilon_p) \right]^n,$$

其中剪切模量 $G_0=0.276$; 屈服强度 $\sigma_0=0.002$; 硬化系数 $\beta=50$; 硬化指数 $n=0.05$; 剪切模量硬化系数 $b=8.0$; 屈服强度硬化系数 $b'=8.0$; 初始塑性应变 $\gamma_i=0.0$; 温度软化系数 $h=0.0$. 计算中取最大屈服强度 $Y_{\max}=0.0068$; 熔化温度 $T=1220$.

在数值模拟中, 利用对称性, 只计算 1/2 个波长铝片的变形过程.

1.4 计算结果

采用扰动幅值增长系数考察扰动表面随时间的演化规律. 扰动幅值增长系数定义为当前时刻扰动幅值与初始时刻扰动幅值的比值. 扰动幅值增长系数表示当前扰动幅值相对于初始幅值的增长倍数.

算例 1 对于模型 I, 只采用状态方程, 不考虑材料本构方程影响, 即将铝片作为流体. 所得结果如图 3 所示.

图 3(a)实线为文献[2]中的数值模拟结果, 虚线为 CHAP 程序在不同的网格尺度下的计算结果, 黑色方块表示程序结果利用 Richardson 外插方法, 估计网格尺度趋近于 0 时的收敛结果. 从中可以看到程序的收敛结果与文献结果几乎完全一致.

图 3(b)为 $t=3.0 \mu s$ 时铝片的形状.

算例 2 对于模型 I, 同时考虑状态方程和本构方程, 所得结果如图 4(a)所示. 图 4 中黑色方块为 Barnes 等人[5]的实验结果, 实线为 CHAP 的模拟结果, 可以看到两者较为接近.

对于模型 II, 同时考虑状态方程和本构方程, 所得结果如图 4(b)所示. 图 4 中黑色方块为 Barnes 等人[5]的实验结果, 实线为 CHAP 的模拟结果, 可以看到两者较为接近.

本项工作用试验结果验证了数值模拟结果的正确性. 同时说明了对于金属界面不稳定性发展存在截止波长. 当扰动波长小于某一临界值时, 扰动不发展.

算例 3 由算例 2 我们看到, 对于波长 2.54 mm 的情形, 扰动几乎不发展, 而对于波长 5.08 mm 的情形, 扰动以指数形式增长. 那么对于波长在 2.54~5.08 mm 之间的情形, 扰动如何发展呢?

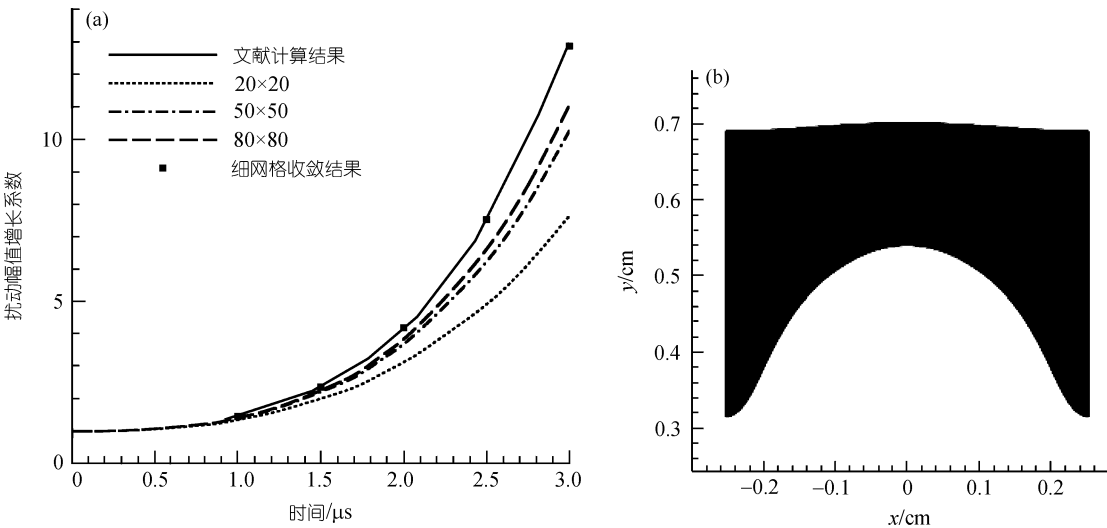


图 3 对于模型 I 只用状态方程的计算结果

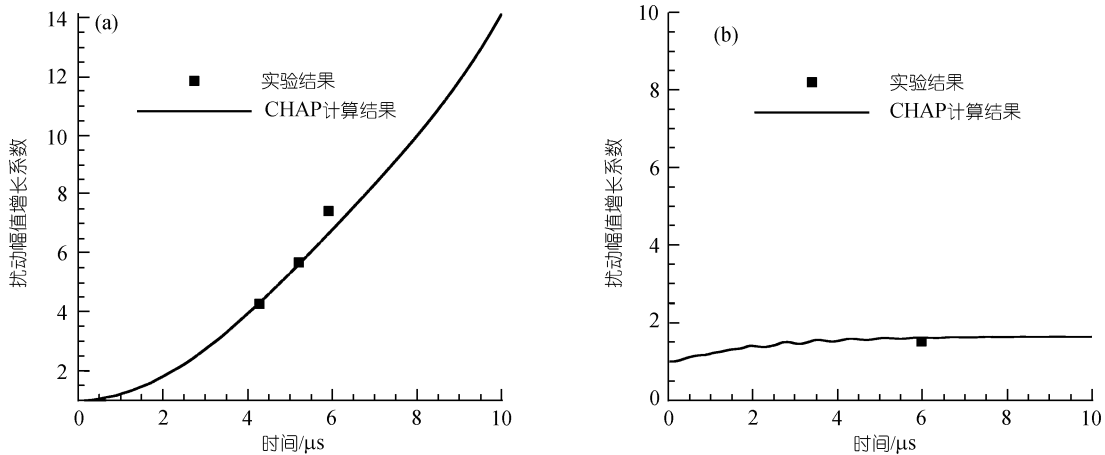


图 4 同时考虑状态方程和本构方程的计算结果

(a) 波长 5.08 mm, 初始振幅 0.102 mm; (b) 波长 2.54 mm, 初始振幅 0.050 mm

为此我们运用经试验校验后的程序进行了一系列计算, 从 2.54~5.08 mm 之间不同波长的计算结果如图 5 所示.

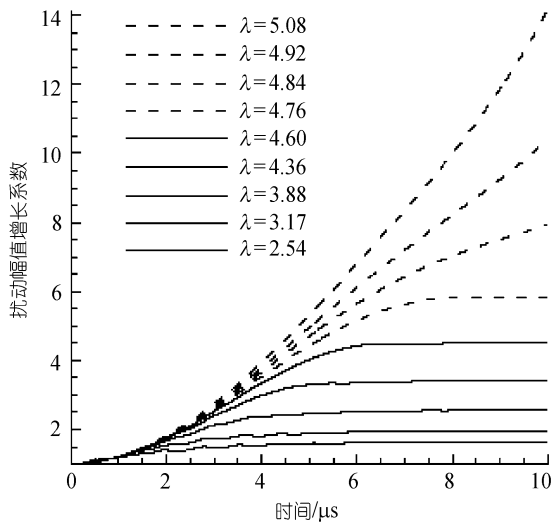


图 5 从 2.54~5.08 mm 之间不同波长的计算结果

由计算结果我们看到, 对于波长小于 4.76 mm 的情形, 扰动经历了短暂的线性增长后都不再继续发展, 波长越大, 经历的线性阶段越长; 而对于波长大于 4.84 mm 的情形, 扰动继续增长并逐渐过渡到以指数形式增长.

2 结论

本文采用自行研制的弹塑性流体动力学程序 CHAP 对爆轰驱动金属铝界面不稳定性进行了数值研究, 给出了计算结果, 与试验结果及国外发表的计算结果符合较好.

对于爆轰驱动金属界面不稳定性的数值计算, 必须考虑弹塑性效应, 用纯流体模型计算结果与试验结果相差很大, 当考虑了弹塑性效应后计算结果与试验结果符合很好; 对于金属界面不稳定性发展存在截止波长. 当扰动波长由小变大时, 扰动从基本不发展变化到以指数规律增长.

致谢 作者感谢中国工程物理研究院胡海波研究员建设性的讨论.

参考文献

- 1 Terones G. Fastest growing linear Rayleigh-Taylor modes at solid/fluid and solid/solid interfaces. *Phys Re E*, 2005, 71(3): 036306[DOI]
- 2 Colvin J D, Legrand M, Remington B A, et al. A model for instability growth in accelerated solid metals. *J Appl Phys*, 2003, 93(9): 5287—5301[DOI]
- 3 Bakhrakh S M, Drennov O B, Kovalev N P, et al. Hydrodynamic Instability in Strong Media. Technical Report UCRL-CR-126710, Lawrence Livermore National Laboratory. 1997
- 4 Robinson A C, Swegle J W. Acceleration instability in elastic-plastic solids. II. Analytical techniques. *J Appl Phys*, 1989, 66(7): 2859—2872[DOI]
- 5 Barnes J F, Blewett P J, McQueen R G, et al. Taylor instability in solids. *J Appl Phys*, 1974, 45: 727—732[DOI]
- 6 张树道, 周海兵, 刘文韬, 等. 拉氏流体动力学相容计算方法简介和应用研究. GF 报告, 2005, 编号: GF-A0091252