论文

金属微层裂模拟中的抗拉伸不稳定人为应力方法

刘军^{1*}, 曹衍闯¹, 熊俊¹, 王裴^{1,2}

1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094;

2. 北京大学应用物理与技术研究中心, 北京 100871

*联系人, E-mail: caepcf@126.com

收稿日期: 2021-04-01; 接受日期: 2021-05-18; 网络出版日期: 2021-11-24

于敏基金(编号: TCYM1820-02)和国防基础科研核科学挑战计划(编号: TZ2018001)资助项目

摘要 金属微层裂是金属在熔化状态下近表面物质的一种拉伸破坏现象, 由于该问题的复杂性, 一直以来模拟与实验的定量化对比存在难度. 本文使用有限元方法模拟了爆轰冲击金属锡微层裂现象, 发现微层裂区的模拟出现非物理现象, 从而导致自由面速度和微层裂区密度分布均难以比实验自由面DPS测速及X光结果. 针对有限元模拟中出现的微层裂区密度、速度不连续等非物理现象, 本文提出了一种抗拉伸不稳定人为应力方法. 引入抗拉伸不稳定人为应力后的模拟结果表明: 金属微层裂区密度、速度连续性有极大改善, 自由面网格脱离现象得到有效抑制, 在密度分布及自由面速度上均能够与实验较好符合. 通过定量化对比分析认为, 虽然抗拉伸不稳定人为应力是并不真实存在的虚假应力, 但其作用于金属微层裂稀疏区能够达到稳定计算、减弱或消除非物理现象的作用, 具有作用范围限定强、幅值小、不影响原格式守恒性等特点. 本文研究突破了金属微层裂模拟与实验难以定量对比的瓶颈问题, 为金属微层裂动力学规律分析及物理模型研究提供了重要的模拟技术支撑.

关键词 人为应力, 拉伸不稳定, 微层裂, 有限元方法**PACS:** 02.70.-c, 47.11.-j, 47.40.Nm, 47.11.Fg, 83.60.Uv

1 引言

当金属受高压加载后处于加/卸载熔化状态下, 金属近表面物质会破碎成大量细小的液态颗粒向外飞散, 这种熔化条件下近表面物质的动态拉伸破坏现象即为金属微层裂现象^[1-4]. 国内外多个团队已开展一系列金属微层裂现象实验研究工作^[5-11], 通过质子照相、X光、Asay窗、多普勒位移干涉仪(DPS)等诊断手段给出了微层裂物质的质量、密度、速度和空间分

布等重要信息. 金属微层裂区在实验中一般体现为金属自由面向内具有一定厚度的、远低于基体密度的均匀低密度区^[5,10].

对于数值模拟而言, 有效利用实验给出的各种数据, 在完成模拟准确性校验的基础上分析总结金属微层裂现象的动力学特征和物理规律是对实验研究的一种升华. 模拟金属微层裂现象具有材料相变、断裂破碎及稀疏后大变形等特点, 模拟方法需要同时具备上述三个过程较好的描述能力, 从而给模拟研究带来一

引用格式: 刘军, 曹衍闯, 熊俊, 等. 金属微层裂模拟中的抗拉伸不稳定人为应力方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 224711
Liu J, Cao Y C, Xiong J, et al. Artificial stress method resistance to tensile instability in simulating metal microspalling (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 224711, doi: 10.1360/SSPMA-2021-0093

定难度. 欧拉方法模拟此类多介质问题(为了避免金属与其他物质非物理混合)多采用界面重构方法, 从而金属断裂破碎后的聚团尺度受网格尺度限制, 其对于大尺度层裂模拟而言可以得到较好效果, 但对于由小尺度液滴组成均匀密度场的微层裂区模拟而言, 欧拉方法的断裂判定条件、断裂后效果与网格尺度强相关^[12]. 无网格类光滑粒子动力学方法(SPH方法)模拟金属断裂破碎、稀疏大变形问题具有天然优势, 通过施加光滑长度可变算法、自由面精度提高算法等可以达到较好的展示效果^[13], 但就与实验结果比对而言, SPH方法难以做到精确的定量化对比. 有限元方法通过加入损伤断裂模型可以处理金属断裂破碎问题, 而且由于具有精确的物质界面和拓扑连接关系, 有限元方法模拟结果具备与实验结果在质量、密度、速度和空间分布上定量化比对的能力. 国内外已开展较多针对金属固态层裂现象的有限元模拟, 能够与实验结果较好符合, 并且对于金属层裂的有限元模拟结果已用于动力学规律和物理模型的深入研究当中^[14]. 与固态层裂现象比较, 金属微层裂现象由于同时涉及材料熔化、断裂、稀疏大变形, 其模拟难度更高、更加难以与实验结果比对, 国内外公开发表的对金属微层裂的模拟研究较少. 为了深入研究金属微层裂动力学规律并提出物理模型, 针对特定物理现象, 解决模拟中关键问题的关键算法研究显得尤为重要.

本文使用拉氏有限元方法模拟金属微层裂现象, 发现模拟中在稀疏大变形区域存在一种“拉伸不稳定”现象. 数值不稳定现象其实是所有拉氏方法都会遇到的问题, 本质在于计算过程中粒子保能, 不会出现欧氏方法由于离散格式导致的数值黏性, 所以从数值方法的角度看, 人为黏性和人为应力的引入将使拉氏计算更稳定^[15]. 基于上述认识, 本文设计了一种抗拉伸

不稳定人为应力算法来抑制或消除这种拉伸不稳定现象. 引入有限元抗拉伸不稳定人为应力后, 金属微层裂模拟结果能够与实验结果较好符合, 为后续金属微层裂动力学规律和物理模型的深入研究提供模拟算法支撑.

2 金属微层裂模拟中的拉伸不稳定现象

为了认清和揭示金属微层裂模拟中的拉伸不稳定现象的本质, 需要在具备该问题模拟能力的情况下进行深入分析.

有限元方法是一种基于连续介质力学的拉式方法, 若使用有限元方法模拟物理上不连续的介质(如金属断裂区域、液滴破碎区域等), 则一般需要额外引入针对不连续介质的计算方法. 使用有限元方法模拟金属从压缩到断裂不同阶段的应力计算参见图1. 图1中虚线范围内为带限定条件的计算模型算法应用范围(限定条件如熔化、断裂、激波压缩等). 在图1中各种计算模型完备的条件下, 有限元程序即可完成金属微层裂问题的模拟计算.

本文使用交错型有限元方法程序^[16]进行该问题的建模及模拟. 为了适应该问题的模拟, 本文使用的计算模型及相关设置如下.

(1) 金属使用Mie-Gruneisen状态方程及考虑材料熔化效应的Steinberg-Guinan本构模型(基于模拟结果三方可复现考虑, 未使用数据库形式的多相状态方程);

(2) 考虑到金属熔化后为无偏应力的流体状态, 无需使用复杂的损伤断裂模型, 本文使用瞬时断裂模型. 临界断裂判据为极限负压 $P_{\min}$ 判据: 当网格压力 $P < P_{\min}$ 时认为网格内物质断裂;

图1 (网络版彩图)金属受冲击-断裂不同阶段的应力计算

Figure 1 (Color online) Stress calculation of metal at different stages from impact to fracture.

(3) 当金属达到临界断裂判据后物质发生断裂, 断裂后处理算法为网格全应力置零+保持网格温度为断裂时刻温度不变(目前仍没有较好的宏观模型能描述该过程的温度变化).

金属使用的Mie-Gruneisen状态方程形式如下:

$$P_{\text{EOS}} = \rho_0 c^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\lambda}{2} \mu^2 \right] / \left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \mu^2 / (\mu + 1) - S_3 \mu^3 / (\mu + 1)^2 \right]^2 + (\gamma_0 + \lambda \mu) \rho_0, \quad (1)$$

其中, $\mu = \rho / \rho_0 - 1$.

适用于较高应变率的Steinberg-Guinan本构模型形式如下:

$$G = G_0 \left[1 + b p \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/3} - h(T - 300) \right], \quad (2)$$

$$Y = Y_0 (1 + \beta \varepsilon^n) \left[1 + b p \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/3} - h(T - 300) \right], \quad (3)$$

$$Y_0 (1 + \beta \varepsilon^n) \leq Y_{\text{max}}, \quad (4)$$

$$T = (e - \varepsilon_0) / 3R, \quad (5)$$

$$T_m = T_{m0} \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{2/3} \exp[2\gamma_0(1 - V)], \quad (6)$$

$$\text{If } T > T_m, Y = G = 0, \quad (7)$$

其中, ρ , e , c , T 分别为材料密度、单位质量内能、声速、温度, P_{EOS} 为状态方程计算得到的压力, ρ_0 为初始密度, c_0 为零压声速, S_1 , S_2 , S_3 , γ_0 , λ 为状态方程参数, G_0 为剪切模量, Y_0 为屈服强度, β 为硬化系数, n 为硬化指数, b 为剪切模量硬化系数, h 为温度软化系数, Y_{max} 为最大屈服强度, 熔化温度为 T_{m0} , P_{min} 为断裂判据中材料允许的极限负压.

炸药使用JWL状态方程来描述:

$$P_{\text{EOS}} = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}, \quad (8)$$

其中, P_{CJ} 为炸药爆压, D_{CJ} 为炸药爆速, E 为单位体积爆热, A , B , R_1 , R_2 , ω 为JWL状态方程参数.

使用如下形式的体人为黏性:

$$q = \begin{cases} 0, & \text{div} \mathbf{u} \geq 0, \\ c_1 \rho l |\dot{\varepsilon}_{kk}| c + c_2 \rho l^2 |\dot{\varepsilon}_{kk}|^2, & \text{div} \mathbf{u} < 0, \end{cases} \quad (9)$$

其中, q 为网格人为黏性, c_1 和 c_2 为一次、二次项人为黏性系数, l 为网格等效长度, 三向应变率之和为

$$\dot{\varepsilon}_{kk} = \dot{\varepsilon}_{rr} + \dot{\varepsilon}_{zz} + \dot{\varepsilon}_{\theta\theta}.$$

计算模型采用2017年陈永涛等人^[10]完成的爆轰驱动金属锡微层裂实验设计: 使用 $\varnothing 2.5 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ 的炸药底端中心一点起爆驱动 $\varnothing 2.5 \text{ cm} \times 0.4 \text{ cm}$ 的金属锡飞片, 冲击波到达锡外表面后反射稀疏波, 由外表面向内形成金属锡的微层裂现象. 初始计算建模为二维轴对称1/2模型, 炸药与金属均使用正四边形网格剖分(图2), 炸药网格尺度 $\text{dx} = 0.25 \text{ mm}$, 金属锡的网格尺度 $\text{dx} = 0.125 \text{ mm}$. 计算中CFL数取为 $\text{CFL} = 0.3$, 人为黏性系数 $c_1 = 0.1$, $c_2 = 2$, 表1和2给出了具体模型参数, 模拟结果参见图3-5.

单由模拟结果来看, 存在两个较为突出的非物理现象: (1) 虽然网格沙漏变形不大, 但金属锡拉伸稀疏区的自由面网格与内部网格在速度、密度的连续性存在较大差异; (2) 侧向稀疏肩部区域出现高密度区. 由冲击过程波系分析认为, 冲击波作用于锡自由面后反射稀疏波, 从而锡自由面向内应为速度、密度连续的稀疏区, 不应存在“低密高速”等不连续部分. 金属锡飞片肩部受拉伸作用凸起后(不存在其他波系作用)同样应为物理量较为均匀的拉伸区域, 不应存在高密度区.

图6和7给出模拟结果和实验结果^[10]的对比, 考察模拟中的非物理现象是否影响与实验结果的量化对

图2 (网络版彩图)初始计算模型及网格剖分

Figure 2 (Color online) Initial calculation model and mesh generation.

表 1 高能炸药JWL参数^[17]

Table 1 The JWL EOS parameters of high explosive [17]

参数	数值
ρ_0 (g cm ⁻³)	1.844
P_{CJ} (GPa)	35.7
D_{CJ} (km s ⁻¹)	8.74
A (GPa)	842.04
B (GPa)	21.81
R_1	4.6
R_2	1.35
ω	0.28
E (kJ cm ⁻³)	8.85

表 2 金属锡相关参数

Table 2 The simulation parameters of tin (Sn)

参数	数值
ρ_0 (g cm ⁻³)	7.3
c_0 (km s ⁻¹)	2.59
S_1	1.49
S_2	0
S_3	0
γ_0	2.27
λ	0.54
G_0 (GPa)	17.9
Y_0 (GPa)	0.16
Y_{max} (GPa)	0.22
T_{m0} (K)	656
P_{min} (GPa)	-0.1

比分析需求. 该实验使用了1 MeV中能X射线照相、DPS自由面测速, 获得了特定时刻金属锡样品微层裂

图 3 (网络版彩图)锡微层裂演化过程中不同时刻密度模拟结果

Figure 3 (Color online) Density simulation results of tin micro-spalling at different time.

物质的空间密度分布特征, 并给出了自由面速度结果. 在模拟结果与自由面测速的对比(图6)中将首次起跳时刻与实验对齐. DPS测量结果呈现一定宽度“弥散速度带”特征, 在不考虑微喷颗粒影响情况下, 其下沿速度应与锡自由面速度接近(约为1.9 km/s). 模拟结果自由面速度在断裂后保持不变, 在历程上与实验结果相符, 但自由面速度值偏高约0.1 km/s (约为2.0 km/s). 在与X光照相对比(图7)中将锡密实基体位置与实验结果对齐. X光结果通过密度反演得到微层裂物质的体密度空间分布(图7左为自由面起跳后13.2 μs照相结果, 模拟中起跳时刻约4.3 μs), 由运动时间除以纵向运动距离判定锡样品初始自由面速度约1.9 km/s, 与DPS自由面测速结果吻合. 模拟结果密度伪彩图色标与实验不同, 但可较清晰看到锡基体宽度基本相同, 但头部、肩部形貌、密度差异较大. 实验结果中头部、肩

图 4 (网络版彩图) Time=17.5 μs时刻金属锡网格(左)及密度(右)模拟结果

Figure 4 (Color online) Simulation results of tin density (right) and grid (left) at Time = 17.5 μs.

图 5 (网络版彩图) Time=17.5 μ s 时刻金属锡自由面附近节点速度及单元密度

Figure 5 (Color online) Node velocity and element density near free surface of tin at Time = 17.5 μ s.

图 6 (网络版彩图)自由面DPS测速^[10](红色散点)与模拟结果(黑线)的对比

Figure 6 (Color online) Comparison of free surface velocity between measurement results (red scatter) and simulation results (black line).

部两块稀疏区均密度连续性较好(除轴线上密度反演不准确),从而验证了模拟结果中的两个非物理现象均与实验结果不符。即使我们通过爆轰参数重修修正自由面速度也无法改善模拟结果的密度分布差异。

为了提出改进方案,首先需要深入分析模拟中非物理现象产生的原因。将对称轴上的金属锡自由面网格记为 E_1 ,自由面向内的第2–4层网格分别记为 E_2 , E_3 , E_4 ,图8统计给出了金属锡自由面附近网格的密度、内能、压力、人为黏性随时间的变化关系(图8(c))

图 7 (网络版彩图) Time=17.5 μ s X光结果^[10](左)与模拟结果(右)的对比

Figure 7 (Color online) Comparison of X-ray results (left) and simulation results (right) at Time = 17.5 μ s.

中人为黏性力为压力负方向对应曲线)。

由于自由面网格 E_1 一侧为物质内部连续介质、另一侧为真空间断面,导致其压力、人为黏性作用明显不同于内部网格,内部 E_3 和 E_4 网格压力在约27–28 GPa,而 E_1 网格压力峰值仅约11 GPa。而且与内部网格不同, E_1 网格未发生卸载熔化,为固相。这均使得稀疏波后 E_1 网格状态与内部网格存在不连续,其表象即为在模拟结果中金属的自由面网格脱离物理层裂区,在不受力情况下自由飞散。这使我们联想到使用SPH方法模拟固体在拉伸应力状态下出现的“拉伸不稳定性”现象。Swegle等人^[18]已证明人为黏性和时间积分算法无法消除这种拉伸不稳定性。2001年Bonet和Kulasegaram^[19]认识到,拉伸不稳定性不是单独针对SPH方法,可能是对连续介质方程离散化失稳导致的结果。在拉伸的情况下,材料模型可能出现负的切线刚度矩阵特征值,这时对连续介质的任何离散化都会导致失稳。由于SPH方法与有限元方法都是基于连续介质力学的拉氏计算方法,同时联想到本文使用有限元方法模拟金属拉伸断裂过程所出现的不连续现象,这里认为本文现象可以表述为一种特殊情况下的拉伸不稳定。

已有学者认识到拉氏方法在处理大应变问题时存在的这种天然失稳现象,主要问题在于非连续的微观量和连续介质场间的联系^[20]。同样,针对本文金属熔化状态下的(微介观上非连续的)微层裂区域模拟而言,本文认为这种拉伸不稳定现象出现的本质是由于在拉氏方法中使用了基于连续介质力学的计算方法和材料模型来模拟了微介观上不连续的物质区域(微层裂区)

图 8 (网络版彩图)锡自由面附近网格的密度(a)、内能(b)、压力(c)和人为黏性随时间变化

Figure 8 (Color online) Density (a), internal energy (b), pressure (c) and artificial viscosity of the grids near the free surface of tin vary with time.

的形成过程.

为了抑制该现象, 我们使用了较多的“常规”解决方案, 开展了如下一系列尝试.

(1) 从计算方法层面考虑, 将交错型有限元方法替换为相容型格式, 并将金属材料的体黏性改为张量型人为黏性, 模拟结果中的非物理现象无明显改善;

(2) 从可调计算参数方面考虑, 将人为黏性系数均增加至默认值的4倍($c_1=0.4$), 模拟结果自由面头部速度有所下降但自由面网格仍然脱离层裂区, 进一步增加人为黏性系数则严重影响激波模拟, 不可取;

(3) 从计算模型网格剖分角度考虑, 将网格加密为 $dx=0.05$ mm后该现象仍然存在, 进一步加密网格后网格体积出现负值、计算非正常终止;

(4) 从自编程序在复杂问题中的适应性角度考虑, 以相同计算模型、参数设置, 使用商业软件LS-DYNA计算, 该拉伸不稳定问题可复现.

为了解决该问题, 借鉴SPH方法中抑制拉伸不稳定性的几种途径可能具有可行性, 下面结合金属稀疏拉伸区的形成机理, 考虑引入新的抑制机制来解决该问题.

3 抗拉伸不稳定人为应力方法

针对SPH方法“拉伸不稳定性”, 较多学者已做出很好的工作, 大体上有三种解决途径^[18,19,21-24]: (1) 核函数; (2) 核估计的修正; (3) 动量方程. 其中Monaghan等人^[22,23]通过在动量方程中引入人为应力(Artificial Stress)减弱或消除SPH的拉伸不稳定性, 虽然该人为

应力没有实际物理含义, 但极大程度上稳定了数值计算. 本文认为在有限元方法模拟金属断裂过程中, 为了抑制模拟中的非物理现象、得到与实验较好符合的模拟结果, 同样可以构造抗拉伸不稳定人为应力项, 以期达到稳定有限元计算的同时抑制非物理现象的目的.

首先, 需要明确并提出其限制器范围. 抗拉伸不稳定人为应力仅能作用于存在非物理现象的金属拉伸断裂后处理阶段(图9红色区域), 不能影响其他不存在拉伸不稳定的应力作用阶段. 同时, 考虑到理论上稀疏波作用后拉伸区域应具有的密度连续性, 人为应力大小需要以密度连续性作为指标进行度量.

下面给出抗拉伸不稳定人为应力的具体算法:

Step.1: 对网格单元进行拉伸断裂区内部网格判定, 以限定有限元抗拉伸不稳定人为应力的作用范围. 仅当 E_i 的周围网格 E_{ij} 全部为断裂网格(E_{ij} 的断裂标志 $B_{E_{ij}}=TRUE$.)才施加抗拉伸不稳定人为应力. 若 E_i 周围网格存在非断裂网格($B_{E_{ij}}=FALSE$.), 则认为本网格为金属材料密实基体到断裂稀疏区的过渡状态, 网格内存在密度不连续符合物理认识, 不能施加抗拉伸不稳定人为应力.

Step.2: 在符合人为应力限制器情况下, 计算网格 E_i 的密度梯度 r_i :

$$r_i = \frac{\sum_{j=1, n} (\rho_i - \rho_j)}{n\rho_0}, \quad (10)$$

其中, ρ_j ($j=1, \dots, n$)是与 E_i 相邻的 n 个网格的密度, ρ_0 为金属材料初始密度. 在金属稀疏拉伸区密度场近似线性分布假设下, 密度梯度 r_i 用来区分网格的三种状态:

图 9 (网络版彩图)在红色限制器范围内施加抗拉伸不稳定人为应力

Figure 9 (Color online) Apply artificial stress in the red range of limiter.

- (1) 密度场较均匀情况下, 应存在 $r_i \approx 0$;
- (2) 若 $r_i < 0$, 则网格为过度拉伸状态;
- (3) 若 $r_i > 0$, 则网格出现拉伸不足状态.

Step.3: 计算网格 E_i 的抗拉伸不稳定人为应力 s_i :

$$s_i = \begin{cases} c_{str} r_i \rho_i \dot{\epsilon}_{kk} c_0, & |r_i| \geq r_0, \\ 0, & |r_i| < r_0, \end{cases} \quad (11)$$

$$qs_i = q_i - s_i, \quad (12)$$

其中, c_{str} 为抗稀疏人为应力系数, 经测试 c_{str} 取值近似等于 CFL 数即可; r_0 为可调的拉伸非线性控制系数, r_0 取值主要与计算网格大小及稀疏波速等相关; qs_i 是人为黏性力 q_i 与抗拉伸人为应力 s_i 的合力. 以 qs_i 替换原有限元计算格式中人为黏性项 q_i 来完成复合人为应力的施加. 由式(12)看到, 有限元抗拉伸不稳定人为应力 s_i 与原网格人为黏性力 q_i 是减的关系(s_i 正负由密度梯度 r_i 的正负控制). 但实际上(受限制器限制)抗拉伸不稳定人为应力 s_i 是单独作用于网格主应力上的, 与状态方程压力 P_{EOS} 或原人为黏性力 q_i 的作用区间不重合. 这里将其施加在黏性项上仅为了方便理解其在整体计算中的作用, 而且由于其作用于黏性项, 抗拉伸人为应力的施加不会影响原有限元格式的守恒性.

在保持第2节中计算模型、参数不变情况下, 第4节使用抗拉伸不稳定人为应力算法, 通过模拟结果与实验结果的对比, 验证其有效性并分析其适用性.

4 人为应力方法适用性分析

对本文模型加/卸载状态及稀疏区网格划分状态而言, 取有限元抗拉伸不稳定人为应力算法中的两个

可调参数为 $r_0=0.1$, $c_{str}=0.3$, 图10–12给出了引入抗拉伸不稳定人为应力后的模拟结果.

由应用前后模拟结果的对比来看, 引入抗稀疏人为应力后, 金属基体区域无差异, 原本存在于锡微层裂区的非物理现象得到有效抑制: 微层裂区内部密度、速度连续性较好, 侧向稀疏肩部未出现高密度区.

图13和14给出了引入抗拉伸不稳定人为应力后的模拟结果与实验结果的对比. 与实验结果对比来看, 锡自由面速度更好地符合实验结果, 同时微层裂区厚度、基体厚度均与实验X光照相较好符合, 在校核爆炸参数后可以满足量化对比需求.

由宏观模拟效果来看, 本文引入的抗拉伸不稳定人为应力方法达到了预期目的. 但仍然需要对抗拉伸不稳定人为应力的作用机理进行分析, 以深入了解其作用过程, 从而判定其合理性.

图 10 (网络版彩图)引入抗稀疏人为应力后, 锡微层裂演化过程中不同时刻密度模拟结果

Figure 10 (Color online) Simulation results of density at different times in tin micro spalling after introducing artificial stress.

图 11 (网络版彩图)引入抗稀疏人为应力后, Time=17.5 μ s时刻金属锡的密度及网格情况

Figure 11 (Color online) After introducing artificial stress, the density and grid of tin at Time = 17.5 μ s.

图 12 (网络版彩图)引入抗稀疏人为应力后, Time=17.5 μ s时刻金属锡自由面附近的节点速度及网格单元密度

Figure 12 (Color online) After introducing artificial stress, the node velocity and element density near the free surface of tin at Time = 17.5 μ s.

由于微层裂区网格沙漏变形不大这里暂不考虑网格沙漏力, 仅考虑压力计算中的 P_{EOS} , q_i , s_i 三项应力的变化过程. 图15为金属锡微层裂区对称轴上自由面网格 E_1 的三项应力随时间变化. 图15(b)为图15(a)的区域放大, 给出了5个不同阶段: 阶段(1)是激波加载过程, 状态方程、人为黏性在该阶段起作用; 阶段(2)是自由面稀疏波卸载过程, 受人为黏性限制器限制本阶段人为黏性 $q_i=0$; 阶段(3)为 E_1 网格已断裂、但网格仍与密实基体网格连接阶段, 受限制器限制, 本阶段抗拉伸不稳定人为应力 $s_i=0$; 阶段(4)为抗拉伸不稳定人为应力单独作用阶段, 随着稀疏区密度梯度降低至 r_0 , 抗拉伸不稳定人为应力逐渐降低至0; 阶段(5)为稀疏区不受任何应力作用、再次自由飞散的过程. 整个作用过

图 13 (网络版彩图)引入抗稀疏人为应力后的模拟结果(黑线)与自由面DPS测速结果^[10](红色散点)的对比

Figure 13 (Color online) After introducing artificial stress, comparison of free surface velocity between simulation results (black line) and measurement results (red scatter).

图 14 (网络版彩图)引入抗稀疏人为应力后, Time=17.5 μ s的模拟结果(右)与X光结果^[10](左)的对比

Figure 14 (Color online) After introducing artificial stress, comparison of X-ray results (left) and simulation results (right) at Time = 17.5 μ s.

程中, 抗拉伸不稳定人为应力最高约为0.1 GPa, 远低于该网格的冲击压力峰值(10.5 GPa)及人为黏性峰值

图 15 (网络版彩图)锡对称轴外界面 E_1 网格的应力随时间变化曲线, (b)为(a)的局部放大

Figure 15 (Color online) The stress curve of E_1 with time on the interface of symmetry axis, (b) is (a) local amplification.

(2.2 GPa); 抗拉伸不稳定人为应力总作用时间约为 $0.8 \mu\text{s}$, 基本不影响稀疏区后续长时间的自由飞散过程.

之前已阐述了该问题的加载条件会使锡自由面向内发生卸载熔化, 未施加抗拉伸不稳定人为应力情况下模拟微层裂区物理量不连续且自由面网格未熔化. 较为遗憾的是, 施加了抗拉伸不稳定人为应力后, 虽然速度、密度连续性有极大改善, 但仍没能使自由面网格达到熔化状态. 结合应力变化(图15)与内能变化(图16)可以看到, E_1 – E_4 网格在断裂后均存在温度变化, 但由于 E_2 – E_4 网格内抗拉伸不稳定人为应力较小且作用时间较短, 其造成的温度变化不明显, E_1 网格内人为应力做功造成的温升也没能使 E_1 达到熔化的程度. 所以, 如何改善温度场的连续性需要从网格温升机制出发进一步开展深入研究, 可能与复杂人为黏性算法类似需要引入更为复杂的抗拉伸不稳定人为应力形式.

5 总结

本文使用有限元方法对爆轰冲击金属锡微层裂现象进行了模拟, 发现自由面速度、微层裂区密度分布均难以与实验达到定量比对的程度, 主要体现为微层裂区内部密度、速度分布不连续且自由面物质未熔化等. 本文分析认为, 这是一种拉伸不稳定现象, 其出现的本质是使用了基于连续介质力学的计算方法和材料

图 16 (网络版彩图)使用抗稀疏人为应力后, 锡自由面附近网格的内能随时间变化

Figure 16 (Color online) After using artificial stress, the internal energy near the tin free surface varies with time.

模型来模拟物理上不连续的物质区域(金属微层裂区)的形成过程.

为了抑制有限元模拟金属微层裂中的非物理现象, 本文在严格限制作用范围情况下提出了抗拉伸不稳定人为应力方法. 引入抗拉伸不稳定人为应力后的模拟结果表明金属微层裂区密度、速度连续性有极大改善、自由面网格脱离现象得到有效抑制, 在密度分

布及自由面速度上均能够与实验较好符合. 本文提出的抗拉伸不稳定人为应力对于其他加载条件(超高速飞片撞击、强激光等)造成金属微层裂的模拟同样可以起到较好效果. 本文算法可拓展应用于其他液态物质拉伸稀疏问题的拉氏模拟计算中. 考虑到SPH方法模拟拉伸过程中存在较多其他算法共同作用, 本文算法拓展应用于SPH方法中的效果仍需要实际测试. 综合来看, 虽然抗拉伸不稳定人为应力是并不真实存在的虚假应力, 但其在金属微层裂稀疏区能够达到稳定计算、减弱或消除非物理现象的作用, 且具有作用范

围限定强、强度小、不影响原守恒性等特点, 可视其为连续介质计算方法中针对非连续的特定问题、特定现象的一种简单有效的处理算法.

需要指出的是, 本文提出的抗拉伸不稳定人为应力没有大幅调整材料温度的作用, 一般不能使微层裂区中未熔化物质达到熔化状态, 这也为算法改进提出要求. 目前, 在实验测量技术和准确性不断提升情况下已有科研团队初步具备了微层裂区物质温度测量的实验研究能力, 后续金属微层裂区温度模拟的准确性将是本领域研究的重点内容之一.

参考文献

- Andriot P, Chapron P, Lambert V, et al. Influence of melting on shocked free surface behavior using Doppler laser interferometry and X-ray densitometry. In: *Shock Waves in Condensed Matter-1983: Proceedings of the American Physical Society Topical Conference held in Santa Fe, New Mexico, July 18–21, 1983*. Amsterdam: North-Holland Physics Publishing, 1984. 277–280
- Remiot C, Chapron P, Demay B. A flash X-ray radiography diagnostic for studying surface phenomena under shock loading. *AIP Conf Proc*, 1994, 309: 1763–1766
- Chen Y T, Hu H B, Tang T G, et al. Experimental diagnostic of micro-spall fragments on Pb surface under intense shock (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2012, 42: 1076–1085 [陈永涛, 胡海波, 汤铁钢, 等. 强冲击加载下铅样品表面微层裂现象诊断. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2012, 42: 1076–1085]
- Wang P, He A M, Shao J L, et al. Numerical and theoretical investigations of shock-induced material ejection and ejecta-gas mixing (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 094608 [王裴, 何安民, 邵建立, 等. 强冲击作用下金属界面物质喷射与混合问题数值模拟和理论研究. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2018, 48: 094608]
- Holtkamp D B, Clark D A, Ferm E N, et al. A survey of high explosive-induced damage and spall in selected metals using proton radiography. *AIP Conf Proc*, 2003, 706: 477–482
- Holtkamp D B, Clark D A, Crain M D, et al. Development of a non-radiographic spall and damage diagnostic. *AIP Conf Proc*, 2003, 706: 473–476
- de Rességuier T, Signor L, Dragon A, et al. Experimental investigation of liquid spall in laser shock-loaded tin. *J Appl Phys*, 2007, 101: 013506
- Chen Y T, Ren G W, Tang T G, et al. Experimental diagnostic of melting fragments under explosive loading (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 62: 116202 [陈永涛, 任国武, 汤铁钢, 等. 爆轰加载下金属样品的熔化破碎现象诊断. *物理学报*, 2013, 62: 116202]
- Chen Y, Ren G, Tang T, et al. Experimental study of micro-spalling fragmentation from melted lead. *Shock Waves*, 2016, 26: 221–225
- Chen Y T, Hong R K, Chen H Y. Micro-spalling of metal under explosive loading (in Chinese). *Expl Shock Waves*, 2017, 37: 61–67 [陈永涛, 洪仁楷, 陈浩玉. 爆轰加载下金属材料的微层裂现象. *爆炸与冲击*, 2017, 37: 61–67]
- Wen X F, Wang X Y, Wang J, et al. A step-signal electric probe technology for recognising the front surface of micro-spall (in Chinese). *Expl Shock Waves*, 2018, 38: 309–315 [文雪峰, 王晓燕, 王健, 等. 可识别微层裂前界面的阶跃信号电探针测试技术. *爆炸与冲击*, 2018, 38: 309–315]
- Zhang F G, Liu J, Wang P, et al. Multi-spall in ductile metal under triangular impulse loading (in Chinese). *Expl Shock Waves*, 2018, 38: 659–664 [张凤国, 刘军, 王裴, 等. 三角波强加载下延性金属多次层裂破坏问题. *爆炸与冲击*, 2018, 38: 659–664]
- He N F, Ren G W, Chen Y T, et al. Numerical simulation on spallation and fragmentation of tin under explosive loading (in Chinese). *Expl Shock Waves*, 2019, 39: 042101 [贺年丰, 任国武, 陈永涛, 等. 爆轰加载下金属锡层裂破碎数值模拟. *爆炸与冲击*, 2019, 39: 042101]
- Zhang F G, Liu J, He A M, et al. Method of determining parameters of void growth damage model and its application to simulation of spall test (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2020, 69: 204601 [张凤国, 刘军, 何安民, 等. 层裂损伤孔洞增长模型参数的确定方法及其应用. *物理学报*, 2020, 69: 204601]
- Liu G R, Liu M B. *Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method* (in Chinese). Changsha: Hunan University Press, 2005 [刘桂

- 荣, 刘谋斌. 光滑粒子流体动力学: 一种无网格粒子法. 长沙: 湖南大学出版社, 2005]
- 16 Yin J W, Pan H, Wu Z H. Stability analysis of interfacial Richtmyer-Meshkov flow of explosion-driven copper interface (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2017, 66: 204701 [殷建伟, 潘昊, 吴子辉. 爆轰驱动Cu界面的Richtmyer-Meshkov扰动增长稳定性. *物理学报*, 2017, 66: 204701]
- 17 Sun C W. *Applied Detonation Physics* (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 2000 [孙承伟. *应用爆轰物理*. 北京: 国防工业出版社, 2000]
- 18 Swegle J W, Hicks D L, Attaway S W. Smoothed particle hydrodynamics stability analysis. *J Comput Phys*, 1995, 116: 123–134
- 19 Bonet J, Kulasegaram S. Remarks on tension instability of Eulerian and Lagrangian corrected smooth particle hydrodynamics (CSPH) methods. *Int J Numer Meth Engng*, 2001, 52: 1203–1220
- 20 Zhao Y P. *Nano and Mesoscopic Mechanics* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2014 [赵亚溥. *纳米与介观力学*. 北京: 科学出版社, 2014]
- 21 Dyka C T, Ingel R P. An approach for tension instability in smoothed particle hydrodynamics (SPH). *Comput Struct*, 1995, 57: 573–580
- 22 Monaghan J J. SPH without a tensile instability. *J Comput Phys*, 2000, 159: 290–311
- 23 Gray J P, Monaghan J J, Swift R P. SPH elastic dynamics. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2001, 190: 6641–6662
- 24 Belytschko T, Guo Y, Kam Liu W, et al. A unified stability analysis of meshless particle methods. *Int J Numer Meth Engng*, 2000, 48: 1359–1400

Artificial stress method resistance to tensile instability in simulating metal microspalling

LIU Jun^{1*}, CAO YanChuang¹, XIONG Jun¹ & WANG Pei^{1,2}

¹ Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing, 100094, China;

² Center for Applied Physics and Technology of Peking University, Beijing 100871, China

Metal microspalling is a phenomenon caused by the tensile failure of near-surface materials in molten metals. To study the dynamics of metal microspalling, the simulation results should be quantitatively compared with the experimental results. However, because of the problem's complexity, the quantitative simulation is challenging. In this paper, the finite element method is used to simulate the detonation-driven metal tin microspalling phenomenon. Because of some nonphysical phenomena in the simulation, it is challenging to compare the velocity of the free surface and the density distribution of the microspalling region to the displacement pin system (DPS) velocity and X-ray results in the experiment. Nonphysical phenomena, such as density and velocity discontinuity in simulating the microspalling region, can be reduced or eliminated via an artificial stress method that can resist tensile instability in simulation. An artificial stress limiter is used to limit its action range to the metal tensile region. The results show that the nonphysical phenomena in the tensile region of microspalling can be effectively restrained using the artificial stress method. The density and velocity continuity of the microspalling region are considerably improved, and the mesh separation of the free surface is effectively suppressed. The simulation results in the density distribution and free surface velocity correlate well with the tin microspalling experiment driven by detonation. The analysis shows that although the artificial stress method's resistance to tensile instability is false stress that does not physically exist, it can achieve stable calculation, weaken or eliminate nonphysical phenomena. Moreover, it has the characteristics of strong action range limitation, small amplitude, and does not affect the original conservation. The work in this paper breaks through the bottleneck of quantitative comparison between simulation and experiment of metal microspalling; in addition, it provides an important simulation technique support for dynamic analysis and physical model research of metal microspalling.

artificial stress, tensile instability, micro spalling, finite element method

PACS: 02.70.-c, 47.11.-j, 47.40.Nm, 47.11.Fg, 83.60.Uv

doi: 10.1360/SSPMA-2021-0093