

高压物理学报

弹体材料在超高速碰撞过程中的物相演化

李依潇 王生捷

Material Phase Evolution in Hypervelocity Impact Process

LI Yixiao, WANG Shengjie

引用本文:

李依潇, 王生捷. 弹体材料在超高速碰撞过程中的物相演化[J]. 高压物理学报, 2019, 33(6):064101. DOI: 10.11858/gywlb.20190723

LI Yixiao, WANG Shengjie. Material Phase Evolution in Hypervelocity Impact Process[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(6):064101. DOI: 10.11858/gywlb.20190723

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190723>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纤维编织材料超高速撞击特性实验研究

Experimental Study of Hypervelocity Impact Characteristics for Fiber Fabric Materials

高压物理学报. 2019, 33(2): 024203 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180654>

球形弹丸超高速撞击靶板时背表面材料破碎的数值模拟分析

Numerical Simulation Analysis of Back Fragmentation of Sphere by Hypervelocity Impact

高压物理学报. 2019, 33(2): 024102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180651>

超高速撞击下47Zr45Ti5Al3V合金的宏观与微观响应行为

Macro- and Micro-Damage Behaviors of 47Zr45Ti5Al3V Alloy in Hypervelocity Impact

高压物理学报. 2017, 31(3): 231 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.03.004>

铝弹丸超高速撞击防护结构的研究进展

Progress of Aluminum Projectile Impacting on Plate with Hypervelocity

高压物理学报. 2019, 33(3): 030112 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190774>

岩石材料冲击开坑行为研究

Deformation of Rock Material Target under High Velocity Impact

高压物理学报. 2017, 31(5): 603 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.05.014>

汇聚型超高速发射装置一级飞片的计算设计

Computational Design of Graded Density Impactors for Convergent Hypervelocity Launchers

高压物理学报. 2015, 29(2): 155 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2015.02.011>

弹体材料在超高速碰撞过程中的物相演化

李依潇^{1,2}, 王生捷²

(1. 中国航天科工集团第二研究院研究生院, 北京 100854;

2. 北京机械设备研究所, 北京 100854)

摘要:在碰撞速度大于10 km/s的超高速碰撞问题中, 弹体材料大部分发生液化、汽化, 以现有技术手段对此类问题进行实验研究存在一定难度。为深入了解超高速碰撞过程中材料物相的演化规律, 揭示不同密度、熔点的材料在超高速碰撞过程中的物相演化特征, 采用物质点法, 结合GRAY三相物态方程, 对铜、镍、铝3种金属材料的超高速碰撞问题进行数值模拟研究, 得到不同碰撞速度下弹体材料物相分布随时间变化曲线, 并总结出材料特性和碰撞速度对物相演化的影响规律, 为开展超高速碰撞等效实验提供参考。

关键词:超高速碰撞; 物质点法; 物相演化; 碰撞速度

中图分类号:O521.2

文献标识码:A

超高速碰撞广泛存在于航天、兵器、天文等领域。在超高速碰撞问题的实验研究中, 最常用的加速设备是轻气炮。二级轻气炮可将弹体加速至8 km/s左右; 对于弹体速度大于10 km/s的超高速碰撞实验, 则通常使用三级轻气炮、电磁炮、爆炸加速器, 然而它们所能发射的弹体质量、尺寸较小, 为此Piekutowski等^[1-3]使用二级轻气炮发射钨弹撞击钨靶, 对碰撞速度大于10 km/s的铝弹-铝靶工况进行等效实验模拟。在测量技术方面, 目前只能通过碎片云X射线照相特征研判、扫描电镜观察校验板金相等间接方法对碎片云的物相进行定性分析, 所能获得的信息有限。受限于现有技术手段, 弹体速度大于10 km/s的超高速碰撞实验数据较为缺乏^[4]。数值模拟既不受加速设备的限制, 又能提取材料在碰撞过程中的全部状态参数, 在此类问题的研究具有重要意义。在超高速碰撞过程中, 材料存在大变形、破碎、相变等现象, 开展数值模拟时需采用适宜的离散方法和物态方程。

物质点法(Material Point Method, MPM)是一种采用拉格朗日质点和欧拉网格双重描述的数值计算方法, 综合了网格法和无网格法的优点。其基本思想是: 将连续体离散成一组携带质量、速度、应力、应变、能量等物质信息的质点, 在物质运动区域建立背景网格, 网格仅用于动量方程的求解和空间导数的计算, 在每一个时间步中, 质点与网格完全固连, 在时间步结束时丢弃已变形的背景网格。物质点法既不存在拉格朗日法的网格畸变问题, 也不存在欧拉法的对流项, 且计算效率优于光滑粒子流体动力学(SPH)方法^[5], 非常适合超高速碰撞问题分析。

在超高速碰撞研究中, 材料的可压缩性不能忽略, 材料的压力需使用物态方程计算。物态方程是用于描述物质压力、内能、体积关系的函数。采用物质点法模拟的每一个时间步内, 通过将所求得的质点体积 V 、内能 E 代入物态方程, 解得当前时刻质点的压力 P 。在碰撞速度大于10 km/s的超高速碰撞问题中, 弹体材料大部分发生液化、汽化, 使用单一相区物态方程难以准确求解材料的压力。GRAY三相物态方程是Royce在Grover液态金属模型与Young-Alder修正范德瓦尔斯方程基础上建立的一种非常实用的三相物态方程模型, 在数值计算中的应用非常广泛。

本研究结合物质点法和GRAY三相物态方程, 对铜、镍、铝3种金属的超高速碰撞问题进行数值模拟, 以获得不同碰撞速度下弹体材料的物相分布随时间变化曲线, 揭示不同密度、熔点的材料在超高速碰撞过程中的物相演化特征, 为深入理解超高速碰撞过程提供参考。

* 收稿日期: 2019-01-29; 修回日期: 2019-03-01

作者简介: 李依潇(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: oldcoon@sina.com

1 物质点法的基本原理

在超高速碰撞问题中,碰撞点附近区域的压力远远大于材料本身强度,可以认为该区域的材料是可压缩流体;材料在超高速碰撞中的变形过程很短暂,可以忽略热传导效应。轴对称冲击动力学分析常使用柱坐标形式的更新拉格朗日格式控制方程,具体形式如下。

$$\text{质量守恒方程} \quad \frac{D\rho}{Dt} + \rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量守恒方程} \quad \left[\begin{array}{c} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rz}}{r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \end{array} \right] = \rho \left[\begin{array}{c} \ddot{u}_r \\ \ddot{u}_z \end{array} \right] \quad (2)$$

$$\text{能量守恒方程} \quad \rho \dot{e} = \sigma_{rr} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \sigma_{\theta\theta} \frac{v_r}{r} + \sigma_{rz} \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \sigma_{zz} \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (3)$$

式中: ρ 为当前密度, t 为时间, r, z 为微元坐标, v_r, v_z 为速度, $\sigma_{rr}, \sigma_{rz}, \sigma_{rz}, \sigma_{\theta\theta}$ 为柯西应力, $\ddot{u}_r, \ddot{u}_z$ 为加速度, e 为单位质量内能。

物质点法将连续体离散为一系列质点,质点的运动代表了物体的运动,质点携带物体的所有物质信息,背景网格结点不存储任何物质信息。物质点法采用质点积分,即将虚功方程中的各项积分转化为被积函数在各质点处的值与该质点所代表的体积乘积之和。在求解动量方程时,质点和背景网格完全固连,随着背景网格一起运动,质点和网格结点之间通过形函数 N_{lp} 建立信息的映射。质点携带的位移、应力等信息的导数,可以由结点信息插值得到^[6]。

物质点法的求解格式如下(其中:下标 p 表示质点携带的变量;下标 I 表示背景网格结点携带的变量; $i=r, z; j=r, z$)。

(1) 将质点的质量和动量通过形函数 N_{lp} 映射到背景网格结点,求得结点质量和动量,分别表示为

$$m_I = \sum_{p=1}^{n_p} N_{lp} m_p \quad (4)$$

$$p_{rI} = \sum_{p=1}^{n_p} N_{lp} m_p v_{rp}, \quad p_{zI} = \sum_{p=1}^{n_p} N_{lp} m_p v_{zp} \quad (5)$$

(2) 对结点动量施加边界条件,进行修正;

(3) 由结点的质量和动量求得结点速度,由此计算质点速度梯度、应变增量和旋量增量,更新质点的体积、应力偏量、内能,其中质点位移导数表示为

$$u_{ip,j} = N_{lp,j} u_{il} \quad (6)$$

(4) 通过物态方程求解质点的压力;

(5) 计算背景网格结点的合力,并根据边界条件进行修正,更新背景网格结点动量,其中结点内力为

$$\begin{cases} f_{rI}^{\text{int}} = -\frac{m_p}{\rho_p} \sum_{p=1}^{n_p} \left(N_{lp,r} \sigma_{rrp} + N_{lp,z} \sigma_{zrp} + \frac{N_{lp}}{r_p} \sigma_{\theta\theta p} \right) \\ f_{zI}^{\text{int}} = -\frac{m_p}{\rho_p} \sum_{p=1}^{n_p} (N_{lp,r} \sigma_{zrp} + N_{lp,z} \sigma_{zrp}) \end{cases} \quad (7)$$

(6) 将背景网格结点位置、速度的变化量映射回质点,更新质点的位置和速度,质点坐标和位移为

$$r_p = N_{lp} r_I, \quad z_p = N_{lp} z_I \quad (8)$$

$$u_{rp} = N_{lp} u_{rI}, \quad u_{zp} = N_{lp} u_{zI} \quad (9)$$

(7) 丢弃已变形的网格,在下一时间步使用未变形的新网格。

2 材料模型

材料模型描述材料在外力作用下的响应,包括本构模型、失效模型和物态方程。

本构模型用于描述材料的偏应力与偏应变的关系, 偏应力更新算法表示为

$$s_{ij}^{n+1} = s_{ij}^n + \left(s_{ik}^n \Omega_{jk}^{n+1/2} + s_{jk}^n \Omega_{ik}^{n+1/2} \right) \Delta t + 2G_0 \left(\dot{\varepsilon}_{ij}^{n+1/2} - \frac{1}{3} \dot{\varepsilon}_{kk}^{n+1/2} \delta_{ij} \right) \Delta t \quad (10)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_{ij} = 0.5(v_{i,j} + v_{j,i})$ 为变形率张量分量; $\Omega_{jk} = 0.5(v_{j,k} - v_{k,j})$ 为旋量张量分量; G_0 为剪切模量; $i = r, z, \theta$; $j = r, z, \theta$; $k = r, z, \theta$ 。

材料在超高速碰撞过程中的屈服应力可用 Johnson-Cook 模型表示

$$\sigma_y = [A + B(\varepsilon^p)^n](1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (11)$$

式中: ε^p 为等效塑性应变, $\dot{\varepsilon}^*$ 为无量纲等效塑性应变率, T^* 为无量纲温度, A 、 B 、 C 、 n 、 m 为材料常数。

超高速碰撞问题涉及材料的冲击破坏, 本研究使用联合失效模型进行描述。当质点的拉应力大于给定值或温度高于熔点时, 质点失效。失效质点的应力偏量为零, 且不能承受拉应力。

在 GRAY 三相物态方程中, 以搭接体积 V_j 为分界, 物质的状态被划分为固-液和液-气两大相区, 其中固-液相区又被划分为固相、熔化相(固液混合相)、液相和热液相 4 个分区。热液相是指在高压条件下未发生汽化的高温液体, 当液相物质的内能继续增加时, 若存在高压环境阻碍物质的膨胀, 使其体积不能超过 V_j , 则在内能超过阈值后物质进入热液相, 若环境压力不足以使物质体积小于 V_j , 则物质进入液-气相。在固-液相区, 物质的状态由 Grover 定标律方程描述; 在液-气相区, 气态由 Young-Alder 方程描述, 液气共存区采用麦克斯韦等面积法则处理^[7]。GRAY 三相物态方程在理论上并不严格, 其液-气相区的具体计算结果并不可靠, 考虑到本研究主要关注材料在超高速碰撞过程中的物相演化, 液-气相只是物相演化过程的最终状态之一, 因此 GRAY 三相物态方程在液-气相区存在的问题对物相演化过程造成的影响很小。

在 GRAY 三相物态方程的原始表达中, 冷能和冷压从以冲击绝热线为参考线的 Mie-Grüneisen 物态方程导出, 在求解温度等状态参数时, 使用由 Mie-Grüneisen 物态方程导出的冷能、冷压数据会导致状态参数表达形式繁琐。本研究使用分子动力学方法直接求解冷能 E_c 、冷压 P_c , 利用内能 E 确定物质所处相区, 计算压力、温度等状态参数。该方法的具体实现方式是: 首先利用分子动力学方法获得冷能、冷压与体积的对应关系, 建立包含足够多数据点的数表, 在使用物质点法模拟超高速碰撞时, 根据质点在该时刻的体积, 利用插值法求得质点的冷能、冷压, 此种冷能、冷压的求解方式不会导致计算量激增, 详见文献 [8]。物态方程的具体表达形式及参数见附录 A。

3 数值方法验证

为验证本研究的数值方法, 选取 Piekutowski 编号为 4-1352 的实验工况^[1], 弹体和靶体材料均为铝合金, 弹体直径 9.5 mm, 靶厚 2.2 mm, 碰撞 6.6 μs 后的碎片云如图 1(b) 所示, 碎片云长 37.7 mm, 宽 34.2 mm。弹体和靶体的离散尺寸选取 0.05 mm, 质点总数 58 010, 背景网格尺寸采用 0.1 mm, 碰撞 6.6 μs 后的数

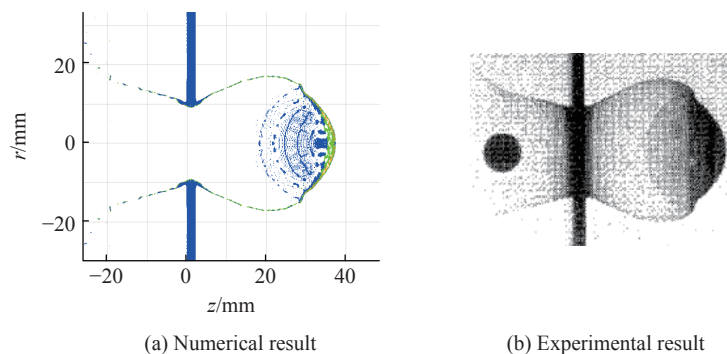


图 1 数值模拟结果与 4-1352 实验结果的对比

Fig. 1 Comparison between numerical result and experimental result of 4-1352

值模拟结果如图1(a)所示,图中蓝色表示材料处于固相,绿色表示材料处于熔化相。在数值模拟结果中,碎片云长37.0 mm,宽33.3 mm,与实验结果的相对偏差小于3%,且碎片云前部呈现出与实验结果相似的阶梯状,证明本数值方法可以较好地模拟超高速碰撞。

由于碰撞速度大于10 km/s的超高速碰撞实验较难实现,因此选取Piekutowski编号为4-1432的铜弹-铜靶等效实验^[1-2]进行对比。在4-1432实验中,铜弹以5 km/s的速度撞击铜靶体,根据Poormon和Piekutowski的观点^[2],4-1432实验结果可以等效为具有相同弹径-靶厚之比的10 km/s铝弹-铝靶碰撞。在数值模拟中,弹体和靶体的材料均为铝合金,弹径为10 mm,靶厚1.6 mm,弹体以10 km/s的速度撞击靶体。弹体和靶体的离散尺寸选取0.05 mm,质点总数47 532,背景网格尺寸采用0.1 mm,碰撞5.7 μ s后的数值模拟结果如图2(a)所示,图中蓝色表示固相,绿色表示熔化相,橙色表示液相,黄色表示热液相,红色表示液-气相。数值模拟结果与等效实验所得碎片云(图2(b))在形态上具有较高的相似性,且图2(a)中碎片云前部的材料分布符合Piekutowski对等效实验结果的分析描述^[1],证明本研究所述方法能够对碰撞速度在10 km/s量级的超高速碰撞问题进行有效模拟,数值模拟所得的物相分布与实际碰撞中的物相分布存在紧密联系。

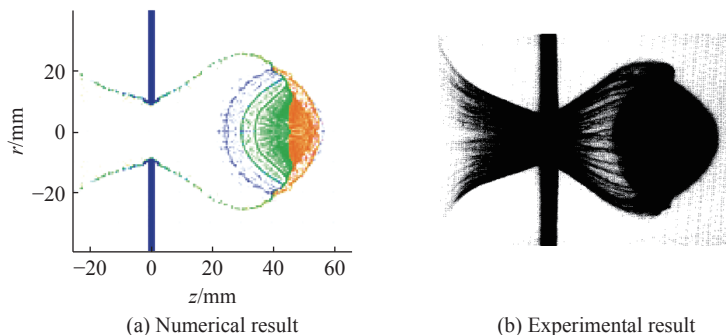


图2 数值模拟结果与4-1432实验结果的对比

Fig. 2 Comparison between numerical result and experimental result of 4-1432

4 数值模拟结果及分析

4.1 参数设置

本算例选取直径为10 mm的球体作为入射弹体,厚度为2 mm的薄板作为靶体。铜和镍的密度设为8.9 g/cm³,铝的密度设为2.7 g/cm³,材料的失效拉应力按Grady失效模型计算,材料模型参数见表1及附录A。弹体和靶体的离散尺寸为0.05 mm,质点总数为55 532,背景网格尺寸为0.1 mm。弹体的入射速度选取4、5、6、7、8、9、10、12和14 km/s。

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

Material	G_0 /GPa	A /MPa	B /MPa	C	n	m
Al	27.6	265	426	0.015	0.34	1.00
Cu	43.9	90	292	0.025	0.31	1.09
Ni	80.2	163	648	0.006	0.33	1.44

4.2 铜弹-铜靶超高速碰撞碎片云

对于铜弹-铜靶超高速碰撞,碰撞5 μ s后部分工况的碎片云如图3所示,其中蓝色、绿色、橙色、黄色和红色分别表示固相、熔化相、液相、热液相和液-气相。当碰撞速度大于10 km/s时,弹体材料大部分发生液化、汽化,处于液-气相区的材料分布形态与Piekutowski^[1]对其实验结果中碎片云前部的描述相符,表明本研究受GRAY三相物态方程固有缺陷的影响很小,数值模拟方法可用且有效。

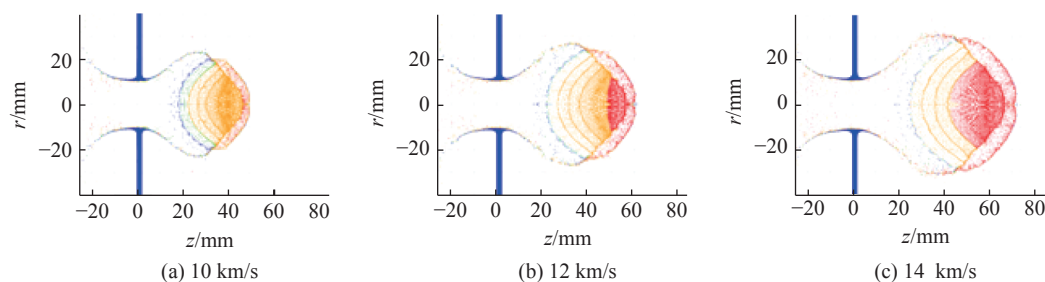


图 3 铜弹-铜靶在不同碰撞速度下的碎片云

Fig. 3 Debris clouds of Cu-Cu hypervelocity impacts at different impact velocities

4.3 铜、镍、铝在超高速碰撞中的物相演化

对于铜弹-铜靶超高速碰撞,当弹体的入射速度低于 5 km/s 时,弹体材料绝大部分(96% 以上)仍保持固相,为此仅选取弹体速度在 6 km/s 以上的工况。弹体速度为 6、8、10、12 和 14 km/s 时,弹体材料的物相分布随时间变化曲线如图 4 所示,图中蓝色、红色、绿色和紫色曲线分别表示固相、熔化相、液相和液-气相。在图 4(a)、图 4(b) 和图 4(c) 中,热液相和液-气相的质量分数较小(小于 5%),故图中没有表示。热液相是 $T > T_G$ (T_G 为液相摩尔热容减小到与单原子分子理想气体摩尔热容相当的温度)的高温高压液体,只在碰撞过程的部分时间段出现,碰撞速度小于 12 km/s 时热液相的质量分数较小(小于 5%),12 km/s 和 14 km/s 两种工况的热液相质量分数随时间变化曲线见图 4(f)。

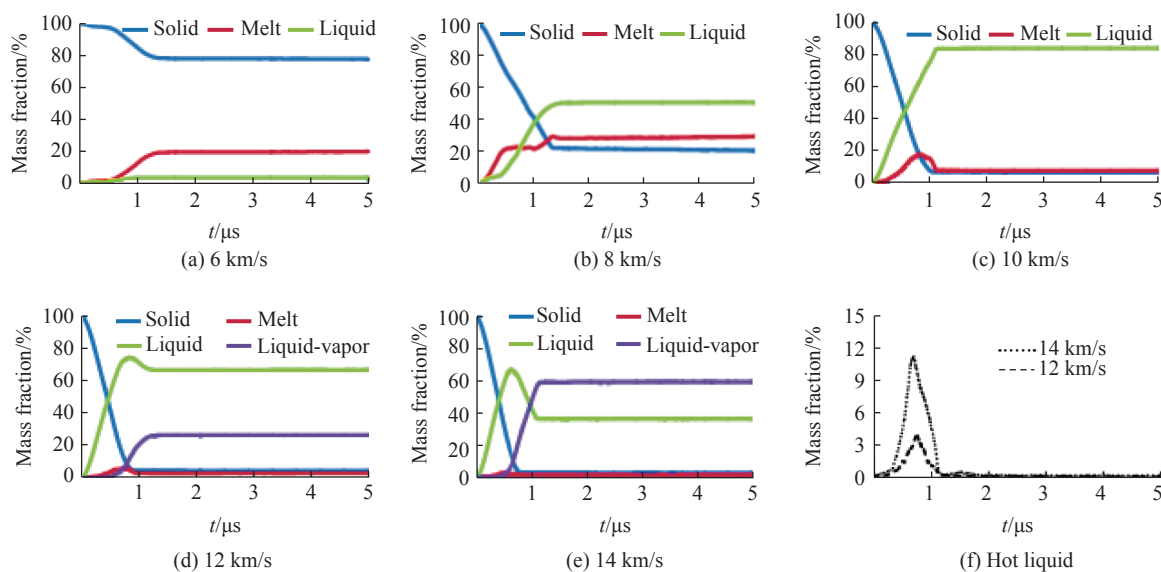


图 4 物相分布随时间变化曲线(铜弹-铜靶超高速碰撞)

Fig. 4 The relation curves of phase distribution vs. time (Hypervelocity impact of Cu-Cu)

图 4(a) 中,由于碰撞速度相对较低(6 km/s),在碰撞初始阶段,固相的质量分数缓慢下降,熔化相的质量分数缓慢上升,随着碰撞过程中弹体动能转化为材料的内能,当能量积累达到阈值后,固相以较快速度转化为熔化相。图 4(b) 中,由于碰撞速度高于图 4(a),从碰撞起始固相就以较快速度转化为熔化相,液相的质量分数则经过能量积累才以较快速度上升。图 4(c) 中,由于碰撞速度相对较高(10 km/s),液相的质量分数从碰撞起始就以较快速度上升;在碎片云膨胀阶段,部分处于熔化相的材料在外部压力减小后转化为液相。图 4(d) 中,同样出现了图 4(c) 中的卸载液化现象,且由于碰撞速度较高(12 km/s),还出现液相转化为液-气相的卸载汽化现象。图 4(e) 中,碰撞速度达到 14 km/s,卸载汽化现象更加明显。

镍的密度与铜接近,但熔点高于铜。图 5(a) 中,当碰撞速度为 12 km/s 时,镍弹-镍靶工况没有出现图 4(d) 中的卸载汽化现象,而出现较明显的卸载液化现象,曲线形态与图 4(c) 相似。图 5(b) 中,出现了

与图4(d)相似的卸载汽化现象。图5(a)和图5(b)与图4(c)、图4(d)、图4(e)的对比说明,高熔点材料的液化及汽化能量阈值高于低熔点材料,高熔点材料的物相分布随时间变化曲线与低熔点材料在碰撞速度较低时的曲线有相似性。

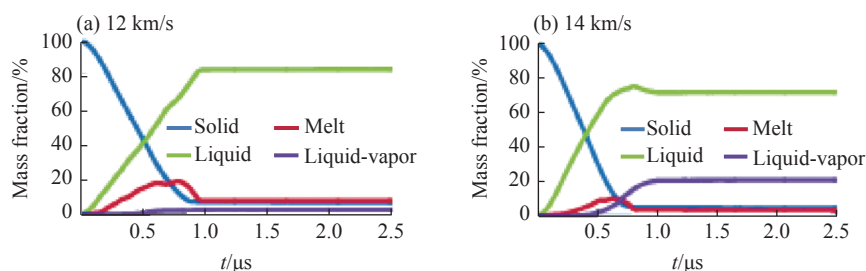


图5 物相分布随时间变化曲线(镍弹-镍靶超高速碰撞)

Fig. 5 The relation curves of phase distribution vs. time (Hypervelocity impact of Ni-Ni)

铝的密度和熔点均小于铜,图6(a)中出现了与图4(c)相似的卸载液化现象。图6(b)中,虽然碰撞速度达到14 km/s,但是仍没有明显的卸载汽化现象,除液-气相的质量分数较高、熔化相的质量分数较低之外,曲线形态仍与图4(c)相似。图6(a)和图6(b)与图4(c)、图4(d)、图4(e)的对比说明,高密度材料弹体的动能较大,高密度材料的物相分布随时间变化曲线与低密度材料在碰撞速度较高时的曲线有相似性。

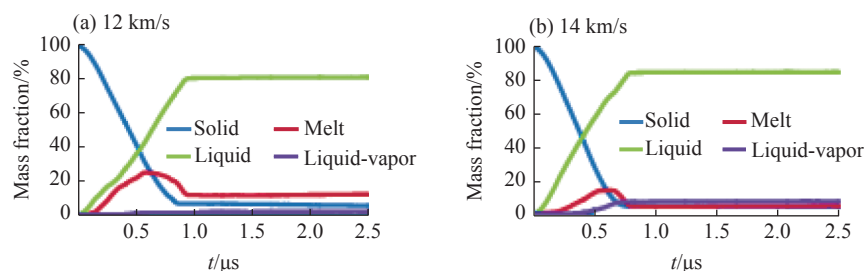


图6 物相分布随时间变化曲线(铝弹-铝靶超高速碰撞)

Fig. 6 The relation curves of phase distribution vs. time (Hypervelocity impact of Al-Al)

铜、镍、铝3种金属弹体在超高速碰撞过程中趋于稳定后的物相分布与碰撞速度的关系见图7。在本研究的工况中,对于铜弹-铜靶,5 km/s和6 km/s分别是熔化相和液相开始快速增加的特征碰撞速度,7 km/s是熔化相质量分数开始下降的特征碰撞速度,10 km/s是液-气相质量分数开始快速增加、液相质量分数开始下降的特征碰撞速度;对于镍弹-镍靶,6 km/s和7 km/s分别是熔化相和液相开始快速增加的特征碰撞速度,8 km/s是熔化相质量分数开始下降的特征碰撞速度,12 km/s是液-气相质量分数开始快速增加、液相质量分数开始下降的特征碰撞速度;对于铝弹-铝靶,6 km/s和7 km/s分别是熔化

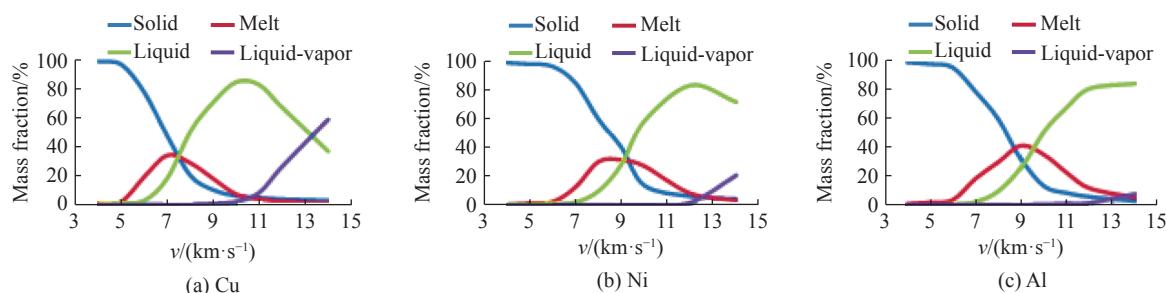


图7 物相分布随碰撞速度变化曲线

Fig. 7 The relation curves of phase distribution vs. impact velocity

相和液相开始快速增加的特征碰撞速度, 9 km/s 是熔化相质量分数开始下降的特征碰撞速度, 12 km/s 是液-气相质量分数开始快速增加的特征碰撞速度, 液相质量分数直到 14 km/s 也未发生明显下降。

铜、镍、铝 3 种不同密度、熔点金属的超高速碰撞数值模拟结果表明: 不同熔点、密度的材料在超高速碰撞过程中具有相似的物相演化特征。对于密度相近的材料, 熔点较高材料的物相分布随碰撞速度的变化曲线相对熔点较低材料存在沿速度轴整体性右移现象。铜的熔点和密度均高于铝, 铝的物相分布随碰撞速度变化曲线相对于铜也存在沿速度轴整体性右移现象, 原因是铝的密度较小, 相同尺寸的弹体在较高速率下的动能具有与铜弹在较低速度时相同的动能。因此, 在超高速碰撞过程中, 高密度、低熔点金属材料在碰撞速度较低时的物相分布与低密度、高熔点金属材料在碰撞速度较高时的物相分布相似。

Piekutowski 等^[1-2]用较低碰撞速度下的铜弹-铜靶(铜的密度高于铝, 熔点低于铝)模拟较高碰撞速度下的铝弹-铝靶, 通过观察碎片云形态, 认为碰撞速度为 v 的铜弹-铜靶实验可以等效碰撞速度为 $2v$ 的铝弹-铝靶实验(Mullin 等^[9]认为比例系数约为 2.65), 其实验结果有效地证明二者的物相演化特征具有相似性。由于铜不是常见结构材料, 其物态方程参数较难获取, 因此本研究无法对铜弹-铜靶的超高速碰撞进行数值模拟。铜的密度与铝接近, 而熔点高于铝; 由图 7(a) 和图 7(c) 可知, 铝的特征碰撞速度约为铜特征碰撞速度的 1.2~1.3 倍; 由图 8 可知, 对于碰撞速度为 v 的铜弹-铜靶工况, 碎片云在形态、物相分布等方面均与碰撞速度约为 $1.25v$ 的铝弹-铝靶工况的碎片云存在较大的相似性, 表明可以利用碰撞速度为 v 的铜弹-铜靶实验等效碰撞速度为 $1.25v$ 的铝弹-铝靶实验。铜的熔点低于铝, 可用于进行比例系数更大的等效实验。

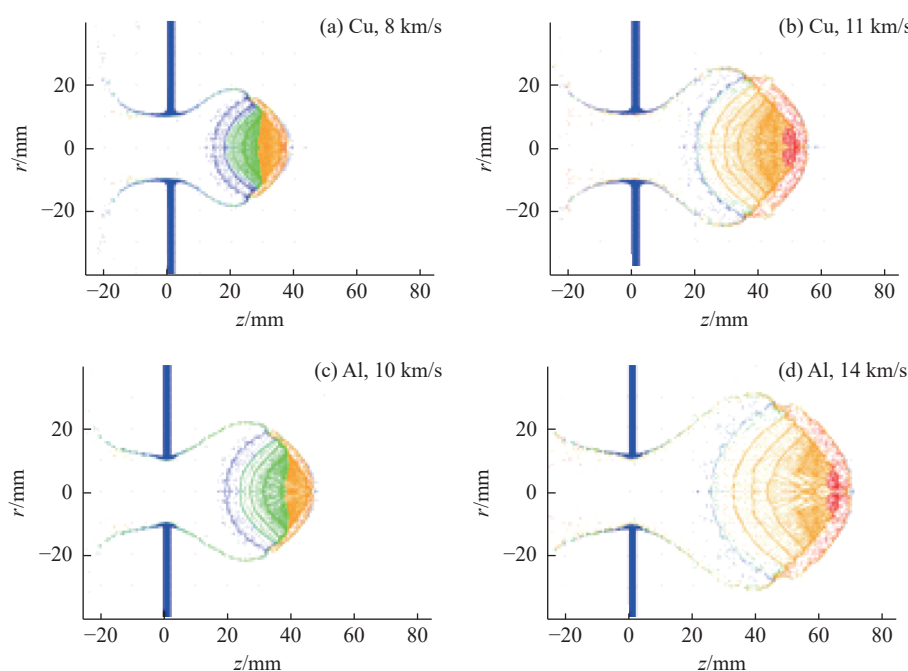


图 8 铜弹-铜靶和铝弹-铝靶碰撞产生的碎片云对比

Fig. 8 Comparison of debris clouds formed by hypervelocity impact between Cu-Cu and Al-Al

5 结 论

- (1) 将物质点法与 GRAY 三相物态方程相结合, 可以有效模拟碰撞速度在 10 km/s 以上的超高速碰撞;
- (2) 对于给定工况, 不同密度、熔点材料的物相分布随碰撞速度的变化曲线在形态上具有相似性, 但是由于密度(弹体动能)和熔点(相变能量阈值)不同, 物相分布随碰撞速度变化曲线的特征碰撞速度不同, 密度较大、熔点较低的材料, 其特征碰撞速度相对较小;

(3)使用镉弹-镉靶能够对铝弹-铝靶在更高速度的碰撞进行等效实验模拟的原因是,镉的密度高于铝而熔点低于铝,镉弹-镉靶超高速碰撞的物相分布随碰撞速度的变化曲线相对于铝沿速度轴整体性左移,所以隔弹-镉靶在较低的碰撞速度下呈现出与铝弹-铝靶在较高碰撞速度下相似的物相分布,从而在碎片云形态上具有相似性;

(4)本研究主要基于数值模拟,目前尚缺乏直接实验验证的技术条件,所得结论存在一定的局限性。

参考文献:

- [1] PIEKUTOWSKI A J. Formation and description of debris clouds produced by hypervelocity impact: NASA Contractor Report 4707 [R]. USA: Marshall Space Flight Center, 1996.
- [2] POORMON K L, PIEKUTOWSKI A J. Comparisons of cadmium and aluminum debris clouds [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, 17(4/5/6): 639–648.
- [3] SCHMIDT R M, HOUSEN K R, PIEKUTOWSKI A J, et al. Cadmium simulation of orbital-debris shield performance to scaled velocities of 18 km/s [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1994, 31(5): 866–877.
- [4] 唐蜜. 基于欧拉方法的超高速撞击程序研制及碎片云物相分布数值模拟 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2015: 3–8.
- [5] MA S, ZHANG X, QIU X M. Comparison study of MPM and SPH in modeling hypervelocity impact problems [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(2): 272–282.
- [6] 张雄, 廉艳平, 刘岩, 等. 物质点法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 46–50.
- [7] 汤文辉, 张若棋. 物态方程理论及计算概论 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 159–167.
- [8] 李依潇, 王生捷. 使用新型物态方程的超高速碰撞物质点法模拟 [J/OL]. *爆炸与冲击* [2019-01-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1148.O3.20181203.1126.006.html>.
- LI Y X, WANG S J. Simulation of hypervelocity impact by the material point method coupled with a new equation of state [J/OL]. *Explosion and Shock Waves* [2019-01-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1148.O3.20181203.1126.006.html>.
- [9] MULLIN S A, ANDERSON JR C E, WILBECK J S. Dissimilar material velocity scaling for hypervelocity impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 29: 469–485.
- [10] ROYCE E B. GRAY, a three-phase equation of state for metals: UCRL-51121 [R]. USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1971.

附录 A GRAY 三相物态方程

本研究采用的GRAY三相物态方程如下。

设 m 为物质点的质量, M 为材料的摩尔质量, 物理量加撇表示经过除以 M 换算, R 为普适气体常量, G_e 为常态电子比热容系数, ΔS 为熔化熵, $\alpha = 0.15R$, $\Gamma = 3R/2\alpha$, γ 为 Grüneisen 系数, γ_e 为电子的 Grüneisen 系数, T_m 为熔点, δT 为熔化相温度范围的一半, E_{m1} 为区分固相与熔化相的内能值, E_{m2} 为区分熔化相与液相的内能值, μ 是与熔化程度相关的参数, E_G 为区分液相与热液相的内能值。

当 $V < V_J$ 且 $E < E_{m1}$ 时(固相)

$$\begin{cases} E = E_c + m \left(3R'T + \frac{1}{2} G_e' T^2 \right) \\ P = P_c + m \left(\frac{\gamma}{V} \cdot 3R'T + \frac{\gamma_e}{V} \cdot \frac{1}{2} G_e' T^2 \right) \end{cases} \quad (A1)$$

当 $V < V_J$ 且 $E_{m1} \leq E \leq E_{m2}$ 时(熔化相)

$$\begin{cases} E = E_c + m \left[3R'T + \frac{1}{2} G_e' T^2 + \mu (T - \mu \delta T) (\Delta S' - \alpha') \right] \\ P = P_c + m \left[\frac{\gamma}{V} \cdot 3R'T + \frac{\gamma_e}{V} \cdot \frac{1}{2} G_e' T^2 + \frac{\lambda}{V} \mu T_m (\Delta S' - \alpha') \right] \end{cases} \quad (A2)$$

当 $V < V_J$ 且 $E_m \leq E \leq E_G$ 时(液相)

$$\begin{cases} E = E_c + m \left\{ 3R'T + \frac{1}{2}G'_e T^2 + T_m \left[\Delta S' - \frac{\alpha'}{2} \left(1 + \frac{T^2}{T_m^2} \right) \right] \right\} \\ P = P_c + m \left\{ \frac{\gamma}{V} \cdot 3R'T + \frac{\gamma_e}{V} \cdot \frac{1}{2}G'_e T^2 + \frac{\lambda}{V} T_m \left[\Delta S' - \frac{\alpha'}{2} \left(1 + \frac{T^2}{T_m^2} \right) \right] \right\} \end{cases} \quad (A3)$$

当 $V < V_J$ 且 $E > E_G$ 时(热液相)

$$\begin{cases} E = E_c + m \left\{ \frac{3}{2}R'T + \frac{1}{2}G'_e T^2 + T_m \left[\Delta S' + \frac{\alpha'}{2} (\Gamma^2 - 1) \right] \right\} \\ P = P_c + m \left\{ \frac{2\gamma - \lambda}{V} \cdot \frac{3}{2}R'T + \frac{\gamma_e}{V} \cdot \frac{1}{2}G'_e T^2 + \frac{\lambda}{V} T_m \left[\Delta S' + \frac{\alpha'}{2} (\Gamma^2 - 1) \right] \right\} \end{cases} \quad (A4)$$

当 $V \geq V_J$ 时(液-气相)

$$\begin{cases} E = \frac{3}{2}mR'T - \frac{m^2 a'_y}{V} + F_E (C_1 - C_3 T^2) + (D_1 + D_2 T + D_3 T^2) \\ P = \frac{mR'T}{V} Z - \frac{m^2 a'_y}{V^2} + F_P (C_1 + C_2 T + C_3 T^2) \end{cases} \quad (A5)$$

式中: T 为物质点温度, a'_y 为常量, Z 、 F_E 、 F_P 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 D_1 、 D_2 、 D_3 为系数。

$$\begin{cases} z_g = V_b/V, \quad Z = \frac{1 + z_g + z_g^2 - z_g^3}{(1 - z_g)^3}, \quad D_1 = E_{cJ} + mT_{mJ} \left[\Delta S' + \frac{\alpha'}{2} (\Gamma^2 - 1) \right] + \frac{m^2 a'_y}{V_J} \\ C_1 = P_{cJ} + \frac{m^2 a'_y}{V_J^2} + \lambda_J T_{mJ} \left[\Delta S' + \frac{\alpha'}{2} (\Gamma^2 - 1) \right] \frac{m}{V_J}, \quad C_2 = (2\gamma_J - \lambda_J) \frac{3}{2} R' \frac{m}{V_J} - \frac{R' m}{V_J} \frac{1 + z_J + z_J^2 - z_J^3}{(1 - z_J)^3} \end{cases} \quad (A6)$$

以上各式中, 下标 J 表示变量在 $V = V_J$ 时的值, V_b 为常量。表 A1 列出了物态方程参数。本研究未给出表达式的变量、未给出具体数值的参数见文献 [10]。

表 A1 物态方程参数

Table A1 Parameters of equation of state

Material	$G/(\text{Pa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-2})$	V_b/V_0	V_J/V_0	$\alpha'_y/(\text{GPa} \cdot \text{cm}^6 \cdot \text{g}^{-2})$	$M/(\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$
Al	870	0.53	1.347 1	6 450	27.0
Cu	490	0.50	1.401 3	868	63.5
Ni	1 010	0.51	1.407 5	1 190	58.7

Material Phase Evolution in Hypervelocity Impact Process

LI Yixiao^{1,2}, WANG Shengjie²

(1. Graduate School of Second Academy of CASIC, Beijing 100854, China;

2. Beijing Institute of Mechanical Equipment, Beijing 100854, China)

Abstract: It is generally known that phase evolution characteristics of materials under hypervelocity impact obtained are limited by experiments. In this paper, the material point method and GRAY three-phase equation of state were combined to simulate the hypervelocity impact of Cu-Cu, Ni-Ni and Al-Al at different velocities, and the relations between phase distribution and time were obtained. The numerical results show that the phase evolution character of the material with higher density and lower melting point at lower velocity impact is similar to the material with lower density and higher melting point at higher velocity impact. Therefore, the phase evolution characteristics of material with higher density and lower melting under hypervelocity impact point could provide reference to the experiment of common structure materials such as Al under hypervelocity impact.

Keywords: hypervelocity impact; material point method; phase evolution; impact velocity