

爆轰驱动金属飞层对碰凸起和微射流形成的数值模拟研究

刘军 付峥 冯其京 王裴

Simulation study of the colliding bulge and surface micro-jet of metal flyers driven by detonation

Liu Jun Fu Zheng Feng Qi-Jing Wang Pei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 234701 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.234701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冲击加载下液态水的结构相变

Structural transformation of liquid water under shock compression condition

物理学报.2014, 63(12): 126201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.126201>

钒的高压声速测量

Sound velocities of vanadium under shock compression

物理学报.2014, 63(2): 026202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.026202>

纳米多晶铜中冲击波阵面的分子动力学研究

Molecular dynamics investigation of shock front in nanocrystalline copper

物理学报.2013, 62(3): 036201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.036201>

熔化前后 Pb 样品表面微喷射现象研究

Ejecta on Pb surface below and above melting pressure

物理学报.2012, 61(20): 206202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.206202>

在石英界面处液态水的冲击结构相变

The structural transition of water at quartz/water interfaces under shock compression in phase region of liquid

物理学报.2012, 61(19): 196201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.196201>

爆轰驱动金属飞层对碰凸起和微射流形成的数值模拟研究*

刘军[†] 付峰 冯其京 王裴

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

(2015年6月4日收到; 2015年8月4日收到修改稿)

本文对柱面两极点起爆情况下滑移爆轰波驱动两层金属飞层对碰凸起和微射流形成进行了模拟研究. 铅飞层内界面走时计算结果与实验结果能够较好符合. 在两极位置铅飞层内部出现断裂并形成空腔, 内壁面则形成鼓包型凸起; 在赤道位置飞层内壁面凸起后断裂产生大尺度金属颗粒, 其与微喷射形成的小尺度颗粒叠加构成了对碰区凸起现象. 在铅飞层内表面微喷射现象的研究中发现, 两极附近的微喷物质最大速度逐渐下降, 而对碰区附近的微喷颗粒最大速度反而随时间逐渐增高. 之后, 通过设计沟槽型微喷计算模型, 验证了在两极和赤道上铅飞层内表面产生的初始微喷射最大速度能够由同一均匀缺陷表面所产生. 最后, 通过数值模拟分析研究初步给出了该问题中抑制金属飞层对碰凸起和微喷现象的方法.

关键词: 爆轰驱动, 对碰凸起, 微射流, 金属飞层

PACS: 47.15.Uv, 62.50.Ef, 47.11.-j

DOI: 10.7498/aps.64.234701

1 引言

炸药在对向两点起爆情况下产生两个滑移爆轰波与金属飞层斜相互作用, 两对向爆轰波及各飞层内波-波对碰后形成具有复杂波系结构的对碰区. 这种复杂波系结构造成飞层对碰区加载条件的局部剧烈变化, 从而引起金属飞层对碰区表面产生急剧升高的压力和剪切流变, 出现不同于其他区域的失稳、变形、熔化、断裂等现象. 此类问题的理论分析非常困难, 目前多为实验基础上的探索研究^[1-3]. 2013年张崇玉等^[3]在柱面爆轰驱动铅飞层的对碰凸起实验研究中认为铅的强度低、熔点低是其对碰区凸起的主要因素. 由于该问题数值模拟难点较多, 目前国内外公开发表的成果中其模拟研究较少.

在爆轰加载金属飞层运动过程中还会出现飞层表面微喷射现象(金属表面受到强冲击加载时一

部分金属微粒将以大于自由表面速度喷出, 即为金属微喷射现象). 1953年Walsh等^[4]从实验中首次观察到金属微喷射现象. 之后, Asay^[5-7]采用高速飞片加载方式对表面刻有平行楔型沟槽的铝材料进行了微喷实验, 测量了喷射最大速度和喷射量, 得到如下结论: 沟槽型微喷的最大喷射速度与自由面速度的比值范围与平面样品实验结果基本一致. 近年, Andriot等^[8]对阻抗接近的金属材料进行了沟槽微喷实验, 发现微喷的产生与冲击波形和材料特性相关; Remiot等^[9]和Resseguie等^[10]也做了相关实验, 发现熔化机理也是影响喷射量的因素之一. 随着计算水平的提高, 金属微喷的数值模拟研究得到了重视. 2009年王裴等^[11]用SPH方法对金属铝微喷射进行了数值模拟研究, 得到了较好效果; 2014年刘军等^[12]使用欧拉方法对铝材料沟槽微喷问题进行了模拟, 得到了喷射系数、喷射最大速度随沟槽角度的变化关系.

滑移爆轰驱动金属飞层对碰凸起和微射流形

* 国家自然科学基金(批准号: 11372052, 11371065, 11371069)、中物院发展基金(批准号: 2015B0201036)和国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院NSAF联合基金(批准号: U1530261)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: caepcfd@126.com

成的数值模拟同时涉及炸药爆轰、多飞层相互作用、金属材料熔化、断裂等方面, 是典型的多介质弹塑性大变形问题. 本文使用欧拉方法对该问题进行了模拟研究, 其深入研究有利于更好的揭示金属飞层对碰凸起和表面微射流形成的特点和规律, 从而为实际问题找到一些抑制其产生和发展的方法.

2 计算方法简介

本文使用自主开发的三维多介质弹塑性流体力学并行自适应程序“MEPH”^[13]进行计算. 其中, 金属材料使用适用于较高应变率计算的 Steinberg-Guinan 本构模型, 其对冲击波加载-卸载有较好的描述能力, 并能给出材料是否熔化的判定.

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

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

$$Y_0(1 + \beta \varepsilon^p)^n \leq Y_{\max}, \quad (2)$$

$$T = (E - \varepsilon_0)/3R,$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{00} + \varepsilon_{01}x + \varepsilon_{02}x^2 + \varepsilon_{03}x^3 + \varepsilon_{04}x^4,$$

$$x = 1 - \rho_0/\rho, \quad (3)$$

$$T_m = T_{m0} \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{2/3} \exp[2\gamma_0(1 - V)], \quad (4)$$

若 $T > T_m$ 则金属熔化, 取 $Y = G = 0$, 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} . 炸药爆轰使用

Reaugh 反应率函数起爆模型和 JWL 状态方程. 在金属材料断裂计算中, 认为当金属材料密度小于某一断裂密度时材料发生断裂(这里需要指出的是, 当金属熔化后断裂判定也需随之发生一定改变). 对于判定出现断裂的网格, 将网格内的物质密度适当提高, 从而使网格体积份额不满, 这样界面重构方法会自然形成网格内裂缝, 达到使同种或不同种物质在该网格断开的目的. 经测试这种处理办法能很好的模拟材料的拉伸断裂.

3 滑移爆轰驱动铅飞层对碰凸起的数值模拟

本文计算模型的实验装置^[3]为圆柱结构, 其实验模型示意图及平面二维计算模型如图 1 所示. 实验中炸药使用 RHT-901, 由于该炸药计算参数不全, 本文替换为 RX-06-AF 炸药, 该炸药爆压、爆速与 RHT-901 炸药相同, 密度较 RHT-901 低约 3%. 炸药外径 7 cm, 内径 5.4 cm; 炸药外层为 304 钢壳, 厚度 0.1 cm; 炸药包裹铝、铅两层飞层, 外飞层为 0.2 cm 厚的 LY12 铝, 内飞层为 0.25 cm 厚的纯铅. 实验中在柱壳炸药的两极外壁面安装两个雷管同时起爆, 产生滑移爆轰波驱动飞层向内汇聚, 并在赤道位置对碰造成局部凸起.

金属使用 Mie-Gruneisen 状态方程:

$$p = \rho_0 c^2 \mu \frac{\left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1)\mu - \frac{S_2 \mu^2}{(\mu + 1)} - \frac{S_3 \mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu)E, \quad (5)$$

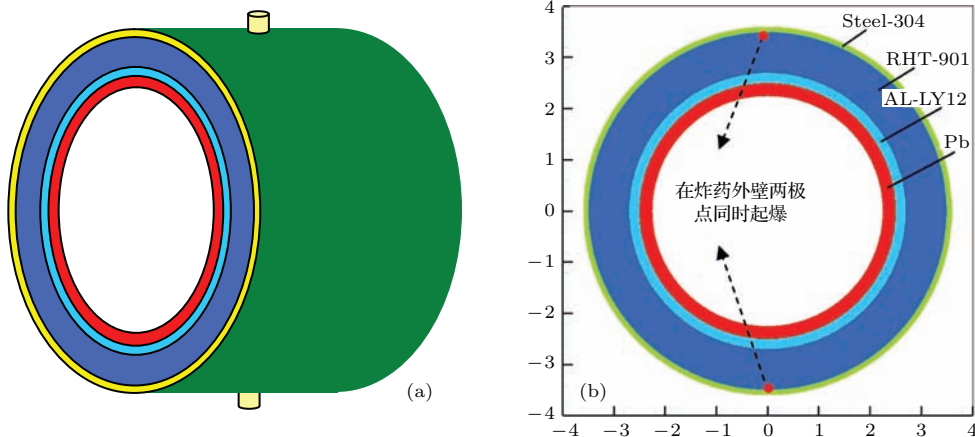


图 1 (网刊彩色) (a) 实验圆柱结构示意图; (b) 计算模型

Fig. 1. (color online) (a) Schematic of experimental setup; (b) Computation model.

其中 $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, $E = e\rho_0$, e 为单位质量内能, ρ_0 为初始密度, c 为零压声速, γ_0 为 Gruneisen 系数.

炸药使用 JWL 状态方程来描述:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \omega E / V. \quad (6)$$

具体计算参数见表 1 和表 2.

计算模型可简化为二维 1/4 模型, X-, Y-方向

设置固壁边界条件, 计算范围 $[0, 4.8] \times [0, 4.8]$ cm, $dx = 0.006$ cm, 计算结果与实验 X 射线图像对比如图 2.

由数值模拟看到, 在两极位置铅飞层内部出现断裂并形成空腔, 从而导致两极飞层内表面形成鼓包型凸起. 由于内表面产生的微喷颗粒尺度极小, 数值模拟和实验 X 射线图中均没有反映出表面微喷射现象.

表 1 RX-06-AF 炸药 JWL 参数 [14]

Table 1. The JWL parameters of RX-06-AF [14].

$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	P_{ej}/GPa	$D/(\text{m}/\text{s})$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E
1658	27	7800	503.03	9.065	4.3	1.1	0.35	7.6

表 2 金属材料相关计算参数 [15,16]

Table 2. The parameters of metals [15,16].

	$\rho_0/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$c_0/(\text{km}/\text{s})$	S_1	γ_0	α	G_0/GPa	Y_0/GPa	Y_{\max}/GPa	T_{m0}/K
LY-12 铝	2.785	5.328	1.34	2.0	0.47	28.6	0.26	0.76	1222
铅	11.34	2.1	1.46	2.74	0.54	8.6	0.008	0.1	760
304 钢	7.9	4.5	1.49	1.93	0.53	77	0.34	2.5	2380

注: 详细计算参数参见文献 [15, 16].

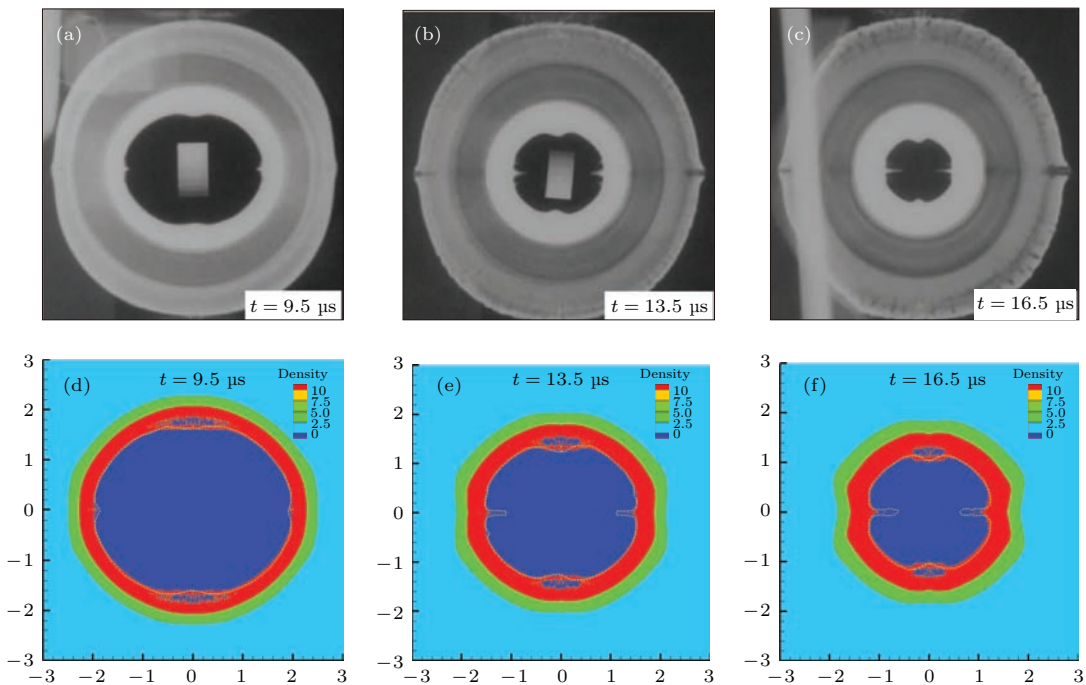


图 2 (网刊彩色) 实验 X 射线图像, 及对应时刻的数值模拟密度图 (黄色虚线为由实验提取的内界面位置)

Fig. 2. (color online) X-ray images, and density images by simulation, the yellow dashed line is the position of inner surface by experiment.

赤道位置上, 铅飞层在对碰后的凸起较为尖锐, 由数值模拟看到对碰区凸起表面到凸起根部长度远小于 X 射线图中测得的凸起长度, 但在对碰后由凸起表面形成了一些大尺度断裂颗粒以高于凸起表面速度喷出. 分析认为正是由于这些大尺度断裂颗粒以较高速度飞出, X 射线图才能够捕捉到该位置的尖锐凸起. 但由于数值模拟网格尺度限制, 不能描述一些近似或小于网格尺度的断裂颗粒, 所以实验中对碰区的大尺度断裂颗粒数量应远多于本文数值模拟结果. 本文认为, 铅材料在赤道对碰后凸起部分并不是连续体, 而是在凸起位置表面发生断裂形成了众多大尺度高速颗粒, 它们和微喷形成的小尺度颗粒共同构成了对碰区凸起现象 (参见图 3).

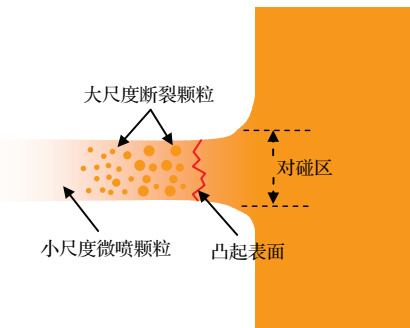


图 3 铅对碰凸起部位构成示意图

Fig. 3. Schematic of the lead colliding bulge structure.

4 铅飞层表面微喷射的数值模拟

4.1 微喷射最大速度计算

实验中的光学图像可以反映 X 射线图像无法反应的微喷颗粒内界面位置. 下面通过实验中的光学图像来对铅飞层内壁面微喷现象的最大喷射速度进行分析研究. 从实验光学图像中提取的内界面走时如图 4.

由实验光学图像读取两极和赤道位置不同时刻微喷颗粒坐标, 另外由数值模拟得到加载波首次作用于两极和赤道铅飞层内界面的时刻 (首次加载波分别于 2.1 μs 和 7 μs 到达两极和赤道内界面). 这样我们就可以得到不同时刻两极和赤道位置上的微喷最大速度 (参见图 5).

这里可以看到一个有趣的现象: 两极附近的微喷物质最大速度逐渐下降, 对碰区 (赤道) 附近的微喷物质最大速度反而随时间逐渐增高, 而一般认为在真空条件下微喷颗粒形成后的最大速度应是保持匀速不变的.

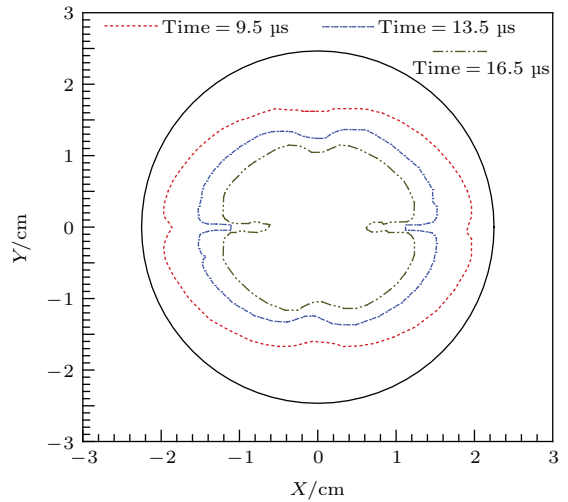


图 4 由不同时刻的光学图像提取的界面位置

Fig. 4. Inner surface position by optical images at different times.

表 3 不同时刻两极端及赤道上的微喷颗粒界面位置

Table 3. Micro-jet particles surface position in pole and equator at different times.

两极端		赤道对碰区	
Time / μs	R /cm	Time / μs	R /cm
2.1	2.25	7	2.25
9.5	1.29	9.5	1.83
13.5	0.85	13.5	1.1
16.5	0.63	16.5	0.5

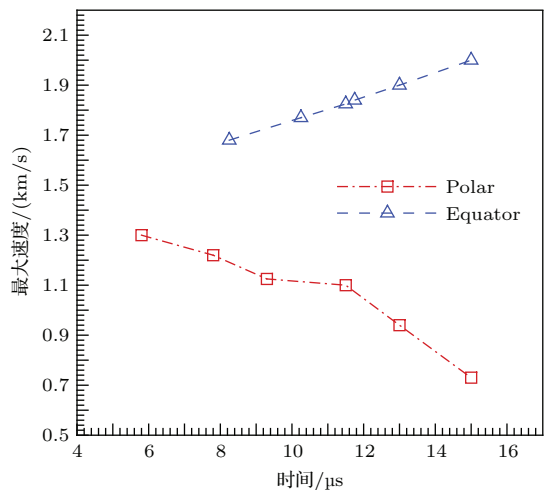


图 5 两极及赤道位置的微喷物质最大速度随时间变化图像

Fig. 5. Max velocity of micro-jet particles in pole and equator.

两极附近的微喷物质最大速度逐渐下降较为容易解释: 在两极产生的微喷射主要为首次加载波作用的结果, 由于该实验在空气中进行, 在两极出

现的微喷颗粒最大速度下降应为微喷颗粒在气体中受到阻力造成的. 而对碰区附近的微喷物质最大速度不降反升这一现象较难理解. 本文认为, 首次加载波作用于对碰区形成了初始最大喷射速度, 而由于首次加载波后还会有后续多个反射、透射波加载, 造成该位置高压持续时间长, 虽然后续加载波的压力峰值较首次加载波低, 但由于后续加载波作用时对碰区自由面已有一个较高的凸起速度, 虽然其造成的微喷颗粒与自由面的最大相对速度较首次加载波低, 但绝对速度则可能超过首次加载波造成的微喷颗粒最大速度. 从而形成了光学图像上对碰区的微喷颗粒最大速度随时间增加的现象.

下面在假设铅飞层内表面的微缺陷数量、形态均匀分布的情况下, 分析两极和赤道位置的初始微喷颗粒最大速度能否自愈, 即在两极和赤道上由首次加载波产生的最大微喷颗粒速度是否能够由同一均匀缺陷表面所产生.

4.2 不同加载条件下的微喷最大速度的数值模拟

Asay 指出平面样品微喷实验结果与沟槽型微喷的最大喷射速度基本一致, 所以这里将具有均匀缺陷的飞层内表面等效为底角为 θ 的三角形沟槽表面. 该计算模型中, 沟槽深度 0.4 cm, 间隔 2 cm. 如图 6 所示.

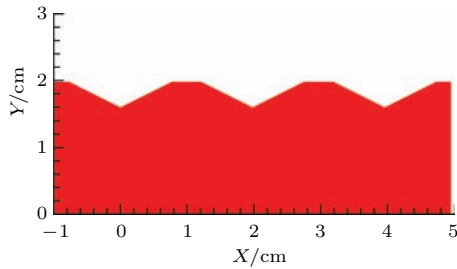


图 6 (网刊彩色) 刻有某一角度沟槽的铅材料计算模型
Fig. 6. (color online) Groove model of lead with some angle.

考虑到微喷尺度极小, 加载方式可等效为由某一速度的飞片撞击形成的方波加载形式, 且该撞击速度可取为首次加载波到达两极和赤道外表面时铅飞层内部达到的最大加载速度. 由数值模拟得到, 对碰区赤道位置可等效为 $V = 0.94$ km/s 的飞片加载; 两极位置的微喷等效为 $V = 0.72$ km/s 的飞片加载 (参见图 7).

经数值计算, $\theta = 127^\circ$ 情况下, $V = 0.72$ km/s 时所产生的微喷颗粒最大速度为 1.32 km/s,

$V = 0.94$ km/s 时所产生的微喷颗粒最大速度为 1.68 km/s, 与实验中的初始最大速度符合较好 (参见图 5), 即两极和赤道位置的微喷最大速度能够自愈, 也侧面说明实验中光学图像所反映的微喷最大位移数据是可靠有效的. 这套办法也可用于预测其他实际问题中关键部位的微喷颗粒最大速度.

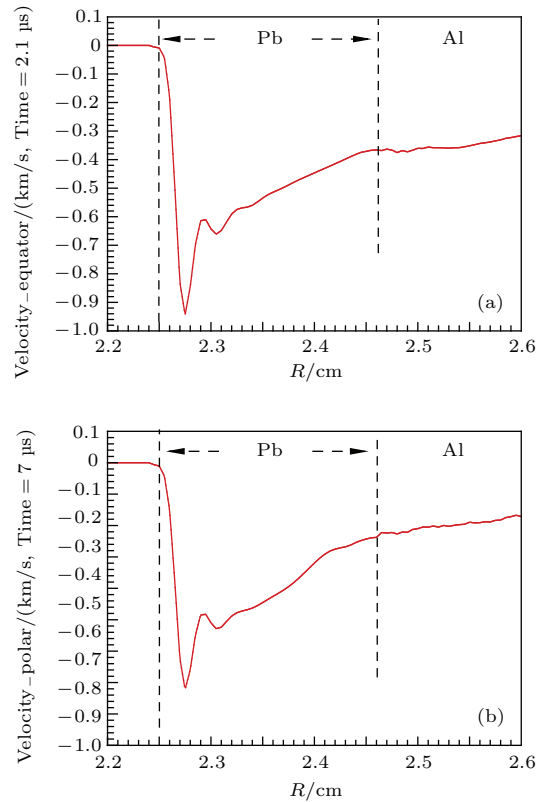


图 7 (网刊彩色) (a) 2.1 μ s 时刻 $X = 0$ 轴向和 (b) 7 μ s 时刻 $Y = 0$ 轴向的飞层内部速度图
Fig. 7. (color online) Flyer inner velocity at (a) 2.1 μ s $X = 0$ axis, and (b) 7 μ s $Y = 0$ axis.

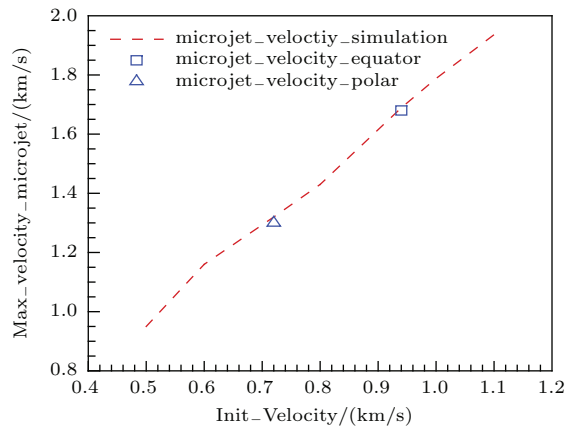


图 8 (网刊彩色) $\theta = 127^\circ$ 沟槽模型中, 微喷颗粒最大喷射速度与加载碰撞速度关系
Fig. 8. (color online) Max velocity of micro-jet particles versus loading impact velocity in $\theta = 127^\circ$ groove model.

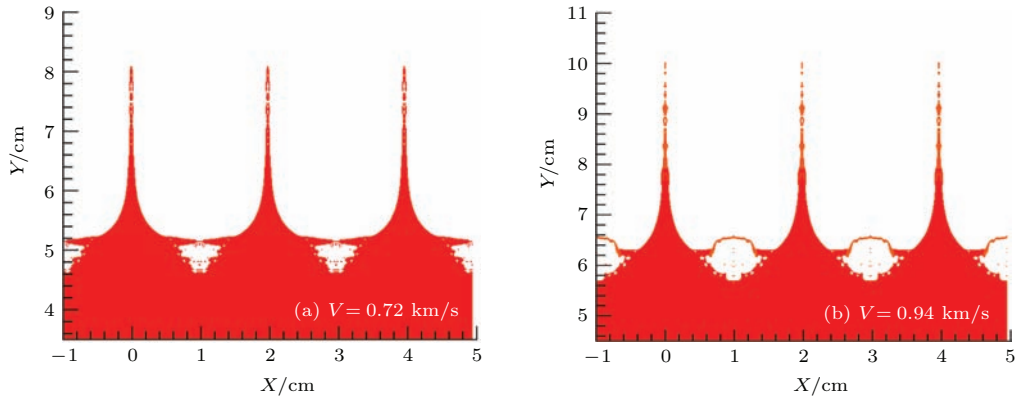


图9 (网刊彩色) 加载波到达沟槽底部开始计时, Time = 50 μs 时刻的物质图

Fig. 9. (color online) Material images at Time = 50 μs which is started on the wave arriving at the bottom of the groove.

5 对碰凸起和微喷现象的抑制方法研究

通过上节分析看到, 材料表面形成微喷的最大速度与首次加载的撞击速度直接相关, 若撞击速度能够降低, 则微喷现象应能得到抑制.

本文给出的办法是: 将起爆点位置由靠近钢壳的炸药外壁两极点同时起爆, 改为靠近铝壳的炸药内壁两极点同时起爆. 这样对两极位置的飞层而言聚心爆轰则变为散心爆轰, 从而使两极飞层的首次加载波由三角波变为近似方波.

数值模拟看到, 修改起爆点后铅飞层内界面最大加载速度仅为 0.27 km/s, 由 3.2 节中的计算得到其形成的微喷最大颗粒速度仅约 0.58 km/s, 所以

由炸药内壁两极点同时起爆的方法能够在不改变飞层走时的条件下明显地抑制两极附近的微喷产生. 而且由于两极铅飞层受到的首次加载波近似为方波, 从而不会形成两极铅飞层内部的断裂空洞, 从而使两极内壁面的鼓包型凸起得到很好的抑制. 该方法对赤道对碰凸起和微喷也有一定的抑制作用, 但不是特别明显.

通过大量模拟研究本文发现, 铅材料由于声速低, 加载波在赤道的对碰角超过了正规反射极限角从而形成了马赫反射, 马赫杆逐渐增长并向铅飞层内表面运动. 正是由于马赫杆对内壁面的高压加载 (约 36 GPa) 造成了铅飞层内壁面具有一定宽度的凸起的形成. 对碰凸起宽度和数值模拟得到的马赫杆宽度基本相同也印证了这一点 (均约为 0.1 cm, 参见图 12).

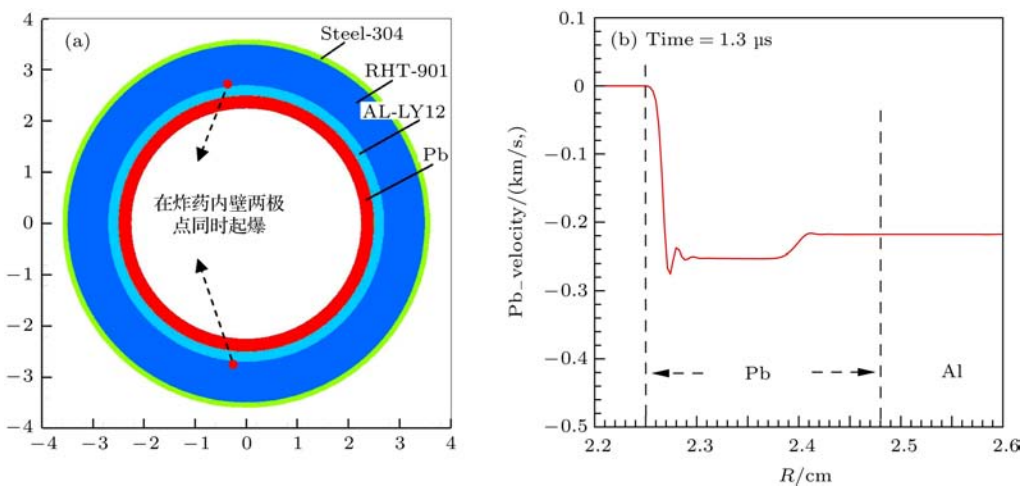


图10 (网刊彩色) (a) 炸药内壁两极点同时起爆; (b) 1.3 μs 时刻 X = 0 轴向飞层内部速度图

Fig. 10. (color online) (a) Detonation at the pole two points near by the flyers, (b) The flyer inner velocity at 1.3 μs X = 0 axis.

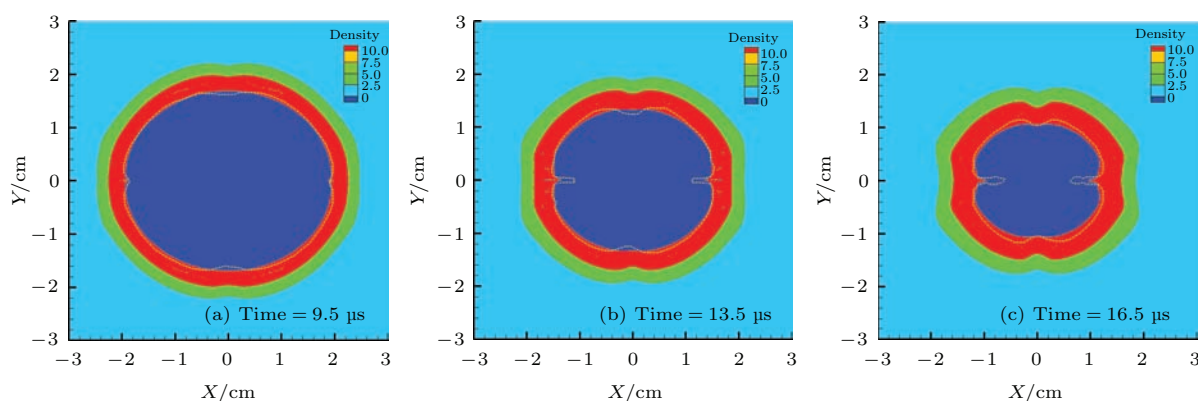


图 11 不同时刻密度图, 黄色虚线为由实验提取的内界面位置

Fig. 11. Density images by simulation, the yellow dashed line is the position of inner surface by experiment.

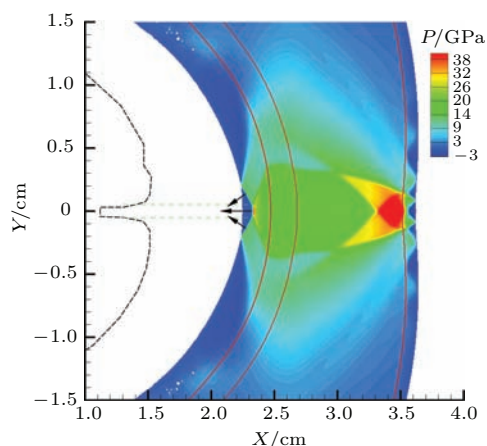


图 12 6.8 μs 对碰区压力图像, 黑色虚线为 13.5 μs 时刻 X 射线内界面

Fig. 12. Pressure image of the colliding area at 6.8 μs, the black dashed line is the inner surface by X-ray at 13.5 μs.

所以本文认为, 若加载波能够在对碰区形成正规反射, 则赤道位置的对碰凸起现象应能够得到抑制. 为了验证这一想法, 本文将铅飞层替换为等质量金属铜, 在其数值模拟中看到铜飞层在对碰区发生了正规反射, 且没有明显的对碰凸起现象产生. 而在本文问题中我们则是通过一些办法来破坏铅飞层在对碰区的马赫反射形成, 通过数值模拟发现也能使铅飞层凸起现象起到较好的抑制. 在不影响界面走时、不破坏聚心效果的前提下对碰凸起问题的抑制办法还需要进行深入的模拟研究和相应的实验验证.

6 结 论

本文对炸药在两点起爆情况下转移爆轰驱动金属飞层对碰凸起和表面微射流形成问题进行了数值模拟. 计算结果与实验结果在关键位置均能较

好符合. 分析认为铅材料在赤道对碰凸起并不连续, 而是会断裂形成一些大尺度颗粒, 这些大尺度颗粒和微喷形成的小尺度颗粒共同构成了对碰区凸起现象.

通过实验中光学图像分析, 发现两极附近的微喷颗粒最大速度逐渐下降, 而对碰区附近的微喷颗粒最大速度反而随时间逐渐增高的现象. 本文认为, 由于对碰位置的后续加载波所形成的微喷颗粒虽然相对速度较低但绝对速度可能高于首次加载波形成的微喷颗粒, 从而形成了对碰部位微喷最大速度升高的现象. 之后, 通过设计沟槽型微喷计算模型, 验证该问题中在两极和赤道上产生的初始微喷最大速度能够由同一均匀缺陷表面所产生.

最后, 提出将起爆点改为由靠近飞层起爆的方法来抑制微喷产生的办法. 改变起爆点后, 两极内壁面的微喷最大速度和鼓包型凸起均得到有效抑制. 对于本文的对碰凸起问题, 认为低声速铅材料在对碰区形成了马赫反射是其对碰凸起的主要原因.

参考文献

- [1] Chandler E A, Egan P O, Stokes J 1999 *UCRL134657*
- [2] Zhang C Y, Hu H B, Li Q Z 2009 *Chin. J. High Pres. Phys.* **23** 283 (in Chinese) [张崇玉, 胡海波, 李庆忠 2009 高压物理学报 **23** 283]
- [3] Zhang C Y, Hu H B, Li Q Z 2013 *Chin. J. High Pres. Phys.* **27** 884 (in Chinese) [张崇玉, 胡海波, 李庆忠 2013 高压物理学报 **27** 884]
- [4] Walsh J M, Shreffler R G, Willig F J 1953 *J. Appl. Phys.* **55** 349
- [5] Asay J R 1976 *SAND76-0542*
- [6] Asay J R 1978 *SAND78-1256*
- [7] Asay J R 1978 *J. Appl. Phys.* **49** 6173

- [8] Andriot P, Chapron P, Lambert V 1984 *Shock Waves in Condensed Matter* Santa Fe, New Mexico, July 18—21, 1983 p277280
- [9] Remiot C, Chapron P, Demay B 1993 *High Press. Sci. Tec.* **2** 1763
- [10] Resseguier T, Signor L, Dragon A 2007 *J. Appl. Phys* **101** 013506
- [11] Wang P, Shao J L, Qin C S 2009 *Act. Phys. Sin.* **58** 1064 (in Chinese) [王裴, 邵建立, 秦承森 2009 物理学报 **58** 1064]
- [12] Liu J, Wang Y J, Feng Q J 2014 *Chin. J. High Pres. Phys.* **28** 346 (in Chinese) [刘军, 王言金, 冯其京 2014 高压物理学报 **28** 346]
- [13] Liu J, He C J, Liang X H 2008 *Chin. J. High Pres. Phys.* **22** 72 (in Chinese) [刘军, 何长江, 梁仙红 2008 高压物理学报 **22** 72]
- [14] Lee E, Finger M, Collins W 1973 *UCID-16189*
- [15] Steinberg D J 1991 *UCRL-MA-106439*
- [16] Li M S, Chen D Q 2001 *Chin. J. High Pres. Phys.* **15** 24 (in Chinese) [李茂生, 陈栋泉 2001 高压物理学报 **15** 24]

Simulation study of the colliding bulge and surface micro-jet of metal flyers driven by detonation*

Liu Jun[†] Fu Zheng Feng Qi-Jing Wang Pei

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

(Received 4 June 2015; revised manuscript received 4 August 2015)

Abstract

In the cylindrical implosion problem, the phenomenon of colliding bulge and surface micro-jet formation of two-layer metal flyers, which are driven by two slip detonations in opposite direction of the pole, is studied by simulation using Euler's program. Simulation results of the inner surface travel times of the lead flyer coincide well with the experimental results. In the polar position, there is a fracture cavity in the lead flyer, and a blunt bulge is formed on the inner surface. At the equator, large-scale fracture particles are generated as the inner surface of the lead flyer is growing. It is considered that the colliding bulge at the equator which seem to be continuous in the X-ray images is actually discontinuous, and it is composed of large-scale fracture particles and small-scale micro-jet particles. By analysis of the inner surface position on the optical images at different times, the maximum velocity of the lead micro-jet particles is obtained. It is found that the maximum velocity of the micro-jet particles is declined in the pole region, but at the equator its maximum velocity is increased with time. It is considered that the subsequent loading waves on the colliding bulge area may cause higher speed of micro-jet particles than the first loading wave. And then, the groove micro-jet model of the lead, which is loaded by impact, is used to be equivalent to the uniform disfigurement surface micro-jet. It is proved that both the micro-jet maximum velocity in the pole region and the velocity at the equator can be formed by the same uniform disfigurement surface, and the correctness of the experimental optical image is also verified. Finally, the restrained method of the colliding bulge and surface micro-jet in this problem is studied by simulation. The micro-jet maximum velocity of the lead flyer can be declined by changing the two opposite initiation points to the points close to the metal flyers in the pole region, and the main cause of collision bulge at the equator is that the Mach reflection is formed in the collision area because of the low sound velocity of lead.

Keywords: detonation drive, colliding bulge, micro-jet, metal flyers

PACS: 47.15.Uv, 62.50.Ef, 47.11.-j

DOI: 10.7498/aps.64.234701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11372052, 11371065, 11371069), the Development Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2015B0201036), and the National Natural Science Foundation of China-Chinese Academy of Engineering Physics Joint Fund(Grant No. U1530261).

[†] Corresponding author. E-mail: caepcfd@126.com