

爆轰波对碰驱动平面锡飞层的动力学及动载行为特征研究

陈大伟 王裴 孙海权 蔚喜军

Loading characteristics and dynamic behaviors of the plane tin flying layer driven by detonation collision

Chen Da-Wei Wang Pei Sun Hai-Quan Yu Xi-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 024701 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.024701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

爆轰波在炸药-金属界面上的折射分析

[Analysis on refraction of detonation wave at the explosive-metal interface](#)

物理学报.2015, 64(11): 114702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114702>

混合物状态方程的计算

[Calculation of equation of state of a material mixture](#)

物理学报.2015, 64(6): 064702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064702>

炸药爆轰的连续介质本构模型和数值计算方法

[A continuum constitutive model and computational method of explosive detonation](#)

物理学报.2014, 63(22): 224702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224702>

来流边界层效应下斜坡诱导的斜爆轰波

[Ramp-induced oblique detonation wave with an incoming boundary layer effect](#)

物理学报.2014, 63(20): 204701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.204701>

密度梯度薄板超高速撞击特性的实验研究

[Experimental study on hypervelocity impact characteristics of density-grade thin-plate](#)

物理学报.2014, 63(2): 024701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.024701>

爆轰波对碰驱动平面锡飞层的动力学及动载行为特征研究*

陈大伟 王裴[†] 孙海权 蔚喜军

(北京应用物理与计算数学研究所, 计算物理重点实验室, 北京 100094)

(2015年8月4日收到; 2015年9月18日收到修改稿)

强冲击下的物质变形、破坏及诱发的轻重介质混合问题, 是内爆压缩科学和工程应用领域的研究重点. 本文针对爆轰波对碰条件下的复杂加载动力学过程及其动载破坏形态特征, 开展数值模拟研究与极曲线理论分析. 设计了爆轰波对碰驱动平面锡飞层的计算模型, 获得了爆轰加载动力学过程及波系相互作用物理图像, 分析了锡飞层对碰区自由表面速度历史的典型特征. 给出了锡飞层中折射激波对碰发生马赫反射的临界条件, 解读了三波结构的传播行为, 阐明了对碰区内存在“一维正冲击”区域, 一维区外存在单次斜冲击向两次斜冲击过渡的复杂加载动力学过程, 提出了对碰区冲击动力学模型, 揭示了影响对碰区动载行为特征的机理. 数值模拟结果与极曲线理论分析结果相互印证, 符合较好. 本文的研究成果, 将为深入理解和解读对碰区特殊的物质破坏及混合现象提供重要的理论支撑.

关键词: 对碰区加载动力学, 动载行为, 数值模拟, 极曲线理论

PACS: 47.40.Nm, 47.40.Rs, 62.50.Ef, 43.28.Mw

DOI: 10.7498/aps.65.024701

1 引言

金属材料经强冲击加卸载后, 将发生相变、变形及破坏等动载行为. 材料破碎产生的颗粒态物质与背景流体发生轻重介质混合现象, 对于材料的压缩效果将产生直接影响. 相关问题已成为工程应用领域的重要研究内容, 同时也是冲击波物理、内爆压缩科学、多相流体力学等学科领域的前沿课题^[1-4]. 根据微喷射等^[5-7]研究成果可以知道, 物质破坏及混合与材料经历的加载动力学过程和加载状态密切相关. 目前对于爆轰波正碰条件下的加载动力学状态及材料破坏行为的研究已取得阶段性进展^[8-10]. 随着研究的深入, 金属材料在爆轰波对碰条件下的复杂加载状态及特殊破坏形态, 逐渐成为当前研究的难点和热点.

爆轰波及激波对碰反射后的高温高压区, 称为

对碰区. 对碰区内将发生独特的表面喷射、断裂破碎等动载行为^[11]. 国内外对此进行了大量的实验研究及数值分析. Singh等^[12]获得了金属圆管对碰部位膨胀变形的X射线图像, 并对其断裂模式进行了分析. 陈军等^[13]利用光学高速分幅照相实验, 测得了金属圆管在两个爆轰波对碰后产物驱动外壳的膨胀、变形过程, 该过程表明爆轰波对碰作用使得对碰处金属圆管相对贯穿断裂时间明显提前, 对碰处金属圆管径向膨胀速度较非对碰处明显增加. 张崇玉等^[14]采用光学阴影照相和脉冲X射线照相, 对柱面内爆对碰驱动下铅飞层对碰区凸起行为进行了实验研究. 结果显示, 铅飞层对碰区出现严重的射流状超前凸起, 凸起行为表现出明显的失稳发展倾向. 张世文等^[15]给出了爆轰波对碰作用下金属圆管运动计算结果, 复现了金属圆管对碰区鼓包现象. 赵永玲等^[16]利用非线性有限元程序LS2DYNA对金属圆管在内爆轰波作用下的变形过

* 国家自然科学基金(批准号: U1530261, 11571002, 11371069)和中国工程物理研究院科学基金(批准号: 2015B0101021, 2013A0201010, 2015B0201043)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wangpei@iapcm.ac.cn

程进行数值模拟分析, 在装药体积和金属圆管材料不变的情况下, 通过改变炸药的种类和金属圆管的壁厚, 研究鼓包部位的速度变化.

综上所述可以看到, 虽然国内外学者通过实验和数值分析, 对于对碰区的凸起、变形以及破坏形态等表观效应取得了一些研究经验和成果, 但由于对碰区的复杂性以及实验材料不透明等因素, 对于对碰区动载行为的机理分析和波系相互作用量化描述研究较少. 另一方面, 工程应用中的高精度装置设计及实验现象解读, 需要确切掌握飞层材料经历的加载动力学过程和加载状态分布特征, 以便进行精细的物理力学研究. 例如, 不同波系相互作用反射模式的波系结构、波后状态及波上升前沿宽度等有很大差别, 而这些因素对于微喷射、材料破碎、不稳定性等均有重要影响.

本文选取金属锡作为飞层材料, 对爆轰波对碰驱动平面飞层的对碰区加载动力学及其动载行为典型特征, 开展细致的数值模拟与极曲线理论研究. 真实再现了流场中的波系结构, 给出了激波强度、对碰角度以及激波对碰反射模式的转换条件, 清晰显示了波系相互作用过程以及反射波系的物理图像, 提出了对碰区冲击动力学模型, 获得了对碰区凸起的形态并进一步揭示了其形成的物理机理. 数值模拟结果与激波极曲线理论分析结果进行了对比验证, 符合较好.

2 极曲线理论

极曲线理论在爆轰波、斜激波对碰反射、界面处的折射现象等^[17]问题中具有广泛应用, 可以给出不同反射模式的临界条件、波后状态等. 采用极曲线理论分析时, 将坐标系固结在波阵面上, 从而使问题定常化, 给出的结果具有重要参考价值. 所谓极曲线是指, 在波前各量已知的情况下, 可以推导给出波后两个量之间的关系式, 该关系式在几何上为一条曲线, 称为极曲线. 比较常用的为 (p, θ) 极曲线, 即波后压力 p 和波前波后质点速度转角 θ 之间的关系, 极曲线表达式与状态方程形式有关. 本文中, 金属飞层采用“刚性气体”状态方程描述, 其形式如下:

$$p = (\gamma - 1)\rho e + c_{00}^2(\rho - \rho_{00}),$$

其中 ρ 为密度, e 为比内能, γ 为绝热指数, ρ_{00} 和 c_{00} 分别是标准状态下的介质密度和声速. 相应的

(p, θ) 极曲线关系式可以写成如下表达式^[18]:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta = \pm & \frac{p - p_0}{\rho_0 q_0^2 - (p - p_0)} \\ & \times \sqrt{\frac{2\rho_0 q_0^2}{(\gamma + 1)p + (\gamma - 1)p_0 + 2\rho_{00}c_{00}^2} - 1}, \end{aligned}$$

其中, p_0, ρ_0 分别为波前介质压力和密度, q_0 为与激波阵面固结的参考系下的来流速度.

下面推导 q_0 的具体计算公式. 由于两等强度斜激波对碰, 相当于一入射激波斜撞击固壁, 从而可以简化分析. 记入射激波与固壁夹角为 α_0 , 马赫杆张角为 ϕ , 规则反射时 $\phi = 0$, 马赫反射时需迭代求解马赫杆张角, 本文采用简单迭代法. 记 α 为 q_0 与入射激波夹角, 则 $\alpha = \alpha_0 - \phi$. 另记激波马赫数为

$$Ma = (D - u_0)/c_0,$$

其中 D, u_0 分别为实验室坐标系下的激波速度和波前流场速度, c_0 为波前声速. 从而由几何关系可以推得

$$q_0 = \frac{Mac_0}{\sin \alpha}.$$

3 数值模拟

3.1 计算模型及参数

爆轰波对碰驱动平面金属飞层的计算模型如图1所示. JOB-9003炸药上方依次放置钢、镁铝、锡飞层. RZ 平面内, 炸药区范围为 $[-20 \text{ mm}, 20 \text{ mm}] \times [0 \text{ mm}, 20 \text{ mm}]$, 钢飞层范围为 $[-25 \text{ mm}, 25 \text{ mm}] \times [20 \text{ mm}, 20.5 \text{ mm}]$, 镁铝飞层范围为 $[-20 \text{ mm}, 20 \text{ mm}] \times [20.5 \text{ mm}, 21 \text{ mm}]$, 锡飞层范围为 $[-20 \text{ mm}, 20 \text{ mm}] \times [21 \text{ mm}, 22.5 \text{ mm}]$. 炸药区与钢飞层相交线段的两端点作为起爆点, $R = 0$ 直线为对碰线.

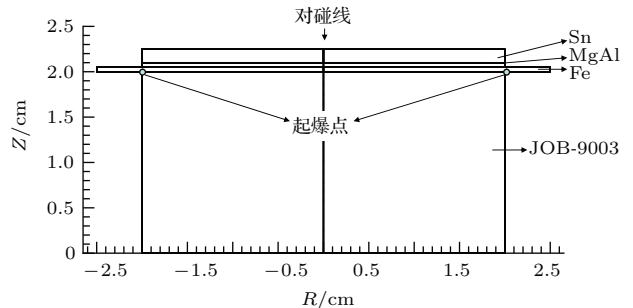


图1 平面模型示意图

Fig. 1. Schematic of plane model.

利用二维拉氏弹塑性流体动力学程序进行数值模拟. 为了有效计算爆轰波传播以及精细捕捉波系相互作用, 炸药区与镁铝飞层正方形计算网格尺度为0.1 mm, 钢飞层与锡飞层正方形计算网格尺度为0.05 mm. 爆轰计算采用两起爆点同时速度起爆方式, 其中左、右起爆点 R 向初始速度分别设置为2.0 km/s和-2.0 km/s, Z 向初始速度均设置为0 km/s. 炸药与钢飞层之间的滑移线设置为单纯滑移, 金属飞层之间的滑移线设置为开穴滑移^[19]. 计算中使用的主要参数为JOB-9003炸药密度1.844 g/cm³, CJ爆压35 GPa, CJ爆速8.74 km/s^[18,20]; 钢密度7.82 g/cm³, 标准状态声速4.57 km/s; 镁铝密度1.78 g/cm³, 标准状态声速4.6 km/s; 锡密度7.3 g/cm³, 标准状态声速2.55 km/s, 绝热指数 $\gamma = 4.8$.

3.2 计算验证

数值模拟JOB-9003炸药起爆及爆轰波传播过程. 以起爆点获得初始速度时刻为时间零点, 典型时刻爆轰流场压力等值线分布如图2所示. 从计算

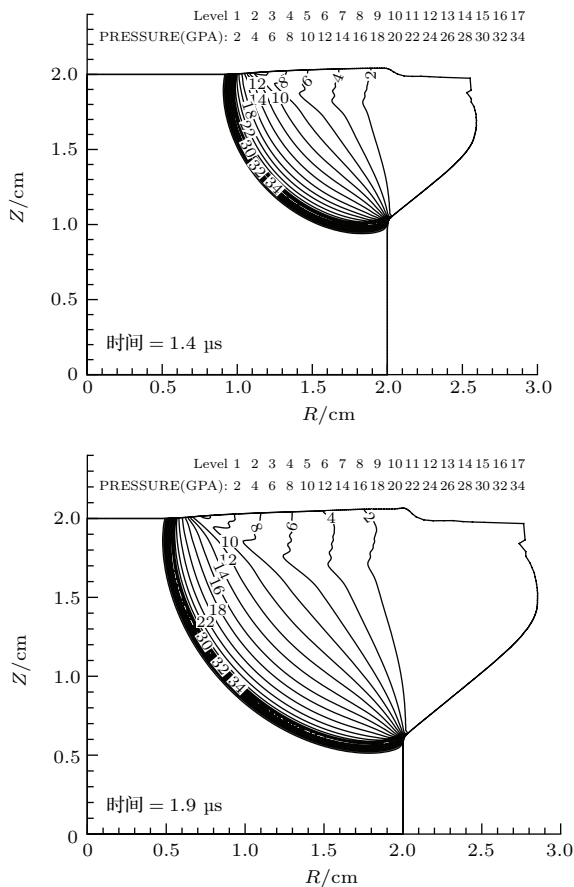


图2 典型时刻爆轰流场压力等值线分布

Fig. 2. Distributions of the pressure contour of the detonation flow field at typical moments.

结果可以看到, 1.4 μ s后计算获得稳定的爆轰状态, 爆轰波波头压力稳定在34 GPa左右. 1.4 μ s时刻, 爆轰波波头前沿位于 $R = 0.95$ cm处. 1.9 μ s时刻, 爆轰波波头前沿位于 $R = 0.52$ cm处. 因此, 可以推算数值计算得到的爆速约8.6 km/s. 与理论值对比可知, 计算得到的爆压及爆速略小于的CJ爆压及CJ爆速. 本文情况下, 由于散心爆轰的影响, 炸药实际的爆压及爆速同样应略小于理论上的CJ爆压及CJ爆速. 从而本文使用的程序及参数设置, 爆轰计算是可靠的. 关于激波反射的计算验证, 我们将在后面的结果分析中, 与极曲线理论结果进行对比说明.

4 结果与分析

4.1 炸药起爆及爆轰波滑移过程波系

炸药两个起爆点起爆后, 产生相向爆轰波向对碰线方向传播. 爆轰波滑移传播过程产生的波系结构如图3所示. 爆轰波与钢飞层界面发生相互作用, 钢飞层中形成折射激波; 钢中折射激波形成后在钢-镁铝界面发生折射现象, 致使镁铝飞层中产生折射激波; 镁铝中折射激波又在镁铝-锡界面发生折射现象, 致使锡飞层中形成折射激波. 可以看到, 1.4 μ s时刻以后, 炸药及各金属飞层中形成了稳定的波系结构, 约2.45 μ s爆轰波传至对碰线处.

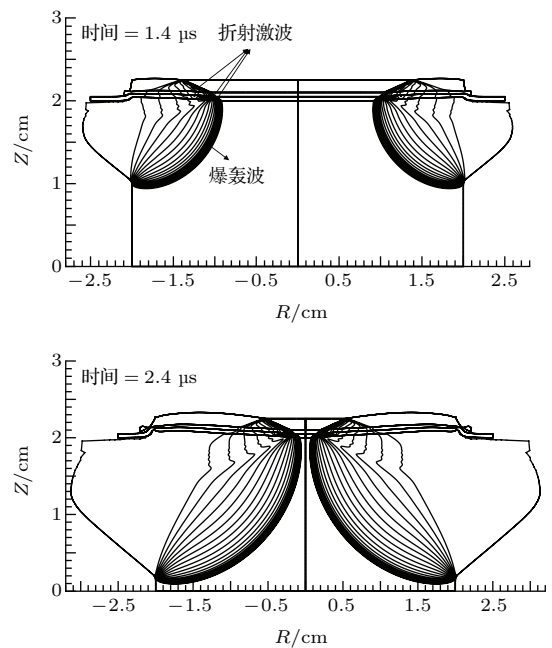


图3 爆轰波滑移过程中的折射波系

Fig. 3. Refraction wave system in the sliding process of detonation wave.

根据图中不同时刻激波所处位置,可计算得到锡飞层中的折射激波与锡自由表面夹角约为 25° ,相向传播的折射激波夹角半角约为 65° ,激波法向传播速度约为 3.727 km/s ,激波马赫数约为 1.462 .

4.2 锡飞层折射激波对碰反射分析

利用极曲线理论获得锡飞层中激波对碰正规反射向马赫反射转换的临界条件,如图4所示.可以看到,激波马赫数在 1.1 到 1.8 范围内,正规反射向马赫反射过渡的临界角,随着激波强度的增加而减小.对于激波强度大于 1.4 时,只要入射激波与固壁夹角 α_0 大于 35° ,就将进入马赫反射区.根据本文中数值模拟给出的锡飞层中的激波条件,极曲线理论预测锡飞层中折射激波对碰将发生马赫反射现象.

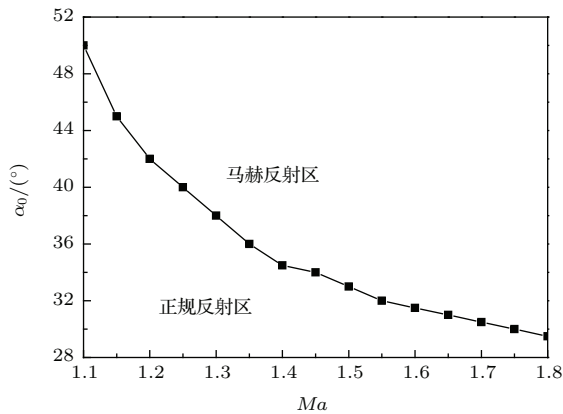


图4 马赫反射的临界条件

Fig. 4. Critical conditions of Mach reflection.

图5为根据计算给出的锡飞层中激波强度和入射角度所画的马赫反射极曲线.可见,理论预测折射激波波后的压力为 19 GPa ,马赫激波波后压力为 48 GPa .

数值模拟给出的激波反射图像如图6所示.从图中可以看到,锡飞层中的折射激波对碰发生了马赫反射,呈现入射波、反射波、马赫波三波结构,与极曲线理论预测相符.三波结构形成后,向自由表面传播.约 $2.8\text{ }\mu\text{s}$ 传至锡飞层中间处,约 $3.0\text{ }\mu\text{s}$ 传至自由表面处.三波结构在传播过程中,将受到非定常流场中的稀疏波的影响,马赫激波范围内不完全是平台区.其中,自由面附近马赫杆平台区 R 向分布范围为 $[-0.2\text{ mm}, 0.2\text{ mm}]$, $[-0.6\text{ mm}, -0.2\text{ mm}]$ 以及 $[0.2\text{ mm}, 0.6\text{ mm}]$ 范围内的马赫杆变弯曲,强度也将随之减弱.

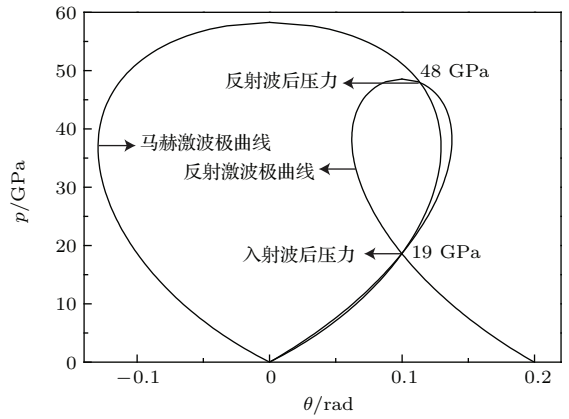


图5 锡飞层马赫反射的极曲线

Fig. 5. Polar curve of the Mach reflection in the tin flying layer.

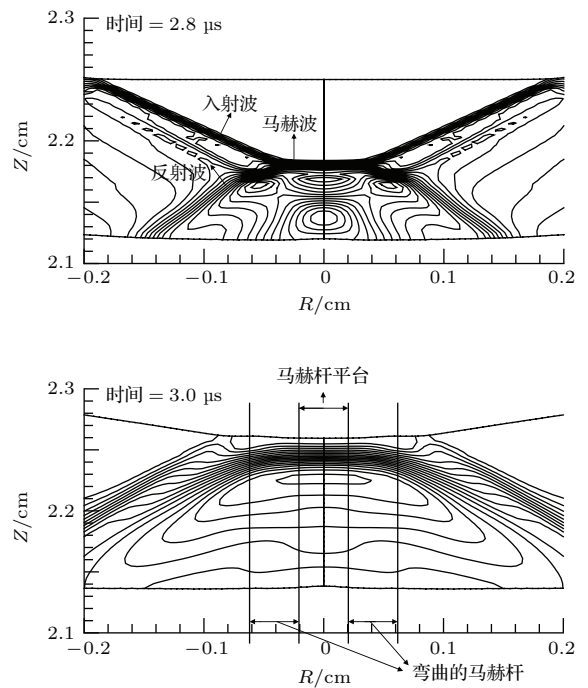


图6 锡飞层中反射波系结构及传播过程

Fig. 6. Structure and propagation process of the reflection wave in the tin flying layer.

锡飞层 Z 向中间部位,经历的冲击加载压力峰值的 R 向分布如图7所示.结果显示,锡飞层对碰区附近经历的冲击加载压力分布不均匀,从 46 GPa 逐渐降到 20 GPa .对碰区的最大压力出现在对碰线附近,数值计算结果与极曲线马赫波后压力的理论预测值符合较好,相对误差在 5% 以内.另外可以看到,锡飞层对碰区高压范围很窄,其中 40 GPa 以上高压范围约 1.2 mm , 30 GPa 以上高压范围也仅约 2.6 mm .锡飞层其余大部分属于滑移加载区,加载压力在 20 GPa 左右,与极曲线入射波后压力理论预测值基本一致.

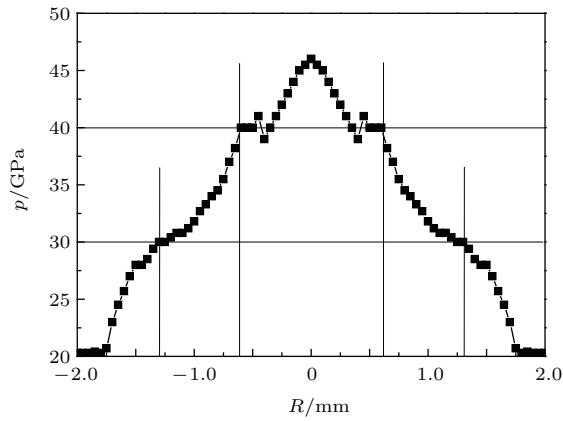


图7 锡飞层冲击加载压力峰值分布

Fig. 7. Peak pressure distributions of the tin flying layer.

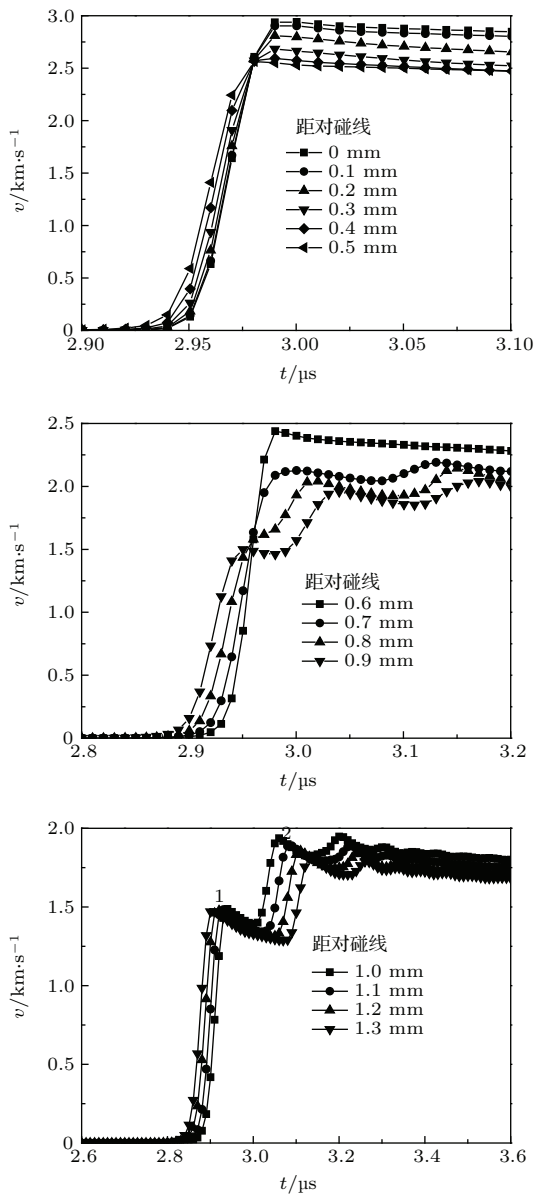


图8 锡飞层对碰区自由面速度历史

Fig. 8. History of free surface velocity in the collision region of tin flying layer.

图8给出了锡飞层对碰区自由面的速度历史. 从图中可以看到, 速度历史呈现分布特征, 不同位置处具有较大差异. 结合图6可以知道, 马赫杆范围内, 即R向分布范围为 $[-0.6\text{ mm}, 0.6\text{ mm}]$ 区域内, 呈现一次冲击加卸载, 包括正冲击和斜冲击两种不同的方式. 其中马赫杆平台区引起的正冲击加载起跳速度可达 3.0 km/s , 弯曲的马赫杆区域, 斜冲击方式使得起跳速度降为 2.5 km/s . 对碰区马赫杆范围外过渡为二次斜冲击加卸载过程, 首次斜冲击后自由面起跳速度约 1.5 km/s , 后经二次斜冲击使得起跳速度提高至 2.0 km/s .

根据上述极曲线理论分析及数值模拟结果, 进一步我们提炼给出锡飞层对碰区冲击动力学模型, 如图9所示. 由于入射激波相向于对碰线传播, 而反射激波背离对碰线传播, 因此图中所示的马赫激波区外的ii点、i点将先后经入射激波加载, 间隔一定时间后, i点、ii点又将先后经反射激波加载, 这就解释了图8中马赫激波区外距对碰线越近的位置首次起跳滞后, 而二次起跳提前的原因. 对碰区内不同位置处, 两次加载的时间间隔差异可能造成不同的破坏状态, 图9所示的波系传播及冲击动力学加载模型, 对于对碰区开展细致的分解性研究、装置设计、实验数据预判与解读具有重要意义.

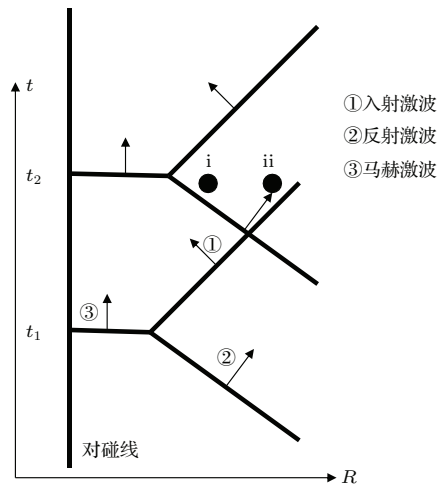


图9 锡飞层对碰区冲击动力学模型

Fig. 9. Impact dynamics model in the collision region of tin flying layer.

4.3 对碰区凸起、破坏形态特征分析

锡飞层对碰区内的反射波系结构及相应的波后高压状态, 将诱发对碰区特殊的材料变形、破坏行为. 图10给出了几个典型时刻对碰区的凸起、破坏形态. 可以看到, 虽然对碰区自由面起跳晚

于滑移区,但由于起跳速度高,加之对碰区高压驱动,对碰区逐渐形成凸起形态,且随着时间推进越来越明显.整个对碰区凸起的 R 向范围约2.6 mm,这与前节得到的对碰区高压(30 GPa以上)范围定量符合.其中 R 向范围约1.2 mm内,呈现严重的凸起变形,这是因为此范围内对碰区压力高达40 GPa以上.严重凸起区可见约0.4 mm的平台区,

这与图6中自由面附近马赫杆平台区域宽度定量一致.

综上所述可以看到,对碰区内的波系对碰反射结构与波后压力分布状态,直接决定对碰区材料响应的形态特征,从而开展加载动力学的精细分析,对于深入理解材料变形、破坏动载行为产生的机理,解读相关实验现象具有重要意义.

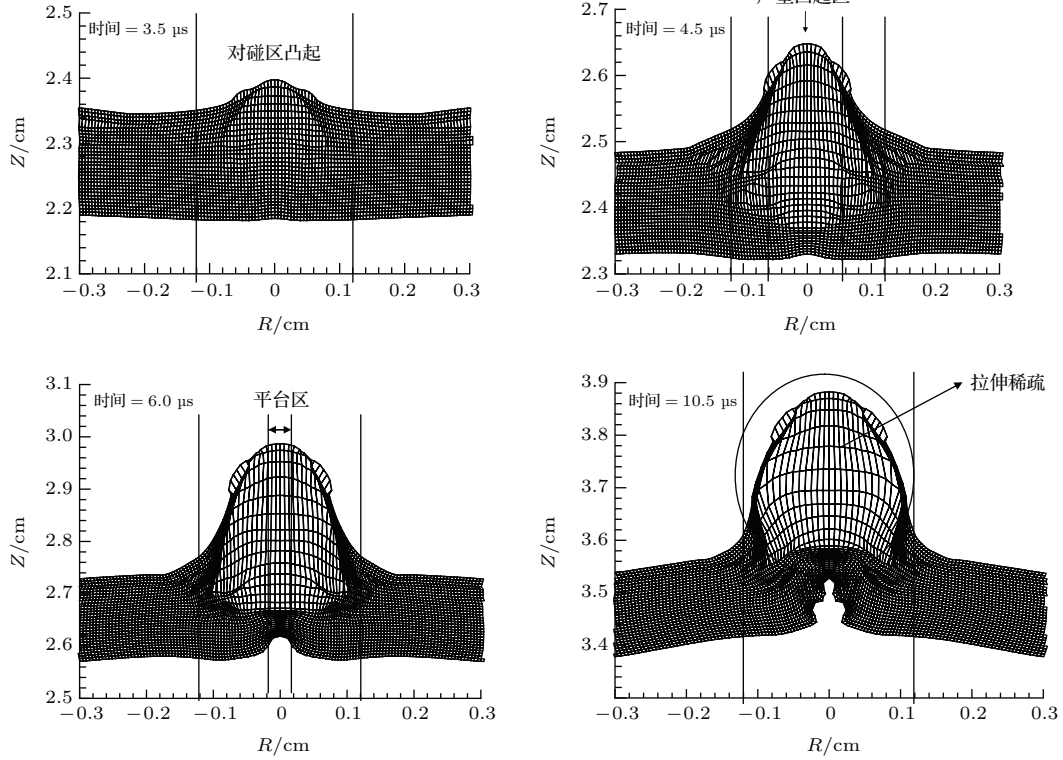


图10 锡飞层对碰区凸起、破坏形态特征

Fig. 10. Characteristics of bulge, fracture in the collision region of tin flying layer.

从图10中10.5 μs 时刻的物理图像可以看到,锡飞层前界面附近约三分之一物质处于强拉伸稀疏状态,经前面分析可知,与其经历的波系相互作用过程有关,将发生微喷、微层裂破坏现象.锡飞层后界面受到很大的侵彻作用,形成原因不在本文讨论范畴.前界面的破坏效应耦合后界面的侵彻作用,严重时可能切断飞层,引起严重后果,进一步的研究有待后续开展.

5 结 论

本文结合极曲线理论与数值模拟,对爆轰波对碰复杂加载条件下,平面金属锡飞层对碰区加载动力学以及相应的动载行为开展细致研究,得到主要结论为:

1) 揭示了对碰区波系相互作用结构、状态、分布与动载行为特征间的联系,提出了锡飞层对碰区冲击动力学模型,为深入研究材料破坏与混合、理解和解读相关实验现象,提供理论基础;

2) 给出了斜激波对碰由正规反射向马赫反射过渡的临界条件,确认了锡飞层中的中等强度折射激波,较大角度对碰将发生马赫反射现象,数值模拟结果与极曲线理论分析结果相互印证,符合较好;

3) 对马赫反射的形成、传播及破坏效应进行了细致考察,获得了直观物理图像,分析了对碰区内丰富的加载特征,包括平面冲击加载、一次斜冲击加载、二次斜冲击加载,给出了冲击压力区间及分布范围,为下一步开展对碰区变形、破坏及混合问题的分解性研究以及装置设计起到重要支撑作用.

参考文献

- [1] Walsh J, Shreffler R, Willig F 1953 *J. Appl. Phys.* **24** 349
- [2] Wang T, Bai J S, Li P, Zhong M 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1127
- [3] Wang P, Sun H Q, Shao J L, Qin C S, Li X Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234703 (in Chinese) [王裴, 孙海权, 邵建立, 秦承森, 李欣竹 2012 物理学报 **61** 234703]
- [4] Shui M, Chu G B, Xin J T, Wu Y C, Zhu B, He W H, Xi T, Gu Y Q 2015 *Chin. Phys. B* **24** 094701
- [5] Zellner M B, McNeil W V, Hammerberg J E, Hixson R S, Obst A W, Olson R T, Payton J R, Rigg P A, Routley N, Stevens G D, Turley W D, Veaser L, Buttler W T 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 123502
- [6] Buttler W T, Oró D M, Preston D L, Mikaelian K O, Cherne F J, Hixson R S, Mariam F G, Morris C, Stone J B, Terrones G, Tupa D 2012 *J. Fluid Mech.* **703** 60
- [7] Shao J L, Wang P, He A M, Qin C S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 184701 (in Chinese) [邵建立, 王裴, 何安民, 秦承森 2012 物理学报 **61** 184701]
- [8] Oró D M, Hammerberg J E, Buttler W T, Mariam F G, Morris C, Rousculp C, Stone J B 2012 *AIP Conf. Proc.* **1426** 1351
- [9] Sun H Q, Wang P, Chen D W, Qin C S 2014 *Explosion and Shock Wave* **34** 392 (in Chinese) [孙海权, 王裴, 陈大伟, 秦承森 2014 爆炸与冲击 **34** 392]
- [10] Fung J, Harrison A K, Chitanvis S, Margulies J 2013 *Computers & Fluids* **83** 177
- [11] Zhang C Y, Hu H B, Li Q Z, Yuan S 2009 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **23** 283 (in Chinese) [张崇玉, 胡海波, 李庆忠, 袁帅 2009 高压物理学报 **23** 283]
- [12] Singh M, Suneja H R, Bola M S, Prakash S 2002 *Int. J. Impact Eng.* **27** 939
- [13] Chen J, Sun C W, Pu Z M, Zhang G S, Gao N 2003 *Explosion and Shock Wave* **23** 442 (in Chinese) [陈军, 孙承纬, 蒲正美, 张光升, 高宁 2003 爆炸与冲击 **23** 442]
- [14] Zhang C Y, Hu H B, Li Q Z 2013 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **27** 885 (in Chinese) [张崇玉, 胡海波, 李庆忠 2013 高压物理学报 **27** 885]
- [15] Zhang S W, Hua J S, Liu C L, Han C S, Wang D S, Sun X L, Zhang Z T 2004 *Explosion and Shock Wave* **24** 219 (in Chinese) [张世文, 华劲松, 刘仓理, 韩长生, 王德生, 孙学林, 张振涛 2004 爆炸与冲击 **24** 219]
- [16] Zhao Y L, Xiao D S, Dai H B 2007 *Journal of Ordnance Engineering College* **19** 30 (in Chinese) [赵永玲, 肖东胜, 戴红彬 2007 军械工程学院学报 **19** 30]
- [17] Yu M, Sun Y T, Liu Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 114702 (in Chinese) [于明, 孙宇涛, 刘全 2015 物理学报 **64** 114702]
- [18] Sun C W, Wei Y Z, Zhou Z K 2000 *Application of Detonation Physics* (Beijing: National Defence of Industry Press) p294–295 (in Chinese) [孙承纬, 卫玉章, 周之奎 2000 应用爆轰物理 (北京: 国防工业出版社) 第 294—295 页]
- [19] Jia Z P, Zhang S D, Yu X J 2014 *Computational Method for Multimaterial Fluid Dynamics* (Beijing: Science Press) p59 (in Chinese) [贾祖朋, 张树道, 蔚喜军 2014 多介质流体动力学计算方法 (北京: 科学出版社) 第 59 页]
- [20] Yu D S, Zhao F, Tan D W, Peng Q X, Fang Q 2006 *Explosion and Shock Wave* **26** 140 (in Chinese) [虞德水, 赵锋, 谭多望, 彭其先, 方青 2006 爆炸与冲击 **26** 140]

Loading characteristics and dynamic behaviors of the plane tin flying layer driven by detonation collision*

Chen Da-Wei Wang Pei[†] Sun Hai-Quan Yu Xi-Jun

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

(Received 4 August 2015; revised manuscript received 18 September 2015)

Abstract

Under strong impact loading, metal materials will produce deformation and show ejecta behaviors. The mixing phenomenon, due to the detached matters entering into the background fluid, has a direct influence on the compression properties. According to the researches of ejecta, the damage and mixing are closely related with the loading state and the dynamic process. Up to now, many results have already been obtained under the condition of the directive impact of detonation. Further study on the metal materials response driven by detonation collision is needed. Previous studies have focused on the macro characteristics, such as the collision uplift and destruction. In this paper, we aim at the wave system's interaction process, in order to obtain the physical detail and to reveal the mechanisms of dynamic behaviors in the collision region. Investigations are carried out by means of both the numerical simulation and the shock polar theory analysis. Planer tin flying layer calculation model is designed for numerical simulation, so the sliding wave systems and shock conditions are obtained effectively. Based on the numerical results in the plane tin flying layer, the shock polar theory forecasts that the Mach reflection will occur, and the images of wave interactions given by numerical simulation also display the three-wave structure, which is the typical structure of the Mach reflection. Quantitative comparisons between the numerical results and theoretical analysis of the shock polar are in good agreement with each other. Furthermore, the critical conditions of Mach reflection in the cases of different shock conditions are given. Meanwhile typical characteristics of the histories of free surface velocity in the collision zone are analyzed. From the numerical and theoretical analyses, the shock dynamical model in the collision zone is proposed to reveal the mechanisms, and the model is very important for investigating the collision zone problem deeply in decomposition way. The results illustrate that in the collision zone there exist multiple kinds of shock loading ways, including one-dimensional once plane impact region, two-dimensional once oblique impact region, and two-dimensional twice oblique impacts region. The complex loading dynamic processes coupling with the unsteady flow field lead to the distributions of the peak pressure at different positions in the collision zone. The corresponding destroyed behaviors are shown, and thus we can establish the relationship between the reflection wave structure and the fracture morphology of the collision zone. This research results will provide an important theoretical support for the understanding and interpretation of the physical phenomena of material deformation, damage and mixing in the collision zone.

Keywords: shock loading in the collision zone, dynamic behaviors, numerical simulation, shock polar theory

PACS: 47.40.Nm, 47.40.Rs, 62.50.Ef, 43.28.Mw

DOI: [10.7498/aps.65.024701](https://doi.org/10.7498/aps.65.024701)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U1530261, 11571002, 11371069) and the Science Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant Nos. 2015B0101021, 2013A0201010, 2015B0201043).

[†] Corresponding author. E-mail: wangpei@iapcm.ac.cn