DOI: 10.11883/bzycj-2017-0198 文章编号: 1001-1455(2018)02-0397-07

金属铅在斜冲击波对碰加载下动态行为的数值模拟*

任国武,张崇玉,张亚军,洪仁楷,陈永涛
(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川 绵阳 621999)

摘要: 高强度冲击加载作用下金属材料的动态物理行为是当前冲击波领域基础研究和工程应用最为关注的焦点。采用光滑粒子法(SPH)开展不同位置起爆诱发的斜冲击波对碰加载金属铅的二维数值模拟研究,得到了金属铅内入射斜冲击波的角度和强度,并利用极曲线方法理论上导出发生马赫反射时的临界入射角和入射马赫数关系。根据计算结果可知,金属铅内入射斜波对碰后将发生马赫反射。随着起爆位置与金属铅表面距离的增加,不仅金属铅内入射冲击波强度和入射角增加,而且形成的马赫杆宽度也在增加。由自由面速度剖面给出了马赫杆宽度及张角,结果与理论预测的结果吻合较好。

关键词: 铅;对碰;马赫反射;斜冲击波
中图分类号: O343 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

冲击加载下金属材料发生的相变、熔化和失效等动态行为是冲击波物理领域基础科学和工程应用最为关心的研究内容,某些低熔点低强度金属在爆轰加载后产生弥散、高速运动的喷射颗粒[1],这对测量仪器以及后续的物理过程都有着重要影响。单点起爆炸药形成的爆轰波直接加载金属材料所产生的动力学特性已得到较为系统的认识,然而在一些特殊的工程结构中,金属材料受到两点起爆所形成的斜冲击波对碰加载,斜冲击波对碰的区域(称之为对碰区)将产生更高的冲击压力,且随入射斜冲击波的角度和强度改变,金属内会产生出复杂的波系结构,这将必然影响金属内部产生的一系列动力学行为,尤其是对于低熔点、低强度金属。

到目前为止,针对爆轰波对碰驱动金属材料的动力学行为,已开展了一些实验或数值模拟工作,但是物理认识还停留于表面,与已发展较为成熟的斜冲击波相互作用理论脱节较远[2-4]。实验上,Singh等[5]给出了金属圆管对碰后的动态图像以及对碰区的膨胀变形断裂特征,张崇玉等[6]和陈永涛[7]等则利用 X 照相获得低熔点铅材料在对碰波作用后动态实验图象,陈永涛等[8]给出了对金属锡和钨对碰后动态破碎特征差异的实验认识。数值模拟上,张世文等[9]利用数值模拟再现了金属圆管对碰后鼓包图像,袁帅等[10-11]应用 SPH 方法获得了吻合实验结果的对碰区动态破碎图像。但是进一步地深入认识发现这些研究给出的图像或分析主要是针对斜冲击波对碰加载金属后发生动态行为的晚期。事实上这些晚期呈现的动态特征受斜冲击波在早期阶段金属材料内相互作用的影响。近来,陈大伟等[12]就应用斜冲击波的冲击波极曲线理论[2-4]并结合数值模拟全面地揭示了锡材料对碰加载后呈现的早期动力学行为,为晚期的图像认识奠定了理论基础。

本文中,选取金属铅为研究对象,利用光滑粒子动力(smooth partical hydrodynamics, SPH)方法对爆轰对碰加载下金属铅动力学行为的进行数值模拟,着重关注不同起爆位置形成的斜冲击波在金属铅内相互作用的早期行为;利用冲击波极曲线理论解释斜冲击波对碰后发生的马赫反射,讨论斜冲击波相互作用对金属铅动态行为特征的影响;基于自由面获得的速度剖面,近似地估算马赫杆的宽度及张角,并与理论预测进行比较。

* **收稿日期**: 2016-06-20; **修回日期**: 2017-04-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(11472254)
第一作者: 任国武(1981—),男,副研究员,gwren@caep.cn。

1 模拟方法

整个模拟采用动力学有限元软件 Autodyn 6.1,包括 Euler-Lagrangian、光滑粒子动力学(SPH)等主要算法,适合于模拟动态加载条件下材料的非线性变形、断裂破碎等物理过程,尤其是 SPH 方法是当前较为普遍研究材料断裂、层裂等动态失效问题。图 1 为二维平面应变物理模型,包括金属材料铅(Pb)、铝(Al 2024-T4)和高能炸药(PBX9502),其尺寸分别为 32 mm×2 mm、32 mm×2 mm 和 32 mm×22 mm。炸药的起爆点有 2 个:D 和 D',对称地置于炸药的两边界,对碰线为对称轴,如图 1 所示。定义直线 DH 与炸药-金属铅界面的夹角为 α_{HE},以标定不同起爆位置。本文中共考虑三种情形:$\alpha_{HE}=0°$、$\alpha_{HE}=20.5°$和 $\alpha_{HE}=34.5°$,以 O 点为原点,对应的起爆点空间位置分别为 D(0.05 mm,22.0 mm)、D(0.05 mm,16.0 mm)和 D(0.05 mm,11.0 mm)。$\alpha_{HE}=34.5°$的情形与早前已开展的数值模拟和实验相同[6,11]。

为准确捕获金属铅材料受爆轰对碰加载后的动力学行为,尤其是早期阶段发生的斜冲击波相互作用以及紧接着驱动金属的自由面速度响应,金属铅和铝采用 SPH 算法,每个 SPH 粒子大小为0.05 mm,炸药则采用 Lagrange 网格,尺寸为 0.1 mm。整个模型共包括 51 200 个 SPH 粒子和 70 400 个网格。材料间的接触相互作用采用该软件自带的间隙接触算法来实现。模拟中所有材料的状态方程和强度模型参数取自 Autodyn 软件材料库。需要说明的是,由于铅材料的层裂强度较低(大约0.5 GPa),导致高能炸药爆轰驱动下易发生动态失效,因此还引入了 Grady 层裂模型,临界应变值设为 0.1。

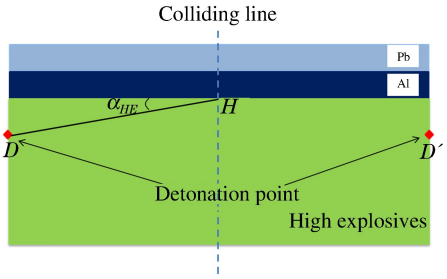


图 1 二维物理模型

Fig. 1 Two-dimensional physical model

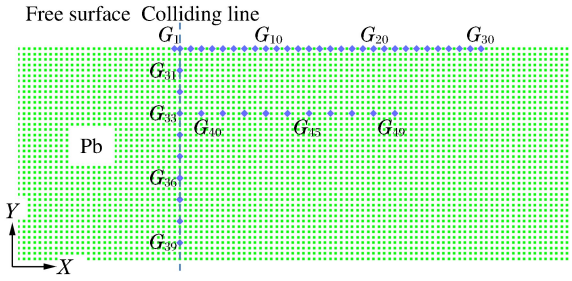


图 2 金属铅材料内的标定点布局

Fig. 2 Gauge points within the metal Pb

为系统分析入射斜波相互作用后铅材料内动态力学物理量的演化,在金属铅内布设 49 个标定点,如图 2 所示。标定点 1-30 置于自由面的对碰线(colliding line)右侧,相邻点间的距离为 0.1 mm(沿横向排列);标定点 31-39 置于对碰线位置,相邻点间距离为 0.2 mm(纵向排列);标定点 40-49 与标定点 33 的纵坐标值相同,点间距离为 0.2 mm(横向排列)。为方便后续讨论分析,图 2 所有标定点记为 G_1~G_{49}。

2 模拟结果与分析

典型的 3 个起爆位置导致的爆轰波对碰前相互作用示意图为如图 3 所示。其中红点为起爆点,起爆时刻 $t=0$。炸药稳定传播后最大压力约为 25 GPa,爆速为 7.695 mm/μs。爆轰波经炸药-金属界面透射进入金属铅的最大压力和角度则随着 α_{HE}的增加而增加。在金属铅内形成的斜冲击波波前压力和入射角对金属铅动态行为有重要影响。

已有的研究工作表明[2-3]当相向的 2 个斜冲击波对碰时,相当于一个斜冲击波入射固壁,正规反射转变为马赫反射时,入射斜冲击波存在一个临界角 α_C 和临界马赫数 Ma_0(入射波速度与声速 c_0 的比值)。基于冲击波极曲线理论,出现正规反射到马赫反射时反射波极曲线(表示为反射波后压力 P 与速度矢量偏转角 θ 关系,其中 θ 定义为入射波后转角 θ_1 与反射波后转角 θ_2 之和)在 $\theta=0$ 时只有一个反射波后压力解,此时斜冲击波入射角和马赫数即为临界角 α_C 和临界马赫数 Ma_0,这就是冯·诺曼脱体激波判据。当应用到具体材料时,利用反射波波后压力(二次压缩的冲击压缩关系)和反射波极曲线,理论计算给出其入射斜冲击波临界角 α_C 与临界马赫数 Ma_0 的关系,以进一步判断斜冲击波以一定角度和

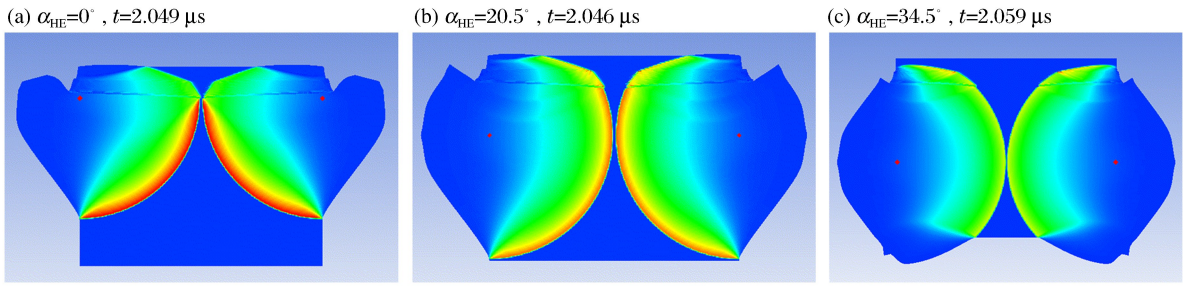


图 3 爆轰波对碰前的相互作用示意图

Fig. 3 Schematic illustrations of two shockwave interactions

马赫数入射该材料内后的反射类型。

图 4 给出了相向的两斜冲击波在金属铅内对碰过程。金属铅内形成的斜冲击波是爆轰波经炸药-金属铝界面和金属铝-铅界面透射而形成的。根据斜冲击波所处的位置，由图 4(a)～(c)可计算出斜波对碰入射角分别为 69.6°、71.5°和 73.6°。入射强度则由图 4 (d)得到，即第一个上升沿压力极值，分别为 12.96、20.47 和 25.65 GPa，对应的入射波马赫数为 1.31、1.44 和 1.53。图 5 给出了利用冯.诺曼脱体激波判据理论给出的金属铅内正规反射到马赫反射临界关系与数值模拟对比图，可以看出这 3 种情形下入射斜冲击波对碰后都将发生马赫反射并形成马赫杆。

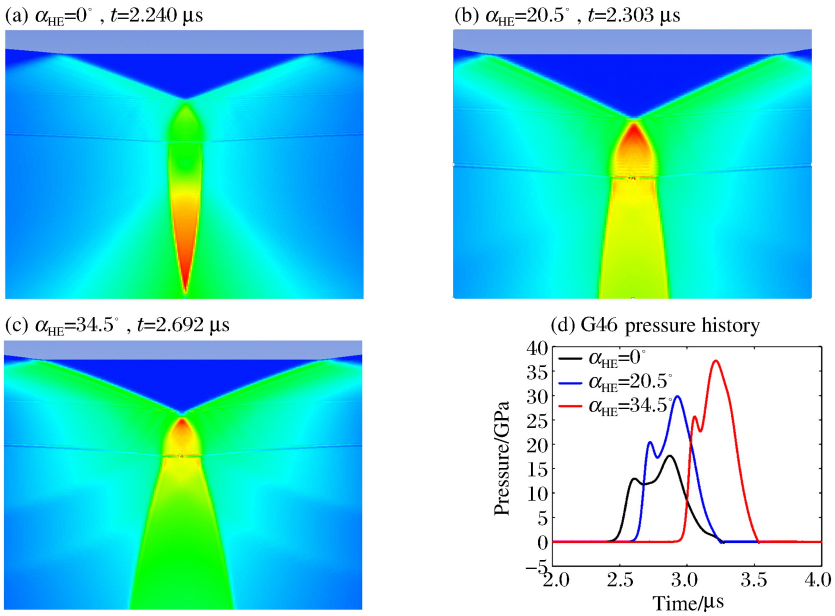


图 4 入射斜冲击波在铅内的相互作用

Fig. 4 Interaction of incident oblique shock wave within the metal Pb

图 6 给出了斜冲击波相互作用后呈现入射波、反射波和马赫波三波共存特征，吻合冲击波极曲线方法给出的理论预测。从图 7 中可以看出，马赫杆垂直于对碰线，但由于受后继稀疏波影响，反射波后压力并不是恒定值，导致从对碰线到三波点的马赫杆压力逐渐减小。图 7 展示具有相同纵坐标值标定点 G_{33} 和 G_{40}～G_{49} 的压力历史响应。从图 7 可以看出，标定点 G_{49} 是入射斜冲击波最先到达的位置，选取压力剖面上第一极大值，时间和压力值分别为：(a) 2.559 μs，12.86 GPa；(b) 2.656 μs，20.49 GPa；(c) 3.0 μs，25.64 GPa。标定点 G_{46} 到 G_{49} 的第一极大值基本相同，表明入射斜冲击波稳定地加载金属铅。受稀疏波影响，靠近对碰线标定点的压力值最高，该位置处时间和压力分别为：(a) 2.724 μs，

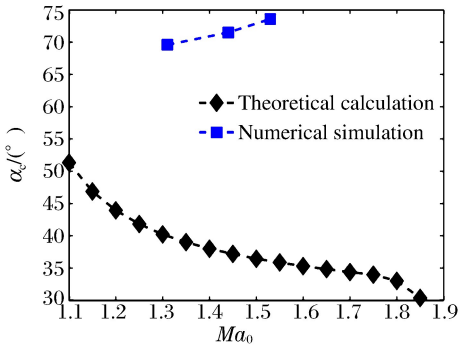


图 5 理论计算的入射斜波临界角 α_C 与马赫数 Ma_0 关系与数值模拟对比

Fig. 5 Comparison of theoretical relationship of incident angle α_C varying with Mach number Ma_0 and numerical simulations

28.032 GPa;(b)2.802 μs,43.407 GPa;(c)3.107 μs,51.022 GPa。由此可以得到马赫杆的最大压力与入射斜波压力比值分别为:2.18、2.11 和 1.99,其变化规律为随斜冲击波入射角增加而减小,与已有的理论预测相吻合[2-3]。但该比值小于正规反射给出的比值 2.7,原因在于斜冲击波入射角远大马赫反射时临界角。但仔细的观察可发现:图 7 (a)中处于压力最大值的标定点有 2 个,图 7 (b)中有 3 个,图 7 (c)中有 4 个,这表明马赫杆宽度逐渐增加。但由于受到稀疏波卸载,反射波加载导致的压力(图 7 所示的第二峰值)并没有达到最大压力,且随着距对碰线距离的增加而减小。

图 8 给出了对碰线上标定点 G_{31}、G_{35} 和 G_{39} 的压力历史剖面图。由于受炸药爆轰形成的 Taylor 波

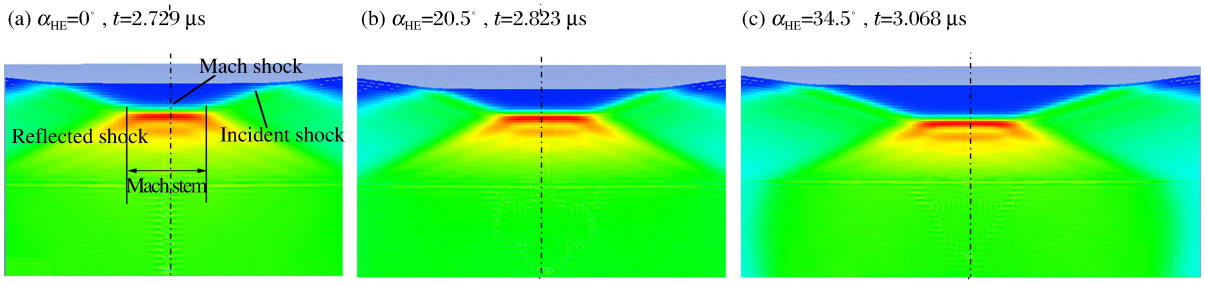


图 6 金属铅内呈现的入射波、反射波和马赫波示意图

Fig. 6 Schematic illustration of incident, reflected and Mach shock waves within the metal

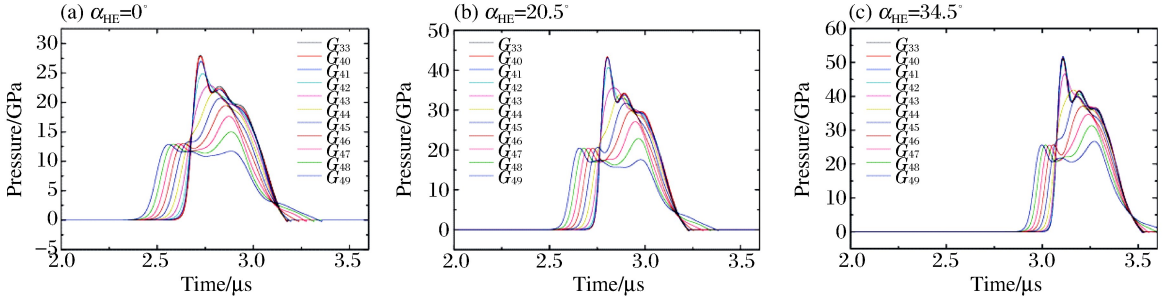


图 7 金属铅内具有相同纵坐标值标定点压力历史剖面

Fig. 7 Pressure histories for the gauge points with the same longitudinal coordinates

系透射进入金属铅,形成马赫杆峰值压力在逐渐减小,G_{31}、G_{35} 和 G_{39} 三个点的马赫杆峰值压力分别从 30.7、51.6 和 64.9 GPa 下降至 26.6、40.7 和 48.0 GPa,下降幅度分别为 13.3%、21.1%和 26.0%。

图 9 给出了马赫反射到达金属铅自由面导致的自由面速度历史剖面(标定点 G_2 到 G_{15},跨越长度为 1.3 mm)。由于 Pb 层裂强度较低,具有三角波特征的马赫反射波冲击金属自由面导致 Pb 发生层裂,表面层脱离金属铅主体并自由飞行。在自由面的速度剖面上展示为表面速度迅速达到最大值后处于恒定值,如图 9 所示的 G_2 速度曲线。由于靠近对碰线马赫杆的冲击压力等同,导致被加载到的自由面区域速度响应相同,但是处于对碰线和三波交汇点间的马赫杆压力逐渐减小,被冲击的自由面区域速度也必然降低,因此图 8 所示的自由面速度历史从 G_2 到 G_{15} 表现为从大到小,且靠近 G_2 附近区域有部分标定点的速度值与 G_2 相同。需要注意的是图 9 中 G_{15} 附近的标定点速度剖面呈现拐点,表明了反射冲击

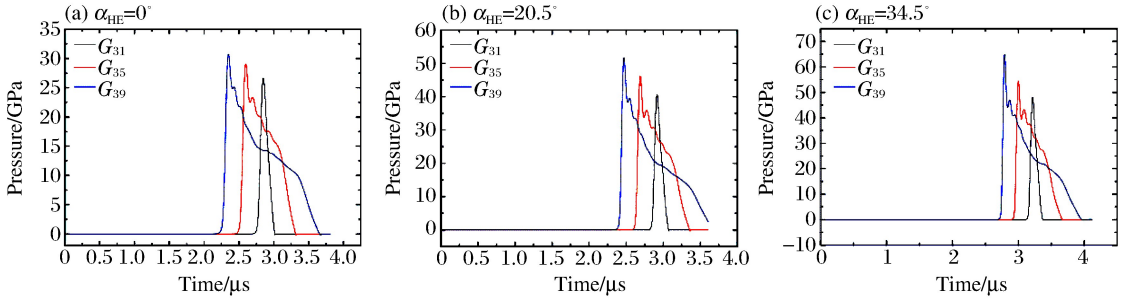


图 8　对碰线上的压力历史剖面图

Fig. 8　Pressure history along the colliding line

波又再次加载该位置。

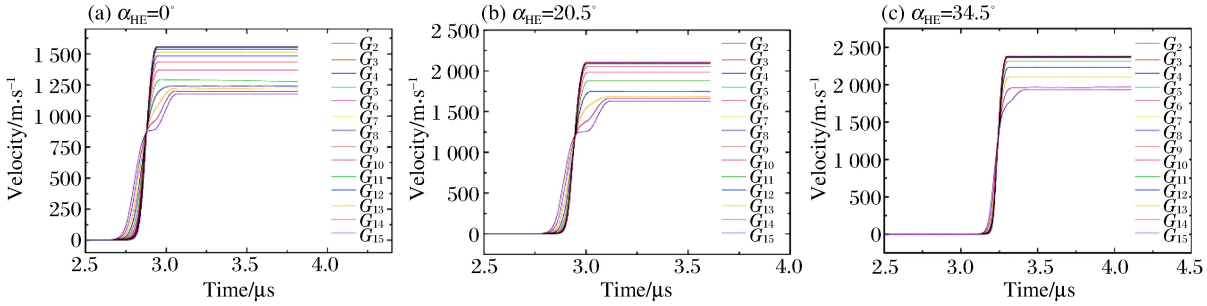


图 9　自由面速度历史

Fig. 9　Free surface velocity histories

从图 9(a)～(c)具有相同最大速度值的标定点数目逐渐增加，表明马赫杆在变宽。为从自由面速度剖面估算马赫杆宽度，给出一个判定准则。定义：$\varepsilon=(V_i-V_{G_2})/V_{G_2}$，其中 V_i 代表 G_3～G_{15} 的自由面速度历史的最大值，V_{G_2} 为 G_2 自由面速度历史的最大值。当 $\varepsilon<0.05$ 时的标定点属于被马赫杆加载的区域。通过该判定准则，给出了图 9(a)的马赫杆宽度 $L_{Mach}=1.0$ mm；图 9(b)中 $L_{Mach}=1.4$ mm；图 9(c)中 $L_{Mach}=1.8$ mm。相应的马赫杆张角为 14.0°，19.3°和 24.2°。而利用冲击波极曲线理论上给出了马赫杆张角 $\psi=\pi/2-\alpha_3$，α_3 是马赫杆与入射波来流速度 q_0 的夹角。该夹角表示为：

$$\alpha_3=\arcsin\left(\frac{1}{q_0}\sqrt{\frac{p_3-p_0}{\rho_0(1-\rho_0/\rho_3)}}\right) \tag{1}$$

式中：p_3、ρ_3 为马赫反射波后压力及密度，p_0、ρ_0 为入射波前压力和密度。

入射波阵面与对碰线的夹角为：

$$\alpha=\alpha_0+\psi \tag{2}$$

式中：α_0 为入射斜波与三波点轨迹之间的夹角。对于 $\alpha_{HE}=0°$的情形，选择 G_{33} 点，$p_3=28.0$ GPa，$\rho_3=15.174$ g/cm^3，$\alpha=69.6°$，带入这些值到式(1)中，得到 $\psi=14.9°$，较好地吻合通过判定准则给出的马赫杆张角 14.0°。

图 10 给出了金属铅表面发生层裂后的图像，清楚地发现马赫杆宽度逐渐增加。但靠近三波点的马赫杆还与主体相连接，该区域的速度值必然小于对碰线附近的速度值。图中显示的动态破碎特征与实验上获得其晚期动态图像[7,9]是一致的。

3　结　论

冲击波极曲线理论和数值模拟方法相结合研究不同起爆位置形成的爆轰波对碰加载下金属铅早期阶段的动力学行为。利用冲击波极曲线给出正规反射到马赫反射时临界入射角与马赫数的关系，确定

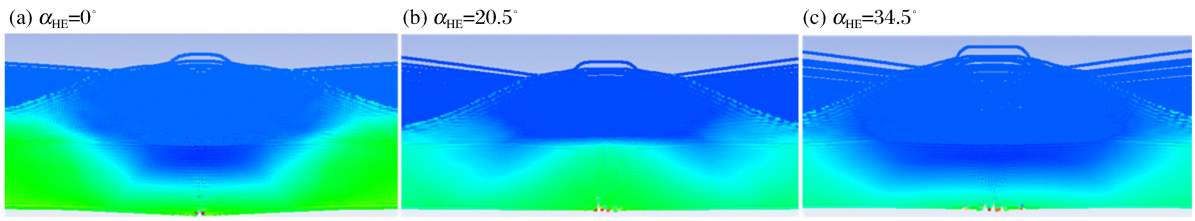


图 10 对碰区动态层裂图像

Fig. 10 Spalled images induced by Mach shockwave loading

该数值模拟中斜冲击波加载金属铅将呈现马赫反射。基于金属铅对碰线附近区域展示的压力速度剖面,详细地分析了爆轰对碰后动态特征。进一步从自由面速度历史剖面计算了形成的马赫杆宽度及马赫杆张角,较好地吻合冲击波极曲线预测。模拟展示的马赫反射导致金属铅层裂的特征符合已有的实验测量结果。当前的工作将有助于理论上认识爆轰波对碰加载低熔点低强度金属的早期动态行为。

参考文献:

[1] 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[J]. AIP Conference Proceedings, 2004,706:477.

[2] 王继海. 二维非定常流和激波[M]. 科学出版社,1994.

[3] 经福谦. 实验物态方程导引[M]. 第 2 版. 北京:科学出版社,1999.

[4] BEN-DOR G. Shock wave reflection phenomena[M]. Second Edition. Springer, 2007.

[5] SINGH M, SUNEJA H R, BOLA M S, PRAKASH S. Dynamic tensile deformation and fracture of metal cylinders at high strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002,27(9):939-954.

[6] 张崇玉,胡海波,李庆忠,等. 爆轰波对碰驱动下平面铅飞层对碰区动载行为实验研究[J]. 高压物理学报,2009,23(4):283-287.
ZHANG Chongyu, HU Haibo, LI Qingzhong, et al. Experimental study on dynamic behavior of lead plate driven by two head-on colliding detonation waves[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009,23(4):283-287.

[7] 陈永涛,洪仁楷,王晓燕,等. 爆轰波对碰加载下平面金属样品动载行为实验研究[J]. 爆炸与冲击,2016,36(2):177-182.
CHEN Yongtao, HONG Renkai, WANG Xiaoyan, et al. Experimental study on dynamic behaviors of metal sample driven by two head-on colliding detonation wave[J]. Explosion and Shock Wave, 2016,36(2):177-182.

[8] 陈永涛,洪仁楷,吴建华,等. 爆轰波对碰加载下平面 Sn 材料动力学行为实验研究[J]. 高压物理学报,2016,30(3):221-226.
CHEN Yongtao, HONG Renkai, WU Jianhua, et al. Experimental study on dynamic behaviors of sn sample driven by two head-on colliding detonation waves[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2016,30(3):221-226.

[9] 张世文,华劲松,刘仓理,等. 金属圆管内爆轰波相互作用效应的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击,2004,24(3):219-225.
Zhang Shiwen, Hua Jingsong, Liu Cangli, et al. A numerical simulation of the metallic tube expansion induced by inside head-on hitting two detonation waves[J]. Explosion and Shock Wave, 2004,24(3):219-225.

[10] 袁帅,胡海波,张崇玉,等. 应用 SPH 方法对平板铅飞层对碰凸起动载行为的数值模拟研究[J]. 高压物理学报,2010,24(5):383-387.
YUAN Shuai, HU Haibo, ZHANG Chongyu, et al. Simulation on head-on bulging dynamic behavior of lead flyer with SPH method[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010,24(5):383-387.

[11] 袁帅,胡海波,张崇玉,李平. 爆轰波对碰驱动平面组合飞片的数值模拟[J]. 高压物理学报,2016,30(1):49-54.
YUAN Shuai, HU Haibo, ZHANG Chongyu, et al. A numerical simulation of the assembled flyers driven by two head-on colliding detonation waves[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2016,30(1):49-54.

[12] 陈大伟,王裴,孙海权,等. 爆轰波对碰驱平面锡飞层的动力学及动载行为特性研究[J],物理学报,2016,65(2):024701.

CHEN Dawei, WANG Pei, SUN Haiquan, et al. Loading characteristics and dynamic behaviors of the plane tin flying layer driven by detonation collision[J]. Acta Phys. Sin. ,2016,65(2):024701.

Numerical investigation of dynamic behavior of metal Pb driven by oblique shock waves

REN Guowu, ZHANG Congyu, ZHANG Yajun,
HONG Renkai, CHEN Yongtao
(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang*, 621999, *Sichuan*, *China*)

Abstract: Dynamic behaviors of metal materials subjected to intense shock loading is presently a focus in basic research and engineering application in the field of shock wave study. This work investigated dynamic behaviors within the metal Pb loaded by two oblique shock waves via Smooth Particle Hydrodynamic (SPH) method, with an emphasis on the influence of different initiation points on the dynamic behaviors in the collision zone. Utilizing the shock polar theory, we obtained the critical angle for an incident oblique shock wave varying with the Mach number, which indicated a transition from regular to Mach reflection. The comparison of the numerical data with the theoretical plot confirmed the interaction of two oblique shock waves, thus essentially revealing the Mach reflection and the formation of the Mach stem. As the distance of the initiation point from the Pb surface increases, so do both the incident pressure and the angle for an oblique shock wave, including also the generated Mach stem. Based on the free surface velocity profiles, we calculated the width of the Mach stem and the Mach angle, the results being in good agreement with the theoretical prediction.

Keywords: Pb; collide; Mach reflection; oblique shock wave

(责任编辑　王小飞)