

DOI: 10.11883/bzycj-2017-0441

铅飞层中斜冲击波对碰马赫反射行为实验研究*

张崇玉¹, 胡海波², 王翔¹, 刘宁文¹

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621999)

摘要: 采用线阵多普勒光纤探针测速技术 (Doppler pins system, DPS) 和高速光电分幅相机照相两种精密诊断技术, 对铅飞层中斜冲击波对碰后的反射行为进行了观测。获得了飞层对碰部位速度-时间历史曲线和凸起形貌演化图像, 给出了凸起轮廓发展演化过程、压力分布等实验数据和信息。结合冲击波反射理论, 对铅飞层对碰区动力学现象进行了分析和解释, 证实铅飞层中斜冲击波对碰后发生了马赫反射。

关键词: 铅飞层; 斜冲击波对碰; 马赫反射; 线阵 DPS; 高速光电分幅相机

中图分类号: O347.5

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

冲击波反射行为是冲击波物理领域研究的基本问题之一。早在 1878 年, Ernst Mach 通过实验首次发现了冲击波反射有两种不同类型: 一种为双波结构的正规反射 (regular reflection), 一种为三波结构的马赫反射 (Mach reflection)^[1]。20 世纪 40 年代, von Neumann 对冲击波马赫反射现象开展了进一步研究, 认识到在不同条件下, 马赫反射可以呈现出不同的反射类型, 产生不同波系结构, 具有不同的物理机制^[1]。自此之后, 冲击波马赫反射现象引起了人们的广泛关注并得到了深入研究。

冲击波反射行为在气体介质中已有较系统的研究, 物理认识也比较深入^[2]。相比而言, 固体介质中冲击波反射行为的研究则比较少, 且研究工作主要停留在理论分析和数值模拟层面, 实验研究工作非常少见。Brown 等^[3]采用极曲线理论对固体介质中斜冲击波的反射行为进行了分析, 结果表明, 极曲线理论不仅适用于气体介质, 同样也适用于固体介质。陈大伟等^[4]采用数值模拟和极曲线理论分析相结合的方法, 对固体介质中的冲击波反射现象进行了研究, 给出了钢材料在强、弱冲击波条件下正规反射向马赫反射过渡的临界角及反射波后压力。王继海对铝材料中的马赫反射问题做过数值分析, 计算显示, 在马赫反射临界角附近, 马赫反射波后压力远高于正规反射波后压力; 但随碰撞角逐渐增大, 马赫反射波后压力随之降低, 当角度大到一定程度后, 马赫反射波后压力甚至低于正规反射波后压力^[5]。张崇玉等^[6]采用线阵 DPS 测速技术获得了钨合金飞层对碰区的速度剖面, 给出了对碰区凸起轮廓、压力分布等信息, 认为钨合金飞层中冲击波对碰后发生的是规则反射。

固体介质中冲击波反射行为实验研究工作比较少的原因, 一方面是因为大多数固体材料为非透明介质, 不像气体介质可以对冲击波反射演化图像进行直观诊断; 另一方面主要是由于缺乏高时空分辨的精密诊断技术, 造成实验观测困难。近年来, 中国工程物理研究院流体物理研究所相继研发了线阵 DPS 测速技术和高速光电分幅相机照相技术, 这两种测试技术均有纳秒、亚毫米的高时空分辨率, 并分别在冲击波物理、爆轰物理实验研究中获得成功应用, 这为开展金属材料中冲击波反射行为的实验研究奠定了技术基础。

本研究分别采用线阵 DPS 测速和高速光电分幅相机照相两种诊断技术, 对纯铅材料飞层中斜冲击波对碰反射行为开展实验研究, 获得铅飞层对碰区的速度-时间历史曲线和对碰区凸起发展演化的物理图像, 给出对碰区压力分布、冲击波反射类型等实验信息和认识, 为更好地理解金属材料中斜冲击波对碰反射行为提供实验依据。

* 收稿日期: 2017-12-08; 修回日期: 2018-09-07

第一作者: 张崇玉(1975—), 男, 硕士, 副研究员, zcy_7718@aliyun.com。

1 实验设计

1.1 实验装置

实验装置与文献 [6] 所用装置结构相同, 区别只是将钨合金飞层换成厚 2 mm 的铅飞层。图 1 为线阵 DPS 测速实验装置, 当开展高速光电分幅相机照相实验时, 去掉线阵 DPS 探头及其支架。采用两个电雷管在炸药柱侧面对称位置上同时起爆, 爆轰波透过铝隔板在铅飞层中产生相向传播的、波阵面与铅飞层表面成一夹角的斜冲击波, 两对称的斜冲击波对碰后发生正规反射或马赫反射。

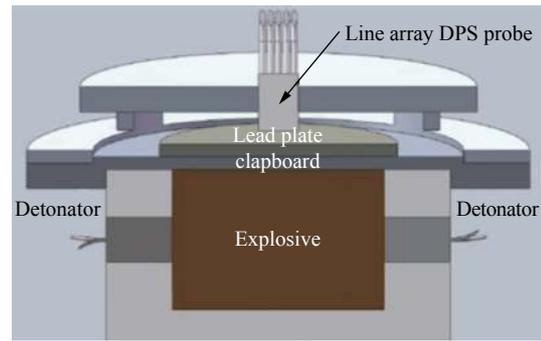


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental set up

1.2 测试技术

实验采用线阵 DPS 和高速光电分幅相机两种测试技术对铅飞层对碰区动力学行为进行诊断, 除了获得丰富的实验数据和信息外, 也是为了两种测试技术的交叉对比, 提升实验数据可靠性。

实验采用 1 个 16 点线阵 DPS 探头对准铅飞层中心部位进行测试, 探头测点垂直对碰线跨中分布, 如图 2 所示。测点编号从左至右依次为: 1~16 号, 测点间隔为 0.25 mm, 探头距铅飞层表面初始距离为 2 mm。

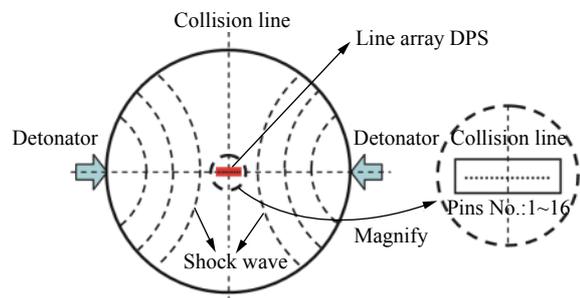


图 2 探头布局示意图(俯视图)

Fig. 2 DPS probe arrangement (viewed from atop)

高速光电分幅相机是中国工程物理研究院流体物理研究所新研发的一种集光、机、电为一体的高速分幅摄影设备, 具有摄影频率高且可调、动态范围大和弱光探测能力强等优点。其摄影频率可达 $2 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, 两幅图像时间间隔在 $5 \text{ ns} \sim 457 \mu\text{s}$ 范围内任意可调, 并具有较高的空间分辨率。主要用于记录高速瞬态变化过程, 能够给出被拍摄目标在动态过程中的二维图像信息。本次实验采用高速光电分幅相机, 主要观测铅飞层对碰区早期凸起形貌特征。

2 实验结果及分析

2.1 线阵 DPS 测速结果

实验获得的铅飞层对碰区 16 个测点的速度-时间历史曲线见图 3, 由速度曲线给出的各测点速度峰值见表 1。由图 3 和表 1 可见, 铅飞层对碰区中间 9 个测点(5~13 号)为单次起跳特征, 速度曲线的起跳时间几乎相同(时间差为 14 ns, 见表 1), 且有速度弥散或速度带特征, 如图 4 所示。速度带特征意味着在测点测试范围内(约 $\varnothing 0.2 \text{ mm}$) 同一时刻出现了多个速度信息, 根据文献 [7] 的实验结果和认识, 表明此时飞层表面出现了微喷射、层碎裂等动力学行为。其余 7 个测点(1~4 号、14~16 号)均为二次加载特征, 且均为单一速度曲线特征。二次加载特征反映了冲击波对碰前及冲击波对碰反射后对飞层的两次加载过程, 单一速度曲线特征说明这 7 个测点测试区域内飞层表面保持完整, 未发生碎裂破坏现象。

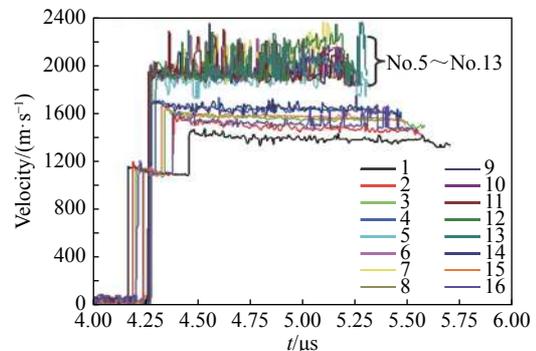


图 3 铅飞层对碰区速度曲线

Fig. 3 Velocity histories of collision region

表 1 各测点的速度曲线峰值和压力峰值

Table 1 Peak values of velocity and pressure at each test point

测点编号	速度峰值/(m·s ⁻¹)		压力峰值/GPa		测点编号	速度峰值/(m·s ⁻¹)		压力峰值/GPa	
	对碰前	对碰后	对碰前	对碰后		对碰前	对碰后	对碰前	对碰后
1	1 156.5	1 463.6	18.9	23.1	9	—	1 952.9	—	38.4
2	1 199.4	1 595.0	19.8	25.4	10	—	1 998.8	—	39.7
3	1 134.7	1 633.6	18.4	25.9	11	—	1 947.3	—	38.2
4	1 124.3	1 687.1	18.2	26.9	12	—	1 922.9	—	37.5
5	—	1 931.1	—	37.8	13	—	1 892.1	—	36.7
6	—	1 902.8	—	37.0	14	1 202.0	1 684.7	19.9	27.0
7	—	1 953.2	—	38.4	15	1 134.0	1 669.4	18.4	26.6
8	—	1 984.8	—	39.3	16	1 100.9	1 604.8	17.7	25.3

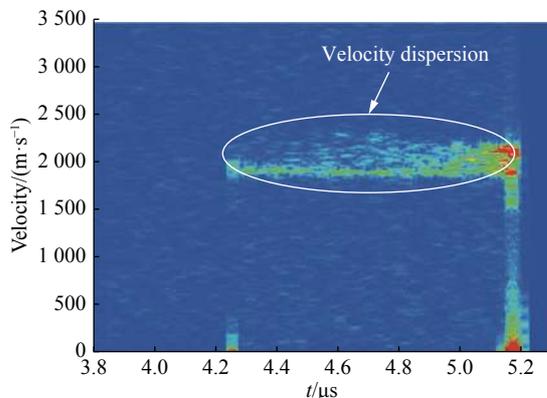


图 4 典型测点速度频谱图

Fig. 4 Velocity spectrum of typical test point

宽度(或马赫杆长度)与碰撞角、冲击波强度、飞层厚度等是相关的,因此马赫反射区宽度(或马赫杆长度)约 2 mm 仅是本实验装置结构下的独特结果,而非任何装置结构下的必然结果。

对各测点的速度曲线进行积分,然后将相同时刻各测点的运动位移连线,就可以得到典型时刻对碰区凸起轮廓的发展演化过程(见图 5)。由图 5 可见,对碰区运动过程为先凹后凸;两侧飞层先开始运动(冲击波到达早),对碰区飞层运动晚(冲击波到达晚),所以开始时呈现下凹形状;冲击波对碰后形成马赫反射,由于马赫反射后压力剧增,对碰区飞层运动速度高于其他区域,因而对碰区飞层运动超前,随时间推移逐渐发展为“平台”形凸起。需要说明的是,由于铅飞层对碰区中间 5~13 号 9 个测点速度呈速度带特征,速度曲线积分时以速度带的下沿代替飞层主体运动速度,这种替代会引入一定的偏差,所以铅飞层对碰区中间 5~13 号 9 个测点的位移及后面计算得到的压力仅供参考。

根据冲击波反射理论,当入射冲击波与固壁发生斜碰时(两相同强度的入射冲击波对称斜碰,等同于入射冲击波与固壁斜碰),如果碰撞角度大于马赫反射的临界角度(临界角与材料性质相关),就会发生马赫反射,形成马赫杆(Mach stem)。在本实验中,当马赫杆(冲击波)到达飞层前表面时,将导致对碰线附近区域基本以相同速度同时运动,造成中间区域的速度曲线几乎同时起跳、无二次加载特征、速度峰值基本相同等现象。这说明铅飞层中冲击波对碰后发生了马赫反射,并可以给出马赫反射区宽度(或马赫杆长度)约为 2 mm。马赫反射区

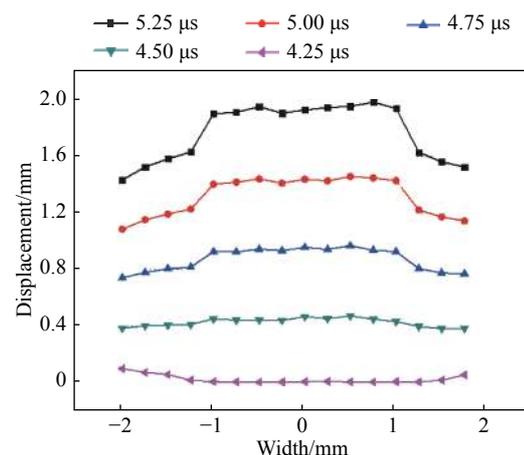


图 5 典型时刻对碰区凸起轮廓

Fig. 5 Bulge contour of collision region at typical time

根据各测点的速度峰值数据和铅的冲击雨贡纽关系($D - u_0 = 2.03 + 1.47(u - u_0)$),可以计算得到的各测点对碰前/后的最高压力(见表 1),然后由表 1 可以画出对碰区压力分布图(见图 6)。由图 6 可见,冲

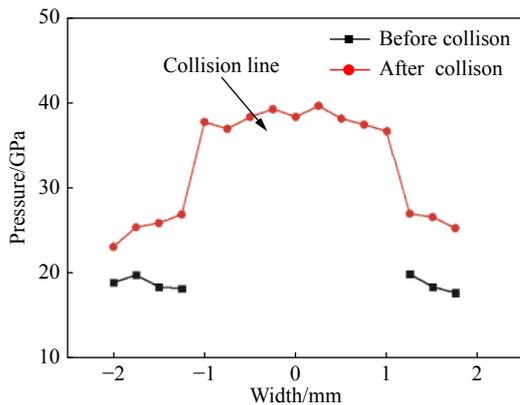


图 6 各测点对碰前/后压力峰值

Fig. 6 Peak pressure at each test point before/after collision

碰区早期凸起形貌图像。由图 7 可以发现, 高速光电分幅相机成功捕捉到了冲击波迎面碰撞及对碰后的反射过程: 冲击波对碰反射后, 铅飞层对碰区出现长条状的“平台”形凸起, 这充分说明铅飞层中冲击波对碰后发生了马赫反射。根据图像放大比, 可以计算出马赫杆的长度或马赫台的宽度约为 2.2 mm, 与线阵 DPS 测速结果基本一致。高速光电分幅相机照相结果与线阵 DPS 测速结果相互印证、自洽, 说明两种测试技术是可靠的, 实验数据可信。

击波对碰前, 各测点压力在 17.7~19.9 GPa 之间(平均值为 18.8 GPa); 冲击波对碰后, 5~13 号测点 2 mm 范围内压力基本一致, 平均值为 38.1 GPa, 约为对碰前压力的 2.1 倍。这也就解释了为什么马赫反射区飞层表面发生了喷射、层碎裂等动力学行为, 而非马赫反射区则没有。这是因为马赫反射区压力高, 可能使得铅发生了冲击或卸载熔化, 强度降低, 当冲击波在飞层表面反射拉伸时, 极易引发表面喷射和层断裂等动力学行为。

2.2 高速光电分幅相机照相结果

图 7 为高速光电分幅相机拍摄的铅飞层对

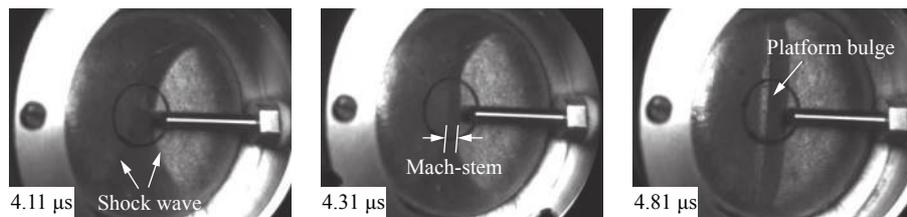


图 7 对碰区凸起形貌演化图像

Fig. 7 Evolving images of bulge in collision region

3 讨论及认识

采用线阵 DPS 测速和高速光电分幅相机两种精密诊断技术, 获得了铅飞层对碰部位速度-时间曲线、马赫反射区宽度、压力分布及凸起发展演化图像等实验数据和信息, 两种测试技术均证实铅飞层中斜冲击波对碰后发生了马赫反射。另外由测速结果可知, 由于马赫反射高压, 铅飞层马赫反射区表面发生了喷射、断裂破碎等动力学行为, 而非马赫反射区飞层表面则是光滑完整的。

文献 [8] 中曾采用与本文相同的实验装置结构和铅飞层开展实验研究, 发现了对碰区中晚期出现的射流状超前凸起现象, 但未发现早期的冲击波马赫反射行为。这是因为当时采用的测试技术为分幅照相和 X 光照相技术, 其时间分辨率不够高(分幅照相技术时间分辨率为亚微秒), 不足以对铅飞层对碰区早期动力学行为和细节特征进行观测。这说明随着测试技术的进步和精密诊断技术的应用, 我们可以比以往实验获取更丰富的实验数据和信息, 从而深化金属飞层对碰区动力学行为认识。

另外, 文献 [6] 采用与本文相同的实验装置, 不同的是飞层材料为钨合金。在相同的实验装置结构和加载条件下, 对碰区动力学行为却表现迥异: 钨合金飞层中冲击波对碰发生的是正规反射, 而铅飞层发生的是马赫反射, 这说明材料性能对冲击波反射类型或动力学行为有重要影响。刘军等^[9] 在爆轰对碰驱动铅飞层对碰凸起形成的数值模拟中发现了马赫反射行为, 认为铅的材料声速较低可能是形成马赫反射的主要原因。除材料声速外, 其他材料参数或性能(如强度、相变、熔化等)对冲击波反射行为的影响尚不清楚, 下一步拟采用冲击波极曲线理论和数值模拟方法对该问题开展重点研究。

参考文献:

- [1] GABI B D. Shock wave reflection phenomena [M]. Berlin: Springer-Verlag Press, 2007.
- [2] 杨畅, 姜宗林, 胡宗民. 激波反射现象的研究进展 [J]. 力学进展, 2012, 42(2): 141–161.
YANG Yang, JIANG Zonglin, HU Zongmin. Advances in shock wave reflection phenomena [J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(2): 141–161.
- [3] BROWN J L, RAVICHANDRAN G. Analysis of oblique shock waves in solids using shock polars [J]. *Shock Waves*, 2014, 24(4): 403–413.
- [4] 陈大伟, 秦承森, 王裴, 等. 凝聚介质中斜激波的反射 [J]. 计算物理, 2011, 28(6): 791–796.
CHEN Dawei, QIN Chengsen, WANG Pei, et al. Oblique shock wave reflection in condensed matter [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2011, 28(6): 791–796.
- [5] 经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1999.
- [6] 张崇玉, 胡海波, 王翔. 平面金属飞层对碰区速度剖面的精密测试 [J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(4): 557–561.
ZHANG Chongyu, HU Haibo, WANG Xiang. Precision test of velocity profile in collision region of plane metal flying layer [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(4): 557–561.
- [7] BUTTLER W T, ORO D M, OLSON R T, et al. Second shock ejecta measurements with an explosively driven two-shockwave drive [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116: 103519.
- [8] 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.
- [9] 刘军, 付峥, 冯其京, 等. 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 [J]. 物理学报, 2015, 64(23): 234701.
LIU Jun, FU Zheng, FENG Qijing, et al. Simulation study of the colliding bulge and surface micro-jet of metal flyers driven by detonation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(23): 234701.

Experimental study of Mach reflection induced by collision of oblique shock waves in a lead plate

ZHANG Chongyu¹, HU Haibo², WANG Xiang¹, LIU Ningwen¹

(1. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;

2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: Using the line-array DPS (Doppler pins system) test technique and a high-speed photoelectric frame camera, we diagnosed the shock wave reflection behavior induced by collision of oblique shock waves in a lead plate, accurately measured the velocity history and captured the bulge evolution images of the collision region. By processing the velocity curves, we obtained such experimental informations as the velocity variation, pressure distribution and plate surface damage. Furthermore, Combining the theory of shock wave reflection, we analyzed and explicated the dynamic behavior of the lead plate's collision region, concluding that it was Mach reflection that occurred after two oblique shock waves collided.

Keywords: lead plate; colliding of oblique shock waves; Mach reflection; line-array DPS; high-speed photoelectric frame camera

(责任编辑 曾月蓉)