DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0557-05

平面金属飞层对碰区速度剖面的精密测试*

张崇玉[1],胡海波[2],王 翔[1,2]

(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流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室,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),对钨合金平面飞层对碰区速度剖面进行了精密测试研究,获得了 4 mm 长度范围内 16 个测点的速度-时间曲线。对速度曲线进一步处理后,给出了对碰区凸起轮廓发展演化过程、对碰区压力分布、材料表面是否发生破坏等丰富的实验参量和信息。实验结果表明,在本文实验装置构形下,冲击波对碰后发生规则反射,对碰后压力约为对碰前压力的 2.5 倍;冲击波对碰后的压力分布决定对碰区的凸起结构,钨合金飞层对碰区凸起为"尖"形结构。

关键词:爆炸力学;速度剖面;线阵 DPS;对碰区

中图分类号:O384 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

在爆轰驱动工程应用中,有时会遇到 2 个爆轰波相向碰撞后驱动金属材料运动的情形。2 个爆轰波或冲击波相向碰撞后,根据碰撞角度的不同,将会发生规则反射或不规则反射(也称马赫反射)。发生规则反射时,波后压力约为碰撞前压力的 2 倍以上;发生马赫反射时,在临界反射角附近,波后压力更高,甚至可以达到 3 倍以上[1]。为叙述方便,常将 2 个爆轰波(或冲击波)相向碰撞的区域称之为爆轰波(或冲击波)对碰区,简称为对碰区。爆轰波对碰驱动金属材料运动时,由于对碰区的高温、高压作用,将会导致金属材料发生表面喷射、变形失稳、冲击熔化、断裂破坏等非均匀的复杂的动力学行为,使得对碰区动载行为的研究变得十分困难。对碰区动力学行为在国防领域中有重要的工程应用背景,同时具有一定的学术研究价值,近年来陆续开展了一些研究工作。M. Singh 等[2]、A. K. Zhiembetov 等[3]、陈军等[4]、张崇玉等[5]对爆轰对碰驱动下金属柱壳的膨胀变形特性进行了实验观测。研究发现,在金属圆管对碰区均出现超前凸起现象;铅、锡等低强度、低熔点金属材料对碰区凸起部位出现多孔断裂、崩溃破碎、雾化等现象,不同于钢材料的对碰区凸起行为,显示材料强度和熔点对对碰区动载行为有重要影响。张崇玉等[6]开展了铅材料飞层对碰区凸起行为的实验研究,观察到铅材料飞层对碰区凸起为多层分区结构,凸起头部出现散碎、雾化特征,整个对碰区凸起为非密实、非连续物质状态。袁帅等[7]采用 SPH (smoothed particle hydrodynamics)方法对铅飞层对碰凸起行为进行了数值模拟,再现了对碰区凸起的散碎、雾化特征;但由于定量实验数据的缺乏,无法对计算结果的准确性和合理性进行直接校验。

上述对碰区实验工作中,主要采用高速摄影和 X 光照相 2 种测试技术,以对碰区动载行为的现象观测和定性分析为主,而涉及对碰区动力学行为的定量数据则严重缺乏,导致对对碰区动载行为的认识不够深入。对碰区动载行为与对碰区的运动、驱动参数(速度、压力分布等)密切相关,若能获取对碰区速度、压力等的定量数据,将为认识对碰区复杂动力学行为提供重要支撑。另外,对碰区量化数据的获取,还可以对对碰区动载行为的数值模拟结果进行很好地校验,以确认计算结果的准确性和合理性。

线阵 DPS 测速技术的出现[8],为对碰区动载行为的精密诊断提供了技术支持。线阵 DPS 测速技术,是将多根光纤探针按直线密排方式集成在一个探头上,利用激光多普勒测速原理,在毫米量级范围内实现对多个测点速度曲线的精密测量,主要用于材料非均匀冲击动力学响应特性研究。

本文中,采用线阵 DPS 测速技术,对钨合金平面飞层对碰区速度剖面进行测试,考察线阵 DPS 测

* **收稿日期**:2014-11-25; **修回日期**:2015-04-07
基金项目:中国工程物理研究院科学技术发展基金项目(2013B0201022)
第一作者:张崇玉(1975—),男,硕士,副研究员,zcy_7718@aliyun.com。

试技术应用于对碰区速度剖面测量的可行性,同时获取对碰区内速度变化、压力分布等信息,以期为认识对碰区复杂动力学行为提供实验支撑。

1 实验设计

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示:炸药为 JH-9005(主要成分为 RDX,质量分数为 96.5%),尺寸为∅32 mm×22 mm;飞层材料为钨合金,密度为 15.7 g/cm^3,尺寸为∅36 mm×1.5 mm;炸药与飞层之间为厚2 mm 的 LY12 隔板;采用 2 个电雷管在炸药柱侧面对称位置上同时起爆,在炸药中形成 2 个相向传播的爆轰波,爆轰波对碰后驱动飞层。在垂直对碰线、距离飞层表面 2 mm 处,布设 1 个线阵 DPS 测速探头。

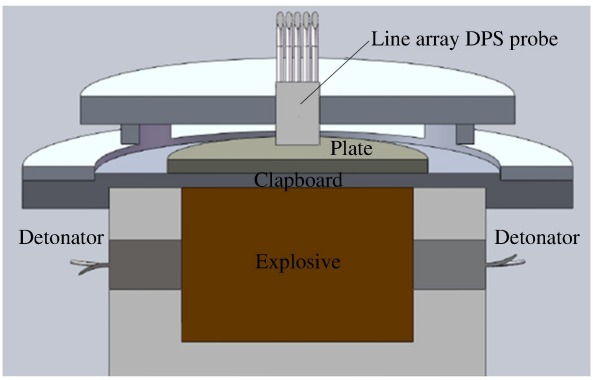

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematics of experimental setup

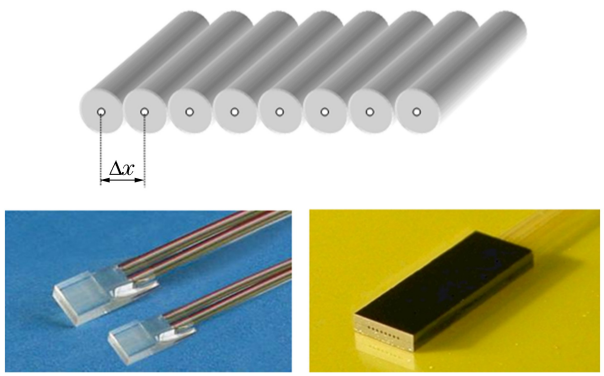

图 2 线阵 DPS 探头

Fig. 2 Images of line array DPS probes

1.2 线阵 DPS 探头及其布局

线阵 DPS 探头实物照片及测点间隔如图 2 所示。根据空间分辨率的大小,测点间隔可选 0.127、0.250、0.500 mm 等。由于光纤探针较细,回光效率较低,且为发散光(距离越大,光斑越大),严重制约了探头的测量距离(即线阵 DPS 探头与测试对象之间的距离),一般要求测量距离控制在2 mm以内。

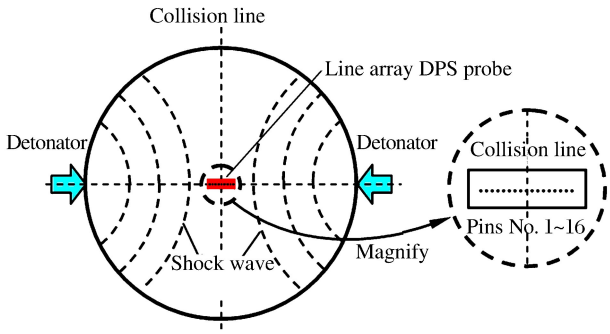

图 3 探头布局示意图(俯视图)

Fig. 3 Schematics of DPS probe arrangement(planform)

实验中采用 1 个线阵 DPS 探头对准钨合金飞层中心部位进行测试,探头测点垂直对碰线对称分布,如图 3 所示。线阵 DPS 探头集成 16 根 DPS 光纤探针,探针编号从左至右依次为:1~16;测点间隔为 0.25 mm;探头距飞层表面 2 mm,测试光斑直径为 0.22 mm。

2 实验结果及分析

实验中成功获得了钨合金飞层对碰区 16 个测点的速度-时间(v-t)曲线和速度曲线峰值 v_p,如图 4 和表 1 所示。由图 4 和表 1 可看出:(1)除 9 号测点外,其余测点均有一大一小 2 个速度峰值,这反映了冲击波对碰前对飞层的一次加载和对碰后反射冲击波对飞层的二次加载特征;(2)9 号测点速度最高,速度峰值达 1.6 km/s,且速度曲线无二次加载特征,说明 9 号测点正好位于冲击波对碰线上;(3)冲击波对碰前,各测点的速度曲线峰值基本一致;而对碰后,各测点的速度曲线峰值,则以 9 号测点为中心,向两侧逐渐降低。表明各测点入射冲击波压力基本一致;而冲击波对碰反射后,冲击波压力逐渐下降;(4)8、10 号测点速度曲线,在对碰加载后出现速度弥散现象,其他测点均无此现象。

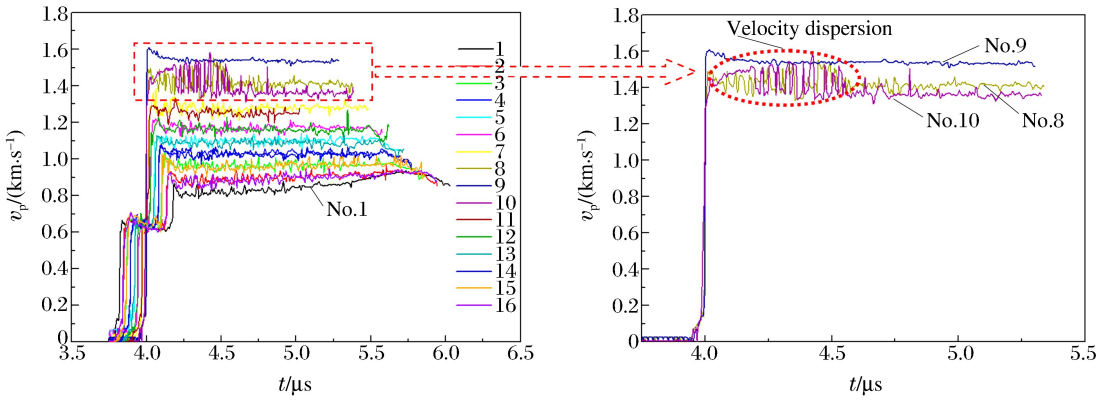

图 4　钨合金飞层对碰区速度历史曲线

Fig. 4　Velocity history of collision region of tungsten alloy flying plate

选 8、9 号 2 个典型测点的速度频谱图进行对比说明，如图 5 所示。8 号测点在对碰加载后出现了明显的速度带特征，这意味着在该区域同一时刻内出现了多个速度信息。根据文献[9]可知，此时飞层表面可能出现了微喷射、断裂破碎等动力学行为。而 9 号测点的速度曲线则比较光滑、干净，表明在测试时间内飞层表面是完整的，没有发生破坏。

表 1　各测点的速度曲线峰值

Table 1　Velocity peaks of each test point

测点编号	v_p/(m·s^{-1})		测点编号	v_p/(m·s^{-1})	
	对碰前	对碰后		对碰前	对碰后
1	666.7	870.3	9		1 600.0
2	681.6	931.5	10	627.6	1445.6
3	672.4	1 037.0	11	646.8	1 290.2
4	663.9	1 084.1	12	643.7	1 227.6
5	686.8	1 119.3	13	655.8	1 128.3
6	677.4	1 219.3	14	673.4	1 071.0
7	627.4	1 363.9	15	705.6	1 030.2
8	630.3	1 497.0	16	709.5	925.8

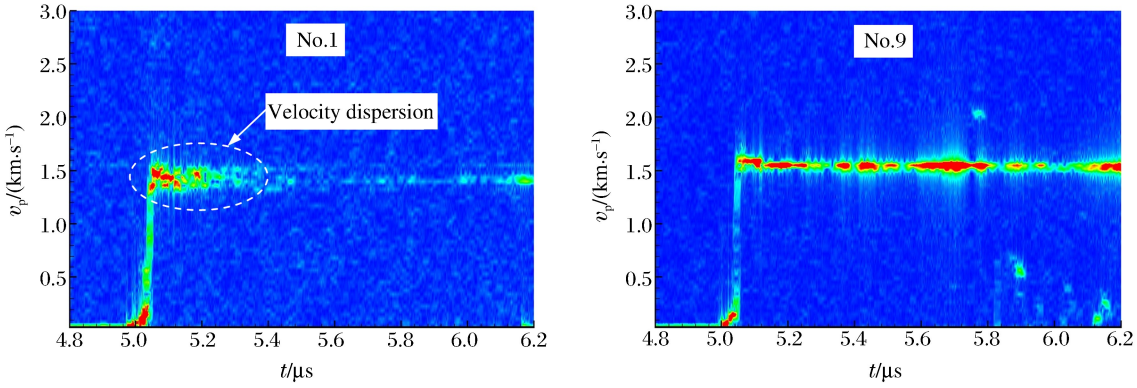

图 5　典型测点速度频谱图

Fig. 5　Velocity spectra of typical test points

对各测点的速度曲线进行积分后，可以得到了各测点的位移曲线，见图 6。根据图 6 可以给出典型时刻各测点的运动位移，将相同时刻各测点的位移连起来后，可得到对碰区凸起轮廓的发展演化过程，见图 7。由图 7 可见，对碰区运动过程为先凹后凸；两侧飞层运动早（冲击波到达早），对碰区飞层运动晚（冲击波到达晚），所以开始时为凹陷形状；冲击波对碰后，由于压力剧增，对碰区飞层运动速度高于其他区域（见表 1）。因而对碰区飞层迅速拱起，随时间推移逐渐发展形为“尖”形凸起形状。根据表 1 数据和钨合金的冲击雨贡纽关系 $D-u_0=4.09+1.34(u-u_0)$，可以计算得到各测点对碰前后的最高压力 p_p，见表 2。压力计算公式为 $p_p-p_0=\rho(D-u_0)(u-u_0)$，式中 ρ 为材料密度，D 为冲击波速度，u 为粒子速度（约为自由面速度的一半），下标 0 表示波前状态。

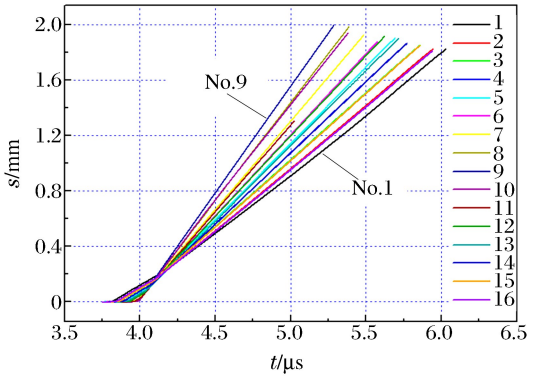

图 6 对碰区各测点位移-时间曲线

Fig. 6 Displacement-time curve of each test point

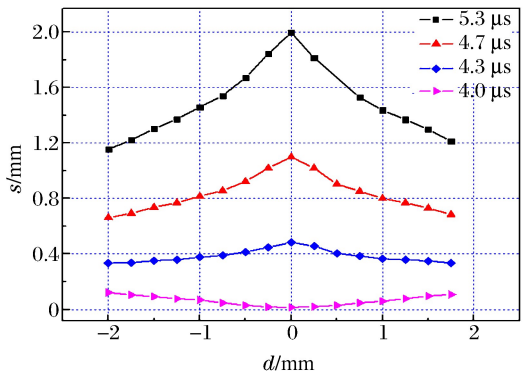

图 7 典型时刻对碰区凸起轮廓

Fig. 7 Bulge contours of collision region at typical times

根据表 2 可以画出对碰区冲击波对碰前后的最高压力分布，如图 8 所示。由图 8 可看出：对碰前，各测点压力基本一致，在 22.2～25.4 GPa 之间（平均值 23.7 GPa）；对碰后，压力急剧升高，9 号测点压力最高，达到 58.5 GPa，约为对碰前平均压力的 2.5 倍；随反射冲击波向两侧传播，加载压力逐渐下降。在对碰区内未观察到压力平台区（如果发生马赫反射，在对碰线附近则有一定宽度的压力平台区），表明本实验构型下冲击波对碰后发生的是规则反射。对比图 7 和图 8，可以发现冲击波对碰后的压力分布与对碰区凸起轮廓一致，表明冲击波对碰后的压力分布决定对碰区的凸起形状。

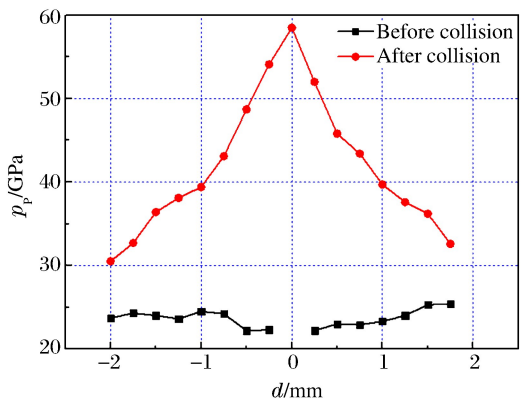

图 8 各测点对碰前/后压力峰值

Fig. 8 Pressure peaks of each test point before and after colliding

3 结 论

采用线阵 DPS 测速技术，成功获得了钨合金平面飞层对碰区 4 mm 长度范围内 16 个测点的速度历史曲线，对速度曲线进一步处理后，给出了对碰区凸起轮廓发展演化、压力分布、冲击波反射类型、材料表面是否破坏等丰富的实验信息。根据对碰区凸起形状及压力分布，可知钨合金平面飞层中冲击波对碰后发生的是规则反射，对碰后压力约为对碰前压力的 2.5 倍。对碰区凸起为“尖”形结构，与冲击波对碰后对碰区压力分布图形状基本一致，表明冲击波对碰后的压力分布决定对碰区的凸起形状。根据各测点的速度频谱图，结合文献[9]，可以定性判断：钨合金飞层对碰区，除个别点发生了类似表面喷射、断裂破碎等动力学行为外，大部分区域飞层表面均保持完整，未发生破坏。

表 2 各测点对碰前/后的压力峰值

Table 2 Pressure peaks of each test point before/after colliding

测点编号	p_p/GPa		测点编号	p_p/GPa	
	对碰前	对碰后		对碰前	对碰后
1	23.7	30.5	9		58.5
2	24.3	32.7	10	22.2	52.0
3	24.0	36.4	11	23.0	45.8
4	23.6	38.1	12	22.9	43.4
5	24.5	39.4	13	23.3	39.7
6	24.2	43.1	14	24.0	37.6
7	22.2	48.7	15	25.3	36.2
8	22.3	54.1	16	25.4	32.6

线阵 DPS 测速技术在对碰区实验研究中的成功应用，实现了对碰区速度剖面的精密诊断，获得了丰富的实验信息，有助于更好地认识对碰区复杂的动力学行为。下一步拟重点借助线阵 DPS 测速技术，开展不同加载状态、不同材料金属飞层对碰区动力学行为实验研究，以期获得加载状态、材料性能等因素对对碰区动力学行为的影响。

参考文献：

[1] 孙承纬，卫玉章，周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京：国防工业出版社，2000：534-543.

[2] Singh M，Suneja H R，Bola M S，et al. Dynamic tensile deformation and fracture of metal cylinders at high strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering，2002，27(9)：939-954.

[3] Zhiembetov A K，Mikhaylov A L，Smirnov G S. Experimental study of explosive fragmentation of metals melts [C]. AIP Conference，2002，620(1)：547-552.

[4] 陈军，孙承纬，蒲正美，等. 爆轰波对碰区产物驱动金属圆管的研究[J]. 爆炸与冲击，2003，23(5)：442-447.
Chen Jun，Sun Chengwei，Pu Zhengmei，et al. Expansion of metallic tubes by detonation product behind two head-on colliding detonation waves[J]. Explosion and Shock Waves，2003，23(5)：442-447.

[5] 张崇玉，谷岩，张世文，等. 爆轰波对碰驱动下金属圆管膨胀变形特性研究[J]. 爆炸与冲击，2005，25(3)：222-226.
Zhang Chongyu，Gu Yan，Zhang Shiwen，et al. Study on expanding characteristic of steel tube driven by two head-on colliding detonation waves[J]. Explosion and Shock Waves，2005，25(3)：222-226.

[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] 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.

[8] 胡昌明，王翔，刘仓里，等. 阵列 DPS 测量技术在材料动态力学性能研究中的应用[J]. 爆炸与冲击，2010，30(1)：105-108.
Hu Changming，Wang Xiang，Liu Cangli，et al. Applications of DPS arrays testing technique to dynamic properties study of materials[J]. Explosion and Shock Waves，2010，30(1)：105-108.

[9] Buttler W T，Oro D M，Olson R T，et al. Second shock ejecta measurements with an explosively driven two-shock-wave drive[J]. Journal of Applied Physics，2014，116(10)：103519.

Precision test of velocity profile in collision region of plane metal flying layer

Zhang Chongyu[1]，Hu Haibo[2]，Wang Xiang[1,2]

(1. *Institute of Fluid Physics*，*China Academy of Engineering Physics*，*Mianyang* 621999，*Sichuan*，*China*；
2. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research*，*Institute of Fluid Physics*，*China Academy of Engineering Physics*，*Mianyang* 621999，*Sichuan*，*China*)

Abstract：Using the line array Doppler pins system(DPS) test technique，the velocity history of the collision region of a tungsten alloy plate was measured，and 16 test points were arranged within the 4-mm-long range in the collision region. The velocity curves were processed to obtain the experimental information such as velocity change，pressure distribution，bulge evolution and plate surface damage. Experimental results show that regular reflection occured after two shock waves colliding，and the pressure of the collision region after colliding was 2.5 times of one before colliding. Meanwhile，the pressure distribution in the collision region after colliding dominated the bulge contour of the collision region. And the collision region of the tungsten alloy flying layer took on a tip-shaped structure.

Key words：mechanics of explosion；velocity history；line array DPS；collision region

(责任编辑　张凌云)