文章编号：1000-5773(2009)04-0283-05

爆轰波对碰驱动下平面铅飞层对碰区动载行为实验研究*

张崇玉，胡海波，李庆忠，袁 帅

（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国防科技重点实验室，四川绵阳 621900）

摘要：采用高速光学照相和脉冲 X 光照相技术，对滑移爆轰波对碰驱动下平面铅飞层对碰区的动载行为进行了实验研究。实验结果显示，在爆轰波对碰区铅飞层出现了类似射流状超前凸起的现象，对碰区凸起呈现出速度和密度有明显差别的多层分区结构。凸起头部速度较高，运动过程中因自身的速度梯度及与周围空气的相互作用，呈现出明显的散碎、雾化特征，体密度远低于初始密度。凸起根部速度相对较低、密度较高，但随时间的推移仍迅速转变为非密实状态。对碰爆轰波的波剖面结构，以及材料的强度和冲击熔化可能是主导对碰区动载行为的主要因素。

关键词：爆轰波对碰；平面铅飞层；对碰区凸起；散碎雾化

中图分类号：O384 **文献标识码**：A

1 引 言

在爆轰驱动研究中，常常会遇到两个爆轰波相互碰撞驱动壳体运动的情况。两爆轰波碰撞后在很窄的区域内产生较高的压力，约为 CJ 压力的 2.3～2.4 倍[1]，常将该区域称之为爆轰波对碰区。爆轰波对碰导致压力、温度的急剧升高，可能会引发材料特殊的表面喷射、变形失稳、断裂破坏等动力学响应。爆轰波对碰驱动下材料的动载行为表现，由于其独特的力学行为特征以及重要的工程应用背景和理论研究价值，近年来逐渐引起了研究人员的关注。

M. Singh 等[2]、陈军等[3]、张崇玉等[4]先后对爆轰波对碰驱动下金属圆管的膨胀变形特性进行了实验研究。由实验结果发现，在爆轰波对碰驱动下金属圆管对碰区出现了超前凸起现象，且该部位壳体较邻近部位易发生提前断裂。王德生等[5]、张崇玉等[6]针对金属圆管对碰区易出现过早断裂的问题，提出在金属圆管对碰区增加保护环结构，以达到抑制对碰区圆管的超前运动，从而推迟其断裂时间的目的，实验结果表明，这一措施在一定条件下是有效的。A. K. Zhiembetov 等[7]在用铅、铜、锡、铁等材料开展柱壳对碰实验时发现，采用铅、铜、锡这类低强度、低熔点金属材料进行实验时，观察到对碰区凸起部位出现多孔断裂、崩溃以及材料的破碎、雾化等现象，完全不同于相同加载条件下铁的对碰区凸起部位的行为表现，表明材料强度和熔点对壳体对碰区凸起行为有重要影响。А. Г. Иванов[8]等采用 X 光照相技术对 R/T 炸药对碰驱动下平面铝飞层对碰区凸起的行为特征进行了实验研究，获得了铝飞层对碰区凸起的形貌及随时间的演化图像，另外作者认为，借助合适的材料模型和不断发展的计算机技术，可以对该类现象进行量化描述。

* **收稿日期**：2008-10-08；**修回日期**：2009-02-16

基金项目：国防科技重点实验室基金(9140C6713030706)

作者简介：张崇玉(1975—)，男，硕士，助理研究员，主要从事冲击波物理与爆轰物理研究. E-mail：zcy_7718@yahoo.com.cn

本研究选择强度和熔点均较低的铅材料作为研究对象，采用光学分幅阴影照相和脉冲 X 光照相两种测试技术，对其平面飞层在爆轰波对碰驱动下的动载行为进行了观测，并对实验获得的现象进行了初步分析和讨论。

2 实验设计

2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示。铅飞层和 LY12 铝飞层的厚度均为 2 mm，炸药为泰安(PETN)，尺寸为 ∅32 mm×22 mm。在药柱柱面中间两点对称安装雷管，同时起爆炸药，驱动飞层运动。

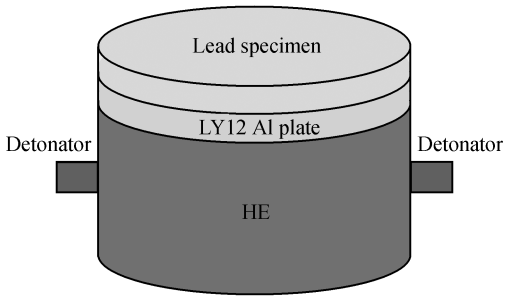


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental set-up

2.2 测试技术

采用光学分幅阴影照相和脉冲 X 光照相两种测试技术，对铅飞层对碰区凸起行为进行观测。为了从一发实验获得较多的信息，实验中同时采用一台高速相机和两台脉冲 X 光机对实验装置进行观测，实验布局如图 2 所示。高速相机为 FJZ-250 转镜式高速分幅相机，转速为 2.4×10^5 r/min，幅间间隔为 0.5 μs。采用高能脉冲氙灯作为光学照相的背景光源。两台 X 光机对应的二极管电压分别为 450 和 300 kV。450 kV X 光机与高速相机沿对碰区凸起方向进行照相(定义为纵向)，300 kV X 光机沿垂直对碰区凸起方向进行照相(定义为横向)。为了实现光学阴影照相和脉冲 X 光照相的联合测试，在 450 kV X 光照相方向上增加了两块薄反光镜。

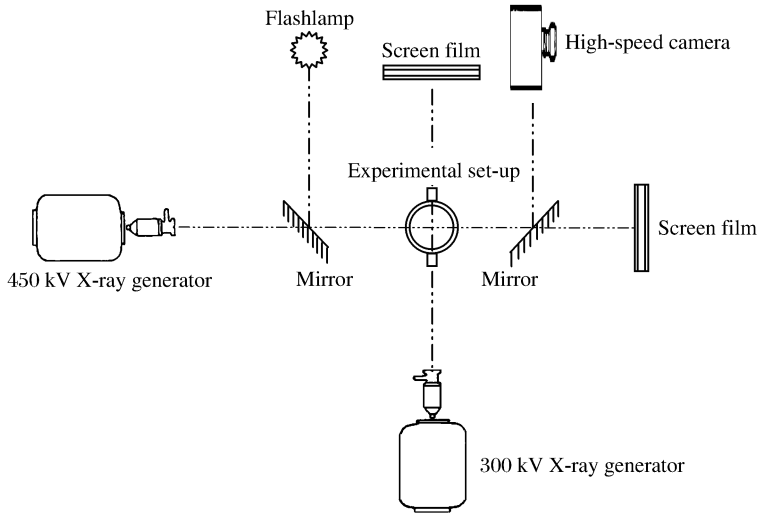


图 2 实验布局示意图

Fig. 2 Layout of experiment configuration

3 实验结果及分析

高速相机记录了炸药从起爆至 14 μs 时刻铅飞层对碰区凸起的整个动态发展过程，典型时刻的光学图像如图 3 所示(取炸药起爆为时间零点，两爆轰波约 2.4 μs 对碰)。由图 3 可见，爆轰波对碰后铅飞层对碰区出现超前凸起现象，随时间的推移，对碰区凸起的高度和宽度不断增加。对碰区凸起头部的平均运动速度为 2.13 km/s，约为非对碰区运动速度的 1.5 倍。另外由图还发现，10、14 μs 时刻在对碰

区凸起表面清晰可见与凸起形状类似的空气冲击波的阵面(如箭头所示)。由于空气冲击波的存在和铅飞层表面的微喷射现象,使得对碰区凸起的界面轮廓变得比较模糊。

图 4 为雷管起爆后约 14.1、23.7 μs 两个时刻、不同观测方向对碰区凸起的 X 光照相实验结果。图中左、右两幅图之间的白色连线表示两个观测方向上高度相同的位置。沿纵向记录的对碰区凸起形状细长,类似聚能装药射流,由于沿观测方向上的物质叠加,表观上似乎处于密实的连续介质状态。沿横向进行观测,得到的对碰区凸起图像直观地反映了对碰凸起的多层分区结构和物质分布状态。由 14.11 μs 时刻横向 X 光图像可以发现,对碰区凸起为从头部到根部存在明显的密度梯度变化,构成多至 3～4 个特征区域的分区结构。凸起头部密度较低,表观上处于不连续的散碎状态,根部密度较高,不同低密度区域中间有密度较高的类似于层裂片的"夹层",将低密度区域分开。对两个时刻 X 光图像的对应特征位置进行对比处理后,可得对碰区凸起头部、中间夹层、凸起根部的平均运动速度分别为:1.55、1.27、0.97 km/s,由头部到根部,各特征区域的运动速度依次递减。因各特征区域的速度差异,随时间推移(见 23.68 μs 图像),凸起结构各区域展宽,高密度"夹层"依然存在,凸起头部轮廓变得模糊。仔细观察对碰凸起头部低密度区域图像,可以发现该区域物质密度不均匀,呈分束特征的高速运动状态,可能因自身速度的差异,同时与周围气体相互作用,而正处于不断散碎、雾化过程中。

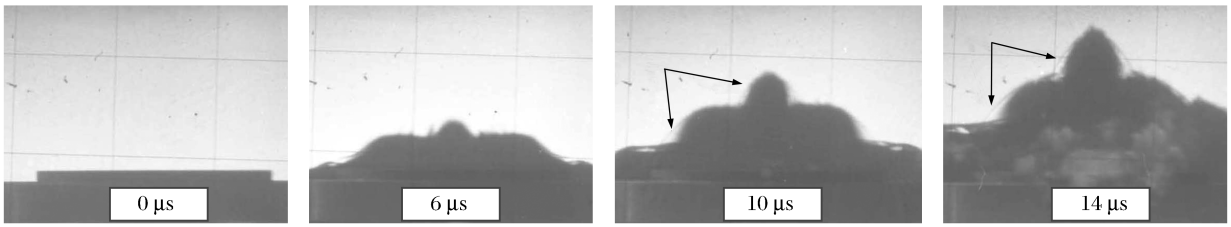


图 3　平面铅飞层对碰区凸起光学图像

Fig. 3　Optical images of collision bulging of Pb plate

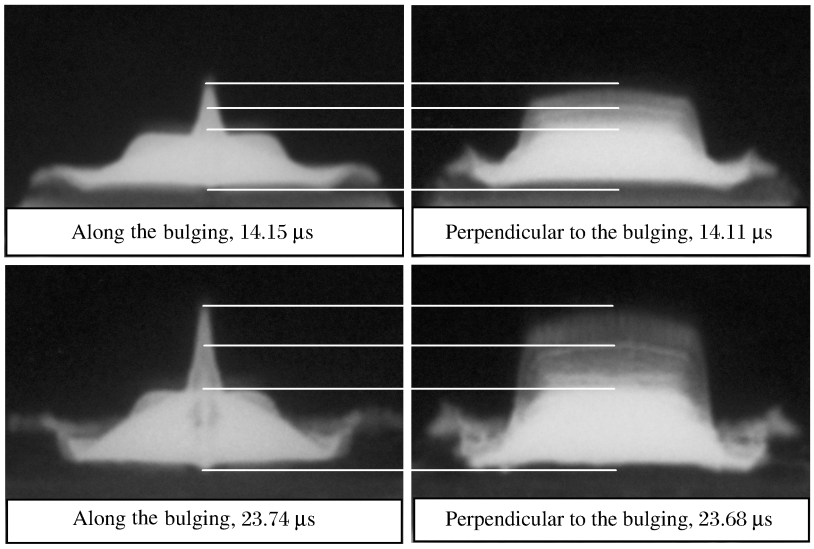


图 4　平面铅飞层对碰区凸起 X 光图像

Fig. 4　Radiographs of collision bulging of Pb plate

将 14 μs 时刻的纵向光学图像和 X 光图像进行对比,可发现两者之间存在明显的差异,光学图像的对碰区凸起宽度大于 X 光图像的对碰区凸起宽度。另外,由光学图像和 X 光图像获得的对碰区凸起头部的运动速度也有差异:光学为 2.13 km/s,X 光为 1.55 km/s。这是由于对碰区凸起表面包覆着微喷射颗粒和空气冲击波,它们的密度很低,只有铅材料初始密度的 0.01 左右,无法在 X 光底片上留下痕

迹，而却可以在光学底片上留下阴影。

借助预设的不同厚度的标定样品对整个 X 光图像进行处理后，获得了铅飞层对碰区凸起横向图像的等效厚度云纹图，见图 5。14.11 μs 时刻对碰区凸起低密度区域的面密度为 280～560 mg/cm^2，体密度约为 2.0 g/cm^3；23.68 μs 时刻对碰区凸起低密度区域的面密度为 170～250 mg/cm^2，体密度约为 0.8 g/cm^3。根部的密度高于头部的密度，但仍低于铅的初始密度(11.35 g/cm^3)。

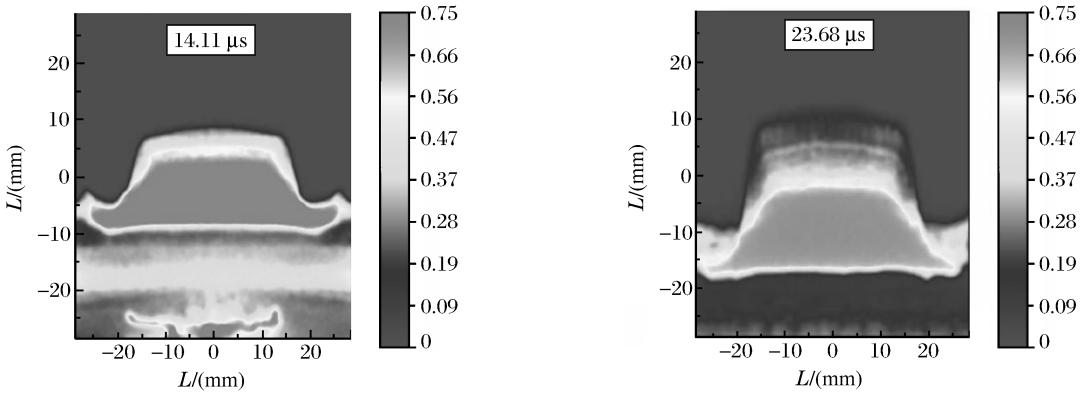


图 5 铅飞层对碰区凸起等效于铅厚度的云纹图

Fig. 5 Equivalent thickness of collision bulging of Pb plate

4 讨 论

实验结果显示，平面铅飞层对碰区出现严重失稳凸起现象，明显区别于 W、HR2、Cu 等材料的实验结果[9]，类似射流的对碰区凸起在发展过程中展现出多层分区的复杂结构，且有别于表观上的连续介质状态，在所观测时刻，各特征区域的密度均明显低于飞层材料的初始密度。由初始的连续、密实状态过渡到对碰区凸起的散碎、雾化结构，其间必然经历系列转换过程。文献[7]结果指出，材料强度和冲击熔化可能是主导飞层对碰区凸起行为的主要因素。从本实验结果来看，铅飞层对碰区出现多层分区、散碎雾化的凸起结构特征，除了材料强度和冲击熔化等因素外，可能还与对碰爆轰波波剖面结构细节有直接的对应关系。关于两者之间的联系，还有待于进一步研究。

另外，文献[8]认为，借助合适的材料模型和不断发展的计算机技术，可以对对碰区凸起现象进行模拟和量化描述，但从本实验结果来看，铅飞层对碰区凸起处于散碎、雾化的非连续、非密实状态，给材料模型和计算方法等均带来了很大的困难，短时间内要实现对这一现象的量化模拟还有很多工作要做，目前已申请专项课题正在开展这方面的工作。本实验观测到的对碰区复杂动力学现象(多区分层、非密实状态)提醒我们，在借助考虑冲击熔化和高应变率强度性能模型的计算程序对铅飞层的对碰区现象进行量化模拟之前，应对所涉及的物理问题和相关变化历程进行更深入的分析。

本项工作是在冯东升、张振涛、孙学林、管永红等的协助下完成的，谨表谢意！

References:

[1] Sun C W, Wei Y Z, Zhou Z K. Physics of Applied Detonation [M]. Beijing: Defense Industry Publishing Company, 2000: 534-543. (in Chinese)
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]. Int J Impact Eng, 2002, 27: 939-954.

[3] Chen J, Sun C W, Pu Z M, 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. (in Chinese)
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.

[4] Zhang C Y, Gu Y, Zhang S W, 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. (in Chinese)
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.

[5] Wang D S, Han C S, Ma S H, et al. On Studies of Delaying Fracture Time of Cylindrical Metallic Tubes under Detonation of Inner Explosive [J]. 爆炸与冲击,1997,17(Suppl):360-364. (in Chinese)
王德生,韩长生,马松合,等.推迟内装炸药爆轰作用下金属圆管断裂时间的研究 [J].爆炸与冲击,1997,17(增刊):360-364.

[6] Zhang C Y, Gu Y, Li Q Z, et al. Study on Deformation Characteristics of Collision Region of Copper Tube with Guard-Ring Driven by Two Head-on Colliding Detonation Waves [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(2): 97-102. (in Chinese)
张崇玉,谷　岩,李庆忠,等.爆轰波对碰驱动下加环紫铜圆管对碰区变形特性研究 [J].爆炸与冲击,2007,27(2):97-102.

[7] Zhiembetov A K, Mikhaylov A L, Smirnov G S. Experimtnal Study of Explosive Fragmentation of Metals Melts [A]// Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2002: 547-550.

[8] Иванов А Г, Новиков С А, Кочкин Л И. Столкновение Детонационных Волнна Поверхности Инертного Материала [J]. ФТВ, 1977, 137(4): 601-605.

[9] Zhang C Y. The Eexperimental Study and Numerical Simulation on Expanding Characteristic of Metallic Cylinder Protected by Guard-Ring under Two Detonation Waves Collided [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2005. (in Chinese)
张崇玉.爆轰波对碰驱动下保护环对金属圆管保护的实验和数值模拟研究 [D].绵阳:中国工程物理研究院,2005.

Experimental Study on Dynamic Behavior of Lead Plate Driven by Two Head-on Colliding Detonation Waves

ZHANG Chong-Yu, HU Hai-Bo, LI Qing-Zhong, YUAN Shuai

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: In order to investigate the configuration and mass distribution of collision bulging, dynamic behaviors of Pb plate driven by collision of head-on sliding detonation waves were characterized with high-speed frame photography and pulsed X-ray radiography. Experimental results showed that a bulging similar to a shaped charge jet were produced in the collision region, which appeared as a multi-zone structure across several layers. The tip of bulging with higher velocity had a characteristic of fragmentary and cavitation because of its speed gradient and the interaction with air, and its bulk density was much lower than the pre-shock initial density of Pb. Though the root of bulging had a lower velocity and a higher density relatively, it was also in non-dense state. It suggested that the collision of sliding detonation waves, strength of materials and shock melting might play a leading role in the bulging formation process.

Key words: two head-on colliding detonation waves; lead plate; the bulging of collision region; fragmentary and cavitation