文章编号：1000-5773(2013)06-0884-05

柱面内爆驱动下铅飞层对碰区动载行为的实验研究*

张崇玉，胡海波，李庆忠

（中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳　621999）

摘要：采用光学阴影照相和脉冲X光照相，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。实验结果显示，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。由于对碰产生高压，因此铅飞层对碰区可能完全熔化，变成名义上无剪切强度的流体。材料的低强度、低熔点（冲击熔化压力）性能是造成铅飞层对碰区出现射流状超前凸起现象的主要因素。还观察到对碰区出现3个超前凸起现象，初步分析可能是由于柱面滑移爆轰波对碰导致的波系反射、叠加造成的，具体原因还有待于进一步分析研究。

关键词：柱面内爆；爆轰波对碰；铅飞层；对碰区凸起；冲击熔化

中图分类号：O384　　**文献标识码**：A

1　引　言

两爆轰波对碰后在很窄的区域内产生较高的压力，在对碰角小于45°的情况下，对碰后压力约为对碰前压力的2.3～2.4倍[1]，而且对碰区域内温度急剧升高，会导致材料出现表面喷射、变形失稳、断裂破坏等复杂动力学行为。在爆轰驱动研究领域中，由于爆轰波对碰现象的复杂性，开展的实验研究较少，并且主要以观测实验现象和定性分析为主，因此对于对碰区动载行为的机理分析和量化描述较少涉及。

Singh[2]、陈军[3]、张崇玉[4]等对柱面外爆对碰驱动下金属圆管的膨胀变形行为进行了实验研究，实验结果发现，金属圆管对碰区出现超前凸起现象，而且该部位壳体较邻近部位易发生提前断裂。张崇玉等[5]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是行之有效的。Mikhailov等[6]用铅、铟、锡等低强度、低熔点金属材料开展了柱面外爆对碰实验，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，完全不同于高强度、高熔点金属的对碰区凸起表现，表明材料的强度和熔点对材料对碰区凸起行为有重要影响。Ivanov等[7]对平面铅飞层对碰区凸起行为进行了实验研究，认为借助合适的材料模型和不断发展的计算机技术，可以对对碰区凸起行为进行量化描述。张崇玉等[8]开展了平面铅飞层对碰区凸起X光照相观测实验，观察到铅飞层对碰区凸起为多层分区结构，凸起头部出现明显的散碎、雾化特征，整个对碰区凸起为非密实、非连续物质状态，目前，借助数值模拟计算技术对铅飞层的对碰区凸起行为进行量化描述，是非常困难的。

目前开展的对碰区动载行为的研究均采用柱面外爆对碰或平面对碰实验装置构形，而对于柱面内爆对碰驱动下飞层对碰区的动载行为还不清楚，也未见有公开的文献报道，而实际工程应用中更关心内爆对碰条件下的飞层对碰区动载行为的特征及规律认识。为此本研究设计了柱面内爆对碰实验装置，

* **收稿日期**：2011-12-08；**修回日期**：2012-04-30

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

选择低强度、低熔点金属铅作为飞层材料,同时采用光学阴影照相和脉冲 X 光照相两种测试技术,对飞层对碰区凸起行为进行观测,并对实验现象进行分析讨论。

2　实验设计

2.1　实验装置

实验装置如图 1 所示,左图为装置剖视图,右图为装置左视图。为了实现柱面内爆对碰,在柱壳炸药的外表面对称安装两个雷管,同时起爆炸药,在炸药内形成两个散心爆轰波,沿柱壳滑移爆轰,在柱壳中间部位(见图 1 右图所示)对碰驱动柱壳向内汇聚运动。炸药为 RHT-901(D_{CJ} = 7.8 km/s, p_{CJ} = 27 GPa),管状结构,外径⌀70 mm,内径⌀54 mm。采用两层飞层,外飞层为 2.0 mm 厚的 LY12 铝,内飞层为 2.5 mm 厚的纯铅。

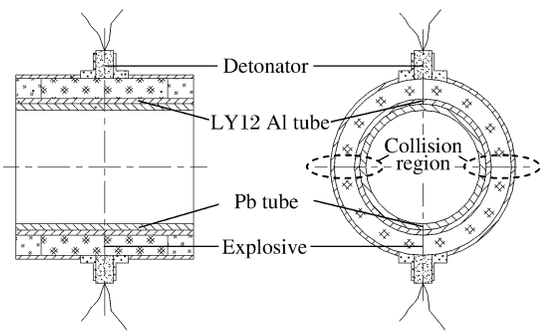


图 1　实验装置示意图

Fig. 1　Schematic of experimental setup

2.2　测试技术

实验采用的测试技术与文献[8]相同,即光学阴影照相和脉冲 X 光照相联合测试。由于实验装置为柱壳结构,无论是光学阴影照相还是 X 光照相,都只有唯一的观测方向,即只有沿装置的轴线进行拍摄,才能获得飞层对碰区凸起行为的物理图像。为了在一发实验中获得较多的信息,并使两种测试技术的观测结果具有可比性,实验中同时采用高速相机和脉冲 X 光机对实验装置进行拍摄,实验布局见图 2。

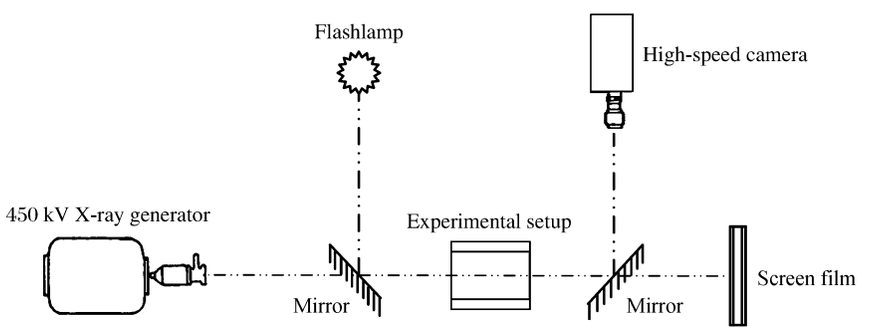


图 2　实验布局示意图

Fig. 2　Layout diagram of experiment

高速相机为 FJZ-250 转镜式高速分幅相机,相机转速为 2.4×10^5 r/min,两幅图像之间的时间间隔为 0.5 μs,一发实验可以获得 40 幅图像,采用高能脉冲氙灯作为阴影照相的背景光源。脉冲 X 光机采用低能 X 光机,二极管电压为 450 kV,焦斑大小为 1 mm,1 m 处照射量为 5.16 μC/kg。为了实现光学阴影照相和脉冲 X 光照相的联合测试,在 X 光照相的光路上增加两块反光镜,由于反光镜会降低 X 射线的穿透率,因此在满足实验要求的前提下,反光镜的厚度应尽量薄,本实验中反光镜的厚度选为 2 mm。

3　实验结果及分析

图 3 为光学阴影照相典型时刻的实验图像。本文中均以炸药起爆为时间零点,两爆轰波约在起爆 6 μs 后对碰,对碰角约 37°。由图 3 可见,两爆轰波对碰后,铅飞层对碰区出现明显的超前凸起现象,随时间推移,对碰区凸起高度越来越高。另外还发现,在 13.5 μs 时刻对碰区出现了 3 个超前凸起的奇特现象,在原中间凸起的两侧又各出现一个小的凸起,到 16.5 μs 时刻该现象消失。目前关于 3 凸起现象的成因还不清楚,也未见国内外有类似现象的相关报道,初步分析可能是由于柱面滑移爆轰波对碰导致的波系反射、叠加造成的,该现象的具体成因还有待于进一步分析研究。

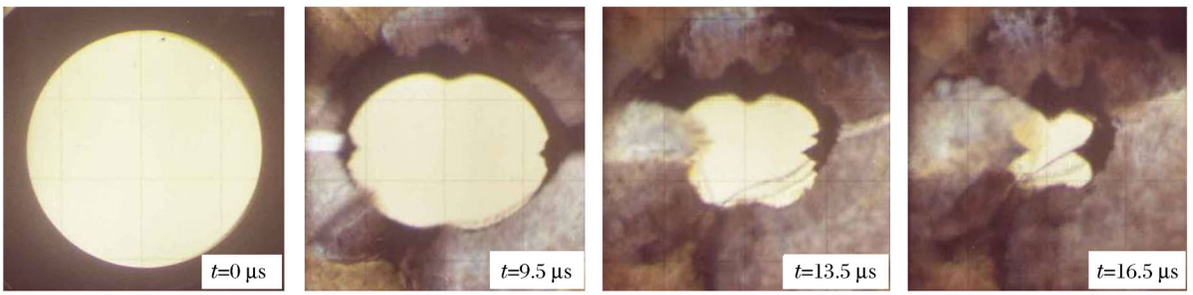


图 3 柱面内爆铅飞层对碰区凸起光学图像

Fig. 3 Optical images of collision spiking of Pb tube driven by cylinderical implosion

图 4 为与光学图像照相时刻相对应的 X 光图像。由图 4 可见，X 光图像与光学图像观察到的对碰区现象基本一致：对碰区均出现明显的超前凸起，随时间推移，对碰区凸起高度越来越高(3 个时刻凸起高度分别为 2.0、4.8、6.7 mm)，表现出明显的失稳发展倾向。由图 4 还可以看到，对碰区凸起特征与起爆区(对应雷管位置)凸起特征明显不同。起爆区凸起为圆滑的鼓包状，而对碰区凸起则为细长的射流状。两者特征的不同反映起爆区飞层和对碰区飞层压力状态的差异。起爆区飞层主要受到炸药的散心爆轰波驱动，因而该区域呈现圆滑的鼓包状。对碰区飞层附近爆轰波对碰后在很窄的区域内产生约 62 GPa 的压力(对碰前压力的 2.3～2.4 倍[1])，而铅的冲击熔化压力约 52 GPa[9]，铅飞层对碰区在爆轰波对碰驱动下可能完全熔化，变成名义上无剪切强度的流体。另外，由于对碰区压力梯度较高，造成该区域飞层的运动速度与邻近区域飞层的运动速度差较大。同时由于对碰面的固壁约束条件，物质只能沿对碰方向向内流动，因此造成铅飞层对碰区出现射流状超前凸起现象。由此看来，铅材料的低强度、低熔点(低冲击熔化压力)性能是造成铅飞层对碰区出现射流状超前凸起现象的主要因素。

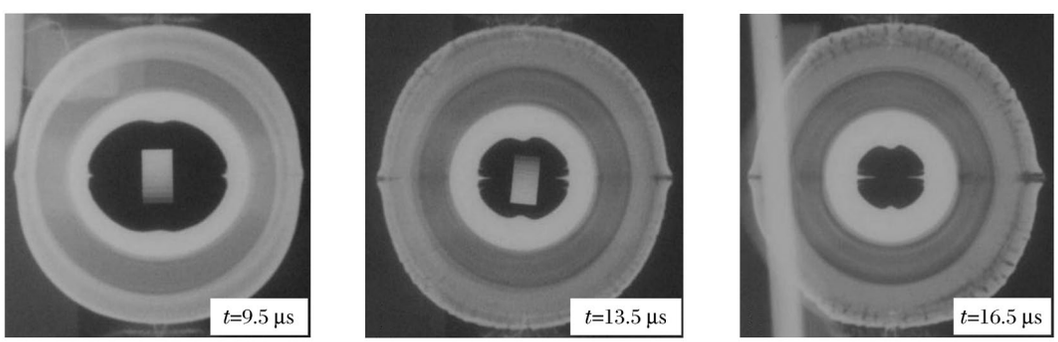
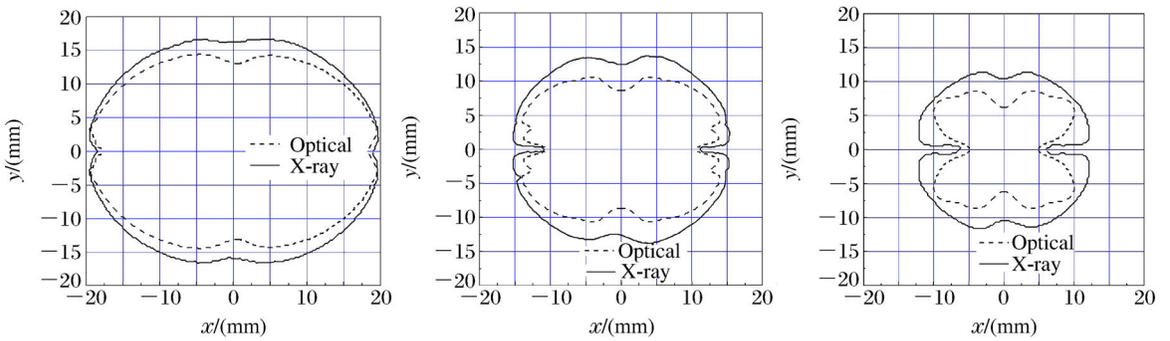


图 4 柱面内爆铅飞层对碰区凸起 X 光图像

Fig. 4 Pulsed X-ray images of collision spiking of Pb tube driven by cylinderical implosion

将图 3 和图 4 的实验图像采用专用程序进行边界处理后，提取了不同时刻飞层空腔界面轮廓数据，并将两种测试技术获得的飞层空腔界面轮廓进行了对比，对比结果见图 5。由图 5 可以发现，光学图像空腔界面轮廓均小于相同时刻 X 光图像的界面轮廓；两者的凸起部位图像细节特征也有差异：光学图像对碰区凸起为粗锥形，而 X 光图像对碰区凸起则为细长的射流状；另外，16.5 μs 时刻光学图像对碰区只有一个凸起，相同时刻 X 光图像则有 3 个凸起。充分说明 X 光图像漏掉了光学图像中所记录到的一些物质，这些物质的密度较低，无法在 X 光底片上留下阴影。文献[5,8]中在柱面外爆对碰和平面对碰中也曾观察到类似的现象。因为铅是低强度、低熔点金属，在冲击加载下表面会产生大量的微喷射颗粒，因此推断 X 光图像漏掉的这些物质为铅飞层表面的微喷射颗粒。图 5 说明，由于大量微喷射颗粒的遮挡，光学照相得到对碰区凸起的物理图像不能真实反映对碰区凸起行为的特征，而 X 光照相过滤掉了这些密度较低的微喷射物质，可以比较真实、客观地反映对碰区凸起的力学行为特征。



(a) $t=9.5\ \mu s$　　(b) $t=13.5\ \mu s$　　(c) $t=16.5\ \mu s$

图 5　光学图像和 X 光图像空腔界面轮廓对比

Fig. 5　Comparison of contour line of cavum between optical images and pulsed X-ray images

4　认识与结论

(1) 柱面内爆对碰条件下铅飞层对碰区凸起严重,出现射流状超前凸起,随时间推移,凸起高度越来越高,表现出典型的失稳发展倾向。经分析,材料性能(低强度、低熔点或低冲击熔化压力)是造成铅飞层对碰区出现射流状超前凸起现象的主要因素。

(2) 首次观察到柱面内爆对碰条件下铅飞层对碰区出现 3 个超前凸起现象,初步分析可能是由于柱面滑移爆轰波对碰导致的波系反射、叠加造成的,具体原因尚有待于进一步分析研究。

(3) 爆轰波加载下铅飞层表面产生大量的微喷射颗粒,掩盖了对碰区凸起行为的真实物理图像,因此光学照相观察到的对碰区凸起行为是不全面的,而 X 光照相滤掉了密度较低的微喷射物质,可以较真实地反映对碰区凸起的力学行为特征。

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(9): 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] 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.

[6] Zhiembetov A K, Mikhaylov A L, Smirnov G S. Experimental study of explosive fragmentation of metals melts

[C]//Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001. New York: AIP, 2002:547-550.

[7] Иванов А Г, Новиков С А, Кочкин Л И. Столкновение летонационных волнна поверхности инертного материала [J]. ФВГ, 1977, 137(4):601-605.

[8] Zhang C Y, Hu H B, Li Q Z, 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. (in Chinese)
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.

[9] Dai C D, Tan H, Geng H Y. Model for assessing the melting on Hugoniots of metals: Al, Pb, Cu, Mo, Fe, and U [J]. J Appl Phys, 2002, 92(9):5019-5026.

Experimental Study on Dynamic Behavior of the Collision Region of Lead Tube Driven by Cylinderical Implosion

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

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621999, *China*)

Abstract: Dynamic behaviors of the collision region of lead tube driven by cylinderical implosion were experimentally investigated by high-speed frame photography and pulsed X-ray radiography. Experimental results showed that a leading jet-like spiking happened in the collision region, and the spiking demonstrated obvious instability tendency. Due to the existence of high pressure in the collision region, lead may be melted and transformed into liquid without shear strength. Shock-melting may be the main reason for the occurrence of the jet-like spiking in the collision region of lead tube. Additionally, three leading spikings observed in the collision region is reported for the first time. Preliminary analysis attributed the above phenomenon to the reflection and superposition of waves caused by head-on collision of two detonation waves, and the detailed reason should be further analyzed in future work.

Key words: cylinderical implosion; head-on collision of two detonation waves; lead tube; the spiking of the collision region; shock-melting