高压物理学报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

第 32 卷　第 3 期
2018 年 6 月

高　压　物　理　学　报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 32, No. 3
June, 2018

DOI:10.11858/gywlxb.20170691

水防护层对射流头部速度衰减作用研究*

李彪彪,王　辉,袁宝慧

(西安近代化学研究所,陕西 西安　710065)

摘要:采用闪光 X 射线摄影方法观测了射流侵彻水防护层间隔靶的过程,分析得到了射流头部的速度变化规律及水介质中金属粒子、冲击波分布特征,探讨了高温金属射流与水防护层的作用机理。结果表明:射流头部速度在侵彻水防护层间隔靶的过程中,呈现出了突然降低的假象,这是由于射流侵彻水防护层时,冲击波后的高压(9～10 GPa)与高温导致射流头部存在明显的碎化现象。在射流进入水防护层初期,射流头部的碎化最为严重,致使射流头部快速消耗,进而在脉冲 X 射线测量实验中出现射流头部速度突降的假象。

关键词:射流;水防护层;头部速度;碎化;闪光 X 射线摄影

中图分类号:TJ760.2;O389　　**文献标识码**:A

射流穿甲是毁伤敌方舰船和潜艇的主要手段之一,如何实现射流对此类目标的最大毁伤效果是国内外科研人员关注的焦点。在模拟实验中常采用水防护层间隔靶模拟舰船和潜艇的防护结构,用于评价射流对敌方舰船和潜艇的毁伤效果,因此,深入研究射流对水防护层间隔靶结构的侵彻效应有重要的意义。

针对射流侵彻间隔靶的问题,一些学者从间隔靶材料及结构、炸高等对侵彻性能的影响方面开展了较多研究,陈少辉等[1]建立和完善了聚能装药射流侵彻间隔靶板的深度计算模型,并运用数值方法模拟了聚能装药射流侵彻间隔靶的过程。李金铭等[2]运用 ANSYS/LS-DYNA 软件对破甲战斗部毁伤间隔靶过程进行了模拟,获得了破甲深度随间隔靶位置及材料的变化规律及最优炸高。朱绪强等[3]结合实验与数值仿真,研究了大炸高下破甲弹的侵彻性能,获得了炸高对破甲深度的影响规律。但上述工作并未深入地研究射流自身的变化,尤其是高温金属射流与间隔靶水防护层之间存在的复杂作用过程,这极可能是射流对间隔靶侵彻效果的重要影响因素之一。由于射流与水的作用过程可能存在复杂的相变过程,如水的汽化等,一定程度上为数值仿真带来了难度,因此,这方面的研究或许更多地需要依赖对射流侵彻变化过程进行细致的实验观测。

鉴于射流头部速度是影响射流侵彻效应的重要物理量,本研究拟利用脉冲 X 射线摄影方法获取射流侵彻水防护层间隔靶的过程,分析射流头部的速度变化规律,探讨高温金属射流与水防护层的作用机理,为相关战斗部及舰船防护结构设计提供理论依据。

1　射流侵彻水夹层间隔靶实验

1.1　射流装药结构

装药结构主要包括主装药、药型罩和传爆药。药型罩材料为无氧铜,主装药采用 JO-8 炸药压制成型。通过端部中心处的传爆药柱直接起爆主装药。实验装药结构的相关参数如表 1 所示,其中 D、L、θ、

* **收稿日期**:2017-12-11;**修回日期**:2018-01-07
基金项目:国防基础预研项目(00402020202)
作者简介:李彪彪(1995—),男,硕士研究生,主要从事爆炸毁伤研究. E-mail:952510579@qq.com
通信作者:袁宝慧(1959—),男,博士,研究员,主要从事爆炸物理及战斗部技术研究. E-mail:ybhybh59@sina.com

© 2018 Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics　http://www.gywlxb.cn

d、l 别表示装药直径、装药长度、药型罩锥角、传爆药柱直径和传爆药柱高度。

1.2　水夹层间隔靶结构

实验中采用的是“钢板-水-钢板”的结构，其中钢板均为 4 mm 厚，水防护层位于两钢板之间，其深度为 100 mm，水防护层的侧向外壁材料为 PVC。

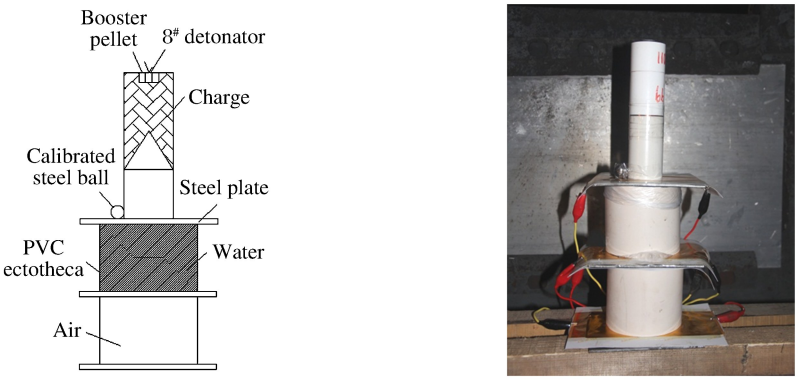
表 1　装药结构参数

Table 1　Loading structure parameters

D/mm	L/mm	θ/(°)	d/mm	l/mm
50	100	57.5	20	10

1.3　实验方法

实验采用脉冲 X 射线摄影仪拍摄射流侵彻水防护层间隔靶的过程，射流炸高为 90 mm，实验装置及现场布局如图 1 所示，图 2 为脉冲 X 射线摄影布局示意图。



(a) Schematic　　(b) Test device

图 1　实验装置图

Fig. 1　Test device

在水防护层内及出水后的空气层中分别拍摄两幅 X 射线图片，通过预置的钢球获得图像放大比，即可确定出相应时刻射流头部实际到达的位置，并根据相邻图片中的距离差及时间间隔获得射流头部在不同介质中速度值。为了保证实验的精度，并没有采用便捷的数字成像板，而是采用精度更高的传统胶片，并严格控制显影、定影的时间等，使所获图像较为清晰，然后采用高精度比长仪对胶片中的信息进行直接量化判读。

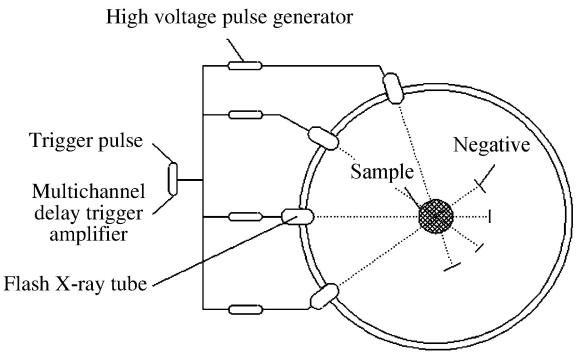


图 2　脉冲 X 射线摄影布局示意图

Fig. 2　Pulse X-ray photography

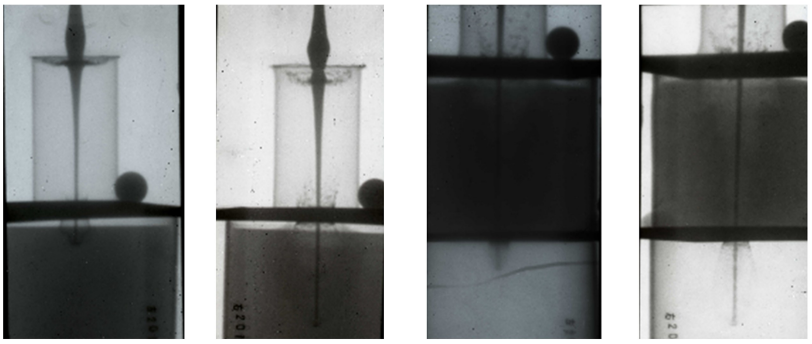
本实验中预制钢球的直径为 20 mm，位于第一层靶板上方的空气中，紧靠控制射流炸高的 PVC 管外壁，并用胶带将其固定。利用 X 射线照片中的钢球投影的直径 d 即可得到实验放大倍数 $\beta=d/20$。若两张 X 射线照片中的射流头部位移为 Δl，则射流头部的实际位移为 $\Delta L=\Delta l/\beta$，结合所对应的时间间隔 Δt，即可获得金属射流头部的平均速度为 $v=\Delta L/\Delta t$。

2　实验结果

实验获取的射流侵彻水防护层间隔靶的过程如图 3 所示，由图 3 可见，脉冲 X 射线摄影仪完整记录了射流头部刚入水、射流头部在水中传播、射流头部出水瞬间及射流头部完全进入空气 4 个过程。

采用 1.3 节中的处理方法，由计算可知，29.8～37.9 μs 时段，射流头部的平均速度 $v_1=5.389$ km/s；在 47.7～52.9 μs 时段，射流头部的平均速度 $v_2=7.097$ km/s，且实验中所采用聚能装药的射流初速为

8.15 km/s。可见,射流头部在水域中的平均速度 v_1 小于射流头部再次进入空气后的平均速度 v_2 和射流头部入水前的速度,这意味着射流头部速度在水防护层出现了突降的现象,这显然是不合理的。鉴于射流传播过程中,其速度应该是不断衰减的,即 v_2 不可能大于 v_1,分析认为,这可能是由于金属射流与水介质、空气介质间的作用机理不同导致的。



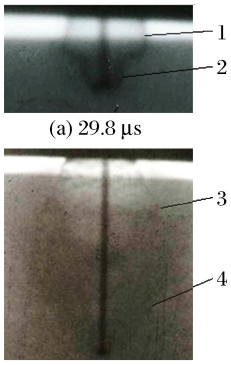
(a) 29.8 μs　(b) 37.9 μs　(c) 47.7 μs　(d) 52.9 μs

图 3　实验 X 射线照片

Fig. 3　X-ray photo of experiment

3　结果分析

为分析金属射流与水防护层的相关作用过程,将侵入水防护层后射流头部在两个不同时刻(即起爆后 29.8、37.9 μs)的状态进行局部放大,如图 4 所示。射流初始入水时,射流头部四周存在着明显的粒子云,且迹线明显,由于 X 射线照片的相对灰度值主要与物质的密度有关,即所拍摄物体的密度越大,其在 X 射线照片中的迹线越明显。从图 4(a)中可以看出,射流头部附近水域的迹线明显呈现两个部分,上半部分的半径相对偏大,这是由于射流穿过第一层靶板后,靶板背面飞散出金属粒子在空气中(第一层靶板与水防护层之间有一段空气间隙)的快速飞散所致,进去水防护层后仍有一小段范围影响,然后其速度迅速衰减;离射流头部较近的迹线,其半径较小,但其灰度与射流相近,表明该迹线不仅仅是水中冲击波沿射流径向的传播迹线,可能掺杂着金属粒子,且极可能为射流头部遇到巨大冲击后形成的径向粒子云[4-5]。图 4(b)显示了射流头部达到水防护层中部时的状态,此时射流周围水域的“模糊范围”更大,但色泽较浅,表明随着径向冲击波的传播,其金属粒子扩散;此外,该区域也明显分为两个部分,上半部分为靶板背面飞散的粒子扩散后所致,下半部分为水中冲击波沿射流径向的传播迹线。



(a) 29.8 μs

(b) 37.9 μs

图 4　射流头部在水中的局部放大图

Fig. 4　Local enlargement of jet tip in water

图 4 中 1 为靶板背面所飞散出的粒子,2 为射流头部与水相互作用产生的粒子,3 也为靶板背面所飞散出的粒子,4 为水中冲击波的传播迹线。为了更为清晰地反映出射流周围影响区域,通过专用判读工具及图像的放大比对该区域的边界进行定量描述,如图 5 所示,其中坐标原点位于射流与第一层

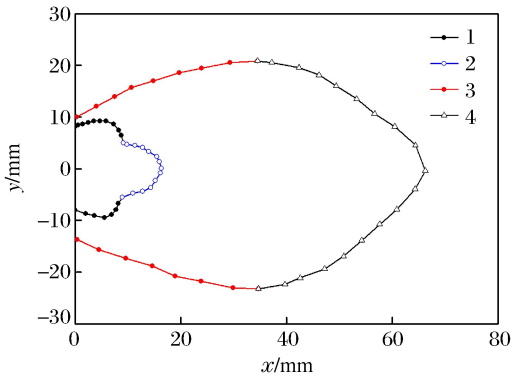


图 5　水防护层中射流四周粒子及冲击波分布图

Fig. 5　Distribution of particles and shock waves in water protection layer

靶板交汇处，射流速度方向为 x 轴正方向，y 轴位于摄影平面内且垂直于 x 轴。

图 5 中曲线 1 和曲线 2 表示 29.8 μs 时刻射流四周的影响区域，曲线 3 和曲线 4 表示 37.9 μs 时刻射流四周影响区域。由曲线 4 可预测在射流穿出水域时冲击波并未传播到边界，可忽略边界约束对射流传播的影响。根据曲线 4 所示的冲击波传播过程及射流的速度，可估算出射流附近冲击波的传播速度及波后压力[6]。由于该射流的初始速度约为 8.15 km/s，而穿过水防护层后的平均速度为 7.097 km/s，则可预估在水防护层中射流头部的真实速度为 $v_3=7.5$ km/s。结合曲线 4 的斜率可计算出射流附近冲击波的径向传播速度为

$$u_s=v_3\frac{\Delta y}{\Delta x}\approx 5\ \text{km/s} \tag{1}$$

根据冲击波的传播速度，可计算出射流头部穿出水域后冲击波传播的距离为

$$\Delta R=u_s\Delta t=90\ \text{mm} \tag{2}$$

冲击波波后的粒子速度与冲击波的传播速度存在如下关系

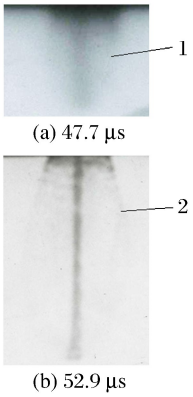
$$u_s=c_0+25.306\lg(1+u_p/5.19) \tag{3}$$

式中：$c_0=1.483$ km/s 为水中的声速，由(3)式求得波后粒子速度为 $u_p=1.957$ km/s。

则冲击波波后的压力为

$$p_s=\rho_{w0}u_su_p=9.785\ \text{GPa} \tag{4}$$

将 47.7、52.9 μs 时刻射流穿出水防护层后的 X 射线照片局部放大，如图 6 所示。



(a) 47.7 μs

(b) 52.9 μs

图 6　射流头部在空气中的局部放大图

Fig. 6　Local enlargement of jet tip in air

图 6 中 1 和 2 均为靶板背面所飞散出的粒子。从图 6 中能够发现，射流再次进入空气后，射流头部四周的粒子密度小于 29.8 μs时刻，且难以观察到明显的冲击波迹线。对图片进行数据判读后可得空气中射流四周的粒子分布图，如图 7 所示，坐标原点位于射流与第二层靶板交汇处，射流速度方向为 x 轴正方向，y 轴位于摄影平面内且垂直于 x 轴，曲线 1 和曲线 2 分别为 47.7 及 52.9 μs 时刻射流四周的粒子飞散迹线，对比两条曲线可以看出，粒子沿着射流方向的飞散距离较小，且逐渐变少，表明其大部分是从第二层钢板背面飞散出来的。

对比水中及空气中射流头部附近的粒子分布可以看出，射流穿水过程中，其头部存在明显碎化，且在射流刚开始穿水时刻射流的碎化较为明显。由图 5 的冲击波传播图，估算得到冲击波的波后压力为 9.785 GPa，根据作用力与反作用力相等的性质，射流所受到的压力也约为 9.785 GPa，在如此高的压力作用下，射流的损耗也将较大。而空气不能够碎化高温的金属射流，射流头部所受到的压力远小于水中射流头部所受到的压力，因而空气中射流的碎化可忽略，则 47.7 和 52.9 μs观察到的射流头部为同一物体。而射流在水中由于存在碎化问题，使 29.8 μs 观察到的射流头部会快速消失，37.9 μs 所呈现的头部实际为后续部分，这导致根据实验直接计算出头部速度偏小，且射流进入水中穿行尚未穿出水层时，射流赋予了周围的水大量势能，射流穿出水层时，上述能量向破口聚焦喷涌而出，挤压射流使射流速度有所提高，进而呈现出了头部速度在水中发生突降的假象。

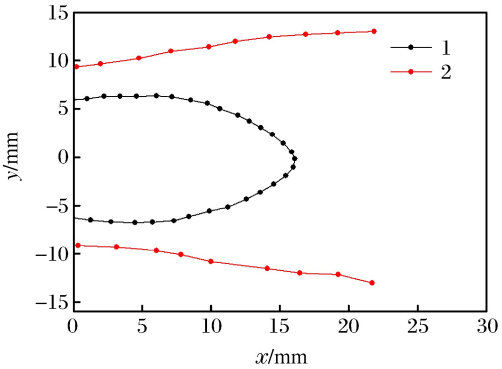


图 7　空气中射流四周粒子分布图

Fig. 7　Distribution of particles in air

因此,在用于攻击舰船和潜艇的破甲战斗部设计中,可以通过调整破甲战斗部的药型罩来控制破甲过程中射流的形状,以期减少射流在水中的消耗与碎化,从而提高射流穿过间隔靶后再次到达空气中的速度,达到提高破甲战斗部威力的目标。

4 结　论

(1) 射流在侵彻水防护层间隔靶进而重新进入空气层的过程中,闪光 X 射线摄影法测得射流头部的速度由 5.379 km/s 增加到 7.097 km/s,呈现出了射流头部速度在水中突降的假象。

(2) 当射流侵彻水防护层间隔靶时,由于高压的作用使射流头部熔融金属发生碎化,射流头部快速消失,而空气层不会引起射流头部明显的碎化,这可能是导致 X 射线实验中射流头部在水中出现突降假象的主要原因。

参考文献:

[1] 陈少辉,雷彬. 聚能射流对间隔靶板的侵彻深度模型及数值模拟研究 [J]. 兵器材料科学与工程,2011,34(1):35-37.
CHEN S H,LEI B. Depth model and numerical simulation research of shaped charge jet penetrating the disconnected target [J]. Ordnance Material Science and Engineering,2011,34(1):35-37.

[2] 李金铭,张国伟,马建. 间隔靶板对破甲战斗部威力影响的数值模拟 [J]. 弹箭与制导学报,2013,33(5):112-114.
LI J M,ZHANG G W,MA J. Numerical simulation of the effect of disconnected target on the power of armor-penetrating warhead [J]. Journal of Projectiles,Rockets,Missiles and Guidance,2013,33(5):112-114.

[3] 朱绪强,成一,李德才,等. 大炸高下破甲弹的侵彻性能研究 [J]. 爆破器材,2013,42(1):47-50.
ZHU X Q,CHENG Y,LI D C,et al. Penetration of shaped charge jets under large standoff distance [J]. Explosive Materials,2013,42(1):47-50.

[4] PIGUSO P,TRILLION G,MAGELLAN D. Material effect and steam explosion at high temperature ($T>2300$ K) [J]. International Journal of Thermo Physics,2005,26(4):1095-1114.

[5] CONCILIO HANSSON R. An experimental study on the dynamics of a single droplet vapor explosion [D]. Stockholm,Sweden:Royal Institute of Technology (KTH),2010:20-26.

[6] 沈飞,王辉,袁建飞,等. 含铝炸药水下滑移爆轰实验研究 [J]. 实验力学,2014,29(5):641-646.
SHEN F,WANG H,YUAN J F,et al. Experimental study of underwater sliding detonation of aluminized explosives [J]. Journal of Experimental Mechanics,2014,29(5):641-646.

Study on the Attenuation Effect of Water Protection Layer on the Velocity of Jet Tip

LI Biaobiao,WANG Hui,YUAN Baohui

(*Xi'an Modern Chemistry Research Institute*,*Xi'an* 710065,*China*)

Abstract:In the present work the process of the jet penetrating the interval target of a water protection layer was observed using flash X-ray photography, the variations of the jet tip velocity and the distribution characteristics of the metal particles and shock waves in water were obtained, and the phenomenon in the experiment were discussed in combination with the mechanism of water on the metal jet at high temperature. The result shows that the jet tip velocity would drop during the jet penetrating the water protection layer. This is mainly due to the fragmentation resulting from the high pressure (9-10 GPa) and high temperature after the shock wave of the jet. Besides, the fragmentation of the jet tip is the most serious in the early stages of the jet entering the water protecting layer, which results in a fast consumption of the jet tip and the false image of the jet tip's velocity drop in the test of the flash X-ray measurement.

Keywords:jet;water protection layer;tip velocity;fragmentation;flash X-ray photography