文章编号：1001-1455(2014)04-0457-07 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)04-0457-07

双材质复合射流对混凝土的侵彻*

肖强强，黄正祥，祖旭东
（南京理工大学机械工程学院，江苏 南京 210094）

摘要：为了增大射流对混凝土靶板的开孔直径，并保证侵彻深度满足要求，在传统铜质药型罩与空气接触的一侧增加了铝质药型罩，这样在炸药爆炸驱动下形成内芯由高密度材料、外层由低密度材料组成的双材质复合射流，增大了射流直径。并根据双材质复合射流的侵彻特点，分析了侵彻过程中单质射流侵彻、双滞止点侵彻和单滞止点侵彻下的混凝土开孔直径。X 射线实验显示：双材质复合射流成型形态良好，铝罩较厚时射流直径增大；在实验范围内，随着铝罩厚度的增加开孔直径有所增大，并且满足侵彻深度要求。对双材质复合射流的侵彻过程进行了理论计算，实验与计算孔形较好吻合。

关键词：固体力学；侵彻模式；双材质复合射流；混凝土靶板；开孔直径；X 射线实验
中图分类号：O346.1 **国标学科代码**：1301545 **文献标志码**：A

为了有效侵彻钢筋混凝土等坚固介质目标，串联随进战斗部中需保证后级顺利随进，其中前级聚能装药的侵彻深度和开孔直径是关键设计参数。低密度材料如铝、钛等金属，形成的射流速度高、直径大，开孔直径较大，而侵彻深度较低。双材质复合射流聚能装药的药型罩采用重金属材料为外罩、低密度材料为内罩的结构形式（见图 1），外罩形成杵体和射流的内芯，而内罩则形成外层射流包裹着内芯。采用该种药型罩结构，和相同厚度的单层药型罩相比，既提高了射流速度，又增加了射流直径。

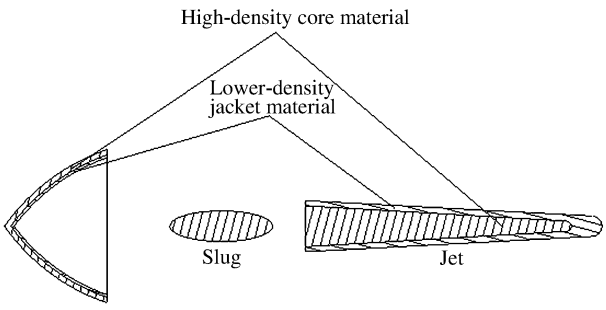

图 1 双层药型罩结构及其形成射流示意图

Fig. 1 The illustration of the jacketed jet

目前，对该种形式的聚能射流研究较少，但对具有相似结构的护套式杆式侵彻体的侵彻行为已有了大量的数值模拟和实验研究[1-4]，B. R. Sorensen 等[3]基于 Lanz-Odermatt 侵彻关系，建立了护套式杆式侵彻体侵彻均质装甲钢的理论模型，该模型与侵彻体的速度及护套的相对厚度有关。D. L. Orphal 等[5-6]讨论了护套式杆式侵彻体的双滞止点侵彻和单滞止点侵彻两种侵彻模式。M. Lee[7]提出了计算单滞止点侵彻时侵彻速度和侵彻孔直径的分析模型，并假设当内芯侵蚀微元流动无法完全包覆外层侵彻体时，开始发生双滞止点侵彻。

外层侵彻体的相对厚度一定时，并不影响内芯对靶板的侵彻深度[4,6]，并且由外层和内芯共同侵彻靶板时形成的孔径，大于内芯单独侵彻时形成的孔径[4]。因此，研究该种形式的双材质复合射流的目的，在于不明显降低侵彻深度的前提下，提高聚能装药对混凝土的侵彻孔直径。

1 双材质复合射流的侵彻特点

双材质复合射流的头部由低密度材料构成，从射流的头部至尾部，内芯的直径 D_c 与外层直径 D_j 的比 D_c/D_j 逐渐增大。因此，双材质复合射流侵彻混凝土的过程中，先后经历了 3 种侵彻模式。

首先，双材质复合射流的头部完全由低密度材料构成，因此初始阶段为单质射流侵彻阶段，侵彻速度比较低，由于射流头部直径较大，并且靶板表面多形成崩落区，因此入孔直径不会明显减小。

* **收稿日期**：2013-01-04；**修回日期**：2013-04-08
作者简介：肖强强（1985— ），男，博士，讲师。

其次,外层侵彻体和内芯侵彻体开始共同侵彻靶板时,由于内芯直径和外层直径的比 D_c/D_j 较小,内芯在侵彻过程中向四周流动,形成的蘑菇头无法完全包覆外层材料,外层材料的侵彻速度小于内芯,因此弹/靶界面处形成两个滞止点,该阶段为双滞止点侵彻阶段。

最后,当内芯直径和外层直径的比 D_c/D_j 大于一定值时,外层直径小于内芯形成的蘑菇头直径,阻碍了外层材料与靶板接触,外层材料在内芯材料的侵蚀微元包覆下,以相同的侵彻速度完成侵彻过程,即单滞止点侵彻阶段。该阶段双材质复合射流的侵彻速度与内芯重金属材料单独侵彻时相等,但侵彻孔直径大于内芯单独侵彻时的侵彻孔直径。

和护套式杆式侵彻体相比,聚能射流速度大得多,侵彻过程中有效射流的速度范围为 2～8 km/s。在超高速情况下,D_c/D_j 较小时内芯重金属材料的侵蚀微元即可完全包覆外层低密度材料,并且由低密度材料形成的射流头部长度有限,因此双材质复合射流的侵彻过程中将以单滞止点侵彻为主。

2 双材质复合射流对混凝土的侵彻理论

通过对双材质复合射流侵彻特点的分析,为了确定双滞止点侵彻向单滞止点侵彻转化的临界条件,需考虑侵彻时的蘑菇头效应。在超高速侵彻现象观察的基础上[8],将孔径增长过程划分为两个阶段[7]:第一阶段,由于射流微元侵蚀过程中的蘑菇头效应而形成初始孔径;第二阶段,靶板惯性和动量作用下致使侵彻孔直径进一步增长[7,9-10],R. Hill[11] 描述了轴对称刚性弹丸以恒定速度侵彻靶板时的孔径增长,因此将变形射流的头部等效为具有球形头部形状的刚性弹丸,等效弹丸的速度为射流的侵彻速度。侵彻孔的最终直径即为两部分之和。通过分析侵彻体作用在靶板上的径向离心力、靶板材料的径向运动以及超声速侵彻时[12]冲击波和可压缩性对径向孔径增长的影响,在单质射流侵彻和单滞止点侵彻的基础上,重点探讨双材质复合射流对混凝土的双滞止点侵彻。

2.1 轴向侵彻速度

超高速侵彻条件下,靶板强度比初始滞止压力小两个数量级以上,因此在计算轴向侵彻时可以忽略靶板强度的影响,则由 Bernoulli 方程可以得到双材质复合射流的内芯重金属材料和外层低密度材料的轴向侵彻方程分别为:

$$\frac{1}{2}\rho_c (v-u_c)^2 = \frac{1}{2}\rho_t u_c^2 \tag{1a}$$

$$\frac{1}{2}\rho_j (v-u_j)^2 = \frac{1}{2}\rho_t u_j^2 \tag{1b}$$

式中:下标 c、j 和 t 分别表示内芯重金属材料、外层低密度材料和靶板材料,ρ 为材料密度,v 为射流速度,u 为侵彻速度。因此,由式(1)可以得到内芯和外层材料的侵彻速度分别为:

$$u_c = \frac{v}{1+\sqrt{\rho_t/\rho_c}} \tag{2a}$$

$$u_j = \frac{v}{1+\sqrt{\rho_t/\rho_j}} \tag{2b}$$

在这里应当注意,单质射流侵彻时只需考虑式(2b),单滞止点侵彻时只需考虑式(2a),双滞止点侵彻时由于存在两个滞止点,需要同时应用到式(2a)和式(2b)。

2.2 径向孔径增长

2.2.1 *单质射流侵彻*

双材质复合射流的头部完全由低密度材料构成,因此其头部侵彻混凝土的动态响应与均质射流侵彻类似。C. W. Miller[13] 描述了侵彻体在侵彻过程中的蘑菇头效应,M. Lee[10] 在 C. W. Miller 研究结果的基础上,通过考虑靶板强度建立了预测最终侵彻孔径的计算模型。肖强强[14] 则在 M. Lee 的基础上,建立了射流侵彻下混凝土靶板开孔直径的计算模型,并根据射流侵彻混凝土时的滞止压力远大于靶板的侵彻阻抗的条件,得到混凝土靶板在单质射流侵彻下的孔径为:

$$r_{j,max}=r_{j0}\sqrt{\frac{9T_j}{8}+\frac{T_j}{2}\int_0^{\pi/2}\frac{2S_j\sin\beta_j}{1+T_j\sin^3\beta_j}\mathrm{d}\beta_j} \tag{3}$$

$$S_j=\frac{\rho_j(v-u_j)^2}{2R_t},\qquad T_j=\frac{\rho_t u_j^2}{2R_t} \tag{4}$$

随着侵彻过程的进行，射流头部被消耗，内芯重金属材料开始对靶板材料产生作用。

2.2.2　双滞止点侵彻

双滞止点侵彻时初始孔径形成示意图如图 2 所示。

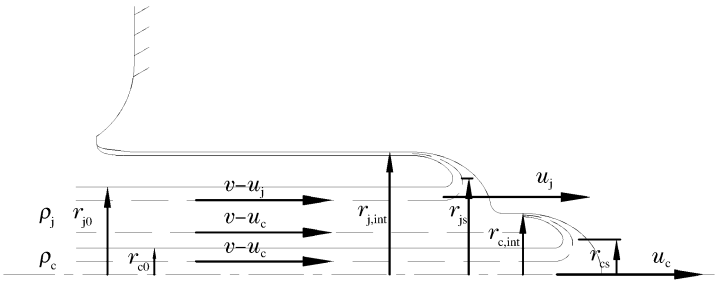

图 2　双滞止点侵彻初始孔径形成示意图

Fig. 2　The geometry of "bi-erosion" for the jacketed jet

Q. Q. Xiao 等[15]对双材质复合射流的双滞止点侵彻进行了详细的研究，双滞止点侵彻时用于描述内芯微元流动轨迹的微分方程需考虑外层材料的作用力。

由于内芯重金属材料和外层低密度材料的共同作用，因此第二阶段平衡方程为：

$$\frac{1}{2}\pi r_{c,int}^2C_d\rho_t u_c^2+\frac{1}{2}\pi(r_{j,int}^2-r_{c,int}^2)C_d\rho_t u_j^2=\int_{r_{c,int}}^{r_{c,max}}2\pi rR_t\mathrm{d}r+\int_{r_{c,max}}^{r_{j,max}}2\pi rR_t\mathrm{d}r=\pi(r_{j,max}^2-r_{c,int}^2)R_t \tag{5}$$

式中：$r_{c,int}$和 $r_{j,int}$分别为内芯和外层形成的初始孔径，$r_{c,max}$为内芯形成的最终孔径，可得到双滞止点侵彻时最终侵彻孔径为：

$$r_{j,max}=\sqrt{r_{c,max}^2+\frac{(r_{j,int}^2-r_{c,int}^2)T_j}{2}} \tag{6}$$

2.2.3　双滞止点侵彻转化为单滞止点侵彻的临界条件

侵彻过程中，内芯直径和外层直径的比 D_c/D_j逐渐增大，当 D_c/D_j增大到一定值时，双材质复合射流的侵彻模式开始从双滞止点侵彻转变为单滞止点侵彻。M. Lee[7]分析了从双滞止点侵彻到单滞止点侵彻的转变准则，认为当侵彻孔的最终直径大于外层材料的直径时发生单滞止点侵彻。然而，实验结果表明[4]，当侵彻孔的最终直径足够大以至于能够容纳外层材料时，仍然会发生双滞止点侵彻。

肖强强[14]假设内芯材料和外层材料共同侵彻时瞬时完成，而第二阶段孔径增长过程与时间有关，因此当外层材料侵彻靶板时，孔径并没有增长到最大。假设外层材料侵彻靶板时，由内芯材料侵彻形成的初始孔径来不及增长，则双滞止点侵彻向单滞止点侵彻转变的临界条件为 $r_{c,int}/r_{j0}=1$，即内芯材料侵彻形成的初始孔径等于外层材料的半径，如图 3 所示。

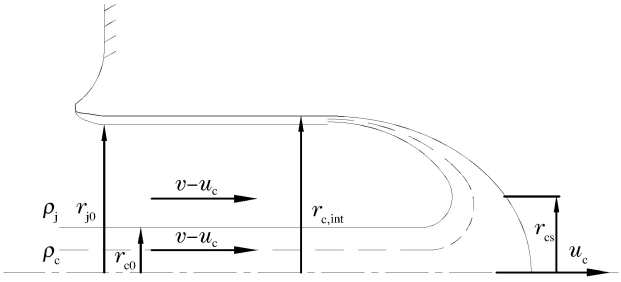

图 3　双滞止点侵彻到单滞止点侵彻临界状态示意图

Fig. 3　The geometry of change criteria for "bi-erosion" to "co-erosion"

2.2.4 单滞止点侵彻

当 $r_{c,int}/r_{j0}>1$ 时，即内芯材料侵彻形成的初始孔径大于外层材料的半径时，双材质复合射流的侵彻模式为单滞止点侵彻，混凝土靶板在单滞止点侵彻时的侵彻模型可参见文献[7,14]。单滞止点侵彻下混凝土靶板的初始孔径为[14]：

$$r_{c,int}=\sqrt{r_{cs}^2+r_{c0}^2\left[\frac{\rho_j}{\rho_c}\left(\frac{r_{j0}}{r_{c0}}\right)^2+\left(1-\frac{\rho_j}{\rho_c}\right)\right]\int_0^{\pi/2}\frac{2S_c\sin\beta_c}{1+T_c\sin^3\beta_c}\mathrm{d}\beta_c} \tag{7}$$

式中：r_{cs} 为单滞止点侵彻时内芯滞止区的半径。

第二阶段侵彻孔径从初始孔径 $r_{c,int}$ 增长到最终孔径 $r_{c,max}$ 的控制方程为：

$$\frac{1}{2}\pi r_{c,int}^2 C_d\rho_t u_j^2=\int_{r_{c,int}}^{r_{c,max}}2\pi rR_t\mathrm{d}r=\pi(r_{c,max}^2-r_{c,int}^2)R_t \tag{8}$$

则可得到单滞止点侵彻时最终侵彻孔径为：

$$r_{c,max}=r_{c,int}\sqrt{T_c/2} \tag{9}$$

3 实验与结果分析

3.1 双材质复合射流成型及侵彻实验

双层药型罩聚能装药装置的口径为 100 mm，采用两台 HP 公司 450 kV 脉冲 X 射线机组合进行拍摄。双材质复合射流聚能装药如图 4 所示，外罩为紫铜罩，内罩为铝罩。



图 4 双材质复合射流聚能装药结构

Fig. 4 The charge of the jacketed jet

进行双材质复合射流成型的 X 射线实验的同时，在装药下方放置标准 C40 混凝土靶，直径为 1 m、厚度为 600 mm，考察双材质复合射流对混凝土的侵彻威力。

共进行了 3 发实验，铜罩的结构均相同，实验 1、2 中铝罩为厚度 2.5 mm 的等壁厚药型罩，实验 3 中铝罩为厚度 1.0 mm 的等壁厚药型罩。其中，实验 1 的聚能装药结构铜罩和铝罩采用机械压合的方式联接，实验 2、3 采用真空扩散的方式联接，双材质复合射流不同时刻的 X 射线照片如图 5 所示。

根据 X 射线实验结果对双材质复合射流进行了分析，得到的双材质复合射流参数见表 1。v_h 为头部速度，D_h 为头部直径，v_t 为尾部速度，D_t 为尾部直径，L 为射流长度。从 X 射线实验结果可以看出，双材质复合射流成型效果良好，联接方式对射流成型影响不大。由于铝的密度较低，两种铝罩厚度对射流的速度影响不大，但铝罩较厚时射流的直径有所增加。

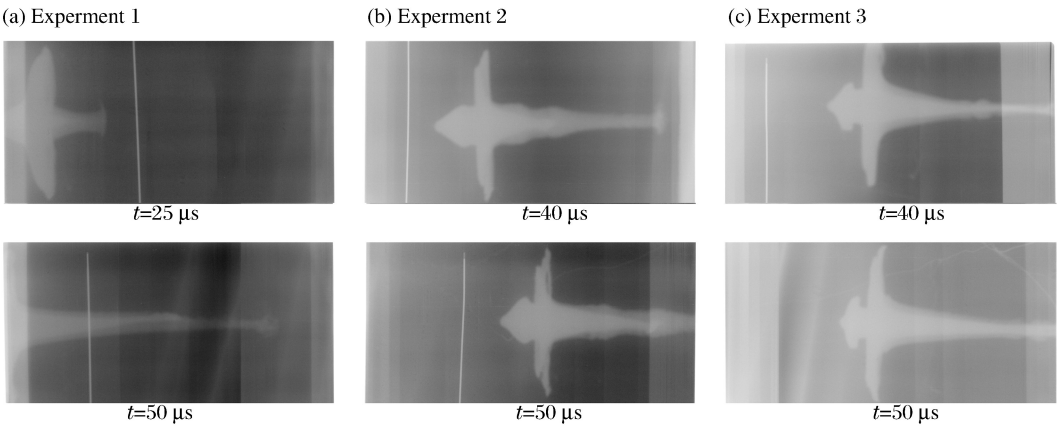

图 5 双材质复合射流成型 X 射线照片

Fig. 5 X-ray photos of the jacketed jets

表 1　双材质复合射流成型 X 射线实验参数

Table 1　Jacketed jet parameters obtained from X-ray experiments

实验	v_h/(km·s^{-1})		D_h/mm		v_t/(km·s^{-1})		D_t/mm		L/mm
	外层	内芯	外层	内芯	外层	内芯	外层	内芯	
1,2	5.932	3.945	6.8	2	1.396	1.396	29	21	150
3	6.048	4.068	4.0	2	1.442	1.442	25	20	153

图 6 为双材质复合射流侵彻混凝土靶板的入孔和出孔试验照片。

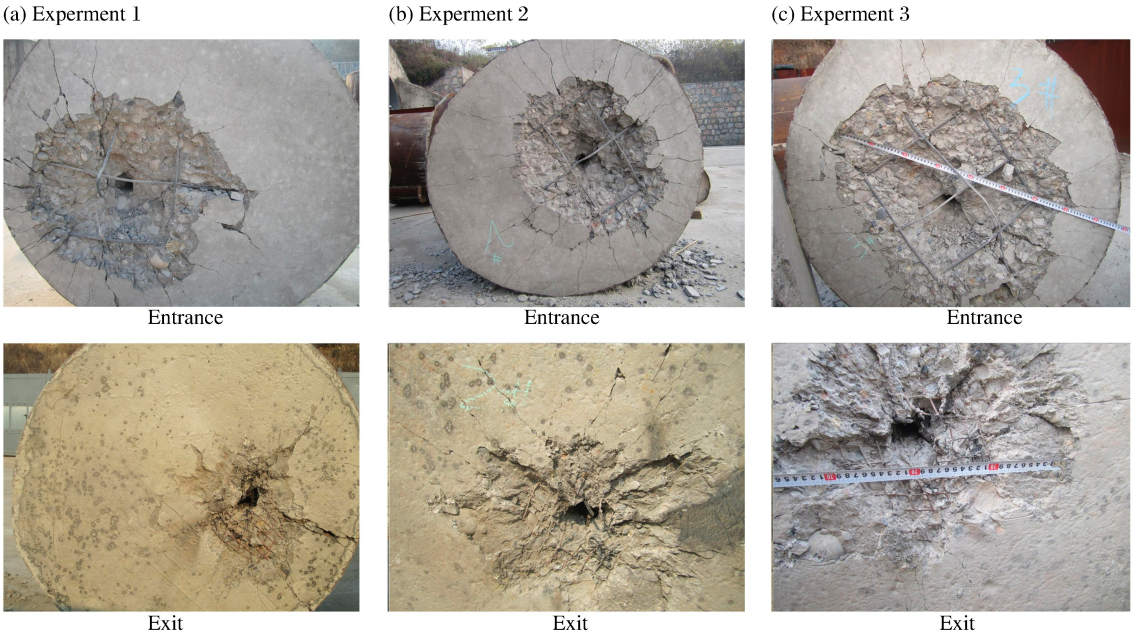

图 6　双材质复合射流侵彻下混凝土靶板的入孔和出孔

Fig. 6　The holes of entrance and exit by jacketed jets penetration into concretes

3.2　结果分析

根据 X 射线实验得到的双材质复合射流参数，假设射流速度按线性分布，射流断裂后的计算可参见文献[14]，采用理论分析对其侵彻混凝土进行了计算，实验结果与理论计算对比见表 2。计算和实验孔形对比如图 7 所示。

表 2　结果对比

Table 2　The results of experiment and calculation

实验	D_{en}/mm		D_{ex}/mm	
	实验	计算	实验	计算
1	55	52	30	32
2	55	50	30	34
3	45	44	30	32

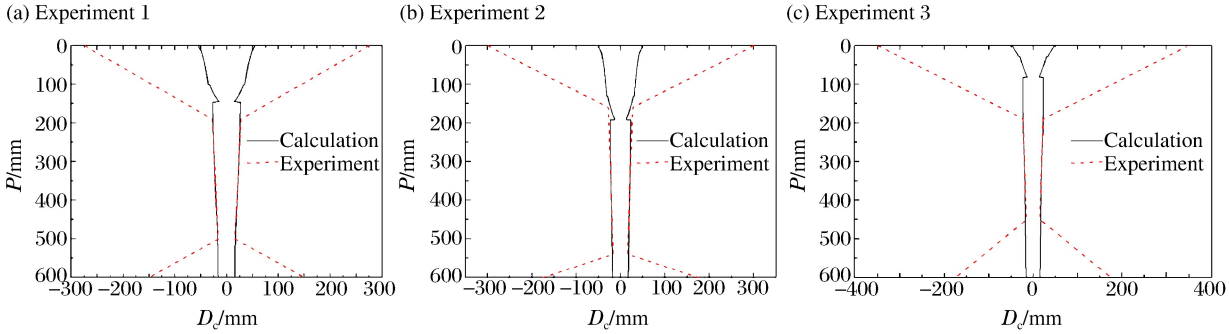

图 7　双材质复合射流侵彻下混凝土靶板的孔形

Fig. 7　The hole profiles by jacketed jets penetration into concretes

从计算和实验对比可以看出，实验和计算结果较好吻合，双材质复合射流侵彻的初始阶段以单质射流侵彻和双滞止点侵彻为主，因此入孔的计算结果出现较大的变化，而这部分主要形成崩落。由于射流速度较高，稳定侵彻阶段以单滞止点侵彻为主，在一定范围内铝罩较厚时，形成的双材质复合射流头部直径增大，因此铝罩厚 2.5 mm 的入孔直径比铝罩厚 1.0 mm 提高了 10 mm。

图 8 为内芯半径和外层半径不同比时，侵彻孔与内芯半径比在不同速度下的变化情况。随着 r_{c0}/r_{j0} 减小，侵彻孔逐渐增大，在射流内芯半径不变的情况下，随着外层半径的增加侵彻孔径逐渐增大。从图 8 中还可以看出，随着 r_{c0}/r_{j0} 减小，高速情况下侵彻孔径增长较快，而速度较低时侵彻孔径增长较慢，这是由于 $r_{c0}/r_{j0}=0.2$ 时在低速情况下发生了双滞止点侵彻。

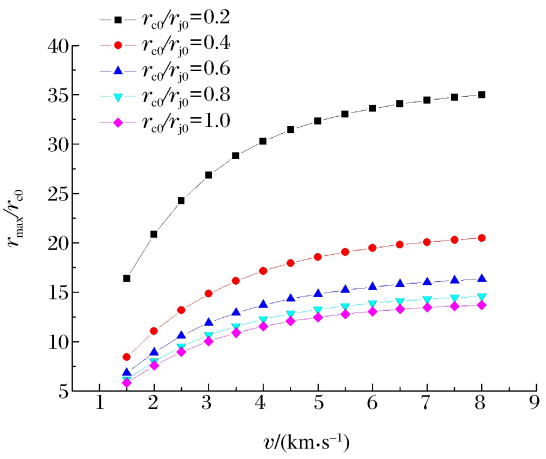

图 8 侵彻孔径随内芯和外层半径的变化

Fig. 8 The ratio of final cavity radius versus core radius

4 结 论

结合双材质复合射流的结构特点，将双材质复合射流侵彻混凝土过程分为单质射流侵彻、双滞止点侵彻和单滞止点侵彻 3 个阶段，通过将双材质复合射流侵彻下混凝土孔径增长过程分为 2 个阶段，分别对单质射流侵彻、双滞止点侵彻和单滞止点侵彻的最终侵彻孔径进行了研究，并分别得到了 3 种侵彻模式下最终侵彻孔径的计算表达式。

通过对双材质复合射流进行 X 射线实验和侵彻混凝土靶板实验，对双材质复合射流的成型过程、成型效果以及对混凝土靶板的侵彻效果进行了研究。X 射线实验表明，双材质复合射流的成型效果良好，机械压合联接和真空扩散联接影响不大，形成的双材质复合射流直径粗大。通过双材质复合射流侵彻混凝土靶板实验发现，在一定范围内随着双材质复合射流外层直径的增大，侵彻孔径有所增大。

采用 X 射线实验得到的双材质复合射流参数，对其侵彻混凝土进行了理论计算，和实验结果较好吻合。

参考文献：

[1] Cullis I G, Lynch N J. Hydrocode and experimental analysis of scale size jacketed KE projectile[C]// 14th International Symposium on Ballistics. 1994:271-280.

[2] Lehr H F, Wollman E, Koerber G. Experiments with jacketed rods of high fineness ratio[J]. International Journal of Impact Engineering, 1995,17(4):517-526.

[3] Sorensen B R, Kimsey K D, Zukas J A, et al. Numerical analysis and modeling of jacketed rod penetration[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999,22(1):71-91.

[4] Pedersen B A, Bless S J, Cazamias J U. Hypervelocity jacketed penetrators[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,26(1):603-611.

[5] Orphal D L, Miller C W, McKay W L, et al. Hypervelocity impact and penetration of concrete by high L/D projectiles[C]// 6th International Symposium on Ballistics. 1982.

[6] Orphal D L, Miller C W. Hypervelocity impact of high L/D penetrators[C]// 1986 Hypervelocity Impact Symposium. 1987.

[7] Lee M. Analysis of jacketed rod penetration[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000,24(9):891-905.

[8] Kivity Y, Hirsch E. Penetration cutoff velocity for ideal jets[C]// 10th International Symposium on Ballistics. San Diego, USA, 1987.

[9] Lee M, Bless S. Cavity dynamics for long rod penetration[R]. Institute for Advanced Technology, The Texas University at Austin, 1996.

[10] Lee M. Cavitation and mushrooming in attack of thick targets by deforming rods[J]. Journal of Applied Mechanics, 2001,68(3):420-424.

[11] Hill R. Cavitation and the influence of headshape in attack of thick targets by non-deforming projectiles[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1980,28(5):249-263.

[12] 肖强强,黄正祥,顾晓辉.冲击波影响下的聚能射流侵彻扩孔方程[J].高压物理学报,2011,25(4):333-338.
Xiao Qiang-qiang, Huang Zheng-xiang, Gu Xiao-hui. Equation of penetration and crater growth by shaped charge jet under the influence of shock wave[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011,25(4):333-338.

[13] Miller C W. Two-dimensional engineering model of jet penetration[C]// 15th International Symposium on Ballistics. Jerusalem, Israel, 1995:8-21.

[14] 肖强强.聚能装药对典型土壤/混凝土复合介质目标的侵彻研究[D].南京:南京理工大学,2012.

[15] Xiao Q Q, Huang Z X, Zu X D, et al. Penetration research of jacketed jet into concrete[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013,54:246-253.

Penetration of jacketed jet into concrete*

Xiao Qiang-qiang, Huang Zheng-xiang, Zu Xu-dong

(*School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

Abstract: In order to increase cavity diameter and meet the penetration depth requirement of jet penetration into concrete, a double-layered liner that could form a jacketed jet was designed. Moreover, three types of penetration modes during the process of jacketed jet penetration into concrete, including homogeneous jet penetration, "bi-erosion" and "co-erosion", were discussed. Thus, an analytical model for predicting the crater size generated by jacketed jet penetration into concrete is presented. The X-ray measurement show that the state of jacketed jet is fine, and the jet diameter increases with thickness increase of aluminum liner. Penetration experiments show that cavity diameter increases with thickness increase of aluminum liner, and penetration depth agrees with the requirement. The hole profile calculated with the analytical model is in good agreement with the experimental data.

Key words: solid mechanics; penetration mode; jacketed jet; concrete target; cavity diameter; X-ray measurement

* Received 4 January 2013; Revised 8 April 2013
Corresponding author: Huang Zheng-xiang, huangyu@njust.edu.cn

(责任编辑　丁　峰)