

文章编号: 1001-1455(2009)02-0149-06

约束及增韧对氧化铝陶瓷抗射流侵彻性能的影响^{*}

张先锋^{1,2}, 李永池¹

(1. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027;

2. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 基于 DOP 实验方法开展了 2 种约束氧化铝陶瓷抗射流侵彻性能系列实验研究, 分别获取了 AD95 陶瓷及 10% 氧化锆增韧陶瓷抗射流侵彻过程的侵彻深度-时间 ($P-t$) 曲线及他们在验证靶上的剩余穿深, 并与 45 钢的抗侵彻数据进行了对比。结果表明: 2 种陶瓷抗射流侵彻的防护因数均大于 1; 约束陶瓷抗射流侵彻能力得到了较大提高; 增韧陶瓷抗射流侵彻能力优于 AD95 陶瓷。基于实验结果分析了约束陶瓷抗射流侵彻的机理, 提出约束边界反射产生的回爆对射流稳定性的干扰是约束陶瓷抗射流侵彻能力提高的主要原因。

关键词: 爆炸力学; 侵彻; 抗侵彻实验; 陶瓷靶; 约束陶瓷; 增韧陶瓷; 聚能射流

中图分类号: O313.4

国标学科代码: 130·3530

文献标志码: A

1 引言

陶瓷材料具有一系列独特优异的物理和力学性能, 例如高强度、高硬度、耐磨、耐腐蚀、耐高温、与钢相比的低密度等。目前陶瓷材料在国民经济、国防和高科技领域得到高度的关注和越来越广泛的应用, 尤其是作为防护装甲和发动机部件等在抗冲击和抗侵彻方面具有其他材料不可替代的优势。在装甲陶瓷中最有潜力或研究最多的是氧化铝陶瓷, 这种陶瓷制造成本低、工艺简单, 且防护能力强。世界各地的研究小组分别开展了该类陶瓷的材料动态特性和终点弹道性能的研究。有关陶瓷的动态材料特性和陶瓷靶的高速侵彻/穿甲动力学研究已成为了冲击工程界的热点领域^[1]。

聚能破甲弹是反坦克战斗部的主用弹药之一, 研究陶瓷装甲抗射流侵彻具有较高的现实意义和理论价值。与动能弹相比, 聚能金属射流在形成和侵彻过程中不断地被拉伸, 其结构参数较复杂, 因此陶瓷靶抗射流侵彻过程的动力学特性更复杂。目前对陶瓷靶抗射流侵彻过程的研究主要有 M. Maysless 等^[2]对射流侵彻陶瓷等低密度材料侵彻过程进行了研究; 徐学华^[3-4]对射流侵彻陶瓷靶进行了实验研究, 建立了侵彻深度的工程计算模型。谭多望等^[5]对射流侵彻陶瓷的力学性能进行了实验研究, 获取了射流侵彻陶瓷的侵彻速度。魏雪英等^[6]将空腔膨胀理论推广到射流侵彻陶瓷靶过程中, 并求解了射流对 Al_2O_3 陶瓷靶的侵彻阻力。孙宇新等^[7]对长杆弹侵彻 AD95 陶瓷靶进行了实验研究, 结果表明当侵彻速度大于 1 200 m/s 时, 陶瓷的抗侵彻能力优势得到了体现。于少娟等^[8]对 AD95 约束和非约束陶瓷抗射流侵彻过程进行了初步的对比性研究, 结果证明约束提高了陶瓷靶的抗射流侵彻能力。张先锋等^[9]对 AD95 陶瓷和 10% 氧化锆增韧陶瓷的抗射流侵彻进行了初步分析, 分析表明后者比前者有更好的抗射流侵彻能力, 但是并未对约束陶瓷提高抗射流侵彻能力的机理进行深入分析。

对射流侵彻陶瓷靶过程的研究大多集中于理想靶板的模型计算和简单实验测试方面, 较少涉及约束条件下陶瓷抗射流侵彻能力的定量研究和机理分析, 对增韧提高陶瓷抗射流侵彻潜力的研究还不深入。本文中在文献[8-9]的基础上, 进行陶瓷增韧及约束特性抗聚能射流侵彻过程的相关补充实验, 对实验结果进行更全面的总结, 特别对约束条件下碎裂陶瓷倒塌对后续射流产生干扰引起约束陶瓷的回爆现象及其作用机制进行分析。

2 实验方案

DOP(depth of penetration)^[10]实验方法主要用于获取侵彻体穿透某一特定材料和结构靶板后在鉴证靶上的剩余穿深, 通过防护因数的计算方法研究材料的宏观抗侵彻能力。为了深入研究材料的抗侵彻机理, 利用特殊的实验测试方法获取侵彻体对靶板的侵彻速度是最可行的方法, 特别是对于聚能射流这样存在头尾速度差、在侵彻中射流不断被拉伸等

* 收稿日期: 2007-11-13; 修回日期: 2008-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(10632080, 10402041); 中国博士后基金项目(20060400731)

作者简介: 张先锋(1978—), 男, 博士, 副教授。

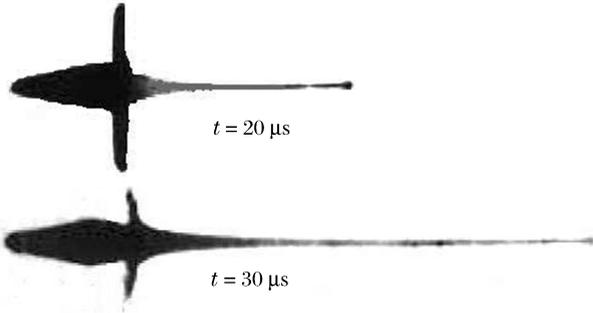


图 4 聚能射流成型 X 光照片

Fig. 4 X-ray photos of the shaped charge jet

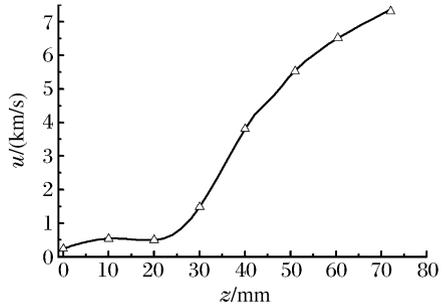


图 5 聚能射流的速度沿射流长度方向的分布

Fig. 5 Velocity distribution of the shaped charge jet in its length direction

4 实验结果及分析

4.1 约束对陶瓷抗射流侵彻能力的提高

由于陶瓷是脆性材料,抗拉强度较低,且在撞击后易碎裂飞散,很难采用传统的半无限靶侵彻方式来考核陶瓷材料的抗侵彻能力。为了定量分析 AD95 陶瓷的抗侵彻能力,并与已有的实验结果相比较,采用改进的 DOP 实验方法(见图 6)来考核陶瓷材料的防护性能。改进的 DOP 方法的思想是:获取侵彻体穿透某一参照材料的穿深及侵彻体穿透陶瓷/参照材料复合靶后在后效靶上的剩余穿深,通过计算下文定义的防护因数来研究陶瓷材料的宏观抗侵彻能力。

聚能装药炸高为 50 mm。表 1 为 45 钢、约束 AD95 陶瓷及无约束 AD95 陶瓷抗射流侵彻过程 $P-t$ 实验数据,以及利用防护因数计算的 F_s 和 F_m 值^[12]。根据防护因数的定义,陶瓷靶防护因数主要有 2 种定义方法,即厚度防护因数 F_s 和质量防护因数 F_m ,该防护因数能较合理地表征 2 种靶板材料的抗侵彻能力

$$F_s = (P_{ref} - P_{res} - \delta_1) / \delta_2$$

$$F_m = (P_{ref} - P_{res} - \delta_1) \rho_{ref} / (\delta_2 \rho_c)$$

式中: P_{res} 为射流在鉴证靶中的侵彻深度, P_{ref} 为无陶瓷材料防护时射流在鉴证靶上的侵彻深度, δ_1 、 δ_2 分别为盖板厚度和陶瓷层厚度, ρ_{ref} 为鉴证靶材料密度, ρ_c 为陶瓷材料密度。

图 7 为典型实验结果照片,图 8 为 3 种靶板鉴证靶破孔实验照片。

由表 1 实验结果可以得出如下结论:

(1) 射流侵彻无约束陶瓷和 45 钢的侵彻深度基本相当,厚度防护因数基本相同,说明陶瓷材料抗射流侵彻能力和同厚度的 45 钢相当;但陶瓷材料的质量防护因数大于 2,说明陶瓷材料抗射流侵彻能力强于 2 倍质量的 45 钢,所以陶瓷作为抗射流侵彻复合装甲中的一种材料有明显优势。

(2) 相对于无约束陶瓷而言,约束陶瓷中的射流侵彻深度降低了 30% 以上,说明约束陶瓷的抗射流侵彻能力有明显

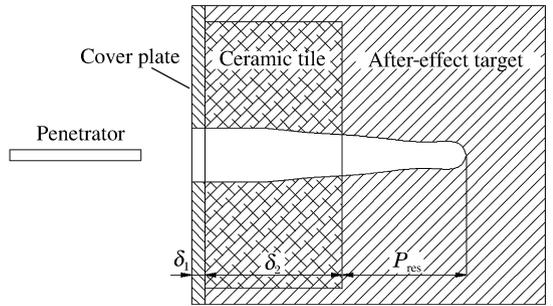


图 6 DOP 实验示意图

Fig. 6 Target configuration in the DOP experiment

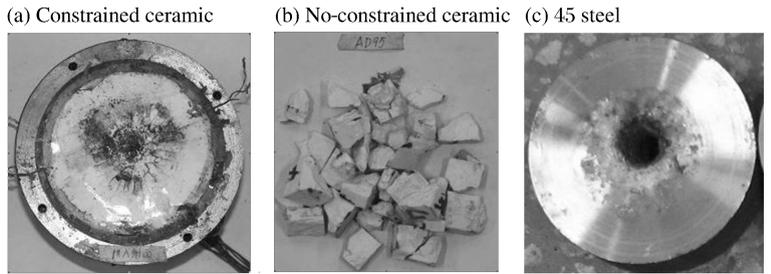


图 7 不同靶板侵彻破坏结果照片

Fig. 7 Photos of different destroyed targets after penetration

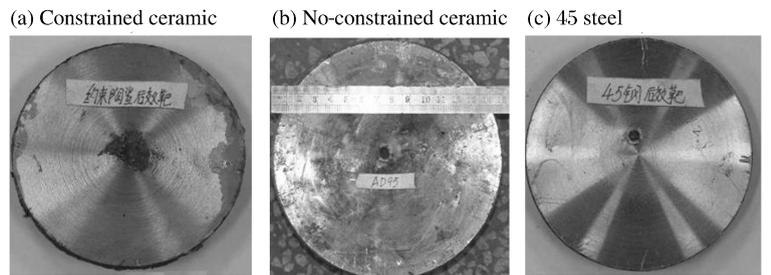


图 8 鉴证靶侵彻成孔状态

Fig. 8 Photos of different after-effect targets after penetration

的提高,且约束陶瓷鉴证靶上剩余射流呈散射状态,说明射流在侵彻过程中受到了干扰。这是因为陶瓷在高冲击压缩应力波和拉伸应力波作用下发生了断裂,陶瓷靶外加约束的存在,一方面使陶瓷各断裂块之间极为紧密,只有裂纹而无扩容;另一方面应力波在约束钢套与陶瓷靶界面发生反射,反射冲击波使破碎的陶瓷向射流收拢,引起射流侵彻通道的倒塌,后续射流受到倒塌陶瓷粒子的干扰,变成间断射流。这一过程可用回爆来定义。

表 1 侵彻实验数据

Table 1 Experimental results of penetration

靶板	P	t	P_{res}	F_s	F_m	靶板	P	t	P_{res}	F_s	F_m	靶板	P	t	P_{res}	F_s	F_m		
	/mm	/μs	/mm				/mm	/mm	/mm				/mm	/mm					
45 钢	30.7	7.42	8	13	1.01	无约束	21	3.3	10	1.33	2.98	约束	20	3.3	10	1.33	2.98		
	58.7	18.17					AD95 陶瓷	42					7.6	AD95 陶瓷				40	6.5
	84.2	31.40						63					13.5					60	9.9
	98.4	45.60						84					20.6					70	11.9
	111.2	75.60						105					75.8					80	20.5

4.2 增韧对约束陶瓷抗射流侵彻能力的提高

传统的考核陶瓷材料抗侵彻能力的结果是陶瓷靶破碎,并伴随强烈的冲击后效四处飞溅,较难观测侵彻完成后陶瓷的破碎形态。本文中借助约束效应定性观测射流侵彻完成后 2 种陶瓷的破碎情况。利用改进的 DOP 实验方法对约束 AD95 陶瓷及约束 10%氧化锆增韧陶瓷抗射流侵彻情况进行了对比实验。表 2 为约束 AD95 陶瓷和约束 10%ZrO₂ 增韧陶瓷抗射流侵彻过程的实验数据。图 9 为 2 种约束陶瓷侵彻过程中的侵彻深度与时间历程曲线以及侵彻速度与时间历程曲线,这些实验数据对认识射流侵彻的过程并检验有关数值模拟结果的可信性有重要意义。图 10 为侵彻完成后 2 种陶瓷入射面的破坏情况。图 11 为约束钢筒线切割后各层陶瓷的破坏情况。

表 2 约束陶瓷在抗侵彻过程中的实验数据

Table 2 Experimental data of the constrained ceramic targets

靶板材料	P /mm	t /μs	P_{res} /mm	F_s	F_m
AD95 陶瓷	20	3.3	10	1.33	2.98
	40	6.5			
	60	9.9			
	70	11.9			
	80	20.5			
10%ZrO ₂ 增韧陶瓷	20	3.3	3	1.42	3.23
	40	6.6			
	60	10.5			
	70	14.0			
	80	27.2			

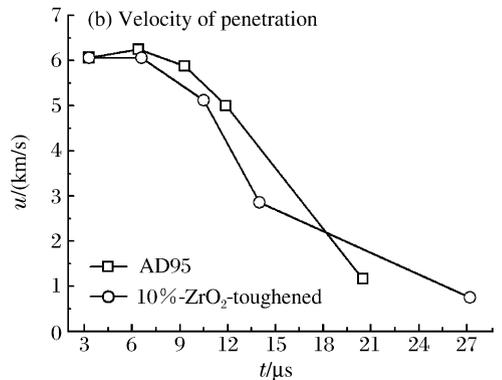
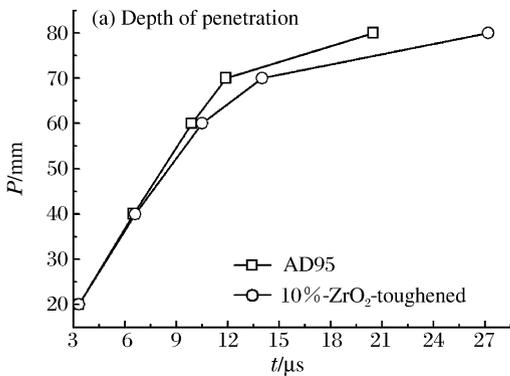


图 9 2 种约束陶瓷抗射流侵彻过程的 $P-t$ 及 $u-t$ 曲线

Fig. 9 $P-t$ and $u-t$ curves of the two kinds of constrained ceramic targets during anti-penetration

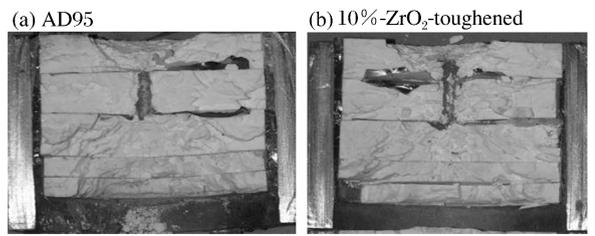
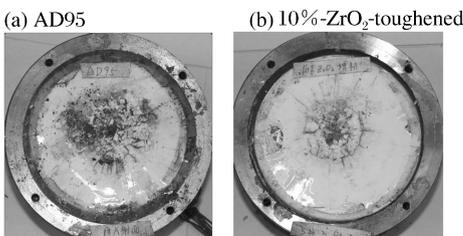


图 10 侵彻完成后 2 种约束陶瓷入射面的破坏情况

图 11 各层陶瓷破坏状态

Fig. 10 Destroyed incidence planes of the two kinds of constrained ceramic targets after penetration

Fig. 11 Destroyed state of every layer target

由表2~3关于约束条件下的AD95及10%ZrO₂增韧陶瓷抗射流侵彻实验的结果可知:

(1) 侵彻结果实验照片表明AD95陶瓷侵彻成孔较大,但其侵彻深度较大,这与侵彻开孔大、侵彻深度小的传统经验结果相反。这是因为陶瓷材料为脆性材料,其破坏特性与金属靶料不同,金属高速侵彻中以弹靶的塑性变形为主要变形机理,陶瓷材料的高硬度和脆性使他们在撞击过程中因材料的严重损伤而断裂和粉碎。粉碎区的强度控制其冲击响应过程^[1]。因此考核陶瓷的抗侵彻过程不能简单以开坑的大、小来度量,而应该综合考虑其各个破坏区的情况。

(2) 侵彻深度与时间曲线中,氧化锆增韧陶瓷的深度-时间曲线在AD95陶瓷的下方,氧化锆增韧陶瓷的防护因数也大于AD95陶瓷的,尽管氧化锆增韧陶瓷的密度和抗压强度降低,但其总体抗侵彻性能得到了提高。这是因为氧化锆增韧陶瓷的韧性增强,射流侵彻过程中陶瓷裂纹扩展范围减小,陶瓷抗侵彻的整体性得到加强,故其抗侵彻能力增强。说明陶瓷材料合理韧性化有助于提高陶瓷材料的抗侵彻能力。

(3) 从侵彻结果中入射面的破坏情况可以明显看出2种陶瓷的差异,2种陶瓷所产生的空腔尺寸基本相同,但破碎区及粉碎区差异较大。由于氧化锆增韧陶瓷的韧性化,其破碎区及粉碎区尺寸较小。解剖后的各层陶瓷破碎情况中可以看到明显的射流穿孔(见图11),2种陶瓷的射流穿孔差异不大;AD95陶瓷各层破碎情况较严重,说明增韧对改善陶瓷材料的破碎性能具有优势。

表3 侵彻完成后陶瓷破坏区尺寸

Table 3 Destroyed-region dimensions of ceramic targets after penetration

陶瓷类型	空腔直径/mm	粉碎区直径/mm	破碎区直径/mm
AD95 陶瓷	20.0	33.0	69
	20.0	37.0	61
10% ZrO ₂ 增韧陶瓷	21.5	32.3	48
	21.0	31.6	53

5 结 论

基于改进的DOP实验原理,开展了约束陶瓷抗射流侵彻对比研究,分别进行了约束状态对AD95陶瓷抗射流侵彻能力的影响、约束下陶瓷增韧对抗侵彻能力的影响的实验,获取了侵彻过程的侵彻深度-时间曲线。实验结果表明:约束陶瓷抗射流侵彻能力得到了较大提高;增韧陶瓷抗射流侵彻能力优于AD95陶瓷。基于实验结果分析了约束陶瓷抗射流侵彻机理,并对约束AD95陶瓷及氧化锆增韧陶瓷抗射流侵彻结果进行了比较。由比较结果可知:约束条件下射流侵彻陶瓷过程中产生的回爆使后续射流受到了干扰,与无约束陶瓷相比,约束陶瓷使射流的侵彻深度降低了约30%;10%ZrO₂增韧陶瓷比AD95陶瓷的抗射流侵彻能力大,陶瓷破坏程度减弱,表明陶瓷材料的合理韧性化有助于增强其抗射流侵彻能力。这些结论能够对未来装甲陶瓷的设计和改进行提供参考。

参考文献:

- [1] 陈小伟,陈裕泽.脆性陶瓷靶高速侵彻/穿甲动力学的研究进展[J].力学进展,2006,36(1):85-102.
CHEN Xiao-wei, CHEN Yu-ze. Review on the penetration/perforation of ceramics targets[J]. Advances in Mechanics, 2006,36(1):85-102.
- [2] Mayselless M, Genussov R. Jet penetration into low density targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999,23:585-595.
- [3] 徐学华.射流侵彻陶瓷靶试验研究与工程计算模型[J].南京理工大学学报,1994(1):18-21.
XU Xue-hua. A study on the experiment of jet penetration into a ceramic target and its engineering calculation model[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1994(1):18-21.
- [4] 徐学华.射流侵彻复合靶的工程计算方法[J].南京理工大学学报,1994(1):38-42.
XU Xue-hua. An engineering calculation method for jet penetration into a laminating target[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1994(1):38-42.
- [5] 谭多望,谢盘海.射流侵彻陶瓷靶力学特性试验研究[J].高压物理学报,1997,11(2):145-149.
TAN Duo-wang, XIE Pan-hai. Experimental study of alumina ceramic against a shaped-charge jet penetration[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1997,11(2):145-149.
- [6] 魏雪英,张春燕,马淑芳.射流侵彻作用下陶瓷材料的性态与阻力[J].兵工学报,2003,26(4):481-485.
WEI Xue-ying, ZHANG Chun-yan, MA Shu-fang. Resistance and property of ceramic target against shaped-charge jet penetration[J]. Acta Armamentarh, 2003,26(4):481-485.
- [7] 孙宇新,李永池,于少娟,等.长杆弹侵彻约束A95陶瓷靶的实验研究[J].弹道学报,2005,17(2):38-41.
SUN Yu-xin, LI Yong-chi, YU Shao-juan, et al. An experimental study on the penetration confined A95 ceramic

targets[J]. *Journal of Ballistics*, 2005, 17(2):38-41.

- [8] 于少娟,李永池,张先锋,等. 约束陶瓷靶抗射流侵彻实验研究[J]. *中国科学技术大学学报*, 2008, 38(11):1299-1303.
YU Shao-juan, LI Yong-chi, ZHANG Xian-feng, et al. An experimental study on anti-penetration process of confined A95 ceramic targets to shaped charge jets[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2008, 38(11):1299-1303.
- [9] 张先锋,李永池,于少娟. 氧化锆增韧陶瓷抗射流侵彻实验研究[J]. *实验力学*, 2007, 22(6):631-636.
ZHANG Xian-feng, LI Yong-chi, YU Shao-juan. An experimental study on anti-penetration process of zirconia toughened alumina ceramic target to shaped charge jet[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2007, 22(6):631-636.
- [10] 翁佩英,任国民,于骐. 弹药靶场试验[M]. 北京:兵器工业出版社,1995.
- [11] 张玉军,张伟儒. 结构陶瓷材料及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [12] 孙宇新,李永池,廖光焯,等. 氧化锆增韧陶瓷与 A95 陶瓷抗侵彻性能对比实验研究[J]. *实验力学*, 2005, 20(3):344-348.
SUN Yu-xin, LI Yong-chi, LIAO Guang-xuan, et al. Comparison studies on the anti-penetration property of toughening ceramic and A95 ceramic[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005, 20(3):344-348.

Constraining and toughening effects on anti-penetration properties of alumina ceramic targets to shaped charge jets

ZHANG Xian-feng^{1, 2}, LI Yong-chi^{1*}

(1. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China;*

2. *School of Mechanics Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China*)

Abstract: Based on depth of penetration experiments, anti-penetration experiments were conducted in constrained AD95 ceramic targets and 10%-zirconia-toughened alumina ceramic targets subjected to shaped charge jet penetration. The depth of penetration-time curves for these two types of ceramic targets and their residual penetration depths in validating targets were obtained, and these data were compared with the corresponding experimental data for 45 steel targets. Results show that the protection coefficients of these two types of ceramic targets are both bigger than 1.0, that the anti-penetration abilities of the constrained ceramic targets are improved distinctly, and that the anti-penetration abilities of the toughened ceramic targets are larger than those of the AD95 ceramic targets. Based on the experimental results, the anti-penetration mechanism of the constrained ceramic targets to shaped charge jets was analyzed, and the following conclusion is presented: the disturbance of back-explosion generated from the constrained boundary to the jet stability is the main cause why the constrained ceramics have better anti-penetration ability than the unconstrained ceramics.

Key words: mechanics of explosion; penetration; anti-penetration experiment; ceramic target; constrained ceramic; zirconia-toughened ceramic; shaped charge jet

* Corresponding author: LI Yong-chi
Telephone: 86-25-84317853

E-mail address: ycli@ustc.edu.cn