文章编号：1000-5773(2009)01-0075-06

复合材料弹侵彻混凝土靶的研究*

钟卫洲[1,2]，宋顺成[1]，张方举[2]，张青平[2]，
黄西成[2]，李思忠[2]，卢永刚[2]

(1. 西南交通大学应用力学与工程系，四川成都 610031；
2. 中国工程物理研究院总体工程研究所，四川绵阳 621900)

摘要：利用碳纤维复合材料壳体和金属弹头组成的复合弹体，对混凝土靶进行了高速侵彻实验，弹体分别以 336、447 和 517 m/s 的速度对强度为 30 MPa、厚度为 200 mm 的混凝土靶进行正侵彻和 30°斜侵彻。实验结果表明：碳纤维复合材料壳体具有较高的强度，在高速侵彻靶体的过程中弹体结构能够保持完整，复合材料壳体没有纤维分层和断裂产生。相对于同样结构尺寸的金属弹体(将复合材料壳体替换为密度 7.8 g/cm^3 的金属材料)，复合材料弹填充物的质量分数(18.5%)约为金属弹体的两倍，因此采用轻质高强复合材料替代高密度金属弹身，不仅可以提高弹体装填比、增加比毁伤威力，而且还具有较高的侵彻能力。

关键词：复合材料；侵彻；碳纤维；装填比；混凝土
中图分类号：O385 **文献标识码**：A

1 引 言

在传统的金属壳体弹中，其壳体金属部分占整个弹重的比例很大，大质量弹体将影响其作用目标靶体时的速度，同时爆炸后装药的部分能量用于驱动金属壳体，从而削弱了弹体对目标靶体的毁伤效应。目前可以从两方面提高装药弹体对目标的毁伤效应：一是采用优良炸药配方，提高爆炸能量；另一种方法是对装药弹体进行优化，提高炸药在弹体中的质量分数。

随着复合材料技术的发展，轻质高强复合材料在国防武器研制中得到了广泛的运用，其低密度、高比强度、高比模量等优点使其拥有提高装药弹体比毁伤威力的能力。例如美国 Livermore 实验室将复合材料运用于战斗部，减少对预定目标之外(目标靶附近盟友)的间接伤害[1]；轻质碳纤维复合材料应用于装甲车，以提高装甲车的反应速度[2]；由纤维复合材料制成的弹托能提高次口径弹的侵彻能力[3]；高比强度、高比模量纤维(Nylon、Aramid、玻璃纤维等)相继应用于增强头盔的安全性能[4]；纤维增强聚合体被广泛地运用于海军船舶和潜艇，采用纤维增强聚合物制成的甲板、桅杆系统、防水壁、螺旋推进器体，不仅可以降低造价成本，而且还能提高结构的力学性能[5]，同时很多科研人员针对纤维增强复合材料靶体抗冲击性能进行了大量研究[6-10]。

目前碳纤维复合材料凭其高比强度、高比模量、耐高温、耐疲劳、热稳定性好等特点，已逐步成为主要的先进复合材料[11]。本研究利用碳纤维增强复合材料替代金属弹身，与金属弹头、弹尾构成的弹体对混凝土靶体进行正侵彻和 30°斜侵彻实验，研究由轻质高强复合材料构成的复合弹体侵彻混凝土靶体的能力。

* **收稿日期**：2008-01-30；**修回日期**：2008-07-02
基金项目：总装武器装备探索研究项目(6130516)
作者简介：钟卫洲(1978—)，男，博士研究生，助理研究员，主要从事冲击动力学研究. E-mail：wz_zhong@sina.com

2 实验原理

实验在直径为 25 mm 的弹道滑膛炮上进行,其工作的基本原理如图 1 所示。实验时弹体经滑膛炮发射,撞击混凝土靶体。弹体速度可由测速装置测得,弹体在着靶前的姿态由平行反射镜系统的垂直光路成像于高速摄影机的胶片上,分析高速摄影胶片上的图形可获取弹体在着靶前的姿态,以及侵彻过程中的靶前状态。实验中调节靶体倾斜角度,可实现弹体对靶体进行不同角度的斜侵彻。

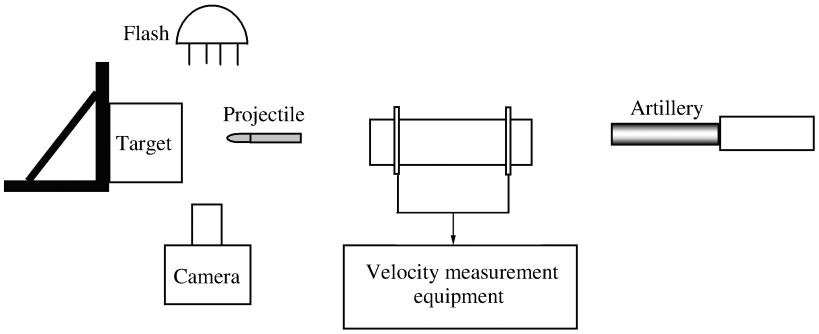


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Configuration of the experiment equipment

3 弹体和靶体结构

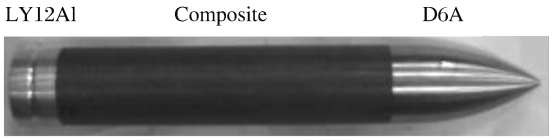


图 2 弹体结构图

Fig. 2 Configuration of projectile

复合材料弹体的结构如图 2 所示,D6A 金属弹头与 LY12 铝金属尾盖之间通过碳纤维复合材料壳体连接。由于本实验的目的旨在研究碳纤维增强复合材料弹侵彻混凝土靶体的能力,因此在弹体内部填充密度为 1.7 g/cm^3 不饱和聚脂,替代炸药材料。复合材料的基体成分是环氧树脂,环氧树脂与稀释剂、固化剂浇注体的力学性能见表 1。增强材料为 T700 碳纤维,相应的力学性能见表 2。

实验中采用圆柱体无筋混凝土作为靶体,柱面靶体外用 2～3 mm 厚的铁皮箍紧,其外形尺寸为 ∅640 mm×200 mm。靶体采用直径为 3～5 mm 的卵石和细沙进行浇筑,加工时保持圆柱靶体的上、下表面平整,混凝土靶轴心抗压设计强度为(30±5)MPa。

表 1 树脂浇柱体性能

Table 1 Properties of cylinder moudled by resin

Density /(g/cm^3)	Tensile strength /(MPa)	Compression strength /(MPa)	Tensile modulus /(GPa)	Compression modulus /(GPa)	Extensibility /(%)
1.27	100	166	3.0	3.6	3.8

表 2 T700 碳纤维材料性能

Table 2 Material properties of T700 carbon fibre

Density/(g/cm^3)	Line density/(g/m)	Tensile strength/(MPa)	Tensile modulus/(GPa)	Extensibility/(%)
1.80	0.80	4 900	230	2.1

4　实验研究

4.1　实验状态

为了研究复合材料弹体正侵彻和斜侵彻混凝土靶体的能力,分别进行了弹体以 0°和 30°方向对靶体进行高速侵彻的实验,相应示意图如图 3 和图 4 所示。

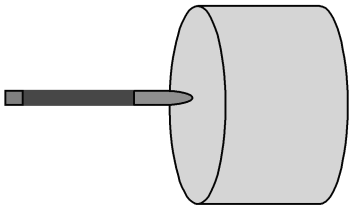


图 3　正侵彻示意图

Fig. 3　Sketch of 0° penetration

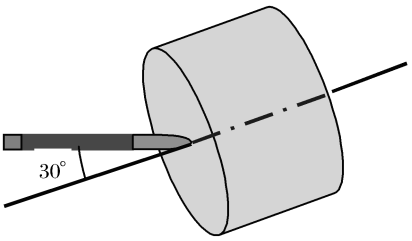


图 4　斜侵彻示意图

Fig. 4　Sketch of 30° penetration

4.2　实验结果

4.2.1　*正侵彻实验*

首先选取复合材料弹体以 336 m/s 的速度侵彻 200 mm 厚混凝土靶,其实验结果如图 5 所示。弹体未能穿透混凝土靶体,弹体结构保持完整陷入靶中,侵彻深度约 10.5 cm。在混凝土靶前表面形成直径约 22 cm 的圆形凹坑,其中心深度约 5 cm,前表面出现 6 道裂纹,从图 5 中可看到,靶的前表面出现一道较宽裂纹,已扩展至靶体边缘;靶体后表面出现大面积(约占靶体圆形表面二分之一)层裂区域,在层裂中心位置可见金属弹头,中心坑深度约 9.5 cm。

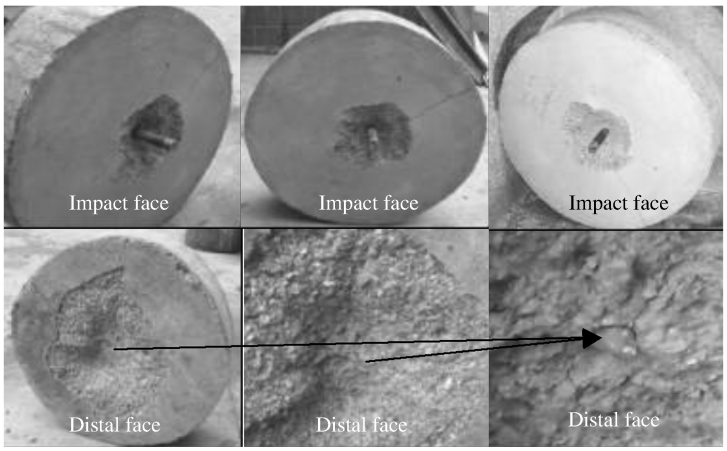


图 5　靶体破坏形式图

Fig. 5　Concrete failure mode

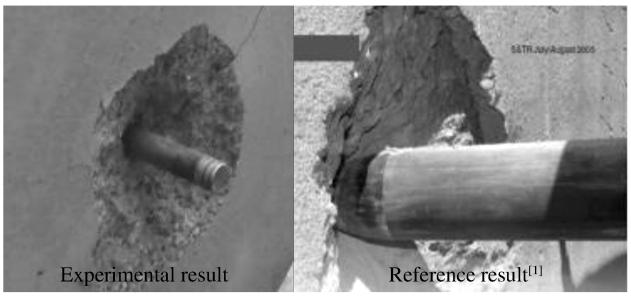


图 6　实验结果与文献结果比较

Fig. 6　Comparison of experimental result with reference result

此发实验现象与文献[1]首页图片相似,弹体均为复合材料弹,侵彻混凝土靶时由于弹速较低而未能穿透靶体并陷入其中,但弹体结构保持完整,如图 6 所示。在文献[1]中,复合材料弹的设计目的是增强对预定靶目标的毁伤能力,并减少对预定目标之外的间接伤害。而本工作复合材料弹的设计旨在减轻弹体质量,提高填充物的装填比。由此可见,本实验中的复合弹

体具有一定的侵彻强度，在 336 m/s 的速度下，弹体结构能保持完整，正侵入强度为 30 MPa、200 mm 厚混凝土靶 10.5 cm，弹体的复合材料具有较高的强度，未发生失效破坏。

由于弹体在速度为 336 m/s 的情况下未能穿透靶体，因而在接下的实验中将弹速提高至 517 m/s，对厚度为 200 mm 的混凝土靶进行正侵彻，实验中弹体顺利通过靶体后继续穿过回收箱中的数袋沙袋，最后弹体复合材料段陷入约 10 mm 的厚钢板中，如图 7 所示。弹体在侵彻回收箱中的高强钢板时，与壳体粘结的弹头和弹尾发生脱落，分别留于回收箱中钢板前、后附近。混凝土靶的前表面形成了直径约 16 cm、近似圆形的凹坑，其中心深度约 5 cm；靶体的后表面出现了大面积（约占靶体圆形表面 1/5）层裂区域，中心坑深度约 9 cm，如图 8 所示。



图 7 弹体破坏形式图

Fig. 7 Projectile failure mode

实验中复合材料壳体与弹头、弹尾发生脱粘，陷入回收箱中的钢板中，但未发生纤维分层和断裂破坏失效。从发现弹头和弹尾脱落的位置（钢板附近）可知，脱落是在侵彻高强钢板时发生的，此时弹体已顺利通过混凝土靶体，因此可确定复合材料弹体具有对实验混凝土靶体的侵彻能力，能实现对强度为 30 MPa、厚度为 200 mm 混凝土靶的正侵彻；同时改善复合材料壳体与弹头、弹尾之间的结合强度，能提高弹体对更高强度靶体的侵彻能力。

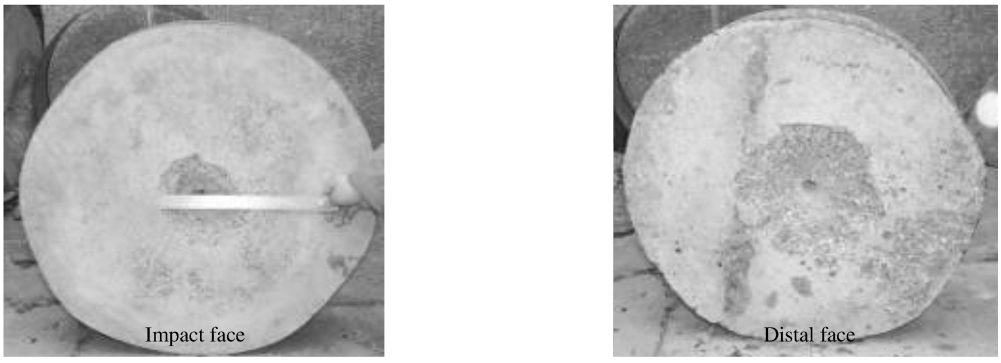


图 8 靶体破坏形式图

Fig. 8 Concrete failure mode

4.2.2 *斜侵彻实验*

复合材料弹体在攻角为 30°的情况下，以 447 m/s的速度对 200 mm 厚混凝土靶体进行斜侵彻，弹体顺利通过靶体，回收的弹体结构保持完整，弹体表面的金属材料和复合材料有所磨损，如图 9 所示。混凝土靶的前表面形成直径约 24.5 cm 近似圆形的凹坑，其中心深度约 9 cm；靶体后表面出现大面积（约占靶体圆形表面 2/5）层裂区域，中心坑的深度约 12 cm，靶体的前、后表面均出现几道裂纹，如图 10 所示。实验结果表明，复合材料弹体具有较强的斜侵彻能力，能实现对强度为 30 MPa、厚度为 200 mm 的混凝土靶 30°斜侵彻。

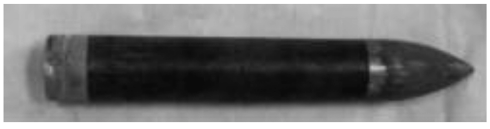


图 9 回收弹体图

Fig. 9 Projectile after experiment

除了上述 336、447 和 517 m/s 3 种速度的正侵彻和 30°斜侵彻，在本工作中还进行了多发相同结构尺寸复合材料弹体的正（30°斜）侵彻 30 MPa 混凝土靶实验，弹体复合材料均未发生破坏，因此本工作设计的复合材料弹体具有正（30°斜）侵彻 30 MPa 混凝土靶的能力。



图 10　靶体破坏形式图

Fig. 10　Concrete failure mode

5　分析讨论

提高弹体装填比有两种途径:一种是增加装填物质量,另一种是减轻弹体总质量。在填充物体积一定的情况下,只能通过降低弹体总重来提高装填比。本实验在保持弹体结构尺寸不变的情况下,将弹身用复合材料进行实验研究,若将本实验弹体的复合材料替换成密度为 7.8 g/cm^3 的金属,可对金属弹和复合材料弹的装填结果进行比较,结果见表 3。从表 3 中可以发现,本实验弹体的装填比约为金属弹体装填比的 2 倍。对于同样推动力、相同质量的复合材料弹体与金属弹体,复合材料弹体则能携带更多的装药,具有更高的破坏力,因此复合材料具有更高比毁伤威力;而对于同样推动力、相同结构尺寸的复合材料弹体与金属弹体,复合材料弹体具有更高的速度,可实现对靶体进行更高速度的侵彻。因此采用轻质高强复合材料替代金属材料,可作为提高弹体装填比的一种途径,而且复合材料弹体仍具有一定的侵彻能力。

表 3　实验分析

Table 3　Experiment analysis

Bullet category	Filler mass/(g)	Total weight/(g)	Charge-weight ratio/(%)
Composite bullet	55.0	297.5	18.5
Metal bullet	55.0	544.6	10.1

实验考察了复合材料弹体高速正侵彻和 30°斜侵彻厚度为 200 mm、抗压强度为 30 MPa 混凝土靶的能力,若针对更高强度和厚度的靶体,需考虑复合弹体中复合材料段在侵彻过程中的承受能力。在承受轴向和偏心(斜侵彻)载荷作用的情况下,纤维复合材料圆筒破坏模式一般为纤维层分层、纤维丝断裂和结构屈曲,因此在设计更高侵彻能力的复合材料弹体时,应加强弹体复合材料结构的抗压和抗弯能力,提高纤维复合材料的层间结合力。

6　结　论

利用∅25 mm 弹道滑膛炮开展了复合材料弹体正(30°斜)侵彻混凝土靶实验,结果表明,采用轻质高强复合材料替代金属弹身是提高弹体装药百分比的一种有效途径,相对于同样结构尺寸的金属弹体(复合材料壳体替换为密度 7.8 g/cm^3 的金属材料),实验中采用的复合材料弹的装填比约为金属弹体的两倍;而且弹体能保持复合材料段结构完整,顺利实现对抗压强度为 30 MPa、厚度为 200 mm 的混凝土靶正(30°斜)高速侵彻。因此采用轻质高强碳纤维复合材料替代高密度金属弹身,不仅可以提高弹体的装填比、增加比毁伤威力,而且还能保持较高的侵彻能力。

本工作得到中国工程物理研究院总体工程研究所相关同志的大力支持,在此表示感谢。

References:

[1] Lawrence Livermore National Laboratory. A New Generation of Munitions [R]. S&TR,2003:20-22.

[2] Naik N K,Shrirao P. Composite Structures under Ballistic Impact [J]. Composite Structures,2004,66:579-590.

[3] Lawrence Livermore National Laboratory. Leveraging Science and Technology in the National Interest [R]. S&TR,1999:4-11.

[4] Huang C G,Shi M W,Duan Z P. Review on the Dynamic Behaviors and Penetration of the Composites Helmet under Impact Loading [J]. Advances in Mechanics,2000,30(2):239-251. (in Chinese)
黄晨光,施媚梧,段祝平. 头盔用复合材料抗侵彻性能研究进展 [J]. 力学进展,2000,30(2):239-251.

[5] Mouritz A P,Gellert E,Burchill P,et al. Review of Advanced Composite Structures for Naval Ships and Submarines [J]. Composite Structures,2001,53:21-41.

[6] Zhang Z G,Huo G,Zhang D X,et al. Study on Ballistic Energy Absorption of Fiber Composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica,1998,15(2):74-81. (in Chinese)
张佐光,霍 刚,张大兴,等. 纤维复合材料的弹道吸能研究 [J]. 复合材料学报,1998,15(2):74-81.

[7] Mei Z Y,Zhu X,Liu Y H,et al. The Developments of Fibre-Reinforced Composite Laminates under Ballistic Impact [J]. Advances in Mechanics,2003,33(3):375-388. (in Chinese)
梅志远,朱 锡,刘燕红,等. 纤维增强复合材料层合板弹道冲击研究进展 [J]. 力学进展,2003,33(3):375-388.

[8] Richardson M O W,Wisheart M J. Review of Low-Velocity Impact Properties of Composite Materials [J]. Composites Part A,1996,27A:1123-1131.

[9] Christoforou A P. Impact Dynamics and Damage in Composite Structures [J]. Composite Structures,2001,52:181-188.

[10] Iremonger M J,Went A C. Ballistic Impact of Fiber Composite Armours by Fragment-Simulating Projectiles [J]. Composites,Part A,1996,27A:575-581.

[11] Shen G L,Hu G K. Mechanics of Composite Materials [M]. Beijing:Publish House of Tsinghua University,2006:13-17. (in Chinese)
沈观林,胡更开. 复合材料力学 [M]. 北京:清华大学出版社,2006:13-17.

Research on Behavior of Composite Material Projectile Penetrate Concrete Target

ZHONG Wei-Zhou[1,2],SONG Shun-Cheng[1],ZHANG Fang-Ju[2],ZHANG Qing-Ping[2],
HUANG Xi-Cheng[2],LI Si-Zhong[2],LU Yong-Gang[2]

(1. *Department of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu* 610031, *China*;
2. *Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Projectiles made of carbon fiber composite material shell and metal warhead have penetrated concrete targets at the speed of 336, 447 and 517 m/s, respectively. The angles are 0° and 30° between the perpendicular of target surface and projectile axes. The thickness of concrete target is 200 mm and its compression strength is 30 MPa. The experimental results indicate that the strength of composite material structure is strong. The composite projectile can go through the concrete target without fiber segregation and breakage. Given the same size of the projectile, the mass percent of filler is 18.5% in the composite material projectile, which is about twice of the metal (density of metal is takes as 7.8 g/cm^3) projectile. Comparing to metal projectile, little density, high strength composite material projectile can lessen weight, improve charge-weight ratio of powder and enhance specific damage powder.

Key words: composite material; penetration; carbon fiber; charge-weight ratio; concrete