

# 单层紧密排列刚玉球砼侵彻特性试验研究<sup>\*</sup>

周布奎<sup>1</sup>, 陈向欣<sup>2</sup>, 唐德高<sup>1</sup>, 周早生<sup>1</sup>, 贺虎成<sup>1</sup>

(1. 解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007;

2. 第二炮兵工程设计研究所, 北京 100011)

摘要: 对普通钢筋混凝土和单层紧密排列刚玉球砼同时进行了抗侵彻模拟试验研究, 并将试验结果进行了对比。结果表明: 与普通钢筋混凝土相比, 单层紧密排列刚玉球砼混凝土有较强的抗侵彻能力。

关键词: 爆炸力学; 抗侵彻性能; 模拟试验; 刚玉球砼; 侵彻

中图分类号: O347.3 国标学科代码: 130°3530 文献标志码: A

## 1 引言

常规精确制导武器之所以对防护工程构成了极大的威胁, 主要在于其侵彻能力的增强<sup>[1]</sup>。在提高工程的抗侵彻能力方面, 目前主要的做法是给工程增加遮弹层。遮弹层的遮弹原理有两种<sup>[2]</sup>: 一是选择强度大的遮弹层材料, 阻止弹体的侵彻; 二是采用合理的遮弹层结构, 使来袭弹丸发生偏转, 减小弹丸的侵彻深度。

刚玉材料的主要成分  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 密度  $\rho_c = 3800 \text{ kg/m}^3$ , 弹性模量  $E_c = 400 \text{ GPa}$ , 强度(抗弯强度) = 274 MPa, 硬度(A 标洛氏硬度)  $H_{RA} = 86 \sim 92$ 。研究用的单层紧密排列刚玉球砼结构, 从上到下依次为砼保护层、单层紧密排列刚玉球层和钢筋砼层; 刚玉球层和砼整体浇注, 是一种新型结构遮弹层, 依靠坚硬的刚玉球层阻止弹丸的侵彻或者使来袭弹丸发生偏转, 降低弹丸的侵彻破坏效应。

弹体侵彻问题属于高速碰撞动力学问题<sup>[3]</sup>, 受现有理论的限制, 这个问题还没有得到完全解决。在弹体侵彻方面的研究工作, 仍以试验为主<sup>[4]</sup>。要研究单层紧密排列刚玉球砼混凝土的抗侵彻性能, 必须进行实弹侵彻原型试验。这种试验不仅规模大, 而且耗资也大, 且对材料抗侵彻机理的研究没有进行实弹侵彻原型试验的必要。

我们对单层紧密排列刚玉球砼混凝土的抗侵彻性能进行了小比例模拟试验研究, 研究结果可以为单层紧密排列刚玉球砼混凝土的抗侵彻性能的理论研究和机理探索提供参考。

## 2 试验设计

### 2.1 弹体

试验弹体为标准  $\varnothing 37 \text{ mm}$  硬芯半穿甲弹, 弹头为平头锥形, 弹长 13.2 cm, 长径比 3.57 : 1; 弹体材料为 35 G rMnSi, 密度  $\rho_b = 7850 \text{ kg/m}^3$ , 抗拉强度 1620 MPa, 屈服应力 1275 MPa, 硬度(布氏硬度)  $H_{B1} = 241$ 。试验中, 弹体垂直入射靶体, 弹体初速度(通过试炮确定)为 340 m/s。

### 2.2 靶体

为了便于进行比较, 试验中共制作了 8 块靶体: 3 块为普通钢筋混凝土靶, 编号分别为  $C_1 \sim C_3$ ; 5 块为刚玉球钢筋砼混凝土靶, 编号分别为  $Q_1 \sim Q_5$ 。

普通钢筋混凝土靶体中的钢筋为  $\varnothing 10 \text{ mm}$  低碳钢, 面积配筋率 0.26%; 根据相应规范<sup>[5]</sup>, 混凝土按照 C40 配比进行设计, 实际标准抗压强度 58 MPa, 靶体尺寸 800 mm × 800 mm × 300 mm, 如图 1。

\* 收稿日期: 2002-04-26; 修回日期: 2002-08-27

作者简介: 周布奎(1975—), 男, 博士研究生。

单层紧密排列刚玉球混凝土靶体几何尺寸 800 mm × 800 mm × 300 mm。刚玉球直径 28 mm，刚玉球层平面大小 300 mm × 300 mm；刚玉球层的下表面设有钢丝网，钢丝网规格  $\phi 2$  mm @ 20 mm × 20 mm。

实际工程中刚玉球层铺设的面积很大，为使试验情况与实际工程更接近，减小边界效应的影响，用  $\phi 25$  mm 的钢筋对刚玉球层进行约束。靶体制作时刚玉球层和混凝土层整体浇注。为了防止试验中刚玉球层大面积脱落，刚玉球层的上表面铺设 30 mm 厚的混凝土保护层。靶体中的钢筋为  $\phi 10$  mm 低碳钢，面积配筋率 0.26%。根据相应规范<sup>[2]</sup>，混凝土按照 C40 配比进行设计，实际标准抗压强度 58 MPa，靶体结构如图 1 所示。

### 2.3 试验设备

试验对如下参数进行了测试：弹体的初始速度和着靶速度、弹体在靶体中的侵彻深度、弹坑的大小以及靶体的破坏现象等。

试验弹丸用  $\phi 37$  mm 火炮发射，通过改变火药用量，可以调整弹体的初始速度。利用锡箔靶和电子测时仪（计时精度  $10^{-6}$  s）测定弹丸的初始速度，通过高速摄影仪（分辨率  $256 \times 256$ ，拍摄速度  $30 \sim 40500$  s<sup>-1</sup>）测定弹体的着靶速度和着靶姿态。试验中两个锡箔靶间距 1 m，距离炮口 10 m，距离靶体 25 m，现场布置如图 3 所示。

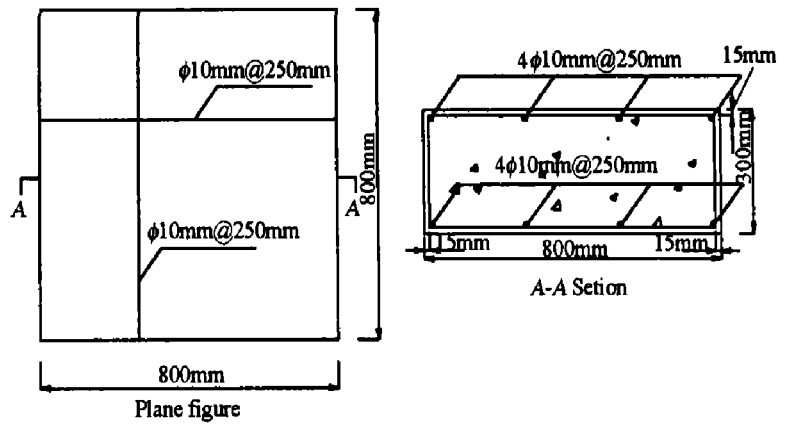


图 1 钢筋砼靶体  
Fig. 1 Target of concrete

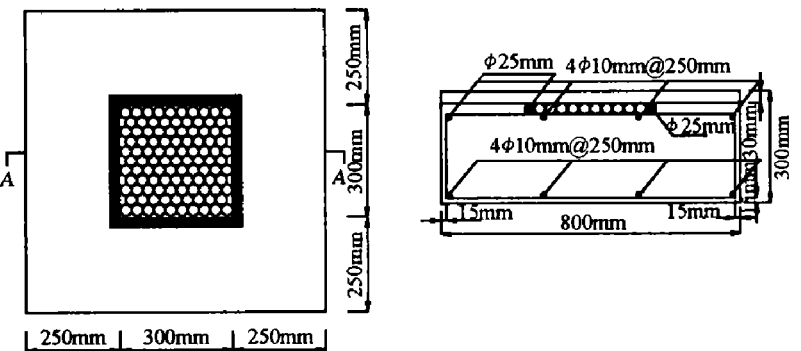


图 2 刚玉块石钢筋砼靶体  
Fig. 2 Target of nubbly corundum concrete

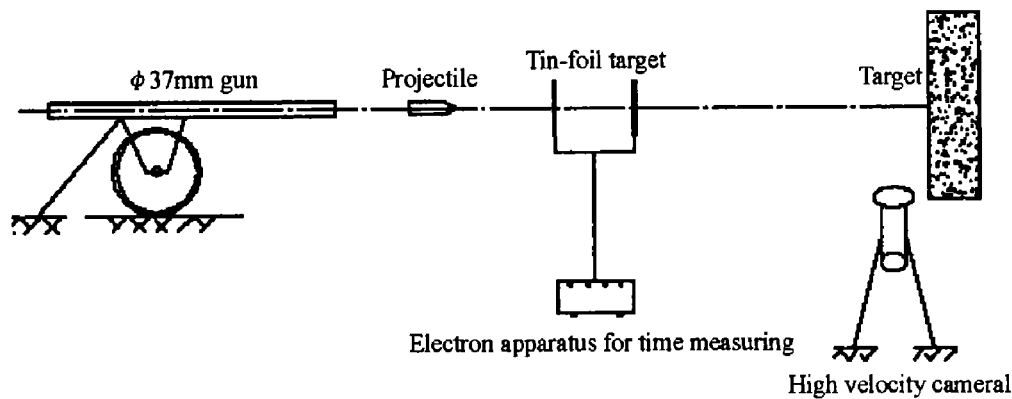


图 3 现场布置图  
Fig. 3 Plane of testing ground

## 3 试验结果及分析

### 3.1 弹体入射及破坏情况

弹体的质量、着靶速度、着靶姿态以及弹体入射后的状态是研究侵彻问题的重要参数，试验的实测

数据见表 1。表 1 中  $m$  为弹体质量,  $v_1$  为着靶速度,  $\alpha$  为入射角(弹体轴线与靶体法线之间的夹角)。

表 1 实测试验数据

Table 1 Data of the test

编号	$m/g$	$v_1/(m/s)$	$\alpha/(\circ)$	弹体入射后状态
C <sub>1</sub>	708	346	0	弹体形状完好, 撞击靶体后反弹约 20 m
C <sub>2</sub>	711	358	0	弹体形状完好, 撞击靶体后反弹约 20 m
C <sub>3</sub>	708	327	0	弹体形状完好, 撞击靶体后反弹约 30 m
Q <sub>1</sub>	711	333	0	弹头变形且多处缺损, 表面有擦痕, 弹被弹回 10 m
Q <sub>2</sub>	710	333	0	弹头变形且多处严重缺损, 表面有擦痕, 弹被弹回 10 m
Q <sub>3</sub>	707	346	0	弹头变形且多处缺损, 表面有擦痕, 弹被弹回 35 m
Q <sub>4</sub>	712	346	0	弹头变形且严重缺损, 表面有擦痕, 弹被弹回 6 m
Q <sub>5</sub>	709	336	0	弹头变形且多处缺损, 表面有擦痕, 弹被弹回 12 m

弹体侵彻问题是一种复杂的高速碰撞动力学问题, 如果弹、靶材料的性质相差较小, 则在弹、靶初始接触点的附近区域内, 弹丸和靶体材料会出现同时粉碎现象; 如果弹、靶材料性质相差很大, 则一种材料的行为类似于流体, 而另一种材料的行为却仍受其强度效应所控制。从弹体入射后的状态(表 1)可以明显地看出这一现象: 由于弹体材料强度远高于普通混凝土材料的强度, 所以弹丸在侵彻混凝土靶体时, 形状保持完好, 而且表面也没有明显的擦痕, 可近似为刚体。刚玉材料的强度和硬度均很高, 所以弹丸与刚玉球碰撞时, 弹头全部受到破坏, 有的弹头甚至完全粉碎缺失, 弹体表面出现了多处擦痕, 这主要是由于弹体与刚玉球之间的碰撞和摩擦造成的。由高速摄影仪的分幅摄像可以看出, 弹体入射时轴线与靶体法线之间的夹角为 0。弹体在侵彻两种靶体时均被弹回。

### 3.2 靶体的破坏情况

弹体在靶体中的侵彻深度是研究靶体抗侵彻性能的重要参数, 试验的现场记录数据见表 2, 表中  $h$  为侵彻深度。

表 2 靶体破坏情况表

Table 2 The damage of targets

编号	$h/mm$	靶体破坏现象描述 <sup>1)</sup>
C <sub>1</sub>	90	靶体的迎弹面有多条呈放射状分布的微细裂纹, 漏斗坑底部有弹间侵入靶体形成的小弹坑, 深 21 mm
C <sub>2</sub>	92	靶体迎弹面无裂纹, 漏斗坑底部有弹头侵入靶体形成的小弹坑, 深 20 mm
C <sub>3</sub>	91	靶体的迎弹面有多条呈放射状分布的微细裂纹, 漏斗坑底部有弹头侵入靶体形成的小弹坑, 深 22 mm
Q <sub>1</sub>	76	混凝土保护层的实际厚度 35 mm, 部分刚玉球脱落, 有的破碎; 靶体的迎弹面有多条呈放射状分布的细裂纹
Q <sub>2</sub>	75	混凝土保护层的实际厚度 35 mm, 部分刚玉球脱落, 有的破碎; 靶体的迎弹面有多条呈放射状分布的细裂纹, 漏斗坑底部有小弹坑, 深 33 mm
Q <sub>3</sub>	94	混凝土保护层的实际厚度 40 mm, 部分刚玉球脱落甚至破碎, 靶体的迎弹面有多条呈放射状分布的细裂纹, 弹孔偏斜
Q <sub>4</sub>	77	混凝土保护层的实际厚度 38 mm, 部分刚玉球脱落甚至破碎; 靶体的迎弹面有多条呈放射状分布的细裂纹
Q <sub>5</sub>	104	混凝土保护层的实际厚度 50 mm, 部分刚玉球脱落甚至破碎; 靶体的迎弹面呈放射状分布的细裂纹, 漏斗坑底部有小弹坑, 深 28 mm, 弹孔偏斜

1) 表中弹坑直径的数值为靶体迎弹面漏斗坑的最大直径和最小直径。

从表 2 可以看出, 弹体在普通钢筋混凝土靶体中的最小侵彻深度  $h_{\min}=90$  mm, 最大侵彻深度  $h_{\max}=92$  mm, 平均侵彻深度  $\bar{h}=91$  mm。从试验现场的实际观察来看, 靶体迎弹面的弹坑形状规整, 呈漏

斗状,漏斗底部有弹头侵入靶体形成的小弹坑,小弹坑基本上都处于漏斗坑的正中心位置。弹坑没有出现偏斜,说明弹体在侵入靶体时弹道没有发生改变,试验后的靶体见图4。

在制作刚玉球混凝土靶体的过程中,由于振捣的原因,使得混凝土保护层厚度各不同。弹体侵彻后留下的弹坑深度也各不相同,有的差别很大。但是,这些弹坑有一个共同的特点,就是弹体经过刚玉球层后继续侵彻的深度都很小,说明弹体经过刚玉球层后动能减小了很多。刚玉球混凝土靶体被弹体撞击后破坏面积较大,部分刚玉球脱落,有的刚玉球被弹体撞碎,见图5。从表2还可以看出混凝土保护层比较厚的靶体,弹坑也比较深。其中编号为 $Q_2$ 和 $Q_5$ 的靶体,弹坑底部有小弹坑,深度分别为33 mm和28 mm,小坑直径略大于刚玉球直径,主要是由于被弹体撞击的刚玉球侵入底部混凝土造成的。编号 $Q_3$ 和 $Q_5$ 的两个靶体的弹坑明显出现了偏斜现象,弹坑的一个方向坡度较缓,其它方向的坡度均较陡,弹坑的平面形状呈椭圆形,说明弹体在侵彻过程中,与刚玉球层发生碰撞时,由于刚玉球层的曲面特性,使弹体发生了偏转,试验中弹体均被弹回,具体的偏转角无法量测。编号为 $Q_1$ , $Q_2$ 和 $Q_4$ 靶体的混凝土保护层相对较薄,其弹坑深度明显小于普通钢筋混凝土靶体中的弹坑深度,刚玉球在减小靶体弹坑深度方面起到了重要作用。



图4 试验后的钢筋砼靶体

Fig.4 Concrete target after test



图5 试验后的刚玉块石钢筋砼靶体

Fig.5 Nubby corundum concrete target after test

### 3.3 试验结果分析

从上述的试验结果可以看出,弹体在侵彻普通钢筋混凝土靶时,没有变形,表面也没有擦痕,可近似为刚体,靶体迎弹面的弹坑面积相对较小,见图4和图5;弹体在侵彻刚玉球钢筋混凝土靶时,与强度和硬度都很高的刚玉球发生碰撞,部分刚玉球被撞碎,弹头缺损,表面有明显的擦痕,靶体迎弹面的弹坑面积也较大。

根据能量守恒原理,弹体在侵彻普通混凝土靶时,混凝土的破碎和弹、靶之间的摩擦是消耗弹体动能的主要因素,由于混凝土的破坏面较小,所以弹坑的平均深度较深。弹体侵彻刚玉球钢筋混凝土靶时,弹体的动能除了用于克服弹、靶之间的摩擦和使混凝土破碎外,还有相当一部分消耗在弹体材料的磨损和刚玉球的破碎上,所以弹坑较浅。

刚玉球层面由规律分布的半球面组成,因此,弹体的偏转与否和弹着点位置密切相关。刚玉球层作用在弹体上的力如果是对称的,弹体显然不会偏转;如果弹体受到的阻力是非对称的,弹体在侵彻过程中就会偏转。而且弹体偏转角度的大小与弹体的侵彻行程也有关系,虽然弹体受到的阻力是非对称的,但是必须要有足够的时间才能使弹体发生明显的偏转。从试验结果可以看出,编号 $Q_3$ 和 $Q_5$ 的两发试验中弹体发生了偏转,另外三发试验弹体没有发生明显的偏转。

## 4 结论

从上述的试验结果可以得出以下几点结论:

(1) 在所试验的速度条件下,弹丸在普通钢筋混凝土靶体中侵彻时,由于弹体材料的强度远大于混

凝土材料的强度, 侵彻后的弹体形状保持完好, 弹体表面没有明显的擦痕, 近似为刚体。

(2) 普通钢筋混凝土靶体的弹坑形状呈漏斗形, 而且底部均有弹头侵入靶体形成的小弹坑, 小弹坑处于漏斗坑的中心位置, 说明弹体在侵彻时没有发生偏转, 弹道没有发生改变, 弹坑的平均深度 91 mm。

(3) 弹体在单层紧密排列刚玉球混凝土靶体中侵彻时, 弹头均严重变形且有多处缺损, 有的弹头几乎完全被破坏, 说明刚玉球的强度和硬度是很高的。

(4) 由于弹体的撞击, 靶体中部分刚玉球脱落, 有的破碎, 弹坑的面积较大, 迎弹面有多条呈放射状分布的细裂纹。尽管弹坑的深度各不相同, 但是它们有一个共同的特点, 弹体经过刚玉球层后继续侵彻的深度均较小, 说明刚玉球层在阻止弹体侵彻方面起到了有效的作用。

(5) 试验中有两块刚玉球混凝土靶体的弹坑出现了偏斜的现象, 弹坑一个方向的坡度较缓, 其它方向的坡度较陡, 弹坑的平面形状呈椭圆形。说明刚玉球层的曲面特性对弹体的偏转起到了一定的作用, 但是这种现象是随机的, 与弹着点的位置有关。

(6) 混凝土保护层较薄的刚玉球混凝土靶体, 弹坑也较浅, 而且其深度均明显的小于普通钢筋混凝土靶体中的弹坑深度, 表明刚玉球层能够有效阻止弹的侵彻, 减小弹坑深度。

#### 参考文献:

- [1] Heierli W, Eiff A. 精确制导武器时代的防御[J]. 王承树, 译. 防护工程, 1994, (1): 52—57.  
Heierli W, Eiff A. The recovery in precisely controlled and guided weapon Age[J]. WANG Cheng-shu translated. Engineering Protection, 1994, (1): 52—57.
- [2] 李晓军, 张殿臣, 李清献. 国外常规武器破坏效应与工程防护技术研究[R]. 洛阳: 中国人民解放军总参工程兵科研三所, 2000.
- [3] 马晓青, 韩峰. 高速碰撞动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [4] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- [5] GJB10-89, 混凝土结构设计规范[S].

## An experimental study on anti-penetration characteristics of concretes shielded with single layer of tightly arrayed corundum spheres

ZHOU Bu-kui<sup>1</sup>, CHEN Xiang-xin<sup>2</sup>, TANG De-gao<sup>1</sup>, ZHOU Zao-sheng<sup>1</sup>, HE Hu-cheng<sup>1</sup>

(1. *Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China;*

2. *Engineering Design and Research Institute of the Second Artillery, Beijing 100011, China*)

**Abstract:** The concrete shielded with single layer of tightly arrayed corundum spheres is a new kind of materials. In order to investigate it's protection effects, the anti-penetration characteristics of concretes shielded with single layer of tightly arrayed corundum spheres and the normal concretes have been experimentally studied and compared with each other. The comparison indicates that the anti-penetration performance of this new material is much better than that of the normal concretes.

**Key words:** mechanics of explosion; anti-penetration characteristics; simulated test; corundum sphere concrete; penetration