

# 高压物理学报

## 不同材料弹体超声速侵彻钢筋混凝土靶的结构破坏对比实验

周忠彬 马田 赵永刚 李继东 周涛 李鹏

## Comparative Experiment on Structural Damage of Supersonic Projectiles with Different Metal Materials Penetrating into Reinforced Concrete Targets

ZHOU Zhongbin, MA Tian, ZHAO Yonggang, LI Jidong, ZHOU Tao, LI Peng

引用本文:

周忠彬, 马田, 赵永刚, 等. 不同材料弹体超声速侵彻钢筋混凝土靶的结构破坏对比实验[J]. 高压物理学报, 2020, 34(2):025101. DOI: 10.11858/gywllxb.20190841

ZHOU Zhongbin, MA Tian, ZHAO Yonggang, et al. Comparative Experiment on Structural Damage of Supersonic Projectiles with Different Metal Materials Penetrating into Reinforced Concrete Targets[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(2):025101. DOI: 10.11858/gywllxb.20190841

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywllxb.20190841>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 高速弹体对钢筋混凝土靶的侵彻/贯穿效应实验研究

Experimental Study of High-Speed Projectile Penetration/Perforation into Reinforced Concrete Targets  
高压物理学报. 2019, 33(5): 055101 <https://doi.org/10.11858/gywllxb.20180672>

#### 钢筋混凝土墙抗冲击性能的数值模拟分析

Numerical Simulation Analysis of Impact Resistance of Reinforced Concrete Wall  
高压物理学报. 2020, 34(1): 014201 <https://doi.org/10.11858/gywllxb.20190772>

#### 动能弹对混凝土靶侵彻深度的PSO-SVM预测

Prediction of Penetration Depth of Projectiles into Concrete Targets Based on PSO-SVM  
高压物理学报. 2018, 32(2): 025102 <https://doi.org/10.11858/gywllxb.20170577>

#### 锥头弹体攻角贯穿薄钢靶数值模拟

Numerical Simulation of Thin Steel Target Perforated by Conical-Nosed Projectile with Yaw Angle  
高压物理学报. 2019, 33(4): 045106 <https://doi.org/10.11858/gywllxb.20180691>

#### 分段PELE弹体冲击多层靶板数值分析

Numerical Analysis of Segmented PELE Penetrating Multi-layer Target  
高压物理学报. 2018, 32(5): 054101 <https://doi.org/10.11858/gywllxb.20180514>

DOI: 10.11858/gywlxb.20190841

# 不同材料弹体超声速侵彻钢筋混凝土靶的结构破坏对比实验

周忠彬<sup>1</sup>, 马田<sup>1</sup>, 赵永刚<sup>1</sup>, 李继东<sup>2</sup>, 周涛<sup>1</sup>, 李鹏<sup>2</sup>

(1. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065;

2. 火箭军驻西安地区第五军事代表室, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 设计了超声速钻地结构弹, 采用 203 mm 口径的火炮, 开展了 25 kg 量级弹体在 1 100~1 300 m/s 速度范围内侵彻钢筋混凝土靶的实验研究, 应用数值仿真对弹体侵彻钢筋混凝土靶的过程进行了模拟计算。基于实验和仿真结果, 对超声速侵彻条件下两种金属材料弹体的结构响应、质量损失等问题进行了分析。结果表明: 在超声速侵彻钢筋混凝土靶的过程中, 两种金属材料的弹体结构变形破坏形式主要为头部侵蚀和侧壁磨蚀, 头部侵蚀量的大小与弹体壳体材料有关, 高强度 G50 钢材料更适合用于 1 200 m/s 速度量级的超声速侵彻环境。对出现的“径缩”现象作了初步分析, 并对今后工程应用的结构弹体设计提出了指导意见。

**关键词:** 超声速; 侵彻; 钢筋混凝土靶; 结构破坏

**中图分类号:** O347.1; O385

**文献标识码:** A

目前在研或已经装备的钻地弹着靶速度较低(马赫数不大于 2.5), 侵彻能力有限<sup>[1]</sup>。为了对地面或地下深埋、加固的重要军事目标进行毁伤打击, 随着高超声速飞行器的快速发展, 超声速侵彻弹已经成为重要的发展方向, 各国都在开展超声速钻地弹的研究。超声速钻地弹具有侵彻能力强、技术要求高等特点。弹体以超声速侵彻混凝土等典型材料时, 弹和靶之间的碰撞力超过目前常用金属材料的强度极限, 弹体部分会发生侵蚀、破坏等现象。开展侵彻实验, 利用实验结果来分析弹和靶的相互作用过程, 是研究弹体侵彻混凝土靶的能力, 以及弹体可能产生的变形破坏、头部侵蚀等超声速侵彻现象最直观和最有效的方法。

国内外对中低速钻地弹对地介质的侵彻研究比较透彻, 对超声速条件下钻地弹的结构响应和侵彻机理也开展了一定的实验研究, 公开的研究报道有限。Lundegren<sup>[2]</sup>对超声速弹体侵彻混凝土介质进行了理论分析; Forrestal 等<sup>[3]</sup>进行了 64 g 量级的弹体在 400~1 400 m/s 速度范围内侵彻混凝土靶的实验; 陈小伟等<sup>[4]</sup>、梁斌等<sup>[5]</sup>、武海军等<sup>[6]</sup>均开展了 1 200 m/s 速度量级的弹体侵彻素混凝土靶的实验研究, 对超声速条件下弹体的结构响应和质量侵蚀进行了分析讨论; 何翔等<sup>[7]</sup>进行了 150 g 量级的实心弹丸在 800~1 470 m/s 速度范围内侵彻素混凝土靶的实验。上述研究主要针对实心弹丸开展, 对结构弹体的实验研究比较少, 且实验靶板多为素混凝土靶。为了研究结构弹体侵彻钢筋混凝土靶的结构响应规律, 王可慧等<sup>[8]</sup>进行了 0.15 kg 和 1.5 kg 的弹体在 1 030~1 630 m/s 速度范围内侵彻钢筋混凝土靶的实验研究, 对结构弹体的结构响应、质量损失、生存极限速度等进行了分析讨论。

本研究从实际的工程应用出发, 设计了 25 kg 量级的超声速钻地弹, 结合 203 mm 口径的火炮, 开展了弹体在 1 100~1 300 m/s 速度范围内侵彻钢筋混凝土靶的实验研究, 着重对比研究超声速侵彻条件下弹体的结构响应、质量损失和不同钢材料作为超声速钻地弹壳体的适应性能。

\* 收稿日期: 2019-10-08; 修回日期: 2019-11-04

通信作者: 周忠彬(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事战斗部总体设计及毁伤威力评估研究。

E-mail: zhouzb3002@126.com

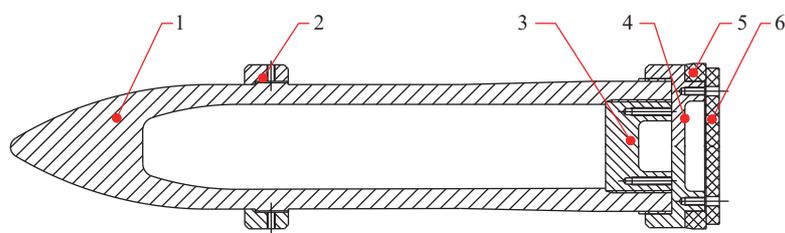
## 1 实验方案

### 1.1 加载技术

根据靶场火炮装置的发射能力,同时考虑到实验的经济性,选择203 mm口径的滑膛炮进行实验,弹体采用次口径设计。滑膛炮可将质量为25 kg量级的实验弹加速至1 100~1 300 m/s,在该速度条件下对弹体侵彻钢筋混凝土靶的机理进行研究,弹体飞行姿态稳定,无明显攻角。

### 1.2 实验弹体设计

大长径比的空心结构弹体在超声速侵彻下会出现结构弯曲、弹体破裂等现象。为了研究超声速侵彻条件下的弹体结构响应、质量侵蚀和不同钢材料作为壳体材料的适用性等问题,弹体壁厚比通常设计值有所增加,以增强弹体的抗弯曲能力。实验弹体的结构和实物如图1所示,弹体主要由壳体、后端盖、惰性填充物(硅橡胶)、前后定心环、闭气环、闭气环压环装置等组成。弹体头部形状系数 $R_{CRH}$ 设计值为3.5,弹体直径 $D$ 为150 mm,长径比 $L/D$ 为6.0,弹体总质量 $M$ 为25.3 kg。除前定心和后定心装置,弹体质量 $m$ 约为20.5 kg。前定心材料为调质后的45钢,后定心材料为35CrMnSiA钢,闭气环为尼龙材料,闭气环压环为35CrMnSiA钢,直径均为203 mm,定心环和闭气环装置与弹体通过螺纹组合,使弹体在炮膛内受力均匀,与炮膛内壁配合和谐,保证不漏气、不划伤炮膛。



1. Shell; 2. Front centering ring; 3. End cover; 4. Rear centering ring; 5. Nylon obturator ring; 6. Pressure ring.

(a) Schematic of the projectile



(b) Image of the projectile

图1 实验弹结构和实物图

Fig. 1 Schematic diagram and image of the projectile

钻地弹侵彻混凝土等硬目标过程中,弹体承受很高的冲击载荷作用,这对弹体材料和弹体结构强度提出了较高要求。壳体是弹体实现侵彻功能的主体承载构件,在侵彻过程中起到抵抗结构变形、保护内部装药的关键作用。弹体壳体应具有优良的力学性能,通常选择弹体壳体材料的主要依据是抗拉强度 $\sigma_b$ 、屈服强度 $\sigma_s$ 和断裂韧性 $K_{IC}$  3个参数。

目前工程上常用的高强度钢有30CrMnSiNi2A、35CrMnSiA、G50和30CrMnSiNi2MoVE,其典型的力学性能测试结果见表1。综合考虑钢的强度和韧性,实验弹体材料选用了高强度、高韧性的G50钢和30CrMnSiNi2MoVE钢。

### 1.3 靶标

实验靶标采用钢筋混凝土靶,设计强度为35~40 MPa。靶体为长方形,靶内钢筋直径为10 mm,每层钢筋网格大小为150 mm×150 mm,两层钢筋网格间距为200 mm。靶标实体如图2所示,靶面尺寸

为 1 500 mm×1 500 mm, 垂直厚度为 3 m, 靶标单轴抗压强度实测值为 39.2 MPa, 满足设计强度要求。

表 1 金属材料力学性能

Table 1 Mechanical properties of metal materials

Material	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\sigma_s/\text{MPa}$	$K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
30CrMnSiNi2A	7.80	1 690	1 300	86
35CrMnSiA	7.80	1 670	1 310	57
G50	7.76	1 740	1 440	105
30CrMnSiNi2MoVE	7.80	1 640	1 360	112

## 1.4 实验布局及测试要求

在 1 300 m/s 速度下, 根据 Young<sup>[9]</sup> 公式计算得到的侵彻深度为 4.0 m, 经数值仿真计算, 弹体穿透厚度为 3 m 的钢筋混凝土靶后, 剩余速度约为 280 m/s。为方便回收实验弹体, 将靶标紧靠回收山体放置。在靶标前 20 m 处布设天幕靶, 用于获取弹体着靶前的速度。203 mm 口径的火炮布设于靶标正前方约 40 m 处, 实验布局如图 3 所示。



图 2 实验钢筋混凝土靶

Fig. 2 Reinforced concrete targets used in the experiment



图 3 实验布局

Fig. 3 Experimental layout

## 2 实验结果及分析

### 2.1 弹体的飞行速度

弹体的壳体材料为 30CrMnSiNi2MoVE 钢和 G50 钢, 每种钢壳体的实验弹数量均为 2 发, 其中: 30CrMnSiNi2MoVE 钢壳体弹体的编号为 1#和 2#, G50 钢壳体弹体的编号为 3#和 4#。4 发实验均获得了有效的数据。实验中天幕靶测试系统测得 1#、2#、3#和 4#弹体的飞行速度分别为 1 259.18、1 307.31、1 305.47 和 1 309.46 m/s, 与预估弹速 1 100~1 300 m/s 基本一致。

### 2.2 弹体的侵彻能力

两种钢壳体的弹体以超声速侵彻厚度为 3 m 的钢筋混凝土靶时, 4 发弹体均穿透靶标, 随后继续钻入靶标后的山体中。钢筋混凝土靶结构都产生严重破坏, 沿厚度方向, 主体结构发生较严重的断裂, 如图 4 和图 5 所示。受到小口径弹体的高速撞击影响, 靶标正面产生一个较大的凹坑, 且靶面上产生由撞击点向四周扩展的数条裂纹, 裂纹基本上是均匀分布的。沿靶标厚度方向, 也可观察到多条裂纹发生了不同程度的扩展。

Young<sup>[9]</sup> 给出的侵彻深度经验公式为

$$D = KSN(M/A)^{0.7} \cdot (v - 30.5) \quad (1)$$

式中:  $D$  为侵彻深度(m);  $K$  为侵彻系数, 在钢筋混凝土条件下为  $1.8 \times 10^{-5}$ ;  $S$  为靶标的可侵彻性, 钢筋混凝土条件下为 0.9;  $N$  为弹体头部形状因子, 取经验值  $N = 0.863 \times [4R_{CRH}^2 / (4R_{CRH} - 1)]^{0.25}$ ;  $M/A$  为截面密度,  $M$  为弹体总质量(kg),  $A$  为横截面积( $\text{m}^2$ );  $v$  为碰靶速度(m/s)。

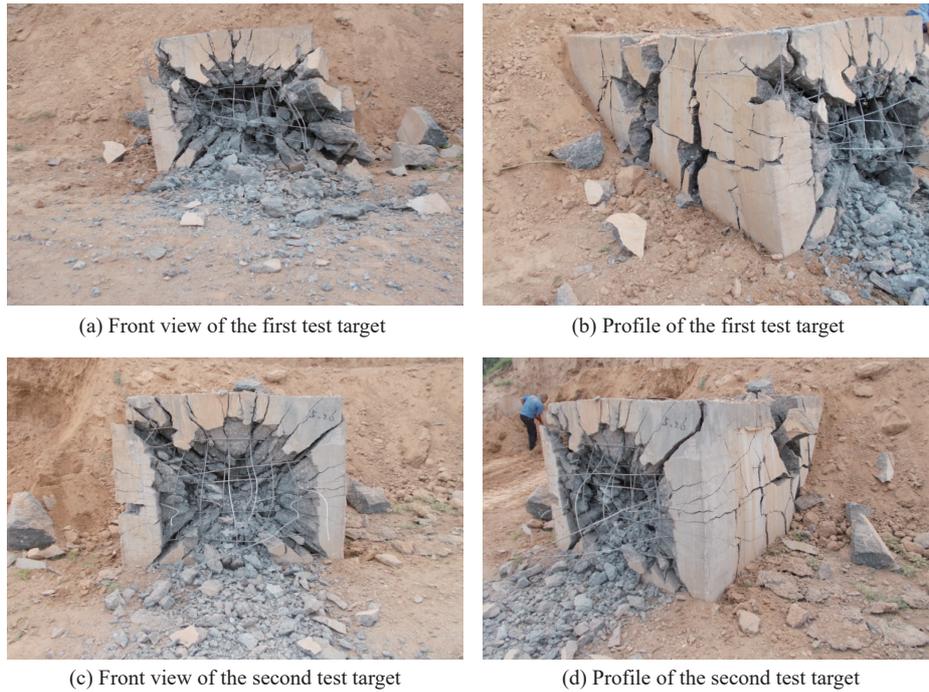


图 4 30CrMnSiNi2MoVE 钢材料实验弹侵彻后靶标的破坏结果

Fig. 4 Destruction results of targets penetrated by experimental projectile of 30CrMnSiNi2MoVE metal material

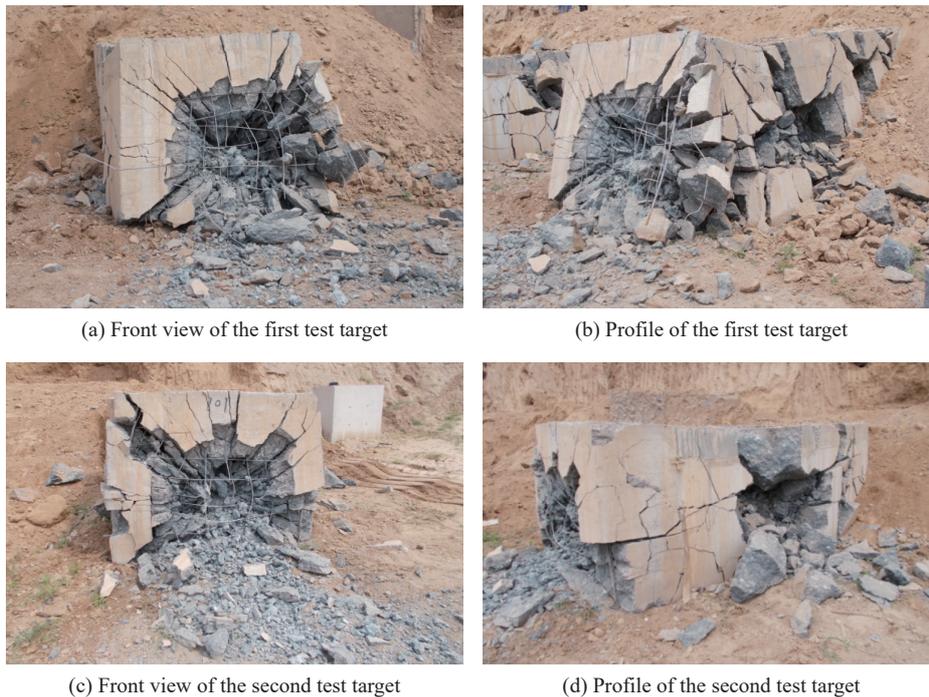


图 5 G50 钢材料实验弹侵彻后靶标的破坏结果

Fig. 5 Destruction results of targets penetrated by experimental projectile of G50 metal material

式(1)的适用范围为:弹体质量大于 2 kg,侵彻速度为 61~1 330 m/s。按照式(1),并依据弹体着靶速度对弹体的侵彻能力进行计算,得到侵彻深度为 3.87~4.03 m。为了保障弹体的可靠回收,出靶后的弹体余速未能通过高速摄影等手段获得。回收弹体时,测得弹体侵入回收山体约 5 m。回收山体的土质按黏土处理,利用式(1)进行计算,侵彻深度为 5 m 的黏土需要的初始速度约为 190 m/s,分析得到弹

体穿透靶标后的剩余速度约为 190 m/s。按式(1)计算,在 190 m/s 的侵彻速度条件下,弹体能够侵彻厚度为 0.5 m 的钢筋混凝土,即在 1 300 m/s 的侵彻速度条件下,设计的钻地弹能够侵彻厚度为 3.5 m 的钢筋混凝土,说明弹体的实际侵彻能力略低于 Young 公式预估的能力。

### 2.3 弹体结构破坏分析

30CrMnSiNi2MoVE 钢材料的弹体(1#和 2#)和 G50 钢材料的弹体(3#和 4#)在实验后均得到回收,实验前和实验后弹体外观对比如图 6 所示。可观察到:撞靶后实验弹的弹身仅头部发生不同程度的侵蚀破坏,头部由卵形变为接近平头的钝形;弹身主体结构完好,后端盖与壳体连接无破坏,弹体无明显弯曲变形现象。说明撞靶速度在 1 259~1 309 m/s 条件下,使用 30CrMnSiNi2MoVE 钢和 G50 钢两种材料的弹体都仅表现出头部侵蚀破坏和侧壁磨蚀等明显的响应特征。

弹体头部侵蚀是弹体超声速侵彻钢筋混凝土靶的一个明显特征,头部侵蚀改变了弹体头部形状,增大了侵彻阻力,在一定程度上影响了弹体的侵彻能力。这也解释了弹体的实际侵彻能力略低于 Young 公式预估能力的原因。

此外,观察 1#~4#回收弹体的前定心附近区域,发现有明显的“径缩”现象,如图 6 中红线标识所示。“径缩”区域容易产生应力集中,在壳体承受高强度撞击载荷作用时,该区域会首先达到强度极限,从而发生断裂破坏,继而影响弹体的结构强度。后续结合数值仿真,对这一现象的产生机理进行了初步分析。

分别对实验前后两种钢壳体的弹体质量  $m$ 、长度  $L$  和外径  $D$  进行了测量,其中实验前弹体质量不包含前定心和后定心装置,结果列于表 2。分析表 2 发现,实验弹体质量损失为 3.7%~6.9%,弹体长度变化为 4.4%~10.5%;弹体外径变化为 0.27%~0.54%。由此可知,超声速侵彻过程对弹体的侵蚀破坏比较严重,质量损失和弹体长度发生变化主要是由于头部遭受侵蚀破坏所致。进一步观察回收的弹体,可以看到弹体表面沿轴线方向的刻痕,弹体侧壁有一定程度的磨蚀,弹身外径较实验前有所减小,这是由于侵彻过程中弹壁和钢筋混凝土靶之间的撞击以及相对运动产生的剪力和摩擦所致。



图 6 实验前后弹体外观比较

Fig. 6 Appearances comparison of projectiles before and after experiment

表 2 实验回收弹体测量结果

Table 2 Measuring results of recycled projectile

Projectile No.	$m/\text{kg}$		$L/\text{mm}$		$D/\text{mm}$		Mass loss/%	Length change/%	Outside diameter change/%
	Before exp.	After exp.	Before exp.	After exp.	Before exp.	After exp.			
1#	20.53	19.16	900	814.6	150	149.2	6.7	10.5	0.54
2#	20.49	19.07	900	824.5	150	149.6	6.9	9.2	0.27
3#	20.51	19.77	900	851.7	150	149.5	3.7	5.7	0.33
4#	20.49	19.73	900	862.4	150	149.3	3.9	4.4	0.47

进一步观察回收弹体的头部,可见头部轮廓变化明显,头部顶端接近平头但也凹凸不平,如图 7 所示。因此对弹体头部的侵蚀机理分析如下:(1)弹体超声速侵彻钢筋混凝土靶体时,弹头和靶体之间发生剧烈作用,弹体头部区域受到的压力超过弹体材料的屈服强度,头部局部区域进入塑性流动状态;(2)弹头与靶体的接触面在撞击时产生高压,变形和摩擦会产生高温,由于热、力学环境超过材料强度

极限,因而引起头部局部剪切破坏;(3)侵彻前端的能量在头部表面产生局部的高温 and 高压,使得弹体头部表面材料出现热软化或熔化,弹体在沿轴向运动的过程中,与混凝土材料发生冲击和相互运动,在冲击压缩应力和温升软化的共同作用下,弹体头部在混凝土硬度较高的骨料切削作用下产生非均匀性的侵蚀破坏。



(a) Head of recycled projectile of 1# and 2#

(b) Head of recycled projectile of 3# and 4#

图7 回收弹体头部侵蚀破坏

Fig. 7 Erosion damage of the head of recycled projectile

综上,弹体头部的侵蚀效应是弹体表面材料与混凝土骨料相互作用的一个复杂过程,弹体初始速度越高,与骨料发生侵蚀作用的持续时间越长,质量损失越大。对比 30CrMnSiNi2MoVE 钢和 G50 钢两种高强度材料,在撞靶速度基本相同的条件下,G50 钢弹体头部质量损失相对较小,即钢壳体材料的抗拉强度和屈服强度越高,超声速侵彻条件下弹体抵抗硬骨料切削的能力越强,表现为弹体头部遭受侵蚀的程度较小。因此,强度高的 G50 钢更适合用于超声速侵彻弹的壳体材料。

## 2.4 弹靶作用结构响应分析

混凝土材料采用 HJC 模型,参数取值如下:密度为  $2240 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为  $14.86 \text{ GPa}$ ,抗压强度为  $40 \text{ MPa}$ ,锁变体积应变为  $0.04$ ,剪切屈服应力  $\tau_0 = (1 - \lambda/3)\sigma_0$ ,强度模量参数  $\lambda$  为  $0.61$ 。

弹体材料采用 Johnson-Cook 模型,弹体仿真模型如图 8 所示。弹体初始撞靶速度为  $1200 \text{ m/s}$ , $0^\circ$  着角和  $0^\circ$  攻角条件下对厚度为  $3 \text{ m}$  的钢筋混凝土靶的侵彻能力仿真结果如图 9 所示。计算结果表明,弹体超声速侵彻厚度较大的钢筋混凝土靶时,在迎弹面方向的靶体表面开坑,后续是和弹体外径比较接近的隧道区。弹体具备穿透厚度为  $3 \text{ m}$  的钢筋混凝土靶的能力,穿透靶标后剩余速度约为  $280 \text{ m/s}$ ,侵彻弹道发生一定程度的向下偏转,偏转角度约为  $0.5^\circ$ ,侵彻弹道较理想。穿透靶标后弹体呈低头姿态飞行,相较于初始姿态角  $0^\circ$ ,姿态偏转角度约为  $10^\circ$ 。超声速撞击钢筋混凝土靶过程中弹体承受的过载变化曲线如图 10 所示,当弹体头部撞击靶面时产生过载峰值,最大撞击过载约  $42498g$ 。

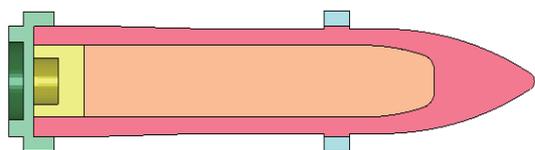


图8 弹体模型

Fig. 8 Simulation model of projectile

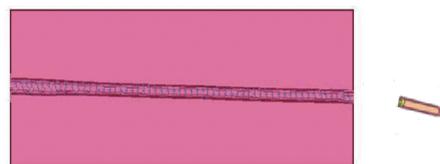


图9 侵彻能力计算结果

Fig. 9 Calculation result of penetration capability

两种钢材料壳体的塑性变形如图 11 所示。结果表明,G50 钢和 30CrMnSiNi2MoVE 钢材料的壳体头部都遭受到不同程度的侵蚀破坏,相较于弹体壳身,壳体头部顶端塑性应变区明显,且头部顶端出现明显的不对称破坏现象,头部顶端上侧侵蚀破坏更为严重。结合图 9 结果,分析认为,由于弹体头部侵

蚀破坏的不对称性, 导致头部受力不均匀, 从而影响了弹体侵彻厚靶标时的弹道稳定性, 弹道发生向下偏转。相较于 30CrMnSiNi2MoVE 钢壳体, G50 钢壳体头部侵蚀程度小, 质量损失小。从图 11 还可得到, 在壳体前定心附近区域也出现了较明显的塑性应变区, 与图 6 中回收弹体前定心附近区域出现明显的“径缩”实验现象相一致。因此对“径缩”现象的机理分析如下: (1) 前定心环外直径为 203 mm, 弹壳体外直径为 150 mm, 超声速条件下弹体头部首先撞击钢筋混凝土靶, 在开坑区前定心可能受到较小的作用力, 未发生破坏, 而在开坑区与隧道区的过渡区域, 前定心受到的撞击力增大, 继而发生破坏, 冲击波传入弹体, 前定心附近区域产生局部的塑性变形; (2) 为了与前定心环连接, 且保障壳体本体强度不受影响, 一般将壳体上的连接螺纹设计为 M155×2, 稍大于壳体外径 150 mm, 因此在隧道区, 该连接螺纹处壳体与钢筋混凝土靶产生相互摩擦和撞击等作用, 撞击冲击波持续传入弹体, 使得连接螺纹附近区域产生塑性变形, 且塑性变形程度随着连接螺纹处壳体与靶标持续作用时间的增长而增大, 最终形成明显的局部“径缩”现象。

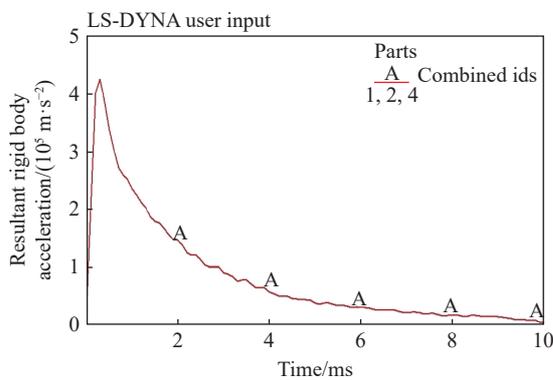


图 10 过载随时间变化曲线

Fig. 10 Overload-time curve

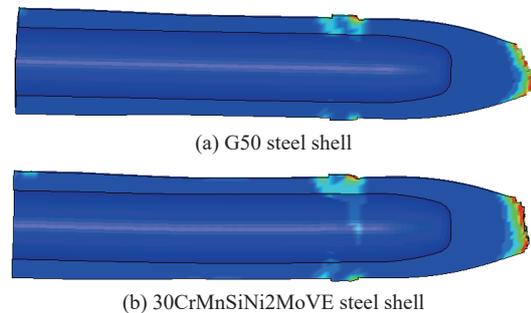


图 11 壳体塑性变形

Fig. 11 Plastic deformation of projectile's body

### 3 结 论

从工程应用性出发, 设计了超声速钻地结构弹, 开展了 25 kg 量级弹体在 1 100~1 300 m/s 速度条件下侵彻钢筋混凝土靶的实验, 着重研究了弹体超声速侵彻钢筋混凝土靶的结构变形和质量损失, 并结合数值仿真对弹体侵彻钢筋混凝土靶过程中的动态响应进行了初步分析, 与实验结果进行了对比讨论, 得到了如下主要结论。

(1) 采用合适的次口径发射技术, 利用口径为 203 mm 的滑膛炮能够将 25 kg 量级侵彻弹体的发射速度提高到 1 259~1 309 m/s, 侵彻弹体姿态稳定, 无明显攻角。

(2) 实验回收的弹体无明显弯曲变形和主体结构破坏, 说明本研究中设计的结构弹能够承受 1 259~1 309 m/s 速度下的正侵彻过载。在主体结构基本完好的情况下, 弹体高速侵彻钢筋混凝土靶的过程中主要产生以头部侵蚀破坏和侧壁磨蚀为代表的结构变形破坏模式, 头部产生明显的质量损失。而且由于头部破坏的不均匀性和不对称性, 侵彻弹道会发生一定程度的偏转。由于头部钝化增大了侵彻阻力, 也影响了弹体的侵彻深度。

(3) 对比 30CrMnSiNi2MoVE 钢和 G50 钢壳体弹体的破坏程度, 强度高的 G50 钢更适合用于超声速侵彻弹的壳体材料。

(4) 次口径发射条件下, 需合理设计定心结构, 特别是前定心环结构, 在满足火炮发射强度的前提下, 应考虑在前定心环设计应力槽结构, 使弹体在撞击靶标时前定心环及时发生解体性破坏, 避免产生明显的“径缩”现象。

## 参考文献:

- [1] 刘永远, 姜正平, 张进. 钻地弹及其发展趋势 [J]. *飞航导弹*, 2006(3): 34–37.  
LIU Y Y, JIANG Z P, ZHANG J. The earth penetrators and their development trends [J]. *Winged Missiles Journal*, 2006(3): 34–37.
- [2] LUNDEGREN R G. High-velocity penetrators: SAND94-2724C [R]. Albuquerque, New Mexico, USA: Sandia National Laboratories, 1994.
- [3] FORRESTAL M J, FREW D J, HANCHAK S J, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, 18(5): 465–476.
- [4] CHEN X W, LI Q M. Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(6): 619–637.
- [5] 梁斌, 陈小伟, 姬永强, 等. 先进钻地弹概念弹的次口径高速深侵彻实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(1): 1–9.  
LIANG B, CHEN X W, JI Y Q, et al. Experimental study on deep penetration of reduced-scale advanced earth penetrating weapon [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(1): 1–9.
- [6] 武海军, 黄风雷, 王一楠, 等. 高速侵彻混凝土弹体头部侵蚀终点效应实验研究 [J]. *兵工学报*, 2012, 33(1): 48–55.  
WU H J, HUANG F L, WANG Y N, et al. Experimental investigation on projectile nose eroding effect of high-velocity penetration into concrete [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(1): 48–55.
- [7] 何翔, 徐翔云, 孙桂娟, 等. 弹体高速侵彻混凝土的效应实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(1): 1–6.  
HE X, XU X Y, SUN G J, et al. Experimental investigation on projectiles high-velocity penetration into concrete targets [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(1): 1–6.
- [8] 王可慧, 耿宝刚, 初哲, 等. 弹体高速侵彻钢筋混凝土靶的结构变形及质量损失的实验研究 [J]. *高压物理学报*, 2014, 28(1): 61–68.  
WANG K H, GENG B G, CHU Z, et al. Experimental studies on structural response and mass loss of high-velocity projectiles penetrating into reinforced concrete targets [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(1): 61–68.
- [9] YOUNG C W. Penetration equations: SAND97-2426 [R]. Albuquerque, New Mexico, USA: Sandia National Laboratories, 1997.

## Comparative Experiment on Structural Damage of Supersonic Projectiles with Different Metal Materials Penetrating into Reinforced Concrete Targets

ZHOU Zhongbin<sup>1</sup>, MA Tian<sup>1</sup>, ZHAO Yonggang<sup>1</sup>, LI Jidong<sup>2</sup>, ZHOU Tao<sup>1</sup>, LI Peng<sup>2</sup>

(1. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China;

2. Fifth Military Representative Office of Rocket Force in Xi'an, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

**Abstract:** A supersonic earth-penetrating projectile is designed where two different metal materials are used for the projectile's body. Experiments of projectiles with mass of 25 kg and impact velocity ranging from 1 100 m/s to 1 300 m/s are implemented by a cannon with caliber of 203 mm. The process of projectile penetrating into the reinforced concrete target is simulated based on a numerical method. Based on the experimental and simulation results, the projectile's structural response and mass loss in supersonic condition were investigated. The results show that the two damage modes of projectile with different metal materials in supersonic penetration condition are head eroding and wall friction corrosion. The degree of damage and the head erosion amount are related to the metal materials of projectiles. The G50 metal with high-strength is appropriate to be used for the projectile body in supersonic penetration with impact velocity of 1 200 m/s. The phenomenon of diameter shrinkage is analyzed, and some suggestions are put forward for the design of projectile body structure in future engineering application.

**Keywords:** supersonic; penetration; reinforced concrete target; structure damage