

金属花岗岩复合材料抗高速弹体侵彻试验研究

徐翔云^{1,2}, 李林², 杨建超², 孔德峰², 高杰²

(1. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2. 总参工程兵科研三所, 河南, 洛阳 471023)

摘要: 针对高速动能弹的侵彻现象, 对高速动能弹的遮弹材料金属花岗岩复合材料(MGCM)开展了试验研究. 研究表明: MGCM 具有抗拉、抗压、抗剪强度高、冲击韧性高等优点, 具有较好的抗弹体高速侵彻能力. 其高强、高冲击韧性、内部极不均匀等特性使弹体在侵彻过程中受力环境极为恶劣, 容易发生磨蚀、弯曲、破碎、解体、侵彻轨迹偏转等现象, 是较为理想的遮弹材料.

关键词: 高速侵彻; 金属花岗岩遮弹层; 质量侵蚀; 侵彻

中图分类号: TU 452; O 241 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0645(2015)增刊 2-0200-04

DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2015.增刊 2.048

The Research of Metal-Granite Composite Material Resisting High-Speed Penetration

XU Xiang-yun^{1,2}, LI Lin², YANG Jian-chao², KONG De-feng², GAO Jie²

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. The Third Research Institute of Engineering Corps, General Staff of PLA, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: Metal-granite composite material can overcome inherent defects of traditional concrete and has good mechanical properties, such as resistance to high pressure, tension, shearing strength, impact toughness. For studying the abilities of resisting high-speed penetration, a series hypervelocity penetration experiments were conducted. Experimental results indicate that metal-granite composite material has perfect ability to resist hypervelocity penetration. The high impact toughness and interior asymmetry characteristics can make mass loss, bend, fragmentation, disaggregation and penetration track deflection etc which occur in penetration. Metal-granite composite material can be considered as perfect bursting layer.

Key words: hypervelocity penetration; metal-granite composite material; mass loss; penetration

随着常规武器特别是精确制导武器在现代战争中的成功应用, 防护工程受到的威胁越来越大. 针对高速动能弹的侵彻现象, 对高速动能弹的遮弹材料即金属花岗岩复合材料(metal-granite composite material, MGCM)开展了试验研究. 研究表明: MGCM 具有抗拉、抗压、抗剪强度、冲击韧性高等优点, 具有较好的抗弹体高速侵彻能力. 其高强、高冲击韧性、内部极不均匀等特性使弹体在侵彻过程中受力环境极为恶劣, 容易发生磨蚀、弯曲、破碎、解

体、侵彻轨迹偏转等现象, 是较为理想的遮弹材料.

1 MGCM 研制

1.1 MGCM 研制

目前, 普通混凝土是由水泥、砂子和石子 3 种材料及水按一定配比拌合, 经过凝固硬化后做成的人工石材. 由于其具有造价低廉、材料来源广泛、易施工、易成型、并且抗压强度高优点, 在土木工程中被大量应用, 但不足之处是其抗拉强度极低, 脆性

收稿日期: 2015-03-20

作者简介: 徐翔云(1983—), 男, 博士生, E-mail: plaxxy@163.com.

大,难以单独承载.从提高混凝土强度、硬度和韧性的思路出发,采用熔融的金属液代替水泥砂浆作为粘结材料,采用硬度更高的花岗岩作为骨料通过高温浇筑的方法得到 MGCM.

1.2 MGCM 静力学性能

作为工程遮弹材料,材料的抗压强度和弯曲强度是非常重要的力学性能指标.目前,绝大多数的工程遮弹材料都是水泥基材料,为方便与这类材料进行性能比较,MGCM 的抗压强度和弯曲强度等静态力学性能试验拟采用水泥材料的测试方法.文中 MGCM 抗压试件尺寸采用 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,抗折试件拟采用 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$.抗压强度试验和弯曲强度试验都在 500T 静载试验机上开展.试验测得 MGCM 的平均抗压强度为 260 MPa,平均抗折强度为 140 MPa.

2 试验设计

2.1 试验方法

试验由发射系统、测试系统以及回收装置 3 个部分组成.以 $\Phi 35\text{ mm}$ 高速弹道炮作为发射设备,采用光电测速仪测量弹体速度,利用高速摄像机和 X 光机拍摄弹体飞行姿态.试验现场布置如图 1 所示.



图 1 $\Phi 35\text{ mm}$ 弹道炮试验现场布置
Fig. 1 Test arrangement of $\Phi 35\text{ Gun}$

2.2 试验弹体

试验弹体直径为 14 mm,弹体长径比为 10,头部长径比为 2,表 1 为弹体材料的主要物理力学参数,采用 $\Phi 35\text{ mm}$ 弹道炮次口径发射,试验所使用的次口径装置为混合型次口径装置的一种,采用分离式弹体和弹托结构.试验前弹体如图 2 所示.

表 1 弹体材料的主要物理力学参数

Tab. 1 Parameters of physical mechanics of projectile materials

材料名称	弹体直径/mm	弹体质量/g	弹体材料屈服强度/MPa	弹体材料硬度 HRC
60Si ₂ Mn	14	155	1 200	40



图 2 试验弹体
Fig. 2 Test projectiles

2.3 试验靶体

$\Phi 35\text{ mm}$ 炮试验 MGCM 遮弹层靶板尺寸为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 46\text{ mm}$.试验时将靶板铺设于基体混凝土表面.基体混凝土直径为 1 000 mm,强度均为 C60,外围采用 5 mm 厚钢板箍紧,靶径与弹径之比远大于 30,可以忽略靶体边界效应地影响,同时又考虑了弹体在靶中侵彻弹道地变化,防止从侧边飞出,保证试验安全性.混凝土基体靶体长度根据弹体侵彻能力确定为 0.6~1.5 m 不等,确保靶体背面不出现震塌,图 3、图 4 分别为靶板的平面图和剖面图.



图 3 靶板平面图(单位:mm)
Fig. 3 Lechnography of target (unit: mm)

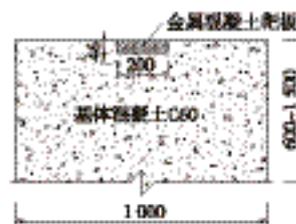


图 4 靶板剖面图(单位:mm)
Fig. 4 Section plan of target (unit: mm)

3 试验结果分析

3.1 宏观破坏情况

侵彻试验共进行了 7 炮,侵彻速度为 889~1 440 m/s,侵彻试验结果如表 2 所示.需要说明的是第 6、7 炮的靶板采用了两块 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 46\text{ mm}$ 的 MGCM 复合遮弹层叠加而成,这就意味着遮弹层的总厚度为 92 mm.

图 5(a)为第 3 炮靶板破坏情况,图 5(b)为第 5 炮靶板破坏情况图片,从图中可以看出,速度弹体速度的增加,靶板的破坏变的越来越严重.但主要破坏集中在 MGCM 遮弹板上,对基体混凝土并不明显.图 5(c)为文献[1]中弹体速度 1 450 m/s 时的靶板破坏情况图片,从图中可以看出,与同种速度弹体侵彻岩石靶板相比,MGCM 靶板破坏面积要小的多(文献[1]中所用的试验弹体和本文完全相同),同时在 MGCM 遮弹板上能明显看到弹体融化留下的痕迹.

表 2 侵彻试验结果

Tab. 2 Penetration data

炮次	弹径/mm	弹重/g	弹体材料	发射后 弹重/g	质量损 失率/%	弹体着速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	混凝土靶 板强度	侵彻深 度/mm
1	14	155.2	60Si ₂ Mn	150.3	3.16	889	C60	3.57
2	14	155.2	60Si ₂ Mn	149.5	3.67	1 133	C60	3.57
3	14	155.8	60Si ₂ Mn	63.0	59.76	1 313	C60	26.07
4	14	155.7	60Si ₂ Mn	106.5	31.60	1 323	C60	26.43
5	14	155.2	60Si ₂ Mn	101.8	34.40	1 440	C60	30.00
6 *	14	155.3	60Si ₂ Mn	56.2	63.81	1 325	C60	19.64
7 *	14	155.3	60Si ₂ Mn	31.2	79.91	1 440	C60	11.07

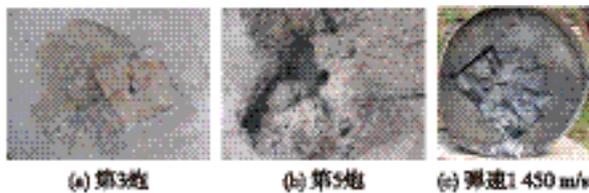


图 5 试验后靶板破坏情况

Fig. 5 Target after penetration by projectile

3.2 侵彻深度分析

图 6 为同种弹体高速侵彻 45 MPa 混凝土、120 MPa 岩石和 MGCM 遮弹层量纲一侵彻深度对比图,混凝土和岩石的试验数据分别来源于文献 [1-2]. 为了数据对比的合理性,图中的 MGCM 遮弹层试验数据仅使用了前 5 炮.

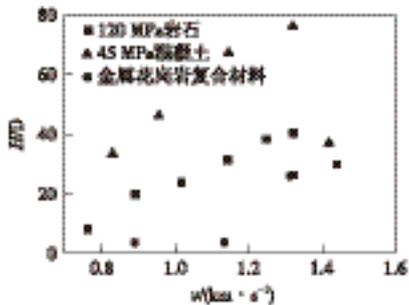


图 6 侵彻深度

Fig. 6 Penetration deep

图中可以明显发现 MGCM 遮弹层具有更强的抗弹体侵彻能力,需要特别说明的是第 6、7 炮采用了双层 MGCM 遮弹板厚,其抗侵彻能力有了进一步的提高,侵彻深度明显降低,在工程应用时可以根据实际需要来设计 MGCM 遮弹层的厚度.

3.3 弹体质量侵蚀

图 7 为同种弹体高速侵彻 45 MPa 混凝土、120 MPa 岩石和 MGCM 遮弹层靶体后的质量损失率的比较,从图中可以看出,随着弹体侵彻速度的增加,弹体的质量损失率都在不断增加.但是对于同速度的弹体而言,弹体高速侵彻(速度 $> 1\ 200\ \text{m/s}$)

MGCM 遮弹层时的质量损失要远大于侵彻岩石和普通混凝土时的质量损失,但是在弹体速度较低时(速度 $< 1\ 200\ \text{m/s}$),由于弹体的侵彻 MGCM 遮弹层深度较小,弹体在靶板里运动历程较短导致弹体的质量侵蚀并不明显.

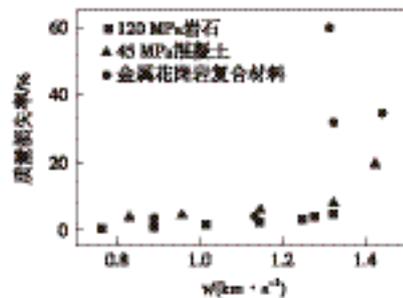


图 7 弹体质量侵蚀

Fig. 7 Projectile mass loss

在研究弹体高速侵彻混凝土问题时,一般认为弹体质量损失主要来源于头部表面材料熔化脱落和靶体骨料等对它的切削.假设弹体质量损失全部来源于头部表面材料熔化,弹靶摩擦力所作功全部转化为热并作用于弹体,认为质量损失与弹体壳体段横截面积、头部纵向截面积、瞬时侵彻深度,靶体剪切强度成正比;与弹体材料熔化热成反比.陈小伟等^[1]结合大量文献进一步提出了表征弹体质量损失率参数 C 与靶体无约束抗压强度 f_c ,密度 ρ_t ,弹体侵彻初速度 V_s ,熔化热 Q ,弹头初始 CRH 值 ψ ,骨料莫氏硬度 H 有关,即

$$C = C(V_s, f_c, \rho_t, Q, \psi, H). \quad (2)$$

6 个变量之中, V_s 为自变量,其余为参变量.由本文试验数据进行了进一步的分析,提出了各参变量按对 C 影响程度有如下排列: H, ψ, f_c, ρ_t . 即 H 对 C 影响最大,其次为弹体头部 CRH 值,其次为靶体无约束抗压强度, C 随这 3 个参变量增加而增加;而靶体密度对 C 影响要小,且由于靶体主要采用的是混凝土类材料,其密度变化不大,目前对靶体密度

带来的影响并没有开展详细的分析.

3.4 偏航效果分析

MGCM 遮弹层内部结构如图 8 所示,当忽略内部花岗岩时,相当于由金属制作的中空网格;当考虑内部花岗岩时,相当于金属骨架内部充满花岗岩的网格结构. 花岗岩四周均受到金属约束,强度也将大大提高. 由于金属和花岗岩两种材料力学性能的差异,使弹体在侵彻过程中极易发生头部非对称磨蚀,弹体受力环境恶劣,更容易发生破碎、断裂等现象.



图 8 MGCM 遮弹层内部结构
Fig. 8 MGCM internal structure

4 结 论

针对高速动能弹的侵彻现象,对高速动能弹的遮弹材料 MGCM,进行了静力学试验. 开展了高速动能弹侵彻试验,验证了 MGCM 遮弹层抗弹体高速侵彻效果. 试验结果表明, MGCM 遮弹层具有较好的抗侵彻性能. 该材料利用其高强、高韧、内部不均匀、较大的摩擦力以及较高的摩擦热使弹体在高速侵彻过程中质量磨蚀严重、弹体头部非对称磨蚀、头部形状改变而致使偏离侵彻轨迹、弹体侵彻过程中受力恶劣而致使结构变形甚至断裂等,通过这些综合效能以达到阻滞弹体侵彻诱使弹体偏转从而降

低弹体侵彻深度之目的,是较为理想的遮弹材料.

参考文献:

- [1] 沈俊,徐翔云,何翔,等. 弹体高速侵彻岩石效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010,29:4207-4212.
Shen Jun, Xu Xiangyun, He Xiang, et al. Experimental study of effect of rock target penetrated by high-velocity projectiles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29:4207-4212. (in Chinese)
- [2] 何翔,徐翔云,孙桂娟,等. 弹体高速侵彻混凝土效应试验研究[J]. 爆炸与冲击,2010,30(1):1-6.
He Xiang, Xu Xiangyun, Sun Guijuan, et al. Experimental investigation into projectiles' high-velocity penetration into concrete targets [J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(1):1-6. (in Chinese)
- [3] 陈小伟,杨世全,何丽灵. 动能侵彻弹的质量侵蚀模型分析[J]. 力学学报,2009,41(5):739-747.
Chen Xiaowei, Yang Shiquan, He Liling. Modeling on mass abrasion of kinetic energy penetrator[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009, 41(5):739-747. (in Chinese)
- [4] 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试验研究[J]. 爆炸与冲击,2008,28(1):1-9.
Liang Bin, Chen Xiaowei, Ji Yongqiang, et al. Experimental study on deep penetration of reduced-scale advanced earth penetrating weapon[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(1):1-9. (in Chinese)
- [5] Silling S A, Forrestal M J. Mass loss from abrasion on ogive-nose steel projectiles that penetrate concrete targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007,34:1814-1820.

(责任编辑:孙竹凤)