

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202602009

弹体对不同围压混凝土靶的侵彻性能研究

蓝贤亮¹, 汪维^{2*}, 薛建锋¹, 原黎明¹, 许红浩¹, 万斯奇¹, 孙雅兰¹, 马庆跃¹

(1. 中航工业洪都660所, 南昌 330024;

2. 宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室, 宁波 315211)

摘要: 在工程实际中, 连续介质混凝土之间通常会相互作用产生挤压, 导致其抗压强度和抗侵彻性能显著增加。为研究弹体对不同围压混凝土的侵彻性能, 利用LS-DYNA有限元软件开展了0~18 MPa围压下弹体垂直侵彻C40混凝土靶的仿真计算, 得到不同围压混凝土靶的受力云图和破坏云图, 并提取速度、侵彻深度和加速度时程曲线, 建立了侵彻深度与围压之间的函数关系。同时, 开展初速为450 m/s条件下弹体对不同围压C40混凝土靶的侵彻试验, 弹体侵彻深度仿真结果与试验结果误差小于4%, 从而验证了仿真模型的正确性。仿真和试验结果表明: 当在混凝土靶四周施加围压时, 混凝土靶的破坏区域明显减少, 且围压越高, 混凝土抗侵彻能力越强; 当无围压作用时, 侵彻过程中弹体动能耗散较为均匀, 当施加围压时, 动能的耗散主要集中在侵彻开始阶段。

关键词: 侵彻力学; 混凝土; 抗侵彻性能; 数值仿真; 侵彻试验

中图分类号: O385、TJ413.2

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2026)02-0094-08



听语音
与作者互动
聊科研

混凝土因其具有密度低、制备简单、成本低廉等特性^[1-3], 在防护工程领域得到广泛应用。随着高端武器的相继出现, 高强混凝土、超高强混凝土、重混凝土等作为人防工程中必不可少的材料, 得到众多科研人员的重视, 相关研究层出不穷^[4]。张雪岩等^[5]研究发现, 随着强度的提高, 混凝土脆性变大, 砂浆对弹体的侵蚀作用也随之增强。陈克等^[6]发现骨料含量越高, 子弹穿透混凝土靶的剩余速度越低, 混凝土抗侵彻性能越好。彭永等^[7]发现侵彻深度存在尺寸效应, 随着弹体尺寸的增加, 无量纲侵彻深度增大。薛建锋等^[8]开展了2种类型混凝土靶的正侵彻试验, 结果表明, 钢筋混凝土的抗侵彻能力更强, 抗二次打击的能力更优。邓勇军等^[9]研究表明, 环向约束效应可提高钢筋混凝土空腔表面的径向应力, 且该应力随配筋率的增加而增大。在对施加约束混凝土靶的抗侵

彻问题上, 宋殿义和蒙朝美等^[10-11]的试验结果表明, 对混凝土四周施加约束能够显著增加其抗侵彻特性, 且正六边形钢管约束混凝土靶的抗侵彻性能优于圆形和正方形靶。贵雪燕^[12]开展了不同围压条件下的常规三轴强度试验, 结果表明, 混凝土圆柱的抗压强度和塑性变形性能伴随着围压的增加而逐步增大, 破坏形态由脆性破坏逐步变化为塑性破坏。高欢等^[13]利用RFPA模拟了混凝土-花岗岩在不同围压下的破坏过程, 揭示了其破坏机制和整体裂纹扩展过程。刘杉等^[14]研究了围压作用下碱激发混凝土的本构模型、力学性能、破坏模式和破坏准则, 结果表明, 随着围压的增加, 其破坏模式由脆性转变为伪延性, 且强度越高, 三轴压缩强度提升越明显。雷光宇等^[15]通过计算不同围压下混凝土的破坏强度和位移, 获取了不同围压水平下混凝土的破坏形态。吴雪等^[16]

收稿日期: 2025-06-05

修回日期: 2025-08-14

录用日期: 2025-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(11972201)

第一作者: 蓝贤亮(1998—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事终点效应和目标毁伤评估研究。E-mail: 2439985068@qq.com

***通信作者:** 汪维(1983—), 男, 教授, 主要从事目标毁伤评估研究。E-mail: wangwei7@nbu.edu.cn

引用格式: 蓝贤亮, 汪维, 薛建锋, 等. 弹体对不同围压混凝土靶的侵彻性能研究[J]. 火箭军工程大学学报, 2026, 40(2): 94-101.
LAN Xianliang, WANG Wei, XUE Jianfeng, et al. Study on the penetration performance of projectiles into concrete target under different confining pressures[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40(2): 94-101.

把研究目光延伸到陶瓷领域,发现破碎的陶瓷仍具有明显的强度,且随着受压压力的增加而提高,研究表明,施加约束而使陶瓷内部存有预应力可显著提高其抗弹性能,且预应力与抗侵彻性能之间存在一个最佳的匹配关系。Meyer等^[17]研究了陶瓷在钛合金钢环约束下侵彻过程中裂纹的形成及扩展过程。Chi等^[18]研究了在不同方向上施加预应力后陶瓷的抗侵彻性能。

随着钻地武器的侵彻深度越来越大以及弹体作用的应力条件日趋复杂,为探究地应力条件下围压作用对弹体侵彻混凝土的弹道极限、侵彻深度以及破坏情况等的影响规律,本文利用LS-DYNA有限元软件建立弹体侵彻半无限厚混凝土靶的仿真模型,通过开展弹体冲击不同围压下混凝土的侵彻仿真计算,系统分析了不同围压作用下弹体侵彻剩余速度、侵彻深度和侵彻过载的变化规律,并通过试验验证了围压混凝土抗对侵彻性能的影响规律,为各种地应力条件下弹体的运动规律和侵彻效应研究提供参考。

1 有限元模型

1.1 几何建模与网格划分

设置弹体直径为20 mm、长度为200 mm,头部长度为30 mm、曲率半径为60 mm,混凝土靶尺寸为400 mm×200 mm×800 mm。为了节约计算成本,选取二分之一模型,同时参考文献[19],在LS-PrePost软件中对混凝土靶施加围压,其有限元模型如图1所示。

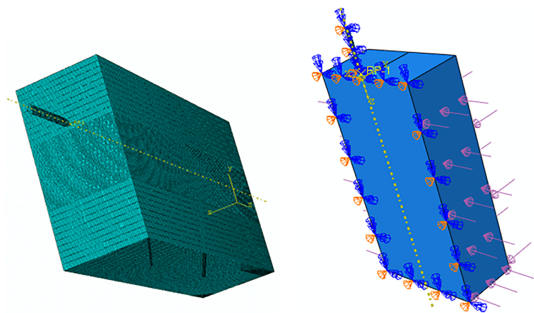


图1 弹体及混凝土靶有限元模型
Fig. 1 Finite element models of projectile and concrete target

弹体和靶体均采用八节点六面体三维实体单元网格(3D-Solid164),为了提升计算效率,两者网格划分尺寸大小相近。其中,弹体网格划分方式采用扫略式,靶体网格划分方式采用映射式,在4倍弹体半径区域内对网格进行局部加密处理。

仿真计算中,弹体和靶体接触采用侵蚀面面接触,参考文献[20],静动摩擦系数分别设置为0.15和0.10。通过关键字*MAT-ADD-EROSION来控制混凝土材料失效网格的删除,定义最大失效主应变为0.4。围压施加后的应力初始化过程采用Dy-nain文件进行计算,其主要步骤如下:

- 1) 利用关键字*Define_Curve定义载荷曲线;
- 2) 在所需施加围压的平面设置segment集合;
- 3) 将载荷曲线通过关键字*Load_Segment_Set施加到segment集合;
- 4) 利用定义好的*Interface_Springback_Ls-dyna关键字,求解输出Dynain文件。

1.2 材料参数

根据以往的侵彻试验结果,当弹体速度低于1 000 m/s时其强度满足刚性条件,因此采用刚性材料模型MAT_RIGID,弹体密度为7.83 g/cm³,弹性模量为207 GPa,泊松比为0.3。混凝土采用HJC本构模型,该模型充分考虑了混凝土材料应变率效应、静水压力和材料损伤的影响,适用于描述混凝土的破碎、损伤及层裂等动力学行为。混凝土材料模型参数设置参考文献[20],具体如表1所示。其中, ρ 为混凝土材料的密度; G 为剪切模量; f_c 为无约束时混凝土的抗压强度; A 和 B 分别为内聚力强度和压力强化系数; C 为应变率敏感系数; N 为压力硬化系数; D_1 和 D_2 为损伤参数; T 为最大拉伸强度; $\epsilon_{\min}$ 为最小塑性应变; P_1 为材料压实点的压力。

表1 混凝土材料模型参数
Table 1 Model parameters of concrete

$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	G/GPa	f_c/GPa	A	B	D_1
2.4	14.86	0.04	0.79	1.6	0.04
D_2	$\epsilon_{\min}$	P_1/GPa	N	T/MPa	C
1	0.01	0.8	0.61	4	0.007

2 不同围压下混凝土靶的仿真计算

为分析不同围压作用下混凝土的抗侵彻性能,本文模拟了弹体在450 m/s速度下冲击围压分别为0、5、10、18 MPa的C40混凝土全过程。通过提取不同围压下混凝土靶的受力云图和侵彻过程云图,以及弹体侵彻深度、加速度和速度时程曲线,系统总结了不同围压下混凝土靶的侵彻响应规律。

2.1 混凝土受力分析

以施加10 MPa围压后的混凝土靶为例,其受

力云图如图 2 所示。

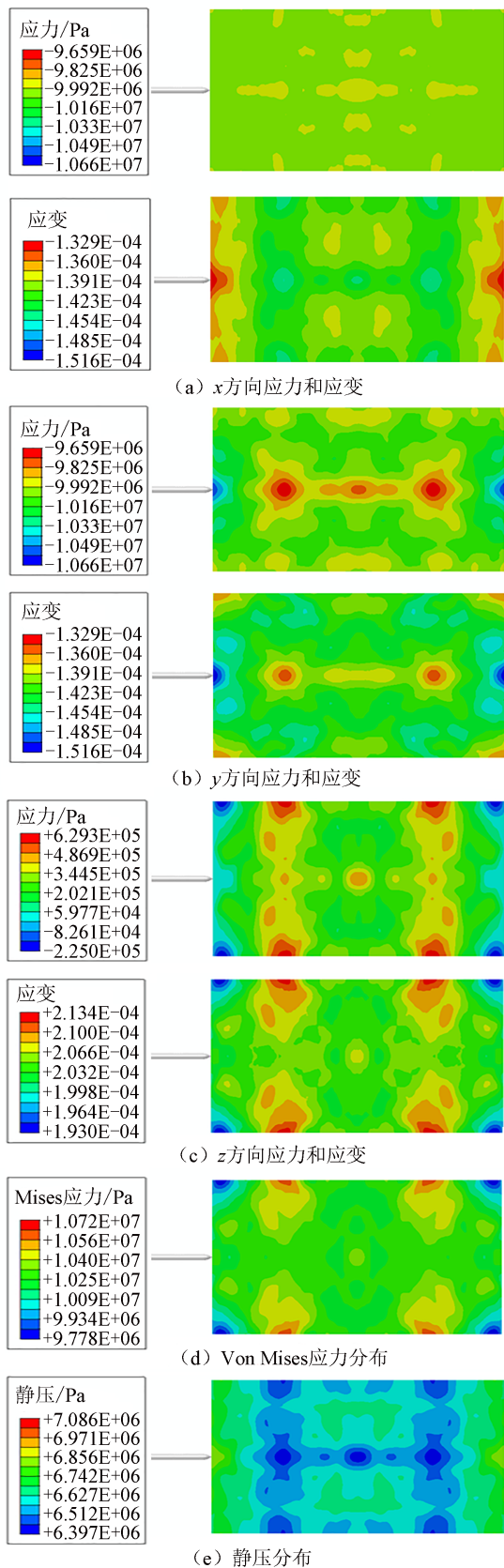


图 2 10 MPa 围压下混凝土靶的受力云图

Fig. 2 Stress cloud maps of concrete target under confining pressure of 10 MPa

由图 2 可知, x 、 y 方向应力均接近 10 MPa 且为负值受压状态, z 方向应力较小, 这与模型外部受压状态相吻合, 且各方向应力及幅值与其应变关系相对应。根据 Von Mises 应力、静压计算可知, 其与三向应力关系一致。

2.2 弹体侵彻过程

无围压条件下混凝土靶迎弹面损伤区域可近似为一个圆形区域。根据低速侵彻混凝土靶的损伤研究成果, 损伤区域由空腔区、塑性区、断裂区、弹性区及未扰动区组成^[21], 各分区示意如图 3 所示。空腔区为弹体侵彻过程中混凝土网格失效删除的部分; 塑性区表现为各个方向均发生破坏; 断裂区表现为环向裂纹, 但不形成塌孔; 弹性区表现为在受到应力波作用下, 混凝土材料仍保持在弹性阶段; 未扰动区在实际中所占面积较少。其中, 塑性区的边界从 $r_1 = Vt$ 到 $r_2 = ct$, 断裂区的边界从 $r_2 = ct$ 到 $r_3 = c_1t$, 弹性区的边界从 $r_3 = c_1t$ 到 $r_4 = c_d t$ 。其中, r 为欧拉球坐标系中的径向坐标; t 为时间; V 为膨胀速度; c 为断裂区和塑性区界面速度; c_1 为弹性区和断裂区界面速度; c_d 为弹性区扩展速度。

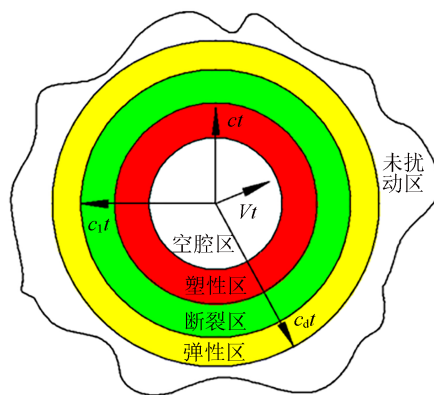


图 3 靶体损伤区分布

Fig. 3 Distribution of target damage area

有围压作用下的混凝土侵彻过程是动静荷载共同作用的过程, 是涉及静态荷载作用的动态问题。不同时刻下, 弹体对 0、5、10 和 18 MPa 围压下混凝土靶的侵彻过程如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 随着侵彻过程的发展, 弹体逐渐挤开弹道方向上的混凝土介质形成弹径大小的空腔, 迎弹面损伤逐渐开始形成。在空腔区形成的瞬间, 仅考虑静载 (围压) 作用下孔壁的环向应力。由迎弹面损伤形成的机理可知, 由于空腔的存在, 在静态围压作用下形成的环向应力会对迎弹面损伤的发展产生一定程度的影响。由

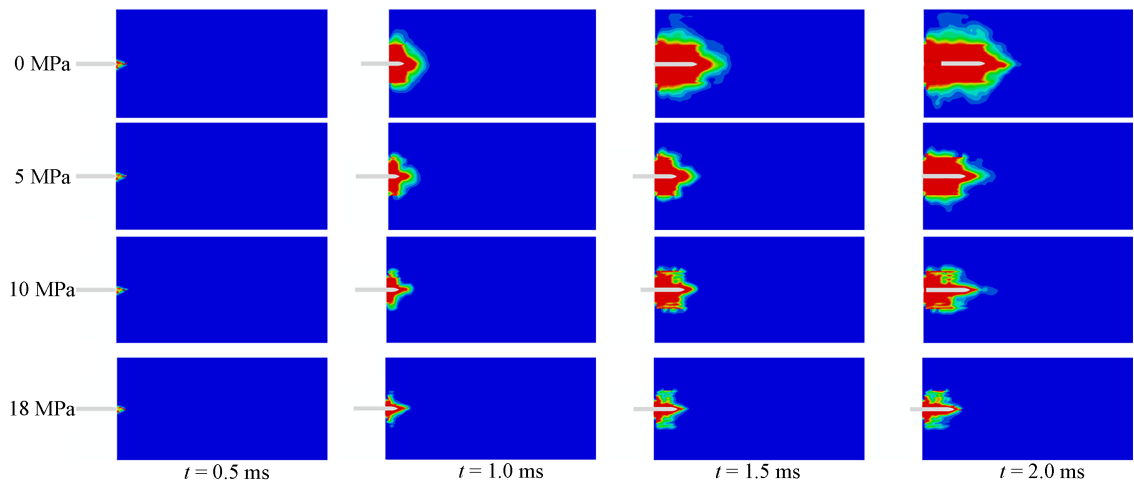


图 4 对不同围压混凝土靶的侵彻过程

Fig. 4 Penetration processes of concrete targets under different confining pressures

于弹体挤开混凝土材料产生的塑性变形需克服环向应力作用，当围压增加时，会使弹体挤开混凝土材料的难度增加，塑性变形也将减小，损伤发展遭到抑制。随着围压的增加，迎弹面损伤会向四周施加面方向扩展，空腔区面积呈现减小的趋势。经计算，0、5、10 和 18 MPa 围压下混凝土靶空腔区半径分别为 95、85、75 和 60 mm。

2.3 仿真结果分析

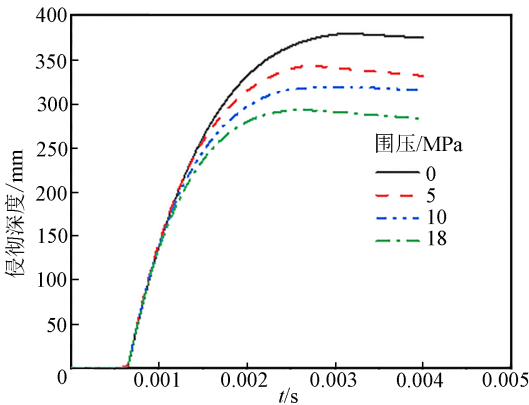
图 5 展示了弹体对不同围压混凝土靶的侵彻深度对比情况。其中，图 5（a）为不同围压下侵彻深度时程曲线，图 5（b）为完成侵彻过程后的弹体最大侵彻深度拟合曲线。

由图 5（a）可知，在侵彻过程中后期，随着围压的增加，相同时间下弹体对混凝土的侵彻深度逐渐降低。从图 5（b）拟合曲线可以看出，混凝土围压与最大侵彻深度之间的关系呈非线性递减，对此进行多项式拟合可得 $H = 378.672 - 7.826p + 0.17p^2$ 。其中， H 为最大侵彻深度，单位为 mm； p 为混凝土围压，单位为 MPa。

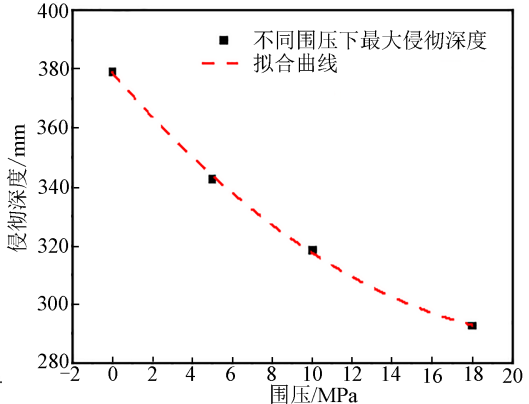
定量提取弹体对混凝土靶侵彻过程中的剩余速度，其时程曲线如图 6 所示。从图中可以看到，由于 C40 混凝土的抗压强度随周围围压的升高而增大，导致弹体的速度衰减与动能耗散加快，表明混凝土靶的抗冲击能力逐渐增加。

在侵彻过程中，弹体加速度的时程曲线如图 7 所示。当围压为 0 时，混凝土因产生轴向及横向变形而更易损伤，继而引发裂纹的产生、发展、贯穿，最终使靶体发生宏观失效。此外，弹体在侵彻过程中的加速度变化较为平缓，最大值出现在侵彻过程的中间阶段，而当对混凝土施加围压后，弹体在侵彻过程前期就受到混凝土靶的抵抗冲击

力，导致其最大加速度出现在侵彻过程的初始阶段。这是由于围压的存在约束了混凝土的横向变形，使得裂纹产生与靶体损伤破坏更为困难，最终导致弹体动能耗散速率在侵彻初期显著加快。综上所述，混凝土靶的抗压强度随着围压的升高而逐渐增强，抵抗变形能力和致密性也随之增大，抗冲击能力显著提高。



(a) 弹体侵彻不同围压混凝土靶的深度时程曲线



(b) 不同围压混凝土靶的最大侵彻深度

图 5 不同围压弹体对混凝土靶的侵彻深度对比

Fig. 5 Comparison of projectile penetration depths on concrete target under different confining pressures

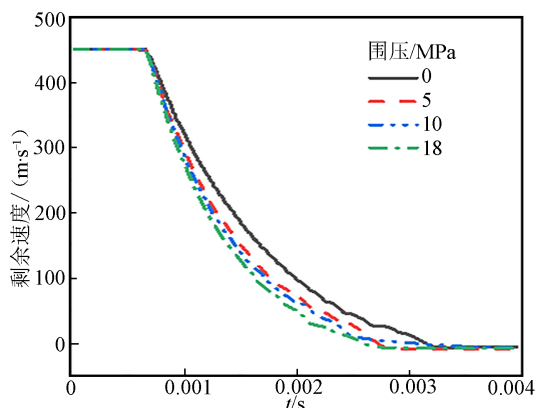


图 6 不同围压下弹体侵彻剩余速度时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of projectile residual velocity under different confining pressures

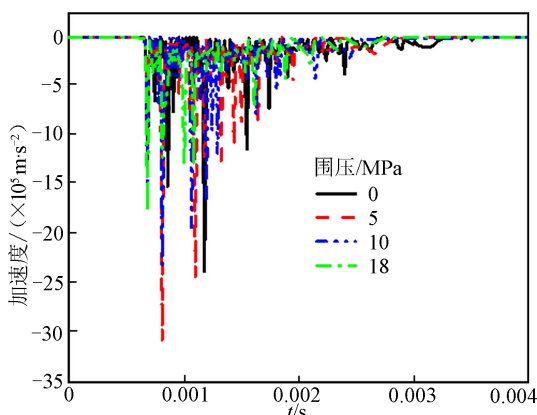


图 7 不同围压下弹体加速度时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of projectile acceleration under different confining pressures

3 试验验证

针对第二节的仿真计算,受现有试验加载手段所限,只选取了对混凝土施加 0、5、10 MPa 围压进行侵彻验证试验。试验中弹体尺寸与仿真模型尺寸一致,实物如图 8 所示。试验弹采用分离式铝制弹托,发射时保证弹托与炮膛内壁良好配合,在膛内运动稳定并达到预期的速度,出炮口后弹托分离而不影响弹体的飞行。弹体质量为 480 g,材料为 35CrMnSiA,屈服强度不低于 1 300 MPa。采用 C40 混凝土作为靶体,水泥采用 PO42.5 级普通硅酸盐水泥,粗骨料为石灰石,骨料平均粒径为 5 mm,细骨料为粗砂,水泥、砂、石灰石骨料和水的质量按 1 : 1.2 : 2.2 : 0.4 配比。为消除侧面边界对围压的影响,混凝土尺寸与仿真模型一致。为了方便浇注及保证完整性,采用 3 mm 厚的钢圈加固,养护后的靶体经静态力学性能测试达到 C40 要求。

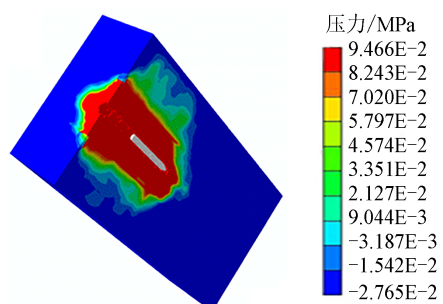


图 8 试验弹体

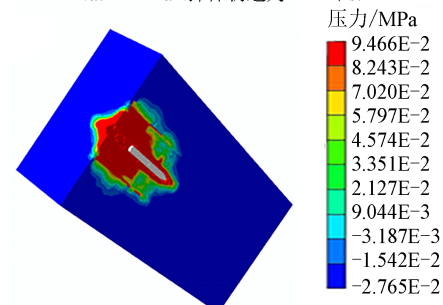
Fig. 8 Test projectile

试验采用军事科学院国防工程研究院设计的一种用于弹体侵彻试验的靶板三向围压箱体结构^[22],由机架、箱体、液压缸、液压站、连接油管等组成。被加载靶板放置在箱体内部,机架中间位置放置箱体,加载板固定在箱体内部上方、右侧和后方,机架左侧、上部 and 下部都安装一组用于加载板运动的液压缸,液压缸与液压站通过油管连接,液压站通过控制液压缸运动来驱动加载板对靶板加载压力。三向围压箱体结构起到精确控制应力大小的作用,试验过程中能够使输出的围压加载状态保持稳定。试验所施加的压力分别为 0、5 和 10 MPa,试验中炮口对准箱体结构的开口处,3 发试验弹体的实际速度为 457、461 和 453 m/s,对应的仿真结果和试验结果分别如图 9 和图 10 所示。由于弹体初速无法准确控制,因此本文忽略弹体初速的影响。

由图 9 和图 10 可知,随着围压的增加,混凝土的破坏区域逐渐缩小,混凝土内部产生剪切和挤压,表面产生拉伸破坏,破碎介质向撞击方向喷出,最终沿撞击方向形成漏斗形弹坑,即为开



(a) 0 MPa (弹体初速为 457 m/s)



(b) 5 MPa (弹体初速为 461 m/s)

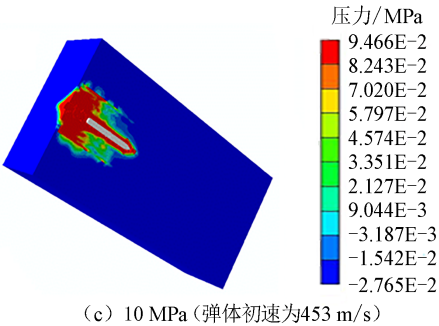
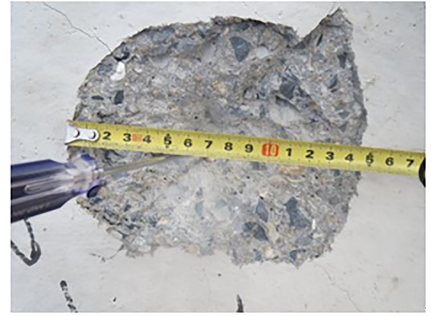


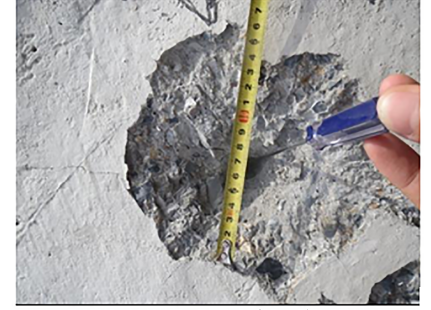
图 9 不同围压和弹体初速下混凝土的损伤应力云图
Fig. 9 Stress damage cloud maps of concrete under different confining pressures and projectile initial velocities



(a) 0 MPa (弹体初速为457 m/s)



(b) 5 MPa (弹体初速为461 m/s)



(c) 10 MPa (弹体初速为453 m/s)

图 10 混凝土靶体表面破坏情况
Fig. 10 Surface damage of concrete targets

坑段。随着弹体的挤进作用, 形成直径略大于弹体直径的圆柱形隧道, 试验后测量混凝土靶开坑区尺寸分别为 182 mm×203 mm、154 mm×173 mm、142 mm×155 mm 左右。试验后回收的弹体如图 11 所示, 弹体头部无明显侵蚀, 与试验前弹体结构外形一致。

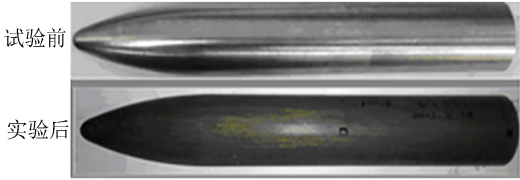


图 11 试验前后弹体对比
Fig. 11 Comparison of projectile before and after the experiment

因混凝土靶为脆性材料, 较难将其剖开测量弹道轨迹, 为了准确得到弹体对混凝土靶侵彻深度的试验结果, 采用沾满红墨水的铁丝伸入侵彻孔洞中, 提取到的试验数据与仿真结果对比如表 2 所示。

表 2 试验结果与仿真结果对比
Table 2 Comparison of the experimental and simulation results

围压/ MPa	simulation results				mm
	试验结果		仿真结果		
	侵彻深度	开坑尺寸	侵彻深度	开坑尺寸	
0	386	182×203	380	172×193	
5	351	154×173	342	148×167	
10	331	142×155	318	136×151	

由表 2 可得, 侵彻深度的试验结果与仿真结果误差小于 4%, 且试验测量的开坑尺寸与仿真结果相近, 从而验证了本文有限元计算的正确性, 也进一步证明了侵彻深度随围压增加而呈非线性递减的变化趋势。

4 结论

本文采用数值模拟和试验验证相结合的方法, 深入研究了混凝土围压作用对弹体侵彻性能的影响, 得到以下结论。

- 1) 通过数值模拟形象展示了不同围压下混凝土的应力应变性能。
- 2) 围压的约束作用使得混凝土在被侵彻过程中裂纹产生与损伤破坏更为困难, 最终导致弹体动能耗散速率在侵彻初期显著加快; 混凝土靶的抗压强度随着围压升高而增加, 抵抗变形能力和致密性也随之增强, 抗冲击能力显著提高。
- 3) 建立了 450 m/s 速度下弹体侵彻深度与围压之间呈非线性递减的函数关系; 侵彻试验与仿真计算得到的弹体最大侵彻深度误差小于 4%, 从而验证了本文计算模型的可靠性。

参考文献

- [1] 夏鸿雁, 侯润, 张钱城, 等. 高性能混凝土填充金属三明治夹层波纹板的抗侵彻性能[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(8): 1025-1031.
- Xia Hongyan, Hou Run, Zhang Qiancheng, et al. Ballistic resistance of metal corrugated sandwich plates filled with high performance concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(8): 1025-1031.
- [2] 黄建涛, 彭永, 陈浩. 中低层框架建筑物毁伤效能评估模型机用弹量算法[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(3): 9-17.
- Huang Jiantao, Peng Yong, Chen Hao. Damage effectiveness assessment model and algorithm of ammunition usage amount for missile strikes on low-to-mid-rise frame buildings[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2024, 38(3): 9-17.
- [3] 董婧, 杨进良, 王伟, 等. 高温后碳纤维混凝土的力学性能与微观结构[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39(1): 84-96.
- Dong Jing, Yang Jinliang, Wang Wei, et al. Mechanical properties and microstructure of elevated temperature-processed steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39(1): 84-96.
- [4] 张志刚. 建筑材料在战争中的应用研究[J]. 中国建材科技, 2017, 26(2): 57-60.
- Zhang Zhigang. Research on the application of building materials in war[J]. China Building Materials Science & Technology, 2017, 26(2): 57-60.
- [5] 张雪岩, 武海军, 李金柱, 等. 弹体高速侵彻两种强度混凝土靶的对比研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(2): 276-283.
- Zhang Xueyan, Wu Haijun, Li Jinzhu, et al. Comparative study of projectiles penetrating into two kinds of concrete targets at high velocity[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(2): 276-283.
- [6] 陈克, 黄德武, 何俊. MCA 法模拟研究骨料对混凝土靶抗弹性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2005(1): 31-34.
- Chen Ke, Huang Dewu, He Jun. Research of the effect of aggregations on the anti-penetration properties of concrete targets by MCA[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005(1): 31-34.
- [7] 彭永, 卢芳云, 方秦, 等. 弹体侵彻混凝土靶体的尺寸效应分析[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(11): 58-68.
- Peng Yong, Lu Fangyun, Fang Qin, et al. Analyses of the size effect for projectile penetrations into concrete targets[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(11): 58-68.
- [8] 薛建锋, 沈培辉, 王晓鸣. 素混凝土与钢筋混凝土的抗侵彻行为及等效关系[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2): 174-179.
- Xue Jianfeng, Shen Peihui, Wang Xiaoming. Anti-penetration behavior of concrete and reinforced concrete and its equivalent relationship[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(2): 174-179.
- [9] 邓勇军, 宋文杰, 陈小伟, 等. 钢筋混凝土靶侵彻的可压缩弹-塑性动态空腔膨胀阻力模型[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(5): 1023-1030.
- Deng Yongjun, Song Wenjie, Chen Xiaowei, et al. A dynamic cavity-expansion penetration model of compressible elastic-plastic response for reinforced concrete targets[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(5): 1023-1030.
- [10] 宋殿义, 刘飞, 蒋志刚, 等. 正六边形钢管约束混凝土靶边长对抗侵彻性能影响的试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(1): 58-64.
- Song Dianyi, Liu Fei, Jiang Zhigang, et al. Tests for influence of side-length of a concrete target confined with hexagonal steel tubes on its anti-penetration performance[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(1): 58-64.
- [11] 蒙朝美, 宋殿义, 蒋志刚, 等. 多边形钢管约束混凝土靶抗侵彻性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(13): 14-19.
- Meng Chaomei, Song Dianyi, Jiang Zhigang, et al. Tests for anti-penetration performance of polygonal steel tube-confined concrete targets[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(13): 14-19.
- [12] 贵雪燕. 混凝土圆柱常规三轴实验与围压效应研究[J]. 甘肃科技, 2019, 35(13): 89-90, 81.
- [13] 高欢, 翟越, 汪铁楠, 等. 主动围压作用下混凝土-花岗岩组合体抗压力学特性与强度预测模型研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(11): 2983-2992, 3046.
- Gao Huan, Zhai Yue, Wang Tienan, et al. Compressive mechanical properties and strength prediction model of concrete-granite combined body under active confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(11): 2983-2992, 3046.
- [14] 刘杉, 石晓贝, 郝逸飞. 围压作用下碱激发混凝土的本构模型与破坏准则[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(8): 1920-1927.
- Liu Shan, Shi Xiaobei, Hao Yifei. Constitutive model and failure criteria of alkali-activated concrete under confining pressure[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(8): 1920-1927.
- [15] 雷光宇, 党发宁, 王昭, 等. 围压作用下类岩材料动态力学特性研究[J]. 混凝土, 2017, 12(6): 22-25.
- Lei Guangyu, Dang Faning, Wang Zhao, et al. Study on dynamic mechanical properties of rock like materials under confining pressure[J]. Concrete, 2017,

- 12(6): 22-25.
- [16] 吴雪, 张先锋, 丁力, 等. 预应力对陶瓷抗侵彻性能影响规律的数值模拟[J]. 高压物理学报, 2018, 32(4): 75-82.
- Wu Xue, Zhang Xianfeng, Ding Li, et al. Numerical simulation of the effect of pre-stress on the ballistic performance of ceramics[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(4): 75-82.
- [17] Meyer H W, Kleponis D S. Modeling the high strain rate behavior of titanium undergoing ballistic impact and penetration[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 26(1-10): 509-521.
- [18] Chi R Q, Serjouei A, Sridhar I, et al. Prestress effect on confined ceramic armor ballistic performance [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 84: 159-170.
- [19] 朱少平. 混凝土侵彻影响因素及侵彻损伤围压效应数值模拟研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021: 50-52.
- Zhu Shaoping. Numerical simulation on the influencing factors of concrete penetration and confining pressure effect of penetration damage[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021: 50-52.
- [20] 薛建锋. 弹体侵彻与贯穿混凝土靶的效应研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 56-57.
- Xue Jianfeng. Research on the performance of projectile penetration and perforation into concrete target[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016: 56-57.
- [21] Forrestal M J, Luk V K. Penetration into soil targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1992, 12(3): 427-444.
- [22] 高伟亮, 孙桂娟, 王幸, 等. 一种用于弹体深侵彻试验的靶板三向围压箱体结构: CN201920133293.9 [P]. 2019-10-01: 2-3.

Study on the Penetration Performance of Projectiles into Concrete Target under Different Confining Pressures

LAN Xianliang¹, WANG Wei^{2*}, XUE Jianfeng¹, YUAN Liming¹,
XU Honghao¹, WAN Siqi¹, SUN Yalan¹, MA Qingyue¹

(1.660 Design Institute of Hongdu Aviation Industry Group, Nanchang 330024, China;

2.Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

ABSTRACT: In engineering practice, interaction within continuous concrete media often generate confining compression, which significantly enhances their compressive strength and anti-penetration performance. To study the penetration performance of projectiles into concrete under varying confining pressures, LS-DYNA finite element software was used to simulate vertical penetration into C40 concrete under confining pressures ranging from 0-18 MPa. The stress and damage cloud maps of the concrete targets under different confining pressures were obtained, and the velocity, penetration depth, and acceleration time-history curves were extracted to establish a functional relationship between the penetration depth and confining pressure. Penetration tests were conducted at an initial velocity of 450 m/s against C40 concrete under different confining pressures. The simulation results for the penetration depths show errors of less than 4% compared to the experimental results, validating the accuracy of the simulation model. Both the simulation and experimental results indicate that applying a confining pressure around the concrete target significantly reduces the damage zone, with a higher confining pressure leading to stronger anti-penetration capabilities. When no confining pressure is applied, the kinetic energy dissipation of the projectile during penetration is relatively uniform, whereas under confining pressure, the kinetic energy dissipation is primarily concentrated in the initial stages of penetration.

KEYWORDS: penetration mechanics; concrete; anti-penetration performance; numerical simulation; penetration testing

(编辑: 刘建民)