

预应力钢筋混凝土结构抗侵彻性能试验 及数值模拟研究

刘蒙莎, 高戈, 蒋迪*

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: 预应力钢筋混凝土结构是核岛厂房中使用的典型结构, 针对预应力钢筋混凝土结构开展抗侵彻能力研究可为相关场景结构状态评估分析提供重要参考。本研究首先针对预应力对钢筋混凝土靶板的抗侵彻能力的影响开展了试验研究, 为了进行对比, 同时开展普通钢筋混凝土靶板试验, 试验结果表明预应力对混凝土靶板正面开坑深度的影响较小, 但是初始预应力的施加会使靶板正面开坑范围增加。进一步通过数值模拟分析复现试验全过程, 数值模拟结果与试验结果吻合较好, 验证了采用的本构模型、参数取值和有限元分析方法的有效性。最后基于数值模拟方法拓展试验工况对不同侵彻速度下预应力靶板的抗侵彻能力进行计算分析, 分析结果总体表明预应力对靶板抗侵彻能力的影响较小, 预应力增加的围压使得弹体穿过靶板受到的阻力有所增加, 弹体穿过预应力钢筋混凝土靶板的剩余速度较普通钢筋混凝土靶板有所降低。

关键词: 预应力; 抗侵彻能力; 冲击试验; 数值模拟

中图分类号: TL99; TU378

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2024)S1-0075-12

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0172

Experimental and Numerical Simulation Research on Penetration Resistance of Prestressed Reinforced Concrete Structure

LIU Mengsha, GAO Ge, JIANG Di*

(China Nuclear Power Engineering Co. Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract: Prestressed reinforced concrete structures are still the commonly used structural form for containment buildings in large pressurized water reactor nuclear power plants. In addition to meeting basic functional requirements, the structures of nuclear power plants may also face various impact events, such as impacts from tornado-borne projectiles, accidental crashes of small airplanes, and the impacts of commercial airliner collisions. Conducting research on the penetration resistance of prestressed reinforced concrete structures can provide important references for assessing and analyzing the structural state in relevant accident scenarios. At present, the basic experimental research on the penetration resistance of prestressed reinforced concrete structures is lacking, and the research on the enhancement effect of the existence of prestressing on the structural penetration resistance is insufficient. Therefore, the experimental research on the penetration resistance of prestressed reinforced concrete structures was conducted and a numerical simulation method through experimental calibration

收稿日期: 2024-03-17; 修回日期: 2024-05-29

基金项目: 中核集团“青年英才”项目

* 通信作者: 蒋迪

was established. On this basis, the enhancement effect of prestressing on the penetration resistance of the structure was further explored. The experimental results indicate that prestressing has a minimal impact on the depth of the cratering on the front face of the concrete target, but the application of initial prestressing increases the extent of the cratering on the front face. Further numerical simulations were conducted to reproduce the entire experimental process. The numerical simulation results are very consistent with the experimental results, validating the effectiveness of the constitutive model, parameter selection, and finite element analysis method used. Finally, based on the numerical simulation method, the anti-penetration ability of prestressed reinforced concrete target plate under different penetration speeds was calculated and analyzed. The overall analysis results indicate that prestressing has a minor effect on the penetration resistance of the target plate. The increased confining pressure due to prestressing increases the resistance encountered by the projectile passing through the target plate, resulting in a reduced residual velocity of the projectile compared to that when it penetrates a normal target plate.

Key words: prestressing; penetration resistance; impact test; numerical simulation

预应力钢筋混凝土结构目前在工程中主要应用于压水堆核电厂的安全壳设计中,由于安全壳需要具备承受内压的功能,而普通钢筋混凝土结构的受拉承载能力较差,容易开裂,施加预应力来提高安全壳承受内压的能力是普遍的做法^[1]。核电厂的构筑物除了需要满足内部功能性要求外,还面临一些外部的冲击事件^[2-5],如龙卷风飞射物的撞击、小型飞机的意外坠机以及商用大飞机撞击的影响,因此有必要对核电厂中预应力钢筋混凝土结构的抗冲击承载能力进行研究。

目前,国内外针对普通钢筋混凝土结构开展的侵彻能力研究已较为充分,针对具有高配筋率、高标号等级的普通钢筋混凝土结构的抗侵彻能力也有一定的研究,而针对预应力钢筋混凝土开展抗侵彻能力分析的研究较少。从20世纪60年代开始,国内外研究者就开始针对混凝土结构开展侵彻试验,揭示了弹体重量、直径^[6-7]、侵彻速度^[8-9]、混凝土强度^[10]、配筋率^[11-13]等因素对混凝土结构抗侵彻能力的影响后果。在大量冲击试验基础上,国内外学者对试验数据进行总结与分析,建立了侵彻深度、剩余速度、极限贯穿厚度、极限震塌厚度等的经验或半经验公式,被广泛使用的如修正的Petry公式^[14]、别列赞公式^[15]、Young公式^[16]、工程兵三所公式^[17-18]等。随着计算机技术的不断发展,采用数值模拟方法模拟弹体侵彻过程具有成本低、可重复性高、可完整地获得侵彻过程中的结构微观特点等优势,国内外学者在钢筋混凝土侵彻分析中开展了大量的数值

模拟分析工作^[19-20],数值模拟方法也是目前研究侵彻问题时普遍采用的一种方式。

目前对预应力钢筋混凝土结构抗侵彻能力的基础性试验研究缺乏,预应力的存在对结构抗侵彻能力的提升作用研究不足,因此本研究针对预应力钢筋混凝土结构抗侵彻能力开展试验研究,并通过试验标定形成数值模拟方法,在此基础上进一步探讨预应力对结构抗侵彻能力的提升作用,可为后续分析预应力钢筋混凝土抗侵彻能力分析提供重要参考。

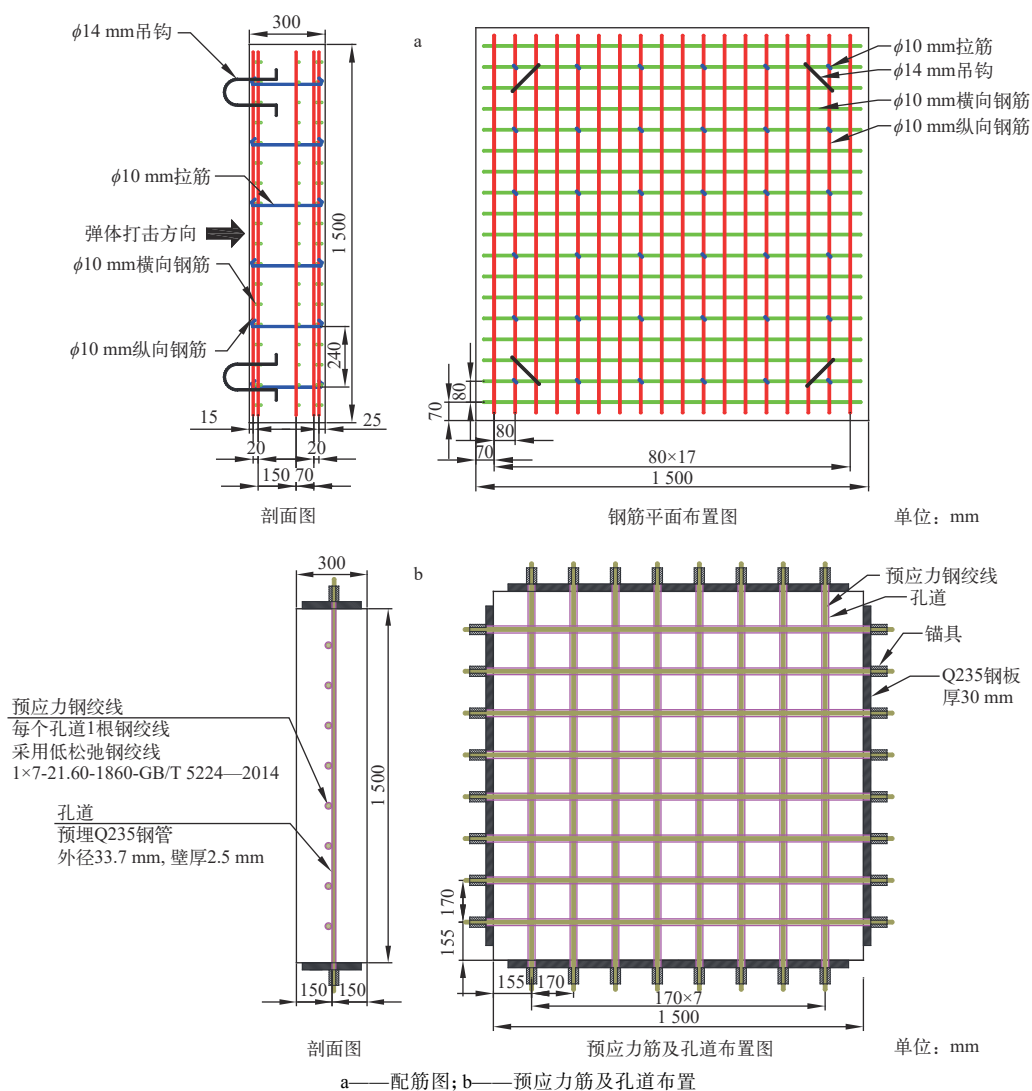
1 冲击试验

1.1 靶板设计

靶板设计如图1所示,混凝土标号为C60,所有钢筋采用HRB500钢筋,采用千斤顶给预应力钢绞线施加预应力,张拉从一端进行,遵循对称、由内向外、先中间后两侧的原则逐根分级张拉。为减少预应力损失,每根预应力筋均张拉4次,分别加载100、200、300、365 kN,最后一次持荷时间不低于5 min,最终使结构内产生5 MPa左右的预应力。

为了对比说明预应力施加对结构抗侵彻能力的影响,同时设计了没有预应力体系的普通钢筋混凝土靶板侵彻试验进行对比说明,普通钢筋混凝土靶板(厚300 mm)设计如图2所示。普通钢筋混凝土靶板与预应力钢筋混凝土靶板的区别仅在于有无预应力体系。

上述靶板采用的混凝土强度等级均为C60,



a——配筋图; b——预应力筋及孔道布置

图 1 预应力钢筋混凝土靶板设计图

Fig. 1 Design diagram of prestressed reinforced concrete target plate

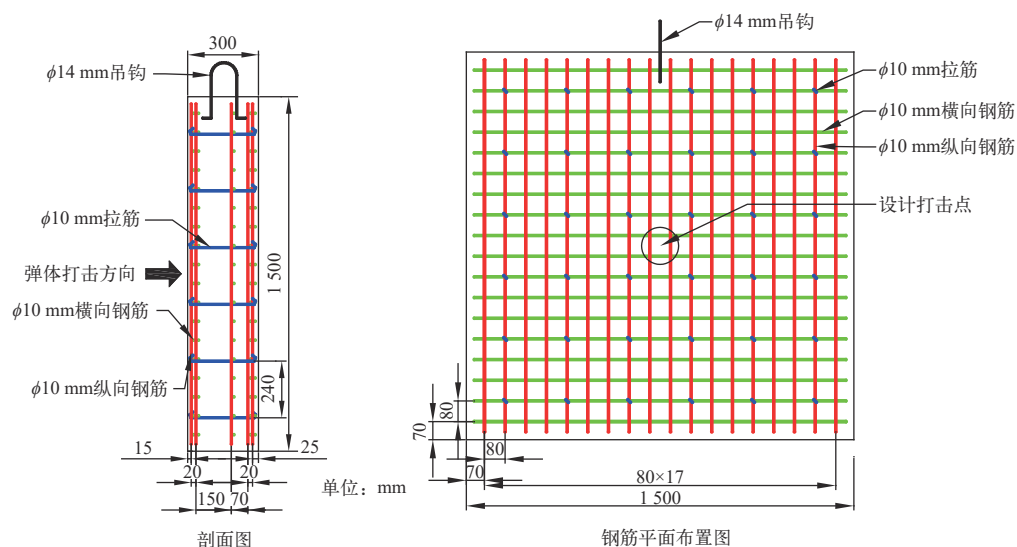


图 2 普通钢筋混凝土靶板设计图

Fig. 2 Design diagram of ordinary reinforced concrete target plate

材性试验方法参照标准 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法》，实测混凝土立方体抗压强度为 64.9 MPa，轴心抗拉强度为 5.28 MPa，弹性模量为 40 818 MPa。受力筋和拉筋均采用强度等级 HRB500 的钢筋，根据标准 GB/T 28900—2022《钢筋混凝土用钢材试验方法》及 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验：第 1 部分：室温试验方法》， $\phi 10$ mm 和 $\phi 32$ mm 钢筋实测屈服强度分别为 500 MPa 和 520 MPa，抗拉强度分别为 740 MPa 和 775 MPa。预应力筋采用低松弛钢绞线 1×7-21.60-1860-GB/T 5224—2014，其测试方法与 HRB500 钢筋相同，实测屈服强度为 1 675 MPa，抗拉强度为 1 946 MPa。

1.2 弹体设计

弹体设计为直径 30 mm、质量 870 g 的卵头弹，弹头曲径比为 3。弹体设计图和实体图如图 3 所示。弹体采用 30CrMnSiNi2A 合金钢材加工，并热处理至硬度 HRC42，保证侵彻过程为刚性侵彻。根据 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验：第 1 部分：室温试验方法》对弹体材料进行了直接拉伸试验，实测抗拉强度为 1 655 MPa。

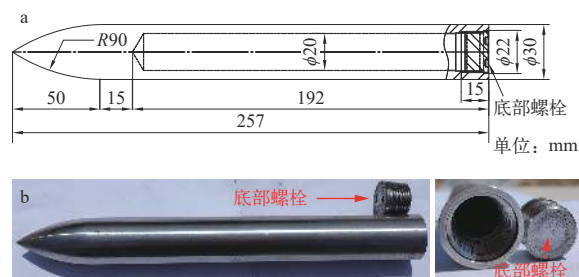


图 3 弹体几何尺寸 (a) 及实体图 (b)
Fig. 3 Geometrical dimension (a) and entity diagram (b) of projectile

1.3 试验装置

图 4 给出试验布置情况，采用 40 mm 口径反



图 4 侵彻试验布置图

Fig. 4 Experimental site layout

应气体炮发射，试验时调整靶板位置使打击点位于靶板中心。

1.4 试验工况

共设计开展 4 组侵彻试验，针对普通钢筋混凝土靶板和预应力钢筋混凝土靶板分别开展不同冲击速度下的侵彻试验，试验工况设置列于表 1。

表 1 试验工况设置

Table 1 Experimental condition

工况	靶板类型	侵彻速度/(m/s)
1	普通钢筋混凝土靶板	350
2	普通钢筋混凝土靶板	400
3	预应力钢筋混凝土靶板	350
4	预应力钢筋混凝土靶板	400

1.5 试验结果

对试验进行了完整记录，侵彻试验后靶板的损伤情况列于表 2，弹体在试验前后的变化情况列于表 3。测量结果包含以下内容：弹体侵彻速度 v_0 、初始质量 M_0 、初始长度 L_0 、残余质量 M_r 、残余长度 L_r ；靶板侵彻深度 h_p 、正面开坑直径 d_p 和背部震塌坑直径 d'_p 。注意 d_1 、 d_2 、 d_3 和 d_4 为靶板正面 0°、45°、90°和 135°方向开坑直径， d_p 为其平均值； d'_1 、 d'_2 、 d'_3 和 d'_4 为靶板背部 0°、45°、90°和 135°方向震塌坑直径， d'_p 为其平均值。靶板开坑直径测量示意图如图 5 所示。此外，由于 3 号靶

表 2 靶板损伤情况

Table 2 Target plate damage

工况	v_0 /(m/s)	h_p /mm	开坑直径/mm				d_p /mm	震塌直径/mm				破坏模式
			d_1	d_2	d_3	d_4		d'_1	d'_2	d'_3	d'_4	
1	339	152	335	310	280	340	316					正面开坑+背部无损
2	388	190	380	400	375	400	389	170		710		正面开坑+背部震塌
3	344	150	410	380	335	385	378					正面开坑+背部无损
4	382	182	465	420	390	430	426					正面开坑+背部开裂

表 3 弹体情况
Table 3 Projectile condition

工况	靶板类型	v_0 /(m/s)	M_0 /g	L_0 /mm	M_t /g	L_t /mm
1	普通钢筋混凝土靶板	339	857	258	852	253
2	普通钢筋混凝土靶板	388	846	258	839	252
3	预应力钢筋混凝土靶板	344	859	258	853	254
4	预应力钢筋混凝土靶板	382	850	258	842	253

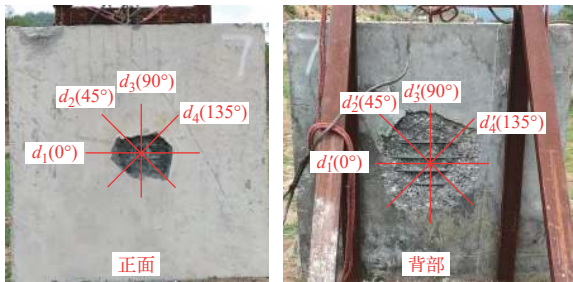


图 5 靶板开坑直径测量示意图

Fig. 5 Damage diameter measurement diagram of target plate

板背部震塌坑近似为长方形,故仅测量其 0°和 90°方向的震塌坑直径。

1.6 试验结果分析

预应力的影响分析如图 6 所示。如图 6a 所示,工况 1 与工况 3 的弹体侵彻速度较为接近,靶板开坑深度基本一致,工况 2 与工况 4 的弹体侵彻速度接近,靶板开坑深度基本一致,表明预应力对于侵彻深度影响较小。分析认为这是由于弹体侵彻过程中,侵彻阻力来自于弹头周围混凝土约 1 GPa 量级的高压应力,而预应力钢筋混凝土靶板的 5 MPa 初始侧向约束,对于弹头周围高压应力状态影响可忽略不计。由图 6b 可知,侵彻速度接近时,预应力钢筋混凝土靶板的开坑直径相较于普通钢筋混凝土靶板有较为明显的增加,表明施

加预应力可导致靶板表面开坑直径增加。其原因可能是由于施加预应力后,混凝土板处于约束状态,具有一定的初始能量,在靶板破坏后这部分能量被释放,导致其损伤破坏有一定程度的增加。综上所述,预应力对混凝土结构的抗侵彻能力影响较小,但可能导致开坑破坏更为严重。

2 数值模拟

2.1 有限元模型

1) 几何模型

考虑到试验中弹体和靶板的对称性,建立如图 7 所示的 1/4 有限元模型并通过*BOUNDARY_SPC_SET 关键字设置对称边界。有限元模型主要包括靶板和弹体,其中靶板采用混凝土和钢筋分离式建模,对于预应力钢筋混凝土靶板模型还包括预应力筋、钢垫板和锚具。混凝土、弹体、钢垫板和锚具采用 SOILD 实体单元,钢筋和预应力筋采用 BEAM 梁单元,钢箍采用 SHELL 壳单元。弹体单元网格设置为 5 mm,钢筋单元网格设置为 10 mm,普通钢筋混凝土靶板采用渐变网格的方法对区域①、②、③的网格尺寸分别设置为 5、8、12 mm,预应力钢筋混凝土靶板网格尺寸设置为 5 mm。

2) 材料本构模型

混凝土采用文献 [21] 中提出的自主开发的新型动态损伤本构模型,自定义本构模型的参数如表 4 所列,其中抗压强度 f_c 、抗拉强度 f_t 和弹性模量 E 由材性试验得到,其余参数根据文献 [21] 中的方法得到。混凝土材料添加*MAT_ADD_EROSION 关键字以定义材料失效,将最大和最小主应变 0.3 设置为混凝土单元的删除准则。

钢筋和预应力筋采用*MAT_PLASTIC_KIN-

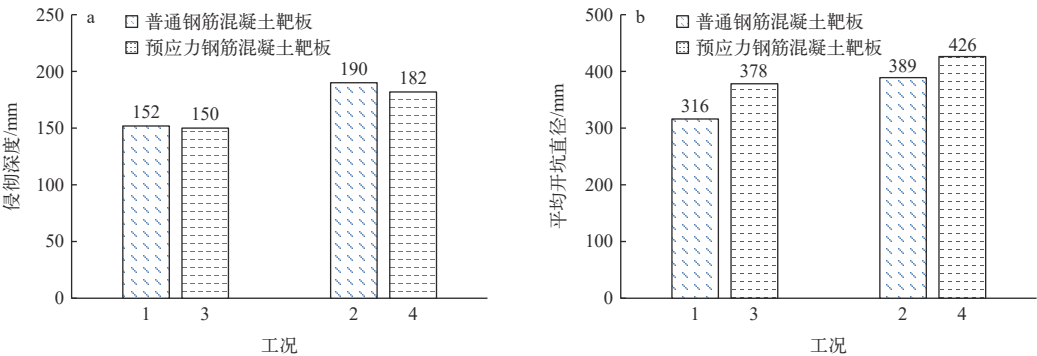


图 6 预应力的影响分析

Fig. 6 Influence analysis of prestressing

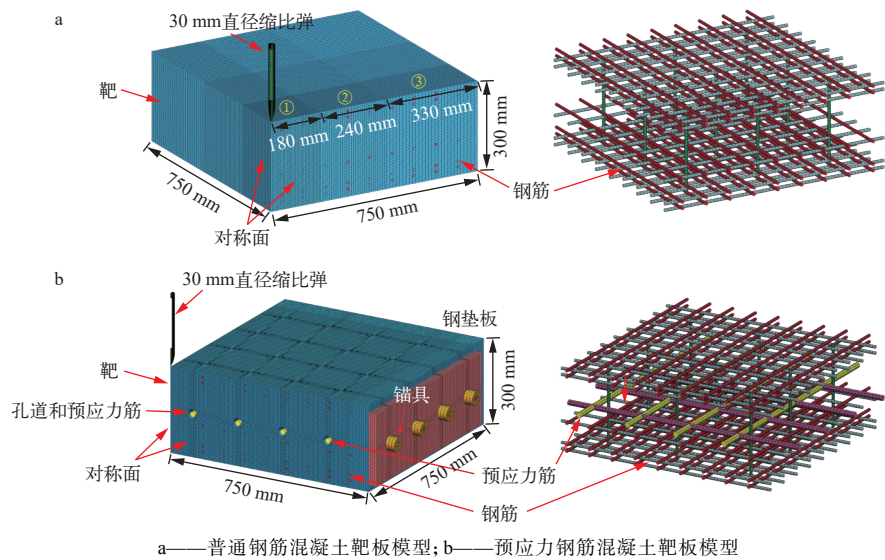


图 7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

表 4 混凝土自定义本构模型参数

Table 4 Constitutive model parameter of concrete

基础参数	参数值	强度参数	参数值	损伤参数	参数值	状态参数	参数值	状态参数	参数值	状态参数	参数值
ρ	2 400 kg·m ⁻³	$S_{\max}$	843.7 MPa	m	0	μ_1	0	P_1	0K μ_2	$K_{u,1}$	1K
f_c	64.9 MPa	P_0	10.4 MPa	A	1.03	μ_2	0.001 5	P_2	1K μ_2	$K_{u,2}$	1K
f_t	5.28 MPa	W_x	1.6	d_2	1	μ_3	0.004 3	P_3	2.18K μ_2	$K_{u,3}$	1.014K
E	40.8 GPa	S	0.8	d_{1h}	2.2×10 ⁻⁴	μ_4	0.010 1	P_4	3.5K μ_2	$K_{u,4}$	1.065K
ν	0.2	F_m	10	d_{1s}	5.4×10 ⁻⁴	μ_5	0.030 5	P_5	6.65K μ_2	$K_{u,5}$	1.267K
G	17 GPa	W_y	5.5			μ_6	0.051 3	P_6	10.03K μ_2	$K_{u,6}$	1.470K
K	22.68 GPa					μ_7	0.072 6	P_7	14.23K μ_2	$K_{u,7}$	1.672K
						μ_8	0.094 3	P_8	21.77K μ_2	$K_{u,8}$	1.825K
						μ_9	0.174	P_9	127.1K μ_2	$K_{u,9}$	4.107K
						μ_{10}	0.208	P_{10}	194.4K μ_2	$K_{u,10}$	5.0K

EMATIC 本构模型, 该本构模型为双线性弹塑性模型, 需通过真实应力-应变曲线确定其中的参数。根据本试验材性试验测得的工程应力-应变曲线计算可得到真实应力-应变曲线, 设置材料参数列于表 5。

弹体采用*MAT_JOHNSON_COOK 本构模型和*EOS_GRUNEISEN 状态方程, 为保证弹体模型质量与实际弹体质量一致, 弹体密度根据实际弹体质量进行调整, 其余参数根据文献 [22] 确定。弹体材料参数如表 6 所列。

表 5 钢筋与预应力筋本构模型参数

Table 5 Constitutive model parameter of reinforcement and prestressing reinforcement

材料类型	ρ /(kg·m ⁻³)	E /GPa	ν	f_y /MPa	E_t /MPa	应变率效应参数		ε_u
						C/s^{-1}	p	
φ10 mm 钢筋	7 800	200	0.3	500	1 990	40	5	0.21
φ32 mm 钢筋	7 800	200	0.3	520	2 180	40	5	0.21
预应力筋	7 800	86.5	0.2	1 730	4 270	40	5	0.13

表 6 弹体本构模型和状态方程参数^[4-5]
Table 6 Constitutive model and state equation parameter of projectile^[4-5]

*MAT_JOHNSON_COOK										
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	ν	屈服 强度 A/MPa	应变强化常数项 B/MPa	应变强化指数项 n	应变率敏感系数 C	材料损伤参数			
							D_1	D_2	D_3	D_4
7620	210	0.28	1269	810.18	0.479	0.04	0.239	8.593	7.867	0.009
*EOS_GRUNEISEN										
$C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	S_1			S_2	S_3		γ_0	一阶体积校正系数 α		
4569	1.49			0	0		2.17	0.46		

钢垫板和钢箍同样采用*MAT_PLASTIC_KINEMATIC 模型, 基于 Q235 钢的基本力学性能, 其密度、弹性模量、泊松比和屈服强度分别为 $7\,800\text{ kg/m}^3$ 、 210 GPa 、 0.3 和 235 MPa , 且不考虑材料的失效和应变率效应。锚具采用*MAT_RIGID 模型以忽略其变形的影响, 其中密度、弹性模量和泊松比分别设置为 $7\,800\text{ kg/m}^3$ 、 210 GPa 和 0.3 。

3) 速度设置、接触与耦合算法

弹体的侵彻速度采用关键字*INITIAL_VELOCITY_GENERATION 赋予。弹体与混凝土之间的接触由关键字*CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE 定义。通过拉格朗日耦合方法*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID (CTYPE=2)模拟混凝土与钢筋的粘结作用。此外, 在预应力钢筋混凝土靶板模型中, 钢垫板与混凝土、锚具与钢垫板之间的接触由关键字*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 定义。

4) 预应力施加

针对工况 3 和工况 4, 为模拟预应力的施加过程, 采用了梁单元应力加载法: 预应力筋采用 BEAM 梁单元且单元方程选择 ELFORM=3, 预应力筋端部与锚具通过共节点的方式连接, 预应力筋通过锚具锚定在靶板两端, 如图 7b 所示; 同时预应力通过*SECTION_BEAM 输入, 其中选项卡 STRESS 填入单根预应力筋上的应力; 此外, 通过关键字*CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION 启用动力松弛, 并将动力松弛收敛因子 (选项卡 DRTOL) 设置为 1×10^{-6} 以保证侵彻前靶板中的预应力已稳定。

需要注意的是, 预应力筋在张拉过程中由于张拉端锚具变形、预应力筋内缩以及预应力筋与孔道壁之间的摩擦等原因导致其应力降低, 即预应力损失。本试验预应力筋的初始张拉应力为

$1\,281\text{ MPa}$, 根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范(2015 年版)》, 预应力损失理论值为 338 MPa , 张拉结束后靶板中预应力筋的实际应力约为 943 MPa 。

图 8 示出动力松弛过程和动力松弛完成时靶板的应力分布情况。可以看出, 经过 10 ms 的动力松弛, 靶板中心部位的混凝土最小主应力收敛于 5.0 MPa , 意味着靶板中的预应力已达到稳定, 侵彻前靶板中心部位的预应力水平为 5.0 MPa 。

2.2 数值模拟结果

由弹体位移确定侵彻深度, 由测量损伤大于 0.9 的单元范围得到开坑直径和震塌范围。4 种工况的模拟结果如图 9 所示。为更直观地表征靶板的开坑和震塌, 自定义本构模型通过灰度显示的方式呈现损伤大于 0.9 的单元范围。值得注意的是, 靶板正面混凝土保护层单元沿钢筋网出现部分剥离, 因此灰度图片展示的是隐藏混凝土保护层单元后的靶板损伤, 以表征靶板的真实开坑区域。观察发现通过剖面图可更加直观地给出靶板内部的损伤情况, 如图 10 所示。

数值模拟计算结果与试验结果的对比如表 7。可以发现: 在靶板破坏深度和开坑直径方面, 多数工况下数值模拟得到的侵彻和爆炸破坏深度以及开坑直径与试验结果的相对误差不超过 15% , 在靶板震塌直径方面, 由于模拟中震塌裂缝尚未延伸至背部混凝土保护层, 模拟中的震塌直径忽略了保护层的剥落, 从而导致震塌直径偏小, 但总体来看, 数值模拟结果可对试验结果进行较好的预测。

试验研究获得了包括靶板背部无损、背部开裂、背部震塌的损伤模式, 结合数值模拟结果给出通过数值模拟方法判定靶板损伤状态的方法, 具体如图 11 所示。根据如图 11 所示的靶板损伤

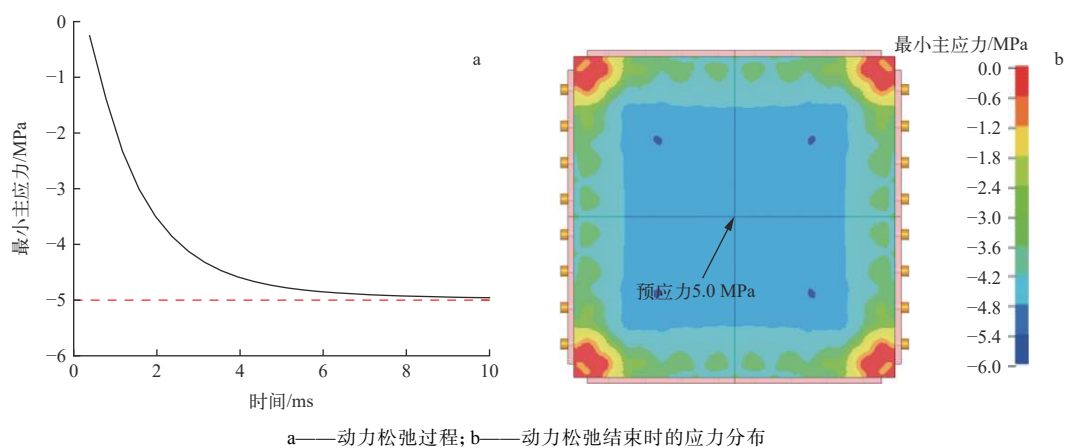


图8 预应力施加结果

Fig. 8 Result of prestressing

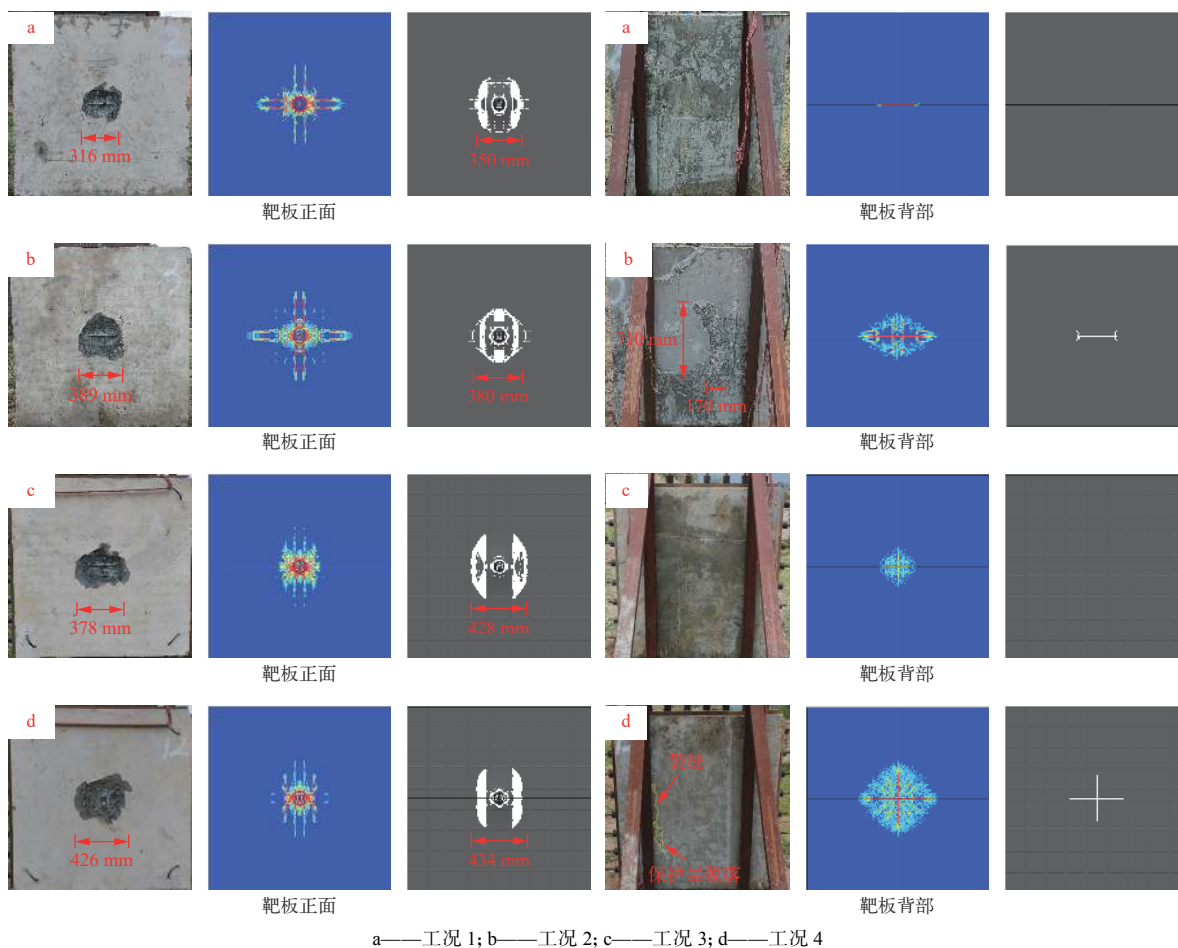


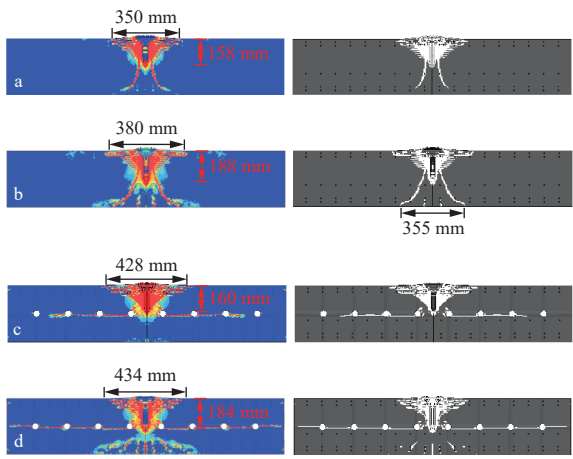
图9 靶板损伤情况对比

Fig. 9 Comparison of target plate damage

模式判定流程对数值模拟结果进行破坏模式识别,与试验结果完全一致。

通过以上分析可知,本研究给出的数值模拟方法可以对普通钢筋混凝土靶板和预应力钢筋混

凝土靶板在侵彻条件下的侵彻深度、正面开坑深度、背部震塌范围给出较好的预测结果,并且给出了基于数值模拟计算结果的靶板破坏模式判定方法。



a——工况 1; b——工况 2; c——工况 3; d——工况 4
图 10 靶板剖面损伤情况对比
Fig. 10 Comparison of damage of target plate profile

表 7 数值模拟计算结果与试验结果的对比
Table 7 Comparison between numerical simulation calculation result and experimental result

工况	破坏深度/mm	开坑直径/mm	震塌直径/mm	破坏模式
1	试验 152	316		背部无损
	模拟 158(+3.9%)	350(+10.8%)		背部无损
2	试验 190	389	440	背部震塌
	模拟 188(-1.1%)	380(-2.3%)	355(-19.3%)	背部震塌
3	试验 150	378		背部无损
	模拟 160(+6.7%)	428(+13.2%)		背部无损
4	试验 182	426		背部开裂
	模拟 184(+1.1%)	434(+1.9%)		背部开裂

注: 括号内为相对误差

3 预应力对结构抗侵彻能力影响分析

为了进一步说明预应力对混凝土结构抗侵彻能力的影响,采用第 2 节标定的数值模拟方法拓展分析工况进行分析,增加弹体侵彻速度至 440、480、500、520、540 m/s,全面分析预应力对靶板抗侵彻全过程的影响。

损伤灰度图可较为直观地给出靶板破坏范围,提取冲击速度为 440、480、500 m/s 时普通钢筋混凝土靶板和预应力钢筋混凝土靶板的损伤灰度图,如图 12~14 所示,汇总所有冲击工况的数值模拟数据列于表 8。结合对试验的模拟结果可以发现以下规律: 1) 若弹体侵彻后靶板背部没有发生明显破坏,普通钢筋混凝土靶板和预应力钢筋混凝土靶板的弹体侵彻深度较为接近,如 2.2 节的模拟结果以及侵彻速度为 440 m/s; 2) 若弹体侵

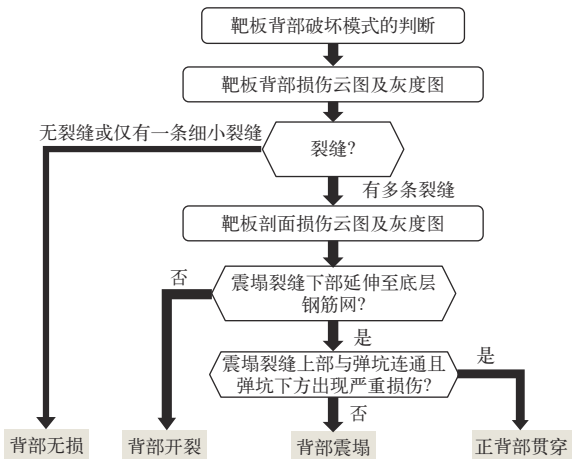


图 11 靶板损伤模式判定方法
Fig. 11 Damage pattern determination method of target plate

彻过程使靶板背部混凝土大范围压溃破坏,则弹体侵彻预应力钢筋混凝土靶板深度较普通钢筋混凝土靶板有所减小,如侵彻速度为 480 m/s; 3) 若弹体穿透靶板,穿透预应力钢筋混凝土靶板的剩余速度小于普通钢筋混凝土靶板,如侵彻速度为 500、520、540 m/s; 4) 随着侵彻速度的增加,弹体穿透预应力钢筋混凝土靶板和普通钢筋混凝土靶板的剩余速度逐渐接近,如侵彻速度为 500 m/s 时剩余速度相差 84%,侵彻速度为 520 m/s 时相差 20%,侵彻速度为 540 m/s 时相差 10%。分析认为这是由于预应力钢筋混凝土靶板 5 MPa 的初始侧向约束作用对于弹体侵彻完好混凝土靶板时产生的约 1 GPa 的高压应力可忽略不计,因此当速度较小时,侵彻过程没有使靶板剩余部分发生严重破坏的情况下,预应力无法发挥明显作用,但是当侵彻速度增加使靶板剩余部分发生明显破坏,混凝土本身对于弹体的阻挡作用衰减,预应力可以发挥出较为明显的作用,当速度进一步增加,弹体以较高速度穿过混凝土靶板,预应力来不及发挥作用,预应力对弹体穿透速度的减小效果逐渐减小。除此之外还可以发现相同侵彻速度时,预应力钢筋混凝土靶板的正面开坑范围和背部震塌范围普遍大于普通钢筋混凝土靶板,与试验结论一致,这是由于预应力的施加使靶板表面产生一定的初始拉应力,在冲击发生时更容易剥落。

通过以上分析可以发现,预应力对于混凝土结构抗侵彻能力的影响较为复杂,靶板损伤状态不同时,预应力对于阻挡弹体侵彻作用发挥着不同的作用,侵彻深度相对靶板厚度较小时,预应力

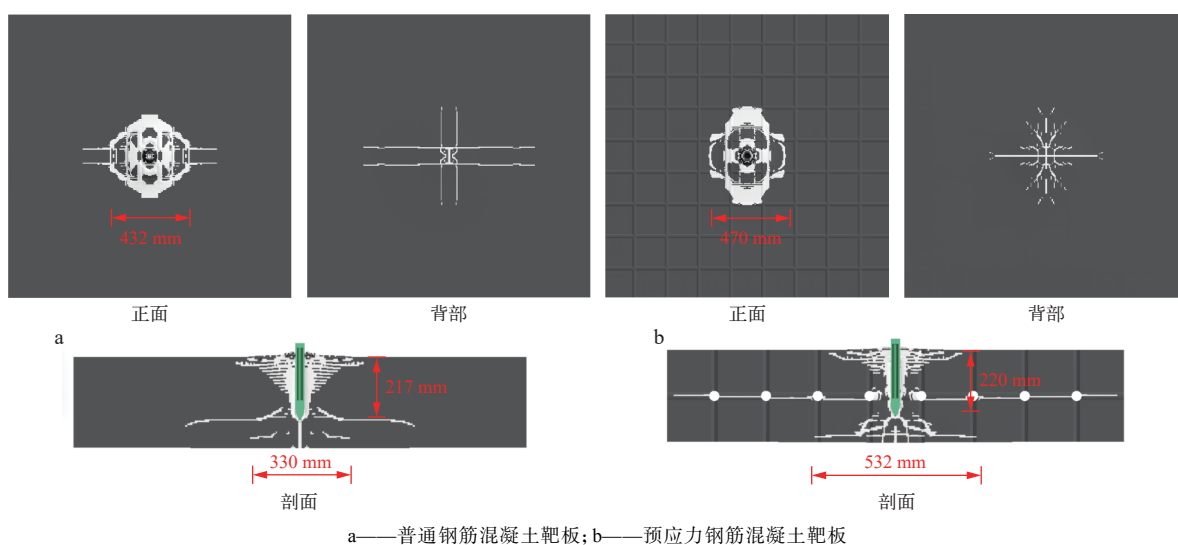


图 12 冲击速度为 440 m/s 的靶板损伤灰度图

Fig. 12 Gray scale image of target plate damage with an impact speed of 440 m/s

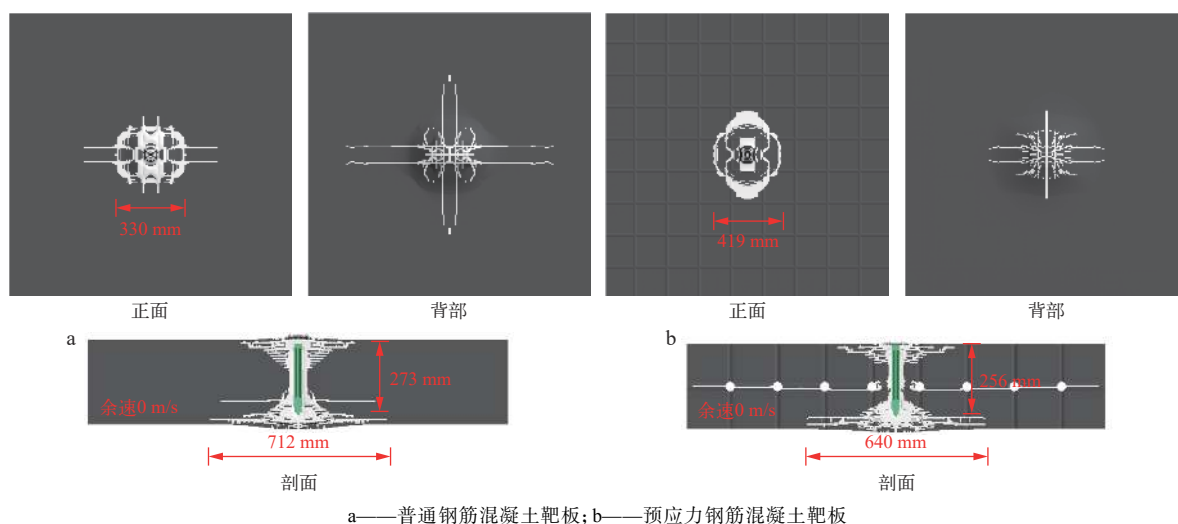


图 13 冲击速度为 480 m/s 的靶板损伤灰度图

Fig. 13 Gray scale image of target plate damage with an impact speed of 480 m/s

发挥作用较小,靶板背部出现明显震塌破坏后,预应力可较为明显的发挥作用。但总体来看,5 MPa 作用的预应力水平对于普通钢筋混凝土靶板的抗侵彻能力影响较小。

4 结论

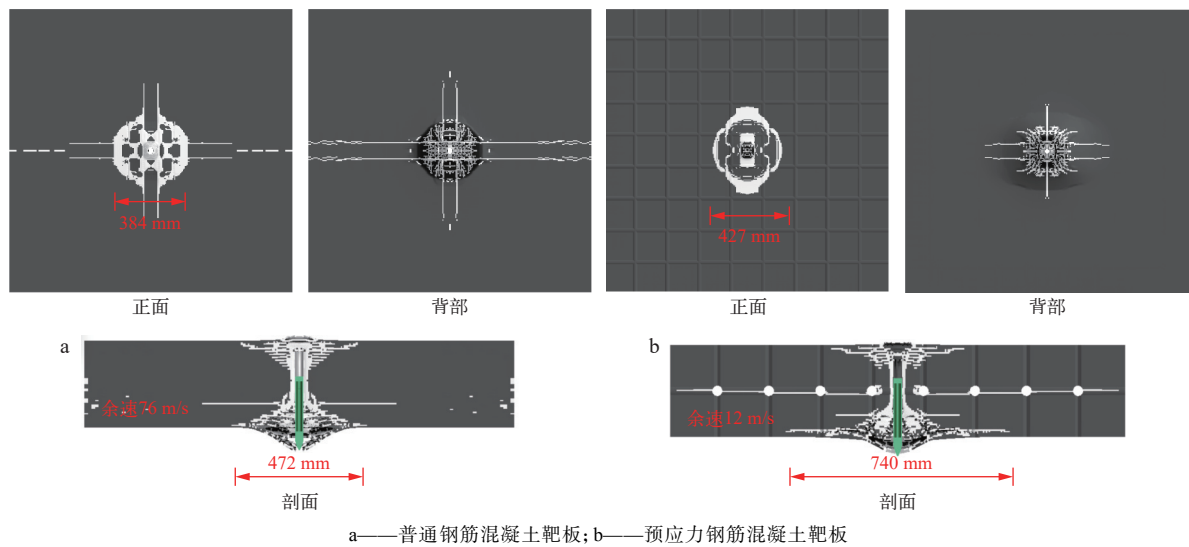
本研究针对预应力钢筋混凝土结构抗侵能力开展了试验及数值模拟分析,探讨预应力对混凝土结构抗侵彻能力的影响,主要结论如下。

1) 开展了预应力钢筋混凝土靶板和普通钢筋混凝土靶板的抗侵彻能力试验,仅改变是否施加预应力进行对比分析,试验结果表明,

预应力对混凝土靶板正面开坑深度的影响较小,但是初始预应力的施加会使靶板表面混凝土更容易崩落,正面开坑范围较大。

2) 对试验全过程进行了数值模拟分析,数值模拟结果与试验结果误差较小,侵彻深度模拟相对误差不超过 10%,开坑直径模拟相对误差不超过 15%,验证了采用的本构模型、参数取值和有限元分析方法在描述侵彻作用下靶体动态阻力、损伤演化 and 开裂行为方面的准确性,并给出了基于数值模拟方法的靶板损伤模式判别方法。

3) 基于数值模拟方法拓展试验工况进行分析,给出了不同侵彻速度下预应力对靶板的抗侵



a——普通钢筋混凝土靶板; b——预应力钢筋混凝土靶板

图 14 冲击速度为 500 m/s 的靶板损伤灰度图

Fig. 14 Gray scale image of target plate damage with an impact speed of 500 m/s

表 8 数值模拟结果统计

Table 8 Statistics of numerical simulation result

冲击速度/(m/s)	靶板类型	侵彻深度/mm	开坑直径/mm	震塌直径/mm	剩余速度/(m/s)	破坏模式
440	普通钢筋混凝土靶板	217	432	330	0	震塌
	预应力钢筋混凝土靶板	220	470	532	0	贯穿
480	普通钢筋混凝土靶板	273	330	712	0	贯穿
	预应力钢筋混凝土靶板	256	419	640	0	贯穿
500	普通钢筋混凝土靶板		384	472	76	贯穿
	预应力钢筋混凝土靶板		427	740	12	贯穿
520	普通钢筋混凝土靶板		403	568	100	贯穿
	预应力钢筋混凝土靶板		424	680	80	贯穿
540	普通钢筋混凝土靶板		384	600	150	贯穿
	预应力钢筋混凝土靶板		412	630	134	贯穿

彻能力影响,分析结果总体表明预应力对靶板抗侵彻能力的影响较小,预应力增加的围压使得弹体穿过靶板受到的阻力有所增加,弹体穿过预应力钢筋混凝土靶板的剩余速度较普通钢筋混凝土靶板有所降低。

参考文献:

[1] 葛育勤. 核电厂安全壳考虑温度作用的极限承载力研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.

[2] 蒋迪, 王黎丽, 杨建华, 等. “华龙一号”抗商用大飞机撞击设计[J]. 核科学与工程, 2021, 41(1): 122-128.

JIANG Di, WANG Lili, YANG Jianhua, et al. Design of resisting malicious impact of large commercial aircraft of “HPR1000”[J]. Nuclear Science and Engineering, 2021,

41(1): 122-128(in Chinese).

[3] 梁振斌, 聂君锋, 王海涛. 高温气冷堆舱室抗商用飞机撞击的耦合数值分析[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(2): 327-333.

LIANG Zhenbin, NIE Junfeng, WANG Haitao. Coupled numerical analysis of large commercial aero plane impact on reactor cavity of High Temperature Gas-cooled Reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(2): 327-333(in Chinese).

[4] 冯尧, 王洪涛, 王晓欣, 等. 飞机撞击下高温气冷堆乏燃料厂房损伤研究[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(3): 496-504.

FENG Yao, WANG Hongtao, WANG Xiaoxin, et al. Study on damage of spent fuel storage building of HTGR

- subjected to aircraft impact[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, 54(3): 496-504(in Chinese).
- [5] 朱秀云, 林皋, 路雨, 等. 大型商用飞机撞击钢板混凝土结构安全壳的有限元分析[J]. *原子能科学技术*, 2021, 55(3): 510-517.
- ZHU Xiuyun, LIN Gao, LU Yu, et al. FEM analysis of steel-plate concrete containment against large commercial aircraft[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2021, 55(3): 510-517(in Chinese).
- [6] 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): 102-109.
- 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): 102-109(in Chinese).
- [7] 宋梅利, 李文彬, 王晓鸣, 等. 弹体高速侵彻效率的实验和量纲分析[J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(6): 752-758.
- SONG Meili, LI Wenbin, WANG Xiaoming, et al. Experiments and dimensional analysis of high-speed projectile penetration efficiency[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(6): 752-758(in Chinese).
- [8] 黄民荣. 刚性弹体对混凝土靶的侵彻与贯穿机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [9] 胡功笠, 刘荣忠, 齐爱东. 动能弹侵彻钢筋混凝土靶的试验研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2005, 25(1): 24-26.
- HU Gongli, LIU Rongzhong, QI Aidong. Experimental study on a kinetic energy penetrator penetrating a reinforced concrete target[J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2005, 25(1): 24-26(in Chinese).
- [10] ZHU Q, HUANG Z, XIAO Q, et al. A semi-empirical study of penetration of shaped charge jet into high and ultra-high strength reactive powder concrete targets[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2021, 235(15): 2679-2691.
- [11] 朱灿伟. 弹体侵彻钢筋混凝土靶的效应研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2021.
- [12] 周宁, 任辉启, 沈兆武, 等. 侵彻钢筋混凝土过程中弹丸过载特性的实验研究[J]. *实验力学*, 2006, 21(5): 572-578.
- ZHOU Ning, REN Huiqi, SHEN Zhaowu, et al. Experimental study on overload characteristics of projectile penetrating reinforced concrete[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2006, 21(5): 572-578(in Chinese).
- [13] 任辉启, 何翔, 刘瑞朝, 等. 弹体侵彻混凝土过载特性研究[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(1): 110-116.
- REN Huiqi, HE Xiang, LIU Ruichao, et al. A study on the overload characteristics of projectile penetrating concrete[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(1): 110-116(in Chinese).
- [14] KENNEDY R P. A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1976, 37(2): 183-203.
- [15] 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.
- [16] YOUNG C W. The development of empirical equation for predicting depth of an earth penetrating projectile, SC-DR-67-60[R]. US: Sandia National Laboratories, 1967.
- [17] 金栋梁, 何翔, 刘瑞朝, 等. 岩石侵彻深度经验公式[C]//第五届全国工结构安全防护学术会议论文集. 南京: 中国力学学会爆炸力学专业委员会, 2005.
- [18] 何翔, 刘瑞朝, 吴飏, 等. 现场岩体侵彻试验研究及侵彻深度经验公式的提出[C]//中国软岩工程与深部灾害控制研究进展——第四届深部岩体力学与工程灾害控制学术研讨会暨中国矿业大学(北京)百年校庆学术会议论文集. 北京: [出版者不详], 2009: 328-331.
- [19] 武海军, 黄风雷, 金乾坤, 等. 弹体贯穿钢筋混凝土数值模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(6): 545-550.
- WU Haijun, HUANG Fenglei, JIN Qiankun, et al. Numerical simulation on perforation of reinforced concrete targets[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(6): 545-550(in Chinese).
- [20] 马爱娥, 黄风雷, 李金柱, 等. 钢筋混凝土抗贯穿数值模拟[J]. *北京理工大学学报*, 2007, 27(2): 103-107.
- MA Aie, HUANG Fenglei, LI Jinzhu, et al. Simulation on the perforation of reinforced concrete[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27(2): 103-107(in Chinese).
- [21] 程月华, 周飞, 吴昊. 抗战斗部侵彻爆炸作用的混凝土遮弹层设计[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(4): 113-130.
- CHENG Yuehua, ZHOU Fei, WU Hao. Design of concrete shield against the combination of penetration and explosion of warheads[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(4): 113-130(in Chinese).
- [22] 李磊, 张先锋, 吴雪, 等. 不同硬度 30CrMnSiNi2A 钢的动态本构与损伤参数[J]. *高压物理学报*, 2017, 31(3): 239-248.
- LI Lei, ZHANG Xianfeng, WU Xue, et al. Dynamic constitutive and damage parameters of 30CrMnSiNi2A steel with different hardnesses[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(3): 239-248(in Chinese).