

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20241227004

# 基于数值模拟的UHPC侵彻系数修正及别列赞公式优化\*

闫秋实<sup>1</sup>, 左耐昕<sup>1</sup>, 张志杰<sup>1</sup>, 洪铭徽<sup>1</sup>, 王庆轩<sup>2</sup>, 汪登<sup>2</sup>, 鲍欣盈<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 中建工程产业技术研究院有限公司, 北京 101300)

**摘要:** 为系统研究超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)抵抗长杆弹体冲击侵彻性能, 分析抗压强度对UHPC抗侵彻性能的影响, 为UHPC防护结构的设计提供理论依据和工程指导。采用校正后的K&C (Karagozian & Case)模型, 在LS-DYNA有限元软件中对长杆弹体侵彻普通混凝土和超高性能混凝土(UHPC)靶板的过程进行了建模和数值计算。利用经过验证的K&C模型参数, 进一步开展原型长杆射弹侵彻UHPC的数值模拟研究。基于数值模拟的结果对Berezan经验公式进行了修正和验证, 并将修正的Berezan公式与其他常用的经验公式进行对比, 结果表明: (1)UHPC的抗压强度的提高有利于其抗侵彻性能的提升, 但这种优势随着抗压强度的提高逐渐减弱; (2)数值模拟结果的可靠性和准确性可通过试验得到的结果数据进行验证, 同时得出了强度等级C100-C200的UHPC侵彻系数 $K_q$ 与抗压强度 $f_c$ 之间的关系, 为评估不同强度UHPC的抗侵彻性能提供了有价值的参考; (3)通过对比试验结果和其他经验公式, 修正后的Berezan公式的准确性得到了验证, 该公式能够准确预测长杆弹体在200~700 m/s着靶速度下侵彻强度等级C100-C200的UHPC侵彻深度, 为UHPC防护结构的设计提供有益的指导。

**关键词:** 侵彻; UHPC; 数值模拟; 长杆弹体; 修正Berezan公式

**中图分类号:** TU528.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-1088-10

## Modification of UHPC Penetration Coefficients Based on Numerical Simulation and Optimization of Berezan Formula

YAN Qiushi<sup>1</sup>, ZUO Naixin<sup>1</sup>, ZHANG Zhijie<sup>1</sup>, HONG Minghui<sup>1</sup>, WANG Qingxuan<sup>2</sup>,  
WANG Deng<sup>2</sup>, BAO Xinying<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;  
2. China Construction Industrial Engineering and Technology Research Academy Co., Ltd., Beijing 101300, China)

**Abstract:** This study aims to systematically investigate the penetration resistance of ultra-high performance concrete (UHPC) against long-rod projectile impacts and analyze the influence of compressive strength on the anti-penetration performance of UHPC, thereby providing a theoretical basis and engineering guidance for the design of UHPC protective structures. Using the calibrated K&C (Karagozian & Case) model, the process of long-rod projectiles penetrating normal concrete and UHPC targets was modeled and numerically simulated in the LS-DYNA finite element software. With the verified

\* 收稿日期: 2024-12-27; 修回日期: 2025-02-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178445)资助

作者简介: 闫秋实(1983—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事建筑结构抗爆设计、防护工程、武器效能评估、爆炸灾后评估方面的研究。E-mail: yqs2011@bjut.edu.cn

K&C model parameters, further numerical simulations of prototype long-rod projectiles into UHPC were carried out. Based on the numerical simulation results, the Berezan empirical formula was modified and verified, and the modified Berezan formula was compared with other commonly used empirical formulas. The results showed that: (1) the increase in compressive strength of UHPC enhanced its anti-penetration performance, but this advantage gradually weakened as compressive strength increased. (2) The reliability and accuracy of the numerical simulation results could be verified using experimental data. Additionally, the relationship between the penetration coefficient  $K_q$  and the compressive strength  $f_c$  for UHPC with strength grades C100-C200 was derived, providing a valuable reference for evaluating the anti-penetration performance of UHPC with different strengths. (3) By comparing the experimental results with other empirical formulas, the accuracy of the modified Berezan formula was verified. This formula could accurately predict the penetration depth of long-rod projectiles into UHPC with strength grades C100-C200 at impact velocities of 200-700 m/s, providing useful guidance for the design of UHPC protective structures.

**Keywords:** penetration; UHPC; numerical simulation; long-rod projectile; modified Berezan formula

## 0 引言

“积极防御”是我国国防战略的核心,强调主动防范潜在威胁。防护建筑工程作为国防体系的关键组成部分,对保障国家安全至关重要<sup>[1]</sup>。长杆弹体作为现代军事冲突中的常用武器,采用高强度、高密度材料制成,长径比超过10,能够在撞击时集中高动能,具备极强的侵彻能力,广泛用于攻击装甲、地下工事和坚固建筑<sup>[2]</sup>。当前,防御工事面临严峻挑战,除优化建筑结构外,开发具备超高性能的新型防护材料也势在必行。这些材料需具备卓越的抗冲击、抗侵彻和抗爆炸性能,以应对现代战争中的多样化威胁。

超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC)是一种新兴的建筑材料。在其制备过程中,通过使用高效减水剂可以实现极低的水胶比,从而提高材料的密实度与强度。此外,去除粗集料并加入活性矿物掺合料及微细集料,能够进一步优化其性能。微细钢纤维的加入显著增强了材料的韧性,使其在外力冲击下能够更好地抵御破坏。硬化后的UHPC具有超高的强度、韧性、抗力以及优异的耐久性,在复杂环境中仍能保持稳定的性能<sup>[3-4]</sup>。因此,UHPC在防护工程中应用广泛<sup>[5]</sup>。尽管对于普通混凝土抗侵彻性能的研究已有许多成果,但关于UHPC抵抗侵彻的研究相对较少。W. Wang等<sup>[6]</sup>使用质量为468 g的高强复合钢试验弹,对C40普通混凝土及C120和C130 UHPC进行侵彻试验。结果表明,在低强度条件下,UHPC的抗侵彻性能优于普通混凝土,但随着抗压强度的提

高,这种优势逐渐减小。张文华等<sup>[7]</sup>通过制备抗压强度达180 MPa的UHPC靶板并进行侵彻测试,研究表明,UHPC能够有效降低弹体对靶体造成的破坏程度,如显著降低侵彻深度和开坑直径。H. Wu等<sup>[8]</sup>通过510~1 320 m/s的高速射弹侵彻试验,发现抗压强度、纤维混合比和粗骨料对降低DOP(侵彻深度)有显著影响。然而,在纤维含量较低( $<3\%$ )的情况下,纤维含量的影响非常有限。这表明在高强度混凝土中,尽管纤维的加入可以改善性能,但其作用在一定含量以下时效果并不明显。P. Mácá等<sup>[9]</sup>通过试验研究了超高性能纤维混凝土(UHPFRC)配合比设计对其抗侵彻性能的影响。他们发现,与传统纤维增强混凝土(FRC)相比,UHPFRC的抗冲击性能更为稳健。高强纤维的加入显著提高了复合材料抵抗冲击载荷的能力,特别是在高强纤维含量为2%时,复合材料的抗弹丸冲击性能达到最佳状态。S. S. Wang等<sup>[10]</sup>利用数值模拟研究了抗压强度为60~140 MPa的高强混凝土在高速(400~600 m/s)弹丸侵彻下的冲击响应。数值计算结果与试验结果非常接近,对侵彻深度进行了较好的预测。X. Z. Kong等<sup>[11]</sup>基于改进后的HJC(Holmquist-Johnson-Cook)模型,通过数值模拟对不同射弹质量、着靶速度和混凝土厚度进行了多组侵彻试验。研究结果表明,数值模型能够准确预测侵彻深度、开坑直径和剩余速度,且与试验结果吻合良好。练兵等<sup>[12]</sup>采用三段式线性状态方程,基于拉伸破坏与剪切饱和的Mohr-Coulomb屈服准则,提出混凝土材料准静态空腔膨胀理论,结合A-T模型(Aleksandrov-Tikhonov)对半无限混凝土

靶的长杆弹体高速侵彻进行了理论分析并进行了试验,且分析结果与试验结果具有较好的一致性。王杰等<sup>[13]</sup>针对 TU1 铜和 Q235 钢两种类型的长杆弹体对强度分别为 26.5 MPa 和 42.1 MPa 的混凝土靶进行了正侵彻试验,根据开坑截面弓形形态推导出了开坑深度的预测公式。吕映庆等<sup>[14]</sup>制备了 120 MPa 和 160 MPa 的 UHPC 靶体,开展了侵彻试验,并通过量纲分析修正了 NDRC 经验公式。王安宝等<sup>[15]</sup>提出了用无量纲冲击指数  $Z$  来表征主要因素对侵彻深度的影响,假设不同抗压强度 UHPC 介质的抗侵彻特征相同,通过引入射弹质量修正系数反映比例模型试验的影响,并加入防护结构可靠性调整系数,建立了一个心型通用侵彻深度计算公式,但该公式有待于补充试验进行验证。

现阶段,关于超高性能混凝土(UHPC)抵抗长杆弹体冲击侵彻性能的研究尚未完善,目前已有研究多局限于特定弹体类型,如舰炮弹、动能杀伤弹或者早期穿甲弹,这些弹体为了保证良好的杀伤效果,一般长径比较小;除此之外,已有研究多针对于某一种特定强度的 UHPC,且 UHPC 的抗压强度多集中于 120~160 MPa。因此其结论的应用范围和精确度存在明显局限。本文运用 LS-DYNA 有限元软件,基于现有的 KC 材料本构模型,对长杆弹体侵彻超高性能混凝土(UHPC)的过程进行了模拟。此外,还进行了参数化分析,深入探讨了混凝土的抗压强度以及长杆弹体的着靶速度对侵彻深度的具体影响。通过这些参数化分析,得到了适用于 UHPC 的侵彻系数,从而对现有的 Berezan 公式进行了修正,推导出了适用于长杆弹体侵彻 UHPC 的侵彻深度(DOP)预测公式。经过与现有试验数据的对比分析,新修正的公式在准确性方面得到了验证。与传统的侵彻深度预测公式相比,该新公式展现出更优的预测能力。这不仅为超高性能混凝土(UHPC)的抗侵彻性能快速评估提供了宝贵的参考依据,还为 UHPC 在防护工程领域的设计与实施奠定了坚实的理论基础。

## 1 长杆弹体侵彻 UHPC 数值模型及验证

### 1.1 弹体侵彻 UHPC 靶体试验

聂晓东等<sup>[16]</sup>制备了抗压强度 160 MPa 的 UH-

PC 靶体,并使用 35CrMnSiA 合金弹体开展了 200~350 m/s 的侵彻试验,弹体屈服强度为 1 300 MPa。试验弹长约 300 mm、质量 1 000 g、弹径为 30 mm、CRH 为 10。靶体直径 1.3 m,并通过周围厚 5 mm 的钢套筒进行约束。现场共进行 8 炮次试验,其中:4#组弹体着靶速度 292 m/s,侵彻深度 194 mm;8#组弹体着靶速度 345 m/s,侵彻深度 227 mm。

### 1.2 计算模型及网格划分

使用 LS-DYNA 建立了三维轴对称数值模型,如图 1 所示。采用 8 节点实体单元 SOLID 164,并使用拉格朗日算法模拟。通过关键字 \*CONTROL\_HOURGLASS 启动模型的 Flanagan-Belytschko 沙漏刚度控制。由于弹体和靶板具有对称性,为限制计算规模,节约求解时间,建立四分之一对称模型,并在对称边界处施加对称约束。参考 J. Liu 等<sup>[17]</sup>和 J. Feng 等<sup>[18]</sup>的方法,对靶板外表面施加固定约束,以模拟试验过程中靶板的固定效果。

合理的网格划分可在保证计算精度的同时提升效率。如图 2 所示,通过 2~10 mm 范围内的网格敏感性分析,确定 3 mm 为最佳网格尺寸。在靶板

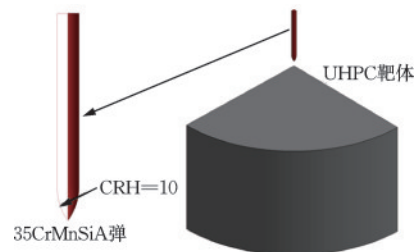


图1 长杆弹体侵彻 UHPC 有限元模型

Fig.1 Finite element model of UHPC target and long-rod projectile

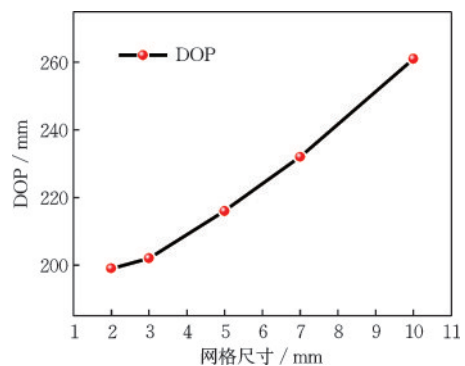


图2 网格敏感性分析

Fig.2 Mesh sensitivity analysis

中心 100 mm 范围内进行加密,使加密区网格尺寸与弹体相近(约 3 mm),非加密区网格尺寸逐渐过渡至 8 mm,以兼顾计算效率。如图 3 所示。

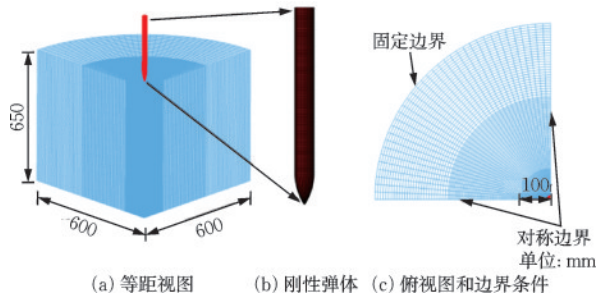


图 3 UHPC 靶体与长杆弹体网格划分

Fig.3 Mesh division of UHPC target and long-rod projectile

### 1.3 模型参数

实际应用中长杆弹体通常采用高强度合金钢制造,试验发现,弹体除了表面留下些许擦痕外,几乎未发生形变,在现有的研究当中认为弹体侵彻着靶速度低于 1 000 m/s 可将弹体视为刚体<sup>[19]</sup>,故在后续数值模拟中,将弹体视为刚体进行处理。在 LS-DYNA 中,使用关键字 \*MAT\_RIGID 来描述长杆弹体。弹体材料为 35CrMnSiA,这是一种优良的高强度合金钢,具有出色的性能和抗冲击性能。根据 J. Ren 等<sup>[20]</sup>对该材料力学性能的研究,汇总材料

参数见表 1,以确保数值模拟的准确性和可靠性。

表 1 35CrMnSiA 材料参数

Table 1 Material parameters of 35CrMnSiA

密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa
7 850	194	0.30	1 675

在 LS-DYNA 中,KC、TCK、EPH、RHT 和 JHC 等多种混凝土材料本构已广泛用于侵彻数值模拟。本研究采用 KC 材料本构模型对 UHPC 进行建模。KC 模型基于塑性理论,使用三个独立的强度面,适用于普通混凝土和超高性能混凝土(UHPC)的爆炸行为模拟。其主要优点是通过无侧限抗压强度、密度和泊松比等简单输入参数,自动生成大部分材料参数和状态方程。尽管该参数生成方案针对普通混凝土,但 LS-DYNA 允许用户根据具体混凝土类型校准和输入 KC 模型参数。UHPC 的 KC 材料本构部分基本参数见参考文献[21],密度  $\rho=2\,500\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量  $E=55.4\text{ GPa}$ ,泊松比为  $\mu=0.2$ ,剪切模量  $G=23.1\text{ GPa}$ ,根据 Q. Su 等<sup>[22]</sup>的研究,对其他参数(如拉伸强度、LocWidth、 $b_1$ 、 $b_2$ 、Omega)进行了校准,其他较难获得的参数,基于文献[23]中提供的参数,通过大量数值模拟计算尝试进行细致的调整,得到能够准确描述 UHPC 材料的 KC 本构模型参数。其 LocWidth=10 mm;  $a_1=0.367$ ;  $b_1=1$ ;  $b_2=2.5$ , Omega=1.84,其他重要参数取值见表 2。

表 2 KC 模型主要参数

Table 2 Main parameters of KC model

编号	$f_c/\text{MPa}$	$f_t/\text{MPa}$	$a_0/\text{MPa}$	$a_2/\text{MPa}^{-1}$	$a_{0y}$	$a_{2y}$
UHPC-1	100	6.479	22.220	0.001 789	22.130	0.004 938
UHPC-2	120	7.316	26.666	0.001 491	26.556	0.004 115
UHPC-3	150	8.490	33.330	0.001 193	33.195	0.003 292
UHPC-4	180	9.588	39.996	0.000 994	39.834	0.002 743
UHPC-5	200	10.285	44.440	0.000 895	44.260	0.002 469

### 1.4 接触与边界效应

为了更好地模拟真实的侵彻过程,在数值模拟中,靶体与弹体接触采用面面侵蚀接触,使用了关键字 \*CONTACT\_ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE 进行定义。同时,鉴于 KC 本构模型未提供失效删除的具体参数设定,为防止在高加载速率条件下出现计算溢出或单元形变失真现象,使用了单元失效算法(\*Mat\_Add\_Erosion)。单元失效

准则基于最大压缩主应变  $\epsilon_{\max}$  和最大剪切应变  $\gamma_{\max}$ <sup>[24]</sup>。当  $\epsilon_{\max}$  或  $\gamma_{\max}$  达到临界值时,程序会自动删除失效单元和节点。B. M. Luccioni 等<sup>[25]</sup>总结混凝土单元失效准则和失效极限,并发现单元失效的极限值与单元网格的大小高度相关,但当网格精细到一定程度时,这种依赖性会逐渐消失。因此,为了确定合适的最大压缩主应变和最大剪切应变,将仿真结果与 350 m/s 下的试验结果<sup>[14]</sup>进行了匹配。最终最大压缩主应变和最大剪切应变分别取为

0.12 和 0.1,并在所有仿真中采用相同的准则。文献[26]研究表明,当靶体的直径大于弹体直径的15倍时,在靶体的周围进行约束,即可忽略边界效应对侵彻深度的影响,因此本文开展的数值模拟靶体直径取为弹径的20倍,并在所有仿真中采用相同的准则。

### 1.5 模型验证

材料本构参数的选取对弹体侵彻超高性能混凝土(UHPC)靶板数值模拟结果的精确度确实具有至关重要的影响。因为数值模拟过程通常依赖于材料的力学性能和变形行为的准确描述,而这些性能参数直接影响模拟过程中应力、应变分布以及破坏模式的预测。故需要对本构参数进行验证。用表1和表2中的模型参数开展数值模拟,通过与试验结果对比用以验证模型参数的准确性与正确性。

通过对比数值模拟与已有试验结果<sup>[16, 27-29]</sup>的分析(表3)可以得出以下几点结论:在六组试验中,数值模拟与实测数据的吻合度较高。具体来说,计算值与试验值在侵彻深度上的误差较小,最大误差控制在7.7%以内,最小误差约为3.5%;在开坑直径方面,最大误差为7.8%,最小误差为4.1%。这些结果表明,数值模拟能够较为准确地预测侵彻过程中的关键参数。然而,数值模拟的误差可能来源于多个方面:材料参数的敏感性(如UHPC的本构模型参数)可能导致结果偏差;网格尺寸的选择影响局部应力集中和损伤演化的精度;边界条件的假设(如靶体固定方式和载荷简化)也可能导致产生误差。如图4所示,UHPC靶体的损伤状况被直观呈现,进一步验证了数值模拟与试验结果的高度一致性。总体而言,本文中数值模型为理解和预测UHPC靶体损伤过程和结果提供了有效工具,具有较好的准确性和可靠性。

## 2 修正 Berezan 公式

### 2.1 Berezan 公式介绍

在预测弹体侵彻混凝土的深度方面,存在众多公式可供借鉴,由于建立的理论基础和试验范围不同,这些公式自身都具有局限性,其中绝大部分仅适用于普通混凝土或者常规弹型,对长杆弹体侵

表3 数值模拟与试验结果对比

Table 3 Comparison between numerical simulation and experimental results

试验 编号	弹速/ (m·s <sup>-1</sup> )	侵彻深度/mm			开坑直径/mm		
		试验 值	计算 值	误 差%	试验 值	计算 值	误 差%
1#	820	274	285	4.0	239	257	7.5
2#	690	239	253	5.9	226	243	6.9
3#	800	155	167	7.7	80	85	6.2
4#	365	530	557	5.1	890	930	4.5
5#	294	209	202	3.5	250	235	4.1
6#	345	227	241	6.3	320	295	7.8

UHPC的深度预测较差。目前,我国的防护规范中用于预测射弹侵彻混凝土目标DOP的公式是修正后的Berezan公式<sup>[30]</sup>。该公式是根据俄罗斯研究人员根据弹丸射击试验提出的经验公式修正而成的,并经过多次真实的侵彻试验验证和修正。试验中弹丸的撞击速度范围为300~765 m/s,因此该公式适用于常规侵彻速度范围内(800 m/s以下)的DOP预测。公式形式如下:

$$\frac{h_q}{d} = \lambda_1 \lambda_2 K_q \frac{P}{d^2} V \quad (1)$$

式中, $h_q$ 为侵彻深度(m); $d$ 为弹体直径(m); $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 分别为弹形系数和弹径系数,由弹体形状决定; $K_q$ 为混凝土侵彻系数,仅与混凝土性能有关; $P$ 为弹体质量(kg); $V$ 为着靶速度(m/s)。

### 2.2 原型长杆弹体侵彻 UHPC 数值模拟

本文数值模拟中UHPC靶体的抗压强度( $f_c$ )范围为100~200 MPa;长杆弹体参数取自三种比较典型的常规制导武器及其战斗部<sup>[31]</sup>,其技术诸元见表4。表中 $L$ 为弹体长度, $d$ 为弹体直径, $L_r$ 为弹卵长度, $P$ 为战斗部质量。弹体着靶速度取值范围为200~800 m/s,符合长杆弹体的常规侵彻速度范围。基于以上选取的参数,共设计了45个计算工况,分别计算三种长杆弹体在300、500、700 m/s速度下对五种不同强度UHPC靶体的侵彻深度,计算结果如图4所示,旨在通过这些数据来修正原始的Berezan公式,使修正后的公式可以更加准确地预测长杆弹体对UHPC的侵彻深度。

### 2.3 UHPC 侵彻系数

目前已有的混凝土侵彻系数,主要是在针对普

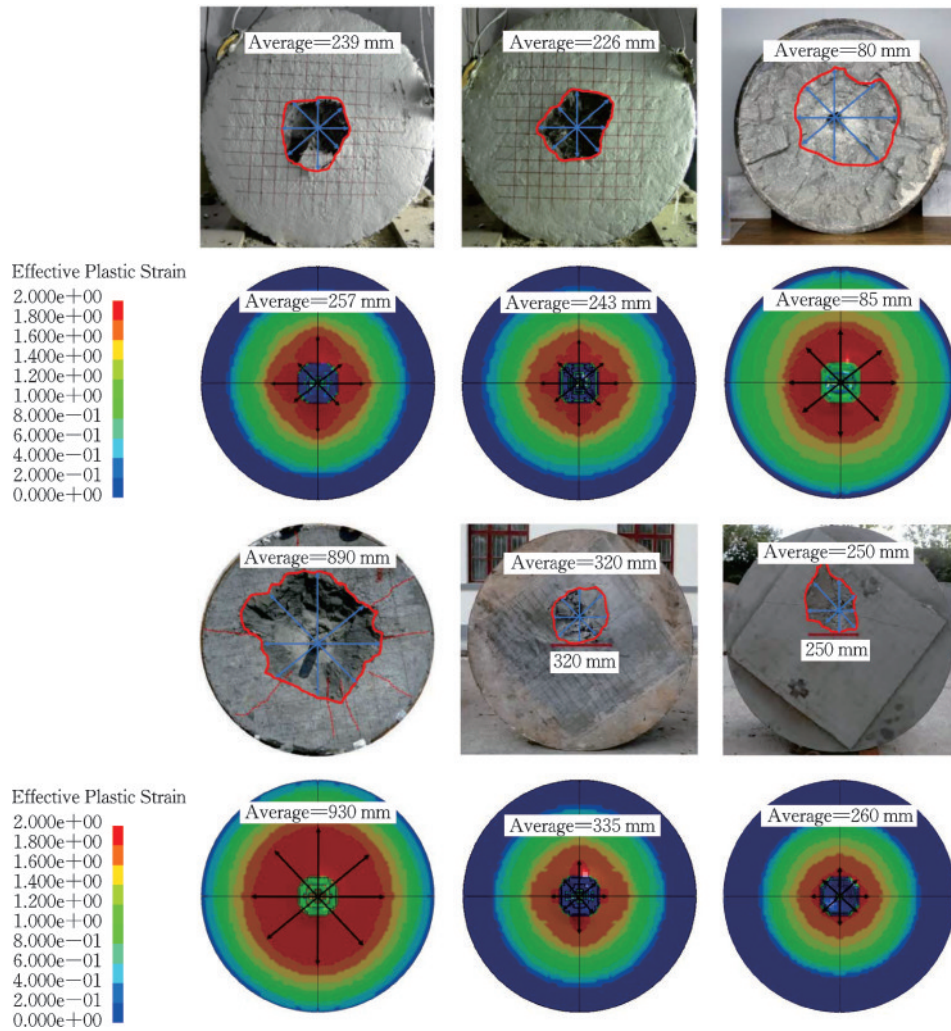


图4 不同侵彻速度下靶体损伤的试验与数值模拟对比

Fig.4 Comparison of target damage between experiments and numerical simulations at different penetration velocities

表4 常规制导武器技术诸元

Table 4 Technical specifications of conventional guided weapons

常规武器型号	$d/m$	$L/m$	$L_r/d$	$P/kg$	战斗部型号
GBU-24A	0.370	4.32	1.66	874	BLU-109B
GBU-28B	0.368	5.84	0.87	2 000	BLU-113
GBU-16	0.36	3.7	1.94	227	MK83

通混凝土靶体进行弹体侵彻试验的过程中得出的。因此,该方法对UHPC具有很大的局限性,为了获取UHPC的侵彻系数,需要大量的侵彻深度数据。鉴于此,采用图5数值模拟侵彻深度中的数值模拟结果进行分析。为了便于研究,引入无量纲化参数相对侵彻深度 $D$ 来反映UHPC受长杆弹体冲击后的侵彻深度大小,相对侵彻深度定义为 $X/X_{max}$ , $X_{max}$ 为长杆弹体体侵彻强度为100 MPa靶体的深度,控制其他条件不变,其他强度混凝土受长杆弹体体冲

击后的侵彻深度为 $X$ 。相对侵彻深度 $D$ 与UHPC抗压强度 $f_c$ 的关系曲线如图6所示( $D_1$ 、 $D_2$ 和 $D_3$ 分别为BLU-109B、BLU-113、MK83侵彻UHPC的相对侵彻深度)。

如图6所示,在不同侵彻速度下,长杆弹体相对侵彻深度 $D$ 与UHPC的抗压强度 $f_c$ 呈现出明显的指数函数关系。这表明,随着UHPC抗压强度的提高,其抗侵彻能力显著增强,因为高强度材料能更好地抵抗冲击载荷和吸收能量。然而,这种增强效应并非线性,而是随着抗压强度的进一步提升逐渐减弱,即当 $f_c$ 达到较高水平时,抗侵彻能力的提升幅度趋于平缓。这种现象可能与UHPC在高强度下塑性变形能力下降、局部破坏集中、纤维增强效果趋于饱和以及界面过渡区的脆弱性增加有关,导致其在高应力条件下的能量吸收能力相对受限。因此,尽管提高UHPC的抗压强度可以有效提升其抗

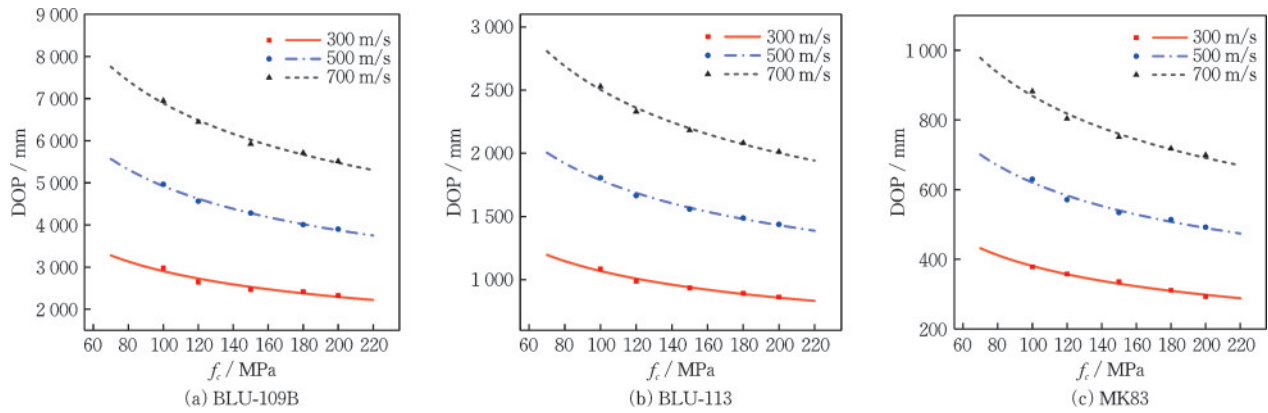


图5 数值模拟侵彻深度

Fig.5 Numerical simulation of penetration depth

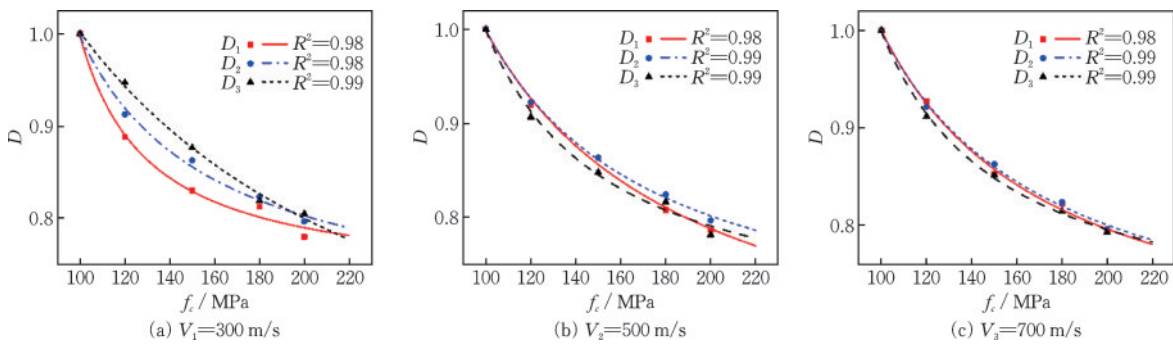


图6 相对侵彻深度与抗压强度关系曲线

Fig.6 Relationship curves between relative penetration depth and compressive strength

侵彻性能,但在实际应用中需综合考虑材料强度与韧性之间的平衡,以达到最佳抗侵彻效果。根据式(1)可知UHPC的侵彻系数为:

$$K_q = \frac{h_q d^2}{\lambda_1 \lambda_2 P V} \quad (2)$$

综合数值模拟结果和式(2),可以得到不同强度UHPC的侵彻系数。具体结果见表5、表6和表7。通过对比发现,UHPC靶体在长杆弹体三种速度下的侵彻系数接近,但仍有少量差距,如图7所示。为了便于实际应用,同时考虑到取值的可靠性,最终得到的UHPC侵彻系数介于这几者之间,

偏为保守。UHPC侵彻系数与抗压强度的关系见表9,适用于长杆弹体在200~800 m/s侵彻UHPC靶体。为最终得到的UHPC侵彻系数与表5~6和表7中侵彻系数对比的结果。综合表8最终确定的UHPC侵彻系数,不同强度UHPC侵彻系数 $K_q$ 与抗压强度 $f_c$ 的关系可拟合为:

$$K_q = 2.32 \times 10^{-6} (f_c)^{-0.33} \quad (3)$$

表5 UHPC侵彻系数(300 m/s)

Table 5 Penetration coefficients of UHPC (300 m/s)					
UHPC强度等级	C100	C120	C150	C180	C200
GBU-24A	5.10	4.53	4.30	4.14	3.97
$K_q (\times 10^{-7})$ GBU-28B	5.09	4.65	4.40	4.19	4.06
GBU-16	5.04	4.70	4.52	4.19	3.95

表6 UHPC侵彻系数(500 m/s)

Table 6 Penetration coefficients of UHPC (500 m/s)					
UHPC强度等级	C100	C120	C150	C180	C200
GBU-24A	5.10	4.69	4.40	4.12	4.01
$K_q (\times 10^{-7})$ GBU-28B	5.09	4.70	4.40	4.20	4.05
GBU-16	5.09	4.83	4.32	4.16	3.98

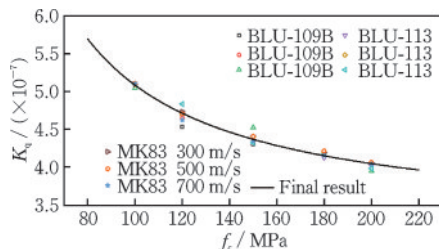


图7 不同强度混凝土的侵彻系数比较

Fig.7 Comparison of penetration coefficients for concrete with different strengths

表7 UHPC 侵彻系数(700 m/s)

UHPC 强度等级	C100	C120	C150	C180	C200
GBU-24A	5.09	4.73	4.35	4.19	4.05
$K_q (\times 10^{-7})$ GBU-28B	5.10	4.70	4.40	4.21	4.06
GBU-16	5.10	4.62	4.34	4.15	4.04

表8 UHPC 侵彻系数(200~800 m/s)

UHPC 强度等级	C100	C120	C150	C180	C200
$K_q (\times 10^{-7})$	5.09	4.68	4.38	4.17	4.02

### 2.4 修正 Berezan 公式与其他传统公式的比较

为了验证改良 Berezan 公式的准确性与可靠性,将其与试验<sup>[14]</sup>得到的侵彻深度进行比较,并与其他常用的侵彻深度预测公式一起进行对比,包括 NDRC 公式<sup>[32]</sup>, C.W. Young 公式<sup>[33]</sup>以及 ACE 公式<sup>[34]</sup>,结果如图 8 所示。可以看出,ACE 公式与 NDRC 公式在预测的长杆弹体侵彻 UHPC 靶体的深度结果过于偏低,C.W. Young 公式的预测结果则过于偏高。本文修正的 Berezan 公式对长杆弹体侵彻 UHPC 的预测结果与数值模拟结果误差较小,预测总体效果最佳。

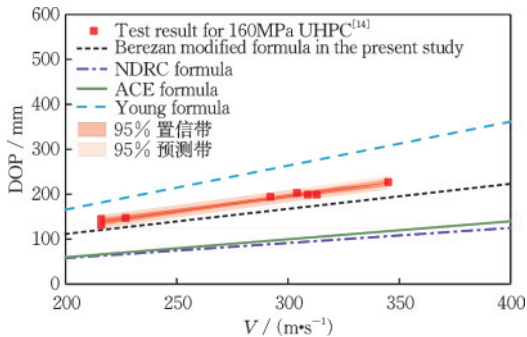


图8 改良 Berezan 公式与常用经验公式的对比

Fig.8 Comparison between modified Berezan formula and commonly used empirical formulas

## 3 结论

基于修正的 KC 混凝土本构模型,利用 LS-Dyna 建立了长杆弹体侵彻 UHPC 靶体的有限元模型,并在前人试验及研究的基础上进一步校准了 UHPC 的 KC 本构模型参数,校准后的模型与试

验结果误差在 7.7% 以下,通过数值模拟研究了抗压强度 100~200 MPa 的 UHPC 在长杆弹体 200~800 m/s 冲击速度下的侵彻深度变化规律,得到如下结论:

(1)长杆弹体的侵彻深度与 UHPC 靶体抗压强度有关,UHPC 的抗压强度的提高有利于其抗侵彻性能的提升,但这种优势随着抗压强度的提高逐渐减弱。

(2)数值模拟结果的可靠性和准确性可通过试验得到的结果数据进行验证,同时得出了强度等级 C100-C200 的 UHPC 侵彻系数  $K_q$  与抗压强度  $f_c$  之间的关系,为评估不同强度 UHPC 的抗侵彻性能提供了有价值的参考。

(3)通过对比试验结果和其他经验公式,修正后的 Berezan 公式的准确性得到了验证,该公式能够准确预测长杆弹体在 200~700 m/s 着靶速度下侵彻强度等级 C100-C200 的 UHPC 侵彻深度,为 UHPC 防护结构的设计提供有益的指导。

### 参考文献:

- [1] 岳万英.从近几场局部战争看防护工程在未来战争中的作用和地位[C]//中国土木工程学会防护工程分会第五届理事会暨第九次学术会议.长春:中国土木工程学会,2004:1-9.  
Yue W Y. The role and position of protective engineering in future wars as viewed from recent local conflicts [C] //The Fifth Council and the Ninth Academic Conference of the Protective Engineering Branch of the China Civil Engineering Society. Changchun: China Civil Engineering Society, 2004: 1-9. (in Chinese)
- [2] 张小东,胡海,姜林君.美国海军战斧巡航导弹战术技术特性分析[J].飞航导弹,2020(11): 31-36.  
Zhang X D, Hu H, Jiang L J. Analysis of tactical and technical characteristics of US navy tomahawk cruise missile [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020 (11) : 31-36. (in Chinese)
- [3] Redondo-Mosquera J D, Sánchez-Angarita D, Redondo-Pérez M, et al. Development of high-volume recycled glass ultra-high-performance concrete with high C3A cement [J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e01906.
- [4] Alkaysi M, El-Tawil S, Liu Z C, et al. Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (UHPC) [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 66: 47-56.

- [5] 赖建中, 何勇, 任辉启. UHPC 防护工程材料研究进展[J]. 防护工程, 2023, 45(1): 1-7.  
Lai J Z, He Y, Ren H Q. Progress of UHPC protective engineering material research [J]. Protective Engineering, 2023, 45(1): 1-7. (in Chinese)
- [6] Wang W, Song X D, Yang J C, et al. Experimental and numerical research on the effect of ogive-nose projectile penetrating UR50 ultra-early-strength concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 136: 104902.
- [7] 张文华, 张云升, 陈振宇. 超高性能混凝土抗缩比钻地弹侵彻试验及数值仿真[J]. 工程力学, 2018, 35(7): 167-175, 186.  
Zhang W H, Zhang Y S, Chen Z Y. Penetration test and numerical simulation of ultra-high performance concrete with a scaled earth penetrator [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(7): 167-175, 186. (in Chinese)
- [8] Wu H, Fang Q, Chen X W, et al. Projectile penetration of ultra-high performance cement based composites at 510-1320m/s [J]. Construction and Building Materials, 2015, 74: 188-200.
- [9] Máca P, Sovják R, Konvalinka P. Mix design of UHP-FRC and its response to projectile impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 63: 158-163.
- [10] Wang S S, Le H T N, Poh L H, et al. Resistance of high-performance fiber-reinforced cement composites against high-velocity projectile impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 95: 89-104.
- [11] Kong X Z, Fang Q, Wu H, et al. Numerical predictions of cratering and scabbing in concrete slabs subjected to projectile impact using a modified version of HJC material model [J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 95: 61-71.
- [12] 练兵, 蒋建伟, 门建兵, 等. 高速长杆弹对混凝土靶侵彻规律的仿真分析[J]. 高压物理学报, 2010, 24(5): 377-382.  
Lian B, Jiang J W, Men J B, et al. Simulation analysis on law of penetration of long-rod projectiles with high speed into concrete [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(5): 377-382. (in Chinese)
- [13] 王杰, 武海军, 周婕群, 等. 长杆弹超高速侵彻半无限混凝土靶实验研究及开坑分析[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(9): 54-65.  
Wang J, Wu H J, Zhou J Q, et al. Experiment research and crater analysis of long rod hypervelocity penetration into concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(9): 54-65. (in Chinese)
- [14] 吕映庆, 陈南勋, 武海军, 等. 弹体高速侵彻超高性能混凝土靶机理[J]. 兵工学报, 2022, 43(1): 37-47.  
Lyu Y Q, Chen N X, Wu H J, et al. Mechanism of high-velocity projectile penetrating into ultra-high performance concrete target [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(1): 37-47. (in Chinese)
- [15] 王安宝, 邓国强, 杨秀敏, 等. 一个新的通用型侵彻深度计算公式[J]. 土木工程学报, 2021, 54(10): 36-46.  
Wang A B, Deng G Q, Yang X M, et al. A new general formula for calculating penetration depth [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(10): 36-46. (in Chinese)
- [16] 聂晓东, 吴祥云, 龙志林, 等. 弹体对超高性能混凝土侵彻深度的研究[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(2): 136-150.  
Nie X D, Wu X Y, Long Z L, et al. Research on penetration depth of projectiles into ultra-high performance concrete targets [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(2): 136-150. (in Chinese)
- [17] Liu J, Wu C Q, Su Y, et al. Experimental and numerical studies of ultra-high performance concrete targets against high-velocity projectile impacts [J]. Engineering Structures, 2018, 173: 166-179.
- [18] Feng J, Gao X D, Li J Z, et al. Influence of fiber mixture on impact response of ultra-high-performance hybrid fiber reinforced cementitious composite [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 163: 487-496.
- [19] Cao Y Y Y, Yu Q L, Tang W H, et al. Numerical investigation on ballistic performance of coarse-aggregated layered UHPFRC [J]. Construction and Building Materials, 2020, 250: 118867.
- [20] Ren J, Xu Y X, Zhao X X, et al. Dynamic mechanical behaviors and failure thresholds of ultra-high strength low-alloy steel under strain rate 0.001/s to 106/s [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 719: 178-191.
- [21] 宗香华, 王银, 孔祥振, 等. 错位多次打击下 UHPC 靶体损伤破坏效应的数值模拟研究[J]. 高压物理学报, 2024, 38(3): 161-173.  
Zong X H, Wang Y, Kong X Z, et al. Numerical investigation on damage and failure of UHPC targets subjected to dislocation multi-attacks [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(3): 161-173. (in Chinese)
- [22] Su Q, Wu H, Fang Q. Calibration of KCC model for UHPC under impact and blast loadings [J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 127: 104401.
- [23] Zhang F L, Shedbale A S, Zhong R, et al. Ultra-high performance concrete subjected to high-velocity projec-

- tile impact: Implementation of K&C model with consideration of failure surfaces and dynamic increase factors [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 155: 103907.
- [24] Li J, Zhang Y X. Evolution and calibration of a numerical model for modelling of hybrid-fibre ECC panels under high-velocity impact [J]. *Composite Structures*, 2011, 93(11): 2714-2722.
- [25] Luccioni B M, Araújo G F. Erosion criteria for frictional materials under blast load [J]. *Mecánica Computacional*, 2011, 30(21): 1809-1831.
- [26] 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.
- Xue J F. Research on the performance of projectile penetration and perforation into concrete target [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [27] Yang Y Z, Fang Q, Kong X Z. Failure mode and stress wave propagation in concrete target subjected to a projectile penetration followed by charge explosion; Experimental and numerical investigation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 177: 104595.
- [28] Liu J, Liu C, Qu K F, et al. Calibration of Holmquist Johnson Cook (HJC) model for projectile penetration of geopolymer-based ultra-high performance concrete (G-UHPC)[J]. *Structures*, 2022, 43: 149-163.
- [29] 张威. 超高性能纤维增强混凝土抗侵彻试验及数值模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 2023.
- Zhang W. Anti-penetration test and numerical simulation of ultra-high performance fiber reinforced concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [30] 王安宝, 邓国强, 张磊, 等. 混凝土侵彻公式的合理性分析[J]. *防护工程*, 2020, 42(6): 1-7.
- Wang A B, Deng G Q, Zhang L, et al. Rationality analysis of concrete penetration formula [J]. *Protective Engineering*, 2020, 42(6): 1-7. (in Chinese)
- [31] 周健南, 金丰年, 王斌. 别列赞公式中弹体参数取值的探讨[J]. *弹道学报*, 2008, 20(2): 20-23.
- Zhou J N, Jin F N, Wang B. Discussion on projectile parameters in брезанъ formula [J]. *Journal of Ballistics*, 2008, 20(2): 20-23. (in Chinese)
- [32] Li Q M, Reid S R, Wen H M, et al. Local impact effects of hard missiles on concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32(1/2/3/4): 224-284.
- [33] 吴飏, 任辉启, 陈力, 等. 弹体侵彻混凝土尺度效应试验研究与理论分析[J]. *防护工程*, 2020, 42(2): 1-10.
- Wu B, Ren H Q, Chen L, et al. Experimental study and theoretical analysis of scale effect of projectile penetrating concrete [J]. *Protection Engineering*, 2020, 42(2): 1-10. (in Chinese)
- [34] U. S. Department of the Army. Fundamentals of protective design for conventional weapons[M]. Washington, D.C.: Headquarters, Department of the Army, 1986.

(本文编辑: 张艺)