

高压物理学报

弹体侵彻混凝土的优化模型及可视化仿真研究

苏永超 宁建国 许香照

Optimization Model and Visualization Simulation of Projectile Penetration into Concrete

SU Yongchao, NING Jianguo, XU Xiangzhao

引用本文:

苏永超, 宁建国, 许香照. 弹体侵彻混凝土的优化模型及可视化仿真研究[J]. 高压物理学报, 2025, 39(2):025103. DOI: 10.11858/gywlb.20240811

SU Yongchao, NING Jianguo, XU Xiangzhao. Optimization Model and Visualization Simulation of Projectile Penetration into Concrete[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(2):025103. DOI: 10.11858/gywlb.20240811

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240811>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

混凝土薄板侵彻贯穿问题的SPH数值模拟

Numerical Simulation of Penetration in Concrete Sheet Based on SPH Method

高压物理学报. 2019, 33(2): 024101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180634>

基于Lagrange及SPH算法的花岗岩侵彻数值模拟

Numerical Simulation of Granite Penetration Based on Lagrange and SPH Algorithm

高压物理学报. 2021, 35(5): 055103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200665>

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/gywlb.20180672>

不同类型装药侵彻安全性数值模拟

Numerical Simulation for PBX Charges Safety of Different Types During Penetration

高压物理学报. 2021, 35(6): 065101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210754>

头部带肋板的异形结构弹体斜贯穿混凝土薄靶实验和数值模拟

Experiment and Numerical Simulation on Oblique Penetrating Concrete Targets by a Special-Shaped Projectile with Ribbed Head

高压物理学报. 2021, 35(6): 065103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210723>

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

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

高压物理学报. 2020, 34(2): 025101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190841>

弹体侵彻混凝土的优化模型及可视化仿真研究

苏永超, 宁建国, 许香照

(北京理工大学爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081)

摘要: 利用可视化仿真技术研究弹体侵彻混凝土的毁伤机理和靶板响应是爆炸冲击领域的重要课题。混凝土作为常见的建筑材料, 在遭受爆炸冲击或高速弹体侵彻时, 其毁伤行为复杂多变。介绍了一种理论与可视化技术相结合的可视化仿真方法。基于空腔膨胀理论建立了优化的侵彻计算模型, 可以预测弹体侵彻混凝土的侵彻深度特征。利用可视化物理引擎, 对弹体运动轨迹、开坑孔径、靶板损伤、碎石飞溅等进行了细致的表征处理和仿真, 增强了场景的真实性和可靠性。开发的可视化仿真系统不仅能够从多角度观察弹体侵彻混凝土的过程, 而且能够高效、准确地分析和预测弹体侵彻混凝土靶的损伤行为和动力响应, 在建筑工程设计和安全评估中具有重要的应用前景, 为理解和探索混凝土侵彻机理提供了新的视角。

关键词: 弹体侵彻; 混凝土; 可视化仿真; 物理引擎

中图分类号: O346.5; O521.9

文献标志码: A

混凝土具有耐久性好、强度高、成本效益高以及卓越的工程保护性能, 因此, 被广泛应用于各种建筑和基础设施项目中, 在军事领域中也具有十分重要的作用^[1-2]。在构建防御工事和军事基础设施(如掩体和坚固的地下设施)时, 混凝土结构需要抵抗包括爆炸冲击波、弹体侵彻和环境侵蚀在内的各种极端条件。混凝土侵彻相关研究对于防护工程具有深远意义, 目前已开展了大量相关工作^[3-6]。

目前, 针对弹体侵彻问题多采用实验研究、理论分析和数值模拟^[7-10]等方法。其中, 实验方法具有一定的局限性, 如成本高、实验条件复杂、难以模拟实际战场环境等, 此外, 每次实验的不可重复性和条件变量的多样性也增加了实验数据的不确定性。理论分析方法往往基于理想化的假设, 如材料均质性, 使得在面对复杂侵彻场景时其适用性和准确性受限, 且过度简化难以模拟塑性流动、裂纹扩展等非线性现象。数值模拟方法则受到材料模型、界面接触、网格划分和计算方法等因素的影响, 并且程序与参数的校准需要依赖实验数据、经验公式以及理论分析模型, 需要考虑的因素过多, 存在一定的不稳定性^[11]。并且上述 3 种方法需要很强的专业知识, 给出的分析结果大多以数据和图表为主, 不能直观地描述打击效果。

随着世界的变化和发展, 国际安全形势和军事战略也在不断演变。而随着计算机图形学和引擎技术的迅速发展, 可视化技术将引领世界进入用视觉研究未来战场的时代。目前, 虚幻引擎等可视化软件已经成为军事仿真系统构建中的一个研究焦点, 这类引擎具有逼真的视觉渲染性能、动态物理模拟效果的高度可复制性以及场景环境的高还原能力^[12]。将这些技术应用于弹体侵彻混凝土的仿真研究中, 不仅是对引擎技术的创新应用, 也是对其性能和逼真度的全新挑战和检验。此外, 可视化仿真技术在工程仿真和可视化领域也发挥着至关重要的作用, 通过将计算机图形学、仿真技术和人工智能等多个学科进行融合, 为用户提供了一种直观高效的分析和设计工具。因此, 可视化仿真模拟在军事、城市规划、教育、工业生产和医疗保健等多个领域都展现出了巨大的应用潜力。

* 收稿日期: 2024-05-13; 修回日期: 2024-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(12372350)

作者简介: 苏永超(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事侵彻力学及可视化研究. E-mail: s15802440892@163.com

通信作者: 许香照(1989—), 男, 博士, 特别副研究员, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: xz xu@bit.edu.cn

过去, 弹体威力的毁伤评估几乎完全依赖于实验研究。研究者们需要投入大量资源进行实验, 根据收集到的数据归纳并构建经验公式, 从而为弹体的设计和研发提供指引。然而, 实验方法成本高昂且常常伴随着高风险。随着计算机技术的飞速发展, 学者们开始采用计算机模拟来替代传统的实验方法, 可视化模拟技术正逐步成为武器装备设计与仿真领域的重要工具^[13]。随着国内外对爆炸冲击领域可视化仿真研究的日益重视, 不仅显著提升了弹体毁伤威力参数的计算效率, 而且使得评估结果更加精确。推动了武器装备研发快速发展的同时, 也为军事战略决策提供了更可靠的数据支持。

目前, 由德国 CONDAT 公司开发的 SPLIT-X 系统^[14]已经成为设计和评估战斗部的标准工具, 不仅能够快速构建战斗部的几何形状参数模型, 还能精确计算破片的杀伤力, 并直观地展示预期的毁伤效果, 为战斗部设计提供了强有力的技术支持。在威力评估和目标易损性方面, 瑞典 FMV 研发的 AVAL 系统^[15]可分析多种类型目标的数据, 包括地面的坦克、水中的舰船、空中的飞机等; 在战斗部方面, 该系统可以评估破片弹、动能弹和穿甲弹的效能。美国空军研究所 (AFIT) 开发了可视化仿真系统 AMES 和 AMVS^[16-17], AMES 软件率先实现了弹目交会的三维动画效果, 在 AMES 基础上改进和开发得到了新版本的 AMVS 系统, 相比 AMES 系统, AMVS 系统的渲染能力和动画显示质量显著提升。这些程序软件的使用不仅降低了研发成本, 缩短了研发时间, 还大大提升了武器装备研发能力。

Rusyak 等^[18]基于 Microsoft Visual Studio 2013 和 C# 编程语言, 利用 NeoAxis Engine 3.2 进行三维可视化, 开发了一种火炮射击内外弹道模拟软件, 能够详细展示火炮射击过程及地形环境。Buzantowicz^[19]基于 MATLAB 开发了用于导弹和空中目标轨迹的三维可视化系统。Schroeder 等^[20]结合 Microsoft Visual Studio .NET 2005 和 VTK 开发了三维可视化系统, 其算法精度与绘制速度相互制约。

在我国, 包括北京理工大学、南京理工大学以及中国工程物理研究院在内的众多单位也致力于可视化评估软件的研究, 旨在发展先进的可视化技术, 为各行业提供更加直观、精准的数据分析和评估工具, 推动相关领域的技术进步和应用创新^[21-24]。刘建斌等^[21]和高鹏等^[22]利用可视化仿真技术研发了火箭杀伤效果评估计算软件, 该软件不仅能够计算毁伤范围, 还可以模拟展示毁伤过程。Yang 等^[23]、杨云斌等^[24]利用前沿的可视化仿真技术研发了一款战斗部威力仿真评估软件, 该软件融合了软件分析与数值仿真的双重优势, 能够对多种类型的战斗部进行仿真模拟, 实现了从破片生成、飞散轨迹到最终目标毁伤效果全过程的精准分析。

Wang 等^[25]通过提取等值表面、均匀分布流线种子, 并应用颜色编码和线条照明技术, 开发了一种基于流线的三维爆炸场可视化方法。Li 等^[26]采用蒙特卡罗方法建立了子弹轨迹模型, 并利用 Visual C# 开发环境和 Unity3D 引擎设计了子弹轨迹可视化仿真软件, 为弹药设计和目标损伤评估提供了参考。张进强等^[27]借助 OpenGL 的先进图形渲染技术, 成功构建了高度逼真的三维场景仿真环境, 进而开发了一套基于数值仿真的实时驱动弹道可视化系统, 不仅实现了对炮弹飞行轨迹的精准模拟, 还可以深入分析炮弹在飞行过程中的实时运动状态。程翔等^[28]运用六自由度算法模型, 实现了导弹六自由度弹道的三维可视化仿真, 该系统具备高度的真实性和可靠性, 并且能够清晰直观地展现导弹在飞行过程中的六自由度弹道特性。王彪等^[29]采用 STK 与 C# 软件结合的方式, 设计开发了多雷达跟踪弹道导弹预报交接可视化系统。纪录等^[30]也基于 STK 构建了半实物弹箭仿真实时可视化系统, 可对弹箭飞行状态和运动轨迹进行分析。上述研究成果不仅提升了我国战斗部设计的科学化水平, 也为我国科学计算可视化领域的持续发展和创新注入了新的活力。

图形图像技术以其丰富的信息量和直观的表现力成为人类认知世界不可或缺的工具。为了充分利用这些优势, 利用虚幻引擎 (unreal engine) 进行系统开发, 该引擎具备强大的渲染能力和物理模拟功能, 能够满足复杂仿真系统的需求。此外, 虚幻引擎是一个开源平台, 可提供丰富的开发资源, 大大提高开发效率和系统稳定性。

综上所述, 在适量的实验和数值计算基础上, 研究高效、快捷的弹体侵彻混凝土可视化仿真系统十分必要, 也是对实验和数值模拟的重要补充。可视化系统能够实时给出毁伤场景, 设计和调整弹体参数以及目标结构参数, 并展示弹体和目标物体的几何模型以及各种威力参数。本工作将结合弹体侵

彻混凝土研究, 建立优化模型, 对弹体和混凝土的结构参数进行优化, 基于虚幻引擎平台, 以优化理论模型为基础, 搭建弹体侵彻混凝土的可视化场景环境, 并开发相应的可视化系统, 对弹体侵彻混凝土的全过程进行可视化展示, 以期提高研究效率, 为爆炸冲击领域的研究提供一定的参考。

1 理论模型与场景表征

1.1 空腔膨胀理论计算

目前, 人们已对混凝土侵彻模型开展了大量的研究, 并建立了一批能够准确计算复杂应力状态下混凝土应力-应变关系的侵彻模型。但是, 现有混凝土类材料状态方程的准确性还没有在很宽的压力范围内被评估。混凝土材料具有不同的微观结构和受力特性^[31-32]。对于不同的初始侵彻速度和靶板材料, 计算的准确性取决于所选用的理论模型^[33-34]。现有的数值仿真法、实验法和经验法对弹体侵彻问题的适用性不强, 预测精度依赖于状态方程和破坏准则的选择。因此, 在工程设计中, 寻找一种能够准确预测不同工况下靶板侵彻深度的方法至关重要。

本研究基于 Li 等^[35]开发的弹体侵彻混凝土模型, 提出了适用范围广、预测精度高的优化侵彻模型, 并将其应用到弹体侵彻混凝土的可视化仿真系统中。该模型在可视化系统中的应用有利于对混凝土的毁伤信息进行快速评估和分析。

混凝土的状态方程选取线性状态方程(Linear)和 HJC 状态方程, 破坏准则采用 Tresca 准则、Mohr-Coulomb 准则、带 Tresca 限制的 Mohr-Coulomb 准则和 Nonlinear Cap 准则, 将这些常用的状态方程和破坏准则组成多种侵彻模型, 分析侵彻模型的适用范围。基于动态空腔膨胀理论, 计算空腔膨胀中各响应区的界面速度和膨胀应力, 建立空腔表面径向应力函数的表达式^[35]

$$\frac{\sigma_r}{f_c} = A + B \left[\frac{v}{(f_c/\rho_0)^{1/2}} \right] + C \left[\frac{v}{(f_c/\rho_0)^{1/2}} \right]^2 \quad (1)$$

式中: σ_r 为径向应力; f_c 为混凝土靶板的抗压强度; A 、 B 和 C 为空腔表面径向应力函数系数, 通过拟合空腔表面径向应力和空腔膨胀速度得到; ρ_0 为混凝土的密度; v 为侵彻速度。

根据式 (1) 得到弹体侵彻阻力 (F_z) 的表达式

$$\begin{aligned} F_z &= 2\pi s^2 \int_{\varphi_0}^{\frac{\pi}{2}} [\sigma_n(v_z, \theta) \cos \theta + \sigma_t(v_z, \theta) \sin \theta] \left(\sin \theta - \frac{s-a}{s} \right) d\theta \\ &= 2\pi s^2 \int_{\varphi_0}^{\frac{\pi}{2}} \sigma_n(v_z, \theta) \left(\sin \theta - \frac{s-a}{s} \right) (\cos \theta + \mu \sin \theta) d\theta \\ &= \alpha v_z^2 + \beta v_z + \eta \end{aligned} \quad (2)$$

式中: σ_n 为弹体表面法向所受压力, 与该位置的混凝土空腔膨胀压力相等; σ_t 为弹体表面切向所受压力, $\sigma_t = \mu \sigma_n$, μ 为滑动摩擦因数; v_z 为弹体运动速度, $v_z \cos \theta$ 为弹体头部表面在该点与混凝土靶的法向相对运动速度, θ 为 σ_n 与水平方向的夹角; s 、 φ_0 为卵形弹头部参数, a 为弹体半径, $\varphi_0 = \sin^{-1} \left(\frac{s-a}{s} \right)$; α 、 β 、 η 为积分后得到的系数, 定义为侵彻阻力系数。

基于混凝土对弹体侵彻阻力的物理假设 (弹体在侵彻过程中没有发生形变), 并通过牛顿第二定律得到侵彻深度。

$$m \frac{dv}{dt} = m v_z \frac{dv_z}{dt_z} = -F_z \quad (3)$$

式中: m 为弹体的质量。对式 (3) 进行积分, 结合初始条件和终止条件, 通过计算 $F_z=0$, 得到最终的侵彻深度。

1.2 理论模型建立

基于空腔膨胀理论, 对多种常用侵彻模型在不同侵彻速度和靶板强度下预测弹体侵彻混凝土靶深度方面的性能表现进行定量分析。

弹靶的各种参数以及模型本身的参数等诸多因素均可影响模型预测的准确性。由于研究的局限性和可操作性,本研究选择在其他参数保持不变的情况下,重点探讨侵彻速度 v 和靶板抗压强度 f_c 这 2 个关键参数的影响。首先,侵彻速度和靶板抗压强度是侵彻过程中的主要影响因素,直接决定了侵彻的深度和效果,通过控制这 2 个参数,可以较准确地分析模型的行为和预测准确性;其次,在有限的研究条件下,固定其他参数有助于简化问题,能够更专注地探讨侵彻速度和靶板抗压强度对模型的影响,从而得到更清晰和具体的结论。

采用回归评价指标^[36] 计算各个模型在不同靶板抗压强度 (13.5~62.8 MPa) 下的平均绝对误差 (σ_{MAE})、平均平方误差 (σ_{MSE})、均方根误差 (σ_{RMSE}) 和决定系数 (R^2) 等指标。这些评价指标提供了不同的度量方式,可以用于评估刚性弹体侵彻混凝土模型的优化效果。通过对这些指标进行综合考虑,可以选择合适的优化策略和参数,以改进模型的预测性能,并使其更准确地预测刚性弹体侵彻混凝土问题。

通过侵彻模型预测的侵彻深度与实验的侵彻深度之间的绝对差异的平均值,获得 σ_{MAE}

$$\sigma_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(H_i - \hat{H}_i)| \quad (4)$$

式中: n 为侵彻深度样本的数量, H_i 为实验侵彻深度, $\hat{H}_i$ 为预测侵彻深度。通过侵彻模型预测的侵彻深度与实验得到的侵彻深度之间的绝对误差的平方,并求其平均值,得到 σ_{MSE}

$$\sigma_{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H}_i)^2 \quad (5)$$

σ_{RMSE} 为 σ_{MSE} 的平方根

$$\sigma_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H}_i)^2} \quad (6)$$

最小化 σ_{MAE} 、 σ_{MSE} 或 σ_{RMSE} , 可以优化模型参数,以减小预测结果与实际观测结果之间的误差。

采用决定系数 R^2 来衡量优化模型与实际数据之间的拟合质量。通过比较优化模型预测的侵彻深度与实验得到的侵彻深度并计算 R^2 , 评估优化模型的拟合程度

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (\hat{H}_i - H_i)^2}{\sum_i (\hat{H}_i - \bar{\hat{H}})^2} \quad (7)$$

式中: $\bar{\hat{H}}$ 为预测侵彻深度的平均值。 R^2 接近 1 时,表示优化模型能够较好地拟合实际观测数据。

根据式 (4)、式 (5)、式 (6) 和式 (7), 结合理论模型计算值和实验值进行数据处理, 鉴于 Tresca 准则在结合 HJC 状态方程和 Linear 状态方程时相较于其他 6 个侵彻模型所得侵彻深度误差过大, 数据分析时不再考虑 Tresca 准则的侵彻模型, 得到如图 1 和图 2 所示的评价指标。

将各模型的预测结果与 Forrestal 等^[37-38] 得到的多组实验数据进行对比, 其中一组实验数据的对比结果如表 1 所示。表中: H_{exp} 为实验得到的侵彻深度, H_{LMC} 和 δ_{LMC} 为 Linear-Mohr Coulomb 准则模型得到的侵彻深度及其与实验值的相对误差, H_{MCT} 和 δ_{MCT} 为带 Tresca 限制的 Mohr Coulomb 准则模型得到的侵彻深度及其与实验值的相对误差, H_{LNC} 和 δ_{LNC} 为 Linear-Nonlinear Cap 准则模型得到的侵彻深度及其与实验值的相对误差, H_{HMC} 和 δ_{HMC} 为 HJC-Mohr Coulomb 模型得到的侵彻深度及其与实验值的相对误差, H_{HMCT} 和 δ_{HMCT} 为带 Tresca 限制的 HJC-Mohr Coulomb 模型得到的侵彻深度及其与实验值的相对误差, H_{HNC} 和 δ_{HNC} 为 HJC-Nonlinear Cap 模型得到的侵彻深度及其与实验值的相对误差。

评价指标的计算结果与实验数据的对比结果表明, 各模型在预测弹体侵彻混凝土靶板深度方面的性能表现存在差异, 某些状态方程与破坏准则在特定工况下表现优异, 但在其他工况下表现较差。通过对各模型的综合分析, 建立了多阶段计算模型

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Linear-Nonlinear Cap} & 400 < v \leq 800, 13.5 \leq f_c \leq 21.6 \\ \text{Linear-Mohr Coulomb with Tresca} & v > 800, 13.5 \leq f_c \leq 21.6 \\ \text{Linear-Mohr Coulomb with Tresca} & v > 400, 21.6 < f_c \leq 36.2 \\ \text{HJC-Mohr Coulomb with Tresca} & 400 < v \leq 800, 36.2 < f_c \leq 58.4 \\ \text{Linear-Mohr Coulomb with Tresca} & v > 800, 36.2 < f_c \leq 58.4 \\ \text{HJC-Nonlinear Cap} & 400 < v \leq 800, 58.4 < f_c \leq 62.8 \\ \text{Linear-Nonlinear Cap} & v > 800, 58.4 < f_c \leq 62.8 \end{array} \right. \quad (8)$$

式中: 侵彻速度 v 的单位为 m/s , 靶板抗压强度 f_c 的单位为 MPa 。该模型综合了不同状态方程和破坏准则的优势, 能够准确预测不同工况下靶板的侵彻深度。

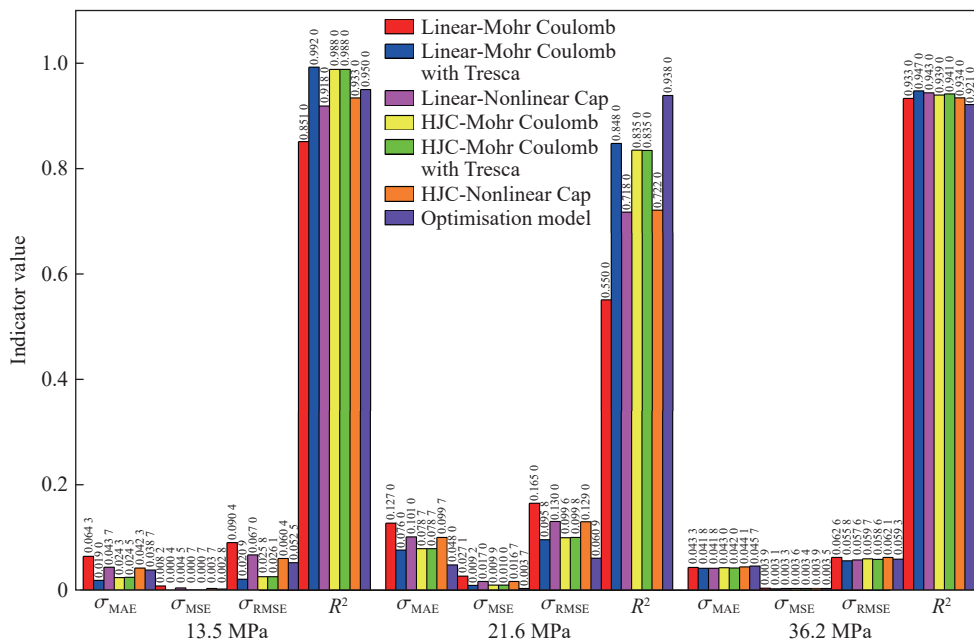


图 1 13.5~36.2 MPa 评价指标

Fig. 1 13.5~36.2 MPa regression evaluation indicator

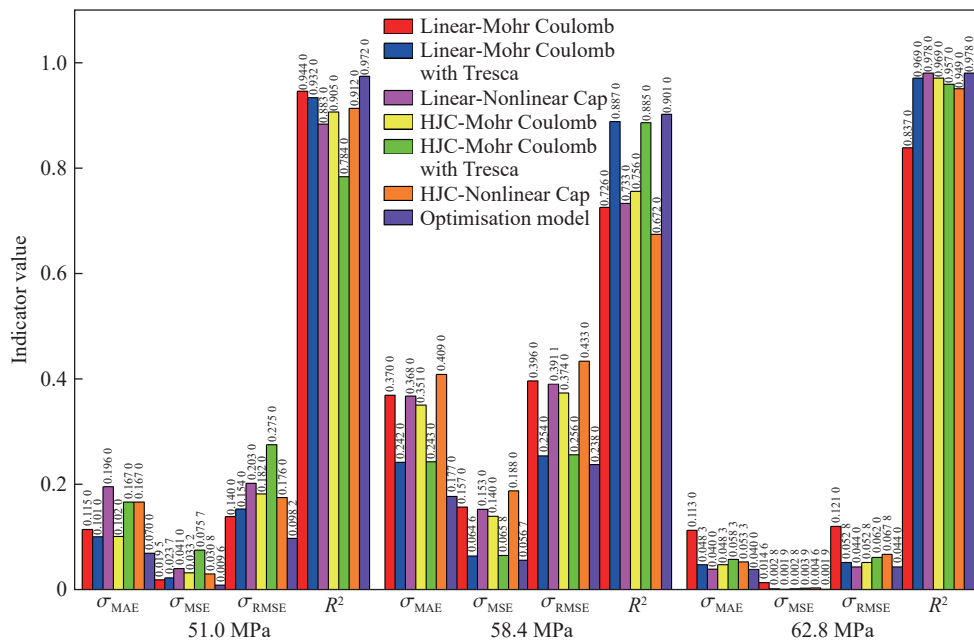


图 2 51.0~62.8 MPa 评价指标

Fig. 2 51.0~62.8 MPa regression evaluation indicator

表 1 30.5 mm 口径弹体侵彻 51.0 MPa 靶板($\rho=2300 \text{ kg/m}^3$) 深度实验数据Table 1 Experimental data on the depth of penetration of a 30.5 mm projectile into a 51.0 MPa target slab ($\rho=2300 \text{ kg/m}^3$)

m/kg	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	H_{exp}/m	H_{LMC}/m	$\delta_{\text{LMC}}/\%$	H_{MCT}/m	$\delta_{\text{MCT}}/\%$	H_{LNC}/m	$\delta_{\text{LNC}}/\%$
1.60	405	0.37	0.28	25.02	0.28	23.87	0.23	37.79
	446	0.42	0.33	20.53	0.34	19.19	0.28	33.66
	545	0.56	0.49	12.69	0.50	10.90	0.41	26.04
	651	0.78	0.69	12.14	0.70	9.99	0.59	24.42
	804	1.05	1.04	1.10	1.07	1.94	0.91	12.93
	821	1.23	1.08	11.96	1.12	9.18	0.96	22.28
	900	1.41	1.30	7.53	1.35	4.30	1.17	17.37
	1 009	1.75	1.65	5.91	1.71	2.15	1.50	14.50
	1 069	1.96	1.85	5.39	1.93	1.36	1.70	13.24
	1 201	2.03	2.36	16.20	2.47	21.87	2.21	8.70
m/kg	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	H_{exp}/m	H_{HMC}/m	$\delta_{\text{HMC}}/\%$	H_{HMCT}/m	$\delta_{\text{HMCT}}/\%$	H_{HNC}/m	$\delta_{\text{HNC}}/\%$
1.60	405	0.37	0.29	21.88	0.32	13.51	0.24	34.55
	446	0.42	0.35	16.85	0.39	8.14	0.29	30.19
	545	0.56	0.52	7.79	0.57	1.40	0.44	22.17
	651	0.78	0.73	6.41	0.80	2.51	0.62	20.47
	804	1.05	1.12	6.48	1.22	16.13	0.96	8.40
	821	1.23	1.17	5.11	1.27	3.45	1.01	18.25
	900	1.41	1.41	0.10	1.54	8.99	1.23	13.11
	1 009	1.75	1.79	2.37	1.95	11.34	1.57	10.14
	1 069	1.96	2.02	3.15	2.20	12.18	1.79	8.85
	1 201	2.03	2.58	27.13	2.81	38.34	2.32	14.10

将建立的优化模型进行精度预测,与各模型和实验数据进行综合对比,得到优化模型预测结果误差,如图 3 所示。

由图 3 可知:本研究建立的改进理论模型在侵彻抗压强度为 13.5 MPa 的靶板时,在整个侵彻速度区间内的预测结果的准确性仅优于 Linear-Mohr Coulomb 和 HJC-Nonlinear Cap 模型,劣于其他 4 个模型,但相对误差为 0.088 9,低于 0.1,在合理的预估范围内;在侵彻其他抗压强度靶板时的预测结果都具有明显的优越性。综合以上分析,结果表明,改进的理论模型在不同靶板强度下的计算结果均显著优于其他 6 个模型,并且与实验数据更加吻合。

1.3 场景模型表征

1.3.1 孔洞与裂纹表征

根据混凝土侵彻实验数据,构建弹体侵彻混凝土的毁伤破坏模型,对模型进行表征处理。以混凝土靶为研究对象,在可视化场景中表征其破坏状态。当混凝土受到不同强度的冲击荷载作用时,靶板会产生孔洞、裂纹和变形等不同的物理现象。

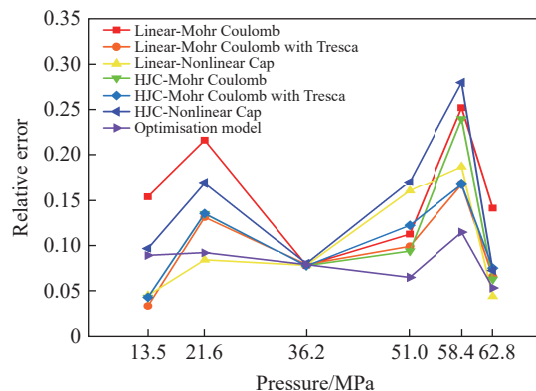


图 3 优化模型预测结果的误差对比

Fig. 3 Comparison of errors in the prediction results of the optimisation model

首先建立靶板模型,在模型建立的初期阶段,对混凝土材料的结构和物理特性进行表征。引入材料的强度、密度等更多的物理参数,通过对这些参数的精准调控,能够更好地模拟混凝土靶在弹体侵彻过程中的变形、裂纹扩展等细微物理现象,使得模拟结果更加真实可信。

在可视化场景中,采用纹理融合技术能够出色地展示复杂的裂缝和孔洞效果。该技术将多个纹理层相互混合,并精确调整透明度、混合模式等参数,实现了不同层次之间的交融,从而呈现出多样化的细节、裂缝和损坏效果。

弹体侵彻混凝土表面的裂缝和孔洞效果往往通过裂缝材质、孔洞材质与几何细节之间的材质融合来实现。可以根据需要调整裂缝和孔洞纹理的颜色、密度、形态等参数,以模拟各种不同类型、大小和分布的裂缝,从而为模型赋予更真实、丰富的细节感和视觉效果。裂缝纹理和孔洞纹理融合技术的运用如图 4 所示。通过调控各项参数,使得毁伤效果更加逼真。

孔洞的尺寸(D_{hole})与侵彻速度 v 、弹体直径(d)以及靶板(混凝土)的抗压强度成比例,即

$$D_{\text{hole}} \propto d \sqrt{v^2 / f_c} \quad (9)$$

将与开坑尺寸有关的参数作为系统的输入参数,系统接收用户输入的侵彻速度、弹体直径和靶板的抗压强度等参数。根据输入参数,系统依据经验公式建立计算函数来预测开坑尺寸,如图 5 所示。

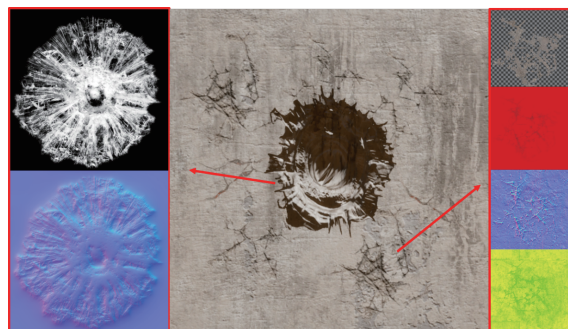


图 4 孔洞与裂缝纹理

Fig. 4 Hole and crack texture

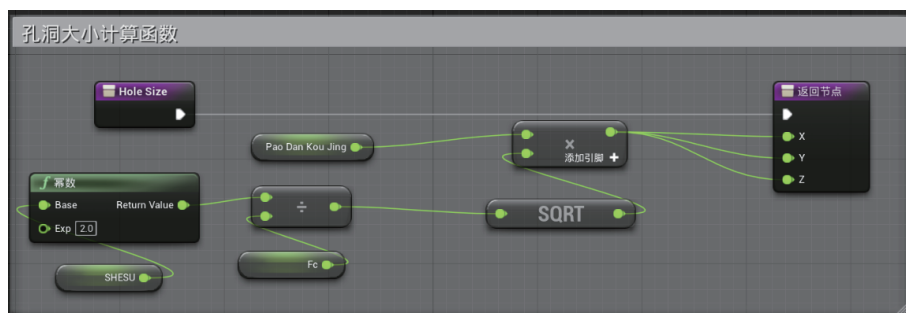


图 5 孔洞计算函数

Fig. 5 Hole calculation function

1.3.2 碎石飞溅表征

靶板碎石飞溅效果的制作利用了纹理融合技术。首先,建立碎块的材质表征,如图 6(a) 所示;然后,对碎块进行材质融合,如图 6(b) 和图 6(c) 所示,将 2 个法向与切向的材质纹理融合到碎块上;接着,通过可视化引擎的粒子系统,复制建立多个碎块,如图 6(d) 所示;最后,对碎块大小进行随机数设定,从而形成碎石飞溅效果。此外,该过程中还结合了物理模拟技术,以确保碎片飞溅的动态效果与实际实验中的现象相符。

可视化引擎能够精确调整碎片的大小、形状、飞溅速度及方向等属性,显著增强视觉上的真实感和细节的丰富度。这个细致的制作过程不仅让场景看起来更加逼真,而且能够让使用人员身临其境地感受到碎石飞溅的真实动态效果,从而提升了视觉体验的沉浸感和观赏价值。

此外,粒子系统的灵活性使得系统能够模拟不同材质靶板在受到高速弹体撞击时的飞溅行为。可以根据实际情况调整粒子系统,以模拟不同材质靶板的反应。为了进一步增强仿真的真实性和细节层次,设计了具体的碎石粒子特效,包括对碎块大小、生命周期以及扩散范围的具体设定。

通过对碎块大小、生命周期等参数进行调节,使得碎石飞溅效果在视觉上显得更加逼真。例如:

可以根据碎块的材质和强度,调整碎片的大小和形状以及飞溅的角度和速度;同时精确地反映不同弹靶参数(弹体速度、角度和靶板材质)对飞溅行为的具体影响。这种调节不仅使得飞溅效果更加逼真,同时也增强了系统的仿真能力。

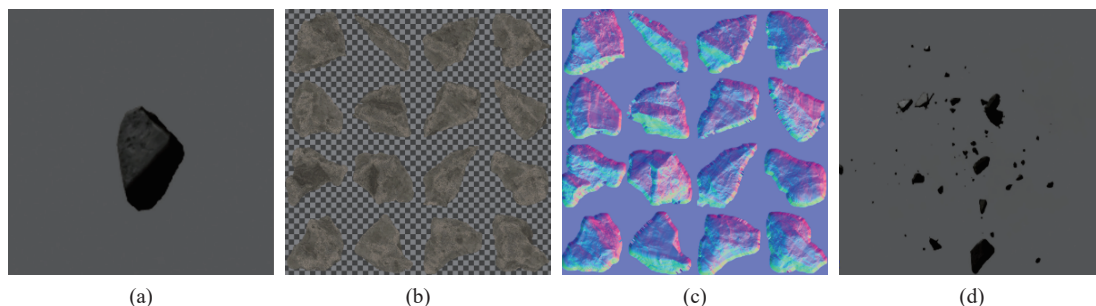


图 6 碎石材质纹理

Fig. 6 Gravel material texture

1.3.3 烟雾粒子表征

烟雾粒子表征是通过对烟雾粒子的纹理进行创建、材质融合、调整材质的透明度和颜色等参数形成的,如图 7 所示。将烟雾粒子表征模型添加到粒子系统,从而实现烟雾效果。粒子系统拥有生成复杂烟雾和尘埃效果的能力,并能够对粒子的大小、生命周期、颜色及发射速率等参数进行精确调整。烟雾效果能够根据弹体速度和靶板材质的差异展现出多样化的视觉表现,提供高度定制化的视觉效果,对上述参数的控制也增强了烟雾效果的逼真性。

为确保生成的烟雾效果与弹体侵彻靶板的实际情况相符,在系统内设计了专门的烟雾粒子特效,其扩散时间和生命周期经过详尽调节,以达到最佳效果。这样的设计使得烟雾能够随着弹体穿透靶板而逐渐扩散,有效模拟了弹体侵彻时产生的尘埃云的动态变化。烟雾的密度也可以根据弹体和靶板参数进行调整,以确保视觉效果与实验现象保持一致。

在模拟混凝土靶受到攻击时的破碎和碎石飞溅等现象时,通过可视化引擎内置的物理系统,可以模拟靶板在受到弹体侵彻作用时的真实反应。在靶板模型上定义碰撞体,并设置碰撞参数,以便准确地模拟弹体侵彻效果。一旦与靶板碰撞,物理系统就会根据碰撞的力和角度计算出靶板的响应,实现其破碎和碎石飞溅效果,并在受到侵彻冲击时,触发烟雾和孔洞裂纹效果。根据靶板破碎程度和碎片飞溅方向对粒子效果进行动态调整,使得整个毁伤效果更加真实。结合本研究建立的粒子系统对靶板的毁伤效果进行集成,得到的毁伤效果如图 8 所示。

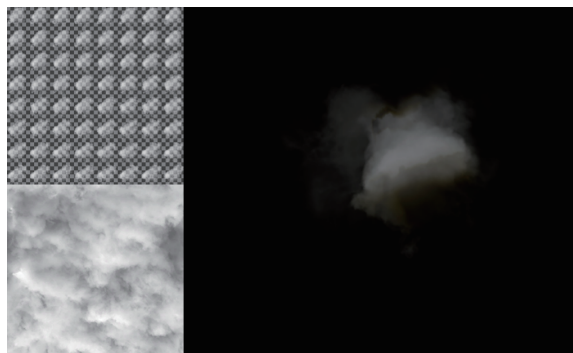


图 7 烟雾材质纹理

Fig. 7 Smoke material texture



图 8 毁伤效果

Fig. 8 Destruction effect

2 仿真平台的系统结构和功能设计

2.1 仿真系统的体系结构

实现可视化仿真系统的过程涉及多个关键步骤。首先,需要明确系统的功能,并构建系统的架构。本研究将系统分为平台搭建、基于搭建的平台进行系统实现、开发出弹体侵彻混凝土的可视化系统 3 个部分。系统的具体架构关系如图 9 所示。

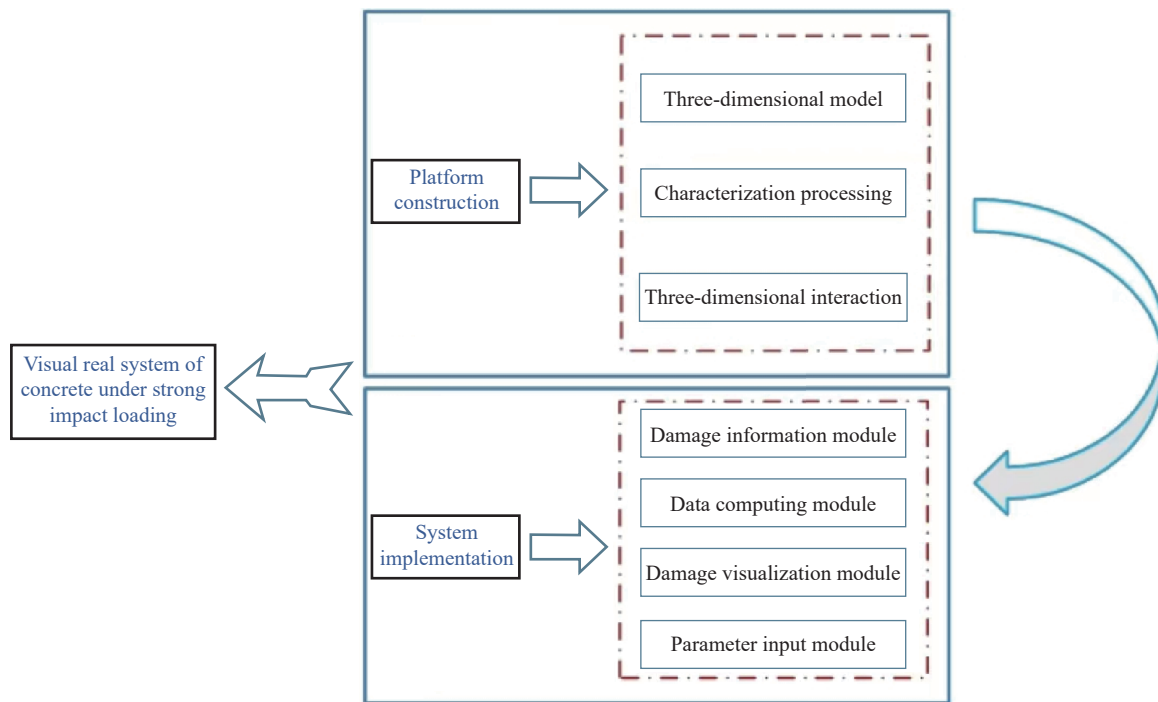


图 9 可视化系统结构

Fig. 9 Structure of the visualization system

为了实现强弹体侵彻混凝土靶过程的三维可视化仿真,开发了一个可视化仿真系统。该仿真系统以图形图像技术和物理仿真引擎为技术核心,基于理论计算模型和三维可视化技术模拟弹体侵彻混凝土目标的破坏效果,并分析对目标的毁伤信息。

系统平台的搭建是实现可视化仿真过程的关键一步,需要进行三维场景模型的构建,包括场景地图、混凝土模型、弹体模型等。这些模型不仅可以反映实际物体的尺寸和形状,还充分考虑了物理特性和外观细节,为后续的可视化提供了仿真基础。

接下来,通过对模型和场景进行纹理制作、材质和光照处理,进一步提升模型的逼真度和视觉效果。通过应用高质量的纹理和材质,使模型表面呈现出丰富的细节和真实的光泽感。同时,利用先进的灯光和阴影渲染技术,为模型创造逼真的光影效果,使其在视觉上更接近真实世界。

为了深入了解混凝土靶毁伤过程,并能够对仿真参数进行灵活调整,实现全方位的动态交互,构建了可视化系统的交互界面。通过可视化引擎的 BluePrint 编程功能,设计了界面布局和交互元素,使用户能够直观地理解每个参数的作用,并快速进行调整。用户可以设置仿真目标,调整弹体的尺寸、速度、质量等参数,甚至定义混凝土靶板的密度、强度等特性,从而实现对仿真过程的个性化定制。通过将系统进行模块化划分,包括参数输入模块、数据计算模块、毁伤效果可视化模块和毁伤信息显示模块,并将各个模块集成,从而实现混凝土毁伤过程的可视化。

最后将平台的搭建与系统模块的实现进行结合,完成可视化仿真系统的开发。

2.2 系统模块的功能设计

本研究研发的三维可视化仿真系统利用计算机仿真构建了弹体侵彻混凝土靶的毁伤场景,实现了目标的可视化和毁伤评估。系统开发时充分利用了虚拟仿真的交互性、真实性、快速性和可重复性等特点。为了满足用户需求,应支持用户根据需求自定义参数。除了提供丰富的可视化和分析工具外,系统还支持数据的计算与输出,方便后续处理和分析。系统的功能结构划分为 3 个模块,各模块之间的关系如图 10 所示。

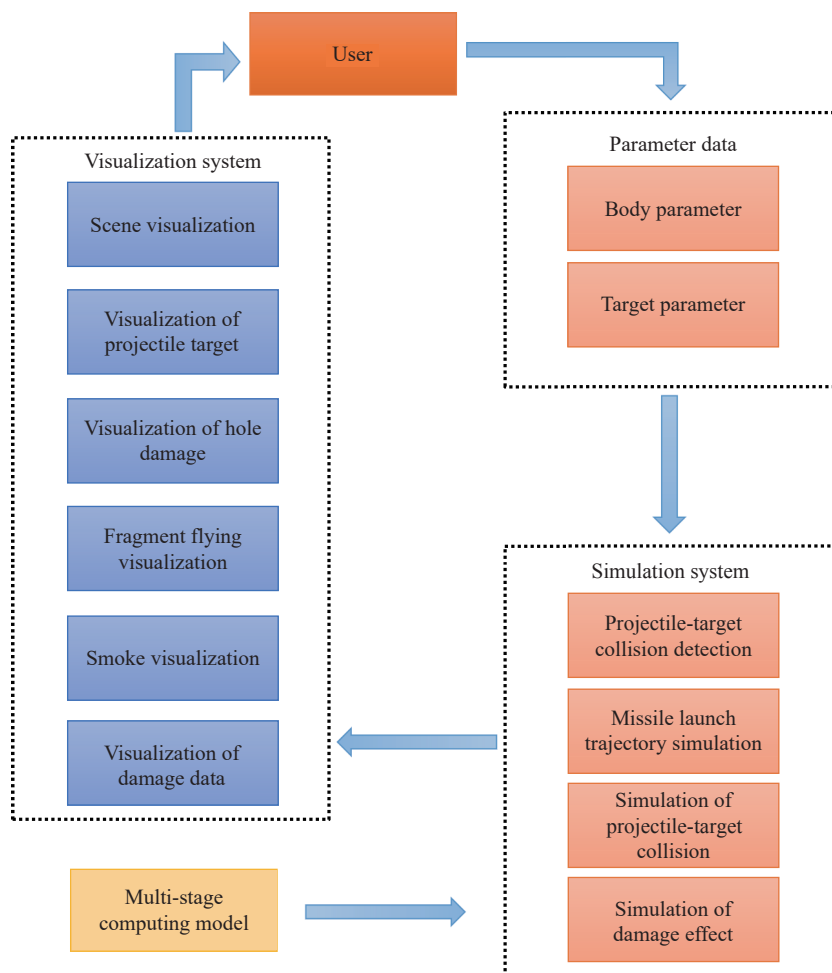


图 10 仿真模块之间的关系

Fig. 10 Relationship of simulation modules

为了方便操作可视化仿真过程,满足对弹体和混凝土靶板参数的灵活设定,并进行不同工况的侵彻可视化模拟,在蓝图系统中添加了参数输入模块,可在仿真界面直接输入参数,并传输到数据计算模块,用于弹体侵彻靶板信息显示,如图 11 和图 12 所示。

交互界面采用图形化的方式展示参数选项,通过按钮点击的形式进行交互,让用户能够理解和操作,从而提高了交互性和可用性。用户还可以通过平滑的视角转换功能,实现从不同角度观察仿真过程,以便从宏观和微观层面全面理解仿真现象。显示模块还可以提供交互式的探索功能。

将建立的场景模型表征集成到毁伤效果可视化模块中,利用可视化引擎的粒子系统和物理引擎实现对实验场景的复现。显示弹体飞行的轨迹还包括混凝土靶板在受到弹体侵彻后的变形、碎片飞溅等一系列复杂现象的可视化,使得场景更加真实和生动。显示模块还提供多角度观察功能。同时,利用可视化引擎的渲染能力可以增强场景的光影效果,使得混凝土靶的破碎和碎石飞溅看起来更加真实。

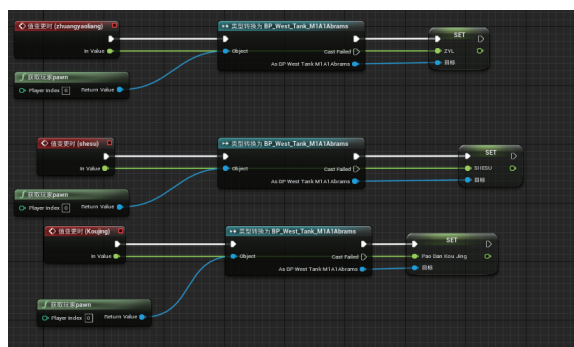


图 11 弹体参数输入

Fig. 11 Input of projectile parameters

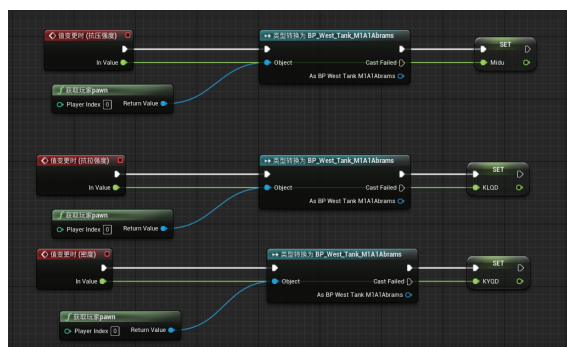


图 12 靶体参数输入

Fig. 12 Input of target parameters

在数据计算模块数据的实现过程中,采取了多层次优化和集成策略,以确保仿真系统能够高效、准确地处理复杂的计算任务。首先,通过 Visual 软件进行的编程计算,利用优化的理论计算模型作为基础,将理论模型转化为可执行的计算程序,并且确保其高效运行,以应对复杂的数值计算和算法操作。其次,通过 Visual 软件的编程功能,准确地实现模型的计算和逻辑,为后续仿真过程提供可靠的基础。最后,通过定义自定义变量接收弹体与靶板的参数值,并在蓝图编辑器中构建一个类作为 DLL 接口的实现载体,将输入的参数传入计算程序中,再将计算结果返还系统并将其传递至毁伤显示界面,数据传递接收过程如图 13 所示。

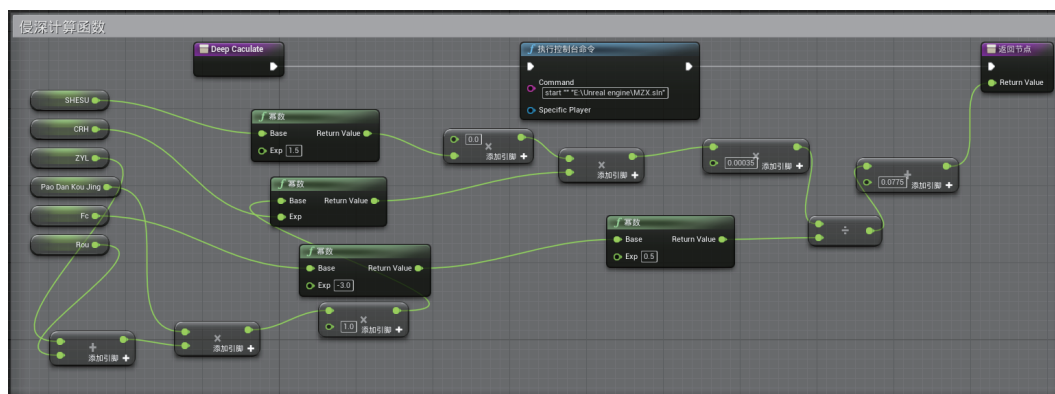


图 13 数据传递接收

Fig. 13 Data transmission reception

在信息界面显示的设计中,基于引擎的 UMG 界面设计系统以合理的交互逻辑创建 UI 元素和信息布局,用户可以轻松获取所需的所有毁伤效果数据,包括靶板的毁伤状态(如被完全贯穿或仅部分破坏)以及弹体侵彻深度的详细信息。设置了点击获取功能,当用户在靶板模型上点击一个特定位置时,就会弹出该靶板的毁伤数据,该数据是基于数据计算模块计算而返回的计算结果,并通过 UMG 控件蓝图显示到界面上。

3 可视化仿真系统测试

基于第 2 节所述的系统构建,实现了可视化平台的搭建,基于实验数据对可视化系统预测的准确性进行验证。

采用 Forrestal 等^[37-38]的实验数据对开发的弹体侵彻混凝土的仿真系统测试进行验证,具体实验数据如表 2 所示,其中: δ_{CRH} 表示弹头形状系数, $\delta_{CRH} = s/2a$ 。

表 2 实验验证数据

Table 2 Experimental validation data

Case	Projectile			Target slab		$v/(m \cdot s^{-1})$	H/m
	m/kg	d/mm	δ_{CRH}	f_c/MPa	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$		
1	1.600	30.5	3	51.0	2300	545	0.560
2	1.600	30.5	3	51.0	2300	1201	2.030
3	0.478	20.3	3	58.4	2320	610	0.491
4	0.478	20.3	3	58.4	2320	1009	1.300
5	1.620	30.5	3	58.4	2320	445	0.460
6	1.620	30.5	3	58.4	2320	980	1.950
7	0.480	20.3	3	62.8	2300	821	0.760

基于表 2 的实验数据进行弹体侵彻混凝土的可视化模拟,并进行数据验证。首先,进行弹靶参数输入;然后,根据交互流程调整观察状态;最后,通过点击目标毁伤靶板,获取毁伤信息。

采用该系统测试了 7 组不同的实验工况,数据对比如表 3 和图 14 所示。

表 3 系统测试数据对比

Table 3 Comparison of system test data

Case	H/m		Error/%
	Experiment	Systematic prediction	
1	0.560	0.642	14.6
2	2.030	2.434	19.9
3	0.491	0.500	1.8
4	1.300	1.185	8.8
5	0.460	0.428	6.9
6	1.950	1.697	12.9
7	0.760	0.819	7.7

结合图 14 和表 3 的分析可以看出,根据本研究提出的理论计算模型,可视化系统对侵彻深度的预测结果与实验结果的一致性较好,预测误差都在合理的范围内,平均误差在 10% 以内。这说明系统具备良好的预测稳定性,理论计算模型的预测结果具有较高的准确性,能够为研究人员提供可靠的参考依据。

将工况 7 侵彻实验的毁伤过程及毁伤结果的可视化效果与真实实验场景进行对比,侵彻过程与毁伤的对比分别如图 15 和图 16 所示。

通过对实验案例进行测试,结果显示,本研究开发的弹体侵彻混凝土可视化系统对实验场景进行了还原,与原场景具有较高的一致性,毁伤预测结果具有较高的准确性,能够逼真地还原弹体侵彻混凝土过程及毁伤结果。

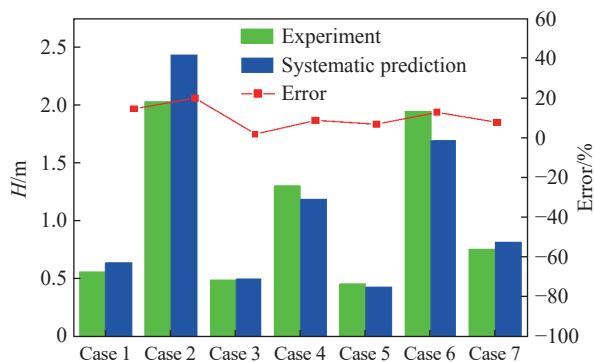


图 14 数据对比

Fig. 14 Comparison of data



图 15 侵彻过程对比

Fig. 15 Comparison of penetration processes



图 16 毁伤对比

Fig. 16 Comparison of destruction

4 结 论

提出了一种理论计算模型与可视化技术相结合的混凝土靶毁伤评估仿真方法, 将实际场景重建为仿真环境, 利用理论计算模型评估目标毁伤信息, 并利用可视化技术展示了复杂的仿真结果, 得到以下主要结论:

(1) 利用空腔膨胀理论建立了多阶段计算模型以预测弹体侵彻混凝土行为, 该模型的预测精度高、适用范围广;

(2) 开发了弹体侵彻混凝土的可视化仿真系统, 通过设置不同弹靶参数, 可以模拟或再现不同侵彻行为下混凝土靶的毁伤和破坏行为;

(3) 可视化仿真系统提供了一种理论计算模型与可视化仿真相结合的分析评估方法, 可以预测弹体侵彻混凝土目标的毁伤行为, 并能直观地显示其破坏过程。

参考文献:

- [1] 金丰年, 刘黎, 张丽萍, 等. 深钻地武器的发展及其侵彻 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2002, 3(2): 34–40.
JIN F N, LIU L, ZHANG L P, et al. Development of projectiles and their penetration [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2002, 3(2): 34–40.
- [2] 王涛, 余文力, 王少龙, 等. 国外钻地武器的现状与发展趋势 [J]. 导弹与航天运载技术, 2005(5): 51–56.
WANG T, YU W L, WANG S L, et al. Development of deep-drilling weapons and their penetration [J]. Missiles and Space Vehicles, 2005(5): 51–56.
- [3] NING J G, REN H L, LI Z, et al. A mass abrasion model with the melting and cutting mechanisms during high-speed projectile penetration into concrete slabs [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2022, 38(10): 121597.
- [4] YANKELEVSKY D, FELDGUN V. The embedment of a high velocity rigid ogive nose projectile into a concrete target [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 144: 103631.
- [5] NING J G, MENG F L, MA T B, et al. Failure analysis of reinforced concrete slab under impact loading using a novel numerical method [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 144: 103647.
- [6] CHEN X G, LU F Y, ZHANG D. Penetration trajectory of concrete targets by ogive steel projectiles experiments and simulations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 120: 202–213.
- [7] 焦登伟. 混凝土/钢筋混凝土高速侵彻贯穿问题的数值模拟与实验研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
JIAO D W. Numerical simulation and experimental research on high-speed penetration of concrete/reinforced concrete [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.
- [8] 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.
- [9] ROSENBERG Z, DEKEL E. Analytical solution of the spherical cavity expansion process [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(2): 193–198.

- [10] WU H, HEN X W, HE L L, et al. Stability analyses of the mass abrasive projectile high-speed penetrating into concrete target. Part I: engineering model for the mass loss and nose-blunting of ogive nosed projectiles [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2014, 30(6): 933–942.
- [11] XU X Z, SU Y C, FENG Y B. Optimization analysis of state equation and failure criterion for concrete slab subjected to impact loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 186: 104872.
- [12] WANG M, WANG K L, ZHAO Q C et al. LQR control and optimization for trajectory tracking of biomimetic robotic fish based on unreal engine [J]. *Biomimetics*, 2023, 8(2): 236.
- [13] 丁钱. 基于模型驱动的复杂系统装备互操作可视化仿真与验证平台设计与实现 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.
DING Q. Design and implementation of a visual simulation and verification platform for equipment interoperability of complex system based on model driven [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [14] CHEN R C, AKKUS I E, FRANCIS P. SplitX: high-performance private analytics [C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 Conference on SIGCOMM. Hong Kong, China: Association for Computing Machinery, 2013: 315–326.
- [15] SHEWCHENKO N, FONRNIER E, WONNACOTT M, et al. A vulnerability/lethality model for the combat soldier, a new paradigm—basis and initial development [C]//Personal Armour Systems Symposium. Nuremberg-Fürth, Germany, 2012.
- [16] 贺歆. 弹目遭遇动态可视化仿真研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
HE X. Simulation study on dynamic visualization of projectile encounters [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.
- [17] 刘云. 弹目遭遇可视化仿真关键技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
LIU Y. Research on the key technology of visual simulation of projectile encounter [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.
- [18] RUSYAK I, SUFIYANOV V, KOLOLEV S, et al. Software complex for simulation of internal and external ballistics of artillery shot [C]//International Conference on Military Technologies (ICMT). Brno, Czech Republic: IEEE, 2015.
- [19] BUŻANTOWICZ W. Matlab script for 3D visualization of missile and air target trajectories [J]. *International Journal of Computer and Information Technology*, 2016, 5(5): 419–422.
- [20] SCHOEDER W J, MARTIN, AVILA, et al. The visualization toolkit user's guide [M]. New York, USA: Kitware Inc., 2001.
- [21] 刘建斌, 徐豫新, 高鹏, 等. 火箭杀爆弹毁伤幅员仿真 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(Suppl 2): 159–164.
LIU J B, XU Y X, GAO P, et al. Simulation of the extent of damage caused by rocket explosive projectiles [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(Suppl 2): 159–164.
- [22] 高鹏, 徐豫新, 李可, 等. 火箭杀爆弹毁伤幅员计算方法与可视化仿真实现 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(Suppl 2): 216–220.
GAO P, XU Y X, LI K, et al. Calculation method and visual simulation implementation of kinetic explosion damage amplitude of rocket explosive projectiles [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(Suppl 2): 216–220.
- [23] YANG Y B, QIAN L X, MING Q U. Lethality test simulation system for conventional warhead based on numerical results [C]//Asia Simulation Conference/6th International Conference on System Simulation and Scientific Computing. Beijing, 2005: 267–271.
- [24] 杨云斌, 屈明, 钱立新. 破片战斗部威力仿真方法与仿真软件研究 [J]. *计算机仿真*, 2007, 24(10): 14–19.
YANG Y B, QU M, QIAN L X. Lethality simulation method & software for fragmentation warhead [J]. *Computer Simulation*, 2007, 24(10): 14–19.
- [25] WANG Y, ZHANG W Y, NING J G. Streamline-based visualization of 3D explosion fields [C]//International Conference on Computational Intelligence and Security. Sanya, Hainan: IEEE, 2011.
- [26] LI B X, LIANG Z G, PENG S, et al. Bullet external ballistic visualization simulation software design [C]//International Conference on Machine Learning and Computer Application. Shenyang, Liaoning: IEEE, 2021.
- [27] 张进强, 蒋夏军. 外弹道可视化仿真研究与实现 [J]. *计算机工程与科学*, 2015, 37(2): 372–378.
ZHANG J Q, JIANG X J. Research and implementation of visualization simulation for external trajectory [J]. *Computer Engineering & Science*, 2015, 37(2): 372–378.
- [28] 程翔, 李苑青, 王丽华. 基于 OpenGL 的六自由度三维弹道仿真技术研究 [J]. *电子科技*, 2017, 30(6): 15–20.
CHENG X, LI W Q, WANG L H. Research on six degree of freedom 3D trajectory simulation based on OpenGL [J]. *Electronic Science and Technology*, 2017, 30(6): 15–20.
- [29] 王彪, 程鹏举, 韩卓茜, 等. 基于 C#与 STK 的多雷达跟踪弹道导弹系统设计与实现 [J]. *计算机科学与应用*, 2020, 10(6): 1185–1193.

- WANG B, CHENG P J, HAN Z X, et al. Design and implementation of multi-radar tracking ballistic missile system based on C# and STK [J]. *Computer Science and Application*, 2020, 10(6): 1185–1193.
- [30] 纪录, 吴国东, 王志军, 等. 基于 STK 的弹箭半实物飞行实时可视化仿真 [J]. *火力与指挥控制*, 2020, 45(2): 170–174, 179.
- JI L, WU G D, WANG Z J, et al. Missile-rocket semi-physical flight simulation based on STK true time visualization technology [J]. *Fire Control & Command Control*, 2020, 45(2): 170–174, 179.
- [31] TIAN X J, TAO T J, LOU Q X, et al. Modification and application of limestone HJC constitutive model under the impact load [J]. *Lithosphere*, 2022, 2021: 6443087.
- [32] FELDGUN V R, YANKELEVSKY D Z. Constitutive equations for reliable projectile penetration analysis into a concrete medium [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2019, 11(2): 159–184.
- [33] DONG H, WU H J, LI J Z, et al. Dynamic spherical cavity expansion analysis of concrete/rock based on hoek-brown criterion [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1507: 032012.
- [34] YANG H W, ZHANG J, WANG Z Y, et al. Numerical study on the resistance of rigid projectiles penetrating into semi-infinite concrete targets [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2021, 37(3): 482–493.
- [35] LI Z, XU X Z. Theoretical investigation on failure behavior of ogive-nose projectile subjected to impact loading [J]. *Materials*, 2020, 13(23): 5372.
- [36] JADON A, PATIL A, JADON S. A comprehensive survey of regression based loss functions for time series forecasting [J/OL]. *Arxiv*, 2022: 2211.02989.
- [37] FORRESTAL M J, ALTMAN B S, CARGILE J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(4): 395–405.
- [38] 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.

Optimization Model and Visualization Simulation of Projectile Penetration into Concrete

SU Yongchao, NING Jianguo, XU Xiangzhao

(State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Using visual simulation technology to investigate the damage mechanism and target response of projectile penetration into concrete is an important research topic in the field of explosive impact. Concrete, as a common building material, has complex and varied damage behavior when subjected to explosive impact or high-speed projectile penetration. Herein, a visual simulation method is introduced, which is based on the combination of theoretical research and visualization technology. An optimized model of penetration calculation is established based on the theory of cavity expansion, which can predict the characteristics of the penetration depth of concrete penetrated by the projectile. Using a visualization physics engine, the trajectory of the projectile, the aperture of the open pit, the damage of the target slab, and the debris splash are carefully characterized and simulated, which enhances to the realism and reliability of the scene. The developed visual simulation system can not only observe the process of projectile penetration into concrete from multiple perspectives, but also efficiently and accurately analyze and predict the damage behavior and dynamic response of projectile penetration into concrete targets. It has important application prospects in the design and safety assessment of construction projects, providing a novel perspectives for understanding and exploring the mechanism of concrete penetration.

Keywords: projectile penetration; concrete; visual simulation; physics engine