



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2504811

引用格式:王彝茹,康志强,王振坤,等.冻融作用下裂隙砂岩链式力学劣化机制与智能预测分析[J].科学技术与工程,2026,26(11):4782-4791.

Wang Yiru, Kang Zhiqiang, Wang Zhenkun, et al. Chain-like mechanical deterioration mechanisms and intelligent predictive analysis of fractured sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(11): 4782-4791.

冻融作用下裂隙砂岩链式力学劣化机制与智能预测分析

王彝茹^{1,2}, 康志强^{1,2}, 王振坤^{1,2}, 李诗童^{1,2}, 姚旭龙^{1,2}

(1. 华北理工大学矿业工程学院, 唐山 063210; 2. 河北省矿山绿色智能开采技术创新中心, 唐山 063210)

摘要 为揭示冻融作用下裂隙砂岩的损伤演化机理,构建了数值模拟、机器学习和决策逻辑及交互效应解析结合的研究体系。通过 PFC 软件建立裂隙砂岩数值模型,开展冻融循环以及三轴压缩模拟实验;建立解构公式,分离冻融作用与裂隙在砂岩力学损伤过程中的各自贡献。采用极限梯度提升算法(extreme gradient boosting, XGBoost)建立冻融裂隙砂岩多目标预测模型(测试集拟合优度大于 0.97),引入沙普利加性解释方法(Shapley additive explanations, SHAP),解析模型决策逻辑与变量交互效应。研究发现,冻融作用下裂隙砂岩的破坏特征由脆性转为延性,随着循环次数增加,其力学性能的劣化速率逐步减缓,呈损伤累计饱和特征。其链式损伤演化机制可总结为,微观角度下冻胀力驱动颗粒黏结劣化,促使裂纹扩展与力链网络失效,随损伤逐步累计,在宏观层面表现为承载力的下降。而 SHAP 交互值则进一步阐明了作用在抗压强度上的三类交互效应,即冻融循环次数与冻融上限温度、裂隙长度、厚度之间的协同劣化效应;冻融循环次数与高裂隙倾角(大于 45°)之间异向作用的协同补偿效应;循环次数与裂隙数量间的拮抗效应。基于以上成果,集成 XGBoost-SHAP 技术框架,开发多目标预测与变量分析平台,为寒区岩体稳定性评估提供了智能化工具。

关键词 裂隙砂岩; 冻融循环; 数值模拟; SHAP; XGBoost

中图分类号 TU45 TP391.41; **文献标志码** A

Chain-like Mechanical Deterioration Mechanisms and Intelligent Predictive Analysis of Fractured Sandstone under Freeze-thaw Cycles

WANG Yi-ru^{1,2}, KANG Zhi-qiang^{1,2}, WANG Zhen-kun^{1,2}, LI Shi-tong^{1,2}, YAO Xu-long^{1,2}

(1. School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;

2. Hebei Innovation Center for Green and Intelligent Mining Technology, Tangshan 063210, China)

[Abstract] To investigate the damage evolution mechanism of fractured sandstone under freeze-thaw cycles, an integrated research framework combining numerical simulation, machine learning, and decision logic analysis & interaction effect analysis was established. Numerical models were constructed using PFC software, through which freeze-thaw cycle tests and uniaxial compression simulations were conducted. A deconstruction formulation was developed to isolate the contributions of freeze-thaw damage and pre-existing fissures. The XGBoost algorithm was employed to build a multi-objective prediction model achieving a test set R^2 exceeding 0.97, while the SHAP method was applied to interpret decision logic and variable interactions. Results indicate a transition from brittle to ductile failure modes under freeze-thaw action, with mechanical property deterioration rates gradually decelerating and showing damage accumulation saturation. The micro-macro chain damage evolution mechanism is summarized as frost heaving forces driving particle bond degradation, triggering crack propagation and force chain network failure. The cumulative effect of this progressive damage manifests macroscopically as a significant reduction in load-bearing capacity. SHAP analysis further reveals three interaction effects on compressive strength: synergistic deterioration between freeze-thaw cycles and upper temperature/fissure length/fissure thickness; synergistic compensation between cycle count and high dip angles ($>45^\circ$); and antagonistic effects between cycles and fissure quantity. Finally, an integrated XGBoost-SHAP platform was developed, providing an intelligent tool for rock mass stability assessment in cold regions.

[Keywords] fractured sandstone; freeze-thaw cycle; numerical simulation; SHAP; XGBoost

收稿日期: 2025-06-27 修订日期: 2025-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(52074123)

第一作者: 王彝茹(1999—),女,汉族,山西临汾人,硕士研究生。研究方向:岩石力学与工程。E-mail:wangyiru@stu.ncst.edu.cn。

* 通信作者: 康志强(1974—),男,汉族,河北井陉人,博士,教授。研究方向:岩石力学与工程。E-mail:kzqzsh@163.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

寒区工程中,裂隙砂岩在冻融循环作用下发生的渐进损伤是诱发岩体失稳的关键因素^[1]。冻融过程中,水冰相变产生的冻胀应力造成了岩石内部裂隙扩展、强度劣化、渗透性增强等灾害效应^[2-3]。近年来,在传统力学试验方面,苗方利等^[4]发现岩石强度随冻融次数增加发生非线性下降;Feng等^[5]发现砂岩的峰值应变随冻融循环次数的增加而增加;叶永芄等^[6]通过单轴压缩试验,分析砂岩在不同冻融循环次数下的变形特征。与此同时,学者们通过核磁共振和CT(computed tomography)扫描揭示了冻融砂岩的微观损伤机制^[7-9];王创业等^[10]对冻融循环后的砂岩进行了核磁共振试验后,提出在冻融30次后,冻融损伤作用机制发生改变。数值模拟方面,相关研究亦取得一定进展,宋勇军等^[11]在离散元模拟软件中用孔隙水体积相变的方式模拟冻融作用;朱谭谭等^[12]基于体积膨胀法,研究在应力-冻融耦合作用下,轴向应力对于微观裂纹扩展情况的影响。在机器学习的应用中,吴顺川等^[13]、王娟等^[14]分别使用基础力学参数和裂隙几何参数作为特征变量建立了岩石抗压强度预测模型;王海静等^[15]还开发了可视化预测界面。

上述研究存在以下局限:力学损伤分析中变量维度单一,而预测模型因缺乏可解释性难以揭示多因素耦合机制。针对以上局限,拟通过多尺度损伤解析、预测模型构建与交互效应分析等工作,旨在建立多变量影响下的损伤分析框架,以期更深入地揭示相关因素的耦合作用关系。

1 裂隙砂岩数值模型的冻融循环模拟与参数标定

1.1 基于孔隙水体积相变的冻融循环模拟

将饱水处理过的砂岩视为岩石颗粒与孔隙水颗粒的集合。通过改变孔隙水颗粒的体积模拟冻融作用。每个冻融周期内水颗粒的体积分步进行计算,公式为

$$V = \begin{cases} V_0 + \Delta V W_f, & T \leq 0 \\ V_0, & T > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: T 为当前温度, $^{\circ}\text{C}$; V_0 为孔隙水颗粒原始体积, mm^3 ; ΔV 为其体积在此时间步内的变化量, mm^3 ; W_f 为单个水颗粒中固态结冰体的占比^[16]; V 、 W_f 与 T 的两相共存时计算公式为

$$\Delta V = V_0 \left(\frac{\rho_w}{\rho_i} - 1 \right) \quad (2)$$

$$W_f = \begin{cases} \left[1 + 0.139 \left(-\frac{1}{T} \right)^{\frac{1}{3}} \ln \left(\frac{1 + e^{0.268T}}{2} \right) \right] \times \\ (1 - e^{0.268T}), & T \leq 0 \\ 0, & T > 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$T = T_0 \left[\sin \left(\frac{\pi}{60} t \right) \right] \quad (4)$$

式中: ρ_i 和 ρ_w 分别为固、液态水的密度, kg/mm^3 ; T_0 为水颗粒的初始温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为当前时间步。通过式(4)模拟自然界中气温的变化规律^[17],进行每个时间步的温度更新。

1.2 裂隙砂岩三维模型的参数标定

具体实验流程如下:(1)岩样制备:选取具有季节性冻融特征的冀北矿区的黄砂岩作为实验对象,将岩样加工为如图1(a)所示 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的标准长方体试件,并在试件中心区域切割出两条 45° 倾角的贯通平行裂隙(长度 30 mm ,宽度 1 mm ,间距 50 mm)。(2)饱水处理:将试件置于真空容器中,注入去离子水后抽真空至 -0.1 MPa ,并维持 4 h 以上至无气泡析出,随后常压浸泡 48 h 以确保充分饱和。(3)加载测试:将饱水处理后的试件放置于 500 t 岩爆测试系统[图1(b)]中,进行三轴压缩试验。

基于颗粒流软件PFC生成的裂隙砂岩数值模型试件如图2所示。模型尺寸为 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 150\text{ mm}$,由直径为 $0.5 \sim 0.8\text{ mm}$ 的岩石颗粒,与直径为 $0.2 \sim 0.3\text{ mm}$ 的水颗粒构成。通过线性平行黏结模型来表征离散元颗粒间的胶结作用,并删除裂隙墙体内颗粒生成预制裂隙。在 x 、 y 、 z 三个方向分别设置6个刚性墙,通过伺服控制以位移加载的方式实现三轴压缩过程。

使用试错法对数值模型的微观参数取值进行了多次调整与优化,并通过遍历算法,为所有颗粒及对应黏结赋予了微观力学参数,成功再现了饱水

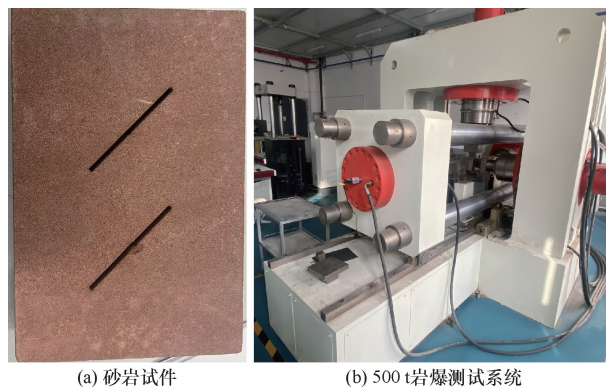


图1 室内三轴压缩试验

Fig. 1 Indoor triaxial compression test

裂隙砂岩从变形至破坏的全过程变形特征。最终得到的应力-应变曲线如图 3 所示。虽然在颗粒生成阶段采用重力沉积法,模拟曲线未呈现明显的压实阶段,但其关键力学指标与试验数据高度吻合:峰值强度偏差仅为 1.84%,破坏后应变误差为 4.26%。此外,二者在峰值应力后均表现出典型的脆性破坏特征。多角度验证结果表明,表 1 所列参数取值具有较高的可靠性。

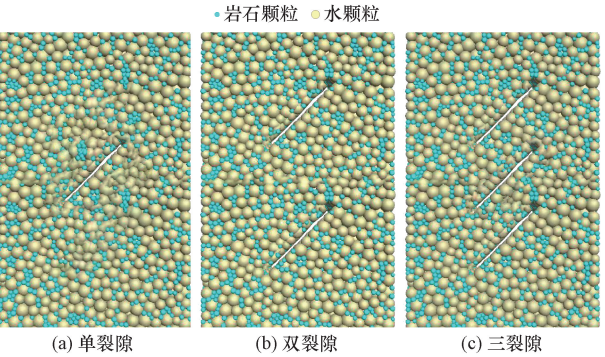


图 2 裂隙砂岩数值模型
Fig. 2 Numerical modeling of fractured sandstone

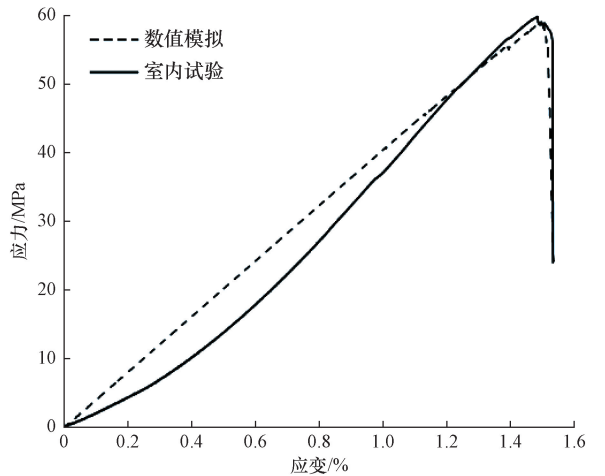


图 3 室内实验与模拟实验应力-应变曲线对比
Fig. 3 Comparison of stress-strain curves between indoor and simulated experiments

2 冻融循环作用后裂隙砂岩的三轴压缩模拟结果分析

采用单因素变量控制法,将基准试件的参数设

置为裂隙长度 10 mm、厚度 1 mm、倾角 45°、单裂隙、温度区间 -10 ~ 10 ℃、60 次冻融循环。对照试件的裂隙长度分别为 30、50 mm;裂隙厚度分别为 3、5 mm;裂隙倾角分别为 0°、15°、30°、60°、75°、90°;裂隙条数为 2 条、3 条;冻融温度区间为 -10 ~ 20 ℃、-10 ~ 30 ℃,循环次数分别为 0、15、30、45 次。

2.1 冻融裂隙砂岩在三轴压缩条件下应力-应变曲线分析

如设 ε_1 (%) 和 σ_1 (MPa) 分别为试件荷载过程中对应的轴向应变和轴向应力。如图 4 所示为多变量影响下冻融裂隙砂岩应力-应变曲线。冻融循环作用后,裂隙砂岩试件荷载后的应力-应变曲线可以分为弹性变形阶段、塑性变形阶段、应力跌落阶段。在弹性变形阶段,应力与应变呈线性关系,裂隙砂岩发生可逆性破坏。随冻融次数增加,试件内部损伤累积,弹性性能退化,此阶段持续时间缩短、曲线斜率减小。

在塑性变形阶段,试件应变速率上升,此阶段的上界应力为试件的抗压强度。抗压强度随裂隙面积参数增长呈下降趋势,具体细节如下:在裂隙长度从 10 mm 增长到 50 mm 后,下降了 16.45%;在厚度由 1 mm 增长到 5 mm 后,下降了 8.41%;在裂隙数量由 1 条增长到 3 条后,下降了 9.68%。而随预制裂隙倾角增加,抗压强度整体呈 V 形变化趋势。由 0° 增长到 45°,下降了 5.79%;由 45° 增加到 90° 又上升了 16.91%。而在冻融条件劣化后其变化规律为:冻融 60 次后,相较未冻融试件,抗压强度下降了 59.19%,在冻融上限温度增长到 30 ℃ 后又额外下降了 13.54%。

进入应力跌落阶段后,试件内部结构破坏,体积应变达到峰值,未冻融裂隙砂岩在此阶段应力下降极快,呈脆性破坏。冻融 60 次后的试件的应力跌落速度则相对缓慢,延性破坏特征显著,相较未冻融裂隙砂岩,体积应变增加了 13.26%。

2.2 冻融裂隙砂岩在三轴压缩条件下微观结构劣化分析

裂隙砂岩在外部荷载或冻胀力作用下,内部颗粒相互挤压,触发了以“挤压-粘结”为核心的应力竞争机制。当颗粒间的挤压力超过固有黏结强度时,

表 1 裂隙砂岩微观参数标定详情

Table 1 Details of micro-parameter calibration of fractured sandstone

黏结类型	颗粒接触模量/GPa	颗粒刚度比	平行黏结法向强度/MPa	平行黏结切向强度/MPa	平行黏结摩擦角/(°)	摩擦系数
岩-岩颗粒	10	3.5	6.3	10.6	45	0.5
水-岩颗粒	10	0.5	130	150	0	—
水-水颗粒	10	0.5	150	150	0	—

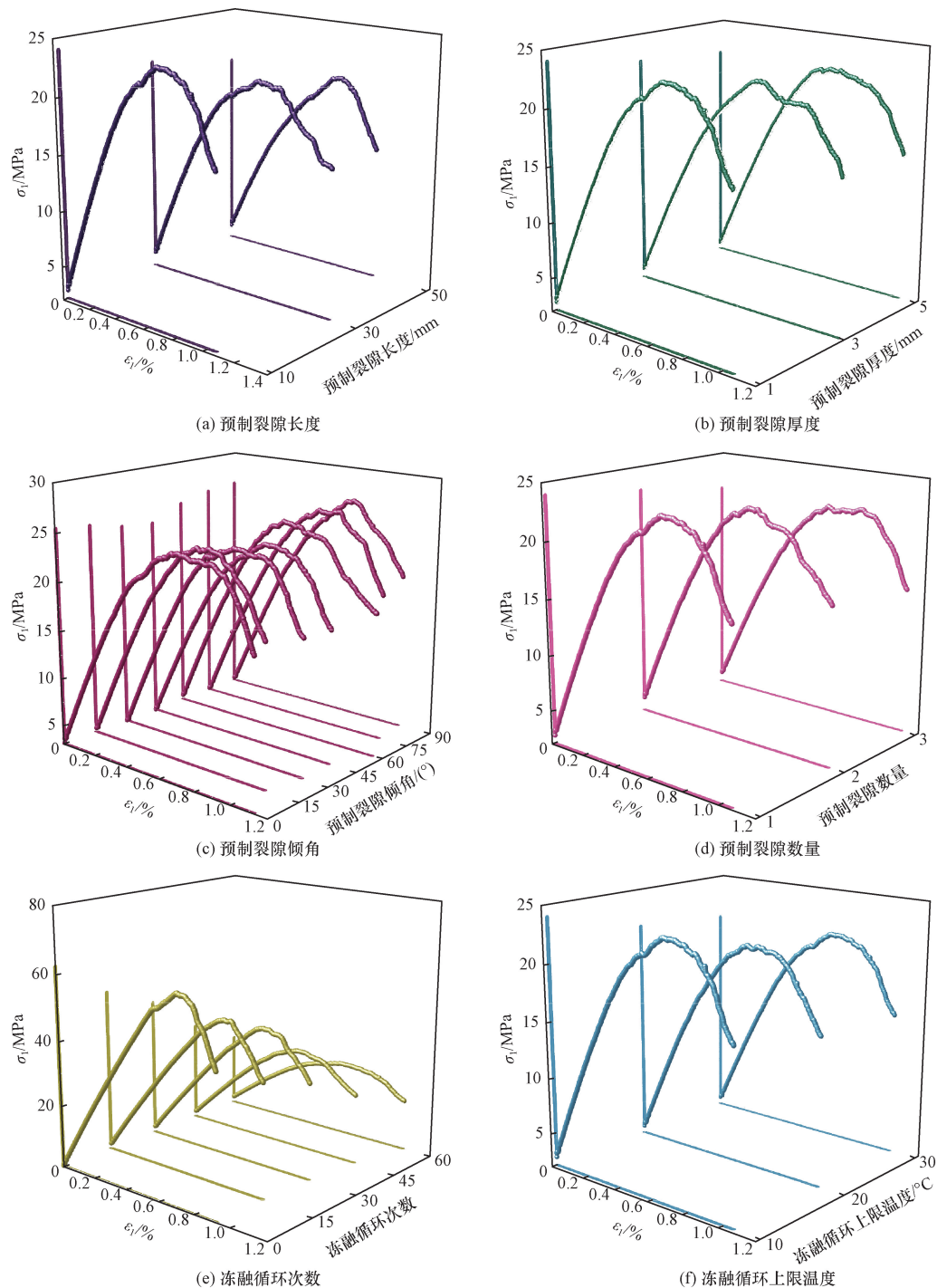


图4 多变量影响下冻融裂隙砂岩应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of freeze-thaw fissured sandstone under multivariate influences

黏结界面将逐步劣化直至断裂。这些断裂事件在数值模拟中被记录为裂纹增量;若黏结界面断裂受法向拉应力主导则记录为张拉裂纹;若由剪应力与摩擦力共同主导,则记录为剪切裂纹。

黏结界面断裂后,颗粒体系在冻胀力或持续加载的应力驱动下发生重组,通过建立物理接触形成力链网络以实现应力传播。在力链网络中,接触数量反映了力链结构的密度,而接触力值则表征

其传递效能。与此同时,裂纹的扩展情况则直接映射了原始黏结系统的劣化情况。力链网络特征与裂纹扩展行为,共同揭示了裂隙砂岩微观结构的劣化规律。

如图5所示,裂隙砂岩在冻融15次后,力链网络的劣化趋势最为剧烈。这是由于未冻融砂岩的颗粒粘结更为坚固,颗粒分布更为密集。冻胀力在紧凑的颗粒系统中产生了更大的挤压作用,导致其

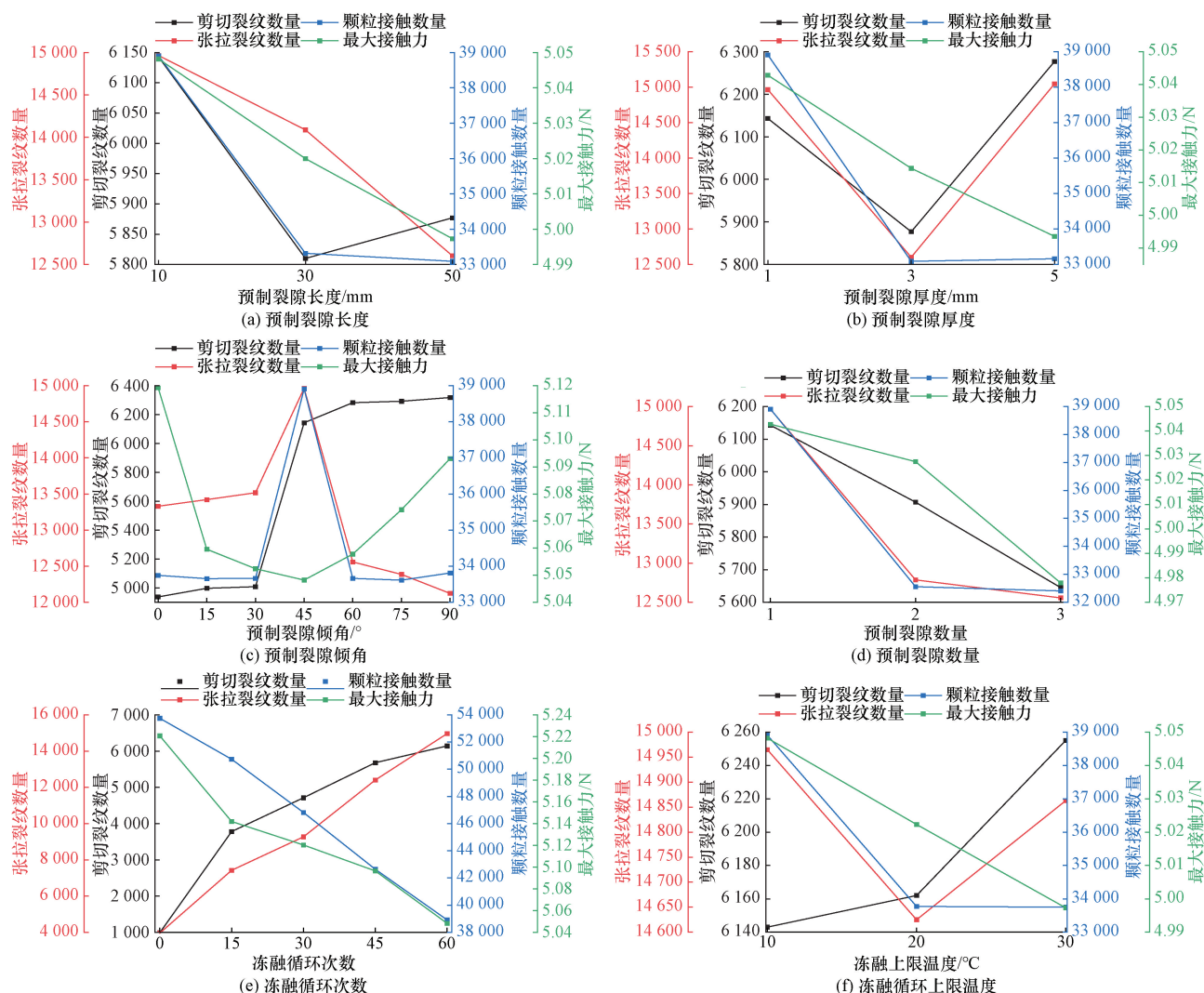


图5 多变量影响下冻融裂隙砂岩裂纹扩展情况与颗粒接触情况

Fig. 5 Crack extension and particle contact in freeze-thaw fractured sandstone under multivariate influence

最大接触力下降了 1.51%, 接触数量下降了 5.62%, 张拉裂纹与剪切裂纹分别上涨了 282.10% 和 87.47%。

经冻融循环 60 次后, 裂隙砂岩内部的接触数量下降 27.61%, 最大接触力亦下降 3.30%。与此同时, 张拉裂纹与剪切裂纹数量分别上涨了 521.33% 和 278.09%, 尽管剪切裂纹占比有所上升, 但张拉裂纹仍占据主导地位, 该现象与文献[18]的研究结论一致。在冻融上限温度上升到 30℃, 裂隙倾角为 45° 时, 上述结构劣化现象最为显著。但随裂隙倾角继续增长, 应力场中剪切分量占比随之增加, 水颗粒冻胀产生的横向推力, 抑制了张拉破坏, 促进了剪切滑移, 导致在倾角为 90° 时, 总裂纹数量减少, 剪切裂纹数量增加了 27.97%, 其破坏机制由张拉主导向剪切局部化转变。

另一方面, 预制裂隙长度和数量的增长则通过给黏结断裂的颗粒提供了迁移空间的方式, 在抑制

接触产生的同时, 引发应力屏蔽效应。该效应直接表现为: 在预制裂隙数量增至 3 条时, 张拉裂纹与剪切裂纹分别减少了 8.11% 和 5.62%。而在预制裂隙长度增至 50 mm 后, 二者降幅则分别为 15.78% 与 4.33%。这种看似矛盾的现象, 实质上反映了预制裂隙通过应力重分布对材料损伤模式所产生的调控作用。

结合裂隙砂岩抗压强度的演化规律与其内部力链结构及裂纹扩展的观测结果, 可推演出冻融作用下裂隙砂岩的损伤演化机制: 冻胀力引发微观层面的剪切与张拉破坏, 导致了颗粒黏结断裂并触发微裂纹的萌生; 随之, 裂纹的扩展与贯通使得原始黏结结构劣化, 与此同时力链网络逐渐退化、应力传播路径失效; 最终这种微观层面的损伤累计在宏观层面表现为承载能力的下降。

2.3 冻融裂隙砂岩基于强度特性的损伤解构分析

为实现不同损伤源的量化表征, 进而为工程防

护措施的精准设计提供数据支撑与理论依据,以抗压强度作为其力学评价指标,建立损伤解构模型,将总力学损伤分解为冻融损伤分量和缺陷损伤分量,二者表达式分别为

$$D_1 = \frac{C_{UF} - C_{F(N,T)}}{C_{UF} - C_{F(N,T);P(L,H,C,D)}} \quad (5)$$

$$D_2 = \frac{C_{UF} - C_{UF;P(L,H,C,D)}}{C_{UF} - C_{F(N,T);P(L,H,C,D)}} \quad (6)$$

式中: D_1 为冻融作用带给裂隙砂岩的力学损伤的程度系数,范围在0~1,值越大表示损伤程度越高; C_{UF} 为完整砂岩未冻融时的抗压强度,取68.713 MPa; $C_{F(N,T)}$ 为完整砂岩在冻融条件为 F (即循环次数为 N ,冻融上限温度为 T)时的抗压强度,MPa; $C_{F(N,T);P(L,H,C,D)}$ 为裂隙砂岩在冻融循环条件为 F 、裂隙参数为 P ,即裂隙长度为 L (mm),裂隙厚度为 H (mm),裂隙倾角为 $C(^{\circ})$,裂隙数量为 D 时的抗压强度,MPa; D_2 为预制裂隙带给砂岩的力学损伤; $C_{UF;P(L,H,C,D)}$ 为裂隙砂岩在裂隙条件为 P ,未冻融时的抗压强度。

如图6、图7所示分别为裂隙砂岩在不同冻融条件以及裂隙参数下的冻融损伤 D_1 以及裂隙损伤 D_2 变化情况。

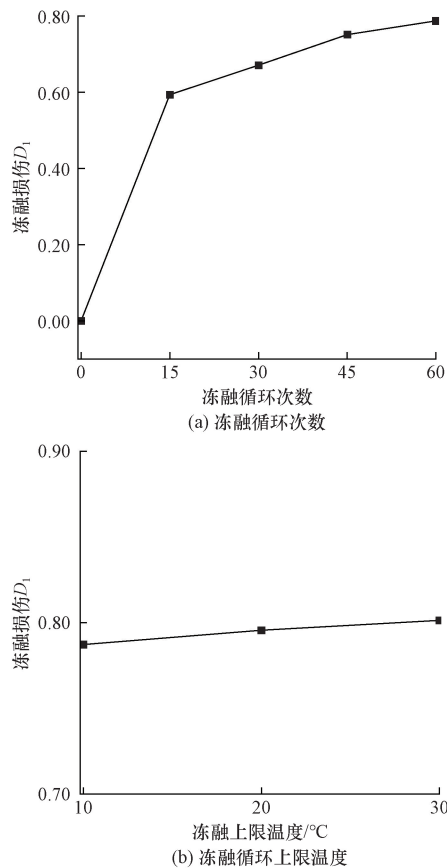


图6 裂隙砂岩的冻融损伤 D_1 图

Fig. 6 freeze-thaw damage D_1 in fractured sandstones

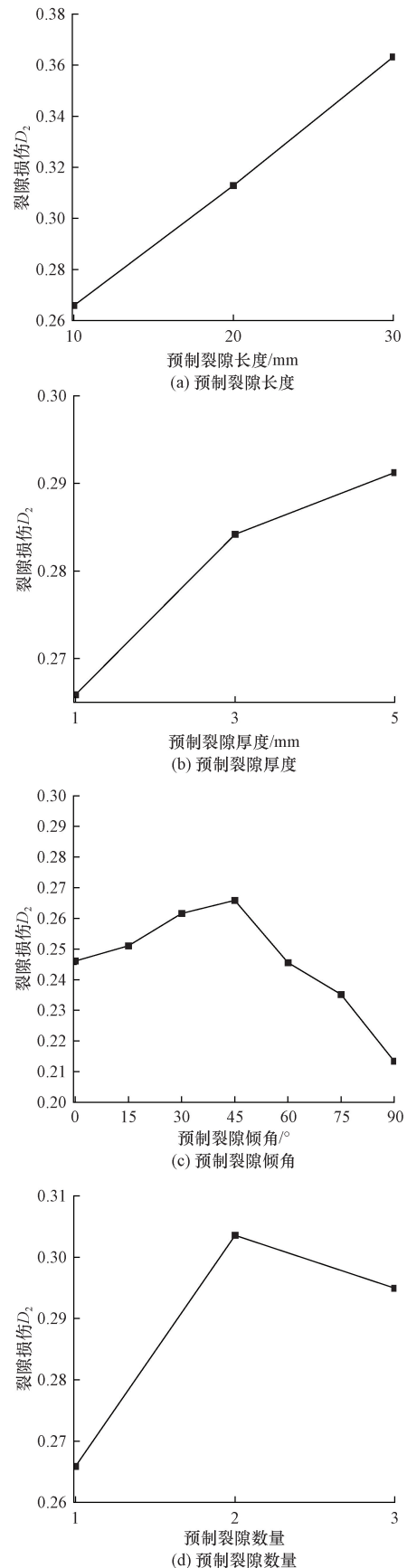


图7 裂隙砂岩的裂隙损伤 D_2 图

Fig. 7 Fracture damage D_2 in fractured sandstones

由图6可知,在前15次冻融中,冻融损伤 D_1 涨幅最大,上涨至0.593,冻融循环60次的砂岩试件的 D_1 达到了0.783。而冻融上限温度的增加进一步加剧了冻融损伤,使得 D_1 增加到了0.802。相比之下预制裂隙损伤 D_2 的增长趋势较为平缓,与预制裂隙面积参数呈近线性关系。在裂隙倾角为 45° ,裂隙长度增长到30 mm后,达到 D_2 最高点0.380。即在多次冻融循环作用下,裂隙缺陷带给砂岩力学性质的劣化程度远低于冻融损伤。从力学角度来说,冻融作用不仅加剧了原有裂隙尖端的应力集中现象,导致受力薄弱区发生稳定的裂纹扩展,还造成了完整区域的颗粒黏结断裂以及裂纹萌生,显著降低了岩石整体的强度。因此在周期性冻融作用下,裂隙砂岩的劣化情况由冻融损伤主导。

3 基于XGBoost-SHAP构建的多目标预测模型与变量交互效应分析

机器学习提高了岩土问题研究的智能化水平和工程应用效率^[19-20]。为提高寒区岩体承载力评估的效率,本研究以裂隙长度、裂隙厚度、裂隙倾角、裂隙数量、冻融循环次数和冻融上限温度作为模型输入的特征变量,抗压强度、冻融损伤 D_1 、裂隙损伤 D_2 作为预测目标,基于XGBoost建立了多目标预测模型,并引入基于博弈论的SHAP方法,探究预测模型的决策逻辑,解析变量间的交互效应,具体流程如图8所示。

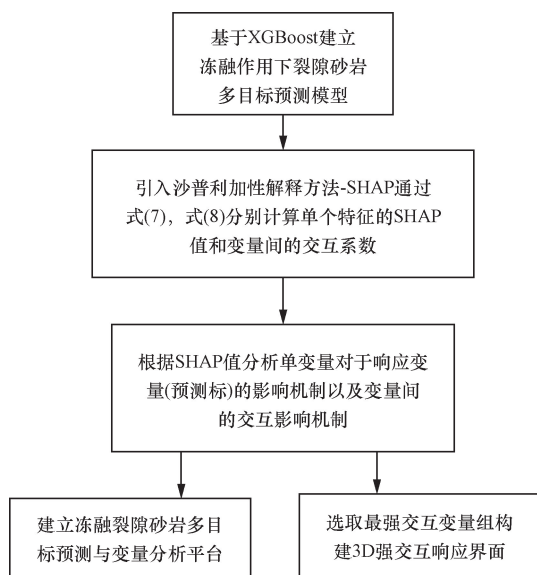


图8 基于XGBoost-SHAP多目标预测模型的构建与交互影响机制分析流程图

Fig. 8 Flowchart for the construction of XGBoost-SHAP based multi-objective prediction model and analysis of interaction effect mechanism

3.1 基于XGBoost构建的冻融裂隙砂岩多目标预测模型

XGBoost算法流程可以简述为:①初始化一个模型;②计算预测误差;③以减小误差为目标调整参数,生成新的模型;④将新模型集成到整个算法中;⑤重复第2到第4步直至误差达到理想值。将样本数据按7:3划分为训练集(107组)和测试集(47组),训练冻融裂隙砂岩多目标预测模型。

使用误差指标平均绝对误差(mean absolute error, MAE)、均方误差(mean squared error, MSE)以及拟合优度 R^2 (coefficient of determination)评估预测模型的性能。根据表2可知,预测模型在测试集上预测误差极小,拟合优度均达到了0.97以上。

表2 模型评估指标详情

Table 2 Details of model assessment indicators

参数	MAE	MSE	R^2
抗压强度	1.104 2	2.130 0	0.986
冻融损伤 D_1	0.014 9	0.000 2	0.973
裂隙损伤 D_2	0.015 7	0.000 7	0.975

3.2 基于SHAP方法的冻融砂岩预测模型的决策机制解析

为探究XGBoost冻融裂隙砂岩多目标预测模型的决策机制,引入基于博弈论的SHAP方法,在所有的特征变量组合中,加入特征 i 后模型预测增量的变化,来计算 i 所对应的SHAP值,具体计算过程为

$$\varphi_i = \sum_{S \subseteq F \setminus \{i\}} \frac{|S|!(|F|-|S|-1)!}{|F|!} [f(S \cup \{i\}) - f(S)] \quad (7)$$

式(7)中: φ_i 为特征 i 对应的SHAP值; F 为包含所有特征变量的集合; S 为不包含特征 i 的特征子集; $|F|$ 和 $|S|$ 分别为集合 F 和 S 中包含的特征数量; $f(S)$ 为使用特征子集 S 时,模型输出的预测值; $f(S \cup \{i\})$ 为特征子集 S 加入特征 i 后,模型输出的预测值。

鉴于冻融损伤 D_1 与裂隙损伤 D_2 均为抗压强度衍生的次级参数,故在此阶段以抗压强度作为核心目标进行决策逻辑与变量交互效应的探究。如图9所示为在预测模型中6个特征变量对抗压强度预测结果的影响程度以及影响方式。图9(a)中每个数据点代表一个样本,通过颜色梯度(红→紫→蓝),表征特征变量的取值(从高到低)。Y轴采用贡献率降序排列规则,贡献率由大到小进行排序。

由图9(a)可知,冻融循环次数、冻融上限温度、裂隙长度和裂隙数量均对抗压强度的预测结果表现出显著的负向边际效应。具体表现为:当以上变

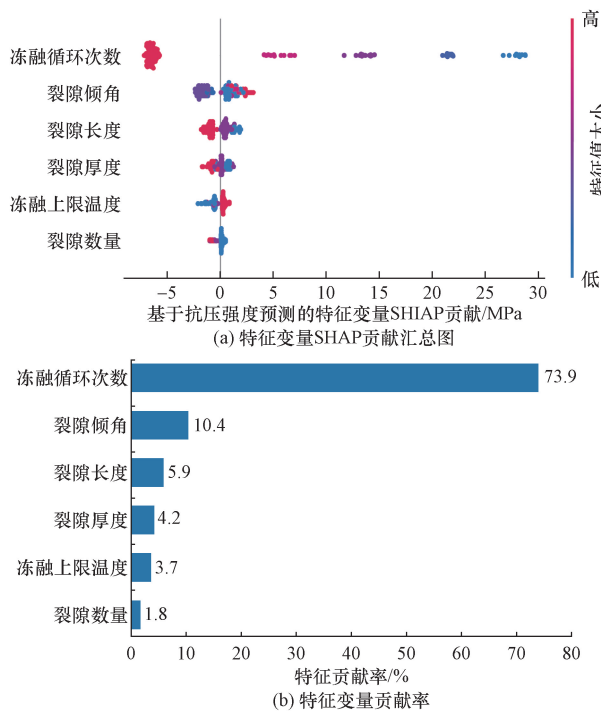


图9 基于冻融裂隙砂岩抗压强度的特征变量贡献图

Fig. 9 Contribution map of characteristic variables based on the compressive strength of freeze-thaw fractured sandstone

量取值在样本的上区间内(红色数据簇),对应的SHAP值均为负值,表示当他们的取值变大,预测结果就会变小。这一现象符合冻融损伤累计和裂隙边界效应导致的岩体强度劣化的理论预期。相比之下,裂隙倾角则表现出较为复杂的影响特征:在低倾角区间(蓝色数据簇)内表现出弱贡献,对应SHAP值接近于0。在取中位数附近时(紫色数据簇)对应SHAP值为负,而在高倾角区间(红色数据簇),对应的SHAP值转为正值,表现出显著的正向边际效应,此现象源于高倾角裂隙在特定条件下通过应力重分布机制,实现缺陷转化。

如图9(b)所示特征重要性排序表明,冻融循环次数在抗压强度的预测中,贡献度最高,占据73.9%。其余排序为裂隙倾角>裂隙长度>冻融上限温度>裂隙数量>裂隙厚度。该结果与推演的冻融砂岩力学响应机制基本一致,从特征变量贡献的量化角度验证了预测模型的有效性与可靠性,为后续冻融损伤演化规律的深入研究提供了坚实的数据分析支撑。

3.3 基于冻融-裂隙变量的交互效应量化分析

交互效应反映了变量共同作用下无法被各自单独效应解释的部分,为量化这种交互效应,引入SHAP交互值,具体计算过程为

$$\varphi_{ij} = \sum_{S' \subseteq F \setminus \{i,j\}} \frac{|S'|!(|F|-|S'|-2)!}{(|F|-1)!} \Delta_{ij} S' \quad (8)$$

式(8)中: φ_{ij} 为变量*i*与*j*对应的SHAP交互值; S' 为不包含特征*i*与*j*的特征子集; $|F|$ 和 $|S'|$ 分别为集合*F*和*S'*中包含的特征变量数; $\Delta_{ij} S'$ 为特征变量*i*与*j*在子集*S'*下的交互贡献,其计算公式为

$$\Delta_{ij} S' = f(S' \cup \{i,j\}) - f(S' \cup \{i\}) - f(S' \cup \{j\}) - f(S') \quad (9)$$

式(9)中: $f(S' \cup \{i,j\})$ 是特征子集*S'*同时加入特征*i*和*j*之后模型输出的预测值; $f(S' \cup \{i\})$ 、 $f(S' \cup \{j\})$ 分别为特征子集*S'*单独加入特征*i*或*j*之后模型输出的预测值; $f(S')$ 是使用特征子集*S'*时模型输出预测值。

根据SHAP交互值的正负,变量间的交互效应可分为协同效应(SHAP交互值为正)和拮抗效应(SHAP交互值为负)。如图10所示,在冻融裂隙砂岩抗压强度的预测中,协同效应又可以细分为以下两种模式。第一种是冻融循环次数与裂隙长度、裂隙厚度、冻融上限温度间存在的协同劣化效应。这表明以上变量单独作用时,均对冻融砂岩抗压强度的预测产生负向边际影响,而它们之间的交互值均为正,表示以上变量同时存在时,会比单独作用对于抗压强度的劣化程度更强。其力学作用机制可解释为:冻融上限温度的升高造成孔隙水融化时体积收缩率增加,在“水分迁移-再冻结”的过程中产生了更大的冻胀压力梯度;预制裂隙长度和厚度的增加,扩展了水分渗透路径,为冻胀力提供了定向发展路径。随循环次数增加,以上变量间的协同作用加剧了冻胀力带来的结构劣化。

第二种协同效应为异向作用的协同补偿,具体

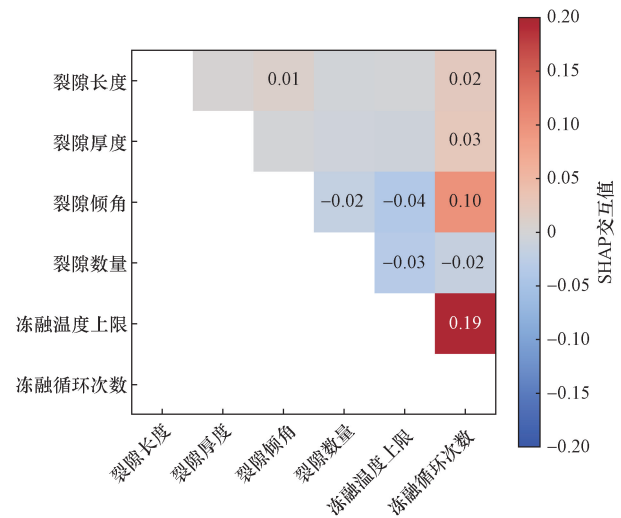


图10 基于冻融裂隙砂岩抗压强度的特征变量SHAP交互值

Fig. 10 SHAP interaction values of characteristic variables based on the compressive strength of freeze-thaw fractured sandstones

表现为在裂隙倾角(大于 45°)单独作用时对抗压强度的预测产生正向边际影响,冻融循环次数单独作用为反向边际影响,而二者交互值为正。这一效应归因于高倾角裂隙通过改变应力分布,将不利结构面重构为应力传递通道,缓解了冻融作用带来的损伤,从而实现补偿效应。

当两个变量单独作用均为负向边际影响,二者的 SHAP 交互值也为负时,变量间表现为拮抗效应。冻融循环次数、冻融上限温度、裂隙倾角均与裂隙数量存在拮抗关系。这是由于多裂隙砂岩发生微裂纹扩展后,裂隙之间形成网状应力缓冲带,缓冲带分散了冻胀力传播的弹性波能量,降低了主裂隙的应力强度因子,从而抑制了冻胀力的局部损伤累积和裂隙尖端的应力集中作用。

基于上述研究,通过实时计算,构建了动态响应曲面交互式界面,用户可以通过移动鼠标,动态探索在不同强交互变量参数组合下的宏微观响应变量的变化规律。如图 11 所示。

3D响应面:冻融温度上限&冻融循环次数

SHAP交互值=0.19

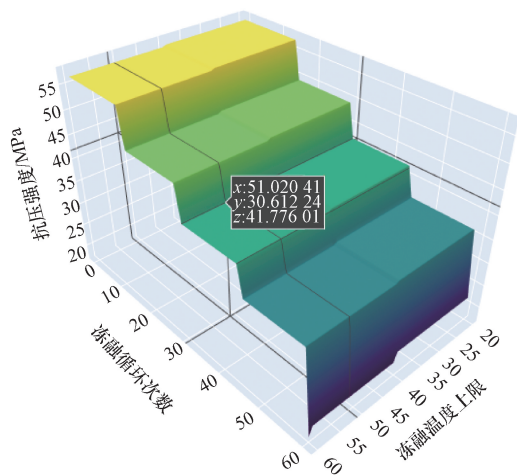


图 11 基于冻融裂隙砂岩抗压强度的 3D 强交互面

Fig. 11 3D strong interaction surface based on the compressive strength of freeze-thaw fractured sandstone

3.4 冻融裂隙砂岩的多目标预测及变量分析平台

以 XGBoost-SHAP 为底层架构,基于 PyQt5 搭建的冻融裂隙砂岩多目标预测及变量分析平台如图 12 所示。此平台使用模块化设计,将整个界面分为 4 个模块,数据导入区:支持用户导入自己数据训练更适合自己的预测模型;参数输入区:在模型训练完成后,用户可以输入参数进行预测;可视化分析区:用户可以选择目标变量以及想要绘制的图像类型(特征边界贡献值与边界贡献率)。预测结果展示区:包括抗压强度预测损伤预测和特征贡献分析图展示。平台响应时间在 0.5 s 以内。

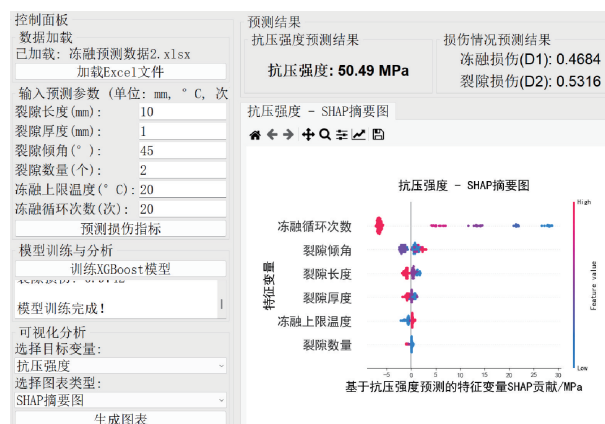


图 12 冻融裂隙砂岩多目标预测与变量分析平台

Fig. 12 Multi-objective prediction and variational analysis platform for freeze-thaw fractured sandstone

4 结论

结合颗粒流数值模拟、机器学习与可解释性分析的系统方法,多尺度揭示了冻融作用下裂隙砂岩的损伤演化规律,并建立了高精度的智能预测模型,得到如下主要结论。

(1)系统阐明了冻融裂隙砂岩的损伤演化规律;明确了其力学性能劣化速率随冻融次数增加逐渐变缓的损伤饱和特性。宏观层面,观测到试件弹性变形阶段持续时间的缩减以及破坏特征由脆性向延性的转变;微观层面,揭示了冻胀力持续作用下驱动的力链网络性能退化以及裂纹扩展机制。基于宏微观力学响应的关联分析,揭示了冻融裂隙砂岩的链式损伤演化机制,明确了冻融损伤在此劣化过程中的主导作用。

(2)构建了高精度、可解释的裂隙砂岩力学预测模型:基于 XGBoost 算法开发的多目标预测模型, R^2 均超过 0.97。更为重要的是 SHAP 分析进一步明确了此模型的决策逻辑符合基本力学原理,且识别出变量间存在的三种交互关系,即协同劣化效应、异向作用的协同补偿效应、拮抗效应。为工程中优化防护设计提供了深度的数据驱动洞察。

(3)研发了面向工程实践的集成化智能预测分析系统:开发的冻融裂隙砂岩多目标预测与变量分析平台,将复杂的数值模拟与机器学习成果转化为易于操作的工程工具,可直接服务于寒区隧道、边坡等工程的岩体承载力快速评估、风险动态诊断与防护措施的精准确定。

参考文献

- [1] 易婷,唐建新,王艳磊. 裂隙倾角及数目对岩体强度和破坏模式的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 98-106.

Yi Ting, Tang Jianxin, Wang Yanlei. Effect of fracture dip angle

- and number on mechanical properties and failure modes of rock mass [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1): 98-106.
- [2] Zhao T, Feng Y, Jia H, et al. Investigation of the mechanical behavior of frozen fissured sandstone addressing the role of fissure ice [I]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2024, 10(1): 140.
- [3] 谭皓, 宋勇军, 郭玺玺, 等. 冻融裂隙砂岩细观损伤与应变局部化研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(12): 2485-2496.
- Tan Hao, Song Yongjun, Jiang Xixi, et al. Research on meso-damage and strain localization of fractured sandstone after freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(12): 2485-2496.
- [4] 苗方利, 姚治会, 张鼎. 冻融循环后岩石的物理力学特性及强度模型[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 151-155.
- Miao Fangli, Yao Zhihui, Zhang Ding. Physical and mechanical properties and strength model of rocks after freeze-thaw cycles[J]. Water Resources and Powers, 2021, 39(12): 151-155.
- [5] Feng Q, Jin J C, Zhang S, et al. Study on a damage model and uniaxial compression simulation method of frozen-thawed rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(1): 187-211.
- [6] 叶永芑, 杨圣奇, 孙博文. 红砂岩冻融循环三轴力学特性及损伤机制[J]. 实验力学, 2023, 38(6): 751-761.
- Ye Yongpeng, Yang Shengqi, Sun Bowen, et al. Triaxial mechanical properties and damage mechanism of the freeze-thaw cycle of red sandstone[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2023, 38(6): 751-761.
- [7] 王文通, 郭沙, 李治兴, 等. 基于核磁共振技术的砂岩孔隙结构冻融损伤演化规律试验研究[J]. 黄金科学技术, 2025, 33(1): 114-126.
- Wang Wentong, Guo Sha, Li Zhixing, et al. Experimental study on the evolution law of freeze-thaw damage of sandstone pore structure based on nuclear magnetic resonance technology[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(1): 114-126.
- [8] Zhou X P, Li C Q, Zhou L S. The effect of microstructural evolution on the permeability of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 177: 103-119.
- [9] Hou C, Jin X G, He J, et al. Experimental studies on the pore structure and mechanical properties of anhydrite rock under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(3): 781-797.
- [10] 王创业, 李仕璋, 刘沂琳. 冻融循环条件下砂岩物理力学劣化特性的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 9969-9975.
- Wang Chuangye, Li Shizhang, Liu Yilin. Experimental study on physical and mechanical deterioration characteristics of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23): 9969-9975.
- [11] 宋勇军, 孙银伟, 李晨婧, 等. 基于离散元法模拟的冻融砂岩细观破裂演化特征研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3602-3616.
- Song Yongjun, Sun Yinwei, Li Chenjing, et al. Meso-fracture evolution characteristics of freeze-thaw sandstone based on discrete element method simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(12): 3602-3616.
- [12] 朱谭谭, 李昂, 黄达, 等. 应力-冻融耦合作用下砂岩变形与损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(2): 342-351.
- Zhu Tantan, Li Ang, Huang Da, et al. Deformation and damage characteristics of sandstone under the combined action of stress and freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(2): 342-351.
- [13] 吴顺川, 王艳超, 张化进. 基于 Stacking 集成算法的岩石单轴抗压强度预测方法研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(6): 105-111.
- Wu Shunchuan, Wang Yanchao, Zhang Huajin. Research on prediction method of rock uniaxial compressive strength based on Stacking ensemble algorithm[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(6): 105-111.
- [14] 王娟, 吴禄源, 袁超. 不同裂隙几何特征岩石强度智能预测研究[J]. 金属矿山, 2024(8): 45-52.
- Wang Juan, Wu Luyuan, Yuan Chao. Intelligent prediction of rock strength with different fracture geometric characteristics[J]. Metal Mine, 2024(8): 45-52.
- [15] 王海静, 周博, 薛世峰, 等. 基于数值模拟和机器学习的岩石力学性能预测[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(7): 81-85.
- Wang Haijing, Zhou Bo, Xue Shifeng, et al. Prediction of rock mechanical properties based on numerical simulation and machine learning[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2024, 43(7): 81-85.
- [16] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 低温饱和岩石未冻水含量与冻胀变形模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2000-2012.
- Liu Quansheng, Huang Shibing, Kang Yongshui, et al. Study of unfrozen water content and frost heave model for saturated rock under low temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 2000-2012.
- [17] 严健, 何川, 曾艳华, 等. 高海拔特长隧道低温大风环境及对围岩-结构温度场的影响[J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 192-201.
- Yan Jian, He Chuan, Zeng Yanhua, et al. Strong cold wind environment outside extra-long tunnel in high altitude region and its influence on temperature field of surrounding rock structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(11): 192-201.
- [18] 王中文, 徐颖, 谢守冬, 等. 岩石冻融损伤细观特征数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(11): 143-149.
- Wang Zhongwen, Xu Ying, Xie Shoudong, et al. Numerical simulation study on mesoscopic characteristics of rock freeze-thaw damage[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(11): 143-149.
- [19] 潘海潮, 吴静红, 姜玥, 等. 基于机器学习算法的空心圆柱砂岩离散元细观参数标定方法[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(1): 339-345.
- Pan Haichao, Wu Jinghong, Jiang Yue, et al. Calibration method for meso-parameters of hollow cylindrical sandstone in discrete element method based on machine learning algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(1): 339-345.
- [20] 岳中文, 闫逸飞, 王煦, 等. 基于随钻数据的岩性识别机器学习算法研究进展[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(10): 4044-4057.
- Yue Zhongwen, Yan Yifei, Wang Xu, et al. Research progress on machine learning algorithms for lithology identification based on drilling data[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(10): 4044-4057.