

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250454

近场裂隙群对花岗岩水力压裂起裂力学行为的试验研究

胡宝文^{1a,1b}, 黄卓悦^{1a}, 宿 辉^{1a}, 马建国², 曹永刚², 董智杰²

(1. 河北工程大学 a. 水利水电学院; b. 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038;

2. 河北省水利工程局集团有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘要: 近场裂隙群的存在对水力压裂起裂力学行为的影响至关重要。通过单轴水力压裂试验、声发射监测及数字图像扫描技术,对花岗岩起裂过程中的力学与破裂特征进行研究。试验数据的统计学分析结果表明,近场裂隙群的存在显著降低了花岗岩的起裂压力、声发射振铃技术和能量,且呈现指数衰减规律。近场裂隙数量在达到双裂隙之后,起裂压力衰减速率显著降低,即裂隙数量的增加对起裂压力的影响弱化。破裂面几何分形维数在近场裂隙群的影响下,亦呈现统计意义上的显著差异,随着近场裂隙数量的增加,分形维数亦呈现增长特征,破裂面几何特征更为复杂,分形维数与起裂压力呈现负相关的线性关系。

关键词: 近场裂隙; 水力压裂; 声发射; 分形维数

中图分类号: TV223.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0094-05

Experimental Study of Fracture Initiation Mechanical Behavior of Granite in Hydraulic Fracturing by Near-field Fracture Groups

HU Bao-wen^{1a,1b}, HUANG Zhuo-yue^{1a}, SU Hui^{1a}, MA Jian-guo², CAO Yong-gang², DONG Zhi-jie²

(1a. School of Water Resources and Hydropower; 1b. Hebei Provincial Key Laboratory of Smart Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038;

2. Hebei Water Conservancy Engineering Bureau Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: The presence of near-field fracture clusters plays a critical role in governing the mechanical behavior of fracture initiation during hydraulic fracturing processes. This study systematically investigates the mechanical properties and fracture propagation mechanisms in granite through uniaxial hydraulic fracturing tests, acoustic emission monitoring, and digital image scanning techniques. Statistical analysis of the experimental data shows that near-field fracture clusters induce significant reductions in fracture initiation pressure, acoustic emission activity, and energy dissipation, all of which follow an exponential decay pattern. When fracture density exceeds two cracks, the attenuation rate of the cracking pressure has decreased significantly, indicating a diminishing influence of fracture quantity on pressure reduction. Fracture surface morphology exhibits statistically significant variations under different fracture cluster configurations, with fractal dimension demonstrating a positive correlation with fracture density. The increasing complexity of fracture surfaces with higher fracture density is characterized by a negative linear relationship between fractal dimension and initiation pressure.

Key words: near-field fracture; hydraulic fracturing; acoustic emission; fractal dimension

1 引言

水力压裂技术在干热岩储层建立人工热储提高循环效率、页岩非常规油气开采、地压调控、围岩稳定性分析等方面发挥着重要作用^[1-3]。岩石

材料作为水力压裂主要作用的对象,其天然的非连续性影响着压裂过程中的力学行为特征,而其内部裂隙恰恰是岩石材料非连续性质的一个重要表征^[4-5]。申林方等^[6-8]开展了岩石内部裂隙对水力压裂力学特征的影响相关的物理与数值试验工

收稿日期: 2025-03-12,修回日期: 2025-04-10,接受日期: 2025-04-12

基金项目: 河北省自然科学基金项目基础研究专项(E2020402087);河北省自然科学基金项目(E2019402256)

作者简介: 胡宝文(1984-),男,博士、副教授、硕导,研究方向为地下工程及水工岩石力学,E-mail:hubaowen1984@gmail.com

通讯作者: 宿辉(1972-),男,博士、教授、博导,研究方向为水工结构和水工材料,E-mail:suh-26@163.com

作,研究了近场裂隙对于岩石起裂压力、压裂裂纹扩展、声发射信号等特征的影响规律。然而目前多数研究工作集中于近场单裂隙与双裂隙对于水力压裂起裂力学行为的影响,关于近场裂隙群的研究工作鲜见。因此探讨预制近场裂隙数量对水力压裂起裂扩展特征的影响,对于研究岩石储层压裂效果具有重要意义。为此,本文以花岗岩为试验对象,利用单轴水力压裂设备结合声发射监测设备开展不同裂隙数量的压裂试验,通过声发射时序特征及声发射空间分布特征探究近场裂隙群对花岗岩起裂特征的影响,并采用分形理论对压裂后试样破裂面进行定量分析,以期在实际压裂工程工艺提供一定理论参考。

2 试验方案

2.1 样品制备

选择完整、表面无明显裂隙、尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 立方体花岗岩试样作为水力压裂对象,试样制备过程为:①选取较为平整的面作为轴向加载面,注水口深度为 50 mm ,直径为 12 mm ,将外径 10 mm 、内径 5 mm 的高强度注水管放入注水孔,在注水管底部预留 5 mm 裸眼段。②利用水刀以 250 mL/min 的进刀速度对注水孔同一水平面进行单裂隙、双裂隙、三裂隙、四裂隙、五裂隙等间隔角度布置,裂隙长度为 5 mm ,深度为 40 mm 。③通过环氧树脂胶封堵封头以下注水管与注水孔之间的空隙,并养护 24 h ,另制备无裂隙试样作为对照组,每组重复三个试样,共 18 个试样,并进行编号(W1~W3、D1~D3、S1~S3、T1~T3、E1~E3、F1~F3)。

2.2 试验设备

本试验采用自研单轴水力压裂装置进行水力压裂物理模拟。设备控制系统由单轴伺服加载系统、水压伺服控制系统及声发射监测设备组成。轴向压力通过单轴伺服加载系统施加,流量由水压伺服控制系统调节,最大孔隙水压可达 70 MPa 。

声发射监测系统采用北京软岛时代科技有限公司 DS5 系列全信息分析仪,前置放大器增益为 40 dB ,探头谐振频率范围为 $40\sim 500\text{ kHz}$ 。为减少试验现场噪声干扰,声发射接收门槛值设为 30 dB ,采样频率为 3 MHz 。采用天远 OKIO-5M 高精度三维蓝光扫描仪提取水力压裂破裂面数据。该扫描仪扫描精度为 0.005 mm ,能够对破裂面细观特征进行高精度采集。单轴水力压裂试验设备与破裂面信息提取过程见图 1。



图 1 单轴水力压裂设备及破裂面信息提取

Fig. 1 Single axis hydraulic fracturing equipment and extraction of fracture surface information

2.3 试验方案

本试验采用单轴加压压裂模式,压裂液为清水,注入流量恒定为 0.8 mL/s ,轴向压力设置为 3 MPa ,分为如下步骤。

步骤 1 将试样与载物平台对接,注水管内注入黑色墨水,上端注水管头与上压块卡槽固定,圆形注水接口与注水管头连接。

步骤 2 加载轴向压力至预定值并静置 3 min ,涂抹凡士林于声发射探头,将 8 个探头固定于试样表面,左右两侧各布置 4 个。

步骤 3 记录水压—时间及声发射数据,观察水从试样边界溢出且信号稳定时,停泵卸压,关闭声发射采集,取下试样,试验结束。

3 试验结果与分析

3.1 水压曲线特征

预制裂隙试样包括对照组,不同裂隙数量水压—时间曲线见图 2。岩样的水压—时间曲线可分为三个阶段:①蓄水排气阶段。试验初期,水压未明显上升,压裂液以恒定流量注入注水孔,逐步填充注水孔及预制裂隙,并少量渗入试件;②急速增压阶段。随着压裂液注入,气体排出,水压呈指数增长。由于试样非均质性,各试样达到起裂压力的时间不同;③裂缝扩展阶段。水压峰值后迅速下降,裂纹在注水孔内部强度较低处产生裂缝并迅速扩展,随后试样表面持续溢出压裂液,水压趋于稳定。

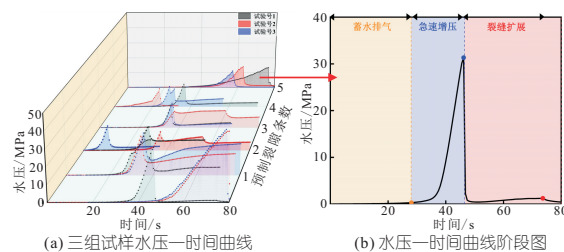


图 2 不同裂隙数量水压—时间曲线图

Fig. 2 Water pressure-time curve for different numbers of cracks

3.2 声发射时序特征

声发射振铃计数、能量及累积能量可反映水力压裂过程中声发射信号频度和强度,从而分析岩石材料的力学行为演化特征。

仅选取典型声发射特征参数—时间曲线进行分析,图3为声发射参数随水压加载的变化。由图3可知,水力压裂作用下声发射演变呈现三个阶段:①蓄水排气阶段。AE振铃计数及能量变化较小,声发射信号较少;②急速增压阶段。注水孔内原生及次生微裂隙受水压增大影响,少量能量以低弹性波释放,AE振铃计数由此产生,累积能量小幅上升,接近水压峰值时声发射信号频繁,注水孔内新裂纹产生,导致AE振铃计数、能量及累积能量迅速上升;③裂缝扩展阶段。当水压超过岩石材料宏观起裂压力时,第二阶段积累的能量迅速释放,AE振铃计数和能量达到最大值,累积能量急剧增加,伴随贯穿的压裂隙产生,水沿裂缝溢出,水压急速下降并趋于稳定,声发射信号不再显著变化。

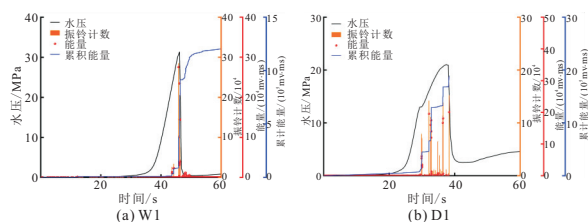


图3 声发射参数随水压加载的变化

Fig. 3 Variation of acoustic emission parameters with water pressure loading

3.3 声发射空间特征

仅选取试件 W1、E1、F1 水力压裂过程声发射事件空间分布图进行展示,见图4。由图4可知,总体来看声发射事件集中于钻孔部位,图4中球点大小表示产生声发射信号能量强度,球点颜色表示声发射事件产生时刻。声发射事件产生时刻、数量及能量与水压—时间曲线三个阶段相对应,首先在钻孔底部产生能量点较小的声发射事件,随着水压逐渐增大,由预制裂缝处萌生内部裂隙,声发射信号逐渐增多,直到起裂瞬间,产生大

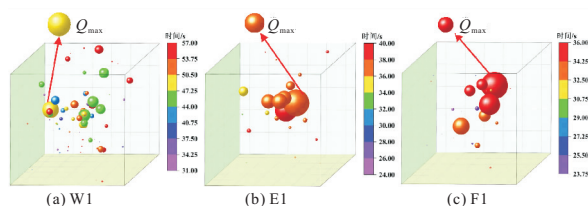


图4 声发射事件时空分布

Fig. 4 Spatial and temporal distribution of acoustic emission events

量能量较大且分布密集的声发射事件,水压裂缝向边界扩展,能量逐渐衰弱并且能量点分布明显稀疏。

四裂隙与五裂隙试件的声发射事件数与最大能量均小于无裂隙试件,即近场裂隙数量的增加,降低了声发射事件数及能量。同时由声发射事件时空分布点可清晰了解到水压裂缝渐进扩展及走向。结合压裂后裂缝对比分析,声发射空间位置分布与水压裂缝位置能较好吻合。

4 近场裂隙群特征影响分析

4.1 起裂压力非参数检验分析

采用 Kruskal-Wallis 检验不同裂隙数量的起裂压力是否存在统计学差异,结果显示组间起裂压力存在统计学意义的显著差异($p < 0.05$)。采用 Mann-Whitney 检验进一步对组间的起裂压力进行两两比较,结果显示无裂隙试样的起裂压力与含裂隙试样的起裂压力存在显著的统计学差异($p < 0.05$),单裂隙试样与其余数量裂隙之间的起裂压力亦存在显著的统计学差异($p < 0.05$),而双裂隙以上的试样,其起裂压力的差异则不显著(图5)。

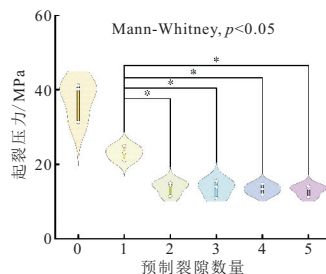


图5 不同裂隙数量起裂压力的统计学检验结果

Fig. 5 Statistical test results of crack initiation pressure for different numbers of cracks

综上统计检验结果可知,近场裂隙数量对于岩石起裂压力的影响至关重要,岩石内部裂隙的出现会显著降低起裂压力,而随着裂隙数量的增加,在恒定注液流量条件下,对于起裂压力衰减的影响逐渐弱化。

为进一步分析裂隙数量对于起裂压力的影响规律,对起裂压力数据进行统计学拟合(图6)。由拟合结果可知,随着近场预制裂隙数量的增加,起裂压力呈现指数衰减规律。单裂隙试件相较于无裂隙试件,均值起裂压力下降了38.65%。双裂隙试件相较于无裂隙试件,均值起裂压力下降了63.67%,三裂隙均值起裂压力相对于无裂隙试件衰减64.09%,由此可见,在双裂隙之后,起

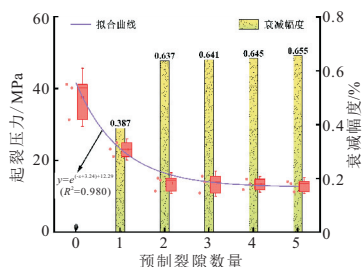


图 6 裂隙数量与起裂压力关系曲线图

Fig. 6 Curve of the relationship between the number of cracks and the initiation pressure

裂压力衰减速率急速降低,随着裂隙数量的增加,起裂压力衰减速率逐渐降低,趋于零。

4.2 声发射特征参数非参数检验分析

采用 Kruskal-Wallis 检验分析各组间声发射特征参数的差异,结果表明,不同裂隙数量的振铃计数($p < 0.05$)、能量($p < 0.05$)存在统计学意义的显著差异。进一步的 Mann-Whitney 检验显示(图 7),单裂隙与其余裂隙之间的振铃计数的统计学差异显著($p < 0.05$);单裂隙与四、五裂隙之间的能量的统计学差异显著($p < 0.05$)。

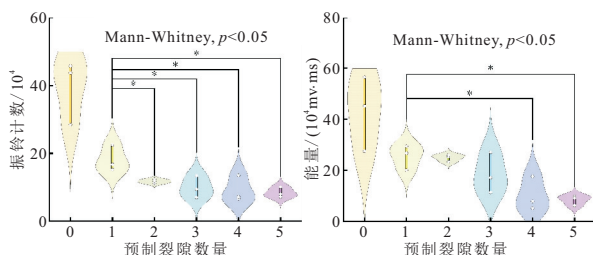


图 7 不同裂隙数量声发射参数的统计学检验结果

Fig. 7 Statistical test results of acoustic emission parameters for different numbers of cracks

对声发射特征数据进行统计学拟合,图 8 为裂隙数量与声发射振铃计数、能量关系曲线图。由图 8 可知,随着近场预制裂隙数量的增加,声发射振铃计数、声发射能量均呈现指数衰减规律。单裂隙试件相较于无裂隙试件,均值振铃计数下降了 53.87%。双裂隙试件相较于无裂隙试件,均值振铃计数下降了 70.12%,此后随着裂隙数量的增加,均值振铃计数衰减速率急速降低,逐渐趋于零。声发射能量的衰减速率规律则与振铃计

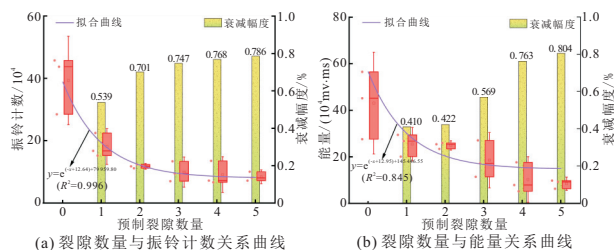


图 8 裂隙数量与声发射振铃计数、能量关系曲线图

Fig. 8 Curve of the relationship between the number of cracks and the acoustic emission ringing count and energy

数表现不同,单裂隙试件相较于无裂隙试件,均值声发射能量下降了 40.99%,双裂隙试件相较于无裂隙试件,均值振铃计数下降了 42.19%,此后随着裂隙数量的增加,声发射能量衰减速率并非急速降低,表现为缓慢降低,逐渐趋于零。

综上可知,近场裂隙数量的增加,整体弱化了材料的力学性能,降低了岩石起裂压力,破裂过程中的声发射振铃计数与能量亦表现出不同程度的衰减。起裂压力与声发射振铃计数,对近场单裂隙与双裂隙最为敏感,而当近场裂隙数量 ≥ 3 ,起裂压力与声发射振铃计数相对于双裂隙,其衰减幅度较小,从统计学检验结果来看,并未呈现出差异显著。

5 破裂面分形特征及分形维数计算

5.1 破裂面信息提取与重构

无论从宏观或细观角度观察岩石水力压裂后的断裂面,其表面特征均为凹凸不平、粗糙不规则状态。盒维数法是分形维数中用来度量岩石领域最直观的方法,可采用分形理论描述岩石水力压裂破裂面起伏粗糙程度^[9]。

通过 Geomagic Wrap 软件对三维蓝光扫描仪所提取的破裂面信息进行噪声处理、孔填充、截取、坐标系调整、点云化处理。接着通过 Sufer 软件对岩石破裂面进行三维重建,图 9 为部分预制裂隙试件破裂面三维形貌图。

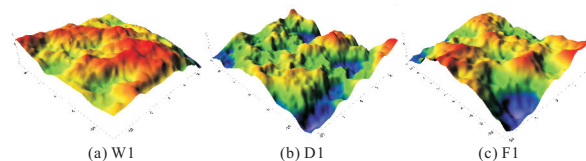


图 9 岩石破裂面三维形貌图

Fig. 9 Three dimensional morphology of rock fracture surface

5.2 水压破裂面分形维数表征

通过盒维数法将处理后的破裂面点云数据导入到 Matlab 软件中进行计算,所得破裂岩样分形维数计算结果见图 10、表 1。根据破裂表面分形维数 D ^[10] 计算定义:

$$D = \frac{\lg N}{\lg(1/r)} \quad (1)$$

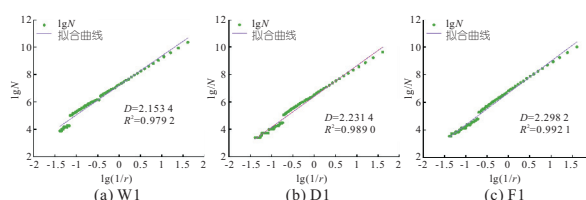
图 10 水力压裂破裂面分布 $\lg N - \lg(1/r)$ 曲线Fig. 10 Distribution of hydraulic fracturing fracture surface $\lg N - \lg(1/r)$ curve

表 1 分形维数计算结果

Tab. 1 Calculation results of fractal dimension

裂隙数量	试样编号	D	R^2	裂隙数量	试样编号	D	R^2
无裂隙	W1	2.153	0.979	三裂隙	T1	2.265	0.991
	W2	2.124	0.985		T2	2.28	0.993
	W3	2.139	0.987		T3	2.27	0.985
单裂隙	D1	2.231	0.989	四裂隙	E1	2.279	0.985
	D2	2.242	0.991		E2	2.266	0.993
	D3	2.158	0.983		E3	2.271	0.990
双裂隙	S1	2.256	0.996	五裂隙	F1	2.298	0.992
	S2	2.271	0.994		F2	2.281	0.987
	S3	2.269	0.991		F3	2.301	0.996

式中, N 为尺寸为 r 的盒子对破裂面覆盖累计盒子数, 对计算所得 N 、 r 的倒数的双对数数值进行双线性拟合, 所得拟合曲线斜率即为分形维数 D , 其数值大小表征破裂面损伤粗糙程度, D 越大表明粗糙程度越高, 能够定量表征水力压裂破裂面损伤状态。

由图 10、表 1 可知, 拟合相关系数 R^2 均在 0.97 以上, 结果表明花岗岩水力压裂后具有明显的分形特征。无裂隙试样分形维数最低, 在起裂瞬间, 声发射振铃计数与能量表现最高, 岩石破裂过程中脆性特征明显, 所形成破裂面较为平整。随着近场裂隙数量的增加, 材料的力学性能整体被弱化, 破坏过程中能量耗散亦减少, 所形成破裂面粗糙程度增加, 表现为分形维数增加。对破裂面分形维数进行非参数检验, 不同裂隙数量的分形维数存在显著差异 ($p < 0.01$)。进一步的事后检验显示, 单裂隙与其余裂隙之间的分形维数差异显著。

5.3 起裂压力与破裂面分形维数定量关系

根据近场预制裂隙数量花岗岩单轴水力压裂试验结果可知, 起裂压力与盒维数关系见图 11。

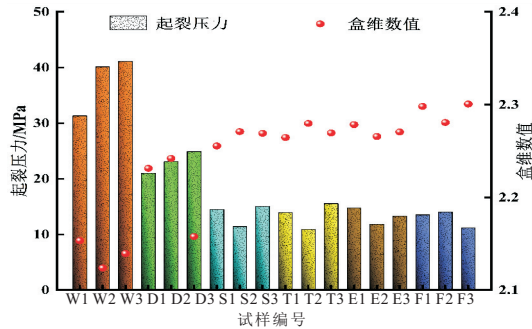


图 11 起裂压力与盒维数值关系图

Fig. 11 Relationship between fracture initiation pressure and box dimension values

由图 11 可知, 近场预制裂隙群花岗岩起裂压力在无裂隙时的分形维数 D 最小, 随着裂隙数量的增大, 分形维数 D 也相对较大。无裂隙起裂压力最大, 破坏剧烈导致形成的破裂面较为光滑, 压

裂过程中产生微破裂较少, 因此分形维数相对较低, 分形维数总体随着裂隙数量增大而增大。对水力压裂后破裂面分形维数 D 与其起裂压力 σ_q 进行拟合分析 (图 12)。近场裂隙群破裂面分形维数 D 与其起裂压力 σ_q 具有较好的线性关系, 随着起裂压力的增加, 分形维数降低。

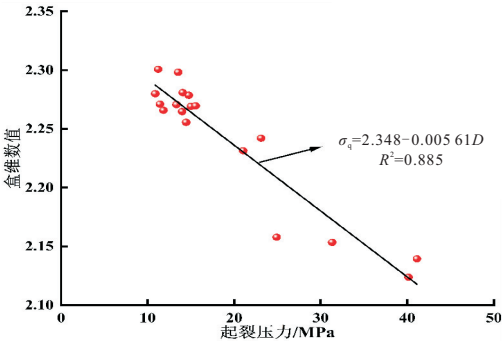


图 12 分形维数与起裂压力拟合曲线

Fig. 12 Fitting curve between fractal dimension and fracture initiation pressure

6 结论

a. 基于水力压裂的试验结果与单因素非参数检验分析结果, 可知近场裂隙群对于岩石起裂压力的大小具有统计意义上的显著影响, 随着近场预制裂隙数量的增加, 起裂压力呈现指数衰减规律, 但双裂隙之后, 起裂压力衰减速率急速降低, 趋于零。

b. 声发射监测试验与统计检验分析结果表明, 近场裂隙群对压裂过程中的声发射特征参数的影响具有统计意义上的显著。随着近场预制裂隙数量的增加, 声发射振铃计数与能量亦呈现指数衰减规律。由声发射时空分布图, 亦可清晰反映近场裂隙数量对于声发射事件数与能量的削弱作用, 同时展示了水压裂缝扩展过程及能量分布特征。

c. 近场裂隙群对破裂面的分形维数的大小具有统计意义上的显著影响, 裂隙数量的增加, 分形维数亦呈现增长特征, 即破坏面的几何形态更为复杂。破裂面分形维数 D 与起裂压力 σ_q 具有较好的线性关系, 随着起裂压力的增加, 分形维数降低。

参考文献:

[1] XUE Y, LIU S, CHAI J R, et al. Effect of water-cooling shock on fracture initiation and morphology of high-temperature granite: Application of hydraulic fracturing to enhanced geothermal systems[J]. Applied energy, 2023, 337: 120858.

调度优化模型,并设计了一个结合二次供水系统与城市主体管网的供水系统进行验证。结果表明,该模型通过精确调控流量控制阀的流量,并结合峰谷电价对水泵相对转速进行调节,成功实现了减漏降耗的目标,使供水总费用减少了 3.5%。

b. 本文在联合二次供水系统与城市主体管网的运行调度方面进行了优化,弥补了现有模型在成本效益分析中的不足,为以绿色和安全为目标的系统优化调度模式提供了理论参考。

参考文献:

- [1] NEGM A, MA X D, AGGIDIS G. Deep reinforcement learning challenges and opportunities for urban water systems[J]. *Water research*, 2024, 253: 121145.
- [2] XU Q, CHEN Q W, QI S L, et al. Improving water and energy metabolism efficiency in urban water supply system through pressure stabilization by optimal operation on water tanks[J]. *Ecological informatics*, 2015, 26: 111-116.
- [3] 王晴怡, 王彤, 康炳卿, 等. 基于聚类分析法的二次供水错峰调蓄研究[J]. *水电能源科学*, 2023, 41(6): 94-97. (WANG Q Y, WANG T, KANG B Q, et al. Study on peak staggered storage of secondary water supply based on cluster analysis[J]. *Water resources and power*, 2023, 41(6): 94-97. (in Chinese))
- [4] 刘雅亭. 基于水力模型和遗传算法的二次供水优化

(上接第 98 页)

- [2] GUO J C, LU Q L, LIU Z, et al. Concept and key technology of “multi-scale high-density” fracturing technology: A case study of tight sandstone gas reservoirs in the western Sichuan Basin[J]. *Natural gas industry B*, 2023, 10(3): 283-292.
- [3] 崔少英, 包腾飞, 崔健健. 水工隧洞中水力劈裂临界孔隙水压计算方法[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(5): 62-64, 170. (CUI S Y, BAO T F, CUI J J. Computing method study of critical pore water pressure of hydraulic splitting in hydraulic tunnel[J]. *Water resources and power*, 2012, 30(5): 62-64, 170. (in Chinese))
- [4] 苏海健, 靖洪文, 赵洪辉, 等. 平行裂隙群岩体强度与破裂特征的试验研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(5): 192-197, 207. (SU H J, JING H W, ZHAO H H, et al. Strength and fracture characteristic of rock mass containing parallel fissures[J]. *Engineering mechanics*, 2015, 32(5): 192-197, 207. (in Chinese))
- [5] 赵洪宝, 胡桂林, 李伟, 等. 预制裂隙岩石裂纹扩展规律的研究进展与思考[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(增刊 2): 899-906. (ZHAO H B, HU G L, LI W, et al. Research progress and thinking on the crack propagation law of pre-fractured rock[J]. *Chinese journal of underground space and engineering*, 2016, 12(S2): 899-906. (in Chinese))
- [6] 申林方, 华涛, 王志良, 等. 参数空间变异性对岩石水力压裂裂隙扩展形态的影响[J]. *岩土力学*, 2025, 46(4): 1294-1302. (SHEN L F, HUA T, WANG Z L, et al. Effect of parameter spatial varia-

调度研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2023. (LIU Y T. Study on optimal operation of secondary water supply based on hydraulic model and genetic algorithm[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2023. (in Chinese))

- [5] 曹金宇, 信昆仑, 周立典, 等. 基于低位水箱调度的二级泵站供水能耗优化[J]. *环境工程*, 2023, 41(6): 174-180. (CAO J Y, XIN K L, ZHOU L D, et al. Energy consumption optimization of secondary pumping station based on low-level water tank scheduling[J]. *Environmental engineering*, 2023, 41(6): 174-180. (in Chinese))
- [6] RAJWAR K, DEEP K, DAS S. An exhaustive review of the metaheuristic algorithms for search and optimization: Taxonomy, applications, and open challenges[J]. *Artificial intelligence review*, 2023, 56(11): 13187-13257.
- [7] 徐凤. 与时俱进 促进发展——国家标准《建筑给水排水设计标准》(GB 50015-2019)修订介绍[J]. *给水排水*, 2020, 56(7): 1-3, 26. (XU F. Introduction on revision of Standard for design of building water supply and drainage (GB 50015-2019)[J]. *Water & wastewater engineering*, 2020, 56(7): 1-3, 26. (in Chinese))
- [8] 王彤, 杨军. M 市供水泵站优化调度模型及应用[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(7): 141-145. (WANG T, YANG J. Study on optimal dispatching of water supply pumping stations in M city[J]. *Water resources and power*, 2019, 37(7): 141-145. (in Chinese))
- [9] 唐巨鹏, 路江伟, 许鹏, 等. 预制裂缝对煤系页岩水力压裂效果影响的试验研究[J]. *实验力学*, 2018, 33(1): 150-158. (TANG J P, LU J W, XU P, et al. Experimental investigation on the effect of prefabricated cracks on hydrofracture of coal measure shale[J]. *Journal of experimental mechanics*, 2018, 33(1): 150-158. (in Chinese))
- [8] LÜ M L, ZHU Z D, ZHOU L M, et al. Numerical simulation of hydraulic fracture propagation in rock masses with pre-existing double fractures using the phase field method[J]. *Rock and soil mechanics*, 2024, 45(6): 1850-1862.
- [9] 蒋长宝, 付银兰, 王光淇. 水力压裂煤裂隙网络表征与造缝性能评估试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(6): 62-71. (JIANG C B, FU Y L, WANG G Q. Experimental study on characterization hydraulic fracturing coal fracture network and evolution of fracture forming performance[J]. *Coal science and technology*, 2023, 51(6): 62-71. (in Chinese))
- [10] 牛双建, 靖洪文, 杨大方, 等. 单轴压缩下破裂岩样强度及变形特征[J]. *采矿与安全工程学报*, 2015, 32(1): 112-118, 125. (NIU S J, JING H W, YANG D F, et al. Experimental study on strength characteristics and deformation behavior of the cracked rock samples under uniaxial compression[J]. *Journal of mining and safety engineering*, 2015, 32(1): 112-118, 125. (in Chinese))