

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.10.007

石质文物渗水病害分级评估方法分析

王军霞,任伟中

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室,武汉 430071)

摘要:针对重庆大足北山石刻不同类型渗水病害,提出了各类渗水病害分级评估方法及细分标准。基于流量—等效开度立方定律总结了不同水力梯度下滴水\流水病害分级临界条件;利用热重法研究了重庆大足紫红色砂岩和灰白色砂岩结合水含量及结合水水膜厚度,提出基于浸水面积的浸水病害分级标准;通过吸湿试验考察不同湿度环境下砂岩吸湿动力学特性,基于Fick定律计算得到不同湿度环境下砂岩水分扩散系数,明确了壁挂水病害的产生条件并提出基于接触角的壁挂水病害分级标准;借助色差仪测量了重庆大足紫红色砂岩和灰白色砂岩干燥状态和湿润状态下CIE- $L^*a^*b^*$ 色度坐标,提出了基于不同饱水程度(含水量)砂岩色差值 ΔE_n 的潮湿\湿润病害分级标准。

关键词:渗水病害;分级评估;结合水;吸湿动力学;色差分析

中图分类号:K854.3;TU451

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2024)10-099-11

Grading evaluation method of water seepage disease of stone cultural relics

WANG Junxia, REN Weizhong

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P. R. China)

Abstract: This study addresses various types of water seepage diseases affecting the Dazu Beishan Rock Carvings in Chongqing, proposing grading evaluation methods and criteria for these water-related diseases. Utilizing the cubic law of flow-equivalent opening, critical conditions for grading drip/flow water diseases under different hydraulic gradients were established. The content and film thickness of bound water in the purple-red and gray-white sandstones of Dazu were evaluated by means of thermo-gravimetric analysis, leading to the formulation of immersion disease grading based on immersed area. Hygroscopic dynamic characteristics of the sandstones were examined under varying relative humidity(RH) through hygroscopic testing, and water diffusion coefficients were calculated based on Fick's law. Wall hanging water disease conditions were defined, and grading standards taking into account contact angle were proposed. Additionally, the CIE- $L^*a^*b^*$ chromaticity coordinates of the sandstones from Dazu were measured in both dry and wet states, establishing wet/humid disease grading criteria based on the color difference value ΔE_n corresponding to different saturation levels(water content).

Keywords: water seepage diseases; grading evaluation; bound water; hygroscopic dynamics; color difference analysis

收稿日期:2023-12-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC1523400)。

Supported by National Key R&D Program of China (2021YFC1523400).

作者简介:王军霞(1987—),女,博士,主要从事文物病害物理化学机理方向研究,(E-mail)jxwang@whrsm.ac.cn。

重庆大足石刻作为中国石质文物的优秀代表之一,以其独特的民族风格和浓烈的生活气息在中国历史文化遗产中独树一帜,以规模宏伟、题材多样、雕刻精巧、内涵丰富而驰名中外。然而,历经1500多年风雨侵蚀和人类活动影响,石刻造像均经历了不同程度、不同类型的环境地质病害和文物本体病害,例如渗水、风化、可溶盐、微生物、稳定性等^[1-4],导致原来尚清晰的雕刻已经逐渐模糊,现存雕刻也多处于极度危险状态。石质文物各类病害的影响因素中,水的作用强度最为显著,渗水病害促使文物本体全年呈现潮湿-干燥周期性变化,加速其风化进程及可溶盐积聚,是造成石质文物风化最为显著的原因之一^[5]。从根本上来说,渗水病害是多种病害发生的根源,其水分来源主要有大气降雨、地下水、毛细水、凝结水及水汽运移。大气降雨引发季节性、临时性的裂隙渗水,是石质文物地下水剥蚀病害的主要破坏方式,毛细水、凝结水及水汽运移是诱发石质文物本体水侵蚀病害的重要因素^[6]。

岩体中液态水的赋存形式主要有重力水、毛细水和结合水,基于重庆大足北山石刻渗水病害调查,结合已有文献资料^[7,8],根据岩壁渗水水量和成因的不同,渗水病害可划分为以下5种类型,具体见表1。

表1 渗水病害分类

Table 1 Classification of water seepage diseases

| 病害类型 | 水量及成因描述 |
|------------|--|
| 流水状(A类) | 裂隙岩体中含重力水,呈连续水流。 |
| 滴水状(A类) | 含水量达到饱和状态形成重力水,水量微弱,逐渐积累形成间歇性滴水。 |
| 浸水状(B类) | 随含水量增大,弱结合水膜增厚,导致最外层处于自由运动临界状态,岩体壁面触摸有水但不流动,由弱结合水、毛细水造成。 |
| 壁挂水状(C类) | 壁面分布单个水珠,一是由气态水凝结形成,当岩体含水量达到饱和状态含水量后,在凝结水的作用下岩表可见壁挂水珠,二是毛细水在不均匀毛细空/孔隙中局部汇聚形成,三是岩壁较大空/孔隙中弱结合水向重力水转化出现的过渡形态,与岩体的含水量、赋存微环境温湿度有关,常见于含水量异常增高区域。 |
| 潮湿/湿润状(D类) | 岩体含水量高于干燥状态含水量,岩壁颜色随岩体含水量改变,主要由空/孔隙中弱结合水造成。 |

北山石刻造像区主裂隙及底部层面裂隙赋存重力水为主,例如第177号、第168号、第137号,表现为滴水/流水状渗水病害;中上部层面裂隙及微小裂隙主要赋存结合水,例如第176号、第136号、第114号,表现为浸水/水珠状渗水病害;下部和中上部泥质条带、泥夹层主要赋存毛细水,例如第117号、第149号、第187号,表现为潮湿/湿润状渗水病害。

重庆大足北山石刻微弱的地下水渗流以不同形态(重力水、毛细水、结合水)、不同方式(浸湿软化、机械潜蚀、化学溶蚀)缓慢的、周期性地作用于岩壁^[7-9],呈现出不同类型的渗水病害,与其他风化作用相结合,最终导致造像逐渐污损变形模糊甚至剥落。然而,针对不同类型渗水病害,目前缺乏系统的分级评估方法及细分标准。

1 试样制备及试验方法

1.1 试样制备

利用钻孔在重庆大足北山石刻非造像区采集紫红色砂岩和灰白色砂岩岩样,分别加工成 $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 圆柱状和 $49\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 块状,用于吸湿试验、接触角测试及色差测试;借助矿石粉碎机制备砂岩粉末(300目),用于热重分析。

1.2 热重分析

将砂岩粉末样品置于相对湿度为10%~20%的自制恒湿箱内(通过在密封盒内放置LiCl饱和溶液实现低湿环境)至恒重后进行热重测试,以最大程度降低表面吸附水对结合水测试结果的影响。利用DTG-60热重-差热分析仪测量重庆大足砂岩粉末升温过程中质量随温度变化,绘制样品失重百分比(TG%)与温度(T)的关系曲线(即T-G曲线),测试温度为38~500℃,升温速率为10℃/min。

1.3 吸湿试验

将 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 圆柱状试样 x_{a1} 、 x_{b1} 、 x_{c1} 分别置于相对湿度 (relative humidity, RH) 为 100%、80% 和 60% 的恒湿箱内, 试验温度为环境温度; 记录试样初始质量 M_0 及试验过程中的质量 M_t , 根据吸湿后岩样质量增量 ($M_t - M_0$) 与初始质量 M_0 的百分比计算吸湿百分比 $w_h(\%)$, 以试验时间为横坐标, w_h 为纵坐标, 绘制吸湿动力学曲线。

$$w_h = \frac{M_t - M_0}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

1.4 接触角测试

利用 DSA100S 接触角测量仪分别测量重庆大足砂岩的接触角, 每个岩样选取 3 个不同测点。

1.5 色差测试

将块状砂岩置于 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱至恒重使其达到干燥状态, 放入水中浸泡 48 h 使其达到饱水状态 (湿润)。借助 NR110 色差仪分别测量重庆大足砂岩干燥状态和饱水状态下 CIE- $L^*a^*b^*$ 色度坐标, 每个岩样选取 20 个不同测点, 基于色差计算公式分别计算干燥状态色差值 (ΔE_d) 和湿润状态色差值 (ΔE_w)

$$\Delta E_n = \sqrt{(L_n^* - L_0^*)^2 + (a_n^* - a_0^*)^2 + (b_n^* - b_0^*)^2} \quad (2)$$

其中: L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 为参比色度坐标; L_n^* 、 a_n^* 、 b_n^* 为待测岩样的色度坐标。 ΔE_d 、 ΔE_w 分别为干燥状态和湿润状态下的 ΔE_n 值。为了便于不同岩性岩石颜色的定量描述及不同含水状态下不同岩性色差值对比, 所有测试样品可选用统一的参比色度坐标, 本文以白板为参比色度坐标, 即 $L_0^* = 90.38$, $a_0^* = -1.32$, $b_0^* = -2.71$ 。

2 石窟岩体渗水病害分级

2.1 流水\滴水病害分级

流水、滴水病害以重力水为主, 呈连续水流或间歇性滴状出水, 其出水流量 q 可测。根据出水流量 q 分为以下 3 级^[10]:

(AI级) 股状涌水: 股状涌出, $q > 100 \text{ mL/min}$;

(AII级) 渗淋水: 产生水流, 水滴间隔小于 2 s, $10 \text{ mL/min} \leq q \leq 100 \text{ mL/min}$;

(AIII级) 滴水: 产生水滴, 水滴间隔大于 2 s, $q < 10 \text{ mL/min}$ 。

流水/滴水病害与裂隙有关, 层流时出水流量与裂隙开度之间的关系遵循立方定律, Romm 等^[11]通过对微裂隙 ($10 \sim 100 \text{ } \mu\text{m}$) 和极微裂隙 ($0.25 \sim 4.3 \text{ } \mu\text{m}$) 渗透特性的研究, 提出只要裂隙开度大于 $0.2 \text{ } \mu\text{m}$, 立方定律总是成立的。针对粗糙裂隙, Lomize、Louis、Amadei、速宝玉、Witherspon、Barton、Walsh 等^[12-19]提出了各种各样的修正公式, 得到了基于裂隙粗糙度、裂宽频率分布函数^[16]、节理粗糙系数 (joint roughness coefficient, JRC)^[17]、面积接触率等修正法的等效开度 e_h 表达式。基于 Lomize 修正立方定律, 粗糙平板单裂隙等效开度 e_h 与流量 q 、渗透系数 K_f 之间的关系为^[20-21]

$$q = \frac{\rho g e_h^3}{12\mu} J = \frac{\rho g e^3}{12\mu} J \frac{1}{1 + 6(\Delta/e)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

$$K_f = \frac{\rho g e_h^2}{12\mu} \quad (4)$$

其中: ρ 为水的密度; g 为重力加速度, 取值 9.8 m/s^2 ; e 为裂隙力学开度; μ 为水的动力学黏滞系数, 取值 $1.01 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ($20 \text{ }^\circ\text{C}$); J 为裂隙内水力梯度; Δ 为裂隙粗糙度。图 1 为不同水力梯度下 ($J=0.017 \sim 10$) 不同等效开度裂隙流量变化曲线, 表 2 为不同水力梯度下滴水\流水病害分级临界条件。

目前裂隙面粗糙度的测量主要有测针式剖面测量仪 (精度 0.1 mm)、断面测量仪 (精度 $10 \sim 0.001 \text{ mm}$)、千分表 (精度 0.001 mm)、光投射仪及激光剖面测量仪 (精度 $0.01 \text{ } \mu\text{m}$) 等, 其表征方法主要有凸起高度表征法、节理粗糙度系数表征法和分形维数表征法^[22]。裂隙力学开度的测量主要有楔形游标塞尺 (精度 0.2 mm)、间隙塞尺 (精度 0.02 mm) 及手机放大镜等。

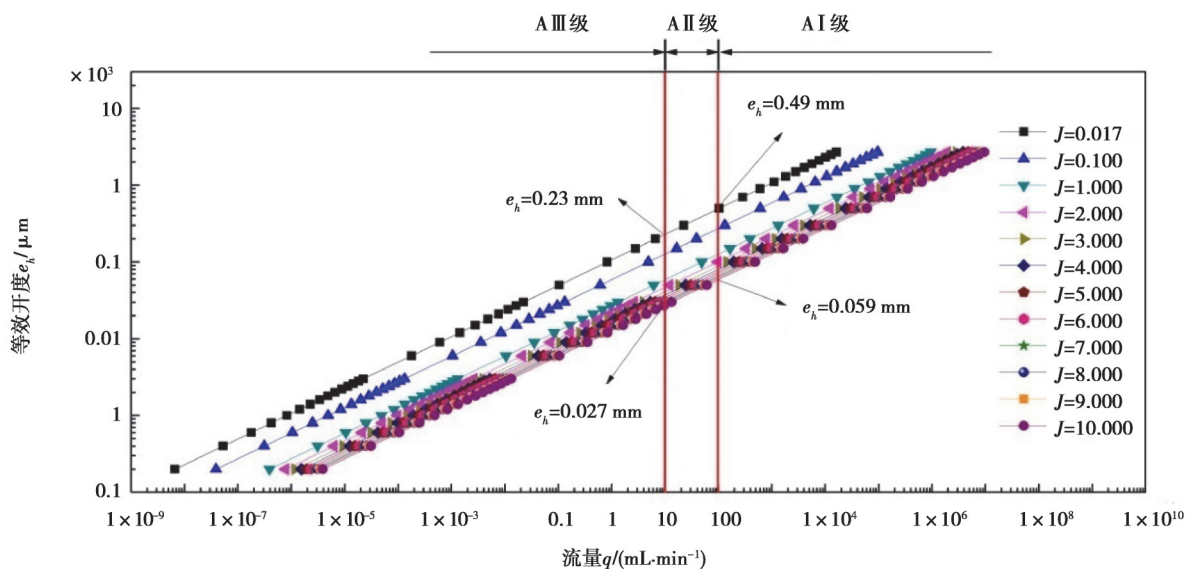


图 1 不同水力梯度下不同等效开度裂隙流量变化曲线

Fig. 1 Fracture flow curve with different equivalent openings under different hydraulic gradients

表 2 不同水力梯度下滴水\流水病害分级临界条件

Table 2 Critical conditions for classification of drip\water disease under different hydraulic gradients

| 水力梯度 J | 滴水-流水病害等级 | | |
|----------|---------------|-----------------------------|---------------|
| | A I级 | A II级 | A III级 |
| 0.017 | $e_h > 0.490$ | $0.230 \leq e_h \leq 0.490$ | $e_h < 0.230$ |
| 0.100 | $e_h > 0.270$ | $0.130 \leq e_h \leq 0.270$ | $e_h < 0.130$ |
| 1.000 | $e_h > 0.130$ | $0.130 \leq e_h \leq 0.059$ | $e_h < 0.059$ |
| 2.000 | $e_h > 0.100$ | $0.047 \leq e_h \leq 0.100$ | $e_h < 0.047$ |
| 3.000 | $e_h > 0.088$ | $0.041 \leq e_h \leq 0.088$ | $e_h < 0.041$ |
| 4.000 | $e_h > 0.080$ | $0.037 \leq e_h \leq 0.080$ | $e_h < 0.037$ |
| 5.000 | $e_h > 0.074$ | $0.035 \leq e_h \leq 0.074$ | $e_h < 0.035$ |
| 6.000 | $e_h > 0.07$ | $0.033 \leq e_h \leq 0.070$ | $e_h < 0.033$ |
| 7.000 | $e_h > 0.066$ | $0.031 \leq e_h \leq 0.066$ | $e_h < 0.031$ |
| 8.000 | $e_h > 0.064$ | $0.029 \leq e_h \leq 0.064$ | $e_h < 0.029$ |
| 9.000 | $e_h > 0.061$ | $0.028 \leq e_h \leq 0.061$ | $e_h < 0.028$ |
| 10.000 | $e_h > 0.059$ | $0.027 \leq e_h \leq 0.059$ | $e_h < 0.027$ |

2.2 浸水病害分级

当裂隙开度达到一定限值时,在无附加压力作用下,水体重力和毛细作用力相等时,水体在裂隙中运动速率为 0,形成裂隙滞水,表现为浸水状病害,计算得到水在毛细管中的最大上升高度 L_{\max} 为

$$L_{\max} = \frac{2\gamma \cos \theta}{r\rho g} = \frac{1.5 \times 10^{-5}}{r}, \tag{5}$$

其中: r 为毛细管半径, m ; γ 为水的表面张力 0.0728 N/m ($20 \text{ }^\circ\text{C}$),当岩石 $\theta=0^\circ$ 时完全润湿。

图 2 为裂隙等效开度 e_h ($e_h=2r$) 与最大毛细上升高度 L_{\max} 关系曲线。当 $e_h=30 \mu\text{m}$ 时, $L_{\max}=1 \text{ m}$, $q_{\min}=0.022 \text{ (mL}\cdot\text{min}^{-1})$; 当 $e_h=3 \mu\text{m}$ 时, $L_{\max}=10 \text{ m}$, $q_{\min}=2.2 \times 10^{-5} \text{ (mL}\cdot\text{min}^{-1})$; 当 $e_h=0.2 \mu\text{m}$ 时, $L_{\max}=150 \text{ m}$, $q_{\min}=6.6 \times 10^{-9} \text{ (mL}\cdot\text{min}^{-1})$ 。

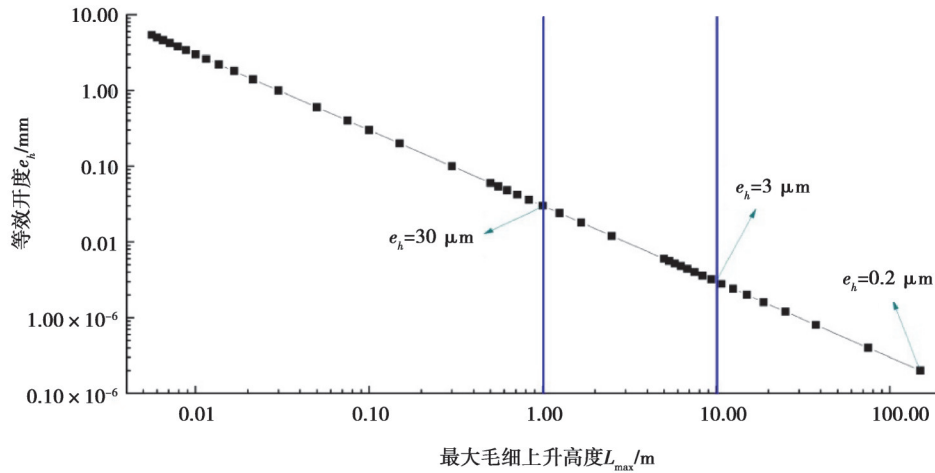
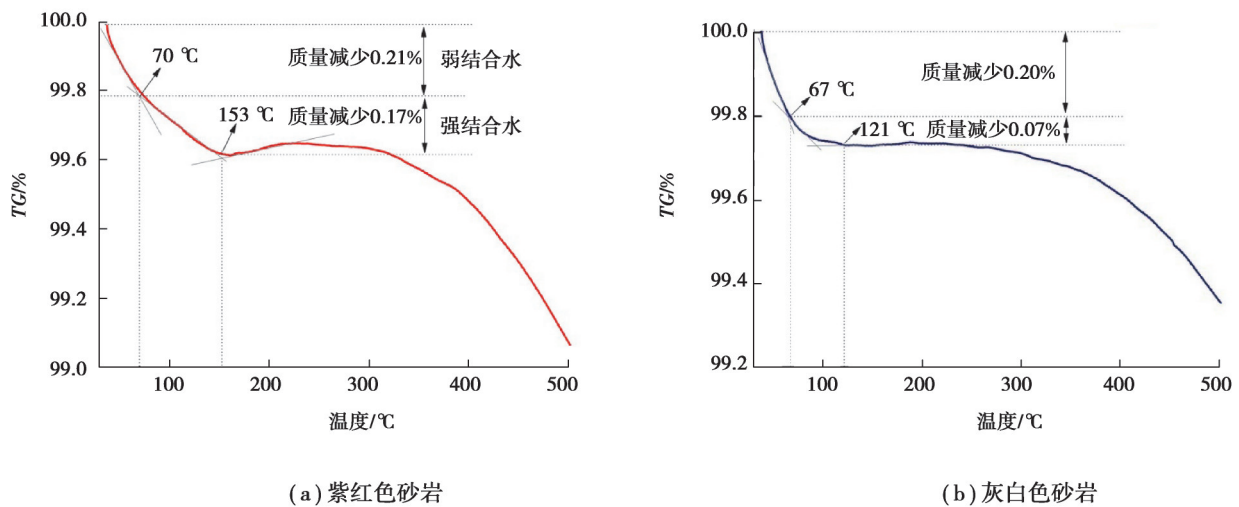


图 2 裂隙等效开度与最大毛细上升高度关系曲线

Fig. 2 Relationship between the equivalent opening of crack and the maximum capillary height

弱结合水具有自由移动和溶解的能力,可诱发或加速石窟岩体病害。等温吸附法和热重法(TG)是研究岩石及土壤中结合水的类型及界限的常用方法^[23, 24],王铁行等^[25]指出结合水水膜厚度与绝对含水量之间存在线性关系,当绝对含水量为 1.33%时,水膜厚度为 3.61Å,是水分子直径的 1.3 倍,当绝对含水量为 6.61%时,水膜厚度为 19.9 Å,是水分子直径的 7.2 倍。图 3 为重庆大足灰白色砂岩和紫红色砂岩的 T-G 曲线,大足紫红色砂岩在 153 °C 附近出现台阶,质量减少了 0.38%,根据切线法得到了 2 个拐点,拐点 1 温度为 70 °C,38~70 °C 温度区间内岩样质量损失百分比等于弱结合水的含量,即弱结合水含量为 0.21%,拐点 2 温度为 153 °C,70~153 °C 温度区间内岩样质量损失百分比为强结合水的含量,即强结合水含量为 0.17%。大足灰白色砂岩在 121 °C 附近出现台阶,质量减少了 0.27%,根据切线法得到了 2 个拐点,拐点 1 温度为 67 °C,弱结合水含量为 0.20%,拐点 2 温度为 121 °C,强结合水含量为 0.07%。根据结合水水膜厚度与绝对含水量之间的线性关系,紫红色砂岩结合水水膜厚度 d_m 为 0.68 Å,灰白色砂岩结合水水膜厚度 d_m 为 0.34 Å。



(a) 紫红色砂岩

(b) 灰白色砂岩

图 3 重庆大足砂岩 T-G 曲线

Fig. 3 The T-G curves of sandstones from Dazu in Chongqing

相同时间 t 内渗水量等于结合水水膜厚度 d_m 乘以浸水面积 A_j ,考虑根据浸水面积 A_j 来划分浸水病害,当 $q=0.022$ (mL·min⁻¹) 且 $d_m=0.68$ Å 时, $A_j=3.2 \times 10^6$ cm²; $q=2.2 \times 10^{-5}$ (mL·min⁻¹) 且 $d_m=0.68$ Å 时, $A_j=3.2 \times 10^3$ cm²; $q=6.6 \times 10^{-9}$ (mL·min⁻¹) 且 $d_m=0.68$ Å 时, $A_j=0.97$ cm²。因此,根据浸水面积 A_j 量级,浸水病害可划分为 3 级:(BI 级)

大面积浸水 ($>10^6 \text{ cm}^2$); (BII级) 中等面积浸水 ($10^3 \sim 10^6 \text{ cm}^2$); (BIII级) 小面积浸水 ($<10^3 \text{ cm}^2$)。

2.3 壁挂水病害分级

壁挂水的形成与凝结水、毛细水汇聚、弱结合水-重力水转化等有关。凝结水的形成不仅与凝结核有关,还与环境温度、 RH 、岩体表面温度、风速等因素有关^[26,27],其露点温度(TD)与环境温度 T 和 RH 的对应关系^[28]如式(6)所示。

$$TD = \frac{b+T}{a} \log u + T = \frac{b+T}{a} (\log RH - 2) + T \quad (6)$$

对于水平面上的饱和水汽压, $a=7.5, b=237.3 \text{ }^\circ\text{C}$; 对于冰面上的饱和水汽压, $a=9.5, b=265.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图4为吸湿试验期间环境温度及不同湿度环境下 ($RH=100\%、80\%、60\%$) 露点温度变化曲线, 环境温度为 $12 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$, 平均温度为 $22.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 。当 $RH=100\%$ 时, 露点温度与环境温度相差 $0.8 \sim 0.9 \text{ }^\circ\text{C}$; 当 $RH=80\%$ 时, 露点温度与环境温度相差 $3.3 \sim 4.0 \text{ }^\circ\text{C}$; 当 $RH=60\%$ 时, 露点温度与环境温度相差 $7.5 \sim 9.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

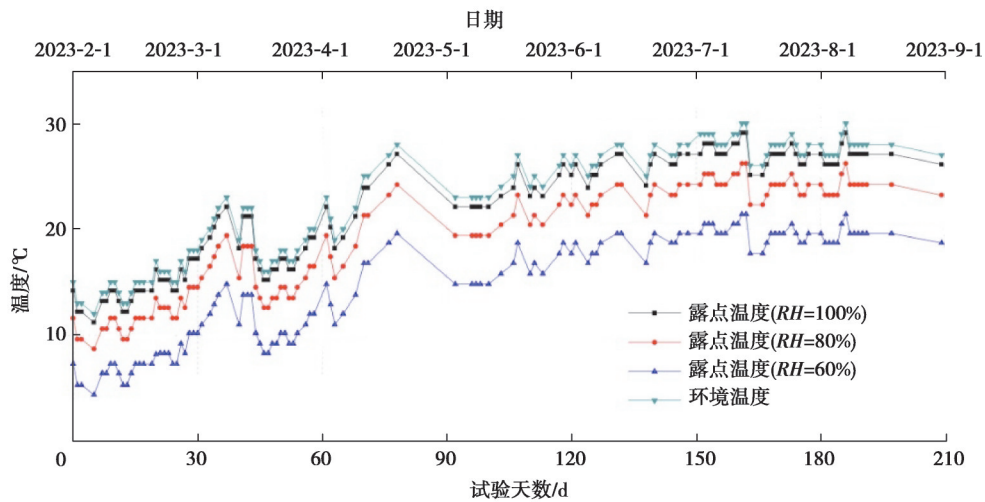


图4 吸湿试验期间环境温度及露点温度变化曲线

Fig. 4 Variation curve of ambient temperature and dew point temperature during hygroscopic test

图5(a)为不同 RH 环境下吸湿百分比 w_h 随时间的变化曲线,由于岩体中极性基团容易吸收空气中的水蒸气使得岩体具有一定的吸湿性,在试验初期, w_h 逐渐增加,随着试验时间的增加, w_h 缓慢增加,曲线趋向平缓。水汽凝结后以自由水的形式附着在岩体表面,在湿度恒定的条件下,气温差异是影响凝结水形成的主要因素,温差越大,越容易形成凝结水,因而夏季更容易具备形成凝结水的条件^[29-32]。当 $RH=100\%$ 时,试验后第130~190 d(即2023年6月~8月期间)凝结水量急剧增加, w_h 随之升高,达到饱和状态后岩体表面呈湿润状,此时砂岩饱和吸湿百分比近似等于1.60%。当凝结水量下降时,在蒸发的作用下岩体表面附着的自由水进入空气中,岩体表面由湿润状变为干燥状, w_h 逐渐降低。 RH 是影响水分扩散的主要因素之一,当岩体处于干燥平衡状态时,与表面空气中的水蒸气建立相对湿度平衡,此时空气中的水蒸气压力略高于岩体表面蒸气压力。在空气湿度和岩体湿度达到平衡前,存在湿度梯度差,这是推动水分由内部向外部迁移的推动力之一,梯度差越大,其推动力越大^[33]。因此,同一温度条件下,较高的 RH 使得岩体吸附较多的水分,显示出较高的 w_h 。

大量研究表明,湿热环境下材料的吸水总量随时间增加并与时间的平方根呈线性关系,满足Fick第二定律

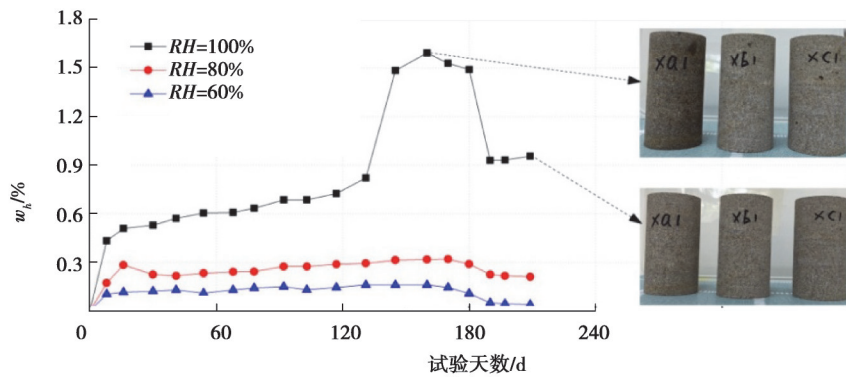
$$\frac{\partial w_h}{\partial t} = D \frac{\partial^2 w_h}{\partial z^2} \quad (7)$$

其中: t 为吸湿时间, s ; z 为材料厚度方向, m ; D 为扩散系数, m^2/s 。

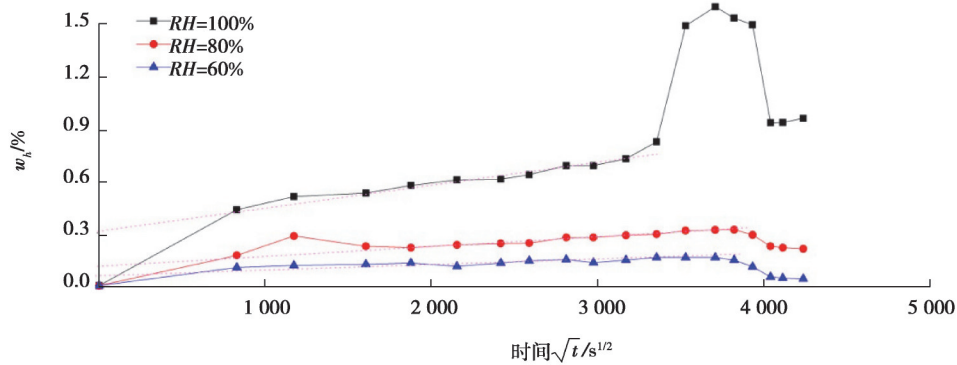
分离变量可得到扩散系数 D 的表达式^[34-37]

$$D = \pi \left(\frac{h}{4w_\infty} \right)^2 \left(\frac{w_{t_2} - w_{t_1}}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \tag{8}$$

其中: w_∞ 为材料的饱和吸湿百分比; h 为材料厚度,m; w_{t_1} 、 w_{t_2} 分别为 t_1 、 t_2 时刻的吸湿百分比。图 5(b)为不同 RH 环境下 $w_h - \sqrt{t}$ 曲线,吸湿过程是水蒸气由空气运移至表面,再由表面向内部扩散传递的过程。试验初期,岩体表面的孔隙或黏土矿物迅速吸附液态水分,使得 w_h 快速增加。当 $1\ 610\ \text{s}^{1/2} < \sqrt{t} < 3\ 180\ \text{s}^{1/2}$ 时,水分运移表现为内部扩散过程, w_h 随 \sqrt{t} 的变化可大致看作是线性的,RH=100%、80%、60% 时其斜率分别为 2.269×10^{-4} 、 8.405×10^{-5} 、 4.726×10^{-5} ,计算得到 RH=100%、80%、60% 时水分扩散系数 D 分别等于 $1.579 \times 10^{-10}\ \text{m}^2/\text{s}$ 、 $2.166 \times 10^{-11}\ \text{m}^2/\text{s}$ 、 $6.848 \times 10^{-12}\ \text{m}^2/\text{s}$ 。



(a) 不同RH环境下吸湿百分比 w_h 随时间的变化曲线



(b) 不同RH环境下吸湿百分比 w_h 随时间根号的变化曲线

图 5 不同恒湿环境下砂岩吸湿动力学曲线

Fig. 5 Hygroscopic dynamics curves of sandstones under different constant humidity environments

根据物理学中大气水分膜状凝结原理,由于液体表面张力的存在,凝结在壁面孔隙内形成不同程度的弯液面,当岩体表面温度低于 TD 时,水蒸气遇到接触较小的低温壁面后不断吸湿,孔隙内充斥的液体越来越多,使得表面逐渐湿润并形成一层冷凝液膜,在液膜与混合气体的边界处,存在一个扩散层,在扩散层区域内,水蒸气不断进行冷凝传质和传热,以及气-液二相对流换热^[26, 38, 39]。水在岩石表面的润湿与岩石的接触角 θ 有关,接触角越小,岩石的润湿性越好,岩石颗粒表面的润湿性通常不均一。图 6~7 为重庆大足砂岩接触角测试结果,紫红色砂岩接触角为 $29.5^\circ \sim 50.4^\circ$,灰白色砂岩接触角为 $41.0^\circ \sim 94.2^\circ$ 。考虑以接触角 θ 划分壁挂水病害,如图 8 所示,当 $\theta = 0^\circ$ 时,水在岩石表面铺展,表现为面流水(CI级);当 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时,水在岩石表面呈半润湿状态,表现为壁挂水珠(CII级),当 $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 时,水在岩石表面呈不润湿状态,表现为干燥状。

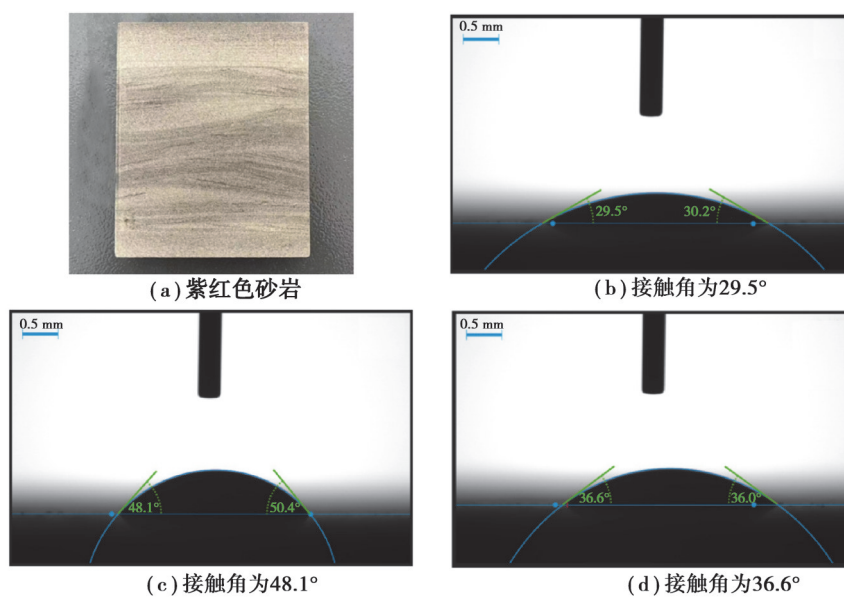


图6 重庆大足紫红色砂岩接触角测试结果

Fig. 6 Contact angles of purple sandstones from Dazu in Chongqing

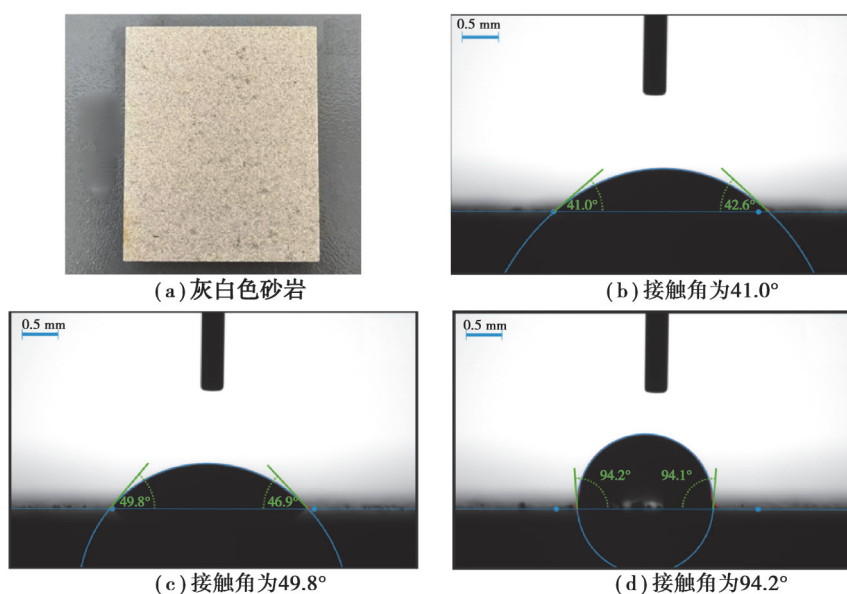


图7 重庆大足灰白色砂岩接触角测试结果

Fig. 7 Contact angles of grayish sandstones from Dazu in Chongqing

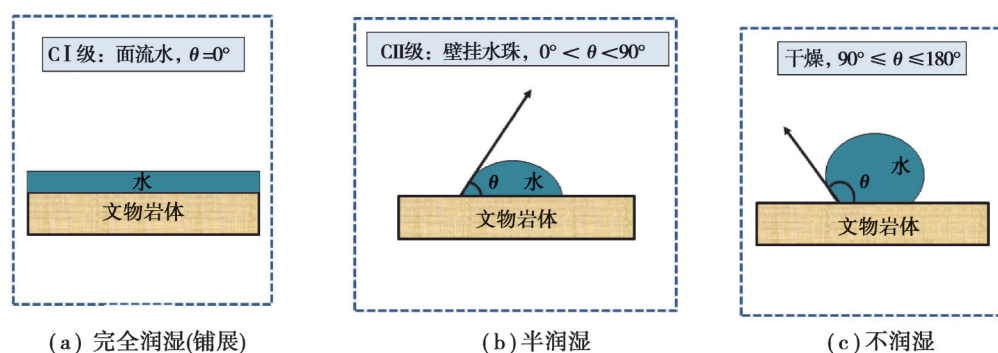


图8 不同接触角对应的润湿状态

Fig. 8 Wet states corresponding to different contact angles

2.4 潮湿\湿润病害分级

图 9 为干燥状态和饱水(湿润)状态下砂岩色差测试结果,当以白板为参比色度坐标时,紫红色砂岩干燥状态下不同测点平均值 $\Delta E_{davg}=41\sim 43$, 饱水状态下不同测点平均值 $\Delta E_{wavg}=62\sim 64$, 两者之间的差值为 19~22; 灰白色砂岩干燥状态下不同测点平均值 $\Delta E_{davg}=34\sim 35$, 饱水状态下不同测点平均值 $\Delta E_{wavg}=57\sim 59$, 两者之间的差值为 23~25。

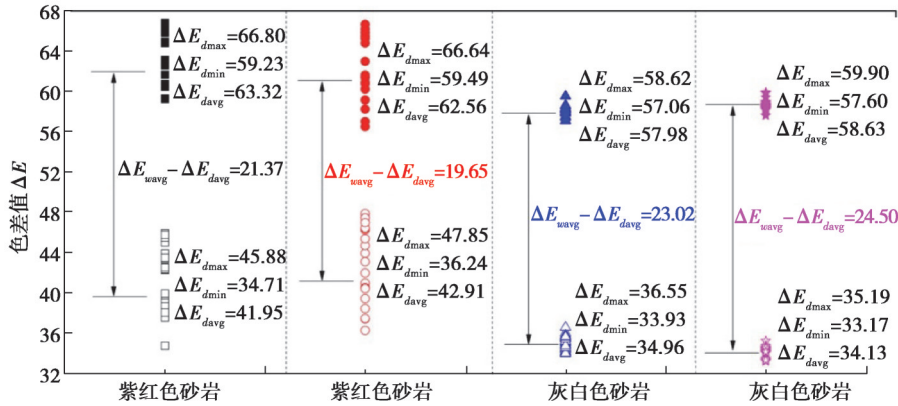


图 9 干燥和饱水状态下重庆大足砂岩色差测试结果

Fig. 9 Color difference test results of sandstones under dry and wet conditions

利用红外热成像、高密度电法、探地雷达等方法可实现文物岩体含水量的现场检\监测^[40-44]。考虑根据不同饱水程度(含水量)对应岩体颜色划分潮湿\湿润病害,以白板为参比色度坐标,当色差值 $\Delta E_n \leq (\Delta E_d + 3)$ 时岩石呈干燥状,当色差值 $\Delta E_n \geq (\Delta E_d + 19)$ 时表现为潮湿/湿润病害(DI级),当色差值 $(\Delta E_d + 3) < \Delta E_n < (\Delta E_d + 19)$ 时表现为半潮湿/半湿润病害(DII级)。

3 结 论

针对重庆大足北山石刻不同类型渗水病害,提出了各类渗水病害分级评估方法及细分标准。

1) 基于流量-等效开度立方定律得到了不同水力梯度下($J=0.017\sim 10$)不同等效开度裂隙流量变化曲线,分析并总结了水力梯度 $J=0.017\sim 10$ 时滴水\流水病害 AI级、AII级、AIII级对应裂隙等效开度 e_h 临界条件。

2) 借助热重法研究了重庆大足砂岩结合水含量及结合水水膜厚度,紫红色砂岩和灰白色砂岩结合水含量分别为 0.38% 和 0.27%,结合水水膜厚度 d_m 分别为 0.68 Å 和 0.34 Å,在此基础上提出了基于浸水面积 A_j 量级的浸水病害分级标准:(BI级)大面积浸水($> 10^6 \text{ cm}^2$);(BII级)中等面积浸水($10^3\sim 10^6 \text{ cm}^2$);(BIII级)小面积浸水($< 10^3 \text{ cm}^2$)。

3) 通过吸湿试验考察了不同湿度($RH=100\%、80\%、60\%$)环境下砂岩吸湿动力学特性,其水分扩散系数 D 分别等于 $1.579 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $2.166 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $6.848 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,明确了壁挂水病害的产生条件并提出了基于接触角 θ 的壁挂水病害分级标准:当 $\theta=0^\circ$ 时,水在岩石表面铺展,表现为面流水(CI级);当 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时,水在岩石表面呈半润湿状态,表现为壁挂水珠(CII级),当 $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 时,水在岩石表面呈不润湿状态,表现为干燥状。

4) 利用色差仪对比了重庆大足砂岩干燥状态色差值 ΔE_d 和湿润状态色差值 ΔE_w ,提出了基于不同饱水程度(含水量)砂岩色差值 ΔE_n 的潮湿\湿润病害分级标准:以白板为参比色度坐标,当色差值 $\Delta E_n \leq (\Delta E_d + 3)$ 时岩石呈干燥状;当色差值 $\Delta E_n \geq (\Delta E_d + 19)$ 时表现为潮湿/湿润病害(DI级);当色差值 $(\Delta E_d + 3) < \Delta E_n < (\Delta E_d + 19)$ 时表现为半潮湿/半湿润病害(DII级)。

参考文献

[1] Zhang J K, Li Z, Li L, et al. Study on weathering mechanism of sandstone statues in southwest China: example from the sandstone of niche of sakyamuni entering nirvana at Dazu rock carvings[J]. Natural Hazards, 2021, 108(1): 775-797.
 [2] Li Z M, Wang L L, Chen H L, et al. Degradation of emerald green: scientific studies on multi-polychrome Vairocana Statue in Dazu Rock Carvings, Chongqing, China[J]. Heritage Science, 2020, 8(1): 64.
 [3] Yan S J, Xie N, Liu J H, et al. Salt weathering of sandstone under dehydration and moisture absorption cycles: an experimental study on the sandstone from Dazu rock carvings[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2022, 47(4): 977-993.

- [4] Meng Z G, Wang F N, Qi G, et al. Stability monitoring and deformation laws of the Yuanjue cave in the influence zone of the unloading zone[EB/OL].(2021-08-02)[2024-10-23].<https://doi.org/10.1155/2021/6696030>.
- [5] 方芳, 方云, 燕学锋, 等. 重庆大足石刻千手观音造像区地下水渗流机制分析[J]. 文物保护与考古科学, 2009, 21(4): 1-4.
Fang F, Fang Y, Yan X F, et al. Groundwater seepage mechanism in the area of the Thousand Armed Guan Yin at Dazu Rock carvings in Chongqing[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2009, 21(4): 1-4.(in Chinese)
- [6] 王金华, 陈嘉琦, 王乐乐, 等. 我国石窟寺病害及其类型研究[J]. 东南文化, 2022(4): 25-32.
Wang J H, Chen J Q, Wang L L, et al. Deterioration patterns of grotto temples in China[J]. Southeast Culture, 2022(4): 25-32. (in Chinese)
- [7] 汪东云, 付林森, 姚金石, 等. 北山石窟岩体风化现状及控制因素[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1993, 15(1): 81-86.
Wang D Y, Fu L S, Yao J S, et al. Present situation and controlling factors of rock weathering in Beishan Grottoes[J]. Journal of Chongqing Architecture University, 1993, 15(1): 81-86.(in Chinese)
- [8] 汪东云, 张赞勋, 付林森, 等. 北山石窟渗水特征及其对造像岩体的破坏作用[J]. 水文地质工程地质, 1993, 20(6): 39-44.
Wang D Y, Zhang Z X, Fu L S, et al. The characteristics of water seepage and its destructive effect to the statue rockmass in Beishan Grottoes[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1993, 20(6): 39-44.(in Chinese)
- [9] 张兵峰, 蒋思维. 重庆大足石刻大佛湾渗水病害初探[J]. 中国文物科学研究, 2016(1): 68-71.
Zhang B F, Jiang S W. Preliminary exploration of water seepage disease on Big Buddha Bay of Dazu Rock Carvings[J]. China Cultural Heritage Scientific Research, 2016(1): 68-71.(in Chinese)
- [10] 徐程. 小开度裂隙注浆封堵扩散规律及控制参数研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
Xu C. Study on diffusion law and control parameters of grouting plugging in small opening cracks[D]. Jinan: Shandong University, 2016. (in Chinese)
- [11] Romm E S. Flow characteristics of fractured rocks[M]. Moscow: Nedra Publishing House, 1966.
- [12] Lomize G M. Flow in fractured rocks[M]. Moscow: Gosemergoizdat, 1951.
- [13] Louis C. Rock hydraulics[M]//Rock Mechanics. Vienna: Springer, 1972: 299-387.
- [14] Amadei B, Illangasekare T. A mathematical model for flow and solute transport in non-homogeneous rock fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1994, 31(6): 719-731.
- [15] 速宝玉, 詹美礼, 赵坚. 仿天然岩体裂隙渗流的实验研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 19-24.
Su B Y, Zhan M L, Zhao J. Study on fracture seepage in the imitative nature roke[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5): 19-24.(in Chinese)
- [16] Wilson C R, Witherspoon P A. Steady state flow in rigid networks of fractures[J]. Water Resources Research, 1974, 10(2): 328-335.
- [17] Barton N, Bandis S, Bakhtar K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1985,22 (3):121-140.
- [18] K I. Fundamental studies of fluid flow through a single fracture[D]. Berkely: University of California, 1976.
- [19] Walsh J B. Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1981, 18(5): 429-435.
- [20] 周海涛. 裂隙岩体承压渗流演化特征及其水力学机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
Zhou H T. Study on evolution characteristics and hydraulic mechanism of confined seepage in fractured rock mass[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017. (in Chinese)
- [21] Lee C H. Flow in fractured rock[D]. Tucson: University of Arizona, 1990.
- [22] 甘磊, 马洪影, 沈振中. 下凹形态裂隙面粗糙程度表征及立方定律修正系数拟合[J]. 水利学报, 2021, 52(4): 420-431.
Gan L, Ma H Y, Shen Z Z. Roughness characterization of concave fracture surface and coefficient fitting of modified cubic law [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(4): 420-431.(in Chinese)
- [23] 刘佳婷, 付昱凯, 李同录, 等. 黄土与其矿物颗粒表面水膜类型及其定量表征[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 105-113.
Liu J T, Fu Y K, Li T L, et al. Types of water film on the surface of loess and related mineral particles and their quantitative characterization[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 105-113.(in Chinese)
- [24] 曾召田, 刘兆强, 莫红艳, 等. 黏性土中结合水测定及影响因素分析[J]. 地震工程学报, 2023, 45(3): 625-633.
Zeng Z T, Liu Z Q, Mo H Y, et al. Determination of bound water in clay soil and analysis of its influencing factors[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(3): 625-633.(in Chinese)
- [25] 王铁行, 李彦龙, 苏立君. 黄土表面吸附结合水的类型和界限划分[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 942-948.
Wang T H, Li Y L, Su L J. Types and boundaries of bound water on loess particle surface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 942-948.(in Chinese)
- [26] 李燕. 麦积山石窟水汽凝结机理及防治措施研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.

- Li Y. Study on water vapor condensation mechanism and prevention measures in Maijishan Grottoes[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020. (in Chinese)
- [27] Sheng W, Qiang Z. Atmospheric physical characteristics of dew formation in semi-arid in Loess Plateau[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(5): 059203.
- [28] Camuffo D. Microclimate, air and temperature[M]//Microclimate for Cultural Heritage. Amsterdam: Elsevier, 2014: 3-47.
- [29] 陈翠琴. 凝结水的形成及变化规律[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(31): 30-32.
Chen C Q. Formation of condensate and change rule[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(31): 30-32. (in Chinese)
- [30] 万力, 曹文炳, 王旭升, 等. 云冈石窟水汽转化特征的初步研究[J]. *工程勘察*, 2012, 40(11): 6-11.
Wan L, Cao W B, Wang X S, et al. Preliminary investigation on water-vapor transfer in Yungang Grottoes[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2012, 40(11): 6-11. (in Chinese)
- [31] 黄继忠, 万力, 彭涛, 等. 云冈石窟水分来源探查工程及若干成果[J]. *工程勘察*, 2012, 40(11): 1-5, 11.
Huang J Z, Wan L, Peng T, et al. Survey on water sources in Yungang Grottoes and some results[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2012, 40(11): 1-5, 11. (in Chinese)
- [32] 欧阳恺皋, 蒋小伟, 马策, 等. 岩体表层凝结水的形成与转化规律: 对岩石风化水分来源的指示意义[J]. *地学前缘*, 2023, 30(2): 506-513.
Ouyang K G, Jiang X W, Ma C, et al. Formation and transformation of condensate water inside rocks: insight into source of rock moisture affecting weathering[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(2): 506-513. (in Chinese)
- [33] 郑龙, 伍健东, 周兴求, 等. 温度和相对湿度对污泥低温干燥速率的影响[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(2): 922-928.
Zheng L, Wu J D, Zhou X Q, et al. Effects of temperature and relative humidity on drying rate of sludge at low temperature[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(2): 922-928. (in Chinese)
- [34] 吴婧婧. 温度和湿度对复合材料螺栓连接强度影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
Wu J J. Study on the influence of temperature and humidity on the strength of composite bolt connection[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [35] Akbar S, Zhang T. Moisture diffusion in carbon/epoxy composite and the effect of cyclic hygrothermal fluctuations: characterization by dynamic mechanical analysis (DMA) and interlaminar shear strength (ILSS)[J]. *The Journal of Adhesion*, 2008, 84(7): 585-600.
- [36] 孟江燕, 王云英, 向东东, 等. 湿热环境对 T700/5429 弯曲和面内压缩强度的影响[J]. *宇航材料工艺*, 2012, 42(5): 30-33.
Meng J Y, Wang Y Y, Xiang D D, et al. Effect of hydrothermal environment on flexural and in-plane compressive strength of T700/5429[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2012, 42(5): 30-33. (in Chinese)
- [37] Wan Y Z, Wang Y L, Luo H L, et al. Moisture absorption behavior of C3D/EP composite and effect of external stress[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, 326(2): 324-329.
- [38] Young J F. Humidity control in the laboratory using salt solutions—a review[J]. *Journal of Applied Chemistry*, 1967, 17(9): 241-245.
- [39] Zschaecck G, Frank T, Burns A D. CFD modelling and validation of wall condensation in the presence of non-condensable gases [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, 279: 137-146.
- [40] 张悦, 黄继忠. 红外技术在文物科学保护中的应用[J]. *自然杂志*, 2021, 43(3): 217-224.
Zhang Y, Huang J Z. Application of infrared technique for scientific conservation of cultural relics[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2021, 43(3): 217-224. (in Chinese)
- [41] 张慧慧. 红外热成像法检测岩石渗水病害的实验研究[J]. *齐齐哈尔大学学报(自然科学版)*, 2014, 30(1): 71-74.
Zhang H H. The experimental study of infrared imaging detection on water-permeation of rock[J]. *Journal of Qiqihar University (Natural Science Edition)*, 2014, 30(1): 71-74. (in Chinese)
- [42] 肖宽怀, 王绪本. 微电极高密度电法探测在文物保护中的应用研究[J]. *物探化探计算技术*, 2013, 35(1): 10-17.
Xiao K H, Wang X B. The research about the application of relic protection with the method of microelectrode detection of highdensity electrical[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2013, 35(1): 10-17. (in Chinese)
- [43] Sass O, Viles H A. Wetting and drying of masonry walls: 2D-resistivity monitoring of driving rain experiments on historic stonework in Oxford, UK[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2010, 70(1): 72-83.
- [44] 仇文岗, 王硕, 刘汉龙, 等. 重庆老鼓楼衙署遗址强度劣化规律及渗水病害防治对策[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2023, 45(5): 26-36.
Zhang W G, Wang S, Liu H L, et al. Strength deterioration pattern and anti-seepage measures of the Old Drum Tower Yamen site in Chongqing[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2023, 45(5): 26-36. (in Chinese)