

王常明,徐巧宣,吴迪,等.温度和湿度对文物砂岩修复材料强度的影响.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(3):933-942.
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220288.

Wang Changming, Xu Qiaoxuan, Wu Di, et al. Effect of Temperature and Moisture on the Strength of Restoration Materials for Cultural Relic Sandstone. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(3): 933-942. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220288.

温度和湿度对文物砂岩修复材料强度的影响

王常明¹, 徐巧宣¹, 吴迪¹, 王卿宇¹, 黄宇², 郭兰昌²

1. 吉林大学建设工程学院, 长春 130026

2. 辽宁省有色地质一〇一队有限责任公司, 辽宁 抚顺 113005

摘要: 为了寻求一种合适的修复材料对砂岩质文物进行有效修复及保护, 本文选取环氧树脂、水硬性石灰5%、水硬性石灰12%等3种修复材料分别对砂岩试样进行修复, 并设定在不同恒温温度、冻融循环次数和饱和条件下测定砂岩试样的抗拉强度和抗剪强度, 研究修复后的砂岩试样在不同温度和湿度条件下的强度和耐久性。试验结果表明: 短时期(10余d)内, 黏结岩样受温度影响并不显著; 在饱和条件下, 岩样的力学强度随着饱和度的增大呈现降低的趋势; 使用环氧树脂黏结的试样抗拉与抗剪强度均高于2种水硬性石灰, 水硬性石灰12%的黏结强度高于水硬性石灰5%; 多次冻融后, 环氧树脂黏结岩样的抗拉强度一直处于较高的水平。相对于其他两种材料, 环氧树脂黏结具有更好的耐久性。

关键词: 温度; 湿度; 文物砂岩; 修复材料; 力学强度

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220288

中图分类号: TU458

文献标志码: A

Effect of Temperature and Moisture on the Strength of Restoration Materials for Cultural Relic Sandstone

Wang Changming¹, Xu Qiaoxuan¹, Wu Di¹, Wang Qingyu¹, Huang Yu², Guo Lanchang²

1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China

2. Liaoning Nonferrous Geology 101 Team Co., Ltd., Fushun 113005, Liaoning, China

Abstract: In order to find a suitable restoration material for the effective restoration and protection of sandstone cultural relics, we selected three kinds of restoration materials such as epoxy resin, water-hard lime in 5% and water-hard lime in 12% to discuss the strength and durability of restored cultural relic sandstone under the influence of temperature and humidity. By setting different temperature, freeze-thaw cycles and different saturation levels to simulate natural environment, the strength changes of the rock samples were analyzed using tensile strength and shear strength tests. The test results show

收稿日期: 2022-10-19

作者简介: 王常明(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程和地质灾害方面的研究, E-mail: wangcm@jlu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972267)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41972267)

that the rock samples are not significantly affected by temperature in a short period of time. Under the influence of humidity, the overall mechanical strength showed a decreasing trend. The strength of specimens bonded with epoxy resin is higher than that with water-hard lime, and the strength of bonding with water-hard lime in 12% is higher than that with water-hard lime in 5%. The tensile strength of the epoxy resin bonded rock sample is always at a high level during multiple freeze-thaw processes, which has better durability compared with the bonding of the other two materials.

Key words: temperature; moisture; cultural relic sandstone; restoration materials; strength

0 引言

在自然环境的长期影响下,文物砂岩会出现不同程度的风化,使用恰当的材料修复文物砂岩能够有效地保护文物,延长文物寿命。我国川渝地区分布着大量砂岩质文物,文物的保护以及修复问题一直受到人们的广泛关注与重视。在修复材料的选择上,砂岩质文物的修复大多选择石灰砂浆。目前,国内相关研究尚处于起步阶段,有学者^[1-3]研究发现,将水泥和粉煤灰加入到黏土中修复砂岩质文物,试样后期的强度较高;然而经过一段时间后,由于水泥的黏结强度过大,被水泥修复过的文物对古建筑石质文物本体造成了更为严重的二次破坏,甚至出现了文物风化消失而水泥还存在的现象。环氧树脂作为一种曾经被用作古建筑石质文物修复和加固的材料,自 20 世纪 80 年代开始被大量应用于石质文物的加固和修复^[4-5]。但环氧树脂经过紫外线照射后老化速度很快,因此对常受阳光照射的石质文物不可采用环氧树脂修复。而掺入水泥的水硬性石灰具有强度适中、不含可溶性盐、与石质文物兼容性好等优点,受到文物保护研究人员的广泛关注。值得注意的是,修复材料的吸力变化和吸附水特征与外界环境湿度、温度有关。探究环境影响下文物修复材料的变化特征,对于科学阐释修复后的砂岩力学强度等问题具有十分重要的意义^[6]。

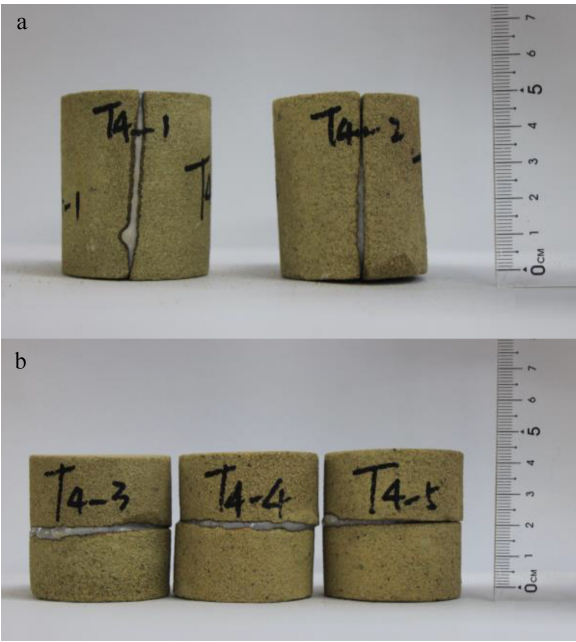
对于砂岩质文物,在探究其强度的过程中,由于试验中破坏岩石的方式大都由外到内,导致作为石质文物载体的岩石表层极易受到风化作用的影响,其中物理风化是普遍存在的^[7-8]。砂岩受到温度和湿度的影响较大,故砂岩质文物极易产生破损、变形或风化等由自然因素导致的损坏情况。高温会导致岩石的物理力学性质发生改变,例如强度、质量损失率等,因此研究温度与湿度对修复材料和砂岩的影响颇为重要^[9-12]。有学者^[13]通过改变干湿循环、冻融循环等外部条件研究砂岩或土体物理力学性质的变化。

有学者^[14]用修复材料黏结砂岩后,通过抗压强度测试探究其强度与耐久性,并通过抗冻试验发现水硬性石灰的抗冻性能良好,较传统石灰砂浆强度明显提高;另外,有学者^[15-16]通过将传统巴西圆盘试验与霍普金森压杆试验结合的方式研究岩石的动态劈裂抗拉强度的变化规律,认为峰值抗压强度、黏聚力和内摩擦角也是考虑砂岩部分力学性质的重要因素。

总体而言,目前选择的石灰质修复材料早期强度低,耐久性不足,阻碍了其发展和应用。在此背景下,本文选取 3 种不同的修复材料对四川省某地区的文物砂岩进行黏结,分别制备成直径与高度基本相同的 3 组砂岩试样。在以往研究的基础上,通过不同温度影响试验、冻融循环试验和饱和度影响试验,研究恒温温度和湿度对 3 种不同修复材料强度的影响程度,并进一步将室内试验理论与现场测试相结合,以期在砂岩质文物修复工作中选择出更为合适的修复材料。

1 材料与试样制备

砂岩试样取自四川省某文物佛像所在地。该地为亚热带季风性湿润气候,所取砂岩风化面呈黄褐色,天然密度为 2.19 g/cm^3 。经由实验室内切割、打磨,制成高度约 50 mm、直径约 50 mm 的圆柱形试样。修复材料选取环氧树脂、水硬性石灰 5% (水泥与熟石灰质量比为 1 : 0.05)、水硬性石灰 12% (水泥与熟石灰质量比为 1 : 0.12)。其中水硬性石灰 5% 与水硬性石灰 12% 由熟石灰、水泥、水按所需比例搅拌使其充分混合。试验所需试样分为劈裂形试样与直剪形试样两种。将圆柱形砂岩分别沿径向(图 1a)和横向(图 1b)的中部切开,取适量修复材料(环氧树脂、水硬性石灰 5%、水硬性石灰 12%)均匀薄涂在砂岩试样横截面,待其还未完全干燥时将两部分进行黏结,静置一段时间使其牢固,最终得到劈裂试样与直剪试样,用于抗拉强度试验和抗剪强度试验。



a. 劈裂试验用试样;b. 直剪试验用试样。

图 1 砂岩试样

Fig.1 Sandstone specimens

2 试验方案

将全部砂岩试样分成 3 组,考虑温度和湿度对修复材料黏结的文物砂岩的影响进行试验(3 组分别为温度影响试验、冻融循环试验、饱和度影响试验,标号分别为 T、C、S),每组均由 3 种修复材料构成(分别为环氧树脂、水硬性石灰 5%、水硬性石灰 12%),各包含 2 个劈裂试样和 3 个直剪试样,试验分组情况详见表 1。

表 1 试验方案
Table 1 Test protocol

试验分类	试验条件	试样分组	劈裂试样 序号	直剪试样 序号
温度影响 试验(T)	-10℃	T ₁	1、2	3、4、5
	0℃	T ₂		
	20℃	T ₃		
	50℃	T ₄		
冻融循环 试验(C)	5 次	C ₁	1、2	3、4、5
	10 次	C ₂		
饱和度影响 试验(S)	100%	S	1、2	3、4、5

注:温度影响试验 T₁组中劈裂试样 1 代表的试样标号为 T₁₋₁,其余类推。

2.1 温度对文物砂岩修复材料的影响

在恒温条件下,考虑温度对修复材料黏结的文物砂岩的影响,对其进行不同温度影响试验。试验所取文物砂岩所在地的温差在 46℃左右,因此设置-10、0、20(室温条件)、50℃等 4 组恒温温度,将组别为 T₁、T₂、T₃、T₄ 的砂岩试样放置在温控鼓风干燥箱中 12 h 使其充分受热直至平衡。

在自然条件下,考虑天气的温度变化对修复后的文物砂岩持续性影响及修复材料的耐久性,对砂岩试样进行冻融循环试验。近 10 a 来该地区最高气温 38℃,最低气温-8℃,平均气温约 18℃。昼夜温差变化较为明显,持续高温或持续低温不超过 10 h。因此综合考虑自然条件,将砂岩试样放入 XT5405C 有载土工冻融试验箱中,温度设置为-10~40℃、循环周期 24 h(保持-10℃低温 12 h、40℃高温 12 h)。C₁、C₂ 分别为循环 5 次和 10 次试验组。将 T₃ 组作为循环 0 次的试验组。

2.2 湿度对文物砂岩修复材料的影响

在自然条件下,考虑地区降雨等情况的发生,以及饱水程度对砂岩及其修复材料黏结性能的影响,对砂岩试样进行完全干燥和完全饱和条件的试验。将 S 组砂岩试样放入真空饱和器中持续浸水 24 h 使其充分达到完全饱和。将 T₃ 组作为饱和度为 0 的试验组。

2.3 力学强度试验方案

依次对进行温度影响试验、冻融循环试验、饱和度影响试验后的砂岩试样进行力学试验。利用巴西劈裂法间接测量试样的抗拉强度,试验设备使用 WE-10 万能试验机,加荷速度为 0.3 MPa/s,试验参考规范为《岩石物理力学性质试验规程》(DZ/T 0276.21—2015)^[17]第 21 部分:岩石抗拉强度试验。砂岩试样的抗拉强度由式(1)计算得出。

$$\sigma_t = \frac{2p}{\pi Dh}。$$
 (1)

式中:σ_t 为砂岩试样抗拉强度,MPa;p 为破坏荷载,N;D 为砂岩试样直径,mm;h 为砂岩试样厚度,mm。

利用岩石直剪仪测量试样的抗剪强度,试验设备使用 YZ-30B 数显式岩石直剪仪,采用平推法,试验参考规范为《岩石物理力学性质试验规程》(DZ/T 0276.21—2015)^[17]第 28 部分:岩体强度试验(直剪试验)。通过对试样施加不同的法向应力间接得到其剪切强度,根据摩尔库伦准则计算得出内

摩擦角和内聚力。砂岩试样的抗剪强度由式(2)计算得出。

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c。$$
 (2)

式中: τ 为砂岩试样抗剪强度, MPa; σ 为法向应力, MPa; φ 为内摩擦角, ($^{\circ}$); c 为内聚力, MPa。

同时, 抗剪强度指标劣化率按照式(3)计算得出。

$$\epsilon = \frac{p_n - p_0}{p_0}。$$
 (3)

式中: ϵ 为指标劣化率; p_n 为试验处理后抗拉强度、内摩擦角和内聚力等 3 个指标的劣化率, 下标 n 为试样组号; p_0 为室温对照组(T_3 组)3 个指标的劣化率。

3 试验结果与分析

3.1 力学强度试验结果

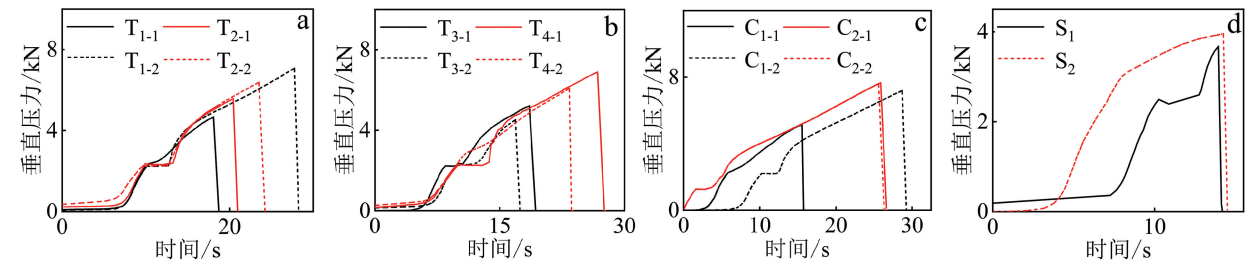
通过抗拉强度试验可以得到垂直压力随时间变化的曲线(图 2—4)。根据破坏曲线确定试样峰值压力, 计算得出抗拉强度, 抗拉强度的破坏荷载见表 2。通过抗剪强度试验可以得到试样的抗剪强度包络线(图 5—7)。利用最小二乘法对数据进行线性拟合, 根据摩尔-库伦准则可以获得试样的内摩擦角

和内聚力。不同抗剪强度试验的峰值切向应力见表 3。

由图 2—4 可以看出, 经 3 种修复材料黏结后的砂岩试样在抗拉强度试验中均呈现出脆性破坏。由图 5—7 可知, 在抗剪强度试验中各试验组数据点线性关系良好, R^2 大多在 0.800 0 以上。由表 2、3 可以明显看出, 使用环氧树脂黏结试样的强度要远大于 2 种水硬性石灰材料, 同时, 不同饱和度对砂岩试样的抗拉强度与抗剪强度影响较大。

3.2 力学强度试验破坏现象

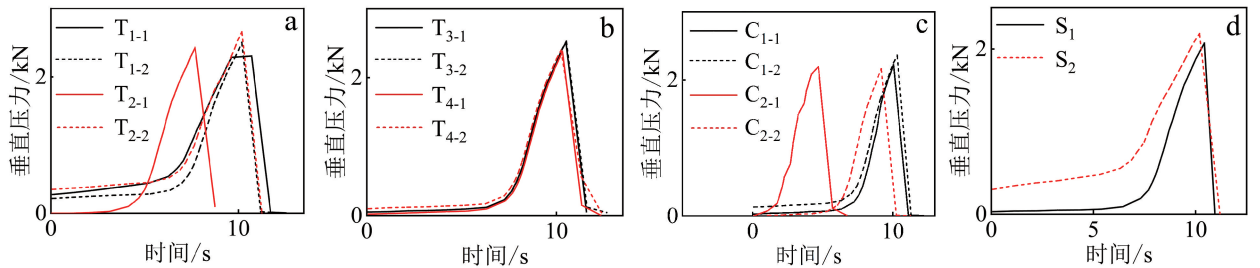
试验中劈裂试样(图 8a—c)均沿加载直径方向破坏, 且均呈现出脆性破坏。修复材料为环氧树脂的试样破坏后, 在修复材料上会附着部分或一层砂岩, 同时试样破坏时有明显的断裂声。出现此现象的原因可能是由于砂岩风化导致试样抗拉能力较低, 也可能由于试样在试验过程中受力不均匀导致。而修复材料为水硬性石灰 5% 和水硬性石灰 12% 的劈裂试样基本在修复材料处完整裂开, 并伴有微弱的断裂声。其中, 在完全饱和条件下试样内部劈裂面存在轻微凸起和凹陷, 可能是由于修复材料黏结不平, 加载过程中受力不均匀导致。



a, b. 温度影响试验; c. 冻融循环试验; d. 饱和度影响试验。

图 2 环氧树脂黏结的试样垂直压力随时间的变化曲线

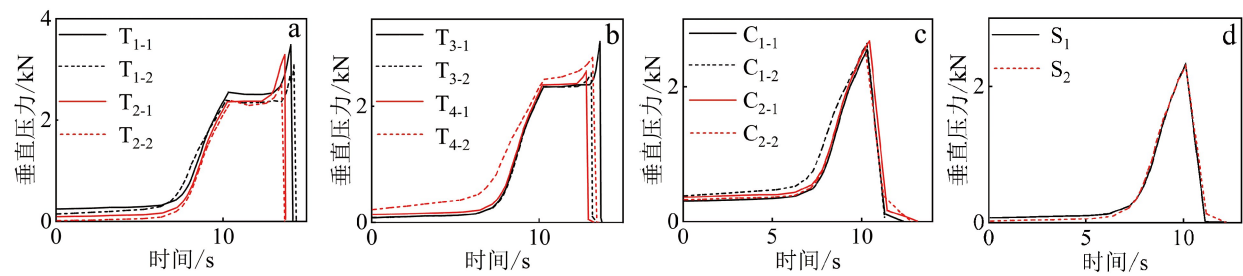
Fig.2 Curve of vertical pressure over time of specimens bonded with epoxy resin



a, b. 温度影响试验; c. 冻融循环试验; d. 饱和度影响试验。

图 3 水硬性石灰 5% 黏结的试样垂直压力随时间的变化曲线

Fig.3 Curve of vertical pressure over time of specimens bonded with water hard lime 5%

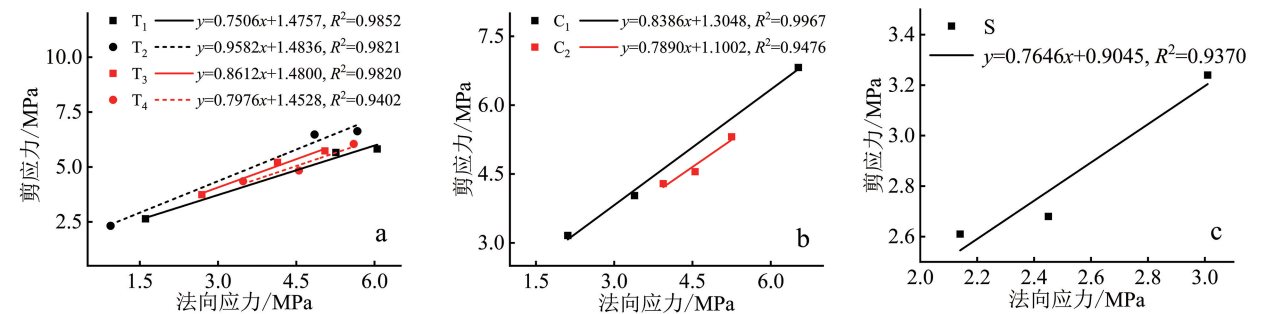


a,b. 温度影响试验;c. 冻融循环试验;d. 饱和度影响试验。
图 4 水硬性石灰 12%黏结的试样垂直压力随时间的变化曲线

Fig.4 Curve of vertical pressure over time of specimens bonded with water hard lime 12%

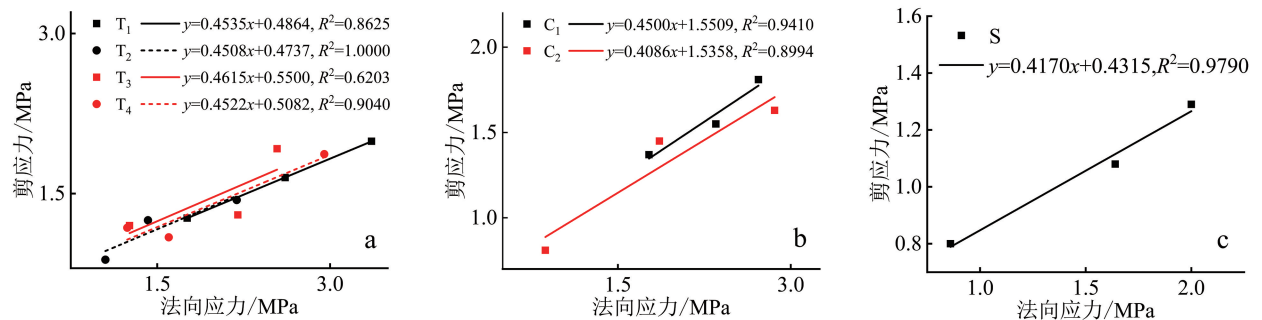
表 2 砂岩试样在不同试验抗拉强度的破坏荷载

Table2 Sandstone specimens have failure loads of tensile strength in different tests													kN	
修复材料	温度影响试验								冻融循环试验				饱和度影响试验	
	T ₁₋₁	T ₁₋₂	T ₂₋₁	T ₂₋₂	T ₃₋₁	T ₃₋₂	T ₄₋₁	T ₄₋₂	C ₁₋₁	C ₁₋₂	C ₂₋₁	C ₂₋₂	S ₁	S ₂
环氧树脂	4.66	7.07	5.57	6.38	5.21	4.52	6.90	6.09	5.16	7.19	7.65	7.60	3.67	3.96
水硬性	2.31	2.51	2.43	2.66	2.51	2.53	2.38	2.40	2.22	2.36	2.20	2.16	2.07	2.18
石灰 5%														
水硬性	3.49	3.09	3.29	2.71	3.11	2.57	2.61	2.84	2.56	2.64	2.68	2.59	2.34	2.31
石灰 12%														



a. 温度影响试验;b. 冻融循环试验;c. 饱和度影响试验。R 为相关系数。
图 5 环氧树脂黏结的试样抗剪强度包络线

Fig.5 Shear strength envelope of specimens bonded with epoxy resin



a. 温度影响试验;b. 冻融循环试验;c. 饱和度影响试验。
图 6 水硬性石灰 5%黏结的试样抗剪强度包络线

Fig.6 Shear strength envelope of specimens bonded with water hard lime 5%

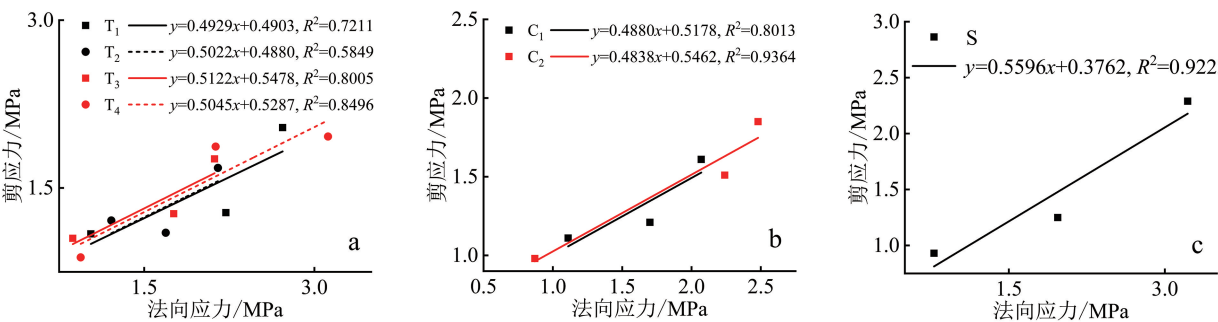


图 7 水硬性石灰 12%黏结的试样抗剪强度包络线

Fig.7 Shear strength envelope of specimens bonded with water hard lime 12%

表 3 不同试验抗剪强度的峰值切向应力

Table 3 Peak tangential stresses of different test shear strengths MPa

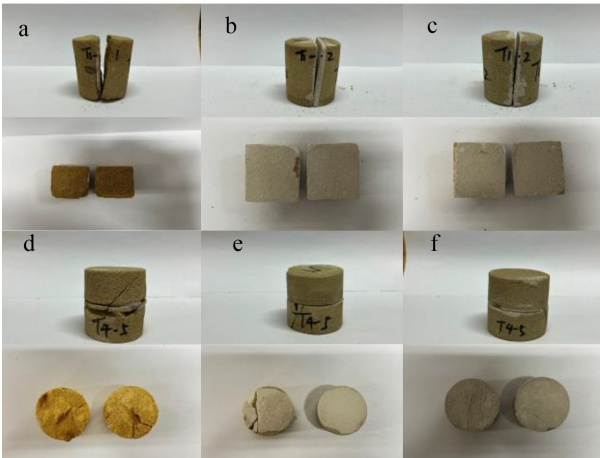
修复材料	温度影响试验												冻融循环影响试验						饱和度影响试验		
	T ₁₋₃	T ₁₋₄	T ₁₋₅	T ₂₋₃	T ₂₋₄	T ₂₋₅	T ₃₋₃	T ₃₋₄	T ₃₋₅	T ₄₋₃	T ₄₋₄	T ₄₋₅	C ₁₋₃	C ₁₋₄	C ₁₋₅	C ₂₋₃	C ₂₋₄	C ₂₋₅	S ₃	S ₄	S ₅
环氧树脂	2.64	5.66	5.82	2.32	6.48	6.63	3.74	5.21	5.73	4.35	4.84	6.05	3.16	4.03	6.82	4.29	4.55	5.31	2.61	2.68	3.24
水硬性石灰 5%	1.27	1.65	1.99	0.88	1.25	1.44	1.20	1.30	1.92	1.18	1.09	1.87	1.37	1.55	1.81	0.81	1.45	1.63	0.80	1.08	1.29
水硬性石灰 12%	1.09	1.28	2.04	1.21	1.10	1.68	1.05	1.27	1.76	0.88	1.87	1.96	1.11	1.21	1.61	0.98	1.51	1.85	0.93	1.25	2.29

试验中直剪试样(图 8d—f)基本均在砂岩与修复材料接触面处破坏,且呈现脆性破坏。修复材料为环氧树脂的试样破坏时伴有明显的断裂声,其他 2 种材料则有微弱的断裂声出现。部分试样存在摩擦划痕,并且能看到修复材料断裂的现象。其中,在完全饱和条件下,由于各组砂岩试样风化程度各不相同,部分试样破坏时会伴有不同程度的纵向裂纹出现,其中修复材料为环氧树脂的试样受到的水平应力与法向应力较大,因此与其他 2 种修复材料黏结的砂岩试样相比碎裂较为严重。

3.3 温度对文物砂岩修复材料的影响

从试验结果(图 9a)可以明显看出:在不同温度恒温条件处理下,修复材料为环氧树脂的试样抗拉强度与修复材料为 2 种水硬性石灰的试样相比一直处于较高水平,而用 2 种水硬性石灰修复的试样抗拉强度相差不大;相较于常温,用 2 种水硬性石灰修复材料黏结的砂岩试样抗拉强度随温度变化并没有明显的变化,但用环氧树脂修复试样在高温和低温状态下的抗拉强度均升高。同时,在不同温度恒温处理后,用环氧树脂修复的砂岩试样内摩擦角和内

聚力均大于用 2 种水硬性石灰修复(图 9b、c)。与常温状态下相比,用环氧树脂修复后,试样的内摩擦角在低温和高温条件下均存在不同程度的减小,但



a. 环氧树脂,劈裂试验; b. 水硬性石灰 5%,劈裂试验; c. 水硬性石灰 12%,劈裂试验; d. 环氧树脂,直剪试验; e. 水硬性石灰 5%,直剪试验; f. 水硬性石灰 12%,直剪试验。

图 8 砂岩试样破坏形态

Fig.8 Sandstone specimens destruction patterns

在 0℃ 时升高,用 2 种水硬性石灰修复材料黏结后,内摩擦角变化都不大;而用 3 种材料修复后,内聚力在不同温度恒温处理后变化均不显著。

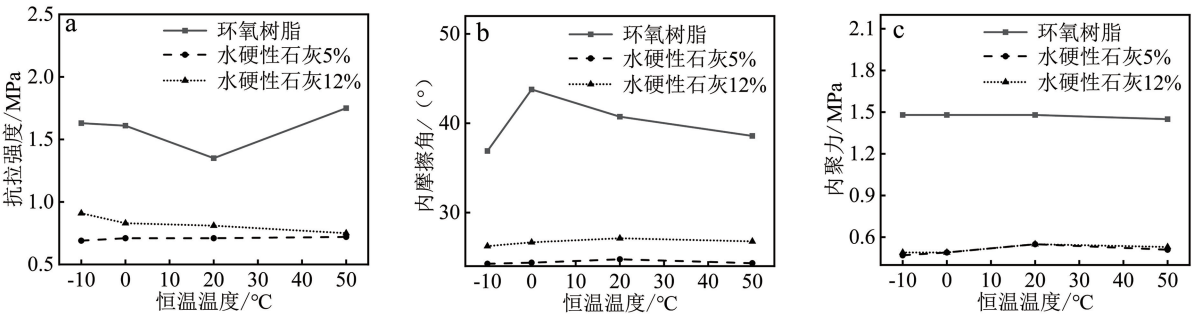
由公式(3)计算得到 3 种修复材料抗拉强度、内摩擦角和内聚力的劣化率,详见表 4—6。可知,在恒温条件下,用环氧树脂、水硬性石灰 5%、水硬性石灰 12%黏结修复后的砂岩试样抗拉强度最大劣化率分别为 29.62%、-2.81%、12.34%,内摩擦角最大劣化率分别为-9.42%、-2.01%、-3.24%,内聚力最大劣化率则分别为-2.02%、-14.54%、-10.90%。可见,除环氧树脂抗拉强度最大劣化率之外,其余最大劣化率之间均相差较小。

3.4 冻融循环对文物砂岩修复材料的影响

在冻融循环试验中,从试验结果(图 10a)可以看出:修复材料为环氧树脂的试样抗拉强度与另外 2 种材料相比一直处于较高水平,基本稳定在 1.38 MPa 左右,而修复材料为水硬性石灰 5%与水硬性石灰

12%的试样随着冻融循环次数的增加抗拉强度逐渐衰减,且在循环次数 5~10 之间呈现趋于稳定的趋势。同时,用 3 种材料修复的试样抗剪强度指标(图 10b、c)整体上呈现出降低的趋势,但内聚力的数值除环氧树脂外,另外两种材料降低并不明显。其中修复材料为水硬性石灰 12%的试样在冻融循环 10 次后内聚力略微升高,其余组别在冻融循环 5 次与 10 次后均存在细微的降低。

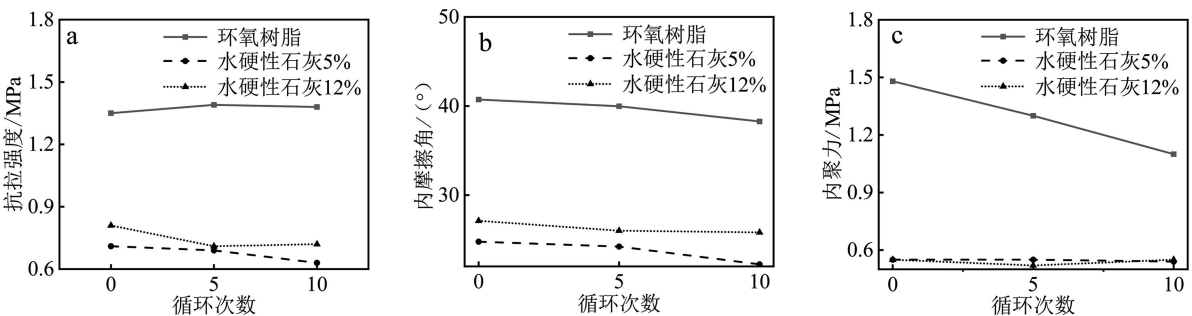
由计算结果(表 4—6)得知:在修复材料耐久性方面,当冻融循环次数达到 5 次时,3 种修复材料黏结的试样内摩擦角劣化率分别为-1.84%、-2.18%和-4.09%,内聚力劣化率分别为-12.16%、0 和-5.45%;当冻融循环次数达到 10 次时,3 种修复材料黏结的试样内摩擦角劣化率分别为-6.03%、-10.25%和-4.79%,内聚力劣化率分别为-25.67%、-1.81%和 0。此外,环氧树脂黏结试样抗拉强度最大劣化率为 2.96%,而水硬性石灰 5%与水



a. 抗拉强度;b. 内摩擦角;c. 内聚力。

图 9 不同温度影响下砂岩试样的抗拉强度与抗剪强度变化

Fig.9 Changes in tensile strength and shear strength of sandstone specimens under different temperatures



a. 抗拉强度;b. 内摩擦角;c. 内聚力。

图 10 冻融循环影响下砂岩试样的抗拉强度与抗剪强度变化

Fig.10 Changes in tensile strength and shear strength of sandstone specimens under freeze-thaw cycles

表 4 砂岩试样在不同试验的抗拉强度劣化率

Table 4 Deterioration rate of tensile strength of sandstone specimens in different tests							%
修复材料	温度影响试验				冻融循环试验		饱和度影响试验
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	C ₁	C ₂	S
环氧树脂	20.74	19.25	0	29.62	2.96	2.22	−21.48
水硬性石灰 5%	−2.81	0	0	1.40	−2.81	−11.26	−11.26
水硬性石灰 12%	12.34	2.46	0	−7.40	−12.34	−11.11	−22.22

表 5 砂岩试样在不同试验的内摩擦角劣化率

Table 5 Deterioration rate of internal friction angle of sandstone specimens in different tests							%
修复材料	温度影响试验				冻融循环试验		饱和度影响试验
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	C ₁	C ₂	S
环氧树脂	−9.42	7.48	0	−5.27	−1.84	−6.03	−6.03
水硬性石灰 5%	−2.01	−1.53	0	−1.77	−2.18	−10.25	−8.59
水硬性石灰 12%	−3.24	−1.65	0	−1.29	−4.09	−4.79	7.30

表 6 砂岩试样在不同试验的内聚力劣化率

Table 6 Deterioration rate of cohesive of sandstone specimens in different tests							%
修复材料	温度影响试验				冻融循环试验		饱和度影响试验
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	C ₁	C ₂	S
环氧树脂	0	0	0	−2.02	−12.16	−25.67	−39.18
水硬性石灰 5%	−14.54	−10.90	0	−7.27	0	−1.81	−21.81
水硬性石灰 12%	−10.90	−10.90	0	−3.63	−5.45	0	−30.90

硬性石灰 12%黏结试样抗拉强度最大劣化率分别为−11.26%、−12.34%(表 4—6),二者相差不大。

在冻融循环过程中,砂岩中部横截面与修复材料的黏结处以及砂岩自身都会发生不同程度的劣化,这些因素都会导致砂岩试样的抗拉强度与抗剪强度降低。但随着冻融循环试验的次数增加,砂岩试样的损伤度会逐步趋于稳定状态,强度也会逐渐降低直至达到某一稳定值。

3.5 饱和度对文物砂岩修复材料的影响

在饱和度影响试验中,完全饱和后的砂岩试样抗拉强度均低于未经饱和试验处理的砂岩试样(图 11a)。将试样用 3 种修复材料黏结后,用水硬性石灰 12%修复的砂岩试样达到完全饱和后内摩擦角

增大,其余组别内摩擦角均呈现减小趋势;3 种材料修复后内聚力均有所减小(图 11b、c)。

由计算结果(表 4—6)得知,3 种修复材料黏结的试样抗拉强度劣化率分别为−21.48%、−11.26%、−22.22%,内摩擦角劣化率分别为−6.03%、−8.59%、7.30%,内聚力降低较为明显,其劣化率分别达−39.18%、−21.81%、−30.90%。由试验结果分析得出,由于砂岩自身遇水会发生明显的软化,修复材料饱和后也呈现出不同程度的细微软化,3 种修复材料黏结的砂岩试样在饱和时抗拉强度和抗剪强度均明显降低。因此在多雨潮湿的环境下,可能造成砂岩与修复材料饱和度升高、强度降低的影响因素在实际应用中需要引起重视。

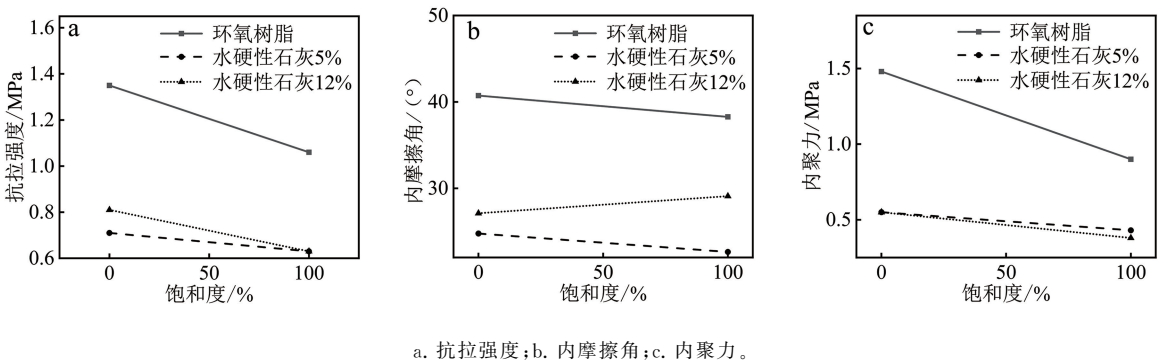


图 11 不同饱和度影响下砂岩试样的抗拉强度与抗剪强度变化

Fig.11 Changes in tensile strength and shear strength of sandstone specimens under different saturation

4 结论与建议

1)使用环氧树脂黏结的砂岩试样强度高于用水硬性石灰,用水硬性石灰 12%黏结强度高于用水硬性石灰 5%。

2)与常温状态下相比,在高温和低温影响下环氧树脂黏结砂岩试样的抗拉强度增大,内摩擦角降低,但内摩擦角在 0℃时升高;而用 5%水硬性石灰与 12%水硬性石灰修复后的试样其抗拉强度和抗剪强度没有受到明显影响。

3)多次冻融过程中环氧树脂黏结砂岩试样的抗拉强度一直处于较高的水平,强度衰减缓慢,说明环氧树脂相对于其他 2 种材料黏结,具有更好的耐久性。

4)与试样完全干燥状态下相比,完全饱和后的试样抗拉强度与抗剪强度指标均有所减小。用环氧树脂、水硬性石灰 5%、水硬性石灰 12%修复后的试样抗拉强度分别减小了 21.48%、11.26%、22.22%。因此,水分增多对经修复材料黏结后的砂岩试样抗拉强度与抗剪强度具有衰减作用。

值得说明的是,由于试样取自实际工程的砂岩,同一批试样中每个试样的均质性很难得到保证,导致同样试验条件下每个试样的试验结果并非达到较高的一致性。后续的研究应更加严格选样,规范制样,并增加试样数量,以进一步增加结果的可信度。

参考文献 (References):

[1] 乔榛,王捷,孙博,等.玄武岩纤维和聚乙烯醇纤维对传统砂岩文物修复材料性能的影响[J].化工新型材料,2020,48(11):64-68.
Qiao Zhen, Wang Jie, Sun Bo, et al. Influence of BF/

PVAF on Traditional Restorative Material for Sandstone Cultural Relic[J]. New Chemical Materials, 2020, 48(11):64-68.
[2] 兰明章,聂松,王剑锋,等.古建筑修复用石灰基砂浆的研究进展[J].材料导报 A:综述篇,2019,33(5):1512-1516.
Lan Mingzhang, Nie Song, Wang Jianfeng, et al. A State-of-the-Art Review on Lime-Based Mortars for Restoration of Ancient Buildings[J]. Materials Reports A:Overview, 2019, 33(5):1512-1516.
[3] 解邦龙,张吾渝,张丙印,等.不同龄期下粉煤灰水泥土的 UU 抗剪强度试验研究[J].工程地质学报,2021,29(4):1216-1223.
Xie Banglong, Zhang Wuyu, Zhang Bingyin, et al. Experimental Study on Unconsolidated and Undrained Shear Strength of Fly Ash Cement Soil at Different Ages[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4):1216-1223.
[4] 杨建林,宋文伟,王来贵,等.古建筑用水硬性石灰的合成及力学性能研究[J].硅酸盐通报,2018,37(8):2633-2639.
Yang Jianlin, Song Wenwei, Wang Laigui, et al. Research on Preparation and Mechanical Properties of Hydraulic Lime Used for Ancient Buildings [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2018, 37(8):2633-2639.
[5] Bras A, Henriques F M A. Natural Hydraulic Lime Based Grouts the Selection of Grout Injection Parameters for Masonry Consolidation [J]. Construction and Building Materials, 2012, 26(1):135-144.
[6] 李凤洁,王旭东,郭青林.湿度影响下莫高窟壁画地仗层吸附水及吸力变化特征研究[J].工程地质学报,2021,29(4):1188-1198.

- Li Fengjie, Wang Xudong, Guo Qinglin. Adsorbed Moisture Feature and Suction Variation Characteristics of Earthen Plaster in Mogao Grottoes Under Influence of Humidity [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4):1188-1198.
- [7] 王浩,李祝君,王双,等. 三维激光扫描在摩崖石刻类文物地质勘察节理裂隙测量中的应用研究[C]//彭建兵. 第十届全国工程地质大会论文集. 成都:西南交通大学,2016:198-202.
- Wang Hao, Li Zhujun, Wang Shuang, et al. 3D Laser Scanning Application of Joint Measuring in the Cliff Stone Geological Survey [C]//Peng Jianbing. Proceedings of the 10th National Congress of Engineering Geology. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016:198-202.
- [8] 雷惊雷,黄美燕,陈卉丽. 摩崖石刻风化及其保护材料[J]. 材料导报 A:综述篇,2012,26(8):88-92.
- Lei Jinglei, Huang Meiyan, Chen Huili. Weathering of Rock Carvings and Their Protective Materials [J]. Materials Reports A:Overview, 2012, 26(8):88-92.
- [9] 吴云,李晓昭,黄震,等. 高温作用后花岗岩单轴压缩下变形破坏特征研究[J]. 工程地质学报,2020,28(2):240-245.
- Wu Yun, Li Xiaozhao, Huang Zhen, et al. Deformation and Failure Characteristics of Granite Under Uniaxial Compression After High Temperature [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2):240-245.
- [10] 张博,崔惠萍,裴强强,等. 不同开放环境下北石窟洞窟温湿度变化特征[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(1):2835-2840.
- Zhang Bo, Cui Huiping, Pei Qiangqiang, et al. Variation Characteristics of Temperature and Humidity in North Grottoes Under Different Opening Regulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1):2835-2840.
- [11] 陈剑平,刘经,王清,等. 含水率对分散性土抗剪强度特性影响的微观解释[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2021,51(3):792-803.
- Chen Jianping, Liu Jing, Wang Qing, et al. Microscopic Interpretation of Water Content Influence on Shear Strength of Dispersive Soil[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(3):792-803.
- [12] 吴蒙,秦勇,申建,等. 致密砂岩储层束缚水饱和度影响因素:以鄂尔多斯盆地临兴地区为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2022,52(1):68-79.
- Wu Meng, Qin Yong, Shen Jian, et al. Influencing Factors of Irreducible Water Saturation in Tight Sandstone Reservoirs: A Case Study of Linxing Area in Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(1):68-79.
- [13] 徐新木,张耀平,付玉华,等. 冻融循环下含节理类岩石试样剪切破坏特性[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2021,51(2):483-494.
- Xu Xinmu, Zhang Yaoping, Fu Yuhua, et al. Shear Failure Characteristics of Rock-Like Specimens Containing Joints Under Freezing-Thawing Cycles[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(2):483-494.
- [14] 张云升,王晓辉,肖建强,等. 古建水硬性石灰材料的制备与耐久性能[J]. 建筑材料学报,2018,21(1):143-149.
- Zhang Yunsheng, Wang Xiaohui, Xiao Jianqiang, et al. Preparation and Durability of Hydraulic Used as Repairing Materials for Architectural Heritage[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(1):143-149.
- [15] 郭慧敏. 饱水-风干循环作用下砂岩力学性质劣化规律[J]. 长江科学院院报,2020,37(1):90-94.
- Guo Huimin. Deterioration of Mechanical Properties of Sandstone Under Cyclic Water Saturation and Drying [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(1):90-94.
- [16] 张海清,贾会会,聂庆科. 土体抗拉强度对均质边坡稳定性的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2021,51(5):1324-1337.
- Zhang Haiqing, Jia Huihui, Nie Qingke. Influence of Soil Tensile Strength on Stability of Homogeneous Slope[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5):1324-1337.
- [17] 岩石物理力学性质试验规程: DZ/T 0276.21—2015 [S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- Regulation for Testing the Physical and Mechanical Properties of Rock: DZ/T 0276. 21—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.