

Research Article

Research Progress and Key Issues on Thermodynamic Characteristics and Thermal Compatibility of Grouting Materials for Cave Rocks Under Temperature Cycling

Yang Wang^{1,2,*}, Li Li¹, Mingshen Shao¹, Weichang Chen¹, Jianhui Liu¹,
Xingzhou Liang¹

¹Institute for Conservation and Restoration of Grottoes and Rock Carvings (Stone and Earthen Heritage), Academy of Cultural Heritage, Beijing, China

²School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, China

Abstract

This study investigates the thermodynamic properties of grouting materials used in fractured rock masses of cave temples and their thermal compatibility with the host rock, aiming to provide a theoretical foundation for the optimal design of reinforcement materials in cave temple conservation. Grotto temples represent a vital component of China's cultural heritage. The rocks of these structures are highly susceptible to thermal deterioration under natural cyclic temperature variations. In particular, the significant discrepancies in thermophysical properties among the constituent parts of the composite structure—specifically between grouting materials and the surrounding rock—induce thermally driven degradation, an issue that warrants considerable attention. The thermophysical properties of grouting materials are markedly influenced by various factors, including compositional ratios and moisture content. However, systematic investigations into the thermodynamic behavior of grouting materials used for fractured rocks in cave temples remain notably insufficient. Consequently, investigating the thermal compatibility between grouting materials and grotto temple rocks is of paramount importance for enhancing reinforcement efficacy and ensuring the long-term conservation of this cultural heritage. Future research should prioritize elucidating the thermodynamic characteristics of grouting materials and their responses to differential thermal expansion relative to the rock mass. Such insights will provide a robust theoretical foundation for the modification and development of advanced grouting materials tailored for heritage preservation.

Keywords

Grotto Temple Rocks, Grouting Material, Thermodynamic Properties, Thermal Compatibility, Thermal Degradation

*Correspondence: Yang Wang (wangyang@cach.org.cn)

Received: 3 July 2026; Accepted: 27 August 2026; Published: 14 September 2026



Copyright: © The Author(s), 2026. Published by Science Publishing Group. This is an **Open Access** article, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

温度循环下石窟寺裂隙岩体灌浆材料热力学特性及热兼容性研究进展与关键问题

汪洋^{1,2,*}, 李黎¹, 邵明申¹, 陈卫昌¹, 刘建辉¹, 梁行洲¹

¹ 中国文化遗产研究院石窟石刻(岩土)文物保护修复研究所, 北京, 中国

² 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京, 中国

摘要

石窟寺在我国文化遗产中占有重要地位, 石窟寺岩体在自然环境温度循环下易发生热病害, 特别是灌浆材料与石窟寺岩体复合结构各部分热力学性质差异导致热劣化问题不容忽视。灌浆材料热力学性质受其组分含量、含水率等因素显著影响, 针对石窟寺裂隙岩体灌浆材料热力学特性系统研究尚显不足, 研究灌浆材料与石窟寺岩体的热兼容性, 对于提高加固效果和保护石窟文化具有重要意义。未来的研究应着重于灌浆材料的热力学特性及其对岩体差异热膨胀响应, 为改性研发灌浆材料提供理论依据。

关键词

石窟寺岩体, 灌浆材料, 热力学性质, 热兼容性, 热劣化

1. 引言

石窟寺是以佛教传播、发展为主线开凿兴建的建筑物, 集寺庙建筑、壁画、彩塑、雕刻、书法等于一体, 体现了中华民族的审美追求、价值理念及文化精神, 在我国文化遗产中占有重要地位。然而, 石窟寺多依托山体开凿、雕刻而成, 其所依附的地质体受到自然环境作用和人类活动影响, 面临岩体失稳、渗漏水毁、风化侵蚀等病害威胁[1], 最终使石窟艺术丧失其原有价值。目前石窟寺面临最为棘手的问题是与自然环境息息相关的各种病害, 外界因素诸如太阳辐射、大气降水、风沙、植被及微生物等综合作用于石窟寺岩体, 使其表面及内部发生不同程度的变形和破坏, 其中岩体温度波动导致风化开裂问题不容忽视。

石窟寺岩体裂隙灌浆加固是当前石窟寺岩体防渗、失稳抢救的主要手段, 是其他病害治理工程的基础和前提。然而, 由于岩体和灌浆材料具有不同热力学性质, 温度循环作用下灌浆材料与岩体热膨胀不协调, 极易导致岩体和灌浆材料各层之间产生应力, 进而引起石窟寺岩体破坏。石窟寺岩体裂隙灌浆加固效果, 主要取决于灌浆材料与石窟岩体的兼容性和耐候性, 而温度场作用下加固材料的热力学性质及其与石窟本体的变形协调性是评价材料适用性的关键科学指标。

目前, 关于石窟寺岩体热效应研究可主要归集于露天石质文物热稳定性研究、灌浆材料热力学性质研究和石窟寺岩体与灌浆材料热兼容性研究。本文在综述石窟寺岩体与灌浆材料热力学性质研究进展的基础上, 对石窟寺岩体热效应未来的研究与应用工作提出了建议。

2. 露天石质文物热稳定性研究

自然环境中裸露岩体温度波动, 在岩体表面至内部形成温度差异导致热应力, 引起裂隙产生、扩张和相互贯通[2-9]。测试资料显示[10], 裸露岩体由于太阳照射和环境温度变化产生的热应力在0.35~6.33MPa范围, 是导致岩体破坏和开裂的原因。

在文物保护领域, 随着近年来文保工作从抢救性向预防性过渡, 对文物赋存环境中温度这一影响因素的关注日益增加[11, 12]。在气候因素中, 季节性、周期性的温度变化导致石质文物岩体劣化, 诱发开裂、剥离、脱落等病害[13, 14], 洛阳地区统计资料显示[15], 太阳照射和环境温度变化导致龙门石窟围岩热应力为0.08~6.75MPa, 足以引起围岩破裂。国内外学者通过热循环试验[16, 17], 扫描电

子显微镜 (SEM) 试验和X射线衍射 (XRD) [18] 试验等方法研究石质文物温度风化剥落机制, 发现日晒和热膨胀产生的张拉应力是导致岩体开裂、文物本体劣化的主要原因[19, 20]。露天石质文物病害类型还与其所处朝向、所在

高度的太阳辐射强度有很强的关联性 (见图1) [21-23], 太阳照射阴阳面差异、季节性波动在石质文物表面引起的温度和热应力变化导致风化速率的差异。



(a) 承德永佑寺石碑热病害 [22] (b) 麦积山石窟太阳辐射劣化 [23]

图1 石质文物热开裂。

除岩体与外界环境热交换作用外, 岩体热物理性质是影响裸露岩体热应力的主要内因[24], 测试研究表明, 岩体热力学参数决定了岩体内部热扩散规律和温度场、热应力场分布形式, 是研究岩体热效应的重要指标[25-27], 因此在太阳照射下石窟寺岩体热效应研究中, 对岩体热力学参数的讨论必不可少。岩体主要热力学参数为导热系数和热膨胀系数: 导热系数表征岩体的导热性能, 即岩体内垂直于热流方向两平行平面温差为 1°C , 在一定时间内通过 1m^2 面积传递的热量, 岩体导热系数越大导热性能越好; 热膨胀系数表征岩体在温度改变时热胀冷缩程度, 是单位长度、单位体积岩体温度升高 1°C 时, 其长度或体积的相对变化量。影响岩体热力学参数的因素多种多样, 如岩体矿物组成、结构、孔隙率、含水率、温度和压力等。岩体的导热系数主要取决于矿物组成和孔隙率: 由于水和空气热导率低于矿物热导率, 岩体孔隙率越大导热系数越小; 不同种类岩体矿物成分不同, 导热系数各不相同, 同一类岩体由于矿物组成比例、结构差异, 导热系数也存在差异。导热系数大的矿物含量高, 岩体导热系数越高, 常见造岩矿物导热系数如石英为 $7.70\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 白云石为 $5.44\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 方解石为 $3.60\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 长石为 $2.24\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 萤石为 $8.63\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 对于孔隙率较小的岩体, 导热系数与石英含量成正比, 对于碳酸盐岩, 白云石含量越大导热系数越大。岩体的热膨胀系数受岩体矿物组成影响, 热膨

胀系数大的矿物含量高, 岩体热膨胀系数越高, 常见造岩矿物热膨胀系数如石英为 $23.3\times 106\text{K}^{-1}$, 云母为 $3.8\times 106\text{K}^{-1}$, 钾长石为 $10.6\times 106\text{K}^{-1}$, 斜长石为 $5.0\times 106\text{K}^{-1}$ 。

石窟寺岩体在自然环境中温度波动, 产生的热应力导致裂隙发育, 劣化失稳问题较为突出。研究石窟寺岩体温度风化过程和热稳定性, 对石窟寺的长久保存具有重要意义, 为其失稳病害的防护与加固提供重要理论支撑。

3. 灌浆材料热力学性质研究

石窟寺岩体裂隙灌浆加固技术具有干预度小、隐蔽性好的特点, 是当前石窟寺岩体防渗、失稳抢救的主要手段, 是其他病害治理工程的基础和前提。一方面将流态黏接材料填充灌入裂隙空腔, 通过失水固结过程将断裂岩体胶合粘连成整体; 另一方面浆液固化后的结石体封堵裂隙通道, 有效减缓裂隙面风化和次生病害发育。

国内外众多学者对石质文物保护修复中使用的灌浆材料特性进行了广泛研究, 早在20世纪70年代, 欧美国家将水硬石灰应用于历史建筑物修复, 并研究其物理力学性质[28, 29]以及不同固化条件[30-33]、不同添加剂[31, 34, 35]对其物理力学性质的影响。国内学者发现并测试了中国传统石灰类材料物理力学性能[36, 37], 发现其具有孔隙率大、收缩变形性小、透气和透水性好等特点, 与欧洲水

硬石灰性质相近。在此基础上, 中国文化遗产研究院对中国传统石灰类材进行改性和应用研究[38-41], 得到针对不同岩性石窟寺岩体及其裂隙加固特点的灌浆材料最佳配比[40, 42], 提升灌浆材料的适用性[43-47]。导热系数、热膨胀系数表征了灌浆材料的热性能, 影响材料的热传导和热变形, 对灌浆材料内部的温度场、热应力场影响较大。针对混凝土的导热系数, 已有许多学者开展了大量的理论和试验研究, 发现骨料类型、孔隙率、含水率对混凝土导热系数的影响最大[48-50]。混凝土导热系数随着骨料含量、骨料导热系数的增加而增加。由于砂的导热系数小于粗骨料的导热系数, 砂含量越大混凝土导热系数越小[51]。粗骨料形状、级配对混凝土导热系数产生影响, 粗骨料粒径越大, 轴长比越大, 混凝土导热系数变异性越显著[52]。Ramazan等[53]研究了改性发泡聚苯乙烯代替混凝土骨料对导热系数的影响, 发现混凝土导热系数随着聚苯乙烯掺量的增加逐渐减小。混凝土中加入矿渣、粉煤灰、漂珠会改变导热系数[54], 添加石墨使混凝土的导热系数升高[55], 添加矿物掺合料使混凝土导热系数下降[56]。Alexander等[57], Min等[58], Hunger等[59]将微胶囊相变材料加入混凝土中, 发现微胶囊相变材料降低了混凝土的导热系数。文献[50, 51, 60-66]研究表明, 混凝土的水胶比越大导热系数越小。混凝土孔隙率与孔径越大, 含水率对导热系数的影响越显著[67, 68]。养护湿度[69]和微环境相对湿度[50]对混凝土导热系数产生影响。混凝土导热系数随孔隙率的增大而降低, 平均孔径的增大会减小孔隙率对导热系数的影响[70-72]。研究混凝土中孔隙形状[73, 74]、空间分布[75]影响导热系数。混凝土中微裂纹和宏观裂纹的萌发、扩展和贯通会阻碍热流通过, 从而导致导热系数显著下降, 引起导热系数各向异性, 造成热流方向改变[76], 混凝土抗拉和抗压破坏过程中骨料和砂浆的脱粘导致混凝土导热系数降低[77]。

材料内部各组分热膨胀系数影响材料整体热膨胀性能, 混凝土是一种复合材料, 温度变化时其内部各组分发

生不同程度膨胀, 各组分之间相互约束, 变形不能自由发生, 因此混凝土热膨胀系数受其各组分性质影响很大, 混凝土骨料类型、各组分含量以及含水率决定了混凝土热膨胀系数大小。混凝土中骨料约占总体积75%, 骨料性质对混凝土的热膨胀系数影响显著[78-82], 骨料热膨胀系数越大, 混凝土热膨胀系数越大, 骨料体积分数越大, 混凝土热膨胀系数越小[83, 84], 骨料粒径越大, 混凝土热膨胀系数越大[85]。粉煤灰掺入比例的变化, 改变胶凝材料中各组分占比及其内部孔隙数量和结构, 对热膨胀系数产生较大影响, 随着粉煤灰掺量增加, 混凝土热膨胀系数减小[86-88]; 矿渣掺量增大, 混凝土热膨胀系数呈先增大后减小趋势[89]; 大坝混凝土中掺入MgO膨胀剂, 使混凝土热膨胀系数增大[90]; 水泥基材料中掺入一定量碳纳米管可以减小水泥基复合材料内部孔隙半径和孔隙率, 增大热膨胀系数[91, 92]。水灰比影响混凝土内部孔隙结构, 水灰比越大, 孔隙尺寸和孔隙率越大, 热膨胀系数越小[93-95]。

文献调查显示, 目前国内外对于石质文物修复加固灌浆材料的研究越来越全面[96-100], 然而目前还未有针对石窟寺裂隙岩体而开展的灌浆材料热力学特性系统研究。

4. 热兼容性研究

自然环境中, 温度循环作用下岩体层状结构会发生差异剥落, 见图2。灌浆技术已广泛应用于石窟寺岩体裂隙加固保护, 由于石窟寺岩体和灌浆材料具有不同热力学性质, 随着环境因素如气温和太阳照射条件的变化, 热物理性能差异导致岩体和灌浆材料各层之间产生应力, 进而导致破坏开裂。在长期地质作用下, 使用灌浆加固材料后的石窟岩体实际上是一种非均质、各向异性和非连续性的复合结构体, 其劣化机制发生了怎样的变化有待探究。



图2 温度作用下岩体层状差异剥落。

国内外学者对热物理性能差异导致复合岩体结构热应力和热劣化问题展开研究。在水利水电工程中,环氧砂浆是最早用于水工混凝土结构修补的材料之一,具有高强度、低弹性模量和大极限抗拉强度等优点,但其热膨胀系数与混凝土差异较大[101, 102]。当温度急剧变化时,导致结构差异热膨胀引起界面失效甚至恶化[103, 104],环氧砂浆与旧混凝土分离[105, 106]。因此,需要通过改变环氧砂浆的填料比例匹配环氧砂浆与混凝土的热膨胀系数,降低两者因变形不同而导致的温度应力,减少由此产生的微裂纹,提高修复后混凝土的耐久性[107]。露天混凝土结构内部水泥砂浆和骨料的热膨胀系数存在较大差异,在温度循环作用下热传导不连续导致热膨胀差异产生不协调变形,在骨料和水泥砂浆界面产生较大的温度应力,进而出现损伤并不断扩展延伸,最终表现为混凝土结构力学性能退化

[108-112]。在壁画保护修复中使用灌浆技术导致壁画不同层具有不同热膨胀性质,温度变化时壁画各层之间产生应力导致差异变形(图3),破坏壁画原始结构并加剧壁画劣化[113-115]。

自然环境温度循环作用下,复合岩体结构中各组成部分热力学性质差异导致热应力和热劣化,加固材料的热力学性质及其与石窟本体的热兼容性是重要评价指标。因此,深入研究灌浆材料的热力学性能,明确温度循环作用下灌浆材料与石窟岩体的相互作用,探明不同固化条件、不同添加剂对灌浆材料热力学性质的影响规律,得到针对不同岩性石窟寺岩体及其裂隙加固特点的灌浆材料最佳配比,为石窟寺岩体裂隙灌浆加固材料选用和制备,以及灌浆加固效果评估提供理论和技术支撑,对于提高灌浆加固后石窟寺岩体的稳定性和耐久性具有重要意义。

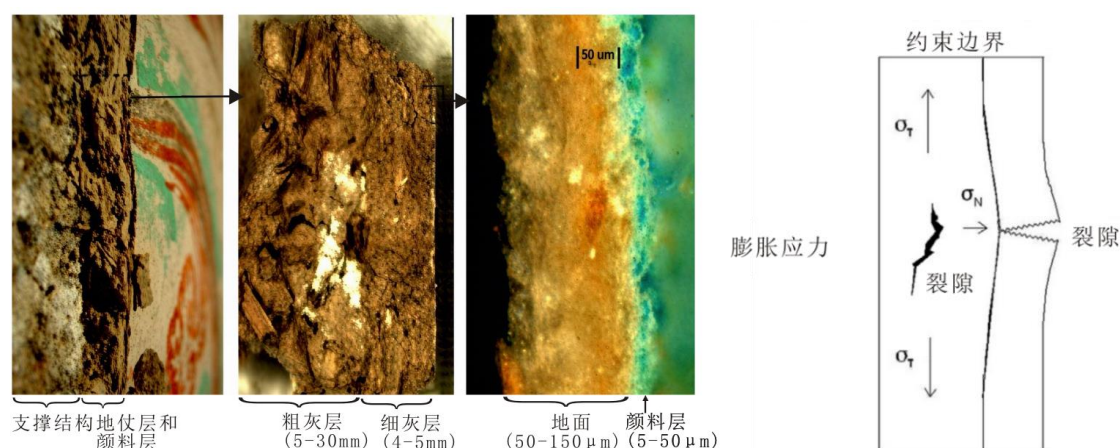


图3 层间差异膨胀应力和裂纹形成[113, 114]。

5. 结论与建议

石窟寺作为中华民族的文化遗产,面临自然环境因素威胁,石窟寺岩体在自然环境中温度波动,产生的热应力导致裂隙发育,劣化失稳问题较为突出。复合岩体结构各部分热力学性质差异导致热应力和热劣化问题不容忽视,石窟寺岩体裂隙灌浆加固效果,主要取决于裂隙灌浆材料与石窟岩体的兼容性和耐候性,而温度场作用下加固材料的热力学性质及其与石窟本体的变形协调性是评价材料适用性的关键科学指标,目前国内外对于石质文物修复加固灌浆材料的研究越来越全面,然而目前还未有针对石窟寺裂隙岩体而开展的灌浆材料热力学特性系统研究。基于此,未来研究需聚焦以下方向,并强化成果转化以推动技术落地:

- 1) 基础研究强化。开展多尺度(微观-细观-宏观)热力学参数测试,建立灌浆材料与石窟寺岩体复合结构

热劣化模型,揭示温度循环作用下复合结构的损伤演化机制。

- 2) 新材料研发。针对不同岩性需求研发改性灌浆材料,优化骨料类型(如低热膨胀石英骨料)、添加剂(相变材料、纳米材料)及孔隙调控技术,开发具有自适应热膨胀性能的复合灌浆材料,通过调控矿物组成与孔隙结构实现热应力兼容,在石窟寺热劣化严重区域,实施灌浆材料热兼容性验证工程,通过长期监测评估材料耐久性。
- 3) 标准化与工程化转化。利用热红外成像、分布式光纤传感技术实时追踪加固区温度场与应力场变化,动态优化材料性能与施工工艺。制定石窟寺岩体灌浆材料热兼容性评价标准,建立涵盖材料制备、施工工艺、长期监测技术规范,推动科研成果向保护工程实践转化。

通过以上措施,可突破当前灌浆材料研发与应用的技术瓶颈,实现从实验室研究到工程实践的跨越式发展,为

石窟寺的可持续保护提供系统性解决方案,同时推动文物保护技术向标准化、科学化方向升级。

致谢

本文为国家自然科学基金联合基金项目《露天大理岩质文物多尺度劣化机理与表层劣化治理技术研究》(U2574213)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目《石窟寺岩体裂隙灌浆材料热力学特性及热兼容性研究》(2024-JBKY-14)、腾讯慈善公益基金会、中国文物保护基金会“石窟寺科技保护与传承专项基金”项目《茗山寺保护研究利用示范项目》的阶段成果之一。

参考文献

- [1] 黄克忠. 石质文物保护若干问题的思考 [J]. 中国文化遗产, 2018, (04): 4-12.
- [2] COLLINS, B. D., STOCK, G. M. Rockfall triggering by cyclic thermal stressing of exfoliation fractures [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(5): 395-400.
<https://doi.org/10.1038/ngeo2686>
- [3] GUERIN, A., JABOYEDOFF, M., COLLINS B D, et al. Remote thermal detection of exfoliation sheet deformation [J]. *Landslides*, 2020, 18(3): 865-879.
<https://doi.org/10.1007/s10346-020-01524-1>
- [4] GUNZBURGER, Y., MERRIEN-SOUKATCHOFF, V., GUGLIELMI, Y. Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: case study of the Rochers de Valabreslope (France) [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2005, 42(3): 331-349.
- [5] LOOPE, D. B., LOOPE, G R, BURBERRY, C. M., et al. Surficial fractures in the Navajo Sandstone, Southwestern USA: the roles of thermal cycles, rainstorms, granular disintegration, and iterative cracking [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 45(9): 2063-2077.
- [6] VLCKO, J., GREIF, V., GROF, V., et al. Rock displacement and thermal expansion study at historic heritage sites in Slovakia [J]. *Environmental Geology*, 2009, 58(8): 1727-1740.
- [7] MCFADDEN, L. D., EPPES, M. C., GILLESPIE, A. R., et al. Physical weathering in arid landscapes due to diurnal variation in the direction of solar heating [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2005, 117(1/2): 161-173.
<https://doi.org/10.1130/B25508.1>
- [8] SHALER, N. S. Notes on the concentric structure of granitic rocks [J]. *Proceedings of the Boston Society of Natural History*, 1869, 12: 289-291.
- [9] KAROLINE, M., HEATHER, V., JAN-CHRISTOPH, O., et al. Linking rock weathering, rockwall instability and rockfall supply on talus slopes in glaciated hanging valleys (Swiss Alps) [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2018, 29(3): 135-151.
<https://doi.org/10.1002/ppp.1976>
- [10] 车用太. 岩体工程地质力学入门 [M]. 北京: 科学出版社, 1983: 88.
- [11] 李黎, 谷本親伯. 龙游石窟的环境特征 [J]. *敦煌研究*, 2005, (4): 97-103.
- [12] 段育龙, 武发思, 汪万福, 等. 麦积山石窟赋存环境中空气细菌的时空分布特征 [J]. *微生物学报*, 2019, 59(1): 145-156.
- [13] 马赞峰, 汪万福. 敦煌莫高窟第 44 窟壁画材质及起甲病害研究 [J]. *敦煌研究*, 2014, (5): 108-118.
- [14] 胡军舰, 贺东鹏, 武发思, 等. 麦积山石窟第 32 窟内外温湿度比较研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(6): 66-72.
- [15] 丁梧秀, 陈建平, 冯夏庭, 等. 洛阳龙门石窟围岩风化特征研究 [J]. *岩土力学*, 2004, 25(1): 145-148.
- [16] 袁广祥, 尚彦军, 杨志法. 藏东南波密地区岩石风化速率及其影响因素分析 [J]. *工程地质学报*, 2010, 18(02): 191-196.
- [17] 张中俭, 杨志法, 卞丙磊, 等. 平遥古城墙基外侧砂岩的风化速度研究 [J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(10): 1628-1632.
- [18] Wang, Y., Shao, M., Zhang, J., et al. Quantitative evaluation of alteration and exfoliation in Jurassic sandstone, Chongqing Danzishi rock carvings, China [J]. *Engineering Geology*, 2021, 292: 106277. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106277>
- [19] Wedekind, W., Gross, C. J., Hoffmann, A., et al. Damage phenomenon and petrophysical properties of sandstones at the Phnom Bakheng Temple (Angkor, Cambodia): first investigations and possible conservation measures [J]. *Environmental Geology*, 2018, 77(21): 735.1-735.36.
- [20] Freire-Lista, D. M., Fort, R., Varas-Muriel, M. J. Thermal stress-induced microcracking in building granite [J]. *Engineering Geology*, 2016, 206: 83-93.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.03.005>
- [21] 孟圆悦, 闫增峰, 王江丽, 等. 龙门石窟大卢舍那像龕太阳辐射特征研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(06): 129-138.
- [22] 许东, 顾鸿宇, 陈卫昌, 等. 承德避暑山庄永佑寺后序碑热应力分布特征模拟及易损性评价 [J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(03): 353-359.
- [23] 麦积山石窟佛像辐射热应力作用规律及保护策略研究雷馥铭. 麦积山石窟佛像辐射热应力作用规律及保护策略研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2024.
- [24] 李最雄. 炳灵寺、麦积山和庆阳北石窟寺石窟风化研究 [J]. *文博*, 1985, (3): 66-75.
- [25] 汪洋, 陈文化. 基于裂隙形状函数的自然环境高温下花岗岩裂隙尖端非线性温度场 [J]. *岩土力学*, 2022, 43 (S1): 267-274.
- [26] 汪洋, 陈文化. 高温环境下花岗岩三角形裂隙热应力场研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40 (S2): 3074-3083.

- [27] WANG, Y., CHEN, W. The shape function method of nonlinear thermal stress of granite fracture tips in a high-temperature environment. *Scientific Reports*, 2024, 14: 2736.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-53198-7>
- [28] ALMUKHTAR, M., BECK, K. Physical-mechanical characterization of hydraulic and non-hydraulic lime based mortars for a French porous limestone [J]. *Physics*, 2006(1): 37-42.
- [29] EL-TURKI, A., BALL, R. J., ALLEN, G. C. A study of the workability of natural hydraulic lime mortars and its influence on strength [J]. *Materials and Structures*, 2008, 41(2): 373-381.
<https://doi.org/10.1617/s11527-007-9229-1>
- [30] EL-TURKI, A., BALL, R. J., ALLEN, G. C. The influence of relative humidity on structural and chemical changes during carbonation of hydraulic lime [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(8): 1233-1240.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.05.007>
- [31] BRAS, A., HENRIQUES, F. M. A., CIDADE, M. T. Effect of environmental temperature and fly ash addition in hydraulic lime grout behaviour [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(8): 1511-1517.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.014>
- [32] BRAS, A., HENRIQUES, F. M. A., CIDADE, M. T. Rheological behaviour of hydraulic lime-based grouts. Shear-time and temperature dependence [J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2013, 17(2): 223-242.
<https://doi.org/10.1007/s11043-012-9202-0>
- [33] GRILO, J., FARIA, P., VEIGA, R., et al. New natural hydraulic lime mortars-Physical and microstructural properties in different curing conditions [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 54(11): 378-384.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.046>
- [34] BALTAZAR, L. G., HENRIQUES, F. M. A., JORNE, F., et al. Combined effect of superplasticizer, silica fume and temperature in the performance of natural hydraulic lime grouts [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 50(1): 584-597.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.014>
- [35] 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.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.011>
- [36] 李最雄, 张鲁, 王亨通. 砂砾岩石窟岩体裂隙灌浆的进一步研究 [J]. *敦煌研究*, 1993, (3): 79-97.
- [37] 李最雄, 赵林毅, 李黎. 砂砾岩石窟岩体裂隙灌浆新材料研究 [J]. *敦煌研究*, 2011, (6): 59-64.
- [38] 李黎, 赵林毅, 王金华, 等. 我国古代建筑中两类传统硅酸盐材料的物理力学特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(10): 2120-2127.
- [39] 赵林毅, 李黎, 李最雄, 等. 中国古代建筑中两类传统硅酸盐材料的研究 [J]. *无机材料学报*, 2011, 26(12): 1327-1334.
- [40] 赵林毅, 王旭东, 李黎, 等. 基于仰韶水泥的砂岩石窟裂隙灌浆材料室内筛选研究 [J]. *文物保护与考古科学*, 2016, 28(3): 48-54.
- [41] 李黎, 赵林毅, 李最雄. 中国古代建筑中几种石灰类材料的物理力学特性研究 [J]. *文物保护与考古科学*, 2014, 26(3): 74-84.
- [42] 赵林毅, 王旭东, 李黎, 等. 基于仰韶水泥的砂岩石窟裂隙灌浆材料物理力学特性研究 [J]. *文物保护与考古科学*, 2018, 30(1): 47-52.
- [43] 赵莽, 方云. 干湿循环条件下龙门石窟防渗灌浆材料耐久性试验研究 [J]. *混凝土*, 2019, (1): 5.
- [44] 赵莽, 严绍军, 何凯, 等. 龙门石窟裂隙防渗灌浆新材料试验研究 [J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(6): 115-123.
- [45] 刘祥友, 翟国林, 方云, 等. 龙门石窟岩体裂隙防渗注浆机制及参数分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(增 2): 3941-3947.
- [46] CHENG, A., LIN, W. T., CHAO, O. S. J., et al. Composition and selected properties of low pH mortars and concretes for radioactive waste repositories [J]. *MATEC Web of Conferences*, 2020, 322: 01033.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/202032201033>
- [47] KHAN, K., ULLAN, M. F., SHAHZADA K., et al. Effective use of micro-silica extracted from rice husk ash for the production of high-performance and sustainable cement mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 258: 119589.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119589>
- [48] HARMATHY T Z. Thermal properties of concrete at elevated temperatures [J]. *Journal of Materials*. 1970, 5(1): 47-74.
<https://doi.org/10.1520/JMLSA-1970-0501-07>
- [49] MARS HALL A L. The thermal properties of concrete [J]. *Building Science*. 1972(7): 167-174.
- [50] 朱丽华, 戴军, 白国良, 等. 再生混凝土导热系数试验与分析 [J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(05): 852-856, 904.
- [51] 张伟平, 童菲, 邢益善, 等. 混凝土导热系数的试验研究与预测模型 [J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(02): 183-189.
- [52] 张伟平, 王浩, 顾祥林. 粗骨料随机分布对混凝土导热性能的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(02): 168-173, 197.
- [53] Ramazan Demirboga, Abdulkadir Kan. Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 35: 730-734.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.030>
- [54] Vanessa Rheinheimer, Yunpeng Wu, Tao Wu et al. Multi-scale study of high-strength low-thermal-conductivity cement composites containing cenospheres [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 80: 91-103.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.03.009>

- [55] 屈春来, 薛少欣, 辛悦, 等. 石墨对混凝土导热系数及抗压强度影响规律分析 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(13): 243-248.
- [56] Wang Wei, Lu Caifeng, Li Yunxia et al. An investigation on thermal conductivity of fly ash concrete after elevated temperature exposure [J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 148-154.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.085>
- [57] Alexander M. Thiele, Zhenhua Wei, Gabriel Falzone et al. Figure of merit for the thermal performance of cementitious composites containing phase change materials [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 65: 214-226.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.003>
- [58] Min HaeWon, Kim Sumin, Kim Hee Sun. Investigation on thermal and mechanical characteristics of concrete mixed with shape stabilized phase change material for mix design [J]. Construction and Building Materials, 2017, 149: 749-762.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.145>
- [59] M. Hunger, A. G. Entrop, I. Mandilaras et al. The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated Phase Change Materials [J]. Cement & Concrete Composites, 2009, 31(10): 731-743.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.08.002>
- [60] 王丕杰, 张泽平, 宫立, 等. 煤矸石保温混凝土导热系数试验研究 [J]. 混凝土, 2016, (12): 138-141.
- [61] Yafei Sun, Peiwei Gao, Fei Geng et al. Thermal conductivity and mechanical properties of porous concrete materials [J]. Materials Letters, 2017, 209: 349-352.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.08.046>
- [62] 宫经伟, 曹国举, 陈国新, 等. 混凝土导热系数与其饱和度及温度的关系 [J]. 水电能源科学, 2017, 35(12): 112-115, 111.
- [63] 曹国举, 宫经伟, 陈瑞, 等. 基于正交试验的寒区混凝土导热系数影响因素研究 [J]. 混凝土, 2019, (03): 35-39.
- [64] 曹国举, 宫经伟, 马利, 等. 不同温度条件下混凝土导热系数影响因素研究 [J]. 长江科学院院报, 2019, 36(12): 144-150.
- [65] 曹国举, 宫经伟, 蔺元, 等. 水泥石导热系数影响因素研究 [J]. 人民黄河, 2020, 42(02): 94-98, 116.
- [66] Li Shuangxin, Jones Benoît, Thorpe Roger et al. An investigation into the thermal conductivity of hydrating sprayed concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 124: 363-372. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.052>
- [67] 王莹莹, 马超, 刘艳峰, 等. 含湿量对混凝土导热系数的影响分析 [J]. 建筑材料学报, 2018, 21(04): 595-599.
- [68] T. Wu, I. Temizer, P. Wriggers. Computational thermal homogenization of concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 35(1): 59-70.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.010>
- [69] 汪学正, 梅德鑫, 高文元等. 养护湿度对发泡混凝土性能的影响 [J]. 大连工业大学学报, 2020, 39(01): 75-78.
- [70] 李鹏, 荆鹏飞, 耿静亚, 等. 蒸压加气混凝土等效导热系数的数值模拟研究 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(06): 91-96.
- [71] 杨正宏, 李婷婷, 于龙. 低密度泡沫混凝土导热系数模型研究 [J]. 建筑材料学报, 2020, 23(02): 322-327.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9629.2020.02.013>
- [72] 丁杨, 邓满宇, 周双喜, 等. 基于 COMSOL 模拟材料孔隙率与导热系数的演变关系 [J]. 材料导报, 2019, 33(S1): 211-213.
- [73] Hedong Li, Qiang Zeng, Shilang Xu. Effect of pore shape on the thermal conductivity of partially saturated cement-based porous composites [J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 81: 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.04.005>
- [74] She Wei, Zhao Guotang, Cai Degou et al. Numerical study on the effect of pore shapes on the thermal behaviors of cellular concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 113-121. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.108>
- [75] SangYeop Chung, TongSeok Han, SeYun Kim et al. Evaluation of effect of glass beads on thermal conductivity of insulating concrete using micro CT images and probability functions [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 65: 150-162.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.011>
- [76] 任青文, 沈雷, 孙立国, 等. 开裂混凝土有效导热系数的微观数值研究 [J]. 水利学报, 2015, 46(08): 892-899.
- [77] Shen Lei, Ren Qingwen, Zhang Linfei et al. Experimental and numerical study of effective thermal conductivity of cracked concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 153: 55-68. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.038>
- [78] Khoury G A. Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment [J]. Magazine of Concrete Research, 1992, 44(161): 291-309.
<https://doi.org/10.1680/mac.1992.44.161.291>
- [79] Venecanin S D. Thermal incompatibility of concrete components and thermal properties of carbonate rocks [J]. Aci Materials Journal, 1990, 87(6): 602-607.
- [80] Kristensen L, Hansen T C. Cracks in concrete core due to fire or thermal heating shock [J]. Aci Materials Journal, 1994, 91(5): 453-459.
- [81] Sumarac D, Krasulja M. Damage of plain concrete due to thermal incompatibility of its phases [J]. International Journal of Damage Mechanics, 1998(7): 129-142.
<https://doi.org/10.1177/105678959800700202>
- [82] Neville A M 著. 混凝土的性能 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [83] 付宝华, 胡宝, 李军. 骨料对混凝土热膨胀系数的影响 [J]. 居业, 2016(8): 3.

- [84] 黄杰, 赵林. 粉煤灰混凝土早期热膨胀系数试验研究及预测模型构建 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(2): 580-583.
- [85] 钱春香, 朱晨峰. 骨料粒径对混凝土热膨胀性能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(01): 18-22.
- [86] 高桂波, 钱春香, 朱晨峰, 等. 粉煤灰对混凝土热膨胀系数的影响 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, (S2): 185-190.
- [87] 钱春香, 朱晨峰. 掺和料及引气剂对水泥混凝土热膨胀系数的影响 [J]. 建筑材料学报, 2009, 12(03): 310-314.
- [88] Powers T C, Brownard T L. Studies of the physical properties of hardened portland cement paste-Part 4: the thermodynamics of adsorption of water on hardened paste [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1947, 18(5): 549-595.
- [89] 黄杰, 帅映勇, 杨斌. 不同掺量矿渣混凝土早期热膨胀系数试验研究及预测模型构建 [J]. 混凝土, 2022, (12): 82-85.
- [90] 钟可, 赵志方, 朱敏敏, 等. 掺 MgO 膨胀剂的面板混凝土早龄期热膨胀系数 [J]. 材料科学与工程学报, 2023, 41(06): 968-973.
- [91] Fu Y F, Wong Y L, Tang C A, et al. Thermal induced stress and associated cracking in cement-based composite at elevated temperatures-Part I: Thermal cracking around single inclusion [J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(2): 99-111. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00055-4](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00055-4)
- [92] 张淑文, 张杰, 王贵春. 碳纳米管水泥基材料的制备及其热膨胀系数研究 [J]. 新型建筑材料, 2019, 46(05): 41-45.
- [93] 姚武, 郑欣. 配合比参数对混凝土热膨胀系数的影响 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, (01): 77-81+87.
- [94] 吴小双. 基于多相夹杂理论的水泥混凝土热膨胀系数研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2016.
- [95] 黄杰, 袁学锋, 帅映勇, 等. 不同水灰比混凝土早期热膨胀系数试验研究 [J]. 工业建筑, 2017, 47(04): 127-129+147. <https://doi.org/10.13204/j.gyjz201704026>
- [96] Yang, F. W., Zhang, B. J., Ma, Q. L. Study of sticky rice lime mortar technology for the restoration of historical masonry construction [J]. Accounts of Chemical Research, 2010, 43(6): 936-944. <https://doi.org/10.1021/ar9000662>
- [97] Fang, S. Q., Zhang, H., Zhang, B. J., et al. A study of Tung-oil-lime putty-A traditional lime based mortar [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014, 48: 224-230. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.10.004>
- [98] 李黎, 赵林毅. 中国古代石灰类材料研究 [M]. 北京: 文物出版社, 2015: 297-354.
- [99] 陈嘉琦, 王金华, 严绍军, 等. 用于石窟岩体裂隙防渗的偏高岭土复合灌浆材料水化性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(02): 627-636.
- [100] 刘鸿, 裴强强, 郭青林, 等. 北石窟寺平顶窟顶板裂隙灌浆黏接材料性能研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42 (S2): 4028-4044.
- [101] 赵杨, 温卫东. 湿热条件下复合材料力学性能的研究进展 [C] // 中国航空学会. 中国航空学会, 2011.
- [102] 辛东嵘. 湿热环境中环氧树脂力学性能和界面破坏机理的研究 [D]. 华南理工大学, 2013.
- [103] 孙宇飞, 胡炜, 张勇. 环氧砂浆热膨胀性能试验研究 [J]. 西北水电, 2013(03): 88-90.
- [104] Li, G. Y., Huang X. H., Lin J. S., et al. Activated chemicals of cementitious capillary crystalline waterproofing materials and their self-healing behaviour [J]. Construction and Building Materials, 2019, 200: 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.093>
- [105] 张文慧. 湿热重载条件下混凝土桥梁沥青铺装防水粘结层的性能研究 [D]. 广州大学, 2017.
- [106] Sun, Y. F., He, J. J., Ma, L. Y., et al. Experimental Study on Thermal Expansion Property of Epoxy Mortar in Hydraulic Structure Repairing [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 636(1): 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/636/1/012009>
- [107] Pandey, A. K., Factors Affecting Bond between New and Old Concrete [J]. Aci Materials Journal, 2012, 109(3): 389-390.
- [108] 唐世斌, 唐春安, 梁正召, 张亚芳. 混凝土热传导与热应力的细观特性及热开裂过程研究 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(02): 11-19.
- [109] 张利然, 周金枝. 混凝土高温多场耦合损伤分析 [J]. 湖北工业大学学报, 2019, 34(01): 34-37+68.
- [110] 朱谊. 高温环境下混凝土力学试验与数值模拟研究 [D]. 河北工程大学, 2020.
- [111] 苗艳春, 张玉, 雷闯, 等. 热力耦合途径下再生保温混凝土的细观力学性能 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(05): 79-85.
- [112] 叶忠志, 张喜强, 苏龙龙, 等. 模型化混凝土热力耦合多尺度行为模拟 [J]. 混凝土世界, 2020(08): 75-79.
- [113] He, X., Xu, M., Zhang, H., et al. An exploratory study of the deterioration mechanism of ancient wall-paintings based on thermal and moisture expansion property analysis [J]. Journal of Archaeological Science, 2014, 42(Complete): 194-200. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.11.006>
- [114] Zhang H., Yan G., Wang X. Laboratory test on moisture adsorption-desorption of wall paintings at Mogao Grottoes, China [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering), 2012 13(3): 208-218 208. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1100278>
- [115] Zehnder, K., Voûte, A. Monitoring detaching murals in the convent of Mûstair (Switzerland) by mirror micrometry [J]. Journal of Cultural Heritage, 2009, 10: 493-500. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.01.004>