

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.10.012

# 蒙脱土内养护天然水硬性石灰的水化行为及使用性能研究

张彪<sup>1</sup>, 齐南<sup>1</sup>, 管璇<sup>1</sup>, 王文科<sup>1</sup>, 施佩<sup>1</sup>, 何静<sup>1</sup>, 马涛<sup>1,2</sup>, 罗宏杰<sup>1,3</sup>, 朱建锋<sup>1</sup>  
(1. 陕西科技大学 a. 材料科学与工程学院; b. 文物保护科学与技术学院; c. 地下文物保护材料与技术教育部重点实验室, 西安 710021; 2. 陕西省文物保护研究院 砖石质文物保护国家文物局重点科研基地, 西安 710075; 3. 上海大学 a. 文化遗产与信息管理学院; b. 硅酸盐质文物保护教育部重点实验室, 上海 200444)

**摘要:**石窟寺是我国独具特色的文物类型,具有重要的历史、艺术和科学价值。裂隙是造成石窟寺失稳、渗水、风化等病害产生及发育最为直接的因素。常规外养护灌浆加固的同时,难以解决养护后期深部裂隙缺水导致的收缩开裂及强度不足的问题。文中利用蒙脱土(MMT)对天然水硬性石灰(NHL)进行内养护改性,系统评估固化过程中的水化行为及使用性能。结果表明,MMT掺量为2%时,NHL的内养护效果最好,7 d自收缩仅为空白试样的56.70%,保水性能优异。此外,该试样的28 d抗压强度相比空白试样增加了22.03%。这是由于养护固化全过程中,预储水的MMT在试样内部湿度梯度作用下,不断释放层间吸附水,促进NHL的水化反应,减少自收缩,提高内养护效果。研究结果为石窟寺裂隙的内养护灌浆加固提供了重要的理论与实践基础。

**关键词:**天然水硬性石灰;蒙脱土;内养护;自收缩;灌浆加固

中图分类号: TU526

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)10-162-10

## Hydration behavior and performance of montmorillonite-modified natural hydraulic lime for internal curing

ZHANG Biao<sup>1</sup>, QI Nan<sup>1</sup>, GUAN Xuan<sup>1</sup>, WANG Wenke<sup>1</sup>, SHI Pei<sup>1</sup>, HE Jing<sup>1</sup>, MA Tao<sup>1,2</sup>,  
LUO Hongjie<sup>1,3</sup>, ZHU Jianfeng<sup>1</sup>

(1a. School of Material Science and Engineering; 1b. School of Conservation Science and Technology for Cultural Heritage; 1c. Key Laboratory of Underground Cultural Relics Conservation Materials and Technology, Ministry of Education, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, P. R. China; 2. Key Scientific Research Base of Conservation for Brick and Stone Cultural Relics(National Cultural Heritage Administration), Shaanxi Institute for the Preservation of Cultural Heritage, Xi'an 710075, P. R. China; 3a. School of Cultural Heritage

收稿日期: 2023-12-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52102108, 52102026, 52272020); 中国博士后科学基金面上资助项目(2021M691997); 陕西省教育厅重点科研计划项目(22JY009, 22JY010); 硅酸盐质文物保护教育部重点实验室(上海大学)资助项目(SCRC2024KF10YQ)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(52102108, 52102026, 52272020), China Postdoctoral Science Foundation(2021M691997), Key Scientific Research Program of Education Department of Shaanxi Provincial Government(22JY009, 22JY010), and the Project of Key Laboratory of Silicate Cultural Relics Conservation (Shanghai University), Ministry of Education (SCRC2024KF10YQ).

作者简介: 张彪(1990—), 男, 讲师, 主要从事石窟寺保护的研究, (E-mail) zhangbiao@sust.edu.cn.

通信作者: 朱建锋, 男, 教授, 博士生导师。(E-mail) zhujf@sust.edu.cn.

and Information Management; 3b. Key Laboratory of Silicate Cultural Relics Conservation, Ministry of Education, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China)

**Abstract:** Cave temples, a unique type of cultural relics in China, possess extremely important historical, artistic and scientific value. Cracks are the main cause of instability, seepage, weathering and other forms of damage in these structures. Conventional external curing grouts and reinforcement methods are ineffective in addressing shrinkage cracking and insufficient strength caused by water shortages in deep cracks during the later curing stages. This study prepares montmorillonite (MMT)-modified natural hydraulic lime (NHL) for internal curing through a one-step in situ polymerization process and systematically evaluates the hydration behavior and performance of the modified NHL during curing. Results show that the internal curing effect of NHL is optimal at a 2% MMT content. After 7 days of curing, the autogenous shrinkage of the modified sample is only 56.70% of that of the blank sample, demonstrating excellent water retention. Moreover, the compressive strength of the modified NHL after 28 days of curing increased by 22.03% compared with the blank sample. This improvement is attributed to MMT's ability to continuously release interlayer-adsorbed water under the sample's internal humidity gradient during the entire curing process, promoting the hydration reaction of NHL, reducing autogenous shrinkage, and improving the internal curing effect. This study provides an important theoretical and practical foundation for the development of internal curing grouts and reinforcement techniques for cracks in cave temples.

**Keywords:** natural hydraulic lime; montmorillonite; internal curing; autogenous shrinkage; grouting reinforcement

石窟寺具有重要的历史、艺术和科学价值,是我国古代灿烂文明的重要体现,是中华文明同其他古代文明交流互鉴的历史见证<sup>[1-2]</sup>。由于环境作用,石窟寺长年遭受失稳、渗水、风化等病害侵蚀,裂隙是上述病害产生及发育的关键因素<sup>[3-5]</sup>。因此,寻找一种性能优异的灌浆加固材料用于石窟寺裂隙修复极为重要。天然水硬性石灰(NHL)兼具水硬性和气硬性,具有收缩率低、透水透气性好、与石窟岩体相容性好及力学性能适中优势,已成功应用于广西左江花山岩画、北京天安门金水桥、平遥古城和美国 Tumacácori 国家公园教堂等的修复中<sup>[6-8]</sup>。但使用 NHL 进行裂隙灌浆修复时,试样内部的水分难以满足 NHL 的水化反应,容易产生干燥收缩开裂,致使灌浆材料与岩体裂隙发生脱落引起二次渗水,并影响其强度。为解决上述问题,研究人员常采用外部洒水养护的方式实现灌浆材料的固化。但外养护技术需要耗费大量人力物力,养护成本高<sup>[9-10]</sup>。更为重要的是,在深部裂隙的灌浆过程中,水分难以均匀扩散至裂隙深处,无法从本质上解决 NHL 内部缺水的问题。如何实现灌浆材料固化过程的充分水化和均匀水化,对于石窟寺裂隙灌浆加固具有重要应用价值。

膨润土(bentonite, BT)是一种常见的黏土矿物,其最大的特征吸水膨胀性归功于主要成分蒙脱土(montmorillonite, MMT)。MMT 具有优异的储水保水性,在水中不容易出现分层沉积现象,悬浮稳定性良好,在改善砂浆防水性能和耐盐性能等方面具有良好的效果<sup>[11-12]</sup>。Andrejkovicova<sup>[13]</sup>将 BT 添加到石灰浆体中用于土质建筑的修复,抗老化、抗盐侵蚀和抗碳酸化性能表现优异,并且与墙体的黏接性和抗渗水能力增强。Xie 等<sup>[14]</sup>将预储水的 BT 作为填充剂,在不加入增气剂的情况下制备多孔轻质混凝土。由于 BT 的火山灰活性,能够与水化产物发生二次水化反应,填充到砂浆大孔隙中,降低砂浆孔隙率,改善其孔隙结构<sup>[15]</sup>。同时, BT 在增强混凝土砂浆的保水性,改善砂浆的早期和后期强度,降低混凝土孔隙率、增强防水渗透性方面表现出优异的效果<sup>[16-18]</sup>。此外,与高吸水性树脂(SAP)和多孔轻集料<sup>[19]</sup>相比,其化学组成与 NHL 相似,预期可作为 NHL 理想的内养护剂。然而,利用 MMT 对 NHL 进行内养护,改善灌浆材料的水化行为及使用性能尚未见报道。

因此,研究以预储水的 MMT 作为内养护剂,添加进 NHL 灌浆材料中,研究 MMT 掺量对灌浆材料固化过程中的水化行为及使用性能的影响,系统评估其内养护效果。为蒙脱土改性天然水硬性石灰灌浆材料在石窟寺裂隙加固中的推广应用提供参考。

## 1 实验

### 1.1 原材料

实验所用天然水硬性石灰为 NHL2 型,购自上海德赛堡建筑材料有限公司,采用 X 射线荧光光谱仪 (XRF, XGT-7200V, 日本) 测试 NHL2 的化学组成,如表 1 所示。所用蒙脱土购自南阳浩发膨润土有限公司,平均粒径 200 目,化学组成如表 2 所示,其 SEM 照片及 XRD 图谱如图 1 所示。所用减水剂为聚羧酸型减水剂 (PCE),由广州达盛建材提供,其技术指标符合 JG/T223—2007 国家标准。

表 1 原料 NHL2 的化学组成

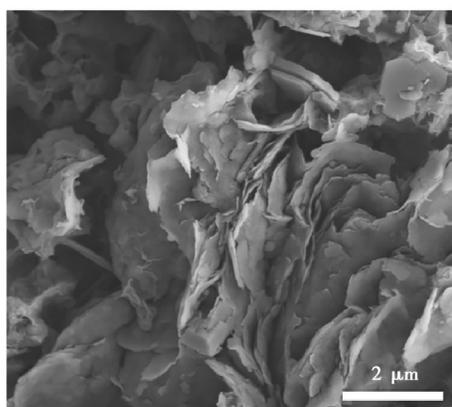
Table 1 Chemical composition of NHL2

原材料	w(Na <sub>2</sub> O)	w(CaO)	w(SiO <sub>2</sub> )	w(MgO)	w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(K <sub>2</sub> O)
NHL2	2.16	78.16	9.74	6.91	1.81	1.66	0.89

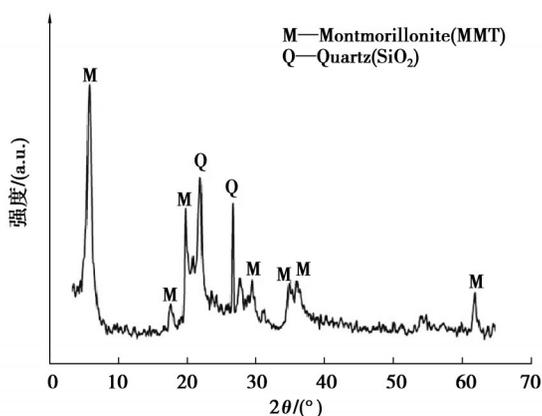
表 2 MMT 的化学组成

Table 2 Chemical composition of MMT

原材料	w(Na <sub>2</sub> O)	w(MgO)	w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(SiO <sub>2</sub> )	w(CaO)	w(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
MMT	8.47	2.00	19.30	66.46	0.73	3.96



(a) SEM照片



(b) XRD图谱

图 1 MMT 的 SEM 照片和 XRD 图谱

Fig. 1 SEM photos and XRD patterns of MMT

### 1.2 蒙脱土内养护天然水硬性石灰的制备

MMT 预先在水中浸泡 24 h,使其充分吸水。依次加入一定质量的 NHL2 和 MMT,与 PCE 的水溶液拌合均匀,控制水灰比 ( $w/c$ ) 为 0.46。将制备好的浆料注入 40 mm×40 mm×40 mm 的钢制模具,空气中固化 24 h 后脱模,在外部自然条件下进行养护,测试不同养护龄期灌浆试样的水化特性及使用性能。其中,PCE 用量是 NHL2 质量的 0.26%,MMT 的掺量分别为 NHL2 质量的 0、1%、2% 和 3%,依次编号为 NHL2/MMT-0、NHL2/MMT-1、NHL2/MMT-2、NHL2/MMT-3,样品配比如表 3 所示。

表 3 样品的配制表

Table 3 Sample preparation

样品	NHL2/g	MMT 掺量/%	PCE 用量/%	水灰比
NHL2/MMT-0	600	0	0.26	0.46
NHL2/MMT-1	600	1	0.26	0.46
NHL2/MMT-2	600	2	0.26	0.46
NHL2/MMT-3	600	3	0.26	0.46

### 1.3 样品的性能及表征

采用 X 射线衍射 (XRD, D8Advance, 日本)、傅里叶红外光谱仪 (FT-IR, VERTEX 70, Bruker, 德国) 对 NHL2 水化产物进行定性分析;采用综合热分析仪 (TG-DTA, Jupiter STA449C, 德国) 对水化产物含量进行定量分析,升温速率  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,测试温度区间为室温至  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;采用扫描电子显微镜 (SEM, FEI Verios460, 美国) 观察 MMT 与 NHL2 浆料的界面结合情况以及水化产物的生长分布情况,分析 MMT 在 NHL2 浆体内养护过程的作用机理;采用电阻应变片 (BSQ120-10AA, Sigma, 中国) 对浆体的自收缩过程进行监测,由数据采集系统 (ASMCI-9, sigma, 中国) 采集和处理,使用的传感器网格长度为  $7\text{ mm}$ ,宽度为  $3\text{ mm}$ ,纸基长度为  $10\text{ mm}$ ,宽度  $4\text{ mm}$ ;强度测试参考标准 EN 469-2:2010 执行,使用万能试验机 (1036PC, 宝大, 中国) 测试 NHL2 固化龄期 7 d、28 d 的抗压强度,加载速率为  $0.01\text{ kN/s}$ ,同时对试样的稳定性和保水性能进行评估。

## 2 结果与讨论

### 2.1 蒙脱土对天然水硬性石灰浆体水化产物物相的影响

NHL2 水化反应时,其水硬性成份硅酸二钙 ( $\text{C}_2\text{S}$ ) 与水发生反应生成水化硅酸钙 (C-S-H) 和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 根据 NHL2 浆体中水化产物的变化,判断水化反应进程<sup>[20]</sup>。图 2(a) 是不同掺量 MMT 改性 NHL2 固化 28 d 的 XRD 图谱,由图可知,MMT 的加入并没有改变 NHL2 水化产物的物相组成,但其相对含量发生变化。图 2(b) 为 NHL2/MMT-2 试样固化 3 d、7 d、28 d 的 XRD 图谱。可以发现,浆体固化 28 d 后,水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  在  $18^{\circ}$  左右的衍射峰强度明显增强。固化 3 d 时,试样内部湿度较大,蒙脱土内养护效果不明显,随着固化龄期增加,浆体内部自由水不断释放,水化反应持续进行,MMT 的内养护作用逐渐发挥出来,促进了水化反应速率,浆体水化产物逐渐增多。MMT 优异的储水保水性在 NHL2 固化过程中持续进行补水养护,使得浆体的水化反应进行得更加充分。

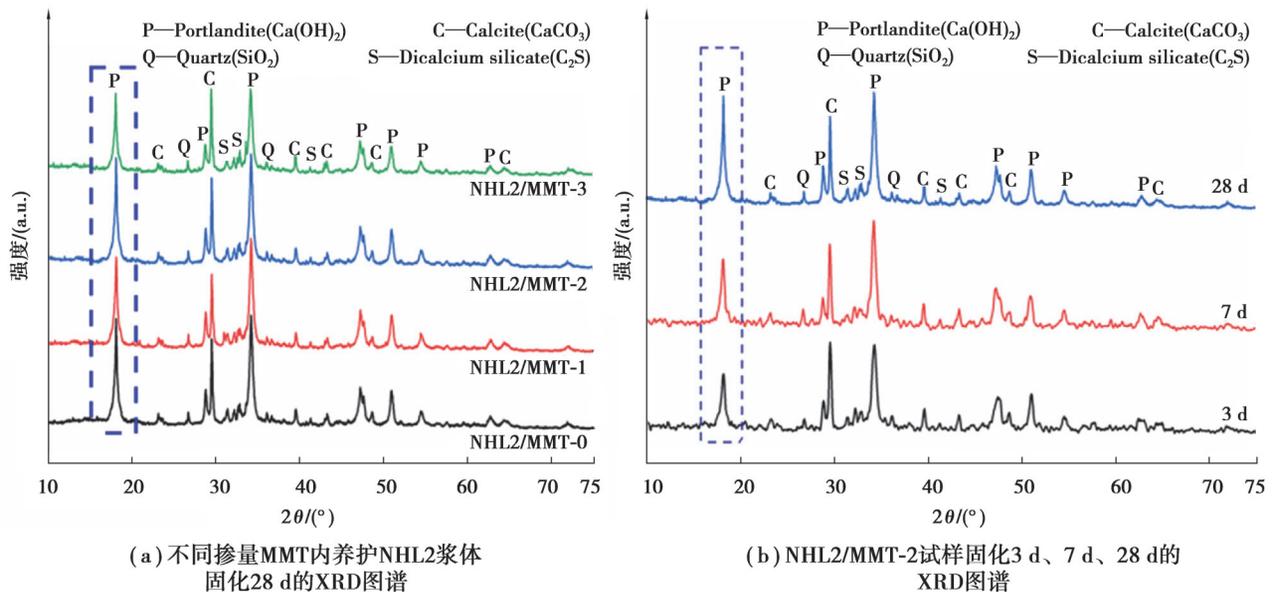


图 2 蒙脱土对天然水硬性石灰浆体水化产物物相的影响

Fig. 2 The influence of montmorillonite on the phase of hydration products of natural hydraulic lime slurry

### 2.2 蒙脱土对天然水硬性石灰浆体水化反应进程的影响

为了分析水化产物的相对含量变化,对试样进行 TG 测试。图 3 为混合浆料固化 14 d 的 TG 曲线以及主要水化产物和碳化产物相对含量的变化曲线。图 3(a) 为混合浆料固化 14 d 时,在不同温度段的质量损失情况。由图可知,  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  之前的失重主要是试样中自由水蒸发引起;  $100\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  阶段质量损失是因为 C-S-H 中结合水的排除所致;  $400\sim 570\text{ }^{\circ}\text{C}$  阶段质量损失是因为  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  高温脱羟基分解引起的;  $570\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$  阶段质量变化是  $\text{CaCO}_3$  高温分解释放  $\text{CO}_2$  所致<sup>[21]</sup>。通过失重量计算出 NHL2 浆体水化产物 C-S-H、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和碳化产

物  $\text{CaCO}_3$  的含量,如图 3(b)、(c)所示。由图 3(b)可知,固化 14 d 时,随着 MMT 掺量的增加,NHL2 中水化产物 C-S-H 和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  含量先增加后减小。当 MMT 掺量为 2% 时,C-S-H 和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的含量最高,相比空白试样分别从 7.06% 增加到 8.47%,从 39.89% 增加到 42.4%,说明 NHL2/MMT-2 试样的内养护效果最好,生成更多的水化产物。MMT 掺量为 3% 时,NHL2 水化产物减少,是因为 MMT 在浆料中发生离子交换,吸附浆体中游离的  $\text{Ca}^{2+}$ ,造成水化反应进程减慢。图 3(c) 是  $\text{CaCO}_3$  含量的变化曲线。可以看出,随着 MMT 的加入, $\text{CaCO}_3$  含量呈现先增加后减少的趋势,但总体比空白试样含量增加,说明 NHL2 浆料的气硬性反应也有所增强,是由于更多的水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  碳酸化反应形成  $\text{CaCO}_3$ 。但在 MMT 掺入量为 2% 和 3% 时, $\text{CaCO}_3$  生成量减少,是由于水化反应增强造成浆体结构致密, $\text{CO}_2$  难以进入浆料内部导致气硬性反应难以进行。结果表明,向 NHL2 浆体中加入适量 MMT 会促进其水化反应,有利于生成更多的水化产物,对硬化浆体的性能具有积极的改善作用。

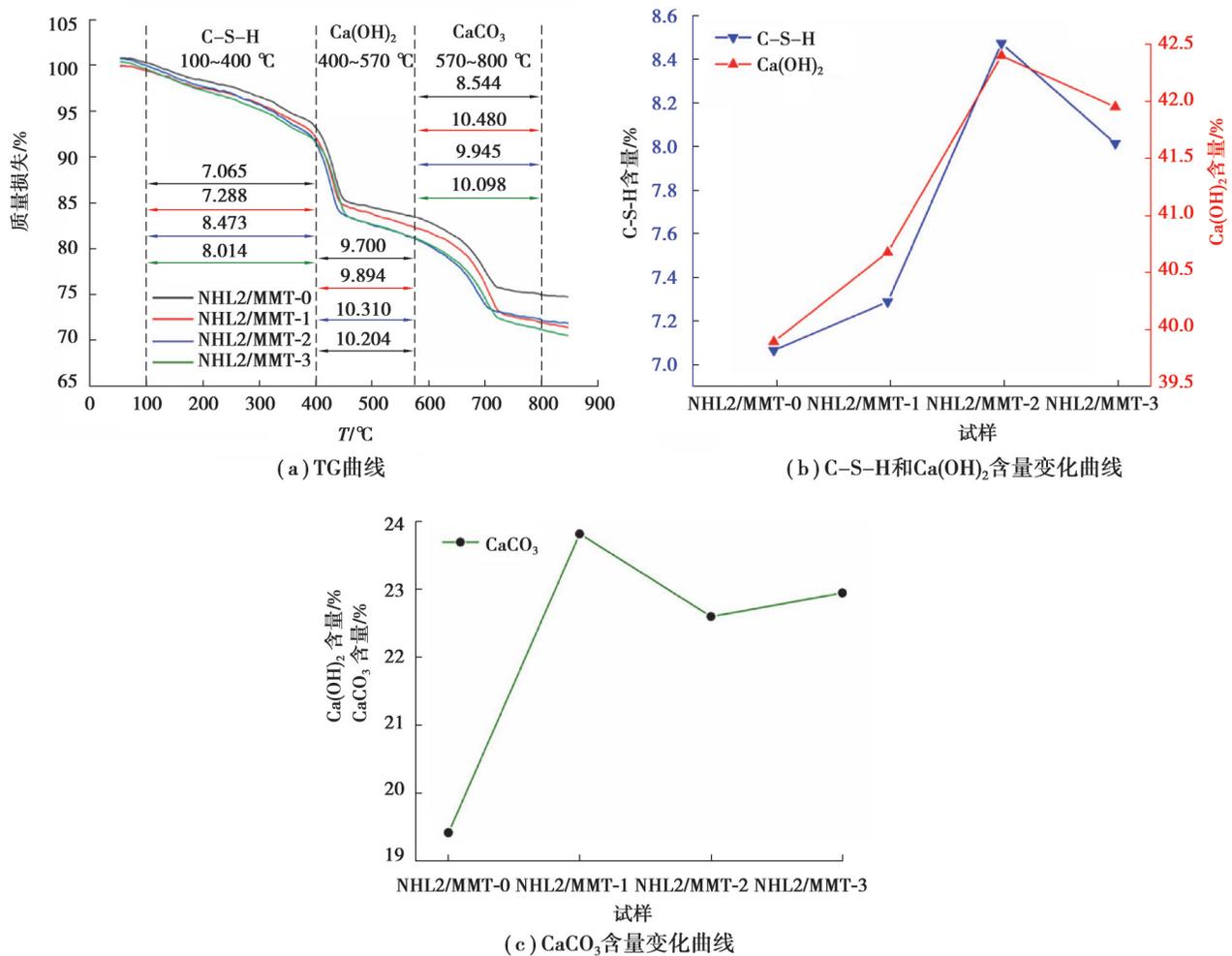


图 3 MMT 内养护 NHL2 固化 14 d 的热分析

Fig. 3 Thermoanalysis of NHL2 sample internal cured with MMT for 14 days

### 2.3 蒙脱土对天然水硬性石灰浆体水化产物结构的影响

图 4 是不同掺量 MMT 内养护 NHL2 浆体固化 14 d 的 FT-IR 图谱。其中,  $3\ 643\ \text{cm}^{-1}$  处的振动峰对应  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  中  $-\text{O}-\text{H}$  的伸缩振动;  $1\ 420\ \text{cm}^{-1}$  处的振动峰对应  $\text{CaCO}_3$  中  $\text{O}-\text{C}-\text{O}$  键的反对称伸缩振动;  $989\ \text{cm}^{-1}$  附近的吸收峰对应 C-S-H<sup>[22]</sup>。由图可知,NHL2 浆体主要含有水化产物 C-S-H、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  以及  $\text{CaCO}_3$ 。其中,C-S-H 的吸收峰随 MMT 掺量的增大逐渐增强,表明水化反应生成的 C-S-H 逐渐增加。同时观察到, $-\text{O}-\text{H}$  的伸缩振动峰也随 MMT 掺量增大而逐渐增强,说明 NHL2 固化过程中生成的水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  逐渐增加。通过 FT-IR 分析,进一步表明在 NHL2 浆体内部,MMT 预储存的层间吸附水在湿度梯度的作用下,持续缓慢向周围释放自由水,保证 NHL2 浆体水化反应的进行。

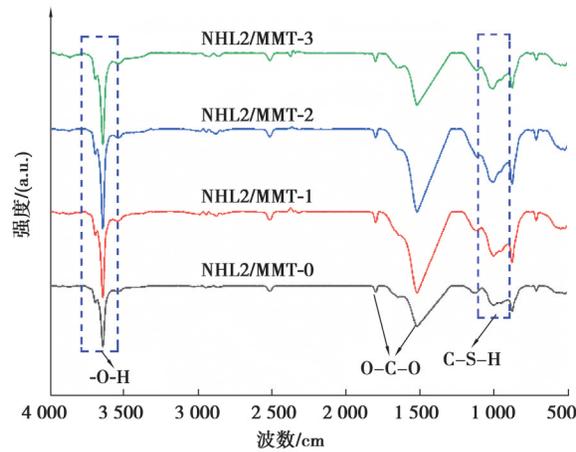
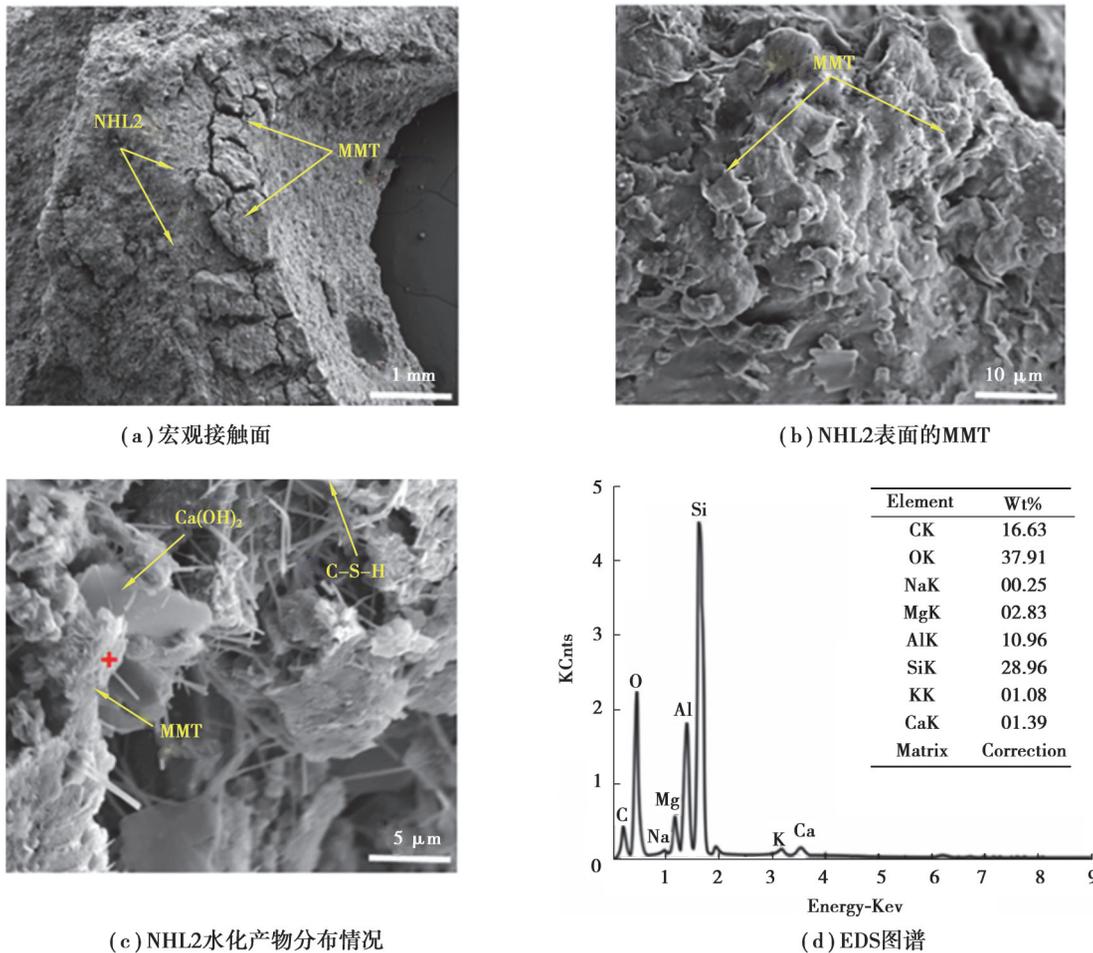


图 4 不同掺量 MMT 内养护 NHL2 固化 14 d 的 FT-IR 图谱

Fig. 4 FT-IR spectra of NHL2 sample internal cured with different MMT dosages for 14 days

2.4 蒙脱土与天然水硬性石灰界面结合情况分析

采用 SEM 对 MMT 与 NHL2 浆料的界面结合情况以及水化产物生长分布情况进行分析,如图 5 所示。MMT 在 NHL2 浆体内部作为内养护剂时,其片层间吸收水之后,在固化过程中湿度梯度的作用下,缓慢向周围释放层间吸附水。从图 5(a)可以看出,MMT 释放水后体积收缩,与 NHL2 分离,掺量过大时收缩效应明显,形成大的裂缝和孔隙,影响 NHL2 的强度,因此,MMT 的掺量要适当。图 5(b)为片层状 MMT 与 NHL2 的结合状态,MMT 是天然的黏土矿物,与 NHL2 有很好的兼容性,胶凝时其紧紧贴附在 NHL2 表面。从图 5 可以清晰地看到,大量纤维状的 C-S-H 和片状 Ca(OH)<sub>2</sub>。根据图 5(d)的 EDS 分析,可以推断图 5(c)红色标记部位



(c) NHL2 水化产物分布情况

(d) EDS 图谱

图 5 MMT 与 NHL2 的界面结合情况

Fig. 5 The interface combination between MMT and NHL2

为MMT。MMT的边缘有许多Si—O、Al—O等不饱和键,在NHL2发生水化反应时,这些不饱和键能够为水化反应提供成核位点,有利于水化反应的进行。

### 2.5 蒙脱土改性天然水硬性石灰的稳定性

MMT因其特殊的层状结构和离子交换性,能够吸收自身体积十几倍的水<sup>[23]</sup>,使其成为良好的内养护材料。图6为不同掺量MMT内养护NHL2浆料固化成型后的光学照片。可以看出,空白试样在模具中固化成型后出现分层现象,这是因为浆料固化时,C<sub>2</sub>S、SiO<sub>2</sub>等密度较大的物质在重力作用下沉淀在模具底部,造成分布不均匀。下部由于C<sub>2</sub>S、SiO<sub>2</sub>等密度大的物质沉淀,固化强度较高;上部水硬性物质较少,固化强度较低,很容易在分层处出现裂纹,从而造成断裂。MMT具有离子交换性,晶格离子带电并相互排斥,使浆料具有良好的悬浮稳定性<sup>[24]</sup>,掺入MMT的试样不会出现分层现象,这是其他内养护材料所不具有的优势。



图6 不同掺量MMT内养护NHL2试样的光学照片

Fig. 6 Optical photograph of NHL2 specimens internal cured with different MMT dosages

### 2.6 蒙脱土对天然水硬性石灰力学性能的影响

为了探究不同MMT掺量对NHL2试样力学性能的影响,测试了系列试样在7 d和28 d的抗压强度,如图7所示。由图可知,随着固化龄期的增长,NHL2试样的抗压强度随着MMT掺量的增加呈现先增大后减少的趋势。固化7 d时,不同掺量的MMT对NHL2强度影响并不显著,可能是由于MMT还没有充分发挥内养护效果。固化28 d后,NHL2/MMT-2试样的抗压强度相比空白试样增加了22.03%。这是由于MMT在固化过程中,特别是固化后期能够持续释放层间吸附水,促进水化反应进行,生成更多的水化产物C-S-H凝胶和Ca(OH)<sub>2</sub>,使得抗压强度增强。NHL2/MMT-3试样的抗压强度出现下降趋势,这是因为MMT在NHL2浆体中释放水后体积收缩,在内部形成裂缝和孔隙。同时,过量的MMT也会导致其水化产物含量降低,对试样的力学性能产生负面影响。

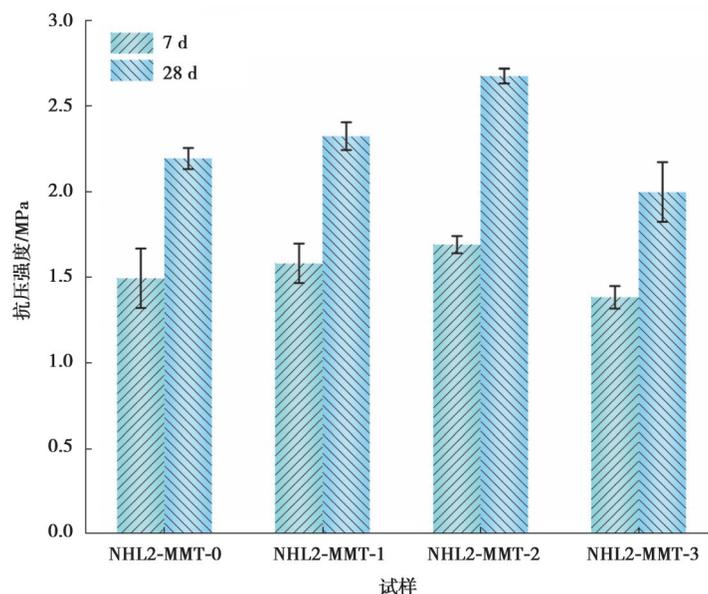


图7 不同掺量MMT内养护NHL2试样固化7 d和28 d的抗压强度

Fig. 7 Compressive strength of NHL2 specimens internal cured with different dosages of MMT for 7 days and 28 days

2.7 蒙脱土对天然水硬性石灰固化过程中自收缩的影响

图 8 反映了不同掺量 MMT 对 NHL2 浆料固化时自收缩的影响。从图 8(a)中可以看到,MMT 的添加对 NHL2 自收缩有明显的抑制作用,NHL2/MMT-1、NHL2/MMT-2 和 NHL2/MMT-3 试样的自收缩分别是空白试样的 89.69%、56.70% 和 64.46%。NHL2 的自收缩一般分为 3 个阶段:从开始至第 3 d 为快速收缩阶段,第 3~6 d 为缓慢收缩阶段,第 6 d 之后为收缩平稳阶段。NHL2 自收缩与其内部湿度变化有关。MMT 具有良好的保水性,能够减轻内部湿度的变化,减缓 NHL2 内部自由水的挥发,从而抑制了浆体的自收缩。图 8(b)表示 NHL2 在固化过程中的质量损失情况。由于外部环境湿度较小,NHL2 试样的质量损失主要是其内部自由水的挥发引起的。空白试样在固化时,自由水挥发快,引起体积收缩。掺入 MMT 的试样前 2 d 水分挥发量较大,第 3 d 后挥发量急剧减少。结合图 8(a),前 3 d 固化时,试样快速收缩,3 d 后由于 MMT 层间吸附水的释放,促进了 NHL2 的水化作用,水化产物填补孔隙,抑制其固化收缩。图 8(c)是 NHL2 固化 7 d 后的质量损失。可以看出,随着 MMT 的掺入,NHL2 内部自由水挥发逐渐降低。其中,NHL2/MMT-2 和 NHL2/MMT-3 试样的保水效果较为显著。结合 NHL2 的自收缩过程,使用 MMT 做内养护剂时,掺量为 1% 时,抑制 NHL2 自收缩效果不明显。掺量为 3% 时,吸附水太多又会造成自收缩增大。因此,使用 MMT 内养护 NHL2 的掺量控制在 2% 效果较好。

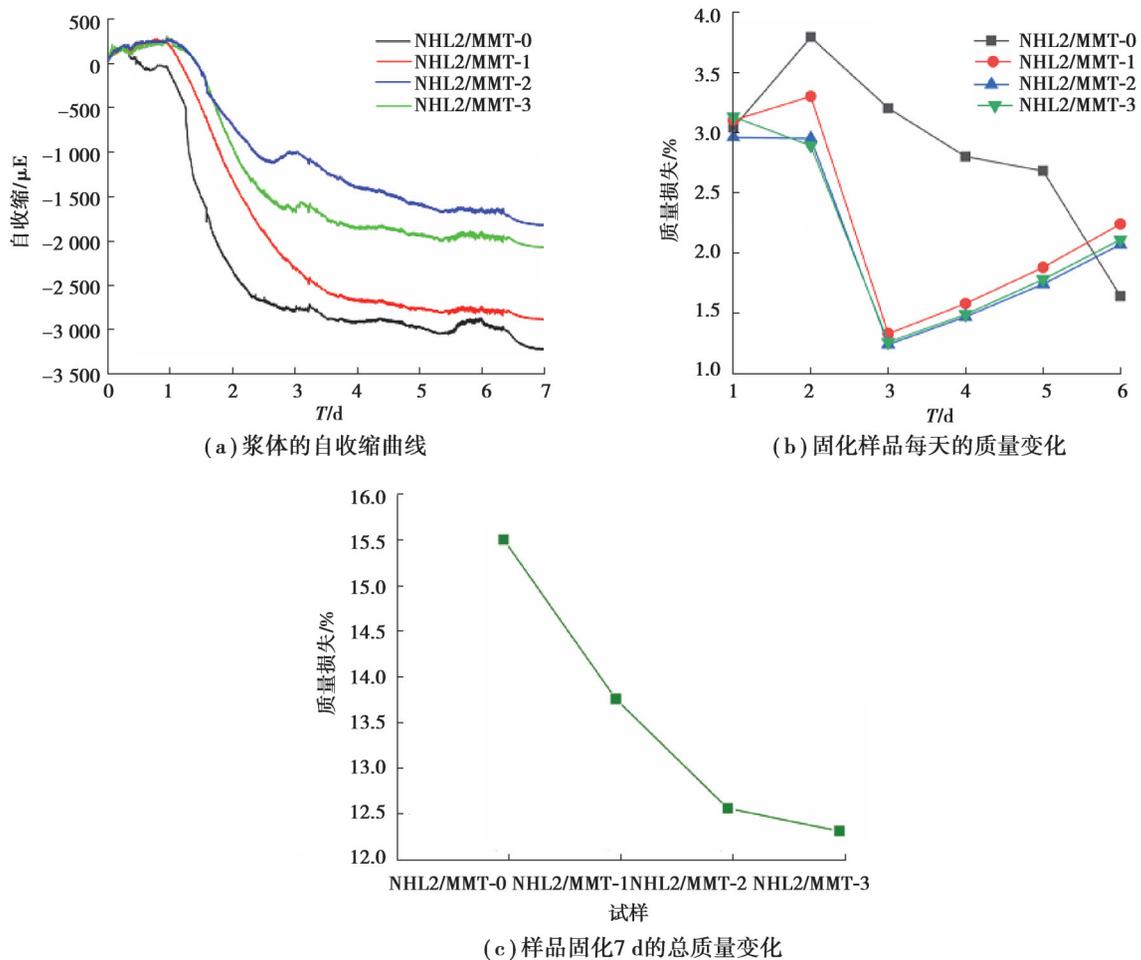


图 8 不同掺量 MMT 对 NHL2 固化过程中自收缩的影响

Fig. 8 Effect of different MMT dosages on autogenous shrinkage during curing of NHL2 paste

2.8 蒙脱土对天然水硬性石灰的内养护机理

图 9 为 MMT 在 NHL2 浆料内部内养护的机理图。由图可知,MMT 具有优异的储水保水性,在水中浸泡 24 h 后,水分子充分进入 MMT 的片层之间。NHL2 浆料制备过程中,MMT 与 NHL2 混合均匀。在浆料固化

过程中,外加的水分被水化反应所消耗,还有大量水分由于蒸发而损失。在试样内部湿度梯度的作用下,MMT预先储存的水会缓慢均匀地向周围释放。一方面,能够为NHL2的后期水化反应提供充足的水分;另一方面,还能够减缓湿度变化,避免浆体内部毛细孔的水蒸发造成内部负压力,改善NHL2浆体的体积收缩。

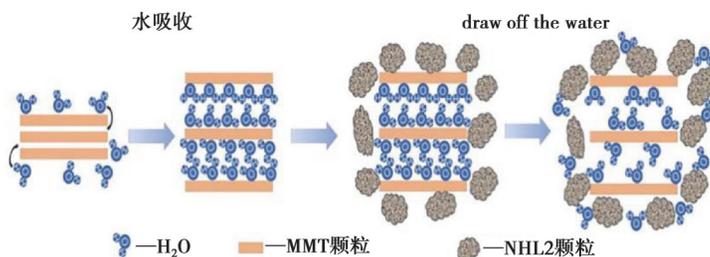


图9 MMT在NHL2砂浆内部的内养护机理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of internal curing mechanism of MMT inside NHL2 paste

### 3 结论

文中以预储水的MMT作为内养护剂,与NHL2浆体拌合后固化成型得到灌浆试样,系统研究了MMT改性NHL2浆体的水化行为及使用性能,主要结论如下:

1) MMT在NHL2浆料固化过程中具有内养护功能,能够在NHL2浆料内部持续、缓慢地释放自由水,促进NHL2的水化反应,减缓NHL2的固化自收缩现象,MMT掺量为2%时的内养护效果最好。

2) MMT与NHL2界面结合紧密,其掺入能够显著改善NHL2浆体的分层现象,增强NHL2浆料的悬浮稳定性,避免固化后期由于分层导致的性质不均匀现象,减少试样的开裂。

3) NHL2试样的28d抗压强度随MMT掺量的增加呈现先增大后减小的趋势。其中,MMT掺量为2%时,试样的抗压强度最高,相比空白试样提高了22.03%,这与水化反应的充分进行具有密切关联。

### 参考文献

- [1] 龙红,王玲娟.论中国石窟艺术的设计意匠[J].重庆大学学报(社会科学版),2006,12(4):99-109.  
Long H, Wang L J. Designing intentions of Chinese grotto arts[J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2006, 12(4): 99-109.(in Chinese)
- [2] 王金华,霍晓彤.石窟寺保护关键科学问题及关键技术探讨[J].东南文化,2021(1):6-13.  
Wang J H, Huo X T. A discussion on the key scientific and technological issues in cave temples protection[J]. Southeast Culture, 2021(1): 6-13.(in Chinese)
- [3] 黄继忠,王金华,高峰,等.砂岩类石窟寺保护新进展:以云冈石窟保护研究新成果为例[J].东南文化,2018(1):15-19.  
Huang J Z, Wang J H, Gao F, et al. Recent progresses in sandstone cave temples conservation: a case study of Yungang Grottoes [J]. Southeast Culture, 2018(1): 15-19.(in Chinese)
- [4] 贾甲,蒋思维,熊雅珉,等.大足石刻大佛湾“卧佛”岩体裂隙渗水病害精细水文地质模型研究[J].石窟与土遗址保护研究,2023(1):4-15.  
Jia J, Jiang S W, Xiong Y M, et al. A study on the hydrogeological model of water seepage deterioration in the rock mass of the sleeping Buddha statue at dafowan in Dazu[J]. Research on the Conservation of Cave Temples and Earthen Sites, 2023(1): 4-15.(in Chinese)
- [5] 刘汉龙,韩绍康,陈卉丽,等.潮湿环境砂岩质石窟岩体微生物加固补配修复方法[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(6):219-220.  
Liu H L, Han S K, Chen H L, et al. Microbial reinforcement and repair method of sandstone grottoes in humid environment[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(6): 219-220.(in Chinese)
- [6] Dai S B. Building limes for cultural heritage conservation in China[J]. Heritage Science, 2013, 1: 1-9.
- [7] 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,2019,33(9):1512-1516.

- Lan M Z, Nie S, Wang J F, et al. A state of the art review on lime-based mortars for restoration of ancient buildings[J]. *Materials Review*, 2019, 33(9): 1512-1516. (in Chinese)
- [ 8 ] Woodham D, Citto C, Porter D W, et al. Investigation, analysis, and treatment testing for the mission church, Tumacácori National Historical Park[J]. *Journal of Architectural Engineering*, 2020, 26(1): 05020001.
- [ 9 ] Semion Z, Konstantin K, Arnon B. Revisiting the protected paste volume concept for internal curing of high-strength concretes [J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(9): 981-986.
- [ 10 ] Song C, Choi Y C, Choi S. Effect of internal curing by superabsorbent polymers-Internal relative humidity and autogenous shrinkage of alkali-activated slag mortars[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 123: 198-206.
- [ 11 ] 刘益良, 苏幼坡, 殷尧, 等. 膨润土改性胶凝材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(5): 5040-5052.  
Liu Y L, Su Y P, Yin Y, et al. Research progress of bentonite modified cementitious materials[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(5): 5040-5052.(in Chinese)
- [ 12 ] Mesboua N, Benyounes K, Benmounah A. Study of the impact of bentonite on the physico-mechanical and flow properties of cement grout[J]. *Cogent Engineering*, 2018, 5(1): 1446252.
- [ 13 ] Andrejkovičová S, Alves C, Velosa A, et al. Bentonite as a natural additive for lime and lime-metakaolin mortars used for restoration of adobe buildings[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 60: 99-110.
- [ 14 ] Xie Y, Li J, Lu Z Y, et al. Preparation and properties of ultra-lightweight EPS concrete based on pre-saturated bentonite[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 195: 505-514.
- [ 15 ] Modabberi S, Namayandeh A, Setti M, et al. Genesis of the Eastern Iranian bentonite deposits[J]. *Applied Clay Science*, 2019, 168: 56-67.
- [ 16 ] 李方贤, 龙世宗, 陈友治. 膨润土对砂浆性能的调控作用[C]// 第三届全国商品砂浆学术交流会论文集. 武汉: 第三届全国商品砂浆学术交流会, 2009.  
Li F X, Long S Z, Chen Y Z. Regulatory effects of bentonite on mortar performance[C]// Proceedings of the 3rd National Academic Exchange Conference on Commercial Mortar. Wuhan: National Academic Exchange Conference on Commercial Mortar, 2009. (in Chinese)
- [ 17 ] 蒋林华, 王涛, 丁国庆, 等. 膨润土水泥砂浆性能及机理研究[J]. *新型建筑材料*, 2012, 39(4): 48-53.  
Jiang L H, Wang T, Ding G Q, et al. Researches on performances and mechanism of bentonite-cement mortar[J]. *New Building Materials*, 2012, 39(4): 48-53.(in Chinese)
- [ 18 ] 丁国庆, 蒋林华, 张继尹. 膨润土对硅酸盐水泥水化硬化的影响[J]. *武汉理工大学学报*, 2012, 34(4): 20-23, 41.  
Ding G Q, Jiang L H, Zhang J Y. Influence of bentonite on hydrating and hardening of cement[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2012, 34(4): 20-23, 41.(in Chinese)
- [ 19 ] 王立久, 侯文博, 刘莎, 等. 水泥基内养护材料开发应用研究进展[J]. *混凝土*, 2013(12): 4-7.  
Wang L J, Hou W B, Liu S, et al. Concrete summary of conservation materials and the development and application of research [J]. *Concrete*, 2013(12): 4-7.(in Chinese)
- [ 20 ] 徐树强, 王乐乐, 马清林, 等. 天然水硬性石灰在不同碳化条件下的水化反应[J]. *文物保护与考古科学*, 2017, 29(4): 1-8.  
Xu S Q, Wang L L, Ma Q L, et al. Hydration of natural hydraulic lime pastes under different conditions of carbonation[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2017, 29(4): 1-8.(in Chinese)
- [ 21 ] Luo K, Li J, Lu Z Y, et al. Effect of nano-SiO<sub>2</sub> on early hydration of natural hydraulic lime[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 216: 119-127.
- [ 22 ] Ma B G, Su L, Jian S W, et al. Early stage hydration mechanism of cellulose ether modified thin layer cement pastes[J]. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed*, 2012, 27(6): 1172-1176.
- [ 23 ] 周智芳, 张有贤, 赵佰平, 等. 多孔蒙脱土的制备及对 Pb(II)吸附特性研究[J]. *重庆大学学报*, 2019, 42(7): 79-87.  
Zhou Z F, Zhang Y X, Zhao B P, et al. Preparation of porous montmorillonite and adsorption properties study of Pb(II) on it[J]. *Journal of Chongqing University*, 2019, 42(7): 79-87.(in Chinese)
- [ 24 ] 万江, 王晓焕, 刘志勇. 膨润土-水悬浮体系的 zeta 电位研究[J]. *非金属矿*, 2017, 40(04): 23-26.  
Wan J, Wang X H, Liu Z Y. Study on zeta potential of Bentonite-Water suspension system[J]. *Non-Metallic Mines*, 2017, 40(4): 23-26. (in Chinese)