文章编号:1007-9629(2025)12-1284-07

有机无机复合改性石灰的性能与作用机理

杜 云[1], 刘子娴[2], 许鸽龙[3], 白金朋[1], 蔡基伟[3,*]
(1.中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司,北京 100024;
2.北京工业大学 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室,北京 100124;
3.河南大学 开封市工程修复与材料循环工程技术研究中心,河南 开封 475004)

摘要:为找到一种有效的砖石建筑修复材料,以预糊化玉米淀粉、阴离子聚丙烯酰胺(APAM)和碱化秸秆粉等3种有机物与$NaHCO_3$复合改性石灰,研究了3种有机物对石灰物理性能、抗压强度和微观结构的作用机理。结果表明:相较于其他2种有机物,7%预糊化玉米淀粉减缓了石灰的水分蒸发并延长了后期碳化周期;相较于对照组试样,7%预糊化玉米淀粉改性石灰28 d的毛细吸水率、干燥速率、吸水率和孔隙率分别下降了96.81%、75.73%、85.80%和30.91%,软化系数和抗压强度分别提高了78.05%和985.23%,表观密度略有增加;预糊化玉米淀粉中存在的—OH基团对生成的$CaCO_3$具有调控作用,碳化后石灰的结构更加致密;7%预糊化玉米淀粉改性石灰的性能最佳。

关键词:修复材料;淀粉;石灰;复合改性
中图分类号:TU528.01 **文献标志码**:A **doi**:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.12.013

Properties and Mechanism of Action of Lime Modified by Organic-Inorganic Hybrid

DU Yun[1], *LIU Zixian*[2], *XU Gelong*[3], *BAI Jinpeng*[1], *CAI Jiwei*[3,*]
(1. Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China; 2. State Key Laboratory of Bridge Engineering Safety and Resilience, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. Kaifeng Research Center for Engineering Repair and Material Recycle, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: To identify an effective restoration material for masonry structures, lime was separately modified by three organic additives such as pre-gelatinized corn starch, anionic polyacrylamide(APAM) and alkalized straw powder in combination with $NaHCO_3$. The effects of three organic additives on the physical properties, compressive strength and microscopic mechanism of lime were systematically investigated. The results indicate that 7% pre-gelatinized corn starch exhibits superior performance compared to two organic additives, effectively decelerating water evaporation and prolonging the carbonation period of lime. Compared to the control group, the lime modified by 7% pre-gelatinized corn starch exhibits reduction of 96.81%, 75.73%, 85.80% and 30.91% in 28 d capillary water absorption, drying rate, water absorption and porosity. Concurrently, its softening coefficient and compressive strength increase by 78.05% and 985.23%, with a slight increase in its apparent density. —OH groups in pre-gelatinized corn starch can modulate the crystallization of $CaCO_3$, and the structure of the lime after carbonation is denser. The lime modified by 7% pre-gelatinized corn starch achieves optimal performance in masonry repair.

Key words: restoration material; corn starch; lime; composite modification

收稿日期:2025-03-21; 修订日期:2025-04-27
基金项目:河南省科技攻关计划(222102320362)
第一作者:杜 云(1997—),男,山西长治人,中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司助理工程师,硕士。E-mail:dyhenu@163.com
通讯作者:蔡基伟(1963—),男,河南开封人,河南大学教授,硕士生导师,博士。E-mail:1719188757@qq.com

古建筑正面临地震侧向滑移、地面沉降、冻融循环、生物侵蚀及酸雨腐蚀等严重破坏[1]，石灰基建筑材料用于建筑文物修复具有重要价值与可行性[2]。古代工匠通过煅烧海洋生物大蛤以制备石灰[3]，并引入糯米[4-6]等有机物来改善石灰性能，发现糯米含量与材料的物理力学性能正相关[7]。有机物对石灰材料的作用机理主要有黏结机理[8]和化学反应[9]，而生物矿化机理[10-11]是目前主流接受的理论，主要是以有机物官能团作为$CaCO_3$的结晶模板来调控晶体形态[12-14]。现代仿制糯米灰浆研究主要是添加偏高岭土[15]、自制硅酸盐[16]和硫酸铝[17-18]等改性剂，虽能提升糯米灰浆的抗压强度、表面硬度及耐候性，但糯米浆存在成本高、需预糊化、易分层离析等缺陷[17]。研究发现，玉米淀粉与糯米粉的结构相似[19]，其预糊化产品可直接冷水溶解[20]。阴离子聚丙烯酰胺(APAM)含有羧基和酰氨基[12]，这些常见含有—OH和—COOH等基团的有机物均可能对石灰碳化及性能产生一定作用。当前复合改性材料用于古建筑修复和新型墙体加固切实可行[21]。

为进一步找出可替代传统糯米灰浆的改性材料，在石灰中加入$NaHCO_3$碳化促进剂，并进一步选取预糊化玉米淀粉、秸秆粉和APAM等3种有机物做进一步改性石灰研究。本研究体系在保持传统材料相容性的同时，解决了糯米灰浆的固有缺陷，为古建筑修复提供了低成本、易施工的新型方案，对延长古建筑的寿命具有工程价值。

1　试验

1.1　试剂与材料

$Ca(OH)_2$粉由东莞市鑫虎建材有限公司提供，纯度(质量分数，文中涉及的纯度、水灰比等除特别说明外均为质量分数或质量比)为90%，密度为2.243 g/cm^3，粒径为37～75 μm，平均粒径为47 μm。$NaHCO_3$为白色结晶粉末，由国药集团化学试剂有限公司提供，pH值为8.3。预糊化玉米淀粉由河南恒瑞淀粉科技股份有限公司提供，含有80%的支链和20%的直链，直链淀粉平均聚合度为930，支链淀粉平均链长度为25，磷含量为0.015%。预糊化玉米淀粉具有高黏度和高膨胀性等特点，在冷水中就可以溶胀和分裂，形成均匀糊状溶胶。

秸秆粉取自开封西郊，经除杂后由粉碎机粉碎制得，含有丰富的纤维素、半纤维素和木质素。阴离子聚丙烯酰胺(APAM)由郑州乘源环保科技有限公司提供，为相对分子质量1 200万的白色粉末，固含量大于90%，具有增稠和絮凝的作用。

1.2　配合比设计

碳化促进剂$NaHCO_3$的水溶液中含有HCO_3^-，可以促进$Ca(OH)_2$快速碳化。试验组均掺入4%的$NaHCO_3$，在此基础上选择预糊化玉米淀粉、APAM和秸秆粉等3种有机物对石灰进行改性。有机物的掺量和种类都会影响石灰的用水量，总体保持石灰净浆稠度为50～70 mm，水灰比随着有机物掺量的增加逐渐增大。每1种有机物设计了2组试验，同时制作对照组L，试验配合比如表1所示。

1.3　样品制备

秸秆粉经4% NaOH溶液常温浸泡12 h以脱除木质素/半纤维素，预糊化玉米淀粉与APAM按质量比1∶3溶于20 ℃去离子水中形成溶胶。将熟石灰、4% $NaHCO_3$及预处理的有机物放入净浆搅拌机，先低速干拌30 s，再加入配好的去离子水低速搅拌2 min。拌好的石灰净浆注入尺寸为20 mm×20 mm×20 mm的钢模，覆膜后于25 ℃、相对湿度70%的养护室中静置3 d后脱模，待到特定养护龄期后测试。

1.4　分析和测试

1.4.1　物理性能

1.4.1.1　质量变化率(m_c)

用电子天平称量脱模后石灰试样的初始质量(m_i)、t时刻的质量(m_t)。以小时平方根为横坐标，绘

表1　改性石灰的配合比

Table 1　Mix proportions of modified lime

Group	$w(Ca(OH)_2)$/%	$w(NaHCO_3)$/%	w(pre-gelatinized corn starch)/%	w(APAM)/%	w(straw powder)/%	Water-lime ratio
L	100	0	0	0	0	0.6
LN_{5s}	100	4	5	0	0	0.7
LN_{7s}	100	4	7	0	0	0.8
LN_{1ap}	100	4	0	1	0	0.7
LN_{3ap}	100	4	0	3	0	0.8
LN_{1cs}	100	4	0	0	1	0.7
LN_{3cs}	100	4	0	0	3	0.8

制质量变化率-时间曲线,线性下降段斜率为水分蒸发率,线性上升段斜率为碳化率,m_c的计算如式(1)所示。

$$m_c=\frac{m_t-m_i}{m_i}\times 100\% \quad (1)$$

1.4.1.2 毛细吸水率(C_w)

将石灰试样于60 ℃烘箱烘至恒重(m_0),用石蜡密封5个侧面仅底面暴露,底部垫滤纸后置于5 mm水中。每隔特定时间记录吸水质量(m_e),至试样的质量变化小于1%终止试验[22]。以分钟平方根为横坐标绘制吸水曲线,线性段斜率即为毛细吸水系数,C_w的计算如式(2)所示。

$$C_w=\frac{m_e-m_0}{A}\times 100\% \quad (2)$$

式中:A为试样的吸水面积,m^2。

1.4.1.3 干燥速率(C_m)

完成毛细吸水测试后,将试样置于(20±3) ℃、相对湿度(65±5)%的环境中,未密封面朝上自然挥发,测得t时刻干燥时的质量。以小时平方根为横坐标绘制干燥曲线,初始线性段斜率为干燥系数,C_m按式(3)计算。

$$C_m=\frac{m_t-m_0}{A}\times 100\% \quad (3)$$

1.4.1.4 吸水率(m_a)

先将待测试样放入60 ℃的烘箱,质量烘干至恒重(m_0)。随后将试样完全浸没于水中,测得试样吸水至恒重的质量,m_a按式(4)计算。

$$m_a=\frac{m_e-m_0}{m_0}\times 100\% \quad (4)$$

1.4.1.5 软化系数

试件饱和吸水后的抗压强度与试件干燥状态下的抗压强度之比。

1.4.1.6 孔隙率(P)

先测得试样的体积(V),然后在真空条件下将烘干后的试样浸于乙醇中4 h,最后称取试样饱和面干质量(m_1)。P按式(5)计算。

$$P=\frac{m_1-m_0}{V\rho}\times 100\% \quad (5)$$

式中:ρ为乙醇的密度,g/mL。

1.4.1.7 表观密度

自然状态下,石灰试样的质量与体积之比。

1.4.2 抗压强度

依据JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》,压力机以50 N/s的加载速度施压在石灰试样上直到试样被破坏,结果取3个石灰试样抗压强度的算数平均值。

1.4.3 微观测试

1.4.3.1 形貌分析

先在60 ℃的真空干燥箱中干燥24 h,随后进行喷金处理。使用QUANTA 250型扫描电子显微镜(SEM)对$CaCO_3$晶体的类型、形状和尺寸等微观结构进行检测分析。

1.4.3.2 物相分析

将干燥后的石灰样品研磨成细粉,使用D8-ADVANCE型X射线衍射分析仪(XRD)对样品进行分析,扫描角度范围为15°~60°,步长为0.02°,扫描速率为10(°)/min。

2 结果与讨论

2.1 物理性能

2.1.1 质量变化率

质量变化率可有效表征改性石灰净浆的水分蒸发与碳化进程。图1为有机物对石灰质量变化率的影响。表2为改性石灰试样的质量变化率。由图1和表2可见:

(1)所有试样均呈现先减后增的质量变化趋势。对照组L的最大质量损失出现在6 d,秸秆粉改性组(LN_{1cs}/LN_{3cs})因木质素疏水作用加速水分迁移,最大质量损失出现时间缩短至5 d。预糊化玉米淀粉改性组(LN_{5s}/LN_{7s})与APAM改性组(LN_{1ap}/LN_{3ap})因支链结构束缚自由水及高分子水合作用,最大质量损失出现时间延迟至10~14 d。除了LN_{3cs},所有改性组的水分蒸发率均低于对照组L的2.56%。随着有机物掺量的增加,只有预糊化玉米淀粉改性组出现了水分蒸发率下降,这得益于预糊化玉米淀粉极强的保水性。

(2)预糊化玉米淀粉改性组(LN_{5s}/LN_{7s})的碳化率与对照组L基本一致,其保水性能通过维持孔隙水环境促进CO_2扩散,同时延缓表面孔隙堵塞,有利于石灰后期强度的提升。APAM改性组(LN_{1cs}/LN_{3cs})因极性基团—$CONH_2$增强水合作用,碳化率最高为0.44%,但快速碳化导致表层孔隙闭合,外部CO_2很难进入石灰内部。7%预糊化玉米淀粉通过支链保水性和矿化反应机制使石灰的水分蒸发和碳化达到最佳平衡状态。

2.1.2 毛细吸水率和干燥速率

图2为有机物对石灰毛细吸水率和干燥速率的影响。表3为石灰的毛细吸水系数和干燥系数。由图2和表3可见,预糊化玉米淀粉改性石灰的毛细吸水率显著降低,LN_{5s}和LN_{7s}的毛细吸水系数相较于试样L的2.51 kg/(m^2·$min^{0.5}$)分别下降到0.18、

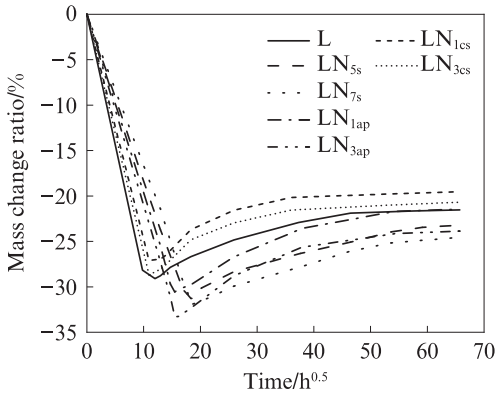


图1　有机物对石灰质量变化率的影响

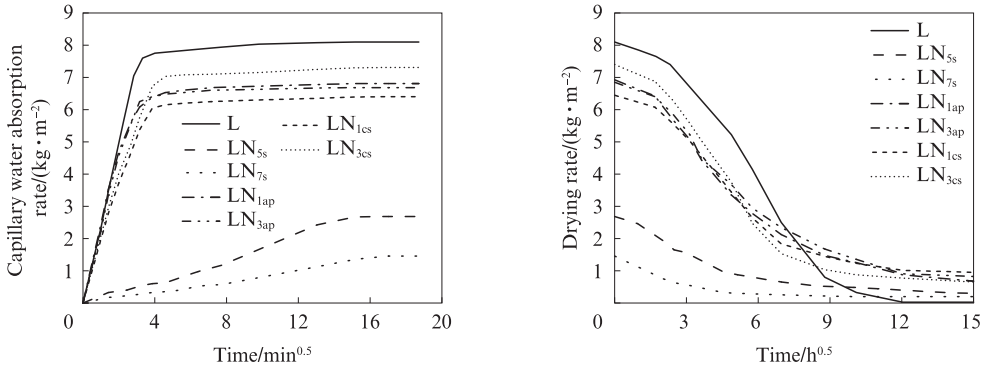
Fig. 1　Effect of organic matter on mass change ratio of lime

表2　改性石灰试样的质量变化率

Table 2　Mass change ratio of modified lime

Group	Maximum mass-loss time/d	Water evaporation rate/%	Carbonation rate/%
L	6	2.56	0.24
LN_{5s}	14	1.80	0.24
LN_{7s}	14	1.72	0.22
LN_{1ap}	10	1.97	0.37
LN_{3ap}	10	2.10	0.44
LN_{1cs}	5	2.47	0.30
LN_{3cs}	5	2.62	0.30

0.08 kg/(m^2·$min^{0.5}$)，降幅达92.83%和96.81%。由于淀粉分子可以包裹$CaCO_3$晶体，抑制晶体团聚，使石灰结构致密化，从而减少毛细水传输路径。当预糊化玉米淀粉的掺量增加时，改性石灰的毛细吸水系数持续降低，其余2种有机物改性组的毛细吸水系数随着改性剂掺量的增加而出现不同程度增大。改性石灰的干燥速率与毛细吸水率行为正相关，毛细吸水系数越小，干燥系数越低。28 d干燥系数相较于对照组L下降了75.73%。预糊化玉米淀粉改性石灰因小孔径阻碍和有机物保水性，有效抑制水分蒸发，提高了抗渗性。



(a) Capillary water absorption　　(b) Drying rate

图2　有机物对石灰毛细吸水率和干燥速率的影响

Fig. 2　Effect on organic matter on capillary water absorption rate and drying rate of lime

表3　石灰的毛细吸水系数和干燥系数

Table 3　Capillary water absorption coefficient and drying coefficient of lime

Group	Capillary water absorption coefficient/(kg·m^{-2}·$min^{-0.5}$)	Drying coefficient/(kg·m^{-2}·$h^{-0.5}$)
L	2.51	1.03
LN_{5s}	0.18	0.39
LN_{7s}	0.08	0.25
LN_{1ap}	1.67	0.83
LN_{3ap}	1.72	0.80
LN_{1cs}	1.57	0.83
LN_{3cs}	1.73	1.05

2.1.3　吸水率和软化系数

图3为有机物对石灰吸水率和软化系数的影响。由图3可见：改性石灰试样的吸水率均下降，掺入预糊化玉米淀粉改性石灰组吸水率的下降幅度最大，相较于L的25.57%，LN_{5s}和LN_{7s}的吸水率下降了63.94%和85.80%，说明此时经由预糊化玉米淀粉改性生成的$CaCO_3$可作为填充物以填充石灰之间的孔隙，从而阻碍水分向试样内部渗透；掺入1% APAM的LN_{1ap}和1%秸秆粉的LN_{1cs}的吸水率分别为22.76%和19.38%，说明2种有机物在小掺量时可以降低石灰的吸水率，但掺量过大会增加连通孔的数量，导致吸水率上升；L具有更多大孔（孔径d>1 mm），吸水率最

高且易开裂;3种改性石灰组的软化系数均提升,改性效果较好的为LN_{7s}、LN_{1ap}和LN_{1cs},分别较于对照组L提高了78.05%、107.32%和82.93%,其中LN_{1ap}达到耐水材料标准。吸水率越低,软化系数越高。低吸水率的改性石灰适用于古建修复。

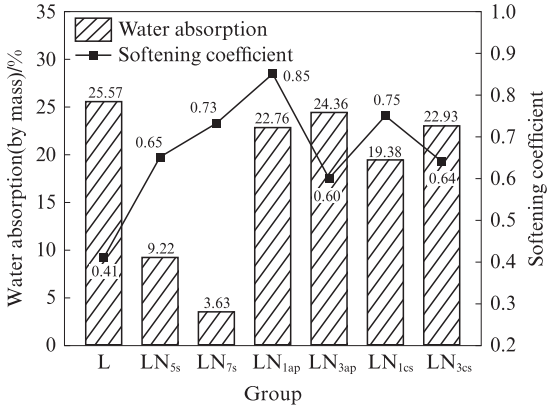


图3 有机物对石灰吸水率和软化系数的影响

Fig. 3 Effect of organic matter on water absorption and softening coefficient of lime

2.1.4 孔隙率和表观密度

孔隙率是影响石灰浆体强度的重要因素,较高的孔隙率会降低石灰强度。图4为有机物掺量对石灰孔隙率和表观密度的影响。由图4可见:有机物改性均降低了石灰的孔隙率;APAM掺量对石灰孔隙率的影响不大,LN_{7s}、LN_{3ap}和LN_{1cs}相比L的孔隙率分别下降了30.91%、19.85%和12.60%。石灰试样的孔隙率取决于基质中大孔(d>1 mm)和毛细孔(d<1 μm)的数量,孔径又取决于有机物的种类和掺量,由于石灰净浆中Ca^{2+}与有机物中极性基团(—OH、—COOH)等发生有效反应,高掺量有机物包裹$CaCO_3$颗粒并填充石灰大孔,从而降低了石灰的孔隙率。预糊化玉米淀粉和秸秆粉可以提高石灰的表观密度,但秸秆粉改性石灰的孔隙率较大有利于碳化增重,所以表观密度略大。APAM改性石灰组的表观密度下降,即使碳化更快,但前期水分蒸发损失量大于碳化增重。增加预糊化玉米淀粉和APAM的掺量会降低石灰的表观密度和孔隙率,有机物质量取代呈负相关。

2.2 抗压强度

图5为有机物对石灰抗压强度的影响。由图5可见:有机物改性显著提升了石灰的抗压强度,所有试样的抗压强度均随着养护龄期的延长而增长;预糊化玉米淀粉改性组的表现最优,LN_{5s}和LN_{7s}的28 d抗压强度达8.34、9.55 MPa,相较于对照组L提高了856.82%和985.23%,达到天然水硬性石灰NHL3.5的抗压强度标准,改性石灰组后期还保持一定的强度增长,LN_{5s}和LN_{7s}的180 d抗压强度较14 d抗压强度分别增长了86.81%和103.38%。原因是预糊化玉米淀粉可以胶结石灰颗粒,使孔径细化;保水性维持孔隙水环境,有利于石灰碳化反应缓慢进行;预糊化玉米淀粉分子模板诱导$CaCO_3$形成细小不规则晶体,结构致密化。改性石灰LN_{3ap}和LN_{1cs}的28 d抗压强度分别为1.9、3.1 MPa,虽高于L的抗压强度,但后期强度增长停滞。掺入APAM和秸秆粉导致石灰快速碳化,堵塞表层孔隙,CO_2扩散受阻,180 d抗压强度仅为4~6 MPa,秸秆粉的疏水作用加速石灰干燥,导致收缩裂缝增加,抵消部分碳化增益。

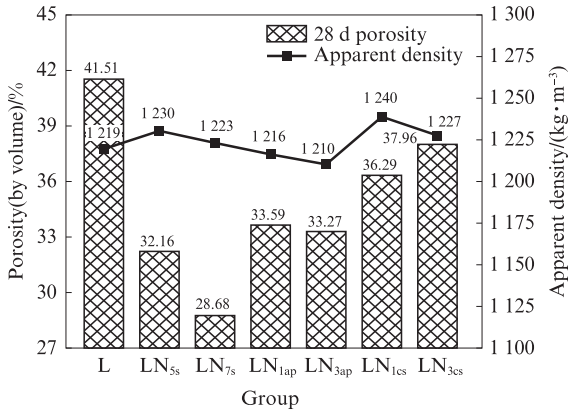


图4 有机物掺量对石灰孔隙率和表观密度的影响

Fig. 4 Effect of organic matter on porosity and apparent density of lime

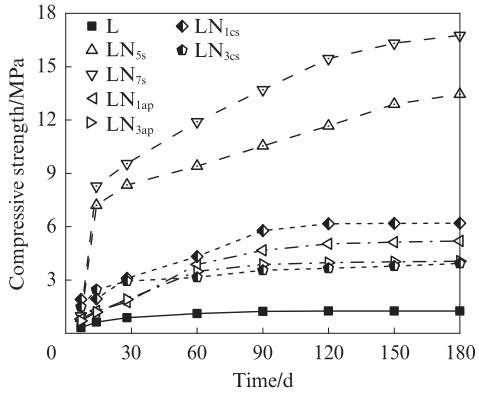


图5 有机物对石灰抗压强度的影响

Fig. 5 Effect of organic matter on compressive strength of lime

2.3 机理分析

2.3.1 物相分析

28 d养护石灰的XRD图谱如图6所示。由图6可见:所有试验组均在23.0°、29.5°、36.0°、39.0°、43.0°、47.5°、48.5°和57.5°处呈现出方解石型$CaCO_3$[23]衍射峰,且峰位与L完全一致,表明有机物改性未改变$CaCO_3$的晶型,亦未生成新物相;在掺入

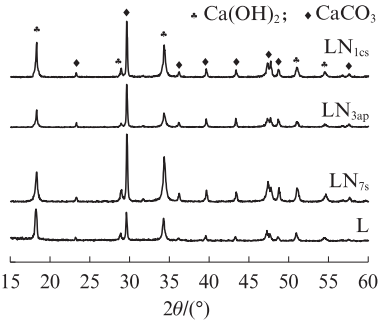


图6　28 d养护石灰的XRD图谱

Fig. 6　XRD patterns of lime at 28 d

4% $NaHCO_3$与5%预糊化玉米淀粉协同改性的试样LN_{7s}中，方解石29.5°的主衍射峰强度增强，这归因于淀粉支链—OH基团与Ca^{2+}的配位作用，加速了$CaCO_3$的成核结晶过程；APAM改性LN_{3ap}与秸秆粉改性LN_{1cs}的$CaCO_3$衍射峰强度提升有限，2种有机物因碳化与扩散失衡限制了后期石灰矿化进程。

2.3.2　形貌分析

28 d养护石灰的SEM照片如图7所示。与XRD图谱结果一致，微观结构中$CaCO_3$类型为方解石型。由图7可见：L为松散多孔结构，$Ca(OH)_2$颗粒以六方片状和板片状交联堆积(图7(a))；预糊化玉米淀粉通过支链—OH基团与Ca^{2+}配位，诱导生成颗粒更细小和不规则的$CaCO_3$晶体，形成淀粉-晶体互穿网络填充孔隙(图7(b))；APAM中的—$CONH_2$和—COO^-基团吸附Ca^{2+}生成鳞片状的$CaCO_3$晶体，但高分子链缠结导致局部孔隙未填充(图7(c))；碱化秸秆粉中纤维素—OH基团与Ca^{2+}产生强烈结合作用，也生成了类似鳞片状的$CaCO_3$聚合体，但存在孔隙缺陷(图7(d))。综合来说预糊化玉米淀粉改性石灰构建了有机无机复合结构，密实度较高，为最优改性方案，APAM与秸秆粉改性石灰因存在孔隙缺陷，改性效果次之。

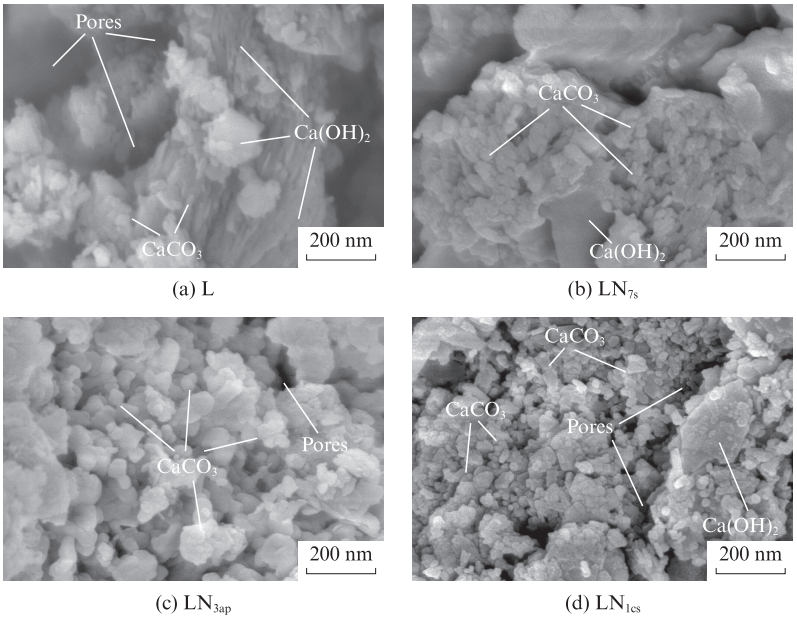


图7　28 d养护石灰的SEM照片

Fig. 7　SEM images of lime at 28 d

3　结论

(1)预糊化玉米淀粉与阴离子聚丙酸胺(APAM)显著减缓了石灰的水分蒸发，较秸秆粉能更有效地抑制开裂并延长石灰碳化周期。

(2)3种有机物均降低了石灰的毛细吸水率、干燥速率、吸水率和孔隙率，并提高了软化系数。秸秆粉和预糊化玉米淀粉提高了石灰的表观密度，7%预糊化玉米淀粉改性效果最优，有机无机复合材料改善了石灰的物理性能。

(3)有机物改性显著提升了石灰的抗压强度，其中5%和7%预糊化玉米淀粉改性组的14 d抗压强度分别达7.20、8.28 MPa，这归因于玉米淀粉的保水增稠作用及其对$CaCO_3$晶体的调控效应。

(4)3种有机物改性石灰碳化后均生成方解石型$CaCO_3$。预糊化玉米淀粉诱导生成纳米级$CaCO_3$晶体，使改性石灰的致密性提升。APAM与秸秆粉减少了石灰的孔隙但结构存在局部缺陷。综合改性效果排序为预糊化玉米淀粉＞秸秆粉＞APAM。

参考文献：

[1] 李新明，武迪，张浩扬，等. 酸环境下石灰-偏高岭土改性遗址土的强度及色差分析[J]. 建筑材料学报，2023，26(7)：783-791.
LI Xinming，WU Di，ZHANG Haoyang，et al. Strength and

color difference analysis of lime-metakaolin modified site soil in acidic environment[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(7):783-791. (in Chinese)

[2] 魏国锋, 周虎, 方世强, 等. 石灰种类对传统糯米灰浆性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(5):873-878.
WEI Guofeng, ZHOU Hu, FANG Shiqiang, et al. Effect of lime type on properties of traditional sticky rice-lime mortar[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(5):873-878. (in Chinese)

[3] 缪纪生, 李秀英, 程荣逵, 等. 中国古代胶凝材料初探[J]. 硅酸盐学报, 1981, 10(2):234-240.
MIAO Jisheng, LI Xiuying, CHENG Rongkui, et al. A preliminary investigation of cementing materials used in ancient China[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1981, 10(2):234-240. (in Chinese)

[4] 刘效彬, 崔彪, 张秉坚. 浙江古城墙传统灰浆材料的分析研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(1):237-242.
LIU Xiaobin, CUI Biao, ZHANG Bingjian. The analysis of traditional lime mortars from Zhejiang Province, China[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(1):237-242. (in Chinese)

[5] ZHANG K, ZHANG H, FANG S Q, et al. Textual and experimental studies on the compositions of traditional Chinese organic-inorganic mortars[J]. Archaeometry, 2014, 56:100-115.

[6] WANG L Z, XIE Y G, WU Y X, et al. Failure mechanism and conservation of the ancient seawall structure along Hangzhou Bay, China[J]. Journal of Coastal Research, 2012, 28(6):1393-1403.

[7] WANG S W, WANG S L, LU Z, et al. Characterization of sticky-rice lime binders from old masonry relics in north China: The primary contribution for conservation[J]. Construction and Building Materials, 2020, 250:118887.

[8] 薛洋海. 浅谈胶黏剂[J]. 黑龙江交通科技, 2010(6):122.
XUE Panhai. Brief discussion on adhesives[J]. Heilongjiang Jiaotong Keji, 2010(6):122. (in Chinese)

[9] 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.

[10] 成亮, 钱春香. 生物矿化碳酸钙机理研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2006, 25(6):108-116.
CHENG Liang, QIAN Chunxiang. Advances in the research of mechanism of biomineralizing calcium carbonate[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2006, 25(6):108-116. (in Chinese)

[11] 冯庆玲. 生物矿化与仿生材料的研究现状及展望[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(3):378-383.
FENG Qingling. Review of current biomineralization and biomimetic materials[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2005, 45(3):378-383. (in Chinese)

[12] MATAHWA H, RAMIAH V, SANDERSON R D. Calcium carbonate crystallization in the presence of modified polysaccharides and linear polymeric additives[J]. Journal of Crystal Growth, 2008, 310(21):4561-4569.

[13] SOMMERDIJK N A J M, DE WITH G. Biomimetic $CaCO_3$ mineralization using designer molecules and interfaces [J]. Chemical Reviews, 2008, 108(11):4499-4550.

[14] 赵建民, 麦康森, 张文兵, 等. 贝壳珍珠层及其仿生应用[J]. 高技术通讯, 2003(11):94-98.
ZHAO Jianmin, MAI Kangsen, ZHANG Wenbing, et al. A review on characteristic of nacre and its potential for biomimetic applications[J]. Chinese High Technology Letters, 2003(11):94-98. (in Chinese)

[15] 闫强强, 王社良, 吴卓, 等. 偏高岭土增强传统糯米-石灰浆力学性能及耐久性试验研究[J]. 混凝土, 2021(12):113-116.
YAN Qiangqiang, WANG Sheliang, WU Zhuo, et al. Experimental study on the mechanical properties and durability of traditional glutinous rice-lime slurry enhanced by metakaolin[J]. Concrete, 2021(12):113-116. (in Chinese)

[16] 郑晓平, 魏国锋, 张秉坚. 自制硅酸盐对传统糯米灰浆性能的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(4):128-133.
ZHENG Xiaoping, WEI Guofeng, ZHANG Bingjian. Influence of prepared silicate on properties of traditional sticky rice-lime mortar[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(4):128-133. (in Chinese)

[17] WEI G F, ZHANG H, WANG H M, et al. An experimental study on application of sticky rice - lime mortar in conservation of the stone tower in the Xiangji Temple[J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1):624-632.

[18] 李祖光, 方世强, 魏国锋, 等. 无机添加剂对糯米灰浆性能影响及机理研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(3):462-468.
LI Zuguang, FANG Shiqiang, WEI Guofeng, et al. Influence of inorganic admixture on performance of sticky rice-lime mortar and its mechanism[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(3):462-468. (in Chinese)

[19] 刘东莉. 不同链/支比玉米淀粉颗粒结构原位表征与分析[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
LIU Dongli. In-situ characterization and analysis of corn starch granules with different chain/branch ratios [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)

[20] 张华, 王新天, 宋佳宁, 等. 不同干燥方法对预糊化淀粉理化性质的影响[J]. 食品工业, 2018, 39(7):4-7.
ZHANG Hua, WANG Xintian, SONG Jianing, et al. Effects of different drying methods on physicochemical properties of pregelatinized starch[J]. The Food Industry, 2018, 39(7):4-7. (in Chinese)

[21] 王振波, 孟凡超, 刘泽, 等. 高延性天然水硬性石灰基材料的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(12):1143-1151.
WANG Zhenbo, MENG Fanchao, LIU Ze, et al. Mechanical properties of natural hydraulic lime based materials with high ductility[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(12):1143-1151. (in Chinese)

[22] Conservation of Cultural Property. Test methods for determination of water absorption by capillarity: UNI/EN 15801—2010[S]. Madrid: European Committee for Standardization, 2009.

[23] 曹伟达, 杨全兵. 碳化养护对钢渣-熟石灰固碳砖耐久性的影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(3):324-331.
CAO Weida, YANG Quanbing. Effect of carbonation curing on durability of carbon fixing steel slag-slaked lime brick[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(3):324-331. (in Chinese)