文章编号:1007-9629(2025)06-0499-09

石灰石粉复合磷酸镁水泥的高温性能及机理

蒋晚晚¹, 朱金才^{1,2,*}, 孟晓凯³, 王湘君¹

(1.内蒙古工业大学 土木工程学院,内蒙古 呼和浩特 010051; 2.内蒙古工业大学 内蒙古自治区土

木工程绿色建造与智能运维重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010051;

3. 内蒙古工业大学理学院, 内蒙古呼和浩特 010051)

摘要:为扩大磷酸镁水泥(MPC)在高温环境的应用,研究了高温作用后石灰石粉(LP)复合磷酸镁水 泥(LP-MPC)的高温性能及机理。结果表明:随着温度的升高,LP-MPC的质量损失率增大,抗压强 度呈先下降后平稳的趋势,孔结构特征趋于劣化;当温度低于600℃时,LP-MPC主要以MgKPO4・ 6H2O脱水为主,LP对提高MPC的抗压强度有利;当温度高于600℃时,CaCO3高温分解,随着LP掺 量的增加,LP-MPC质量损失率增大,抗压强度减小,温度及LP掺量对孔隙结构的劣化影响显著;高 温后LP-MPC相同分形区域下的孔隙结构随着温度的升高复杂程度降低,有害孔与多害孔的分形 维数与抗压强度的相关性更高。

关键词:磷酸镁水泥;石灰石粉;高温作用;抗压强度;孔结构 中图分类号:TU525.9 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.06.002

Properties and Mechanisms of Limestone Powder Blended Magnesium Phosphate Cement under High Temperature

JIANG Wanwan¹, ZHU Jincai^{1,2,*}, MENG Xiaokai³, WANG Xiangjun¹

 (1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;
 Inner Mongolia Key Laboratory of Green Construction and Intelligent Operation and Maintenance of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;
 School of Sciences, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: To expand the application of magnesium phosphate cement(MPC) in high-temperature environments, the properties and mechanisms of limestone powder blended magnesium phosphate cement(LP-MPC) after exposure to high temperature were investigated. The results indicate that as the temperature increases, the mass loss rate of LP-MPC gradually rises, while the compressive strength exhibits an initial decline followed by a stabilization trend, accompanied by a deterioration in pore structure characteristics. Below 600 °C, dehydration of MgKPO₄·6H₂O dominates in LP-MPC, and LP is beneficial for enhancing the compressive strength of MPC. However, above 600 °C, CaCO₃ undergoes decomposition at high temperature, leading to an increased mass loss rate and a decrease in compressive strength as LP content increases. Both temperature and LP content significantly affect the deterioration of pore structure. After high temperature exposure, the complexity of pore structure in LP-MPC decreases with rising temperature within the same fractal region, and the fractal dimension of detrimental and highly detrimental pores correlate more closely with compressive strength.

通讯作者:朱金才(1985—),男,内蒙古呼伦贝尔人,内蒙古工业大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail:ZJC00288@126.com

收稿日期:2024-08-15;修订日期:2024-10-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52168031);内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2024MS05056,2022QN01007);内蒙古自治区直 属高校基本科研业务费项目(JY20220152,JY20220222);内蒙古工业大学科学研究项目(BS201944)

第一作者:蔣晚晚(1997—),女,贵州六盘水人,内蒙古工业大学硕士生。E-mail;jww59588@126.com

Key words: magnesium phosphate cement; limestone powder; high temperature; compressive strength; pore structure

火灾对建筑物结构耐久性构成威胁,高温下混 凝土易开裂和剥落^[1],导致其力学性能降低^[2-3]。鉴于 此,工程领域需要在高温环境中采用耐高温材料,以 延长建筑物的服役寿命。

磷酸镁水泥(MPC)具有凝结硬化快、早期强度 高以及与混凝土黏结性好等优点^[4-9],在混凝土构筑 物的快速修补领域得到了广泛应用^[10]。在模拟火灾 试验中,MPC展现出良好的力学强度和保温隔热性 能^[11],这得益于其内部的游离水和化学键结合水能 够有效吸收热量,从而延缓了火灾的蔓延^[12]。当前, MPC的研究重点已转向高性能复合材料领域,通过 掺入偏高岭土^[13-14]、硅灰^[15-16]、粉煤灰^[17]、纤维^[18]和镍 铁渣^[19]等材料,进一步提升MPC的性能。石灰石粉 (LP)作为一种成本低廉且兼容性强的材料,当适量 掺入MPC中时,能够显著提高早期MgKPO4·6H₂O 的结晶程度和生成量,使MPC结构更加致密^[20]。此 外,石灰石中的Ca²⁺通过其活性作用促进新相的生 成,进一步优化了MPC的孔隙结构^[21]。

目前,关于石灰石粉复合磷酸镁水泥(LP-MPC) 的研究主要集中在常温下力学性能及微观机理,而 对于其耐高温性能的研究鲜有报道。因此,本文研 究了105~1000℃作用后LP-MPC的力学性能及微 观结构,以期为MPC在高温环境下的应用提供理论 依据。

1 试验

1.1 原材料

MgO为由菱镁矿(MgCO₃)经过1800℃高温煅 烧后研磨而成的黄色粉末,平均粒径为185.436µm; 磷酸二氢钾(KH₂PO₄,PDP)选用四川某公司生产的 纯度(质量分数,文中涉及的组成、比值等除特殊说 明外均为质量分数或质量比)为99%的工业级产品; 硼砂(Na₂B₄O₇·10H₂O,SB)为天津某公司生产的化 学纯试剂;LP由河南某厂家提供,平均粒径为 95.743µm。用X射线荧光光谱(XRF)分析了MgO 和石灰石粉的氧化物组成,结果见表1。由表1可见, LP中CaCO₃的含量占90%以上。

1.2 试件的制备

胶凝材料为 MgO、PDP 和 LP,设置 MgO 与 PDP 的质量比m(MgO):m(PDP)=3.00,水胶 比 $m_w:m_B=0.16$,硼砂与 MgO 的质量比m(SB):m(MgO)=0.05。以 MgO 和 PDP 的总质量计,LP

表1 MgO和石灰石粉的氧化物组成 Table 1 Oxide compositions(by mass) of MgO and LP

							Unit: %
Material	MgO	$CaCO_3$	CaO	SiO_2	$\mathrm{Fe}_{2}\mathrm{O}_{3}$	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	Other
MgO	90.87		1.43	6.51	0.58	0.38	0.23
LP	0.11	92.50		2.02		0.37	5.00

的掺量 w_{LP} 为 0%(未掺 LP 的对照组)、10%、20%、 30%,制备的试件分别记为 MPC-0LP、MPC-10LP、 MPC-20LP、MPC-30LP。试件的制备过程为:(1)按 比例将称量好的原材料在搅拌机中干混1 min;(2)加 入自来水混合 2 min,直至搅拌均匀;(3)将水泥浆体 倒入尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm(用于强度和 质量损失测试)与 40 mm×40 mm×40 mm(用于强度和 质量损失测试)与 40 mm×40 mm×40 mm(用于微 观测试)的模具中,在振动台上振捣 1 min使其成型 密实,刮去多余的浆料,使表面光滑;(4)自然养护3 h 后脱模,放置在(20±2)℃、相对湿度 RH 为(50± 5)%的室内自然养护至 28 d。下文中,高温处理前的 试件是指 20℃下自然养护的试件。

1.3 试验方法

1.3.1 高温养护

试件在105℃烘干箱中烘24h后,将其置入马 弗炉中加热至目标温度t为105、200、400、600、 800、1000℃,升温速率为10℃/min,达到目标温度 后恒温2h,取出置于室温下自然冷却,24h后进行 测试。

1.3.2 强度和质量损失测试

参照 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》进行抗压强度测试。采用 WDW-100型 电子通用试验机,加载速率为2400 N/s,每组3个试件,结果取平均值。

测试试件的初始质量 *m*₀、高温后的质量 *m*_t,其质量损失率 *w*_t为:

$$w_t = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100\%$$
 (1)

1.3.3 微观测试

对高温后的试件进行 24 h 真空保水,达到饱水 状态后,采用 MesoMR23-060H-I型核磁共振分析 仪测试试件的孔结构。采用 D/max-β型 X 射线衍射 仪(XRD)测试试件的物相组成,辐射源为 CuKα靶, 工作电压为 35 kV,工作电流为 30 mA,步宽为 0.02°, 扫描范围为 5°~90°,扫描速率为 5 (°)/min。采用 FEI-QUANTA-650FEG型扫描电子显微镜(SEM) 对试件的微观结构进行测试。热重-差示扫描量热 (TG-DSC)测试采用德国耐驰公司生产的 STA449-F5型同步热分析仪,参照物为α-Al₂O₃,以 10 ℃/min的升温速率从30 ℃加热至1000 ℃,保护 气为氮气。

由 TG-DSC 曲线的失重率可计算 MgKPO₄・ 6H₂O的含量 w_{M} 为:

$$w_{\rm M} = \frac{M_{\rm M} \times \omega_{\rm 62-300}}{6 \times M_{\rm W}} \tag{2}$$

式中: $M_{\rm M}$ 为MgKPO₄·6H₂O的摩尔质量; $M_{\rm w}$ 为水的 摩尔质量; ω_{62-300} 为62~300 ℃对应的TG-DSC曲线 的失重率。

2 结果与分析

2.1 质量损失率

试件的质量损失率见图1。由图1可见:随着温度的升高,所有试件的质量损失率均增大;当温度为 105℃时,试件的质量损失率大幅上升至10%左右, 该阶段为试件基体内部大量自由水与少量结合水的 蒸发所致;当温度为105~400℃时,试件质量损失率 的上升速率开始放缓,LP掺量对试件的质量损失率 无明显影响;当温度为600℃时,试件的质量损失率随 着LP掺量的增加而增大;当温度为800℃时,不同LP 掺量的试件质量损失率差距显著,试件MPC-0LP、 MPC-30LP的质量损失率分别为18.36%、25.66%, 其主要原因是LP的主要成分CaCO₃在高温作用后发 生分解,导致基体质量损失率发生明显变化^[22];当温 度为1000℃时,试件MPC-0LP、MPC-30LP的质量 损失率分别为19.34%、26.08%。



2.2 抗压强度

试件的抗压强度见图 2。由图 2 可见:随着温度 的升高,试件的抗压强度均呈先下降后平稳的趋势; 当温度为 200 ℃时,试件的抗压强度下降幅度较大, 与高温前相比,试件 MPC-0LP、MPC-10LP、 MPC-20LP、MPC-30LP的抗压强度分别降低了 60.52%、60.32%、59.35%、54.02%,其原因是MPC 的主要水化产物 MgKPO₄・6H₂O 在 125 ℃时逐渐失 去结晶水,影响了晶体结构,从而导致试件的强度降 低[23];当温度为105~600℃时,试件的抗压强度随着 LP掺量的增加均有一定程度的增大(MPC-30LP除 外);当温度为600℃时,与未掺LP的试件MPC-0LP 相比,试件MPC-10LP、MPC-20LP、MPC-30LP的 抗压强度分别增加了5.61%、19.69%、16.09%,适量 LP的掺入能够改善MPC的耐高温性能,这可能是由 于接近惰性的CaCO3颗粒与未水化MgO颗粒均可 作为MPC硬化体的微集料,水化产物分布其间,从 而使 MPC 硬化体结构更加致密,提高了其抗压强 度^[20]; 当温度为800~1000℃时, 试件 MPC-0LP、 MPC-10LP的抗压强度发生了一定程度的回升,这 是由于 MPC 在 1 000 ℃左右出现烧结熔融现象^[24], 而试件MPC-20LP、MPC-30LP抗压强度未出现回 升,说明LP掺量过高不利于MPC的烧结熔融;当温 度为1000 ℃时,试件的抗压强度随着LP 掺量的增 加 而 降 低,试件 MPC-30LP 的 抗 压 强 度 低 至 7.28 MPa, 较未掺 LP 的试件 MPC-0LP 降低了 56.43%。结合质量损失率分析可知,过高的温度将 导致LP-MPC基体内LP的稳定性降低,进而导致其 抗压强度降低。



Fig. 2 Compressive strength of specimens

2.3 TG-DSC分析

试件的 TG-DSC 曲线见图 3。由图 3 可见:(1) MPC-0LP 试件的 TG-DSC 曲线中只有 1 个质量损 失阶段,而掺入 LP 的试件有 2 个明显的质量损失阶 段。(2)62~300 ℃为 MgKPO4·6H₂O 的脱水区间^[25], 此区间内试件 MPC-0LP、MPC-10LP、MPC-20LP、 MPC-30LP 的质量损失率分别为 16.37%、16.57%、 16.15%、14.36%,其对应的 MgKPO4·6H₂O 含量分 别为40.32%、44.08%、39.78%、35.36%,可见试件 MPC-10LP的MgKPO4·6H₂O生成量最高。(3)当温 度为120℃左右时,所有试件的DSC曲线均存在明 显的吸热峰,说明此时发生了吸热反应,为 MgKPO4·6H₂O受热分解发生脱水;试件MPC-10LP 的吸热峰最强,对应TG曲线中LP-MPC质量下降 显著,其失重率最大。(4)当温度为400~600 ℃时,试 件内部的结晶水损失趋于稳定。(5)当温度为600~ 800 ℃时,LP-MPC再次发生失重,且随着LP掺量的 增加,其失重率增加,对应的DSC曲线中可以看出此 时LP-MPC有1个吸热峰,为LP中CaCO₃的分 解^[22],进而引起LP-MPC的失重。



Fig. 3 TG-DSC curves of specimens

2.4 孔隙结构特性分析

2.4.1 核磁共振 T₂谱

试件的T。谱见图4。由图4可见:对高温处理前 的试件,其T。谱均仅有1个明显的波峰,且信号幅值较 小,表明试件内部以小孔隙为主,孔隙数量较少;当温 度为105℃时,试件的T₂谱有2个波峰,第1波峰峰值 明显高于第2波峰,T。谱的信号幅值明显增大,表明基 体中的孔隙以小孔隙为主,并存在少量中孔隙,同时 孔隙数量增加,原因是自由水蒸发和MgKPO4·6H2O 脱水导致基体内部孔隙增加;当温度为200~600℃ 时,试件的T2谱信号幅值均随着温度的增加而增大, 表明其孔隙结构劣化,不同LP掺量试件的T。谱变化 规律大致相同,表明LP掺量对MPC孔隙结构影响不 大;当温度为800℃时,试件的T₂谱波峰位置向右偏 移,波峰涵盖的孔径增大,幅值信号显著增大,表明孔 径扩张,孔隙数量增多,此时试件 MPC-20LP、 MPC-30LP出现了3个波峰,T₂谱的信号幅值增大,表 明基体孔隙由小孔隙、中孔隙和大孔隙组成,孔隙数 量增多;当温度为1000℃时,试件的T₂谱均出现3个 波峰,第1波峰峰值减小,第2波峰峰值增大为主波 峰,T2谱的信号幅值较大,表明小孔隙占比降低,基体 中的孔隙以中孔隙为主,并存在大孔隙,孔隙结构劣 化严重;当温度为800、1000℃时,随着LP掺量的增 加,试件 T₂谱的波峰位置向右偏移,T₂谱的信号幅值 增大,表明LP加速了 MPC 孔隙结构的劣化,其原因 是CaCO₃的分解导致基体内部孔隙增加。

2.4.2 孔径分布

为更深入地分析高温对LP-MPC孔结构的影 响,根据孔径d将孔隙分为4种类型^[26]:无害孔(d< 20 nm)、少害孔(20 mm≤d<50 nm)、有害孔(50 mm≤ d≤200 nm)和多害孔(d>200 nm)。试件的孔径分 布和孔隙率(体积分数)见图5。由图5可见:(1)当温 度为20~600℃时,各试件的孔隙主要为无害孔,其 体积占比为50%~64%;有害孔体积占比最小,为 6%~32%;试件孔径分布随温度增加变化不明显, 但孔隙率由2.46%增至7.00%;LP掺量对孔径分布 影响不明显。(2)当温度为600~1000℃时,随着温度 的升高,无害孔减少,其体积占比由50%~55%降至 3%~27%,其中试件 MPC-30LP下降幅度最大,体 积占比由 53% 降至 3%;多害孔增多,其体积占比由 17%~21% 增加至 28%~79%,其中试件 MPC-30LP 增加幅度最大,体积占比由 20% 增加至 79%;孔隙率显著增大,由 6.84%~7.00% 增加至 14.63%~24.03%,其中试件MPC-30LP增加幅度最 大,由 6.86% 增加到 24.03%。综上,温度及 LP 掺量 对LP-MPC孔径分布和孔隙率影响显著。





2.4.3 分形维数

目前,常采用分形理论来表征孔隙的结构特征。 通过分形分析,可以有效量化孔隙体积空间的复杂 程度。分形维数D的计算式^[27]为:

 $\lg S_v = (3-D) \lg T_2 + (D-3) \lg T_{2,max}$ (3) 式中: S_v 为累计孔隙体积分数; $T_{2,max}$ 为最大横向弛豫 时间。分形维数越接近2,该分形结构的复杂程度越 小,孔隙均质性越强;反之,分形维数越接近3,该分 形结构的复杂程度越大,孔隙非均质性越强^[25]。

绘制试件 MPC-10LP 的 lg T_2 曲线,结果见图 6。 由图 6 可见,根据孔径大小将曲线划分为4个分形区 域,分别对应于无害孔(I)、少害孔(II)、有害孔(III) 和多害孔(IV)。

对图6中lg T₂进行线性拟合,得到试件MPC-10LP 不同区域的分形维数,结果见图7。由图7可见:无害 孔的分形维数不在2.00~3.00范围内,无法通过欧式 几何学描述,因此排除此分形区域^[28];少害孔、有害 孔、多害孔的分形维数分别为2.61~2.72、2.73~ 2.91、2.84~2.93,说明试件MPC-10LP中的内部孔 隙结构具有明显的分形特征,与少害孔对比,有害孔



与多害孔的孔隙结构复杂程度更高,非均质性越强;当温度为20~600℃时,少害孔的分形维数由2.72降低至2.63,有害孔的分形维数由2.91降低至2.76,多害孔的分形维数由2.99降低至2.84,表明各分形区域下的孔隙结构随着温度的升高复杂程度降低;对比600℃下多害孔的分形维数增大,表明多害孔复杂程度增加,可能是MPC本身出现烧结熔融现象,导致孔隙通道曲折,空间分布形态复杂性、不规则性和多样性加剧。



Fig. 7 Fractal dimension of specimen MPC-10LP

若分形区域内抗压强度随着分形维数的增加 而增大,则表明该分形区域内抗压强度随着孔结构 复杂程度的提高而提高。高温后试件 MPC-10LP 抗压强度与分形维数的关系见图 8。由图 8 可见, 在相同分形区域下,孔隙结构分形维数与抗压强度 具有一定的正相关性,但相关程度不同;高温作用 后,少害孔、有害孔和多害孔抗压强度与分形维数的线性相关系数 R²分别为 0.704 3、0.901 8 和 0.910 4。综上,与少害孔相比,多害孔、有害孔与抗压强度的关联性更强,通过有害孔与多害孔的分形维数能够更准确地反映高温后 LP-MPC 抗压强度的变化。





2.5 XRD分析

试件MPC-10LP的XRD图谱见图9。由图9可 见:高温作用前(20℃),试件MPC-10LP的主要水 化产物为MgKPO4·6H2O、未反应MgO和CaCO3; 随着温度的升高,结合图3的TG-DSC分析,当温度 为105~200 ℃时,大部分 MgKPO4·6H2O 失去部分 结晶水而形成 MgKPO₄·H₂O,此时主要水化产物为 MgKPO₄·H₂O、残留的 MgKPO₄·6H₂O、未反应 MgO和CaCO₃;当温度为400℃时,MgKPO₄·6H₂O 消失,此时主要水化产物为MgKPO₄·H₂O、未反应 MgO和CaCO₃; 当温度为600℃时, MgKPO₄·H₂O 分解成 Mg₂P₂O₇; 当温度为 800~1 000 ℃时, CaCO₃ 分解生成CaO,此外检测到新生成物 $Mg_3(PO_4)_2$,此 时主要水化产物为Mg₃(PO₄)₂、未反应的MgO和 CaO。MgKPO₄·6H₂O 高温分解成 Mg₂P₂O₇和 Mg₃ $(PO_4)_2$ 以及CaCO₃分解是抗压强度降低的重要 原因。



·		
A AAA		1 000 °C
A AAA V	•	<u>♠ ♠800 ℃</u>
B BB A		<u>♦ €600 °C</u>
vy vi	iî	<u>♦</u> 400 °C
<u>vv vi * * * .</u>	l.	<u>♦ 200 °C</u>
<u>vv</u> <u>*</u> **	i î	<u>♦ 105 °C</u>
		▲ 20 °C
5 10 15 20 25 30 35 40	45 50 55 60 6	55 70 75 80 85 90
	A (1/A)	

 $2\theta/(^{\circ})$

图 9 试件 MPC-10LP 的 XRD 图谱 Fig. 9 XRD patterns of specimen MPC-10LP

2.6 SEM 分析

高温作用后试件 MPC-10LP 的 SEM 照片见图 10。由图 10 可见:当温度为 105 ℃时,基体出现裂



图 10 高温作用后的试件 MPC-10LP SEM 照片 Fig. 10 SEM images of specimen MPC-10LP after high temperature

纹,MgKPO4·6H2O中结晶水的损失导致晶体表面出 现缝隙;当温度为400~800℃时,提供一定强度的 MgKPO4·6H2O消失,MPC水化产物由原来的块状 结构转变为表面有裂纹和孔洞的不规则形状,裂纹 的长度与数量增加,宏观性能呈下降趋势;当温度为 1000℃时,MPC中晶体被烧结熔融,基体内晶体重 组,晶体之间连接紧密,同时CaCO3分解导致的孔隙 劣化,孔结构呈不规则的沟壑状,该温度下抗压强度 有一定程度的回升,表明烧结熔融所提供的有利影 响弱化了孔结构劣化的不利作用。

3 结论

(1)石灰石粉复合磷酸镁水泥(LP-MPC)的质量 损失率随着温度的升高而增大。当温度低于600℃ 时,主要以自由水蒸发以及MgKPO4·6H2O晶体脱水 为主,石灰石粉(LP)对磷酸镁水泥(MPC)的质量损 失率无明显影响;当温度超过600℃时,CaCO3高温 分解,MPC质量损失率随着LP掺量的增加而增大。

(2)LP-MPC的抗压强度随温度升高呈先下降后 平稳的趋势。当温度低于 600 ℃时,LP 有利于提高 MPC 的抗压强度;当温度超过 600 ℃时,LP 降低了 MPC 的抗压强度;当温度为1000 ℃时,未掺LP 和LP 掺量为10%的MPC抗压强度有一定程度的回升。

(3)适量 LP 提高了 MPC 水化产物的生成量; LP-MPC 的孔结构特征随温度升高趋于劣化,当温 度超过 600 ℃时,温度及 LP 掺量对孔隙结构的劣化 影响显著;高温后 LP-MPC 相同分形区域下的孔隙 结构随着温度的升高复杂程度降低,且有害孔与多 害孔的分形维数与抗压强度的相关性更高。

参考文献:

- [1] ANUPAMA KRISHNA D, PRIYADARSINI R S, NARAYANAN S. Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete [J]. Procedia Structural Integrity, 2019, 14:384-394.
- [2] 刘普,王明华,李庆涛.高温后路缘石再生骨料混凝土的力学 性能[J].建筑材料学报,2022,25(12):1233-1240.
 LIU Pu, WANG Minghua, LI Qingtao. Mechanical properties of curb recycled aggregate concrete after high temperature[J].
 Journal of Building Materials, 2022, 25(12):1233-1240.(in Chinese)
- [3] 毛振豪,张继承,李元齐,等.活性粉末混凝土高温后性能劣 化及微观结构[J].建筑材料学报,2022,25(12):1225-1232.
 MAO Zhenhao, ZHANG Jicheng, LI Yuanqi, et al. Performance degradation and microscopic structure of reactive powder concrete after exposure to high temperature [J]. Journal of Building

Materials, 2022, 25(12):1225-1232.(in Chinese)

- [4] LI Y, BAI W L, SHI T F. A study of the bonding performance of magnesium phosphate cement on mortar and concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 142:459-468.
- [5] QIN J H, QIAN J S, YOU C, et al. Bond behavior and interfacial micro-characteristics of magnesium phosphate cement onto old concrete substrate[J]. Construction and Building Materials, 2018, 167:166-176.
- [6] LIU J X, YAN Y M, LI Z Y, et al. Investigation on the potassium magnesium phosphate cement modified by pretreated red mud:Basic properties, water resistance and hydration heat[J]. Construction and Building Materials, 2023, 368:130456.
- [7] QIAO F, CHAU C K, LI Z J. Property evaluation of magnesium phosphate cement mortar as patch repair material[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(5):695-700.
- [8] LAIZY, WANGHT, HUY, et al. Rapid solidification of highly loaded high-level liquid wastes with magnesium phosphate cement[J]. Ceramics International, 2019, 45(4):5050-5057.
- [9] MA C, CHEN G G, JIANG Z W, et al. Rheological properties of magnesium phosphate cement with different M/P ratios[J]. Construction and Building Materials, 2021, 282:122657.
- [10] 陈柯宇,张抒扬,闵万林,等.树脂基改性玄武岩纤维增韧海水-海砂磷酸镁水泥砂浆性能[J].硅酸盐学报,2024,52(5):1532-1542.
 CHEN Keyu, ZHANG Shuyang, MIN Wanlin, et al. Properties of seawater sea-sand magnesium phosphate cement mortar reinforced with resin-based modified basalt fibers[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2024, 52(5):1532-1542. (in Chinese)
 [11] 丁涛,刘铁,蒋俊,等.磷酸镁水泥基多孔材料孔结构及性能
- 研究[J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(8):7-13. DING Tao, LIU Tie, JIANG Jun, et al. Pore structure and performance of porous materials based on magnesium phosphate cement[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2022, 44(8):7-13.(in Chinese)
- [12] YUAN F, PENG C, ZHU D, et al. Properties of a magnesium phosphate cement-based fire-retardant coating containing glass fiber or glass fiber powder [J]. Construction and Building Materials, 2018, 162:553-560.
- [13] LIU R Q, WANG W, CUI Y P, et al. Impact of metakaolin on hydration properties of magnesium phosphate cement[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20:e02840.
- [14] LIU R Q, WANG W, QI D W, et al. Static and dynamic mechanical properties of magnesium phosphate cement modified by metakaolin after high-temperature treatment[J]. Construction and Building Materials, 2023, 392:131933.
- [15] GAO X J, ZHANG A L, LI S X, et al. The resistance to high temperature of magnesia phosphate cement paste containing wollastonite [J]. Materials and Structures, 2016, 49 (8): 3423-3434.
- [16] 高明,刘宁,陈兵.微硅粉改性磷酸镁水泥砂浆试验研究[J]. 建筑材料学报,2020,23(1):29-34.
 GAO Ming, LIU Ning, CHEN Bing. Effect of silica fume on

properties of magnesium phosphate cement mortar[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):29-34.(in Chinese)

- [17] 林玮,孙伟,李宗津.磷酸镁水泥中的粉煤灰效应研究[J].建 筑材料学报,2010,13(6):716-721.
 LIN Wei, SUN Wei, LI Zongjin. Study on the effects of fly ash in magnesium phosphate cement [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(6):716-721.(in Chinese)
- [18] AHMAD M R, CHEN B. Microstructural characterization of basalt fiber reinforced magnesium phosphate cement supplemented by silica fume [J]. Construction and Building Materials, 2020, 237:117795.
- [19] 刘佳辉,周新涛,罗中秋.镍铁渣基磷酸镁水泥的制备及其机 理研究[J].建筑材料学报,2020,23(2):255-262.
 LIU Jiahui, ZHOU Xintao,LUO Zhongqiu. Preparation and formation machanism of ferronickel slag-based magnesium phosphate cement[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2): 255-262. (in Chinese)
- [20] 杨建明,杜玉兵,徐选臣.石灰石粉对磷酸镁胶结材料浆体性能的影响[J].建筑材料学报,2015,18(1):38-43.
 YANG Jianming, DU Yubing, XU Xuanchen. Effect of limestone powder on properties of magnesium phosphate cement paste[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(1):38-43.(in Chinese)
- [21] WU Q Q, HOU Y Y, MEI J T, et al. Influence of synthetic limestone sand on the frost resistance of magnesium potassium phosphate cement mortar[J]. Materials, 2022, 15:6517.
- $[\,22\,]$ $\ \ LIU \ X \ G$, $\ NIU \ D \ T$, $\ LI \ X \ C$, et al. Effects of $\ Ca(\ OH)_2\mbox{-}CaCO_3$

concentration distribution on the pH and pore structure in natural carbonated cover concrete: A case study [J]. Construction and Building Materials, 2018, 186:1276-1285.

- [23] LI Y, SHI T F, CHEN B, et al. Performance of magnesium phosphate cement at elevated temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2015, 91:126-132.
- [24] 赖振宇,钱觉时,卢忠远,等.不同温度处理对磷酸镁水泥性能的影响[J].功能材料,2012,43(15):2065-2070.
 LAI Zhenyu, QIAN Jueshi, LU Zhongyuan, et al. Effects of different temperature treatment to properties of magnesium phosphate cement[J]. Journal of Functional Materials, 2012,43 (15):2065-2070.(in Chinese)
- [25] 朱金才,李超众,闫长旺,等.粉煤灰改性磷酸镁水泥性能及 机理分析[J].材料科学与工程学报,2024,42(2):262-268.
 ZHU Jincai, LI Chaozhong, YAN Changwang, et al. Performance and mechanism analysis of magnesium phosphate cement modified by fly ash[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2024, 42(2):262-268.(in Chinese)
- [26] ZHOU M H, DONG W. The relationship between pore structure and strength of aeolian sand concrete under low temperature[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 80:108067.
- [27] ZHAO K, MA C, YANG J, et al. Pore fractal characteristics of fiber-reinforced backfill based on nuclear magnetic resonance[J]. Powder Technology, 2023, 426:118678.
- [28] ZHANG B Q, LI S F. Determination of the surface fractal dimension for porous media by mercury porosimetry[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1995, 34(4):1383-1386.