

文章编号:1007-9629(2024)01-0016-07

陶砂对石灰石-煅烧黏土-水泥砂浆性能的影响

程书凯^{1,2}, 游 啸¹, 陈旭勇^{1,2,*}, 陈 康¹, 吴子杨¹

(1. 武汉工程大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430073; 2. 武汉工程大学 绿色土木工程材料与结构湖北省工程研究中心, 湖北 武汉 430073)

摘要:采用轻质陶砂、水泥、偏高岭土和石灰石粉制备了石灰石-煅烧黏土-水泥(LC3)砂浆,研究了陶砂掺量及预湿状态对LC3砂浆干密度、力学性能、抗渗性能及抗氯离子侵蚀能力的影响,分析了其强度形成和微观结构机理。结果表明:随着砂胶比的增大,LC3砂浆的干密度和抗压强度逐渐降低,累积吸水量逐渐增大,抗氯离子侵蚀能力逐渐增强;与掺未预湿陶砂的LC3砂浆相比,掺预湿陶砂的LC3砂浆试件28 d抗压强度增大3.4%~10.8%,28 d电通量降低59.0%~80.0%,累积吸水量降低更为显著。LC3体系中石灰石粉的成核作用能够促进水泥早期水化,偏高岭土的火山灰反应有利于细化孔结构,同时预湿陶砂的内养护效应能够维持基体内部湿度继续促进水泥水化,使得掺预湿陶砂的LC3砂浆微观结构更为密实,从而提高了其力学性能、抗渗性能和抗氯离子侵蚀能力。

关键词:陶砂;石灰石-煅烧黏土-水泥;力学性能;抗渗性能;孔结构

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.01.003

Effect of Ceramsite Sand on Properties of Limestone-Calcined Clay-Cement Mortar

CHENG Shukai^{1,2}, YOU Xiao¹, CHEN Xuyong^{1,2,*}, CHEN Kang¹, WU Ziyang¹

(1. Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China; 2. Hubei Provincial Engineering Research Center for Green Civil Engineering Materials and Structures, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China)

Abstract: Limestone calcined clay cement (LC3) mortar was prepared by using light ceramsite sand, cement, metakaolin and limestone powder. The influences of ceramsite sand content and prewetting state on the dry density, mechanical properties, impermeability and resistance to chloride ion erosion of LC3 mortar were investigated and the strength formation and microstructure mechanism were analyzed. The results show that the dry density and compressive strength of LC3 mortar decrease gradually with the increases of the mass ratio of ceramic sand to binder. The cumulative water absorption of LC3 mortar increases, while its chloride ion penetration resistance increases. However, compared with LC3 mortar without prewet ceramic sand, the 28 d compressive strength of samples mixed with prewet ceramic sand increase by 3.4%~10.8%, the 28 d electric flux decrease by 59.0%~80.0%. In addition, the cumulative water absorption decreases more significantly. For the LC3 system, the nucleation of limestone powder promotes the early hydration of cement and the pozzolanic reaction of calcined clay is contributed to refining pore structure. Meanwhile, the internal humidity of the matrix and the hydration of cement is promoted because of internal curing effect of the prewet ceramic sand, which improves microstructure of the prewet ceramic sand LC3 mortar more

收稿日期:2022-11-25; 修订日期:2023-04-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52208286);湖北省自然科学基金资助项目(2022CFB672);武汉知识创新专项-曙光计划项目(2022020801020362);武汉工程大学科学研究基金资助项目(K2021031)

第一作者:程书凯(1989—),男,湖北武汉人,武汉工程大学讲师,硕士生导师,博士。E-mail:chengsk@wit.edu.cn

通讯作者:陈旭勇(1979—),男,湖北武汉人,武汉工程大学教授,博士生导师,博士。E-mail:chenxy@wit.edu.cn

dense, and thus its mechanical properties, impermeability and resistance to chloride ion erosion are enhanced.

Key words: ceramsite sand; limestone-calcined clay-cement; mechanical property; impermeability; pore structure

普通混凝土由于结构自重大,导致出现基础承载力大、补强修复困难等问题,严重制约了混凝土结构的发展.轻骨料混凝土具有降低结构恒载、提高隔热性能、抗震性能和环境负荷小等优点,已广泛应用于中高层建筑、大中跨度桥梁和恶劣海洋环境等结构中^[1-3].采用人造陶砂制备轻质混凝土是降低混凝土容重的有效途径之一.陶砂不仅具有良好的隔热性能和低弹性模量等特点,还具有吸水 and 释水特性.将其作为砂浆和混凝土的内部成分,可以减缓水分损失,维持砂浆和混凝土内部湿度,促进水泥的水化反应,从而产生致密的微观结构^[4-8].因此,研究和制备轻质砂浆及轻质混凝土对于工程结构和混凝土材料的进步具有重要意义.

石灰石-煅烧黏土-水泥(LC3)是一种向水泥中复掺石灰石粉和煅烧黏土制得的新型胶凝材料^[9].研究表明^[10],合适配合比的石灰石粉和煅烧黏土复掺后可以有效细化水泥孔径,改善力学性能等.Dhandapani等^[11]研究发现,LC3的渗透性远低于普通硅酸盐水泥和粉煤灰基混凝土,其抗氯离子侵蚀能力优于后两者.另外LC3中的水泥熟料替代率可达50%,且不会对力学性能产生明显影响^[12].

鉴于中国丰富的黏土和石灰石粉资源,制备LC3具有低碳环保、成本低廉和来源广泛等优点,将其应用于结构工程中具有广阔的应用前景.因此,本文选用最大粒径为2.36 mm的轻质黏土陶砂作为细集料,采用LC3作为胶凝材料,设计并制备了表观密度低于1 700 kg/m³、强度不低于50 MPa的轻质高强砂浆,探究陶砂吸水状态及其掺量对

LC3砂浆干密度、力学性能、抗渗性能及抗氯离子侵蚀能力的影响规律.

1 试验

1.1 原材料和配合比

本文以P·O 52.5普通硅酸盐水泥(OPC)、偏高岭土(MK)和石灰石粉(LP)作为LC3的主要原材料.其中OPC的表观密度为3 130 kg/m³,比表面积为365 m²/kg;MK为广东茂名的M08型偏高岭土,表观密度为2 520 kg/m³,比表面积为16 800 m²/kg;LP为市售23 μm(600目)钙质石灰石粉,表观密度为2 720 kg/m³,比表面积为795 m²/kg.参考文献[13],将LC3的基础配合比设为 m (普通硅酸盐水泥): m (偏高岭土): m (石灰石粉): m (石膏)=0.50:0.30:0.15:0.05.表1为P·O 52.5水泥的物理性能.水泥、偏高岭土和石灰石粉的化学组成(质量分数,文中涉及的组成、砂胶比等除特别注明外均为质量分数或质量比)见表2.陶砂(CS)选用湖北省某公司产烧结黏土陶砂,粒径为0~3 mm,连续级配,表观密度为1 720 kg/m³,物理性能见表3.减水剂(SP)为聚羧酸减水剂,减水率20%.水(W)为武汉市市政自来水.以绝干和24 h预湿陶砂制备不同系列LC3砂浆,其中陶砂与胶凝材料体积比(V_s/V_b)分别为1.9、2.1、2.3、2.4和2.5;砂胶比(m_s/m_b)分别为1.1、1.2、1.3、1.4和1.5.表4为LC3砂浆的配合比,其中CM表示采用绝干陶砂制备的LC3砂浆,PCM表示采用预湿陶砂制备的LC3砂浆.

1.2 试验设计

LC3砂浆试件尺寸为40 mm×40 mm×

表1 P·O 52.5水泥的物理性能
Table 1 Physical properties of P·O 52.5 cement

Apparent density/ (kg·m ⁻³)	Specific surface area/ (m ² ·kg ⁻¹)	Setting time/min		28 d flexural strength/MPa	28 d compressive strength/MPa
		Initial	Final		
3 130	365	165	210	9.1	58.4

表2 水泥、偏高岭土和石灰石粉的化学组成
Table 2 Chemical compositions(by mass) of cement, metakaolin and limestone powder

Material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	IL
OPC	63.83	19.21	4.18	3.35	1.65	3.32	1.11
LP	51.33	0.31	0.13	0.05	0.77	0.02	42.60
MK	0.18	54.62	43.21	0.78	0.08	0.01	1.04

表 3 陶砂的物理性能
Table 3 Physical properties of ceramsite sand

Apparent density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Bulk density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Void fraction(by volume)/%	Water absorption(by mass)/%	Cylinder compressive strength/MPa
1 720.0	880.5	59.27	5.3	7.8

表 4 LC3 砂浆的配合比 Table 4 Mix proportions of LC3 mortars								
Specimen No.	Mix proportion/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)						m_s/m_b	V_s/V_b
	OPC	MK	LP	CS	SP	W		
CM-1	420.0	120.0	60.0	660.0	5.0	240.0	1.1	1.9
CM-2	420.0	120.0	60.0	720.0	5.0	240.0	1.2	2.1
CM-3	420.0	120.0	60.0	780.0	6.0	240.0	1.3	2.3
CM-4	420.0	120.0	60.0	840.0	6.0	240.0	1.4	2.4
CM-5	420.0	120.0	60.0	900.0	7.0	240.0	1.5	2.5
PCM-1	420.0	120.0	60.0	696.9	5.0	240.0	1.1	1.9
PCM-2	420.0	120.0	60.0	760.3	5.0	240.0	1.2	2.1
PCM-3	420.0	120.0	60.0	823.7	6.0	240.0	1.3	2.3
PCM-4	420.0	120.0	60.0	887.0	6.0	240.0	1.4	2.4
PCM-5	420.0	120.0	60.0	950.4	7.0	240.0	1.5	2.5

160 mm,将其置于标准养护室((20±2)℃、相对湿度(98±2)%)养护至规定龄期后取出.LC3砂浆的干密度测试参照GB/T 5486—2008《无机硬质绝热制品试验方法》执行;LC3砂浆的抗压强度采用YAW-300C微机控制全自动恒应力压力试验机进行测试;LC3砂浆的毛细吸水速率测试参照ASTM C1585—13 *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes* 执行;LC3砂浆的28 d抗氯离子侵蚀能力使用电通量法进行评价,所用仪器为国产NJ-DTL混凝土氯离子电通量测定仪.将养护至28 d的试件切割成尺寸约为

5 mm×5 mm×5 mm的试样,用于微观形态特征分析,采用JSM-7800F扫描电镜(SEM)观察和分析试样界面过渡区(ITZ)的微观结构变化及孔洞中的水化产物;将养护至28 d的试件切割成尺寸约为5 mm×5 mm×5 mm的试样,用于孔结构分析,采用AutoPore IV 9510型全自动压汞仪(MIP)测定其孔径分布;将试样粉碎研磨后,过0.075 μm圆孔筛,先将收集的20 g左右粉末置于105℃烘箱中烘干至恒重,再采用马氏炉升温至950℃,测定其非蒸发水含量.

2 结果与讨论

2.1 干密度

图1为LC3砂浆试件的1、28 d干密度曲线.由图1可见:(1)随着 m_s/m_b 的增大,试件的1、28 d干密度均有不同程度降低.(2)随着 m_s/m_b 的增大,PCM组试件的1、28 d干密度大于CM组试件.(3)当 $m_s/m_b=1.5$ 时,两者间的干密度差异较小.(4)与试件CM-1相比,试件CM-5的1、28 d干密度分别降低11.9%和15.9%;与试件PCM-1相比,试件PCM-5的1、28 d干密度分别降低17.7%和18.9%.这主要是陶砂堆积密度较低,随着 m_s/m_b 的增大,单位体积内陶砂掺量增大所致;而在相同陶砂掺量条件下,PCM组试件较CM组试件含有更多的吸附水,因此,PCM组试件的干密度大于CM组试件.

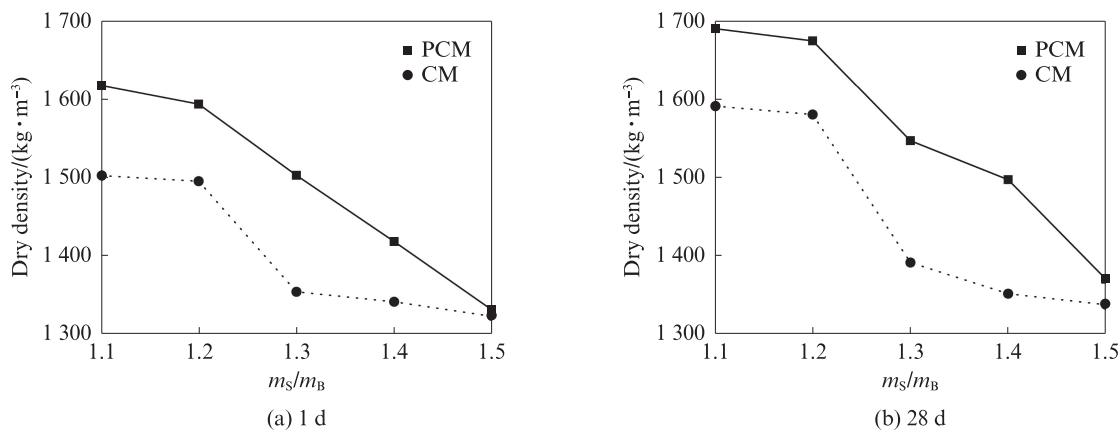


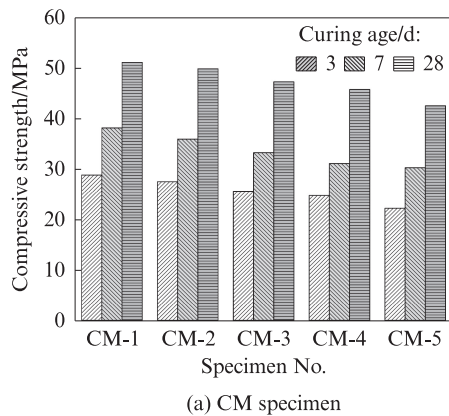
图1 LC3砂浆试件的1、28 d干密度曲线
Fig. 1 Dry density curves of LC3 mortar specimens cured for 1, 28 d

2.2 抗压强度

图2为LC3砂浆试件的抗压强度.由图2可见:

(1)随着 m_s/m_b 的增大,试件各龄期抗压强度逐渐降低.(2)与试件CM-1相比,试件CM-5 3、7、28 d抗压

强度分别降低 22.9%、20.5% 和 16.9%;与试件 PCM-1 相比,试件 PCM-5 3、7、28 d 抗压强度分别降低 22.9%、18.3% 和 17.7%。(3)在相同 m_s/m_b 下,PCM 组试件与 CM 组试件 3 d 抗压强度无明显差异;而随着养护龄期的延长,PCM 组试件 7、28 d 抗压强度明显高于 CM 组试件,其中 PCM 组试件 28 d 抗压强度较 CM 组试件增大 3.4%~10.8%。主要原因是预湿陶砂在砂浆硬化早期阶段释水效应较弱;而随着养护龄期的延长,砂浆内部自由水减少,内部相对湿度降低,使得预湿陶砂逐渐释放内部水分,从而促进了水泥水化^[14],产生更多的水化产物填充内部孔隙,进而提高了试件抗压强度。



2.3 比强度

图 3 为 LC3 砂浆试件的 28 d 比强度曲线。由图 3 可见:随着 m_s/m_b 的增大,PCM 组试件的比强度表现为降低—平稳—上升的变化趋势;而 CM 组试件的比强度表现出降低—上升—降低的变化趋势。结合图 2 可知,试件 PCM-1、PCM-2、PCM-3 和 CM-1 的 28 d 抗压强度均超过 50 MPa,其比强度分别为 0.033 6、0.031 9、0.032 8 和 0.032 2 MPa/(kg·m⁻³);而普通 C50 混凝土的比强度仅为 0.01 70~0.02 10 MPa/(kg·m⁻³)。这表明本文设计的 LC3 砂浆有更高的比强度,具有降低结构恒载和提高抗震性能的优点。

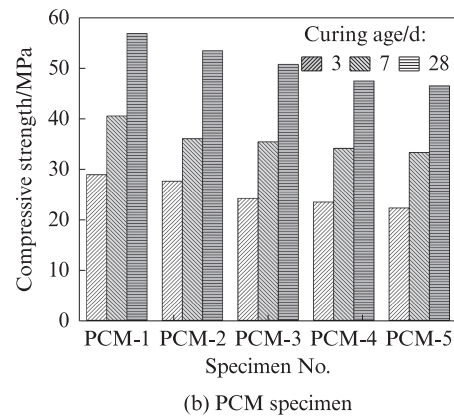


图 2 LC3 砂浆试件的抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of LC3 mortar specimens

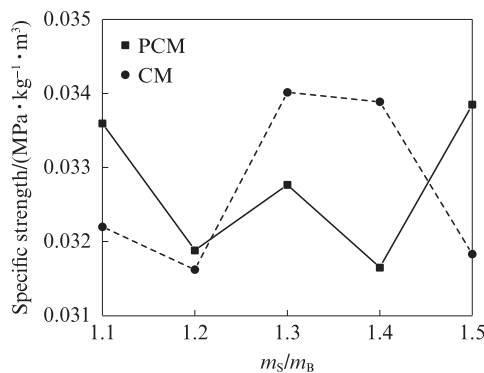


图 3 LC3 砂浆试件的 28 d 比强度曲线

Fig. 3 Specific strength curves of LC3 mortar specimens cured for 28 d

2.4 电通量

图 4 为 LC3 砂浆试件的 28 d 电通量曲线。由图 4 可见:(1)随着 m_s/m_b 的增大,各试件的电通量显著降低;PCM 组试件的电通量均低于 CM 组试件;相同 m_s/m_b 条件下,PCM 组试件比 CM 组试件的电通量分别降低 59.0%、52.7%、63.4%、73.5% 和 80.0%。(2)与试件 CM-1 相比,试件 CM-2、CM-3、CM-4 和 CM-5 的电通量分别降低 18.0%、21.2%、27.0% 和

34.7%;与试件 PCM-1 相比,试件 PCM-2、PCM-3、PCM-4 和 PCM-5 的电通量分别降低 5.5%、29.7%、52.7% 和 68.1%。这主要因为预湿陶砂能进一步促进水泥水化和煅烧黏土的火山灰反应(碳铝酸盐的形成),LC3 体系中的水化硅酸钙(C-S-H)、水化硅铝酸钙(C-A-S-H)、单碳铝酸盐(Mc)和半碳铝酸盐(Hc)相的形成有利于细化 LC3 胶凝体系的孔结构,进而能够有效阻碍氯离子的传输^[15];同时多孔陶砂对砂浆中

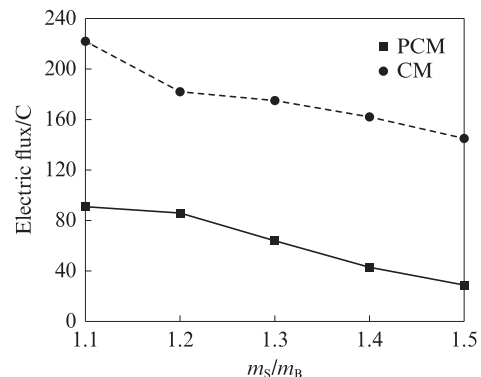


图 4 LC3 砂浆试件的 28 d 电通量曲线

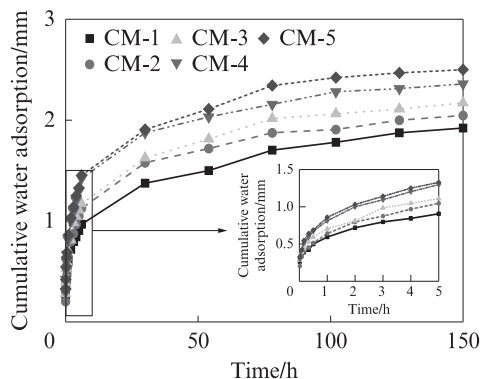
Fig. 4 Electric flux curves of LC3 mortar specimens cured for 28 d

的氯离子扩散具有阻断作用^[16].因此,随着 m_s/m_b 的增大,LC3砂浆的抗氯离子侵蚀能力逐渐增强,且PCM组试件的抗氯离子侵蚀能力优于CM组试件.

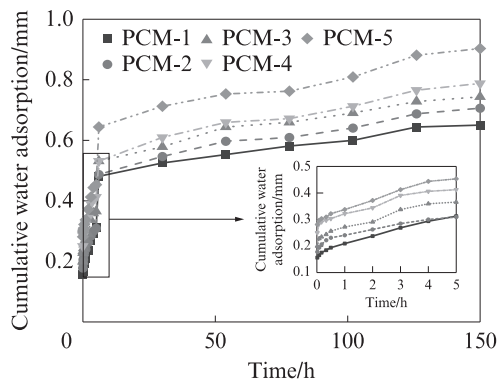
2.5 累积吸水量

图5为LC3砂浆试件的累积吸水量曲线.由图5可见:(1)随着 m_s/m_b 的增大,各试件的累积吸水量均显著增大,且CM组试件累计吸水量明显高于PCM

组试件.(2)在相同 m_s/m_b 条件下,PCM组试件的累积吸水量比CM组试件分别降低66.2%、65.5%、65.8%、66.6%和63.9%.这说明预湿陶砂能够显著提高LC3砂浆的抗渗性能,其主要原因是多孔陶砂对LC3砂浆中水分的迁移、交换具有阻断作用,进而有效限制了水分传输,而预湿陶砂对水分迁移的影响更为显著^[17].



(a) CM specimen



(b) PCM specimen

图5 LC3砂浆试件的累积吸水量曲线

Fig. 5 Cumulative water adsorption curves of LC3 mortar specimens

2.6 非蒸发水含量

图6为LC3砂浆试件的非蒸发水含量曲线.由图6可见:随着 m_s/m_b 的增大,PCM组试件的非蒸发水含量表现为降低—略微上升—降低趋势,CM组试件的非蒸发水含量先上升后显著降低,且后者的非蒸发水含量明显低于前者.这说明PCM组试件的水化程度明显高于CM组试件,主要是预湿陶砂在水化后期逐渐释放内部吸附水,促进了水泥的持续水化,优化了水化产物的形成,从而改善了水泥的微观结构并降低了内部孔隙率,使得预湿陶砂LC3砂浆的力学性能、抗渗性能和抗氯离子侵蚀能力均优于绝干陶砂LC3砂浆.

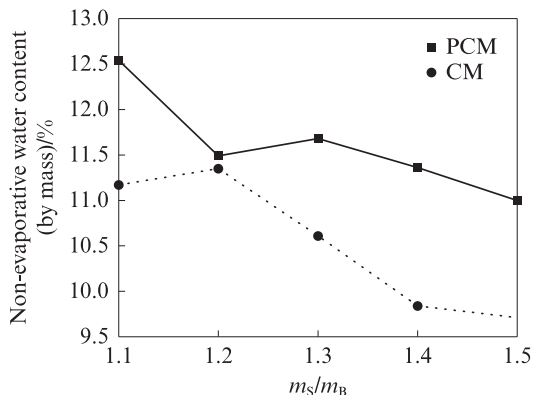


图6 LC3试件的非蒸发水含量曲线

Fig. 6 Non-evaporative water content curves of LC3 mortar specimens

2.7 MIP分析

选取试件CM1、CM5、PCM1和PCM5进行孔径结构分析,其28d孔径分布曲线如图7所示.其中 V 为平衡压下吸附分子的体积; D 为孔径.由图7(a)可见,与CM组试件相比,PCM组试件的最可几孔径分布曲线明显左移,毛细孔比例较高,大孔比例较低.由图7(b)可见,各试件的累计孔体积由大到小依次为CM-1>PCM-5>PCM-1>CM-5,主要是由于PCM组试件的水化程度较高,水化产物填充了内部孔隙,降低了砂浆总孔隙率,细化了孔径,从而减少了水分和氯离子的传输通道.这与LC3砂浆累积吸水量与电通量的试验结果一致.

2.8 SEM分析

图8为部分LC3砂浆试件养护28d时的SEM照片.由图8可见:PCM组试件和CM组试件中均能观察到C-S-H凝胶、氢氧化钙(CH)和未水化的水泥;PCM组试件中未找到大量富集的CH晶体,且未水化的水泥颗粒也很少,而CM组试件中有大量富集的CH晶体和未水化的水泥颗粒;PCM组试件结构完整,无明显孔洞和裂缝.这说明预湿陶砂LC3砂浆微观结构更为密实,减少了水分和侵蚀性离子的侵入,并提升了砂浆抗压强度,与LC3砂浆抗压强度、抗渗性能和电通量的试验结果相一致.

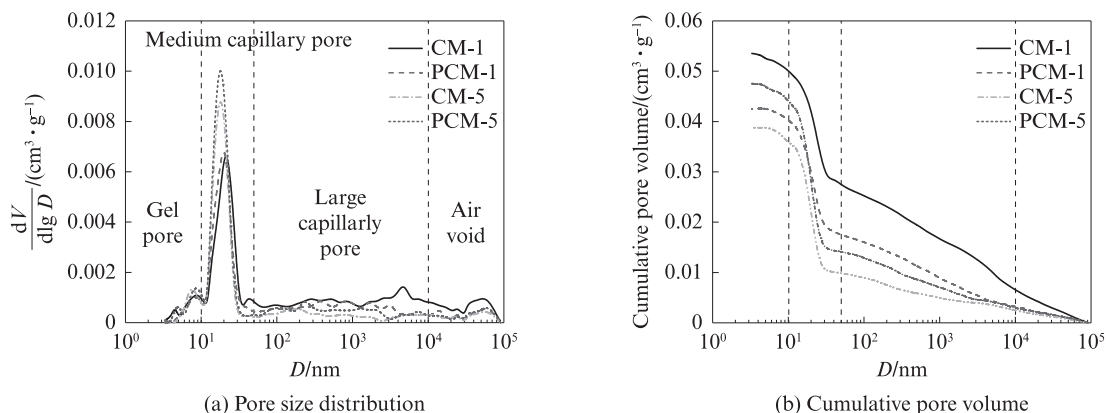


图7 LC3砂浆试件的28 d孔径分布曲线

Fig. 7 28 d pore size distribution curves of LC3 mortar specimens

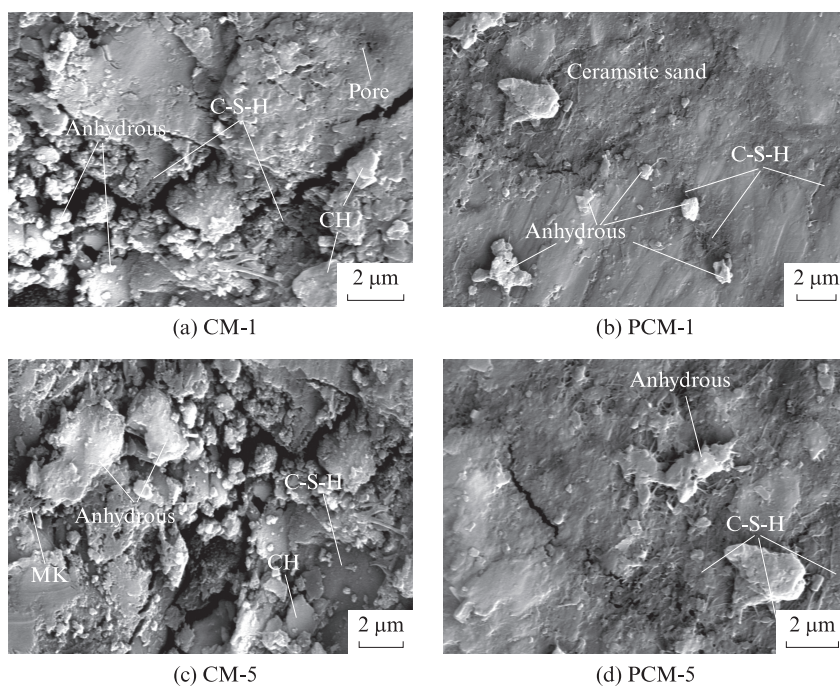


图8 部分LC3砂浆试件养护28 d时的SEM照片

Fig. 8 SEM images of some LC3 mortar specimens cured for 28 d

3 结论

(1)随着砂胶比(m_s/m_b)的增大,LC3砂浆的干密度和抗压强度均逐渐降低,且预湿陶砂LC3砂浆各龄期抗压强度明显高于绝干LC3砂浆;在相同 m_s/m_b 条件下,预湿陶砂LC3砂浆的水化程度更高,这说明预湿陶砂能促进LC3水泥水化。

(2)随着 m_s/m_b 的增大,LC3砂浆的累积吸水量逐渐增大,但其抗氯离子侵蚀能力逐渐增强;在相同 m_s/m_b 条件下,预湿陶砂LC3砂浆的抗渗性能与抗氯离子侵蚀能力更优。这主要是预湿陶砂进一步促进了水泥水化,优化了水化产物组成,减少了水分和氯离子的侵入通道。

(3)预湿陶粒增大了砂浆中的毛细孔比例,降低

了大孔比例,表明砂浆孔隙得以细化,改善了内部微观结构,从而提高了其力学性能和抗渗性能。

参考文献:

- [1] CUSSON D, HOOGEVEEN T. Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(6):757-765.
- [2] BENTUR A, IGARASHI S, KOVLER K. Prevention of autogenous shrinkage in high strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(11):1587-1591.
- [3] AL-KHAIAT H, HAQUE M N. Effect of initial curing on early strength and physical properties of a lightweight concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(6):859-866.

- [4] CHIDAPRASIRT P, NUAKLONG P, ZAETANG Y, et al. Mechanical and thermal properties of recycling lightweight pervious concrete [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2015, 40(2):443-450.
- [5] ZHAO Y S, GAO J M, CHEN F, et al. Utilization of waste clay bricks as coarse and fine aggregates for the preparation of lightweight aggregate concrete[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 201:706-715.
- [6] KOCKAL N U, OZTURAN T. Strength and elastic properties of structural lightweight concretes[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(4):2396-2403.
- [7] 张高展, 王宇譞, 葛竞成, 等. 轻集料对超高性能混凝土工作和力学性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(3):499-507. ZHANG Gaozhan, WANG Yuxuan, GE Jingcheng, et al. Effect of lightweight aggregate on workability and mechanical properties of ultra-high performance concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(3):499-507.(in Chinese)
- [8] 郭寅川, 黄忠财, 王文真, 等. 湿热环境下 SAP 内养生混凝土抗碳化性能及机理研究[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(1):8-20. GUO Yinchuan, HUANG Zhongcai, WANG Wenzhen, et al. Investigation of carbonation resistance and mechanism of SAP internal curing concrete in humid and hot environment[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(1):8-20.(in Chinese)
- [9] CHEN Y, RODRIGUEZ C R, LI Z M, et al. Effect of different grade levels of calcined clays on fresh and hardened properties of ternary-blended cementitious materials for 3D printing[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 114:103708.
- [10] SCRIVENER K, AVET F, MARAGHECHI H, et al. Impacting factors and properties of limestone calcined clay cements (LC3)[J]. *Green Materials*, 2018, 7(1):3-14.
- [11] DHANDAPANI Y, SANTHANAM M. Assessment of pore structure evolution in the limestone calcined clay cementitious system and its implications for performance [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 84:36-47.
- [12] DHANDAPANI Y, SAKTHIVEL T, SANTHANAM M, et al. Mechanical properties and durability performance of concretes with limestone calcined clay cement (LC3) [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 107:136-151.
- [13] SCRIVENER K, MARTIRENA F, BISHNOI S, et al. Calcined clay limestone cements (LC3) [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 114:49-56.
- [14] ZHUTOVSKY S, KOVLER K. Influence of water to cement ratio on the efficiency of internal curing of high-performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 144:311-316.
- [15] BENTZ D P. Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in mortars[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(5):285-289.
- [16] 朱博, 段锋, 何娟, 等. 陶砂替代石英砂制备活性粉末混凝土 (RPC) 的性能研究[J]. *材料导报*, 2022, 36(10):69-73. ZHU Bo, DUAN Feng, HE Juan, et al. Performance of reactive powder concrete (RPC) prepared by ceramic sand instead of quartz sand[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(10):69-73.(in Chinese)
- [17] LIU J H, SHI C J, MA X W, et al. An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement-based materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 146:702-712.