

超低离子渗透性水泥基材料的性能与微观结构

王信刚¹, 宋固全¹, 陈礼和², 张爱萍¹

(1. 南昌大学 建筑工程学院, 南昌 330031; 2. 江西省第一建筑有限责任公司, 南昌 330001)

摘要:采用显微硬度、MIP、SEM-EDXA 研究了超低离子渗透性水泥基材料(Ultra Low Ion Permeability Cementitious Materials, 简称 ULIPCM)的微观结构,同时研究了 ULIPCM 的宏观性能。结果表明:ULIPCM 的 28 d 抗压强度 ≥ 80 MPa,抗折强度 ≥ 11.0 MPa,弹性模量在 38.0~42.0 GPa 之间; Cl^- 扩散系数 $\leq 0.8 \times 10^{-13} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,6 h 导电量 ≤ 300 C;抗硫酸盐侵蚀性能较好;28 d 收缩值可控制在 400×10^{-6} 以内。ULIPCM 的集料与水泥石界面过渡区的微观结构和性能得到了显著改善,有利于提高其力学性能和抗渗性能。ULIPCM 的集料与水泥石界面过渡区由普通混凝土的 60~100 μm 细化为 30 μm 以下,有效阻断了侵蚀性介质的渗入通道;ULIPCM 的孔隙率、最可几孔径等孔结构参数均得到了优化,显著改善了其孔结构;ULIPCM 的集料与水泥石界面过渡区中的 CH 晶体较少,且 CH 晶体的取向性差。

关键词:显微硬度;孔结构;抗离子渗透性能;抗硫酸盐侵蚀性能;界面过渡区

中图分类号:TU528.32 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2009)05-0138-07

Performance and Microstructure of Ultra Low Ion Permeability Cementitious Materials

WANG Xin-gang¹, SONG Gu-quan¹, CHEN Li-he², ZHANG Ai-ping¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, P. R. China; 2. Jiang Xi No. 1 Construction Engineering Limited-liability Co., Nanchang 330001, P. R. China)

Abstract: Microstructure and macro-performance of Ultra Low Ion Permeability Cementitious Materials (ULIPCM) were investigated by Micro-hardness, MIP and SEM-EDXA. It was shown that the compressive strength of ULIPCM was more than 80 MPa, flexural strength was more than 11.0 MPa, and elastic modulus was in the range of 38.0 to 42.0 GPa at the age of 28 days; chloride diffusion coefficient was lower than $0.8 \times 10^{-13} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, conductive charge for 6 hours was lower than 300 coulombs; sulfate attack resistance was good; shrinkage at the age of 28 days was lower than 400×10^{-6} . Compared with ordinary concrete with which thickness of interfacial transition zone is 60 to 100 μm , the thickness of interfacial transition zone of ULIPCM was lower than 30 μm . Penetration paths of corrosive medium were effectively interrupted in ULIPCM. And pore structure parameters, such as porosity and the most probable pore radius of ULIPCM, were also obviously optimized in ULIPCM. Besides, few CH crystals were in the ULIPCM aggregate and the interfacial transition zone of ULIPCM. And the orientation of CH crystals was poor.

Key words: microhardness; pore structure; chloride ion penetration resistance; sulfate attack resistance; interfacial transition zone

收稿日期:2009-02-18

基金项目:国家“863”计划课题(2005AA332010);江西省教育厅青年科学基金项目(GJJ09428)

作者简介:王信刚(1977-),男,博士,副教授,主要从事混凝土材料与结构的耐久性研究,(E-mail)wxglab@126.com。

地下工程往往要经受外部环境中的水和侵蚀性介质(如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 等)的共同侵蚀作用。混凝土保护层是地下工程结构防水抗渗的第一道防线,可以阻止各种侵蚀性介质向混凝土内部的迁移^[1-2]。地下工程结构混凝土保护层要求具有良好的抗渗性能,特别是其抗离子渗透性能,以有效阻止各种侵蚀性介质渗入混凝土结构内部,从而大幅提高地下工程混凝土结构耐久性^[3-4]。因此,提高地下工程混凝土结构耐久性的关键是降低其保护层的离子传输性能。曾志等^[5]进行了表面砂浆层改善混凝土抗氯离子渗透性能的试验研究,结果表明,致密的表面砂浆层能显著地降低混凝土本体的氯离子扩散系数,有效提高混凝土本体的抗氯离子渗透能力。当前关于改善混凝土抗渗性能的研究基本上集中在提高混凝土保护层厚度和质量方面^[6],但是缺乏关于保护层水泥基材料的深入研究,尤其是缺乏其抗氯离子渗透性能与微观结构之间关系的研究。

该文研究一种适用于地下工程混凝土结构构件保护层的高性能水泥基材料——超低离子渗透性水泥基材料(Ultra Low Ion Permeability Cementitious Materials,简称 ULIPCM),开展 ULIPCM 的力学性能、抗离子渗透性能、抗硫酸盐侵蚀性能、收缩性能等宏观性能的研究,同时采用显微硬度、MIP、SEM-EDXA 等测试手段来研究其微观结构和性能。

1 原材料和试验方法

1.1 原材料

ULIPCM 是由胶凝材料(包括水泥和填充密实组分)、细颗粒骨架材料、性能调整组分(包括减缩组分、抗裂组分和憎水组分)、高效减水剂、水等 5 大组分组成。ULIPCM 的原材料:1)水泥:武汉亚东水泥有限公司生产的 P·II 52.5 水泥;2)填充密实组分:包括武汉阳逻电厂的 II 级粉煤灰和和武汉森太冶金有限责任公司的微硅粉;3)细颗粒骨架材料:由粒径为 0.18~0.27 mm 和 0.27~0.70 mm 的石英砂按质量比 1:1 配制而成,细度模数为 1.50,属特细砂;4)减缩组分:小分子聚醚类减缩剂;5)抗裂组分:由长度为 3 mm 和 10 mm 的聚丙烯纤维按质量比 1:1 配制而成;6)憎水组分:高效渗透结晶型防水材料;7)高效减水剂:武汉浩源化学建材有限公司生产的 FDN 高浓型萘系高效减水剂。ULIPCM 的配合比见表 1,其中 M1 集胶比为 1.1, M2 集胶比为 1.2, M1、M2 水胶比均为 0.22。

同时,为便于比较 ULIPCM 和普通砂浆的宏观性能和微观性能,设计了 1 组普通砂浆配合比——基准样 M0 作为对比,其中 M0 采用河砂(细度模数为 2.5 的巴河河砂,属中砂),其集胶比为 2.0,水胶比为 0.35。M0 的配合比见表 1。

表 1 ULIPCM 的配合比($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

试样 编号	胶凝材料				河砂	性能调整组分					扩展度/mm
	水泥	填充密实组分		细颗粒 骨架材料		减缩组分	抗裂组分	憎水组分	高效减水剂	水	
		粉煤灰	硅粉								
M0	700	—	—	—	1 400	—	—	—	5.6	245	150
M1	588	294	98	1 078	—	11.76	1.82	11.76	19.6	215.6	140
M2	560	322	98	1 176	—	11.76	1.82	11.76	19.6	215.6	145

1.2 试验方法

力学性能试验:1)抗折强度和抗压强度试验借鉴国家标准《水泥胶砂强度检验方法(ISO)法》(GB/T 17671—1999)进行,其中抗折强度采用 40 mm×40 mm×160 mm 的棱柱体试件,抗压强度采用 40 mm×40 mm×40 mm 的立方体试件;2)静力抗压弹性模量试验按照国家标准《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T 50081—2002)进行,采用 150 mm×150 mm×300 mm 的棱柱体试件。

抗离子渗透性能试验:1)快速 Cl^- 扩散测试法

(NEL 法)——采用中国土木工程学会 CCES 01—2004 标准推荐的快速 Cl^- 扩散测试法(NEL 法)来测试水泥基材料的 Cl^- 扩散系数^[7-8];2)电量法——根据 ASTM C1202—97 电量法测试水泥基材料的 6 h 导电量^[9]。

抗硫酸盐侵蚀性能试验:采用 40 mm×40 mm×160 mm 的棱柱体试件,试件成型 1 d 后拆模,移入水温恒定在 20 ± 1 °C 的养护池中养护,到 28 d 龄期时,将试件取出置于质量浓度为 5% 的 Na_2SO_4 溶液中(每 2 个月换一次溶液),然后分别在 0 d、90 d、150 d、210 d 龄期时(从试件移入 Na_2SO_4 溶液中算

起)测试试件抗折、抗压强度。

干燥收缩试验:借鉴国家标准《水泥胶砂干缩试验方法》(JC/T 603—2004)测试收缩值。采用 25 mm×25 mm×280 mm 的棱柱体试件,试件成型 3 d 后移入干燥室(温度 20 ℃±3 ℃,相对湿度 50%±4%)测定其初始长度,然后分别测定 1 d、3 d、7 d、14 d、21 d、28 d、45 d、60 d、90 d 的变形值(从试件移入干燥室中算起)。

微观性能测试包括:1)采用上海尚光显微镜有限公司生产的 HXS-1000 数字式智能显微硬度计分析集料与水泥石之间界面过渡区的显微硬度;2)采用美国 Quantachrome 公司生产的 Autoscan-60 型压汞仪测定孔结构,测试的孔半径范围为 3 nm~4 000 nm,并采用配套的 Poremaster for Windows v4.02 软件进行数据处理分析;3)采用日本电子株式会社(JEOL)生产的 JSM-5610LV 型扫描电子显微镜观察集料与水泥石之间界面过渡区内水化产物的微观形貌,并采用与该仪器配套的美国 EDAX 公司生产的 X 射线能谱仪(Energy Dispersive X-ray Analysis,简称 EDXA),进行微区元素的定性和定量分析。

2 宏观性能

2.1 力学性能

表 2 是 ULIPCM 在标养条件下的抗折和抗压强度以及 28 d 龄期的弹性模量。从表中可以看出,与基准样——普通砂浆 M0 相比,M1 和 M2 在相应龄期下的抗折和抗压强度均比 M0 的高。M1 和 M2 的 28 d 抗压强度均大于 80 MPa。M0 的 28 d 抗折强度为 10.0 MPa,而 M1 和 M2 的 28 d 抗折强度均比 M0 的高,分别为 11.7 MPa 和 14.3 MPa,有利于提高 ULIPCM 的抗裂能力。同时,由于 ULIPCM 采用了高活性辅助胶凝材料作为填充密实组分,在填充密实组分的二次水化反应作用下,ULIPCM 在 7 d 后的强度增长率会有较大程度的增长。

M1 和 M2 的 28 d 弹性模量均比 M0 的低,且 M2 的 28 d 弹性模量比 M1 的高,主要是由于水泥基材料的弹性模量与集料用量有很大关系^[10-11],M0 采用了粒径小于 5 mm 的河砂,且集胶比为 2.0,而 ULIPCM 采用了粒径在 180~700 μm 的特细砂,且 M2 的集胶比为 1.2,M1 的集胶比为 1.1。因此,ULIPCM 的弹性模量比普通砂浆 M0 的低,且 M2 的弹性模量比 M1 的高。

表 2 强度和弹性模型

试样编号	抗折强度/MPa			抗压强度/MPa			弹性模量/GPa
	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d	
M0	8.3	9.2	10.0	46.8	53.7	67.0	46.6
M1	9.7	10.1	11.7	54.5	61.9	81.5	38.7
M2	9.3	9.7	14.3	53.0	60.4	84.3	41.7

2.2 抗离子渗透性能

表 3 是 ULIPCM 在标养 28 d 的 Cl⁻ 扩散系数和 6 h 导电量。从表中可以看出,M1 和 M2 的 Cl⁻ 扩散系数≤0.8×10⁻¹³ m²·s⁻¹,6 h 导电量≤300 C。与基准样——普通砂浆 M0 的 Cl⁻ 扩散系数在 10.0×10⁻¹³~11.0×10⁻¹³ m²·s⁻¹ 之间相比,ULIPCM 的 Cl⁻ 扩散系数下降了 1~2 个数量级,根据 Cl⁻ 扩散系数评价混凝土渗透性可知^[7],M0 的 Cl⁻ 渗透性能为“中”,且非常接近于“低”,而 ULIPCM 的 Cl⁻ 渗透性能为“极低”;与 M0 的 6 h 导电量在 2 000 C 以上相比,ULIPCM 的 6 h 导电量下降为 300 C 以下,下降了 1 个数量级,根据 6 h 导电量对混凝土进行分类标准可知^[9],M0 的 Cl⁻ 渗透性能为“中”,且非常接近于“低”,而 ULIPCM 的 Cl⁻ 渗透性能为“非常低”。因此,ULIPCM 具有高抗渗性能,尤其是其抗离子渗透性能。

表 3 ULIPCM 的 Cl⁻ 扩散系数和导电量

试样编号	Cl ⁻ 扩散系数/ (×10 ⁻¹³ m ² ·s ⁻¹)	6 h 导电量/C
M0	10.52	2 079
M1	0.41	226
M2	0.55	278

2.3 抗硫酸盐侵蚀性能

图 1(a)和(b)分别是 ULIPCM 在 5% Na₂SO₄ 溶液中不同浸泡龄期的抗压强度和抗折强度变化。从图 1(a)可以看出,在浸泡 90 d 时,M0、M1 和 M2 的抗压强度均比浸泡前有较大幅度地增加,分别为浸泡前的 125.1%、126.3%和 121.6%,而随着浸泡龄期的延长,抗压强度又逐渐降低,到浸泡 210 d 时,分别为浸泡前的 111.9%、112.6%和 111.0%,且均高于浸泡前的抗压强度。

从图 1(b)可以看出,在浸泡 90 d 时,M0、M1 和 M2 的抗折强度均比浸泡前有一定程度地增加,分别为浸泡前的 122.4%、112.4%和 108.7%,而随着浸泡龄期的延长,抗折强度又逐渐降低,到浸泡 210 d 时,分别为浸泡前的 114.3%、105.8%和 102.9%,其中浸泡 210 d 时 M1 和 M2 的抗折强度

均高于 12.5 MPa。

综合分析 ULIPCM 经硫酸盐侵蚀后的抗压和抗折强度变化可知,ULIPCM 的抗硫酸盐侵蚀性能较好。分析其中原因,主要是由于 ULIPCM 中引入了高活性辅助胶凝材料,一方面消耗了部分 CH 晶体,另一方面是增加了 ULIPCM 的致密性。

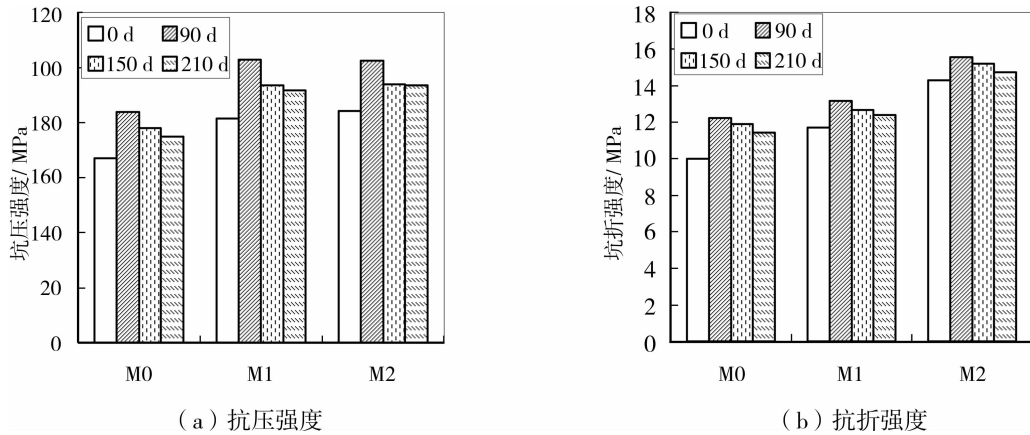


图 1 ULIPCM 在 5%Na₂SO₄ 溶液中的不同浸泡龄期强度

2.4 干燥收缩

图 2 是 ULIPCM 在干燥环境下的收缩。从图中可以看出,M0、M1 和 M2 的收缩值都是随着龄期的增长而有不同程度地增长,且 M1 和 M2 的收缩值要比相应龄期下 M0 的小。M0 在 28 d 和 90 d 的收缩值分别为 756×10^{-6} 和 944×10^{-6} ,而 M1 在 28 d 和 90 d 的收缩值分别有 656×10^{-6} 和 852×10^{-6} ,M2 在 28 d 和 90 d 的收缩值分别降低到仅有 374×10^{-6} 和 482×10^{-6} 。M0、M1 和 M2 的收缩值从 28 d 到 90 d 之间分别增长了 24.9%、29.9%和 28.9%。可见,ULIPCM 的 28 d 收缩值可以控制在 400×10^{-6} 以内,与高性能混凝土的收缩值相当。

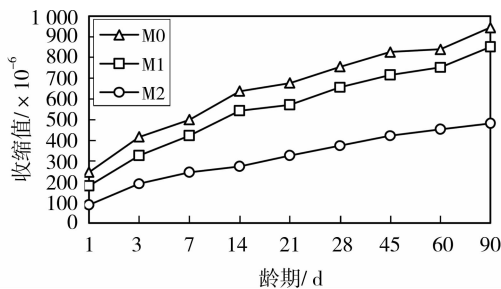


图 2 ULIPCM 的收缩

分析其中原因,尽管 M0 的砂胶比有 2.0,而 ULIPCM 的砂胶比仅为 1.1~1.2,不利于限制 ULIPCM 的收缩,但是由于 ULIPCM 中掺入了减缩组分和抗裂组分,减缩组分能显著改善 ULIPCM 的收缩开裂趋势,降低 ULIPCM 的收缩值,抗裂组

分能细微化裂纹,提高抗裂能力。另外,ULIPCM 中也掺有大量的、在一定程度上也能抑制 ULIPCM 的收缩的填充密实组分。上述原因导致 ULIPCM 的收缩值要比相应龄期下普通砂浆的小。

3 微观性能

3.1 显微硬度

图 3 是 M0 和 M2 标养 28 d 的集料-水泥石界面过渡区的显微硬度。从图中可以看出,M2 和 M0 的集料与水泥石界面过渡区显微硬度的发展趋势基本一致:在靠近集料表面处,显微硬度小,从集料表面到水泥浆体本体,显微硬度基本上是逐渐增大,直至近乎为常数。

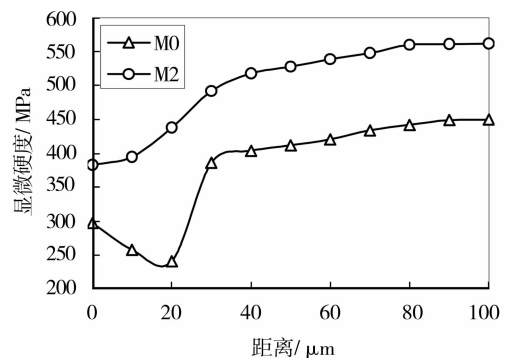


图 3 ULIPCM 的集料-水泥石界面过渡区的显微硬度

M0 的集料与水泥石界面过渡区显微硬度在距离集料表面 0~20 μm 内是逐渐降低的,且在 20 μm 处最低,为 241 MPa,从 20~40 μm 内显微硬度是逐

渐增大的,从 241 MPa 增大到了 404 MPa,从距离集料表面 40 μm 后显微硬度趋于稳定,说明 M0 的集料与水泥石界面过渡区厚度大约为 30~40 μm 。实际上,普通混凝土的集料与水泥石界面过渡区厚度一般为 60~100 μm ^[12-14]。

M2 的集料与水泥石界面显微硬度在距离集料表面 10~30 μm 处显著增大,但在距离集料表面 10 μm 、20 μm 、30 μm 处的显微硬度分别达到 395MPa、438MPa、492MPa,远高于试样 M0 界面过渡区中相应位置的显微硬度,说明 M2 的集料与水泥石界面过渡区得到了显著改善,可以认为 M2 的集料与水泥石界面过渡区已经被细化。ULIPCM 的集料与水泥石界面过渡区由普通混凝土的 60~100 μm 细化为 30 μm 以下,从而有效地阻断了侵蚀性介质的渗入通道。

分析其中原因,主要是由于 ULIPCM 中取消了传统水泥基材料中粗、细集料,引入了特细砂和高活性辅助胶凝材料,并掺入了性能调整组分,细化集料—水泥石之间界面过渡区,阻断了 ULIPCM 中的连通孔,大幅提高其抗渗性能。这与前面的力学性能、抗渗性能分析结果是一致的。

3.2 MIP

表 4 是 ULIPCM 标养 28 d 的孔结构分析。从

表中可以看出,基准样——普通砂浆 M0 的孔隙率为 3.17%,孔径分布在 10~50 nm 之间的孔占 61.99%,孔径 ≥ 50 nm 的孔和孔径 ≥ 25 nm 的孔分别占 20.30%和 30.26%,最可几孔径在 10.0~14.0 nm,孔比表面积为 4.05 m^2/g ; M1 的孔隙率有 2.54%,孔径 ≤ 10 nm 的孔占 59.55%,孔径 ≥ 50 nm 的孔和孔径 ≥ 25 nm 的孔分别占 22.27%和 29.09%,最可几孔径在 3.0~7.0 nm,孔比表面积为 7.26 m^2/g ; M2 的孔隙率仅有 1.74%,孔径 ≤ 10 nm 的孔占 64.62%,孔径 ≥ 50 nm 的孔和孔径 ≥ 25 nm 的孔分别占 13.88%和 19.26%,最可几孔径在 3.0~5.0 nm,孔比表面积为 5.80 m^2/g 。也就是说,ULIPCM 的孔隙率、最可几孔径均小于普通砂浆的,且孔径 ≥ 25 nm 的孔含量也是 ULIPCM 的小于普通砂浆的。

分析其中原因,与普通砂浆采用粒径 ≤ 5.0 mm 的河砂相比,由于 ULIPCM 采用了粒径 180~700 μm 的特细砂,且掺入了高活性辅助胶凝材料和性能调整组分,使得 ULIPCM 的孔结构得到了显著改善,从而导致 ULIPCM 的力学性能和抗渗性能都得到大幅提高。这与前面的力学性能、抗渗性能分析结果是一致的。

表 4 ULIPCM 的孔结构分析

试样编号	孔隙率/%	孔径分布/%						最可几孔径/ nm	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)
		≤ 5 nm	5~10 nm	10~25 nm	25~50 nm	50~100 nm	≥ 100 nm		
M0	3.17	0	17.71	52.03	9.96	9.23	11.07	10.0~14.0	4.05
M1	2.54	36.82	22.73	11.36	6.82	6.36	15.91	3.0~7.0	7.26
M2	1.74	56.92	7.70	16.12	5.38	3.85	10.03	3.0~5.0	5.80

3.3 SEM-EDXA

图 4 是标养 28 d 的 M0 和 M2 的集料—水泥石界面过渡区的 SEM-EDXA 分析。从图 4(a)可以看出, M0 的集料与水泥石界面过渡区内,从集料表面到水泥浆体本体的界面过渡区内有一定数量的网络状 C—S—H 凝胶,以及数量较少的 CH 晶体,且 CH 晶体的取向性比较明显,结构稀松,构成了界面薄弱区;从图 4(b)的 A 点 EDXA 分析可以计算出,该点水化产物的 Ca/Si 比为 4.99,界面过渡区中水化产物的 Ca/Si 比大于 4,其 Ca/Si 比接近 AFm 的(当水化产物为 AFm 时, $\text{Ca/Si} \geq 4$),说明其水化产物主要是 CH 晶体或是 CH 晶体与 AFm 在小范围内的混合交织^[15-17],主要是由于 M0 的胶凝材料为纯水泥,而没有高活性辅助胶凝材料,导致消耗 CH 晶体的二次水化反应几乎不可能发生。

从图 4(c)可以看出, M2 的集料与水泥石界面过渡区内,从集料表面到水泥浆体本体有较多网络状的 C—S—H 凝胶,以及数量较少的 CH 晶体,且 CH 晶体的取向性差,结构致密;从图 4(d)的 B 点 EDXA 分析可以计算出,该点水化产物的 Ca/Si 比为 1.13,主要成分为 C—S—H 凝胶^[16]。

上述分析说明, ULIPCM 界面过渡区内水化产物中的 CH 含量大为降低,可能是高活性的填充密实组分与水泥水化产物发生二次水化反应,消耗掉了一部分 CH 晶体,生成了一部分 C—S—H 凝胶,同时也包含有集料是采用了粒径小于 700 μm 的特细砂的因素。因此,与普通砂浆相比, ULIPCM 的集料与水泥石界面过渡区得到了显著改善,这也有利于大幅提高 ULIPCM 的力学性能和抗渗性能。

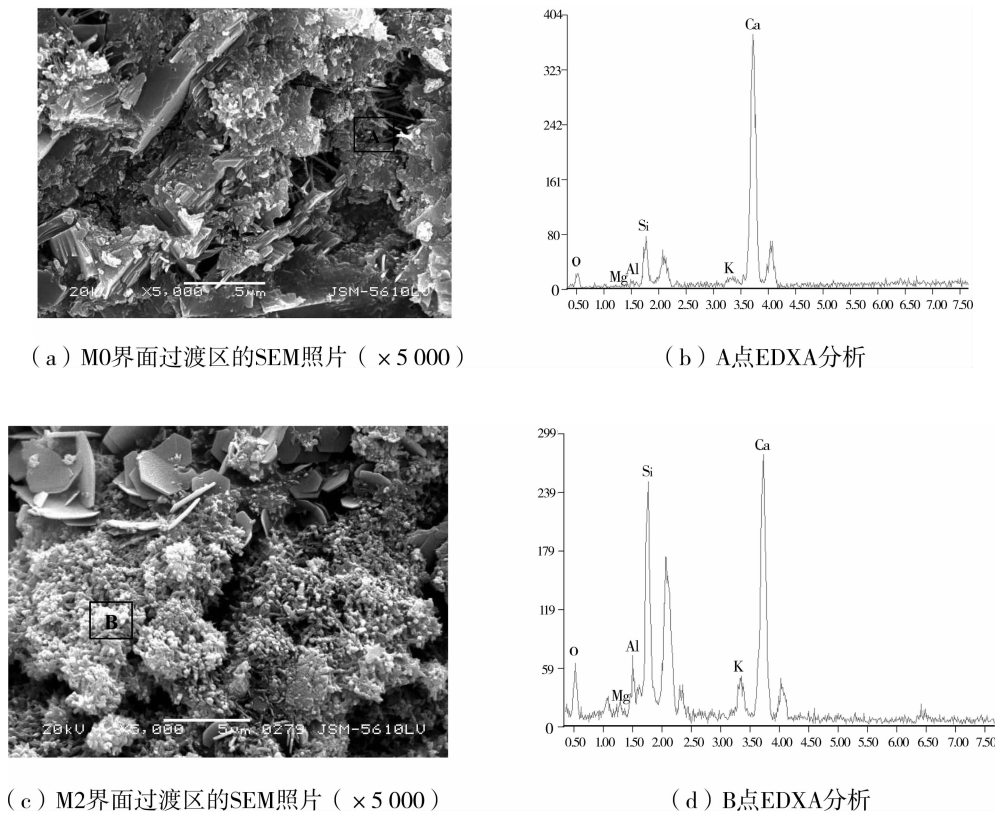


图4 ULIPCM的集料-水泥石界面过渡区的SEM-EDXA分析

4 结 论

1) ULIPCM的 Cl^- 扩散系数 $\leq 0.8 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 6 h导电量 $\leq 300 \text{ C}$ 。与普通砂浆相比, ULIPCM的 Cl^- 扩散系数下降了1~2个数量级, 6 h导电量下降了1个数量级, ULIPCM的 Cl^- 渗透性能为“极低”或“非常低”。因此, ULIPCM具有高抗渗性能, 尤其是其抗离子渗透性能。

2) ULIPCM的28 d抗压强度大于80 MPa, 28 d抗折强度大于11.0 MPa, 有利于提高其抗裂能力。ULIPCM的弹性模量在38.0~42.0 GPa之间。在5% Na_2SO_4 溶液中浸泡90 d时, ULIPCM的抗折和抗压强度比浸泡前均有较大幅度地增加, 而随着浸泡龄期的进一步延长, 强度又逐渐降低, 但是到浸泡210 d时, 其强度仍高于浸泡前的强度。因此, ULIPCM的抗硫酸盐侵蚀性能较好。

3) 尽管ULIPCM取消了传统水泥基材料中粗、细集料, 不利于限制ULIPCM的收缩, 但是由于ULIPCM中掺入了能显著改善ULIPCM的收缩开裂趋势的减缩组分和细微化裂纹的抗裂组分, 降低了ULIPCM的收缩值, 提高了ULIPCM的抗裂能力。ULIPCM的28 d收缩值可以控制在 400×10^{-6} 以内, 与高性能混凝土的收缩值相当。

4) ULIPCM的集料与水泥石界面过渡区的微观结构和性能得到了显著改善, 有利于提高其力学性能和抗渗性能。ULIPCM的集料与水泥石界面过渡区由普通混凝土的60~100 μm 细化为30 μm 以下, 从而有效地阻断了侵蚀性介质的渗入通道; ULIPCM的孔隙率、最可几孔径等孔结构参数均得到了优化, 显著改善了其孔结构; ULIPCM的集料与水泥石界面过渡区中的CH晶体较少, 且CH晶体的取向性差, ULIPCM中水化产物C-S-H凝胶的Ca/Si比也低于普通砂浆的。

参考文献:

- [1] MEDEIROS M H F, HELENE P. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(3): 1476-1484.
- [2] 季常煦, 王信刚, 王凯, 等. 地下工程结构混凝土的耐久性分析与研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(8): 43-45.
JI CHANG-XU, WANG XIN-GANG, WANG KAI, et al. Analysis and research on durability of concrete used in underground engineering structure [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(8): 43-45.

- [3] MARSAVINA L, AUDENAERT K, SCHUTTER G D, et al. Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(1): 264-274.
- [4] 杨林德, 黄慷. 水底隧道管片构件耐久性失效风险研究 [J]. *地下空间*, 2004, 24(1): 1-4.
YANG LIN-DE, HUANG KANG. A study on risk of durability failure of the segments for underwater tunnel [J]. *Underground Space*, 2004, 24(1): 1-4.
- [5] 曾志, 邓德华, 原通鹏, 等. 表面砂浆层改善混凝土抗氯离子渗透性能的试验研究 [J]. *河南建材*, 2006(2): 34-37.
ZENG ZHI, DENG DE-HUA, YUAN TONG-PENG, et al. Experiment study on the effects of surface mortar layer to the resistance of concrete to chloride ion penetration [J]. *Henan Building Materials*, 2006(2): 34-37.
- [6] TROCÓNIS DE RINCÓN O, SÁNCHEZ M, MILLANO V, et al. Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in iberoamerican countries: DURACON Project/CYTED [J]. *Corrosion Science*, 2007, 49(7): 2832-2843.
- [7] LU XIN-YING. Application of the nernst-einstein equation to concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 1997, 27(2): 293-302.
- [8] 中国工程院土木水利与建筑学部工程结构安全性与耐久性研究咨询项目组. 混凝土结构耐久性设计与施工指南 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [9] ASTM C1202-09, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration [S]. 2009.
- [10] KE Y, BEAUCOUR A L, ORTOLA S, et al. Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(8): 2821-2828.
- [11] MAHAUT F, MOKÉDDEM S, CHATEAU X, et al. Effect of coarse particle volume fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials [J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(11): 1276-1285.
- [12] XUAN D X, SHUI Z H, WU S P. Influence of silica fume on the interfacial bond between aggregate and matrix in near-surface layer of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(7): 2631-2635.
- [13] HOSSAIN K M A, LACHEMI M. Strength, durability and micro-structural aspects of high performance volcanic ash concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(5): 759-766.
- [14] LEEMANN A, MÜNCH B, GASSER P, et al. Influence of compaction on the interfacial transition zone and the permeability of concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(8): 1425-1433.
- [15] CHATTERJI S. Concrete durability and CaO/SiO₂ mole ratio of CSH [J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(5): 929-932.
- [16] KJELLSSEN K O, WALLEVIK O H, LLBERG L. Microstructure and microchemistry of the paste-aggregate interfacial transition of high performance concrete [J]. *Advances in Cement Research*, 1998, 10(1): 33-41.
- [17] MATSCHEI T, LOTHENBACH B, GLASSER F P. Thermodynamic properties of Portland cement hydrates in the system CaO-Al₂O₃-SiO₂-CaSO₄-CaCO₃-H₂O [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(10): 1379-1410.

(编辑 胡英奎)