

文章编号:1671-8879(2015)06-0049-07

密封养护剂对露石混凝土路用性能的影响

陈 伟¹,黄展魏¹,申培亮¹,韩鹏飞²

(1. 武汉理工大学 材料科学与工程学院,湖北 武汉 430070;

2. 武汉城开房地产开发有限公司,湖北 武汉 430070)

摘 要:提出一种露石混凝土路面密封养护剂的设计方法,可提高路面的养护效果和耐久性。研究了养护剂对露石混凝土路面路用性能的影响规律,通过力学性能、吸水率、耐磨性、抗碳化等试验分析了露石混凝土路面的强度、抗渗性、耐磨度和碳化速率等性能。利用 SEM、XRD、DSC 热分析技术从微观角度分析了密封养护剂的增强机理。研究结果表明:密封养护剂可以提升露石混凝土中水泥的水化反应程度,提高水泥浆体和界面过渡区的微观力学性能,并可填充混凝土表面微观孔隙,提高密实度,从而提升露石混凝土的力学性能、抗渗性、耐磨性和抗碳化等性能。

关键词:道路工程;露石混凝土;密封;养护剂;路用性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

Effects of sealing curing agent on the paving performance of exposed aggregate concrete

CHEN Wei¹, HUANG Zhan-wei¹, SHEN Pei-liang¹, HAN Peng-fei²

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;

2. Wuhan Urban Development Real Estate Development Co. Ltd, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: A type of sealing curing agent for exposed-aggregate concrete pavement was developed in this study aiming at promoting the curing effects and durability of the concrete pavement. The effects of this sealing curing agent on the paving performance of exposed-aggregate concrete were investigated, and the strength, impermeability, abrasion resistance and carbonation rate of the exposed aggregate concrete were experimentally tested and analyzed by mechanical properties experiment, water absorption experiment, abrasion resistance experiment and anti-carbonation experiment. The enhancement mechanism of sealing curing agent was analyzed by employing SEM, XRD, DSC analytical techniques from the microcosmic point of view. The results show that the sealing curing agent can not only accelerate the degree of hydration reaction of cement in the exposed aggregate concrete and improve the microcosmic mechanical properties of the cement paste and interfacial transition zone, but also fill the micropores on the concrete surface and improve the density. Thereby it enhances the mechanical properties of exposed-aggregate concrete pavement as well as its permeability, abrasion resistance and anti-carbonation properties. 4 tabs, 10 figs, 15 refs.

Key words: road engineering; exposed aggregate concrete; sealing; curing agent; paving performance

收稿日期:2015-07-25

基金项目:交通运输部科技项目(2012 319 811 120)

作者简介:陈 伟(1976-),男,湖北武汉人,教授,工学博士,E-mail:chen.wei@whut.edu.cn.

0 引言

露石混凝土路面是一种在新浇筑水泥混凝土路表喷洒缓凝露石剂、待混凝土强度发展到一定程度后刷除表层砂浆得到的粗集料裸露混凝土路面^[1-3]。露石混凝土路面可以克服传统水泥混凝土路面起尘砂、抗滑耐磨性较弱的不足,在国内外道路工程中得到广泛应用^[4-5]。并且,集料外露混凝土还具有滚动噪音低、夏季不炫目、排水能力强、使用寿命长等优点^[6]。因此,国际道路会议常设委员会(permanent international association of road congresses)提出,露石混凝土路面将成为未来路面的主要材料。目前,比利时、奥地利、英国、德国等国家已建成大量露石水泥混凝土高速公路路面。长安大学在 2000 年铺筑了试验路段,在 2001 年铺筑了中国第一条露石混凝土路面,并在拉萨协荣隧道等道路上得到应用^[7-8]。与普通混凝土相比,露石混凝土在铺装并经露石剂化学处理后,骨料直接外露,骨料与水泥浆体之间的界面过渡区与外界环境直接相连,导致 CO₂、除冰盐溶液等外界物质容易沿连通界面过渡区和孔隙直接渗入混凝土内部,引起水泥浆体碳化及结晶压胀,降低了混凝土的耐久性^[6]。并且,露石处理后,混凝土内部水分更容易蒸发逸出,导致混凝土开裂。同时,在表面砂浆刷除的过程中,由于水流的扰动和机械刮磨作用,容易产生有害裂纹。因此,需要对混凝土采取更加严格的养护和密封措施,以增强混凝土的力学和耐久性能。为此,本文研究了混凝土密封养护剂对露石混凝土路用性能和微观结构的影响,论证了密封养护剂应用的关键技术参数,并从显微结构出发探讨密封养护剂增强混凝土性能的机理。

1 试验原材料与配比

试验用水泥为华新水泥股份有限公司生产的 P. I 52.5 硅酸盐水泥,其化学成分和技术指标见表 1、表 2。混凝土粗集料采用湖北阳新县碎石,其表观密度为 2 689 kg/m³,压碎值为 13.9%,含泥量为 0.09%。经岩相分析,该粗集料主要矿物组成为石灰石,含有少量的碳酸镁。将连续级配碎石筛选出粒径范围为 4.75~13.2 mm 的粗集料用于制备露石混凝土。混凝土细集料采用巴河黄砂,表观密度为 2 549 kg/m³,细度模数为 2.3,属中砂,通过筛分得到最大粒径为 1.26 mm 的露石混凝土用细集料。减水剂为聚羧酸盐高效减水剂。混凝土用露石剂为合成复合型液体露石剂,主要由葡萄糖酸钠、木质素

磺酸钠、十二烷基磺酸钠、颜料和水复配而成。露石混凝土密封养护剂为实验室合成液体养护剂,主要由增强组分氟硅酸镁、反应促进剂乙酸、成膜组分硅酸锂和水组成。

表 1 硅酸盐水泥氧化物成分分析

Tab. 1 Oxide composition of portland cement %

Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	L. O. I
0.19	0.65	2.06	4.64	21.05	3.49	62.83	3.16	2.31

表 2 硅酸盐水泥的技术性质

Tab. 2 Technical properties of portland cement

类别	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	标准稠度用 水量/g	凝结时间/min	
			初凝	终凝
P. I 52.5	333.4	134	165	255

混凝土按照 C40 强度等级设计,其具体配合比如表 3 所示,分别成型普通混凝土和露石混凝土试样。普通混凝土试样成型和养护按照《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T 50081—2002)实施。露石混凝土试样浇注成型后,静置至混凝土表面无可见水分,然后喷涂露石剂,静置 24 h 后进行刷除,然后养护。

表 3 混凝土配合比

Tab. 3 Mix design of concrete

水泥/ (kg·m ⁻³)	砂/ (kg·m ⁻³)	石/ (kg·m ⁻³)	减水剂/%	水灰比
356	659	1 225	0.1	0.45

2 试验配比与方法

混凝土按照表 3 配比拌和后,浇入不同模具中,并经充分振捣密实。水泥混凝土抗压强度参照《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T 50081—2002)进行,试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm,标准条件下养护 24 h 后脱模,然后用养护剂涂刷混凝土试块的 6 个面,涂刷量为 200 g/m²,标准条件下养护,分别测定其 7 d 和 28 d 强度。

混凝土耐磨度试验采用 150 mm×150 mm×150 mm 尺寸试件,共成型 4 组试件,各组试样处理工艺如下页表 4 所示。其中,密封养护剂在试样养护 3 d 后按照 200 g/m² 用量涂刷。所有试样在标准条件下持续养护至 28 d 后进行耐磨度测试。混凝土耐磨度按照《混凝土及其制品耐磨度试验方法(滚珠轴承法)》(GB/T 16925—1997)实施,该方法是以滚珠轴承为磨头,通过滚珠在额定负荷下回转滚动摩擦试件表面,在受磨面上形成环形磨槽。通过测量磨槽深度和磨头转数,计算其耐磨度。每个试件的耐磨度计算为

表 4 耐磨度测试试样编号及处理方法
Tab. 4 Numbering of samples for abrasion resistance tests and treatment

试样编号	露石处理	养护剂
A	无	无
B	无	有
C	有	无
D	有	有

$$I=\frac{\sqrt{R}}{P}$$
 (1)

式中: I 为耐磨度($\text{kr}^{\frac{1}{2}}/\text{mm}$, kr 表示千转),精确至 $0.01\text{ kr}^{\frac{1}{2}}/\text{mm}$; R 为磨头转数(kr); P 为磨槽深度(mm)。

混凝土抗氯离子渗透性采用《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(电通量法)进行,该方法是由 Whiting 于 1981 年提出的^[9],后来为美国 AASHTO T277-83^[10]和 ASTM C1202-91^[11]2 个标准所采用。水泥混凝土试件直径为 100 mm,切割厚度为 50 mm。混凝土试件养护至 3 d 时在其上下表面分别按照 0、50、100、200、300 g/m^2 的用量喷涂养护剂,养护至 28 d 时,使用电通量法测定混凝土试件的抗氯离子渗透能力。

混凝土吸水率试验参照《建筑砂浆基本性能试验方法》(JGJ 70—2009)进行,成型混凝土试件尺寸为 $100\times100\times100\text{ mm}^3$,使用养护剂涂刷水泥混凝土试样 6 个面。

混凝土抗碳化能力试验采用尺寸为 $100\text{ mm}\times100\text{ mm}\times100\text{ mm}$ 的试块,共成型 2 组试样,其中一组为普通混凝土试样,一组为经露石处理的试样。2 组试样经养护 3 d 后在 6 个表面按照 200 g/m^2 用量涂刷养护剂,并持续养护至 26 d。然后将试样置于 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干 48 h,石蜡封装。封装过程中,普通混凝土保留成型面及其相对面,露石混凝土保留露石面及其相对面。加速碳化试验在相对湿度、温度、 CO_2 浓度分别为 $(70\pm5)\%$ 、 $(20\pm2)^{\circ}\text{C}$ 、 $(20\pm3)\%$ 的碳化箱内进行,使用酚酞溶液显色法测定其 3 d、7 d、14 d 的碳化深度。

成型 $100\text{ mm}\times100\text{ mm}\times100\text{ mm}$ 立方体水泥混凝土试件,在养护 3 d 后喷涂养护剂,养护至 28 d 后使用混凝土粉末打磨机由表面向内逐层打磨粉末,并采用 170 目标准筛(孔径 90 μm)筛去石英砂和粗集料得到水泥浆粉末。使用差示扫描量热仪(DSC)和 X 射线衍射(XRD)方法分析各层水化产物,并对喷涂养护剂试样的内部微结构进行扫描电镜(SEM)观察,分析养护剂的作用机理。

3 试验结果

3.1 力学性能试验结果

混凝土力学性能试验结果如图 1 所示。由图可知,混凝土试样涂刷养护剂后,其强度较无养护剂试样有略微提高。多孔材料的强度理论认为混凝土的强度发展取决于孔隙率,而水泥浆体是水泥混凝土中形成强度的主要材料。涂刷养护剂后,养护剂中的氟硅酸镁可渗入水泥浆体以及浆体与集料之间的界面过渡区,与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,生成新的水化产物堵塞有害孔,使得表面的孔隙率降低,提高混凝土的强度。另一方面,混凝土表面的孔隙率降低,将阻止水泥浆体内部水分蒸发,保证了浆体内部水泥继续水化所需的湿度,提高了水化程度。

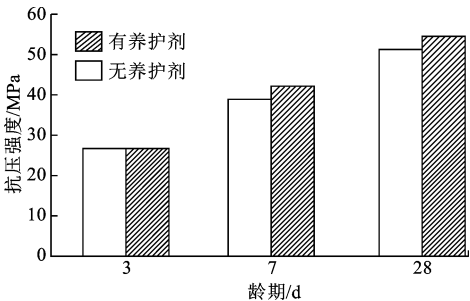


图 1 养护剂对露石混凝土抗压强度的影响
Fig. 1 Effects of curing agent on the compressive strength of exposed aggregate concrete

3.2 吸水率试验结果

混凝土试样吸水率试验结果如图 2 所示。由图可知,与未处理露石混凝土相比,六面喷涂养护剂的露石混凝土(喷涂量为 200 g/m^2)的吸水率显著降低,降低比例为 11%。水泥混凝土是一种多相多孔体系,固相之间的孔隙数量及孔径大小和分布状态对水泥混凝土的力学性能、抗冻性、抗碳化、抗渗性等性能都有重要影响。水泥混凝土中的孔隙按孔径可分为凝胶孔、过渡孔、毛细孔和大孔^[12-14]。水泥混凝土中的孔隙包括环境的自由水能沿着毛细孔和

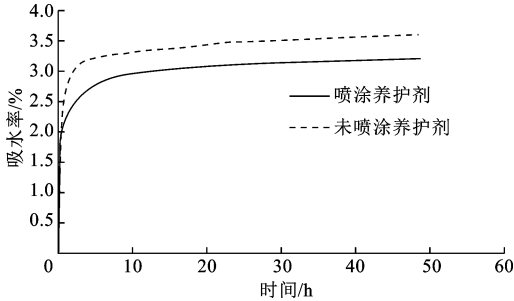


图 2 养护剂对混凝土吸水率的影响
Fig. 2 Effects of curing agent on the water adsorption of concrete

大孔进入内部,毛细孔和大孔的数量越多,外界的自由水越容易进入水泥混凝土内部,对应的渗透速度和吸水率将增加。露石混凝土养护剂,一方面可以阻止水泥混凝土内部水分蒸发,起到养护的作用,增加混凝土的密实度;另一方面,养护剂中的成膜组分硅酸锂可以在混凝土表面形成一层保护膜,堵塞混凝土表层的毛细孔及大孔^[15],起到阻止水分渗入的作用。

3.3 耐磨性

图 3 为喷涂和未喷涂养护剂露石混凝土的耐磨度试验结果。喷涂养护剂后,露石混凝土的耐磨度都显著提高,表明密封养护剂可以进一步提高露石混凝土的耐磨性能,延长路面使用寿命。耐磨度的提高是因为养护剂一方面可以填充混凝土表面微观孔隙,提高密实度;另一方面可以促进水泥的水化,提高表层水泥浆体和集料的结合牢固度。

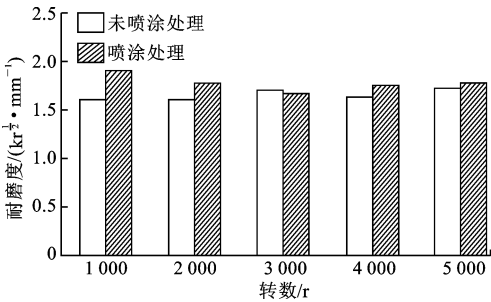


图 3 养护剂对露石混凝土耐磨度的影响

Fig. 3 Effects of curing agent on the abrasion resistance of exposed aggregate concrete

3.4 抗氯离子渗透性

水泥混凝土具有一定的导电性,主要原因是水泥浆体、骨料、界面等含有孔隙,采用电通量法测定混凝土的导电性可以反应抗渗能力和致密度。图 4 为养护剂刷涂量对混凝土电通量的影响。如图所示,混凝土试件的 6 h 电通量随着刷涂量的增加而降低,在 200 g/m² 时趋于稳定,混凝土的电通量下降了 32.4%。

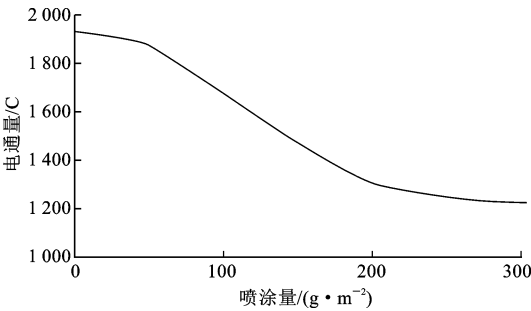


图 4 养护剂对混凝土电通量的影响

Fig. 4 Effects of curing agent on the electric flux of concrete

3.5 抗碳化性能

图 5 为酚酞指示剂法测定的混凝土加速碳化 3 d、7 d、28 d 的碳化深度。编号 A、B 分别表示喷涂和未喷涂养护剂的露石混凝土,编号 C、D 分别表示喷涂和未喷涂养护剂的普通混凝土。由图可知,经过露石处理后,混凝土试样的同龄期碳化深度加大,表明 CO₂ 更容易渗入混凝土内部与水泥水化产物发生反应,引起混凝土碱度下降。喷涂养护剂的露石混凝土和普通混凝土的碳化深度均低于未喷涂的混凝土对比试件,露石混凝土的抗碳化能力改善明显,其 14 d 碳化深度下降了 23%。喷涂养护剂后普通混凝土的 14 d 碳化深度下降了 15%左右。

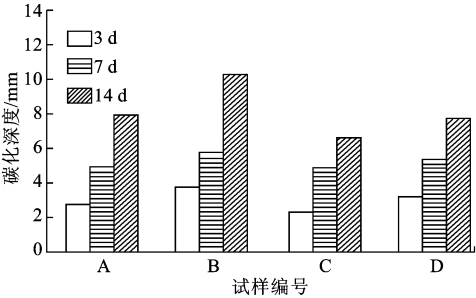


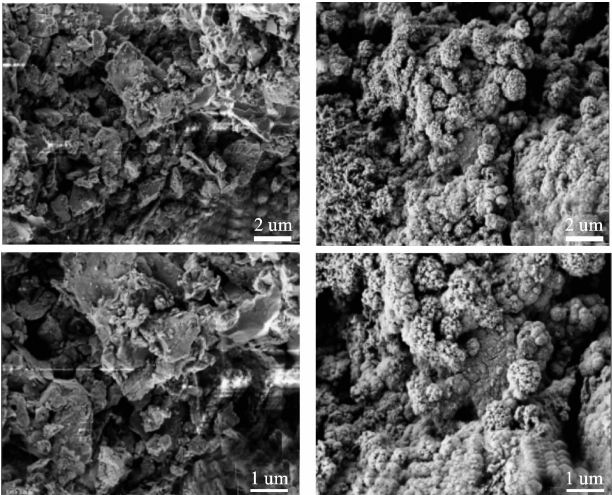
图 5 养护剂对普通混凝土和露石混凝土碳化深度的影响

Fig. 5 Effects of curing agent on the carbonation depth of normal and exposed aggregate concrete

4 微观机理分析

4.1 SEM 分析

对未喷涂和喷涂养护剂的露石混凝土表面集料进行 SEM 观察(图 6)。由图可知,由于经过冲刷处理,石灰石表面有大量的方解石颗粒存在,矿物颗粒



(a) 无养护剂处理 (b) 经养护剂处理

图 6 养护剂处理与无养护剂处理露石混凝土粗集料表面形貌

Fig. 6 Surface morphology of aggregate in exposed aggregate concrete with or without curing agent

呈不规则堆积,形成大量孔隙。喷涂养护剂后,养护剂中的乙酸可与集料表面的方解石发生反应,生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与增强组分发生反应,生成莫氏硬度较大的硅酸盐产物附着在表面和填充孔隙,改善了粗集料表面微观结构,提高了粗集料的强度和耐磨性能。

取未喷养护剂和喷涂养护剂的露石混凝土试样距表面约 2 mm 的试块,观察其内部形貌(图 7)。由图可知,喷涂养护剂后,水泥浆体孔隙变少,集料与水泥浆体之间的结合增加,这是因为养护剂中氟硅酸镁、乙酸、硅酸锂可以充分渗入露石混凝土内部,与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 C—S—H 等钙质组分反应,生成新的产物堵塞孔隙,改善内部孔结构。

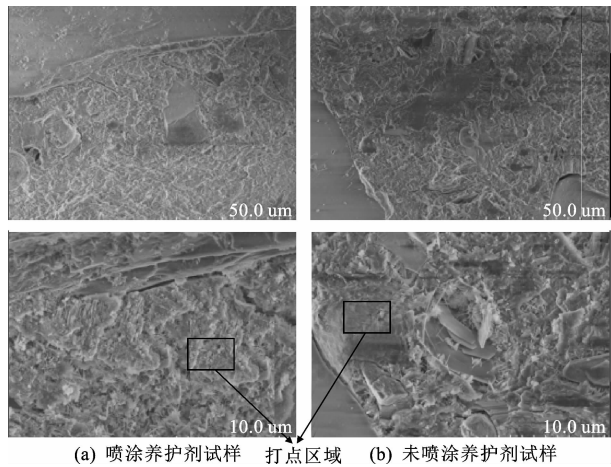


图 7 露石混凝土断面 SEM 图片

Fig. 7 SEM image of fracture surface of exposed aggregate concrete

图 7 中标示区域水泥浆体的元素含量 X 射线能谱(EDS)分析结果如图 8 所示。由图可知,经过喷涂养护剂处理的露石混凝土内部(0~2 mm)的碳元素含量明显降低,而硅元素的含量升高,说明养护剂渗入露石混凝土内部,与 CaCO_3 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应。其中 CaCO_3 与养护剂中的乙酸发生反应,生成的游离钙离子、复合 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 C—S—H 等水化产物与增强组分氟硅酸镁发生反应,生成硅酸盐和氟硅酸盐等硬质产物,堵塞混凝土的孔隙,引起露石混凝土表层水泥浆体水化产物发生变化,减小了露石混凝土内部水分的蒸发量,保证了内部水泥水化环境,提高了其力学性能和耐久性。

4.2 DSC 热分析

下页图 9 为喷涂养护剂后混凝土内水泥浆体的 DSC 分析结果。在 450 ℃ 左右的吸热值为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的分解温度,在 600 ℃~900 ℃ 范围内主要为 CaCO_3 吸热分解峰和硅酸钙转化峰。随着深度增加, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的分解量增大,其中表层(0~1 mm)粉末中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的失重率为 -1.67%,说明养护剂的增强组分和促进组分都渗入,与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,生成了硅酸盐、氟硅酸盐等产物。在试块中打磨深度为 2~3 mm、4~5 mm 的粉末在 400 ℃~500 ℃ 的失重率分别为 -5.34%、-5.80%,表明养护剂的渗透深度为 3~5 mm。0~1 mm 和 2~3 mm 位置打磨层的粉末在 960 ℃ 出现较为明显的吸热峰,为氟

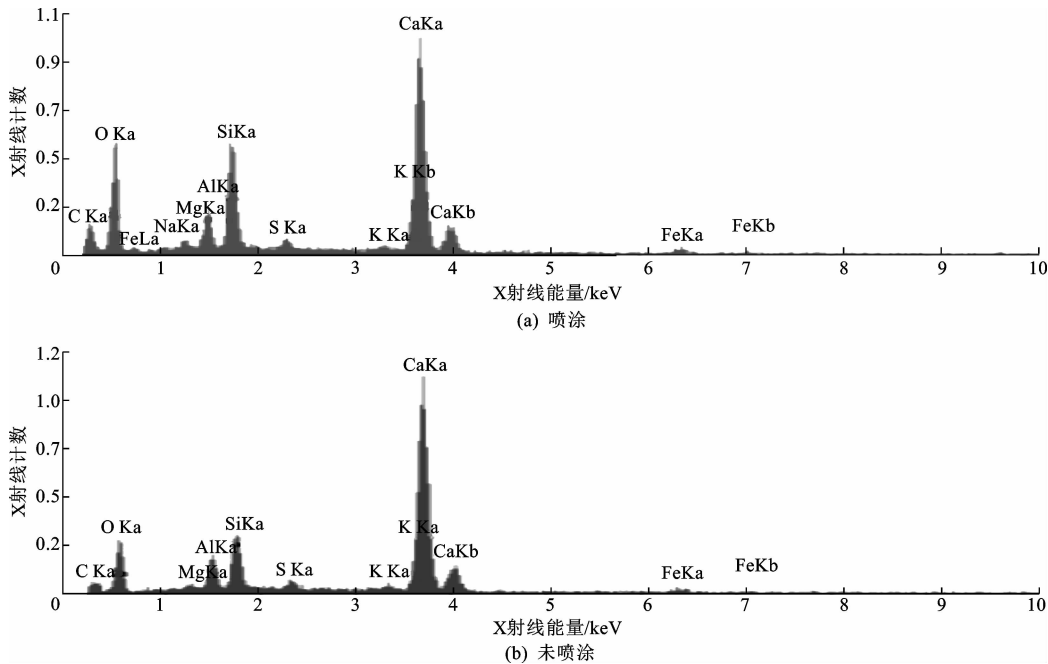


图 8 喷涂处理和未喷涂处理的露石混凝土 EDS 分析结果

Fig. 8 EDS analysis of cement paste in exposed aggregate concrete with or without curing agent

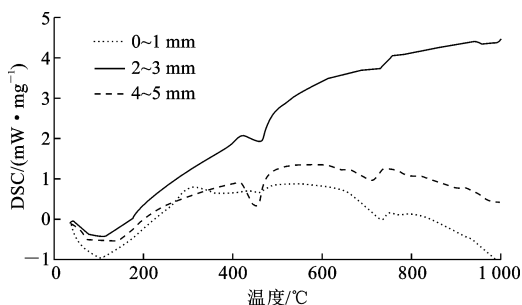


图9 喷涂养护剂水泥净浆试样不同深度粉末的 DSC 分析

Fig. 9 Results of DSC analysis of cement paste in different locations sprayed with curing agent

硅酸钙的吸热峰,表明氟硅酸镁可与钙质水化产物反应生成氟硅酸钙类低溶解度硬质产物。

4.3 XRD 分析

图 10 为喷涂养护剂后混凝土内水泥浆体的 XRD 图谱。随着深度的增加, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的衍射峰逐渐增大,表明混凝土表面水泥浆体中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 可与养护剂中氟硅酸镁发生反应,生成了硅酸钙、氟硅酸钙等产物,消耗部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。由图可知,喷涂养护剂后试块 2~3 mm、4~5 mm 粉末中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的失重率分别为 -5.34%、-5.80%。对比喷涂养护剂的试块 4~5 mm 深度的粉末 XRD 和 DSC 分析,发现两者的组分和含量基本一致,说明养护剂渗透深度不超过 5 mm。因此可以推定,养护剂中的氟硅酸镁、硅酸锂等活性组分能与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,形成的产物堆积在毛细孔中,降低渗透层的内部孔隙率,同时生成的反应产物堵塞了表层连通的孔隙,减少了试块内部水分的蒸发量,从而提高了水泥水化程度。

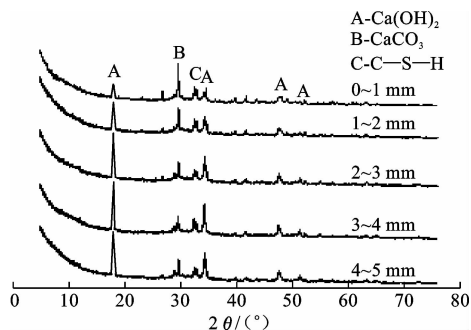


图 10 涂刷养护剂不同深度水泥浆体的 XRD 图谱

Fig. 10 XRD pattern of cement paste in different locations sprayed with curing agent

5 结 语

(1) 露石混凝土表面经刷除处理后,易于产生裂纹等缺陷,需要进行修复和表面增强;同时表面刷除

处理时,水泥的水化度较低,因此后期养护环境对露石混凝土路用性能发展十分重要。

(2) 露石混凝土养护剂的最优喷涂量为 200~250 g/m²,可以显著降低其吸水率,略提高其抗压、抗折强度,显著提高其抗渗透性及抗碳化能力。

(3) 养护剂提升混凝土路用性能的微观机理是其氟硅酸镁、硅酸锂等活性物质可渗入露石混凝土表层浆体和浆体与集料间的界面过渡区,与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、水化硅酸钙凝胶等钙质产物反应,生成的新硬质产物堵塞孔隙,能改善混凝土内部孔结构,从而显著提高露石混凝土耐磨能力和耐久性。

参考文献:

References:

- [1] Burns M. Advantages of exposed aggregate in visual concrete[J]. Concrete International, 1980, 2(1): 50-55.
- [2] 卿笃干, 陈 瑜. 水泥混凝土路面磨蚀与抗滑构造衰减的模拟试验研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(2): 24-29.
QING Du-gan, CHEN Yu. Analog test study on abrasion of cement concrete pavement and attenuation of skid-resistant texture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(2): 24-29. (in Chinese)
- [3] 刘 英, 田 波, 牛开民, 等. 不同纹理水泥混凝土路面降噪与抗滑特性[J]. 公路交通科技, 2012, 29(1): 28-33.
LIU Ying, TIAN Bo, NIU Kai-min, et al. Skid-resistance and denoising properties of cement concrete pavement with different surface texture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(1): 28-33. (in Chinese)
- [4] 韩 森, 李志玲, 张东省, 等. 露石水泥混凝土路面性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(4): 6-9.
HAN Sen, LI Zhi-ling, ZHANG Dong-sheng, et al. Performance of exposed-aggregate cement concrete pavement [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(4): 6-9. (in Chinese)
- [5] Caestecker C. Test sections of noiseless cement concrete pavements[C]//ARRB Group Limited. 6th International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance, 1997. Indianapolis: ARRB Group Limited, 1997, 3: 251-268.
- [6] 韩 森, 王 旭. 基于数字图像技术的露石水泥混凝土路面露石分布[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(6): 1-5.
HAN Sen, WANG Xu. Particle distribution of ex-

- posed-aggregates-cement cement pavement(EACCP) based on digital image processing[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2010, 30(6):1-5. (in Chinese)
- [7] 董雨明. 隧道抗滑低噪声水泥混凝土路面研究[D]. 西安:长安大学, 2004.
DONG Yu-ming. The study of anti-slide and low noise of cement concrete pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (in Chinese)
- [8] 陈海峰. 露石水泥混凝土路面高原地区应用适应性研究[D]. 西安:长安大学, 2006.
CHEN Hai-feng. The study of application of exposed-aggregate cement concrete pavement on plateau[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006. (in Chinese)
- [9] Xu S, Chen Z, Zhang B, et al. Facile preparation of pure CaAl-layered double hydroxides and their application as a hardening accelerator in concrete[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 155(3): 881-885.
- [10] AASHTO T, 277-83, Standard method of test for rapid determination of the chloride permeability of concrete[S].
- [11] ASTM, C1202-91, Standard test method for electrical indication of concrete ability to resist chloride ion penetration[S].
- [12] 袁润章. 胶凝材料学[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 1996.
YUAN Run-zhang. Cementitious materials science[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 1996. (in Chinese)
- [13] Mindess S, Young J F, Darwin D. Concrete[M]. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.
- [14] Taylor H F W. Cement chemistry[M]. 2nd ed. London: Thomas Telford Ltd, 1997.
- [15] 耿飞, 秦鸿根, 金林, 等. 密封固化剂对混凝土性能的影响研究[J]. 低温建筑技术, 2012, 34(4): 6-8.
GENG Fei, QIN Hong-gen, JIN Lin, et al. Influence of the coating of sealing and hardening agent on concrete[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2012, 34(4): 6-8. (in Chinese)
- (上接第32页)
- [9] 张泓, 闻邦椿. 振动压路机压实机理的研究[J]. 建筑机械, 2000(3): 25-27.
ZHANG Hong, WEN Bang-chun. Study on compaction mechanism of vibratory roller[J]. Construction Machinery, 2000(3): 25-27. (in Chinese)
- [10] 归少雄, 马丽英, 曹源文. 提高沥青混凝土路面压实质量控制的分析[J]. 建筑机械, 2011(7): 42-45.
GUI Shao-xiong, MA Li-ying, CAO Yuan-wen. Analysis on improving compaction quality control of asphalt concrete pavement[J]. Construction Machinery, 2011(7): 42-45. (in Chinese)
- [11] 汤炳新, 刘平. 振动压路机振动轮跳振时的次谐波振动现象[J]. 河海大学常州分校学报, 2000, 14(1): 13-17.
TANG Bing-xin, LIU Ping. Subharmonics in the jump vibration of a vib-roller drum[J]. Journal of Hohai University Changzhou, 2000, 14(1): 13-17. (in Chinese)
- [12] 杜善其. 振动压路机压实度实时测量与控制采集信号的分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2004, 21(8): 47-49.
DU Shan-qi. Analysis on the signal sampling from real-time testing and control of vibratory roller[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2004, 21(8): 47-49. (in Chinese)
- [13] 居彩梅. 车载式压实度检测仪[D]. 西安: 长安大学, 2001.
JU Cai-mei. In-vehicle compaction meter[D]. Xi'an: Chang'an University, 2001. (in Chinese)
- [14] 张智明. 压实度计及其试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.
ZHANG Zhi-ming. Compaction meter and its experimental study[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [15] 严世榕, 闻邦椿. 振动压路机的一种非线性动力学特性研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2000, 28(5): 64-67.
YAN Shi-rong, WEN Bang-chun. Investigation of characteristics of one kind of nonlinear dynamics of a vibratory roller[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2000, 28(5): 64-67. (in Chinese)
- [16] Pietzsch D, Poppy W. Simulation of soil compaction with vibratory rollers[J]. Journal of Terramechanics, 1992, 29(6): 585-597.
- [17] Yoo T S, Selig E T. Dynamics of vibratory-roller compaction[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1979, 105(10): 1211-1231.
- [18] 吴梁. 路基土压实度检测技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
WU Liang. Research on the compaction degree detection technology of subgrade soil[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)