

## 涂层防护对低真空暴露混凝土性能的影响规律

程冠之<sup>1,3</sup>, 林红威<sup>2</sup>, 李咏昊<sup>2</sup>, 庄扬波<sup>2</sup>, 韩 松<sup>2</sup>, 韩 冰<sup>2</sup>, 李大林<sup>1,3</sup>

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 北京 100081;

2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 3. 高速铁路轨道系统全国重点实验室, 北京 100081)

**摘 要:** 低真空管道是超高速低真空磁悬浮交通系统的核心运行平台, 内部环境具有极低气压、交变气流、极低湿度等特点。采用涂层对混凝土进行防护是保证管道内混凝土安全服役的有效措施之一。为研究低真空环境下涂层防护对混凝土质量损失、力学强度与微观结构等的影响规律, 对经常压养护和真空暴露的涂层防护 C50 混凝土开展质量损失、力学强度和涂料附着强度测试, 并通过扫描电子显微镜(SEM)和背散射电子(BSE)图像观察涂层表面以及硬化水泥浆体的微观形貌和物相。结果表明: 低真空环境下氟碳涂层体系能有效抑制低真空环境下混凝土内部自由水的散失, 涂层防护混凝土的质量损失率明显小于无涂层混凝土。在常压和低真空环境下, 涂层均可显著提升混凝土弯拉强度, 但对抗压强度表现出了一定的不利影响。无论是否采用涂层防护, 早龄期低真空暴露均对混凝土抗压及弯拉强度不利。此外, 有涂层硬化水泥浆体试样的孔隙率相较于无涂层试样降低了 18.1%, 说明涂层能够抑制低真空环境对硬化浆体内部结构的不利影响, 使硬化浆体的孔隙率降低。随着混凝土龄期增长, 常压及真空环境中涂层附着强度均缓慢增大。经真空暴露后, 涂层附着强度略有提升。

**关键词:** 混凝土; 低真空环境; 涂层防护; 质量损失; 强度

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)05-1133-11

网络出版时间: 2025-01-09



超高速低真空磁悬浮交通系统(简称“高速飞车”)是继汽车、铁路、飞机、轮船之后, 新一代交通运输模式。借助磁悬浮技术和低真空管道, 这种新型交通运输模式可大幅减少高速列车在运行中的空气阻力和轮轨阻力, 实现时速达 1000 km 的超高速“近地飞行”<sup>[1-3]</sup>。在中国, 超高速低真空磁悬浮交通系统已被列为面向 2035 年的国家重大颠覆性工程技术, 并被写入《交通强国建设纲要》。中国航天科工集团、西南交通大学等对这一技术正开展研发工作<sup>[4-6]</sup>, 其中中国航天科工集团已完成 2 km 试验线的建设。

作为“高速飞车”的核心运行平台, 低真空管道为列车提供真空环境, 其内部长期保持低真空状态, 内部气压约为海平面大气压力的 0.100~0.001<sup>[7-8]</sup>。由于运营维护等需要, 真空管道还需要频繁恢复至常压状态。因此, 真空管道在服役过程中内部环境具有极低气压、交变气压的特点。综合国内外相关

研究, 考虑经济性以及技术成熟度等指标, 混凝土被认为是一种非常有竞争力的低真空管道结构材料。然而, 既有研究表明, 在极低气压、交变气压作用下, 混凝土基体将发生快速失水, 孔隙结构也会明显改变, 致使其力学性能和长期服役性能发生劣化<sup>[9-11]</sup>。此外, 林红威等联合航天科工集团开展的研究表明<sup>[12-13]</sup>, 交变气压在低真空管道内引发的高速气流会对混凝土基体内外造成气动疲劳损伤, 引发严重的粉尘问题, 对列车的高速运行构成重大威胁。因此, 为了保证混凝土在低真空环境中安全服役, 必须对混凝土进行防护或采用高气密性混凝土。

目前, 采用密封涂层对混凝土进行防护被认为是经济高效的解决方案<sup>[14-15]</sup>。一方面, 表面密封涂层可以阻隔混凝土基体与外部环境之间的水汽交换, 减弱低真空环境对混凝土的不利影响; 另一方面, 表面密封涂层还可以减少交变气压引起的高速

收稿日期: 2024-09-19。 修订日期: 2024-11-12。

基金项目: 中国铁道科学研究院集团有限公司科研基金项目(2022YJ129);

国家自然科学基金(52108109、52478118、52478290)。

第一作者: 程冠之(1987), 男, 博士, 副研究员。

通信作者: 林红威(1989), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2024-09-19. Revised date: 2024-11-12.

First author: CHENG Guanzhi (1987-), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: chengguanzhi@163.com

Correspondent author: LIN Hongwei (1989-), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: hwlin@bjtu.edu.cn

气流对混凝土表层的风蚀作用。基于北京交通大学牵头研发的复合涂层体系<sup>[14]</sup>，这一技术方案已在中国“高速飞车”2 km 试验线全线得到应用。

国内外关于混凝土表面涂层的研究很多，但主要集中于恶劣环境条件下混凝土耐久性的研究。Diamanti 等<sup>[16]</sup>研究表明聚合物改性水泥基涂层在干湿循环条件下起到了有效的物理屏障作用，能够调节混凝土与外部环境之间的水分交换，从而影响混凝土的含水量；Woo 等<sup>[17]</sup>通过水蒸气渗透性试验和盐雾试验证明在混凝土表面涂覆涂料能够填充混凝土表面存在的微孔隙，并且可以有效地减少液体或气体渗透进入混凝土中。Kay 等<sup>[18]</sup>对不同湿度条件下基材涂层体系进行研究，发现水分条件会显著影响环氧树脂涂层的拉拔强度，限制基材水分对发挥涂层性能有积极影响，但过于干燥的基材混凝土对涂层性能有害。在一些混凝土抗氯盐侵蚀研究中<sup>[19–20]</sup>，还发现高性能涂层防护材料能够在混凝土表面形成有效的屏障，阻止氯离子进入混凝土内部，从而显著提高混凝土结构的耐氯离子侵蚀能力，延长混凝土结构的使用寿命。这些已有研究为涂层防护材料在混凝土结构中的应用提供了诸多参考。然而，目前关于低真空环境下涂层防护混凝土性能演变规律仍十分有限。Shangguan 等<sup>[21]</sup>设计了一种有机与无机表面改性剂相结合的混凝土涂层，对低真空环境中砂浆内部水分的迁移有一定限制作用。

综上所述，采用涂料对低真空环境中服役的混凝土结构进行防护是当前较为可行的技术方案，但目前相关研究非常少，可供参考的技术资料十分有限。因此，亟需针对涂层防护混凝土在低真空环境中的服役性能开展更多研究。基于上述背景，研究了低真空环境中氟碳涂层体系对混凝土的防护效果。首先，研究了涂层防护混凝土的质量损失和力学强度演变规律，随后分析了涂层防护对硬化水泥净浆微观结构的影响规律，最后研究了涂层附着强度演变规律。本研究旨在探究低真空环境下涂层对混凝土性能的影响规律以及涂层在低真空环境下的适用性，可为中国低真空混凝土管道的建设提供有益参考。

## 1 实验

### 1.1 原材料

水泥为抚顺水泥股份有限公司生产 P·I 42.5 基准硅酸盐水泥(化学组分见表 1)，细骨料为细度模数 2.8 的天然河砂；粗骨料为 5~10、10~20 mm 连续级

配石灰岩碎石，含泥量 0.4%(质量分数)；水为市政自来水；减水剂为非引气类聚羧酸减水剂。涂料为北京交通大学研发的双组份氟碳涂层体系，体系包括无溶剂环氧渗透底漆和氟碳树脂面漆，主要成膜物为氟碳树脂，固化剂主要成分为六亚甲基二异氰酸酯，涂料颜基比为 0.4，具体性能参数如表 2 所示。

表 1 P·I 42.5 基准硅酸盐水泥化学组分

Table 1 Chemical compositions of P·I 42.5 Portland cement

| Chemical composition            | Mass fraction w/% |
|---------------------------------|-------------------|
| SiO <sub>2</sub>                | 20.81             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 4.11              |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 3.16              |
| CaO                             | 63.22             |
| MgO                             | 3.19              |
| SO <sub>2</sub>                 | 2.08              |
| Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> | 0.53              |
| f-CaO                           | 0.80              |
| Loss                            | 2.52              |
| Cl <sup>-</sup>                 | 0.03              |

表 2 氟碳涂层体系性能参数

Table 2 Parameters of fluorocarbon coating system

| Type                       | Thickness/<br>μm | Tensile<br>strength/MPa | Adhesion<br>strength/MPa |
|----------------------------|------------------|-------------------------|--------------------------|
| Fluorocarbon resin topcoat | 100              | 14                      | 8.0                      |
| Epoxy resin primer         | 60               |                         | 8.1                      |

### 1.2 试件制备

混凝土的强度等级为 C50。混凝土配合比水、水泥、河砂、小石、中石、减水剂比例为 192.00: 584.00: 633.00: 397.00: 595.00: 0.88。在混凝土水化初期即进行涂料涂覆，涂覆工艺为先涂覆环氧渗透底漆，再涂覆氟碳树脂面漆。采用滚涂的方式在混凝土表面均匀涂覆了 1 层底漆和 1 层面漆，厚度分别为 60 μm 和 100 μm 左右，涂层总厚度约为 160 μm。具体涂覆流程如下：C50 混凝土成型完毕后，在 (20±2) °C 的室内环境下静置 1 d 后拆模，然后涂覆涂料底漆。室内风干 2 d 后，再涂刷涂料面漆，室内风干 2 d。

1) 为研究氟碳涂层体系对混凝土强度的影响规律，分别设计了 300 mm×100 mm×100 mm 的混凝土抗压强度试件和 400 mm×100 mm×100 mm 的混凝土弯拉强度试件。研究变量包括真空起始暴露龄期、测试龄期、是否涂覆涂料(后文简称有涂

层及无涂层)。

2) 在低真空环境中, 混凝土基体内水分快速蒸发, 质量不断降低。为了表征涂层对混凝土质量损失的影响规律, 设计了一批 40 mm×40 mm×40 mm 混凝土质量损失试件。研究变量包括真空起始暴露龄期、测试龄期、是否涂覆涂料。

3) 为研究低真空环境对涂层附着强度的影响规律, 试验设计了 70 mm×70 mm×400 mm 的附着强

度试件。混凝土试件成型后, 将其切割制作呈 70 mm×70 mm×40 mm 的附着强度试件。试件表面涂装涂料后, 分别在常压养护环境中养护至 6、28 d 龄期, 然后放入真空舱。待放置 28 d 和 60 d 后, 将试件取出进行涂料粘结强度测试。研究变量包括真空起始暴露龄期和测试龄期。

上述每组变量分别设计 3 个重复试件, 总计 171 个试件, 所有试件具体信息见表 3。

表 3 混凝土试件列表  
Table 3 Matrix of concrete specimens

| Label     | Environment                     | Number of specimens      |                               |              |                       |
|-----------|---------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------|-----------------------|
|           |                                 | Compressive strength (P) | Flexural tensile strength (F) | Mass loss(M) | Adhesion strength (D) |
| A#-*      | Atmosphere                      | 9                        | 9                             | 15           |                       |
| A6V#-*    | 6 d in atmosphere, then vacuum  | 9                        | 9                             | 15           |                       |
| A28V#-*   | 28 d in atmosphere, then vacuum | 3                        | 3                             | 6            |                       |
| C-A#-*    | Atmosphere                      | 9                        | 9                             | 15           | 6                     |
| C-A6V#-*  | 6 d in atmosphere, then vacuum  | 9                        | 9                             | 15           | 6                     |
| C-A28V#-* | 28 d in atmosphere, then vacuum | 3                        | 3                             | 6            | 3                     |

Note: “\*” represents the compressive strength (P)/ flexural tensile strength (F) / mass loss (M) / adhesion strength (D). Letter “A” represents the atmospheric environment, the letter “V” represents the vacuum environment, and the letter “C” represents the coating. “#” stands for the concrete age.

4) 为进一步探究涂层对 C50 混凝土性能的影响机理, 还制备了直径 28 mm、高 103 mm 的硬化水泥净浆试样, 其水灰比与 C50 混凝土水灰比(0.37)一致。在硬化水泥净浆试样养护至规定龄期后, 首先将试样切割成高度分别为 10 mm 和 20 mm 的小圆柱体试样。随后用钳子从 10 mm 试样中掰取样品进行扫描电子显微镜分析(SEM); 20 mm 圆柱体试样使用环氧树脂进行镶嵌, 并磨平抛光, 用于背散射电子图像分析(BSE)。

### 1.3 低真空试验舱

采用的低真空暴露环境由真空管线系统综合大型试验平台提供。该试验平台由中国航天科工集团有限公司和中铁六局集团有限公司共同建设, 位于北京市平谷区。试验平台整体结构形式为 U 型梁, 其外轮廓为全圆钢管结构, 内部浇筑混凝土实现 U 型构造。试验过程中内部气压在 2000 Pa 附近浮动, 测试期间经历若干次复压过程。

### 1.4 试验方法

1.4.1 常压养护及真空暴露环境 常压养护在温度(20±2)℃、相对湿度≥95%的标准养护室中进行; 低真空暴露环境为气压 1000~2000 Pa 的 U 型梁真空舱, 舱内温度与当地户外环境保持一致(-5~20℃)。

1.4.2 混凝土质量测试 将质量损失测试试件在

常压养护环境中养护至龄期 6 d 和 28 d, 然后放入真空舱。放入真空舱前用精度为 0.01 g 的电子称测量试件的原质量  $W_{0i}$ , 在真空舱中暴露至龄期 14、28、60、90 d 和 120 d 时取出试件测量此时试件的质量  $W_{ni}$ 。根据公式(1), 计算试件质量损失率 $\Delta W_{ni}$ 。每组试验取 3 个平行试件的平均质量损失率作为最终结果<sup>[18]</sup>。

$$\Delta W_{ni} = \frac{\Delta W_{0i} - \Delta W_{0i}}{\Delta W_{0i}} \times 100 \quad (1)$$

式中:  $\Delta W_{ni}$  为在低真空环境暴露至指定龄期时第  $i$  个混凝土试件的质量损失率(%), 精确至 0.01;  $W_{0i}$  为低真空暴露前第  $i$  个混凝土试件的质量(g);  $W_{ni}$  为在低真空环境暴露至指定龄期时第  $i$  个混凝土试件的质量(g);  $\Delta W_n$  为在低真空环境暴露至指定龄期时一组混凝土试件的平均质量损失率(%), 精确至 0.1。

1.4.3 强度测试 参考 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》<sup>[22]</sup>对混凝土抗压及弯拉强度进行测试。试件的测试龄期为 14、28 d 和 60 d。采用 HL-2000 液压式压力试验机对棱柱体试件和弯拉强度试件分别开展轴压试验和四点弯曲试验, 加荷速率控制在 0.5~0.8 MPa/s 之间。

1.4.4 SEM 和 BSE 采用扫描电子显微镜分析(SEM)来观测涂层在试样表面的微观形貌以及试样

内部微观结构形貌,通过背散射电子图像分析(BSE)来分析试样内部水化物相成分。在进行扫描电镜分析前,先对硬化水泥浆体试样观测面进行抛光打磨,直至出现光亮表面。采用 Phenom Pharos G2 场发射扫描电子显微镜拍摄扫描电子显微镜照片(SEM)和背散射电子照片(BSE)。SEM 照片放大倍数为 10 000 和 50 000, BSE 照片放大倍数为 1000。同一批次样品保持同一对比度和亮度,以保证图像灰度的一致性。

**1.4.5 附着强度测试** 参考 GB/T 5210—2006《色漆和清漆拉开法附着力试验标准》<sup>[23]</sup>,采用电子万能试验机测定涂层与混凝土基底之间的附着力。每组样品重复测试 6 次,附着强度取为 6 组测试平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 混凝土质量损失结果

图 1 为在不同暴露条件下有涂层和无涂层混凝土试件的质量变化率。

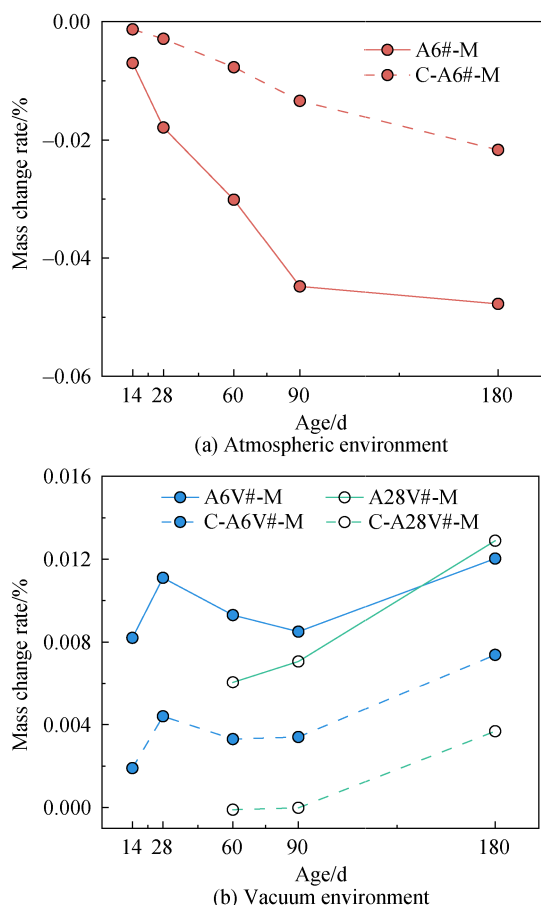


图 1 混凝土立方体试件质量损失率

Fig. 1 Mass loss of concrete cube specimens

从图 1a 可以看出,在常压标准养护环境下,有

涂层和无涂层试件在各个龄期时的质量损失率均为负值,说明常压养护环境会使试件的质量得到提升。分析其原因,在标准养护室进行养护时,由于环境湿度较高,水分能够渗透到混凝土内部,使得试件质量随着龄期不断提升。同时,还可以发现,无涂层试件的质量增加量始终高于有涂层试件,且养护龄期越久,二者质量提升量相差越大。说明在常压环境下,涂层能够有效阻隔环境中的水分渗透进入混凝土内部。

图 1b 是低真空暴露下有涂层和无涂层混凝土试件的质量损失率测试结果。在低真空暴露下,有涂层及无涂层试件的质量损失率在各个暴露龄期均为正值,说明混凝土在低真空暴露下质量会逐渐降低,这是因为混凝土内部的水分在低真空环境下会不断蒸发散失,同时水汽逸出可能会携带微小颗粒脱离混凝土试件。对于有涂层试件,其质量损失率均低于无涂层试件,说明涂层对低真空暴露下试件的质量损失有明显改善效果。这是因为涂层会在混凝土表面形成一层致密的薄膜,使得混凝土内部仍能保持较高气压,自由水蒸发散失减少。同时,涂层阻碍了水汽外逸所造成的固相颗粒的损失,因此有涂层试件的质量损失率要低于无涂层试件。

对比 A6V#-M 和 A28V#-M 系列试件发现,在常压养护 28 d 后再移入低真空进行暴露(后文简称晚龄期低真空暴露)的试件,其 60 d 和 90 d 的质量损失率均低于在常压养护 6 d 后再移入低真空进行暴露(后文简称早龄期低真空暴露)的试件。对比 C-A6V#-M 和 C-A28V#-M 系列试件,同样出现上述现象。说明无论有无涂层,晚龄期低真空暴露的混凝土试件,其质量损失均低于早龄期低真空暴露的试件。从图 1b 还可以发现,晚龄期低真空暴露有涂层试件的质量损失率最低,在 60、90 d 和 180 d 时的质量损失率分别仅为-0.011%、0.002%和 0.370%。这是因为在 28 d 的标准养护下,外部环境中的水分会少量渗透进入有涂层混凝土内部,抵消了在后期低真空暴露时所蒸发散失自由水的质量。

### 2.2 涂层对混凝土强度的影响

**2.2.1 混凝土抗压强度** 图 2 为有涂层和无涂层混凝土试件的抗压强度对比。通过图 2a 可以看到,对于仅在常压环境下进行养护的试件,有涂层试件抗压强度普遍低于无涂层抗压强度。28 d 和 60 d 龄期时,有涂层试件强度相较于无涂层试件分别降低

了 13.2% 和 3.2%。分析其原因, 在混凝土早期水化阶段, 混凝土需要与外界环境有一定的水汽交换, 本研究所设计的有涂层混凝土试件在其水化初期就进行了涂料涂覆, 因此致密的涂层阻碍了外部养护环境中的水分向基体内部渗透, 使得常压环境下有涂层试件的水化程度低于无涂层试件。

在低真空环境下, 有涂层试件抗压强度同样低于无涂层试件。在常压养护 6 d 后开始低真空暴露的有涂层试件, 14、28 d 和 60 d 抗压强度比无涂层试件分别降低了 7.6%、4.8% 和 4.8%。对于常压养护 28 d 后开始低真空暴露的试件, 有涂层试件抗压强度比无涂层试件降低了 17.63%。这是由于低真空环境暴露对有涂层试件的抗压强度同样产生了不利

影响。此外, 涂刷涂层后, 混凝土试块与万能机压盘之间的摩擦力减小, 端部效应减弱, 也会导致抗压强度测试值偏低。因此, 无论低真空暴露龄期早或晚, 有涂层试件抗压强度(C-A6V#、C-A28V#)均较常压环境下有涂层试件(C-A#)偏低。

结合图 2a 和图 2b 还可以发现, 与常压养护有涂层试件相比, 低真空暴露后的有涂层试件抗压强度普遍有所降低。6 d 开始低真空暴露的试件平均降低了 2.4 MPa, 28 d 开始低真空暴露的试件降低了 3.5 MPa。这说明低真空暴露会对有涂层混凝土试件的抗压强度产生不利影响。

**2.2.2 混凝土弯拉强度** 图 3 是有涂层和无涂层混凝土试件的弯拉强度。

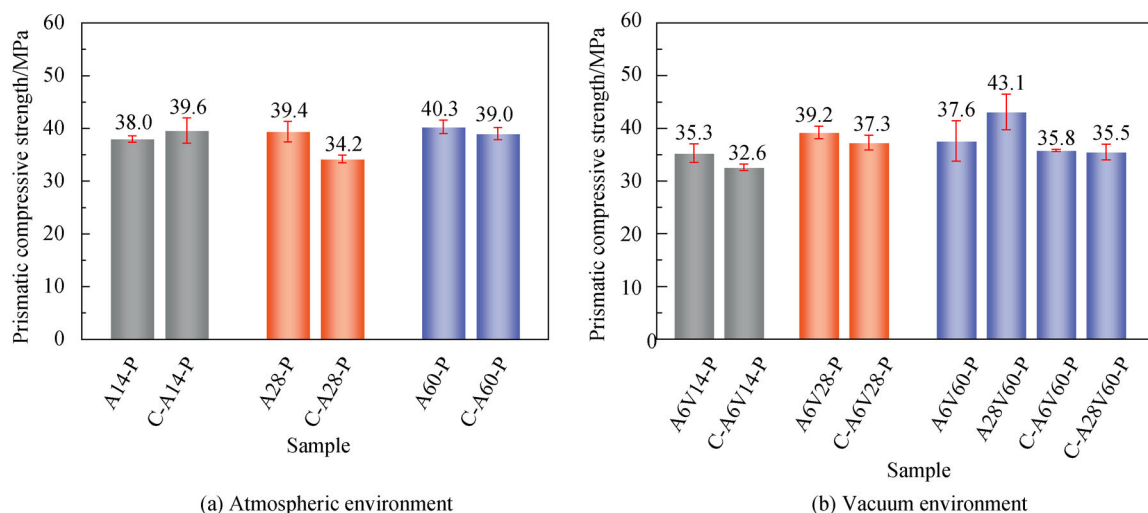


图 2 涂层对混凝土抗压强度的影响  
Fig. 2 Influence of surface coating on the compressive strength

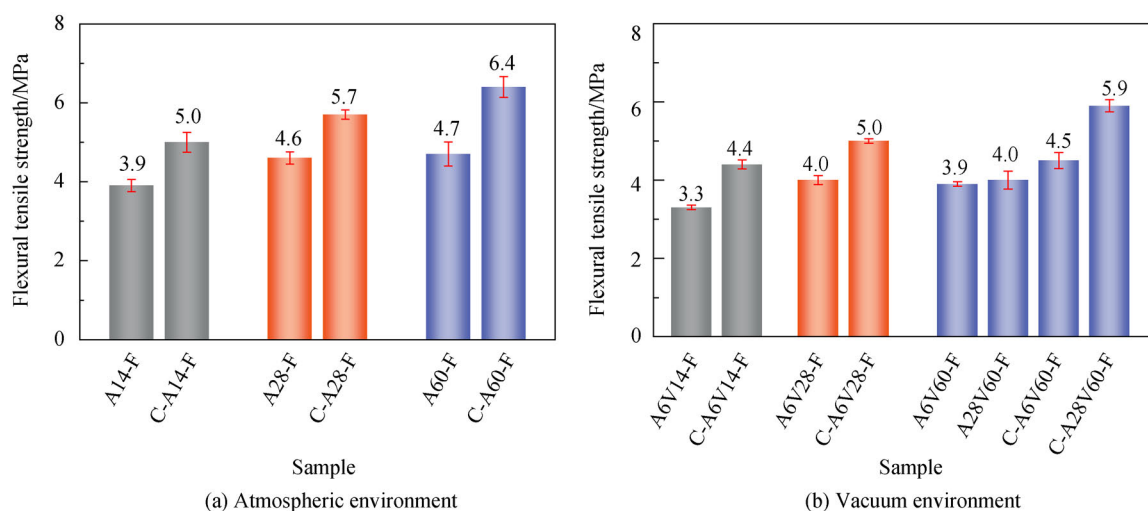


图 3 涂层对混凝土弯拉强度的影响  
Fig. 3 Influence of surface coating on the flexural tensile strength

从图 3 可以看出,无论是在常压还是低真空环境下,有涂层混凝土试件的弯拉强度均大于相同环境下的无涂层试件,且弯拉强度随着龄期的增长也不断提升。在常压养护下,有涂层试件(C-A#-F)14、28 d 和 60 d 的弯拉强度相较于相同龄期无涂层试件(A#-F)分别提升了 28.2%、23.9%和 36.2%;对于常压养护 6 d 后移入低真空环境暴露的有涂层试件(C-A6V#-F),在 14、28 d 和 60 d 的弯拉强度相较于无涂层试件(A6V#-F)分别升高了 33.3%、25%和 15.4%;同时,在常压养护 28 d 后移入低真空环境暴露的有涂层试件(C-A28V60-F),其弯拉强度相较于无涂层试件(A6V60-F)提高了 47.5%。

涂层对混凝土弯拉强度的提升效果较明显。这是因为在混凝土试件进行弯拉强度测试时,涂层自身具有可观的抗拉强度(见表 3),在进行弯拉试验时自身承担一部分强度,进而提高混凝土试件的弯拉强度。同时,混凝土表面的涂料会不断渗入到混凝土内部,形成交联结构并填充混凝土表面的微裂缝和胶凝孔隙,从而使混凝土弯拉强度得到提升。图 4 为通过试验获取到的有涂层混凝土试件表面涂层与混凝土界面区图像,其中图 4a 为对有涂层混凝土试件进行切割后,其断面边缘处的涂层-混凝土界面图像。图 4b 和图 4c 分别为光学显微镜和扫描电子显微镜所拍摄图像。通过 3 种观测尺度下拍摄的涂层与混凝土界面图像可以发现,涂料能够渗透进入混凝土表面,并形成一层相对致密的结构,涂层平均渗透厚度为 229  $\mu\text{m}$ 。同时,还可以发现涂层渗透区整体结构相对致密,而在未渗透区出现了大量的针状水化产物,以及较多的孔隙和微裂缝。这说明涂层能够填充混凝土表面微裂缝和孔隙,并且起到阻碍混凝土裂缝发展的作用。

结合图 3a 和图 3b 还可以发现,与常压养护有涂层试件相比,低真空暴露后的有涂层试件弯拉强度普遍有所降低。这一现象与无涂层试件相同。6 d 开始低真空暴露的试件平均降低了 1.1 MPa,28 d 开始低真空暴露的试件降低了 0.5 MPa。说明低真空暴露会对有涂层混凝土试件的弯拉强度产生不利影响。

**2.2.3 SEM 分析** 图 5 为是 10 000 倍扫描电镜下涂层在硬化净浆试样表面的微观形貌图。从图 5 可以看出,涂层在试样表面铺展状态较好且分布均匀,呈一层致密的薄膜状覆盖在试样表面。

图 6 为通过扫描电镜拍摄得到的低真空暴露下无涂层和有涂层硬化净浆试样微观形貌图。图 6 中

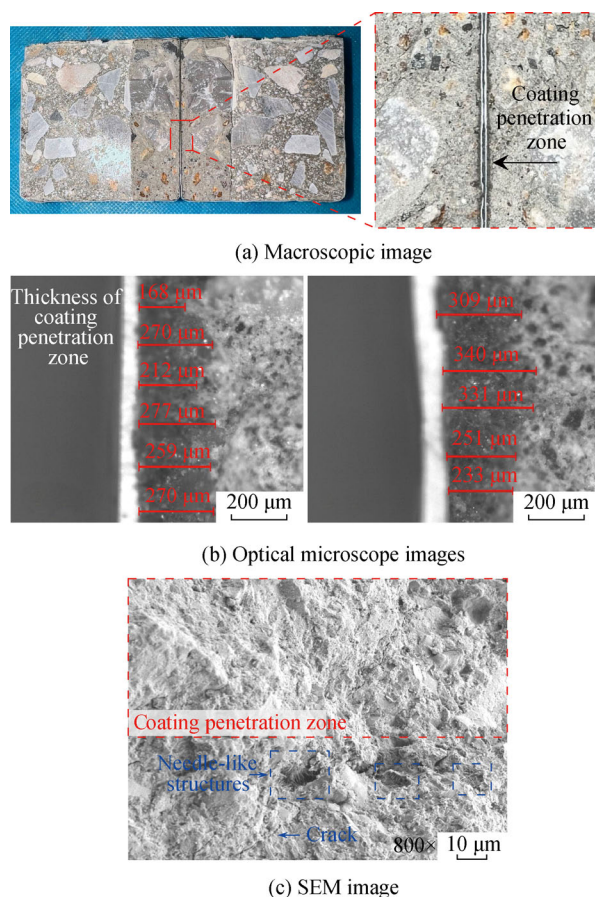


图 4 涂层与混凝土界面区照片

Fig. 4 Images of interface zone between coating and concrete

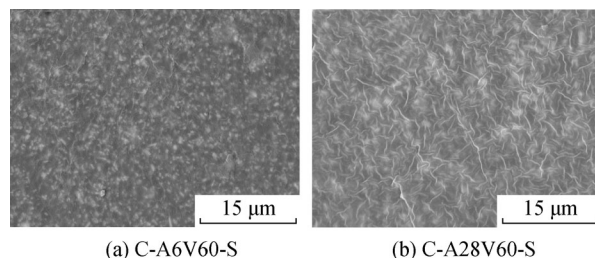


图 5 涂层在硬化净浆基底上的微观形貌

Fig. 5 Microscopic morphology of surface coating

针状物为钙矾石,片状物和网状物为水化硅酸钙 C-S-H。可以看到,在低真空暴露下,有涂层和无涂层试样生成的水化产物微观形貌较相似,均有钙矾石和 C-S-H。然而,从图 6 可以较明显的看出,无涂层试样的针状钙矾石和网状 C-S-H 较多。而有涂层试样中针状钙矾石和网状 C-S-H 减少,片状 C-S-H 增多。产生上述现象主要是由于,在低真空环境下,硬化净浆内部尚未参与水化反应的自由水蒸发汽化。由于内部气压大于外部气压,水汽在向外部逸出的过程中,体积不断膨胀,从而在尚未完

全硬化的水泥浆体内部产生网状结构。而对于有涂层的试样, 涂料会在试样表面形成一层致密的薄膜, 阻碍水汽向外逸出。但是, 由于基体内部气压仍然大于外部气压, 基体内水汽仍然会出现体积膨胀, 导致少量网状结构的出现。

**2.2.4 背散射分析** 在水泥基材料的 BSE 图像中, 可以根据图像的灰度及形貌特征来区分不同物相。BSE 图像中的灰度值可粗略地对应于 4 大

类物相, 从暗到亮依次为: 孔隙与裂缝; C-S-H 凝胶及水化(硫)铝酸盐; 氢氧化钙(CH)和未水化水泥熟料<sup>[24]</sup>。基于 BSE 的成像原理, 未水化水泥由于密度大、平均原子序数高, 因此其亮度最高<sup>[25]</sup>。图 7 为低真空和常压环境下有涂层及无涂层硬化水泥浆体试样的典型 BSE 图像。图中最亮部分为未水化水泥熟料, 未水化水泥熟料边缘为水泥水化产物, 其表面灰度均匀。

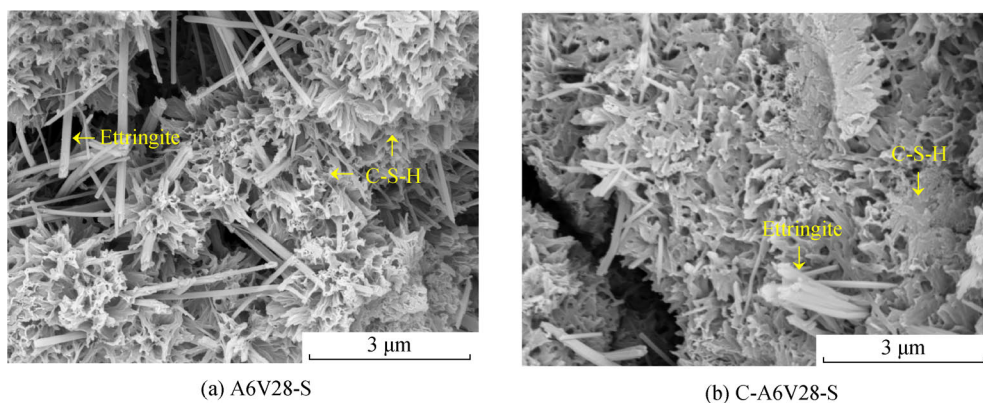


图 6 硬化净浆试样微观形貌  
Fig. 6 Microscopic morphology of hardened cement paste sample

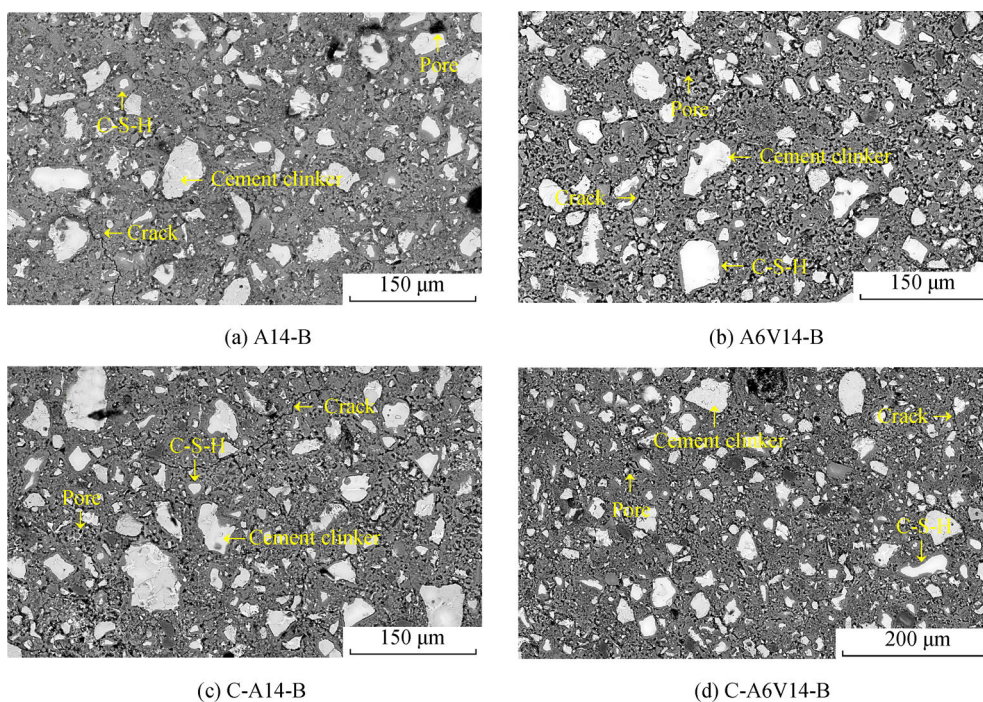


图 7 硬化水泥净浆试样典型 BSE 照片  
Fig. 7 Typical BSE images of hardened cement paste sample

采用 ImageJ 图像软件自动识别统计 BSE 图像各像素点灰度值。通过统计 BSE 图像所有像素点灰度值, 从而观察各物相的含量。图 8 为 28d 试样背

散射图像所对应的灰度分布图。根据文献[26-27]中所采用的孔隙和未水化水泥灰度值阈值确定方法, 孔隙阈值即为灰度面积累计分布二次导数曲线的第

1 个峰值所对应的灰度值, 如图 8b 所示; 未水化水泥阈值为灰度值频率分布曲线中峰谷所对应的灰度值。由于在获取 A6V28 试样和 C-A6V28 试样 BSE 图片时的对比度、亮度参数设置不同, 不同试样的

图片物相阈值也不一样。因此, 需分别对每种试样的灰度图进行阈值分割。A6V28 试样和 C-A6V28 试样的孔隙阈值分别为 91 和 110, 未水化水泥阈值分别为 161 和 192。

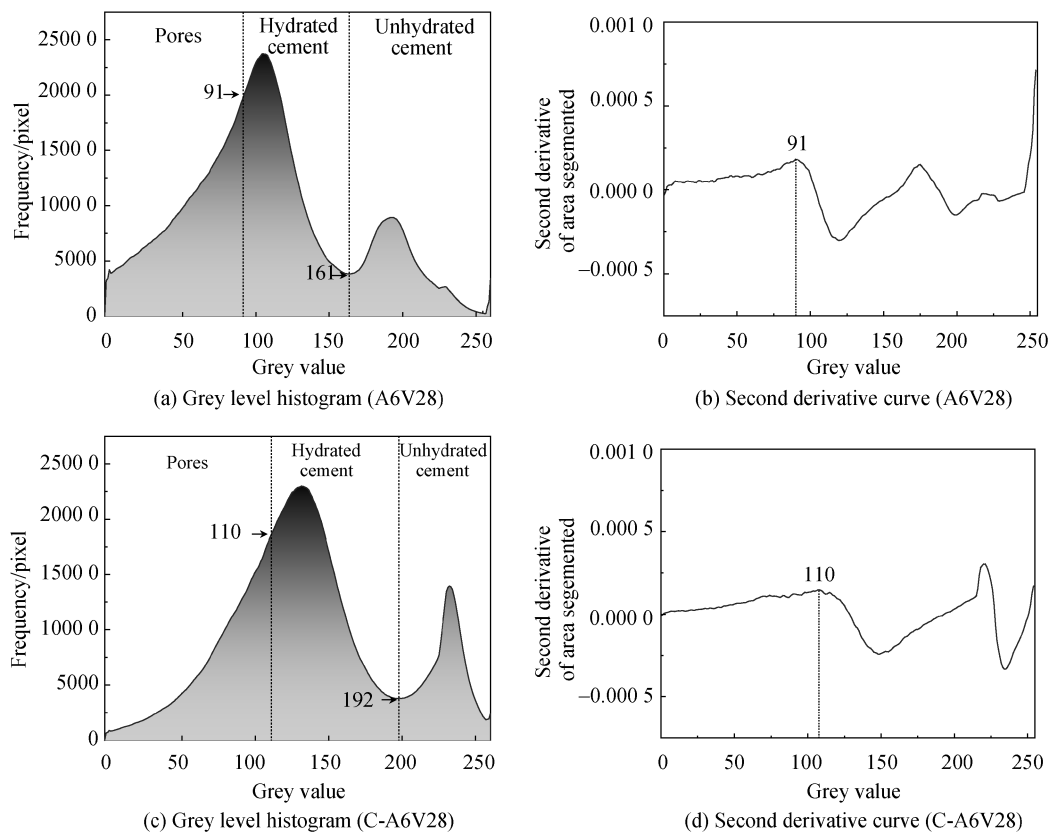


图 8 BSE 灰度频率分布图及二次导数曲线  
Fig. 8 BSE gray level frequency distribution and second derivative curves

在物相阈值确定后, 即可采用 ImageJ 图像软件识别分析每张图像中的孔隙和未水化水泥的体积含量。针对每种类型的硬化净浆试样选取 15 张典型的 BSE 图像进行识别统计, 最后对 15 组体积分数取平均得到每种类型硬化净浆试样孔隙和未水化水泥的体积分数。

试样孔隙和未水化水泥体积分数如图 9 所示。在 28d 时, 低真空有涂层试样孔隙的含量占比相较于无涂层试样降低了 18.1%。在早龄期进行低真空暴露后, 有涂层试样内部的密实度高于无涂层试样。该现象可能是由于在低真空条件下, 水泥水化产物 C-S-H 凝胶不断发生干燥收缩, 导致水泥基体中出现更多的微裂缝, 同时硬化净浆内部还未参与水化反应的自由水不断向外部蒸发逸出, 在试样内部留下较多网状结构, 从而使得孔隙含量增多。而涂层会抑制低真空条件下硬化浆体内部的自由水蒸发散失, 减缓 C-S-H 的干燥收缩现象以及网状结构的生

成, 使得有涂层试样孔隙率低于无涂层试样。

值得注意的是, 有涂层试样中未水化水泥的含量相比于无涂层试样高了 7.5%。可能原因是, 在相对湿度极低的真空环境中, 未水化水泥颗粒会随气流抽吸而离开混凝土基体, 而涂层可以阻止这一现象的发生。

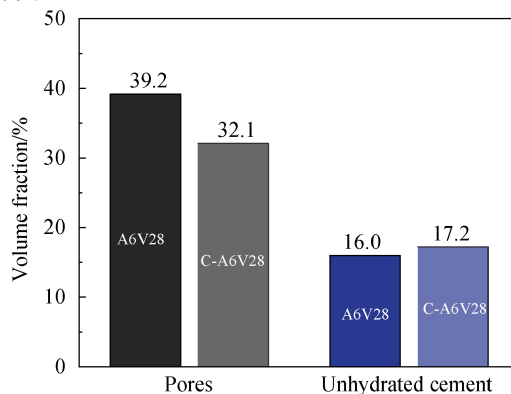


图 9 试样孔隙和未水化水泥的体积分数  
Fig. 9 Volume fraction of pores and unhydrated cement

## 2.3 涂层附着强度

在混凝土涂层附着力拉拔试验过程中,若涂层与混凝土表面的粘结力(界面间附着拉力)小于混凝土表层与内部硬化结构的粘结力(自身内聚破坏拉力),将会发生涂层与混凝土基材的附着破坏;相反,若界面间附着拉力大于混凝土自身内聚破坏拉力,则会表现为混凝土基材的内聚破坏<sup>[24, 28-29]</sup>。试件的破坏类型包括涂层与混凝土基材的附着破坏以及混凝土基材的内聚破坏。图 10 为 28 d 龄期试件附着力测试典型破坏图像。图 10a 和图 10b 分别为涂层与基材的附着破坏以及混凝土基材的内聚破坏。在 6 组常压试件和 6 组低真空试件试验中,附着破坏和内聚破坏出现的比例均为 1:2,破坏模式以混凝土基材内聚破坏为主。

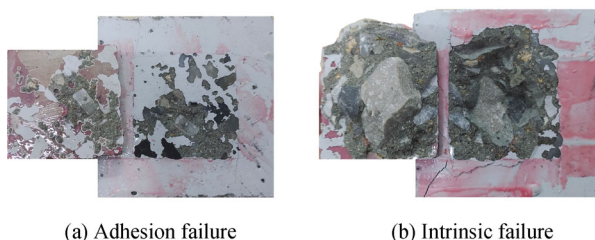


图 10 涂层失效模式图  
Fig. 10 Failure mode of surface coating

图 11 是根据拉拔荷载计算出的附着强度(极限荷载与拉拔头面积的比值)。可以看出,无论是在常压还是低真空环境中,混凝土表面涂层的附着强度均随着龄期增长而增大。60 d 龄期常压环境试件和低真空环境试件的附着强度相较于 28 d 龄期试件分别提升了 1.23% 和 0.79%。这主要是因为随着涂料自身交联反应和混凝土水化反应的进行,涂料粘结强度和混凝土抗拉强度也随龄期提高,进而提高附着强度。同时涂层会通过连通孔隙渗入混凝土内部,因此附着强度也受涂层与混凝土基底的渗透深度影响<sup>[30]</sup>。但龄期对附着强度的影响相对较小,这是因为 28 d 龄期混凝土的水化程度与涂料交联程度已较高,后期试件水化反应和交联反应较慢,因此附着强度的提升程度不明显。

对于早龄期低真空暴露的混凝土试件,在 28 d 和 60 d 时,其涂层附着强度相较于同龄期的常压养护试件分别提升了 3.5% 和 3.1%。对于晚龄期低真空暴露的混凝土试件,在 60 d 时,附着强度相较于常压养护试件提升了 8.4%。综上可知,低真空环境有助于提升涂层的附着强度。

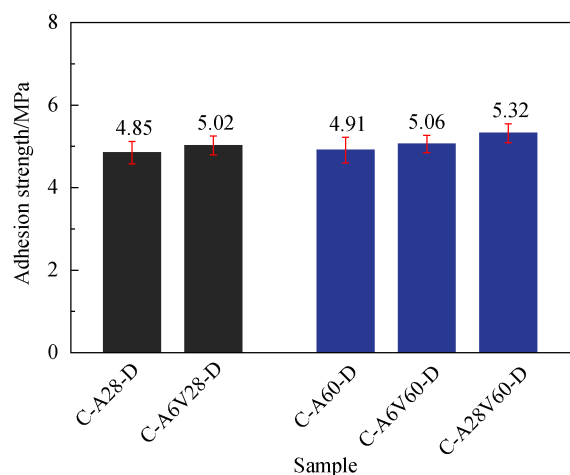


图 11 涂层附着强度  
Fig. 11 Coating adhesion strength

## 3 结论

1) 在常压标准养护下,混凝土试件质量不断提升;而在低真空暴露下混凝土试件质量会不断降低。本研究采用的氟碳涂层体系能够有效地阻隔环境中的水分渗透进入混凝土内部,同时抑制内部自由水蒸发散失,从而降低环境因素对有涂层试件质量的影响。

2) 低真空环境对无涂层混凝土和有涂层混凝土抗压和弯拉强度均有负面影响。在混凝土表面涂覆涂料对常压或低真空环境下混凝土材料的弯拉强度有明显的提升作用。

3) 经 BSE 照片分析可得,有涂层硬化浆体试样孔隙率相较于无涂层试样降低了 18.1%,而未水化水泥的占比提升了 7.5%。氟碳涂层体系能够抑制低真空环境对硬化浆体内部结构的不利影响,使硬化浆体的孔隙率降低。

4) 在常压和低真空环境下,混凝土表面涂层附着强度均随时间增长而提高。低真空暴露后涂层的附着强度相比常压情况有所提高。

## 参考文献:

- [1] 沈志云. 关于我国发展真空管道高速交通的思考[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(2): 133-137.  
SHEN Zhiyun. J Southwest Jiaotong Univ, 2005, 40(2): 133-137.
- [2] SUETSUGU Y, KANAZAWA K I, SHIBATA K, et al. Results and problems in the construction phase of the SuperKEKB vacuum system[J]. J Vac Sci Technol A Vac Surf Films, 2016, 34(2): 021605.
- [3] ZHANG Y P, OSTER D, KUMADA M, et al. Key vacuum technology issues to be solved in evacuated tube transportation[J]. J Mod Transp, 2011, 19(2): 110-113.
- [4] DENG Z G, ZHANG W H, ZHENG J, et al. A high-temperature superconducting maglev-evacuated tube transport (HTS maglev-ETT)

- test system[J]. IEEE Trans Appl Supercond, 2017, 27(6): 3602008.
- [5] 邓自刚, 张勇, 王博, 等. 真空管道运输系统发展现状及展望[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(5): 1063–1072.  
DENG Zigang, ZHANG Yong, WANG Bo, et al. J Southwest Jiaotong Univ, 2019, 54(5): 1063–1072.
- [6] 冯仲伟, 方兴, 李红梅, 等. 低真空管道高速磁悬浮系统技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2018, 20(6): 105–111.  
FENG Zhongwei, FANG Xing, LI Hongmei, et al. Strateg Study CAE, 2018, 20(6): 105–111.
- [7] 汤友富. 超级高铁发展趋势及关键问题分析[J]. 铁道建筑技术, 2019(4): 1–4.  
TANG Youfu. Railw Constr Technol, 2019(4): 1–4.
- [8] ZHANG Y P, LI S S, WANG M X. Main vacuum technical issues of evacuated tube transportation[J]. Phys Procedia, 2012, 32: 743–747.
- [9] SHANGGUAN M H, XIE Y J, XU S Q, et al. Mechanical properties characteristics of high strength concrete exposed to low vacuum environment[J]. J Build Eng, 2023, 63: 105438.
- [10] 王云飞. 低真空高温环境下混凝土材料水分传输行为及收缩研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.  
WANG Yunfei. Study on moisture transfer behavior and shrinkage of concrete materials in low vacuum and high temperature environment[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [11] 王晓龙. 低真空高温环境下混凝土力学性能演变规律及劣化机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.  
WANG Xiaolong. Study on evolution law and deterioration mechanism of mechanical properties of concrete in low vacuum and high temperature environment [D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [12] LIN H W, HAN S, HAN B, et al. Development of mechanical properties of concrete in vacuum tunnel of vacuum-based maglev train[J]. Constr Build Mater, 2024, 445: 137928.
- [13] 林红威. 基于大型低真空装置的混凝土时变性能测试研究报告[R]. 北京交通大学, 2024.
- [14] 林红威, 韩冰, 韩松, 等. 低真空-常压交变环境下混凝土构件多级防浮尘方法[P]. CN113771638A. 2021–12–10.
- [15] 王成, 刘昊苏, 何蓉, 等. 低真空高速磁悬浮管道密封材料研究[J]. 交通建设与管理, 2021(2): 94–95.  
WANG Cheng, LIU Haosu, HE Rong, et al. Transp Constr Manag, 2021(2): 94–95.
- [16] DIAMANTI M V, BRENN A, BOLZONI F, et al. Effect of polymer modified cementitious coatings on water and chloride permeability in concrete[J]. Constr Build Mater, 2013, 49: 720–728.
- [17] WOO R, ZHU H, CHOW M, et al. Barrier performance of silane-clay nanocomposite coatings on concrete structure[J]. Compos Sci Technol, 2008, 68(14): 2828–2836.
- [18] KAY S, BEUSHAUSEN H. The influence of concrete substrate moisture condition on the tensile pull-off strength of protective coatings[J]. MATEC Web Conf, 2018, 199: 07016.
- [19] 宋莉芳, 赵丽珂, 李开元, 等. GO/环氧树脂涂层的制备及其在混凝土耐除冰盐腐蚀防护领域的应用[J]. 复合材料学报, 2024, 41(3): 1300–1315.  
SONG Lifang, ZHAO Like, LI Kaiyuan, et al. Acta Mater Compos Sin, 2024, 41(3): 1300–1315.
- [20] SULEIMAN A R, SOLIMAN A M, NEHDI M L. Effect of surface treatment on durability of concrete exposed to physical sulfate attack[J]. Constr Build Mater, 2014, 73: 674–681.
- [21] SHANGGUAN M H, XIE Y J, WANG F, et al. Preparation of coatings for moisture migration control of cementitious materials under low-vacuum environment[J]. Mater Lett, 2024, 355: 135553.
- [22] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 18651—2002[S].
- [23] 中国化工建设总公司常州涂料化工研究院. GB/T 5210—2006 色漆和清漆拉开法附着力试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [24] 张倩倩, 魏亚. 基于背散射电子图像的矿渣-水泥复合体系反应程度的定量分析[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(5): 563–569.  
ZHANG Qianqian, WEI Ya. J Chin Ceram Soc, 2015, 43(5): 563–569.
- [25] 王培铭, 丰曙霞, 刘贤萍. 背散射电子图像分析在水泥基材料微观结构研究中的应用[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(10): 1659–1665.  
WANG Peiming, FENG Shuxia, LIU Xianping. J Chin Ceram Soc, 2011, 39(10): 1659–1665.
- [26] 胡曙光, 袁盼, 王发洲, 等. 背散射电子图像分析法在水泥基材料孔结构研究中的应用[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2): 316–320.  
HU Shuguang, YUAN Pan, WANG Fazhou, et al. J Build Mater, 2017, 20(2): 316–320.
- [27] 陈培鑫. BEI-GSR 分析技术在复合水泥浆体结构中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.  
CHEN Peixin. Study on application of BEI-GSR analysis technology in composite cement paste structure [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [28] 北京航材百慕新材料技术工程有限公司等. JT/T 695—2007 混凝土桥梁结构表面涂层防腐技术条件[S]. 北京: 交通工业出版社, 2007.
- [29] 刘晓月, 闫国庆, 裴元江, 等. 混凝土抗冻性对防腐涂层附着性的影响研究[J]. 科技与创新, 2024(11): 123–125.  
LIU Xiaoyue, YAN Guoqing, PEI Yuanjiang, et al. Sci Technol Innov, 2024(11): 123–125.
- [30] ALMUSALLAM A A, KHAN F M, DULAIJAN S U, et al. Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability[J]. Cem Concr Compos, 2003, 25(4/5): 473–481.

## Effects of Surface Coating on Concrete Properties Under Low Vacuum Environment

CHENG Guanzhi<sup>1,3</sup>, LIN Hongwei<sup>2</sup>, LI Yonghao<sup>2</sup>, ZHUANG Yangbo<sup>2</sup>, HAN Song<sup>2</sup>, HAN Bing<sup>2</sup>, LI Dalin<sup>1,3</sup>

- (1. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;  
2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;  
3. State Key Laboratory for Track System of High-Speed Railway, Beijing 100081, China)

### Extended Abstract

**Introduction** Low-vacuum tunnels are the core infrastructure of ultra-high-speed low-vacuum magnetic levitation transportation systems. The internal environment of these tunnels is characterized by extremely low pressure, alternating airflows, and very low humidity. Based on a comprehensive review of existing research, concrete is considered a highly competitive material for

low-vacuum tunnels due to its cost-effectiveness and technological maturity. However, studies have shown that under conditions of extremely low pressure and fluctuating atmospheric pressure, concrete experiences rapid moisture loss, resulting in significant changes to its pore structure and leading to the deterioration of its mechanical properties and long-term performance. Additionally, the high-velocity airflow caused by alternating pressure in low-vacuum tunnels can induce aerodynamic fatigue damage to the internal and external surfaces of the concrete, generating severe dust that poses a significant threat to the safe operation of high-speed trains. To address these challenges and ensure the reliable performance of concrete in low-vacuum environments, protective measures or the use of high air-tightness concrete is necessary. Coating materials have been identified as an effective solution to enhance the service safety of concrete in vacuum tunnels.

**Methods** The cement used was P·I 42.5 Portland cement produced by Fushun Cement Co., Ltd. Fine aggregates consisted of natural river sand with a fineness modulus of 2.8. Coarse aggregates were crushed limestone with continuous gradation, sized between 5 mm and 20 mm, with a mud content of 0.4%. Water used was municipal tap water. The water-reducing agent was a non-air-entraining polycarboxylate-based superplasticizer. The coating system was a two-component fluorocarbon material jointly developed by Beijing Jiaotong University, consisting of a solvent-free epoxy penetrating primer and a fluorocarbon resin topcoat. The primary film-forming material was fluorocarbon resin, with hexamethylene diisocyanate as the hardener, and the pigment-to-binder ratio of the coating was 0.4.

To better understand the effect of coating materials on concrete performance, the coating was applied during the early hydration stage of concrete. After casting, the specimens were stored at  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  for one day before demolding, after which the primer coat was applied. Following two days of air drying, the topcoat was applied, and the specimens were further air-dried for two days. The compressive and flexural strengths of the concrete were tested using specimens sized  $300\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  and  $400\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ , respectively. To evaluate the impact of surface coating on concrete mass loss, specimens of  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$  were prepared. Adhesion strength tests were conducted to examine the effects of low-vacuum environments on the coating's adhesion. Hardened cement paste samples with the same water-to-cement ratio as C50 concrete (0.37) were also prepared, cured to the specified age, cut into cylinders with heights of 20 mm and 10 mm, and embedded in epoxy resin for analysis. Hydration was terminated by immersing these samples in isopropanol.

The surface coating's effects on C50 concrete were further analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and backscattered electron (BSE) analysis. Atmospheric curing was conducted in a standard curing chamber at  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  and  $\geq 95\%$  relative humidity. A U-shaped vacuum chamber with a pressure range of 1000–2000 Pa and a temperature consistent with the local outdoor environment ( $-5^\circ\text{C}$  to  $20^\circ\text{C}$ ) provided the low-vacuum exposure environment.

**Results and discussion** The application of surface coatings significantly reduced the mass loss of concrete under low-vacuum conditions. Compared to uncoated concrete, coated specimens exhibited a noticeably lower mass loss rate, demonstrating that the surface coating effectively suppressed the loss of free water within the concrete.

The surface coating markedly improved the flexural strength of concrete under both atmospheric and low-vacuum conditions. Under atmospheric curing, the flexural strength of coated specimens at 14, 28 d, and 60 d increased by 28.2%, 23.9%, and 36.2%, respectively, compared to uncoated specimens. For coated specimens exposed to a low-vacuum environment after six days of atmospheric curing, flexural strength at 14, 28 d, and 60 d increased by 33.3%, 25.0%, and 15.4%, respectively, compared to uncoated specimens under the same conditions. Furthermore, coated specimens exposed to low vacuum after 28 d of atmospheric curing showed a 47.5% increase in flexural strength compared to uncoated specimens.

In contrast, the compressive strength of coated specimens was generally lower than that of uncoated specimens under both atmospheric and low-vacuum exposure. This reduction is attributed to the adverse effects of low vacuum on the compressive strength of coated specimens. Additionally, the application of surface coatings reduces friction between the concrete specimens and the testing machine, diminishing end effects, which may also contribute to the lower compressive strength observed.

Microstructural analysis using SEM revealed similar hydration products in both coated and uncoated specimens, including ettringite and C-S-H. However, uncoated specimens exhibited more needle-like ettringite and network-like C-S-H, whereas coated specimens showed fewer needle-like structures and more plate-like C-S-H. BSE analysis indicated an 18.1% reduction in porosity for coated specimens under low-vacuum conditions compared to uncoated ones, reflecting improved internal density. Nevertheless, the unhydrated cement content in coated specimens was 7.5% higher than in uncoated specimens, suggesting partial hydration inhibition by the coating.

The adhesion strength of the coating increased with time under both atmospheric and vacuum conditions. Vacuum exposure slightly enhanced the coating's adhesion strength, indicating that low-vacuum environments promote better bonding between the coating layer and the concrete surface over time.

**Conclusions** The surface coating effectively mitigated free water loss in low-vacuum environments, resulting in significantly reduced mass loss rates for coated concrete compared to uncoated specimens. Coated specimens demonstrated notable improvements in flexural strength under both atmospheric and low-vacuum conditions, although compressive strength was slightly reduced. Early-age exposure to low vacuum negatively impacted both compressive and flexural strength, regardless of coating protection. Microstructural analysis showed that the coating reduced porosity and enhanced internal density, mitigating the detrimental effects of low-vacuum environments on concrete's internal structure. Over time, the adhesion strength of the coating increased under both atmospheric and vacuum conditions, with slight improvements observed following vacuum exposure.

**Keywords** concrete; low vacuum environment; coating protection; mass loss; strength