

地铁工程混凝土抗腐蚀复合表面处理工艺技术

肖霞¹ 邱新洁²

1. 山东交通职业学院 山东潍坊 261206

2. 山东科技职业学院 山东潍坊 261053

【摘要】地铁工程混凝土结构由于特殊的地下环境和使用条件,极易受到腐蚀的威胁。为此,本文探讨了混凝土腐蚀的机理,指出湿度、盐分侵入、化学物质侵蚀、微生物侵蚀等因素对地铁工程混凝土的腐蚀作用。之后详细介绍了地铁工程混凝土抗腐蚀复合表面处理工艺技术的各个关键部分,包括基础处理、防腐涂层涂覆、复合增强层、化学稳定化处理和渗透性防护剂技术。最后,对地铁工程混凝土抗腐蚀复合表面处理工艺技术的未来发展方向进行了展望,包括智能化和数字化、多功能性和综合性以及集成化和模块化等方面。以期对地铁工程混凝土抗腐蚀复合表面处理工艺技术的发展提供一定的参考和借鉴。

【关键词】地铁工程; 混凝土; 抗腐蚀; 复合表面处理

引言

在现代城市化进程中,地铁系统作为城市公共交通的重要组成部分,其安全、稳定和持久的运行对于保障城市交通效率和居民出行的便利性具有至关重要的作用。然而,由于地铁环境中的高湿、高盐分和化学物质等特殊条件,地铁工程混凝土结构面临着严重的腐蚀威胁,不仅可能导致结构损坏和安全隐患,还会增加维护和修复的成本。因此,开展有效的混凝土抗腐蚀技术研究和应用,对于确保地铁工程的长期稳定运行和延长其使用寿命具有重要的理论和实际价值。基于此背景下的迫切需求,本文通过探索和开发适用于地铁工程混凝土的高效、环保和经济的抗腐蚀复合表面处理工艺技术,力求为地铁工程的安全、可靠和可持续发展提供技术支撑和解决方案。

1 地铁工程混凝土腐蚀机理

地铁工程中混凝土结构面临的主要问题之一是腐蚀,其原因主要与特殊的地下环境和使用条件有关。地铁工程混凝土腐蚀对结构的安全、使用寿命和维护成本带来了显著的危害^[1]。一方面,混凝土腐蚀破坏混凝土与钢筋之间的粘结力,导致结构的承载能力下降。随着腐蚀的加剧,混凝土结构可能会发生严重的损坏和甚至崩溃,威胁到乘客和工作人员的安全。而腐蚀又会加速混凝土结构的老化过程,导致使用寿命大大缩短。另一方面,混凝土腐蚀极易导致设备故障和线路中断,影响地铁的运营效率和乘客的出行体验。比如,频繁的维修和维护工作导致地铁列车的正常运营受到干扰,给乘客带来不便。

混凝土腐蚀的机理涉及多种物理、化学和生物过程,

具体分为以下几点:一是湿度环境。地铁隧道处于地下深部,环境湿度高,导致混凝土长时间处于湿润状态。当混凝土中的孔隙被水填充时,水中的盐分和溶解物质会导致电解质的形成,为腐蚀过程提供了条件。二是盐分侵入。地下水中含有大量的盐分,例如氯离子,这些盐分随水分渗透到混凝土内部。在混凝土中,氯离子与钢筋表面的氧化铁层发生反应,形成可导电的氧化物,进而引发钢筋的进一步腐蚀。三是,化学物质侵蚀。地铁环境中存在多种化学物质,如硫酸盐、硫化物等,此类物质与混凝土中的水和孔隙溶液反应,形成具有腐蚀性的化合物,对混凝土和钢筋造成损害。四是,微生物侵蚀。地下环境中存在的多种微生物在特定条件下可以利用混凝土中的有机物质和溶解物质,产生腐蚀性物质,对混凝土结构造成损伤。

2 地铁工程混凝土抗腐蚀复合表面处理工艺技术

2.1 基础处理技术

地铁工程混凝土抗腐蚀复合表面处理工艺技术中,基础处理技术直接影响混凝土结构的耐久性和使用寿命。在进行地铁工程混凝土抗腐蚀处理之前,首先应采用高压水洗或喷砂法彻底清洁混凝土表面。高压水洗是使用高压水流冲击混凝土表面,有效去除附着的松散物质和污染物,而喷砂法则是用高速喷射的砂粒打击表面,除去顽固的污垢和表面的浮灰^[2]。在清洁完成后,仔细检查混凝土表面是否存在裂缝、孔洞或破损等问题。对于裂缝,应采用专用的裂缝填充剂进行填补,选择与混凝土兼容且具有良好弹性和粘结性的材料;对于孔洞和破损部分,可使用高性能修补混凝土或聚合物修补剂进行修复。其中,高性能修补混

混凝土具有良好的耐久性和抗压强度，能够与原有混凝土紧密结合，恢复结构完整性；聚合物修补剂则提供了更好的粘接力和灵活性，适合修补较小的破损或裂缝。之后，在基础处理中，进行腐蚀评估，以确定混凝土表面的腐蚀程度和损害程度。并根据腐蚀评估的结果，选择合适的表面预处理方法。常见的方法包括酸洗、碱洗、磨削或钢刷处理，以改善混凝土表面的粗糙度和附着性，为后续抗腐蚀涂层提供更好的附着力。需要注意的是，基础处理的最后一步是应用抗腐蚀涂层。涂层的选择取决于混凝土结构的环境条件和腐蚀媒介，以阻止腐蚀介质的侵蚀，保护混凝土结构。

2.2 防腐涂层涂覆技术

地铁工程混凝土防腐涂层涂覆技术在环氧树脂涂层、聚合物水泥砂浆和硅酸盐基涂层等方面的研究和应用为混凝土结构提供了多种有效的防护手段，具有广泛的应用前景和经济价值。环氧树脂作为一种常用的混凝土防腐涂层材料，其优越的化学稳定性和物理阻隔性能受到广泛关注。研究表明，优质的环氧树脂涂层在混凝土表面形成均匀、致密的保护膜，其渗透系数可低至 1×10^{-14} m/s，显著阻隔水分和有害化学物质的渗透。同时，环氧树脂涂层具有良好的附着力和耐磨性，可有效抵抗地铁环境中的机械磨损和化学侵蚀，为混凝土结构提供长期稳定的保护。聚合物水泥砂浆和硅酸盐基涂层，作为近期混凝土防腐涂层技术的重要进展，各自展现了出色的特性。其中，聚合物水泥砂浆以其独特的组合特性，已成为研究者们关注的焦点。实验表明，该涂层可在混凝土表面形成一个坚固且致密的防护层，抗渗系数达到了 5×10^{-15} m/s，大幅提升了防水和抗裂的能力^[3]。这种材料的双重特性，即聚合物的韧性与水泥砂浆的强度相结合，不仅增强了整体涂层的性能，还显著提升了混凝土结构的抗冻融和抗碱骨化性，进而延长了其使用寿命。另一方面，硅酸盐基涂层因其环境友好和出色的化学反应性与稳定性而备受青睐。该涂层与混凝土表面的化学反应会生成一层坚硬且紧密的硅酸盐薄膜，极大地增强了其抗渗和耐久性。更为值得注意的是，硅酸盐基涂层还展现了卓越的耐化学腐蚀和高温性能，可有效对抗地铁环境中的酸碱侵蚀和温度波动，为混凝土结构提供了长效的保护。

2.3 复合增强层技术

复合增强层技术通过在混凝土表面施加一层或多层复合材料，以增强结构的抗腐蚀、抗冲击及抗裂性能，从而确保地铁工程的长期安全运营。目前，复合增强层技术主

要包括高性能涂层、纤维增强复合材料（FRP）和纳米复合材料等多种形式。高性能涂层，如环氧树脂和聚氨酯，能在混凝土表面形成致密保护层，其抗化学腐蚀能力显著，耐久性能良好。例如，某研究显示，环氧树脂涂层可以使混凝土的耐酸腐蚀能力提高约50%。纤维增强复合材料（FRP）是一种由高强度纤维和树脂基体组成的复合材料，以其高强度、轻质和优异的耐久性在地铁工程中得到广泛应用。将FRP层附着在混凝土表面，可以显著提高结构的承载能力和抗裂性，延长服务寿命。此外，含纳米材料的复合增强层更是表现出更高的抗化学腐蚀性能和更长的耐久周期，这对酸碱变化复杂且湿度较高的地铁环境尤为重要。在进行复合增强层技术施工时，需要对混凝土表面进行彻底清理和预处理，确保无杂质、油污和松散物质，并采用喷涂、刷涂或滚涂等方式均匀涂布增强层材料，严格控制环境温度、湿度和通风条件等，以确保材料的最佳性能发挥。

2.4 化学稳定化处理技术

化学稳定化处理技术作为先进的混凝土防护方法，通过特定化合物的渗透和反应，深入混凝土的毛细孔隙，与基材发生化学反应，形成稳定的非溶性结晶物，有效提高混凝土的耐久性和抗腐蚀能力。例如，硅酸盐化合物的使用能与混凝土中的游离氢氧化钙反应生成硅酸钙水合物，从而极大地提高混凝土的抗渗和抗腐蚀性能。在进行实际施工时，首先应考虑化学处理剂的选用。硅烷类化合物因其小分子结构易于渗透混凝土内部并与之反应，生成具有疏水性的化合物，可有效地阻止水分和有害物质的侵入；硅酸盐处理则是利用其与混凝土中的游离氢氧化钙反应，生成稳定的硅酸钙水合物，从而增强混凝土的密实度和耐久性；纳米材料的应用也日益广泛，例如纳米二氧化硅可填充混凝土的微孔隙，提高其密实性和抗压强度。在施工环境和时间的控制上，应确保化学处理剂在最适宜的条件下与混凝土反应。比如，温度和湿度都会影响化学反应的速率和效果，因此施工时需选择相对稳定的气候条件，避免雨水冲刷或过高的温度使化学剂挥发。此外，施工过程中的质量控制也是保证化学稳定化处理技术效果的关键。在施工前，必须彻底清理混凝土表面，去除油污、尘土和其他可能影响化学反应的杂质，确保处理剂能均匀覆盖整个混凝土表面，无遗漏或堆积，并在后期进行适当保湿和遮挡养护，防止早期干燥导致裂缝或效果不均。还需注意的是，针对不同的使用环境和混凝土类型选择合适的化学处理剂种类和浓度至关重要。例如，在盐碱地区，可能需要

选择更具有抗盐碱性的化学剂；而在酸雨频发的地区，则需要强调化学剂的抗酸性。

2.5 渗透性防护剂技术

渗透性防护剂技术是地铁工程混凝土防腐处理中的关键技术之一。通过使用硅基渗透剂和晶体型渗透剂，可显著提高混凝土的抗渗和抗腐蚀性能。硅基渗透剂主要成分通常为硅酸盐、硅烷或硅氧烷，可深入混凝土孔隙，与混凝土中的氢氧化钙等基材发生化学反应，生成水不溶的硅酸钙等化合物。在实际应用中，硅基渗透剂能够提高混凝土的抗渗性能达到30%-50%。例如，经过硅基渗透剂处理的混凝土，其渗透系数可以从未处理时的 4.0×10^{-12} m/s降低到 2.0×10^{-12} m/s以下。而经过处理的混凝土其抗碳化系数提高了约20%-40%，有效延缓了混凝土碳化速率，从而提高了其抗腐蚀性^[4]。晶体型渗透剂通常含有活性化学物质，如硅酸盐、氧化物等，可在混凝土内部与水分反应形成不溶性晶体。这些晶体能够有效堵塞混凝土的孔隙和微裂缝，减少水分和腐蚀性物质的侵入。在抗压强度方面，经过晶体型渗透剂处理的混凝土可提高约10%-25%。此外，晶体型渗透剂还能显著提高混凝土的抗冻融能力，其抗冻融循环次数可提高30%-50%。

3 地铁工程混凝土抗腐蚀复合表面处理工艺技术发展方向

3.1 智能化和数字化

随着数字技术和智能化技术的飞速发展，未来的抗腐蚀复合表面处理工艺技术将更加注重智能化和数字化的应用。目前，智能传感器、物联网(IoT)、大数据和人工智能(AI)等技术已经开始在各行各业得到广泛应用。这些技术在抗腐蚀复合表面处理领域的应用，将大大提升对混凝土结构腐蚀状态的实时监测、预警和管理能力。比如，在混凝土表面或内部安装微型传感器，实时监测混凝土内部pH值、氯离子浓度、湿度和温度等参数；结合先进的数据分析工具和算法，实现对腐蚀进程的精确预测和有效控制；通过分析收集到的数据，预测腐蚀发生的具体位置和程度，从而提前采取维护和修复措施，显著提高维护效率和降低成本。此外，数字孪生技术的发展为混凝土结构的维护管理提供了新的思路。通过创建混凝土结构的数字孪生模型，可以在虚拟环境中模拟和分析真实环境下的腐蚀情况，及时调整维护策略，实现更加智能和高效的工程管理。

3.2 多功能性和综合性

随着材料科学和表面处理技术的不断进步，未来的抗

腐蚀复合表面处理工艺预计将展现出更多创新和多功能特性。纳米科技的发展为混凝土材料的改性提供了新的机遇。纳米二氧化硅、纳米钛白粉等具有超小尺寸效应和高比表面积的材料被加入到混凝土中，可在微观层面优化混凝土的结构。这些纳米粒子填充在混凝土的微观孔隙中，减少了孔隙率，提高了材料的密实性，从而增强了抗压强度和耐久性。同时，纳米材料的加入还能改善混凝土的界面过渡区，增强其抗裂性能和抗腐蚀性能。目现代化学和材料科学的进步使得开发具有自愈合功能的聚合物，该类涂层可在混凝土表面形成保护层，在出现微裂纹时自动“流动”并填充裂缝，从而防止水分和腐蚀介质的进一步侵入，显著提高了材料的自修复能力和使用寿命，减少了维护成本和频率。此外，未来的混凝土材料可能会通过添加特定功能的微粒来获得额外的性能。例如，加入具有隔热性能的微粒可以提高混凝土的热效率，适用于需要调控温度的环境中。另外，吸声微粒的加入提高混凝土的吸音性能，还赋予其更多的附加价值和应用范围。

4 结论

地铁工程混凝土抗腐蚀复合表面处理工艺技术是确保地铁工程长期安全、可靠和经济运行的关键。通过对混凝土腐蚀机理的深入理解和分析，可以更有效地设计和应用抗腐蚀处理技术，提高混凝土结构的耐久性和使用寿命。在地铁工程混凝土抗腐蚀复合表面处理工艺中，基础处理、防腐涂层涂覆、复合增强层、化学稳定化处理 and 渗透性防护剂技术等关键技术的综合应用，可以有效地阻止腐蚀因子的侵入，延缓混凝土结构的老化过程。未来，随着智能化和数字化技术的发展，有望实现对混凝土结构腐蚀状态的实时监测和管理，进一步提高工程管理和维护效率，满足不同应用和环境条件的需求，进而为地铁工程的安全、可靠和可持续发展提供更加可靠和经济的保障。

参考文献:

- [1] 刘辉, 陆安群, 潘利. 混凝土裂缝控制技术在宁句城际地铁工程中的应用[J]. 江苏建筑, 2022 (02): 61-65.
- [2] 宋衍坤. 混凝土裂缝控制技术在南京地铁工程中的应用[J]. 建材与装饰, 2020 (04): 270-271.

作者简介:

肖霞 (1984.02-), 女, 汉族, 山东潍坊人, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 结构工程。

邱新洁 (1983.06-), 男, 汉族, 山东潍坊人, 硕士研究生, 副教授, 研究方向: 智能化结构。