

海洋桥梁工程轻质、高强、耐久性结构材料 现状及发展趋势研究

吴智深¹, 刘加平¹, 邹德辉², 汪昕¹, 史健喆¹

(1. 东南大学, 南京 211189; 2. 武汉钢铁集团设计研究院, 武汉 430080)

摘要: 本文针对海洋环境下大跨桥梁突出的长期服役性能问题和轻量化需求, 通过对轻质、高强、耐久的材料深入调研, 总结了高性能钢、高性能混凝土及纤维增强复合材料的研究现状及发展趋势, 介绍了上述材料在桥梁关键区域的针对性应用技术, 并提出海洋桥梁工程轻质、高强、耐久材料发展的战略建议, 以满足海洋桥梁工程高性能、长寿命、轻量化的需求, 突破海洋环境下大跨桥梁的耐久和跨度瓶颈。

关键词: 海洋环境; 大跨桥梁; 高性能钢; 高性能混凝土; 纤维增强复合材料

中图分类号: TU5 **文献标识码:** A

Status Quo and Development Trend of Light-Weight, High-Strength, and Durable Structural Materials Applied in Marine Bridge Engineering

Wu Zhishen¹, Liu Jiaping¹, Zou Dehui², Wang Xin¹, Shi Jianzhe¹

(1. Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Design & Research Institute of Wuhan Iron & Steel Group, Wuhan 430080, China)

Abstract: This paper focuses on the requirements of marine long-span bridges for durability and light-weight. It summarizes the research status and development tendency of high-performance steel, high-performance concrete, and fiber-reinforced polymer (FRP), after a thorough investigation on light-weight, high-strength, and durable materials. The application technologies of the aforementioned materials to key zones of bridges are introduced, and the strategic recommendations for the development of light-weight, high-strength, and durable structural materials in marine bridge engineering are proposed. The research results contribute to satisfying the requirements of marine bridge engineering for high performance, long life, and light weight, and overcoming the challenges in durability and span of long-span bridges in marine environment.

Keywords: marine environment; long-span bridges; high-performance steel; high-performance concrete; fiber-reinforced polymer (FRP)

收稿日期: 2019-04-25; 修回日期: 2019-05-18

通讯作者: 吴智深, 东南大学教授, 主要从事纤维增强复合材料及其结构加固增强技术以及结构健康监测及智能化研究工作;

E-mail: zswu@seu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“海洋桥梁工程技术发展战略研究”(2016-XZ-13)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

海洋环境下的桥梁结构，受严酷腐蚀环境和复杂荷载形式影响（如风荷载、交通荷载的耦合作用等），其长期服役性能（耐久性问题、疲劳蠕变引起的性能退化等）不足，严重影响桥梁结构的安全性能和服役寿命。首先，钢材在海水的腐蚀作用下力学性能降低，危害十分严重，我国 2014 年因钢材腐蚀造成的经济损失高达 1.9 万亿人民币，占当年国内生产总值的 3%。另外，海洋环境中水下或水位变动区的混凝土结构，直接与海水中的硫酸盐、镁盐等腐蚀性介质接触。硫酸盐腐蚀一方面由硫酸根离子和水化铝酸盐、氢氧化钙作用生成膨胀产物引起；另一方面是硫酸镁造成水泥石中水化硅酸钙（CSH）凝胶分解，体系强度损失，黏结力下降。欧洲每年超过 50% 的建设预算花费在混凝土结构修复和翻新工程 [1]；在我国，每年投入路桥混凝土结构的维修费用在 100 亿元左右 [2]。此外，桥梁拉索承受的高应力会加速其腐蚀速率；建于 1960 年的委内瑞拉 Maracibo 桥在风雨的不断侵蚀以及拉索剧烈振动的影响下，192 根钢索中有 25 根存在严重隐患，由于没有及时发现并采取相应的措施，其中 1 根拉索于 1979 年 2 月突然发生断裂，造成桥体的局部坍塌，直接经济损失达 5000 万美元；此外，由于拉索的自重垂度影响，大跨钢拉索斜拉桥的有效跨径只能达到 1300 m，更大跨径下钢拉索将不能满足施工挂索和经济性能等要求。

针对海洋环境下大跨桥梁突出的长期服役性能问题和轻量化需求，基于轻质、高强、耐久的材料调研结果，研究在桥梁关键区域的针对性应用方法，

突破海洋环境下大跨桥梁的耐久和跨越瓶颈，以实现高性能和长寿命的目标，所涉及的相关技术主要包括传统钢材、混凝土的性能提升技术以及海洋桥梁用新型纤维增强复合材料（FRP）应用技术。

二、海洋桥梁工程轻质、高强、耐久性材料现状及发展趋势

（一）高性能钢材现状及发展趋势

1. 既有研究概述

国外海洋桥梁工程用钢屈服强度为 245~700 MPa 不等 [3]。国内普通桥梁用钢的发展从 20 世纪 50 年代至 60 年代起步，与国外相比发展速度缓慢。20 世纪 90 年代上海南浦大桥、杨浦大桥、徐浦大桥等桥梁采用的都是进口或国产的 StE355 钢。随后，我国研制开发了桥梁钢 14MnNbq，先后用于芜湖长江大桥、南京长江大桥、黄河长东二桥等长江、黄河上的近 20 座桥梁。2007 年，WNQ570(Q420qE) 桥梁钢用于南京大胜关长江大桥；2016 年，在建的沪通大桥首次应用 Q500qE 高性能桥梁钢（见图 1）。

（1）钢材耐腐蚀表面处理技术

自 18 世纪将涂料用于钢铁桥梁的保护以来，钢材表面处理技术已有 200 多年的历史。在涂层材料方面，目前采用既具有隔离功能又具有电化学牺牲阳极保护功能的富锌涂料和喷涂金属涂层作为底涂层，即钢结构防腐蚀可分为两类，一类是以富锌涂料为底涂，中间漆多为环氧云铁涂料，面漆有醇酸树脂漆、氯化橡胶漆和聚氨酯（含脂肪族）漆，以聚氨酯面漆居多；另一类是以喷涂金属为底涂，面涂多采用氟碳涂料的长效防腐蚀体系。目前国外



图 1 中国桥梁钢的发展历程

较为先进的表面稳定化处理技术包括耐候性涂膜处理、氧化物涂膜处理、带锈涂层处理、锈层稳定化表面处理、钛合金表面处理等。

采用上述表面处理技术进行一次涂覆使用后,免维护时间长。然而,目前国内该技术在钢构件中的应用还处于空白,也未开发出较成熟的可广泛应用于稳定耐候钢构件表面锈层的处理技术。

(2) 耐腐蚀钢

耐腐蚀钢是不锈钢的一种。美国和日本的耐腐蚀钢在桥梁中已有成熟的应用,分别有约 50% 和 20% 的桥梁使用耐腐蚀钢。此外,加拿大新建的钢桥中有 90% 使用耐腐蚀钢,韩国目前有十余座耐腐蚀钢桥。目前国际主流的耐腐蚀钢主要有 Cu-P-Cr-Ni 系的美国 Corten 钢及日本的 SMA 钢等 [4]。国内除仿制上述两种产品外,还考虑 Ni、Cr 资源的稀有性及我国富含稀土资源,逐渐开发出 Cu-P-RE 系。1984 年,我国制定了高耐候性结构钢标准及焊接结构用耐腐蚀钢的相关标准,并于 2008 年重新修订。近年来,国内桥梁建设中耐腐蚀桥梁钢的应用逐渐增加。国内桥梁大量使用耐腐蚀钢的工程主要有:咸阳渭河公路桥、沈阳后丁香大桥、大连 16 号路跨海桥、官厅水库特大桥、川藏线拉林铁路雅鲁藏布江大桥、河北路桥工程。目前,国内具备耐腐蚀性能的桥梁用钢,如 Q355NH、Q345qNH、Q420qNH、Q460qNH、Q420qE、Q500qE 等钢,已经开展室内加速腐蚀试验研究,并在不同环境条件下进行了长期暴晒试验。据相关资料显示,上述钢种的耐腐蚀性能是普通 Q235 钢的 2~8 倍甚至更优。

但是,所有上述钢种存在两个主要问题,一是缺乏裸露状态的应用业绩,二是缺乏海洋环境下的应用业绩,国内所有海洋环境下的桥梁工程,绝大部分采用涂装方式使用。国外高性能耐海洋腐蚀用桥梁钢已经开始实桥应用,选材规范已经建立,涂装使用、裸露使用和表面处理使用都有章可循,而国内在这方面还有很大的差距。

(3) 耐候钢

耐候钢是介于普通钢和不锈钢之间的低合金钢系列。日本开发出系列适应恶劣海洋环境的耐候桥梁钢,如 355 MPa 级和 455 MPa 级耐候桥梁钢。截至目前,上述日本桥梁用钢在海洋桥梁工程的应用比较普遍,大幅降低了全寿命成本。其中 S490A/B/C、SMA490AW/BW/CW、SMA490AP/BP/CP 等钢种已

经普遍应用,且应用技术及维护技术相当成熟。

国内钢铁企业也开始大力开展桥梁用耐候钢的相关研究,以超低碳贝氏体为设计主线,并充分利用 HTP、RPC、TMCP 等多项组织细化、组织均匀等关键技术。通过控制碳含量在 0.03%~0.07%,并优化组合 Cu、Ni、Cr、Mo、Ti、Nb 等化学元素,提高钢的韧性并降低冷裂纹敏感性和焊接热影响区硬度,使该钢种具有良好的焊接性能;通过控制铁素体、贝氏体组织转变,提高钢的强度、塑性和韧性;通过均匀的铁素体、贝氏体组织和 Cu、Ni、Cr、Mo 的合理配置,使钢具有优良的耐大气腐蚀性能。

虽然耐候钢成本低、工艺简单且能够减缓腐蚀速度,但其形成致密锈层历时长(4~15 年),形成稳定化锈层之前会出现锈液流挂与飞散,污染周围环境,在沿海的海洋大气环境中会出现层状剥落,具有一定的局限性。此外,国产耐候钢还存在耐候性不足、焊接性能差、低温韧性不足、封闭部位防腐差、综合成本高等问题。

(4) 高 Ni 钢

高 Ni 钢具有良好的综合性能,可耐各种酸腐蚀和应力腐蚀。日本对高 Ni 钢的研究处于世界前列,其产品中 Ni 含量超过了相关标准 JIS、GB/T 714 和 ASTM A709 中的上限值,是典型的含 Ni 高等耐腐蚀钢。日本通过不同 Ni 含量的高等耐腐蚀钢在高含盐环境(空气中含盐量高达 1.3 mdd)下的大气暴露试验,验证了高 Ni 钢优越的耐腐蚀性能。

与日本 JIS 标准耐腐蚀钢和普通钢材相比,在相同的腐蚀条件下,高 Ni 钢的板厚减薄量明显小于普通耐腐蚀钢,远优于普通钢材,耐腐蚀性能优良。但由于贵重金属元素含量高,因此高 Ni 钢初期成本极高,且材料缺乏长期应用数据。

(5) 国内外目前海洋桥梁工程用缆索用钢

日本在线盐浴工艺生产的 SWRS87B-DLP 盘条,组织均匀性性能较好,可满足 $\phi 5.0$ mm 2000 MPa(含扭转)的要求。欧洲专注于高碳钢生产的钢厂主要有英国钢铁公司、德国撒斯特公司。韩国的桥梁缆索行业的发展时间不到 10 年,主要采用盘条离线铅浴的传统处理方式,解决了盘条的组织均匀性问题。

在国内桥梁缆索用钢主要采用锌铝钢丝,其特点是强度高、松弛低、直线性好、缆索成型性很好,且缆索服役后的钢丝蠕变较少。桥梁镀锌钢丝企业

不再采购日本盐浴淬火 (DLP) 盘条, 使国内钢厂得到更多的机会持续改善盘条品质 [5]。国内锌铝合金镀层钢丝目前在桥梁应用已有 5 座以上, 例如 2007 年苏通大桥采用了 $\phi 7.0 \text{ mm}$ 1770 MPa 级的桥索钢丝。随着城镇化建设的深入, 特别是黄河、长江、珠江等流域城市群的建设及“一带一路”倡议背景下海外基建市场的陆续启动, 预计锌铝合金镀层技术的应用前景将非常广阔。

通过升高碳含量实现强度的提高, 会造成盘条塑性明显下降, 高强度钢丝扭转、弯曲、缠绕性能遇到极大挑战; 桥索的缠绕弯曲扭转特性、工艺性能和强度指标尚有待进一步研究; 此外, 国外线材制品的技术保护使得相关技术的国产化需求迫在眉睫。

2. 发展趋势

从前述的桥梁用钢现状来看, 高性能钢是未来发展的主要方向。研究和工程实践表明, 桥梁结构用高性能钢具有如下优点: ①减轻自重, 易于处理和运输, 且减小在顶推施工中悬臂段的弯矩, 降低施工和运输成本; ②可降低梁高, 使结构更美观; ③增加跨度, 减少了桥墩数量或主梁数量; ④减少了焊接中的制造成本, 且因为板厚减小, 焊接体积减小同时预热要求降低; ⑤提高的断裂韧性减小了由脆断引起的突然破坏的可能, 增加了裂缝容忍能力, 提高了结构的安全系数和可靠性; ⑥高性能钢良好的耐腐蚀性使桥梁在长期的使用阶段免于涂装; ⑦延长了桥梁使用寿命, 减少了桥梁的全寿命周期成本。

桥梁防腐涂装技术的未来发展趋势将遵循高性能、长寿命、绿色环保的原则, 向多元化方向发展以适应不同腐蚀环境、不同防腐部位, 并要考虑施工技术及维护方案, 还要考虑材料成本控制和人文景观的要求。

(二) 高性能混凝土现状及发展趋势

1. 既有研究概述

高性能混凝土耐久性、流动性和体积稳定性是保证混凝土高性能的重要因素。

(1) 表面防护技术

混凝土外防护技术根据作用机理的不同, 可分为涂层技术、孔堵塞技术、孔壁憎水技术与孔结构优化技术。表面防护材料包括有机和无机材

料, 在有机防护材料中, 聚脲弹性体涂料是继高固体分涂料、水性涂料、光固化涂料、粉末涂料等传统涂料之后, 为适应环境保护需求而研发的一种无溶剂、无污染的较为先进的涂料。这种高厚膜弹性涂料, 不仅能实现一次喷涂厚涂层, 且能快速固化, 物理力学性能及耐化学腐蚀性能优异。与有机涂料相比, 无机防护材料具有原料来源广泛、成本与能耗低、便于运输储存、耐老化性能好、绿色环保、抗高温性能好、透气性好等优点。目前, 表面防护技术主要存在老化、湿基面黏结差等瓶颈问题, 未来有望通过纳米改性有机涂层体系得以解决。

(2) 高密实性混凝土

在混凝土结构致密化方面, 传统方式主要采用强度等级 C40 以上的混凝土, 同时在混凝土配合比设计中引入了粉煤灰等矿物掺合料, 从而实现混凝土结构致密化。另外, 在耐腐蚀胶凝材料方面, 主要采用抗硫酸盐水泥, 通过降低硅酸盐水泥中 C_3A 与 $Ca(OH)_2$ 的含量, 有效降低混凝土材料中侵蚀性介质所造成的腐蚀性反应风险, 从而改善混凝土密实度。

最新研究发现, 纳米材料可显著改善混凝土致密性和抗侵蚀。在孔隙填充作用的基础上, 各纳米材料的自身特性也有助于优化抗渗与抗侵蚀性能; 将纳米材料与其他掺合料及外加剂进行合理的复配可进一步提升耐久性。

(3) 高流动性混凝土

高流动性混凝土概念最早于 1986 年由日本 Okamura 教授提出, 1995 年后世界各国逐步开展相关研究。经过 20 多年的发展, 针对高流动性混凝土开发了高效减水剂 (如氨基磺酸系减水剂等), 可大幅降低混凝土材料流变方程中的屈服剪切应力, 实现高流动性。此外, 通过一系列试验优化了高流动性混凝土的矿物掺合料类型 (粉煤灰、矿渣粉等), 并优化了骨料粒径与砂率。高流动性混凝土已在港珠澳大桥沉管隧道的最终接头中应用, 成功解决了接头主体结构中混凝土振捣困难的问题。

(4) 混凝土收缩抑制技术

海洋桥梁中使用的高强与超高性能混凝土材料的高胶材用量以及低水胶比导致其收缩变形大, 水化温升高, 导致了体积稳定性差, 开裂风险高。收缩抑制技术主要集中在两个方面: 一方面为降低混

凝土温降收缩；另一方面为减小干燥收缩和塑性收缩。在降低混凝土温降措施方面可选用低、中热水泥或大掺量粉煤灰等矿物掺合料配制混凝土；掺加具有减水、缓凝、引气、膨胀作用的外加剂；选用级配良好的粗细集料等措施。在减小干燥收缩和塑性收缩方面，主要采取膨胀剂、养护剂等方法来补偿混凝土收缩，减少混凝土微裂纹，优化混凝土孔结构，降低孔隙率，改善水泥石与骨料过度层的界面结构和性能 [6]。在混凝土收缩抑制技术中应重点突破分阶段全过程调控混凝土水化放热历程，以及添加膨胀剂抑制收缩技术。

2. 发展趋势

(1) 海工混凝土微结构优化技术

基于混凝土微结构与渗透性之间的关系，围绕适用于海洋环境耐腐蚀高性能混凝土的关键耐久性设计指标及微结构设计参数，应用基于微结构的混凝土配合比设计方法使用高性能混凝土减水剂，并辅以适宜的功能性混凝土外加剂，实现抗介质渗透能力与耐腐蚀性能显著高于普通混凝土的低介质腐蚀混凝土制备技术。

(2) 基于高耐候、低介质渗透与长寿命化的外防护技术

针对海洋环境中大气区混凝土结构具有高紫外线辐射的特点，采用无机防护材料技术在低收缩、高抗裂的大体（面）积混凝土表层实现孔阻塞技术；针对浪溅区干湿交替与海浪冲刷的难题，采用具有优异耐磨与防腐特性的喷涂聚脲弹性体技术实现混凝土表面涂层技术的封闭与防护效应。此外，针对暴露于浪溅区与潮汐区的钢筋混凝土梁与柱，可考虑采用 FRP 包裹技术或钢管复合桩技术，利用 FRP 耐蚀特性或钢管保护层作用有效延缓混凝土结构中钢筋锈蚀与混凝土破坏；针对水下区混凝土结构发生腐蚀破坏的低概率特点，采用渗透性模板布技术优化耐腐蚀高性能混凝土表层孔结构，提升混凝土结构的耐久性。

(3) 有机阻锈技术

针对海洋独特的侵蚀环境，在海工高性能混凝土的基础上使用迁移型阻锈剂，提升钢筋表面的临界氯离子浓度，并综合考量筋材耐蚀性、力学性能、施工工艺性能和经济性等多方面因素。自修复阻锈剂作为新兴的钢筋阻锈技术，在应用方面具有显著的优势。

(4) 超高性能混凝土

超高性能混凝土（UHPC）以超高的强度、韧性和耐久性为特征，成为实现水泥基材料性能跨越式发展的新体系。从工业固体废弃物或低品位资源中高效获取富含化学活性物质的纳米粒子，作为“生态纳米材料”，制备超高强度、超高韧性、超高耐久的生态纳米超高性能混凝土，满足大跨径桥梁、薄壁结构、抗爆结构和深水海洋平台等重大或特种工程的迫切需求，创新轻型混凝土梁板体系，促进高强钢筋规模化应用和固体废弃物的高效利用，具有重大的理论和现实意义 [7]。

(三) 纤维增强复合材料（FRP）现状及发展趋势

1. 既有研究概述

FRP 是由纤维和树脂基体通过一定工艺固化后形成的具有特定形状的结构材料，其中纤维一般包括碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维等，树脂包括环氧树脂、乙烯基树脂、不饱和聚酯树脂等。形成的 FRP 制品按纤维种类分为碳纤维 FRP（CFRP）、芳纶纤维 FRP（AFRP）、玻璃纤维 FRP（GFRP）、玄武岩纤维 FRP（BFRP）、混杂纤维 FRP（Hybrid FRP）[8] 等。FRP 普遍具有轻质高强和耐腐蚀性能，不同的 FRP 具有不同的力学、物理和化学性能，如 CFRP 具有高强度、高弹性模量特征；BFRP 和 GFRP 具有较好的延伸率。FRP 按制品形式包括片材（布、薄板等）、筋材（光面、肋纹、缠绕等）、索材（平行索、绞索）、型材（具有一定截面形状的制品，如管材、工字型材等）、网格材（包括硬质的网格和柔性的格栅）等，如图 2 所示。其中，片材主要用于主梁、桥面板及桥墩加固；筋材可用于桥梁混凝土中的增强材料，也可用于结构加固；索材可用于斜拉桥拉索和悬索桥主缆，还可用作预应力加固；型材可直接作为桥面板结构，也可以和混凝土形成组合结构用于桥面板或桥墩柱；网格材可用于桥面结构及桥墩加固，还可作为增强材料用于桥墩柱，对混凝土施加约束作用，提高力学性能和耐久性。

2. 发展趋势

(1) 高耐腐蚀低成本 FRP

传统 FRP 包括 CFRP、AFRP 和 GFRP，其中 CFRP 质量轻、强度高、长期性能和耐久性好，但价格昂贵，大规模运用于土木工程领域的成本过

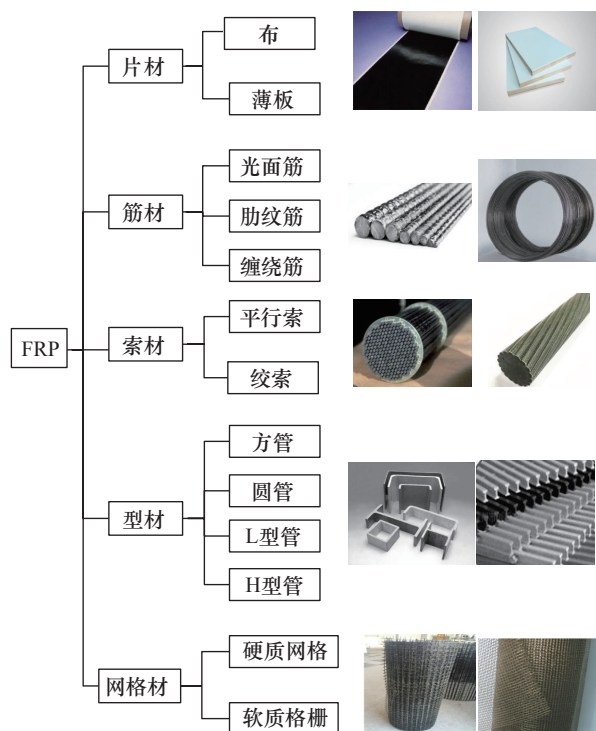


图 2 土木工程用典型 FRP 制品

高；AFRP 长期蠕变大，且价格高；GFRP 成本较低，但强度和弹性模量较低，且耐碱性能较差。针对上述 FRP 的综合性价比瓶颈，目前已开发多种新型 FRP，其中新型 BFRP 以综合性价比突出的优势，近年来得到推广应用 [9~11]。

(2) 可二次加工性 FRP 制品

传统热固性树脂 FRP 制品无法根据现场施工的需要，在施工现场进行二次加工，箍筋、异形筋等需预制；热塑性 FRP 制品经过加热即可弯折，极大增加现场施工的便利性。目前研究与应用较多的热塑性 FRP 主要以聚丙烯、聚乙烯树脂为基体材料，这两种热塑性 FRP 存在硬脆、强度偏低，纤维和树脂的界面黏结性能较差等缺点。

三、高性能材料在海洋工程中的应用技术研究

(一) 高性能钢材在海洋工程中的应用

1. 海洋桥梁工程用高性能钢板焊接工艺研究

在 JIS3114 的基础上，日本开发出桥梁用高性能钢 SBHS500W 和 SBHS700W。SBHS700W 高性能钢是新日铁 1994 年为明石海峡大桥设计的刚性大梁用材料。国内海洋桥梁工程用高性能钢板在焊接方面的工艺研究由于母材研究的匮乏尚处于起步

阶段。但是类似于 Q420qE、Q500qE 的力学性能高、具有一定耐腐蚀性能的桥梁钢的焊接工艺研究已非常成熟，且经过实际应用检验 [12]。一旦研制出高性能耐海洋腐蚀用钢，焊接工艺研究工作必定快速跟上步伐。

2. 缆索用钢盘条热处理工艺

国外桥梁缆索用镀锌铝合金钢丝的生产对线材（盘条）有着较高的要求，一般为共析钢或者过共析钢成分的盘条。该高碳钢需要通过适当的热处理方式获得良好的综合性能，以便于制作高强度、高性能缆索用钢丝。淬火是高碳钢丝生产中的关键工序之一，盘条通过淬火得到符合生产工艺及产品要求的组织结构，如良好的拉拔性能和综合力学性能等 [13]。

3. 缆索用钢盘条深加工工艺研究

(1) 线材表面处理

为了降低拉拔时钢丝与模壁间的摩擦系数，确保钢丝表面质量，钢丝拉拔前应对盘条进行表面处理（包括以清除盘条表面氧化皮为主的表面清净处理）以及润滑涂层处理。

(2) 钢丝拉拔

钢丝的拉拔主要目的是为了获得具有稳定的形状、尺寸和性能指标的，并符合产品技术要求的钢丝。变形金属在不发生脆断的情况下所能承受的最大延伸率值，称为该金属的冷加工极限。桥梁缆索用镀锌铝钢丝的原材料为索氏体化程度很高的热轧盘条，其冷加工极限高达 90% 以上，实际生产中采用多模连续拉拔，较低的部分压缩率，避免了钢丝变形过快而产生温升异常现象，保证了钢丝的高强韧性。

(3) 钢丝抗疲劳性能研究

由于单丝疲劳损坏在整体索股中的累积效应，随着主缆索股规格的增大，其抗疲劳性能降低。基于以上调查研究，对影响超高强度大规格索股疲劳性能的因素（如原材料的抗疲劳性能、锚固过渡区参数等）进行了系统的分析和研究，其中，针对索股的高应力范围要求，钢丝的疲劳应力上限为 0.45 倍抗拉强度对应的应力，应力循环次数为 200 万次。

(二) 高性能混凝土耐久性提升技术在海洋工程中的应用

1. 混凝土的温度调控、收缩抑制以及增韧技术

(1) 混凝土水化放热历程调控技术

为了抑制混凝土的温度开裂, 必须严格控制混凝土温升, 除了传统降低水泥用量、放热量、水冷等方式, 也可通过化学外加剂(水化热调控材料, TRI)控制混凝土结构温升, 进而降低开裂风险。

(2) 分阶段全过程混凝土收缩抑制技术

通过相转移催化的方法合成具有亲水/亲油特性的两亲性聚合物(聚甲基丙烯酸十八酯), 解决了小分子两亲性化合物间弱范德华力的缺陷, 有效提升了单分子膜的排列密度和稳定性, 实现了单分子膜抑制水分蒸发性能的有效提升。最终可降低混凝土塑性阶段水分蒸发 70% 以上, 降低塑性收缩 50% 以上, 该技术已应用于兰新高速铁路、成贵高速铁路、泰州大桥、横琴二桥等国家重大工程。

2. 干湿交替下侵蚀性介质传输与混凝土腐蚀抑制技术

(1) 侵蚀性离子传输抑制技术

新型混凝土侵蚀性介质传输抑制技术利用与水泥水化产物可以形成键合作用的新型有机物, 彻底解决了传统材料溶出的问题。该产品可以实现疏水长碳链与水泥水化产物的化学键合, 且不影响混凝土的水化进程和强度发展等性能; 同时利用“纳米效应”, 进一步减少混凝土有害孔, 优化孔结构, 增加混凝土致密性, 以江苏苏博特新材料股份有限公司的侵蚀性离子传输抑制技术(TIA)为典型。掺入侵蚀介质传输抑制剂, 混凝土抗压强度提升 10 MPa, 电通量、吸水率、氯离子扩散系数降低超过 40%, 效果较国外同类产品提升 50%, 该技术已应用于虎门二桥项目。

(2) 盐结晶抑制技术

混凝土抗硫酸盐腐蚀选择性结晶抑制剂掺入混凝土中, 可在 5% Na_2SO_4 腐蚀环境下, 在不影响氢氧化钙等正常水化结晶产物生成的前提下降低钙矾石的生成量, 减少混凝土试件的力学性能损失, 抑制腐蚀膨胀的产生。

(3) 海工混凝土结构外防护涂层体系

在有机防护材料方面, 针对高盐浓度、水下环境的极端环境, 近年来基于水性化与湿固化技术的

防护材料已成为国际研究的热点。研究表明, 以吸水量、抗化学腐蚀、氯离子的渗透为评价指标, 则环氧涂层和聚氨酯涂层的防护性能优于其他涂层。随着老化时间的延长, 涂层表面光泽度不断下降, 涂层的耐腐蚀性能下降, 聚合物化学键被破坏, 造成涂层树脂不断降解引起老化。目前, 有机硅是使用最广泛的渗透性表面防护涂料。有机硅防水涂料是通过涂装, 在硅酸盐基材表面和孔隙内部形成硅氧烷憎水膜以达到防水效果。无机防护材料突出的耐老化性能与绿色水性化特征使得该材料逐步得到广泛关注, 无机类渗透性防护材料由于渗透性与反应性的矛盾导致此类技术展现出的防护效果有待进一步提高。

3. 基于有机阻锈剂的结构钢筋长效防护与修复技术

(1) 干湿交替下长效阻锈技术

利用现代有机合成技术, 将多位点强吸附阻锈分子与 Cl^- 传输抑制分子整合为一体, 在结构服役过程中缓慢释放, 从而巧妙规避对混凝土新拌性能的影响, 真正实现高效阻锈分子在实体结构中的应用, 并对阻锈分子进行合理的浓度配置; 释放出的 Cl^- 传输抑制组分通过与 Ca^{2+} 的分子自组装, 在混凝土保护层中构建离子屏障, 确保钢筋表面阻锈分子对 Cl^- 的长期浓度优势。

(2) 纳米材料在水泥基复合材料中的应用

纳米材料在促进水泥基材料的早期水化进程, 提升其早期强度方面应用前景广阔, 与钙盐、三乙醇胺等传统早强剂相比, 纳米材料具有无有害离子(如氯离子、硫酸根等)引入, 掺量敏感度低(三乙醇胺等过掺易缓凝)等优点(见图 3)。

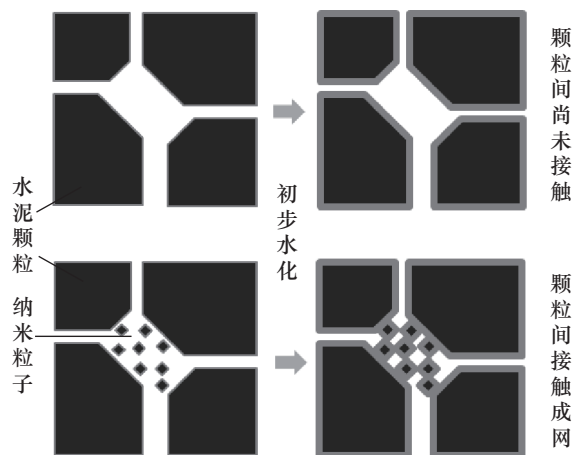


图 3 纳米材料提升水泥基材料早期强度的原理

(三) 纤维增强复合材料在海洋工程中的应用

1. FRP 加固桥梁结构

FRP 在桥梁加固结构中已有广泛应用。针对传统外贴加固存在的胶层老化问题，提出了高渗透耐候界面剂对纤维界面及混凝土基层进行强化的关键技术；针对预应力纤维布的端部应力集中问题，提出了分层锚固和分步张拉锚固两种有效解决方法；针对预应力 FRP 板 / 筋的端部锚固问题，提出同源材料锚固技术以避免锚固区刚度突变导致的应力集中。体外预应力 FRP 筋 / 板加固混凝土梁的力学性能试验证明，结构刚度、开裂及屈服荷载均得到了有效提升 [14,15]。针对预应力 BFRP 筋嵌入式加固结构，开发了成套张拉锚固技术（见图 4）。此外，还开发了 BFRP 网格 / 筋加固技术，将 BFRP 网格用聚合物砂浆黏贴加固于桥面板或主梁的底部或腹板，或将 BFRP 筋布置在桥面中，可显著提高结构的抗弯、抗剪承载力，防止桥面开裂，该技术已在南京长江大桥的加固修复中得到成功应用（见图 5）。

2. FRP 耐腐蚀轻量化桥面体系

国内外 FRP-混凝土组合桥面板在结构形式相对传统混凝土或全 FRP 具有优势，但目前仍存在模壳变形大、模壳-混凝土连接性能不足等问题。东南大学吴智深教授团队研究设计出一种新型自平衡预应力 BFRP 模壳-混凝土组合桥面板结构，如图 6 所示。该体系在 FRP 模壳制备过程中增加齿状结构，并对模壳表面进行黏砂处理，以增加模壳与混凝土的咬合力，有效提升 FRP 型材之间及 FRP 和混凝土间的黏结性能；通过 FRP 板条进行预应力张拉形成模壳反拱，降低模壳在施工荷载下的变形。静力及疲劳性能试验结果表明，BFRP-混凝土组合桥面板静力下的极限荷载高达 644 kN [16]，在疲劳试验取荷载水平 $0.511F_u$ (F_u 为极限承载力)、疲劳上下限荷载比为 0.274 条件下，试件最终疲劳破坏的循环次数为 249 万次，组合桥面板端部混凝土与

BFRP 模壳未发生相对滑移 [17]。

3. FRP 筋-钢筋混合配置混凝土结构

传统钢筋混凝土结构在带裂缝工作的情况下易产生锈胀裂缝，而一味地增加钢筋保护层厚度则会造成裂缝宽度过大。因此提出 FRP 筋-钢筋混合配置混凝土结构，将 FRP 筋布置在钢筋外侧，利用 FRP 筋与混凝土之间的稳定滑移性能限制裂缝开展（见图 7）[18]。另一方面，由于普通钢筋混凝土结构屈服后刚度接近于零，结构屈服后损伤发展过快且难以控制，有些结构在极端荷载下

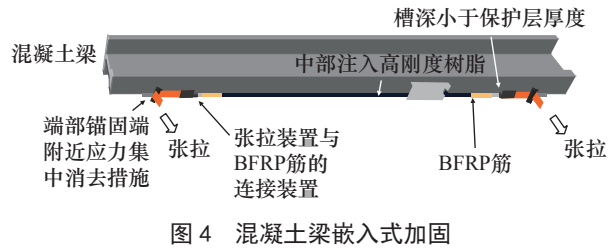


图 4 混凝土梁嵌入式加固



图 5 BFRP 网格 / 筋加固南京长江大桥桥面及拱肋

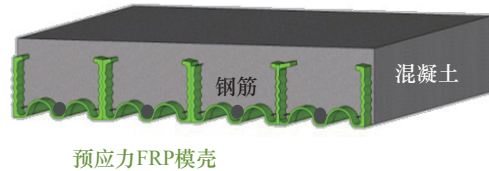


图 6 组合桥面板及预应力模壳

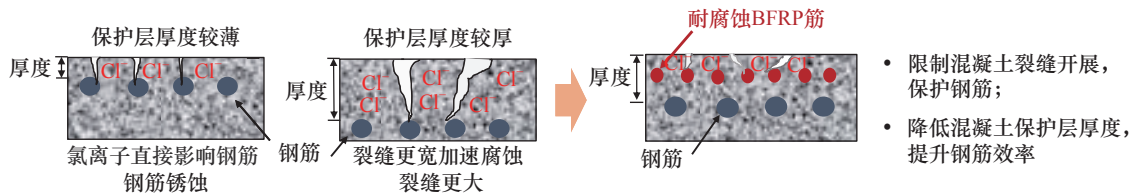


图 7 FRP 筋 - 钢筋混合配置混凝土结构示意图

虽然不发生倒塌, 却由于变形过大而无法继续使用。所提出的 FRP 筋-钢筋混配方式可保证稳定的结构二次刚度, 且显著控制残余变形, 实现结构灾后可修复 [19]。

4. 大跨海洋斜拉桥、悬索桥用 FRP 拉索结构

基于 FRP 拉索基本性能的研究, 通过综合考虑不同 FRP 拉索的力学性能与经济性能, 确定了多种拉索的合理适用跨度区间, 提出了在同一桥梁不同跨度区域混合布置的 FRP 拉索斜拉桥体系, 简称 FRP 混布拉索体系, 以充分发挥不同材料 FRP 拉索的力学性能与经济性能, 实现大跨斜拉桥拉索在力学性能与经济性能上的优化设计。另外, 开发了由混杂 FRP 拉索和橡胶黏弹性材料组成的自减震拉索, 可根据振动幅度的大小使拉索振幅相应地衰减 (见图 8) [20]。

由于 FRP 的横向力学性能远低于纵向力学性能, 大吨位 FRP 拉索锚固是其应用于大跨桥梁结构的瓶颈问题。为此, 提出了变刚度型整体锚固系统, 如图 9 所示, 通过在锚固区不同部位设置不同的材料, 实现荷载传递材料径向弹性模量的梯度变化, 利用整体模压或分段浇筑对 FRP 拉索进行整体固化, 减小了荷载传递材料-拉索界面剪应力 (黏结应力), 避免荷载传递材料-拉索界面因抗剪强度不足导致拉索从锚具中滑脱 [21,22]。系列研究已表明, 通过一体化、变刚度的同源荷载传递介质, 可实现 1000 t 级大吨位 FRP 拉索的有效锚固, 但仍需

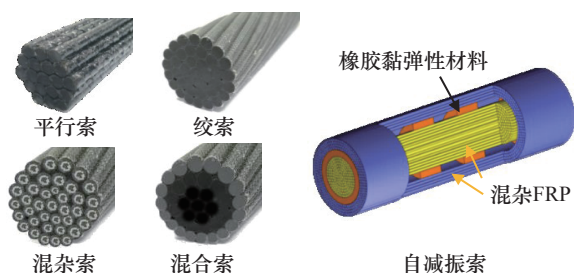


图 8 混杂索及自减震拉索

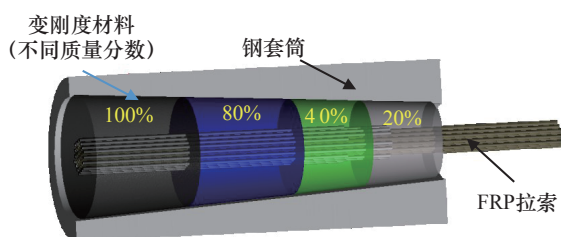


图 9 变刚度型整体锚固系统

通过不断完善拉索-锚固体系制备工艺技术, 以保证其质量的可靠性。

四、结语

未来, 在我国海洋大跨桥梁工程材料发展领域中, 应针对海洋桥梁工程服役环境特征, 开展关键工程材料的腐蚀机理与性能提升研究; 研发高性能桥梁钢及超高强缆索用钢, 形成海洋桥梁工程材料标准体系; 建立钢筋混凝土材料与结构耐久性一体化设计方法, 发展基于表层防护-基体耐蚀-钢筋阻锈的耐久性提升成套技术, 形成高耐久钢筋混凝土相关产品和规范; 研发海洋桥梁工程用高性能耐腐蚀 FRP 系列制品, 着重发展缆索、桥面板和抗震桥墩等 FRP 结构, 建立结构轻量化、损伤可控、寿命可控以及耐久性设计方法; 积极推动轻质、高强、高耐久材料在海洋桥梁工程中的大规模应用。建议国家参考对节能、环保产业的支持政策, 大力扶持非金属资源纤维产业, 特别是具有绿色、环保等高性能玄武岩纤维材料, 推动海洋桥梁的长寿命和可持续发展。

致谢

衷心感谢秦顺全院士主持的中国工程院咨询项目“海洋桥梁工程技术发展战略研究”(2016-XZ-13)的支持及对本课题的多方面指导!

参考文献

- [1] Mangat P S, Grigoriadis K, Abgbakr S. Microwave curing parameters of in-situ concrete repairs [J]. *Construction and Building Materials*, 2016 (112): 856-866.
- [2] 郭小华, 于英俊, 王玲, 等. 工业环境混凝土结构耐久性修复研究现状 [J]. *工业建筑*, 2019, 49(1): 156-162.
Guo X H, Yu Y J, Wang L, et al. Research status of durability repair of concrete structure in industry environment [J]. *Industry Construction*, 2019, 49(1): 156-162.
- [3] 黄维, 张志勤, 高真凤, 等. 国外高性能桥梁用钢的研发 [J]. *世界桥梁*, 2011 (2): 18-21.
Huang W, Zhang Z Q, Gao Z F, et al. Research and development of high-performance steel used in bridge abroad [J]. *World Bridges*, 2011 (2): 18-21.
- [4] 姚昌荣, 李亚东, 强士中. 美国桥梁高性能钢的发展与应用 [J]. *世界桥梁*, 2005 (1): 57-61.
Yao C R, Li Y D, Qiang S Z. Development and applications of high-performance steel used in bridge in the USA [J]. *World Bridges*, 2005 (1): 57-61.
- [5] Ohba H, Noshida S, Tarui T, et al. High-performance wire rods

- produced with DLP [J]. Nippon Steel Technical Report, 2007, 96: 50–56.
- [6] 党玉栋, 钱觉时, 乔墩, 等. 减缩剂预饱和和轻骨料对水泥砂浆自收缩的影响及机理 [J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(1): 47–53.
Dang Y D, Qian J S, Qiao D, et al. Influence and mechanism of lightweight aggregates pre-saturated with shrinkage reducing admixtures on autogenous shrinkage of cement mortar [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39(1): 47–53.
- [7] 刘建忠. 超高性能水泥基复合材料制备技术及静态拉伸行为研究 [D]. 南京: 东南大学 (博士学位论文), 2013.
Liu J Z. Study on preparation technology and static, dynamic tensile behavior of ultra-high performance cementitious composites [D]. Nanjing: Southeast University (Doctoral dissertation), 2013.
- [8] Wang X, Wu Z, Wu G, et al. Enhancement of basalt FRP by hybridization for long-span cable-stayed bridge [J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 44(1): 184–192.
- [9] Wang X, Shi J, Liu J, et al. Creep behavior of basalt fiber reinforced polymer tendons for prestressing application [J]. Materials & Design, 2014, 59(7): 558–564.
- [10] Zhao X, Wang X, Wu Z, et al. Fatigue behavior and failure mechanism of basalt FRP composites under long-term cyclic loads [J]. International Journal of Fatigue, 2016, 88: 58–67.
- [11] Wang X, Wu G, Wu Z, et al. Evaluation of prestressed basalt fiber and hybrid fiber reinforced polymer tendons under marine environment [J]. Materials & Design, 2014, 64: 721–728.
- [12] 国际桥梁与结构工程协会. 高性能钢材在钢结构中的应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
International Association for Bridge and Structural Engineering. Use and application of high-performance steels for steel structures [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [13] Kazeminezhad M, Taheri A K. The effect of controlled cooling after hot rolling on the mechanical properties of a commercial high carbon steel wire rod [J]. Materials & Design, 2003, 24(6): 415–421.
- [14] Wang X, Shi J, Wu G, et al. Effectiveness of basalt FRP tendons for strengthening of RC beams through the external prestressing technique [J]. Engineering Structures, 2015, 101: 34–44.
- [15] 刘长源. 预应力BFRP板外贴加固RC梁抗弯性能研究 [D]. 南京: 东南大学 (硕士学位论文), 2019.
Liu C Y. Study on the bending performance of steel reinforced concrete beams strengthened by prestressed and externally bonded BFRP plates [D]. Nanjing: Southeast University (Master's thesis), 2019.
- [16] 孙沈鹏. BFRP模壳—混凝土组合桥面板基本性能研究 [D]. 南京: 东南大学 (硕士学位论文), 2015.
Sun S P. Research on fundamental behavior of BFRP form-concrete composite deck slab [D]. Nanjing: Southeast University (Master's thesis), 2015.
- [17] 邓文杰. BFRP模壳—混凝土组合桥面板在长期荷载下的性能研究 [D]. 南京: 东南大学 (硕士学位论文), 2017.
Den W J. Mechanical behavior of BFRP shell-concrete composite bridge deck under long-term loads [D]. Nanjing: Southeast University (Master's thesis), 2017.
- [18] Wu Z S, Yamamoto M. Study on the basic performance of FRP-concrete structures using basalt fibre reinforced polymer rods [R]. Okayama: The 68th Annual Meeting of the Japan Society of Civil Engineers, 2013.
- [19] Ibrahim A M A, Wu Z, Fahmy M F M, et al. Experimental study on cyclic response of concrete bridge columns reinforced by steel and basalt FRP reinforcements [J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 20(3): 04015062.
- [20] Yang Y, Wang X, Wu Z. Damping behavior of hybrid fiber-reinforced polymer cable with self-damping for long-span bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(7): 05017005.
- [21] Wang X, Xu P, Wu Z, et al. A novel anchor method for multitendon FRP cable: Concept and FE study [J]. Composite Structures, 2015, 120: 552–564.
- [22] Wang X, Xu P, Wu Z, et al. A novel anchor method for multitendon FRP cable: Manufacturing and experimental study [J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 19(6): 04015010.