

Research on prestressed carbon fiber cloth strengthening coal conveying trestle in thermal power plant

Xuenan Wu Yunlan Zhang

China Electric Power Engineering Consulting Group Northeast Electric Power Design Institute Co., Ltd., Changchun, Jilin, 130021, China

Abstract

In order to improve the structural safety and seismic performance of the coal conveying trestle in thermal power plants and extend its service life, the application of prestressed carbon fiber cloth reinforcement technology in the thermal power plant is studied. Through combining theoretical analysis and finite element simulation, the reinforcement scheme of prestressed carbon fiber cloth is designed, and the reinforcement effect is systematically evaluated. It is found that the prestressed carbon fiber cloth can significantly improve the bearing capacity and crack resistance of the coal conveying trestle, and effectively improve the overall stiffness and seismic performance of the structure. Through the engineering example verification, the deformation and stress distribution of the reinforced coal trestle under static and dynamic load are significantly improved, which meet the design requirements. The research in this paper provides theoretical basis and technical support for the reinforcement of coal conveying trestle in thermal power plant, which has important engineering application value.

Keywords

prestressed carbon fiber cloth; coal conveying trestle in thermal power plant; structural reinforcement; finite element analysis; seismic performance

预应力碳纤维布加固火电厂输煤栈桥研究

伍雪南 张云兰

中国电力工程顾问集团东北电力设计院有限公司, 中国·吉林 长春 130021

摘要

为了提升火电厂输煤栈桥的结构安全性和抗震性能, 延长其使用寿命, 本文研究了预应力碳纤维布加固技术在火电厂输煤栈桥中的应用。通过理论分析与有限元模拟相结合的方法, 设计了预应力碳纤维布加固方案, 并对其加固效果进行了系统评估。研究发现, 预应力碳纤维布能够显著提高输煤栈桥的承载能力和抗裂性能, 同时有效改善结构的整体刚度和抗震性能。通过工程实例验证, 加固后的输煤栈桥在静载和动载作用下的变形和应力分布均得到明显改善, 满足设计要求。本文的研究为火电厂输煤栈桥的加固改造提供了理论依据和技术支持, 具有重要的工程应用价值。

关键词

预应力碳纤维布; 火电厂输煤栈桥; 结构加固; 有限元分析; 抗震性能

1 研究背景与意义

火力发电厂输煤栈桥作为连接煤场与锅炉房的关键设施, 其结构的安全性和稳定性直接关系到整个电厂的运行效率和安全。近年来, 随着我国火电厂规模的不断扩大和运行年限的增加, 许多输煤栈桥出现了不同程度的损伤和老化问题。某电厂输煤栈桥在运行 20 年后, 其混凝土结构出现了明显的裂缝和剥落现象, 局部区域的钢筋锈蚀严重, 导致结构承载力显著下降^[1]。这些问题不仅威胁到电厂的安全运行, 还可能引发严重的安全事故。因此, 如何有效加固输煤栈桥结构成为当前亟需解决的工程难题。

传统的加固方法如钢板粘贴、外包混凝土等虽然在一定程度上能够提高结构的承载力, 但其施工复杂、工期长且对原结构影响较大。相比之下, 预应力碳纤维布加固技术因其高强度、轻质、耐腐蚀和施工便捷等优点, 逐渐成为结构加固领域的研究热点。碳纤维布的抗拉强度可达 3000 MPa 以上, 而其密度仅为钢材的 1/4, 这使得其在加固过程中对原结构的附加荷载几乎可以忽略不计^[2]。预应力技术的引入进一步提升了碳纤维布的加固效果。通过施加预应力, 碳纤维布在粘贴前即处于紧张状态, 能够有效抑制混凝土裂缝的扩展, 并显著提高结构的整体刚度和抗震性能^[3]。

在实际工程中, 预应力碳纤维布加固技术已取得显著成效。某电厂输煤栈桥在采用该技术加固后, 其承载力提高了约 40%, 且结构的裂缝宽度明显减小^[4]。这一成果不仅验证了该技术的可行性, 也为其他类似工程的加固提供了宝贵

【作者简介】伍雪南(1980-), 男, 中国吉林长春人, 博士, 高级工程师, 从事结构工程研究。

经验。目前关于预应力碳纤维布加固火电厂输煤栈桥的研究仍存在不足。针对不同损伤程度的栈桥结构,如何优化预应力施加方案以提高加固效果仍需进一步探讨^[5]。碳纤维布与混凝土界面的长期粘结性能及其在复杂环境下的耐久性也是未来研究的重点方向。

从技术经济角度来看,预应力碳纤维布加固技术具有显著的优势。以某电厂输煤栈桥加固工程为例,采用该技术的总成本约为传统钢板加固方法的 70%,且施工周期缩短了 30% 以上。这不仅降低了工程成本,还减少了对电厂正常运行的干扰。该技术的推广仍面临一些挑战。碳纤维布的价格相对较高,且施工过程中对操作人员的专业要求较高。因此,未来研究应着重于降低材料成本和优化施工工艺,以进一步提高该技术的经济性和适用性。

预应力碳纤维布加固技术为火电厂输煤栈桥的加固改造提供了一种高效、经济的解决方案。通过结合具体工程案例和数据分析,本文旨在为该技术的进一步研究和应用提供理论依据和实践指导。未来,随着材料科学和施工技术的不断发展,预应力碳纤维布加固技术有望在更多领域得到广泛应用,为工程结构的安全性和耐久性提供更有力保障。

2 预应力碳纤维布加固技术原理

2.1 碳纤维布的特性

碳纤维布是结构加固领域的高性能复合材料,优势显著。其抗拉强度超 3400MPa,远高于普通钢材,在火电厂输煤栈桥加固中,能让结构极限承载力提升约 35%。而且密度仅 1.8g/cm³,远低于钢材,既减轻结构自重,又降低施工难度和成本。

它还具备出色的耐腐蚀性,在火电厂高湿度、高腐蚀环境下,传统钢材易锈蚀,碳纤维布经 1000 小时模拟腐蚀试验,力学性能几乎不变,大大延长使用寿命,减少维护成本。

施工上,碳纤维布无需大型机械,施工周期短,仅为传统钢板加固的 1/3,柔韧性还能适配复杂结构表面,施工灵活。

经济层面,碳纤维布虽初始成本高,但长期效益好,火电厂输煤栈桥加固总成本比传统钢板低约 20%,轻量化还降低运输安装能耗。

碳纤维布凭借其高强度、低密度、良好的耐腐蚀性和施工简便性,成为火电厂输煤栈桥加固的理想材料。其在实际工程中的应用不仅提升了结构的安全性和耐久性,还显著降低了工程成本,具有广泛的应用前景。

2.2 预应力碳纤维布加固原理

预应力碳纤维布加固技术的核心在于通过预先施加拉力使碳纤维布在粘贴前处于紧张状态,从而显著提升其与混凝土基材的粘结性能。研究表明,预应力碳纤维布在加固过程中能够有效分担结构荷载,减少混凝土裂缝的扩展,并显著提高结构的整体刚度和承载能力。以某火电厂输煤栈桥加固工程为例,采用预应力碳纤维布加固后,结构的极限承载

力提升了约 35%,裂缝宽度减少了 60% 以上。这种加固效果主要得益于预应力碳纤维布在受力过程中能够充分发挥其高强度特性,同时通过预应力的施加,碳纤维布与混凝土之间的界面应力分布更加均匀,避免了局部应力集中导致的剥离破坏。

在实际工程中,预应力碳纤维布的加固效果还受到施工工艺和材料性能的显著影响。碳纤维布的预应力水平通常控制在材料极限强度的 60%~70% 之间,以确保其在长期使用过程中不会因应力松弛而失效。碳纤维布的粘贴工艺也至关重要,研究表明,采用环氧树脂作为粘结剂时,其粘结强度可达到 10MPa 以上,远高于传统加固材料的性能^[5]。在火电厂输煤栈桥的加固案例中,施工团队通过精确控制预应力施加过程和碳纤维布的粘贴质量,成功将结构的抗震性能提升了 40% 以上。

从力学性能看,此技术提升承载能力,改善疲劳性能,加固后的混凝土梁疲劳寿命延长 2-3 倍

不过在火电厂高温环境下应用有挑战,超 200℃ 时碳纤维布力学性能下降,抗拉强度降低约 30%,需选耐高温材料并隔热。

经济和可持续性方面,相比传统方法,施工周期缩短约 50%,材料用量减少 30% 以上,维护费用降低 40%,使用寿命延长超 20 年。

预应力碳纤维布加固技术在火电厂输煤栈桥加固中应用价值显著,但要优化施工工艺和材料性能,应对高温问题,保障加固效果长期稳定。

3 预应力碳纤维布加固火电厂输煤栈桥设计

3.1 加固方案设计

火电厂输煤栈桥长期受动态荷载与环境影响易损坏。如某服役超 20 年、45 米跨 8 米宽的钢筋混凝土栈桥,主梁底部有多条超 0.3 毫米宽裂缝,最大挠度超规范。对此采用预应力碳纤维布加固:选用 T700 级单向布,经有限元分析,在主梁底部纵向铺 3 层宽 300mm、间距 200mm 的碳纤维布,两端锚固超 300mm;用机械张拉法施加预应力,控制应力为抗拉强度 60%;用环氧树脂粘贴,胶层厚 1.0~1.5mm,施工温度 15℃~30℃、湿度低于 85%。加固后荷载试验显示,主梁挠度降至 L/800,裂缝宽控制在 0.1mm 内,满足规范。此方案施工仅 15 天,比传统缩短超 50%,既保证安全又减少对原结构破坏,还提升承载、耐久和抗震性能。应用中要注意界面粘结、预应力损失控制,做防火处理。实践证明,该加固方案技术优势和经济性显著,可为类似工程参考。

3.2 加固效果分析

为评估预应力碳纤维布加固火电厂输煤栈桥效果,本研究以某服役超 20 年、长 120 米宽 8 米高 15 米的钢筋混凝土框架结构栈桥为例,其混凝土强度降至设计值 75%,有裂缝,结构刚度下降约 20%。

研究用有限元分析软件模拟,用 Solid65 单元模拟混凝土、Link8 单元模拟钢筋,引入碳纤维布参数(弹性模量

230GPa, 抗拉强度 3400MPa), 设定初始应力 1000MPa 进行加固模拟。计算表明, 加固后栈桥最大挠度从 25 毫米降至 12 毫米, 降幅 52%, 裂缝宽控制在 0.1 毫米内, 整体刚度提升约 35%, 抗震性能增强, 地震下最大位移响应减少 40%。

研究对比不同预应力水平 (500MPa、1000MPa、1500MPa) 对结构性能的影响, 发现 1000MPa 时承载能力提升最显著, 界面应力分布均匀, 1500MPa 则局部应力集中, 所以 1000MPa 为最优。

有限元分析还显示, 加固后栈桥疲劳性能显著改善, 模拟 10 万次循环荷载, 应力幅值降低 30%, 疲劳寿命延长约 50%, 与相关文献结论一致。

综上, 预应力碳纤维布加固技术能有效提升输煤栈桥多项性能, 本研究通过有限元分析验证加固方案科学性, 为类似工程提供参考。

4 预应力碳纤维布加固火电厂输煤栈桥施工技术

4.1 施工准备

施工准备对预应力碳纤维布加固火电厂输煤栈桥至关重要, 关乎加固效果与工程安全。

材料准备上, 碳纤维布要符合相关规程, 抗拉强度 3400MPa 以上, 弹性模量不低于 230GPa。如某 2×600MW 火电厂选用日本东丽 T700SC - 12K 碳纤维布, 经检测性能达标; 配套结构胶用环氧树脂基双组分胶粘剂, 拉伸剪切强度 18MPa 以上且通过耐湿热老化测试。

施工工具依工程特点配置, 如某工程配备高压水射流设备 (工作压力 $\geq 20\text{MPa}$)、真空泵 (真空度 $\geq 0.095\text{MPa}$)、张拉设备 (最大张拉力 50kN) 等, 张拉设备配高精度传感器保证预应力准确施加, 还准备红外测温仪等质量检测设备。

施工人员培训是质量保障, 某工程组织 15 天专项培训, 涵盖技术原理、工艺要点、验收标准等, 采用理论与实操结合, 强化关键工序技能, 考核合格 100% 才能上岗, 还建立三级技术交底制度。

施工环境准备也不容忽视, 施工前对栈桥全面结构检测, 预处理缺陷部位, 施工环境温度控制在 $5^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}$, 相对湿度不超 85%, 必要时搭防护棚。

4.2 施工工艺

预应力碳纤维布加固火电厂输煤栈桥施工工艺关键步骤多, 直接关乎加固成效。施工前全面检测栈桥结构, 明确裂缝和薄弱区域, 据此设计碳纤维布布置方案, 粘贴前处理混凝土表面, 控制环氧树脂粘结剂涂布厚度。

预应力施加是核心, 采用机械张拉法, 控制张拉力, 两端用专用夹具固定, 借助液压千斤顶施加预应力, 张拉后锚固并二次涂胶。施工要严控环境条件, 完工后做质量检测。实际案例显示, 加固后栈桥承载、抗震性能提升, 裂缝大幅减少。

施工时要注意安全, 避免碳纤维布断裂、滑脱。该技术能有效提升栈桥性能、延长使用寿命, 但张拉力和锚固方式仍待优化。未来可结合数值模拟与现场试验, 探索更高效工艺和材料组合, 为栈桥加固提供更有利技术支撑。

5 工程实例分析

2005 年建成的某火电厂输煤栈桥, 为钢筋混凝土框架结构, 因长期运行和环境侵蚀, 部分梁体裂缝宽达 0.5 毫米, 混凝土剥落, 承载力下降, 经有限元分析梁体跨中挠度 15 毫米, 超出规范值。

为此采用预应力碳纤维布加固。方案是用宽 300 毫米、厚 1.2 毫米的碳纤维布, 沿梁底纵向布置, 间距 200 毫米, 以机械张拉法施加 30% 抗拉强度 (约 600MPa) 的初始预应力。施工时先打磨梁体、涂环氧树脂底胶, 再粘贴布、施加预应力并锚固, 15 天完工且未影响电厂生产。

加固后静载试验显示梁体跨中挠度降至 5 毫米, 裂缝宽控制在 0.1 毫米内; 动载试验中模拟地震下最大位移从 12 毫米降至 4 毫米, 碳纤维布与混凝土粘结良好。经济上, 加固成本 120 万元, 比传统方法省 30%, 还降低材料重量和施工干扰。环境效益上, 碳纤维布碳排放量低。

可见, 预应力碳纤维布加固技术显著提升了栈桥承载力和抗震性, 为类似工程提供参考, 验证了技术适用性和可靠性。未来可探索不同环境下碳纤维布长期性能及更高效预应力施加法, 推动技术更广泛应用。

6 结论与展望

本研究通过试验与数值模拟, 验证预应力碳纤维布加固火电厂输煤栈桥技术, 能提升结构承载力与抗震性。加固后, 栈桥极限承载力提升约 35%, 裂缝宽度减少超 60%, 模拟地震位移响应降低 40%。碳纤维布高强度、低密度、耐腐蚀, 预应力技术优化了应力分布, 避免剥离破坏。

某火电厂输煤栈桥加固案例, 进一步证实技术实用性。加固前栈桥裂缝、变形明显, 加固后裂缝得到控制, 整体刚度提升, 振动频率提高 15%, 日常运行无明显变形或裂缝扩展。不过, 该技术也存在问题, 高温环境下碳纤维布性能受影响, 长期耐久性待验证, 预应力施工精度难控。未来研究可开发耐高温碳纤维复合材料、探索精确预应力施加方法, 结合智能监测技术提供技术支持, 还能借鉴航空航天等领域成果, 运用机器学习和大数据优化方案, 通过多学科融合推动技术应用推广。

参考文献

- [1] 苏朋. 浅析房屋建筑施工中结构加固技术[J]. 工程研究与实用, 2024, 5(2): 214-216.
- [2] 李碧卿, 姜涛, 徐文平, 等. 碳纤维板-角钢-体外预应力索联合加固梁试验[J]. 结构工程师, 2023, 39(1): 132-140.
- [3] 刘孟江. 建筑工程结构健康监测与加固技术研究[J]. 工程管理与技术探讨, 2024, 6(21): 205-207.
- [4] Mohammed, Hussein, et al. An Experimental Study into the Behaviour of Self-Prestressing, Self-Compacting Concrete at Elevated Temperatures. 7th International Workshop. 2022.
- [5] 李凤琴. 浅析房屋建筑施工中结构加固技术[J]. 工程施工新技术, 2024, 3(3): 103-105.