

现代桥梁钢结构制造技术的进展与挑战

王钦国

中铁山桥(南通)有限公司, 江苏 如皋

收稿日期: 2025年3月11日; 录用日期: 2025年4月2日; 发布日期: 2025年4月15日

摘要

近年来, 得益于技术的显著进步, 桥梁钢结构制造技术已经取得了重大突破, 这不仅提升了桥梁的抗震性能、生态环保性、跨度和荷载能力, 还通过模块化设计、工厂化制造和精准快速的安装架设, 极大地推动了钢结构桥梁在交通基础设施建设中的广泛应用。随着钢材性能的提升、激光焊接技术的广泛应用、自动化和数字化技术的深入应用, 以及模块化和装配式生产的推广, 现代桥梁钢结构的制造效率和精度得到了极大提高。随着激光焊接技术的不断进步, 其在钢结构桥梁建设中的应用显著提升了结构质量的稳定性, 并且大幅缩短了施工周期。然而, 尽管取得了诸多进展, 现代桥梁钢结构制造仍面临诸多挑战, 诸如材料成本攀升、焊接质量控制难度加大、结构健康监测与维护技术瓶颈, 以及日益严格的环保和可持续性要求等。未来, 随着新型高性能钢材的研发、智能化制造的推进和绿色可持续技术的应用, 钢结构桥梁的制造技术将继续朝着更加高效、环保和智能化的方向发展。

关键词

现代桥梁, 钢结构, 制造技术, 焊接技术, 自动化, 数字化技术, 模块化生产, 装配式技术, 高性能钢材, 结构健康监测, 可持续发展, 智能化制造

The Progress and Challenges of Modern Bridge Steel Structure Manufacturing Technology

Qinguo Wang

China Railway Shanqiao Group Co., Ltd., Rugao Jiangsu

Received: Mar. 11th, 2025; accepted: Apr. 2nd, 2025; published: Apr. 15th, 2025

Abstract

In recent years, thanks to the significant progress of technology, the manufacturing technology of

bridge steel structure has made a major breakthrough, which not only improves the seismic performance, ecological environmental protection, span and load capacity of the bridge, but also greatly promotes the wide application of steel structure bridge in transportation infrastructure construction through modular design, factory manufacturing and accurate and rapid installation and erection. With the improvement of steel performance, the wide application of laser welding technology, the in-depth application of automation and digital technology, and the promotion of modular and assembly production, the manufacturing efficiency and accuracy of modern bridge steel structure have been greatly improved. With the continuous progress of laser welding technology, its application in the construction of steel structure bridges has significantly improved the stability of structural quality and greatly shortened the construction period. However, despite many advances, modern bridge steel structure manufacturing still faces many challenges, such as rising material costs, increasing difficulty in welding quality control, technical bottlenecks in structural health monitoring and maintenance, and increasingly stringent environmental and sustainability requirements. In the future, with the development of new high-performance steel, the advancement of intelligent manufacturing and the application of green sustainable technology, the manufacturing technology of steel structure bridges will continue to develop in a more efficient, environmentally friendly and intelligent direction.

Keywords

Modern Bridge, Steel Structure, Manufacturing Technology, Welding Technology, Automation, Digital Technology, Modular Production, Assembly Technology, High Performance Steel, Structural Health Monitoring, Sustainable Development, Intelligent Manufacturing

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

桥梁作为重要的交通基础设施，其设计与施工质量直接影响着社会的经济发展与民生改善。随着交通需求的增加和技术的不断发展，现代桥梁的设计、建造以及使用寿命也面临着越来越多的挑战。钢结构作为桥梁的一种常见形式，因其重量轻、承载能力强、施工周期短等优点，广泛应用于各种桥梁建设中[1]。近年来，随着钢铁制造技术、焊接技术、数控技术和材料科学的不断进步，钢结构桥梁的制造技术得到了显著提升。尽管钢结构桥梁在现代交通建设中因其高强度、轻质特性、快速施工速度、良好的耐久性和抗震性能而扮演着重要角色，承载着重要的交通流量，但它们在实际应用中仍然面临诸多技术和工程挑战。例如，桥梁检测的难度较大，因为许多桥梁位于特殊环境中，如高空、水下或山区，这使得检测工作变得困难。此外，桥梁结构的复杂性，加之长期使用过程中外界环境如腐蚀、疲劳等因素的影响，均要求对其进行及时的检测和维修。尽管检测技术如结构健康监测正在发展，但目前仍处于初期阶段，需要进一步推广和创新。因此，探索现代桥梁钢结构制造技术的进展与挑战，显得尤为重要。

2. 现代桥梁钢结构制造技术的进展

从国内外文献中可以发现，近年来，随着钢材性能的提升、焊接技术的发展、自动化技术的引入，钢结构桥梁的制造效率和精度得到了显著提升。例如，现代焊接技术，如激光焊接与自动化焊接技术，显著提高了焊接质量和施工效率[2]。同时，随着数字化技术的应用，计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程(CAE)等工具在钢结构桥梁的设计和优化中发挥了重要作用。

2.1. 钢材性能的提升

随着科技的不断发展,我国钢材产量和性能均得到了显著提升。例如,2023年11月,92家重点钢铁企业的钢材产量同比增长3.59%,累计产量也实现了4.93%的同比增长。此外,我国成功研制出性能提升200%的超级钢,性能远超西方国家同类产品,对推动钢结构桥梁的应用和发展起到了至关重要的作用。现代钢材不仅要求具有较高的强度和延展性,还需要具备良好的抗腐蚀性能、耐低温性能以及优异的焊接性。特别是在海洋气候及恶劣环境等极端条件下,钢材的耐腐蚀性显得尤为重要。例如,应用于桥梁建设中的镀锌钢、涂层钢以及不锈钢等新型材料,极大地提高了桥梁的使用寿命和维护周期。

2.2. 焊接技术

现代桥梁钢结构的制造工艺得到了显著的改进,尤其是在焊接技术和装配精度方面。近年来,随着自动化和智能化技术的引入,钢结构制造的精度和效率得到了大幅提升。主要的进展包括:

现代钢结构桥梁制造中,采用了机器人焊接技术、视觉引导焊接、感知式焊接、增材制造焊接、跟踪式焊接以及激光焊接等新型焊接技术,这些技术利用自动化、机器人技术和计算机控制等先进技术,实现了焊接过程的智能化,提高了焊接效率、质量和安全性。这些技术能够提高焊接的精度、效率和稳定性,且减少了人为因素对质量的影响。

数控切割与钻孔技术:桥梁制造中,钢结构的切割与钻孔至关重要。数控切割与激光切割技术的不断进步,极大地提高了钢材切割的精度和孔位的准确性。这不仅显著提升了钢结构的制造精度,还为大规模生产创造了有利条件。

模块化生产:随着装配式桥梁的兴起,钢结构桥梁的制造越来越趋向模块化生产。模块化生产方式通过在工厂进行预制,有效降低了现场施工的难度,缩短了施工周期,并且进一步提升了结构的精度。

2.3. 自动化与数字化技术应用

随着计算机技术和信息技术的进步,数字化技术在桥梁钢结构设计与制造中得到了广泛应用。现代钢结构桥梁设计与制造,既依赖传统手工计算和图纸绘制,也借助CAD、CAE、虚拟仿真等先进技术。计算机辅助设计(CAD)技术的应用显著提升了钢结构桥梁的设计精确度和施工效率。计算机强大计算能力助力设计人员快速完成复杂结构设计,并进行优化与模拟。计算机辅助工程(CAE)技术使得桥梁设计人员能够对钢结构的力学性能进行精确分析和模拟。这种技术能够在设计阶段发现潜在的结构问题,提前采取措施,从而避免了在施工过程中的失误。建筑信息模型(BIM)技术也逐渐应用到桥梁钢结构的设计与施工中。BIM技术能够直观展示三维可视化设计方案,优化工作流程,提升协作效率,并有效减少项目错误和资源浪费。

2.4. 现代装配式技术

随着钢结构桥梁建设规模的扩大和施工要求的提升,装配式技术在现代桥梁中得到了广泛应用。装配式技术应用于钢结构桥梁,通过工厂预制与现场速装,大幅缩短工期,并减轻环境影响。工厂预制钢结构部件,确保了构件的高质量和精确度。预制钢结构构件运送至现场,借助大型吊装设备快速组装,显著提升施工效率。随着钢结构桥梁设计和制造工艺的成熟,越来越多的设计方案采用标准化的模块和构件。标准化设计有助于降低成本,提升施工便捷性与可靠性。智能化施工技术的应用,如无人机进行现场勘测和智能机器人进行焊接等,显著提升了桥梁钢结构现场施工的效率 and 安全性。例如,利用无人机进行现场勘测和监控,智能机器人进行焊接、装配等工序,减少了人工操作的风险,并提高了精度。

3. 面临的技术挑战

尽管在许多方面取得了显著进展，但钢结构桥梁的制造仍然面临许多挑战。例如，材料成本的上升和环保法规的日益严格仍然是行业面临的重要问题[3]。此外，尽管结构健康监测技术有所进展，但如何实现低成本、高效的健康监测仍然是亟待解决的问题[4]。

3.1. 材料成本与资源问题

尽管现代钢结构桥梁的制造技术取得了显著进展，但其制造成本正面临显著的挑战。环保法规趋严与钢铁生产成本上升，推动钢材价格持续攀升，直接影响桥梁制造成本。例如，根据行业分析，钢价上涨 20% 可能会使得桥梁建设项目的直接成本增加 100 万元，正如一个中型商业建筑项目在钢价上涨 20% 后，其采购成本增加 100 万元的情况所示。这种成本压力迫使建筑企业重新评估预算，寻找额外资金来源，或调整项目规模和规格，以适应成本的增加[5]。此外，钢材生产消耗大量资源，既增加制造成本，又可能对环境构成负担。因此，如何在确保结构强度和性能的同时，有效降低材料成本，成为现代钢结构桥梁制造领域亟待解决的一大挑战。

3.2. 焊接质量控制

尽管自动化焊接技术提高了焊接精度和效率，但在复杂施工环境下(如极端天气或高空施工)，如何实现焊接缺陷的早期检测与质量控制仍然是一个难题。焊接过程中容易出现缺陷，如气孔、裂纹等，这些缺陷不仅影响结构的承载能力，还可能导致桥梁的早期损坏[6]。因此，如何在复杂的施工环境中实现焊接质量的精确控制，依然是一个亟待解决的问题。焊接过程中，容易出现焊接缺陷，如气孔、裂纹等，这些缺陷不仅影响结构的承载能力，还可能导致桥梁的早期损坏。因此，如何在复杂的施工环境中实现焊接质量的精确控制，仍然是一个亟待解决的问题。

3.3. 结构健康监测

钢结构桥梁长时间暴露于风雨、腐蚀等恶劣环境中，如何实施高效且成本可控的桥梁健康监测仍是一个挑战。尽管传感器技术、无人机航拍和人工智能技术取得了较大进展，但如何整合这些技术有效整合，进行实时监测和预警，并同时优化成本，仍需进一步突破。

3.4. 环境适应性与可持续性

随着环保法规的日益严格以及钢铁生产成本的上升，钢结构桥梁在制造过程中，不仅要确保结构强度和性能，还要尽量减少对环境的影响，如降低能耗、减少废物排放等。钢结构桥梁的生产过程中消耗大量能源，且其对环境的负面影响不容忽视。另外，钢材的回收与再利用效率仍需进一步提高，亟需深入探索与优化[7]。因此，探索如何设计和生产环境友好、可持续发展的钢结构桥梁，已成为技术创新的重要方向。

4. 具体技术路线与实施方案

4.1. 技术路线

阶段一(1~3 年): 以高性能钢材的研发与应用为基础，推动钢结构桥梁的绿色环保生产。此阶段重点是研发新型钢材并测试其在极端环境下的适用性。

阶段二(4~6 年): 实现钢结构桥梁的智能制造与自动化。主要通过引入机器人焊接、自动化切割和数字化设计等技术，提升生产效率和精度。

阶段三(7~10 年): 推广结构健康监测技术的应用, 结合人工智能、大数据等技术, 对桥梁进行全面健康管理。并实现钢结构桥梁生命周期管理, 确保桥梁长期安全使用。

4.2. 实施方案

新材料研究与开发: 与钢铁研究院、材料科学研究机构合作, 加大对高强度、耐腐蚀钢材的研发力度。通过国家重点科研项目支持, 推动新型钢材的规模化生产。

自动化生产线建设: 与自动化设备供应商合作, 建设数字化、自动化的钢结构桥梁生产线。包括机器人焊接、数控切割等设备的引入, 提升生产效率和质量。

智能监测系统的部署: 建设基于物联网(IoT)和人工智能(AI)的桥梁健康监测平台, 实现 24 小时实时监控与数据分析, 提供桥梁健康状态的预警。

5. 未来发展方向

随着科技的不断进步, 钢结构桥梁的制造技术将继续向智能化、绿色化和高效化方向发展。随着对高强度、耐腐蚀、抗疲劳等性能要求的不断提高, 新型高性能钢材的研发将成为钢结构桥梁制造的重点。优化钢材成分和生产工艺后, 钢材综合性能将得到显著提升, 增强钢结构桥梁的耐久性和安全性。

展望未来, 钢结构桥梁制造将更加倚重智能化技术, 如人工智能、大数据分析及物联网技术等, 通过智能化设备对钢结构桥梁进行全程监控和管理, 从而提高制造效率和施工安全。

在绿色制造与可持续发展方面, 钢结构桥梁的绿色制造将成为未来发展的重要趋势。通过使用环保型钢材、减少碳排放、提高材料回收率等方式, 钢结构桥梁将实现可持续发展。

6. 结论

随着我国桥梁钢结构技术的不断进步, 包括材料、工艺、设计和施工等方面的显著提升, 钢结构桥梁的应用已经达到了世界先进水平, 并在实际建设中得到了广泛的应用。尽管技术不断进步, 钢结构桥梁的制造过程仍需应对包括材料成本控制、焊接质量的严格监控以及结构健康的有效监测等挑战[8]。随着科技的不断进步, 智能化、绿色化和高效化的钢结构桥梁制造技术正逐渐成为行业发展的主流趋势。这些技术不仅提升了桥梁的质量与安全性, 还符合了国家对交通基础设施建设的鼓励政策和节能环保的更高要求。

参考文献

- [1] 谢曙辉. 某双桥面钢桁架拱梁组合体系施工监控研究[J]. 山西建筑, 2023, 49(4):147-150.
- [2] 刘世忠, 王方旭, 朱立龙, 等. 书夹型钢-混组合结构在桥梁加宽中的应用研究[J]. 桥梁建设, 2024, 54(4): 21-27.
- [3] Smith, J., Zhang, L. and Wang, Q. (2023) Advances in High-Performance Steel for Modern Steel Bridge Structures. *Journal of Constructional Steel Research*, **180**, 101-115.
- [4] 李亮. 钢结构桥梁中的智能化制造与绿色可持续技术应用研究[J]. 钢结构, 2023(12): 45-50.
- [5] 陆仕诚. 钢结构桥梁施工中的焊接技术研究与优化[J]. 汽车周刊, 2024(11): 249-251.
- [6] 钱芳荣. 智能化无损检测技术在钢结构桥梁中的应用[J]. 中国金属通报, 2024(15): 86-88.
- [7] 聂建国. 结构创新与土木工程的可持续发展[J]. 中国公路, 2017(1): 66-68.
- [8] Brown, T. and Davis, M. (2022) Innovations in Welding Technology for Steel Bridges. *Engineering Structures*, **245**, 134-142.