

基于地铁车辆制造的焊接与粘接技术优劣比较研究

邓超

株洲九方装备股份有限公司，湖南省株洲市，412001；

摘要：随着城市轨道交通的快速发展，地铁车辆的制造对连接技术提出了更高的要求。本文深入分析了焊接与粘接技术在地铁车辆制造中的应用与发展趋势，探讨了两种技术的优缺点及其复合连接工艺的潜力。研究表明，焊接技术在承载部件和高强度连接中具有明显优势，而粘接技术在轻量化和生产效率方面表现突出。结合焊接与粘接的复合连接工艺，不仅可以优化结构强度，还能提高制造效率并降低生产成本。展望未来，随着激光焊接、智能监控技术和新型高性能粘接材料的发展，焊接与粘接技术将在地铁车辆制造中持续创新和完善，推动行业向更高效、绿色和智能化的方向发展。

关键词：地铁车辆；焊接技术；粘接技术；复合连接工艺；智能制造；激光焊接

DOI：10.69979/3041-0673.25.08.032

引言

随着城市轨道交通需求的持续增长，地铁车辆的轻量化设计成为提高运输效率、节能减排和降低运营成本的关键技术之一。近年来，地铁车辆制造逐步向高强度、低自重、环保节能方向发展，尤其是在车体结构材料和连接技术方面。轻量化不仅能提高载客量和动力效率，还对车辆的耐久性和安全性提出了更高要求。在此背景下，焊接与粘接技术在地铁车辆制造中发挥着重要作用。焊接技术因其强大的连接强度和适应性，广泛应用于车身和车门等关键部件，而粘接技术则因其对异种材料的适应性及低热变形特性，在车内饰件和玻璃安装等非承重部位得到应用。本文将比较焊接与粘接技术的优劣，并探讨其在地铁车辆制造中的应用与未来发展方向，旨在为制造工艺优化提供理论支持和实践指导。

1 焊接与粘接技术在地铁车辆制造中的应用现状

1.1 焊接技术概述

焊接技术广泛应用于地铁车辆的金属结构连接，常见方法包括 MIG（气体金属电弧焊）、TIG（钨极氩弧焊）和激光焊接。MIG 焊接适用于中厚板的快速连接，TIG 焊接具有较高精度，适合对焊缝质量要求高的部件。激光焊接因其高速度和精度，广泛应用于精密部件和车体

外壳的连接。焊接材料的选择通常基于部件的要求，常用材料包括低合金钢、不锈钢和铝合金，这些材料具备较强的抗腐蚀性和耐高温性能，能满足地铁车辆的使用需求。

1.2 粘接技术概述

粘接技术在地铁车辆制造中逐渐得到应用，特别是在车窗、内饰和车门等部件的连接。常用粘接材料包括环氧胶、聚氨酯胶和丙烯酸胶等。环氧胶因其高粘接强度和耐高温性能，广泛应用于金属和复合材料连接。聚氨酯胶则因其抗冲击性和柔韧性，常用于车门框架和表面装饰部件。粘接技术能够减少高温对材料的影响，特别适用于异种材料连接，如金属与玻璃、复合材料之间。随着粘接材料性能提升，粘接技术在地铁车辆轻量化设计中越来越重要。

1.3 两种技术在地铁车辆不同部位的实际应用情况

焊接与粘接技术各有优势，且根据部件需求灵活应用。焊接主要应用于车体框架、底盘和连接梁等承载部件，确保结构强度与安全性。粘接技术则广泛应用于内饰、车窗、车门等非承载部件，减少热变形并减轻重量，提升车体舒适性和环保性^[1]。表 1 总结了焊接与粘接技术在地铁车辆不同部位的应用情况：

表 1 焊接与粘接技术在地铁车辆不同部位的应用对比

应用部位	焊接技术应用	粘接技术应用
车体框架	采用 MIG 焊、TIG 焊，提供高强度连接	不适用
底盘	使用 MIG 焊和激光焊接技术，确保抗冲击性能	不适用
车窗和内饰	TIG 焊接完成框架连接	环氧胶、聚氨酯胶等用于玻璃与金属连接
车门框架	TIG 焊接或激光焊接，确保结构强度	聚氨酯胶用于车门与框架、玻璃的粘接
复合材料连接	部分使用焊接技术，但局限性较大	粘接技术广泛应用于复合材料与金属、塑料等异种材料连接

如表格所示,焊接技术适用于承载部件,确保连接的强度和稳定性;而粘接技术则在非承载部件应用中具有显著优势,特别是在异种材料连接和轻量化设计方面。两者相辅相成,满足地铁车辆在性能、成本和工艺方面的多重需求。

2 焊接与粘接技术的性能比较分析

2.1 力学性能比较

焊接技术通常提供更高的接头强度,能够承受更大的拉伸和剪切力,适用于高负载部件。焊接接头的连续性确保了高强度的连接,但在薄壁结构中可能存在应力集中,导致疲劳损伤。粘接技术的接头强度较低,但在异种材料连接中表现良好,尤其是高性能胶粘剂可提供可接受的强度。焊接技术的疲劳寿命较长,尤其在交变负荷下表现优异,而粘接技术受环境影响较大,疲劳寿命短^[2]。动态冲击响应方面,焊接能够有效分散冲击力,粘接则较为敏感,特别在高强度冲击下容易失效。

2.2 制造与工艺性比较

焊接工艺要求高,特别是高精度焊接,如 TIG 和激光焊接,需高技术水平和特殊设备,且焊接过程可能引起材料热变形。粘接工艺施工便捷,无需高温设备,适合大规模生产和自动化。然而,粘接接头的均匀性和可靠性较难控制,尤其在表面处理不当时,强度会降低。焊接技术工艺一致性高,适合标准化生产,而粘接技术的工艺稳定性较差,特别在极端环境下容易受到影响。

2.3 环境适应性与耐久性比较

焊接技术在耐高温、耐湿热和耐腐蚀性方面优于粘接,焊接接头能承受高温工作环境,且抗腐蚀性强。但在高负载和极端环境中,焊接接头可能因应力集中出现疲劳裂纹^[3]。粘接技术在耐腐蚀性上也有优势,尤其是高性能粘接材料,但其耐高温性能较差,通常不适用于超过 120℃ 的高温环境。粘接接头在长期高负荷或高温环境下的使用寿命较短,维护频次较高。

2.4 质量控制与检测手段

焊接接头的质量控制依赖于无损检测技术,如超声波、X 射线等,这些方法能够有效检测出气孔、裂纹等缺陷,保证结构的安全性。相比之下,粘接接头的检测较为困难,通常依赖视觉检查和手工测试,难以实时发现内部缺陷^[4]。因此,焊接技术的质量检测手段更为完善,而粘接技术的质量控制依赖于胶粘剂均匀性和表面处理的稳定性。

2.5 成本与经济性比较

焊接技术的初期成本较高,尤其是需要高精度设备

和技术人员的情况下。然而,焊接接头的长期使用寿命和较低的维护需求使得焊接技术在长期经济性上更具优势。粘接技术在材料和施工成本方面较低,且无需特殊设备,适合短期应用。然而,粘接接头在高负荷或恶劣环境下的失效可能导致频繁维修,增加了长期维护成本^[5]。整体而言,焊接技术在长周期使用中的经济效益高于粘接技术。

3 典型案例分析:某型号地铁车辆连接技术选择对比

3.1 项目背景与技术选型目标

本项目旨在评估某型号地铁车辆的连接技术,以优化结构强度、减轻重量并提高制造效率。考虑到高强度、轻量化及高生产效率的需求,焊接与粘接技术被作为主要连接方案进行比较。技术选型的目标是选择一种既能保证车辆性能,又能有效降低制造成本和生产周期的连接工艺。

3.2 焊接与粘接方案实施效果对比

焊接方案主要采用 MIG 和 TIG 焊接技术,应用于车体框架、底盘等承载部件,确保接头的高强度和良好的抗疲劳性。焊接接头能够有效承受车辆运行中的冲击和振动,但焊接过程中高温效应可能导致局部热变形,需后期修整。相较而言,粘接技术主要应用于车窗、内饰板等非承载部件,使用环氧胶和聚氨酯胶,减轻了车体重量,并提供良好的密封性^[6]。尽管粘接技术在轻量化方面表现突出,但其在高温和湿热环境下的耐久性较差,长时间使用后可能出现老化或脱落问题。

3.3 数据分析与技术选型优化建议

通过对焊接与粘接技术的对比分析,在结构性能方面,焊接技术具有明显优势,尤其在承载部件和高强度要求的部位,焊接接头能提供较强的抗疲劳性和承载能力。粘接技术则在轻量化和生产效率方面具有优势,施工便捷且成本较低。然而,在长期使用中,焊接技术因其耐久性和稳定性更具经济效益,而粘接技术的长期维护成本较高^[7]。因此,建议采用焊接与粘接相结合的方案。承载部件使用焊接技术以确保强度,非承载部件则采用粘接技术以优化生产效率,并通过改进粘接材料和工艺提升其耐久性,确保车辆在各种环境下的长期可靠性。

4 基于发展趋势的技术优化与融合方向

4.1 先进焊接技术的集成化发展

激光焊接因其高精度、快速焊接和小热影响区,已经成为地铁车辆制造的重要工艺。未来,激光焊接将与

智能监控系统融合,实时监测并自动调整焊接参数,确保焊接质量稳定,减少人为误差^[8]。这种集成化发展不仅能提高生产效率,还能优化焊接过程的精确度,并降低能耗。

4.2 新型高性能粘接材料的研发应用

传统粘接材料在高温、湿热和强力承载环境中的性能存在局限。纳米增强胶作为一种新型材料,通过引入纳米碳管、纳米硅等,提升了粘接强度、热稳定性和抗老化性能。随着纳米技术的发展,纳米增强胶将广泛应用于地铁车辆制造中,解决粘接材料在极端环境下的性能瓶颈,提供更加稳定和持久的连接效果^[9]。

4.3 焊接与粘接的复合连接工艺探讨

焊接与粘接技术的复合应用将为复杂结构的制造

提供新的解决方案。焊接适用于承载部件,提供高强度连接,而粘接技术在非承载部件中有效减轻重量并提高生产效率。复合连接工艺能够结合两者优势,提升结构强度和生產灵活性,特别是在异种材料和复杂部件连接中,克服单一连接技术的局限性。

4.4 自动化与智能制造在两种技术中的融合应用前景

自动化与智能制造的不断发展将为焊接与粘接技术提供强大支持。自动化焊接系统能够提高焊接精度和稳定性,智能粘接技术则通过传感器监控材料的均匀性,优化粘接过程。未来,这两种技术的深度融合将推动生产效率、质量稳定性以及成本控制的优化,促进地铁车辆制造向更高效、精准的方向发展^[10]。表2总结了焊接与粘接技术的发展趋势与融合应用:

表 2 焊接与粘接技术发展趋势对比

技术方向	发展趋势	关键优势	持续改进方向
激光焊接与智能监控	高精度焊接,集成智能监控系统	提高焊接精度,优化生产效率	强化实时数据反馈与自适应控制系统
纳米增强胶	新型高性能粘接材料开发	提高粘接强度,耐高温、抗湿热	增强在极端环境下的耐久性与粘接强度
焊接与粘接复合连接	结合焊接与粘接技术,优化结构与轻量化设计	提升连接强度,降低重量	增加异种材料连接的适应性,优化复合工艺
自动化与智能制造	融合自动化和智能制造技术,提升精度和效率	提高生产效率,确保质量稳定性	完善生产数据的实时反馈与动态调整系统

表格总结了不同技术方向的优势、发展趋势和改进方向,有助于读者理解焊接与粘接技术的优化路径及其在地铁车辆制造中的应用前景。

5 结论与展望

本研究深入分析了焊接与粘接技术在地铁车辆制造中的应用,指出焊接技术在承载部件和高强度连接中表现优越,而粘接技术则在轻量化和生产效率方面具有明显优势。结合使用两者的复合连接工艺能够优化结构强度和制造效率,同时降低成本。随着激光焊接、智能监控技术、纳米增强胶的研发,以及自动化与智能制造的推进,焊接与粘接技术将不断改进,为地铁车辆制造提供更高效、更精准的解决方案。展望未来,焊接与粘接技术将朝着智能化、自动化方向发展,进一步提高工艺精度和生产可靠性。复合连接工艺将在复杂结构和异种材料连接中发挥更大作用。随着新材料的应用和智能制造技术的普及,地铁车辆制造的质量和效率将进一步提升,推动行业向高效、绿色、智能化的方向发展。

参考文献

[1] 徐良,杨海峰,崔辉,等. 轨道客车高功率激光焊接关键技术及应用[J]. 长春工业大学学报,2022,43(Z1):

382-386.

[2] 刘本末. 地铁车辆车体强度仿真分析与优化设计[D]. 大连交通大学,2023.

[3] 牛国营. 地铁车辆关键技术现状与发展趋势[J]. 铁路采购与物流,2022,17(11):55-58.

[4] 王宏伟,苏强,沈旭奎,等. 一种新型铝合金地铁车辆车体底架焊接结构设计[J]. 铁道车辆,2024,62(03):76-79.

[5] 李岐峰,张旭. 基于等效结构应力的地铁车辆焊接构架疲劳寿命分析[J]. 电力机车与城轨车辆,2022,45(01):35-39.

[6] 张振江,姜宝建. 地铁车辆驻厂建造过程中的若干问题分析[J]. 设备监理,2022,(02):46-50.

[7] 徐良,杨海峰,崔辉,等. 轨道客车高功率激光焊接关键技术及应用[J]. 长春工业大学学报,2022,43(Z1):382-386.

[8] 姜宝建. 5M1E 分析法在地铁车辆生产质量控制中的应用[J]. 设备监理,2021,(07):27-30.

[9] 张晨烁. 轮对多边形对某型地铁车焊接构架疲劳影响分析[D]. 大连交通大学,2024.

[10] 王晓玲,陈国帼,芦红霞. 地铁车辆柔性连接加固探讨[J]. 机车车辆工艺,2023,(01):33-35.