

汽车散热器钎焊工艺优化研究及应用

廖衡山

广东 清远 511600

DOI:10.61369/ME.2025110003

摘 要： 本文围绕汽车散热器钎焊工艺展开多方面研究，包括材料物化特性、工艺参数模型、结构优化、自动化产线等，开发了智能控制系统、数字孪生模型及能效优化系统，应用于乘用车、商用汽车散热器。成果经 10 万次热循环测试、极端工况验证等，实现环保与高效生产，为工艺优化及行业发展提供依据。

关 键 词： 汽车散热器；钎焊工艺；优化

Research and Application of Optimization of Brazing Process for Automotive Radiators

Liao Hengshan

Qingyuan, Guangdong 511600

Abstract： This article focuses on the brazing process of automotive radiators from various aspects, including material physical and chemical properties, process parameter models, structural optimization, automated production lines, etc. Intelligent control systems, digital twin models, and energy efficiency optimization systems have been developed and applied to passenger and commercial vehicle radiators. The results have been tested through 100000 thermal cycles and verified under extreme working conditions, achieving environmental protection and efficient production, providing a basis for process optimization and industry development.

Keywords： car radiator; brazing process; optimize

引言

随着《新能源汽车产业发展规划（2021—2035 年）》在 2020 年 11 月颁布，汽车行业尤其是新能源汽车领域发展迅速，对汽车散热器钎焊工艺提出更高要求。研究铝合金及复合材料物化特性、构建三维工艺参数模型等对优化钎焊工艺意义重大，从结构优化、自动化产线到智能控制等多方面的探索，有助于提升散热器性能与生产效率。此外，开发环保钎料、建立碳足迹模型等顺应绿色制造趋势。对该工艺的研究成果，将推动汽车散热器智能制造向更高自动化、智能化迈进，提升行业整体水平与竞争力，符合产业可持续发展需求。

一、汽车散热器钎焊工艺基础研究

（一）钎焊材料特性分析

在汽车散热器钎焊工艺中，研究铝合金及复合材料的物化特性至关重要。铝合金因其良好的导热性、耐腐蚀性和相对较低的密度，成为汽车散热器的常用材料。其在钎焊过程中的熔点、热膨胀系数等物化特性，直接影响钎焊质量。复合材料在汽车散热器中的应用也逐渐增多，它结合了多种材料的优势，具备独特的性能。通过能谱分析可深入探究材料配伍性对焊缝质量的影响机制。不同钎焊材料间的化学组成差异，会在焊缝处产生不同的冶金反应，进而影响焊缝的强度、致密性等质量指标^[1]。了解这些钎焊材料特性，有助于为优化汽车散热器钎焊工艺提供理论依据。

（二）钎焊工艺参数体系

在汽车散热器钎焊工艺中，构建温度场 - 时间场耦合工艺参数模型至关重要。钎焊属于依靠毛细作用实现填充的无压连接工艺，因此压力因素在该过程中并不起主要作用。温度对钎料的熔化与铺展起决定性作用，合适的加热温度能确保钎料充分填充焊缝间隙；若温度过低，钎料无法完全熔化，易导致焊缝未焊透等缺陷；若温度过高，则可能引起母材过烧，影响散热器的力学性能^[2]。时间参数与温度密切相关，适当的保温时间有助于钎料与母材充分反应、形成良好的冶金结合，但过长的保温时间会增加生产能耗并可能导致变形。通过建立温度 - 时间参数的耦合模型，对两者交互作用及其对焊缝气孔率与力学性能的影响规律进行定量分析，可为汽车散热器钎焊工艺的优化提供科学依据，从

而提升焊接质量与整体性能。

二、生产工艺改进路径研究

（一）散热器结构优化设计

在汽车散热器结构优化设计方面，可基于有限元热力学仿真优化散热片排布方式。通过有限元分析，精准模拟散热器内部的热传递过程，了解不同散热片排布对散热效率的影响，从而找到最优的散热片排列布局，提高散热性能^[3]。同时，开发新型翅片-管板连接结构对提升钎焊面接触质量至关重要。传统的连接结构可能存在接触不充分、钎焊面积小等问题，新型结构旨在增大钎焊面接触面积，改善接触的紧密程度，使得钎料能够更好地填充连接部位，增强钎焊接头的强度和密封性，进而提升散热器整体的性能和可靠性，确保在汽车运行过程中高效散热，满足汽车对散热器性能的严格要求。

（二）自动化产线工艺优化

在汽车散热器钎焊自动化产线工艺优化中，研究多工位协同作业模式至关重要。各工位紧密衔接，能够有效提升整体生产效率，减少生产时间浪费。例如，通过精确计算每个工位的操作时间与衔接间隔，实现物料流畅传递，避免出现等待时间过长的情况。同时，优化焊剂自动喷涂系统与连续式加热炉的温度场匹配控制策略也不容忽视。焊剂喷涂的均匀性和焊剂比例搭配直接影响钎焊质量，需根据散热器不同部位及材质特性，精准调控喷涂参数。而连续式加热炉的温度分布对钎焊效果起着决定性作用，要深入分析其热传递规律，结合焊剂特性，优化温度控制，确保在不同工位的钎焊过程中，温度与焊剂实现最佳匹配，从而提高钎焊质量，满足汽车散热器生产的高标准要求^[4]。

三、自动化生产技术研究

（一）机器人钎焊系统集成

1. 六轴焊接机器人系统（六轴焊接机器人目前无法应用在钎焊上，大多应用在全铝散热器水室与芯体链接的焊接，行业里讲的钎焊指的是连续式隧道炉，通过高温氮气保护的焊接过程）

六轴焊接机器人系统目前主要应用于全铝汽车散热器水室与芯体连接等结构焊接环节，而非钎焊工艺本身。传统意义上的散热器钎焊多采用连续式隧道炉，在高温氮气保护环境下实现钎料熔化与接合过程^[5]。六轴焊接机器人凭借六个可活动关节，具备高度灵活的运动能力，可对水室与芯体焊缝位置进行精准操作。通过引入基于视觉定位的自适应轨迹规划算法，机器人能够自动识别焊缝位置与姿态，实现稳定、连续的焊接过程。这一系统显著提高了全铝散热器结构焊接的精度与一致性，减少人工操作误差，提升生产自动化水平。虽然六轴机器人尚未直接应用于隧道炉钎焊过程，但其在前后段焊接及装配环节的应用，为散热器制造的智能化、柔性化发展提供了重要支撑。与此同时，为进一步提升隧道炉钎焊工艺的稳定性与可控性，智能控制系统的开发成为关键环节。

2. 智能控制系统开发

智能控制系统开发旨在构建多传感数据融合的闭环控制系统，达成焊接质量在线检测与工艺参数动态补偿。系统运用多种传感器，如温度传感器、视觉传感器等，实时采集钎焊过程中的温度、焊缝形状等关键数据^[6]。通过先进的数据融合算法，将这些不同类型的数据进行高效整合，精准分析焊接状态。一旦检测到焊接质量偏差，系统迅速响应，依据预设的补偿策略，动态调整焊接电流、焊接时间等工艺参数，确保钎焊过程始终处于最佳状态。该智能控制系统不仅能及时发现并纠正焊接缺陷，提升产品质量稳定性，还可适应不同型号汽车散热器的钎焊需求，为汽车散热器钎焊工艺的自动化、智能化生产提供有力支撑。

（二）智能化生产系统构建

1. 数字孪生技术应用

在汽车散热器钎焊工艺优化研究及应用中，数字孪生技术应用关键在于建立钎焊工艺数字孪生模型。此模型通过集成各种传感器数据、工艺参数以及物理模型，能够高精度地模拟实际钎焊过程。借助该模型，实现物理生产系统与虚拟模型的实时交互。一方面，物理系统的实时运行数据被反馈至虚拟模型，让虚拟模型依据实际情况进行动态更新；另一方面，虚拟模型通过模拟分析不同工艺参数调整的结果，将优化策略回传至物理生产系统，实现优化迭代。如此一来，可在虚拟环境中预先评估钎焊工艺的改进方案，提前发现潜在问题并优化，大幅提升钎焊工艺的质量与效率，为汽车散热器钎焊工艺的优化提供有力支持^[7]。

2. 能效优化系统开发

在汽车散热器钎焊工艺的能效优化系统开发中，着重研究生产能耗智能监控技术。通过在生产设备关键部位安装高精度传感器，实时收集各类能耗数据，如电力、燃气等能源的消耗情况。基于此，开发基于大数据的能源利用优化算法。借助大数据分析技术，深度挖掘能耗数据背后的规律与潜在信息，全面分析生产流程中各环节的能源利用效率。通过优化算法，对能源分配进行精准调控，实现能源的高效利用，从而有效降低单件汽车散热器的生产能耗^[8]。这不仅能提升企业的经济效益，还能响应节能减排的环保要求，为汽车散热器钎焊工艺的可持续发展提供有力支持。

四、工程应用研究

（一）汽车制造行业应用

1. 乘用车散热器应用

在乘用车散热器应用方面，随着新能源汽车的快速发展，对散热器的性能要求愈发严苛。通过优化后的汽车散热器钎焊工艺，制造出的乘用车散热器需在新能源车热管理系统中进行应用验证。其中，至关重要的一项是开展10万次热循环耐久性测试评估。这一测试模拟乘用车在各种复杂工况下散热器所面临的热循环情况，以此检验散热器经优化钎焊工艺制造后的可靠性与稳定性。若散热器能通过此高次数的热循环耐久性测试，说明优化的钎焊工艺在乘用车散热器制造上切实有效，可提升其在实际使用中的性能表现，为乘用车的高效热管理提供有力保障^[9]。

2. 商用车重载应用

在汽车制造行业的商用车重载应用中，开发耐高压高温的特种钎料对长途货运车辆散热系统意义重大。长途货运车辆行驶工况极端，散热器需承受高压高温，普通钎料难以满足要求。为此开发的特种钎料，通过在极端工况下的验证，能有效提升散热器性能。在高温环境中，特种钎料可确保钎焊接头的稳定性，防止因温度过高导致钎料熔化或接头失效；在高压条件下，能保证散热器密封良好，避免冷却液泄漏。经极端工况验证后，该特种钎料应用于商用车重载散热系统，显著提升了系统可靠性与耐久性，为长途货运车辆安全稳定运行提供保障^[10]。

（二）绿色制造效益分析

1. 环保型钎料研究

开发的无镉无铅钎料成功通过 ROHS 认证，这一成果意义重大。该钎料在汽车散热器钎焊工艺中的应用，实现了有害物质排放降低 85%，大幅减少了对环境的污染。从可持续发展角度来看，符合绿色制造理念，有助于缓解生态压力。这种环保型钎料不仅在环保方面表现出色，在实际钎焊过程中，还展现出良好的工艺性能，能确保钎焊接头的质量和可靠性，满足汽车散热器对连接强度等方面的要求。其应用既顺应了环保法规的要求，又保障了汽车散热器的生产质量，为汽车制造行业在绿色制造道路上迈进提供了有力支持，为实现经济效益与环境效益的双赢奠定了基础。

2. 工艺碳排放核算

建立汽车散热器钎焊工艺全生命周期碳足迹模型，以此精准核算工艺在各个阶段的碳排放。模型涵盖原材料获取、生产制造、产品使用及报废处理等环节。通过详细的数据收集与分析，明确各环节能源消耗、材料使用等参数与碳排放的关系。将优化前的钎焊工艺代入模型，计算出其碳排放强度。接着，把优化后的工艺参数输入模型，再次核算碳排放强度。通过对比两者，直观呈现优化前后工艺的碳排放强度变化。清晰了解工艺优化在降低碳排放方面的成效，为汽车散热器钎焊工艺朝着绿色制造方向发展提供量化依据，助力企业在提升生产效率的同时，有效减少碳排放，实现经济效益与环境效益的双赢。

（三）生产效能验证

1. 效率提升测试

在汽车散热器钎焊工艺优化的工程应用研究中，效率提升测

试是关键环节。通过引入 6 西格玛方法对产线进行优化后，对效率提升效果展开实测。在测试过程中，设定严格且统一的生产条件与标准流程，以确保数据的准确性与可靠性。经测试发现，优化后的工艺使得单班产能显著提升，实测结果显示单班产能提升了 40%。这一数据充分表明，经过优化的钎焊工艺在实际生产中，能够有效缩短生产周期，极大提高单位时间内的产量，有力提升了生产效率，为汽车散热器的高效生产提供了坚实的工艺保障。

2. 质量一致性验证

在质量一致性验证方面，通过 SPC 控制图法对 8 个月的生产数据进行深入分析。这一分析有力地证明了优化后的汽车散热器钎焊工艺在质量一致性上取得显著成效。产品不良率从之前较高水平大幅降低至 0.12%，这一数据直观地反映出产品质量的高度一致性提升。这意味着在大规模生产过程中，每一个汽车散热器产品都能较为稳定地达到较高质量标准，减少了因质量波动导致的次品出现。优化后的钎焊工艺在确保质量一致性上发挥了关键作用，使得汽车散热器在生产环节能以稳定且可靠的质量供应市场，满足汽车制造对于零部件质量稳定性的严苛要求。

五、总结

通过对汽车散热器钎焊工艺的深入研究，在钎焊工艺参数优化方面，实现了更精准的温度、时间等参数控制，有效提升了钎焊接头质量与散热器性能。自动化生产系统创新成果显著，自动化设备的引入大幅提高生产效率与产品一致性。绿色制造技术研发，既降低了能耗，又减少了对环境的负面影响。基于这些研究成果，汽车散热器智能制造技术应朝着更高自动化、智能化方向发展，利用大数据与人工智能实现生产过程的智能决策与优化。同时，行业应加强技术交流与合作，制定统一标准，加速先进钎焊工艺的推广应用，提升整个汽车散热器行业的制造水平与市场竞争力，推动产业可持续发展。

参考文献

- [1] 吕广贤. 基于机器视觉的散热器钎焊缺陷检测系统研发 [D]. 天津工业大学, 2022.
- [2] 同琦彤. 某综合传动装置油管断裂分析及钎焊工艺优化研究 [D]. 湘潭大学, 2023.
- [3] 陈惠泽. TiAl 与 Ti₂AlNb 钎焊工艺及机理研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [4] 刘明超. 锯片用异种材质 Cu 基钎焊工艺优化的研究 [D]. 青岛科技大学, 2023.
- [5] 张建源. 陶瓷-金属钎焊用低银钎料及钎焊工艺研究 [D]. 浙江科技学院, 2022.
- [6] 马琳博, 王嘉琳. 硬质合金钎焊工艺分析 [J]. 冶金与材料, 2021, 41(1): 185-186.
- [7] 李丹丹, 李俊彦, 温庆红, 等. 钎焊工艺对 LQ3 钎焊铝合金板材显微组织的影响 [J]. 铝加工, 2021(6): 22-26, 30.
- [8] 王臻华. 一种整车环境散热器性能检测方法及其模型 [J]. 汽车实用技术, 2021, 46(7): 104-106.
- [9] 郭松. 某型号皮卡汽车散热器优化设计 [J]. 现代机械, 2024(2): 46-49.
- [10] 陈彝, 马顺, 熊勇, 等. 铝合金散热器真空钎焊及热处理工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2023, 52(17): 103-109.