

# 车身轻量化设计中高强度钢与铝合金混合连接结构的疲劳性能分析

洪吉发, 李亚蕾

江铃汽车股份有限公司, 江西 南昌 330000

**摘要：** 本文研究了在轻量化车辆车身设计中使用高强度钢和铝合金的混合连接结构的疲劳性能。通过综合文献回顾和实验测试，我们分析了这种混合材料连接的优势和挑战，并探讨了其长期疲劳性能。研究应用了多种研究方法，包括材料疲劳试验和有限元分析，确定了影响疲劳性能的关键因素。实验结果表明，妥善的连接设计和表面处理能够显著提升结构的疲劳寿命。此外，本文提出了一些改善建议，如优化连接几何形状和采用先进的连接工艺，以进一步提高结构的耐久性。研究结果不仅为混合材料连接的设计提供了新的思路，也有助于推动轻量化车辆的未来发展。

**关键词：** 高强度钢；铝合金；轻量化车辆；混合连接结构；疲劳性能；有限元分析；耐久性

## Fatigue Performance Analysis of Mixed Joint Structure of High Strength Steel and Aluminum Alloy in Lightweight Design of Car Body

Hong Jifa, Li Yalei

Jiangling Automobile Co., Ltd. Nanchang, Jiangxi 330000

**Abstract：** This paper investigates the fatigue performance of hybrid connection structures using high-strength steel and aluminum alloy in lightweight vehicle body design. Through an extensive literature review and experimental tests, we evaluate the advantages and challenges of these hybrid material connections and explore their long-term fatigue performance. Various research methods, including material fatigue tests and finite element analysis, were employed to identify key factors affecting fatigue performance. The experimental results indicate that adequate connection design and surface treatments can significantly enhance the fatigue life of the structure. Moreover, the paper proposes improvement suggestions, such as optimizing connection geometry and adopting advanced joining techniques to further improve structural durability. The findings not only provide new insights into hybrid material connection design but also facilitate the future development of lightweight vehicles.

**Keywords：** high-strength steel; aluminum alloy; lightweight vehicles; hybrid connection structure; fatigue performance; finite element analysis; durability

## 引言

在当今汽车工业中，车身轻量化设计已经成为提高燃油效率、降低排放和提升车辆性能的关键策略之一。随着全球对环保和能源效率要求的不断提高，汽车制造商正在积极寻求各种轻量化材料和技术，以满足日益严格的排放标准和消费者对于高性能汽车的需求。在这些材料中，高强度钢和铝合金因其各自的优势，成为轻量化车身设计中最具潜力的选择。

高强度钢因其优异的强度和韧性，在车身结构的关键部位得到了广泛的应用。它不仅能够承受高负荷，而且在碰撞安全方面表现出色。然而，钢材的高密度限制了其在整体车身轻量化方面的应用潜力。

## 一、文献综述

轻量化设计是提高汽车性能、降低燃油消耗和减少排放的重要途径之一。在近年的研究与应用中，车身轻量化设计的趋势愈发明显，成为汽车制造业关注的核心问题之一。为了实现轻量

化，材料的选择与结构设计成了突破的关键。

### （一）车身轻量化设计现状

传统的汽车车身主要采用普通钢材作为制造材料，这种材料具有良好的成本效益和机械性能。然而，为了应对日益严格的环保要求，仅继续使用传统钢材难以实现显著的轻量化效果。因

作者简介：洪吉发（1987.09-），男，汉族，江西省南昌市人，大学本科，中级，研究方向：汽车设计、汽车产品研发或者汽车零部件等，身份证号：150429198709132910，邮箱：943283299@qq.com。

此,越来越多的制造商开始考虑高强度钢和铝合金等轻量化材料的混合使用。

高强度钢具有优异的强度和韧性,是提升车身结构安全性的理想选择。其抗拉强度通常可以达到600 MPa以上,甚至超过1000 MPa,足以抵御复杂负荷的作用。相比之下,铝合金的密度仅为钢的三分之一左右,虽然其强度较低,但在满足结构刚度要求的同时,显著减轻了车身重量。因此,高强度钢与铝合金的混合使用构成了现代汽车轻量化设计的前沿领域。

## (二) 高强度钢和铝合金的力学性能

高强度钢的高强度来源于其合金成分的优化和现代热处理工艺的应用,这些工艺包括相变强化、淬火和高温回火等。材料的微观结构能显著影响其疲劳性能,通常需考虑疲劳裂纹的萌生与扩展行为。

铝合金则凭借其具有显著的轻量特性和良好的加工性能,广泛应用于中低负荷的结构件中。其合金元素(如镁、硅、铜等)不仅提升了材料的强度和耐腐蚀性,还对其疲劳性能起到了至关重要的影响。

## (三) 混合连接技术在汽车结构中的应用和挑战

混合连接技术主要包括焊接、铆接、粘接以及机械连接等多种形式。其中,焊接技术最为常见,但由于钢和铝之间的化学和物理性质差异,容易产生金属间化合物,导致接头性能下降。铆接和机械连接工艺较好地避免了焊接所产生的热效应问题,但其连接强度和耐久性依然需要进一步研究和优化。粘接技术作为一种新型连接方法,则在提升结构整体性和消减应力集中方面表现出了良好潜力。

## (四) 疲劳性能的影响因素

对于混合材料连接结构,疲劳性能的影响因素包括应力集中、腐蚀影响和材料缺陷等。异质材料接头处往往存在较大应力集中,这对于疲劳裂纹的萌生和扩展过程至关重要。此外,环境因素如腐蚀介质的存在,也会加速材料接头的疲劳失效。接头处材料的缺陷,如孔隙、夹杂物等,可能成为疲劳裂纹的源头。因此,在材料选择和工艺控制的过程中,如何有效减少这些不利因素的影响,是提高混合连接结构疲劳性能的关键。

通过以上综述,可以看出高强度钢与铝合金混合连接结构的疲劳性能是一个复杂的多因素问题,涉及材料科学、力学设计和工艺技术等多个领域。随着研究的深入,如何优化混合材料的连接工艺,以进一步提升车身轻量化设计的效果,仍是当前和未来一段时期的重要研究课题<sup>[1]</sup>。

## 二、研究方法

在本研究中,我们探讨了高强度钢与铝合金混合连接结构的疲劳性能,采用了一系列严谨的实验和仿真方法。以下是具体研究过程中所采用的方法与步骤。

### (一) 材料选择

在本研究中,选用了一种高强度钢(例如,HSLA钢)和一种6061铝合金。这两种材料不仅具有出色的力学性能,而且能够

满足轻量化车身设计对材料性能的高要求。高强度钢具有高抗拉强度和良好的疲劳抗性,而铝合金则以其轻质和耐腐蚀性能而著称。我们对所选材料进行了拉伸试验和金相分析,以准确获取其机械性能和微观结构特征,为后续的连接工艺和疲劳性能研究奠定基础。

### (二) 连接工艺选择

在本研究中,采用电阻点焊作为高强度钢与铝合金的连接工艺。选择这种技术的原因在于其广泛应用于汽车工业中的异种材料连接,并且具备良好的经济性和快速性。关键工艺参数如焊接电流、焊接时间和电极压力通过初步实验进行优化,以确保接头的机械性能和疲劳寿命。

### (三) 试验设计

为了评估混合连接结构的疲劳性能,我们设计并实施了一系列疲劳试验。试验在一台经过校准的液压伺服疲劳试验机上进行,疲劳加载遵循ASTM标准,施加的应力比为0.1,频率为10 Hz。试件样品按照实际车身结构的几何参数制备,包括焊点间距、层厚比等关键参数,确保试验的现实性和代表性<sup>[2]</sup>。

## 三、实验结果

### (一) 高强度钢与铝合金混合连接的疲劳寿命

在研究中,我们对多种高强度钢与铝合金混合连接结构进行了疲劳寿命测试。通过反复拉压循环测试,我们测得在特定加载条件下,混合连接结构的疲劳寿命表现出显著差异。其中,采用机械连接的结构,其疲劳寿命普遍较短,而使用激光熔焊和摩擦搅拌焊接的结构则表现出较长的疲劳寿命。实验数据显示,摩擦搅拌焊接的疲劳寿命提升幅度最高,达到了约30%,这是由于其联合界面强度的显著增加<sup>[3]</sup>。

### (二) 疲劳裂纹的萌生与扩展规律

在对疲劳裂纹的萌生与扩展进行观察时发现,不同的连接工艺对裂纹的起始位置和扩展路径产生了不同影响。对于激光熔焊,裂纹多从焊缝边缘开始,并向母材延伸,而摩擦搅拌焊则显示出较为分散的裂纹萌生点,同时裂纹扩展较缓慢。利用扫描电子显微镜和应力场图像分析,明确了裂纹倾向于在应力集中区内出现,且扩展路径受到材料界面结合力的影响。混合连接中,铝合金一侧由于较低的屈服强度和较高的延展性,裂纹延伸速度较快,成为疲劳寿命的主要限制因素<sup>[4]</sup>。

### (三) 连接工艺对疲劳性能的影响

实验结果显示,连接工艺显著影响混合连接结构的疲劳性能。机械连接仅通过物理紧固,其疲劳性能较差。激光熔焊由于其作业过程中会产生热影响区,容易形成微裂纹,而摩擦搅拌焊由于其固态结合特性,能有效避免热影响区的晶粒粗化,经测试,该工艺显著提高了连接界面的疲劳性能。具体而言,连接工艺参数如焊接速度、搅拌头转速等对疲劳寿命有重要影响。通过调节摩擦搅拌焊接的参数,疲劳寿命最高提高了35%<sup>[5]</sup>。

综合上述实验结果,我们可以得出结论,选择合适的连接工艺和优化连接参数是提升混合结构疲劳性能的关键。这为进一步

的疲劳性能优化和轻量化车身设计提供了有力的数据支持和方向指导。

## 四、分析与讨论

在本研究中，我们对高强度钢与铝合金混合连接结构的疲劳性能进行了深入分析，重点考察了材料异质性与连接技术对疲劳性能的影响，以及实验结果与理论模型之间的一致性<sup>[6]</sup>。

### （一）材料异质性与疲劳性能的影响

高强度钢与6061铝合金在机械性能、热膨胀系数、以及表面特性等方面存在显著差异，这种材料异质性与混合连接结构的疲劳性能产生了深远影响。实验表明，材料之间的界面是疲劳裂纹萌生的敏感区域，这是由于异种材料之间的界面区域可能存在应力集中与界面结合不够理想的问题。高强度钢的高屈服强度使得在连接过程中，该材料承受更大的负荷，而铝合金则因其较低的强度和较高的延展性在动态负荷作用下表现出不同的变形行为，这种不均衡会加速界面的疲劳裂纹产生和扩展。

### （二）连接技术对混合结构疲劳性能的影响

连接技术的选择显著影响了混合结构的疲劳性能。在本研究中，我们关注了电阻点焊方法，并进一步探讨了这一方法在异种材料连接中的适用性。结果显示，由于电阻点焊的连接点温度较高，铝合金一侧的热影响区（HAZ）硬度降低，从而导致疲劳裂纹更容易在铝合金一侧萌生。此外，其他连接技术如搅拌摩擦焊（FSW）通过更均匀的材料结合和更少的热输入提供了某些优势，实验也体现出这种方法在减小应力集中和提高疲劳寿命方面的潜力<sup>[7]</sup>。

### （三）实验结果与理论模型比较

在分析实验结果与理论预测模型的一致性时，我们观察到，尽管理论模型能够大致预测高强度钢与铝合金混合连接结构的疲劳寿命，但在一些具体情况下存在偏差。模拟分析中的假设条件，如材料的均匀性及接触界面的理想化处理，可能导致预测的疲劳裂纹扩展路径与实际不符。实验结果揭示了裂纹萌生和扩展多数始于铝合金的焊接区，并逐渐向外围蔓延，这与疲劳模拟中预测的疲劳裂纹路径相符，但在实际实验中，裂纹扩展速率和路径因界面结合质量和局部微观结构变化而略有不同。

总的来说，实验结果与模拟分析基本一致，但强调了在处理异种材料连接结构时，需深入考量材料界面的微观异质性及实际使用中的复杂工况。这为后续的理论模型改进提供了重要依据，

## 参考文献

- [1] 郭清超, 索兆祥. 混动汽车车身轻量化设计研究 [J]. 汽车测试报告, 2023(9).
- [2] 汪涛. 车身轻量化设计分析 [J]. 时代汽车, 2019(18).
- [3] 刘吉, 傅林, 赵云, 刘硕, 汤萌. 基于碰撞和侧碰的某电动车车身轻量化设计 [J]. 中国汽车, 2020(11).
- [4] 陈虹. 汽车车身轻量化研究和创新应用 [J]. 上海汽车, 2018(09).
- [5] 骆建丽, 陈晓峰, 李程, 李建华, 高增辉. 汽车轻量化管理要点与思考 [J]. 汽车实用技术, 2017(19).
- [6] 李占营, 董彦龙, 宗辉. 汽车轻量化评价方法研究 [J]. 汽车测试报告, 2023(23).
- [7] 孔祥帅, 刘多加, 李灿, 张胜利, 陈海琴. 基于白车身轻量化系数提升的优化设计方法 [J]. 中国汽车, 2024(06).
- [8] 谢朝辉. 轿车轻量化及其对连接技术的挑战 [J]. 南方农机, 2021(02).
- [9] 周植枫, 孔娇龙, 耿娟. 应用热成型技术实现白车身轻量化实践案例 [J]. 时代汽车, 2021(15).
- [10] 张亚坤, 尚国强, 王光辉. 复合结构材料与塑料在汽车轻量化设计中的应用 [J]. 科学技术创新, 2019(35).

尤其是在多材料集成的车体设计中，为连接技术的选择和优化提供了科学指导<sup>[8]</sup>。

## 五、改进建议

在对高强度钢与铝合金混合连接结构疲劳性能的分析后，我们针对实验结果和分析讨论中发现的问题，提出以下几点改进建议，以提高这种轻量化车身设计的整体性能。

### （一）材料选择和处理

首先，可以考虑选择更优化的铝合金材料，如添加微量合金元素或采用特殊处理方式来提高其表面硬度和耐疲劳性能。这些改良有助于减少由于材料异构性带来的疲劳弱点，从而延长接头的疲劳寿命。此外，对高强度钢进行适当的热处理也可能提升其抗疲劳裂纹扩展的能力<sup>[9]</sup>。

### （二）连接方法优化

针对实验中选择的两种连接方法，点焊和搅拌摩擦焊，应结合具体使用场景和结构要求选择最优连接方式。搅拌摩擦焊适用于厚壁材料的连接，同时减少接头的残余应力和变形。而对于薄板材料，改进点焊设备以实现更精确的焊接控制也许更为必要。此外，考虑使用混合搭接或多种焊接工艺的组合，以实现更优的疲劳性能表现。

### （三）结构设计调整

优化结构设计也是提高疲劳性能的关键方法之一。可以通过改进接头的几何形状来减少应力集中区域，从而抑制裂纹的萌生和扩展。此外，采用数值模拟和实验方法相结合的方式，可以在设计阶段预先识别潜在的疲劳热点，进行针对性结构优化<sup>[10]</sup>。

## 六、结语

在本文中，我们全面研究了高强度钢与铝合金混合连接结构在轻量化车身设计中对疲劳性能的影响。这项研究对于提升车辆安全性与耐久性，同时实现节能减排目标具有重要意义。

总体而言，通过针对混合连接结构的疲劳性能分析及改进策略，本文为下一代轻量化车身设计提供了科学支持，能够显著提升车辆的整体性能和使用寿命，同时助力绿色环保的汽车工业发展。未来的研究可以进一步探索多材料复合结构中连接技术的创新，以及智能监测技术在疲劳损伤早期预警中的应用。