

超声焊自冲铆复合连接接头力学性能研究的发展

张昊晗* (通讯作者) 陈绍强

云南开放大学机电工程学院 云南昆明 650500

摘要: 自冲铆接 (Self-Piercing Riveting, SPR) 和超声波焊接 (Ultrasonic Welding, USW) 的原理及技术特点, 在轻量化制造中的优势备受关注 and 讨论, 国内外学者对其进行了大量研究。本文综述了超声焊自冲铆复合连接接头力学性能的研究进展, 阐述了超声焊自冲铆复合连接在提高接头力学性能方面的优势和研究进展, 分析了如材料、工艺参数、环境温度等对复合连接对接头力学性能的影响, 深入研究这些因素有利于合理优化复合连接工艺, 还探讨了接头失效机理和无损检测方法, 为提高接头质量和力学性能以及可靠性提供了重要理论依据, 最后对超声自冲铆复合连接未解决问题和该领域的空白以及未来的研究方向进行了展望。

关键词: 复合连接; 超声焊; 自冲铆; 接头力学性能

引言

在面对能源危机和生态环境日益严重的背景下, 《中国制造2025》提出的将绿色和轻量化作为中国汽车产业未来的主要发展方向, 其中“节能”作为未来汽车发展的重要方向之一。研究表明当车自身质量下降10%时, 汽车自身燃料消耗可以下降6%~8%^[1], 汽车车身重量占整车的60%, 因此解决汽车轻量化问题十分重要。尤其在汽车制造、航空航天等领域对轻量化以及连接技术要求的不断提高, 自冲铆接和超声波焊接等连接技术得到了广泛应用。自冲铆接是一种快速机械冷连接技术, 主要通过铆接过程中上下板材及铆钉的塑性变形和回弹所形成的机械内锁来实现^[2]。是一种效率高, 可实现同异种薄板多层连接的技术, 但在铆接过程中可能出现裂纹或应力集中等问题。超声波焊接作为一种新型机械紧固连接技术, 无需对连接板进行预打孔或预处理, 即可实现同异种轻合金薄板材料之间的连接, 且操作简单、生产周期短、自动化程度高、易实现大批量现代化生产^[3]等优点, 基于振动能量的焊接技术, 能避免裂纹产生, 但焊接产生热量会影响连接强度和可靠性。

基于超声焊自冲铆复合连接接头力学性能研究, 对接头力学性能进行了分析。张昊晗等^[4]采用自冲铆接与超声波焊接相结合的方法, 探索超声波焊接对自冲铆接接头力学性能的影响、提升5A06铝合金薄板的连接性

能。许龙等^[5]研究了自冲铆接头在常温与低温环境下的力学性能, 使用自冲铆接工艺与超声焊接工艺制备自冲铆接头与超声自冲铆接头, 通过常温拉伸与低温拉伸方法探究超声振动对自冲铆接头力学性能的影响。霍小乐等^[6]分别进行自冲铆接和不同超声焊接工具头下的超声自冲铆复合连接试验, 发现利用超声振动提高了自冲铆接头静力学性能。赵伦等^[7]发现ST拥有优异的成形质量, 以TA1钛合金自冲铆 (ST) 接头为对象, 对静失效载荷, ST接头适用于对静失效载荷要求较高的结构, 对于能量吸收值, ST接头适用于对缓冲吸震要求较高的接头。

一、超声焊自冲铆复合连接的原理及优势

(一) 自冲铆接原理

自冲铆技术是一种冷连接技术, 通过铆钉穿透材料形成机械互锁结构实现连接两层或多层材料, 通过冲头将铆钉直接压入待连接板材, 铆钉在模具作用下产生塑性变形, 穿透下板材形成机械互锁结构, 从而实现连接。这种连接方式可以连接多种材料, 包括铝合金、钛合金等轻质金属, 广泛应用于汽车工业、航空航天、家电和建筑领域。

(二) 超声波焊接原理

超声波焊接是利用高频振动 (通常为15kHz~40kHz) 波传递到两个需焊接的物体表面, 分子之间高频摩擦导致接触表面温度升高, 使材料软化或部分融化, 且在加压作用下, 软化材料相互渗透, 冷却后形成分子键。焊

基金项目: 云南开放大学第一批、第三批高层次人才科研启动经费

接过程快速高效、无添加剂、精准控制，能避免传统点焊导致裂纹、缺陷等。

（三）超声焊自冲铆复合连接的优势

将超声波焊接与自冲铆接两种工艺相结合，适用于多种材料焊接，为轻量化开辟了新思路，其具备高强度与可靠性，且提高了密封性和耐腐蚀性。在自冲铆接的基础上通过超声波焊接在板材之间形成固相焊接，显著提高了接头的拉伸强度、韧性和静载强度等力学性能。张昊晗^[4]等人的研究表明，超声波焊接显著提高了5A06铝合金自冲铆接接头的拉伸强度和韧性，接头硬度峰谷明显降低，增强了接头的延展性和韧性。

二、影响超声焊自冲铆复合连接接头力学性能的因素

（一）材料因素

不同材料的物理和化学性质对复合连接接头的力学性能有影响，如膨胀系数（CTE）、电导率与热导率、表面氧化层特性等。雷乐^[8]分析超声波金属焊接对自冲铆接头力学性能的影响，制备自冲铆接头与超声自冲铆两种接头，对各接头进行高温加热人工时效模拟自然时效。张涛^[9]采用阳极氧化工艺对铝合金表面进行处理，研究氧化温度、时间、电压和电解液浓度对铝合金表面形貌、铝元素和氧元素的变化以及超声波焊接后6063铝合金/PPS接头强度的影响。

（二）工艺参数因素

工艺参数如超声振幅、焊接压力、焊接时间、铆钉长度、冲头速度和冲头行程等都会影响接头的力学性能。张涛^[9]研究了6063铝合金与聚苯硫醚（PPS）塑料超声波焊的工艺参数，发现超声波振幅和焊接压力是超声焊接的关键工艺参数，接头的剪切强度随着这些参数的变化先增大后减小。田海^[10]针对7075铝合金薄板的自冲铆接工艺，研究了铆钉长度、冲头速度和冲头行程为主要因素，接头失效载荷和能量吸值作为响应值，建立多元非线性回归模型探究接头静力学性能影响。邢保英^[11]等发现铝合金材料通过退火后塑性和延展性提高，硬度下降且增强了密封性和抗腐蚀性。

（三）环境温度因素

环境温度会导致超声焊自冲铆复合连接接头的稳定性降低，铆接时容易产生裂纹。高温环境下，接头冷却后会产生更大的残余应力，低温环境使材料在铆接后回弹量增加，影响尺寸稳定性。许龙^[5]等人研究了低温环境下5A06铝合金超声自冲铆接头的力学性能，结果表明

超声金属焊接能有效提升接头在常温与低温环境下的力学性能，低温下接头脆性增加，稳定性降低，出现多种失效形式，说明超声金属焊接有效提升了自冲铆接头的抗低温性能。肖锐^[12]通过铆接前预热和铆接后感应加热两种方式实验，探究TA1板自冲铆接的力学性能、成形质量、失效形式的影响，研究表明在不同最大载荷下，疲劳寿命随着载荷水平先增后减，随着预加热温度升高板材硬度降低，最大等效应力逐渐降低。

三、超声焊自冲铆复合连接接头的失效机理

为探究超声焊自冲铆接头的失效机理，张昊晗^[13]等人制作了两侧滚纹（USPR-A）、环形滚纹（USPR-B）两种超声焊接自冲铆接头，经过实验进行对比研究。说明了，两种接头均在薄板连接处产生了固相焊，提高了自冲铆接头的力学性能。EDS结果分析表明，USPR-A接头密封性比USPR-B密封性好。赵伦^[14]等用不同厚度5052铝合金板连接的自冲铆接头进行拉伸-剪切实验，研究了基板厚度对自冲铆接单搭接头静力学性能的影响，结果说明基板厚度的增加有助于提高接头力学性能。

四、超声焊自冲铆复合连接接头的无损检测方法

自冲铆机械内锁区的结构特征直接影响着结构连接强度和疲劳寿命，因此无损检测方法对评估接头质量和力学性能具有不可替代的优势，通过超声检测、射线检测、红外热成像等无损检测技术，可在不破坏接头结构情况下检测出接头内部缺陷，并分析缺陷尺寸、位置及分布特征。曾凯^[15]等人基于聚焦超声探头焦平面声压分布，建立结构体边缘声强分布理论公式，并提出一种自冲铆钉脚扩张直径的无损检测方法。该方法通过分析超声C扫图中灰度位置曲线的斜率变化，以灰度值变化率的“极值点”作为钉脚扩张直径测量的边界点，与实际试件剖切测量结果相比较，相对误差为0.14%~1.87%，验证了该方法的可行性。王凯伟^[16]基于超声C扫描图像分析的结构体边缘检测，以及自冲铆接头机械内锁区域结构的超声检测方法可实现残余底厚的测量以及铆接缺陷位置、大小、形貌判断。对铆接中的铆接裂纹、铆偏、外观缺陷进行超声C扫描，与实际自冲铆接缺陷对比，得出自冲铆接缺陷的超声C扫图特征，作为铆接缺陷的依据。倪明^[17]将传统图像识别技术应用用于自冲铆接接头剖面尺寸检测，提出了一种基于边缘提取和角点检测的接头剖面尺寸视觉检测算法，算法能够实现接头剖面的尺寸检测。

五、结论与展望

(一) 结论

综上所述, 超声焊自冲铆复合连接技术为轻量化行业做出了贡献, 在提高接头力学性能方面具有优势, 具备高强度与可靠性, 能有效解决自冲铆接和超声波焊接单独使用时存在的问题。不同材料的物理化学性质、超声振幅、焊接压力、焊接时间、铆接长度、冲头行程环境温度等因素都会影响接头力学性能, 深入研究这些因素有助于合理优化复合连接工艺。其次, 就是对失效机理的研究和无损检测方法的研究, 为提高接头质量和力学性能以及可靠性提供了重要依据, 无损检测方法对于评估接头质量和力学性能具有不可代替的优势。

(二) 展望

优化复合连接工艺参数, 深入研究不同材料组合下的最佳工艺方法, 异种材料连接过程中的残余应力分布和塑性变形现象, 以便提高接头力学性能和结合强度。现有研究仍存在诸多不足, 如接头的静力学性能、抗疲劳强度和密性不足, 研究方法以理论和小规模实验为主, 为系统性解决力学性能的问题。未来研究可以现在理论为基础, 结合数值模拟与数据驱动方法, 复合连接技术的发展需以材料—工艺—性能协同优化为核心, 通过学科交叉解决现有问题, 突破瓶颈。

参考文献

[1] 杜行. 新型材料和工艺在汽车轻量化中的应用 [J]. 科技创新与应用, 2019 (5): 148-150.

[2] Wang D Y, Li X B, Wang H H, et al. Dissolution rate and mechanism of solid MgO particles in synthetic ladle slags [J]. *J Non-Cryst Solids*, 2012, 358: 1196.

[3] RUSIA A, WEIHE S R. Development of an end-to-end simulation process chain for prediction of self-piercing riveting joint geometry and strength [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 57(9): 519-532.

[4] 张昊晗, 朱建雄, 赵伦, 徐凡, 郭子鑫, 刘纪元, 张丽. 超声波焊接对5A06铝合金自冲铆接接头力学行为的影响 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (11): 94-100

[5] 许龙, 李承旺, 赵伦, 叶凯, 洪宛璐, 雷乐, 严卓晟. 低温环境下超声自冲铆接头力学性能 [J]. 应用声学,

2024, 43 (06): 1334-1340.

[6] 霍小乐, 赵伦, 许龙, 周光平, 蔡景, SHAFIQU LI Islam, 郭子鑫, 林森. 超声振动对5A06铝合金自冲铆接头静力学性能影响 [J]. 材料科学与工艺, 2023, 31 (02): 44-49.

[7] 赵伦, 何晓聪, 张先炼, 程强, 邓聪. 钛合金自冲铆接头力学性能优越性研究 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (09): 40-43.

[8] 雷乐. 超声波金属焊接对自冲铆接头力学行为的影响 [D]. 导师: 高山凤. 山西大学, 2024.

[9] 张涛. 6063铝合金与聚苯硫醚 (PPS) 塑料超声波焊的连接工艺及机理研究 [D]. 导师: 俞伟元. 兰州理工大学, 2021.

[10] 田海. 基于球形底模的7075铝合金自冲铆连接及质量评价方法研究 [D]. 导师: 曾凯. 昆明理工大学, 2023

[11] 邢保英, 陈锦聪, 阎治铭, 等. 热处理对铝合金自冲铆接头裂纹和力学性能的影响 [J/OL]. 工程计学报, 1-10 [2025-04-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1288.TH.20241211.1546.002.html>.

[12] 肖锐. 温度对TA1板自冲铆接性能的影响 [D]. 导师: 黄志超. 华东交通大学, 2020.

[13] 张昊晗, 张振, 赵伦, 等. 5A06铝合金超声焊接自冲铆接头失效机理 [J/OL]. 应用声学, 1-8 [2025-04-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2121.O4.20241011.1116.002.html>.

[14] 赵伦, 何晓聪, 卢毅, 等. 基板厚度对自冲铆接头静力学性能的影响及其失效机理 [J]. 热加工工艺, 2015, 44 (17): 1-5. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2015.17.001.

[15] 曾凯, 田海, 邢保英, 张洪申, 王凯伟, 何晓聪. 自冲铆机械内锁结构形态的超声无损检测方法 [J]. 机械工程学报, 2024, 60 (02): 10-16.

[16] 王凯伟. 自冲铆接头机械内锁区成型质量的超声无损检测方法研究 [D]. 昆明理工大学, 2021. DOI: 10.27200/d.cnki.gkmlu.2021.000063.

[17] 倪明, 王健强, 李尚鸿. 基于机器视觉的自冲铆接接头剖面尺寸检测研究 [J]. 机械工程与自动化, 2023, (01): 1-3+7.