

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.08.02

搅拌摩擦焊技术在汽车材料连接中的应用、发展与挑战

李 雨^{1,2}, 周 利^{1,2*}, 杨朝旭^{1,2}, 高士康^{1,2}

1. 哈尔滨工业大学 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

2. 哈尔滨工业大学(威海) 山东省特种焊接技术重点实验室, 山东 威海 264209

摘要: 汽车轻量化趋势推动了先进高强度钢、铝合金、镁合金及碳纤维增强复合材料(CFRP)等轻质材料的广泛应用,但异种材料理化性能差异给传统连接技术带来严峻挑战。搅拌摩擦焊(FSW)作为一种创新性固相连接技术,凭借无熔化、低缺陷、可调控界面金属间化合物等优势,在轻量化材料连接领域展现出显著潜力。本文系统综述了FSW技术在汽车材料连接中的应用现状,重点分析常规搅拌摩擦焊与搅拌摩擦点焊(FSSW)的技术原理、研究进展及设备开发:常规FSW在铝合金轮毂、电池包箱体等构件中已实现工程应用,通过优化工艺可有效抑制铝/钢、镁/铝异种连接中的脆性相;FSSW(含回填式技术)优于传统电阻点焊工艺,在车身复杂结构连接中表现出高效性与可靠性。研究表明,FSW技术能显著提升异种材料接头的力学性能与稳定性,但当前面临工艺窗口窄、复杂构件适应性有限、智能化设备不足等挑战。本文展望了FSW技术向多维化、智能化设备发展的趋势,为其在汽车轻量化制造中的规模化应用提供理论与技术参考。

关键词: 搅拌摩擦焊;搅拌摩擦点焊;异种材料连接;汽车轻量化;固相连接

中图分类号: TG456.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)08-0024-14

Application, Development and Challenges of Friction Stir Welding Technology in Automotive Material Joining

LI Yu^{1,2}, ZHOU Li^{1,2*}, YANG Zhaoxu^{1,2}, GAO Shikang^{1,2}

1. Harbin Institute of Technology, National Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin 150001, China

2. Harbin Institute of Technology at Weihai, Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Weihai 264209, China

Abstract: The trend towards the lightweighting of vehicles has promoted the widespread application of advanced high-strength steels, aluminum alloys, magnesium alloys, and carbon fiber-reinforced composite materials (CFRP), but the differences in the physicochemical properties of different materials pose a severe challenge to traditional joining technologies. Friction Stir Welding (FSW) as an innovative solid-phase joining technology, with advantages such as no melting, low defects, and controllable interfacial intermetallic compounds, demonstrates significant potential in the field of lightweight material joining. This paper systematically reviews the current status of FSW technology in automotive material joining, focusing on the technical principles, research progress, and equipment development of conventional friction stir welding and friction stir spot welding (FSSW): conventional FSW has achieved engineering applications in aluminum alloy wheels, battery pack bodies, and other components, and through process optimization, it can effectively suppress the brittle phase in aluminum/steel and magnesium/aluminum dissimilar joints; FSSW (including the refilling technique) has superiority over traditional resistance spot welding processes, demonstrating efficiency and reliability in complex body structure joining. Research indicates that FSW technology can significantly improve the mechanical performance and stability of dissimilar mate-

收稿日期: 2024-06-23 修回日期: 2025-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(52375316);山东省泰山学者青年专家项目(tsqn202211089)

作者简介: 李 雨(2000—),男,硕士研究生,主要从事固相连接与增材制造研究。

通讯作者: 周 利(1982—),男,博士,教授,主要从事固相连接与增材制造研究。E-mail: zhou.li@hit.edu.cn。

rial joints, but currently faces challenges such as a narrow process window, limited adaptability to complex components, and insufficient intelligent equipment. This paper looks forward to the trend of FSW technology towards multi-dimensional, intelligent equipment development, providing theoretical and technical references for its large-scale application in lightweight vehicle manufacturing.

Keywords: friction stir welding; friction stir spot welding; dissimilar materials joining; automotive lightweighting; solid-phase connection

引用格式:李雨, 周利, 杨朝旭, 等. 搅拌摩擦焊技术在汽车材料连接中的应用、发展与挑战[J]. 电焊机, 2025, 55(8): 24–37.

Citation:LI Yu, ZHOU Li, YANG Zhaoxu, et al. Application, Development and Challenges of Friction Stir Welding Technology in Automotive Material Joining[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(8): 24–37.

0 引言

我国于2020年提出“双碳”目标,明确力争2030年前实现“碳达峰”,2060年前实现“碳中和”。随着相关政策和措施的深化落实,绿色环保理念越发深入人心。近年来,我国汽车产业发展迅速,汽车产量与保有量均居世界前列。但随之而来的能源消耗与环境污染问题日益突出,推动燃油效率提升及减少尾气排放成为行业迫切需求。研究表明^[1-2],汽车质量每减重10%,燃油消耗可减少6%~8%,能够有效地提高能源利用并减轻环境污染。新能源电动汽车虽以清洁无污染、能量利用效率高等优点,在全球范围内快速普及^[3],但相较于传统汽车,新能源汽车仍面临质量过大、续航里程不足、稳定性和

制动性差等问题^[4],轻量化同样是破解此类问题的最优解。因此,汽车轻量化技术已成为行业研究热点和主流发展方向。

轻量化的核心前提是保障汽车构件的强度和安全性能^[5],实现途径主要有三种^[6]:(1)优化汽车结构设计;(2)采用轻量化高强材料;(3)应用新型连接和制造工艺。其中,以轻质高强材料代替传统的钢制部件是实现车身轻量化最直接的方式,可使车身和底盘质量降低20%~60%,从而提高能源利用效率。目前,先进高强钢(Advanced high strength steel, AHSS)、铝合金(Aluminum alloy)、镁合金(Magnesium alloy)、碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced plastic, CFRP)等轻量化材料已在汽车领域得到了广泛应用,其性能对比如表1所示。

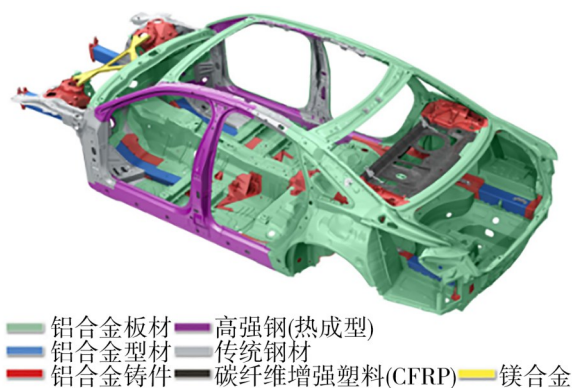
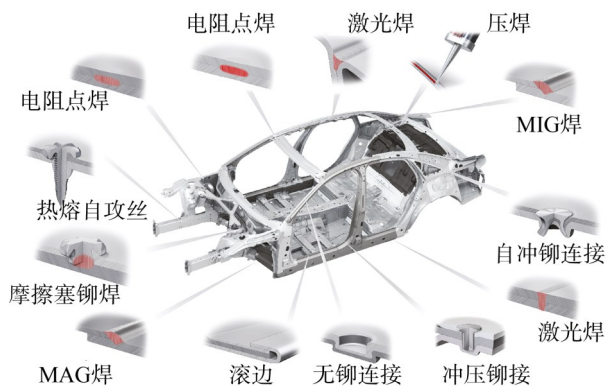
表 1 汽车轻质高强材料性能对比^[6-8]
Table 1 Performance comparison of automotive lightweight high-strength materials^[6-8]

材料	密度 (/g·cm ⁻³)	减重效 率/%	性能特点	应用
先进高强钢	7~8	20~30	疲劳寿命长,吸收碰撞能力强,弹性变形面积大;对焊接热输入敏感	A、B柱加强件、保险杠、底盘悬挂件等
铝合金	2.6~2.7	40~50	延展性好,易加工、耐腐蚀;线膨胀系数较大,焊接构件稳定性低	变速箱、发动机、底盘、轮毂等
镁合金	1.7~1.8	55~60	良好比强度和比刚度,优异的导热性和导电性;成本高,耐腐蚀性差	仪表盘、方向盘、变速箱、离合器壳体等
CFRP	1.5~1.6	55~60	密度低,耐腐蚀性高,抗疲劳性能及减震性能好;成本高	仪表盘、保险杠、车门、油箱、灯罩等

尽管钢铁材料仍是汽车制造最常用的材料之一,但高强钢的应用占比持续提升。先进高强钢在性能和减重方面优势明显,现已发展至第三代^[9-10]。铝、镁^[11]合金相比钢材具有较低的密度、较高的强度和加工性能,均是轻量化结构的理想材料。此外,碳纤维增强复合材料^[12]也发展迅速,逐渐成为航空、汽车等领域的前沿材料。以奥迪A8汽车为例^[3],该型号的车架结构采用了28种不同的材料,包括多种铝合金和高强钢框架、镁合金支撑以及CFRP后面板,质量减轻了约15%,如图1所示。

随着各种轻质材料的研发与应用,多材料混合结构开始逐步实现车身性能、安全以及轻量化的协同提升。然而,异种材料的理化性能差异较大,异种材料连接界面硬脆相、应力变形和电化学腐蚀等问题^[13],亟需可靠性高、成本低且效益高的新型连接技术。目前,针对车身材料的连接技术较为多样,大致可以分为机械连接、粘接和焊接^[14],如图2所示。

但传统的连接技术效果有限,机械连接成本较高^[8],胶接技术受复杂服役环境限制^[15]。焊接技术

图1 奥迪A8车身构件材料应用分布^[3]Fig. 1 Audi A8 body component material application distribution^[3]图2 汽车结构中的连接技术^[21]Fig. 2 Connection technology in automotive construction^[21]

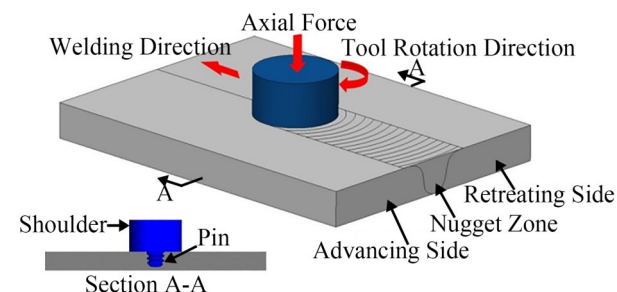
是车身连接最常用的手段之一,是指通过加热或加压或两者相结合的方式使被焊材料产生原子间结合的过程^[16]。目前,冷金属过渡焊^[17](Cold metal transfer, CMT)、激光焊^[18](Laser Beam Welding, LBW)、电阻点焊^[19](Resistance Spot Welding, RSW)、超声波焊^[20](Ultrasonic Welding)以及搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)等焊接技术在汽车轻量化材料连接中具有较好的发展应用前景。

搅拌摩擦焊作为一种新型的固相连接工艺,在轻质材料连接方面相对于传统熔化焊有明显的技术优势^[22]。FSW技术在汽车轻量化材料连接方面展现出巨大的发展潜力,并且正在不断变革与发展,现已经在汽车轻量化连接中得到了一定程度的应用。如今,国内外学者在该领域开展了大量研究,本文简述汽车材料连接制造现状,聚焦搅拌摩擦焊技术,分析常规搅拌摩擦焊(连续缝焊)与搅拌摩擦点焊的发展与应用,探讨相关设备研发进展,并对其在汽车领域的应用前景提出见解与展望。

1 常规搅拌摩擦焊技术

搅拌摩擦焊(FSW)是指利用高速旋转的焊具插入工件并产生摩擦,从而带动材料达到剧烈的塑性流动变形,并在轴肩顶锻力作用下形成致密焊缝的连接工艺^[22],其原理如图3所示。作为一种新型的固相连接工艺,FSW在焊接过程中不发生材料的熔化,能够避免传统焊接过程中常见的气孔、裂纹和合金元素烧损等问题。

对于异种材料的连接,由于材料晶体结构和理化性质的显著差异,传统熔焊容易产生各类缺陷和脆性金属间化合物,而FSW工艺能够有效调控界面金属间化合物的形成,从而获得性能稳定的焊接接头^[23]。FSW技术具有许多传统熔化焊接技术所不具备的优势,被誉为“继激光焊后最为革命性的连接技术”。

图3 搅拌摩擦焊接示意^[24]Fig. 3 Schematic diagram of friction stir welding^[24]

1.1 轻量化材料FSW连接研究进展

铝合金是汽车轻量化的主要材料之一,在高端车型中的应用比例已超过50%,并应用于加强板、散热系统和发动机等多种汽车零部件。Venkateswarlu^[25]等研究了6 mm厚2219/7039铝合金异种FSW接头的力学性能,通过参数优化确定了最佳工艺窗口。Gao^[26]等采用双轴肩搅拌摩擦焊技术连接8 mm厚的5251铝合金板材,获得了高质量的表面光洁度和无缺陷接头,接头系数最高达76%,接头显微硬度呈典型“W”型分布,断口表现为韧性断裂特征。

随着车用铝合金比例的提高,铝-钢结构代替传统钢结构成为了实现汽车轻量化的重要研究方向。Ramakrishna^[27]等对3 mm厚汽车用先进高强贝氏体钢的FSW可行性进行了探索。蔺宏涛^[28]等研

究发现,焊具转速对Q&P980高强度钢FSW接头组织与性能的影响:随着转速增加,焊核区组织从马氏体+铁素体转变为单一马氏体,在高转速下最终形成马氏体+贝氏体的混合组织。Ma^[23]等进一步研究了下压量对铝/钢FSW对接接头组织和力学性能的影响,并在铝/钢界面处原位形成了非晶层,取代了金属间化合物,提高了接头力学性能;但下压量过大,非晶层将生长到临界厚度18 nm以上,随后被金属间化合物 FeAl_3 、 FeAl 所取代,如图4所示。

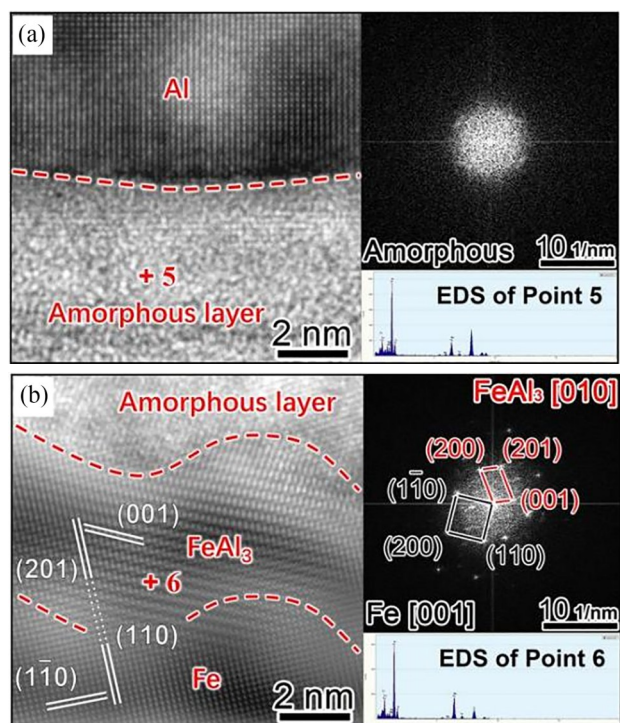


图4 铝/钢FSW接头界面非晶层的转化^[23]

Fig. 4 Transformation of amorphous layers at the interface of Al/steel FSW joints^[23]

镁合金具有很高的比强度和比刚度,被认为是当今最有发展前景的汽车轻量化材料之一。镁合金与钢、铝合金异种材料的FSW连接研究较广,主要集中于工艺研究、组织调控以及性能优化等方面。黄勇兵^[29]等对4 mm厚的AZ31B镁合金和Q235低碳钢进行了FSW对接试验,发现靠近焊核与钢侧界面钢侧存在Fe-Mg元素过渡区,焊核与钢侧界面处存在Mg元素向钢中的短程扩散,而不存在Fe元素向镁中扩散。Al-Mg异种焊接进展的主要障碍是Al-Mg基脆性金属间化合物(IMCs)的形成,而固相FSW技术能够有效调节这一问题。Lak-

shminarayanan^[30]等建立了连续多缝搅拌摩擦包覆工艺参数与不同镁铝合金包覆接头质量之间的经验关系,得到了高界面强度和低腐蚀速率的理想工艺条件。高热输入下界面处易形成较厚金属层,低热输入下材料流动不足导致混合不良,导致界面强度降低。李佩琪^[31]对AZ91D镁合金和压铸态ADC12铝合金的异种FSW进行了研究,结果显示,当镁板置于搅拌摩擦焊的前进侧,所有焊接参数下接头均出现连续沟槽状缺陷;而铝板置于前进侧时,各参数下均形成完整接头。Fu^[32]等研究了AZ31B/6061-T6异种合金搅拌摩擦焊,获得的接头抗拉强度可达镁合金母材的70%,发现镁铝异种连接产生的金属间化合物主要为 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 和 Al_3Mg_2 ,并且在焊核区存在共晶结构。图5为Mg-Al异种FSW连接中常见的三种结合界面,是由于不同程度的材料流动而引起的,其中III型是最理想的界面,该结构可以阻碍裂纹扩展,获得良好的接头性能^[33]。

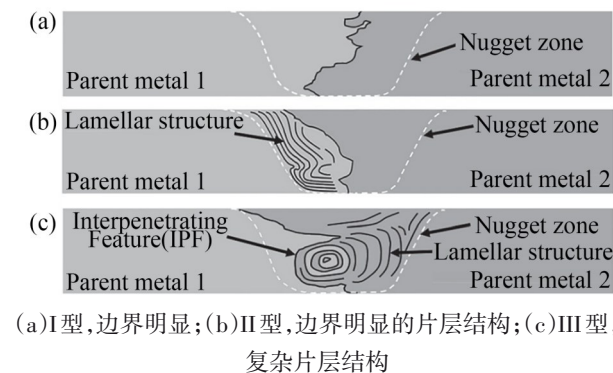


图5 铝镁异种材料FSW连接界面变化类型^[33]

Fig. 5 Types of interfacial changes in Al/Mg dissimilar-material FSW connections^[33]

碳纤维增强复合材料(CFRP)密度仅1.7 g/cm³,链状分子结构带来良好韧性、抗损伤和抗冲击能力,成型周期短、生产效率高,是汽车轻量化首选材料之一。目前,CFRP材料已用于宝马i3、i8、奥迪R8、保时捷等高端车型,在车身覆盖件和外饰件中的应用呈稳步上升趋势,但因无法用传统焊接工艺连接,尚未在汽车业实现大规模产业化应用^[34]。CFRP与铝合金的异种FSW是研究重点,主要集中于焊接工艺和焊接工具。焊接工艺方面,Nagatsuka^[35]等采用搅拌针不穿透上板的方式连接A5052铝合金与CFRP,因下板复合材料难提供足够背部

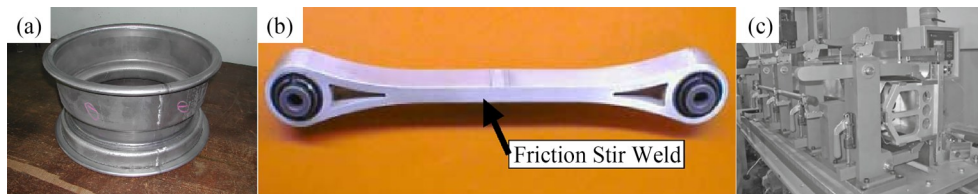
支撑,焊后焊缝内凹明显,虽未产生大量飞边,但焊缝仍明显减薄。谢一鸣^[36]试验表明CF-PEEK与铝合金直接对接易产生界面裂纹,而铝合金在上的搭接形式可形成有效连接。工具设计方面,Lenin^[37]发现锥形带螺纹搅拌针比光滑针更利于聚丙烯FSW接头成形;Huang^[38]等则通过三面锥形螺纹工具诱导动态材料流动,利用机械连锁与界面粘接实现高质量连接。

异种材料混合车身是未来汽车轻量化发展的主要方向,FSW在钢、铝合金、镁合金以及CFRP等异种材料连接中具有显著的优势,但接头中金属间化合物的形成机理和调控手段仍需深入研究,这也是其工业应用受限的关键因素。

1.2 FSW在汽车工业中的应用

自问世以来,搅拌摩擦焊技术便在汽车制造领域大放异彩,早期应用探索主要聚焦于同种合金材料的连接。1997年,挪威发明了一种采用FSW制造

汽车车轮的新工艺,并被Hydro公司应用于轮毂制造^[39],如图6a所示。澳大利亚西蒙斯公司也利用FSW创新了轧制车轮辐条制造技术。1998年,英国焊接研究所(The Welding Institute, TWI)携手宝马、福特等车企,将FSW概念应用于门板、传动轴和空间框架的铝制定制毛坯上^[40]。2001年,美国Tower汽车公司成功将FSW应用于汽车后桥零件,并为福特公司生产拼焊板白车身,产生了经济效益,如图6b所示。美国福特公司在其GT车型的中央隧道制造中,借助FSW实现了性能优化,如图6c所示;德国Pierburg公司开发了一种基于FSW开发的废气再循环(EGR)冷却器,内部连接全部采用该技术,摒弃了传统耐高温紧固件和密封件,大幅提升了冷却器耐用性和可靠性。美国林肯城市汽车的悬挂连杆由两个相同的挤压铝件构成,并采用双面FSW技术进行连接,焊接而成的悬挂连杆具有出色的抗疲劳性能^[41]。



(a)轮毂制造;(b)后桥零件制造;(c)中央隧道制造

图6 FSW技术在汽车零件制造中的应用^[39,42]

Fig. 6 Application of FSW technology in automotive parts manufacturing^[39,42]

如今,FSW技术应用于汽车工业主要以大批量铝合金汽车及小批量专用汽车构件与车身的连接制造为主。2013年,本田公司成功将FSW技术应用于钢和铝的异种材料连接^[43],实现车辆减重25%,安装点刚度提升20%,显著改善了汽车的动态性能,并已大规模商业化应用,如图7所示。

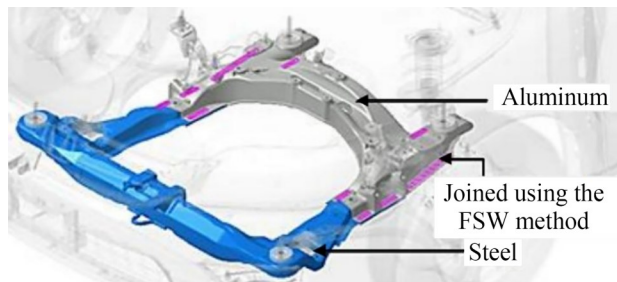
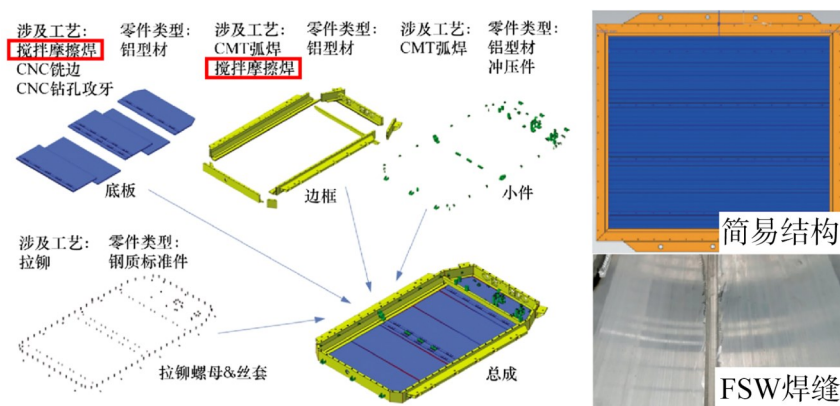


图7 本田雅阁2013新副车架用FSW技术代替螺栓连接^[43]

Fig. 7 Honda Accord's new 2013 subframe uses FSW technology instead of bolts^[43]

新能源汽车是实现汽车轻量化的另一种途径,拥有污染低、效率高等优点,发展十分迅速。电池是新能源汽车的核心,铝制电池包箱体因轻质和耐用性成为首选。FSW的无缺陷、出色密封性和焊接接头高强度的特点备受新能源界的青睐,已经成为电池包箱体焊接领域的主流技术。比亚迪推出的“刀片电池”技术以及江淮汽车的“蜂窝电池”技术均要求电池箱采用底板承载式结构,旨在精确控制箱体的尺寸和形状,而FSW因其在精确性和可靠性方面的优势,成为了制造此类电池箱体的理想选择^[44]。这种结构的设计简洁,如图8所示,主要部分通过FSW完成,而边梁和小件等少数焊缝则采用熔化焊技术,不仅提升了生产效率,还增强了箱体的整体安全性。吉利和小鹏等知名汽车品牌在多款车型的电池包箱体制造中,都采用了双面搅拌摩擦

图8 FSW在电池包箱体结构中的应用^[44-45]Fig. 8 Application of FSW in battery pack case structures^[44-45]

焊技术,有效减少底板的变形,相比传统工序缩短了工作时间。

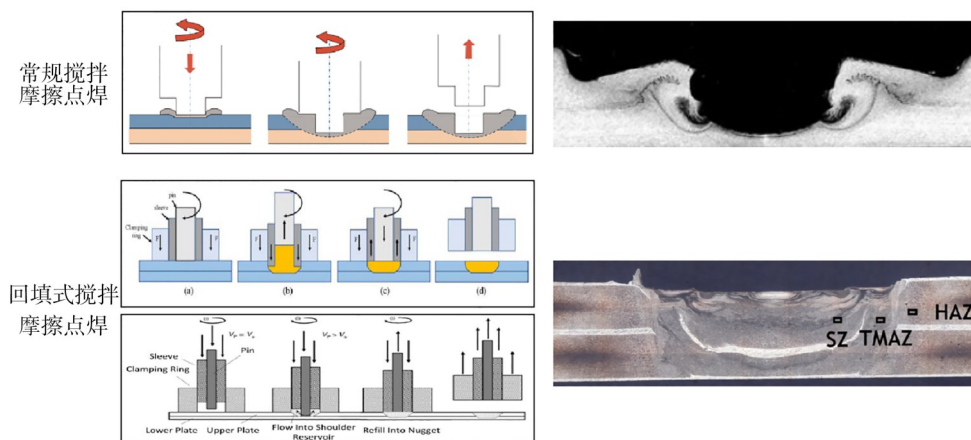
目前,常规搅拌摩擦焊接在汽车结构中的应用以铝合金、钢材料的连接为主,展现出显著的优势,但是针对其他轻质材料的连接研究报道较少,还需要进一步探究和完善相关的焊接工艺与连接机理。此外,由于常规FSW需刚性固定的技术特点,不易完成复杂结构或位置的材料连接,通常仅适用于直焊缝、环焊缝结构部件,工业应用受到一定限制。

2 搅拌摩擦点焊

搅拌摩擦点焊(Friction Stir Spot Welding, FSSW)是在FSW基础上开发的新型固相焊接技术,可以有效地实现轻质合金材料的高质量连接。其工艺原理为:在轴向压力作用下,将高速旋转的搅

拌工具压入待连接的工件内部,金属材料受到摩擦热和机械搅拌作用而发生塑性变形,在搅拌工具保持压力并逐渐退出的过程中形成焊点^[46]。与传统的电阻点焊(Resistance Spot Welding, RSW)方法相比,FSSW能够避免电阻点焊连接铝合金时出现的焊点质量不稳定、焊缝缺陷、工件热变形等问题,在轻合金焊接方面拥有明显的优势,因此在汽车制造业领域内受到了极大的关注。目前在汽车领域应用最多的FSSW技术主要有常规搅拌摩擦点焊以及回填式搅拌摩擦点焊(Refill friction stir spot welding, RFSSW),如图9所示。

1993年,日本马自达公司发明了搅拌摩擦点焊^[51],作为一种简化版的搅拌摩擦焊技术,其设备简洁、生产效率高,适用于对接、搭接等不同的应用场景。传统式搅拌摩擦点焊采用整体式搅拌工具头,由轴肩和搅拌针两部分组成,经过压入-焊接-

图9 搅拌摩擦点焊的分类与原理^[47-50]Fig. 9 Classification and principle of stir friction spot welding diagram^[47-50]

回撤三个步骤便可完成焊接,但在被焊区域会留下匙孔,影响焊缝外观和成形质量。显然,匙孔形貌会影响点焊接头的成形质量,影响搅拌摩擦点焊在车用领域中的应用,目前主要采用回填式搅拌摩擦点焊技术以解决该问题。德国 HZG 研究所开发的回填式搅拌摩擦点焊技术,成功克服了传统搅拌摩擦点焊过程中出现的匙孔问题^[52]。该技术采用组装式焊具,由搅拌针、搅拌套和压紧套组成,通过调节搅拌针与搅拌套之间的相互运动以执行材料压缩和回填的动作,将焊接时产生的热塑性材料重新压入焊缝区域。根据插入阶段下压的工具,回填式搅拌摩擦点焊可分为搅拌套下压式和搅拌针下压式两种类型。

2.1 轻量化材料 FSSW 连接研究进展

搅拌摩擦点焊作为固相连接技术,能够形成稳定的焊接接头,显著降低能源消耗,而且适用于异种材料的连接,在汽车轻量化连接领域得到了广泛的应用,能够满足多样化的工业焊接需求^[49,53]。异种材料连接最大的问题便是用何种技术保证接头区域的优异机械性能。最普遍的电阻点焊技术在异种材料连接时会形成脆性金属间化合物 IMCs (Intermetallic Compounds),尤其是钢/铝异种金属焊接界面会形成 Fe_2Al_3 和 FeAl_3 等金属间化合物,导致焊接接头力学性能降低^[54]。相比之下,FSSW 通过精确控制热输入和塑性变形过程,能够调控接头金属间化合物数量与分布,同时减少焊后残余应力与变形,获得高质量的焊接接头。

铝合金和钢的混合结构在减轻质量和节约能源方面为汽车工业提供了明显的优势。Sung^[55]等使用 FSSW 技术成功实现了 3 mm 厚的 A15083-O 铝合金与 2 mm 厚的 DP590 高强度钢的焊接,焊接接头最大拉伸剪切强度达 6.5 kN,接头界面处 IMCs

层厚度控制在 6 μm 以内。该技术不仅提高了异种材料连接强度,更通过形成薄层 IMCs 增强了接头的稳定性和可靠性。Chende^[56]等对 6061 铝合金和 TRIP/800 钢进行了 FSSW 研究表明,焊接时间对焊接接头的强度有更大的影响。而程璋良^[57]等有不同的结论,在对 6061 铝合金和 B240VK 钢进行 FSSW 的实验中发现,主轴转速对焊接接头的力学性能影响最为显著,其次是焊接深度,再其次是焊接速度,而停留时间对力学性能的影响相对较小。Svoboda^[58]等探讨了不同搅拌头尺寸对焊接接头力学性能的影响,并观察到搅拌头的形状会改变 IMCs 层的厚度、形态和延伸度,如图 10 所示。Li^[59]等使用 1 mm 厚的 PX 铝合金板和 1 mm 厚的 ST16 钢板进行了回填式 FSSW 焊接实验,发现接头断口区域可以划分为搅拌针影响区和搅拌套影响区。在搅拌针影响区,断口的形貌主要是韧性断裂的韧窝;而在搅拌套影响区,断口上观察到大量片状或颗粒状的金属间化合物,显示出脆性断裂的特征。

大量研究表明,FSSW 同样可以很好地用于 CFRP 与铝合金、镁合金的异种连接,相关研究主要集中于工艺参数的精细化调整、焊接过程中温度场的动态变化、接头微观组织演变以及接头断裂失效模式。Goushegir^[60]等进行了 AA2024 铝合金与 CFRP 复合材料的搅拌摩擦点焊接头的拉伸剪切强度测试,结果表明,母材表面覆盖铝层时的焊接接头剪切强度高于未覆铝层试样。在焊接接头中,由于存在径向裂纹,粘附区 (Adhesion Zone, AZ) 被认为是最薄弱的环节,而塑性变形区 (Plastic Deformation Zone, PDZ) 显示出最高的强度。Esteves^[61]等人的研究指出,搅拌针的旋转速度是影响接头剪切强度的最关键因素,增加热输入可以扩大焊核区域并提高

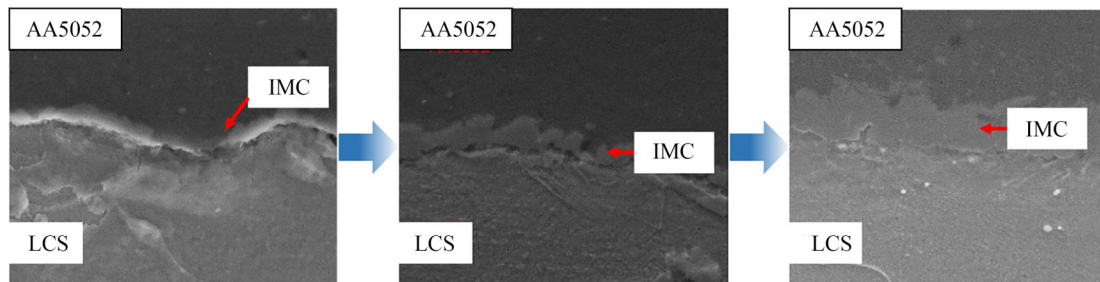


图 10 铝钢异种 FSSW 接头 IMCs 演变^[58]

Fig. 10 Al/steel dissimilar material FSSW joints IMCs evolution^[58]

接头的整体强度。此外,复合材料在金属表面的铺展与材料表面孔隙度密切相关。施加更大的下压力可以改善界面间的润湿性以及复合材料的铺展性,从而获得力学性能更佳、强度更高的焊接接头。为了增强连接处的机械强度并减少固化所需时间,André^[62]等人在CFRP与2024-T3铝合金之间引入了聚苯硫醚作为中间层,通过搅拌摩擦点焊技术进行连接,结果表明使用PPS中间层的连接点的抗剪强度比不使用中间层的连接点高出20%~55%,如图11所示。Ogawa^[63-64]研究显示,通过预先对铝合金表面进行处理,可以制造出具有更高疲劳强度的铝合金与CFRP的搅拌摩擦点焊接头。此外,在保持其他参数不变的情况下,随着连接时间的适当延长,接头的静态剪切强度和疲劳强度均会得到提升。

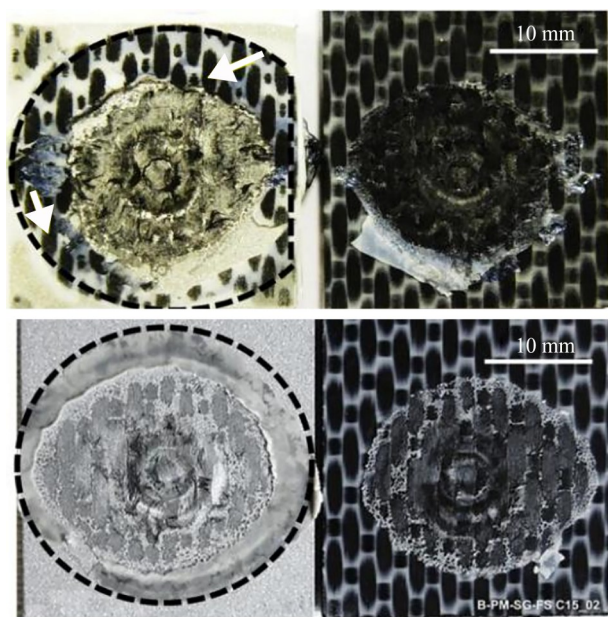


图11 中间层对Al/CFRP搅拌摩擦点焊接头断裂行为的影响^[62]

Fig. 11 Effect of interlayer on the fracture behaviour of Al/CFRP FSW joints^[62]

综上,搅拌摩擦点焊适用于异种材料的焊接,在汽车领域具有广阔的应用前景。通过选择合理的焊接工艺参数可获得接头成形良好、内部无缺陷的高质量接头,相比于传统铆接和电阻点焊,具有连接强度和效率上的优势。但FSSW的焊接工艺窗口较窄,在接头中容易产生多种焊接缺陷,一定程度上降低了接头的使用可靠性。因此,需要进一步深入研究点焊缺陷形成与断裂机制,拓宽焊接工艺区间,以提高FSSW技术在工业生产中的适应性和优越性。

2.2 FSSW在汽车工业中的应用

搅拌摩擦点焊技术在最初被开发之前,其主要目标之一就是作为电阻点焊的替代方案,特别是在汽车工业中用于铝合金结构件的连接。这种创新的焊接技术旨在解决传统焊接方法在铝合金材料上应用时遇到的一些局限性,如焊接接头质量不稳定、容易产生焊接缺陷等问题。在汽车工业中,FSSW的主要应用场景为车身连接——车身结构十分复杂,焊接部位往往难以实现刚性支撑,而FSSW可有效适应此类工况。

传统式搅拌摩擦点焊的首次工业化应用始于2003年,日本马自达公司将其用于新款运动车型Mazda RX-8的后门生产^[65],其整体焊接成本仅为电阻点焊的五分之一,如图12所示。2004年,马自达与川崎重工业公司合作,联合设计并研发了固定式搅拌摩擦点焊设备。2005年,马自达汽车公司进一步将该技术应用于铝合金与钢材的异种材料连接,具体应用到马自达MX-5车型上的行李箱盖和用于固定螺栓的套筒之间的连接。同年,德国Riftec公司将FSSW技术应用于宝马5系车型的车门框架和直边立柱生产中。丰田公司亦采用此技术用于普锐斯(Ex PRIUS)车型的门框连接^[66],如图13所示,截至目前已有超过100万套门框使用该技术制造。

我国在汽车领域的FSSW技术应用研究尚处于起步阶段,距离工程化应用仍存在诸多亟待解决的基本问题。目前仅有少数公司公开报道了其开发的FSSW技术在部分汽车构件中的应用探索,整体距离大规模的工业应用还有一定差距。但鉴于FSSW在异种材料连接中展现出的优势不可忽视,在未来汽车轻量化领域拥有着巨大的发展潜力。

3 搅拌摩擦焊接设备

FSW技术针对异种材料连接能够发挥出显著的优势,具有焊接性能好、焊接变形小和焊接效率高等特点,相比传统熔焊更容易获得高质量的焊接接头。但FSW过程较为复杂,不同的材料焊接时产生的塑性变形和热循环不同,工艺参数的选择以及设备调控精度直接影响着焊缝质量。因此,搅拌摩擦焊接设备的开发与应用对提升FSW接头的成形

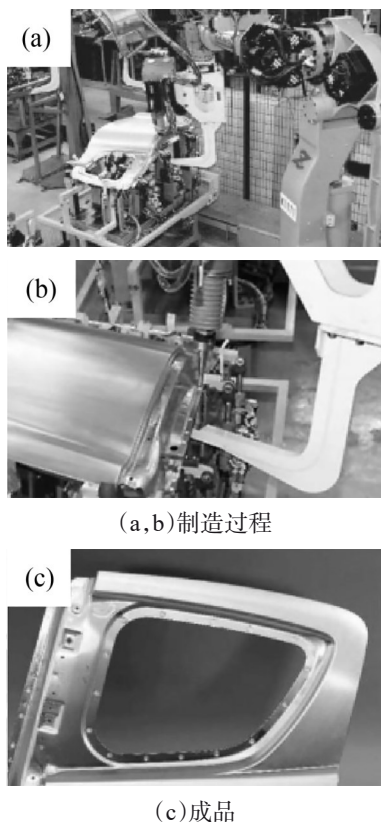


图 12 Mazda-RX8 运动型轿车后车门焊接制造^[65]

Fig. 12 Mazda-RX8 sports sedan rear door welding fabrication^[65]

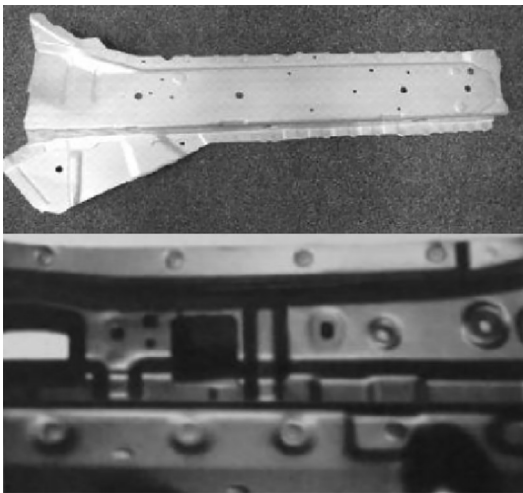


图 13 采用 FSSW 连接的直边立柱^[66]以及门框构件^[67]

Fig. 13 Straight-edged columns^[66] and jamb elements^[67] joined by friction stir spot welding

质量,推动该技术在汽车材料连接中的规模化应用具有重要意义,进而助力汽车工业的技术升级。

3.1 设备开发原理

FSW 焊接设备主要包括支撑系统、动力系统、搅拌头系统、辅助系统以及数字控制系统,不同系

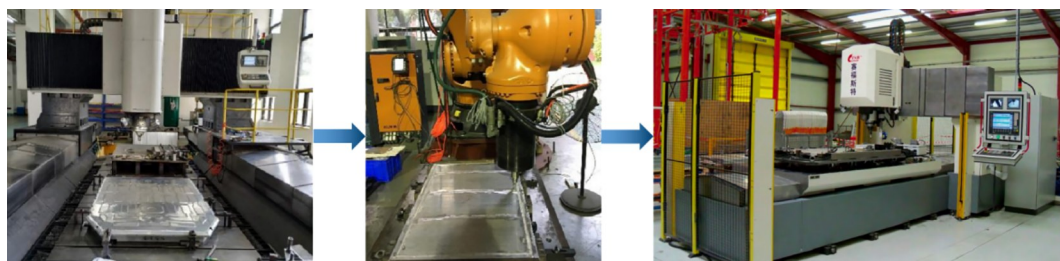
统之间相辅相成,从而能够实现搅拌摩擦焊接过程的旋转、下扎、焊接与离开四大工艺要求^[68]。目前,多数 FSW 设备都是基于龙门式 CNC 系统,能够在焊接过程中表现出很好的刚度和载荷,但是工作范围和定向能力有限,仅能完成简单的直缝、T 型缝等一维焊接。

随着 FSW 技术的发展,各国企业都在围绕改善焊接负载状况、增强设备刚度以及提高整体柔性控制等方面持续改进焊接设备。如今先进的搅拌摩擦焊接设备能够实现二维甚至三维的多轴联动焊接^[69],在航空航天、轨道交通等领域发挥出巨大的应用价值。机器人搅拌摩擦焊(Robotic Friction Stir Welding, RFSW)也成为了搅拌摩擦焊接设备的一种选择,其相比龙门式 CNC 系统成本更低、体积更小而且工作灵活度更大。但机器人搅拌摩擦焊存在着两个弊端:一是工业机器人的有效载荷能力限制了加工板材的厚度;二是机器人关节的低刚度容易导致焊具发生精度偏差^[70]。

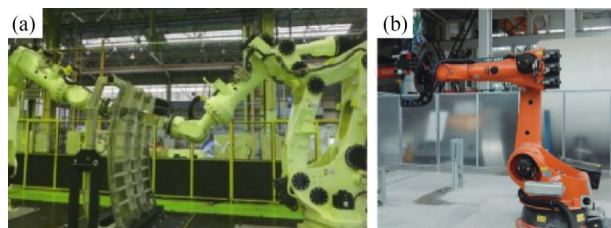
3.2 设备研发进展

FSW 技术起源于英国焊接研究所,经过数十年发展已实现了成熟的工业化应用,国外主要的搅拌摩擦焊接设备制造商有 GTC、ESAB、MTS、GEMCOR、FSWLL、HLFAHL、FSL 和 CFSWC 等公司^[69]。国内 FSW 设备研究虽起步较晚,但已在多个工业领域实现了良好应用。在汽车电池托盘焊接生产中,中航工业赛福斯特公司已开发出成熟的专用设备,其搅拌摩擦焊专机具备高刚性和焊接过程稳定等特点;同时该公司研发的自由度更高的机器人搅拌摩擦焊,集成了激光焊缝跟踪系统、压力控制系统,可实现焊接过程的位置控制和压力实时的跟踪控制。2013 年,赛福斯特公司与国内富士康公司合作研发了适用于电动汽车的电池壳体搅拌摩擦焊接产品;2014 年又成功开发了适用于奔驰电动汽车底板的搅拌摩擦焊接产品,进一步巩固了其在高端制造领域的领先地位,并销往全球^[71],如图 14 所示。

FSSW 技术因操作简单、适应复杂工况的特性,成为当前设备研发的主流。日本川崎重工已研发并生产多种回填式搅拌摩擦点焊设备,包括固定式、C 型焊点钳式等,如图 15a 所示。2016 年,中航工业赛福斯特公司成功实现回填式搅拌摩擦点焊

图14 赛福斯特生产的FSW焊机^[71]Fig. 14 Friction stir welding machine made by Beijing FSW Technology Co., Ltd. ^[71]

与机器人系统的集成,如图15b所示。与传统的电阻点焊技术相比,FSSW可规避高熔点材料焊接缺陷及铆接等传统连接方式的局限性,结合机器人的灵活性,能够适应各类复杂结构件的焊接需求。



(a) 日本川崎重工焊机

(b) 赛福斯特焊机

图15 搅拌摩擦点焊机器人^[67]Fig. 15 Friction stir spot welding robot^[67]

常规FSW过程中,被焊板材通常需要刚性固定,且难以实现复杂结构与路径的连接。尽管当前常规搅拌摩擦焊设备已具备机械化、自动化特性,但焊接效率相对较低,且无法满足变截面拼焊板的焊接需求。因此,亟需研发具备高度柔性 with 视觉传感功能的智能化搅拌摩擦焊设备,以适应汽车零部件高效率、高质量的生产要求。

4 总结与展望

汽车轻量化的需求正推动车身材料的应用和结构设计向多元化方向发展,先进高强钢、铝合金、镁合金、CFRP等轻质高强材料的规模化应用,有效实现了汽车构件的减重目标。由于异种材料之间存在的理化性能差异导致传统工艺连接效果受限,而新型固相连接技术——搅拌摩擦焊能够避免传统熔焊的大部分缺陷,从而形成高质量焊接接头。然而,FSW技术在实际应用中仍存在一些局限和不足,已成为制约其进一步发展的主要障碍。未来需通过持续的技术研发与迭代优化,克服技术瓶颈并

解决生产痛点,才能推动FSW技术的深度发展与广泛应用。

(1)汽车结构的传统连接技术主要包括机械连接、胶结以及焊接三类,随着轻量化进程的推进,传统连接工艺难以在保证安全性能的前提下实现结构减重,因此焊接技术成为研究焦点。FSW作为新型固相连接工艺,其焊接过程中不发生材料的熔化,可有效避免传统熔焊中常见的气孔、裂纹和合金元素烧损等问题,并能有效调控界面金属间化合物的形成,从而获得性能稳定的焊接接头。

(2)当前FSW技术在汽车结构中的应用仍以铝合金与钢的连接为主,针对镁合金、CFRP等其他轻质材料的应用研究报道相对较少。国内外学者对轻量化材料FSW的研究主要集中于接头成形工艺优化、微观组织演变、IMCs调控及性能评估,但对IMCs的形成机理和调控手段缺乏更深层次的理论探索,导致实际焊接工艺窗口较窄,制约了技术的工程化应用。

(3)在汽车应用领域,常规FSW及FSSW虽已实现部分场景的应用,但针对实际工程问题的系统性应用研究仍较匮乏。各企业采用FSW技术连接汽车构件多处于初步探索阶段,尚未实现大规模的商业应用。未来需进一步深化FSW技术在汽车轻量化材料连接领域的基础研究与工程实践,完善工艺规范与应用标准,同时推动该技术在轨道交通等相关领域的拓展应用。

(4)FSW设备主要分为龙门式和机器人式等结构,在加工载荷和工作灵活度方面各有侧重。传统FSW设备虽具备机械化、自动化特性,但焊接效率相对较低且仅能实现一维焊接;面对复杂多样的汽车构件,具备多维焊接能力的FSW设备将显著推动汽车制造领域的技术升级。未来FSW设备将朝着

多元化、智能化、小型化和低成本方向发展,以满足汽车零部件高效率、高质量的焊接生产。

参考文献:

- [1] 侯俊良,周博芳,张红霞,等. 汽车轻量化铝合金材料的搅拌摩擦焊研究现状[J]. 电焊机,2023,53(12): 86-94.
HOU J L, ZHOU B F, ZHANG H X, et al. Research Status of Friction Stir Welding of Automobile Lightweight Aluminium Alloy Material[J]. Electric Welding Machine,2023,53(12):86-94.
- [2] Dhingra R, Das S. Life cycle energy and environmental evaluation of downsized vs. lightweight material automotive engines [J]. Journal of Cleaner Production, 2014,85:347-358.
- [3] 李红,刘旭升,张宜生,等. 新能源汽车产业及其技术发展现状与展望[J]. 材料导报,2019,33(23):3853-3861+3881.
LI H, LIU X S, ZHANG Y S, et al. Current Research and Challenges in Innovative Technology of Joining Dissimilar Materials for Electric Vehicles[J]. Materials Reports,2019,33(23):3853-3861+3881.
- [4] 洪吉超,梁峰伟,杨京松,等. 新能源汽车产业及其技术发展现状与展望[J]. 科技导报,2023,41(5):49-59.
HONG J C, LIANG F W, YANG J S, et al. New energy vehicle industry and technology development status[J]. Science & Technology Review,2023,41(5):49-59.
- [5] Witik R A, Payet J, Michaud V, et al. Assessing the life cycle costs and environmental performance of lightweight materials in automobile applications [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011,42(11):1694-1709.
- [6] 陈宇豪,薛松柏,王博,等. 汽车轻量化焊接技术发展现状与未来[J]. 材料导报,2019,33(S2):431-440.
CHEN Y H, XUE S B, WANG B, et al. Development Status and Future Direction of Welding Technology in the Automotive Lightweight [J]. Materials Reports, 2019,33(S2):431-440.
- [7] 娄元豪,王优强,邢照斌. 汽车轻量化研究进展[J]. 汽车工艺与材料,2023(9):1-7.
LOU Y H, WANG Y Q, XING Z B. Research Progress on Automotive Lightweight [J]. Automobile Technology & Material,2023(9):1-7.
- [8] 宋燕利,杨龙,郭巍,等. 面向汽车轻量化应用的碳纤维复合材料关键技术[J]. 材料导报,2016,30(17): 16-25+50.
SONG Y L, YANG L, GUO W, et al. A Survey on Key Technologies for Carbon fiber-reinforced Plastics with Applications to Automobile Lightening [J]. Materials Reports,2016,30(17):16-25+50.
- [9] Valentini R, Tedesco M M, Corsinovi S, et al. Delayed Fracture in Automotive Advanced High Strength Steel: A New Investigation Approach [J]. Steel Research International,2019,90(8):1900136.
- [10] 安柯宇,梁佳敏,幸非凡,等. 第三代汽车用高强钢——Q&P 钢的研究现状[J]. 金属热处理,2019,44(2):1-7.
AN K Y, LIANG J M, XING F F, et al. Research status of the 3rd generation advanced high strength steels for automobiles-Q&P steels[J]. Heat Treatment of Metals, 2019,44(2):1-7.
- [11] Kulekci M K. Magnesium and its alloys applications in automotive industry [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(9): 851-865.
- [12] 李雨. 火箭贮箱结构材料应用及发展现状[J]. 宇航材料工艺,2024,54(2):29-42.
LI Y. Application and Development Status of Rocket Tank Structural Materials [J]. Aerospace Materials & Technology,2024,54(2):29-42.
- [13] 李永兵,马运五,楼铭,等. 轻量化多材料汽车车身连接技术进展[J]. 机械工程学报,2016,52(24):1-23.
LI Y B, MA Y W, LOU M, et al. Advances in Welding and Joining Processes of Multi-material Lightweight Car Body[J]. Journal of Mechanical Engineering,2016, 52(24):1-23.
- [14] 范子杰,桂良进,苏瑞意. 汽车轻量化技术的研究与进展[J]. 汽车安全与节能学报,2014,5(1):1-16.
FAN Z J, GUI L J, SU R Y. Research and development of automotive lightweight technology [J]. Journal of Automotive Safety and Energy,2014,5(1):1-16.
- [15] Korta J, Mlyniec A, Uhl T. Experimental and numerical study on the effect of humidity-temperature cycling on structural multi-material adhesive joints [J]. Composites Part B: Engineering,2015,79:621-630.
- [16] 杜则裕. 焊接冶金学:基本原理[M]. 北京:机械工业出版社,2018.
- [17] Selvi S, Vishvakshen A, Rajasekar E. Cold metal transfer (CMT) technology-An overview[J]. Defence Technology,2018,14(1):28-44.
- [18] Bunaziv I, Akselsen O M, Ren X, et al. Laser Beam and Laser-Arc Hybrid Welding of Aluminium Alloys

- [J]. *Metals*, 2021, 11(8): 1150.
- [19] 卢清爽, 杨杰寅, 秦志刚. 汽车车身制造中铝合金连接技术研究[J]. *汽车文摘*, 2024(1): 57–62.
LU Q S, YANG J Y, QIN Z G. Research on Aluminum Alloy Joining Technologies in Automobile Manufacturing[J]. *Automotive Digest*, 2024(1): 57–62.
- [20] Abbas Z, Zhao L, Deng J, et al. Advances in ultrasonic welding of lightweight alloys: A review[J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2023, 42(1): 20220298.
- [21] 刘亦功. 车身轻量化材料和工艺制造技术[J]. *汽车文摘*, 2019(12): 40–44.
LIU Y G. Lightweight Material and Manufacturing Technologies for Car Body[J]. *Automotive Digest (Chinese)*, 2019(12): 40–44.
- [22] Huang Z, Sun S, Wang J, et al. Formation and fracture characteristics of friction stir lap joint of Alclad 2A12–T42 aluminum alloy at different tilt angles [J]. *Weld World*, 2023, 67: 1901–1910.
- [23] Ma L, Xu Z, Zhang T, et al. In-situ formed amorphous phase in aluminum/steel friction stir welds: Interface evolution and strength improvement[J]. *Journal of Advanced Joining Processes*, 2024, 9: 100220.
- [24] Salih O S, Ou H, Sun W, et al. A review of friction stir welding of aluminium matrix composites[J]. *Materials & Design*, 2015, 86: 61–71.
- [25] Venkateswarlu D, Nageswara rao P, Mahapatra M M, et al. Processing and Optimization of Dissimilar Friction Stir Welding of AA 2219 and AA 7039 Alloys[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 24(12): 4809–4824.
- [26] Gao S, Zhou L, Sun G, et al. Influence of Welding Speed on Microstructure and Mechanical Properties of 5251 Aluminum Alloy Joints Fabricated by Self-Reacting Friction Stir Welding[J]. *Materials*, 2021, 14(20): 6178.
- [27] Ramakrishna R V S M, Sankara Rao K B, Reddy G M, et al. Friction stir welding of advanced high strength (bainitic) steels for automotive applications[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(9, Part 1): 17139–17146.
- [28] 蔺宏涛, 孟强, 王怡嵩, 等. 旋转速度对高强度钢 Q&P980 搅拌摩擦焊接头组织与性能的影响[J]. *材料导报*, 2024, 34(6): 6126–6131.
LIN H T, MENG Q, WANG Y C, et al. Effect of Rotation Speed on the Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welding of joint High Strength Steel Q&P980 [J]. *Materials Reports*, 2024, 34(6): 6126–6131.
- [29] 黄勇兵. 镁/钢异种金属搅拌摩擦焊工艺及性能研究[D]. 江西: 南昌航空大学, 2014.
HUANG Y B. The research of process and properties of Magnesium alloys and steel friction stir welding[D]. Jiangxi: Nanchang Hangkong University, 2014.
- [30] Lakshminarayanan A K, Annamalai V E. Fabrication and performance evaluation of dissimilar magnesium – aluminium alloy multi-seam friction stir clad joints[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(1): 25–35.
- [31] 李佩琪, 游国强, 徐轩曦, 等. 压铸态镁/铝异种合金搅拌摩擦焊接接头组织及性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(5): 1551–1558.
LI P Q, YOU G Q, XU X X, et al. Microstructure and Properties for Friction Stir Welded joints of High-pressure Die Casting Dissimilar Mg/Al Alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 48(5): 1551–1558.
- [32] Fu B, Qin G, Li F, et al. Friction stir welding process of dissimilar metals of 6061–T6 aluminum alloy to AZ31B magnesium alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 218: 38–47.
- [33] Shah L H, Othman N H, Gerlich A. Review of research progress on aluminium–magnesium dissimilar friction stir welding [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2018, 23(3): 256–270.
- [34] Marannano G, Zuccarello B. Numerical experimental analysis of hybrid double lap aluminum–CFRP joints [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 71: 28–39.
- [35] Nagatsuka K, Yoshida S, Tsuchiya A, et al. Direct joining of carbon–fiber–reinforced plastic to an aluminum alloy using friction lap joining[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 73: 82–88.
- [36] 谢一鸣. FRTP 同种及 FRTP 与铝合金异种材料搅拌摩擦焊[D]. 江西: 南昌航空大学, 2013.
XIE Y M. Friction Stir Welding of Homogenous FRTP and Dissimilar, FRTP/Aluminum Alloy [D]. Jiangxi: Nanchang Hangkong University, 2013.
- [37] Panneerselvam K, Lenin K. Investigation on Effect of Tool Forces and Joint Defects During FSW of Polypropylene Plate[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 38: 3927–3940.
- [38] 刘煜纯, 赵洪运, 周宝升, 等. 金属/聚合物基于摩擦连接技术研究现状[J]. *航空学报*, 2022, 43(4): 200–217.

- LIU Y C, ZHAO H Y, ZHOU B S, et al. A review on friction-based metal/polymer joining technologies [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 43 (4): 200–217.
- [39] 柴鹏, 孙成彬, 简波, 等. 搅拌摩擦焊接技术在汽车制造中的应用研究[J]. *汽车技术*, 2005(2): 25–28.
- CHAI P, SUN C B, JIAN B, et al. Research Development of Application of FSW in Automotive Manufacturing[J]. *Automobile Technology*, 2005(2): 25–28.
- [40] Gibson B T, Lammlein D H, Prater T J, et al. Friction stir welding: Process, automation, and control[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, 16(1): 56–73.
- [41] Kavathia K, Badheka V. Application of Friction Stir Welding (FSW) in Automotive and Electric Vehicle [C]//Parwani A K, Ramkumar PL, Abhishek K, et al. *Recent Advances in Mechanical Infrastructure*. Singapore: Springer Nature, 2022: 289–304.
- [42] 栾国红. 汽车制造新技术——搅拌摩擦焊[J]. *现代零部件*, 2006(5): 76, 78–80.
- LUAN G H. New technology in automotive manufacturing –Friction Stir Welding [J]. *Auto Manufacturing Engineer*, 2006(5): 76, 78–80
- [43] Hussein S A, Tahir A S M, Hadzley A B. Characteristics of aluminum-to-steel joint made by friction stir welding: A review [J]. *Materials Today Communications*, 2015, 5: 32–49.
- [44] 胡大武, 张桂源, 曹鹏程, 等. 新能源汽车电池包关键连接技术[J]. *金属加工(热加工)*, 2020(8): 10–13.
- HU D W, ZHANG G Y, CAO P C, et al. Key connection technology of new energy vehicle battery pack[J]. *MW Metal Forming*, 2020(8): 10–13.
- [45] 巫飞彪, 周博俊. 搅拌摩擦焊在新能源汽车电池下壳体焊接工艺中的应用[J]. *机电工程技术*, 2021, 50(11): 231–235.
- WU F B, ZHOU B J. Application of Friction Stir Welding in the Welding Process of Battery Undershell of New Energy Automobile [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2021, 50(11): 231–235.
- [46] 高辉. 搅拌摩擦点焊技术在汽车行业的应用[J]. *内燃机与配件*, 2022(4): 143–145.
- GAO H. Application of Friction Stir Spot Welding Technology in Automobile industry [J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2022(4): 143–145.
- [47] 张翹超. 6061/TC4 搅拌摩擦点焊接头力学性能研究[D]. 江苏: 南京航空航天大学, 2022.
- ZHANG C C. Research on The echanical Performance of Friction Stir Spot Welding Joint of 6061/TC4 [D]. Jiangsu: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022.
- [48] 陈溯. 铝合金/钢回填式搅拌摩擦点焊机理研究[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2018.
- CHE S. Mechanism of Refill Friction Stir Spot Welding Between Aluminum Alloy and Steel [D]. Liaoning: Dalian University of Technology, 2018.
- [49] Shen Z, Ding Y, Gerlich A P. Advances in friction stir spot welding [J]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2020, 45(6): 457–534.
- [50] Li Y, Sun G, Zhang Z, et al. Texture evolution of refill friction stir spot welding in alclad 2A12–T42 aluminum alloy [J]. *Materials Characterization*, 2023, 205: 113289.
- [51] R S. Development of spot FSW robot system for automobile body members [C]//*Proceedings of the 3rd International Symposium of Friction Stir Welding*, Kobe, Japan, 2004.
- [52] Zhang Z, Yang X, Zhang J, et al. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy [J]. *Materials & Design*, 2011, 32(8–9): 4461–4470.
- [53] 赵衍华, 张丽娜, 刘景铎, 等. 搅拌摩擦点焊技术简介 [J]. *航天制造技术*, 2009(2): 1–5.
- ZHAO Y H, ZHANG L M, LIU J Z, et al. Introduction of Friction Stir Spot Welding Technology [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2009(2): 1–5.
- [54] Qiu R, Satonaka S, Iwamoto C. Effect of interfacial reaction layer continuity on the tensile strength of resistance spot welded joints between aluminum alloy and steels [J]. *MATERIALS & DESIGN*, 2009, 30 (9): 3686–3689.
- [55] Sung B S, Bang H S, Jeong S O, et al. Effects of processing parameters on the friction stir spot joining of Al5083–O aluminum alloy to DP590 steel [J]. *Metals and Materials International*, 2017, 23(3): 562–567.
- [56] Chen K, Liu X, Ni J. Effects of Process Parameters on Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloy to Advanced High-Strength Steel [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, 139: 081016.
- [57] 程璋良. 车用铝钢异种材料搅拌摩擦点焊焊接工艺研究[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2019.
- CHENG Z L. Research on Friction Stir Spot Welding Process of Dissimilar Aluminum to Steel for car [D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology,

- 2019.
- [58] Piccini J M, Svoboda H G. Tool geometry optimization in friction stir spot welding of Al-steel joints[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 26: 142-154.
- [59] Li P, Chen S, Dong H, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of dissimilar aluminum/steel joint fabricated via refilled friction stir spot welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 49: 385-396.
- [60] Goushegir S M, dos Santos J F, Amancio-Filho S T. Friction Spot Joining of aluminum AA2024/carbon-fiber reinforced poly (phenylene sulfide) composite single lap joints: Microstructure and mechanical performance[J]. Materials & Design, 2014, 54: 196-206.
- [61] Esteves J V, Goushegir S M, dos Santos J F, et al. Friction spot joining of aluminum AA6181-T4 and carbon fiber-reinforced poly (phenylene sulfide) : Effects of process parameters on the microstructure and mechanical strength[J]. Materials & Design, 2015, 66: 437-445.
- [62] André N M, Goushegir S M, dos Santos J F, et al. Friction Spot Joining of aluminum alloy 2024-T3 and carbon-fiber-reinforced poly (phenylene sulfide) laminate with additional PPS film interlayer: Microstructure, mechanical strength and failure mechanisms [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 94: 197-208.
- [63] Ogawa Y, Nakahara F, Akebono H, et al. Effect of jig constraint state during welding process on fatigue properties of Al/CFRP dissimilar welds and fatigue life evaluation based on singular stress[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2020, 43 (10): 2259-2269.
- [64] Ogawa Y, Xiong Y, Akebono H, et al. Fatigue properties of friction stir welds of treated Al to carbon fibre-reinforced plastic[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2018, 23(1): 79-86.
- [65] 秦红珊, 杨新岐. 搅拌摩擦点焊技术及在汽车工业应用前景[J]. 汽车技术, 2006(1): 1-5.
- QIN H S, YANG X Q. Friction Stir Spot Welding Technology and Its Application in Automotive Industry[J]. Automobile Technology, 2006(1): 1-5.
- [66] 乔凤斌, 张松, 郭立杰. 搅拌摩擦点焊技术及其在工业领域中的应用[J]. 电焊机, 2012, 42(10): 82-86.
- QIAO F B, ZHANG S, GUO L J. Friction stir spot welding technology and its application in industry[J]. Electric Welding Machine, 2012, 42(10): 82-86.
- [67] 司福建. 搅拌摩擦焊在汽车工业中的应用[J]. 金属加工(热加工), 2021(4): 6-12.
- SI F J. Application of friction stir welding in automobile industry[J]. MW Metal Forming, 2021(4): 6-12.
- [68] 苏海龙, 刘照松, 骆宗安. 管型母线搅拌摩擦焊接设备的研究开发[J]. 热加工工艺, 2022, 51(23): 145-148+156.
- SU H L, LIU Z S, LUO Z A. Research and Development of Friction Stir Welding Equipment for Tubular Busbar[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(23): 145-148+156.
- [69] 刘照松. 铜及铝管型母线搅拌摩擦焊接设备与工艺研发[D]. 辽宁: 东北大学, 2022.
- LIU Z S. Copper and aluminum tubular busbar friction stir welding equipment and process development [D]. Liaoning: Northeastern University, 2022.
- [70] 刘永宁. 薄壁金属零件机器人搅拌摩擦焊接工艺参数优化与控制方法研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2024.
- LIU Y N. Research on Optimization and Control Method of FSW Process Parameters for Thin-walled Metal Parts Robot[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2024.
- [71] 栾国红, 郭德伦. 搅拌摩擦焊技术在中国的发展和推广应用[J]. 航空制造技术, 2014(17): 70-75.
- LUAN G H, GUO D L. Aeronautical Manufacturing Technology[J]. Development and Application of Friction Stir Welding Technology in China, 2014(17): 70-75.