

超大型一体化电池托盘的搅拌摩擦焊技术研发及应用

梁汉广¹ 卢樱棋¹ 孙永明¹ 万里^{1,2} 黄志垣² 赖影惠² 高亚平¹ 王烁翔²

(1. 广东鸿图科技股份有限公司, 肇庆 526108; 2. 广东鸿图汽车零部件有限公司, 广州 510700)

摘要 聚焦超大型一体化电池托盘的搅拌摩擦焊技术, 基于新能源电池托盘的电池模芯多样、热管理方式不同, 创新设计在托盘本体集成水冷通道并采用搅拌摩擦焊。阐述了该技术应用领域及优势, 分析其难点如水冷板薄、焊道长且复杂、产品易变形等。制定搅拌头选型和焊接参数设计方案, 选用静轴肩焊具并通过DOE试验确定参数。实施双机器人搅拌摩擦焊方案, 成功制造出高质量托盘, 该托盘焊接接头良好, 力学性能达标, 生产效率大幅提高。

关键词 一体化压铸; 电池托盘; 搅拌摩擦焊; 焊接参数

中图分类号 TG249.2; TG457.14

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.Z20240030

Research and Application of Friction Stir Welding Technology for Ultra-large Integrated Battery Trays

LIANG Hanguang¹, LU Yingqi¹, SUN Yongming¹, WAN Li^{1,2}, HUANG Zhiyuan², LAI Yinghui², GAO Yaping¹, WANG Shuoxiang²

(1. Guangdong Hongtu Technology Co., Ltd., Zhaoqing 526108; 2. Guangdong Hongtu Automotive Parts Co., Ltd., Guangzhou 510700)

Abstract: The friction stir welding technology for ultra-large integrated battery trays was focused on, and a water-cooled channel integrated into the tray body was designed and friction stir welding was utilized in view of diverse battery mold cores of new energy battery trays as well as different thermal management methods. The application areas and advantages of the technology were expounded, and difficulties were analyzed such as thin water-cooled plates, long and complex weld beads, and easy product deformation. A selection plan for mixing heads and welding parameter design was developed, and static shoulder welding tools were selected to determine parameters through DOE experiments. The implementation of a dual robot friction stir welding scheme was carried out to successfully produce high-quality trays with desirable welding joints, meeting mechanical performance standards, which significantly improves production efficiency.

Key Words: Integrated Die Casting, Battery Tray, Friction Stir Welding, Welding Parameter

新能源电池托盘所承装的电池模芯方式多样^[1], 各家电芯制造厂及整车厂的电池热管理方式不同, 电池托盘可以集成冷却管道, 也可采用单独的冷却方式^[2]。

搅拌摩擦焊技术自20世纪90年代发明以来, 在国内外均得到了广泛的研究与应用, 已经成功应用于航空、航天、船舶、汽车、电子、电力等领域。随着技术的不断完善和创新, 其应用领域将进一步向新能源、医疗器械、环保设备等领域拓展。近年来, 随着国内新能源汽车的飞速发展, 新能源汽车电池托盘焊接、电机部件焊接、底部部件焊接、电控箱及其他部件焊接都在广泛

应用搅拌摩擦焊。

搅拌摩擦焊是一种固态焊接技术^[3-5], 在焊接过程中, 搅拌头高速旋转并插入被焊接材料的接头处, 通过搅拌头与材料之间的摩擦热和机械作用, 使材料发生塑性变形并实现连接。相比于传统的熔化焊接方法(如弧焊、气焊等), 搅拌摩擦焊具有焊接接头质量好(接头为细晶锻造组织结构, 无气孔、裂纹、夹渣等缺陷)、残余应力低、变形小、可实现多种接头形式的焊接、焊接效率高、能在较厚的材料范围内实现单焊道焊接成形、接头强度高、疲劳性能好、冲击韧性优异、焊接

收稿日期: 2024-09-14; 修订日期: 2024-10-16

基金项目: 工信部高质量发展资助项目(2340STCZB1927)

第一作者简介: 梁汉广, 男, 1986年出生, 工程师, E-mail: lhg@ght-china.com

通信作者: 万里, 男, 1970年出生, 教授级高工, E-mail: wanli@ght-china.com

引用格式: 梁汉广, 卢樱棋, 孙永明, 等. 超大型一体化电池托盘的搅拌摩擦焊技术研发及应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(7): 1117-1120.

LIANG H G, LU Y Q, SUN Y M, et al. Research and application of friction stir welding technology for ultra-large integrated battery trays[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(7): 1117-1120.

成本低(无焊接材料消耗,不需要填丝和保护气体)以及焊接操作简单便于实现自动化焊接等特点。

超大型一体化电池托盘的焊道长度是传统型材拼接的电池托盘焊道长度的3倍以上(传统型材拼接的电池托盘都是在产品四周搅拌摩擦焊焊一圈,一体化电池托盘焊道存在于产品四周和中间),搅拌摩擦焊过程中搅拌头的运动轨迹和焊接参数的均匀性控制难度增加。保证在整个托盘焊接区域内都能实现良好的焊接质量,避免出现局部焊接缺陷,如未焊透、弱连接等问题,是需要解决的重要挑战。本研究针对超大型一体化压铸电池托盘的搅拌摩擦焊工艺进行研究,旨在为相关生产提供参考。

1 一体化压铸电池托盘的搅拌摩擦焊难点

目前市场上常见的大型型材拼接电池托盘电池冷却方式为在电池托盘本体安装多层钎焊的水冷板(见图1),但这种方式成本高,整体质量大。目前我司在制造大型一体化压铸电池托盘时,创新设计为在电池托盘本体集成水冷通道(见图2),再利用搅拌摩擦焊工艺把一块单层的铝板焊接到电池托盘本体上形成水冷通道,大幅降低了成本,减轻整体的质量,通过铸件本体就可以实现复杂的水路。

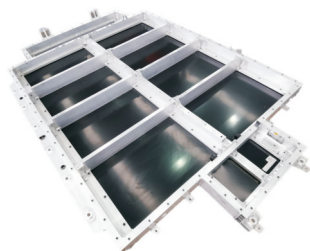


图1 钎焊水冷板电池托盘
Fig.1 Brazed water-cooled plate battery tray

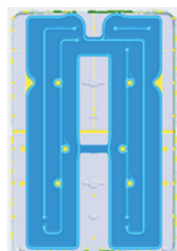


图2 单层水冷电池托盘
Fig.2 Single-layer water-cooled battery tray

我司为某整车厂开发的大型电池托盘见图3,该产品尺寸为2 000 mm×1 600 mm×123 mm,最薄壁厚为3 mm,需要搅拌摩擦焊安装两块A5052合金材质,尺寸为1 750 mm×551 mm×2 mm的水冷板。搅拌摩擦焊的焊道共12条,焊接轨迹总长度为21 m,焊道轨迹复杂,焊接后产品变形大,电池模组平面度要求0.8 mm以内,装配完水冷板后总质量为60 kg。

该电池托盘的搅拌摩擦焊难点主要体现为:①搅拌摩擦焊(FSW)水冷板厚度薄(2 mm),FSW焊接过程需要铝板与铸件贴平,才能保证焊接质量,一旦翘起变形就会导致焊接不良。因此焊接时需对水冷板压紧,焊接后及时释放压紧,焊接设备要求边压紧、边焊接、边释

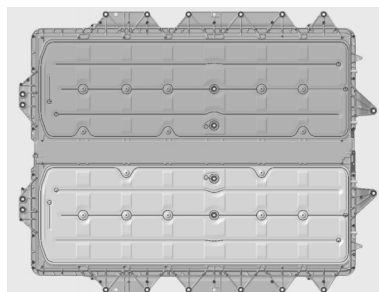


图3 一体化电池托盘产品图

Fig.3 Product of integrated battery tray

放,做到有效配合;②焊道长21 m,路径复杂,对焊接设备的轨迹精度控制要求高;③产品平面尺寸大、易变形,且变形量波动幅度大,导致FSW焊接夹具的设计与制造难度大;④焊接强度 $\geq$ 本体性能的70%。

2 搅拌摩擦焊方案的制定

2.1 搅拌头选型

目前搅拌摩擦焊焊具根据轴肩分类,可以分为动轴肩焊具和静轴肩焊具^[6-9]。动轴肩在焊接过程中会随着搅拌头一起旋转,这使得轴肩与被焊接材料之间产生相对运动,通过摩擦生热来促进材料的软化和流动,有助于形成良好的接头。动轴肩能够提供较大的摩擦热输入,有利于提高焊接效率和接头质量。其可以使接头金属材料充分塑化,并且在搅拌作用下,材料的混合和均匀性较好,能够减少接头中的缺陷。图4为动轴肩焊具和焊缝实物图。

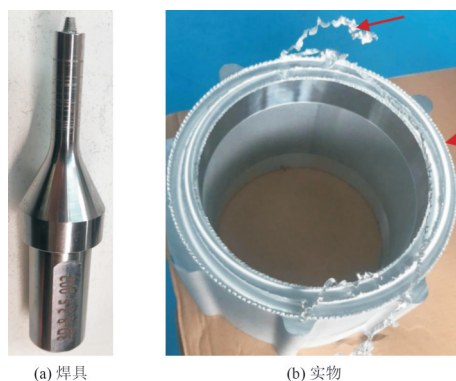


图4 动轴肩焊具和焊缝实物图

Fig.4 Dynamic shoulder welding tool and entity of welding joint

静轴肩搅拌摩擦焊采用轴肩与搅拌针分体式设计,在焊接过程中内部搅拌针转动,而外部轴肩不转动,仅沿焊接方向行进。图5为静轴肩焊具和焊接实物图。由于轴肩不转动,表面热输入减小,工件厚度方向热量分布相对较均匀;接头摩擦热量分布较为均匀,组织均匀性好,接头表面光洁,飞边量小。此外,静轴肩能够有效抑制接头材料挤出,减少接头减薄,可实现角接头结构,降低孔洞、隧道等缺陷的形成几率,接头性能优良。

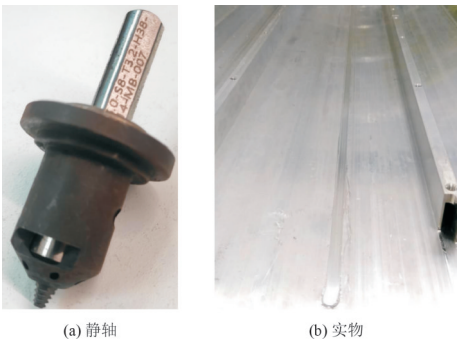


图5 静轴肩焊具和焊接实物图

Fig.5 Static shoulder welding tool and welding entity

针对超大型一体化电池托盘的结构特点和焊接要求,前期用了同样的板材在两种不同的焊具进行测试。图6为两种轴肩焊具的表面粗糙度和板减量对比。各图中间位置为搅拌摩擦焊焊道,静轴肩焊具焊接后母材的板减料只有83.71 μm ,表面也更光滑。静轴肩焊具能够有效抑制接头材料挤出,减少接头减薄,工件厚度方向热量均匀,表面接头光滑、无飞边,表面减薄量小,更能满足力学性能要求和金相要求,因此选用静轴肩焊具。

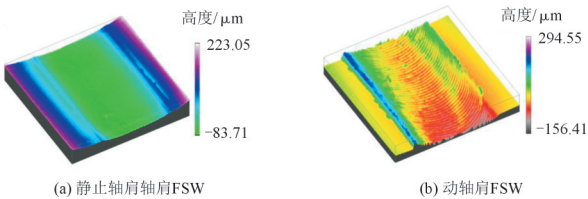


图6 两种轴肩焊具的表面粗糙度和板减量对比^[9]

Fig.6 Comparison of surface roughness and plate reduction of different shoulder welding tools^[9]

电池托盘的焊道宽度为12 mm,因此轴肩宽度设计为10 mm,水冷板的厚度为2 mm,根据搅拌摩擦焊的工艺需求,焊深推荐深度为1 mm,焊具宽度为3.2 mm,以确保在焊接过程中能够有效地搅拌材料,实现良好的接头成形和接头性能。

2.2 焊接参数设计

合理的焊接参数设计直接影响焊接质量、效率以及最终产品的性能。搅拌摩擦焊的关键焊接参数包括旋转速度,焊接速度,焊接压力^[10]。

(1)旋转速度 搅拌头的旋转速度直接影响着焊接过程中的热输入、材料的塑性流动以及焊接接头的质量。较高的旋转速度会增加摩擦热的产生,使材料更容易软化和流动,但同时也可能导致过热,引起材料的过度软化、变形甚至烧损。对于超大型一体化电池托盘,由于其尺寸较大,热传导相对较慢,过高的旋转速度可能会导致局部过热,影响焊接接头的性能和尺寸精度。旋转速度过低则可能无法提供足够的热输入和搅拌力,导致焊接不充分,出现未焊透、气孔等缺陷。

(2)焊接速度 焊接速度直接影响着焊接效率和焊接质量。较高的焊接速度可以提高生产效率,但可能会导致热输入不足,材料的塑性流动不充分,从而影响焊接接头的强度和密封性。对于超大型电池托盘,由于其尺寸较大,需要在保证焊接质量的前提下,尽可能提高焊接速度,以缩短生产周期。焊接速度过低则会增加热输入,使焊接区域的温度升高,可能导致材料过度软化、变形,增加热影响区的宽度,降低焊接接头的力学性能。此外,过低的焊接速度还会降低生产效率,增加生产成本。

(3)焊接压力 焊接压力可以促进材料的流动和扩散,保证焊接接头的紧密接触,提高焊接质量。适当的焊接压力可以使搅拌头与被焊材料之间产生足够的摩擦力,从而产生所需的摩擦热,使材料软化并实现良好的焊接连接。焊接压力过大可能导致被焊材料过度变形甚至压溃,同时也会增加搅拌头的磨损和设备的负荷。焊接压力过小则可能无法提供足够的摩擦力和材料流动动力,导致焊接不充分,出现未焊透、气孔等缺陷。

为了达成高质高效的焊接成效,需全面考量各类因素,借助试验与模拟相互融合的途径,来明确最为适宜的参数组合。选用焊接速度为800~1 500 mm/min,旋转速度为1 600~2 800 r/min,焊接压力为5 300~6 000 N的多组参数组合来开展DOE(试验设计)试验(见表1)。选用材质相同的板材进行测试,焊接完成后,对样件实施金相和拉伸检验。最终确认焊接参数工艺窗口:旋转速度为2 000~2 400 r/min,焊接速度为1 000~1 300 mm/min,焊接压力为5 300~6 000 N,见表1方框处。

表1 焊接参数验证组合和选用的焊接参数

Tab.1 Validation combination and final selection of welding parameters

焊接速度/ (mm·min ⁻¹)	旋转速度/(r·min ⁻¹)											
	1 600		2 000		2 200		2 400		2 600		2 800	
	5 300 N	6 000 N	5 300 N	6 000 N	5 300 N	6 000 N	5 300 N	6 000 N	5 300 N	6 000 N	5 300V	6 000 N
800	○	—	○	—	—	○	○	○	—	×	○	×
1 000	○	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1 300	×	—	○	○	○	○	○	○	×	○	×	—
1 500	×	—	×	—	—	—	○	—	—	—	×	—

注:×表示金相或拉伸NG;—表示未做此组;○表示质量合格;□虚线框内为工艺窗口。

3 方案实施与结果

经过评估,选择搅拌摩擦焊技术和铸件本体复合水冷通道的设计,并采用双机器人搅拌摩擦焊工作站^[11]和静轴肩焊具的生产方案来制造超大型一体化电池托盘。

通过对设备进行了全面的调试和优化。根据电池托盘结构,设计了专用的工装夹具,确保托盘在焊接过程中能够保持稳定的位置,前期通过大量的试验和模拟,确定了适合该电池托盘的焊接参数:旋转速度为 2 000~2 400 r/min,焊接速度为 1 000~1 300 mm/min,焊接压力为 5 300~6 000 N。在实际焊接过程中,根据不同部位的焊接要求,对参数范围内进行了微调,以确保焊接质量。焊接的主要流程为:①整线搬运机器人抓取水冷盖板 1、水冷盖板 2 放置于电池托盘铸件本体上;②搬运机器人抓取待焊工件(本体+盖板 1+盖板 2)放到 FSW 工装上;③工装感应工件和检测两块水冷板安装后,机器人避位,桁架落下大压板,工装夹紧工件,并输出夹紧到位信号;④两台机器人搅拌摩擦焊设备同时按规划路径同时开始焊接;⑤焊接完成后,工装松开工件,两台机器人修磨焊具,同时桁架升起大压板;⑥搬运机器人取件。

通过双机器人搅拌摩擦焊技术成功制造出高质量的超大型一体化电池托盘。焊接接头的外观光滑、无明显缺陷,内部无气孔、裂纹等缺陷。图 7 为搅拌摩擦焊断面金相组织。搅拌摩擦焊后板减量要求 ≤ 0.4 mm,实测为 0.22 mm,满足要求(见图 7);力学性能要求为 $\geq 8\ 225$ N,拉伸样件平均测量值为 9 130 N,图 8 为搅拌摩擦焊拉伸力-时间图。可以看出,达到设计要求。

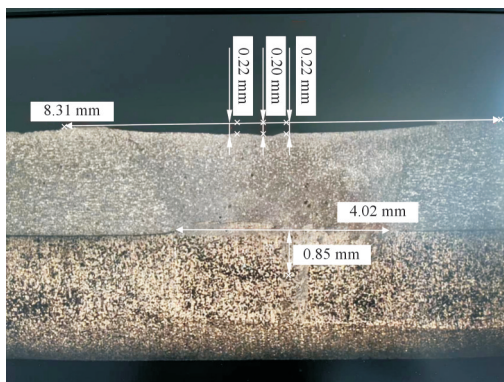


图 7 搅拌摩擦焊断面金相组织

Fig.7 OM images of fracture section of friction stir welding

双机器人搅拌摩擦焊和静轴肩焊具的组合大幅提高了生产效率。相比传统的焊接方法,生产周期缩短了 50%,满足了企业大规模生产的需求。虽然搅拌摩擦焊设备的投资相对较高,但是由于其生产效率高、焊

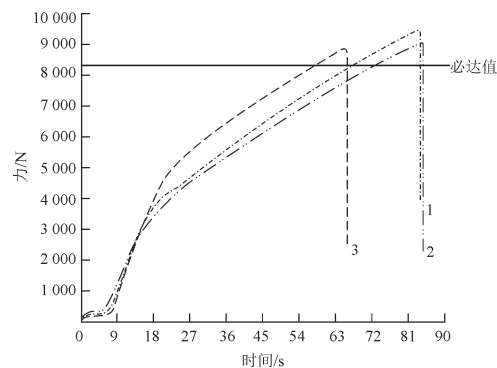


图 8 搅拌摩擦焊拉伸力-时间图

Fig.8 Relationship between tensile force of friction stir welding with time

接质量好,降低了后续的加工成本和废品率,整体成本效益显著提高。

4 结 语

针对超大型一体化电池托盘搅拌摩擦焊进行研究。选用静轴肩焊具,通过 DOE 试验确定焊接参数工艺窗口。采用双机器人搅拌摩擦焊工作站及相关流程,成功制造出高质量一体化电池托盘,焊接接头外观好、内部无缺陷,力学性能达标,生产效率提高、成本效益显著。搅拌摩擦焊技术在新能源汽车电池托盘制造中具有重要应用价值,为行业提供了有效解决方案。

参 考 文 献

- [1] 微型新能源汽车车架-电池托盘一体化设计[J]. 制造业自动化, 2020, 42(10): 8-12.
- [2] NICHOLAS S, JOSHUA S, DIMITRY S, et al. Stress characterization for friction-stir-welded electric vehicle battery trays with application of neutron diffraction[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 101: 1 109-1 123.
- [3] 黄永宪. 搅拌摩擦焊接基础及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2021.
- [4] 湖南省焊接协会. 搅拌摩擦焊接技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [5] 李亚江. 先进焊接/连接工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [6] 李骏, 王雷, 张尧. 新能源汽车结构轻量化关键工艺的研究[J]. 机械制造, 2019, 57(9): 65-68.
- [7] 朱志, 郑森木, 欧晓琴, 等. 2219 铝合金机器人静轴肩搅拌摩擦焊工艺研究[J]. 航天制造技术, 2022(5): 25-29.
- [8] 王国庆, 赵衍华, 周庆. 新型搅拌摩擦焊工具的研制及应用[J]. 航空制造技术, 2015(10): 74-77.
- [9] 黄永宪, 谢丰铭, 万龙. 搅拌摩擦焊工具研究现状及发展趋势[J]. 焊接学报, 2017, 38(12): 108-112.
- [10] 张坤, 江海涛, 孟强, 等. 焊接速度对机器人搅拌摩擦焊 AA7B04 铝合金接头组织和力学性能的影响[J]. 工程科学学报, 2018, 40(12): 1 525-1 532.
- [11] 张新棋, 董传杰, 谢冬, 等. 基于 KUKA 重载机器人的柔性搅拌摩擦焊接系统开发与试验研究[J]. 宇航材料工艺, 2024, 54(1): 79-85.

(编辑: 彭瑾)