

搅拌摩擦焊在汽车工业中的应用

司福建

无锡威唐新能源科技有限公司 江苏无锡 214115

摘要：作为一种新型的连接技术，搅拌摩擦焊在轻质材料连接上相对于传统的熔化焊有明显的技术优势。随着新能源汽车的发展，轻质材料获得了较多的应用以达到更高的轻量化水平，提升汽车的续航里程。目前，搅拌摩擦焊在新能源汽车三电系统，如电池包下箱体、液冷板、电动机壳体及电控壳体等已有大规模地应用。随着全铝车身的发展，搅拌摩擦点焊有望在车身连接上取得大范围的应用。

关键词：搅拌摩擦焊；搅拌摩擦点焊；新能源汽车；铝合金；车身连接

1 序言

1991年，搅拌摩擦焊（Friction Stir Welding, FSW）由英国焊接研究所（TWI）发明，属于固相连接技术范畴。搅拌摩擦焊的发明，最初是希望解决在航天领域中应用到的轻质金属材料（铝、镁合金等）连接接头性能弱化的问题。该技术依靠高速旋转的搅拌头与两待焊工件接触产生摩擦热，使接缝处金属产生塑性软化，旋转的搅拌头周围塑性软

化金属受到搅拌挤压，并随搅拌针的旋转沿焊缝前进方向向后退方流动，塑性金属待搅拌针离开冷却后形成焊缝，实现了固相连接（见图1）^[1-3]。因为搅拌摩擦焊针对轻质材料焊接所展现出的独特优势，所以它被誉为“20世纪焊接领域中继激光焊之后的又一项革命性焊接技术”^[4]。

在汽车制造领域，传统燃油汽车车身结构主要应用钢铁材料，轻质材料应用较少，但随着新能源

1) 铝合金和热成形板材的应用，是未来轻量化车身发展的必然趋势，鉴于两种材料特殊的物理化学性能，决定了其连接形式和手段必然不同于传统的车身连接。因此，必须进一步开发以激光焊和RES为代表的新的焊接技术，以适应铝合金以及钢/铝异种材料的连接。

2) 激光焊将成为轻量化车身连接的重要手段，借助于激光焊自身的特点，利用填丝型激光熔焊或激光+MIG复合焊技术，可以成功实现多种接头铝/铝或铝/钢等异种材料的优质连接。

3) 传统点焊已经难以实现铝/铝或铝/钢等异种材料的点焊，采用直流中频或高频点焊以及RES等新型焊接技术可以实现优质点焊连接。

4) 利用铝/钢材料的物理化学性能，在现有激光焊等新技术的基础上，进一步开发符合轻量化车身设计要求的复合型焊接技术，是未来连接技术发展的重要方向。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 张琪，叶鹏程，杨中玉，等.汽车轻量化连接技术的应用现状与发展趋势[J].有色金属加工，2019，48（1）：1-9.
- [3] 李光霖，刘新玲.汽车轻量化技术的研究现状综述[J].材料科学与工艺，2020，28（5）：47-61.
- [4] 韩立军.激光焊接技术在一汽大众迈腾车身制造中的应用[J].金属加工（热加工），2008（8）：32-35，40.
- [5] 韩立军.白车身激光熔焊接头设计型式与质量评价标准[J].电焊机，2010，40（5）：45-49.
- [6] 张正林.超高强度钢的中频点焊性能研究[D].长春：吉林大学，2010.

MW 20210310

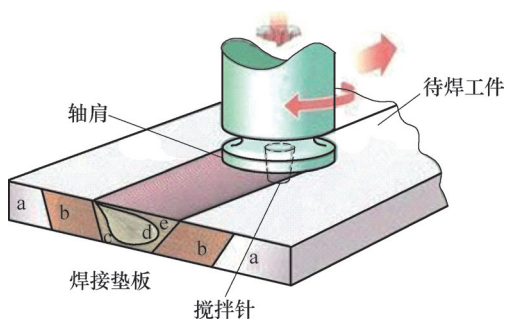


图1 搅拌摩擦焊过程原理

汽车的发展，续航里程成为顾客使用体验的主要影响因素。在目前技术条件下，提升汽车的轻量化水平是增加新能源汽车续航里程的一个有效可行的方式，因此轻质材料获得了越来越多的应用。针对传统钢结构车身，电阻点焊、MIG/MAG、激光焊等是主要的连接方式，具有工艺成熟稳定、连接成本低、效率高等特点。但随着新材料的应用，尤其是铝合金材料的大范围应用，传统的连接工艺存在质量不稳定，适用性差，电极寿命短，易出现气孔、裂纹，以及焊接变形大等问题，难以适应新的发展需求。因此，开发新型连接工艺成为新能源汽车车身连接领域的一项重要课题。由于在轻质材料及异种材料连接上的天然优势以及良好的综合成本，所以搅拌摩擦焊在汽车制造过程中正发挥越来越重要的作用。

2 搅拌摩擦焊技术特点

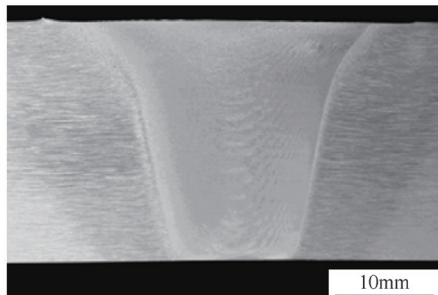
相较于传统熔化焊，搅拌摩擦焊技术具有适用范围广、接头质量高、焊接成本低及绿色环保等特点，在轻质材料尤其是铝合金连接领域具有明显的技术优势。

2.1 优质的焊接接头

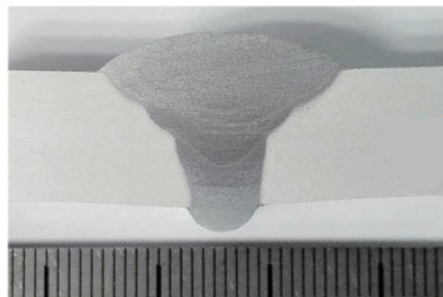
由于特殊的理化性能（固/液态溶氢能力差、线膨胀系数大等），故轻质材料尤其是铝合金应用传统熔化焊进行焊接时很容易出现气孔、裂纹等焊接缺陷；并且由于合金元素的烧损及较大的热输入，接头软化现象较为明显，所以难以获得理想的焊接接头。

搅拌摩擦焊属于固相连接，焊接过程中母材不发生熔化和凝固过程，为此完全避免了铝合金熔化焊中因材料熔化及凝固过程而带来的气孔、裂纹及合金元素烧损等问题，从根本上解决了铝合金焊接难题。同时，搅拌摩擦焊类似于锻造的压力加工过

程，最终形成致密的锻造组织，不同于熔化焊形成的铸造组织接头，接头力学性能（强度、塑性、疲劳性能等）明显优于传统熔化焊（见图2）。



a) 搅拌摩擦焊接头组织



b) 熔化焊接头组织

图2 搅拌摩擦焊和熔化焊接头组织对比

2.2 良好的工艺适用性

相对于铝合金焊接中常用的传统熔化焊（TIG/MIG），搅拌摩擦焊的工艺适用性更广。在高强铝合金（2xxx系、7xxx系等）焊接方面，由于材料的焊接性差，故传统的熔化焊（TIG/MIG）很容易出现焊接裂纹、气孔等缺陷，并且熔化焊接头软化严重，接头强度仅能达到母材强度的50%~70%，难以获得优质焊接接头。搅拌摩擦焊由于其固相连接特性，所以从根本上避免了接头熔化和凝固过程中形成缺陷的可能，有效解决了高强铝合金的焊接难题。目前，在航天领域已批量应用搅拌摩擦焊进行高强铝合金火箭贮箱的焊接（见图3）。

此外，在异种材料连接中，由于材料的理化特性差异明显，性能差异巨大，传统焊接方法很容易产生裂纹、脆性相及未熔合等焊接缺陷，难以实行有效连接。搅拌摩擦焊由于其固相连接、低热输入属性，可有效地控制异质材料连接时界面处脆性金属间化合物的形成，避免接头过热带来的明显软化现象，因此在异种材料连接方面具有很大的优势，有望突破异种材料焊接的难题。



图3 火箭贮箱搅拌摩擦焊

2.3 绿色高效的焊接过程

同传统熔化焊相比,搅拌摩擦焊焊接过程中无弧光辐射、烟尘、飞溅、噪声及辐射等污染,是一种绿色环保的焊接技术。同时,也明显地改善了焊接从业人员的工作环境,减少工艺过程对焊接人员身体造成的损伤。

搅拌摩擦焊无需焊丝、保护气等耗材,常规铝合金焊接用 $\phi 3\text{mm}$ 搅拌头使用寿命可长达数千米,焊接速度一般可超过 $1000\text{mm}/\text{min}$,明显优于传统熔化焊,并且搅拌摩擦焊设备及工艺过程简单,对操作人员的技术要求远低于熔化焊。在厚板焊接场景下,搅拌摩擦焊可实现单层单道焊接深度最大达 100mm ,相比传统熔化焊需采用的多层多道焊方式,焊接效率大幅提高。因此,搅拌摩擦焊的综合使用成本明显低于熔化焊,是一种更为经济高效的焊接方式。

3 搅拌摩擦焊在汽车工业中的应用

新能源汽车的发展增加了对汽车轻量化的需求,以铝合金为代表的轻质材料得到更大范围应用。铝合金的理化特性与传统用钢有很大不同,因此对新的连接工艺有了更大的需求。目前,搅拌摩擦焊在新能源汽车领域的应用主要集中于三电系统、车身连接及轮毂焊接等。

3.1 在新能源汽车三电系统中的应用

新能源汽车三电系统包括电池包、电动机、电控设备,是新能源汽车的核心零部件。由于轻量化的需求,所以三电系统结构件大量采用铝合金进行制造,是搅拌摩擦焊技术应用的主要场景。

目前,挤压铝合金拼焊结构是电池包下箱体的主流设计方案,通过定制截面的挤压铝型材拼焊及加工来实现不同的结构设计。相对于传统钢结构及压铸铝合金结构下箱体,具有设计灵活、扩展性强、易实现平台化设计,以及加工工艺成熟等特

点,同时在性能上具有结构强、刚度 high、抗振动和挤压及冲击性能优异等优点。

在电池包下箱体中,搅拌摩擦焊的应用场景主要有:底板型材拼焊、底板总成和边框总成拼焊(见图4)。在底板型材拼焊中,一般采用双面焊接方式,可减小焊接变形,单面焊接深度 $3\sim 4\text{mm}$ 即可满足对接接头强度要求。但由于焊接量大,拼焊后底板宽幅大,而底板作为电池模组的承载部位,故其对平面度通常有较高要求,从而使焊接变形的控制成为一个难题。

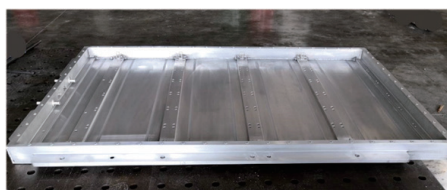


图4 搅拌摩擦焊焊接电池包下箱体

目前,对于焊接变形的解决方法主要有以下3种。

1) 增大单块型材宽度,从而减少焊缝数量,减小焊接变形。目前常用底板型材宽度为 $200\sim 450\text{mm}$,适当增大型材宽度可有效减小底板变形,但型材宽度过大将导致型材挤压难度增大,模具及挤压成本快速上升,综合成本提高。

2) 焊接工艺的调整。包括焊接工装控制,在焊接工装中采用水冷散热、反变形控制等方法,可有效减少焊接变形;焊接顺序的调整,结合有限元分析,预测不同焊接顺序的残余变形,做出有针对性的优化。

3) 采用冲压铝板替代型材拼焊,取消底板拼焊工序,这是目前部分箱体中采用的设计方案,简化了底板平面度控制的问题。

整拼底板与边框背部拼接环缝一般采用搅拌摩擦焊,焊接效率高,接头密封性好,且可采用不同规格的搅拌头来满足不同强度要求。在应用中,底板与边框的装配对接间隙、错边量是需要重点控制的因素,会对焊接接头质量的稳定性产生重要影响。底板型材和总成拼焊如图5所示。

液冷散热器件包括液冷板、液冷电动机壳、液冷电控盒等,是搅拌摩擦焊的另一个主要应用场景(见图6)。铝合金液冷散热器件传统连接密封采用钎焊工艺,但存在接头强度低、对零件加工及装配



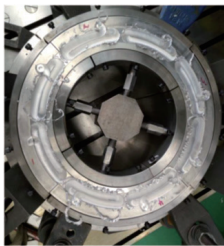
a) 底板型材搅拌摩擦焊拼焊



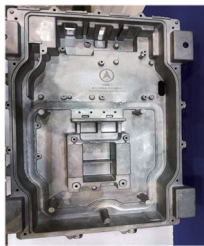
b) 总成搅拌摩擦焊拼焊

图5 底板型材和总成拼焊

要求高、适用性差（适用于1xxx系、3xxx系、部分6xxx系合金等）、工艺复杂及成本高等问题。但搅拌摩擦焊完美地解决了钎焊存在的上述问题，目前在液冷散热器件焊接上基本实现了对钎焊的替代应用。



a) 液冷电动机壳焊接



b) 液冷电控盒焊接

图6 铝合金液冷电动机壳和电控盒焊接

在电池包结构件中，铜排（T2纯铜）、铝排（工业纯铝）有很大的应用需求。基于其理化特性，需要将铜排、铝排进行连接，以充分利用铜的优异导电性和铝的低成本优势。目前，铝铜模组汇流排主要通过超声波焊接方式进行连接，但存在接头连接强度弱，限于薄板搭接接头，难以进行对接焊，以及容易出现虚焊等问题，成为制约铝铜模组汇流排发展的主要问题。

铝/铜搅拌摩擦焊可以有效解决目前存在的问题，获得优质的焊接接头，现已在铜排/铝排连接上获得部分应用，取得了较好的经济效益（见图7）。

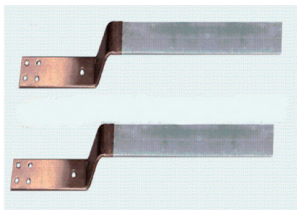


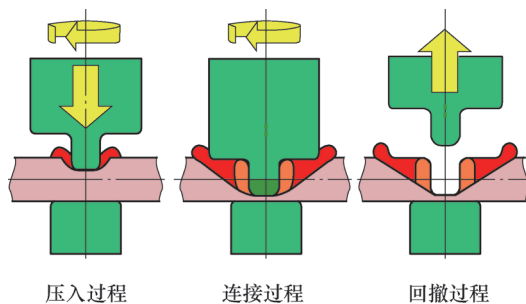
图7 铜排/铝排搅拌摩擦焊

3.2 汽车车身连接应用

受限于车身结构的复杂性，难以在焊接部位实现刚性支撑，因而搅拌摩擦焊在车身连接上的应用主要表现为搅拌摩擦点焊技术的应用。搅拌摩擦点焊（Friction Stir Spot Welding, FSSW）是在“线性”搅拌摩擦焊基础上发展而来的一种创新的摩擦焊技术。搅拌摩擦点焊冶金连接产生在搅拌头周围形成的一种圆环状搅拌区域与材料发生重结晶的区域中，这一区域在搅拌工具旋转、挤压、粉碎等机械力作用下，形成致密组织结构，赋予搅拌摩擦点焊接头优异的力学性能^[5]。相较于传统的电阻点焊在铝合金连接上存在的电极寿命短、焊接质量不稳定、能耗高等问题，搅拌摩擦点焊具有焊接工具使用寿命长、接头强度高、节能环保等优点，同时搅拌摩擦点焊可实现异种材料的连接，在车身连接上具有广阔的发展前景。

目前，搅拌摩擦点焊主要有两种技术路线：

第一种为日本马自达公司发明的“带有匙孔搅拌摩擦点焊技术”，该技术采用的设备与普通搅拌摩擦焊设备相似，焊接过程分为3个阶段：压入过程、连接过程、回撤过程。该技术过程简单，连接效率高，但匙孔的存在造成接头承载面积下降，影响接头外观和力学性能^[6]。该技术已在马自达RX-8车型上进行了应用，连接铝合金发动机罩和后门（见图8）。



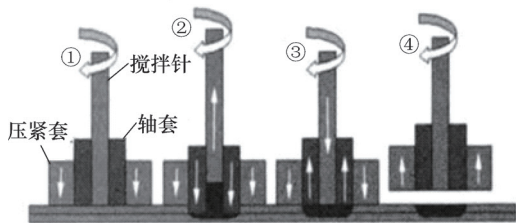
a) 带匙孔搅拌摩擦点焊工艺过程



b) 马自达搅拌摩擦点焊汽车部件

图8 带匙孔搅拌摩擦点焊过程及应用

第二种为原德国GKSS中心发明的“回填式搅拌摩擦点焊技术”，通过搅拌针与轴套的配合运动可以有效解决匙孔残留问题，消除焊接匙孔。其主要工艺过程如下：①摩擦预热阶段。搅拌工具压紧于工件表面并通过轴套与搅拌针的旋转摩擦，对待焊部位进行预热。②轴套下压及搅拌针回抽。轴套的旋转下压实现焊接过程，搅拌针回抽容纳挤出的焊接材料。③轴套回抽及搅拌针下压。实现焊接材料的进一步搅拌熔合，并填充焊接匙孔。④磨平形成焊点。当搅拌针和轴套重回压紧套平面，将焊点磨平，搅拌工具整体从工件表面移走，完成焊接过程（见图9）。



a) 回填式搅拌摩擦点焊工艺过程



b) 回填式搅拌摩擦点焊焊点

图9 回填式搅拌摩擦点焊过程及焊点

注：①为摩擦预热阶段；②为轴套下压及搅拌针回抽；③为轴套回抽及搅拌针下压；④为磨平形成焊点。

相比之下，回填式搅拌摩擦点焊焊接过程复杂，效率较低，对设备的刚性及控制要求更高，但可实现无匙孔焊接，表面成形美观，接头质量及强度均明显优于带有匙孔搅拌摩擦点焊，在车身连接上具有很好的发展前景。目前，已有企业研发出机器人搅拌摩擦点焊设备，采用C形焊钳结构，可实现铝合金车身薄板搭接焊（见图10）。

3.3 汽车轮毂的搅拌摩擦焊

汽车轮毂焊接是搅拌摩擦焊在汽车工业应用的又一场景。传统铝合金汽车轮毂采用整体低压铸造或锻造工艺生产。铸造具有成本优势，但产品性能略差；锻造产品性能好，但生产工艺复杂，成本较高。搅拌摩擦焊可将这两种工艺优势结合起来，同



图10 搅拌摩擦点焊机器人

时又具有较好的综合成本优势。

铝合金搅拌摩擦焊焊接轮毂中轮辐采用铸造工艺加工，轮辋采用旋压工艺加工，然后通过搅拌摩擦焊将轮辐和轮辋进行连接。该加工方案中，轮辋可以实现标准化生产，可显著降低生产成本；轮辐采用定制化铸造生产，但相比整体铸造，模具成本及产品质量控制都有明显改善，同时多种工艺的应用可满足不同部位对材料性能的不同要求，有利于实现轻量化设计。目前，轮毂搅拌摩擦焊技术在汽车工业中已有批量应用，北京赛福斯特技术有限公司和航天工程装备（苏州）公司分别已向韩国和欧洲出口了整条轮毂搅拌摩擦焊生产线（见图11）。

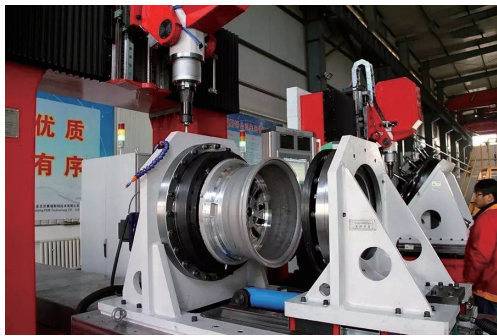


图11 赛福斯特轮毂搅拌焊设备

4 搅拌摩擦焊技术的发展方向

近些年，搅拌摩擦焊技术已经获得了快速发展，但目前依旧存在一些问题需要解决。

(1) 更高效的焊接工艺 随着新能源汽车规模的快速增大，需要更高效的搅拌摩擦焊技术以解决汽车工业大批量生产的需求。回填式搅拌摩擦点焊相对于电阻点焊有性能优势，但焊接效率尚无法达到电阻点焊水平，是制约其发展的主要问题。

(2) 飞边、变形等工艺问题 常规动轴肩搅拌摩擦焊不可避免地会产生飞边，严重影响了零件的

流转和装配,需要进行打磨,影响生产效率,增加生产成本;搅拌摩擦焊具有相对较小的变形,但随着焊接量的增加,变形问题已成为制约其发展的主要问题,需要开发更新的焊接工艺以实现对接头变形的控制。

(3) 异种材料连接问题 多材料混用成为汽车轻量化发展的趋势,目前汽车上异种材料连接主要采用铆接方案,但存在工艺增重,生产成本高等问题。搅拌摩擦焊在异种材料连接中理论上可行,目前也已有部分应用,有望解决车身多材料混用连接问题。

(4) 应用空间拓展问题 传统搅拌摩擦焊设备为采用类似于铣床的专机,适合焊接二维平面曲线,难以满足三维空间复杂结构的焊接。搅拌摩擦焊背部必需安装刚性支撑,在无支撑或难以实现支撑焊缝位置无法施焊。因此,如何实现复杂三维空间焊缝的焊接,拓展焊缝应用场景,成为其进一步发展需要解决的问题。

4.1 高效搅拌摩擦焊技术

虽然搅拌摩擦焊生产效率已经取得了较大进步,但随着新能源汽车需求量的增大,搅拌摩擦焊焊接速度成为了制约产品生产节拍的主要因素,因此高速搅拌摩擦焊技术已成为搅拌摩擦焊发展的一个现实需求。高速搅拌摩擦焊技术不是简单地提升焊接速度,而是需要针对高速焊条件下对设备、控制系统、搅拌工具等进行系统性的优化,实现高效稳定的焊接过程。无锡威唐新能源科技有限公司针对常用的6061-T6铝合金开展了一系列高速搅拌摩擦焊技术研究,目前已实现 $\phi 3\text{mm}$ 搅拌头、2500mm/min速度下的稳定焊接。高速搅拌摩擦焊下接头力学性能如图12所示。

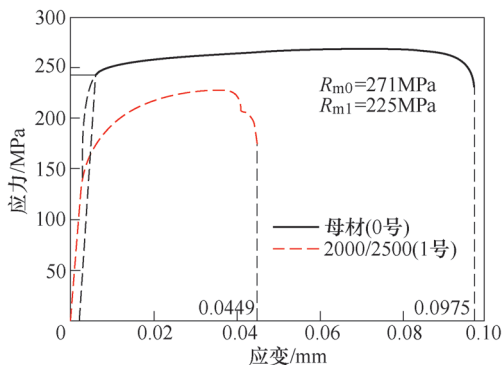


图12 高速搅拌摩擦焊下接头力学性能

复合搅拌摩擦焊技术通过采用附加能量(电弧、激光、超声波及电磁感应等)作为辅助能量输入,可解决摩擦热不足或者难以满足焊接要求的问题,在高熔点、高硬度材料(如钢、钛合金)焊接中具有很好的效果,能够有效减少搅拌头的磨损,提高使用寿命。同时,复合搅拌摩擦焊还可以改善焊缝表面成形,抑制焊接缺陷,提升接头质量。超声波辅助搅拌摩擦焊工作原理如图13所示^[7]。

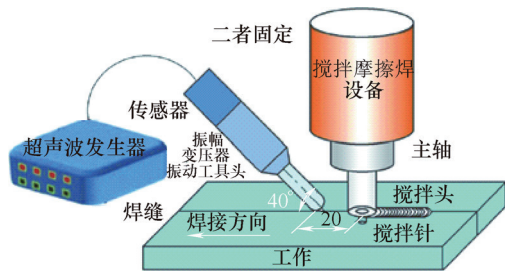


图13 超声波辅助搅拌摩擦焊工作原理

4.2 特种搅拌摩擦焊技术

静轴肩搅拌摩擦焊技术是在传统搅拌摩擦焊技术基础上发展而来的,通过采用轴肩和搅拌针的分体设计及不同驱动方式,实现了焊接中搅拌针旋转而轴肩不旋转的工艺过程。相较于传统动轴肩搅拌摩擦焊,静轴肩焊接的主要技术优势:①无飞边焊接。由于焊接过程中轴肩不发生旋转,不会有焊接材料溢出,从而避免了飞边的产生,减少焊后飞边打磨清理工序,提高了生产效率。②无减薄焊接。常规搅拌摩擦焊焊缝会产生一定的下压量(一般为0.2~0.3mm)以保证顶锻力,但在薄板焊接时焊缝减薄会明显减弱接头的承载面积,甚至会导致焊穿。静轴肩搅拌摩擦焊可实现无减薄焊接,适合薄板焊接。③角焊缝焊接。传统动轴肩搅拌摩擦焊仅适用于平面对接焊缝焊接,不适用于角焊缝焊接,通过定制特定角度的轴肩,静轴肩搅拌摩擦焊可实现角焊缝焊接(见图14)。目前,静轴肩搅拌摩擦



图14 静轴肩角焊缝

焊已部分应用于电池包下箱体型材拼焊，达到了较好的应用效果。

双轴肩/双机头搅拌摩擦焊：双轴肩搅拌摩擦焊是通过搅拌工具的创新设计，上下两个轴肩夹持焊接工件焊接的过程，可实现自支撑焊接，打破了搅拌摩擦焊需要背部刚性支撑的局限性。并可实现单面焊双面成形，避免单面焊根部未焊透问题，双面受热均匀，减小焊接变形；双机头搅拌摩擦焊是通过焊接设备的创新设计，上下两个机头同步夹持工件焊接的过程，实现双面同时焊接，提高焊接效率，双面同时受热，减小焊接变形。

双轴肩搅拌摩擦焊可实现全焊透，设备通用性好，但搅拌头受力状态复杂，对搅拌头的设计及材料要求很高，存在使用寿命问题，且不宜于进行厚板焊接；双机头搅拌摩擦焊焊接速度和搅拌头使用寿命可达到传统搅拌摩擦焊水平，且可进行厚板焊接，但设备结构复杂，需要专用设备，应用成本较高。

4.3 设备智能化发展

设备智能化发展的主要应用形式为机器人搅拌摩擦焊平台，机器人焊接平台具有高的柔性及低的制造成本，是未来智能化制造的重要技术平台^[8]。工业机器人由于具有较高的柔性，因此可实现空间复杂轨迹的应用，使三维空间焊接成为了可能。同时，机器人搅拌摩擦焊设备焊接适用性强，易于实现空间全位置焊接，自动化程度高，易于实现生产线集成，近些年来得到了越来越多的应用。目前，国内进行机器人搅拌摩擦焊设备研制的企业有昆山万州特种焊接有限公司、上海发那科机器人有限公司及广州瑞松智能科技股份有限公司等。在电池包下箱体制造领域，已经开始应用机器人搅拌摩擦焊设备（见图15）。



图15 机器人搅拌摩擦焊设备

5 结束语

伴随着我国新能源汽车产业的快速发展，搅拌摩擦焊由于其技术优势和特点，将有望获得更大的发展空间。同时也应看到，搅拌摩擦焊还存在一些局限和不足，已成为制约其发展的主要障碍。未来需要通过不断地进行技术研发，迭代优化，去克服技术缺陷，解决生产中存在的痛点，实现降本增效，搅拌摩擦焊技术将会获得更持久的生命力。

参考文献：

- [1] DONG Peng, LI Hongmei, SUN Daqian, et al. Effects of welding speed on the microstructure and hardness in friction stir welding joints of 6005A-T6 aluminum alloy[J]. Materials and Design, 2013, 45: 524-531.
- [2] LIU H J, HOU J C, GUO H. Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy[J]. Materials and Design, 2013, 50: 872-878.
- [3] HILGERT J, SCHMIDT H N B, DOS SANTOS J F, et al. Thermal models for bobbin tool friction stir welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 211 (2) : 197-204.
- [4] DAVID S A, DEBROY T. Current issues and problems in welding science[J]. Science, 1992, 257 (5069) : 497-502.
- [5] 严铿, 冯杏梅, 赵勇, 等. 工艺参数对复合搅拌摩擦点焊接头力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2008, 29 (6) : 5-8.
- [6] 周利, 周炜璐, 林正勇, 等. 搅拌摩擦点焊技术研究现状[J]. 航天制造技术, 2014 (5) : 2-3.
- [7] 付瑞东, 李艺君. 我国搅拌摩擦焊接技术的发展及展望[J]. 金属加工 (热加工), 2020 (6) : 15-16.
- [8] 谭锦红, 赵运强, 王春桂, 等. 机器人搅拌摩擦焊应用发展现状[J]. 金属加工 (热加工), 2020 (1) : 8-12.

MW 20210315