

搅拌摩擦焊在白车身焊接中的应用

杨洪期^{1, 2}, 王刚^{1, 2}, 高海东^{1, 2}, 姚晓涛^{1, 2}, 刘林^{1, 2}

1. 中国汽车工业工程有限公司 天津 300110

2. 机械工业第四设计研究院有限公司 河南洛阳 471000

摘要: 随着汽车工业的发展, 众多新材料、新工艺、新设备和新技术也随之发展。搅拌摩擦焊作为一种固相连接技术, 具有无需添加焊丝和保护气, 焊接过程无污染、无烟尘、焊接残余应力小, 在车门、机盖和尾门等部位具有非常好的应用前景。简述搅拌摩擦焊技术的原理、优缺点、系统组成和常见缺陷及原因分析。

关键词: 搅拌摩擦焊; 焊接设备; 汽车白车身

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2025.04.001

随着汽车轻量化要求的提高, 铝合金和镁合金以及碳纤维等轻金属材料在汽车白车身上的应用越来越多, 但现有的连接技术很难兼顾成本和焊接质量, 这也就限制了轻量化金属材料的广泛应用^[1]。但随着搅拌摩擦焊 (Friction Stir Welding, 简称FSW) 技术及其衍生技术的发展, 使得铝镁合金及异种材料的连接成为可能。

搅拌摩擦焊技术是一种固相连接技术, 焊接过程中母材不熔化, 焊接过程无烟尘和飞溅, 不需要使用保护气和焊材, 这些优点使得搅拌摩擦焊技术在汽车白车身制造领域得到了广泛关注, 并逐步开始应用。

搅拌摩擦焊原理

摩擦焊是在压力作用下, 利用被焊接零件接触面之间的摩擦产生的摩擦热, 进而使焊缝金属达到热塑性状态, 通过金属间的扩散和再结晶实现连接的焊接技术^[2]。

摩擦焊过程中材料在压力作用下相对摩擦, 破坏了接合面上的氧化膜或其他污染层, 同时摩擦产生的

摩擦热使得接合面很快形成热塑性层, 在随后的摩擦扭矩和轴向压力作用下破碎的氧化物和部分塑性层被挤出接合面形成飞边, 剩余的塑性金属就构成焊缝金属。

在压力作用下, 被焊界面通过相对运动进行摩擦时, 机械能转变为热能, 所产生的摩擦加热功率为

$$N = \mu k P V \quad (1)$$

式中 N ——摩擦加热功率;

μ ——摩擦系数;

k ——系数;

P ——摩擦压力;

V ——摩擦相对运动速度。

搅拌摩擦焊是利用高速旋转的搅拌头扎入被焊工件内, 旋转的搅拌针与被焊材料发生摩擦并使其发生塑化, 轴肩与工件表面摩擦生热并用于防止塑性状态的材料溢出。在焊接过程中, 工件要刚性固定在背部垫板上, 搅拌头边高速旋转边沿工件的接缝与工件相对移动, 在搅拌头锻压力的作用下形成焊缝, 最终实现被焊工件的冶金结合。搅拌摩擦焊的原理如图1所示。

搅拌摩擦焊主要分为四步: 搅拌头旋转、插入并

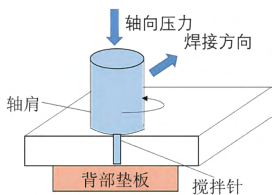


图1 搅拌摩擦焊原理示意图

调整倾斜角、搅拌焊接和退出，图2所示为工作步骤原理图^[3]。

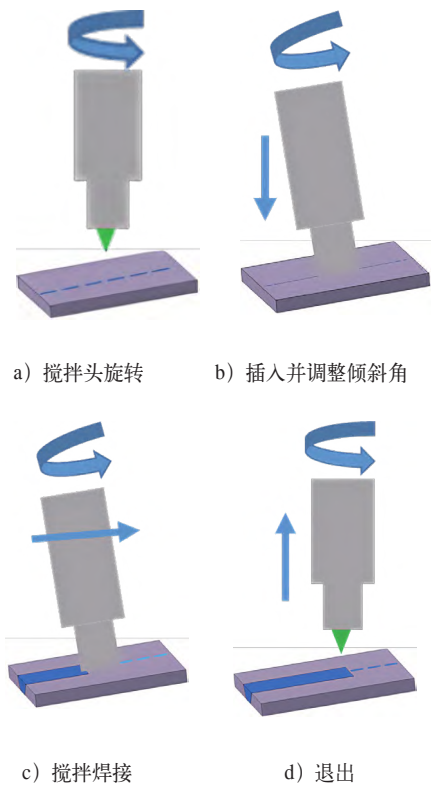


图2 搅拌摩擦焊工作步骤原理图

如图3所示，搅拌摩擦焊能够完成对接、搭接、角接、丁字接等多种结构形式的连接。

搅拌摩擦焊的焊接质量会受到很多因素的影响，主要工艺变量见表1^[4]。

搅拌摩擦焊特点

搅拌摩擦焊是一种固相连接技术，利用旋转的搅拌针将母材搅拌至塑性变形，从而实现连接的技术，具有明显的优缺点^[5]。

1.主要优势

1) 热输入低，焊接变形小。搅拌摩擦焊过程中，

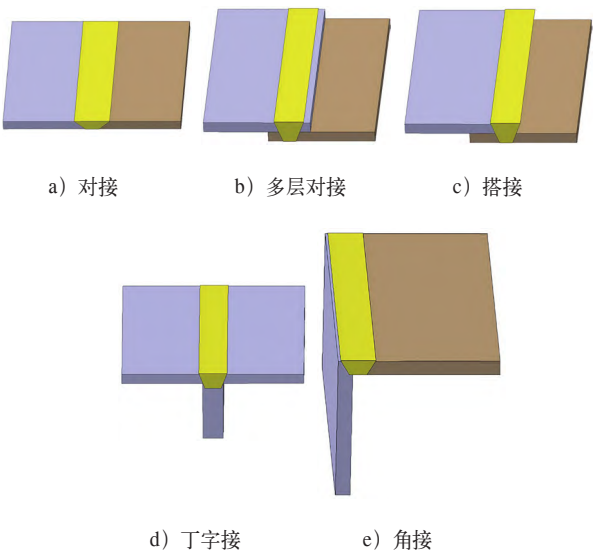


图3 搅拌摩擦焊接头形式

表1 搅拌摩擦焊主要工艺变量

搅拌头	设备	其他
轴肩和搅拌针的材料	焊接速度	垫板材料
轴肩直径	搅拌头转速	垫板尺寸
搅拌针直径	轴向压力	工件尺寸
搅拌针长度	搅拌头倾角	工件属性
搅拌针螺距		
搅拌针形状		

母材不熔化，仅在搅拌针的作用下，发生塑性变形，且焊接过程中工装夹具和背后的垫板对母材起到很好的控制作用，所以焊接变形很小。

2) 焊缝强度高，焊接质量好。由于是固相焊接技术，焊接过程中温度低，没有常见的弧焊缺陷，焊缝及周围无明显的残余应力。

3) 无需辅材。和弧焊相比，焊接过程中无需焊丝和保护气，减少了生产成本。

4) 更加绿色、环保。焊接过程中，无任何烟尘、飞溅和弧光，避免了对生产人员的伤害，避免了对环境的污染。

5) 焊接姿态不受限制。熔化焊时，由于焊丝和母材的熔化，无法实现仰焊。而搅拌摩擦焊可以不受限制。

6) 可以焊接以前无法焊接的材料。搅拌摩擦焊

的出现,使得更容易实现钢铝、镁铝等异种金属的焊接。

2.不足之处

虽然搅拌摩擦焊技术得到了广泛关注和研究,但由于技术本身的限制,仍有以下不足之处:

(1) 只能用于轻金属及其合金材料的焊接 由于工艺的特点,仅限于塑性好、熔点较低的材料。对于塑性差、熔点过高的材料,无法实现焊接。

(2) 焊缝末端留有匙孔 由于焊缝末端搅拌针退出时,会在搅拌针位置留下一个孔,不仅影响美观,还会影响强度。

(3) 焊缝无增高 焊接过程中,无法添加焊材,所以焊缝无法增高。

(4) 焊缝背面必须要有垫板 由于焊接过程中搅拌头对焊缝需要有足够的下压力,所以必须要有垫板支撑母材。

(5) 对装配精度要求高 间隙和错边要求很高,如间隙或错边偏大,就容易造成焊接质量缺陷。

(6) 可焊接的件尺寸受限 由于搅拌针的尺寸和强度限制,无法焊接厚度过大的零件。而对于过薄的零件,受到搅拌摩擦力的影响,也无法焊接。

搅拌摩擦焊系统设备构成及应用

根据带动搅拌头的执行机构不同,搅拌摩擦焊系统主要分为机器人搅拌摩擦焊和机床式搅拌摩擦焊。

1.机器人搅拌摩擦焊系统

工业机器人具有柔性高、自动化程度高,并且可以实现复杂的轨迹运动,易于实现空间全位置焊接,这就使得复杂构件的焊接成为可能^[6]。

机器人搅拌摩擦焊系统主要由机器人及其控制柜、搅拌头、主轴及其控制系统、变位机及焊接工装夹具等组成。

(1) 机器人及其控制柜 机器人作为运动机构,可以达到不同位置的焊缝。目前主要是串联式机器人,且由于焊接过程中需要承受不同方向的力,所以机器人全部为高刚度和高精度的重载机器人,目前常用的是KUKA KR500系列,FANUC M-900iB/700,ABB IRB 8700和IRB 7600系列。

(2) 搅拌头 由搅拌头和搅拌针组成的旋转部件。一般根据待焊接的零件选择合适形状的搅拌头或新设计搅拌头。此外搅拌头的材质对于搅拌头的使用寿命至关重要,严重的也会影响焊接质量。

(3) 主轴及其控制系统 主轴是搅拌摩擦焊的核心驱动部件,通过带动轴肩和搅拌针组成的搅拌头旋转,主要为搅拌头的旋转提供动力来源,为搅拌头提供焊接扭矩、轴向压力、前进抗力。目前以电主轴为主,也有部分选用液压主轴。一般要求主轴的最大转速要能达到4000r/min,电主轴和液压主轴所承受的扭矩分别不小于40N·m和120N·m。此外,常用的是单主轴,也有部分选用双主轴。

(4) 变位机 变位机主要和机器人配合,完成复杂零件的焊接。

(5) 焊接工装夹具 由于焊接过程中,被焊工件承受较大的力,所以需要工装对零件进行夹具和固定,避免焊接过程中焊缝出现较大偏移,保证焊接质量稳定,并可避免对零件造成较大的变形。

此外,为监测焊接过程中的力、变形以及焊缝偏移情况,可以选配力传感器、位移传感器和焊缝跟踪传感器等设备,并可将这些数据和信号进行集成,利用合适的算法进行实时反馈,达到监控和矫正的目的,实现智能化焊接。

2.机床式搅拌摩擦焊系统

机床式搅拌摩擦焊系统是以机床设备为基础,将搅拌摩擦焊头进行集成,从而完成焊接。机床式搅拌摩擦焊系统具有刚度大、可焊工件厚度大、焊接效率高和焊接稳定性好等优点^[7]。可根据主体的不同,主要分为台式搅拌摩擦焊系统和龙门式搅拌摩擦焊系统。

和机器人搅拌焊系统相比,机床式搅拌摩擦焊系统焊接稳定性更好、焊接效率更高,可以根据零件的尺寸以及焊缝的位置、形状,选择不同尺寸和形式的机床。但机床式搅拌摩擦焊系统主要用于直线和平面二维曲线。

3.搅拌摩擦焊在白车身焊接中的应用

最早在1999年,由宝马、沃尔沃、福特等车企组成的联合项目小组在实验室研究了通过搅拌摩擦焊将1.5mm和3mm不等厚板进行焊接,随后进行冲压,用

于车门内板^[8]。随后，马自达、奥迪、丰田、奔驰和本田等众多车企逐步尝试在白车身制造中选用搅拌摩擦焊，表2是目前搅拌摩擦焊在白车身上的应用情况^[9]。

表2 搅拌摩擦焊应用情况

汽车品牌	车型	应用部位
马自达	RX-8	车门和前盖
马自达	MX-5	车门和后盖
奥迪	R8	B柱
丰田	普锐斯	后盖
奔驰	R231	中地板
本田	雅阁	前副车架
本田	讴歌TLX	前副车架
福特		门内板

常见缺陷及原因

1.飞边毛刺

- 1) 转速过大。
- 2) 焊接速度过小。
- 3) 下压量偏大。

2.表面沟槽

- 1) 轴肩选择不合适，轴肩偏小。
- 2) 下压力不够。
- 3) 焊接速度过大。

3.表面起皮

- 1) 转速过大。
- 2) 焊接速度过小。

4.表面鼓皮

- 1) 表面氧化膜过厚。
- 2) 零件有油污。

5.背部焊瘤

- 1) 被焊材料和工装夹具贴合差，间隙过大。

- 2) 搅拌针长度过长。

结语

和传统的焊接工艺相比，搅拌摩擦焊具有焊接质量好、焊接变形小、无飞溅、焊接过程安全等特点。随着搅拌摩擦焊技术和汽车材料轻量化等技术的发展，搅拌摩擦焊工艺和装备将越来越智能和先进，搅拌摩擦焊技术有望在汽车制造中得到更广泛的应用。

参考文献：

[1] B.T. Gibson, D.H. Lammlein, T.J. Prater, et al.Friction stir welding: Process, automation, and control, Journal of Manufacturing Processes[J]. 2014, 16 (1) : 56-73.

[2] 史耀武.中国材料工程大典.22卷，材料焊接工程（上）[M]. 北京：化学工业出版社，2006.

[3] Mohan, D.G., Wu, C.A Review on Friction Stir Welding of Steels[J]. Chin. J. Mech. Eng, 2021, 34 (137) : 137.

[4] Bharat Raj Singh. A Hand Book on Friction Stir Welding [M]. LAP Lambert Academic Publishing, 2012.

[5] 武凯，贾贺鹏，孙宇，等.搅拌摩擦焊技术的研究进展[J].机械制造与自动化，2020，49（6）：1-9.

[6] 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.

[7] 刘会杰，张艳伟，李金全.搅拌摩擦焊设备及其研究进展[J].焊接，2011（12）：3-6，70.

[8] S.W. Kallee. 5-Industrial applications of friction stir welding, Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, Friction Stir Welding[M].Woodhead Publishing, 2010.

[9] B.T. Gibson, D.H. Lammlein, T.J. Prater, et al.Friction stir welding: Process, automation and control[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16 (1) : 56-73.**AUTO1950**