

# 铝合金搅拌摩擦焊研究现状

Research Status About Friction Stir Welding of Aluminum Alloy

哈尔滨工业大学现代焊接生产国家重点实验室 王 廷 刘会杰 冯吉才



王 廷

博士研究生,主要研究方向为新材料及异种材料的连接。

铝合金以其高的比强度、良好的加工性能、较高的韧性以及抗腐蚀性能,被认为是航空航天工业中最具应用前景的轻质高强结构材料<sup>[1,2]</sup>,然而由于铝合金较活泼,表面容易氧化,导热导电性好,线膨胀系数大,熔焊时容易形成气孔、裂纹、咬边等缺陷,焊接性较差,对于大的结构件,钎焊、电阻焊、压力焊等方法更是难以实施。因此,铝合金的焊接技术成为该种合金在工业上推广应用的极大障碍,用固态焊取代熔焊实现铝合金的连接成为研究者的共识。

在搅拌摩擦焊接中,焊接缺陷、接头组织都将影响到接头的最终性能。而焊接缺陷、接头组织都受到材料流动形式和焊接热循环的影响,因此以上各方面都在铝合金搅拌摩擦焊中受到极大关注。本文将从这几个方面对铝合金搅拌摩擦焊接的研究现状进行评述。

英国焊接研究所(TWI)1991年发明的搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)是一种固相连接方法,可以避免熔化焊产生的缺陷,为铝合金的焊接提供了一种崭新的途径。

在搅拌摩擦焊接中,焊接缺陷、接头组织都将影响到接头的最终性能。而焊接缺陷、接头组织都受到材料流动形式和焊接热循环的影响,因此以上各方面都在铝合金搅拌摩擦焊中受到极大关注。本文将从这几个方面对铝合金搅拌摩擦焊接的研究现状进行评述。

## 铝合金搅拌摩擦焊 焊缝缺陷研究

A. J. Leonard 等人<sup>[3]</sup>对搅拌摩擦焊接头中的缺陷进行了研究,认为缺陷主要有孔洞、飞边、沟槽及未焊合四种;焊接缺陷的产生是由于在搅拌摩擦焊接过程中焊缝金属经历

了不同的热机过程所致,过热或者塑性材料流动不足都会导致焊接缺陷的形成。搅拌头几何尺寸、搅拌头旋转速度和焊接速度、搅拌针扎入深度和倾斜角度、对接间隙、试板厚度匹配以及厚度变化等都会对接头缺陷产生影响。赵衍华等人<sup>[4]</sup>认为焊接缺陷的产生是多种因素共同作用的结果,对于不同的焊接过程及被焊材料,焊接压力、焊接速度和旋转速度是相互制约的。

Z. W. Chen 等人<sup>[5]</sup>研究了搅拌针形状和倾斜角度对搅拌摩擦焊缝成形的影响,结果表明:焊核区的成型仅受搅拌针搅动部分塑性材料流动的影响,轴肩尺寸过小会导致塑性材料流动不足而在焊缝上部形成沟槽,较大的倾斜角度会增强流动从而减小沟槽出现的可能。Y. G. Kim 等人<sup>[6]</sup>以4mm厚ADC12模铸铝合金为对象研究了搅拌针扎入深度对接头成形的影响,认为扎入越深搅拌

摩擦焊的最佳焊接范围越宽。邢丽等人<sup>[7]</sup>通过试验认为,对于一定形状的搅拌头,影响FSW成型的主要因素是搅拌头的转速、焊接速度和压力。黄华等人<sup>[8]</sup>利用对LF21铝合金板搅拌摩擦焊分析了对接板间隙对焊缝缺陷的影响,结果表明:间隙越大,焊缝区出现的孔洞越大,甚至会在焊缝中出现隧道型缺陷。其产生原因是由于间隙的存在使得焊缝连接所需的塑性金属减少,在没有塑性金属补充的情况下只能是在焊缝中形成隧道型缺陷。

### 铝合金搅拌摩擦焊焊接热循环研究

王大勇<sup>[9]</sup>等对铝锂合金搅拌摩擦焊热循环进行了研究,结果表明,焊件上任一位置,于搅拌头行走到该位置所在垂直于焊缝直线的瞬间,热循环温度达到最大值,并随着搅拌头远离而迅速降低。搅拌摩擦焊接过程中,焊缝中心经受的焊接热循环温度最高,为415℃,焊缝两侧经受的热循环温度不同,前进侧的焊接温度略高于后退侧7~12℃。Frigaard等<sup>[10]</sup>重点研究了AA6082和AA7108铝合金搅拌摩擦焊接头热影响区在焊接过程中经历的热循环过程,分析不同参数下的热循环差异,以及对热影响区组织变化的影响,并分析了焊接速度对热循环的影响。

Kamp等人<sup>[11]</sup>对7系铝合金的热循环用有限差分软件TS4D进行了模拟,搅拌头作为热源,对于特定形状和焊接参数下的热输入功率用实测结果进行了校正。胡礼木等人<sup>[12]</sup>用理论计算的方法分析搅拌摩擦焊接温度的影响因素,认为影响焊接温度的因素包括被焊材料和搅拌头材料的物理性质、两者之间的摩擦因数、搅拌头的尺寸、焊接参数、轴向压力和侧面受到的进给压力等。Mir Zahedul H等<sup>[13]</sup>采用模拟与实验相结合的方法研究了5452-0铝合金

厚板焊接过程中试件不同厚度所经受的热循环过程,认为焊缝厚度方向存在温度梯度,因此经受的热循环存在较大的差异,从焊缝底部至表面,热循环程度逐渐增大。

### 铝合金搅拌摩擦焊金属塑性流动研究

搅拌摩擦焊中,焊缝金属围绕搅拌针的塑性流动是焊缝形成的主要过程,直接关系到焊缝缺陷形成、焊缝组织转变以及接头最终的力学性能。对材料流动的研究主要思路是使流动过程能够可视化,主要的试验方法有三种:金相组织法、焊具急停法以及嵌入标示物法。

Helena Larsson<sup>[14]</sup>研究了5mm厚铝合金AA5083-H12和AA6082-T6对接焊时材料的流动情况。研究结果表明,异种焊接接头的微观组织与典型的FSW接头非常相似。然而,焊核的圆环状流线更为明显,由交替的圆环或由不同成分的区域界面组成。Chen等人<sup>[15]</sup>等人通过试验设计使搅拌头在焊接过程中脆断在焊缝中的方法研究5083-0铝合金搅拌摩擦焊接时的塑性流动,搅拌针外围的受剪切的区域的部分材料旋转时形成一滞后层,这一滞后层形成焊核区。搅拌头移过后会在前进侧留下一空洞,滞后层材料不断填充到空洞中,只有少部分继续随搅拌针旋转。新形成的滞后层材料的旋转速度要远远低于搅拌针的旋转速度。

Guerra等人<sup>[16]</sup>采用在焊缝对接面设置跟踪示片和搅拌针冷冻(nib frozen)技术对搅拌摩擦焊焊接过程中的金属流动进行研究。研究结果表明,金属材料的转移由两个过程组成,第一个过程为前进侧材料被带入到一个材料随着搅拌针旋转并向前移动的区域;第二个过程是从搅拌针前面的后退侧带走材料并填充到前进侧。Colligan<sup>[17]</sup>通过在焊接6061和7075铝合金时分别加小

钢球作为示踪标记的方法以及搅拌头“急停”技术研究了金属的流变过程,研究表明,在搅拌摩擦焊中,不是所有受搅拌针影响的区域都发生搅拌,材料搅拌发生在焊接搅拌针的上部,发生搅拌的材料在搅拌针螺旋力的作用下被强制向下方流动,并在焊核区域沉积,搅拌针下面的材料仅仅受到挤压作用。

Seidel和Reynolds<sup>[18]</sup>采用标记插入技术(Marker Insert Technique)对搅拌摩擦焊焊接AA2195-T8时材料的流动进行了研究。标记由AA5454-H32制成,放置在焊缝对接面不同位置中。研究表明,在垫板、轴肩、焊接区域外“冷金属”共同形成一个“挤压模”,材料在这个“挤压模”内运动,随着热输入的提高,材料的运动更剧烈。材料的“搅拌”仅仅发生在焊缝上部,这部分的材料移动主要受搅拌头轴肩的作用。

可以看出目前对于铝合金搅拌摩擦焊接过程中材料塑性流动的研究都是从最后的结果进行推测,对于材料流动的实际过程的信息尚难以获取,因此试验结果与实际情况必然存在偏差。

### 铝合金搅拌摩擦焊焊缝微观组织研究

Yingchun Chen等<sup>[19]</sup>对2219-T6及2219-0铝合金搅拌摩擦焊进行了研究,结果表明,母材的状态对焊缝的形态、焊接缺陷和机械性能有很大影响。2219-0接头中,焊核区和热机影响区之间没有明显的界面,焊接缺陷多分布于焊缝底部,而在2219-T6焊缝中,焊核区和热机影响区之间有明显的界面,并在焊核区存在明显的“洋葱”环,缺陷多分布于焊缝顶部。Sato等人<sup>[20]</sup>对5052-0铝合金搅拌摩擦焊研究表明,焊核区晶粒发生了再结晶,形成了细小的等轴晶粒,位错密度较低。热机影响区晶粒发生了较大的弯曲变形,并

且位错密度较高,同时含有大量的小角度晶界,说明该区发生了回复。Cabibbo 等人<sup>[21]</sup>对 6056-T6 铝合金搅拌摩擦焊进行了研究,认为在热机影响区和接近焊核的区域晶粒形态完全不同;前进侧存在拉长的弯曲晶粒,而更宽的后退侧则包含更多的拉长了的窄晶粒。热影响区和母材包含轻微拉长的粗晶。焊核区由于较高的温度和低的应变速率,形成大量的微晶,以及从 TMAZ 区延伸出来的重新排列的亚晶,HAZ、TMAZ 和焊核区的沉淀分布不同于母材,HAZ 区发生了粗化,TMAZ 后退侧由残留的时效沉淀、半共格的颗粒和粗大的共格-Mg<sub>2</sub>Si 颗粒组成。

Rhodes 等人<sup>[22]</sup>对 7075-T6 合金在搅拌摩擦焊中的显微组织变化进行了研究,接头为典型的搅拌摩擦组织,焊核区由细小的再结晶等轴晶粒组成,为大角晶界。晶内含有大量沉淀物,为盘状或者片状,焊接过程中,沉淀物溶解到基体又重新析出。晶界处也有沉淀物存在,可能为 Mg<sub>32</sub>(Al, Zn)<sub>49</sub>。热影响区没有发生再结晶,较大尺寸的沉淀物没有变化,较小尺寸的发生了粗化,晶界附近析出带存在,位错密度低,没有发生缠结。

Su 等人<sup>[23]</sup>对 7075-T6 铝合金搅拌摩擦焊接过程中接头断续动态再结晶(DDRX)、位错增殖、动态回复(DRV)以及连续动态再结晶(CDRX)过程进行了研究,结果表明在靠近搅拌针的区域,新晶粒结构的形成为间断动态再结晶过程,在产生严重变形的微观结构中产生大量的新核。连续动态再结晶是以动态回复过程为基础的,动态回复过程中形成的亚晶发展成为大角晶界的晶粒,位错不断进入亚晶界是动态再结晶过程中亚晶界错位角增大的主要机制。Dumout 等人<sup>[24]</sup>利用小角度 X 射线散射(SAXS)对 T3(自然时效)和 T79(过时效)两种状态下的

7449 铝合金搅拌摩擦焊缝进行了分析,获得了沉淀物的体积含量,对焊缝各区域的沉淀物体积分数和尺寸的空间变化作了定量分析,并分析了母材原始组织特征对沉淀物分布的影响。Allehaux 等人<sup>[25]</sup>对 7349-T6 铝合金的研究发现,母材中主要强化相在热机影响区和热影响区已经转变为稳定的  $\eta$  相,在焊核区完全分解,在随后的自然时效中以 GP 区的形式重新析出。Hassan 等人<sup>[26]</sup>研究了焊接工艺参数对 7010 铝合金搅拌摩擦焊接接头焊核区微观组织的影响。当转速降低时,晶粒不均匀;当转速升高时,晶粒趋向均匀,这主要是由温度梯度决定的。

Rhodes 等<sup>[27]</sup>对 7050 铝合金搅拌摩擦处理中的细晶演化作了研究,变形铝合金发生了再结晶,再结晶晶粒的初始尺寸约为 25~100nm,但在开始条件下先存在的亚晶要小,然后再结晶晶粒在 350~450℃加热 1~4min,长大到 2~5 $\mu$ m,与搅拌摩擦焊缝中的晶粒尺寸相当。Su 等人

<sup>[28]</sup>对 7050-T651 铝合金搅拌摩擦焊接过程中的动态再结晶行为和沉淀现象进行了研究,结果为动态再结晶机制与文献<sup>[23]</sup>所述相同。沉淀物在搅拌摩擦焊接过程中粗化,晶间析出带宽度增宽,更多的相在热影响区形成。TMAZ 区达到了固溶体热处理温度,沉淀强化相溶解,冷却时首先在晶界,亚晶界和位错处再析出。DXZ 的沉淀强化相溶入固溶体并在位错或者基体 Al<sub>3</sub>Zr 颗粒处异质再析出。沉淀的程度取决于位错密度。

### 铝合金搅拌摩擦焊接接头力学性能研究

对接头力学性能的研究主要包括抗拉强度、疲劳性能、断裂性能和残余应力等。国内对于铝合金搅拌摩擦焊接接头抗拉性能的研究结果如表 1 所示,国外对于该方面的研究结果如表 2 所示。

可以看出不同状态下的不同系列铝合金分别进行搅拌摩擦焊接时,接头抗拉强度的强度系数参差不齐,

表1 国内铝合金搅拌摩擦焊接接头抗拉性能研究结果<sup>[29-33]</sup>

研究者	合金牌号	抗拉强度(强度系数)	断裂位置
陈迎春等	2219-0	159MPa(100%)	母材 HAZ
	2219-T6	341MPa(82%)	
赵衍华等	2014	361MPa(78%)	HAZ 与 TMAZ 过渡区
周鹏展等	2519-T87	313MPa(65%)	HAZ 与 TMAZ 过渡区
张平等	7A52-T6	364MPa(74%)	HAZ 与 TMAZ 过渡区
沈洋等	7075-T7351	390MPa(78%)	HAZ 与 TMAZ 过渡区

表2 国外铝合金搅拌摩擦焊接接头抗拉性能研究结果<sup>[21,34-39]</sup>

研究者	合金牌号	抗拉强度(强度系数)	断裂位置
Cabibbo 等	6056-T6	280MPa(90%)	—
Fujji 等	2017-T351	354MPa(82%)	NZ 与 TMAZ 过渡区
Cavaliere 等	2024/7075	424MPa(86%)	2024 侧 HAZ
Peel 等	5083-0	304MPa(67%)	HAZ
Lombard 等	5083-H321	315MPa(85%)	缺陷处
Scialpi 等	6082-T6	252MPa(76%)	HAZ
Ren 等	6061-T651	217MPa(70%)	HAZ 与 TMAZ 过渡区

说明搅拌摩擦焊接性与铝合金的牌号和热处理状态有关,大部分研究中接头都断裂在HAZ或HAZ与TMAZ的过渡区,说明该区域是铝合金在搅拌摩擦过程中弱化最严重的区域。此外柴鹏等人<sup>[40]</sup>对6063-T651铝合金搅拌摩擦焊接头冲击断裂进行了分析,接头焊核区的抗脆断性能优于热影响区。Cabibbo等人<sup>[21]</sup>对6056-T6铝合金搅拌摩擦焊接试验中发现,接头屈服强度低于母材,而且焊缝区的韧性下降。Di等人<sup>[41]</sup>研究了“S线”缺陷对7075-T6铝合金搅拌摩擦焊接头疲劳性能的影响,结果表明焊缝根部的分型线曲线是降低单面焊接头疲劳性能的主要因素。此外,搅拌摩擦焊接头与熔焊焊接头相比有更良好的疲劳性能。

Staron等<sup>[42]</sup>对搅拌摩擦焊接后铝合金薄板接头的残余应力作了测量,发现纵向的残余应力最大值出现在热影响区,最小值出现在焊核区

域,而横向没有明显的残余应力。

对于接头性能的研究大多集中于接头拉伸强度的分析,而对于评判接头性能的其他重要指标如弯曲强度、疲劳性能、冲击韧性以及抗腐蚀性能等的研究还比较少,在对焊接工艺参数进行优化时,需要从实际应用的角度全面考虑,才能加速搅拌摩擦焊接技术在高强铝合金连接中的推广应用。

### 结论

(1) 对焊缝缺陷的研究大多数集中于试验参数对焊缝缺陷影响的结果分析,对焊缝缺陷形成过程及产生本质的研究还相对较少。

(2) 对于焊接热循环的研究集中于平面热循环的研究,而对于三维温度场的研究还不多见,特别是对于焊接参数与焊接热循环的定量描述还需进一步研究。

(3) 目前对于铝合金搅拌摩擦焊

接过程中材料塑性流动的研究都是从最后的结果进行逆向推测,对于材料流动的实际过程的信息尚难以获取,因此试验结果与实际情况必然存在偏差。

(4) 对于铝合金搅拌摩擦焊接过程中显微组织的研究已经深入到沉淀相以及位错的尺度,但都属于定性的描述,需要通过定量的测定才能最终获得工艺参数对接头性能的关系。

(5) 对于接头性能的研究大多集中于接头拉伸强度的分析,而对于评判接头性能的其他重要指标如弯曲强度、疲劳性能、冲击韧性以及抗腐蚀性能等的研究还比较少,在对焊接工艺参数进行优化时,需要从实际应用的角度全面考虑。

本文有参考文献42篇,因篇幅所限不能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 侧卫)



提供航空制造软件全程解决方案

#### 航空制造软件解决方案

3D ACIS Modeler (ACIS) 是 Spatial 久负盛名的3D造型引擎,为超过350种客户应用程序所采用,全球应用量超过150万套。ACIS采用面向对象的开放C++架构,拥有强大的3D造型能力。ACIS集成了线框、曲面和实体造型的功能,支持流形和非流形拓扑,具备非常丰富的几何运算集,因此非常适用于构建具有混合造型功能的3D应用程序。

**3D ACIS Modeling 技术优势**



兼具容错与精确性



多线程机制的引入



强大的造型功能

**3D SPATIAL 其他组件功能**

**去除隐藏线功能**

3D ACIS PHL V5为ACIS模型生成高质量的二维控制图。使用PHL V5应用程序可以单独只显示从某个视角可见的模型局部信息。删除3D模型表示中隐藏包含的隐藏(或虚线)边,或用指定造型控制列表表示被遮挡的位置。

**曲面造型功能**

3D ACIS Deformable Modeling—扩展ACIS曲面造型功能。Deformable Modeling是一个独特的交互式雕塑成型工具,具有局部或全局编辑的功能。用户可以根据结构基于约束的自由D转体和NURBS曲线和曲面,为创建精确曲面提供了很高的艺术自由度。

**广泛的接口支持**

Spatial的3D InterOp组件为主要的MCAD文件格式提供及时可靠的数据转换接口。InterOp组件转换产品结构、3D几何和通用非几何数据如名称、颜色、层和坐标系等。

**流体力学分析**

Spatial公司的ACIS和HOOPS组件中的Fluent软件提供了完全可配置的流体力学分析功能。通过大部分计算机辅助工程(CAE)需处理的需求进行了优化,提供了包括结构分析、热传递、计算流体力学和电磁设计自动化(EDA)等功能。

#### 甘特图权威解决方案






VARChart XGANTT 控件可以快速、简单地集成到您的应用程序中,帮助您识别性能瓶颈,避免延迟以及高效地利用资源,使复杂数据变得更加容易掌控。

使用VARChart XGANTT,您便具有一个生成清晰、灵活的甘特图开发工具。使您实现“从概念到部署”的时间大大缩短。VARChart XGANTT 完美支持中文,并提供了: ActiveX, .NET WinForms, ASP.NET WebForms 三个版本。

**XGANTT 优势**

- ▶ 丰富的可视化选择
- ▶ 完美的支持64位系统
- ▶ 灵活的资源规划和调度

- ▶ 清晰的任务与链接视图
- ▶ 可靠的运行时体验
- ▶ 丰富的成功案例和完善的技术支持服务

**全球众多知名企业均选择 XGANTT**

- British Airways (英国航空公司)
- 深圳航空 (中国)
- 用友软件 (中国)

- Boeing (美国波音公司)
- 中国三峡电力 (中国)
- 深圳明源 (中国)

- 空中客车公司
- 泰山核电 (中国)
- 好孩子儿童用品 (中国)

专业控件解决方案提供商 慧都控件网 <http://www.evget.com>

免费咨询电话: 400-700-1020

广告索引号 09-111