

# LF6 铝合金与不锈钢异种金属惯性摩擦焊工艺技术研究

赵衍华<sup>1</sup> 张丽娜<sup>1</sup> 孙秀京<sup>1</sup> 刘敏<sup>1</sup> 何胜春<sup>2</sup>

(1 首都航天机械公司,北京 100076)

(2 中航工业北京航空制造工程研究所,北京 100024)

**文 摘** 铝合金与不锈钢物理化学性能较大的差异使两者采用常规焊接技术较难实现连接。本文采用惯性摩擦焊接技术进行了 LF6 铝合金与不锈钢异种金属连接,分析研究了接头的微观组织及拉伸力学性能。研究表明,LF6 铝合金与不锈钢惯性摩擦焊接过程中,相对不锈钢一侧,LF6 铝合金一侧发生了较大的塑性变形,飞边主要由 LF6 铝合金摩擦挤压而成;微观组织显示 LF6 铝合金一侧分为细晶区、拉长晶区和母材区,细晶区中呈现为细小等轴晶状组织,拉长晶区为摩擦剪应力作用下的板条状拉伸组织。EDX 分析表明,在摩擦热和顶锻力的作用下,焊接界面存在明显的浓度梯度,形成了数微米的扩散反应层;力学断口断裂于铝合金一侧受力薄弱区。

**关键词** 铝合金,不锈钢,惯性摩擦焊,飞边,微观组织,力学性能

中图分类号: TG146.2

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.05.012

## Inertia Friction Welding Between LF6 Aluminum Alloy and Stainless Steel

ZHAO Yanhua<sup>1</sup> ZHANG Lina<sup>1</sup> SUN Xiujing<sup>1</sup> LIU Min<sup>1</sup> HE Shengchun<sup>2</sup>

(1 Capital Aerospace Machinery Corporation, Beijing 100076)

(2 Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024)

**Abstract** The welding between aluminum alloy and stainless steel is of practical importance for widening the application of aluminum alloys, however, it is difficult to join them using the conventional welding method because of their different physical and metallurgical properties. In this work, inertia friction welding has been used to create joints between LF6 aluminum alloy and stainless steel, and the microstructure and the mechanical properties were analyzed. The results showed that the flash of the joints was mainly caused by friction and extrusion of aluminum alloy during welding, and the microstructure in aluminum alloy side was divided into fine-grain and elongated-grain area. The EDX results displayed that the welded joint was of evident concentration gradient, and a very narrow interface diffusion layer was formed under the function of friction heat and upset force. The fracture mechanics model showed the fracture occurs at the weak area of aluminum alloy side.

**Key words** Aluminum alloy, Stainless steel, Inertia friction welding, Flash, Microstructure, Mechanical properties

### 0 引言

铝合金与不锈钢的连接从最初的螺栓连接、粘接到焊接,工程应用领域均进行了尝试使用,而焊接件可克服螺栓、粘接带来的增重、性能不可靠的缺欠,成为业内研究热点<sup>[1-3]</sup>。铝钢较大的物理化学性能差异及其高温下较厚脆性金属间化合物的产生使其采用传统熔焊较难实现有效连接。为了获得可靠的铝钢连接接头,一些新型铝钢焊接技术应运而生。哈尔滨工业大学宋建岭等利用电弧熔钎焊进行了 5A06 铝合金与不锈钢的试验,获得了具有熔焊和钎焊双重

性质的连接接头<sup>[4]</sup>;ALEXANDRE MATHIEU 等人采用激光熔钎焊技术实现了 AA6061 铝合金与镀锌钢板的连接<sup>[5]</sup>,JURGEN VRENKEN 等人为 TATA STEEL COMPANY 进行了 AA6016 和 AA5182 铝合金与不锈钢的无钎剂激光熔钎焊,接头金属间化合物层厚度可控制在 1  $\mu\text{m}$  以下<sup>[6]</sup>;除熔钎焊技术外,德国学者采用扩散焊接技术实现了纯铝和碳素钢的应用连接<sup>[7]</sup>,KIMAPONG 采用搅拌摩擦焊接了 SS400 低碳钢板和 AA5083 铝合金<sup>[8]</sup>,国内南昌航空工业学院邢丽等也尝试采用搅拌摩擦焊接了 LF6 铝合金与低

收稿日期:2015-11-14

作者简介:赵衍华,1977 年出生,研究员,主要从事特种焊接技术研究。E-mail:zanyanhua@sohu.com

碳钢的搅拌摩擦焊接<sup>[9]</sup>。这些焊接方法为铝钢连接进行了有益的尝试,但存在某些应用限制,熔钎焊中镀锌层及锌焊丝的引入降低了接头的耐蚀性,扩散焊工艺控制的复杂性及搅拌摩擦焊中特制搅拌头的难获取均使铝钢接头工程化应用受到限制。

惯性摩擦焊接技术是一种应用于回转体构件连接的固相焊接技术,通过旋转飞轮贮存动能,转化为摩擦热能实现构件的连接。目前,惯性摩擦焊接技术在航空发动机用高温材料、钛合金材料构件的连接应用方面进行了研究<sup>[10-14]</sup>并实现了工程化应用。惯性摩擦焊接技术还适用于异种材料构件的连接,JIANG LUO 等采用惯性摩擦焊接技术进行了高温合金 K418 与合金钢 42CrMo 的连接<sup>[15]</sup>,D. YASHAN 采用惯性摩擦焊接技术实现了 1100 铝合金与 316 不锈钢的连接<sup>[16]</sup>,EMEL TABAN 等也实现了 6061-T6 铝合金与

1018 steel 的惯性摩擦焊接<sup>[17]</sup>,北京航空制造工程研究所采用惯性摩擦焊接技术进行了纯铝和不锈钢的连接<sup>[18]</sup>。

目前国内外尚无 LF6 铝合金与不锈钢的惯性摩擦焊接技术报道,LF6 铝合金为铝镁系合金,镁合金的加入增大了铝合金的强度,但是却会恶化铝合金的焊接冶金特性,尤其是促使扩散系数的增大,导致接头界面处金属间化合物的进一步形成,降低焊接接头的强度<sup>[19]</sup>。本文将就两种材料的连接及接头微观组织和力学性能进行分析研究,为 LF6 铝合金与不锈钢接头工程化应用提供借鉴。

## 1 实验

### 1.1 材料

实验采用了 LF6 铝合金与 1Cr8Ni9Ti 奥氏体不锈钢,材料的化学成分见表 1、表 2。

表 1 不锈钢 1Cr8Ni9Ti 的化学成分

Tab. 1 Chemical compositions of 1Cr8Ni9Ti stainless steel

C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	其他
≤0.12	≤2.00	≤1.00	≤17~19	≤8~11	≤0.030	≤0.035	Ti=5(C%-0.02)~0.80

表 2 LF6 铝合金的化学成分

Tab. 2 Chemical compositions of LF6 aluminum alloy (Wt. %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
0.40	0.40	0.10	0.50~0.8	5.8~6.8	0.20	0.02~0.10	余量

### 1.2 试验方法

铝合金和不锈钢均为直径 150 mm 棒料,焊前材料加工为适应于焊接设备的规格形状,焊后接头区域加工为壁厚为 6 mm 的圆柱体,如图 1 所示。



图 1 拉伸试样示意图

Fig. 1 Schematic illustration of tensile testing sample

惯性摩擦焊接试验在美国 MTI 公司生产的 MODEL-300BX 设备上,焊接转速 1 800 ~ 2 000 r/min,焊接压力 12 ~ 14 MPa,转动惯量 10 kg·m<sup>2</sup>。焊后沿垂直于焊缝方向切取金相试样,抛光腐蚀后在 OLYMPUS 光学显微镜进行金相组织分析,对焊接接头进行 EDX 能谱分析;并在 100 t 拉伸试验机上整体拉伸进行接头力学性能测试。

## 2 结果与分析

### 2.1 焊接接头的宏观形貌分析

图 2 为不同参数(焊接压力、转速)下,焊接接头宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016 年 第 5 期

飞边的宏观形貌。

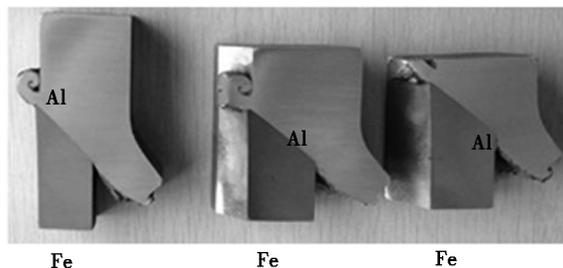


图 2 铝钢惯性摩擦焊接接头飞边形貌

Fig. 2 Flash appearance of inertia friction welded joint between aluminum and steel

图 2 可以看出,不同焊接参数均形成了完整的焊接接头,试样的飞边形貌表现为外侧飞边大且厚,内侧飞边小且薄的特征,随着焊接参数的变化,形貌仍有所差异,主要由焊接输入能量的差别造成,焊接热输入量越大,铝合金侧形成的飞边就越明显。

此外,惯性摩擦焊接引起的接头轴向变形主要由 LF6 铝合金的轴向缩短造成,不锈钢基本未发生变形,这是因为不锈钢的熔点是铝合金的 2 倍多,惯性摩擦焊接过程中产生的热量使铝合金发生了软化及较大塑性变形,不锈钢侧的变化要小得多,斜接接头的采用使不锈钢的剪切挤压类似于切削作用,使内侧飞边薄且卷曲,更多的金属流向外侧,形成厚大的外侧飞边。

### 2.2 焊接接头微观组织分析

铝钢惯性摩擦焊接过程中,在焊接摩擦热及顶锻力的作用下,焊接变形基本发生在铝合金侧,铝钢惯

性摩擦焊接接头微观组织照片也明显验证了该现象,如图3所示。

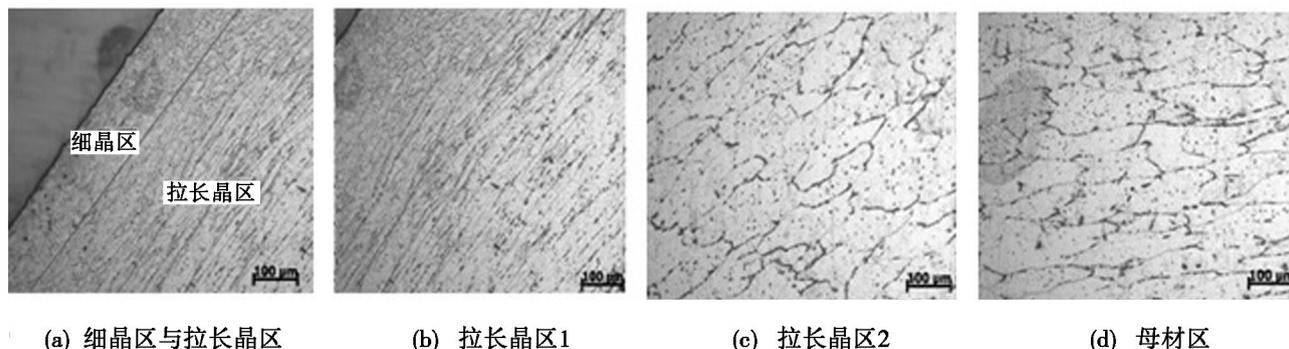


图3 惯性摩擦焊接接头铝合金一侧晶粒变化

Fig. 3 Microstructure of aluminum alloy near weld interface

图3分析可知,铝钢惯性摩擦焊接接头铝合金一侧可分为细晶区、拉长晶区及母材区。细晶区中呈现为细小等轴晶状组织,这是由于摩擦面是一个集中产热区,连续的摩擦扭转及剪切使新晶核大量形成并被挤出,直到焊接停止,较快的冷却速度使焊缝区内的新晶粒无法持续长大;此外,惯性摩擦焊过程中,快速的焊接热循环促使摩擦过程中动态再结晶不断进行,同时摩擦剪切变形对该区晶粒的破碎效能以及两摩擦面间金属的塑性流动对动态再结晶晶粒长大的阻碍作用,在焊接过程中达到一种近均衡状态,使焊缝区的新生晶粒无法长大,因此在焊缝区获得了细晶或超细晶。细晶区向母材过渡一侧存在晶粒沿金属流线方向拉长的拉长晶区,并伴有少量的动态再结晶组织,这是基于摩擦过程中近焊缝区金属在高温下软化,垂直焊缝方向温度梯度大,垂直焊缝方向的金属形成一系列软化层,软化层内存在一定的黏度,在流速不同的流层间界面处产生黏性摩擦剪应力,方向相反的剪应力致使板条状组织受到拉伸而伸长。

### 2.3 焊接接头 EDX 分析

借助扫描电镜(SEM)及能谱分析可更好的观察焊接界面处元素的变化。图4为压力、转动惯量一定,不同转速下LF6铝合金与不锈钢惯性摩擦焊接头的电镜能谱分析图。

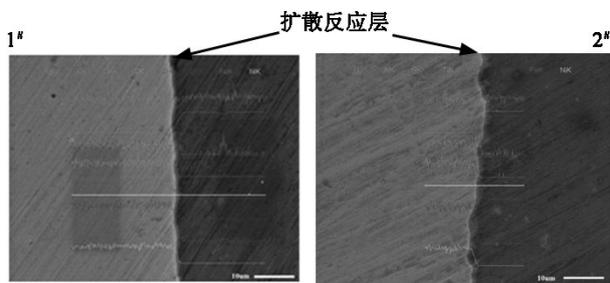


图4 铝钢惯性摩擦焊接接头的扫描电镜照片

Fig. 4 SEM photograph of inertia friction weld interface

1#试样转速大于2#试样转速,可以看出,两种转速下焊接界面均存在明显的浓度梯度,扩散距离随转

数的增大而增加,1#试样的扩散距离约5 μm左右;2#试样的扩散距离只有3 μm左右,因为1#试样的转速提高,焊接输入能量和焊接过程温度提高,原子的转移频率及高温下晶格中空位和间隙原子的密度也随之提高,晶格中能够接纳扩散原子的概率就更大,跃迁频率增大,焊接过程中高温停留时间延长,因此转速高时扩散会更充分,扩散距离增大。

尽管在惯性摩擦热及顶锻压力的作用下,Fe、Al元素发生了扩散并形成了扩散反应层,但由于惯性摩擦焊接工艺具有高速旋转、短时作用的特点,因此扩散反应层很窄,仅有数微米,扩散区多为Fe和Al元素形成的金属间化合物<sup>[16-17]</sup>,扩散层进一步增大将会导致接头脆性增加,造成接头性能损失。

### 2.4 焊接接头的力学性能分析

采用优化参数进行LF6铝合金与不锈钢惯性摩擦焊接,并进行了接头加工,在100 t实验机上整体拉伸,整体拉伸更好的反应了实际工况,降低了试件分解加工过程中应力释放带来的影响,为工程应用提供相对合理有效的性能数据。结果见表3。

表3 LF6铝合金/1Cr18Ni9Ti 不锈钢惯性摩擦焊接头的力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of LF6/1Cr18Ni9Ti inertia friction welded joints

序号	拉伸温度/℃	最大拉力/kN	抗拉强度/MPa
1#	23	309	208
2#	23	314	211
3#	23	311	209

焊接强度基本在210 MPa左右,拉断试样见图5所示。宏观断口看出,断裂从铝合金一侧断开,未从铝钢连接处断开,从图2看出,铝合金一侧由薄区过渡到厚区的转折处为受力薄弱区,因此断裂从该处断开,断口扫描照片可以看出断口存在大小不一的韧窝及铝撕裂痕迹,表明断裂为韧性断裂。断裂间接证明了铝钢接头的强度高于210 MPa,该数值高于其他焊

接方法形成的铝钢接头拉伸强度指标<sup>[19-20]</sup>。

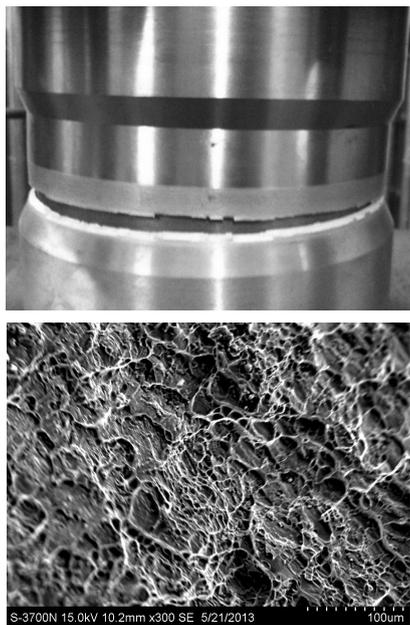


图5 LF6 铝合金/1Cr18Ni9Ti 不锈钢惯性摩擦焊接头整体拉伸断裂及断口形貌

Fig. 5 Fracture surfaces of LF6/1Cr18Ni9Ti inertia friction welded joint

### 3 结论

(1) 采用优化焊接工艺规范形成了完整的 LF6/1Cr18Ni9Ti 惯性摩擦焊接接头, 基于铝钢熔点的差异, 摩擦热及压力的作用使铝合金一侧发生了较大的塑性变形, 焊接飞边主要由铝合金旋转摩擦与不锈钢的剪切挤压共同作用形成。

(2) 铝钢惯性摩擦焊接接头铝合金一侧分成细晶区、拉长晶区及母材区。细晶区中呈现为细小等轴晶状组织, 拉长晶区基于软化层的摩擦剪应力使板条状组织拉伸而伸长。

(3) EDX 分析结果表明, 在惯性摩擦热及顶锻压力的作用下, 焊接界面存在明显的浓度梯度, 由于惯性摩擦焊接工艺具有高速旋转、短时作用的特点, 因此扩散反应层很窄, 仅有数微米。

### 参考文献

[1] FUKUMOTO S, TSUBAKINO H, OKITA K, et al. Amorphization by friction welding between 5052 aluminum alloy and 304 stainless steel [J]. Scripta materialia, 2000, 42: 807-812.

[2] 史春园, 于启湛. 异种金属的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

[3] LEE W B, MARTIN SCHMUECKER, ULISES ALFARO MERCARDO, et al, Interfacial reaction in steel-aluminum joints made by friction stir welding[J]. Scripta Materialia, 2006,

55:355-358.

[4] 宋建岭, 林三宝, 马广超, 等. 铝合金-不锈钢预涂层钨极氩弧熔钎焊接头的特性[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(7): 1209-1214.

[5] ALEXANDRE M, RAJASHEKAR S, ALEXIS D, et al. Dissimilar material joining using laser (aluminum to steel using zinc-based filler wire) [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(3): 652-661.

[6] VRENKEN J, GOOS C, VELDT TV, et al. Fluxless laser brazing of aluminum to steel [C]. Joining in Automotive Engineering, 2009.

[7] 卡扎科夫著材料的扩散焊接[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.

[8] KIMAPONG, WATANABE T. Friction stir welding of aluminum alloy to steel [J]. Welding Journal, October 2004, 83(10): 277-s-282-s.

[9] 邢丽, 柯黎明, 等. 铝合金与钢的搅拌摩擦焊焊缝成形及接头性能[J]. 焊接学报, 2007(1): 29-33.

[10] CHAMANFAR A, JAHAZI M, CORMIER J. A review on inertia and linear friction welding of Ni-based super-alloys [J]. Metallurgical and materials transactions A, 2015, 46A: 1640-1669.

[11] BAESLACK W. Inertia-friction welding of an advanced rapidly solidified titanium alloy [J]. Journal of materials science letters, 1991(10): 1401-1408.

[12] 杨军, 严隽民. GH4169 高温合金惯性摩擦焊接头晶粒分布特征[J]. 焊接学报, 2001, 22(6): 33-35.

[13] 祝文卉, 王敬和. GH4169 惯性摩擦焊工艺参数的实验研究[J]. 航空制造工程, 1994(5): 23-27.

[14] 赵红凯, 肖锋, 任飞, 等. TC4 钛合金高转速惯性摩擦焊接头组织及性能分析[J]. 焊接, 2008(11): 46-49.

[15] LUO J, LI L, DONG Y, et al. A new current hybrid inertia friction welding for nickel-based superalloy K418-alloy steel 42CrMo dissimilar metals [J]. International J Adv Manufacture Technology, 2014, 70: 1673-1681.

[16] YASHAN D, TSANG S, JOHNS W L, et al. Inertia friction welding of 1100 aluminum to type 316 stainless steel [C]. 67 Annual American welding society meeting, atlanta, GA, USA, 13 APR, 1986.

[17] EMEL TABAN, GOULD J E, LIPPOLD J C. Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1018 steel; properties and microstructure characterization [J]. Materials and Design, 2010, 31: 2305-2311.

[18] 张田仓, 栾国红. 纯铝-不锈钢异种材料惯性摩擦焊的研究[J]. 航空工艺技术, 1998(3): 35-36.

[19] 董红刚, 杨丽群. 铝和钢的熔焊和搅拌摩擦焊概况[J]. 材料科学与工艺, 2009(12)增刊2: 46-50.