

包铝层对搅拌摩擦焊接头力学性能的影响

Effect of Alclad on Mechanical Property of FSW Joint

严 铿¹, 马志新¹, 张 健²

(1 江苏科技大学 先进焊接技术省级重点实验室,
江苏 镇江 212003; 2 中国搅拌摩擦焊中心, 北京 100024)

YAN Keng¹, MA Zhixin¹, ZHANG Jian²

(1 Provincial Key Lab of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China; 2 China FSW Center, Beijing 100024, China)

摘要: 为提高 2024 航空铝合金材料的抗腐蚀性能,在其表面通常包有一层高纯铝或含 Zn 1% (质量分数) 的锌铝合金,包铝层在搅拌摩擦焊时会对接头的性能产生较大的影响。本研究采用搅拌摩擦焊技术对不同表面带有包铝层的 2024-T3 铝合金薄板进行了焊接,测试了其力学性能,并进行了金相组织观察。研究结果表明,包铝层的存在明显降低了 2024-T3 铝合金搅拌摩擦焊接头的力学性能;去掉包铝层后接头的性能显著提高;下表面包铝层对接头性能的影响大于上表面包铝层;当 2024-T3 铝合金表面带有包铝层进行搅拌摩擦焊接时,在搅拌头的旋转和搅拌作用下,包铝层被卷入焊缝中,形成类似于熔焊的“夹杂”,从而使得接头的力学性能下降。

关键词: 包铝层; 2024-T3 铝合金; 搅拌摩擦焊; 力学性能

中图分类号: TG456.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2008)09-0044-04

Abstract: High purity aluminum or allumen (including 1% Zn, mass fraction) alclad on 2024 aerolite is usually employed for improving corrosion resistance. This alclad will greatly impact the mechanical properties of friction stir welded joint. Mechanical properties and microstructures of varied welded al-clad aluminum 2024-T3 were investigated. It was found that the mechanical properties of the joints decreased by the alclad and it will be increased dramatically by removing the alclad. The effect of alclad on the bottom surface is larger than on the top surface. The mechanical properties of 2024-T3 joints will fall down because alclad is entrapped into the welded joints by the rotating and stirring tools during the friction stir welding, similar with “inclusion” in fusion welding.

Key words: alclad; 2024-T3 aluminum alloy; FSW; mechanical property

铝合金是航空航天工业中普遍使用的一种高强度铝-铜系合金,它具有密度低、比强度高、加工性能好等优点,广泛应用于飞机蒙皮、运载火箭等结构材料。但是对于传统的熔焊方法,2024-T3 铝合金的焊接性很差,焊缝中容易出现脆性相、气孔、热裂纹等缺陷。搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)是一种新型的固相连接技术,在焊接过程中材料并不熔化,形成的是固相接头,特别适用于铝合金的焊接^[1]。

目前,国外对 2024 铝合金的搅拌摩擦焊工艺和组织性能进行了大量研究,美国的 M A Sutton, A P Reynolds 等人研究了 2024 铝合金搅拌摩擦焊对接接头的显微结构^[2],G Bussu 研究了 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头的残余应力等^[3]。中国有人对 6mm 厚的 2024 铝合金的搅拌摩擦焊工艺进行了研究,但对小于

2mm 薄板 2024 铝合金研究的较少。为提高 2024 铝合金材料的抗腐蚀性能,在其表面通常有一层高纯铝或含 Zn 1% (质量分数) 的锌铝合金,称为包铝层。在熔化焊时该包铝层对接头性能的影响不是很明显,但在搅拌摩擦焊时,情况就有很大的不同。本工作研究了包铝层对搅拌摩擦焊接头性能的影响。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料及设备

本实验用材料为 2024-T3 可热处理强化的高强铝合金,其表面有一层成分为高纯铝的包铝层,其化学成分和力学性能分别见表 1 和表 2。

表 1 2024-T3 铝合金化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of 2024-T3 aluminum alloy (mass fraction/%)

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Cr	Al
3.8-4.9	1.2-1.8	0.3-0.9	0.5	0.5	0.25	0.15	0.1	Bal

表 2 2024-T3 铝合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 2024-T3 aluminum alloy

State	Tensile strength/MPa	Elongation/%
T3	485	18

试板尺寸为 400mm×100mm×2.65mm,沿长度方向进行对接。实验采用的焊接设备为 FSW2-4CX-006 型平面二维搅拌摩擦焊机,其上装有锥状搅拌头。搅拌头的轴肩直径为 10mm,搅拌针为圆顶内凹型,直径为 3mm。

1.2 实验方法

为测试包铝层对搅拌摩擦焊接头性能的影响,实验分三组进行。第一组实验对试板不加处理,上下表面都有包铝层;第二组实验对试板的上表面进行加工,采用机械加工铣掉 0.1mm,去除包铝层;第三组实验对试板的下表面进行加工,铣掉 0.1mm,去除包铝层。

焊前用丙酮擦拭试板,焊接参数为转速 500r/

min、焊速 180mm/min。焊后 5 天进行拉伸性能实验和硬度测试,分析包铝层对 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能的影响;同时进行金相组织和断口形貌观察,采用 JSM-5600LV 型扫描电镜(Jeol, Japan) 分析包铝层对 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头组织的影响。

2 实验结果与分析

2.1 力学性能的实验结果与分析

包铝层的存在对铝合金搅拌摩擦焊接头的力学性能有重要的影响。表 3 是三组试板拉伸性能实验的平均试验结果,可以看出,去掉包铝层的第二组和第三组试板均比第一组的拉伸强度高,其中去掉下表面包铝层的第三组试板的拉伸强度最高,平均为 419.74MPa,比没去包铝层的第一组试板平均高出 35.54MPa,达到母材性能的 86.1%,此外,第三组接头的延伸率也最高,达到 7.2%。

表 3 拉伸性能实验结果

Table 3 Result of tensile test

Test group No	Tensile strength/MPa	Elongation/%	Strength factor/%
First group test (top and bottom surface both with alclad)	391.16	5.62	80.24
Second group test (top surface without alclad)	407.96	6.02	83.68
Third group test (bottom surface without alclad)	419.74	7.20	86.10

图 1 所示为三组实验焊缝接头的显微硬度从后退侧到前进侧的分布曲线,其中 x 轴的零点为焊缝中心。

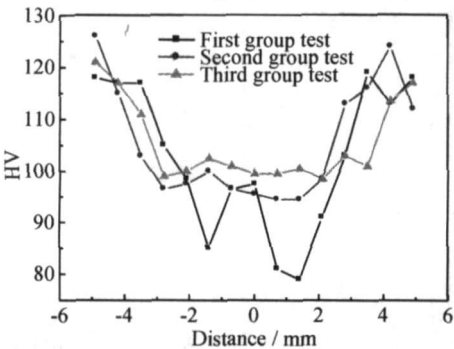


图 1 焊缝接头的显微硬度变化曲线

Fig.1 Microhardness curves of the joints

均呈“W”型,最低点位于焊缝的热影响区附近,并且两面均有包铝层的接头硬度明显低于上表面无包铝和下表面无包铝的接头硬度。从焊缝区硬度的变化趋势上看,两面都带有包铝层的第一组实验焊缝的硬度分布波动很大,由焊缝中心到两侧,硬度逐渐降低,当到热影响区时,硬度达到最低,然后其值逐渐升高到母材水平。去掉表面包铝层的第二组实验和第三组实验的在焊缝区的硬度分布波动较小,分布比较均匀,其平均值均高于第一组实验。从力学性能实验的结果可以看出,包铝层的存在大大降低了搅拌摩擦焊接头的力学性能,去掉包铝层后 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头的性能明显提高;除去下表面包铝层的第三组试板比除去上表面包铝层的第二组试板的拉伸性能和硬度高,这说明下表面包铝层对搅拌摩擦焊接头性能的影响大于上表面。

从图 1 可以看出,三组实验接头的显微硬度分布

2.2 断口分析

在搅拌摩擦焊过程中, 搅拌头旋转方向和前进方向相同的一侧称为前进侧, 与前进方向相反的一侧称为后退侧^[4], 三组实验中上下表面都有包铝层的第一组试样拉伸断裂在焊缝的前进侧热机械影响区, 为剪切断裂, 上表面无包铝的第二组试样拉伸断裂在焊缝中心偏于前进侧位置, 第三组下表面没有包铝层的试

样拉伸断裂在后退侧热机械影响区位置, 成 45° 角剪切断裂。图 2 是三组实验拉伸断口的微观形貌照片。可以看出, 除去包铝层后拉伸断口中的韧窝状特征明显增加, 在图 2c 中, 断口上布满了大小不等的圆形或椭圆形的杯状凹坑群。通过分析可以看出, 从第一组实验到第三组实验的试样, 脆性断裂逐渐减少, 塑性断裂逐渐增加, 这说明了包铝层的存在降低了 2024-T3

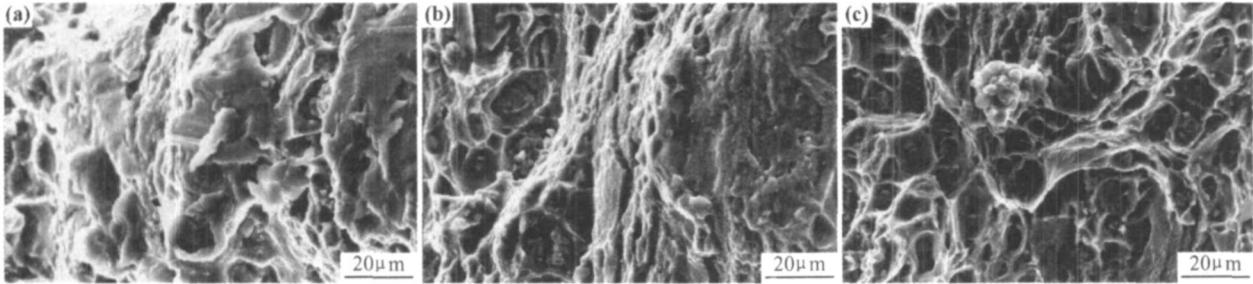


图 2 焊缝接头的拉伸断口形貌

(a) 第一组实验; (b) 第二组实验; (c) 第三组实验

Fig. 2 Tensile fracture surfaces of the joints

(a) the first group test; (b) the second group test; (c) the third group test

铝合金的塑性性能。

2.3 金相组织分析

图 3 是焊缝接头组织宏观金相照片。可以看出, 下表面带包铝层的试样的焊缝下部有少量的白色齿状的纯铝搅入焊缝, 从左往右逐渐减少, 即从焊缝的前进侧到后退侧逐渐减少 (见图 3b); 上表面带包铝层的试样大焊缝上部有大量的白色的纯铝搅入焊缝, 并从右

往左逐渐减少, 即从焊缝的后退侧到前进侧逐渐减少 (见图 3c)。在搅拌摩擦焊接过程中, 搅拌头旋转着逐渐插入被焊试样, 材料在搅拌头的摩擦力和搅拌针的搅拌作用下发生塑性, 形成固相接头。一般把焊接过程中的塑化金属分为两层, 上层塑化金属主要在搅拌头的旋转摩擦带动下由焊缝的前进侧向后退侧移动转移, 下层塑化金属主要由搅拌针对底层金属的挤压和

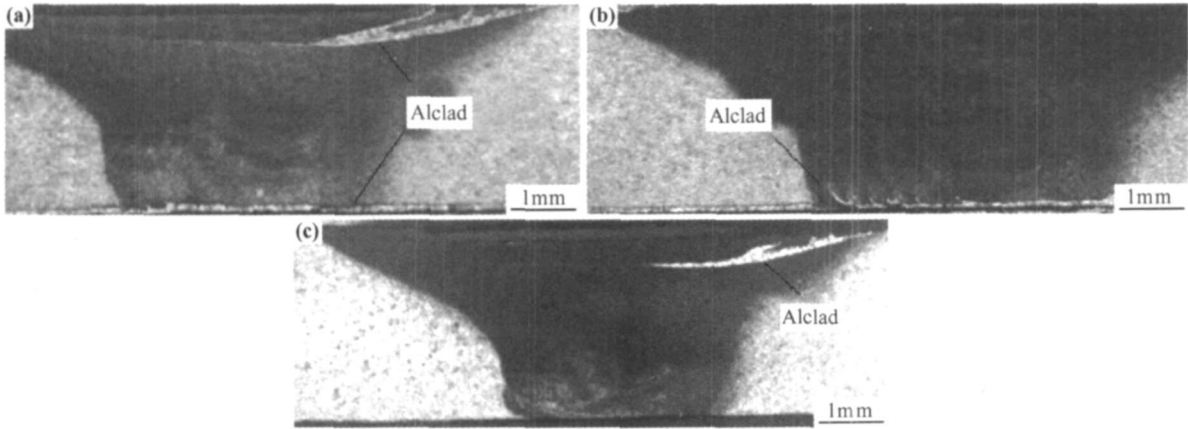


图 3 焊缝接头的金相照片

(a) 上下表面都有包铝层; (b) 上表面没有包铝层; (c) 下表面没有包铝层

Fig. 3 Cross sectional appearances of the joints

(a) top and bottom surface both with alclad; (b) top surface without alclad; (c) bottom surface without alclad

旋转带动来实现转移^[5]。

第二组试样在进行搅拌摩擦焊接时, 旋转的搅拌针对底层金属进行挤压和搅拌, 下层金属和包铝层发

生塑性, 由于在焊接过程中搅拌针和下表面之间存在一定距离, 所以只有极少数的包铝层被卷入焊缝, 而且没有和焊缝中的其他金属熔合在一起, 当接头承受载

荷时,该位置就容易应力集中,产生微裂纹,这可能是下表面带有包铝层的 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头的拉伸性能较低的原因。

第三组试样的上表面带有包铝层,在进行焊接时,前进侧的焊缝金属受到搅拌针的热剪切作用,发生塑化变形,并在搅拌针的旋转摩擦带动下,由焊缝的前进侧转移到后退侧,在后退侧焊缝金属受到旋转面前方金属的挤压作用而沉积下来,形成明显的聚集层,这部分金属也没有和焊缝中的金属熔合在一起,在接头承受载荷时,造成应力集中,成为裂纹产生的根源,这就造成上表面带有包铝层的 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头的拉伸性能的下降。

总之,表面带有包铝层的 2024 铝合金进行搅拌摩擦焊接时,包铝被卷入焊缝,由于焊接温度低,包铝不能和铝合金熔合在一起,从而形成类似于熔焊的“夹杂”,当接头承受载荷时就产生应力集中,容易形成裂纹,使焊缝的力学性能下降。

3 结论

(1) 包铝层的存在大大降低了 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头的力学性能。

(2) 去掉包铝层后 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头的性能显著提高,而且分布比较均匀。

(3) 下表面包铝层对 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头

性能的影响大于上表面的包铝层。

(4) 当 2024 铝合金表面带有包铝层进行搅拌摩擦焊接时,在搅拌头的旋转和搅拌作用下,包铝层被卷入焊缝中,由于和铝合金不能熔合在一起,形成类似于熔焊的“夹杂”,从而使得接头的力学性能下降。

参考文献

[1] 关桥. 轻金属结构制造中的搅拌摩擦焊技术与焊接变形控制[J]. 航空科学技术, 2005, (4): 13- 16.

[2] SUTTON M A, REYNOLDS A P, HUBBARD C R, et al. A study of residual stresses and microstructure in 2024 aluminum friction stir butt welds [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2003, 124: 215- 221.

[3] BUSU G, IVRING P E. The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024 T351 aluminum joints [J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25: 77- 78.

[4] NORMAN A F. High resolution EBSD analysis of the grain structure in an AA2024 friction stir weld [J]. Materials Science Form, 2000, 331- 337: 1713- 1718.

[5] 栾国红. 搅拌摩擦焊流变特性研究[J]. 航空制造技术, 2003, (11): 23- 25.

收稿日期: 2008-06-02; 修订日期: 2008-07-14
作者简介: 严铿(1961—), 男, 教授, 现从事搅拌摩擦焊方面研究工作, 联系地址: 镇江江苏科技大学先进焊接技术省级重点实验室(212003)。 E-mail: yankeng@126.com

(上接第 43 页)

(3) Ti/ZrN/瓷结合强度达到 29.2MPa, 与 Ti/瓷结合强度 23.5MPa 相比, 提高了 24.3%。

参考文献

[1] 陈治清. 口腔材料学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2001. 326- 328.

[2] TANAKA Y. Titanium-oxide interface structures formed by degassing and anodization processes [J]. Journal of Materials Science, 2005, 40: 3081- 3090.

[3] YILMAZ H, DINCER C. Comparison of the bond compatibility of titanium and a NiCr alloy to dental porcelain [J]. Journal of Dentistry, 1999, 17(3): 245- 222.

[4] SUANSU WANA N, SWAIN M V. Adhesion of porcelain to titanium and a titanium alloy [J]. Journal of Dentistry, 2003, 31 (7): 509- 518.

[5] ADACHI M, MACKERT J R, PARRY E E, et al. Oxide adherence and porcelain bonding to titanium and Ti-6Al-4V alloy [J].

Journal of Dental Research, 1990, 69(6): 1230- 1235.

[6] K N NEN M, KIVILAHTI J. Fusing of dental ceramics to titanium [J]. Journal of Dental Research, 2001, 80(3): 848- 854.

[7] WANG R R, WELSCH G E, MONTEIRO O. Silicon nitride coating on titanium to enable titanium-ceramic bonding [J]. J Biomed Mater Res, 1999, 46(2): 262- 270.

[8] ZCAN I, UYSAL H. Effects of silicon coating on bond strength of two different titanium ceramic to titanium [J]. Dental Materials, 2005, 21(8): 773- 779.

[9] ISO 10477- 9693. Metal-ceramic dental restorative systems[S].

[10] 饶东生. 硅酸盐物理化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1983. 90- 93.

基金项目: 吉林省科技发展项目(20050511)
收稿日期: 2008-06-02; 修订日期: 2008-07-14
作者简介: 段珍珍(1982—), 女, 博士研究生, 现从事先进材料连接方面的研究工作, 联系地址: 吉林大学材料科学与工程学院(130025)。 E-mail: duanzz2009@yahoo.cn