

不同基体组织对搅拌摩擦焊接接头性能的影响

Effect of Base Metal on Joint Properties of Friction Stir Welded

金玉花, 王希靖, 李常锋, 马宁宁

(兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 兰州 730050)

JIN Yu-hua, WANG Xi-jing, LI Chang-feng, MA Ning-ning

(State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous

Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

摘要: 对板厚为 5mm 的 2024, 6082, 7050-T7451 三种铝合金进行搅拌摩擦焊接实验。结果表明: 搅拌摩擦焊接铝合金 2024 时, 接头部位很容易出现孔洞缺陷, 但一定尺寸范围内的缺陷并未严重削弱接头的抗拉强度。铝合金 6082 可在很大的范围内选择工艺参数, 接头成型性明显好于铝合金 2024 和 7050-T7451, 工艺参数的改变对接头的抗拉强度无大的改变。铝合金 7050-T7451 在设计焊接参数范围内没有发现孔洞缺陷, 但接头的抗拉强度系数比铝合金 2024 和 6082 接头都低。因为搅拌摩擦焊接接头的性能除与焊接工艺参数有关外, 基体材料的屈服强度、延展性、基体硬度等也是不可忽视的影响因素。

关键词: 搅拌摩擦焊; 铝合金; 基体组织; 抗拉强度

中图分类号: TG456 9 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)09-0060-04

Abstract: Three different aluminium alloy plates of 5mm thickness 2024, 6082 and 7050 were welded by FSW. The results show that some defects such as holes appear easily in the joint zone for aluminium alloy 2024, but the tensile strength of joint can not decrease predominantly when the size of hole is lower than certain value. For aluminium alloy 6082, the formation of joint is super to that of aluminium alloy 2024 and 7050, its tensile strength raises or decreases 5MPa with various welding parameter. Hole defeat hasn't been found in the joint under the welding parameters which were designed in this experiment, however, the ratio of tensile strength of joint to base material is lower comparing with aluminium alloy 2024 and 6082. Because the properties of FSW joint were also influenced by the material properties such as the yield strength, ductility and hardness of base metal besides FSW process parameter.

Key words: friction stir welding; aluminium alloy; based metal; tensile strength

搅拌摩擦焊与传统的熔化焊接方法相比较, 具有接头晶粒细小、疲劳性能、拉伸性能和弯曲性能良好、无需焊丝、焊接时不需使用保护气体、焊接后残余应力和变形小等优点。并且由于其焊接时无尘烟、无气孔、无飞溅和节能等特点而被誉为“绿色焊接工艺”^[1-4]。

搅拌摩擦焊可以对多种熔化焊接性差的有色金属尤其是铝合金、镁合金、铜合金等材料进行可靠的连接, 而且连接工艺简单、并有较好的工艺适应性。自问世以来大量的研究工作都集中在工艺参数(包括轴向压力、搅拌针旋转速度、焊接速度、搅拌针形状等)对材料搅拌摩擦过程中流动性的影响, 对接头微观组织的影响以及力学性能(单向拉伸、疲劳性能、弯曲性能)的影响等等^[5-7]。目的是寻求一种比较理想的工艺参数范围获得无缺陷连接。但是关于金属基体本身对搅拌摩擦焊接头性能影响的报道几乎没有, 本工作分析研

究了不同铝合金搅拌摩擦焊接头的性能。

1 实验方法

本实验选用 5mm 厚的三种不同材质的铝合金材料, 即 2024, 6082 和 7050 铝合金轧板进行搅拌摩擦焊接实验。基体金属的化学成分如表 1 所示。焊前将板材的上下面以及对接面打磨至光亮, 然后用丙酮将焊板表面擦拭干净。焊接采用对接形式, 在搅拌摩擦焊机上焊接。焊后制备接头金相试样, 用 Kellers 试剂腐蚀, 观察焊缝的宏观形貌, 并分析焊缝的组织; 对表面光滑没有缺陷和背部焊合较好的焊接板, 按照国家标准 GB/T228—2002 加工成拉伸试样(每个工艺下取 3 个试样), 在 WDW-E200D 型微机控制的电子万能试验机上测量接头的拉伸性能。

表 1 铝合金的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of aluminium alloy (mass fraction/%)

Alloy	Cu	Mg	Fe	Si	Cr	Zn	Ti	Al
2024	3 8-4 9	1 2-1 8	0 5	0 5	0 10	0 25	0 15	Bal
6082	0 10	0 6-1 2	0 5	0 7-103	0 25	0 2	0 10	Bal
7050	2 0-2 6	1 9-2 6	0 15	0 12	0 04	5 7-6 7	0 06	Bal

2 结果及讨论

2.1 接头成型

铝合金的熔焊常会伴随孔洞、夹渣、焊后凝固时产生裂纹等缺陷使接头的性能恶化。搅拌摩擦焊因材料之间的连接,主要在轴肩与被焊材料之间摩擦产生的热量以及搅拌针挤压前沿金属并与前沿金属之间作用产生的热量联合作用使搅拌针前沿金属软化、产生塑性变形实现材料之间的固相连接。但是不同基体的铝合金在搅拌摩擦焊过程中接头的成型有一定程度的差异,图 1 是铝合金 2024 在轴肩压力恒定、焊速恒定、不同转速下得到的横截面宏观形貌。可以看出,当转速高时,前进边上表面(靠近轴肩端)易出现隧道型缺陷,转速在 1400~1300r/min 间变化时,随着转速的减小缺陷逐渐的由焊缝的前进边上端向下端转移,缺陷尺寸随焊接头旋转速度的降低而缩小;当速度降到 1200r/min 时缺陷消失,形成致密的焊缝,继续降低旋转速度,当旋转速度降到 800r/min 时缺陷又出现了,

与高转速下相比不同的是缺陷尺寸很小。当转速低于 600r/min 以下焊接时,焊接表面变得非常粗糙,底部明显看到未焊透的缝隙。图 2 是铝合金 6082 在轴肩压力恒定、焊速在 50~150mm/min、转速在 500~1500r/min 间变化时得到的横截面宏观形貌。图 3 是铝合金 7050 在轴肩压力恒定、焊速在 40~100mm/min、转速在 400~600r/min 间变化时得到的横截面宏观形貌。可以看出,相对而言铝合金 6082 可以在很大的范围内改变工艺参数而不影响接头的成型性。搅拌摩擦焊接铝合金 7050 时可选的工艺参数范围比焊 2024 宽,但比焊 6082 窄。此外,铝合金 6082 接头横截面很容易得到“洋葱环”结构,铝合金 7050 横截面除部分工艺下得到“洋葱环”结构外,其它工艺下横截面有明显的塑性流线带。“洋葱环”的形成是由于搅拌头的旋转和搅拌头的移动过程共同作用于焊缝两侧材料,而搅拌头旋回侧的金属材料不断挤出受到轴肩的挤压。塑性变形流线带的形成是由于搅拌头的搅拌作用使得焊核区周围的母材纤维状组织产生明显的塑性

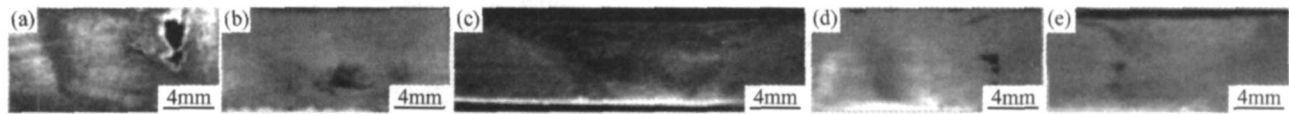


图 1 2024 铝合金在不同转速下接头截面宏观形貌(焊速 60mm/min)

(a)1400r/min;(b)1300r/min;(c)1200r/min;(d)800r/min;(e)600r/min

Fig. 1 Effect of welding parameter on macrostructure of 2024 aluminium alloy joint (welding speed 60mm/min)

(a)1400r/min;(b)1300r/min;(c)1200r/min;(d)800r/min;(e)600r/min



图 2 6082 铝合金在不同工艺下接头截面宏观形貌

(a)500r/min,50mm/min;(b)1200r/min,100mm/min;(c)1500r/min,150mm/min

Fig. 2 Effect of welding parameter on macrostructure of 6082 aluminium alloy joint

(a)500r/min,50mm/min;(b)1200r/min,100mm/min;(c)1500r/min,150mm/min



图 3 7050 铝合金在不同工艺下接头截面宏观形貌

(a) 400r/min, 40mm/min; (b) 400r/min, 70mm/min; (c) 400r/min, 100mm/min; (d) 600r/min, 60mm/min
Fig 3 Effect of welding parameter on macrostructure of 7050 aluminium alloy joint
(a) 400r/min, 40mm/min; (b) 400r/min, 70mm/min; (c) 400r/min, 100mm/min; (d) 600r/min, 60mm/min

变形所致。

焊接接头的形成主要由处于塑性状态的材料的流动性所控制,而材料的流动性又受该材料的屈服强度、延展性、基体材料的硬度、搅拌针形状尺寸、焊接工艺参数等因素的影响。由以上分析可以看出,高温塑性差的金属(如 2024 铝合金),焊接时摩擦头所带动的金属由于流动性差而不能及时填充前进边金属的损失,在前进边接头内常常出现孔洞、隧道等缺陷,大尺寸的缺陷严重影响接头强度;高温塑性好的金属(如 6082 铝合金),焊接时摩擦头所带动的金属由于流动性好,能及时填充前进边金属的损失,使焊缝成型良好。

2.2 抗拉强度

搅拌摩擦焊焊接铝合金可以得到较高的抗拉强度,这可以和组织中的晶粒细化结合起来分析,晶粒越细小存在的晶界越多,而多晶体中的位错运动除了要克服临界切应力外还要克服界面阻力,因为晶界两侧晶粒的取向不同,其中一个晶粒滑移并不能直接进入临近的晶粒,于是引起位错在晶界附近塞积,造成应力集中,激发相邻晶粒中的位错源开动,引起宏观的塑性应变。搅拌摩擦焊使接头晶粒细化,致使多晶体中的位错运动困难,引发塑性变形的抗力较大,所以抗拉强度较高,但不同基体的铝合金搅拌摩擦焊后接头抗拉强度与基体抗拉强度的比值因基体材料性能不同存

在一些差异。

表 2 为不同焊接参数、不同处理状态下 2024, 6082, 7050 铝合金搅拌摩擦焊接头的单向拉伸实验结果。从实验结果来看,搅拌摩擦焊接后这三类铝合金的接头强度都可达母材强度的 70% 以上,比熔焊法焊接得到的接头强度都高。2024 铝合金在不同工艺下焊接后其断裂强度大部分在 90% 以上,当转速为 800r/min,焊接速度为 60mm/min 时甚至接近于母材的强度,其它的工艺下尽管都出现如图 1 所示的一些缺陷,但这些缺陷在一定的范围内对抗拉强度的削弱程度不及其它铝合金大,这一现象在 M. A. Sutton 等人^[8]的实验中也报道过,目前公认的解释是铝合金 2024 对缺口不敏感。即存在一个极限缺口尺寸,当缺口尺寸小于极限缺口尺寸时,缺陷不是产生断裂的主要因素。另外铝合金 2024 是析出强化型铝合金,也是加工硬化型铝合金,在搅拌摩擦焊接中,搅拌针前沿的材料在搅拌热和摩擦热的共同作用下软化,搅拌针不断打碎处于塑性状态的基体,当温度高于 0.5T_m (T_m 为材料的熔点) 时发生动态再结晶而细化组织,搅拌摩擦焊接头的薄弱区热影响区与热机械影响区的交界处其主要强化相是 G.P 区,在 Al-Cu 系铝合金中,铜的含量大于等于 4% (质量分数) 时, G.P 区的临界屈服应力高于焊核区主要强化相 θ' 相或 θ 相,在焊接后的

表 2 不同铝合金 FSW 接头拉伸试验数据

Table 2 Summary of the tensile testing experiments

Alloy	Heat-treatment	Parameter(rotation/welding speed)	UTS/MPa	UTSw/UTSBM
		/(r•min ⁻¹)/(mm•min ⁻¹)		/%
2024	Anneal	1400/60	181.95	88.6
		1300/60	192.81	93.5
		1200/60	197.6	98.1
		800/60	200.3	99.5
		600/60	118	58.8
6082	Anneal	500/50	203	91.2
		1500/150	193	86.7
		400/40	338.67	73.5
7050	T7451	600/50	366.67	79.58
		800/65	347.5	75.42

自然时效阶段 G. P 区的加工硬化率近似于平衡相 θ 相, 这些原因的综合作用使铝合金 2024 搅拌摩擦焊后接头抗拉强度很高。铝合金 6082 因具有良好的塑性变形能力, 低的屈服强度, 在搅拌摩擦焊接过程中可在更广的范围内进行转速与焊速的匹配, 接头抗拉强度跳动不大, 基本保持在母材抗拉强度的 86.79% ~ 91.29% 之间。对铝合金 7050, 转速在 400~ 800r/min 之间变化, 焊速在 40~ 100mm/min 之间变化时没有发现孔洞、咬合带、沟槽等缺陷, 但接头抗拉强度与基体材料抗拉强度的比值明显低于铝合金 2024 和 6082 的。因为对这种纯析出强化型铝合金, 强度的变化与硬度的变化成正比, 而硬度的变化不依赖于位错等的强化, 主要依赖于第二相对基体的强化作用, 焊核区、热机影响区按 Orowan 机制强化, 热影响区弹性应力场对位错的阻碍作用成为主要的强化机制。因为强化机制的不同, 热影响区往往成为该材料搅拌摩擦焊后接头强度的薄弱区域。

3 结论

- (1) 搅拌摩擦焊接铝合金 2024 时, 转速在 800~ 1200r/min 之间变化, 接头部位没有孔洞缺陷, 转速大于 1200r/min, 或小于 800r/min 时, 接头处都会出现孔洞缺陷, 但缺陷的出现并未严重削弱接头的抗拉强度。
- (2) 铝合金 6082 由于具有优良的塑性变形能力, 可在很大的范围内选择工艺参数, 而且接头的抗拉强度随工艺参数的改变没有大的改变。
- (3) 铝合金 7050-T 7451 在设计的焊接参数范围内没有发现孔洞缺陷, 但相对基体而言接头的抗拉强度下降的程度比铝合金 2024 和 6082 都大。

(4) 不同铝合金搅拌摩擦焊后接头抗拉强度与基体抗拉强度的比值有很大的差异, 说明焊接参数并不能完全控制接头抗拉强度, 基体材料的其它性能如屈服强度、塑性变形能力以及基体的硬度都是影响接头性能不可忽视的因素。

参考文献

[1] DAWES C J, THOMAS W M. Friction stir process welds aluminum alloys[J]. Welding Journal (Miami, Fla), 1996, 75 (3): 41- 45.

[2] DAWES C J. Introduction to friction stir welding and its development[J]. Welding and Metal Fabrication, 1995, 63(1): 13- 15.

[3] STEWARD W W. Welding of airframes using friction stir [J]. Air & Space Europf, 2001, 3 (3/4): 64- 66.

[4] 张田仓, 郭德伦, 陈沁刚, 等. 铝合金搅拌摩擦焊技术研究 [J]. 机械工程学报, 2002, 38(2): 127- 130.

[5] 刘小文, 鄢君辉, 杜随更. LY12 搅拌摩擦焊技术 [J]. 焊接学报, 2001, 22(4): 55- 57.

[6] JOEL J D. The friction stir welding advantage [J]. Welding Journal, 2001, 80(5): 30- 34.

[7] WANG Xun hong, WANG Kua+she. Microstructure and properties of friction stir but+ welded AZ31 magnesium alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2006, A431: 114- 117.

[8] YANG Bang-cheng, TAN Jun-hui, SUTTON M A, et al. Banded microstructure in AA2024-T351 and AA2524-T351 aluminum friction stir welds[J]. Materials Science and Engineering, 2004, A364: 55- 65.

收稿日期: 2008-06-02; 修订日期: 2008-07-16
作者简介: 金玉花(1971—), 女, 博士研究生, 现从事先进焊接技术方面研究工作. 联系地址: 兰州理工大学材料科学与工程学院(730050).
E-mail: lif@lut.cn

(上接第 59 页)

[5] 尤显卿, 马建国. 电冶熔铸 WC/ 钢复合材料中 WC 的溶解行为 [J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(9): 1363- 1368.

[6] AHN S A, KANG S. Dissolution phenomena in the Ti(C0 7 N0 3)-WG-Ni system[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2008, (26): 340- 345.

[7] 郭绍义, 李俊兴, 杨秋合, 等. 激光熔覆 WG-Ni/ TiC 涂层的组织合摩擦磨损性能研究[J]. 材料工程, 2008, (6): 72- 75.

[8] 杨瑞成, 王夏冰, 王军民. WC/ 钢基合金不同热处理状态的微观特征[J]. 材料科学与工艺, 1998, 6(3): 29- 33.

[9] 刘富荣, 高谦, 高登攀, 等. 激光熔覆 WC 增强复合涂层开裂行为

分析[J]. 材料工程, 2003, (5): 37- 39.

[10] 康进兴, 赵文珍. WC 对铜基和镍基喷焊覆层材料耐气蚀性能的影响[J]. 材料工程, 2002, (3): 3- 6.

收稿日期: 2008-06-02; 修订日期: 2008-07-12
作者简介: 王智慧(1956—), 男, 教授级高工, 工学硕士, 从事金属表面强化研究. 联系地址: 北京市朝阳区平乐园 100 号, 北京工业大学材料科学与工程学院(100124). E-mail: zhwang@bjut.edu.cn