

铝合金搅拌摩擦焊对搭接接头 Hook 缺陷研究

Investigation on Hook Defect of Butt-Overlap Joint of Aluminum Alloy by Friction Stir Welding

南车株洲电力机车有限公司
中航工业北京航空制造工程研究所

吴志明 吴坚定
马正斌 陈巍 董春林 栾国红

[摘要] 对厚度为 16mm 与 20mm 的 6082 铝合金对搭接接头进行搅拌摩擦焊接试验,结果表明,对搭接接头搅拌摩擦焊接工艺参数可调范围较宽,搅拌头旋转速度在 300~600r/min 及焊接速度在 60~200mm/min 条件下,能够获得完整无缺陷的焊接接头。搭接面处于前进侧时,Hook 缺陷向上偏转,角度大于 90°;搭接面处于后退侧时,Hook 缺陷向下偏转,角度小于 45°。

关键词: 搅拌摩擦焊 对搭接接头 Hook 缺陷 材料流动

[ABSTRACT] The butt-overlap joint of 6082 aluminum alloy by friction stir welding is investigated. The results show that defect-free joint can be obtained using different rotation speeds (300–600r/min) and different welding speeds (60–200mm/min). When the overlap region is in AS, Hook defect deflects towards the weld surface with a larger angle ($>90^\circ$). However, when the overlap region is in RS, Hook defect deflects towards the weld foot with a smaller angle ($>45^\circ$).

Keywords: Friction stir welding Butt-overlap joint Hook defect Material flow

近年来,随着国家节能、减排、降耗型“低碳经济”的提出,列车制造行业目前正朝着高效、减重及提高可靠性和安全性的方向发展。因此,轻量化合金材料的应用在提高能源效率及改善性能方面起到了重要作用。铝合金具有密度小、强度高、耐腐蚀、力学性能优异等特点,并能够替代钢材以减轻列车质量,从而实现节能降耗的目的。材料和结构的变革需要新的焊接工艺。与其他焊接技术(如 TIG 和 MIG)相比,搅拌摩擦焊接(FSW)技术能够在焊接区域获得细小的再结晶晶粒,从而得到具有优良力学性能的接头。作为一种先进的固相连接技术,由于焊接过程无金属飞溅、不产生有毒气体、缺陷率低及节约能源等特点,搅拌摩擦焊技术在列车制造行业具有广泛的应用前景^[1-2]。

对搭接接头形式在列车型材结构件组装中较为常见。目前,有关对搭接接头 FSW 方面的研究鲜有报导。与常规对接接头相比,对搭接接头采用搅拌摩擦焊方

法焊接后,搭接末端往往存在一个类似于裂缝的未焊区,通常称之为钩状缺陷,或 Hook 缺陷。“Hook”^[3-5]一般是由氧化物粒子和局部冶金结合区域共同组成,可能是直线也可能转向一侧(角度可以大于 90°)。接头中 Hook 缺陷的存在将导致材料的净连接厚度减薄,从而导致接头强度降低^[6-7]。本文针对车体结构常见的中厚度 6082 铝合金材料,分析搅拌摩擦焊对搭接接头的 Hook 缺陷特征,以及焊接工艺参数对 Hook 缺陷的影响。

1 试验材料与方法

焊接试验所用材料为 16mm 及 20mm 厚的 6082-T651 铝合金轧制板,焊件尺寸规格为 500 mm × 200 mm,厚度为 20mm,铝合金板在试验前铣出如图 1(a)所示结构。搅拌摩擦焊试验在中国搅拌摩擦焊中心的静龙门搅拌摩擦焊接设备上,焊接试验采用针长为 16.2mm 的锥形带螺纹搅拌头,焊接方式为单道对搭接拼焊,焊接后结构如图 1(b)所示。

焊接前,打磨掉焊接处的氧化膜并清除焊接试板表面的油污等杂质,将两块待焊铝合金厚板固定在刚性垫板上。焊接过程将待焊试件分为两种情况(如图 2 所示):A 组为前进侧位于薄板一方,后退侧位于厚板一方;B

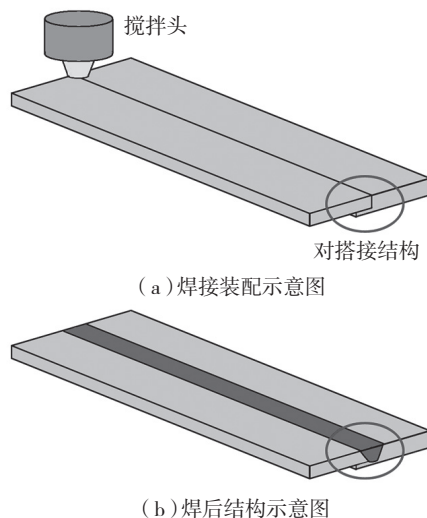


图 1 对搭接焊接结构示意图
Fig.1 Diagram of butt-overlap joint

组为前进侧位于厚板一方,后退侧位于薄板一方。焊接后,在拼焊板上截取焊缝试样,制取金相试样观察焊缝内部成形。本研究对 A、B 两组共 24 种工艺参数进行了焊接试验,试验参数见表 1。

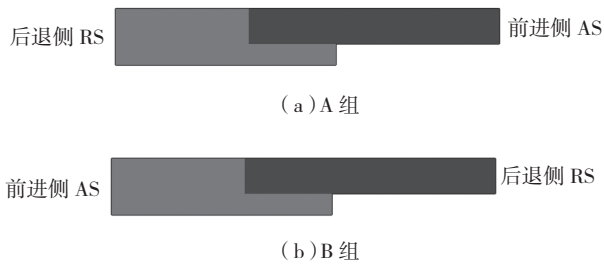
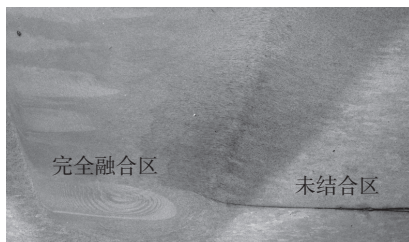


图2 接头形式示意图
Fig.2 Diagram of joint types

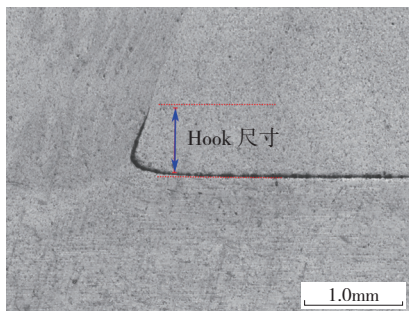
2 试验结果

2.1 焊缝宏观金相

图 3 为 6082 铝合金 FSW 对搭接接头中 Hook 缺陷典型形貌图。在接头搭接一侧的焊接区域可以明显看



(a) 对搭接 FSW 焊缝横截面宏观形貌



(b) 典型 Hook 缺陷

图3 Hook缺陷典型形貌

Fig.3 Typical morphology of Hook defect

到,上下两板的原始界面在焊接后相对于原始位置会发生偏离。焊接前,上下两板之间的界面为一平面,焊后变为曲面。在 FSW 搭接接头中,这种扭曲的界面通常被称作 Hook 缺陷。Hook 缺陷只在热机影响区(TMAZ)出现。TMAZ 的材料受到搅拌头的搅动而产生迁移,但产生的塑性应变和热量比焊核区低。热影响区(HAZ)只受到焊接热循环的影响,故不会产生 Hook 缺陷。尽管原始接合表面在焊核区仍然存在,这种发生剧烈变形的界面缺陷通常仍被称作焊核区原始界面塑性变形消失线。

在搭接接头中,Hook 缺陷可以出现在前进侧也可以出现在后退侧。两边的 Hook 缺陷可以朝焊核区向上或者向下延伸,表明 TMAZ 和接近 SZ/TMAZ 界面的搅拌区材料发生了某种向上或者向下的运动。在很多情况下,后退侧的 Hook 缺陷有向上延伸的趋势,而只有在搅拌针较短的情况下可以观察到后退侧 Hook 缺陷向下运动^[3]。从图 3 中可以看出在 Hook 的一侧为完全融合区,另一侧为原始界面完整存在的未结合区。在 FSW 过程中,搅拌头旋转使得材料围绕搅拌针流动,若具有左螺纹的搅拌针顺时针转动,将导致下板的材料会向上方运动。Hook 的形状和大小与材料的流动相关,材料流动形式通过 Hook 的形状直观反映出来。

2.2 焊接工艺参数与 Hook 缺陷的关系

本文研究了对搭接结构中搭接面的 Hook 缺陷随工艺参数的变化情况。当搭接面位于前进侧时,Hook 缺陷基本向上延伸;而搭接面位于后退侧时,Hook 缺陷在不同的焊接参数下既可能向上延伸又可能向下延伸。图 4 为不同参数下 A、B 两组焊接接头中 Hook 缺陷的形貌及尺寸。在 A 组和 B 组两种接头形式下,焊接参数为 300r/min、100mm/min 时,Hook 缺陷走向较为平直(图 4(i)和 4(j))。另外,由于对接面与搭接面氧化物的存在,导致 S 线与 Hook 缺陷相连。

图 4 中(a)、(c)、(e)、(g)、(i)及(k)为 A 组焊件,搭接面位于前进侧一方;而(b)、(d)、(f)、(h)、(j)及(l)为 B 组焊件,搭接面位于后退侧一方。从图中可以看出,当搭接面处于前进侧时,搭接界面发生向上的畸变或者其转向的大体趋势向上,并且搭接界面消失于焊核

表1 对搭接FSW焊接参数

A 组	编号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
	旋转速度 / ($r \cdot \min^{-1}$)、 焊接速度 / ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	300、60	400、60	500、60	600、60	300、100	400、100	500、100	600、100	300、150	400、150	500、150	500、200
B 组	编号	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
	旋转速度 / ($r \cdot \min^{-1}$)、 焊接速度 / ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	300、60	400、60	500、60	600、60	300、100	400、100	500、100	600、100	300、150	400、150	500、150	500、200

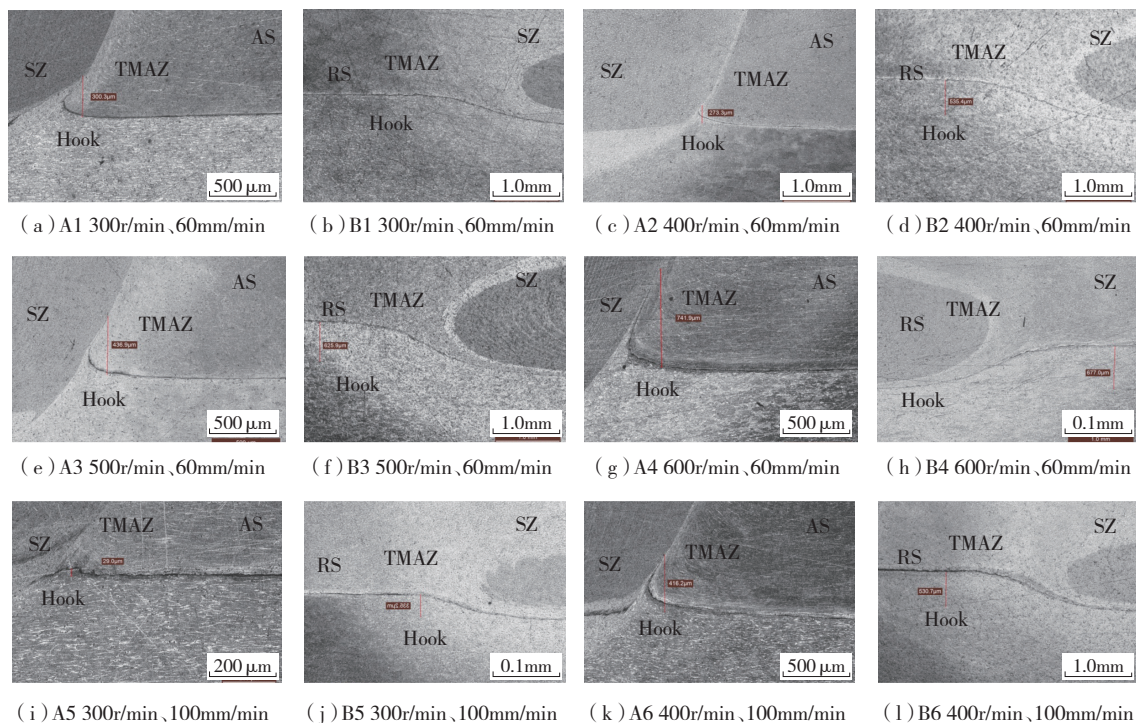


图4 不同工艺参数下对搭接接头中的Hook缺陷

Fig.4 Hook defect of butt-overlap joint under different welding parameters

区(SZ)与热机影响区(TMAZ)分界面处,其转向角度大于 90° ;当搭接面位于后退侧时,搭接界面发生向下的畸变或者其转向带有向下的趋势,并向下延伸消失于焊核区与下搭接板之间的区域。本文试验中采用的焊接搅拌头带有右旋螺纹,在焊接过程中搅拌针逆时针旋转。从材料流动的角度来看,位于前进侧热机影响区的材料受到了搅拌针的“切削摩擦”而产生偏转,变形较为剧烈。由于搅拌针的右旋螺纹,界面总体发生向上偏转且偏转角度较大,因此,本试验中位于前进侧的搭接界面大多产生一种向上的畸变并且最后消失于焊核区与热机影响区的分界面。另一方面,位于后退侧热机影响区的材料由于整个焊接过程都不断受到来自搅拌针前部及前进侧迁移过来的材料的挤压与拖曳,流动的形式较为复杂,因此其材料在厚度方向上的迁移具有不确定性。从图中可以看到,后退侧底部界面延伸入焊核区底部与下搭接板之间的结合处并消失于此。另外,

图4中后退侧产生的Hook缺陷向下的偏转角度都小于 45° ,说明后退侧热机影响区材料发生塑性变形的程度小于前进侧热机影响区材料。

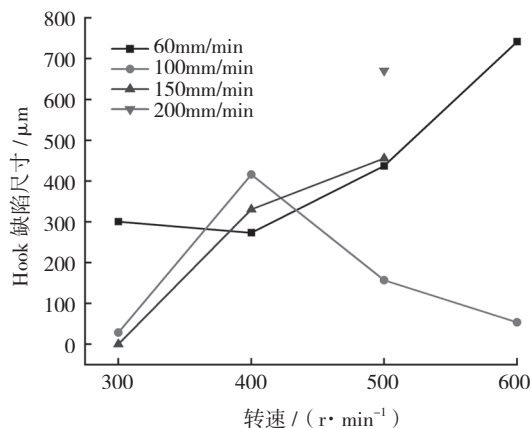
表2为A、B两组对搭接FSW试件接头中Hook缺陷的走向与尺寸数据。可以看到,A9与B9号试件中Hook缺陷尺寸为 $0\mu\text{m}$,说明工艺参数为 300r/min 、 150mm/min 时,由于焊接时采用的低转速、高焊速匹配,焊接过程中的热输入较低,材料软化程度较低,在前进侧搅拌针与材料作用时主要表现为剪切,拖曳几乎不存在;在焊缝的底部,搅拌头对金属的作用较小,材料之间的流动行为较弱,是容易出现缺陷的位置,当热输入很低时,材料的变形抗力较大,因此Hook的值为0,从而使得搭接界面不发生偏转,得到无畸变无Hook的接头。

焊接工艺参数对对搭接接头中Hook缺陷尺寸的影响如图5所示。从图中可以看到,当焊接速度为 60mm/min 和 150mm/min 时,试件接头Hook缺陷的尺寸随着

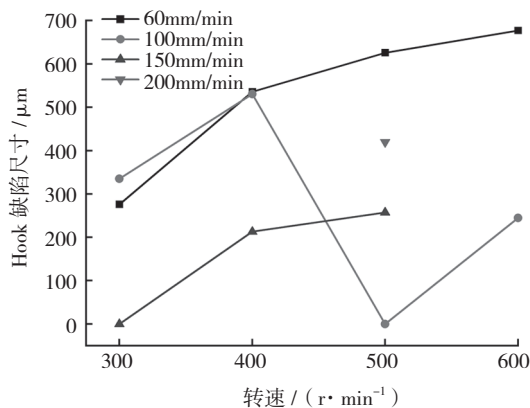
表2 A组和B组试件接头中Hook缺陷的走向与尺寸

编号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
缺陷方向	向上	向上	向上	向上	向上	向上	向上	向上	向上	向上	向上	向上
缺陷尺寸	300.3	273.3	436.9	741.9	29	416.2	157.3	53.7	0	330.4	455.9	670.5
编号	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
缺陷方向	向下	向下	向下	向下	向下	向下	向下	向下	向下	向下	向下	向下
缺陷尺寸	< 300	535.4	625.9	677.0	335.2	530.7	0	244.7	0	212.9	257.4	419.5

搅拌头转速的增大而增大。值得注意的是, A 组试件 Hook 缺陷随转速增加的速度要比 B 组试件快。这一现象可以从两个方面来解释: 首先, 在 FSW 焊接过程中, 在焊接速度一定的情况下, 塑性材料迁移的体积与转速成正比关系。因此随着转速的增加, 搅拌针对材料的作用增加, 金属迁移的体积增大, 从而导致 Hook 缺陷的尺寸随着搅拌头的旋转速度增大而增加。其次, 由于前进侧热机影响区材料受到搅拌针的剪切作用, 而后退侧热机影响区材料是受到搅拌针的拖曳作用而产生偏转, 因此搅拌针在前进侧的作用较后退侧剧烈, 进而使得 A 组试件接头中 Hook 缺陷的尺寸随旋转速度的增加比 B 组要迅速。另外, 当焊接速度为 100mm/min 时, A 组和 B 组试件中的 Hook 缺陷尺寸与搅拌头的旋转速度的关系不一致。



(a) A 组



(b) B 组

图5 焊接参数对Hook缺陷尺寸的影响

Fig.5 Effects of the welding parameter on Hook defect size

2.3 力学性能

在相同的工艺参数下对比 A 组与 B 组接头力学性能(如图 6 所示)。可以看出, 当焊接工艺参数相同时,

A 组(前进侧位于薄板一方, 后退侧位于厚板一方)的抗拉强度小于 B 组(前进侧位于厚板一方, 后退侧位于薄板一方)。这是由于搭接界面位于前进侧, Hook 缺陷扭转角度较大, 导致材料的净厚度减薄, 材料在受力时有效承载面积减小; 搭接界面位于后退侧, Hook 缺陷较为平缓, 力学性能较高。由此可见, 在对搭接接头中, 搭接界面位于后退侧能够获得较高的力学性能。

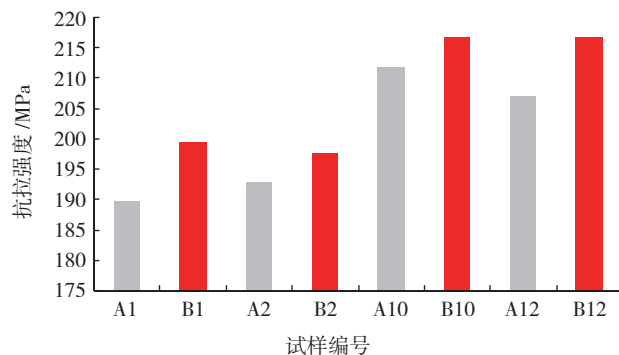


图6 不同焊接工艺下的力学性能

Fig.6 Mechanical properties under different welding processes

3 结论

(1) 成功实现了厚度为 16mm 与 20mm 的 6082 铝合金板对搭接接头搅拌摩擦焊, 工艺参数可调范围较宽, 搅拌头旋转速度在 300~600r/min 以及焊接速度在 60~200mm/min 条件下能够获得完整无缺陷的 FSW 接头。

(2) 搭接面位于前进侧时, 接头中 Hook 缺陷向上偏转, 搭接界面偏转角度大于 90°, 并消失于焊核区与热机影响区的分界面; 搭接界面位于后退侧时, 接头中 Hook 缺陷总体向下偏转, 搭接界面偏转角度小于 45°, 并消失于焊核区底部与下搭接板的交界处。

(3) 对搭接结构中 Hook 缺陷的形成与搅拌头的旋转速度以及焊接速度相关, 前进侧热机影响区底部材料产生向上的塑形变形, 后退侧热机影响区材料在厚度方向的偏转趋于向下。

(4) 对搭接结构中, 相同工艺参数焊接时搭接界面位于后退侧获得的力学性能较位于前进侧高。

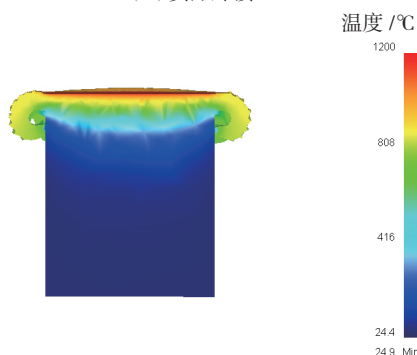
参考文献

- [1] 周鹏展, 钟掘, 贺地求. 7A52 铝合金厚板搅拌摩擦焊. 中国有色金属学报, 2006, 16(6): 964-969.
- [2] Badarinarayan H, Shi Y, Li X, et al. Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(11): 814-823.

(下转第 64 页)



(a) 实际焊接



(b) 3s 时模拟

图6 模拟与实际焊接飞边形貌对比
Fig.6 Comparisons of actual and simulation flash morphology

算出 TC4-DT 在此工艺参数下的缩短量为 12.64mm, 可见模拟结果准确度较高, 相对误差不超过 4%。

3 结论

(1) 焊接界面中心温度在 1s 内升到 1000℃ 以上。随着焊接过程的进行, 界面温度场逐步均匀, 界面温度升到不低于 1223℃, 缩短量不断增加。这说明线性摩擦焊稳定摩擦阶段界面最高温度超过 1200℃。

(2) 通过试验证明文中建立的模拟方法可靠, 对飞边形貌模拟较准确, 能反映实际焊接过程中的金属流动情况, 可以用来预测线性摩擦焊温度场和轴向缩短量。

参考文献

- [1] 袁鸿, 余槐, 王金雪, 等. TC4-DT 钛合金电子束焊接接头的损伤容限性能. 材料工程, 2007, 21(8): 17-19.
- [2] 李辉, 赵永庆, 曲恒磊, 等. 损伤容限型 TC4-DT 合金疲劳裂纹扩展行为研究. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(6): 963-967.
- [3] 张田仓, 韦依, 周梦慰, 等. 线性摩擦焊在整体叶盘制造中的应用. 航空制造技术, 2004(11): 56-58.
- [4] Li W Y, Ma T J, Li J L. Numerical simulation of linear friction welding of titanium alloy: Effects of processing parameters. Materials and

Design, 2010, 31: 1497-1507.

[5] Ceretti E, Fratini L, Giardini C, et al. Numerical modelling of the linear friction welding process. Int J Mater Form, 2010, 3(S1): 1015-1018.

[6] Sorina-Müller J, Rettenmayr M, Schneefeld D, et al. FEM simulation of the linear friction welding of titanium alloys. Computational Materials Science, 2010, 48: 749-758.

(责编 谷雨)

(上接第 56 页)

晶断裂, 在断口表面分布着极浅的韧窝。

4 结论

(1) TC17 钛合金的母材、焊缝及热影响区的断裂韧性表现为母材 > 热影响区 > 焊缝 K_{Ic} 。

(2) TC17 钛合金惯性摩擦焊的焊接接头由焊缝区、变形晶区、热影响区及母材组成。其中焊缝区为细小的等轴晶组织, 变形晶区晶粒较大, 晶粒存在着较大的纵横比, 热影响区的晶粒粗大, 母材晶粒较大, 晶内为 $\alpha + \beta$ 相的网篮状组织。

(3) TC17 母材拉伸试样的断裂模式为韧性断裂, 在断口表面分布着大量的韧窝; TC17 焊缝区和热影响区拉伸试样的断裂模式为脆性沿晶断裂, 热影响区晶界处可以观察到小的脆性相及大量的二次裂纹。

参考文献

- [1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册 (第 2 版) (第 4 卷, 钛合金). 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [2] 束德林. 金属力学性能. 北京: 机械工业出版社, 1987: 113-117.
- [3] 崔约贤, 王长利. 金属断口分析. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998: 34-40.

(责编 深蓝)

(上接第 60 页)

[3] Fersini D, Perondi A. Analysis and modeling of fatigue life of friction stir welded aluminum alloy single-lap joints. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75: 790-803.

[4] Ericsson M, Jin L Z, Sandstrom R. Fatigue properties of friction stir overlap welds. International Journal of Fatigue, 2007, 29: 57-68.

[5] Buffa G, Campanile G, Fratini L, et al. Friction stir welding of lap joints: influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties. Materials Science and Engineering A, 2009, 519: 19-26.

[6] Cao X, Jahazi M. Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of a friction stir welded magnesium alloy. Materials and Design, 2011, 32(1): 1-11.

[7] Kumar K, Kailas S V. The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation. Materials Science and Engineering A, 2008, 485(1): 367-374.

(责编 谷雨)