

2219 铝合金无倾角式搅拌摩擦焊接头组织性能*

Microstructure and Performance of Friction Stir Welding Joint of 2219 Al-Alloy With Zero Tilt Angle

上海航天设备制造总厂 赵慧慧 李颖 封小松 熊艳艳 胡蓝 郭立杰

[摘要] 采用基于三轴联动系统的无倾角搅拌摩擦焊方法,研究了 2mm 厚 2219 铝合金焊接试验过程,重点分析了微观组织分布特点和接头力学性能。结果表明,采用内聚花纹锥形轴肩搅拌工具,实现了无倾角搅拌摩擦焊接过程,焊缝外观及内部质量良好,但搭接界面处存在 Hook 现象,在前进侧呈现先向上后向下弯曲,指向焊核区的纹路特征,而后退侧呈现了向上弯曲的 Hook 钩状纹路;2mm 厚铝合金 2219 无倾角式搅拌摩擦焊搭接接头拉伸剪切抗力平均为 5630N,与母材抗拉力的比值为 75.7%;同时,通过试验证明了无倾角搅拌摩擦焊方法对曲线焊缝的适应性。

关键词: 铝合金 搅拌摩擦焊 无倾角 组织性能

[ABSTRACT] The friction stir welding process of 2219 Al-alloy with thickness of 2mm with zero tilt angle is studied based on three axis linkage system, especially on the microstructure distribution and mechanical performances of the welding joints. The results show that the cone-shaped shoulder friction stir tools with figures could realize the friction stir welding process with zero tilt angle, and the appearance and inside qualities of joints are excellent. The Hook exists in the overlap interface. In the advancing side, the interface curves upwards first, then downwards, and points to the nugget zone. In the retreating side, the Hook curves upwards. The average value of tensile and shear resistance of 2219 Al-alloy friction stir welding overlap joint with zero tilt angle is 5630N. And the ratio of loading capability of the joint and base metal is 75.7%. Meanwhile, the adaptability of friction stir welding with zero tilt angle on curve welding seam is proved.

Keywords: Al-alloy Friction stir welding Zero tilt angle Microstructure and performance

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.15.094

搅拌摩擦焊(FSW)是英国焊接研究所(TWI)发明的新型固相连接方法^[1],具有热输入低、焊接变形小、焊接缺陷少、力学性能好、无需焊接填充材料等优点^[2-3]。该方法应用范围广泛,包括铝、镁合金以及传统熔化焊难以焊接的材料,甚至可适用于异种金属的焊接^[4-9],其应用能够极大地提高构件的可靠性和制造精度。

搅拌摩擦焊技术在航天关键构件的制造中具有相当重要的地位。在国际航天领域中,搅拌摩擦焊固相连接技术应用广泛,如美国波音公司、洛克希德·马丁公司、NASA 等^[10]。目前,搅拌摩擦焊设备正逐渐朝着小型化和便携式方向不断发展。其中一种可行的技术方案就是实现无倾角式焊接,该方法目前是搅拌摩擦焊领域中的研究热点和难点之一。传统搅拌摩擦焊焊接过程是以有倾角的方式实现的,搅拌工具时刻与工件表面法向保持 2°~5° 倾角并沿焊缝的切线方向进行跟随;除了机床本身 X、Y、Z 3 个轴以外,设备还需实现倾角轴和周向随动轴运动。倾角的存在使搅拌工具前方材料可以进入工具轴肩下方而被拘束,使搅拌摩擦焊接过程得以实现。采用无倾角方式无需倾角轴和周向随动 C 轴,仅仅基于三轴联动系统就可以实现搅拌摩擦焊过程,不仅大大降低了设备的复杂程度,而且对提高设备运转的稳定性也具有极其重要的意义。英国焊接研究所 TWI 开发出多种无倾角式搅拌摩擦焊工具,通过试验证明,该方法能够获得良好的表面成形和焊接质量^[11]。此外,美国 MTI、德国玛雅、韩国 Taekwang Tech. 等多家机构也开展了无倾角搅拌摩擦焊方面的相关研究。

文中针对 2mm 厚 2219 铝合金,对基于三轴联动系统的无倾角搅拌摩擦焊过程进行研究,包括接头截面宏观、微观组织分布特点等,并分析了接头力学性能以及显微硬度分布规律。

1 试验方法

2219 铝合金是 Al-Cu-Mn 系析出强化型铝合金,焊接性能良好,广泛应用于航空航天领域。主要合金元素含量如表 1 所示。进行了 2mm 厚 2219 铝合金无倾角搭接焊接试验,试验参数为:主轴转速 1000 r/min,焊速

* 上海市优秀技术带头人项目(13XD1421300)资助。

400mm/min, 主轴转速 1200 r/min, 焊速 400mm/min。

表1 2219主要合金元素含量 %

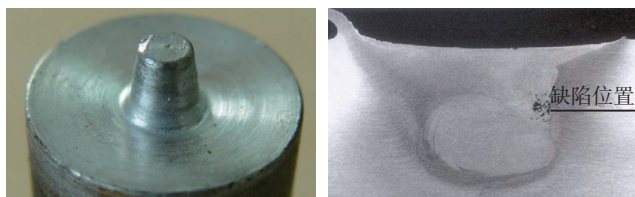
元素	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Zn	V	Ti	Zr
含量	5.8~6.8	0.02	0.2	0.3	0.2~0.4	0.1	0.05~0.15	0.02~0.1	0.1~0.25

搅拌摩擦焊工具材料选择了热强性、红硬性和耐磨性高的热作模具钢 H13。焊接后采用 X 光无损检测方法对 2mm 厚 2219 铝合金搭接接头进行了检测,并对缺陷进行分析;采用金相显微镜对截面微观组织形貌进行研究;并对无倾角搅拌摩擦焊搭接试样进行了拉伸剪切试验,在 AET-100K 电子万能材料试验机(100kN)上进行测试,加载速度 5 mm/min。

2 试验结果与分析

2.1 无倾角搅拌摩擦焊接头缺陷分析

当采用传统内凹式搅拌头进行无倾角焊接试验时,发现焊接缺陷都发生在前进侧轴肩影响区和焊核区交界处,如图 1 所示。这是由于传统搅拌头在焊接过程中,搅拌针向下转移材料,上部出现材料缺失,轴肩对金属的顶锻力减小,转移金属的能力降低,不足以弥补搅拌针上部出现的材料缺失,最终形成图示缺陷,更为严重的是形成表面沟槽,如图 2 所示。因此,要实现无倾角焊接,必须要增加轴肩作用。



(a) 传统内凹式搅拌头 (b) 内凹式搅拌头无倾角焊接产生缺陷

图1 无倾角焊接缺陷

Fig.1 Flaws of zero-tilt FSW

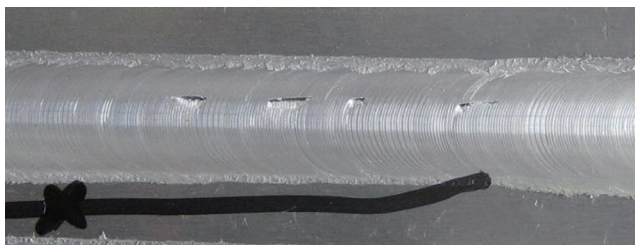


图2 无倾角焊接表面沟槽缺陷

Fig.2 Groove flaws of zero-tilt FSW

采用锥形轴肩搅拌工具,同时在轴肩上设计了内聚式花纹,对材料进行内聚,搅拌工具如图 3 所示。两条焊缝外观都非常光滑、美观,没有出现沟槽(如图 4 所示)。但如果轴向压入量不足时,例如上面焊缝压入量

不足,顶锻力不够,焊缝较下面的质量良好的焊缝稍窄,经 X 光无损检测,得到如图 5 的前进侧缺陷。上述现象说明,对于无倾角焊接方法,即使在比较特殊的情况下,如当压入量不足,甚至轴肩没有完全压入母材时,也能形成表面光滑的焊缝,焊缝表面无飞边,外观完整,且不会产生表面犁沟与表面裂纹等缺陷,但易于在焊缝内部产生缺陷,严重的会产生隧道缺陷。因此,必须采用足够的压入量,对焊缝材料进行顶锻压实。

2.2 无倾角搅拌摩擦焊成形

当采用锥形轴肩无倾角搅拌焊方法焊接厚度 2mm



图3 无倾角搅拌摩擦焊工具

Fig.3 Zero-tilt FSW tool



图4 焊缝外观

Fig.4 Weld appearance

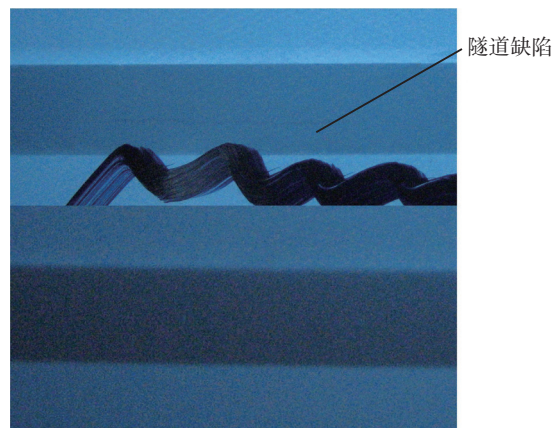


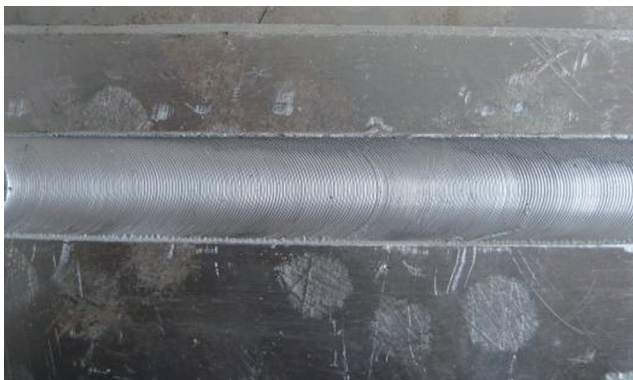
图5 无倾角焊接隧道缺陷

Fig.5 Tunnel flaws of zero-tilt FSW

的 2219 铝合金搭接接头,压入量采用 0.15mm,典型的焊缝外观如图 6 所示得到。经过 X 光无损检测,焊缝表面及内部质量良好,无表面沟槽和隧道等缺陷产生。



(a) 转速 1000 r/min, 焊速 400mm/min



(b) 转速 1200r/min, 焊速 400mm/min

图6 2mm 2219铝合金搭接无倾角搅拌摩擦焊接头典型外观

Fig.6 Typical appearance of zero-tilt FSW overlap joints of 2219 Al-alloy with 2mm thickness

2.3 无倾角搅拌摩擦焊接头组织性能分析

搅拌摩擦焊焊缝为非对称性焊缝,可分为前进侧、后退侧两个部分。图 7 所示为典型的 2mm 厚 2219 铝合金无倾角搅拌摩擦焊搭接接头形貌,接头区域可分为焊核区、轴肩影响区、热机影响区与热影响区。焊核区位于焊缝中心;轴肩影响区位于焊缝上表面附近;热机影响区位于焊核区外侧,既受到热作用的影响又受到机械搅拌作用的影响而使晶粒拉长、变形;热影响区位于热机影响区外侧,只受到热作用的影响而使晶粒发生

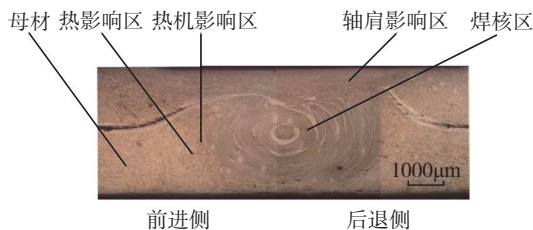
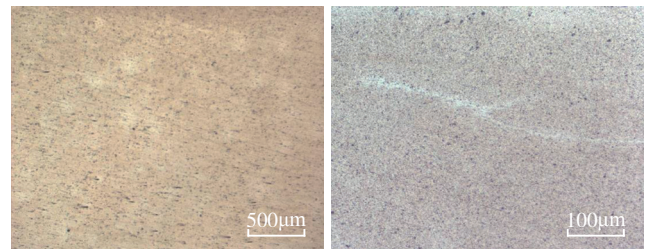


图7 2mm厚 2219铝合金无倾角搅拌摩擦焊搭接接头形貌

Fig.7 Macrostructure photographs of zero-tilt FSW overlap joints of 2219 Al-alloy with 2mm thickness

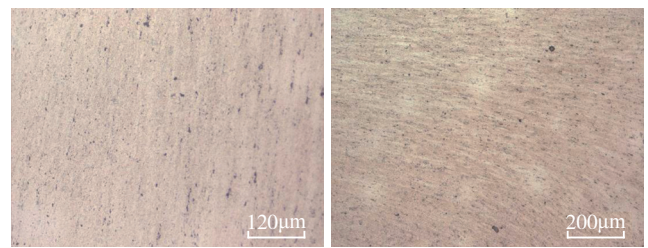
大,呈现与母材不同的形态。Hook 在前进侧呈现先向上后向下,指向焊核区纹路的纹路特征,而在后退侧呈现了向上弯曲的钩状纹路。搭接接头 Hook 结构较为严重的,会减小搭接接头的承力面积。

图 8 所示为 2219 铝合金 FSW 接头各区域微观组织形貌。母材的主要相组成为 α 固溶体、 θ 相(CuAl_2) 和 T 相(CuMn_2Al_2)^[12]。由图 8 (a) 可以看到母材为板条组织,在母材的晶界和晶内存在大量的强化相,焊前母材晶粒细长。焊核区受到焊接热循环及搅拌双重作用,形态发生明显变化(如图 8 (b) 所示)。在搅拌摩擦焊接过程中,搅拌头与工件之间产生大量的热,使周围金属塑化并充分流动,位错在力的作用下密度不断增加,当储存能增加到一定程度,足够发生再结晶时,金属内便不断形成晶核,使组织发生动态再结晶,转变成等轴再结晶组织,晶粒均匀细小。图 8 (c) 所示为 2219 铝合金搅拌摩擦焊接接头轴肩影响区的晶粒组织。轴肩影响区是在焊接过程中受轴肩影响最大的区域,位于焊核区上面,其组织也是由细小的等轴晶组成。搅拌摩擦焊过程中,轴肩与母材摩擦产生大量的热,使轴肩挤压区的材料达到塑性状态。虽然轴肩挤压区材料一般距离搅拌针较远,受搅拌针搅拌作用较弱,但要受到轴



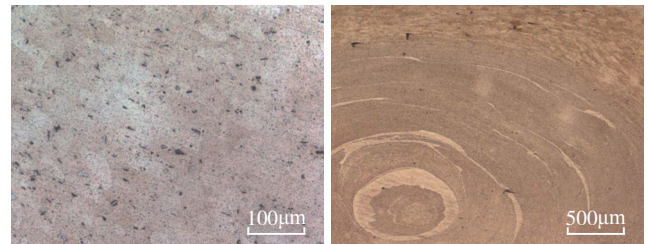
(a) 母材

(b) 焊核区



(c) 轴肩影响区

(d) 热机影响区



(e) 热影响区

(f) 洋葱环

图8 2219 铝合金 FSW 接头微观组织

Fig.8 Microstructure photographs of 2219 Al-alloy joints of FSW

肩巨大的顶锻压力和大线速度的搅拌作用,而且由于靠近焊缝上表面,散热条件非常好,因此该区域塑性变形材料发生动态再结晶后,晶粒来不及长大就形成了等轴、细小的晶粒。热机影响区组织在焊接过程中同时受到搅拌针的机械搅拌和焊接热循环的双重作用,但由于热机影响区距离搅拌针较远,受到的搅拌作用远小于焊核区组织这部分材料发生了较大程度的弯曲变形,组织有被明显拉长的迹象(如图8(d)所示)。热影响区微观组织如图8(e)所示,由于在焊接过程中没有受到搅拌作用,但是受到热作用,晶粒明显粗大,但仍保留了板条状组织的特征。图8(f)是焊缝中心焊核区形成的一系列同心圆环状结构,形状类似于“洋葱环”。

2mm厚铝合金2219试板搭接接头拉伸剪切试验试样尺寸如图9所示,力学性能数据见表2,以其搭接接头抗拉剪力为接头抗拉性能评价指标。母材承受拉伸力平均值为7438N,焊接接头的拉伸剪切抗力平均值为5630N,与母材平均抗拉力比值平均为75.7%。

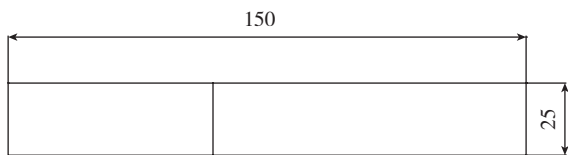


图9 2219铝合金接头拉伸剪切试验试样 (mm)
Fig.9 Tensile and shear test sample of 2219 Al-alloy joints (mm)

表2 2219 (2mm) 接头拉剪力学性能

试板编号	抗拉力 /N	与母材平均抗拉力比值 /%
母材-1	7450	/
母材-2	7399	/
母材-3	7466	/
母材平均值	7438	/
1-1	5876	79.0
1-2	5119	68.8
1-3	5879	79.0
2-1	5937	79.8
2-2	5350	71.9
2-3	5624	75.6
平均值	5630	75.7

2.4 无倾角搅拌摩擦焊曲线焊缝应用

使用同种无倾角搅拌头进行了平面曲线焊缝搅拌摩擦焊研究,以检测无倾角焊接方法对曲线焊缝的适应性,选用的试验参数为:主轴旋转速度1000r/min,焊接速度为400mm/min。焊接的曲线焊缝实物有四边形和S形,如图10所示。经X光无损检测,焊缝表面及内部质

量良好无缺陷,证明了无倾角焊接方法对曲线焊缝的适应性。

无倾角搅拌摩擦焊方法将设备要求从五轴四联动降为三轴联动,大大简化了设备复杂性,而且对空间三维曲线焊缝具有较大的应用潜力。



图10 曲线焊缝
Fig.10 Curve welding seam

3 结论

(1) 基于三轴联动系统实现了2mm铝合金2219无倾角搅拌摩擦焊过程,焊缝外观及内部质量良好。

(2) 焊接接头分为焊核区、轴肩影响区、热力影响区、热影响区、母材;搭接界面处仍保留Hook现象,在前进侧呈现先向上后向下、指向焊核区的纹路特征,而后退侧呈现了向上弯曲的钩状纹路。

(3) 2mm厚铝合金2219无倾角式搅拌摩擦焊搭接接头拉伸剪切抗力平均为5630N,与母材平均抗拉力比值平均为75.7%;且通过试验证明了无倾角焊接方法对曲线焊缝的适应性,对空间三维曲线焊缝具有较大的应用潜力。

参考文献

[1] Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C, et al. Friction stir butt welding. International Patent No.PCT/GB92/02203 and GB Patent No.9125978.8, 1991.

[2] Dawes C J, Thomas W M. Friction stir process welds aluminum alloys. *Welding Journal*, 2003, 75 (3): 41-45.

[3] 张昭, 刘会杰. 搅拌头形状对搅拌摩擦焊材料变形和温度场的影响. *焊接学报*, 2011, 32 (3): 5-8.

[4] Rhodes C G, Mahorey M W, et al. Effect of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum. *Scripta Materialia*, 2004, 36(1):69-75.

[5] Sato Y S, Urata M, Kokawa H, et al. Hall-petch relationship in friction stir welds of equal channel angular-pressed aluminium alloys. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 354: 298-305.

[6] Sutton M A, Yang B, Reynolds A P, et al. Microstructural studies of friction stir welds in 2024-T3 aluminum. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 323: 160-166.

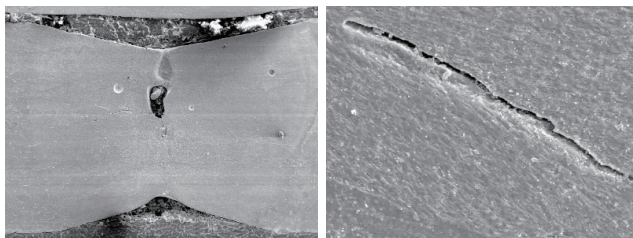
[7] Cavaliere P, Squillace A, Panella F. Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6082 joints produced by friction stir welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008,

(下转第100页)

纹 2 种。对于添加稀土的激光焊接焊缝,由于稀土质点析出产生应力集中,而 TiNi 形状记忆合金属于金属间化合物,焊缝本身具有较大的脆性,从而易于导致裂纹产生。

图 4 (a) 为焊缝中心线的裂纹。通常,熔化焊缝组织结晶的主轴方向总是与散热最快的方向或者说与最大温度梯度方向一致,熔池的最大散热方向垂直于结晶等温面。因此,焊缝柱状晶的生长方向总是垂直于结晶等温面。在焊接速度较低时,焊接熔池近似为椭球形,结晶组织以弯曲形状向焊缝中心成长。在高速焊接时,熔池变窄变长,晶粒主轴生长方向近似与焊缝中心线垂直。当晶粒主轴垂直于焊缝中心时,在焊缝中心形成脆弱的结合面,在横向收缩拉伸应力作用下就形成了沿焊缝中心线开裂的纵向长裂纹。由于激光焊接的速度较快,加之添加的稀土含有较多的脆性相,而焊缝中心是最后凝固部位,使得稀土质点往往在焊缝中心析出,引起焊缝中心开裂,产生孔洞,在焊接过程的应力作用下很容易形成沿焊缝中心线的裂纹。因此,控制焊接速度,匹配合理的线能量,降低焊接过程应力,将有利于减少中心线裂纹的产生。

图 4 (b) 为晶间裂纹,当焊接速度提高时,虽然焊缝组织得到细化,但另一方面快速冷却也有利于柱状晶的快速生长,从而得到方向性极强的小的柱状组织。那些具有相同散热条件的细小的柱状晶沿相同的方向生长,而形成一个一个的柱状晶集团,这种结晶形式称为“束状晶”,在束状晶之间的界面上形成有利于裂纹产生的条件。对于添加稀土的激光焊接焊缝,稀土质点析出也会出现在柱状晶晶界,由于稀土质点析出产生应力集中,而 TiNi 形状记忆合金属于金属间化合物,焊缝本身具有较大的脆性,从而易于导致裂纹产生。又由于记忆合金焊缝的脆性,裂纹由焊缝中心产生,沿柱状晶晶界向熔合线方向扩展,一般扩展至熔合线附近停止,可见,记忆合金添加稀土激光焊接的关键是控制裂纹的形成,这在很大程度上与稀土薄膜的制备质量有关。



(a) 焊缝中心线裂纹 (b) 裂纹沿晶开裂

图4 TiNi形状记忆合金添加稀土激光焊接裂纹

Fig.4 Weld crack of laser welding with filling rare-earth sheet for TiNi shape memory alloy

3 结论

(1) TiNi 记忆合金焊缝中气孔的形成与焊接过程中合金表面氧化膜有关,因此在焊接前对焊接区域的金属表面进行清洗去除氧化膜,可减少焊缝中气孔的生成。

(2) TiNi 记忆合金激光焊接裂纹倾向性小,然而现有研究条件下添加稀土的激光焊接的焊缝易于产生气孔与裂纹。从对焊缝裂纹产生的机理分析来看,激光焊接 TiNi 记忆合金时,激光焊接速度提高会增加裂纹产生的倾向,因此焊接速度是焊缝中心线裂纹和晶间裂纹产生的原因之一。

参考文献

- [1] Tuissi A, Besseghini S. Effect of Nd-YAG laser welding on the functional properties of the Ni - 49.6at.%Ti. Materials Science and Engineering, 1999(A273-275):813-817.
- [2] Keisuk U, Masaya T, Kojiro F K. Fourth international symposium on laser precision micro fabrication. Proceedings of SPIE ,2003,5063:282-287.
- [3] Tuissi A, Besseghini S, Ranucci T, et al. Effect of Nd-YAG laser welding on the functional properties of the Ni-49. 6at. %Ti. Materials Science and Engineering:A,1999, 273-275:813-817.
- [4] Falvo A, Furguiele F M , Maletta C. Laser welding of a NiTi alloy:Mechanical and shape memory behavior. Materials Science and Engineering: A ,2005, 412:235-240.
- [5] 王蔚. 预置填充稀土激光焊接对 TiNi 形状记忆合金微观组织及成分的影响. 稀有金属材料与工程, 2008,37(11):1941-1945.
- [6] 陈俐. 航空钛合金激光全熔透稳定性及焊接物理冶金研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.

(责编 玲犀)

(上接第 97 页)

200: 364-372.

[8] 梁志芳, 史清宇, 康旭. 7A52 铝合金搅拌摩擦焊工艺优化. 焊接学报, 2011, 32 (2):17-20.

[9] 王廷, 朱丹阳, 刘会杰, 等. 7050-T7451 铝合金的搅拌摩擦焊接试验分析. 焊接学报, 2009, 30 (8):109-112.

[10] Higginbotham D. Proven friction stir welding technology brings together reliability and affordability for NASA's space launch system [EB/OL].2012[2014-12-10].Http://www.sciencedaily.com/releases/2012/05/120521153524.html.

[11] Perrett J G. Evaluation of advanced tool material technology for the friction stir welding of 6mm AISI 304L stainless steel. TWI Ltd, Granta Park, Great Abington Cambridge CB21 6AL, United Kingdom. 17244.02/2009/1380.3.

[12] 李颖. 铝合金激光-MIG 复合横向焊接特性分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

(责编 谷雨)