

## 2014 铝合金拉锻式摩擦塞补焊接头微观组织及力学性能

## Microstructure and Mechanical Property of Friction Plug Welding Joint of 2014 Al Alloy

首都航天机械公司 赵衍华 刘景锋 张加涛 孙忠绍 王国庆

**[摘要]** 采用拉锻式摩擦塞补焊方法对4mm厚的2014铝合金进行了焊接,焊后对接头的微观组织和力学性能及断裂特性进行了分析。研究表明,摩擦塞补焊接头由焊缝区、热影响区和母材这3部分组成,焊缝由细小的等轴再结晶组织构成。力学试验表明:摩擦压力、摩擦时间、塞棒/塞孔配合角度以及工进速度均会影响接头质量,选择合适的焊接参数和接头结构,塞补焊接头的抗拉强度可以达到375MPa,约为母材强度的79%。断口形貌分析显示,接头断裂模式为塑性断裂。

**关键词:** 摩擦塞补焊 2014铝合金 接头微观组织 断裂特性

**[ABSTRACT]** Friction plug welding (FPW) of 2014 Al alloy in 4mm thickness is carried out and the microstructures, mechanical properties and fracture mode of the joint are analyzed. The result shows that the FPW joint microstructures could be divided into three different regions including welding seam zone, HAZ and base metal zone. The welding seam consists of refined and equiaxial recrystallized grains. Mechanical experiment shows that the technological parameters, such as frictional pressure, friction time, tapered plug/tapered hole suited angles and welding speed can affect joint properties. The peak tensile strength of the FPW joint can reach 375 MPa as much as 79% of the base metal by selection of suitable welding parameters and joint structures. The analysis of the fracture surface morphology shows that it is ductile fracture.

**Keywords:** Friction plug welding 2014 Al alloy Joint microstructure Fracture mode

2014铝合金具有高的比强度、比模量、断裂韧度和耐腐蚀稳定性,是航天工业中应用最广泛的有色金属结构材料之一。在2014铝合金加工和使用过程中需要广泛应用焊接技术,塞补焊(Friction Plug Welding,FPW)是英国焊接研究所于1995年发明的一种新型固相补焊技术,摩擦塞补焊的接头质量高、残余应力低、焊接变形

小,接头强度比电弧焊补焊接头提高20%以上,在航空航天铝合金补焊等领域具有广阔的应用前景<sup>[1-6]</sup>。依据焊接压力加载的方式不同,摩擦塞补焊分为顶锻式和拉锻式2种,见图1和图2。其中顶锻式摩擦塞补焊时焊机和背部支撑垫板位于被焊工件的两侧,而拉锻式摩擦塞补焊时焊机和背部支撑垫板位于被焊工件的一侧。对于结构简单、背部有广阔空间、可以设置大型支撑结构的零件来说,两种加载方式差别不大,但对于结构复杂、体积庞大、工件背部无法设置大型支撑结构的零件,一般需要采用拉锻式摩擦塞补焊。本课题采用拉锻式摩擦塞补焊技术实现了4mm厚度2014铝合金摩擦塞补焊,研究了接头的微观组织和力学性能。

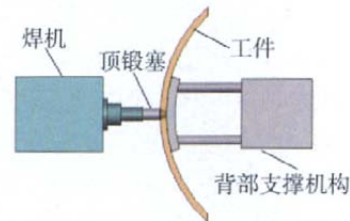


图1 顶锻式结构

Fig.1 Upsetting load FPW

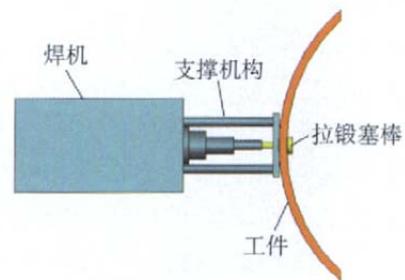


图2 拉锻式结构

Fig.2 Pulling load FPW

## 1 试验方法

试验采用2014铝合金进行拉锻式摩擦塞补焊,试板尺寸为200mm×100mm×4mm。2014铝合金的化学成份如表1所示。焊接前用酒精擦拭试板,去除试板上

的油污,然后采用合适的钻头在试板上加工塞孔,塞孔一般为锥形孔,如图3所示。本试验中采用塞孔最小直径为20mm。将试板刚性固定在垫板上,然后将匹配的塞棒固定在设备夹持机构中,塞棒与塞孔配合面一般为锥形面,如图3所示。塞棒也为2014铝合金。焊接时,塞棒以 $R=4\ 000\text{r}/\text{min}$ 的旋转速度沿塞孔轴向进给,当达到设定摩擦时间后急停制动,并施加一定的顶锻压力保压,完成焊接后取下焊接试板。焊接后制取金相试样,用混合酸(1ml HF+1.5ml HCl+2.5ml  $\text{HNO}_3$ +95ml  $\text{H}_2\text{O}$ )溶液对抛光后的试样进行腐蚀,然后在光学显微镜下对接头组织进行观察分析,并进行显微硬度测量。在Instron-1186电子万能试验机上对接头进行拉伸测试,采用S-750扫描电镜观察断口形貌。

表1 2014铝合金的化学成份和力学性能

化学成份 w/%				力学性能	
Cu	Mg	Si	Mn	$\sigma_t/\text{MPa}$	$\delta/\%$
3.9~4.8	0.4~0.8	0.6~1.2	0.4~1.0	475	8

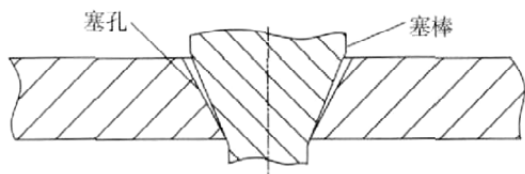


图3 塞孔与塞棒结构

Fig.3 Structure of tapered hole/tapered plug

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 接头微观组织

图4所示为典型的2014铝合金拉锻式摩擦塞补焊接头形貌。从图中可以看出,摩擦塞补焊后板材的塞孔附近发生了较大变化。部分板材基体发生了向上的变形,部分为向下的变形,如图4(a)所示。另外在板材

塞孔与塞棒接触的上部,有明显的未焊合现象。这是因为在焊接过程中塞棒与塞孔以一定的角度进行锥形面配合,塞棒在高速旋转的同时以一定的工进速度向下运动,由于塞棒的进入,导致塞孔上部板材被挤压出来向上翻卷,接头下部材料在塞棒的带动下向下运动,如图4(a)中的弯曲箭头所示。向上翻卷后的板材基体与塞棒之间没有外力拘束,呈自由状态,极易在接头上部形成未焊合,如图4(b)所示。接头下部板材与塞棒接触底部也会产生未焊合,但由于焊接垫板的约束作用,未焊合一般远离板材中心,见图4(c)。摩擦塞补焊接头顶部和底部的未焊合长度与焊接参数及塞棒/塞孔配合角度有关。一般来说,未焊合长度较短,通过焊接后去除塞棒余高(焊接后塞棒突出板材的部分)可以有效消除未焊合。

图5(a)所示为2014铝合金摩擦塞补焊接头的微观组织,从图中可知接头可以分为3个区,即焊缝区、热影响区和母材区(塞棒和板材)。其中焊缝区位于接头中部,宽度非常窄,由塞棒与塞孔锥形配合面附近的材料组成。焊接时塞棒与塞孔发生强烈的相对运动,塞棒与塞孔锥形配合面附近材料经历了较高温度的热循环,组织发生动态再结晶,由塞棒和试板母材原始的板条状组织转变为细小的等轴再结晶组织,如图5(b)所示。焊接过程中,塞棒与塞孔之间的摩擦产热使配合面周围材料达到塑性状态,而且沿塞棒旋转方向有一个相对运动。塑性材料在塞棒作用下发生塑性运动,但其运动的速度和方向是随时间和位置的变化而不断变化的,塑性材料之间存在速度梯度,因此配合面附近的塑性材料不是静态地达到塑性变形,而是一个动态随机变化的过程。塑性材料在焊接热循环的作用下发生动态再结晶,由于焊缝区组织在焊接时还需要承受沿塞孔轴向的压力,摩擦停止后承受顶锻压力,焊缝区发生再结晶的晶粒来不及长大,焊接后形成等轴、细小的晶粒。

摩擦塞补焊焊接时间短、焊接热输入量小,焊缝区

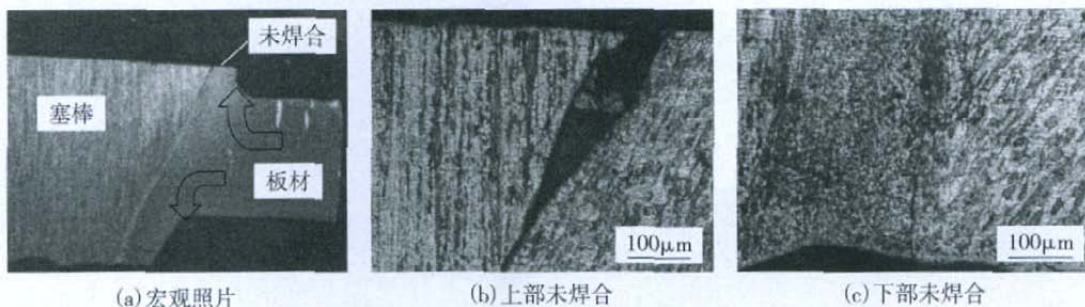


图4 摩擦塞补焊接头形貌

Fig.4 Appearance of FPW joint

宽度非常窄,可以有效降低焊接热输入过大对接头性能的影响,并且摩擦塞补焊焊缝组织细密,与塞棒和试板母材基本可以实现平滑过渡,有效地保证接头的连

接性能。图5 (c)和(d)分别为2014铝合金塞棒和试板的金相组织,可以看出都呈明显的方向性。

### 2.2 接头显微硬度分析

摩擦塞补焊属于固相焊,焊接时热输入量少,并且在摩擦压力作用下形成的焊缝窄,热影响区也比熔焊小得多。常见的2014铝合金摩擦塞补焊接头剖面如图6所示。对接头进行显微硬度测量,测量点如图6中黑点所示(未显示所有测量点),其中在焊缝区及热影响区取点较密集,远离焊缝的区域取点间距较大。

图7所示为接头显微硬度分布图,从图中可知,焊缝整体变化范围不大,但是在焊缝区有硬度突然增大的现象。结合焊缝微观组织可知,焊缝区组织非常细密,在焊接时,这部分组织经历了热和压力的作用,组织在摩擦压力和顶锻压力的作用下形成了细小的等轴晶。一般来说,晶粒直径越小其微观硬度越大,因此焊缝区硬度较高。但由于摩擦塞补焊本身热作用范围窄,因此形成的组织细化区小,在焊缝区外围,组织很快就恢复到基体状态(即试板或塞棒基体状态),晶粒比焊缝区组织粗大,硬度降低。

从接头硬度分布图中还可以看出,焊缝整体硬度变化不大,这有利于提高接头整体性能的稳定。摩擦塞补焊时热影响区非常窄,并且焊缝区与热影响区组织过渡平滑,硬度分布较均匀,各组织之间力学性能较均匀,未形成明显的性能薄弱区。而常规熔焊时,在熔合线和

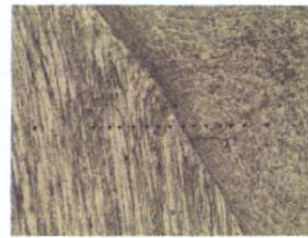


图6 显微硬度测点照片

Fig.6 Measuring point picture of microhardness

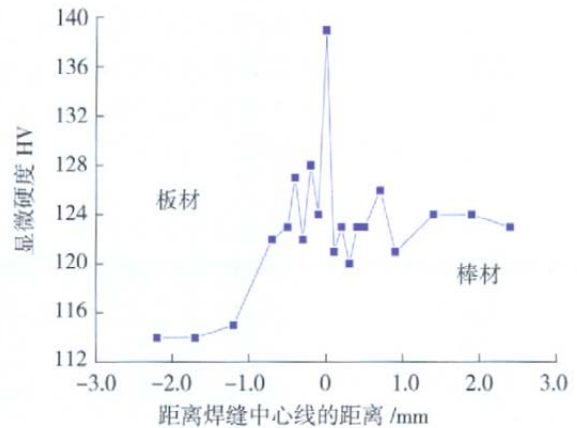


图7 摩擦塞补焊焊缝显微硬度

Fig.7 Microhardness distribution of FPW seam

热影响区附近组织突变,热影响区组织粗大,这部分的显微硬度值较低,硬度分布变化比较剧烈,是接头的薄弱环节。

### 2.3 工艺参数对力学性能的影响

摩擦塞补焊需要控制的工艺参数比较多,主要有:主轴旋转速度 $R$ ,焊接工进速度 $V$ ,摩擦压力 $P_1$ ,焊接摩擦时间 $t_1$ ,顶锻压力 $P_2$ ,顶锻保压时间 $t_2$ ,急停制动时间 $T$ 。采用正交试验法对4mm厚2014铝合金摩擦塞补焊进行试验分析。选取塞棒/塞孔配合角度、摩擦压力、摩擦时间和焊接工进速度等4个影响因子,每个影响因子取4个水平,共进行16次试验,所选取的影响因子及水平如表2所示。其他参数设定为:塞棒旋转速度4 000r/min,顶锻压

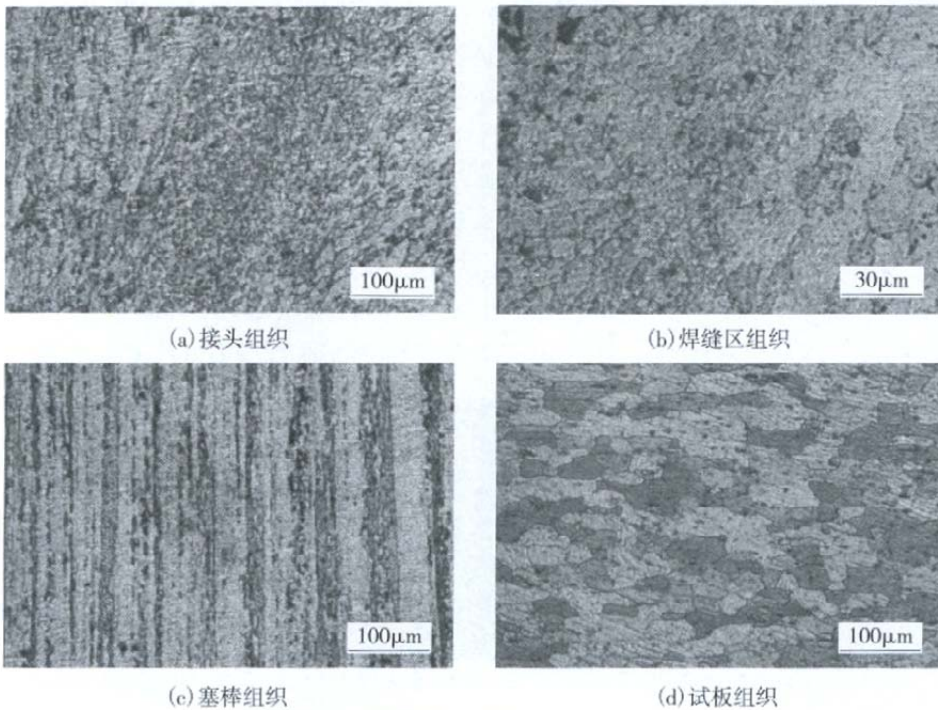


图5 摩擦塞补焊接头金相组织

Fig.5 Microstructures of FPW joint

表2 摩擦塞补焊各因子及水平

因子	接头锥角 塞棒+塞孔/(°)	摩擦 压力/kN	摩擦 时间/s	工进速度/ (mm·min <sup>-1</sup> )
水平1	45+45	38	0.8	130
水平2	45+50	39	0.9	140
水平3	55+50	40	1.0	150
水平4	55+55	41	1.1	160

力40kN,顶锻时间5s,急停制动时间0.2s。焊接后进行塞补焊接头拉伸试验。

### 2.3.1 塞棒/塞孔配合角度对接头抗拉强度的影响

从图8中可以看到,随着塞棒/塞孔配合角度的不同,焊接接头的抗拉强度随之变化。当采用45°+50°和55°+50°配合时,接头强度较高。这是由于当塞孔和塞棒不同角度配合时,焊接过程中塞棒和塞孔开始接触时为线接触。当塞棒角度大于塞孔角度时,接头上部先接触;当塞棒角度小于塞孔角度时,接头下部先接触,但接触面积都比较小,降低了塞棒承受的摩擦扭矩,塞棒锥形面下部不容易产生缩颈变形,防止了未焊合缺陷的产生,提高了焊接接头的抗拉强度。当塞孔和塞棒的配合角度完全相同时,接头的抗拉强度比较低,这是因为焊接过程中塞棒和塞孔开始接触时为摩擦面全部接触,摩擦扭矩比较大,塞棒易发生扭断和变形,产生下部未焊合缺陷,降低接头质量;另外,当塞棒和塞孔角度相同时,焊接初始阶段塞孔与塞棒全面接触,摩擦力急剧增大,易造成设备损坏和焊接质量稳定性差等问题。

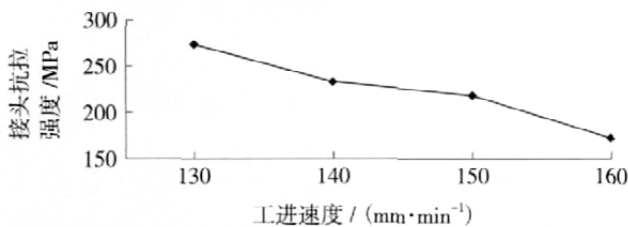


图9 工进速度对接头抗拉强度的影响

Fig.9 Influence of welding speed on joint tensile properties

### 2.3.2 工进速度对接头抗拉强度的影响

图9为不同工进速度对接头性能的影响,从图中可以看出,工进速度对接头抗拉强度影响较大,当采用130mm/min的工进速度时,接头强度最高。当工进速度过大时,接头强度降低,这是因为要得到高质量的焊接接头,必须有一定的摩擦变形量。当工进速度低时,产生的摩擦变形量也比较小,不能将摩擦塑性变形层中

的氧化物和夹杂完全挤出,另外接头附近产热比较少,不能实现接头区域材料的塑化,无法形成有效的连接接头,抗拉强度比较低。同时还需注意摩擦压力和工进速度的匹配问题,若摩擦压力设置较高,当工进速度设置较低时,由于材料变形的速度高于工进的速度,摩擦压力不能完全施加,降低了摩擦热量的产生;当工进速度过高时,因为焊接过程的产热不足,造成接头底部或者顶部的未焊合缺陷,引起接头性能的降低。

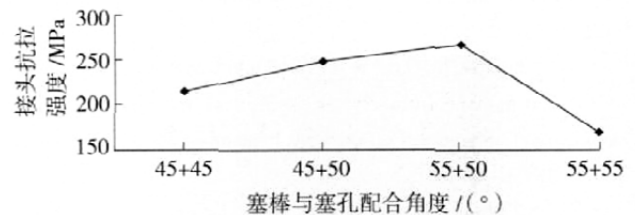


图8 塞棒/塞孔配合角度对接头抗拉强度的影响

Fig.8 Influence of tapered plug/tapered hole suited angles on joint tensile properties

### 2.3.3 焊接时间对接头抗拉强度的影响

图10所示为焊接时间对接头抗拉强度的影响,可以看出当摩擦时间为1.0s时,接头强度最高。由于拉锻式摩擦塞补焊依靠塞棒施加摩擦压力,若摩擦时间太短,则界面加热不充分,接头区温度场不满足焊接要求,接头强度比较低;若时间过长,则塞棒的芯部被加热,塞棒锥形面下部棒材发生塑性变形,在拉应力作用下变细,容易造成接头背面的未焊合缺陷,降低接头的抗拉强度。

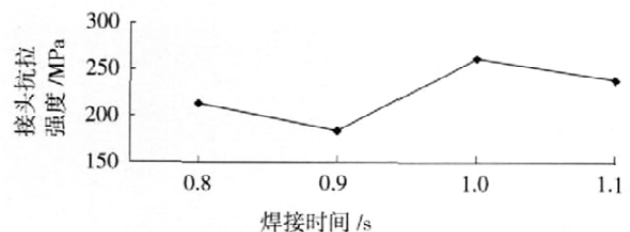


图10 焊接时间对接头抗拉强度的影响

Fig.10 Influence of welding time on joint tensile properties

### 2.3.4 摩擦压力对接头抗拉强度的影响

图11所示为摩擦压力对接头性能的影响,可以看出,摩擦压力对接头性能影响不明显,但当摩擦压力过大时,接头强度急剧降低。这主要是因为,在摩擦塞补焊过程中当压力过大时,一方面会引起焊接产热增加,材料塑性变形程度增大;另一方面,在一定的工进速度下

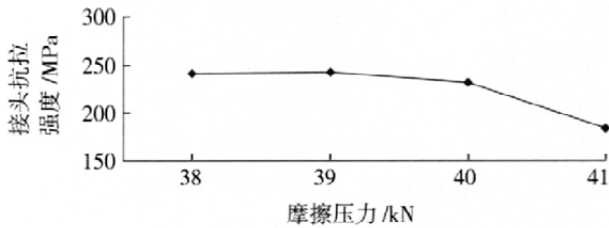


图 11 摩擦压力对接头抗拉强度的影响  
Fig.11 Influence of frictional pressure on joint tensile properties

会造成塑化的材料被挤压出焊接区域,焊接后形成未焊合缺陷,影响接头性能。

### 2.3.5 工艺优化后的接头性能

通过正交试验,确定了优化的焊接工艺参数范围,在此基础上进一步确定了最佳焊接参数,进行了板材厚度为 4mm 的 2014 铝合金摩擦塞补焊,焊接接头抗拉强度和延伸率分别如表 3 所示。从表中可知,通过正交试验进行优化后,选择最佳焊接工艺参数进行焊接,可以获得质量良好的摩擦塞补焊焊缝,接头强度可以达到母材强度的 79% (母材强度为 475MPa)。需要说明的是,接头抗拉强度试样按国标拉伸试样制备,但由于塞补焊焊缝是一个圆环形,因此拉伸试样中塞补焊焊缝其实是两道圆弧状接头,而不是直线形的。

表 3 摩擦塞补焊接头力学性能

试样编号	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%
1	360	6.0
2	375	7.0
3	365	6.5
4	365	5.5
5	360	5.5

### 2.4 断口分析

图 12 为拉伸试验后摩擦塞补焊接头断口形貌,试样断裂于热影响区,从其整体形貌来看,断口表面基本光滑平整,局部区域有少量的纤维状特征,在摩擦塞补焊焊缝中心存在大量的韧窝,基本属于塑性断裂。

### 3 结论

(1) 采用拉锻式摩擦塞补焊方法实现了 4mm 厚度 2014 铝合金的焊接。接头由焊缝区、热影响区和母材这 3 部分构成,焊缝区发生了动态再结晶,形成了细小的等轴晶组织,热影响区仅受热循环的作用,组织稍微有粗

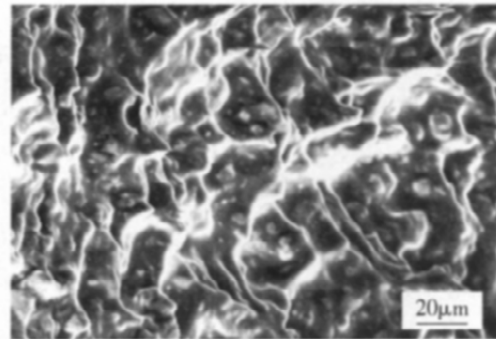


图 12 接头断口形貌

Fig.12 Fracture surface appearance of FPW joint

化现象。

(2) 摩擦塞补焊接头结构和焊接工艺参数对接头性能有重要影响,选用优化的焊接参数,可以获得性能优良的接头,接头抗拉强度可以达到 375MPa,相当于母材强度的 79%。

(3) 对接头断口形貌进行分析,接头的断裂形式为塑性断裂。

### 参 考 文 献

- [1] Riki T, Terry L, Kenner. Friction plug welding: United States Patent, US 6213379 B1. 2001-04-10.
- [2] Richard F. Bringing aerospace welding specifications up to standard. *Welding and Metal Fabrication*, 2000, 68(7):12-14.
- [3] Fred D, William L, Wayne T, et al. Advanced joining processes for repair in nuclear power plants. 2005 International Forum on Welding Technologies in Energy Engineering, Shanghai, China, September 21-23, 2005.
- [4] Stephan K, Dave N. Friction and forge welding processes for the automotive industry. Presented at International Body Engineering Conference, Detroit, USA, September 28-30, 1999 (Paper No. 99-IBEC-13).
- [5] Thomas W M, Dolby R E. Friction stir welding developments. 6th International Conference on Trends in Welding Research, Georgia, USA, April 15-19, 2000.
- [6] Howse D, Lucas W, Thomas W. Novel joining techniques for repair in the power generation industry. EPRI Welding and Repair Technology for Power Plants Conference, Point Clear, Alabama, USA, June 26-28 2002.
- [7] 栾国红,季亚娟,董春林,等. LY12 铝合金摩擦塞焊接头组织分析. *焊接学报*,2006, 27 (10) : 1-3.
- [8] 刘雪梅,张彦华,邹增大,等. 先进摩擦焊接技术的开发与应用. *热加工工艺*,2006,35 (7) : 49-52.
- [9] 范平章. 摩擦塞焊研发与关键问题. *航空制造技术*, 2007 (1) : 34-37.

(责编 阳光)