

# TC4 钛合金与 LD10 铝合金感应摩擦焊接头的组织与性能

傅 莉, 杜随更, 白建红

(西北工业大学 材料学院, 西安 710072)

**摘 要:** 利用感应电磁场对焊接过程热与物质流动作用, 改善异种金属摩擦焊接头的组织与性能。采用光学金相、扫描电镜及室温拉伸实验与对比分析的方法, 研究了外加电磁场对弱磁性材料 TC4 钛合金与 LD10 铝合金摩擦焊接头焊合区的显微组织、主要合金元素扩散行为及室温力学性能的影响。结果表明: 外加电磁场作用使 TC4 钛合金与 LD10 铝合金摩擦焊接头铝合金侧动态再结晶区宽度增大; 同时, 感应电磁场通过影响摩擦副合金材料内部电子密度状态等, 促进了摩擦焊接过程中主要合金元素 Al 和 Ti 在焊合区的扩散过程, 并且提高了 TC4 钛合金与 LD10 铝合金摩擦焊接头的拉伸强度。其中, 外加电磁场在顶锻保压阶段的影响更为明显。

**关键词:** TC4 钛合金; LD10 铝合金; 电磁场; 摩擦焊接; 显微组织

中图分类号: TG 456

文献标识码: A

## Microstructures and properties of induction friction welded joint of TC4 Ti alloy and LD10 Al alloy

FU Li, DU Sui-geng, BAI Jian-hong

(College of Materials Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** By means of optical microscopy, EDX analysis and tensile test, the influence of the electromagnetic field on the microstructure characteristics, diffusion behavior and mechanical properties of friction welded joints between TC4 Ti alloy and LD10 Al alloy was explored. The results indicate that the width of dynamic recrystallization zone of friction welding joint between TC4 Ti alloy and LD10 Al alloy increases under the electromagnetic field. In addition, the diffusion zones of main alloying elements become wider, especially when the electromagnetic field is applied during the forging process. Meanwhile, the tensile strength of friction welding joint is improved obviously when the electromagnetic field is applied during the forging process of TC4 Ti alloy and LD10 Al alloy.

**Key words:** TC4 titanium alloy; LD10 aluminium alloy; electromagnetic field; friction welding; microstructure

众所周知,金属材料变形过程存在电致塑性效应,具有低流动应力、高塑变能力、以及高的原子扩散能力等特点<sup>[1-3]</sup>。Conrad 等<sup>[4-5]</sup>研究了静电场对铜和铝两种金属回复和再结晶的影响,研究结果指出,静电场提高了铜和铝的回复和再结晶温度,这一点与电流通过试样的作用相反。国内近年来的研究表明,电流和静电场均能降低 7475 铝合金的再结晶温度和硬度,提

高再结晶速度<sup>[6-7]</sup>。文献[8]探讨了外加静电场对 LY12CZ 合金摩擦焊接头焊合区显微结构和力学性能的影响。结果表明,静电场提高了摩擦焊接头焊合区的合金元素固溶程度,降低焊合区晶粒内的位错密度,增加位错的可动性,因而可以提高焊接接头的塑性。近年来电磁场在材料加工、合成与制备中得到越来越广泛的应用<sup>[9-10]</sup>。Tseng 和 Savage<sup>[11]</sup>发现在电磁作用

基金项目: 航空科学基金资助项目(03H53035)

收稿日期: 2006-05-08; 修订日期: 2006-11-15

通讯作者: 傅 莉, 教授, 博士; 电话: 029-88492276; E-mail: fudi317@yahoo.com.cn

下焊接高强钢时,降低了热裂纹的敏感性。20 世纪 70 年代中期,有关学者曾开展了感应摩擦焊接工艺的研究<sup>[12]</sup>,通过感应电流在物质上产生的涡流来调节摩擦焊接表面的温度场,对焊接接头采用复合热源,以改善焊接接头性能,但有关感应电磁场对摩擦焊接头组织及扩散行为的研究尚未见报道。

在传统的摩擦焊接过程中,由于两侧金属高温物理性能和力学性能不同,焊接时两侧变形抗力、变形程度、变形速度以及飞边大小等有明显差异。变形抗力大的一侧变形程度低,直接影响到表面第二相和杂质的排除,并产生焊后残余应力。若能通过在摩擦焊接合区施加感应电磁场的作用来改善异种金属摩擦焊接头的变形条件,减小焊接残余应力,可望提高焊接接头的力学性能。因此,本研究尝试在外加电磁场条件下进行 TC4 钛合金与 LD10 铝合金的摩擦焊接,探讨外加电磁场对弱磁性异种金属摩擦焊接头组织、合金元素扩散行为以及焊接接头力学性能的影响。

### 1 实验

焊接实验在配备有工业控制计算机系统的 C200 型连续驱动摩擦焊机上进行;感应电磁场由 SP-15A 型高频感应加热电源给出;实验中将感应加热线圈置于摩擦界面处以施加感应电磁场,并保证电磁场均匀施加在焊件上,实验装置如图 1 所示。

TC4 钛合金与 LD10 铝合金的几何尺寸分别为  $d$  20 mm×100 mm,  $d$  20 mm×160 mm; TC4 焊前状态为退火态,LD10 焊前状态为热轧+自然时效态。实验规范如表 1 所示,顶锻刹车制度为后制动。每种规范各焊接 6 件试样,每种规范取 1 件进行显微结构分析,其余试样进行性能测试。

摩擦焊接头金相试样在焊态下沿轴向剖切后进行

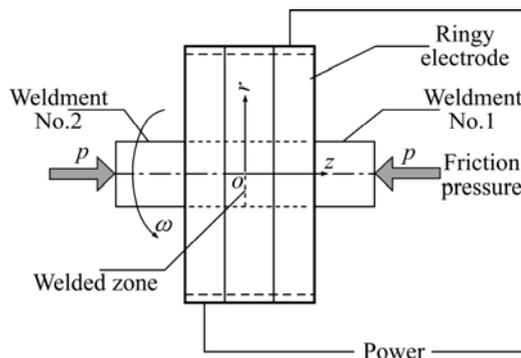


图 1 电磁场下的摩擦焊接装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental arrangement with electromagnetic field

抛光,经腐蚀后在 OLYMPUS PMG3 型光学显微镜上进行观察;在 AMRAY-100B 型扫描电镜上采用 EDX 线扫描分析法测定焊合区不同位置主要合金元素的浓度分布,加速电压为 20 kV;焊接接头拉伸性能测试在 WE-30 型万能材料实验机上进行,并取 5 件试样测量结果的平均值作为该规范下焊合区的平均拉伸强度。

### 2 实验结果

#### 2.1 电磁场对 TC4 钛合金与 LD10 铝合金摩擦焊合区金属组织的影响

TC4 钛合金和 LD10 铝合金摩擦焊接时,钛合金一侧在焊接过程中的变形程度小,近缝区组织特征是与焊缝成垂直的纤维状流线,几乎无动态再结晶晶粒。焊接接头焊合区的变形与动态再结晶主要发生在 LD10 铝合金侧。在焊接接头上 TC4 钛合金和 LD10 铝合金的界面以及铝合金侧纤维流线清晰可见。

表 1 TC4 钛合金与 LD10 铝合金的感应摩擦焊接规范

Table 1 Friction welding and electromagnetic field parameters used in experiment

Sample No.	Friction pressure, $p_1$ /MPa	Friction time, $t_1$ /s	Forging pressure, $p_2$ /MPa	Forging time, $t_2$ /s	Rotate speed, $n$ /(r·min <sup>-1</sup> )	Intensity of induced current, I/A	Time for applying electromagnetic field to friction stage, $t_3$ /s	Time for applying electromagnetic field to forging stage, $t_4$ /s
1	2.5	2	4	6	700	0	0	0
2	2.5	2	4	6	700	600	3	0
3	2.5	2	4	6	700	600	0	6
4	2.5	2	4	6	700	600	3	6
5	2.5	2	4	6	700	300	3	0

图2对比了有、无电磁场作用时,采用相同摩擦焊接规范参数得到的TC4钛合金与LD10铝合金摩擦焊接头铝合金侧的显微组织。由图可知,摩擦加热阶段施加电磁场作用使LD10铝合金侧焊合区金属的动态再结晶区(Dynamic recrystallization zone, DRZ)宽度增大。

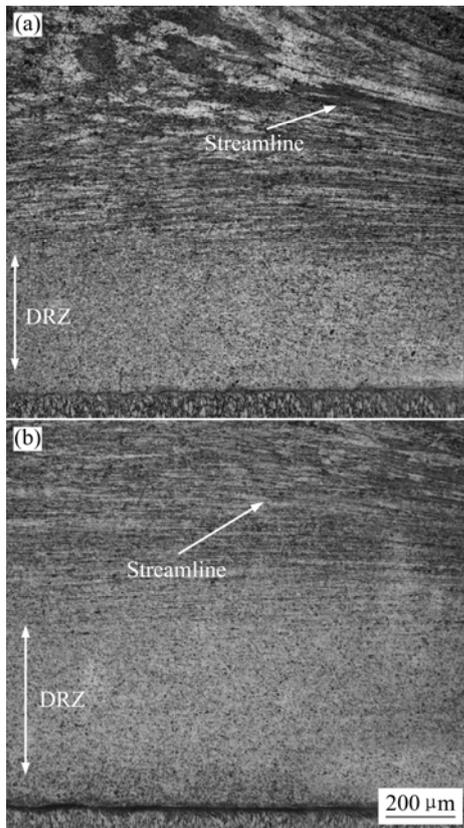


图2 电磁场对TC4钛合金与LD10铝合金摩擦焊接头铝合金侧显微组织的影响

Fig.2 Influence of electromagnetic field on dynamic recrystallization zone of LD10 aluminum in friction welding joint of TC4 alloy and LD10 alloy: (a)  $I=0$  A,  $t_3=0$  s,  $t_4=0$  s; (b)  $I=600$  A,  $t_3=2$  s,  $t_4=0$  s

## 2.2 电磁场对TC4钛合金与LD10铝合金摩擦焊接头铝合金侧动态再结晶区宽度的影响

图3所示为采用相同摩擦焊接规范条件下,TC4钛合金与LD10铝合金常规摩擦焊接头与感应摩擦焊接头铝合金侧动态再结晶区宽度沿径向的分布曲线。由图可知,在相同摩擦焊接参数条件下,焊接接头铝合金侧动态再结晶区的宽度变化规律基本相同,均随焊件半径增加先变宽而后变窄。这主要是因为通常在焊合区距轴心(1/2~2/3)半径处焊接界面温度最高,相应地在此发生的塑性变形最为剧烈,致使此处动态再结晶区宽度增大。

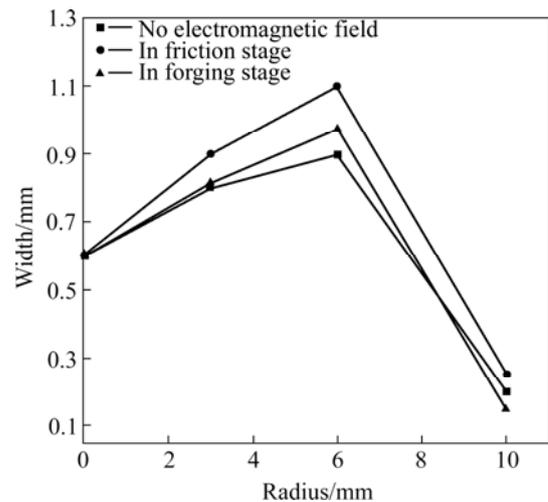


图3 电磁场对摩擦焊接头铝合金侧动态再结晶区宽度沿径向分布的影响

Fig.3 Influence of electromagnetic field on width of dynamic recrystallization zone at aluminum side of friction welded joint along radial direction

在外加电磁场作用下,TC4钛合金与LD10铝合金摩擦焊接头铝合金侧动态再结晶区宽度有所增加,且在摩擦加热阶段施加电磁场时塑性变形区宽度增加更为明显。

## 2.3 电磁场对TC4钛合金与LD10铝合金摩擦焊接头合金元素扩散行为的影响

在有、无电磁场作用下TC4钛合金和LD10铝合金摩擦焊接头不同半径处主要合金元素沿轴向的扩散宽度见表2。由表可知:在半径 $r=8$  mm处,合金元素Al、Ti的扩散区宽度比焊接接头中心区域( $r=0$  mm)要大;在外加电磁场作用下,TC4钛合金和LD10铝合金摩擦焊接头合金元素Al和Ti的扩散区宽度均比无电磁场时有所增加;在顶锻保压阶段施加电磁场比摩擦加热阶段施加电磁场对合金元素扩散行为的影响要大。

## 2.4 电磁场对TC4钛合金与LD10铝合金摩擦焊接头抗拉性能的影响

采用相同的焊接规范和不同的电磁场规范时得到的TC4钛合金与LD10铝合金摩擦焊接头拉伸实验结果如表3所示。由表可知,外加电磁场作用下,TC4钛合金和LD10铝合金摩擦焊接头抗拉强度均有所提高,且在顶锻阶段施加电磁场对焊接接头抗拉强度的影响更为明显。在摩擦加热阶段和顶锻保压阶段施加合适的电磁场( $I=600$  A,  $t_3=3$  s,  $t_4=6$  s)时,TC4钛合金和LD10铝合金摩擦焊接头抗拉强度最高。

表 2 有、无电磁场作用时 TC4 钛合金和 LD10 铝合金摩擦焊接头不同半径处主要合金元素沿轴向的扩散区宽度

Table 2 Diffusion width of alloying elements along axial direction in friction welded joints of TC4 alloy and LD10 alloy at different radius with or without electromagnetic field

Sample	Diffusion width <sup>1)</sup> /μm		Diffusion width <sup>2)</sup> /μm	
	Al	Ti	Al	Ti
No electromagnetic field	2.6	2.1	3.5	2.8
Electromagnetic field applying to friction stage	4.3	3.2	7.5	6.5
Electromagnetic field applying to forging stage	6.8	6.1	8.12	8.05

1)  $r=0$  mm; 2)  $r=8$  mm

表 3 有、无电磁场作用下 TC4 钛合金和 LD10 铝合金摩擦焊接头的抗拉强度

Table 3 Tensile strength of friction welding joint between TC4 alloy and LD10 alloy with or without electromagnetic field

Sample No.	Intensity of induced current, I/A	Time for applying electromagnetic field to friction stage,	Time for applying electromagnetic field to forging stage,	Tensile strength, $\sigma$ /MPa
		$t_3$ /s	$t_4$ /s	
1	0	0	0	118
2	600	3	0	148
3	600	0	6	201
4	600	3	6	236
5	300	3	0	169

### 3 分析与讨论

LD10 铝合金和钛合金磁导率较小, 对于磁导率较小的弱磁性材料, 外加电磁场对其摩擦焊合区金属除产生“热作用”外还存在一种“场效应”。在微观组织层次上, 可以认为电磁场对摩擦焊接头组织的影响可能是一种因表面电荷而引起的空位或空位与原子的结合体的微观迁移现象的结果, 即电磁场在焊接试样表面引起的感应电荷降低了表面局部的空位密度, 因而引起内部的空位与表面之间出现空位流, 加快了扩散以及位错的攀移与滑移速度, 最终导致表面和内部的宏观迁移, 由此引起电场作用下焊接试样组织与性能的改变。从物理概念上讲, 焊件表面的感应电荷只能存在几个原子层的厚度, 这种机理似乎还不能解释电场引起的焊接接头内部远离表面的组织变化。文献[13-14]对电场影响一直延伸至相当厚的试件中部提出了另一种解释, 认为是相之间的边界和晶粒边界上电子密度不均匀的结果。而 Baranov<sup>[15]</sup>则认为, 电场中近试件表面位错环形成能的增加、金属表面位错形核率的降低以及表面位错的消失等都是通过金属试样的“表面效应”来最终影响到金属试样的塑性变形性

能。

本文作者认为, 电磁场作为一种能量流引入摩擦焊接过程中, 会增大焊合区金属正离子的热振动, 无疑会使 TC4 钛合金和 LD10 铝合金摩擦焊接界面温度升高; 同时电磁场也改变焊合区金属价电子的动能、势能及其分布等, 均会降低扩散所需的激活能, 促进摩擦焊合区合金元素的扩散。而伴随着扩散过程的晶界迁移也会显著增强, 从而促进与塑性变形有关的位错滑移与攀移, 使摩擦焊接头动态再结晶区加宽。由于在摩擦加热阶段, 摩擦焊接头合金元素扩散区宽度除了与合金元素扩散行为有关外, 还与摩擦焊接头焊合区金属的变形速度、变形程度有关, 所以电磁场在摩擦加热阶段对焊合区合金元素扩散宽度的影响较之在顶锻阶段的影响要小。此外, 外加电磁场主要通过促进摩擦焊合区合金元素的扩散, 以及减少 TC4 钛合金与 LD10 铝合金摩擦焊接头残余应力来提高 TC4 钛合金与 LD10 铝合金摩擦焊接头抗拉强度的。

### 4 结论

1) 在外加电磁场作用下, TC4 钛合金与 LD10 铝

合金摩擦焊接头铝合金侧动态再结晶区宽度增大; 主要合金元素 Al、Ti 的扩散区宽度增加, 顶锻阶段施加电磁场比摩擦阶段施加电磁场对合金元素扩散行为的影响要大; 摩擦焊接头抗拉强度有所提高, 且在顶锻阶段施加电磁场对焊接接头抗拉强度的影响更为明显。

2) 施加合适的电磁场时, TC4 钛合金和 LD10 铝合金摩擦焊接头抗拉强度可达 236 MPa。

## REFERENCES

- [1] Campbell J, Fahmy Y, Conrad H. Influence of an electric field on the plastic deformation of fine-grained  $Al_2O_3$ [J]. Metall Mater Trans A, 1999, A30(11): 2817-2823.
- [2] Liu W, Liang K M, Zheng Y K. Study of the diffusion of Al-Li alloys subjected to an electric field[J]. Journal of Materials Science, 1998, 33: 1043-1047.
- [3] Cao W D, Lu X P, Sprecher A F, Conrad H. Superplastic deformation behavior of 7475 aluminum alloy in an electric field[J]. Materials Science and Engineering, 1990, A129: 157-166.
- [4] Conrad H, Karam N, Mannan S. Effect of prior cold work on the influence of electric current pulses on the recrystallization of copper[J]. SRIPTA Metallurgica, 1984, 18(3): 275-280.
- [5] Conrad H, Guo Z, Sprecher A F. Effect of an electric field on the recovery and recrystallization of Al and copper[J]. SRIPTA Metallurgica, 1989, 23(6): 821-823.
- [6] 刘兵, 陈铮, 王永欣, 王西宁. 电场对含铈铝锂合金的改性作用及其机制[J]. 中国稀土学报, 2001, 19(1): 58-61.  
LIU Bing, CHEN Zheng, WANG Yong-xin, WANG Xi-ning. Influence of electric field on mechanical properties of Al-Li alloy containing Cerium and its electronic mechanism [J]. Journal of The China Rare Earth Society, 2001, 19(1): 58-61.
- [7] 陈铮, 刘兵, 王永欣, 魏齐龙. 电场处理的强化晶界效应与唯象理论[J]. 稀有金属材料与工程, 2001, 30(5): 331-334.  
CHEN Zheng, LIU Bing, WANG Yong-xin, WEI Qi-long. Effect and phenomenological theory of electric field treatment on grain boundary strengthening[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2001, 30(5): 331-334.
- [8] 傅莉, 杜随更, 介万奇. 电场对 LY12CZ 合金摩擦焊缝组织微观结构与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(2): 305-310.  
FU Li, DU Sui-geng, JIE Wan-qi. Effects of electric field on microstructure and mechanical properties of friction welding joint of LY12CZ alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(2): 305-310.
- [9] 代威, 傅正义, 卢北平, 张丰收. 电磁场在材料科学中的应用[J]. 国外建材科技, 2004, 25(3): 7-10.  
DAI Wei, FU Zheng-yi, LU Bei-ping, ZHANG Feng-shou. Application of the electromagnetic field in materials science[J]. Building Materials Science and Technology Abroad, 2004, 25(3): 7-10.
- [10] 李世辉, 张长春, 于妍, 迟剑峰. 塑料成型加工过程中场致作用的应用研究[J]. 工程塑料应用, 2004, 32(3): 71-73.  
LI Shi-hui, ZHANG Chang-chun, YU Yan, CHI Jian-feng. Study on application of fields in plastics processing[J]. Application of Engineering Plastics, 2004, 32(3): 71-73.
- [11] Tseng, C F, Savage W F. Effect of arc oscillation[J]. Welding Journal, 1971, 50(11): 77-86.
- [12] Dennin G. Inductive friction melding[J]. Welding and Cutting Journal, 1974, 26(10): 408-409.
- [13] Gilman J J. Electro-plastic effect in semiconductors[J]. Mater Sci Eng A, 2000, A287: 272-275.
- [14] Gu X M, Liu W, Liang M K. The effect of electric field on phase separation in glasses: a mode and experimental testing[J]. Mater Sci Eng A, 2000, A278: 22-26.
- [15] Baranov Y V. Effect of electrostatic fields on mechanical characteristics and structure of metals and alloys[J]. Mater Sci Eng A, 2000, A287: 288-300.

(编辑 龙怀中)