

文章编号: 1004-0609(2003)02-0305-06

电场对 LY12CZ 合金摩擦焊缝组织 微观结构与力学性能的影响^①

傅 莉, 杜随更, 介万奇

(西北工业大学 材料科学与工程学院, 西安 710072)

摘 要: 采用透射电镜和扭转试验研究了外加静电场对 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, 使 s' 相析出数量增多, 并以小尺寸弥散分布; 同时, 电场的激活作用降低了焊合区晶粒内的位错密度, 减少了位错缠结程度, 增加了位错的可动性。因而, 合适的静电场可以加强摩擦焊接过程中晶界运动在协调焊合区金属塑性变形方面的作用, 提高焊接接头的塑性。

关键词: 电塑性效应; 摩擦焊接; LY12CZ 合金; 显微结构; 力学性能

中图分类号: TG 111, TG 401, TG456.9

文献标识码: A

电塑性理论认为, 电场和电流对金属材料内部晶体的空位、位错和晶界等有显著影响, 可增强位错可动性, 使变形金属的显微组织重新排列^[1-4]。近年来的研究表明, 脉冲电流或电磁场的作用能使合金塑性提高 2~3 倍, 超塑性变形提高一倍以上^[5-9]。李等^[10]结合金属电塑性原理和空洞型损伤演变的数学模型, 提出了 LY12CZ 铝合金超塑性变形过程的电塑性机制, 表明合适的电场强度能减小第二相粒子的尺寸, 使第二相粒子的析出量增多, 并呈弥散分布; 此外, 合适的强电场可以提高金属材料的应变速率敏感性指数, 改善材料的塑性, 特别是超塑性性能。国内有关文献报道了含铈的 Al-Li 合金在电场中进行固溶处理时的强化晶界效应, 指出电场能增大溶质在晶内的固溶能力, 使晶内强度提高; 同时电场阻碍空位以及 Li, Na, K 等低价溶质在晶界簇聚, 强化晶界, 使沿晶断裂倾向减弱, 提高塑性, 从而表现出电场作用下固溶处理的材料强度变化不大, 但塑性有所改善^[11, 12]。

目前, 国内外学者所开展的电塑性理论研究工作大多数是采用低速拉伸或压缩实验方法来进行, 或是在恒压、恒温等条件下研究热处理态组织与性能, 这与摩擦焊接过程焊合区金属的变形条件(扭转与压缩复合载荷)有很大差别。同时, 摩擦焊接过程中, 热和力的耦合作用使摩擦焊缝金属发生了

一系列的物理冶金和力学冶金反应, 如塑性变形与流动、相互扩散与渗透、动态回复与再结晶、热量产生与耗散、合金相的固溶与析出以及组织相变等等, 在外加强电场的作用下, 这些过程无疑会更加剧烈。本文作者尝试在外加静电场条件下进行 LY12CZ 铝合金的摩擦焊接, 研究静电场对摩擦焊缝金属微观组织、第二相分布与形态以及位错组态的影响, 探讨静电场对 LY12CZ 合金摩擦焊接头性能的作用原理。

1 实验

LY12CZ 铝合金的焊接采用配备有工业控制计算机系统的 C25 型连续摩擦焊机。电场电压由 GYY-1 型商用高压恒压电源给定, 其输出值在 0~10kV 间可调, 并且可以根据需要输出恒定直流电压。实验采用环状电极, 焊件接高压电源正极, 环状电极接电源的负极, 如图 1 所示。

焊接试件采用 LY12CZ 铝合金棒材, 焊前试样经热轧+自然时效处理, 试件几何尺寸为 d 30 mm $\times$ 120 mm, 所采用的焊接规范如表 1 所示。用每种规范各焊 6 件试样, 每种规范取 1 个试样进行显微结构分析, 其余的进行性能测试。

将摩擦焊接头沿轴线剖开, 再沿轴线切取 0.3mm

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50005017)

收稿日期: 2002-05-24 修订日期: 2002-07-10

作者简介: 傅 莉(1968-), 女, 副教授, 博士研究生。

通讯联系人: 傅 莉, 副教授; 电话: +86-29-8492654; E-mail: Fuli@nwpu.edu.cn

表 1 电场参数及摩擦焊接规范

Table 1 Electric field and friction welding parameters

Condition No.	Intensity of electric field/ ($\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Friction pressure/ MPa	Friction time/ s	Forging pressure/ MPa	Forging time/ s	Rotation speed/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	0	1.4	4.0	1.9	6	1 450
2	3.5	1.4	4.0	1.9	6	1 450

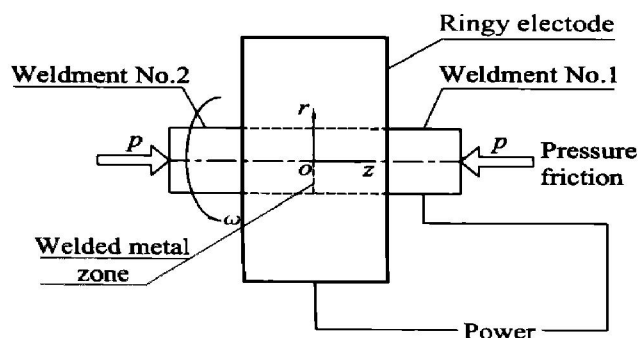


图 1 电场作用下的摩擦焊接装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement with electric field

厚的薄片, 先用砂纸将薄片减至 0.08 mm 以下, 再用 MPT-100 双喷减薄仪在焊合区及设定位置进行化学减薄并穿孔。制备好的薄膜试样在 JSX200X 型 TEM 上观察, 加速电压为 200 kV。

采用瑞士生产的 ALFRED J. AMSLER 型扭转试验机(最大扭矩为 150 kg·m)来测试焊态下摩擦焊接头的抗扭强度和扭转角。

2 结果与分析

通常 LY12CZ 铝合金摩擦焊接头焊合区的组织主要由 α 相、过渡相 s'' 和 s' 、平衡相 s (CuMgAl_2) 和少量的 θ 强化相 (CuAl_2) 组成, 如图 2 所示, 基体为 α 相, 深色长棒状析出相为 s'' 相或 s' 相, 它们可能是原母材中存在的、在焊接加热过程中未固溶到基体中的第二相, 也可能是在冷却过程中析出并长大的第二相; α 相基体还存在 GP 区, 在该区周围析出有细小过渡相 s' (CuMgAl_2), 这是在焊接接头空冷到室温后的自然时效过程中析出的。由于摩擦焊接时间很短, 平衡相 s (CuMgAl_2) 和 θ 相 (CuAl_2) 均较少。此外, 由于 LY12 铝合金中含有 Fe 和 Mn 元素, 在基体上出现的圆形、椭圆形或长方形的粗大黑色颗粒均为难溶杂质相, 主要是 Cu_2FeAl_7 , (FeMn) Al_6 或 (FeMnSi) Al_6 。

图 2 所示是常规摩擦焊接条件下 LY12CZ 焊合区显微组织及析出相的形态与分布。由图 2 可

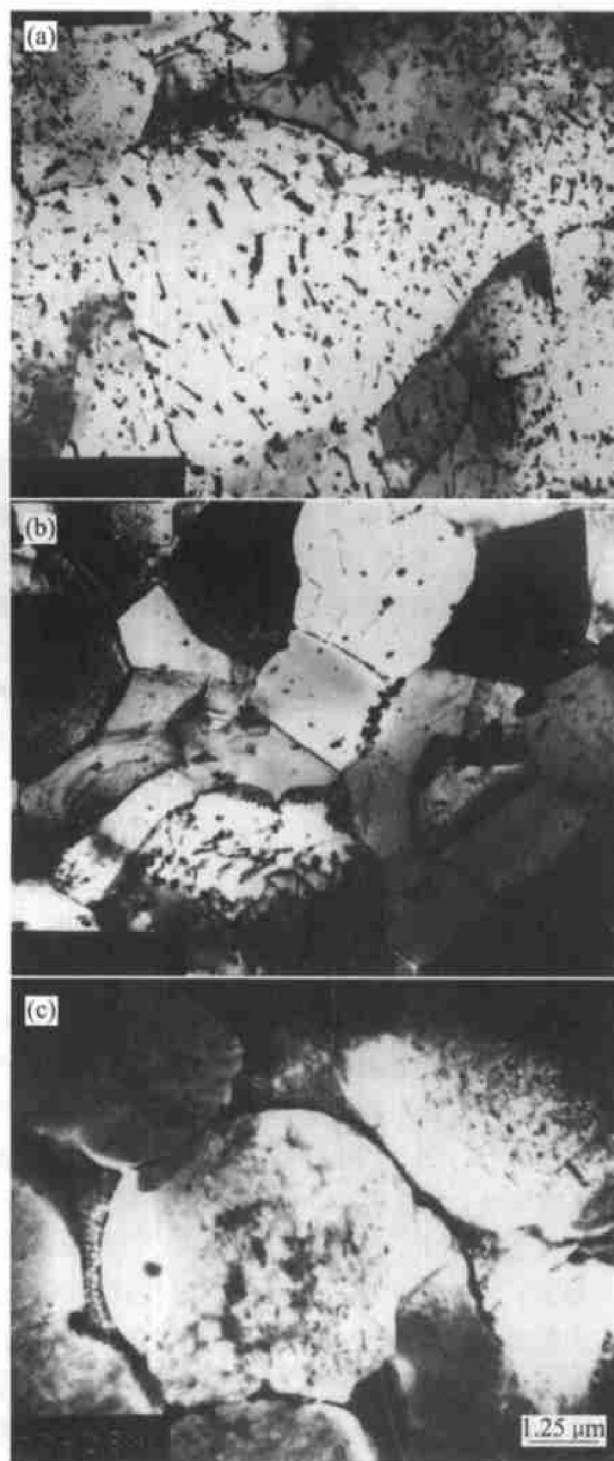


图 2 常规摩擦焊接头焊合区不同半径处的微观结构

Fig. 2 TEM morphologies of weld zone at different radius of same welding joint in absence of electric field

(a) $r = 0$ mm; (b) $r = 5$ mm; (c) $r = 12$ mm

见, LY12CZ 摩擦焊接头上不同半径处的焊合区存在不同的析出相分布状态和位错组态: 1) 摩擦焊接头焊缝中心处($z=0$, $r=0$ mm), 晶粒尺寸较大, 粗大的棒状第二相粒子数目最多, 晶内位错密度最低; 2) 摩擦焊接头 $1/3$ 半径处的焊缝上($z=0$, $r=5$ mm), 晶粒尺寸最小, 长棒状析出相粒子数目最少, 细小弥散均匀分布的 s' 相粒子数量增多, 位错密度较低; 3) 摩擦焊接头近外圆处的焊缝上($z=0$, $r=12$ mm), 晶粒尺寸最大, 呈细小弥散均匀分布的 s' 相粒子数量最多, 同时该处位错密度也较高, 在晶内和晶界上都形成位错缠结而成的“网络”。

外加静电场作用下摩擦焊接头焊合区显微组织及析出相的形貌如图 3 所示。在静电场的作用下, LY12CZ 摩擦焊接头焊合区内第二相粒子分布、形态和位错组态沿径向的分布规律与无电场作用时基本相同。然而, 在焊接接头的同一位置上, 有静电场作用的摩擦焊接头显微组织、析出相形态和位错组态则不同于常规摩擦焊接头的, 可以观察到以下几个现象:

1) 静电场作用下, 摩擦焊接头焊合区内亚晶粒尺寸有所减少, 大小趋于均匀, 这主要是由于静电场可以降低 LY12CZ 铝合金摩擦焊缝中金属扩散所需的激活能, 使扩散过程加强, 促使摩擦焊接头焊合区金属变形均匀, 同时由于电场促使第二相粒子在晶界附近析出的数量增加, 使驱动晶界迁移的压力提高, 阻碍晶粒的长大, 二者的综合作用使焊合区亚晶粒尺寸细小、分布均匀。

2) 在静电场作用下, 摩擦焊接头焊合区内粗大的黑色杂质相颗粒以及长棒状的 s' 相和 s'' 相 (CuMgAl_2) 的尺寸和数量都有所减少, 而在摩擦焊后的冷却过程中析出的细小、呈弥散分布的 s' 过渡相 (CuMgAl_2) 粒子数目则明显增多(见图 4)。由此可见, 静电场的引入促使了摩擦加热时 LY12CZ 铝合金析出相的固溶, 并提高焊后降温过程中强化相 s' 的形核率, 诱发 s' 相的大量析出, 并使之均匀分布。此外, 由于静电场的作用, α 基体上由于焊合区变形金属组织引起的棒状析出相 s' 相所呈现出的方向性明显减弱。

3) 如图 5 所示, 无论有无电场的作用, 由于摩擦焊接头 $r=12$ mm 半径处的变形速度和变形程度都较大, 即使该处焊接温度较高, 能提高位错运动速度, 但综合作用下此处的位错数目仍较大, 有位错胞结构和亚晶界等形成。当引入静电场时, LY12CZ 摩擦焊接头焊合区晶内的位错密度有所降低, 位错分布较均匀, 且位错线有所增长, 这表明

静电场的作用使摩擦焊缝金属在变形过程中的位错更易于生成与扩展。

表 2 为有、无电场作用时 LY12CZ 摩擦焊接头扭转性能的测试结果。可见静电场效应对摩擦焊接头焊缝金属的抗扭强度影响不大, 但使焊缝金属的扭转角增加约 15% 左右。所以, 外加静电场效应可使 LY12CZ 铝合金摩擦焊缝金属在保持良好强度的

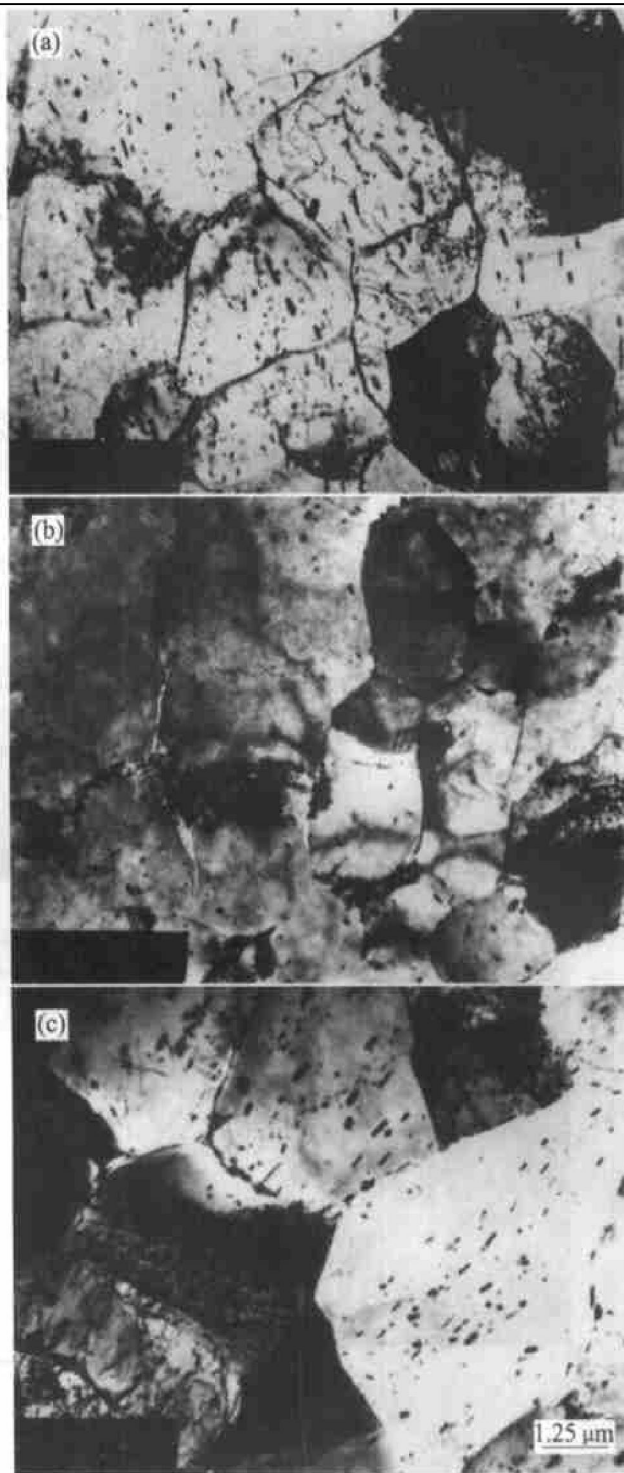


图 3 电场作用下焊接接头焊合区不同半径处的微观结构
Fig. 3 TEM morphologies of weld zone at different radii of same welding joint in presence of electric field
(a) $r=0$ mm; (b) $r=5$ mm; (c) $r=12$ mm

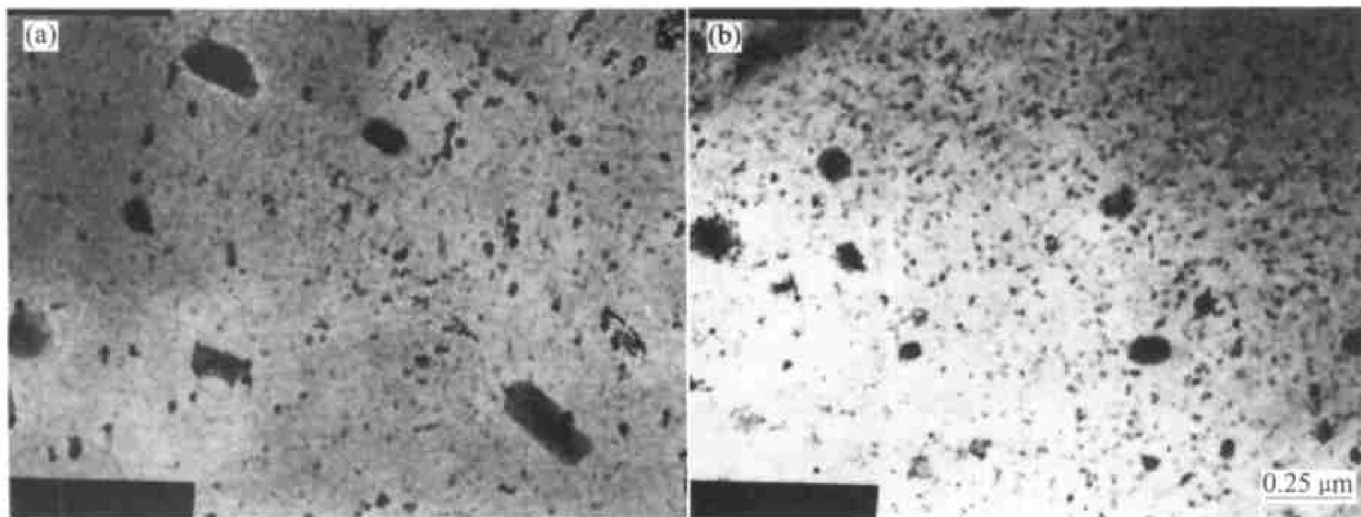


图 4 电场强度对析出相粒子形态的影响

Fig. 4 Influence of electrical field intensity on shape of precipitation phases

(a) $-E = 0 \text{ kV/cm}$; (b) $-E = 3.5 \text{ kV/cm}$

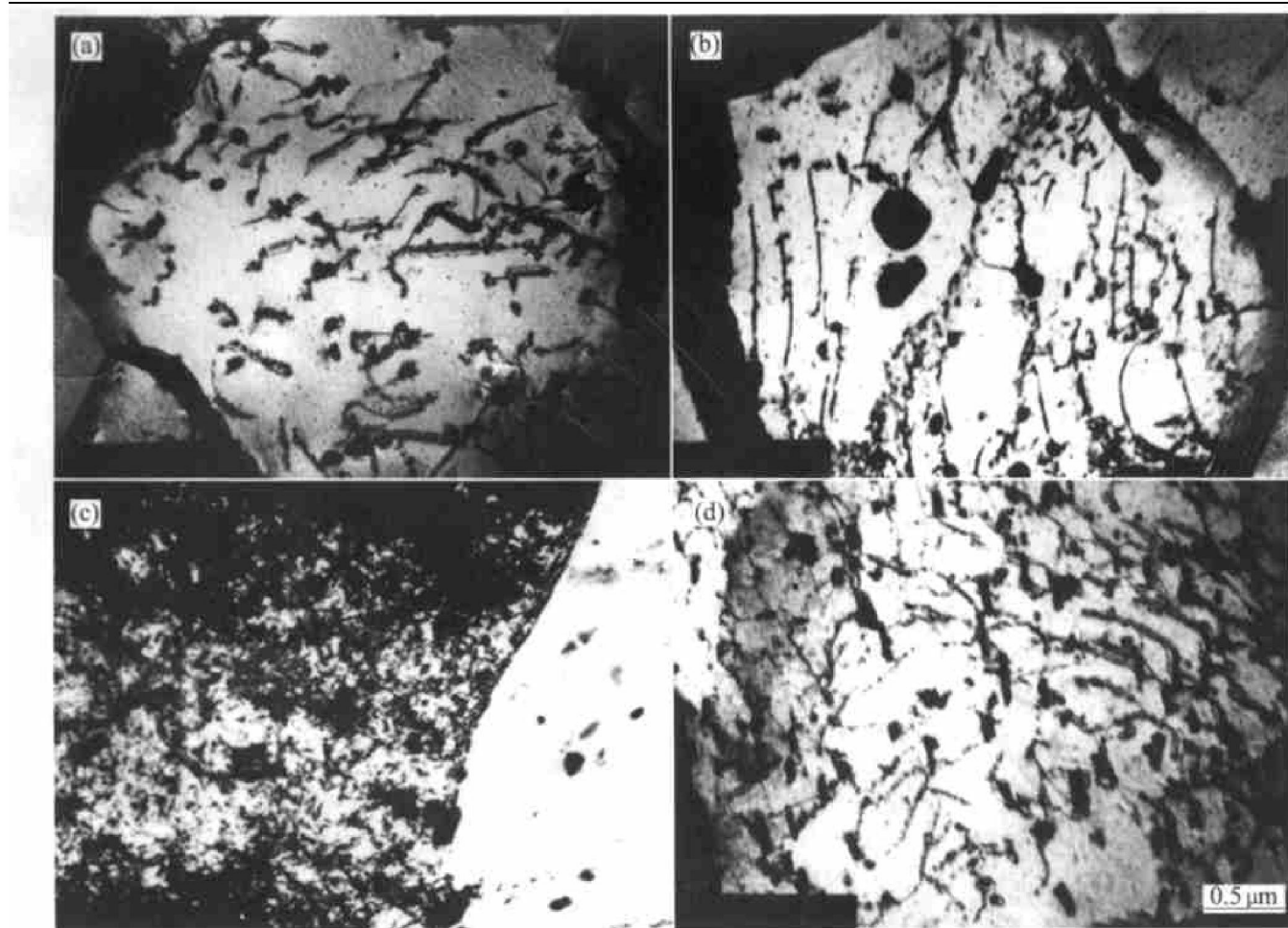


图 5 电场强度对焊合区不同半径处位错形态与分布的影响

Fig. 5 Influence of electrical field intensity on shape and distribution of dislocation at different radii

(a) $-E = 0 \text{ kV/cm}$, $r = 5 \text{ mm}$; (b) $-E = 3.5 \text{ kV/cm}$, $r = 5 \text{ mm}$; (c) $-E = 0 \text{ kV/cm}$, $r = 12 \text{ mm}$; (d) $-E = 3.5 \text{ kV/cm}$, $r = 12 \text{ mm}$

前提下,仍具有较好的塑性。

3 讨论

摩擦焊接过程中,由于焊缝金属的变形速度、

变形程度和变形温度沿径向分布不均匀性,导致不同半径处焊合区晶粒尺寸、第二相形态与分布以及位错组态等均不相同。通常,无论有无电场的作用,在焊接接头轴心线上($r = 0 \text{ mm}$, $z = 0 \text{ mm}$)的

表 2 摩擦焊接头焊合区的扭转性能

Table 2 Torsion properties of weld zone of friction welding joints

Condition No	Yielding torsion strength /MPa	Torsion strength/MPa	Torsion angle/(°)
1	259	327	104
2	261	332	122

变形程度和温度均较低,母材中的析出相固溶不充分,导致该处棒状析出相较多;而在近外圆处的焊合区内变形程度和变形温度均较高,母材中的析出相固溶比较充分,所以该处析出相多以细小尺寸弥散分布。由于变形程度和变形温度的共同作用,摩擦焊接头 1/3 半径处的亚晶粒尺寸最小,晶内位错密度也较低;而在近外圆处亚晶粒尺寸则较大,晶内位错密度亦较高。

LY12CZ 铝合金摩擦焊接头焊合区金属的主要强化相是过渡相 s' (CuMgAl_2) 和 s'' 相,由于 s'' 相和 s' 相均与母相完全共格,且点阵错配度很小,共格应变能低,因此 s'' 相和 s' 相可在基体内均匀形核。在静电场作用下,焊接接头金属表面能下降,导致析出相的均匀形核功增加,而在位错线上的非均匀形核功降低^[13, 14],即电场可能促使 s'' 相或 s' 相的非均匀形核,因而增大了细小 s' 相的体积分数。对于弥散分布于基体上的 s' 相(CuMgAl_2),由于其尺寸较小,塑性变形时位错运动可切过析出相粒子,此时 s' 相尺寸越小,数量越多,对位错运动的阻力越大,焊接接头的强度也越高;对于尺寸较大的棒状 s'' 相或 s' 相(CuMgAl_2),位错运动主要以绕过机制进行,析出相尺寸越大,位错绕过粒子所需的临界切应力越小。因为静电场效应使棒状析出相尺寸减少,使细小弥散 s' 相数量增加,从而提高焊接接头的强度;另一方面,静电场作用下,焊接接头位错密度有所减少,使位错的可动性增大,二者的综合作用致使摩擦焊接头焊合区的强度变化不大,但塑性却有所提高。

到目前为止,有关电场对摩擦焊接头微观组织和性能的作用机制尚未不明了。通常认为摩擦焊接过程中,焊合区组织都会经历变形、动态回复和动态再结晶过程,而再结晶驱动力来源于形变储能,主要以微观缺陷(如空位、位错及晶界等)形式表现。金属电子理论认为,空位具有负电性,晶体缺陷的能量实质上是由于负电荷的薄层对正电荷的屏蔽效应引起的静电能,这种屏蔽作用越大,缺陷所具有的能量也就越大。当试件作为电源正极时,

电场不但削弱了屏蔽作用,降低了静电能,而且具有促进空位向表面定向迁移及促进位错滑移和攀移的作用^[15, 16],所以静电场也将促进与摩擦焊接头焊合区金属塑性变形有关的位错滑移与攀移,使焊合区金属的变形变均匀,位错缠结现象减少。同时,电场的引入可促使第二相粒子在晶界附近大量析出,并使驱动晶界迁移的压力提高,从而阻碍晶粒的长大,故在 LY12CZ 摩擦焊接头焊合区可观察到亚晶粒尺寸减小的现象。

4 结论

1) 在静电场作用下,LY12CZ 铝合金摩擦焊接头焊合区内,亚晶粒尺寸有所减小,分布趋于均匀,而晶内弥散分布的细小过渡相 s' 数目增多,粗大的棒状 s' 相或 s'' 相数量减少。

2) 静电场作用下,LY12CZ 摩擦焊接头焊合区的位错密度有所降低。此外,电场作用使 LY12CZ 铝合金摩擦焊接头焊合区内位错线变长,表明电场效应使摩擦焊缝金属变形过程中位错更易于生成与扩展。

3) 静电场作用下,LY12CZ 铝合金摩擦焊接头扭转强度基本不变,而焊合区扭转角增加约 10%。

REFERENCES

- [1] Cao W D, Lu X P, Sprecher A F, et al. Superplastic deformation behaviour of 7475 aluminum alloy in an electric field [J]. Mater Sci Eng A, 1990, A129: 157 - 166.
- [2] Conrad H, Sprecher A F, Cao W D, et al. Electroplasticity - the effect of electricity on the mechanical properties of metals [J]. JOM, 1990, 42(9): 28 - 33.
- [3] Cao W D, Lu X P, Sprecher A F, et al. Increased hardenability of steel by an external electric field [J]. Materials Letters, 1990, 9(5-6): 193 - 197.
- [4] Wang X F, Li R S, Liu B X, et al. Effect of strong electric on aging behavior of tension preformed 1420 alloy [J]. Material Science & Technology, 1999, 7(4): 39 - 43.
- [5] 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.
- [6] Dariavach N G, Rice J A. Electromigration and the electroplastic effect in aluminum SiC MMCs [J]. JOM, 2000, 52(5): 40 - 42.
- [7] Tang G Y, Zhang J, Zheng M X. Experimental study of electroplastic effect on stainless steel wire 304L [J]. Materials Science and Engineering A, 2000, A281(1): 263 - 267.

- [8] Conrad H, Cao W D, Lu X P. Effect of an electric field on the superplasticity of 7475 Al[J]. Scripta Metall, 1989, 23 (6): 697 - 702.
- [9] Baranov Y V. Effect of electrostatic fields on mechanical characteristics and structure of metals and alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, A287: 288 - 300.
- [10] Li M Q, Wu S C. Superplastic deformation of duralumin LY12CZ under an electric field[J]. J Mater Process Technol, 1994, 40: 385.
- [11] 刘 兵, 陈 铮, 王永欣, 等. 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, et al. Effect of electric field on the modification of Ce-doping Al-Li alloy [J]. Journal of The China Rare Earth Society, 2001, 19 (1): 58 - 61.
- [12] 陈 铮, 刘 兵, 王永欣, 等. 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, et al. Rare Metal Materials and Engineering, 2001, 30(5): 331 - 334.
- [13] 布鲁克斯 C.R. 著, 丁夫等译. 有色合金的热处理组织与性能[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988. 120 - 140.
Brucks C R, Ding Fu, et al transl. Microstructure and Property of Non-ferrous Alloy After Heat Treatment [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988. 120 - 140.
- [14] Conrad H, Guo Z, Sprecher A F. Effect of an electric field on the recovery and recrystallization of Al and Cu[J]. Scripta Metall, 1989, 23(5): 821 - 823.
- [15] Campbell J, Fahmy Y, Conrad H. Influence of an electric field on the plastic deformation of fine-grained Al_2O_3 [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30A (11): 2817 - 2823.
- [16] Lu H A, Conrad H. Influence of an electric charge during quench aging of a low-carbon steel[J]. Appl Phys Lett, 1991, 59 (15): 1847 - 1849.

Effects of electric field on microstructure and mechanical properties of friction welding joint of LY12CZ alloy

FU Li, DU Su-geng, JIE Wan-qi

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

Abstract: By means of TEM and the torsion test, the microstructure and the mechanical properties of the friction welding joint of LY12CZ alloy in the presence of the electrical field were studied. The results show that the external electric field increases the solubility of the alloy elements in the weld zone of the friction welding joint, promotes the formation of the precipitation phases with a small size and a dispersion distribution. Meanwhile, the dislocation density in the grain and the entwining degree of dislocation decrease in the presence of the electric field. Hence the external electric field harmonizes the plastic deformation in the weld zone, and improves the plasticity of the friction welding joint.

Key words: electroplastic effect; friction welding; LY12CZ alloy; microstructure; mechanical properties

(编辑 杨 兵)