

# 工艺参数对 MIG 焊铝铜合金焊缝组织的影响\*

杨成刚<sup>1</sup> 国旭明<sup>1</sup> 洪张飞<sup>1</sup> 钱百年<sup>1</sup> 赵秀柏<sup>2</sup>

1. 中国科学院金属研究所 沈阳 110016

2. 开原维科容器有限责任公司 开原 112300

**摘要** 研究了电磁搅拌工艺参数对 2219 铝铜合金脉冲 MIG 焊焊缝形状和组织的影响。结果表明,随着磁感应强度增加,焊缝枝晶数量减少,等轴晶数量增加,焊缝由指状熔深变为成形良好的椭圆形熔深。当磁感应强度和频率匹配合适时,焊缝成形良好,焊缝组织几乎为细小的等轴晶。但随着磁感应强度继续增加,焊缝成形变差,焊缝等轴晶数量减少,枝晶数量增多。电磁搅拌频率对焊缝成形影响不大,频率较低和较高时都会降低焊缝组织的细化效果。

**关键词** 金属材料, 铝铜合金, 电磁搅拌, 焊缝组织

**分类号** TG113

**文章编号** 1005-3093(2006)03-0267-05

## Influence of process parameter of MIG welding on the weld of Al-Cu alloy

YANG Chenggang<sup>1</sup> GUO Xuming<sup>1\*\*</sup> HONG Zhangfei<sup>1</sup> QIAN Bainian<sup>1</sup> ZHAO Xiubai<sup>2</sup>

1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

2. Kaiyuan Weike Vessel Ltd. Co., Kaiyuan 112300

\* Supported by National High Technology Research and Development Program of China No.2002AA305402. Manuscript received April 25, 2005; in revised form December 30, 2005.

\*\* To whom correspondence should be addressed, Tel:(024)23971912, E-mail: xmguo@imr.ac.cn

**ABSTRACT** The effects of electromagnetic stirring parameters on the shape and microstructure of MIG weld for 2219 aluminum alloy were investigated. The results showed that the number of dendrite grains gradually decreased and the equiaxed grains gradually increased with the increasing of magnetic intensity, the finger-like penetration of weld shapes transformed into elliptical penetration. With optimum magnetic intensity and frequency, the weld microstructures were almost fine equiaxed grains and the weld shape was the best. But with magnetic intensity further increasing, the shape of weld became worse, the number of equiaxed grains gradually decreased and dendrite grains gradually increased. Electromagnetic frequency had little effect on the shape of weld. Low frequency or high frequency electromagnetic field would weaken the effect of weld grains refinement.

**KEY WORDS** metallic materials, Al-Cu alloy, electromagnetic stirring, weld microstructure

高强铝铜合金具有很高的室温强度及良好的高温和低温性能,广泛应用于航空航天、舰船、车辆等焊接结构。但是铝铜合金熔焊时接头强度只有焊前母材强度的大约 60%,塑性也不理想。这些问题的产生与焊缝凝固后的组织形态密切相关。目前细化焊缝组织的方法主要有:电磁搅拌、脉冲焊接、表面强冷和孕育处理<sup>[1~4]</sup>。电磁搅拌成本低、效率高,是近年来兴起的一种新的高效优质焊接技术。Matsuda 等<sup>[5,6]</sup>对 Al-Mg 合金 TIG 焊的结果表明,电磁搅拌细化了

焊缝组织,降低了焊缝热裂纹倾向,但未解释电磁搅拌细化焊缝组织机理。Pearce 等<sup>[7]</sup>对 Al-Mg、Al-Mn 和 Al-Zn-Mg 等铝合金 TIG 焊的结果表明,焊丝中细化剂 Ti 和 Zr 的含量较高时,电磁搅拌促使熔池中 Ti 和 Zr 元素的均匀分布和  $\alpha(\text{Al})$  非均质形核,细化了焊缝组织。但是,未解释细化剂 Ti 和 Zr 的含量较低时,电磁搅拌对焊缝组织的影响。本文研究电磁搅拌工艺参数对 MIG 焊 2219 铝铜合金焊缝组织的影响。

### 1 实验方法

实验用母材为 2219 铝铜合金,尺寸为 20 mm×150 mm×300 mm。焊接时先在试板表面堆焊,以观察

\* 国家高技术研究发展计划资助项目 2002AA305402。

2005 年 4 月 25 日收到初稿;2005 年 12 月 30 日收到修改稿。

本文联系人:国旭明

焊缝形状和组织的变化, 确定最佳的焊接工艺参数. 然后选取一组最佳的工艺参数焊接试板, 试板的坡口形式为 X 形, 坡口角度为  $70^\circ$ , 对接接头. 焊丝为 ER2319, 直径为 1.6 mm. 母材及焊丝化学成分列于表 1, 电磁搅拌工艺参数列于表 2. 焊接设备采用德国 CLOOS 公司生产的 Qunito 503 型焊机. 电磁搅

拌装置为自行研制, 外加磁场为纵向交变磁场, 磁力线平行于焊接电弧轴线, 且以电弧轴线为中心对称分布. 分别用 E2-X30P/R 型光学显微镜、SSX-550 扫描电镜对焊态下焊缝显微组织进行观察分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 磁感应强度对焊缝形状和组织的影响

由图 1 可见, 普通脉冲 MIG 焊 (磁感应强度为零) 的焊缝为指状熔深, 根部较窄, 易产生裂纹和未熔合等缺陷 (图 1a). 随着磁感应强度的提高, 根部变宽, 成椭圆形熔深, 成形变好, 有利于减少焊缝裂纹和未熔合等缺陷 (图 1b, c). 当磁感应强度过高时, 熔深急剧变浅, 成形变差 (图 1d).

表 1 母材及焊丝化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of base metal and filler wire (mass, %)

	Cu	Mn	Ti	Zr	V	Al
2219	6.28	0.30	0.048	0.12	0.07	Bal.
ER2319	6.30	0.30	0.15	0.18	0.10	Bal.

表 2 电磁搅拌工艺参数

Table 2 Electromagnetic stirring parameters

Sample No.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Magnetic frequency $f/\text{Hz}$	0	5	5	5	5	5	2	8	12	20
Magnetic intensity $B/10^{-3}\text{T}$	0	3.9	7.9	10.0	12.5	14.2	7.9	7.9	7.9	7.9
Average current $I/\text{A}$	251	243	233	235	241	238	230	232	234	233
Average voltage $U/\text{V}$	26.4	27.1	27.6	28.1	28.7	28.3	27.7	27.6	27.5	27.4

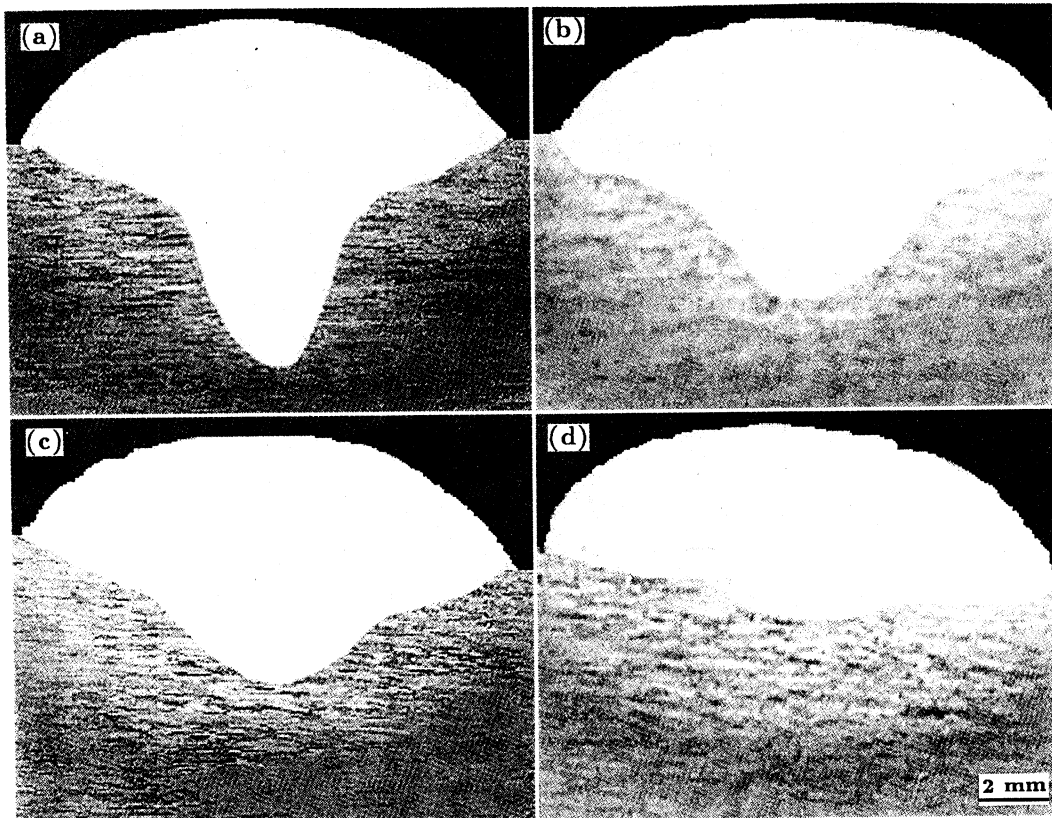


图 1 磁感应强度对焊缝形状的影响

Fig.1 Influence of magnetic intensity on shape of weld (electromagnetic stirring frequency  $f=5\text{ Hz}$ )

(a)  $B=0$ , (b)  $B=3.9\times 10^{-3}\text{ T}$ , (c)  $B=7.9\times 10^{-3}\text{ T}$ , (d)  $B=14.2\times 10^{-3}\text{ T}$

没有电磁搅拌时, 普通脉冲 MIG 焊的电弧呈锥形, 在电弧力的作用下, 形成明显的轴向性很强的液体流束, 产生指状熔深. 电磁搅拌脉冲 MIG 焊时, 电弧受到电磁力的作用而扩张. 磁感应强度较低时, 电弧受到的电磁力较弱, 电弧扩张较小, 焊接电弧仍然有较强的穿透力, 形成深宽比合理、成形良好的焊缝. 磁感应强度过高时, 电弧受到的电磁力很大, 电弧进一步扩张、电弧穿透力变得很弱, 熔深变浅. 同时, 熔滴离心力增大使熔滴破碎成几个细滴, 细滴脱离电极后在垂直于电极轴线的平面上移动, 影响了熔滴向熔池的平稳过渡, 甚至产生飞溅, 破坏了焊接过程的稳定性.

图 2 表明, 没有电磁搅拌脉冲 MIG 焊时, 焊缝显微组织是以粗大、方向性很强的枝晶组织为主, 等轴晶数量很少 (图 2a). 随着磁感应强度增加, 焊缝等轴晶数量增多, 枝晶组织减少, 当  $B=7.9 \times 10^{-3} \text{T}$  时, 焊缝显微组织几乎由细小的等轴晶组成 (图 2b, c). 若磁感应强度继续增加, 焊缝等轴晶数量减少, 枝晶组织增加 (图 2d).

焊缝组织细化的关键是将柱状晶转变为细小的等轴晶, 减少焊缝柱状晶含量, 增加等轴晶的含

量. Hunt<sup>[8]</sup> 发现柱状晶转变为等轴晶的临界条件为  $G_L \leq 0.061 N_0^{1/3} [1 - \frac{(\Delta T_N)^3}{(\Delta T_C)^3}] \Delta T_C$ , 其中  $G_L$  为固液前沿液相的温度梯度,  $N_0$  为非均质形核率,  $\Delta T_N$  为非均质形核临界过冷度,  $\Delta T_C$  为柱状晶生长前沿过冷度,  $C_0$  为合金成分. 由此式可见, 降低固液前沿液相的温度梯度, 增加非均质形核率, 能促进柱状晶向细小的等轴晶转变, 细化焊缝的组织. 由图 3 可见, 焊缝非均质形核核心为  $\text{Al}_3\text{Zr}$  和  $\text{Al}_3\text{Ti}$ , 增加焊缝  $\text{Al}_3\text{Zr}$  和  $\text{Al}_3\text{Ti}$  的数量有利于增加非均质形核率<sup>[9,10,11]</sup>. 磁感应强度与频率匹配得比较合理时 ( $f=5 \text{ Hz}$ ,  $B=7.9 \times 10^{-3} \text{ T}$ ), 焊接熔池的熔化金属做复杂的循环运动和涡旋运动, 导致对熔化金属的搅拌. 这一方面使熔合区中一些未熔的粒子 ( $\text{Al}_3\text{Zr}$  和  $\text{Al}_3\text{Ti}$  等) 进入焊缝, 成为非均质形核核心, 同时使液体金属按照一定的频率在熔池往返运动, 使成长着的晶粒受到冲刷、剪切而破碎, 不仅阻碍晶粒的长大, 破碎的晶粒也将变成新晶粒形核核心; 另一方面, 电磁搅拌使合金元素在熔池中分布均匀, 尤其是减少了 Ti、Zr 等细化剂的偏析, 促使  $\text{Al}_3\text{Zr}$  和  $\text{Al}_3\text{Ti}$  等形核核心弥散分布, 促进非均质形核. 可见, 电磁搅拌能提高焊缝非均质形核率. 同时, 电磁搅拌使熔池内的温度变得均

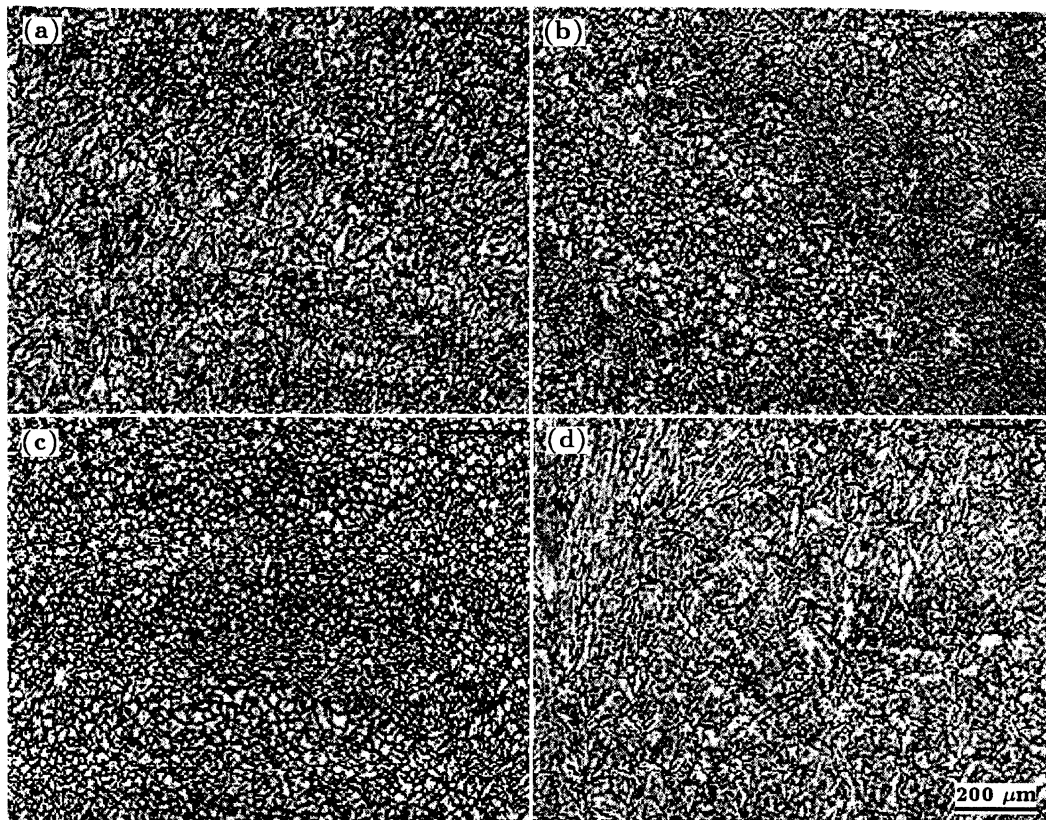


图 2 磁感应强度对焊缝显微组织的影响

Fig.2 Influence of magnetic intensity on microstructure of weld metal (electromagnetic stirring frequency  $f=5 \text{ Hz}$ ) (a)  $B=0$ , (b)  $B=3.9 \times 10^{-3} \text{ T}$ , (c)  $B=7.9 \times 10^{-3} \text{ T}$ , (d)  $B=14.2 \times 10^{-3} \text{ T}$

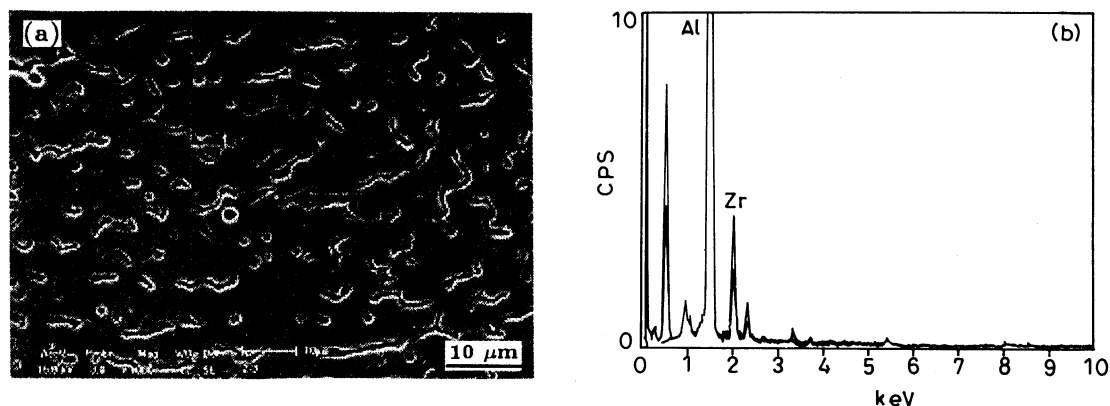


图3 焊缝等轴晶晶粒内形核质点的形貌及其能谱分析

Fig.3 Morphology (a) and EDS analysis (b) of heterogeneous nucleus within an equiaxed grain

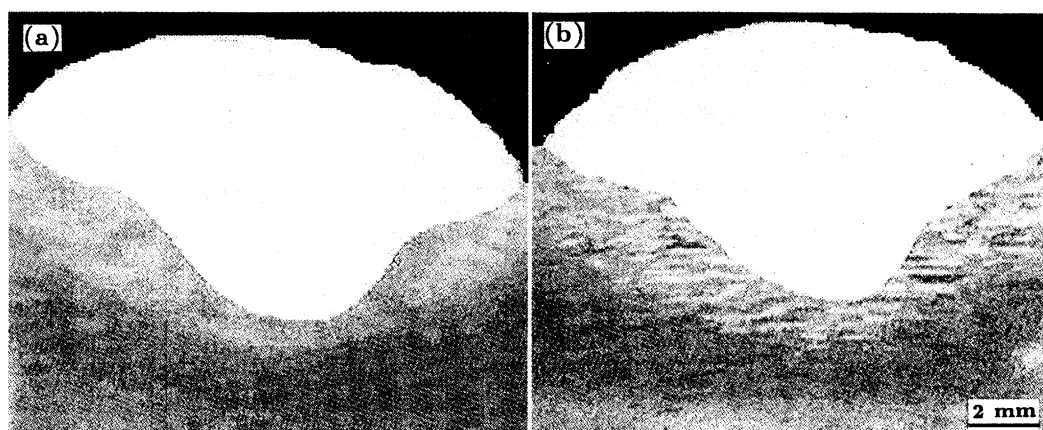


图4 电磁搅拌频率对焊缝形状的影响

Fig.4 Influence of electromagnetic stirring frequency on shape of weld (a)  $f=2$  Hz, (b)  $f=20$  Hz

衡,降低了固液界面前沿液相的温度梯度.因此,电磁搅拌降低了熔池固液界面前沿液相的温度梯度,增加了非均质形核率,促使柱状晶转变为等轴晶,细化了焊缝组织.磁感应强度较低时,熔池所受电磁搅拌力较弱,对熔化金属的搅拌作用较弱,熔合区未熔的粒子( $\text{Al}_3\text{Zr}$ 和 $\text{Al}_3\text{Ti}$ 等)进入焊缝的数量较少,成长着的晶粒受到冲刷作用较弱,减弱了焊缝组织细化效果.

## 2.2 电磁搅拌频率对焊缝形状及组织的影响

在 $B=7.9\times 10^{-3}\text{T}$ 时,焊缝组织细小,成形良好.因此保持 $B=7.9\times 10^{-3}\text{T}$ 不变,研究电磁搅拌频率对焊缝成形及组织的影响.

将图4与图1c对比,可见电磁搅拌频率的改变对焊缝形状影响不大,都是成形良好的椭圆形熔深.电磁力对电弧的扩张作用主要受磁感应强度的影响,而电磁搅拌频率对电磁力影响不大,因此频率的改变对焊缝形状影响不大.

将图5与图2c对比,可见随着电磁搅拌频率的

增加,焊缝等轴晶数量增多,枝晶组织减少,在 $f=5$  Hz时,等轴晶数量最多.随着频率进一步增加,等轴晶数量减少,枝晶组织增加.

磁场频率过低时,晶粒生长过程受电磁力作用的时间间隔较长,在两次冲刷作用之间,晶粒仍有足够的生长机会,特别是在磁场较弱时,晶粒长大的倾向更明显,使焊缝晶粒细化的效果降低.当频率过高时,电磁力的方向变化太快,具有一定机械惯性的液态金属在迅速交变的电磁力的作用下来不及产生足够幅度的冲刷作用,因而也使晶粒细化的效果降低.

## 2.3 焊接接头力学性能

与普通MIG焊比较,在焊接过程加入电磁搅拌( $f=5$  Hz,  $B=7.9\times 10^{-3}\text{T}$ )使接头的抗拉强度由296.4 MPa增加到326.0 MPa,接头强度系数由63%增加到70%,延伸率由4.7%增加到7.6%,显著提高了焊接接头强度和塑性(表3).对接头断口的观察发现,接头的断裂部位均为焊缝,可见焊缝是焊接接头的最薄弱区.

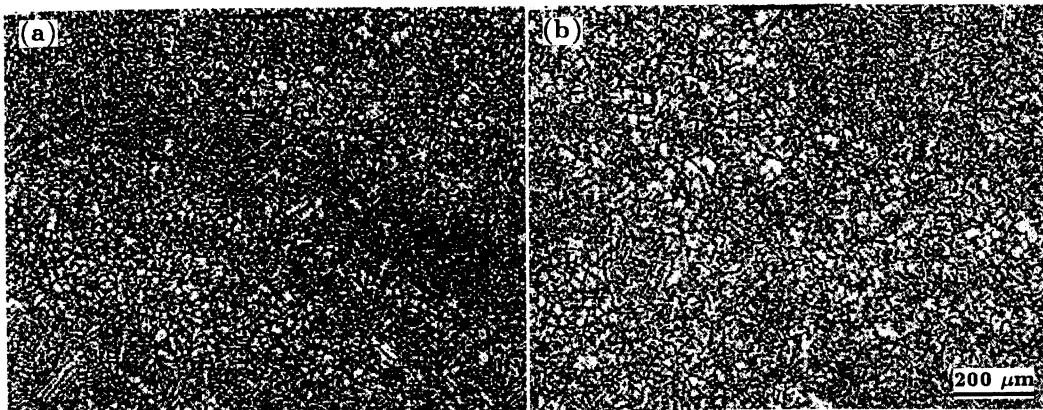


图 5 电磁搅拌频率对焊缝显微组织的影响

Fig.5 Influence of electromagnetic stirring frequency on microstructure of weld metal (a)  $f=2$  Hz, (b)  $f=20$  Hz

表 3 焊接接头的拉伸性能

Table 3 Tensile properties of weld joints

Method	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_y$ /MPa	$\delta$ /%	Joint strength coefficient/%
Conventional pulse MIG welding	296.4	190.7	4.7	63
Electromagnetical stirring plus pulse MIG welding	326.0	235.2	7.6	70

Hall-Petch 公式  $\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-\frac{1}{2}}$  ( $\sigma_0$  为常数, 大体相当于单晶体的屈服强度,  $K$  为表征晶界对强度影响程度的常数,  $d$  为晶粒的平均直径) 表明, 晶粒越细小, 焊缝的强度越高. 同时, 在相同外力的作用下, 细小晶粒的晶粒内部和晶界附近的应变度相差较小, 变形较均匀, 因应力集中引起开裂的机会也较小, 在断裂之前承受较大的变形量, 可以得到较大的延伸率和断面收缩率. 由于细晶粒中的裂纹不易产生也不易传播, 在断裂过程中吸收了更多的能量, 表现出较高的韧性. 因此, 电磁搅拌能细化焊缝组织, 提高接头的力学性能.

### 3 结 论

磁感应强度对焊缝成形和组织影响较大, 随着磁感应强度增加, 焊缝成形变好, 组织逐步细化. 磁感应强度和频率匹配合适时, 焊缝成形良好, 焊缝组织为细小的等轴晶, 显著提高了接头力学性能. 随着磁感应强度继续增加, 焊缝熔深变浅, 组织逐步粗化, 当磁感应强度过大时, 熔深极浅, 不适合铝合金焊接. 电

磁搅拌频率对焊缝形状影响不大, 对焊缝组织影响较大, 频率过低和过高都影响焊缝组织的细化效果.

### 参 考 文 献

- 1 H.Yunia, H.R.Frost, D.L.Olson, *Welding J.*, **68**(7), 280s(1989)
- 2 G.Janaki, D.Ram, R.Murugesan, S.Sundaresan, *J. Mater. Eng. Performance*, **8**(5), 513(1999)
- 3 G.M.Reddy, A.A.Gokhale, K.P.Rao, *J. Mater. Sci.*, **32**(15), 4117(1997)
- 4 S.Kou, Y.Le, *Welding J.*, **64**(4), 51s(1985)
- 5 F.Matsuda, H.Nakagawa, K.Nakata, *Trans. of JWRI.*, **7**(1), 111(1978)
- 6 F.Matsuda, K.Nakata, Y.Miyayaga, *Trans. of JWRI.*, **7**(2), 33(1978)
- 7 B.P.Pearce, H.W.Kerr, *Metall. Trans.*, **12B**, 479(1981)
- 8 J.D.Hunt, *Mater. Sci. Eng.*, **65**, 75(1984)
- 9 B.S.Murty, S.A.Kori, M.Chakraborty, *Inter. Mater.*, **47**(1), 3(2002)
- 10 C.Limmaneevichitr, W.Eidhed, *Mater. Sci. Eng.*, **355**, 74(2003)
- 11 S.Kou, Y.Le, *Welding J.*, **66**(12), 305s(1986)