

[文章编号] 1004- 0609(2002)01- 0052- 05

电磁搅拌作用下非树枝晶铝合金组织演变过程的数学描述^①

许珞萍, 邵光杰, 任忠鸣, 朱明原, 史文

(上海大学材料科学与工程学院, 上海 200072)

[摘要] 研究了电磁搅拌法制备半固态铝合金原材料工艺中, 主要工艺参数(磁场强度和冷却速度)与非树枝晶组织之间的关系, 半定量地描述了非树枝晶组织的演变过程, 给出了非树枝晶组织参数随着磁场强度和冷却速度变化的数学关系, 为合理选择工艺参数提供了理论指导。

[关键词] 半固态成形; 铝合金; 非树枝晶组织; 电磁搅拌

[中图分类号] TG 292; TG 146. 2; TG 142. 1

[文献标识码] A

半固态成形(Semi-solid forming, SSF)技术因融合了铸造、锻造以及热挤压的优点, 具有独特的优越性, 而受到广泛的关注, 被称为 21 世纪金属成形的关键技术之一^[1, 2]。目前, 在非树枝晶(Non-dendritic)原材料, 即半固态金属(Semi-solid metal SSM)的制备、二次加热及半固态加工 3 个关键环节上, 均取得了显著进展^[3~ 7], 从而使 SSF 技术在工业生产中的应用日益普及。作为 SSF 技术基础和前提条件的非树枝晶原材料的制备技术, 以电磁搅拌法、应变诱发熔化激活法(SIMA 法)为代表, 并日臻成熟。同时, 对非树枝晶组织的形成机理、非树枝晶组织演变过程等理论问题的研究也日益深入。Flemings^[8]定性地提出, 随着剪切速率、剪切时间的增加以及冷却速度的降低, 非树枝晶组织的演变过程为初始枝晶碎片→枝晶生长→玫瑰花型→成熟的玫瑰花型→椭球型, 如图 1 所示。众多的材料工作者^[9, 10]亦观察到了大致相同的实验现象, 并对 Flemings 提出的非树枝晶组织的演变过程表示认同。

但令人遗憾的是对此过程中剪切速率、剪切时间和冷却速度与非树枝晶组织之间的关系尚缺少定量的数学描述。而在半固态原材料的制备过程中, 正是这几个因素以及相互间的匹配, 决定了原材料的组织性能, 从而严重影响后续二次加热和成形工艺。本文作者研究电磁搅拌法制备半固态铝合金原材料工艺中, 主要工艺参数(磁场强度和冷却速度)与非树枝晶组织间的变化规律, 旨在揭示其半定量的数学关系。

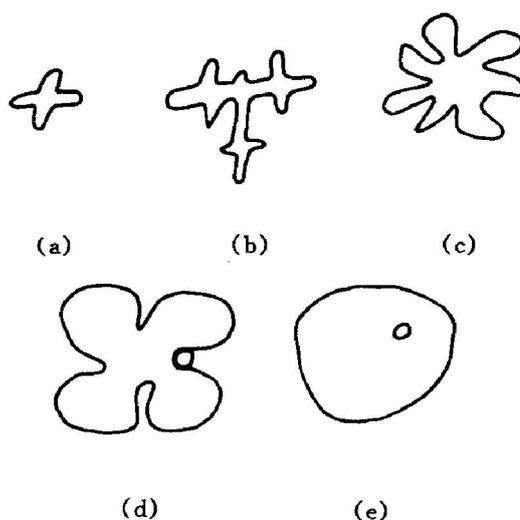


图 1 非树枝晶组织的演变模型

Fig. 1 Evolution model of non-dendritic structure

(a) —Initial dendritic fragment; (b) —Dendritic growth; (c) —"Rosette"; (d) —Ripe rosette; (e) —Spheroid

1 实验

1.1 非树枝晶组织的数学表达

在电磁搅拌条件下铝合金的凝固组织中发现, 除了枝晶、近球型粒状晶外, 还有短棒状(或条状)组织^[4]。非树枝晶组织的概念应涵盖粒状晶、棒状晶组织, 其特点是一次、二次枝晶间距极不明显。因此, 对非树枝晶组织的描述除了晶粒大小之外, 还有晶粒形态。

通常采用球形系数或球形度来描述实际颗粒与球形颗粒的差异程度。它定义为与实际颗粒体积相

① [收稿日期] 2001- 03- 01; [修订日期] 2001- 04- 16

[作者简介] 许珞萍(1938-), 女, 教授, 博士生导师。

同的球体表面积和实际颗粒的表面积之比。对于圆球体其值为 1, 其它形状颗粒的球形度均小于 1。Lu 等人^[11]采用圆度(其定义为 $4\pi \times \text{面积} / \text{周长}^2$)来表示颗粒形状。在本实验中, 因无法测定初生相固体的表面积, 而无法使用球形度来衡量初生相固体的形态。故此, 作者提出了相对简单的颗粒平均尺寸 D 及形状因子 S 两个参数来描述非树枝晶组织。其定义为

$$D = \frac{l_1 + l_2}{2}, S = \frac{l_2}{l_1} \quad (1)$$

式中 l_1, l_2 分别表示非树枝晶组织初生相颗粒的长度(长轴)和宽度(短轴); D 表示颗粒平均直径, 反映非树枝晶组织颗粒的大小; S 为形状因子, 反映非树枝晶颗粒接近理想球状的程度。 $S = 1$ 时, 长轴与短轴相等, 表示颗粒为球状, 最为理想; S 数值越小, 颗粒越不圆整, 越接近枝晶组织。

1.2 实验装置、工艺流程及实验方法

实验在自制的电磁搅拌静态浇注系统上进行。该系统主要包括结晶器、电磁搅拌器、电源变压器、温度记录装置和冷却系统^[11]。结晶器内水平旋转磁场的强度连续可调, 经 CT3-A 型特斯拉计测量, 结晶器内最大磁感应强度为 0.1 T。通过调节冷却水水压、流量以及结晶器的结构(改变其传热特性), 控制合金的凝固速度。

以工业上应用极为广泛的 ZL101A 铝合金为研究对象, 在中频感应炉中熔化并进行常规变质、除气和精炼处理。浇注前装配整个系统, 在结晶器腔体中部安装热电偶, 连接 X-Y 记录仪。浇注后, 开启冷却水系统, 启动电磁搅拌器, 调节至设定强度, 使合金在电磁搅拌作用下冷却凝固, 得到非树枝晶组织。

在整个铸锭的中部即安装热电偶的部位取样, 试样经打磨抛光, 用 HF 溶液腐蚀后作金相分析。

2 结果与讨论

2.1 磁感应强度对非树枝晶铝合金组织影响的定量表述

对在不同电磁搅拌强度作用下得到的非树枝晶组织作金相分析, 每个样品取 6 个视场, 每个视场在不同位置测量 6 次, 得出磁场强度与非树枝晶组织平均尺寸 D 和非树枝晶颗粒形状因子 S 的关系, 列于表 1。从表中可见, 在磁感应强度小于 0.1 T 的条件下, 增大电磁搅拌强度对于非树枝晶组织的细化和球化是单调有利的。

表 1 磁感应强度与非树枝晶组织参数的关系

Table 1 Effect of magnetic induction on average size and shape factor of non-dendritic structure

B/T	$D/\mu\text{m}$	S
0.065	155	0.54
0.072	133	0.62
0.075	131	0.64
0.09	103	0.68

$B-D, B-S$ 的关系经拟合后, 得出数学表达式为

$$D = 5.2283B^{-1.2378}, \text{ 即 } D = aB^{-n} \quad (2)$$

$$S = 0.4372 \ln B + 1.7552, \text{ 即 } S = A \ln B + C \quad (3)$$

即随着电磁搅拌磁场强度的增加, 非树枝晶组织平均尺寸呈乘方关系减小; 而非树枝晶组织形状因子呈对数关系增加, 最终趋近于 1。

2.2 冷却速度与非树枝晶组织参数的数学关系

对在一定电磁搅拌作用下, 由不同凝固条件得到的非树枝晶合金组织(如图 2 所示)作金相分析和数学处理, 得到不同冷却速度(固相线以上温度区域的冷却速度)条件下, 初生相颗粒平均直径值和形状因子值, 列于表 2。表 2 显示, 随着冷却速度(v)的增加, 初生相颗粒平均尺寸减小, 而形状因子也减小, 即组织向枝晶化方向发展。

对表 2 数据进行数学拟合处理, 得出 $v-D, v-S$ 的关系式为

$$D = 79.454v^{-0.1466}, \text{ 即 } D = av^{-n} \quad (4)$$

$$S = 0.831 \ln(v) + 0.5301,$$

$$\text{即 } S = A \ln\left(\frac{1}{v}\right) + C \quad (5)$$

对于常规凝固过程所得到的结晶组织, 一般采用枝晶间距, 如一次、二次或高次枝晶间距来衡量凝固条件对枝晶结构的影响。研究表明, 在大多数具有柱状和等轴状结构的合金中, 一次、二次枝晶臂间距(d)取决于热梯度和生长速度的乘积, 即取决于冷却速度。在枝晶臂间距和冷却速度之间存在着下列关系式:

$$d = bv^{-n} \quad (6)$$

式中 指数 n 的数值对于二次枝晶间距为 $1/3 \sim 1/2$; 对于一次枝晶间距一般非常接近于 $1/2$ 。

比较式(4)和(6)可见, 非树枝晶组织的 $v-D$ 关系与树枝晶枝晶间距与冷却速度的数学表达式, 虽然 D, d 两者的含义不同, 但在形式上是一致

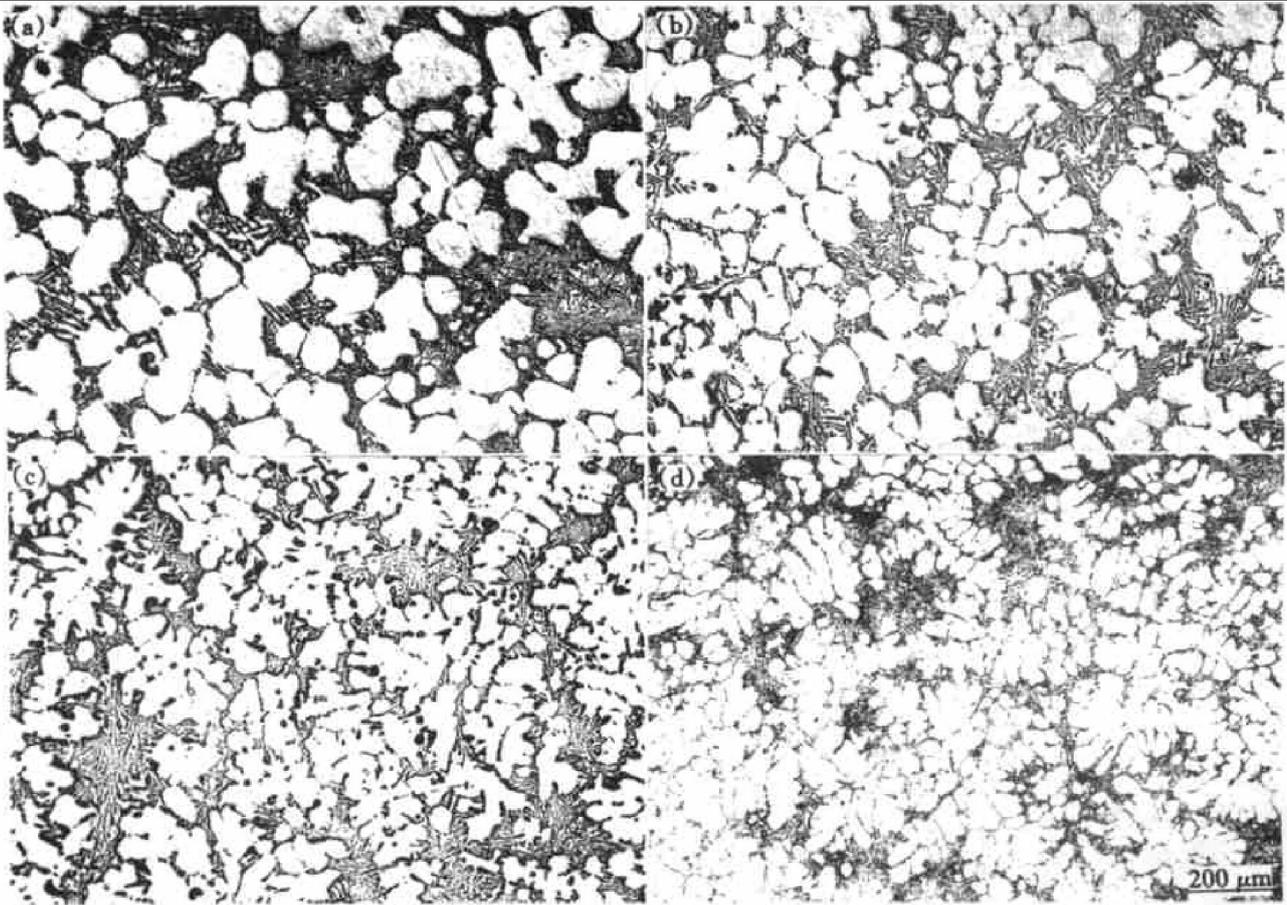


图2 冷却速率对合金组织形貌的影响

Fig. 2 Effect of cooling rate on non-dendritic microstructure

(a) $-v = 0.07 \text{ } ^\circ\text{C/s}$; (b) $-v = 0.3 \text{ } ^\circ\text{C/s}$; (c) $-v = 0.62 \text{ } ^\circ\text{C/s}$; (d) $-v = 1.90 \text{ } ^\circ\text{C/s}$

表2 电磁搅拌作用下冷却速率与非树枝晶组织参数

Table 2 Effect of cooling rate on parameters of non-dendritic structure under electromagnetic stirring

$v / (^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1})$	$D / \mu\text{m}$	S
0.07	118	0.73
0.30	94	0.68
0.62	85	0.55
1.90	73	0.47

的。其区别关键在于指数 n 的不同，在相同的冷却速度下， n 越大，颗粒越粗。单就指数 n 而言，一次枝晶 > 二次枝晶 > 非树枝晶，这也反映了电磁搅拌作用对晶粒的细化作用。

冷却速度与非树枝晶形状因子的数学关系表达了在非树枝晶组织演变过程中，冷却速度对组织形貌的影响。该关系式与现有研究对非树枝晶组织演变过程的认识规律相吻合，即随着冷却速度的降低，初生相颗粒向近球形发展。而这种变化规律可以半定量地表达为随着冷却速度的降低，非树枝晶

组织的形状因子呈对数关系增大，即初生相颗粒以对数增长方式向近球形方向发展。

2.3 电磁搅拌作用下铝合金组织变化的数学描述

影响铝合金结晶组织的主要参数有电磁搅拌强度、冷却速度和搅拌时间。由于搅拌主要在固-液两相区起作用，因而可以认为搅拌时间的影响已经包含在冷却速度之中。因此，对铝合金结晶组织起主导作用的工艺参数是搅拌强度和冷却速度。结合式(2)~(5)，可以得出铝合金在电磁搅拌作用下主要工艺参数对凝固组织变化的数学描述。

如果暂不考虑磁感应强度和冷却速度的交互作用对凝固组织的影响，那么搅拌强度和冷却速度与非树枝晶颗粒平均尺寸的关系可用下式表示：

$$D = \lambda(v + kB)^{-n} \quad (7)$$

式中 λ 为常数， k 为系数， n 为指数。

同样，搅拌强度和冷却速度与非树枝晶颗粒形状因子的关系可用下式表示：

$$S = \lambda_1 \ln\left(\frac{1}{v} + kB\right) + \lambda_2 \quad (8)$$

由此, 可以半定量地理解: 在确定的电磁搅拌强度下, 随着冷却速度的增加, 初生相颗粒平均尺寸按乘方关系减小的同时, 会造成其形状因子按对数关系减小, 即初生相组织向枝晶方向发展; 而要使初生相颗粒圆整, 又势必造成其平均尺寸的增大。同时, 磁感应强度也参与了对非树枝晶组织的影响。在磁感应强度不很大(约小于 0.1 T)的情况下, 随着电磁搅拌强度的提高, 颗粒平均尺寸按乘方关系减小, 而颗粒形状因子则按对数关系增大。即适当加大电磁搅拌强度对形成理想的非树枝晶组织是有利的。

因此, 在采用电磁搅拌方法制备非树枝晶铝合金坯料的工艺过程中, 电磁搅拌强度一定的条件下, 合理选择冷却速度即拉坯速度, 并使其它的工艺参数与之相匹配成为能否得到具有理想非树枝晶组织的连铸坯的关键。

3 结论

1) 电磁搅拌磁感应强度对非树枝晶初生相颗粒平均尺寸和形状因子的影响可表示为 $D = aB^{-n}$, $S = a \ln B + C$, 即在磁感应强度小于 0.1 T 的条件下, 增加磁场强度对细化初生相颗粒、提高颗粒圆整程度是有利的。

2) 电磁搅拌条件下的凝固过程中, 冷却速度对非树枝晶初生相颗粒平均尺寸和形状因子的影响可表示为 $D = av^{-n}$, $S = A \ln(1/v) + C$, 即提高冷却速度虽有利于细化晶粒, 但使初生相颗粒向枝晶方向发展, 不利于形成等轴晶。

3) 如果不考虑磁感应强度和冷却速度的交互作用对凝固组织的影响, 那么磁感应强度和冷却速度对非树枝晶初生相颗粒尺寸和形状因子的综合影响可表示为 $D = \lambda_1(v + kB)^{-n}$, $S = \lambda_1 \ln(\frac{1}{v} + kB) + \lambda_2$ 。

4) 在电磁搅拌强度一定的条件下, 合理选择冷却速度, 并使其它工艺参数与之相匹配成为能否得到具有理想非树枝晶组织的关键。

[REFERENCES]

- [1] Ed Nussbanu A I. Semisolid forming of aluminum and magnesium [J]. Light Metal Age, 1996(6): 6- 22.
- [2] 苏华钦, 朱鸣芳, 高志强. 半固态铸造的现状与发展前景 [J]. 特种铸造及有色金属, 1995(5): 1.
SU Hua-qin, ZHU Ming-fang, GAO Zhi-qiang. Overview and prospect of semisolid casting [J]. J Special Casting and Nonferrous Alloys, 1995(5): 1.
- [3] 张大辉, 毛卫民, 钟雪友. 变形速率对半固态 AlSi7Mg 合金变形性的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2000, 10 (Suppl. 1): 132- 134.
ZHANG Da-hui, MAO Wei-min, ZHONG Xue-you. Effect of deformation rate on deformation behavior of semisolid AlSi7Mg alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(Suppl. 1): 132- 134.
- [4] 史文, 许珞萍, 邵光杰, 等. ZL101A 铝合金半固态连铸坯的组织力学性能 [J]. 金属热处理学报, 2000, 21(1): 40.
SHI Wen, XU Luoping, SHAO Guang-jie, et al. Microstructure and mechanical properties of ZL101A semisolid aluminum alloy by continuous casting [J]. J Transactions of Metal Heat Treatment, 2000, 21(1): 40.
- [5] 杨湘杰, 刘谨, 谢水生. 半固态铝合金触变成形流场的模拟仿真 [J]. 中国有色金属学报, 2000, 10 (Suppl. 1): 145- 149.
YANG Xiang-jie, LIU Jin, XIE Shui-sheng. Simulation of fill status during thixofining of semisolid aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(Suppl. 1): 145- 149.
- [6] 张景新, 张奎, 刘国钧, 等. 电磁搅拌制备半固态非树枝晶组织的形成机制 [J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(4): 511- 514.
ZHANG Jing-xin, ZHANG Kui, LIU Guojun, et al. Formation mechanism of non-dendritic structure in semisolid metals produced by ES process [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(4): 511.
- [7] 罗守靖, 田文彤, 谢水生, 等. 半固态加工技术及应用 [J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(6): 765- 773.
LUO Shou-jing, TIAN Wen-tong, XIE Shui-sheng, et al. Technology and applications of semisolid forming [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(6): 765- 773.
- [8] Flemings M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state [J]. Metall Trans, 1991, 22A: 957.
- [9] Jabrane S, Clement B, Aiersch F. Flemings M C ed. Evolution of primary particle morphology during rheo-processing of Al-5.2% Si alloy [J]. Proc of the 2nd Inter Conf on the Semisolid Processing of Alloys and Composites [C]. Cambridge: Massachuset, 1992. 223.

- [10] 邢书明, 马 静, 陈维视, 等. 半固态亚共晶铝硅合金非树枝晶固相的形成和演变 [J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(Suppl. 1): 270– 274.
XING Shu-ming, MA Jing, CHEN Wei-shi, et al. Formation and evolution of nondendritic solid phase of semisolid Al-Si alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(Suppl. 1): 270– 274.
- [11] Lu G, Cui J, Dong J, et al. Continuous casting of Al alloy 7075 for semisolid forming [A]. 6th Inter Conf Semisolid Processing of Alloys and Composites [C]. Turin, Italy, 2000.
- [12] 朱明原, 史 文, 杨森龙, 等. 电磁搅拌作用对铝合金显微组织的影响 [J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(Suppl. 1): 29– 34.
ZHU Ming-yuan, SHI Wen, YANG Sen-long, et al. Influence of EMS on aluminum alloy microstructure [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(Suppl. 1): 29– 34.

Semi-quantitative mathematical description of evolution of non-dendritic structure of aluminum alloy under electromagnetic stirring condition

XU Luo-ping, SHAO Guang-jie, REN Zhong-ming, ZHU Ming-yuan, SHI Wen
(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

[Abstract] The relationship between the main technological parameters(magnetic induction and cooling rate) and the non-dendritic structure of aluminum alloy produced by electromagnetic stirring was studied. The evolution of the non-dendritic structure was semi-quantitative described, and the semi-quantitative relationship between the magnetic induction and cooling rate and the non-dendritic structure parameters was obtained, which offer the theoretic direction to choose the technological parameters for producing the aluminum alloy with non-dendritic structure.

[Key words] semisolid forming; aluminum alloy; non-dendritic structure; electromagnetic stirring

(编辑 杨 兵)