

文章编号: 1004- 0609(2000) 01- 0047- 04

电磁搅拌法连铸半固态铝合金及其凝固组织分析^①

张 奎, 刘国钧, 徐 骏, 石力开
(北京有色金属研究总院, 北京 100088)

摘 要: 采用电磁搅拌连续铸造装置, 制备具有触变性非枝晶组织的半固态铝合金圆棒。棒料内部组织形貌为具有类圆形轮廓的初生相晶粒浸润在细共晶体中, 与传统的凝固枝晶组织有显著差异。对半固态非枝晶组织的演化机理进行了探讨, 结果表明处于交变电磁场中的金属液体, 可视为导电介质流, 它与磁场交互作用, 在导电介质流中产生彻体力。半固态非枝晶组织是在晶体正常的形核和长大过程中, 受彻体力强烈的混合抑制作用而形成的。

关键词: 连续铸造; 凝固组织; 半固态合金; 转变机制

中图分类号: TG292

文献标识码: A

金属半固态加工技术是一种在合金的液-固两相区直接加工成型的方法。关于半固态金属材料的特性和理论研究始于 1970 年代^[1~ 3], 经过 20 多年的努力, 国外对半固态金属成形 (Semi-Solid Metal Forming) 技术的研究和应用已比较成功^[4, 5]。用半固态成形法 (SSF) 生产零件, 要求合金原材料具有特殊的非树枝晶状显微组织, 熔体搅拌是获得具有这种组织的材料的常用制备方法^[1~ 5]。为了使半固态金属更有利于铸造成形, 首先必须对半固态金属的本构性能作深入研究, 包括对半固态非枝晶组织的工艺变量参数 (如冷却速率、转切频率、动态热梯度变化等)、半固态非枝晶组织结构和形态以及非枝晶组织转变过程等规律的研究。此前, 关于半固态非枝晶的稳态流变、非稳态流变和非枝晶组织的转变行为等方面的研究还不完善。作者在前人对金属半固态加工技术和组织转变机制研究的基础上, 采用电磁搅拌法连续铸造技术^[6, 7], 主要研究了 Al-7%Si 合金半固态制备成型后的组织特点及晶胚生长机制。

1 试验方法

1.1 试验装置的结构

本试验装置通过交变旋转电磁场作用处理金属液体, 可实现连续制备过程。半固态金属材料连续电磁搅拌制备装置由熔体导流装置、熔体温度测控

装置、熔体净化装置和感应线圈系统、连续冷却系统等几部分组成, 各系统工艺参数可实现中央统一控制。

1.2 试验过程

试验选用 Al-7%Si 合金, 其成分见表 1。

表 1 Al-7%Si 合金成分 (质量分数, %)

Table 1 Composition of Al-7%Si alloy (mass fraction, %)

Si	Mg	Cu _{max}	Fe _{max}	Mn _{max}	Zn _{max}	Al
6.5~ 7.5	0.45~ 0.6	0.05	0.15	0.03	0.05	Bal.

为稳定试验过程, 保持导流系统内熔体温度约为 660 ℃, 根据不同的搅拌容器容量和出料口内径, 把旋转磁场同步转速和冷却水流量工艺参数分别控制在 250~ 650 r/min 和 40~ 70 L/min 条件下进行试验。

1.3 组织观察

在所制备棒料的横断面上切取试样, 制成金相样品。观察非稳态条件下半固态非枝晶组织的形貌、组织变化和分布特点。

2 试验结果与分析

2.1 连续制备半固态铝合金工艺过程分析

电磁搅拌技术的突出优点是不用搅拌器, 对合金液体的成分影响小, 搅拌强度易于控制, 适合于

① 基金项目: 国家“863”计划资助项目 715- 009- 0120
作者简介: 张 奎 (1963-), 男, 博士, 高级工程师

收稿日期: 1998- 12- 01; 修订日期: 1999- 03- 19

各种低熔点或高熔点金属的半固态制备。在连续铸造和电磁搅拌过程中, 结晶器中接近于凝固点的金属液体, 可视为导电介质流; 它与磁场交互作用时, 在导电介质流中产生彻体力^[8]:

$$F = [J \cdot B]$$

$$J = \sigma(E + [u, B])$$

式中 J — 电流密度; σ — 介质电导率; u — 介质流动速度; E — 电场强度; B — 磁感应强度。

通过旋转磁场与合金液体间的相互作用, 在合金液中形成必要的水平旋转和切变作用。在同一时间和同一部位, 通过结晶器壁把可控的传导热传到结晶水套导致金属液流在彻体力作用下部分凝固。因此, 采用电磁搅拌连续铸造工艺制备半固态非枝晶组织的合金, 可简单地有效地控制转切搅动频率和凝固放热速率等参数。

图1所示为经电磁搅拌连续制备的部分半固态Al-7%Si铝合金圆棒样品, 图1中, 下部的棒料为 $d80\text{ mm}$, 上部的棒料为 $d60\text{ mm}$ 。试验制备的半固态铝合金棒料直径从 60 mm 到 110 mm , 最大长度达 1.6 m 。

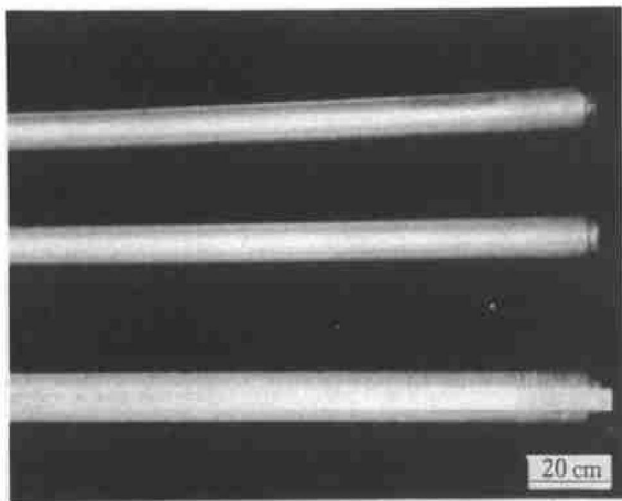


图1 半固态Al-7%Si铝合金圆棒样品

Fig. 1 Semi-solid Al-7%Si alloy cylinder

2.2 连铸半固态铝合金的凝固组织分析

金属液体在电磁搅拌作用下, 虽然熔体内的温度梯度减小, 但由于连续制备半固态合金材料的工艺特点, 使得凝固始终发生在结晶器中液穴界面附近的同一位置, 这与间歇式^[9]电磁搅拌过程中熔体的凝固形式不同。

半固态非枝晶组织的形态(包括颗粒形态、初生相体积分数、分布情况等)受温度变化速率、搅拌频率、半固态连铸速率等很多参变量和因素的影响。对此, 我们曾在间歇式电磁搅拌试验中进行过

研究^[9], 本文不再重述。

图2(a), (b)分别为无电磁搅拌试样和搅拌试样($d60\text{ mm}$)的金相组织。可以看出, 搅拌处理对材料结晶组织形态有显著影响。经电磁搅拌连续制备的半固态铝合金的凝固组织, 初生相结构都形成较均匀的类型或蔷薇花状的非枝晶轮廓, 它们相互独立, 被剩余液体激冷形成的细共晶体完全浸润。其中, 颗粒状白色相为初生 α 相, 初生 α 相的体积分数 $\varphi \approx 60\%$; 深色细片层组织为 $\alpha + \text{Si}$ 共晶。正是由于搅拌与未搅拌合金凝固组织的显著差异, 使得搅拌组织材料在半固态时表现出特殊的流变行为。

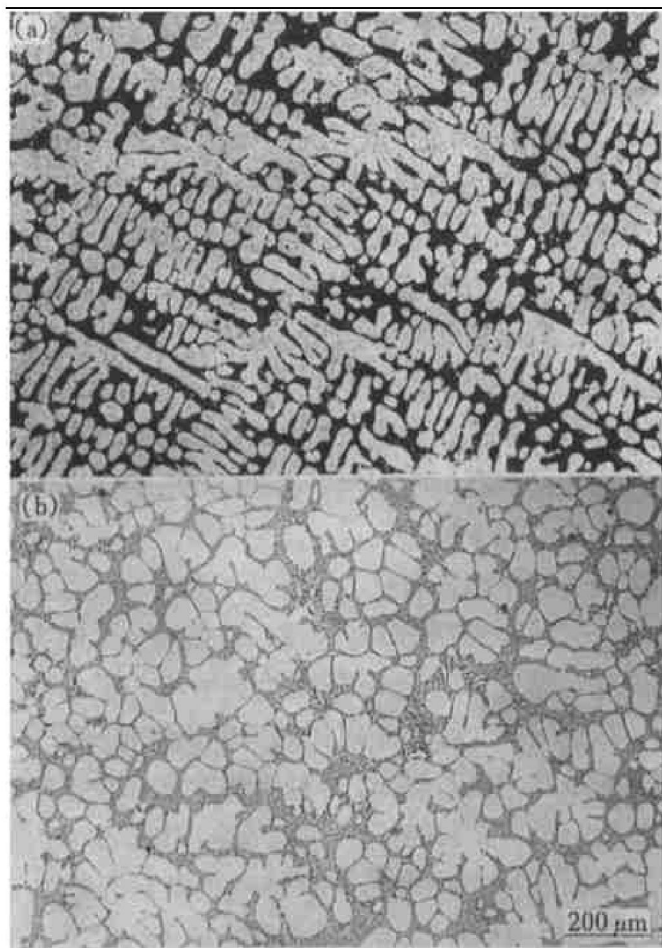


图2 电磁搅拌与未搅拌材料的凝固组织比较

Fig. 2 Comparison between solidification structure of materials prepared with and without magnetic stirring

a) —No stirred sample; (b) —Electromagnetic stirred sample

具有颗粒状非枝晶组织结构的半固态浆料, 在 f_s 为 $40\% \sim 60\%$ 时, 流变理论认为其显示“非线性塑性”。依照Flemings^[3], 多种半固态金属浆料流变行为的本构关系可表示为

$$\eta = \eta(\gamma, f_s, m, s)$$

$$\text{或 } ds/dt = s(\gamma, f_s, m, s)$$

所以, 半固态金属浆料的粘度 η 与流变剪切速率 $\dot{\gamma}$ 、固相分数 f_s 、初生相粒子形状因素 m 及粒子团聚程度因素 s 有关系。一定的固-液相分数下, 初生相粒子越趋于圆滑、分散, 施加的剪切速率越大, 则体系粘度 η 越小。

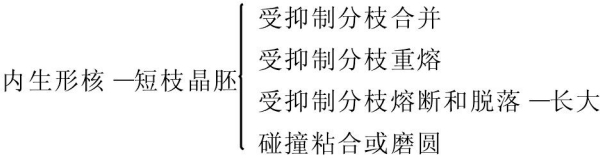
2.3 半固态非枝晶组织的演变机理探讨

半固态非枝晶组织是合金液体在特殊凝固条件下, 正常晶体的形核和长大过程受到强烈的混合抑制而形成的异常组织。

关于熔体搅拌条件下, 半固态非枝晶组织的转变机制, 存在多种观点^[3], 如枝晶弯曲理论、枝晶折断理论、枝晶分离理论等。可是, 搅动并不足以使枝晶折断, 至多是发生弹性或塑性弯曲^[10]。

在搅拌过程中, 由于径向强制扰动和轴向热对流引起金属液体紊流, 使金属液中许多小的热起伏和成分起伏区域同时具备了形核条件。在形核初期, 搅拌引起的紊流作用还降低了熔体中的温度梯度和形核界面处的成分过冷现象, 使正常的初生 α 相晶体树枝状方向的生长状态受到抑制, 生成许多不完全的短枝晶胚。继续施加搅拌, 长大到一定尺寸的短枝晶并不会长成交叉连续的网状, 而是受液流的冲刷、其他晶粒的碰擦及温度和成分起伏的混合抑制作用, 发生三种主要的生长与变化过程: 1) 不完全受抑制分枝合并生长。由于短枝晶的生长没有明显的方向性, 使得二次分枝间距缩小, 直至二次臂完全融合(图 3(a))。2) 受抑短分枝熔化或熔

断单独生长, 起伏的液相中不稳定的小突起熔化或熔断增殖(图 3(b))。3) 晶粒碰撞粘合或碰撞磨圆变化过程(图 3(c))。总之, 半固态非枝晶组织的演化遵循以下途径:



3 结论

1) 处于交变电磁场中的金属液体, 可视为导电介质流。它与磁场交互作用时, 在导电介质流中产生初体力^[8]:

$$F = [j \cdot B]$$

初体力在合金液中形成了必要的水平旋转和切变作用。采用电磁搅拌连续铸造工艺, 可有效地控制制备过程中的转切搅动频率和凝固放热速率等参数。目前, 可制备半固态铝合金棒料的直径范围为 60~110 mm。

2) 在合理的试验工艺参数范围内, 半固态材料的初生 α 相组织为较均匀的一类球形或蔷薇花状非枝晶轮廓, 它们相互独立, 完全浸润在剩余液体激冷形成的细共晶组织之中, 与未搅拌合金的凝固组织形貌迥异。由于这种特殊的组织结构, 使得搅拌组织材料在半固态时表现出特殊的流变行为。

3) 半固态非枝晶组织是合金液体在非正常凝

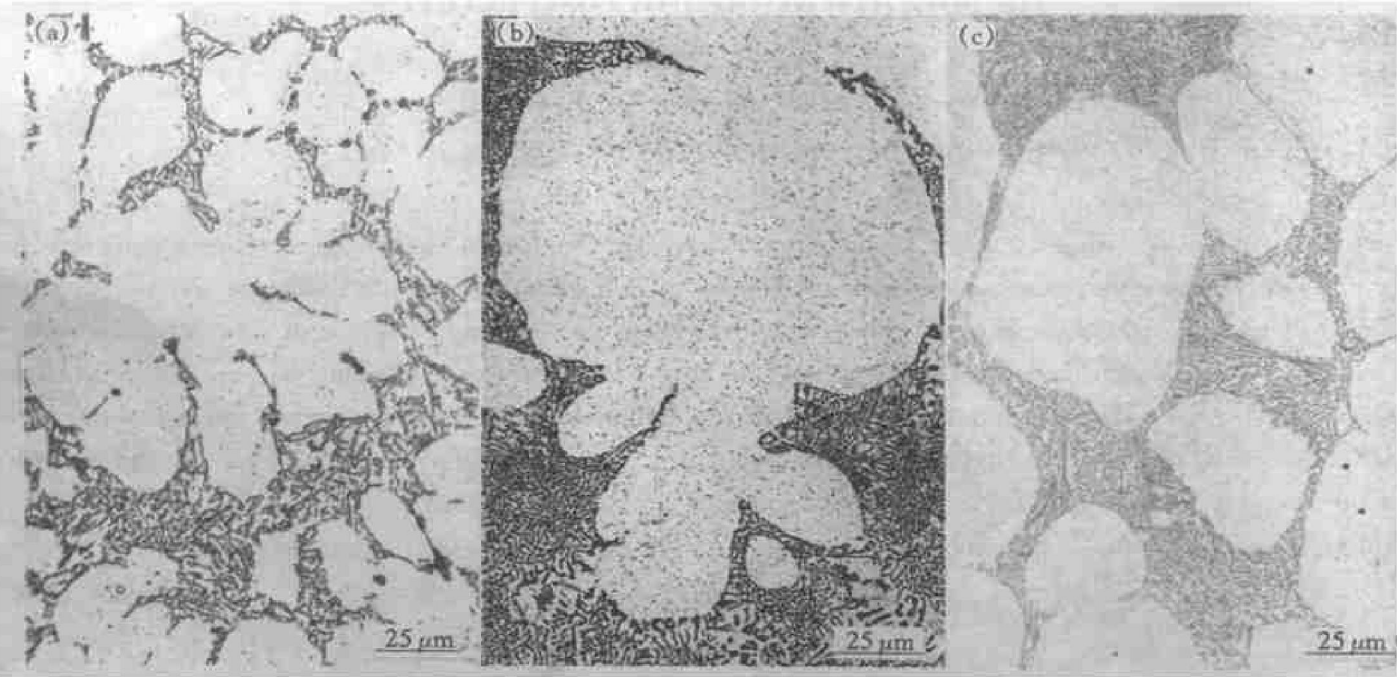


图 3 半固态非枝晶组织的演化机制

Fig. 3 Mechanism of semisolid rheological structure

(a) —Branched grain merged; (b) —Melt or fusing; (c) —Merged or polished by impacting

固条件下(如施加搅拌),在正常的晶体形核和长大过程中,受到液流的冲刷、其他晶粒的碰擦及温度和成分起伏的混合抑制作用,经过不完全受抑制分枝合并生长,受抑短分枝熔化或熔断单独生长和晶粒碰撞粘合及磨圆三个主要过程转变形成的。

REFERENCES

- [1] Kirkwood D H and Kapranos P. Semisolid processing of alloys [J]. *Metals and Materials*, 1988, 11(2): 16~ 20.
- [2] Flemings M C, Riek R G and Young K P. The rheology of a partially solid alloy [J]. *Metallurgical Transactions*, 1972, 17(3): 1925~ 1932.
- [3] Flemings M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state [J]. *Metallurgical Transactions*, 1991, 22B(6): 269~ 291.
- [4] Chiarmetta G. Thixoforming of automobile components [A]. In: Kirkwood D H and Kapranos P eds. *Proceedings of the 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites* [C]. Sheffield: The University of Sheffield, 1996. 204~ 207.
- [5] Nakada Masayuki, Shiohara Yuh and Flemings M C. Semisolid processing of copper alloys for electric motor components [J]. *ISIJ International*, 1990, 30(1): 27~ 33.
- [6] Koop R, Mertens H P and Bremer T. A new collaborated research center at the RWTH Aachen: Thixoforming of metals in the semisolid state and their properties [A]. In: Kirkwood D H and Kapranos P eds. *Proceedings of the 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites* [C]. Sheffield: The University of Sheffield, 1996. 262~ 268.
- [7] Nussbaum A I. Semisolid forming of aluminium and magnesium [J]. *Light Metal Age*, 1996, 10(6): 6~ 22.
- [8] JIANG Zhang-yan(蒋章焰), HE Wen-xin(何文欣) and WANG Chuan-yuan(王传院). *Thermophysics Similary Analysis(热物理学相似分析)* [M]. Beijing: Science press, 1987: 212~ 215.
- [9] ZHANG Kui(张奎), LIU Guo-jun(刘国钧), ZHANG Yong-zhong(张永忠), *et al.* Al-7Si 合金的半固态制备工艺及微观组织研究 [J]. *Chinese Journal of Rare Metals(稀有金属)*, 1998, V22(Suppl): 333~ 336.
- [10] Hellawell A. Grain evolution in conventional and rheocastings [A]. In: Kirkwood D H and Kapranos P eds. *Proceedings of the 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites* [C]. Sheffield: The University of Sheffield, 1996. 19~ 21.

Semi-solid Al-7%Si alloy prepared by electromagnetic stirring continuous casting technology and its solidification microstructures

ZHANG Kui, LIU Guo-jun, XU Jun, SHI Li-kai

General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, P. R. China

Abstract Experiments on semisolid slurry forming were carried out by practical electromagnetic stirring-continuous casting method. Through optimizing the processing parameters, semisolid Al-7%Si alloy cylinders with thixotropic non-dendritic structures were successfully produced. The diameter of the cylinder is in the range of 60~ 110 mm. The original phase crystalline grains with roundish configuration are merged in fine eutectic crystal, and this kind of microstructure is apparently different from conventional solidification crystal structure. The forming mechanism of the semisolid rheological non-dendritic structures was discussed, the results show that the semisolid non-dendritic structures are resulted from the strong restraint of normal crystal nucleation and growth in the semisolid process.

Key words: continuous casting; solidification microstructure; semisolid alloys; transform mechanism

(编辑 张曾荣)