

特约专栏

强制均匀凝固组织精确控制技术

徐 骏

(北京有色金属研究总院, 北京 100088)

摘 要: 针对合金熔体, 尤其是大体积合金熔体凝固组织存在的晶粒粗大、成分偏析、组织不均匀和目前传统电磁搅拌存在的趋肤效应问题, 提出了实现大体积合金熔体凝固组织细化、均匀化的新思路 and 环缝式电磁搅拌制备新方法, 并对其技术原理做了深入研究和分析。研究结果表明: 与常规电磁搅拌技术相比, 环缝式电磁搅拌技术可使合金熔体获得较大的剪切速率, 有利于获得更加均匀的温度场和成分场, 得到的合金熔体温度梯度小, 温度场分布均匀, 初生相组织细小、形貌圆整、分布均匀; 环缝式电磁搅拌技术连铸过程中的温度梯度减小, 温度场更为均匀, 可流变铸造出表面质量好, 初生相组织细小、分布均匀的半固态坯料。

关键词: 强制均匀; 凝固组织; 精确控制

中图分类号: TG244⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2010)11-0026-05

A Method to Precisely Control Uniform Solidification Microstructure

XU Jun

(General Research Institute for Non-Ferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: Aim to overcome the shortcomings, such as the coarse microstructure, composition segregation, non-uniform microstructure distribution existing in the solidification microstructure of melt especially for large volume melt and skin effect. A novel method to precisely control uniform solidification microstructure, the novel Annulus Electromagnetic Stirring(AEMS) method has been exploited and studied. the results show that AEMS is advantageous to obtain the bigger shear rate and uniform temperature and composition, and the little temperature grade and uniform temperature may be obtained. the microstructure in AEMS is fine, spherical and distribute homogeneously. Moreover the little temperature grade and more uniform temperature may be obtain in the direct chill continuous casting of AEMS and the semisolid billet with good surface quality, fine and spherical microstructure has been obtained.

Key words: mandatory uniform; solidification microstructure; precise control

1 前 言

凝固组织的细化、均匀化是提高金属材料性能和品质的关键环节, 是实现金属材料短流程近终形成形加工的技术基础。但是受金属材料固有的凝固特性限制, 组织通常呈现“三晶带”的分布特点, 存在晶粒粗大、成分偏析、组织不均匀等问题, 对大体积合金熔体凝固而言尤为明显。针对这个科学问题, 国内外均尝试采用施加外场干预合金熔体的凝固过程, 使合金熔体获得均匀的温度场和成分场, 从而实现对合金熔体凝固组织的精确控制, 获得细小均匀的凝固组织, 为此提出和应用了许多新的方法和技术^[1-7]。其中, 由于电磁搅拌法具有

非接触性、可实现精确控制、容易与大工业生产对接等优点, 所以率先实现产业化并获得较为广泛的商业应用^[1-3]。但是传统的电磁搅拌制备技术仍存在组织偏大、分布不均、坯料尺寸受限等问题, 一直是阻碍其应用的关键环节。针对这个问题, 国内外均在这方面进行了较为深入的研究和开发, 以期能够实现大体积合金熔体凝固组织细化、均匀化。

围绕上述目标, 在国家“973”计划和其他科技计划多年的支持下, 北京有色金属研究总院在充分借鉴国外先进凝固理论技术和自己研究成果的基础上, 提出了实现大体积合金熔体强制均匀凝固组织细化、均匀化的新思路, 即“熔体分散-汇聚-整体控制凝固”的技术思路。主要技术思路是将大体积的合金熔体分散成小体积的合金熔体, 小体积的合金熔体在外场作用下实现温度场和成分场的均匀化, 然后小体积合金熔体再汇聚成大体积合金熔体。在该技术思路的基础上, 开发了环缝式

电磁搅拌制浆新技术^[8]。为合金熔体凝固组织的细化、均匀化，尤其是大体积合金熔体凝固组织的细化和均匀化提供了有利的技术保障。

2 环缝式电磁搅拌技术

图 1 是环缝式电磁搅拌制浆原理示意图。与传统电磁搅拌的区别在于，在制浆室的中心设置内部冷却器，冷却器与制浆室共同形成环形缝隙，大体积的合金熔体导入环形缝隙变成小体积的合金熔体，受到强烈的电磁搅拌剪切处理。熔体在内外共同冷却和电磁搅拌的共同作用实现合金熔体的强制均匀凝固，得到细小均匀的非枝晶组织浆料，然后这些小体积的浆料再汇聚成大体积的合金浆料进行流变成形加工，这样可以克服传统电磁搅拌制备过程中由于趋肤效应导致的电磁搅拌力分布不均匀造成的温度场成分场不均匀的问题，可实现大体积合金熔体的强制均匀凝固。该方法也极易与传统的连铸工艺、压铸工艺、铸轧工艺等相结合，可以显著缩短工艺流程，为大体积金属制品的近终成形提供有力的技术保障。

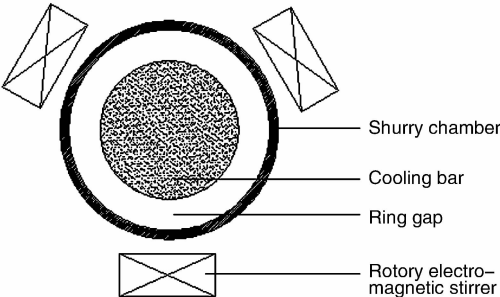


图 1 环缝式电磁搅拌原理示意图。

Fig. 1 Schematic diagram of annulus electromagnetic stirring

2. 1 常规电磁搅拌获得的温度场及组织分布

在传统的电磁搅拌过程中，由于电磁感应趋肤效应的存在，使不同位置的合金熔体受到的电磁搅拌力是不一样的，熔体边缘受到的搅拌力大，而内部小，这样导致合金熔体的温度场和成分场存在较为明显的差别，图 2 和图 3 是采用 ANSYS 软件模拟的在电源频率 10 Hz，搅拌器名义输入电流 50 A，坩埚内直径为 80 mm 条件下，熔体中磁感应强度的分布情况和 A357 铝合金熔体横断面温度分布情况^[9]。

从图 2 可以看出，磁感应强度在熔体中的分布是不均匀的，熔体边部由于靠近感应线圈，因此磁感应强度最高，熔体心部最低。即熔体边部受到的电磁力最大，而心部最小，这会导致熔体温度场的分布不均匀，如图 3 所示。在熔体内部形成了一个从熔体心部到边部温度

不断降低的温度梯度，熔体边部和坩埚进行热传导，温度下降快，为 600 ℃，铝合金熔体内部的热量传输主要由搅拌处理所带来的熔体传质来完成，熔体中心电磁力小，搅拌效果差，温度降低慢，为 628 ℃，熔体边部和心部温度梯度达到 28 ℃，温度场分布不均匀。而温度差的不均匀会导致最终的凝固组织出现不均匀，组织粗大且形貌也较差^[10]，如图 4 所示。而且随着熔体横断面尺寸的加大，趋肤效应将更加明显，虽然熔体边部搅拌强度最大，但是熔体内部的搅拌力更小，熔体中心甚至受不到电磁搅拌力，温度场的不均匀性将更加明显。因此，这也是影响电磁搅拌方法进一步发展的阻力，也是目前生产的半固态坯料直径难以突破 150 mm 的原因所在。

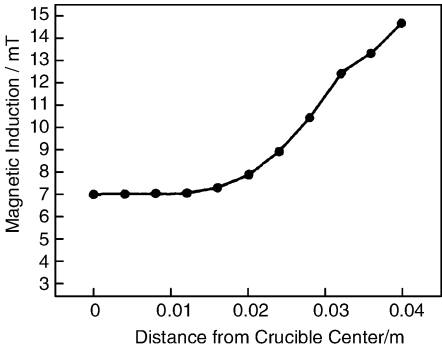


图 2 熔体中磁感应强度的分布

Fig. 2 Distribution of magnetic Induction in melt

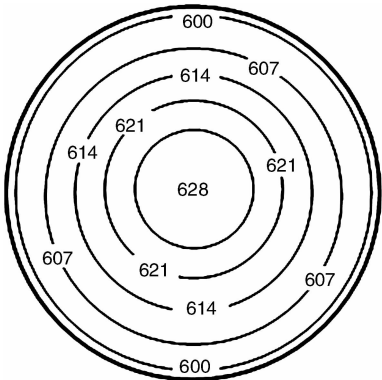


图 3 熔体中温度场分布

Fig. 3 Temperature distribution in melt

2. 2 环缝式电磁搅拌获得的温度场及组织分布

图 5 所示是环缝式电磁搅拌条件下获得的熔体温度场的分布情况^[7]，模拟采用的参数与图 3 中相同，内部冷却棒是 $\phi 40$ mm 的室温石墨棒。

从图 5 可以看出，在环缝式电磁搅拌装置中，石墨冷却器的加入起到了局部激冷的作用，形成一个熔体边部到冷却器壁温度逐渐降低的温度场，温度梯度与图 3

所示的普通电磁搅拌装置的温度梯度相比减小很多，熔体中温度梯度不超过 5℃，这样的温度分布，有利于在金属熔体中同时形核，获得组织均匀的半固态浆料。图 6 是环缝式电磁搅拌获得的浆料组织分布，从图中可以看出，获得的浆料组织与图 4 所示常规电磁搅拌相比，初生铝组织细小，形貌圆整，分布均匀。

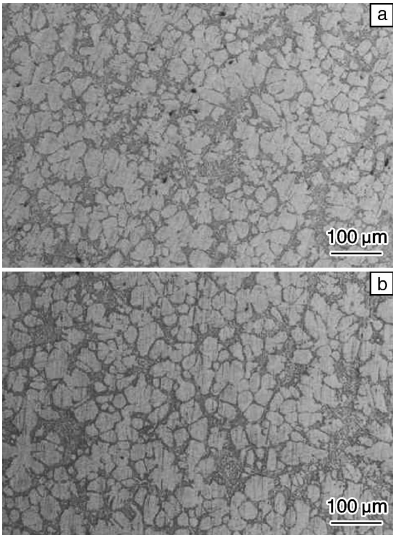


图 4 常规电磁搅拌得到的浆料组织：(a) 边部，(b) 心部
Fig. 4 Structure of slurry prepared by conventional electromagnetic stirring: (a) edge and (b) center

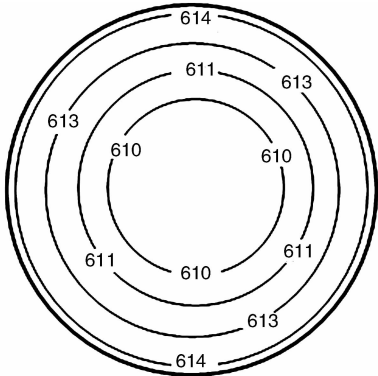


图 5 环缝式电磁搅拌装置中温度场分布
Fig. 5 Temperature distribution in annulus electromagnetic stirring device

2.3 理论分析

在本质上，常规电磁搅拌和环缝式电磁搅拌没有明显的区别，二者均是采用电磁搅拌作为外力场对熔体进行搅拌，使合金熔体凝固得到初生非枝晶组织的过程。但是二者对铝合金熔体的搅拌效果和散热效果却存在明显的区别，直接导致了熔体温度场和成分场的不同，造成熔体形核出现时间上和空间上的差异，最终导致得到

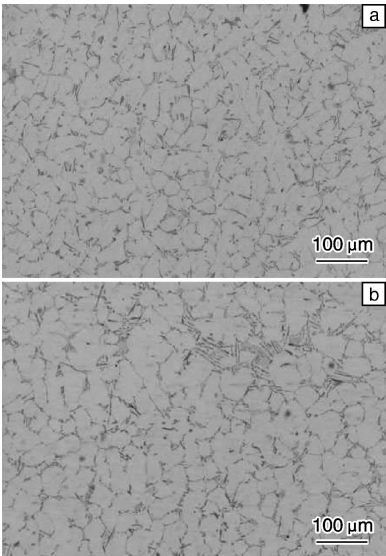


图 6 环缝式电磁搅拌得到的浆料组织：(a) 边部，(b) 心部
Fig. 6 Structure of slurry prepared by annulus electromagnetic stirring: (a) edge and (b) center

的半固态合金浆料组织不同。环形缝隙的设置导致搅拌力和搅拌强度的不同是常规电磁搅拌和环缝式电磁搅拌技术的主要不同之处，最终影响了熔体温度场和成分场的分布，导致二者获得的半固态浆料组织出现明显的不同。

在常规电磁搅拌中，由于电磁感应趋肤效应的存在，合金熔体的边部和心部受到的力不同。合金熔体边部受到的电磁搅拌力大，搅拌强度大；而在合金熔体的心部，受到的电磁搅拌力小，搅拌强度小，因此温度场均匀性较差，这从图 2 中可以看出。而对环缝式电磁搅拌技术而言，虽然也是电磁搅拌，也改变不了电磁感应的趋肤效应，但却改变了熔体的有效搅拌区域。熔体的温度梯度减小(如图 5 所示)，温度场的分布较为均匀。

此外，环缝的设置导致熔体受到的搅拌强度明显不同。根据 Spancer 的计算方法^[2]，合金熔体受到的平均剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的计算公式如式(1)所示：

$$\dot{\gamma} = \frac{2\omega Rr}{R^2 - r^2} = \frac{2Rr}{R^2 - r^2} \cdot \frac{2\pi n}{60} = \frac{2(\frac{r}{R})}{1 - (\frac{r}{R})^2} \cdot \frac{2\pi n}{60} \quad (1)$$

式中， R - 制浆室内径， r - 内部冷却棒外径， n - 旋转磁场每分钟的转速。

从式(1)可知，当 r 为 0 时， $r/R = 0$ ，平均剪切强度 $\dot{\gamma} = 0$ ；即制浆室内不设置内部棒，也即为常规电磁搅拌，合金熔体获得的剪切速率 $\dot{\gamma}$ 最小。而随着 r/R 增大时，即环形缝隙相对宽度越小时，则合金熔体获得的剪切强度在急剧增加， r/R 为 1 时，即处于极限(没有缝隙)，平均剪切速率 $\dot{\gamma}$ 为无穷大。图 7 是在电源频率为

50Hz，搅拌器磁极为 1 对级的情况下制浆室内径和内部冷却棒外径 r/R 相对系数对剪切速率的影响规律。从图 7 可以看出，在环缝式电磁搅拌技术条件下，随着 r/R 的增大， $\dot{\gamma}$ 在急剧增加。当 $r/R=0.9$ ，也即环缝宽度为制浆室内径的 10% 时，合金熔体受到的平均剪切速率将达到近 3 000，剪切速率很大。剪切速率的大小是半固态浆料制备过程中的一个关键参数，对半固态组织的形成过程影响较大。较大的剪切速率加强了熔体的搅动和热量的传输，可使温度场更加均匀，同时熔体的剧烈搅动减薄了树枝晶周围的热扩散层和溶质扩散边界层的厚度，减小了成分过冷，抑制了树枝晶的生长。此外，较大的剪切速率有利于促进枝晶的破碎和组织的熟化，增大初生相组织之间的碰撞作用，促进晶粒形貌的圆整和细化。Fan^[4] 教授等在研究双螺旋机械搅拌流变射铸过程中认为高剪切速率或高强度的紊流增加了形核的有效性，促进在整个搅拌区形核，可以显著提高存留下来的晶核数量，细化晶粒组织，促使球状晶粒生长。

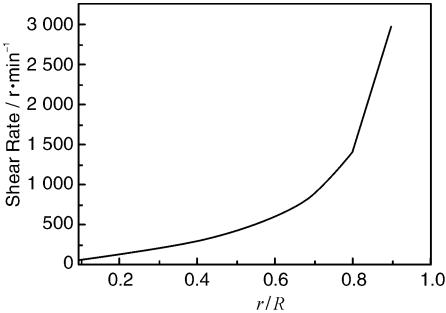


图 7 制浆室内径和内部冷却棒外径 r/R 相对系数对剪切速率的影响规律。
Fig. 7 Effect of relative coefficient r/R of slurry chamber inside diameter and diameter of infemal cooling rods on shear raet

3 环缝式电磁搅拌流变铸造

将环缝式电磁搅拌与流变铸造技术相结合生产品质的大尺寸铝合金棒料是该技术的发展方向之一。本节对环缝式电磁搅拌流变铸造过程进行了初步的研究，并与传统的电磁搅拌流变铸造过程做了对比分析。

3.1 模拟分析

如图 8 所示的是在搅拌频率 25 Hz，熔体浇注温度为 973 K，连铸速度为 2.6 m/s，搅拌器输入电流为 35 A，合金熔体为 A319 铝合金的情况下传统电磁搅拌和环缝式电磁搅拌连铸过程温度场的分布。图 8 结果表明：采用环缝式电磁搅拌可使半固态合金熔体横截面径向温度梯度减小，连铸过程产生的液穴深度变小，有利于合金熔体温度场的均匀化和生产优质的坯料。

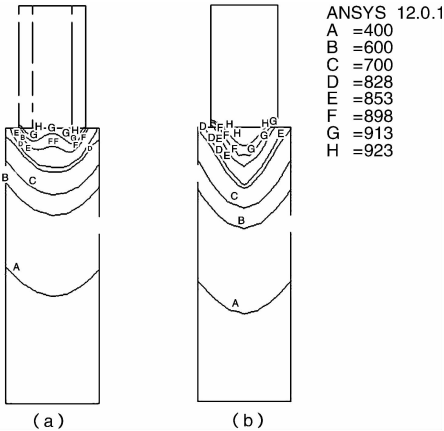


图 8 常规电磁搅拌和环缝式电磁搅拌连铸过程中温度场分布：(a) 环缝式电磁搅拌，(b) 常规电磁搅拌
Fig. 8 Temperature distribution in continuous casting process of conventional and annulus electromagnetic stirring: (a) annulus and (b) conventional

3.2 连铸结果及组织分析

图 9 和图 10 所示是采用如图 8 所示的工艺制作的半固态 A319 铝合金坯料及其组织。从图中可以看出，坯料表面质量好、组织细小、分布均匀，说明了环缝式电磁搅拌流变铸造在制备优质合金坯料的可行性和有效性。



图 9 环缝式电磁搅拌制备的 A319 铝合金坯料
Fig. 9 A319 alloy billet prepared by annulus electromagnetic stirring

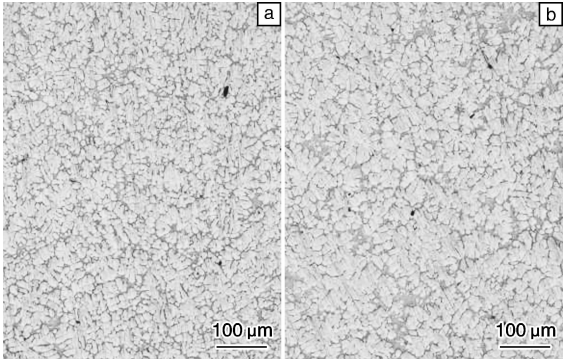


图 10 获得的半固态 A319 铝合金坯料组织分布：(a) 边部，(b) 心部
Fig. 10 Structure of semi-solid A319 allay billet: (a) edge and (b) center

4 结 论

(1)与常规电磁搅拌技术相比，环缝式电磁搅拌技术得到的合金熔体温度梯度小，温度场分布均匀，初生相组织细小、形貌圆整、分布均匀。

(2)环缝式电磁搅拌技术可使合金熔体获得较大的剪切速率，有利于获得更加均匀的温度场和成分场。

(3)与常规电磁搅拌流变铸造相比，环缝式电磁搅拌技术连铸过程中的温度梯度减小，温度场更为均匀，可流变铸造出表面质量好、初生相组织细小、分布均匀的半固态坯料。

参考文献 References

[1] Widdowson R, Marr H S. *Processing of Interational Conference on Solidification*[C]. *Sheffield UK: University of Sheffield*, 1977: 547 – 552.

[2] Spencer D, Flemings M C. Rheological Behavior of Sn – 15% Pb in the Crystallization Range [J], *Metal Trans*, 1972, 3(7): 1 925 – 1 932.

[3] Flemings M C. Behavior of Metal Alloys in the Semi – Solid State [J]. *Metal Trans*, 1991, 22A(5): 957 – 981.

[4] Fan Z. Semi – Solid Metal Processing[J]. *International Materials Reviews*, 2002, 47(2): 1 – 37.

[5] Wang K K, Pengs Hs, Wang N, *et al.* *Method and Apparatus for Injection Molding of Semi – Solid Metals*: US, Patent 55501266 [P]. 1996.

[6] Kaufmann H, Wabusseg H and Uggowitzer P J. Metallurgical and Processing Aspects of the NRC Semi – Solid Casting Technology [J]. *Aluminum*, 2000, 76(1/2): 70 – 75.

[7] Yurko J, Flemings M C, Martinez. R A. Semi – Solid Rheocasting (SSR)—Increasing the Capabilities of Die Casting [J]. *Die Casting Engineer*, 2004, 48(1): 50 – 52.

[8] Xu Jun(徐 骏), Zhang Zhifeng(张志峰), Bai Yuelong(白月龙), *et al.* *A Ilevice of Preparing Semi – setid Alloy Slurry or Billet* (一种制备半固态合金浆料或坯料的装置): China, 200810116181[P]. 9. 2008.

[9] Chen Xingrun(陈兴润). *Numerical Simulatio of Annulus Electro-magnetic Stirring*(环缝式电磁搅拌制备过程的数值模拟)[D]. Beijing: General Research Institute for Non – Ferrous Metals, 2010.

[10] Bai Yuelong, Xu Jun, Zhang Zhifeng, *et al.* The Research on the Annulus Electromagnetic Stirring for Preparing the Semisolid A357 Aluminum Alloy Slurry [J]. *Transactions of Nonferrous Metals So-ciety of China*, 2009, 19(5): 1 078 – 1 082.



中国建筑材料科学研究总院绿色建筑材料国家
重点实验室大楼落成

2010 年 11 月 2 日上午，中国建筑材料科学研究总院隆重举行绿色建筑材料国家重点实验室落成暨检验认证大楼和军工楼奠基庆典仪式，科技部高新司副司长刘久贵，中国建材集团董事长宋志平，中国建材集团外部董事姜均露、曹德生、王振侯，中国工程院院士顾真安，中国建材联合会副会长兼秘书长孙铁石等出席了庆典仪式。庆典仪式由中国建筑材料科学研究集团总经理、中国建筑材料科学研究总院院长姚燕主持。

绿色建筑材料国家重点实验室是国家批准的首批企业国家重点实验室之一，将推动我国在绿色建材领域形成具有自主知识产权的共性关键技术、前瞻性和前沿性技术。实验室大楼建设采用了 10 多项节能环保材料新技术及产品，实现了经济与环保的双重功效。

刘久贵在讲话时指出，随着社会的发展进步，对节能环保的绿色建筑材料的需求越来越迫切，党和国家领导人也非常关注建筑节能。他希望总院进一步完善绿色建筑材料国家重点实验室的运行机制，加强在绿色建筑材料基础性、共性技术的开发，引领科技发展；加强与企业、地方和产业下游的结合，走联合开放的发展道路；加强人才队伍建设和培养，力争培养出一批领军人才和能独挡一面的行业科技骨干。

宋志平表示，绿色建材国家重点实验室落成暨检验认证大楼和军工楼奠基，既是中国建筑材料科学研究总院不断增强科研实力，打造国际一流科研机构的需要，也是中国建材集团提升自主创新能力、增强国际竞争力、履行社会责任、追求绿色成长，并为推动我国建材工业加快转变经济发展方式迈出的重要一步。希望总院在 60 周年新的起点上加倍努力，以科学发展观为指导，贯彻十七届五中全会精神，牢牢把握发展机遇，充分利用科技资源，多出新技术、新成果，不断提升核心竞争力，实现更好更快的发展，为集团和行业发展做出新的更大的贡献。

中国建材集团有关部门负责人、中国建材总院领导及部门负责人、相关技术人员共 100 余人参加了庆典仪式。

(本刊通讯员)