

# 旋转电磁场作用下金属凝固补缩机理探讨

## Research on Feeding Mechanism during Metal Solidification under Rotating Electromagnetic Field

王晓东, 李廷举, 金俊泽 (大连理工大学, 大连 116024)

WANG Xiao-dong, LI Ting-ju, JIN Jun-ze

(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**摘要:** 研究了金属熔体在旋转电磁场作用下的凝固过程。据金属凝固理论和磁流体力学分析, 电磁搅拌力引起的动量对流对补缩的促进作用并不大。旋转电磁场阻碍中心疏松、缩孔形成的机制为: 电磁力引起的动量对流增强了熔体的热、质传输过程, 使熔体温度分布更趋均匀, 温度梯度减小, 使心部熔体的固相率更趋一致且在短时内增至特征固相分数, 且凝固末期熔体的凝固速率增大, 使心部熔体在短时内凝固, 从而避免了中心疏松、缩孔的形成。

**关键词:** 旋转电磁场 (REMF); 电磁搅拌; 补缩; 金属凝固

**中图分类号:** TG21<sup>+</sup>4    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381 (2001) 11-0003-03

**Abstract:** Solidification process of the melt with electromagnetic field action was studied. Based on theory analysis of metal solidification and hydrodynamics, momentum convection generated by rotating electromagnetic field do not improve feeding obviously. Mechanism of counteraction of center shrinkage cavities formed by electromagnetic force is heat and mass transport which is increased by momentum convection, temperature tends to be well distributed, and temperature gradient in radial direction decrease, solid phase ratio of melt in the center portion increase to the characteristic one in a short time, and solidifying velocity increases at the last stage of solidification. The center portion of melt is solidified quickly, so the forming of center shrinkage cavities is counteracted.

**Key words:** rotating electromagnetic field; electromagnetic stirring; feeding; metal solidification

连铸末端金属凝固时, 熔体的温度低, 粘度大, 致使心部熔体的补缩阻力很大, 往往形成中心疏松、缩孔, 造成组织缺陷。连铸铸坯的生产是一个连续过程, 若补缩能力不足, 导致补缩通道堵塞, 在中心将产生连续的疏松、缩孔, 严重影响铸坯的质量。铸坯心部熔体的凝固处于连铸末端, 仅依靠重力往往不能满足补缩的要求。凝固末端电磁搅拌对改善铸坯中心疏松有明显效果<sup>[1, 2]</sup>, 本文通过实验分析了电磁驱动力对金属心部熔体凝固过程中传质、传热的影响, 探讨了电磁场作用下连铸的补缩机理。

## 1 实验方法

图 1 为实验装置的示意图。不锈钢铸型上端内径为 40mm, 下端内径为 50mm, 外径为 100mm, 高为 200mm。采用 Sn+3.5%Pb 合金作为实验材料, 其物性参数均与钢液的相近。在距铸坯底端 100mm 处水平面内从中心沿半径方向间隔 10mm 均布 5 支热电偶。实验时, 将铸型置入电磁搅拌装置内, 向铸型内浇注 240 的金属液, 分别在施加和未施加电磁场

条件下考察铸坯的凝固情况, 并测量其温度分布; 从熔体倒入铸型内开始计时, 分别在凝固 5s、10s、20s 和 40s 时提拉铸型, 未凝固的熔体自动流下, 得到固体坯壳, 并测量坯壳的厚度。

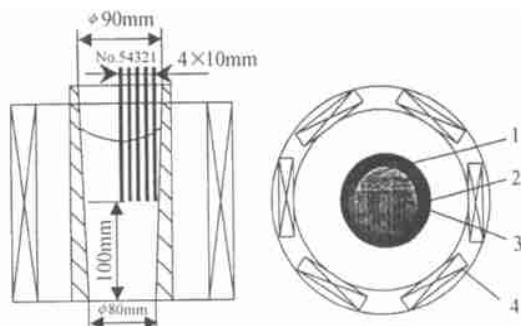


图 1 电磁搅拌装置示意图

Fig. 1 Schematic of electromagnetic stirring apparatus  
1-melt; 2-mold; 3-thermocouple; 4-electromagnetic stirrer

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 电磁场对金属凝固补缩的效果

图 2 示出了施加与未施加电磁场两种情况下铸坯心部熔体的凝固收缩情况。未施加电磁场时铸坯在金属型内完全凝固后中心部有一细长的收缩通道,这是由于凝固最后阶段上部液体已凝固,不能对其补缩而形成的,铸件被剖开侵蚀后,可见凝固组织大部分为柱状晶;施加电磁场后铸坯中心未出现通向内部的收缩通道,且凝固组织基本为致密的等轴晶组织。

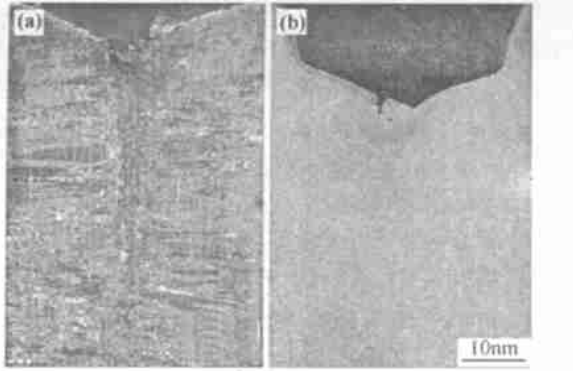


图 2 未施加 (a) 和施加 (b) 电磁场金属铸坯的凝固

Fig. 2 Solidification phenomena of cast metal without (a) and with (b) electromagnetic field

## 2.2 电磁力对金属凝固补缩的影响

液体金属凝固时补缩的动力有表面张力,液态金属的压力以及可能有的外界强制力等;液态金属补缩的阻力有补缩液体的粘滞力,晶间弯曲通道阻力等。随着凝固的进行,补缩通道进一步变窄,缩小成毛细管状,根据金属凝固理论和流体力学理论,可建立式(1)的模型<sup>[3]</sup>。

$$\frac{u}{D} = \frac{d^2 G}{32 T} \left[ \frac{G}{Y} \left( \frac{4}{d} + P \right) + \right] \quad (1)$$

其中:  $u$  为液态金属的补缩速度;  $D$  为晶粒的平均直径;  $d$  为毛细管内径;  $G$  为固液相两相区的温度梯度,  $G > 0$ ;  $Y$  为液态金属的动力粘度;  $T$  为结晶温度范围;  $\frac{G}{Y}$  为系数;  $\frac{4}{d}$  为补缩通道的实际长度与固液两相区的厚度之比;  $P$  为液态金属的表面张力;  $P$  为外界压力;  $\rho$  为液态金属的重度,式(1)左端表示液态金属单位时间所流过的晶粒的个数。

对于连铸而言,外界压力  $P = P_0 + \rho h$ ,  $P_0$  为大气压,  $h$  为补缩处压头高度。而旋转电磁场作用下补缩模型可表示为式(2)。

$$\frac{u}{D} = \frac{d^2 G}{32 T} \left[ \frac{G}{Y} \left( \frac{4}{d} + P_0 + \rho h \right) + \frac{\rho R^2}{4} \right] \quad (2)$$

其中:  $\rho$  为液态金属的密度;  $R$  为熔体转动半径;  $\omega$  为熔体转动的角速度。钢液的密度约为  $7.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。令  $n$  为施加与未施加电磁场时连铸的补缩能力之比,

则  $n$  可表示为:

$$n = \frac{\frac{G}{T} \left( \frac{4}{d} + P_0 + \rho h \right) + \frac{\rho R^2}{4}}{\frac{G}{T} \left( \frac{4}{d} + P_0 + \rho h \right) + \frac{\rho R^2}{4}} \quad (3)$$

以中碳钢的连铸为例:  $\rho = 1872 \times 10^{-3} \text{ N/m}^3$ <sup>[4]</sup>,  $T = 50$ ,  $P_0 = 105 \text{ Pa}$ ,  $G = 6.86 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ ,  $h = 10 \text{ m}$ ,  $G = 500 \text{ /m}^3$ <sup>[5]</sup>, 取  $\frac{G}{Y} = 10$ ,  $\frac{4}{d}$ ,  $P_0$ ,  $\rho h$  的值分别为  $7.5 \times 10^3 \text{ Pa}$ ,  $100 \times 10^3 \text{ Pa}$ ,  $686 \times 10^3 \text{ Pa}$ , 可见熔体的静压头所产生的补缩作用要大于表面张力和大气压的。取  $R = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$ , 则  $n$  与  $\omega$  的关系如表 1 所示。

表 1 熔体角速度与补缩能力的关系

Table 1 Relationship between angle velocity of melt and feeding capability

(rad/s)	1	10	20	30	100	200
$n$	1.00	1.04	1.16	1.37	5.06	17.24

旋转电磁场作用于金属熔体,所产生旋涡的转数  $N$  可近似表示为式(4)。

$$N = \frac{g y}{2 r} \quad (4)$$

而角速度  $\omega$  为式(5)。

$$\omega = 2 N = \frac{2 g y}{r} \quad (5)$$

本实验中磁感应强度与角速度关系见表 2。

表 2 磁感应强度与熔体角速度的关系

Table 2 Relationship between magnetic flux density and angle velocity of melt

$B_s / \text{mT}$	旋涡深度/mm	旋涡半径/mm	角速度/ (rad/s)
14.2	—	—	—
26	11.8	24.47	19.6
36	24.0	23.64	29.0

比较本试验条件下与熔钢的牛顿惯性力准数,牛顿惯性力准数  $N_I$  见式(6)<sup>[6]</sup>。

$$N_I = \frac{F}{u^2 L^2} \quad (6)$$

$F$  为电磁力,它与密度、电导率、磁导率有关。为金属密度,  $u$  为流体速度,  $L$  为特征长度。实验用合金 Sn+3.5% Pb 与熔钢的密度、电导率、磁导率相近,由式(6)可见上述实验结果可近似用于熔钢受电磁力作用情形。由表 1、表 2 可见,电磁力引起的动量对流对熔体凝固的补缩能力只提高了数倍,动量对流对补

缩影响不大。

### 2.3 旋转电磁场对心部熔体凝固过程的影响

液态金属凝固时, 当固相率超过某一固相分数时, 熔体内部形成固相骨架, 熔体被包含在固相骨架间, 其流动阻力很大, 熔体的流动性变得很差。可以认为存在一临界固相分数, 当熔体固相分数大于该值时, 熔体不再具有补缩能力。本文采用“提拉铸型法”确定铸坯凝固过程中临界固相分数所在位置(临界位置)。利用所测铸坯温度分布和 Sn-Pb 合金相图可计算出临界处的固相分数, 结果表明: 虽然实验条件和凝固时间不同, 但临界固相分数较为一致, 将其定义为特征固相分数。熔体在某一电磁力作用下亦有此规律, 将其定义为施加旋转电磁场作用下熔体的特征固相分数。如图 3 所示, 本实验条件下未施加电磁场的特征固相分数为 65%, 施加电磁场的特征固相分数为 72%, 显见施加电磁场使凝固前沿金属熔体的粘度降低了。

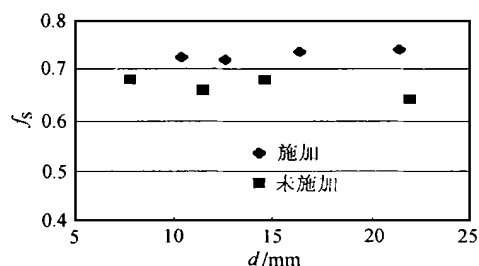


图 3 未施加与施加电磁场铸坯的特征固相率

Fig. 3 Characteristic ratio of solid phase of cast metal with and without electromagnetic field

利用所测的温度分布, 可算出熔体凝固至特征固相分数所需的时间, 如图 4 所示。铸坯截面半径为

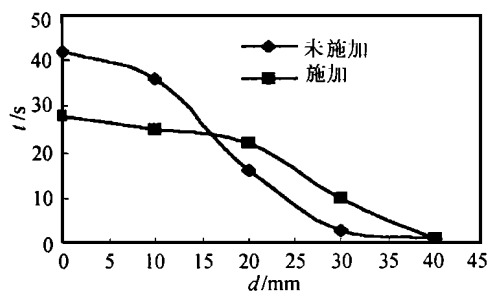


图 4 熔体凝固至特征固相分数所用时间

Fig. 4 Time of the melt solidifying to characteristic ratio of solid phase

42.5mm, 大约有 2.5mm 的激冷层, 施加电磁场时, 动量对流将熔体心部的热量带到半径 30~40mm 范围内, 因而这部分熔体凝固至特征固相分数比未施加电磁场的所需时间较长; 半径小于 20mm 以内的熔体均

在第 22s 至第 30s 的短时间内凝固至特征固相分数, 这是由于动量对流的作用使心部熔体的温度分布均匀, 温度梯度小, 熔体内部同时形成大量晶核, 凝固是在较短时间内完成的; 半径 20~30mm 内的熔体是上述两个凝固阶段的过渡段, 是热量交换较剧烈的阶段, 但与未施加电磁场时熔体凝固时间差别不大。而未施加电磁场时熔体凝固至特征固相分数所用时间差别较大, 即心部熔体是按照先后次序凝固的。

图 5 示出了未施加和施加电磁场两种情况下的坯壳厚度与凝固时间平方根的关系, 坯壳厚度与凝固时间平方根的比值可认为是凝固速率, 在熔体凝固的第 20s 至第 40s 时间段内, 未施加电磁场时的平均凝固速率为 0.21mm/s, 施加电磁场的平均凝固速率为 0.34mm/s。可见在电磁场作用下, 最后凝固阶段的凝固速率明显增大。

通过上述分析, 可见心部熔体的凝固过程如下: 施加电磁场使心部熔体温度分布较为均匀, 且凝固速率增大, 即在短时间内使熔体达到特征固相分数。这样心部熔体的热力学条件基本相同, 这种凝固状况避免了熔体由于凝固次序的先后引起的补缩, 因而消除了中心疏松、缩孔的形成。

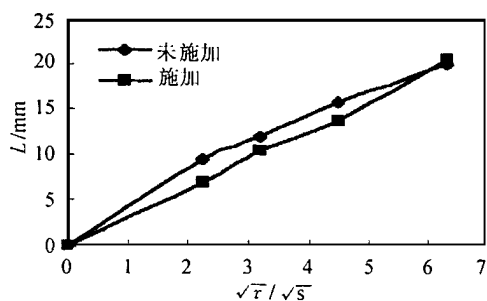


图 5 施加与未施加电磁场铸坯

凝固壳厚度与时间平方根的关系

Fig. 5 Relationship between shell thickness L and square root of timing of melt with and without EMF

从金属的凝固组织方面分析, 施加电磁场后心部熔体的温度梯度  $G$  减小, 而凝固速率  $R$  增大, 即降低了  $G/R$  值, 枝晶高次分枝增多, 在动量对流作用下易形成新的晶核, 从而获得细小等轴晶组织。等轴晶组织较柱状晶组织对熔体流动的晶间阻力要小得多, 有利于补缩。

连铸中凝固末端电磁场的位置十分关键, 实施电磁场位置太靠前, 经电磁搅拌后心部熔体仍可能向周围补缩; 搅拌器位置太靠后, 熔体的粘度大, 流动性差, 失去施加电磁场补缩的意义。我们先前的研究认为<sup>[7]</sup>在连铸中应在心部熔体的固相分数大于 65% 之前实施电磁搅拌。

(下转第 12 页)

旋转角速度时所产生的最大侧壁压强  $P_{\max}$ 。

在合金成形过程中,浇道尺寸的合理与否,转台转动角速度大小,对于最大压强值的获得及避免金属液的浪费有很大影响。图4所示分别为浇道高度  $H = 20\text{cm}$  时,转台的最大允许转动角速度  $\omega_{\max}$  与金属液面高度  $H_0$  和浇道直径  $D_0$  之间的关系曲线。当金属液面高度不变时,随着浇道直径的增大,所允许的最大旋转角速度减小;而当浇道直径一定时,随着金属液面高度的增大,最大旋转角速度也减小。

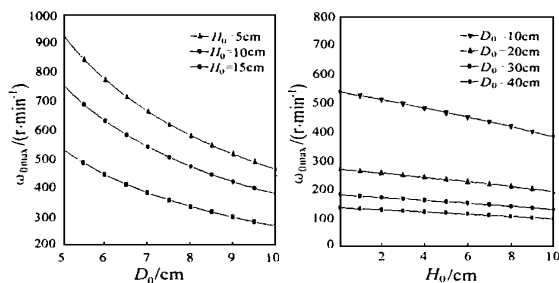


图4 最大旋转角速度  $\omega_{\max}$  与冒口直径  $D_0$ , 熔体高度  $H_0$  之间的关系,  $H = 20\text{cm}$

Fig. 4 Relation between maximum rotating speed  $\omega_{\max}$  and basin diameter  $D_0$ , as well as melt height  $H_0$

### 3 结论

(1) TiAl 合金离心浇注过程中的所产生的压强由两部分组成,一是金属液静态压强  $P_s$ ,二是由于离心力作用而产生的附加压强  $P$ 。

(2) 离心浇注过程中,应满足条件:  $\frac{2}{14400g} \frac{D_0^2}{H_0} + \frac{H - H_0}{D_0} = \omega_{\max}^2$ 。转台的最大旋转角速度为  $\omega_{\max}$ 。

(3) 浇道直径增大或金属液面高度增大时,转台的最大旋转角速度均减小。

#### 参考文献

- [1] D M Dimiduk, D B Miracle, and C H Ward. Development of Intermetallic Materials for Aerospace Systems [J]. Materials Science and Technology. 1992, 8 (3): 367—375.
- [2] F H Froes. Structure Intermetallics [J]. JOM. 1989, 41 (9): 6—7.
- [3] C T Liu, H Inouye. Control of Ordered Structure and Ductility of (Fe, Co, Ni) 3 Alloys [J]. Metal Trans A, 1979, 10A (10): 1515—1525.
- [4] Y W Kim. Intermetallic Alloys Based on Gamma Titanium Aluminides [J]. JOM. 1989, 41 (7): 24—30.
- [5] V R Parameswaran. High-Temperature Aluminides and Inter-

metallics [J]. JOM. 1992, 44 (6): 41—43.

- [6] F H Froes, C Suryanarayana, D Eliezer. Synthesis, properties and applications of titanium aluminides [J]. Journal of Materials Science. 1992, 27: 5113—5140.
- [7] P E Jones, W J Porter III, D Eylon, and G Colvin. Development of a Low Cost Permanent Mold Casting Process for TiAl Automotive Valves [J]. Gamma Titanium Aluminides. 1995, 53—62.
- [8] 贺跃辉, 黄伯云等. Sb 对改善 TiAl 基合金高温抗氧化性的影响 [J]. 材料科学与工艺. 1995, 3 (1): 10—13.
- [9] 曲选辉, 黄伯云, 吕海波等. TiAl 有序合金研究综述 [J]. 稀有金属材料与工程. 1991, 20 (4): 3—14.
- [10] 陈卓如. 工程流体力学 [M]. 高等教育出版社, 1992.

收稿日期: 2000-10-08; 修订日期: 2001-04-18

作者简介: 盛文斌 (1973—), 男, 博士, 主要从事钛合金成型方面的研究, 联系地址: 沈阳市沈河区文化路 72 号金属所 10 室 (110015)。

\* \* \* \* \*

(上接第 5 页)

### 3 结论

在金属熔体凝固过程中,旋转电磁力引起的动量对流对促进金属熔体补缩的作用不大;但旋转电磁力改变了熔体的温度分布,使心部熔体的温度分布更为均匀。在凝固末期,熔体更趋一致且在短时间内熔体的固相率增至特征固相分数,且凝固组织为等轴晶。这种心部熔体凝固的“同时性”,避免了中心疏松、缩孔的形成。

#### 参考文献

- [1] 竹内英磨, 池原康允, 柳井隆司, 松村省吾. 电磁搅拌钢连铸  $r$  品质改善 [J]. 铁 钢, 1977, (8): 59—68.
- [2] 周尧和, 胡壮麒, 介万奇. 凝固技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982, 124.
- [3] 朱丽娟, 王冬. 特种铸造及有色合金, 1997, 34 (6): 34—38.
- [4] 日本金属学会. 金属 — [M]. 丸善株式会社. 1993.
- [5] 李庆春. 铸件形成理论基础 [M]. 北京: 机械工业出版社. 1982.
- [6] J Szekeley, J W Evans, J K Brimacombe. The mathematical and physical modeling of primary metals processing operations [M]. 1988.
- [7] 王晓东, 李廷举, 金俊泽. 电磁场对连铸末端凝固过程影响的研究 [J]. 金属学报. 2000, 9: 15—18

基金项目: 国家重大基础研究资助项目 (G1998061500); 国家自然科学基金面向 (50071015) 和重大 (59995442) 项目; 教育部跨世纪人才基金资助项目。

收稿日期: 2001-05-22; 修订日期: 2001-08-10

作者简介: 王晓东 (1972—), 男, 博士生, 从事磁流体力学在冶金中的应用研究工作, 主要研究内容有低频和永磁体磁场对金属凝固的影响, Lorentz 力在金属熔体中形成的流速场等, 联系地址: 大连理工大学材料系铸造工程研究中心 (116024)。