

电磁驱动力对金属铸坯凝固的影响

Effect of Electromagnetic Driver Force on Solidifying of Billet

王晓东, 李廷举, 金俊泽 (大连理工大学, 大连 116024)

于 艳, 刘俊江, 徐海澄, 陈依雯 (上海宝钢集团公司研究院, 上海 201900)

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

(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

YU Yan, LIU Jun-jiang, XU Hai-cheng, CHEN Yi-wen

(Shanghai Bao Steel Group, Shanghai 201900, China)

摘要: 利用低熔点 Sn+ 3.5wt% Pb 合金模拟钢的凝固末端电磁搅拌的实验条件, 研究了电磁驱动力对铸坯凝固进程的影响。研究表明: 在电磁驱动力作用下, 半固态区存在一个边界层, 边界层表征电磁驱动力作用的极限区域, 边界层以内熔体的流速随着搅拌器线圈电流的增大而增大, 电磁场对边界层以外的熔体影响不大; 电磁搅拌驱动力使固-液界面或边界层向外推移, 铸坯凝固坯壳变薄; 电磁搅拌力对半固态的金属熔体具有熔蚀、冲刷作用, 阻碍柱状晶生长, 使凝固壳生长均匀, 且内表面光滑无突起。

关键词: 电磁场; 金属凝固; 电磁搅拌; 液体金属流动

中图分类号: TG21⁺4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2001) 06-0013-03

Abstract: In this experiment, lower melting point Sn+ 3.5wt%Pb alloy was served as experiment material, through experiment simulating finite electromagnetic stirring of continuous casting of steel, effect of electromagnetic driver force on the solidifying process of billet was researched. The results show that under electromagnetic driver force, there is a boundary layer in the semi-solid zone, the boundary layer is the maximum zone of electromagnetic force affecting on the metal molten. Velocity of melt within boundary layer is increased with electric current in coil increasing, but no affecting is on the melt beyond boundary layer. Electromagnetic stirring pushes the boundary layer out symmetrically, and makes the solidifying shell thickness thinner. Meanwhile, the growth of dendrite is counteracted; prominences on the interface become smaller and even escape.

Key words: electromagnetic field; metal solidifying; electromagnetic stirring; liquid metal flow

交变电磁场可在液体金属中产生电磁驱动力, 根据此原理开发的连铸电磁搅拌技术可改善铸坯的凝固组织、提高连铸质量^[1~4]。例如, 凝固末端的电磁搅拌 (F-EMS, Finite Electromagnetic Stirring) 具有减少连铸坯中心偏析、V 形偏析、促使枝晶骨架位置调整和促使等轴晶形成等功能^[5,6], 已成为进一步提高铸坯质量的手段之一。F-EMS 多采用大功率、低频的旋转型搅拌器, 将其放置在靠近液相穴末端, 用以搅动小断面、高粘度、大固相分数的金属熔体。用于凝固末端电磁搅拌的搅拌器安装位置十分关键, 安装位置靠前, 起不到改善中心偏析等缺陷的作用, 甚至变成二冷区的电磁搅拌 (S-EMS); 安装位置靠后, 液相穴断面减小、金属熔体粘度增大, 搅拌器所需功率加大, 有时甚至无法搅动。国外有些学者进行了此方面的研究^[7,8], 国内此技术的应用和研究较少。本文采用模拟实验研究了电磁场对铸坯壳厚度、铸坯凝固等的

影响。

1 实验装置和实验方法

1.1 实验装置

电源和搅拌器均为三相、频率为 50Hz。电磁搅拌器线圈采用电势利用率较高的三相单层整距集中绕组, 每相有 432 匝, 搅拌器的有效长度 220mm, 内径 $\phi 200\text{mm}$ 。铸型为圆筒形, 材质为不锈钢, 其外径为 $\phi 10\text{mm}$, 上端内径为 $\phi 90\text{mm}$, 下端内径为 $\phi 80\text{mm}$, 图 1 给出了实验装置示意图。

施加磁场时, 电磁力对金属铸型的穿透层深度 δ 可用公式 (1) 表示。

$$\delta = \frac{1}{2\mu\sigma\omega} \quad (1)$$

其中 μ 为磁导率, σ 为电导率, $\omega = 2\pi f$, f 为频

率。经计算工频电磁场对不锈钢的渗透层深度大于60mm, 本实验不锈钢铸型壁最厚处为15mm, 铸型壁对磁感应强度基本没影响。

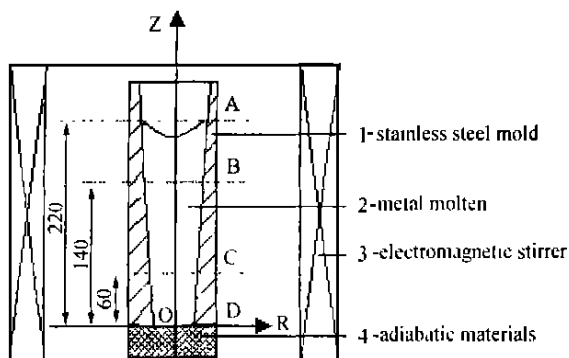


图1 电磁搅拌装置示意图

Fig. 1 Schematic of electromagnetic stirring apparatus

1.2 实验材料

实验材料为低凝固点Sn+ 3.5wt%Pb合金(凝固点为219℃), 密度为 $7.13 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、电导率 $2.08 \times 10^6 / \Omega \cdot \text{m}$ 、比磁导率约为1、液态时的粘度系数约为 $2 \text{MPa} \cdot \text{s}$ 。

为使实验满足动力学相似准则, 实验与连铸过程应有相似的力场: 即电磁力场、重力场、粘滞力场等。公式(2)示出了牛顿惯性力相似准数 $W^{[9]}$ 。

$$W = \frac{F}{\rho \eta L^2} \quad (2)$$

式中 F 为施加的电磁力, ρ 为金属密度, η 为粘度, L 为系统的特征长度; 电磁力即是起搅拌作用的

Lorenz力, 它与金属的电导率 σ 和磁导率 μ 有关, 而所选合金材料的密度、电导率、粘度、磁导率等物性参数均与钢液的接近, 实验和实际连铸过程有相近的相似准数, 满足相似准则。

1.3 实验方法

将Sn+ 3.5wt%Pb合金加热熔化, 当温度达到240℃后将其迅速浇注到铸型内, 凝固一定时间后, 采用重力提拉法使铸型内未凝固的金属熔体自动流下得到金属凝固坯壳。分别在施加和不施加电磁场两种条件下考察电磁场对铸坯凝固壳厚度及固-液界面结晶状况的影响。

2 实验结果与讨论

2.1 电磁搅拌对铸坯凝固壳厚度影响

分别在不施加和施加磁感应强度为36mT的电磁场两种条件下, 铸坯凝固一定的时间($t = 5, 10, 20$ 和40s)后, 提拉铸型得到不同厚度的凝固坯壳。将坯壳沿轴线剖开后, 分别测取坯壳下端面(图1中D端面)、距下端60mm处的C剖面、140mm处的B剖面和220mm处的A端面4处的凝固壳厚度, 图2、图3示出了所测的凝固壳平均厚度 A 及其标准差 S , 当凝固时间 $t < 40\text{s}$ 时, 施加电磁场条件下的凝固壳厚度都比未加电磁场的明显变薄, 随着凝固时间延长, 两种条件下坯壳厚度的差值减小。当 $t = 40\text{s}$ 时, 施加电磁场条件下的凝固壳反而比没施加电磁场的略微大一些。由图3可见, 无论凝固时间多长, 施加电磁场所形成的凝固壳厚度的标准差比未加电磁场的都小, 即施加电磁搅拌后铸坯的凝固壳厚度更均匀, 这样有利

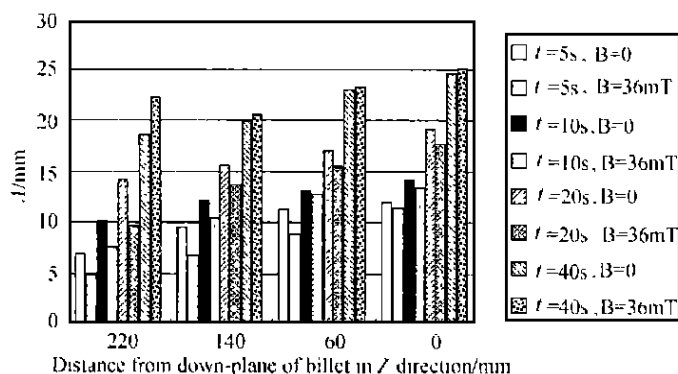


图2 不同实验条件下铸坯壳的平均厚度

Fig. 2 Average thickness of billet at the different condition

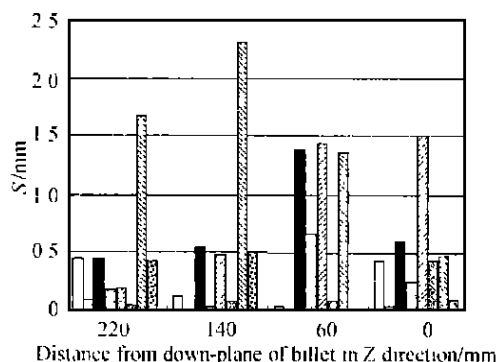


图3 不同实验条件下坯壳厚度的标准差

Fig. 3 Standard deviation of thickness of billet at the different condition

于防止裂纹的产生。

2.2 电磁搅拌对固-液界面形态影响

图4a、b示出了在不施加和施加磁感应强度为36mT的电磁场两种条件下铸坯凝固10s钟后用提拉

法获得的铸坯固-液界面形貌。在金属凝固过程中, 固-液界面的枝晶沿着与热流相反的方向生长, 未施加电磁场时, 由于择优生长熔体会垂直于固-液界面长出枝晶, 宏观上表现为内表面长出许多小突起; 施加

电磁场时,沿径向生长的柱状晶前端受到电磁搅拌力的剪切作用,枝晶长大受阻;动量对流加速凝固前沿

的传质过程,使凝固壳变薄。在电磁搅拌力作用下,其表面类似于非小晶面界面,宏观上内表面光滑,突起

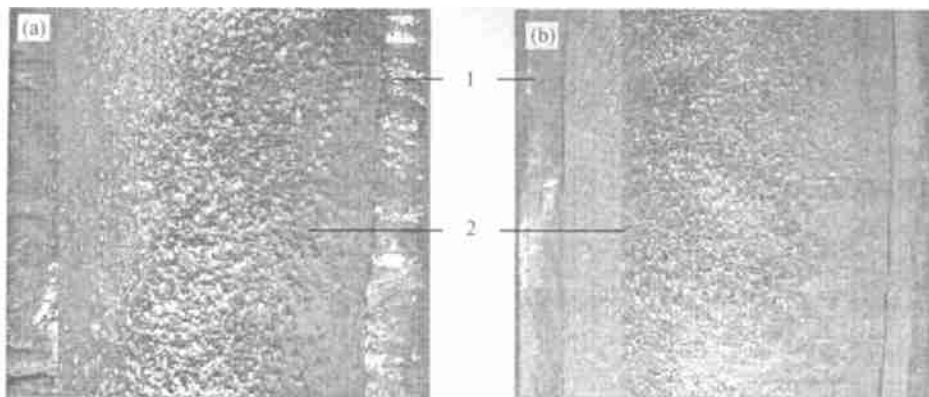


图4 凝固10s铸坯内表面熔体的结晶状况

Fig. 4 Crystal situation of billet at interface after solidifying 10 seconds

消失,如图4b所示。

2.3 电磁搅拌对金属熔体凝固影响的机理探讨

由于电流的周期交变性和线圈在周向分布的对称性,电磁场对金属熔体所产生的电磁力表现为水平面内的切向力和离心力。在电磁搅拌力的作用下,金属熔体所产生的强迫对流(亦称动量对流)改变了金属凝固的传质、传热过程。

金属凝固时熔体粘度是沿径向向外逐渐增大的。当施加电磁场时,一定强度的电磁力只能搅动低于某一粘度的金属熔体,这样在半固态区域里就存在一个边界层区域。边界层以内的金属熔体在动量对流作用下使热、质均匀传输;边界层是受动量对流影响的区域,它受到剪切的粘滞力作用;边界层外的金属熔体则不受电磁搅拌力的作用。边界层是电磁驱动力对金属熔体作用的极限区域,该区域的金属熔体具有特征固相分数,特征固相分数与电磁搅拌力大小有关。增大动量对流强度可使边界层外移。动量对流强度越大,则可搅动的金属熔体的粘度越大,边界层外移得越多,这就是施加电磁场情形下凝固壳变薄的原因。动量对流强度一定时,随着凝固时间的延长,熔体粘度增大,边界层向内移动。一定凝固时间后($t=40$ 秒),熔体粘度增大致使边界层不再移动,施加电磁搅拌与未加电磁搅拌的凝固壳相差不大。在均匀的电磁搅拌力作用下,随着凝固时间的延长边界层均匀向里移动,故在电磁搅拌力作用下凝固壳更为均匀。此外,凝固壳的均匀生长还有利于防止裂纹的萌生。

3 结论

(1) 在半固态区存在一个边界层,边界层是电磁驱动力对金属熔体作用的极限区域,边界层以内熔体

的流速随着搅拌器线圈电流的增大而增大,电磁场对边界层以外的熔体影响不大。

(2) 电磁搅拌驱动力使固-液界面或边界层向外推移,铸坯凝固坯壳变薄。

(3) 电磁搅拌力对半固态的金属熔体具有熔蚀、冲刷作用,阻碍柱状晶生长,使凝固壳生长均匀,且内表面光滑无突起。

参考文献

- [1] 浅井滋生. 电磁流体力学の冶金・応用[J]. 日本金属学会会報, 1983, 22(12): 1029~1035.
- [2] 竹内英磨, 池原康允, 柳井隆司, 松村省吾. 电磁搅拌による鋼連铸の品質改善[J]. 鉄と鋼, 1977, (8): 59~68.
- [3] Miroslav Gavlik and Erich Janosch. Electromagnetic stirring and improved product quality [M]. In: Peter H Scholes. Steel Technology Internation. London: Sterling Publications Limited. 1994/95: 144.
- [4] K-H Spitzer, K Schwerdtfeger. The magnetic field of inductors used for rotational stirring in the continuous casting of steel [J]. Transactions of the ISS, 1990, 57(9): 116~125.
- [5] 渡边省三, 坂名清, 青木松秀, 竹内正道. 连续铸造方法 [P]. Jp 平 3-254338A, 1991.
- [6] 近藤修, 滨田腾成, 迁田进. 连续铸造方法 [P]. Jp 特开平 5-228580A, 1993.
- [7] 水上秀昭, 小松政美, 北川融, 川上公成. 铸片最终凝固位置近傍の电磁搅拌效果 [J]. 鉄と鋼, 1984, (2): 194~200.
- [8] 竹内英磨, 森久, 池原康允, 驹野忠昭, 柳井隆司. SUS430 连续铸造の凝固組織におよぼす电磁搅拌の影響 [J]. 鉄と鋼, 1980, (6): 38~46.
- [9] J Szekely, J W Evans, J K Brimacombe edit, 蔡开科译. 金属初级加工过程的数学和物理模型 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992: 80.

(下转第20页)

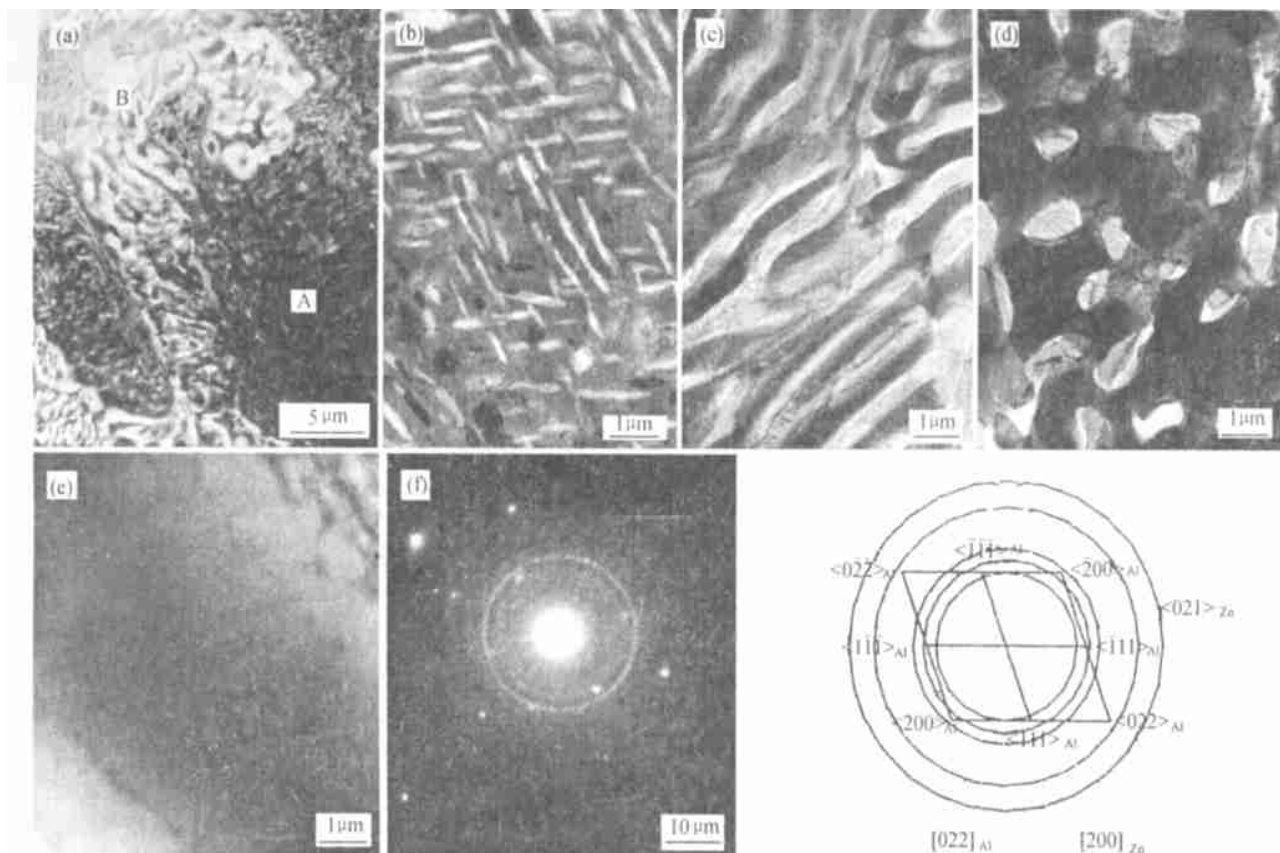


图2 铸态 ZA27Ce 合金 250 °C 人工时效后 TEM 观察结果

Fig. 2 TEM photograph of ZA27Ce alloy after artificial aging at 250 °C

合金和 250 °C 人工时效后的初生 α 枝晶均有调幅结构组织, 只是 250 °C 人工时效使得 α 相调幅分解进行得更加充分, 分解产物的界面更加清晰。对于铸态 ZA27Ce 合金来说, α 初生晶是主要的基体组织, 它所发生的调幅分解肯定会对阻尼性能的提高起到最积极的作用。因此从调幅组织的结构、耗能特点以及 α 初生晶在基体中占据较大的份额来看, 认为 250 °C 人工时效过程中发生的较为充分的调幅分解是提高铸态 ZA27Ce 合金阻尼性能的主要原因。

4 结论

(1) 250 °C 人工时效过程中, 铸态 ZA27Ce 合金初生晶和晶间组织均发生了较为充分的固态相变, 形成了大量的 α 相和 η 相异相界面, 从而提高了合金的阻尼性能。

(2) 250 °C 人工时效后, α 初生晶中获得充分的调幅分解产物, 对阻尼性能的提高起了主要作用。

参考文献

[1] 戴德沛. 阻尼技术的工程应用 [M]. 北京: 清华大学出版社,

1991.

- [2] 张福全, 舒震. 稀土铈和热处理对高铝锌合金减振性能的影响 [J]. 稀土, 1990, 11 (6): 23-26.
- [3] 刘耀文. 高铝锌合金阻尼性能的研究 [D]. 洛阳: 洛阳工学院, 1996.

收稿日期: 2001-03-13; 修订日期: 2001-05-21

作者简介: 刘耀文 (1967-), 女, 硕士, 工程师, 从事铸造工艺研究。

联系地址: 北京 81 信箱百慕航材高科技股份有限公司 (100095)。

本文编辑: 孙常青

(上接第 15 页)

基金项目: 上海宝钢集团公司, 国家自然科学基金重大项目基金 (5999542), 国家重大基础研究基金 (G1998061500) 资助

收稿日期: 2000-06-10; 修订日期: 2000-12-19

作者简介: 王晓东 (1972-), 男, 博士, 主要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)。

本文编辑: 孙常青