

文章编号: 1004-0609(2003)06-1494-06

7A60 超高强铝合金的低频电磁铸造(I) ——直径 0.2 m 锭坯的铸态组织^①

董 杰, 崔建忠, 刘晓涛, 赵志浩, 包卫平

(东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110004)

摘 要: 采用低频电磁铸造技术, 半连续铸造制备了直径为 0.2 m 的 7A60 超高强铝合金锭坯。研究了铸锭表面质量和内裂纹发生情况, 考察了电磁场频率和强度对铸态组织的影响。结果表明: 低频电磁场可消除锭坯裂纹, 改善其表面质量。在低频电磁场作用下, 半连续铸造组织得到显著细化, 铸锭边部和中间部位的晶粒大小差别减小, 其平均晶粒尺寸分别为 30 μm 和 45 μm 。适当降低电磁场频率和增加强度有利于获得细小均匀的等轴晶组织, 铸造组织最佳的电磁场频率为 25 Hz, 安匝数为 18 000 A $\cdot$ turn。

关键词: 低频; 电磁铸造; 微观组织; 细化; Al-Zr-Mg-Cu-Zr

中图分类号: TF 777; TG 113.2

文献标识码: A

高强度高韧性铝合金是运载火箭、宇宙飞船和空间站等航天器的主体结构材料, 也是导弹、战斗机等武器系统和核反应堆分离机、高速车辆主承力框等关键结构材料, 其研究和应用倍受关注^[1~6]。但是, 目前高强度铝合金合金含量高(如 7A60 合金含量超过 14%), 采用传统的半连铸工艺凝固后, 只有少量的合金元素在晶内固溶, 大量的合金元素则以共晶和化合物形式存在于晶界。在随后的加工热处理过程中, 仅少部分发生溶解, 进入晶内, 其余大部分仍残存在晶界, 呈链状分布, 造成合金低韧性。因此, 在铸造过程中提高合金元素在晶内固溶度的同时, 降低晶界处的共晶和化合物的数量和尺寸, 并细化晶粒, 是提高高强度铝合金断裂韧性的有效方法。Osamura 等^[7]和 Wei 等^[8]分别采用粉末冶金和喷射沉积方法, 提高冷却速度强制合金元素固溶, 获得了高强度高韧性 Al-Zr-Mg-Cu 合金, 但成本高, 且气体含量和夹杂等问题难以解决。

本文作者采用 Vives^[9, 10]提出的电磁细晶铸造技术(Casting, Refining, Electromagnetic), 利用更低的频率, 半连续电磁铸造制备了 7A60 合金锭坯, 达到了铸锭显微组织细小均匀, 晶内溶质固溶度高, 内部无裂纹, 表面质量好的目的, 为后续工序获得超高强度高韧性合金打下了坚实基础。

1 实验

结晶器由 LF6 铝合金加工而成, 内嵌石墨环, 石墨环内径为 0.204 m, 高度为 0.025 m。电磁线圈由铜管缠结而成, 互相绝缘, 内通冷却水, 匝数为 50, 由 BP-30 逆变式电源控制箱控制输入电流及频率的大小。电磁线圈布置在结晶器外, 其水平中心线与结晶器内石墨环的中心线平齐。

合金在 2RZ30 倾斜式熔化电阻炉内熔炼, 其熔炼温度为 760 $^{\circ}\text{C}$, 主要合金元素 Al, Zn, Cu, Mg 均为工业纯(99.7%), 微量元素 Zr 以复合锆盐形式(原料为氟锆酸钾、氯化锂和氟化钙)加入。合金熔体经除气、扒渣、精炼后转入中间包。当中间包内合金熔体的温度降到 710 $^{\circ}\text{C}$ 时, 设定电磁线圈不同的电流和频率, 半连续铸造获得锭坯, 铸造机速度为 50 mm/min。

对锭坯进行化学成分分析, 确保其成分范围为(质量分数, %): Cu 2.28 ~ 2.32; Mg 2.59 ~ 2.81; Zn 8.53 ~ 8.79; Zr 0.12 ~ 0.18; Be 0.000 2 ~ 0.001; Al 余量。先用高浓度混合酸(10 mL HF, 5 mL HCl, 5 mL HNO₃ 和 380 mL H₂O)腐蚀, 并观察锭坯垂直横截面的宏观组织; 然后在锭坯垂直横截面上的边部、1/2 半径、中间等部位截取试样, 用低浓度混合酸(2 mL HF, 3 mL HCl, 5 mL

① 基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2001AA332030)

收稿日期: 2002-11-28; 修订日期: 2003-02-22

作者简介: 董 杰(1974-), 男, 博士研究生。

通讯联系人: 董 杰, 博士研究生, 东北大学 317 信箱, 110004; 电话: 024-83681742; E-mail: dj.dongjie@21cn.com

HNO₃ 和 250 mL H₂O) 腐蚀后进行金相分析, 同时用图像分析仪测定晶粒的平均尺寸。

2 结果与分析

2.1 外加电磁场对合金熔体凝固的影响

电磁铸造过程中, 熔体与周围空间为近场源的感应场。遵守准稳态的 Maxwell 方程组, 磁感应强度矢量在金属熔体内的分布决定于电磁感应线圈的位置、结晶器材料和截面形状、输入感应线圈的交变电流的强度和频率。

感应线圈内的交变电流在合金熔体内激发变化磁场, 产生感生电流 $J = 1/[\mu(\nabla \times B)]$, 感生电流和变化的磁场交互作用使合金熔体受到 Lorentz 力 $F = J \times B$ 的作用(F 为体积力), 熔体内部各点受到的 Lorentz 力由下式给出:

$$F = 1/[\mu(\nabla \times B)] \times B \\ = -\nabla[1/(2\mu B^2)] + 1/[\mu(B \cdot \nabla)B] \quad (1)$$

式中 B 为磁感应强度, μ 为合金熔体的磁导率。方程右边的第 1 项是垂直于金属液侧面的力, 它与表面张力、静压力平衡, 对金属熔体产生约束作用, 使熔体表面形成弯液面而与结晶器接触线高度减小(软接触); 第 2 项是回旋驱动力, 引起金属液流动形成强制对流。熔体中存在大量的有效形核质点, 如高温合金相等, 在适宜的条件下可作为非均匀形核的基底大量形成晶核。强制对流使结晶器壁和液面处温度较低的熔体流入溶液内部, 延缓了结晶器壁和液面处熔体的冷却, 推迟了表层稳定凝固壳层的形成, 与内部温度高的熔体混合, 加速了内部熔体温度的降低, 从而缩短结晶器内外熔体同时进入过冷状态的时间, 熔体温度场相对均匀, 有利于熔体内部各个地方均匀大量形成晶核。同时, 强制对流还能消除局部过热造成的部分晶粒重熔, 增加了熔体有效晶核数目。另外, 电磁场略增大合金熔体最大过冷度 $\Delta T_{\max}^{[11]}$, 电磁场以电磁波的形式作用于熔体, 加大熔体内部存在的结构起伏和能量起伏, 原子与原子之间的团聚体的体积增加, 降低临界形核功, 从而有利于大量晶核的形成。从传质方面来看, 熔体中物质传输形式由扩散转变为对流形式, 晶粒生长排出的溶质被及时带走, 不会在界面前沿堆积, 因而使得熔体中宏观成分均匀, 减小宏观偏析。

2.2 DC 和低频电磁铸造铸锭裂纹和表面形貌

高合金含量的合金, 如 7075, 7055 等合金是较难铸造的合金, 严重的表面偏析和易开裂的特性极

大地影响了成材率。常规直接水冷铸造(Direct chilling, DC)的铸锭中容易出现中心裂纹和径向裂纹, 而低频电磁铸造(Low frequency electromagnetic casting, LFEC)铸锭中未发现此类裂纹。图 1 所示为未施加低频电磁场和施加低频电磁场锭坯的表面状况。图中上部分未施加低频电磁场锭坯的表面, 出现了轻微的表面偏析瘤和严重的冷隔, 以及冷隔导致的表面拉裂现象; 而在频率为 25 Hz、安匝数为 18 000 A·turn 的低频电磁场作用下, 下部分铸锭基本消除了表面偏析瘤和冷隔, 光洁度大大提高。由此可见, 低频电磁铸造可以很大地改进 7A60 合金锭坯表面质量。

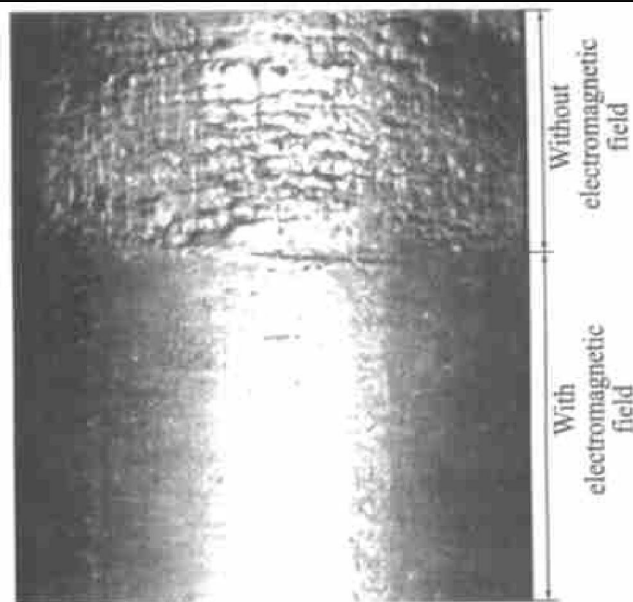


图 1 未施加和施加低频电磁场铸锭表面状况

Fig. 1 Surface view of cast billet with and without low frequency electromagnetic field

2.3 DC 和低频电磁铸造组织

高浓度混合酸腐蚀后的低频电磁铸造宏观组织非常细小, 肉眼无法直接观察到单个的晶粒。常规 DC 铸造宏观组织则较粗大, 肉眼可以直接观察到部分晶粒。2 种铸造方法的微观组织如图 2 所示。图 2(a), (b) 所示分别为常规 DC 铸造锭坯边部和中间部位微观组织, 差异非常大, 边部组织为粗大的蔷薇型, 中间部位组织呈异常粗大的枝晶网, 枝晶网间还存在一些胞状晶粒, 组织极不均匀。在低频电磁场作用下(安匝数为 18 000 A·turn, 频率 f 为 25 Hz), 凝固后的锭坯边部和中间部位铸态组织(见图 2(c)和(d))差异较小, 均为细小均匀的等轴晶组织, 边部的平均晶粒尺寸 30 μm , 中间部位的晶粒尺寸为 45 μm 。由此可见: 在低频电磁场作用下凝固后的铸锭组织, 宏观上看, 锭坯中间和边部

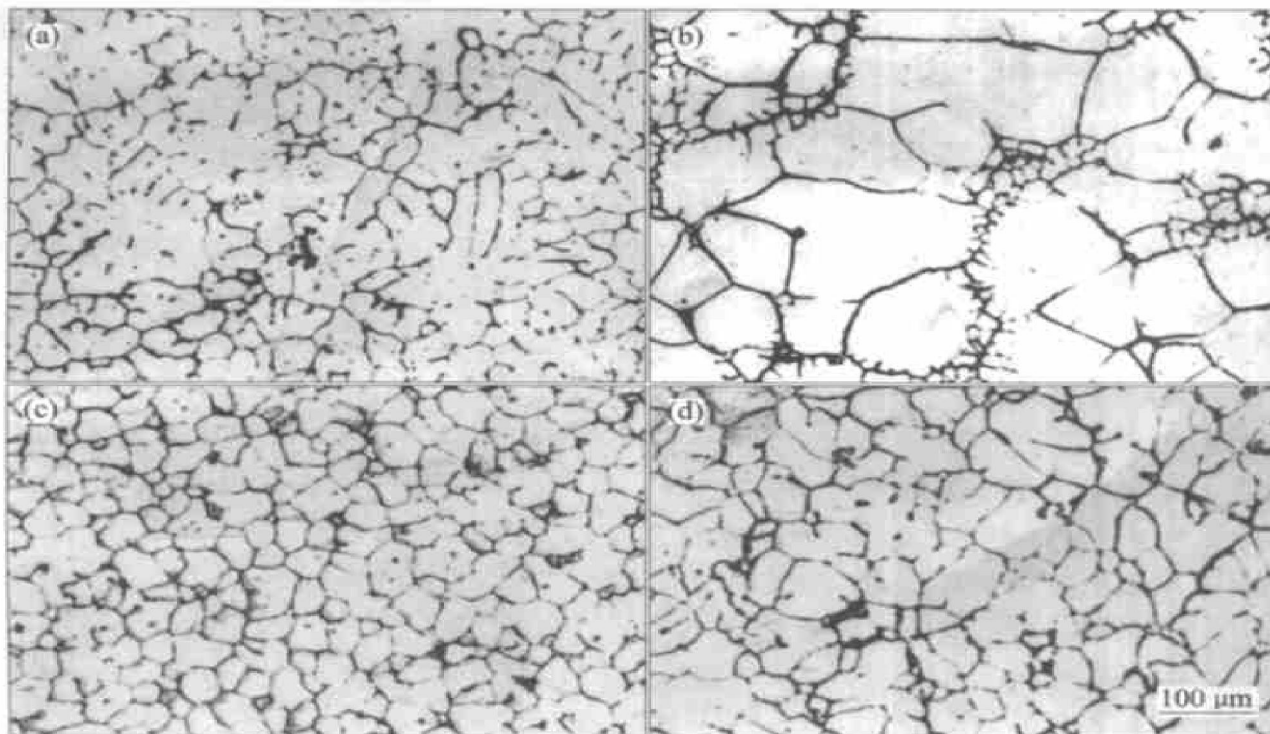


图 2 DC 和 LFEC 铸锭的组织形貌

Fig. 2 Microstructures of DC and LFEC billet
(a) —DC border; (b) —DC center; (c) —LFEC border; (d) —LFEC center

的组织大小差别较小; 微观上看, 局部晶粒细小均匀, 微观组织偏析减小, 这将大为提高合金产品的综合性能。

2.4 频率对低频电磁铸造组织的影响

为考察频率对低频电磁组织的影响, 选取相同的电磁场和铸造工艺参数: 安匝数为 $18\,000\text{ A}\cdot\text{turn}$, 铸造速度为 50 mm/min , 浇注温度为 $710\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。不同频率铸坯 1/2 的组织如图 3 所示。当频率较低为 15, 25, 35 Hz 时, 铸锭边部和中间的微观组织均是细小的蔷薇型组织(见图 3(a)~(c)), 局部晶粒大小差别不大, 其平均晶粒尺寸分别为 45, 32, $38\text{ }\mu\text{m}$, 其中以频率为 25 Hz 的组织最为细小均匀; 当频率较高时(50 Hz), 铸锭微观组织由比较粗大的蔷薇型组织构成(见图 3(d)), 平均晶粒尺寸为 $62\text{ }\mu\text{m}$ 。磁感应强度在金属熔体内渗透深度的增加由集肤深度 δ 来表征:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\sigma \mu \pi f}} \quad (2)$$

式中 σ 为合金熔体的电导率; f 为电磁场频率。当频率较高时, 电磁场的渗透深度较小, 电磁场能量主要消耗在熔体的表面, 即电磁力主要集中于熔体的表面, 具体表现为作用于合金熔体表面的约束力增加, 在相同电磁场强度条件下, 此时熔体与结

晶器接触高度减小, 减小了合金熔体的一次冷却强度, 同时, 增加了表层熔体的流动, 有利于整个熔体同时进入过冷状态, 获得均匀细小的等轴晶组织。频率越低, 电磁场渗透越深, 微观组织因形核数目多而细小, 所以可以认为电磁场细化组织是一个综合作用, 频率过高和过低均不利于形成最细小的组织, 频率为 25 Hz 的组织最为细小均匀。

2.5 电磁场强度对微观铸造组织的影响

在频率为 25 Hz, 铸造速度为 50 mm/min , 浇注温度为 $710\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 不同磁场条件下低频电磁铸造铸锭 1/2 半径处的微观组织如图 4 所示。当安匝数为 $12\,000\text{ A}\cdot\text{turn}$ 时, 铸锭 1/2 半径处为粗大的蔷薇形和胞状枝晶组织, 组织极不均匀, 晶粒平均尺寸为 $58\text{ }\mu\text{m}$, 如图 4(a) 所示。当为 $15\,000\text{ A}\cdot\text{turn}$ 时, 铸锭 1/2 半径处的组织尺寸有所降低, 且相对比较均匀, 呈蔷薇形组织, 平均尺寸为 $40\text{ }\mu\text{m}$, 如图 4(b) 所示。当安匝数为 $18\,000\text{ A}\cdot\text{turn}$ 和 $20\,000\text{ A}\cdot\text{turn}$ 时, 铸锭 1/2 半径处组织均匀细小, 晶粒平均尺寸分别为 $34\text{ }\mu\text{m}$ 和 $36\text{ }\mu\text{m}$, 不过晶粒形貌有近球形向细小蔷薇型转变, 如图 4(c) 和 (d) 所示。因此, 随磁场强度的增加, 晶粒变得细小、均匀, 当安匝数为 $18\,000\text{ A}\cdot\text{turn}$ 时组织细化效果最优。

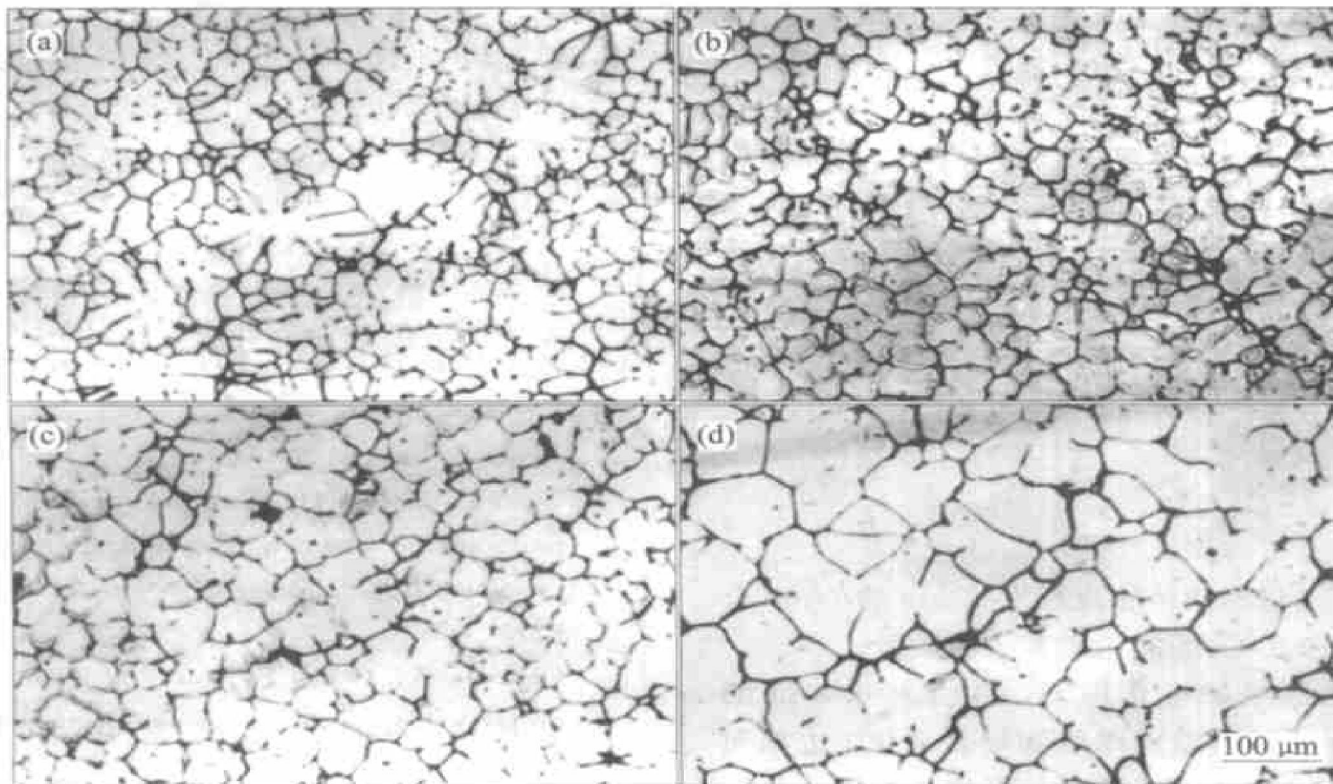


图 3 频率对低频电磁铸造组织的影响

Fig. 3 Effect of frequencies on low frequency electromagnetic cast microstructures

(a) 15 Hz; (b) 25 Hz; (c) 35 Hz; (d) 50 Hz

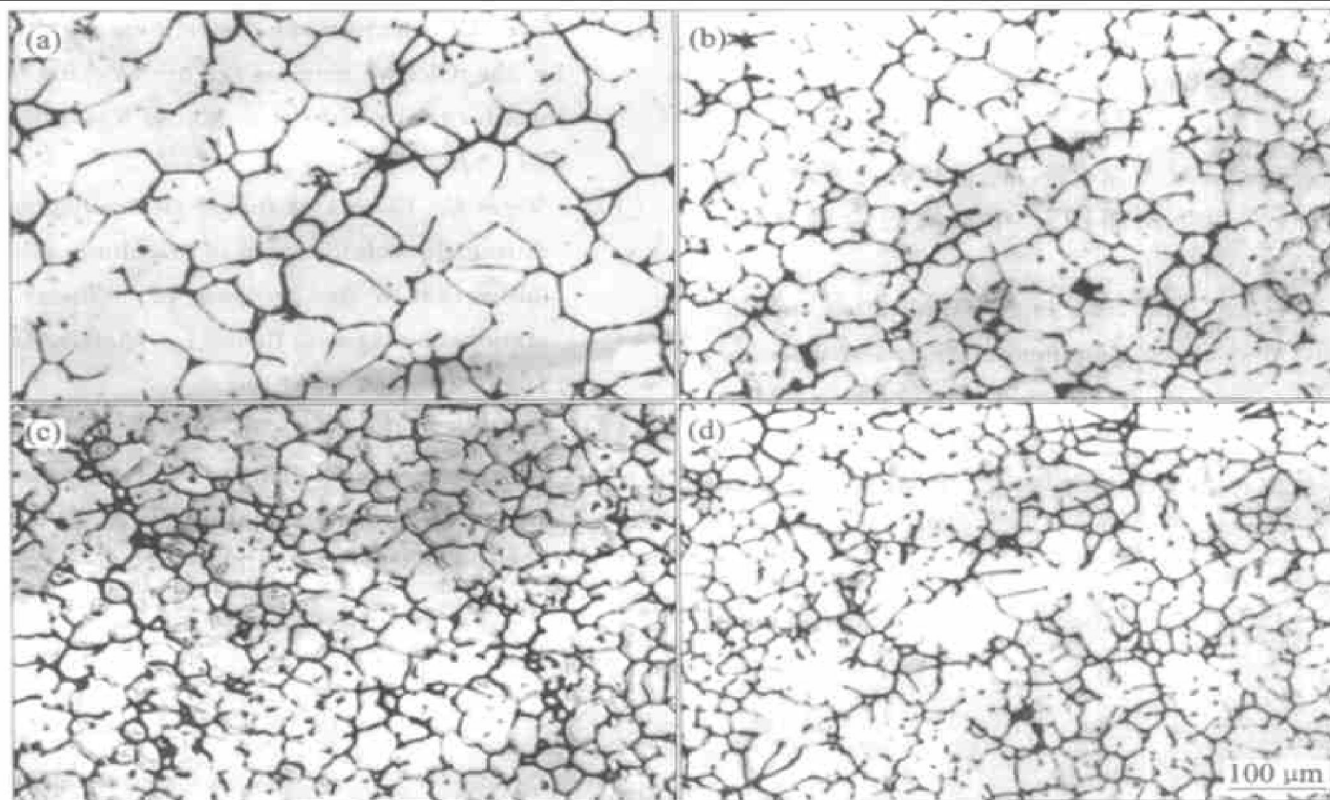


图 4 不同电磁场时低频电磁铸造组织

Fig. 4 Low frequency electromagnetic cast microstructures under different electromagnetic fields

(a) 12 000 A·turn; (b) 15 000 A·turn; (c) 18 000 A·turn; (d) 20 000 A·turn

当线圈内电流分布已知时, 结晶器内任意一点的磁感应强度可以由 Biot-Savart 定律给出:

$$\mathbf{B}(P) = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{J(Q) \times \mathbf{R}^0}{R^2} dV(Q) \quad (3)$$

式中 $dV(Q)$ 为源点周围的体积元; $J(Q)$ 为其电流密度; R 为源点 Q 到场点 P 之间的距离; $\mathbf{R}^0$ 为源点 Q 指向场点 P 的单位矢量。式(3)表明, 线圈内的电流强度越大, 在合金熔体内的引起的磁感应强度越大, 产生的感生电流越大, 由此熔体受到的磁场力作用越强, 合金细化效果越明显。

3 结论

1) 低频电磁场能消除直径为 0.2 m 的 7A60 合金半连续铸造锭坯裂纹, 改善其表面质量。

2) 在低频电磁场作用下, 直径为 0.2 m 的 7A60 合金半连续铸造组织得到显著细化, 边部和中间部位的晶粒大小差别减小, 平均晶粒尺寸分别为 30 μm 和 45 μm 。

3) 适当地降低电磁场频率和增加强度有利于获得细小均匀的等轴晶组织。铸造组织最佳的电磁场频率为 25 Hz, 安匝数为 18 000 A·turn。

REFERENCES

- [1] 李成功, 巫世杰, 戴圣龙, 等. 先进铝合金在航空航天工业中的应用与发展[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(S2): 14-21.
LI C G, WU S J, DAI S L, et al. Application and development of advanced aluminum alloy in aerospace industry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(S2): 14-21.
- [2] 陈昌麒. 超高强铝合金的发展[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(S2): 22-27.
CHEN C Q. Development of ultrahigh-strength aluminum alloy[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2002, 12(S2): 22-27.
- [3] Osman T M, Singh P M, Lewandowski J J. Crack bridging in a laminated metal matrix composite[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1994, 31: 607-612.
- [4] Pandey A B, Majumdar B S, Miracle D B. Effects of thickness and precracking on the fracture toughness of particle reinforced Al alloy composites[J]. Metall Mater Trans A, 1998, 29A: 1237-1243.
- [5] Adachi H, Osamura K, Ochiai S, et al. Mechanical property of nanoscale precipitate hardening aluminum alloys[J]. Scripta Materialia, 2001, 44: 1489-1492.
- [6] Wu Y L, Froes F H, Alvarez A, et al. Microstructure and properties of a new super-high-strength Al-Zr-Mg-Cu alloy C912[J]. Materials & Design, 1997, 18: 211-215.
- [7] Osamura K, Ochiai S, Kusui J, et al. Mechanical property of nanoscale precipitate hardening aluminum alloys[J]. Scripta Materialia, 2001, 44(8): 1489-1492.
- [8] Wei Q, Xiong B Q, Zhang Y A, et al. Production of high strength Al-Zr-Mg-Cu alloys by spray forming process[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2001, 11(2): 258-261.
- [9] Vives C. Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process(I) —working principle and metallurgical results[J]. Metall Trans B, 1989, 20B: 623-629.
- [10] Vives C. Effects of forced electromagnetic vibrations during the solidification of aluminum alloys(II) —solidification in the presence of collinear variable and stationary magnetic fields[J]. Metall Mater Trans B, 1996, 7B: 457-464.
- [11] Desnain P, Fautrelle Y, Meyer J L, et al. Prediction of equiaxed grain density in multicomponent alloys stirred electromagnetically[J]. Acta Metall Mater, 1988, 38(8): 1513-1523.

Super-high strength 7A60 Al alloy by low frequency electromagnetic cast(I) ——as-cast structures of billets with diameter of 0.2 m

DONG Jie, CUI Jian-zhong, LIU Xiao-tao, ZHAO Zhi-hao, BAO Wei-ping
(Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials for Ministry of Education,
Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Under the low frequency electromagnetic field, a super-high strength 7A60 Al alloy was semi-continuously cast into billets with diameter of 0.2 m. The surface properties, inner cracks of billets and the effect of electromagnetic frequency and intensity on as-cast microstructures were investigated. The microstructures of 7A60 Al alloy cast under low frequency electromagnetic field are fine, uniform and equiaxed, the difference of the microstructures between the border and center of the billet is small, their average sizes are 30 and 45 μm , respectively. The decrease of electromagnetic frequency and increase of intensity are helpful for obtaining fine, uniform and equiaxed as-cast microstructures. The optimum electromagnetic parameters are that the frequency is 25 Hz and the number of ampere turns is 18 000 A $\cdot$ turn.

Key words: low frequency; electromagnetic cast; microstructure; refinement; Al-Zn-Mg-Cu-Zr

(编辑 李向群)