

文章编号: 1004-0609(2004)01-0117-05

7A60 超高强铝合金的低频电磁铸造(II) ——直径 0.2m 锭坯合金元素晶内固溶度及其力学性能^①

董 杰, 刘晓涛, 赵志浩, 包卫平, 崔建忠

(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: 研究了低频电磁半连续铸造 7A60 合金铸锭的合金元素在晶内的固溶状况和力学性能。结果表明: 适当降低电磁场频率和增强电磁场强度, 有利于提高合金元素 Zn、Mg 和 Cu 在晶内的固溶度、锭坯的维氏硬度、抗拉强度和延伸率。频率为 15Hz, 安匝数为 20kA·turn 时, Zn、Mg 和 Cu 元素相对溶质固溶百分数最高, 分别为 68.8%、76.0% 和 45.0%; 频率为 15Hz, 安匝数为 20kA·turn 时, 锭坯维氏硬度最高为 Hv160; 频率为 25Hz, 安匝数为 20kA·turn 时, 抗拉强度最高为 324MPa。

关键词: 低频; 电磁铸造; 元素晶内固溶度; Al-Zn-Mg-Cu-Zr

中图分类号: TF777; TG113.2

文献标识码: A

Superhigh strength 7A60 Al alloy by low frequency electromagnetic cast(II) —Intracrystalline solubility of alloy element and mechanical property of billets with diameter of 0.2m

DONG Jie, LIU Xiao-tao, ZHAO Zhi-hao, BAO Wei-ping, CUI Jian-zhong

(The Key Lab of Electromagnetic Processing of Materials of Ministry of Education,
Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The intracrystalline solubility of alloy elements and mechanical properties of 7A60 Al alloy billets cast by low frequency electromagnetic casting were investigated. The results show that the relative intracrystalline solubility of alloy elements (Zn, Mg and Cu) and mechanical properties, Vicker hardness, ultimate tensile strength and elongation are increased with decreasing electromagnetic frequency and increasing electromagnetic intensity. When the frequency is 15Hz and number of ampere turns is 20kA·turn, relative intracrystalline solubility of alloy elements (for Zn, Mg and Cu the solubility are 68.8%, 76.0% and 45.0%, respectively) is the highest; when the frequency is 15Hz and number of ampere turns is 20kA·turn, Vicker hardness is the highest of Hv160; when the frequency is 25Hz and number of ampere turns is 20kA·turn, ultimate tensile strength is the highest of 324MPa.

Key words: low frequency; electromagnetic casting; intracrystalline solubility of alloy element; Al-Zn-Mg-Cu-Zr

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之一, 其研究和应用倍受关注^[1-6]。但是, 目前超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, 但大部分仍残存在晶界, 呈链状分布, 造成

① 基金项目: “十五 863” 项目(2001AA332030)

收稿日期: 2003-02-17; 修订日期: 2003-04-23

作者简介: 董 杰(1974-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 董 杰, 辽宁省沈阳市东北大学 317 信箱, 110004; 电话: 024-83681742; E-mail: dj_dongjie@21cn.com

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,降低晶界处的共晶和化合物的数量和尺寸,并细化晶粒,是提高该高强度铝合金断裂韧性的有效方法。Kusui 等^[7]采用粉末冶金和 WEI 等^[8]采用喷射沉积方法,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,气体含量和夹杂等问题难以解决。

张北江等^[9]提出了低频半连续电磁铸造(low frequency electromagnetic casting, LFEC) 7075 铝合金,相对于常规直接水冷半连续铸造(direct casting, DC),不仅可改善锭坯表面质量,细化晶粒,更重要的是可以提高合金元素在晶粒内的固溶度,还可以避免大直径铸锭产生裂纹,因此,采用低频电磁铸造技术铸造 7A60 合金,可期望获得超高强度和高韧性。本文作者主要研究了电磁场频率和强度对低频电磁铸造 7A60 合金锭坯合金元素晶内含量的影响规律,同时测定了锭坯的铸态力学性能。

1 实验

合金的熔炼和低频半连续铸造方法见文献[10],锭坯的化学成分范围(质量分数,%)为 Cu2.28~2.32, Mg 2.59~2.81, Zn8.53~8.79, Zr0.12~0.18, Be0.0002~0.001, Al 余量。在锭坯垂直横截面上 1/2 半径处截取试样,机械抛光后利用日本岛津 EPM-810Q 电子探针扫描电镜测定微区溶质元素含量。利用 HVA-10A 型小负荷维氏硬度计测量试样的硬度,用 Instron 8032 万能电子拉伸仪测定拉伸力学性能。

2 结果与讨论

2.1 电磁场提高合金元素晶内固溶度的机理

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,原子与原子之间团聚体的体积增加,降低临界形核功;熔体受到电磁力作用,产生强制对流,宏观上促使温度场和溶质场趋于均匀,增大了两相共存区间,有利于整个合金熔体均匀形核。综合上述原因,低频电磁铸造有利于大量晶核的形成,最终铸造组织为细小均匀的等轴或球形晶粒^[10]。

另外,在液态和固态金属中,原子失去价电子成为离子,没有磁场作用时,这些离子的热运动速度 v 是随机的、任意的。有磁场 B 存在时,速度 v

分解为垂直于磁场的分量 v_e 和平行于磁场的分量 $v_{\parallel}$ 。以速度 v_e 运动的带电荷为 q 的离子与 B 相作用,产生洛伦兹力:

$$f = qv_e \times B \quad (1)$$

洛伦兹力 f 和速度 v_e 相垂直,不改变 v_e 的大小,只改变其方向,故离子在 f 作用下围绕磁力线旋转。在垂直于磁场的投影面内,粒子运动轨迹是一个圆,其半径为

$$r_c = \frac{mv_e}{|q|B} \quad (2)$$

式中 m 是带电粒子的质量, q 为离子的带电量。由此可知,回旋半径 r_c 与离子质量成正比,与其电荷 q 成反比。由于 Al^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cu^{+} 的质量和电荷量各不相同,其回旋半径也不同。所以,磁场作用使得各溶质粒子对基体铝产生了相对运动,这种运动增强了溶质粒子在合金中的扩散,减小了微观偏析,从而增加了溶质在 $\alpha(Al)$ 中的固溶度。因此,电磁场作用下,锭坯的形核率增加,减小了晶粒之间的溶质元素扩散距离,以及不平衡凝固时合金元素在晶界的聚集程度;同时,在长大过程中,熔体内 Al^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cu^{+} 产生相对运动,有利于凝固晶粒前沿溶质场成分的均匀,从而增加合金元素在晶粒内部的含量。

2.2 电磁场对合金元素晶内固溶的影响

对低频电磁铸造部分锭坯垂直横截面上 1/2 半径处作电子探针分析,测定晶粒内部微区的合金含量,以了解溶质的固溶情况。由于在合金熔炼过程中不可能精确控制每一炉合金的烧损,以及不能完全去除熔炼炉内合金成分的宏观偏析,所以半连续电磁铸造锭坯的合金成分不可能完全相同。为了消除成分偏差的影响,实验中对部分锭坯 1/2 半径处的主要元素进行了化学分析,用相对溶质固溶含量来比较元素在晶内的固溶状况。

(1) 频率对铸锭合金元素固溶度的影响

电磁频率的高低对合金中的主要元素 Zn、Mg 和 Cu 的固溶度有明显影响。在相同的安匝数 (20kA·turn) 和铸造工艺条件下(铸造速度 50mm/min, 温度 710℃),图 1 给出了频率与相对溶质固溶含量的变化关系。实线和虚线分别代表 DC 和低频电磁铸造 Zn、Mg 和 Cu 在 1/2 铸锭处晶内的相对溶质固溶度。常规 DC 铸造 Zn、Mg 和 Cu 的相对溶质固溶度较小,分别为 41%、45% 和 29%;低频电磁铸造大幅增加 Zn、Mg 和 Cu 在晶粒内的固溶度,频率较低为 15Hz 时,溶质相对固溶度最大,

Zn、Mg 和 Cu 相对溶质固溶度分别为 68.8%、76.0% 和 45.0%。随频率的升高, Zn、Mg 和 Cu 相对溶质固溶度降低; 而当频率从 15Hz 增加到 25Hz 时, Zn 的相对溶质固溶度降低幅度较小, Mg 次之, Cu 最大; 当频率从 25Hz 增加到 35Hz 时, Zn、Mg 和 Cu 相对溶质固溶度降低幅度均较大; 当频率从 35Hz 增加到 50Hz 时, Zn、Mg 和 Cu 相对溶质固溶度降低幅度中 Zn 最大, Mg 其次, 然后是 Cu, 但均高于常规 DC 铸造的相对溶质固溶度。同时可以发现, 在相同条件下, Zn 和 Mg 元素在晶粒内的含量高, Cu 元素较低, 表明 Cu 元素更容易在晶界富集。所以, 适当的降低频率, 有利于提高合金元素在晶粒内部的含量。

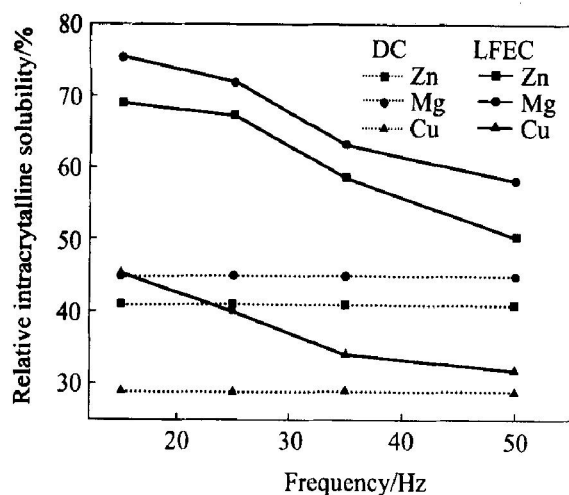


图 1 频率与铸锭元素相对固溶度的关系

Fig. 1 Effect of frequencies on relative intracrystalline solubility of alloy elements

磁感应强度在金属熔体内渗透深度的增加由集肤深度 δ 来表示:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\sigma \mu \pi f}} \quad (3)$$

式中 σ 和 μ 为合金熔体的电导率和磁导率, f 为电磁场频率。当电磁频率降至 25Hz 以下时, 电磁力的约束作用和搅拌强度都大幅减弱, 但电磁场的渗透深度增加, 熔体内两相区中的电磁感应强度相应增强, 这样更有利于改善溶质元素的分布状态、提高合金元素的晶内固溶量。

(2) 电磁场强度对铸锭合金元素固溶度的影响

电磁场对溶质的分布和固溶有一定的促进作用。图 2 所示为铸造温度 710℃, 频率 15Hz 和铸造速度为 50mm/min 的条件下, 锭坯 1/2 半径部位相对溶质含量与线圈磁场强度的变化关系。当安匝数

较小为 12kA·turn 时, Zn、Mg 和 Cu 的相对固溶度 (分别为 45.9%、50.5% 和 31.0%) 与常规 DC 铸造 Zn、Mg 和 Cu 的相对溶质固溶度 (分别为 41.0%、45.0% 和 29.0%) 相比, 略有增加。安匝数由 12kA·turn 增加到 15kA·turn 时, Zn、Mg 含量增加得很快, Cu 元素略有增加; 由 15kA·turn 增加到 18kA·turn 时, Zn、Mg 和 Cu 元素相对溶质固溶度有较大幅度的增加; 由 18kA·turn 增加到 20kA·turn 时, Zn、Mg 和 Cu 元素相对溶质固溶度增加幅度较小, 当安匝数为 20kA·turn 时, Zn、Mg 和 Cu 元素相对溶质固溶度最高, 分别为 68.8%、76.0% 和 45.0%。因此, 电磁场安匝数为 18k~20kA·turn 时有利于合金元素固溶到晶粒内去, 但是如想再通过增加电磁场强度的办法来提高合金元素在晶粒内的含量意义不大。

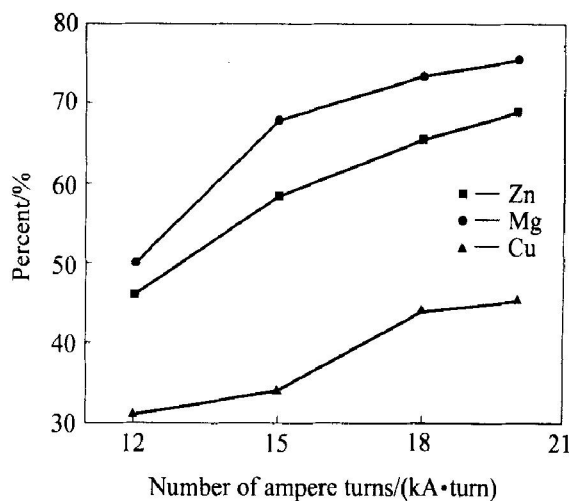


图 2 磁场强度与铸锭相对固溶度的关系

Fig. 2 Effect of number of magnetic density on relative intracrystalline solubility of alloy elements

当线圈内电流分布为已知时, 磁场中任意一点的磁感应强度可以由 Biot-Savart 定律给出:

$$B(P) = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{I(Q) \times R^0}{R^2} dV \quad (4)$$

式中 $dV(Q)$ 表示源点 Q 周围的体积元, $I(Q)$ 表示其电流密度, R 为源点 Q 到场点 P 之间的距离, R^0 为源点 Q 指向场点 P 的单位矢量, μ 为磁导率。(4) 式表明, 线圈的磁场强度越大, 在合金熔体内引起的磁感应强度越大, 产生的感生电流越大, 熔体受到的磁场作用越强。改善溶质元素的分布状态、增大合金元素在熔体内的运动强度和范围, 可提高合金元素的晶内固溶量。

2.3 铸锭力学性能

用维氏硬度计测量锭坯 1/2 半径处的宏观硬度, 载荷为 98N, 测量 6 次, 取平均值。低频电磁铸造锭坯增加部位的维氏硬度值与常规 DC 铸造的维氏硬度值(76)相比有较大的提高, 不同磁场强度和频率对应的维氏硬度值如图 3 所示。当安匝数为 $12\text{kA}\cdot\text{turn}$ 、频率为 50Hz 时, 硬度值最小为 Hv81.1, 略高于常规 DC 铸造合金的维氏硬度值; 当安匝数为 $18\text{k}\sim 20\text{kA}\cdot\text{turn}$ 、频率为 $15\sim 25\text{Hz}$ 时, 硬度值最大, 达 Hv150~160; 当安匝数较小为 $12\text{kA}\cdot\text{turn}$ 时, 电磁场的作用相对较弱, 硬度值较小; 安匝数增加到 $15\text{kA}\cdot\text{turn}$, 硬度值有较大幅度的增加, 50Hz 的硬度值增加的幅度较小; 安匝数增加到 $18\text{kA}\cdot\text{turn}$ 时, 频率为 15、25 和 50Hz 的硬度增加幅度较大, 35Hz 增加幅度较小; 安匝数增加到 $20\text{kA}\cdot\text{turn}$ 时, 频率为 15、25 和 30Hz 的硬度增加幅度均较小, 50Hz 时增加幅度稍大一些。同时, 在相同的电磁场强度下, 硬度也随着频率的增加而减小, 例如当安匝数为 $18\text{kA}\cdot\text{turn}$ 时, 频率为 15 和 25Hz 时, 硬度分别为 Hv153 和 Hv154, 而频率增加到 35Hz 时, 硬度降低到 Hv128; 再增加到 50Hz 时, 硬度仅为 Hv116。因此, 适当地增加磁场强度和降低频率有利于铸锭获得较高的硬度。

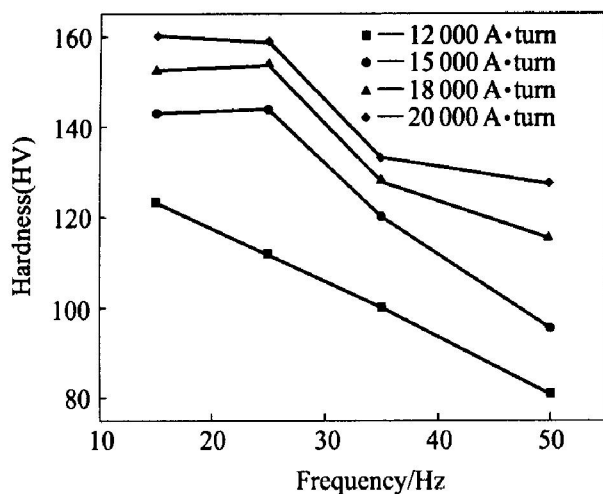


图 3 电磁场参数与硬度的关系

Fig. 3 Effect of electromagnetic parameters on hardness

在部分硬度值较高的锭坯的垂直横截面上, 沿直径方向截取制得标准拉伸试样, 在常温测得拉伸强度极限和延伸率, 测量 3 次, 取平均值。结果表明, 低频电磁场作用下的铸锭拉延伸率(0.2%~1.2%), 与不加电磁的常规 DC 铸造锭坯的延伸率

(0.2%) 相比, 有不同程度的增加。虽然低频电磁铸造锭坯的延伸率相对常规 DC 铸造有一定的提高, 但是, 延伸率为 0.8%~1.2% 时, 试样对应的电磁场频率和强度范围分别为 $15\sim 25\text{Hz}$ 和 $18\text{k}\sim 20\text{kA}\cdot\text{turn}$, 这表明延伸率的增加是细化晶粒和增加合金元素晶内的固溶度的综合结果。观察应力—应变曲线可以发现: 锭坯未达到屈服点时就断裂, 这表明提高合金含量, 可大幅提高铸造组织强度, 但是韧性会降低, 因此, 要获得超高强度高韧铝合金, 还需对后续工艺如均匀化、成型制度、热处理制度等进行进一步研究。

低频电磁场作用下的铸锭抗拉强度(264~324MPa), 与不加电磁的常规 DC 铸造锭坯的抗拉强度(260MPa)相比, 也有不同程度的增加。图 4 所示是不同频率对应的抗拉强度, 两条曲线分别表示安匝数为 18k 和 $20\text{kA}\cdot\text{turn}$ 时锭坯的抗拉强度, 当频率为 $15\sim 25\text{Hz}$ 时的抗拉强度较高, 其中 25Hz 最高, 抗拉强度分别为 321 和 324MPa, 然后随着频率的降低, 抗拉强度也降低, 而频率为 50Hz 时最低。图 5 表示不同磁场强度对应的抗拉强度, 频率分别为 15 和 25Hz, 安匝数为 $12\text{kA}\cdot\text{turn}$ 时, 抗拉强度分别为 273 和 264MPa, 略高于常规铸造合金的。而随磁场强度的增加, 抗拉强度增加很快, 但当安匝数从 $18\text{kA}\cdot\text{turn}$ 增加到 $20\text{kA}\cdot\text{turn}$ 时, 增加的幅度不大, 在 $20\text{kA}\cdot\text{turn}$ 时, 极限抗拉强度达到最大值。结果表明, 在频率为 $15\sim 25\text{Hz}$, $18\text{k}\sim 20\text{kA}\cdot\text{turn}$ 时, 锭坯可以获得较大的铸态抗拉强度。

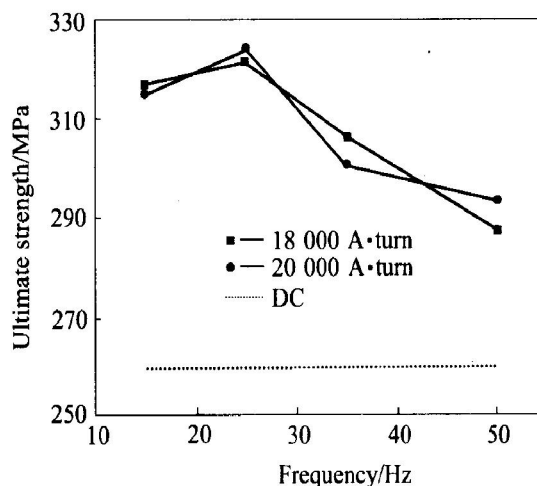


图 4 不同频率时的极限抗拉强度

Fig. 4 Effect of frequencies on ultimate tensile strength

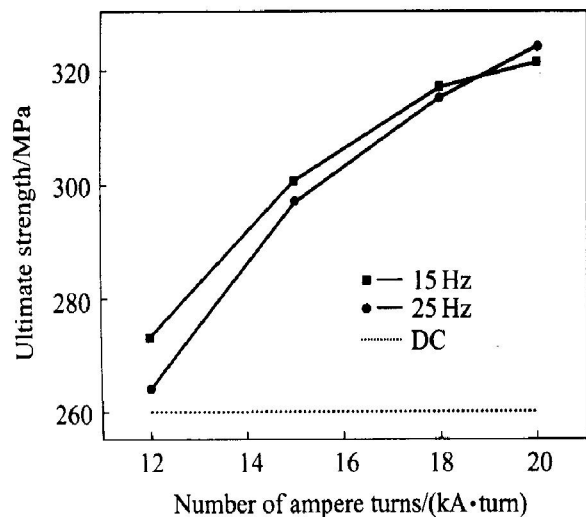


图5 磁场强度与极限抗拉强度的关系

Fig. 5 Effect of number of magnetic intensities on ultimate tensile strength

3 结论

1) 低频电磁场细化晶粒和促使合金元素粒子做相对运动是提高合金元素晶内固溶度的主要原因。

2) 适当降低频率和增加安匝数,有利于提高合金元素Zn、Mg和Cu在晶内的固溶度,錠坯维氏硬度、延伸率和抗拉强度。

3) 频率为15Hz,安匝数为20kA·turn时,Zn、Mg和Cu元素相对溶质固溶度最高,分别为68.8%、76.0%和45.0%。

4) 频率为15Hz,安匝数为20kA·turn时,錠坯维氏硬度最高为Hv160;频率为25Hz,安匝数为20kA·turn时,抗拉强度最高为324MPa。

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(S1): 14-21.
LI Cheng-gong, WU Shi-jie, DAI Sheng-long, et al. Application and development of advanced aluminum alloy in aerospace industry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(S1): 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(S1): 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(5): 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, 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(8): 1489-1492.
- [6] Wu Y L, Froes F H, Alvarez A, et al. Microstructure and properties of a new superhigh-strength AlZrMg-Cu alloy C912[J]. Materials & Design, 1997, 18(4): 211-215.
- [7] Kusui J, Fujii K, Yokoe K, et al. Development of super-high strength AlZrMg-Cu P/M alloys[J]. Materials Science Forum, 1996: 217-222(7): 1823-1828.
- [8] WEI Q, XIONG B Q, ZHANG Y A, et al. Production of high strength AlZrMg-Cu alloys by spray forming process[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2001, 11(2): 258-261.
- [9] 张北江,崔建忠,路贵民. 电磁场频率对电磁铸造7075铝合金微观组织的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(2): 215-219.
ZHANG B J, CUI J Z, LU G M, et al. Effect of frequency on microstructure of electromagnetic casting 7075 aluminum alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(2): 215-219.
- [10] 董杰,崔建忠,刘晓涛,等. 7A60超高合金的低频电磁铸造(I)——直径0.2m錠坯铸态组织[J]. 中国有色金属学报, 2003, 12(6): 1494-1499.
DONG Jie, CUI Jian-zhong, LIU Xiao-tao, et al. Superhigh strength 7A60 Al alloy by low frequency electromagnetic cast—as cast structures of billets with diameter of 0.2m[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 12(6): 1494-1499.

(编辑 龙怀中)