

普通铸造和低频电磁铸造 7050 铝合金 电阻率-温度特性的研究^{*}

樊 飞 班春燕[†] 王 洋 巴启先 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)

(2007 年 12 月 7 日收到, 2008 年 2 月 16 日收到修改稿)

利用四端接线法测量以普通铸造(DC)和低频电磁铸造(LFEC)两种不同方法制备的 7050 铝合金的电阻率-温度曲线. 发现升温曲线在 250℃ 有一斜率转变点, 且 LFEC 样品电阻率随温度变化得要快; 由室温至 900℃ 的过程中, LFEC 试样的液固相线温度均高于 DC 试样, 而 DC 试样在 900℃ 保温甚至降温至 600℃ 电阻率都显著增大. 结合金相显微组织的观察, 对上述现象进行理论分析.

关键词: 低频电磁铸造, 电阻率, 铝合金, 洛伦兹力

PACC: 8140, 4100

1. 引 言

超高强铝合金(Al-Zn-Mg-Cu 合金)具有强度高、密度低和极好的断裂韧性等优点, 是广泛应用于航空的主体结构材料^[1]. 其作为重要的材料, 代表着各国的宇航技术水平, 在国家未来的军事和经济中都具有重要的战略地位. 因此超高强铝合金的开发和研制具有重要价值. 现代航空工业的发展对高强度高韧性铝合金的综合性能提出了更高的要求. 为适合这些特殊应用的要求, 各种性能需不断提高^[2].

近十几年, 材料电磁加工技术得到了快速发展, 已成为金属材料基础研究和开发制备新技术领域的重要研究方向^[3-5]. 低频电磁铸造(low frequency electromagnetic casting, LFEC)是近年来崔建忠等在电磁铸造(casting, refining, electromagnetic, CREM)的基础上发展起来的新的铸造工艺. 该工艺在普通铸造技术的结晶器周围布置交流感应线圈, 通入低频电流(低于 50 Hz), 用半连续低频电磁铸造工艺制备铝合金铸锭. 相对于普通铸造(direct chilling casting, DC), LFEC 不但可以实现 CREM 铸锭微观组织细小均匀, 表面质量好的目的, 而且还可以提高晶内合金

元素含量, 增强铸锭的抗裂纹能力, 减小宏观偏析, 显著改善了铸锭的质量^[6,7].

电阻率对于合金的结构变化是一个敏感的参数, 通过对影响电阻率因素的详细分析, 可以了解合金内部组织结构的变化^[8-11]. 电阻率还应用于液态金属的研究, 这除了由于金属液固相变时电阻率会发生突变外, 还发现在远高于液相线的高温, 液态金属的结构改变也会由电阻率的变化灵敏地反映出来^[12-14]. 因此, 通过电阻率-温度($\rho-T$)曲线的研究, 可以得到固态和液态金属的组织结构随温度演化过程中的许多有用信息.

本文分别在室温—500℃ 和室温—900℃ 的温度范围内, 测量了 DC 和 LFEC 两种方法制备的 7050 铝合金的 $\rho-T$ 曲线, 并结合金相组织的观察, 研究了两种铸造工艺所造成的 $\rho-T$ 曲线差异的原因.

2. 实验材料及方法

配制 7050 铝合金, 合金成分(质量比)为 Zn6.5%, Cu2.5%, Mg2.5%. 分别用 DC 和 LFEC 制备成铸锭. 浇注温度 725—730℃, 铸造速度 55 mm/min, 冷却水量 90 L/min. LFEC 铸造励磁线圈电流 160 A, 频率 20 Hz. 铸锭直径 120 mm, 在铸锭中部截

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 50674030, 50404007)资助的课题.

[†] E-mail: bancy@epm.neu.edu.cn

取长约 140 mm 的一段,去掉边缘部分,制成截面尺寸约为 10 mm × 10 mm × 100 mm 的方料,再加工成 $\Phi 6$ mm × 90 mm 的样品。

一组样品以 2℃/min 加热至 500℃,保温 10 min,再以 2℃/min 降至室温,温度每变化 5℃测一个电阻值。另一组样品以 5℃/min 加热至 900℃保温 10 min,再以 5℃/min 降至室温,温度每变化 5℃测一个电阻值。采用四端接线法,用 SB-2230 型直流数字电阻测试仪测量试样的电阻率。

从试样中部截取长约 20 mm 的样品,经砂纸打磨、机械抛光、麂皮精抛后,用混合酸腐蚀,制成金相

试样,用 LeicaDMR 光学显微镜观察金相组织。用 Optima 4300DV 型光谱仪对试样不同部位进行化学分析。

3. 实验结果与讨论

图 1(a)和(b)是 7050 铝合金原始铸态的宏观组织。图中显示 LFEC 铸态组织比 DC 铸态组织细小,并且 DC 铸态组织中存在粗大的柱状晶,而 LFEC 铸态组织的晶粒形状呈近球形。图 1(c)和(d)是其微观组织,可以发现 LFEC 样品的晶界比 DC 样品的细。

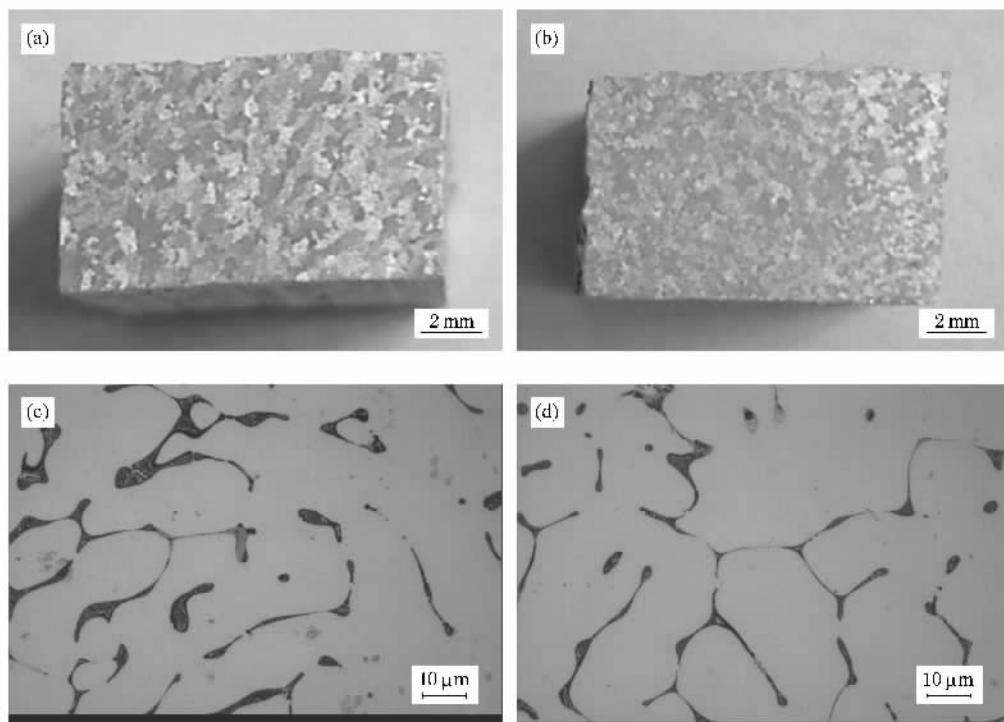


图 1 7050 铝合金铸态宏观组织和微观组织 (a)(c) DC;(b)(d) LFEC

图 2 是室温至 500℃升降温过程中电阻率-温度曲线。其中图 2(a)为升温过程 ρ - T 曲线,由图可知,曲线大致由两个线性区间组成,在大约 250℃处有一个斜率转变点。图 2(b)所示的降温过程 ρ - T 曲线几乎呈单一斜率线性下降。无论升温或降温过程,在整个测量温度范围内,LFEC 样品的 ρ - T 曲线均比 DC 的高,且随温度变化的也较快。将两图中的室温电阻率加以比较,发现测量后两种铸造方法制备样品的电阻率都比其原始值降低了。

图 3 是经升降温电阻率测量后样品的金相照片。可以看到原始组织中粗大的晶界变为细条状并且不连续,晶内还出现大量的大小不均的针状析出物。

把原始铸态样品以 2℃/min 的速度升至 400℃,保温 0.5 h,然后水淬,其显微组织如图 4(a)和(b)所示。与图 1(c)和(d)比较,晶界都变细了,显示晶界上的溶质元素溶入 α -Al 中。比较图 3 和图 4,前者晶界更细,表明随着温度升高到 500℃,晶界上更多的溶质溶入 α -Al 中。而后者晶内没有析出物,可见图 3 中析出物是在降温至较低温度生成的。

图 5 是室温至 900℃升降温过程中电阻率-温度曲线。图 5(a)升温至 900℃的过程中在 890℃之下 LFEC 电阻率始终高于 DC 的电阻率。从室温至约 250℃的 ρ - T 曲线线性变化,250℃后仍大致是线性的,但斜率稍变大。约 570℃后,曲线陡峭上升,而

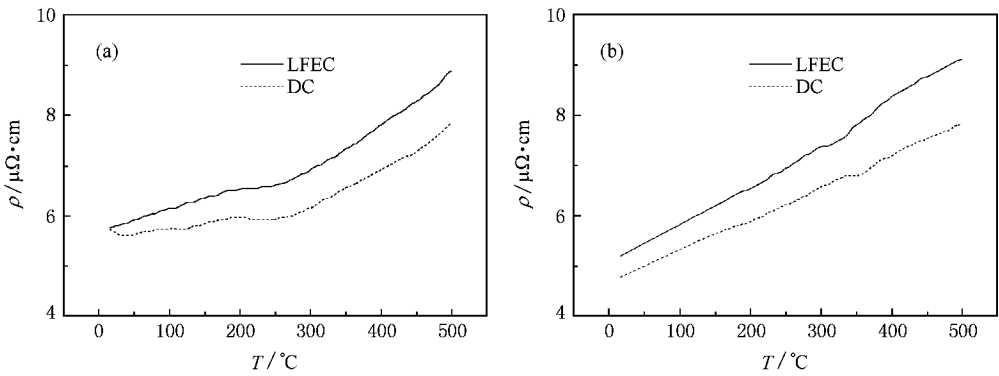


图 2 7050 铝合金室温—500℃过程中 ρ - T 曲线 (a)升温过程 ;(b)降温过程

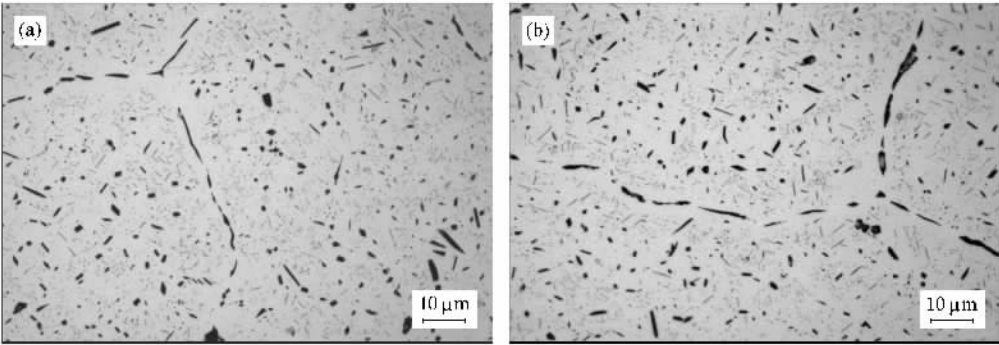


图 3 7050 铝合金室温—500℃测量电阻率后试样显微组织 (a)DC ;(b)LFEC

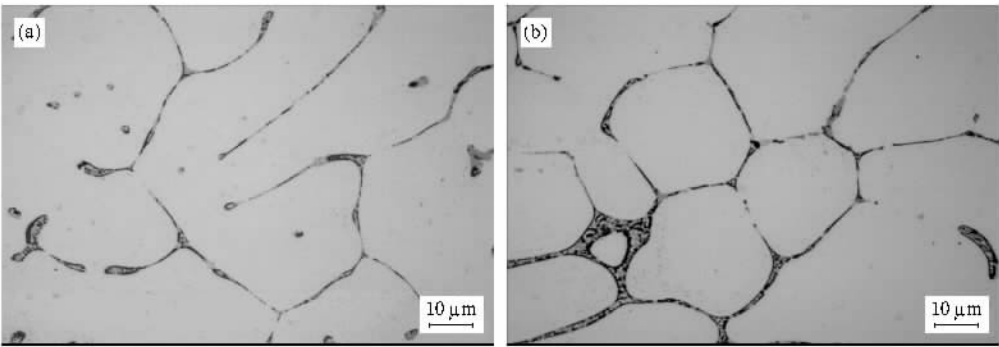


图 4 7050 铝合金 400℃淬火显微组织 (a)DC ;(b)LFEC

650℃左右上升又趋于平缓. 前一个转变温度对应合金的固相线温度,而后者对应液相线温度. 由图 5 (a)确定的两种铸造工艺制备的 7050 铝合金的固相线和液相线温度如表 1 所示. 可见,LFEC 合金的固相线和液相线温度都相对 DC 合金向高温移动. ρ - T 曲线大约 880℃时再次突升,这个温度可能与溶质团簇分解有关,使电阻率发生突变^[13]. 图 5 (b)是降温曲线,从 900℃降至 600℃,电阻率没有下降反而

上升,且 DC 样品上升更为显著. 低于 600℃,电阻率随温度单调下降. 与升温曲线不同的是,在 900℃至室温降温过程中 DC 样品的 ρ - T 曲线一直比 LFEC 样品的高.

为了解保温和降温过程电阻率的变化情况,将 DC 试样升温至 900℃,保温 1 h 后,再降至室温. 作出电阻率(温度)-时间曲线如图 6 所示. 由图可见,不仅升温过程电阻率增大,在 900℃保温,甚至降温

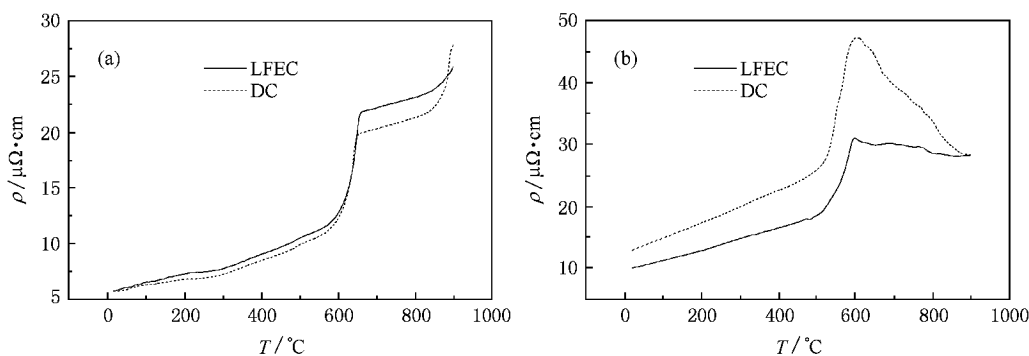


图 5 7050 铝合金室温至 900℃ ρ - T 曲线 (a)升温过程 ;(b)降温过程

表 1 DC 和 LFEC 液固相线温度

铸造工艺	固相温度/℃	液相温度/℃
DC	565	650
LFEC	575	660

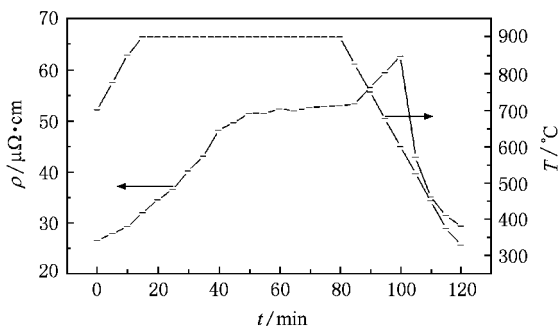


图 6 DC 试样室温至 900℃电阻率(温度)时间曲线

至 600℃之前电阻率都在增大,直到温度降至 600℃以下电阻率才开始下降。

当交流的励磁电流通过感应线圈时,在线圈中产生交流磁场 B ,位于磁场中的金属内部会感应生成涡流 J 。涡流 J 与磁场 B 相互作用产生洛伦兹力

$$f = J \times B = \frac{1}{\mu} (B \cdot \nabla) B - \frac{1}{2\mu} \nabla B^2, \quad (1)$$

式中 μ 为磁导率。考虑铝为弱磁性物质,可取 $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。(1)式中右边第一项为有旋力,它强迫金属熔体产生涡旋运动,致使在交流磁场中凝固的合金晶内溶质含量增加^[6,15]。第二项为无旋力

$$f = -\frac{1}{2\mu_0} \nabla B^2. \quad (2)$$

利用磁感应强度 B 和磁场强度 H 的关系(2)式可改写成

$$f = -\frac{\mu_0}{2} (1 + \chi) \nabla H^2, \quad (3)$$

式中 χ 为磁化率。由于磁力线纵向不均匀性和金属的趋肤效应, ∇H^2 存在纵向分量 $\nabla_{\parallel} H^2$ 和横向分量 $\nabla_{\perp} H^2$ 。相应的无旋力也分为纵向分量 $f_{\parallel}$ 和横向分量 $f_{\perp}$ 。考虑感应线圈内部的磁力线大致沿铸锭的轴线方向,取轴线方向为 z 轴,建立柱坐标系(r, θ, z)。横向分量的力可表示为

$$f_{\perp} = -\frac{\mu_0}{2} (1 + \chi) \frac{\partial}{\partial r} H^2, \quad (4)$$

其方向沿铸锭径向。若基体铝的磁化率为 χ_b ,溶质的磁化率为 χ_p ,则溶质相对基体铝受磁力^[16]

$$\Delta f = f_{\perp p} - f_{\perp b} = \frac{\mu_0}{2} (\chi_b - \chi_p) \frac{\partial}{\partial r} H^2. \quad (5)$$

式(5)表明,若 $\chi_p > \chi_b$,溶质相对基体受到一个沿径向指向轴线的磁力,将向铸锭中心移动。若 $\chi_p < \chi_b$,溶质受磁力作用将向铸锭的边缘移动。7050 铝合金中溶质主要有 Zn、Cu 和 Mg,它们的磁化率都比铝小,因此受磁力作用会移向铸锭边缘。我们分别在半径为 60 mm 的 DC 和 LFEC 圆柱形铸锭的圆心、1/2 半径和边部各车出宽为 2mm 的一圈碎屑进行化学分析,得到 DC 和 LFEC 样品中 Zn、Cu 和 Mg 等元素沿铸锭径向的分布,如图 7 所示。由图 7 可见,两种铸造方法铸锭边部的溶质含量均高于铸锭心部,但是 LFEC 铸锭心部的 Zn、Cu 和 Mg 均比 DC 的低,而边部的要比 DC 的高。

需要指出的是,化学分析的溶质成分表示的是合金中晶内和晶界上溶质的总含量。而晶内溶质又分为溶入固溶体内和未溶入固溶体内的两部分。温度一定,溶入固溶体的溶质浓度的高低决定着固溶体电阻的大小,从而主导着低溶质含量合金的电阻大小。

电磁搅拌能够细化晶粒,因此导致了图 1(a)和(b)中晶粒大小的差异。而且电磁搅拌能够增加晶

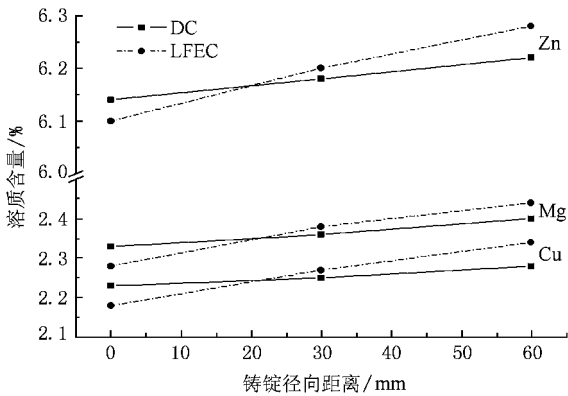


图 7 溶质元素沿铸锭径向的分布

内溶质含量. 图 1(c)和(d)中, LFEC 样品的晶界比 DC 样品的晶界细, 这是因为 LFEC 晶内溶质含量增加, 导致晶界溶质含量减少所致.

低溶质含量合金的电阻取决于溶剂金属固溶体的电阻^[17]. 固溶体的电阻率 ρ 可表示为

$$\rho = \rho_i + \rho_m(T), \tag{6}$$

其中 ρ_i 同溶质含量有关; $\rho_m(T)$ 是溶剂金属的电阻, 取决于晶格振动, 与温度 T 有关. 在高于室温的温度, ρ_m 与 T 成线性关系, 即

$$\rho_m(T) = CT, \tag{7}$$

其中 C 为常数. 溶质溶入固溶体产生杂质散射, 是金属电阻的另一个来源. 固溶体中溶质的浓度 n_i 较小时, 与电阻的关系可粗略的表示为

$$\rho_i = Kn_i, \tag{8}$$

K 为比例常数.

电磁搅拌作用不但使 LFEC 样品晶内溶质含量增高, 而且还使 α -Al 固溶体中溶质的溶解度也增高^[15]. 所以在室温升温至 500℃, 乃至升温至 900℃ 的过程中, LFEC 样品的 ρ - T 曲线始终比 DC 的高. 当温度比较低时, α -Al 固溶体中溶质浓度几乎不变. 随着温度升高, 晶格振动增强, 电阻率线性增加. 当温度超过 250℃ 时, 可能是溶质在 α -Al 中溶解度增加, 此时不仅电子散射随温度增强, 而且杂质散射也

随温度增大, 致使在 250℃ 时 ρ - T 曲线的斜率出现一个转折点. 显然晶内的溶质比晶界上的溶质更容易进入 α -Al 中. 由于 LFEC 样品中晶内溶质含量高, 所以随着温度升高, 其 ρ 增加得也快.

室温至 500℃ 的升降温测量过程, 实际上是对样品缓慢加热和冷却的处理过程. 测量到高温, 溶质溶入 α -Al 中增多, 电阻增加. 降温时, 溶质将从 α -Al 中析出. 由于测量时降温速度远低于浇铸时的冷却速度, 使得溶质有更多的机会从 α -Al 中析出, 以致测量后 α -Al 中溶质含量比原始铸锭的低, 故测量后电阻率降低了. 可以证明, 对于液态金属 (6) 式和 (7) 式仍然适用^[18]. 在大约 830℃ 时, 液态合金的电阻率明显上升, 估计在这个温度溶质团簇开始分解, 更多的溶质溶入液态中. 这可能是由于 DC 样品溶质总含量比 LFEC 样品高, 因此高温液体中溶质的总含量也高, 导致在约 880℃ 之后 DC 样品的 ρ 超过 LFEC 样品, 而且在 900℃ 保温, 甚至降温至 600℃ 时, DC 样品中 ρ 一直呈上升趋势. 从 900℃ 降至室温的过程中虽然溶质不断地从 α -Al 中析出, 但溶质在 α -Al 中的浓度, DC 始终高于 LFEC, 因此 900℃ 至室温的 ρ - T 降温曲线 DC 的反而要高.

4. 结 论

1. DC 和 LFEC 两种不同铸造工艺制备的 7050 铝合金铸锭, 在室温至 500℃ 的 ρ - T 曲线大致呈两个线性区, 升温曲线在 250℃ 有一斜率转变点, 且 LFEC 样品电阻率随温度变化得要快.

2. 室温至 900℃ 的 ρ - T 曲线上, 在固相线和液相线温度 ρ - T 曲线都发生突变, 在约 880℃ 时, 曲线又出现突变点. DC 和 LFEC 两种不同铸造工艺制备的样品, ρ - T 升温曲线后者高于前者, 而降温曲线前者高于后者.

3. 造成上述差异的原因是由于电磁铸造使 Zn, Cu 和 Mg 等溶质向铸锭边部移动, 并使晶内溶质含量增加所致.

[1] Alrubaie K S, Delgrande M A, Travessa D N, Cardoso K R 2007 *Mater. Sci. Eng. A* **464** 141
[2] Dixit M, Mishra R S, Sankaran K K 2007 *Mater. Sci. Eng. A* **464** 1
[3] Ban C Y, Ba Q X, Cui J Z, Lu G M, Zi B T 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2028 (in Chinese) [韩逸、巴启先、崔建忠、路贵民、曹炳涛 2001 物理学报 **50** 2028]

[4] Han Y, Ban C Y, Ba Q X, Wang S H, Cui J Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2955 (in Chinese) [韩逸、班春燕、巴启先、王书晗、崔建忠 2005 物理学报 **54** 2955]
[5] Gillon P 2000 *Mater. Sci. Eng. A* **287** 146
[6] Zhang B J, Cui J Z, Lu G M 2002 *J. Mater. Sci. and Tech.* **18** (5) 1

- [7] Zhang Q , Ban C Y , Cui J Z , Ba Q X , Lu G M , Zhang B J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2642 (in Chinese) [张 勤、班春燕、崔建忠、巴启先、路贵民、张北江 2003 物理学报 **52** 2642]
- [8] Chen H X 1987 *The physics capability and measurement method of metal* (Beijing : Metallurgical Industry Press) [in Chinese] [陈洪荪 1987 金属物理性能及测试方法 (北京 : 冶金工业出版社)]
- [9] Corfield M R , Harris I R , Williams A J 2007 *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* . **316** 59
- [10] Xu J F , Wei B B 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3444 (in Chinese) [徐锦锋、魏炳波 2005 物理学报 **54** 3444]
- [11] Zhai Q Y , Yang Y , Xu J F , Guo X F 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6118 (in Chinese) [翟秋亚、杨 扬、徐锦锋、郭学锋 2007 物理学报 **56** 6118]
- [12] Li X F , Zu F Q , Ding H F , Yu J , Liu L J , Xi Y 2006 *Physics Letters . A* **354** 325
- [13] Wang Q , Jia J , Li P J , Wu P L 1998 *Casting* **3** 7 (in Chinese) [王 强、贾 均、李培杰、吴培莲 1998 铸造 **3** 7]
- [14] Wang Q , Lu K Q , Li Y X 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1355 (in Chinese) [王 强、陆坤权、李言祥 2001 物理学报 **50** 1355]
- [15] Ban C Y , Ba Q X , Cui J Z , Zeng G Y 2002 *Journal of Northeastern University* (Natural Science) . **23** 799 (in Chinese) [班春燕、巴启先、崔建忠、曾桂仪 2002 东北大学学报(自然科学版) **23** 799]
- [16] Han Y , Ban C Y , Zhang H T , Nagaumi H , Ba Q X , Cui J Z 2006 *Mater. Trans.* **47** 2092
- [17] Fang J X , Lu D 1980 *Physics of solid state* (Shanghai : Science and Technology Press in Shanghai) (in Chinese) [方俊鑫、陆 栋 1987 固体物理 (上海 : 上海科技出版社)]
- [18] Shimoji M 1977 *Liquid metals an introduction to the physics and chemistry of metals in the liquid state* (London : Academic Press)

The resistivity evolution with temperature of 7050 aluminium alloy by different casting methods^{*}

Fan Fei Ban Chun-Yan[†] Wang Yang Ba Qi-Xian Cui Jian-Zhong

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

(Received 7 December 2007 ; revised manuscript received 16 February 2008)

Abstract

The resistivity-temperature curve of 7050 aluminium alloy prepared by different casting methods (DC and LFEC) has been measured with D. C. four-probe method. By analysing the curve , it was found that a change occurred to the slope at 250℃ when the samples were heated , and the resistivity of LFEC sample changed with temperature more quickly than that of DC. Both the solidus and liquidus temperatures of LFEC samples were higher than those of DC samples during the process of temperature rise from room temperature to 900℃ . However , the resistivity of DC samples increased remarkably when the temperature was kept at 900℃ and before it was decreased to 600℃ . With the help of microstructure observation , the characteristics and phenomenon of the resistivity evolution with temperature were studied.

Keywords : low frequency electromagnetic casting , resistivity , aluminium alloy , Lorentz force

PACC : 8140 , 4100

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50674030 , 50404007).

[†] E-mail : bancy@epm.neu.edu.cn