

[文章编号] 1004-0609(2001)01-0022-05

## 铝电磁铸轧中熔体的频率响应<sup>①</sup>

赵啸林, 毛大恒, 李晓谦, 贺地求

(中南大学机电工程学院, 长沙 410083)

**[摘 要]** 介绍了在铝铸轧工艺中用频率交替变化的电磁场抑制晶粒长大的方法, 阐述了粘性流体与电磁波频率响应的关系, 分析了电磁场频率与熔体波动对晶粒细化效果产生的影响。结果表明在  $d 650 \text{ mm} \times 1 600 \text{ mm}$  铸轧机系统中, 电磁场的最佳频域范围为  $11 \sim 15 \text{ Hz}$ 。

**[关键词]** 铝; 电磁铸轧; 频率响应; 频域

**[中图分类号]** TG 249.9

**[文献标识码]** A

连续铸轧是目前先进的材料加工工艺, 其特点是用转动的轧辊做结晶器, 使金属熔体经过铸造和轧制直接生产带坯, 代替通常铝板、箔材生产中所需的铸造、锯切、铣面、加热、热轧等全部工序, 因此, 经济效益非常显著, 但这种工艺必须向熔体内添加晶粒细化剂, 才能获得细小的晶粒组织, 而添加晶粒细化剂就不可避免地会产生污染, 这对要求高纯铝箔材的航天、电子产品来说是一个必须解决的问题。从 20 世纪 90 年代开始, 世界各国都在研究电磁连续铸轧, 拟用电磁场代替通常的晶粒细化剂, 籍以提高板、箔材的质量。中南工业大学研制的电磁连续铸轧系统是将供料嘴安装在电磁感应器的上、下铁芯气隙中, 电磁感应器由多个均匀分布的铁芯组成, 在铁芯的线圈中通入交流电, 当铝熔体注入供料嘴而进入铸轧区时, 在铝熔体中通入直流电, 就形成如图 1 所示的电磁铸轧系统。该项技术不同于添加晶粒细化剂, 它是采用电磁场来抑制晶粒长大的线速度从而达到细化晶粒的目的。从铸轧区示意图(图 2)中可以看出, 在液固区的外侧是已凝固的金属, 中心部分是铝熔体。在液固区因冷却速率非常大, 铝熔体受激冷而凝固, 同时经轧制而成铝带坯。因这种工艺的铸轧区形状特殊, 长度只有几十毫米, 铝熔体在其中只有  $2 \sim 3 \text{ s}$  的时间即完成液固态转变, 因此, 它不仅对输入的电磁场形态有约束, 而且对频域和幅值也有苛刻的要求。本研究是将铸轧区置于二相频率和相序都可控的正交电磁场中, 用改变激磁电流频率和相序的方法, 研究激磁电流频率对晶粒细化效果的影响。

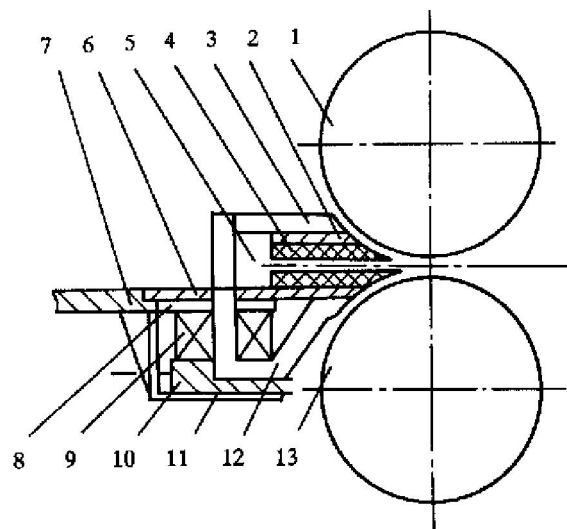


图 1 电磁连续铸轧示意图

**Fig. 1** Schematic diagram of electromagnetically continuous cast-rolling

- 1—Upper casting roller; 2—Pressing board;
- 3—Upper iron core; 4—Feeding mouth;
- 5—Aluminium liquid; 6—Insulation magnetic board;
- 7—Base board; 8—Cooling water tank;
- 9—Coil; 10—Gliding support; 11—Supporting box;
- 12—Lower iron core; 13—Lower casting roller

## 1 实验与结果

### 1.1 实验

在西北铝加工厂  $d 650 \text{ mm} \times 1 600 \text{ mm}$  铸轧机上进行铝连续铸轧实验, 铸轧速度为  $0.98 \text{ m/min}$ ,

① [基金项目] 湖南省自然科学基金资助项目(99JJY2052)

[收稿日期] 2000-02-28; [修订日期] 2000-05-30

[作者简介] 赵啸林(1952-), 男, 实验员。

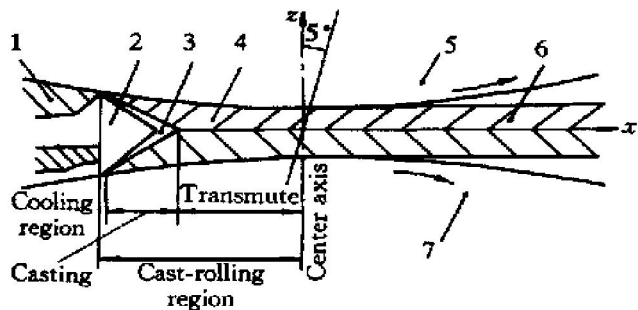


图 2 连续铸轧中的铸轧区

Fig. 2 Cast-rolling zone

1—Feeding mouth; 2—Liquid wedge;

3—Liquid and solid section; 4—Solid;

5—Upper roller; 6—Solid metal; 7—Lower roller

磁感应强度为 0.06T。实验时交替变换输入到线圈中的二相正弦电流相序并随机变化电流的频率, 使铝流体受电磁力的扰动而形成湍流来抑制晶粒长大速率。在供料嘴前沿部位布置测点, 分别测量频率、振幅、温度、流速和其他参数, 测量的信号经转换后送入 XR-50 磁带记录仪, 再输入 CF-910 频谱仪进行分析。

## 1.2 实验结果

因粘性流体的传递时滞, 采用不同频率的输入电流时, 测出熔体波动的振幅和晶粒细化的效果明显随频率的变化而变化<sup>[1~4]</sup>。

1) 在低频段 2 Hz 附近, 晶粒的细化效果差, 熔体波动的振幅较小, 它与输入频率的相位几乎无法分辨。

2) 频率升至 3 Hz 段, 系统产生共振, 振幅达到最大值, 相移趋向  $-90^\circ$ , 晶粒细化效果很差, 而且板面有气道和马蹄形裂纹。

3) 频率接近 8 Hz 段时, 振幅明显减小, 相移趋向  $-180^\circ$ , 这时晶粒细化效果转好。

4) 频率升至 11~15 Hz 段时, 晶粒细化效果最好, 相移接近  $-180^\circ$ 。

5) 再升高频率, 晶粒细化效果又变差。

可见系统对电磁场的频域有要求, 即存在频率响应关系(见图 3)。图 4 是输入频率为 11~15 Hz 段时合金的金相照片。由图 4(a) 可明显看出, 无电磁场时带坯呈柱状晶组织, 有电磁场时(图 4(b)), 晶粒明显均匀细化。图 5 是加电磁场和不加电磁场 2 种工况条件下测出的温度场示意图。比较它们可以看到, 合适频率和幅值的电磁场对铝熔体产生扰动, 熔体中温度梯度减小, 这对抑制晶粒长大的速率、细化晶粒非常有利。由此可知, 电磁场的频率和幅值强烈影响晶粒细化的效果。

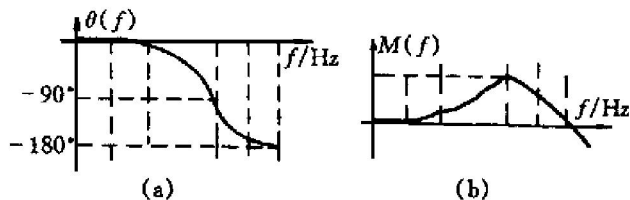


图 3 系统的频率响应

Fig. 3 Frequency response of system

(a)—Phase delay of output; (b)—Swing of output

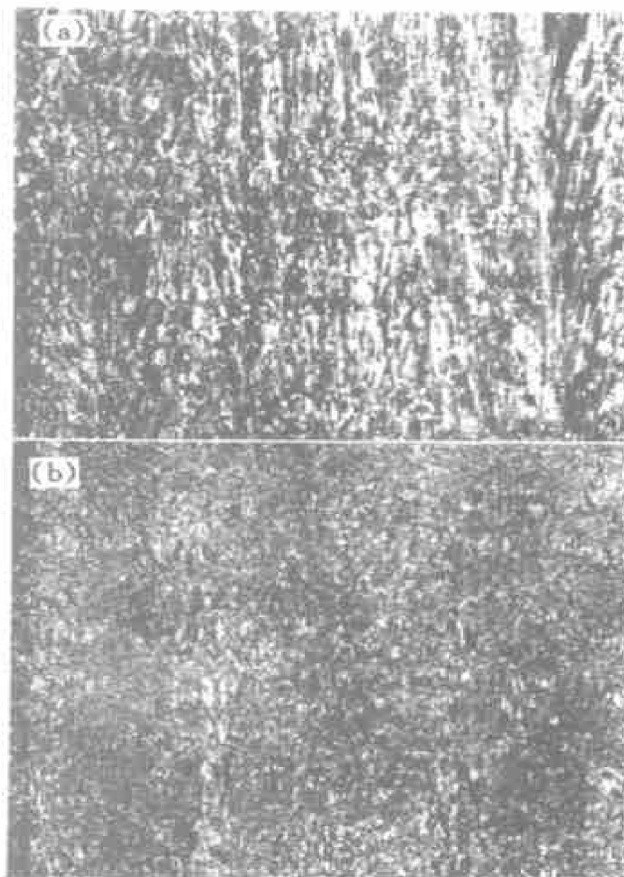


图 4 合金的低倍组织

Fig. 4 Macrostructure of L4 alloy

(a)—Without magnetic field; (b)—Introducing Magnetic field

## 2 讨论

### 2.1 扰动的频域和幅值对晶粒细化的影响

分析实验数据可知, 在输入频率为 2 Hz 段时, 振幅较小, 电磁力对熔体在单位时间内的扰动次数也较少, 因此搅拌、碎化颗粒的效果差; 当输入频率接近 3 Hz 段时, 系统产生了共振, 破坏了凝固结晶的环境; 当扰动波的频率在铸轧区既能增加界面自由能, 而又不破坏刚刚凝固的金属薄壳的特定频域(11~15 Hz) 时<sup>[5]</sup>, 才能达到最好的晶粒细化效果; 随着频率继续升高, 由于趋肤效应, 电磁力的渗入深度变浅, 因此在熔体中的搅拌、碎化效

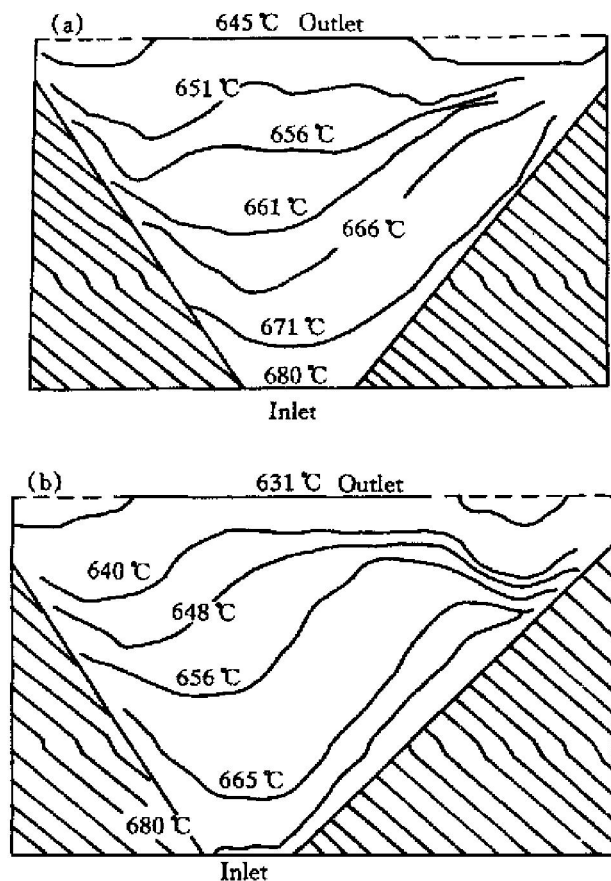


图5 熔体中的温度场

Fig. 5 Temperature field in melt

(a) —Temperature grade for free flow age;

(b) —Temperature grade under action of electromagnetic field

果变差。由此可知, 熔体能够得到充分的搅拌, 又能维持界面连续、稳定和平衡的凝固结晶是实现高速电磁铸轧的关键。

如果把图2中固相线假设为铝熔体的平衡稳定凝固点, 则可以用不稳定性运动模型来描述电磁连续铸轧中形核和结晶的过程。

$$\frac{dN}{dt} = r_0 \left[ 1 - \frac{N(t)}{k} \right] N(t), \begin{cases} t \geq 0 \\ N(t) \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $r_0$  —晶粒长大速率,  $N(t)$  —在  $t$  时刻产生的晶粒数量,  $k$  —一定冷却速率下所允许产生的晶粒数量。

模型存在3种可能:

- 1)  $N(t)/k > 1$ , 不存在;
- 2)  $N(t)/k = 1$ , 平衡稳定;
- 3)  $N(t)/k < 1$ , 非稳定。

由式(1)可以看到, 熔体中晶粒尺寸大小与  $r_0$ ,  $k$  和  $N(t)$  有关。因实际生产中多为  $N(t)/k < 1$  的工况,  $k$  和  $N(t)$  都为定值, 所以只有通过控制  $r_0$  来达到细化晶粒的目的。用具有一定强度和合适频率的冲击扰动力来抑制晶粒的生长速度是电磁连续铸轧细化晶粒、强化非均质形核的原理。

电磁扰动对铝熔体的影响见图6, 可以看到,

熔体中的晶粒数量向着冷却速率所允许产生的晶粒数量发展, 这时加上电磁力的冲击扰动(见图6中扰动示意线1)使晶坯碎化, 则晶粒的数量增加 ( $N(t) \rightarrow k$ ), 在有效频域内, 扰动波的频率越高, 被剪断、碎化的晶坯就愈多, 因而抑制了晶粒长大速率,  $N(t)$  就愈靠近  $k$  (见图6中晶粒颗粒数趋势线2), 直到  $N(t) = k$ 。如果不考虑其他因素, 则电磁力在单位时间内的冲击次数愈多愈好, 但铝熔体对冲击波的频率存在响应极限(即最高频率响应), 当冲击波的作用时间间隔极短时, 熔体会来不及响应。由上可知, 铝熔体的进动速度与振动幅值与扰动波的频率有关, 而且熔体的最高频率响应随铸轧速度的不同而异。

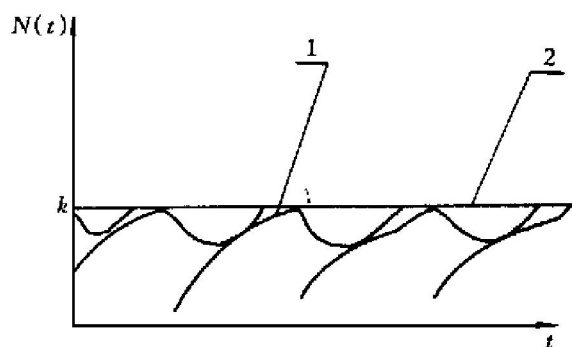


图6 扰动对铝熔体的影响

Fig. 6 Influence of disturbance on aluminium crystallization

1 —Disturbing sketch curve;

2 —Trend curve of crystal grain number

## 2.2 电磁力的形态对晶粒细化效果的影响

电磁感应器上、下铁芯气隙中有进动的铝熔体, 因此熔体中存在  $z$  轴方向的脉振电磁力  $F_z$  和  $y$  轴方向的行波电磁力  $F_y$ , 另外在进动的铝流体中还输入了直流电, 铝流体与脉振电磁场和行波电磁场相耦合而形成的力矩将使熔体中的粒子作如图7所示的螺旋线运动。螺旋线的螺度  $h$ , 是速度向量  $\mathbf{v}$  和旋度向量  $\boldsymbol{\omega}$  的点积, 若速度  $\mathbf{v}$  和旋度  $\boldsymbol{\omega}$  平行, 则螺度有最大值, 改变电磁场的频率, 螺距随着改变, 电磁场的频率愈高, 螺距则愈密。由质点动力学的牛顿定律用于流场的结果可知, 输入确定频率的电磁场将在流体中出现随机的结果, 即混沌和湍流。这种螺旋线轨迹对加强熔体内部的传质与扩散非常有利。

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \times \nabla) \mathbf{v} = - \nabla \left( \frac{p}{\rho} \right) + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{v},$$

$$Re = \frac{g \partial \bar{\theta}}{\partial z} \cdot \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right)^{-2} = f^2 \cdot \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right)^{-2} \quad (2)$$

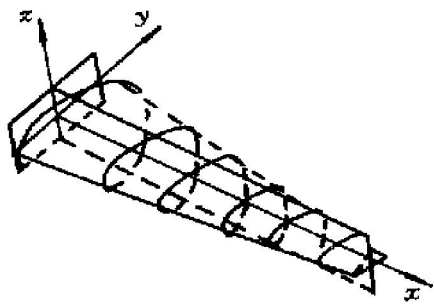


图 7 衰减椭圆形螺旋线

Fig. 7 Attenuation ellipse spiral curve

式中  $v$  一是湍流(在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向)的运动速度;  $P$ —普朗特常数;  $\rho$ —流体的密度;  $Re$ —雷诺数;  $f$ —Brunt 频率, 是描述位温  $\bar{\theta}$  分层和速度  $\bar{v}$  分层的流体湍流的重要参数。

式(2)等号右端的雷诺应力项是平均运动方程中的因变量, 当雷诺数大于某个值时(因粘性力总是使流体趋于稳定, 而大雷诺数则是使流体不稳定的因素), 由欧拉方程可知:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = v \times \omega - \nabla \left( \frac{P}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right) \quad (3)$$

式(3)可化为线性方程:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = - \nabla \left( \frac{P}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right) \quad (4)$$

式(4)的定常解为  $\nabla \left( \frac{P}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right) = 0$ , 因此速度场是贝切美流(Beltrami flow)。因频率变化的电流感应产生的电磁力在铝流体中不断变化渗入深度, 所以在各流层之间存在速度差(即相位差), 由此而形成的雷诺应力产生扰动波, 又因铝熔体中存在温度差异而形成对流, 进而产生扰动波, 同时还有通电铝流体在磁场中运动激发的扰动波, 因此, 铝熔体中含有多种频率成分集成的扰动波。由于扰动波的作用, 使铝流体产生大涡旋, 同时不稳定的大涡旋将分裂成小涡旋, 然后再分裂成更小的涡旋, 这种分裂一直到粘性耗散为止。因湍流和涡旋是联系在一起的, 且输入线圈中的电流是不断变换相序的, 所以涡旋的方向是相对的, 因此, 流层内有相当大的速度切变。当速度切变超过临界值时, 切变层内即产生波动、扭曲, 结果使涡旋内的流体分解成更小尺度的湍流。由于这种衰减形螺旋线与铸造区的形状很吻合, 流体内这种由大涡逐步串级成小涡过程产生的能量(电磁能、热能)传递, 能引起界面的自由能变化。当流体内的自由能达到临界值时, 因界面处的冷却速率非常大, 这时均匀形核的速率激增, 界面处即形成均匀细小的晶粒<sup>[8, 9]</sup>。

频率交替变化的脉振磁场在铝熔体中形成的涡

旋闭合流线使铝液产生一层层的孤立波, 而交替变化频率的行波磁场则将这些波混杂。假设绘出流场定常解(奇点)的位置及相应的轨线, 这些奇点就是鞍点, 而涡旋闭合流线就在这 4 个鞍点组成的闭合圈内(见图 8)。脉振电磁力是驱动熔体中的熔质从鞍点出发而又回到该鞍点(即  $t \rightarrow \pm \infty$  都趋向这个鞍点), 因铝熔体是进动的, 所以行波电磁力驱动熔体中的熔质从一个鞍点( $t \rightarrow -\infty$ )到另一个鞍点( $t \rightarrow +\infty$ ), 它将使铸造区中的不稳定流和稳定流混合。如果是同一双曲点的不稳定流和稳定流相交, 其交点就是同宿点; 如果是双曲点的稳定流和双曲点的不稳定流相交, 其交点就是异宿点。而(同)异宿轨道横截相交就是使流体出现湍流的条件, 也是产生马蹄和混沌的因素。

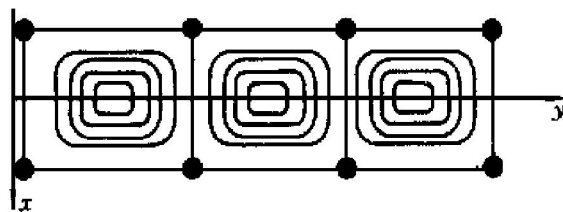


图 8 熔体中感应的涡旋

Fig. 8 Inducing eddy in melt

由此可知, 将铸轧区中进动的铝流体置于正交电磁场系统中, 流体运动的轨迹就受电磁场的频率和幅值的影响<sup>[10, 11]</sup>。当输入的电磁场频域和幅值合适时, 流体中将感应产生适当形态和能量的涡旋扰动波, 由此流体出现湍流, 由于湍流的作用, 就可达到既细化晶粒, 而又不破坏刚刚凝固的金属薄壳的效果。

### 3 结论

1) 正交电磁场在铝熔体中产生的(同)异宿轨线是使流体形成湍流和混沌的主要原因, 衰减扁平椭圆形电磁场符合铸造区中铝熔体的形状, 有利于晶粒均匀、细化。

2) 铝熔体随输入的电磁场频率不同, 将产生不同的晶粒细化效果。在本实验条件下, 电磁场最佳频域范围为 11~15 Hz。

3) 将电磁场和其他强外场耦合应用到连续铸轧中, 有希望实现高速电磁铸轧, 得到高质量的铝材产品。

## [ REFERENCES ]

- [ 1 ] ZHAO Xiao-lin(赵啸林), MAO Da-heng(毛大恒), YAN Hong-zhi(严宏志), et al. 铝电磁铸轧冷却区中电磁场行为探讨 [ J ]. Light Alloy Fabrication Technology(轻合金加工技术), 1998, 26(10): 12- 16.
- [ 2 ] ZHAO Xiao-lin(赵啸林), MAO Da-heng(毛大恒), LI Xiao-qian(李晓谦), et al. 铝电磁连续铸轧中铸造区的电磁场讨论 [ J ]. Shanghai Nonferrous Metals(上海有色金属), 1999, 2(20): 57- 61.
- [ 3 ] MAO Da-heng(毛大恒) and YAN Hong-zhi(严宏志). 电磁搅拌对铝及其合金凝固和铸态组织的影响 [ J ]. Light Alloy Fabrication Technology(轻合金加工技术), 1991, 19(4): 10- 16.
- [ 4 ] XIAO Li-long(肖立隆) and CHEN Jian-lin(陈建林). 电磁场对铸轧铝带坯晶粒的影响 [ J ]. Light Alloy Fabrication Technology(轻合金加工技术), 1999, 27(8): 8- 12.
- [ 5 ] MAO Da-heng(毛大恒), ZHONG Jue(钟掘), ZHAO Xiao-lin(赵啸林), et al. 电磁场对金属凝固的作用机理 [ J ]. Mining and Metallurgical Engineering(矿冶工程), 1996(2): 68- 71.
- [ 6 ] ZHAO Xiao-lin(赵啸林), MAO Da-heng(毛大恒) and CHEN Qian-gen(陈欠根). 将电磁场引入连续铸轧的新技术探讨 [ J ]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1995, 5(4): 145- 149.
- [ 7 ] LIU Zhi-yi(刘志义) and FU Heng-zhi(傅恒志). 晶粒取向对 DD8 镍基高温合金定向凝固的界面稳定性的影响 [ J ]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1998, 8(1): 47- 51.
- [ 8 ] MAO Da-heng(毛大恒) and XIAO Li-long(肖立隆). 电磁场对铸轧带坯质量的影响 [ J ]. Light Alloy Fabrication Technology(轻合金加工技术), 1998, 26(3): 11- 15.
- [ 9 ] MAO Da-heng(毛大恒), ZHONG Jue(钟掘), CHEN Qian-gen(陈欠根), et al. 电磁铸轧工业试验研究 [ J ]. J Cent South Univ Tech(中南工业大学学报), 1995, 26(Suppl. 1): 89- 94.
- [ 10 ] MAO Da-heng and XIAO Li-long. Effects of electromagnetic field on casting-rolling strip breakdowns [ J ]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1997, 7(4): 4- 11.
- [ 11 ] LI Xiao-qian(李晓谦). 连续铸轧带坯在轧制区的温度场 [ J ]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1997, 7(4): 168- 170.

## Frequency response of melt in aluminum electromagnetically continuous cast-rolling process

ZHAO Xiao-lin, MAO Da-heng, LI Xiao-qian, HE Di-qiu

(Department of Electromechanical Engineering, Central South University,  
Changsha 410083, P. R. China)

**[ Abstract ]** The method of controlling velocity of grain growth in aluminum electromagnetically continuous cast-rolling by inputting rotated electromagnetic field was introduced. The relationship between viscous fluid and frequency response was described. The effect of electromagnetic field frequency and melt fluctuation on grain refinement was analyzed. The best frequency band 11~ 15 Hz under normal condition (  $d650\text{ mm} \times 1\ 600\text{ mm}$  roller ) was obtained.

**[ Key words ]** aluminum; electromagnetically continuous cast-rolling; frequency response; frequency domain

( 编辑 杨 兵 )