

# 电磁连铸高频调幅磁场对铸坯表面温度的影响

王宏明<sup>1,2</sup>, 任忠鸣<sup>2</sup>, 李桂荣<sup>1</sup>

(1. 江苏大学, 江苏 镇江 014010)

(2. 上海大学, 上海 200072)

**摘要:** 建立电磁软接触连铸结晶器内三维电磁场和温度场计算模型, 研究采用方波和正弦波调幅后的高频调幅磁场对铸坯表面温度的影响。结果表明: 方波和正弦波调幅磁场的感应热功率都与调幅波频率无关。方波调幅磁场的感应热功率( $Q$ )介于单独施加用于调幅的两个恒幅磁场的感应热功率( $Q_1$  和  $Q_2$ )之间, 在  $Q_1$  和  $Q_2$  确定后, 调幅磁场的感应热功率取决于各自作用时间  $T_1$  和  $T_2$  的相对比例; 正弦波调幅磁场产生的感应热功率是高频磁场调幅前感应热功率的 62%~64%。

**关键词:** 电磁连铸; 高频磁场; 调幅; 感应热; 表面温度

中图法分类号: TG 249.7; TG111.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2010)02-0347-05

电磁软接触连铸技术<sup>[1,2]</sup>利用电磁场控制结晶器内金属凝固来提高铸坯的质量, 成为近年来备受关注的研究方向<sup>[3,4]</sup>。高频磁场在结晶器内金属液中主要产生力效应和热效应, 力效应使弯月面及初始凝固坯壳向内压缩, 保护渣通道被拓宽, 改善了铸坯与结晶器间的润滑, 起到提高铸坯质量的效果; 热效应延缓了初始凝固进程, 使初凝点下移以远离波动的弯月面, 起到“热顶”的作用, 使铸坯质量提高<sup>[5]</sup>。前期研究者对磁场的力效应进行了大量研究, 并在施加连续恒幅磁场的基础上, 根据结晶器内弯月面变形波动<sup>[6]</sup>和保护渣道压力变化, 提出采用间嵌磁场<sup>[7]</sup>、复合磁场<sup>[8]</sup>和调幅磁场<sup>[9]</sup>, 这类特殊磁场的共同特征是磁场的幅值随时间变化, 在金属中产生随时间变化的电磁力, 利用该变化的电磁力来抵消结晶器振动导致的初始凝固区域的弯月面变形和压力波动, 达到准确控制初始凝固的目的。在磁场的热效应方面, 前期的研究报道较少<sup>[10]</sup>, 文献<sup>[11]</sup>研究了连续恒幅磁场感应热对初始凝固的影响, 本工作建立电磁软接触连铸过程电磁场和钢液凝固传热过程数学模型, 研究磁场调幅后的感应热对铸坯温度的影响, 为有效提高铸坯表面质量提供理论基础。

## 1 数学模型的建立

### 1.1 电磁场计算数学模型

根据 Maxwell 方程组, 电磁软接触连铸过程电磁

场计算的控制方程为:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

非涡流区(空气和线圈区域):

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) - \nabla \left( \frac{1}{\mu} \nabla \cdot \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_s \quad (4)$$

涡流区(钢液和结晶器壁区域):

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\nabla \phi + \frac{1}{\mu \sigma} \nabla^2 \mathbf{A} \quad (5)$$

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (6)$$

### 1.2 钢液凝固传热数学模型

电磁场下钢液在结晶器内的凝固传热属有内热源的三维传热, 其控制方程为<sup>[12]</sup>:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \rho Q - \rho C v \frac{\partial T}{\partial z} \quad (7)$$

式中,  $k$  为传热系数,  $C$  为比热容,  $\rho$  为密度,  $v$  为拉坯速度,  $Q$  为感应电流产生的焦耳热, 按下式:

$$Q = \frac{|J_e|^2}{\sigma} \quad (8)$$

## 2 计算物理模型

物理模型及其结构参数如图 1 所示。结晶器壁均匀切缝 6 条, 取整体区域的 1/6 作为计算区域, 利用

收稿日期: 2009-01-05

基金项目: 江苏省高校自然科学基金(05KJD450043); 江苏省高技术研究(BG2005026); 江苏省自然科学基金 (BK2006078)资助

作者简介: 王宏明, 男, 1974 年生, 博士生, 副教授, 江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013, 电话: 0511-88780191, E-mail: whmlgr@ujs.edu.cn

有限元软件 ANSYS10.0 对结晶器内三维电磁场、温度场进行模拟计算。

2.1 相关参数

高频磁场激励电流为 20 kHz 正弦交流电, 线圈电流密度变化范围为:  $0\sim 3.3\times 10^7 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ 。模型内介质的电磁参数见表 1。浇铸金属为 Q235 钢, 浇铸温度为  $1540\text{ }^\circ\text{C}$ , 拉坯速度为  $3\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 钢及铜结晶器的热物性参数见表 2。钢液凝固潜热按固液两相区的等效比热容处理, 钢液流动对传热的影响考虑为液相存在区的有效导热系数, 具体处理方法见文献[12]。

2.2 网格划分

高频磁场在结晶器壁及钢液内出现集肤效应, 在集肤层内至少要划分2层单元以保证计算精度, 根据下式计算集肤深度 $\delta$ 的值:

$$\delta = (\pi\mu\sigma\omega)^{-1/2} \quad (9)$$

式中,  $\mu$  是磁导率,  $\sigma$  是电导率,  $\omega$  是角频率。采用六面体单元进行网格划分, 如图 2 所示。

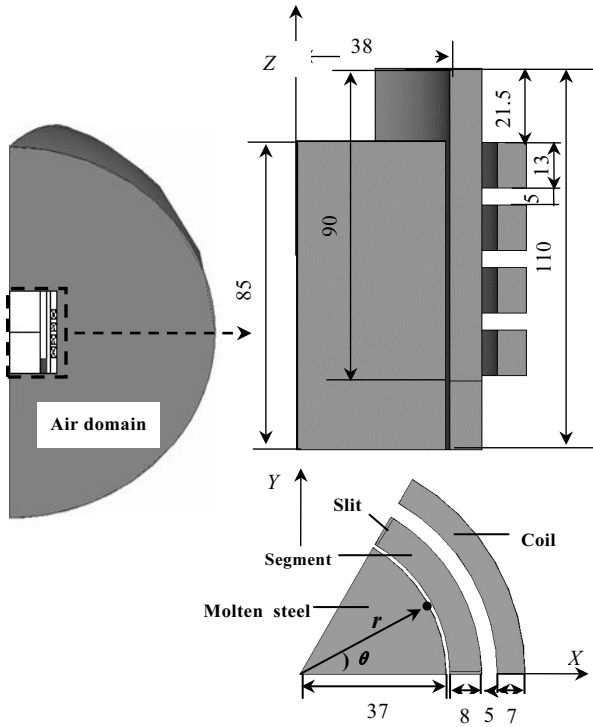


图 1 物理模型示意图

Fig.1 Schematic of physical model

表 1 模型内介质的电磁参数

Table 1 Electromagnetic parameters of different medium in model

Medium	Electric resistivity/ $\Omega\cdot\text{m}$
Steel ( $1520\text{ }^\circ\text{C}$ )	$8.5\times 10^{-7}$
Mold ( $220\text{ }^\circ\text{C}$ )	$2.4\times 10^{-8}$
Coil	$3\times 10^{-8}$
Air	$1\times 10^{20}$
Slit	$1\times 10^{20}$
Slag	$1\times 10^{15}$

表 2 结晶器铜壁及钢液的热物性参数

Table 2 Thermo-physical property parameter of molten steel and mold<sup>[12]</sup>

Property parameter	Value
Steel grade	Q235
Density of steel, $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7100
Solidus temperature, $T_{\text{sol}}/\text{K}$	1763
Liquidus temperature, $T_{\text{liq}}/\text{K}$	1787
Heat conductivity of solid steel, $k/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	$13.86+0.01075T$
Specific heat capacity of steel, $C(T)/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	$481.482+0.1997T$
Latent heat of solidification, $L/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	$2.762\times 10^5$
Heat conductivity of mold copper/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	370
Specific heat capacity of copper/ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	394

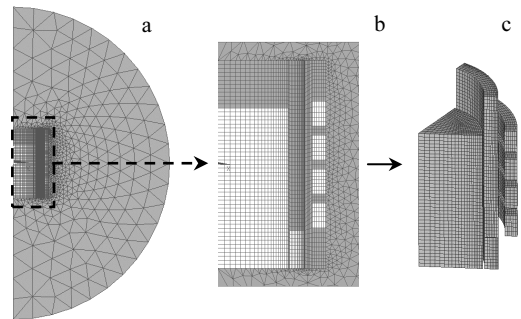


图 2 模型网格划分

Fig.2 Meshes of model: (a) whole domain, (b) mesh merging, and (c) in metal

3 计算结果及分析

3.1 方波调幅磁场的感应热变化特征

方波调幅磁场的实质是两个或多个不同幅值的恒幅波磁场按一定时间间隔顺序依次施加, 每种幅值的磁场各作用一段时间(各自的周期  $T$ ), 磁场的感应热决定于磁场的功率和作用时间。磁场的功率取决于激励电流的功率, 在高频激励电流频率一定的情况下, 激励电流的功率取决于激励电流的幅值, 为此, 计算了 20 kHz 不同幅值的高频正弦电流按方波调幅后对结晶器内钢液凝固过程温度场的影响, 计算结果与不施加磁场及施加磁感应强度幅值恒定的高频磁场时的结果对比, 来分析方波调幅磁场感应热带来的影响。

图 3 是不同幅值的恒幅磁场及对应的方波调幅磁场下, 电磁结晶器分瓣体中心线对应的结晶器内钢液柱或铸坯侧表面上的温度。图 3a 中, M1 是激励电流幅值恒定为  $6.6\times 10^6 \text{ A}$  的恒幅磁场, M1'是激励电流幅值恒定为  $1.98\times 10^7 \text{ A}$  的恒幅磁场, AMMF1 是 M1 和

M1'先后分别作用等时间间隔 0.5 s 得到的调幅磁场, AMMF1 的周期( $T_{AMMF1}$ )为 M1 和 M1'作用周期之和, 即  $T_{AMMF1}=T_{M1}+T_{M1'}=1$  s。图 3a、3b、3c 中的调幅磁场都是两种幅值不同的恒幅磁场等时间间隔施加得到的调幅磁场, 称“对称方波调幅磁场”。图 3c、3d 中的一个磁场为零, 即不施加磁场, 此时得到的调幅磁场 AMMF3、AMMF4 和 AMMF5 就是文献中提及的“间嵌磁场”<sup>[9]</sup>, 其中 AMMF4 和 AMMF5 施加磁场与不施加磁场的的时间间隔不对等, 得到“不对称方波调幅磁场”。

研究表明, 方波调幅磁场产生的感应热对结晶器内钢液或铸坯温度的影响程度介于分别单独施加用于调幅的两个恒幅磁场之间。这可以用磁场的感应热功率进行解释。

假设用于调幅的两个磁场  $M_{max}$  和  $M_{min}$ (分别代表调幅磁场的最大幅值和最小幅值时的磁场)的功率分别为  $W_1$  和  $W_2$ , 对相同的介质, 在物性变化不大的范围内, 磁场转换为感应热的效率相同, 设为  $\eta$ , 则  $M_{max}$  和  $M_{min}$  的热效率分别为  $Q_1=W_1\eta$  和  $Q_2=W_2\eta$ ,  $M_{max}$  和  $M_{min}$  在调幅磁场一个周期内的作用时间分别为  $T_1$  和  $T_2$ , 则调幅磁场的周期  $T=T_1+T_2$ , 方波调幅磁场转换

为热的功率  $Q$  可按式(10)计算:

$$Q = \frac{W_1\eta T_1 + W_2\eta T_2}{T} = \frac{Q_1 T_1 + Q_2 T_2}{T} \tag{10}$$

由于  $Q_1 > Q_2$ , 则有:

$$Q_1 > Q > Q_2 \tag{11}$$

式(11)说明, 方波调幅磁场的感应热功率介于幅值最大和幅值最小的两个恒幅磁场的热功率之间。

对于对称方波调幅磁场,  $Q=(Q_1+Q_2)/2$ , 图 3a、3b、3c 中表现为施加对称方波调幅磁场后, 铸坯表面温度线近似位于分别单独施加两个用于调幅的恒幅磁场后铸坯表面温度线中间。

对于不对称方波调幅磁场, 其感应热功率  $Q$  取决于  $T_1$  和  $T_2$  的相对大小, 若  $T_1 > T_2$ , 则  $Q > (Q_1+Q_2)/2$ , 反之, 若  $T_1 < T_2$ , 则  $Q < (Q_1+Q_2)/2$ 。图 3d 中表现为施加不对称方波调幅磁场后, 铸坯表面温度线偏向施加时间较长的恒幅磁场得到的铸坯表面温度线。

因此, 可以用式(10)来计算调幅磁场的感应热功率。另外, 在  $Q_1$  和  $Q_2$  确定(方波调幅磁场幅值变化幅度确定)后, 调幅磁场的感应热功率取决于  $T_1$  和  $T_2$  的相对比例, 因此方波调幅磁场的感应热功率与调幅磁场的幅值变化周期无关, 也就与调幅波的变化频率无关。

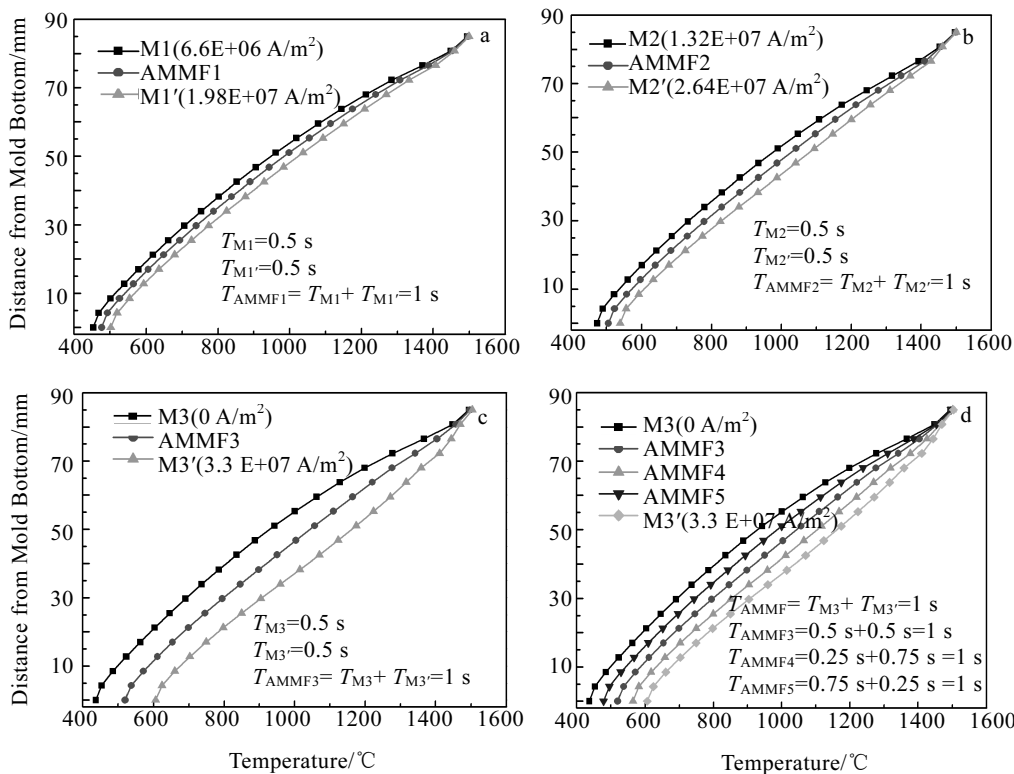


图 3 方波调幅磁场感应热对铸坯侧表面温度的影响

Fig.3 Effect of induction heat generated by square wave AMMF on the temperature of billet side surface: (a) square wave AMMF1, (b)square wave AMMF2, (c)square wave AMMF3, and (d)square wave AMMF4

### 3.2 正弦波调幅磁场的感应热变化特征

为研究正弦波调幅磁场在结晶器内金属中产生感应热的变化特征，计算不同幅值的高频正弦电流激发的恒幅磁场用 1 和 5Hz 正弦波调幅前后，对结晶器内金属中感应热的影响。

图 4 是施加不同幅值的恒幅磁场及对应的正弦波调幅磁场前后，电磁结晶器分瓣体中心线对应处结晶器内铸坯侧表面的温度变化。

研究表明，高频磁场的感应热使结晶器内铸坯侧表面的温度升高，感应热影响的程度随高频激励电流幅值(决定磁场幅值)的提高而明显提高。恒幅磁场经正弦波调幅后，调幅磁场产生的感应热明显低于调幅前的恒幅磁场产生的感应热。从高频磁场调幅前后产

生的感应热使铸坯表面温度升高的程度来看，正弦波调幅磁场产生的感应热是高频磁场调幅前产生感应热的 62%~64%，因此，在已知恒幅磁场感应热对铸坯表面温度影响的情况下，可以据此推测正弦调幅磁场感应热对铸坯表面温度影响的程度。

图 4c、4d 中给出了两个不同幅值高频恒幅磁场及采用 1 和 5Hz 正弦波调幅后的高频调幅磁场产生的感应热对结晶器内铸坯侧表面温度的影响。结果表明，采用 1 还是 5Hz 正弦波调幅，对调幅磁场的感应热几乎没有影响，说明正弦波调幅磁场的感应热效应与正弦调幅波的频率基本无关，当然，调幅波的频率要在一个合理的范围内。

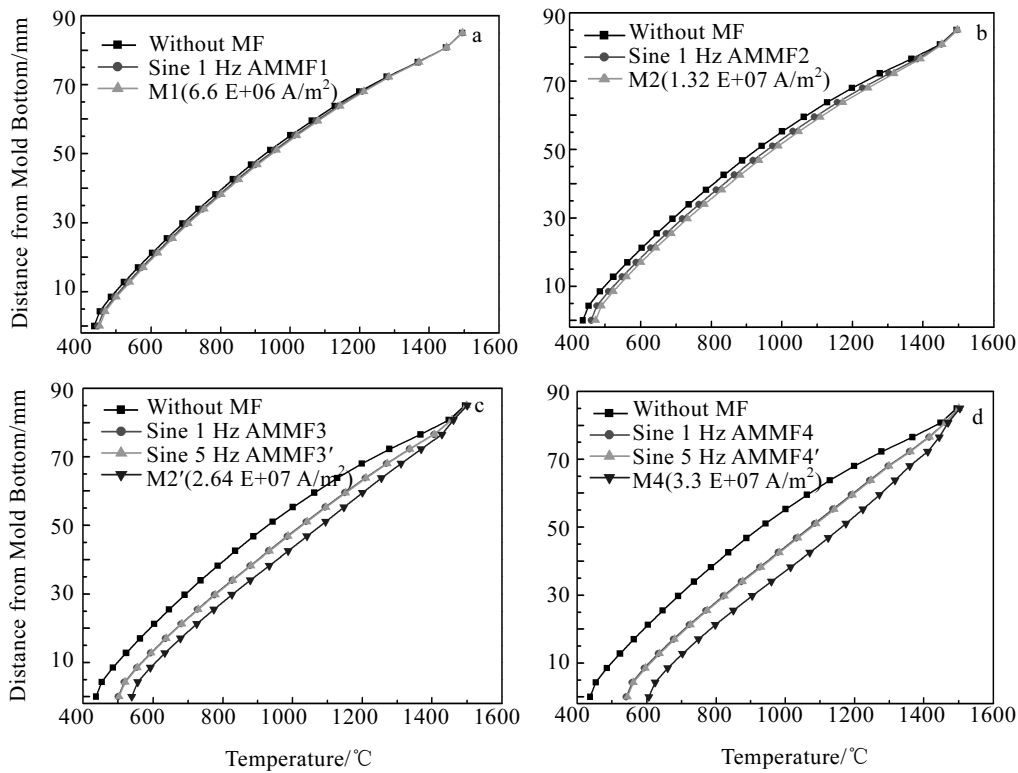


图 4 正弦波调幅磁场感应热对铸坯侧表面温度的影响

Fig.4 Effect of induction heat generated by sine wave AMMF on the temperature of billet side surface: (a) square wave AMMF1, (b)square wave AMMF2, (c)square wave AMMF3, and (d)square wave AMMF4

## 4 结 论

1) 对方波调幅磁场，其感应热功率(Q)介于单独施加用于调幅的两个恒幅磁场的感应热功率(Q<sub>1</sub>和 Q<sub>2</sub>)之间。

2) 正弦波调幅磁场产生的感应热功率是高频磁场调幅前感应热功率的 62%~64%，与正弦调幅波的频

率基本无关。

3) 在已知恒幅磁场感应热对铸坯温度及凝固传热影响的情况下，可以根据本研究得到的结论推测调幅磁场感应热对铸坯温度及凝固影响的程度。

### 参考文献 References

[1] Hui Chunhua(回春华), Li Tingju(李廷举), Jin Wenzhong(金

- 文中) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(4): 721
- [2] Zhang Shibin(张世斌), Li Weixuan(李伟轩), Deng Kang(邓康) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(12): 2236
- [3] Park P, Jeong H, Kim H *et al. ISIJ Int*[J], 2002, 42(4): 385
- [4] Shen Jun(沈 军), Pei Xinfeng(裴新风), Peng Guilin(彭桂林) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(9): 1517
- [5] Kim H, Park J, Jeong H *et al. ISIJ Int*[J], 2002, 42(2): 171
- [6] Wang Hongming(王宏明), Li Guirong(李桂荣), Zhao Yutao(赵玉涛) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2006, 35(4): 669
- [7] Zhou Y, Sassa K, Asai S. *Acta Mater*[J], 2001, 37(7): 777
- [8] Li T J, Li X T, Zhang Z F. *Ironmak Steelmak*[J], 2006, 33(1): 57
- [9] Wang Hui(王 辉), Jin Junze(金俊泽), Li Tingju(李廷举). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(11): 1149
- [10] Fang Canfeng(房灿峰), Zhang Xingguo(张兴国), Ji Shouhua(季首华) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(8): 1319
- [11] Wang Hongming, Luo Yan, Li Guirong. *Journal of Iron and Steel Research International*[J], 2008, 15(S1): 549
- [12] Wang H M, Li G R, Lei Y C *et al. ISIJ Int*[J], 2005, 45(9): 1291

## Effect of High Frequency Amplitude-Modulated Magnetic Field on Billet Surface Temperature during Electromagnetic Continuous Casting

Wang Hongming<sup>1,2</sup>, Ren Zhongming<sup>2</sup>, Li Guirong<sup>1</sup>

(1. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(2. Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** A three dimensional finite element mathematical model of electromagnetic field and temperature field was developed to investigate the effect of high frequency amplitude-modulated magnetic field on the billet surface temperature. The results show that the induction heat power of magnetic field amplitude-modulated with sine wave and square wave is unrelated to the frequency of modulating wave. The induction heat power of magnetic field modulated with square wave is between the induction heat powers of the two constant amplitude magnetic fields employed to modulate. If the induction heat powers of the two constant amplitude magnetic fields are determined, the induction heat power of magnetic fields modulated with square wave is determined by the relative scale of the acting time of the two constant amplitude magnetic fields. The induction heat power of magnetic field modulated with sine wave is about 62-64% of that of the high frequency magnetic field before modulation.

**Key words:** electromagnetic continuous casting; high frequency electromagnetic field; amplitude modulation; induction heat; surface temperature

---

Corresponding author: Wang Hongming, Candidate for Ph. D., Associate Professor, Department of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, P. R. China, Tel: 0086-511-88780191, E-mail: whmlgr@sina.com