

# 电磁悬浮熔炼的温度特性\*

马伟增 季诚昌 李建国† 许振明

(上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200030)

(2002 年 8 月 1 日收到 2002 年 9 月 28 日收到修改稿)

利用一般电磁悬浮熔炼感应器, 球形试样悬浮情况下, 悬浮力和悬浮试样输入功率表达式, 建立了不含悬浮感应器电流的悬浮试样输入功率表达式. 利用这些表达式, 结合自然对流情况下, 球形试样在气体介质中的功率耗散模型, 建立了悬浮熔炼工艺参量与悬浮熔炼试样温度之间的关系. 以 (TbDy)<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub> 合金在 Ar 气保护情况下, 在一定工艺条件下的电磁悬浮熔炼为例, 得到了电磁悬浮熔炼各种工艺参量与悬浮试样温度的关系. 通过对计算结果的分析, 结合实际电磁悬浮熔炼特点, 得到了降低电磁悬浮熔炼试样最低温度的措施: 减小悬浮试样的半径; 在能够实现悬浮的情况下, 采用较低的电源频率; 通过调整电源功率, 使试样悬浮于温度最低的位置; 减小下悬浮绕组参量  $R_d$ , 增大上稳定控制绕组与下悬浮绕组的间距  $S_m$ , 增大上稳定控制绕组参量  $R_u$ , 增加上稳定控制绕组匝数.

关键词: 电磁悬浮熔炼, 悬浮力, 输入功率, 耗散功率

PACC: 4110F, 4400, 8100

## 1. 引言

悬浮熔炼是指在悬浮状态实现金属或合金的熔炼操作. 使试样悬浮的方式包括电磁悬浮<sup>[1,2]</sup>、声悬浮<sup>[3]</sup>、空气动力悬浮等. 加热熔炼的方式包括高频电磁场、激光. 作为一种可以把悬浮和熔炼结合在一起的悬浮熔炼方式, 电磁悬浮熔炼的思想 1923 年首次由 Muck 提出. 1950 年, Okress 等<sup>[4]</sup>首次对金属实现了电磁悬浮熔炼. 由于该方法可以消除坩埚的限制, 坩埚内壁的污染和坩埚内壁引起的异质形核, 电磁悬浮熔炼广泛应用于高活性、高熔点金属熔炼<sup>[4-6]</sup>, 材料的深过冷和快速凝固研究<sup>[7-9]</sup>, 材料物性参量的测定<sup>[10,11]</sup>, 气体金属、熔渣金属的相互作用. 然而由于电磁悬浮熔炼加热与悬浮是耦合在一起的, 因此对于密度较大, 电导率较小金属, 试样处于悬浮状态时温度较高. 虽微重力下的电磁悬浮熔炼和强制冷却可以克服这个缺点, 但这两种方法分别有成本高和冷却气体杂质污染的缺点, 因此有必要探讨各种工艺因素对试样电磁悬浮熔炼温度的影响, 以指导在较低温度下利用电磁悬浮熔炼研究金属材料的实践.

利用计及磁场不均匀性球形试样悬浮力和加热

功率高精度表达式, 结合悬浮试样在保护性气体介质自然对流情况下的散热模型, 建立了试样悬浮温度与感应器参量、试样几何尺寸等之间的关系. 利用所得到的关系模型, 以巨磁致伸缩材料 (TbDy)<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub> 合金在氩气保护情况下利用具有给定参量感应器进行电磁悬浮熔炼为研究对象, 研究各种工艺参量对悬浮试样温度的影响.

## 2. 电磁悬浮熔炼各种工艺因素对悬浮试样温度影响的计算模型

电磁悬浮感应器的普遍形式是反向串联的上部主要起稳定作用的线圈和下部主要起悬浮作用的线圈. 这里, 就以普遍形式的电磁悬浮熔炼感应器为研究对象, 建立数学模型, 进行研究.

建立如图 1 所示极坐标系, 球形试样球心  $o$  为极点, 悬浮感应器对称轴为  $\theta = 0$ . 根据文献给出的两匝线圈情况下球形试样电磁悬浮力的高精度计算公式<sup>[12]</sup>, 推广到上稳定线圈为  $w$  匝, 下悬浮线圈为  $m - w$  匝情况下悬浮力的计算公式:

$$F = -\pi\mu I^2 \sum_{n=1}^{\infty} G_n(x) \frac{h_n h_{n+1}}{n+1} a^{2n+1}, \quad (1)$$

$$G_n(x) = -\text{Re} [J_{n+1}(Ka) J_{n-1}(Ka)], \quad (2)$$

\* 国家自然科学基金(批准号 50171044)资助的课题.

† 通讯联系人.

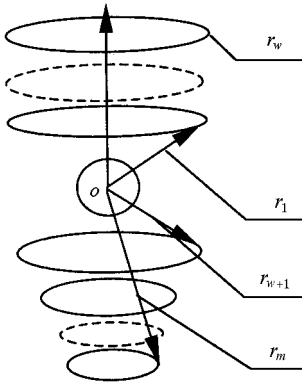


图1 悬浮感应器、试样与其坐标

$$h_n = \sum_{z=1}^w P_n^1(\cos\theta_z) \sin\theta_z \cdot r_z^{-n} - \sum_{z=w+1}^m P_n^1(\cos\theta_z) \sin\theta_z \cdot r_z^{-n}, \quad (3)$$

式中  $Ka = (1-i)x$ ;  $x = a/\delta$ ,  $\delta = 1/(\pi\mu_r\mu_0 f\sigma)$  为趋肤层深度;  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$  分别为  $oz$  与矢径  $r_1, r_2, \dots, r_m$  的夹角;  $P_n^1(\cos\theta)$  为勒让德函数;  $J_n(Ka)$  为球贝塞耳函数;  $a$  为试样半径;  $m$  为悬浮感应器总匝数;  $\mu_r$  为试样相对磁导率;  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$  为真空磁导率;  $f$  为悬浮线圈电流频率;  $\sigma$  为试样电导率。

根据文献 [11] 推广的输入试样功率的高精度计算公式为

$$P = \frac{\pi I^2}{\sigma \delta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} Q_n(x) \{h_n a^n\}^2, \quad (4)$$

$$G_n(x) = \text{Re}[(i-1)J_n(Ka)J_{n-1}(Ka)]. \quad (5)$$

在悬浮熔炼状态, 电磁悬浮力与重力平衡, 因此有

$$F = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho g, \quad (6)$$

$g$  为重力加速度。

高频大电流测量比较困难, 根据 (1) (4) 和 (6) 式得出不含电流的功率表达式为

$$P = - \frac{4\pi\rho g \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} Q_n(x) \{h_n a^n\}^2}{3\mu\sigma\delta \sum_{n=1}^{\infty} \frac{h_n h_{n+1}}{n+1} G_n(x) a^{2n-1}}. \quad (7)$$

试样散热功率表达式为

$$E_d = 4\pi a^2 \epsilon \sigma_{\text{SB}} (T^4 - T_0^4) + 4\pi a^2 h (T - T_0), \quad (8)$$

$\sigma_{\text{SB}} = 5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2} \text{K}^{-4}$  为斯蒂芬-玻耳兹曼常量;  $\epsilon$  为试样辐射率;  $T$  为悬浮试样表层温度;  $T_0$  为周围环境温度;  $h$  表示试样与周围介质传导和对流的热传输系数。

在自然对流情况下,  $h$  可以表示为<sup>[13]</sup>

$$h = k_{\text{cm}}/a [1 + 0.295(8a^3 \rho_{\text{cm}}^2 g \beta \Delta T / \mu_{\text{cm}}^2)^{1/4} \times (\hat{C}_p \mu_{\text{cm}} / k_{\text{cm}})^{1/4}], \quad (9)$$

$$\beta = 2K(T + T_0), \quad \Delta T = T - T_0,$$

式中  $k_{\text{cm}}$  为介质导热系数;  $\rho_{\text{cm}}$  为介质密度;  $\mu_{\text{cm}}$  为介质黏度;  $\hat{C}_p$  为介质比热容。一般情况下,  $T_0 \ll T$  (8) 和 (9) 两式可以简化为

$$E_d = 4\pi a^2 \epsilon \sigma_{\text{SB}} T^4 + 4\pi a^2 h T, \quad (10)$$

$$h = k_{\text{cm}}/a [1 + 0.59(8a^3 \rho_{\text{cm}}^2 g / \mu_{\text{cm}}^2)^{1/4} (\hat{C}_p \mu_{\text{cm}} / k_{\text{cm}})^{1/4}]. \quad (11)$$

在温度恒定情况下, 试样吸收的功率与试样耗散的功率平衡, 结合 (10) 和 (11) 式, 得到一以试样温度为自变量的四次方程

$$\epsilon \sigma_{\text{SB}} T^4 + h T + \frac{\rho g \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} Q_n(x) \{h_n a^{2n}\}}{3\mu\sigma\delta \sum_{n=1}^{\infty} G_n \frac{h_n h_{n+1}}{n+1} a^{2n}} = 0. \quad (12)$$

利用 (12) 式, 结合 (2) (3) 和 (5) 式就可以对各种工艺参量对悬浮试样的温度影响进行研究。

下面以 (TbDy)Fe<sub>2</sub> 合金在 0.1MPa 氩气保护下的情况为例, 通过理论计算和实验验证, 揭示试样半径  $a$ , 试样结构尺寸, 试样悬浮位置对该材料悬浮熔炼温度的影响。

计算的基本热物性参量如表 1 所示。

表1 悬浮试样和气体介质的热物性参量

参量	数值
(TbDy)Fe <sub>2</sub> 密度 $\rho/\text{kgm}^{-3}$	$9.23 \times 10^3$
(TbDy)Fe <sub>2</sub> 电导 $\sigma/\text{Ohm}^{-1} \text{m}^{-1}$	$1.67 \times 10^6$
(TbDy)Fe <sub>2</sub> 相对磁导率 * $\mu_r$	1
(TbDy)Fe <sub>2</sub> 表面辐射率 ** $\epsilon$	0.5
Ar 气密度 $\rho_{\text{cm}}/\text{kgm}^{-3}$	$9.7 \times 10^{-1}$
Ar 气比热 $\hat{C}_p/\text{Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$	$5.22 \times 10^2$
Ar 气导热系数 $k/\text{Jm}^{-1} \text{k}^{-1} \text{s}^{-1}$	$3.55 \times 10^{-2}$
Ar 气黏度 $\mu_{\text{cm}}/\text{kgm}^{-1} \text{s}^{-1}$	$4.62 \times 10^{-5}$

\* 由于在电磁悬浮熔炼情况下, 一般情况下 (TbDy)Fe<sub>2</sub> 温度超过了其居里温度, 材料转变为超顺磁性, 因此可以认为其相对磁导率为 1;

\*\* (TbDy)Fe<sub>2</sub> 的热辐射系数现在还没有人测定, 这里采用 0.5 是一个估计值 (根据悬浮实验和测温结果计算), 虽然对以后的温度计算的绝对数值有影响, 但对其趋势变化没有影响。

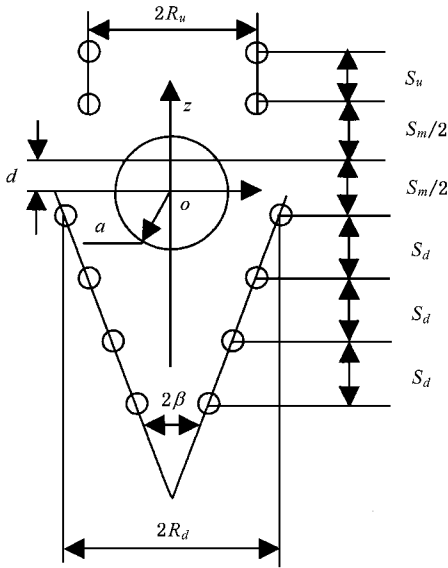


图2 电磁悬浮熔炼结构参量示意图

感应器电流频率为  $f = 175 \times 10^3 \text{ Hz}$ . 试样半径基本数值为  $a = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ , 悬浮感应器基本数值为  $S_u = 4 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $S_m = 11 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $S_d = 4 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $R_u = 5.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $R_d = 6.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $d$  为悬浮试样中心与上稳定绕组和下悬浮绕组之间间隙中心间距(试样悬浮位置的  $z$  座标大于  $S_m/2$  时  $d$  取负值, 反之  $d$  取正值),  $2\beta = 40^\circ$ ,  $w = 1$ ,  $m = 5$ , 各字母的意义如图1和图2所示.

所示参量与计算公式中所用参量的换算关系如下:

$$\begin{aligned} r_z &= \sqrt{R_u^2 + [d + S_m/2 + S_u(z - 1)]^2}, \\ \sin\theta_z &= R_u/r_z, \\ \cos\theta_z &= \frac{d + S_m/2 + (z - 1)S_u}{r_z} \\ &(z = 1, 2, \dots, w), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} r_z &= \sqrt{[R_d - S_d(z - w - 1)\tan\beta]^2 + [(S_m/2 - d) + S_d(z - w - 1)]^2}, \\ \sin\theta_z &= \frac{R_d - S_d(z - w - 1)\tan\beta}{r_z}, \\ \cos\theta_z &= -\frac{(S_m/2 - d) + (z - w - 1)S_d}{r_z} \\ &(z = w + 1, w + 2, \dots, m). \end{aligned} \quad (14)$$

在进行数值计算过程中, 考察某一参数对试样悬浮温度的影响, 其他参数为基本参数规定的数值.

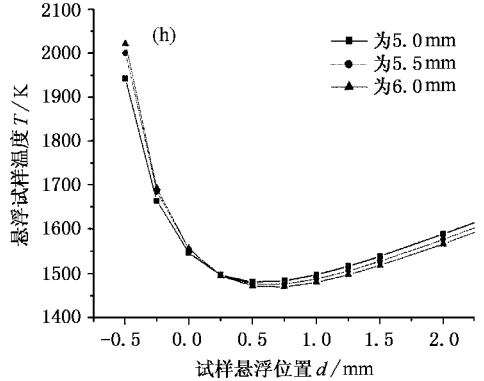
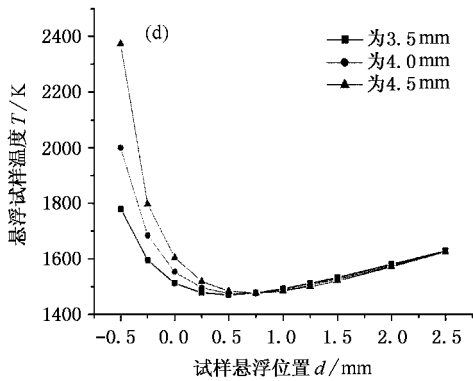
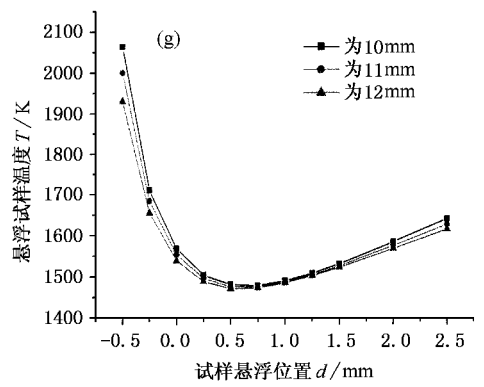
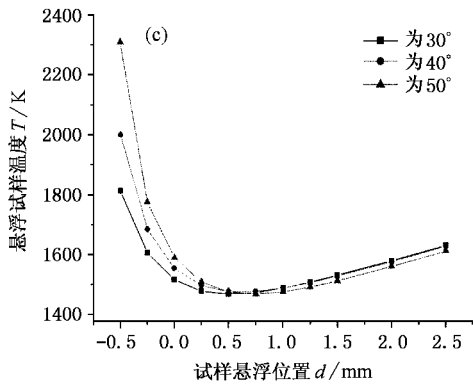
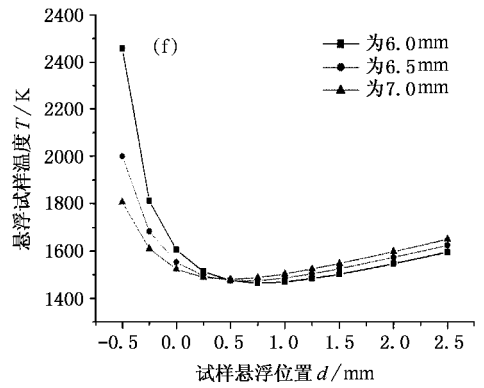
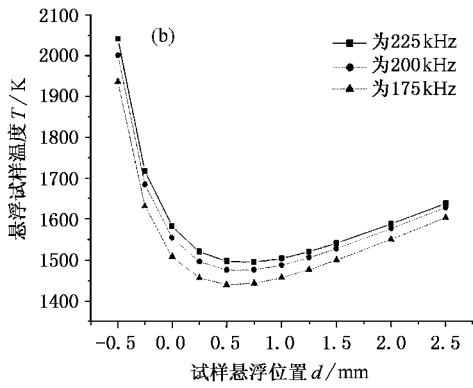
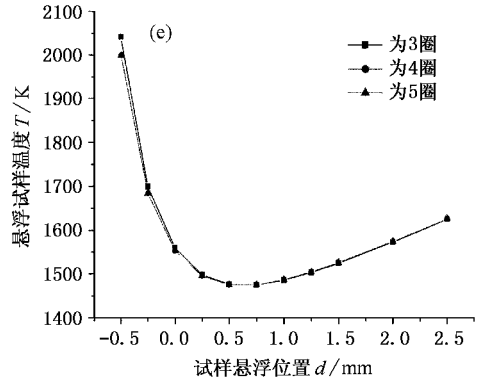
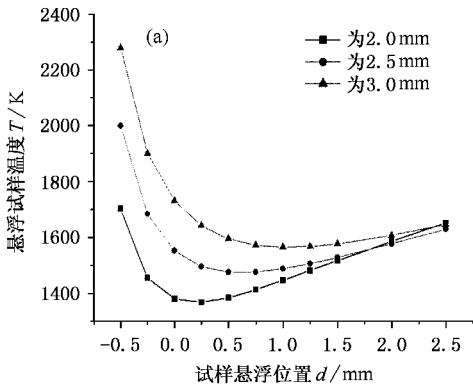
### 3. 计算结果与分析

计算结果如图3所示. 图3(a)表示试样半径  $a$  对悬浮试样温度  $T$  的影响, 随着试样半径的增大, 电磁悬浮试样的最低温度显著升高, 并且温度最低点位置向下偏移. 图3(b)表示感应器频率  $f$  对悬浮试样温度  $T$  的影响, 随着感应器电流频率的增加, 电磁悬浮试样的最低温度升高, 高频段频率增加对温度的影响较低频段小. 图3(c)表示试样下悬浮线圈锥度  $2\beta$  对悬浮试样温度  $T$  的影响,  $2\beta$  对试样悬浮熔炼的最低温度影响比较小, 但随着下悬浮线圈锥度增大, 具有最低试样悬浮温度的悬浮位置下降. 图3(d)(e)(f)(g)(h)分别表示悬浮熔炼感应器的结构参量  $S_d$  ( $m - w$ ),  $R_d$ ,  $S_m$ ,  $R_u$  对悬浮试样温度  $T$  的影响, 这些结构参量对试样悬浮熔炼的最低温度影响比较小, 具有最低试样悬浮温度的位置影响也不大. 图3(i)表示悬浮熔炼感应器上稳定线圈匝

数  $w$  对悬浮试样温度  $T$  的影响. 在没有上稳定线圈情况下, 悬浮试样温度变化不大, 并且温度较高, 但出于稳定性考虑, 这种情况在实际的悬浮熔炼中并不采用. 在存在上稳定线圈情况下, 其匝数对悬浮试样最低温度影响不大, 对试样具有最低试样悬浮温度试样悬浮位置的影响比较大, 随着上稳定线圈匝数的增加, 试样具有最低试样悬浮温度试样悬浮位置显著下降. 从整体上来看, 试样悬浮位置  $d$  与悬浮试样温度  $T$  具有显著的联系. 悬浮位置太高或者太低, 悬浮试样的温度都比较高, 悬浮位置略低于  $S_m/2$  线, 即  $d$  略大于0, 悬浮试样的温度最低.

通过上面的分析, 可以得到降低电磁悬浮试样温度的措施: 减小悬浮试样的半径, 在能够实现悬浮的情况下, 采用较低的电源频率通过调整电源功率; 使试样悬浮于温度最低的位置. 悬浮熔炼线圈的结构对悬浮试样的最低悬浮温度的影响比较小, 通过改变悬浮熔炼线圈结构而降低悬浮试样最低温度的方法不可行.

以上的计算不显含悬浮感应器电流  $I$ , 实际上是认为电源可以提供使试样稳定悬浮的任意大电



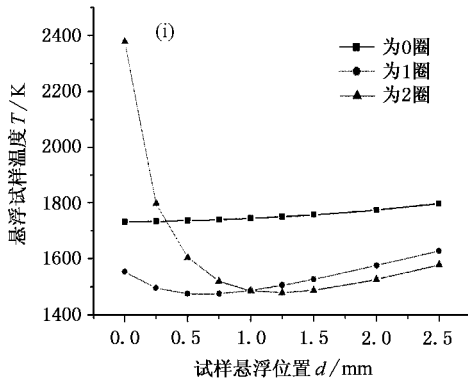


图3 各种工艺因素对试样悬浮熔炼温度  $T$  的影响 (a)为试样半径  $a$  对  $T$  的影响 (b)为感应器频率  $f$  对  $T$  的影响 (c)为线圈匝数  $2\beta$  对  $T$  的影响 (d)为  $S_d$  对  $T$  的影响 (e)为  $(m-w)$  对  $T$  的影响 (f)为  $R_d$  对  $T$  的影响 (g)为  $S_m$  对  $T$  的影响 (h)为  $R_u$  对  $T$  的影响 (i)为  $w$  对  $T$  的影响

流.前面的论述和得出的结论都是基于此前提条件的.在实际的悬浮熔炼实践中,由于电源的限制,悬浮感应器所能达到的最大电流是有限的.在某些情况下,悬浮位置难以达到图3中具有最低试样悬浮温度的悬浮位置,而是位于其下部,在图3中表示位于曲线偏右位置.在这种情况下,从图3(f)(g),(h)(i)又可以得到降低电磁悬浮熔炼温度另外的措施:减小下悬浮绕组参量  $R_d$ ;增大上稳定控制绕

组与下悬浮绕组的间距  $S_m$  增大上稳定控制绕组参量  $R_u$  增加上稳定控制绕组匝数.

## 4. 结 论

1. 利用作者推广的多匝感应器悬浮力和试样吸收功率高精度计算公式,结合自然对流情况下球形试样在气体介质中散热表达式,得到了悬浮试样温度与电磁悬浮熔炼各种工艺参量之间的关系表达式.

2.(TbDy)Fe<sub>2</sub>合金在氩气保护情况下在给定参量的悬浮感应器进行电磁悬浮熔炼为例,得到了各种工艺因素与(TbDy)Fe<sub>2</sub>试样电磁悬浮熔炼温度的关系.

过电磁悬浮熔炼各种工艺参量对(TbDy)Fe<sub>2</sub>试样电磁悬浮熔炼温度的关系的分析,结合实际电磁悬浮熔炼特点,得出了降低电磁悬浮熔炼悬浮试样温度的措施:减小悬浮试样的半径;在能够实现悬浮的情况下,采用较低的电源频率;通过调整电源功率,使试样悬浮于温度最低的位置;减小下悬浮绕组参量  $R_d$ ;增大上稳定控制绕组与下悬浮绕组的间距  $S_m$  增大上稳定控制绕组参量  $R_u$  增加上稳定控制绕组匝数.

[1] Wang N, Xie W J and Wei B B 1999 *Chin. Phys.* **8** 503  
 [2] Ma W Z, Ji C C, Li J G et al 2002 *Acta Phys. Sin.* **51**(10) (in Chinese) 马伟增、季诚昌、李建国等 2002 物理学报 **51**(10)  
 [3] Xie W J, Cao C D and Wei B B 1999 *Acta. Phys. Sin.* **48** 250 (in Chinese) 解文军、曹崇德、魏炳波 1999 物理学报 **48** 250  
 [4] Okress E C, Wroughton D M and Comenetz G 1952 *J. Appl. Phys.* **23** 25  
 [5] Hermann R and Löser W 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 6399  
 [6] Kiessig H and Essmann U 1985 *Scr. Metall.* **8**(19) 989  
 [7] Herlach D M, Cochrane R F, Egly I et al 1993 *Int. Mat. Rev.* **38** (6) 273  
 [8] Wei B B, Wang S and Barth M et al 1994 *Acta. Metall. Sin.* **30**

(7) B289 魏炳波、王 彬, Barth M 等 1994 金属学报 **30**(7) B289  
 [9] Suzuki M, Piccone T J, Fleming M C et al 1991 *Metall. Trans. A* **22** 2761  
 [10] Trinh E H and Ohsaka K 1995 *Int. J. Thermophys.* **16**(2) 545  
 [11] Egly I, Lohöfer G, Gorges E et al 1996 *J. Phys. : Condes. Matter.* **8** 9363  
 [12] Tsutomu H, Noriaki S, Youichi H et al 1982 *Trans. Electr. Eng. Japan B* **102** 219 星野勉、佐藤则明、林洋一等 1982 电气学会论文志 **B 102** 219  
 [13] Bird R B, Stewart W E, Lighthfoot E N 1960 *Transport Phenomena* (New York: John Wiley Press) p408

# Temperature character of electromagnetic levitation melting

Ma Wei-Zeng Ji Cheng-Chang Li Jian-Guo Xu Zhen-Ming

( School of Materials Science and Engineering , Shanghai Jiaotong University Shanghai 200030 , China )

( Received 1 August 2002 ; revised manuscript received 28 September 2002 )

## Abstract

Utilizing the formula of electromagnetic force and input power , we have derived the expression of input power of a spherical sample for a general electromagnetic levitation inductor without including the current of the inducer . Combining the power dissipation model of the spherical sample in free-convection gas medium and the expression of input power without including the current of inducer , the relation between processing parameters of electromagnetic levitation and temperature of levitation sample is established . The electromagnetic melting of spherical ( TbDy )Fe<sub>2</sub> alloys under the protection of Ar is employed as an example to study the effect of processing parameters on the temperature of levitation sample obtained by numerical computation . According to computation results and the character of actual electromagnetic levitation , the methods to decrease the temperature of the levitation melted sample are obtained : i. e. reducing the radius of the levitation melted sample , employing low frequencies of the inducer , adjusting the position of the levitated sample to a position at which the lowest levitation melting temperature can be obtained , reducing the radius of the lower levitation coil , increasing the space interval between the upper stability controlling coil and the lower levitation coil , increasing the radius of the upper stability controlling coil , and increasing the turns of the upper stability controlling coil .

**Keywords** : electromagnetic levitation melting , levitation force , input power , dissipated power

**PACC** : 4110F , 4400 , 8100