

文章编号: 1004-0609(1999)03-0482-06

行波磁场净化液态金属的电磁力参数^①

钟云波 任忠鸣 邓 康 俞迅捷 蒋国昌 徐匡迪

(上海大学 上海市钢铁冶金重点实验室, 上海 200072)

摘 要: 对影响液态金属所受电磁力大小的因素进行了研究, 对电磁力作用下的导电流体中的非金属颗粒的迁移速度进行了测定。结果表明: 金属液回路的几何尺寸、行波磁场发生器的气隙大小以及发生器中通过的电流等对电磁力参数产生很大的影响; 行波磁场能使微细非金属夹杂物(5~100 μm)的迁移速率成倍提高。

关键词: 金属净化; 电磁力; 行波磁场

中图分类号: TF1

文献标识码: A

行波磁场净化液态金属技术^[1,2]中, 电磁力参数是决定除杂效果的关键因素之一。由文献[3~7]可知, 液态金属受到的电磁力越大, 则其中的非金属夹杂物受到的挤压力越大, 非金属夹杂物便可获得更大的迁移速度, 这对缩短净化时间、增强该技术的工业实用性等方面都具有重要的意义。由公式 $f = J \times B$ 可知, 行波磁场中, 液态金属受到的电磁力大小主要取决于两个因素: 一个是磁感应强度, 另一个是金属液中通过的电流, 因此, 凡是影响该电流和磁感应强度的因素, 都将对电磁力参数产生影响。

已有的研究对该方法的基本原理进行了探讨^[4], 考察了液态金属中颗粒尺寸对颗粒迁移速度的影响^[8], 但关于如何进一步增加颗粒迁移速度, 提高去除效率, 却未见报道, 而这对于该方法的工业化应用无疑是非常重要的。

本文通过模拟实验, 确定了行波磁场中影响液态金属所受电磁力大小的因素, 并通过测定模拟体系中颗粒的迁移速度来证实加大电磁力后的除杂效果。

1 行波磁场净化液态金属的原理^[1]

将形成环路的陶瓷管放入到行波磁场发生器的气隙中, 如图1所示(图1中只画出部分回路的情况, 实际应用中则是将许多陶瓷管并排放置而组成多个回路)。陶瓷管中充满待净化的金属液并利用其自身的导电性而形成回

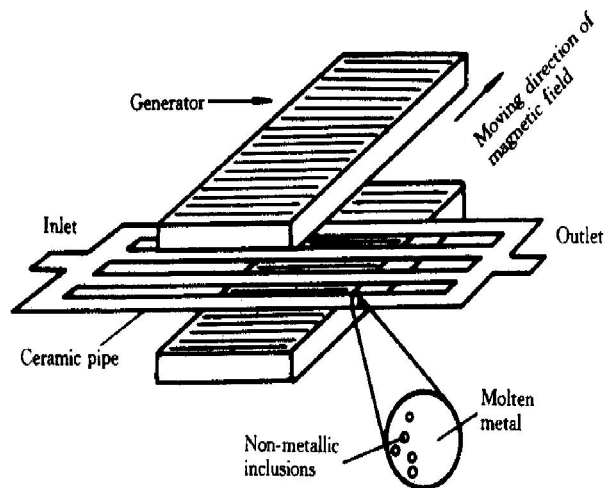


图1 行波磁场净化金属液的装置示意图

Fig. 1 Schematic of equipment for purifying molten metal by travelling magnetic field

① 上海市科委重点资助项目 97JC14017 收稿日期: 1998-06-17; 修回日期: 1998-11-06

钟云波(1971-), 男, 博士研究生

路, 根据电磁感应的原理, 行波磁场发生器产生的交变磁场将在金属液回路中感生出交变电流, 此交变电流在磁场作用下产生电磁力, 则电流载体——金属液受到单向的电磁力(指时间平均值)的作用, 被压向陶瓷管壁, 而金属液中的非金属夹杂物由于不导电而不受电磁力作用, 但它将受到周围金属液的挤压而迁移到陶瓷管的另一侧, 最终附着在管壁上而与金属液分离。如果金属液从行波磁场发生器的一边流向另一边, 则可实现金属液的连续净化。

2 实验方法

2.1 电磁场的测定

用 $d4\text{ mm}$ 的铜导线围成矩形线圈, 用来模拟金属液形成的导电回路, 置于行波磁场发生器的气隙中, 气隙中的磁感应强度用霍尔变送器和高斯计测出, 线圈中通过的感生电流值用电流表测得。改变气隙大小、线圈尺寸以及行波磁场发生器的输入电流等, 来研究电磁力变化的规律。

2.2 夹杂物颗粒迁移速度的测定

实验装置如图2所示。往截面积为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的有机玻璃矩形管中注入氯化钠饱和溶液(电解液, 能导电, 模拟液态金属), 有机玻璃管中设有两电极(间距 100 mm), 电极中间的电解液中悬浮有密度与电解液相当的氧化铝空心球(用来模拟夹杂物。实验颗粒直径为

$1.30 \sim 1.40\text{ mm}$, 其计算直径则为游标卡尺测量20个粒子的直径平均值, 颗粒的迁移时间也是10次测量值的平均值), 两电极外围用铜导线形成回路, 感生电流和磁感应强度分别用电流表和高斯计测得。氧化铝空心球迁移时间用计时器测得, 精确度为 0.01 s 。根据氧化铝空心球的迁移距离, 即可求出其迁移速度, 从速度与电磁力大小的关系来研究增加电磁力的除杂效果。

3 实验结果与讨论

3.1 回路面积与感生电流的关系

这里由导线形成的线圈回路, 相当于实际应用中由金属液所形成的导电回路, 因此, 以下叙述的回路参数, 也就相当于金属液回路的参数。在模拟实验中, 线圈平面与磁感应强度垂直, 设回路面积为 S , 则根据楞次定律可知, 线圈中产生的感应电势 $E^{[9]}$ 为

$$E = -N \frac{d\phi}{dt} = -NS \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

式中 N 为线圈匝数(本实验中 $N=1$), B 为磁感应强度, ϕ 为磁通量。设线圈回路电阻为 R , 则线圈中通过的电流 I 为

$$I = \frac{E}{R} = \frac{NS}{R} \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

当行波磁场发生器处于稳态时, 式(2)中的磁感应强度变化率 $\frac{dB}{dt}$ 为一定值, 则线圈中

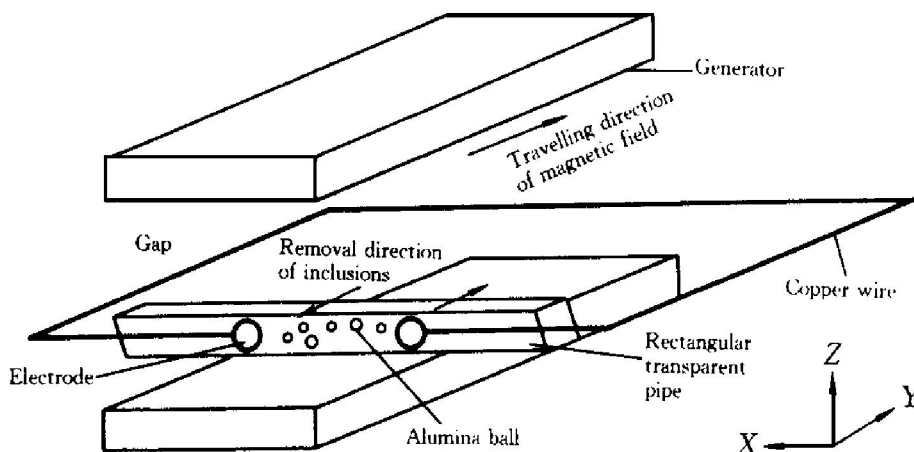


图2 颗粒迁移速度测量装置

Fig. 2 Equipment for measuring removal rate of inclusions

产生的感生电流仅与线圈面积有关。在图2中,线圈面积改变可分别通过改变 X 或 Y 方向上的长度或宽度来实现。实验结果如下图所示,图3(a)是固定线圈长度而改变宽度的情况,图3(b)则是固定宽度改变长度的情况。

从图3(a)可以看出,固定长度而改变线圈宽度时,感生电流有一极大值,该极大值位于宽度为200~250mm处,这个尺寸与行波磁场发生器中每极线圈的极距宽度相同(200~250mm),超过这个尺寸,通过线圈的磁通量中,三相交流电中另两相交流电贡献的磁通量成分增加,由于三相电流中每相电流的相位各不相同,互相抵消,因此减少了净的磁通量,导致感生电流降低;而低于这个宽度,通过线圈的磁通量减小,同样使得感生电流值减低。图3(b)则表明,当固定线圈宽度时,感生电流随线圈长度增加而不断增加,这是因为,行波磁场发生器中的磁场是向外扩展的,如图4所示。增加线圈长度,显然增加了线圈中通过的磁通量,从而导致感生电流的增加。这与任忠鸣等在电磁连铸中发现的现象是一致的^[10]。在那里,金属液所受到的电磁压力与金属液屏蔽回路的面积成正比。这一规律对实际应用是十分有利的,因为在实际应用中,线圈回路将由金属液形成,对高熔点金属而言,在远离行波磁场发生器处将金属浇入陶瓷管中,可使行波磁场发生器得到保护。

3.2 行波磁场发生器气隙对电磁力影响

气隙发生改变,将使磁力线回路缩短和增

加,这不但影响了气隙中的磁感应强度,也改变了线圈中的感生电流值,因此对线圈所受的电磁力产生极大影响。气隙改变对感生电流的影响如表1所示。

由表1可以看出,随着气隙的减小,线圈中感生电流不断增大。气隙尺寸减小一半,线圈感生电流增加将近两倍。另外,气隙的减小也使得气隙中的磁感应强度发生显著改变,其变化情况如表2所列(行波磁场发生器输入电流为120A)。

从表2可以看出,随着气隙的减小,气隙中的磁感应强度值也不断增强,如果感生电流从截面积为 $9\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 金属液中通过,则金属液受到的电磁体积力与气隙尺寸的关系如表3所列(感生电流按发生器电流为120A时的数值来计算)。

由表3可以看出,气隙尺寸减少一半,电磁体积力增加接近3倍,因此,气隙尺寸对金属液受到的体积力的影响是非常大的;但是,在实际应用中,气隙不能过于减小,否则盛有金属液的陶瓷管难以在气隙中放置。

3.3 行波磁场发生器输入电流对电磁力的影响

图5表示了气隙中磁感应强度与输入电流的关系。从中可见,随输入电流的增加,磁感应强度成线性增加。此外,从表1也可看出,随着输入电流的增加,感生电流相应不断增加。这是因为输入电流增加时,气隙中的磁感应强度不断增加,使得线圈中通过的磁通量增

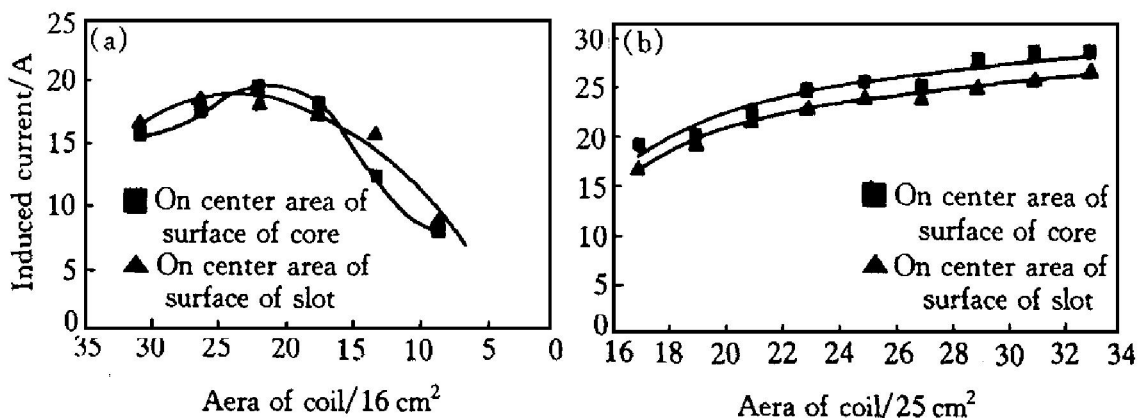


图3 感生电流与线圈回路面积的关系

Fig. 3 Relationship between induced current and area of coil

表 1 气隙尺寸对感生电流的影响

Table 1 Effect of gauge of gap on induced current

Gauge of gap/ mm	Current/ type	Current value/ A					
60	Current in generator	100	110	120	130	140	150
	Induced current	44	47	50	52	56	60
40	Current in generator	100	110	120	130	140	150
	Induced current	52	52	55	59	60	84
30	Current in generator	100	110	120	130	140	150
	Induced current	74	76	84	90	N. d.	N. d.

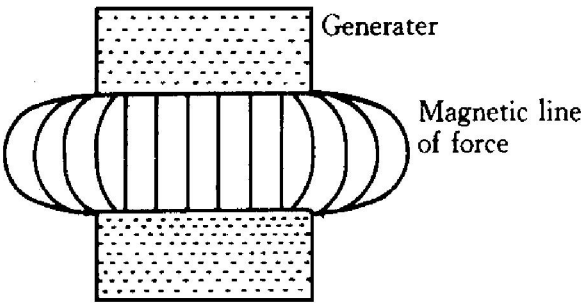


图 4 行波磁场发生器中磁力线分布

Fig. 4 Distribution of magnetic flux in magnetic generator

表 2 气隙尺寸对磁感应强度的影响

Table 2 Effect of gauge of gap on magnetic flux density

Gauge of gap/ mm	Average magnetic flux density/ mT
60	122. 30
40	155. 93
30	191. 16

表 3 气隙尺寸对电磁体积力的影响

Table 3 Effect of gauge of gap on EMF

Gauge of gap/ mm	EMF/(N•m ⁻³)
60	8. 49×10 ⁴
40	1. 19×10 ⁵
30	2. 23×10 ⁵

加, 导致感生电流增大。由公式 $f = J \times B$ 可知, 电磁力将大大增加, 因此, 增加磁场发生器的输入电流能获得更大的电磁力。

3. 4 电磁力对夹杂物迁移速度的影响

由文献[4] 可知, 金属液中的非金属夹杂物受到的挤压力为

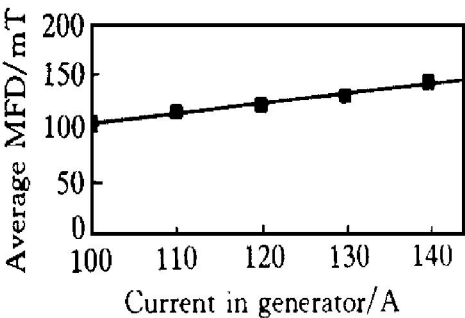


图 5 行波磁场发生器输入电流与磁感应强度关系

Fig. 5 Relationship between current in generator and MFD

$$F_p = - \frac{3}{4} \frac{\pi d_p^3}{6} J \times B$$
 (3)

若令此挤压力与夹杂物受到的粘滞阻力相等^[4], 则可得出夹杂物的最终迁移速度为

$$V = - d_p^2 J \times B / 24 \mu$$
 (4)

而靠比重差获得的夹杂物迁移速度则由下式求得^[11]:

$$U = d_p^2 \Delta Q g / 18 \mu$$
 (5)

由式(4)可知, 金属液受到的电磁体积力越大, 夹杂物获得的迁移速度就越大, 也就越有利于夹杂物的除去。颗粒迁移速度与电磁体积力的关系如图 6 所示(颗粒直径为 1. 32 mm, 磁感应强度为 0. 10~ 0. 12 T, 电流密度为 1. 5 ~ 3. 0×10⁴A/m²)。

图 6 表明, 颗粒的迁移速度与电解液所受

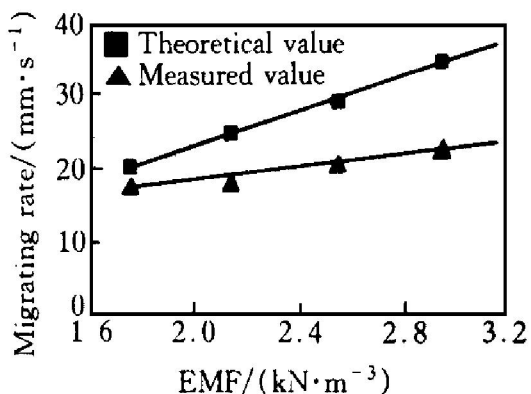


图6 颗粒迁移速度与电磁力的关系

Fig. 6 Relationship between EMF and migrating rate of particle

电磁力呈良好的正比关系。测量值与理论值之间的偏差来自于计时器操作误差以及颗粒的形状因素^[5]等。在上述实验中,由于电解液的电阻较大,电流密度只能达到 10^4 数量级。尽管如此,图中显示颗粒的迁移速度仍能达到数十毫米每秒。对于实际金属液中去除微小颗粒夹杂(50~100 μm , 约为本实验中的 1/10)而言,则由于金属液低得多的电阻(电解液电阻可达到几个 Ω , 而金属液电阻只有 $10^{-2}\Omega$ 数量级),在相同的感生电势下,电流密度可达到 10^6 数量级,相应电磁力增加 100 倍。由式(4)可知,颗粒的迁移速度与颗粒直径的平方成正比,也就是说,颗粒直径减小 10 倍,颗粒迁移速度将降低 100 倍,那么对金属液而言,电流密度的增加可弥补上述颗粒直径减小而引起的迁移速度的降低。具体而言,对于金属液中直径约为 100 μm 的夹杂物颗粒,当电流密度达到 10^6 数量级时,置于上述磁场中,仍然可获得与图 6 中相当的迁移速度(15~25 mm/s),在实际生产中,上述粒径的夹杂物靠重力获得的迁移速度可根据式(5)计算出来,以铝液中的 Al_2O_3 为例,约为 5 mm/s,仅为上述速度的 1/3~1/5,由此可见,采用行波磁场能显著提高夹杂物的去除速度。对其它粒径的夹杂物,在前述的电磁力作用下,获得的理论迁移速度与靠重力差获得的迁移速度的关系如图 7 所示。仍以铝液中的 Al_2O_3 夹杂为例,图中数据取自文献^[10~12]。图中的 $U_{\text{emf}-1}$ 至 $U_{\text{emf}-4}$ 是根据

前面得到的电磁力计算得到的夹杂物迁移速度,电磁力数值分别为 3.33×10^4 , 5.00×10^4 , 7.50×10^4 , $1.27 \times 10^5 \text{ N/m}^3$; 而 U_{stocks} 则是指仅靠重力差而获得的迁移速度,由式(5)计算而得。图中也显示出,随着电磁力的增加,微细夹杂物的迁移速度也大大增加(最大电磁力时,可使夹杂物获得的迁移速度为 U_{stocks} 迁移速度的 7 倍),这使得原本靠重力差而难以除去的微细夹杂物可利用行波磁场来除去,由此可见,

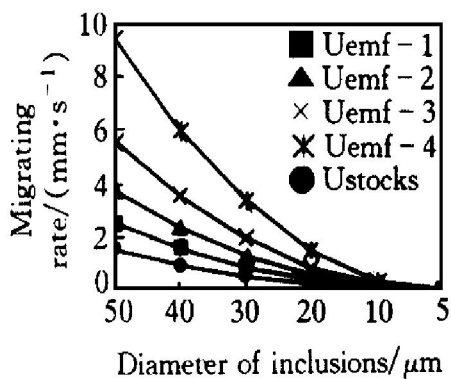
图7 电磁力作用下夹杂物迁移速度与 U_{stocks} 速度对比

Fig. 7 Comparison of migrating rate of inclusion under EMF and stocks rate

行波磁场净化液态金属技术具有广阔的工业应用前景。

4 结论

(1) 行波磁场中的液态金属所受电磁力的大小与金属液回路所包围的面积、行波磁场发生器的气隙以及行波磁场发生器中的输入电流等因数有关:

① 金属液回路所包围的几何区域中,当宽度接近于行波磁场发生器每极线圈的宽度时,金属液中通过的感生电流达最大值;在行波磁场磁力线作用范围之内,随着该几何区域长度增加,感生电流也不断增加,感生电流的增加导致所受电磁力增大;

② 行波磁场发生器的气隙尺寸对电磁力产生很大的影响。随着气隙的减小,不但磁感

应强度不断增加, 感生电流也不断增加, 导致金属液受到的电磁力显著增加;

③随着行波磁场发生器中通过的电流的增加, 将导致气隙中磁感应强度和回路中感生电流同时增加, 使得电磁力大大增加。

(2) 夹杂物颗粒的迁移速度与周围导电流体所受电磁力成正比关系, 当金属液中的电流密度达 10^6 数量级时, 可将微细夹杂物 ($5 \sim 100 \mu\text{m}$) 的迁移速度提高 $3 \sim 7$ 倍。

REFERENCES

- 1 Tanaka Y, Sassa K, Asai S *et al.* Tetsu to Hagane, 1995, 81(12): 12.
- 2 Zhong Yunbo(钟云波), Ren Zhongming(任忠鸣) and Deng Kang(邓康). Journal of The Chinese Rare Earth Society (Spec issue), 1998, 16: 708.
- 3 Park J, Sassa K, Asai S *et al.* CAMP-ISIJ, 1993, 6: 2.
- 4 Leenov D and Kolin A. J Chem Phys, 1954, 22: 683.
- 5 Marty P and Alemany A. In: Proc of Symp of IUTAM, Cambridge: The Metal Society, 1984: 245.
- 6 Sassa K *et al.* In: Proc of EMP Intern Cong Paris, 1997: 157.
- 7 El-Kaddah N, Patel A D and Natarajan T T. JOM, 1995, 47(5): 46.
- 8 Taniguchi S and Keith Brimacombe J. Tetsu to Hagane, 1994, 80(1): 24.
- 9 Li Daming(李大明). Measuring of Magnetic Field(磁场的测量). Beijing: Mechanical Industry Press, 1993: 20.
- 10 Ren Zhongming(任忠鸣), Jiang Guochang(蒋国昌) *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1996, 6(1): 108.
- 11 Flemings M C. Solidification Processing(凝固过程), Beijing: Metallurgical Industry Press, 1981: 202.
- 12 Shangguan D, Ahuja S and Stefanescu D M. Metallurgical Transactions A, 1992, 23A(2): 669.

Electromagnetic force parameters during process of purifying liquid metal by travelling magnetic field

Zhong Yunbo, Ren Zhongming, Deng Kang, Yu Xunjie, Jiang Guochang, Xu Kuangdi
*Shanghai Enhanced Laboratory of Ferrous Metallurgy,
 Shanghai University, Shanghai 200072, P. R. China*

Abstract: The factors which affect the magnitude of the electromagnetic force imposed on the molten metal were investigated, and the removal rate of the non-metallic particles immersed in the conductive liquid was determined. It was shown that the geometric size of the loop forms by the molten metal, the size of the gap of the magnetic generator and the electric current in the generator affect the magnitude of the electromagnetic force greatly. The removal rate of the micro non-metallic particles ($5 \sim 100 \mu\text{m}$) in the liquid metal can be improved by times compared the case without EM force.

Key words: metal purifying; electromagnetic force; travelling magnetic field

(编辑 黄劲松)