

[文章编号] 1004- 0609(2001) 04- 0541- 06

交变磁场净化金属液时金属液紊流的形成及其控制^①

钟云波, 任忠鸣, 邓 康, 蒋国昌, 徐匡迪

(上海大学 上海市钢铁冶金国家重点实验室, 上海 200072)

[摘 要] 使用金属镓液对交变磁场作用下的金属液紊流现象进行了直接观察, 并对相应的成因进行了探讨, 结果发现交变磁场中磁场分布不均匀是引起紊流的根本原因。提出采用磁场分布不均度参数来衡量磁场不均匀性, 该参数的提出为电磁净化器的设计和提高净化效果提供了理论依据。为了探讨控制紊流的方案, 还采用了模拟体系, 研究了不同截面形状的管型及不同磁感应强度分布不均度下颗粒的迁移规律, 并分析了管型影响紊流形成的原因。

[关键词] 交变磁场; 紊流; 磁感应强度分布不均度; 净化

[中图分类号] TF 1

[文献标识码] A

金属电磁净化技术是一项具重大实用价值的技术^[1~8]。在该技术的应用中, 影响净化效果的关键因素之一是金属液的紊流, 一旦金属液出现强烈紊流, 则分离的夹杂物将重新进入金属液中, 大大降低除杂效率。因此, 必须深入研究紊流的形成规律, 以有效地加以控制。

文献[9, 10]分析了目前存在的几种电磁净化技术方案的优缺点, 指出采用交变电磁场方案是目前该领域研究的重点。在各种交变电磁场方案中, 行波磁场方案是具有较大工业可行性的方案之一。因此作者拟以行波磁场为例, 对金属液中的紊流产生原因及其控制方案进行探讨。

1 实验

1.1 金属液紊流观察用实验装置

行波磁场发生器是一个类似直线电机的结构, 它由带有凹槽的硅钢片和嵌放在凹槽中的线圈组成, 上下定子之间的间隙组成了磁场空间, 如图 1 所示。硅钢片凸起部分表面称为齿面, 而凹槽与齿面平齐的平面称为齿槽面, 齿与槽交界处与齿面平齐面称为交界面。为考察紊流的形成规律, 用透明的有机玻璃制成金属液储槽, 采用低熔点的金属镓液(熔点 29.4 ℃)进行实验。镓液储槽的两端各设

一电极, 其外围用铜导线连接而形成一导电回路, 该回路置于磁场空间时将有感生电流产生, 磁场与电流的相互作用使镓液受到电磁力的作用。当金属液中有紊流产生时, 由于流向紊乱, 因此金属液的自由表面不能保持平整, 紊流愈强烈, 自由表面愈不平整。通过观察镓液表面平整度的变化规律也就可以了解金属液紊流的变化规律。金属液紊流状况用摄影方式记录。

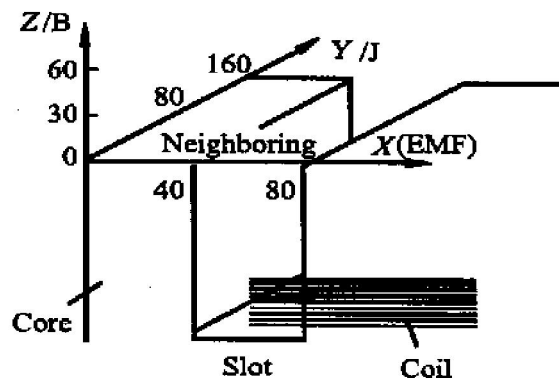


图 1 行波磁场发生器基本结构

Fig. 1 Structure of generator of travelling magnetic field(mm)

1.2 磁感应强度的测定

电流频率为 50 Hz, 磁场空间中的磁感应强度用霍尔元件及特斯拉计来测量。

1.3 紊流对夹杂物颗粒迁移行为的影响

① [基金项目] 上海市科委资助项目(97JC14017); 上海市教委青年基金资助项目(2000QN61)

[收稿日期] 2000- 10- 25; [修订日期] 2001- 03- 02

[作者简介] 钟云波(1971-), 男, 讲师, 博士。

采用过共晶铝硅合金液^[11, 12], 以初生态富硅相模拟非金属夹杂物, 进行了不同磁场空间和不同截面形状的金属液管道中夹杂物颗粒迁移的实验。

2 实验结果与讨论

2.1 紊流的形成规律与磁场分布的关系

2.1.1 紊流的形成规律与磁场空间位置的关系

图 2 所示为观察到的不同磁场空间位置处, 金属镓液自由表面的平整情况, 由图可见:

1) 当镓液储槽分别位于齿面、齿槽面和齿与槽交界面上时, 镓液表面平整度依次降低, 尤以位于交界面上方时变化最为剧烈;

2) 当镓液储槽位于齿面上方, 并改变其 Z 坐标值, 镓液表面基本保持平整, 即紊流很弱甚至几乎没有形成紊流;

3) 当镓液储槽位于齿槽面上或交界面上时,

镓液自由表面极不平整, 说明产生了强烈的紊流, 但是当镓液储槽的 Z 坐标增加时, 镓液表面平整度也发生变化: 当距离 $Z = 20$ mm 时, 镓液自由表面由极不平整变为相对平整, 说明此时的紊流状况也由强烈变为微弱; 由于磁场空间在 Z 向上的高度为 60 mm, 也就是说, 当镓液储槽接近磁场空间的中分面时, 金属液紊流将逐渐减弱。

2.1.2 磁场空间中的磁场分布

为了进一步揭示产生紊流的原因, 测定了磁场分布, 结果如图 3 所示, 可以看出:

1) 靠近齿表面($Z = 10$ mm) 的磁感应强度较高, 但均匀性稍差, 而靠近磁场空间的中部($Z = 20$ mm), 磁感应强度则较均匀, 但强度相应减小;

2) 齿槽面上方的磁感应强度幅值比齿面上方约低 40% 左右, 在齿槽面上方的任何一个水平面上, $X = 60$ mm 处(齿槽口的中央) 的磁感应强度最低;

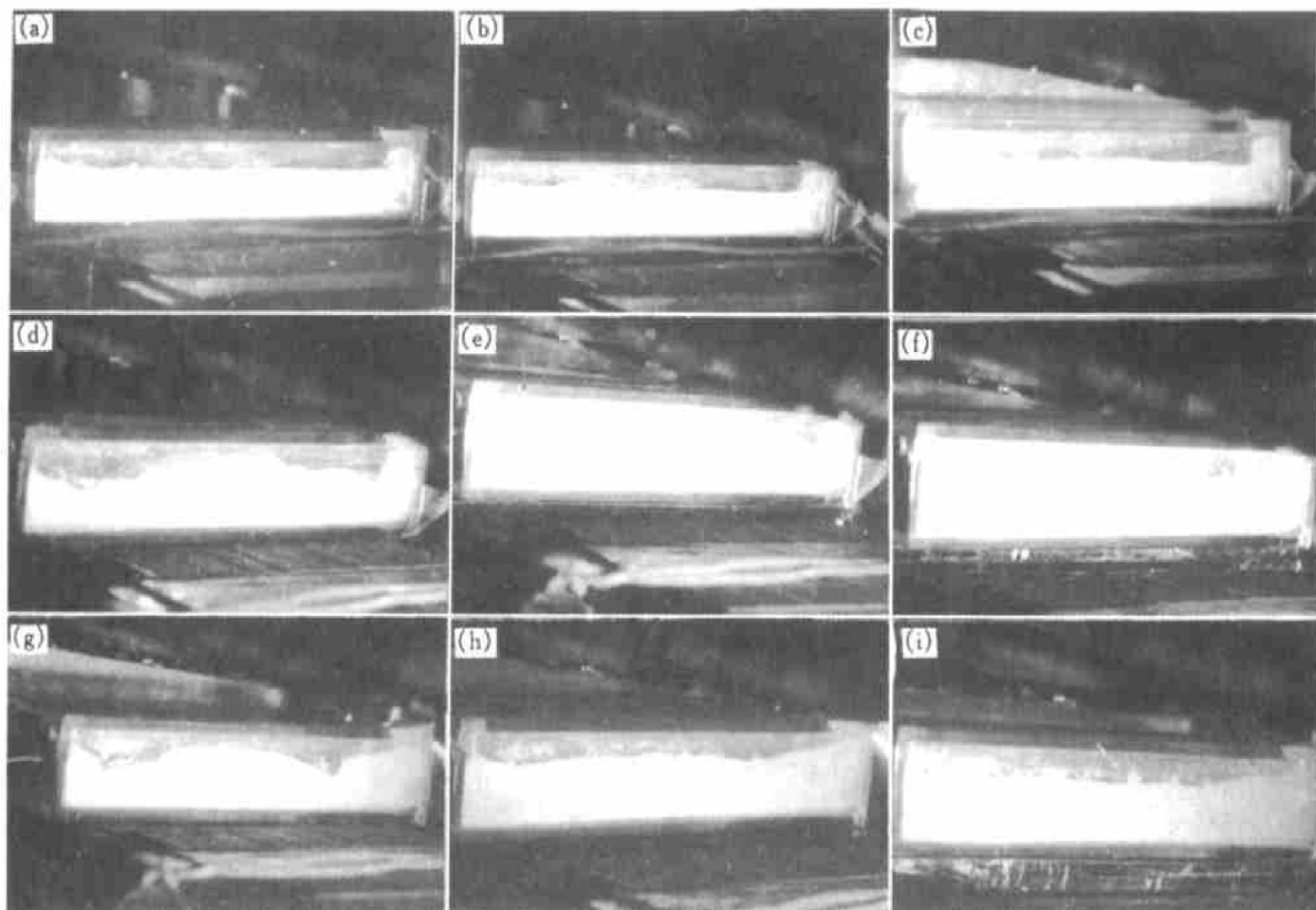


图 2 磁场空间中不同位置处镓液自由表面的平整情况

Fig. 2 Free surface macrostructures of liquid gallium at different positions in magnetic field

(End of arrow is free surface of liquid gallium)

- (a) $-X = 20$ mm, $Z = 10$ mm; (b) $-X = 20$ mm, $Z = 15$ mm; (c) $-X = 20$ mm, $Z = 20$ mm;
 (d) $-X = 60$ mm, $Z = 10$ mm; (e) $-X = 60$ mm, $Z = 15$ mm; (f) $-X = 60$ mm, $Z = 20$ mm;
 (g) $-X = 40$ mm, $Z = 10$ mm; (h) $-X = 40$ mm, $Z = 15$ mm; (i) $-X = 40$ mm, $Z = 20$ mm

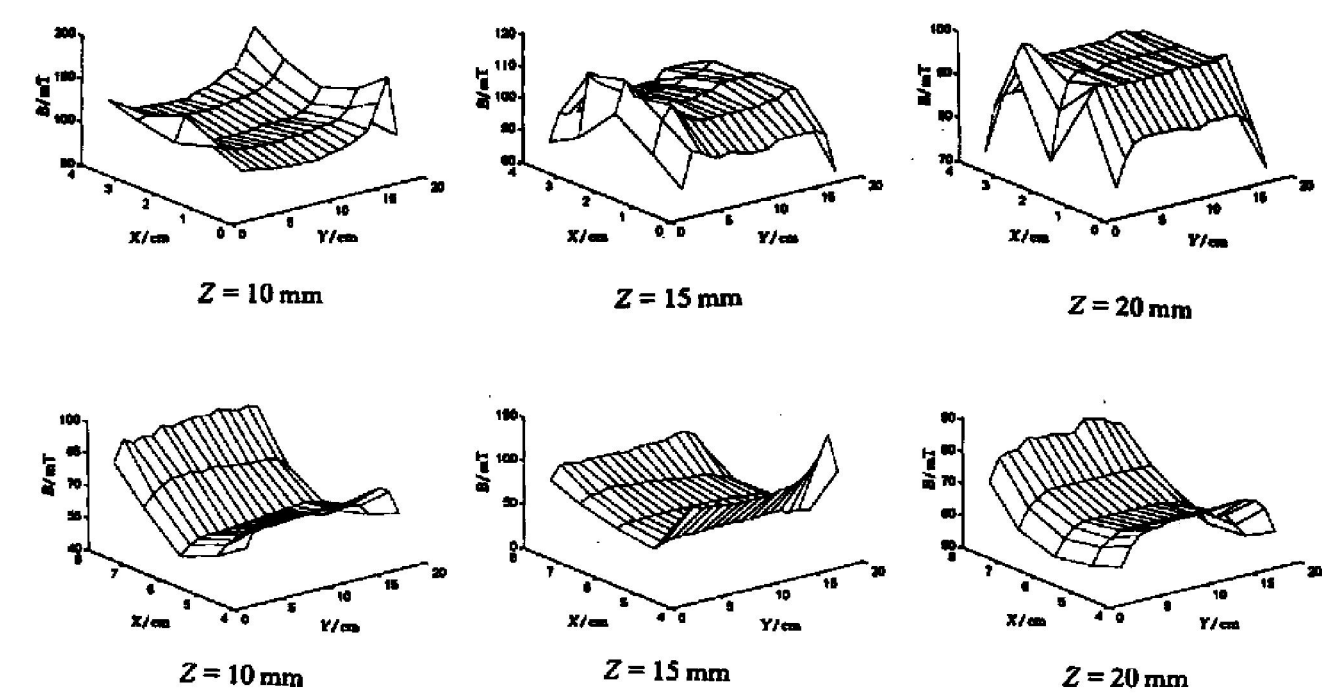


图 3 行波磁场空间中不同位置处磁场分布

Fig. 3 Distribution of magnetic flux density(MFD) in travelling magnetic field

3) 在齿两端以及在齿与相邻齿槽交界处, 磁感应强度变化剧烈, 分布也极不均匀。

上述 3 个规律与前面的观察对象对比可以看出, 凡是磁感应强度变化强烈处, 镓液自由表面越不平整, 即紊流产生越强烈; 而磁感应强度变化相对均匀的区域, 镓液表面平整, 紊流产生较弱。由此可见, 磁场分布的均匀性决定了金属液紊流的剧烈程度。

为了定量表征磁场均匀性对金属液紊流状态的影响, 定义了磁场分布不均度参数 $H_{om}(B)$:

$$H_{om} = \frac{\sum_{i=1}^N |B_i - \bar{B}|}{N \bar{B}} \times 100\%$$

式中 $H_{om}(B)$ 为磁场分布不均度, %; B_i 为磁场空间中某一点的磁感应强度, T; $\bar{B}$ 为整个磁场空

间中磁感应强度的算术平均值, T; N 为磁感应强度测定点的数目。采用该参数, 对磁场空间中不同区域的 $H_{om}(B)$ 进行了计算, 结果如表 1 所列。

从表 1 的数据可以看出, 当磁场分布不均度小于 10% 时, 金属液中紊流较弱; 当该参数大于 10% 时, 金属液中将产生较强烈的紊流, 由此可见, 磁场分布不均匀是导致金属流液紊流最直接的原因。

2.2 紊流对夹杂物迁移行为的影响

上述已表明, 磁场分布不均度直接决定紊流的强弱, 而紊流的强弱又将影响非金属夹杂物颗粒的迁移行为, 因此对应的磁场空间中, 颗粒的迁移行为也将不同。使用过共晶铝硅合金液, 利用其凝固过程先析出的富硅颗粒模拟非金属夹杂物^[3], 观察了不同磁场分布不均度下, 富硅颗粒的迁移行为, 结果如图 4 所示。

表 1 磁场空间不同区域中磁感应强度的平均值及不均度

Table 1 Average MFD and H_{om} in different space in magnetic fields

Position	Z/mm	Average MFD/ mT	$H_{om}(B) / \%$	Turbulent
Over core	10	106.359 0	4.351 8	Weak
	15	103.076 9	1.641 8	Weak
	20	95.102 6	0.349 8	Weak
Over slot	10	57.274 5	12.793 3	Strong
	15	65.102 6	9.190 0	Weak
	20	65.884 6	3.068 5	Weak
Over neighboring	10	92.735 3	17.587 4	Strong
	15	89.544 1	10.841 2	Weak
	20	81.900 0	10.154 7	Weak

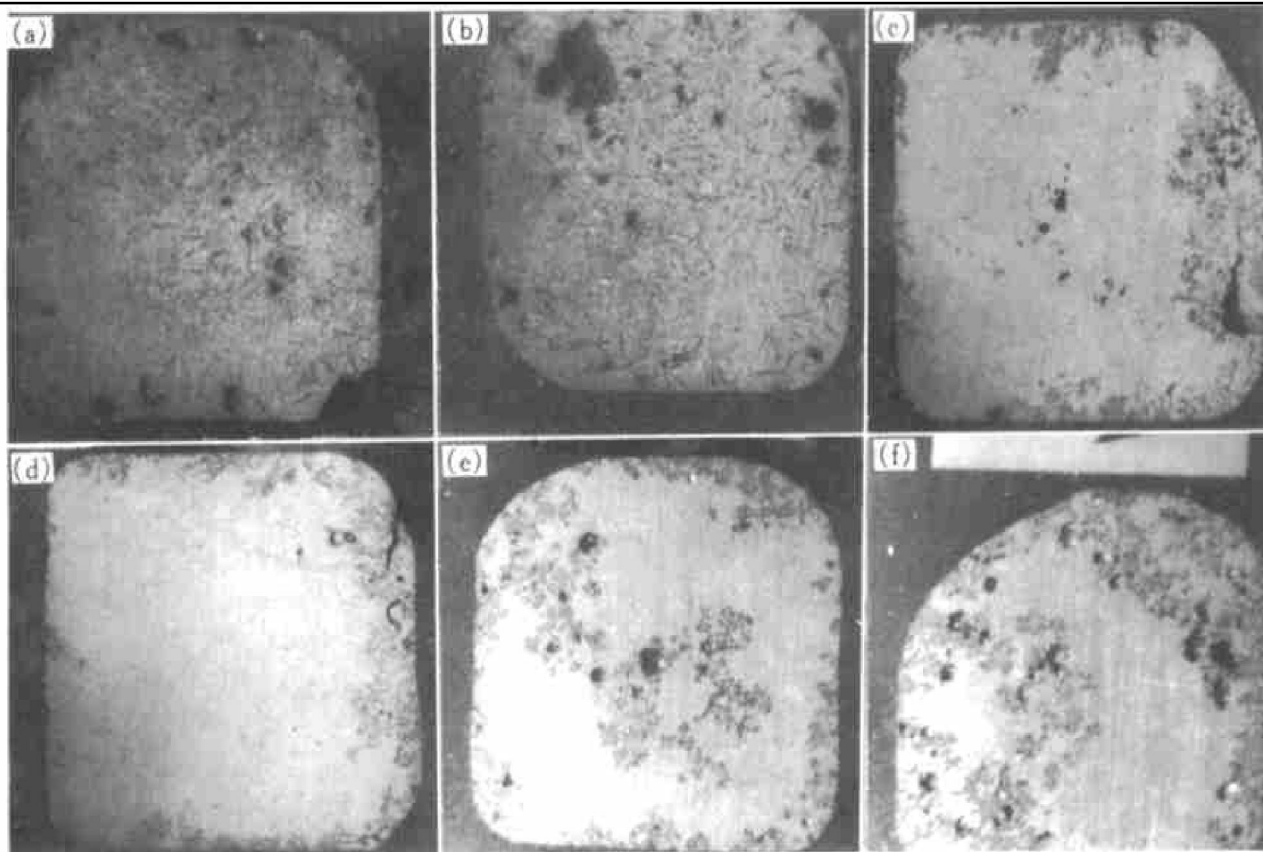


图 4 颗粒分布与磁场分布不均度的关系

Fig. 4 Distribution of particles under different H_{om}

(a) —Without EMF, section in $y = 40$ mm; (b) —Without EMF, section in $y = 120$ mm;

(c) —Without EMF, section in $y = 40$ mm, $H_{om} = 4.35\%$; (d) —Without EMF, section in $y = 120$ mm, $H_{om} = 4.35\%$;

(e) —Without EMF, section in $y = 40$ mm, $H_{om} = 12.79\%$; (f) —Without EMF, section in $y = 120$ mm, $H_{om} = 12.79\%$

从图 4 可以看出, 无电磁场时, 由于富硅颗粒密度与铝液的接近, 因此析出的富硅颗粒基本悬浮在铝液中, 凝固后, 富硅颗粒随机分布在整個断面上; 施加电磁力后, 当磁场分布不均度为 4.35% 时 (齿面上方), 富硅颗粒朝电磁力逆方向迁移后聚集在管壁一侧, 而同样是施加电磁场后, 当金属液槽位于磁场分布不均度为 12.79% 的区域时 (齿槽面上方), 试样断面上的富硅颗粒出现了无规则分布, 由此可见, 强烈的紊流将严重阻碍颗粒的定向迁移行为。

2.3 管截面形状对颗粒迁移的影响

上述规律的获得均是采用矩形管道来盛装金属液, 那么与之等截面积的圆形或三角管中, 颗粒迁移行为如何呢? 为此进行了对比实验。结果如图 5 所示。

图 5 表明, 在同样的磁场分布不均度下, 采用三角形管, 断面上的高硅颗粒分布在电磁力的逆向侧, 说明三角形管与矩形管一样, 其中的颗粒能定向迁移, 显然, 金属液中紊流较弱; 而采用圆形管道时, 断面上的硅颗粒没有实现定向迁移, 这说明

圆形管道中产生了较强的紊流。由此可见, 金属液流通管道的形状也对紊流的强弱有很大影响。由于上述 3 种管道的截面积和感生电流均相等, 外部磁感应强度也一致, 即金属液受到的平均电磁体积力相等, 它们与金属液接触的内表面积之比为: $S_{\text{圆形管}}: S_{\text{矩形管}}: S_{\text{三角形管}} = 3.54: 4: 4.56$, 即矩形管和三角形管与金属液接触面积要比圆形管的高 14%~24%, 文献[13]指出, 管道与金属液接触面积的增加将不利于紊流的形成。另外, 3 种管中紊流强弱的变化规律还与水力学因素有关, 如图 6 所示。

图 6 中, 假设 3 种管道中的金属液, 由于磁场分布不均或者其它因素导致了如图所示的局部紊流时, 由于圆形管具有圆弧壁面, 金属液流遇到圆弧壁面时, 流向将发生改变, 其改变的角度 θ_1 小于等于 90° , 而如果遇到矩形管或三角形管的平直壁面, 金属液流向也将发生改变, 但改变的角度大于等于 90° , 根据水力学的原理^[14], 液流方向改变的角度越大, 则其所受阻力越大, 对流动的衰减也就越大, 因此, 这也是矩形和三角形管中金属液紊流较弱的原因。

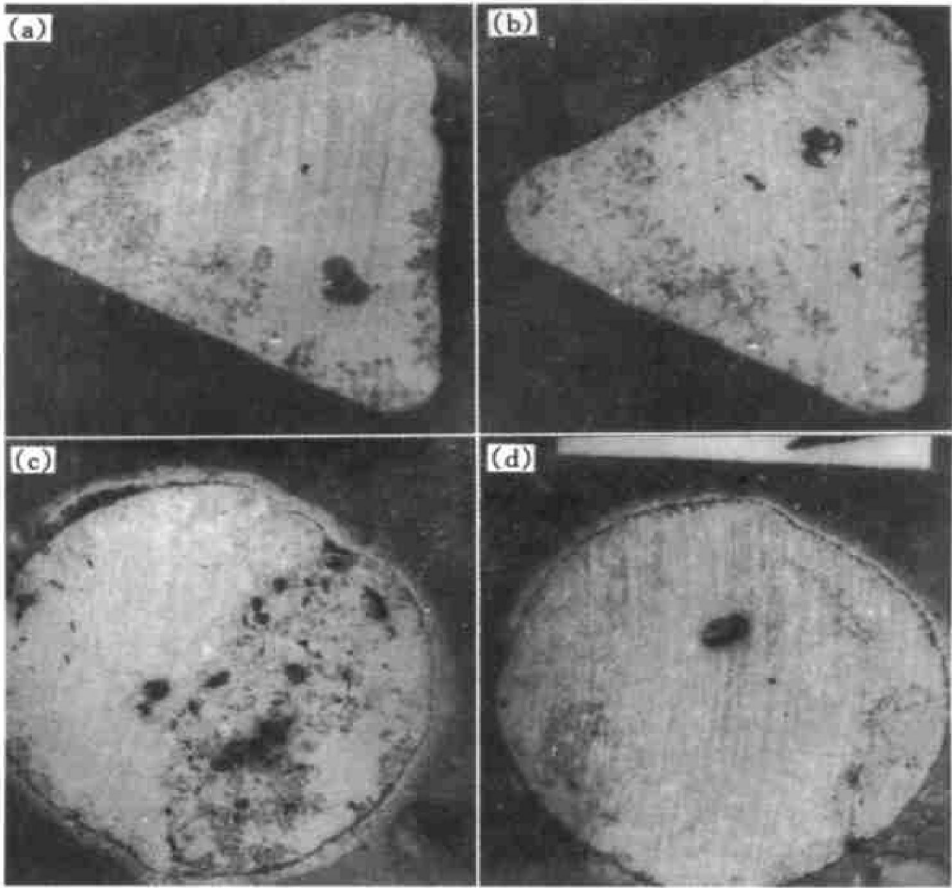


图 5 三角形或圆形管中颗粒的迁移行为

Fig. 5 Migration behavior of particles in triangle and circular pipes

(a) —With EMF, $y=80\text{ mm}$, $H_{om}=4.35\%$; (b) —With EMF, $y=120\text{ mm}$, $H_{om}=4.35\%$;
(c) —With EMF, $y=120\text{ mm}$, $H_{om}=4.35\%$; (d) —With EMF, $y=160\text{ mm}$, $H_{om}=4.35\%$

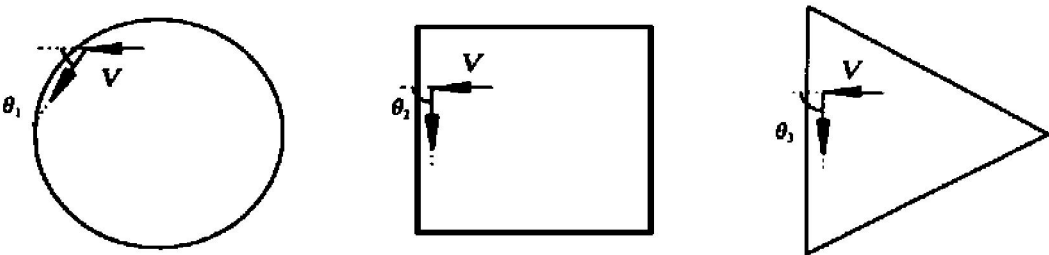


图 6 管道形状对金属液紊流的抑制作用水力学图解

Fig. 6 Hydraulics interpretation for restriction of turbulent in pipes with different section shapes

3 结论

1) 磁场分布的均匀性对金属液紊流的形成产生决定性的影响。

2) 采用磁场分布不均度参数 $H_{om} = \frac{\sum_{i=1}^N |B_i - \bar{B}|}{\bar{B}} \times 100\%$ 能判定磁场的均匀性和紊流的强弱。在采用矩形管的前提下, 当该值小于 10% 时, 金属液中紊流较弱, 非金属颗粒能平稳地进行定向迁移; 反之, 当其值大于 10% 时, 金属液

中紊流强烈, 颗粒难以进行稳定的定向迁移。
3) 在同等的磁场分布均匀度的情况下, 盛装金属液的管道截面形状对金属液紊流的形成产生影响, 矩形和三角形管道比圆形管道能更好地抑制紊流产生。

[REFERENCES]

[1] Marty P, Alemany A. Theoretical and experimental aspects of electromagnetic separation. Metallurgical applications of magnetohydrodynamics [A]. Proceedings of a Symposium of the International and Applied Mechanics

- (IUTAM) [C]. 1982, Cambridge: 245– 259.
- [2] Patel A D, Nagy EF Kaddah. On the theory of electromagnetic separation in alternating electromagnetic fields [A]. International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials [C]. ISIJ, 1994, Nagoya: 115– 120.
- [3] ZHONG Yun-bo(钟云波). Non-Metallic Particles' Migration in Molten Metals in An Electromagnetic Force Field And It's Application(电磁力场作用下液态金属中非金属颗粒迁移规律及其应用研究) [D]. Shanghai: Shanghai University Press, 2001. 6.
- [4] Tanaka Y, Sassa K, Iwai K, et al. Separation of non-metallic inclusions from molten metal using travelling magnetic field [J]. Tetsu-to-Hagane, 1995, 81(12): 12– 17.
- [5] Taniguchi S, Brimacombe J J. Application of pinch force to the separation of inclusion particles from liquid steel [J]. ISIJ International, 1994, 34(9): 722– 731.
- [6] Taniguchi S, Brimacombe J J. Numerical analysis on the separation of inclusion particles by pinch force from liquid steel flowing in a rectangular pipe [J]. Tetsu-to-Hagane, 1994, 80(4): 58– 63.
- [7] ZHONG Yun-bo(钟云波), REN Zhong-ming(任忠鸣), DENG Kang(邓康), et al. Separation of inclusions from liquid metal contained in a triangle/square pipe by travelling magnetic field [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2000, 10(2): 240– 245.
- [8] LI Tian-xiao, SHU Da, XU Zhen-ming, et al. Physical simulation and theoretical analysis of migration rate of inclusions in aluminum melt in electromagnetic field [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2001, 11(1): 30– 34.
- [9] ZHONG Yun-bo(钟云波), REN Zhong-ming(任忠鸣), DENG Kang(邓康), et al. The development and present situation of the technology of purifying methods by electromagnetic [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society(中国稀土学报), 1998, 16(增刊): 708.
- [10] ZHONG Yun-bo(钟云波), REN Zhong-ming(任忠鸣), DENG Kang(邓康), et al. 金属电磁净化技术的一种革命性方法—电磁净化法 [J]. Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology, 1999, 18(3): 363– 368.
- [11] Park J P, Tanaka Y, Asai S, et al. Elimination of tramp elements in molten metal using electromagnetic force [J]. Tetsu-to-Hagane, 1994, 80(5): 31– 36.
- [12] ZHONG Yun-bo(钟云波), REN Zhong-ming(任忠鸣), DENG Kang(邓康), et al. 行波磁场净化液态金属时金属液流动控制的初步探讨 [J]. Journal of Shanghai University(上海大学学报), 1999, 5(1): 42– 45.
- [13] Verhoeven. The effect of an electric field upon solute redistribution during solidification of Bi-Sn alloys [J]. Trans Metal Soc AIME, 1967, 239: 694– 702.
- [14] LIU Jin(刘金). The Theory of the Chemical Engineering(化工原理) [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1988. 45.

Formation and control of turbulent in metal melts purified by alternating magnetic field

ZHONG Yun-bo, REN Zhong-ming, DENG Kang, JIANG Guo-chang, XU Kuang-di
(Shanghai Enhanced Laboratory of Ferrous Metallurgy, Shanghai University,
Shanghai 200072, P. R. China)

[Abstract] The turbulent in the liquid gallium under the travelling magnetic field was observed, and the reason for its formation was discussed. It was found that the distribution of the magnetic flux density in the travelling magnetic field will dominate the formation of the turbulent. The factor named inhomogeneity of the magnetic field was adopted to assess the distribution of the magnetic field. It is very helpful for designing the purifying equipment and for the sake of the ways of increasing the inclusion-removal efficiency by adopting this factor. The simulative experiments were carried out to study the particles' migrating behavior in different pipes under different H_{om} , the reason why the shape of the pipe affected the migration of the particles was discussed too.

[Key words] alternating magnetic field; turbulent; inhomogeneity of the magnetic field; purification

(编辑 黄劲松)