

行波磁场励磁电流对薄壁件充型和表面缩陷的影响

范学焱¹, 王亮¹, 杜志强², 苏彦庆¹, 骆良顺¹, 张建兵³,
许纪刚¹, 徐达鸣¹, 郭景杰¹, 傅恒志¹

(1. 哈尔滨工业大学 金属精密热加工国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(2. 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462)

(3. 首都航天机械公司, 北京 100076)

摘要: 通过使用 ansoft 软件对筒形薄壁件在不同励磁电流的行波磁场作用下的电磁力进行了分析, 进一步研究了行波磁场的励磁电流对合金充型能力以及铸件外表面缩陷的影响。结果发现: 行波磁场影响合金充型能力的同时也影响了铸件凝固表面质量; 随着励磁电流强度的增加, 合金充型能力成平方倍的提高, 同时也成平方倍的增加了铸件表面缩陷发生的几率; 相同励磁电流强度下, 励磁电流频率对合金充型能力存在最优值; 励磁电流频率在 1000 Hz 以下变化时, 随着励磁电流频率的降低铸件表面缩陷发生的可能性不断减小。

关键词: 薄壁件; 行波磁场; 励磁电流; 充型; 表面缩陷

中图分类号: TG249.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)11-2803-05

随着航空航天、国防、汽车工业的不断发展, 要求铸件向小余量、薄壁、高精度、高性能、大型复杂、整体化的方向发展。铸件壁厚薄且表面积大, 使得铸件成型过程中热量散失得快, 凝固时间短, 熔体的粘滞力很大, 加上界面张力的影响, 使得铸型很难被充满。因此, 需要采取必要的措施提高金属熔液的充型能力^[1-5]。通常提高金属熔液的充型能力主要采用外力驱动和预热铸型以及提高金属熔体浇铸时的过热度的方法。在传统的铸造方法中外力一般是在金属熔液的表面施加压力, 比如在低压铸造和调压铸造中使用的压力。对于导电材料还可以应用电磁场产生的电磁力对导电液体提供驱动力。行波磁场铸造就是利用电磁场提高合金的充型能力的技术^[1-3,5,6]。对于行波磁场铸造技术已经进行了很多理论研究和实验研究, 但是由于行波磁场铸造是新开发的技术, 因而有些特殊问题需要研究解决^[3,6-11], 例如提高合金充型能力的最优电磁参数设置以及避免铸件表面的缩陷等。

已有的实验仅研究板型行波磁场对水平板型薄壁件的影响, 通过改变行波磁场发生器的电流强度(或者安匝数)和使用铁芯影响合金充型能力^[3,6,11,12]。薄壁件的充型过程中, 合金的充型能力是铸件能否完整充型的重要因素, 也是行波磁场铸造需要亟待解决的问题。因

此, 研究行波磁场的电磁参数对提高合金充型能力的影响有重要的理论意义和应用价值。薄壁件充型过程中, 铸件表面已部分凝固, 行波磁场作用下的铸件充型与表面凝固的研究是不可分割的。本研究通过行波磁场作用下合金充型能力的实验, 研究了励磁电流强度对铸件受到的电磁力的影响。借助于低频电磁场专用软件 ansoft 对实验的模型进行数值模拟计算, 分析筒形行波磁场的励磁电流强度和频率对合金充型能力以及铸件表面缩陷的影响。

1 行波磁场对薄壁筒形件充型效果的影响

实验合金为 ZL205A, 经电阻炉熔化、精炼、除渣处理后, 浇入树脂砂型, 浇铸成内径 49 mm, 壁厚 6 mm 的圆筒。浇注温度为 730 °C, 采用底注式浇注, 铸型的型腔高为 250 mm。分别在筒形磁场发生器施加电流为 10 A 向下运动的行波磁场、电流为 20 A 向上运动的行波磁场和不加行波磁场的情况下, 进行浇注实验, 浇注至铸件部分的空腔充满或者浇道充满。铸型和行波磁场的轴截面示意图如图 1 所示, 行波磁场的其他参数见表 1。行波磁场在浇注前开启, 至铸件完全凝固后关闭。

收稿日期: 2014-11-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(2011CB610406); 黑龙江省自然科学基金(JC201209)

作者简介: 范学焱, 男, 1984 年生, 博士生, 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院金属精密热加工国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001, 电话: 0451-86418415, E-mail: fan_hengbo@163.com

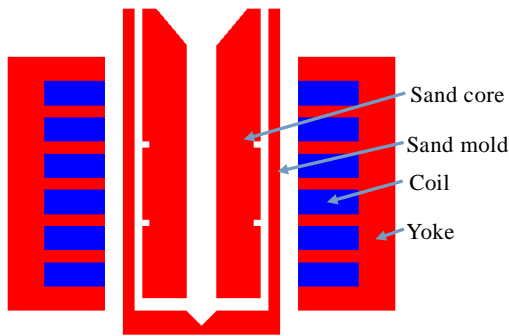


图 1 行波磁场发生器及铸型轴截面示意图

Fig.1 Schematic diagram of traveling magnetic field generator and cast axis section

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

Coil turn	92
Coil current/A	20
Current frequency/Hz	50
Electrical conductivity of coils/ $\times 10^6 \text{ S m}^{-1}$	58
Electrical conductivity of iron core/ $\times 10^6 \text{ S m}^{-1}$	10.3
Relative magnetic conductivity of iron core	4000
Inner diameter of traveling wave magnetic field generator/mm	160

在不同励磁电流强度的行波磁场作用下浇铸筒形薄壁件，将铸件沿轴截面剖开，分别测量浇道与铸件的高度，研究行波磁场对合金充型能力的影响。实际浇注出的薄壁件与其浇道高度不相同，以铸件高出其浇道的高度产生的静压头定义为铸件的相对静压差，若铸件高度低于其浇道的高度，则以浇道高出铸件的高度产生的静压头定义为铸件相对静压差，为区分以上 2 种情况，记铸件高于浇道时的铸件相对静压差为正，反之为负。铸件相对静压差越大则铸件高度比浇道高度越大，说明在行波磁场对合金充型能力提高的越多，即当浇道高度相同时，得到的铸件长度越长。并记向上运动的行波磁场参数为正，向下运动的行波磁场的参数为负。铸件相对静压差随行波磁场励磁电流强度的变化结果如图 2 所示。由图可知，加载的励磁电流越大，浇道与铸件的相对高度也越大，铸件内流体受到轴向的作用力越大，对合金的充型能力的影响也越大。加载的励磁电流的平方和浇道与铸件的相对高度的数值成线性关系，这与板型行波磁场作用下平板型铸件铸造的结果相同^[12]，但没有在铸件表面产生缩陷。铸件的相对静压差高度越大，说明在充型方向上受到的行波磁场产生的作用力也越大。行波磁场在铸件内产生电磁力是沿筒形件厚度方向逐渐递减的，而且电磁力是体积力，行波磁场对流体产生的

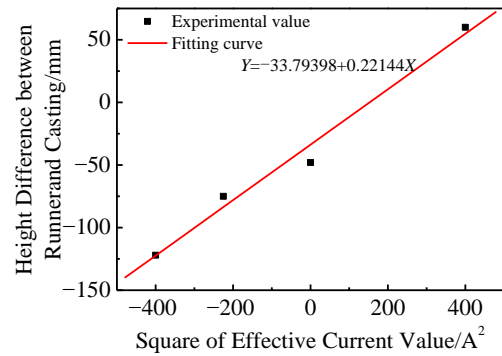


图 2 行波磁场的励磁电流强度对浇道与铸件相对高度的影响

Fig.2 Influence of exciting current intensity on the height difference between runner and casting

力的作用效果用电磁场对铸件产生的轴向力来表征。为区分铸件由于电磁感应使铸件受到某方向的作用力和铸件不同位置处的电磁体积力，将铸件由电磁感应产生的轴向方向的作用力简称为铸件电磁轴向力，其单位 N，铸件内各位置的轴向方向的电磁体积力简称为轴向电磁力，径向方向的电磁体积力简称为径向电磁力，其单位是 N/m^3 。充型过程中，行波磁场使合金熔体感应产生电磁力控制合金熔体运动，而合金熔体属于流体，在本实验条件下电磁力对合金熔体作用效果是轴向方向电磁体积力的综合作用产生的。本研究中计算模型中铸件的几何结构相同，铸件电磁轴向力反映了行波磁场在铸件内的综合作用效果。因此，选用铸件电磁轴向力反映行波磁场对合金充型能力过程的影响。铸件电磁轴向力越大，对合金充型能力影响越大，铸件相对静压差越大。

2 计算模型的建立

为研究行波磁场电参数对合金充型能力的影响作用，对筒形薄壁件简化建立了如图 3 所示的二维模型。研究不同电磁参数下，行波磁场对筒形薄壁件的作用规律。采用计算低频电磁场的专业电磁软件 *ansoft* 对筒形行波磁场作用下的筒形薄壁件内的电磁场进行数值模拟计算。模拟计算选用了几种不同电导率的材料。计算中作出如下假定：（1）材料的电导率和磁导率各向同性，在本研究中设为常数；（2）计算频率采用低频，忽略位移电流的影响；（3）输入的各相励磁电流幅值相等，忽略边端效应对励磁电流的影响。

2.1 电磁场的控制方程

描述电磁场的基本方程如下：

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

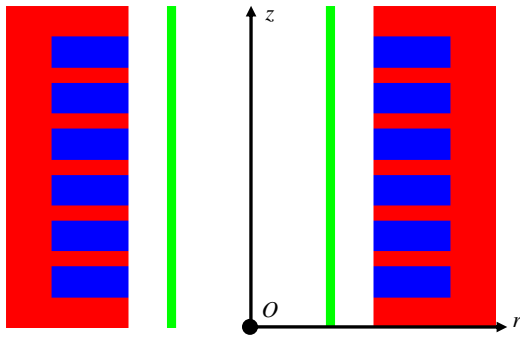


图 3 筒形行波磁场及筒形件轴截面示意图

Fig.3 Schematic diagram of the vertical section on the barrel-type TMF and cast

$$\nabla \times H = J \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$J = \sigma E \quad (4)$$

$$B = \mu H \quad (5)$$

$$F = J \times B \quad (6)$$

其中， E 为电场强度； B 为磁感应强度； H 为磁场强度； J 为电流密度； σ 为电导率； μ 为磁导率； F 为电磁力。

采用矢量法对电磁场进行数值模拟计算。筒形行波磁场为轴对称结构，可以应用柱坐标下的二维模型进行电磁场计算，采用 *ballon* 边界条件，由于 *ansoft* 软件采用自适应剖分网格技术，故不需要考虑网格剖分问题，将材料属性、边界条件和计算参数设定后，即可计算，数值模拟计算所需参数列于表 1。计算得到的电磁力是随时间变化的，变化周期为 0.01 s，低于金属熔体的机械性缓和时间，实际作用效果是时均体积力作用于金属熔体^[13]。

2.2 筒形行波磁场数值模拟计算效果验证

由于行波磁场随时间变化的，因此将各位置的磁感应强度的幅值作为其表征值，本研究所述磁感应强度皆为各位置的幅值。筒形行波磁场内部空间较小，仅用径向磁感应强度验证数值模拟计算结果。测量值与计算值都是在励磁电流强度为 20 A，频率 50 Hz 产生的行波磁场的磁感应强度结果。在轴向方向取 13 个点的实验测量值与模拟计算值进行对比，结果如图 4 所示。

从图 4 可知，实验结果与数值模拟计算结果趋势基本一致，磁感应强度的急剧变化的位置与趋势的数值模拟结果与实验结果一致，行波磁场实验测量值比数值模拟计算值普遍偏小。这是由于行波磁场发生器制作上存在一些误差以及由于边端效应使得三相电流幅值存在一定差距，产生了附加磁场，使得行波磁场产生了部分损耗所致。模拟计算结果反映了磁场的分布特征

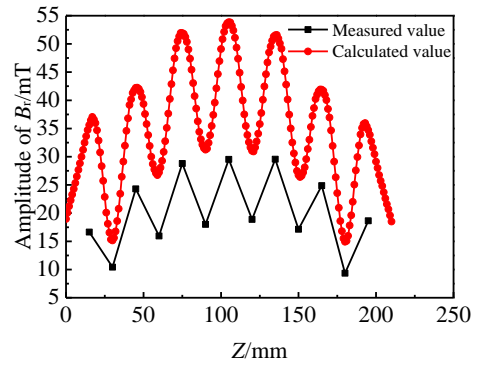


图 4 磁感应强度 B_r 实测值与模拟计算值对比

Fig.4 Comparisons of the measured values and the calculated values of the radial magnetic induction B_r

和变化趋势，因此可用 *ansoft* 的数值模拟计算结果研究行波磁场在薄壁件内的电磁场特征和变化规律。

3 结果与讨论

3.1 励磁电流对合金充型能力的影响

选用几种典型材料(铝，高温铁，铝熔体)在不同电流强度的行波磁场作用下，对铸件由电磁感应产生的轴向方向的作用力数值模拟计算，结果如图 5 所示。由于行波磁场的运动方向影响电磁力的方向，不影响电磁力的大小^[14]，对各部分的模拟计算仅研究励磁电流对一个行波磁场运动方向的影响。由图 5 可知，铸件电磁轴向力随励磁电流强度的平方线性增加的规律，不受电导率以及励磁电流频率的影响。沿充型方向的铸件电磁轴向力的增加，则合金充型能力也相应的增加。本实验结果也表明励磁电流强度的平方和铸件相对静压差成线性关系。

受合金表面集肤效应的影响，充型过程中应用的行波磁场频率不能很高，一般应用低频电磁场，因此

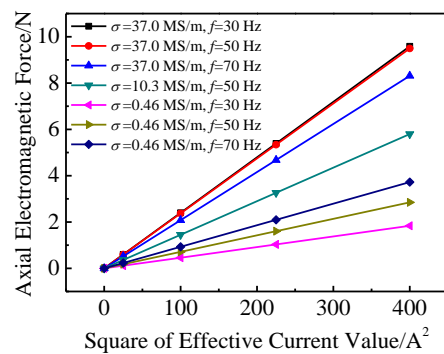


图 5 电流强度对铸件轴向电磁力的影响

Fig.5 Influence of excitation current intensity on the axial electromagnetic force of casting

研究的励磁电流频率上限设为 1000 Hz。不同励磁电流频率作用下，铸件电磁轴向力的模拟计算结果如图 6 所示。由图 6 可知，励磁电流频率在低于 1000 Hz 范围内，随着励磁电流频率增加，铸件电磁轴向力的数值先增大后减小，即不同励磁电流频率的行波磁场作用下的铸件电磁轴向力存在极值。随着电导率的增加，出现极值的励磁电流频率在逐渐减小，对应的电磁力的极大值在逐渐增加。即励磁电流频率对合金充型能力存在最佳的影响效果。

综上可知，仅从提高合金充型能力考虑，行波磁场方向与铸件充型相同时，提高励磁电流强度，可以明显的提高合金的充型能力，行波磁场方向与铸件充型方向相反，感应的电磁力将阻碍合金熔体充型。励磁电流的频率对合金充型能力影响存在最佳的作用频率，在最佳作用频率下，行波磁场与充型方向相同，则合金充型能力最大；行波磁场与充型方向相反，则会最大程度的阻碍合金的充型过程。

3.2 励磁电流对铸件表面缩陷的影响

行波磁场作用下得到的薄壁件在靠近行波磁场发生器的铸件表面产生表面缩陷，这种缺陷是由于行波磁场发生器产生的垂直于充型方向的电磁力过大引起的^[12]。避免发生表面缩陷，就是要减小或者抵消铸件表面的径向电磁力。而行波磁场的励磁电流在增加沿充型方向的电磁力的同时还会以相同的比例增加垂直于充型方向的电磁力。因此，通过提高励磁电流强度提高了合金的充型能力，同时也增加了凝固过程中的铸件表面形成表面缩陷的可能性。这使得只改变励磁电流强度影响合金的充型能力受到了限制。因此，为减少铸件表面缩陷，只能在一定的范围内，通过提高励磁电流强度的方式来提高合金的充型能力。

随着励磁电流频率的增加，铸件外表面受到的最大轴向电磁力和最大径向电磁力的变化如图 7 所示。

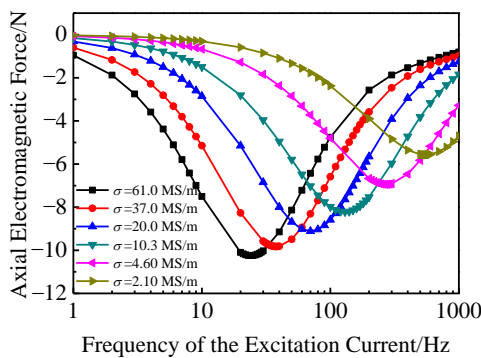


图 6 不同励磁电流频率时铸件轴向电磁力

Fig.6 Axial electromagnetic force with different frequency of the excitation current

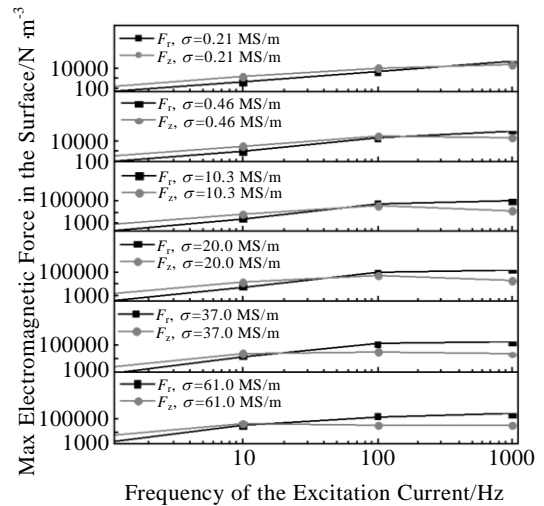


图 7 励磁电流频率对铸件表面的最大电磁力的影响

Fig.7 Influence of excitation current frequency on the max electromagnetic force in the surface

励磁电流频率低于 1000 Hz 时，随着励磁电流的频率减小，铸件表面最大径向电磁力减小，且径向电磁力减小比轴向电磁力更明显。适当的减小励磁电流频率，既可以减小径向电磁力，又可以使得沿充型方向的电磁力不会减小的过大。

通过以上分析可知，单独通过改变励磁电流强度和频率都不能很好地达到最佳的充型与凝固的效果。在不引起表面缩陷的前提下，施加最大的励磁电流强度，并通过调节励磁电流频率，使合金的充型能力达到最佳效果。

4 结 论

1) 行波磁场的励磁电流的强度可以明显地影响合金的充型过程，充型方向与行波磁场运动方向一致可提高合金的充型能力，反之，则降低合金的充型能力。

2) 不同励磁电流频率的行波磁场作用下，励磁电流强度相同时，铸件受到沿行波磁场方向的铸件电磁轴向力存在极值。取得极值对应的励磁电流频率，随着合金电导率的增大而逐渐减小。

3) 行波磁场的励磁电流强度和频率都可以提高合金的充型能力，同时也增加了产生铸件表面缩陷的几率。只有通过匹配的励磁电流强度和频率才能保证薄壁件最佳充型效果的同时，避免铸件表面产生缩陷。

参考文献 References

[1] Gel'fgat Y M, Krumin Y K, Meshkov V P *et al.* *Magneto-hydrodynamics*[J], 1990, 26(2): 250
 [2] Rabinovich B V. *Liteinoe Proizvodstvo*[J], 1992(10): 6

- [3] Lin Jiali(林家骝), Jiang Jun(姜 军), Duan Guiming(段桂明). *Foundry(铸造)*[J], 1996(3): 18
- [4] Li Chenxi(李晨希), Wang Hong(王 宏), Li Ge(李 革) *et al. Special Casting and Nonferrous Alloys(特种铸造及有色合金)*[J], 2006, 26(11): 713
- [5] Lin Xiaoying(林小瑛), Weng Wei(翁 薇), Lu Yuemei(卢月美) *et al. Journal of Fuzhou University(福州大学学报)*[J], 2007, 35(4): 566
- [6] Su Yanqing, Zhang Tiejun, Guo Jingjie *et al. Journal of Materials Science and Technology*[J], 2004, 20(1): 27
- [7] Zhang Qi(张 琦), Wang Jin(王 进), Chu Zhong(褚 忠). *Foundry Technology(铸造技术)*[J], 2012, 33(7): 818
- [8] Zhao Chunhui(赵春晖), Li Qinlin(李丘林), Liu Wei(刘 伟). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2012, 41(S2): 573
- [9] Zhang Qi(张 琦), Li Tingju(李廷举), Wang Tongmin(王同敏) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2007, 36(9): 1566
- [10] Wang Fang(王 芳), Li Baokuan(李宝宽), Shen Fengman(沈峰满). *Journal of Northeastern University(Natural Science)(东北大学学报)*[J], 2009, 30(8): 1143
- [11] Xu Yanjin(徐严谨), Zhang Tiejun(张铁军), Guo Jingjie(郭景杰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2012, 41(3): 548
- [12] Su Yanqing, Xu Yanjin, Zhao Lei *et al. China Foundry*[J], 2010, 7(3): 259
- [13] Yan Hengzhi(严珩志), Zhong Jue(钟 掘), Mao Daheng(毛大恒) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 1996, 6(3): 158
- [14] Zhang H L, Wang E G, Jia G L *et al. Acta Metallurgica Sinica*[J], 2001, 14(3): 227

Influence of the Excitation Current in Traveling Magnetic Field on Mold Filling and Surface Depression of Thin-walled Casts

Fan Xueyi¹, Wang Liang¹, Du Zhiqiang², Su Yanqing¹, Luo Liangshun¹, Zhang Jianbing³,
Xu Jigang¹, Xu Daming¹, Guo Jingjie¹, Fu Hengzhi¹

(1. National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(2. Tianjin Long March Launch Vehicle Manufacturing Co. Ltd, Tianjin 300462, China)

(3. China Shoudu Space Machinery Company, Beijing 100076, China)

Abstract: Ansoft software was used to simulate the electromagnetic force of the cylindrical thin-walled casts under the action of traveling magnetic field, and the influence of excitation currents on mold-filling capacity of different alloys and surface depression of thin-walled casts were investigated. The results show that the magnetic field remarkably influences the mold-filling capacity of alloys and the casting surface depression simultaneously. The mold-filling capacity and the possibility of the surface depression are increased with the square of the excitation current intensity increasing. Under the same excitation current intensity, the excitation current frequency has the optimal value to the mold-filling capacity; the possibility of the casting surface depression decreases along with its decrease below 1000 Hz.

Key words: thin-walled casts; travelling magnetic field; excitation current; mold filling; surface depression

Corresponding author: Su Yanqing, Ph. D., Professor, National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals, School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, Tel: 0086-451-86417395, E-mail: suyq@hit.edu.cn