

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.09.011

连铸结晶器非正弦振动共振分析

孟祥宁, 崔禹, 吕则胜, 彭修星
(东北大学冶金学院, 辽宁沈阳 110819)

摘 要: 根据谐波共振理论,连铸结晶器做非正弦振动且振频低于振动机构自然频率时,由于谐波频率是振频的整数倍,一部分幅值较大的谐波可引发共振.利用傅里叶变换对连铸结晶器非正弦振动加速度函数进行谐波分析,得该波形谐波幅值与振幅、振频、非正弦因子和谐波阶数的变化关系,从理论上给出一种削弱共振的方法.当结晶器振动机构的自然频率已知时,不同振频下可引起共振的谐波阶数是确定的.通过谐波幅值与各振动参数的变化关系,得到不同振动参数组合对应的谐波幅值.采用谐波幅值较小的振动参数组合,可削弱共振现象对连铸结晶器振动机构的不利影响,减小结晶器偏摆量,维持钢液液面稳定,改善连铸机工作状况.

关键词: 连铸;结晶器;非正弦振动;共振;谐波分析

中图分类号: TF 341.6 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2019)09-1273-06

Resonance Analysis of Non-sinusoidal Oscillations of Continuous Casting Mold

MENG Xiang-ning, CUI Yu, LYU Ze-sheng, PENG Xiu-xing

(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: MENG Xiang-ning, E-mail: mengxn@smm.neu.edu.cn)

Abstract: According to the harmonic resonance theory, when the continuous casting mold is non-sinusoidal oscillation and the vibration frequency is lower than the natural frequency of the oscillator in the mold, partial harmonics with a higher amplitude can lead to resonance because the harmonic frequencies is an integer multiple of the oscillation frequency, which can directly affect the quality of slab. Using Fourier transformation, the acceleration curve of non-sinusoidal oscillation of the mold is analyzed and the relationships between harmonic amplitude and other factors, such as initial amplitude, oscillation frequency, non-sinusoidal oscillation factor and harmonic order are obtained. Then, a theoretical method of restraining resonance can be given. When the natural frequency of the oscillator in the mold is known, the harmonic order of resonance under different oscillation frequencies is determined. The harmonic amplitude corresponding to the combination of different oscillation parameters can be given by the relationship between the harmonic amplitude and the variation of each oscillation parameter. Consequently, selecting an oscillation parameter combination with a smaller harmonic amplitude can reduce the adverse effect of resonance phenomenon on the oscillator in the mold, resulting to reduce the deflection of mold, maintain liquid level stabilizing and improve the working conditions of continuous casting machine.

Key words: continuous casting; mold; non-sinusoidal oscillation; resonance; harmonic analysis

“连铸”概念于19世纪中叶提出,于20世纪40年代得到工业应用.经过数十年发展,连铸技术凭借其其在设备投资、管理成本、生产工序、钢水

收得率和自动化程度等各方面的优势,已全面取代模铸工艺.除沸腾钢、高速钢、大型轴承钢等部分特殊钢种外,现代钢铁铸造工序全部采用了连

收稿日期: 2018-09-05

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N172502006);辽宁省自然科学基金资助项目(201602258).

作者简介: 孟祥宁(1977-),男,辽宁本溪人,东北大学副教授,博士生导师.

铸技术.

结晶器是连铸机的核心,钢液在结晶器内迅速、连续地冷却形成坯壳,再拉出即为初坯.为了防止坯壳与结晶器粘连,结晶器振动技术得到开发与应用.非正弦振动是目前最先进的结晶器振动模式,能减小初生坯壳受到的损伤,提高铸坯表面质量.

如今结晶器振动技术趋于成熟,振动曲线、振动控制系统、振动机构设计均被多次优化^[1-4].对连铸的研究开始转向铸坯凝固过程分析^[5]、结晶器内流场分析^[6-7]、电磁搅拌^[8]、夹杂物行为研究^[9-11]等方面.但在连铸结晶器非正弦振动过程中仍偶有共振现象发生,降低铸坯质量,甚至导致漏钢,影响生产效率.

选取一个具有代表性的非正弦振动波形函数^[12],利用傅里叶变换将其加速度曲线展开为三角级数形式.调整非正弦振动函数的频率、非正弦因子、振幅及谐波阶数,计算不同参数组合下的谐波幅值,进而获取其变化规律,为控制连铸结晶器共振影响,保障生产稳定提供理论参考.

1 理论基础

1.1 结晶器工作原理

中间包中的钢水通过浸入式水口流入结晶器(见图 1),被冷却水冷却,于铜制内壁表面迅速凝固出坯壳.在结晶器振动作用下,坯壳与结晶器内壁分离,并向下运动.钢水的注入、冷却和铸坯的前进连续进行,即为连铸过程.

结晶器振动实际上起到了脱模的作用.这种上下往复的运动令坯壳与铜质内壁之间的黏附力下降,防止因初生坯壳表面应力过大而出现裂纹或拉漏问题.结晶器相对铸坯向上运动(正滑脱)时,坯壳表面受拉力作用形成裂痕源.结晶器相对铸坯向下运动(负滑脱)时,裂痕被压合,铸坯表面质量得到改善.

正弦式振动结晶器的速度与时间关系为 1 条正弦曲线.这种振动模式的冲击和加速度较小,机械结构简单.非正弦振动的速度曲线如图 2 所示.其特点主要有:结晶器上升时间相对较长,速度平稳,降低了坯壳所受拉力;下降速度快,对坯壳压力较大,利于脱模和裂痕压合;负滑脱时间短,可减轻振痕深度;结晶器摩擦阻力和拉坯阻力降低.目前非正弦振动装置有机械和液压两种驱动方式.

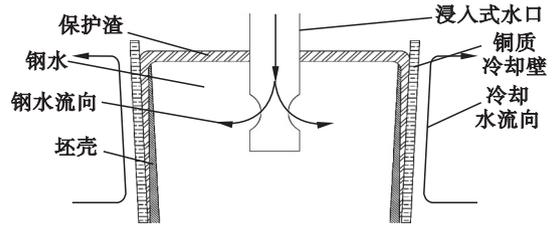


图 1 结晶器示意图

Fig. 1 Schematic of the mold

1.2 非正弦振动速度曲线

$$v_{bc} = v, \tag{1}$$

$$v_{cd} = -k(t - t_c)^2 + v, \tag{2}$$

$$v_{deg} = -2\pi s f_1 \cos \left[2\pi f_1 \left(\frac{1}{2f} - t \right) \right], \tag{3}$$

$$v_{gj} = -k(t - t_j)^2 + v, \tag{4}$$

$$v_{jl} = v. \tag{5}$$

式中: $v_{bc}, v_{cd}, v_{deg}, v_{gj}, v_{jl}$ 分别为曲线 bc, cd, deg, gj, jl 段振动速度, mm/min ; v 为最大上振速度, mm/min ; t 为振动时刻, min ; f 为振频, min^{-1} ; s 为振幅, mm ; k 为抛物线段方程系数, $k > 1$.

$$t_c = \frac{1+a}{4f} - \frac{1}{2f_2}, \tag{6}$$

$$t_d = \frac{1+a}{4f}, \tag{7}$$

$$t_g = \frac{1+a}{4f} + \frac{1-a}{2f}, \tag{8}$$

$$t_j = \frac{3-a}{4f} - \frac{1}{2f_2}, \tag{9}$$

$$k = \frac{4\pi^2 s f^2 f_2}{(1-a)^2}, \tag{10}$$

$$v = \frac{\pi^2 s f^2}{(1-a)^2 f_2}, \tag{11}$$

$$f_1 = \frac{f}{1-a}, \tag{12}$$

$$f_2 = \frac{3(1+a)\pi + \sqrt{9(1+a)^2\pi^2 - 96(1-a)^2}}{24(1-a)^2} \pi f. \tag{13}$$

式中: f_1 为余弦段频率, min^{-1} ; f_2 为抛物线段频率, min^{-1} ; a 为非正弦因子; t_c, t_d, t_g, t_j 分别为振动周期内 c, d, g, j 点对应的时刻, min .

图 2 和图 3 分别为该振动函数的振动速度曲线和对应的振动加速度曲线.振动速度曲线由水平直线段 bc 、抛物线段 cd 、余弦段 deg 、抛物线段 gj 和水平直线段 jl 光滑连接组成.

1.3 分析方法

共振发生条件为激励频率与自然频率比值接近 1.结晶器振动系统受到的激励由加速度波形函数描述,该波形的频率一般远离振动系统自然

频率. 在正弦振动下激励频率单一, 不会导致共振. 非正弦振动时, 若某谐波频率接近自然频率且该谐波幅值较大, 也会引发共振(谐波共振).

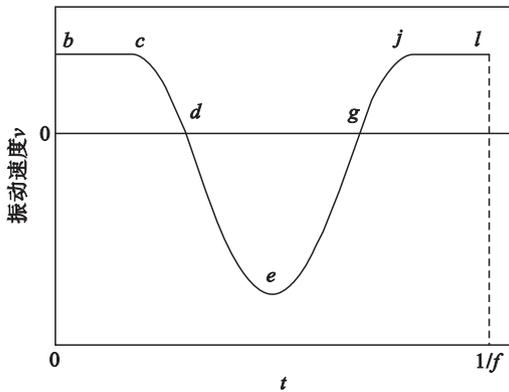


图 2 振动速度曲线
Fig. 2 Velocity curve of oscillation

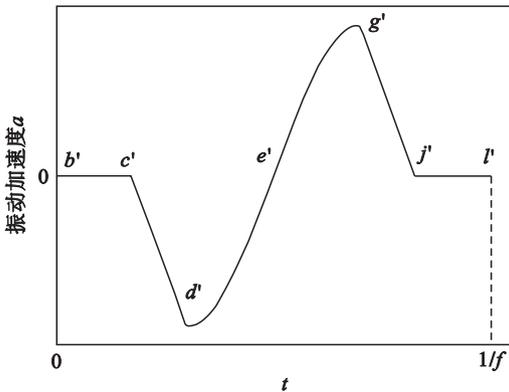


图 3 振动加速度曲线
Fig. 3 Acceleration curve of oscillation

根据结构动力学, 当谐波频率与自然频率的比值范围处于 0.75 ~ 1.25 (共振区间) 内时, 谐波共振发生的可能性较大.

将非正弦振动波形加速度函数以傅里叶变换式分解, 得到一个由正弦和余弦函数构成的无穷级数. 分解式中每一项的频率即谐波频率, 同频率项系数平方和的二分之一次方 $c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ 即为该谐波的振幅. 波形已知时, 可获取不同参数组合下各阶谐波的振幅值.

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)],$$

$$\omega = 2\pi f, n = 1, 2, \dots \quad (14)$$

该加速度函数是周期为 $1/f$ 的奇函数, 其傅里叶系数可通过式(15)计算:

$$\left. \begin{aligned} a_n &= 4f \int_0^{\frac{1}{2f}} f(x) \sin(2n\pi fx) dx (n = 0, 1, 2, \dots) \\ b_n &= 0 (n = 0, 1, 2, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

根据该波形工作情况, 选取各参数变化范围: 振频 $f = 80 \sim 300 \text{ min}^{-1}$, 步长 10 min^{-1} ; 非正弦因子 $a = 0.10 \sim 0.30$, 步长 0.01; 振幅 $s = 0 \sim 8 \text{ mm}$, 步长 1 mm; 谐波阶数 $n = 1 \sim 20$, 步长 1.

2 计算结果及分析

2.1 计算结果

谐波幅值 c_n 与振幅 s 和振频的平方 f^2 均呈正比例关系(见图 4, 图 5). 为保持图像清晰, 仅绘出部分直线.

图 4 中的每一条线对应 f, a, n 在变化范围内的一种组合. 图 5 中的每一条线对应 a, n 在变化范围内的一种组合(此时 $s = 8 \text{ mm}$).

可见在其他参数不变时, f 对谐波幅值的影响远大于 s .

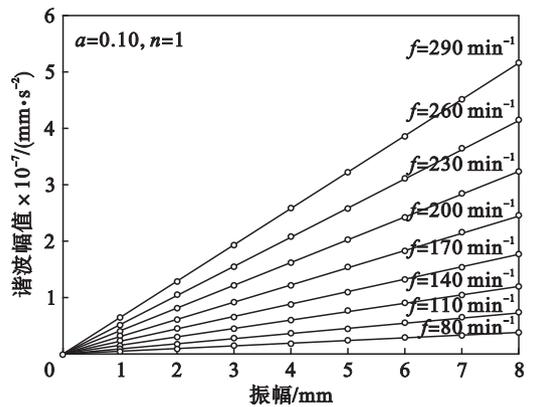


图 4 谐波幅值与振幅的关系
Fig. 4 Relationship between harmonic amplitude and initial amplitude

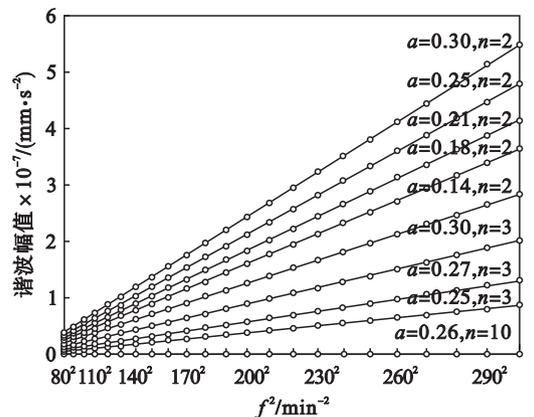


图 5 $s = 8 \text{ mm}$ 时, 谐波幅值与频率平方的关系
Fig. 5 Relationship between harmonic amplitude and the square of frequency when $s = 8 \text{ mm}$

由图 6 可知, 随着谐波阶数 n 增加, 谐波幅值迅速减小. 在不同的 n 值下, 谐波幅值与非正弦因子 a 的变化关系不相同(见图 7).

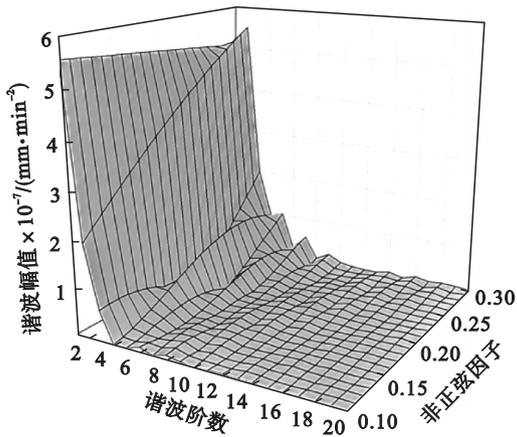


图6 谐波幅值与阶数、非正弦因子的关系

Fig. 6 Relationship between harmonic amplitude, harmonic orders and non-sinusoidal factor

n 阶谐波的频率是振频 f 的 n 倍(式(14)),当自然频率确定而 f 变化时,共振谐波阶数也发生变化.随着 f 的减小,共振谐波数量增加,谐波共振发生的可能性增大.

假设振动机构的某阶自然频率为 $1\ 000\ \text{min}^{-1}$,则在 $f=100\ \text{min}^{-1}$ 条件下,共振谐波阶数为 $8\sim 12$;而在 $f=200\ \text{min}^{-1}$ 条件下,共振谐波阶数变为 $4\sim 6$;当 $f=300\ \text{min}^{-1}$ 时则为 $3\sim 4$.

2.2 抑制共振的方法

共振谐波阶数受振动机构自然频率和振频共同影响.不同阶数下,谐波幅值与非正弦因子的变化关系也不一致.因此以某振动机构的前4阶自然频率^[13]为例(见表1),说明为减弱谐波共振影响,应采取的振动参数选择原则.

表1 振动机构的一到四阶自然频率

Table 1 Natural frequency from the first to fourth order of the oscillator in the mold

阶数	1	2	3	4
自然频率/Hz	4.668 9	10.088 0	20.420 0	20.709 0

分别取低、中、高频 $f=100, 200, 300\ \text{min}^{-1}$,三种频率在一到四阶共振区间内的谐波阶数如表2所示.

表2 不同振频下,一到四阶共振区间内的谐波阶数

Table 2 Harmonic orders from the first to fourth order resonance frequency range under different frequencies

振频/ min^{-1}	共振谐波阶数			
	1	2	3	4
100	3	5~7	9~15	9~15
200	无	3	5~7	5~7
300	1	2	4~5	4~5

为抑制共振,谐波幅值应尽可能小.振频 f 已确定,故不作讨论.振幅 s 与谐波幅值恒为线性关系,因此 s 越小越好.至此,需要选择的参数只有非正弦因子 a .

在 $100\ \text{min}^{-1}$ 下,一阶共振区间内谐波阶数为3,据图6($n=3$)可知, $a=0.20$ 时谐波幅值最小(此时3阶谐波幅值为 $320\ 323\ \text{mm}/\text{min}^2$),该参数值削弱共振的效果最好.二阶共振区间内谐波阶数为5,6,7,对应的最优非正弦因子分别为0.22,0.14,0.18(或0.22),但考虑到这些谐波都可能引发共振,应令其中每一阶谐波的幅值都尽可能小,因此建议 a 值为0.21(该值下5~7阶谐波幅值平均为 $1\ 277\ 148\ \text{mm}/\text{min}^2$).

同理,三、四阶共振区间内 a 的建议值为0.12(对应9~15阶谐波幅值平均为 $252\ 013\ \text{mm}/\text{min}^2$). $f=200\ \text{min}^{-1}$ 时,一阶共振区间内无谐波,不会引发一阶共振.二阶共振区间内仅有第3阶谐波, a 应取0.20.而利于削弱三、四阶共振的 a 值为0.21(对应5~7阶谐波幅值平均为 $1\ 277\ 148\ \text{mm}/\text{min}^2$). $f=300\ \text{min}^{-1}$ 时,抑制一、二阶共振应选取的 a 值分别为0.30和0.10.抑制三、四阶共振应选取的 a 值为0.10(对应4,5阶谐波幅值平均为 $98\ 690\ \text{mm}/\text{min}^2$).

在实际生产过程中,结晶器共振问题多发于铸机开浇阶段^[13].该阶段拉速 v_c 持续上升,为保证负滑脱量,频率 f 和振幅 s 一般分别按照 $f=-A_1v_c+B_1$ 和 $s=A_2v_c+B_2$ 形式变化(A_1, A_2, B_1, B_2 为常数,其值取决于所应用的同步控制模型)^[14-15],共振谐波数量和谐波幅值均不断改变,因此易引发共振.

不同振动机构的自然频率是不一样的;不同的非正弦振动波形,其各阶谐波幅值与非正弦因子的变化关系也不一样.因此难以给出具有普适性的参数取值.

在实际应用中,可测定不同振频下结晶器的横向偏摆量,找到横向偏摆较大时的振频.将该振频各阶谐波频率与振动机构的自然频率比对,确定共振谐波阶数.最终通过谐波幅值与非正弦因子的变化关系,确定最优的参数取值.

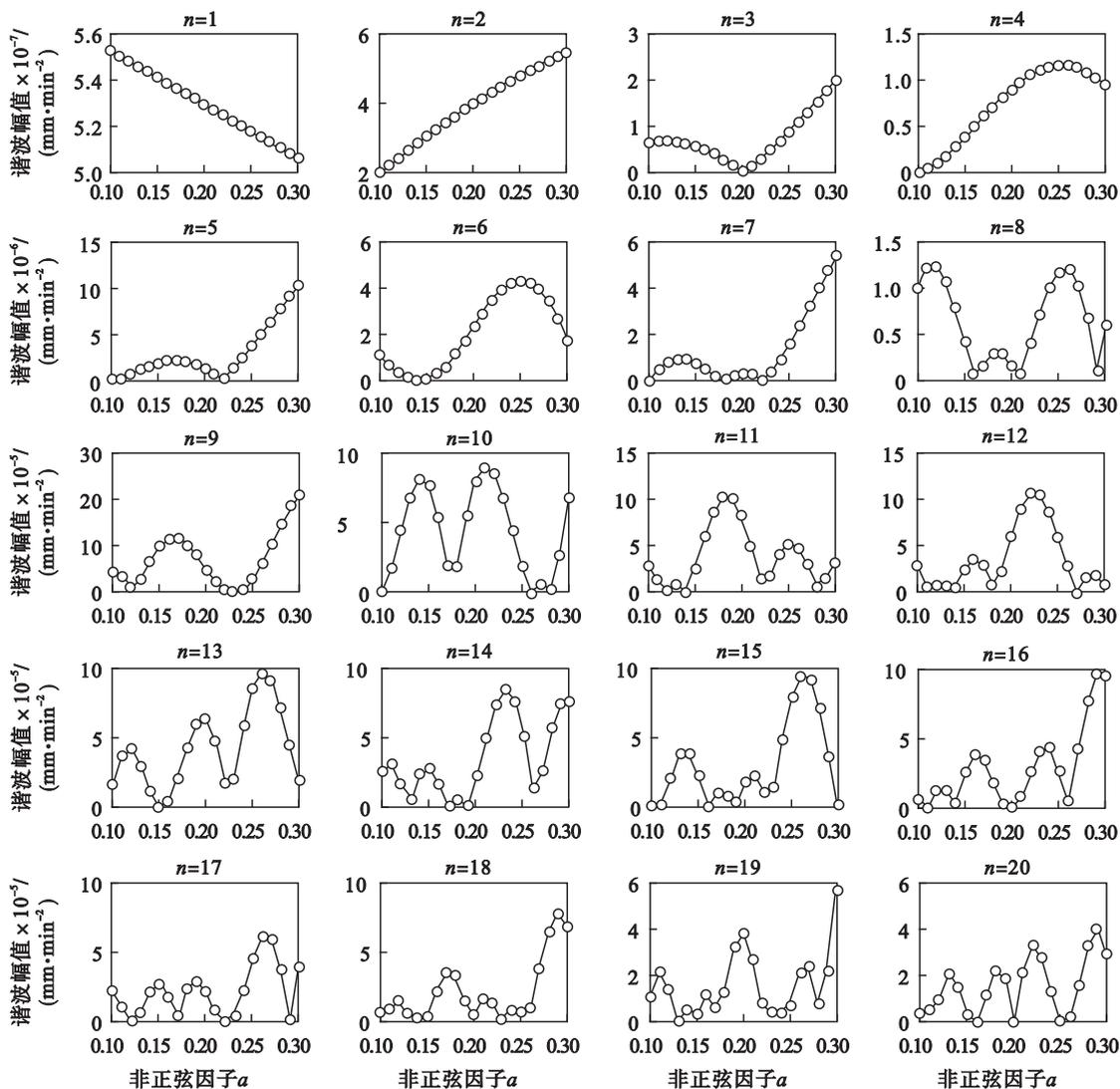


图 7 不同阶数下谐波幅值与非正弦因子的关系

Fig. 7 Relationships between harmonic amplitude and non-sinusoidal factor under different harmonic orders

3 结 论

1) 根据谐波共振理论,在非正弦振动条件下,可通过调节振动波形参数,抑制由共振导致的结晶器偏摆。

2) 非正弦振动谐波幅值与振幅和振频的平方均呈正比例关系。非正弦因子与谐波幅值的变化关系受谐波阶数影响。

3) 抑制共振的参数取值,由实际采用的振动函数形式与振动机构的自然频率共同决定。

参考文献:

[1] 李宪奎,朱清香,郑学然,等. 结晶器非正弦振动波形及参数研究[J]. 钢铁,1998,33(11):28-31.
(Li Xian-kui, Zhu Qing-xiang, Zheng Xue-ran, et al. Research on non-sinusoidal oscillation waveform and parameters of mold [J]. *Iron and Steel*, 1998, 33

(11):28-31.)
[2] 方一鸣,郑会成,王宏斌,等. 伺服电动机驱动的连铸结晶器非正弦振动控制系统[J]. 冶金自动化,2016,40(6):12-18,29.
(Fang Yi-ming, Zheng Hui-cheng, Wang Hong-bin, et al. Non-sinusoidal oscillation control system of continuous casting mold driven by servo motor [J]. *Metallurgical Industry Automation*, 2016, 40(6):12-18,29.)
[3] Sotnikov A L, Kikin A B. Theoretical foundations of the design of a lever mechanism of oscillations of the mold of a sorting machine for the continuous casting of billets [J]. *Metallurgist*, 2018, 61(11/12):1075-1083.
[4] Park Y H, Park H. Dynamic characteristic analysis of mold oscillator including improved gear mesh model and cam profile for eccentric shaft [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(11):4465-4473.
[5] 仲红刚. 连铸坯凝固过程热模拟研究[D]. 上海:上海大学,2013.
(Zhong Hong-gang. Thermal simulation study on solidification process of continuous casting billet [D]. Shanghai:Shanghai University, 2013.)
[6] Park J Y, Sohn I. Evaluating the heat transfer phenomena and the interfacial thermal resistance of mold flux using a copper

