● 装备技术 Equipment Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.11.012

连铸结晶器振动工艺参数比较与分析

刘建洋
(武汉大西洋连铸设备工程有限责任公司,湖北 武汉 430023)

摘　要:正弦与非正弦振动是目前连铸结晶器常用的振动形式。在新建或技术改造项目中,普遍提倡采用非正弦振动以提高铸坯质量、拉速。正弦与非正弦波形均具有振动所需的特征参数,针对这些工艺参数,具体分析了各工艺参数在正弦和非正弦工况下的变化趋势。结果表明,这更有利于更好的理解两种波形的特点,为实际生产参数的选择提供了参考。

关键词:工艺参数;非正弦;结晶器振动

中图分类号:TG233　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)11-0976-03

Comparison and Analysis on Oscillation Process Parameters of Continuous Casting Mold

LIU Jianyang
(Wuhan Atlantic Continuous Casting Equipment Co., Ltd., Wuhan 430023, China)

Abstract: At present, sinusoidal and non-sinusoidal oscillations are commonly used in continuous casting molds. Non-sinusoidal vibration is generally recommended to improve billet quality and drawing speed in new construction or technical transformation projects. Both sinusoidal and non-sinusoidal waveforms have characteristic parameters required for vibration. Aiming at these process parameters, the variation trend of each process parameter under sinusoidal and non-sinusoidal working conditions is analyzed in detail. The results show that this method is beneficial to better understand the characteristics of the two waveforms, and provides a reference for the selection of actual production parameters.

Key words: process parameters; non-sinusoidal; mold oscillation

高拉速、高铸坯质量是当今连铸机的主要发展方向,结晶器作为连铸机的核心设备之一,其振动规律对拉速、铸坯质量有极其重要的影响。结晶器的振动方式历经了同步振动、负滑振动、正弦振动和非正弦振动的发展过程[1]。现有运行的连铸机以正弦振动和非正弦振动为主,在连铸机新建或技术改造项目中,多提及到结晶器的振动方式要满足高拉速的需求,非正弦振动因此得以大量推广使用,且能满足铸机要求。针对非正弦振动的波形,各领域也做了大量的研究,将正弦与非正弦振动工艺参数结果进行直观的数值比较的文献相对较少。本文从结晶器的振动工艺参数包括:负滑动时间、负滑动率、负滑动时间比、负滑动超前量、正滑动时间、正滑动速度差六个方面汇总分析正弦与非正弦振动的详细变化趋势,为工厂的实际生产提供参考。

1　工艺参数的定义

分别得出正弦和非正弦波形下的各参数表达式;因非正弦函数复杂,大多数均为超越函数,要得出各参数的解析表达式有时会十分困难,且非正弦函数的种类也较多,也有研究者根据结晶器运动速度、加速度的特点构造新的非正弦函数,如分段函数[2]等;综合各类非正弦函数分析可发现,其波形曲线大都十分相似,在某一小段时间范围内,速度、加速度变化趋势有所不同,但都具有较好的动力学特性。因此,选取容易计算的非正弦函数为例进行分析[3],各参数的表达式如下,因两种情况的参数计算原理相同,将其数值结果进行比较是合理的。

正弦条件下:

$$S=h\sin\left(\frac{2\pi ft}{60}\right) \tag{1}$$

$$t_n=\frac{60}{\pi f}\cos^{-1}\left(\frac{1\,000\nu_c}{2\pi fh}\right) \tag{2}$$

$$N_s=\frac{4fh}{1\,000\nu_c}-1 \tag{3}$$

$$\mathrm{NSR}=\frac{1}{\pi}\cos^{-1}\left(\frac{1\,000\nu_c}{2\pi fh}\right) \tag{4}$$

$$\mathrm{NSA}=2h\sin\left(\frac{2\pi ft}{60}\right)\Bigg|_{\frac{T-t_n}{2}}^{\frac{T}{2}}-\nu_c t_n \tag{5}$$

$$t_p=\frac{60}{f}-\frac{60}{\pi f}\cos^{-1}\left(\frac{1\,000\nu_c}{2\pi fh}\right) \tag{6}$$

收稿日期:2021-08-08

作者简介:刘建洋(1990—),四川岳池人,硕士,工程师.主要从事连铸设备设计方面的工作.电话:15994249934,E-mail:364594440@qq.com

$$\Delta V=\frac{2\pi fh}{1\,000}+\nu_c \tag{7}$$

非正弦条件下：

$$S=ah\left[\sin\left(\frac{2\pi ft}{60}\right)-m\sin\left(\frac{2\pi f}{60}t\right)\right] \tag{8}$$

$$t_n=\frac{60}{\pi f}\cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{1+16m\left(\frac{1\,000\nu_c}{2\pi fah}+2m\right)}-1}{8m}\right) \tag{9}$$

$$N_s=\frac{4fh}{1\,000(1-\alpha)\nu_c}-1 \tag{10}$$

$$\mathrm{NSR}=\frac{1}{\pi}\cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{1+16m\left(\frac{1\,000\nu_c}{2\pi fah}+2m\right)}-1}{8m}\right) \tag{11}$$

$$\mathrm{NSA}=2ah\left[\sin\left(\frac{2\pi f}{60}t\right)-m\sin\left(\frac{4\pi f}{60}t\right)\right]_{\frac{T-t_n}{2}}^{\frac{T}{2}}-\nu_c t_n \tag{12}$$

$$t_p=\frac{60}{f}-\frac{60}{\pi f}\cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{1+16m\left(\frac{1\,000\nu_c}{2\pi fah}+2m\right)}-1}{8m}\right) \tag{13}$$

$$\Delta V=\frac{\pi fah(32m^2+1)}{8\,000m}+\nu_c \tag{14}$$

式中，t_n 为负滑动时间，表示振动周期内结晶器向下运动的速度大于铸坯拉速的时间段；N_s 为负滑动率，表示结晶器向下运动的平均速度与铸坯拉速的差值占铸坯拉速的比值；NSR 为负滑动时间比，表示负滑动时间与振动周期之比；NSA 为负滑动超前量，表示结晶器在负滑动时间里相对铸坯的位移量；t_p 为正滑动时间，表示振动周期内除负滑动时间以外的全部时间；ΔV 为正滑动速度差；S 为位移，mm；ν_c 为拉速，m/min；h 为振幅，mm；f 为频率，min；t 为时间，s；α 为波形偏斜率。

a 为波形偏斜因子 1：

$$a=\frac{\cos(\pi\alpha)}{\cos^3\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)} \tag{15}$$

m 为波形偏斜因子 2：

$$m=\frac{\sin\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)}{2\cos(\pi\alpha)} \tag{16}$$

2　相同工况条件下的参数比较及分析

通过上述的各参数计算表达式，给定拉速，频率，振幅即可求出正弦和非正弦振动下各参数的数值结果，根据实际生产中的一些典型数据进行比较分析，结果列于表 1。可以看出，当拉速 <3.0 m/min 时，非正弦与正弦振动相比，t_n 低、Ns 高、NSA 高、t_p 高、ΔV 低，这些有利于铸坯脱模、铸坯的焊合、降低粘结漏钢可能、改善铸坯润滑条件等，综合影响的结果使铸坯质量得到改善；当拉速>3.0 m/min 时，对于 t_p、t_n，正弦与非正弦在数值上有差异，但差异不大，其他参数如 NSA、ΔV 等，也都是向着有利于铸坯质量提高的方向在变化；这也说明，单个参数取值合理，未必能得高质量的铸坯；每个参数都可以在适当范围内波动，若其中某一参数不符合常规要求，通过在其他参数上的微调也能弥补这种不足，最终得到合格的铸坯。通常可以使多个参数参与建立目标最优化函数，根据生产中大量经验数据，将不同的振幅、频率、拉速作为自变量，可得出大量的目标函数值，再将这些结果通过优化设计方法得出合适的振幅、频率、拉速匹配值[4]。

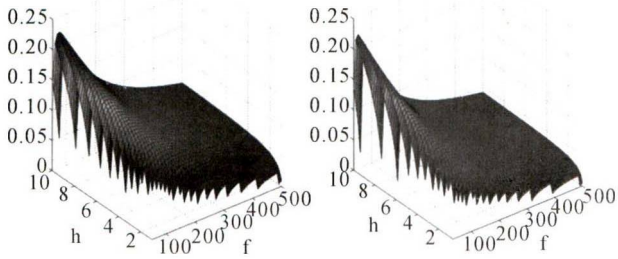
非正弦振动引入了波形偏斜率 α 的变量，当 α=0 时，即为正弦振动；从表 1 中的数据可以发现，拉速越高，α 对 t_n、t_p、NSR 的影响越小；而随着 α 的增加，t_n 降低、NSA 增加、ΔV 增加，因此不能简单的直接得出随着 α 的变化，铸坯质量一定会提高或者降低；且不同的非正弦函数，其 α 的影响程度不尽相同，要结合具体波形函数进行分析。本文选取的复合函数的非正弦波形，其 α 取值多为 0.1~0.3。

取拉速 V_c=3.0 m/min，α=0.3，利用 Matlab 绘制了工艺参数与振幅、频率的关系图[5]，如图 1~ 图 4

表1 给定工况下的参数结果值

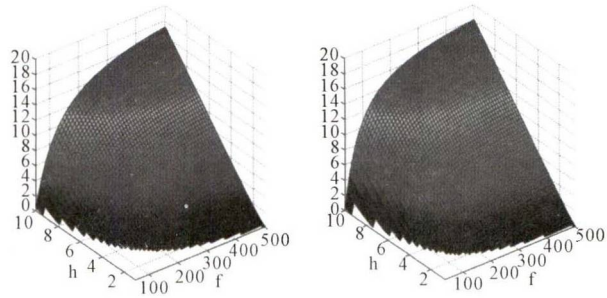
Tab.1 Parameter result value of given working condition

条件	h=4.5 mm；f=192/min V_c=2.41 m/min；断面：150×150			h=4.0 mm；f=204/min V_c=3.5 m/min；断面：150×150			h=5.75 mm；f=180/min V_c=5.0 m/min；断面：155×155		
参数	正弦	非正弦 α=0.2	非正弦 α=0.3	正弦	非正弦 α=0.2	非正弦 α=0.3	正弦	非正弦 α=0.2	非正弦 α=0.3
t_n/s	0.110 5	0.093 6	0.085 7	0.076 7	0.072 3	0.067 8	0.073 6	0.075 2	0.072 8
N_s	0.434 0	0.792 5	1.048 6	-0.067 4	0.165 7	0.332 2	-0.172 0	0.035 0	0.182 9
NSR	0.353 6	0.299 5	0.274 2	0.260 8	0.245 9	0.233 7	0.220 8	0.225 6	0.218 5
NSA /mm	3.626 3	4.619 4	5.087 5	1.371 0	2.468 6	2.998 0	1.219 3	2.814 1	3.605 3
t_p/s	0.202 0	0.218 9	0.226 8	0.217 4	0.221 8	0.225 4	0.259 7	0.258 1	0.260 5
ΔV/m·min^{-1}	7.838 7	6.030 9	6.624 2	8.627 1	6.919 7	7.480 1	11.503 1	9.337 5	10.048 3



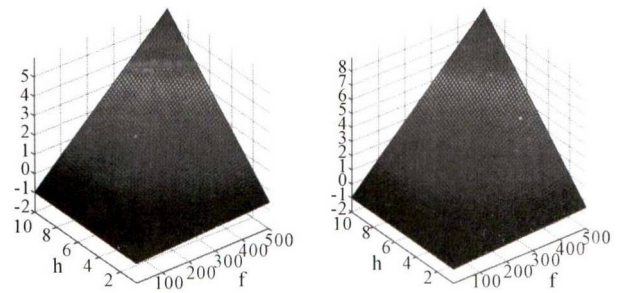
(a)正弦　(b)非正弦

图 1 t_n 随 h 和 f 的变化曲面图(V_c=3.0 m/min)
Fig.1 Variation surface diagram of t_n with h and f



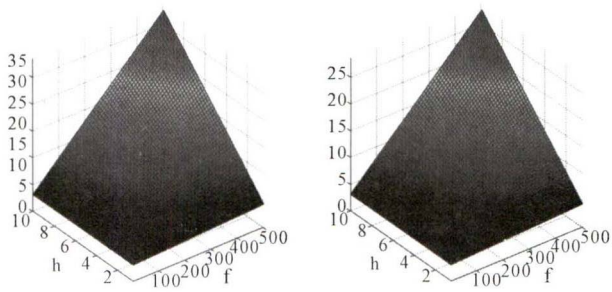
(a)正弦　(b)非正弦

图 2 NSA 随 h 和 f 的变化曲面图(V_c=3.0 m/min)
Fig.2 Variation surface diagram of NSA with h and f



(a)正弦　(b)非正弦

图 3 N_s 随 h 和 f 的变化曲面图(V_c=3.0 m/min)
Fig.3 Variation surface diagram of N_s with h and f



(a)正弦　(b)非正弦

图 4 ΔV 随 h 和 f 的变化曲面图(V_c=3.0 m/min)
Fig.4 Variation surface diagram of ΔV with h and f

所示。观察图 1 可知,当 f<100/min 时,对于正弦下的结果,h<6 mm,无负滑动时间,对于非正弦下的结果,h<4 mm,无负滑动时间;在 f<150/min 范围内,正弦振动的负滑动时间变化陡峭,在 f<130/min 范围内,非正弦振动的负滑动时间变化陡峭,不易控制,应避开这些频率段。负滑动时间既不能太短也不能太长,各厂根据自己的生产状况,一般都有合理的负滑动时间的经验数据,结合上图即可确定振幅、频率的范围。

从图 1 至图 4 的比较发现,在给定拉速和非正弦偏斜率的情况下,正弦和非正弦的工艺参数随振幅、频率的变化走势相近,因为偏斜率 α 的引入,使得各曲面有向上或向下微调的变化。用竖坐标(Z 轴)为某一固定值的平面去截取上述曲面,即可得到各参数的等值曲线变化图。

3 结论

(1)与正弦振动相比,相同工况下,非正弦振动的各参数综合影响结果确实更有利于提高铸坯质量;单独的某一参数值的小幅度变化,对铸坯质量的影响可能并不明显。

(2)各生产厂家要结合各自的生产特点,再结合与振动函数对应的工艺参数特征有方向的去寻找更合理的振动基本参数。

参考文献:

[1] 陈家祥. 连续铸钢手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.
[2] 李宪奎, 吴晓名, 方一鸣. 非正弦振动波形的开发及应用 [J]. 钢铁, 2005(6): 199-202.
[3] 张燕岭. 连铸结晶器非正弦振动装置的设计及研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015: 9-20.
[4] 林锋. 变参数化优化方坯连铸机结晶器振动参数 [J]. 冶金设备, 2011(85): 39-41.
[5] 周品. MATLAB 数值计算与仿真应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.

杭州文特机电有限公司

热处理炉、加热炉、工业自动化工程、环保节能工程、机电设备的设计、制造、加工、安装、技术开发、技术咨询、技术服务。工业自动化设备、仪器仪表、工业炉窑配件、计算机等的生产、批发、零售。

地址:杭州市西湖区万塘路 262 号 6 号楼 5-65 室
厂址:长兴县林城镇午山岗开发区
联系人:丁为兵
电话:15088362822
传真:0572-6087688
邮箱:dwb150@163.com