● 实用成型技术 Practical Shaping Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.01.024

异型坯结晶器振动参数对铸坯摩擦力的影响

陈 伟,和保民,郭高翔,杨改彦
(华北理工大学 冶金与能源学院;河北省高品质钢连铸工程技术研究中心,河北 唐山 063009)

摘 要:为有效防止漏钢事故的发生,降低铸坯与结晶器之间的摩擦力,改善铸坯与结晶器之间的润滑状况,本文研究了异型坯结晶器振动参数对铸坯摩擦力的影响。利用 VB 软件建立了异型坯连铸结晶器振动参数模型和固液两态摩擦力计算模型,分析了在不同的振动参数条件下,铸坯与结晶器之间摩擦力的变化规律,以期找到摩擦力最小的异型坯结晶器振动参数,为改善铸坯表面质量提供理论依据。

关键词:异型坯;结晶器;振动参数;摩擦力
中图分类号:TG748⁺.06 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)01-0093-05

Effect of the Crystallizer Vibration Parameters on the Frictional Force of Beam Blank

CHEN Wei, HE Baomin, GUO Gaoxiang, YANG Gaiyan
(School of Metallurgy & Energy, North China University of Technology, Hebei Province High Quality Steel Continuous Casting Engineering Technology Research Center, Tangshan 063009, China)

Abstract: In order to effectively prevent steel leakage accidents, reduce the friction between the casting slab and the mold, and improve the lubrication between the casting slab and the mold, the influence of the vibration parameters of the special-shaped mold on the friction of the casting slab was studied. Using VB software, the vibration parameter model and the calculation model of solid-liquid friction force of the mould for special-shaped slab continuous casting were established. In order to find the vibration parameters of the mould with the least friction and provide the theoretical basis for improving the surface quality of the casting slab.

Key words: beam slab; mold; vibration parameters; friction

近年来,摩擦力作为表征结晶器与铸坯之间润滑状况的物理参数已越来越引起人们的重视。而结晶器振动参数作为连铸机关键工艺参数,对铸坯表面质量、结晶器内的润滑以及事故控制起着重要的作用。传统的振动操作中,在超过一定浇注速度范围,负滑动时间不能以要求的定值维持下来,结晶器保护渣消耗降低,导致铸坯表面质量恶化,甚至出现铸坯裂纹或造成漏钢。郭兵书[1]分析了天铁 1# 连铸机 120 mm×120 mm 断面结晶器溅钢的主要原因,认为主要是脱模不好造成摩擦力增大,导致结晶器钢液外溅。为了改变现状,对 1# 连铸机结晶器振动参数进行了重新分析、调整。冯科等[2]基于正弦振动波形和二阶三角级数非正弦振动波形为建模对象和参照振动工艺参数(负滑脱时间、保护渣消耗量和振痕深度),并结合同步控制模型的设计原则,对结晶器振动同步控制模型进行了优化设计。漆鑫等[3]认为在结晶器振动参数导前偏大时,结晶器与铸坯间的摩擦力会增大,易产生钢水在弯月面上溢出,形成钩形振痕。张洪波[4]认为振动的工艺效果主要反映在对粘结性漏钢的控制上,因此对其工艺效果分析的基础是振动工艺参数对坯壳粘结的影响。为防止坯壳粘结需要考虑:①改善坯壳表面质量,提高坯壳铸态高温强度;②改善结晶器润滑状况,减少结晶器摩擦阻力。王昌旭[5]认为结晶器的振动参数直接影响正、负滑脱时间,即影响铸坯表面的振痕深度及其均匀性和保护渣的耗量。本文研究是为了探寻合理的结晶器振动参数,以达到降低摩擦力的目的。

1 结晶器振动参数

提高拉坯速度、挖掘铸机潜力是传统连铸发展的主要方向。但是,随着拉速的提高,保护渣消耗量下降,结晶器摩擦阻力增加,粘结漏钢几率增大。控

收稿日期:2018-08-11
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51574103)
作者简介:陈 伟(1974-),女,河北唐山人,博士,教授.研究方向:连铸坯质量控制.电话:18633385596,
E-mail: hblgdxzzb@163.com

制粘结漏钢成为实现高速连铸的前提条件。结晶器振动参数通常可划分为 2 大类，即振动基本参数和振动工艺参数。前者包括频率、振幅和波形偏斜率；后者为对铸坯脱模及表面质量有重要影响的参数，包括负滑脱时间、负滑脱率、负滑脱量、正滑脱时间、保护渣消耗量和振痕深度等。

1.1 结晶器振动形式

根据波形偏斜率又可以将结晶器振动形式分为正弦振动和非正弦振动。波形偏斜率的计算公式如下：

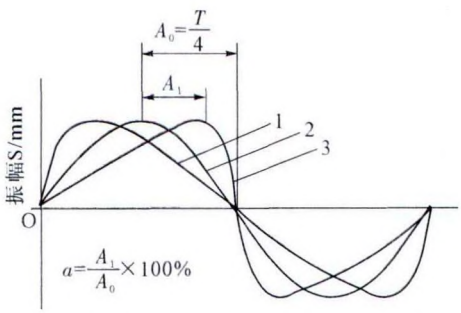


图 1 不同波形偏斜率对应的振动方式

Fig.1 Vibration mode corresponding to the slope of the waveform

$$\alpha=A_1/A_0\times 100\% \tag{1}$$

其中，A_1 波峰之间的距离；A_0 1/4 周期。

由图 1 和式(1)可知，α 的取值范围为 -1~1。当 $\alpha<0$，对应第一类振动形式；$\alpha=0$，对应第二类振动形式；$\alpha>0$，对应第三类振动形式。可见 α 是对应振动形式的一个参数。

对第一类振动形式来说，结晶器上升速度快、上升时间短，下降速度慢、下降时间长，其效果是对坯壳的压合时间最长，结晶器摩擦阻力最大，同步式振动即属此类。对第二类振动形式来说，结晶器上升、下降的速度及时间相同，其效果是结晶器对坯壳的压合时间及摩擦阻力均适中。正弦振动即属此类。对第三类振动形式来说，结晶器上升速度慢、上升时间长，下降速度快，下降时间短，其效果是对坯壳的压合时间短，结晶器对坯壳的摩擦阻力最小，非正弦振动即属此类。本文主要研究异型坯结晶器正弦振动形式。

1.2 振动工艺参数

工艺参数主要包括负滑脱时间、负滑脱率、负滑脱量、正滑脱时间、保护渣消耗量和振痕深度等。负滑脱时间(t_N)是振动结晶器最重要的工艺参数。目前已有的实验结果证实，振痕深度主要由负滑脱时间控制，两者呈增函数关系[6-8]。

正弦振动的基本参数计算公式如下：

负滑脱时间：(t_N，单位：s)

$$t_N=\frac{60}{f}\left[1-\frac{1}{\pi}\cos^{-1}\left(\frac{1\,000\,V}{2\pi fA}\right)\right] \tag{2}$$

振动速度：(V_m，单位：m/min)

$$V_m=\frac{\pi fA}{1\,000}\sin 2\pi ft \tag{3}$$

负滑脱率：(NS，单位：%)

$$NS=\frac{V-V_m}{V}=1-\frac{4Af}{1\,000\,V} \tag{4}$$

负滑脱时间率：(NSR，单位：%)

$$NSR=\frac{t_N}{T/2}=\frac{2}{\pi}\cos^{-1}\left(\frac{1\,000\,V}{2\pi fA}\right) \tag{5}$$

正滑脱时间：(t_P，单位：s)

$$t_p=\frac{60}{f}\left[1-\frac{1}{\pi}\cos^{-1}\left(\frac{1\,000\,V}{2\pi fA}\right)\right] \tag{6}$$

其中，A 结晶器振幅，mm；f 结晶器振频，次/min；V_m 结晶器振动速度，m/min；V 拉坯速度，m/min；T 振动周期，min。

正滑脱与负滑脱之间的关系为：$t_P=T-t_N$，而 $T=1/f$。

2 建立振动参数及摩擦力计算模型

2.1 振动参数计算模型

根据结晶器振动参数的计算公式，利用 VB 编程建立了结晶器振动参数计算模型。该模型可以输入基本参数，计算得到相应的工艺参数。同时将相应参数的关系以曲线图形式清晰显示出。模型主界面如图 2。

2.2 摩擦力计算

蔡娥等[9]认为在结晶器与铸坯之间存在着固态渣膜与液态渣膜。对于知道温度分布的钢-渣界面，可以用凝固温度来界定熔渣的状态，即根据保护渣凝固温度来确定渣膜中固渣层、液渣层的分布。由此可知。

(1)熔渣温度大于凝固温度时，熔渣为液态。

(2)当熔渣温度小于凝固温度时，熔渣为固态。

在弯月面以下，对于渣膜完全为液态的区域，铸坯与结晶器间的摩擦力为液态摩擦力。对于渣膜为固、液渣层同时存在的区域，假定固渣层随结晶器一起上下运动，此时铸坯与结晶器间的摩擦力也用液态摩擦力计算。对于铸坯表面温度低于保护渣的凝固温度的区域，渣膜完全为固态。此时铸坯与结晶器间的摩擦力为固体摩擦力。

2.2.1 液态摩擦力计算模型

根据铸坯与结晶器之间液态渣膜流动特性，可用牛顿黏性定律计算铸坯与结晶器之间的液态摩擦力，具体表达式如下：

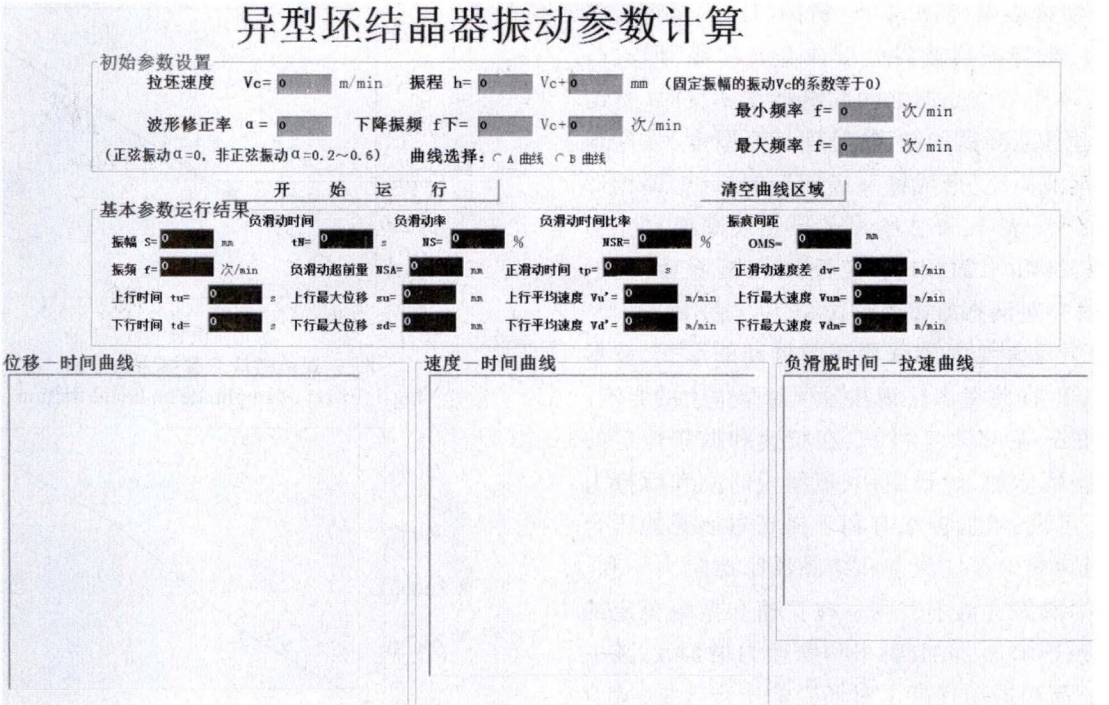


图 2 结晶器振动参数计算模型

Fig.2 Mold vibration parameter calculation model

$$F_l=\mu\cdot\frac{V_m-V_c}{d_l}\cdot S \tag{7}$$

式中，F_l 液体摩擦力，Pa；μ 保护渣的粘度，Pa·s；V_m 结晶器振动速度，m/min；V_c 拉速，m/min；d_l 液渣膜厚度，mm；S 液态渣膜存在面积，mm²。

在上一步计算出结晶器振动速度基础上，编写程序，计算结晶器与异型坯之间的液态摩擦力。液态渣膜厚度取 0.8 mm，液态渣膜面积计算后为 330 964.5 mm²。程序计算界面图如图 3。

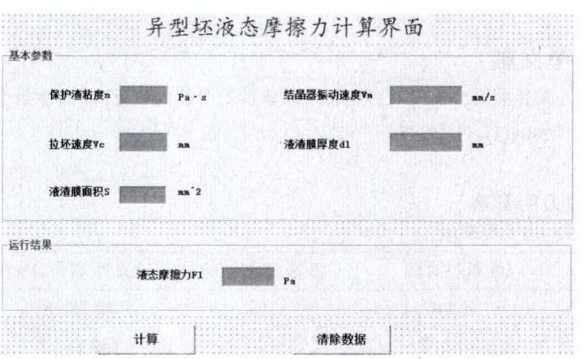


图 3 液态摩擦力计算界面

Fig.3 Liquid friction calculation interface

2.2.2 固态摩擦力计算模型

对于固态渣膜润滑区，固态渣膜看成跟随结晶器一起运动。依据库仑定律计算铸坯与结晶器间的固态摩擦力。计算公式如下：

$$F_S=\rho g h\cdot S \tag{8}$$

式中，F_S 固态摩擦力，Pa；ρ 钢水密度，g/mm³；g 重力加速度，mm/s²；h 结晶器有效高度，mm；S 固态渣膜面积，mm²。

钢液密度取 7 800 g/mm³，重力加速度取 9.8 g/mm³，结晶器有效长度为 800 mm，固态渣膜面积计算后为 237 035.5 mm²。利用 VB 编程计算固态摩擦力，程序计算界面如图 4

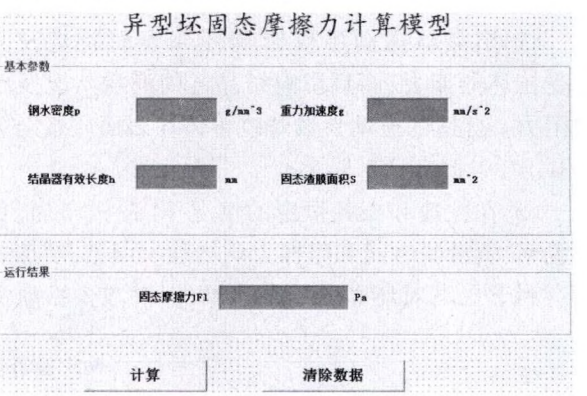


图 4 固态摩擦力计算界面

Fig.4 Solid friction calculation interface

以上给出了异型坯液态和固态摩擦力的计算程序界面，通过结晶器振动参数计算模型计算得出的结果代入到摩擦力计算模型中，可以得出该振动参数条件下异型坯液态摩擦力，摩擦力为 52 788.8 Pa，固态摩擦力为 $1.449\ 5\times10^{13}$ Pa。

3 振动参数与摩擦力的关系

摩擦力的大小对改善铸坯与结晶器之间的润滑状况起着重要的作用。当润滑不良、摩擦阻力大时，振痕会沿拉坯方向弯曲，产生弯曲、浅、凸振痕及钩

形振痕。实践表明,润滑不良,铸坯与结晶器铜板将发生粘结,常规振痕波谷处变成金属波峰,形成凸振痕。在铸坯与结晶器之间润滑严重不良时,粘结将加重,弯月面凝固加剧,弯月面坯壳厚度、强度增加,造成钢液溢流,形成铸坯表面上的搭结,即钩形振痕现象[10]。表 1、表 2 给出了异型坯断面尺寸为 555(宽面)×440(窄面)×105(腹板) mm 时振幅(表 1)与振频(表 2)对液态摩擦力的影响。

因该异型坯结晶器采用正弦振动的形式,波形偏斜率为 0。在此考虑振幅和振频对摩擦力的影响。由图 5、图 6、表 1、表 2 可知,在拉速和振频恒定的情况下,振幅增加,负滑脱率、负滑脱时间和摩擦力均增加。可见,增加振幅有利于提高对坯壳的压合效果, 但对减少振痕深度和结晶器摩擦阻力不利。因此,振幅取值宜低不宜高。在拉速和振幅恒定的情况下,频率增加,负滑脱率和摩擦力增加,t_N 减少[10]。可见,高频振动提高了对坯壳的压合效果,减少了振痕深度,但降低了保护渣消耗量,增加了结晶器摩擦阻力。因此,频率取值应视工艺要求的不同取合适的振频。

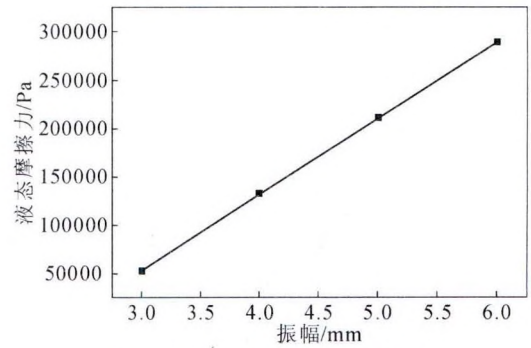


图 5 振幅对液态摩擦力的影响

Fig.5 Effect of amplitude on liquid friction

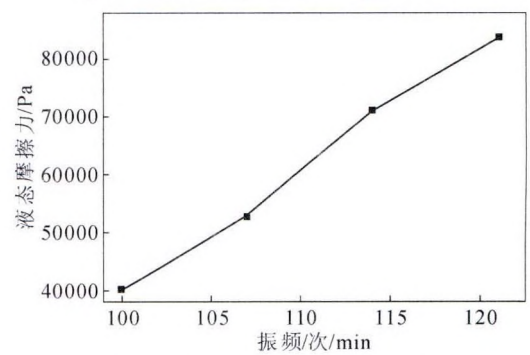


图 6 振频对液态摩擦力的影响

Fig.6 Effect of vibration frequency on liquid friction

4 结论

本文研究了异型坯结晶器振动参数对摩擦力的影响,得出了以下结论。

(1)结晶器振动不仅影响坯壳表面质量及其承受拉坯的能力,而且影响结晶器的润滑状况及摩擦阻力。合适的振动参数对改善铸坯表面质量至关重要。

(2)在拉速和振频恒定的情况下,振幅增加,负滑脱率、负滑脱时间和摩擦力均增加。可见,增加振幅有利于提高对坯壳的压合效果,但对减少振痕深度和结晶器摩擦阻力不利。因此,振幅取值宜低不宜高。

(3)在拉速和振幅恒定的情况下,频率增加,负滑脱率和摩擦力增加,t_N 减少。可见,高频振动提高了对坯壳的压合效果,减少了振痕深度,但降低了保护渣消耗量,增加了结晶器摩擦阻力。因此,频率取值应视工艺要求。

参考文献:

[1] 郭兵书. 120 mm×120 mm 结晶器振动参数的优化[J]. 天津冶金, 2005(3) :11-12.

表1 振幅对液态摩擦力的影响

Tab.1 Effect of amplitude on friction

参数断面	拉速(m/min)	振幅 /mm	负滑脱率(%)	负滑脱时间 /s	振频(次 /min)	液态摩擦力(Pa)
555×440×105	0.97	3	29.6	0.187	107	52 788.8
		4	72.8	0.211	107	132 882.3
		5	116	0.225	107	211 155.3
		6	159.2	0.234	107	289 428.5

表2 振频对液态摩擦力的影响

Tab.2 Effect of vibration frequency on friction

参数断面	拉速(m/min)	振频(次 /min)	负滑脱率(%)	负滑脱时间 /s	振幅 /mm	液态摩擦力(Pa)
555×440×105	0.97	100	22.4	0.192	3	40 046.7
		107	29.6	0.187	3	52 788.8
		114	39.2	0.18	2.91	70 991.9
		121	46.4	0.175	2.91	83 734

(下转第 105 页)

[16] 桂赤斌. 高强度钢船体焊接材料的使用要求与发展趋势 [J]. 电焊机, 2007, 37(6): 98-101.
[17] 柴锋. 低合金高强度船体钢焊接热影响区韧化机理研究[D]. 上海：上海交通大学, 2008.
[18] 李亚江. 焊接组织性能与质量控制[M]. 北京：化学工业出版社, 2005.
[19] Fairchild, D P Bangaru, N V Koo, et al .A study concerning inter-critical HAZ microstructure and toughness in HSLA steels [J]. Welding Journal,1991, 70(12): 321-325.
[20] 陈茂爱，楼松年，唐逸民. 低合金高强钢 HAZ 中的 MA 组元及其对接头韧性的影响[J]. 焊接研究与声场, 1997, 6(2): 89-93.
[21] 陈伯氢. 焊接冶金原理[M]. 北京：清华大学出版社, 1991.
[22] Huang H H, Tsai W T, Lee J T. The influences of microstructure and composition on the electrochemical behavior of a 516 steel weldment[J]. Corrosion Science, 1994, 36(6):1027-1032.
[23] 徐杰，李朋朋，樊宇，等. 温度对焊接热模拟 X80 管线钢断裂韧性的影响[J]. 焊接学报, 2017, 38: 22-26.
[24] 刘会杰. 焊接冶金与焊接性[M]. 北京：机械工业出版社, 2007.
[25] 高君. 船舶用异种高强钢焊接接头组织及性能研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学, 2012.
[26] Miyannoto G, Shinyoshi T, Yamaguchi J, et al. Crystallography of intragranular ferrite formed on(MnS+V(C,N)) complex precipitate in austenite[J]. Scripta Materialia, 2003, 48: 371-375.
[27] Sudarsanam, Suresh, Babu. The mechanism of acieular fetrite in weld deposits[J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2004, 8: 267-271.
[28] 常铁军，谢辅洲，杨世伟. 10NiSCrMoV 钢焊接热模拟热影响区组织和性能[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002, 23(5): 66-70.
[29] 王长利. 焊接温度场和应力场的数值模拟[D]. 沈阳：沈阳工业大学, 2005.
[30] 吴言高，李午申，邹宏军，等. 焊接数值模拟技术发展现状[J]. 焊接学报, 2002, 3: 89-92.
[31] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999.
[32] 龚曙光. ANSYS 工程应用实例解析 [M]. 北京： 机械工业出版社, 2003.
[33] 谭建国. 使用 ANSYS6.0 进行有限元分析[M]. 北京：北京出版社, 2002.
[34] 张林，王元明，张彩碚. Ni 基耐热合金凝固过程的元胞自动机方法模拟[J]. 金属学报, 2001, 37(8): 882-888.
[35] 张林. 元胞自动机方法模拟材料微观结构演化[D]. 沈阳：东北大学, 2002.
[36] Gandin C A, Desbiolles J L, Rappa M. Three-dimensional finie element-cellulare automation model the prediction of solidification grain structures [J]. Metallurgy Materials Transaction, 1999, 30A (2): 3153-3156.
[37] 严卫东，杨爱民，刘汉武. K4169 高温合金凝固晶粒组织的计算机模拟[J]. 特种铸造及有色金属, 2002, 22(4): 26-28.
[38] Rappaz M. Probabilistic modeling of microstructure formation in solidi-fication process [J]. International Materials Reviews, 1989, 34(3): 93.
[39] Grong O. Metallurgical modeling of welding [M]. London: the Institute of Materials, 1994.
[40] Dilthey U, Pavlik V, Reichel T. Mathematical modeling of the weld Phenomena[M]. London: The Institute of Materials, 1997.
[41] 黄安国，余圣甫，李志远. 焊缝金属凝固组织元胞自动机模拟[J]. 焊接学报, 2008, 29(4): 45-51.

（上接第 96 页）

[2] Hiroyukiyasunka. 第四届国际连铸学术会议文集 [C]. 中国金属学会连续铸钢学会. 1988,61.
[3] 竹内英密. 国外连铸新技术(三)[C]. 冶金部情报研究总所. 1985, 95.
[4] 川上公成. 国外连铸新技术(一)[C]. 冶金部情报研究总所. 1982, 291.
[5] 冯科，韩志伟. 板坯结晶器液压振动同步控制模型的优化设计[J]. 铸造技术, 2009, 30(3):1326-1329.
[6] 漆鑫，唐萍，文光华，等. 结晶器振动参数对连铸坯表面质量的影响[J]. 特殊钢, 2004, 25(5):34-37.
[7] 张洪波. 连铸结晶器振动参数优化理论[J]. 连铸, 1995(6):7-11.
[8] 王昌旭. 选择结晶器振动参数的研究[J]. 连铸, 2002(4):1-3.
[9] 蔡娥. 保护渣物化性能对铸坯与结晶器间摩擦的影响 [J]. 保护渣, 2007(1): 35-38.
[10] 林国强，唐萍，孔凡杰，等. 南钢方坯连铸结晶器振动参数优化的研究[J]. 钢铁, 2005, 40(6):27-29.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页，特快专递邮购价 226 元。

邮购咨询：李巧凤 029-83222071，技术咨询：13609155628