



连铸结晶器摩擦力在线检测方法研究

马 勇^{*1}, 王旭东¹, 臧欣阳¹, 姚 曼¹, 叶世鸿²

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 上海宝钢研究院 前沿技术所, 上海 201900)

摘要: 对液压振动下的板坯连铸结晶器摩擦力检测方法——摩擦功法进行了研究, 阐述了摩擦功法的检测原理和实现方法, 并通过现场试验对检测方法误差进行了分析和验证. 基于板坯连铸结晶器摩擦力的现场实测数据, 讨论了拉速变化对摩擦力影响, 并对正弦和非正弦振动方式下的摩擦力检测结果进行了分析. 结果表明, 运用摩擦功法进行摩擦力检测, 能够很好地反映铸坯与结晶器之间的摩擦和润滑状况, 为摩擦功法用于液压振动下铸坯与结晶器之间摩擦力的在线检测提供了理论参考和实验依据.

关键词: 在线检测; 结晶器摩擦力; 连铸; 液压振动

中图分类号: TF777 **文献标志码:** A

0 引言

连铸坯与结晶器之间的摩擦力对铸坯质量有着重要影响. 近年来, 随着拉坯速度的逐步提高, 由润滑条件恶化和粘着所导致的铸坯裂纹和漏钢等事故的比例不断上升^[1,2], 成为发展高效连铸技术急需解决的问题之一. 在此背景下, 在线检测并评估结晶器与铸坯间的摩擦和润滑状况引起了人们的广泛关注^[3,4].

20世纪90年代末, 液压振动技术逐渐推广应用至连铸生产^[5,6]. 奥钢联开发的结晶器在线监控系统——MoldExpert^[7,8], 较早地实现了液压振动装置下结晶器摩擦力的在线测量, 其测量原理可简要概括为摩擦功法. 国内近期多部新建、改造的铸机即匹配了上述系统, 但因对摩擦力的测量原理缺乏了解, 摩擦力的检测功能并未发挥出应有的作用. 针对以上问题, 本文基于液压振动装置下的板坯连铸机, 对摩擦功法进行研究, 经理论分析推导摩擦力的检测模型, 并通过现场试验对检测方法及其误差进行讨论, 同时对摩擦力的检测结果进行分析.

1 摩擦功法检测原理及方法

1.1 检测原理

结晶器摩擦力是指连续向下运动的铸坯与不断振动的结晶器之间由于相对运动产生的机械作用. 当振动系统空振(cold)时, 结晶器摩擦力为零, 因此在相同振动状态下, 拉坯(hot)与空振时结晶器驱动力的差值即为摩擦力, 如式(1)所示. 根据上述检测原理, 摩擦功法从能量的观点出发, 分别检测振动系统在相同振动条件下拉坯与空振状态下驱动力做功情况, 将其做差即可得到摩擦力做的功(摩擦功), 且结晶器一个周期的行程为振幅的4倍, 由此推算出一个振动周期内的摩擦力均值, 如式(2)所示.

依据上述摩擦力的检测思路, 对摩擦力进行了测试, 结果如图1所示. 正常状态下摩擦力随结晶器振动时间的周期变化如图1(a)所示. 其中的正摩擦力使坯壳受到拉力的作用, 是产生铸坯表面裂纹的主要原因; 相应的负摩擦力会使铸坯表面受到压力作用, 对正滑脱期间形成的微小裂纹

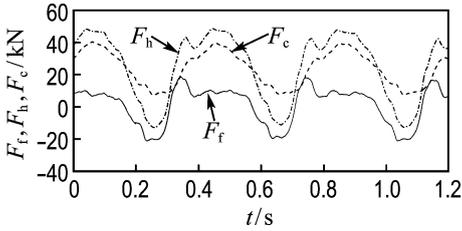
收稿日期: 2007-03-04; 修回日期: 2009-04-04.
基金项目: “八六三”国家高技术研究发展计划资助项目(2009AA04Z134).
作者简介: 马 勇*(1979-), 女, 博士, E-mail: mayong_dlut@163.com.

具有焊合作用。振动装置一个振动周期做的功等于由驱动力和位移所围成的面积,如图1(b)所示,空振时驱动力做的功描述了与拉坯相同振动条件下振动系统振动所必需的能量。拉坯与空振两种状态下的面积差即为摩擦力做的功(摩擦功)。

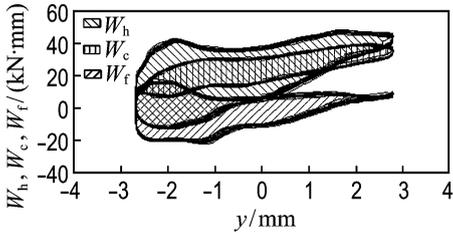
$$F_f = F_h - F_c \quad (1)$$

$$\bar{F}_f = \frac{W_h - W_c}{4s} = \frac{W_f}{4s} \quad (2)$$

式中: F_f 为结晶器瞬态摩擦力,kN; F_h 为拉坯时液压缸的驱动力,kN; F_c 为空振时液压缸的驱动力,kN; \bar{F}_f 为结晶器平均摩擦力,kN; W_h 为拉坯时液压缸驱动力做的功,kN·mm; W_c 为空振时液压缸驱动力做的功,kN·mm; W_f 为摩擦功,kN·mm; s 为结晶器振幅,mm。



(a) 拉坯、空振时液压缸驱动力及摩擦力



(b) 力与位移形成的示功图

(正弦,振频 150 cpm,振幅 3 mm,拉速 1.5 m/min)

图1 摩擦力计算原理图

Fig.1 Friction force extraction

1.2 检测方法

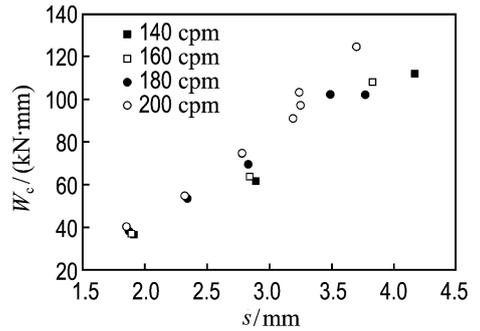
根据摩擦功法检测原理,需要检测拉坯和空振两种状态下驱动力在一个振动周期内做功的数值。拉坯时驱动力与位移可由两侧液压缸的输出压力和位移检测到,根据式(3)可以直接计算 W_h 。

$$W_h = \oint_c \mathbf{F}_h \cdot d\mathbf{y} \quad (3)$$

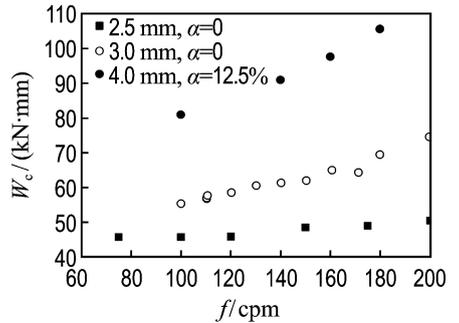
其中 y 为结晶器的位移,mm。

实际生产中连铸机大部分时间内处于拉坯状

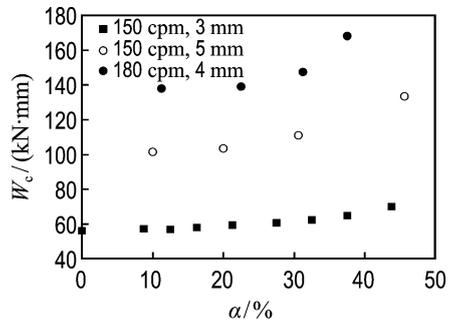
态,只有在生产的间歇阶段才进行空振试验,由于空振情况下系统的做功受到振动参数(振频 f 、振幅 s 、偏斜率 α)、振动装置机械运行状态及其他因素的影响,为实现摩擦力在线检测,有必要在短时间内准确地测定空振功。非正弦振动方式下(正弦是偏斜率为0的特殊非正弦),结晶器振动波形由振幅、振频和偏斜率3个参数决定,为寻找空振功与3个振动参数之间的关系,在现场进行了大量空振正交试验。试验中,固定其中两个参数调整另外一个参数,依据实测的空振驱动力和位移数据,逐一讨论振动参数对空振功的影响,部分试验结果如图2所示。从图中可以看出,在其中两个参数固定的情况下,空振功随变化的参数呈潜在的线



(a) 振幅



(b) 振频



(c) 偏斜率

图2 振动参数对空振功的影响

Fig.2 Effect of oscillation parameters on cold work

性或二次函数(抛物线)关系,通过进一步的理论推导和模型拟合,最终得到了不同参数下空振功与振动系统振幅和振频等参数的关系式。

1.3 误差分析

空振功计算和检测的准确性会直接影响到摩擦力计算结果的准确性.忽略数据传递和现场干扰引起的数据转换和测量误差时,空振功计算产生的摩擦力检测误差可近似表示为

$$\Delta \bar{F}_f = \frac{W_h - W_{c,exp}}{4s} - \frac{W_h - W_{c,cal}}{4s} = \frac{W_{c,cal} - W_{c,exp}}{4s} \quad (4)$$

$$W_c = \oint_c F_c dy \quad (5)$$

式中: $\Delta \bar{F}_f$ 为摩擦力误差,kN; $W_{c,exp}$ 为根据式(5),由实测的空振液压缸驱动力 F_c 直接得到的空振功,kN·mm; $W_{c,cal}$ 为依据推导的空振动与振动参数之间的关系式所得到的空振功,kN·mm。

图3(a)为正弦振动下空振功计算值与实测值的比较(n 为振动周期个数),在此过程中振幅保持3 mm,振频从120 cpm逐渐提高到175 cpm,空振功的实测值随振频的变化近似呈连续的上升趋势,计算值与实测值之间存在一定的偏差.由于振动系统的瞬时工作状况和偶然性因素的影响,振动时每个周期的液压缸驱动力并不严格相等,但相同振动参数下的波形近似一致,长时

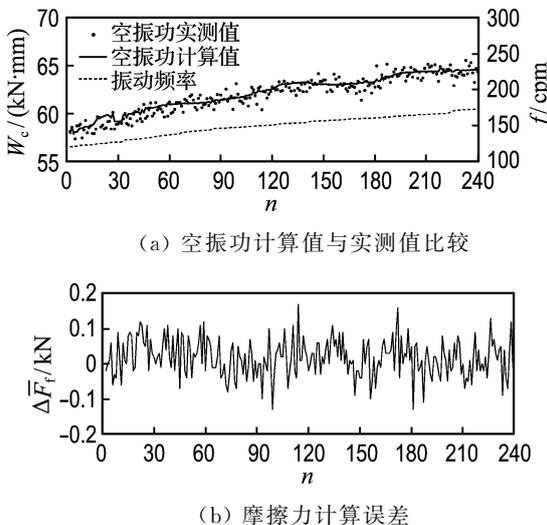


图3 正弦振动下实验结果

Fig. 3 Experimental results under sinusoidal mode

间内的空振功趋向重合为一点,实测值会围绕其均值略有波动.空振功的计算结果与实测均值趋于一致,可很好地反映系统的空振功随振动参数的变化规律.由式(4)估算出此过程中摩擦力的检测误差如图3(b)所示,振动频率升高过程中,摩擦力误差控制在 ± 0.2 kN.板坯连铸条件下,对多组振动参数下空振功计算值与实测值进行比较,利用推导的空振动与振动参数之间的关系式计算出的空振功值与实测值符合较好,摩擦力的误差均值基本控制在 ± 1.0 kN,在允许范围之内。

2 结晶器摩擦力检测结果的分析和讨论

2.1 拉速变化对摩擦力的影响

图4示出了拉速(v_c)缓慢上升时摩擦力的变化情况.浇注时采用正向振动控制模型,振频和拉速为成正比关系, $f=75+50v_c$.本试验中,振幅基本保持在2.78 mm,拉速由1.75 m/min提高至2.0 m/min时,结晶器振频由162.5 cpm上升至175.0 cpm.在此过程中,拉速的缓慢提高并未对摩擦力产生明显的影响,摩擦力在一定范围内小幅度波动并呈现稍微下降的趋势,其数值相对平稳,基本维持在8 kN左右,驱动力做功随拉速的升高也无显著变化.此种情况下拉速的调整有利于减轻振动装置的负荷,并对防止拉速变化期间铸坯缺陷的产生具有积极作用。

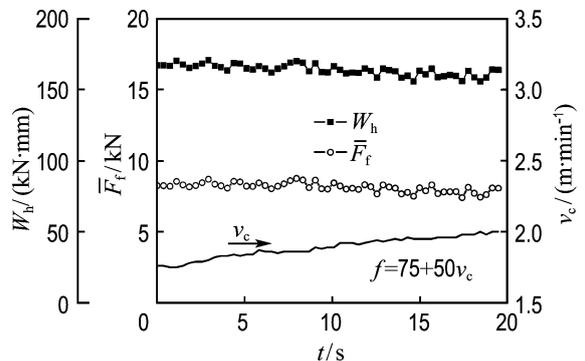
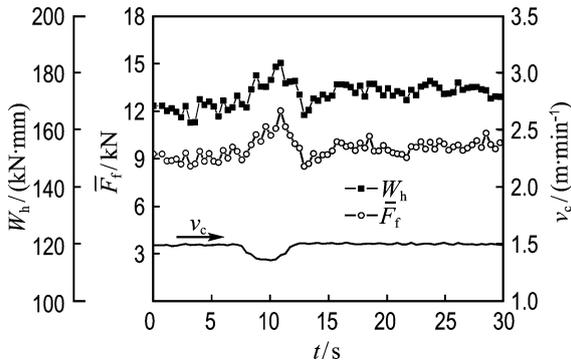


图4 拉速稳步升高过程中摩擦力的变化情况(正弦振动)

Fig. 4 Variation of mould friction during the steadily increasing process of casting speed (sinusoidal mode)

图5示出连铸过程中拉速突然发生变化时摩擦力的检测结果. 图中摩擦力出现了较为明显的波动, 拉坯时驱动力做的功与摩擦力具有相同的变化趋势. 拉速的突然变化会导致液面产生较大的波动, 且对结晶器不同位置的局部温度产生影响, 从而造成结晶器润滑和传热的不均匀, 因此摩擦力呈现出急剧的上升趋势, 当拉速恢复到稳定拉坯阶段, 摩擦力也趋于平稳. 摩擦功法检测的摩擦力对工艺参数变化引起的润滑状态的改变有很高的敏感性, 能很好地体现润滑状态的变化情况.



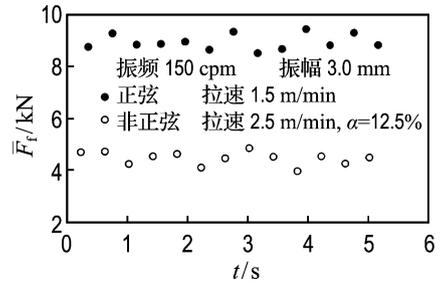
(正弦振动, 振频 150 cpm, 振幅 3 mm)

图5 拉速急剧变化对结晶器摩擦力的影响

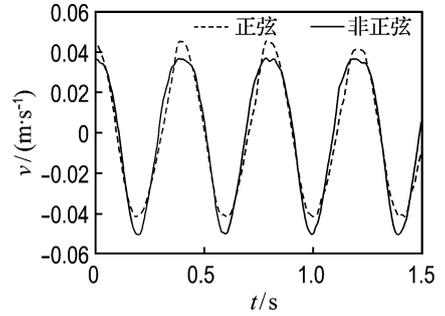
Fig. 5 Effect of casting speed abruptly change on mould friction

2.2 振动方式对摩擦力的影响

结晶器振动方式直接影响铸坯与结晶器之间的润滑情况. 根据实测数据运用摩擦功法对不同振动方式下的摩擦力进行了检测, 结果如图6(a)所示. 从图中可以看出相同振动参数下, 正弦振动与非正弦振动相比, 其摩擦力数值明显较高, 值得注意的是正弦振动下的拉速为 1.5 m/min, 而非正弦振动则是 2.5 m/min. 图6(b)为图6(a)中相同振动参数下两种方式的速度曲线, 采用非正弦振动方式, 结晶器振动过程中, 上升运动比下降运动时间长, 这不仅延长了正滑脱时间, 有利于增加渣耗量, 同时减小了正滑脱时间内相对速度, 有利于降低结晶器壁与坯壳间的摩擦拉力. 摩擦力检测结果反映了非正弦振动能有效改善润滑、减小摩擦, 相同的振动和保护渣条件下可以达到更高的拉坯速度.



(a) 摩擦力



(b) 振动速度

图6 不同结晶器振动方式下摩擦力与振动速度检测结果

Fig. 6 The trends of friction force and velocity under different oscillation modes

3 结 论

(1) 通过检测模型计算出的空振状态下振动系统做功与其实测值基本相符, 具有较高的检测精度. 依据现场的摩擦力检测结果, 能够得到摩擦力对铸坯表面拉伸、压合交替的综合作用及结晶器与铸坯之间的润滑特征.

(2) 本文采用的正向控制模型, 拉速的缓慢变化对摩擦力的影响相对较小, 这对防止铸坯在拉速变化过程中产生表面缺陷具有积极的作用; 然而, 拉速的急剧变化会影响结晶器与铸坯之间的润滑情况, 导致摩擦力出现较为剧烈的波动, 实际生产中应尽量避免.

(3) 本文实验条件下, 当振动装置采用相同振频和振幅时, 采用非正弦振动方式时结晶器与铸坯之间的摩擦力较小, 润滑条件更为优越, 对于提高连铸机拉坯速度、减少粘结漏钢和改善铸坯表面质量等具有积极的作用.

参考文献:

- [1] YAO M, FANG D C. On line measuring method for mould friction in continuous casting [J]. **Ironmaking and Steelmaking**, 1996, **23**(6):19-23
- [2] SUZUKI M, MIZUKAMI H, KITAGAWA T, *et al.* Development of a new mold oscillation mode for high-speed continuous casting of steel slabs [J]. **ISIJ International**, 1991, **31**(3):254-261
- [3] CARLOS C, CONSTANINO C, ANGEL C, *et al.* Analysis of mold friction in a continuous casting machine of round bars [J]. **Iron and Steel Technology**, 2006, **3**(7):45-51
- [4] 姚曼,温承浩,魏勇,等. 功率法用于板坯连铸结晶器摩擦力在线检测的试验研究 [J]. 钢铁, 2001(05):29-31
- [5] 马勇,王旭东,臧欣阳,等. 结晶器液压振动台振动状态检测与分析 [J]. 钢铁, 2007(07):34-37
- [6] 周小华. DYNAFLEX 液压振动技术的应用 [J]. 浙江冶金, 2006(02):14-16
- [7] WATZINGER J, PESEK A, HUEBNER N, *et al.* MoldExpert — operational experience and future development [J]. **Ironmaking and Steelmaking**, 2005, **32**(3):208-212
- [8] WATZINGER J, FLICK A. VAI's online mold friction monitoring system in continuous casting [J]. **Slab Casting Session**, 2000(6):17-23

Research on online measurement method for mould friction in continuous casting

MA Yong^{*1}, WANG Xu-dong¹, ZANG Xin-yang¹, YAO Man¹, YE Shi-hong²

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Advanced Technology Institute, Shanghai Baosteel Technology Center, Shanghai 201900, China)

Abstract: Based on the slab continuous casting under hydraulic oscillation, the measurement method of mould friction — friction work measurement method is studied. The extraction and the realization of friction work measurement method are discussed and the error of friction is also analyzed and verified through the casting tests. Finally, according to the monitored data in slab continuous casting, the effects of casting speed on friction are discussed, and the comparative analysis is carried out to the friction results under the sinusoidal mode and the non-sinusoidal mode. The results show that the friction monitored by the friction work method can well reflect the lubrication situation between the mould and slab. This research provides the theoretical and experimental bases for the mould friction monitored online with the friction work method under the hydraulic oscillation.

Key words: online measurement; mould friction; continuous casting; hydraulic oscillator