

结晶器非正弦振动对结晶器润滑和铸坯表面质量的影响

白晓路 彭家清 李孟雄

(江苏永联钢铁集团有限公司炼钢二厂, 张家港 215628)

摘要 运用结晶器润滑效果的理论,通过对结晶器振动参数与结晶器内液体摩擦力及保护渣消耗关系的理论计算,获得增加结晶器振动频率能提高保护渣的消耗量以及提高结晶器振动偏斜率能降低结晶器内液体摩擦力的结论。冷镦钢 SWRCH35K 160 mm × 160 mm 铸坯的应用表明,结晶器振动频率从 160 c/min 增加至 190 c/min 时,保护渣消耗量从 0.35 kg/t 增至 0.39 kg/t;并且结晶器振动偏斜率从 0.20 增至 0.25 时,结晶器内液体摩擦力降低,显著改善了铸坯表面质量。

关键词 160 mm × 160 mm 铸坯 冷镦钢 结晶器振动 保护渣消耗量 结晶器润滑效果 表面质量

Effect of Non-Sine Oscillation of Mold on Lubrication of Mold Flux and Surface Quality of Cast Billet

Bai Xiaolu, Peng Jiaqing and Li Mengxiong

(No.2 Steelmaking Works, Jiangsu Yonglian Iron and Steel Group Co Ltd, Zhangjiagang 215628)

Abstract With using the theory of mold lubrication effect and by theory calculation on relation between mold oscillation parameters and liquid friction force and mold powder consumption, it is obtained that with increasing mold oscillation frequency the consumption of mold powder increases and with increasing the mold oscillation offset value the friction force of liquid in mold decreases. The application results of 160 mm × 160 mm cast billet of cold-heading steel SWRCH35K show that with increasing the mold oscillation frequency from 160 c/min to 190 c/min, the consumption of mold powder increases from 0.35 kg/t to 0.39 kg/t, with increasing the mold oscillation offset value from 0.20 to 0.25, the friction force of liquid in mold decreases obviously to improve the surface quality of casting billet.

Material Index 160 mm × 160 mm Cast Billet, Cold-Heading Steel, Mold Oscillation, Consumption of Mold Powder, Lubrication Effect of Mold Flux, Surface Quality

江苏永联钢铁集团有限责任公司第二炼钢厂 5# 连铸机小方坯主要生产汽车合金用钢等高端产品,其特点为:合金冷镦钢热强度差、初始凝固温度低且收缩小,容易产生粘结,故要求保护渣润滑性能要好,即粘度小且保证一定的消耗量;小方坯的拉速高,结晶器液面波动较大,容易卷渣,故要求较高的保护渣粘度;结晶器散热快,保护渣容易凝固,导致铸坯产生褶皱、结疤等;为了降低偏析,要求钢水有较低的过热度。

1 铸坯表面质量分析

目前,合金冷镦钢铸坯表面质量整体较好,但是还存在铸坯表面光滑性不一致;存在轮廓不清晰或不规则的振痕,该种情况是液渣层厚度较薄,保护渣流入不足,从而使渣圈重熔导致^[1]。图 1 为 160 mm × 160 mm 冷镦钢铸坯 (SWRCH35K) 的酸洗样。

目前保护渣消耗量较低

(约 0.23 kg/t 或 0.07 kg/m²),可通过优化结晶器非正弦振动适当提高保护渣消耗来改善结晶器内润滑,从而获得良好的铸坯表面质量。表 1 为 160 mm × 160 mm 铸坯和拉速 1.2 ~ 1.6 m/min 的结晶器保护渣消耗量^[1]。

2 结晶器润滑效果的理论

2.1 结晶器摩擦力

结晶器上部因高温及钢水静压力,液体摩擦力

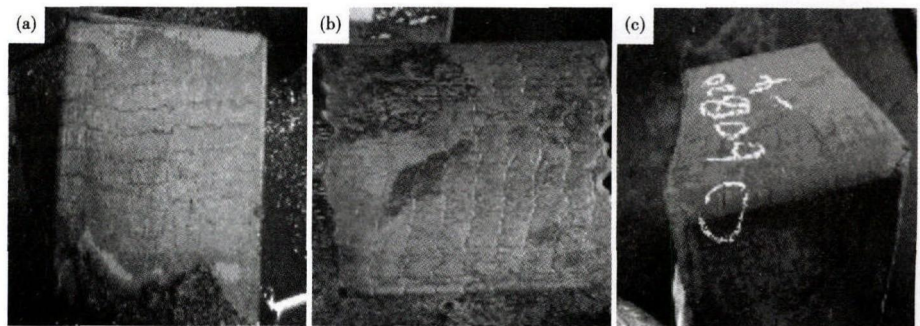


图 1 160 mm × 160 mm 冷镦钢铸坯酸洗样表面缺陷:(a) 振痕稳流;(b) 表面不光滑;(c) 局部振痕深

Fig. 1 Surface defect of acid-etched specimen of 160 mm × 160 mm cast billet of cold-heading steel: (a) steady flow type oscillation-mark; (b) rough surface and (c) local deep-oscillation-mark

表 1 160 mm × 160 mm 铸坯, 拉速 1.2 ~ 1.6 m/min 的结晶器保护渣消耗量

Table 1 Consumption of mold powder for 160 mm × 160 mm cast billet with casting speed 1.2 ~ 1.6 m/min

每米质量/ kg	面积/ m ²	体积/ m ³	面积/体积/ m ⁻¹	消耗量/ (kg · t ⁻¹)	消耗量/ (kg · m ⁻²)
194	0.64	0.026	24.62	0.49	0.15

起主要作用;结晶器下部因温度降低及铸坯收缩,导致液渣膜变薄,或可使铸坯与固渣膜或结晶器直接接触产生固体摩擦力;总摩擦力为液体摩擦力与固体摩擦力之和。液态摩擦为主要摩擦力时,液体摩擦力的变化形式与结晶器振动速度有关;如固体摩擦为主要摩擦力时,固体摩擦力恒定^[1]。故从振动角度来分析,本文只考虑液体摩擦力 F_L :

$$F_L = \frac{\eta(\nu_m - \nu_c)A}{d_L} \quad (1)$$

式中: η - 保护渣粘度; ν_m - 结晶器振动速度,向上为正,向下为负; ν_c - 铸坯拉速; A - 铜管面积; d_L - 液渣膜厚度。

2.2 结晶器非正弦振动

实现结晶器非正弦振动的原理有偏心轮原理、波形叠加原理、泰勒级数展开构造原理等,但比较主流的还是由直线、抛物线、余弦曲线构造的连续可导曲线形成,无非是直线与抛物线的时间分界点不同而已。图 2 为典型的非正弦振动位移及速度曲线。

在非正弦振动中比较关键的参数为负滑脱时间 t_N , 实践表明,负滑脱时间越短,振痕越浅。

$$t_N = \frac{60(1 - \alpha)}{\pi f} \arccos \left[\frac{(1 - \alpha)V_c}{2\pi f} \right] \quad (2)$$

式中: α - 偏斜率; f - 频率; V_c - 拉速。可以看出,偏斜率越大,负滑脱时间越短。另外,由牛顿液体摩擦阻力定律,当结晶器达到上升的最大速度时,即图 2(b)

中的水平段,液体摩擦阻力 F_L 达到最大值^[2]:

$$F_L = \eta^{\frac{3}{2}} V_c \frac{2\pi s f + V_c}{k_1 k_2 t_p} \quad (3)$$

式中: s - 振幅(振程的 1/2); t_p - 正滑脱时间; k_1 、 k_2 - 经验常数(按现有工艺条件下收集的数据可以推导出 k_1 、 k_2)。由此看出,在保护渣粘度、拉速一定的条件下,波形偏斜率越大,正滑脱时间越长,结晶器对坯壳的摩擦阻力越小。偏斜率从 0 增加到 0.4 时,结晶器摩擦阻力减小 40%,其中 30% 是由于结晶器上升时与拉速的相对速度减小所致,另 10% 是由于保护渣消耗量增加所致^[3]。图 2 中的水平段表达式为:

$$\nu_m = \frac{24\pi s f}{3(1 + \alpha)\pi + \sqrt{9(1 + \alpha)^2 \pi^2 - 96(1 - \alpha)^2}} \quad (4)$$

2.3 保护渣消耗

保护渣消耗量 Q 是反映结晶器润滑状况的主要指标,其中液渣膜造成 90% 的消耗,振动痕迹中夹渣造成的损失约 10%,影响消耗量的因素有:拉速、振幅、振频、正滑脱时间、保护渣粘度、凝固温度等,其中很大程度上取决于拉速和结晶器振动^[4];由于液渣膜随着铸坯移动,其平均厚度可由公式

$$(5) \text{ 计算求出。} d_L = \frac{0.9Q_s}{\rho_L} \quad (5)$$

式中: Q_s - 单位面积的保护渣消耗量; ρ_L - 液态渣的密度,取 2 600 kg/m³。

3 结晶器振动参数的影响

从图 3 可以看出,大的偏斜率、低振频、小振幅有利于结晶器润滑。其中,低振频好像与生产经验不相符,这主要是因为,低振频虽然增加了正滑脱时间,同时也增加了负滑脱时间,对铸坯振痕的减轻是不利的,故在生产中一般采用高振频,依靠大的偏斜率来抵消部分摩擦力^[5]。

从图 3(c) 可以看出,在高粘度(0.335 pa · s) 情况下,保护渣的消耗随着振幅的增加而迅速减少。另外,在高频率工作条件下,振幅继续减小对振动机构的寿命有很大影响,故不对振幅进行调整。

4 结晶器振动参数的结果分析

从图 3(a, b) 可以看出,最大液体摩擦力随振频增加而增

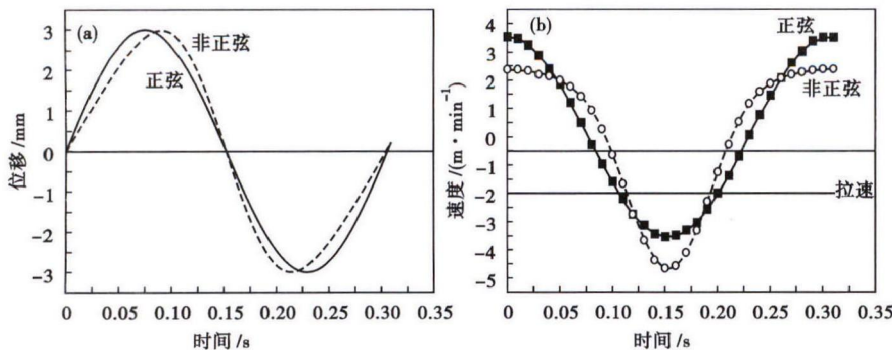


图 2 结晶器非正弦振动位移(a)及速度(b)曲线

Fig. 2 Mold non-sinusoidal oscillation displacement (a) and velocity (b) curves

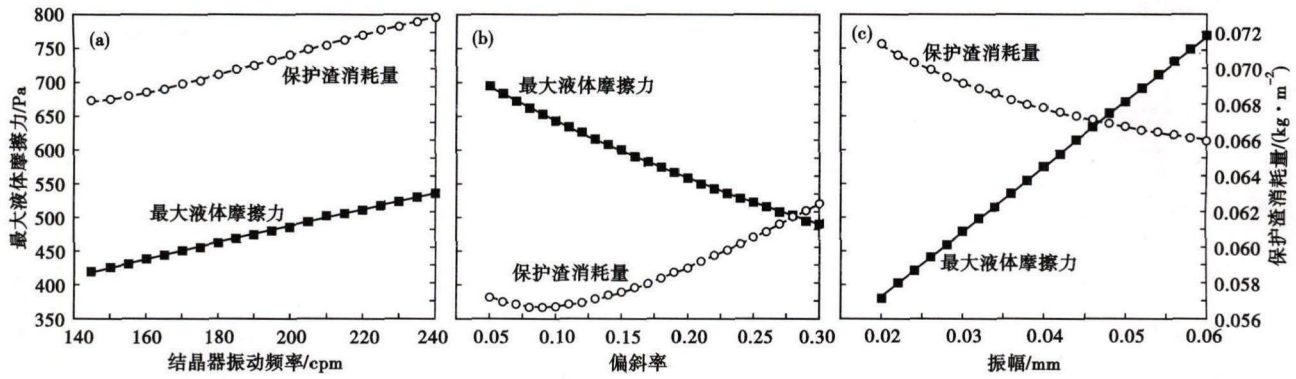


图3 (a) 结晶器振动频率($\alpha = 0.2, s = 3 \text{ mm}$), (b) 振动偏斜率($f = 196 \text{ cpm}, s = 3 \text{ mm}$)和(c) 振动振幅($f = 196 \text{ cpm}, \alpha = 0.2$)对最大液体摩擦力和保护渣消耗量的影响

Fig. 3 Effect of (a) mold oscillation frequency ($\alpha = 0.2, s = 3 \text{ mm}$), (b) oscillation offset value ($f = 196 \text{ cpm}, s = 3 \text{ mm}$) and (c) amplitude of oscillation ($f = 196 \text{ cpm}, \alpha = 0.2$) on max liquid frictional force and consumption of mold powder

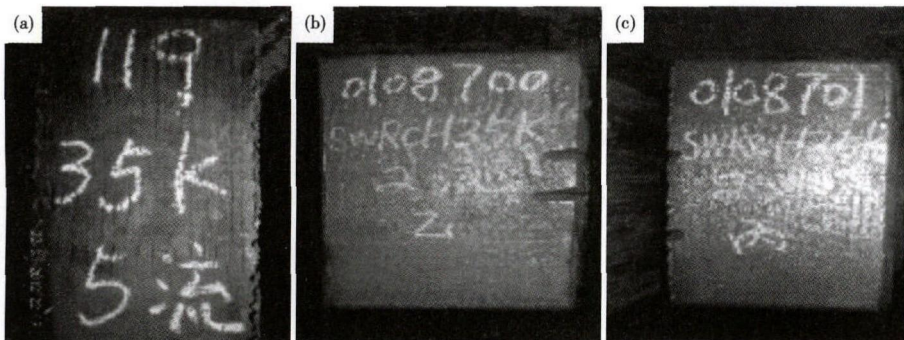


图4 (a)原振动工艺(振动频率 160 c/min, 偏斜率 0.20)和优化工艺(b)提高振动频率至 190 c/min, 偏斜率 0.20 和(c)适当提高振动频率(190 c/min)和偏斜率(0.25)的铸坯质量

Fig. 4 Surface quality of billet casting by (a) original process (oscillation frequency 160 c/min, offset value 0.2), optimization process (b) increasing oscillation frequency to 190 c/min, offset value 0.2 and (c) suitable increasing oscillation frequency to 190 c/min and offset value to 0.25

表2 振动频率和偏斜率对结晶器保护渣消耗量的影响,冷镢钢 SWRCH35K 160 mm × 160 mm 铸坯

Table 2 Effect of oscillation frequency and offset value on consumption of mold powder, 160 mm × 160 mm cast billet of cold-heading steel SWRCH35K

项目	拉速/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	振幅/ mm	振频/ ($\text{c} \cdot \text{min}^{-1}$)	偏斜 率	负滑脱 时间/s	消耗量/ ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)
原工艺	2.1	±3	160	0.20	0.094	0.35
提高偏斜率	2.1	±3	190	0.20	0.087	0.38
提高偏斜率和频率	2.1	±3	190	0.25	0.084	0.39

加,随偏斜率增加而减小,保护渣消耗量随频率增加而增加,随偏斜率($\alpha = 0.1$ 附近)的增加变化不是很明显;图4为在 160 mm × 160 mm 的冷镢钢铸坯(SWRCH35K)上进行试验,表2为该试验的具体工艺参数。

故可以适当的增加结晶器振动频率以提高保护渣的消耗量,其增加的液体摩擦力可以通过适当提高偏斜率来抵消。

5 结论

(1) 结晶器内最大液体摩擦力随振频增加而增加,随偏斜率增加而减小。

(2) 保护渣消耗量随频率增加而增加,随偏斜率的增加变化不是很明显。

(3) 适当的增加结晶器振动频率以提高保护渣的消耗量,其增加的液体摩擦力可以通过适当提高偏斜率来抵消,从而获得良好的铸坯表面质量。

参考文献

[1] 李殿明, 邵明天, 连铸结晶器保护渣应用技术[J]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 16-25.
 [2] 唐中川. 结晶器振动方式解析与连铸机非正弦振动技术[J]. 现代制造技术与装备, 2005, 18(6): 5-10.
 [3] 干勇, 陈栋梁, 杨文改, 等. 连铸结晶器瞬态摩擦阻力的实验研究[J]. 钢铁, 1999, 4(3): 10-18.
 [4] 张立, 陈亚贤, 姚曼, 等. 连铸结晶器拉坯阻力异常数据分析及应用方法研究[J]. 钢铁, 2004, 7(2): 12-16.
 [5] 姚曼, 王文华, 魏树立, 等. 板坯连铸结晶器摩擦力计算与影响因素研究[J]. 大连理工大学学报, 2002, 4(5): 11-15.

白晓路(1983-), 男, 工程师, 2006年安徽工业大学(本科)毕业, 连铸工艺技术研究。

收稿日期: 2016-12-15