

DOI:10.13228/j.boyuan.issn1005-4006.20200071

小方坯结晶器正弦振动参数的优化

杨志雄¹, 朱国军¹, 张年华², 杨鹏辉¹, 贾敬伟¹, 孙丰硕¹

(1. 日照钢铁控股集团有限公司型材制造部, 山东 日照 276806;

2. 日照钢铁控股集团有限公司长材技术处, 山东 日照 276806)

摘 要: 根据四连杆振动机构及正弦振动的特点, 主要从振动频率、振幅、负滑脱时间等参数进行研究。介绍了某钢厂小方坯连铸机的工艺状况及铸坯表面质量状况, 对铸坯表面质量的影响因素进行了分析, 对结晶器振动参数进行理论分析并对参数进行了优化。参数优化后, 铸坯表面质量及溢漏率等问题均得到了有效地改善。

关键词: 小方坯; 结晶器; 正弦振动; 参数; 优化

文献标志码: A **文章编号:** 1005-4006(2020)06-0074-05

Analysis on sinuous oscillation parameters of billet continuous casting

YANG Zhi-xiong¹, ZHU Guo-jun¹, ZHANG Nian-hua²,

YANG Peng-hui¹, JIA Jing-wei¹, SUN Feng-shuo¹

(1. Profile Manufacturing Department, Rizhao Iron and Steel Holding Group Co., Ltd.,

Rizhao 276806, Shandong, China; 2. Long Material Technology Department,

Rizhao Iron and Steel Holding Group Co., Ltd., Rizhao 276806, Shandong, China)

Abstract: According to the characteristics of four-bar linkage vibration and sinusoidal vibration, the vibration frequency, amplitude, negative slip time and other parameters are studied in this paper. The process and surface quality of billet continuous casting machine in a steel plant are introduced. The influencing factors of surface quality of billet are analyzed. The vibration parameters of the mould are analyzed theoretically and optimized. After the optimization of parameters, the surface quality and the leakage rate of the slab have been effectively improved.

Key words: small billet; mould; sinusoidal vibration; parameter; optimize

随着连铸技术的发展, 以高拉速、高质量和高作业率为目标的高效连铸技术, 逐渐成为当代连铸的主要发展方向。要达到高产、高质的目的, 必须不断完善设备、工艺参数以及过程控制技术。某钢厂现有 1 台小方坯连铸机, 投产 3 年多以来, 铸坯产量和质量都有非常明显地提高。随着一些高标准新品种的开发, 部分历史遗留问题也逐渐暴露, 如高溢漏率、高事故率、铸坯表面缺陷较多等。针对生产中存在的问题, 为改善铸坯表面质量, 降低溢漏率, 对钢水条件、拉速、保护渣、设备状况等进行了讨论, 最终认为结晶器振动参数是解决相关问题的关键。

四连杆机构是被广泛应用于小方坯连铸机一种仿弧的振动机构, 本文介绍了四连杆振动机构的特点, 工艺状况及铸坯表面质量状况, 对铸坯表面质量的影响因素进行分析, 主要从振动频率、振幅、负滑脱时间等参数进行研究。对结晶器振动参数进行理论分析并对参数进行优化, 参数优化后, 铸

坯表面质量及溢漏率等问题均得到了有效的改善。同时, 提出了正弦振动的不足及解决办法。

1 四连杆振动机构的特点

结晶器振动装置是连铸机的关键设备之一, 连铸机结晶器振动机构的形式很多, 四连杆机构又是被广泛应用于小方坯连铸机一种仿弧的振动机构, 根据驱动方式可分为电机驱动和液压驱动。目前冶金行业中广泛使用的结晶器振动装置多为短臂连杆悬挂式半板簧振动结构, 某钢厂小方坯连铸机采用的振动装置即为这种半板簧四连杆振动机构, 其组成包括电动机、传动装置、连杆、振动臂、支座、板簧和振动台架, 此悬挂式振动装置是通过螺栓将支座与振动悬挂梁联接实现悬挂, 振动臂通过轴和轴承分别与支座和振动台架连接, 振动台架与支座之间通过板簧连接。振动臂绕支座上的支点在传动装置的带动下来回转动, 从而带动振动台架上下

振动。

半板簧振动结构的振动类型多为机械振动,某钢厂小方坯连铸机振动装置的驱动方式为电机驱动,振动方式为正弦振动,正弦振动是由偏心轮-杆机构实现的。因此,振幅可直接由偏心轮的偏心距通过杆系的换算得到,也可按速度-时间正弦曲线的半波面积计算获得。

每经过相同的时间间隔,振动波形能重复出现的振动称为周期振动,与时间成正弦函数的周期振动称为正弦振动,正弦振动中频率、振幅和加速度决定了振动台的性能。正弦振动的特点为:结晶器在整个振动过程中速度一直是变化的,即铸坯与结晶器时刻都存在相对运动。在结晶器下降过程中有一段负滑动,能防止和消除粘结,具有脱模作用;另外,由于结晶器的运动速度是按正弦规律变化的,加速度必然按余弦规律变化,所以过度比较平稳,冲击力也较小^[1]。

2 工艺现状

某钢厂小方坯连铸机为六机六流全弧型连续矫直连铸机,浇铸断面主要为 163 mm×163 mm,采用快换式定径水口或塞棒控制、浸入式水口保护浇铸、结晶器液面自动控制、保护渣和事故摆槽等浇注方式。目前,主要生产的钢种有 H08A、Q195、Q215B、Q235B、HRB400、30MnSi、ML35、45 号、SWRH22A、SWRH82B 等,连铸机的主要工艺参数见表 1。振动曲线如图 1 所示。

表 1 连铸机的主要工艺参数

Table 1 Main process parameters of continuous casting machine	
名称	连铸机参数
弧形半径/m	8
流间距/mm	1 200
工作拉速/(m·min ⁻¹)	1.8~3.2
结晶器形式及材质	窄水缝导流水套式结晶器,材质为磷脱氧铜
结晶器水缝/mm	3.5
结晶器长度/mm	900
振动装置	半板簧四连杆
振动类型	机械振动
振动方式	正弦振动
振幅/mm	±4.8、±4.2、±3.4、±2.4

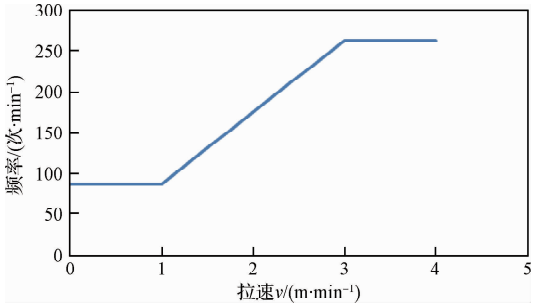


图 1 结晶器振动曲线

Fig. 1 Mould vibration curve

3 铸坯表面质量现状与分析

3.1 铸坯表面质量现状

在现有振动模式下,铸坯表面振痕经常出现不完整和弯曲现象,且钩形振痕比例较多,铸坯振痕如图 2 所示。一般低碳钢或超低碳钢由于钢水流动性差导致钩形振痕略深一些。通过对铸坯振痕金相组织的分析发现:振钩下晶粒较其他部位粗大,磷、硫成分偏析也较其他部位严重,易造成振痕谷部分布大量的微观裂纹。在外力(如结晶器铜管内的摩擦力、拉坯力等)作用下,这些裂纹将进一步扩展。谷部裂纹在高温下产生,裂纹内表被氧化,形成氧化铁夹渣,如图 3 所示。轧制过程中若裂纹不能焊合,就会出现起皮、结疤,严重时出现掉块甚至断裂现象^[2]。凹陷型振痕由于深度比较浅,一般不会对影响到轧材的质量。

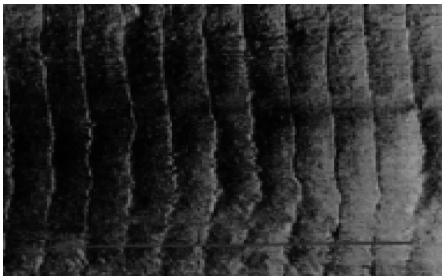


图 2 铸坯振痕

Fig. 2 Vibration mark of slab

3.2 原因分析

关于浸入式水口保护渣浇注条件下振痕的形成比较一致的认识是“弯月面凝固模型”。在负滑脱期间,结晶器向下运动的速度大于铸坯运动速度,弯月面坯壳在保护渣内压力冲击或渣圈的作用下,离开结晶器壁向内弯曲。当正滑动期间保护渣的负压又把部分弯月面坯壳拉回到结晶器壁,形成凹状振痕。如果弯月面坯壳刚度较大,坯壳的顶部

$$f=\begin{cases} 87.5 & v\leqslant 1.0\text{ m/min} \\ 87.5\times v & 1.0\text{ m/min}<v\leqslant 3.0\text{ m/min} \\ 263 & v>3.0\text{ m/min} \end{cases}$$

不能向结晶器壁弯曲,钢液在其上溢流,从而形成皮下钩状振痕^[3],振痕的典型形态如图 4 所示。

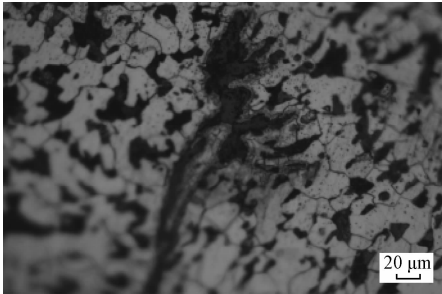


图 3 30MnSi 盘圆中间料横向

Fig. 3 30MnSi disc intermediate transverse

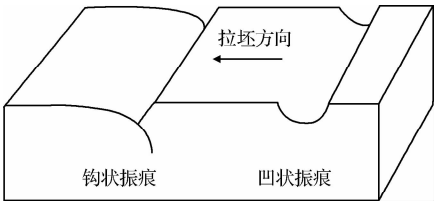


图 4 振痕的典型形态

Fig. 4 Typical pattern of vibration marks

当铸坯与结晶器铜板间润滑不良时将发生粘结,弯月面凝固加剧,坯壳厚度、强度增加,造成钢水溢流,形成铸坯表面上的搭结,即钩状振痕。在铸坯运行与结晶器振动速度差较大时,会造成结晶器与铸坯间的机械作用力过大,这也易导致钢水在

弯月面上溢出,同样形成钩状振痕。因此,优化结晶器振动参数、促进结晶器与铸坯间的润滑,是杜绝钩状振痕、提高铸坯表面质量的关键。

根据相关研究,采用不合理的工艺参数,会导致生产时保护渣消耗量偏小,铸坯表面与结晶器壁间的摩擦阻力过大,超过了初生坯壳强度承受的范围,严重时引起黏结甚至出现已凝固的坯壳被撕裂而钢液溢流的问题^[4]。

4 结晶器振动参数理论分析

4.1 参数计算

正弦振动的基本参数计算公式见式(1)~式(3)^[5]。

负滑脱率 NS 计算公式为

$$NS = \frac{v - v_m}{v} = 1 - \frac{4Af}{1\,000v} \tag{1}$$

负滑脱时间 T_N 计算公式为

$$T_N = \frac{60}{\pi f} \cos^{-1} \frac{1\,000v}{2\pi fA} \tag{2}$$

正滑脱时间 T_p 计算公式为

$$T_p = \frac{60}{f} \left(1 - \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \frac{1\,000v}{2\pi fA} \right) \tag{3}$$

式中: v 为拉坯速度, m/min ; v_m 为结晶器振动的平均速度, m/min ; A 为结晶器振动的振幅, mm ; f 为结晶器振动的频率, 次/min 。

当 $A=4.8\text{ mm}$ 时,计算结果见表 2。负滑脱时间与负滑脱率的等值曲线如图 5 所示。

表 2 振动参数计算

Table 2 Calculation of vibration parameters

拉速 $v/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	振频 $f/(\text{次} \cdot \text{min}^{-1})$	负滑脱时间 T_N/s	正滑脱时间 T_p/s	负滑脱率 $NS/\%$
1.6	140	0.16	0.27	-68.0
1.8	158	0.14	0.24	
2.0	175	0.13	0.21	
2.2	193	0.12	0.19	
2.4	210	0.11	0.18	
2.6	228	0.10	0.16	-57.8
2.8	245	0.09	0.15	
3.0	263	0.09	0.14	
3.2	263	0.08	0.13	

4.2 理论分析

(1)负滑脱率取值范围较宽。经验表明,对于采用保护浇注的小方坯,负滑脱率在 $-5\% \sim -80\%$ 内时对铸坯质量并无明显影响,负滑脱时间

应控制为 $0.08 \sim 0.13\text{ s}$ ^[6]。负滑脱率一般为 $55\% \sim 80\%$ 。对于 $f=av$ 式正弦振动同步控制模型,负滑脱率为常数。某钢厂小方坯正弦振动负滑脱率为 -68% ,满足工艺要求。

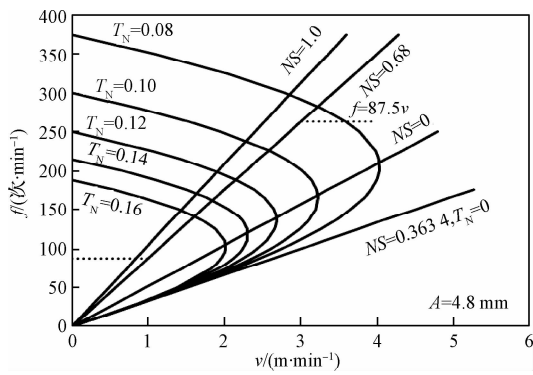


图 5 负滑脱时间等值曲线

Fig. 5 Equivalent curves of negative slip time

(2)确定适宜的振动参数,关键是确定负滑脱时间。结晶器摩擦阻力是负滑脱时间的增函数,铸坯表面振痕深度及由此造成的表面缺陷,随负滑脱时间的增加而增加^[7]。某钢厂小方坯正弦振动负滑脱时间主要集中在 0.08~0.16 s,波动范围较大,特别是低拉速(低于 2.0 m/min)时负滑脱时间较长,振痕较深,易形成钩形振痕,对铸坯表面质量非常不利。

(3) $f=av$ 式正弦振动同步控制模型存在一个很大的缺陷,即负滑脱率为一定值,不能同时满足铸坯表面质量及保护渣润滑两个方面的要求。研究表明,在所使用保护渣相同的情况下,通过合理优化调整振动参数来降低负滑动时间、增大正滑动时间,可达到减小铸坯表面振痕深度、改善润滑、优化铸坯表面质量的目的^[8-9]。

4.3 振动参数的优化

结晶器振动参数分为基本参数(振幅、振频)和工艺参数(负滑脱时间、负滑脱率等)。在同等生产条件下,基本参数的取值决定了工艺参数的大小,而工艺参数是否合适直接决定了结晶器的振动效果,从而影响铸坯表面质量。结晶器振动参数的选择应以减少振痕深度和增加保护渣消耗为原则,尽可能降低负滑脱时间,同时尽可能提高正滑脱时间,本文即从振幅和振频两方面对振动参数进行分析优化。

4.3.1 振幅的确定

相关研究证明,在同频率的情况下,振幅越小负滑脱时间越短,振痕越浅,反之振痕越深。振幅越小,保护渣吸入量越小,影响结晶器铜管润滑及连铸坯脱壳,易造成黏结性漏钢事故。振幅越大,负滑脱时间越长,偏摆越大且不易控制,振痕越深,易造成铸坯表面横裂纹和拉断事故^[10-11]。

在相同振频时,降低振幅,负滑脱时间减小,正滑脱时间增加,有利于减小铸坯表面振痕深度和改善润滑,同时结晶器内的钢水液面波动小。但过小的振幅对坯壳的压合效果不利,所以振幅取值宜低但不能过低。负滑脱时间曲线如图 6 所示(设 $Z=2A/v$, $A=3.4$ mm, 式中 A 为结晶器振动的振幅, mm; v 为拉坯速度, m/min)。

由负滑脱时间曲线可以看出, $NS=2.4\%$ 时,负滑脱时间处于峰值,将负滑脱时间曲线分成两个区域。当 $NS>2.4\%$ 时,负滑脱时间随频率的增加而急剧上升,频率的微小变化即造成负滑脱时间变化很大,这在实际操作中很难控制,实践中不能采用;当 $NS<2.4\%$ 时,负滑脱时间随频率的增加而下降,特别是当 Z 值较小时,曲线下降比较缓慢,在实际生产中可采用。但负滑脱率不能过小(如 $NS<-80\%$),避免采用较高的频率,不利于振动设备的维护。

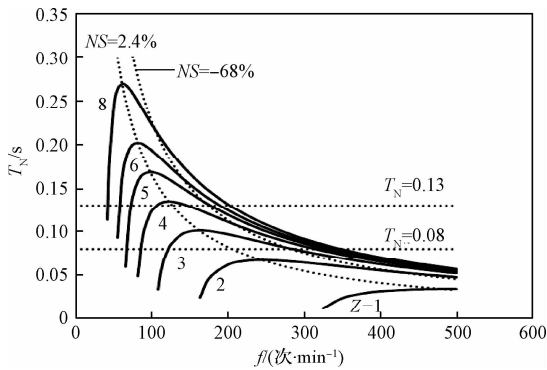


图 6 负滑脱时间曲线

Fig. 6 Negative slip time curves

在当前振幅和工作拉速下,某钢厂小方坯连铸机结晶器振动的 Z 值主要为 3~6,范围偏大,负滑脱时间波动也较大,且低拉速时负滑脱时间过长。建议采用 ± 3.4 mm 振幅, Z 值为 2.4~4.0,负滑脱时间波动小,且较易控制在 0.08~0.13 s 区域。

4.3.2 振动模式的确定

根据有关研究^[12],对于固定负滑动时间和负滑动量的结晶器正弦振动同步模型,可以适应拉速不太高的连铸机,而采用变动的负滑动时间和负滑动量可以使结晶器正弦振动同步模型适应更高拉速的连铸。

鉴于 $f=av$ 式正弦振动同步控制模型存在的缺陷,建议将其改为 $f=av+b$ 式。该模型是一条不通过坐标原点的斜线,负滑脱率不为常数。其优点是频率随拉速的变化比较平缓,所以当拉速降低

时负滑脱时间增加不大,比原控制模型有所改善^[3]。如 $A=3.4\text{ mm}$, $f=50v+100$ 时,负滑脱时间等值曲线如图 7 所示($A=3.4\text{ mm}$)。

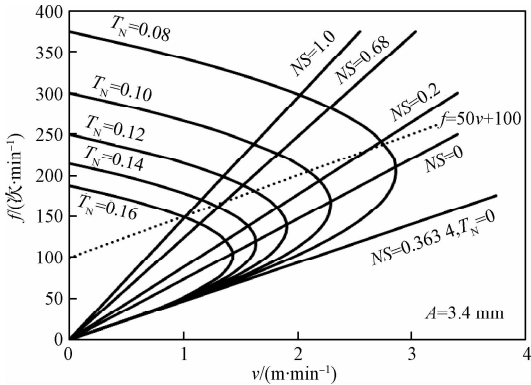


图 7 负滑脱时间等值曲线

Fig. 7 Equivalent curves of negative slip time

在正弦振动中,当振幅和振频确定后,整个振动效果就已确定,操作人员无法根据现场生产状况的变化将振动参数调整至最佳状态,这是正弦振动方式的先天不足。现在使用比较广泛的结晶器非正弦振动可解决这个问题。在非正弦振动中,结晶

器上升速度慢且时间长,下降速度快且时间短,可获得更小的负滑脱时间和更大的正滑脱时间,对于铸坯表面质量的提高、结晶器内的润滑以及坯壳的压合都非常有利。所以,从提高质量、减少事故角度来讲,还是采用结晶器非正弦振动方式较好。

实现非正弦振动可采用电动缸振动装置,电动缸振动装置具有无冲击、无间隙、精度高的优点,可实现在线调整振频、振幅;与液压振动相比无污染、上线快、调试简单。要获得更好的控制效果,可以考虑将机械偏心轮振动改造成电动缸振动装置。

5 优化后的效果

按照新模型优化振动参数后,振动频率在拉速低于 2.6 m/min 时有所升高,而当拉速在 2.8 m/min 以上时略有降低;负滑脱时间减少约 0.02 s,在拉速 2.0 m/min 以上时,滑脱时间增加约 0.02 s;负滑脱率随拉速增加呈递减趋势,计算结果见表 3。

通过调整结晶器振幅、振频参数,某钢厂小方坯的表面质量得到了有效改善,溢漏率由 0.30% 降至 0.03% 以下。

表 3 优化后的振动参数计算

Table 3 Calculation of vibration parameters after optimization

拉速 $v/(m \cdot min^{-1})$	振频 $f/(次 \cdot min^{-1})$	负滑脱时间 T_N/s	正滑脱时间 T_P/s	负滑脱率 $NS/\%$
1.6	180	0.12	0.21	-53.0
1.8	190	0.11	0.20	-43.6
2.0	200	0.10	0.20	-36.0
2.2	210	0.10	0.19	-29.8
2.4	220	0.09	0.18	-24.7
2.6	230	0.08	0.18	-20.3
2.8	240	0.08	0.17	-16.6
3.0	250	0.07	0.17	-13.3
3.2	260	0.07	0.16	-10.5

6 结语

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。振动的工艺效果完全可以由工艺参数表现出来。首先确定合适的振幅、振频,使负滑脱时间、负滑脱率等工艺参数处于合理范围,从而达到提高铸坯表面质量和促进润滑的振动效果。实践中可以通过绘制负滑脱时间曲线和等值曲线,确定合理的正弦振动同步控制模型,再综合分析所

取得的模型是否合适。

参考文献:

[1] 郭世晨. 连铸结晶器振动技术的发展及应用[J]. 冶金设备, 2013(5):50.
[2] 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):28.
[3] 李宪奎,张德明. 连铸结晶器振动技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2000:15.
[4] 徐松,周青峰,邹长东,等. 高碳钢连铸小方坯表面异常振痕