

板坯连铸动态轻压下扇形段的受力分析和应用

谢长川¹ 王新华¹ 张炯明¹ 李富帅² 王朝盈² 艾健³ 焦玉水³ 陈茂敬³

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 中冶连铸技术工程股份有限公司,武汉 430073;

3 泰山钢铁公司不锈钢厂,莱芜 271100)

摘要 通过 ANSYS 软件模拟了 200 mm × 1 600 mm 不锈钢板坯连铸轻压下过程扇形段铸坯的变形,得出 1[#] 到 11[#] 扇形段辊缝的动态补偿量 0.2 ~ 1.0 mm。生产应用表明,拉速 0.7 m/min 和 0.9 m/min,压下速率 0.8 ~ 1.4 mm/m,总压下量 1.30 ~ 4.56 mm,铸坯中心偏析均有改善,铸坯厚度与设定值之差 ≤ 0.5 mm;拉速为 0.7 m/min 时,未采用动态轻压下时,C、S 中心偏析指数为 1.30,当压下速率为 1.2 mm/m,压下区间固相率 20% ~ 50% 时,C、S 中心偏析指数降至 1.05。

关键词 板坯连铸 动态轻压下 有限元模拟 应用

Analysis on Action and Reaction Force between Slab and Rollers at Segment of Dynamic Soft Reduction and Application in Casting

Xie Changchuan¹, Wang Xinhua¹, Zhang Jiongming¹, Li Fushuai², Wang Caoying², Ai Jian³, Jiao Yushui³ and Chen Maojin³
(1 Metallurgical and Ecological Engineering School, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 CCTEC Engineering Co Ltd, Wuhan 430073; 3 Stainless Steel Works, Shandong Taishan Iron and Steel Co Ltd, Laiwu 271100)

Abstract Deformation of slab at segment during dynamic soft reduction of casting 200 mm × 1 600 mm stainless steel slab has been simulated by soft ware ANSYS. It is obtained that the effective compensation of roll gap at No1 to No11 of segment is 0.2 ~ 1.0 mm. Production application results show that with casting speed 0.7 m/min and 0.9 m/min, dynamic soft reduction rate 0.8 ~ 1.4 mm/m, total reduction 1.30 ~ 4.56 mm, the center segregation of slab all improves and the error of thickness of slab between measured and given value is less than 0.5 mm; at casting speed 0.7 m/min, as without using dynamic soft reduction the center segregation index of C and S is 1.3, while with dynamic soft reduction rate 1.2 mm/m, solidification rate at reduction zone is 20% ~ 50%, the center segregation index of C and S decreases to 1.05.

Material Index Slab Casting, Dynamic Soft Reduction, Finite Element Simulation, Application

连铸动态轻压下技术即通过在线跟踪铸坯凝固进程,适时地在铸坯凝固末端给以一定的机械压下,以弥补末端两相区的凝固体收缩,从而减轻乃至消除中心偏析、疏松^[1,2]。该技术问世以来一直受到广泛关注,长期以来我国对该技术始终依靠引进。

泰山钢厂 220 mm × 1 600 mm 不锈钢板坯铸机,生产的铸坯厚度有 160、200、220 mm 三种,宽度 800 ~ 1 600 mm,铸机半径 9 m,共设计了 11 个扇形段,是第 1 台实施了动态轻压下技术的国产板坯铸机。该铸机的机械设备、控制、液压系统以及动态轻压下模型全部是自主设计、制造、开发。

1 扇形段强度校核

生产过程中,铸坯在扇形段上下辊的夹持下前进,铸坯承受着来自液芯钢水的静压力、拉矫机的矫直力、拉坯力等。同时扇形段也承受着铸坯的反作用力,因此扇形段的框架和辊子必须有足够的强度,才能保持所要求的辊缝,能够准确地实施轻压下,而且扇形段和辊子的使用寿命不会出现明显的降低。

1.1 辊缝远程控制扇形段

本铸机设计的扇形段采用 4 个液压缸夹紧上下框架及夹紧缸内置的位移传感器判断油缸的位置。通过控制扇形段上的伺服阀、通断阀等阀组分别向油缸的上下腔进油,来调节辊缝的开口度,取消了传统的定距块。其中传感器的精度可以达到 ± 0.01 mm,冷态辊缝的控制精度误差可在 ± 0.1 mm 内。更换铸坯厚度规格时,几分钟内就可以全部自动调整到位,而通过人工更换定位块来调整扇形段的辊缝,控制精度只能达到 ± 0.2 mm,整个调整过程需要 2 个多小时。

实施动态轻压下时,扇形段如果出现较大的变形,会导致铸坯出现鼓肚,或不能使辊缝缩小到指定值,而无法达到轻压下的目的。这就必须先对扇形段的受力情况仔细分析,得出在不同受力情况下,扇形段的拉杆、上框架、辊子的变形情况。再实施动态的补偿,从而确保补偿后所得到的实际辊缝是所需要的值^[3,4]。

1.2 扇形段受力分析

对于钢水静压力引起的鼓肚力,采用任意两辊间钢水静压力对夹辊的作用模型来计算。采用材料力学中两端固定等截面梁受均匀分布载荷即钢水静压力来计算夹辊受力^[5],如公式(1)所示。

$$F_i = \rho g h_i l_i \left(w - 2K \sqrt{\frac{L}{V_c}} \right) \quad (1)$$

式中: ρ - 钢液密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); h_i - 第 i 对辊处相对于钢液面的高度值/m; l_i - 第 i 对辊的辊间距/mm; w - 铸坯的宽度/mm; L - 从结晶器液面算起的铸坯弧长/mm; V_c - 拉速/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$); K - 综合凝固系数/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1/2}$)。

所用的辊列计算模型采用的是粘弹性梁模型。它在传统的纯蠕变模型的基础上,考虑了铸坯的弹性变形。此外,粘弹性梁模型中也考虑了由于液芯的存在,弯曲矫直力主要发生在铸坯侧面坯壳上这一事实,引入了“硬盒”模型,从而使计算结果更加合理^[6]。

当扇形段实施动态轻压下时,扇形段还要受到铸坯压下变形时产生的反作用力。可以通过平辊轧制理论^[7]来推导轻压下过程中作用于辊子上的力,采用公式(2)、(3)表示:

$$P = \sigma \delta \sqrt{2R\Delta h - \Delta h^2} \quad (2)$$

$$\Delta h = Ql \quad (3)$$

式中: σ - 单位轧制平均压力/($\text{t} \cdot \text{mm}^{-2}$); δ - 铸坯厚度/mm; R - 压下辊半径/mm; Δh - 压下量/mm; Q - 压下速率/($\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$); l - 辊间距/m。

2 扇形段变形 ANSYS 分析

不同位置的扇形段受力差异很大,而扇形段的结构又非常复杂,不可能用简单的弹性变形来分析其变形量。通过 ANSYS 软件建模,可以比较准确地计算出各种情况下的扇形段变形量。

2.1 模型的建立与说明

根据设备图建立扇形段有限元三维实体模型(图1)。原则上完全按照实际的图纸尺寸建模,但考虑到单元划分,在不影响计算结果的前提下,对模型作适当简化:(1)忽略所有板或轴的倒角;(2)焊缝按固结处理;(3)忽略所有螺栓孔及定位销孔;(4)由于液压油路在加载时是封闭的,上框架所受载荷是压力,根据液体不可压缩原理及力的传递关系,将拉杆与上框架油缸杆之间视为固结。

边界条件:(1)下框架底部4个地脚螺栓位置,

其中一个在三个方向全约束,其对角位置只约束 Z 向位移,另外两个分别约束 YZ 及 XZ 方向位移;(2)截取与扇形段长度相当的一段坯壳作为计算模型的一部分,截面上

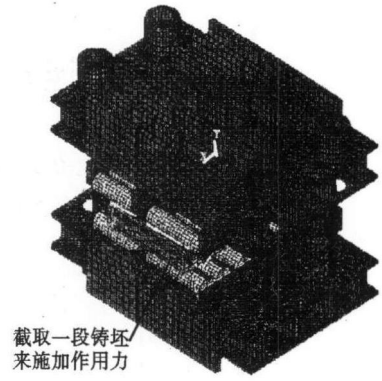


图1 扇形段有限元模拟
Fig.1 Finite element model of segment

施加 Z 向的位移对称边界条件;坯壳内表面承受的面压力载荷,根据该扇形段所处位置采用计算模型进行计算来确定;(3)扇形段上7对辊子与铸坯之间建立30个接触对,面面接触,摩擦系数取0.4,铸坯对上下框架的载荷分别通过其与连铸辊之间接触面来传递;(4)拉杆底部节点与下框架脱离,但通过约束其 Y 方向的位移 dy 来实现压下量的设置;(5)各钢件材料为16Mn,材料性能取 $\sigma_s = 265 \text{ MPa}$, $E = 206 \text{ GPa}$, $G = 79.38 \text{ GPa}$, $\mu = 0.3$ 。

2.2 计算结果与讨论

当铸坯经过扇形段时,铸坯内部的钢水静压力通过坯壳传给辊子及扇形段,扇形段受力后会发生变形,尤其是4根连接上下框架的连杆,变形量较大,从而使得扇形段张开。而由于辊缝变大,钢水的静压力不能全部传递给上框架,而是由铸坯两侧的坯壳承受了部分的钢水静压力,从而使得铸坯与辊子之间的作用力减小,反过来,又会影响框架和拉杆的变形,减小辊缝。这个过程实际是一个迭代平衡过程,最终铸坯与扇形段之间的相互作用力与框架及拉杆变形会达到一种平衡。通过 ANSYS 软件数学模型计算,便可以求出这种平衡力,得到在各种工况下扇形段的变形量。扇形段、铸坯的位移分布云图如图2(a,b)所示。在本研究的轻压下过程中,通过控制模型设定不同的辊缝值,计算出铸坯对扇形段反作用力与辊缝变化之间的相互关系(图2c)。

在现场实际的轻压下过程中,通过上述计算分析,从1*到11*扇形段对辊缝的控制分别进行0.2~1.0 mm的动态补偿。

3 实际运用情况

2008年3月该铸机投产以来,一直采用动态轻压下技术进行生产,设备性能稳定、可靠。成功地浇

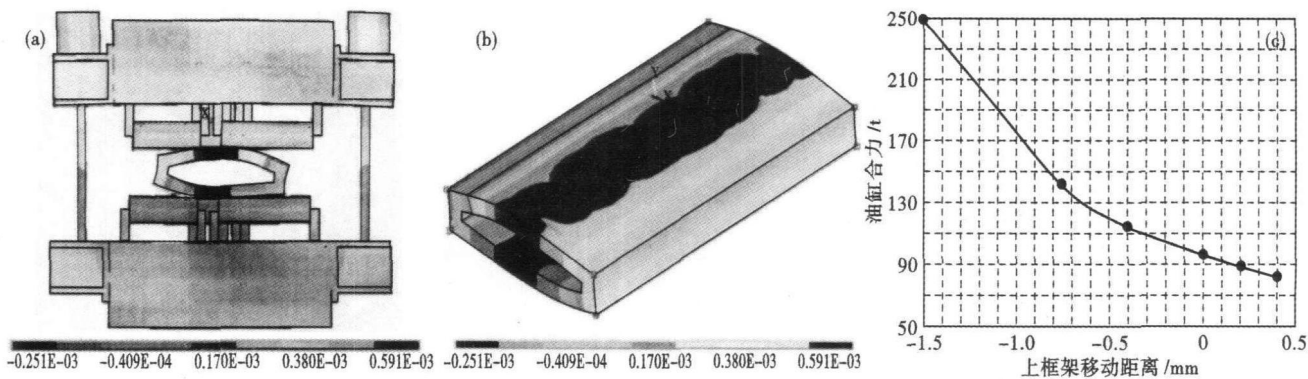


图 2 (a)扇形段铸坯 Y 方向位移分布云图;(b)扇形段铸坯位移云图;(c)扇形段变形与受力的关系图

Fig.2 Contour plot of displacement of slab along Y direction at segment; (b) Contour plot of displacement of slab at segment; (c) Relation between deformation and reaction force at segment

铸出了 201、304、430、420 系列的不锈钢铸坯和 Q235、Q345 等普碳钢。

3.1 铸坯低倍与偏析的检验

设计了 14 组试验来优化轻压下的关键参数。主要考察压下位置和压下速率变化对铸坯质量的影响。铸坯规格 200 mm × 1 550 mm,设计的轻压下工艺参数如表 1 所示,同时取了试验编号为 13# 和 14# 两组未采用轻压下的试样作对比,其拉速分别为 0.7、0.9 m/min。

表 1 轻压下试验参数与辊缝设定值和实验值

Table 1 Parameters for dynamic soft reduction test and contrasting given value with measured value of roll gap

试验编号	压下速率/(mm·m ⁻¹)	设定压下位置 f _s /%	总压下量/mm	设定厚度/mm	实测厚度/mm
1#	0.8	0.2~0.5	2.61	199.24	199.25
2#	0.8	0.3~0.7	2.61	199.24	199.50
3#	0.8	0.6~1.0	1.30	200.50	200.40
4#	1.0	0.2~0.5	3.26	198.51	198.75
5#	1.0	0.3~0.7	3.26	198.51	198.70
6#	1.0	0.6~1.0	1.63	200.20	199.70
7#	1.2	0.2~0.5	3.92	197.90	198.25
8#	1.2	0.3~0.7	3.92	197.90	198.40
9#	1.2	0.6~1.0	1.96	199.80	200.30
10#	1.4	0.2~0.5	4.56	197.25	197.60
11#	1.4	0.3~0.7	4.56	197.25	197.75
12#	1.4	0.6~1.0	2.28	199.51	199.40

对铸坯的低倍样进行了评级,同时刨削取样进行 C、S 偏析分析。采用轻压下后,铸坯的中心偏析基本上都有了一定程度地改善。在压下区间固相率为 0.2~0.5 时,压下速率为 1.2 mm/m,C、S 中心偏析最大只有 1.05、1.10,远低于没有采用轻压下试样的 1.30、1.85。

3.2 辊缝控制效果检验

测量了以上试验的铸坯厚度(辊缝值),与设定值做对比,结果如表 1 所示。由于扇形段的变形,实际辊缝几乎都大于设定值。但最大偏差不到 0.5

mm,辊缝控制处于理想的状态。这证明了所进行的扇形段变形补偿的准确性、重要性,否则辊缝偏差过大,得不到轻压下的效果。

4 结论

(1)所研发的动态轻压下系统,投产以来模型计算准确,设备性能稳定可靠,铸坯内部质量 C 级以上的达到 93%。

(2)通过 ANSYS 软件进行了模拟计算,找出了在不同受力情况下的扇形段变形情况。确定了轻压下过程中,扇形段 0.2~1.0 mm 的动态补偿量。

(3)实测铸坯厚度表明,铸坯厚度与设定值之差小于 0.5 mm。

(4)轻压下铸坯 C、S 中心偏析明显低于无轻压下铸坯,铸坯质量得到了明显的提高,说明整个辊缝控制状态良好。

参考文献

- Masaoka T, Mizuoka S, Kobayashi H, et al. Improvement of Centerline Segregation in Continuously Cast Slab with Soft Reduction Technique. Steelmaking Conference Proceeding, 1989; 63
- Kyung Shik Oh, Park J K, Kwon O D, et al. Development of Soft Reduction Technology for the Bloom Caster at Pohang Works of POSCO. Steelmaking Conference Proceedings, 1995; 301
- Dipankar Mojumdar, Prakash Chaudhari, Bruce Kozak. Optimization of Slabe Centerline Quality Using Dynamic Soft Reduction, ESSAR Steel, Hazira Gujarat India. AISTech 2007 Proceedings, Volume II: 209
- Richard E Fash, Peter J Vielkind, Daniel J Bederka, et al. Dynamic Machine Gap Control at the ISG Sparrows Point No. 1 Caster. Iron & Steel Technology, May 2005; 229
- 蔡开科. 连续铸钢原理与工艺. 北京:冶金工业出版社, 1994
- 李进. 板坯辊列设计的粘弹性梁模型. 2007 年钢铁年会论文集; 556
- 刘战英. 轧钢. 北京:冶金工业出版社, 1995

谢长川(1976-),男,博士生,连铸新技术。

收稿日期:2009-04-21