

## 中厚钢板侧弯的形成原因分析

胡贤磊<sup>1</sup>, 赵忠<sup>1</sup>, 刘相华<sup>1</sup>, 王国栋<sup>1</sup>, 阎智平<sup>2</sup>

(1. 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(东北大学), 辽宁 沈阳 110004; 2. 首钢集团中厚板厂, 北京 100043)

**摘要:** 基于4辊中厚板轧机, 分析了坯料楔形、温度分布不均匀、轧机两侧刚度存在差异、推床对不正、轧辊辊形和APC及AGC方式对中厚板侧弯的影响, 得知温度分布不均匀、推床对不正和轧辊辊形对侧弯影响较大, 是今后控制侧弯的重要因素。这些分析对今后侧弯的控制方法提供一定的理论依据。通过首钢中厚板厂的应用实践, 上述分析得到很好验证。

**关键词:** 中厚板; 侧弯; 对中; 辊形

**中图分类号:** TG335.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0449-749X(2006)04-0056-06

## Analysis of Formation Reasons of Plate Camber

HU Xian-lei<sup>1</sup>, ZHAO Zhong<sup>1</sup>, LIU Xiang-hua<sup>1</sup>, WANG Guo-dong<sup>1</sup>, YAN Zhi-ping<sup>2</sup>

(1. The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, Liaoning, China; 2. Shougang Plate Plant, Beijing 100043, China)

**Abstract:** For 4-high plate rolling mill, the influence of slab wedge, temperature uniformity along width direction, rigidity difference, side-guide alignment, roll profile, APC(automatic position control) and AGC(automatic gauge control) on plate camber was analyzed. The results show that temperature uniformity along width direction, side-guide alignment, roll profile are main influencing factors. The analysis affords theoretical base for camber control. Application in Shougang Plate Mill has proved the analysis is effective.

**Key words:** plate; camber; alignment; roll profile

侧弯现象在中厚板轧制过程比较常见, 它对轧制过程的稳定性危害极大, 轻则造成边部切损过大, 降低成材率, 重则出现废品或损害推床等设备。造成侧弯的因素很多, 如坯料楔形、坯料宽度方向温度分布不均匀、轧机两侧刚度存在差异、推床不对中和辊形不合理等。即使操作人员在轧制过程中反复调节轧辊两侧倾斜量, 但这种调节在某些情况下不是一直有效。目前针对侧弯的检测仪表和自动控制设备比较少, 而且造价昂贵, 所以需要针对这种现状分析中厚板的侧弯形成原因, 为提出合理有效的控制方法创造理论基础。

### 1 侧弯形成原因

常见的侧弯形成原因有: ①坯料楔形; ②坯料宽度方向温度分布不均匀; ③轧机两侧刚度存在差异; ④推床不对中; ⑤轧辊辊形; ⑥APC和AGC控制方法。以上影响因素不是单一作用在钢板上, 一般是多种影响因素同时作用于钢板上。

#### 1.1 坯料楔形的影响

坯料楔形对侧弯的影响, 可以通过图1表示。

由于坯料楔形造成钢板两侧压下量不一样, 从而轧机两侧弹跳不一样, 使得钢板两侧出口厚度不一致, 随着钢板长度的增加, 这种现象越来越明显。但实际上坯料楔形对侧弯的影响非常小, 这可以通过下面的分析得到解释。

假定坯料楔形造成的两侧入口厚度差为 $dH$ , 则该差值对出口厚度的影响通过图2的 $P-H$ 曲线可以显示出来<sup>[1]</sup>。图2中曲线 $A_1$ 为轧件塑性曲线, 其塑性系数为 $M$ , 轧机的弹跳曲线为 $B_1$ , 其刚度系数为 $K$ (这里为简化起见, 把轧件塑性曲线和轧机弹跳曲线当成直线处理), 轧件入口厚度为 $H$ 。假设入口厚度发生微小偏差时, 其塑性曲线的斜率不变, 根据推导可以得出出口厚度差 $dh$ 与入口厚度差 $dH$ 之间的关系。

$$dh = h_1 - h = \frac{M}{K + M} \cdot dH \quad (1)$$

分析中厚板轧制过程: 中厚板轧制可以看成是多个轧制道次组成的轧制序列, 每相邻两个轧制道次之间有一定的间隔时间。前几个道次轧件的塑性系数较小, 一般为轧机刚度的 $1/8 \sim 1/6$ , 假设对第一道次的坯料楔形不作任何辊缝调节, 则第一个道

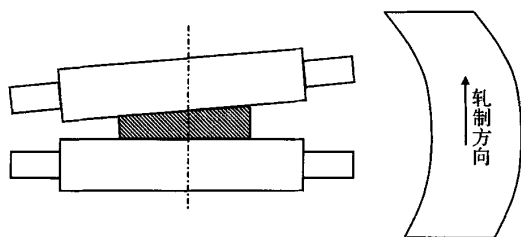


图1 坯料楔形对侧弯的影响

Fig. 1 Influence of slab wedge on plate camber

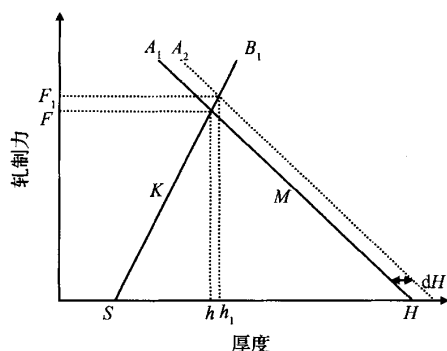


图2 入口厚度波动对出口厚度的影响

Fig. 2 Influence of entry gauge deviation on exit gauge

次的入口厚度差在3个道次后造成的出口厚度偏差为:

$$dh_3 = \frac{M_1}{K + M_1} \cdot \frac{M_2}{K + M_2} \cdot \frac{M_3}{K + M_3} \cdot dH \quad (2)$$

由于中厚板一般需要进行展宽轧制和延伸轧制,假设展宽轧制阶段,钢板的塑性系数不超过轧机刚度的1/8,坯料宽度方向的楔形,在展宽阶段经过2个道次其厚度差小于初始厚度差的1/60,基本可以忽略。同样,坯料长度方向的楔形,在延伸阶段可以消除。所以坯料楔形对中厚板的侧弯影响很小,可以忽略。而最终成品头部形成一个尖角。

## 1.2 温度分布不均对侧弯的影响

温度分布不均匀的危害比坯料楔形要大,因为温度分布不均匀存在于每个道次,即这种影响因素对侧弯的干扰不随道次增加而衰减。

假定坯料楔形造成的两侧温度差为dT,则该差值对出口厚度的影响通过图3的P-H曲线可以显示出来。假设入口温度差对应的塑性系数差为dM时,根据推导可以得出出口厚度差dh与dM之间的关系。

$$dh = h_1 - h = \frac{F_1 - F}{K} =$$

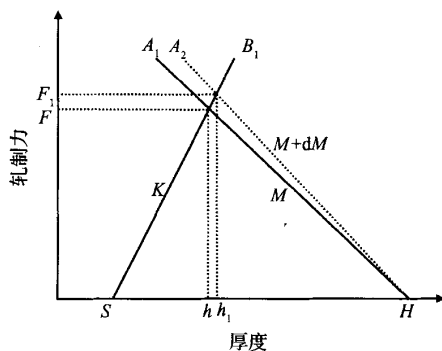


图3 入口温度偏差对出口厚度的影响

Fig. 3 Influence of entry temperature deviation along width direction on exit gauge

$$\frac{(M + dM)(H - h_1) - M(H - h)}{K} = \frac{dMH - dMh_1 - MdH}{K} \quad (3)$$

$$dh = \frac{dMH - dMh_1}{K + M} = \frac{dM \cdot (H - h_1)}{K + M} \approx \frac{dM \cdot (H - h)}{K + M} \quad (4)$$

在中厚板比较厚,温度较高时,轧件的塑性系数较小,dM也很小,但压下量较大,综合起来可知两侧出口厚度偏差较大,但是由于初期钢板较短,所以在轧制初期温度分布不均匀对侧弯影响较小;在轧制后期,轧件的塑性系数明显大于轧机刚度,但压下量较小,综合效果表现为两侧出口厚度偏差较小,但由于轧件较长,侧弯的危害加大。假定轧机刚度为10000 kN/mm,坯料尺寸为220 mm×1400 mm×2550 mm,成品尺寸为16.0 mm×2350 mm×20888 mm,根据表1的轧制规程可知,钢板宽度方向的温度差造成的侧弯只能在转钢后发生作用,假定各道次的温度差造成的塑性系数差值为塑性系数的5%,则第5道次的厚度差约为0.05×1515×23.1/(10000+1515)=0.152 mm,第15道次的厚度差约为0.05×11692×1.3/(10000+11692)=0.035 mm。同时温度差造成的影响会累计,所以多个道次的累计会造成侧弯现象越来越大,虽然轧机本身对坯料侧弯具备一定的消除功能,但是随着钢板长度的增加,侧弯的影响越来越大。另外温度分布不均匀对最终产品的厚度差影响较大,直接影响成材率,所以必须加强对烧钢的控制,从源头上杜绝坯料温度分布不均匀。总体而言温差对侧弯的影响可以通过调整轧辊倾斜进行消除。

表 1 16 mm 钢板轧制规程  
Table 1 Rolling schedule of finished 16 mm plate

道次	厚度/ mm	辊缝/ mm	压下量/ mm	宽度/ mm	凸度/ mm	温度/ ℃	轧制力/ MN	变形抗力/ MPa	塑性系数/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	力矩/ (kN·m)	速度/ (r·min <sup>-1</sup> )	状态
1	195.7	195.0	23.9	2572	0.33	1050	25.5	82	1067	2824	40	除鳞
2	171.8	170.8	23.9	2572	0.38	1049	28.3	90	1184	3136	40	
3	147.9	146.6	23.9	2572	0.42	1044	30.8	96	1288	3412	40	
4	124.0	122.4	23.9	2572	0.47	1041	33.8	103	1414	3744	40	转钢
5	101.0	99.2	23.1	2500	0.50	1036	35.0	108	1515	3808	40	除鳞
6	79.0	76.6	22.0	2500	0.58	1030	40.0	120	1818	4245	40	
7	62.3	60.3	16.7	2500	0.53	1020	37.3	124	2234	3542	40	
8	49.6	47.8	12.7	2500	0.51	1001	35.7	133	2811	2885	50	
9	40.0	38.4	9.6	2500	0.46	989	32.9	136	3427	2315	50	
10	32.5	30.9	7.5	2500	0.45	935	33.5	151	4467	2075	50	
11	26.5	24.6	6.0	2500	0.46	922	36.0	174	6000	1999	50	
12	21.7	19.8	4.8	2500	0.43	907	36.0	186	7500	1789	50	
13	19.1	18.2	2.7	2500	0.36	876	26.1	188	9667	965	50	
14	17.2	17.1	1.8	2500	0.30	861	20.0	178	11111	610	50	
15	16.0	15.8	1.3	2500	0.24	843	15.2	168	11692		50	

1.3 轧机刚度差异对侧弯的影响

轧机在制造过程中,会通过各种工艺技术保证两侧牌坊刚度的一致,但大部分轧机两侧刚度还是存在一定的差异,这个差值决定于制造工艺,一般情况新建轧机的刚度差值较小。

轧机两侧刚度不一样,于是两边牌坊及零件的弹性变形不再相等,从而两个轧辊轴线不再平行,这就造成钢板两边压下率不相等,从而钢板两边出口厚度不相等。

如图 4,假设轧机刚度分别为  $k_1, k_2$ , 在轧制力

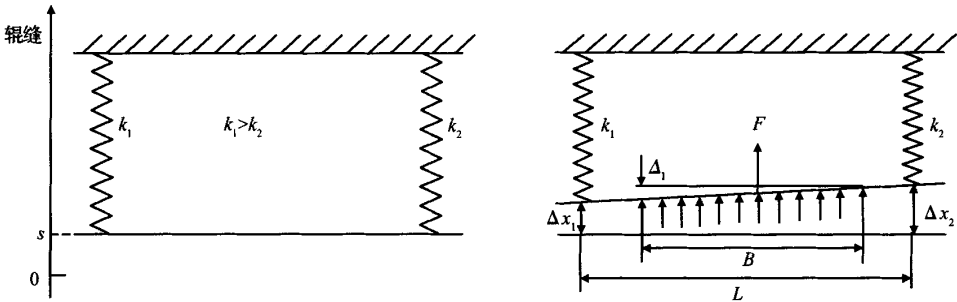
为  $F$  时,轧辊发生倾斜,造成钢板两侧产生  $\Delta_1$  的偏差。式(5)和(6)是力平衡方程和力矩平衡方程:

$$F = k_1 \Delta x_1 + k_2 \Delta x_2, \Delta x_2 = \Delta x_1 + \Delta_1 \frac{L}{B} \quad (5)$$

$$F \frac{L}{2} = k_2 \Delta x_2 L \quad (6)$$

$$\Delta_1 = \frac{(k_2 - k_1) \Delta x_1}{k_1} \cdot \frac{B}{L} \quad (7)$$

式中,  $\Delta x_1, \Delta x_2$  是轧机两侧的弹性变形。假设轧机刚度差异是单侧刚度的 5% 左右,钢板宽度是压下螺丝中心距的 1/2,轧机弹跳为 4 mm 左右,则由公



$k_1$ —驱动侧轧机刚度;  $k_2$ —非驱动侧轧机刚度;  $s$ —设定辊缝;  
 $F$ —轧制力;  $B$ —轧件宽度;  $L$ —压下丝杠中心距

图 4 轧机两侧刚度差异对侧弯的影响

Fig. 4 Influence of mill rigidity difference on plate chamber

式(7)可得钢板两侧出口厚度差为 0.1 mm。这个数量级对侧弯的影响较小,在钢板长度不是很长的情况下可以忽略。另外刚度差对侧弯的影响可以通过调整侧弯进行消除。所以在轧机两侧刚度相差较小时,可以不考虑轧制过程轧机两侧刚度对侧弯的影响。

#### 1.4 推床对中不正对侧弯的影响

推床对中不正或轧制过程不进行对中操作,都会造成侧弯。假定工作辊辊形凸度为 0 时,如果钢板由轧制中心线偏移  $a$  的距离,如图 5 所示,轧辊两端轴承上所受的力不再相等,于是两边牌坊及零件的弹性变形不再相等,从而两个轧辊轴线不再平行,这就造成钢板两边压下率不相等,从而钢板两边出口厚度不相等。

由图 5 可以求出钢板偏移  $a$  的距离而引起的钢板两边厚度的差值  $\Delta_1$  为<sup>[2]</sup>:

$$\Delta_1 = \frac{4FaB}{L^2K} \quad (8)$$

式中, $F$  是轧制力; $B$  是钢板宽度; $L$  是两压下螺丝轴线中心距; $K$  是轧机刚度。

如果轧制力为 30 000 kN,轧机刚度为 10 000 kN,钢板宽 2500 mm, $L$  等于 4800 mm,则钢板两边厚度差与钢板偏移量的关系如图 6 所示。由轧制原理可知,压下率增加,将使金属出辊速度增加而进辊速度减小。则压下较大的一边出辊速度较大而进辊速度较小,使钢板出现侧弯,向着压下较小的那边继续偏移。同时咬入端轧件会向压下较小的那边发生偏移,所以因为不对中造成的钢板偏移产生的轧辊倾斜在轧制过程中具有自动扩大的趋势。另一方面虽对中使得两侧厚度差不大,但  $a$  值的不确定使得钢板侧弯方向不定,这容易造成误调节。如果前后推床对中偏差方向相反,则侧弯的弯向更难确定,且轧辊倾斜调整会加剧侧弯的影响。所以对中不好对侧弯影响非常大。

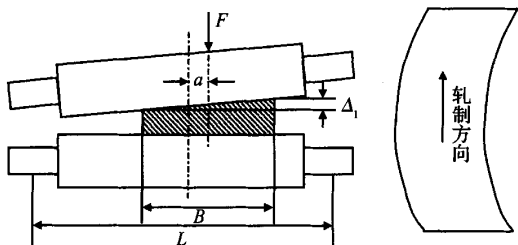


图5 推床不对中对侧弯的影响  
Fig. 5 Influence of misalignment of side guide on plate chamber

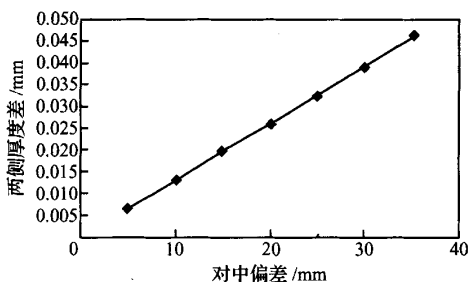


图6 对中偏差与两侧厚度差的关系

Fig. 6 Relationship of thickness difference and misalignment

#### 1.5 有载辊形对侧弯的影响

有载辊形对侧弯的影响是基于推床不对中得出的。图 7(a)表示工作辊有载凸度等于 0 时,只要钢板偏移轧辊中心线,则根据 1.4 节的分析,钢板会出现侧弯<sup>[2]</sup>,而且这种侧弯随着轧制的进行会自动扩大。图 7(b)表示工作辊有载凸度等于负凸度时(将两个轧辊的凸度合并到下工作辊,而保持上工作辊凸度等于 0),虽然钢板偏移轧辊中心线造成的钢板两边厚度的差值等于  $\Delta_1$ ,但是工作辊负凸度会使得钢板两侧厚度差值减小  $\Delta_2$ ,显然这两种作用能够互相抵消。如果  $\Delta_2 > \Delta_1$ ,钢板具有自动定心作用。通过推导可以得出,在钢板偏移量很小时,钢板能够自动定心所必需的最小挠度值为:

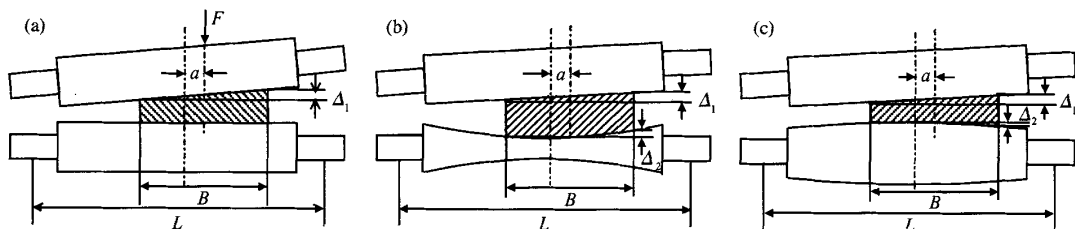
$$y = \frac{FB^2}{KL^2} + y_0 + y_T + y_w \quad (9)$$

式中, $y$  为轧辊挠曲量; $y_0$  是初始辊形; $y_T$  是轧辊热凸度; $y_w$  是轧辊磨损量。

图 7(c)表示工作辊有载凸度等于正凸度时(将 2 个轧辊的凸度合并到下工作辊,而保持上工作辊凸度等于 0),钢板偏移轧辊中心线造成的钢板两边厚度的差值等于  $\Delta_1$ ,工作辊正凸度会使得钢板两侧厚度差值继续增加  $\Delta_2$ ,这在一定程度上加剧钢板侧弯的效果。所以轧辊的配辊对轧制稳定性影响很大,目前许多中厚板厂家忽略配辊,直接用平辊进行轧制,这时很容易造成侧弯,而且这种侧弯的走向非常随机,人工很难通过轧辊倾斜进行调节。

#### 1.6 APC 和 AGC 对侧弯的影响

APC 控制方式分为电动 APC 和液压 APC,其作用是在轧制过程中维持设定辊缝不变,但咬入瞬间压下螺丝会发生少量的回缩,电动 APC 不能补偿该回缩量,而液压 APC 可以对该回缩量进行补偿,所以从本质上看,两者没有什么区别,对侧弯没有主动影响。



(a) 工作辊有载凸度为 0; (b) 工作辊有载凸度为负凸度; (c) 工作辊有载凸度为正凸度

图 7 有载辊形对侧弯的影响

Fig. 7 Influence of roll profile on plate chamber

AGC 对侧弯的影响可以从 2 个方面分析:①两侧伺服阀和液压系统的特性不一样,造成 AGC 调整过程中,两侧压下动作不同步,这对侧弯有一定影响,这个缺陷可以通过 PLC 程序强制压下动作同步来解决;②AGC 调整过程可以对两侧辊缝分别进行调节,如果不依靠侧弯检测设备,仅仅依靠两侧轧制力实测值分别调节两侧辊缝值,很容易造成误调节,如果在 AGC 调整辊缝时保持轧辊倾斜量不变,则这个问题可以得到克服。

## 2 应用实例分析

根据以上分析针对首钢中厚板厂 3500 mm 轧机进行研究。通过长期跟踪发现,在换辊以后的一段时间内,侧弯现象比较严重,而在轧辊中后期,侧弯现象明显好转。且发生侧弯时,一般出现弯向不定的特点,给操作人员的人工干预带来很大困扰。根据 1.5 节的分析可知,有载辊形对侧弯影响较大,如果辊形选择不好,容易出现侧弯且弯向不定。首钢中厚板厂目前换辊采用平辊,这样由于热凸度的影响以及压紧缸的作用,换辊初期,工作辊有载辊形为正凸度,这对轧制稳定性是非常不利的(图 8 是根据首钢中厚板轧机参数得到的工作辊有载凸度和工作辊原始凸度(支承辊凸度为 0)的关系),而在轧制中后期,随着轧辊磨损的增加,工作辊有载辊形逐渐向负凸度发展,改善了轧制稳定性。

同时通过测量,发现轧机前后推床的对中存在一定偏差:机前对中向轧制中心线左偏 150 mm,而机后对中向轧制中心线右偏 20 mm,根据 1.4 节的分析,中对对轧制稳定性影响也较大,特别是该轧机前后中对偏向不一致,加剧了弯向不定的现象。根据以上分析,该厂采用如下对策:①换辊时,上工作辊采用一定的负凸度;②严格对中对装置进行标定,使得对中与轧制中心线的偏差在 10 mm 以内;③加

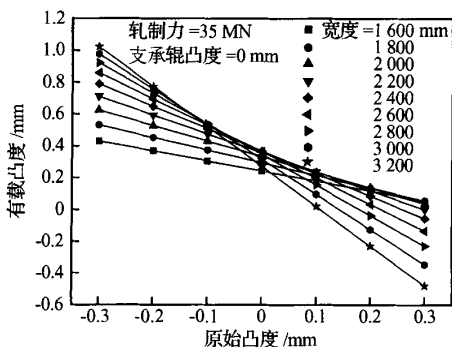


图 8 有载凸度与辊形的关系

Fig. 8 Relationship of roll crown with load and roll profile

强加热炉烧钢控制,避免出现钢温分布不均匀。通过以上 3 条措施,该厂的侧弯现象基本得到好转,产品的成材率有了一定提高。

## 3 结论

(1) 坯料楔形对侧弯的影响较小,宽度方向的楔形通过展宽轧制,基本上可以消除,长度方向的楔形,通过延伸轧制也可以基本消除。

(2) 坯料宽度方向温度分布不均匀只对延伸阶段的轧制起作用,但是它始终影响延伸阶段各道次,随着钢板厚度的减小,它对侧弯的影响越来越大,考虑各个道次侧弯的累计效应,温度分布不均匀对侧弯的影响较大;另外温度分布不均匀对最终产品的厚度差影响较大,直接影响成材率,所以必须加强对烧钢的控制,从源头上杜绝坯料温度分布不均匀。

(3) 新建轧机刚度差异较小,所以在一般情况下,轧机刚度差异对侧弯的影响较小,可以不予考虑;可以通过调整轧辊倾斜消除刚度差异对侧弯的影响。

(4) 推床对中对不正对两侧出口厚度差值的影响

可以用公式  $\Delta_1 = \frac{4FaB}{L^2K}$  来表示,如果轧制力越大,偏移量越大,轧机刚度越小,则产生侧弯的可能性越大。如果前后推床对中偏差方向相反,则侧弯的弯向更难确定,且轧辊倾斜调整会加剧侧弯的影响。所以需要对推床的安装精度给予足够重视,并在轧制过程中精心操作,避免不对中轧钢。

(5) 辊形对侧弯的影响很大,如果有载辊形为负凸度,当该负凸度达到一定数值时,钢板具有自动定心作用,这对侧弯的控制非常有利。如果有载辊形为正凸度,则钢板出现侧弯的可能急剧增加,且容易造成弯向不定,如果能够将工作辊上辊磨成负凸度,则有利于侧弯控制。

(上接第 35 页)

质耐火材料及合适的烘烤制度,结晶器电磁搅拌电流应为 300~400 A,浸入式水口插入深度 $\geq 120$  mm。

(2) 提高连铸钢水纯净度,降低钢水氢含量,可以减少铸坯夹渣。因此,应优化 LF 精炼工艺,控制最佳底吹氩搅拌强度及稳定 LF 结束时的软吹时间。

(3) 在合金结构钢的钙处理时, 加入量多将严重侵蚀塞头、水口等耐火材料, 成为产生铸坯夹渣的又一主要原因。故钙处理时, 应严格限制 Si-Ca 的加入量。

(4) 钢中气体特别是氢含量高时,铸坯易产生渣气孔缺陷,是铸坯夹渣形成的新观点。

(6) APC 对侧弯没有影响, AGC 对侧弯的影响有两方面, 两侧伺服阀和液压系统特性不一样造成两侧压下动作不一致, 单纯依靠轧制力实测值分别调节两侧辊缝值, 则两方面问题都可以通过程序进行克服。

### 参考文献:

- [1] 胡贤磊. 中厚板轧机过程模型的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2003. (HU Xian-lei. Process Control Models for Plate Mill [D]. Shenyang: Northeastern University, 2003.)
- [2] 王廷溥. 金属塑性加工理论—轧制理论与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988. (WANG Ting-pu. Metal Plastic Deformation Theory-Rolling Theory and Technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988.)

### 参考文献:

- [1] 迟景灏. 连铸保护渣[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993. 49. (CHI Jing-hao. Mould Powder of Continuous Casting[M]. Shenyang, Northeastern University Press, 1993. 49.)
- [2] 王雅贞. 连续铸钢工艺及设备[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999. 78.
- [3] 毛 斌. 方坯连铸电磁搅拌技术的若干问题[J]. 连铸, 1999, (5): 36-42. (MAO Bin. Problems About Electromagnetic Stirring on Billet[J]. Continuous Casting, 1999, (5): 36-42.)
- [4] 马国军. 连铸结晶器电磁搅拌对夹杂物的影响[J]. 云南冶金, 2000, 29(2): 50-53. (MA Guo-jun. Effect of Electromagnetic Stirring in Continuous Casting Mold on Inclusion[J]. Yunnan Metallurgy, 2000, 29(2): 50-53.)
- [5] 李庆春. 铸件形成理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987. 187.