

热轧带钢短行程控制优化的研究与实践

吴建峰¹, 王国栋²

(1. 宝钢股份有限公司研究院, 上海 201900; 2. 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110006)

摘 要: 短行程控制是热轧粗轧调宽过程中改善带钢端部形状、减少成材率损失的主要方法, 而宝钢某热轧机组采用的传统的折线式短行程控制效果较差。采用刚塑性有限元法建立了立轧/平轧三维热应力耦合有限元模型, 对粗轧机组轧制过程进行了全过程模拟, 模拟结果得到实物验证。根据有限元模拟得到的带钢头尾失宽曲线, 运用多项式插值原理, 建立了短行程多项式模型, 实际使用后提高了轧线成材率。

关键词: 热轧; 调宽; 短行程; 有限元; 多项式

中图分类号: TG335 **文献标识码:** A **文章编号:** 0449-749X(2008)08-0044-05

Study and Practice of Optimizing Short Stroke Control of Strip Hot Rolling

WU Jian-feng¹, WANG Guo-dong²

(1. Baosteel Ltd. Co., Shanghai 201900, China; 2. Northeastern University, Shenyang 110006, Liaoning, China)

Abstract: Short Stroke Control(SSC) is the main method to optimize the shape of strip ends and reduce metal loss in hot roughing, but the traditional broken line SSC model was not effective enough at Baosteel. A 3D thermal-mechanical coupling Finite Element Method (FEM) model for edging and horizontal rolling was established, and used to investigate the total roughing process, the results were validated by practice. Using polynomial theory, a polynomial SSC model was established according to the curves of width deviation of the strip head and tail through FEM simulation, the production results showed that the yield has been largely improved since adoption of this model.

Key words: hot rolling; edge rolling; SSC; FEM; polynomial equation

当前, 在热连轧生产中提高成材率是一个重要的研究课题。在热轧板带粗轧过程中, 采用大立辊侧压调宽技术, 可以减轻连铸机在线调宽量和减少板坯的宽度种类。但是, 立辊轧机的大侧压引起板坯头、尾在相当大的长度范围内宽度不合格。为了不影响后续加工过程, 在进入精轧前, 这些不合格部分必须用飞剪加以切除, 从而造成切头切尾损失, 降低了主轧线的带钢成材率。通常, 较为有效的控制头尾部切损的方法是在轧制过程中对带钢头尾实施短行程控制^[1~4]。但是, 现用的折线式短行程控制效果较差, 同时由于立辊和水平辊交替轧制变形非常复杂, 很难用传统的优化方法来优化短行程控制曲线, 因此在实际生产中只能根据经验选取短行程曲线。

研究表明, 在热带钢粗轧机组中, 立轧引起的板坯变形不均匀是影响产品宽度精度和成材率的主要因素。在国内外, 许多专家学者^[5~10]都就该问题进行了多种不同程度的研究。本文针对宝钢某热轧粗

轧机组的实际轧制条件, 利用刚塑性有限元法, 建立了立辊/平辊带钢头尾轧制三维热应力耦合有限元模型, 并有效地模拟了该粗轧机组的轧制过程。

1 刚塑性有限元建模与模型验证

立辊/平辊轧制过程模型如图 1 所示, 该模型充分考虑了带钢温度分布对轧制过程的影响, 还实现了立辊的动态浮动侧压进 SSC。

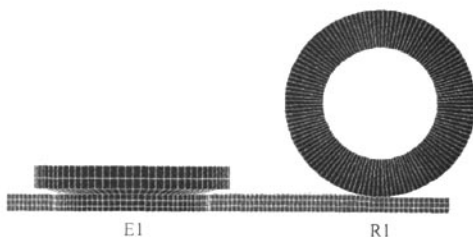


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite Element Model

选取宝钢某粗轧机组现场轧制 3207401600 号钢的轧制条件进行有限元模拟。现场粗轧段共轧 8 个道次,模拟得到出口的带钢尾部形状如图 2 所示。

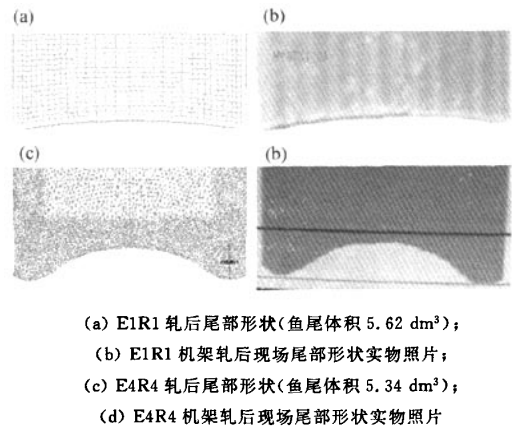


图 2 带钢尾部形状仿真结果与实际照片比较
Fig. 2 Comparison between the measured and calculated tail shapes

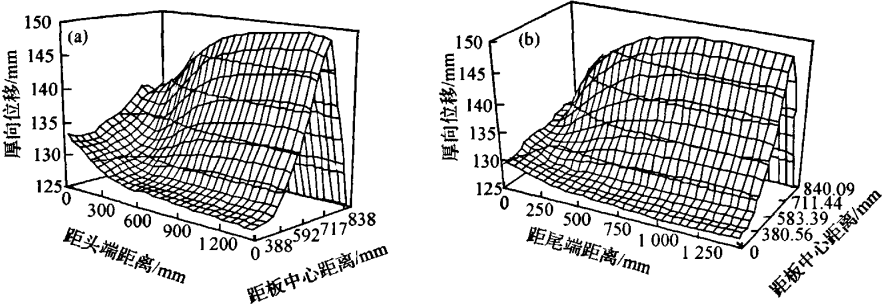
从图 2 中尾部形状的模拟结果与现场照片比较看,仿真结果与实际轧制吻合良好。计算尾部切损量可知,第一道次切损量约为 5.6183 dm³,比粗轧

区出口处的切损量还要大 5.3444 dm³,这表明后面的轧制道次对最终切损量起到了减小作用,同时可知控制好第一道次的尾部切损量可以大大减小粗轧区出口切损量。

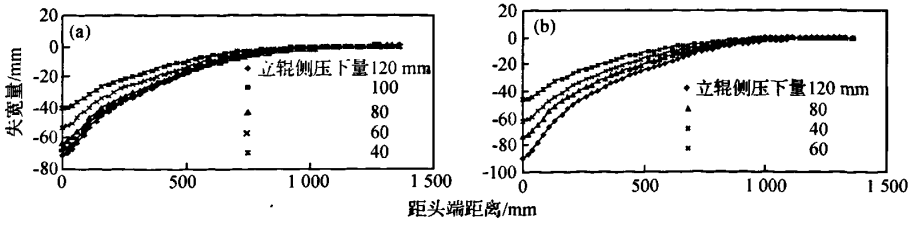
2 带钢头尾端失宽

从立辊轧制变形机理可知,由于板坯的宽厚比较大,立辊侧压变形属高件变形,所以变形主要集中于板宽边部的局部区域,而很难深入到轧件中间部分。此时,变形区内存在一个刚性区,导致边部延伸大,中间延伸小,甚至无延伸。从而也造成轧件侧面隆起而形成双鼓形,即端面呈“狗骨”状。沿轧制方向看,最大“狗骨”高度从轧件头尾向中间段逐渐增加,并达到稳定状态。这是因为立轧时,板坯头尾部没有约束,金属沿轧制方向的流动相对容易。而在中间稳定段,因前后刚端的作用,致使金属在轧件宽度方向流动受阻,边部聚集而局部增厚。图 3 形象给出了 E1R1 有限元模拟得到带钢头尾部狗骨高分分布规律,所采用轧制参数为板宽 1800 mm、侧压下量 120 mm。

图 4、5 给出了 E1R1 立轧/平轧后带钢头尾部失宽曲线与侧压下量的变化曲线。带钢的入口厚度为 254.8 mm,水平辊压下量为 30 mm。

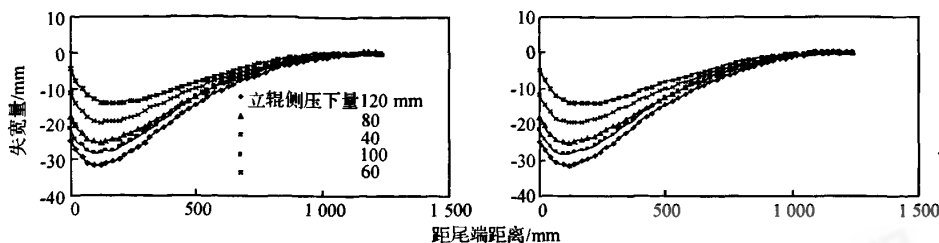


(a) 立轧后带钢头部厚向位移分布; (b) 立轧后带钢尾部厚向位移分布
图 3 带钢头尾部立轧狗骨分布
Fig. 3 Dog bone shape after edging



(a) 板宽 1500 mm; (b) 板宽 1800 mm
图 4 带钢头部失宽分布(无 SSC)

Fig. 4 Width reduction of strip head without SSC



(a) 板宽1500 mm; (b) 板宽1800 mm

图 5 带钢尾部失宽分布(无 SSC)

Fig. 5 Width reduction of the strip tail without SSC

带钢头尾失宽机理不尽相同。头部宽度失宽主要是由于立辊轧制造成边部和中心金属在纵向延伸不均匀。头部失宽量在立轧后就已经存在,再加上头部狗骨小,水平轧制所引起的宽展较小,对先前的失宽不能及时给予弥补,从而进一步增大了头部失宽量。尾部失宽则是由于立辊在靠近尾端处轧制时所形成的狗骨小,故随后的水平轧制宽展量也很小。从图 4、5 中的头尾部失宽曲线可以看出,失宽量随板宽增大、侧压下量的增大而增加;失宽长度随板宽的增大而增加,而与侧压下量的关系不大。

3 SSC 多项式模型

3.1 关于 SSC 轨迹的问题

为了提高 SSC 的精度,必须使控制曲线更加符合带钢头尾的轧制变形情况,为此,用多项式曲线代替目前的折线模型,其控制曲线设计为 4 次多项式,为如下的表达式:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^4 \quad (1)$$

对于不同的道次,采用不同的 SSC 数据。另外对于头尾的不同,所使用的控制曲线也不同,分别定义 a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 。此外还需定义头尾使用 SSC 的长度 l 。

3.2 多项式插值原理

所谓多项式插值问题就是采用多项式函数对给定的数据点进行插值运算,即给定 $(x_i, y_i) (i=0, 1, \dots, n)$, 要构造多项式函数 $y = P(x)$, 使得 $y_i = P(x_i) (i=0, 1, \dots, n)^{[11]}$ 。

为了与 2 段折线模型的控制效果进行比较,同时使控制机构的动作相对简单一些,使用两次多项式进行控制研究。

给定 3 个数据点 $P(x_0, y_0), P(x_1, y_1)$ 和 $P(x_2, y_2)$, 要构造 1 个 2 次多项式函数 $y = P_2(x)$,

使得 $y_i = P_2(x_i) (i=0, 1, 2)$, 这里设 $x_0 < x_1 < x_2$, 容易求得

$$y = y_0 \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} + y_1 \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} + y_2 \frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} \quad (2)$$

因为求解过程是唯一的,所以上式是插值 $P_i (i=0, 1, 2)$ 的二次多项式函数 $P_2(x)$, 也是唯一的。这是一条抛物线,所以也称为抛物线插值多项式。

3.3 SSC 的多项式模型

$$y = a_0 + a_1 \cdot (l-x) + a_2 \cdot (l-x)^2 \quad (3)$$

$$a_0 = f_1(S_{SP})$$

$$a_1 = f_2(S_{11}, S_{12}, S_{SP}, L_{11}, L_{12})$$

$$a_2 = f_3(S_{11}, S_{12}, S_{SP}, L_{11}, L_{12})$$

$$l = f_4(L_{11})$$

式中, x 为 SSC 控制点距离端部的长度, mm; l 为 SSC 总长度, mm; y 为 x 对应点的立辊 SSC 开度, mm, 当 $x > l$ 时, $y = 0$; S_{SP} 为立辊静态开口度, mm; S_{11} 为 SSC 第 1 段的开度, mm; S_{12} 为 SSC 第 2 段的开度, mm; L_{11} 为 SSC 总长度, mm; L_{12} 为 SSC 中间点距离端部的长度, mm。

利用有限元模拟得到的带钢头尾部失宽曲线,结合宝钢现场实际,得到如下计算公式。

短行程调整长度计算模型:

$$L_{11} = 5.8695 \cdot W_0^{0.6681} \cdot d_e^{0.0615} \quad (4)$$

$$L_{12} = 0.5 \cdot L_{11} \quad (5)$$

短行程开度模型:

第一段:

$$S_{11} = 1.7075 \cdot 10^{-1} \cdot W_0^{1.6803} \cdot d_e^{0.5634} \quad (6)$$

第二段:

$$S_{12} = 28.9841 \cdot W_0^{-0.6595} \cdot S_{11} \quad (7)$$

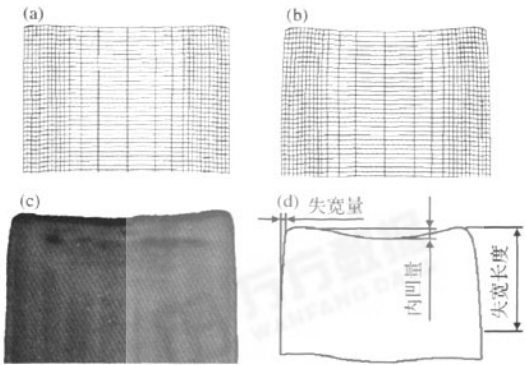
式中, W_0 为立辊入口板宽; d_e 为宽度压下量。

3.4 新老模型仿真比较

以宽度压下 120 mm,厚度压下 30 mm 的轧制工艺,分别利用新模型和老模型进行短行程控制,对宽 1800 mm,厚 254.8 mm 的原始板材进行模拟轧制,带钢头部形状结果如图 6 所示。对比图 6(a)、(b)、(c)可知,一方面使用老模型计算的头部形状与实拍图片吻合很好,另一方面,当采用新控制模型后,所计算的头部失宽长度明显得到减小。为了定量表示两种模型在控制带钢形状方面的差别,图 6(d)给出了用于衡量带钢形状优劣的参数示意图。由于尾部形状的控制原理与头部的基本相同,因此表征尾部形状优劣的参数值可以参照头部。表 1 为头尾形状各具体参数的对比值。理论上讲失宽长度、失宽量和内凹量越小,带材的头尾切损越小。由此可知新模型更好地改善了轧制过程中带钢不必要的头尾损耗。

3.5 应用效果

SSC 的多项式模型控制已在该热轧过程机上实现,表 2 给出了实施前后的成材率统计,图 7 给出了其直方图比较,其中实施后 3 月份的成材率明显偏低是由于轧线年修的缘故。实际轧制结果表明,其功能完全符合要求,并且使主轧线的年平均成材率由 98.15%提高到 98.26%,平均提高了 0.11%,按照当年的产量可产生经济效益近千万元。



(a) 新模型计算结果; (b) 老模型计算结果;
(c) 实拍头部图片(老模型); (d) 参数示意图

图 6 头部形状
Fig. 6 Head shape

表 1 头尾部形状计算比较
Table 1 Comparison of calculated head and tail shapes

项目		失宽长度/mm	失宽量/mm	内凹量/mm
头部	新模型	830	10	20.5
	老模型	1020	68	36.3
尾部	新模型	800	11	83.4
	老模型	810	42	86.2

表 2 SSC 模型实施前后主轧线成材率数据统计

Table 2 Statistics of metal yield before and after adoption of SSC model %

项目	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	平均
实施前	98.02	98.03	98.12	98.15	98.18	98.10	98.13	98.28	98.14	98.24	98.15	98.23	98.15
实施后	98.39	98.38	97.80	98.38	98.42	98.25	98.26	98.24	98.31	98.29	98.40	97.98	98.26

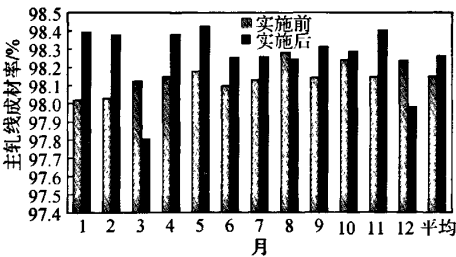


图 7 SSC 模型实施前后主轧线成材率比较
Fig. 7 Comparison of metal yield before and after adoption of SSC model

4 结论

(1) 采用刚塑性有限元建立粗轧区轧制的三维

热应力耦合有限元模型。针对宝钢实际轧制工艺和钢种模拟了粗轧区的全过程,计算得到的尾部形状与实际结果吻合良好,验证了模型的有效性。

(2) 给出多道次轧制后的带钢尾部鱼尾的切损量分布,并得出第一道次轧制对带钢切损量的影响最大。

(3) 利用有限元模拟得到的带钢头尾部失宽曲线,结合多项式插值原理,建立了 SSC 多项式控制模型。仿真比较和实际使用均表明,SSC 多项式模型要优于折线模型,明显提高了轧线成材率。

参考文献:

[1] 付江,赵以相,贺毓辛.板坯大侧压调宽变形的模拟研究[J].宝钢技术,1993,41(2):44.
[2] 日本钢铁协会.板带轧制理论与实践[M].王国栋,吴国良,

- 译. 北京:铁道出版社,1992.181.
- [3] 阿部英夫. ホット粗圧延における伴うクロップロス低減法[J]. 塑性と加工, 1984, 277(25):87.
- [4] Fassel A, Liegeon E, Siener P, et al. Reduction of Crop-Losses by Optimal Setting of the Roughing Stands in a Hot Strip Mill[A]. Proc. ICSTIS[C]. 1980. 252.
- [5] Nikaido H, Naoi T, Shibata K, et al. FEM Simulation of Nonsteady Deformation in Edge Rolling[J]. J. Jap Soc. Tech. Plasticity, 1983, 24(268):486.
- [6] 孙本荣, 王有铭, 陈 瑛. 中厚钢板生产[M]. 北京:冶金工业出版社,1993.8.
- [7] 熊尚武, 吕 程, 刘相华, 等. 立轧非稳态过程的三维刚塑性有限元分析[J]. 东北大学学报, 1999, 20(6):647. (XIONG Shang-wu, LU Cheng, LIU Xiang-hua, et al. Simulation of Unsteady-State Dimensional Rigid-Plastic Finite Edging Process by Full Three-Element Method[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 1999, 20(6):647.)
- [8] 熊尚武, 刘相华, 韩 力, 等. 粗轧机组调宽轧制技术与减少切损的方法[J]. 钢铁, 1994, 29(12):75. (XIONG Shang-wu, LIU Xiang-hua, HAN Li, et al. Slab Width Reduction Technology in Roughing Trains of Hot Strip Mills and Methods for Improvement of Crop Loss[J]. Iron and Steel, 1994, 29(12):75.)
- [9] 吕 程, 朱洪涛, 王国栋, 等. 利用遗传算法优化板坯立轧短行程控制曲线[J]. 钢铁研究学报, 1998, 10(5):19. (LÜ Cheng, ZHU Hong-tao, WANG Guo-dong, et al. Optimization of the Curve of Short Stroke Control in Slab Edging by Genetic Algorithm[J]. Journal of Iron and Steel Research, 1998, 10(5):19.)
- [10] 刘太中, 周旭东, 刘相华, 等. 热连轧粗轧短行程控制全程优化[J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(4):52. (LIU Tai-zhong, ZHOU Xu-dong, LIU Xiang-hua, et al. Optimization of Short Stroke Control for Rough Rolling on Hot Strip Mill[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2002, 14(4):52.)
- [11] 易大义, 蒋叔豪, 李有法. 数值方法[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,1984.14.

宝钢填补国内超高强度厚板制造空白

日前,一个令人振奋的消息从宝钢分公司厚板厂传来:代表国际顶尖水平的1400兆帕级超高强度厚板在宝钢试制成功。经检验,产品性能均达到工艺设计标准。至此,宝钢成功填补了国内在超高强度厚板制造领域的空白,成为全球极少数拥有该项生产技术的企业之一。

屈服强度大于1200 MPa、抗拉强度大于1400 MPa的钢铁产品被称为超高强度钢。1400 MPa级厚板是目前世界上强度最高的厚板产品,具有极高的强度、足够的韧性、良好的焊接性与成形性,被工程机械行业用来制造关键承力部件。由于成分设计与制造难度极高,能否生产这一强度等级的产品已成为跻身世界一流厚板厂的重要“筹码”之一。

随着国内机械制造业的迅猛发展,用户对工程机械用焊

接结构钢的强度提出了更高的要求,宝钢顺应发展潮流,针对用户需求,立志向世界最高强度等级的厚板发起挑战。2007年9月,在宝钢分公司厚板厂的策划、组织及研究院结构钢所和宝钢分公司制造部、炼钢厂、条钢厂,宝钢工业检测公司的通力配合下,1400兆帕级超高强度厚板的研制工作正式启动。在没有经验可借鉴的情况下,宝钢技术人员依靠自身力量,反复摸索钢种的成分配比,不断优化工艺参数。通过团队成员的共同努力,一些关键工艺参数逐渐“浮出水面”,化学成分设计也渐趋合理,并于2007年年底一举试制成功1300 MPa级高强度厚板。在此基础上,今年又通过调整化学成分及优化工艺参数,成功试制出抗拉强度达到1400 MPa的超高强度厚板。