试验研究

变截面钢板轧制应用研究

杜 平
（济南钢铁股份有限公司 宽厚板厂，山东 济南 250101）

摘 要：变截面轧制过程中厚度线性变化的LP钢板轧制过程中的辊缝为非线性变化，在综合考虑体积不变定律和限制条件的基础上，给出了不同类型LP钢板的形状设计方法。在变截面轧制过程中，采用多点动态设定方法，讨论了设定点的轧制参数计算方法。在济钢4 300 mm宽厚板轧机上进行了变截面钢板的形状设计、多点设定和轧制应用，得到10余种连续变厚度的LP钢板。

关键词：变截面；形状设计；多点设定；轧制参数
中图分类号：TG335.5 **文献标识码**：A **文章编号**：1004-4620(2012)01-0031-02

1 前 言

纵向变截面（Longitudinal Profiled，LP）钢板是在轧制过程中通过连续改变轧辊的开口度来改变纵向厚度的钢板，也称作楔形钢板[1-4]。LP钢板应用在桥梁和船体建设上，根据承受载荷的情况来采用不同形状的LP钢板，从而可优化桥梁、船体、建筑等结构断面的设计，不仅可以减少钢材的重量、减少焊接的次数，而且还可以通过连接处的等厚变化改善操作性，如省略垫板和锥度加工等[4-6]，是一种减量化、节约性的钢材。厚度线性变化的LP钢板轧制过程中的辊缝为非线性变化，本研究探讨LP钢板的形状设计、多点设定、参数设定等，并在宽厚板轧机上轧制应用，轧制10余种设计形状的LP钢板。

2 LP钢板形状设计

厚度变化方向LP钢板可以分为单向变厚度、双向变厚度和连续变厚度钢板。LP钢板的形状设计是根据客户的要求进行最终钢板尺寸计算、形状设计以及板坯尺寸计算。按照长度方向建立长度和厚度的二维坐标系（见图1），按照用户对长度和厚度变化的要求，沿长度方向将LP钢板分成$i-1$部分，第1个长度设定点为$l_1=0$，第i个长度设定点相对于坐标原点的长度为l_i，对应着i个厚度设定点h_i。对于第i部分，体积为：

$$V_i=(h_i+h_{i-1})\times(l_i-l_{i-1})/2。\quad(1)$$

LP钢板总的体积为：

$$\sum V=\sum V_i。\quad(2)$$

板坯体积计算公式：

$$V_{SLAB}=L_{SLAB}\times W_{SLAB}\times H_{SLAB},\quad(3)$$

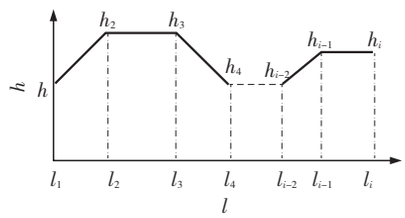

图1 LP钢板厚度变化示意图

其中L_{SLAB}、W_{SLAB}和H_{SLAB}分别为板坯的长度、宽度和厚度。LP钢板总的体积和板坯体积的关系为$\sum V=k\times V_{SLAB}$，其中k为系数，即切损量和成材率的影响系数。在计算板坯尺寸的过程中，考虑板坯厚度$H_{SLAB}>3\times h_{max}$，其中h_{max}为LP钢板沿长度方向的最大厚度，目标宽度$w>W_{SLAB}$，最大转钢厚度为$h_{turnmax}=W_{SLAB}\times H_{SLAB}/w$，同时符合轧制策略和生产过程中实际参数限制值，如轧制的最大宽度、轧制的最大长度、轧制最大厚度、楔形段的最大斜率等。

3 多点设定

常规普通钢板长度方向的厚度目标值固定不变，针对钢板头部进行单点静态设定即可满足控制和工艺要求[6]，但对于LP钢板的轧制过程，由于钢板的出口厚度是连续变化的，是轧制方向上的轧出长度和倾斜角的函数，与此相关的前滑、辊缝和轧制力等参数沿钢板轧制方向也是连续变化，因此轧制过程中针对不同厚度目标值和长度位置进行多点设定。多点设定的目的是让辊缝设定曲线最大可能地接近LP钢板设计目标形状所要求的辊缝。变厚度轧制设定点包括恒定厚度轧制段的起始点、结束点、中间设定点和连续变厚度楔形段起始点、结束点以及中间设定点，设定点间的辊缝连续非线性变化，轧制过程中辊缝需要进行动态变化调整。根据LP钢板最大厚度与最小厚度差值，LP钢板可以最后一道次进行变厚度轧制，也可以最后几道次进行变厚度轧制。基本流程见图2。

收稿日期：2011-09-01
作者简介：杜平，男，1980年生，2009年毕业于东北大学材料加工工程专业，博士。现为济钢宽厚板厂电气车间副主任，工程师，研究方向：轧钢、控冷工艺模型和过程自动化。

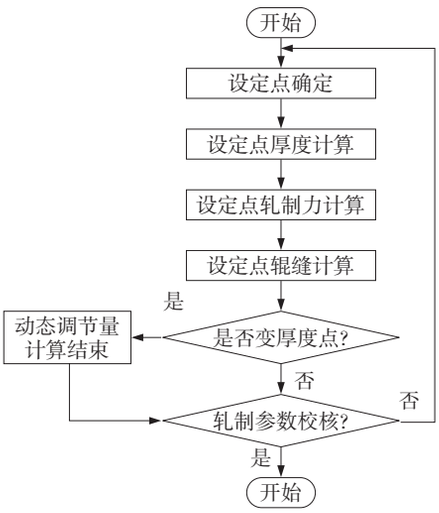

图2　多点设定基本流程

4　轧制参数设定

1)厚度。变厚度设定点确定后,要对每个设定点厚度、轧制力、辊缝和前滑等轧制参数进行计算。变截面轧制过程第i轧制道次,第j个的动态设定点厚度h_i,j是在j-1设定点的基础上,加上一个变厚度偏差$\Delta h_{i,j}$,$h_{i,j}=h_{0i}+\Delta h_{i,j}$。

2)轧制力。轧制力的计算采用如下公式:

$$F_{i,j}=\sigma_{fm}\times C_A\times A_{ci,j},$$

其中:$F_{i,j}$为i道次第j个设定点的轧制力,σ_{fm}为平均变形抗力,C_A为变形抗力形状函数,$A_{ci,j}$为接触面积。在变厚度轧制过程中,厚度$h_{i,j}$是连续变化的,则$A_{ci,j}$也是连续变化的,所以$F_{i,j}$随厚度变化。

3)辊缝。辊缝设定值根据弹跳方程计算,第j个设定点的厚度为$h_{i,j}$,对应的辊缝$S_{i,j}$为:

$$S_{i,j}=h_{i,j}+S_0-(F_{i,j}-F_0)/M+\Delta,$$

其中:S_0为调零辊缝,F_0为调零轧制力,M为轧机刚度,Δ为各种轧制补偿。第j个设定点相对于第j-1的厚度偏差为$\Delta h_{i,j}$,那么在轧制过程中第j个设定点相对于第j-1设定点缝隙的辊缝变化为:

$$\Delta S_{i,j}=h_{i,j}-h_{i,j-1}-(F_{i,j}-F_{i,j-1})/M。$$

4)轧制速度。第j和j-1个设定点间的厚度偏差为$\Delta h_{i,j}$,第j和j-1个设定点间的长度偏差为$\Delta l_{i,j}$,则第j和j-1设定点间的梯度$k_{i,j}=\Delta h_{i,j}/\Delta l_{i,j}$。

如果$k_{i,j}<\varepsilon$,则$v_{ij}=V_{stand}$;如果$k_{i,j}\geqslant\varepsilon$,则$v_{ij}=\min(V_{stand},V_{cylinder}/k_{i,j})$。其中$V_{stand}$为设定轧制速度,$V_{cylinder}$为液压缸压下速度。

5　轧制应用

在济钢宽厚板厂4 300 mm宽厚板轧机上进行LP钢板的轧制应用试验,钢种为Q345B,坯料尺寸为250 mm×2 000 mm×2 800 mm,成品目标宽度3 110 mm。成品为带有3个楔形段、3个普通轧制段的双向变厚度LP钢板,最大厚度55 mm,最小厚度30 mm,楔形深度25 mm,LP钢板总体积为1.4 m^3。根据公式(1)~(3),按照产品要求,设计的LP钢板的形状如图3所示。根据长度划分、厚度变化点,进行了7点设定,利用公式计算的长度、厚度、梯度和速度设定见表1。轧制规程为粗轧机成型1道次、粗轧机展宽3道次、粗轧机延伸2道次、精轧机延伸4道次。表2为精轧机延伸轧后4道次轧制规程,其中后3道次为变厚度轧制道次。

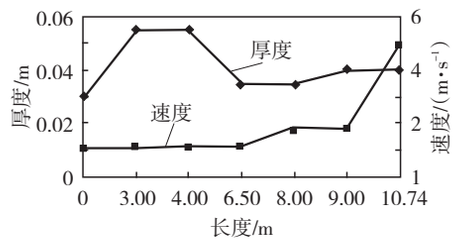

图3　设计的LP钢板形状

表1　LP钢板的设定点

设定点	长度间隔Δl/m	长度l/m	厚度h/m	体积V/m^3	梯度$\Delta h/\Delta l$	速度/(m·s^{-1})
1	0	0	0.030	0	0.008 3	1.080
2	3.0	3.0	0.055	0.397	0.008 3	1.080
3	1.0	4.0	0.055	0.171	0.008 0	1.125
4	2.5	6.5	0.035	0.350	0.008 0	1.125
5	1.5	8.0	0.035	0.163	0.005 0	1.800
6	1.0	9.0	0.040	0.117	0.005 0	1.800
7	1.7	10.7	0.040	0.202	0	5.000

表2　最后4道次的轧制规程和测量数据

道次(FM)	计算厚度/mm	辊缝/mm		轧制力/MN		转矩/kNm		速度/(m·s^{-1})	楔形最大深度/mm
		计算	实际	计算	实际	计算	实际		
1	85.36	83.89	83.59	47.27	49.67	2 860	2 730	3.04	0
2	61.83	59.18	59.09	53.38	54.54	2 968	2 787	-3.77	1.13
3	41.83	39.35	39.17	49.37	53.76	2 462	2 553	1.20	16.13
4	35.00	35.02	34.26	28.06	31.67	843	907	-1.11	25.00

图4为LP钢板轧制完成后设定厚度与测厚仪测量的实际厚度对比。结果表明,多点动态设定满足变截面轧制的要求,得到厚度连续变化的目标设计形状的变截面钢板,各段的实际测量厚度达到设定厚度要求。济钢宽厚板厂对LP钢板的形状设计、多点设定和轧制应用进行了深入研究,目前已经能生产出10余种单向、双向变厚度的LP钢板。

(下转第35页)

金相组织对比发现，压缩比为2时，与连铸坯轧制的钢板相比，电渣重熔钢轧制的钢板晶粒明显变细，这与原始铸态组织形貌不同有关。因此电渣重熔后轧制的钢板组织性能有了明显改善。

5 结　论

5.1　电渣重熔后的钢锭组织致密，没有明显的偏析、疏松，与连铸坯相比，基本消除了二次枝晶，金相组织明显细化，为采用小压缩比生产高性能厚钢板提供了保证。

5.2　Q235B和Q345R重熔后轧制的钢板屈服强度和抗拉强度都有所提高，同时电渣重熔工艺可以在一定程度上提高轧后钢板的塑性，断面收缩率分别提高1.7和1.9倍。

5.3　电渣重熔钢轧后更易形成比较细的组织，可以明显改善轧后特厚钢板的综合性能，在小压缩比轧制条件下更容易保证特厚板的性能要求。

参考文献：

[1]　李正邦.21世纪电渣冶金的展望[J].炼钢，2003，19(2)：6-12.

[2]　姜周华，李正邦.电渣冶金技术的最新发展趋势[J].特殊钢，2009，30(6)：10-13.

[3]　李正邦.21世纪电渣冶金的新进展[J].特殊钢,2004，25(5)：1-5.

[4]　崔风平，孙玮，刘彦春，等.中厚板生产与质量控制[M].北京：冶金工业出版社，2008.

[5]　姜周华.电渣冶金的物理化学及传输现象[M].沈阳：东北大学出版社，2000.

Structures and Properties of Continuously Casting Slabs, the ESR Ingots and the Heavy Plates Rolled by Them

YIN Shi-you, MENG Chun-guang

(The Technology Centre of Jinan Iron and Steel Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: Making Q235B and Q345R as examples, this article analyzed the internal qualities of the continuously casting slabs and the ESR ingots. And then, in the condition of laboratory, they were rolled into heavy plates by low reduction ratio and 6 passes. It researched the microstructure and properties of the heavy plates. The results showed that ESR process improved the internal qualities, eliminated the segregations and porosities, refined the microstructure, and increased the yield strengths, tensile strengths and the percentage reductions of area for 1.7 times and 1.9 times.

Key words: continuously casting slab; electroslag remelting (ESR) steel; heavy plate; property

(上接第32页)

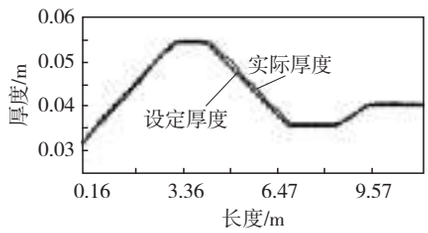

图4　LP钢板心部设定厚度与实际厚度比较

6 结　论

6.1　线性变化的LP钢板轧制过程中的辊缝为非线性变化；在综合考虑体积不变定律和限制条件的基础上，给出了不同类型LP钢板的形状设计方法。

6.2　在变截面轧制过程中，采用多点动态设定方法，讨论了设定点厚度、轧制力、辊缝、速度等轧制参数计算方法。

6.3　在济钢4 300 mm宽厚板轧机上进行了变截面钢板的形状设计、多点设定和轧制应用，实际测量厚度达到设定厚度要求，实现了变截面钢板工业轧制应用。

参考文献：

[1]　弓削佳德，堀紀文，西田俊一. LP鋼板(テーパープレート)の製造技術と船舶，桥梁への適用[J].川崎製鉄技报，1998，30(3)：137-141.

[2]　T Osamu，K Takeshi，A Keniti.Development of high performance steel plates in terms of reliability and economy of steel structure [J].Kawasaki Steel Giho，2000，32(3)：198-204.

[3]　邱红雷，胡贤磊，赵忠，等.中厚板轧制过程中的辊缝设定模型及其应用[J].钢铁，2004，39(12)：36-39.

[4]　张殿华，王君，李建平，等.中厚板平面形状计算机控制系统[J].钢铁，2000，35(5)：40-43.

[5]　杜平，胡贤磊，王君，等.变截面轧制过程的多点设定[J].钢铁研究学报，2009，21(11)：27-30.

[6]　杜平.纵向变厚度扁平材轧制理论与控制策略研究[D].沈阳：东北大学，2008.

Application Research for Variable Cross-section Rolling Process

DU Ping

(The Wide Thick Plate Plant of Jinan Iron and Steel Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: In the process of variable cross-section rolling, the gap of taper plate is non-linear. According to the law of constant volume and constraints, shape design method of different longitudinal profiled plate is given. In the process of variable cross-section rolling, multiple-point dynamic setup is adapted and calculated method of rolling parameters is discussed. More than ten kinds of LP plates is produced in Jinan Steel's 4 300 mm heavy plate line by use of shape design method and multiple-point dynamic setup.

Key words: variable cross-section; shape design; multiple-point setup; rolling parameters