

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20170591

连铸坯倒角对粗轧宽展的影响及宽度模型改进

苏 岚¹, 宋 勇², 郑永刚², 高志刚²

(1. 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心, 北京 100083; 2. 北京科技大学工程技术研究院, 北京 100083)

摘 要: 带倒角的结晶器能够改善连铸板坯角部在矫直段的高温延展性, 显著减少角横裂的发生。然而, 连铸坯的倒角对粗轧过程宽展量有很大影响。通过建立粗轧过程板坯形变的有限元仿真模型, 系统研究了轧制过程中板坯倒角尺寸和形状对轧件宽展量的影响。结果表明, 连铸坯倒角边长越大, 相同的立辊侧压量下所产生的狗骨回展量越小, 同时在水平轧制时所产生的自然宽展也越小, 而倒角角度的变化对粗轧宽展的影响不显著。针对现有的宽展公式没有考虑轧件存在倒角的问题, 给出了一个含有倒角参数的修正项公式。通过与现场实测数据和原宽度模型计算结果对比, 对于带倒角的连铸坯轧制情况, 修正后的宽展模型预报精度显著提高。

关键词: 连铸坯倒角; 有限元模型; 宽展模型; 粗轧

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)06-0070-06

Influence of slab chamfer on spread and improvement of width control model in rough rolling

SU Lan¹, SONG Yong², ZHENG Yong-gang², GAO Zhi-gang²

(1. Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Institute of Engineering Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The mould with chamfered corner can improve high temperature ductility at continuous casting slab corner in straightening section, and significantly reduce the occurrence of transverse crack. However, the chamfering of the continuous casting slab has a significant effect on the spread during rough rolling. The slab deformation finite element model of rough rolling process was used to study the influence of chamfering side length and shape on the spread during rough rolling. The results show that the larger the chamfering side length, the dog bone spread is smaller produced by the same width reduction, and the natural spread is smaller produced by the horizontal rolling. The chamfering angle had no significant effect on the spread. A modified formula with chamfering parameters was presented. The accuracy of the modified spread prediction model is improved obviously for the continuous casting slab with chamfered corners on base of the comparison with the measured value and the calculated value using the new original spread model.

Key words: slab with chamfered corner; finite element model; spread model; rough rolling

由于在连铸弯曲或矫直区域, 微合金钢连铸坯的角部温度无法避开高温脆性区, 极易产生角部横裂纹, 从而导致轧后板带表面边角部时有烂边缺陷发生。采用带倒角的结晶器能够提高铸坯角部温度, 改善其在矫直段的高温延展性, 显著减少微合金钢连铸坯角横裂的发生^[1-4]。与传统的连铸坯离线修磨方法相比, 该技术能够有效降低劳动强度和生产成本, 目前已经在多条热轧生产线上取得了实际应用^[5-10]。

然而, 连铸坯的倒角对轧制变形时的金属流动, 尤其是轧件宽展量有很大影响。目前绝大多数

控制系统的宽度模型中并没有考虑连铸坯的倒角参数, 虽然通过模型自学习系数能够对预报精度进行一定的自适应补偿, 但当生产来料中出现倒角坯和直角坯混轧或者板坯倒角尺寸形状变化的情况时, 将会造成宽度模型的自学习系数混乱, 导致带钢宽度的控制偏差波动大, 严重影响产品的合格率和成材率。

为此, 本文以某钢厂 2 250 mm 热连轧粗轧过程为研究对象, 建立粗轧过程板坯形变有限元仿真模型, 系统研究轧制过程中板坯倒角形状和尺寸对轧件宽展量的影响, 并最终建立能够考虑倒角影响的

基金项目: 科技部创新方法工作专项资助项目(2016IM010300)

作者简介: 苏 岚(1973—), 女, 博士, 工程师; **E-mail:** sulan@ustb.edu.cn; **收稿日期:** 2017-12-08

宽度预报模型,提高轧材宽度控制精度。

1 粗轧过程板坯形变有限元计算模型

某钢厂 2 250 mm 热连轧的粗轧区由一架两辊立轧机和一架四辊可逆式粗轧机组成,加热后的连铸坯经过 5~7 道次的往复轧制,轧制成 35~60 mm 的中间坯并经延迟辊道送入“热卷箱→飞剪→精轧机”区。

针对 2 250 mm 热连轧的粗轧过程,采用 DEFORM-3D 软件建立多道次轧制热力耦合有限元模型^[11-13],分析板坯在粗轧过程的形变规律。

1.1 几何模型

粗轧过程中三维有限元模型如图 1 所示。坐标系中的 x 轴方向为水平轧制时宽展方向, y 轴为水平轧制高度压下方向, z 轴为轧件轧制方向。轧辊变形与轧件变形相比小很多,所以假设轧辊为刚性体,轧件为变形体。水平辊直径取值为 1 200 mm,立辊直径取值为 1 100 mm。铸坯尺寸为 9 600 mm×2 000 mm×230 mm,为了缩短有限元分析求解时间,考虑轧制模型的几何对称性和载荷对称性,取板坯的 1/4 进行模拟,轧制变形区长度为 120 mm,为了消除头尾非稳定轧制的影响,板坯几何模型长度需大于 3 倍轧制变形区长度,这里板坯几何模型为 1 200 mm×1 000 mm×115 mm。

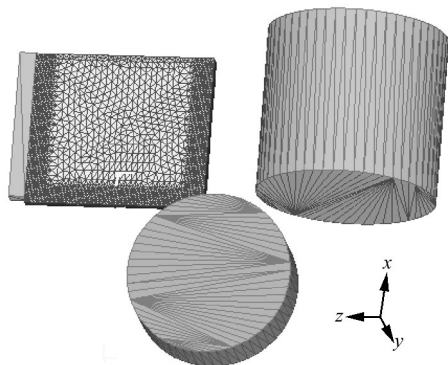


图 1 粗轧有限元模型

Fig. 1 Finite element model of rough rolling

倒角结晶器的倒角角度和倒角尺寸的选取主要是综合考虑连铸时角部钢液流动、角部温度与切向应力应变值,目前现场 230 mm 厚的板坯倒角结晶器的倒角角度选取 30°~45°,倒角边长选取 35~50 mm。为了研究倒角对宽展的影响,本文模型中选取倒角角度为 15°、30°、45°和 60°,倒角边长为 0 (没有倒角)、30、40 和 50 mm。

由于轧件宽度边部与立辊接触,且发生狗骨变

形主要在边部,对于此部分的单元采用局部网格细化,如图 1 所示。

1.2 物性参数

DEFORM-3D 软件的材料库包含 230 多种材料,在材料库中,对每一种支持的材料提供了轧制变形热力耦合计算所需的不同温度和应变率下材料流动应力应变曲线、膨胀系数、弹性模量、泊松比、热导率等随温度的变化曲线。本文模拟的钢种为 Q235B,对应的美国钢号为 AISI-1020,因此采用 DEFORM-3D 材料库中 AISI-1020 的本构模型,泊松比为 0.3。

1.3 初始条件与边界条件

现场高温计采集到粗轧开轧温度为 1 123 °C,将其作为本文有限元计算第一道次轧制初始温度。热轧粗轧属于高温轧制,轧件表面温度始终保持在 1 000 °C 以上,环境温度为 20 °C。轧件外表面赋予对流换热边界条件,对流换热系数定为 20 W/(m²·K),轧件与轧辊的接触换热系数取 5 kW/(m²·K)^[12],轧件与轧辊接触面上的摩擦采用剪切摩擦模型,摩擦因数取 0.5^[11]。轧制时变形功转化为热量,热功转换系数为 0.9。粗轧各道次的规程参数见表 1 (表中厚度、压下量已转换为热值)。

表 1 粗轧道次规程参数

Table 1 Rough rolling schedule						mm
道次	机架	入口厚度	出口厚度	压下(侧压)量	辊缝	
1	E1	233.88	233.88	27.65	2 051.3	
	R1	233.88	210.71	23.17	209.2	
2	R2	210.71	186.25	24.60	184.6	
3	E3	186.25	186.25	26.25	2 046.0	
	R3	186.25	151.19	35.19	148.4	
4	R4	151.19	117.38	33.40	114.3	
5	E5	117.58	117.58	15.63	2 035.6	
	R5	117.58	89.48	28.10	86.2	
6	R6	89.48	66.10	23.52	63.0	
7	E7	66.08	66.08	5.65	2 047.7	
	R7	66.08	46.62	19.46	43.7	

1.4 模型验证

将有限元计算出的轧件奇数道次出口宽度与现场出口测宽仪采集的宽度数据作对比,如图 2 所示。其中最大的宽度误差为 1.5 mm 左右,因此该有限元模型的仿真精度可以满足需要。

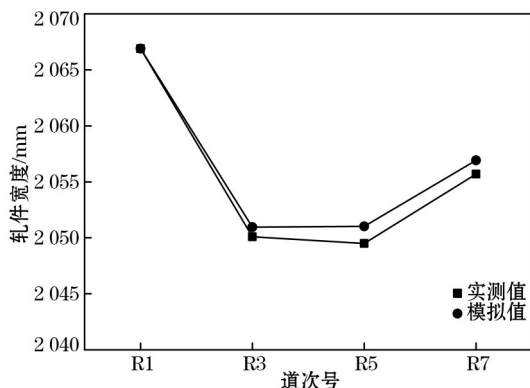


图2 有限元计算结果与实测值对比

Fig. 2 Comparison of finite element simulation results and measured values

2 倒角形状对轧制宽展的影响分析

在粗轧过程中, 轧件经过立辊侧压后再经水平辊压下轧制, 如图3所示。图中: w_e 为立辊侧压后板坯宽度, mm; h_b 为立辊侧压后狗骨凸起处板坯厚度, mm; w_f 为平辊轧制后板坯宽度, mm; h_f 为平辊轧制后板坯厚度, mm; Δw_b 为立辊侧压后形成的狗骨部分经过水平轧制后的狗骨回展量, mm; Δw_s 为轧件截面整体水平压下后的自然宽展量, mm。实际生产时, 立辊侧压和水平辊压下同时进行, 一般宽展公式分别计算 Δw_b 和 Δw_s , 总的宽展量是两者之和^[12]。为了定量分析板坯压下量和倒角尺寸、倒角角度对狗骨回展量和自然宽展量各自相对独立的影响规律, 需要在分析狗骨回展量时, 水平辊压下量设为0, 即水平辊只对立辊侧压后的轧件边部狗骨凸起部分进行压下; 在分析自然宽展量时, 立辊侧压量设为0, 即在水平辊轧制时轧件边部没有狗骨。

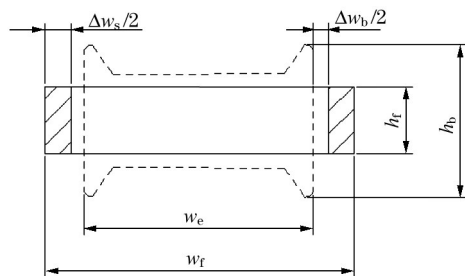


图3 粗轧过程中的展宽

Fig. 3 Spread during rough rolling

2.1 板坯倒角对狗骨回展量的影响

选取宽度为2 000 mm、厚度为230 mm的典型尺寸板坯, 倒角角度为45°, 倒角边长分别为0(没有倒角)、30、40、50 mm来研究倒角尺寸对狗骨回展量的影响, 如图4所示。

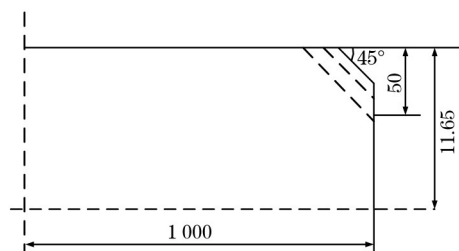


图4 板坯倒角尺寸

Fig. 4 Chamfer size of slab

立辊侧压量分别为10、20、30和40 mm, 水平辊压下量为0(水平辊只对立辊侧压后轧件边部的狗骨凸起部分进行压下), 侧压量和倒角尺寸对狗骨回展量的影响如图5所示。例如侧压量为40 mm时, 无倒角板坯狗骨回展量为23.0 mm, 倒角尺寸为30 mm的狗骨回展量为14.8 mm, 倒角尺寸为40 mm的狗骨回展量为11.4 mm, 倒角尺寸为50 mm的狗骨回展量为9.7 mm, 由此可以看出, 当侧压量一定时, 倒角尺寸越大, 狗骨回展量越小。而当倒角尺寸相同时, 狗骨回展量都是随着侧压量的增加而增加, 只是从图5的曲线斜率来看, 倒角坯狗骨回展量增加趋势比没有倒角的板坯稍缓一些。板坯倒角影响狗骨回展量的主要原因是由于倒角的存在造成侧压后轧件边部金属受挤压所隆起的狗骨较小, 如图6所示(其中倒角边长为40 mm), 而且倒角角度越大, 隆起的狗骨量越小。

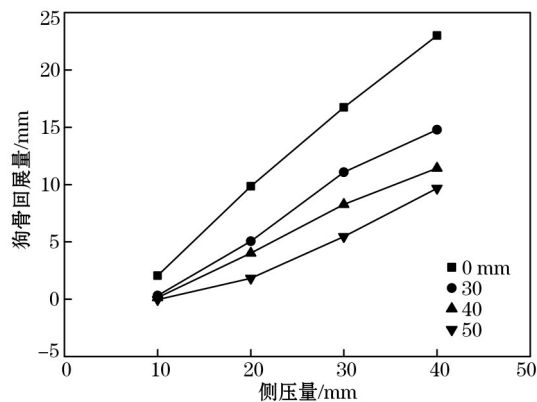


图5 侧压量和倒角尺寸对狗骨回展量的影响

Fig. 5 Influence of width reduction and chamfering side length on dog bone spread

当倒角边长恒定为40 mm时, 立辊侧压量为40 mm, 倒角角度分别为15°、30°、45°、60°时的狗骨回展量如图7所示。倒角角度15°时狗骨回展量为10.1 mm, 倒角角度60°时狗骨回展量为12.8 mm, 可以看出, 倒角角度增加, 狗骨回展量增加, 但是增加幅度不大。

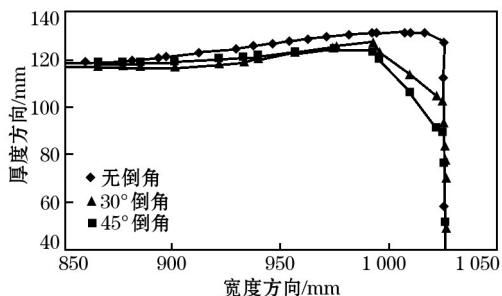


图 6 倒角角度对狗骨形状的影响

Fig. 6 Influence of chamfering angle on dog bone shape

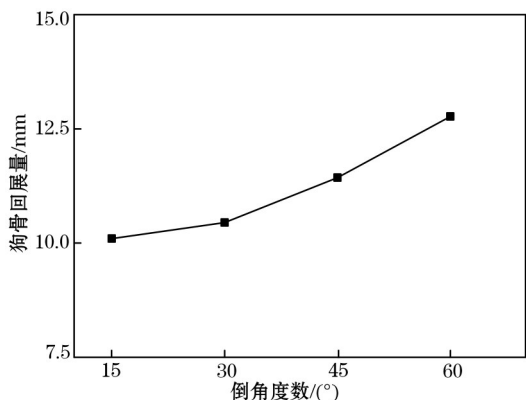


图 7 倒角角度对狗骨回展量的影响

Fig. 7 Influence of chamfering angle on dog bone spread

2.2 板坯倒角对自然宽展量的影响

选取图 4 所示的板坯倒角尺寸,直接经过压下量分别为 20、40、60、80 mm 的水平辊轧制后的轧件自然宽展量如图 8 所示。当水平压下量为 20 mm 时,无倒角板坯自然宽展量为 1.7 mm,倒角角度恒为 45° 时,倒角尺寸 30 mm 时板坯自然宽展量为 1.2 mm,倒角尺寸 50 mm 时板坯自然宽展量为 0.2 mm,无倒角板坯与倒角尺寸 50 mm 板坯自然宽展量的差值为 1.5 mm;当水平压下量为 80 mm 时,无倒角板坯自然宽展量为 28.3 mm,倒角尺寸 30 mm 板坯自然宽展量为 20.8 mm,倒角尺寸 50 mm 板坯自然宽展量为 17.2 mm,无倒角板坯与倒角尺寸 50 mm 板坯自然宽展量的差值为 11.1 mm。可以看出,在相同的压下量情况下,自然宽展量随着倒角尺寸的增加而减小,无倒角板坯与倒角板坯自然宽展量的差值随着水平压下量的增加而增加。

当倒角边长恒定为 40 mm 时,水平辊压下量为 40 mm,倒角角度分别取 15°、30°、45°、60° 时的自然宽展量如图 9 所示。倒角角度 15° 时自然宽展量为 5.0 mm,倒角角度 60° 时自然宽展量为 2.5 mm,两者之间的差值为 2.5 mm。可以看出,倒角尺寸相同的情况下,板坯倒角角度越大,自然宽展量越小,但板

坯倒角角度对自然宽展量的影响幅度小于倒角尺寸的影响。

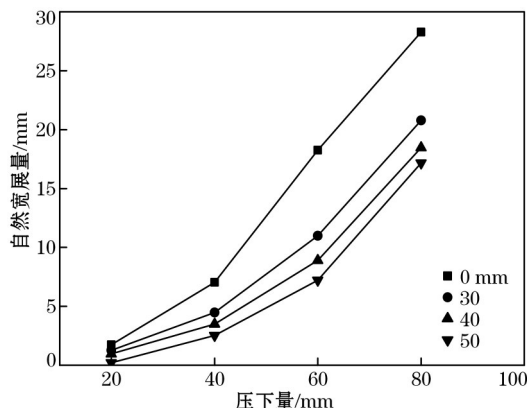


图 8 压下量和倒角尺寸对自然宽展的影响

Fig. 8 Influence of reduction and chamfering side length on natural spread

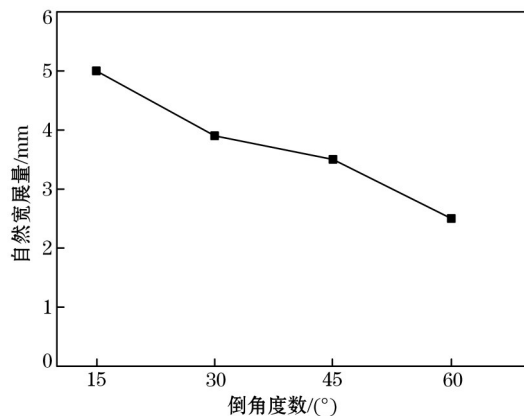


图 9 倒角形状对自然宽展的影响

Fig. 9 Influence of chamfering angle on natural spread

从以上分析可以看出,与无倒角板坯相比,在连铸合理的倒角尺寸和角度范围内,在同样的侧压量和平辊压下量下,连铸坯倒角尺寸越大,板坯狗骨回展量和自然宽展量越小,而倒角角度的变化对粗轧宽展的影响幅度明显小于倒角尺寸的影响。立辊侧压的调宽效率取决于立辊压下量与狗骨回展量的差值,采用倒角连铸坯不但能够减小铸坯角横裂缺陷,而且可以提高立辊侧压的调宽效率。前文提到从提高连铸坯角部质量出发,目前该厂 230 mm 厚的板坯倒角结晶器的倒角角度选取范围为 30°~45°,倒角边长选取范围为 35~50 mm,如果综合考虑粗轧阶段的调宽效率,建议 230 mm 厚的板坯倒角结晶器倒角边长选 50 mm,倒角角度仍然在 30°~45° 范围内选取。

3 宽展模型的修正

目前大多数控制系统中都是采用芝原(SHI-

BARHARA)公式预报热连轧粗轧过程的轧件宽展量^[14],其中自然宽展量的计算公式见式(1),几何参数 a 见式(2)。

$$\Delta w_s = w_c \left[\left(\frac{h_0}{h_f} \right)^a - 1 \right] \quad (1)$$

$$a = \exp \left[-1.64m^{0.376} \left(\frac{w_c}{L_c} \right)^{0.016m} \left(\frac{h_0}{R} \right)^{0.015m} \right] \quad (2)$$

式中: Δw_s 为轧件自然宽展量, mm; h_0 、 h_f 分别为轧件入口和出口厚度, mm; w_c 为水平辊的轧件入口宽度, mm; R 为水平轧制时的工作辊半径, mm; L_c 为轧制接触弧投影长度, $L_c = \sqrt{R \cdot (h_0 - h_f)}$, mm; m 为轧件的宽厚比, $m = \frac{w_c}{h_0}$ 。

狗骨回展量的计算公式见式(3),其中几何参数 b 见式(4)。

$$\Delta w_b = b d_c \left(1 + \frac{\Delta w_s}{w_c} \right) \quad (3)$$

$$b = \exp \left[-1.87 \left(\frac{d_c}{w_0} \right)^{0.063} \left(\frac{h_0}{R_c} \right)^{0.441} \left(\frac{R_c}{w_0} \right)^{0.989} \left(\frac{w_0}{w_c} \right)^{7.591} \right] \quad (4)$$

式中: Δw_b 为轧件狗骨回展量, mm; d_c 为立辊轧制时的侧压量, mm; R_c 为立辊半径, mm; w_0 为立辊入口的轧件宽度, mm。

以上模型公式都只是针对无倒角坯轧制的情况,为了能准确预报倒角坯轧制时的宽展,需要分别对上述公式进行修正。

3.1 考虑倒角参数的宽展公式

本文采用在芝原公式的基础上增加一个倒角影响宽展量的修正项来预报板坯倒角在粗轧过程中的宽展。

利用之前所建立的有限元模型,通过模拟不同板坯尺寸、倒角尺寸、倒角角度、侧压量、压下量等条件下倒角板坯粗轧变形过程,得到各种倒角参数和轧制条件下的自然宽展量和狗骨回展量。同时利用芝原公式计算出无倒角坯在相同轧制条件下的自然宽展量和狗骨回展量,从而可得出各种倒角坯在不同轧制条件下采用芝原公式预测宽展时所需要的修正量。

通过分析压下量(相对压下量)、厚度(宽厚比)、倒角尺寸与厚度比值、倒角角度的正弦值分别与宽展修正量之间的曲线形式,可分别得到这些参数之间的回归函数项,并采用 1stOpt 数学分析软件进行非线性回归分析和优化,最终得出倒角坯自然宽展计算公式见式(5),倒角坯自然宽展修正量

$\Delta w_s'$ 见式(6)。

$$\Delta w_s = w_c \left[\left(\frac{h_0}{h_f} \right)^a - 1 \right] - \Delta w_s' \quad (5)$$

$$\Delta w_s' = a_1 \left[\left(\frac{w_c}{2h_0} \right)^{a_2 \left(\frac{h_0}{h_f} \right)^{a_3} \left(\frac{l}{h_0} \right)^{a_4} (\tan \theta)^{a_5}} - 1 \right] \quad (6)$$

式中: l 为倒角边长度, mm; θ 为倒角角度, (°); $a_1 \sim a_5$ 为回归系数。

同理,考虑倒角参数的狗骨回展计算公式见式(7),倒角坯狗骨回展修正量 $\Delta w_b'$ 见式(8)。

$$\Delta w_b = b d_c \left(1 + \frac{\Delta w_s}{w_c} \right) - \Delta w_b' \quad (7)$$

$$\Delta w_b' = b_1 d_c \left\{ \exp \left[b_2 \left(\frac{w_0}{h_0} \right)^{b_3} \left(\frac{l}{h_0} \right)^{b_4} (\tan \theta)^{b_5} \right] - 1 \right\} \quad (8)$$

式中: $b_1 \sim b_5$ 为回归系数。

3.2 多道次轧制情况下的倒角尺寸变化

在实际控制系统中,采用上述修正公式需要知道倒角的边长和角度,对于第一道次轧制,可以从连铸传来的板坯信息中得到。从有限元仿真结果可知,经过第一道次轧制后,板坯的倒角一般不会消失,因此在后续轧制道次中仍然需要采用修正公式预报轧制宽展。图 10 所示为 7 个道次轧制过程中的轧件倒角变化情况。

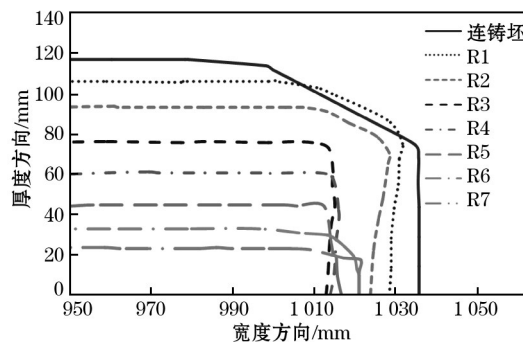


图 10 多道次轧制下的倒角变化情况

Fig. 10 Change of chamfer shape during different pass

从图中可以看出,连铸坯在前 3 个道次轧制过程中,倒角的角度基本没变,而倒角的边长由于压下变形的作用逐渐变小。因此,在后续道次的宽展计算中,轧件倒角参数可按下面方法取值,见式(9)和式(10)。

$$l_{n+1} = \begin{cases} l_n - (h_0 - h_f), & l_n \geq h_0 - h_f \\ 0, & l_n < h_0 - h_f \end{cases} \quad (9)$$

$$\theta_{n+1} = \theta_n \quad (10)$$

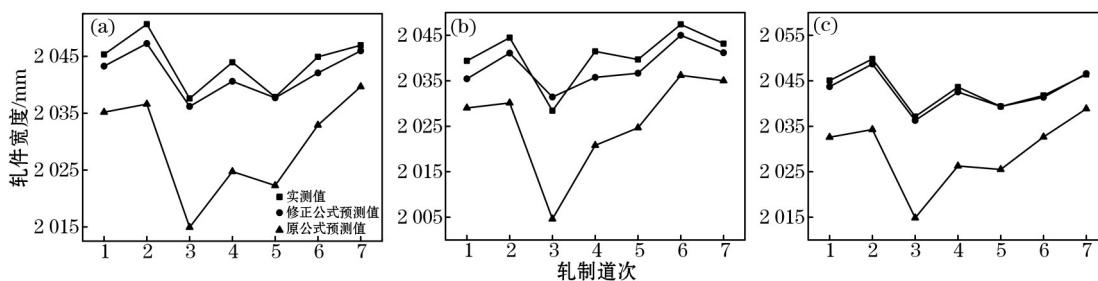
式中: n 为粗轧轧制道次号, $n=0$ 时表示粗轧前的

连铸坯状态。

3.3 模型验证

采用现场采集的粗轧过程参数,通过将原来的宽展模型和修正后的宽展模型的计算结果数值与现场采集实测的数据进行对比,来验证宽度修正模型的精确性与可行性。图 11 所示为 3 块倒角连铸坯的轧制宽度实测值以及原模型和修正模型的预测值。从对

比结果可以看出,对于倒角连铸坯轧制来说,采用原宽展公式预报的轧件宽度值与现场实测宽度值的差值为 7.3~23.8 mm,最后一道次的宽度差值为 7.3~8.1 mm;而采用修正后的宽展计算公式预报的轧件宽度值与现场实测宽度值的差值为 0.01~5.70 mm,最后一道次的宽度差值为 -0.2~1.9 mm,说明修正后的宽展计算公式预报精度比原公式有显著提升。



(a) 第 1 块板坯; (b) 第 2 块板坯; (c) 第 3 块板坯。

图 11 轧件宽度实测值与修正公式计算值、原公式计算值的对比

Fig. 11 Comparison of calculated value using modified formula, original formula and measured values

4 结论

(1) 在目前连铸工艺允许的倒角尺寸范围内,增加连铸坯的倒角尺寸能有效减少粗轧过程的狗骨回展量和自然宽展量,提高粗轧的调宽效率,其中当倒角角度取 45°、侧压量为 40 mm、水平压下量为 20 mm 时,倒角边长为 50 mm 的板坯的狗骨回展量是无倒角板坯的 40% 左右,综合宽展量减少了 14.8 mm。而倒角角度对调宽效率的影响则不显著,其余条件相同情况下,倒角角度从 15° 增加到 60° 时,综合宽展量只增加了 0.2 mm。

(2) 通过在现有的芝原宽展公式中增加一个含倒角参数的修正项,综合考虑倒角尺寸、倒角角度、板坯尺寸和压下量对轧件宽展的影响,建立了倒角板坯宽展计算公式。对于多道次轧制,倒角边长可由前一道次的轧件倒角边长减去该道次水平压下量得到。

(3) 通过对比现场宽度实测值与两个宽展公式预报值发现,采用原宽展公式最后一道次的预报宽度和实测宽度间的误差为 7.3~8.1 mm,采用修正后的宽展公式最后一道次的预报宽度和实测宽度间的误差为 -0.2~1.9 mm,宽展公式预报精度明显提高。

参考文献:

[1] 杨春政. 典型微合金化钢板坯角部横裂纹产生机理与倒角结晶器技术研究[D]. 上海: 上海大学, 2011. (YANG Chun-zheng. Study on the Mechanism of Transverse Cracks in Typi-

cal Microalloyed Steel Slab and the Technology of Chamfering Mold[D]. Shanghai: Shanghai University, 2011.)

- [2] 雷松, 曾珊, 阎建武, 等. 板坯连铸倒角结晶器的开发与试验应用[J]. 钢铁技术, 2015(3): 16. (LEI Song, ZENG Shan, YAN Jian-wu, et al. Development and application of slab continuous casting chamfering mold[J]. Journal of Iron and Steel Technology, 2015(3): 16.)
- [3] 何宇明, 胡兵, 周宏, 等. 宽厚连铸板坯角部裂纹控制技术开发[J]. 钢铁, 2016, 51(7): 34. (HE Yu-ming, HU Bing, ZHOU Hong, et al. Development of corner crack control technology for continuous casting strand of wide-thick plate[J]. Iron and Steel, 2016, 51(7): 34.)
- [4] 刘延强, 尹世超, 王雷川, 等. 板坯角横裂成因及控制措施[J]. 中国冶金, 2016, 26(11): 58. (LIU Yan-qiang, YIN Shi-chao, WANG Lei-chuan, et al. Formation reasons and counter-measures of transverse corner cracks in continuous casting slabs[J]. China Metallurgy, 2016, 26(11): 58.)
- [5] 张丽丽, 马威, 刘国梁, 等. 迁钢倒角结晶器技术开发及应用[J]. 世界金属导报, 2016-05-31(B07). (ZHANG Li-li, MA Wei, LIU Guo-liang, et al. Development and application of chamfering technology for moving steel in Qian'an steel mills[J]. World Metal Herald, 2016-05-31(B07).)
- [6] 李俊伟, 杨新泉, 唐树平, 等. 倒角结晶器在武钢板坯连铸中的应用[C]//第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集 II. 上海: 中国金属学会, 宝钢集团有限公司, 2015: 5. (LI Jun-wei, YANG Xin-quan, TANG Shu-ping, et al. Application of chamfering mold in Wuhan Iron and Steel slab continuous casting[C]//The 10th China Iron and Steel Annual Conference and the 6th Baosteel Academic Annual Conference Proceedings II. Shanghai: The Chinese Society for Metals, Baosteel Group Ltd., 2015: 5.)

(下转第 84 页)