

20 辊轧机轧制宽幅工业纯钛带的变形行为研究

周冠禹¹, 何安瑞¹, 刘超¹, 周明伟², 秦剑², 刘正乔²

(1. 北京科技大学, 北京 100083)

(2. 湖南湘投金天钛金属股份有限公司, 湖南 长沙 410006)

摘要: 基于 ABAQUS 有限元软件, 考虑了钛金属的各向异性力学特点, 建立了可实现工作辊与轧件动态轧制过程的 20 辊轧机辊系-轧件一体化模型, 并利用实际轧制数据对模型计算精度进行了验证。同时, 利用该模型对 20 辊轧机轧制宽幅工业纯钛带的单一以及组合板形调控特性进行了仿真研究。结果表明: 支承辊 1#与 7#、2#与 6#对称位置分段压下与一中间锥辊窜辊组合调节时, 随着窜辊量的增加, 距边部 75~300 mm 区域厚度减薄最为显著, 将导致或加剧该区域的二肋浪形; 3#与 5#、4#对称位置分段压下与一中间锥辊窜辊组合调节后, 对缓解二肋浪形具有一定作用; 此外, 还发现一中间锥辊窜辊调节无法解决二肋浪形问题。最后, 结合 20 辊轧机板形调控特性, 提出了一种能够减小二肋浪形区的压应力的分段压下组合方案, 工业实验证明分段压下组合方案实施后二肋浪形区压应力下降 60%, 有效缓解了 20 辊轧机轧制宽幅钛带时的二肋浪形缺陷及程度。

关键词: 森吉米尔 20 辊轧机; 宽幅工业纯钛带; 二肋浪形; 有限元; 板形调节特性

中图分类号: TG335.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-185X(2020)07-2333-07

钛及钛合金具有密度小、比强度高、耐高温、耐腐蚀、无磁性等诸多优点, 广泛应用于航空航天、核能、石油、化工、医疗等领域, 已成为重要的战略金属材料, 被誉为“未来金属”^[1-3]。钛的各向异性显著, 轧制变形困难, 用普通两辊及四辊轧机难以进行钛薄带材的轧制^[4,5], 因此, 国内外多采用 20 辊轧机轧制钛带材。由于 20 辊轧机辊系配置复杂, 辊系-轧件耦合变形行为更加复杂, 加之钛金属材料本身特殊的变形特性, 宽幅工业纯钛带的板形产生机理复杂, 控制难度很大, 在此领域公开的研究资料和成果较少^[6,7]。另在宽幅工业纯钛带实际生产中, 二肋浪形问题频繁出现, 产生机理尚未明确, 长期困扰产品质量的提升, 严重影响企业的市场声誉和经济效益, 需要从机理出发, 研究宽幅工业纯钛带轧制的力学变形行为, 揭示 20 辊轧机轧制宽幅钛带的板形演变机理, 并在此基础上, 提出板形调控优化策略, 改善实际工业生产中冷轧钛带的板形质量。

从上世纪 90 年代至今, 森吉米尔 20 辊轧机轧制仿真模型逐渐从辊系变形模型^[8-12]向具有更高计算精度的辊系-轧件耦合模型发展。耦合模型包括 2 种不同的建模方法, 一种是耦合辊系弹性变形模型与轧件弹

塑性变形模型^[13], 此种方法计算效率高, 但其中假设与简化条件较多影响了计算精度; 另一种是基于商用有限元软件建立的辊系-轧件一体化耦合模型^[14], 模型中轧辊定义为弹性材料, 轧件定义为弹塑性或刚塑性材料, 通过接触处理将二者进行耦合, 这类方法能够更精确地模拟多变的工艺参数与复杂的现场工况, 求解精度高, 但计算耗时长, 适合离线分析。但目前的 20 辊轧机辊系-轧件耦合模型属于静压模型, 不能实现轧辊与轧件动态轧制过程的仿真计算, 这将导致接触弧长为实际情况的 2 倍, 模型计算结果存在偏差。为了克服静压模型接触弧长与真实情况不相符的问题, 本研究采用 ABAQUS 有限元软件建立了辊系-轧件一体化隐式模型, 实现了动态轧制过程, 保证了工作辊与轧件接触弧长与真实情况的一致性。同时也充分考虑了钛金属材料各向异性特点, 采用 Hill'48 各向异性屈服准则^[15-17], 计算轧制过程中钛带的变形行为。

1 宽幅钛带冷轧二肋浪形的描述

国内某厂利用森吉米尔 20 辊轧机进行 1230~1260 mm 宽幅钛带冷轧生产, 其中, 二肋浪形问题经常出现。尤其在成品轧程即 1.6 mm 以下厚度规格轧制中,

收稿日期: 2019-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(51674028); 广西创新驱动发展专项资金项目(桂科 AA17202008); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-NP-18-006)

作者简介: 周冠禹, 男, 1994 年生, 博士生, 北京科技大学高效轧制国家工程研究中心, 北京 100083, 电话: 010-62332598, E-mail: zgy_ustb@163.com

距边部 75~300 mm 范围出现二肋浪形问题十分突出，并且尚不明确现有板形调控手段对二肋浪形的调控能力。在轧制过程中实时板形曲线在距边部 75~300 mm 区间呈现压应力，如图 1 所示。成品卷真空退火后高次浪形与实测板形应力曲线表现一致，如图 2 所示。

2 森吉米尔 20 辊轧机辊系-轧件一体化有限元模型

2.1 森吉米尔 20 辊轧机辊系基本结构

森吉米尔 20 辊轧机的辊系呈 1-2-3-4 塔形布置，如图 3 所示，支承辊顺时针分别为 A、B、C、D、E、F、G、H，第 2 中间辊顺时针分别为 I、J、K、L、M、N，第 1 中间辊顺时针分别为 O、P、Q、R，上下工作辊分别是 S、T。第 2 中间辊外侧四根轧辊是传动辊，顺时针依次为 I、K、L、N。

20 辊轧机具备 2 种板形调控手段^[18]，即支承辊分段压下 (AS-U) 和一中间锥辊窜辊。一中间锥辊为单侧锥辊，文中定义锥面与钛带重叠长度为窜辊量。在 20 辊轧机辊系中，支承辊分段压下存在双 AS-U 压下与单 AS-U 压下 2 种机械结构，此次研究的轧机为单 AS-U 压下调节结构，即 B、C 支承辊同时负责辊缝的整体压下与板形调节的分段压下。B、C 支承辊分段压下共有 7 段，从操作侧到传动侧依次为 1#~7#，其中 1#与 7#、2#与 6#、3#与 5#处于轧机中心线的对称位置，4#处于轧机中心线位置。

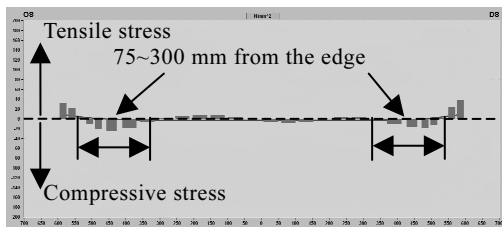


图 1 钛带轧制过程中板形应力曲线

Fig.1 Shape stress curve during rolling of titanium strip

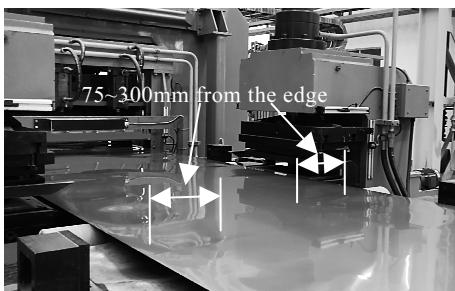


图 2 成品钛卷真空退火后二肋浪形

Fig.2 Double-rib wave of finished titanium coil after vacuum annealing

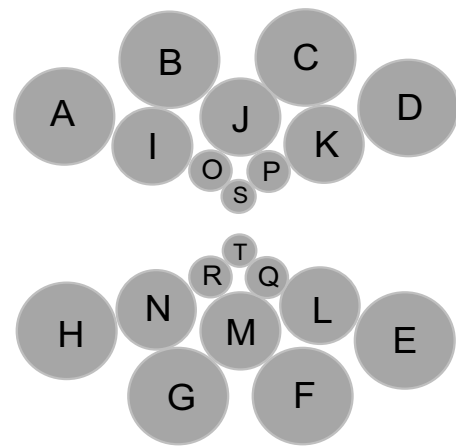


图 3 森吉米尔 20 辊轧机辊系结构

Fig.3 Roll system structure of Sendzimir 20-high mill

2.2 模型几何参数

某厂 20 辊轧机轧辊几何尺寸如表 1，其中支承辊由心轴、偏心环、背衬轴承、鞍座组成，本研究将其简化为体式阶梯结构，如图 4 所示。二中间辊与工作辊采用平辊形，一中间辊采用 230 mm、0.2%单侧锥度辊形，辊形建模中取轧件（钛带）长度为 30 mm，宽度 1240 mm，厚度 1.6 mm。支承辊、二中间辊、一中间锥辊、工作辊、轧件均采用三维实体单元建模。

表 1 轧辊几何尺寸

Table 1 Geometric dimensions of rolls

Roll	Length/mm	Diameter/mm
Backup roll	See Fig.4	See Fig.4
Second middle driving roll	1384	173
Second middle idler roll	1444	173
Intermediate roll	1580	102
Work roll	1414	63.5

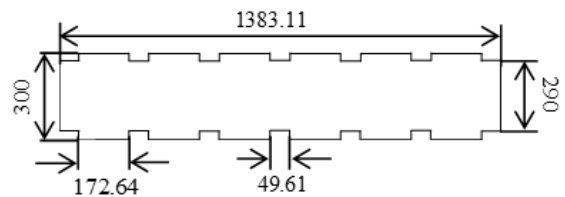


图 4 支承辊简化尺寸

Fig.4 Simplified dimensions of backup rolls (mm)

2.3 模型材料参数

为了更加真实反映轧辊挠曲、压扁状态，模型中轧辊定义为弹性材料，轧辊材料参数如下表 2。

仿真中，轧件取工业纯钛 TA2，主要成分（质量分数%， $Fe \leq 0.3$ ， $C \leq 0.1$ ， $N \leq 0.05$ ， $H \leq 0.015$ ， $O \leq 0.25$ ，余为 Ti），具有明显的各向异性，为提高模型的计算精度，更准确反映轧件变形及金属横向流动情况，轧件定义为具有各向异性特征的弹塑性材料。下文中 1 表示轧向、2 表示横向、3 表示厚向。通过拉伸试验获得了仿真所需的工业纯钛 TA2 弹性阶段参数，如表 3。塑性阶段参数需要确定 6 个各向异性屈服应力比，对于金属薄板来说，由于其厚度较薄，无法获得 σ_{31} 、 σ_{23} ，因此文中取 $\sigma_{31} = \sigma_{23} = \sigma_{12}$ 。结合文献[19]确定了仿真所需的工业纯钛 TA2 各向异性屈服应力比(S)如表 4。

表 2 轧辊材料参数

Table 2 Roll material parameters

Roll	Material	Elasticity/ $\times 10^5$ MPa	Poisson ratio
Backup roll	GCr15	2.19	0.3
Second middle roll	5Cr2Mn9Ni4N	2.05	0.265
Intermediate roll	5Cr2Mn9Ni4N	2.05	0.265
Work roll	Cr12MoV	2.18	0.28

表 3 工业纯钛 TA2 弹性阶段材料参数

Table 3 Material parameters in elastic stage of TA2

Parameters	Value
E_1 /MPa	102000
E_2 /MPa	112000
E_3 /MPa	112000
μ_{12}	0.33
μ_{13}	0.33
μ_{23}	0.29
G_{12} /MPa	38000
G_{13} /MPa	38000
G_{23} /MPa	43500

表 4 工业纯钛 TA2 各向异性屈服应力比

Table 4 Anisotropic yield stress ratios of TA2

Parameters	Value
S_{11}	1.00
S_{22}	1.27
S_{33}	1.32
S_{12}	0.99
S_{13}	0.99
S_{23}	0.99

本研究采用的工业纯钛冷轧变形抗力通过室温压缩试验获得，具体数据如下表 5。

2.4 网格的划分

为保证模型的计算精度，在轧辊辊间接触区和轧辊与钛带接触区细化了网格尺寸。考虑轧制大变形过程中网格扭转过大，而线性减缩积分单元对位移的求解较精确，且受网格扭转变形时精度不会受到太大影响，因此轧辊与轧件均采用八节点线性六面体非协调单元 (C3D8R)，具体如图 5 所示。

2.5 分析步设置

ABAQUS 有限元模型仿真中，复杂的运动需要通过设置多个分析步来实现，合理设置分析步可保证模型的准确性和减少计算时间，提高效率。本研究中模型需要实现的动作依次是轧机轧制压下、钛带前后张力的建立、板形调节手段分段压下的施加、工作辊旋转、轧制完成后模拟结束。

2.6 边界条件和加载设置

模型通过定义接触对的方式来实现轧辊间以及工作辊与钛带的接触。接触对由主面和从面组成，一共有 26 组接触对。支承辊与二中间辊接触、二中间辊与一中间辊接触、一中间辊与工作辊接触、工作辊与钛带接触。本研究模型将不考虑轧辊间摩擦力，根据已

表 5 工业纯钛 TA2 冷轧变形抗力

Table 5 Deformation resistance of TA2 during cold rolling

Deformation amount	Yield stress/MPa
0	508
0.1	646
0.2	693
0.3	756
0.4	807

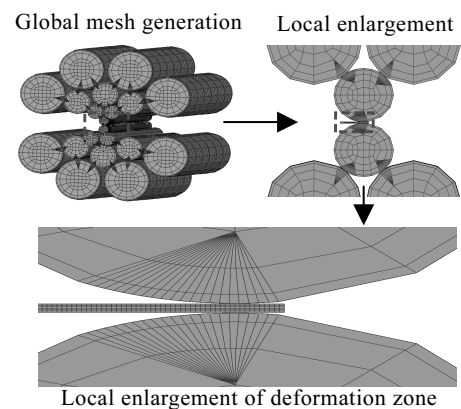


图 5 森吉米尔 20 辊轧机辊系-轧件一体化模型

Fig.5 Integrated rolls-strip model for Sendzimir 20-high mill

有研究成果与现场生产经验，工作辊与钛带之间的摩擦系数为 0.05。

模型中采用捆绑约束方式，将刚性环固定在支承辊对应的偏心环位置，通过对刚性环的参考点施加约束和运动来实现支承辊压下与分段压下(AS-U)功能。同时，在二中间辊、一中间辊、工作辊端面中心设置参考点，并与端面耦合约束，通过对参考点施加约束和运动来实现工作辊的转动。

模型通过控制二中间辊、一中间辊、工作辊端部参考点的自由度来控制中间辊及工作辊的轧制压下(y方向移动)和工作辊的轴向旋转(绕z轴旋转)，支承辊通过刚性环来保证压下方向移动自由度；钛带前后两端中心面限制y方向自由度，中部变形区域无自由度限制；辊系轴向对称面施加z向对称约束。

2.7 模型验证

为了验证森吉米尔 20 辊轧机辊系-轧件一体化模型计算的可靠性，采用超声波测厚仪对钛带轧后断面轮廓进行了测量，并与实测断面轮廓进行对比。模型设置的初始工艺参数为：钛带凸度 30 μm，入口厚度 1.6 mm，出口厚度 1.26 mm，前张力 130 MPa，后张力 100 MPa，窜辊量 66 mm，1#~7#分段压下(AS-U)调节量依次为 0.028、0、0.14、0.196、0.14、0、0.028 mm，仿真第 2 轧程第 1 道次轧制。模型仿真钛带轧后断面轮廓与现场实测轧后断面如图 6 所示。仿真结果与实测值之间的断面轮廓误差在 5%以内，说明本研究中建立的模型具有良好的计算精度，能满足实际需求。

3 工业纯钛带轧制过程变形仿真分析

3.1 对称位置分段压下满行程调节特性

对称位置 AS-U 调节仿真工况如下：钛带采用无凸度板，窜辊量 0 mm，前张力 130 MPa，后张力 100 MPa，无板形调控时出口厚度 1.28 mm，1#与 7#、2#

与 6#、3#与 5#以及 4#AS-U 满行程压下 0.28 mm。对称位置 AS-U 调节后钛带断面同无板形调节且其他条件不变时钛带断面取差值，可得对称位置 AS-U 调节后钛带断面厚度变化曲线，如图 7 所示。

同时，为了直观分析对称位置 AS-U 调节后断面厚度变化趋势，定义距钛带边部 0~75 mm 为边部区，距钛带边部 75~300 mm 为二肋浪形区，距钛带边部 300~620 mm 为中部区，并分别计算了边部区、二肋浪形区以及中部区厚度变化值，如表 6。

从图 7 及表 6 中，可以发现：(1) 1#与 7#、2#与 6#AS-U 调节对边部区厚度影响最为明显，1#与 7#、2#与 6#AS-U 在调控二肋浪形区时会减小边部区与二肋浪形区不均匀减薄程度的同时加大二肋浪形区与中部区的不均匀减薄程度；(2) 3#与 5#、4# AS-U 调节对中部区厚度影响最为明显，3#与 5#、4# AS-U 在调控二肋浪形区时会减小中部区与二肋浪形区不均匀减薄程度的同时加大二肋浪形区与边部区的不均匀减薄程度；(3) 4#AS-U 对调控距中心点两侧 120 mm 区域内厚度的效果最为显著。

3.2 一中间锥辊窜辊调节特性

窜辊调节仿真工况如下：钛带采用无凸度板，窜

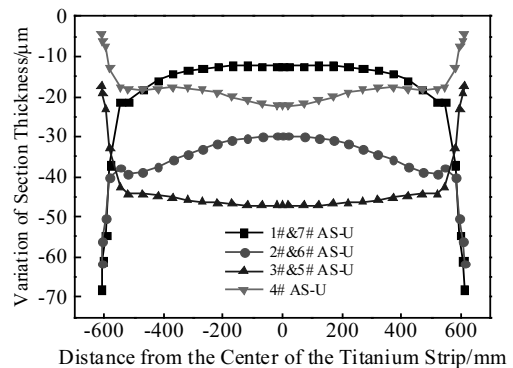


图 7 对称位置 AS-U 调节后钛带断面厚度变化曲线

Fig.7 Curves of section thickness change of titanium strip after the symmetrical position AS-U adjustment

表 6 对称位置 AS-U 调节后不同区域厚度变化值

Table 6 Variation of thickness in different regions after the symmetrical position AS-U adjustment (μm)

Symmetric position AS-U	Edge region	Double-rib wave region	Central region
1# and 7#	-48	-17	-12
2# and 6#	-49	-37	-31
3# and 5#	-27	-45	-47
4#	-10	-18	-21

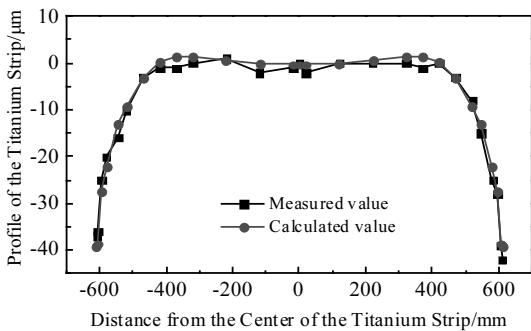


图 6 钛带轧后断面轮廓计算值与实测值对比

Fig.6 Profile comparison of titanium strip after rolling

辊 30、50、70 mm, 前张力 130 MPa, 后张力 100 MPa, 无板形调控时出口厚度 1.28 mm。窜辊调节后钛带断面与无板形调节且其他条件不变时钛带断面取差值, 可得窜辊调节后钛带断面厚度变化曲线, 如图 8 所示。

为了更直观定量掌握窜辊调节对钛带不同区域厚度的影响, 分别计算了不同窜辊量下的边部区、二肋浪形区以及中部区厚度变化值, 如表 7。

从图 8 及表 7 中, 可以发现: 一中间锥辊窜辊量增加后钛带整体厚度也随之增加; 与二肋浪形区及中部区厚度影响程度相比, 窜辊调节对钛带边部区厚度影响显著; 通过窜辊量调节无法有效控制二肋浪形区厚度减薄而发生浪形的问题。

3.3 板形调控手段组合调节特性

进一步仿真分析一中间锥辊窜辊与对称位置分段压下组合调节特性。组合调节特性仿真工况数据如下: 钛带采用无凸度板, 窜辊量 30、50、70 mm, 前张力 130 MPa, 后张力 100 MPa, 无板形调控时出口厚度 1.28 mm, 1#与 7#、2#与 6#、3#与 5#以及 4#支承辊分段压下分别取满行程 0.28 mm。为了直观反映组合调节特性, 文中仿真了无板形调节且其他条件不变时断面厚度情况, 并以此为基础得到了组合调节后钛带断面厚度变化曲线, 如图 9 所示。

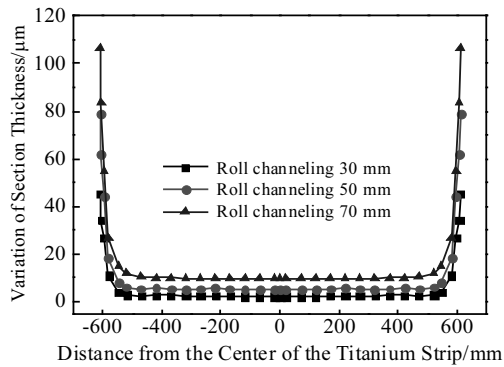


图 8 窜辊调节后钛带断面厚度变化曲线

Fig.8 Curves of section thickness change of titanium strip after roll channeling adjustment

表 7 窜辊调节后不同区域厚度变化值

Table 7 Variation of thickness in different regions after roll channeling adjustment

Roll channeling/mm	Edge region/ μm	Double-rib wave region/ μm	Central region/ μm
30	29	3	2
50	51	6	5
70	68	10	10

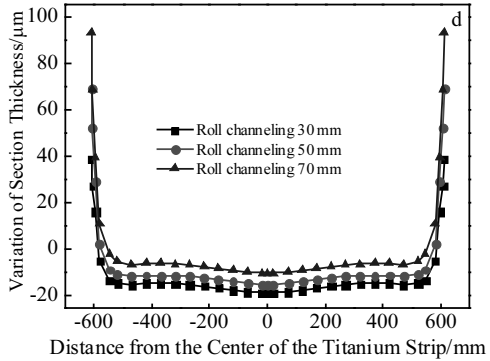
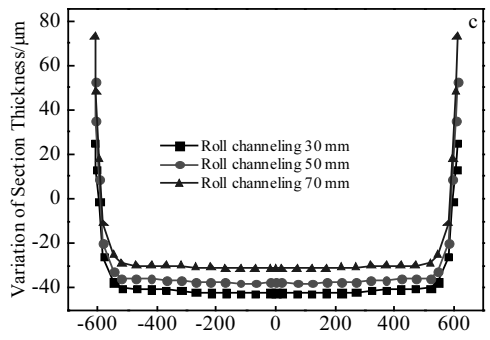
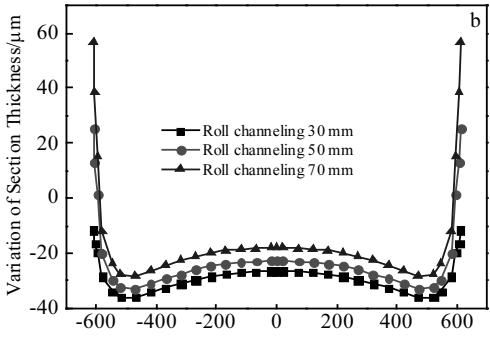
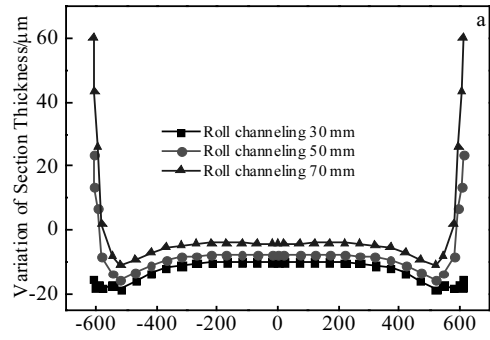


图 9 组合调节后钛带断面厚度变化曲线

Fig.9 Section thickness change curves of titanium strip after combination adjustment: (a)1#&7# AS-U; (b)2#&6# AS-U; (c) 3#&5# AS-U; (d) 4# AS-U

从图 9 及表 7 中, 可以发现: 1#与 7#、2#与 6#AS-U 组合调控无法有效调控二肋浪形区与中部区的厚度差异, 并且随着窜辊量的增加, 1#与 7#、2#与

6# AS-U 组合调控后钛带断面厚度减薄在距边部 75~300 mm 区域最为显著, 说明上述 2 种对称位置 AS-U 组合调控方式会导致二肋浪形区厚度减薄, 进而增加该处的纵向延伸, 不利于二肋浪形问题的解决; 3#与 5# AS-U 组合调节对调控二肋浪形区厚度减薄有一定的作用, 其中 3#与 5#AS-U 组合调控后中部区较二肋浪形区厚度减薄 2 μm 以内, 4#AS-U 组合调控后中部区较二肋浪形区厚度减薄 3 μm 左右, 与 3#与 5#AS-U 组合调控相比, 4#AS-U 组合调控对缓解二肋浪形区厚度减薄更有效果; 组合调控时, 通过调节窜辊量可控制二肋浪形区与边部区的厚度减薄的差异程度, 但对二肋浪形区与中部区的厚度减薄差异的影响较为微弱。

3.4 板形调控优化策略现场应用

通过对森吉米尔 20 辊轧机 2 种板形调控手段单一

或组合调控特性的研究, 可以发现: 在使用组合调控手段解决二肋浪形问题时, 应减小 1#与 7#、2#与 6# 的压下量, 由于相邻位置 AS-U 压下时不得超过限定行程, 在减小 2#与 6#AS-U 压下量时还应考虑减小 3#与 5#AS-U 压下量, 中部厚度可通过 4#AS-U 控制, 此外, 边部厚度控制可使用窜辊调节。因此, 可得出分段压下板形调控策略方案, 即减小 1#与 7#、2#与 6#AS-U 压下量, 中部厚度由 3#、4#、5# AS-U 调节时 4#AS-U 可增加压下量而减小 3#与 5#AS-U 压下量。

从图 10 现场记录的对比试验板形应力数据来看, 分段压下组合优化方案调节后距边部 75~300 mm 压应力减小, 该区域最大压应力由优化前-25 MPa 左右改善到优化后-10 MPa 左右, 下降 60%, 钛带在该区间厚度减薄得到缓解, 现场效果验证了分段压下板形调控策略方案的有效性。

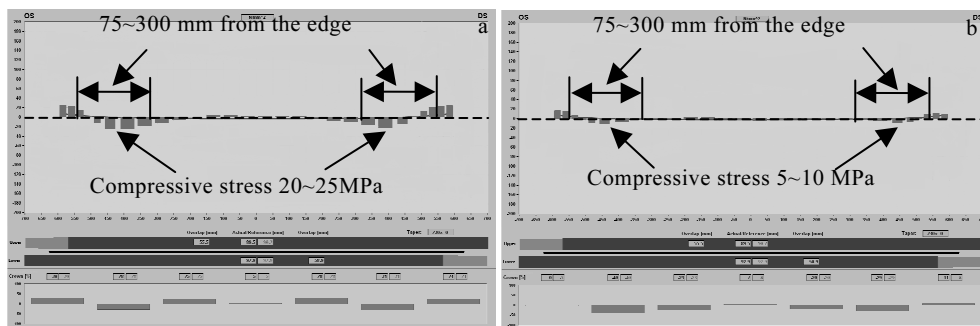


图 10 对比试验前后板形应力

Fig.10 Shape stress curves of the contrast test: (a) before optimizing scheme adjustment and (b) after optimizing scheme adjustment

4 结 论

1) 采用 ABAQUS 有限元软件, 考虑了工业纯钛的各向异性力学特点, 建立了能够实现动态轧制过程的森吉米尔 20 辊轧机-轧件一体化隐式有限元模型, 并结合现场实际生产数据, 对模型进行了验证, 证明了本研究建立的模型具有较高的计算精度。

2) 1#与 7#、2#与 6#AS-U 与锥辊组合调控无法有效调控二肋浪形区与中部区的厚度差异, 并且随着窜辊量的增加, 会导致二肋浪形区厚度减薄最为显著, 3#与 5#、4#AS-U 对缓解二肋浪形区与中部区厚度差异有一定效果, 其中 4#AS-U 强于 3#与 5#AS-U。

3) 通过一中间锥辊窜辊调节无法对缓解二肋浪形问题, 窜辊调节对边部区厚度影响显著。

4) 结合板形调节特性研究结果, 制定了分段压下组合优化方案, 即减小 1#与 7#、2#与 6#AS-U 压下量, 中部厚度由 3#、4#、5#AS-U 调节时 4#AS-U 可增加

压下量而减小 3#与 5#AS-U 压下量, 现场实施后二肋浪形区压应力下降 60%。

参考文献 References

[1] Roodposhti P S, Farahbakhsh N, Sarkar A *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25(5): 1353
 [2] Liu D K, Huang G S, Gong G L *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2017, 27(6): 1306
 [3] Sahoo S K, Sabat R K, Sahni S *et al. Materials & Design*[J], 2016, 91: 58
 [4] Roth A, Lebyodkin M A, Lebedkina T A *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2014, 596: 236
 [5] Yi N, Hama T, Kobuki A *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2016, 655: 70
 [6] Zhu Xinmin(祝新民), Feng Guanghong(冯光宏), Zhang Hongliang(张宏亮). *Hot Working Technology(热加工工艺)*[J], 2014, 19: 227

- [7] Shi Yaming(史亚鸣), Li Zhimin(李志敏), Cao Zhanyuan(曹占元) *et al. China Metallurgy(中国冶金)*[J], 2017, 27(9): 25
- [8] Hara K, Yamada T, Takagi K. *ISIJ International*[J], 1991, 31(6): 607
- [9] Kim J T, Yi J J, Han S Y. *Journal of Mechanical Science and Technology*[J], 1996, 10(3): 277
- [10] Yu H, Liu X, Lee G T. *ISIJ International*[J], 2007, 47(7): 996
- [11] Zhang Lianjun(张连军), Zhang Qingdong(张清东), Yu Meng(于孟). *Metallurgical Equipment(冶金设备)*[J], 2008(1): 40
- [12] Wang Chongtao(王崇涛). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2003
- [13] Zhang Qingdong(张清东), Dai Chang(代畅), Wen Jie(文杰) *et al. Steel Rolling(轧钢)*[J], 2013, 30(3): 1
- [14] Li H, Zhao Z, Dong D *et al. Metals*[J], 2018, 8(10): 783
- [15] Hill R A. *Proceedings of the Royal Society A*[J], 1948, 193(1033): 281
- [16] Liu Yanjuan(刘彦娟). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2005
- [17] Xu Dan(徐丹). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007
- [18] Yan Dong(闫冬). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011
- [19] Wang L, Zhang H, Huang G *et al. Journal of Materials Research*[J], 2016, 31(21): 3372

Modeling and Simulation of Wide Commercial Pure Titanium Strip Rolling on Sendzimir 20-high Mill

Zhou Guanyu¹, He Anrui¹, Liu Chao¹, Zhou Mingwei², Qin Jian², Liu Zhengqiao²

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. Hunan Xiangtou Goldsky Titanium Metal Co., Ltd, Changsha 410006, China)

Abstract: The problem of double-rib wave occurs frequently and is difficult to control when Sendzimir 20-high rolling mill rolls wide industrial pure titanium strip. In order to grasp the regulation law of existing shape control means and to provide reasonable control strategy to solve the problem of double-rib wave, an integrated roller-strip model of 20-high rolling mill for realizing the dynamic rolling process of work roll and strip was established, and the calculation accuracy of the model was verified by the actual industrial rolling data, based on ABAQUS finite element software and considering the anisotropic mechanical characteristics of commercial pure titanium strip rolling. The model was used to simulate the single and combined shape control characteristics of wide industrial pure titanium strip rolled by 20-high rolling mill. The results show that the thickness of 75~300 mm from the edge decreases most significantly with the increase of roll channeling when the backup roll 1# and 7#, 2# and 6# symmetrical position subsection pressing is combined with the middle cone roll channeling roll, which will lead to or aggravate the double-rib wave; the combination of 3# and 5#, 4# symmetrical position subsection pressing and the middle cone roll channeling can alleviate the problem of the two rib waveform, and it is also found that the adjustment of the middle cone roll channeling cannot solve the problem of the double-rib wave. Finally, combined with the shape control characteristics of 20-high rolling mill, a piecewise reduction combination scheme is proposed, which can reduce the compressive stress in the double-rib wave zone. Industrial experiments show that the compressive stress in the double-rib wave zone decreases by 60% after the implementation of the piecewise reduction combination scheme, which effectively alleviates the double-rib wave defects when rolling wide titanium strip on 20-high rolling mill.

Key words: Sendzimir 20-high mill; wide commercial pure titanium strip; high-order buckle; finite element; shape control characteristics

Corresponding author: He Anrui, Ph. D., Professor, National Engineering Research Center for Advanced Rolling Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-62332598, E-mail: harui_ustb@163.com