

轧制

## 薄带钢卷取过程中屈曲缺陷生成机理

王志强<sup>1</sup>, 王兴东<sup>1</sup>, 吴宗武<sup>1</sup>, 夏江涛<sup>2</sup>, 黎友华<sup>3</sup>

(1. 武汉科技大学 机械自动化学院, 湖北 武汉 430081; 2. 武钢有限技术中心, 湖北 武汉 430080;  
3. 武汉钢铁有限公司, 湖北 武汉 430080)

**摘要:** 针对薄带钢卷取过程中产生的横向屈曲缺陷问题, 采用有限元软件 ABAQUS 建立了带钢卷取过程的动态仿真模型, 并通过修改 INP 文件中带钢各个结点的坐标得到不同的初始板形, 分析了带钢初始板形、卷取张力及带钢厚度对带钢横向屈曲缺陷的影响规律。研究表明: 带钢厚度小于 0.20 mm 时, 减小卷取张力能够改善四分浪、复合浪和中浪初始板形的带钢的横向屈曲缺陷; 带钢厚度为 0.20 mm 时, 中浪初始板形的带钢在卷取张力为 25 MPa 时最不易产生横向屈曲, 减小和增大卷取张力均会增大其横向屈曲; 当卷取张力一定时, 各初始板形带钢的屈曲系数随带钢厚度增大而减小, 即增大带钢厚度能够减小横向屈曲。具有双边浪形的带钢在不同卷取张力和带钢厚度下均保持在较小水平, 未发现横向屈曲缺陷。

**关键词:** 带钢; 卷取; 初始板形; 屈曲系数; 横向屈曲

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.12.011

**中图分类号:** TG306

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 12-0090-08

## Generation mechanism of buckling defects during coiling process for thin strip steel

Wang Zhiqiang<sup>1</sup>, Wang Xingdong<sup>1</sup>, Wu Zongwu<sup>1</sup>, Xia Jiangtao<sup>2</sup>, Li Youhua<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;  
2. Technology Center, Wuhan Iron & Steel Co., Ltd., Wuhan 430080, China;  
3. Wuhan Iron & Steel Co., Ltd., Wuhan 430080, China)

**Abstract:** For the transverse buckling defect problems in the coiling process of thin strip steel, the dynamic simulation model of the strip coiling process was designed by finite element analysis software ABAQUS, and the coordinates of each node of strip steel in the INP file were modified to obtain the different initial plate shapes. The influence laws of initial plate shape, coiling tension and the thickness of strip steel on the transverse buckling defect were analyzed. The results show that when the thickness of the strip steel is less than 0.2 mm, reducing the coiling tension can improve the transverse buckling defects of the strip steel with the initial plate shape of the quarter wave, composite wave and medium-wave. When the thickness of the strip steel is 0.2 mm, the strip steel with the initial plate shape of the medium wave is the least prone to produce transverse buckling when the coiling tension is 25 MPa, and the transverse buckling is increased by decreasing and increasing the coiling tension. When the coiling tension is constant, the buckling coefficient of each initial strip steel decreases with increasing of thickness, that is, increasing the thickness reduces transverse buckling. The strip steel with double-sided wavy remains at a relatively low level under different tensions and thicknesses, and no transverse buckling defects were found.

**Key words:** strip steel; coiling; initial plate shape; buckling coefficient; transverse buckling

目前, 国内钢铁行业竞争日益激烈, 带钢厚度也逐渐向着越来越薄的方向发展, 主流的带钢厚度在 0.20 mm 及以下 (例如 0.10 和 0.15 mm), 具有

极大的宽厚比, 在轧制过程中可能会产生一些板形缺陷<sup>[1-2]</sup>, 这些板形缺陷会导致带材品质下降, 使得带材不能平整地卷取在卷筒上从而产生横向屈曲缺陷, 影响产品的整体外观和使用性能。

为研究带材卷取过程中缺陷产生机理、提高卷取质量, 许多学者进行了深入的研究。刘华等<sup>[3-5]</sup>通过有限元仿真的方法, 研究得到轧机工作辊的辊形、轧制张力和轧制速度这 3 个参数与铝箔轧制过程中铝箔面内的应力分布及其板形的影响规律, 并

收稿日期: 2024-03-14; 修订日期: 2024-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52375117)

作者简介: 王志强 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 2439622718@qq.com

通信作者: 吴宗武 (1987-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: 421123a012n.cdb@sina.cn

对工作辊辊形和轧制参数进行了优化, 提高了板形质量。龚殿尧等<sup>[6]</sup>分析了工作辊粗糙度和工作辊曲线对工作辊凸度的影响, 对工作辊进行了优化, 改善了铝箔轧制过程中存在的二肋浪问题。卿伟杰等<sup>[7]</sup>假设了不同板形缺陷下的应力分布, 计算得到不同应力分布、不同宽厚比下板带的临界失稳特性和后屈曲变形路径。于海军等<sup>[8-9]</sup>通过有限元仿真模拟了铝箔清洗线卷取过程中板形和张力对铝箔屈曲的影响。令狐克志等<sup>[10]</sup>通过有限元仿真, 研究了不同初始板形下带钢对应的临界瓢曲应力, 通过对初始板形进行优化, 降低了带钢热瓢曲发生的概率。王震等<sup>[11]</sup>基于向量式有限元薄膜单元基本理论, 分析了平面薄膜结构的局部褶皱问题, 获得了屈曲临界极限载荷。

以上学者对带材和薄膜的研究大多是在静态条件下, 而带钢的卷取过程是动态的, 这就导致影响带钢卷取质量的因素较多, 影响规律多变, 且带钢的材料属性与之前学者研究的均不相同<sup>[12]</sup>。本文基于有限元理论, 根据现实中带材的卷取设备参数, 建立了一套带钢卷取过程的三维动态有限元仿真模

型。目前带钢卷取多采用无芯筒的卷取方式, 本模型根据实际生产, 在胀芯表面添加了橡胶层, 并修改 ABAQUS 的 INP 文件中带钢结点的坐标来模拟出不同初始板形缺陷的带钢, 通过有限元仿真得到卷取过程中初始板形对带钢的受力、变形的影响及带钢厚度和卷取张力变化对带钢横向屈曲缺陷的影响。

## 1 问题描述

具有大宽厚比的带钢在轧制过程中可能会产生某些较复杂的板形缺陷<sup>[13-14]</sup>, 图 1a 为带钢轧制后出现的 5 种较典型的板形缺陷类型, 其中二肋浪也叫四分浪。为方便运输, 带钢在轧制完成后需要进行卷取, 具有初始板形缺陷的带钢在进入卷取机组时, 由于带钢在宽度方向上发生了不同的弹性变形, 在受到张力时容易出现横向起皱缺陷, 如图 1b 所示。当横向起皱达到一定程度时, 起皱区域会被卷入钢卷从而产生横向屈曲缺陷, 如图 1c 所示, 最终导致废料的产生, 此时需要进行停机处理, 严重影响生产进度, 造成经济损失。

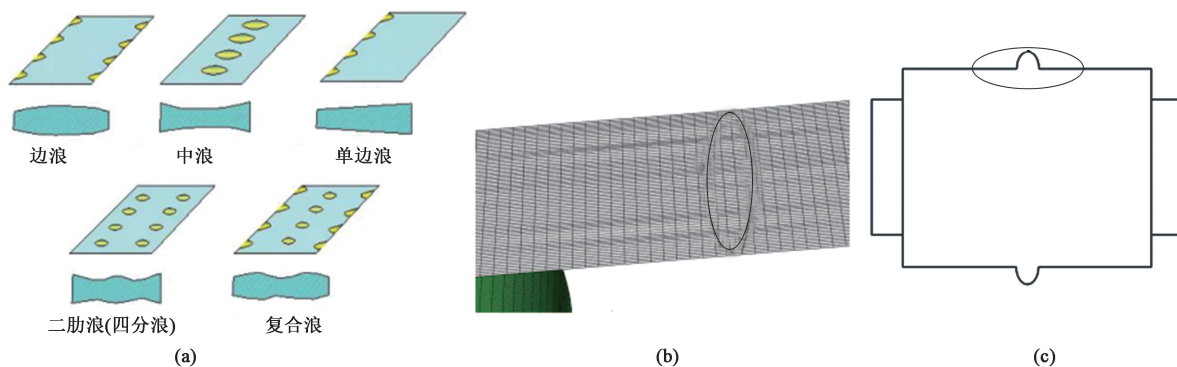


图 1 带钢板形缺陷

(a) 缺陷类型 (b) 横向起皱缺陷 (c) 横向屈曲缺陷

Fig. 1 Plate shape defects of strip steel

(a) Defect types (b) Transverse wrinkling defects (c) Transverse buckling defects

## 2 有限元仿真模型建立

### 2.1 模型设置

本文采用 ABAQUS 有限元软件建立带钢卷取过程中的动态仿真模型, 该模型主要包括胀芯、橡胶层、带钢和导向辊, 如图 2 所示。由于在卷取过程中, 胀芯和导向辊相对于带钢几乎没有变形, 所以在模型中将胀芯和导向辊设置为刚体, 在整个模型的求解中不参与计算, 整个模型选择动态显式算法求解。

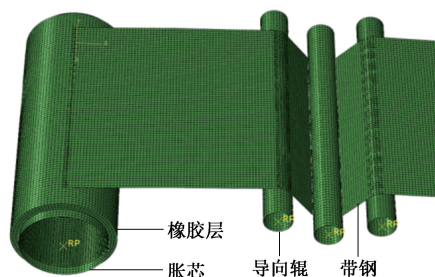


图 2 带钢卷取过程仿真模型

Fig. 2 Simulation model of strip steel steel coiling process

整个仿真过程设置为两个分析步，第 1 个分析步时间为 0.5 s，第 2 个分析步时间为 2.5 s。在第 1 个分析步中，对带钢右端施加一个均匀张力，使带钢表面和导向辊表面之间能够形成一个稳定接触；在第 2 个分析步中，持续对带钢右端施加均匀的张力，同时为胀芯施加一个绕 Z 轴逆时针旋转的角速度，观察带钢在卷取过程中不同参数情况下带钢沿宽度方向的应力分布及其屈曲情况。由于该模型中所研究的带钢宽度为 1100 mm，具有极大的宽厚比，所以，对带钢进行网格划分时需要采用 S4R 薄壳单元，单元格大小设置为 15 mm。表 1 为有限元模型的几何参数。

表 1 模型几何参数 (mm)  
Table 1 Geometry parameters of model (mm)

参数	数值
胀芯半径	210
胀芯长度	1300
橡胶层内半径	210
橡胶层外半径	250
橡胶层长度	1200
导向辊长度	1300
导向辊半径	70
带钢宽度	1100

2.2 仿真工况设置

具有板形缺陷的带钢在进入卷取装置后会对带钢轴向即宽度方向上的应力分布产生影响，结合各种影响因素，设置了如表 2 所示的仿真工况。

表 2 仿真工况参数  
Table 2 Operating condition parameters in simulation

参数	数值
卷取张力/MPa	35、30、25、20
初始浪形高度/mm	4
初始浪形宽度/mm	200
初始浪形长度/mm	600
初始板形缺陷类型	中浪、双边浪、复合浪、四分浪
带钢厚度/mm	0.20、0.15、0.10
带钢弹性模量/GPa	210
带钢屈服强度/MPa	150
带钢泊松比	0.3
橡胶层弹性模量/MPa	200
橡胶层泊松比	0.45

2.3 边界条件设置

在卷取过程中，带钢的上下表面与导向辊和橡

胶层的表面相互接触，属于面面接触，在 ABAQUS 中设置相互作用类型为表面与表面接触，相互作用属性为硬接触，允许接触后分离，摩擦因数为 0.3，力学约束方法为罚接触，对各个导向辊、胀芯和橡胶层添加只能绕 Z 轴旋转的约束，且胀芯外表面和橡胶层内表面设置绑定约束。

为防止第 2 个分析步开始时，带钢所受的瞬时加速度过大，使带钢产生较大的瞬态变形，本文采用图 3 所示的胀芯的角速度变化曲线。

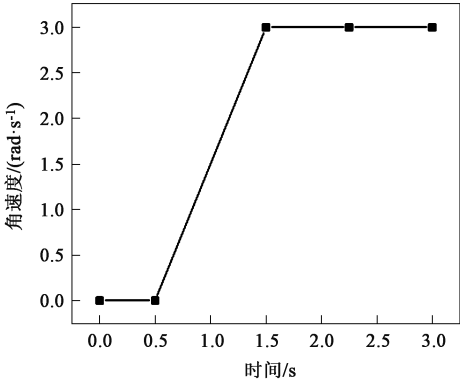


图 3 胀芯角速度的变化曲线  
Fig. 3 Angular velocity variation curve of expansion core

2.4 模型精度验证

为验证带钢卷取过程的有限元仿真模型的精度，本文设置了无浪形缺陷、厚度为 0.1 mm、卷取张力为 35 MPa 仿真工况，得到带钢与橡胶层和导向辊相切位置的中间截面处的横向应力曲线，如图 4 所示。图 4 中曲线有 7 个峰值，这与文献 [8] 中的仿真结果具有相同的分布规律，且文献 [8] 中实际生产过程中带材面内出现了 7 个起皱条纹，说明该有限元仿真模型具有较高的精度，能够对生产中的其他各种工况进行仿真分析。

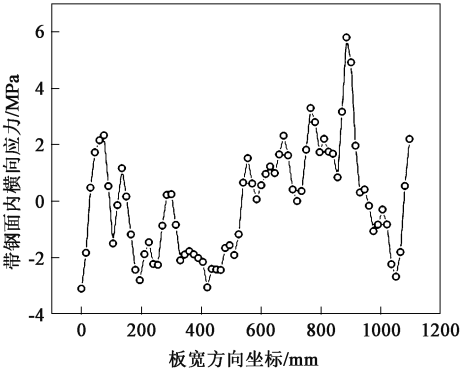


图 4 无浪形缺陷时带钢面内横向应力  
Fig. 4 Transverse stress distribution in section of strip steel without wave-shaped defect

### 3 结果分析

#### 3.1 定义带钢屈曲系数

为了研究各因素对带钢卷取质量的影响, 需要定义一个评价标准来表示横向起皱的严重程度<sup>[15]</sup>。刘艳红<sup>[16]</sup>和叶玉娟<sup>[17]</sup>采用带钢的横向弯曲率来表示横向屈曲程度, 但现场中横向弯曲率无法直接测量。本文采用屈曲系数  $\alpha$  来评价带钢在卷取过程中的横向屈曲情况, 屈曲系数  $\alpha$  值越大说明越容易出现横向屈曲缺陷, 在卷取时越需要注意。如图 5 所示, 截面 A-A 为带钢与橡胶层的相切处, 截面 C-C 为带钢与导向辊的相切处, 截面 B-B 为截面 A-A 与截面 C-C 的中间位置, 取截面 B-B 运动到截面 A-A 处时带钢上各个结点的面外位移曲线, 如图 6 所示, 面外位移指截面 B-B 处带钢面内各个结点与橡胶层表面的距离, 然后根据式 (1) 计算出  $\alpha$  值。

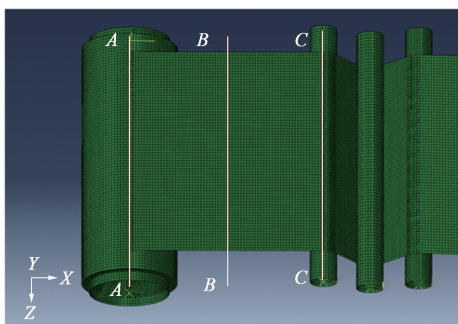


图 5 带钢截面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of cross-section for strip steel

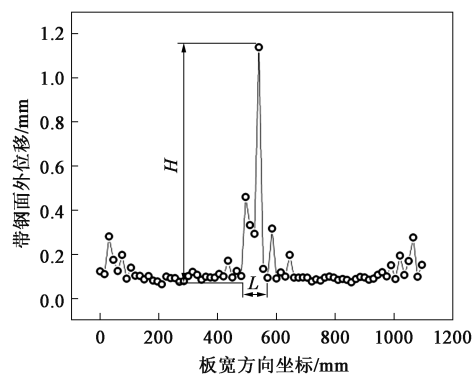


图 6 屈曲系数的示意图

Fig. 6 Schematic diagram of buckling coefficient

$$\alpha = \frac{H}{L} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $H$  为波高;  $L$  为波长。

#### 3.2 初始板形对横向屈曲的影响

为研究不同初始板形对卷取情况的影响, 设定初始浪高为 4 mm、浪长为 600 mm、浪宽为 200 mm, 带钢厚度为 0.15 mm, 卷取张力为 30 MPa, 仿真得到不同初始板形对横向屈曲的影响。

图 7 为在卷取张力为 30 MPa、初始浪高为 4 mm、浪长 600 mm、浪宽为 200 mm、带钢厚度为 0.15 mm 的工况下, 模型第 1 个分析步结束后, 即带钢拉紧状态下, 不同初始板形在图 5 中截面 B-B 处的纵向和横向应力分布情况。纵向应力为截面 B-B 处各个结点沿 X 轴方向所受的应力, 即带钢的长度方向; 横向应力为截面 B-B 处各个结点沿 Z 轴方向所受的应力, 即带钢的宽度方向。

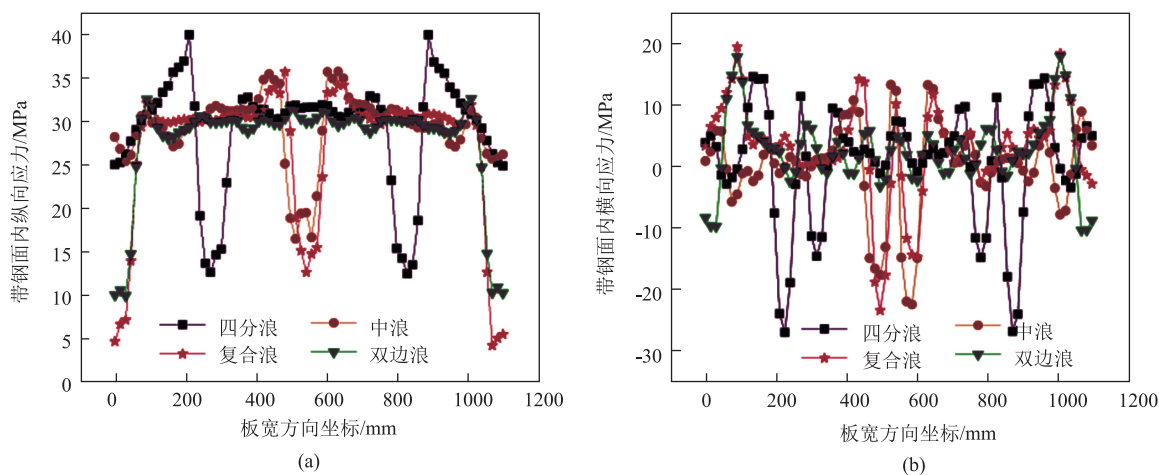


图 7 卷取过程中带钢面内应力分布

(a) 纵向应力 (b) 横向应力

Fig. 7 Stress distributions in section of strip steel during coiling process

(a) Longitudinal stress (b) Transverse stress



由图 7 可知初始板形类型对带钢面内应力分布的影响情况。四分浪、复合浪和中浪初始板形带钢面内纵向应力的波动幅度较大,见图 7a,波动幅度越大,应力分布越不均匀,这是因为在浪形位置带钢的纵向伸长率较其他位置大,处于未完全拉紧状态,这就导致在浪形位置带钢的纵向应力减小。不均匀分布的带钢面内的纵向应力会对面内横向应力产生影响,见图 7b,由于带钢在宽度方向上是一个整体,各位置之间相互牵制,纵向伸长率大的位置被压缩,产生压应力,纵向伸长率小的位置被拉伸,产生拉应力<sup>[18-19]</sup>。从图 7 中可以看出:在卷取张力和带钢厚度相同时,具有四分浪、复合浪和中浪初始板形的带钢面内横向应力明显要比双边浪初始板形大;双边浪初始板形的面内带钢纵向应力和横向应力均无显著变化。图 8 为截面 B-B 运动到截面 A-A 处带钢的面外位移情况,可以看出四分浪和复合浪的面外位移最大,中浪的面外位移相对较小,双边浪几乎不发生面外位移,这与图 7 所示的应力分布规律相同,表明带钢的面外位移由其所受的横向应力的决定。从图 9 可看出,四分浪和复合浪的屈曲系数也是最大,达到 3 以上,较易产生屈曲缺陷,此时起皱区域将进入带钢与橡胶层相交处的左侧,产生横向屈曲缺陷,所以在卷取时,应当格外注意这两种初始板形。

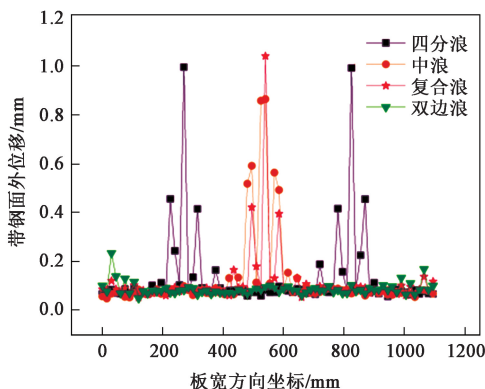


图 8 不同初始板形缺陷时带钢面外位移分布

Fig. 8 Out-of-surface displacement distribution of strip steel with different initial plate shape defects

### 3.3 卷取张力对横向屈曲的影响

卷取张力也是卷取过程一个至关重要的工艺参数,张力的不同对卷取的影响效果也是不一样的<sup>[20]</sup>。根据不同的卷取张力对带钢的横向屈曲系数的影响情况,可以通过优化卷取过程中张力大小来控制带钢屈曲缺陷的产生。

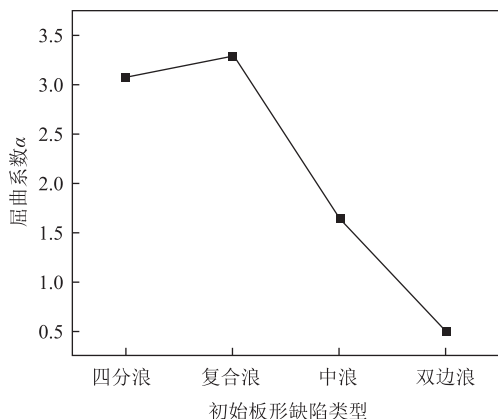


图 9 不同初始板形缺陷时带钢屈曲系数曲线

Fig. 9 Buckling coefficient curves of strip steel with different initial plate shape defects

图 10 为初始浪高为 4 mm、浪长为 600 mm、浪宽为 200 mm 工况下,各初始板形缺陷下带钢屈曲系数随卷取张力的变化曲线。从图 10 中可以看出,当带钢厚度为 0.10 和 0.15 mm 时,具有四分浪、复合浪和中浪初始板形缺陷的带钢的屈曲系数随卷取张力的增大而增大,即带钢的横向屈曲会加重;当卷取张力增大到 30 MPa 以上时,具有四分浪初始板形缺陷的带钢的屈曲系数的增大较明显,且略大于四分浪初始板形缺陷的带钢;当带钢厚度为 0.20 mm 时,具有四分浪和复合浪初始板形缺陷的带钢的屈曲系数随张力的变化趋势相同,均是先增大后减小随后再增大;具有中浪初始板形缺陷的带钢的屈曲系数随张力的增大先减后增大;由此可知,当带钢厚度在 0.20 mm 以下时,减小卷取张力能够减小具有四分浪、复合浪和中浪初始板形缺陷的带钢在卷取过程中的屈曲缺陷,但卷取张力也不能过小,过小会产生塌卷;当带钢厚度为 0.20 mm 时,具有中浪初始板形缺陷的带钢的屈曲系数在张力为 25 MPa 时最小,此时最不易产生屈曲缺陷;具有双边浪形初始板形缺陷的带钢屈曲系数,随张力的增大无明显变化且保持在较小水平,说明对于初始板形缺陷为双边浪的带钢,卷取张力对其卷取过程中的横向屈曲影响不明显,故在生产中不需要格外注意。

### 3.4 带钢厚度对横向屈曲的影响

在实际生产中,带钢厚度各不相同,厚度不同时带钢的横向屈曲情况也不相同,图 11 为初始浪高为 4 mm、浪长为 600 mm、浪宽为 200 mm 工况下,各初始板形缺陷的带钢屈曲系数随带钢厚度的变化曲线。

由图 11 可以看出:随带钢厚度的增大,初始板

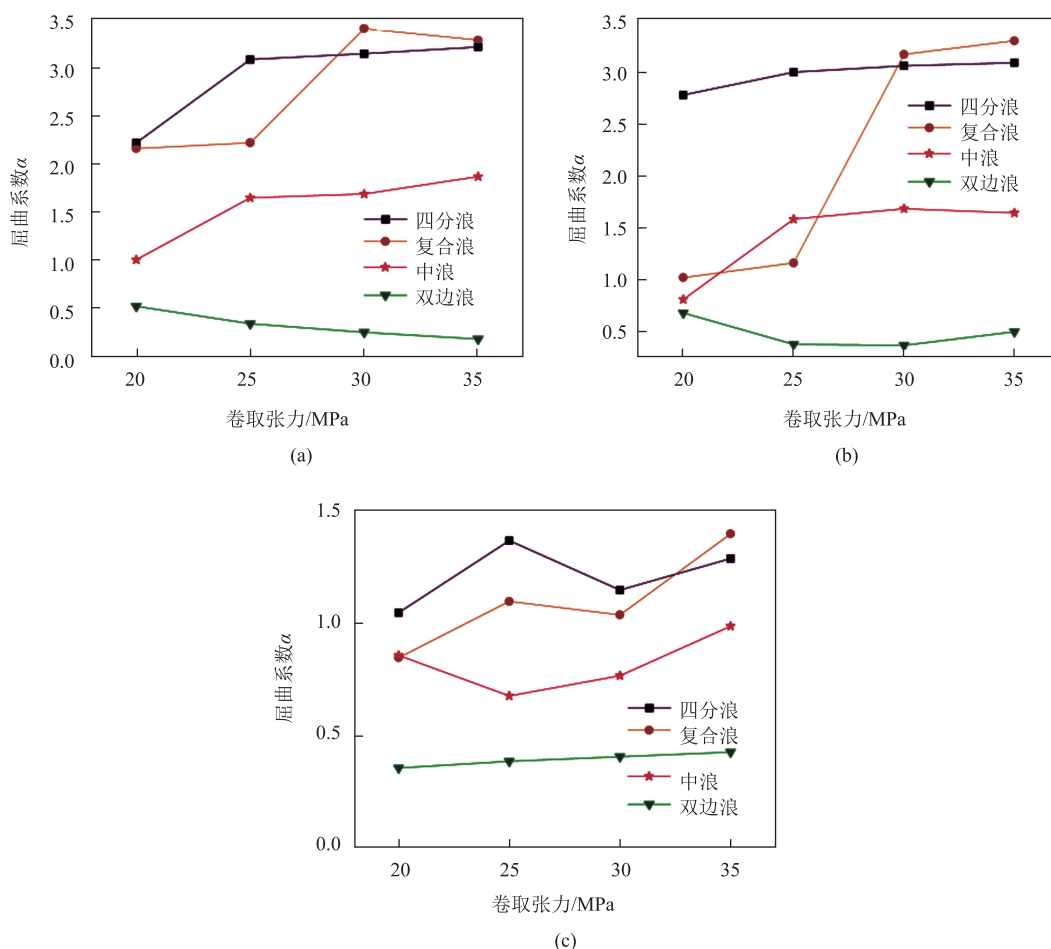


图 10 不同张力下各初始板形缺陷的带钢屈曲系数的变化曲线

(a) 带钢厚度为 0.10 mm (b) 带钢厚度为 0.15 mm (c) 带钢厚度为 0.20 mm

Fig. 10 Buckling coefficient variation curves of strip steel for various initial plate shape defects under different tensions

(a) Strip steel thickness of 0.10 mm (b) Strip steel thickness of 0.15 mm (c) Strip steel thickness of 0.20 mm

形缺陷为四分浪、复合浪和中浪的带钢在卷取过程中其屈曲系数均呈减小趋势，即带钢厚度越大，越不易产生屈曲缺陷；当卷取张力大于 25 MPa 时，具有四分浪和复合浪初始板形缺陷的带钢的屈曲系数在厚度为 0.10 和 0.15 mm 时基本相同，均保持在 3.0 以上，说明带钢厚度在 0.20 mm 以下时，带钢厚度对这两种初始板形缺陷的带钢的横向屈曲影响不大且此时易发生横向屈曲缺陷，在生产时应格外注意；当厚度从 0.15 mm 增大到 0.20 mm 时，其屈曲系数减小较为明显，此时能够明显改善带钢的横向屈曲；对于具有双边浪初始板形缺陷的带钢，随厚度增大，其屈曲系数无明显变化且均保持在较低水平，不易产生屈曲缺陷，说明对于具有双边浪初始板形缺陷的带钢，厚度变化对其卷取过程中的横向屈曲的影响最小，故在卷取时不需要考虑带钢厚度的影响。

## 4 结论

(1) 对于存在初始板形缺陷的带钢，卷取张力、初始板形缺陷类型和带钢厚度对带钢的横向屈曲影响均不相同。在卷取张力为 30 MPa、厚度为 0.15 mm 的工况下，各初始板形缺陷带钢的横向应力分布规律与其面外位移变化规律基本相同，初始板形缺陷为四分浪和复合浪的带钢的屈曲系数较大，卷取时较易出现屈曲缺陷；初始板形缺陷为中浪时虽然带钢的屈曲系数有所减小，但其面外位移最大幅值与复合浪板形缺陷的带钢较接近，在卷取时也应格外注意。

(2) 当带钢厚度在 0.20 mm 以下时，减小卷取张力能够减小具有四分浪、复合浪和中浪初始板形缺陷的带钢的横向屈曲缺陷；当带钢厚度在

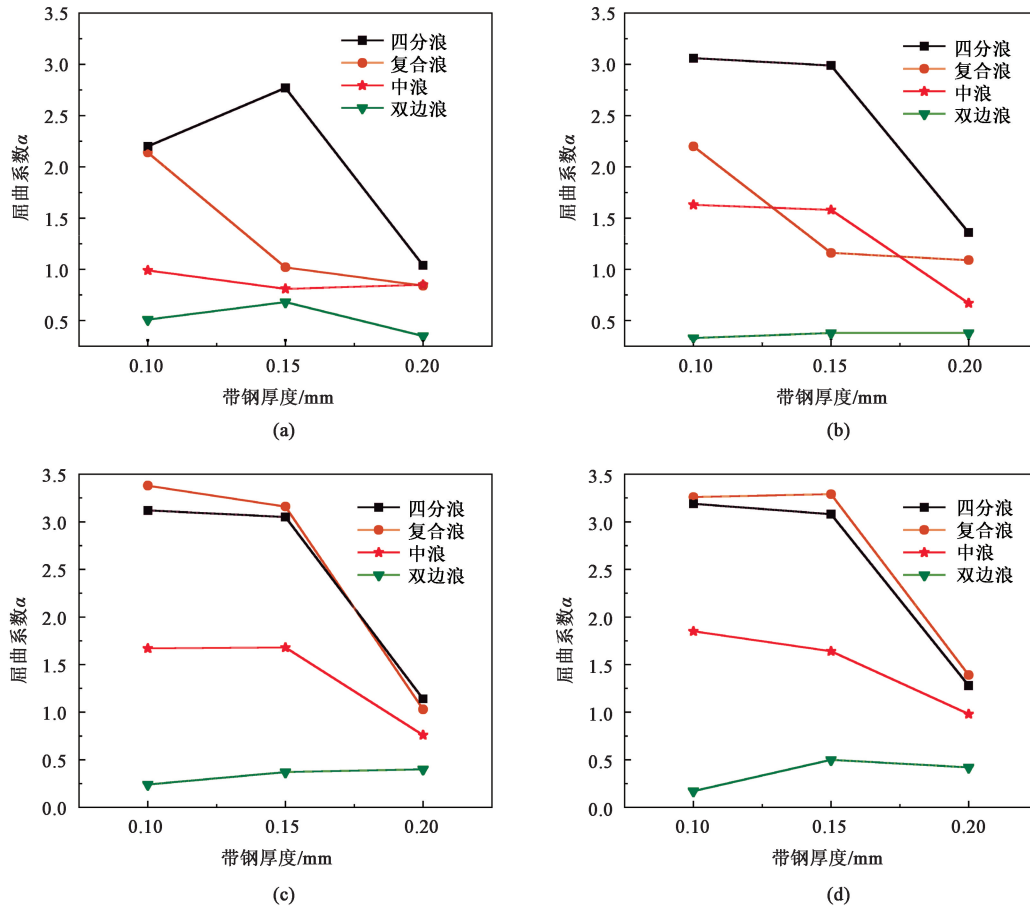


图 11 不同带钢厚度下各初始板形缺陷的带钢屈曲系数的变化曲线

(a) 卷取张力为 20 MPa (b) 卷取张力为 25 MPa (c) 卷取张力为 30 MPa (d) 卷取张力为 35 MPa

Fig. 11 Buckling coefficient variation curves of strip steel for various initial plate shape defects under different strip steel thicknesses

(a) Coiling tension of 20 MPa (b) Coiling tension of 25 MPa (c) Coiling tension of 30 MPa (d) Coiling tension of 35 MPa

0.20 mm 时, 具有中浪初始板形缺陷的带钢的屈曲系数在卷取张力为 25 MPa 时最小, 此时最不易产生横向屈曲, 减小和增大卷取张力均会增大其横向屈曲; 具有双边浪初始板形缺陷的带钢受卷取张力变化的影响不明显, 不产生横向屈曲缺陷。

(3) 当卷取张力一定时, 对于初始板形缺陷为四分浪、复合浪和中浪的带钢, 厚度增大, 屈曲系数减小, 带钢横向屈曲得到改善; 其中, 初始板形缺陷为四分浪和复合浪的带钢在厚度为 0.10 和 0.15 mm 时, 屈曲系数较大, 容易出现横向屈曲缺陷, 应格外注意; 具有双边浪初始板形缺陷的带钢受厚度影响较小, 均未产生横向屈曲缺陷。

#### 参考文献:

- [1] 郑莲宝, 徐勇, 王松伟, 等. 水平连铸铜板坯冷轧带材表面缺陷问题研究 [J]. 铜业工程, 2023 (1): 57-65.  
Zheng L B, Xu Y, Wang S W, et al. Surface defects of cold rolled strip of horizontal continuous casting copper slab [J]. Copper Engineering, 2023 (1): 57-65.
- [2] 刘兆洋, 陈建永, 刘焱. C42500 铜合金铸锭热轧开坯温度对板坯质量的影响 [J]. 铜业工程, 2023 (3): 108-112.  
Liu Z Y, Chen J Y, Liu Y. Slab quality of C42500 copper alloy ingot with different hot rolling temperature [J]. Copper Engineering, 2023 (3): 108-112.
- [3] 刘华, 杨荃, 何安瑞. 张力对大宽厚比铝箔板形的影响 [J]. 塑性工程学报, 2005 (4): 62-65.  
Liu H, Yang Q, He A R. Effect of tension on the shape of aluminum foil with large aspect ratio [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005 (4): 62-65.
- [4] 刘华, 吴斌, 何安瑞, 等. 工作辊辊形对铝箔板形影响的有限元分析 [J]. 工程科学学报, 2005 (1): 90-93.  
Liu H, Wu B, He A R, et al. Finite element analysis of the influence of work roll shape on aluminum foil plate shape [J]. Chinese Journal of Engineering, 2005 (1): 90-93.
- [5] 刘华, 杨荃, 何安瑞. 速度对极薄铝箔轧制的影响 [J]. 塑性工程学报, 2007 (1): 76-79.  
Liu H, Yang Q, He A R. Effect of velocity on very thin aluminum foil rolling [J]. Chinese Journal of Plasticity Engineering, 2007 (1): 76-79.

- [6] 龚殿尧, 徐建忠, 邸洪双, 等. 四重铝箔轧机工作辊辊形曲线的优化 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2013, 34 (7): 952-955.  
Gong D Y, Xu J Z, Di H S, et al. Optimization of work roll curve of work roll in quadruple aluminum foil mill [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34 (7): 952-955.
- [7] 卿伟杰, 杨荃. 冷轧带钢整体和局部屈曲及后屈曲的有限元分析 [J]. 工程科学学报, 2000 (4): 377-380.  
Qing W J, Yang Q. Finite element analysis of global and local buckling and post-buckling of cold-rolled strip [J]. Chinese Journal of Engineering, 2000 (4): 377-380.
- [8] 于海军, 何安瑞, 陈长科, 等. 铝箔清洗线卷取过程横向起皱与屈曲 [J]. 中国有色金属学报, 2021, 31 (3): 546-555.  
Yu H J, He A R, Chen C K, et al. Horizontal wrinkling and buckling during the winding process of aluminum foil cleaning line [J]. Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2021, 31 (3): 546-555.
- [9] 于海军, 何安瑞, 陈长科, 等. 板形和张应力对铝箔卷取过程横向屈曲的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2020, 51 (10): 2782-2791.  
Yu H J, He A R, Chen C K, et al. Effect of plate shape and tension on lateral buckling of aluminum foil coiling process [J]. Journal of Central South University (Natural Science), 2020, 51 (10): 2782-2791.
- [10] 令狐克志, 乔建军, 王洋, 等. 带钢连退热瓢曲与初始板形关系仿真与实践 [J]. 钢铁, 2012, 47 (2): 58-61.  
Linghu K Z, Qiao J J, Wang Y, et al. Simulation and practice of the relationship between strip steel with antipyretic scooping and initial plate shape [J]. Iron and Steel, 2012, 47 (2): 58-61.
- [11] 王震, 赵阳, 杨学林. 平面薄膜结构屈曲行为的向量式有限元分析 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2015, 49 (6): 1116-1122.  
Wang Z, Zhao Y, Yang X L. Vector finite element analysis of buckling behavior of planar thin film structures [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49 (6): 1116-1122.
- [12] Li M W, Liu H F, Wang X L, et al. Key techniques of automatic gauge control and profile control for aluminium strip and foil [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16 (S3): 1595-1599.
- [13] 王鹏飞, 张智杰, 李旭, 等. 冷轧带材板形在线云图监控系统研究与应用 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29 (12): 2775-2784.  
Wang P F, Zhang Z J, Li X, et al. Research and application of online cloud map monitoring system for cold-rolled strip plate shape [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29 (12): 2775-2784.
- [14] 李志明, 彭艳, 于丙强, 等. 一种板形信号处理系统研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2012, 43 (4): 1299-1308.  
Li Z M, Peng Y, Yu B Q, et al. Research on a plate shaped signal processing system [J]. Journal of Central South University (Natural Science), 2012, 43 (4): 1299-1308.
- [15] 于丙强, 杨利坡, 高朋. 冷轧带钢板形测量方法对比分析 [J]. 钢铁研究学报, 2014, 26 (5): 36-41.  
Yu B Q, Yang L P, Gao P. Comparative analysis of measurement methods for plate shape of cold-rolled strip [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 26 (5): 36-41.
- [16] 刘艳红. 连续退火生产线带钢稳定通板技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.  
Liu Y H. Research on Strip Stabilized Through Plate Technology in Continuous Annealing Production Line [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [17] 叶玉娟. 带钢连续退火瓢曲现象的研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2009.  
Ye Y J. Study on Continuous Annealing and Bending Phenomenon of Strip Steel [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2009.
- [18] 张竹庆. 带材冷轧过程中张应力演变规律研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.  
Zhang Z Q. Study on Tensile Stress Evolution Law in the Process of Strip Cold Rolling [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.
- [19] 白振华, 石晓东, 张岩岩, 等. 连续退火过程中带钢热瓢曲产生的机理 [J]. 塑性工程学报, 2012, 19 (1): 97-102.  
Bai Z H, Shi X D, Zhang Y Y, et al. Mechanism of hot bending of strip steel during continuous annealing [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19 (1): 97-102.
- [20] 张清东, 常铁柱, 戴江波. 矩形薄钢板高温态横向皱曲的解析与实验研究 [J]. 塑性工程学报, 2007 (6): 41-46.  
Zhang Q D, Chang T Z, Dai J B. Analysis and experimental study of transverse wrinkle bending of rectangular thin steel plate in high temperature state [J]. Chinese Journal of Plasticity Engineering, 2007 (6): 41-46.

## 警惕不法网站, 保障投稿安全

近期, 本刊接到多名作者投诉, 网络上出现冒充《锻压技术》杂志官方网站的伪网站, 如 [www.dyjszz.cn](http://www.dyjszz.cn), 这些网站盗用本杂志官网内容及相关行业信息, 误导和欺骗广大投稿作者, 骗取文章版面费、套取作者文章及个人信息, 侵犯了广大作者的切身权益。

特此声明, 本刊唯一官方网站为 [www.fstjournal.net](http://www.fstjournal.net), 投稿方式为网站注册登录投稿, 不接受邮箱投稿。请作者投稿时务必认准杂志官方网站, 谨防受骗。

本刊郑重警告伪网站相关人员尽快停止违法行为, 否则将严肃对待, 并将运用一切法律手段维护本刊的权利。

请广大读者协助本刊监督网络上的不法行为, 一经发现, 请联系本刊, 本刊将及时处理, 共同努力营造良好的期刊网络氛围。

《锻压技术》杂志联系方式: [fst@263.net](mailto:fst@263.net); 010-62920652。

《锻压技术》编辑部