

# 热轧卷取机扇形板应力场仿真研究

陈天翔<sup>1,3</sup>, 庄曙东<sup>1,2</sup>, 董春光<sup>3</sup>, 陈威<sup>1</sup>, 史柏迪<sup>1</sup>

(1. 河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022;

2. 南京航空航天大学 江苏省精密仪器重点实验室, 江苏 南京 210016;

3. 宝菱重工机械有限公司, 江苏 常州 213022)

**摘要:** 为了获得卷取机扇形板在卷取过程中所受的应力场分布情况, 通过给出扇形板所受径向压力计算方法, 建立卷取模型的物理方程, 得出柱塞接触位置的正压力。对扇形板的接触情况进行讨论, 给出相应的接触行为及其接触参数, 运用 Ansys 有限元分析软件, 得到扇形板与外部带钢接触时的等效应力分布图。将等效应力与同一时刻的温度应力相耦合, 得到最终在实际工况下龟裂集中区的应力场, 既弥补了生产过程当中无法直接测量扇形板应力大小的不足, 又为进一步探究扇形板龟裂现象提供了有效的参考依据。

**关键词:** 扇形板; 有限元仿真; 非线性接触分析; 耦合应力场

**中图分类号:** TH164    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1671-5276(2022)03-0104-04

## Simulation Study on Stress Field of Segment of Hot Rolling Coiler

CHEN Tianxiang<sup>1,3</sup>, ZHUANG Shudong<sup>1,2</sup>, DONG Chunguang<sup>3</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>, SHI Baidi<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Precision Instruments, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 210016, China; 3. Baoling Heavy Industry Machinery Co., Ltd., Changzhou 213022, China)

**Abstract:** In order to obtain the distribution of the stress field on the segment of the coiler during the coiling process, the calculation method of the radial pressure on the segment is given, the physical equation of the coiling model is established to obtain the positive pressure at the contact position of the plunger. The contact condition of segment is discussed to gain the corresponding contact behavior and contact parameters. Thus, the equivalent stress distribution diagram of segment contacting with external strip steel is obtained by applying Ansys finite element analysis software. The equivalent stress is coupled with the temperature stress simultaneously to gain the final stress field in the crack concentration area under the actual working condition, which not only makes up for the shortage that the stress of segment cannot be measured directly in the production process, but also provides an effective reference for further exploring the cracking phenomenon of segment.

**Keywords:** segment; finite element simulation; nonlinear contact analysis; coupled stress field

## 0 引言

在现代热连轧带钢生产过程当中, 带钢卷取机是非常重要的设备之一, 带钢的卷取是热轧工艺中最后一道关键工序<sup>[1]</sup>。因此作为热轧工艺应用的重要设备<sup>[2]</sup>, 国内外设计了多种结构的热轧卷取机。目前对于楔形套式热轧卷取机的研究较为成熟, 但该结构当中扇形板与楔形套之间产生的卡紧力超过卷筒的卸卷能力时, 卷筒就不能缩径<sup>[3]</sup>。柱塞连杆式热轧卷取机作为一种新式卷取机能够有效解决这种问题, 目前很少有学者对于该种型号卷取设备的工况有相关研究。

针对扇形板在工作时应力场的研究, 国内外已经有了诸多成果。在扇形板的径向压力方面, 连家创等将卷筒单

位压力的计算当作弹性理论平面问题进行求解<sup>[4-5]</sup>; C.E. 英格利斯公式将层叠卷取的带材和卷筒看成是弹性厚壁筒<sup>[6]</sup>; 蒋昭公式将钢卷看作是径向压紧程度可变的多元圆筒<sup>[7]</sup>。在扇形板的热应力方面, 孟令健对楔形套式热轧卷取机扇形板进行有限元仿真<sup>[8]</sup>; 刘富博研究了楔形套式热轧卷取机扇形板的稳态热应力<sup>[9]</sup>。章健根据相关热应力研究对扇形板磨损及寿命进行预测<sup>[10]</sup>。

本文基于学者周国盈<sup>[11]</sup>对扇形板径向压力的研究, 探究柱塞连杆式热轧卷取机扇形板机械应力与耦合应力, 同时讨论扇形板与带钢接触行为与接触参数的选择, 弥补了国内对柱塞连杆式新型卷取机扇形板卷取模型研究的不足。用仿真软件给出了扇形板实际工况下的应力场分布情况, 这对扇形板龟裂的改善以及寿命的延长具有指导意义, 也为扇形板的选材与制造、冷却工艺的安排与设置

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费(2018B44614); 江苏省高校实验室研究会立项资助研究课题项目(GS2019YB18); 江苏省精密与微细制造技术重点实验室数学建模课题组项目(CZ520007812)

**第一作者简介:** 陈天翔(1997—), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 研究方向为热轧卷取机扇形板有限元仿真。

提供相应的条件。

## 1 扇形板机械应力场边界条件

### 1.1 扇形板径向压力的计算

扇形板与钢卷之间挤压力的产生主要是由于扇形板外侧钢卷缠绕效应的作用<sup>[12]</sup>。图1为扇形板径向压力示意图,图中A为带钢,B为卷筒上4块扇形板。将卷筒简化为连续带环多层组合弹性圆筒,同时考虑外侧钢卷层间摩擦力的影响,带卷上的总径向压力为各层径向压力之和<sup>[11]</sup>。根据接触条件可以确定径向压力增量,通过积分得径向压力公式为

$$P_0 = \frac{\sigma_0 \left(1 + \frac{1}{e^{f/\pi}}\right)}{2(B+1)} \ln \frac{B(R_c^2 - r_2^2) + R_c^2 + r_2^2}{2r_2^2} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad B = \frac{E_2(r_2^2 + r_c^2)}{E_1(r_2^2 - r_c^2)} - u_1 + \frac{E_2}{E_1} u_2 \quad (2)$$

式中: $\sigma_0$ 为单位张力,MPa; $r_c$ 为卷筒当量内半径,mm; $r_2$ 为卷筒外半径,mm; $R_c$ 为带卷最大卷取半径,mm; $E_1$ 为卷筒的弹性模量; $E_2$ 为带材的弹性模量; $u_1$ 为卷筒的泊松比; $u_2$ 为带材的泊松比; $f$ 为带材层间摩擦系数。

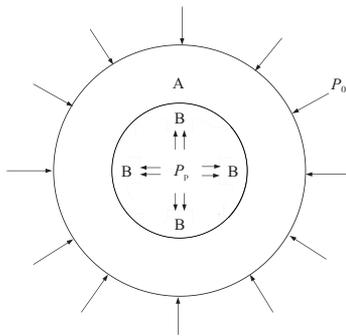


图1 径向压力计算示意图

### 1.2 卷取模型的物理方程

柱塞连杆式热轧卷取机的卸卷主要依靠其内部柱塞对扇形板的顶缩来实现,柱塞与扇形板接触面位置如图2所示。卷取机卷取过程中,4块扇形板都受到柱塞对其3个面上的正压力作用。将单块扇形板与其所接触部分带钢作为一个整体,进行受力分析。该分离体在正压力方向上的合力为0,如图3所示。

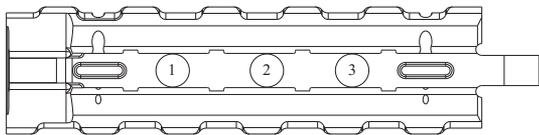


图2 柱塞接触面位置示意图

以对称轴为起始零轴,向右为正,向左为负,则平衡方程式为

$$\pi r_p^2 P_p = \int_{-\pi/4}^{\pi/4} P_0 L r_2 \cos \theta d\theta \quad (3)$$

式中: $P_p$ 为扇形板受到柱塞压力,MPa; $L$ 为带钢宽度,mm; $r_p$ 为柱塞面半径,mm; $\theta$ 为距离对称轴角度,rad。

经过计算, $P_p$ 的值大小为21.66MPa,相当于100t的力施加到扇形板上。

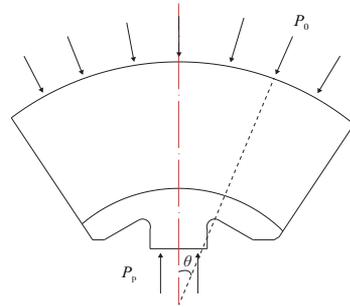


图3 单个扇形板与带材受力示意图

## 2 扇形板卷取过程非线性接触分析

### 2.1 接触行为的确定

几乎所有接触问题都是非线性的,在Ansys经典版本中有7种接触行为,包括标准接触行为、粗糙接触行为、绑定接触行为、绑定接触行为(始终)、绑定接触行为(初始接触)、不分开型、不分开型(始终)<sup>[13]</sup>。

带钢在扇形板上的接触行为分为如图4的4个过程:分离状态、带钢与扇形板一侧线接触、带钢与扇形板的部分区域面接触、完全闭合状态。该过程符合标准接触行为的要求。图中,数字1、2表示带钢分离体的前、后两端面;数字3、4表示扇形板的左、右两侧面。

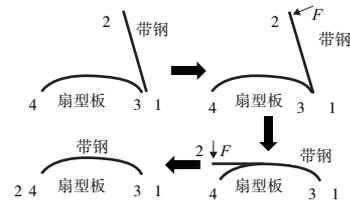


图4 卷取接触行为

### 2.2 其他接触参数的确定

图5所示为建立的接触分析的三维模型。扇形板与带钢接触为面-面接触,根据接触面和目标面的确定准则,定义带钢内层凹面为目标面,扇形板外表面凸面为接触面。在Ansys中可以选择接触向导快速创建接触对。其中目标面可以设置为170号单元,接触面设置为174号单元。由于两者挤压作用,接触面上会产生一定的摩擦力,其摩擦系数设置为0.2。

实际卷取过程当中,带钢与扇形板互不穿透,为了体现这样一种接触协调关系,同时尽可能得到最大精度,可设置接触刚度为1,渗透容差为0.1,同时设置缩小间隙/减少穿透选项来自动调整接触穿透。

为了提高计算的收敛性,采用增广Lagrangian算法。该算法将罚函数法和Lagrangian乘子法结合起来强制接

触协调,迭代开始时,确定罚刚度,一旦达到平衡,检查渗透容差,同时控制接触压力的增加,使迭代得以继续。

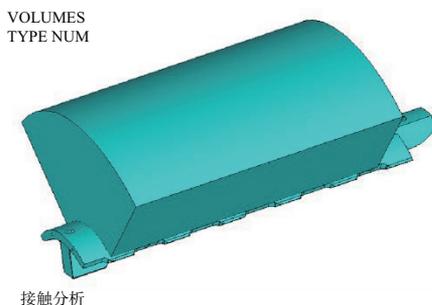


图5 接触分析的三维模型

### 3 有限元模型的建立与结果分析

#### 3.1 卷取过程有限元模型的建立

对图5所示的三维模型进行网格划分。划分过程中扇形板采用自由网格划分,而带钢采用映射网格划分,网格大小调整为0.05 m。图6所示为网格划分结果,划分完的网格节点总数360345个,单元总数共1987774个。赋予各部件相应的材料属性,带钢与扇形板对应的材料参数如表1所示。

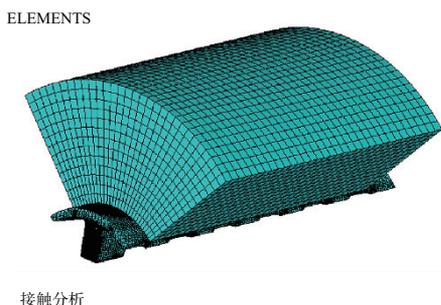


图6 接触分析的网格划分

表1 各个部件的材料参数

部件	材料	弹性模量/Pa	泊松比
带材	普碳钢	$0.95 \times 10^{11}$	0.3
扇形板	X22CrMoV12-1	$1.27 \times 10^{11}$	0.3

#### 3.2 扇形板等效应力结果分析

经过计算,由第四强度理论得出的扇形板等效应力如图7-图8所示。正面等效应力呈块状分布,最大值点位于3个柱塞接触处对应的中心位置,由中心向四周逐渐减少,其他位置处等效应力几乎为0。

由图8可知其等效应力最大处位于扇形板内部凸台与扇形板表面过渡位置的凹槽处,最大值为25.5 MPa。其余远离柱塞接触位置的部位等效应力也几乎为0,满足圣维南原理的表述。

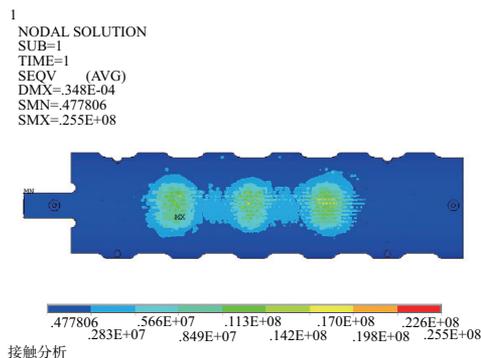


图7 扇形板正面等效应力

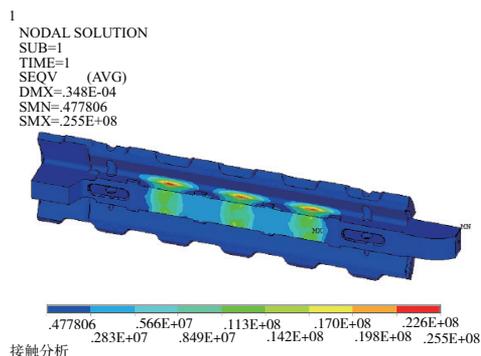


图8 扇形板反面等效应力

### 4 扇形板机械应力对温度应力的影响

#### 4.1 扇形板的龟裂集中区

根据实际情况,扇形板龟裂的主要区域集中在其外表面的中心部位,如图9所示。故本文所讨论的温度应力与耦合应力主要是该区域的应力值,对于扇形板边缘及螺栓孔边缘处由于面积突变所导致的应力奇异点可作适当的剔除。

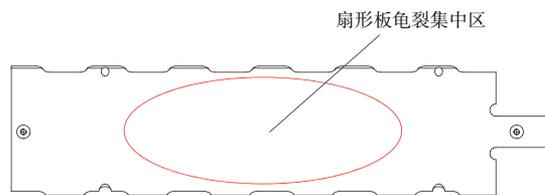


图9 扇形板龟裂部位

#### 4.2 扇形板温度应力的仿真结果

扇形板在连续工作过程当中,受到不断变化的温度场的作用。由于扇形板内外表面温差的不均匀性,在其表层会产生较大的温度应力。图10所示是扇形板在连续工作10卷时,第10卷卷钢结束时刻扇形板表面温度应力分布云图。该时刻带钢在扇形板表面卷取层数达到最大值。图中龟裂集中区的温度应力的最大值为802 MPa,靠近头

尾部分的应力值相对较小。

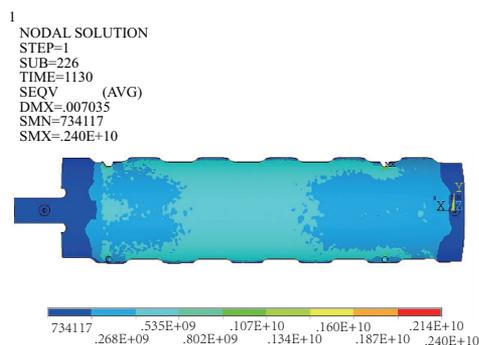


图 10 扇形板温度应力

### 4.3 扇形板耦合应力的仿真结果

将图 10 的温度应力与图 7 的等效应力进行耦合,即可得到扇形板在连续卷取第 10 卷卷钢结束、卸卷之前的时刻点实际工况下的耦合应力,其应力分布图如图 11 所示。图中龟裂集中区的最大耦合应力约为 379 MPa,个别区域 $<190$  MPa,整体应力区域呈带状分布。对比温度应力,耦合应力数值要小于温度应力,其原因在于扇形板与带钢接触产生非线性机械应力,该应力可以近似看作为上节所示的等效应力。由于温度应力为三向应力状态,而机械应力为单向压应力,两者综合作用的结果导致了部分区域内节点应力值的减小。

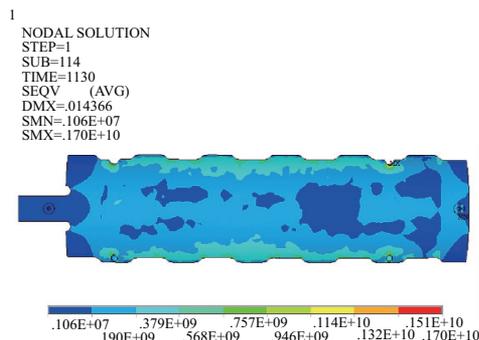


图 11 扇形板耦合应力

## 5 结语

1) 通过扇形板径向压力的计算,建立卷取模型的物理方程,得到卷取过程当中扇形板内部柱塞顶出力大小约为 100 t。

2) 扇形板与带钢接触行为为标准接触,同时确定各个接触参数,进一步通过有限元法建立计算模型,得出外表面最大应力出现在柱塞对应中心位置,内部的最大应力出现在凹槽处,大小为 25.5 MPa。

3) 在扇形板表面龟裂集中区部位,由于与带钢的非线性接触所产生的机械应力对由于间歇性外部水冷产生的温度应力起到了削减作用。

### 参考文献:

- [1] 王爱华. 国内外强力卷取机设备改造及应用情况分析[J]. 中国钢铁业, 2014(10): 30-33.
- [2] 丛振华. 热轧卷取机张力控制系统[J]. 中国金属通报, 2019(2): 78-79.
- [3] 李俊洪, 连家创, 孙蓟泉, 等. 1580 热连轧机卷取机卷筒扇形板热变形研究[J]. 重型机械, 2001(3): 35-37, 48.
- [4] 白振华, 连家创. 差分法计算卷取机卷筒单位压力[J]. 重型机械, 2002(1): 22-24.
- [5] 连家创. 卷取机卷筒单位压力的计算[J]. 东北重型机械学院学报, 1979, 3(增刊 1): 1-9.
- [6] 白卫卫, 史锡强. 卷取机卷筒的静态应力变形分析[J]. 机械研究与应用, 2007, 20(6): 17, 20.
- [7] 宋晓东. 卷取机卷筒涨缩缸直径计算[J]. 一重技术, 2007(6): 1-2.
- [8] 孟令健. 热轧卷取机卷取过程仿真及关键部件模拟分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [9] 刘富博. 热轧卷取机关键部件有限元分析及模态研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2015.
- [10] 章健. 热轧卷取机卷筒扇形板失效机理及寿命研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.
- [11] 周国盈. 带钢卷取设备[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982: 37-67.
- [12] 高卫军. 带钢张力辊的设计计算和结构分析[J]. 中国重型装备, 2017(4): 7-10.
- [13] 孙韵韵. 粗糙固结界面接触特性分析与非线性振动机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.

收稿日期: 2021-02-24