

# 连续退火炉内炉辊热变形的有限元分析

苏步新<sup>1</sup>, 何飞<sup>2</sup>

(1. 冶金工业出版社, 北京 100009; 2. 安徽工业大学 冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

**摘要:** 炉辊热变形是影响连续退火炉内带钢瓢曲和跑偏的关键因素之一, 合理控制热态辊形变化对连续退火过程高效稳定通板至关重要。针对连续退火炉内最重要的加热段和冷却段工序, 采用 ANSYS 软件建立炉辊有限元模型, 基于软件的热力耦合分析, 模拟不同工况下加热段和冷却段炉辊的热变形, 比较分析冷态和热态工况下辊形曲线变化, 讨论炉辊温度分布和轴向温差对炉辊辊形变化的影响规律。结果表明: 加热段炉辊较大的轴向温差会使单锥度辊变为平辊, 不起防跑偏的作用; 冷却段炉辊较大的轴向温差会使平辊变为具有一定凸度的炉辊, 增加带钢的冷瓢曲风险。炉辊轴向温差控制在  $\leq 50$  °C 时, 热变形对炉辊形状的影响较小。

**关键词:** 连续退火炉; 炉辊; 带钢; 热变形; 温度分布; 有限元

**中图分类号:** TG 335; TG 156.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.22236



## Finite Element Analysis of Thermal Deformation of Hearth Rollers in Continuous Annealing Furnace

SU Buxin<sup>1</sup>, HE Fei<sup>2</sup>

(1. Metallurgical Industry Press, Beijing 100009, China; 2. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

**Abstract:** The thermal deformation of the hearth rollers is one of the key factors affecting the buckling and deviation of the strip steel in the continuous annealing furnace. Reasonable control of hot roll shape change is very important for high efficiency and stability of pass plate technology in continuous annealing process. For the most important heating section and cooling section in the continuous annealing furnace, the finite element model of the hearth roller was established by ANSYS software. Based on the thermal mechanical coupling analysis of the software, the thermal deformation of the hearth roller in the heating section and cooling section under different working conditions was simulated. The change of the roll shape curve under cold and hot working conditions was compared and analyzed. The influence of the temperature distribution of the hearth roller and the axial temperature difference on the change of the roller shape were discussed. The results show that the large axial temperature difference of the hearth roller in the heating section will change the single taper roller into a flat roller, which does not play a role of preventing the strip deviation. The large axial temperature difference of the hearth roller in the cooling section will change the flat roller into a roller with a certain crown, which increases the cold buckling risk of the strip. When the axial temperature difference of the hearth roller is controlled at  $\leq 50$  °C, the thermal deformation has less influence on the roller shape.

收稿日期: 2022-09-14

基金项目: 安徽省自然科学基金项目 (2008085QE225)

作者简介: 苏步新 (1985—), 男, 安徽合肥人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为钢铁冶金。

通信作者: 何飞 (1986—), 男, 安徽枞阳人, 博士, 副教授, 主要研究方向为冶金过程数值模拟。

引文格式: 苏步新, 何飞. 连续退火炉内炉辊热变形的有限元分析[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2023, 40(1):24-29.

**Keywords:** continuous annealing furnace; hearth roller; strip; thermal deformation; temperature distribution; finite element

连续退火炉是冷轧带钢生产中的关键设备, 带钢通过连续退火炉进行再结晶退火热处理, 可消除冷轧过程的加工硬化和残余应力, 改善钢的性能, 很多高级别带钢产品如汽车用板、家电用板和电工用板等须经过连续退火炉热处理。冷的带钢从进炉到出炉, 需要通过高速(目前工艺速度超过 350 m/min) 运行来完成一个较长的连续热处理过程, 炉内带钢长度甚至达 2 000 m 以上<sup>[1]</sup>。带钢在炉内的连续前行是在一定张力作用下依靠大量的炉辊驱动的, 实际生产中带钢在温度不同的炉段绕炉辊上下运行时会出现瓢曲变形和跑偏问题, 严重影响带钢的稳定运行, 阻碍高速通板的发展<sup>[2]</sup>。

炉辊辊形是影响炉内带钢瓢曲和跑偏的关键因素之一<sup>[3]</sup>。Sasaki 等<sup>[4]</sup>、Matoba 等<sup>[5]</sup>、Masui 等<sup>[6]</sup>、Kasada 等<sup>[7]</sup>采用铝箔或软钢箔代替带钢进行冷态和热态实验, 模拟分析了炉辊辊形对带钢瓢曲的影响; Jacques 等<sup>[8]</sup>、Yang 等<sup>[9]</sup>、Bai 等<sup>[10]</sup>通过有限元法和理论解析法模拟得出炉辊凸度是带钢产生瓢曲的主要原因; 王海玉等<sup>[11]</sup>通过有限元方法分析了双锥度辊形参数对带钢跑偏的影响; 任伟超等<sup>[12]</sup>采用回归的方法分析了炉辊凸度对带钢跑偏的影响; 白振华等<sup>[13]</sup>提出了适合于连退机组的全炉段炉辊辊形曲线综合优化设定技术。但以上研究均没有深入分析炉辊表面温差产生的热变形对带钢瓢曲和跑偏的影响。唐荻等<sup>[14]</sup>、Hu 等<sup>[15]</sup>考虑了实际连续退火炉内炉辊表面温差产生的热变形及其对带钢瓢曲和跑偏的影响, 但把炉辊看成实心的, 而实际炉辊是离心浇铸的空心炉辊, 实心炉辊和空心炉辊的热变形情况有所不同。

带钢在连续退火炉内连续运行过程中会长时间与不同的炉辊接触, 不管是冷带钢接触热炉辊还是热带钢接触冷炉辊, 炉辊温度分布必然影响带钢温度及其分布的均匀性, 而且炉辊表面温差产生热变形也会影响炉辊的原始凸度, 改变炉辊的辊形, 从而会增加带钢瓢曲和跑偏的风险。同时, 考虑到连续退火炉内环境恶劣复杂和封闭性, 采用实验测量和理论分析研究比较困难。因此, 采用有限元法模拟分析连续退火炉内不同工况下的炉辊热变形及其对辊形的影响, 为现场有效控制炉辊热态辊形和改善带钢瓢曲、跑偏提供理论依据和指导。

## 1 炉辊热变形的有限元模型

### 1.1 几何模型和网格划分

连续退火炉一般由预热段、加热段、均热段、冷却段(缓冷段和快冷段)、过时效段和终冷段等工序组成<sup>[16-17]</sup>。加热段和冷却段是连续退火炉内最重要的工序, 带钢与炉辊之间的接触传热会使稳态炉辊产生较大的轴向温差, 进而使炉辊产生热变形。以国内某厂连续退火炉为例, 加热段的炉辊为单锥度辊, 结构尺寸如图 1; 冷却段的炉辊为平辊(无锥度)。加热段和冷却段炉辊均为空心炉辊, 两者直径、厚度和长度相同, 分别为 0.9、0.022、2.4 m。采用 ANSYS 软件分别建立加热段和冷却段炉辊的几何模型; 再采用 solid70 三维热实体单元划分网格, 建立炉辊的有限元模型, 如图 2。

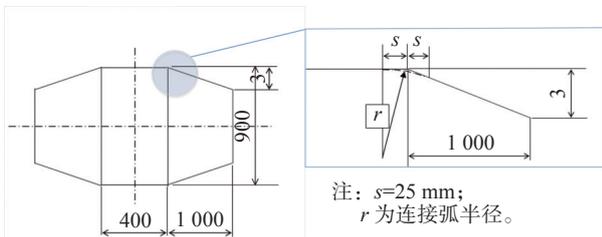


图1 加热段冷态炉辊形状和尺寸 单位:mm

Fig. 1 Shape and dimension of cold hearth roller in heating section Unit: mm

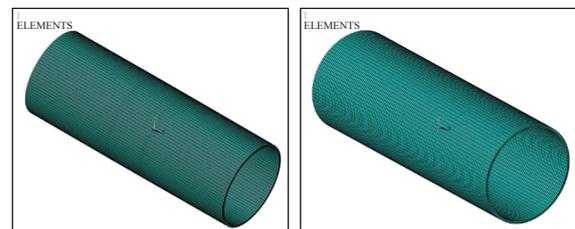


图2 加热段和冷却段炉辊的有限元模型

Fig. 2 Finite element models of hearth rollers for heating section and cooling section

### 1.2 材料属性

连续退火炉的炉辊辊身一般用耐热钢离心浇铸, 炉辊密度为 7 860 kg/m<sup>3</sup>, 其主要物性参数(比热容、热导率、弹性模量和热膨胀系数)随温度变化的关系如表 1。取泊松比为 0.3, 热变形分析时的参考温度为 298 K。

### 1.3 边界条件和求解

采用间接耦合方法, 通过 ANSYS 软件的稳态热分析将炉辊温度分布曲线或函数加载至炉辊, 再将

solid70 三维热实体单元转为 solid185 结构单元, 进行炉辊的热应力分析。对于炉辊热变形有限元模型的边界条件, 主要在炉辊两端施加固定约束。当炉辊转动足够长时间达稳态时, 其平直段温度和带钢温度非常接近, 炉辊两端未与带钢接触部分的温度为炉温。为简化分析, 对于加热段, 直接采用图 3 所示的炉辊温度分布曲线或式 (1) 的炉辊温度函数。其中: 与带钢接触的炉辊平直段温度为带温; 炉辊沿辊身方向、超过带钢宽度部分为炉温; 炉辊平直段以外、带钢宽度以内部分的温度呈线性变化, 炉辊温差为炉温和带温之差。由此, 根据计算工况对炉辊温度分布曲线编制程序, 将其加载至炉辊计算加热段和冷却段的温度分布, 结果如图 4, 这里忽略炉辊厚度方向温差。

表 1 炉辊的热物性参数

Tab. 1 Thermal physical parameters of hearth roller

温度/K	比热容/ (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	热导率/ (m·K)	弹性模 量/GPa	热膨胀系数/ (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )
293	468	18.74	200	15.5
773	683	22.05	160	17.0
973	692	22.88	145	17.5
1 173	670	26.16	135	18.5
1 273	700	28.89	125	19.0

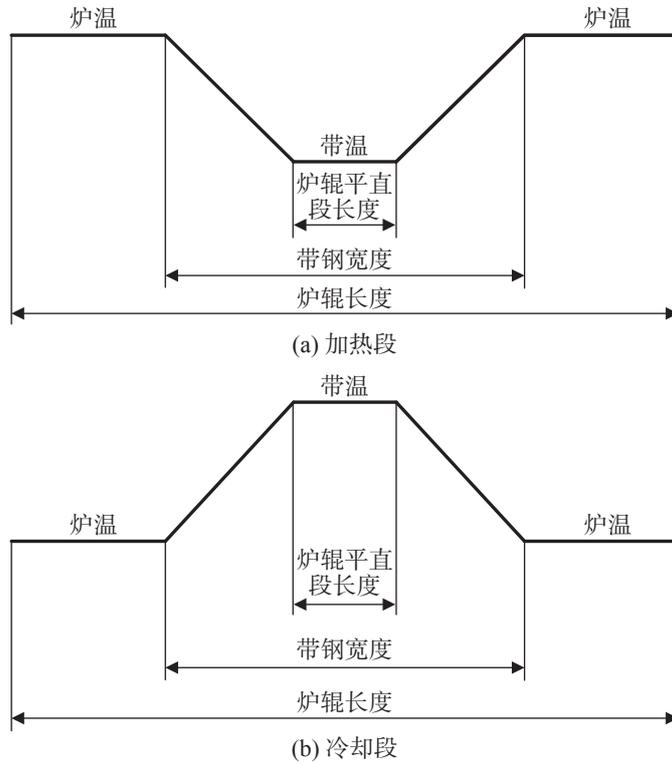


图3 加热段和冷却段炉辊的温度分布曲线

Fig. 3 Temperature distribution curve of hearth roller in heating section and cooling section

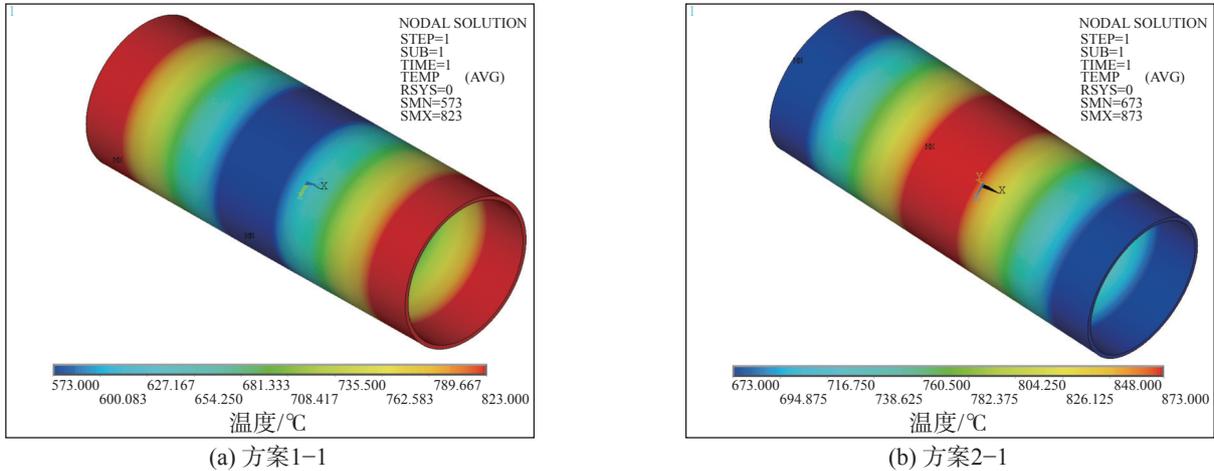


图4 加热段和冷却段炉辊的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of hearth roller in heating section and cooling section

$$t_{\text{roller}} = \begin{cases} t_f, & x \leq -\frac{B}{2} \text{ 或 } x \geq \frac{B}{2} \\ t_s, & -\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2} \\ \frac{t_f - t_s}{\frac{B}{2} - \frac{L}{2}} \left(x - \frac{L}{2}\right) + t_s, & \frac{L}{2} < x < \frac{B}{2} \\ \frac{t_f - t_s}{\frac{L}{2} - \frac{B}{2}} \left(x + \frac{L}{2}\right) + t_s, & -\frac{B}{2} < x < -\frac{L}{2} \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $x$  为炉辊宽度方向坐标, 坐标原点在炉辊几何中心;  $t_{\text{roller}}$  为沿  $x$  轴不同位置炉辊温度;  $t_f$  和  $t_s$  分别为炉温和带温;  $B$  为带钢宽度;  $L$  为炉辊平直段长度。

### 1.4 计算工况

根据加热段和冷却段的特点, 改变式 (1) 炉辊温度函数中的炉温 ( $t_f$ ) 和带温 ( $t_s$ ), 设计不同的炉辊温度分布计算工况, 如表 2。其中: 方案 1-1~方案 1-11 为加热段计算工况, 方案 2-1~方案 2-5 为冷却段计算工况。

表 2 不同计算工况方案

Tab. 2 Calculation schemes under different working conditions

方案	炉温/°C	带温/°C	炉辊轴向温差/°C	带宽/mm
1-1	550	300	250	1 870
1-2	550	350	200	1 870
1-3	550	400	150	1 870
1-4	550	450	100	1 870
1-5	550	500	50	1 870
1-6	550	550	0	1 870
1-7	500	300	200	1 870
1-8	450	300	150	1 870
1-9	400	300	100	1 870
1-10	350	300	50	1 870
1-11	300	300	0	1 870
2-1	400	600	200	1 870
2-2	400	550	150	1 870
2-3	400	500	100	1 870
2-4	400	450	50	1 870
2-5	400	400	0	1 870

## 2 结果与讨论

### 2.1 加热段炉辊热变形

加热段不同工况炉辊热变形的模拟结果如图 5。由图 5 可知: 炉辊轴向温差越大, 炉辊热变形的径向位移呈 M 型分布越明显; 相较其他方案, 方案 1-1 炉辊轴向温差最大 (250 °C), 对应的 M 型分布最明显。具体看, 图 5(a) 表明: 对于炉温相同 (550 °C)、带温不同 (300, 350, 400, 450, 500, 550 °C) 的工况, 在  $x = \pm 960$  mm 附近, 炉辊径向变形位移最大, 达 5.0~5.5 mm; 炉辊中心 (即  $x = 0$  mm) 处, 带温越低炉

辊轴向温差越大, 炉辊中部径向变形位移越小, 从方案 1-6 (带温为 550 °C) 到方案 1-1 (带温为 300 °C), 炉辊中部径向变形位移从 5.25 mm 减至 3.05 mm, 主要是由于冷带钢与热炉辊中部接触, 使炉辊中部温度低于两端。图 5(b) 表明: 对于带温相同 (300 °C)、炉温不同 (300, 350, 400, 450, 500, 550 °C) 的工况, 炉辊中部径向变形位移在 3.0 mm 附近; 而在  $x = \pm 960$  mm 附近的最大径向变形位移影响较大, 炉温从 300 °C (方案 1-11) 增至 550 °C (方案 1-1), 炉辊最大径向变形位移从 2.85 mm 增至 5.13 mm。

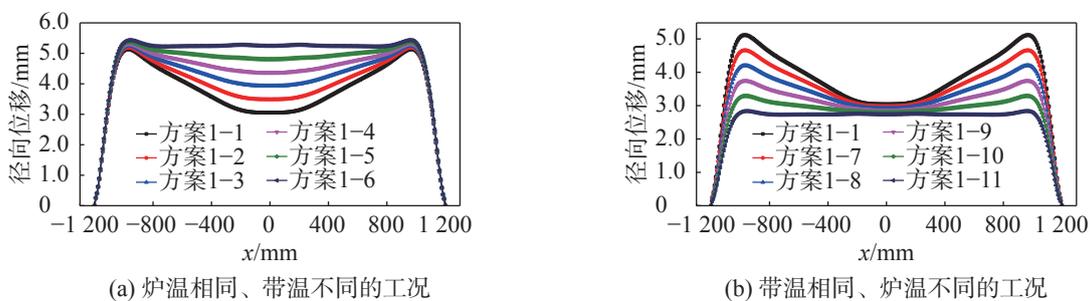


图 5 加热段炉辊表面沿宽度方向的径向位移

Fig. 5 Radial displacement along width direction of roller surface in heating section

炉辊的这种热变形量会改变冷态炉辊形状, 如图 6 所示, 热态炉辊表面形貌发生了明显变化。一方面, 热态炉辊半径整体有所增加; 另一方面, 炉辊轴向温差越大, 热变形产生的 M 型径向位移分布越明显, 其与炉辊的原始凸度叠加后抵消了原单锥度辊的凸度, 使原单锥度辊不起防跑偏等作用。由图 6 可看出: 冷态工

况下,在 $-200\text{ mm}\leq x\leq 200\text{ mm}$ 时,为炉辊平直段,在 $-1200\text{ mm}\leq x\leq -200\text{ mm}$ 或 $200\text{ mm}\leq x\leq 1200\text{ mm}$ 时,为单锥度辊,辊形曲线斜率为 $\pm 0.30\%$ ;热态工况下,炉辊热变形后形状为双锥度辊。具体看,对于方案1-1,炉辊温差为 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,辊形曲线在 $-1200\text{ mm}\leq x\leq 1200\text{ mm}$ 时接近于水平;对于方案1-4和方案1-9,炉辊温差为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,辊形曲线在 $-200\text{ mm}\leq x\leq 200\text{ mm}$ 时仍为平直段,在 $-960\text{ mm}\leq x\leq -200\text{ mm}$ 或 $200\text{ mm}\leq x\leq 960\text{ mm}$ 时,为单锥度辊,辊形曲线斜率为 $\pm 0.19\%$ ;对于方案1-5和方案1-10,炉辊温差为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,辊形曲线在 $-200\text{ mm}\leq x\leq 200\text{ mm}$ 仍为平直段,在 $-960\text{ mm}\leq x\leq -200\text{ mm}$ 或 $200\text{ mm}\leq x\leq 960\text{ mm}$ 时,为单锥度辊,辊形曲线斜率为 $\pm 0.25\%$ ;对于方案1-6和方案1-11,炉辊温差为 $0$ ,辊形曲线在 $-200\text{ mm}\leq x\leq 200\text{ mm}$ 仍为平直段,在 $-960\text{ mm}\leq x\leq -200\text{ mm}$ 或 $200\text{ mm}\leq x\leq 960\text{ mm}$ 时,为单锥度辊,辊形曲线斜率接近 $\pm 0.30\%$ 。

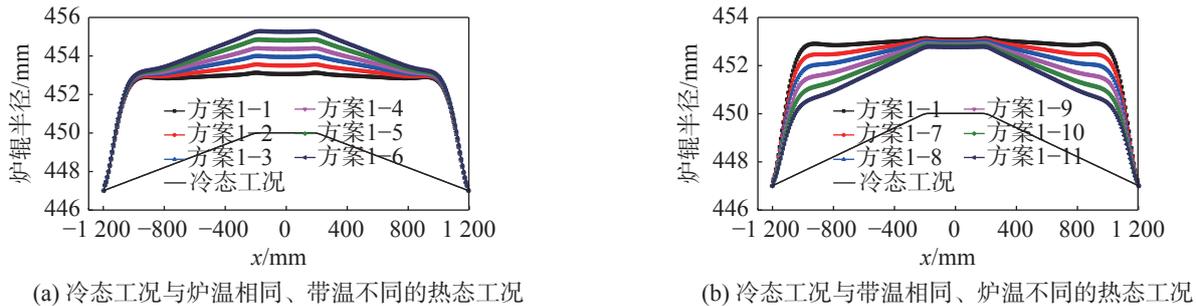


图6 加热段炉辊热变形前后的辊形曲线变化

Fig. 6 Change of roller profile before and after hot deformation of hearth roller in heating section

由此可知,炉辊轴向温度分布的不均匀会引起炉辊辊形曲线的明显变化,主要体现为:在 $-960\text{ mm}\leq x\leq -200\text{ mm}$ 或 $200\text{ mm}\leq x\leq 960\text{ mm}$ 范围内,炉辊温差越大,辊形曲线越接近于水平或者说锥度越小,起不到自动纠偏作用,这是引起加热段带钢绕炉辊高速运行过程跑偏的重要因素;反之,炉辊温差越大,辊形曲线的锥度越大,实际生产时应将炉辊温差控制在 $\leq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,此时热态与冷态炉辊辊形曲线较接近,纠偏能力最强。

## 2.2 冷却段炉辊热变形

冷却段不同工况炉辊热变形的模拟结果如图7,8。由图7可知:炉辊轴向温差越大,炉辊中部节点偏移越大;方案2-1炉辊轴向温差在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,炉辊中间节点偏移最明显,达 $5.51\text{ mm}$ ,两边越来越小,这是因为带钢温度高于炉辊温度,炉辊中间段与带钢直接接触,导致炉辊中间段温度较高,使得炉辊中心位置的变形增大;炉辊温差从 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (方案2-1)减至 $0$ (方案2-5),炉辊中部节点径向变形位移从 $5.51\text{ mm}$ 降至 $3.75\text{ mm}$ ,单位炉辊温差变化下炉辊中部节点径向变形位移的变化量为 $0.88\text{ }\% \cdot \text{mm} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;炉辊温差为 $0$ ,在 $-960\text{ mm}\leq x\leq 960\text{ mm}$ 范围内炉辊径向变形位移相等。

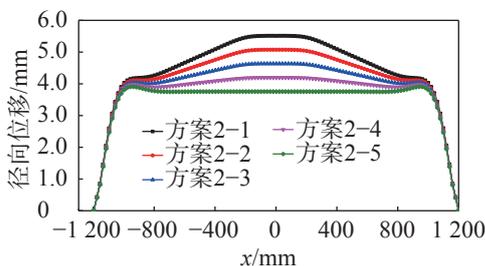


图7 冷却段炉辊表面沿宽度方向的径向位移

Fig. 7 Radial displacement along width direction of roller surface in cooling section

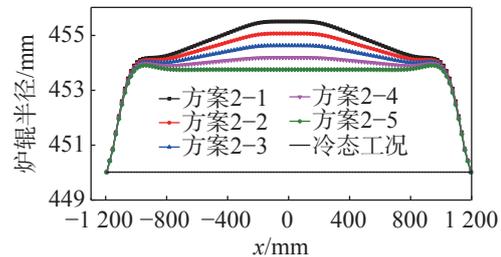


图8 冷却段炉辊热变形前后的辊形曲线变化

Fig. 8 Change of roller profile before and after hot deformation of hearth roller in cooling section

由图8可知:热态工况下炉辊表面形状发生了明显的变化,而且由于冷却段不同的炉辊温度分布,热态炉辊表面形状的变化与加热段明显不同。具体来看:与冷态炉辊辊形相比,热态炉辊半径整体有所增加,辊形由平辊变为凸度辊;热态炉辊轴向温差越大,热变形引起的正凸度变化越大,即凸度辊形状越明显,这会增加冷瓢曲发生的风险;方案2-4热变形后的中部炉辊凸度较小,接近于平辊,即炉辊轴向温差 $\leq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,炉辊的热变形不会改变原平辊的作用,否则会增加冷瓢曲的风险。

### 3 结 论

基于实际连续退火炉结构和工艺特点,采用有限元软件 ANSYS 建立加热段和冷却段炉辊的有限元模型,基于软件的热力耦合分析,模拟加热段和冷却段炉辊的热变形,分析不同工况下炉辊热态辊形变化规律,得到以下主要结论:

1) 炉辊温度分布的不均匀会引起炉辊辊形凸度的明显变化;

2) 加热段炉辊较大的轴向温差会使单锥度辊变为平辊,不起防跑偏的作用,当炉辊温差 $\leq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,炉辊的热变形影响较小;

3) 冷却段炉辊较大的轴向温差会使平辊变为具有一定凸度的炉辊,增加带钢的冷瓢曲风险,当炉辊温差 $< 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,炉辊的热变形影响较小。

较大的炉辊温差会使炉辊产生热变形,引起炉辊辊形变化,这是引起带钢加热段跑偏和冷却段瓢曲的重要原因。因此,本文研究可为现场有效控制炉辊热态辊形和改善带钢瓢曲、跑偏提供理论依据和实际指导。

#### 参考文献:

- [1] 尹家凡,陶涛.高速连退机组的几个关键控制技术[J].冶金自动化,2020,44(3):45-50.
- [2] WANG R, LI Y, BAI Z H, et al. Modelling and simulation of strip running deviation in continuous annealing process[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2020, 47(5):553-560.
- [3] 刘亚星,方永,滕华湘,等.带钢退火关键工艺与产品质量综合控制技术概述[J].轧钢,2022,39(4):27-34.
- [4] SASAKI T, HIRA T, ABE H, et al. Control of strip buckling and snaking in continuous annealing furnace[J]. Kawasaki Steel Technical Report, 1984, 9:37-45.
- [5] MATOBA T, ATAKA M, AOKI I, et al. Effect of roll crown on heat buckling in continuous annealing and processing lines[J]. Tetsu to Hagane, 1994, 80(8):61-66.
- [6] MASUI T, KASEDA Y, ISAKA K. Basic examination on strip wandering in processing plants[J]. ISIJ International, 2000, 40(10):1019-1023.
- [7] KASEDA Y, MASUI T, HIROOKA E, et al. Development of pinch rolls to control strip wandering in strip processing lines[J]. ISIJ International, 2001, 41(11):1366-1372.
- [8] JACQUES N, ELIAS A, POTIER-FERRY M, et al. Buckling and wrinkling during strip conveying in processing lines[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 190(1):33-40.
- [9] YANG J, TANG D, SU L, et al. Effect of roller shapes on strip buckling in a continuous annealing furnace[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2011, 18(3):297-302.
- [10] BAI Z H, WANG R, DU J C, et al. Modelling of strip buckling in the continuous annealing process[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2016, 44(10):1-7.
- [11] 王海玉,杨荃,张葵,等.连续退火炉内双锥度辊形参数对带钢跑偏的影响[J].北京科技大学学报,2014,36(3):373-377.
- [12] 任伟超,李洋龙,杨枕,等.冷轧连续退火炉加热段出口带钢跑偏研究[J].钢铁研究学报,2018,30(9):723-728.
- [13] 白振华,许鹏,王晓雷,等.连退机组炉辊辊型曲线综合优化设定技术开发[J].钢铁,2019,54(12):48-54.
- [14] 唐荻,杨静,苏岚,等.连退炉内炉辊热变形对带钢瓢曲变形的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(5):1724-1730.
- [15] HU G K. Control of thermal crown in the roller inside the continuous annealing furnace[J]. Baosteel Technical Research, 2009(1):51-55.
- [16] HE F, WANG Z X, LIU G, et al. Calculation model, influencing factors, and dynamic characteristics of strip temperature in a radiant tube furnace during continuous annealing process[J]. Metals, 2022, 12(8):1256.
- [17] 孙文权,韩应锐,袁铁衡.基于变步长策略的宽带钢连续退火温度场预测模型研究[J].轧钢,2022,39(4):35-40.

责任编辑:何莉