

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20170603

## 连续退火炉 W 型辐射管破损调研及优化措施

刘顺明<sup>1</sup>, 李洋龙<sup>2</sup>, 侯大伟<sup>1</sup>, 王道金<sup>1</sup>, 郑晓飞<sup>1</sup>

(1. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司冷轧作业部, 河北 唐山 064000; 2. 首钢集团有限公司技术研究院, 北京 100043)

**摘 要:** 辐射管损坏会直接影响连续退火炉加热能力和破坏炉内保护气氛, 针对某厂冷轧连退线 W 型辐射管批量开裂情况进行分析, 利用数值模拟的方法研究了辐射管及其附件结构对辐射管应力场的影响, 发现辐射管安装结构不合理是辐射管开裂损坏的直接原因, 进一步提出改进辐射管安装结构的优化方案, 改进后在 850 °C 下的辐射管最大等效应力约为 104 MPa, 并且不存在过大的局部应力集中点, 通过改进可大大降低辐射管开裂概率, 辐射管使用寿命从之前的 2 年延长至 5 年。

**关键词:** 连续退火炉; W 型辐射管; 冷轧; 带钢; 破损

**文献标志码:** A **文章编号:** 0449-749X(2018)06-0103-06

## Damage investigation and optimization measures of W-shaped radiant tube in continuous annealing furnace

LIU Shun-ming<sup>1</sup>, LI Yang-long<sup>2</sup>, HOU Da-wei<sup>1</sup>, WANG Dao-jin<sup>1</sup>, ZHENG Xiao-fei<sup>1</sup>

(1. Cold Rolling Department, Shougang Jingtang United Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan 064000, Hebei, China;  
2. Research Institute of Technology, Shougang Group Corporation Beijing 100043, China)

**Abstract:** The damage of radiant tube will directly affect the capacity of the continuous annealing furnace and the protection atmosphere in the furnace. The large amount of cracking of W-shaped radiant tube in cold rolling continuous annealing line is analyzed. The influence of the structure of radiant tube and its accessories on the stress field of radiant tube is studied by numerical simulation. It is found that the improper installation of the radiant tube is the direct cause of the cracking and damage of the radiant tube, and the optimization scheme for improving the installation structure of radiant tube is further proposed. After improvement, the maximum equivalent stress of radiant tube at 850 °C is about 104 MPa, and there is no large local stress concentration point. The cracking probability of radiant tube is greatly reduced base on this improvement, and the service life of radiant tube is prolonged from 2 to 5 years.

**Key words:** continuous annealing furnace; W-shaped radiant tube; cold rolling; strip; damage

连续退火炉是当前冷轧后处理广泛采用的重要工序之一<sup>[1-4]</sup>, 其工作状态的好坏决定了带钢退火质量和通板效率<sup>[5-9]</sup>。辐射管作为连续退火炉内重要的加热装备, 它的使用寿命直接影响连续退火炉的能力和炉内保护气氛。根据辐射管的结构不同, 辐射管包括直管型、套管型、U 型、W 型和 P 型等类型的辐射管<sup>[10]</sup>, 其中 W 型由于具有热辐射面积大、温度分布均匀等特点<sup>[11]</sup>, 是目前较常使用的一种辐射管。近些年, 辐射管的破损问题时有发生, 并且引起了国内外部分学者的重视, 利用现场调研、元素分析和扫描电镜等手段, 发现辐射管破损的原因主要有材料性能不足<sup>[12]</sup>、预留膨胀空间不足<sup>[12]</sup>、高温冲击<sup>[13]</sup>、氧化腐蚀<sup>[13-15]</sup>、有害元素侵蚀<sup>[15]</sup>等。有一些研究工作通过有限元方法研究了辐射管的传热和

热应力<sup>[16-20]</sup>。但是目前几乎没有结合数值模拟方法来研究 W 型辐射管破损问题的报道, 考虑辐射管实际的安装结构, 使其更符合辐射管工作条件下的受力状态, 这也正是本文关注的重点。

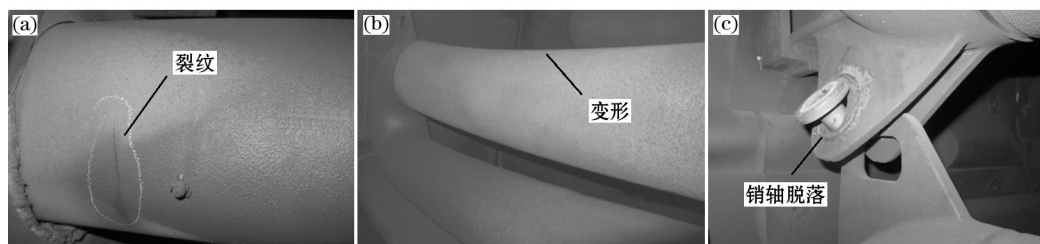
本文基于某厂连续退火炉 W 型辐射管批量开裂问题展开研究, 在确定安装结构问题导致辐射管破损的原因后, 利用数值模拟分析了原始安装条件下辐射管受到的应力, 进一步改进了辐射管安装结构, 取得了明显的优化效果, 辐射管使用寿命得到显著延长。

### 1 连退炉辐射管破损现象

某厂冷轧部连退线共 2 座立式连续退火炉, 均采用 W 型辐射管加热, 介质为焦炉煤气。其中 1 号

连退线辐射管装机量为 356 根,2009 年投产运行,至 2012 年辐射管开裂损坏 260 余根;2 号连退线辐射管装机量为 364 根,2010 年 10 月投产运行,至 2013 年开裂损坏 200 余根。按照单根辐射管价值约 10 万元计算,累计经济损失约 5 000 万元。

辐射管损坏情况如图 1 所示。图 1(a)所示为辐射管下支管距根部约 300 mm 处开裂,图 1(b)所示为辐射管支管变形,出现了明显的弯曲轮廓;图 1(c)所示为辐射管销轴变形并发生脱落。由图可见,辐射管发生了严重的破损。



(a) 辐射管下支管开裂; (b) 辐射管支管变形; (c) 辐射管销轴变形脱落。

图 1 辐射管破损实物

Fig. 1 Pictures of damaged radiant tube

辐射管破损的原因可能包括如下 3 个方面:(1)材质问题,辐射管原材料存在问题,或者使用过程中受到外界侵蚀、变质导致损坏;(2)结构问题,辐射管本身结构或者安装不合理;(3)受热问题,辐射管受热不均,或者局部高温引起的破损。检测分析了辐射管原材料开裂位置的元素成分,见表 1。发现辐射管原材料不存在问题,并且开裂位置的辐射管材质元素成分与原材料成分基本一致。通过辐射管的温度检测,发现辐射管整体温度为 850~950 ℃,不存在局部过热的现象。因此,在排除材质问题和受热问题的原因后,辐射管大量破损极有可能是由辐射管结构问题导致的。为了进一步探究破损原因,建立辐射管热应力模型进行计算。

表 1 辐射管原始和破损试样的化学元素分析(质量分数)

Table 1 Chemical element analysis of initial materials and

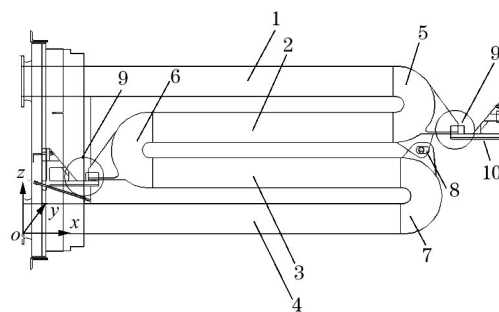
damaged samples of radiant tube %

| 试样   | Ni    | Cr    | W    | Si   | Mn   | C    | P     | S     |
|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|
| 原始材料 | 48.65 | 28.72 | 4.74 | 1.68 | 1.14 | 0.50 | 0.030 | 0.020 |
| 开裂位置 | 48.13 | 28.48 | 4.62 | 1.65 | 1.02 | 0.44 | 0.015 | 0.018 |

## 2 辐射管热应力模型

### 2.1 物理模型

以该厂连退炉辐射管为例,建立辐射管热应力的计算模型。辐射管物理模型如图 2 所示,辐射管上支管、上弯头、中间上支管和中间弯头的材质为 Cr25-Ni35,下支管、下弯头和中间下支管的材质为 Cr28-Ni48,辐射管材质的强度参数见表 2。辐射管销轴为下支管提供支撑,上支管和中间上支管由牛



1—上支管; 2—中间上支管; 3—中间下支管; 4—下支管;  
5—上弯头; 6—中间弯头; 7—下弯头; 8—销轴;  
9—搭接板; 10—牛腿支撑。

图 2 辐射管物理模型

Fig. 2 Physical model of radiant tube

表 2 辐射管材质的强度参数

Table 2 Strength parameters of radiant tube materials

| 材质        | 强度参数     | 室温  | 900 ℃ | 1 000 ℃ | 1 100 ℃ | 1 200 ℃ |
|-----------|----------|-----|-------|---------|---------|---------|
| Cr25-Ni35 | 抗拉强度/MPa | 440 | 196   | 142     | 78      |         |
|           | 屈服强度/MPa | 245 | 132   | 93      | 51      |         |
| Cr28-Ni48 | 抗拉强度/MPa | 390 | 186   | 127     | 74      | 41      |
|           | 屈服强度/MPa | 295 | 103   | 74      | 45      | 25      |

腿支撑来提供,下支管和中间下支管受到具有滑动功能销轴的约束。直角坐标系  $(x, y, z)$  的原点  $O$  位于下支管下端部。

## 2.2 数学模型

根据热弹性理论,建立直角坐标系  $(x, y, z)$  下辐射管的稳态热应力场数学模型

平衡方程

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

几何方程

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\ \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{cases} \quad (2)$$

物理方程

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha(T - T_0) \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)] + \alpha(T - T_0) \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha(T - T_0) \\ \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy}, \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz}, \gamma_{xz} = \frac{1}{G} \tau_{xz} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_i (i=x, y, z)$  为正应力;  $\varepsilon_i (i=x, y, z)$  为正应变;  $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yz}$ 、 $\tau_{zx}$  为切应力;  $\gamma_{xy}$ 、 $\gamma_{yz}$ 、 $\gamma_{zx}$  为剪切应变;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的位移;  $E$  为弹性模量;  $G$  为剪切弹性模量;  $\mu$  为泊松比,满足  $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ ;  $\alpha$  为材料的线膨胀系数。

边界条件:(1)忽略辐射管各部位的温度差异,辐射管整体温度为  $850^\circ\text{C}$ ;(2)牛腿支撑位置的高度方向( $z$ 向)为固定约束;(3)辐射管销轴施加仅有压缩的约束。

## 3 结果分析

### 3.1 辐射管热应力分析

辐射管等效应力云图如图3所示。从计算结果可知,最大等效应力位于上弯头和下弯头之间的销轴,最大值达到  $379\text{ MPa}$ 。辐射管总变形量云图如图4所示。从图中可见,最大变形量位于辐射管上

弯头的支撑处,最大值为  $32\text{ mm}$ 。由于销轴受力变形后,滑动铰接功能失效,变为固定铰接,辐射管的热膨胀和热应力无法释放,辐射管弯曲变形,局部的应力集中和变形量过大导致了辐射管销轴变形脱落、辐射管支管的变形甚至开裂。

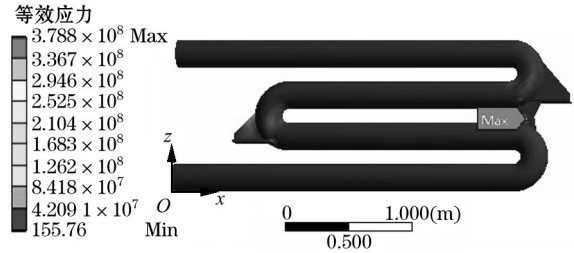


图3 辐射管等效应力云图

Fig. 3 Equivalent stress of radiant tube

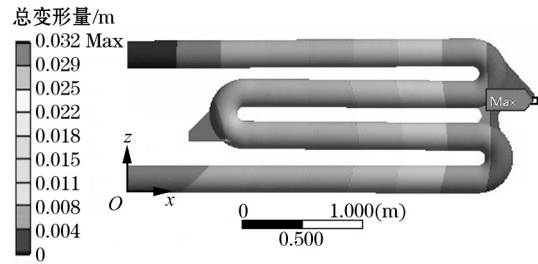


图4 辐射管总变形量云图

Fig. 4 Total deformation of radiant tube

从上面的分析中可知,  $850^\circ\text{C}$  下的辐射管最大等效应力远大于材料的抗拉强度和屈服强度,原始结构的辐射管销轴为下支管提供支撑,但是作为应力集中点,随着销轴变形卡死,滑动铰接变为固定铰接,应力集中无法释放是导致销轴脱落、辐射管变形甚至开裂的直接原因,这就是该厂 W 型辐射管破损的机理。因此,需要对辐射管安装和固定结构进行优化。

### 3.2 辐射管安装结构优化

在辐射管的下弯头增加滑动搭接板,并在炉膛的相应位置增加一个牛腿支撑,辐射管中间下支管和下支管的平衡由新的支撑提供,同时拆除销轴避免变形后导致应力集中,优化的辐射管结构如图5所示。

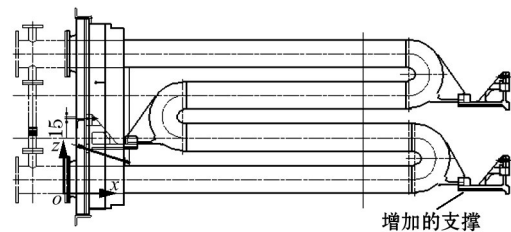


图5 优化的辐射管安装结构

Fig. 5 Optimized installation structure of radiant tube

优化后的辐射管等效力云图如图6所示。通过热应力分析,辐射管最大应力约为104 MPa,可见,下支管新支撑的增加以及上下支管连接销轴拆除,使整个辐射管受到的热应力变得均匀,并且没有过大的热应力集中点。

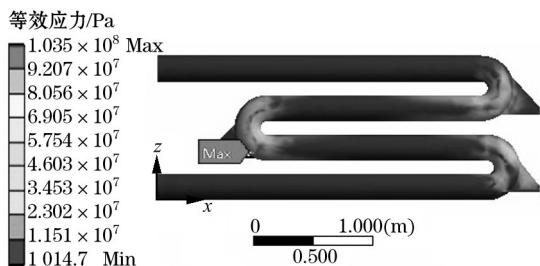


图6 优化的辐射管等效力云图

Fig. 6 Equivalent stress of optimized radiant tube

在不同辐射管温度下,计算得到的优化前、后辐射管的最大等效力如图7所示。从图中可见,随着辐射管温度的升高,优化前、后辐射管的最大应力都逐渐增加,并且两者的差值越来越大,表明了较高的辐射管温度下,改进前的辐射管更容易发生破损,处于高温下的辐射管更有改进的必要。

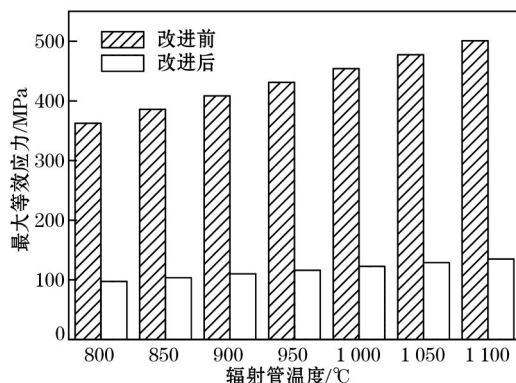


图7 不同温度下改进前后的辐射管最大等效力

Fig. 7 Maximum equivalent stress of radiant tube before and after optimization at different temperature

## 4 改进效果

自2012年至2017年,共计改造3支撑辐射管47根,2017年7月26日进行了辐射管检查,除去当日上线的6根辐射管未验证外,剩余41根中只有1根出现开裂现象,其为2012年10月上线,裂纹长度约4 cm,属于轻微开裂,其余辐射管均正常,见表3。可见,优化辐射管结构后,辐射管寿命从之前的2年

表3 结构改进后的辐射管使用情况

Table 3 Service condition of radiant tube after structure improvement

| 序号 | 辐射管编号 | 安装日期      | 使用时间/a | 检查结果 | 序号 | 辐射管编号 | 安装日期       | 使用时间/a | 检查结果 |
|----|-------|-----------|--------|------|----|-------|------------|--------|------|
| 1  | O6AX  | 2012/10/1 | 4.8    | 未开裂  | 25 | O4AJ  | 2016/7/25  | 1.0    | 未开裂  |
| 2  | O4AW  | 2012/10/1 | 4.8    | 未开裂  | 26 | O4AN  | 2016/7/25  | 1.0    | 未开裂  |
| 3  | O6BC  | 2012/10/1 | 4.8    | 轻微开裂 | 27 | O4AS  | 2016/7/25  | 1.0    | 未开裂  |
| 4  | O4AY  | 2012/10/1 | 4.8    | 未开裂  | 28 | O5AN  | 2016/7/25  | 1.0    | 未开裂  |
| 5  | M6AX  | 2015/3/16 | 2.4    | 未开裂  | 29 | O5AH  | 2016/7/25  | 1.0    | 未开裂  |
| 6  | M3AV  | 2015/3/16 | 2.4    | 未开裂  | 30 | O5AG  | 2016/10/16 | 0.8    | 未开裂  |
| 7  | O2AW  | 2015/8/31 | 1.9    | 未开裂  | 31 | O5AV  | 2016/10/16 | 0.8    | 未开裂  |
| 8  | M4AL  | 2015/8/31 | 1.9    | 未开裂  | 32 | M5AI  | 2016/10/16 | 0.8    | 未开裂  |
| 9  | O4AX  | 2015/8/31 | 1.9    | 未开裂  | 33 | O4AH  | 2016/10/16 | 0.8    | 未开裂  |
| 10 | O1AW  | 2015/8/31 | 1.9    | 未开裂  | 34 | M4BD  | 2016/10/16 | 0.8    | 未开裂  |
| 11 | O4AG  | 2015/8/31 | 1.9    | 未开裂  | 35 | M5AY  | 2016/10/16 | 0.8    | 未开裂  |
| 12 | M6AN  | 2015/8/31 | 1.9    | 未开裂  | 36 | M4AK  | 2016/10/16 | 0.8    | 未开裂  |
| 13 | O4AP  | 2015/8/31 | 1.9    | 未开裂  | 37 | O2AP  | 2017/2/16  | 0.4    | 未开裂  |
| 14 | M4AQ  | 2015/8/31 | 1.9    | 未开裂  | 38 | M4BE  | 2017/2/16  | 0.4    | 未开裂  |
| 15 | O2BC  | 2015/8/31 | 1.9    | 未开裂  | 39 | O1AY  | 2017/2/16  | 0.4    | 未开裂  |
| 16 | O3AP  | 2015/8/31 | 1.9    | 未开裂  | 40 | M5AQ  | 2017/2/16  | 0.4    | 未开裂  |
| 17 | O3AL  | 2016/1/20 | 1.5    | 未开裂  | 41 | O5AY  | 2017/2/16  | 0.4    | 未开裂  |
| 18 | O4AD  | 2016/1/20 | 1.5    | 未开裂  | 42 | M6AD  | 2017/7/26  | 0      | 未开裂  |
| 19 | O4AF  | 2016/1/20 | 1.5    | 未开裂  | 43 | O4AT  | 2017/7/26  | 0      | 未开裂  |
| 20 | O3AW  | 2016/1/20 | 1.5    | 未开裂  | 44 | M2AG  | 2017/7/26  | 0      | 未开裂  |
| 21 | M4AP  | 2016/1/20 | 1.5    | 未开裂  | 45 | O5AM  | 2017/7/26  | 0      | 未开裂  |
| 22 | M4AG  | 2016/1/20 | 1.5    | 未开裂  | 46 | O5BD  | 2017/7/26  | 0      | 未开裂  |
| 23 | M5AJ  | 2016/7/25 | 1.0    | 未开裂  | 47 | M4AT  | 2017/7/26  | 0      | 未开裂  |
| 24 | O3AJ  | 2016/7/25 | 1.0    | 未开裂  | —  | —     | —          | —      | —    |

可延长至 5 年左右。

## 5 结论

(1) 本文对某厂立式连续退火炉 W 型辐射管开裂现象进行探讨分析,利用有限元方法建立辐射管热应力模型,计算了辐射管等效应力,发现辐射管销轴位置存在较大应力,辐射管安装不合理是导致销轴脱落、辐射管破损的直接原因。

(2) 原始结构的辐射管销轴为下支管提供支撑,但其也成为应力集中点,850 ℃ 下的辐射管温度的最大等效应力约为 379 MPa,应力集中无法释放导致辐射管变形、开裂,是辐射管破损的直接原因。

(3) 在辐射管下支管安装牛腿支撑,并且取消上下辐射管支管间的销轴,可以有效缓解辐射管的应力集中现象。辐射管温度越高,优化前、后的辐射管最大等效应力差值越大,因此处于较高温度的辐射管更有必要进行优化。

(4) 通过改进辐射管安装结构,起到了良好效果,大大降低了辐射管开裂概率。自 2013 年至今,累计安装 3 支撑新辐射管 47 个,仅开裂 1 个,辐射管使用寿命由 2 年延长至约 5 年。

### 参考文献:

- [ 1 ] 王瑞,白振华,王云祥,等.连退过程带钢热瓢曲指数及其影响因素[J].钢铁,2016,51(12):94.(WANG Rui,BAI Zhen-hua,WANG Yun-xiang,et al.Strip hot buckling index and its influence factors in continuous annealing process[J].Iron and Steel,2016,51(12):94.)
- [ 2 ] 包仁人,张杰,李洪波,等.非对称板形对连续退火炉内带钢跑偏的影响[J].钢铁,2015,50(5):34.(BAO Ren-ren,ZHANG Jie,LI Hong-bo,et al.Influence of asymmetric flatness errors on strip wandering in continuous annealing lines[J].Iron and Steel,2015,50(5):34.)
- [ 3 ] 李春诚,佟铁印,王亚东,等.连退工艺对低合金高强度钢 HC300LA 力学性能的影响[J].中国冶金,2017,27(3):28.(LI Chun-cheng,TONG Tie-yin,WANG Ya-dong,et al.Effect of continuous annealing process on mechanical properties of high strength low alloy steel HC300LA[J].China Metallurgy,2017,27(3):28.)
- [ 4 ] 陈金山,王君,岑一鸣,等.1 750 mm 冷连轧精冲钢的连续退火工艺[J].中国冶金,2016,26(3):7.(CHEN Jin-shan,WANG Jun,CEN Yi-ming,et al.Continuous annealing process of fine blanked steel for 1 750 mm tandem cold rolling mills[J].China Metallurgy,2016,26(3):7.)
- [ 5 ] 任新意,高慧敏,唐伟,等.基于模式识别的超宽带钢初始板形与连退跑偏[J].钢铁,2016,51(8):49.(REN Xin-yi,GAO Hui-min,TANG Wei,et al.Ultra wide strip wandering in continuous annealing furnace and initial shape based on pattern recognition[J].Iron and Steel,2016,51(8):49.)
- [ 6 ] 白振华,王瑞,张岩岩,等.连退过程中带钢板形在线控制技术[J].钢铁,2016,51(2):62.(BAI Zhen-hua,WANG Rui,ZHANG Yan-yan,et al.Shape online control technique of steel strip in continuous annealing process[J].Iron and Steel,2016,51(2):62.)
- [ 7 ] 郑海燕,王道金,刘顺明,等.冷轧连退炉内带钢跑偏控制[J].轧钢,2017,34(5):86.(ZHENG Hai-yan,WANG Dao-jin,LIU Shun-ming,et al.Control methods of strip running deviation in the continuous annealing furnace used in cold rolling line[J].Steel Rolling,2017,34(5):86.)
- [ 8 ] 史亚鸣,李志敏,曹占元,等.钛带在带钢连续退火炉内张应力横向分布仿真[J].中国冶金,2017,27(9):25.(SHI Ya-ming,LI Zhi-min,CAO Zhan-yuan,et al.Simulation on transverse stress distribution of titanium strips in steel strip continuous annealing furnace[J].China Metallurgy,2017,27(9):25.)
- [ 9 ] 杜国强,袁文振,张宝平,等.连续退火机组带钢板形翘曲控制[J].中国冶金,2016,26(12):44.(DU Guo-qiang,YUAN Wen-zhen,ZHANG Bao-ping,et al.Buckling control for strip steel in continuous annealing line[J].China Metallurgy,2016,26(12):44.)
- [ 10 ] 郭沫飞.W 型热辐射管设计与数值模拟[D].秦皇岛:燕山大学,2016.(GUO Mo-fei.W Heat Pipe Design and Numerical Simulation[D].Qinhuangdao:Yanshan University,2016.)
- [ 11 ] 李刚.冷轧连退炉 W 型辐射管分级修复的探讨[J].工业炉,2015,37(5):34.(LI Gang.Discuss on grading repair of W type radiant tube in cold rolling continuous annealing furnace[J].Industrial Furnace,2015,37(5):34.)
- [ 12 ] 白世宏,高恩运,柳庆坡,等.连退炉辐射管长寿技术的研究[J].钢铁研究学报,2012,24(增刊 1):174.(BAI Shi-hong,GAO En-yun,LIU Qing-po,et al.Longevity technology of radiant tube for continuous annealing furnace[J].Journal of Iron and Steel Research,2012,24(s1):174.)
- [ 13 ] Dini G,Vaghefi S M M,Lotfiani M,et al.Computational and experimental failure analysis of continuous-annealing furnace radiant tubes exposed to excessive temperature[J].Engineering Failure Analysis,2008,15(5):445.
- [ 14 ] 祝志超,程从前,王鲁,等.退火炉辐射管破裂失效分析[J].金属热处理,2011,36(增刊):334.(ZHU Zhi-chao,CHENG Cong-qian,WANG Lu,et al.Failure analysis of radiant tube rupture in annealing furnace[J].Heat treatment of Metals,2011,36(s):334.)
- [ 15 ] 张喜娥,骆合力,李尚平,等.退火炉辐射管的高温腐蚀[J].腐蚀科学与防护技术,2006,18(3):202.(ZHANG Xi-e,LUO He-li,LI Shang-ping,et al.High temperature corrosion of pipe radiator for annealing furnace[J].Corrosion Science and Protection Technology,2006,18(3):202.)
- [ 16 ] LIU Xun-liang,TIAN Ye,YU Yue,et al.Experimental studies on the heating performance and emission characteristics of a W-shaped regenerative radiant tube burner[J].Fuel,2014,135(11):262.
- [ 17 ] 王建刚,叶国城,刘华飞,等.连续退火线辐射管炉内传热过

- 程模型[J]. 宝钢技术, 2008(4): 34. (WANG Jian-gang, YE Guo-cheng, LIU Hua-fei, et al. A mathematical model for heat transfer in a radiant tube furnace on the continuous annealing line[J]. Baosteel Technology, 2008(4): 34.)
- [18] Irfan M, Chapman W. Thermal stresses in radiant tubes: A comparison between recuperative and regenerative systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(2/3): 196.
- [19] Irfan M A, Chapman W. Thermal stresses in radiant tubes due to axial, circumferential and radial temperature distributions[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(10): 1913.
- [20] 朱伟素. 辐射管辊底式热处理炉数学模型的研究与应用[J]. 中国冶金, 2017, 27(2): 37. (ZHU Wei-su. Study and application of mathematical model for radiant tube roller-hearth heat treatment furnace[J]. China Metallurgy, 2017, 27(2): 37.)

#### 普锐特冶金技术第4条阿维迪 ESP 线在中国日照钢铁公司投产

- 这条连铸连轧线能够年产 170 万 t 优质超薄热轧带钢
- 阿维迪 ESP 线在项目执行过程中进行了修改以适应粗钢生产和场地条件的变化

- 该线采用了全流程工艺优化(TPO)和工业 4.0 方案

2018 年 4 月, 由普锐特冶金技术提供的第 4 条阿维迪 ESP(无头带钢生产)线在中国钢铁企业日照钢铁有限公司(日照)投产。这条连铸连轧线将能够年产 170 万 t 最薄只有 0.8 mm、最宽可达 1 300 mm 的优质超薄热轧带钢, 产品系列包括了碳钢和 HSLA(高强度低合金)钢种。为了适应日照粗钢生产和设备配置的变化, 这条阿维迪 ESP 线在项目执行过程中进行了重新设计以便于使用更大的钢包和缩小生产场地。该线采用了全流程工艺优化(TPO)和工业 4.0 方案。普锐特冶金技术是在 2014 年获得这项合同的。

日照钢铁有限公司(日照)隶属于日照钢铁控股集团, 距离山东省南部的日照港大约 30 km。公司的粗钢生产能力约为 1 500 万 t。日照的产品系列包括热轧卷、线材、棒材和小型工字钢, 主要面向中国客户销售。新建的阿维迪 ESP 线

使日照能够进一步拓展高等级薄带钢和冷轧替代产品的生产能力。

普锐特冶金技术负责了这条阿维迪 ESP 线的设计以及机械设备、流体系统、工艺包和自动化系统的供货。连铸连轧线由集成的基础自动化(1 级)和过程自动化(2 级)控制, 从而保证了连铸和轧制工艺之间的精确协调。安装的全流程工艺优化(TPO)方案包括智能型全流程工艺质量控制系统(TPQC)——一种新开发的基于工业 4.0 思想的 IT 系统——和全流程工艺诀窍(TPKH)模块。TPO 系统将记录从钢水直到最终处理线的整个生产流程的所有工艺参数及实测产量和产品数据测量值, 从而连续监测和管理产品质量。

阿维迪 ESP 系统依靠连续不间断的铸轧串接工艺直接用钢水生产热轧带钢。这种生产线的能耗水平和相关成本与连铸和轧制分开的传统生产工艺相比能够降低 45% 之多, 这也意味着二氧化碳排放量大幅度减少。另外, 生产线的长度只有 155 m, 也比传统的连铸和轧制设备紧凑得多。