

冷轧热镀锌退火炉节能高效生产分析

方瑞, 李坚, 吴亭亭

(华东理工大学 煤气化及能源化工教育部重点实验室, 上海 200237)

摘要: **目的** 采用热工测试与结构检查手段分析冷轧热镀锌退火炉加热段热工操作及结构存在的问题, 并给出合理的解决方案。**方法** 将退火炉预热段 (PHS) 与直接燃烧加热段 (DFS) 作为一个系统, 辐射管加热均热段 (RHS) 作为另一个系统, 分别采取合适的热工测试方案及结构检查的细节, 主要涉及到温度、压力、流量及烟气成分等的实时测量。**结果** 炉子 DFS 与 RHS 段烧嘴的工艺参数控制与选择不恰当。前者因过度控制炉内气氛调节而空气系数过低, 导致燃料利用率低; 后者因不精确的进气方式吸入过剩空气, 使烟气温度偏低、生成量大, 致使热量利用率低。同时, 还存在烟气余热利用及炉墙保温材料使用寿命等问题。**结论** 适度提高 DFS 段空气系数, 改 RHS 段助燃空气为“抽-鼓”方式进气, 改善烟气余热回收设备与方式, 定期关注炉墙表面温度波动, 将有利于退火炉的节能降耗, 提高其热效率。整改结果显示, PHS/DFS 段热效率由 51.8% 提高至 60.0%, RHS 段热效率由 44.3% 提高至 55.8%。

关键词: 退火炉; 设备改善; 工艺参数; 节能; 热效率

中图分类号: TQ153.1; TG155 文献标识码: B 文章编号: 1001-3660(2016)06-0042-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.06.007

Energy Saving and High Production Efficiency of Cold Rolled Hot-dip Galvanizing Annealing Furnace

FANG Rui, LI Jian, WU Ting-ting

(Key Laboratory of Coal Gasification and Energy Chemical Engineering of Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

ABSTRACT: **Objective** To analyze the heating period of thermal operation and the problems existing in the structure of cold rolled continuous hot-dip galvanizing annealing furnace(CAF) and give reasonable solutions by means of thermal test and structural examination. **Methods** Regarding preheating section (PHS) and direct-fired heating section(DFS) as a system, and radiation heating section as another, appropriate test scheme and examination details were adopted, involving the real-time measurements of temperature, pressure, flow rate and gas composition. **Results** The control and choice of DFS and RHS burner process parameters were not appropriate. The former had a low utilization rate of fuel because of excessive control atmosphere in furnace by lower air coefficient too much, the latter had a low heat utilization rate due to the inaccurate inlet mode leading to inhalation of excess air. Meanwhile, there were other problems such as under-explored gas waste heat recovery and service life

收稿日期: 2016-04-07; 修订日期: 2016-05-18

Received: 2016-04-07; Revised: 2016-05-18

作者简介: 方瑞 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究工业炉燃烧模拟、节能设计。

Biography: FANG Rui (1991—), Male, Master graduate student, Research focus: industrial furnace combustion simulation, energy saving design.

通讯作者: 吴亭亭 (1969—), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 固体燃料气化、能源利用。

Corresponding author: WU Ting-ting (1969—), Female, Associate Professor, Research focus: solid fuel gasification, energy utilization.

of thermal insulation material. **Conclusion** Moderately increasing DFS air coefficient, changing RHS air inlet mode to “pump-ing-blowing”, improving the gas waste heat recovery equipment and methods, regularly monitoring temperature fluctuations on the furnace wall surface will be helpful for saving energy, reducing consumption of fuel and improving the thermal efficiency of annealing furnace. Rectification results showed that the thermal efficiency of PHS/DFS section was increased from 51.8% to 60%, and that of RHS section was increased from 44.3% to 55.8%.

KEY WORDS: annealing furnace; equipment improvement; process parameters; energy reduction; thermal efficiency

热镀锌板材表面存在锌层,在受损情况下能够通过牺牲阳极的电化学保护方式使镀层内的钢材得到保护^[1],加之热浸镀层一般比电镀层厚得多,耐腐蚀性强,成本低^[2],因此其在家电汽车产业的需求量日益增长。中国现有 280 余条热镀锌线,生产能力约 5000 万吨,产能过剩,产品竞争日益激烈^[3],企业对连续镀锌生产线的工艺与能耗等方面越来越关注。

退火是钢材生产中常用的预备热处理工艺,退火炉是热镀锌生产线的核心设备。某钢铁公司(以下简称某钢)一条热镀锌生产线的退火炉近两年的煤气消耗量有显著增加,炉子的安全生产、企业生产成本以及产品竞争力都受到影响。针对节能降耗,张想堂^[4]从加热方式、余热回收、燃烧方式等方面探讨了退火炉的节能设计,吕军^[5]在讨论直接燃烧加热段无氧化工艺时,运用“挡墙理论”提高了机组的质量与产量。文中在对退火炉热工测试及结构检查分析的基础上,探究了其能耗增加的原因,并给出了相应工艺与设备改进方案,对炉子节能降耗及安全高效生产有一定指导作用。

1 退火炉工艺及试验分析过程

1.1 工艺概况

某钢退火炉选用的是典型改良森吉米尔法纯水平卧式炉。卧式炉有炉子结构简单、安装容易、维修方便、操作难度低、建设成本低等优点,而缺点主要表现在生产率受炉长限制,炉子占地面积大,散热面积大,炉辊易结瘤而影响带钢表面质量,炉内还原性气氛不均匀等^[6]。

退火炉生产普通纯锌镀层钢卷产品(GI)时,CQ、FH 钢种最大产量为 49.40 t/h, DQ、HSS 钢种最大产量为 33.80 t/h,机组最大速度为 160 m/min。炉子由预热段(PHS)、直接燃烧加热段(DFS)、

辐射管加热段(RHS1)、辐射管均热段(RHS2)、缓冷段(CS1)、快冷段(CS2)、热张紧辊段(TDRS)、炉鼻子组成,全长约 130 m。

带钢经冷轧变形后,内部会出现晶粒破碎或扭曲现象,这将导致加工硬化及残余应力的出现,因此需要采用连续退火的过程处理。退火是将冷轧后的带钢在 PHS 段进行预加热,到 DFS 段进行内部组织回复,在 RHS1 段内部组织经历再结晶过程,在 RHS2 段保持恒定温度,即在整个连续退火过程中,带钢的内部组织主要经历回复、再结晶、晶粒长大等过程^[7],为晶粒长大提供充足的条件。根据各炉段预先设定的带钢退火温度,某钢退火炉中的带钢再结晶过程如图 1 所示。

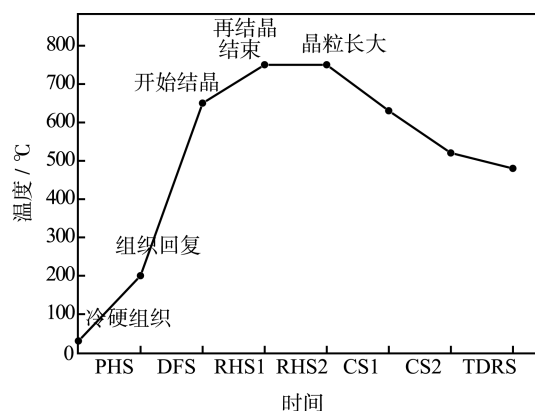


图 1 带钢在退火炉中的再结晶过程

Fig.1 Recrystallization of strip in annealing furnace

1.2 试验过程

热工测试是围绕退火炉 PHS、DFS 及 RHS 段的热量收入、支出展开试验的。热量收入主要包括燃料化学热、助燃空气及 N_2-H_2 保护气体带入物理热、带钢入炉带入热;热量支出包括出炉带钢带走热、烟气带走热、炉体表面散热、化学不完全损失热以及预热段入口密封门处的辐射逸气热等。试验的主要仪器有德图 350 烟气分析仪、热电偶、PT150 高精度红外测温仪等。

由于退火炉尺寸大,炉段多,为了试验的精准性及可操作性,将 PHS、DFS 段作为整体与 RHS 段分别进行热量收入、支出分析。RHS 段助燃空气因其负压吸气进气方式而无法精确测量气量,将其带入热量用烟气热量等量替代。对于与炉子控制仪表测量重复的数据,均与其近期测得的平均数据进行校验,剔除因操作不当产生的极度偏差数据,以保证试验的准确性。

2 退火炉能耗增加的原因分析及解决方案

退火炉能耗约占连续热镀锌生产线总能耗的 35%^[8],因此退火炉的节能尤为重要。某钢退火炉在 PHS 段,采用 DFS 段产生的烟气对带钢进行预热;在 DFS 段,通过上下交错布置在炉墙两侧的直燃烧嘴采用明火加热带钢;在 RHS 段,采用辐射管间接加热。目前,卧式退火炉 PHS/DFS 段的热效率能达到 60%左右,RHS 段辐射管热效率可达 55%^[9],而通过热平衡算得某钢退火炉 PHS/DFS 段的热效率只有 50%左右,RHS 段辐射管热效率只有 44%。因此,

退火炉在节能降耗上有很大的提升空间。

2.1 DFS 段气氛的控制

退火炉使用的燃料是焦炉煤气,煤气中的主要成分为 CH_4 、 H_2 、 CO ,与助燃空气混合后在炉内燃烧。DFS 段直燃烧嘴空气过剩系数小于 1 时,煤气为不完全燃烧,形成的烟气成分主要为 CO_2 、 H_2O 、 N_2 及未燃尽的 CO 、 H_2 ,没有过剩的自由 O_2 ,不会氧化带钢表面的活性铁^[10],但 CO_2 和 H_2O 为弱氧化性气体,对带钢表面生成氧化层有促进作用。目前普遍采取的措施为保持较低的空气过剩系数,以此控制炉内的氧化性气氛。

当通入一定量的煤气时,利用公式(1)、(2)可计算出空气过剩系数 α 。

$$L_0 = 0.0238(\text{H}_2 + \text{CO}) + 0.0952\text{CH}_4 + 0.0476(m + n/4) \\ C_m\text{H}_n + 0.0714\text{H}_2\text{S} - 0.0476\text{O}_2 \quad \text{Nm}^3/\text{Nm}^3 \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{L_n}{L_0} \quad (2)$$

式(1)中物质化学式代表其体积分数。通过计算得出在热工测试期间 DFS 段各燃烧控制区的空气过剩系数,见表 1。

表 1 DFS 炉不同燃烧区在不同时的空气过剩系数
Tab.1 Air excess rate of different zones at different time in DFS

时间	燃烧区空气过剩系数 α				
	1Z	2Z	3Z	4Z	5Z
13:00	0.84	0	0.81	0.86	0.81
13:30	0.84	0	0.80	0.86	0.81
14:00	0.84	0	0.81	0.87	0.82
14:30	0.83	0	0.80	0.85	0.80
15:00	0.86	0	0.81	0.87	0.81
15:30	0.83	0	0.79	0.85	0.80
16:00	0.84	0	0.80	0.86	0.81
16:30	0.84	0	0.80	0.86	0.81
17:00	0.84	0	0.80	0.86	0.81

由表 1 可以看出,DFS 段各区(二区未点火)在 4 h 测试期间的一次空气系数在 0.79~0.87 之间。尽管在 PHS 段会对 DFS 段烟气中的可燃成分进行补燃,但烟气分析仪测出烟气中 CO_2 的含量为 7%,说明补燃效果不佳,PHS/DFS 段整体的热工制度不合理。空气过剩系数过低可以较好地控制炉内的还原性气氛,但对燃料的利用率将会下降。

事实上,DFS 段只要控制炉内气氛为弱氧化状

态,即能满足生产要求。这是由于 RHS 段的 N_2 - H_2 保护气体中的 H_2 会对部分微弱氧化的带钢表面进行还原,根据国外的经验,烧嘴的空气系数应设置在 0.92~0.98 之间^[11]。

图 2 是退火炉 DFS 段空气过剩系数与煤气节约量的对应关系图。考虑到炉内气氛的要求,控制 DFS 段烧嘴的空气过剩系数在 0.95 上下,对应的空煤比在 4.0 左右,便可以获得工艺要求的处理效

果。另外,煤气成分是不停变化的,根据每日一次的成分分析来设定空燃比,会造成空气过剩系数的不准确,建议在煤气入炉前安装在线热值分析仪,通过调节手动/自动控制一体的电动阀门的阀芯位置来控制煤气与空气量。

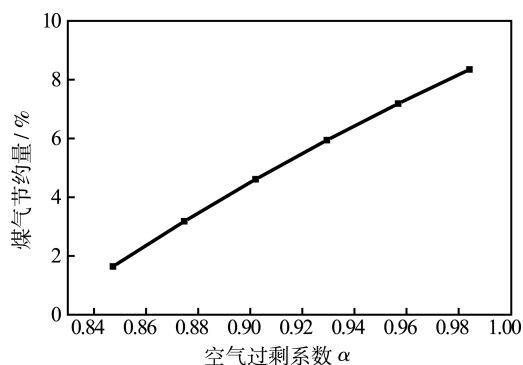


图 2 空气过剩系数与煤气节约量的关系

Fig.2 Relationship between excess air coefficient and coal gas reduction

2.2 RHS 段辐射管烧嘴进气方式

RHS 段气氛为 N_2-H_2 构成的还原性气氛,目的是利用 H_2 将带钢表面的氧化薄膜还原成纯铁,使带钢表面以活性海绵状态进入锌液^[12]。辐射管烧嘴采用“抽-吸”式进气方式。“抽-吸”式是指由排烟风机抽风,在烧嘴的助燃空气入口处产生负压而吸入空气,这种结构的缺陷是无法精确有效控制助燃空气的量。测试过程中利用烟气分析仪测量辐射管烟气的成分,推算出各燃烧区域的空气过剩系数,结果如图 3 所示。

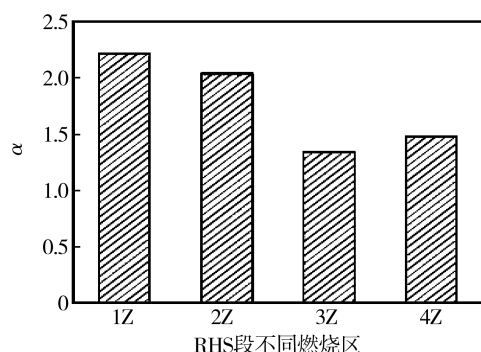


图 3 RHS 炉不同燃烧区的空气过剩系数 α

Fig.3 Air excess coefficient of different zones in RHS

由图 3 可以看出,辐射管的空气过剩系数均在 1.3 以上,甚至超过了 2。这样一来,由烧嘴燃烧生成的烟气量也大大增加,烟气带走的热量相应增加,热量利用率降低。由于烟气整体温度下降,辐

射管表面的温度也会相应降低,要想使炉膛保持在工艺要求的高温,需布置更多的辐射管来满足要求,这样会给企业带来成本上的压力。

退火炉现采用的“抽-吸”式辐射管烧嘴在助燃空气吸入量的控制上表现得并不好。日本最初发展了“抽-鼓”式烧嘴,它在温度控制精度、空气/煤气比调节的难易程度、对燃料热值变化的适应能力以及燃烧系统的可维护性和可靠性等方面比“抽-吸”式都有明显的优势。辐射管段煤气的燃烧一般控制空气过剩系数在 1.05 左右,可以达到充分燃烧与辐射管表面高温的要求,减少烟气带走热量。若将整个辐射管段的烧嘴全部由“抽-吸”式换成“抽-鼓”式,会使辐射管煤气用量减少,热效率相应提高。在改造前需要对一段时间内辐射管所需的风量进行统计,然后进行风机选型,选型时一定要预留一定的鼓风机风量冗余量。由于空气由鼓风机严格供给,生成的烟气量少,对处理烟气的排烟风机的负荷也有一定缓解。

2.3 烟气余热回收

DFS 段产生的烟气在 PHS 段预热带钢后,烟气温度仍有 900 °C 左右 PHS/DFS 段烟气系统流程如图 4。可以看出,烟气仅将助燃空气加热至 300 °C,烟气余热未较好得到利用。在处理烟气的过程中,有两处掺冷风处理过程,其目的是保护空气换热器和排烟风机。若停用掺冷风过程,增设一台省煤器来降低烟温,生成的水蒸汽可用于加热清洗段的碱液和加热热风干燥段的冷风^[13]。另外在掺冷风后,烟气由炉膛时的 900 °C 降至 550 °C 左右,故选择较为耐热的空气加热器也可以减少烟气有效热损失。

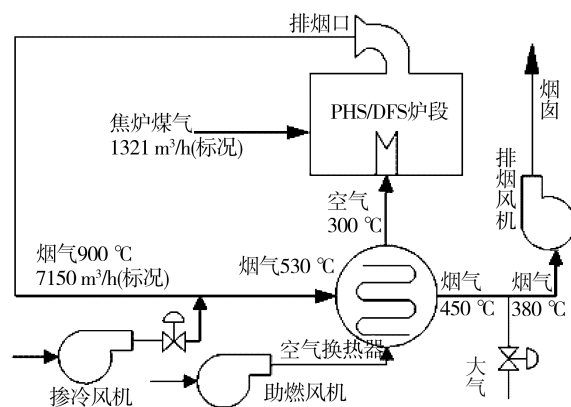


图 4 PHS/DFS 段烟气系统流程图

Fig.4 Flow system of flue gas in PHS/DFS section

RHS 段辐射管烧嘴要求温度峰值小的长火焰烧嘴^[14],且辐射管加热器对燃气品质的要求没有明火加热高。退火炉辐射管加热的均热段采用 W 型辐射管,其一端布置烧嘴,另一端布置换热器,烟气的余热没有得到充分利用。对于 W 型辐射管烧嘴,可将其改造成蓄热式烧嘴,即在原有的辐射管两端各设置 1 个蓄热式烧嘴,通过换向阀控制实现烧嘴的交替燃烧。助燃空气和热烟气交替流经两烧嘴的蓄热体,通过蓄热体交换热量,将助燃空气预热至接近辐射管管壁温度,烟气温度降至 200 ℃ 以下,从而实现烟气热量的极限回收。此外,采用蓄热式燃烧技术应将辐射管烧嘴的燃料换成热值较低的高炉煤气,这样既可以节能,又不会因燃烧火焰温度过高而降低辐射管的使用寿命,还可以减少 NO_x 的产生。

在实际生产中,DFS 段最终排至烟囱的烟气温度仍有 380 ℃,RHS 炉也有 300 ℃,可以建一套过热水系统余热回收装置(见图 5)。该装置有投资小、热回收效率高的优点,回收的热量同样可以用于清洗段的热水漂洗及热风干燥气^[15]。值得注意的是,采用过热水余热回收技术要求前后二级供需的热量平衡,需配有及时的外来水蒸汽及烟气调节旁通来调节,以防止系统因超压汽化发生的风险^[16]。

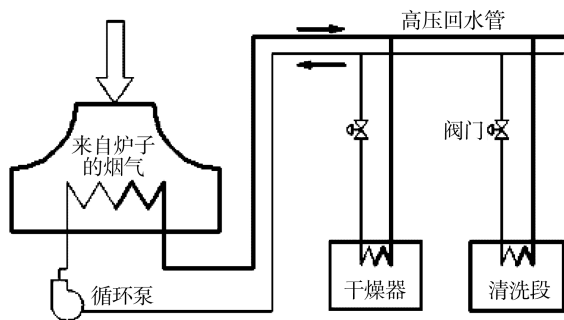


图 5 过热水余热回收系统
Fig.5 Overheated water waste heat recovery system

2.4 炉墙外表面散热

PHS 段炉墙和炉顶的耐火保温材料有陶瓷纤维块和陶瓷纤维,炉底铺设耐火砖、隔热砖、硅酸钙板。DFS 段炉墙和炉顶采用 1600/1425 等级的纤维和陶瓷纤维毯,炉底和 PHS 段铺设的耐热材料一样。RHS 段炉墙和炉顶铺设陶瓷纤维、陶瓷纤

维、矿棉板,炉底铺设隔热砖与硅酸钙板。耐火材料的选择与炉型、炉段、燃料种类、加热工艺及炉子的热工制度等众多因素相关。

在炉子外表散热的热工测试过程中,按炉长比例分别在两侧炉列不同炉段选取若干测温点。在炉列 1 与炉列 2 的侧墙(沿炉长方向)分别取 11 个测温点——预热段 3 个,无氧化加热段 3 个,辐射管加热均热段 5 个。炉列 1 测点标记为 1—11,炉列 2 测点标记为 12—22。记录并计算出炉列 1、2 侧墙各测点在 4 h 测试时间内的最高温度、最低温度及平均温度,炉列 1、2 在整个测试期间各测点的温度波动如图 6 所示。

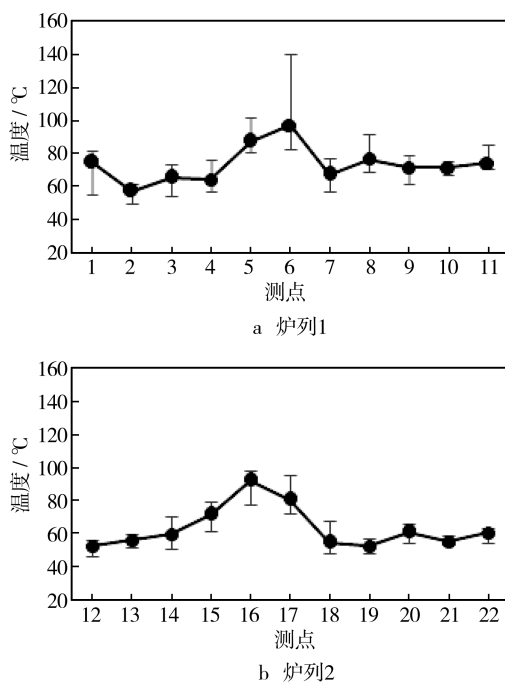


图 6 炉列 1、2 侧墙表面各测点温度波动图
Fig.6 Temperature fluctuation of measured points on the side wall surface of furnace column 1,2

由温度波动图可以明显看出,DFS 段的侧墙温度波动较 PHS 段和 RHS 段稍大,这与该炉段的燃料直接在炉膛内燃烧的方式有关。RHS 段的温度波动最小,这也间接反映出该段炉膛内部温度较稳定,满足其对温度稳定性要求较高的特性。注意到,炉列 1 第 6 个测点(DFS 段)出现正向的异常峰值,最高温度达 140 ℃,经仔细检查,发现该测点附近外部保温材料有部分烧损状况。由此可见,观察一段时间内炉墙表面温度波动图,可以对炉体保温材料的使用情况进行预判。

炉窑的耐火材料不仅要保证炉体不被高温或

火焰烧损，还有保持炉温的重要作用。类似上述耐火保温材料老化破损的情况会增加炉墙的散热量，降低热效率。某钢退火炉侧墙与炉顶采用全纤维模块结构，为了方便炉子检修，炉底采用耐火砖、隔热砖及硅酸钙板组成的砌砖结构。耐火纤维材料属于新型的保温材料，具有质量轻、抗震性好、保温效果好等优势，这符合如今纤维结构代替砌砖结构作为耐火保温材料的趋势。因此，定期检查原退火炉耐火保温材料的使用情况以及将陶瓷纤维固定在炉壳上的锚固钉的牢固性，并及时将受损部位更替为耐火陶瓷纤维折叠块和耐

火纤维喷涂层等保温材料，对减少燃料消耗、节约能源大有裨益。

2.5 整改结果

退火炉 PHS/DFS 段与 RHS 段工艺及设备采取改进措施后，热损减少量及前后热效率的对比见表 2。从表 2 中看出，通过采取降低能耗的相应措施，退火炉各段的热效率有显著提高，PHS/DFS 段热效率由 51.8%提高至 60.0%，RHS 段热效率由 44.3%提高至 55.8%。

表 2 工艺设备改进前后各段热损减少量及热效率
Tab.2 Reduction of heat loss and thermal efficiency after improving process and equipment

炉段	热损减少量/($\times 10^5$ kJ · h ⁻¹)			热效率/%	
	优化烧嘴工艺	烟气余热回收	保温材料更换	改进前	改进后
PHS/DFS	9.006	22.487	0.411	51.8	60.0
RHS	8.259	2.978		44.3	55.8

3 结论

1) 增加进炉(焦炉)煤气成分在线检测频率，并根据实时煤气热值制定 DFS 段烧嘴燃烧空煤比，将 DFS 段空气过剩系数提高至 0.95 左右，能够在保证炉内还原性气氛的同时，提高燃料的利用率；在 RHS 段将“抽-吸”式进气方式换成“抽-鼓”式，精确控制辐射管烧嘴空气过剩系数，能够达到辐射管内燃烧充分与表面温度的要求，减少烟气带走热，提高辐射管的热效率。

2) DFS、RHS 段在原有烟气加热助燃空气的基础上，将掺冷风机换成省煤器、过热水余热回收装置等，能够提高烟气余热的回收效率，回收的热能可供多功能使用。RHS 段辐射管可尝试采用蓄热式燃烧技术，长期看来有益于企业的节能降耗。

3) 炉墙外表面的温度波动图能定性地体现出炉内加热温度的状况，及时为保温材料的使用情况进行预判，对炉子减少表面散热损失大有意义。应定期对退火炉墙体的耐火保温材料及固定用锚固钉进行检查维修，防止耐火保温材料的脱落、烧损，减少炉体的散热损失。

参考文献

[1] BUSH Glenn W. Developments in the Continuous Galvanizing of Steel [J]. JOM, 1989, 41(8): 34—36.

[2] 冯刚, 侯静, 张琳. 钢铁成分及添加元素对热镀锌组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(4): 118—121.

FENG Gang, HOU Jing, ZHANG Lin. Effects of Steel Composition and Adding Elements on Microstructure and Properties of Hot Dip Galvanizing [J]. Hot Working Technology, 2011, 40(4): 118—121.

[3] 李九岭, 李守华, 张雨泉. 带钢连续热镀锌的发展趋势[J]. 武钢技术, 2010(6):54—58.

LI Jiu-ling, LI Shou-hua, ZHANG Yu-quan. Trend of Development of Continuous Hot Dip Galvanized Strip [J]. Wisco Technology, 2010(6):54—58.

[4] 张想堂. 带钢连续处理线退火炉设计节能探讨[J]. 工业炉, 2013(6): 52—55.

ZHANG Xiang-tang. Discussion on Design Energy-saving of Annealing Furnace in Strip Continuous Process Line [J]. Industrial Furnace, 2013(6): 52—55.

[5] 吕军, 刘明辉, 沈达敏. 无氧化工艺对连续热镀锌钢板锌层附着性的影响[J]. 钢铁, 2001, 7(11): 31—33.

LV Jun, LIU Ming-hui, SHEN Da-min. Influence of Non-oxidizing Process on Adhesion of Coating on Continuously Galvanized Strip [J]. Iron and Steel, 2001, 7(11): 31—33.

[6] 李九岭, 胡八虎, 陈永朋. 热镀锌设备与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015:13—14.

LI Jiu-ling, HU Ba-hu, CHEN Yong-peng. Hot-dip Galva-

- nizing Equipment and Technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015:13—14.
- [7] 周钢, 温治, 豆瑞锋, 等. 卧式连续退火炉工艺设备和模型控制的研究现状及发展趋势[J]. 冶金能源, 2011, 30(1): 20—26.
- ZHOU Gang, WEN Ye, DOU Rui-feng, et al. Review of the Processes and Modeling in Horizontal CAF [J]. Energy for Metallurgical Industry, 2011, 30(1): 20—26.
- [8] 白保安, 应铖. 浅析热镀锌退火炉节能的措施和发展方向[J]. 冶金能源, 2004, 23(2):33—35.
- BAI Bao-an, YING Cheng. Analysis on Energy-saving and Developmental Direction of CGL Annealing Furnace [J]. Energy for Metallurgical Industry, 2004, 23(2):33—35.
- [9] 涂卫国, 刘赞赞, 冯俊小, 等. 辐射管加热技术综述[J]. 工业炉, 2007, 29(3):15—18.
- TU Wei-guo, LIU Yun-yun, FENG Jun-xiao, et al. Summarize of Radiant Tube Heating Technology [J]. Industrial Furnace, 2007, 29(3):15—18.
- [10] 贾丽娣, 徐烈山. 热镀锌退火炉无氧化段炉内气氛合理控制[J]. 冶金能源, 2006, 25(3): 24—26.
- JIA Li-di, XU Lie-shan. Reasonable Atmosphere Control of Non-oxidized Zone in Annealing Furnace for Hot Galvanizing [J]. Energy for Metallurgical Industry, 2006, 25(3): 24—26.
- [11] 罗诚. 连退产品氧化色原因分析及对策[C]//第八届(2011)中国钢铁年会论文集(摘要). 北京: 中国金属学会, 2011.
- LUO Cheng. The Reason Analysis and Countermeasure on Series Anneal Strip Steel Being Oxidation [C]//The Eighth (2011) China Iron and steel Annual Meeting (Abstract). Beijing: The Chinese Society for Metals, 2011.
- [12] 徐秀清, 王顺兴. 连续热镀锌工艺进展与展望[J]. 表面技术, 2007, 36(1):71—74.
- XU Xiu-qing, WANG Shun-xing. Development and Prospect of Continuous Hot-dip Galvanized Process [J]. Surface Technology, 2007, 36(1):71—74.
- [13] 闵长松. 带钢连续退火炉烟气余热回收分析[J]. 工业炉, 2014(5): 64—67.
- MIN Chang-song. Strip Steel Continuous Annealing Furnace Flue Gas Waste Heat Recovery Analysis [J]. Industrial Furnace, 2014(5): 64—67.
- [14] 梁师帅. 高强钢用连续退火炉节能技术探讨[J]. 工业加热, 2012, 41(2): 18—22.
- LIANG Shi-shuai. Discussion about Energy Saving Technologies in High Strength Steel Continuous Annealing Furnace [J]. Industrial Heating, 2012, 41(2): 18—22.
- [15] 王鲁, 王家真. 连续退火炉余热回收技术应用与节能方案[J]. 宝钢技术, 2009(2):70—74.
- WANG Lu, WANG Jia-zhen. Application of Residual Heat Recovery Technology of the Continuous Annealing Furnace and Energy-saving Schemes [J]. Baosteel Technology, 2009(2):70—74.
- [16] 朱文君. 连续退火机组烟气余热回收技术和设计要点[J]. 轧钢, 2014, 31(6):75—77.
- ZHU Wen-jun. Technologies and Design Key Points of the Flue Gas Heat Recovery from the Continuous Annealing Furnace [J]. Steel Rolling, 2014, 31(6):75—77.