

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.08.011

# 热镀锌 S350GD 大锌花表面亮点缺陷原因 分析及改进措施

李黎<sup>1,2\*</sup>, 郭远<sup>1</sup>, 郭志飞<sup>2</sup>, 刘鸣凤<sup>1</sup>, 李进存<sup>3</sup>

(1. 邵阳技师学院 机械工程中心, 湖南 邵阳 422000; 2. 首钢技术研究院, 北京 100041;  
3. 青岛四方阿尔斯通铁路运输设备有限公司, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 针对热镀锌 S350GD 大锌花表面亮点缺陷, 采用扫描电镜、能谱仪分别对亮点缺陷微观形貌、微观成分及去除亮点镀层后的基板形貌进行观察分析。结果表明: 由于炉辊结瘤微颗粒在带钢表面形成凹坑, 凹坑内部锌液在气刀吹扫作用下, 从涡脱落区喷出, 导致镀层厚度减薄, 从而使得缺陷形貌为凹坑状; 凹坑内镀层表面未被光整到, 镀层表面粗糙度更小, 容易反射光线, 肉眼看起来更为明亮而形成亮点缺陷; 凹坑破坏了带钢表面形成的 Fe 与 Fe 的氧化物, 使得内氧化形成的 Mn 及 Mn 的化合物裸露在外, 裸露区域对锌液浸润性差, 从而凹坑内部镀层形成漏镀缺陷; 可从合理选择炉辊涂层、优化炉内张力和辊型及控制炉内气氛与露点等方面来减少和控制炉辊结瘤, 改进亮点缺陷。

**关键词:** 大锌花; 亮点; 结瘤; 凹坑; 选择性氧化; 露点

**中图分类号:** TG178 **文献标识码:** A

## Analysis of the cause of bright spot defects of S350GD with large zinc flower and improvement measures

Li Li<sup>1,2\*</sup>, Guo Yuan<sup>1</sup>, Guo Zhifei<sup>2</sup>, Liu Mingfeng<sup>1</sup>, Li Jincun<sup>3</sup>

(1. Mechanical Engineering Center, Shaoyang Technician College, Shaoyang 422000, China;  
2. Shougang Technology Institute, Beijing 100041, China; 3. Alstom Sifang (Qingdao)  
Transportation Ltd., Qingdao 266000, China)

**Abstract:** In order to find the cause of the surface defect of hot-dip galvanized S350GD with large zinc flower, the morphology, micro-component and the morphology of the substrate after removing the bright spot coating were observed and analyzed by scanning electron microscopy and energy dispersive spectrometer. The results show that the bright spot defect is caused by the formation of pits on the surface of the strip due to the nodulation of the furnace roller, and the zinc liquid the pit is blown out from the vortex shedding area under the action of the air knife, resulting in the thinning of the coating thickness, thus the defect morphology is shaped; the surface of the coating in the pit is not polished, the surface roughness of the coating is smaller, and it is easy to reflect light, which brighter to the naked eye and

收稿日期: 2025-02-25 修回日期: 2025-04-22

通信作者: 李黎(1983—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为冷轧汽车用钢产品的开发与应用, email: hbl1983@163.com

引用信息: 李黎, 郭远, 郭志飞, 等. 热镀锌 S350GD 大锌花表面亮点缺陷原因分析及改进措施[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(8): 70-75.

Li Li, Guo Yuan, Guo Zhifei, et al. Analysis of the cause of bright spot defects of S350GD with large zinc flower and improvement measures[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(8): 70-75.

forms a bright spot defect; the pit destroys the Fe and Fe oxides formed on the surface of the strip, which makes the Mn and Mn compounds formed by internal oxidation exposed to the outside, and the exposed area has poor invasive with zinc liquid, resulting in the formation of a missing coating defect the pit; the nodulation of the furnace roller can be reduced and controlled from the aspects of reasonable selection furnace roller coating, optimizing the tension and roller shape in the furnace and controlling atmosphere and dew point in the furnace.

**Keywords:** large zinc flower; bright spot; nodulation; pit; selective oxidation; dew point

热镀锌锌花是通过向锌液中加入微量的Pb、Sb、Bi、Sn等合金元素在镀层中的锌结晶时生成的一种具有特定位向的粗大晶粒<sup>[1]</sup>。生产有锌花热镀锌板时,一个锌花是由一个结晶中心长大而成,在单位面积上结晶中心越多则锌花越小,结晶中心越少则锌花越大。目前,大锌花热浸镀锌钢板广泛应用在建筑装饰材料等领域<sup>[2]</sup>。

带钢连续热镀锌是一种高效的生产工艺,其主要生产过程和设备包括:经酸轧后的带钢冷硬卷基板在碱液槽、电解脱脂等装置中清洗脱脂,清洗后带钢进入退火炉中进行退火处理,之后带钢进入锌锅内进行热镀锌,出锌锅后由气刀流量控制镀层厚度,随后进入光整机调整表面质量及性能<sup>[3]</sup>。亮点是热镀锌大锌花产品一种很常见的缺陷,其产生原因多种多样,如:冷硬卷基板表面质量缺陷,酸洗和镀锌清洗段钢卷表面清洗不良,退火炉内炉辊结瘤微颗粒、出锌锅后锌渣与锌灰、光整机工作辊表面异物压入,高强钢选择性氧化导致漏镀等<sup>[4-5]</sup>。一般而言,对于这种缺陷,客户都是无法接受的。

本文就工业化大生产的热镀锌S350GD大锌花表面亮点缺陷进行取样,对亮点缺陷微观形貌、微观成分及去除亮点镀层后的基板形貌进行观察分析,对亮点缺陷产生原因进行了分析讨论并提出改进措施。

## 1 材料及方法

从国内某知名钢铁厂热镀锌大锌花生产线生产的S350GD钢卷进行现场取样,其基板化学成分见表1。使用Hitachi S-3400n型扫描电镜对样品进行SEM分析,用Ince Energy 450 ADD能谱仪对样品进行EDS分析,采用50%稀盐酸+缓释剂浸泡5 min部分样品后清除表面锌层,进行基板宏观形貌分析。

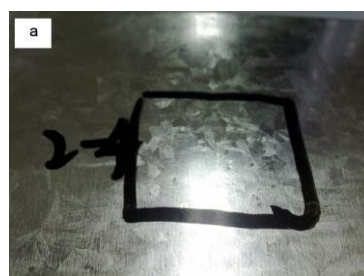
表1 S350GD 化学成分

Tab.1 Chemical composition for S350GD

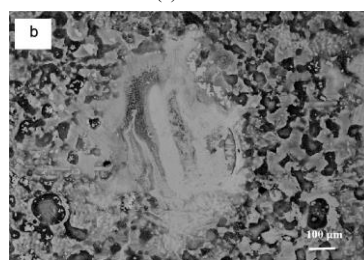
元素	C	Si	Mn	P	S	Al
含量/(wt.%)	0.18	0.03	1.20	0.015	0.015	0.030

## 2 实验结果

亮点缺陷表面照片见图1。缺陷宏观呈亮点状无规律分布在钢卷上下两面,手摸无触感,见图1(a);为更清晰观察缺陷形貌,对亮点缺陷表面放大80倍,缺陷呈凹坑状,凹坑内部存在未光整区,见图1(b)。亮点缺陷截面形貌见图2(a)和图2(b),可见凹坑内部镀层厚度减薄,且镀层存在漏镀区。综合图1和图2可得,亮点缺陷为凹坑状,凹坑内镀层厚度减薄使得镀层表面存在未被光整机光整区,同时凹坑内部存在漏镀区。



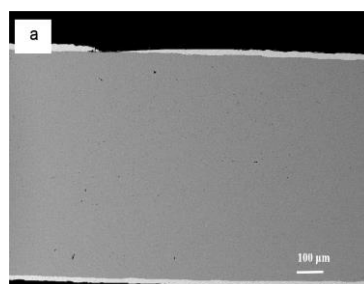
(a) 宏观



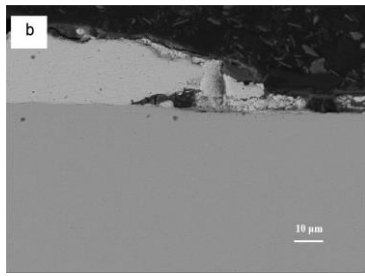
(b) 80倍

图1 亮点缺陷照片

Fig.1 Photograph of the bright spot defect



(a) 80倍



(b) 1 000 倍

图 2 亮点缺陷截面形貌

Fig.2 Bright spot defect cross-sectional morphology

对亮点缺陷存在漏镀现象不同位置进行EDS成分分析,见图3和表2所示。结果表明:4处不同位置的Mn元素富集较为严重,含量分别达到4.78%、1.70%、1.51%和1.34%,远超基板Mn元素平均含量。

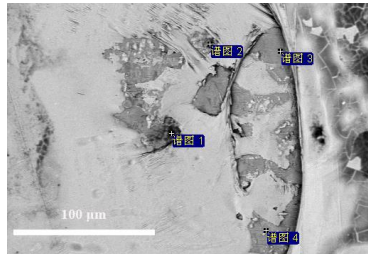


图 3 亮块缺陷能谱分析图

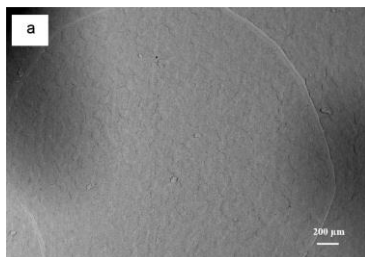
Fig.3 EDS analysis of bright spot defect

表 2 能谱分析结果

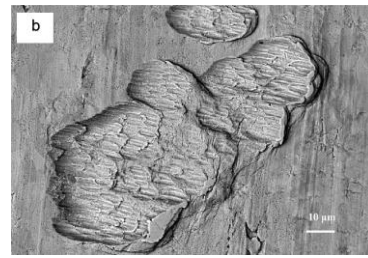
Tab.2 Energy spectrum analysis results

谱图	元素含量/(wt.%)			
	O	Mn	Fe	Zn
谱图 1	26.27	4.78	43.56	14.06
谱图 2	11.90	1.70	67.49	16.03
谱图 3	10.03	1.51	76.12	11.59
谱图 4	5.72	1.34	82.89	10.05

为了找到形成亮点缺陷的原因,对亮点缺陷位置采用50%稀盐酸+缓释剂浸泡5 min后清除表面锌层,进行基板形貌分析,去镀层后基板形貌见图4,从图4中可以看出,基板表面整体较为光洁,除在基



(a) 35 倍



(b) 1 000 倍

图 4 基板凹坑形貌

Fig.4 Substrate pit morphology

板表面可看到一些轻微无规律分布凹坑外,未见其它异常缺陷。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 基板凹坑形成原因

通过确认带钢基板在退火炉入口处表面无凹坑缺陷,说明凹坑来源于炉内。停机检修时发现炉内炉辊存在结瘤现象。检验结瘤物,其主要成分为Fe,说明结瘤物来自带钢。在理想状态下,炉辊表面应保持清洁,这表明结瘤物是由于炉辊与带钢基板之间的粘着磨损,从而从带钢基板转移到炉辊上的。

在钢卷生产中,炉辊辊型设计为一定凸度用来保证带钢稳定。其目的主要为两方面,第一可以减轻热凸度对稳定性的影响;第二可以在带钢上形成一个向心力 $\sigma$ ,避免带钢跑偏。带钢在生产时也有一个张力 $T$ 。在向心力 $\sigma$ 和张力的综合作用下,带钢与炉辊会产生滑动,使得带钢表面金属或者氧化物转移到炉辊上(如图5所示)。金属或氧化物不断积累,从而形成结瘤<sup>[6]</sup>。对于Mn含量高的钢种,在退火炉内还可能发生选择性氧化,优于Fe,形成MnO。MnO会与炉辊涂层里的 $Al_2O_3$ 形成一种新的共晶产物,该产物黏附性好、熔点低,也可聚集形成结瘤<sup>[7]</sup>。炉辊上的结瘤物将表面形态复刻到钢卷基板表面,从而形成凹坑。

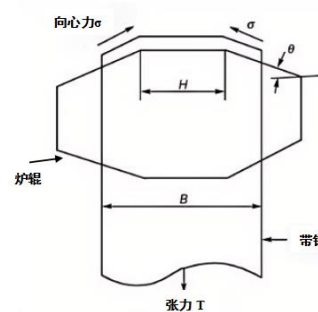


图 5 带钢向心力及张力示意图

Fig.5 Schematic diagram of the centripetal force  $\sigma$  and tension of the strip  $T$

### 3.2 亮点缺陷形成原因

由试验结果可知,亮点缺陷主要包括两部分,一是因为基板凹坑内镀层减薄,镀层未被光整机光整,镀层表面粗糙度更小,容易反射光线,形成色差<sup>[8]</sup>,使得肉眼看起来更为明亮而形成。

首先分析凹坑内镀层减薄原因。冷硬卷基板进入退火炉后,表面由于炉辊结瘤微颗粒形成凹坑,形成凹坑后,流体的流动边界层和传热边界层会被破坏,使得流体再附着时形成的粘性底层厚度减小,流体的自由剪切层发展为涡旋,最后喷出<sup>[9]</sup>。Giffith T H等<sup>[10]</sup>也研究提出简化的凹坑内部涡系结构图,如图6所示,将凹坑内分为四个区域,分别为:背风面回流区、迎风面再附区、尾缘上升区和涡脱落区。当基板镀完锌出锌锅之后,气刀对表面进行吹扫,在凹坑内部形成涡系,凹坑内部锌液从涡脱落区喷出,从而使得镀层厚度减薄。

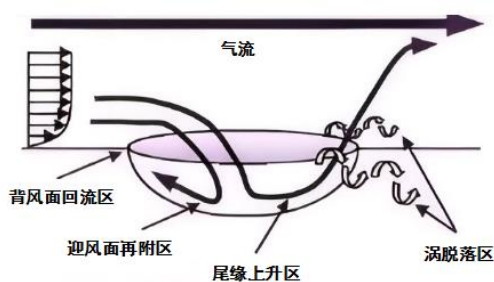


图6 凹坑内部区域分布图<sup>[10]</sup>

Fig.6 Distribution map of the internal area of the pit<sup>[10]</sup>

二是凹坑内部存在漏镀现象。基板成分Mn元素含量高,为1.20%。在退火炉内,Mn元素会优先与炉中气体中 $O_2$ 反应,在带钢表面形成Mn的氧化物,这就是选择性氧化。在退火阶段,钢板会经历一个加热至高温的过程。在这个过程中,钢中的合金成分会向表面迁移,并与 $O_2$ 发生反应,形成一层表面氧化物。这种现象被称作外氧化。此外, $O_2$ 还会进一步渗透到钢的次表面区域,与合金成分反应,形

成次表面氧化物层,这一过程则被定义为内氧化(如图7所示)<sup>[11]</sup>。当合金元素在钢板表面发生外氧化,形成表面氧化物时,会降低带钢表面与锌液的浸润性,妨碍 $Fe_2Al_3$ 抑制层的形成,从而导致钢带表面的可镀性下降,引发漏镀缺陷<sup>[12]</sup>。

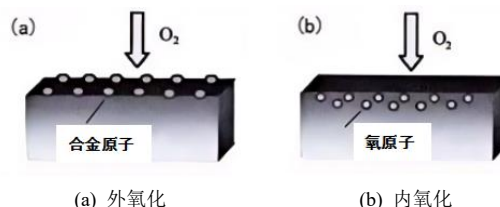


图7 外氧化和内氧化示意图<sup>[11]</sup>

Fig.7 Schematic diagram of internal oxidation and external oxidation<sup>[11]</sup>

目前,存在四种技术手段用于提升高合金元素含量钢的可镀性。一是在退火炉内实施“加热段氧化-均热段还原”的技术,即在加热阶段先在带钢表面形成一层保护层,以阻止其他合金元素在带钢表面发生选择性氧化;在均热阶段,将Fe氧化物还原为海绵铁<sup>[13]</sup>。二是提高退火炉内露点温度,将表面选择性氧化转化为次表层选择性氧化<sup>[14]</sup>。第三,向高合金钢中添加微量的表面偏聚元素,如锡(Sn)、铋(Sb)、铋(Bi),改变合金元素氧化物的形态,提升钢卷表面的可镀性<sup>[15-16]</sup>。最后是在高合金元素钢表面预先镀上一层金属,例如铜(Cu)、铁(Fe)、镍(Ni)等,抑制退火过程中合金元素在钢卷表面的选择性氧化<sup>[17]</sup>。

该产线生产S350GD大锌花产品时选择的是第二种方法,在镀锌线退火炉增设加湿装置,使得带钢表面具有较高的氧分压,将钢卷表面选择性氧化转化为次表层选择性氧化,使Mn等易氧化的元素在带钢次表层氧化,使带钢表面形成一层Fe氧化物,原理如图8所示<sup>[18]</sup>。

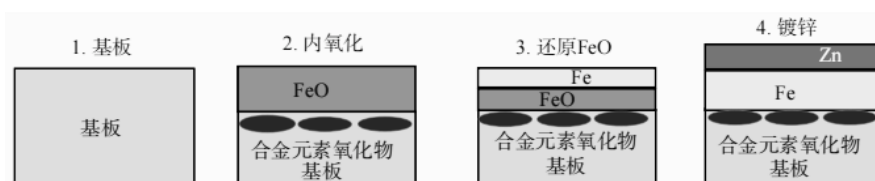
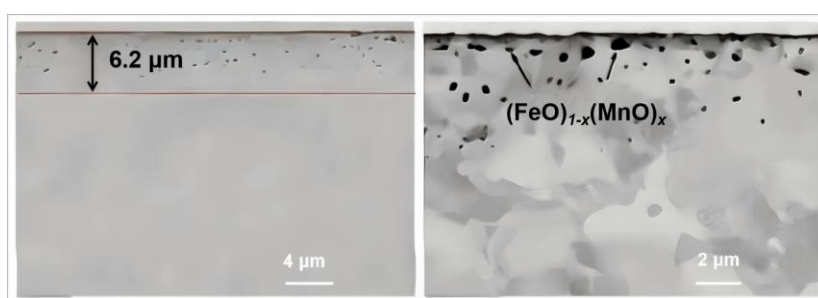


图8 预氧化原理示意图<sup>[18]</sup>

Fig.8 Schematic diagram of pre-oxidation principle<sup>[18]</sup>

文献<sup>[19]</sup>研究了Fe-2Mn内氧化化合物沿基板厚度方向的分布情况,主要的化合物分布深度达到

6.2  $\mu\text{m}$ ,如图9所示。

图9 内氧化化合物分布情况<sup>[19]</sup>Fig.9 Distribution of internal oxidation compounds<sup>[19]</sup>

综上所述,在表2试验结果中,凹坑漏镀区域出现Mn元素富集分布,含量分别达到4.78%、1.70%、1.51%和1.34%,远超基板Mn元素平均含量,是因为凹坑破坏了基板表面形成的Fe与Fe的氧化物,使得内氧化形成的Mn及Mn的化合物裸露在外,由于这些裸露区域对锌液的浸润性差,从而形成漏镀缺陷。

### 3.3 改进措施

由于该亮点缺陷是由于炉辊结瘤微颗粒导致基板形成凹坑所致,重点可以采取以下改进措施来减少和控制炉辊结瘤。

**炉辊涂层** 炉辊涂层材料具有高硬度、高弹性模量、高熔点性,可根据不同炉段的工作情况,通过对比分析结瘤情况后,合理选择不同炉辊涂层材料。专利[20]采用CoCrAlY80-85%金属混合物及ZrB<sub>2</sub>(陶瓷)15%~20%组成的炉辊涂层材料,高温烧制后在辊面涂层上形成了更致密的保护膜,提高了炉辊抗铁、锰结瘤性;国内某钢铁企业退火炉内高温段优先采用Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及CoCrAlYTa组成的炉辊涂层材料,生产高强钢时则优先选择含铬陶瓷作为炉辊涂层材料。

**优化炉内张力和辊型** 优化退火炉内各段不同区域张力,使得钢带在不同区域张力平稳过渡,可以改善带钢向心力 $\sigma$ 和张力的 $T$ 综合作用,减轻炉内带钢与炉辊表面之间产生的滑动,但是滑动不能彻底避免。

**合理控制炉内气氛与露点** 为了防止带钢表面氧化以及高合金钢在带钢表面氧化富集,需要对炉内保护气体进行严格控制。

## 4 结论

(1) 热镀锌S350GD大锌花表面亮点缺陷为凹坑状,由于凹坑内镀锌层厚度减薄,镀层表面未被光整机光整到,使得镀层表面粗糙度更小,容易反

射光线,形成色差,肉眼看起来更为明亮而形成。同时凹坑内部镀层存在漏镀现象。

(2) 凹坑状缺陷是由于炉辊结瘤微颗粒将表面形态复刻到带钢表面,凹坑内部锌液在气刀吹扫作用下,从涡脱落区喷出,从而使得镀层厚度减薄而形成。

(3) 凹坑破坏了带钢基板表面形成的Fe与Fe的氧化物,使得内氧化形成的Mn及Mn的化合物裸露在外,由于这些裸露区域对锌液的浸润性差,从而凹坑内部镀层形成漏镀缺陷。

(4) 可采用合理选择不同炉辊涂层材料、优化炉内张力和辊型及控制炉内气氛与露点等措施来减少和控制炉辊结瘤,改进亮点缺陷。

## 参考文献

- [1] 金永清,张林. 镀锌工艺对锌花状态的影响[J]. 轧钢, 2020, 37(6): 33-39.
- [2] 刘润博,王子明,王昭云. 热基镀锌工艺中表面锌花成因及锌花大小控制研究[J]. 山西冶金, 2023, 46(9): 72-74.
- [3] Song G M, Vystavel T, van der Pers N, et al. Relation between microstructure and adhesion of hot dip galvanized zinc coatings on dual phase steel[J]. Acta Materialia, 2012, 60(6/7): 2973-2981.
- [4] 梁燕燕,刘少先,杨冬冬. 某热镀锌卷大锌花和发亮缺陷产生原因及改善措施[J]. 理化检验(物理分册), 2022, 58(3): 75-78.
- [5] 李研,崔阳,徐海卫,等. 双相钢热镀锌表面漏镀缺陷分析及对策[J]. 电镀与涂饰, 2013, 32(5): 32-34.
- [6] 李国洋,夏强强. 大锌花热镀锌板表面亮点缺陷产生原因分析及对策[J]. 金属热处理, 2014(8): 160-162.
- [7] 周建明,张贵春. 冷轧退火炉炉辊结瘤原因分析及控制措施[J]. 江西冶金, 2016, 36(5): 25-28.

- [8] 李研, 张亮亮, 于洋, 等. 热镀锌双相钢表面粗糙问题分析与控制[J]. 钢铁, 2017, 52(6): 94-99, 104.
- [9] 左胥杰. 凹坑流向间距与深度对流动与换热影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [10] Griffith T S, Hadhrani L A, Han J C. Heat transfer in rotating rectangular cooling channels (AR=4) with angled ribs[J]. Journal of Heat Transfer, 2002, 124(4): 617-625.
- [11] Bellhouse E M, Mcdermid J R. Selective oxidation and reactive wetting during galvanizing of a CMnAl TRIP-assisted steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(9): 2753-2768.
- [12] 郑艳坤, 巫雪松, 马孟宁, 等. 热镀锌 DP980 脱锌原因分析及措施[J]. 金属世界, 2023(4): 6-11.
- [13] Sohn Il-R, Kim J S, Sridhar S, et al. Effect of dew point and gas flow rate on the surface oxidation of advanced high strength steels[J]. ISIJ International, 2015, 55(9): 2008-2017.
- [14] 蒋光锐, 王海全, 刘李斌. 退火工艺对 C-Mn-Si 高强度钢表面选择性氧化行为的影响[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(12): 96-100.
- [15] Lawrence S, Jung E J, Geun S, et al. Surface selective oxidation of Sn-added CMnSi TRIP steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47(4): 1705-1719.
- [16] Oh J, Cho L, Kim M, et al. The effect of Bi on the selective oxide formation on CMnSi TRIP steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47(11): 5474-5486.
- [17] 蒋光锐, 王海全, 刘广会, 等. 预镀镍层对一种 C-Mn-Si 高强度钢选择性氧化行为的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(2): 304-309.
- [18] 李远鹏, 江社明, 张启富. 高强度热镀锌双相钢的可镀性问题研究[J]. 钢铁研究学报, 2012, 24(4): 1-5.
- [19] Zhang X, Silva D C C, Zhang S Y, et al. Investigation of selective oxidation during cooling of hot-rolled iron-manganese-silicon alloys[J]. Corrosion Science, 2021, 186: 109466.
- [20] 王鲁, 陈东畏, 何建锋. 一种连续退火炉炉辊表面涂层及其后处理方法: 中国, 101654377B[P]. 2012-01-11.

\*\*\*\*\*

\*上接 28 页\*

- hardness and corrosion resistance[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(32): 20783-20790.
- [21] Abdulwahab M, Fayomi O S I, Popoola A P I, et al. In-situ hybrid study of thermal behavior of Zn-Ni and Zn-Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocrystallite thin films induced TEA/MEA by electrocodeposition[J]. Results in Physics, 2017, 7: 213-215.
- [22] Roventi G, Giuliani G, Pisani M, et al. Electrodeposition of Zn-Ni-ZrO<sub>2</sub>, Zn-Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Zn-Ni-SiC nanocomposite coatings from an alkaline bath[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2017, 12(1): 663-678.
- [23] 日野実, 平松実, 堀川敬太郎. Zn 系めっきによる高強度鋼の水素脆性[J]. 表面技術, 2020, 71(5): 323-329.
- [24] 王亚伟, 乔永莲, 沙春鹏, 等. 航空用 30CrMnSiNi2A 高强度钢电镀锌-镍合金层及其对氢脆性能的影响[J]. 材料保护, 2013, 46(12): 61-62, 9.
- [25] 朱立群. 评高强度钢电镀锌基合金的低氢脆性[J]. 材料保护, 1991, 24(1): 4-7.
- [26] 孙小炎. 螺栓氢脆问题研究[J]. 航天标准化, 2007(2): 1-9.
- [27] 杨智清, 曹玲玲. 高强度紧固件电镀中的氢脆问题分析[J]. 汽车工程师, 2018(10): 55-57.
- [28] 日野実, 向井駿, 介島田丈寛, 等. 硫酸浴から各種亜鉛系めっきされた高強度鋼の水素脆性に及ぼすベークングの効果[J]. 日本金属学会誌, 2020, 84(3): 87-91.