

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.09.012

## 带钢热镀锌锌渣缺陷形成机理及控制措施

刘石双<sup>1</sup>, 袁天祥<sup>1\*</sup>, 刘延强<sup>1</sup>, 张良<sup>2</sup>, 黄立春<sup>1</sup>, 张逸忠<sup>1</sup>(1. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司制造部, 河北 唐山 063200; 2. 首钢京唐钢铁联合  
有限责任公司冷轧作业部, 河北 唐山 063200)

**摘要:** 带钢连续热镀锌是目前应用最广泛且具有经济性的防腐技术。然而, 热镀锌过程难免会产生锌渣, 锌渣的形成不仅会造成锌资源的损失, 也会严重影响带钢的表面质量, 因此控制锌渣的形成是带钢热镀锌质量控制的关键点。笔者综述了近年来国内外带钢连续热镀锌锌渣缺陷的研究现状, 分析了锌渣的形成机理, 探讨了锌渣的影响因素, 总结了锌渣的控制措施, 证明通过一系列设备改进、工艺优化和规范操作等调整, 可有效减少锌渣、降低锌耗、节省成本、提高质量。同时, 对热镀锌技术锌渣缺陷的进一步有效预防与控制进行了展望。

**关键词:** 热镀锌; 锌渣缺陷; 形成机理; 影响因素; 控制措施

**中图分类号:** TG335.22 **文献标识码:** A

## Formation mechanism and control measures of zinc slag defects in hot dip galvanizing of strip steel

Liu Shishuang<sup>1</sup>, Yuan Tianxiang<sup>1\*</sup>, Liu Yanqiang<sup>1</sup>, Zhang Liang<sup>2</sup>,  
Huang Lichun<sup>1</sup>, Zhang Yizhong<sup>1</sup>(1. Manufacturing Division, ShougangJingtang United Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan 063200,  
China; 2. Cold Rolling department, ShougangJingtang United Iron and Steel Co., Ltd.,  
Tangshan 063200, China)

**Abstract:** Continuous hot dip galvanizing is currently the most widely used and cost-effective anti-corrosion technology. However, the hot dip galvanizing process inevitably produces zinc slag. The formation of zinc slag not only causes the loss of zinc resources, but also seriously affects the surface quality of the strip steel. Therefore, controlling the formation of zinc slag has become the key point in the quality control for hot dip galvanizing of strip steel. In this paper, the research status of zinc slag defects in continuous hot dip galvanizing of strip steel at home and abroad in recent years is reviewed. The formation mechanism of zinc slag is analyzed, the influencing factors of zinc slag are explored, and the control measures of zinc slag are summarized. It is proved that through a series of equipment improvements, process optimization, and standardized operation adjustments, the zinc slag can be effectively reduced, zinc consumption can be reduced, costs can be saved, and quality can be improved. At the same time, the further effective prevention and control of the zinc slag defects in hot dip galvanizing technology are prospected.

**Keywords:** hot dip galvanizing; zinc slag defect; formation mechanism; influencing factors; control

收稿日期: 2024-02-22 修回日期: 2024-03-13

作者简介: 刘石双(1990—), 男, 博士(工学), 工程师, email: 18233586621@163.com

通信作者: 袁天祥(1984—), 男, 硕士(工学), 高级工程师, email: yuantx0010@sgitsteel.com

measures

锌具有优异的抗腐蚀性能,通常被用作钢材的表面镀层。热镀锌以锌为镀层,具有镀层均匀、附着力强和减蚀长寿等特点,镀锌后的带钢性能优异,越来越受市场的青睐,是目前带钢防腐应用最广泛、最有效的方法之一<sup>[1]</sup>。随着热镀锌带钢不断进入市场,面临着来自竞争材料和生产工艺的挑战,对其质量和性能提出了更高的要求。然而,在热镀锌生产过程中,锌渣产生会造成锌资源浪费和产品降级,一直是困扰热镀锌带钢表面质量控制的难题<sup>[2]</sup>。

锌渣是影响镀锌带钢表面质量的最主要因素,控制其含量对于提高热镀锌带钢表面质量尤为重要。目前,表面粘附锌渣是带钢连续热镀锌产品的主要缺陷之一,是各大镀锌产品生产企业提高产品质量面临的重要挑战。为了减少锌渣缺陷对镀锌带钢质量的影响,国内外学者在热镀锌锌渣产生机理和影响因素的理论 and 实践两方面展开了广泛的研究,取得了丰硕的成果。鞍山钢铁集团有限公司冷轧镀锌产线根据生产经验,将带钢入锌锅温度严格控制在450~490℃,有效增加了锌层的附着力,减少了铁损和锌渣生成<sup>[3]</sup>。湘潭钢铁集团有限公司采用陶瓷锅代替铁锅进行镀锌,由于耐材与锌液不反应,解决了铁锅镀锌锅腐蚀问题,锌渣大幅减少<sup>[4]</sup>。攀钢集团有限公司探讨了铝含量对镀层质量的影响,发现锌液铝含量在(0.16~0.20)wt.%时,获得的产品质量最佳,并通过反馈添加法制定了合理的加合金锭方式<sup>[5]</sup>。陆勇等<sup>[6]</sup>分析了浮渣的分布特点,提出锌渣流动的管理方法,证实锌液切向流动可促进锌渣流动,改善锌渣分布,从而促进锌渣排出。兰言彬等<sup>[7]</sup>建立了带钢横截面积与带钢入锅温度之间的关系,得出带钢入锅温度均高于锌液温度10~20℃;在此温度下感应加热器高低功率比均低于1:2,此时锌液温度波动稳定,铁渣形成量较少,带钢镀锌质量明显提高。吕军义等<sup>[8]</sup>发现感应加热器功率对锌渣形成影响有限,而其位置离锌液较近会增加底渣,较远会增加浮渣,位置应适中。宝山钢铁股份有限公司利用热镀锌锌锅电磁驱渣法和捞渣机器人耦合清渣方法,具有良好的自动清渣效果,实现了锌锅表面零锌渣,大大改善了锌锅环境<sup>[9]</sup>。Fei等<sup>[10]</sup>研究了带钢宽度和带钢镀锌速度对锌锅底渣动态沉积的影响,发现带钢宽度减小可以抑制底渣搅动,从而减少底渣接触带钢表面的机会,

避免了带钢表面锌渣的附着。笔者对此进行了总结,旨在为改善带钢热镀锌表面质量提供理论参考依据,实现提质增效、节能降耗的目标。

## 1 锌渣形成机理

热镀锌锌锅中锌液的温度和成分会受生产过程和带钢入锌锅温度的影响,产生温度和成分的起伏。在热镀锌过程中,带钢表面铁粉不断溶于锌液内部,加之锌液成分及温度的波动,会导致锌渣的产生。锌渣形成原因:当带钢进入锌锅时,其表面残留的铁粉与锌液主要发生 $\text{Fe}+7\text{Zn}\rightarrow\text{FeZn}_7(\delta\text{相,底渣})$ 和 $2\text{FeZn}_7+5\text{Al}\rightarrow14\text{Zn}+\text{Fe}_2\text{Al}_5(\eta\text{相,面渣})$ 等化学反应,主要形成Fe-Zn化合物 $\text{FeZn}_7$ 和Fe-Al化合物 $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ <sup>[11]</sup>,Zn在 $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ 化合物中有一定溶解度,实际结构应为 $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_x$ 三元系金属间化合物。 $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ 密度小于锌液密度,上浮为面渣; $\text{FeZn}_7$ 密度大于锌液密度,下沉为底渣<sup>[10,12]</sup>,如图1所示。当锌液成分稳定时,可降低锌渣生成量,提高产品质量,如加入合适的铝元素可以形成铝铁化合物,阻碍锌铁反应,从而减少锌渣形成;当锌液温度波动较小时,可降低锌渣生成量,其中带钢温度过高或带钢与锌液温差过大,都会加快造渣速度。因此,要严格控制锌液成分、带钢入锌锅温度和锌液温度。

在镀锌过程的反应初期,首先形成 $\text{FeZn}_7$ ,锌渣质点尺寸较小且不稳定,质点会随锌液温度的升高或铁损而回溶;一部分未溶的锌渣质点在锌液中发生布朗运动相互碰撞长大,尺寸超过一定值便形成底渣。后续,锌渣质点在布朗运动中也会与锌液中的铝元素发生碰撞而反应,形成浮渣。由锌渣成分可以看出,锌渣主要组成元素为Fe,应严格控制其含量;按其形态和所处位置可将锌渣分为底渣(尺寸约为80~400 μm)、悬浮渣(又名自由渣,尺寸约为10~40 μm)和面渣(又名浮渣,尺寸约为40~100 μm)<sup>[13]</sup>。

锌渣缺陷正是这样在热镀锌过程中,由底渣、悬浮渣和面渣等锌渣粘附在镀锌板表面引起的点状、粒状、或块状凸起,以及表面粗糙不平缺陷<sup>[3]</sup>,典型锌渣缺陷如图2所示,该缺陷严重影响带钢产品质量和企业经济效益。锌渣粘附到带钢表面主要通过锌液面波动、锌液流动和辊系粘附三种途径<sup>[14]</sup>,带钢穿过锌液时,锌渣粘附在带钢表面产线

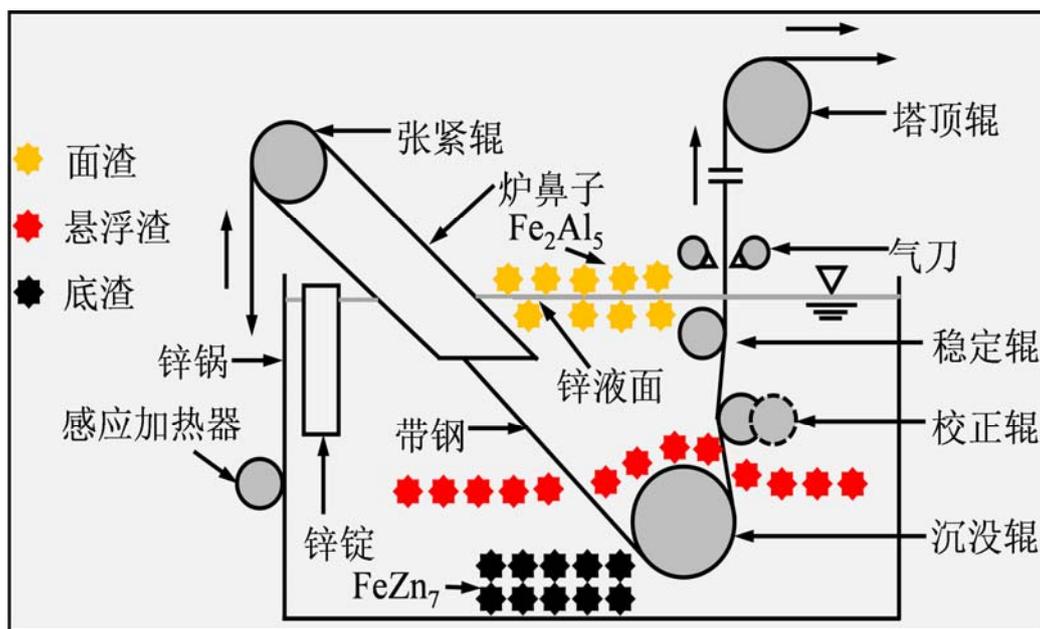


图1 热镀锌工艺示意图

Fig.1 Schematic diagram of hot dip galvanizing process

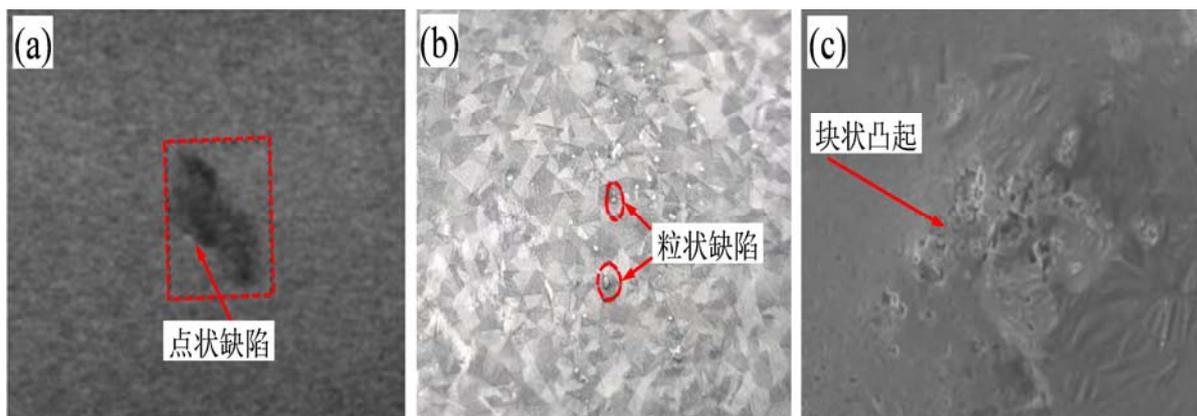
图2 锌渣缺陷: (a)点状缺陷<sup>[15]</sup>; (b)粒状缺陷<sup>[12]</sup>; (c)块状凸起缺陷<sup>[16]</sup>

Fig.2 Zinc slag defects

点状压痕; 锌渣通过在辊系上积累, 锌渣压入带钢表面产生条状压痕。底渣粘附在带钢表面形成粗糙型锌渣缺陷, 悬浮渣和面渣粘附在带钢表面形成光滑型锌渣缺陷。由于底渣危害大且不易捞取, 现代镀锌产线一般采用控制锌锅铝含量实现无底渣镀锌工艺。

## 2 锌渣影响因素

锌渣形成因素众多, 主要与锌液成分、带钢入锌锅温度、锌液温度、带钢成分、带钢表面光洁度、生产操作规程、设备等因素有关。因此, 镀锌产线应从工艺参数、设备改进、操作规程等入手, 切实减少锌渣生成、降低生产成本、提高带钢表面质量,

从而提升企业行业竞争力。

### 2.1 锌液成分影响

锌液成分稳定, 不仅可提升产品质量, 还可以降低锌渣生成量。其中, 锌液中的铝含量直接影响锌渣成分, 锌液中铁的溶解度直接影响锌渣含量。

在现代热镀锌生产中, 铝是锌液中的关键元素之一, 铝元素具有提高镀层表面光洁度、减少锌液氧化和提高锌液流动性等作用<sup>[17-19]</sup>。铝元素较铁元素相比活泼, 二者具有较强的亲和力, 可以形成铝铁化合物, 阻碍锌铁反应, 减少锌渣的形成<sup>[19]</sup>, 从而保障热镀锌带钢表面质量。但是, 铝含量对于热镀锌工艺具有双重作用, 铝含量过低会形成锌铁反应层, 锌渣生成量较高; 铝含量过高会提高铁的溶

解度，锌渣生成量增加。锌液中铝含量与渣生成量的关系如图3所示<sup>[19]</sup>，从图中可以看出，当铝含量低于0.14 wt.%时，随着铝含量的增加，底渣减少，面渣增加；当铝含量接近0.14 wt.%时， $2FeZn_7+5Al \rightarrow 14Zn+Fe_2Al_5$ 反应开始，而铝含量大于等于0.14 wt.%时，锌渣全部为面渣，可实现无底渣作业，锌渣的总量随着铝含量的增加而减少<sup>[20]</sup>。目前，热镀锌产线基本采用控制锌液中铝含量的无底渣镀锌工艺，底渣含量急剧下降，部分底渣也会反应消失，浮渣则可以随时捞出，实现无底渣生产工艺操作<sup>[21]</sup>，但并非真正意义上的无渣化。锌渣的形成与铁在锌液中的溶解度密切相关，当铁含量超过其饱和溶解度时，锌渣将以金属间化合物的形式析出，锌液中析出的铁含量越大， $Fe+7Zn \rightarrow FeZn_7$ 和 $FeZn_7+5Al \rightarrow 14Zn+Fe_2Al_5$ 反应越剧烈，则锌渣形成越多<sup>[22]</sup>。此外，研究发现，铁元素的溶解度受硅元素含量影响，含硅的带钢在经历退火处理后，硅原子较铁原子相比具有更大的亲和力，可将带钢表面氧化铁还原<sup>[23]</sup>，抑制铁铝化合物形成，使锌液中铝原子失去阻碍铁锌化合物形成的作用，进而使锌渣生成量增加，随着硅含量增加，铁的溶解度增加，对应着锌渣生成量增加。

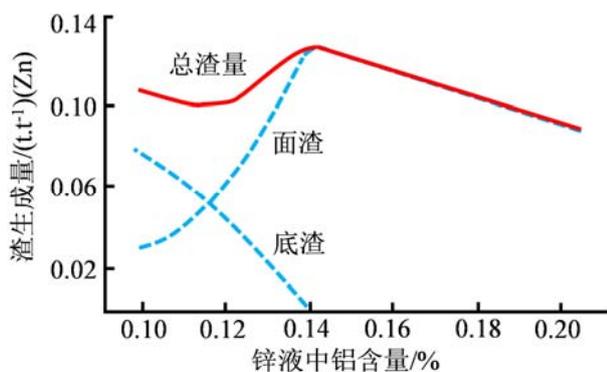


图3 锌液中铝含量与生成渣量关系曲线<sup>[20]</sup>

Fig.3 The relationship curve between aluminum content and slag generation in zinc solution

### 2.2 带钢和锌液温度影响

带钢入锌锅温度对锌锅中锌液的温度有重要影响，不仅会影响镀层中间层厚度，同样会影响锌渣形成<sup>[24]</sup>。一般情况下，带钢入锌锅温度测量误差较大，进而导致带钢带入锌锅的热量波动造成锌液温度波动<sup>[25]</sup>。当带钢温度低于锌液温度时，会造成带钢浸润性能下降，影响镀层附着性能；当带钢温度过高时，会增加锌液中铁元素的损失，促进 $Fe_2Al_5$ 的生成，进而使锌渣量增加<sup>[7]</sup>。另外，带钢温度与

锌液温度差越大，铁元素的扩散越快，加快造渣反应<sup>[26]</sup>。许秀飞等<sup>[27]</sup>人探索出了以锌锅锌液温度为基准，通过控制冷凝线高度来调整锌液温度，进而控制带钢与锌液之间的温度差来设定带钢温度的方法，既保证产品质量，又简单易行，发现问题后还能够及时调整。

锌液温度的变化是影响带钢铁损的主要因素，当带入锌锅中的铁元素超过其溶解度时，饱和析出的铁会与锌液中的铝或锌反应生成流动性极差的铁铝合金或铁锌合金，即锌渣，锌液中的铁含量越大，锌渣生成量越多。锌渣析出是非可逆行为，锌液温度的波动会增加锌渣的形成。锌液温度过高会加速铁元素的消耗， $Fe+7Zn \rightarrow FeZn_7$ 反应激烈进行，使锌渣的生成增加，锌液温度和铁损二者关系如图4所示<sup>[23,24]</sup>。根据锌液与带钢铁损关系图可见，锌液温度波动会像潮汐一样，温度过低或过高都会增加锌渣的形成，当锌液温度大于480℃时，铁损加剧，温度达到500℃时带钢铁损最大，从而增加铝的消耗和锌渣的生成。可见，锌液温度是决定带钢热镀锌工艺优劣的重要参数，因此要严格控制锌液温度。正常情况下，锌液温度控制在460℃左右，带钢入锌锅温度高于其10~15℃时较好，在480℃左右<sup>[29,30]</sup>。

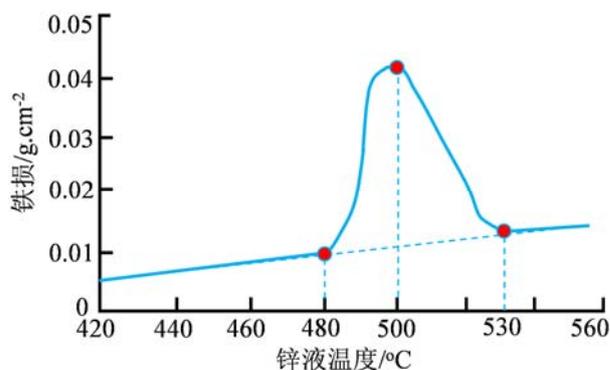


图4 锌液温度与锌锅铁损关系<sup>[23,24]</sup>

Fig.4 The relationship between zinc solution temperature and zinc pot Fe loss

### 2.3 带钢成分影响

带钢成分不同，对锌渣的影响也不同。带钢中碳、硅等元素含量及形态对锌渣的影响显著。碳影响锌铁反应，碳含量较高的钢种，铁锌反应强烈，造成铁损增加，锌渣生成量增加，且使镀层附着性下降。碳形态也会显著影响锌渣形成速度，粒状/层状珠光体的存在会加速铁元素溶解。因此，低碳钢适合热镀锌，通常碳含量在0.05~0.15 wt.%。通常将硅含量控制在0.15 wt.%以下。

## 2.4 带钢表面光洁度影响

带钢经酸洗和冷轧后,其表面会残留一些油脂、铁粉、氧化铁和灰尘等,这些残留对镀锌过程十分有害。通常将带钢表面每平方米残留物总量定义为带钢表面光洁度,如果清洗不干净,会导致带钢表面的残留铁屑和氧化铁会向锌锅中带入铁元素,铁与锌液逐渐反应形成锌渣,一部分形成底渣和浮渣,大部分粘附在带钢表面形成锌渣缺陷<sup>[28]</sup>,严重影响带钢性能和外观。带钢表面光洁度越好,带入锌锅的残留物越少,锌渣生成越少;带钢粗糙度越大,表面暴露面积越大,锌铁反应越剧烈,锌渣生成越多。同时,带钢表面残留的油污会造成带钢表面残存碳,导致锌渣增加。因此,要加大带钢清洗力度,确保带钢具有较高的清洁度,减少锌渣的形成。

## 2.5 其他因素影响

锌渣的生成还受其他因素影响,比如氧分压、加锌锭方式、锌锅成分、气刀工艺参数等,其中氧含量越高,带钢氧化形成氧化铁的含量越高,氧化铁与锌液中铝反应生成铁和氧化铝,进而导致生成的锌渣含量越多<sup>[3]</sup>;添加锌铝锭方式不当易造成锌液成分波动,形成大量铁铝化合物,悬浮在锌液表面形成浮渣;锌锅中碳、硅含量高会使锌渣增加;气刀的位置、喷气压力、垂直度以及气刀存在豁口等问题也会影响锌渣的形成。

## 3 锌渣控制措施

针对上述锌渣形成机理及其影响因素,要防止锌渣的形成或控制锌渣的产量,镀锌产线可以从工艺优化、设备改进、操作规程等方面减少锌渣的形成,以降低锌耗、降低成本、提高质量,从而实现降本增效的目的。减少锌渣缺陷的具体措施:调节锌液成分、控制锌液温度和带钢入锌锅温度、清洗

带钢表面降低油脂和铁残余,及时清理锌锅内的锌渣、减少锌液波动、提高沉没辊的排渣能力等一系列措施。

### 3.1 锌液成分调整

铝元素在热镀锌生产过程中的作用显著,一是可以抑制锌铁反应,形成铁铝反应层,提高镀锌层的附着力;二是有利于底渣上浮,锌液中铝元素与底渣发生置换反应,可使底渣转化为浮渣后捞渣去除,基本可实现无底渣操作。铝元素与底渣、浮渣的生成紧密相关,铝含量过低,使底渣增加,易产生锌渣缺陷;铝含量过高,降低了铁的溶解度,促进锌渣形成<sup>[21]</sup>。但是,在铁元素在完全饱和析出前可形成一个无渣区,可通过提高锌液中铝含量来控制热镀锌带钢表面质量。

理论分析锌液温度为460℃时铁的溶解度相图(见图5)可知<sup>[17]</sup>,铁的溶解度随着铝含量的增加而下降。在热镀锌生产过程中,如果锌液成分处于B位置,此时铁含量为0.01 wt.%,铝含量为0.24 wt.%,处于铁溶解曲线上方,此时部分铁饱和析出,生成 $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ ,易形成锌渣缺陷;当锌液成分处于A位置,铁含量不变,铝含量下降至0.16 wt.%时,处于铁溶解曲线下方,铁全部溶解于锌液中,无锌渣产生,有效防止了锌渣缺陷的产生,即“降铝防渣”的原理<sup>[29]</sup>。铝含量对锌渣的控制存在临界点,理论研究和生产实践表明,当铝含量在0.18~0.22 wt.%时,底渣转化较彻底,可适当提高铝含量来控制自由渣含量;铝含量在0.22~0.23 wt.%时,可有效减少自由渣含量。实际生产过程中,锌液中的铝含量基本控制在(0.20±0.02) wt.%范围内<sup>[30]</sup>。通过合理添加锌锭和调整锌液成分检测频次,增加在线测量铝含量测定装置,及时确保铝含量稳定,从根源上减少锌渣的形成<sup>[30]</sup>。

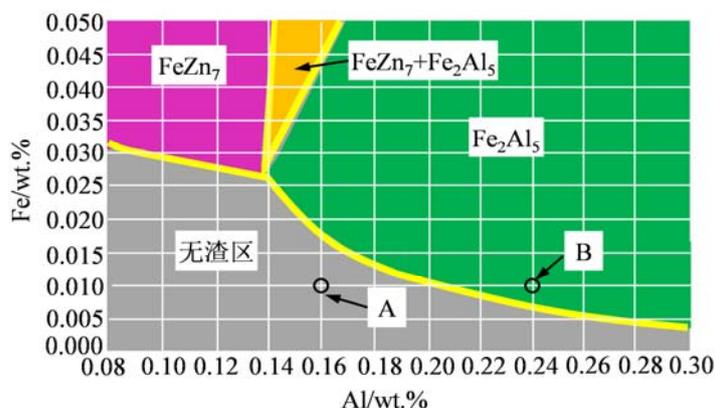


图5 锌液460℃时铁溶解度相图<sup>[17]</sup>

Fig.5 Phase diagram of Fe solubility in zinc liquid at 460 °C

### 3.2 控制锌液温度和带钢入锌锅温度

锌液和带钢入锌锅温度对锌渣的形成有显著影响,当锌液成分位于A位置,锌液温度为450℃时,处于铁溶解曲线上方,部分铁从锌液中析出,生成 $Fe_2Al_5$ 面渣,易形成锌渣缺陷;当锌液温度上升至460℃时,处于铁溶解度曲线下方,铁全部溶解于锌液,不会出现锌渣缺陷,即“升温防渣”原理,铁的溶解度曲线见图6<sup>[29]</sup>。研究表明,当锌液温度超过480℃时,铁耗成抛物线关系倍增,低于480℃时,铁损失缓慢,锌渣产量少。因此,在镀锌过程中,当要守住480℃红线,锌液一旦超温立即采取措施。在满足生产效率的前提下,尽量采用较低温度进行

热镀锌。

提高带钢温度检测的准确性,减少带钢入锅温度检测不准而引起的锌液温度波动,采用新型多波长高温计测量<sup>[31]</sup>。严格控制锌液温度波动,波动越小越好,采用锌液温度自动控制方式,自动调节锌液温度,保证锌液温度平稳,可以在很大程度上控制锌渣的生成量。根据大量试验证明,在实际生产过程中,一般将锌液温度控制在 $(460\pm 2)$ ℃左右,尽量不要超过465℃,带钢入锌锅温度控制在480℃左右,此时锌渣的生成量较少;较厚带钢或较厚镀层可以适当降低锌液温度,而较薄带钢或者较薄镀层必须提高锌液温度。

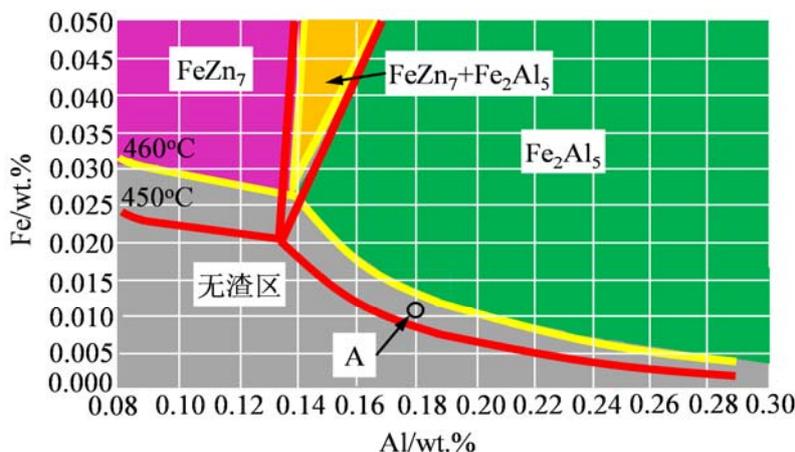


图6 锌液温度对锌渣产生的影响<sup>[29]</sup>

Fig.6 The influence of zinc liquid temperature on the production of zinc slag

### 3.3 提高带钢入锌锅表面清洁度

现代热镀锌产线十分注重带钢表面的清洁度,因为锌渣由铁和锌液反应而成,而铁的主要来源是带钢表面残留的铁粉和氧化铁。带钢带入锌锅带入的铁粉会与锌液按照1:25比例反应形成锌渣,铁的带入显著增加了锌耗,且增加锌渣的生成<sup>[32]</sup>。因此,采用物理和化学等前处理方法去除带钢表面的大部分油脂、铁粉和灰尘等残留物是影响带钢质量的关键性工序,带钢入锌锅前越清洁,铁含量越低,锌渣生成量越小。因此,要优化清洗参数,一般在热镀锌入口增设酸洗、电解和碱洗等设备,采用烧碱、碱性钠盐、表面活性剂、消泡剂和助洗剂等加强镀锌前带钢表面清洗,保证入锌锅带钢表面清洁对提高带钢质量和降低锌耗至关重要<sup>[28, 33]</sup>。

加强炉内气氛和炉区设备的监控,发现情况及时处理。同时,带钢表面锈蚀与带钢表面粘附性极

弱,锈蚀进入锌锅后会增加锌液中的铁浓度,进而增加锌渣生成可能,要防止带钢在存储或退火炉中被氧化<sup>[20]</sup>,减少因氧化物与锌液中铝元素反应产生锌渣,因此要合理控制炉内气氛,减少氧分压。

### 3.4 规范生产操作

生产速度和镀锌时间:热镀锌过程中,生产速度过慢或带钢在锌锅中停留时间过长会使锌铁有足够的时间反应,增加了铁耗和锌渣生成概率;生产速度过快或带钢在锌锅中停留时间过短,会造成漏镀或粘附力不强,从而导致锌渣产生<sup>[21]</sup>。因此,在实际生产过程中,根据钢种和镀锌要求,严格控制生产速度和镀锌时间。

捞渣工艺:底渣一般采用化学方法去除,即无底渣工艺;浮渣一般采用人工捞渣,定期采用人工捞渣,捞渣频次低、捞渣量少,避免捞渣过程中由于用力搅动造成锌液面波动,保持锌液面距离上方

80~120 mm。

铝合金和锌锭加入方式：调整和控制铝合金成分范围，合金块分批加入，根据铝含量波动修正调整铝合金加入。采用缓慢、高频率的方式加入锌锭，同时改变加锌锭位置来减少其对锌液温度场和局部铝含量的影响，减少沉没辊锌渣的富集。加入锌锭前对锌锭进行烘烤预热，采用自动添加方式加入锌锭，推进自动加锭系统，每块锌锭加锭次数不少于4次，减少液位波动<sup>[34]</sup>。

沉没辊工艺：定期清理沉没辊表面，避免粘附的锌渣带入带钢表面，引起锌渣缺陷；合理安排生产带钢生产的宽窄规格，按照规格搭配生产，遵循由宽带窄的逐渐过渡生产排产，带钢规格过渡时应尽量平稳。同时，也可以通过现场工艺改进，设计沉没辊积渣装置，在沉没辊和上部温度定辊之间增设多组积渣盘<sup>[35]</sup>，积渣盘不与辊系接触，在锌液搅动时有利于将锌渣收集在积渣盘中，明显减少辊系表面积渣，从而提高带钢镀层表面质量。

其他工艺调整：生产过程中对气刀参数进行调整，适当提升气刀高度，观察效果，调整合适的气刀喷吹压力和喷吹角度，减少锌液飞溅。控制锌液流动速度，温度高，锌液流动速度大，锌渣生成量小。提高锌渣泵转速，摆动炉鼻子，将溢流槽内锌渣摆空。

### 3.5 设备改进

气刀：采用压缩空气为气刀供气，气体对带钢表面锌液起氧化和冷却作用，导致氧化锌增多，影响热镀锌带钢表面质量；而采用氮气为气刀供气不会氧化带钢表面锌液，可减少锌渣产生，同时氮气可以对锌液面进行保护，减少锌液面锌液的氧化和锌渣的产量。气刀压力越大越有利于锌液氧化，在实际生产过程中应使用小压力近距离进行镀锌，减

少锌液氧化和锌渣的产生。定期检查气刀外形，保证气刀垂直度良好，不存在豁口等问题。

炉鼻子：炉鼻子处锌液浮渣和内壁凝结的固态渣极易被带钢带出锌锅形成锌渣缺陷，因此需要对炉鼻子区域进行改进。合理调节炉鼻子氧分压，在炉鼻子处可以加设锌渣泵、清渣孔、通氮气等措施进行改善。同时，开展对炉鼻子的液位稳定性攻关，控制溢流量的稳定；确保炉鼻子露点控制稳定，减少锌渣缺陷的产生<sup>[36]</sup>。

沉没辊：部分悬浮渣和部分由带钢运行搅动起来的底渣会在沉没辊和稳定辊上积累，带钢在运行过程中，辊面上积累的锌渣就会压入带钢，产生锌渣缺陷，带钢越宽，锌渣缺陷越明显，如图7所示<sup>[14]</sup>。因此，减少锌渣缺陷需要增加单位摩擦力。通过对沉没辊进行改造可以有效减少锌渣缺陷，改善带钢表面质量。目前，沉没辊辊面沟槽主要有U型和V型，沟槽间距过宽或过大会影响锌液流动，造成锌渣在沟槽沉积<sup>[37]</sup>。涟源钢铁改变了沉没辊旋向、增加了沟槽宽度、设计了R5尺寸的倒角，并在沟槽处增设排液孔，如图8所示<sup>[23,38]</sup>，此设备改造增加了锌液在辊面的流动性，有利于锌渣的排除，有效减少了锌渣缺陷的形成。

同时，不锈钢辊系的侵蚀会易粘附锌渣，影响带钢表面质量。将不锈钢沉没辊表面喷涂耐高温钴基碳化钨(WC-Co)合金材料，不仅耐腐蚀、耐磨，而且降低了涂层辊面和锌渣的结合力，有效降低了锌渣缺陷，并大幅提高了辊系寿命<sup>[20]</sup>。除了对辊系喷涂，还采用在辊面上涂刷封孔剂来抑制喷涂层与锌液润湿，可有效阻碍锌渣在辊面的粘附。降低沉没辊辊面表面积，提高辊面粗糙度，也可以减少锌渣的聚集。

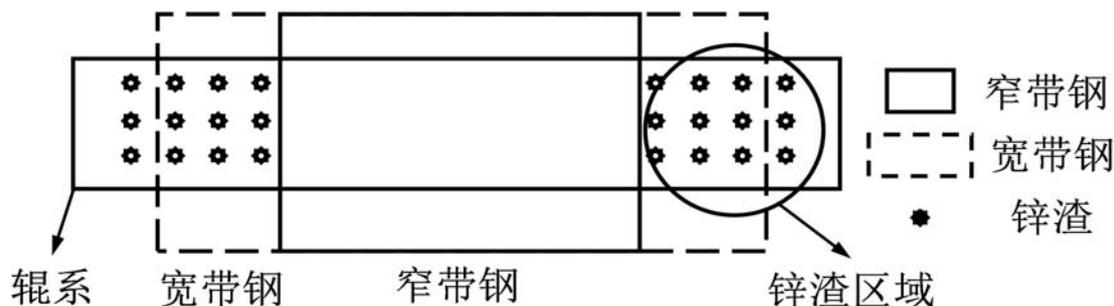


图7 窄带钢向宽带钢过渡形成的锌渣缺陷<sup>[14]</sup>

Fig.7 Zinc slag defects formed during the transition from narrowband steel to broadband steel

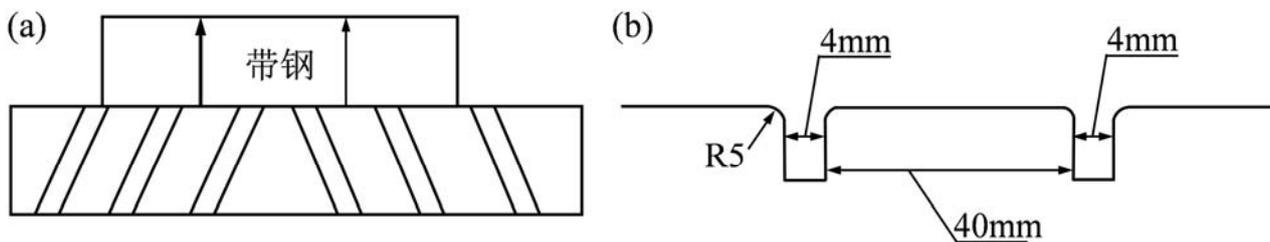


图8 沉没辊改进<sup>[23, 38]</sup>: (a)双螺旋沉没辊; (b)圆角 R5 沟槽

Fig.8 Improvement of sink roll

锌液成分在线检测：采用锌液在线检测设备，避免了人工检测的高强度、降低了危险性、提高了检测精度和扩大了检测项目，有效提高了锌液成分的稳定性。表检仪应用前后的锌渣缺陷对比如图9

所示<sup>[39]</sup>，图9(a)~(b)为表检仪应用前，图9(c)~(d)为表检仪应用后，可见表检仪的应用使操作工人及时发现锌渣缺陷，能够及时采取解决方法，有效控制锌渣，降低出渣率，实现了降本增效的目标。

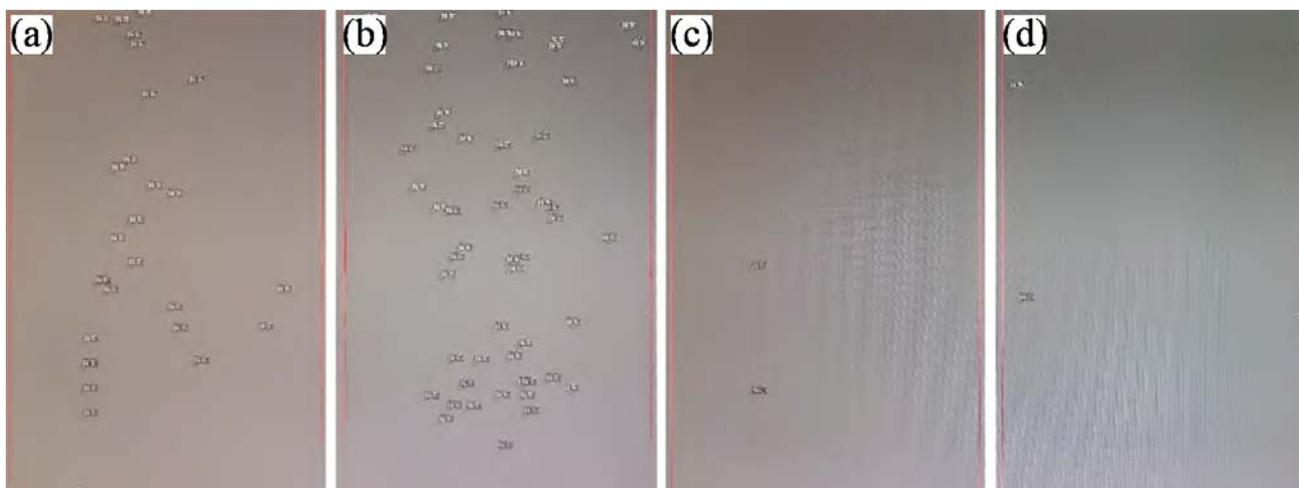


图9 表检仪应用前后锌渣缺陷<sup>[38]</sup>: (a-b)表检仪应用前; (c-d)表检仪应用后

Fig.9 Zinc slag defects before and after the application of on-line aluminum content analyzer

#### 4 结论与展望

在保证国家标准和客户要求的前提下，提质量、降成本是企业追求的目标和获利的必然途径，有利于提高企业市场竞争力。热镀锌产线亟需持续开发降本增效的设备和方法，以适应当前“绿色、节能、低碳”发展理念，使企业立于不败之地。锌渣缺陷一直是镀锌行业比较棘手的问题，虽然锌渣在生产过程中会不可避免的产生，但是结合热镀锌生产现场，根据锌渣影响带钢表面质量的情况，对症下药。通过一系列措施，可以减轻和抑制锌渣的产生量，进而减轻和消除热镀锌板锌渣缺陷。通过对锌渣产生机理及控制措施分析总结，归纳出了以下降低锌渣缺陷的措施：

(1)调整锌液成分：铝含量控制在(0.20±0.02)

wt.%范围内；采用“降铝防渣”的无底渣工艺。

(2)控制锌液温度和带钢入锌锅温度：锌液温度控制在(460±2)℃左右，带钢入锌锅温度控制在480℃左右。

(3)提高带钢入锌锅表面清洁度：优化清洗参数，加强镀锌前带钢表面清洗。

(4)规范生产操作工艺：严格控制生产速度和镀锌时间；底渣采用无底渣工艺去除；合理安排带钢宽窄规格排产等。

(5)设备改进：优化气刀参数、改进炉鼻子结构、调节沉没辊表面材料和结构等。

目前，热镀锌产线锌渣缺陷研究还不够系统和全面，仍有许多问题需加深理解。近期亟待重点开展以下工作：(1)建立带钢温度控制数据库；结合带

钢成分、带钢规格、带钢速度等,优化带钢入锌锅温度和锌液温度的温度差,积累生产数据,完善数据库。(2)优化设备结构:沉没辊系管理,辊面和结构优化,减少辊面粘渣、沟槽锌渣沉积,其表面涂层和沟槽结构仍需进一步研究;炉鼻子结构和工艺参数管理,合理优化炉鼻子内部露点参数、改进炉鼻子端头排渣系统和收集锌渣溢流槽。

控制锌渣生成、实现低成本管理是镀锌产线持续追求的目标。锌渣工业控制亟待解决,需系统、深入和前瞻性的研究,生产技术必将迎来新挑战。需要广大科研人员开发出一种更有效、可持续发展的锌渣去除工艺,将“除”与“防”相结合,从根本上解决锌渣缺陷影响热镀锌带钢表面质量的国际性难题。相信科技赋能未来,创新引领发展。

## 参考文献

- [1] 赵川翔,冯辉雄,吴科,等.合金化热镀锌钢板表面锌渣缺陷研究[J].宝钢技术,2022,(6):26-31.
- [2] Luo Q, Jin F, Li Q, et al. The mechanism of dross formation during hot-dip Al-Zn alloy coating process[J]. Journal for Manufacturing Science and Production, 2013, 13(1-2): 85-89.
- [3] 李林,高毅.镀锌板表面锌渣缺陷的控制[J].上海金属,2007,29(5):87-90.
- [4] 曾智宇.钢丝热镀锌锌渣的控制[J].湖南冶金,2007,31(6):37-39.
- [5] 金永清,郭太雄.连续热镀锌液铝含量的控制[J].轧钢,2011,28(5):24-26.
- [6] 陆勇,侯晓光,钱洪卫.附加外场力对锌锅表层锌液流动和锌渣分布的影响[J].宝钢技术,2020,(1):13-20.
- [7] 兰言彬,王平,唐成龙,等.热镀锌工艺中带钢入锌锅温度的优化研究[J].热加工工艺,2023,52(2):72-74.
- [8] 吕军义.热镀锌锅中感应加热器功率和位置对锌渣分布的影响[J].宝钢技术,2018,(1):54-58.
- [9] 侯晓光,钱洪卫,陆勇.热镀锌锌锅电磁驱渣模拟研究及生产实践[J].轧钢,2022,39(4):87-96.
- [10] Fei H Z, Li J, Li H Y. Size effect on flow field and dynamic deposition of bottom dross in a molten zinc pot [J]. ISIJ International, 2021, 61(5): 1633-1640.
- [11] Vourlias G, Pistofidis N, Stergioudis G, et al. A negative effect of the insoluble particles of dross on the quality of the galvanized coatings[J]. Solid State Sciences, 2005, 7(4): 465-474.
- [12] 张文军,刘格非,王孝建,等.热镀锌带钢表面缺陷形成机理及工艺优化[J].钢铁,2023,58(4):87-95.
- [13] 王银军,李远鹏,江社明,等.热浸镀锌熔池锌渣形成的研究进展[J].材料保护,2020,53(10):85-92.
- [14] 王保勇,鲍成人,宁媛媛,等.热镀锌带钢表面锌渣缺陷形成分析及改进措施[J].冶金与材料,2019,39(1):14-16.
- [15] 周国平,于磊,谷田,等.带钢表面锌渣产生的机理及控制措施[J].冶金管理,2020,(15):6-7.
- [16] 宋进英,张宏军,赵定国,等.焊接钢管热浸镀锌表面凸起缺陷成因分析及改进措施[J].铸造技术,2016,37(4):692-694.
- [17] 陈刚,但斌斌,严开勇,等.热镀锌板隐形锌渣缺陷的典型特征及控制措施[J].机械工程材料,2019,43(1):31-35.
- [18] Kim H S, Kim J G, Yoon S C, et al. Numerical simulation of flow and dross particle transfer in a 55% Al-Zn pot[J]. Corrosion Science and Technology, 2012, 11(3): 71-76.
- [19] Kancharla H, Mandal G K, Singh S S, et al. Effect of strip entry temperature on the interfacial layer and corrosion behavior of galvanized steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 433: 128071.
- [20] 胡华东.热镀锌板锌渣缺陷形成机理分析及预防措施[J].山东冶金,2018,40(5):24-26,29.
- [21] 卜二军,薛向欣,杨合.邯钢冷轧厂热镀锌渣形成原因分析及控制措施[J].中国冶金,2016,26(4):47-50.
- [22] Luo Q, Jin F, Li Q, et al. The mechanism of dross formation during hot-dip Al-Zn alloy coating process[J]. Journal for Manufacturing Science and Production, 2013, 13(1-2): 85-89.

- [23] 许秀飞. 钢带连续热镀锌技术问答[M]. 北京:化学工业出版社, 2007.
- [24] 李龙. 热镀锌沉没辊印的成因分析及控制[J]. 金属材料与冶金工程, 2022, (5): 29-35.
- [25] 张军, 杨建国, 钱洪卫, 等. 连续热镀锌机组锌液温度的精确控制[J]. 宝钢技术, 2016, (1): 59-63.
- [26] 金永清, 李响, 蒋英箴, 等. 热镀锌锌液有效铝控制技术[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(6): 73-76.
- [27] 许秀飞. 钢带热浸镀工艺参数的动态精准控制方法[J]. 中国冶金, 2018, 28(4): 61-65.
- [28] Mandl G K, Balasubramaniam R, Mehrotra S P. Theoretical investigation of the interfacial reactions during hot-dip galvanizing of steel[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2009, 40A(3): 637-645.
- [29] 吴价宝, 张雨泉. 控制热镀锌汽车外板锌渣缺陷的工艺创新方法[C]//第十二届中国钢铁年会论文集. 北京:中国金属学会, 2019, 123-128.
- [30] 张霞, 卢秉仲, 张冰, 等. 连续热镀锌汽车面板锌渣缺陷产生原因及改善[J]. 金属世界, 2017, (6): 40-43.
- [31] 徐勇. 镀铝锌机组的退火炉设计优化[J]. 工业炉, 2013, 35(4): 34-36.
- [32] 吴新忠, 苗立贤. 降低钢材热镀锌过程锌耗的方法研究[J]. 天津冶金, 2022, (5): 36-40.
- [33] 任新意, 高慧敏, 郑艳坤, 等. 热镀锌双相钢表面亮点缺陷的生成机理及控制[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(1): 36-41.
- [34] 杨宏伟, 刘春雨, 周研, 等. 热浸镀锌板表面锌渣缺陷成因及控制技术研究[J]. 天津冶金, 2022, (4): 33-36.
- [35] 岳崇锋, 江社明, 王银军, 等. 热镀锌铝硅镀层凸点缺陷组织分析及生产工艺优化[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(3): 306-309.
- [36] 李刚, 闫秉昊. 热镀锌铝厚板锌渣缺陷原因分析[J]. 宝钢技术, 2023, (2): 50-53.
- [37] 冯冠文, 胡吟萍, 杨芃, 等. 热镀锌钢带沉没辊印缺陷成因分析及控制方法[J]. 钢铁研究, 2010, 38(4): 57-59.
- [38] 郭军贤. 热镀锌产品表面渣斑的形成机理与改进技术[J]. 金属材料与冶金工程, 2016, 44(3): 52-56.
- [39] 何立军. 连续热镀锌液成分在线检测仪及应用实践[J]. 轧钢, 2023, 40(2): 150-153.

## \*上接 39 页\*

- [12] 黄庆国, 朱立华, 王宗申, 等. 限制模压变形和超声喷丸复合工艺对 AZ31 镁合金表层组织及硬度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(3):623-638.
- [13] 张聪惠, 刘颖, 赵旭, 等. 高能喷丸镁合金表面磁控溅射铝膜的微观结构和耐腐蚀性能[J]. 机械工程材料, 2020, 44(5):72-76.
- [14] 唐亮. 超声喷丸复合激光冲击强化镁合金微观组织及性能研究[D]. 江苏大学, 2024.
- [15] 刘洪喜, 孟春蕾, 林波, 等. 氮钛双离子注入 AZ31 镁合金的抗腐蚀和力学性能[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(8):137-142.
- [16] 孟春蕾. 离子注入 AZ31 镁合金的抗腐蚀和力学性能研究[D]. 昆明理工大学, 2010.
- [17] Yu H, Xin Y, Wang M, et al. Hall-Petch relationship in Mg alloys: A review[J]. Journal of Materials Science Technology, 2018, 34(2):248-256.
- [18] Andani T M, Lakshmanan A, Sundararaghavan V, et al. Quantitative study of the effect of grain boundary parameters on the slip system level Hall-Petch slope for basal slip system in Mg-4Al[J]. Acta Materialia, 2020, 200148-161.
- [19] Singh O, Malik K H, Dahiya P R, et al. Tuning of mechanical and structural properties of 20 MC 5 steel using N ion implantation and subsequent annealing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 710253-259.
- [20] 吴成成, 王守仁, 王高琦, 等. 高能喷丸强化镁合金骨板的显微组织、力学和腐蚀性能(英文)[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(8):1641-1652.
- [21] 陶学伟, 王章忠, 巴志新, 等. 镁合金离子注入表面改性技术研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(7):112-115.