

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.04.015

## 薄带连铸结晶辊涂层研究进展

张棣尧, 袁磊, 于景坤\*

(东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 双辊薄带连铸结晶辊兼有铸辊和结晶器的双重作用, 在连铸过程中同时受到高温磨损、热应力以及压应力的多重作用, 因此, 原来的辊体铜质基质材料不能满足正常的连铸需要, 必须选择合适的涂层材料和工艺对其表面进行涂层处理。目前, 采用电镀、化学镀、热喷涂、冷喷涂以及激光熔覆等技术手段可以在结晶辊表面制备一种或多种材料的涂层。电镀、热喷涂以及激光熔覆技术相对成熟, 应用最为广泛。涂层材料有单一金属、各类合金, 同时可以加入各种添加剂。选用 W、Cr、Ni、Co 等单质金属以及 WC-Co、Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>-Ni-Cr、Ni-Cr 等合金可以获得更好的综合性能; 添加 Cu 的合金, 如 WC-Cu、W-Cu、Cu-Ni 等, 可以获得与铜基体相近的导热系数以及膨胀系数, 添加稀土元素可以细化晶粒、降低裂纹倾向。通过表面涂层处理可以大幅度提高薄带连铸结晶辊的使用寿命。

**关键词:** 双辊薄带连铸; 结晶辊; 电镀; 热喷涂; 激光熔覆

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

## Research progress on coating of crystallization roller used for thin strip continuous casting and rolling

Zhang Diyao, Yuan Lei, Yu Jingkun\*

(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** Crystallization roller used in twin-roll strip continuous casting has the dual functions of casting roll and crystallizer. In the process of continuous casting, it is simultaneously affected by high temperature wear, thermal stress and compressive stress. Therefore, the original copper matrix material of the roll body cannot meet the normal needs of continuous casting, appropriate coating materials and processes should be used for the surface coating treatment. At present, one or more materials can be used for the surface coating of crystallization rollers by means of electroplating, electroless plating, thermal spraying, cold spraying and laser cladding. Among them, electroplating, thermal spraying and laser cladding technologies are relatively mature and widely used. The coating materials included single metal, various alloys, and various additives, and comprehensive better properties could be obtained by adding different additives. Simple metals such as W, Cr, Ni, Co, and alloys such as WC-Co, Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>-Ni-Cr and Ni-Cr. By using the alloys added with Cu, such as WC-Cu, W-Cu, Cu-Ni, can obtain thermal conductivity and expansion coefficient similar to that of copper matrix. The addition of rare earth elements can refine grains and reduce crack tendency. Through the surface coating treatment, the service life of crystallization roller can be greatly increased.

**Keywords:** twin-roll strip casting; crystallization roller; electroplating; hot spraying; laser cladding

收稿日期: 2023-01-16

修回日期: 2023-02-10

作者简介: 张棣尧 (1996—), 男, 博士生, email: 986959780@qq.com

\*通信作者: 于景坤, email: yujk@smm.neu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51932008、No. 52074070)

薄带连铸是一项将传统连铸和轧制工艺整合为一体的近终型连续铸钢新技术,具有生产工序简单、生产周期短以及产品成本低等优点。因此,近年来受到了人们的广泛关注,被认为是钢铁工业的一场技术革命。

薄带连铸技术按结晶器的不同可以分为带式、辐式以及辐带式 3 种。目前研究最多、应用最为广泛的是双薄带连铸技术。其工艺特点是将钢液注入一对反向旋转且内部通水冷却的铸辊之间,使钢液在两辊间凝固形成薄带(如图 1 所示)。由于薄带连铸取消了传统连铸工艺中的结晶器,因此,需要在铸辊两侧设置侧封板盛储由中间包注入的钢液。这时,铸辊除了轧制功能之外,还兼有结晶器的作用。为了使流入辊缝中的钢液快速凝固形成坯壳,以保证连铸顺利进行,需要选用导热性能优良的铜质材料制备铸辊,以便能够快速将钢液中的热量导出。

由于铸辊内部通水冷却,因此,从铸辊结构和钢液凝固原理上来说,铸辊与传统连铸结晶器的作用相同。首先,必须要满足钢液结晶和凝固的需要,因而亦被称为“结晶辊”。结晶辊在冷却钢水使其形成坯壳的同时,还必须在垂直于辊面方向对铸坯施加压力以轧制出不同厚度的带钢,所以要求结晶辊表面要具有一定的强度和耐磨性。由于铜质材料的强度和耐磨性能较差,不能满足正常的连铸需要,因此,在利用其作为薄带连铸结晶辊使用时,必须根据结晶辊所需具有的性能,选择合适的涂层材料和工艺对其表面进行涂层处理。

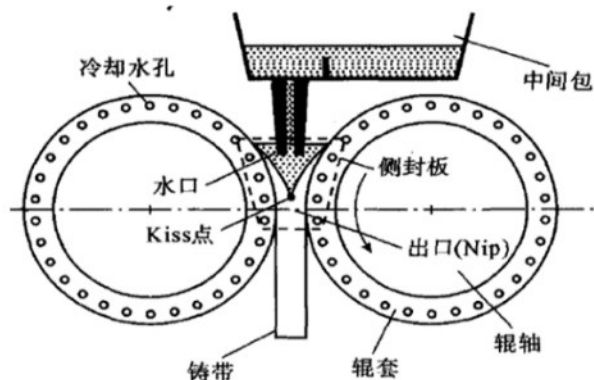


图 1 双辊薄带连铸工艺示意图照片

Fig. 1 Diagram of twin-roll strip continuous casting process

## 1 结晶辊表面涂层性能

结晶辊表面涂层的作用主要是增加结晶辊表面的强度和耐磨性,因此,需要结晶辊表面涂层具有一定的性能。

### 1.1 力学性能

结晶辊表面涂层的力学性能主要是指涂层的硬度和耐磨性,对结晶辊的使用寿命具有重要影响。影响涂层硬度的因素主要有涂层材料及其组分、涂层方法以及涂层处理工艺等。Cr、W、Ni 以及 Co 是常用的涂层材料,使用其可以获得较高的涂层硬度。例如,采用三价铬-碳电镀时,由于在电镀过程中发生了铬碳沉积物中非晶相碳膜向纳米晶金刚石膜结构的转变,因此,镀层硬度可以达到  $1600 \text{ HV}^{[1]}$ 。使用 WC-12Co 作为涂层材料时,由于形成了 WC-Co 系固溶体,因此涂层硬度可达  $1654.2 \text{ HV}_{0.5}^{[2]}$ 。使用 Ni 及其合金时,亦可获得良好的涂层硬度。例如,利用超音速火焰喷涂 Ni60 粉体时,可以获得硬度为  $718 \text{ HV}_{0.1}$  的涂层;但如果在 Ni60 粉体加入一定量的  $\text{ZrO}_2$ ,则可以将硬度进一步提高至  $1300 \text{ HV}_{0.1}$  左右<sup>[3]</sup>。对于相同的 Ni 材料,采用激光熔覆时,熔覆层硬度约为  $500 \text{ HV}_{0.1}$ ,而使用超音速火焰喷涂工艺时,则硬度可以达到  $700 \text{ HV}_{0.1}$  以上<sup>[4]</sup>。

在涂层材料中引入碳或陶瓷组分是提高涂层耐磨性能的主要方法,陶瓷组分主要有  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、C 以及 TiN 等。由于加入了这些陶瓷组分的复合涂层的耐磨性是铜基体的 4.37 倍<sup>[5]</sup>,因此,可以将涂层的磨损量降低 70% 以上。但是,过量加入陶瓷组分会对涂层的热传导性能带来不利影响。

### 1.2 热学性能

结晶辊表面涂层的热学性能主要是指涂层的导热性能和抗热震性能,主要受涂层材料及其组分影响。

由于结晶辊兼有结晶器的功能,在连铸过程中要进行高强度的热量交换。由于结晶辊基体材料铜的热导率为  $398 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,因此,结晶辊表面涂层的热导率应尽量接近于铜质基体。通过使用高热导率的金属和添加碳素材料可以有效提高涂层的热传导率。例如,WC-17Co 涂层的热导率  $280.48 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})^{[6]}$ ,WC- $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -Ni 的热导率为  $292 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})^{[7]}$ 。采用 Ni60 涂层的时候,其热导率

亦可达到 $318.85 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ <sup>[8]</sup>。金刚石和石墨烯是提高涂层热传导率的优良材料,通过改性和复合的方法可以将金刚石和石墨烯成功应用于涂层,并使其热传导率提高至 $424\sim 605 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ <sup>[9-10]</sup>。但是,由于金刚石和石墨烯与铜间的润湿性较差,与基质间难以形成高强度的结合。另外,由于金刚石和石墨烯的膨胀系数与铜相差较大,在使用过程中极易产生开裂,影响使用寿命。

在薄带连铸过程中,结晶辊的受热区域如图2所示。可见,随着辊体转动,结晶辊表面冷热交替频繁、温度变化幅度较大,因此,如果涂层材质和结晶辊基体间在热膨胀系数方面存在的差异较大,那么就很容易造成涂层开裂或脱落。

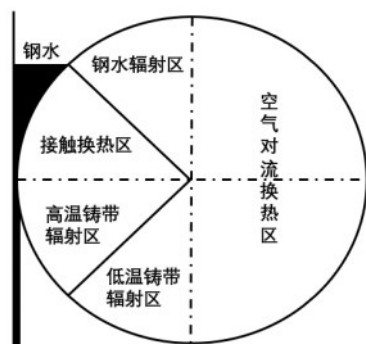


图2 结晶辊表面受热区域划分<sup>[11]</sup>

Fig.2 Division of heating zone on surface of crystallization roller<sup>[11]</sup>

铜的热膨胀系数为 $16.5\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,线热膨胀率为 $18\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。在进行涂层选材时,应尽量选择热膨胀系数相同或相近的物质或组分。当结晶辊基体和涂层间膨胀系数相差较大时,可以通过加设中间层的方法进行来缓解温度变化时所产生的应力。中间层多采用Ni及其合金,这首先是因为Ni热膨胀系数与铜相近,为 $13\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,而且Ni元素与Cu元素的互溶性好,可以实现无限互溶。因此,选用Ni作为中间层既可以缓解涂层热应力,还可以提高结合强度,有利于提高涂层的性能与使用寿命<sup>[12]</sup>。

## 2 结晶辊表面涂层用材料

由上述可见,为了满足结晶辊的使用性能,保证其具有较长的使用寿命,表面涂层必须在力学性能和热学性能上满足一定要求。表面涂层材料是影响涂层性能的重要因素,目前常用的涂层材料及其作

用如下。

(1)单质金属:W、Cr、Ni以及Co等,Cr、Ni作为涂层材料的主原料使用最为广泛。Cr镀层强度高,一般在700 HV以上,Ni镀层虽然硬度较低但是膨胀系数与铜相近,结合力强,且镀层厚度可达到5 mm左右<sup>[13-15]</sup>。

(2)合金:WC-Co、WC-Cu、W-Cu、M-Cr-Al-Y、Fe-Cr-Ni、 $\text{Cr}_2\text{C}_3$ -Ni-Cr、Cu-Mo、Co-Cr-Mo-Si、Cu-Ni-Co-Be、Ni-Cr-B-Si、Ni-Al、Ni-Cr以及 $\text{MoSi}_2$ 等,主要作为涂层材料的主原料使用,可以获得比使用单一单质金属时更好的综合性能,在合金M-Cr-Al-Y中M代表Ni基或Co基的三元Ni-Cr-Al或Co-Cr-Al合金体系<sup>[4, 16-19]</sup>。另外,一些合金可以作为中间层材料使用,如Ni-Al等。

(3)碳及碳化物:C、SiC、WC以及 $\text{Cr}_2\text{C}_3$ ,作为添加相使用,主要用于提高涂层的热传导性能、耐磨性能以及抗氧化性能等。碳通过与单质金属结合,原位形成化合物,还可以提高涂层的强度<sup>[2-3]</sup>。

(4)硼化物:BN、 $\text{TiB}_2$ ,作为添加剂使用,主要用于提高涂层的抗氧化性能和抗热震性能<sup>[20-21]</sup>。

(5)氧化物: $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 以及 $\text{ZrO}_2$ 等,主要作为添加剂与其他单质金属或合金一起使用,用于提高涂层的耐磨性能<sup>[7, 22-23]</sup>。

## 3 结晶辊表面涂层的制备方法

表面涂层可以使用的材料很多,选用原则如下:

(1)可以与辊体表面形成较高结合强度;(2)耐磨性能好;(3)具有良好的热传导性;(4)涂层操作容易实施。

实际的涂层材料与表面涂层方法和工艺密切相关,根据表面涂层方法选择涂层材料更能获得最佳的涂层效果。目前,可选择的常用结晶辊表面涂层方法如下。

### 3.1 电镀

电镀是目前对结晶辊实施涂层的常用技术之一,分为立式和卧式两种电镀方法。镀层不但可以减轻浇铸时由热应力和机械应力对结晶辊造成的损伤,有效保护结晶辊本体;同时还可以增加表面耐磨性,保持辊型及表面形貌。在结晶辊使用一段时间后,只需重新镀层即可重复使用,大幅度延长了结晶辊的使用寿命,降低了薄带连铸的生产成本。镀层材料主要有电镀Cr、Ni、Ni-Fe、Ni-P、Ni-W、Ni-Co、



Ni-Co-Fe、Ni-Co-W 以及 Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Ni/金刚石等<sup>[19, 24]</sup>。镀层后结晶辊表面的硬度可以提高到 620~750 HV, 如果经 600 °C 退火处理可进一步提高到 1600 HV, 是镀铜硬度的 5 倍<sup>[25]</sup>。电镀涂层的缺点是镀层沉积速度慢、生产周期长、镀层易剥落, 特别是电镀过程易产生环境污染等。

### 3.2 化学镀

化学镀是在金属催化作用下通过化学反应在工件表面形成金属沉积层的过程。利用化学镀形成的镀层厚度均匀, 且镀层与基体的结合强度与耐腐蚀和抗磨性能普遍高于电镀层。例如, 对于 30CrMn-SiA 钢进行化学镀镍修复时, 经过镀后热处理, 镀层硬度可达 1050 HV<sup>[26]</sup>; 在 A3 钢表面进行化学镀 Ni-P 合金, 当热处理温度为 400~430 °C 的时候, 镀层的硬度最高达到 1310 HV<sup>[27]</sup>。化学镀层虽然可以达到极高的强度, 但在镀镍过程中添加的络合剂会在废水中吸附镍离子, 这一特性使得化学镀后的废液对环境污染程度巨大, 处理难度高, 这也使得化学镀的应用和发展不如电镀工艺广阔。

### 3.3 热喷涂

热喷涂是借助于某种热源将涂层材料加热至熔化或半熔化状态, 然后在气流的推动下将熔融或半熔融粒子加速撞击到结晶辊基体表面, 并在表面经流散、变形、凝固, 最后形成热喷涂涂层。由于热喷涂可以采用气体燃料、液体燃料以及电弧和等离子弧等多种热源, 因此, 通过热喷涂的方法可以熔化包括陶瓷的几乎所有材料, 可以制备出各种性能优异的涂层。例如, 利用等离子弧喷涂时, 可使涂层和铜基体间的结合强度达到 16 MPa<sup>[28]</sup>; 当采用超音速火焰喷涂(HVOF)时, 结合强度提升至 62 MPa, 将涂层材料细化至纳米级别后, 结合强度可以达到 75 MPa<sup>[29]</sup>。热喷涂可使用的涂层材料极其广泛, 而且可以作用于各种类型的基体, 涂层的厚度及制备区域高度可控, 可以实现不同类型涂层的拼接, 基体表面温度低, 形变程度低。也正是由于基体表面的低温, 导致涂层与基体仅为机械结合, 无法形成冶金结合, 涂层结合强度低, 且孔隙率较高。

### 3.4 冷喷涂

冷喷涂是以压缩气体为加速介质, 带动固态涂层材料以极高的速度碰撞工件表面, 使涂层材料颗粒发生强烈的塑性变形而沉积形成涂层的一种新型喷涂技术。冷喷涂时多采用金属颗粒为涂层材

料, 制备的涂层具有氧化物含量低、涂层热应力小、硬度高、结合强度高等优点<sup>[30]</sup>。利用冷喷涂制备的涂层强度通常可高达 70 MPa 以上, 且致密性好。但冷喷涂具有一定局限性, 即制备高温合金涂层时必须使用氦气, 因此费用较高<sup>[31]</sup>。

### 3.5 物理气相沉积

物理气相沉积是在真空条件下利用气体放电使涂层材料蒸发离化沉积在工件表面上。目前常用的主要有磁控溅射镀、多弧离子镀和蒸镀<sup>[32]</sup>。溅射镀膜颗粒细小、镀层均匀、与基体结合力高, 但是工艺复杂、沉积率低; 多弧离子镀生产效率高、镀层附着性好、工艺稳定; 蒸镀的工艺方法简单, 但是应用受限, 不适用于高熔点材料、低硬度材料, 同时镀层厚度不易控制, 导致镀层不均匀且易于脱落。与传统的电镀喷涂相比, 物理气相沉积镀层附着性能好、镀层质量好、可镀材料广泛, 膜层的厚度为微米级, 可以在几乎不影响工件原来尺寸的情况下提高工件表面的各种物理性能和化学性能<sup>[33]</sup>。

### 3.6 化学气相沉积

化学气相沉积是利用化学气体或蒸汽在基质表面反应、原位合成涂层的方法, 可用来沉积多种材料<sup>[34]</sup>。化学气相沉积可以在形状复杂的大型工件上沉积组织致密的涂层, 而且工艺简单且稳定。相比于物理气相沉积, 化学气相沉积技术沉积速度快、沉积效率高, 且所形成的镀膜纯度高、成分精确可控<sup>[35]</sup>。但是在某些加工过程中, 参与沉积的反应物以及反应产物易燃、易爆, 对环境污染严重, 且对于设备具有腐蚀效应。

### 3.7 激光熔覆

熔覆是以激光为热源, 将置于辊体表面或同步输送至辊体表面的粉体经过激光熔化并将其快速凝固形成表面涂层的一种方法, 是目前进行表面涂层的常用方法。由于激光熔覆是将涂层粉末熔化并与辊体表面形成冶金结合, 因此涂层与辊体间的结合强度较高、耐磨损性及抗氧化性较强。常采用的熔覆材料主要有镍基合金(Ni-Co、Ni60)、Co 基合金、Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr、ZrB<sub>2</sub>-TiB<sub>2</sub>、TiB<sub>2</sub>-Cu、SiC 等, 其中 Ni60 熔覆层涂层硬度可达 1100 HV 以上, TiB<sub>2</sub> 增强镍基梯度涂层硬度可达 1150~1450 HV, 是镀铜基体的 4~5 倍<sup>[6, 36-37]</sup>。但是, 由于铜质材料热传导率高且对激光有反射作用, 这使激光熔覆涂层的制备变得困难, 因此, 必须采用大功率激光器, 从而增加了涂层的制

备成本<sup>[38]</sup>。

对比诸多的涂镀层工艺方法,无论是喷涂还是施镀都可以在特定的基体上实现高强度、高硬度涂镀层的制备,但是各种工艺的施工环境以及工艺要求并不相同。电镀与化学镀简单易于操作,但是对于环境并不友好;热喷涂满足各类施工场地各类基体,但是涂层结合强度低、孔隙率高,涂层由于高温易于发生氧化;冷喷涂以及物理化学气相沉积的施工环境通常需要真空负压或者惰性气体保护,对于大型工件具有局限性;激光熔覆由于金属铜高导热的特性,会导致基体金属再结晶以及熔池分布不均匀。随着电镀工艺的进步,对环境污染严重的六价铬电镀被逐渐淘汰,电镀过程中对于环境的污染程度降低;热喷涂工艺中涂层材料开始采用纳米级尺寸,涂层的性能随着涂层材料尺寸的缩小而提高。电镀与热喷涂工艺简单易于操作、成本低廉,对于施工环境要求低,可完成复杂大型工件表面涂镀层的制备,所以电镀和热喷涂工艺的应用越来越广阔。

#### 4 结语

近年来,随着薄带连铸技术发展和普及,结晶辊表面涂层技术取得了较大进步,本文对目前可用于结晶辊表面涂层的技术进行了归纳和总结,得到以下结论:

(1)结晶辊涂层主要以提高结晶辊表面强度、硬度、耐磨性以及导热性能为目的,并结合结晶辊的尺寸大小选择涂层材料和涂层工艺。

(2)结晶辊涂层材料包括单质金属、各类合金以及各类添加物。单质金属主要有W、Cr、Ni以及Co等,合金主要有WC-Co、Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>-Ni-Cr、WC-Cu、W-Cu、Cu-Ni以及NiCr等,添加物主要是碳、碳化物、硼化物以及氧化物等。

(3)目前常用的涂层方法主要有电镀、热喷涂以及激光熔覆等。其中,应用最为广泛的是电镀与热喷涂。

未来涂层的发展应当在开发新材料的基础上将传统材料与新技术相结合,通过现代化的技术手段(如数学模拟等方式),将涂层表面形貌改进与自身性质相结合,从而达到更好的效果。新技术的研发应同时注重工艺成本与技术难度,与连铸连轧领域紧密结合,更好地推动钢铁行业的发展。

#### 参考文献

- [1] Huang C A, Liu Y W, Chuang C H. The hardening mechanism of a chromium-carbon deposit electroplated from a trivalent chromium-based bath[J]. Thin Solid Films, 2009, 517(17): 4902-4904.
- [2] 刘建金, 崔照雯, 贾成厂, 等. 超音速火焰喷涂WC-12Co涂层的滑动磨损特性[J]. 北京科技大学学报, 2015, 37(12): 1617-1623.
- [3] 邹发夔, 刘康诚, 陈漳, 等. 铜基体HVOF法喷涂WC-17Co涂层的组织性能研究[J]. 辽宁科技学院学报, 2019, 21(3): 4-8.
- [4] 庞新星. 结晶器铜板耐磨涂层的制备与性能研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
- [5] Zhang Y T, Tu Y, Xi M Z, et al. Characterization on laser clad nickel based alloy coating on pure copper[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(5): 924-928.
- [6] 曲聪凯. 铜结晶器表面激光熔覆Ni基涂层的组织性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [7] 马壮, 董书琳, 董世知, 等. 纯铜表面火焰喷涂陶瓷/渗铝复合层及其性能[J]. 材料保护, 2012, 45(3): 59-62.
- [8] 朱川, 吴冰阳, 邹发夔, 等. 铜结晶器HVOF法喷涂WC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Ni的试验研究[J]. 材料与冶金学报, 2019, 18(4): 286-293.
- [9] Li H, Sun J, Zang J, et al. Thermal conductivity of graphene nanoplates reinforced Cu-Cr composite coatings by mechanical alloying method[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 405(8): 126554.
- [10] 侯领, 沈维霞, 房超, 等. 高导热金刚石/铝复合材料的高温高压制备[J]. 高压物理学报, 2020, 34(5): 053101.
- [11] 朱光明, 常征. 双辊薄带连铸结晶辊热辊型预报[J]. 轧钢, 2010(6): 11-15.
- [12] 古一, 赵培新. 铜合金表面新型金属陶瓷涂层材料的性能[J]. 材料保护, 2017, 50(6): 22-27.
- [13] 岳灿甫. 连铸结晶器铜板及表面处理技术进展[J]. 材料开发与应用, 2011, 26(1): 56-60.
- [14] 高泽平. 连铸结晶器铜板及镀层的应用进展[J]. 特殊钢, 2007, 28(4): 39-41.
- [15] 孔昂, 宫本奎, 董志超. 铜结晶器表面耐磨层材料及制造工艺研究进展[J]. 山东冶金, 2016, 38(3): 4-7.
- [16] 陈健, 刘雪飘, 梁欢, 等. CuCrZr合金表面等离子喷涂Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr及NiAl/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr涂层的结合性能[J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 13-17.
- [17] 张颖, 王佳杰, 许建平, 等. 结晶器HVOF功能梯度涂层孔隙率与显微硬度的试验[J]. 机械制造文摘: 焊接分册, 2011(4): 47-48.

- [18] 纪朝辉, 王志平, 丁坤英, 等. 超音速火焰喷涂 CoCrMoSi 涂层的组织与性能[J]. 材料保护, 2008, 41(1): 54-56.
- [19] 王立平. 代硬铬镀层材料及工艺[M]. 北京: 科学出版社, 2015, 102-119.
- [20] 王培, 叶源盛. 钛合金表面激光熔覆 h-BN 固体润滑涂层[J]. 表面技术, 2015(8): 44-48, 75
- [21] 杨李安卓, 董仕节, 罗平, 等. 铜电极表面电火花沉积  $ZrB_2$ - $TiB_2$  复相涂层[J]. 材料热处理学报, 2015(5): 167-172.
- [22] 柯德庆, 潘应君. 铜合金表面等离子喷涂  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$  和  $Al_2O_3$ - $TiO_2$  涂层的抗高温氧化性能[J]. 表面技术, 2014, 43(3): 64-73.
- [23] 李超. 铜基合金表面 FSP 制备  $Al_2O_3$ / $TiO_2$  颗粒增强复合材料改性层的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [24] 胡忠卿, 王帅星, 柳鑫, 等. 不同镀铬工艺及镀铜预处理对 30CrMnSiA 高强度钢疲劳性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 184-192.
- [25] Huang C A, Liu Y W, Chuang C H. The hardening mechanism of a chromium-carbon deposit electroplated from a trivalent chromium-based bath[J]. Thin Solid Films, 2009, 517(17): 4902-4904.
- [26] 葛文军, 夏成宝, 陈名华. 飞机高强度钢附件的化学镀镍修复工艺[J]. 电镀与涂饰, 2011, 30(5): 25-27.
- [27] Liu G J, Mao X H, Cao J, et al. Effect of heat treatment on hardness of electroless Ni-P plating [J]. Advanced Materials Research, 2011(228/229): 878-882.
- [28] 杜三明, 刘超, 蔡宏章, 等. 等离子喷涂 Cu- $Al_2O_3$  复合涂层制备及摩擦学性能研究简[J]. 表面技术, 2019(3): 134-140.
- [29] 周夏凉, 陈小明, 吴燕明, 等. HVOF 制备纳米 WC-10Co<sub>4</sub>Cr 涂层的微观组织及抗冲蚀性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2018, 23(2): 124-130.
- [30] 杨景文, 李文亚, 邢词皓, 等. 冷喷涂铜涂层研究进展[J]. 材料保护, 2022, 55(1): 58-70.
- [31] 黄仁忠, 孙文, 郭双全, 等. 冷喷涂技术的研究进展与应用[J]. 中国表面工程, 2020, 33(4): 16-25.
- [32] 柳琪, 王进, 王小连, 等. PVD 涂层工业化应用及发展现状[J]. 铸造技术, 2018, 39(2): 440-444.
- [33] 罗来马, 俞佳, 刘少光, 等. 低合金高速钢的物理气相沉积技术应用与发展[J]. 金属热处理, 2008, 33(11): 13-16.
- [34] 顿易章, 吴勇, 张磊. CVD 法在镍基高温合金表面制备改性铝化物涂层的研究进展[J]. 金属热处理, 2018, 43(3): 145-151.
- [35] 张福林, 王旋, 宋凯强, 等. 化学气相沉积钨涂层的研究现状与进展[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 141-148.
- [36] 李晋升. 结晶器 CuCrZr 合金表面激光熔覆  $Cr_3C_2$ -NiCr 及  $Cr_3C_2$ -NiCr+Ni60 耐磨涂层的研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
- [37] 房刘杨, 姚延松, 闫华, 等. 铜合金表面激光熔覆  $TiB_2$  增强镍基梯度涂层[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 96-103.
- [38] 张维平, 马海波. 铜合金表面激光熔覆研究现状[J]. 机械工程材料, 2009, 33(9): 6-9.