

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.04.017

## 电镀技术在机械备件修复中的生产应用

吕春雷\*, 芮 灿

(宝武装备智能科技有限公司, 上海 201900)

**摘要:** 介绍了电镀技术在冶金、化工机械备件修复中的生产应用, 并重点对带钢连续电镀机组的导电辊、冷轧机组的轧辊、炼钢机组的结晶器铜板、丙烷脱氢制丙烯机组的脱氢大阀的电镀修复与制造进行了阐述。

**关键词:** 电镀技术; 机械备件; 导电辊; 轧辊; 结晶器铜板

**中图分类号:** TQ153.1      **文献标识码:** B

## Application of electroplating technology in the repair of mechanical spare parts

Lyu Chunlei\*, Rui Can

(Baowu Equipment Intelligent Technology Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

**Abstract:** The production practice of electroplating technology in the repair of metallurgical and chemical machinery spare parts was introduced. The electroplating repair and manufacturing of the conductive roll of the strip steel continuous electroplating unit, roller of the cold rolling unit, copper plate of crystallizer of steel making unit, and dehydrogenation valve of the propane dehydrogenation to propylene unit were mainly described.

**Keywords:** electroplating technology; mechanical spare parts; conductive roll; roller; copper plate of crystallizer

在冶金、化工行业, 大量机械设备在高温、高速、冷热疲劳及腐蚀环境下运行, 如结晶器铜板、轧辊、导电辊、活套辊、转向辊、测张辊和化工阀体等。因此, 这些设备的一些关键零部件的质量和使用寿命直接影响到企业的生产率、生产成本和产品质量。从备件的失效形式来看, 多为热疲劳失效、腐蚀失效和磨损失效。其中作为连铸结晶器心脏的结晶器铜板主要失效形式为: 磨损、电化学腐蚀和热疲劳裂纹等<sup>[1-2]</sup>。作为带钢连续电镀锡、连续电镀锌、连续电镀铬生产线心脏的导电辊主要失效形式为腐蚀和磨损<sup>[3]</sup>。一些工艺辊如活套辊、转向辊、轧辊则多为磨损失效<sup>[4]</sup>。各类化工大型闸阀, 则多为腐蚀失效<sup>[5]</sup>。

早期, 主要是从研究机械零件本体材质来提高

其耐磨损、耐腐蚀和抗疲劳性能, 表面处理技术上出现了表面淬火、堆焊、喷丸强化等方法。随着钢铁产品结构的不断升级, 特别是家电业、汽车业的发展, 对钢板质量提出了越来越高甚至近于苛刻的要求, 这些传统的表面工程技术手段已显得力不从心。一些表面强化和改性的表面工程技术逐渐在钢铁行业中得到推广使用, 其中电镀技术是应用较为广泛的一种。因此, 本文对电镀技术在结晶器铜板、导电辊、轧辊、阀门等的应用研究进行了介绍。

### 1 电镀技术在结晶器铜板中的应用

#### 1.1 连铸结晶器铜板简介

结晶器铜板是炼钢连铸设备结晶器的核心部

收稿日期: 2023-02-11

修回日期: 2023-02-25

\*通信作者: 吕春雷(1983—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 冶金机械备件修复, email: 7408348@163.com

件,由于结晶器铜板主要承载了高温钢水冷却为铸坯的热量传导,因此对于其要求极为苛刻。连铸结晶器铜板在工作时既要承受高温钢水的热负荷,又要承受钢坯运动而产生的磨损和应力作用,极易发生磨损、腐蚀、热裂、变形等失效<sup>[1]</sup>,如图 1 所示。对结晶器铜板而言,常规的性能要求包括:导热性良好,较高的室温和高温抗拉强度、屈服强度以及较高的软化温度。铜板母材的变化主要由紫铜向银铜及铬锆合金铜、铬锆铝合金铜进行演变<sup>[6]</sup>。最初结晶器铜板为裸铜板,但因铜元素进入钢水后会引铸坯质量缺陷,并且裸铜板的耐磨损性能差(单次使用的磨损量高达 3 mm),因此逐步被镀层铜板所取代。

电镀技术在结晶器铜板表面处理中的应用较早,镀层种类由镀铬、镀镍逐渐演变到镍铁合金和镍钴合金<sup>[7]</sup>。因电镀液维护简单方便且电镀液寿命长,目前主流的技术为镍钴合金<sup>[8]</sup>。铜板表面进行电镀处理主要目的是提高铜板的使用寿命,减少单次修复的切削量。随着冶金工艺的改善(如为了提高铸坯质量而广泛应用的电磁搅拌,以及为了降低生产成本而越来越高的废钢使用量),对结晶器铜板表面镀层的要求越来越高,近些年逐步发展了复合结构镀层、高硬度镀层<sup>[9]</sup>和热喷涂技术<sup>[10]</sup>等。



图 1 结晶器铜板腐蚀、磨损失效照片

Fig.1 Photo of corrosion and wear failure of copper plate

### 1.2 连铸结晶器铜板电镀修复制造技术

为满足结晶器铜板在线使用时上部抗裂纹和下部抗磨损、耐腐蚀的要求,在对电镀层进行设计时应满足:上部镀层应控制在 0.5 mm 以内,下部镀层应控制在 1.0 mm 以上。表 1 列举了 2 种常规铜板的镀层规格和种类。

因结晶器铜板下线后基本均伴有磨损、腐蚀、裂

纹等缺陷,因此其通用修复路线为:酸洗→校平→镀前加工→探伤→抛光→电镀→热处理→校平→镀后加工→抛光→酸洗→装配。

表 1 常规铜板的镀层规格和种类

Tab.1 Coating specifications and types of conventional copper plate

机组名称	铜板规格/ mm <sup>2</sup>	镀层种类	上部镀层 厚度/mm	下部镀层 厚度/mm
2150 机组	2430×900	钴镍	0.2 ~ 0.3	1.4 ~ 1.5
1650 机组	1860×900	复合结构 镀层	0.4 ~ 0.5	1.4 ~ 1.5

因结晶器铜板属于规格的板状结构,因此一般采用浸入式电镀方式,即铜板完全浸没于电镀液中,图 2 为宝钢结晶器铜板电镀设备照片,所示铜板即将入槽进行电镀。部分企业也采用组箱式<sup>[11]</sup>进行电镀,即将结晶器铜板作为镀槽的槽壁,电镀结束后镀液放流至储液槽。与组箱式电镀相比,浸入式电镀的优点主要为铜板电镀过程未加约束,利于应力释放,而且浸入式电镀的效率要比组箱式电镀高,利于工业化生产。



图 2 铜板电镀照片

Fig.2 Photo of electroplating of copper plate

## 2 电镀技术在导电辊修复中的应用

### 2.1 导电辊简介

导电辊是钢铁冶金工业中冷轧薄板进行化学处理、电解、电镀、热熔过程中用来传递电流和引导薄板通过的特殊钢辊<sup>[12]</sup>,主要用在带钢连续电镀锌、连续电镀锡和连续电镀铬机组<sup>[13]</sup>。根据其应用要求,导电辊要求具有良好的导电性能、耐磨损性能、耐腐蚀性能和一定的粗糙度保持性能。表 2 列举了常见带钢连续电镀机组的导电辊的规格和镀层参数。

表2 带钢连续电镀机组的导电辊的规格和镀层参数

Tab.2 Specifications and coating parameters of conductive roll of continuous electroplating unit for strip steel

机组名称	导电辊规格/ mm	粗糙度/ $\mu\text{m}$	表面覆层	覆层厚 度/mm
连续电镀锡	$\Phi 475 \times 1200$	$\approx 2.5$	镀铜+镀铬	0.2
连续电镀铬	$\Phi 610 \times 1300$	$\approx 3.0$	镀铜+镀铬	0.2
连续电镀锌	$\Phi 1000 \times 2100$	$\leq 0.4$	哈氏合金	8.0

## 2.2 导电辊电镀修复制造技术

导电辊基体一般为碳钢和不锈钢,一般采用铸造、锻造、热挤压、卷板焊接等技术制造导电辊芯轴,由于其材料所限,现有导电辊不可能同时兼具耐磨、耐蚀、导电及高强度等综合性能,需在表面电镀镀层以提高其导电、耐磨及耐蚀性能<sup>[14]</sup>。除连续电镀锌机组外,一般带钢连续电镀生产线上的导电辊为镀铜+镀硬铬镀层,如果芯轴为不锈钢芯轴,在镀铜前还需要镀镍进行打底。导电辊的使用寿命很大程度上取决于表面镀层的质量。为满足性能要求,导电辊新品的制造流程一般为:芯轴→喷砂毛化→酸性镀铜→车削→磨削→喷砂毛化→镀硬铬。

一般导电辊的服役周期为4~6个月,下线后的导电辊一般伴有磨损、腐蚀剥落等宏观缺陷,也有电弧击伤等微观缺陷,如图3所示。下线后的导电辊,一般先化学法褪除残余铬层,再车削铜疲劳层,经检查无凹坑、裂纹等缺陷后,镀铜补足原设计铜层后,再经过喷砂毛化后镀硬铬。因修复导电辊只需补足车削后的铜层,故修复周期和成本要远低于新品制造,对于钢铁冶金行业而言,不仅生产效率得以提升,而且生产成本得以下降。



图3 导电辊下线照片

Fig.3 Photo of offline conductive roll

导电辊的质量主要取决于电镀技术和设备,目前国内对于该类辊子主要采用卧式电镀技术<sup>[3]</sup>,如图4所示。采用该方式的优点为两端导电,能够确保镀铜、镀铬的厚度均匀,而且易于观察电镀过程中辊子的表面质量。



图4 导电辊电镀照片

Fig.4 Photo of electroplating of conductive roll

## 3 电镀技术在冷轧工作辊中的应用

### 3.1 冷轧工作辊简介

冷轧工艺是将热轧基板在非加热状态下轧制成不同厚度的薄板,冷轧工作辊要承受巨大的压力和剧烈的摩擦力<sup>[15]</sup>。冷轧工作辊由优质合金钢锻制而成,根据其使用工段不同,又分为轧机工作辊和平整机工作辊,冷轧工作辊是冷轧厂的主要消耗部件之一,对带钢表面形貌的传递过程是一个衰减性过程,轧辊质量的好坏直接影响着带钢的质量。为了改善普通冷轧工作辊使用寿命短、频繁换辊、轧制钢板表面质量差等缺点,逐渐发展了冷轧工作辊镀硬铬技术<sup>[16]</sup>。采用表面镀硬铬后,镀铬层改变了工作辊表面组织形貌,不仅增加了硬度和耐磨性,而且增加了表面润滑性能<sup>[17]</sup>,使其使用寿命可以提高几倍乃至十几倍,从而提高了生产效率,降低了生产成本。表3列出了几种工作辊的规格和参数。

表3 工作辊规格和镀层参数

Tab.3 Specifications and coating parameters of working roll

序号	辊身尺寸/mm	基体材料	粗糙度/ $\mu\text{m}$	镀层厚度/ $\mu\text{m}$
1	$\Phi 450 \times 1850$	铬钼钒	1.6	10
2	$\Phi 600 \times 2100$	铬钼钒	2.5	15
3	$\Phi 450 \times 2100$	铬钼钒	2.0	12

### 3.2 冷轧工作辊修复制造技术

冷轧工作辊表面材质为锻钢,表面硬度为800 HV左右。一般轧机工作辊采用光辊,平整机工



作辊采用毛化镀铬辊。目前主流的毛化方式为电火花 EDT 毛化<sup>[18]</sup>和喷丸毛化<sup>[19]</sup>,两种方式各有优缺点,其中电火花毛化主要优点是毛化后峰值密度高,缺点是效率低而且成本高。而喷丸毛化的主要优点是成本低、效率高,但其毛化后的峰值密度要低于 EDT 毛化,因此高档汽车板、家电板的工作辊仍然采用 EDT 毛化+镀铬的方式进行表面处理。目前国内有 Pretex 毛化镀铬技术<sup>[20]</sup>,国内有凸包状毛化铬<sup>[21]</sup>研究的报道。

工作辊失效形式主要为磨损,即为粗糙度衰减,如果镀层厚度严格控制的话,一般不会出现镀层剥落现象。下线后工作辊表面形貌如图 5 所示,从图 5 可以明显看出,带钢摩擦区域的粗糙度已明显低于两端部。

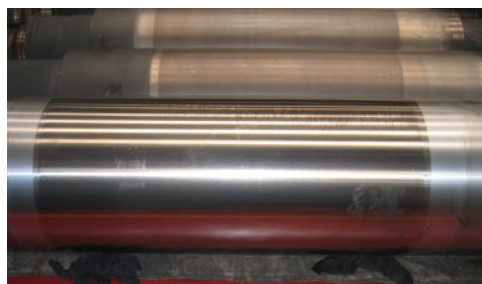


图 5 下线后的工作辊表面形貌

Fig.5 Surface morphology of working roll after off-line

因工作辊为锻钢制造,因此下线后的工作辊均为磨削去除失效镀层,经磨削一定疲劳层之后,再进入毛化工序。目前国内对于该类辊子主要采用立式电镀技术,即辊子垂直电镀技术,如图 6 所示即轧辊垂直电镀设备。采用该类方式电镀的优点为便于工装的拆卸,电镀生产效率高。冷轧工作辊电镀后表面形貌如图 7 所示。



图 6 冷轧工作辊电镀设备

Fig.6 Plating equipment of cold rolling working roll



图 7 冷轧工作辊镀铬后表面形貌

Fig.7 Surface morphology of cold rolling working roll after chromium plating

## 4 电镀技术在丙烷脱氢(PDH)大阀中的应用

### 4.1 丙烷脱氢大阀简介

丙烷直接脱氢<sup>[22]</sup>是制取丙烯的化工生产手段之一,其中大阀是其主要设备部件之一。丙烷直接脱氢工艺生产条件苛刻,反应温度高达 600 °C,涉及气氛有丙烷、丙烯、氢气以及少量甲烷、乙烷、乙烯,工况条件极其恶劣<sup>[23]</sup>。

丙烷脱氢反应器由阀体、阀瓣、阀座、阀杆等组成,在工作时,大阀频繁开合,同时伴随有腐蚀和磨损产生,故对大阀的内腔表面要求极高,一般都要电镀一层金属镍起防腐作用。对镀镍层的要求主要包括:(1)电镀材料为纯镍,电镀工艺为氨基磺酸盐电镀;(2)镀层厚度不低于 0.5 mm;(3)镀层与基材结合力不低于 100 MPa;(4)镀层硬度为 150~200 HV<sub>0.1</sub>;(5)镀层断裂伸长率不低于 15 %;(6)镀层材料抗拉强度不低于 450 MPa;(7)镀层均匀、光滑,无夹杂、气孔等缺陷,特别是镀层与非镀层过渡区域清晰等。

### 4.2 丙烷脱氢 PDH 大阀制造技术

丙烷脱氢 PDH 大阀的阀体和底座材质为 C5 铸件。由于阀体为铸造件,故其表面存在大量黑色氧化铁皮和气孔,因此在电镀之前首先需要喷砂,采用 0.7 mm 的铸钢砂,在 0.55 MPa 的气压下,可以将氧化铁皮完全去除,再通过焊补、打磨的手段将肉眼可见气孔消除。

以直径为 1.715 m 的阀体为例,其总高度为 2.04 m,总质量 5.986×10<sup>3</sup> kg,内腔容积为 2 m<sup>3</sup>,无法采用传统的浸镀工艺,可直接以阀体为阴极,将阳极均匀分布在阀体内,填充溶液后进行电镀,如图 8 所示为上海宝钢阀体电镀设备。其主要工艺步骤为:喷砂→打磨→绝缘→碱水除油→法兰安装→阳极安装→酸洗→活化→电镀。电镀后的阀体照片如图 9 所示。



图8 阀体电镀照片

Fig.8 Photo of electroplating of valve



图9 阀体电镀后照片

Fig.9 Photo of valve after electroplating

## 5 结论

高端产品的创造得益于先进的材料和设备,而先进的设备又依赖于备件质量的稳定性和可靠性。宝钢通过对关键零部件进行失效分析,越来越多的备件已经依赖于表面处理技术进行改善,如电镀、电刷镀、化学镀、热喷涂、激光熔覆等。随着钢铁冶金和化工领域的发展,越来越多的备件需要电镀技术进行表面改性和强化,因此电镀技术在冶金、化工领域的应用必然带来备件的长寿命、高质量和低成本,进而带来最终产品质量的提升。

## 参考文献

- [1] 吕春雷,夏鹏,高茜,等. 连铸结晶器铜板表面镀层失效分析[J]. 复旦学报(自然科学版), 2016, 55(2): 205-210.
- [2] 侯峰岩,吕春雷. 连铸结晶器铜板表面处理关键技术的研究与应用[J]. 表面技术, 2012, 41(4): 63-65.
- [3] 黄岳. 导电辊电镀技术[J]. 电镀与环保, 2008, 28(4): 20-23.
- [4] 孙满臣,吉建旭,韩维国,等. 冷轧辊材质及制造技术发展趋势[J]. 大型铸锻件, 2020(5): 1-2, 5.
- [5] 金勇威. 浅谈丙烷脱氢(PDH)制丙烯工艺及其危险性分析[J]. 化工设计通讯, 2017, 43(4): 84-85.
- [6] 钱明,姚书典. 连铸结晶器铜板的现状与发展趋势[J]. 冶金设备, 2008(6): 62-66.
- [7] 吕春雷,曹为民,印仁和,等. 连铸结晶器铜板电镀层的研究进展[J]. 电镀与精饰, 2010, 32(1): 15-19.
- [8] 曹旭,李宁,黎德育,等. 氨基磺酸盐镀液在结晶器铜板电镀中的应用[J]. 电镀与精饰, 2008, 30(6): 21-24, 33.
- [9] 吕春雷,芮灿,腾威. 连铸结晶器铜板电镀生产研究[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(2): 66-70.
- [10] 戴兴浩,陈雄伟,吕春雷. 热喷涂技术在连铸结晶器铜板上的应用[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(20): 102-105.
- [11] 王红,方克明,张宏杰. 薄板坯结晶器铜板组箱式电镀 Ni-Co 合金镀层特点及应用[J]. 连铸, 2005(1): 20-27.
- [12] 艾晶,徐时栋,马瑞杰,等. 导电辊的结构和电流密度的分析[J]. 冶金设备, 2013(2): 35-39.
- [13] 陈声鹤,王文. 冷轧薄板连续电镀铬机组[J]. 电镀与精饰, 2011, 33(4): 22-25.
- [14] 张普强,吴继勋,孟惠民,等. 电镀锌生产线导电辊腐蚀失效原因与机理[J]. 北京科技大学学报, 1994, 16(S1): 22-26, 36.
- [15] 睦向荣,陈洪冰,白波,等. 冷轧工作辊修复与再制造技术[J]. 江苏冶金, 2011, 36(4): 15-18.
- [16] 张广安,刘德志,孙荣生,等. 镀铬轧辊在鞍钢冷轧厂 2#线的应用[J]. 轧钢, 2011, 28(6): 74-76.
- [17] 黄岳. 轧辊镀铬层形态对轧制薄板的影响[J]. 电镀与环保, 2009, 29(2): 16-18.
- [18] Elkoca O. A study on the characteristics of electrical discharge textured skin pass mill work roll[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202: 2765-2774.
- [19] Yamamura H, Hamada N, Izu T, et al. Cooling drum for thin slab continuous casting, processing method and apparatus thereof, and thin slab and continuous casting method thereof [P]. American, US 7159641B2, 2007-01-09.
- [20] 王帅,黄凌峰,刘建明,等. 薄板冷轧辊表面毛化技术的发展趋势[J]. 冶金与材料, 2020, 40(2): 84-86.
- [21] 严波,刘德荣,秦真波,等. 轧辊凸包状毛化铬镀层的耐腐蚀性能研究[J]. 电镀与精饰, 2016, 38(4): 1-5.
- [22] 黄格省,丁文娟,王红秋,等. 丙烷脱氢制丙烯发展现状与前景分析[J]. 油气与新能源, 2022, 34(2): 8-13, 19.
- [23] 葛长喜. 丙烷脱氢(PDH)制丙烯工艺装置危险性分析及对策[J]. 化工管理, 2022(3): 49-51, 82.