

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.04.001

## 汽车减震器杆高速硬铬电镀效果分析

张卫民<sup>1\*</sup>, 王天钦<sup>2</sup>, 牛继高<sup>3</sup>, 杨 勇<sup>4</sup>

(1. 河南地矿职业学院 智能制造学院, 河南 郑州 451464; 2. 濮阳技师学院汽车工程系, 河南 濮阳 457001;  
3. 中原工学院 机电学院, 河南 郑州 450007; 4. 中原工学院 后勤服务中心, 河南 郑州 450007)

**摘要:** 汽车减震器杆是悬架减振器的核心零件之一, 它连接着减震器的上下两个腔室, 在车辆行驶过程中起到支撑和缓冲的作用。汽车减震器杆在恶劣的工况下工作时, 容易受到腐蚀的影响, 导致活塞杆的强度、挠度和疲劳失效等问题。为了提高整车的可靠性和安全性, 对汽车减震器杆高速硬铬电镀效果展开了研究。经过预热、阳极活化、冲击电镀和正常电镀等工序, 对除油后的试件进行高速硬铬电镀。然后将试件放置在烘箱内, 设定时间与温度分别为 190 °C 和 12 h, 完成试件除氢。利用相应设备测试试件的镀层厚度、维氏硬度与耐磨损性等。结果表明: 采用 B 组参数进行高速硬铬电镀, 得到的镀层厚度达到 22.8 μm, 显微硬度高达 920 HV, 且磨损失重较小 (3.5±0.2) mg, 表明该镀层具有较好的物理屏障和抵抗腐蚀介质渗透的能力。随着电镀时间的增加, 镀层厚度也随之提升, 镀层的沉积速率保持在 1.5 μm/min 左右; 除氢前后的试件镀层的维氏硬度分别为 730 HV<sub>01</sub> 和 800 HV<sub>01</sub>; 试件镀层的摩擦系数在摩擦磨损 17 min 后达到 0.35 左右, 并在到达 20 min 后维持稳定状态。通过测试结果验证所制备的试件具有较高的耐磨性。

**关键词:** 高速硬铬电镀技术; 减震器杆; 镀液制备; 阳极活化; 除氢处理; 耐磨损性

中图分类号: TQ153

文献标识码: A

## Analysis of high speed hard chromium electroplating effect on automotive shock absorber rod

Zhang Weimin<sup>1\*</sup>, Wang Tianqin<sup>2</sup>, Niu Jigao<sup>3</sup>, Yang Yong<sup>4</sup>

(1. School of Intelligent Manufacturing, Henan Geology Mineral College, Zhengzhou 451464, China;  
2. Department of Automotive Engineering, Puyang College of Technicians, Puyang 457001, China;  
3. School of Mechatronics Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 4. Logistics Service Center, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

**Abstract:** The car shock absorber rod is one of the core components of the suspension shock absorber, which connects the upper and lower chambers of the shock absorber and plays a supporting and buffering role during vehicle driving. When the shock absorber rod of a car works under harsh working conditions, it is easily affected by corrosion, leading to problems such as strength, deflection, and fatigue failure of the piston rod. In order to improve the reliability and safety of the entire vehicle, research has been conducted on the high-speed hard chrome plating effect of automotive shock absorber rods. High-speed

收稿日期: 2025-02-05 修回日期: 2025-02-18

通信作者: 张卫民(1987—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为机械工程, email: tyhg56671@sina.com

基金项目: 河南省科技攻关项目: 汽车无钥匙进入和无钥匙启动控制系统的应用(172102210595)

引用信息: 张卫民, 王天钦, 牛继高, 等. 汽车减震器杆高速硬铬电镀效果分析[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 1-6.  
Zhang Weimin, Wang Tianqin, Niu Jigao, et al. Analysis of high speed hard chromium electroplating effect on automotive shock absorber rod[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 1-6.

hard chromium electroplating was performed on the degreased specimens through preheating, anodic activation, impact electroplating, and normal electroplating processes. After electroplating, place the test piece in an oven and set the time and temperature to 190 °C and 12 h respectively to complete the dehydrogenation of the test piece. Use corresponding equipment to test the coating thickness, Vickers hardness, and wear resistance of the test specimens. The results showed that high-speed hard chromium electroplating with group B parameters obtained a coating having a thickness of 22.8  $\mu\text{m}$ , a microhardness of up to 920 HV, and a small wear loss ( $3.5 \pm 0.2$ ) mg, indicating that the coating has good physical barriers and the ability to resist the penetration of corrosive media. The increase of electroplating time, the thickness of the coating also increased, and the deposition rate of the coating remained at around 1.5  $\mu\text{m}/\text{min}$ ; The Vickers hardness of the coating on the specimen before and after hydrogen removal were 730 HV<sub>01</sub> and 800 HV<sub>01</sub>, respectively; The friction coefficient of the coating on the test piece reached around 0.35 after 17 minutes of friction and wear, and remained stable after 20 minutes. Verify through test results that the prepared specimens have high wear resistance.

**Keywords:** high speed hard chromium electroplating technology; shock absorber rod; preparation of plating solution; anodic activation; dehydrogenation treatment; wear resistance

减震器杆作为减震器的核心组件, 不仅承受着车辆行驶过程中复杂多变的动态载荷, 还直接决定了减震器的工作效率和寿命<sup>[1-2]</sup>。减震器杆在使用过程中会因持续摩擦引起连杆的早期失效而产生漏油, 硬铬电镀技术则能够在减震器杆表面形成一层致密的钝化膜, 可以极大地提高其耐磨性能, 减少连杆早期失效的发生频率, 提升整车的安全性。因此, 将高速硬铬电镀技术应用于汽车减震器杆中, 对于增强整个减震系统的性能具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。近年来, 众多研究者聚焦于减震器杆的表面处理技术, 旨在通过改进材料表面特性来延长减震器使用寿命并提高系统稳定性。

Xu等<sup>[5]</sup>使用无氢脆铬电镀技术对不锈钢杆件进行电镀处理, 该方法应用过程中将离子液体(氯化 $\text{AlCl}_3$ -1-乙基-3-甲基咪唑鎓,  $\text{AlCl}_3$ -EMIC)作为电解质, 结果显示无水氯化铬盐在酸性 $\text{AlCl}_3$ -EMIC IL中的低溶解度使得电沉积过程不切实际, 而通过一种溶解 $\text{CrCl}_3$ 或 $\text{CrCl}_2$ 的新方法, 可有效提高 $\text{AlCl}_3$ -EMIC IL中无水铬盐的浓度, 使用这种溶液可以在Al基板上实现Cr的化学沉积。但该方法的研究过程中, 由于槽液中包含杂质, 导致镀层与不锈钢基材之间的结合性能下降, 导致镀层在使用过程中有较大概率产生脱落问题。金洋等<sup>[6]</sup>分析在钢球上进行电镀硬铬, 并分析不同润滑油添加剂对镀铬摩擦学行为的影响, 结果显示在纯润滑油条件下, 镀铬钢球的平均摩擦系数最大, 说明在润滑油中添加适量添加剂能够有效降低镀铬钢球-灰铸铁摩擦性。但该方法实际研究过程中, 镀层与钢球的结合力相对较

弱, 有一定概率会脱落。张磊等<sup>[7]</sup>采用激光熔覆技术对不锈钢杆件进行电镀处理, 通过X射线衍射仪与X射线能谱仪等仪器分析电镀涂层的情况, 结果显示: 熔覆层组织呈现均匀分布状态, 未产生裂纹等问题。但该方法应用后, 涂层沉积速率较慢、硬度较差。劳新力等<sup>[8]</sup>利用超音速火焰喷涂技术对不锈钢杆件进行涂层处理, 分析WC-10Co<sub>4</sub>Cr涂层质量分数差异化条件下的耐磨性能与耐腐蚀性能, 结果显示在WC-10Co<sub>4</sub>Cr含量逐渐提升的条件下, 涂层中耐磨性能逐渐提升, 而耐腐蚀性能逐渐降低。该方法在实际应用过程中, 镀层厚度波动显著, 且镀层性能固定化, 无法满足不同的应用需求。

高速硬铬电镀技术作为一种先进的表面处理技术, 因其能够显著提高基材硬度与耐磨性等性能, 而被普遍应用于机械制造等不同领域<sup>[9]</sup>。特别是在汽车行业中, 高速硬铬电镀技术在提高关键零部件的耐用性和可靠性方面展现出了巨大潜力。针对上述文献中存在的问题, 本文将重点研究高速硬铬电镀技术在汽车减震器杆中的应用, 旨在通过理论分析与实践案例相结合的方式, 深入剖析该技术对减震器杆性能的具体改善效果, 为汽车减震系统的优化设计提供科学依据和技术参考。

## 1 高速硬铬电镀技术

### 1.1 实验材料与仪器

在针对高速硬铬电镀技术于汽车减震器杆中的应用开展研究时, 所使用的材料和仪器分别如表1和表2所示。

表 1 材料及其表征

Tab.1 Materials and their characterization

材料	型号	产地
减震器杆试件	尺寸为 10 cm×2.5 cm×10 cm 的 300 M 钢	德州启力传动机械有限公司
铬酸酐	工业级优等品	成都远大化工有限公司
硫酸	纯度优于工业硫酸的一级硫酸	廊坊蓝科化工集团有限公司
去离子水	满足水质标准 B 类水要求	自制
Oakite90	59.9~74.8 g·L <sup>-1</sup>	工之品(上海)化学技术有限公司

表 2 实验仪器

Tab.2 Experimental Instruments

仪器	型号	产地
涂层测厚仪	AT240	北京时代光南科技有限公司
弯折试验器	PDW-20	济南文腾试验仪器有限公司
显微维氏硬度计	VHVS-30ATE	山东徕示自动化技术有限公司
氢脆实验专用实验机	QD-100	中钢集团郑州金属制品研究院股份有限公司
磨损测试机	HSR-2M	济南文腾试验仪器有限公司

1.2 镀液配制

高速硬铬电镀和普通硬铬电镀的区别为：普通硬铬电镀的镀液配制相对简单，对成分和浓度的控制需求较低；而高速硬铬电镀的镀液配制更为精细，通过精确控制铬酐、硫酸和三价铬的浓度，以及特定的添加顺序和条件，以获得高质量的镀层。由于普通硬铬电镀的镀液成分和电镀参数的控制精度较低，镀层质量存在一定的波动；而高速硬铬电镀通过精确控制镀液成分和电镀参数，可以获得均匀、致密且硬度高的镀层。

在利用高速硬铬电镀技术对汽车减震器杆处理过程中，镀液的制备十分重要<sup>[10-11]</sup>。在制备镀液过程中，设置3个组别，分别将220、240和260 g/L的铬酐与去离子水进行融合，得到满足标准的容积液。分别将2.0、2.3和2.6 g/L的硫酸分两次添加到不同容积液内，第一次添加时的硫酸浓度为1.5 g/L。在检测分析后，再次添加时硫酸的浓度为2.2 g/L。这是因为在实际运用高速硬铬电镀技术对汽车减震器杆进行处理的过程中，普遍使用硫酸来制备铬酐<sup>[12]</sup>，即在反应釜内对重铬酸钠和硫酸进行热处理以得到铬酐<sup>[13]</sup>，反应式如下：



结束加热过程后，将溶液静置在室温环境中，令溶液内的物料实现分层<sup>[14]</sup>。由于硫酸氢钠相对较轻，所以其处于上层；而熔融铬酐相对较重，因此

其处于反应器的下层中，可通过底阀进行滤出，滤出的熔融铬酐在冷却后进行制片获取铬酐成品。硫酸根是所获取的铬酐成品中必不可少的成分<sup>[15]</sup>，因此在实际制备镀液的过程中需充分考虑铬酐成品内的硫酸根含量。在溶液制备成功后，在(1.5±0.5) A/dm<sup>2</sup>的电流密度条件下进行通电<sup>[16]</sup>，由此获取镀铬溶液内不可缺少的三价铬。

1.3 高速硬铬电镀流程

针对汽车减震器杆进行硬铬电镀处理的主要流程如图1所示。

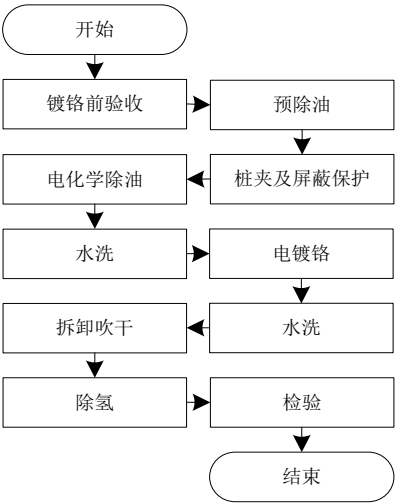


图 1 硬铬电镀处理主要流程图

Fig.1 Main process diagram of hard chromium electroplating treatment

采用高速硬铬电镀技术对汽车减震器杆进行硬铬电镀处理时,过程如下:

(1) 电化学除油:在温度和电流密度分别为85℃和(8±2) A/dm<sup>2</sup>的条件下,利用Oakite90清洗剂对试件进行电化学除油。

(2) 高速硬铬电镀:分别设置三组不同的镀液参数,铬酐、硫酸和三价铬的浓度如表3所示。

表3 镀液配制及相关参数

组别	铬酐浓度 (g·L <sup>-1</sup> )	硫酸浓度 (g·L <sup>-1</sup> )	三价铬浓度 (g·L <sup>-1</sup> )
A组	220	2.0	5.0
B组	240	2.3	5.5
C组	260	2.6	6.0

在温度为(50±5)℃的条件下进行高速硬铬电镀<sup>[17]</sup>,表4所示为高速硬铬电镀过程与相关参数。

表4 高速硬铬电镀过程与相关参数

Tab.4 High speed hard chromium electroplating process and related parameters

过程	电流密度/(A·dm <sup>-2</sup> )	时间/min
预热	—	4±1
阳极活化	30±5	1.5±0.5
冲击电镀	100±20	1.5±0.5
正常电镀	50±10	依照实际需求

(3) 除氢:在完成高速硬铬电镀后,将汽车减震器杆试件放置在烘箱内,设定时间与温度分别为190℃和12 h,完成试件除氢。

1.4 性能检测方法

(1) 通过涂层测厚仪进行镀层厚度测量与分析。

(2) 利用维氏硬度计对试件镀层的显微硬度进行测试,试验条件如下:设定载荷和加载时间分别为100 g和10 s,在试件表层平均取5个检测点,分析过程中获取五个点的均值<sup>[18]</sup>。

(3) 采用磨损试验机对试件实施磨损试验<sup>[19-20]</sup>,试验条件如下:以半径2.5 mm大小的GCr15钢磨球为摩擦对偶件,设定载荷和试验时间分别为30 N和1 h。设V为磨损体积,ι为载荷,ω为摩擦功,获取磨损率的计算公式为:

$$\kappa = \frac{V}{\iota \omega}$$

(2)

(4) 通过划格法确定镀层结合力。在镀层表面

任意划刻长宽分别为1 mm的区域,确定该区域范围内镀层是否存在脱落、起皮等问题。

2 实验结果

2.1 高速硬铬电镀液参数对镀层影响分析

探究不同镀液参数(如铬酐浓度、硫酸浓度和三价铬浓度)对汽车减震器杆镀层性能的影响,结果如表5所示。

表5 镀液参数对镀层影响

Tab.5 Influence of plating solution parameters on the coating

组别	镀层厚度 /μm	显微硬度 /HV	磨损失重 /mg
A组	20.5±1.2	850±20	4.2±0.3
B组	22.8±1.0	920±15	3.5±0.2
C组	21.1±1.3	870±25	3.8±0.3

由表5可知,随着铬酐浓度的增加,镀层厚度逐渐增加,这主要是因为铬酐浓度的增加提高了镀液中铬离子的浓度,从而促进了镀层的沉积;随着铬酐和硫酸浓度的增加,镀层的显微硬度呈现出先增加后降低的趋势,这主要是因为适当的硫酸浓度有助于促进铬离子的还原和沉积,形成更致密的镀层结构,从而提高硬度。B组和C组的磨损失重小、耐磨性优于A组,这是因为更致密的镀层结构能够更有效地抵抗磨损,但C组的耐磨性略低于B组。综上所述,B组参数(铬酐浓度240 g/L、硫酸浓度2.3 g/L、三价铬浓度5.5 g/L)在镀层厚度、显微硬度和耐磨性等方面均表现出较好的性能。因此,这些参数可以作为后续研究的参考。

2.2 铬镀层沉积速率分析

根据电镀时间与镀层厚度之间的相关性,分析铬镀层沉积速率,结果如图2所示。

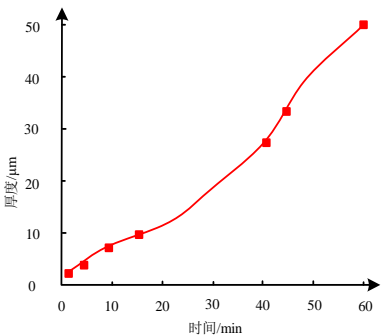


图2 铬镀层沉积速率分析结果

Fig.2 Analysis results of chromium coating deposition rate

分析图2能够得到,在硬铬电镀的初始阶段,随着电镀时间的提升,镀层厚度也有所提升,镀层的沉积速率约为 $1.5\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ 。当试验时间达到 $60\text{ min}$ 以上时,镀层整体发黑,这是因为在电镀时间不断增加的情况下,生成了部分铬的氢氧化物。

### 2.3 镀层维氏硬度分析

分析烘箱除氢前后,试件镀层的维氏硬度变化情况,结果如图3所示。

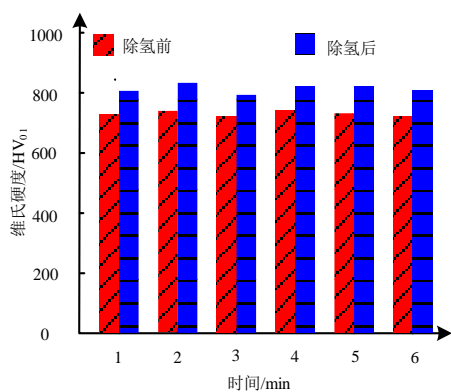
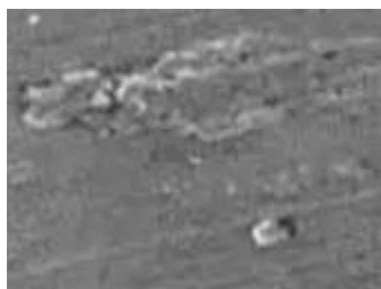


图3 镀层的显微硬度变化情况

Fig.3 Microhardness changes of the coating

分析图3可知,在利用烘箱对试件镀层进行除氢处理前,试件镀层的维氏硬度达到 $730\text{ HV}_{0.1}$ 左右,而经过烘箱除氢处理后,试件镀层的维氏硬度得到了一定提升,达到 $800\text{ HV}_{0.1}$ 左右,与除氢前相比有所提升,这是由于除氢处理令镀层内加载的氢被扩散出来,由此提升镀层的致密性,令其维氏硬度提升。



(a) 高速硬铬电镀前



(b) 高速硬铬电镀后

图5 镀层的结合力

Fig.5 Adhesion of coating

由图5可知,采用高速硬铬电镀技术后,汽车减震器杆镀层未出现从基体金属表面上脱离的现象,镀层表面更加光滑、结合力更好。这是因为本文方法在镀液制备成功后,通过特定的电流密度条件进行通电,有效促进了镀铬溶液中三价铬的生成。三

### 2.4 镀层耐磨性分析

图4所示为试件镀层的摩擦系数波动情况。试件镀层的摩擦系数在经历 $17\text{ min}$ 的摩擦磨损后基本趋于稳定,并维持在 $0.35$ 左右。同时,在经历 $20\text{ min}$ 的循环摩擦磨损后,试件镀层磨损率达到 $4.42\times 10^{-6}\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ,并趋于平稳。上述数据表明采用高速硬铬电镀技术并在电镀后进行除氢处理的试件,其摩擦系数和磨损率均保持在相对较低的水平。这也就意味着,通过本研究方法所得到的镀层具有优异的耐磨性能。

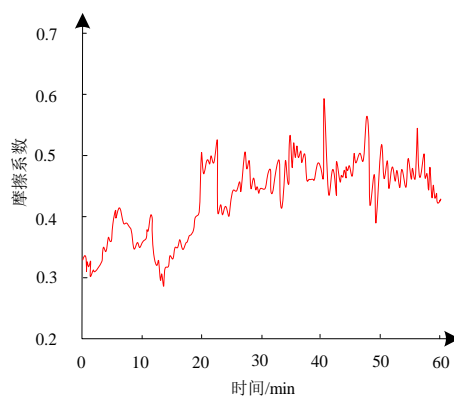


图4 镀层的摩擦系数变化情况

Fig.4 Changes in friction coefficient of coating

### 2.5 镀层结合力分析

采用划格法随意划取长宽分别为 $1\text{ mm}$ 的区域,并测试采用高速硬铬电镀技术前后试件镀层的结合力,SEM结果如图5所示。

价格的存在有助于增强镀层与基体之间的结合力,从而提高镀层的附着性和耐久性。

## 3 结 语

汽车减震器杆是连接车身与车轮的关键部件,

因此本文研究高速硬铬电镀技术在汽车减震器杆中的应用,利用制备的镀液对汽车减震器杆进行高速硬铬电镀。研究结果显示:B组(铬酐浓度240 g/L、硫酸浓度2.3 g/L、三价铬浓度5.5 g/L)的耐磨性最优,其致密的镀层结构有效抵抗了磨损。在硬铬电镀的初始阶段,镀层沉积速率约为1.5  $\mu\text{m}/\text{min}$ 。但当电镀时间超过60 min时,镀层发黑,原因是生成了部分铬的氢氧化物。烘箱除氢处理前,镀层的维氏硬度约为730 HV<sub>01</sub>;处理后,硬度提升至约800 HV<sub>01</sub>,除氢处理通过扩散出镀层内的氢,提升了镀层的致密性和硬度。试件镀层的摩擦系数在经历17 min的摩擦磨损后趋于稳定,维持在0.35左右。经历20 min的循环摩擦磨损后,磨损率趋于平稳,保持在较低水平,表明采用高速硬铬电镀技术并在电镀后进行除氢处理的镀层具有优异的耐磨性能。采用高速硬铬电镀技术后,镀层未出现从基体金属表面上脱离的现象,表面更加光滑,结合力更好,归因于三价铬的存在增强了镀层与基体之间的结合力。

## 参考文献

- [1] 季文超,郭士茹,赵晶,等.汽车底盘减震器衬套件质量检测方法仿真[J].计算机仿真,2021,38(8):167-171.
- [2] 董庆,张育明,王冬晨,等.控轧控冷工艺对汽车减震器活塞杆用S45C钢盘条微观组织和力学性能的影响[J].锻压技术,2023,48(10):150-153.
- [3] 高子辰,尹时海,王亚森.空气悬架减震器性能及疲劳寿命的研究[J].中国测试,2022,48(增2):192-196.
- [4] 关亮亮,田国红.基于动力学分析的汽车减震器示功图故障检测算法[J].吉林大学学报(工学版),2024,54(5):1221-1226.
- [5] Xu D, Li J, Liang C, et al. Increasing anhydrous chromium chloride concentration in AlCl<sub>3</sub>-EMIC ionic liquid: a step towards non-hydrogen-embrittlement chromium electroplating[J]. RSC Advance. 2022, 12(3): 1855-1861.
- [6] 金洋,张鹏,曾大海,等.润滑油添加剂羟基硅酸镁/二硫化钼含量对镀铬钢球-灰铸铁摩擦副摩擦学行为的影响[J].电镀与涂饰,2024,43(2):62-68.
- [7] 张磊,陈小明,霍嘉翔,等.激光熔覆马氏体/铁素体涂层的组织与抗磨耐蚀性能[J].粉末冶金材料科学与工程,2022,27(2):196-204.
- [8] 劳新力,张家健,高传连,等.超音速火焰喷涂Ni60/WC-10Co4Cr复合涂层的组织与性能[J].机械工程材料,2024,48(5):84-89.
- [9] 张达,翟梓桢,王戈,等.铜/铝双金属固-液复合工艺研究[J].铸造,2024,3(9):1292-1297.
- [10] 焦贵生,杜庆新,李小翻,等.提高电镀硬铬镀层与基体金属结合力的方法[J].电镀与精饰,2023,45(9):69-73.
- [11] 潘晓敏,管敏超,谢杰辉.大型注塑机拉杆卧式电镀硬铬夹具的改进[J].材料保护,2021,54(9):158-162.
- [12] 王晓曼,陈天虎,孙付炜,等.焙烧酸浸联合处理电镀高铬污泥高值化利用研究[J].环境科学学报,2022,42(8):356-362.
- [13] 韩晓刚,严炜鑫,王一鸣,等.一种重金属螯合吸附剂的制备及其对镍离子和六价铬的吸附性能[J].电镀与涂饰,2024,43(8):142-150.
- [14] 王李张政,张浩峰,黄凯华,等.含铬电镀污泥碱性氧化浸出试验[J].电镀与涂饰,2023,42(9):68-75.
- [15] 刘志威,魏祥,汪力,等.超高速激光熔覆Fe-Cr-B基耐磨涂层工艺优化及性能研究[J].矿冶工程,2023,43(5):169-173.
- [16] 王井,艾超,员霄,等.高速激光熔覆马氏体不锈钢涂层与电镀层性能对比与研究[J].中国机械工程,2024,35(8):1480-1488.
- [17] 孙伟,张淑婷,杜开平,等.基于有限元冶金冷轧辊表面替代电镀铬涂层的设计与研究[J].材料导报,2022,36(7):122-127.
- [18] 刘建祥,浦建堂,周磊,等.有机磺酸盐添加剂对电镀硬铬性能的影响[J].电镀与精饰,2021,43(6):6-9.
- [19] 胡剑锋,尹中秋,毛喆,等.电镀硬铬槽液的质量控制要求[J].材料保护,2022,55(2):195-198.
- [20] 周铭江,李磊,肖阳,等.碱式氧化焙烧-水浸-还原法从电镀污泥中制备三氧化二铬[J].中国有色冶金,2024,53(1):142-152.