

合金盘条高压磨料水射流除鳞系统实验研究

成鹏飞¹, 周向红¹, 唐勇^{2,3}

(1. 湖南科技大学 管理学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 中南大学 机电学院, 长沙 410012; 3. 长沙矿山研究院, 长沙 410012)

摘要: **目的** 对合金盘条高压磨料水射流除鳞系统进行优化。**方法** 建立一条合金盘条高压磨料水射流除鳞系统实验装置, 研究材质、工作压力、喷嘴数量、移动速度、磨料浓度、靶距等参数对除鳞效果的影响; 应用图像处理技术对除鳞效果量化为除净率并加以分析, 采用 MATLAB 软件对系统压力、喷嘴数、移动速度、磨料浓度及靶距对除鳞效果进行拟合分析。**结果** 设计了年产 5000 吨合金盘条高压磨料水射流除鳞系统, 参数为: 额定压力 45 MPa、额定流量 10 m³/h、最大除鳞速度 40 m/min、磨料质量分数 35%、靶距 20 mm、喷嘴 12 个。**结论** 高压磨料水射流除鳞系统能满足合金盘条除鳞的设计要求, 应用前景广阔。

关键词: 合金盘条; 磨料水射流; 除鳞参数; 除鳞效果; 图像处理; 曲线拟合

中图分类号: TU511.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)04-0144-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.04.024

Experimental Study on High-pressure Abrasive Water Jet Descaling for Alloy Wire

CHENG Peng-fei¹, ZHOU Xiang-hong¹, TANG Yong^{2,3}

(1. Management Institute, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410012, China;

3. Changsha Mining Research Institute, Changsha 410012, China)

ABSTRACT: **Objective** To optimize the high-pressure water jet system for alloy rod. **Methods** A high-pressure water jet descaling system test device for metal rod was established, and the effects of material, working pressure, nozzle number, speed, abrasive concentration, and target distance on descaling result were studied. Image processing technology was adopted for the quantitative analysis of descaling effect, and the descaling effect was quantized to a precise representation of net descaling rate. The effects of system pressure, nozzle number, movement speed, abrasive concentration and target distance on descaling were fitted and analyzed by MATLAB software. **Results** The production line of 5000 t/a high-pressure water jet descaling system for alloy rod was designed, with the parameters as follows: rated pressure 45 MPa, rated flow 10 m³/h, maximum speed descaling 40 m/min, abrasive concentration 35%, target distance 20 mm, amount of nozzles 12. **Conclusion** The high-pressure water jet descaling system could meet the descaling design requirements of alloy wire rod, with broad application prospects.

收稿日期: 2016-01-30; 修订日期: 2016-02-23

Received: 2016-01-30; Revised: 2016-02-23

基金项目: 湖南省哲学社会科学项目(15JD21)

Fund: Supported by Hunan Province Philosophy Social Sciences Project(15JD21)

作者简介: 成鹏飞(1969—), 男, 教授, 博士, 主要从事高压水射流技术、矿山机械、计算机应用和技术创新等领域的研究。

Biography: CHENG Peng-fei(1969—), Male, Professor, Ph. D., Research focus: high-pressure water jet technology, mining machinery, computer application and technology innovation.

KEY WORDS: alloy wire; abrasive water jet; descaling parameters; descaling effect; image processing; curve fitting

合金盘条在加工处理过程中需要清除掉表面的鳞皮和污渍,酸洗工艺因具有成本低^[1-2]、技术成熟的优势,在传统加工工艺中被普遍应用。但随着人们环保意识的加强,环境治理成本的增加,酸洗的成本优势已不复存在。高压磨料水射流技术应用于金属表面除鳞的研究始于 20 世纪 80 年代,因其不仅有良好的磨削^[3]、穿透和冲蚀力,能高效完成金属表面的除鳞工作,还具有金属损失小、项目投资小、生产过程中无任何污染等优点^[1,4],已得到社会的关注与重视。合金盘条与板带材、钢棒、钢管相比,是高压磨料水射流技术能否成功应用于合金盘条除鳞的关键因素。本文对除鳞速度、压力、喷嘴数量、磨料浓度、靶距和材质等对除鳞效果的影响程度进行实验研究。

1 实验

高压磨料水射流除鳞主要通过高压泵等增压装置将水加压,当高压水从喷嘴喷出时,在高压水中加入磨料,混合了磨料的水射流从混合喷嘴中喷出,打击到金属表面,将附着在金属表面的氧化层击碎、剥离,使金属呈现本色,完成金属表面的除鳞^[1,5-6]。

根据磨料加入高压水的位置,可将高压磨料水射流除鳞分为前混式和后混式^[1,7-8]。后混式具有可方便实现连续供砂、喷嘴和管路磨损小、设备使用寿命长等特点,本文采用后混式进行除鳞实验。针对合金盘条的成分、规格,本文研究除鳞压力、除鳞速度、处理量、磨料浓度和喷射数量对除鳞的影响,实验装置如图 1 所示。

实验中采用额定工作压力为 55 MPa,额定流量为 10 m³/h,功率为 315 kW 的高压柱塞泵。为了全面清除合金表面氧化皮,设计了 4 组喷射环,每组喷射环采用孔径为 1.0 mm 的 3 个喷头间隔 120 度布置在盘条的截面圆周上,每组可单独控制开关,每个喷头相互错开,尽量降低喷嘴的相互干扰。为了测试除鳞速度,拉丝机的电机采用变频器控制,可实现除鳞速度的连续调节、实时记录,其工艺如图 2 所示。

磨料对磨料水射流的冲蚀性能有很大影响^[9-10],甚至直接影响除鳞效果。磨料的种类很多,如人造刚玉、碳化硅、碳化硼、氧化铝、氧化铁和石榴石等^[11]。实际应用时,除考虑磨料的粒度、硬度、脆性等因素外^[12],还要考虑磨料的价格、以及是否容易获取等因素。综合考虑各种因素,实验选用 60# 石榴石作为磨料。

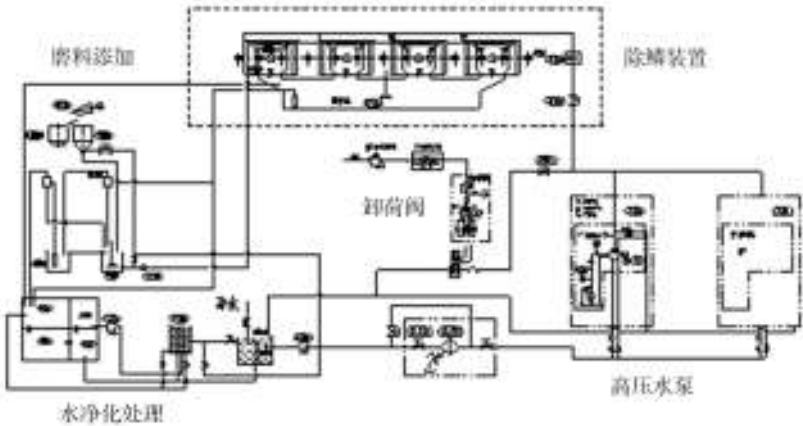


图 1 高压磨料水射流除鳞实验装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device for high-pressure abrasive water jet descaling

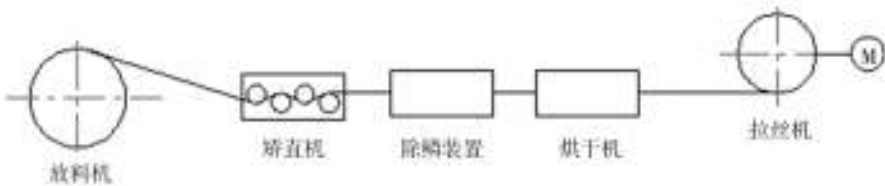


图 2 高压磨料水射流实验线工艺

Fig. 2 High-pressure abrasive water jet test line

当除鳞参数不变时,除鳞对象材质不同,除鳞效果也会存在差异,因此,对直径为 9.0 mm 的 NiFe 合金和 Cr20Ni80 合金各 64 kg 进行实验,以分析材质与除鳞效果的关系。

实验前,调整好喷嘴到合金盘条的距离,按顺序启动各设备。首先,启动管道泵和润滑泵,运行平稳后,再启动高压泵;接着,开启搅拌桶中的搅拌电机,在搅拌桶中加入适量的水和石榴石,并搅拌均匀;然后,调节高压水泵变频器,慢慢形成一定压力;最后,启动渣浆泵和收线机,并通过调节变频器控制合金盘条速度和供沙量,开始除鳞实验^[13]。按实验步骤,调整实验参数,用高清摄像头记录下合金盘条除鳞后的表面图像,同时通过控制系统的上位计算机,记录下除鳞系统的各参数,如磨料浓度、除鳞压力、除鳞速度和靶距等参数。

2 结果与讨论

2.1 除净率

合金盘条经高压磨料水射流除鳞后,在对比非常明显的情况下,除鳞效果如图 3 所示,但无法对除鳞效果进行定量分析,当除鳞效果非常接近或边界模糊不清时,则无法精确判别除鳞效果的好坏。为了准确研究各参数和除鳞效果之间的关系,在烘干机和收线机之间安装高清摄像头,利用高清摄像头拍下的图像像素灰度值的差别,如白色的 RGB 值为(255,255,255),灰色的 RGB 值为(190,190,190),黑色的 RGB 值为(0,0,0)等,通过统计分析算法很容易识别盘条边界,并剔除干扰像素^[14]。采用式(1)计算盘条表面鳞皮除净率:

$$y = \sum_{i=1}^n (r_i + g_i + b_i) \div (3 \times 255 \times n) \quad (1)$$

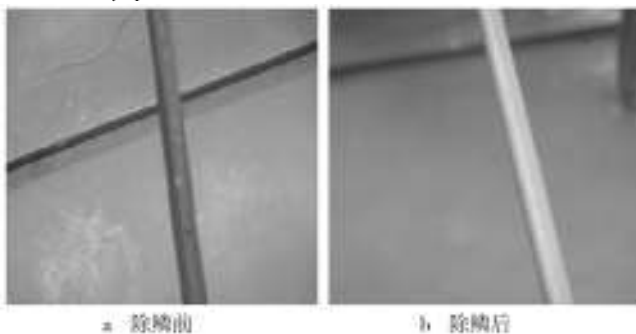


图3 高压磨料水射流除鳞效果对比

Fig. 3 Comparison of the alloy rod before and after high-pressure abrasive water jet descaling

式中: r_i 为第*i*点的红色通道亮度, g_i 为第*i*点的绿色通道亮度, b_i 为第*i*点的蓝色通道亮度; $r_i, g_i, b_i \in Z, 0 \leq r_i, g_i, b_i \leq 255$ 。

2.2 实验结果

为了分析除鳞参数对除鳞效果的影响趋势,按实验参数顺序,分批将离散数据导入 MATLAB,用最小二乘法对各离散的点进行曲线拟合^[15],可得到各参数与除净率之间的关系曲线图。图 4 是喷头为 9 个、除鳞速度为 25 m/min、磨料质量分数为 40%、靶距为 20 mm 时,流量和压力同时变化对除净率的影响。图 5 是除鳞压力为 40 MPa、喷头为 9 个、除鳞速度为 25 m/min、靶距为 20 mm 时,磨料质量分数对除净率的影响。图 6 是除鳞压力为 40 MPa、磨料质量分数为 41%、除鳞速度为 25 m/min、靶距为 20 mm 时,喷嘴数量对除净率的影响。图 7 是除鳞压力为 40 MPa、喷头为 9 个、磨料质量分数为 40%、除鳞速度为 25 m/min 时,靶距对除净率的影响。图 8 是除鳞压力为 40 MPa、喷头为 9 个、磨料质量分数为 40%、靶距为 20 mm 时,除鳞速度对除净率的影响。

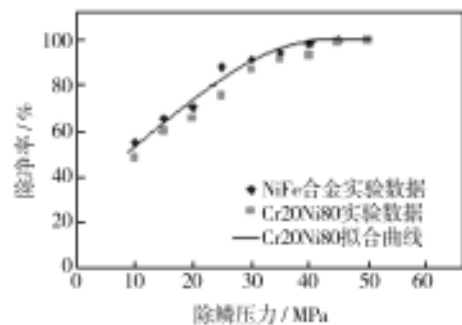


图4 除鳞系统压力与除净率之间的关系

Fig. 4 Relationship between pressure of the descaling system and descaling rate

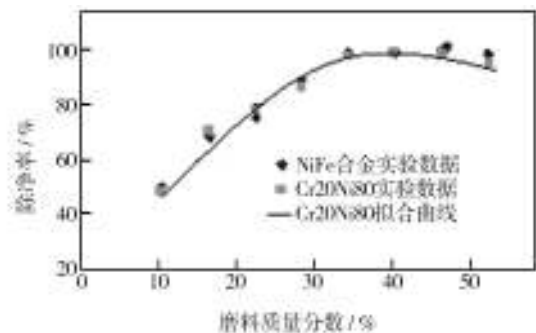


图5 磨料质量分数与除净率之间的关系

Fig. 5 Relationship between abrasive concentration and descaling rate

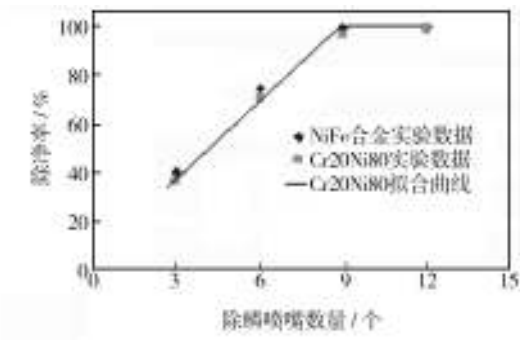


图6 喷嘴数量与除净率之间的关系

Fig. 6 Relationship between the number of nozzles and the descaling rate

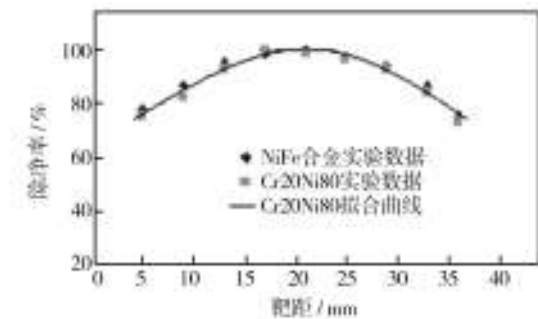


图7 靶距与除净率之间的关系

Fig. 7 Relationship between target distance and descaling rate

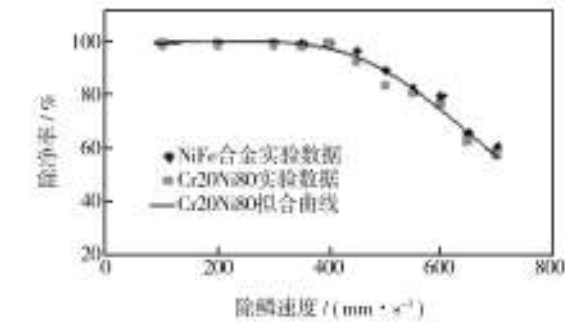


图8 除鳞速度与除净率之间的关系

Fig. 8 The relationship between decaling speed and descaling rate

2.3 分析与讨论

经高压磨料水射流除鳞后得到的合金盘条表面的SEM照片如图9所示。

从图9可以看出合金盘条表面氧化皮已清除干净,表面平整,但表面仍粘附有磨料,也存在被磨料切削所留下的细小凹坑,经后续工序处理及分析检验,高压磨料水射流除鳞处理后的合金盘条表面质量能满足生产处理要求。对除鳞后的合金盘条表面进行

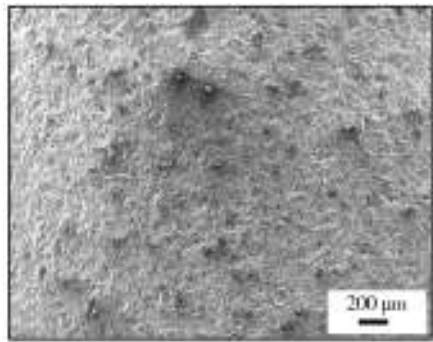


图9 合金盘条高压磨料水射流除鳞后表面 SEM 照片

Fig. 9 SEM photo of alloy rod after high-pressure abrasive water jet descaling

EDS 能谱分析,如图10所示,除了镍、铬等元素外,还含有硅、钙、铝等元素,氧元素质量分数为0.42%,证明氧化物已清除干净,同时也验证了本文所采用的除净率计算方法是可行的。

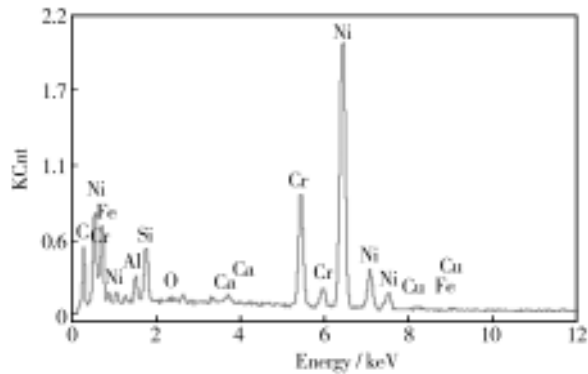


图10 合金盘条高压磨料水射流除鳞后表面 EDS 能谱分析

Fig. 10 EDS analysis of surface of alloy rod after high-pressure abrasive water jet descaling

- 根据实验结果及对图4—图8的分析可知:
- 1) 高压磨料水射流除鳞技术能有效清除合金盘条表面的氧化皮,且合金盘条表面质量能满足生产加工要求。
 - 2) NiFe 合金和 Cr20Ni80 合金因材质不同,除鳞参数有一定差异,因此,在设计高压磨料水射流除鳞系统时,应根据除鳞对象确定系统参数。
 - 3) 在其他参数不变的情况下,一定范围内,当系统压力越大,合金盘条表面鳞皮清除效果越好。考虑到使用成本、设备可靠性等问题,除鳞压力不宜过高,在保证除鳞效果的前提下,工作压力越小越好。由图4可知,合金盘条除鳞系统额定压力可设计为45 MPa,工作压力为30~40 MPa。
 - 4) 磨料质量分数是影响除鳞效果的关键因素之

一,太低除鳞效果不明显,增加后除净率将快速提高,但增加到一定程度后除净率增加缓慢。从图5可以看出,合金盘条高压磨料射流除鳞的最佳磨料质量分数的范围为30%~45%。

5) 在其他参数不变的情况下,喷射次数越多,磨料水射流对合金盘条的喷射时间越长,除鳞越均匀,效果越好。因此,当安装空间不受限制时,可通过增加喷射次数,即增加系统流量,降低系统压力,保证设备可靠性、除鳞效果和提高生产线产能。根据合金盘条情况,设计除鳞喷射次数为3~6次。

6) 从图7可知,高压磨料水射流除鳞存在最佳靶距范围,靶距太小,因沙水反射干扰、沙水混合不充分、除鳞覆盖面积小等原因造成除鳞效果不理想;靶距太大,则因空气阻力、喷射不均匀等因素,而影响除鳞效果,合金盘条高压磨料水射流除鳞最佳除鳞靶距为16~24 mm。

7) 在其他参数稳定的情况下,盘条行进速度越慢,磨料射流对合金盘条的喷射时间越长,除鳞效果越好,行进速度越快,喷射时间越短,除鳞效果越差。在进行系统设计时,应综合考虑除鳞效果,生产能力等因素,收线机采用变频调速,可无级调节盘条行进速度。当系统最大负荷工作时,必须保证除鳞效果和最大产能。设计合金盘条高压磨料水射流除鳞最佳除鳞速度范围为20~30 m/min,最大行进速度为40 m/min。

根据实验,设计了年产5000吨的除鳞生产线,系统参数为:额定压力45 MPa、额定流量10 m³/h、最大除鳞速度40 m/min、磨料质量分数35%、靶距20 mm、喷嘴12个(共4组,每组3个)。

3 结论

通过采用图像处理方法和MATLAB对合金盘条高压磨料水射流除鳞实验数据进行了定量分析,得到了除鳞系统各参数与除净率之间的曲线关系,为磨料水射流除鳞系统的设计提供了参考,也可为磨料水射流除鳞系统的使用和调试提供依据。

参考文献

[1] 成鹏飞,刘寿华,张正学,等. 高压水喷砂除鳞技术的研究与应用[J]. 矿业研究与开发,2006,26(10):72—75.
CHENG Peng-fei, LIU Shou-hua, ZHANG Zheng-xue, et al. Research and Application of High Pressure Water Blasting

and Descaling Technology[J]. Mining Research and Development, 2006, 26(10): 72—75.

- [2] LÁSZLÓ P, ORSOLYA S. Study of the Acid Pickling of Low-alloyed Steels by Using a Descaling Workstation Simulating the Production Line[J]. Steel Research Int, 2015, 86(7): 704—715.
- [3] 陈逢军,唐宇,苗想亮,等. 磨料射流表面抛光研究综述[J]. 表面技术, 2015, 44(11): 119—127.
CHEN Feng-jun, TANG Yu, MIAO Xiang-liang, et al. Review on the Abrasive Jet Surface Polishing (AJP) Technology[J]. Surface Technology, 2015, 44(11): 119—127.
- [4] 唐勇,祝爽,张正学. 磨料水射流除鳞技术在镍合金盘条中的应用[J]. 轧钢, 2012, 29(5): 70—72.
TANG Yong, ZHU Shuang, ZHANG Zheng-xue. Application of Abrasive Water Jet Descaling Technique in Nickel-alloy Wire[J]. Steel Rolling, 2012, 29(5): 70—72.
- [5] 黄威. 后混合磨料水射流除鳞在钢管生产中的应用[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(2): 91—93.
HUANG Wei. The Application of Post Mixed Abrasive Water Jet for Descaling in Steel Production[J]. Mining Research and Development, 2015, 35(2): 91—93.
- [6] JOHN K. Application of Taguchi Design for Quality Characterization of Abrasive Water Jet Machining of TRIP Sheet Steels[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(5): 635—643.
- [7] 陈可卿,成鹏飞,彭敏. 不锈钢带钢磨料水射流除鳞工艺研究[J]. 表面技术, 2009, 38(6): 70—72.
CHEN Ke-qing, CHENG Peng-fei, PENG Min. The Process Research on Abrasive Water Jet Descaling for Stainless Strip[J]. Surface Technology, 2009, 38(6): 70—72.
- [8] 戴杰涛,李湘文,喻峰,等. 带材无酸除鳞系统的开发及其在750 mm不锈钢生产线的应用[J]. 中国冶金, 2013, 23(6): 50—54.
DAI Jie-tao, LI Xiang-wen, YU Feng, et al. Development and Application of Descaling System without Acid on 750 mm Stainless Steel Strip[J]. China Metallurgy, 2013, 23(6): 50—54.
- [9] SOORAJ V S. A Study on Fine Finishing of Hard Workpiece Surfaces Using Fluidized Elastic Abrasives[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(9—12): 1495—1509.
- [10] 钟鹏,周俐,常立忠,等. 风淬转炉渣作为喷砂磨料的可行性及效果研究[J]. 表面技术, 2014, 44(2): 49—54.
ZHONG Peng, ZHOU Li, CHANG Li-zhong, et al. Feasibility and Application Effect Research of the Wind Quenching Slag as Sand Blasting Abrasive[J]. Surface Technology, 2014, 44(2): 49—54.

(下转第188页)

- Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 28(3): 61—64.
- [6] JAUHARI I, YUSOF H A M, SAIDAN R. Superplastic Boronizing of Duplex Stainless Steel under Dual Compression Method[J]. Materials Science and Engineering, 2011, 528(28): 8106—8110.
- [7] 衣晓红, 鲍闯, 李凤华, 等. ZG1Cr18Ni9 奥氏体不锈钢的渗硼[J]. 金属热处理, 2009, 34(11): 74.
- YI Xiao-hong, BAO Chuang, LI Feng-hua, et al. Boronizing of ZG1Cr18Ni9 Austenite Stainless Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(11): 74.
- [8] 邢学刚, 杨耀军, 卢盼娜, 等. 添加不同稀土元素对固体包埋法在 304 不锈钢表面制备 Ti /Cr-RE 双层涂层电化性能的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(11): 9—12.
- XING Xue-gang, YANG Yao-jun, LU Pan-na, et al. Influence of Adding Various Rare Earth Elements on Electrochemical Corrosion Resistance of Ti/Cr-RE Coatings Fabricated on 304 Stainless Steel by Pack Cementation[J]. Surface Technology, 2015, 44(11): 9—12.
- [9] 董志军, 黄锐, 罗安安, 等. 包埋添加剂对 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料结构和性能的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(6): 23—27.
- DONG Zhi-jun, HUANG Rui, LUO An-an, et al. Effect of Additives Used in a Pack Cementation Technique on the Structure and Properties of SiC-ZrC Coated Carbon/Carbon Composites[J]. Surface Technology, 2014, 43(6): 23—27.
- [10] 胡文全, 迟长志, 刘杨. TiO 钢盐浴渗硼工艺及性能研究[J]. 表面技术, 2011, 40(4): 51—54.
- HU Wen-quan, CHI Chang-zhi, LIU Yang. Study on Technology and Property of Salt-bath Boronizing on TiO Steel[J]. Surface Technology, 2011, 40(4): 51—54.
- [11] MERIC C, SAHIN S, BACKIR B, et. Investigation of the Boronizing Effect on the Abrasive Wear Behavior in Cast Irons[J]. Materials and Design, 2006, 27(9): 751—757.
- [12] 雷天同, 谷志刚, 李志林. 特种钢固体渗硼的研究[J]. 金属热处理, 1987, 4(8): 15—19.
- LEI Tian-tong, GU Zhi-gang, LI Zhi-lin. Study on the Pack-boronization of Special Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 1987(8): 15—19.
- [13] 杨凯军, 王西科, 朱世杰. 4Cr13 不锈钢渗硼工艺及渗层组织研究[J]. 郑州大学学报, 2003, 24(1): 73—75.
- YANG Kai-jun, WANG Xi-ke, ZHU Shi-jie. Study on Microstructure of Boronizing Layer and Boronizing Process Parameters of 4Cr13 Stainless Steel[J]. Journal of Zhengzhou University, 2003, 24(1): 73—75.
- [14] 龙东平, 薛建荣, 晏智鑫. 纳米压痕和划痕法测定 TiO₂ 纳米薄膜的力学性能[J]. 表面技术, 2015, 44(6): 116—118.
- LONG Dong-ping, XUE Jian-rong, YAN Zhi-xin. Nanoindentation and Nanoscratch Measurements to Determine the Mechanical Properties of TiO₂ Nano Films[J]. Surface Technology, 2015, 44(6): 116—118.
- [15] 吴鲁周, 杨弟. 渗硼层的观察与分析[J]. 金属热处理, 1987, 2(2): 9—13.
- WU Lu-zhou, YANG Di. Observation and Analysis on the Boriding Layers[J]. Heat Treatment of Metals, 1987, 2(2): 9—13.
- [16] 张菁, 董仕杰, 黄伦. Cr12MoV 钢渗硼层脆性与耐磨性研究[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2005, 19(2): 16—19.
- ZHANG Jing, DONG Shi-jie, HUANG Lun. Study of Brittleness and Wear Resistance of Boride Layer to Steel of Cr12MoV[J]. Hubei Automotive Industries Institute, 2005, 19(2): 16—19.
- [17] 赵景浩, 罗宏. 球墨铸铁粉末渗硼的耐蚀性能研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(12): 166—169.
- ZHAO Jing-hao, LUO Hong. Study on Corrosion Resistance of Ductile Cast Iron with Boride Layer[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(12): 166—169.

(上接第 148 页)

- [11] GOKHAN A. Recycling of Abrasives in Abrasive Water Jet Cutting with Different Types of Granite[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(10): 4425—4435.
- [12] SHTERTSER A A. Impact of a Hydroabrasive Jet on Material: Hydroabrasive Wear[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2013, 54(3): 508—516.
- [13] 成鹏飞, 阳卫国. 高压水除鳞控制系统的结构与功能[J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(2): 31—33.
- CHENG Peng-fei, YANG Wei-guo. Structure and Function of High Pressure Water Scale Control System[J]. Mining Research and Development, 2003, 23(2): 31—33.
- [14] 成鹏飞, 高阳. 复杂背景下圆形物体分割算法[J]. 计算机应用, 2006, 26(10): 2360—2361, 2365.
- CHENG Peng-fei, GAO Yang. Circular Object Segmentation under Complicated Background[J]. Computer Applications, 2006, 26(10): 2360—2361.
- [15] ÖZKAYA E. A Novel Abrasive Blasting Process: Abrasive Medium Classification and CFD Simulations[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2013, 44(6): 577—585.