

电解质等离子抛光在高碳微合金钢上的应用研究

卓城之，陆忠，刘国强，季晓东，董俊

(金轮针布(江苏)有限公司，江苏 南通 226143)

摘要：目的 提高金属针布产品(高碳微合金钢)的表面质量，降低针布产品的表面粗糙度值，有效提升产品的使用效果。**方法** 采用电解质等离子抛光工艺在针布产品上展开工艺研究，探索了不同电解质浓度(无机盐质量分数)、不同生产速度和不同电解质等离子抛光单元组数对针布表面粗糙度的影响。利用非接触式粗糙度扫描仪测试粗糙度 R_a ，以此对针布表面的抛光质量进行表征。**结果** 采用电解质等离子抛光工艺可以实现钢铁材料的表面抛光，抛光后不仅有效地去除了针布表面的氧化皮，并且表面平整且达到镜面效果。最佳工艺参数(电解质无机盐质量分数 2.75%，走线速度 40 m/min，电解质等离子抛光单元 4 组)下，表面粗糙度 R_a 值达到了 0.11 μm 。**结论** 电解质等离子抛光工艺成功地应用于钢铁材料上，且实现了非接触式连续抛光工艺，既不损伤工件，又实现了表面的光亮平整，还具有环境友好、节能和生产效率高等特点。

关键词：非接触式抛光工艺；电解质等离子；高碳微合金钢；表面粗糙度；氧化皮；针布

中图分类号：TG175 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2018)04-0115-05

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.04.017

Application of Plasma Electrolytic Polishing to High Carbon Microalloyed Steel

ZHUO Cheng-zhi, LU Zhong, LIU Guo-qiang, JI Xiao-dong, DONG Jun

(GERON Card Clothing (Jiangsu) Co. Ltd, Nantong 226143, China)

ABSTRACT: The work aims to improve surface quality of metallic card clothing (MCC) products (made of high carbon microalloyed steel), decrease R_a value of card-clothing surface, and effectively enhance using effect of the products. Process study was applied to card clothing products by adopting plasma electrolytic polishing process, and effects of different electrolyte concentration, production speed and plasma electrolytic polishing cell groups on surface roughness of card clothing were investigated. Polishing quality of card clothing was characterized with non-contact surface roughometer and determined based upon roughness R_a indicator. Plasma electrolytic polishing process could be applied to realize surface polishing of steel materials, the polishing would not only remove oxide scale on the surface of card clothing effectively, but also make the surface smooth and have mirror effect. Surface roughness R_a reached 0.11 μm based upon the optimum process parameters (electrolyte concentration as 2.75%, routing speed as 40 m/min, and plasma electrolytic polishing unit as 4 groups). The process of EPPo has been successfully applied to steel materials. This non-contact continuous polishing process is made possible, which keeps workpieces intact, makes the surface bright and smooth, and features in environmental protection, energy conservation and high production efficiency.

KEY WORDS: non-contact polishing process; electrolyte plasma; high carbon microalloyed steel; surface roughness; oxide scale; card clothing

收稿日期：2017-11-15；修订日期：2017-12-20

Received: 2017-11-15; Revised: 2017-12-20

作者简介：卓城之（1982—），男，高级工程师，主要研究方向为梳理器材工艺研究。

Biography: ZHUO Cheng-zhi (1982—), Male, Senior engineer, Research focus: the processing of carding.

钢铁件的传统抛光工艺主要有电解抛光、化学抛光、机械抛光、喷砂抛光和其他抛光技术等^[1-4]。纺织梳理器材中的典型耗材——金属针布，由高碳钢材料经过拉拔、轧制、冲切和热处理工艺实现，为钢铁件的一种，是纺织梳理器材梳棉机的核心配件^[5]。随着纺织客户要求的不断提升，对金属针布产品的表面质量提出了更高的要求。传统的金属针布抛光工艺主要采用上述四种工艺，随着国家对环保政策的调整，尤其是污染性较大的抛光工艺，如电解抛光已经逐渐被淘汰，寻找环境友好型的抛光工艺是提升金属针布表面质量的主流方向。每盘金属针布产品的长度为8000~10 000 m，且尺寸结构特殊，由齿部和基部组成，齿部作用为梳理纤维，基部作用为便于包卷在梳棉机的大滚筒上。齿部为作用区，在使用过程中与各类纤维进行摩擦磨损^[6]，因此需要对齿部进行表面抛光处理，提高其表面粗糙度，降低摩擦系数，减少针布与纤维之间的摩擦磨损，最终实现产品耐磨性提升的目的。

近年来随着电解质等离子抛光工艺的研究和成果转化^[7-10]，该工艺已经在不锈钢等材料领域进行了

广泛的应用推广。采用该工艺，可以实现材料表面的镜面抛光效果，且工艺过程无任何污染物的排放^[8]。在不锈钢领域，电解质等离子抛光工艺为单槽处理方式，即处理的不锈钢件为零件式，可以采用挂具或夹具的方式来实现。但对于一盘长度达到8000~10 000 m的金属针布，采用这样的结构显然无法满足要求，必须设计出一种非接触式的抛光工艺。同时，电解质等离子抛光工艺在钢铁材料上的研究与应用也较少，因此本文重点研究了电解质等离子抛光工艺在钢铁材料如金属针布产品上的应用研究，实现针布产品的表面光亮处理和低粗糙度，提升产品的使用效果和使用寿命^[11-12]。

1 实验

1.1 材料的表面状态特征

金属针布产品的初始表面状态如图1所示。由于采用了开放式的热处理工艺，因此表面形成了黑色的氧化膜结构。

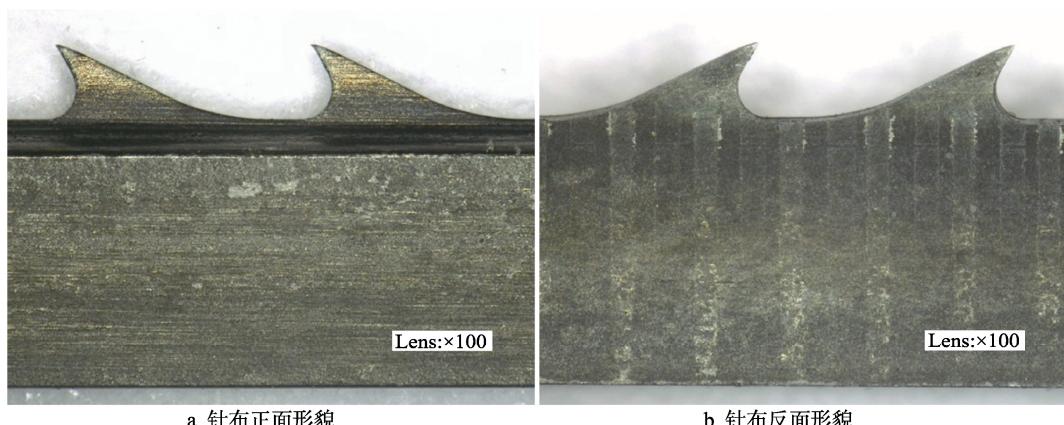


图1 针布实物图
Fig.1 Card clothing: a) front, b) reverse side

1.2 实验线设计及检测

根据文献[9]，电解质等离子抛光工艺在不锈钢领域时采用单槽结构。而本文所处理的金属针布为连续工件，为了在金属针布产品上展开工艺试验，得出最佳的工艺参数并应用于产品上，依据电解质等离子抛光工艺原理^[13-14]，设计了金属针布专用的非接触式电解质等离子抛光线。将原有的单体机结构设计进行分解，分解为阳极和阴极两个部分，针布从两个部分中通过。当针布到达阴极时，针布相当于作为阳极，从而在阴极槽内实现原来单槽结构的电解质等离子抛光条件，结构示意图如图2所示。在实验线设计时，将高压阳极-高压阴极这样的结构称为一个单元，为

了确保针布表面的抛光质量，最多设计了4个单元，实验时可根据需要开启。

生产线主要由以下几个部分组成：上料、抛光单

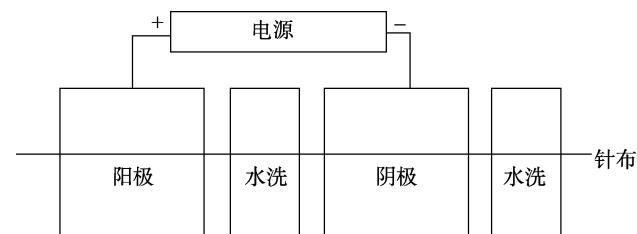


图2 非接触式电解质等离子抛光工艺结构示意图
Fig.2 Diagram of non-contact EPPo structure

元、烘干防锈单元、下料。抛光工艺流程如下：放料→高压阳极→水洗→高压阴极→超声波热水洗→冷水洗→吹干→烘干→表面防锈→收料。其中，表面烘干防锈采用压缩空气吹扫+热风快速烘干+在线上防锈油的方式。配套电源采用高压直流电源，电压 360~400 V。

针对溶液浓度、溶液温度、针布线速度三个因素展开全试验，找出影响针布表面粗糙度的关键因素，并进行稳定化生产验证。采用 VK-9710 非接触式形貌仪对金属针布齿部的表面进行粗糙度检测。采用体式显微镜观察针布表面的抛光质量。参考 FZ/T 93038—1995《梳理机用齿条》，采用维氏硬度计评价齿尖部位抛光前后的硬度变化情况。

2 结果及分析

2.1 溶液浓度对表面粗糙度的影响

先利用一个高压单元展开工艺试验，验证同一速度和同一溶液温度条件下，溶液浓度对粗糙度 R_a 的影响，试验结果如图 3 所示。依据文献[2]，溶质成分主要为无机盐，无任何重金属等介质添加。由图 3 可知，随着电解质浓度的增加，齿部的表面粗糙度 R_a 先降低后升高。当电解质浓度（无机盐质量分数，下同）为 2.75% 时，粗糙度值最低，即表面平整度最好；当电解质浓度超过 2.75% 时，针布表面粗糙度逐渐上升，这可能与浓度增大，导电离子增多有关。

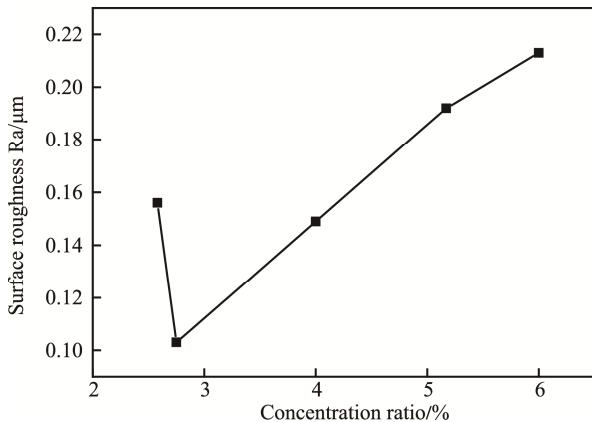


图 3 电解质浓度对粗糙度的影响
Fig.3 Effects of concentration on roughness

图 4 为不同电解质浓度条件下的反应状态，可以明显地看出，电解质浓度为 6% 时虚线区域内的放电强度（图 4a）明显大于浓度为 4% 时的放电强度（图 4b）。等离子反应强度高，微观上表现为放电通道增多，宏观上表现为图 4b 的现象。在放电通道多的条件下，本实验所采用的电压为 360~400 V 的高电压，使得针布齿尖微观突起处放电时去除速度过快，形成了微观不平整的凹坑

等缺陷，从而影响了表面粗糙度值^[15]。因此，针对高碳微合金钢材质的针布产品，选择偏低的浓度比较合适。

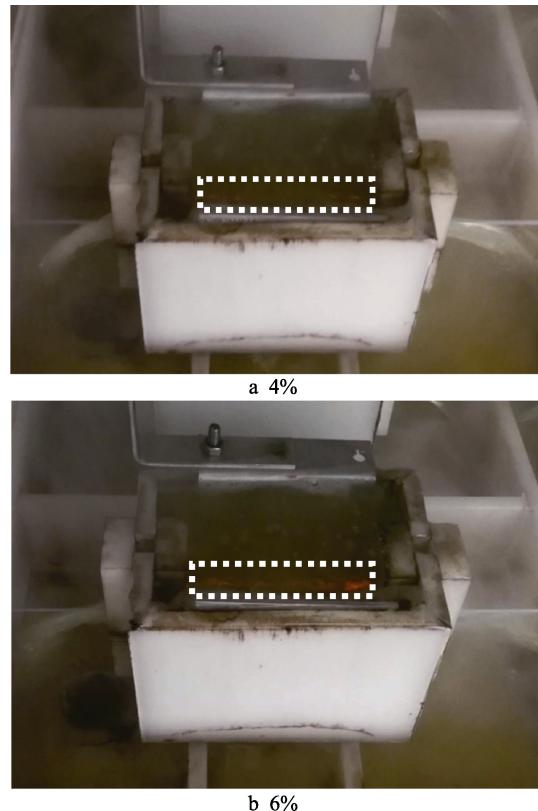


图 4 不同电解质浓度条件下的反应状态
Fig.4 Reactive state at different electrolyte concentration

2.2 速度对表面粗糙度的影响

将电解质溶液浓度确定在 2.75%，溶液温度确保在 85~90 °C，验证速度对金属针布表面粗糙度的影响，试验结果如图 5 所示。

从图 5 可以明显看出，随着线速度的提升，金属针布的表面粗糙度值逐渐降低，即表面质量越来越平整，这主要与电解质等离子抛光的原理有关^[7]。当金

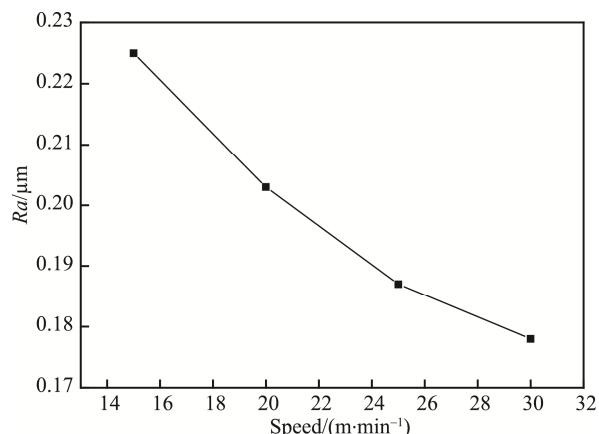


图 5 单组槽条件下速度对粗糙度的影响
Fig.5 Effects of velocity on roughness in single set of tank

属针布表面粗糙度在瞬间被整平后,反应时间的进一步延长,反而会形成过腐蚀^[16],影响粗糙度。本实验证明,单组槽时,反应时间不宜过长,等效于在生产控制时线速度不宜过低。

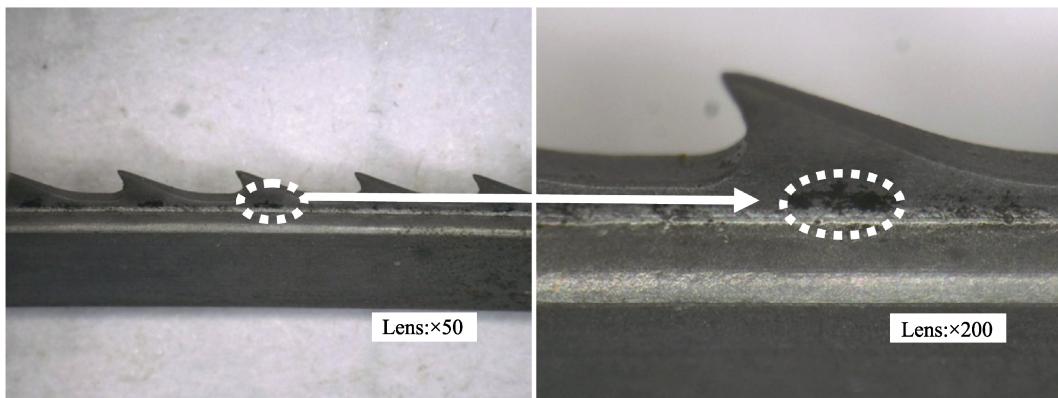


图 6 金属针布齿底部出现的氧化皮残留

Fig.6 Residual oxide scale at bottom of metallic card clothing

式,以达到最好的抛光效果。

2.3 多组高压单元对表面粗糙度的影响

为了验证多组电解质等离子抛光工艺对粗糙度的影响,在上述结果的基础上,线速度为30、40 m/min时,展开了8组工艺试验,试验结果见图7和表1。可见,线速度为30 m/min时,多组电解质等离子抛光单元有利于表面粗糙度的提升,但是抛光单元达到4个时,并没有达到理想的粗糙度水平(见表1数据)。当线速度提高到40 m/min时,随着抛光单元数的增加,粗糙度值明显降低,抛光单元数为4时,针布表面粗糙度Ra达到了0.11 μm,目测达到了镜面效果。分析认为,多组抛光单元实现了单次抛光效果的叠加作用^[6],故根据试验结论,确定采用4组电解质等离子抛光单元来提升针布表面粗糙度水平^[11]。基于Ra已经达到了0.11 μm,继续增加抛光单元数量,只是增加了生产成本,故确定抛光单元数为4组。

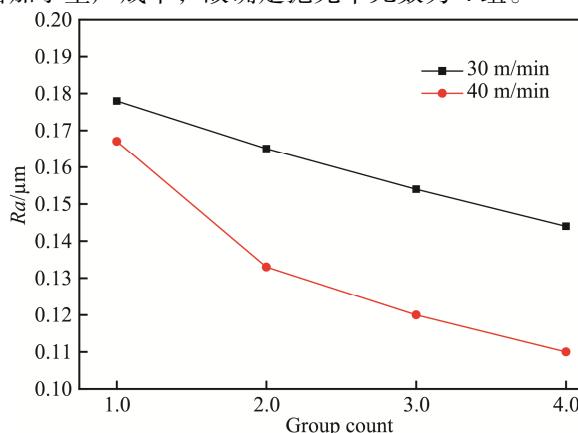


图 7 多组反应槽中速度与粗糙度的关系图

Fig.7 Relationship between speed in multiple sets of reaction tank and Ra

随着速度的增加,电化学反应时间缩短,去除率降低,线速度为25、30 m/min时,针布齿底部位置出现了氧化皮去除不干净的现象,如图6所示。故线速度需要与抛光效果综合考虑,即采用多组反应槽模

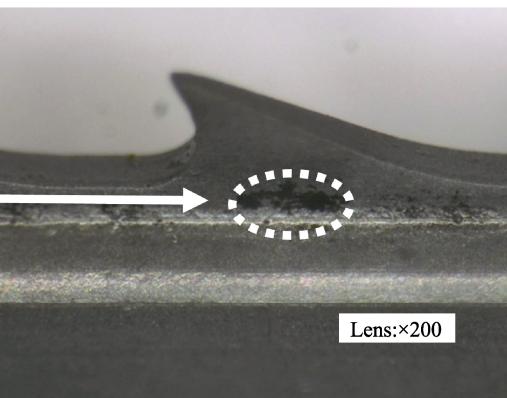


图 8 针布齿尖抛光前后的硬度变化曲线图

Tab.1 Multiple sets of reaction tank and surface roughness

Group count	Ra/μm	
	30 m/min	40 m/min
1	0.178	0.167
2	0.165	0.133
3	0.154	0.120
4	0.144	0.110

图8为针布齿尖抛光前后的硬度变化曲线图,由图可见,抛光后齿尖硬度无明显变化。电解质等离子抛光工艺主要是在微观不平整区域(尤其是凸起处)产生放电,进而实现凸点的去除和表面的平整化。因为表层的微观放电现象可以通过工艺参数合理控制放电程度,所以电解质-等离子抛光工艺既达到了提高表面质量的目的,又保证了齿尖原有的硬度。针布表面粗糙度的降低,有利于耐磨度的提升,从而延长针布产品的使用周期,且光亮整洁的表面去除了冲裁

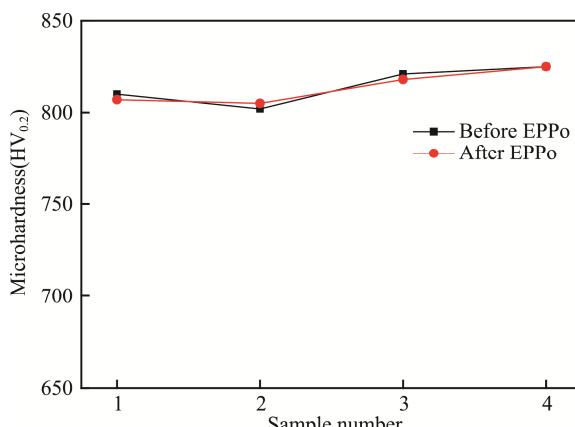


图 8 针布齿尖抛光前后硬度变化

Fig.8 Microhardness changes before and after EPPo

加工过程中的细小毛刺等缺陷，提高了产品上车使用初期效果，为客户带来了一定的经济效益。

3 结论

1) 采用电解质等离子抛光工艺，实现了在针布产品（钢铁件）上的工艺探索与研究。

2) 通过对传统电解质等离子抛光设备的改造，提出了针布专用的非接触式电解质等离子抛光生产工艺。

3) 采用 2.75% 的电解质浓度、40 m/min 的生产速度、4 组电解质等离子抛光单元的参数，可以实现针布表面粗糙度 R_a 达到 $0.11 \mu\text{m}$ ，目测针布表面达到了镜面效果。

参考文献：

- [1] 王季. 金属表面电解质等离子抛光及其工艺的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
WANG Ji. Research on Metal Surface Electrolysis and Plasma Polishing and Process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [2] 张笃飞. 电解质-等离子加工技术中电解液作用的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
ZHANG Du-fei. Research on Role of Electrolyte in Electrolyte-Plasma Processing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [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] 杜炳志, 漆红兰. 电化学抛光技术新进展[J]. 表面技术, 2007, 36(2): 56-58.
DU Bing-zhi, QI Hong-lan. Development of Electrochemical Polishing Technology[J]. Surface Technology, 2007, 36(2): 56-58.
- [5] 费青, 阙浩英, 陈海涛, 等. 梳理针布的工艺特性、制造和使用[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2007.
FEI Qing, QUE Hao-ying, CHEN Hai-tao, et al. Carding of Process Characteristics, Manufacture and Use[M]. Beijing: China Textile Press, 2007.
- [6] 许鉴良. 高耐磨金属针布齿条钢材探讨(一)[J]. 纺织器材, 2017, 44(2): 67-71.
XU Jian-liang. Probing into High Wear-resistant MCC Wires[J]. Textile Accessories, 2017, 44(2): 67-71.
- [7] 王季, 索春来, 关丽丽, 等. 电解质等离子抛光表面粗糙度随时间变化规律[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(2): 227-232.
WANG Ji, SUO Chun-lai, GUAN Li-li, et al. Regularity of Surface Roughness with Polishing Time in Electrolysis and Plasma Polishing[J]. Journal of Harbin Engineer University, 2013, 34(2): 227-232.
- [8] 王季, 索来春, 付宜利. 电解质等离子抛光液中硫酸铵含量的检测方法[J]. 材料科学与工艺, 2014, 22(2): 30-35.
WANG Ji, SUO Lai-chun, FU Yi-li. Detecting the Mass Fraction of Ammonium Sulfate in Polishing Solution in Electrolysis and Plasma Polishing[J]. Materials Science and Technology, 2014, 22(2): 30-35.
- [9] KHAN R H U, YEROKHIN A L, LI X, et al. Influence of Current Density and Electrolyte Concentration on DC PEO Titania Coating[J]. Surface Engineering, 2014, 30: 102-108.
- [10] GALEDARI, KHOEI S M M. Effect of Pulse Frequency on Microstructure and Surface Properties of Ck45 Steel Treated by Plasma Electrolysis Method[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 551: 415-421.
- [11] GUI Han, TAN Si-cong, WANG Qian, et al. Spraying Printing of Liquid Metal Electronics on Various Clothes to Compose Wearable Functional Device[J]. Science China Technological Sciences, 2017, 60(2): 306-316.
- [12] 潘甘, 徐凯坪. 边角圆形化针布与纱线质量的关系[J]. 上海纺织科技, 2014, 42(2): 57-58.
PAN Gan, XU Kai-ping. Relationship between Card Clothing of Circular Edge and Yarn Quality[J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2014, 42(2): 57-58.
- [13] WANG Ji, SUO Lai-chun, GUAN Li-li, et al. Analytical Study on Mechanism of Electrolysis and Plasma Polishing[J]. Advanced Materials Research, 2012, 472-475: 350-353.
- [14] NEVYANTSEVA R R, GORBATKOV S A, PARFENOV E V, et al. The Influence of Vapor-Gaseous Envelope Behavior on Plasma Electrolytic Coating Removal [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 128: 30-37.
- [15] LEE W H, KIM J R, KIM S G, et al. Study of Parameters of the Plasma Electrolyte Polishing on the Stainless Steel[J]. Acta Universitatis Medicinalis Nanjing, 2009, 22(4): 1-15.
- [16] PARFENOV E V, FARRAKHOV R G, MUKAEVA V R, et al. Electric Field Effect on Surface Layer Removal during Electrolytic Plasma Polishing[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 307: 1329-1340.