

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170426003

气动喷砂工艺对 304 不锈钢表面润湿效应的影响

李 晶¹, 姜虹宇¹, 杜 锋², 刘利强¹, 赵世才¹

(1. 长春理工大学 机电工程学院, 长春 130022; 2. 装甲兵技术学院 机械工程系, 长春 130117)

摘 要: 针对仿生润湿性研究中喷砂工艺常作为获取粗糙表面方法被学者使用的现状, 为喷砂处理基底表面提供数据基础, 文中利用试验优化方法, 分析不同参数下喷砂工艺对 304 不锈钢表面润湿性能的影响。通过扫描电子显微镜 (SEM)、激光共聚焦显微镜 (LSCM) 和 X 射线衍射仪 (XRD) 分析喷砂表面的微观形态和化学成分, 使用接触角测试仪 (OCA) 测试分析喷砂试样表面润湿特性。结果表明: 在优化喷砂工艺参数下 (砂粒尺寸 180 μm ; 喷砂压力 0.6~0.65 MPa; 喷砂时间 1 min), 能够在 304 不锈钢基底表面获得粗糙结构, 使润湿性能由亲水性向疏水性发生转变, 获得静态接触角达到 120°, 动态滞后角降至 13.9°的特性。

关键词: 气动喷砂; 表面形貌; 接触角; 润湿效应

中图分类号: TG668

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)05-0095-07

Influences of Pneumatic Sandblasting Process on Wetting Effect of 304 Stainless Steel Surface

LI Jing¹, JIANG Hong-yu¹, DU Feng², LIU Li-qiang¹, ZHAO Shi-cai¹

(1. Institute of Electrical and Mechanical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022; 2. Department of Mechanical Engineering, Changchun Institute of Engineering, Changchun 130117)

Abstract: In the research of bionic wettability, as a method of obtaining rough surface, the sandblasting process is often used by scholars to provide data base of the sandblasted substrate surface. With the experiment optimization method, researchers analyzed the wettability influence of 304 stainless steel surface, which was sandblasted with different parameters. The microstructure and the chemical composition of the sandblasted surface were analyzed by scanning electron microscope (SEM), laser scanning confocal microscope (LSCM) and X-ray diffraction (XRD). The wettability of sample surface sandblasted was tested by contact angle system (OCA). The results show that under the best sandblasting process optimized parameters at the sand size of 180 μm , the sandblasting pressure of 0.6 MPa to 0.65 MPa, and the sandblasting time of 1 min, the rough structure can be obtained on the 304 stainless steel surface and the wettability surface is converted from hydrophilic to hydrophobic. The static contact angle attains 120° and the dynamic lag angle is reduced to 13.9°.

Keywords: pneumatic sandblasting; surface morphology; contact angle; wetting effect

收稿日期: 2017-04-26; 修回日期: 2017-09-08

网络出版日期: 2017-09-11 17:07; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170911.1707.032.html>

通讯作者: 李晶 (1975—), 女 (汉), 副教授, 博士; 研究方向: 金属功能表面; E-mail: jl2015edu@163.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51505039); 吉林省科技发展计划 (20150204018GX)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51505039) and Jilin Scientific and Technological Development Program (20150204018GX)

引文格式: 李晶, 姜虹宇, 杜锋, 等. 气动喷砂工艺对 304 不锈钢表面润湿效应的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(5): 95-101.

LI J, JIANG H Y, DU F, et al. Influences of pneumatic sandblasting process on wetting effect of 304 stainless steel surface[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(5): 95-101.

0 引言

喷砂工艺是利用喷砂设备,将细小的砂粒磨料在高压状态下,以高速喷射到工件表面,借助砂粒与表面的撞击,改变工件表面形貌,优化工件表面性能的处理工艺。早在19世纪70年代,Benjamin Chew Tilghman就进行了第一次喷砂试验。目前为止,国内外研究人员针对喷砂工艺对金属表面的粘附性^[1]、粗糙度^[2]、腐蚀性^[3]及工艺参数的影响^[4]和优化^[5]作了一定的研究,但对金属表面喷砂润湿效应影响的研究还略显不足。

润湿性是固体表面的特性之一,包括超亲水、亲水、疏水及超疏水等特性,材料表面具有疏水特性,有利于提高表面耐腐蚀性能、减少流动阻力和实现自清洁效应。进入21世纪后,随着仿生学的兴起,自然界生物适应自然环境所展现的优异疏水能力越来越受到广大学者的重视,并展开大量研究。例如,模仿荷叶特征制备超疏水表面。无论是对润湿性转换的理论研究^[6],还是利用改变表面性能的方法制备超疏水表面^[7]等研究,都取得了一定的成果。汪怀远^[8]等利用喷涂工艺,以NH₄HCO₃为造孔剂,碳纳米管(CNT_S)为纳米级纤维填料,制备出超双疏耐磨涂层。另外,杨钦^[9]等综述了超疏水自清洁涂层防结冰技术的研究进展。侯绍行^[10]等研究了荷叶在不同水深下的超疏水状态的寿命。近年来,长春理工大学课题组在这一方面也取得了一些进展^[11-13]。但在类似于表面润湿性能研究中,喷砂工艺多被研究者辅助应用于制备粗糙表面。于思荣^[14]等采用喷砂毛化处理、化学刻蚀和氟化处理复合在X52管线钢表面成功地制备了超疏水表面;ZHE Cui^[15]等利用喷砂—浸涂法制备超疏水表面;李晶^[16]等通过喷砂与电刷镀相结合方法,在碳钢表面制备出微纳双尺度复合结构的超疏水表面。但在润湿性研究方面,对喷砂工艺的单项研究还有待进一步开展。

文中以单纯的喷砂工艺作用于样品表面,借助试验优化方法,研究304不锈钢表面由亲水性向疏水性转变的最佳条件,并分析喷砂工艺对金属表面的形貌变化和界面润湿效应的作用影响,为喷砂处理改善不锈钢表面疏水性提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料选用

喷砂工艺选用样品材料为具有加工性能好、韧性高、耐腐蚀、无磁性等特点的S30408不锈钢(06Cr19Ni10),其化学成分(质量分数)为:C(0.080%)、Si(1.00%)、Mn(2.00%)、P(0.045%)、S(0.030%)、Ni(8.00%~11.00%)、Cr(18.00%~20.00%),其余为Fe。试样尺寸为15 mm×10 mm×4 mm。喷砂介质选用180 μm和120 μm两种不同尺寸的金刚砂。

1.2 样品制备

首先,将304不锈钢样品分4组,分别编为数字1、2、3、4号,依次用400、600、800、1 000、1 500和2 000型号砂纸打磨,使样品表面粗糙度R_z趋近于0.3 μm。按照L₄(2³)正交表^[17]设计优化试验方案。因素水平表如表1所示:

Table 1 Factor level table of optimization test			
Standard	Sand size (A) / μm	Sandblasting pressure (B) / MPa	Time (C) / min
1	180	0.6-0.65	1
2	120	0.7-0.75	2

除此之外,喷砂距离15 cm,角度为90°,环境温度20 ℃。标准正交试验方案如表2所示,按照优化试验方案,利用TB-6050A型喷砂机(浙江通宝公司,喷口直径:8 mm,功率:0.55 kW)对样品表面进行喷砂处理。

Table 2 Optimization of experimental plan			
Test number	Sand size (A) / μm	Sandblasting pressure (B) / MPa	Time (C) / min
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

1.3 试样表征

采用EM-30型电子显微镜(SEM)(韩国COXEM公司)及TCS-SP2型激光共聚焦显微镜(LSCM)(德国Leica公司)对喷砂后样品进行表面形貌观测。利用SV-3200型表面粗糙度测量仪(武汉信斯特公司)、D8-ADVANCE型X射线衍射仪(XRD)(德国布鲁克公司)依次对试验样品进行表征。使用接触角测量仪(OCA)(德国Date Physic 仪

器公司), 测量各个时间节点水滴在 1、2、3、4 号样品表面的静态接触角和动态接触角。

2 结果与讨论

2.1 表面静态润湿性

表 3 为水滴在样品表面 10 s 时的接触角数

值, 接触角从喷砂后 1 d 起迅速提升。但自喷砂后 2~6、8 d 左右, 接触角趋于一个相对变化率不高的亚稳定阶段。而 8~20 d 时, 接触角再一次有所提升, 但程度比前期提升区间要低。随后直到 60 d, 数值趋于稳定阶段。30~60 d 区间, 静态接触角近似平稳, 达到相对稳定程度。

表 3 各时段样品表面接触角测试结果

Table 3 Test results of surface contact angle at each period										(°)
Sample number	Original	1 d	2 d	4 d	6 d	8 d	10 d	20 d	30 d	60 d
1	75.7	53.3	84.2	84.1	87.3	92.9	111.6	127.2	120.2	120.0
2	78.5	54.7	90.9	92.5	89.5	100.9	111.7	117.8	113.7	112.4
3	77.2	17.7	68.4	77.5	90.0	91.7	109.2	119.8	114.7	112.0
4	76.3	22.9	76.4	78.9	80.5	101.2	111.6	110.9	109.2	111.7

2.2 表面动态润湿性

基于静态接触角的变化, 采用加减法分别对样品在喷砂前后的动态接触角进行测量, 如表 4 所示(水滴体积均为 4 μL)。其中, 前进角与后退角的差值代表了接触角的滞后性。

表中可以看出, 样品经喷砂处理后的接触角滞后性要比在喷砂工艺前略显降低, 而接触角滞后程度能够反映出液体在样品表面脱离的难易程度, 滞后性越明显, 则样品表面粘附力越强。

由于喷砂后的样品表面形貌属于复杂的粗糙表面, 根据 Cassie 模型^[18], 使得液滴到达样品表

面的同时, 部分空气被储存在粗糙结构的凹陷或沟槽中, 减小了固—液接触面积, 故表面的粘附程度略显减低。但其表面提供的粘附力可以克服水滴的重力和表面张力, 使得水滴粘附在样品表面不会掉下来, 这一特性归因于样品表面复杂的粗糙形貌, 在水滴润湿表面过程中, 坑凹处储存一定量的空气, 部分水滴也浸入到坑凹处, 在空气之上相继填满凹陷结构, 使表面疏水性得到改善, 并且仍然具有一定程度的粘附性。因此, 水滴在样品表面的润湿状态为 Wenzel 状态与 Cassie 状态的过渡态, 并且偏向于 Cassie 状态, 如图 1 所示。

表 4 样品表面动态接触角参数

Table 4 Parameters of the static contact angle on samples surface							(°)
Sample number	Before sandblasting			After sandblasting			
	Advancing angle	Receding angle	Contact angle hysteresis	Advancing angle	Receding angle	Contact angle hysteresis	
1	68.9	41.7	27.2	104.9	88.2	16.7	
2	70.2	42.9	27.3	106.7	90.6	16.1	
3	70.9	42.0	28.9	110.6	96.1	14.5	
4	71.5	42.2	29.3	104.8	90.9	13.9	

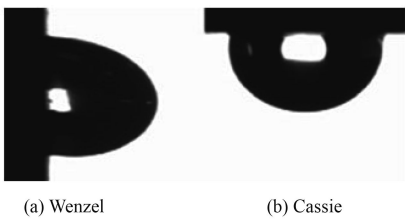


图 1 水滴在喷砂后样品表面的存在状态

Fig.1 Exist state of water droplet on the sample surface after sandblasting

2.3 表面形貌分析

图 2 为原始样品的静态接触角, 通过对比可以看出, 4 件样品的润湿性能相差不大, 误差可以忽略不计。

Bouzakis^[19]等指出, 在其他各项因素条件一定的情况下, 砂粒尺寸越大, 对表面的粗糙度影响也越大。如图 3 的 SEM 图像显示, 样品表面经喷砂处理后, 形成了以砂粒外部轮廓和砂粒对样品

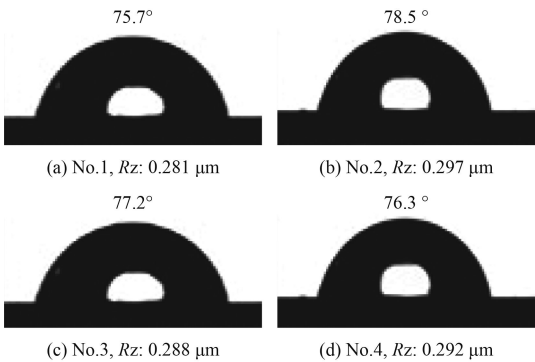


图 2 原始样品的表面形貌及接触角

Fig.2 Surface morphologies and contact angle of the original samples

表面切削后造成的塑性变形为主的多尺度复杂片状微观结构。对比 (a)(c) 与 (b)(d) 表面结构可以看出，样品 1 和样品 2 尺度略大，说明喷砂压力不同，样品表面的微观结构也有变化。

而通过图 4 激光共聚焦三维图像观察发现，试样表面形成微观形貌尺寸差异较大，从粗糙度测试结果也可以确认，且同样可以看出样品 1 与样品 2 要比样品 3 与样品 4 形貌尺寸更大，这一特征，与 Bouzakis 等提出的理论相符。这是因

为，在砂粒种类及尺寸一定的条件下，增大喷砂压力，会使砂粒对样品表面冲击力相继增强，进而对样品表面的形貌影响也会增大。

喷砂前后样品表面粗糙度对比如图 2 和图 3 Rz 数值所示。在变量 (喷砂压力和喷砂时间) 变化值相同的条件下，砂粒尺寸越大，对样品表面形貌的变化影响越大。

根据 Cassie-Baxter 方程^[19-20]:

$$\cos \theta_w = f_1 \cos \theta - f_2$$

(1)

可以得出:

$$f_2 = (1 - \cos \theta_w / \cos \theta) / (1 + 1 / \cos \theta)$$

(2)

在试验中，由于样品理想光滑表面并不存在，为了有效达到测试结果对比的目的，将 θ 值取各样品原始接触角的测量值。这样根据式 (2)，可以得到各样品在不同时间内，表面液滴与夹杂在固-液之间的空气所接触的面积比例。以各样品喷砂当日所得结果为基准点，将各样品数值以各自相应的等差形式放大, 得到:

$$f'_{2i} = f_{2i} + a_i$$

(3)

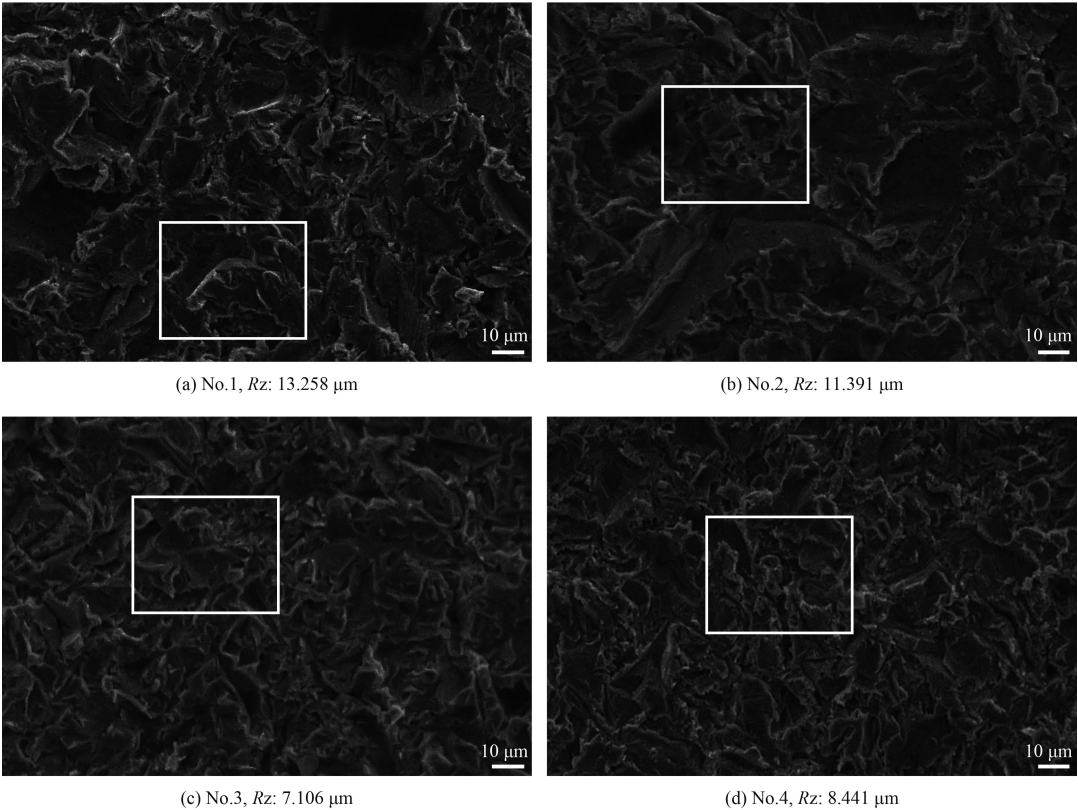


图 3 喷砂后各样品表面 SEM 形貌

Fig.3 SEM images of sample surface after sandblasting

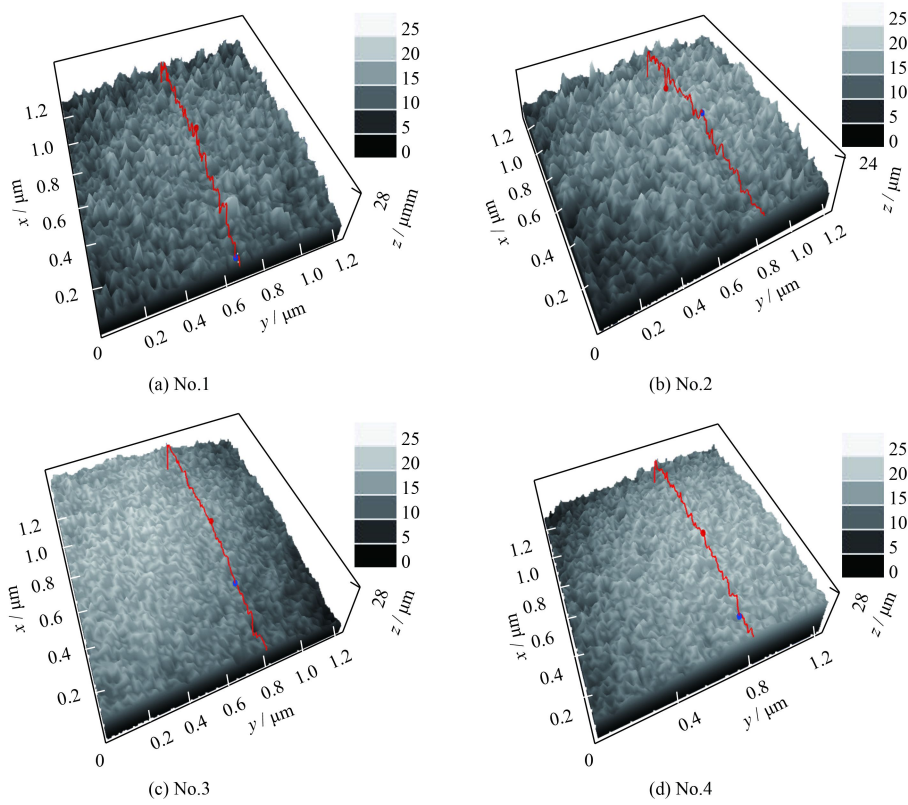


图 4 喷砂后各样品表面 LSCM 形貌

Fig.4 LSCM images of sample surface after sandblasting

(其中, $i=1、2、3、4$, $a_1=0.28$, $a_2=0.31$, $a_3=0.59$, $a_4=0.54$) 获得放大后的数值 f_2' 变化曲线, 如图 5 所示。

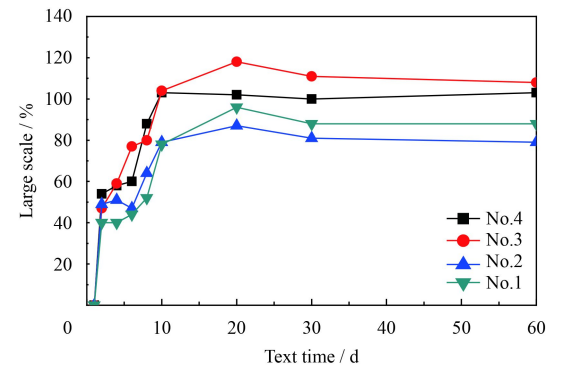


图 5 气-液接触面占比放大后的数值 (f_2') 变化曲线

Fig.5 Curves of large numerical value of gas-liquid contact area (f_2')

由 f_2' 的变化趋势, 可以直接反映出固—液接触面积在三相接触面中所占比例的变化, 从而可以推断样品表面经喷砂作用后, 不同时间段内表面形貌发生了微观变化。从图中 4 条曲线可以得出相应结论, 即 120 μm 砂粒喷射的样品要比由

180 μm 喷射的样品形貌变化的程度大, 进而可以推断出, 当样品表面经喷砂工艺处理后, 随着时间的推移, 表面形貌会出现微观的变化, 且砂粒尺寸越小, 其微观变化的程度越大。

2.4 表面成分分析

图 6 显示出了样品在喷砂前后两种不同尺寸砂粒喷砂后的 X 射线衍射 (XRD) 图谱。通过对比

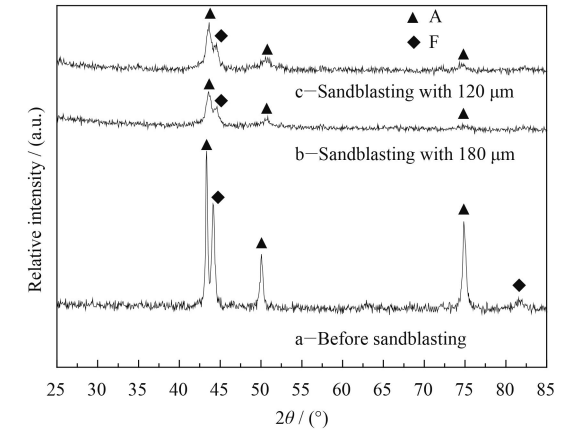


图 6 喷砂前后样品表面 XRD 图谱

Fig.6 XRD patterns of sample surface before and after sandblasting

可以看出,样品在喷砂前与喷砂后主衍射峰位置相近。对衍射峰的具体位置进行测量,其结果如表 5 所示。

表 5 XRD 图谱各衍射峰对应的 2θ 值
Table 5 Values of 2θ corresponding to the peaks in XRD patterns

Sample types	$2\theta / (^{\circ})$				
a	43.58	44.67	50.79	74.69	82.33
b	43.59	44.65	50.73	75.21	
c	43.65	44.61	50.79	74.97	

从 XRD 图谱看,喷砂试验前的样品 2θ 值为 43.58° 、 50.79° 、 74.69° 分别与奥氏体不锈钢标准衍射卡 (ICSD PDF No.33-0397) 相对应,衍射峰位置分别对应奥氏体 (A) 的 (111)、(200) 和 (220) 晶面,其余衍射峰为铁素体 (F) 的贡献。通过图谱中 (b)(c) 曲线与原始样品图谱对比分析,衍射峰的位置没有出现变化,但衍射峰由于应变和晶粒细化发生了宽化,从而说明文中润湿性的改善主要是表面组织的细化和应变等因素变化引起。

2.5 试验优化结果分析

按照试验优化方案及分析方法,以表面接触角最终达到 130° 为试验指标,以喷砂后 60 d 测试结果 (样品 1: 120.0° 、样品 2: 112.4° 、样品 3: 112.0° 、样品 4: 111.7°) 作为最终试验结果,进行试验优化分析,如表 6 所示。

表 6 试验优化分析与结果 Table 6 Analysis and results of experimental optimization				
Sample number	Sand size (A) / μm	Sand blasting pressure (B) / MPa	Time (C) / min	$y_i / \%$
1	1	1	1	92.3
2	1	2	2	86.5
3	2	1	2	86.2
4	2	2	1	85.9
y_{j1}	178.8	178.5	178.2	
y_{j2}	172.1	172.4	172.7	
$\bar{y}_{j1}$	89.4	89.25	89.1	
$\bar{y}_{j2}$	86.05	86.2	86.35	
R_j	3.35	3.05	2.75	
Optimization level	A_1	B_1	C_1	
Secondary factors		A, B, C		
Optimal combination		$A_1B_1C_1$		

参照试验指标与试验结果,取得 y_i (达到接触角数值指标百分比) 为 92.3%、86.5%、86.2%、85.9%,利用极差分析方法,获得均值 1 分别为 89.4%、89.25%、89.1%,均值 2 分别为 86.05%、86.2%、86.35%。由均值对比看出,最优水平为 A_1 、 B_1 、 C_1 。进而得到各因素极差值为 3.35、3.05、2.75,主次因素分别为:砂粒尺寸>喷砂压力>喷砂时间。即最优组合为: $A_1(180\text{ }\mu\text{m 金刚砂})B_1(\text{喷砂压力 } 0.6\sim 0.65\text{ MPa})C_1(\text{喷砂时间 } 1\text{ min})$ 。

3 结 论

(1) 直接喷砂方法能够改善 304 不锈钢表面润湿性能,使表面由亲水性能向疏水性能转变,可获得静态接触角达到 120° 、动态滞后角降至 13.9° 的疏水特性。

(2) 研究表面形貌特征和润湿特性发现,喷砂工艺作用于金属表面形成粗糙微观形貌,促进表面润湿性转换。

(3) 本试验优化获得的改善 304 不锈钢表面疏水性能的工艺参数为:砂粒尺寸 $180\text{ }\mu\text{m}$,喷砂压力 $0.6\sim 0.65\text{ MPa}$,喷砂时间 1 min。

参考文献

[1] RUDAWSKA A, DANCZAK I, MULLER M. The effect of sandblasting on surface properties for adhesion[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2016, 70(13): 176-190.

[2] 王金东,吕志利,李新伟,等. 油管外表面气动喷砂两相流场数值模拟[J]. 中国机械工程, 2011, 22(15): 1815-1818. WANG J D, LV Z L, LI X W, et al. Numerical simulation of two-phase flow field on outside blasting of tubing[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(15): 1815-1818 (in Chinese).

[3] MARTINELLI C S M. Co-Cr alloy: sandblasting and percentage variation in surface roughness[J]. Dental Materi-als, 2013, 29(1): 35-37.

[4] HORODEK P, ESEEV M K, KOBETS A G. Studies of stainless steel exposed to sandblasting[J]. Nukleonika, 2015, 60(4): 721-724.

[5] GARBATOV Y, PARUNOV J, KODVANJ J, et al. Experimental assessment of tensile strength of corroded steel specimens subjected to sandblast and sandpaper cleaning[J]. Marine Structures, 2016, 49(16): 18-30.

[6] 刘朋博,王嘉骏,冯连芳. 润湿性可切换的表面[J]. 材料工程, 2016, 44(12): 118-126.

- LIU P B, WANG J J, FENG L F. Surface with switchable wettability[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(12): 118-126 (in Chinese).
- [7] 晏忠钠, 车彦汇, 冯利邦. 超疏水铝合金表面的防覆冰和防粘附行为[J]. 材料工程, 2015, 43(9): 25-29.
- YAN Z N, CHE Y H, FENG L B. Anti-icing and anti-adhesion behavior of superhydrophobic aluminum alloy surface[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(9): 25-29 (in Chinese).
- [8] 汪怀远, 王恩群, 孟旸, 等. 超双疏耐磨 PPS 基涂层的制备与性能[J]. 材料工程, 2017, 45(1): 38-42.
- WANG H Y, WANG E Q, MENG Y, et al. Preparation and propertise of superamphiphobic wear-resistance PPS-based coating[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(1): 38-42 (in Chinese).
- [9] 杨钦, 罗莊竹, 谭生, 等. 超疏水自清洁涂层防结冰技术的研究进展[J]. 中国表面工程, 2016, 29(4): 10-22.
- YANG Q, LUO Z Z, TAN S, et al. Research progress in anti-icing techology of superhydrophobic self-cleaning coating[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(4): 10-22 (in Chinese).
- [10] 侯绍行, 王峰会, 黄建业, 等. 荷叶在水下的超疏水状态的使用寿命测试与分析[J]. 科学通报, 2016, 61(7): 735-739.
- HOU S X, WANG F H, HUANG J Y, et al. Lifetime test and analysis of superhydrophobicity when lotus leaves are underwater[J]. Science China Press, 2016, 61(7): 735-739 (in Chinese).
- [11] 弯艳玲, 张学蕊, 张留新, 等. 高速微铣削构建疏水性铝合金表面[J]. 中国表面工程, 2013, 26(5): 37-42.
- WAN Y L, ZHANG X R, ZHANG L X, et al. Hydrophobic aluminum alloy surface fabricated by high speed micro-milling technology[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(5): 37-42 (in Chinese).
- [12] 李晶, 赵言辉, 李红, 等. 激光表面织构铝基低粘附双疏表面[J]. 中国表面工程, 2016, 29(3): 80-86.
- LI J, ZHAO Y H, LI H, et al. Fabrication of amphiphobic surface on aluminum via laser surface texturing[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(3): 80-86 (in Chinese).
- [13] 李晶, 赵言辉, 于化东. 电刷镀—激光加工法制备耦合结构及复合特性研究[J]. 材料工程, 2016, 44(12): 28-34.
- LI J, ZHAO Y H, YU H D. Fabrication of coupling structure and composite properties by electro-brush plating and laser processing[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(12): 28-34 (in Chinese).
- [14] 于思荣, 刘家安, 刁伟. X52 管线钢仿生超疏水表面的制备[J]. 科学通报, 2014(3): 273-278.
- YU S R, LIU J A, DIAO W. Fabrication of bionic superhydrophobic surface on X52 pipeline steel[J]. Science China Press, 2014(3): 273-278 (in Chinese).
- [15] ZHE C, YIN L, WANG Q J. A facile dip-coating process for preparing highly durable superhydrophobic surface with multi-scale structures on paint films[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, 337(2): 531-536.
- [16] 李晶, 李红, 于化东, 等. 碳钢超疏水表面制备及其耐腐蚀性研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(23): 3241-3246.
- LI J, LI H, YU H D, et al. Research on preparation and corrosion resistance of superhydrophobic surface on carbon steels[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(23): 3241-3246 (in Chinese).
- [17] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 14-19.
- REN L Q. Test optimization design and analysis[M]. Beijing: Science press, 2003: 14-19(in Chines).
- [18] CASSLE A B D, BAXTERS. Wet ability of porous surfaces[J]. Translation of the Faraday Society, 1944, 40: 546-551.
- [19] BOUZAKIS K D, TSOUKNIDAS A, SKORDARIS G, et al. Optimization of wet or dry micro-blasting on PVD films by various A1203 grain sizes for improving the coated tools'cutting performance[J]. Tribology in Industry, 2011, 33(2): 49-56.
- [20] CASSLE A B D. Contact angles[J]. Discussions of the Faraday Society, 1948, 3: 11-16.

(责任编辑: 常青)