

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20161030001

# 基于生物修饰的304不锈钢表面抗菌性能

曹攀<sup>1</sup>, 杨膺(英)<sup>2</sup>, 袁成清<sup>1</sup>, 肖劲飞<sup>1</sup>, 白秀琴<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学 能源与动力工程学院, 武汉 430063; 2. 英国基尔大学 医药科技研究所, 英国 斯托克 ST4 7QB)

**摘要:** 为了研究生物修饰对材料表面抗菌性能的影响, 利用多巴胺及三种生物多肽修饰304不锈钢的表面, 利用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)和接触角测量仪研究修饰后的材料表面性质, 选用金黄色葡萄球菌(*S.aureus*)作为试验菌株研究样本表面抗菌性能, 并通过超景深三维显微系统初步研究了样本表面形貌对抗菌性能的影响。结果表明, 多巴胺和生物肽修饰后, 样本表面的湿润性发生了改变, 且都具有抗菌效果, 1号多肽抗菌效果最好, 多巴胺修饰样本的抗菌效果最差; 不同颗粒度砂纸、不同抛磨压力处理的样本表面会影响材料表面性能, 600号砂纸抛光的样本经生物修饰后抗菌效果优于2000号砂纸抛光的样本, 这个结论同样适用于开放环境中。

**关键词:** 生物膜; 抗菌; 吸附量

**中图分类号:** TG174.44

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-9289(2017)03-0001-07

## Antimicrobial Performance of 304 Stainless Steel Surface Using Biological Modification

CAO Pan<sup>1</sup>, YANG Ying<sup>2</sup>, YUAN Cheng-qing<sup>1</sup>, XIAO Jin-fei<sup>1</sup>, BAI Xiu-qin<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063; 2. Institute for Science and Technology in Medicine (ISTM), Keele University, Stoke-on-Trent ST4 7QB, UK)

**Abstract:** In order to study the effect of biological modification on the antibacterial properties, the surface of 304 stainless steel was modified with dopamine and three kinds of biological peptides. The surface properties of the modified materials were studied by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and contact angle measuring instrument. *S. aureus* was used as the experimental strain to study the antimicrobial properties of the samples, and the effects of sample morphology on the antibacterial properties were also studied by super depth 3D microscope. The results show that the wettability of samples treated by dopamine and peptides are changed, and all of them reveal antibacterial effect, polypeptide 1 has the best antibacterial effect, while the samples treated by dopamine show the worst antibacterial properties. Antibacterial properties of the material are related with polishing pressure and particle size sandpaper. Samples polished by 600# sandpaper show better antibacterial properties than those polished by 2000# sandpaper after biological modification. The above conclusion is also applicable to open environment.

**Keywords:** biofilm; antibacterial; adsorption capacity

收稿日期: 2016-10-30; 修回日期: 2017-04-15

网络出版日期: 2017-05-05 18:31; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170505.1831.026.html>

通讯作者: 袁成清(1976—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 船舶动力系统可靠性与绿色防污减阻; E-mail: ycq@whut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51375355); 湖北省自然科学基金(2015CFA127); 中央高校基本科研业务费(2016-YB-023)

**Fund:** Supported by National Natural Science Foundation of China (51375355), Natural Science Foundation of Hubei Province (2015CFA127) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (2016-YB-023)

引文格式: 曹攀, 杨膺, 袁成清, 等. 基于生物修饰的304不锈钢表面抗菌性能[J]. 中国表面工程, 2017, 30(3): 1-7.

CAO P, YANG Y, YUAN C Q, et al. Antimicrobial performance of 304 stainless steel surface using biological modification[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(3): 1-7.

## 0 引言

污损生物存在于多种环境中,影响生活和生产中的多种行业,包括医疗、食品、航运等<sup>[1-2]</sup>。这些污损生物吸附在材料表面后,会分泌黏性蛋白、胞外多糖等物质,这些物质会腐蚀表面材料,改变其表面理化性质,影响材料的品质,降低其使用的可靠性<sup>[3-5]</sup>。

基于表面改性的物理防污方法是一种绿色生物防污方法,可以在不污染周围环境的前提下起到防污减阻的效果<sup>[6-7]</sup>。污损生物附着的最初阶段是细菌和真菌的粘附<sup>[8]</sup>,因此研究微生物与表面的反应是非常必要而有效的。生物肽可以与金属以一种全新的化学形式与不锈钢自发地发生了反应,生成一种低表面能的生物有机金属物质<sup>[9]</sup>,这种物质不会损害周围环境,是一种环境友好型材料。影响反应的因素有温度、pH值、搅拌速度和多肽的浓度等<sup>[10]</sup>,控制好反应条件有利于增大反应的量。多巴胺是一种常见的耦合剂,能与很多固体材料表面发生化学反应,增大表面改性剂的作用效果<sup>[11-13]</sup>,并且具有一定的抗菌能力<sup>[14]</sup>,虽然多巴胺在材料表面超强附着的作用机理还有待于进一步的研究,但已有研究表明,多巴胺对基体材料表面的附着行为来源于多巴胺的邻苯二酚和氨基官能团,这种结构可以和有机-无机表面建立共价和非共价的相互作用,从而使聚合多巴胺交联层强力附着在材料表面上<sup>[15]</sup>,因此,多巴胺常常作为连接剂对材料表面改性。Davis<sup>[16-18]</sup>等人利用绿脓假单胞杆菌分泌受体结合蛋白与304不锈钢反应得到一种新型生物有机材料,推测出这种反应是结合域中二硫键和铁共用电子的结果,经分析发现新材料的粘附力降低,进而降低污损生物的粘附。大环寡肽的分子中均包括六个保守性的半胱氨酸残基,它们之间形成3个分子内二硫键,形成特征的环半胱氨酸结,部分具有抗菌作用,且可结合于一些材料的表面,起到抗菌效果<sup>[19]</sup>。Yang<sup>[20]</sup>等人从枯草芽孢杆菌膜蛋白提取疏水性蛋白,将其嵌入大肠杆菌质粒上,通过转录和复制获得了疏水性强的蛋白,任晓燕<sup>[21]</sup>将其与304不锈钢反应可以获得一种疏水性增大的有机金属。这些成果着重于抗菌肽的分析与制备,没有对抗菌性进行抗菌性能分析。

文中介绍了一种新型抗菌材料制备方法,利

用多巴胺作为耦合剂使将多肽牢牢固定在样本表面;分析材料表面特征,并开展定量细菌粘附试验,初步分析了表面形貌对细菌粘附的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

304不锈钢(退火处理,  $\Phi 10\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ , 合金元素质量分数如下: 0.08% C、1% Si、18%~20% Cr、2% Mn、8%~11% Ni、0.035% P、0.030% S及极少量的N); 1号多肽序列ACTSNADNKYLPKTCQT(简称P1, 含C—C二硫键, 淘普生物科技有限公司); 2号多肽ACTFFAFFFYLPFTCF(简称P2, 含C—C二硫键, 三羟甲基氨基甲烷); 3号多肽(简称P3, 茎科植物提取分离产物); 金黄色葡萄球菌(基尔大学医学院提供); 大肠杆菌(基尔大学医学院提供); 多巴胺(Sigma); 结晶紫(0.1%, Sigma); 醋酸(30%, Sigma); 砂纸(3M); 三羟甲基氨基甲烷溶液(Tris溶液); 胰酶大豆肉汤(TSB培养基); 96孔细胞培养板; 24孔细菌培养板及24孔细胞培养板。

### 1.2 试验方法

依次用颗粒度为120、240、400、600、800、1 200和2 000号的砂纸手动抛磨304不锈钢至表面光洁,洗涤剂清洗干净后浸泡在70%乙醇溶液中15 min,然后自来水清洗3次,用丙酮浸泡2 min,取出冲洗后空气中晾干,放入24孔细胞培养板中。每个孔里加入20  $\mu\text{g/mL}$ 的多巴胺溶液1 mL,室温下在摇床上缓慢摇晃(60 r/min)浸泡12 h后取出不锈钢样本,清洗后分别加入1 mL、20  $\mu\text{g/mL}$  (pH=8.4的Tris溶剂)的P1, P2或P3。室温下在摇床上缓慢摇晃(60 r/min)浸泡24 h后取出不锈钢样本,清洗后在空气中晾干;

选取常见的革兰氏阴性菌大肠杆菌和常见的革兰氏阳性菌金黄色葡萄球菌做菌株粘附试验确定合适菌株。将未经处理的304不锈钢分别浸泡在金黄色葡萄球菌、大肠杆菌中16 h,清洗后用结晶紫溶液染色15 min,晾干后用CEICA-L2反射光学显微镜观察样本表面生物膜的情况,根据生物膜的量确定目的细菌。

确定菌株后,挑取单克隆菌株放入TSB培养基,将培养基培养在37  $^{\circ}\text{C}$ 摇床中培养,并伴有慢速摇晃。16 h后,按1:100稀释菌液,将稀释后

的菌液搅拌均匀后加入处理前后的样本中(24孔细菌培养板, 1 mL/孔)。密封后在37 ℃摇床中培养24 h, 然后, 清洗样本, 并用结晶紫对样本表面染色15 min, 取出样本, 用清水清洗染色后的样本, 直至最后一次清洗液无明显颜色。在超净台中将样本晾干, 用30%的醋酸溶液浸泡晾干后的样本15 min, 收集洗涤液, 将洗涤液滴入96孔培养板(200  $\mu$ L/孔), 用BioTek®分光光度计获得所测溶液的光密度(OD)值[OD值: 表面经菌液繁殖24 h后, 结晶紫(Crystal violet)染色, 醋酸清洗后测量光OD值, OD值越高, 表明醋酸洗掉生物膜的量越多, 也就说明菌液在材料表面生成越多生物膜]。

选用抗菌性能最好的多肽, 配置成20  $\mu$ g/mL溶液。用颗粒度为600号砂纸抛磨304不锈钢样本(抛磨压力约20 N), 颗粒度2 000号砂纸抛磨时采用不同压力(约20 N的压力记作2000#f, 约10 N的压力记作2000#c)。然后先后用20  $\mu$ g/mL的多巴胺和1号多肽浸泡抛磨后的样本。待样本晾干后, 放入24孔细菌培养板中, 每孔分别加入1 mL的TSB培养液和目的菌液, 37 ℃环境下非无菌培养24 h。清洗染色后用醋酸洗脱, 读取洗脱液的OD值。

利用傅里叶变换红外光谱仪(NICOLET Is50)检测处理前后样本表面的化学成分, 测量时红外光谱仪的扫描次数为128次, 分辨率为4.0  $\text{cm}^{-1}$ , 选择ATR模式, 每个样本表面量取3点。

Biolin接触角测量仪采用了OneAttension测量监控软件, 检测处理前后样本表面的接触角的变化, 每滴液滴体积为2  $\mu$ L, 每个样本表面量取5点。

利用电子扫描显微镜(TM3000)和VHX-2000超景深三维显微系统观察样本表面形貌, 每组4个样本。采用单因素方差分析法(One-way ANOVA)对试验数据的差异性进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 红外光谱分析

图1为表面处理后样本的红外光谱。可以发现, 3 300~3 500  $\text{cm}^{-1}$ 处的峰证明存在 $-\text{NH}_2$ 、 $-\text{NH}$ 及 $-\text{OH}$ 等官能团, 2 800~3 000  $\text{cm}^{-1}$ 处的两个峰可以说明样本表面存在烷基, 1 717~1 777  $\text{cm}^{-1}$ 处的峰代表对称或非对称的 $\text{C}=\text{O}$ 振动, 1 460  $\text{cm}^{-1}$ 处的峰为 $-\text{CH}$ 的弯曲振动, 而1 050~1 085  $\text{cm}^{-1}$

处的峰为 $-\text{CO}$ 的伸缩振动, 这些官能团的出现证明多巴胺附着在不锈钢的表面上<sup>[2]</sup>, 而 $\text{C}=\text{O}$ 的出现证明多巴胺自身发生了聚合和氧化。在上述3 300~3 500  $\text{cm}^{-1}$ 及2 800~3 000  $\text{cm}^{-1}$ 处的两个峰的基础上, 1 690  $\text{cm}^{-1}$ 和1 612  $\text{cm}^{-1}$ 附近峰为 $\beta$ -重叠对称或非对称 $\text{C}=\text{O}$ 振动(Amide I), 1 480~1 575  $\text{cm}^{-1}$ 为CN伸缩振动或NH弯曲振动(Amide II), 1 250~1 410  $\text{cm}^{-1}$ 为CN伸缩振动或NH弯曲振动(Amide III)<sup>[23]</sup>, 而1 050~1 085  $\text{cm}^{-1}$ 处的峰为 $-\text{CO}$ 的伸缩振动, 这些官能团的出现证明3种多肽都出现在了改性后的样本上, 且多肽化学成分与多巴胺相似, 但是位置发生了偏移, 特别是1 200~1 400  $\text{cm}^{-1}$ 区域, 这是由表面含有有机硫化物造成的<sup>[24]</sup>。

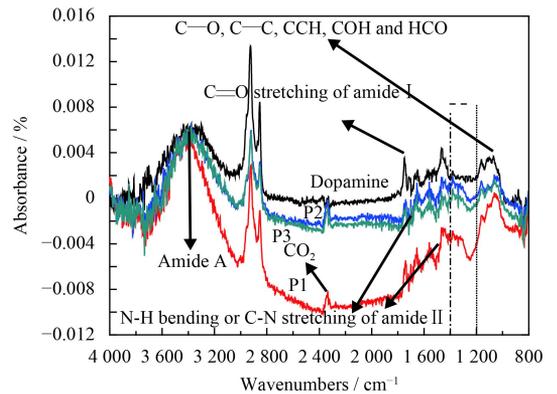


图1 表面处理后样本的红外光谱

Fig.1 FTIR of samples after modification

### 2.2 接触角

用去离子水作为滴定液测量处理前后样本表面的接触角, 如图2所示。由图2可知, 多巴胺处理后, 304不锈钢样本表面接触角约为36°, 相对于原始样本明显降低, 而用P1, P2和P3处理所得样本后发现, 样本表面接触角得到了不同程度的提高, 分别约为48°、53°和55°, 这是因为多巴胺是一种亲水性强的化学耦合剂, 原始304不锈钢经过多巴胺处理后, 表面附有一层氧化聚合后的多巴胺, 这层多巴胺降低了样本表面接触角。P1, P2和P3处理后, 多巴胺的自由端与多肽的部分残基发生耦合, 这样使得样本表面接触角的值有所增加, 但是多肽疏水性不强, 因此, 接触角的值没有得到较大提升。

通过分析处理前后样本表面的红外光谱和接触角可以发现: 处理后的样本表面性能发生了改变。表面化学成分随着改性化学材料的添加而发

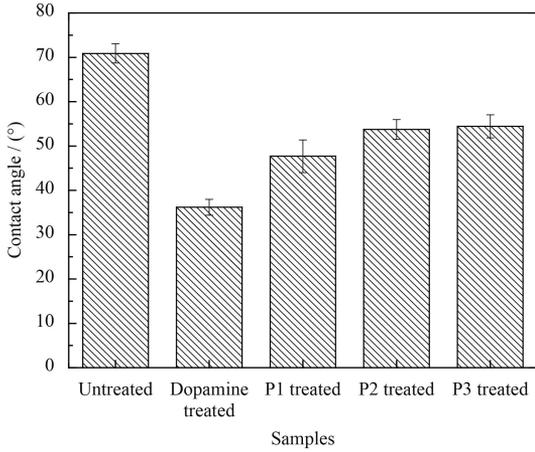


图2 原始样本与生物处理后样本的接触角

Fig.2 Contact angles of original and biological treated samples

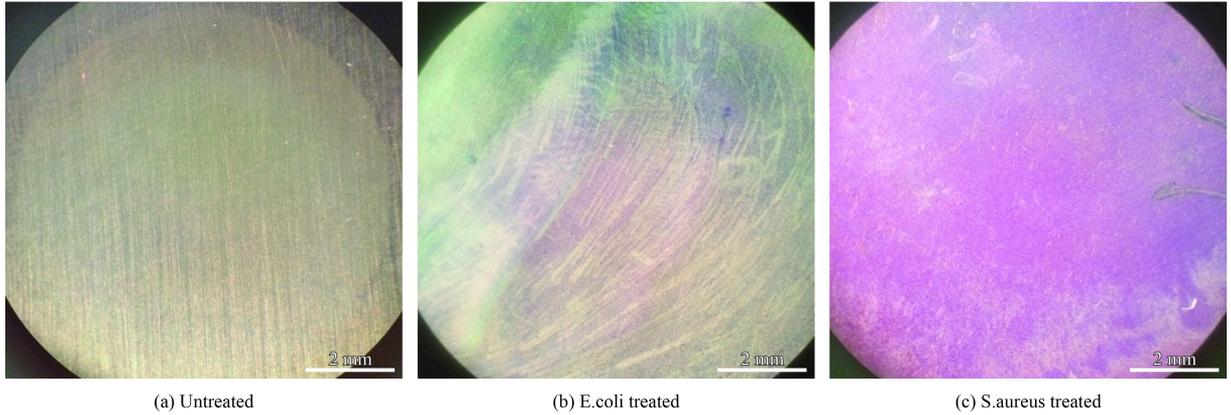


图3 细菌处理后的304不锈钢样本的光学图像

Fig.3 Images of 304 stainless steel after bacterial treatment

中利用金黄色葡萄球菌粘附样本试验来研究表面生物修饰降低材料表面细菌粘附的能力。

金黄色葡萄球菌粘附试验如图4所示,图4(a)(b)分别为菌液浸泡及样本染色图。由图4(a)可以发现,组1中的溶液依然清澈,组2~6则相对浑浊,这说明TSB培养液并未被菌液污染。图4(b)中组1的样本表面没有明显的颜色,组2~6则可以看出有紫色覆盖,组2和组3的颜色较深,组4~6颜色较浅,这说明经过菌液浸泡后,组2~6的样本表面产生代谢产物,为细菌附着提供基体材料,这些物质经过染色后出现紫色,且与颜色的深度成正比例关系。图5为样本表面洗脱液的光密度。由图4(b)和图5可以看出,未处理的样本表面很容易被细菌吸附,产生大量的生物膜,结晶紫染色后表面颜色最深,加入多巴胺后细菌的吸附量略微降低,但降低量较少,这说明多巴胺有一

生改变,检测出多巴胺/多肽的红外光谱;而表面接触角也因此而发生了不同程度的改变。

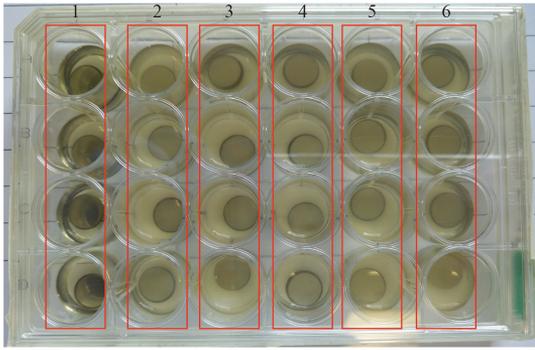
### 2.3 抗菌性能

细菌及微生物粘附是生物污损的初级阶段,细菌的数量与其产生的生物膜量成正相关关系,研究样本表面生物膜量可以得出细菌的吸附量。样本表面生物膜如图3所示。

由图3可以看出,大肠杆菌和金黄色葡萄球菌浸泡后的样本表面形成了一层生物膜,颜色越深说明生物膜量越大,比较后可知金黄色葡萄球菌在不锈钢表面的成膜能力远大于大肠杆菌,在研究材料抗菌性能方面有着较大的优势,因此,文

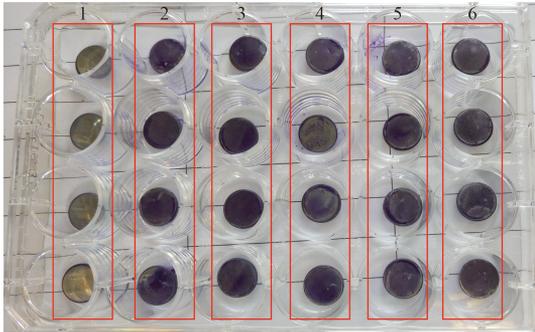
定的抗菌防污效果,但其能力不强,与前人结论相对应<sup>[18]</sup>。经过3种多肽处理后,样本表面细菌粘附量及生物膜生成量有了明显的降低,1号多肽的效果最好,2号肽次之,3号肽最差。这可能与多肽的构象及组成多肽的氨基酸种类有关,在1号肽中,丝氨酸(S)和苏氨酸(T)的含量最高,有利于结合耦合剂,得到最好的抗菌效果。

由图4(b)可以看出,同一组样本经过相同的处理后,样本表面颜色的深度也是有差别的。试验中难保证所有样本表面的纹理一致,所以,得到的同一批表面形貌不可能完全一致。样本表面的抗菌性除了与样本表面的物质相关外,还会受到表面形貌的影响。为了研究样本抛磨时受到抛磨压力及颗粒度的影响,在不同抛磨压力采用颗粒度的砂纸抛磨304不锈钢样本。样本经多巴胺和1号多肽先后处理后,分别对它们做细菌粘附试



1-Dopamine+TSB; 2-Dopamine+Bacteria; 3-Untreated+Bacteria; 4-P1+Bacteria; 5-P2+Bacteria; 6-P3+Bacteria

(a) Samples immersed in bacteria solution for 16 h



1-Dopamine+TSB; 2-Dopamine+SA; 3-Untreated+SA; 4-P1+SA; 5-P2+SA; 6-P3+SA

(b) Stained samples

图4 金黄色葡萄球菌粘附试验

Fig.4 Attachment assay of *S.aureus*

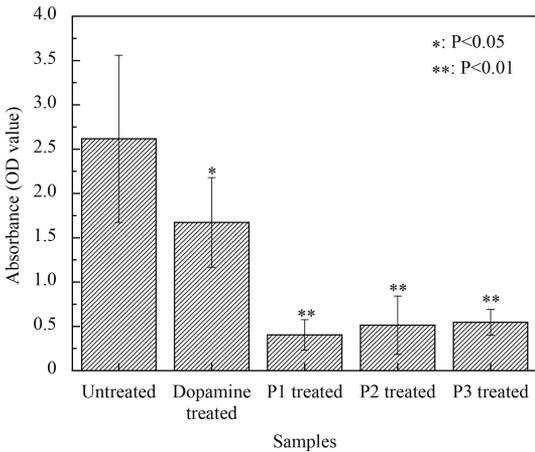
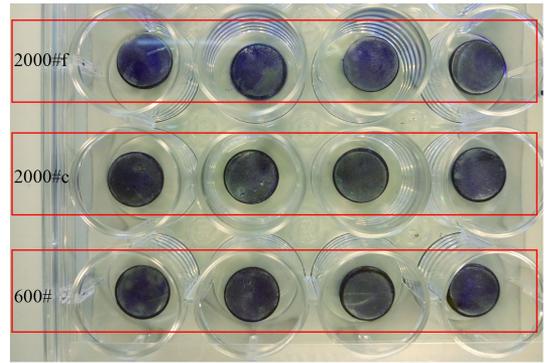


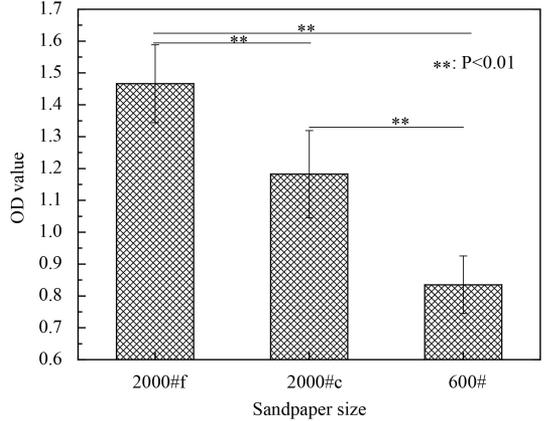
图5 醋酸洗脱液的光密度

Fig.5 OD value of acetic acid eluent

验。结晶紫染色后得到如图6(a)所示的样本染色图, 可看出样本间无明显的差异, 醋酸洗脱并用酶标仪读数后可知(见图6(b)), 对于颗粒度2000号砂纸抛磨的样本, 压力较大抛磨均匀的样本表面相对于压力较小抛磨相对不均匀的样本表面更易被细菌粘附, 而颗粒度600号抛磨的样本表面细菌



(a) Image of stained samples



(b) Plate reader readings after eluting using acetic acid

图6 抛磨压力和砂纸颗粒度对样本表面抗菌性的影响

Fig.6 Effect of polishing pressure and sand particle size on antibacterial properties of sample surface

吸附能力比颗粒度2000号抛磨的样本表面小, 这是因为材料的表面纹理结构与抗菌性能有很大的关系<sup>[25]</sup>, 较为粗糙的表面不仅可以为生物修饰剂提供更多的附着位点, 提高材料表面修饰剂的含量, 还可以由自身纹理大小影响特定尺寸的细菌的附着, 有助于提高材料的抗菌性。

海洋环境是一种开放环境, 不只含有一种细菌。因此, 将TSB培养液放置于大气环境中, 使培养液被环境中的多种细菌污染, 模仿复杂的多细菌环境, 研究在复杂环境中表面形貌对处理后样本表面抗菌性能的影响。开放环境中2000号和600号的砂纸抛磨后改性表面的染色洗脱液的光密度如图7所示。经颗粒度600#的砂纸抛磨后与1号多肽反应, 所得样本的抗菌性比颗粒度2000#的砂纸抛磨后与1号肽反应所得的样本的抗菌性好。

由超景深三维显微系统所得形貌(图8)可以看出, 600号的砂纸抛磨后样本纹理的高度明显高于2000号的砂纸抛磨后样本, 表面粗糙度分别为(5.607±0.532) μm, (4.577±0.896) μm。颗粒度

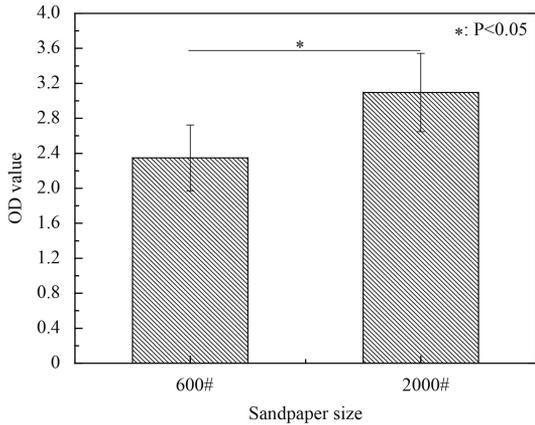


图7 开放环境中不同砂纸处理的样本表面洗涤液的光密度

Fig.7 OD value of the wash solution on the surface of the sample treated by different sandpaper in an open environment

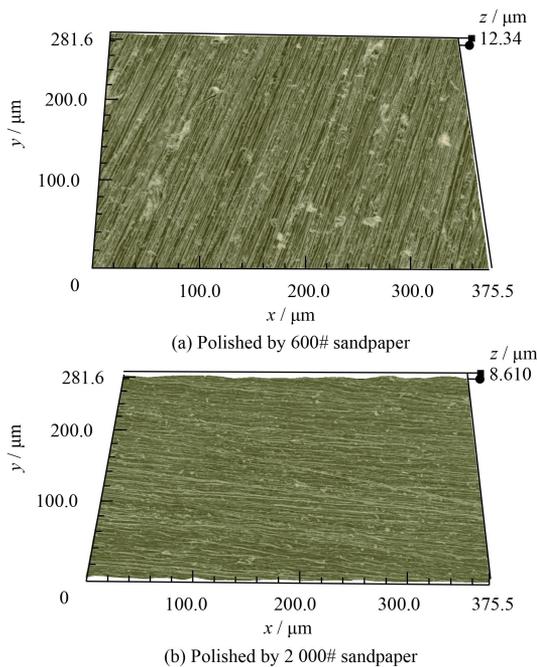


图8 不同砂纸处理的样本超景深三维显微形貌

Fig.8 Super depth 3D morphologies of samples treated by different sandpaper

600号的砂纸处理后表面的纹理对自然环境中细菌的抗性比2000号的砂纸处理后表面好。这可能是由于在表面粗糙度相近的情况下,粗糙的表面为其本身与多巴胺及多肽的结合提供了更多的附着面积,提高了多巴胺及多肽的结合效率,较多的多肽附着在样本表面后可以减少环境中细菌的附着,以达到降低表面污损的效果。

### 3 结论

(1) 多巴胺通过螯合作用可以在304不锈钢表面形成一层膜,且该多巴胺膜在水环境下可以作

为连接剂与多肽偶联,提高其连接在不锈钢的表面的结合力和结合效果。

(2) 比较多巴胺及三种多肽改性后的样本表面细菌吸附能力,结果表明均可以降低细菌吸附,其中1号肽效果最好,2号肽次之,3号肽再次之,多巴胺最差。

(3) 表面形貌会影响材料表面细菌的吸附能力,颗粒度600号砂纸抛磨后处理的样本比颗粒度2000号砂纸抛磨后处理的样本抗菌能力强。

### 参考文献

- [1] TRENTIN I, ROMAIRONNE V, MARCENARO G, et al. Quick test methods for marine antifouling paint[J]. *Progress in Organic Coating*, 2001, 42(1): 15-19.
- [2] 蔺存国. 海洋污损生物惰性附着材料的设计与构筑[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.  
LIN C G. Design and preparation of inert materials for marine fouling organisms attachment[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (in Chinese).
- [3] 钱斯文. 低表面能及仿生表面微结构防污技术[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.  
QIAN S W. Antifouling technology of low surface energy and bio-inspired microstructure[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008 (in Chinese).
- [4] PHILLI P M. Biologically inspired materials synthesis for anti-fouling purpose[R]. Fiskebackskil: International workshop, 2003: 3-4.
- [5] YEBRA D M, KIL L S, JOHANSEN K D. Antifouling technology-past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2004, 50(2): 75-104.
- [6] 麻春英, 王雪君, 曹攀, 等. 防生物污损生物肽改性金属材料的研究现状[J]. *机械工程材料*, 2014, 38(3): 1-4.  
MA C Y, WANG X J, CAO P, et al. Research status of anti-biofouling metal material modified by peptides[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2014, 38(3): 1-4 (in Chinese).
- [7] 赵海洲. 海洋监测仪器用防污技术的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.  
ZHAO H Z. Study on antifouling technology for marine monitoring instruments[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006 (in Chinese).
- [8] CHAMP M A. The status of the treaty to ban TBT in marine antifouling panits and alternatives[C]. *The Proceedings of the 24th UJNR (US/Japan) Marine Facilities Panel Meeting*, Hawaii.
- [9] WONG W Y, CAMPBELL A P, MCINNEN C, et al. Structure-function analysis of the adherence binding domain on

- the pilin of *Pseudomonas aeruginosa* strains PAK and KB7[J]. *Biochemistry*, 1995, 34(40): 12963-12972.
- [10] STANLEY P M. Factors affecting the irreversible attachment of *Pseudomonas aeruginosa* to stainless steel[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 1983, 29(11): 1493-1501.
- [11] LEE H, DELLATORE S M, MILLER W M, et al. Mussel-inspired surface chemistry for multifunctional coatings[J]. *Science*, 2007, 318(5849): 426-430.
- [12] LIU T, PAN C, HOU Y, et al. Tailoring of dopamine-coated stainless steel with Cu(II)-loaded multifunctional nanoparticles for improving the biocompatibility[C]. 10th World Biomaterials Congress, Montréal, Canada, 17-22, May, 2016.
- [13] KIM H W, MCCLOSKEY B D, CHOI T H, et al. Oxygen concentration control of dopamine-induced high uniformity surface coating chemistry[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(2): 233-238.
- [14] KARKHANECHI H, TAKAGI R, MATSUYAMA H. Biofouling resistance of reverse osmosis membrane modified with polydopamine[J]. *Desalination*, 2014, 336(1): 87-96.
- [15] LEE H, SCHERER N F, MESSERSMITH P B. Single-molecule mechanics of mussel adhesion[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(35): 12999-13003.
- [16] DAVIS E M, LI D Y, IRVIN R T. A peptide-stainless steel reaction that yields a new bioorganic-metal state of matter[J]. *Biomaterials*, 2011, 32(23): 5311-5319.
- [17] DAVIS E M, LI D Y, SHAHROOEI M. Evidence of extensive diversity in bacterial adherence mechanisms that exploit unanticipated stainless steel surface structural complexity for biofilm formation[J]. *Acta Biomaterialia*, 2013, 9(4): 6236-6244.
- [18] DAVIS E M. Generating bio-organic metal surfaces with altered surface properties using the type IV pilus of *Pseudomonas aeruginosa*[D]. Edmonton: University of Alberta, 2013.
- [19] LYONS S A, O'NEAL J, SONTHEIMER H. Chlorotoxin, a scorpion-derived peptide, specifically binds to gliomas and tumors of neuroectodermal origin[J]. *Glia*, 2002, 39(2): 162-173.
- [20] YANG C, XIE H, ZHANG J K. Anchoring proteins to *Escherichia coli* cell membranes using hydrophobic anchors derived from a *Bacillus subtilis* integral membrane protein[J]. *Protein Expression and Purification*, 2012, 85(1): 60-65.
- [21] 任晓燕. 用于船体防污减阻的低表面能生物肽的设计及性能分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- REN X Y. Design and performance analysis of biofilm with low surface energy for hull anti fouling and drag reduction[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015 (in Chinese).
- [22] 翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- WENG S F. Fourier transform infrared spectroscopy analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012 (in Chinese).
- [23] CARBONARO M, NUCARA A. Secondary structure of food proteins by Fourier transform spectroscopy in the mid-infrared region[J]. *Amino Acids*, 2010, 38(3): 679-690.
- [24] COATES J. Interpretation of infrared spectra, a practical approach[C]. Coates Consulting, Newtown, USA, 15 SEP, 2006.
- [25] PERNI S, PROKOPOVICH P. Micropatterning with conical features can control bacterial adhesion on silicone[J]. *Soft Matter*, 2012, 9(9): 1844-1851.

(责任编辑: 王文宇)