

生物肽不同结构肽链对生物修饰金属材料疏水性能的影响

麻春英^{1,2}, 袁成清¹, 肖劲飞¹

(1. 武汉理工大学, 武汉 430063; 2. 华东交通大学, 南昌 330013)

摘要: **目的** 通过调整与金属反应的肽的肽链结构, 提高反应后金属表面的疏水性。**方法** 取同种肽两种不同结构 (L-型和 D-型反序结构) 分别与金属不锈钢作用, 通过 CA 测定材料疏水性的变化, 采用 FTIR 显示有机肽在材料表面的附着情况。分别在 L-型和 D-型肽上接入疏水基团十二烷酸, 获得两种新的不同结构的肽: L'-型肽和 D'-型肽。两种肽分别与金属不锈钢作用, 利用 FTIR 和 CA 研究疏水基团的接入及其对材料疏水性的影响情况。**结果** 与金属不锈钢作用之后, D 型肽反序结构修饰的不锈钢表面接触角比 L 型肽修饰有所提高, 由原来的 39.7° 变成 80.1°。接入疏水基团后的肽在 PBS 中的溶解度减小, 用有机溶剂初溶之后再溶入 PBS 中, 生物肽全部溶解。该肽溶液与金属材料作用之后, D'-型肽比 L'-型肽作用的表面接触角更高, 分别为 89.4° 和 87.4°, 前者作用效果更好。**结论** 通过调整生物肽肽链的结构, 可以改变改性金属材料表面的疏水特性, 为进一步通过调整金属反应肽的肽链结构和疏水基团的种类得到具有良好疏水性能金属材料提供了有力的数据支撑。

关键词: 生物肽; 肽链结构; 手性异构; 表面改性; 疏水性; 接触角

中图分类号: U661.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)01-0141-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.01.018

Effects of Peptides with Different Peptides Chains on the Hydrophobicity of the Peptide Modified Metal

MA Chun-ying^{1,2}, YUAN Cheng-qing¹, XIAO Jin-fei¹

(1. Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

ABSTRACT: The work aims to method of improving improve the hydrophobicity of metal surface after reaction was studied by adjusting the peptide chain structure of peptides reacting with metal. It took the same peptide of tTwo different structures of the same peptide were adopted: L-type and D-type antitone reacting reacted respectively with stainless steel and, the change of metal material's hydrophobicity was determined through CA. FTIR showed the existence of organic peptide on the surface of the material. Hydrophobic group dodecanoic acid was added to L-type peptide and D-type peptide respectively to obtain two new peptides with different structures: L'-type peptide and D'-type antitone peptide. Two peptides respectively reacted with the stainless steel. FTIR and CA were used to study the connection of hydrophobic groups and the effect on the hydrophobicity of

收稿日期: 2018-05-05; 修订日期: 2018-06-19

Received: 2018-05-05; **Revised:** 2018-06-19

基金项目: 国家自然科学基金 (51375355); 江西省自然科学基金 (20161BAB206162); 江西省载运工具与装备重点实验室资助项目 (14JD02)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51375355), the Province Natural Science Foundation of Jiangxi(20161BAB206162), Jiangxi Provincial Key Laboratory of Carriage Tools and Equipment (14JD02)

作者简介: 麻春英 (1977—), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为表面工程。

Biography: MA Chun-ying (1977—), Female, Doctor, Lecturer, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 袁成清 (1976—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为表面工程及摩擦磨损。邮箱: ycq@whut.edu.cn

Corresponding author: YUAN Cheng-qing (1976—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface engineering, frictional wear. E-mail: ycq@whut.edu.cn

materials. After the action, the surface contact angle of the stainless steel surface modified by the D-type antitone peptide was higher than that of the stainless steel surface modified by the L-type peptide, which was changed from 39.7 degree to 80.1 degree. After the insertion of the hydrophobic group, the solubility of the peptide in the PBS decreased. By the initial solution in the organic solvent, the peptide dissolved completely in the PBS. After the action of the D'-type peptide solution with the metal material, the surface had a higher surface contact angle than that of L'-type peptide, which was 89.4 degree and 87.4 degree respectively. The effect of former was better. By adjusting the structure of the peptide chain of biopeptide, the hydrophobic properties of the modified metal surface can be changed, thus providing a powerful data support for preparing a metal materials with good hydrophobic properties by adjusting the peptide chain structure and the hydrophobic group of the metal reaction peptide.

KEY WORDS: peptide; peptide chain structure; Chiral isomers; surface modification; hydrophobicity; contact angle

生物修饰金属材料的出现由来已久,主要被应用在医疗领域来替代人体的某些器官或者组织。但是,受科学技术和材料本身发展条件的限制,目前比较成熟的应用领域主要是牙科和骨科的植入体。随着现代制造技术的发展,金属材料的应用范围越来越广,性能要求也越来越高。不仅仅是医疗领域,在液体环境下长期工作的金属材料也容易发生腐蚀。这种现象一旦发生,就会破坏金属的强度,缩短使用寿命,增加成本,带来安全隐患,而这种腐蚀现象往往与微生物的作用密不可分。为了解决金属因为微生物作用而导致的腐蚀问题,人们进行了大量的研究。研究发现,影响材料表面防生物污损性能的因素是多方面的,表面能、表面粗糙度、极性等都与之息息相关。防污方法的研究先后经历了机械法、涂层法、改性法等几个阶段。这些方法因耗时、破坏生态和成本高等原因,发展受限,也不能很好地解决生物污损的问题。人们发现,某些生物活性物质,包括某些生物肽,能够对生物的附着起到阻止和抑制的作用^[1-4]。这些抗微生物的肽是包括人类在内的大多数生命体天然免疫系统中必不可少的组成部分,且具有广谱抗菌性,因而正逐渐引起研究者的重视。抗微生物肽的另一个突出优点是易于水解^[5],这一点使抗微生物肽可以用作稳定的抗菌涂层。生物肽几乎可以在所有材料、所有形状的表面附着^[6],从金属到玻璃再到高分子材料的表面均可,但是某一种肽对附着材料的表面是有选择性的^[7-8],人们把能够附着并牢固地连接在金属表面的肽叫作金属连接肽。早在 1992 年, Brown^[9-10]就从细胞表面展示库中得到能与氧化铁连接的多肽,证实了多肽与金属材料连接的可行性。近几年,人们陆续发现了银、铂、钯、钢、铝、钛以及其他金属氧化物的连接肽^[4,11-12]。生物肽在金属表面牢固的连接,会赋予金属材料表面一些生物特有的功能性,比如说自

我修复、形成代谢的能力等。这些研究或因为所用的金属材料大多是粉末形态,在实际的工程、结构件中的应用意义不是很大,或仅限于应用在医疗领域,对于跟液体接触的其他环境中工作的金属材料鲜少提及。WONG^[13]和 DAVIS^[14-15]团队分别利用生物肽与金属反应,得到了一种相对更稳定的金属材料,同时发现,改变受体结合域蛋白的结构可以改变新材料的防污性能。

利用生物肽与金属材料作用,形成稳定的连接或者化学反应,从而改变金属材料表面的疏水性,不仅对医疗领域,而且对船舶、食品、化工等领域的应用,都具有深远的现实意义。本文利用不锈钢连接肽与不锈钢作用,对金属表面进行改性,通过调整生物肽的肽链结构和接入疏水基团等方式,获得了不同表面性质的改性材料。L-肽和 D_D-肽为同种肽两种手性异构的构型,且 D_D-肽的氨基酸呈反序排列,文中对两种结构肽的两端分别进行乙酰化和酰胺化,L'-肽和 D_D'-肽分别为在 L-肽和 D_D-肽反序上接入了十二烷酸。本研究为设计绿色环保的防污金属材料提供了依据和新的思路。

1 实验

1.1 材料

本实验以 304 不锈钢为材料。304 不锈钢的主要成分为: C 0.08%, Mn 2%, P 0.045%, S 0.03%, Cr 18%~20%, Si 0.75%, Ni 8%~12%, N 0.1%, 其余为 Fe。将不锈钢加工成 $\phi 10$ mm、厚度 2.5 mm 的圆形样本, 1040 °C 温度下退火处理 1 h, 去除应力。实验用生物肽委托上海淘普生物科技有限公司合成, 纯度大于 95%, 各肽结构见表 1。

表 1 实验肽的结构
Tab.1 Structure of the peptide used in experiment

Peptide	Structure
L-peptide	Ac-A-C-T-S-N-A-D-N-K-Y-L-P-K-T-C-Q-T-amide
D _D -peptide	AC-DT-DQ-DC-DT-DK-DP-DL-DY-DK-DN-DD-DA-DN-DS-DT-DC-DA-amide
L'-peptide	C ₁₂ H ₂₃ O ₂ -A-C-T-S-N-A-D-N-K-Y-L-P-K-T-C-Q-T-amide
D _D '-peptide	C ₁₂ H ₂₃ O ₂ -DT-DQ-DC-DT-DK-DP-DL-DY-DK-DN-DD-DA-DN-DS-DT-DC-DA-amide

1.2 方法

考虑到加入疏水基团后的肽在无菌磷酸盐溶液（PBS，pH7.4）中的溶解性较差，采用有机溶剂二甲基亚砜（DMSO）及无菌磷酸盐溶液（PBS）共同配制而成各浓度的肽溶液。各实验用肽溶液标号及配制方法见表 2。不锈钢样本先后用 240[#]—1200[#]的砂纸依次打磨，再进行抛光处理，获得均匀粗糙度的表面。

表 2 实验用肽的标号
Tab.2 Label of the peptide solution used in experiment

label	Preparation Instructions
L10	L-peptide, dissolve in PBS, concentrations of 10 μg/mL
L'10	L'-peptide, dissolve in PBS, concentrations of 10 μg/mL
L''10	L'-peptide, dissolve in PBS and DMSO, concentrations of 10 μg/mL
D _D 10	D _D -peptide, dissolve in PBS, concentrations of 10 μg/mL
D _D '10	D _D '-peptide, dissolve in PBS, concentrations of 10 μg/mL
D _D ''10	D _D '-peptide, dissolve in PBS and DMSO, concentrations of 10 μg/mL
D _D ''20	D _D '-peptide, dissolve in PBS and DMSO, concentrations of 20 μg/mL
D _D ''100	D _D '-peptide, dissolve in PBS and DMSO, concentrations of 100 μg/mL

1.3 表面性质的表征

用傅里叶红外光谱仪（FTIR，NEXUS，USA）测定样本表面的化学组成，以确定样本表面连接肽的存在情况。其光谱的范围为 4000~400 cm⁻¹，分辨率优于 0.09 cm⁻¹，ATR 附件，采用全反射模式进行检测。每个实验样本上分别取 5 个不同位置的点作为测试点，扫描次数为 256 次，以更全面地获得样本表面的信息，取 5 次扫描结果的平均数作为测试结果。

采用 X 射线光电子能谱分析（XPS，岛津/Kratos AXIS ULTRADLD，Japan）测定材料表面元素的种类和能量变化，从而判断生物肽与金属不锈钢之间的作用形式是否为化学变化。该能谱仪具有 165 mm 平均半径的双聚焦 180°高精度能量分析器，最大功率为 450 W（30 mA，15 kV）。实验采用 Al/Ag 单色化双阳极 X 射线源，Ag 3d 分辨率为 0.48 eV（Al Kα 单色化），对样品进行 300 μm×700 μm（slot）的区域分析。

采用接触角测量仪（CA，JC2000D）对样本表面进行接触角测量。根据 Yang 氏方程可知，接触角越大，固体的表面能越小，材料表现为越疏水，所以通过接触角可以表征材料表面疏水状态的变化。本实验以去离子水为液滴，分别于样本上取 3 个点，测量其静态接触角值，取平均值作为最终的测量结果。

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。资料数据以均数±标准差形式表示。若 P 值小于 0.05，则认为有显著性差异。

2 结果及分析

2.1 FTIR 分析

由图 1 和图 2 可以发现，除了 L10 不太明显外，

已抛光样本立即用清洗剂洗干净，然后用蒸馏水彻底冲洗，再依次用酒精、丙酮和蒸馏水依次彻底清洗。自然风干后，将样本置于 12 孔的培养板中，每个孔内置一个样本，并分别用 2 mL 的各实验肽溶液进行覆盖，室温下保持 80 min，期间保持温和的搅拌。反应后将样本及时取出，用蒸馏水反复多次彻底清洗，以去除表面连接不牢固的多肽，置于室温下，自然风干。

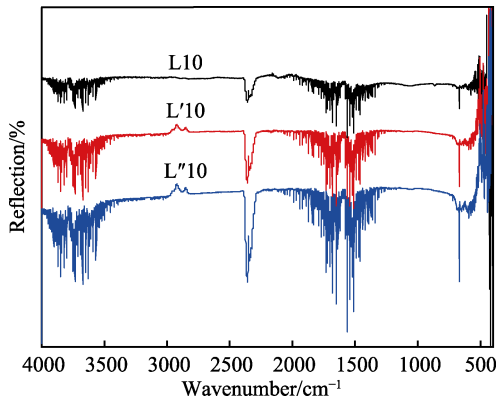


图 1 L-肽不同溶解方法的红外图
Fig.1 FTIR of L-peptide by different dissolving methods

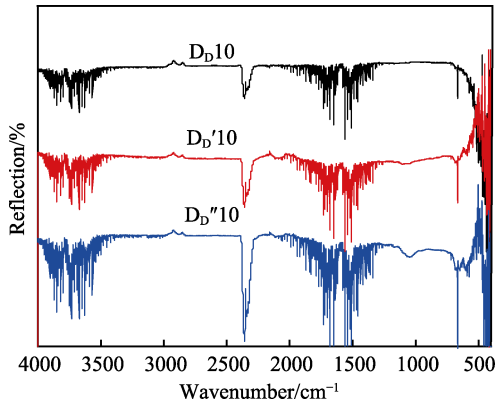


图 2 D_D-肽不同溶解方法的红外图
Fig.2 FTIR of D_D-peptide by different dissolving methods

各样本在 2500~3000 cm⁻¹ 处均有峰存在。此处的峰证明为 x—H 单键的伸缩振动，2800~3000 cm⁻¹ 处的两个峰可以说明样本表面存在烷基，且在 665 左右有峰存在，进一步确定含有烷基。加入疏水基团后，采用

DMSO 和 PBS 作为溶剂, 所得的材料表面各峰值更加明显。如图 3 所示, $2000\sim 2500\text{ cm}^{-1}$ 是三键和累积双键伸缩振动区, 此处 $D_D''10$ 的峰值比 $L''10$ 略大, 且在 $1000\sim 1100\text{ cm}^{-1}$ 还有一个峰。 $1000\sim 2000\text{ cm}^{-1}$ 范围内的峰往往是羟基与碳原子相连接的 C—O 伸缩振动引起的。图 4 对比了 D_D -肽加入疏水基团后, 采用 DMSO 和 PBS 作为溶剂, 得到的不同浓度肽溶液处理的样本红外光谱。可见, 随着浓度的增加, 各峰值变化不大, $D_D''100$ 时, 665 cm^{-1} 左右的峰变得不明显, 且 $1000\sim 1100\text{ cm}^{-1}$ 处的峰消失。

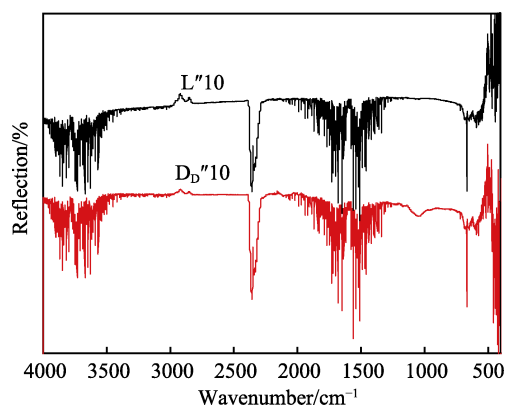


图 3 $L''10$ 肽与 $D_D''10$ 肽的红外图
Fig.3 FTIR of $L''10$ -peptide and $D_D''10$ -peptide

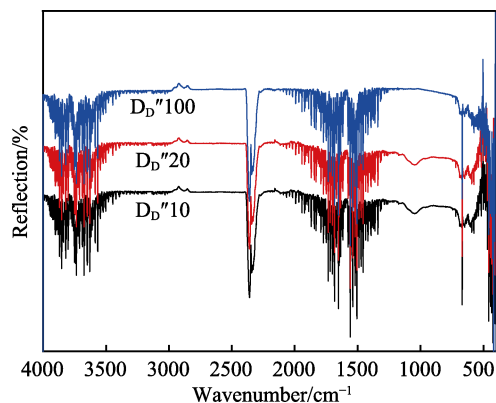


图 4 D_D'' -肽不同浓度的红外图
Fig.4 FTIR of D_D'' -peptide with different concentrations

上述结果证明了材料表面有机物基团的存在, 肽与金属发生了相互作用, 且 L -肽与金属作用的效果不如 D_D -肽明显, 尤其是加入疏水基团的 D_D'' -肽反应后的峰值最大。随着浓度的增加, 原本存在的有机物基团的量反而有所减少, 甚至消失。产生上述结果的原因与肽的结构有关, 同时还与溶解方法有关。加入疏水基团后的肽在 PBS 中的溶解度降低, 而采用 DMSO 与 PBS 共同作为溶剂之后, 改善了肽的溶解性, 在溶液中有更多的肽与金属表面接触。随着浓度的增加, 肽中存在的疏水基团浓度高, 这些基团易于聚集, 使反应效果变差。

2.2 CA 分析

由图 5—7 可知, L -肽的亲水性比 D_D -肽好, 经过 PBS 溶解、反应后, 材料表面的接触角变小, 只有不到 40° , 而加入疏水基团后, 其接触角大幅度增加, 达到了 82° 以上。采用 DMSO 和 PBS 共同作为溶剂进行溶解之后, 未能全部溶解到液体中的肽进一步溶解, 与金属充分作用, 表现为接触角进一步增加, 达到 87° 以上。相对于 L -肽来说, D_D -肽表现出更强

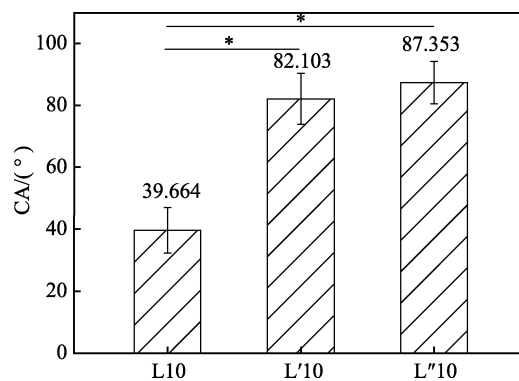


图 5 L -肽不同溶解方法的 CA (*: $P < 0.05$)
Fig.5 CA of L -peptide by different dissolving methods (*: $P < 0.05$)

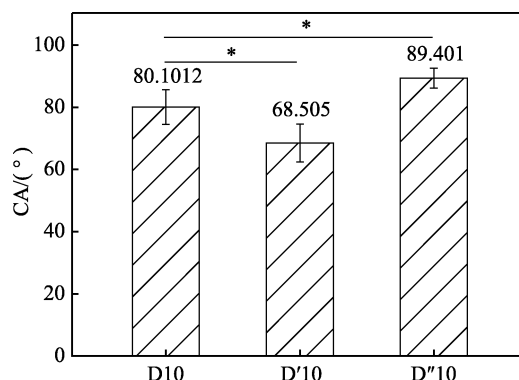
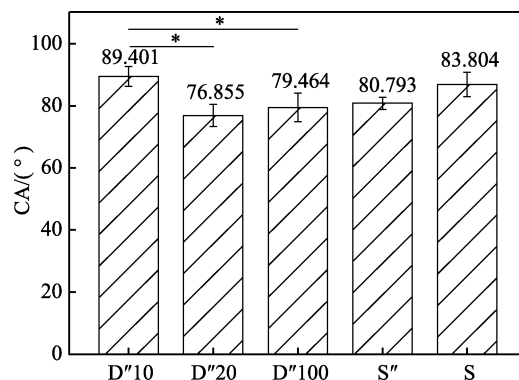


图 6 D_D -肽不同溶解方法的 CA (*: $P < 0.05$)
Fig.6 CA of D_D -peptide by different dissolving methods (*: $P < 0.05$)



Among them S'' is the stainless steel that has been treated by PBS and DMSO while S is the stainless steel that is treated without solution after polishing

图 7 不同浓度的 D_D'' -肽处理表面与不锈钢表面的 CA 值 (*: $P < 0.05$)

Fig.7 CA of D_D -peptide with different concentrations and stainless steel (*: $P < 0.05$)

的疏水性, 与金属作用后, 接触角更大, 高达 80° 以上。加入疏水基团之后, D_D -肽在 PBS 溶液中的溶解度降低, 材料表面的接触角下降, 进一步印证了 D_D -肽处理表面的疏水性比 L-肽处理表面更高这一结论。

从立体化学可知, L-肽与其手性异构 D-肽的疏水性相同。本实验采用的是 D-肽的反序结构 D_D -肽, 且 L-肽和 D_D -肽的两端分别进行乙酰化和酰胺化的氨基酸并不一样。L-肽的头端和 D_D -肽的尾端分别被乙酰化了, 在它们分别与金属表面作用时, 很可能形成以一定角度头朝上 (或尾朝上) 的结构。因此暴露在外面的基团是不一样的, 导致水接触角不一致, 呈现出不同的疏水特性。加入疏水基团的 D_D -肽更不容易溶解在无菌磷酸盐溶液中, 溶液中出现絮状白色漂浮的肽, 参与反应的肽的数量减少, 导致材料表面的接触角降低。用 DMSO 和 PBS 共同作为溶剂进行溶解之后, 生物肽充分溶解, 参与反应的肽浓度增加, 所得反应材料表面的接触角增加, 达到了 89° 以上, 比原始不锈钢要高, 比经过 DMSO 和 PBS 共同处理的不锈钢也明显增高, 说明肽链上的疏水基团发挥了作用。这一数值比相同条件下其他浓度的肽溶液反应后所得的接触角都要高。究其原因, 生物肽在溶液中, 疏水基团因浓度的增加而更易聚集成团, 与不锈钢表面的接触减少, 反应效果变差。因疏水基团作用而聚集成团的生物肽在后续的彻底、反复清洗过程中脱落, 因此浓度越高, 接触角越小, 比 D_D "10 更小。从不锈钢的两种处理方法得到的结果来看, DMSO 和 PBS 的加入并没有提高原始不锈钢的接触角, 反而使其有所降低。可见, DMSO 的加入并不会提高材料的接触角, 而材料表面的接触角增高, 完全是溶液中的肽的作用, 这与 DMSO 的特性是相符的。

2.3 XPS 分析

由 FTIR 的测试结果得出, D_D "10 与 D_D "20 对金属处理后, 表面存在的有机物情况相似。CA 测量结果显示, D_D "10 溶液处理后的金属表面接触角最大, 表面能最低。以 D_D "10 为研究对象, 用 XPS 对反应后材料表面几种元素进行测试, 结果如图 8 和图 9 所示。

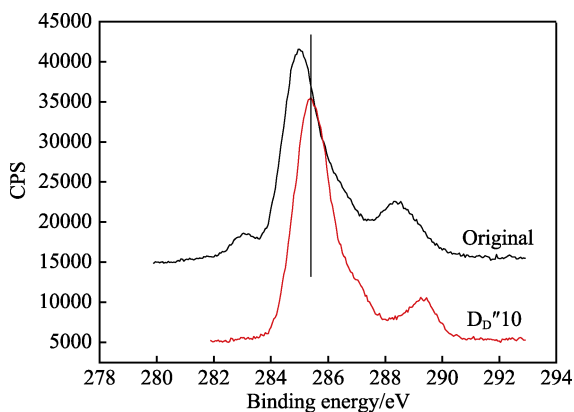


图 8 反应前后材料表面 C 元素的能量变化
Fig.8 Energy changes of C elements on the surface of the material before and after the reaction

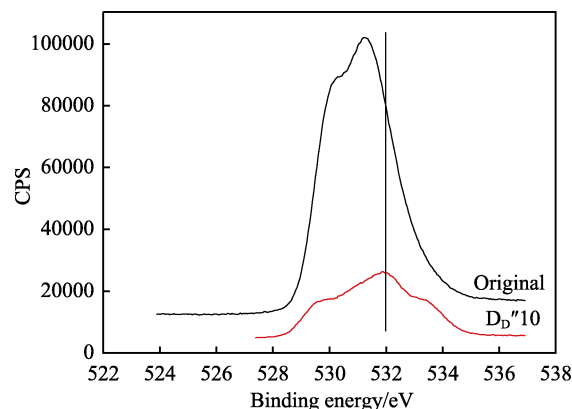


图 9 反应前后材料表面 O 元素的能量变化
Fig.9 Energy changes of O elements on the surface of the material before and after the reaction

生物肽处理后的金属表面测得的 C1s 和 O1s 的结合能都发生了变化, C1s 分别由反应前的 284.6 eV 增加到反应后的 285.4 eV, O1s 由 531.5 eV 增加到 532 eV。这些变化说明, 肽与金属之间是以一种化学的形式进行了反应, 而不是简单的物理连接, 这点与 Davis 等进行研究的结果相一致^[13]。

2.4 抗菌实验

细菌粘附是样本表面污损现象的初级阶段, 防止细菌的粘附可以从根本上解决样本表面的抗菌防污性能。因此, 可以通过测量样本表面的细菌数量, 进而测量其抗菌性能。选取常见金黄色葡萄球菌为目标菌株, 对加入疏水基团的肽溶液处理过的不锈钢表面做样本抗菌性试验。采用贴膜法, 其过程如下: 1) 取对照样品和受检样品, 用 70% 的乙醇溶液擦拭其表面后, 用无菌蒸馏水冲洗, 然后自然干燥; 2) 将接种后的菌液用磷酸盐缓冲液稀释至适宜浓度 (约为 10^5 cfu/mL), 然后吸取 0.2~0.5 mL 该菌液, 再滴加在已放置于灭菌皿中的对照样品和受检样品表面, 并用覆盖膜分别盖在样品表面, 使菌液均匀接触样品, 每个样品做 3 个平行样; 3) 将表面涂有菌液的样品和对照不锈钢样品放入温度为 $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 90% 的培养箱内做 24 h 的细菌培养, 培养 24 h 后, 将培养后的菌液反复洗脱, 并分别稀释成 3 个浓度, 再分别从稀释后的菌液中取出一定量, 倾注在经过灭菌处理的营养琼脂培养基中; 4) 将上述平板置于 $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的恒温培养箱内培养 20 h, 最后对每个灭菌皿做活菌培养计数统计, 取平均数, 并计算杀菌率, 计算公式见式 (1)。

$$\eta = (N_1 - N_2) / N_1 \times 100\% \quad (1)$$

式中: N_1 为未经任何处理的对照不锈钢进行细菌培养试验后的平均活菌浓度, N_2 为抗菌不锈钢进行细菌培养试验后的平均活菌浓度。

由图 10 可以看出, 处理后样本表面的抗菌性得到了很大的提高, 利用式 (1) 计算可知, 样本表面的抗菌性能约为 85.9%。

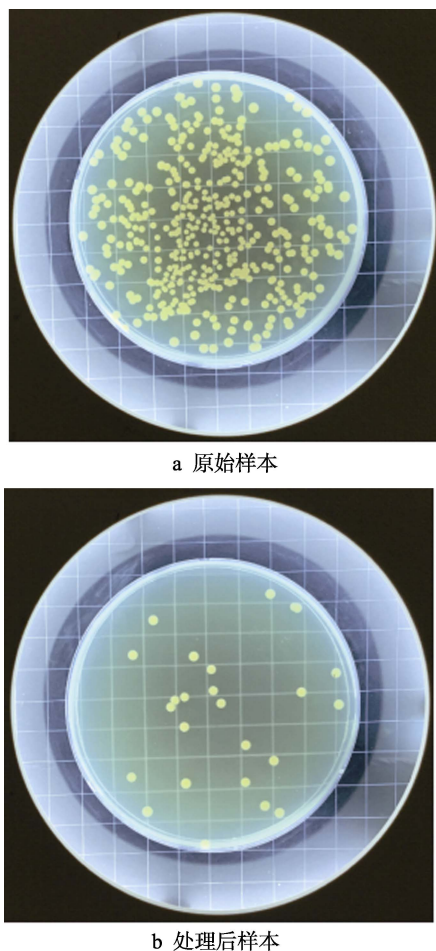


图 10 金黄色葡萄球菌涂板实验

Fig.10 *Staphylococcus aureus* coated plate experiment: a) original sample; b) after processing the sample

3 结论

1) 对于实验用肽来说, D_D -型肽处理过的不锈钢表面比 L-型肽的表面疏水性更好。

2) 加入疏水基团的肽溶液与不锈钢样本作用后, 不锈钢表面表现出的疏水性有所提高。

3) 实验肽与不锈钢之间发生了化学反应。

4) 随着浓度的增加, 样本并不会表现出更高的接触角和更低的表面能, 质量浓度为 $10 \mu\text{g/mL}$ 是比较理想的反应浓度。

5) 金黄色葡萄球菌涂板实验结果显示, 加入疏水基团后的肽溶液与不锈钢作用后, 表面的抗菌性明显提高。

6) 通过改变生物肽的结构和疏水基团的种类, 可以以一种稳定的化学形式改变金属材料表面的疏水性。这为提高液体环境下工作的金属材料的使用寿命, 提出了一个新的途径, 具有广阔的发展前景。

参考文献:

[1] 宓宇晓, 周泽华, 王泽华, 等. 海工构件防生物吸附涂

料的研究进展[J]. 材料导报 A: 综述篇, 2015, 29(2): 35-39.

MI Yu-xiao, ZHOU Ze-hua, WANG Ze-hua, et al. Research progress of antifouling coatings for maritime structures[J]. Materials review, 2015, 29(2): 35-39.

[2] DIAZ D P, OCAMPO M, PABON L, et al. Mycobacterium tuberculosis PE9 protein has high activity binding peptides which inhibit target cell invasion[J]. Int j biol macromol, 2016, 86: 646-655.

[3] ONAIZI S A, LEONG S S L. Tethering antimicrobial peptides: current status and potential challenges[J]. Biotechnology advances, 2011, 29: 67-74.

[4] SEKER U O, DEMIR H V. Material binding peptides for nanotechnology[J]. Molecules, 2011, 16(2): 1426-1451

[5] LIN Y M, WU S J, CHANG T W, et al. Outer membrane protein I of pseudomonas aeruginosa is a target of cationic antimicrobial peptide/protein[J]. The journal of biological chemistry, 2010, 285: 8985-8994.

[6] VREULS C, ZOCCHI G, GENIN A, et al. Inorganic-binding peptides as tools for surface quality control[J]. J inorg biochem, 2010, 104: 1013-1021

[7] BUCIOR I, PIELAGE J F, ENGEL J N. Pseudomonas aeruginosa pili and flagella mediate distinct binding and signaling events at the apical and basolateral surface of airway epithelium[J]. PLOS pathogens, 2012(8): 1-18.

[8] SANO K, AJIMA K, IWAHORI K, et al. Endowing a ferritin-like cage protein with high affinity and selectivity for certain inorganic materials[J]. Small, 2005(1): 826-832.

[9] BROWN S. Metal-recognition by repeating polypeptides [J]. Nature biotechnology, 1997, 15(3): 269.

[10] BROWN S. Engineered iron oxide-adhesion mutants of the escherichia coli phage lambda receptor[J]. Proceedings of the national academy of sciences, 1992, 89(18): 8651-8655.

[11] 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 Chun-ying, WANG Xue-jun, CAO Pan, et al. Research status of anti-biofouling metal material modified by peptides[J]. Material of mechanical engineering, 2014, 38(3): 1-4.

[12] ZUO R, ORNEK D, WOOD T K. Aluminum-and mild steel-binding peptides from phage display[J]. Appl micro-biol biotechnol, 2005, 68: 505-509.

[13] WONG W Y, CAMPBELL A P, MCINNES 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.

[14] DAVIS E M, LI D, IRVIN R T. A peptide-stainless steel reaction that yields a new bioorganic-metal state of matter [J]. Biomaterials, 2011, 32(23): 5311-5319.

[15] DAVIS E M, LI D, SHAHROOEI M, et al. 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.