

基于原儿茶醛的有机转化功能涂层的制备及研究

陈航¹, 李培闯², 杜佳奇¹, 陈心怡¹, 杜昱华¹, 赵元聪^{1*}, 王进¹

¹西南交通大学材料先进技术教育部重点实验室, 四川 成都

²齐鲁工业大学(山东省科学院)菏泽分院, 山东省生物工程技术创新中心, 山东 菏泽

Email: *zhaoyc7320@163.com

收稿日期: 2021年4月2日; 录用日期: 2021年5月12日; 发布日期: 2021年5月19日

摘要

316L不锈钢因其优异的化学稳定性和机械性能在介入治疗领域有着广泛的应用,但其生物相容性不能够满足长期治疗的要求,因此往往需要对其表面进行功能改性。本研究通过原儿茶醛(DBA)和三(2-氨基乙基)胺(TAEA)之间的共聚反应,在316L不锈钢表面成功构建DBTA有机转化涂层,并系统研究了涂层的化学结构和生物学性能。傅里叶变换红外光谱(FTIR)、X射线光电子能谱(XPS)和官能团定量检测结果共同证明了DBTA涂层成功制备,且表面官能团密度可调控。血小板粘附结果表明DBTA涂层的血液相容性有待提升,但细胞相容性良好。该结构特点为后续特定功能分子的固定以实现表面功能化提供了很好的平台。

关键词

316L不锈钢, 功能改性, 原儿茶醛, 有机转化涂层, 表面功能化

Preparation and Research of Functional Coating of Organic Transformation Based on Protocatechualdehyde

Hang Chen¹, Peichuang Li², Jiaqi Du¹, Xinyi Chen¹, Yuhua Du¹, Yuancong Zhao^{1*}, Jin Wang¹

¹Key Laboratory of Advanced Materials Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

²Heze Branch, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Heze Shandong

Email: *zhaoyc7320@163.com

Received: Apr. 2nd, 2021; accepted: May 12th, 2021; published: May 19th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 陈航, 李培闯, 杜佳奇, 陈心怡, 杜昱华, 赵元聪, 王进. 基于原儿茶醛的有机转化功能涂层的制备及研究[J]. 材料科学, 2021, 11(5): 536-544. DOI: 10.12677/ms.2021.115062

Abstract

Due to excellent chemical stability and mechanical properties, 316L stainless steel has been widely used in the field of interventional therapy. However, the biocompatibility of 316L stainless steel could not meet the requirements of long-term treatment. Therefore, it is necessary to carry out surface functional modification. In this study, DBTA organic transformation coating was successfully constructed on 316L stainless steel surface by the copolymerization reaction between protocatechualdehyde (DBA) and tri (2-aminoethyl) amine (TAEA). Besides, the chemical structure and biological properties of the coating were systematically studied. A series of results including Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and quantitative determination of functional groups proved that the coating was successfully prepared and the density of surface functional group could be adjusted. The results of platelet adhesion showed that the blood compatibility of DBTA coating needed to be improved. Nevertheless, the cell compatibility was good. This structure feature provides a good platform for the subsequent fixation of specific functional molecules to realize the surface functionalization.

Keywords

316L Stainless Steel, Functional Modification, Protocatechualdehyde, Organic Transformation Coating, Surface Functionalization

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

冠状动脉粥样硬化是心血管疾病中威胁人类生命健康的主要疾病之一[1]。心血管支架植入治疗是治疗该疾病最有前景的一种治疗方式，但是对于血管植入材料面临许多急需解决的问题，例如平滑肌细胞的快速生长，血液相容性差或内皮化速率慢[2]。316L 不锈钢作为心血管支架基材，后期生物相容性不好，长期存在体内会释放有毒金属离子触发局部免疫反应和炎症反应，进而可能引起内膜增生和支架内再狭窄[3]。因此，越来越多的生物材料要求具有各种生物功能以获得理想的功能效果。

表面改性是实现植入材料表面多功能化的常用方法之一。目前被广泛采用的表面改性方法也存在许多限制，如仪器设备昂贵、操作繁杂、反应条件和改性基底要求严格，需要界面改性剂和表面之间的化学特异性[4] [5]。此外，许多改性后固定的功能分子稳定性差，容易损失，有的材料表面无法提供足够的活性位点导致生物分子接枝量少，有的功能转化涂层具有一定的生物毒性，不能获得理想的表面改性效果[6] [7]。

为了改善上述问题，需要开发一种低廉，操作简单，适用于多种生物材料，可固定多种生物功能分子的新型表面改性方法。原儿茶醛，一种含有邻酚羟基结构的分子，该物质不仅价格低廉，易获取，而且是常用中药丹参水溶性成分丹酚酸 B 降解的主要产物之一，具有抗动脉粥样硬化、降低心肌耗氧量、抑制血小板聚集[8]、神经保护、抗脓血、抗病毒、抗纤维化等广泛的药理活性[9]。本文借鉴聚多巴胺的沉积原理[10]，将小分子多酚(原儿茶醛，DBA)与多胺(三(2-氨基乙基)胺，TAEA)在碱性条件下，发生交

联聚合在 316L 不锈钢表面制备了 DBTA 有机转化涂层, 通过各种材料学表征和结构表征, 了解成膜过程以及反应原理, 并研究了 DBTA 涂层的血液相容性和细胞相容性。

2. 实验部分

2.1. 实验材料及设备

原儿茶醛, DBA, 纯度 98%, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 三(2-氨基乙基)胺, 纯度 96%, 成都华夏化学试剂有限公司; 三羟甲基氨基甲烷(Tris, 纯度 98%); 去离子水, 成都金山试剂厂; 其他化学试剂均来自成都科龙试剂有限责任公司, 纯度为分析纯。

傅立叶反射红外光谱仪(NICOLET 5700, 美国 Thermo 公司); X 射线光电子能谱仪(Fisher K-Alpha, 美国 Thermo 公司); 水接触角测量仪(DSA100, 德国 KRUSS 公司); 扫描电子显微镜(FESEM, 荷兰 FEI 公司, QUANTA200)。

2.2. DBTA 有机转化功能涂层的制备

将 316L 不锈钢棒材切割成 ϕ 10 mm, 厚度 1.5 mm 的圆片, 在抛光机上进行机械打磨抛光至镜面。将抛光的 316L SS 依次用丙酮、无水乙醇、去离子水在超声清洗设备中清洗 3~5 min, 每种试剂清洗三次, 烘干后密封备用。配制 Tris 缓冲液: 按照 1.2 g/L 浓度配制 Tris-base 缓冲液, 用盐酸调节至 pH = 8.5 左右, 保存备用。

DBTA 涂层制备: 将原儿茶醛 DBA 和 TAEA 三(2-氨基乙基)胺如表 1 所示参数投料, 首先将处理后的 316L 不锈钢放入培养皿中, 随后加入配置好的原儿茶醛和三(2-氨基乙基)胺的 Tris 溶液, 控制环境温度为 20℃ 反应 12 h, 去离子水清洗 3 次, 重复上述成膜过程, 总共沉积三次, DBA 和 TAEA 成膜制备示意图如图 1 所示。

Table 1. The molar weight of DBA and TAEA used in the organic conversion coating of protocatechualdehyde

表 1. 原儿茶醛有机转化涂层所采用的 DBA 与 TAEA 摩尔量

Sample	DBA (mol)	TAEA (mol)
D ₂ T ₁	2	1
D ₁ T ₁	1	1
D ₁ T ₂	1	2

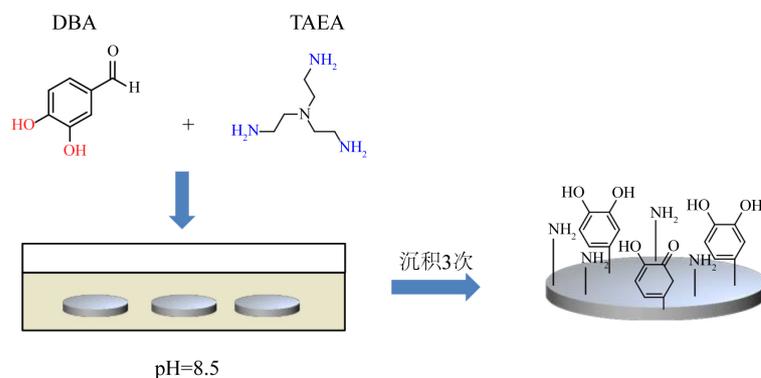


Figure 1. Schematic diagram of the preparation of DBTA coating on the 316L SS

图 1. 在 316L SS 表面制备 DBTA 涂层的示意图

2.3. DDBTA 涂层材料学表征

2.3.1. 傅里叶红外光谱(FTIR)表征

通过红外光谱分析可以表征材料组成与结构。本文采用红外衰减全反射法(ATR-FTIR)表征成膜后的表面官能团和组成的变化。

2.3.2. X 射线光电子能谱(XPS)表征

X 射线光电子能谱是表征材料表面元素组成及对应元素化学键合状态的定量分析能谱技术。本文采用 Fisher K-Alpha 型 X 射线光电子能谱仪进行检测, 阳极靶为 Al 靶, X 射线能量 $h\nu$ 为 1486.6 eV, 分析条件为 10^{-20} KV 工作电压, 真空度 2×10^{-9} Torr。

2.3.3. 表面官能团定量表征

涂层表面的胺基定量分析通过酸性橙(AO II)法来检测[11]。其原理是在酸性条件下, 酸性橙的磺酸基带负电, 可与样品表面带正电的氨基结合, 从而使样品染色。接着在碱性条件下将结合的酸性橙解离, 检测解离液在 485 nm 的吸光度值, 对比标准曲线可得出样品表面的胺基含量。采用 Micro-BCA 法检测样品表面酚羟基的密度[12], 在碱性环境中酚羟基可使 Cu^{2+} 还原为 Cu^+ , 并与双喹啉酸反应形成紫色配合物, 在 562 nm 处测定吸光度。

2.4. 血小板粘附与激活实验

将新鲜的人血加入离心管中, 以 1500 rpm 转速下离心 15 min, 得到顶层富血小板血浆(PRP)。然后, 在每个样品表面加入 60 μl 的 PRP 放置在 24 孔板, 37 $^{\circ}\text{C}$ 孵育 45 min。然后用 0.9 wt% NaCl 溶液仔细冲洗样品以去除不牢固粘附的血小板。2.5 wt% 戊二醛溶液固定 12 h 后, 用蒸馏水洗涤 3 次。将吸附在表面的血小板依次用 40、50、70、90 和 100 vol% 的乙醇/水溶液脱水 15 min。样品经自然干燥后喷金, 扫描电子显微镜观察血小板形态变化。

2.5. 内皮和平滑肌细胞相容性

选择内皮细胞(ECs)和平滑肌细胞(SMCs)进行体外细胞相容性评价。从新生儿脐带中分离出内皮细胞和平滑肌细胞, 细胞在 37 $^{\circ}\text{C}$ 和含 5% CO_2 的培养箱中培养。先将样品置于 24 孔板上, 然后将 1×10^4 细胞密度的内皮细胞和平滑肌细胞悬液直接接种到有样品的孔中, 在添加 10% 胎牛血清的 DMEM/F12 培养基中培养 1 天和 3 天, 洗涤后用 2.5% 戊二醛固定过夜。进一步, 将细胞用罗丹明 123 染色 15 min, 然后在荧光显微镜下观察所有样品表面的细胞形态。细胞增殖试剂盒(CCK-8)检测细胞增殖情况。

2.6. 统计学分析

AO II 和 Micro-BCA 测定, 以及血液和细胞实验至少重复三次, 并准备四到五个平行样品。所有定量结果以平均值 \pm 标准偏差(SD)来表示。各组样品结果差异采用单因素方差(One way ANOVA)分析法, 以评估统计显著性。* $P < 0.05$ 被认为是统计学上的显著差异。

3. 结果与讨论

3.1. 涂层反射红外光谱表征

图 2 为不同投料量的 DBTA 涂层的红外光谱。可以看到, D_2T_1 、 D_1T_1 和 D_1T_1 样品在 3371 cm^{-1} 附近出现的宽峰, 是 DBA 中酚羟基 O-H 和 TAEA 中氨基 N-H 伸缩振动, 在 $1600\sim 1450 \text{ cm}^{-1}$ 处存在的吸收峰是苯环骨架的 C=C 伸缩振动峰, 它是苯环特征吸收峰, 来源于形成涂层的原单体 DBA 中的特征官能团。

在 1658 cm^{-1} 附近的吸收峰是 $\text{C}=\text{O}$ 、 $\text{C}=\text{N}$ 的伸缩振动峰，归因于氧化的儿茶酚结构以及氧化儿茶酚与氨基之间发生的席夫碱反应。此外，在 $1330\sim 1270\text{ cm}^{-1}$ 是芳香族仲胺和叔胺的 $\text{C}-\text{N}$ 振动峰，说明与苯环和伯胺基发生了迈克尔加成反应有关。红外结果显示，在 316L SS 表面上不同投料比都能成功构建 DBTA 有机转化功能涂层。

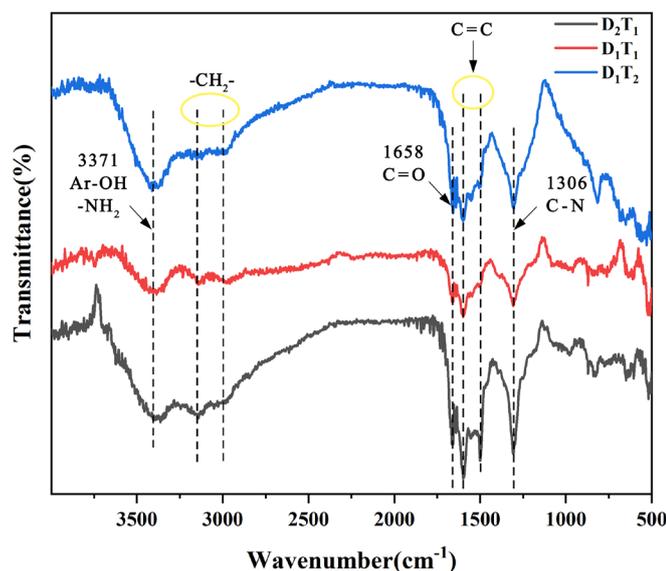


Figure 2. ATR-FTIR spectra of coating surface of different samples
图 2. 不同样品涂层表面的红外光谱

3.2. 涂层表面 XPS 分析

为进一步研究不同投料比的 DBTA 涂层中元素的化学键合状态，采用 XPS 对有机转化涂层中各元素进行了全谱扫描(图 3(a))并对涂层中相关元素进行了高分辨图谱分析(图 3(b))。全谱扫描结果如图 3(a)所示，所有样品表面都出现了 C、N、O 的元素信号，而 SS 表面没有出现 N 元素的峰，其余样品 C、N、O 的元素信号明显加强，说明 SS 表面均有 DBA 和 TAEA 的沉积。进一步对 $\text{C}1\text{s}$ 、 $\text{N}1$ 的高分辨图谱进行曲线拟合，如图 3(b)所示。 $\text{C}1\text{s}$ 高分辨谱被分为五种可能的键合状态， $\text{C}1$: 283.8 eV (苯环骨架的 C); $\text{C}2$: 284.4 eV (脂肪族 C-C、C-H); $\text{C}3$: 285.5 eV (脂肪族 C-N、芳香族 C-N)，分别归属于 TAEA 中的伯胺基以及 TAEA 与 DBA 迈克尔加成反应产生的芳香族 C-N; $\text{C}4$: 286.7 eV (芳香族 C=N、C-OH)，C=N 来自于席夫碱反应产生的芳香族结构; $\text{C}5$: 288.3 eV (酮基和醛基 C=O)。N1s 高分辨谱可以分为四种键合状态， $\text{N}1$: 399.0 eV (TAEA 伯胺 C-N); $\text{N}2$: 399.6 eV (芳香族 C=N); $\text{N}3$: 400.2 eV (芳香族 C-N); $\text{N}4$: 401.3 eV (TAEA 叔胺 C-N)。该结果表明 DBTA 有机转化涂层的成功构建，进一步证明涂层制备过程中 DBA 和 TAEA 发生了迈克尔加成和席夫碱反应形成交联分子粘附到基底材料上。

3.3. 表面官能团定量表征结果

作为一种生物材料表面有机转化功能涂层，表面官能团是后续生物功能化的基础。为了获得表面酚羟基和胺基的密度，分别用 Micro-BCA 和酸性橙(AOII)比色法对酚羟基和胺基进行选择标记。如图 4 所示，相比于 SS 表面，DBTA 涂层明显保留了大量的胺基和酚羟基官能团，官能团密度最大值分别为 $32.1 \pm 1.9\text{ nmol/cm}^2$ 和 $25.3 \pm 1.8\text{ nmol/cm}^2$ 。从图 4(a)可以看出，随着胺分子比例的增加，胺基密度增大， D_1T_2 样品的胺基密度达到最大值。从图 4(b)可以看出，随着 DBA 分子比例的增加，酚羟基密度增大，

D_2T_1 酚羟基的密度达到最大值。结果表明, 我们可以通过不同的投料比成功引入不同的官能团密度, 实现涂层表面功能基团含量的可调控性。

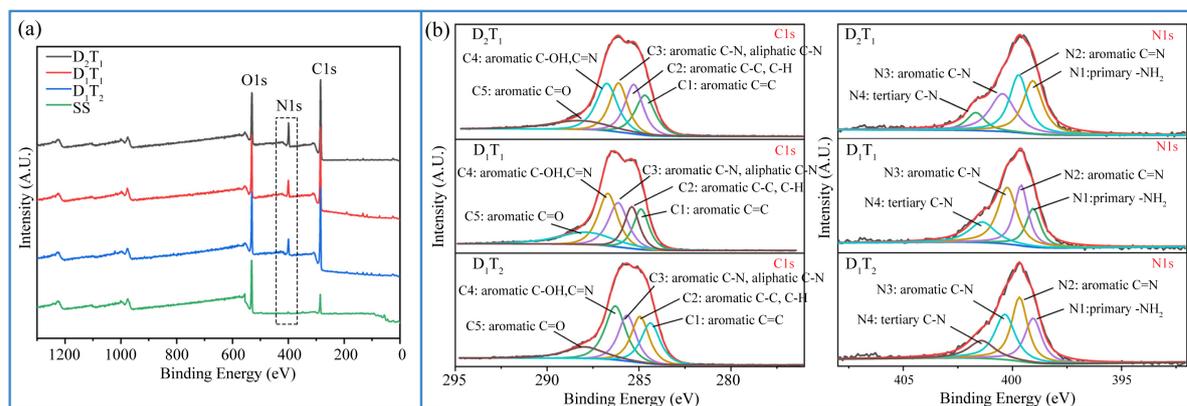


Figure 3. (a) XPS survey scan spectra of SS, D_2T_1 , D_1T_1 and D_1T_2 ; (b) High-resolution C1s and N1s XPS spectrum of SS, D_2T_1 , D_1T_1 and D_1T_2

图 3. (a) SS、 D_2T_1 、 D_1T_1 和 D_1T_2 涂层的 XPS 全谱分析; (b) SS、 D_2T_1 、 D_1T_1 和 D_1T_2 涂层的 C1s 和 N1s 高分辨图谱

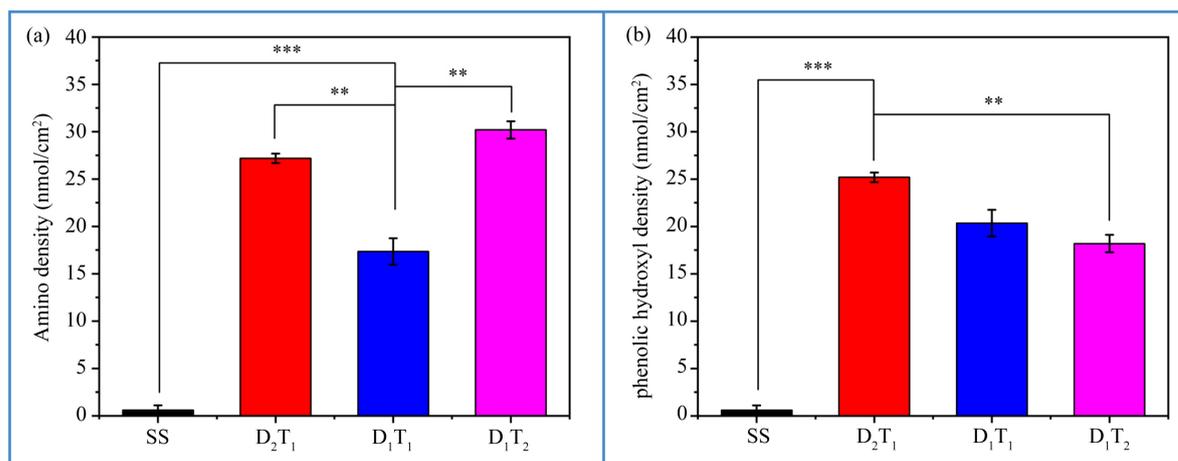


Figure 4. (a) Density of amine ($-NH_2$) and (b) phenolic hydroxyl ($-OH$) groups on the surface of different samples. ($0.001 < **P < 0.01$, $***P < 0.001$, mean \pm SD, N = 5)

图 4. 不同样品表面胺基官能团(a) 和酚羟基官能团; (b) 密度定量结果($0.001 < **P < 0.01$, $***P < 0.001$, mean \pm SD, N = 5)

3.4. 血小板粘附实验

对于心血管植入材料而言, 材料表面的抗凝血性能是首要解决的问题, 因此我们评价了不同样品表面的血小板粘附与激活情况, 从样品表面血小板 SEM 图片(图 5(a))和血小板计数结果(图 5(b))可以看出, D_1T_2 涂层表面血小板粘附量明显多于 SS 和其余样品且血小板出现了聚集, D_2T_1 、 D_1T_1 表面粘附量较少于 SS 样品, 同时 D_2T_1 表面的血小板聚集程度低于其余样品, 这归因于 D_2T_1 样品中原儿茶醛的含量最多, 可以抑制血小板的聚集。从血小板粘附形态来看, 文献已有报道血小板在材料表面粘附有 5 种形态, 分别为圆形、树枝状、树枝状铺展、铺展和完全铺展的形态[13], 激活程度依次提高。发现所有样品组均呈现不同程度的激活状态, 血小板伸出大量伪足, 其中 D_1T_1 和 D_1T_2 部分血小板完全铺展, 激活程度高于

SS 表面的血小板,这是因为相比于 SS 表面,改性后的 D_2T_1 、 D_1T_1 和 D_1T_2 样品表面通过官能团定量表征存在大量胺基官能团,表面的胺基官能团呈正电性,可以促进带负电荷的血小板的粘附与激活,这与很多文献报道胺基表面可以促进血小板的粘附与激活相一致[14] [15]。

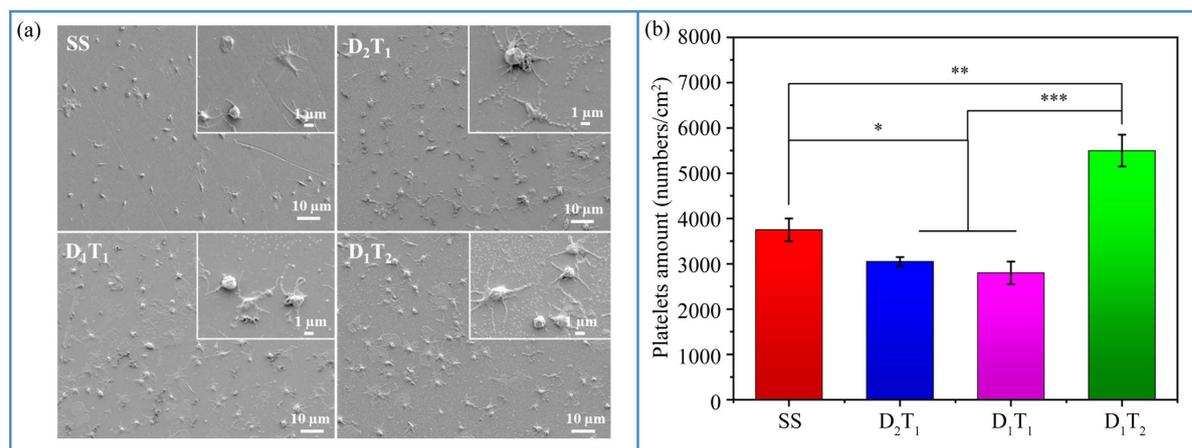


Figure 5. (a) Morphology platelet adhesion on different surfaces of samples; (b) Amounts of platelet attached onto different surfaces of samples ($0.01 < *P < 0.05$, $0.001 < **P < 0.01$, $***P < 0.001$, mean \pm SD, N = 5)

图 5. (a) 不同样品表面血小板粘附的 SEM 图像; (b) 不同样品表面血小板粘附计数结果($0.01 < *P < 0.05$, $0.001 < **P < 0.01$, $***P < 0.001$, mean \pm SD, N = 5)

3.5. 内皮细胞培养实验结果

心血管植入物表面内皮化对于植入材料而言是至关重要的,为了研究内皮细胞在材料表面的生长行为,我们评价了样品表面内皮细胞粘附与增殖实验。从图 6(a)内皮细胞罗丹明染色照片可以看到,细胞培养 1 天时,三种涂层表面细胞数量没有明显差异,当培养 3 天后,所有样品表面细胞明显发生了增殖,其形态都呈椭圆形或者圆形,图 6(b)显示了 SS、 D_2T_1 、 D_1T_1 和 D_1T_2 涂层的内皮细胞 CCK-8 结果,可以看到内皮细胞培养 1 天时,三种涂层的 CCK-8 都与 SS 没有明显差异,培养 3 天后, D_2T_1 、 D_1T_1 相比于 SS 吸光度值有所降低, D_1T_2 略高于 SS 对照样而明显高于其余样品组,说明 D_2T_1 、 D_1T_1 对内皮细胞有轻微毒性,但 D_1T_2 有利于内皮细胞的增殖。已有研究表明,中低密度的酚羟基有利于内皮细胞的存活[16],表面官能团定量结果显示 D_1T_2 具有相对较低的酚羟基密度,因此会促进内皮细胞的粘附与增殖。

3.6. 平滑肌细胞培养实验结果

心血管支架表面抑制平滑肌细胞的粘附与增殖是降低支架再狭窄的有效途径之一,因为我们除了对内皮细胞,进一步研究了 DBTA 涂层与平滑肌细胞的相互作用。从图 7(a)平滑肌细胞罗丹明染色照片可以看到,细胞培养 1 天时,三种涂层表面细胞数量没有明显差异,当培养 3 天后,所有样品表面细胞明显发生了增殖, D_2T_1 、 D_1T_1 表面平滑肌形态都呈正常的细长、纺锤状,而 D_1T_2 表面出现很多呈短棒状的平滑肌。图 7(b)显示了 SS、 D_2T_1 、 D_1T_1 和 D_1T_2 涂层的平滑肌细胞 CCK-8 结果,可以看到平滑肌细胞培养 1 天时,三种涂层的 CCK-8 都与 SS 没有明显差异,培养 3 天后, D_2T_1 、 D_1T_1 相比于 SS 没有显著性差异,而具有高胺基密度的 D_1T_2 的吸光度值低于 SS,对平滑肌的增殖有一定抑制作用,有研究表明高活性酚羟基表面对平滑肌细胞活力和增殖的抑制作用较弱,一定量的胺基能够抑制平滑肌细胞的增殖 [16]。

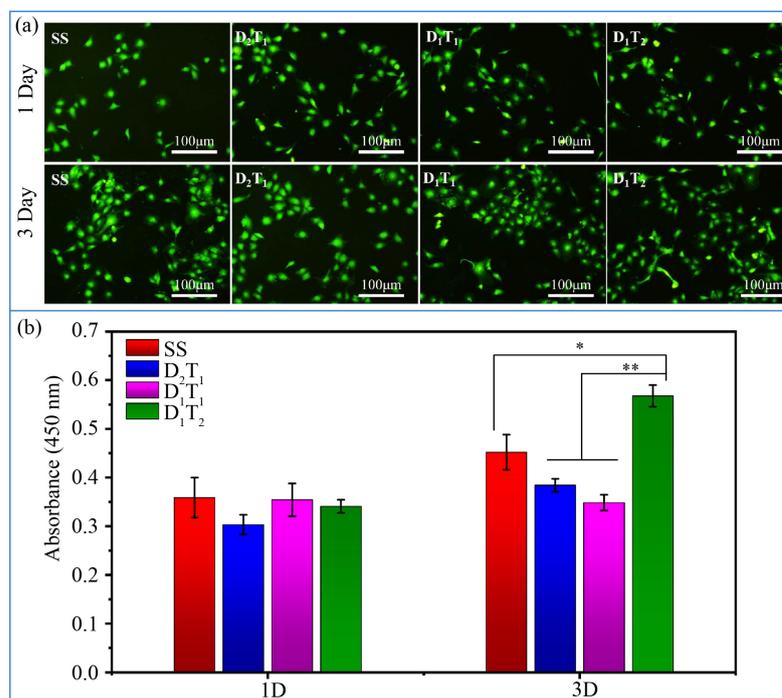


Figure 6. (a) Immunofluorescence staining of ECs on different sample surfaces; (b) CCK-8 results of ECs on different sample surfaces ($0.01 < *P < 0.05$, $0.001 < **P < 0.01$, mean \pm SD, N = 5)

图 6. (a) 不同样品表面内皮细胞免疫荧光图片; (b) 不同样品表面内皮细胞 CCK-8 结果 ($0.01 < *P < 0.05$, $0.001 < **P < 0.01$, mean \pm SD, N = 5)

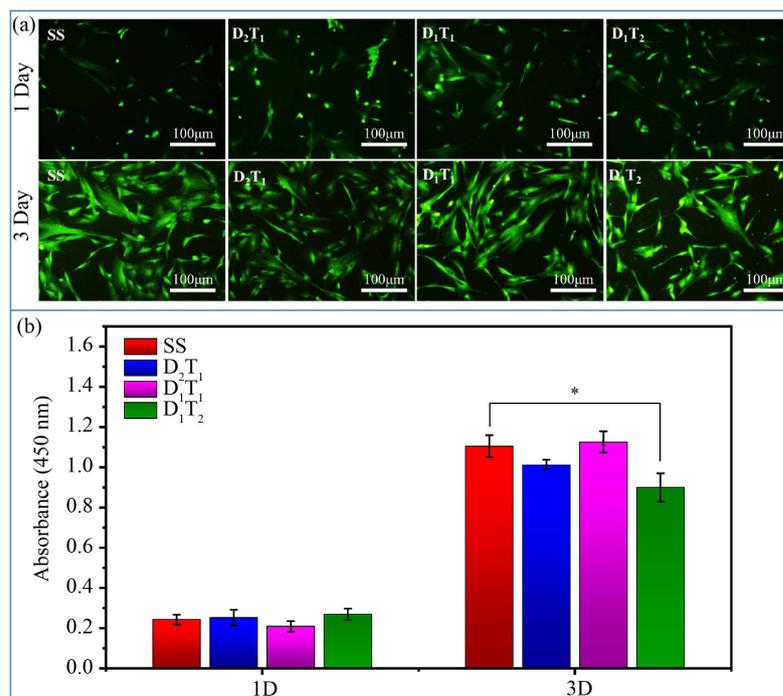


Figure 7. (a) Immunofluorescence staining of SMCs on different sample surfaces; (b) CCK-8 results of SMCs on different sample surfaces ($0.01 < *P < 0.05$, mean \pm SD, N = 5)

图 7. (a) 不同样品表面平滑肌细胞免疫荧光图片; (b) 不同样品表面平滑肌细胞 CCK-8 结果 ($0.01 < *P < 0.05$, mean \pm SD, N = 5)

4. 结论

本工作通过简单的一步法在 316L SS 表面上制备了 DBTA 有机转化功能涂层, 并增加了表面氨基、酚羟基官能团的数量, 不同的投料比可以调控涂层表面官能的密度与种类, 可为后续的功能分子固定改性提供更好的平台。FTIR 和 XPS 结果表明, 成膜过程中发生了迈克尔加成反应和席夫碱反应, 形成共价交联的涂层。同时, 血小板黏附结果表明 DBTA 涂层会导致血小板激活程度增加。细胞培养结果表明, DBTA 涂层对内皮细胞和平滑肌细胞无明显的细胞毒性作用, 具有一定的生物相容性, 其中 D_1T_2 可以促进内皮细胞的增殖, 抑制平滑肌细胞的增殖, 具有植入材料理想的生物学行为。综上所述, DBTA 有机转化功能涂层不仅提供了有效的表面改性方法, 同时也为血管植入材料表面生物修饰的进一步应用开辟了新途径。

基金项目

国家自然科学基金(32071328), 四川省国际合作项目(2020YFH0103)。

参考文献

- [1] 吴迪, 张庆军. 中国冠心病诊疗现状和进展[J]. 中国研究型医院, 2020, 7(1): 71-75.
- [2] Garcia De Tena, J. (2005) Inflammation, Atherosclerosis, and Coronary Artery Disease. *The New England Journal of Medicine*, **353**, 429-430. <https://doi.org/10.1056/NEJM200507283530425>
- [3] Koster, R., Vieluf, D., Kiehn, M., et al. (2000) Nickel and Molybdenum Contact Allergies in Patients with Coronary In-Stent Restenosis. *The Lancet*, **356**, 1895-1897. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(00\)03262-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)03262-1)
- [4] Lee, H., Dellatore, S.M., Miller, W.M., et al. (2007) Mussel-Inspired Surface Chemistry for Multifunctional Coatings. *Science*, **318**, 426-430. <https://doi.org/10.1126/science.1147241>
- [5] Luo, R., Tang, L., Xie, L., et al. (2016) Multifunctional Mussel-Inspired Copolymerized Epigallocatechin Gallate (EGCG)/Arginine Coating: The Potential as an Ad-Layer for Vascular Materials. *Regenerative Biomaterials*, **3**, 247-255. <https://doi.org/10.1093/rb/rbw027>
- [6] Luo, R., Tang, L., Zhong, S., et al. (2013) *In Vitro* Investigation of Enhanced Hemocompatibility and Endothelial Cell Proliferation Associated with Quinone-Rich Polydopamine Coating. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **5**, 1704-1714. <https://doi.org/10.1021/am3027635>
- [7] Yang, Y., Qi, P., Ding, Y., et al. (2015) A Biocompatible and Functional Adhesive Amine-Rich Coating Based on Dopamine Polymerization. *Journal of Materials Chemistry B*, **3**, 72-81. <https://doi.org/10.1039/C4TB01236D>
- [8] 石琳, 吴禅群, 杨毓麟. 原儿茶醛对血小板聚集性和血小板内 cAMP 含量的影响[J]. 苏州医学院学报, 1982(2): 1-2.
- [9] 张翠英, 郭丽丽, 王阶. 原儿茶醛的药理研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2013, 19(23): 1-2.
- [10] Wang, Z., Yang, H.-C., He, F., et al. (2019) Mussel-Inspired Surface Engineering for Water-Remediation Materials. *Matter*, **1**, 115-155. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.05.002>
- [11] Noel, S., Liberelle, B., Robitaille, L., et al. (2011) Quantification of Primary Amine Groups Available for Subsequent Biofunctionalization of Polymer Surfaces. *Bioconjugate Chemistry*, **22**, 1690-1699. <https://doi.org/10.1021/bc200259c>
- [12] Shin, Y.M., Lee, Y.B. and Shin, H. (2011) Time-Dependent Mussel-Inspired Functionalization of Poly(L-lactide-co-epsilon-caprolactone) Substrates for Tunable Cell Behaviors. *Colloids and Surfaces B Biointerfaces*, **87**, 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2011.05.004>
- [13] Goodman, S.L., Grasel, T.G., Cooper, S.L., et al. (1989) Platelet Shape Change and Cytoskeletal Reorganization on Polyurethaneureas. *Journal of Biomedical Materials Research*, **23**, 105-123. <https://doi.org/10.1002/jbm.820230109>
- [14] Amiji, M.M. (1998) Platelet Adhesion and Activation on an Amphoteric Chitosan Derivative Bearing Sulfonate Groups. *Colloids and Surfaces B Biointerfaces*, **10**, 263-271. [https://doi.org/10.1016/S0927-7765\(98\)00005-8](https://doi.org/10.1016/S0927-7765(98)00005-8)
- [15] Yang, Z.-L., Zhou, S., Lu, L., et al. (2012) Construction and Hemocompatibility Study of Highly Bioactive Heparin-Functionalized Surface. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, **100**, 3124-3133. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.34247>
- [16] 陈思. 类聚多巴胺涂层——没食子酸/己二胺交联薄膜的制备与性能研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2015.