表面渗硼对新型 β-钛合金耐腐蚀性能的影响

王昊，张娇娇，冯晓飞，王鹤峰

（太原理工大学 机械与运载工程学院，太原 030024）

摘　要：目的 通过制备渗硼涂层，提高新型 β-钛合金的耐腐蚀性能。**方法** 采用固体粉末包埋法，在空气及氮气气氛中，选取不同的渗硼温度，在 Ti-33Nb-4Sn（简称 334 钛合金）表面渗硼。对比分析涂层的表面、断面形貌，总结渗硼涂层的生长规律。利用电化学测试方法，测定 334 钛合金制备渗硼涂层前后，在 3.5% NaCl 溶液中的电化学腐蚀性能。**结果** 在不同的制备条件下，都能在新型 β-钛合金表面形成一层致密、连续的渗硼层。该涂层为双层结构，由致密的外涂层和针须状的过渡层组成。在相同气氛下制备的涂层，随着渗硼温度的升高，致密外涂层厚度增加。在氮气气氛下制备的涂层致密外涂层的厚度，大于同温度下在空气中制备的涂层。基体经过不同条件渗硼处理后，开路电位都明显提高。334 钛合金基体的自腐蚀电位为 0.6692 V，腐蚀电流密度为 2.356 μA/cm^2。在空气中经过 900、950、1000 ℃温度渗硼后，自腐蚀电位分别为 1.0993、0.7221、0.7639 V，腐蚀电流密度分别为 3.377、2.274、1.584 μA/cm^2。在氮气中经过 900、950、1000 ℃温度渗硼后，自腐蚀电位分别为 0.8617、0.6804、0.8143 V，腐蚀电流密度分别为 1.358、1.445、1.525 μA/cm^2。**结论** 渗硼涂层可提高 334 钛合金的耐腐蚀性能，氮气气氛下制备涂层的耐腐蚀性能明显优于空气气氛。

关键词：β-钛合金；渗硼；改性涂层；电化学测试；固体包埋法；腐蚀

中图分类号：TG174.4　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-3660(2020)05-0230-07

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.05.028

Effect of Surface Boronizing on Corrosion Resistance of New β-Titanium Alloy

WANG Hao, ZHANG Jiao-jiao, FENG Xiao-fei, WANG He-feng

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

ABSTRACT: The paper aims to improve the corrosion resistance of new β-titanium by preparing boronizing coating. In this paper, the surface of Ti-33Nb-4Sn (334 titanium) was boronized in air and N_2 atmosphere at different temperature by pack cementation. The surface morphology and cross-section morphology of the coating were compared and analyzed, and the growth rule of boronizing coating was summarized. The electrochemical test method was used to determine the electrochemical corrosion performance of 334 titanium alloy substrate and boronizing coating in 3.5% (mass fraction) NaCl solution. Under different preparation conditions, a dense and continuous boronizing coating can be formed on the surface of the 334 titanium

收稿日期：2019-04-30；**修订日期：**2019-08-09

Received：2019-04-30；**Revised：**2019-08-09

基金项目：国家自然科学基金（11172195，11702185）

Fund：Supported by the National Natural Science Foundation of China (11172195, 11702185)

作者简介：王昊（1993—），男，硕士研究生，主要研究金属材料表面改性。

Biography：WANG Hao (1993—), Male, Master, Research focus: surface modification of metallic materials.

通讯作者：王鹤峰（1978—），男，博士，副教授，主要从事材料表面改性与防护的研究。邮箱：wanghefeng@tyut.edu.cn

Corresponding author：WANG He-feng (1978—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: surface modification and protection of materials. E-mail: wanghefeng@tyut.edu.cn

引文格式：王昊，张娇娇，冯晓飞，等. 表面渗硼对新型 β-钛合金耐腐蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 230-236.

WANG Hao, ZHANG Jiao-jiao, FENG Xiao-fei, et al. Effect of surface boronizing on corrosion resistance of new β-titanium alloy[J]. Surface technology, 2020, 49(5): 230-236.

alloy. The coating consists of a dense outer layer and a needle-like transition layer. For the coating prepared in the same atmosphere, the thickness of the dense outer coating increased with the increase of the boronizing temperature. The thickness of the dense outer coating prepared in N_2 atmosphere was thicker than the coating prepared in air at the same temperature. After boronizing treatment under different conditions, the open circuit potential of the substrate increased. The self-corrosion potential of 334 titanium alloy was 0.6692 V and its corrosion current density was 2.356 μA/cm^2. After boronizing in the air at 900, 950, 1000 ℃, the self-corrosion potential was 1.0993, 0.7221, 0.7639 V, the corrosion current density was 3.377, 2.274, 1.584 μA/cm^2. After boronizing in N_2 atmosphere at 900, 950, 1000 ℃, the corrosion potential was 0.8617, 0.6804, 0.8143 V, and the corrosion current densities was 1.358, 1.445, 1.525 μA/cm^2. The boronizing coating can improve the corrosion resistance of 334 titanium alloy. The coatings made in N_2 atmosphere have better comprehensive corrosion resistance than that made in air.

KEY WORDS: β-titanium alloy; boronizing; modified coating; electrochemical test; pack cementation; corrosion

由于钛和钛合金具有密度小，比强度、比刚度高的优点，相比于常见金属，有着优异的生物相容性和较强的耐腐蚀性，因此被誉为“现代金属”和“战略金属”。其中 β 型钛合金是一种弹性模量低、强度较高、加工性能良好的新型钛合金，在生物医学、航天航空、交通机械等工业领域都有较好的应用前景[1]。钛铌合金，是 β-钛合金的主要类型之一。其中铌是一种稳 β 合金元素，且具有良好的生物相容性和无毒性，是一种优异的生物医学材料[2]。部分钛铌合金相对于常见的 TC4 钛合金，耐腐蚀性能有所下降[3]。TC4 表面渗铌后，其耐腐蚀性能也会有不同程度的降低[4]。钛铌合金相变过程中，由于 Nb 在 β 相中固溶度较大，发生偏聚，从而在 α 相与 β 相之间形成了原电池，这对合金的耐腐蚀性能有不良的影响[5]。一些学者对不同成分、加工工艺的钛铌合金在 NaCl 溶液、人工体液等溶液中的腐蚀行为展开了有关研究[6-8]。

渗硼法是钛合金表面处理的常见方法[9-13,16-22]，目前国内外研究者对于钛合金表面渗硼进行了一些较高水平的研究。Bose 等人[11]对渗硼后的 TC4 钛合金在林格氏液中的腐蚀行为开展了相关研究，结果表明，渗硼层厚度增加，有利于提高其耐腐蚀性能。Ebrahimi 等人[12]对渗硼后的纯钛进行了浸泡实验，渗硼涂层表现出良好的耐蚀性能。汪旭东[13]对 TC4 钛合金的渗硼工艺进行了探究，结果表明，由经过优化的渗硼工艺得到的渗硼涂层，耐磨性及耐腐蚀性均有所提高。

相对于液体、气体渗硼法，固体渗硼法有着易清洁、低污染等优点[14-15]。相对于等离子渗硼、激光渗硼等方法，包埋法具有设备成本低、操作流程简单等优点[16-19]。衣晓红等人[20-22]的研究表明，渗硼涂层的生长与渗硼温度有关。由于生成渗硼涂层所需温度较高，容易在生成过程中受到氧元素的影响而氧化分解[23]，因此有必要对渗硼气氛及温度对渗硼涂层的影响进行研究，以得到更好的渗硼涂层。目前关于钛合金渗硼的研究绝大部分是基于 α+β 型钛合金（如 TC4 合金）而展开的，对于 β-钛合金的渗硼涂层研究较少，其耐腐蚀性能也有待研究。综上所述，本实验采用固体包埋法，在不同气氛和温度条件下，对新型 β-钛合金进行表面渗硼，并且对制备得到的渗硼表面和基体合金的电化学性能进行比较，评估渗硼涂层对 β-钛合金耐腐蚀性能的影响。

1　实验

1.1　制备涂层

选用 β-钛合金 Ti-33Nb-4Sn（简称 334 钛合金）作为基材，它的化学成分（以质量分数计）为：Ti 46%，Nb 46.76%，Sn 7.24%。试样尺寸为 20 mm×10 mm×1 mm。试样表面用 500#、800#、1000#、1500#、2000#砂纸逐级打磨，分别使用 3.5、1.5 W 的金刚石研磨膏进行抛光，放入无水乙醇中超声波清洗，烘干待用。

包埋法所用渗硼剂组成为：硼砂（B_4C，37.5%）作为供硼剂，碳化硅（SiC，37.5%）作为填充剂，石油焦粉（C，25%）作为催化剂。将三种粉末放入球磨机中充分研磨，使其混合均匀。使用 4 cm×2 cm×1 cm 的陶瓷干锅，将 334 钛合金试样包埋于该混合粉末中。

分别在空气和氮气气氛中进行制备。将坩埚分别放入箱式和管式电阻炉中加热至 300 ℃，保温 0.5 h，除去水分。再分别升温至 900、950、1000 ℃，保温 6 h，最后空冷至室温。将试样取出，放入丙酮中超声清洗，备用。

1.2　表征及测试

借助 JEOL7100F 型扫描电子显微镜（SEM）观察渗硼后钛合金的表面形貌。用线切割机将试样一端垂直于表面切开，得到横截面。对截面打磨，抛光，清洗烘干之后，用科勒试剂（2 mL HF，5 mL HNO_3，43 mL H_2O）腐蚀后，在电镜下观察其截面微观形貌。采用 CHI660E 型电化学工作站，测试 334 钛合金基体及不同气氛、温度下制备的渗硼涂层在 3.5%NaCl 溶液中的电化学性能。测试前将待测试样与铜导线链接，留出 1 cm^2 的反应面积，使用 704 硅胶将剩余表面与裸露导线进行包裹，达到绝缘效果，作为工作电

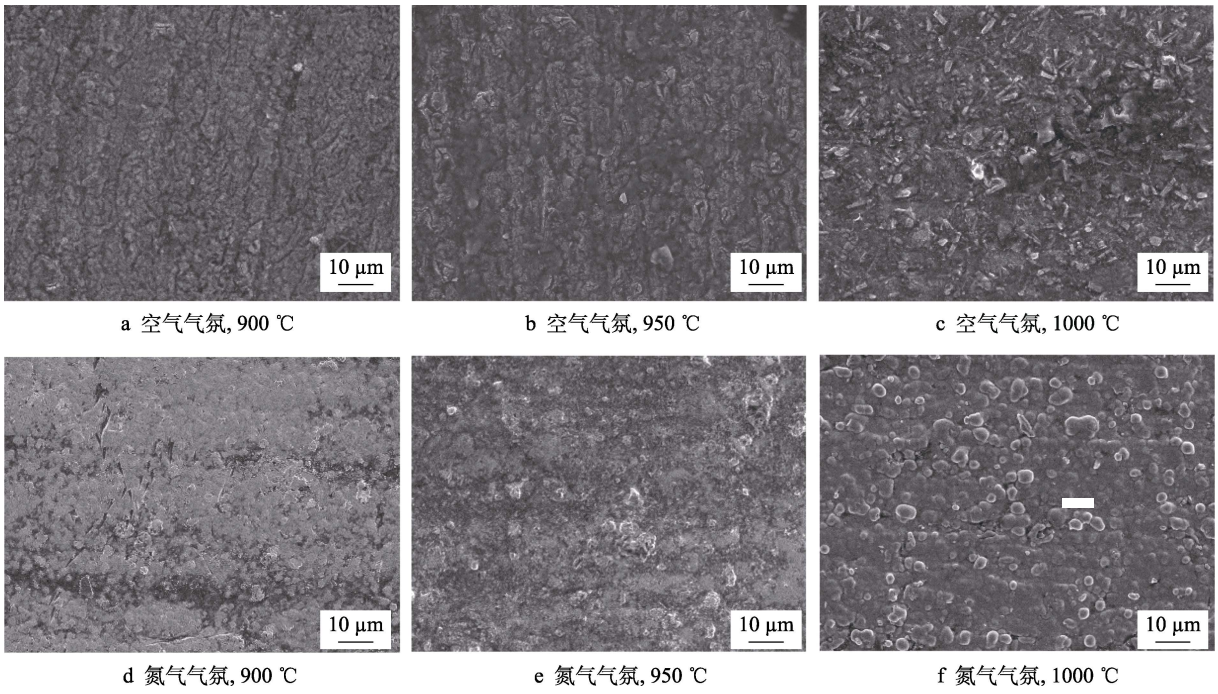
极，使用 4 cm^2 的铂片电极作为辅助电极，使用饱和甘汞电极作为参比电极。由上述电极组成三电极体系，将各电极在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 30 min，以达到动态化学稳定，然后测得开路电位和动电位极化曲线。开路电位的测试时间为 1800 s，动电位极化曲线的电位测试范围为–1~2 V，扫描速率为 1 mV/s。

2　结果与讨论

2.1　渗层微观形貌

334 钛合金基体以及不同气氛和温度下制备的渗硼的表面形貌如图 1 所示。可以看出，各种工艺得到的渗硼表面形貌都均匀致密。不同的是，在空气气氛中得到的渗硼表面呈现出絮状颗粒分布，其间有明显的缝隙；在氮气气氛中得到的渗硼表面呈现小球颗粒状，分布较为均匀，相对空气中制备的渗硼表面更加完整。各个渗硼涂层表面都分布有细小颗粒及微小裂纹，这是金属材料表面经过热处理后的典型形貌。

从图 2 中可以看出，渗层由两部分组成。靠外有一层致密的外涂层，由外涂层向基体延伸，可以看到许多针须状结构。其数量由表面到基体逐渐减少，楔入基体，构成了过渡层。



a 空气气氛, 900 ℃　b 空气气氛, 950 ℃　c 空气气氛, 1000 ℃

d 氮气气氛, 900 ℃　e 氮气气氛, 950 ℃　f 氮气气氛, 1000 ℃

图 1　334 钛合金在不同渗硼条件下制备的涂层表面形貌

Fig.1 Surface micrographs of coating on 334 titanium alloy under different boronizing conditions: a) air atmosphere 900 ℃; b) air atmosphere 950 ℃; c) air atmosphere 1000 ℃; d) N_2 atmosphere 900 ℃; e) N_2 atmosphere 950 ℃; f) N_2 atmosphere 1000 ℃

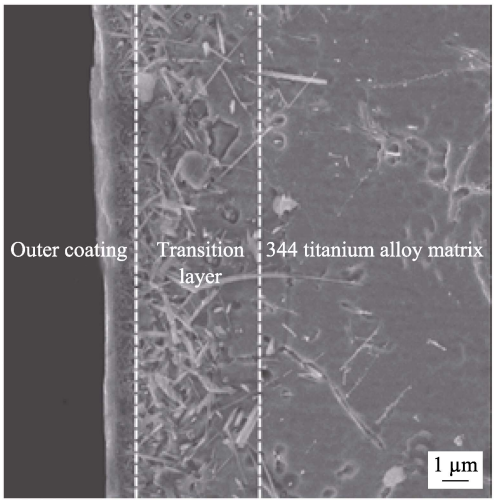


图 2　渗硼涂层结构

Fig.2 Structure of boronizing coating

各工艺下 334 钛合金表面渗硼涂层的截面形貌如图 3 所示。由图 3a、c、e 对比可知，随着渗硼温度的提高，外涂层的厚度有所增加，过渡层针须变粗变短。相同温度下，相比空气气氛，在氮气气氛中制备的渗层（见图 3b、d、f），外层厚度有明显的增加，过渡层厚度减小，针须状物数量明显减少，形状变短粗。通过表 1 可以看出，温度和气氛对渗层总厚度影响不大，氮气气氛和更高的温度，均有利于外涂层增厚。

2.2　渗层电化学性能

在不同气氛和温度下，钛合金及其渗硼后的表面开路电位随时间的变化如图 4 所示。可以看出，经渗硼处理后，钛合金表面的开路电位明显高于基体，说明通过渗硼处理能使表面腐蚀倾向变小[24]。在空气气氛中，随着渗硼温度的提升，开路电位呈现下降趋势。

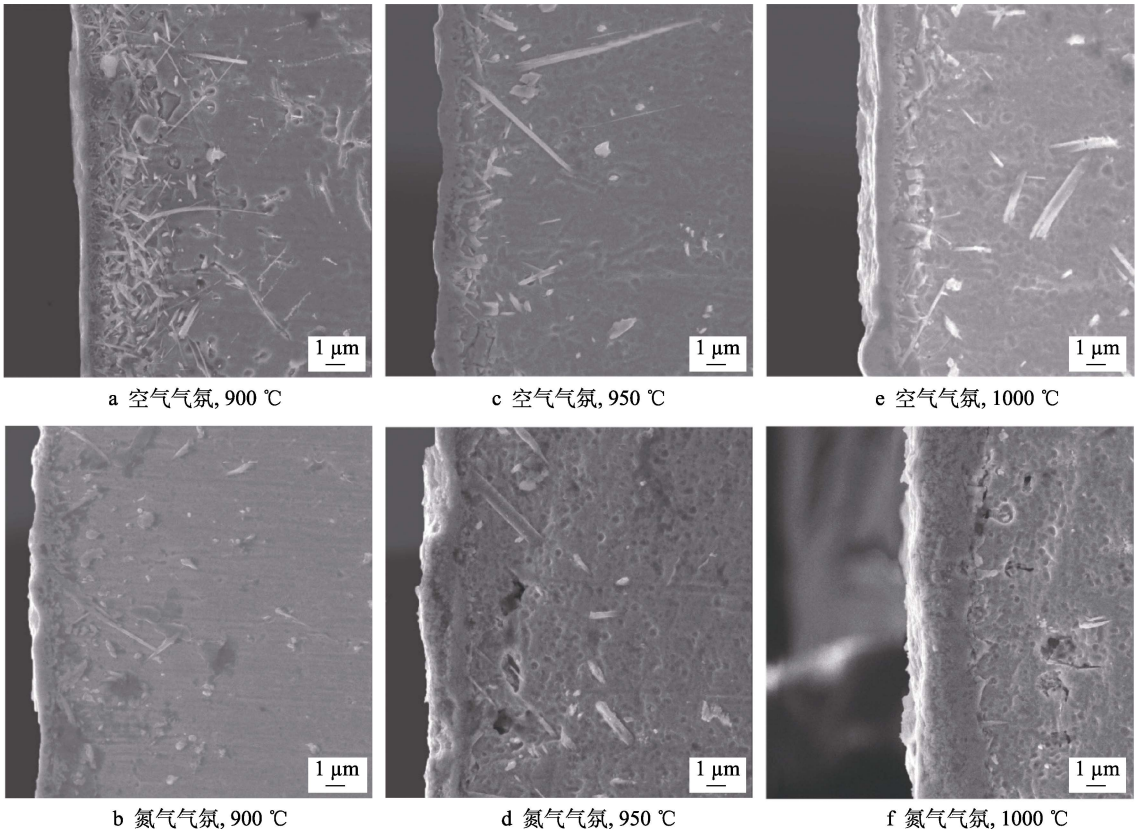


图 3　钛合金表面涂层的截面形貌

Fig.3 Cross-sectional micrographs of coating on titanium alloy: a) air atmosphere 900 ℃; b) N_2 atmosphere 900 ℃; c) air atmosphere 950 ℃; d) N_2 atmosphere 950 ℃; e) air atmosphere 1000 ℃; f) N_2 atmosphere 1000 ℃

表 1　渗硼涂层厚度

Tab.1 Thickness of boronizing coatings

	Air			N_2		
	900 ℃	950 ℃	1000 ℃	900 ℃	950 ℃	1000 ℃
Exterior coating thickness/μm	0.821	1.011	1.221	1.117	1.558	2.459
Coating thickness/μm	6.402	6.486	6.182	6,168	6.255	5.889

氮气气氛中，在三种不同温度下，渗硼涂层的开路电位相差很小。由此可分析得出，在空气气氛中，随着渗硼温度的提高，空气中的氧气对于渗硼表面的影响越来越大，这种影响对于钛合金表面的耐蚀性是不利的。

334 钛合金基体以及在空气、氮气气氛中不同温度下制备的渗硼涂层的极化曲线如图 5 所示。观察 334 钛合金基体的阳极极化曲线可知，在 0.65~1.0 V 之间，随着电位的升高，电流密度升高，这是活性溶

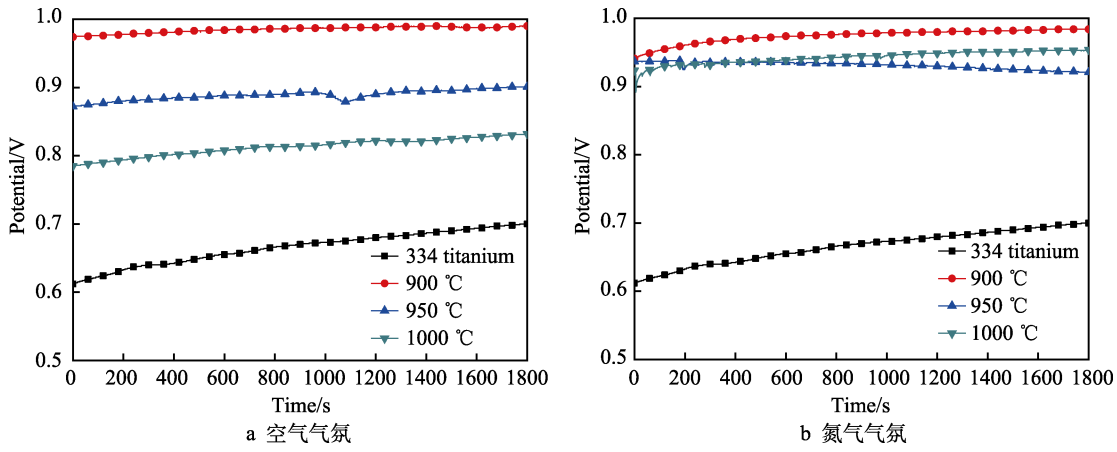


图 4　334 钛合金和渗硼涂层的开路电位-时间曲线

Fig.4 Open circuit potential curves of 334 titanium alloy and boronizing coatings in 3.5% NaCl solution: a) air atmosphere; b) N_2 atmosphere

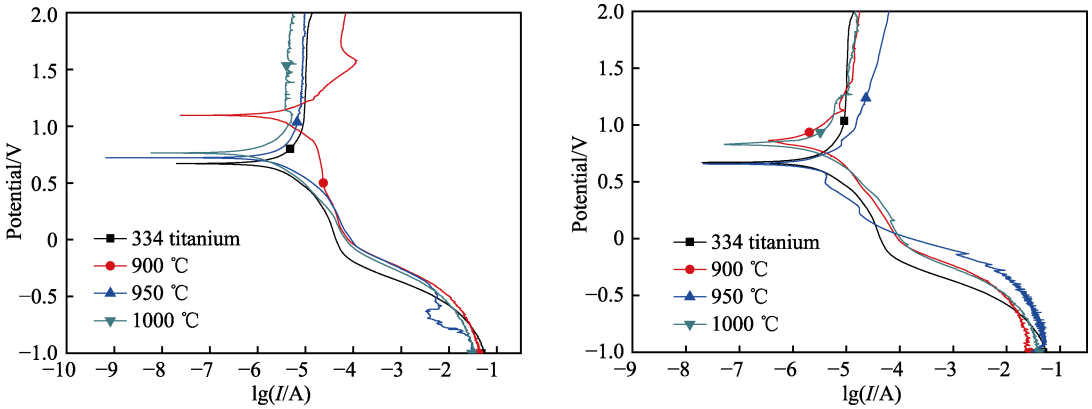


图 5　334 基体以及不同渗硼涂层的极化曲线

Fig.5 Polarization curves of 334 matrix and boronizing coatings in 3.5% NaCl solution: a) air atmosphere; b) N_2 atmosphere

解阶段。随着电位的不断增大，达到 1.1 V 后，电流密度没有明显增加，此时 334 钛合金试样表面处于稳定钝化状态。空气和氮气气氛中制备的渗硼涂层的极化曲线大体相似。通过外延法计算出各试样的电化学参数，见表 2。

由表 2 可以看出，相对于基体的 E_{corr} 值（0.6692 V），各渗硼涂层的 E_{corr} 值均有所提升。E_{corr} 是电化学腐蚀热力学参数。E_{corr} 的升高，表明各渗硼涂层都使钛合金表面更难发生腐蚀。这说明渗硼涂层能有效提升 334 钛合金表面的耐腐蚀能力。

J_{corr} 是电化学腐蚀动力学参数，表示发生腐蚀时表面反应的剧烈程度。可以看出，除了在 900 ℃空气气氛中制备的渗硼涂层的 J_{corr} 值高于基体之外，其余各渗硼涂层的 J_{corr} 值均小于基体。对比空气和氮气气氛制备的涂层的自腐蚀电流密度可以发现，在氮气气氛中制备的涂层的 J_{corr} 值更小。这说明其表面在 3.5% NaCl 溶液中受到腐蚀后，腐蚀速率最慢，受到腐蚀的破坏更小。也说明外涂层厚度是影响腐蚀速率的主要原因，更厚的致密涂层可有效缓蚀。

表 2　电化学测试数据

Tab.2 Electrochemical test data

Simples	E_{corr}/V	J_{corr}/(μA·cm^{-2})	J_{pass}/(μA·cm^{-2})
334 titanium	0.6692	2.356	10.839
Air 900 ℃	1.0993	3.377	57.544
Air 950 ℃	0.7221	2.274	9.772
Air 1000 ℃	0.7639	1.584	4.841
N_2 900 ℃	0.8617	1.358	16.218
N_2 950 ℃	0.6804	1.445	47.863
N_2 1000 ℃	0.8143	1.525	14.723

腐蚀实验前后，334 钛合金基体表面形貌如图 6 所示。通过对比可以明显观察到，腐蚀后的钛合金基体表面出现了许多小孔，这是点蚀的特征。观察图 7 可知，渗硼涂层表面没有明显的孔洞出现。说明不同的渗硼工艺对钛合金表面的耐腐蚀性能都有所提升，这与电化学测试的数据分析结果相吻合。

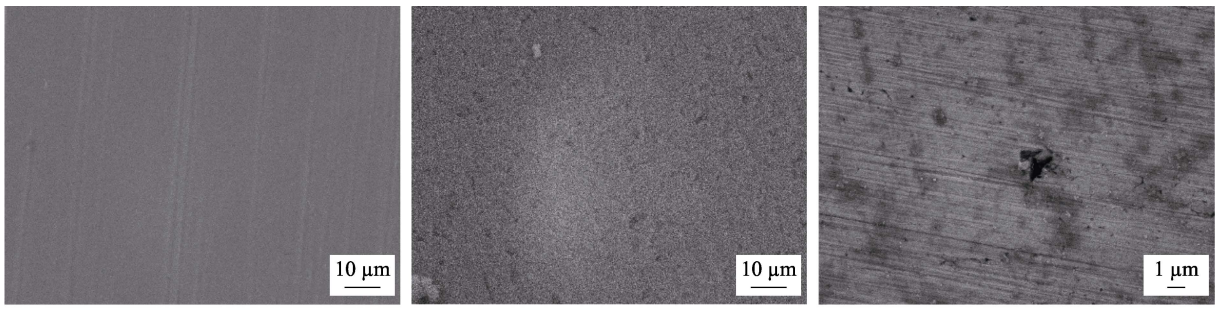
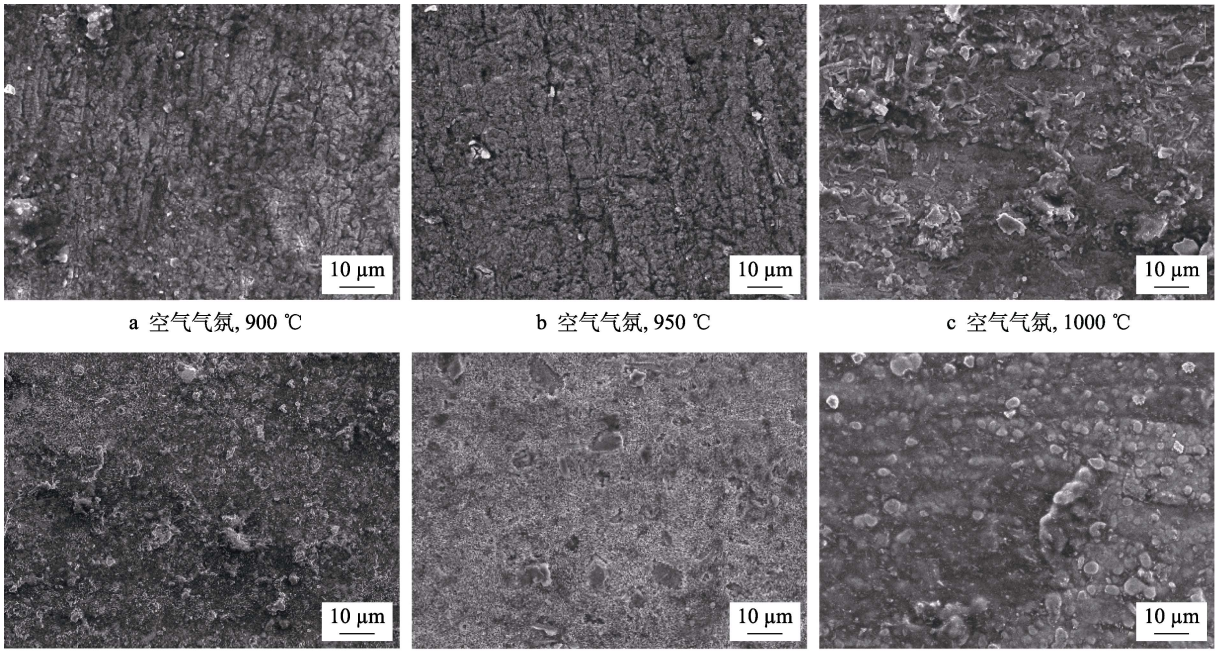


图 6　334 钛合金基体腐蚀前后表面形貌

Fig.6 334 titanium surface micrographs before and after corrosion: a) before corrosion; b) after corrosion; c) local enlargement of Fig.b



a 空气气氛, 900 ℃　b 空气气氛, 950 ℃　c 空气气氛, 1000 ℃

d 氮气气氛, 900 ℃　e 氮气气氛, 950 ℃　f 氮气气氛, 1000 ℃

图 7　不同渗硼条件下制备的涂层腐蚀后的表面形貌

Fig.7 Coating surface micrographs of different boronizing conditions after corrosion: a) air atmosphere 900 ℃; b) air atmosphere 950 ℃; c) air atmosphere 1000 ℃; d) N_2 atmosphere 900 ℃; e) N_2 atmosphere 950 ℃; f) N_2 atmosphere 1000 ℃

3　结论

1）在两种气氛下，采用固体包埋法都在 334 钛合金表面制备出了均匀、连续的钛硼化合物涂层。

2）渗硼层由致密的外表层和不均匀针须状结构的过渡层组成。相同气氛制备条件下，随着渗硼温度的升高，涂层外层的厚度有所增加。无氧的氮气气氛明显更有利于外层致密涂层厚度的增长。

3）电化学测试结果表明，相比 334 钛合金基体，各渗硼试样的开路电位、自腐蚀电位均有所提高，更不易发生腐蚀。在氮气气氛下制备的试样表面，拥有更低的自腐蚀电流密度和更厚的致密渗层，在含 Cl^- 的溶液中表现出更好的耐腐蚀性。

参考文献：

[1] BANERJEE R, NAG S, FRASER H L. A novel combinatorial approach to the development of Beta titanium alloys for orthopaedic implants[J]. Materials science and engineering, 2005, 25(3): 282-289.

[2] RAJAMALLU K, MANISH K, SUHASH R. First principles theoretical investigations of low Young's modulus Beta Ti-Nb and Ti-Nb-Zr alloys compositions for biomedical applications[J]. Materials science and engineering C, 2015, 50: 52-58.

[3] 卢盼娜, 杨耀军, 韩志军, 等. 低弹性模量 Ti-33Nb-4Sn, Ti-31Nb-3Zr-4Sn 钛合金在模拟人工体液中的腐蚀行为研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(14): 89-92.
LU Pan-na, YANG Yao-jun, HAN Zhi-jun, et al. Electrochemical corrosion behavior of low elastic modulus Ti-33Nb-4Sn, Ti-31Nb-3Zr-4Sn alloys in stimulated body fluids[J]. Hot working technology, 2017, 46(14): 89-92.

[4] 刘道新, 唐长斌, 李凡巧, 等. 钛合金表面等离子渗铌及其耐磨性能研究[J]. 材料保护, 2011, 44(4): 136-141.
LIU Dao-xin, TANG Chang-bin, LI Fan-qiao, et al. Study on niobium plasma infiltration and wear resistance of titanium alloys[J]. Materials protection, 2011, 44(4): 136-141.

[5] 林建国, 罗联. Nb 含量及相组成对 Ti-Nb 二元合金腐蚀性能的影响[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2009, 31(1): 38-41.
LIN Jian-guo, LUO Lian. Influence of Nb content and microstructure on the electrochemical behavior of Ti-Nb alloys[J]. Natural science journal of Xiangtan University, 2009, 31(1): 38-41.

[6] WANG J C, LIU Y J, QIN P, et al. Selective laser melting of Ti-35Nb composite from elemental powder mixture: Microstructure, mechanical behavior and corrosion behavior[J]. Materials science and engineering A, 2019, 760: 214-224.

[7] CHELARIU R, BOLAT G, IZQUIERDO J, et al. Metastable Beta Ti-Nb-Mo alloys with improved corrosion resistance in saline solution[J]. Electrochimica acta, 2014, 137: 280-289.

[8] UREÑA J, TSIPAS S, PINTO A M, et al. Corrosion and tribocorrosion behaviour of β-type Ti-Nb and Ti-Mo surfaces designed by diffusion treatments for biomedical applications[J]. Corrosion science, 2018, 140: 51-60.

[9] KULKA M, MAKUCH N, DZIARSKI P, et al. Microstructure and properties of laser-borided composite layers formed on commercially pure titanium[J]. Optics and laser technology, 2014, 56: 409-424.

[10] CAI C, RADOSLAW C, ZHANG J, et al. In-situ preparation and formation of TiB/Ti-6Al-4V nanocomposite via laser additive manufacturing: Microstructure evolution and tribological behavior[J]. Powder technology, 2019, 342: 73-84.
[11] BOSE S, PATHAK L C, SINGH R. Response of boride coating on the Ti-6Al-4V alloy to corrosion and fretting corrosion behavior in Ringer's solution for bio-implant application[J]. Applied surface science, 2018, 433: 1158-1174.
[12] EBRAHIMI A, ESFAHANI H, FATTAH-ALHOSSEINI A, et al. In-vitro electrochemical study of TiB/TiB_2 composite coating on titanium in Ringer's solution[J]. Journal of alloys and compounds, 2018, 765: 826-834.
[13] 汪旭东. Ti6Al4V 钛合金固体渗碳、渗硼工艺探究及组织性能研究[D]. 苏州: 江苏大学, 2017.
WANG Xu-dong. Research on solid carburizing and boronizing process of Ti6Al4V and its microstructure and properties[D]. Suzhou: Jiangsu University, 2017.
[14] 吉泽升. 多元渗硼技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004: 26-38.
JI Ze-sheng. Multielement boronizing technology and application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004: 26-38.
[15] 齐宝森, 王忠诚, 李玉婕. 化学热处理技术及应用实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 279-283.
QI Bao-sen, WANG Zhong-cheng, LI Yu-jie. Chemical heat treatment technology and application examples[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015: 279-283.
[16] KAESTNER P, OLFE J, RIE K T. Plasma-assisted boriding of pure titanium and TiAl6V4[J]. Surface and coatings technology, 2001,142-144: 248-252.
[17] QIN L, LIU C, YANG K, et al. Characteristics and wear performance of borided Ti6Al4V alloy prepared by double glow plasma surface alloying[J]. Surface and coatings technology, 2013, 225: 92-96.
[18] 尹研, 李翠玲, 刘成松, 等. AISI316 不锈钢表面等离子渗硼及摩擦磨损性能的研究[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 43-47.
YIN Yan, LI Cui-ling, LIU Cheng-song, et al. Study on tribological performance of surface plasma boronized AISI316 stainless steel[J]. Surface technology, 2015, 44(2): 43-47.
[19] KULKA M, MAKUCH N, DZIARSKIA P. Gradient boride layers formed by diffusion carburizing and laser boriding[J]. Optics and lasers in engineering, 2015, 67: 163-175.
[20] SARMA B, RAVI CHANDRAN K S. Accelerated kinetics of surface hardening by diffusion near phase transition temperature: Mechanism of growth of boride layers on titanium[J]. Acta materialia, 2011, 59(10): 4216-4228.
[21] LI Feng-hua, ZHANG Jing-lei, FAN Zhan-guo, et al. Growth kinetics of titanium boride layers on the surface of Ti6Al4V[J]. Acta metallurgica sinica (english letters), 2010, 23(4): 293-300.
[22] YI Xiao-hong, FAN Zhan-guo, ZHANG Jing-lei, et al. Surface modification of Ti-6Al-4V alloy by pack boronizing[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(9): 119-123.
[23] WILLIAM G, FAHRENHOLT Z. 超高温陶瓷: 应用于极端环境的材料[M]. 周延春, 冯志海译. 北京: 国防工业出版社, 2016: 294-301.
WILLIAM G, FAHRENHOLT Z. Ultra-high temperature ceramics: materials for extreme environment applications[M]. ZHOU Yan-chun, FENG Zhi-hai, Translate. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 294-301.
[24] 柏舸, 闫莹, 周浩, 等. 带锈青铜文物材料在环境模拟介质中的电化学腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(2): 79-86.
BAI Ge, YAN Ying, ZHOU Hao, et al. Electrochemical corrosion behavior of bronze artifact materials covered with patina in environment simulation solutions[J]. Corrosion and protection, 2019, 40(2): 79-86.

（上接第 229 页）

[18] WALVEKAR A A, SADEGHI F. Rolling contact fatigue of case carburized steels[J]. International journal of fatigue, 2017, 95: 264-281.
[19] 王海斗, 张志强, 李国禄, 等. 等离子喷涂层接触疲劳失效模式及失效机理的研究[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(3): 251-257.
WANG Hai-dou, ZHANG Zhi-qiang, LI Guo-lu, et al. Investigation of contact fatigue failure mode and mechanism of plasma spraying coating[J]. Tribology, 2012, 32(3): 251-257.
[20] 黎国猛, 梁益龙, 范航京, 等. 水射流喷丸预处理对 42CrMo 钢氮化后接触疲劳性能的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(9): 3107-3112.
LI Guo-meng, LIANG Yi-long, FANG Hang-jing, et al. Effects of water jet shot peening pretreatment on contact fatigue properties of 42CrMo steel after plasma nitriding [J]. Materials reports, 2019, 33(9): 3107-3112.
[21] RAHMAN Z, OHBA H, YOSHIOKA T, et al. Incipient damage detection and its propagation monitoring of rolling contact fatigue by acoustic emission[J]. Tribology international, 2009, 42(6): 807-815.
[22] WANG G H, QU S G, XIONG Z H, et al. Wear behavior and mechanism of a sliding pair of 0.1C-3Cr-2W-V nitride steel rubbing against an aluminum bronze alloy[J]. Journal of iron and steel research, international, 2016, 23 (3): 281-288.
[23] 高玉魁. 喷丸对 TC18 钛合金拉-拉疲劳性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(9): 1000-1002.
GAO Yu-kui. Influence of shot peening on tension-tension fatigue properties of TC18 titanium alloy[J]. Rare metal materials and engineering, 2004, 33(9): 1000-1002.
[24] STEWART S, AHMED R. Contact fatigue failure modes in hot isostatically pressed WC-12% Co coatings[J]. Surface and coatings technology, 2003, 172(2-3): 204-216.