

钛表面夹层薄膜对微小碎片撞击防护的影响

张婷婷¹, 杨桂民¹, 魏强¹, 罗栋元¹, 白羽²

(1.天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300350; 2.北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: **目的** 提高航天器材料表面空间微小碎片的防护能力。**方法** 基体采用高纯钛。以氟化铵的乙二醇溶液为电解液, 采用阳极氧化法在钛表面制备类蜂窝状 TiO_2 纳米管阵列夹层; 用氢氧化钠溶液, 通过碱热处理方法, 在钛表面制备泡沫状多孔结构夹层。再采用溶胶凝胶方法制备 SiO_2 表板覆层, 最终在钛表面形成具有类蜂窝状纳米管阵列夹层和泡沫状多孔结构夹层的两种防护膜层体系。通过扫描电子显微镜、超景深三维体式显微镜分析表面形貌; 采用激光驱动飞片模拟碎片撞击试验, 评价膜层对微小碎片撞击防护的效果; 用纳米压痕仪测定材料表面载荷-深度曲线, 评价表面力学性能。**结果** 钛金属表面具有类蜂窝状纳米管阵列和泡沫状多孔结构夹层时, 表面接触刚度可明显降低, 提高了外力作用下的接触变形能力。受到高速撞击时, 可以较好地吸收高速撞击产生的能量, 对高速撞击有一定的防护作用。**结论** 在钛表面制备了 TiO_2 纳米管阵列/ SiO_2 和多孔结构/ SiO_2 两种复合防护膜系, 可以有效提高表面抗冲击能力。开展表面膜层结构化设计, 是对空间微小碎片表面防护的有益探索, 对于空间微小碎片防护具有重要意义。

关键词: 空间微小碎片; 类蜂窝结构; 泡沫结构; 激光驱动飞片; 纳米压痕

中图分类号: O484.4; V416.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)05-0015-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.05.003

Protection Effect of Interlayer Film on Titanium Surface against Micro-debris Impact

ZHANG Ting-ting¹, YANG Gui-min¹, WEI Qiang¹, LUO Dong-yuan¹, BAI Yu²

(1.School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2.Beijing Satellite Environment Engineering Research Institute, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: The work aims to improve surface protection of spacecraft materials against space micro-debris. With high purity titanium as the substrate and ammonium fluoride glycol solution as electrolyte, quasi-honeycomb TiO_2 nanotube array interlayer was prepared in anodic oxidation method. Porous foam structure was prepared on the Ti surface using sodium hydroxide solution in the method of alkali-heat-treatment. SiO_2 sheet coatings was prepared in sol-gel method on the two kinds of interlayers. Finally, two protective film systems, namely, quasi-honeycomb nanotube array interlayer and foamed porous structure interlayer, formed on the Ti surface. Surface morphology was studied with SEM and ultra DOF 3D stereomicroscope. Impact test of micro-debris was simulated with laser-driven flyer. Load-depth curves were measured with nano-indenter, mechanical properties of

收稿日期: 2018-02-10; 修订日期: 2018-03-12

Received: 2018-02-10; Revised: 2018-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41274191)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (41274191)

作者简介: 张婷婷 (1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为空间碎片与原子氧表面效应研究。

Biography: ZHANG Ting-ting (1992—), Female, Master, Research focus: space debris and atomic oxygen effects.

通讯作者: 魏强 (1978—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为空间材料环境行为与表面工程。

Corresponding author: WEI Qiang (1978—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: environment behavior of space materials and surface engineering.

surface were evaluated. The quasi-honeycomb nanotube array interlayer and foamed porous structure interlayer on Ti surface could significantly reduce surface contact stiffness and improve contact deformability under the effect of external force. In case of high velocity impact, the energy generated by high-speed impact could be better absorbed, and certain protective effect was produced under the effect of high-speed impact. Therefore, the composite protective coating systems, i.e., TiO_2 nanotube array/ SiO_2 and porous Ti/ SiO_2 are prepared on titanium surface, which can effectively improve impact resistance of Ti surface. Structured design of surface film is a helpful exploration of surface protection against space micro-debris, and is of great significance to protection against space micro-debris.

KEY WORDS: space micro-debris; quasi-honeycomb structure; foam structure; laser-driven flyer; nano-indentation

随着人类太空活动的日益频繁,空间碎片数量逐年大幅增加,对在轨航天器的威胁也随之增加^[1-2]。在人类开展航天活动的空间内,特别是在低地球轨道(LEO)空间中,空间碎片已被认为是影响航天任务的一个现实问题。空间碎片探测活动表明,空间碎片数量随尺寸的减少而成倍增加。由空间碎片模式 MASTER-2005 计算可知,绝大多数碎片为直径 1~1000 μm 的微小碎片,而直径小于 1 μm 的碎片更是难以数计^[3]。相对于大碎片而言,空间微小碎片单次撞击虽不足以产生严重后果,但由于数量巨大,其长期累积撞击所产生的影响不可忽视^[4-5]。空间微小碎片的累积撞击会对航天器材料和系统产生严重影响,已成为制约长寿命、高可靠性航天器发展的重要空间环境因素。因此,必须开展空间微小碎片防护。

空间微小碎片撞击航天器表面可引起表面穿孔、等离子放电、碰撞污染、光学“砂蚀”效应等损伤,使航天器表面热控、光学等性能退化或结构受损^[6-8]。微小碎片的防护主要着眼于结构和材料两方面^[9]。其中,防护结构通常采用蜂窝结构^[10]、多孔泡沫结构^[11],Whipple 防护屏;防护材料则为高强铝、金属纤维板、碳/聚酰亚胺、Nextel 高强度陶瓷纤维、石英玻璃等强度高、质量轻、性能稳定的材料。除了改变航天器自身结构和材料外,对航天器材料进行表面改性也是重要的防护方法之一。薄膜技术在空间环境的表面防护中起到了相当大的作用,例如常见的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 及类金刚石等无机硬质薄膜^[12-16],硅氧烷有机柔性薄膜以及有机/无机复合薄膜等^[17]。

目前,对于表面防护膜层的研究主要集中于材质属性,而对于其进一步细微结构化设计的研究,还鲜有报道。因此,开展表面防护膜层结构化设计,对于空间微小碎片防护的研究具有重要意义。

SiO_2 薄膜牢固稳定、抗磨耐蚀,且可充实薄膜表面缺陷,是常用的空间防护薄膜^[18-19]。钛及其合金具有质量轻、比强度高、耐腐蚀性好等优点,是重要的航空航天飞行器材料之一^[20]。特别是近年来,对于钛及其合金表面微/纳米结构设计已有大量报道。例如,钛表面改性后既可获得分布均匀整齐的 TiO_2 纳米管

阵列^[21],也可形成泡沫状多孔结构^[22]。然而,钛及其合金表面微/纳米结构设计主要集中在医用领域,在航天领域的应用还很少。

因此,本文将防护结构和材料设计微缩化应用于表面防护膜层微结构,分别采用阳极氧化和碱热处理的方法在钛金属表面制备了类蜂窝状纳米管阵列和泡沫状多孔结构夹层,并进一步采用溶胶凝胶方法覆以 SiO_2 无机硬质薄膜封装成整体,形成具有多墙面以及连续网状结构的防护膜层体系以分散冲击挤压力^[23-24],探索表面膜层微结构化对空间微小碎片的防护效果。

1 试验

1.1 夹层结构制备

本试验基片为纯度 99.9% 的高纯钛,通过阳极氧化法在其表面制备类蜂窝状 TiO_2 纳米管阵列夹层^[25]。首先将钛片用 600#、1000#、1500# 金相砂纸按顺序打磨,然后用无水乙醇超声清洗,最后用去离子水洗净,吹干。取 800 mL 烧杯一个,依次加入 1.8 g 氟化铵、4 mL 去离子水,待其完全溶解后,加入乙二醇至溶液体积为 400 mL。加入磁搅拌子,在磁力搅拌器上搅拌均匀,即得到所需电解液。将洗净的钛片放入 100 mL 电解液中,在直流电源下进行阳极氧化,电压为 60 V,电解时间为 2 h。反应完成后,将钛片放在无水乙醇中超声清洗 2 min,再用去离子水清洗,干燥待用。

采用碱热处理法在钛表面制备泡沫状多孔夹层^[22]。首先将钛片用 600#、1000#、1500# 金相砂纸按顺序打磨,随后用无水乙醇超声清洗,最后用去离子水洗净,吹干。配制浓度为 5 mol/L 的浓氢氧化钠溶液,将钛片置于其中,在 60~90 $^{\circ}\text{C}$ 下保温 6~8 h,取出,清洗,干燥待用。

1.2 表板薄膜制备

采用溶胶凝胶方法在具有类蜂窝状 TiO_2 纳米管阵列或泡沫状多孔结构的钛片表面镀制 SiO_2 膜层,

得到表板薄膜^[26]。

SiO₂ 溶胶的制备步骤如下: 首先将 210 mL 无水乙醇和 210 mL 正硅酸乙酯混合搅拌均匀, 然后将混合均匀的 45 mL 无水甲酸、9 mL 盐酸和 16.2 mL 水逐渐滴入其中, 最后滴入 4~5 滴二甲基甲酰胺作为助剂来增加其与夹层的附着作用。

将具有类蜂窝状 TiO₂ 纳米管阵列或泡沫状多孔结构的钛片置于提拉镀膜机上, 使用所制得的 SiO₂ 溶胶进行提拉镀膜法镀膜。提拉次数为 3 次, 每次提拉之间的间隔为 10 min, 在液体中浸渍的时间为 10 s。待镀膜完成后, 将其置于马弗炉中烧结, 烧结温度为 500 °C, 升温速度为 10 °C/min。在 500 °C 下保温 1 h 后随炉冷却, 得到具有微结构化夹层的防护涂层。

1.3 性能测试及组织观察

采用日本日立 (HITACHI) 公司的 S4800 型场发射扫描电子显微镜和 Keyence VHX-2000C 体式显微镜观察材料表面形貌。采用 X-ray diffraction (XRD, D8 Advanced, Bruker, Germany) 表征样品的物相组成, 工作参数: Cu K α_1 射线 ($\lambda=0.154$ nm), 工作电压 40 kV, 工作电流 40 mA。

通过激光驱动铝飞片模拟空间微小碎片^[27], 激光器为北京镭宝 Nimma900 型固体激光器, 其发射的激光光束经光学系统进入真空室。工作参数: 激光波长 1064 nm, 输出能量 850 mJ, 激光单点触发模式; 铝飞直径 120 μ m, 铝飞厚度 20 μ m, 飞片速度 2~3 km/s; 真空室真空度 6×10^{-2} Pa。

使用美国 TI-Premier 型纳米压痕仪测定材料表面载荷-深度曲线, 表征材料表面力学性能。工作参数: Berkovich 金刚石压头, 最大载荷 300 μ N, 最大压痕深度 30 nm。

2 结果及分析

2.1 夹层结构形貌分析

图 1 为 TiO₂ 纳米管阵列夹层扫描电镜形貌。可以看出, 采用阳极氧化法在钛片表面制备了分布密集的 TiO₂ 纳米管阵列, TiO₂ 纳米管的圆度较好, 孔径大小均匀, 整体类似蜂窝状, 但是表面有起伏。图 1b 为局部放大图, 图中测量了五个 TiO₂ 纳米管的孔径, 分别为 128、117、117、119、130 nm, 平均值为 122.2 nm。此外, TiO₂ 纳米管管壁厚约为 10 nm。

图 2 为钛金属表面多孔夹层结构的扫描形貌。从图中可以看出, 钛金属经碱热处理后, 表面得到了多孔结构, 且多孔结构表面存在一些沟壑。图 2b 为局部放大图, 可见多孔结构呈现出泡沫状构造。

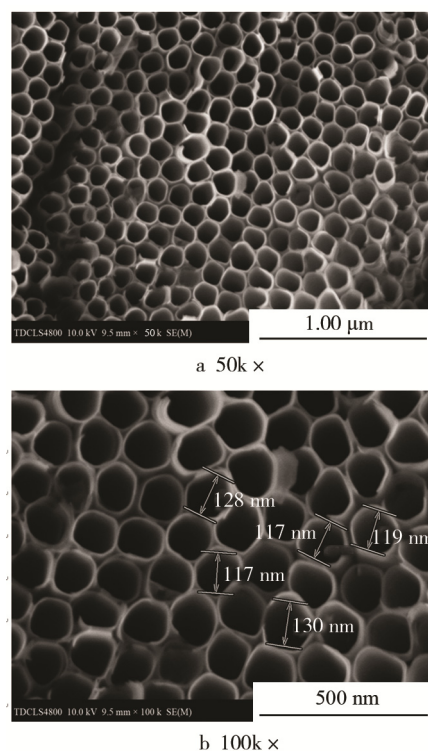


图 1 阳极氧化法制备的二氧化钛纳米管阵列扫描电镜图
Fig.1 SEM images of TiO₂ nanotubes array made in the method of anodic oxidation

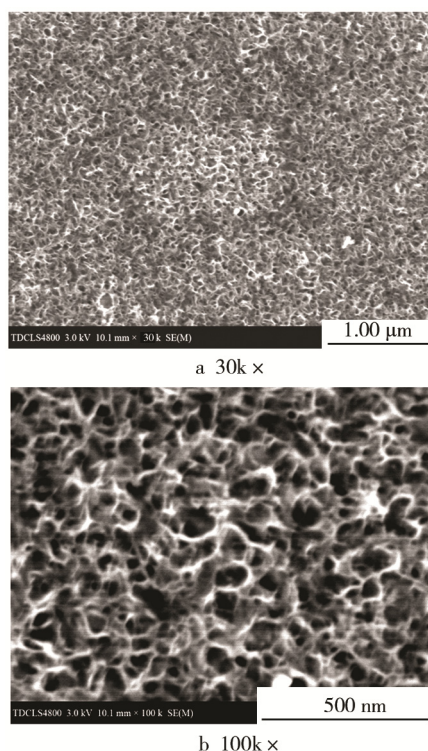


图 2 碱热处理制备的多孔结构扫描电镜图
Fig.2 SEM images of porous structure of alkali-heat treated titanium

2.2 表板薄膜形貌分析

图 3 为具有 TiO₂ 纳米管阵列的钛片表面镀覆 SiO₂ 薄膜形貌。其中, 图 3a 为光学显微形貌图, 可

以看出所制备的表板 SiO_2 薄膜表面完全覆盖了 TiO_2 纳米管阵列结构,但表面并不平整。图 3b 为 3D 显微形貌,可以进一步看到表板 SiO_2 薄膜表面的高低起伏。这主要是与 TiO_2 纳米管阵列的夹层结构有关。

图 4 为具有泡沫状多孔结构的钛片表面镀覆

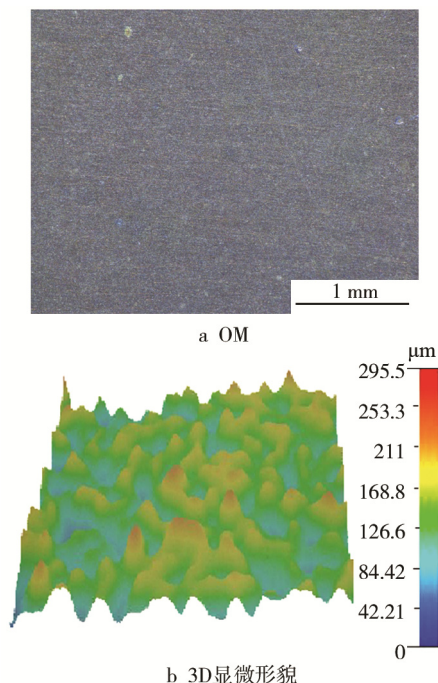


图 3 具有 TiO_2 纳米管阵列的钛片表面镀覆 SiO_2 薄膜后的形貌

Fig.3 OM (a) and 3D microstructure (b) of TiO_2 nanotube array coated with SiO_2 film

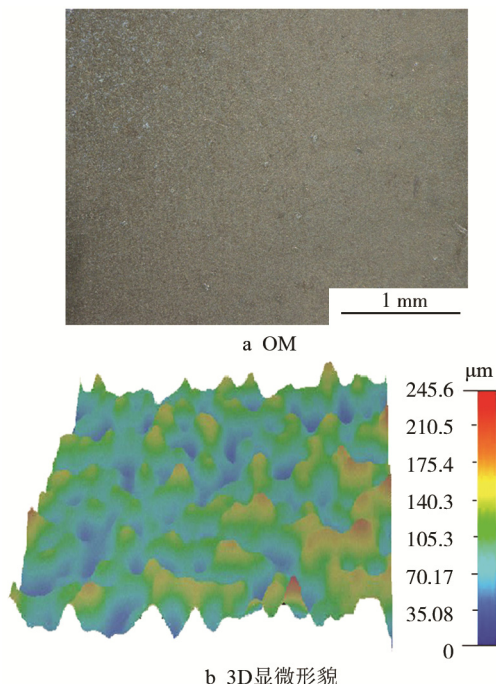


图 4 多孔夹层结构镀覆 SiO_2 膜后的光学显微观察和 3D 显微形貌图

Fig.4 OM (a) and 3D microstructure (b) of porous interlayer structure coated with SiO_2 film

SiO_2 薄膜形貌。与图 3 对比发现,两种表板 SiO_2 薄膜的形貌相近似,均有效实现了对夹层结构的覆盖,同时表面均呈现较均匀的起伏态势。

由上可知,在钛片表面成功制备了具有类蜂窝状纳米管阵列夹层和泡沫状多孔结构夹层的两种防护膜层体系。

2.3 模拟微小碎片撞击研究

针对表面具有类蜂窝状纳米管阵列和泡沫状多孔结构夹层的钛片以及无涂层纯钛片,采用激光驱动飞片模拟空间微小碎片撞击,对比分析夹层结构对微小碎片撞击防护的影响,光学显微观察和 3D 显微形貌结果如图 5 所示。可以看出,无防护涂层的纯钛片被撞击后,撞击损伤坑较为集中,最大坑深约 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。而具有夹层防护结构的钛片被撞击后,形成的损伤区域范围较大,呈现由中心向四周放射性溅射的特征,最大坑深分别约为 $20\text{ }\mu\text{m}$ (纳米管阵列夹层结构) 和 $25\text{ }\mu\text{m}$ (多孔夹层结构)。由此可见,钛片表面的纳米管阵列和多孔夹层结构提高了对微小碎片撞击的抵抗能力,降低了撞击产生的损伤程度。

2.4 纳米压痕测试分析

采用纳米压痕仪对材料表面进行力学性能评价,测定载荷-深度曲线。用纳米压痕仪测得所镀制 SiO_2 表板膜层的厚度约为 300 nm ,确定试验加载方式为 $1/10$ 厚度模式,即最大压痕深度为 30 nm 。为了更清楚地说明两种防护涂层的力学性能,同时以相同模式测定无涂层纯钛片的载荷-深度曲线,结果如图 6 所示。可见,纯钛片在达到最大压痕深度 30 nm 时,表面载荷可达 $300\text{ }\mu\text{N}$,且卸载后仍然具有较大的残余变形,产生的塑性变形量在 15 nm 左右。而表面具有纳米管阵列和多孔结构夹层防护钛片的最大加载载荷分别为 100 、 $130\text{ }\mu\text{N}$,卸载后残余塑性变形量分别为 7 、 10 nm 。

典型的纳米压痕的载荷-深度曲线如图 7 所示^[28]。图中, P_{\max} 为最大载荷; h_{\max} 为压痕过程的最大压深; h_c 为卸载曲线顶部切线和横轴的交点; h_f 为完全卸载后残余压痕深度; S 为卸载曲线顶部斜率,物理意义可反映系统接触刚度,表达式为式 (1)。

$$S = \frac{P_{\max}}{h_{\max} - h_c} \quad (1)$$

由此分析可知,钛片表面具有纳米管阵列和多孔夹层防护结构时,接触刚度约为纯钛片表面的 21% 和 32% ,表面接触刚度明显降低,这将提高外力作用下的接触变形能力,有效缓解和吸收高速撞击产生的能量,实现对高速撞击的防护作用。这一结果与图 5 给出的微小飞片撞击后钛片表面扫描电镜与三维体氏显微镜形貌结果一致。

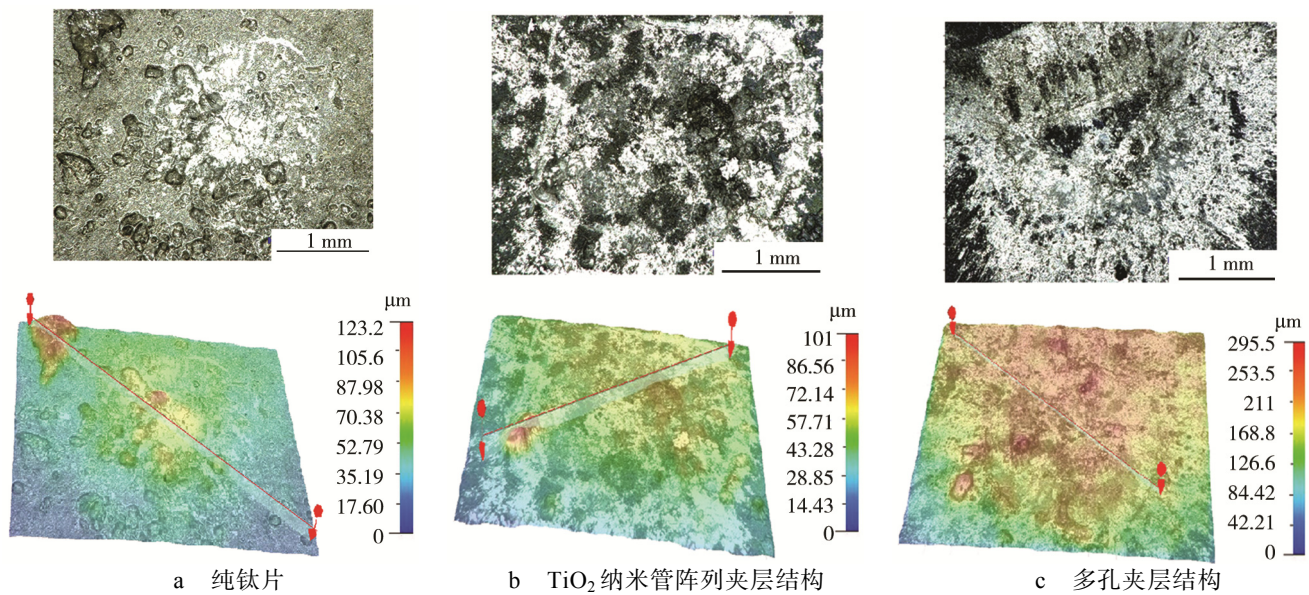


图 5 微小飞片撞击后钛片表面光学显微观察与三维体氏显微镜形貌图
Fig.5 OM and 3D microscope morphology of Ti surface after micro flyer impact: a) pure Ti substrate, b) TiO_2 nanotubes array interlayer structure, c) porous interlayer structure

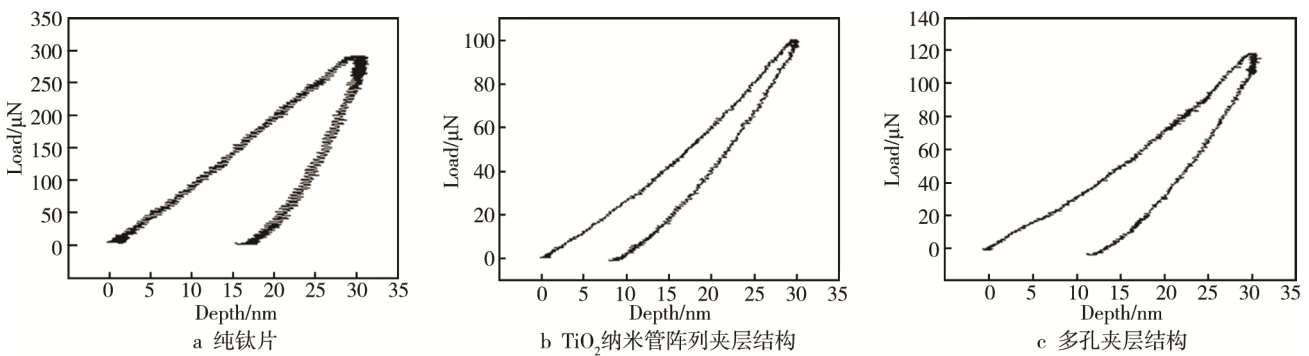


图 6 纳米压痕测定载荷-深度曲线
Fig.6 Load-depth curves from nano-indentation test: a) pure Ti substrate, b) TiO_2 nanotubes array interlayer structure, c) porous interlayer structure

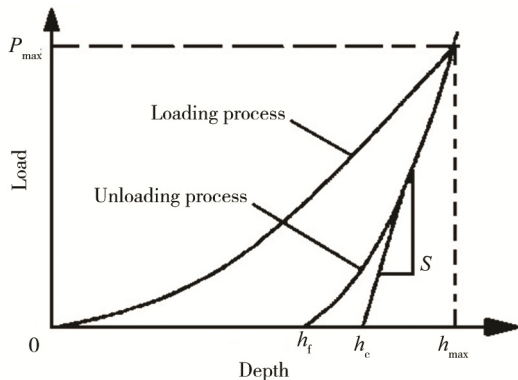


图 7 典型的纳米压痕的载荷-深度曲线^[28]
Fig.7 Typical load- depth curves from nano-indentation test

3 结论

1) 用阳极氧化法和碱热处理法在金属钛表面制备了类蜂窝 TiO_2 纳米管阵列和泡沫多孔结构两种夹

层，用溶胶凝胶法在其表面进一步镀制 SiO_2 膜层作为表板薄膜，最终在钛表面形成了 TiO_2 纳米管阵列/ SiO_2 和多孔结构/ SiO_2 两种防护膜系。

2) 钛金属表面的类蜂窝 TiO_2 纳米管阵列和泡沫多孔夹层结构明显降低了表面接触刚度，提高了外力作用下的接触变形能力，可有效缓解和吸收高速撞击产生的能量，使表面撞击坑变浅、损伤程度降低，提高了对空间微小碎片高速撞击的防护作用。

参考文献：

[1] 都亨, 刘静. 载人航天和空间碎片[J]. 中国航天, 2002(2): 18-23.
DU Heng, LIU Jing. Manned Space Flight and Space Debris[J]. Aerospace China, 2002(2): 18-23.
[2] LIOU J C, JOHNSON N L. Risks in Space from Or-

- biting Debris[J]. Science, 2006, 311: 340-341
- [3] 黄建国, 刘丹秋, 高著秀, 等. 空间微小碎片累积撞击损伤效应加速模拟研究[J]. 物理学报, 2012, 61(2): 565-569.
HUANG Jian-guo, LIU Dan-qiu, GAO Zhu-xiu, et al. Simulation of Culminated Microimpacts of Micro Debris to Solar Cells and Function Ddegradation[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(2): 565-569.
- [4] 李宏伟, 黄建国, 韩建伟, 等. 空间微小碎片撞击对太阳能电池表面损伤的评估方法[J]. 科学通报, 2010, 55(26): 2576-2581.
LI Hong-wei, HUANG Jian-guo, HAN Jian-wei, et al. Evaluation Method of Surface Damage on Solar Cells by Small Space Debris Impact[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(26): 2576-2581.
- [5] DROLSHAGEN G. Impact Effects from Small Size Meteoroids and Space Debris[J]. Advances in Space Research, 2008, 41: 1123-1131.
- [6] 蔡明辉, 吴逢时, 李宏伟, 等. 空间微小碎片超高速撞击诱发的等离子体特性研究[J]. 物理学报, 2014, 63(1): 457-462.
CAI Ming-hui, WU Feng-shi, LI Hong-wei, et al. Study on Plasma Characteristics from Hypervelocity Impacts by Small Space Ddebris[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(1): 457-462.
- [7] 白羽, 庞贺伟, 龚自正, 等. 空间微小碎片累积作用下材料光学性能退化预示模型适用性研究[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(4): 306-309.
BAI Yu, PANG He-wei, GONG Zi-zheng, et al. A Study on the Models for Degradation of Optical Properties Caused by Space Micro-debris[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(4): 306-309.
- [8] 白羽, 杨德庄. 空间微小碎片对光学玻璃的污染效应研究[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(5): 262-264.
BAI Yu, YANG De-zhuang. A Study on Pollution Effect of Space Micro-debris on Optical Glass[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(5): 262-264.
- [9] 童靖宇. 国外空间微小碎片被动防护技术研究概况及几点建议[C]//2002 年度中国宇航学会结构强度与环境工程专业委员暨航天第十情报网学术交流会论文集. 绵阳: 中国宇航学会结构强度与环境工程专业委员, 2002: 221-227.
TONG Jing-yu. General Situation and Suggestions of Passive Protection Technology for Space Debris in Foreign Countries[C]//Proceedings of the Symposium on Structural Strength and Environmental Engineering of China Aerospace Society and Academic Symposium on Aerospace Tenth Information Network. Mianyang: Structural Strength and Environmental Engineering Specialized Committee, Chinese Society of Astronau-
- tics, 2002: 221-227.
- [10] 赵金森. 铝蜂窝夹层板的力学性能等效模型研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
ZHAO Jin-sen. Study on the Equivalent Models of Aluminum Honeycomb Sandwich Plates[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [11] BANHART J. Manufacture, Characterization, and Application of Cellular Metal and Metal Foams [J]. Progress in Materials Science, 2001, 46: 559-632.
- [12] CAO Zhou, JING Hui. Proton Radiation Effects of Optical Reflectors Used in Spacecraft Optical Instruments[C]//50th International Astronautical Congress. Paris: International Astronautical Federation, 1999: 1-7.
- [13] COOPER R, UPADHYAYA H P, MINTON T K, et al. Protection of Polymer from Atomic Oxygen Erosion Using Al_2O_3 Atomic Layer Deposition Coatings[J]. Thin Solid Films, 2008, 516(12): 4036-4039.
- [14] KLEIMAN J K, ISKANDEROVA Z A, PÉREZ F J, et al. Protective Coatings for LEO Environments in Spacecraft Applications[J]. Surface & Coatings Technology, 1995, s76-77(95): 827-834.
- [15] 曹燕, 牛锦超, 牟永强, 等. CAST 激光驱动微小飞片及其超高速撞击效应研究进展[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(2): 162-175.
CAO Yan, NIU Jin-chao, MOU Yong-qiang, et al. Recent Progresses of Laser-driven Flyer Technique and Micro-space Debris Hypervelocity Impact Tests in China Academy of Space Technology[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2015, 32(2): 162-175.
- [16] 姜海富, 曹燕, 牟永强, 等. 光学玻璃微米级空间碎片防护膜: 中国, CN106987804A[P]. 2017-07-28.
JIANG Hai-fu, CAO Yan, MU Yong-qiang, et al. Protective Film of Optical Glass in Micro Scale against Space Debris: China, CN106987804A[P]. 2017-07-28.
- [17] DWORAK D P, BANKS B A, KARNIOTIS C A, et al. Evaluation of Protective Silicones/Siloxane Coating in Simulated Low-earth-orbit Environment[J]. Journal of Spacecraft & Rockets, 2006, 43(2): 393-401.
- [18] 杨道奇, 付秀华, 耿似玉, 等. 0.6-1.55 μm 可见/近红外超宽带增透膜的研制[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 270-276.
YANG Dao-qi, FU Xiu-hua, GENG Si-yu, et al. Design and Fabrication of 0.6-1.55 μm Visible/Near Infrared Ultra-broad Band Antireflection Coatings[J]. Chinese Optics, 2012, 5(3): 270-276.
- [19] 冯丽萍, 刘正堂. SiO_2 薄膜对蓝宝石表面扩高温强度的改善[J]. 无机材料学报, 2006, 21(1): 217-222.
FENG Li-ping, LIU Zheng-tang. Improving on Surface and High Temperature Strength of Sapphire by SiO_2 Films[J]. Journal of Inorganic Materials, 2006, 21(1):

- 217-222.
- [20] BOYER R R. An Overview on the Use of Titanium in Aerospace Industry[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1996, 213(1-2): 103-114.
- [21] 刘非拉, 肖鹏, 周明, 等. 二氧化钛纳米管阵列的制备、改性及应用[J]. *无机化学学报*, 2012, 28(5): 861-872.
- LIU Fei-la, XIAO Peng, ZHOU Ming, et al. Preparation, Modification and Application of TiO_2 Nanotube Arrays[J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 2012, 28(5): 861-872.
- [22] WEI Qiang, CUI Zhen-duo, YANG Xian-jin, et al. Improving the Bioactivity of NiTi Shape Memory Alloy by Heat and Alkali Treatment[J]. *Applied Surface Science*, 2008, 255(2): 462-465.
- [23] KIMURA T, ITOH T, FUSAZAKI T, et al. A Numerical Modeling for Eigenvibration Analysis of Honeycomb Sandwich Panels[J]. *Composited Interface*, 2012, 8(6): 393-402.
- [24] 黄洁, 马兆侠, 兰胜威, 等. 带隔热层蜂窝夹层结构的超高速撞击特性研究[J]. *宇航学报*, 2010, 31(8): 2043-2049.
- HUANG Jie, MA Zhao-xia, LAN Sheng-wei, et al. Study on Hypervelocity Impact Characteristics for Honeycomb Sandwich with Multi-layer Insulation[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(8): 2043-2049.
- [25] DAWEI G, GRIMES C A, VARGHESE O K, et al. Titanium Oxide Nanotube Arrays Prepared by Anodic Oxidation[J]. *Journal of Materials Research*, 2001, 16(12): 3331-3334.
- [26] 张锐, 秦丹丹, 王海龙, 等. 溶胶凝胶制备 SiO_2 工艺[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2006, 27(3): 119-122.
- ZHANG Rui, QIN Dan-dan, WANG Hai-long, et al. Preparation of SiO_2 Sol-Gel[J]. *Journal of Zhengzhou University(Engineering Science)*, 2006, 27(3): 119-122.
- [27] SONG Li-hong, WEI Qiang, BAI Yu, et al. Impact Effects on Fused Quartz Glass by Ground Simulating Hypervelocity Space Debris[J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56(7): 724-731.
- [28] 贾世奎, 李成贵, 刘春红. 超光滑表面纳米压痕硬度测试研究[J]. *计量测试与检定*, 2008, 18(2): 3-5.
- JIA Shi-kui, LI Cheng-gui, LIU Chun-hong. Research on Nano-hardness Testing of Super Smooth Surface[J]. *Metrology Test Technology and Verification*, 2008, 18(2): 3-5.