基于空心碳球的超黑涂层的制备与性能研究

胡越凡[1],曹康丽[2],荣　昊[1],刘　刚[2],周　博[2],潘阳阳[2],李瑜婧[2],李　垚[3],赵九蓬[1],潘　磊[1]
(1.哈尔滨工业大学 化工与化学学院,黑龙江 哈尔滨 150001;2.上海卫星装备研究所,上海 200240;
3.哈尔滨工业大学 航天学院 复合结构与材料研究所,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘　要: 针对空间光学系统中的杂散光抑制难题,设计并制备了基于空心碳球(HCS)的超黑涂层。对涂层的颜基比进行优化,发现在最佳颜基比1∶2的条件下,可获得高达0.983的太阳吸收比,结合力等级为2级,符合应用要求。研究表明:在涂层成膜过程中,黏合剂并未进入HCS中空部分,保留的亚波长小孔可有效降低涂层表观折射率,从而降低涂层在太阳波段上的反射率;HSC团聚形成的颗粒有助于涂层形成微米级陷光结构,进一步提高涂层的太阳吸收比。

关键词: 杂散光; 空心碳球; 太阳吸收比; 结合力; 颜基比; 亚波长小孔; 陷光结构
中图分类号: V 45　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.03.005

Preparation and Properties of Ultra-Black Coating Based on Hollow Carbon Sphere

HU Yuefan[1], CAO Kangli[2], RONG Hao[1], LIU Gang[2], ZHOU Bo[2], PAN Yangyang[2], LI Yujing[2], LI Yao[3], ZHAO Jiupeng[1], PAN Lei[1]
(1.School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China; 2.Shanghai Institute of Spacecraft Equipment, Shanghai 200240, China; 3.Center for Composite Materials and Structure, School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract: To deal with the stray light suppression in space optical system, an ultra-black coating based on hollow carbon sphere (HCS) is designed and prepared. The pigment-to-binder ratio (P/B) is optimized. It is found that under the optimal pigment-to-binder ratio of 2∶1, the solar adsorptance of up to 0.983 can be obtained, and the adhesion level is 2, which meet the application requirements. Studies have shown that during the coating film formation process, the adhesive does not enter the hollow part of the HCS, which means that the reserved sub-wavelength pores can reduce the apparent refractive index of the coating effectively and thus the reflectance of the coating on the solar band will decrease. Moreover, the particles formed by HSC aggregation contribute to the formation of a micro-scale light trapping structure in the coating, which further improves the solar absorptance.

Key words: stray light; hollow carbon sphere; solar absorptance; adhesion; pigment-to-binder ratio (P/B); sub-wavelength pore; light trapping structure

0　引言

菲涅尔反射定律指出,由于空气和材料界面处存在折射率的突变,该界面处不可避免地会发生反射现象。杂散光的存在对高精度光学仪器会产生很多负面影响[1-4],例如2013年12月发射升空的盖亚太空望远镜,杂散光的存在干扰了其对弱光星系的观测,影响了银河系星图的精确绘制。为降低杂散光的反射,需要设计一种在宽波长范围内都具有极低反射率的超黑表面。

研究者通常采用3种机制形成低反射表面:

收稿日期: 2020-01-13; **修回日期:** 2020-03-20
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51603123);上海航天科技创新基金资助项目(SAST2017-065)
作者简介: 胡越凡(1997—),男,硕士生,主要研究方向为超黑涂层的制备与性能研究。
通信作者: 潘　磊(1978—),男,博士,副研究员,主要研究方向为微米纳米尺度上有序微结构的制备及应用。

1）形成较大的凹陷（通常是微米级），即陷光结构，入射光将在凹陷内发生多次反射和吸收[5-10]；2）引入低密度材料作为中间或梯度折射率层，以抑制菲涅耳反射[7,11-18]；3）使用在宽波段上具有消光系数的吸收剂（如碳或金属纳米粒子）吸收入射光[5,19-20]。

由于低廉的价格和非常宽的吸收带，碳材料一直是高吸收涂层中最常见的光吸收剂。根据机制2，低密度碳材料应当具有更优良的光吸收性能。常见的低密度碳材料主要有碳纳米管和碳气凝胶。文献[14]中通过化学气相沉积法制备出垂直排列的碳纳米管阵列，低密度的碳纳米管阵列具有较低的表观折射率和由之带来的低反射率，最低反射率为0.045%。但是定向碳纳米管阵列力学性能欠佳，与基底结合不紧密，不利于实际应用。文献[15]利用超临界 CO_2 干燥 RF 树脂水凝胶，在 N_2 气氛下将其热解得到碳气凝胶膜，碳气凝胶具有三维网状结构，内部有众多无序小孔，导致太阳反射率降低，最低反射率可达0.24%。但是这些开放性疏松多孔结构同样会导致膜层的机械性能下降，同时该方法得到的碳气凝胶是自立膜，不与基底结合，实用性较低。文献[21]以多壁碳纳米管作吸光剂，按不同比例混合硅黏合剂，喷涂在铝片基底上得到不同颜基比（P/B）涂层。在可见光范围（350～800 nm）内，测得涂层的漫反射率在2.60%～5.11%的范围内；在近红外波段（850～2 400 nm），反射率在4.0%～6.5%的范围内。由于黏合剂的加入，涂层的力学性能和结合力都有较大提升，但是涂层的反射率随之增加，不能满足消杂光应用。

本文提出了以空心碳球（HCS）作吸光剂，氟树脂作黏合剂，并通过喷涂工艺实现高附着覆盖的方案。空心碳球在形成亚波长孔结构的同时，由于具有封闭的球形外壳，能降低涂层的密度并保持一定的力学性能。空心碳球之间会团聚，进一步提高自身力学性能，避免了加入大量黏合剂而导致涂层的反射率大幅提高。而团聚的HCS与黏合剂结合，形成微米级陷光结构，会进一步提升光吸收性能。

超黑涂层原理如图1所示。由于涂层粗糙的表面结构，到达涂层表面的入射光大部分将会被反射进入涂层的“凹坑”结构，并在其中经过多次反射和吸收，同时，HCS引入的亚波长微孔可降低涂层的表观折射率，从而进一步降低涂层整体的反射率。

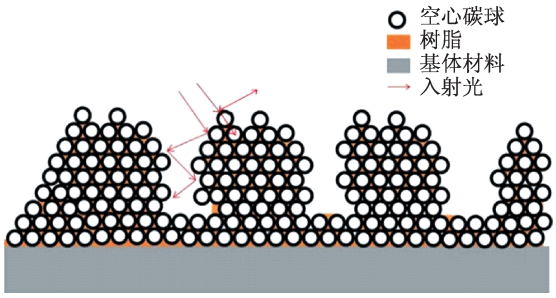


图1　超黑涂层原理

Fig.1　Schematic diagram of ultra-black coating principle

1　实验部分

1.1　原料

硅酸乙酯（TEOS）、氨水、乙酸丁酯，分析纯，西陇科学股份公司；间苯二酚、丙酮、甲醛、十六烷基三甲基溴化铵（CTAB），分析纯，西陇化工公司；无水乙醇，分析纯，苏州正洋化工科技公司；超纯水，自制；氢氟酸，分析纯，长城化工有限公司；黏合剂氟树脂，上海卫星装备研究所提供。

1.2　HCS的合成

根据文献[22-23]合成HCS纳米颗粒。首先向反应器中加入22 mL超纯水、150 mL乙醇和9 mL氨水溶液（质量分数25%），搅拌5 min混合均匀，再将5 g TEOS和20 mL乙醇混合，快速加入反应器中，在40 ℃水浴下保温搅拌8 h，得到 SiO_2 微球胶体溶液。

向反应器中加入500 mL超纯水、2g SiO_2 微球、20 mL CTAB溶液（0.01 mol/L）和3 mL氨水溶液（14 mol/L），搅拌5 min，同时将溶解有2 g间苯二酚的20 mL水和25 mL甲醛溶液（质量分数40%）缓慢加入反应器中，在室温下搅拌15 h。间苯二酚-甲醛（RF）树脂层将被包覆在 SiO_2 微球上，再干燥 SiO_2@RF 微球，于惰性气氛下加热到600 ℃保温煅烧，将RF树脂转化为碳，通过HF溶液去除 SiO_2，得到HCS。HCS合成阶段示意图如图2所示。

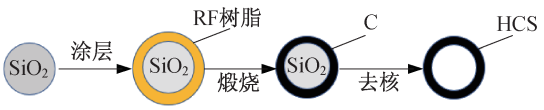


图2　HCS合成阶段示意图

Fig.2　Schematic diagram of HCS synthesis

1.3 HCS涂层的制备

使用尺寸为1 mm×40 mm×40 mm的铝片作基底。先用砂纸打磨粗糙,然后用HF溶液、丙酮和水分别清洗3次;将氟树脂溶解于乙酸丁酯与丙酮(m(乙酸丁酯):m(丙酮)=2:1),得到质量分数为10%的氟树脂溶液;以不同比例混合HCS与氟树脂溶液,超声处理10 min,使用喷枪喷涂在铝片上形成涂层,室温下放置30 min完全固化。

1.4 结构表征与性能测试

利用Hitachi SU 8010显微镜观察HCS合成过程各阶段制得的微球形貌,得到扫描电子显微镜(SEM)图像;使用日立H-7650显微镜观察HCS的中空结构,得到透射电子显微镜(TEM)图像;利用反应离子刻蚀机对HCS涂层进行刻蚀,刻蚀气体选择O_2;设置各工作参数如下:工作功率150 W,反应器压力13.33 Pa,氧气流速30 sccm,反应时间6 min,对刻蚀后的涂层形貌进行表征,探究固化涂层是否保留中空结构。

通过《色漆和清漆漆膜的划格试验》(GB/T 9286—1998)测试HCS涂层的结合力;由Lambda 950分光光度计测量的漫反射光谱,按照ASTM-E490标准太阳能常数和气团起始阳光能光谱辐照表,计算得到太阳反射比R,

$$A+T+R=1 \tag{1}$$

式中:T为太阳透射比;A为太阳吸收比;R为太阳反射比。

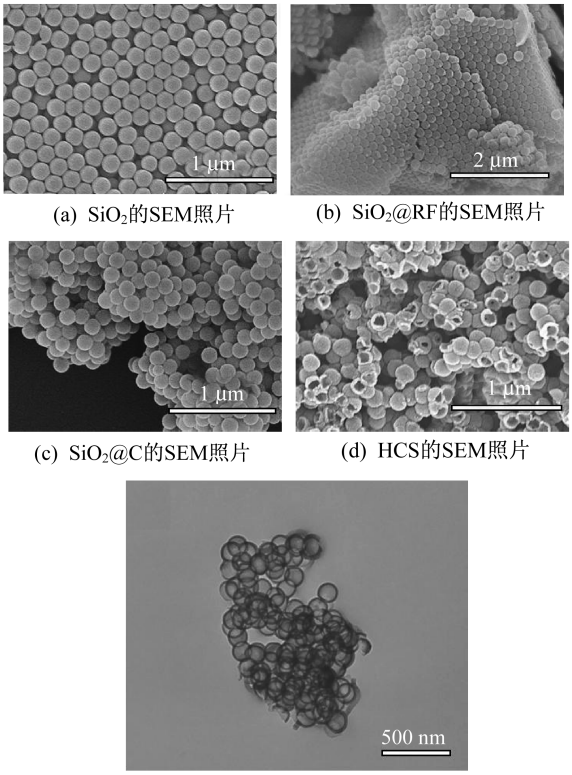
物体所吸收的投射在它上面的总的太阳辐照度的百分比。由于涂层基底为铝片,$T=0$,则

$$A=1-R \tag{2}$$

2 实验结果与讨论

2.1 微球形貌表征

对HCS合成各阶段得到的微球表面形貌进行表征。图3(a)为SiO_2微球的SEM照片,SiO_2微球单分散性较好,直径约173 nm;图3(b)为SiO_2@RF微球的SEM照片,得到的SiO_2@RF微球球形度高,粒径均一,说明反应过程是均匀包覆的;图3(c)为SiO_2@C微球的SEM照片,可以看出在煅烧过程中SiO_2@C微球之间连接很紧密;图3(d)是HCS微球的SEM照片,表面碳球部分破碎,可能是由于空心碳球结构脆弱,在研磨过程中导致表面碳球部分破碎,从破碎的部分可以看到碳球的空心结构;图3(e)为HCS的TEM照片,碳球之间团聚在一起形成大颗粒,从中可更直观看到碳球空心结构,而且团聚体内部HCS并未破碎,只有表面少数碳球破碎,说明这种破碎对整体结构影响不大。



(a) SiO_2的SEM照片 (b) SiO_2@RF的SEM照片 (c) SiO_2@C的SEM照片 (d) HCS的SEM照片 (e) HCS的TEM照片

图3 HCS合成各阶段制得微球的微观形貌

Fig.3 Micro morphology images of microspheres obtained from the synthesis of HCS

2.2 HCS涂层的光学性能

将制得的HCS与氟树脂溶液按不同比例混合均匀,喷涂在基底铝片上,室温下固化得到不同颜基比的HCS涂层。如图4所示,当P/B为1:10时,太阳反射比为3.68%,太阳吸收比为96.32%。随着P/B的增大,涂层太阳吸收比不断增加。当P/B增大到1:2时,太阳反射比为1.63%,太阳吸收比达到98.37%。当进一步提高颜基比,发现涂层的结合力急剧下降,不满足使用要求。1:10 P/B HCS涂层的太阳反射比与1:2 P/B HCS涂层相比高出1倍,这对杂散光的反射抑制很不利。对比两种涂层的表面微观形貌,图5(a)~(d)为1:10 P/B的涂层的

SEM 照片，涂层的表面有微小起伏，当光线射在涂层上时，这种程度的起伏并不能提供多次反射和吸收。同时 HCS 含量相对较少，涂层表观折射率的降低幅度较小，所以该涂层太阳反射比较高；图 5(c)～(d)为 1∶2 P/B 的涂层的微观形貌，从图 5(c)可以看出，涂层表面十分粗糙，存在大量微米级凹陷，这对陷捕入射光非常有利；凸出部分由微米量级的颗粒结合而成，对应着图 3(e)中团聚的 HCS。进一步放大凸出部分，发现从颗粒表面即可清楚地看到每个碳球的形状，说明碳球团聚颗粒表面仅包覆着一层薄薄的树脂，树脂含量很低，涂层整体密度基本由 HCS 决定，所以该涂层太阳吸收比很高。

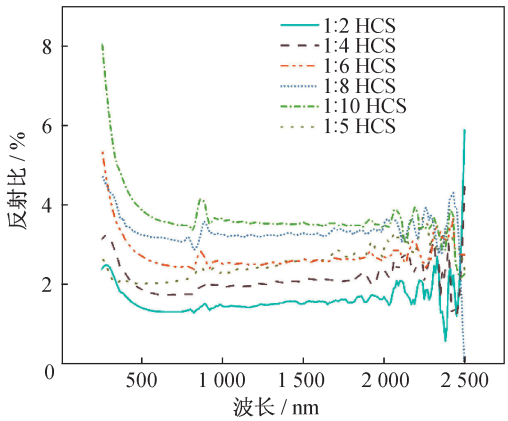
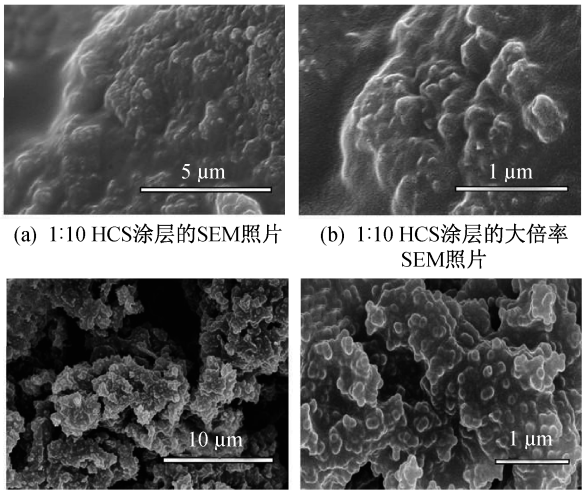


图 4　实心碳球涂层与不同颜基比 HCS 涂层的反射光谱图

Fig.4　Reflection spectra of solid carbon sphere coating and HCS coatings with different *P*/*B*



(a) 1:10 HCS涂层的SEM照片　(b) 1:10 HCS涂层的大倍率SEM照片

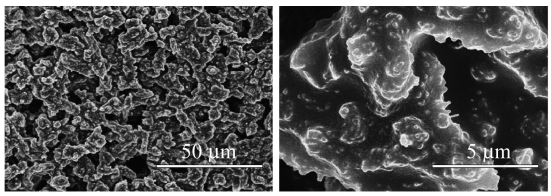
(c) 1:2 HCS涂层的SEM照片　(d) 1:2 HCS涂层的大倍率SEM照片

图 5　颜基比为 1∶10 与 1∶2 的 HCS 涂层的 SEM 照片，

Fig.5　SEM images of HCS coatings when *P*/*B* = 1∶10 and 1∶2

与低 P/B 涂层相比，高 P/B 涂层的亚波长孔结构较多，且具有陷光结构。两种因素共同作用于涂层的光吸收性能。为比较单独一种因素对涂层光学性能的影响，对不具备亚波长孔结构的实心碳球(SCS)的光吸收性能进行探究。为保证 SCS 涂层具有与 HCS 涂层类似的陷光结构，两种碳球应具有相近的体积。根据 HCS 孔径计算，等粒径的 HCS 与 SCS 密度比约为 1∶2.5。为得到与 1∶2 P/B HCS 涂层陷光结构相似的涂层，制备了 P/B 为 1∶5 的 SCS 涂层，并测试其光学性能。光谱图如图 4 所示，SCS 涂层的太阳反射比为 2.21%，太阳吸收比为 97.79%，低于 P/B 为 1∶2、1∶4 的 HCS 涂层，却高于 1∶6～1∶10 P/B HCS 涂层。

SCS 涂层表面微观形貌如图 6 所示，与高颜基比 HCS 涂层相比，它同样拥有陷光结构，影响两者光学性能的主要是亚波长孔结构；与低颜基比 HCS 涂层相比，SCS 涂层的反射率更低，这说明就此两者而言，陷光结构对光学性能的影响更大。



(a) 1:5 SCS涂层的SEM照片　(b) 1:5 SCS涂层的大倍率SEM照片

图 6　颜基比为 1∶5 的 SCS 涂层的 SEM 照片

Fig.6　SEM images of SCS coating when *P*/*B* = 1∶5

2.3 HCS 涂层空心结构验证

2.2 节中对 HCS 涂层形貌和光学性能的分析是建立在涂层中的碳球依然保持中空亚波长结构的前提下，然而 RF 树脂高温烧结后，碳壳层会形成微孔(这也是二氧化硅被去除的通道)。因此，氟树脂溶液有可能通过这些微孔进入 HCS 内部并在里面固化，堵塞微球中空结构。为探究氟树脂是否进入 HCS 内部，本文对固化后的 HCS 涂层进行反应离子刻蚀，如图 7 所示，刻蚀后的 HCS 内部没有堵塞，说明氟树脂没有渗透到 HCS 内部。

为进一步探究氟树脂为何没有进入 HCS 内部，本文对 HCS 表面微孔孔径和氟树脂粒径进行测试。77 K 下 HCS 的氮气吸附脱附等温线如图 8 所示。由图 8 可见，该吸附等温线属于Ⅲ型吸附等温线，碳

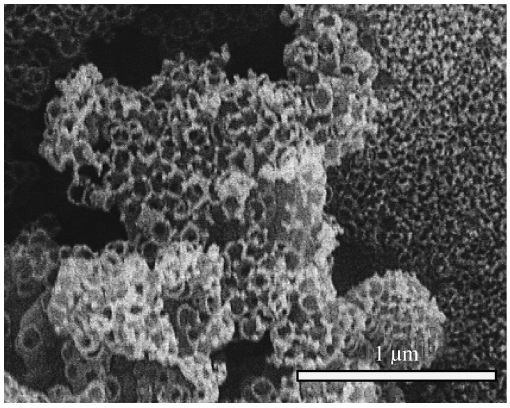


图 7 反应离子刻蚀后的 HCS 涂层的 SEM 照片

Fig.7 SEM images of HCS coating after the reactive ions are etched

球与 N_2 的相互作用力较弱，在低压区($p/p_0<0.1$)仅吸附少量氮气，随着分压的增大，氮气吸附量缓慢增大，在较高的相对压力时($p/p_0>0.97$)吸附量迅速上升。HCS 的孔径分布曲线通过密度泛函理论(DFT)模型计算得到，如图 9 所示，HCS 主要以微孔、大孔结构存在。大孔表现出很窄的孔径分布，约为 120.8 nm。放大图显示了 0～32 nm 范围内的孔径分布，可以看出 HCS 表面微孔孔径约 1 nm。氟树脂溶液的丁达尔现象如图 10 所示，光线通路较明显，则氟树脂的粒径在几十纳米量级，所以氟树脂不会进入 HCS 内部。

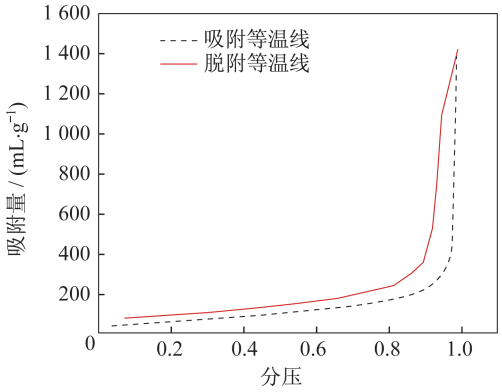


图 8 HCS 的氮气吸脱附等温线

Fig.8 Adsorption and desorption isotherms of HCS with nitrogen

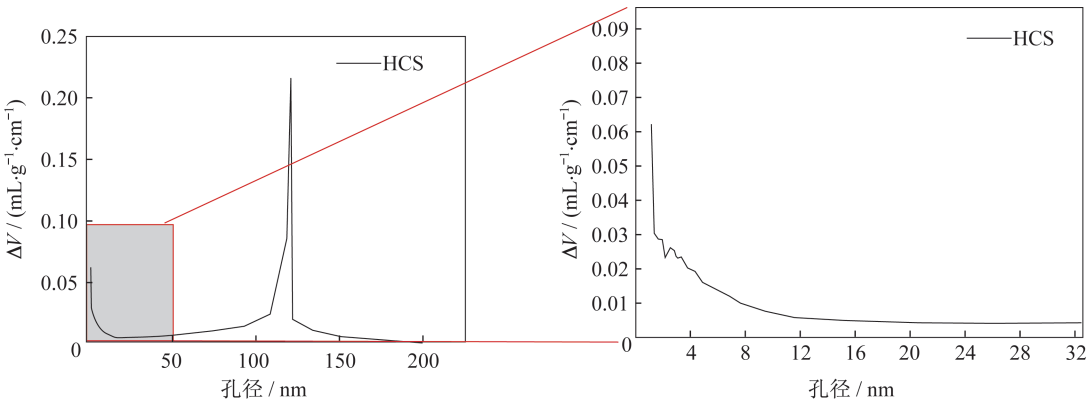


图 9 密度泛函理论计算微分孔体积的孔径分布

Fig.9 Aperture distribution obtained by differential pore volume calculation with the density functional theory

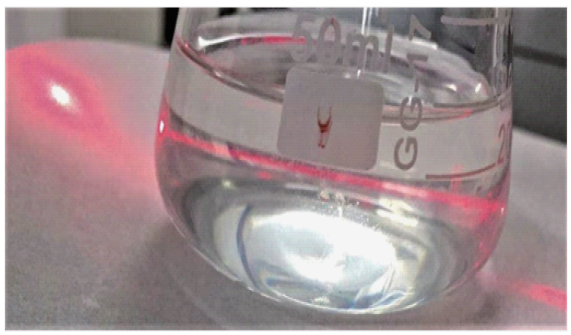


图 10 氟树脂溶液的丁达尔现象

Fig.10 Tyndall phenomenon in fluororesin solution

2.4 涂层的结合力测试

涂层结合力对其能否实际应用极为关键。根据《色漆和清漆漆膜的划格试验》(GB/T 9286—1998)测试了 2.2 节中 5 组不同颜基比的 HCS 涂层的结合力。如图 11 所示，1∶8、1∶10 的低颜基比涂层结合力均较好，切割边缘平滑，无一格脱落，结合力等级为 0 级；比例为 1∶6 的高颜基比涂层在切口交叉处有少许涂层脱落，但交叉切割面积小于 5%，结合力等级为 1 级；而 1∶4、1∶2 高颜基比涂层结合力

相对较差,中部和边缘脱落较多,受影响的交叉切割面积小于15%,结合力等级为2级,但是仍可以满足使用要求。对于更高颜基比的HCS涂层如1∶1等,发现该涂层结合力很差,轻轻刮碰便大面积脱落。综合考虑涂层的光学性能和力学性能,最优颜基比为1∶2。

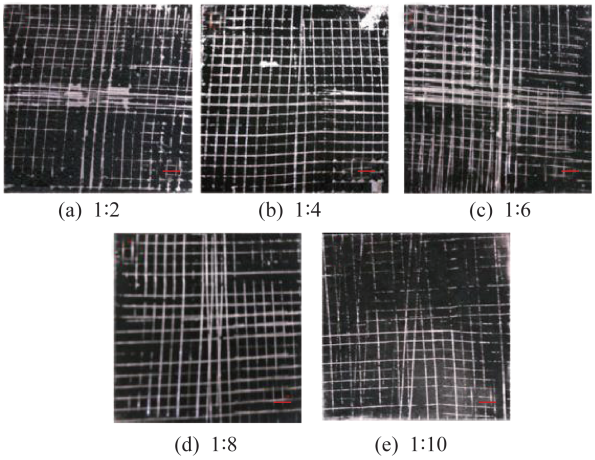


图 11　不同颜基比 HCS 涂层结合力测试后的基底图片(红色标尺长均为 4 mm)

Fig.11　Images of the substrates of HCS coatings with different *P*/*B* after adhesion tests (the red scale length is 4 mm)

3　结束语

对比几种常用低密度碳材料,空心碳球具有封闭的亚波长结构,不仅能提高光吸收性能,还能保持一定的力学性能,所以我们提出以HCS作为吸光材料。通过对HCS涂层进行反应离子刻蚀,验证了HCS涂层保存了亚波长封闭小孔,并进一步比较HCS壳层微孔孔径与氟树脂粒径大小加以解释;通过研究实心碳球涂层和不同颜基比的空心碳球涂层的反射光谱及表面微观形貌,验证了亚波长结构和微米级陷光结构对涂层的光吸收性能有较大影响。同时综合比较不同P/B的HCS涂层的结合力,本文得到最优颜基比为1∶2,该涂层有着高达98.37%的太阳吸收比和较好的结合力,在高精度光学系统中具有良好的应用前景。

参考文献

[1] 赵艳华,李岩,晋利兵,等.全谱段光谱成像仪高精度辐射定标技术[J].上海航天,2019,36(增刊2):106-111.

[2] 熊伟.高分五号卫星大气主要温室气体监测仪优化设计及数据分析[J].上海航天,2019,36(增刊2):167-172.

[3] PERSKY M. Review of black surfaces for space-borne infrared systems [J]. Review of Scientific Instruments, 1999, 70(5): 2193-2217.

[4] MCCALL S H, POMPEA S M, BREAULT R P, et al. Reviews of black surfaces for space and ground-based optical systems [C]// Proceedings of the Stray Radiation in Optical Systems II. San Diego , CA: International Society for Optics and Photonics, 1993: 140714.

[5] FAN P, BAI B, JIN G, et al. Patternable fabrication of hyper-hierarchical metal surface structures for ultrabroadband antireflection and self-cleaning [J]. Applied Surface Science, 2018(457): 991-999.

[6] HAN Z, NIU S, LI W, et al. Preparation of bionic nanostructures from butterfly wings and their low reflectivity of ultraviolet [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(23): 233702.

[7] ZHAO Q, FAN T, DING J, et al. Super black and ultrathin amorphous carbon film inspired by anti-reflection architecture in butterfly wing [J]. Carbon, 2011, 49(3): 877-883.

[8] FAN P, BAI B, ZHONG M, et al. General strategy toward dual-scale-controlled metallic micro-nano hybrid structures with ultralow reflectance [J]. ACS Nano, 2017, 11(7): 7401-7408.

[9] YAO Z, HU B, SHEN Q, et al. Preparation of black high absorbance and high emissivity thermal control coating on Ti alloy by plasma electrolytic oxidation [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 253 (9): 166-170.

[10] XING F, ZHAO B, SHI W. Study on tunable fabrication of the ultra-black Ni-P film and its blacking mechanism [J]. Electrochimica Acta, 2013, 100(7): 157-163.

[11] XU H B, LU N, QI D P, et al. Biomimetic antireflective Si nanopillar arrays [J]. Small, 2008, 4 (11): 1972-1975.

[12] SUN Y, EVANS J, DING F, et al. Bendable, ultra-black absorber based on a graphite nanocone nanowire composite structure [J]. Optics Express, 2015, 23 (15): 20115-20123.

[13] SUN C H, JIANG P, JIANG B. Broadband moth-eye antireflection coatings on silicon [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(6): 061112.

[14] YANG Z P, CI L, BUR J A, et al. Experimental

observation of an extremely dark material made by a low-density nanotube array [J]. Nano Letters, 2008, 8(2): 446-451.

[15] ZHU J, YANG X, FU Z, et al. Facile fabrication of ultra-low density, high-surface-area, broadband antireflective carbon aerogels as ultra-black materials [J]. Journal of Porous Materials, 2016, 23(5): 1217-1225.

[16] SUN W, DU A, FENG Y, et al. Super black material from low-density carbon aerogels with subwavelength structures [J]. ACS Nano, 2016, 10(10): 9123-9128.

[17] PANAGIOTOPOULOS N T, DIAMANTI E K, KOUTSOKERAS L E, et al. Nanocomposite catalysts producing durable, super-black carbon nanotube systems: applications in solar thermal harvesting [J]. ACS Nano, 2012, 6(12): 10475-10485.

[18] HAN Z W, WANG Z, LI B, et al. Flexible self-cleaning broadband antireflective film inspired by the transparent cicada wings [J]. ACS Appl Mater Inter, 2019, 11(18): 17019-17027.

[19] HUANG J, LIU C, ZHU Y, et al. Harnessing structural darkness in the visible and infrared wavelengths for a new source of light [J]. Nature Nanotechnology, 2015, 11(1): 60-66.

[20] ZHOU L, TAN Y L, WANG J Y, et al. 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination [J]. Nat Photonics, 2016, 10(6): 393-398.

[21] AZOUBEL S, COHEN R, MAGDASSI S. Wet deposition of carbon nanotube black coatings for stray light reduction in optical systems [J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 262: 21-25.

[22] LI N, ZHANG Q, LIU J, et al. Sol-gel coating of inorganic nanostructures with resorcinol-formaldehyde resin [J]. Chemical Communications, 2013, 49(45): 5135-5137.

[23] PAN L, WANG Y, XU H B, et al. Synthesis of silica particles with precisely tailored diameter [J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2014, 27(5): 563-567.

(上接第 37 页)

[8] 梁松松,张弓,侯至丞.FDM工艺参数对制件表面质量的影响分析与实验研究[J].制造技术与机床, 2017(11): 33-38.

[9] FAFROSE M, HMASOOD S, IOVENITTI P, et al. Effects of part build orientation on fatigue behavior of FDM-processed PLA material [J]. Progress in Addictive Manufacturing, 2016(1): 21-28.

[10] TORRES J, COTEL J, KARL J, et al. Mechanical property optimization of FDMPLA in shear with multiple objectives [J]. JOM, 2015, 67: 1183-1193.

[11] 李素丽,刘伟,张永军.3DFDM成形薄板塑料ABS零件连接工艺[J].新技术新工艺, 2015(3): 33-36.

[12] BERRETTA S, DAVIES R, SHYNG Y T, et al. Fused deposition modeling of high temperature polymers: exploring CNT PEEK composites [J]. Polymer Testing, 2017, 63: 251-262.

[13] MOSTAFA K G, MONTEMAGNO C, QURESHI A J. Strength to cast ratio analysis of FDM Nylon 12 3D printed parts [J]. Procedia Manufacturing, 2018, 26: 753-762.

[14] PEI S L, WANG K F, LI J J, et al. Mechanical properties prediction of injection molded short/long carbon fiber reinforced polymer composites using micro X-ray computed tomography [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 130: 105732-105740.

[15] GREGORY J R, SPEARING S M. Nanoindentation of neat and in situ polymers in polymer-matrix composites [J]. Composites Science and Technology, 2005, 65: 595-607.

[16] 孙振明,胡小石,张春雷,等.连续碳纤维增强镁基复合材料制备工艺研究[J].上海航天, 2019, 36(2): 60-65.

[17] 田小永,李涤尘,卢秉恒.空间3D打印技术现状与前景[J].载人航天, 2016, 22(4): 471-476.

[18] 于丽丽,李爱群,解琳琳.泡沫铝压缩和吸收性能的影响因素分析[J].建筑技术, 2018(3): 28-33.