

深空辐射环境对高吸收率消杂光涂层的性能影响

张家强¹ 牛虎² 杨佑健¹ 孙浩然¹ 平托¹

(1 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100190)

(2 中国航天宇航元器件工程中心, 北京 100094)

文 摘 为了研究深空辐射环境对SCB-1型空间高吸收率消杂光涂层的太阳光谱吸收性能影响。采用5 000 ESH剂量的真空-紫外、 2.5×10^{15} p/cm²注量的真空-质子和 2.5×10^{16} e/cm²注量的真空-电子依次对SCB-1消杂光涂层进行串联辐照试验,分析各项辐照试验前后消杂光涂层外观、太阳吸收比 α_s 及半球发射率 ε_H 的变化情况。并采用热失重分析(Thermal Gravity Analysis)判断消杂光涂层受辐照试验后的分解情况与热稳定性变化。经串联辐照试验后,SCB-1消杂光涂层全波段太阳吸收比总变化值 $\Delta\alpha_s$ 下降了0.011~0.012,400~1 100 nm波段太阳吸收比总变化值 $\Delta\alpha_s$ 下降了0.011~0.013,以上三项串联辐照过程中SCB-1消杂光涂层的半球发射率总变化值 $\Delta\varepsilon_H$ 无明显变化。SCB-1消杂光涂层呈现了极佳的深空辐射环境下的消杂光持久性,可对未来深空探测领域的光学技术发展提供有力支持。

关键词 消杂光涂层,高吸收率,深空辐射,太阳吸收比,半球发射率

中图分类号:TB4

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.05.020

Effect of Deep Space Radiation Environments on Properties of High Absorptivity Stray Light Coatings

ZHANG Jiaqiang¹ NIU Hu² YANG Youjian¹ SUN Haoran¹ Ping Tuo¹

(1 Beijing Spacecrafts, Beijing 100190)

(2 China Aerospace Components Engineering Center, Beijing 100094)

Abstract In order to investigate the effect of deep space irradiation environment on solar spectral absorption performance of SCB-1 high absorptivity stray light coatings, the series irradiation tests of SCB-1 stray light coatings were carried out with 5 000 ESH vacuum-UV irradiation, 2.5×10^{15} p/cm² vacuum-proton irradiation and 2.5×10^{16} e/cm² vacuum-electron irradiation. The changes of appearance, solar absorption and hemispheric emissivity of stray light coatings before and after various deep space irradiation tests were analyzed. Thermal gravity analysis was used to determine the decomposition and thermal stability of the coatings after the deep space irradiation test. After the series irradiation test, the total change value of solar absorption of SCB-1 stray light coatings in the full-wave band decreased by 0.011 to 0.012, and the total change value of solar absorption of SCB-1 stray light coatings in the 400 to 1 100 nm band decreased by 0.011 to 0.013. During the above three series irradiation process, the total change value of hemispheric emissivity of SCB-1 stray light coatings have no obvious change. SCB-1 stray light coatings show the excellent extinction durability under deep space irradiation environment, which provide the strong support for future development of optical technology in deep space exploration field.

Key words Stray light coatings, High absorptivity, Deep space radiation, Solar absorption, Hemispheric emissivity

0 引言

探测恒星等暗目标的光学探测系统星敏感器与获取地球目标信息的光学传感器系统空间相机,均对深空中存在的杂散光极为敏感。杂散光基本来自

天气光、月亮光和太阳光这类成像外的强光,其中太阳光是杂散光最主要的来源,其对比7.5等星,可达到 10^{13} 以上的强度。当空间光学系统受到这些光线的干扰后,内部各元部件会对接触到杂散光产生二

收稿日期:2021-05-08

第一作者简介:张家强,1985年出生,硕士,主要从事航天器外表面涂层技术研究工作。E-mail:Jqzhang@163.com

通信作者:平托,1990年出生,硕士,主要从事航天器外表面涂层技术研究工作。E-mail:pinto1218@qq.com

次反射或衍射,出现多余的非成像光线,形成“噪声”。“噪声”不仅会影响成像信噪比、对比度与识别精度,甚至会在成像像面上呈现光斑,最恶劣的情况下,还会淹没目标图像。因此,杂散光抑制是后续高等星探测与超高分辨率光谱呈像发展的关键技术问题^[1-4]。

“十三五”及其后续航天器对高精度姿态定位、高精度光谱成像等提出了更高要求,对超高吸收率消杂光涂层提出了太阳吸收比不小于0.98的技术要求。涂层太阳吸收比由0.97提升至0.98,在不改变成像产品结构的基础上,到达产品探测面的杂光能量将下降50%以上,光学系统的信噪比提升约2倍,可以极大的提高系统的灵敏度和信号探测能力。目前广泛应用的进口PNC黑漆太阳吸收比为0.97,已不能满足后续极高精度星敏感器、高精度光学相机等产品的杂散光抑制要求。

北京卫星制造厂有限公司开发了一种适用于空间环境的高吸收率消杂光涂层(SCB-1涂层),200~2500 nm下太阳吸收比 $\alpha_s \geq 0.98$,目前短期内在轨应用状态良好,可以满足后续消杂光技术要求。但消杂光涂层应用的遥感相机或星敏感器等光学仪器会长期暴露在空间环境中,会长期直接与深空中能量极高的真空-紫外或真空-质、电子接触,这些辐照物质可能会造成涂层材料的光学吸收性能与耐热性能退化^[5-7],以及导致涂层发生凋落或开裂等情况,更严重的情况下,还会发生凋落的涂层附着到光学镜头表面干扰成像^[8-9]。

为研究长期的深空辐射环境是否会对SCB-1涂层造成性能退化,本文针对SCB-1涂层开展深空环境下的模拟辐照测试,以此来判定SCB-1消杂光涂层长期抵御深空辐射环境后的光学性能与耐热性能退化情况。

1 实验

1.1 涂层试样制做

(1)涂层成分及来源:SCB-1高吸收率消杂光涂层为自研产品,PNC黑漆购买自法国MAP公司,两者主成分均为炭黑填料与有机硅类树脂粘接剂等物质,交联剂采用硅酸四乙酯,采用有机锡类催化剂,二甲苯为溶剂。

(2)实验试样制作:使用尺寸为30 mm×30 mm×1 mm、牌号为5A06的铝合金试片为涂装基材,对基材进行本色导电阳极化处理。采用0.15 MPa的空气压力,以喷涂方法进行SCB-1消杂光涂层和PNC涂层试样的制作,喷涂5~7遍,阴干24 h后,采用50℃烘烤固化4 h后再85℃烘烤固化16 h,得到40~70 μm厚度的SCB-1与PNC黑漆的空间级消杂光涂层

试样。

1.2 空间模拟辐照实验方法

选取3个SCB-1涂层试样与1个PNC黑漆涂层试样,以串联的方式依次进行真空-紫外辐照、真空-电子辐照及真空-质子辐照试验。真空-紫外辐照试验过程中选取7个辐照剂量点,真空-电子及真空-质子辐照过程中各选取5个辐照剂量点,对以上剂量点下的涂层进行太阳吸收比与半球发射率的测试,观察涂层变化情况。真空-紫外辐照总量为5 000 ESH,真空-电子辐照注量为 $2.5 \times 10^{16} \text{ e/cm}^2$,真空-质子辐照注量为 $2.5 \times 10^{15} \text{ p/cm}^2$,每项辐照试验均采用分段测试试片表面涂层热辐射性能并在辐照试验最后观察涂层外观状态的方法;试验设备与试片放置状态如图1与图2所示。

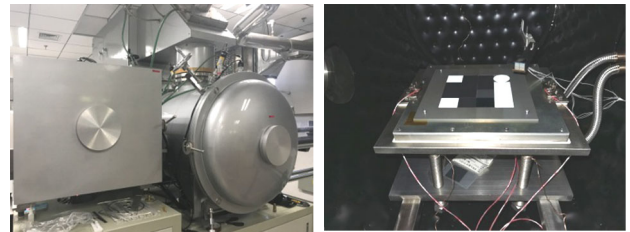


图1 真空-紫外辐照设备与试片摆放状态

Fig. 1 Vacuum-UV irradiation equipment and the placement of test plates

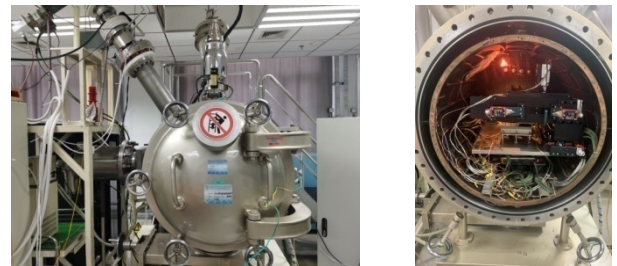


图2 真空-质子电子辐照设备与试片摆放状态

Fig. 2 Vacuum-proton & electron irradiation equipment and the placement of test plates

1.3 消杂光涂层性能检测方法

消杂光涂层的太阳吸收比 α_s 及半球发射率 ϵ_{H} 的测试依据GJB2502.02—2006与GJB2502.03—2006;消杂光涂层外表面状态检验方法按GJB 2704A—2006进行,热失重检测采用美国PE公司的TG/DTA 6300热失重分析仪,消杂光涂层辐照后结合力的检测方法按GB/T9286—1998进行,根据涂层厚度范围采用1 mm专用漆膜划格刀进行检测。

2 结果及分析

SCB-1涂层经真空-紫外、真空-质子以及真空-电子辐串联照后,涂层太阳吸收比与半球发射率性能变化数据如表1所示。三项串联辐照后,涂层全波

段 200~2 500 nm 的太阳吸收比 α_s 下降了 0.011~0.012, 400~1 100 nm 太阳吸收比 α_s 下降了 0.011~0.013, 半球发射率 ε_H 变化相对较小, 属于测量误差

范围内。PNC 黑漆在 200~2 500 nm 的太阳吸收比 α_s 降低 0.011, 400~1 100 nm 太阳吸收比 $\alpha_{s400-1100nm}$ 降低 0.012, 半球发射率 ε_H 同样未发生明显变化。

表 1 经真空-紫外、电子、质子辐照前后的 SCB-1 与 PNC 消杂光涂层吸收发射数据

Tab. 1 The α_s and ε_H of SCB-1 and PNC coatings before and after the vacuum-electron, the vacuum-UV and the vacuum-proton irradiation

Simple	Before UV irradiation(α_s)	After UV irradiation(α_s)	Before UV irradiation($\alpha_{s400-1100nm}$)	After UV irradiation($\alpha_{s400-1100nm}$)	Before UV irradiation(ε_H)	After UV irradiation(ε_H)
1# SCB-1	0.984	0.975	0.984	0.974	0.93	0.92
2# SCB-1	0.985	0.977	0.984	0.976	0.93	0.93
3# SCB-1	0.984	0.976	0.984	0.975	0.93	0.93
PNC	0.972	0.963	0.972	0.962	0.90	0.89

Simple	Before electron irradiation(α_s)	After electron irradiation(α_s)	Before electron irradiation($\alpha_{s400-1100nm}$)	After electron irradiation($\alpha_{s400-1100nm}$)	Before electron irradiation(ε_H)	After electron irradiation(ε_H)
1# SCB-1	0.975	0.976	0.974	0.975	0.92	0.93
2# SCB-1	0.977	0.978	0.976	0.977	0.93	0.92
3# SCB-1	0.976	0.975	0.975	0.975	0.93	0.93
PNC	0.963	0.962	0.962	0.962	0.89	0.89

Simple	Before proton irradiation(α_s)	After proton irradiation(α_s)	Before proton irradiation($\alpha_{s400-1100nm}$)	After proton irradiation($\alpha_{s400-1100nm}$)	Before proton irradiation(ε_H)	After proton irradiation(ε_H)
1# SCB-1	0.976	0.972	0.975	0.971	0.93	0.92
2# SCB-1	0.978	0.974	0.977	0.974	0.92	0.92
3# SCB-1	0.976	0.974	0.975	0.973	0.93	0.93
PNC	0.962	0.961	0.962	0.960	0.89	0.89

由 SCB-1 涂层太阳吸收比过程测试累计点的曲线如图 3 所示。

涂层在 0 ESH 至 3 000 ESH 时太阳吸收比降低

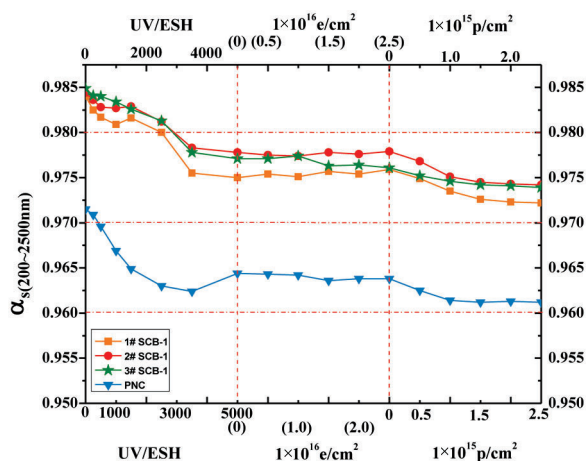


图 3 真空-紫外、电子及质子串联辐照过程中 SCB-1 与 PNC 涂层太阳吸收比变化

Fig. 3 The α_s of SCB-1 and PNC coatings during the vacuum-UV, the vacuum-electron and the vacuum-proton irradiation

较为显著, 而 3 000 ESH 后, 涂层 α_s 降低趋势停止, 开始保持, 无明显变化; 各项辐照测试后的 PNC 黑漆与 SCB-1 涂层 200~2 500 nm 波段光谱吸收变化曲线如图 4、图 5 所示, 曲线呈整体降低, 450~800 nm 波段吸收曲线降低显著, 与表 2 中 $\Delta\alpha_s$ 值较低于 $\Delta\alpha_{s400-1100nm}$ 的数据结果。真空-电子辐照阶段, SCB-1 涂层与 PNC 黑漆均无明显变化, 而到了真空-质子辐照阶段, SCB-1 涂层与 PNC 黑漆涂层 200~2 500 nm 波段下的太阳吸收比 α_s 与 400~1 100 nm 波段下的太阳吸收比 $\alpha_{s400-1100nm}$ 数值均先较小程度的降低, 再趋于稳定。这可能是由于电子的粒径、质量较质子更小, 轰击后作用于涂层的深度高于质子, 所以对涂层外表面的太阳吸收比 α_s 的影响也较小。

SCB-1 涂层经三项串联辐照前后外观状态如图 6 所示, 涂层在试件表面均未发现脱落与露底现象, 但涂层外观颜色均明显变浅, 由深黑色转为黑灰色, PNC 涂层外观变化较大, 由深黑色转化为灰色。但涂层均未出现开裂、露底基材现象。对真空-紫外、电子及真质

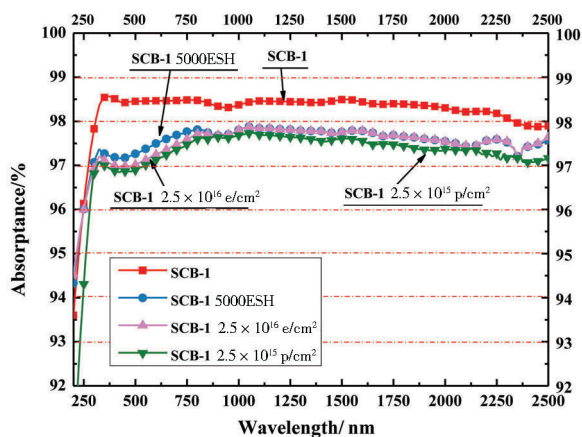


图4 真空-紫外、真空-电子及真空-质子串联辐照前后 SCB-1 涂层太阳光谱吸收曲线

Fig. 4 The solar spectral curve of SCB-1 coatings before and after the test during vacuum-UV, vacuum-electron and vacuum-proton irradiation

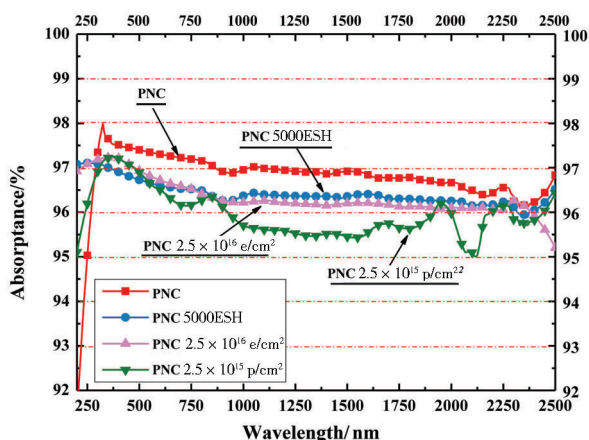


图5 真空-紫外、真空-电子及真空-质子串联辐照前后 PNC 涂层太阳光谱吸收曲线

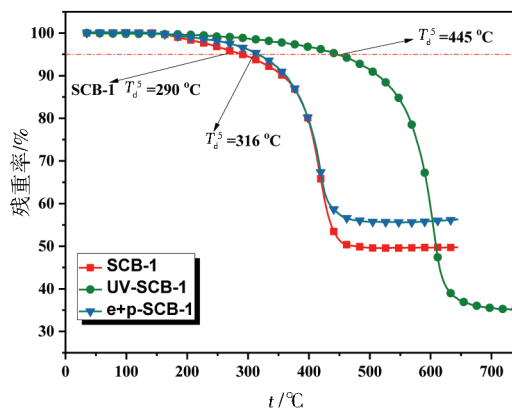
Fig. 5 The solar spectral curve of PNC coatings before and after the test during vacuum-UV, vacuum-electron and vacuum-proton irradiation



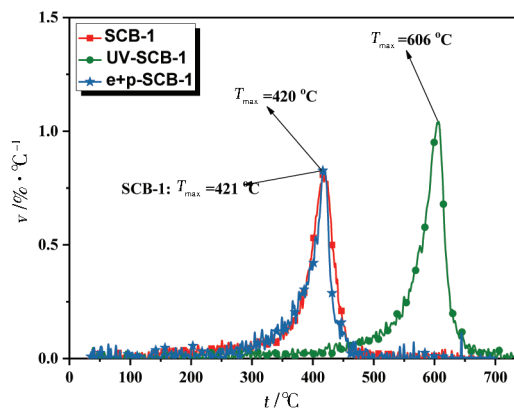
图6 真空-紫外、电子及质子辐照前后 SCB-1 与 PNC 涂层外观状态

Fig. 6 Appearance state of the SCB-1 and PNC coatings before and after the series of irradiation testing.

子连续辐照后的 SCB-1 涂层进行热失重测试,热失重 (TG) 曲线与失重变化曲线 (DTG) 见图 7。



(a) TG 曲线



(b) DTG 曲线

图7 经历不同辐照试验前后 SCB-1 的 TG 曲线与 DTG 曲线
Fig. 7 The TG and DTG curves of SCB-1 coatings before and after irradiation in different space environments

可看出未经辐照试验的 SCB-1 涂层失重 5% 的温度在 290 °C,经历了紫外辐照后的 SCB-1 涂层失重 5% 的温度达到 445 °C,这种失重温度提高的原因是由于高能紫外辐照促使有机硅树脂的侧甲基断裂,同时有机硅树脂在断裂处获得紫外辐照带来的能量,进而在断裂处发生聚合反应,提升了交联密度以及生成氧化硅等物质^[10]。无机氧化物含量提高,涂层整体耐热性提高。而经历电子与质子辐照后的 SCB-1 涂层热失重曲线与失重变化曲线中均与未经辐照的 SCB-1 涂层无明显区别,能量作用有限。在 DTG 曲线中可同样证明紫外促使 SCB-1 有机硅树脂转化为无机产物,促使涂层的最高失重温度向高温方向偏移。

对不同辐照试验后的 SCB-1 涂层进行结合力测试,如图 8 所示。由于三个涂层样品试片厚度均低于 80 μm,因此采用 1 mm 专用漆膜划格刀进行检测。经划格试验后,SCB-1 涂层与 PNC 黑漆涂层试片的结合力均为 1 级。证明了真空-紫外、电子及质子辐照作用在涂层的表层与浅表层,对涂层与基材的结合力性能不产生影响。

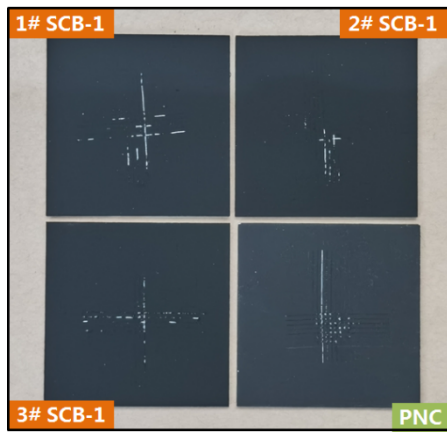


图8 经历不同辐照试验后的SCB-1与PNC涂层的结合力
Fig. 8 The bonding test of the PNC and SCB-1 coatings after irradiation testing

3 结论

经过了真空-紫外、真空-电子及真空-质子的连续辐照后,SCB-1消杂光涂层太阳吸收比与半球发射率变化较小。三项试验后的太阳吸收比(α_s)降低最大值仅为0.012,半球发射率(ϵ_H)降低最大值为0.01,涂层均未发生露底或脱落现象,结合力良好,体现了SCB-1消杂光涂层具备较佳的空间环境稳定性。

参考文献

[1] 张凯,何欣,刘强. 空间可见光相机的杂散光分析与抑制[J]. 红外,2014,35(9):10-14.

ZHANG Kai, HE Xin, LIU Qiang. Analysis and suppression of stray light in spaceborne visible light camera[J]. Infrared, 2014, 35(9):10-14.

[2] 赵雨时,付跃刚,欧阳明钊,等. 一种星敏传感器光机系统结构与杂光分析[J]. 长春理工大学学报,2016,39(5):30-34.

ZHAO Yunshi, FU Yuegang, OU Yang Mingzhao, et al. Optical analysis of a star sensor optical system design and miscellaneous[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2016, 39(5):30-34.

[3] 李洋,廖志波,穆生博,等. 星敏传感器杂散光抑制方法及仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报,2016,42(12):2620-2624.

LI Yang, LIAO Zhibo, MU Sheng-bo, et al. Stray light suppressing technique and simulation for star sensor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(12): 2620-2624.

[4] 陈贇,郑循江,刘宗明,等. 星敏传感器遮光罩出口杂光的辐照度测试[J]. 光学精密工程,2017,25(6):1464-1471.

CHEN Yun, ZHENG Xunjiang, LIU Zongming, et al. Testing of stray light irradiance at exit of lens hood for star sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(6):1464-1471.

[5] 李春东,杨德庄,何世禹,等. 电子辐照能量对Kapton/Al热控涂层光学性能的影响[J]. 强激光与粒子束,2003,15(8):741-744.

LI C D, YANG D Z, HE S Y, et al. Effects of electron irradiation energy on optical properties of Kapton/Al thermal control coatings[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(8): 741-744.

[6] 王丹艺. TMA空间遥感相机消杂光技术研究[D]. 长春:长春理工大学,2013,14-15.

WANG D Y. TMA remote sensing camera eliminate stray light research[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013:14-15.

[7] 冯伟泉,王荣,丁义刚,等. 低能质子对卫星热控涂层太阳吸收率的影响[J]. 中国空间科学技术,2007,12(6):42-47.

FENG Weiquan, WANG Rong, DING Yigang, et al. Low energy proton effects on solar absorptance of thermal control coatings[J]. Chinese Space Science and Technology, 2007, 12(6): 42-47.

[8] 李涛,姜海富,刘向鹏,等. 空间原子氧环境对常用热控涂层的影响[J]. 航天器环境工程,2012,29(3):268-272.

LI Tao, JIANG Haifu, LIU Xiangpeng, et al. The effects of atomic oxygen on the thermal control coatings in common use[J]. Spacecrafts Environment Engineering, 2012, 29(3): 268-272.

[9] 张雷,严川伟,屈庆,等. 原子氧对金属Ag及其表面TiO₂-有机硅热控涂层的侵蚀[J]. 金属学报,2003,39(9):984-988.

ZHANG Lei, YAN Chuanwei, QU Qing, et al. Oxygen-atom erosion to Ag and TiO₂-siloxane thermal control coatings on Ag surface[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(9): 984-988.

[10] 张会. 消毒柜密封条用耐紫外/臭氧老化硅橡胶的制备与性能[D]. 杭州:浙江大学,2018:58-59.

ZHANG Hui. Preparation and properties of UV and ozone resistant silicone rubber for sealing strip of disinfection cabinet [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 58-59.