

光谱选择反射型太阳隔热膜研究

张明, 潘永强, 陈佳, 栗旭阳, 杨飞

(西安工业大学 光电工程学院, 西安 710032)

摘要: **目的** 研制具备高紫外光阻隔率、高红外光阻隔率、高可见光透射率的太阳隔热膜。**方法** 依据标准大气光谱和隔热膜的基本原理给出理想隔热膜的透射率光谱曲线,在防止室内眩光的基础上给出太阳隔热膜的实用透射率曲线。通过对金属 Ag 薄膜光学常数的研究,提出基于介质 ZnS 和金属 Ag 的多层结构的选择反射型太阳隔热膜结构,利用 TFC 膜系软件设计三层结构的选择反射型太阳隔热膜并进行允差分析。采用热蒸发技术制备该选择反射型膜太阳隔热膜。**结果** 隔热膜在 $0.3 \sim 0.38 \mu\text{m}$ 紫外波段的阻隔率达到 99.2%,在 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ 可见光波段的平均透射率为 75.2%,在 $0.78 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 红外波段的阻隔率达到 91.2%,太阳能总隔热率为 62.1%。**结论** 研制的太阳隔热膜能在保证隔离紫外线辐射和红外热辐射的同时满足对可见光具有较高的透射率。

关键词: 太阳隔热膜;透射率;反射率;光学常数;热蒸发;隔热率

中图分类号: O484.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)04-0079-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.04.014

Design and Fabrication of Spectral Selective Reflection Type Solar Heat Insulation Film

ZHANG Ming, PAN Yong-qiang, CHEN Jia, LI Xu-yang, YANG Fei

(School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

ABSTRACT: Objective To develop a solar heat insulation film with high UV blocking rate, high infrared blocking rate and high visible light transmittance. **Methods** The ideal transmittance spectral curve of solar heat insulation film was given according to the principle of heat insulation and the standard atmosphere spectrum. The practical transmittance spectral curve of solar heat insulation film was also given to prevent the glare. The optical constant of metal Ag thin film was studied, and the spectral selective reflection solar heat insulation film with multilayer structure based on the medium zinc sulfide (ZnS) and metal Ag was presented. Three-layer solar heat insulation film was designed using TFC software, and tolerance analysis was performed. The solar heat insulation film was deposited by thermal evaporation technique. **Results** The spectral test results showed that the UV blocking rate of the heat insulation film reached 99.2% in the range of $0.3 \sim 0.38 \mu\text{m}$, the average transmittance was more than 75.2% in the visible wavelength range of $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ and the infrared blocking rate was 91.2% in the range of $0.78 \sim 2.5 \mu\text{m}$. The total solar heat in-

收稿日期: 2015-01-30; 修订日期: 2015-02-28

Received: 2015-01-30; Revised: 2015-02-28

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(201410702001);陕西省自然科学基金研究计划项目(2014JM8333)

Fund: Supported by the National College Students' Innovative Entrepreneurial Training Program (201410702001) and Shaanxi Province Natural Science Foundation Research Project (2014JM8333)

作者简介: 张明(1992—),男,陕西人,硕士研究生,主要从事光学薄膜技术研究。

Biography: ZHANG Ming(1992—), Male, from Shaanxi, Master graduate student, Research focus: optical thin film technology.

通讯作者: 潘永强(1974—),男,陕西人,博士,教授,主要从事薄膜与等离子体技术研究。

Corresponding author: PAN Yong-qiang(1974—), Male, from Shaanxi, Ph. D., Professor, Research focus: thin film and plasma technology.

sulation rate was 62.1%. **Conclusion** The heat insulation film developed could isolate UV radiation and infrared radiation, and meanwhile had high transmittance in the visible waveband.

KEY WORDS: solar heat insulation film; transmittance; reflectance; optical constant; thermal evaporation; heat insulation

太阳光包含紫外光、可见光以及红外光。太阳隔热膜是能够隔离紫外光线、调节进入室内或车内的可见光,并可以很好地隔离红外热辐射的工程薄膜。太阳隔热膜通过对紫外波段光线的隔离可以使室内或车内的物品和人员免受紫外线的辐射,延长室内物品老化;通过对进入车内的可见光强度的调节减少眩光,有效避免交通事故。此外,太阳隔热膜对红外波段热辐射的隔离可大大减少因红外热辐射给室内或车内带来的不必要的热量,从而降低空调能耗,起到绿色环保的效果。

理想的太阳隔热薄膜必须尽可能隔离 $0.3 \sim 0.38 \mu\text{m}$ 波段的紫外光线,同时还必须保证在可见光波段 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ 内具有一定的透射率不妨碍视线。由于太阳的热辐射主要集中在 $0.78 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的红外波段,因此,还必须对该红外波段具有良好的吸收和反射效果。通常,把具备这种效果的隔热膜称为太阳光谱选择反射型隔热薄膜^[1-5]。

太阳隔热膜从 20 世纪 70 年代兴起,到目前大约经历了五代。第一代是利用涂布或复合工艺制备的隔热膜,一般称为“茶纸”,这种隔热膜一般只能对太阳光线起到隔离作用,其隔热效果非常差。第二代是“染色膜”,它是在深层染色剂中加入一定量吸热剂,通过染色工艺实现对太阳光的隔热,这种隔热膜最大的缺点是当隔热膜吸热饱和后自身会产生大量的红外线辐射,从而形成二次辐射,也会对人体产生较大伤害。第三代是金属膜隔热膜,它是以真空热蒸发技术将金属铝蒸镀在基底上或采用磁控溅射技术将金属镍、银等金属沉积在基底上,达到隔热效果,这种隔热膜的显著弱点是反射率较高,对可见光透射率差,容易产生光污染。第四代是“陶瓷膜”,它是通过含有金属氧化物微小颗粒的粉末涂层实现对紫外光线和红外光线的吸收,以实现隔热效果;相对于金属隔热膜,陶瓷型隔热膜在一定程度上解决了金属隔热膜的氧化问题,但由于这种隔热膜主要通过吸收实现隔热,因此,当吸收的热量达到某一饱和值时,其隔热作用将会大大下降;此外,陶瓷型隔热膜在使用中还容易产生气泡和裂纹,也会影响其隔热效果。第五代是近几年刚发展起来的多层光学薄膜,通过多层薄膜的干涉效果诱导出金属膜层在可见光的最大透射率,从而实现选择性反射的效果,进一步实现隔离紫外线

和红外热辐射的功能^[6-10]。目前,国内对于多层光谱选择性反射型太阳隔热薄膜的研究较少。

本文首先依据标准大气光谱,即 AM1.5 标准大气光谱和理想太阳隔热膜所需要达到的隔热效果,给出了太阳隔热膜的理想透射率光谱曲线,并在考虑防止眩光和实际制备技术的情况下,给出了一种实用的太阳隔热膜透射率光谱曲线。在此基础上,通过对热蒸发制备的金属 Ag 薄膜光学常数随波长变化关系的研究,利用 TFC 膜系设计软件,采用硫化锌 (ZnS) 介质和金属 Ag 两种膜料,在超白窗玻璃基底上设计出 ZnS-Ag 多层选择反射型太阳隔热薄膜,采用热蒸发技术制备具有三层结构的光谱选择反射型太阳能隔热膜。

1 太阳隔热膜透射率光谱曲线的获取

为了获得光谱选择反射型太阳隔热膜的透射率光谱曲线,本文首先从标准大气光谱入手,分析了 AM1.5 光谱中各波段的能量分布。在标准大气光谱中,紫外线、可见光、红外线波段的能量分别约占太阳光辐射总能量的 3%, 44%, 53%。在分析标准大气光谱辐射能量分布的基础上,依据理想太阳隔热薄膜必须能完全阻隔 $0.3 \sim 0.38 \mu\text{m}$ 的紫外光,透射 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ 的可见光并很好地阻隔 $0.78 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的红外光的原理,给出了光谱选择反射型太阳隔热膜理想的透射率光谱曲线如图 1 所示。从图 1 中可以看出,标准大气光谱中,辐射到地球表面的热量大多集中在 $0.78 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的红外波段。虽然在 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$

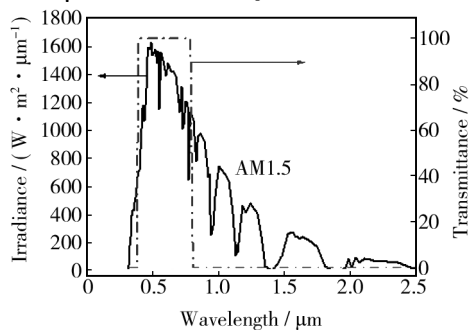


图 1 标准大气光谱及理想隔热膜曲线

Fig. 1 The spectral curves of AM1.5 and the ideal solar heat insulation film

的可见光波段的辐射热量也较大,但为了保证室内或车内具有足够的可见光,防止可见光的透射率过高所产生的室内或车内眩光,考虑作为汽车窗玻璃贴膜的安全性,其在可见光区的透射率一般控制在 70% ~ 80%。图 2 为实际太阳隔热膜的光谱透射率曲线。

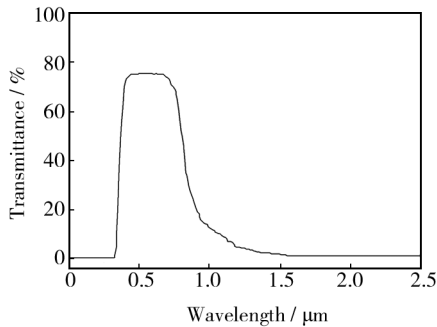


图 2 隔热膜透射率光谱曲线

Fig. 2 Transmittance spectral curves of solar heat insulation film

2 膜系设计和镀制

2.1 膜系设计

ZnS 是常用的高折射率薄膜材料,其在可见及红外波段消光系数较小,折射率约为 2.35。金属 Ag 薄膜在可见和红外波段都具有高的反射率且倾斜入射时引起的偏振效应小,是常用的金属膜料。因此,设计 ZnS-Ag 多层选择性反射型太阳隔热薄膜的关键是获得使用波段范围内金属 Ag 薄膜准确的光学常数。为了得到金属 Ag 薄膜的光学常数,本文在单面抛光的硅基底上采用电阻热蒸发技术制备了厚度约为 25 nm 的金属 Ag 薄膜,利用 M2000UI 型椭偏仪测试了 Ag 薄膜的椭偏参数,得到在紫外、可见及近红外波段 0.2 ~ 1.7 μm 的折射率和消光系数,再经过外推最终得到金属 Ag 薄膜在 0.2 ~ 3.0 μm 的折射率和消光系数,如图 3 所示。从图 3 中可以看出,随着波长的增加,金属 Ag 薄膜的消光系数在紫外波段存在一个较小的峰值,随后会呈现出线性增加的关系,而折射率则在紫外波段呈现出明显的峰值,在 0.3 μm 以后随着波长的增加而增加。

根据图 3 所确定的金属 Ag 薄膜的光学常数,依据金属诱导透射率的基本理论,采用 TFC 膜系设计软件,设计出了光谱选择反射型太阳隔热薄膜的膜系结构为 $S/k_1Hk_2Mk_3H/Air$,其中,H 代表高折射率 ZnS 介质薄膜, k_1 代表其厚度系数,该层薄膜的物理厚度为 26 nm; k_3 代表第三层薄膜的厚度系数,该层薄膜

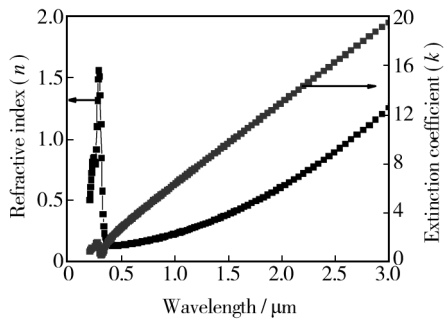


图 3 金属 Ag 薄膜的折射率和消光系数随波长的变化

Fig. 3 Refractive index and extinction coefficient of metal Ag thin film vs. wavelength

的物理厚度为 32 nm;M 代表金属 Ag 薄膜, k_2 代表其厚度系数,其物理厚度为 17 nm。图 4 所示为设计后的三层太阳隔热膜膜系的理论透射率光谱曲线。

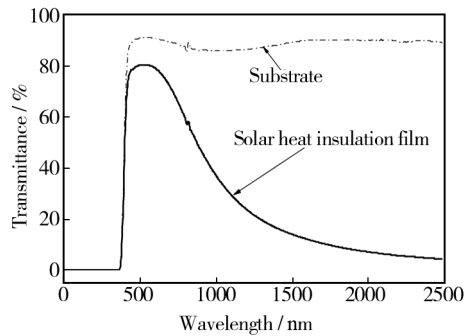


图 4 理论设计的三层太阳隔热及基底透射率光谱曲线

Fig. 4 Theoretical transmittance spectra of the 3-layer solar heat insulation film and the substrate

从图 4 可以看出,对于太阳隔热膜,在 0.3 ~ 0.38 μm 波段范围内,对紫外线的阻隔一方面可以通过膜层本身来实现,另外一方面可以通过基底本身对该波段的吸收来实现,该膜系的紫外阻隔率为 99.4%。此外,该理论透射率曲线在 0.38 ~ 0.78 μm 的可见光波段的平均透射率为 76.3%,在 0.78 ~ 2.5 μm 的红外波段的阻隔率为 91.5%。

通过对该三层结构的太阳隔热膜系的敏感层分析表明,金属 Ag 膜层是该膜系的最敏感层,其厚度允差不能超过 1.0 nm。因此在制备过程中,必须严格控制金属 Ag 膜层的厚度,才能保证整个太阳隔热膜的光谱曲线满足设计要求。

2.2 膜系的镀制

在光谱选择反射型太阳隔热膜的制备中,采用国营南光机械厂生产 ZZS700-1/G 箱式光学镀膜机。为

了保证薄膜的致密性,增加薄膜与基底之间的附着力,本文在该真空镀膜设备上安装了西安工业大学生产的宽束冷阴极离子源^[11-15]。同时,为了准确控制金属 Ag 薄膜的厚度,镀膜时的膜层厚度监控采用美国 Telemark 公司的 800 型石英晶振膜厚仪。实验所用基底是厚度为 3 mm、边长为 100 mm 的正方形超白窗玻璃。实验中的本底真空为 5.0×10^{-3} Pa,离子束镀膜前轰击和离子束辅助沉积时的工作真空度为 1.0×10^{-2} Pa,工作气体为氩气,镀膜时基底温度为室温。薄膜镀制过程中,ZnS 薄膜的沉积速率为 0.6 nm/s,金属 Ag 薄膜的沉积速率为 0.5 nm/s。膜层镀制后,采用日本日立公司 U-3501 型可见及近红外分光光度计对所镀制的太阳能隔热膜进行透射率光谱曲线测试,测试波段范围为 0.2 ~ 2.5 μm 。

3 结果与讨论

测试光谱选择反射型太阳隔热薄膜样片在 200 ~ 2500 nm 的透射率光谱曲线,太阳隔热膜的实测透射率光谱曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出,实测的太阳隔热薄膜的透射率光谱曲线在 0.3 ~ 0.38 μm 的紫外波段有比较深的截止深度,其截止深度和宽度主要依赖基底的吸收,紫外阻隔率达到 99.2%。在 0.38 ~ 0.78 μm 的可见光波段,实测光谱透射率曲线与理论透射率曲线吻合较好,可见光波段范围内的平均透射率为 75.2%。在 0.78 ~ 2.5 μm 的红外波段,其透射率的平均值较低,红外阻隔率高于 91.2%。

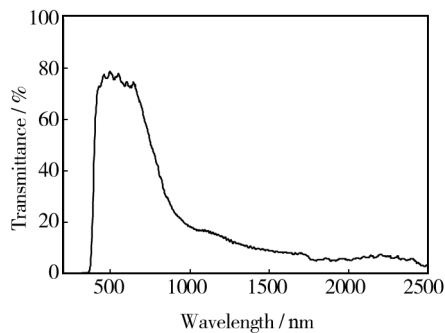


图 5 实测三层太阳隔热膜的透射率光谱曲线

Fig. 5 Measured transmittance spectrum of the 3-layer solar heat insulation film

由于紫外线、可见光、红外线波段的能量分别约占太阳光辐射总能量的 3%, 44%, 53%, 因此太阳能的总隔热率可用下式估算: 太阳能总隔热率 = 红外线阻隔率 \times 53% + 可见光阻隔率 \times 44% + 紫外线阻隔率 \times

3%。经过计算,所制备的太阳隔热膜的太阳能总隔热率约为 62.1%,能较好地实现隔热的效果。

4 结论

采用椭偏仪测试并获得了金属 Ag 薄膜在 0.2 ~ 3.0 μm 波段的光学常数(折射率和消光系数),利用高折射率 ZnS 介质和金属 Ag 两种薄膜材料设计出了三层结构的光谱选择反射型太阳隔热薄膜,对其进行了敏感层分析,给出了金属 Ag 膜层的最大允差为 1 nm。通过电阻热蒸发技术制备了该三层结构的太阳隔热薄膜,结果表明所制备的多层太阳隔热薄膜在 0.3 ~ 0.38 μm 的紫外波段的阻隔率达到 99.2%;在 0.38 ~ 0.78 μm 的可见光波段平均透射率为 75.2%,在 0.78 ~ 2.5 μm 的红外波段的阻隔率高于 91.2%,太阳能总隔热率约为 62.1%,起到了对紫外线很好的隔绝以及对红外热辐射的隔离作用,同时又极大地保证了可见光的透过性,为高质量太阳隔热膜的研制和开发提供了理论和实践基础。

参考文献

- [1] 翟玉涛,戴彬,王军生,等. 大面积 PET 基中频反应磁控溅射沉积 TiN 隔热薄膜实验研究[J]. 真空,2011,48(6):40—45.
ZHAI Yu-tao, DAI Bin, WANG Jun-sheng, et al. Experimental Study of Heat Insulation TiN Film Deposited on Large-area PET Substrate by MF Reactive Magnetron Sputtering[J]. Vacuum,2011,48(6):40—45.
- [2] 牛娟妮,杜彦飞,秦长喜,等. 纳米隔热膜的研究[J]. 信息记录材料,2013,14(1):51—55.
NIU Juan-ni, DU Yan-fei, QIN Chang-xi, et al. Study on Nanoscale Thermal Insulation Film [J]. Information Recording Materials,2013,14(1):51—55.
- [3] 楚洪亮,郑荣进. 不同遮阳板材料涂隔热膜后的光谱透射率[J]. 新型建筑材料,2008,6:20—22.
CHU Hong-liang, ZHENG Rong-jin. Spectral Transmittance of Different Sun Shield Materials Coated with Thermal Insulation Film[J]. New Building Materials,2008,6:20—22.
- [4] 高超,秦长喜,牛娟妮,等. 隔热膜的性能测试及评价[J]. 信息记录材料,2012,13(6):21—25.
GAO Chao, QIN Chang-xi, NIU Juan-ni, et al. The Testing and Evaluation on the Properties of Insulation Film [J]. Information Recording Materials,2012,13(6):21—25.
- [5] LU Chun-lian, ZHOU Yan-ping, FU Sen. Test Research on

- IR Radiation Characteristics Control of Space Target using Cryogenic Vacuum Multilayer Insulation Film Structure [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 18 (4): 119—122.
- [6] ERDEM C. Performance Investigation of Heat Insulation Solar Glass for Low-carbon Buildings [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 88 (9): 834—841.
- [7] 侯翠红, 孙吉梅, 张宝林, 等. 红外反射涂料在玻璃上的隔热效果研究 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2007, 28 (2): 54—56.
- HOU Cui-hong, SUN Ji-mei, ZHANG Bao-lin, et al. Study on the Heat Insulation Effect of Infrared Radiation Coatings [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2007, 28 (2): 54—56.
- [8] 陈飞霞, 付金栋, 韦亚兵, 等. 纳米氧化锡透明隔热涂料的制备及性能表征 [J]. 涂料工业, 2004, 34 (2): 48—51.
- CHEN Fei-xia, FU Jin-dong, WEI Ya-bing, et al. Preparation of Nano Indium/Tin Oxide Transparent Heat Insulation Coatings and Its Performance Characterization [J]. Paint & Coatings Industry, 2004, 34 (2): 48—51.
- [9] 杨泉. 玻璃隔热膜建筑节能改造应用案例分析 [J]. 墙材革新与建筑节能, 2013, 10: 57—59.
- YANG Quan. Glass Heat Insulation Membrane Construction Energy Conservation Transformation Application Case Analysis [J]. Wall Materials Innovation & Energy Saving in Buildings, 2013, 10: 57—59.
- [10] 常天海, 黄光周. 汽车前挡风玻璃用 ITO 薄膜的隔热及节能实验研究 [J]. 真空, 2002, 39 (3): 18—22.
- CHANG Tian-hai, HUANG Guang-zhou. Experimental Studies on Thermal Shielding and Saving Energy of the Coated ITO Film for Automobile Front Windshield [J]. Vacuum, 2002, 39 (3): 18—22.
- [11] 徐均琪, 杭凌侠, 弥谦, 等. 宽束冷阴极离子源的工作特性研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2008, 28 (3): 266—270.
- XU Junqi, HANG Lingxia, MI Qian, et al. Operating Characteristics of Newly Modified Broad Beam Ion Source [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2008, 28 (3): 266—270.
- [12] 潘永强, 施洋, 杭凌侠. 太阳能模拟器滤光片的研制 [J]. 真空科学与技术学报, 2010, 30 (5): 470—473.
- PAN Yong-qiang, SHI Yang, HANG Ling-xia. Design and Fabrication of Air Mass Filter for Solar Simulator [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2010, 30 (5): 470—473.
- [13] 潘永强, 弥谦, 杭凌侠. Al_2O_3 -Cr 多层中高温选择吸收薄膜的研制 [J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33 (3): 267—270.
- PAN Yong-qiang, MI Qian, HANG Ling-xia. Growth of Al_2O_3 -Cr Multi-Layered Coatings for Solar Selective Absorption at Medium and High Temperatures [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013, 33 (3): 267—270.
- [14] 潘永强, 王飞飞, 杭凌侠, 等. 四栅网式离子能量分析仪栅网特性研究 [J]. 表面技术, 2013, 42 (2): 34—36.
- PAN Yong-qiang, WANG Fei-fei, HANG Ling-xia, et al. Study on Grid Characteristic of Four-gridded Ion Energy Analyzer [J]. Surface Technology, 2013, 42 (2): 34—36.
- [15] 张艳茹, 杭凌侠, 郭峰, 等. 直流反应磁控溅射制备 a-C:H 薄膜及其表面粗糙度研究 [J]. 表面技术, 2013, 42 (2): 92—94.
- ZHANG Yan-ru, HANG Ling-xia, GUO Feng, et al. Study on Deposition of a-C:H Film by Reactive DC Magnetron Sputtering and Its Surface Roughness [J]. Surface Technology, 2013, 42 (2): 92—94.

(上接第 73 页)

- [81] ZENG Y, CHENG G, WEN M, et al. Effect of External Bias Voltage and Coating Thickness on the Photocatalytic Activity of Thermal Sprayed TiO_2 Coating [J]. Progress in Organic Coatings, 2008, 61 (2/4): 321—325.
- [82] COLMENARES A J, ZHAO S, YOUNG C, et al. The Effects of Thermal Spray Technique and Post-deposition Treatment on the Photocatalytic Activity of TiO_2 Coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 204 (4): 423—427.
- [83] BORDES M C, VICENT M, MORENO A, et al. Microstructure and Photocatalytic Activity of Aps Coatings Obtained from Different TiO_2 Nanopowders [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 220: 179—186.
- [84] TOMA F L, BERGER L M, STAHR C C, et al. Microstructures and Functional Properties of Suspension-sprayed Al_2O_3 and TiO_2 Coatings: An Overview [J]. Journal of thermal spray technology, 2010, 19 (1/2): 262—274.
- [85] GARDON M, GULEMANY J M. Milestones in Functional Titanium Dioxide Thermal Spray Coatings: a Review [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2014, 23 (4): 577—595.
- [86] LIU J, ZENG Y, GAO J, et al. Photocatalytic Efficiency Enhancement of Plasma-sprayed TiO_2 Coatings under External Bias Voltage [J]. Ceramics international, 2006, 32 (6): 719—721.