

航天器热控涂层研究进展

侯 彬

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要:热控涂层是航天器热设计常用的一种被动热控制技术。选用合适的热控涂层,能使航天器某些部位处于期望的温度范围内,这对于航天器正常在轨运行具有重要的作用。文中首先介绍了热控涂层的概念及基本原理,按照热辐射性质和组成对热控涂层进行了分类,并按照制备方法的不同对各类热控涂层进行了详细阐述,重点分析了国内外涂料型热控涂层的主要差距;然后,从热辐射性质、空间稳定性、基材适用性、附着性、清洗性及工艺性几个方面对各类热控涂层的性能进行了比较;最后,指出了当前我国航天器热控涂层存在的不足,并对航天器热控涂层技术的未来发展方向进行了展望。

关键词:热控涂层;太阳吸收比;半球发射率;性能;发展方向

中图分类号:V250.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-7859(2021)01-0086-05

引用格式:侯 彬. 航天器热控涂层研究进展[J]. 现代雷达, 2021, 43(1): 86-90.

HOU Bin. Research Progress on Thermal Control Coatings for Spacecraft[J]. Modern Radar, 2021, 43(1): 86-90.

Research Progress on Thermal Control Coatings for Spacecraft

HOU Bin

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Thermal control coatings is a kind of passive thermal control technology used in spacecraft thermal design. The appropriate thermal control coating can be used to keep certain parts of the spacecraft in the desired temperature range, which plays an important role in the normal operation of spacecraft. This paper first introduces the concept and basic principle of thermal control coatings. Thermal control coatings are classified according to their thermal radiation properties and composition. Various kinds of thermal control coatings are described in detail according to different preparation methods. The main differences of coating-type thermal control coatings at home and abroad are analyzed. Then the properties of various thermal control coatings are compared from the aspects of thermal radiation properties, space stability, substrate applicability, adhesion, cleaning and process. At the end of the paper, the shortcomings of thermal control coatings for spacecraft in china are pointed out, and the future development direction of thermal control coating technology for spacecraft is prospected.

Key words: thermal control coatings; solar absorptance; hemispherical emittance; performance; development direction

0 引 言

太空是一个高真空的特殊环境,航天器在太空运行受太阳照射和非照射时,其温差变化范围可达数百度。为保证航天器在苛刻的高真空、高低温交变环境中的正常运行,航天器上所有的载荷、设备必须保持在一个相对恒定的温度区间内,而恶劣的空间环境给航天器的正常工作带来了极大的挑战,必须对航天器进行合理的热控制设计并研制可靠的热控制系统。

热控涂层是专门用来调整固体表面热辐射性质从而达到热控制目的的功能材料。热控涂层是航天器常用的一种被动热控制技术,选用合适的热控涂层,能使

航天器某些部位处于期望的温度范围内。

航天器表面的太阳吸收比 α_s 、半球发射率 ε_H 是两个重要的可控热辐射性能参数。采用不同太阳吸收比和半球发射率的热控涂层,可决定暴露于空间环境中航天器表面热平衡温度水平。

假设在空间有一等温物体,它只受到太阳的直接照射,没有地球反照、地球红外辐射以及内热源等影响,那么,在达到稳定状态时,它所吸收太阳的热量等于它辐射的热量,物体表面的热平衡温度与太阳吸收比和半球发射率的比值 α_s/ε_H 的 $1/4$ 次方成正比。

因此,通过在物体表面选用不同热辐射性质的热控涂层,可以得到不同的热平衡温度。在对航天器进行热设计时,按照其在轨各瞬间所受外热流和内功率

情况,在各个部位合理选择涂层的热辐射性质,再配合其他热控措施,可使各个部位处于适宜的温度范围。

1 热控涂层的类型

热控涂层的分类形式较多,比如,按照热辐射性质的不同,它们可分为低吸收($\alpha_s < 0.20$)、中吸收($\alpha_s = 0.20 \sim 0.80$)、高吸收($\alpha_s > 0.80$)、低发射($\varepsilon_H < 0.20$)、中发射($\varepsilon_H = 0.20 \sim 0.80$)、高发射($\varepsilon_H > 0.80$)、低吸收-发射比($\alpha_s/\varepsilon_H < 0.40$)、中吸收-发射比($\alpha_s/\varepsilon_H = 0.40 \sim 1.10$)、高吸收-发射比($\alpha_s/\varepsilon_H > 1.10$)等类型^[1]。

按照组成的不同,热控涂层可分为金属(不锈钢、金、黑镍等)、氧化铝、涂料、玻璃-铝、塑料薄膜-铝(金、银)、二氧化硅-铝等类型。按照制备方法的不同,热控涂层主要可分为以下六种类型。

(1) 物理处理型

直接利用金属基材的表面状态来调节航天器表面的热辐射性质是最简单的一种热控涂层使用方法。抛光处理的金属表面通常具有很低的 ε_H ($0.02 \sim 0.09$)和高 α_s/ε_H (> 2)^[2-3],喷砂处理的金属表面通常具有较高的 α_s 和 ε_H ,比如,喷砂的不锈钢表面的 $\alpha_s \approx 0.58$, $\varepsilon_H \approx 0.38$ ^[4],比抛光表面高2~3倍。

(2) 电化学氧化型

铝和铝合金经抛光处理后,再进行阳极氧化处理可形成光亮阳极氧化热控涂层,通常具有较低的 α_s 和较低至中等的 ε_H 。文献[1]对软质铝合金波导光亮阳极氧化热控涂层制备工艺进行了研究,制备的涂层的 $\alpha_s/\varepsilon_H \approx 0.4$,涂层外观光滑、无疏松、无剥落、无腐蚀斑点且波导内腔无氧化膜,获得了较优的电性能指标。

铝和铝合金经过阳极氧化、着黑色处理,可得到黑色阳极氧化热控涂层,通常其 $\alpha_s > 0.80$, $\varepsilon_H > 0.85$ 。文献[5]采用硫酸阳极氧化、黑染料着色的方法制备了LY12铝合金黑色阳极氧化热控涂层,涂层的 $\varepsilon_H = 0.85 \sim 0.87$ 。

铝、镁、钛等通过微弧氧化处理形成微弧氧化热控涂层,通常制备成中等 α_s (≈ 0.40)、高 ε_H (> 0.85)涂层,亦可制备成高 α_s (> 0.85)涂层。文献[6]通过微弧氧化在MB7镁合金基体上制备了高 α_s ($0.88 \sim 0.95$)、高 ε_H ($0.85 \sim 0.9$)的热控涂层,解决了航天器替代铝合金制件的减重问题。

(3) 电镀型

金镀层是航天器应用较多的电镀型热控涂层。铝合

金经抛光处理后所获得的金镀层具有很低的 ε_H (约为0.03)和很高的 α_s/ε_H (> 7.0),在空间环境下稳定性好。

另一种常用的电镀型热控涂层是黑镍镀层,其 $\alpha_s > 0.80$,可被用作高吸收热控涂层。

(4) 涂料型

有机漆是应用最广泛的涂料型热控涂层,它主要由颜料(ZnO 、 TiO_2 等)和有机基料(硅树脂、丙烯酸树脂等)组成。有机漆又可细分为有机白漆、有机黑漆、有机灰漆等。

有机白漆具有较低的 α_s ($0.15 \sim 0.27$)和较高的 ε_H ($0.85 \sim 0.90$),在航天器外表面应用较多。

美国航天器应用的有机白漆有Z-93、S13G/LO(低放气)、A429M、YB-71等^[7],其中,A429M的空间稳定性优于Z-93、S13G/LO。俄罗斯航天器应用的主要有K-BAK-14、40-1-28,它们采用了 ZrO_2 颜料,空间稳定性好并具有防静电功能^[8]。我国自主研制的主要有SR107、SR107-ZK,大多用于短寿命航天器,长期空间稳定性不好;近年来,国内研究者主要在树脂和颜料的改性方面开展了一些研究以提高其空间稳定性。文献[9]采用改性 ZnO 合成了硅树脂白漆,较传统 ZnO 白漆稳定性提高了近50%。文献[10]利用改性硅树脂与 ZnO 制备了热控白漆,试验表明耐紫外辐照稳定性好。

国内有机白漆与国外的差距主要为两个方面^[11]:

(1)国内颜料以 ZnO 为主,国外颜料大多为 ZrO_2 、改性 ZnO 等,这直接导致了白漆长期空间稳定性的显著差异;(2)国外热控白漆兼具防静电功能,国内则无此功能。这无疑为国内热控白漆研究者指明了今后的工作方向。

另一种应用较多的是有机黑漆,它们通常具有高 α_s ($0.90 \sim 0.95$)和 ε_H ($0.88 \sim 0.90$)。美国航天器使用的代表性黑漆如Z306黑漆,它除了具有高 α_s 、高 ε_H 的特点之外,还具有低出气率的特点,这对于航天器的光学镜头成像是极其有利的^[12]。俄罗斯航天器常用的黑漆有AK-512、AK-243、KO-818、1-416等,其中,AK-512空间稳定性最佳,应用最广泛^[8]。我国自主研制的热控黑漆主要有SR107-E51、E51-M、HA95、ERB-2B等,其中,HA95黑漆具有很强的疏水耐污特性,可以有效解决型号产品在地面装配、转运、测试环节中产生的污染清洁难题。

有机灰漆的热辐射性质介于有机白漆和有机黑漆两者之间。有机金属漆具有较低的 ε_H (0.25~0.30), $\alpha_s/\varepsilon_H \approx 1.0$ 。

无机漆具有较低至中等的 α_s 和较高的 ε_H , 主要由颜料 (ZnO、SiC 等) 和无机粘结剂 (硅酸盐、磷酸盐等) 组成, 典型体系为 ZnO/K₂SiO₃。近年来, 国内研究者进行了颜料优选方面的研究, 文献 [13] 以纳米 ZnO、硅酮橡胶弹性体等成分研制了一种 250℃ 以下使用的防静电热控涂层, 具有低 α_s 、较高的 ε_H 和表面电阻, 可用于航天器防静电和反射热量。文献 [14] 以正钛酸锌为颜料, 硅酸钾为粘结剂, 获得了低 α_s 、高 ε_H 的热控涂层, 可满足航天器高效、长寿命的应用需求。

(5) 真空沉积型

真空沉积型热控涂层可分为真空镀膜型、二次表面镜型两种。

真空镀膜型是通过真空中蒸发、沉积, 在金属、玻璃或塑料等基体上得到纯度很高的铝、金、银、铑、铬、铂等金属膜层。它们通常具有低至中等的 α_s 和低的 ε_H , 常用的主要是铝 ($\alpha_s \approx 0.15, \varepsilon_H \approx 0.05$)、银 ($\alpha_s \approx 0.04, \varepsilon_H \approx 0.02$) 和金 ($\alpha_s \approx 0.30, \varepsilon_H \approx 0.14$) 三种。文献 [15] 通过真空沉积在碳纤维表面制备出 $\alpha_s/\varepsilon_H \approx 0.2/0.2$ 的 VDA/SiO₂ 热控涂层, 可用于形状较复杂的曲面, 且涂层的发射率随保护层厚度可调节。

二次表面镜型是通过选用合适的金属底层和一定厚度的透明薄膜表面层得到的热控涂层。根据其透明薄膜表面层的组成, 可将它们细分为玻璃型、塑料薄膜型、复合薄膜型三种。

通常, 玻璃型二次表面镜的 $\alpha_s = 0.05 \sim 0.15, \varepsilon_H = 0.81 \sim 0.83$; 塑料薄膜型二次表面镜的 $\alpha_s = 0.08 \sim 0.25, \varepsilon_H = 0.40 \sim 0.88$ 。文献 [16-18] 利用金属氧化物研发了一种 Meta-OSR 热控涂层, 其质量轻、耐久性能优异, 具有极强的红外散射特性和极低的 α_s , 有望替代玻璃型二次表面镜, 将有效推动航天器的轻量化。

(6) 热控带

热控带由基体薄膜 (箔)、涂层和压敏胶三部分组成, 可直接粘贴到需要的表面。最常见的热控带有三种: 金属箔 (如铝箔)、金属化塑料薄膜带 (如聚酰亚胺薄膜镀金) 和漆带 (如聚酯薄膜喷涂白漆)。文献 [19-20] 利用聚酰亚胺薄膜金属化制备低 α_s 、低 ε_H 热控带, 特别是银基复合型薄膜 CCAG, 在长寿命航天器上应用前景较好。

2 热控涂层的性能比较

各类常用热控涂层的热辐射性质、附着性、工艺性等基本性能比较如表 1 所示。

表 1 热控涂层的基本性能比较

涂层类型	涂层名称	热辐射性质			附着性	清洗性	工艺性
		α_s	ε_H	α_s / ε_H			
金属基材	抛光金属	低	低	高	好	好	较好
电化学氧化	铝合金光亮阳极氧化膜	低~中	低~中	低~中	好	好	需镀槽, 适用于中、小零部件
	铝合金黑色阳极氧化膜	高	高	中	好	好	
	镁合金微弧氧化膜	中~高	高	低~中	好	好	
电镀	铝合金光亮镀金	低~中	低	高	好	好	较好
	铝合金镀黑镍	高	低~高	中~高	好	好	
涂料	有机漆	低~高	低~高	低~中	较好	较好	工艺简单, 适用面宽
	无机漆	低~高	低~高	低~中	中	差	工艺简单, 适用面较宽
真空沉积	真空蒸镀金属	低	低	高	较好	较好	需镀膜设备, 适用于中、小零部件
	玻璃型二次表面镜	低	高	低	好	好	粘贴方便, 需镀膜设备, 适用于中、小零部件
	塑料薄膜型二次表面镜	低~中	高	低~中	好	好	
	复合薄膜型二次表面镜	低	低~中	低~中	好	好	需镀膜设备, 适用于中、小零部件
其他	热控带	低~高	低~高	低~高	较好	较好	粘贴方便, 适用于各种零部件

航天器在空间运行时, 会受到多种空间辐射环境的作用, 如低轨道会受到严重的原子氧侵蚀作用, 高轨

道受高真空、紫外及带电粒子(电子、质子)辐照等空间环境因素的影响;处于航天器外表面的热控涂层发生退化,导致热控涂层表观 α_s 增大,这是航天器入轨后温度升高、以致不能正常工作的主要原因。

就空间稳定性而言,各类热控涂层不尽相同。在耐紫外辐照性能方面,玻璃型二次表面镜最好,塑料薄膜型二次表面镜、铝光亮阳极氧化涂层次之;对于同类型热控涂层,高 α_s 热控涂层优于低 α_s 热控涂层,比如,黑漆优于灰漆,而灰漆又优于白漆。在耐电子辐照性能方面,塑料薄膜型二次表面镜(如F46薄膜镀铝)、复合薄膜型二次表面镜(如铝-二氧化硅)最好,不锈钢镀黑镍涂层、灰漆、白漆、铝光亮阳极氧化涂层、铝光亮镀金涂层次之。在耐质子辐照性能方面,铝黑色阳极氧化涂层、白漆最好,黑漆、不锈钢镀黑镍涂层、铝光亮阳极氧化涂层次之。

此外,从基材适用性方面来看,涂料型热控涂层应用最广泛,其中有机漆适用性最好,它既适用于金属基材,又适用于非金属表面,且具有良好的附着性;无机漆适用性也较好,但其附着性逊于有机漆,特别指出的是,无机漆表面孔隙率较高、易被污染且不易清洗,须注意妥善保护。

3 结束语

我国航天器热控涂层的研制工作始于20世纪60年代中期,虽然50多年来取得了巨大的进步,然而,热控涂层在空间环境下的退化仍然影响着我国航天器的正常工作和使用寿命。和美国、俄罗斯等空间强国相比,我国航天器热控涂层的不足主要表现为品种单一、空间稳定性不好、使用寿命短。

当前,我国正处于发展空间站、探月工程的关键时期。因此,研制空间稳定性好、使用寿命长的热控涂层(如低吸收-发射比的防沾污防静电白漆)已经成为航天器热控设计和热控涂层研制单位所亟需解决的课题。

此外,可根据太空环境温度进行发射率自主调节的智能热控涂层、能够提高探测器分辨率和成像质量的高太阳吸收比-低可凝挥发物的热控涂层也都是重点研究方向,在未来的航天器上具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] GJB 2704A. 航天器热控涂层通用规范[S]. 2006.

GJB2704A. General specification for thermal control coatings of spacecraft[S]. 2006.

[2] SCOLLON T R. Long life high reliability thermal control systems study data handbook[R]. N72-28913. [S. l.]: NASA, 1971: 51-53.

[3] MOOKHERJI T K. Handbook on passive thermal control coatings[R]. N73-25969. [S. l.]: NASA, 1978: 72-75.

[4] HENNINGER J H. Solar absorptance and thermal emittance of some common spacecraft thermal control coatings[R]. N84-23698. [S. l.]: NASA, 1983: 105-109.

[5] 刘会彬,邹松华. 铝合金阳极氧化着色黑色热控涂层工艺研究[J]. 电镀与精饰, 2016, 38(8): 35-38.

LIU Huibin, ZOU Songhua. Process research of black anodized thermal control coating for aluminum alloy[J]. Plating and Finishing, 2016, 38(8): 35-38.

[6] 秦 伟,吴晓宏,王小东,等. 一种镁合金表面高太阳吸收率高发射率热控涂层的制备方法[P]. CN: 101748468B, 2011.

QIN Wei, WU Xiaohong, WANG Xiaodong, et al. The invention relates to a preparation method of high solar absorptance and high emission thermal control coating on magnesium alloy surface [P]. CN: 101748468B, 2011.

[7] KENNY M, MCNULTY R, FINCKENOR M. Further analysis of thermal control coatings on MISSE for aerospace applications[C]// Proceedings of National Space and Missile Materials Symposium. Henderson, USA: [s. n.], 2009: 36-38.

[8] 曾一兵,张廉正,胡连成. 俄罗斯空间有机热控涂层发展的现状及动向[J]. 宇航材料工艺, 1999(6): 57-59.

ZENG Yibing, ZHANG Lianzheng, HU Liancheng. The development status and trend of organic thermal control coatings in Russia[J]. Aerospace Materials and Technology, 1999(6): 57-59.

[9] 周 博. 改性 ZnO 基有机热控白漆的合成与表征[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

ZHOU Bo. The synthesis and characterized of modified ZnO-based organic thermal control coating[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[10] 李瑜婧,刘 刚,曹康丽,等. POSS 改性卫星用白漆热控涂层的研究[J]. 涂料工业, 2017, 47(7): 6-12.

Li Yujing, Liu Gang, Cao Kangli, et al. Research on POSS-modified thermal control white coating for satellite[J]. Paint and Coatings Industry, 2017, 47(7): 6-12.

- [11] JAWORSKE D A, KLINE S E. Review of end-of-life thermal control coating performance [R]. NASA/TM-2008-215173. [S.l.]:NASA, 2008: 25-29.
- [12] 张建贤,邹永军,徐 蕾,等. 消光漆在光学系统的国内外应用[J]. 宇航材料工艺,2014(6):88-90.
ZHANG Jianxian,ZOU Yongjun,XU Lei,et al. Matte coating and its application in optical system [J]. Aerospace Materials and Technology,2014(6):88-90.
- [13] 曹先启,王 勃,王 超,等. 一种白色无机防静电热控涂层材料[P]. CN:103756379A,2014.
CAO Xianqi,WANG Bo,WANG Chao,et al. The invention relates to a white inorganic anti-static thermal control coating material[P]. CN:103756379A,2014.
- [14] 张 杭,贺光辉,张家强,等. 正钛酸锌无机热控涂层制备及其性能研究[J]. 表面技术,2018,47(9):90-94.
ZHANG Hang,HE Guanghui,ZHANG Jiaqiang,et al. Research on preparation and properties of inorganic thermal control coating of zinc titanate [J]. Surface Technology, 2018,47(9):90-94.
- [15] 王 彦,康奥峰,曹韞真,等. 静止轨道实孔径微波天线主反热控方案研究[J]. 上海航天,2016,33(5):107-113.
WANG Yan,KANG Aofeng,CAO Yunzhen,et al. Research of real aperture microwave antenna main reflector thermal control measures on geostationary earth orbit [J]. Aerospace Shanghai,2016,33(5):107-113.
- [16] MUSKENS OL, KAI S, GROOT CHD, et al. Metal oxide metasurfaces for active control and space technology[C]// Proceedings of Conference on Lasers and Electrooptics Europe&European Quantum Electronics Conference: Munich, Germany:[s. n.], 2017:92-95.
- [17] KAI S, RIEDEL CA, WANG Y, et al. Metasurface optical solar reflectors using AZO transparent conducting oxides for radiative cooling of spacecraft[J]. Acs Photonics, 2018, 5(2):495-501.
- [18] SUN K, RIEDEL C A, URBANI A, et al. VO₂ thermochromic metamaterial-based smart optical solar reflector [J]. Acs Photonics, 2018, 5(6):2280-2286.
- [19] KNOFF P W, MARTIN R J. Correlation of laboratory and flight data for the effects of atomic oxygen on polymeric materials[R]. AIAA-85-1066, [S.l.]: AIAA, 1981: 1-11.
- [20] GATT R, NIKLASSON G A, GRANQVIST C G. Degradation modes of cermet based selectively solar absorbing coatings[C]// Proceedings of Physics Department, Chalmers University of Technology and University of Gothenburg S-41296 Gothenburg. Sweden: SPIE Press, 1992: 87.

作者简介:

侯 彬 男,1979年生,硕士,高级工程师,研究方向为电子设备表面工程。