引用格式：谷金鑫，隋子奇，魏航，等．智能热控材料及空间应用研究进展[J]．材料工程，2026，54(8)：134-149.
GU Jinxin，SUI Ziqi，WEI Hang，et al.Research progress in smart thermal control materials for space applications[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(8)：134-149.

智能热控材料及空间应用研究进展

谷金鑫[1]，隋子奇[1,2]，魏　航[3]，张　翔[2]，张雷鹏[2]，豆书亮[2*]，任飞飞[1*]，李　垚[1,2*]
（1 苏州实验室，苏州 215123；2 哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所，哈尔滨 150001；
3 苏州大学 光电科学与工程学院，苏州 215006）

摘要：我国空间科学中长期发展规划明确提出快速推进深空探测等重大任务的实施，加快建设空间强国。当前，航天器所面临的空间热环境日趋复杂且极端，对其热控系统提出了更高要求。传统热控材料调温特性单一，难以满足不断提升的性能需求。智能热控材料能够在外部激励下动态调节其物理特性，进而智能调控航天器散热/保温能力，实时匹配变化热环境下的控温需求，大幅提升热控系统的热控制精度与能效，是下一代航天器热控系统的重要发展方向。本文系统梳理了热致变色、电致变色等典型智能热控材料的研究进展、在空间任务中的应用情况以及所面临的关键挑战。为实现智能热控涂层的广泛应用，未来还需在AI赋能材料设计、低成本制备、空间环境失效分析与寿命预测、系统集成等方面开展进一步的研究，这对于推动航天热控技术革新、加速系统迭代升级，支撑航天强国建设具有重要意义。

关键词：智能热控；热致变色；电致变色；光谱调控；空间应用
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2026.000303　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2026.000303
中图分类号：TB34　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)08-0134-16

Research progress in smart thermal control materials for space applications

GU Jinxin[1]，SUI Ziqi[1,2]，WEI Hang[3]，ZHANG Xiang[2]，ZHANG Leipeng[2]，
DOU Shuliang[2*]，REN Feifei[1*]，LI Yao[1,2*]
（1 Suzhou Laboratory，Suzhou 215123，China；2 Center for Composite Materials and Structure，Harbin Institute of Technology，Harbin 150001，China；3 School of Optoelectronic Science and Engineering，Soochow University，Suzhou 215006，China）

Abstract：China's medium- and long-term space science development program clearly puts forward the major tasks of rapidly promoting deep space exploration and accelerating the construction of a space power. The increasingly complex and extreme thermal environment in space imposes more stringent requirements on spacecraft thermal control systems. Conventional thermal control materials exhibit limited and static thermoregulatory properties, failing to meet evolving performance demands. In contrast, smart thermal control materials can dynamically modulate their physical characteristics in response to external stimuli, thereby enabling smart regulation of spacecraft heat dissipation and insulation capabilities, and significantly improving the precision and energy efficiency of thermal management systems. As a result, smart thermal control technology has emerged as a critical development direction for next-generation spacecraft thermal control systems. This review systematically outlines the research progress of typical smart thermal control materials, including thermochromic and electrochromic materials, their applications in space missions and the key challenges in this field. To enable the widespread application of smart thermal control coatings, future research work should be carried out in the AI-assisted material design, low-cost fabrication, failure analysis and life prediction under space environments, and system integration. These endeavors are of great significance for driving innovation in aerospace thermal control technology, accelerating the iterative upgrading

of thermal management systems, and supporting the steady progression of national space strategy.
Key words: smart thermal control; thermochromic; electrochromic; spectral regulation; space application

热控材料是航天器热管理功能的关键载体，其性能直接决定了热控效能与航天器在轨运行的可靠性[1-5]。在我国已实施的月球与火星探测等深空任务中，超低密度纳米气凝胶、高透明聚酰亚胺薄膜、高吸收低发射率热控涂层等一系列热控材料发挥了重要作用[6]。随着深空探测等重大任务的持续推进，航天器面临更加复杂的空间热环境，极端温度波动对热控系统提出了更高要求[2,7]。具体而言，探测载荷的不断增加要求热控部件进一步轻量化；卫星设计寿命的延长对系统能耗提出更严格的限制；同时，多样化的轨道类型与高精度载荷的复杂工作模式，则要求热控系统具备应对复杂外热流变化的快速响应与高精度调控能力。传统热控涂层因其发射率固定，难以响应动态热环境下实时变化的控温需求，增加了主动控温能耗，限制了有效载荷的提升，无法满足我国航天战略发展要求。因此，发展新一代智能热控技术是必然趋势[8-9]。

智能热控材料，如热致变色与电致变色涂层，能够根据环境温度要求动态调节发射率，从而在热控性能上超越传统热控系统[4,10-12]。近年来，智能热控材料在迈向实际应用中已取得显著进展，然而，在面向严苛空间环境时，仍面临诸多挑战。随着深空探测、月球基地等下一代航天任务对轻量化、长寿命、低功耗热控技术的需求日益迫切，加速推进新型智能热控技术工程化应用迫在眉睫。

本文聚焦于热致变色与电致变色两类最具代表性的智能热控材料（图 1），系统梳理其调控机理、最新研究进展及空间应用验证情况。在此基础上，深入讨论智能热控材料在性能优化、环境可靠性等方面存在的共性科学与技术问题，结合未来航天任务需求，提出对智能热控材料与技术发展方向的思考与建议，为我国航天热控技术的迭代升级与创新发展提供参考。

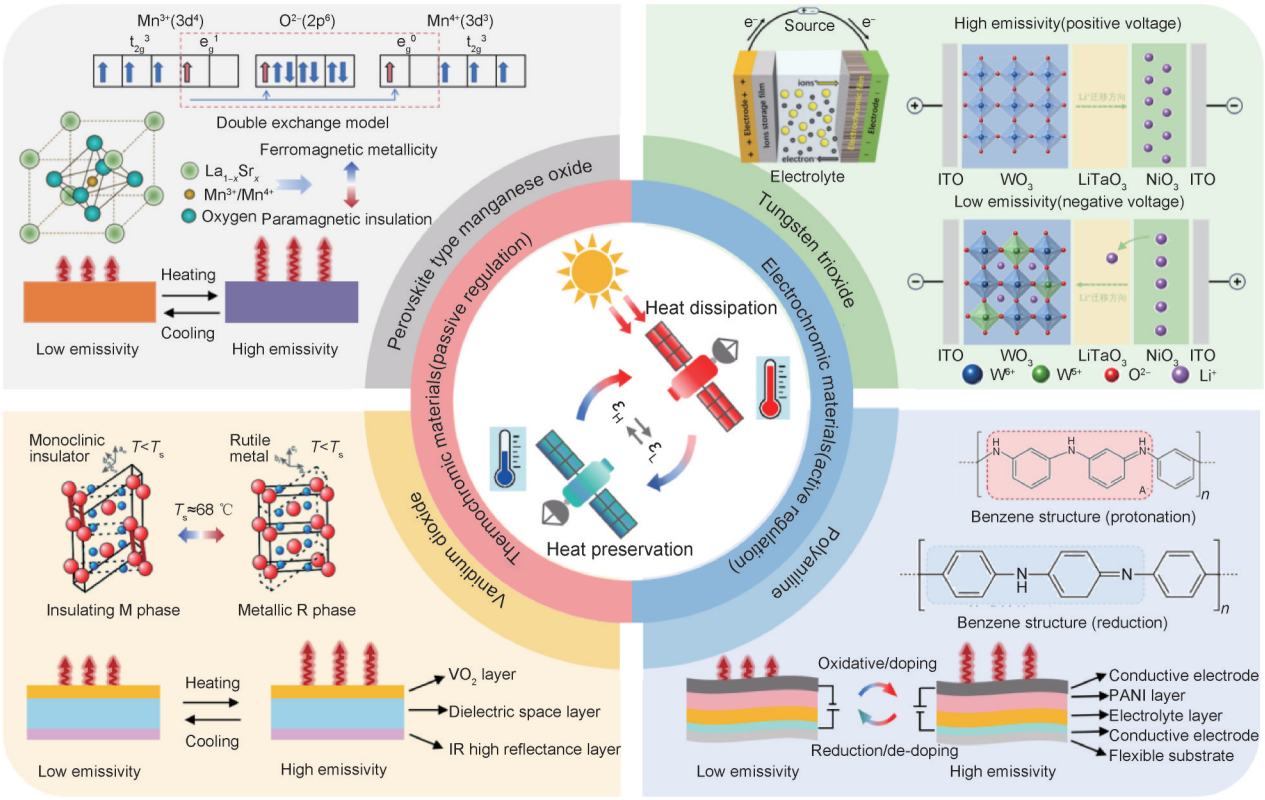


图 1　典型智能热控材料及调控机理

Fig.1　Typical smart thermal control materials and regulation mechanisms

1　光热调控机理

航天器在轨运行时，其温度状态取决于外部空间热环境与内部设备产热之间的动态平衡（图 2(a)）。在简化的稳态热平衡模型中（图 2(b)），航天器散热器吸收的辐射能量（包括太阳直射辐射 J_s、地球/行星反

照率 J_A 与地球/行星红外辐射 J_P)与内部设备功耗(Q_{int})共同构成热输入;热输出则主要为航天器向温度约为 2.7 K 的深空背景进行的红外辐射($\varepsilon\sigma T_R^4$)[9]。据此可建立稳态热平衡方程,见式(1):

$$\alpha_s J_s A_R + \alpha_s J_A A_R + \varepsilon J_P A_R + Q_{int} = \varepsilon\sigma T_R^4 A_R \tag{1}$$

式中:α_s 与 ε 分别为散热器表面的太阳吸收率与总半球发射率;σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数,5.67×10^{-8} W·m^{-2}·K^{-4})。由公式可推导出平衡温度 T_R 近似满足式(2):

$$T_R = \left(\frac{J_s}{\sigma}\cdot\frac{\alpha_s}{\varepsilon}\right)^{1/4} \tag{2}$$

该方程表明,通过选择具有特定 α_s/ε 比值的材料,可将航天器温度维持在目标区间,而这即是传统航天器热控系统构筑的底层物理机制。由于太阳辐射谱段和航天自身热辐射谱段并不重合,因此在理论上可以对同一表面的 α_s 与 ε 进行独立调控。然而,静态热控涂层的 α_s 和 ε 固定,无法应对任务中热环境的动态变化,难以满足微纳卫星(热容小、温度波动剧烈)及深空探测器(太阳辐照度变化范围大)的发展需求。具有可变发射率的智能热控材料则可突破上述性能局限,其核心在于能够根据背景环境状况,在温度(热致变色)或外电场(电致变色)驱动下实现 ε 的动态调节。如图 2(c)所示,理想的智能热控材料应能在外界激励下,实现发射率在较宽范围内的快速、可逆地切换,从而获得最佳的控温效果。随着多光谱兼容技术的发展,部分主动型智能热控器件(如电致变色器件)不仅实现了红外发射率的动态调控,还展现出了太阳吸收率动态调节的潜力[13],这不仅可显著降低对主动加热的依赖、节约能源,还能提高热控系统对复杂多变环境的适应能力。

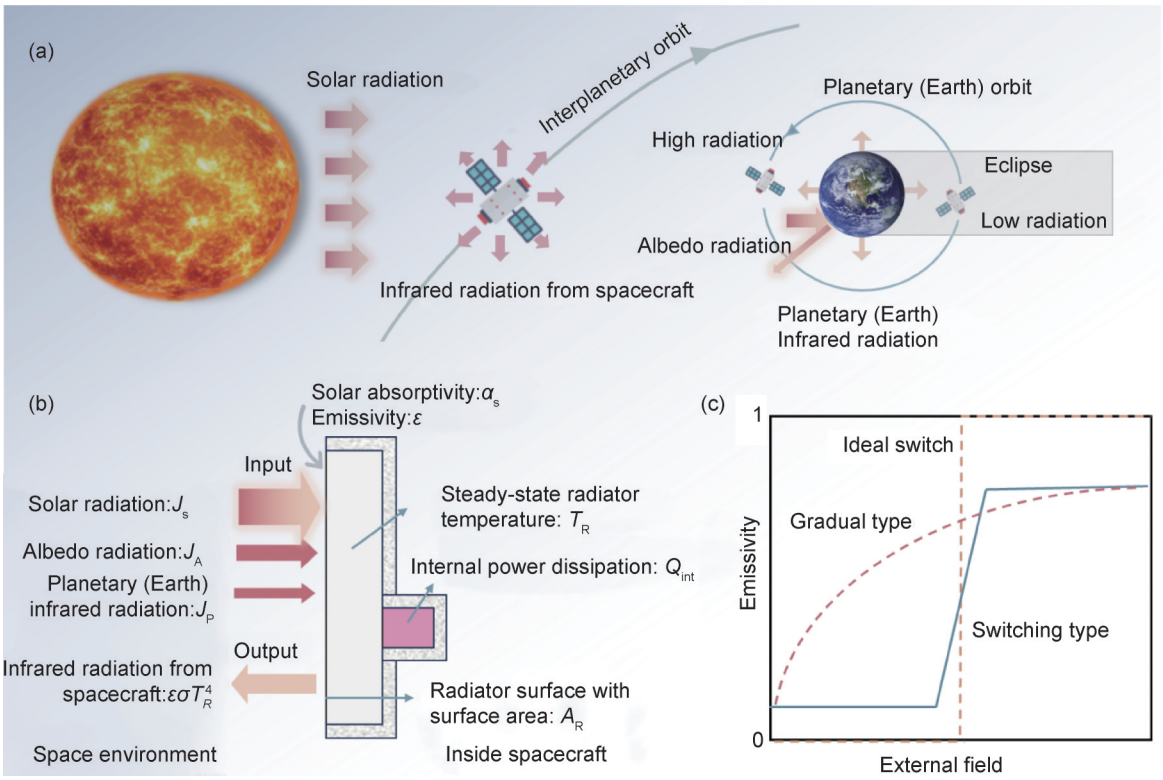


图 2 空间辐射环境与智能热控材料的光谱特性

(a)航天器在地球轨道和行星际轨道运行时的热环境;(b)空间环境中辐射器稳态热平衡;(c)智能材料响应示意图

Fig.2 Space radiation environment and spectral characteristics of smart thermal control materials

(a)thermal environment of spacecraft operating in Earth orbit and interplanetary orbit;(b)steady-state thermal equilibrium of radiators in the space environment;(c)schematic diagram of smart material response

2 热致变色智能热控涂层

热致变色材料能够响应环境温度变化,自适应调控自身红外辐射特性,通过合理的材料与结构设计,可实现在低温低发射率(保温态)与高温高发射率(散热态)之间的动态可逆切换。基于热致变色材料制备的智能热控涂层,可自适应调控热辐射,无需外部能源输入且系统复杂度较低,在航天智能热控领域具有显著优势。本节重点评述基于钙钛矿型锰氧化物($La_{1-x}A_xMnO_3$)和二氧化钒(VO_2)两类材料体系的热

致变色智能热控涂层研究进展与应用挑战。

2.1　钙钛矿型锰氧化物热控材料

钙钛矿型锰氧化物($La_{1-x}A_xMnO_3$)是一种通过A位离子掺杂形成的畸变钙钛矿结构[14]，在相变温度(T_c)附近会发生从铁磁金属态到顺磁绝缘态的可逆转变，并伴随电阻率与光学性质显著变化[15]，被认为是理想的航天器智能热控材料之一。其调控原理在于，温度变化会影响其自由电子迁移率，从而使光谱特性改变。具体而言，当温度低于T_c时，自由电子迁移率升高，通过电子-声子耦合作用使反射率上升，表现为红外低发射率；反之，在高温下，迁移率下降，则表现为红外高发射率[15]。

通过调节$La_{1-x}A_xMnO_3$中A位掺杂元素(如Ca、Sr等金属元素)的含量，可有效调控其相变温度与发射率变化。以$La_{1-x}Sr_xMnO_3$(LSMO)为例，早期研究系统考察了Sr掺杂量对其电学与热辐射性能的影响，通过优化元素配比获得了$La_{0.825}Sr_{0.175}MnO_3$陶瓷材料，其$T_c\approx280$ K、红外发射率变化$\Delta\varepsilon=0.42$(图3(a))，为其在航天器热控中的应用奠定了基础[16-22]。单元素掺杂虽可调控相变温度，使之接近室温，但往往会牺牲发射率调制幅度，而采用双元素共掺如La(Sr,Ca)MnO_3、La(Ba,Be)MnO_3可同时优化相变温度与调制幅度。Fan等[23]制备的$La_{0.7}Sr_xCa_{0.3-x}MnO_3$陶瓷样品的$\Delta\varepsilon$最高可达0.52，且$T_c$调控至室温附近。Shimazaki等[17-19]同样利用Sr和Ca共掺杂制备了$La_{0.775}Sr_{0.115}Ca_{0.11}MnO_3$智能辐射器(smart radiation device，SRD)，并通过优化制备工艺，成功将陶瓷材料厚度减薄至70 μm，面密度降低至461 g/m^2，有效降低了器件质量。该器件于2003年5月搭载于“隼鸟号”(MUSES-C)小行星探测器并进行了在轨验证(图3(b))[24]，实验结果表明，应用于X波段功率放大器与电源等部位的SRD有效抑制了温度波动，与OSR辐射器相比节约加热功耗约18 W，相较于传统机械百叶窗减重250 g，且历经2.5年在轨运行未出现明显性能衰减[24-25]。上述$La_{1-x}A_xMnO_3$材料仍存在固有高α_s的问题，有研究表明通过引入光谱选择性多层薄膜则可实现特定波段高反射的效果。Tachikawa等[26]采用Si/MgF_2/Ge等介质构筑多层光学薄膜，结合遗传算法通过长波通滤波设计，将α_s从0.81大幅降至0.15(SRD M2)，同时保持了高红外发射率调制能力($\Delta\varepsilon=0.41$)，如图3(c)所

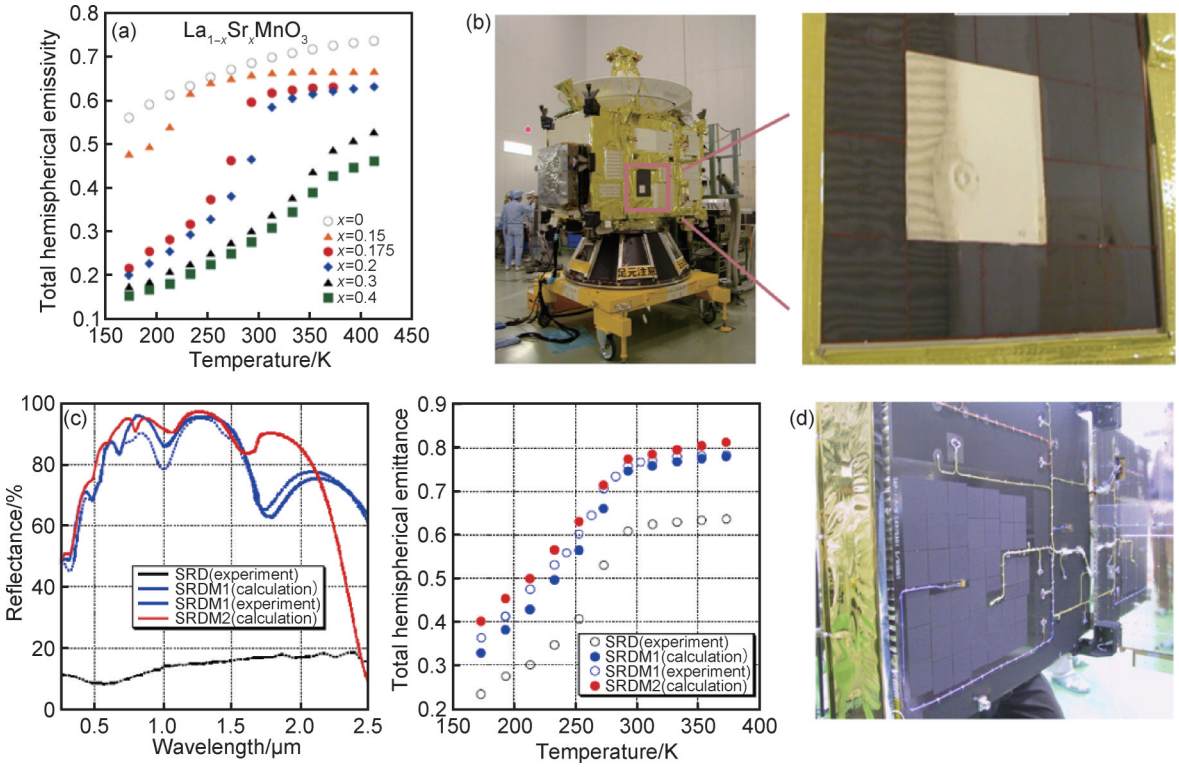


图3　钙钛矿型锰氧化物热控涂层光学性能及空间搭载实验

(a)不同掺杂比例下$La_{1-x}Sr_xMnO_3$发射率随温度变化曲线[16]；(b)安装于MUSES-C航天器[24]；(c)太阳光反射光谱和红外发射率随温度变化曲线[26]；(d)安装于REIMEI卫星[9]

Fig.3　Optical properties and in-orbit piggyback test of perovskite-type manganese oxide thermal control coating

(a)temperature dependent emissivity curve of $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ with different doping ratios[16]; (b)the SRD mounted on MUSES-C[24]; (c)solar reflectance spectra and IR emissivity as functions of the temperature[26]; (d)the SRD mounted on REIMEI[9]

示。Fan等[27]则进一步通过实验证明该设计方法的可行性，所制备的$(Si/MgF_2)_3/Ge/MgF_2/Ge/LCSMO$样品获得了较低的太阳吸收比($\alpha_s$=0.28)。

陶瓷材料存在加工难度大、面密度大等问题，限制其进一步应用。相比之下，薄膜型智能热控材料可兼容不同发射率基底，易于实现轻量化与集成化，被视为更具发展潜力的技术路线。采用溶胶-凝胶法制备的LSMO薄膜，其发射率变化接近块体陶瓷，凸显了该方法在复杂组分薄膜制备中的优势[28]。2005年8月，日本在发射的小型卫星“创新技术演示实验 REIMEI”(INDEX)上搭载了涂层型LSMO材料(图3(d))，将其应用于太阳帆板背面以抑制温度波动，结果表明其具有良好的热辐射调制能力，展现了更好的工程适用性[9,25]。

近年来，智能热控材料的发展呈现出从刚性向柔性转变的趋势。相较于刚性薄膜易受表面形状限制、贴合性不足的问题，柔性薄膜能更好地适应复杂表面，实现有效贴附[29-31]。表1[10,13,22-24,26,29-51]梳理了钙钛矿型锰氧化物热控材料研究进展，ε_H为高发射率，ε_L为低发射率，可以发现其逐渐从刚性陶瓷发展为轻质柔性薄膜，发射率调制幅度显著增强。如图4(a)所示，黄郅航等[29]利用磁控溅射技术制备的$La_{0.7}Ca_{0.25}K_{0.05}MnO_3$薄膜展现出良好的机械柔性，在173～373 K温区内具有0.37发射率调制幅度，接近陶瓷基材料(≈0.43)。Fan等[30]则通过将LSMO纳米颗粒嵌入氟化聚酰亚胺(PI)基质中制备了柔性热致变色薄膜(图4(b))，其发射率调节幅度可以达到0.46，与现有OSR片比，在低温条件下至少可节省61%的能耗。2022年，该团队又设计了一种基于LCKMO/STO/3YSZ的多层光子堆叠结构(图4(c))[31]，通过协同热致变色与开关效

表1 具有代表性的智能热控材料及其光学性能[10,13,22-24,26,29-51]

Table 1 Summary of representative smart thermal control coatings and their performance[10,13,22-24,26,29-51]

Material	Structure	ε_H	ε_L	$\Delta\varepsilon$	α_s	Ref.
$La_{1-x}A_xMnO_3$	$La_{0.825}Sr_{0.175}MnO_3$	0.63	0.21	0.42		[22]
	$La_{0.775}Sr_{0.115}Ca_{0.11}MnO_3$	0.637	0.233	0.404	0.88	[24]
	$La_{0.7}Sr_{0.15}Ca_{0.15}MnO_3$	0.65	0.13	0.52		[23]
	$(Si/MgF_2)_3/(Ge/MgF_2)_2/LSMO$			0.41	0.15	[26]
	$La_{0.7}Ca_{0.25}K_{0.05}MnO_3/InO/Mica$	0.65	0.28	0.37		[29]
	LSMO nanoparticles/PI	0.77	0.31	0.46		[30]
	LCKMO/STO/3YSZ	0.68	0.21	0.47		[31]
	$(La_{0.825}Sr_{0.175}MnO_3\text{-}BaF_2)_5/Al$	0.83	0.18	0.65		[32]
VO_2	$VO_2/HfO_2/Ag$	0.68	0.13	0.55		[33]
	$W:VO_2/HfO_2/Al$	0.74	0.23	0.51		[34]
	$W\text{-}Mg:VO_2/HfO_2/Al$	0.86	0.17	0.69	0.40	[35]
	$(Ge/MgF_2)n/VO_2/MgF_2/W$	0.636	0.054	0.582		[36]
	$VO_2/BaF_2/ITO/Ag/ITO$	0.67	0.16	0.51	0.16	[37]
	$Al_2O_3/VO_2\text{-metasurface}/SiO_2/Al/Al_2O_3/Si$	0.636	0.320	0.48	0.46	[38]
	$VO_2\text{-metasurface}/BaF_2/Ag$	0.90	0.20	0.70	0.25	[10]
	$W:VO_2\text{-metasurface}/SiO_2/Al$			0.35		[39]
	$(YF_3/ZnS)_n/W:VO_2\text{-metasurface}/SiO_2/Al/polyimide$	0.80	0.47	0.33	0.22	[40]
	$CaF_2@VO_2$	0.83	0.47	0.36		[41]
WO_3	$ITO/WO_3/Au$			0.32		[42]
	$Glass/ITO/NiO_x/LiTaO_3/WO_3/ITO$	0.76	0.46	0.30		[43]
	$ITO/NiO/LiTaO_3/Li_4Ti_5O_{12}/WO_3/ITO$	0.66	0.32	0.34		[44]
	$ITO/SiO_2/ITO/glass/ITO/NiO/ZrO_2/Li/WO_3/ITO$	0.80	0.38	0.42		[13]
	$ITO/WO_3/Ta_2O_5/NiO/Ag/glass$			0.49	0.38	[45]
	$W_{18}O_{49}$ nanowire/MXene	0.77	0.30	0.47		[46]
PANI	$PANI\text{-}DBSA/BMIBF_4\text{-}LiBF_4/PVDF\text{-}HFP$	0.84	0.42	0.42		[47]
	$PANI\text{-}PSS/H_2SO_4/HclO_4/CSA/BMIBF_4\text{-}LiBF_4/PVDF\text{-}HFP$	0.86	0.48	0.38	0.31	[48]
	PANI/PDPA copolymer/polymeric sulfate dopant	0.79	0.39	0.40		[49]
	$Li^+:V_2O_5/PANI$			0.51		[50]
	PANI/metal-doping (Ni/Mn/Pb)/Au/nylon substrate/PVDF gel electrolyte	0.74	0.22	0.52		[51]

应，将红外辐射调控幅度提升至0.47。

在空间服役环境下，材料还面临质子、电子、紫外线辐照等多种性能衰退因素的复合作用。为应对上述问题，还需在材料组分、防护涂层与耐久性设计等方面开展协同设计，以保障智能热控涂层在轨的长期可靠运行能力。陈铭俊等[15]采用第一性原理计算筛选出最佳Sr掺杂量，利用磁控溅射技术制备出致密均匀的LSMO智能热控涂层，系统探究了质子、紫外等不同辐照条件对涂层性能影响。结果表明，该LSMO智能热控涂层在紫外辐照（图4(d)）、电子辐照环境下较为稳定，而质子辐照会导致晶体产生氧空位，弱化双交换作用，从而使热控性能显著衰减。

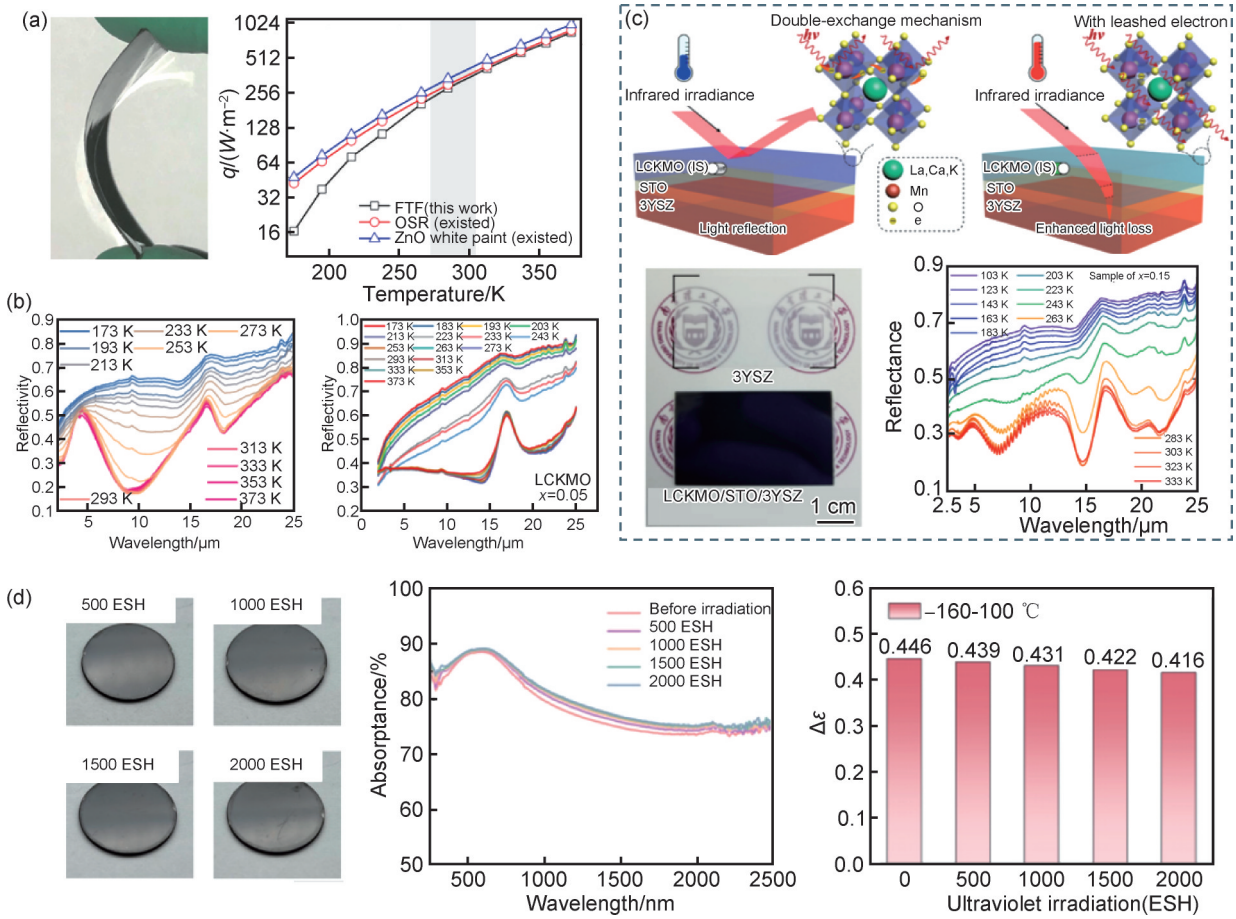


图4　钙钛矿型锰氧化物热控涂层光学性能与紫外辐照稳定性

(a)柔性样品实物图和辐射功率密度随温度变化曲线[29]；(b)$La_{0.7}Ca_{0.25}K_{0.05}MnO_3$材料变温红外反射光谱（左为柔性薄膜，右为块体材料）[30]；(c)多层光子堆叠结构辐射调制机制及性能表征[31]；(d)不同紫外辐照注量下LSMO涂层的形貌及光学性能变化[15]

Fig.4　Optical properties and ultraviolet irradiation stability of perovskite-type manganese oxide thermal control coatings

(a)physical image of the flexible sample and its radiation power density curve with temperature increasing[29]; (b)temperature-dependent infrared reflectance spectra of $La_{0.7}Ca_{0.25}K_{0.05}MnO_3$ (left: flexible thin film, right: bulk material)[30]; (c)radiative modulation mechanism and performance characterization of the structure based on the photonic stacked layer[31]; (d)morphological and optical property variations of LSMO coatings under different ultraviolet irradiation fluence levels[15]

2.2　VO_2热控材料

VO_2在相变温度（T_c≈68 ℃）附近会发生绝缘态-金属态可逆转变（MIT），其光学和电学性质会发生显著变化[52]。VO_2从单斜（M）相向金红石（R）相转变时，其能带结构也会发生可逆变化。低温时，VO_2（M）表现为半导体特性，对光子能量低于其禁带宽度的电磁波表现为高透特性；而高温时，VO_2（R）表现为类金属型能带结构，电阻率较VO_2（M）降低3～5个数量级，呈现高导电性，对于频率低于其等离子振荡频率的电磁波表现为高吸收/反射态[53]。因此，为实现高温高发射率、低温低发射率的智能热控效果，通常将VO_2薄膜与具有红外高反射的基底结合[40,54-55]。根据等效介质理论，VO_2相变过程中，M相和R相共同存在，其组分占比决定了VO_2的介电常数。随着温度升高，R相体积分数增加，VO_2等效介电常数随之改变，最终使器件的发射率随温度

发生动态可逆变化[56]。

21世纪初，加拿大MPB公司Kruzelecky等首次提出基于VO_2的SRD概念，并制备了VO_2/Al样品，其调控原理为：低温下VO_2(M)呈红外高透过，受基底反射影响，涂层呈现低发射率；随着温度升高，M相逐渐向R相转变，高温下VO_2(R)呈现半透明金属特性，受本征吸收影响，涂层发射率逐渐升高[57-58]。通过优化VO_2层厚度实现了约0.35的发射率变化，然而单一VO_2薄膜存在$\Delta\varepsilon$较小、T_c较高等问题，难以满足复杂应用需求[59]。为进一步提升$\Delta\varepsilon$，研究者们提出了由VO_2相变层、红外高透介质层和高反金属层组成的非对称法布里-珀罗谐振结构(简称F-P腔)，高温时利用F-P腔共振效应增强红外吸收，从而提高发射率变化[60-62]。Wang等[33]基于F-P腔结构研制的VO_2/HfO_2/Ag智能热控涂层，实现了30～80 ℃温度区间内红外发射率从0.13至0.68的连续可调。为满足航天器正常工作温度要求，常通过掺杂改性降低VO_2相变温度。研究表明，2%(原子分数)W掺杂可将VO_2智能热控涂层相变温度降低至27.5 ℃[34]。为解决高α_s难题，Geng等[35]采用W-Mg共掺杂提高VO_2的光学带隙，减少对可见至近红外波段的光吸收，将α_s降低至0.4，同时保证了较高的发射率变化($\Delta\varepsilon_{8\sim13\,\mu m}$=0.69)(图5(a))。此外，超材料结构设计或引入一维光子晶体滤波结构也被证明是降低太阳吸收比、提高红外发射率的有效途径[10,40]。近年来，通过将Al等金属材料替换为ITO[63]、ITO/Ag/ITO[37]、ZnO/Ag/ZnO[64]等可见高透、红外高反射的结构，又发展出了透明型VO_2智能热控涂层，适用于航天器太阳能电池等需可见光透过的场景。表1系统总结了目前典型的VO_2智能热控涂层(主要包括F-P谐振腔、超材料及光子晶体等结构)及其性能参数。

近年来，为降低航天器曲面共性贴合难度和成本，VO_2智能热控技术正从刚性涂层向柔性涂层加速迭代发展。然而，高质量VO_2薄膜的制备长期依赖400 ℃以上结晶温度，难以实现在柔性基底上原位制备。当前，柔性VO_2智能热控涂层的制备主要依赖于膜转移法和溶液法[10,39,65]。吴军桥团队开展了系统性的研究：先期采用脉冲激光沉积、热蒸镀结合高温退火在刚性衬底上生长多层膜，经光刻与刻蚀获得超材料结构后，通过膜层转移技术在黏性玻璃纸上成功制备出智能辐射散热柔性材料(图5(b))，其$\Delta\varepsilon_{8\sim13\,\mu m}$高达0.70[10]。后续其团队进一步开发卷对卷工艺(图5(c))[65]，通过图形化、$W_xV_{1-x}O_2$纳米颗粒表面涂覆、层压Al/PET薄膜三个步骤，实现了颜色可调的温度自适应辐射制冷薄膜的低成本连续化制备，$\Delta\varepsilon_{8\sim14\,\mu m}$达0.60。Sun等[39]则采用电子束光刻、纳米压印光刻技术在聚酰亚胺柔性基底上制备了10 cm×10 cm柔性VO_2智能热控涂层(图5(d))，该器件在大面积条件下仍保持良好的光谱响应与发射率调控能力，其$\Delta\varepsilon_{2.5\sim20\,\mu m}$达0.33，$\alpha_s$降低至0.22，并在空间环境实验中表现稳定，展现出应用于航天热控系统的潜力。

针对智能热控涂层的航天应用，需系统评估其热控性能及环境稳定性。加拿大MPB公司较早采用真空热平衡实验对涂层性能进行了系统验证，从图6(a)可以观察到，三种VO_2智能热控涂层的发射率均随温度升高而增加，变化趋势与光谱测试结果一致[54]。国内研究团队近年来也逐步开展单板级真空热平衡性能实验，测试得到$V_{0.98}W_{0.02}O_2$/HfO_2/Al智能热控涂层在－20～50 ℃温度范围内全波段发射率变化可达0.35[55]。Chen等[66]通过构建卫星热控模型对热控涂层进行系统评估(图6(b))，结果表明，VO_2智能热控涂层可有效将温度波动降低57%，并减少约23%的太阳能电池阵面积需求，凸显其在航天热管理中的应用潜力。相关研究进一步验证了VO_2智能热控涂层在不同苛刻环境下的长期稳定性。实验表明，VO_2智能热控涂层在经历高达10000次热循环后仍保持性能稳定[35]，在高温高湿环境(50 ℃、90%RH)中暴露102天，其光学性能基本无衰减[55]。此外，VO_2涂层对原子氧(AO)侵蚀也表现出良好的耐受性，表面受影响程度有限[54,59,67]，在质子/电子辐照等空间环境模拟测试后关键性能指标波动极小[40]。

2024年11月，美国NASA和空军研究实验室(AFRL)联合启动了“太空功率红外辐射和寿命分析实验”(SPIRRAL计划)，旨在通过国际空间站对VO_2智能热控材料进行在轨测试与评估，以解决大阵列电子元器件在极端热环境下的热管理难题，并为未来太空太阳能发电站的热控提供技术支撑[68-69]。2025年5月，由哈尔滨工业大学李垚团队自主研发的VO_2智能热控材料成功应用于“天问二号”小行星探测器，实现了该材料在国际首次型号化工程应用，有力保障了探测器在极端变热流环境下的可靠运行，标志着我国在智能热控材料工程化方面已步入国际领先行列。

3 电致变色智能热控涂层

电致变色材料是一类在外加电场驱动下，通过电解质离子的嵌入脱出，发生可逆氧化还原反应或晶体与能带结构改变，从而动态改变自身光学属性(如颜色、透过率、反射率及发射率)的智能光热调控材

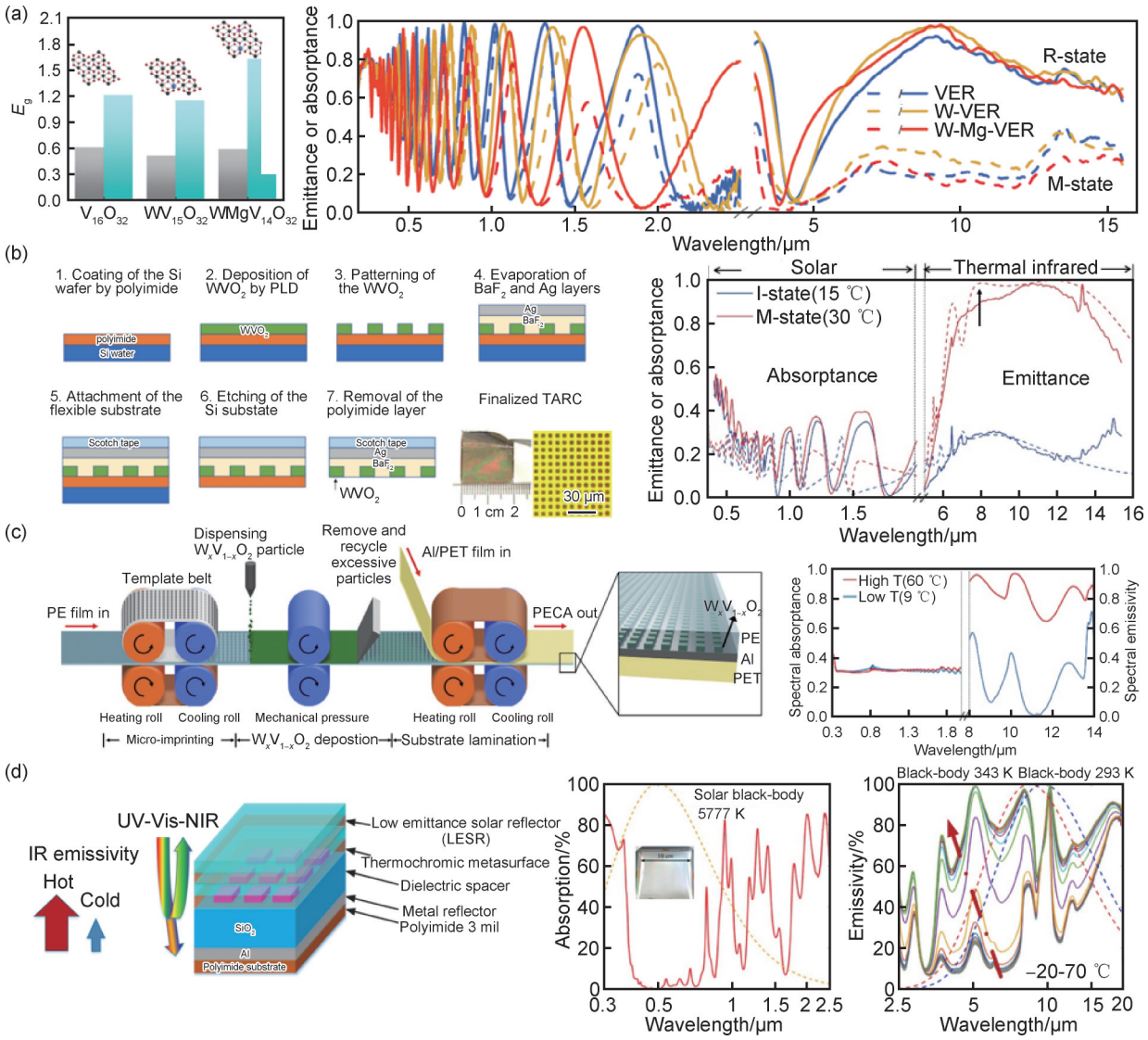


图 5　VO_2掺杂改性及涂层制备工艺

(a)W-Mg共掺杂VO_2光学带隙和智能热控涂层光谱[35]；(b)转移法制备流程及涂层光谱[10]；(c)卷对卷工艺制备流程及涂层光谱[65]；(d)柔性热控涂层及光谱表征[39]

Fig.5　VO_2 doping modification and coating preparation process

(a)optical bandgap of W-Mg co-doped VO_2 and and optical characterization of smart thermal control coating[35]; (b)transfer process and spectra of the coatings[10]; (c)roll-to-roll process and spectra of the coatings[65]; (d)physical image and spectral characterization of flexible VO_2 thermal control coating[39]

料[53,70]。为实现对电磁波的动态调控，需将电致变色材料组装为多层电致变色器件，常见的器件结构由五层组成，依次为导电电极层、电致变色层、离子传导层、离子储存层、导电电极层。电致变色器件可实现主动热管理，具有控制电压低、功耗小等优点，为应对空间极端温度波动提供了理想解决方案[71-72]。传统电致变色热控器件可分为无机与有机两类，其中，三氧化钨(WO_3)无机电致变色器件和聚苯胺(PANI)有机电致变色器件是研究最为广泛的卫星智能热控器件之一，本节将重点评述WO_3与PANI两类材料体系的电致变色智能热控涂层研究进展与应用挑战。

3.1　WO_3热控材料

WO_3是一种典型的阴极变色材料，具有优异的离子嵌入能力、较高的变色效率与良好的循环稳定性。不同结构的WO_3的中红外发射率调制机制存在显著差异(图 7(a))[73]：其结晶态c-WO_3依赖于导电性变化，而非晶态a-WO_3则基于分子振动模式的差异。与c-WO_3相比，a-WO_3有更宽阔的离子传输通道和更丰富的离子储存位点，表现出更快的响应速度、更大的光学调节幅度和离子存储容量，非常适用于智能热控方向的研究[43]。

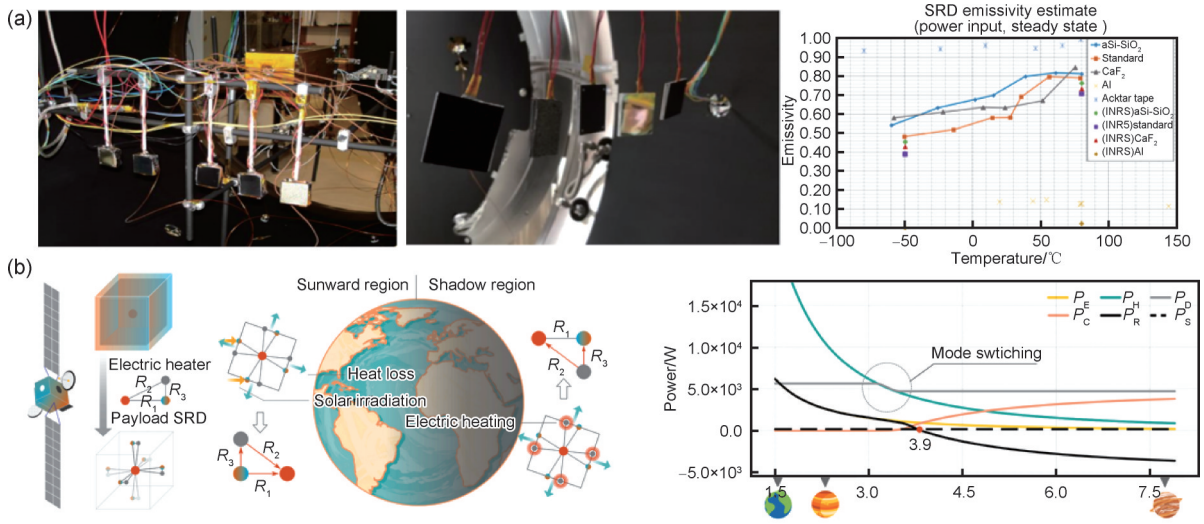


图 6 VO_2 智能热控涂层环境稳定性研究与热控性能评价

(a)真空热平衡实验及测试结果[54];(b)近地空间 SRD 热管理性能模拟[66]

Fig.6 Study on environmental stability and thermal control performance evaluation of VO_2 smart thermal control coating

(a)vacuum thermal balance test and results[54];(b)simulation of SRD thermal management performance in near-Earth space[66]

典型的全固态电致变色器件采用多层薄膜结构，其经典构型为透明导电层/电致变色层(WO_3)/离子传导层/离子存储层/透明导电层，如图 7(b)所示[5]。其中，电致变色层是实现红外发射率动态调控的核心材料；离子传导层为离子传输提供通道，同时隔绝电子在内部回路中的传导；离子存储层为电致变发射率功能层提供和储存电荷平衡离子；两个透明导电层则和外部电路相连，在外加电压下驱动器件中的离子和电子运动。目前电致变色器件中最常用的离子存储层为 NiO，通过与 WO_3 搭配构成互补型电致变色体系，可提升整体光学调制幅度与循环耐久性。Zhang 等[43]制备了结构为 ITO/WO_3/$LiTaO_3$/NiO_x/ITO/Glass 的全固态电致变色涂层，其发射率变化值为 0.3。何延春等[45]则制备了结构为 ITO/WO_3/Ta_2O_5/NiO/Ag/Glass 全固态电致变色涂层，实现了 $\Delta\varepsilon=0.49$、$\Delta\alpha_s=0.38$ 的器件性能。为突破传统电致变色技术在中远红外波段调控范围有限、多光谱难以独立调控等瓶颈，Zhang 等[13]将电致变色器件与 F-P 腔垂直集成设计了 ITO/SiO_2/ITO/Glass/ITO/NiO/SiO_2/Li/WO_3/ITO 光热调节器，如图 7(c)所示，不仅实现了可见光至红外多波段的独立精准调控，且太阳光调制能力和红外发射率变化分别可达 0.31 和 0.42。目前，WO_3 基电致变色涂层在发射率调节幅度上已取得大幅度提升，如表 1 所示，但仍面临低 α_s 与高 $\Delta\varepsilon$ 协同优化的挑战。此外，未来的研究还应着力于解决长寿命可靠性、极端空间环境适应性和系统集成等工程应用难题，并朝着多模式响应、柔性化和智能化的方向演进。

在工程化与应用方面，Eclipse Energy Systems (EES)公司较早地开展了全无机薄膜电致变色器件的研究[75-76]，其设计的五层结构器件可实现发射率在 0.06～0.77 间的可逆切换(图 8(a))，并于 2007 年通过 MidSTAR-1 卫星完成在轨飞行验证(图 8(b))，技术成熟度(TRL)达 6 级以上，显示出良好的工程应用潜力。国内在该领域也取得了重要进展。2021 年 10 月，哈尔滨工业大学所研制的无机全固态电致变色器件搭乘交通 VDES 卫星，完成空间性能与功能验证，这是我国首次开展电致变色技术在空间环境下的性能验证。此外，该技术也入选了空间站首批舱外验证技术，并于 2025 年 4 月在航天员操作下完成空间热控性能实验，为智能热控技术的航天应用奠定了重要基础。

3.2 聚苯胺热控材料

聚苯胺(PANI)作为典型的导电聚合物，其具有结构多样性(即多重氧化还原状态)和独特的可逆质子化过程[76]。这些结构特性使 PANI 表现出多种能带结构，进而赋予其赝金属-半导体-绝缘体转变特性。与此同时，聚苯胺在外加电场作用下，能够实现氧化还原状态的可逆动态切换，在此过程中伴随着载流子(离域在聚苯胺分子链上的极化子和双极化子)的产生与消失，而离域在聚苯胺分子链上的载流子能够对中远红外光产生共振吸收，进而赋予聚苯胺在中远红外光区具有较好的光谱调控能力，可有效调控热辐射能量[50,77]。

国外 Chandrasekhar 等[49,78-79]率先研究了 PANI 的

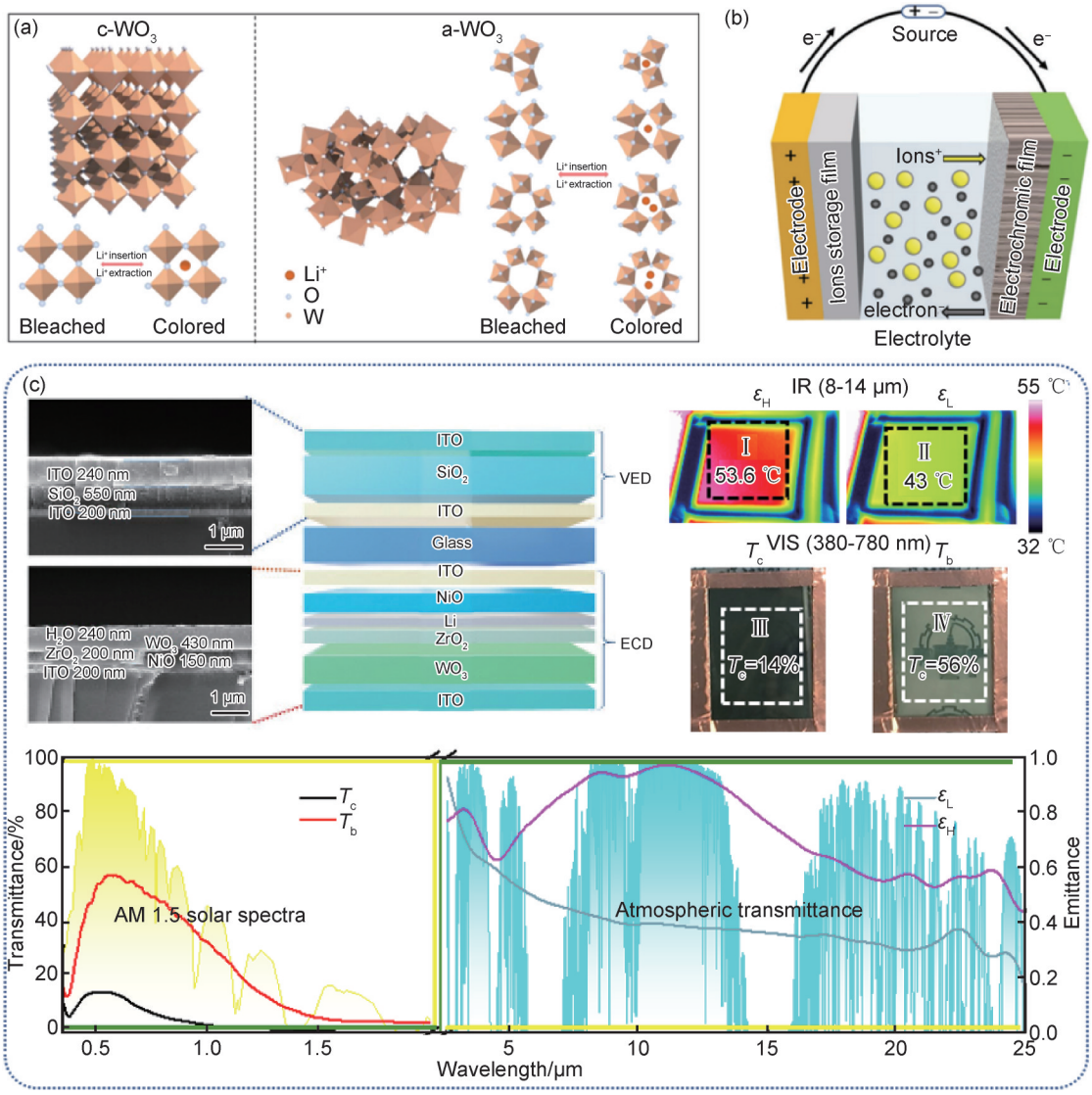


图 7　WO_3 晶态结构及智能热控器件

(a)WO_3 的晶态结构和离子嵌入/脱出通道[73]；(b)典型器件结构[5]；(c)多谱段独立调控器件[13]

Fig.7　WO_3 crystal structure and smart thermal control device

(a)crystalline structure and ion intercalation/deintercalation channels of WO_3[73]; (b)schematic diagram of a typical device structure[5]; (c)multi-spectral independent control device[13]

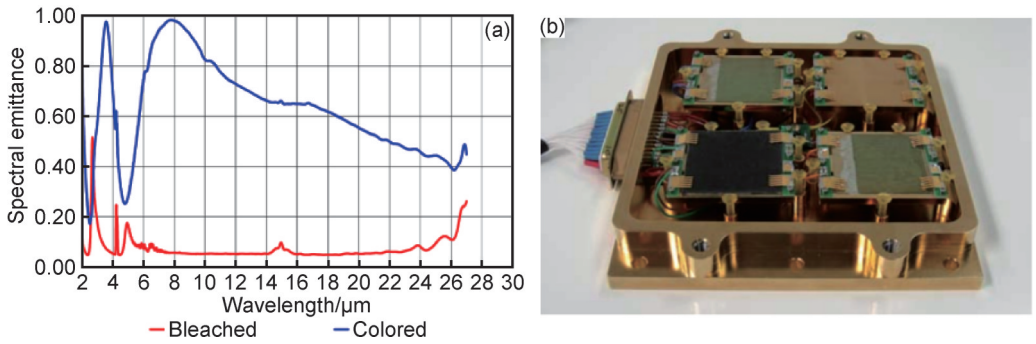


图 8　WO_3 电致变色器件光学性能及实物图[75]

(a)电致变色器件光谱；(b)MidSTAR-1 卫星测试模块实物照片

Fig.8　Optical properties of WO_3 electrochromic devices and physical picture[75]

(a)spectra of the electrochromic devices; (b)photo of the MidSTAR-1 satellite test module

红外发射率调控机制，设计了基于PANI的反射型电致变色器件，该器件响应时间小于2 s，2.5～45 μm的红外发射率调制幅度达到0.47。后续针对航天器的热控需求，提出引入高红外透过率、低太阳反射率的封装层，并通过一体化结构设计获得柔性电致变发射率器件，该器件的α_s得到大幅降低，Δε显著提升（超过0.5），为其航天器热控应用奠定了基础。近年来，国内针对PANI电致变发射率器件也开展了较为系统的研究工作，主要通过基底、电解质和功能层的调控来实现器件综合能力的提升，如表1所示[47-51]。Li等[47]探究了PANI薄膜在不同离子液体电解质体系中的红外调控能力和循环稳定性。结果表明，使用掺杂四氟硼酸锂的1-丁基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐（$BMIBF_4$-$LiBF_4$）作为电解质构筑的PANI器件表现出较快的响应速度（着/褪色时间为14.6 s/17.0 s）和较大的红外调制幅度（$\Delta\varepsilon_{2.5\sim25\,\mu m}$=0.42）。Zhang等[48,70]采用0.22 μm的聚醚砜和尼龙66多孔膜作为导电基底材料，多孔PE薄膜作为封装层，吸附离子液体的聚合物多孔膜作为电解质以及优化制备的PANI功能层来构建反射型红外电致变色器件，获得了$\Delta\varepsilon_{2.5\sim25\,\mu m}$=0.38和较低的太阳吸收率（$\alpha_s$=0.31），并表现出较好的高低温循环稳定性和耐真空性。为进一步提高红外发射率调制幅度，任子琛[50]制备了Li^+掺杂的V_2O_5@PANI复合薄膜（图9(a)），实现了高响应速度（着/褪色时间为1.99 s/1.24 s）、强红外调控能力（$\Delta\varepsilon_{2.5\sim25\,\mu m}$=0.51）以及长循环稳定性（5000次循环的Δε保持率达92%）。

在工程化应用方面，美国Ashwin-Ushas公司所开发的PANI基柔性电致变发射率器件，在−1 V和0.5 V的作用下能够实现颜色的动态转变（图9(b)），其发射率变化幅度最大达到0.4[49,78]。此外，室温下的响应时间<5 s，在−35 ℃的环境下的响应时间<3 min，循环稳定性>10^4，且能够在真空环境下，−40 ℃～75 ℃温度范围内，以及太阳风和γ射线下稳定工作。该涂层于2006年3月搭载于ST-5卫星进行在轨验证，在轨

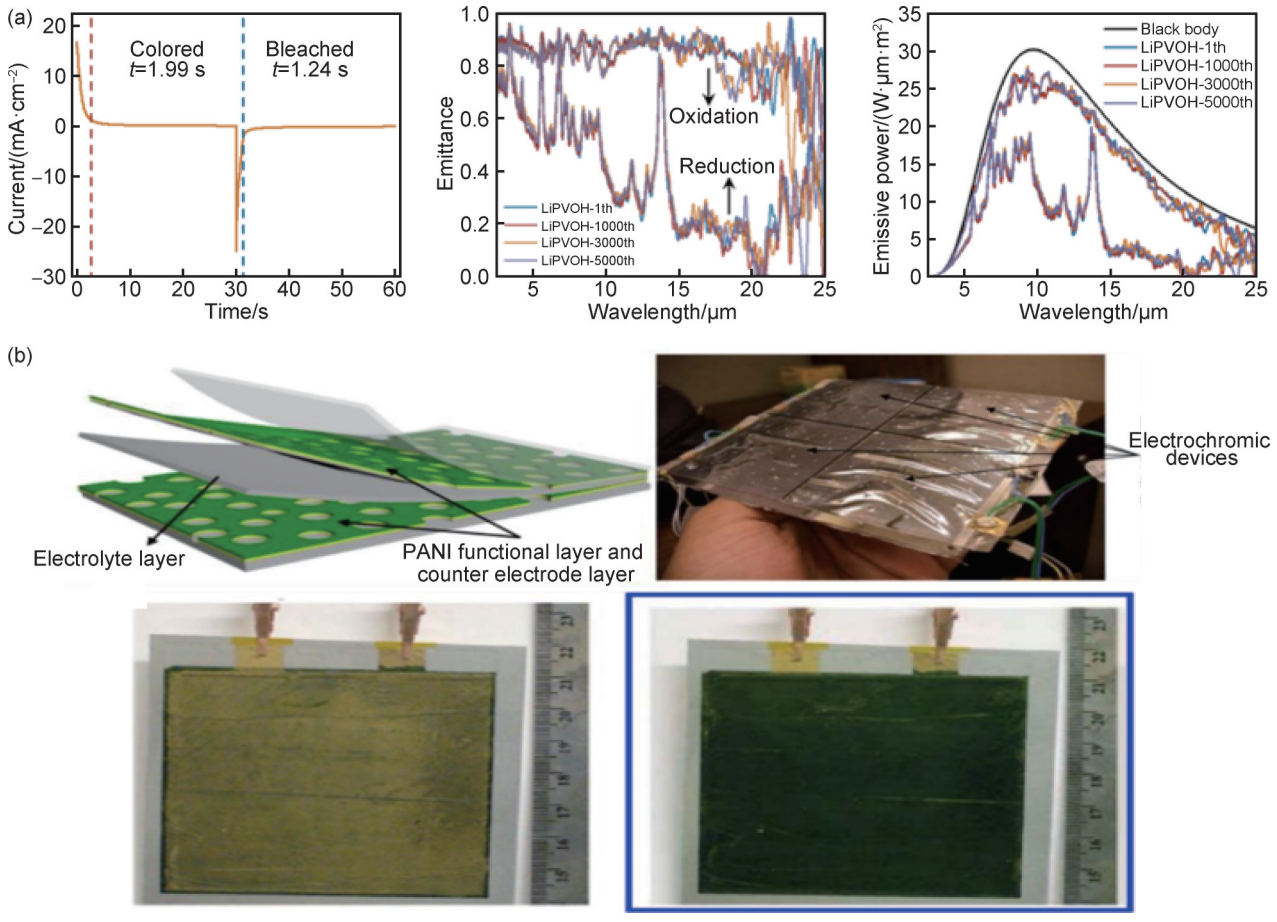


图9 PANI电致变色器件及性能

（a）PANI电致变色器件响应时间和光谱表征[50]；（b）PANI电致变色器件结构示意图与不同电压下测试的实物图[78]

Fig.9 PANI electrochromic device and its performance

(a) response time and spectral characterization of PANI electrochromic device[50]; (b) structural diagram of PANI electrochromic device and physical images tested under different voltages[78]

运行90天工作正常，并且展示出较好的热辐射管理能力[70]。哈尔滨工业大学自主研发的高性能PANI基电致变发射率器件发射率调控幅度大于0.4，且具有响应时间快、循环稳定性高的特点，并于2025年4月完成空间热控性能实验。

表2系统对比了热致变色与电致变色两类智能热控涂层的综合性能。热致变色涂层（LSMO、VO_2）无需外部能源，可实现被动自适应调控：其中LSMO相变温度可调至室温，但相变温区宽（约100 K）、太阳吸收比高；VO_2智能热控涂层具有相变区间窄、响应快、发射率调制幅度大的优点，但高质量VO_2薄膜制备条件苛刻，VO_2超材料会增加成本与工艺难度。电致变色涂层（WO_3、PANI）可主动精准控温，WO_3智能热控涂层循环稳定性优异，但响应速度相对较慢，大面积制备时变色性能显著降低，系统复杂度高；PANI柔性好、发射率调制幅度大，但空间环境稳定性研究不足，界面结合强度、长期循环稳定性及光学可调谐性有待提升。总体而言，目前研制的智能热控涂层尚难以同时兼顾发射率调制幅度、低太阳吸收比、适宜相变/工作温度及工程可靠性。因此，亟须在结构设计、掺杂改性与低成本制备工艺上协同创新，推动智能热控涂层从实验室走向型号应用。

表2　智能热控涂层综合性能分析

Table 2　Comprehensive performance comparison of smart thermal control coatings

Smart thermal control material	Advantage	Disadvantage
$La_{1-x}A_xMnO_3$	Simple structure, no power consumption and excellent environmental stability	High solar absorption ratio and wide phase transition temperature range
VO_2	Large emissivity tunability, narrow phase transition range, no power consumption, and good environmental stability	Stringent VO_2 growth conditions, and metamaterial-induced cost/complexity
WO_3	Large emissivity tunability, high control accuracy and good environmental stability	Relatively slow response time, and requirement of additional control electronics
PANI	Flexible, fast response time, active control	Requirement of additional control electronics, and limited research on space environmental stability

4　结束语

航天智能热控材料近年来取得了显著进展，通过多层膜、超材料、纳米颗粒复合等设计优化，其发射率调制幅度、太阳吸收比等关键性能显著提升，在空间实验中展现出巨大应用潜力。然而，智能热控材料的全面应用仍面临诸多挑战：首先，材料多维性能之间存在强耦合博弈，单一性能的优化往往导致其他特性的衰减；其次，缺乏面向多轨道环境（低轨、高轨、深空）与复杂载荷特性的设计范式，使得发射率调制幅度、太阳吸收比等关键指标难以与真实服役环境精准匹配；此外，受限于设备尺寸与工艺精度，难以实现大面积、低成本、高一致性的批量制造，制约了实验室样品向工程产品的快速转化；空间服役稳定性研究匮乏，性能劣化机制尚不清晰，服役寿命难以准确评估。

为进一步地推动智能热控材料的工程化应用，仍

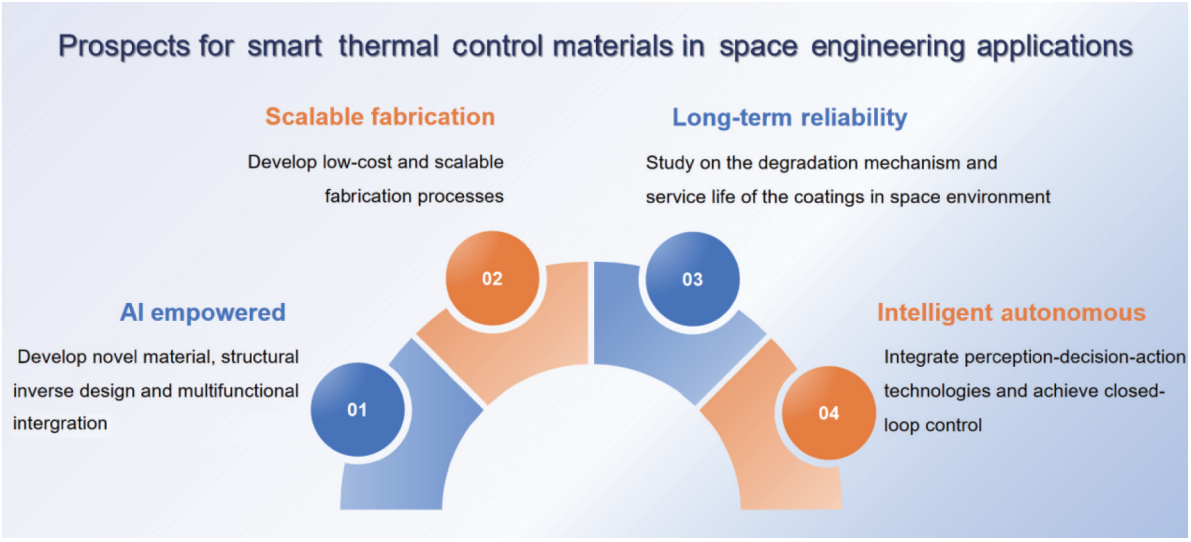


图10　智能热控材料空间工程应用展望

Fig.10　Prospects for smart thermal control materials in space engineering applications

需进行更深入的探索(图10):(1)利用AI赋能第一性原理计算和超材料结构设计,建立电-热-光多物理场耦合的计算体系,开发面向不同深空轨道热流特征的定制化智能光热调控器件,以及针对不同应用场景的多功能集成器件,加速智能热控材料升级迭代;(2)发展低成本、大面积的卷对卷、3D打印等可扩展制备工艺,突破传统加工技术的尺寸与效率限制,实现大面积柔性智能热控涂层的研制,匹配航天器表面的复杂曲面共形贴合需求;(3)重点开展智能热控涂层耐空间环境适应性及温度环境适应性实验,不断提升涂层稳定性与耐久性,建立材料-环境-寿命评价模型,实现在轨服役寿命预测;(4)将智能热控涂层与微纳传感、轻量化控制算法等技术深度融合,提升热控系统对复杂空间热环境的响应速度与自主决策能力,构建极低功耗甚至零功耗的自适应航天热控系统。

可以预见,智能热控材料必将引领航天器热管理技术革新,为深空探测、在轨服务、月球基地乃至星际航行等长远航天任务提供至关重要的技术支撑。

参考文献

[1] OuY Y, Wang Y, Chen Y, et al. The recent progress of photo-thermal regulation devices[J]. Applied Physics, 2024, 14(5): 339-351.

[2] Fan Y R, Chen H, Liu X C, et al. Radiative cooling in outer space: fundamentals, advances in materials and applications, and perspectives[J]. Advanced Materials, 2025, 37(43): e06795.

[3] Liu R, Wang S C, Zhou Z G, et al. Materials in radiative cooling technologies[J]. Advanced Materials, 2025, 37(2): 2401577.

[4] Li C C, Cao C C, Luo H J, et al. Temperature-adaptive radiative modulator for multi-domain safety applications [J]. Device, 2024, 2(8): 100407.

[5] Wu W T, Choi J U, Lee P S. Toward triband electrochromism: from energy-saving strategies to smart system integration[J]. ACS Energy Letters, 2026, 11(2): 1349-1396.

[6] 向艳超,高鸿,文明,等.航天器热控材料及应用研究进展[J].材料导报,2022,36(22):64-69.
Xiang Y C, Gao H, Wen M, et al. Review of spacecraft thermal control materials and applications[J]. Materials Reports, 2022, 36(22): 64-69.

[7] 王赤, 范全林. 2024年空间科学与深空探测回眸 [J]. 科技导报, 2025, 43(1): 31-46.
Wang C, Fan Q L. Review of space science and deep space exploration in 2024 [J]. Science & Technology Review, 2025, 43(1): 31-46.

[8] Cao B Y, Zhang Z T. Thermal smart materials and their applications in space thermal control system [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(1): 014401.

[9] Tachikawa S, Nagano H, Ohnishi A, et al. Advanced passive thermal control materials and devices for spacecraft: a review[J]. International Journal of Thermophysics, 2022, 43(6): 91.

[10] Tang K C, Dong K C, Li J C, et al. Temperature-adaptive radiative coating for all-season household thermal regulation[J]. Science, 2021, 374(6574): 1504-1509.

[11] Wei H, Gu J X, Ren F F, et al. Smart materials for dynamic thermal radiation regulation[J]. Small, 2021, 17(35): 2100446.

[12] Wang S C, Jiang T Y, Meng Y, et al. Scalable thermochromic smart windows with passive radiative cooling regulation[J]. Science, 2021, 374(6574): 1501-1504.

[13] Zhang H L, Zhang X, Sun W H, et al. All-solid-state transparent variable infrared emissivity devices for multi-mode smart windows [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(16): 2307356.

[14] Zhai H T, Fan D S, Li Q. Dynamic radiation regulations for thermal comfort[J]. Nano Energy, 2022, 100: 107435.

[15] 陈铭俊. 镧锶锰氧智能热控涂层的设计制备及其辐照效应研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2024.
Chen M J. Design, preparation and irradiation effect of LSMO intelligent thermal control film [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2024.

[16] Shimazaki K, Tachikawa S, Ohnishi A, et al. Radiative and optical properties of $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($0\leqslant x\leqslant 0.4$) in the vicinity of metal-insulator transition temperatures from 173 to 413K[J]. International Journal of Thermophysics, 2001, 22(5): 1549-1561.

[17] Shimazaki K, Ohnishi A, Nagasaka Y. Development of spectral selective multilayer film for a variable emittance device and its radiation properties measurements[J]. International Journal of Thermophysics, 2003, 24(3): 757-769.

[18] Shimazaki K, Ohnishi A, Nagasaka Y. Computational design of solar reflection and far-infrared transmission films for a variable emittance device[J]. Applied Optics, 2003, 42(7): 1360-1366.

[19] Shimazaki K, Tachikawa S, Ohnishi A, et al. Design of thermal radiative properties of multilayer films on a variable emittance radiator[C]//SAE Technical Paper Series, 2001, 1: 2001-1-2339.

[20] Iwata M, Tohyama F, Ohnishi A, et al. Evaluation of new thermal control material for interior planet missions[C]//SAE Technical Paper Series, 1998, 1: 981687.

[21] Tachikawa S, Ohnishi A, Shimazaki K, et al. Development of a variable emittance radiator, 1999[C]//SAE Technical Paper Series, 1999, 1: 1999-1-2090.

[22] Shimazaki K, Tachikawa S, Ohnishi A, et al. Temperature dependence of total hemispherical emittance in perovskite-type manganese oxides, $La_{1-x}Sr_xMnO_3$[J]. High Temperatures-High Pressures, 2001, 33(5): 525-531.

[23] Fan D S, Li Q, Xuan Y M, et al. Temperature-dependent infrared properties of Ca doped (La, Sr)MnO_3 compositions with potential thermal control application [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51(1/2): 255-261.

[24] TACHIKAWA S, SHIMAZAKI K, OHNISHI A, et al. Smart radiation device based on a perovskite manganese oxide [J]. Pro-

ceedings of the 9th International Symposium on Materials in a Space Environment, 2003:41-47.

[25] 邱家稳,冯煜东,吴春华.航天器热控薄膜技术[M].北京:国防工业出版社,2016.
Qiu J W, Feng Y D, Wu C H. Spacecraft thermal control thin films technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.

[26] Tachikawa S, Ohnishi A, Matsumoto K, et al. Multi-layer coating for smart radiation device with solar absorptance 0.13[C]//SAE Technical Paper Series, 2009, 1: 2009-1-2574.

[27] Fan D S, Li Q, Xuan Y M. Tailoring the solar absorptivity of thermochromic material[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2011, 112(18): 2794-2800.

[28] Shimakawa Y, Yoshitake T, Kubo Y, et al. A variable-emittance radiator based on a metal-insulator transition of (La, Sr) MnO_3 thin films[J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(25): 4864-4866.

[29] 黄郅航.钙钛矿型柔性热致变色薄膜的制备与辐射特性研究[D].南京:南京理工大学,2022.
Huang Z H. Preparation and radiation characteristics of perovskite-type flexible thermochromic thin films[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2022.

[30] Fan D S, Chen C X, Xiao T C, et al. Flexible thermochromic foil derived from fine perovskite nanoparticles with excellent energy-saving performance[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(9): 4546-4553.

[31] Zhao Y, Fan D S, Li Q. Flexible perovskite-based photonic stack device for adaptive thermal management[J]. Materials & Design, 2022, 219: 110719.

[32] Wang X Z, Chen M J, Guo H F, et al. Perovskite manganese oxide-based superposed multilayer film with high emittance tunability for smart radiation devices[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 257: 124197.

[33] Wang X, Cao Y Z, Zhang Y Z, et al. Fabrication of VO_2-based multilayer structure with variable emittance[J]. Applied Surface Science, 2015, 344: 230-235.

[34] Gu J X, Wei H, Ren F F, et al. VO_2-based infrared radiation regulator with excellent dynamic thermal management performance[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(2): 2683-2690.

[35] Geng C C, Chen Y Y, Wei H, et al. Adaptive variable emissivity reflector for seasonal and daily thermal regulation in regions with significant temperature variations[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(52): 2410819.

[36] Ono M, Chen K F, Li W, et al. Self-adaptive radiative cooling based on phase change materials[J]. Optics Express, 2018, 26(18): A777.

[37] Wu B Y, Huang X Q, Wu X H. Transparent smart radiation device for efficient thermal management of spacecraft solar cells[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 71: 106161.

[38] SuN K. Riedel C A, Urbani A, et al. VO_2 Thermochromic Metamaterial-based Smart Optical Solar Reflector[J]. ACS Photonics, 2018, 5(6): 2280-2286.

[39] Sun K, Wheeler C, Hillier J A, et al. Room temperature phase transition of W-doped VO_2 by atomic layer deposition on 200 mm Si wafers and flexible substrates[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(23): 2201326.

[40] Simeoni M, Sun K, Urbani A, et al. Smart and flexible optical solar reflectors for passive radiative cooling regulation in space using a W:VO_2 metasurface[J]. Nanophotonics, 2026, 15(3): e70011.

[41] Wu X Y, Yuan L, Weng X L, et al. Passive smart thermal control coatings incorporating CaF_2/VO_2 core-shell microsphere structures[J]. Nano Letters, 2021, 21(9): 3908-3914.

[42] Li Z T, Zhang X, Sun B, et al. Memristor of tunable IR emissivity based on ITO/WO_3/Au[J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(9): 10625-10633.

[43] Zhang X, Tian Y L, Li W J, et al. Preparation and performances of all-solid-state variable infrared emittance devices based on amorphous and crystalline WO_3 electrochromic thin films[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 200: 109916.

[44] Xiao Y J, Zhang X, Li Z T, et al. A visible-to-infrared broadband all-solid-state electrochromic device based $Li_4Ti_5O_{12}/WO_3$ for optical and thermal management[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2024, 268: 112735.

[45] 何延春, 郑家稳, 许昊, 等. 电致变色热控薄膜的制备与性能[C]//第九届真空冶金与表面工程学术会议论文摘要集, 2009: 70.
He Y C, Zheng J W, Xu H, et al. Preparation and properties of electrochromic thermal control thin film[C]//Abstracts of the 9th Academic Conference on Vacuum Metallurgy and Surface Engineering, 2009: 70.

[46] Zhao J, Zhang S L, Chang S, et al. A flexible electrochromic device with variable infrared emissivity based on $W_{18}O_{49}$ nanowire cathode and MXene infrared transparent conducting electrode[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 480: 148010.

[47] Li X B, Zhang L P, Xu G P, et al. Effect of ionic liquid electrolytes on the electrochemical stability and optical tunability of polyaniline-based infrared variable emittance devices[J]. Electrochimica Acta, 2020, 358: 136935.

[48] Zhang L P, Hao T T, Song S S, et al. Enhancing infrared electrochromic properties of the poly(styrene sulfonate) doped polyaniline composite film by morphology regulation[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 475: 145927.

[49] Chandrasekhar P, Zay B J, Birur G C, et al. Large, switchable electrochromism in the visible through far-infrared in conducting polymer devices[J]. Advanced Functional Materials, 2002, 12(2): 95-103.

[50] 任子琛.Li^+掺杂V_2O_5/聚苯胺基热辐射调控器件的制备与性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2025.
Ren Z C. Preparation and property of thermal radiation regulation devices based Li^+ doped V_2O_5/polyaniline[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2025.

[51] Zhou Y, Zhao J X, Li X S, et al. Improved infrared emissivity modulation of polyaniline based on various metal compound dop-

ing strategies[J].Journal of Materials Chemistry C,2025,13(20):10231-10241.

[52] Kruzelecky R V,Haddad E,Soltani M,et al.Integrated thin-film smart coatings with dynamically-tunable thermo-optical characteristics[C]//SAE Technical Paper Series,2002,1:2002-1-2549.

[53] 魏航.基于VO_2相变的多谱段电磁波调控器件设计与自适应响应行为[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2024.
Wei H.The design of multispectral manipulation device based on the phase transition of VO_2 with its adaptive response behaviour[D].Harbin:Harbin Institute of Technology,2024.

[54] Haddad E,Kruzelecky R,Murzionak P,et al.VO2-based thin-film smart radiator device for improved passive thermal control of space systems[C]//2020 International Conference on Environmental Systems,2020.

[55] 谷金鑫.VO_2/HfO_2/Al智能热控涂层的制备及性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
Gu J X.Study of the fabrication and performance of VO_2/HfO_2/Al smart thermal control coating [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2023.

[56] 李琳.基于二氧化钒的太赫兹超表面特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.
Li L.Research on terahertz metasurface characteristics based on VO_2[D].Harbin:Harbin Engineering University,2020.

[57] 范浩博,豆书亮,李垚.二氧化钒智能热控涂层光学结构原理及研究进展[J].材料导报,2025,39(1):30-39.
Fan H B,Dou S L,Li Y.Principle and research progress of optical structure of vanadium dioxide intelligent thermal control coating[J].Materials Reports,2025,39(1):30-39.

[58] Haddad E,Kruzelecky R V,Murzionak P,et al.Review of the VO_2 smart material applications with emphasis on its use for spacecraft thermal control[J]. Frontiers in Materials, 2022, 9:1013848.

[59] Kruzelecky R V,Haddad E,Jamroz W,et al.Thin-film smart radiator tiles with dynamically tuneable thermal emittance[C]//SAE Technical Paper Series,2005,1:2005-1-2906.

[60] Taylor S,Boman N,Chao J,et al.Cryothermal vacuum measurement of thermochromic variable-emittance coatings with heating/cooling hysteresis for spacecraft thermal management[J].Applied Thermal Engineering,2021,199:117561.

[61] Taylor S,Yang Y,Wang L P.Vanadium dioxide based Fabry-Perot emitter for dynamic radiative cooling applications[J].Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer,2017,197:76-83.

[62] Beaini R,Baloukas B,Loquai S,et al.Thermochromic VO_2^- based smart radiator devices with ultralow refractive index cavities for increased performance[J].Solar Energy Materials and Solar Cells,2020,205:110260.

[63] 赵海鹏.基于相变材料的自适应温度调控研究[D].苏州:苏州大学,2021.
Zhao H P.Research on self-adaptive temperature modulation based on phases-changing material[D].Suzhou:Soochow University,2021.

[64] Zhang K H,Hu Q Q,Wu B Y,et al.Lithography-free transparent spacecraft smart radiation device based on phase change material VO_2[J].Optics Express,2024,32(20):35243-35255.

[65] Li J C,Dong K C,Zhang T C,et al.Printable,emissivity-adaptive and albedo-optimized covering for year-round energy saving[J].Joule,2023,7(11):2552-2567.

[66] Chen Y Y,Zhao T,Geng C C,et al.Adaptive thermal radiation design for spacecraft heat dissipation[J].Results in Engineering,2025,27:106262.

[67] BenKahoul M,Haddad E,Kruzelecky R,et al.Multilayer tuneable emittance coatings,with higher emittance for improved smart thermal control in space applications[C]//40th International Conference on Environmental Systems. Barcelona: AIAA, 2010:AIAA2010-6266.

[68] Perkins J. Revolutionizing space-based thermal systems: AFRL's SPIRRAL launch on SPX-31[EB/OL].(2024-11-25)[2026-05-15]. https://www.afrl.af.mil/News/Article-Display/Article/3977263/revolutionizing-space-based-thermal-systems-afrls-spirral-launch-on-spx-31/.

[69] Hengeveld D W,Foster I J,Bird T J,et al.Thermochromic variable emissivity material thermal modeling and test correlation[C]//2025 International Conference on Environmental Systems,2025.

[70] 张雷鹏.电致变色聚苯胺薄膜改性机理与红外发射行为[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
Zhang L P.Modification mechanism and infrared emission behavior of electrochromic polyaniline films[D].Harbin:Harbin Institute of Technology,2020.

[71] 金海波,凌晨,李静波.航天器用可变发射率热控器件的研究进展[J].深空探测学报,2018,5(2):188-200.
Jin H B,Ling C,Li J B.Development of variable-emittance thermal control technology[J].Journal of Deep Space Exploration,2018,5(2):188-200.

[72] Guo J K,Jia H X,Shao Z W,et al.Fast-switching WO_3-based electrochromic devices: design, fabrication, and applications[J].Accounts of Materials Research,2023,4(5):438-447.

[73] 陈明俊.WO_{3-x}基全薄膜电/光致变色器件的制备与性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2024.
Chen M J.Preparation and performance of WO_{3-x} based all-thin-film electrochromic/photochromic devices[D].Harbin:Harbin Institute of Technology,2024.

[74] Hengeveld D W,Mathison M M,Braun J E,et al.Review of modern spacecraft thermal control technologies[J]. HVAC&R Research,2010,16(2):189-220.

[75] Osiander R,Champion J,Darrin M,et al.Micro-machined shutter arrays for thermal control radiators on ST5[C]//40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno: AIAA, 2002:AIAA2002-359.

[76] Demiryont H,Moorehead D. Electrochromic emissivity modulator for spacecraft thermal management [J]. Solar Energy Materi-

als & Solar Cells, 2009, 93: 2075-2078.

[77] 覃婷. 聚苯胺薄膜器件电致变色与红外辐射调控特性研究[D]. 长沙:中南大学,2023.
Qin T. Study on electrochromic and infrared radiation modulation performance of the polyaniline films and devices[D]. Changsha: Central South University, 2023.

[78] Chandrasekhar P, Zay B J, McQueeney T, et al. Variable emittance materials based on conducting polymers for spacecraft thermal control [J]. AIP Conference Proceedings, 2003, 654(1): 157-161.

[79] Chandrasekhar P, Zay B J, Lawrence D, et al. Variable-emittance infrared electrochromic skins combining unique conducting polymers, ionic liquid electrolytes, microporous polymer membranes, and semiconductor/polymer coatings, for spacecraft thermal control[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(19): app. 40850.

基金项目:国家重点研发计划资助(2025YFF0520600);江苏省基础研究计划资助(BK20240389)

收稿日期:2026-05-18;**录用日期**:2026-06-17

通讯作者:任飞飞(1992—),男,助理研究员,博士,研究方向为智能光热调控超材料,联系地址:江苏省苏州市工业园区金鸡湖大道66号苏州实验室超材料科学与技术研究中心(215123),E-mail:renff@szlab.ac.cn;豆书亮(1989—),男,研究员,博士,研究方向为智能光热调控超材料,联系地址:黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街92号哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所(150001),E-mail:dousl@hit.edu.cn;李垚(1973—),男,教授,博士,研究方向为光热功能复合材料,联系地址:黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街92号哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所(150001),E-mail:liyao@hit.edu.cn

(本文责编:齐书涵)