

新型热控材料器件及应用

主 编 何知朱

副主编 江经善

审 校 闵桂荣

宇航出版社

内 容 简 介

本书叙述了人造地球卫星热控制系统中常用的新型材料、元件及装置等多项硬件技术。按照各自的不同特点,从基本原理、技术特性、制造工艺、结构以及性能测试等加以系统论述,重点放在实用方面,内容体现了我国在该领域的研究成果和应用水平,也包含国外有较高水平的工作。

本书可供从事航天科学研究和设计的人员使用,并对其他工农业生产部门、科研单位及高等院校从事热工领域工作的专业人员也具有相当的参考价值。

新型热控材料器件及应用

主 编 何知朱

副主编 江经善

审 校 闵桂荣

责任编辑 林茂燕

☆

宇航出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

测绘出版社印刷厂印刷

☆

开本: 850×1168 1/32 印张: 12.625 字数: 320千字

1988年11月第1版第1次印刷 印数: 1—3000册

ISBN7-80034-154-2/TB·040 定价: 5.50元

序

航天技术是一个综合性很强的新技术领域。廿多年以来，它发展十分迅速，已成为一个高效益的航天产业，而且促进和带动了许多学科和专门技术的发展。航天热控制技术就是其中之一。

航天器在宇宙空间中运行，遇到的热环境是非常恶劣的。宇宙空间的超高真空、太阳和行星热辐射、低温背景，使航天器在宇宙空间经受剧烈的高低温交变载荷。因此，为了保证航天器上各种设备、部件和生物有一个良好的工作环境，所有的航天器都附设有热控制系统，又称温度控制系统。各国宇航部门或公司设有航天热控制系统的研究机构，开展热控制系统的研究、设计、制造和试验工作。

我国卫星热控制技术研发始于60年代中期。廿多年来在各有关单位共同努力下，取得了很好的成就。其中包括大量的热控制软件研究和许多性能优异的硬件研制，如涂层、隔热材料、热管、导热填料、相变材料、加热组件、制冷机、百叶窗组件、测温元件等等，不少项目达到了国际先进水平。由这许多软硬件组成先进的热控制系统，成功地解决了我国的各种人造地球卫星的温度控制问题，保证了卫星飞行任务的顺利完成，为我国的航天事业作出了贡献。

必需指出，上述高水平的热控制技术的研制成果，不仅满足我国航天工程的需要，而且同样被广泛地应用于国民经济许多部门的技术更新和技术改造。例如，卫星热控涂层用于太阳能利用和远红外加热，卫星热管用于回收工业余热和电子设备强化散

热，隔热技术用于低温工程和建筑业，导热硅脂用于改善电子装置的散热，控温和测温技术用于冷库工程，先进的加热和测温技术用于热物理实验研究等等，不胜枚举。这许多先进的单项技术用于工农业生产和科学研究都取得明显的经济效益和社会效益。

为了促进我国的航天技术的发展，以及使航天热控制技术更好地为国民经济有关部门的技术进步服务，由有经验的专家编写了这本专著，其主要内容是介绍卫星热控制各种硬件的原理、性能及其应用。本书内容体现了我国的研究成果和水平，也包含国外有较高水平的工作。本书的出版对工农业生产部门，科研单位及高等院校从事热工领域工作的专业人员具有参考价值。

中国空间技术研究院 闵桂荣

一九八六年七月

前 言

航天器热控制（简称热控）是运用传热学，热力学以及其它一些学科的基本原理对航天器的热状态加以调节或控制的一门工程技术，它是在航天器运行的各个工作阶段中，为了保障内部仪器设备及乘员的正常工作，将其保持在预定热状态而采取的那些综合技术措施，它伴随空间科学的进步而迅速发展，是空间热物理学这门新兴学科当前的主要内容^①。

编写本书的主要目的是为了向读者介绍在热控制工程中目前使用的各种硬件技术，包括常用的各种新型材料以及基本的器件和机构装置，并探讨将这些成果推广应用到国民经济各部门和科学技术的其它领域，以有助于技术更新和改造^②。

航天器热控制在我国曾习惯称为航天器温度控制（简称温控）。按照现在空间科学常用技术名词术语标准化文件，已规定

①现在有一些国家的科学家已在讨论并开始筹划将地球上的人移民到其它星球上去生存和进行开发这样一类的问题。随着宇航技术的突飞猛进，空间热物理学的内容必将不断扩展，其研究对象与任务将不仅限于解决航天器热控制有关技术，还要涉及在越来越复杂和庞大的航天器上及各种人造空间环境中的有关热能动力的产生、利用等更广泛的各种技术问题。

②人类文明的进步和发展历来就与制造和使用材料及工具紧密相关，所以历史学家就曾以材料、工具的种类来作为划分人类早期历史的标志。而当代科技的水平已使得人们对物质结构认识得相当深入，并掌握了广泛的工艺技术能力，因此可按照不同的需要制造出性能各异而形式繁多的材料和器件，早已经达到不可能再用某一类材料及工具来概括当今时代的程度。然而材料科学和新型元器件方面的成就不仅仍然是现代科技进步的重要物质基础，并且其推广应用的速度及广泛性也反映出人类文明进化的程度。

改称为“航天器热控制”。实际上，从词义看，“热控制”较为确切。参照空间技术先进国家所习惯使用的术语的含义看（英语原词为Thermocontrol，俄语为Терморегулирование，它们既可译为“热控制”也可译成“温度控制”或“温度调节”），翻译成“热控制”似乎更确切些，因为“热控”较“温控”能更清楚表述这种控制过程的实质。对于“航天器热控制”应理解主要是对于航天器在宇宙空间运行工作时，从它所接收的外部热流开始，经过内部各构件及仪器装置之间的热交换，直到最终将热量再散发到周围宇宙空间这一整个持续不断传热过程的研究与计划安排。或换句话说，是对航天器所必须具有的热状态进行设计和组织。对于任何一种航天器，不论从结构功能最简单的人造地球卫星直到各式各样永久性载人空间站，以及今后构造功能更加复杂，规模更加庞大的空间设施，都可以看作是与周围宇宙空间不断进行热量交换的人工天体。在它们上面的传热过程与热状态可简单用以下的示意图表示（图1）。在太阳系范围内运行的航天器可能接受的外部热流主要来源于以下三大构成部分：来自太阳的直接热辐射；行星所反射的太阳热辐射；以及来自行星的热辐

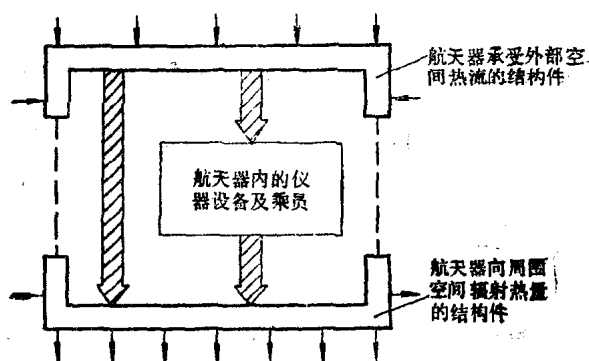


图1 航天器的内外热流示意图

射。其次，如果再更仔细考虑，外热流尚应包括来自航天器与外部分子碰撞产生的热量，在航天器表面大气原子可能复合产生的热量，甚至还有宇宙残余背景辐射，但它们相对微弱，以针对航天器实际热状态的影响而言，在多数情况下可以忽略不计。而航天器内部产生的热流则主要取决于其中仪器设备的功率以及乘员所产生的热量。航天器热控制系统的任务就是控制和组织航天器上内外热量的传递过程，从“热”的角度上设法保持航天器处在预定容许的工作状态，从而保证其整体任务的顺利完成。

另外，采用“热控制”这一技术术语可以从概念上与通常的“温度控制”一词加以区别。因为后者已在许多科技文献和书籍中经常出现。“温度控制”一般是指将各种被控制对象，例如将某些设备、炉子、房间等的温度保持稳定，或者按一定变化规律升高或下降。一般来说，温度控制系统是由监测温度的敏感器、控制器和加热或致冷部件等功能部分所组合成的由人工操作或自动化进行的较复杂控制系统，它们可以达到较高控制精度（可参看本书第十章，第十二章有关内容）。

航天器热控制的方法可划分为被动式与主动式两种。过去曾按控制方法及装置是否具有运动部件或者是否消耗功率作为分辨特征：无运动部件，不耗功者为被动式热控；而凡含有运动部件，耗功的则划归于主动式热控。但如此划分有时会遇到困难，例如对于本书第七章所描述的热控百叶窗机构来说，它既含有驱动元件以及可转动的叶片，却又无需能源消耗，于是有人折中将其称为半主动式热控。导致这种混乱情况是由于分类特征选择不够恰当的缘故。如果改变成按控制原理的不同来区别，问题则易于解决。被动式热控是一种开环式控制(Open-Loop Control)。在这样的控制过程中不存在被控制量—温度的信息反馈作用。一般来说，被动式热控较为简易，运行较可靠，使用寿命长并较为经济，因此应当优先考虑选用。但它们往往会受到航天器总体布局的限制，其热控特性不能自动调节，灵活性差，故仅可适用在

当被控制对象容许在较宽温度范围内变动的场合。被动式热控除了包括合理的设计布局 and 选择航天器的外形与飞行姿态方法之外尚有以下几种依靠硬件技术实施的办法：选择和改变表面的光学特性；建立热“通道”，隔热；遮挡阳光辐射；吸收航天器产生的热量。本书第一章至第六章主要介绍被动式热控制的几种单项技术。而主动式热控制则是闭环式控制 (Closed-Loop Control)，实质上它相当于一般所谓的自动温度控制。在这样一类的装置或系统中必定具有温度敏感器和控制器这样的一些功能部件，当被控温度量进行信息反馈并与予定值比较后随而改变控制量，反过来再调节被控温度量，构成闭环。主动式热控制可以自动调节被控对象的换热特性，具有较大的灵活性，控制能力强，但其装置一般较为复杂因此可靠性较差，还可能耗功较多及质量较大。主动式热控制方法包括：自动调节的电加热和电致冷；辐射及传导式主动热控制；利用流体的强迫对流循环带走或引入热量。其有关技术内容可参看本书第七章至第十二章。

空间科学技术是当代的前沿科学之一。它综合性强，并建立在人类已经广泛掌握的和不断发展的各门科学技术的成就之上。仅从本书所涉及到的有限的范围内容就可显示出多门学科技术相互渗透、紧密相关的情况。虽然本书主要是从空间热物理学的观点，即主要是运用传热学和热力学方面的原理和知识来分析和论述热控制工程中常用材料和器件装置，但又必须广泛运用包括物理、化学、数学、材料工艺，天文学、光学、计算机技术，电子及电工、自动控制、低温工程、真空技术和系统工程等等许多学科的原理和知识。自然，空间科学在其迅速发展过程中会出现各种需要并产生多方面的课题，迫使人们不得不更加努力的深入研究和设法加以解决、从而必然又会带动和促进有关基本学科和新兴边缘科学的进步和发展。

本书采取了集体分章节负责编写的方式。为了克服各作者写作风格上的差异，我们努力在章节内容的编排形式上作必要的统

一、针对各种热控材料和器件装置的不同特点，按其基本原理、分类特征、工艺结构、基本性能以及有关使用范围和注意事项等方面来加以叙述。在某些章中简要地增述其基本技术性能、测试方法及有关装置。为了使读者便于理解，并有可能结合各自的需要情况参照应用，各章还扼要举出一些国内外在宇航及其他领域的应用实例。应当说明，由于条件所限，本书仅从热控材料和器件应用的角度进行扼要描述，是抛砖引玉性质的一本小册子，而并非完整论述和全面介绍航天热控制技术成就的著作。尚有一些在航天热控制中相当重要的技术项目，比如流体循环式系统装置，机械式制冷机等，考虑到它们是较复杂的系统。不但已超出本书命题范围，且已在民用部门广泛采用，已有许多专著论述，故未再予编入。

参加本书编写的有下列同志：江经善（第一、四、十一章）；彭芝生（第二章）；王兴国及项立成（第三章）；李金林（第五章）；李亭寒（第六章）；徐济万（第七章）；华诚生（第八章）；于显成（第九章）；何知朱（第十章）；朱其荫（第十二章）。除了各章作者相互进行技术校对之外尚有：童德霖（校第三章）；张岑（校第五章）；郭舜（校第八章）。

因著者们水平有限，经验不足，本书内容中不当之处在所难免，我们恳切希望读者予以批评指正。

本书在筹划及撰写过程中得到胡金刚等许多同志的鼓励支持。中国空间技术研究院闵桂荣院长对本书编写工作给予积极的支持，提出了许多宝贵意见，并在繁忙工作之余对本书初稿进行了认真仔细的审核并作序，我们在此表示衷心感谢。另外，还应当提及宇航出版社的有关同志，尤其是责任编辑林茂燕同志，从选题到编写方式上我们都曾得到她的具体帮助，没有他们的督促和辛勤工作我们就不可能及时将本书奉献给读者。

目 录

主要符号表	(1)
第一章 热控涂层	(3)
1.1 热控涂层	(3)
1.1.1 基本原理	(3)
1.1.2 热控涂层的类型	(8)
1.1.3 热控涂层的发展	(32)
1.1.4 热控涂层的比较和选择	(36)
1.1.5 热控涂层的应用	(39)
1.1.6 热辐射性能测试方法	(47)
1.2 示温涂料	(51)
1.2.1 基本原理	(51)
1.2.2 示温涂料的组成	(52)
1.2.3 示温涂料的分类	(53)
1.2.4 示温涂料的应用	(54)
第二章 隔热材料	(56)
2.1 多层隔热材料	(56)
2.1.1 隔热原理	(57)
2.1.2 材料和结构形式的选择	(60)
2.1.3 隔热性能	(64)
2.1.4 影响隔热性能的因素	(68)
2.1.5 隔热性能的测量	(76)
2.1.6 高温多层隔热材料	(80)
2.2 泡沫隔热材料	(82)

2.2.1	隔热原理	(83)
2.2.2	物理性能	(85)
2.2.3	高温泡沫材料	(96)
2.3	多层隔热材料的应用	(98)
2.3.1	应用工艺	(98)
2.3.2	在空间技术中的应用	(107)
2.3.3	在其他方面的应用	(112)
2.4	泡沫材料的应用	(116)
2.4.1	应用工艺	(116)
2.4.2	空间技术中的应用	(119)
2.4.3	在其他方面的应用	(124)
第三章	导热填充材料	(125)
3.1	引 言	(125)
3.2	基本概念	(126)
3.3	导热填充材料	(131)
3.4	应 用	(133)
第四章	胶 粘 剂	(138)
4.1	基本原理	(138)
4.2	热控技术用胶粘剂的品种	(143)
4.3	胶粘剂在热控技术中的应用	(170)
第五章	相变材料与相变热控装置	(174)
5.1	基本原理	(174)
5.2	相变装置	(176)
5.3	相变材料的充装	(182)
5.4	相变装置的设计	(184)
5.5	相变装置的应用	(199)
第六章	热 管	(202)
6.1	引 言	(202)
6.2	热管的原理及性能	(204)

6.3	热管的结构及材料	(210)
6.4	热管的演变	(215)
6.5	热管的应用	(220)
第七章	热控百叶窗机构	(231)
7.1	原 理	(232)
7.2	换热计算与性能分析	(232)
7.3	百叶窗热结构设计	(239)
7.4	热结构不同形式及其应用	(245)
7.5	热控百叶窗的发展动向	(251)
第八章	热辐射器	(253)
8.1	空间散热方法及特点	(253)
8.2	基本原理及热分析	(257)
8.3	应用实例	(274)
第九章	热电组件及致冷材料	(280)
9.1	热电致冷的基本原理	(280)
9.2	热电组件参数的确定	(281)
9.3	热电组件的热阻	(288)
9.4	热电组件的散热	(290)
9.5	热电组件的组装	(291)
9.6	热电组件系统及其可靠性	(293)
9.7	热电致冷材料	(294)
9.8	热电致冷的应用	(295)
第十章	测温材料及元件	(299)
10.1	温度测量的概述	(299)
10.1.1	温度测量原理及温标	(299)
10.1.2	测温材料和测温元件	(300)
10.2	热 电 偶	(303)
10.2.1	热电偶的工作原理	(304)
10.2.2	热电偶材料	(308)

10.2.3	热电偶的结构与制作	(311)
10.2.4	热电偶的使用	(316)
10.3	半导体热敏电阻	(326)
10.3.1	热敏电阻概述	(326)
10.3.2	负电阻温度系数热敏电阻	(328)
10.3.3	热敏电阻的温度特性	(329)
10.3.4	温度特性的计算和简化分度	(331)
10.3.5	热敏电阻的互换	(333)
10.3.6	关于热敏电阻的应用	(335)
10.4	测温元件的实验分度	(341)
10.4.1	分度设备及装置	(341)
10.4.2	恒温器的原理与结构	(342)
第十一章	电热材料及器件	(347)
11.1	基本原理	(347)
11.2	新型电加热器及材料的分类	(348)
11.2.1	薄膜型电加热器	(348)
11.2.2	套管型电加热器	(354)
11.2.3	等离子体—火焰喷涂型电加热器	(355)
11.2.4	真空蒸发—沉积型电加热器	(356)
11.2.5	涂料型(电热涂层)电加热器	(357)
11.3	新型电加热器及材料的比较和选择	(358)
11.4	新型电加热器及材料的应用	(361)
第十二章	电加热恒温控制器	(364)
12.1	电加热系统	(365)
12.2	恒温控制器	(366)
12.2.1	机械式恒温控制器	(366)
12.2.2	电子式恒温控制器	(369)
12.2.3	遥控控制	(380)
12.3	电加热系统的性能环境试验	(381)
	参考文献	(382)

主要符号表

A	面 积
b	宽 度
C	热 容
c_p	比 热 容
D	直 径
E	热电势；弹性模量
E_s	太阳辐射照度
H	高度；耗散系数
h	传热系数
h_c	接触热导率
h_{eff}	当量传热系数
I	电 流
k	热 导 率
L	长 度
M	辐射出射度（又称辐射本领）；分子量
m	质量流量
P	压力；功率
Q	热 流 量
q	热流密度
R	电阻；热阻；半径
S	太阳常数；热电势率
T	温 度
t	时间；温度

- U ——电压, 相变潜热
 α ——热扩散率
 α_s ——太阳吸收率
 $\alpha(\lambda)$ ——光谱吸收率
 δ ——厚度
 ε ——发射率
 ε_H ——半球发射率
 ε_N ——法向发射率
 $\varepsilon(\lambda)$ ——光谱发射率
 η ——粘度, 效率
 Π ——珀尔帖电势
 ρ ——电阻率, 密度, 反射率
 σ ——电导率, 斯忒藩-玻耳兹曼常数
 τ ——透射率
 φ ——辐射换热角系数
 ϕ ——输出信号
 μ ——空间外热流角系数

第一章 热控涂层

1.1 热控涂层

在日常生活中，人们常常利用物体表面的光学、热学性能来控制物体温度。例如，为了降低太阳光下油库和食品冷藏车的表面温度，可在它们的外壳表面涂覆一层白色或银灰色的油漆；在冬天，为了从太阳光中吸收更多的热量，人们常常喜欢选用深色的衣料；为了减少保温瓶的散热，我们可在保温瓶瓶胆夹层的内表面上，用化学方法涂覆一层光亮的银膜……。上述的白漆、银灰漆、深色染料、光亮银膜就是利用其光学、热学性能，来控制物体温度的表面涂层。在航天领域中，这种表面涂层常称之为热控涂层或温控涂层，在太阳能集热器的应用中，称之为光谱选择性涂层或选择性涂层。概括地说，热控涂层（又称温控涂层）就是一类用以调节固体表面光学、热学性能（又称热辐射性能），从而达到热控制（又称温度控制）目的的特种涂层。

1.1.1 基本原理^{[1][2]}

1.1.1.1 太阳辐射和太阳吸收率

在太阳光下，物体表面吸收直射太阳光的热流量 Q_s 为：

$$Q_s = \alpha_s \cdot A_s \cdot E_s \quad (1-1)$$

式中 α_s ——物体表面的太阳吸收率

A_s ——物体表面在垂直太阳光平面上的投影面积

E_s ——物体表面上的太阳辐射照度

太阳辐射照度 E_s 是指单位时间内到达垂直于太阳光的单位面

积上的太阳辐射能。在地球的大气层外、日地平均距离处（即一个天文单位—— $1.496 \times 10^{13} \text{cm}$ 处），太阳平均辐射照度值为 1353W/m^2 ，称之为太阳常数。在地球大气层内，由于受大气的吸收、反射和散射的影响，太阳辐射照度要小于上述的数值，一般而言，赤道上空直射时的太阳辐射照度只有大气层外的 $60 \sim 70\%$ （此即大气层的透射系数），大气层的透射系数随大气层情况而变，如果天气晴朗、空气干燥，约为 78% ，而如果湿度大、云量多或尘埃多，则只有 $50 \sim 60\%$ 。

太阳吸收率 α_s 是表示物体表面吸收的太阳辐射能通量占入射太阳辐射能通量的百分比。

已知太阳的光谱辐射照度 $E_s(\lambda)$ 和光谱吸收率 $\alpha(\lambda)$ ，太阳吸收率 α_s 可由下式表示：

$$\alpha_s = \frac{\int_0^\infty \alpha(\lambda) E_s(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty E_s(\lambda) d\lambda} \quad (1-2)$$

应注意：这里的光谱吸收率 $\alpha(\lambda)$ 是在给定波长 λ 下，物体表面的吸收率，是物体表面的物性，它只与物体表面的物理性质、表面状态和温度有关；而太阳吸收率 α_s 不仅与物体表面的物理性质、表面状态和温度有关，而且还与投射的太阳辐射的光谱分布有关。

在前述例子中，白漆的太阳吸收率 α_s 较低，约为 0.2 ；而深色衣料的太阳吸收率 α_s 较高，可达 $0.8 \sim 0.9$ 。由式 (1-1) 可见，在同样的太阳辐照下，后者要比前者吸收更多的热流量。因而，可以利用物体表面不同的太阳吸收率，来控制物体表面吸收的太阳辐射能。

1.1.1.2 热辐射和发射率

根据斯忒藩—玻耳兹曼定律，黑体在单位时间和单位面积上辐射的能量与黑体的热力学温度四次方成正比。

$$M_b = \sigma T^4 \quad (1-3)$$