

LÜPO JUERE CAILIAO
JIQI YING YONG

黄奇明著

铝箔绝热材料及其应用



浙江科学技术出版社

黄奇明著

铝箔绝热材料 及其应用



浙江科学技术出版社

责任编辑 任路平
封面设计 潘孝忠

铝箔绝热材料及其应用

黄奇明 著

*

浙江科学技术出版社出版
浙江印校印刷厂排版
浙江新华印刷厂印刷
浙江省新华书店发行

开本：850×1168 1/32 印张：13.75 字数：346,000

1985年2月第一版

1985年2月第一次印刷

印数：1—5,320

统一书号：15221·73

定 价： 2.50 元

内 容 提 要

铝箔绝热材料是一种全新的多功能保温隔热材料。由于它以热辐射理论为基础，所以与导热学理论为基础的多孔绝热材料完全不同。本书系统地论述了铝箔热绝缘的基本理论、铝箔复合材料的性能、铝箔绝热结构的构造原理及设计计算方法，并有许多应用实例和效果分析。全书共分四章，第一章铝箔热绝缘基础；第二章铝箔绝热材料；第三章铝箔绝热构造；第四章设计应用及效果。

本书反映了当前铝箔热绝缘研究和应用的成果，国内在论述反射绝热技术和材料方面的专著，尚不多见。

本书可供从事建筑、工业炉、热工、节能及环境声学等专业的工程技术人员学习，亦可作为各行各业开发新技术和新材料的人们参考。同时，也是高等院校有关专业师生的教学参考书。

前 言

凡有热能交换的地方，几乎都存在隔热保温问题。然而，解决隔热保温问题的重要物质条件，却是寻找理想的绝热材料。

绝热材料与热绝缘技术的应用和发展，同传热学的发展紧密相关。传热学中的导热学和热辐射学与绝热材料的关系较为密切。导热学至今已有200多年的发展历史，以其为理论基础的多孔绝热材料的普遍应用，可以说已经不足为奇了。但是，热辐射学直到七十年代方趋成熟，因而，以其为理论基础的铝箔反射绝热材料和热绝缘技术，是当人类进入空间探索的时代，在宇宙飞行器和超低温工程中才获得应用；而它在更广泛的领域里，如建筑、机械、冶金、化工、交通等工业部门和人们日常生活中所特有的良好效果，还没有被多数人所认识。

从科学技术的发展和作者对铝箔反射绝热材料的研究来看，铝箔绝热材料在不少工程中应用的技术经济效果要比目前广为应用的多孔绝热材料好得多。许多多孔绝热材料无法解决的绝热问题，对于铝箔反射绝热材料来说，却是轻而易举的事。因此，它被誉为“超级绝热材料”，当然是受之无愧的了。

有效地绝热，也就是有效地节能。从人们的穿衣保暖、住房的隔热、冷库和建筑物的温度控制，到机械、冶金、化工、食品等工矿企业所使用的工业炉、压力容器、烘房、烘炉、热力管道等等，都需要有良好的绝热性能，以减少能耗。

作者鉴于目前尚缺乏铝箔绝热材料及其应用的专门书籍，乃不揣鄙陋，总结了近二十年来的实践，并吸取国内外的先进经验，整理成书。本书共分四章，力求系统地论述铝箔热绝缘的基础理论、设计构造原理、材料特性和在工程中的应用及效果。它可供

各行各业从事绝热设计和绝热材料的研制、生产的科研人员学习。也可作为从事节能、环境声学 and 劳动保护工作者、高等院校有关专业的师生的参考书。

在研究和整理编写本书过程中，得到机械工业部设计研究总院和第二设计研究院的领导、重庆建筑工程学院陈启高教授、中国科学院马大猷教授的支持和帮助；俞为公、何立瑜同志对本书进行了详细的审阅和校对。在此谨致衷心的感谢。

本书虽经多年研究和整理，然而辐射传热学和反射热绝缘技术尚在继续发展，所涉及的领域又十分广阔，加上作者才学有限，定会有不少错误和不妥之处，欢迎读者批评指正。

著 者

1984年1月 于杭州

目 录

第一章 铝箔热绝缘基础

第一节	热辐射基本概念	(1)
第二节	热辐射基本定律	(6)
一、	基尔霍夫定律	(6)
二、	普朗克定律	(7)
三、	维恩位移定律	(8)
四、	斯忒藩—玻尔兹曼定律	(9)
五、	灰体的辐射和吸收	(9)
六、	朗伯定律	(10)
第三节	导来辐射系数和角辐射系数	(12)
一、	导来辐射系数 C'	(12)
二、	角辐射系数 φ_{m-n}	(14)
第四节	N 个表面间的辐射传热计算	(23)
第五节	绝热结构的传热机理	(33)
一、	传热方式	(33)
二、	传热过程与热绝缘技术	(37)
第六节	铝箔的热绝缘特性	(42)
一、	铝的一般特性	(42)
二、	铝箔的一般热物理性能	(43)
三、	铝箔的发射率	(44)
第七节	影响铝箔绝热性能的因素	(47)
一、	铝箔的 ρ 值与热辐射波长 λ 值的关系	(47)
二、	辐射体表面温度对铝箔 ρ 值的影响	(47)
三、	铝的纯度对铝箔 ρ 值的影响	(49)

四、铝箔表面质量对其 ρ 值的影响	(49)
五、铝箔厚度与反射特性的关系	(50)
六、铝箔的表面涂层对其发射率的影响	(52)
七、蒙尘对铝箔绝热性能的影响	(57)
第八节 铝箔空气间层的热阻计算	(60)
一、空气间层中的传热	(60)
二、空气间层中的分子导热系数 λ_0	(61)
三、空气间层中的对流当量导热系数 λ_c	(65)
四、空气间层中的辐射当量导热系数 $\lambda_{r, \Delta}$	(67)
五、空气间层中相变当量导热系数 $\lambda_{\phi, \Delta}$	(67)
第九节 铝箔绝热结构的总热阻和总传热系数	(70)
一、总热阻 R_{Σ} 和总传热系数 K_{Σ} 的概念	(70)
二、表面传热系数 α 的计算	(72)
三、铝箔绝热结构的 R_{Σ} 和 K_{Σ} 值	(73)
第十节 铝箔绝热结构的不稳定传热计算	(75)

第二章 铝箔绝热材料

第一节 传热学与绝热材料的发展	(86)
一、传热学的发展	(86)
二、绝热材料的研制和应用	(87)
三、绝热材料必须具备的特性	(88)
第二节 铝箔的品种及规格	(88)
一、绝热用铝箔的质量标准	(88)
二、铝箔的加工	(91)
第三节 铝箔的依托材料	(92)
一、依托材料应具备的特性及其种类	(92)
二、铝箔的基层纸	(93)
第四节 铝箔的粘合剂	(96)
一、概述	(96)

二、水玻璃粘合剂	(97)
第五节 铝箔复合绝热材料	(103)
第六节 铝箔波形纸板	(106)
一、概述	(106)
二、波形纸板绝热材料	(107)
三、原材料、加工及规格	(108)
四、铝箔波形纸板的物理性能	(115)
第七节 耐火试验及铝箔复合耐火材料	(123)
一、耐火试验	(123)
二、铝箔复合耐火材料	(129)
第八节 微孔铝箔波形板吸声绝热结构	(131)
一、基本原理	(131)
二、微孔铝箔波形板吸声结构	(133)
三、吸声性能	(134)
四、设计实例	(140)

第三章 铝箔绝热构造

第一节 构造设计的一般原则	(143)
第二节 绝热结构中铝箔的设置位置	(144)
一、设置在围护结构的外表面	(145)
二、设置在围护结构的内表面	(151)
三、用于围护结构的空气间层	(153)
第三节 空气间层厚度和垂直间层高度的确定	(157)
一、空气间层厚度的确定	(157)
二、垂直空气间层高度的确定	(161)
第四节 多孔绝热材料与铝箔平行板串联	(161)
一、当量黑板	(162)
二、多孔绝热材料与铝箔平行板串联设计	(164)
第五节 铝箔空气间层的骨架传热——冷(热)桥	(167)

一、带肋空气间层的热阻计算	(167)
二、理论计算值与实测值的比较	(180)
三、冷(热)桥处理的判据	(180)
四、冷(热)桥消除方法举例	(184)
第六节 空气间层的密封	(186)
一、设计不当举例	(187)
二、封缝热工试验及接缝构造举例	(189)
第七节 铝箔绝热构造设计举例	(191)
一、骨架与基层的连接	(191)
二、铝箔绝热屋盖构造	(193)
三、铝箔薄膜材料披覆绝热构造	(198)

第四章 设计应用及效果

第一节 铝箔绝热设计的一般考虑	(201)
第二节 炎热地区建筑隔热理论与设计	(207)
一、屋盖隔热现状	(207)
二、外围护结构隔热能力的评价指标	(209)
三、隔热设计计算方法	(214)
第三节 铝箔隔热建筑	(220)
第四节 寒冷地区建筑的保温	(233)
一、冬季保温试验	(233)
二、铝箔保温计算与设计	(244)
三、铝箔保温建筑实例	(247)
第五节 铝箔在空调建筑中的应用	(252)
一、结构的传热特征及其热工参数的确定	(252)
二、铝箔空调房间的模拟试验	(260)
三、铝箔绝热空调建筑实例	(262)
第六节 铝箔绝热冷库	(268)
一、冷库绝热技术的发展	(268)

二、围护结构的热工设计·····	(271)
三、铝箔绝热冷库工程实例·····	(274)
第七节 铝箔反射挡热板及其在高温防护中的应用·····	(281)
一、铝箔反射挡热板的设计计算·····	(282)
二、反射挡热板的应用·····	(285)
三、使用铝箔挡热板的经济效果·····	(289)
第八节 铝箔绝热工业炉·····	(295)
第九节 铝箔在低温工程中的应用·····	(312)
一、低温绝热技术的发展·····	(313)
二、多层铝箔隔热系统·····	(315)
三、多层反射绝热系统的分析模式·····	(321)
四、应用实例·····	(326)
第十节 铝箔反射卷帘被动式采暖降温屋盖·····	(330)
一、计算模型及热平衡方程·····	(331)
二、试验值与理论计算值的比较·····	(349)
三、试验结果分析·····	(353)
第十一节 铝箔在太阳能被动式采暖降温建筑中的应用·····	(354)
一、对常规太阳能建筑的评述·····	(354)
二、铝箔绝热系统被动式采暖降温建筑·····	(359)
三、采暖降温效果·····	(368)
第十二节 铝箔在其他行业中的应用·····	(373)
一、在交通工具中的应用·····	(373)
二、在农村中的应用·····	(374)
三、在空间飞行器上的应用·····	(375)
第十三节 铝箔的耐久性及长期使用效果·····	(379)
一、耐久性调查及分析·····	(379)
二、铝箔长期使用后的热工效果·····	(382)
第十四节 铝箔在建筑中应用的综合技术经济效果 分析·····	(385)

一、技术效果.....	(385)
二、经济效果.....	(391)
三、综合经济效果算例.....	(393)

附 录

一、材料表面法线方向上的发射率 ϵ_n 和总发射率 ϵ 表.....	(394)
二、材料的热物理性质表.....	(397)
三、公英制单位换算表.....	(408)
四、符号表.....	(409)

索 引	(418)
-----------	---------

参考文献	(425)
------------	---------

第一章

铝箔热绝缘基础

铝箔反射绝热材料及其热绝缘技术的理论基础是辐射传热学。因此有必要首先论述有关的辐射传热的概念、定律和计算，尔后讨论铝箔绝热材料及其在工程中的应用。

第一节 热辐射基本概念

温度高于绝对零度的物体均能以电磁辐射（电波与磁波的组合）方式发射出能量，并且也能吸收这种能量。因此所有传热过程总是伴有辐射热交换。这种因温度而产生的辐射称为热辐射。热辐射可认为是受激分子或原子释放出光子（能量束）的能量传递。它的本质与 x 射线、可见光及无线电波相同。热辐射区别于其他辐射的特征是其波长在 $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间。全辐射光谱的波长分布见图1-1。

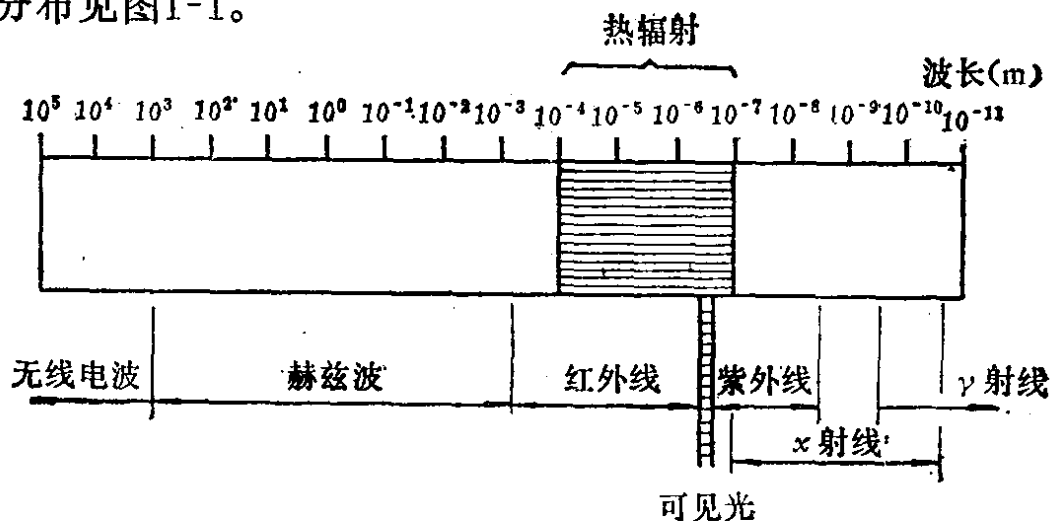


图1-1 电磁辐射光谱的波长分布

描述辐射的参数是光子或电磁波的速度 C (m/s), 波长 λ (m)和频率 f (Hz)。它们的关系是:

$$C = \lambda \cdot f \quad \dots\dots \quad (1-1)$$

一个光子的能量 $E = hf$, h 为普朗克常数($h = 6.6256 \times 10^{-34}$ J·s)。

在真空中热辐射的传播速度与频率无关, 其值是 $C_0 = 2.997925 \times 10^8$ m/s。电磁波在自然界所有介质中的传播速度都比真空中的小, 并有如下关系式:

$$C = \frac{C_0}{n_0} \quad \dots\dots \quad (1-2)$$

n_0 表示折射系数。空气和气体的折射系数与1相差万分之几, 即是说热辐射在空气和气体中的传播速度与其在真空中的传播速度十分接近。

当热射线由介质1穿入介质2时, 入射角 θ_1 和折射角 θ_2 有如下关系:

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{n_1}{n_2} \quad \dots\dots \quad (1-3)$$

式中: n_1 和 n_2 表示两种介质相对于真空的折射系数。

热辐射在空气中的传播速度, 工程中计算时, 可取真空中的速度 C_0 代替。辐射能随波长 λ 的变化也有很大的变化, 在1500℃以下时, 辐射能的主要部分位于波长为 $\lambda = 0.7 \sim 50 \mu\text{m}$ 的电磁波段, 红外线和可见光在此波段内。当温度为6000℃时, 可见光和紫外线部分($\lambda = 0.3 \sim 0.77 \mu\text{m}$)几乎占有辐射能的一半。太阳辐射能的分布曲线见图1-2。它的最大辐射能量是位于波长为 $0.38 \sim 0.77 \mu\text{m}$ 的可见光谱内。可见光辐射能占太阳总辐射能量的52%, 红外线辐射占43%, 紫外线辐射占5%。在绝热工程和技

术设备中，由物体发射出的辐射能包括从 $0.3\sim 50\mu\text{m}$ 或更长一些的电磁波。

$I_s(\text{w}/\text{cm}^2\cdot\mu\text{m})$

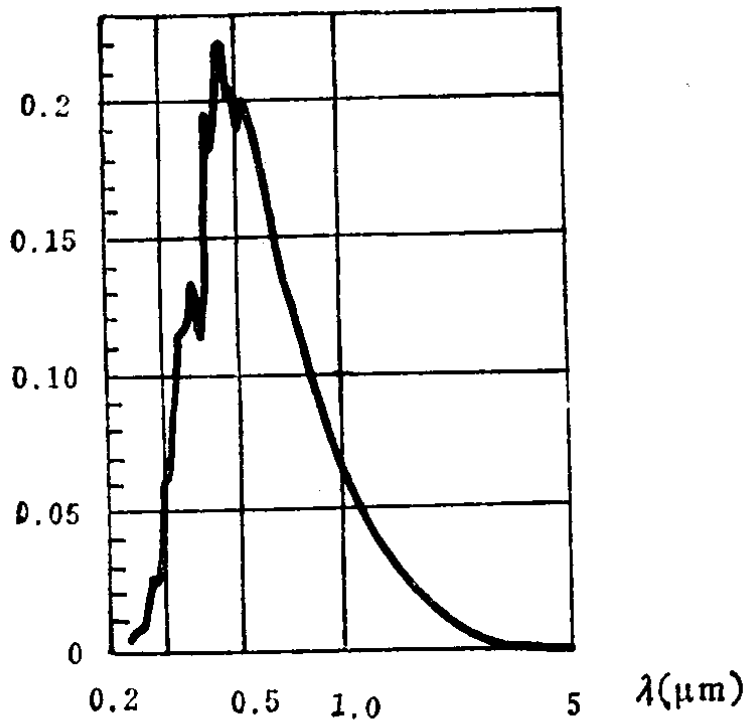
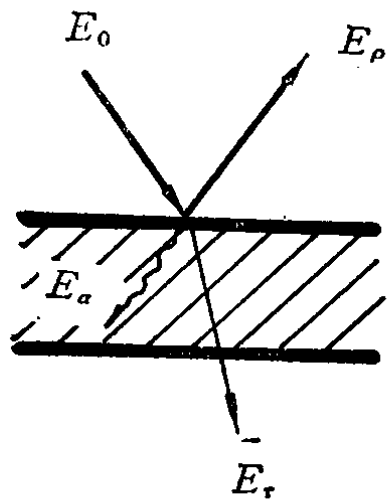


图1-2 太阳辐射光谱分布



辐射与传导、对流这两种传热方式截然不同，辐射不必借助于介质。

当辐射能 E_0 投射到物体表面时，一部分被反射 (E_ρ)，一部分被吸收 (E_α)，另一部分被透过 (E_τ)，如图1-3所示。

由能量平衡原理得：

图1-3 辐射能的分配图

$$E_0 = E_\rho + E_\alpha + E_\tau \quad \dots\dots (1-4)$$

或

$$\frac{E_\rho}{E_0} + \frac{E_\alpha}{E_0} + \frac{E_\tau}{E_0} = 1 \quad \dots\dots (1-5)$$

即 $\rho + \alpha + \tau = 1 \quad \dots\dots (1-6)$

式中： $\rho = \frac{E_{\rho}}{E_0}$ 为物体的反射率； $\alpha = \frac{E_{\alpha}}{E_0}$ 为物体的吸收率； $\tau = \frac{E_{\tau}}{E_0}$ 为物体的透过率。

ρ 、 α 、 τ 为无量纲数，在0~1内变化。三个量的大小与物体表面温度、物理特性、几何形状、材质和辐射波长有关。

如果 $\alpha = 1$ ，即表示入射到物体上的辐射能全部被吸收，我们称该物体为绝对黑体。如果 $\rho = 1$ ，即入射到物体上的辐射能均被其反射，若反射服从于几何光学定律，则此种反射称为镜面反射，该物体称为镜体；若反射是漫反射，该物体称为绝对白体。在热辐射学中，将磨光的铝面当作白体来举例。若 $\tau = 1$ ，即入射到物体上的全部辐射能量均被透过，则称该物体为绝对透明体。满足条件 $\alpha \neq 1$ ， $\rho \neq 1$ ， $\tau \neq 1$ 的物体，称为灰体。大多数固体在表面下很薄的一层内就吸收了全部的入射辐射。在导体中，吸收层的厚度约为 $1\mu\text{m}$ ；在介电体中，吸收层的厚度约为 1.27mm 。具体可从表1-1和表1-2中查出。

表1-1 金属箔对单色辐射的透过率随波长 λ 的变化

λ	$d(\mu\text{m})$		
	银	金	铂
2.5		0.0272	0.0352
2.0		0.0238	0.0331
1.5	0.0222	0.0244	0.0309
1.2	0.0214	0.0249	0.0300
1.0	0.0230	0.0266	0.0284
0.8	0.0236	0.0281	0.0274
0.7	0.0233	0.0311	0.0263

注： d 是用 μm 表示的厚度，在此厚度内，入射辐射的强度已减小到原始值的 $1/10$ 。

表1-2 在95℃时，非导体对于入射黑体辐射的透过率

材 料	d (mm)
玻 璃	0.30
打 字 纸	0.06
写 字 纸	0.07
描 图 纸	0.09
云 母	0.25

注： d 是用mm表示的厚度，在此厚度内，入射辐射的强度已减小到原始值的1/10。

由此可见，对固体和液体可近似认为：

$$\alpha + \rho = 1 \quad \dots\dots \quad (1-7)$$

上式表明：凡是反射热辐射能力强的物体，它所吸收辐射能的能力一定弱。反之亦然。

被吸收的辐射能转变为热能，被反射和透过物体的辐射能被其他物体吸收后，也转变为热能。每一物体不仅辐射能量，同时还不断地吸收能量。这种由热能——辐射能——热能的能量之间的互变现象，就构成了辐射换热的本质。辐射传热学、辐射化学、光谱学的发展和杜鲁德根据电磁波同金属表面传导电子的相互作用提出的金属反射理论，促进了反射绝热技术的研究和应用。根据辐射传热理论，物体的辐射热交换是在表面进行的，发射或吸收辐射热能力的大小取决于物体表面状况，而与厚度几乎无关，这为轻薄绝热材料的出现提供了理论依据。我们把隔绝辐射传热的材料，叫做反射绝热材料。铝箔是反射绝热材料中最经济和应用最广的一种。