

绝 热 技 术

徐 烈、方荣生、马庆芳 编著

国防工业出版社

内 容 提 要

本书较为全面、系统地阐述了绝热技术的原理、设计计算、绝热材料、结构以及施工方法。全书分两篇，上篇为常规绝热技术，内容包括常规绝热技术中的传热原理、绝热计算、绝热材料及其性能的测试方法，各种型式的绝热结构及制作。下篇为低温绝热技术，内容包括低温绝热的传热机理、低温绝热计算、各种低温绝热的结构、材料、制作及其实验研究方法。

本书可供化工、轻工、建筑、冶金、动力、交通、制冷、航空、航天等部门从事绝热技术的研究、设计、施工等方面工作的科技人员使用，亦可作为大专院校有关专业师生的参考书。

绝热技术

徐烈、方荣生、马金芳 编著

国防工业出版社

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 1/32 印张117/8 307千字

1990年7月第一版 1990年7月第一次印刷 印数：0,001—1,565册

ISBN 7-118-00409-X/TK12

定价：7.25元

序

众所周知，绝热技术是一门古老而又年轻的学科。凡存在温度差的场合都会产生热流，而隔绝有害热流可以保持特定的热状态、节约能源、防止环境热污染。因此，绝热技术在工业、农业、国防和生活各个领域都有着广泛应用，在动力、冶金、建筑、化工、低温、宇航等工程技术中尤有重要地位。七十年代的世界“能源危机”促使人们更加注意能源的节约，而绝热是节能的重要通用手段；低温、宇航、原子能等新兴科学技术的发展不断提出新的绝热课题，推动产生更优良的绝热材料和绝热方式。在这种情况下，绝热技术这一古老学科获得了迅速发展的新活力。

绝热技术在节约能源中获得了显著的技术经济效益。我国有些工业炉改用硅酸铝纤维作为绝热材料，可节约 25% 的燃料，并能明显提高生产率；美国在化工、石油、造纸等六个高能耗工业中使用良好的绝热材料，估计可以节能 10% 左右。乐观的估计：以先进的绝热材料代替传统的绝热材料，可使热能利用率提高 20~50%。因此，绝热技术是投资少、效益高的节能手段。

在新技术领域，绝热更为重要的作用是实现某些技术必不可少的条件。例如，没有高效能的绝热装置，超低温的实现和保持都是不可能的；各种高速飞行器（导弹、卫星、航天飞机等）在通过大气层时会产生强烈的气动加热，若不采取适当的绝热措施，将会导致飞行器的烧毁；又如处于深冷空间环境（约为 4 K）的空间飞行器，采用优良的绝热材料后，可不耗用能源（或耗用很少能源），使舱内温度维持近于室温的水平。

绝热技术是一门综合性学科，其基础是工程热物理学（特别是传热学）和材料科学。它还涉及到物理学、工艺学、经济学、低温技术、高温技术、测试技术、真空技术以及应用绝热技术的各

个科学和技术领域。事实证明，只有这些学科的努力，才能使绝热技术获得较快的发展。

本书按工业常规绝热技术与低温绝热技术两个方面，系统地阐述了绝热技术的原理与计算方法、绝热材料、绝热结构、测试方法。如此全面详尽的绝热技术专著，在我国还是不多见的。对于能源、低温、化工、冶金、宇航等专业涉及绝热技术科研与应用的技术人员以及有关专业的大学师生，本书是一本很有价值的参考书。

绝热技术涉及的领域颇广，要想在一部中等篇幅的专著中全面地介绍是不现实的，但像建筑绝热这样重要的专题，似应加以讨论。同时，为了合理的应用绝热技术，若能运用系统工程理论，对工程中的绝热系统进行优化设计，专辟章节介绍，则更有价值。此外，绝热技术属于应用科学，它的应用者多于研究者，因此本书如能介绍更多的应用实例，将对读者更有裨益。本书采用国家法定单位制，这是应当肯定的，考虑到目前我国处于向法定单位制过度时期，有些物理量在给出新单位的同时，也给出旧单位，例如真空度以“帕”表示，同时给出“托”的对应值，这样，对读者更为方便。本书如有机会修订再版，以上意见可供作者参考。

闵桂荣

一九八六年

前 言

绝热技术是一门应用非常广泛的技术。在所有的热能利用与转移场合,都不可避免地出现热量的传递。为了提高产品的质量,控制生产条件,强化生产过程,节约能量和保护环境都要涉及到绝热技术。对于高温炉热量的保持,如冶金高炉或转炉,石油化工中的裂解炉、各种动力锅炉等;工业建筑和住宅的采暖与空调;食品的冷冻与冷藏;特别是在整个低温区域(12 K以下的温区),不论是低温的产生,低温的贮运,低温的各种应用都必须借助于高效的绝热技术才能实现。因此,了解绝热机理,研究绝热材料,探讨绝热结构,摸索绝热工艺是人们日益关心的问题。鉴于目前系统地介绍绝热技术的书籍比较少,作者深感有必要撰写本书。在撰写过程中,力求做到内容全面,叙述尽可能深入浅出,特别注意原理与技术的有机联系,并尽可能介绍一些新的技术。

本书共分十一章。第一章叙述了传热原理,对传热的基本方式和三种传热途径的基本知识进行了介绍。第二章着重介绍了常规绝热材料的传热机理,分析了密度、温度、湿度等因素对绝热材料传热的影响,提出了绝热设计的原则。第二章介绍绝热计算,分别介绍了不同类型的热损失、绝热层厚度以及表面温度等的计算方法。第四章为绝热材料性能的测试。第五章介绍了常规型绝热材料的品种及其性能,选用绝热材料的原则以及保存方法。第六章叙述了常规绝热结构以及它们的制作工艺。第七章重点介绍低温绝热中的一些传热问题,特别是对低温下的固体导热、辐射传热以及有冷蒸气冷却的管道传热等进行了讨论。第八章、第九章分别叙述了各种低温绝热材料的性质以及影响它们性能的因素,不同类型低温绝热结构的传热计算及影响因素。第十章简要介绍了低温绝热体的制作工艺以及与低温绝热密切相关的真空获

得与保持等技术。最后，在第十一章中介绍了低温绝热的实验研究方法，对低温下绝热材料的导热系数、导温系数、辐射率与吸收率、膨胀系数等物性的实验方法也作了介绍。在这里，还需特别说明的是，考虑到低温绝热与常规绝热有许多不同的特点，因此分成上、下两篇进行撰写，从标题看来，似乎有重复的感觉，但在实际的内容上却是按不同的对象进行叙述的，而且有的方面还能互相补充与完善。

本书第一、二、四、六章由马庆芳执笔，第三、五章由方荣生执笔，第七、八、九、十、十一章由徐烈执笔。最后由徐烈负责统稿。在本书编写过程中承蒙上海交通大学尉迟斌教授、杨强生副教授的热情支持，中国空间技术研究院院长闵桂荣研究员在百忙中为本书撰写了序言。作者在此表示衷心感谢。由于作者水平所限，书中难免有不当之处，恳请读者批评指正。

编著者

1986年5月

目 录

上篇 常规绝热技术

第一章 传热原理	1
§ 1.1 传热的基本方式	1
§ 1.1.1 热传导	2
§ 1.1.2 热对流	2
§ 1.1.3 热辐射	3
§ 1.2 热传导	4
§ 1.2.1 导热系数	5
§ 1.2.2 平壁的热传导	6
§ 1.2.3 圆筒壁的热传导	8
§ 1.2.4 圆球壁的热传导	9
§ 1.2.5 多维热传导的形状因数	10
§ 1.2.6 带有对流边界条件的热传导问题	18
§ 1.2.7 接触热阻	20
§ 1.3 热对流	21
§ 1.3.1 边界层基本概念	22
§ 1.3.2 受迫对流传热的经验公式	25
§ 1.3.3 自然对流传热的经验公式	29
§ 1.4 热辐射	32
§ 1.4.1 普朗克定律和维恩定律	34
§ 1.4.2 斯蒂芬-波尔兹曼定律	35
§ 1.4.3 克希霍夫定律	36
§ 1.4.4 朗伯定律	37
§ 1.4.5 物体间的辐射换热	38
§ 1.4.6 遮热原理	43

参考文献	44
第二章 绝热材料的传热分析	45
§ 2.1 各种传热方式在绝热材料传热中的作用	45
§ 2.2 密度对绝热材料传热的影响	50
§ 2.3 温度对绝热材料传热的影响	53
§ 2.4 湿度对绝热材料传热的影响	57
§ 2.5 其它因素对绝热材料传热的影响	62
§ 2.5.1 气压对绝热材料传热的影响	62
§ 2.5.2 杂质对绝热材料传热的影响	63
§ 2.5.3 纤维直径对绝热材料传热的影响	65
§ 2.6 绝热材料的设计原则	65
参考文献	66
第三章 绝热计算	67
§ 3.1 绝热计算的项目和参数	67
§ 3.1.1 绝热计算的项目	67
§ 3.1.2 绝热计算中的常用参数	67
§ 3.2 热损失计算	78
§ 3.2.1 热量的传递	78
§ 3.2.2 室内、外的设备与管道的热损失	81
§ 3.2.3 埋在土中管道的热损失	85
§ 3.2.4 铺设在地沟里的管道热损失	85
§ 3.2.5 绝热体外表面允许的热损失范围	93
§ 3.3 绝热层厚度的计算	93
§ 3.3.1 计算室内、外热力设备及管道的绝热层厚度	93
§ 3.3.2 计算埋在土中管道的绝热层厚度	103
§ 3.3.3 计算铺设在地沟内管道的绝热层厚度	103
§ 3.3.4 计算管道防冻的绝热层厚度	104
§ 3.3.5 根据允许下降的温度, 计算其绝热层厚度	106
§ 3.3.6 计算防止结露的绝热层厚度	108
§ 3.4 表面温度的计算	114
§ 3.4.1 计算室内、外热力设备与管道的表面温度	114
§ 3.4.2 计算埋在土中管道的绝热层表面温度	117

§ 3.5 绝热设计的经济性计算	118
§ 3.5.1 绝热材料选择的经济性计算	119
§ 3.5.2 绝热层的经济厚度计算	122
参考文献	126
第四章 绝热材料性能的测试方法	127
§ 4.1 导热系数	127
§ 4.1.1 测定导热系数的稳态法	127
§ 4.1.2 测定导热系数的非稳态法	131
§ 4.2 比热容	138
§ 4.3 蓄热系数	141
§ 4.4 热扩散系数	143
§ 4.5 机械强度	144
§ 4.6 热流密度的测量	146
参考文献	148
第五章 绝热材料	149
§ 5.1 绝热材料的分类与性质	149
§ 5.1.1 绝热材料的分类	149
§ 5.1.2 绝热材料的性质	151
§ 5.1.3 选用绝热材料的一般原则	153
§ 5.2 多孔绝热材料	155
§ 5.2.1 泡沫塑料	155
§ 5.2.2 泡沫玻璃	161
§ 5.2.3 微孔硅酸钙	162
§ 5.2.4 轻质耐火材料	163
§ 5.2.5 其它多孔绝热材料	167
§ 5.3 纤维绝热材料	168
§ 5.3.1 石棉及其制品	170
§ 5.3.2 玻璃棉及其制品	174
§ 5.3.3 矿渣棉	176
§ 5.3.4 岩棉及其制品	177
§ 5.3.5 硅酸铝纤维及其制品	179

X

§ 5.4 粉状绝热材料	181
§ 5.4.1 硅藻土及其制品	181
§ 5.4.2 膨胀蛭石及其制品	183
§ 5.4.3 膨胀珍珠岩及其制品	186
§ 5.5 绝热材料的保管	190
§ 5.5.1 绝热材料保管的目的	190
§ 5.5.2 绝热材料保管的环节	190
§ 5.5.3 保管后材质劣化的确定	192
参考文献	193
第六章 绝热结构及其制作	194
§ 6.1 绝热结构的一般要求	194
§ 6.2 绝热结构的施工	195
§ 6.2.1 胶泥结构	195
§ 6.2.2 缠绕结构	196
§ 6.2.3 包扎结构	197
§ 6.2.4 填充结构	197
§ 6.2.5 浇灌结构	198
§ 6.2.6 预制件绝热结构	199
§ 6.2.7 粘贴结构	200
§ 6.2.8 喷涂结构	201
§ 6.3 绝热结构的保护层	203
§ 6.3.1 涂抹式保护层	204
§ 6.3.2 金属保护层	206
§ 6.3.3 毡、布类保护层	206
参考文献	208

下篇 低温绝热技术

第七章 低温绝热中的一些传热问题	209
§ 7.1 自然对流传热	209
§ 7.2 稀薄气体的导热	210
§ 7.3 低温下固体的导热	219
§ 7.3.1 金属的导热	219

§ 7.3.2 非金属的导热	222
§ 7.3.3 合金的导热	224
§ 7.3.4 固体导热量的计算	226
§ 7.4 低温下的辐射传热	228
§ 7.4.1 低温下辐射传热的几个效应	228
§ 7.4.2 低温下材料的辐射性质	229
§ 7.4.3 低温下辐射传热的计算	238
§ 7.5 分散介质中的传热	239
§ 7.5.1 分散介质中的气体与固体热传导	239
§ 7.5.2 分散介质中的接触传热	247
§ 7.5.3 分散介质中的辐射传热	248
§ 7.6 有蒸发气体冷却的管道传热	254
§ 7.6.1 理想情况	255
§ 7.6.2 实际情况	256
参考文献	260
第八章 低温绝热的类型及其材料的性质	261
§ 8.1 低温绝热的类型	261
§ 8.1.1 普通堆积绝热	262
§ 8.1.2 高真空绝热	262
§ 8.1.3 真空多孔绝热	263
§ 8.1.4 多层绝热	264
§ 8.1.5 多屏绝热	267
§ 8.2 低温绝热材料	267
§ 8.2.1 绝热材料的种类	268
§ 8.2.2 常用绝热材料	270
§ 8.2.3 多层绝热材料	275
§ 8.2.4 绝热材料的热物理性质	277
参考文献	284
第九章 低温绝热结构的传热计算	285
§ 9.1 高真空绝热的传热计算	285
§ 9.2 真空型多孔介质(粉末或纤维)绝热的传热计算	289
§ 9.2.1 有效导热系数及传热量的计算	289

§ 9.2.2 影响绝热性能的因素	295
§ 9.3 多层绝热的传热计算	298
§ 9.3.1 有效导热系数及传热量的计算	298
§ 9.3.2 多层绝热中的侧向传热	301
§ 9.3.3 多层绝热中的气体传热	303
§ 9.4 多屏绝热的传热计算	305
§ 9.4.1 高真空-多屏绝热	306
§ 9.4.2 真空粉末-多屏绝热	309
§ 9.4.3 真空多层-多屏绝热	310
§ 9.5 绝热结构中热桥传热的计算	311
§ 9.5.1 吊件	311
§ 9.5.2 支承	314
§ 9.5.3 管道	316
参考文献	317
第十章 低温绝热体的制作	319
§ 10.1 多层绝热材料的处理	319
§ 10.2 吸气剂的安置	320
§ 10.2.1 吸气剂的选择	320
§ 10.2.2 吸气剂的活化	324
§ 10.2.3 吸气剂盛皿的结构	324
§ 10.2.4 吸气剂安置工序	325
§ 10.3 多层绝热体的包扎	325
§ 10.3.1 包扎工序	325
§ 10.3.2 包扎过程中的注意事项	325
§ 10.3.3 传导屏的安装	326
§ 10.4 其它绝热体制作时注意事项	327
§ 10.4.1 真空-粉末绝热体	327
§ 10.4.2 堆积绝热体	327
§ 10.5 绝热空间的真空获得与保持	328
§ 10.5.1 真空检漏	328
§ 10.5.2 绝热空间的抽空	331
§ 10.5.3 绝热空间真空的保持	339

参考文献	343
第十一章 低温绝热的实验研究方法	344
§ 11.1 概述	344
§ 11.2 低温下导热系数的实验测试方法	345
§ 11.2.1 测定导热系数的理论	345
§ 11.2.2 导热系数的测试方法	349
§ 11.3 低温下导温系数的实验方法	355
§ 11.4 辐射率及吸收率的实验确定方法	358
§ 11.4.1 辐射法	358
§ 11.4.2 量热计法	359
§ 11.4.3 正规热工况法	360
§ 11.5 低温热膨胀系数的实验方法	362
§ 11.5.1 低温下的热膨胀系数	363
§ 11.5.2 热膨胀系数的测量	364
参考文献	366

上篇 常规绝热技术

第一章 传热原理

热绝缘技术的理论基础是传热学，也可以说它是传热学的一个分支。在本章中将简要地介绍传热学的基本原理，并给出常用的传热公式，掌握这些传热机理对于深入掌握绝热的本质、改进绝热材料的性能和绝热设计是十分重要的。

§ 1.1 传热的基本方式

热量由一物体传至另一物体，或由物体的某一部分传至另一部分称之为传热（热传递、热交换）。研究传热规律的学科是传热学。

传热是由温度差引起的，只要存在温度差便伴随有传热过程发生。在自然界和工程技术中，温度差是普遍存在的，所以传热过程也几乎无处不存在。

简要地说，传热学的研究课题主要有两个：（1）已知温度场求传热速率；（2）已知传热速率求温度场。

热流密度（热通量、比热流量） q 表示为

$$q = \frac{Q}{F} \quad (\text{W/m}^2) \quad (1-1)$$

式中 Q ——热流量 (W)；

F ——传热面积 (m^2)；

q ——通过单位面积的热功率 (W/m^2)。

工程技术人员往往面临提高热通量或降低热通量的任务。对于各种换热器，提高热通量能够降低设备重量，节约能源，使用

各种传热强化技术、提高换热器的效率是传热学的重大课题。在绝热工程中，则面临着相反的任务，最大限度地降低热通量以减小热损失则是其主要目标。

传热过程可用三种基本传热方式来实现：热传导、热对流和热辐射。

§ 1.1.1 热传导

热传导是指物质直接接触部分之间的热传递。这种传热过程是依靠物质微观质点（分子、原子或电子）的能量传递而实现的，与宏观运动无关。导热是物质的本能，尽管导热能力有所差异，但任何物质不论处于固态、液态或气态都能进行热传导。

傅立叶定律表示了热传导的基本规律：

$$q_n = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1-2)$$

式中 q_n ——等温面法线方向的热流密度 (W/m^2)，

λ ——导热系数 ($\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$)，

$\frac{\partial t}{\partial n}$ ——等温面法线方向的温度梯度 ($^\circ\text{C}/\text{m}$)。

公式中的负号表示热流方向与温度梯度相反。

§ 1.1.2 热对流

借助于流体（液体或气体）宏观运动传递热量的过程称为热对流或对流换热。

对流换热通常是流体与固体表面之间的传热。就固体表面与贴近表面的流体薄层而言，传热的机理仍是热传导。当然，流动特征诸如流速、流向等都会影响对流换热，流体的导热系数、粘度和密度等物理特性与热传导和流动特征都有关系，所以也会影响对流换热。

作用在流体上的表面力和体积力都会驱动流体运动，进行对流换热。在工程技术中常使用泵或活塞驱动流体，这种流体受迫

运动产生的热对流称为受迫对流换热（亦称为强迫对流换热），受迫对流换热有较高的换热速率。

温度差会产生空气的密度差，在重力场内，不同温度的流体会在重力驱动下产生运动，从而产生对流换热，与受迫运动产生的受迫对流换热不同，这种对流换热称为自然对流换热。室内暖气片的热量主要就是通过空气的自然对流散出的。自然对流换热对于建筑物和管道的保温尤为重要。

对流换热的速率常用著名的牛顿公式计算：

$$Q = \alpha A (T_w - T_0) \quad (1-3)$$

式中 Q ——热流量 (W)；

α ——对流换热系数 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)；

A ——传热面积 (m^2)；

T_w ——壁面温度 ($^\circ\text{C}$)；

T_0 ——流体主流温度 ($^\circ\text{C}$)。

除换热系数 α 外，其余参数均可视为已知量， α 的计算方法是对流换热最重要的研究课题，本章的第三节将对此作简要的介绍。

§ 1.1.3 热辐射

上面论及的热传导和热对流都要通过物质进行热传递，而辐射传热机理则完全不同，它是借助于电磁辐射波传递热量的，在完全真空的地方热辐射仍能进行。

任何温度的物体都从表面向外辐射热量，此热量与绝对温度的四次方成正比：

$$q = \sigma \varepsilon T^4 \quad (1-4)$$

式中 σ ——辐射常数（斯蒂芬-玻尔兹曼常数），其值为 $5.669 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ；

ε ——物体表面的发射率（辐射率、黑度），是无量纲量。

物体的辐射率是低于 1 或等于 1 的正数。

对于一般工程材料，两个物体间的辐射热交换可用下式计算：

$$Q_{1-2} = \sigma A_1 \varepsilon_2 F_{1-2} (T_1^4 - T_2^4) \quad (1-5)$$

式中 Q_{1-2} ——物体 1 传给物体 2 的辐射热 (W),

A_1 ——物体 1 的表面积 (m^2),

ε_s ——有效发射率,

F_{1-2} ——物体 1 对物体 2 的辐射角系数。

ε_s 与两物体的表面发射率和几何位置有关。 F_{1-2} 亦称为形状因子, 它纯粹取决于几何因素, 是小于或等于 1 的正数。

上面简述了三种基本传热方式, 在工业生产或自然环境中的传热过程往往不是一种传热方式, 而是兼备几种传热方式。例如图 1-1 所示的热力管道, 管内流动的蒸汽以受迫对流方式将热量传

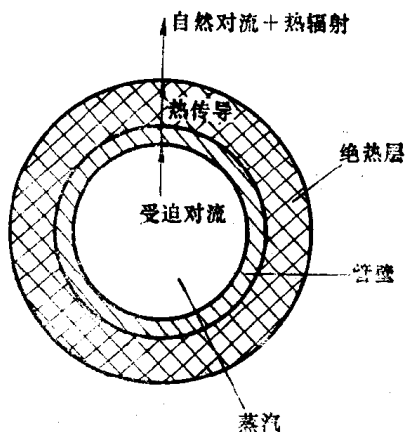


图1-1 热力管道的散热

给管壁, 热量再以传导方式穿过管壁和绝热层, 最后在绝热层外表面通过自然对流和热辐射将热量散失到周围环境, 如果管道外面有空气流动, 则还伴随有受迫对流换热发生。这就是热力管道的散热过程。

§ 1.2 热 传 导

本节只讨论稳定热传导问题, 所谓“稳定”是指温度场不随时间变化。不稳定热传导问题增加了时间参数, 因而比较复杂,