

绝热材料 与绝热工程

主编 谢文丁



国防工业出版社

National Defense Industry Press

绝热材料与绝热工程

主 编	谢文丁	
副主编	方 震	
编 者	任春莲	谢春晖
	张祥昌	谢朝晖
审 校	王刚毅	

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书以绝热材料为主题。由三大部分组成,第一部分系统地介绍了绝热的基本原理,绝热材料的基本性能与性能分析、绝热结构形成及现行绝热材料的概况,并以新型复合高效节能绝热材料的形成展示高新技术在绝热领域中的生成与应用;第二部分介绍工业设备及管道的绝热设计原则及要求,包括绝热层、防潮层及保护层结构,施工示范与施工质量中冷态验收、热态考核新采用的测试方法和常用测试仪器的简介;第三部分以建筑领域里隔热保温(保冷)与节能的辩证关系,阐述有机质材料与无机质材料的结合,保温与保冷中的材料结构、应用设计原则、效果计算依据和方法等。

本书适用于从事绝热材料生产厂、绝热工程技术人员及专业设计人员阅读,也可供节能专管人员、大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

绝热材料与绝热工程/谢文丁主编. —北京:国防工业出版社,2006.5

ISBN 7-118-04405-9

I. 绝... II. 谢... III. ①隔热材料②绝热工程
IV. ①TB35②TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 016369 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 13¼ 字数 238 千字

2006 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 定价 26.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

绝热材料与绝热工程的兴起,是和节约能源相关联的,也就是说,绝热是为了节能。从科学的定义来说,节能应该是在满足人们需求的前提下,减少对能源的消耗量。这种有实际价值的降低能耗,提高能源利用率,对人类节约能源才有积极的意义。充分发挥能源的作用是人类社会发展的需要,它和积极的节约能源是相辅相成的,人们在认识能源上是有着明确区分的。

作为一次性能源它包括:煤炭、石油、天然气、油页岩、核能等,它们能耗后不能再生,所以划归为非再生能源,也称常规能源。在我国能源结构上,仍以一次性能源为主,近年来开始新能源的开发,新能源中包括:太阳能、风能、地热能、潮汐能、核裂变等。国际上把节能称为开发“第五能源”,而“第五能源”的开发就是指绝热材料与绝热工程,其地位可与上述能源相比。

我国的能源消费 96% 以上都是一次性能源,即煤炭、天然气和石油。这些能源在地壳中贮存是有限的,采一点就少一点,总有用完的一天,这就叫能源枯竭,同全世界一样,这种危机感都是类同的。而且随着经济发展,能源消耗剧增,又加速了这种危机感。因此,节约能源决非是一个权宜之计,而是对全人类发展具有重大的战略意义的。决不能掉以轻心。有一句很具哲理的话:节能就是拯救明天。

在节约能源、降低能耗、提高能源利用率上,绝热工程(包括绝热材料)作为最重要的措施被提到一个新的高度,正像人们强调性指出的绝热就是节能。绝热是一个系统工程,它不仅包括绝热材料的开发,而且还包括与绝热材料有着同等重要性的施工工程质量的规范化,这也就意味着绝热工程进入一个新阶段的标志。这个新阶段要求人们把绝热的理念上升到将科学性与经济性结合在一起,抓住节能的四大要素:即使用寿命、经济厚度、物美价廉和功能齐全。在实际应用上应该从工程概念出发,构成一个合理的绝热结构,形成一个以节能为目标,科学发展为基础,质量为中心,经济的和社会的效益为考核标准的专业学科。

这个专业学科应该包括:新型绝热材料的开发、施工的规范化与现代科学管

理密切结合,从而构成一个系统工程。

目前,我国乃至世界的绝热材料仍处在传统模式中,需要有突破性的、质的变化。虽然已萌发出一些具有高科技含量的新型绝热材料和施工工艺规范化的呼声,但迫切需要有高素质的科学工作者来参与。这是编者由衷的期望。

作者
2006.3

目 录

第一章 绝热材料的基本原理、性能、结构及现状	1
第一节 概述.....	1
第二节 绝热的基本原理.....	6
第三节 绝热材料的分类和基本性能	11
第四节 绝热材料性能分析	15
第五节 绝热材料的结构形式	20
第六节 绝热材料相关名词注释	21
第七节 现行绝热材料分类、原辅材料及制品.....	23
第八节 GGN 新型复合高效节能绝热材料的形成.....	58
第九节 绝热材料的辅助材料	59
第二章 设备及管道绝热的设计原则及要求	62
第一节 概述	62
第二节 保温层厚度的计算和确定	64
第三节 绝热计算主要数据选取原则	66
第四节 火电厂绝热工程的特点	67
第五节 绝热工程中技术、经济和综合指标的权衡.....	68
第三章 绝热层的结构	71
第一节 绝热结构的作用	71
第二节 绝热结构的选用	72
第三节 绝热结构	73
第四节 绝热结构选用	78
第四章 绝热层施工的准备和要求	84
第一节 施工前的准备	84
第二节 施工中的一般要求	85
第三节 固定件与支承件的安装	87
第四节 常用的几种施工方法	88

第五章 防潮层的施工	95
第一节 一般规定	95
第二节 施工	95
第六章 保护层的施工	97
第一节 金属保护层	97
第二节 毡箔布类保护层	99
第三节 抹面保护层	99
第七章 工程验收	101
第一节 质量检查	101
第二节 绝热工程的施工质量及冷态验收	102
第三节 绝热工程的热态考核	104
第四节 绝热效果测试所使用的仪器	105
第五节 测点的选取	107
第六节 测试点误差分析	109
第七节 测试数据的处理	112
第八章 建筑物体隔热保温材料与绝热工程	115
第一节 建筑用隔热保温材料	115
第二节 建筑用有机类保温材料	119
第三节 建筑用无机类保温材料	127
第四节 墙体保温的设计原则	138
第五节 节能效果的计算依据和方法	146
第六节 墙体保温施工	148
第七节 墙体保温验收	150
第八节 建筑用有机类保冷材料与工程	160
附录1 绝热层厚度选用表	174
附录2 $\lambda - t_f - d$ 与 δ 关系表	175
附录3 绝热层计算用量表	190
附录4 常用单位换算表	198
附录5 国家标准要求	199
附录6 绝热材料生产厂家和绝热工程施工单位	202
参考文献	206

第一章 绝热材料的基本原理、性能、结构及现状

第一节 概 述

绝热材料习惯上称保温隔热材料(包括保冷材料)。是指对热流具有显著阻抗性的材料或材料复合体。是绝热工程应用技术的物质基础,在节能工作中占据着十分重要的位置。因此,人们把绝热与节能有机的结合在一起。在国外把节约能源称为开发“第五能源”,制订了一系列法规,如日本“合理化使用能源法律”,欧美等国对保温项目采取补助和减税等政策,可见其位置的重要性。所以在开发煤、石油、天然气和电力(包括风力、水利)的同时,把积极生产优质绝热材料,加强工业、建筑、交通等方面的保温保冷和隔热作为开发“第五能源”的重要措施。

在我国随着国民经济的发展,能源日趋紧张,已把节能作为国策,公布了一系列的政策和法规,如“企业能源平衡通则”(GB 3484)、“评价企业合理用热技术导则”(GB 3486—93)、“设备管道保温技术通则”(GB—4272—92)、“电力工业管理法规”等。这些政策、法规为发展绝热工程奠定了战略基础,展示了广阔的前景。

绝热工程是用能工业生产的重要环节,也是节约能源的重要措施,其所用材料称之为绝热材料,其所采用的手段称之为绝热工程,而要达到的目的就是节约能源。大体可归纳以下五点:

- (1)绝热的直接目标就是把热损失减少到最低;
- (2)创造出最好的工作环境,保证安全、健康;
- (3)在输油管道中防止介质冻结(液体);
- (4)防止火灾;
- (5)建筑物达到节能型、安全型、健康型。

绝热的直接目标就是绝热后的热损失可以减少 80%~90%,甚至更多。可从下列实例(见表 1-1,表 1-2,表 1-3)中看出明显的反差:

表 1-1 每米长裸露管道与保温管道散热损失比较

管道直径/mm	介质温度/℃	散热损失/(W/m)(kcal/m·h)		散热损失 相比倍数
		裸露管道	保温管道	
100	100	355(305)	52(45)	6.78
	300	2360(2030)	159(137)	14.82
	450	5465(4700)	238(205)	22.93
200	100	669(575)	81(70)	8.22
	300	4512(3880)	228(196)	19.80
	450	10465(9000)	337(290)	31.04
300	100	930(800)	99(85)	9.41
	300	6488(5580)	279(240)	23.25
	450	15000(12900)	413(355)	36.34

表 1-2 裸露阀门与保温阀门散热损失比较

直径/mm	介质温度/℃	阀门散热损失/[(W/m)(kcal/h)]		散热损失 相比倍数
		裸露阀门	保温阀门	
100	100	433(372)	163(140)	2.66
	300	2419(2080)	744(640)	3.25
	500	6163(5300)	1751(1540)	3.44
200	100	733(630)	262(225)	2.80
	300	3907(3360)	1203(1035)	3.25
	500	9884(8500)	2826(2430)	3.50
300	100	1122(965)	395(340)	2.84
	300	5870(5050)	1773(1525)	3.31
	500	14534(12500)	4163(3580)	3.49

表 1-3 每对裸露法兰与保温法兰散热损失比较

直径/mm	介质温度/℃	阀门散热损失/(W/m)(kcal/h)		散热损失 相比倍数
		裸露法兰	保温法兰	
100	100	188(162)	23(20)	8.1
	300	1252(1077)	105(90)	11.47
	500	2900(2494)	169(145)	17.20
200	100	341(293)	52(45)	6.51
	300	2302(1980)	221(190)	10.42
	500	5340(4592)	337(290)	15.84
300	100	567(488)	81(70)	6.97
	300	3959(3405)	349(300)	11.35
	500	9152(7871)	517(445)	17.69

建筑方面同样是保温与不保温有着很大的差别,在建筑节能中,日常用能最

大,它包括采暖、制冷、照明、家用电器等,而采暖、制冷空调的节能主要涉及建筑物的外墙、地板、屋顶和隔墙的保温隔热效果,占日用能的 2/3,因此隔热保温是最主要的节能措施。但在以往的投资指导思想上偏重于尽量减省一次性投资,如住宅的外墙一般均为 240mm 标准砖墙,单层玻璃窗等,这样一次性投资虽然降低,但导致传热系数加大,采暖、空调等长年运行费用加大,资料表明,改变这种思路和作法,把总投资略有增加(2%~4%),热耗就可下降 2/3。举例(见表 1-4,表 1-5)如下。

表 1-4 不同保温厚度与一年取暖所需热量关系

地区	厚度/mm 隔热	0	50	100	150	200
	所需热量/kJ	103577	41382	31736	27430	25062
长春	能耗比率/%	100	39.9	30.6	26.4	24.1
	所需热量/kJ	74960	23676	22688	19569	
北京	能耗比率/%	100	39.6	30	26.1	
	所需热量/kJ					

表 1-5 不同保温厚度与年制冷所需热量关系

地区	厚度/mm 隔热	0	50	100	150
	制冷所需热量/kJ	11501	7528	7063	6869
济南	能耗比率/%	100	65.5	61.4	59.6
	制冷所需热量/kJ	21323	15278	14507	
福州	能耗比率/%	100	71.6	68	
	制冷所需热量/kJ				

在热力系统同时还能创造出良好的工作环境,改善劳动条件,保证人身安全。因此国外还把绝热分成功能型、防护保健型等使绝热智能化、人性化。国家电力行业标准 DL/T 5072—1997 规定:管道距离地面或平台的高度小于 2100mm,靠操作平台水平距离小于 750mm 都必须保温。就是从保护人员角度出发的。

在输油管道中防止介质液体冻结,防止外表面结露。

防止火灾。如防火隔断墙、特种防火设施等。

实现建筑物体节能 50% 以上的目标,(北京、上海等地要求达到 65%,2010 年部分地区提高到 75%)提高建筑物体的综合功能等。使建筑物成为节能型、安全型及健康型并智能化。

但是从绝热工程整体看,我国与世界先进国家比较仍然存在着较大的差距,资料表明每生产一美元产值,我国消耗能源是法国的 4.97 倍,日本的 4.43 倍,意大利的 3.95 倍,英国的 2.97 倍,美国的 2.1 倍,印度的 1.65 倍,造成这样的现状,从绝热角度讲大致可归纳到以下四个方面:

(1)从绝热原材料上讲,主要是制造材料质量差,这也是国产产品与国外产

品主要的差距,普遍存在的问题是材料中纤维直径粗,渣球含量较高,制作工艺粗糙。究其原因多为中小企业生产,设备陈旧,管理素质低下,不能求精求质量。建筑物隔热保温上问题更多,甚至根本上就没有保温。

(2)从材料结构上讲:无论粒状料,纤维状料都需要成型才能使用,而这些材料采用的成型结合剂多为物理性混合,采用有机类材料,这种结构的产品无法在较高温度下长期稳定的工作,如岩棉,玻璃棉的黏合剂均为树脂类,高温下很快灰化,导致产品松散、脱落。即便是采用水泥等无机质黏合剂却又使产品容重加大,影响绝热性能。最本质的原因是缺乏科技含量较高的结构方式,导致绝热材料制品一直处于落后地位。

(3)从施工工艺上讲:存在问题的严重性不亚于材料,因此有施工质量占绝热工程总体质量一半的说法。在软质材料施工上的表现为薄厚不均,在硬质材料施工上多表现为接缝处露热、加上存在着裸露部位多,严重的影响了整体绝热效果。这在全国热电厂系统成为普遍现象,例如一台 30 万 kW 机组有不同类型和规格的阀门 1370 个,这些地方保温差,多处裸露,热量损失严重,而且严重影响了工作环境。

热量的传导常用导热方程进行计算:

$$\lambda = a + bt$$

式中: a 为常温下保温材料的导热系数; b 为每升温 1°C 时,导热系数增加的常数,均为保温平均温度。

图 1-1 和图 1-2 为导热方程示意图和导热方程案例。

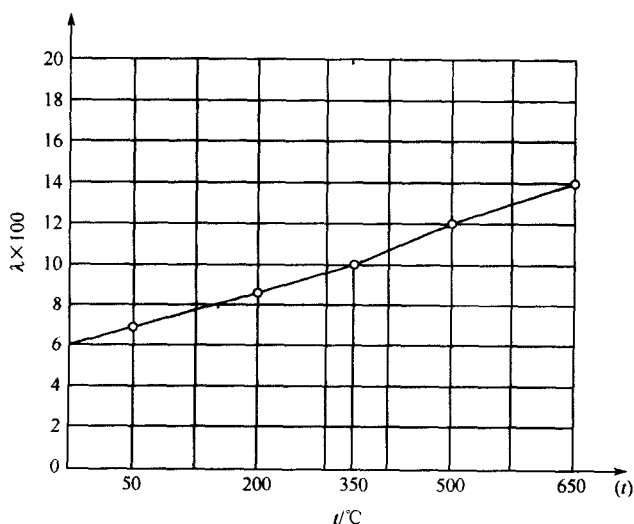


图 1-1 导热方程示意图

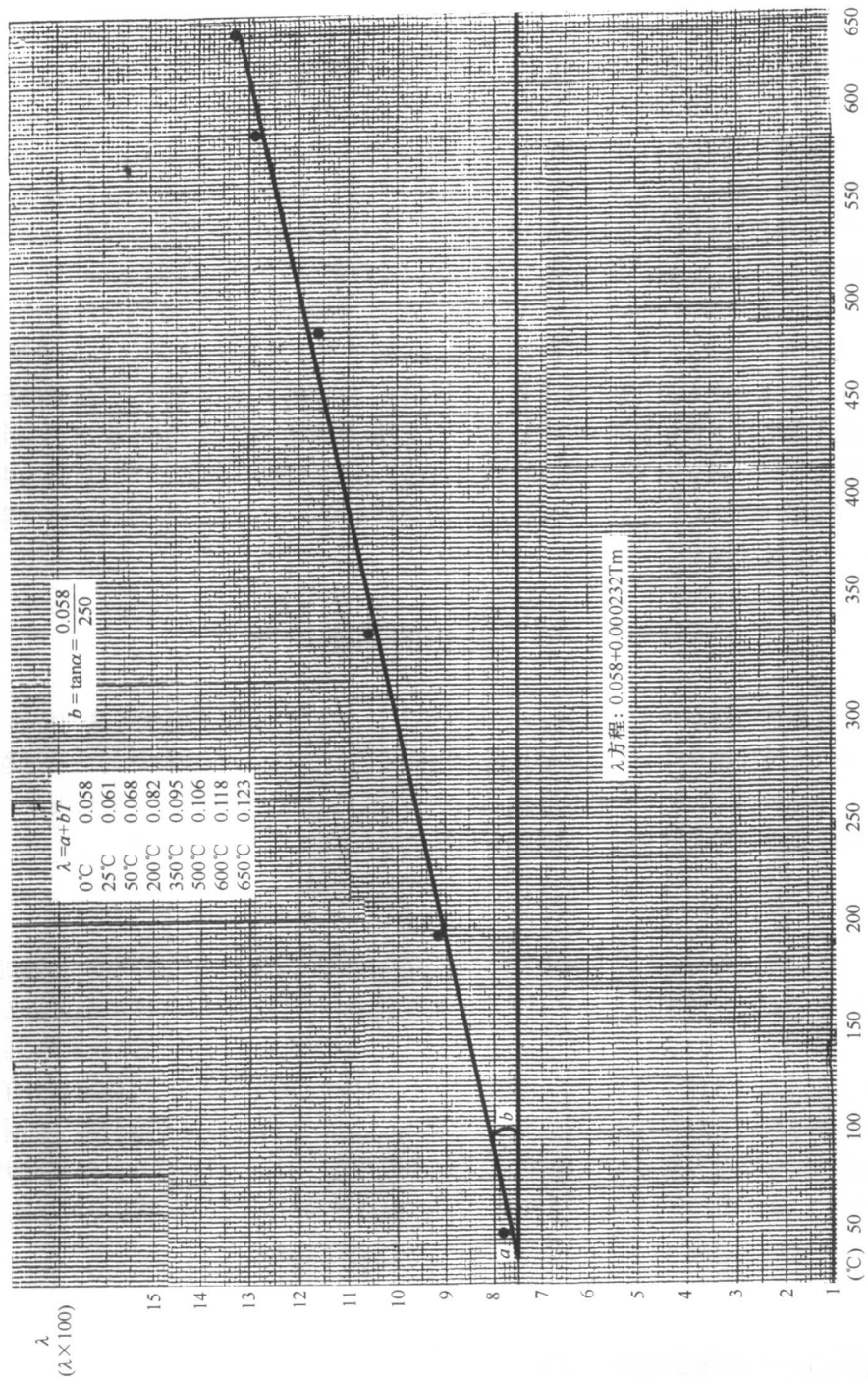


图 1-2 导热方程(案例)

一般情况下,可在 650℃ 范围内选测几个不同的温度的测点进行计算,高温下的值越小越好,低温下 α 值越小越好。此图表选自一例,其测值:50℃ 时为 0.07、200℃ 时为 0.09、350℃ 时为 0.1075、500℃ 时为 0.123、650℃ 时为 0.14。

(4)从设计方面讲:仍然被保守和守旧思想束缚着,缺乏设计理念上的突破,徘徊在“老三件”(岩棉、玻璃棉和硅酸铝棉)的设计与运用中。致使已经出现的新产品、新技术得不到充分的应用与发挥。支吊架部位的绝热至今没有一个较好的设计方案。而噪声隔离设计,防结露设计等都是些没有解决的问题。

当然,近年来在国家提出以设计为突破口,强制推行新型节能材料的推动下,无论从设计上,新材料的开发与应用上,施工工艺规范上,都有了新的进展,国内专家与专业人员,从系统工程要求提出了“免维护工程”的概念,其组成的核心就是在绝热工程中从抓住“设计是根本、材料是保证、施工是关键”提出了一个完整的方案。树立以节能为基础(达到目标)、技术为指导(依据科学)、质量为中心(关键环节)、经济为考核(经济厚度)的全新概念。相信这一系列的变化会带来一个全新的局面。

第二节 绝热的基本原理

绝热是传热学中的重要课题。根据热力学的定律,有温度差就有热的传递,在任何传热的物体中,热量总是从高的物体传向低的物体,在这种热的交换过程中,一般把它划分为三种基本形式,即:热传导、热对流、热辐射。而绝热则是以阻止或减少这种传热能力,达到减少热损失的目的。

一、热传导

热传导或称导热,是指由于物体同热直接接触而发生的热传递现象,是通过物质本身微观粒子的热运动来进行的,这种现象在固体、液体、气体中都可以发生,但单纯的导热只能发生在固体中,如金属主要靠自由电子运动进行导热,非导电的固体和液体主要靠分子、原子在平衡位置附近的振动进行,气体则靠分子热运动时的相互碰撞进行导热。经过壁的导热是由壁的内部热交换产生。固体导体一般分平壁及圆管壁两种,但其导热的原理是一样的,即热流从一侧流向另一侧。实验证明,经过平壁的导热热量与面积,温度差与时间成正比,与壁厚成反比。

法国数学家傅里叶在 1882 年给出下列公式计算热量大小。

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x}$$

式中 q ——热流密度(W/m^2);

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

对于厚度为 dx 的微元体,根据能量守恒原理,左侧导入的热量与微元体产生的热量之和等于微元体内能的变化与右侧导出的热量之和。其中各分项的数据如图 1-3 所示。

左侧导入的热量

$$q_x = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x}$$

内热源产生的热量 $q \cdot dx$

微元体内能的变化

$$\rho C_p = \frac{\partial t}{\partial x} \cdot dx$$

右侧导出的热量

$$q_x + dx = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x+dx} = -\left[\lambda \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right) \cdot dx \right]$$

上四式中 q ——单位体积发热率(W/m^3);

ρ ——材料密度(kg/m^3);

C_p ——材料的比热容 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]。

将上述四个分项代入能量守恒定律表达式得到:

$$q_x + \dot{q} \cdot dx = \rho C_p \frac{\partial t}{\partial x} \cdot dx + q_x + dx - \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + \dot{q} dx =$$

$$\rho C_p \frac{\partial t}{\partial x} \cdot dx - \left[\lambda \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right) \cdot dx \right]$$

即:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial t}{\partial x}$$

若导热系数不随空间变化,上述还可变成:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau}$$

式中 $a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$ 称为热扩散率,对三维空间的导热,上式可写成:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau}$$

对于热力管道而言,轴向导热与横截面导热相比很小,可看成是一维稳定导热,所以,对火电厂热力设备及管道而言,它们的绝热都属于一维稳定导热。

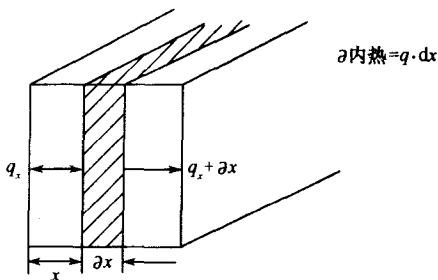


图 1-3 热传导分项数据

二、对流换热

任何流体都会和固体壁相接触,如流体温度高于或低于它所接触的壁面温度,那么两者间将同时产生对流与导热两种方式的热交换,这种过程叫“对流换热”。这在汽轮机内部高温高压蒸汽和气缸缸壁之间的换热,主蒸汽管道、再热蒸汽管道及给水管道内部热介质与管内壁之间的换热,设备及管道绝热层外表面与周围环境空气之间的换热都是这种对流换热现象。

由于引起对流换热原因不同,可分为两类:一类是自然对流,一类是强迫对流。前者是流体冷热不均造成密度不均,如设备及管道绝热外表面与周围环境空气之间的对流。而后者是由水泵、风机等外因造成流体运动而引起,如凝汽器、冷油器等,但两者的换热量都可由下式表示

$$q = a(t_1 - t_2)$$

式中 a ——对流换热系数($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$);

t_1 ——壁面温度;

t_2 ——流体温度。

对流换热系数与流体的物理性质如导热系数、流体密度、比热容、速度等有关,这些因素越大,换热能力越强;而运动黏度大则反而弱一些,当然与液体所处界面的几何形状、流动时与所处界面的相对位置及速度也都有影响。

由于与绝热有关的对流换热主要是热力设备及管道绝热层外表面与周围空气之间的换热,而且火电厂的汽轮机、加热器、除氧器及中小火电机组的锅炉均设置在厂房内,因此,所有热力设备和管道向周围环境的传热均可看成是自然对流换热。对于大型火电机组室外布置的锅炉有风时,视为强制对流换热,但实际计算时仍按近似大空间自然对流换热,准则方程式为:

$$Nu = C_m(G_r \cdot Pr)^n$$

$$Nu = \frac{a \cdot L}{\lambda} \quad G_r = \frac{gL^3 \beta \Delta t}{\nu^2}$$

式中 Nu ——努塞尔数;

C_m, n ——分别为系数和指数(按表 1-6 选取);

G_r ——格拉晓夫数;

Pr ——普朗特数,按定性温度 t_m 查干空气物性参数表,定性温度 t_m 取绝热层外表面空气和周围空气温度的算术平均值;

L ——特性尺度(m),按表 1-6 选取;

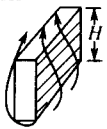
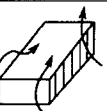
g ——重力加速度(m/s^2);

β ——流体的体胀系数,将空气近似看成理想气体,则 $\beta = 1/T$, T 为热力学温度(K);

ν ——流体的运动黏度(m^2/s);

Δt ——绝热层外表面温度与周围空气温度之差($^{\circ}\text{C}$)。

表 1-6 C_m 和 N 值取法

加热表面形状与位置	图示	系数 C_m 与指数 N			特性尺度 L	$G_r \cdot P_r$ 范围
		流态	C_m	N		
竖平板及竖圆柱		层流	0.59	1/4	高度 H	$10^4 \sim 10^9$
		湍流	0.10	1/3		$10^9 \sim 10^{13}$
横圆柱		层流	0.53	1/4	外径 d	$10^4 \sim 10^9$
		湍流	0.13	1/3		$10^9 \sim 10^{12}$
水平板热面朝上		层流	0.54	1/4	正方形取边长、长方形两边平均值 $0.9d$, 狭长条取和平短边	$10^5 \sim 10^7$
		湍流	0.14	1/3		$2 \times 10^7 \sim 3 \times 10^{10}$
水平板热面朝下		层流	0.27	1/4		$3 \times 10^5 \sim 3 \times 10^{10}$

对于少数绝热层外表面的空气流动受到周围其他设备或管道影响的,可视为有限空间的自然对流换热,从表 1-7 中给出。

表 1-7 常用流体换热系数变化范围

流体种类及换热方式	换热系数大致范围/($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)
空气自然对流	1.163~11.63(1~10)
空气强制对流	11.63~58.14(10~50)
水自然对流	116.3~1163(100~1000)
加热与冷却水(强制对流)	233~11628(200~10000)
水沸腾	581~52326(500~45000)
水蒸气膜状凝结	4651~17442(4000~15000)
水蒸气球状凝结	46512~139535(40000~120000)
有机物蒸气凝结	581~2326(500~2000)
过热水蒸气强制对流	581~3488(500~3000)

对于少数绝热层外表面空气流动受到周围其他设备或管道影响的设备或管道表面,它们的散热过程可视为有限空间的自然对流换热,换热量的计算公式如

表 1-8 所列。

表 1-8 有限空间自然对流换热计算式

夹层形状	图示	换热量	当量导热系数	适用范围	流态
竖夹层 (当 $\delta/h > 0.33$ 时,可按大空间计算)		$Q = \lambda_c / \delta (t_{w1} - t_{w2})$ Q 为单位面积的热流量; λ_c 为当量导热系数; δ 为夹层厚度; t_{w1} 为热面温度; t_{w2} 为冷面温度	$\lambda_c / \lambda = 1, \lambda_c / \lambda = 0.18 Gr \delta^{1/4} (\delta/n)^{1/9}$ 其中, $Gr \delta = (gb \delta^3 \Delta t) / \nu 2 \lambda_c / \lambda = 0.065 Gr \delta^{1/3} (s/h)^{1/9}$	$Gr \delta < 2000$ 空气 $Gr \delta = 2 \times 10^4$ $\sim 2 \times 10^4$ 空气 $Gr \delta = 2 \times 10^5$ $\sim 1.1 \times 10^7$ 空气	几乎不流动 层流 湍流
横夹层 (热面在下面)			$\lambda_c / \lambda = 0.195$ $Gr_s^{1/4} \lambda_c / \lambda = 0.068 Gr_s^{1/3}$ $\lambda_c / \lambda = 0.037$ $(Gr \delta \cdot Pr^{1.65})^{1/3}$	$Gr = 10^4 \sim 4 \times 10^5$ 空气 $Gr > 4 \times 10^5$ 空气 $Gr (Gr \delta \cdot Pr^{1.65}) > 1.60 \times 10^5$	层流 紊流 湍流

三、热辐射

任何物体都具有吸收或放射辐射能的特性,一物体辐射能达到另一物体时,另一物体吸收其一部分,其余部分也可能被反射,这种吸收、反射,透过的辐射同总的辐射能之比,分别叫该物体的吸收率、反射率和透过率。这就是物体全部吸收了投射到该物体上的辐射能,这种物体叫“绝热黑体”,实际在工程上并不存在真正的黑体,物体吸收率均小于一,任何物体在单位时间内从单位面积上辐射出的辐射能叫辐射力。它决定于物体的性质,表示状况及其温度,黑度越大,则物体的辐射力越接近于同温度下绝对黑体的辐射力。磨光的金属表面黑度较小,表面粗糙或氧化的金属表面则黑度较大,见 1-9 表。

表 1-9 材料表面的法向黑度

材料类别和表面状况	温度/℃	黑度	材料类别和表面状况	温度/℃	黑度
铬镍合金	52~1034	0.64~0.76	严重氧化铝	50~500	0.2~0.3
镀锌铁皮	38	0.23	石棉纸	40~400	0.93~0.94
具有光滑的氧化层表皮的铁板	20	0.82	耐火砖	500~1000	0.8~0.9