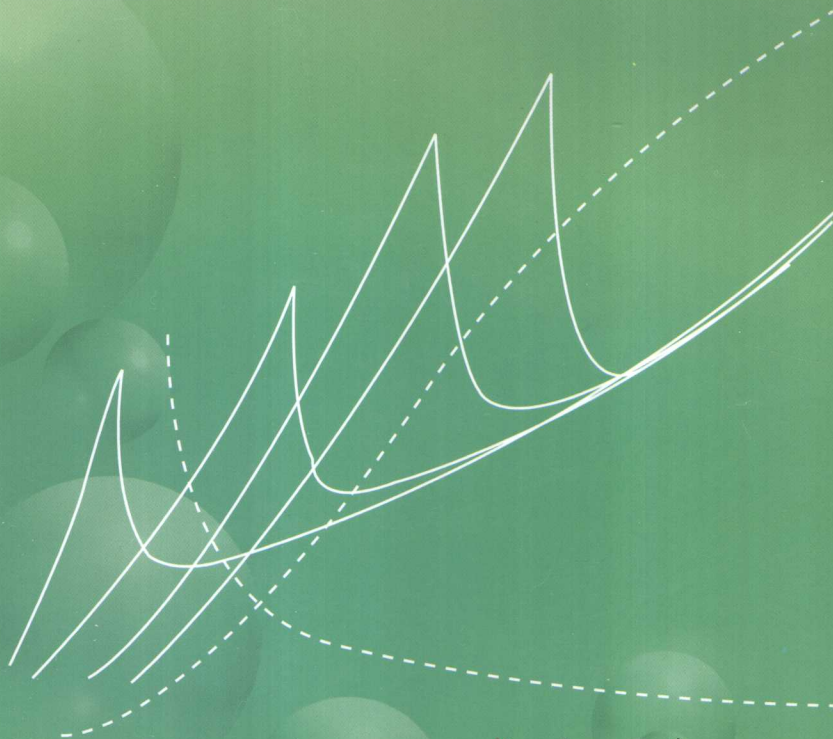




低温技术与设备丛书

低温传热 与设备

陈国邦 金滔 汤珂 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

低温技术与设备丛书

低温传热与设备

陈国邦 金滔 汤珂 编著



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书主要介绍在低于 120K 温度范围内出现的特殊传热问题,主要涉及空气分离装置、液化天然气系统、运载火箭推进技术的地面系统以及回热式低温制冷技术中出现的与常温传热现象不同的一系列问题;探求强化传热和节能的方法和途径;介绍低温换热设备传热设计的计算方法及示例。全书共 6 章,包括低温传热学基础、相变传热、低温绝热技术、传热过程中的有用功损失与熵产、低温热交换器及交变流动回热器。在内容上尽量避免与普通传热学的重复,适用于具有大专文化程度以上的从事低温工程工作的相关技术人员、管理人员和营销人员使用,也可作为研究生及高年级大学生的选修教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

低温传热与设备/陈国邦,金滔,汤珂编著. —北京:
国防工业出版社, 2008. 5
(低温技术与设备丛书)
ISBN 978-7-118-05441-5

I. 低... II. ①陈... ②金... ③汤... III. 低温-传热
IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 173350 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)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 19 字数 470 千字

2008 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 36.00 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

《低温技术与设备丛书》编委会

主 编 陈国邦 王如竹 华泽钊

委 员 (按姓氏笔画排序)

王如竹 王惠龄 华泽钊 陈国邦

吴裕远 罗二仓 张 鹏

序

当今低温工程的应用领域包含了航空航天、高能物理、电子技术、机械系统、空间模拟、红外遥感、生物医学、食品加工、材料回收、过程工业等各个方面。可以说,低温技术已经渗透到了国民经济的许多领域。

低温技术的发展可以追溯到 1877 年,是 Cailletet 和 Pictet 液化了氧气。1879 年 Linde 创立了 Linde 公司,使得空气的液化和分离变成了产业,并在许多工业领域以及基础研究中获得了应用。

在此之前,一般工业气体的液化可以通过蒸气压缩式制冷来实现,而对于那些临界温度低于 273K 的气体,则在室温下不可能用蒸气压缩的方法使之冷凝。后来的研究发现,这些“永久性气体”需要采用具有预冷的气体绝热膨胀制冷,或者绝热放气制冷,或者气体多级节流等方法来实现液化。可见低温气体的液化制冷方法与普通制制冷流体不同,但是低温流体与普通制冷工质之间并没有严格的分界线。根据第 13 届国际制冷大会(1971)的建议,将沸点低于 120K 左右的流体定义为低温流体。当然,获得低温需要消耗更多的功,要获得纯质的低温气体或液体(氮、氧、氢、氦等)需要专门的气体液化和分离技术,并涉及低温绝热问题。总之,低温的获得、保持和应用构成了低温系统的三个要素。

我国低温技术的发展已有 50 多年历史,它与我国的国防工业、航天技术、冶金工业及能源工业关系密切,发挥了重要作用。改革开放后,由于电子工业、化学工业等现代工业的需求,我国气体工业得到了飞速发展。最近几年则由于天然气资源的开发和利用,液化天然气工业得到了新的发展机遇。

国民经济和国防技术的需求,以及从事低温技术研究和应用的技术人员的明显增长,迫需要相应的低温技术参考书籍,作为学校教材的补充或满足深入研究的向导。《低温技术与设备丛书》正是在这个背景下应运而生的,它包括了《低温流体热物理性质》、《氮-4 和氮-3 及其应用》、《热声制冷技术原理及应用》、《低温工业气体制取技术及应用》、《超导应用低温技术》、《低温传热与设备》等。可以看出,这些新书既是一般的低温原理与技术教材的深化,又是对现有低温图书的补缺。

应国防工业出版社之约,我们组织了这套丛书,并分别审查了有关书稿。书稿作者都是工作在低温技术与设备领域的研究人员,不乏资深教授和卓有成绩的

青年学者,例如,西安交通大学的吴裕远教授长期从事气体液化和分离的研究和教学工作,对国内外低温气体行业的发展有深刻的把握;上海交通大学的张鹏教授从事低温液氮研究近10年,对氮-3和氮-4的重要性和规律性有较深刻的认识;中国科学院理化技术研究所的罗二仓研究员执着研究热声制冷多年,近年来在热声发动机及其与脉管制冷机结合制冷方面取得了一系列显著成绩;华中科技大学的王惠龄教授长期从事低温超导的相关理论基础及其实验技术工作,曾经在此领域发表了系列研究论文;浙江大学陈国邦教授长期从事低温制冷研究,在此过程中积累了低温流体热物理性质的大量数据,并形成了具有自己特色的低温流体热物理性质处理方法,使得大多数的低温流体热物理性质有案可查。在与低温流体相关的两本书中,浙江大学的黄永华博士等在数据整理以及模型化、图形化和数据化方面做了深入的工作,这些工作使得数据不再单调枯燥,并使查找、使用低温数据变得容易。

相信《低温技术与设备丛书》将为我国低温技术研究和设计人员提供不少方便,也会给我国低温领域的研究生和教师提供很多有价值的参考。诚然这些书不可能提供低温领域的所有信息,但是它们却为低温领域的广大读者提供了方便的工具。

《低温技术与设备丛书》编委会

2005年6月

前 言

随着我国航天、超导、高能物理等高新科技及冶金、化工、能源等现代工业的快速发展,低温技术的应用和发展正面临着新的机遇和挑战。例如,大型空气分离装置的制氧容量已经发展到 $80000\text{m}^3/\text{h}$ 的等级;液化天然气工业要求提供具有 10万 m^3 以上容量的 LNG 储罐、运输槽船及其配套的气化设备;新一代大型运载火箭技术则要求提供规模液氢和液氧的无损储运和快速输送设备。在另一方面,由于最近 10 余年来小型低温制冷机研究的突破性进展,适于液氮温区直至液氦温区工作的回热式低温制冷机已经在半导体工业、大型医疗仪器、空间技术和许多高科技部门获得广泛应用。因此,对于其中涉及的低温传热问题的研究也得到了快速发展,对在低温传热过程中出现的一些特殊现象和物质的特殊性质的认识也日趋深入和完善。例如,在低温下某些金属的热导率会发生数量级的改变,某些流体的比热容将发生显著变化。由于低温流体的临界压力要比普通流体低得多,在近临界和超临界状态下的对流换热将会出现得更加频繁和显著。由于低温流体的低沸点和高的显热与潜热比值,用于低温系统的多屏绝热的表观热导率大概为室温下普通绝热结构的万分之一,其中涉及稀薄气体导热及辐射换热的微尺寸效应。对于回热器低温制冷机来说,交变流动条件下的传热与流动问题是获得深低温高效率制冷的关键因素之一。

目前国内中文版的低温传热学方面的书要么是出版年代比较久远,要么是内容过于专题化且面不够宽。因此,本书的目标是在一般传热学的基础上,就低温工程中有关传热的特殊问题进行探讨,并参考国外相关著作的特点,引用其中的精华,编写成一本适用面较广的专业书籍。内容的选择尽量避免了与普通传热学的重复,适用于具有大专文化程度以上的从事低温工程的相关技术人员、管理人员和营销人员使用,也可作为可作为研究生及高年级大学生的选修教材和参考书。

本书由陈国邦主编,编写内容的主要分工为:金滔负责编写第 1 章和第 2 章等有关低温传热学的内容,陈国邦和汤珂负责编写第 3 章、第 4 章、第 5 章以及第 6 章。

本书的编写参考了有关国外专著,特别是 R. F. Barron 教授编著的“Cryogenic Heat Transfer”(1999, Taylor & Francis)和 A. Bejan 教授编著的“Entropy Generation Through Heat and Fluid Flow”(1982, John Wiley & Sons, Inc.)等书,并向读者介绍了其中的精华部分。

本书的编写工作得到了浙江大学制冷与低温研究所陈光明、邱利民、甘智华等老师与硕士生李金寿、寿琳、姜慧明、汪世清、肖勇及鲍君香、火明等的支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。特别值得感谢的是本书主编在 30 年前受到浙江大学化学工程系传热学教师陈维钮教授的指导和教诲,并于 1978 年在《深冷技术》上合作发表了“低温换热器”一文。

由于水平与时间的限制,书中的缺点和谬误在所难免,敬请读者批评指正。

编著者

2007 年 8 月 1 日

目 录

第1章 低温传热学基础	1
1.1 热传导	1
1.1.1 基本控制方程	1
1.1.2 一维稳态导热	2
1.1.3 复合材料的导热	4
1.1.4 接触热阻	7
1.1.5 通过肋片的导热	10
1.1.6 低温下霜的性质	12
1.1.7 固体表面镀层的冷却	14
1.1.8 二维导热和三维导热	18
1.1.9 瞬态导热	23
1.1.10 低温流体储存容器的冷却	26
1.2 对流传热	29
1.2.1 控制方程	30
1.2.2 圆管内强迫对流传热	31
1.2.3 非圆管传热	35
1.2.4 管外强迫对流传热	37
1.2.5 平板自由对流	42
1.2.6 水平圆管自由对流	43
1.2.7 有限空间自然对流	44
1.2.8 近临界区的传热	46
1.2.9 近临界区的传热关联式	49
1.2.10 卡皮查热导	50
1.3 辐射换热	54
1.3.1 黑体辐射	54
1.3.2 热辐射特性	56
1.3.3 辐射角系数	60
1.3.4 两灰表面间的辐射换热	63
1.3.5 封闭腔的网络方法	64
1.3.6 液化天然气火焰辐射能	69
参考文献	71
第2章 相变传热	72

2.1	两相流动的流态	72
2.2	两相流的压降	75
2.2.1	洛克哈特—马蒂内利关联式	76
2.2.2	均匀流动模型	81
2.3	沸腾传热	83
2.3.1	池内沸腾	83
2.3.2	强制对流沸腾	91
2.4	凝结传热	94
2.4.1	管外凝结	94
2.4.2	水平管内凝结	97
2.5	低温冷冻	101
2.6	固—液(浆)流动及传热	107
	参考文献	111
第3章	低温绝热技术	112
3.1	表观热导率	112
3.2	膨胀泡沫绝热	113
3.2.1	绝热机理及影响因素	113
3.2.2	典型的膨胀泡沫绝热材料	115
3.3	高真空绝热	117
3.3.1	自由分子导热	117
3.3.2	辐射屏	122
3.3.3	液氮保护屏	125
3.3.4	蒸汽冷却屏	127
3.4	粉末绝热	128
3.4.1	颗粒材料的热传导	128
3.4.2	充气粉末绝热	132
3.4.3	充气粉末绝热结构及计算	135
3.5	真空粉末绝热	137
3.5.1	绝热机理及计算	137
3.5.2	影响真空粉末绝热性能的因素	139
3.5.3	添加金属粉末	144
3.6	真空多层绝热	146
3.6.1	多层绝热组成特点	146
3.6.2	影响真空多层绝热性能的因素	147
3.7	低温绝热性能比较	151
	参考文献	151
第4章	传热过程中的有用功损失与熵产	153
4.1	不可逆系统和过程中的有用功与熵产	153

4.1.1	不稳定流动过程	153
4.1.2	稳定流动过程	154
4.1.3	非零温差传热	156
4.1.4	有摩擦流动	156
4.2	对流传热	157
4.2.1	局部熵产速率	158
4.2.2	流体摩擦与传热的不可逆性	160
4.2.3	内部流动	161
4.2.4	外部流动	164
4.3	传热强化技术	167
4.3.1	熵产分析	167
4.3.2	粗糙化表面	169
4.3.3	旋流促进器	171
4.3.4	扩展表面	173
	参考文献	175
第5章	低温热交换器	176
5.1	低温换热设备的设计特点	176
5.1.1	低温热交换器的效率	176
5.1.2	最小传热单元数设计法	178
5.1.3	流体比热容变化对换热的影响	183
5.1.4	低温换热器中的冷量损失问题	187
5.1.5	低温热交换器的紧凑性	194
5.1.6	低温换热器的结构材料	194
5.2	绕管式换热器	195
5.2.1	绕管换热器的几何参数	196
5.2.2	绕管换热器的给热系数	199
5.2.3	绕管式换热器的流体阻力	202
5.2.4	绕管式换热器的工艺设计	205
5.2.5	吉奥克—汉普逊换热器计算实例	207
5.2.6	管式换热器的传热强化	212
5.3	板翅式换热器	220
5.3.1	板翅式换热器的结构特点	220
5.3.2	板翅式换热器的传热机理	222
5.3.3	板翅式换热器的流体阻力和给热系数	229
5.3.4	板翅式换热器的计算步骤	232
5.3.5	板翅式换热器中的压降和质量流率	238
5.3.6	孔板式换热器	244
	参考文献	250

第6章 交变流动回热器	252
6.1 回热器的特点及其在低温领域的应用	252
6.1.1 回热器的特点	252
6.1.2 回热器在低温领域的应用	252
6.1.3 回热器在低温应用中的性能评价	254
6.2 回热器填料	255
6.2.1 回热器填料的几何结构	255
6.2.2 回热器填料的传热与流阻特性	259
6.2.3 回热器填料的热物性	261
6.3 回热器的设计计算方法	264
6.3.1 回热器的传统计算方法	265
6.3.2 回热器的模拟计算方法	277
6.3.3 热声理论与回热器计算	287
参考文献	292

第 1 章 低温传热学基础

众所周知,任何系统中只要存在温度差,或两个不同温度的系统发生接触,都会产生热量的传递。在工程领域里进行换热设备设计时,往往要计算单位时间内所传递的热量和确定物体温度变化的规律。根据换热过程的机理,传热具有 3 种不同的方式:热传导、热对流和热辐射。在工程实际中,热量很少以单一方式进行传递,而往往是几种方式的综合。不过,在研究传热过程时,可把这 3 种传热方式分别进行分析,在此基础上,分清哪种传热方式处于主导地位。

本章概要介绍热传导、热对流和热辐射的基本定律和计算公式,重点讨论它们在低温下的特征及其在低温工程中的应用。

1.1 热传导

当把常温下有效的热传导模型和方法应用到低温工况时,可能会缺乏足够的精度而不再适用。本节将对低温应用领域重要而又特殊的一些热传导问题进行讨论。

1.1.1 基本控制方程

导热的基本控制方程包括傅里叶方程和温度场方程。一旦温度和坐标 x 间的关系确定,就可以联立傅里叶方程求得 x 方向的热流。傅里叶方程的表达式为

$$Q = -\lambda_t A \frac{dT}{dx} \quad (1-1)$$

温度场方程由能量守恒定律和傅里叶方程推导而得,通常可以写成下列形式:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_t \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_t \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_t \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}_g = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1-2)$$

式中: λ 为热导率; A 为面积; T 为温度; ρ 为密度; c 为比热容; $\dot{q}_g$ 为热源,其实质是单位体积内由电流、磁滞等引起的内热源。

方程(1-2)左边的前 3 项分别表示 x 、 y 、 z 方向的净导热量,右边项则表示物体的内能变化。一旦解出温度场方程,就可以得到温度的空间和时间分布情况。

对于稳态工况,温度与时间无关,没有内热源的温度场方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_t \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_t \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_t \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (1-3)$$

除低温工况外,热导率通常可被视为常数。此时,稳态温度场方程变为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (1-4)$$

这就是人们所熟知的拉普拉斯方程。

1.1.2 一维稳态导热

低温传热中的许多导热问题都可用一维模型求解,例如,低温流体储存容器通过支承系统的传热以及杜瓦瓶绝热层的传热。对于一维稳态导热,应用傅里叶方程有

$$Q \frac{dx}{A(x)} = -\lambda_i dT \quad (1-5)$$

对于换热率(单位时间换热量)为常数的稳态工况,可对式(1-5)进行积分,得

$$Q \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{1}{A} \right) dx = - \int_{T_H}^{T_C} \lambda_i dT = + \int_{T_C}^{T_H} \lambda_i dT \quad (1-6)$$

式中: x_1 为热表面(温度为 T_H) 的坐标; x_2 为冷表面(温度为 T_C) 的坐标。

式(1-6)左边的积分仅涉及到坐标 x 和导热面积 A ,而导热面积也是坐标 x 的函数,所以,该积分只取决于物体的几何尺寸或者几何形状。定义形状因子 S 为

$$\frac{1}{S} = \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{1}{A} \right) dx \quad (1-7)$$

利用式(1-7)可计算不同几何结构的形状因子。例如,平壁面 $A(x) = \text{常数}$,其形状因子为

$$S = \frac{A}{\Delta x} \quad (1-8)$$

式中: Δx 为壁面或平板的厚度。

中空长圆柱体的导热面积 $A(r) = 2\pi rL$,结合式(1-7)可得其形状因子为

$$S = \frac{2\pi L}{\ln(D_0/D_1)} \quad (1-9)$$

式中: L 为圆柱体的长度; D_0 为圆柱体的外径; D_1 为圆柱体的内径。

表1-1给出了多种几何形状物体的导热形状因子表达式,图1-1给出了对应形状的示意图。

表 1-1 导热形状因子表达式

序号	几何形状	形状因子表达式
1	平壁面或平板	$S = \frac{A}{\Delta x}$
2	中空圆柱体	$S = \frac{2\pi L}{\ln(D_0/D_1)}$
3	中空球体	$S = \frac{2\pi D_0 D_i}{D_0 - D_i}$
4	垂直于半无限大物体的等温圆柱体	$S = \frac{2\pi L}{\ln(4L/D)}$
5	埋于半无限大物体中的等温圆柱体	$S = \frac{2\pi L}{\text{arcosh}(2H/D)}$
6	埋于半无限大物体中的等温球体	$S = \frac{8\pi D}{1 - (D/4H)}$
7	置于大平板中心线上的圆柱体	$S = \frac{2\pi L}{\ln(4H/D)}$

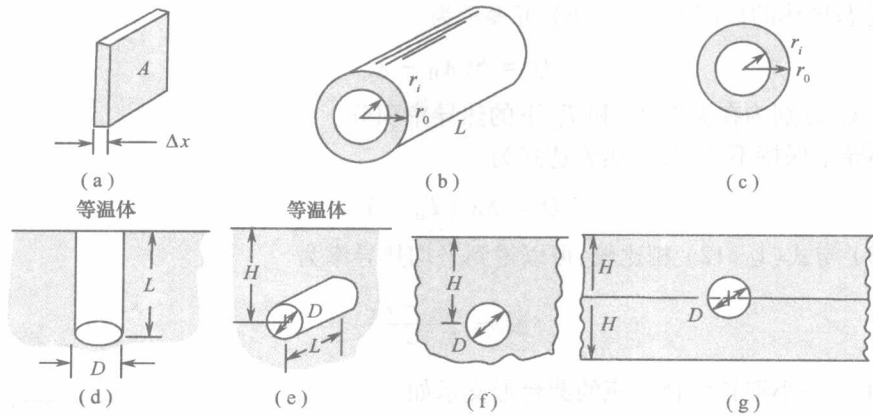


图 1-1 表 1-1 中所对应的几何形状示意图

(a) 平板; (b) 中空圆柱体; (c) 中空球体; (d) 垂直于半无限大物体的等温圆柱体;

(e) 埋于半无限大物体中的等温圆柱体; (f) 埋于半无限大物体中的等温球体; (g) 置于大平板中心线上的圆柱体。

式(1-6) 右边的积分可写成两项积分之差,即

$$\int_{T_c}^{T_H} \lambda_t dT = \int_0^{T_H} \lambda_t dT - \int_0^{T_c} \lambda_t dT \tag{1-10}$$

定义热导率积分 $\lambda(T)$ 为

$$\lambda(T) = \int_0^T \lambda_t dT \tag{1-11}$$

表 1-2 给出了几种固体材料热导率积分式的值。如果给出热导率随温度变化的数学函数,就可以得到热导率积分的解析式。

表 1-2 几种材料的热导率($\lambda_t, W/(m \cdot K)$) 和热导率积分($\lambda, W/m$) 的值

温度 /K	铝合金 (6063-T5)		铍铜合金		碳钢 (C1020)		不锈钢 (304)		蒙乃尔合金		氟塑料 (特氟隆)		玻璃	
	λ_t	λ	λ_t	λ	λ_t	λ	λ_t	λ	λ_t	λ	λ_t	λ	λ_t	λ
4	34	0	1.9	0	3.0	0	0.24	0	0.43	0	0.046	0.0	0.097	0.00
10	86	360	4.8	19	11.5	43	0.77	2.9	1.74	6	0.096	0.44	0.120	0.68
20	170	1650	10.6	95	24.0	222	1.95	16.3	4.30	36	0.141	1.64	0.146	2.00
30	230	3650	16.2	229	32.0	502	3.30	42.4	6.90	93	0.174	3.23	0.190	3.68
40	270	6200	21.0	415	38.6	867	4.70	82.4	9.00	173	0.193	5.08	0.24	5.86
50	280	8950	26.1	650	47.6	1310	5.80	135	10.95	273	0.208	7.16	0.29	8.46
60	270	11700	30.0	930	53.6	1810	6.80	198	12.09	368	0.219	9.36	0.34	11.5
70	248	14300	33.7	1250	57.5	2360	7.60	270	13.06	513	0.228	11.6	0.39	15.1
80	230	16700	37.0	1600	60.0	2950	8.26	349	13.90	647	0.235	13.9	0.44	19.4
90	222	19000	40.1	1990	61.8	3550	8.86	436	14.63	791	0.241	16.3	0.50	24.0
100	216	21100	43.0	2400	62.9	4170	9.40	528	15.27	940	0.245	18.7	0.55	29.2
120	207	25300	48.4	3300	64.1	5450	10.36	726	16.26	1260	0.251	23.7	0.64	40.8
140	201	29300	53.3	4320	64.6	6750	11.17	939	17.34	1590	0.255	28.7	0.73	54.2
160	200	33300	57.6	5440	64.8	8050	11.86	1170	18.25	1950	0.257	33.8	0.79	64.4
180	200	37300	61.5	6640	64.9	9350	12.47	1410	19.02	2320	0.258	39.0	0.85	85.8
200	200	41300	65.0	7910	65.0	10700	13.00	1660	19.69	2710	0.259	44.2	0.90	103.0
250	200	51300	72.4	11300	65.0	13900	14.07	2340	21.02	3730	0.260	57.2	0.98	150.0
300	200	61300	78.5	15000	65.0	17200	14.90	3060	22.0	4800	0.260	70.2	1.02	199.0

注:数值来源于 Stewart and Johnson 1961

一维稳态导热的控制方程(1-6)可表示为

$$Q = S(\lambda_H - \lambda_C) \quad (1-12)$$

式中: λ_H 和 λ_C 分别为在温度 T_H 和 T_C 下的热导率积分。

假设热导率保持不变,其换热表达式为

$$Q = S\lambda_t(T_H - T_C) \quad (1-13)$$

把式(1-13)与式(1-12)相比较,可以得到平均热导率为

$$\lambda_t = \frac{\lambda_H - \lambda_C}{T_H - T_C} \quad (1-14)$$

例 1-1 一小型长颈杜瓦瓶的圆台形支承如图 1-2 所示,小头端的直径 12mm,温度 90K;大头端的直径 36mm,温度 300K;支承高 48mm,材料为特氟隆。试计算通过支承的热流率。

在任意坐标 x 处,绝热层的横截面积表达式为

$$A(x) = \pi[r_1 + (r_2 - r_1)(x/L)]^2$$

式中: r_1 为小头端($x = 0$)的半径; r_2 为大头端($x = L$)的半径。

利用式(1-7)可计算支承的形状因子:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{\pi} \int_0^L \frac{dx}{[r_1 + (r_2 - r_1)(x/L)]^2} = \frac{L}{\pi(r_2 - r_1)} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{L}{\pi r_1 r_2}$$

于是,形状因子为

$$S = \frac{\pi D_1 D_2}{4L}$$

式中: $D_1 = 2r_1, D_2 = 2r_2$ 。代入各变量的数值得

$$S = \frac{\pi \times 12 \times 36}{4 \times 48} = 7.07(\text{mm})$$

查表 1-2,可得相应条件下特氟隆的热导率积分值:

当 $T_H = 300\text{K}$ 时, $\lambda_H = 70.2\text{W/m}$; 当 $T_C = 80\text{K}$ 时, $\lambda_C = 16.3\text{W/m}$ 。

代入式(1-12),得到热流率为

$$Q = S(\lambda_H - \lambda_C) = 7.07 \times 10^{-3} \times (70.2 - 16.3) = 0.381(\text{W})$$

1.1.3 复合材料的导热

从一维导热傅里叶方程的形式可以看到,热传递和电流传递之间存在相似性。根据式(1-13)有

$$Q = \frac{T_H - T_C}{1/S\lambda_m} = \frac{\Delta T}{R_k} \quad (1-15)$$

式中: $R_k = 1/S\lambda_m$ 为热阻。式(1-15)和欧姆定律具有完全一致的数学形式:

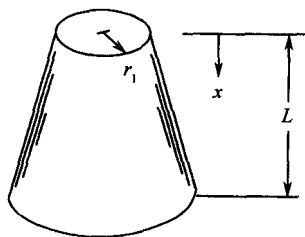


图 1-2 小型长颈杜瓦支承结构示意图

$$I = \frac{\Delta E}{R_E} \quad (1-16)$$

式中: R_E 为电阻; ΔE 为电压差, 与热系统中的温差相对应。然而, 在热系统中热阻实际上是温度的函数。该特征意味着在求解低温下复合材料的导热问题时需要用迭代方法。

图 1-3 为复合结构平壁或平板发生的串联传热过程(即热量依次传过单元 1、单元 2 和单元 3)。如果经过每个单元的热流率相等, 则可以得到系统的总热阻为

$$R_0 = R_1 + R_2 + R_3 \quad (1-17)$$

如果 3 个导热单元是并联的, 即每个单元两端的温差相等, 那么总热阻为

$$1/R_0 = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 \quad (1-18)$$

因为热导率(或热阻)是温度的函数, 上述两个总热阻的表达式尽管从数学上来说是正确的, 但是并不能直接利用这些公式进行计算。

而对于那些表面存在热对流的系统而言, 同样可以应用比拟电流传递的方法求得对流换热热阻, 即

$$R = \frac{1}{h_c A} \quad (1-19)$$

式中: h_c 为对流换热系数; A 为与流体相接触的面积。

例 1-2 复合支承构件在低温容器中得到广泛应用。图 1-4 所示的复合低温支承结构由两部分组成: 外径 33.4mm、壁厚 1.65mm、长 914mm 的不锈钢管; 外径 38.1mm、壁厚 3.18mm、长 152.4mm 的玻璃钢管。不锈钢的热导率 $\lambda_1 = \lambda_0 \ln(T/T_0)$, 其中 $\lambda_0 = 5.08 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $T_0 = 15.65 \text{ K}$ 。玻璃钢的热导率 $\lambda_2 = a(l + bT)$, 其中 $a = 0.2726 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $b = 0.6354 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 。试计算热端温度 $T_H = 300 \text{ K}$, 冷端温度 $T_C = 80 \text{ K}$ 下系统的导热热量。

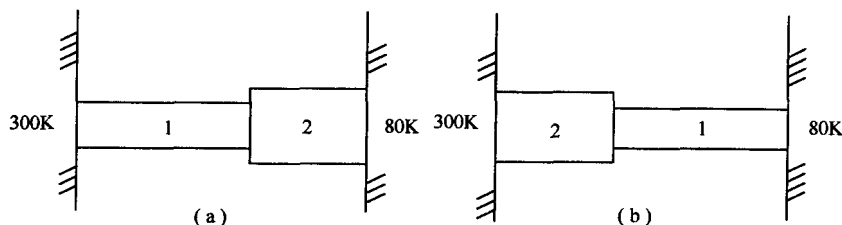


图 1-4 复合低温支承结构

材料 1: 不锈钢, 材料 2: 玻璃钢。

(a) 不锈钢在热端; (b) 不锈钢在冷端。

两管端部导热面积分别为

$$A_1 = \pi(D_0 - t)t = \pi \times (33.4 - 1.65) \times 1.65 = 164.6 (\text{mm}^2)$$

$$A_2 = \pi \times (38.1 - 3.18) \times 3.18 = 348.9 (\text{mm}^2)$$

两管的形状因子分别为

$$S_1 = \frac{A_1}{L_1} = \frac{164.6}{914} = 0.1801(\text{mm})$$

$$S_2 = \frac{348.9}{152.4} = 2.289(\text{mm})$$

不锈钢的热导率积分为

$$\lambda(T) = \int_{T_c}^T \lambda_0 \ln(T/T_0) dT = \lambda_0 [T \ln(T/T_0) - (T - T_0)]$$

玻璃钢的热导率积分为

$$\lambda(T) = \int_0^T a(1 + bT) dT = a[1 + (b/2)T]T$$

由于通过两管的换热率是相等的,所以,通过支承系统的换热率为

$$Q = S_1(\lambda_{1,H} - \lambda_{1,I}) = S_2(\lambda_{2,I} - \lambda_{2,C})$$

式中:下标 I 表示界面温度为 T_I 下材料的热导率积分值。

由于不能显式确定界面的温度,需用迭代法进行求解。假设界面温度初值为 $T_I = 254.3\text{K}$, 对应的热导率积分为

$$\lambda_{1,H} = \lambda_1(300\text{K}) = 5.08 \times [300 \ln(300/15.65) - (300 - 15.65)] = 3056.3(\text{W/m})$$

$$\lambda_{1,I} = \lambda_1(254.3\text{K}) = 2389.4(\text{W/m})$$

$$\lambda_{2,I} = \lambda_2(254.3\text{K}) = 0.2726 \times 254.3 \times [1 + (1/2) \times 0.6354 \times 10^{-3} \times 254.3] = 74.92(\text{W/m})$$

$$\lambda_{2,C} = \lambda_2(80\text{K}) = 22.36\text{W/m}$$

根据式(1-13)可计算出通过每根管的热流率分别为

$$Q_1 = S_1(\lambda_{1,H} - \lambda_{1,I}) = 0.1801 \times 10^{-3} \times (3056.3 - 2389.4) = 0.1201(\text{W})$$

$$Q_2 = S_2(\lambda_{2,I} - \lambda_{2,C}) = 2.289 \times 10^{-3} \times (74.92 - 22.46) = 0.1201(\text{W})$$

可见,当界面温度为 254.3K 时,通过每个单元的换热率是相等的,因此系统热流率即为 0.1201W 。

如果假设的初值不合适,那么 Q_1 和 Q_2 的值很有可能不相等。这种情况下,需要重新假设界面温度,直到找到合适的界面温度使 $Q_1 = Q_2$ 。求解此类迭代问题有许多种数值算法,包括简单而有效的牛顿算法。

假设把支承系统的排列方式改变一下,不锈钢管置于近冷端,玻璃钢管则置于近热端,如图 1-4(b) 所示。形状因子没有变化,但是热导率的积分却并不相同。

假设界面温度 $T_I = 142.8\text{K}$, 图 1-4(b) 所示结构下的热导率积分为

$$\lambda_{1,C} = \lambda_1(80\text{K}) = 336.17\text{W/m}$$

$$\lambda_{1,I} = \lambda_1(142.8\text{K}) = 957.97\text{W/m}$$

$$\lambda_{2,I} = \lambda_2(142.8\text{K}) = 40.69\text{W/m}$$

$$\lambda_{2,H} = \lambda_2(300\text{K}) = 89.57\text{W/m}$$

在假定的界面温度下,通过两管的热流率分别为