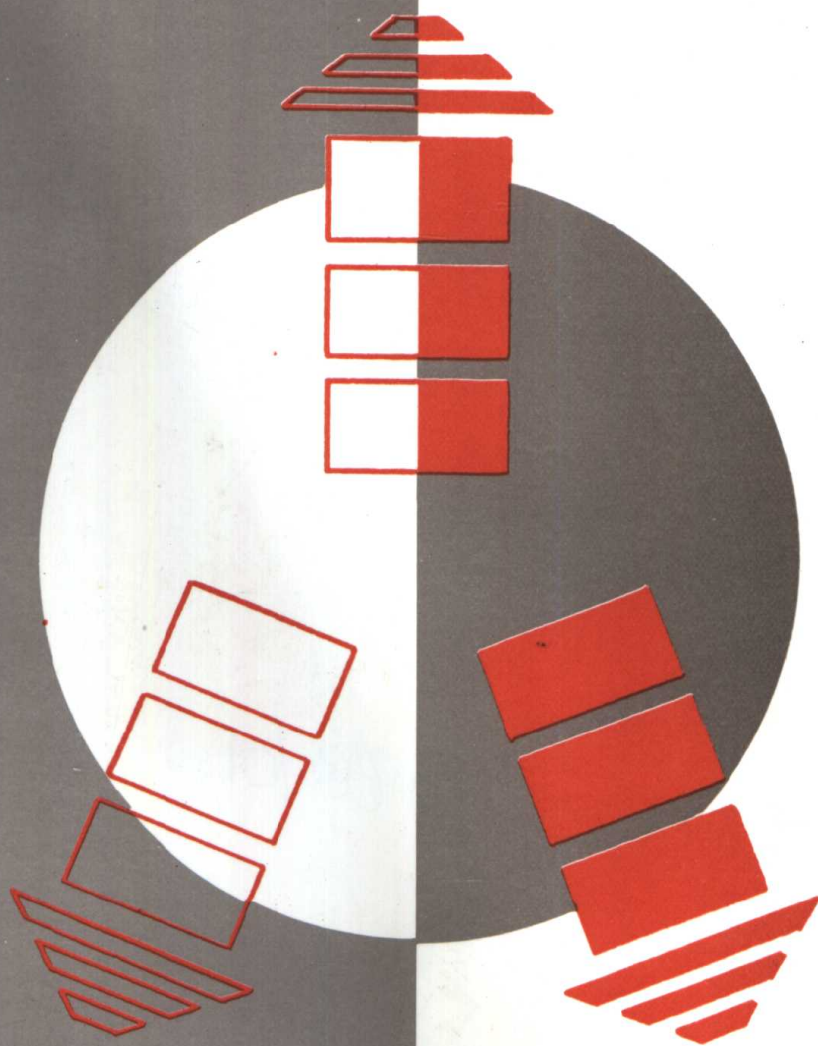


延伸表面

传热研究

■ 杨翔翔 苏亚欣著



暨南大学出版社

A STUDY OF EXTENDED SURFACE
HEAT TRANSFER

延伸表面传热研究

杨翔翔 苏亚欣 著

BAT80/01

暨南大学出版社

内 容 简 介

延伸表面作为强化传热的一种有效手段被许多工业部门广泛采用,自 20 年代开始进行研究,特别自 70 年代以来,研究的深度和广度都有较大进展,但尚缺少一本系统论述延伸表面传热特性的专著,本书出版将有助于弥补这一缺陷。

本书详细论述了延伸表面传热的理论、方法及其最新研究成果,突出特点就是强调了数值计算方法的应用。全书共十章,各章之间既有连贯性和系统性,又保持相对独立性和指导性。章末均列出参考文献,并提供少量计算机程序和算例。

本书可作为动力工程、工程热物理、能源、化工、冶金和航天技术等类专业的研究生及高年级大学生的教学参考书或选取部分章节作为选修课教材,也可作为相应专业教师和设计、科研部门工程技术人员的参考书。本书具有较高的理论参考价值和实用价值。

图书在版编目(CIP)数据

延伸表面传热研究/杨翔翔等编著
—广州:暨南大学出版社,1997.2
ISBN 7—81029—595—0

I. 延…
I. 杨…
II. 工程热物理学
IV. TB3

暨南大学出版社出版发行

(510632 广州石牌)

华侨大学印刷厂印刷

新华书店经销

1997年2月第1版 1997年2月第1次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:37.5

字数:960千 印数:1000册

ISBN7—81029—595—0/T·11

定价:48.00元

序

许多传统的工程领域,如能源开发与利用、动力、化工、石化、冶炼等等,都会遇到特定条件下的传热强化问题,1973年11月的中东战争激发了石油供应紧张而引起全球的能源危机感,促进了对节能的重视与传热强化研究的深化。“延伸表面”,作为引伸扩大换热表面积和干扰流体流动的有效手段,吸引着研究者和技术开发界更多的注目。随着精细加工技术不断取得新的进展,延伸表面也从原有的简单肋化表面向更复杂的形状和微细结构及其优化等方向发展。散见于各种文献中的大量有关延伸表面传热研究的报道,需要结合我国国情予以系统整理,起到“温故知新”而有所启迪,以便为我所用,从而适应我国经济规模蓬勃发展、要求技术进步的实际情况。

杨翔翔教授及其合作者,正是本着上述设想,结合长期从事专题研究所积累的资料与心得,严肃地撰成书稿,并取名《延伸表面传热研究》,力求阐明延伸表面传热研究的理论、基础方法和某些典型成果。在本书即将付梓问世之际,愿为之简介和推荐。同行和读者的宝贵意见,将有助于本书在使用中得到充实和提高,以发挥更多的作用。

王补宣*

1996年12月12日于北京清华园

* 中国科学院院士、全国高校工程热物理研究会理事长、清华大学教授。

作者的话

我有幸于1985年赴美国进修,在大量查阅有关资料并结合所在学校具体条件的基础上,选定延伸表面传热及其最优化作为合作科研的方向。从此以后,无论是在指导研究生教学工作方面,还是承担省部级科研课题方面,便一直同延伸表面传热研究结下了不解之缘。十几年来,积累了一定的科研成果和相当的文献资料。深感有关这方面的研究工作既广泛而又零碎,文献资料既丰富而又分散。总体说,国外学者的研究以及发表的论文比起国内的要多得多。其中,A. D. Kraus教授和D. Q. Kern教授1972年合著的“Extended Surface Heat Transfer”一书,是唯一一本比较系统总结延伸表面传热研究成果的专著。但自七十年代以来,延伸表面传热研究广泛而又深入,新成果和新方法不断涌现,所建立的数学模型以及所采用的数值计算方法愈加先进。遗憾的是,至今尚无一本阐述延伸表面传热研究新进展的专著问世。于是,我和我的研究生——苏亚欣同学,他是一位十分勤奋又很有才华的年青人——斗胆决定,共同撰写本书。并以此作为我从教四十年的纪念。

本书是在综合整理前人研究的基础上,尤其注意搜集自七十年代以来国内外学者的研究论文及其研究成果,并且结合作者十多年来开展这方面研究所积累的成果和体会,前前后后阅读了三百余篇有关的学术论著。因此,本书比较系统而又详细地阐述延伸表面传热研究的理论、方法及其成果。力求做到既有理论指导又有实用参考价值,并尽量在有限的篇幅里提供较新的研究成果和资料线索。

本书以从事动力工程、工程热物理及能源工程等方面的教师和研究生为对象,也可供有关设计研究单位和厂矿企业科技人员参考。书中各章节内容自成体系,可视需要选取部份内容作为研究生或高年级大学生选修课的教材。

在本书即将付印之时,作者深切感谢中国科学院院士、著名工程热物理学家王补宣教授,他在百忙中审阅了本书的大纲和部分内容,并热情为之作序。作者还要感谢集美大学航海学院翁泽民教授和华侨大学曾文平教授和林文銓教授等人,他们认真审阅本书内容并提出许多宝贵意见。

本书能够得以出版,我还要特别感谢爱国侨胞、香港著名实业家颜彬声先生的大力支持和帮助。感谢振兴中华教育科学基金会等的支持和帮助。趁此机会,我向他们再次表示衷心的感谢和崇高的敬意。

大凡一个脑力劳动者在经过一段较长时间的辛勤耕耘而将要收获之际,心里总是充满着喜悦和不安。喜悦之情自不待言,不安呢?因为作品即将公诸于世,于是各种缺点乃至错误都将充分地暴露出来。但是只有经过社会的检验和读者的审阅,他们的作品才能够得到改进和提高。作者正是怀着这种心情,期待着来自各个方面的批评和指正。

杨翔翔

1996年10月15日于

国立华侨大学 祖营楼

绪 论

传热问题广泛存在于动力、核能、制冷、石油、化工、冶金、电子以及航空等各个工业领域。在工业生产和日常生活中能量的传输及其充分利用往往制约了设备性能的改善和效益的提高,譬如发动机运转过程中气缸壁的传热损失将使发动机的功率和效率下降,同时气缸壁的传热和冷却措施决定了壁面温度场,对发动机的寿命和可靠性有重大影响。北方冬季使用的暖气散热片性能的优劣直接影响室内的温度和热效率的高低。在石油化工工业中,空气分离、乙烯、天然气液化等对换热器换热性能的依赖关系更为明显。因此,高效的换热设备不仅是保证生产正常运行所必不可少的条件,而且对材料和动力消耗以及投资效益的比例关系上都有很重要的意义。随着工业生产的迅速发展,由于增大设备可以减少设备投资和运转费用,因此,各工业部门都致力于发展大容量的设备;另一方面,随着空间技术的发展,越来越要求重量轻而体积小的微型结构换热设备。但是,无论是大型换热设备或是微型换热设备,其共同要求都是高效的换热性能,都要求要采取有效的强化传热的措施。

稳态条件下换热设备的传热量一般可表示为三个参数的函数

$$Q = K A \Delta t$$

式中 K 为传热系数, A 为传热面积, Δt 为传热温差。

上式表明,强化传热可通过三个途径来实现:(1)增大传热系数;(2)增大传热面积;(3)增大传热温差。其中,增大传热温差往往受到生产工艺要求以及经济性等因素的限制;增大传热系数也会受到材质及动力消耗等因素的牵制。而增大传热面积却是增加传热量的一种最有效的手段。采用延伸表面借以增大传热面积则是增大传热量或是改善散热性能的一种既经济而又方便的技术措施[1]。采用延伸表面后,不仅增加了总的传热面积,而且若几何参数选择得当,延伸表面对其周围流体的流动还会起到扰流的作用,其后果是增强了对流换热,提高总的传热系数。因此,延伸表面传热受到工程热物理学者和工程技术人员的高度重视,对延伸表面的传热特性开展了大量富有成果的研究,并且不断把这方面的研究工作推向深入。

延伸表面有三种基本形式:(1)直肋;(2)环肋;(3)销钉形肋。它们在工业上被广泛地用作各种肋化管道和紧凑式肋片换热设备。除了上述这三种标准的形式外,为了适应不同的工作环境要求,还开发出其他各种改进型的肋片形式,如波纹形,百叶窗式、开孔式等。近来,又相继报道了新型高效肋片的研究情况,如锯齿型肋片。由于延伸表面一般比较薄,长宽远大于其厚度。因此,国内的许多文献都形象地称之为“翅片”,在这里,我们将统一命名为肋片(fin)。

对延伸表面传热的研究一直是传热学学科中较为活跃的研究课题之一。从本世纪二十年代开始,对肋片简化的数学模型下得出的解析解,一直到现在考虑各种更接近于实际情况时导出的复杂的非线性控制微分方程下的各种数值计算结果。延伸表面传热的研究不断深化,揭示了更深层次的肋片导热和表面对流换热及辐射换热的传热机理,并且探讨了肋片在不同条件下的最优化理论和方法。许多学者在开展理论研究的同时还进行了大量的实验研究工作,一方面验证已有理论分析的结果,另一方面又发展实验研究的技术和方法,所提供的经验关联式可以直接应用到工业设计中。

延伸表面传热的设计数据在一些传热学手册中虽然可以查到[2,3],但是这些手册所包含

的内容和涉及的范围都远远不能满足现在日新月异的工业生产发展的需要。文献〔4〕是唯一一本较系统地总结了七十年代以前肋片研究成果的专著。然而,它的数学模型都是在作了大量简化假设的基础上得出的结果,与实际情况还有相当的差距。自七十年代以来,肋片研究不断深入,新成果、新方法不断地产生和形成,所采用的数学模型也越来越接近于实际情况。然而至今国内尚无一本系统介绍延伸表面传热研究的专著问世。

本书第一章作为全书的概述,其余各章则遵循由浅入深、循序渐进的编排方式分别进行论述:第二章 传热问题的数学基础,第三章 一维稳态传热研究,第四章 多维稳态传热研究,第五章 非稳态传热研究,第六章 肋管传热研究,第七章 延伸表面传热的最优化研究,第八章 延伸表面传热实验研究,第九章 微结构肋片传热研究和第十章 延伸表面传热通用程序设计。在具体编写上,力求做到前后呼应,既有系统性和连贯性,又有相对独立性和指导性。

为了适应计算传热学的发展趋势,本书突出的特点就是强调了数值计算方法的应用。由于计算方法和计算传热学、计算流体力学方面的专著很多〔5—8〕,对温度场、流场的微分方程的数值处理都有详细而深入的论述。因此,为了避免重复,同时又要保持本书体系的完整性,我们仅对有关数学知识作一简单介绍,指出进一步参考的有关文献。作者认定本书的读者都具有一定的数值计算基础和使用经验,能够较熟练地使用一种计算机语言进行编程。所以在各章中,仅对相应的微分方程作数值计算上必要的处理,除就某种特定数值方法进行较详细地推导,以便说明该方法的具体应用外,一般不限定采用何种数值计算方法去求解。书中提供的少量程序,仅供参考,相信读者自会编出更好的程序来。

参 考 文 献

- 1、王补宣,《工程传热传质学》(上册). 科学出版社,1982
- 2、W. M. 罗森诺等编,《传热学手册》(下册). 科学出版社,1987
- 3、王松汉等,《板翅式换热器》. 化学工业出版社,1984
- 4、A. D. Kraus and D. Q. Kern, 《Extended Surface Heat Transfer》. McGraw Hill, N. Y, 1972
- 5、陶文铨,《数值传热学》. 西安交通大学出版社,1988
- 6、帕坦卡. S. V. 著,张政译,《传热与流动的数值计算》. 科学出版社,1984
- 7、朱家骥,《计算流体力学》. 科学出版社,1985
- 8、郭宽良,《数值计算传热学》. 安徽科技出版社,1987

目 录

序

作者的话

绪论

第一章 延伸表面传热研究概况

§ 1-1 延伸表面传热研究的意义	(1)
§ 1-2 延伸表面传热研究的概况	(2)
§ 1-3 延伸表面传热研究的内容	(5)
§ 1-4 延伸表面传热研究的方法	(6)
参考文献	(7)

第二章 传热问题的数学基础

§ 2-1 一阶线性常微分方程	(14)
§ 2-2 二阶线性常微分方程	(15)
2.2.1 二阶线性常微分方程解的结构	(15)
2.2.2 常系数二阶线性常微分方程	(15)
2.2.3 变系数二阶线性常微分方程	(16)
§ 2-3 二阶线性偏微分方程	(23)
2.3.1 基本概念	(23)
2.3.2 分离变量法	(25)
2.3.3 对非齐次方程或非齐次边界条件的处理	(26)
2.3.4 特征函数的正交性	(30)
§ 2-4 Newton-Raphson 迭代法	(30)
§ 2-5 准线性化技术	(32)
§ 2-6 不变插值原理	(35)
§ 2-7 Runge-Kutta 法	(38)
2.7.1 初值问题的 Runge-Kutta 法	(38)
2.7.2 变系数非线性二阶常微分方程两点边值问题的 Runge-Kutta 法	(43)
2.7.3 二阶常微分方程两点边值问题的改进算法	(46)
§ 2-8 试射法	(48)
§ 2-9 摄动法	(49)
2.9.1 摄动法简介	(49)
2.9.2 基本概念	(49)
2.9.3 正则摄动法	(50)
§ 2-10 有限差分法	(52)
2.10.1 常微分方程边值问题的有限差分法	(53)
2.10.2 抛物型偏微分方程的差分格式	(54)

2.10.3 椭圆型偏微分方程的差分格式	(61)
§ 2-11 有限元法	(62)
2.11.1 有限元方程的出发方程	(63)
2.11.2 区域剖分	(65)
2.11.3 在每个基本单元上构造插值函数(基函数)	(65)
2.11.4 单元分析	(66)
2.11.5 总体合成	(67)
2.11.6 本质边界条件处理	(67)
2.11.7 有限元方程组的求解	(68)
§ 2-12 代数方程组的求解	(68)
参考文献	(74)
附录 1 Gauss 消去法子程序 (FORTRAN 语言)	(75)
附录 2 Gauss 消去法子程序 (C 语言)	(76)

第三章 一维稳态传热研究

前 言	(78)
§ 3-1 端部绝热条件下的一维传热	(79)
3.1.1 纵长肋/直肋	(79)
3.1.2 环肋	(84)
3.1.3 销钉形肋片	(91)
§ 3-2 端部有对流换热时的一维传热	(97)
3.2.1 矩形剖面直肋	(97)
3.2.2 梯形剖面直肋	(101)
3.2.3 矩形环肋	(102)
§ 3-3 一维稳态传热的近似解析解	(104)
3.3.1 一阶近似解析解	(105)
3.3.2 高阶近似解析解	(106)
§ 3-4 辐射对肋片传热的影响	(109)
3.4.1 在辐射和对流条件下肋片的传热特性	(109)
3.4.2 纯辐射换热肋片	(116)
§ 3-5 肋表面的局部传热特性	(127)
3.5.1 对流换热系数均匀条件下的局部传热特性	(127)
3.5.2 从边界层方程出发分析肋表面局部传热特性	(127)
一、自然对流条件下竖直平板肋片的传热特性	(127)
二、自然对流条件下竖直平板肋片传热的相似解	(131)
三、强迫对流条件下竖直平板肋片的传热特性	(135)
四、竖直钉肋的混合传热特性	(139)
§ 3-6 变热特性参数条件下的一维传热	(143)
3.6.1 对流换热系数是位置的函数	(143)
3.6.2 对流换热系数是温度的函数	(149)

§ 3-7 内热源对肋片传热的影响·····	(153)
3.7.1 有内热源时矩形直肋的传热特性 ·····	(153)
3.7.2 有内热源时竖直平板肋片在自然对流条件下的传热特性 ·····	(155)
§ 3-8 护罩(套管)对肋片传热的影响·····	(157)
§ 3-9 评价肋片性能的指标—增大系数和强化因子·····	(163)
§ 3-10 研究肋片的新参数法—热转换矩阵 ·····	(167)
3.10.1 热转换矩阵法简介·····	(167)
3.10.2 改进型热转换矩阵法·····	(175)
3.10.3 均布热源的处理·····	(180)
3.10.4 肋列设计的限制条件·····	(180)
§ 3-11 一列肋片的“有限元”分析法 ·····	(182)
参考文献·····	(187)
附录 ·····	(190)

第四章 多维稳态传热研究

§ 4-1 肋片一维分析的误差·····	(197)
§ 4-2 二维分析的解析解·····	(201)
4.2.1 二维肋片的解析解 ·····	(201)
4.2.2 二维肋片的一维修正解 ·····	(207)
§ 4-3 肋片与基体接触完好性对传热的影响·····	(209)
§ 4-4 二维肋片解析解的级数截去法·····	(210)
§ 4-5 肋根温度沉降对传热的影响·····	(213)
§ 4-6 矩形肋片管的肋效率计算·····	(218)
§ 4-7 延伸表面的凝结换热·····	(223)
4.7.1 竖壁上垂直肋片的凝结换热 ·····	(224)
4.7.2 水平整体式肋管的凝结换热 ·····	(229)
§ 4-8 平行板通道中肋片的传热特性·····	(233)
§ 4-9 二维肋片的有限元分析·····	(243)
参考文献·····	(248)

附录 1 二维肋片的有限元程序(FORTRAN 语言) ·····	(250)
-------------------------------------	-------

附录 2 二维肋片的有限元程序(C 语言) ·····	(256)
-------------------------------	-------

第五章 非稳态传热研究

§ 5-1 矩形直肋的瞬态传热特性—Laplace 变换的解析解 ·····	(265)
5.1.1 肋根温度突变 ·····	(265)
5.1.2 肋根热流突变 ·····	(271)
5.1.3 变热特性参数时的非稳态传热 ·····	(273)
§ 5-2 矩形直肋的周期性传热·····	(274)
5.2.1 肋根温度按正弦规律变化 ·····	(274)
5.2.2 肋根热流按正弦规律变化 ·····	(276)

5.2.3	肋根温度按余弦规律变化	(277)
5.2.4	变热特性参数时的周期性传热	(283)
§ 5-3	梯形肋片的周期性传热	(286)
5.3.1	定热特性参数时梯形直肋的周期性传热	(286)
5.3.2	变热特性参数时梯形直肋的周期性传热	(295)
5.3.3	定热特性参数时梯形环肋的周期性传热	(299)
5.3.4	变热特性参数时梯形环肋的周期性传热	(305)
§ 5-4	辐射对肋片非稳态传热的影响	(308)
5.4.1	板式肋管在辐射—导热下的瞬态传热	(308)
5.4.2	梯形环肋在辐射—对流下的瞬态传热	(310)
5.4.3	辐射对矩形直肋周期性传热的影响	(315)
§ 5-5	二维非稳态传热分析	(316)
5.5.1	柱形钉肋	(316)
5.5.2	复合直肋的瞬态传热	(320)
5.5.3	二维矩形直肋的周期性传热	(325)
参考文献		(326)

第六章 肋管传热研究

§ 6-1	管内流动和传热的基本理论	(327)
§ 6-2	内肋管的层流传热	(329)
6.2.1	具有均匀表面壁温的内肋管层流传热	(329)
6.2.2	竖管内肋管中纯浮升力引起流动的传热	(335)
6.2.3	交叉流型双管通道中内肋管的传热	(340)
6.2.4	间断直肋内肋管的传热	(343)
6.2.5	环肋内肋管的层流传热	(350)
§ 6-3	内肋管的紊流传热	(353)
6.3.1	内肋管的紊流传热	(353)
6.3.2	内肋环管的紊流传热	(356)
§ 6-4	内肋管入口区的传热	(358)
6.4.1	内肋管入口区的传热	(358)
6.4.2	内肋环管入口区的传热	(365)
6.4.3	流动充分发展而热正在发展的内肋管的传热	(370)
§ 6-5	外肋管的传热特性	(374)
参考文献		(379)

第七章 延伸表面传热最优化研究

§ 7-1	最优化研究概述	(381)
一、延伸表面传热最优化研究的回顾		(381)
二、优化研究应考虑的因素		(381)
三、优化研究的一般程序		(382)
§ 7-2	简单形状肋片的传热优化	(382)

7.2.1	最小重量的矩形直肋	(382)
7.2.2	柱形钉肋的传热优化	(383)
7.2.3	最低成本的直肋	(384)
§7-3	直肋的传热优化	(385)
7.3.1	梯形直肋的传热优化	(385)
7.3.2	沸腾液中矩形直肋的传热优化	(387)
7.3.3	最小熵产肋片的优化	(389)
7.3.4	层流中肋管的传热优化	(396)
§7-4	环肋的传热优化	(399)
7.4.1	梯形环肋的传热优化	(399)
7.4.2	双曲线形环肋的传热优化	(405)
7.4.3	抛物线形环肋的传热优化	(407)
7.4.4	肋根温度周期性变化时环肋的传热优化	(409)
§7-5	纯辐射肋片的传热优化	(413)
§7-6	具有内热源时肋片的传热优化	(420)
7.6.1	内热源生成率分布均匀	(421)
7.6.2	肋片内总的内热源生成热为常数	(423)
7.6.3	单位肋高内热源生成率为常数	(423)
	参考文献	(425)

第八章 延伸表面传热实验研究

§8-1	延伸表面传热实验研究概述	(427)
8.1.1	实验研究概述	(427)
8.1.2	可视化实验方案的选择	(428)
§8-2	直肋传热的实验研究	(430)
8.2.1	直肋表面对流换热的实验研究	(430)
8.2.2	等温三角形直肋自然对流换热的实验研究	(433)
8.2.3	护罩对矩形直肋传热影响的实验研究	(435)
§8-3	钉肋传热的实验研究	(437)
§8-4	套片管束换热的实验研究	(447)
§8-5	圆肋管换热的实验研究	(454)
8.5.1	直圆肋管换热的实验研究	(455)
8.5.2	环圆肋管换热的实验研究	(457)
8.5.3	四种空调设备上用的肋片管的实验研究	(463)
§8-6	椭圆肋管换热的实验研究	(466)
8.6.1	椭圆管与圆管性能的比较	(466)
8.6.2	椭圆管矩形肋片的换热特性	(467)
8.6.3	椭圆管矩形肋片管的换热特性	(467)
8.6.4	低 Re 数下肋片管束的换热特性	(472)
§8-7	内肋管换热的实验研究	(475)

§ 8-8 肋表面的凝结换热	(477)
§ 8-9 肋表面的沸腾换热	(488)
参考文献	(495)

第九章 微结构肋片传热研究

前 言	(499)
§ 9-1 微结构槽道的传热特性	(500)
9.1.1 微结构槽道传热的实验研究	(500)
9.1.2 微结构槽道传热的数值分析	(502)
§ 9-2 水平三微内肋管的传热	(505)
§ 9-3 竖直三微内肋管的传热	(509)
参考文献	(513)

第十章 延伸表面传热通用程序设计

§ 10-1 延伸表面传热通用微分方程	(515)
10.1.1 稳态传热	(515)
10.1.2 肋根温度周期性变化时的传热	(523)
10.1.3 微分方程的离散化	(524)
10.1.4 肋片传热的优化	(526)
§ 10-2 通用程序的系统设计	(530)
10.2.1 软件分析	(532)
10.2.2 软件总体设计	(537)
§ 10-3 通用程序的具体实现设计	(541)
10.3.1 主控模块的设计	(542)
10.3.2 数值计算辅助程序的设计	(546)
§ 10-4 延伸表面传热 CAD 开发研究小结	(557)
参考文献	(558)

附录 I Runge-Kutta 法结合 Newton-Raphson 迭代法求解两点边值问题的通用程序 (559)

附录 II 叠加原理和 Runge-Kutta 法求解定热特性参数条件下直肋周期性传热微分方程波动部分的通用程序 (562)

附录 III 应用叠加原理和 Runge-Kutta 法结合 Newton-Raphson 迭代法求解变热特性参数条件下直肋周期性传热微分方程摄动展开式中一阶项的通用程序 (566)

附录 IV 变热特性参数条件下直肋周期性传热微分方程摄动展开式中二阶项稳态分量〔式(5-3-16a)〕的通用程序 (573)

附录 V 变热特性参数条件下直肋周期性传热微分方程摄动展开式中二阶项非稳态分量〔式(5-3-16b)和式(5-3-16c)〕联立解的通用程序 (582)

第一章 延伸表面传热研究概况

§ 1—1 延伸表面传热研究的意义

强化传热技术在工业中日益受到重视,延伸表面作为强化传热的一种有效手段,越来越广泛地被应用到工业生产各个领域和人民日常生活中。因此,有必要深入研究延伸表面传热的机理及其传热特性,探索如何从延伸表面的几何尺寸、形状以及排列布置方式等方面进一步改进,以便提高它的强化传热效果。

延伸表面之所以能够增强传热效果,主要有两方面的原因:(1)延伸表面大大提高了原设备的换热面积,从而增加总的传热量;(2)延伸表面的存在使得延伸表面之间的流体运动受到扰动,热量交换趋于激烈,从而提高总的传热系数。研究结果表明〔1〕,装有延伸表面的设备与未装延伸表面相比,其换热系数往往可以增加几个数量级。延伸表面强化传热的能力与其恰当的参数选择及其使用条件有密切的关系。因此,延伸表面的设计需要建立在深入研究其传热特性的基础之上。

延伸表面的应用范围很广,从动力机械、电力、核能、石油、化工、制冷、空调、大规模可控硅电子设备、太阳能集热器、航空航天飞行器等各个行业都大量使用着各种不同形状和不同布置形式的延伸传热表面。这些不同应用领域所涉及的延伸表面的工作环境差异很大,传热方式和传热的数学物理模型也有很大的差别,但现今文献资料中有关延伸表面的各种可供设计人员参考和引用的公式或数据并不能很好地与其所对应的具体条件相适应。可参考的资料也往往是建立在一定的简化模型之下得出的结果〔2〕,与实际情况有相当程度的偏差。因此,深入研究延伸表面传热机理具有重要而现实的意义。

当代新型材料不断出现,新的工艺不断产生,对延伸表面传热提出了更高的要求,假如延伸表面的几何尺寸取得适当,可以使一定材料所加工的延伸表面能够传递最大限度的热量,以便充分利用材料的传热能力;或者传递一定量的热量以期使用最少的材料以便节约制造成本。在工作空间受到限制时,如航空航天散热器,总是要求尽量缩小体积并减轻重量,所有这些都需要进行优化设计。延伸传热表面的最优化是目前研究的热点之一,对于节约材料,降低成本以及减少动力消耗,改善设备的工作性能等方面都具有重要的意义。

延伸表面除了具有强化传热的作用以外,实际上还有其他一些鲜为人知的作用。有些学者通过研究带肋热管换热器发现〔3〕,热管肋化不仅能使换热器体积成倍减少,同时,冷热侧肋化系数的变化还能达到使热管壁温得到人为控制的目的。此外,螺旋形环肋还能提高管道的抗腐蚀性能,并且它相对于其他换热器而言,在防止煤粉、灰尘等的堵塞与积聚方面要好,从而改善设备的传热性能。

总而言之,延伸传热表面的应用范围日益扩大,这就要求理论指导要日渐完善,技术参数要日趋成熟。因此,对延伸表面传热机理的研究和优化设计理所当然地越来越受到工程热物理科学者和工程技术人员的高度重视。

§ 1—2 延伸表面传热研究的概况

延伸表面有三种最基本的形式:(a)直肋;(b)环肋;(c)销钉形肋。如图 1—1 所示。在这三种基本形式中,它们又各具有不同的剖面形状和排列布置方式。此外还开发出其他一些形状的延伸表面,譬如波纹型,三角形,百叶窗式[4],锯齿形[5—6],穿孔式[7]等等,可以说,延伸传热表面的形式还在不断地发展和变化。对于三种基本形式的延伸表面,一般称为肋片,它们的形状较规则,理论分析较多,也有许多实验研究成果。对于其它形状的延伸表面,一般以实验研究为主,再从实验数据中归纳出在一定范围内适用的经验关联式。

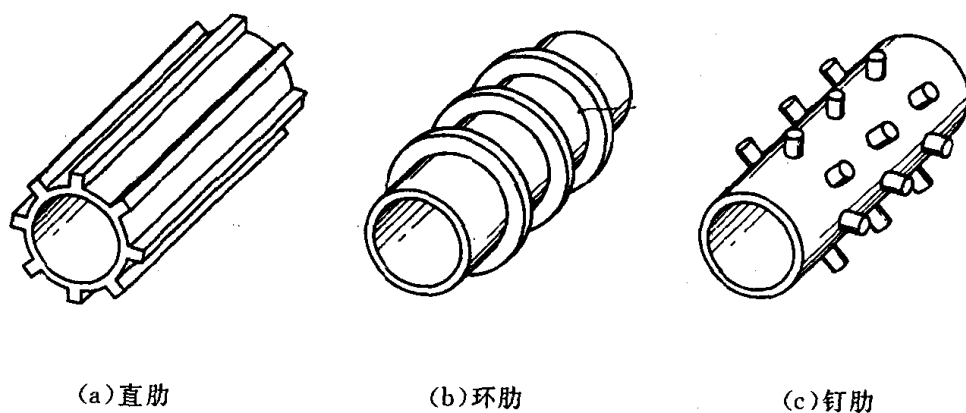


图 1—1 延伸表面基本形式

延伸表面的加工制造一般有整体轧制,机加工,冲压,镶嵌,焊接,张力缠绕,热套等。肋片材料一般以导热性能好的金属材料如铝、铜以及不锈钢、低碳钢等为主,在腐蚀性较严重的环境中,如锅炉的省煤器,则需配以铸铁的环肋[9]。肋片材料可以与母体材料相同,也可以不同,甚至肋片本身也可以是由不同材料做成的内外两层的复合肋[10—11]。

对延伸表面传热进行研究最早的学者包括 Harper, Brown, Schmidt, Murray 和 Gardner 等人。Harper 和 Brown 在 1922 年首先在一份研究报告中[12]建立了肋片导热的数学方程,并提出了著名的 Harper—Brown 近似。之后,在 1926 年,德国学者 Schmidt[13]研究了肋片的最优形状和最优尺寸问题,发现肋片的形状最好以两条抛物线为界,并且提出通过肋片的比热流应为常数。Weinig 在研究最小重量肋问题时,指出最小重量肋的外形是圆弧[14]。Murray [15]和 Gardner[16]分别于 1938 和 1945 年系统地研究了肋片的传热特性,并把延伸表面传热特性的关系式加以普遍化,第一次比较完整系统地建立了延伸表面传热的数学简化模型和提出理想化的假设条件,他们所得到的一些常用肋片的解析解表达式和肋效率曲线图至今依然被许多传热学专著、手册和教科书所择录,其后的许多学者在研究延伸表面的传热问题时往往全部或部分地采用 Gardner 等人提出的假设条件。Kraus 和 Kern 将延伸表面早期的研究成果加以收集整理,于 1972 年正式出版了第一本专著[2]。

1959 年, Duffin[17]应用变分法研究了肋片的对流换热。1969 年, Smith 等人[18]应用无穷级数解决了三角形环肋的温度分布和肋效率的解析解表达式,从而填补了常用形状肋片解析解中三角形环肋无解析解的空白。在延伸表面传热的研究中一般均作一维处理, Wah Lau

和 C. W. Tan[19]在 1973 年研究发现,只有当 $Bi < 0.1$ 时一维模型才是正确的,大于这一临界值后一维模型将不再适用。Suryanarayana[20]在 1977 年也比较了直肋的一维和二维分析的误差。1981 年, Heggs 等人研究了二维肋片传热的边界积分方程法[21],并应用该法在二维模型下研究了肋片与基体的接触程度所引起的接触热阻对传热性能的影响[22],在 1982 年他们还提出了一个用于二维肋片数值研究的级数截去法[23]。

安装肋片后由于肋根处热流密度的增大,势必有更多的热量从基体传入肋片,并散失于环境之中,因而肋根处的温度应比无肋壁面的温度更低。E. M. Sparrow 和 D. K. Hennecke 首先于 1970 年注意到这一现象,并完成了肋根温度沉降的第一篇研究论文[24]。之后, D. E. Klett 等人于 1972 年研究了肋片与基体的导热系数对肋根温度沉降的影响[25], E. M. Sparrow 和 L. Lee 于 1975 年研究了一系列直肋的肋根温度沉降问题[26]。李隆键和张洪济在 1995 年分析了环肋的肋根温度沉降[27]。所有这些研究都表明:肋根温度沉降必将影响肋片的传热性能,在工程设计中不容忽视。

辐射换热对肋片传热性能的影响也逐渐引起人们的注意。对辐射换热的研究可归纳为两个方面:一是纯辐射条件下的肋片传热,这主要是以空间设备为应用背景;二是在常规的各种工业应用中以对流换热为基本换热方式时,考虑了肋片对空间,肋片与基体以及肋片与肋片相互之间的辐射换热作用在总的传热中所占的比重。E. R. G. Eckert 等人在 1960 年推导了相互辐射肋片的分析公式[28],随后 E. M. Sparrow 等人对辐射肋片的肋效率及黑度的影响进行了详细的研究[29],并进而讨论了他们所提出的一种平板式肋管结构的辐射影响[30]。N. M. Schnurr 等人对梯形环肋的辐射换热进行了研究[31]。R. C. Dohovan 等人在 1971 年研究了一系列矩形直肋在辐射——对流共同作用下的传热特性[32],张玉文和陈钟顾于 1989 年讨论了一维梯形肋片在辐射和对流条件下的数值计算[33],杨翔翔等人也在 1989 年研究了梯形直肋的辐射换热影响[34]。

近年来,不少学者研究了复杂表面条件或边界条件的肋片传热特性。Heggs 等人[35]研究了肋表面对流换热系数呈线性变化时三角形环肋的传热,从而获得一个级数解。Sen 等人[36]以及 Unal[37—38]研究了矩形直肋表面的传热方程中对流项为温度的 n 次幂时的传热问题,并得到了用特殊函数表示的解。Yang[39]对肋根温度周期性变化的矩形直肋进行了研究, Aziz 和 Na[40]进一步应用摄动法研究了矩形直肋变热特性参数时的周期性传热,杨翔翔等人分别对定热特性参数[41]和变热特性参数[42]时梯形直肋的周期性传热进行了深入研究。Ralph 等人[43]首次应用有限元法分析了肋片有辐射换热时的周期性传热,许绿丝等人[44]用有限差分法研究梯形环肋在辐射和对流条件下的周期性传热特性。Suryanarayana[45]应用 Laplace 变换求得了在不同边界条件下直肋的非稳态传热的解析解,陆煜等人[46]应用两次 Fourier 余弦变换得到一个矩形直肋周期性传热的复杂解析解。

为了能够准确地反映肋片的局部传热特性,许多学者从肋片周围流体的边界层方程出发,应用数值方法求解肋片表面的局部换热系数和热流量等特性参数的变化规律。E. M. Sparrow 等人分别于 1981[47]和 1982 年[48]研究了竖直平板肋片在自然对流和强迫对流、 $Pr=0.7$ 时的传热特性, Kuehn 等人在 1983 年[49]又得到了自然对流换热的相似解, Garg 等人[50]在 1986 年将强迫对流下的换热特性研究扩大到 $0.01 \leq Pr \leq 100$ 的范围内。1988 年, Sarma 等人[51]在上述几篇文献的基础上分析了内热源对自然对流换热的竖直平板肋片传热特性的影响。此外,台湾学者 Huang 等人[52]研究了竖直钉肋的混合传热问题。夏吉良等人[53]采用激光干涉法对直肋进行了初步测试,王启杰等人[54]进一步对水平及倾斜放置的直肋进行了

测定,田野等人[55]采用蔡升华技术研究了双排肋片管束的传热机理,张春雨等人[56]采用蔡升华技术测定了椭圆管矩形肋片的局部传热特性。所有这些研究成果都大大地加深了人们对延伸表面局部传热特性的认识。

工业上广泛地使用各种肋化管道,八十年代以来各国学者对肋管周围流体的流动和传热特性进行了大量的深入研究。Soliman 等人[57], Prakash[58], Tao[59], Kelkor[60]等许多学者对内肋管的充分发展区层流换热的边界层方程进行了数值研究,探讨了肋片参数对流体的阻力和传热的影响, Patankar 等人[61]应用一种混合长模型分析了内肋管中的紊流换热特性, Moukalled[62]和 Sparrow[63]分别研究了外肋管的换热特性。Prakash[64]、Renzoni[65]和 Rustum[66]分别研究了内肋管入口区的传热特性。我国的许多学者对肋片管(主要是外肋管)的传热特性及其阻力特性进行了大量的试验研究[67—69]。所有这些都对工业设计起到了直接的指导作用。

随着制冷工业的发展,延伸表面的凝结和沸腾换热也得到了深入的研究。Lienhard 等人[70]在1974年研究了非等温任意热流密度表面上的凝结换热, S. V. Patankar 等人[71]在1979年研究了竖直肋片表面的三维膜态凝结换热。Rudy [72]和 Webb [73]研究了水平整体式肋管的凝结换热特性,日本学者 Honda 等人[74]建立了一种“柱模式”和“层模式”的理论模型来预测一束水平肋管的凝结换热,并对顺排和错排水平肋片管束上 R-113 的凝结换热进行了实验研究[75—76], Masuda 等人[77]对乙烯、乙二醇工质在水平整体式肋管上的凝结换热进行了实验测试,王幼纯等人[78]对向下倾斜肋化表面的凝结换热液膜稳定性进行了实验研究,王世平等人[5]对一种新型高效的锯齿形肋管的冷凝换热进行了实验研究。Hahne 等人[79—80]对肋管的沸腾换热进行了研究,所有这些研究工作,极大地推动了延伸表面凝结和沸腾换热研究工作的深入发展。

伴随着传热学科中微结构传热前沿性课题研究的进展,微型结构肋片也逐渐应运而生,如开展对微矩形槽道[81—89]和二维及三维内肋管[90—104]的实验研究。在微结构肋片的研究中,目前以实验研究为主。张培杰等人[81—84]对空气和水在微矩形槽内的对流换热进行了实验研究,同时也进行数值分析工作,廖光亚等人[90—92]对三维内肋管的换热进行了研究,廖强和辛明道等人[93—94]对三维内肋管进行了广泛的实验研究,杜扬等人[99—100]和童明伟等人[101]对内微肋管凝结换热进行了实验研究,张洪济等人[102—104]对中压下三维内肋管的上升及下降流动进行了试验研究。

自七十年代中后期开始,对肋片的最优化研究逐渐增多。Schmidt(1926)是最早研究肋片传热优化的学者。Cash 等人(1971)[105]对钉肋沸腾换热进行了近似优化研究。Biyikli (1985)[106]对矩形直肋的沸腾换热作了优化研究。Gucerl 和 Maday(1975)[107]、Mikk (1978)[108]研究了最小重量的肋片, Sonn 等人(1981)[109]研究了柱形钉肋的优化, Kovarik (1983, 1984)[110—111]研究了单位成本的肋管的优化问题, Razelos 研究了内热源直肋(1979)[112]和变热特性参数下梯形环肋(1980)[113]的优化问题, Poulikakos 等人(1982)[114]研究了强迫对流时最小熵产的肋片形状, Netrakawtl 等人(1985)[115]应用不变插值原理研究了变热特性参数时环肋的优化, 杨翔翔(1985—1988)[116—121]对环肋传热的最优化进行了深入系统的研究, Karlekar 等人(1963)[122]、Schnurr 等人(1976)[123]、Chung 等人(1991)[124]对辐射肋片的优化问题进行了大量研究, Razelos 等人(1993)[125]对梯形直肋的优化也进行了深入的研究。可以说,肋片的优化研究工作正方兴未艾。新的研究成果必将会不断涌现。