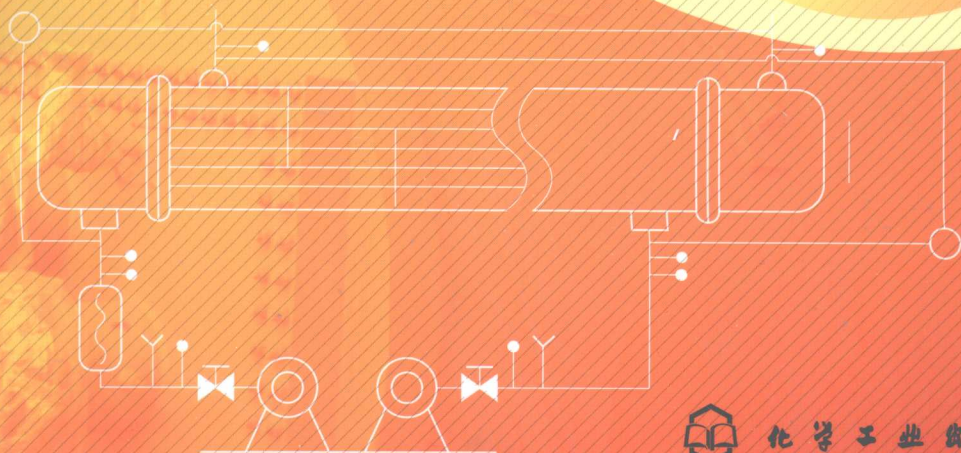


列管式换热器 强化传热技术

喻九阳 徐建民 郑小涛 林 纬 著



化学工业出版社

013069713

TQ051.5
07

列管式换热器强化传热技术

喻九阳 徐建民 郑小涛 林 纬 著



中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第133689号

ISBN 978-7-135-15260-4
I. ①列... II. ①喻... III. ①列管式换热器-强化传热-研
究生-教材 W. ①TQ051.5
中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第133689号

责任编辑：李亚梅

封面设计：刘国平

北京航空航天大学出版社
北京市昌平区学院南路13号 邮政编码100011

787mm×1092mm 1/16 印张10.5 字数256千字 2013年10月北京第1版第1次印刷

邮发代号：010-64218888(发行) 010-64213685(售后) 010-64218829



化学工业出版社

·北京·

定价：20.00元



北航 C1677765

定价：20.00元

01308213

本书以作者及其团队的研究成果为基础,对列管式换热器的各种强化传热技术所涉及的传热学和流体力学理论进行介绍。既简要介绍基本理论,更突出展示数值理论与工程应用的最新成果。重点介绍了异型管的强化传热及脉动流强化传热技术,其内容包括列管式换热器强化传热基本原理、实验方法和数值模拟技术等方面。

本书层次分明,深入浅出,以点带面,点面结合,可供传热设备设计、制造工程技术人员和传热强化研究人员参考,也可作为高等院校本科生、研究生的教材或参考资料。

列管式换热器强化传热技术

喻九阳 程树珍 宋玉晖 宋 玮 刘丽华

图书在版编目(CIP)数据

列管式换热器强化传热技术/喻九阳等著. —北京:化学工业出版社, 2013. 7

ISBN 978-7-122-17569-4

I. ①列… II. ①喻… III. ①列管式换热器-强化传热-研究生-教材 IV. ①TQ051.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第122689号

责任编辑:程树珍 李玉晖

责任校对:宋 玮

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张10½ 字数256千字 2013年10月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 50.00 元

版权所有 违者必究

前 言

换热器是非常重要的换热设备，几乎在所有的工业领域中都有应用，尤其是广泛应用于化工、能源、机械、交通、冶金、动力及航空航天等行业。近年来，由于高新技术的发展和新能源的开发，要求对原有换热器进行改造，研制新型高效换热设备的呼声越来越高。

本书是编者及其团队 20 多年来在此领域研究成果的系统总结，是国内首部针对列管式换热器及其强化传热技术研究的专著。书中重点介绍了异型管的强化传热及脉动流强化传热技术，其内容包括列管式换热器强化传热基本原理、实验方法和数值模拟技术等方面。

全书共分为 11 章。第 1 章介绍了换热器的基本功能，从有源强化传热和无源强化传热两方面介绍了强化传热的发展过程与研究进展，并建立了强化传热的总体概念。第 2 章从计算流体力学和传热学的角度，分别介绍了传统管内强化传热技术的理论、核心流强化传热理论、场协同理论、热量传递势容耗散极值原理和场物理量协同理论等强化传热基本理论，并分析了强化传热的发展和这些理论之间的联系。第 3 章重点讲解了扁管强化传热技术，结合数值模拟和实验研究阐明了扁管强化传热的原理。第 4 章和第 5 章分别介绍了波节管和翅片管强化传热及其结构稳定性研究，其中包括波节管换热器管板应力分析、波节管承受外压失稳性能研究和波节管承受内压爆破性能研究。第 6 章~第 9 章是本书的重点和创新之处，文中系统论述了列管式换热器诱导振动下的强化传热机理。其中，第 6 章采用数值模拟方法研究了圆管振动强化传热，表明换热管在振动条件下有明显的强化传热效果，且在相同振动条件下，雷诺数越小，强化效果越好。这与 20 世纪部分学者研究发现换热管振动幅度达到一定强度后会诱导产生二次流，对流传热系数随之增加的现象相吻合。第 7 章~第 9 章分别介绍了脉动流下螺旋槽管、横纹管和波节管强化传热研究。结果表明，与稳态流相比，脉动流下不同异型管都有明显的强化传热效果，且由于脉动流产生的周期性壁面剪切力对管壁有显著的抑垢作用。第 10 章和第 11 章分别讲解了内插弹簧和折流板开、扩孔对换热器的强化传热作用，从改变管程流场和壳程流场的角度，分别阐述了其强化传热的原理。

本书对列管式换热器的各种强化传热技术所涉及的传热学和流体力学理论，都用了相当的篇幅进行介绍。讲述力求层次分明，深入浅出，以点带面，点面结合；既简要介绍基本理论，更突出展示数值理论与工程应用的最新成果。力求通过本书告诉读者列管式换热器的强化传热原理，也力求使读者能够充分掌握强化传热技术，运用到工程实际中发挥出本书的真正作用。

本书的出版得益于编者多年从事换热器与强化传热技术的研究，许多集体和个人对本书均有贡献，编者特别感谢国家自然科学基金项目 (No. 50976080) “列管式换热器流体诱导振动强化传热机理研究”给予的大力资助。编者所指导过的博士生、硕士生和研究团队近年来在该领域开展了卓有成效的研究工作，他们的若干重要研究成果更加充实了本书的内容。本书集中反映了列管式换热器及其强化传热研究的最新成果，希望本书的出版能为

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 强化传热技术的分类	2
1.2.1 有源强化技术	2
1.2.2 无源强化技术	3
1.2.3 其他强化传热方法	6
1.3 强化传热技术的发展	7
参考文献	8
第 2 章 强化传热基本理论	9
2.1 传统管内强化传热技术的理论基础	10
2.2 核心流强化传热理论	13
2.3 场协同理论	17
2.4 热量传递势容耗散极值原理	18
2.5 场物理量协同理论	19
参考文献	23
第 3 章 扁管管壳式换热器传热特性研究	24
3.1 扁管管内传热性能分析	24
3.1.1 计算模型	24
3.1.2 计算结果分析	26
3.1.3 小结	28
3.2 扁管承受极限内压能力的研究	28
3.2.1 计算模型的建立	29
3.2.2 计算结果及讨论	30
3.2.3 数据分析及处理	33
3.2.4 小结	34
3.3 扁管管束结构优化实验研究	34
3.3.1 实验方案及测试参数	34
3.3.2 实验方法	36
3.3.3 测试结果	36
3.3.4 小结	38
参考文献	38
第 4 章 波节管承载性能及传热特性研究	40
4.1 波节管承载性能研究	40
4.1.1 波节管换热器管板应力分析	40
4.1.2 波节管承受外压失稳性能研究	43
4.1.3 波节管承受内压爆破性能研究	46
4.2 波节管换热器传热与流阻性能	50
4.2.1 波节管传热与流阻理论计算	51
4.2.2 波节管传热与流阻性能试验测试	54
4.2.3 试验结果与分析	56
4.2.4 准则方程式的确定	61
4.2.5 波节管内强化传热模拟分析	64
4.2.6 小结	66
4.3 波节管换热器流动与传热的研究	67
4.3.1 波节管传热与流动特性的数值模拟	67
4.3.2 实验验证	71
4.3.3 小结	71
4.4 波节管当量壁厚研究	72
4.4.1 波节管和光管轴向刚度有限元分析	73
4.4.2 结果数据拟合	74
4.4.3 当量壁厚 δ_d 计算	76
4.4.4 当量壁厚计算程序	76
参考文献	77

第 5 章 翅片管传热性能研究	78
5.1 翅片管单管传热性能测试分析与评价	78
5.1.1 试验装置及测试流程	78
5.1.2 测试结果与分析	78
5.1.3 小结	81
5.2 圆弧形组合开缝翅片传热特性数值模拟	81
5.2.1 物理模型	81
5.2.2 控制方程	83
5.2.3 标准 $k-\epsilon$ 湍流模型	83
5.2.4 网格划分	84
5.2.5 边界条件	84
5.2.6 计算方法	84
5.2.7 数据整理与结果分析	85
5.2.8 小结	86
参考文献	86
第 6 章 圆管振动强化传热研究	88
6.1 振动圆管内对流传热特性及场协同分析	88
6.1.1 物理模型及计算方法	88
6.1.2 数值计算结果	89
6.1.3 强化传热原因分析	89
6.1.4 小结	92
6.2 脉动流绕过横向振动圆管的换热特性研究	92
6.2.1 模型分析	93
6.2.2 边界条件	95
6.2.3 计算结果	95
6.2.4 小结	98
6.3 脉动流沿不同方向绕过振动圆管的传热特性研究	99
6.3.1 计算模型	99
6.3.2 边界条件	100
6.3.3 计算结果分析	100
6.3.4 小结	102
参考文献	104
第 7 章 螺旋槽管脉动流传热及场协同分析	106
7.1 螺旋槽管层流脉动流强化传热特性	106
7.1.1 计算模型及边界条件	106
7.1.2 计算结果与讨论	107
7.2 螺旋槽管内脉动流流动试验研究	109
7.2.1 脉动流强化传换热器	110
7.2.2 实验系统以及其他辅助设备	113
7.2.3 实验流程	118
7.2.4 试验结果分析	118
7.2.5 数值模拟和实验结果的比较	119
7.3 小结	123
参考文献	123
第 8 章 横纹管脉冲流强化传热研究	124
8.1 物理模型和控制方程	124
8.2 数值计算	124
8.3 分析与讨论	125
8.4 小结	129
参考文献	129
第 9 章 波节管脉冲流强化对流换热研究	131
9.1 换热管脉冲强化传热数值分析	131
9.1.1 计算模型及边界条件	131
9.1.2 计算结构分析	132
9.2 换热管脉冲强化传热实验研究	134
9.2.1 脉冲流发生器的选择	134
9.2.2 实验方案和其他设备	134
9.2.3 实验步骤	136
9.2.4 实验结果分析	137
9.2.5 实验的误差分析	139
9.3 小结	139

参考文献	140		
第 10 章 换热管内插弹簧强化传热及阻垢特性研究	141		
10.1 内插螺旋弹簧换热管传热特性试验	141	10.2.1 几何模型	143
研究	141	10.2.2 数值模拟	144
10.1.1 试验装置及条件	141	10.2.3 计算模型和边界条件	144
10.1.2 试验结果分析	142	10.2.4 计算结果及讨论	145
10.2 内插自振弹簧换热管流动与传热特性的	143	10.3 小结	147
数值模拟	143	参考文献	148
第 11 章 折流板开孔换热器传热特性研究	149		
11.1 折流板开孔数量与布局对换热器性能的影响研究	149	11.3 折流板扩孔传热特性研究	154
11.1.1 实验设备及方案	149	11.3.1 实验目的及内容	155
11.1.2 实验结果分析	150	11.3.2 实验装置及方法	155
11.2 折流板开孔孔径对换热器壳程性能的影响研究	152	11.3.3 扩孔数量、布局试验结果与分析	155
11.2.1 实验设备及方案	152	11.3.4 扩孔孔径实验结果与分析	158
11.2.2 实验结果与分析	153	11.4 小结	159
		参考文献	160

第 1 章 绪 论

1.1 概述

传热是自然界和工程技术领域中极普遍的一种传递过程，用来完成各种热传递过程的换热器是化工、石油、制药、能源等工业部门中应用相当广泛的单元设备之一。例如，在热电厂中，如果把锅炉也作为换热设备，换热器的投资约占整个电厂总投资的 70%；在制冷机中，蒸发器的质量要占制冷机总质量的 30%~40%，其动力消耗约占总值的 20%~30%；在化学工业中所用换热器的投资大约占设备总投资的 30%左右，在炼油厂中换热器占全部工艺设备的 40%左右，海水淡化工艺装置则几乎全部是由换热器组成。

换热器又称热交换器 (Heat Exchanger)，主要用于工艺过程中冷、热流体的热量传递^[1]。工业生产中，换热器的主要作用是使工艺介质的温度达到规定的指标，以满足工艺流程的需要。传统管壳式换热器具有结构简单、可靠性高、适应压力范围广、选材范围大、成本低，且设计、制造和使用技术成熟等优点，特别在处理量大、高温和高压等高参数工况下，管壳式换热器更突显其独特优势。但是，传统管壳式换热器的壳程流体流动时在转折区及进出口附近涡流的滞留区都会形成流动和传热死区，如图 1-1 中 B 区所示，从而降低了传热效率。另外，壳程流体横向冲刷换热管束，造成流动阻力，在大雷诺数下换热管束容易发生流体诱导振动，从而导致换热管泄漏失效。

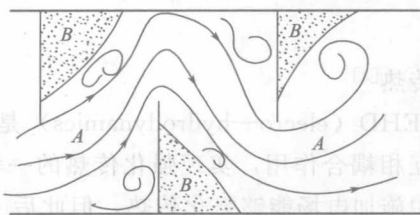


图 1-1 弓形折流板管壳式换热器壳程流场示意图

自从 20 世纪 70 年代初发生世界性能源危机以来，能源费用在制造成本中所占的比例迅速增大。随着现代工业的飞速发展，一方面能源紧张的状况愈演愈烈，另一方面各工业生产过程中存在很大的节能潜力。如何高效回收化工、石油等工业生产过程中存在的大量余热并加以充分利用，离不开经济、高效的换热设备。因此，传统的管壳式换热器在结构和性能上都有待进一步完善，强化传热技术的研究逐渐兴起。

强化传热技术是指能显著改善传热性能的节能新技术，其主要内容是采用强化传热元件，改进换热器结构，提高传热效率，从而使设备投资和运行费用最低，以达到生产的最优化。换热设备传热过程的强化主要是使换热设备能在单位时间内、单位面积上传递的热量达到最大化从而实现下述目的：①减少设计传热面积，以减小换热器的体积和质量；②提高现有换热器的换热能力；③使换热器能在较低温差下工作；④减小换热器的阻力，以减少换热器的动力消耗。目前，换热器设备研究主要集中在两大方向上，一是开发新的换热器类

型；二是对传统的管壳式换热器采用强化措施。

1.2 强化传热技术的分类

强化传热技术有多种，可以针对其不同特点，从不同的角度进行分类。

从被强化的传热过程可以分为：导热过程的强化、辐射传热过程的强化和对流换热过程的强化三类。

导热是热量传递的三种基本方式之一，同样也存在着强化问题。导热是依靠物体中的质量（分子、原子或自由电子）运动来传递能量。固体内部不同温度层之间的传热就是一种典型的导热过程^[2]。导热过程的强化就是在高热流场合下，设法降低接触热阻尽快导出热量，一般可以采用的方法有：①提高接触面面积或者接触面的光洁度；②填充热导率较高的介质于接触面之间；③于接触面上添加金属涂抹或者金属垫片。

辐射传热过程普遍存在于自然界和许多生产过程中，只要物体温度高于绝对零度，它就能依靠电磁波向外发射能量，所以物体之间总是存在着辐射换热，在物之间温度差别不是很大的情况下，辐射换热可以忽略，但在高温设备中辐射却是换热的主要方式。因此，可以通过改变辐射的影响因素：材料、固体微粒、表面粗糙度等来提高高温设备的辐射传热效果。

对流强化传热与流体的物理特性、流动状态、流道几何形状、有无相变发生以及传热壁面的表面状况等许多因素有关。对流换热强化技术按其是否附加动力源可以划分为有源强化和无源强化，有源强化技术必须依赖外加机械力或者电磁力的帮助，无源强化技术除了流体介质传动的必要功率消耗外，无需再附加外部动力。

在以上三种强化传热过程中，对流换热强化技术涉及面最广、研究最多且工业应用最为广泛，所以本书主要介绍对流换热强化技术。

1.2.1 有源强化技术

(1) 电流体动力学强化传热^[3]

电流体动力学强化传热 EHD (electro—hydrodynamics) 是在流体中施加高压静电场，利用电场、流场和温度场的互耦合作用，实现强化传热的一种有源强化方法。早在 1916 年，美国学者就发现在流体中施加电场能够强化传热，但此后 40 多年，该项技术并未引起人们的重视。近年来，由于余热利用、高效暖通空调系统、海洋能和地热能开发中对小温差传热的要求，加上 EHD 强化传热具有效率高、功耗低、易于控制等一系列优点，该研究逐渐受到重视。对 EHD 强化传热的研究主要从以下 3 个方面进行：①试验确定传热系数与外加电场的关系；②从流体在电场中的受力角度进行理论分析；③应用数值模拟对 EHD 强化传热进行研究。目前 EHD 强化传热研究处于以实验积累数据为主的研究阶段。研究认为，外加高压电场可以引起加热表面附近介电流体的附加运动，使换热器传热系统较易进入混沌状态，从而强化传热过程。

(2) 超声波抗垢强化传热^[4]

超声波在液体介质中传播时会产生机械振动作用、空化作用和热作用，这些作用同时产生效应时，会减弱成垢物质的分子间结合力以及析出垢粒与管道间的附着力，破坏污垢生成和板结的条件，阻止污垢生长，从而实现防垢的功能。同时，超声波也可导致已形成的污垢脱落，形成松散而不易板结的沉淀物，达到除垢作用。因此，超声波可使换热器表面污垢热

阻减小,总传热系数提高,起到了强化传热和除垢的作用。超声波抗垢装置主要由超声波发生器、传声系统和换热器组成。中国蓝星化学清洗总公司研究认为,超声波有明显的阻垢功效,施加 20kHz 的声波可使钙离子和碳酸根离子的结合过程变得很缓慢,阻垢率达到 85% 以上。

(3) 流体诱导振动强化传热^[5]

流体诱导振动在管壳式换热器使用过程中极为普遍,且破坏性很大。以往只能防止它,没能够被利用。近年来,随着换热器技术的发展,一些科研单位对换热器流体诱导振动进行了深入的研究,提出了很多有价值的方法和理论。换热器长时间运行后,在换热管壁上会附着很多污垢,换热管的振动能够有效地去除污垢,提高传热效率。在传热管内插入圆珠、圆管等内件可以使流体出现卡门涡街现象,诱导流体差生弹性振动,增加流体的紊流程度,破坏壁面附近的层流层,从而限制污垢在壁面沉积;另外,圆珠不断地敲击管壁,使污垢自行脱落,从而达到清除污垢、提高传热系数和强化传热之目的。

(4) 扰流装置

为了提高管内层流状态下的传热系数,可在管内插入金属网、扭曲带、静态混合器、环、盘等元件,使流体产生径向流动,加强流体的混合,因而可使传热系数提高。旋流片结构如图 1-2 所示,旋流片被插入管内时,可使流体边界层减薄,加强流体的混合,使管内流体温度场和速度场分布均匀,达到强化传热的目的。



图 1-2 旋流片

1.2.2 无源强化技术

无源强化,即在不消耗外功的情况下主要通过改变换热器形状和结构来实现强化传热效果,是目前工业强化传热的主要方法。由换热器传热的基本关系式(1-1)可知,传热量 Q 与传热面积 A 成正比,与冷热流体间的平均温度差(推动力)成正比。

$$Q = KA\Delta t_m \quad (1-1)$$

式(1-1)又可表示为

$$\frac{Q}{A} = \frac{\Delta t_m}{1/K} = \frac{\Delta t_m}{R} \quad (1-2)$$

其中, $R=1/K$ 称为传热总热阻。式(1-2)表明,单位传热面积的传热效率与传热推动力成正比,与热阻成反比。因此,工艺设计和生产实践中大多是增加传热面积 A 、平均温差 Δt_m , 或者降低传热总热阻 R 使传热量 Q 增大。

1.2.2.1 改变换热器结构强化传热

改变换热器结构强化传热即增加传热面积或采用特殊结构来提高换热器的传热系数。但传热面积过大则成本增加,不能仅靠增大换热器尺寸来强化传热,还需从设备的结构入手,提高单位体积的传热面积。下面介绍几种高效能传热面,不仅增加了传热面,还改善了流体的流动状态。

(1) 翅化面

用翅片来扩大传热面积和促进流体的紊流是强化传热的有效方法。翅化面的种类和形式很多,用材广泛,制造工艺多,如翅片管式换热器、板式换热器等均属此类。

① 锯齿形翅片管 锯齿形翅片管是一种新型传热管,其翅片外缘有锯齿缺口,加强了流体的扰动,促进对流换热,换热面积增大,从而使换热量增大。锯齿管的传热系数是光管的6倍,是低肋管的1.5~2倍。花瓣形翅片管是一种特殊的三维翅片结构强化传热管,从截面上看,各翅片像花瓣状而得此名。花瓣形翅片管既能显著地强化低表面张力介质及其混合物和含不凝性气体的水蒸气的冷凝传热,又能显著地强化空气和高黏性流体的冷却传热。有研究表明,自然对流条件下,花瓣形翅片管的传热系数比锯齿形翅片管提高了8%~10%,且在强制对流下,其传热系数是光管的5~6倍。

② 斜针翅管 斜针翅管^[6]的优点是扩大了二次换热面积,保持较小的管距,利用流体的不断扰动,破坏流体的层流边界层,增加紊流度,从而达到强化传热的效果。

流体流经换热管表面时总存在一层滞留内层,该层传热仅为热传导,导热热阻很大,流体的流速和温度都属于抛物形,只有使滞留层消除或变薄才能够减小热阻,强化传热。斜针翅管强化传热的机理是在扩大二次传热面的同时,利用流体扰动,提高紊流度,破坏边界层,同时阻止了污垢的积累,达到强化传热和阻垢的双重效果。研究表明,壳程流体的纵向流动,可有效地避免了流体诱导振动,防止管子因振动破坏而失效。另外,斜针翅管具有折流杆换热器的特点,这种传热元件的换热面积能够有效地被利用,不存在换热死区间,并且增加了换热面积。在同等条件下,其换热面积较光管可提高10%以上。

③ 新型钉翅管 新型钉翅管^[7,8]的结构是在光管的外表面交错地排列一个个钉翅。理论和实验研究表明,与光管相比新型钉翅管所消耗的比功并不大,但传热效果明显增强,其传热系数是普通光管的100倍左右,是翅片管的10倍左右,是百叶窗翅管的5倍左右,其努塞尔数 Nu 是光管的65~105倍。可见,与其他翅片管相比,新型钉翅管的传热效果最好。图1-3为内展翅片管,此结构使得管内承压强,体积小,传热面积大。

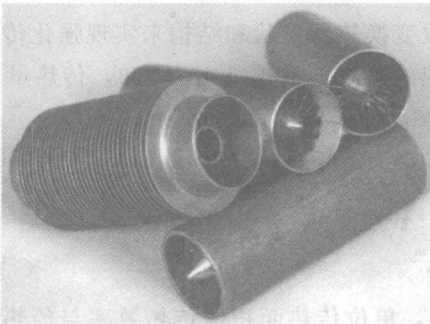


图 1-3 内展翅片管

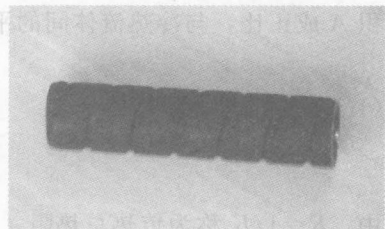


图 1-4 螺旋槽管

(2) 异形表面

用轧制、冲压、打扁或爆炸成型等方法将传热面制造成各种凹凸形、波纹形、扁平状等,使流道截面的形状和大小均发生变化。这不仅使传热表面有所增加,还使流体在流道中的流动状态不断改变,增加扰动,减少热边界层厚度,从而使传热过程得到强化。工业生产中,主要应用的异形管包括螺旋槽管、旋流管、波纹管、缩放管、螺旋椭圆扁管、交界面管、内肋管^[9]等。这种换热管具有结构紧凑、加工方便、传热面积大、传热效果好等一系列优点。

① 螺旋槽管 螺旋槽管(图 1-4)是表面具有螺旋形凹槽的一种强化传热管,传热管内外表面的凸起或槽纹,干扰了管内流体的流动,破坏了层流边界层,使得紊流程度增强,促进了换热管同流体间的热交换;同时,湍流度的增加也有助于避免污垢在传热管壁面的沉积。螺旋升角对传热性能的影响很大,较大的螺旋升角更有利于换热^[10]。研究表明,螺旋槽管换热器比光管式换热器的传热系数提高了 2~4 倍,在阻力损失和换热面积相同时,其换热量可增加 30%~40%。

旋流管是螺旋槽管的衍生品,也叫异形螺旋槽管,其槽纹是半流线的勺形或 W 形。流体在管内流动呈波状流动,其传热机理与螺旋槽管大体相同。这种传热管的传热面积和传热系数大大增加,其传热系数比光管提高 3.5 倍,且在相同传热量下旋流管的传热系数比螺旋槽管提高 3%~8%,而压力损失降低 5%~10%。

② 波纹管 波纹管(图 1-5)是表面有波纹凸起的强化换热管。流体在管内流动时,由于截面不断变化,可以增强流体扰动,破坏层流边界层,以达到强化传热的效果。波纹管的传热效率通常是光管的 2~4 倍,同时还具有较强的除垢能力。由于波纹管的壁厚较薄,可以在一定程度上自由伸缩,因而其温差应力相对较小。

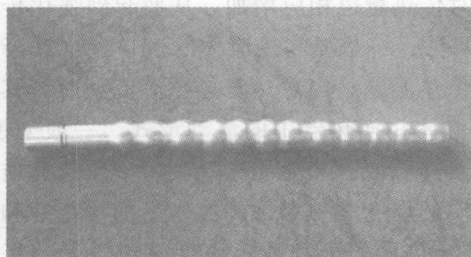


图 1-5 波纹管

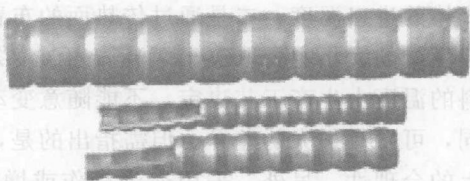


图 1-6 横纹管

③ 横纹管 横纹管(图 1-6)是由光管的外表面被滚压成一圈圈有序的环形凹槽而成,且环形凹槽与管子轴线成 90° 夹角。影响横纹槽管综合传热性能的主要结构参数为肋间距和肋形,而肋高的影响较小,但传热综合因子随流动 Re 数增大而迅速降低。横纹管的传热性能和抗垢能力优于光管和螺旋管,其渐近污垢热阻值约为光管的 0.83 倍,且污垢状态下横纹管的强化比约为 1.4^[11]。

④ 螺旋椭圆扁管(扭曲管) 螺旋椭圆扁管是把圆形光管压成椭圆形,再经旋转扭曲而成,如图 1-7 所示。流体在管内处于螺旋流动状态,因而破坏了管壁附近的层流边界层,提高了传热效率。这种管型的特点包括相邻管子的椭圆长轴相互接触,相互支撑,无需附加的管束支撑物,节约了材料和成本;同时自支撑作用减小了管束间的振动和磨损,延长了设备的使用寿命。

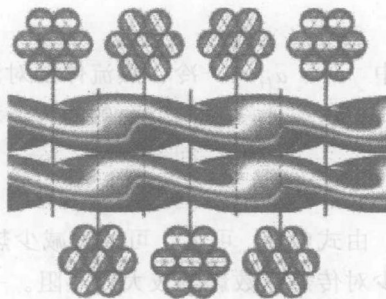


图 1-7 螺旋扁管

研究表明,螺旋椭圆扁管换热器具有较好的强化传热性能,管径大小和螺旋导程对传热和阻力性能均有影响。从综合性能来看,大管径优于小管径;对于相同规格管子,导程增大,传热性能降低,流动阻力减小^[12]。这种结构的换热器与光管换热器相比,其热流密度可提高 50%,容积减小 30%。

(3) 多孔介质结构

多孔介质是一种性能优良的管内强化插入物,其定义非常广泛。所谓多孔介质,是指多孔固体骨架构成的空隙空间中充满了单相或多相介质。固体骨架遍及多孔介质所占据的空间,空隙之间相互连通,其内的介质可以是气相流体,液相流体或气液两相流体。该结构的主要物理特征是空隙尺寸极其微小,比表面积很大^[13]。插入多孔介质可以使管内流体的有效热导率大幅提高,从而大大增强了换热管的传热性能。工业上常采用烧结、机加工或其他方法将传热表面处理成表面多孔结构,以实现扩大传热面积的目的。

(4) 采用较小的管径

较小的管径可增大换热面积,从而提高传热系数。尤其是气体在管外流动时,传热系数提高最为显著。但此强化传热措施也带来了一些矛盾,如增大了流动阻力,设备维修费用增加,制造工艺复杂等。因此,应根据实际情况来选择合适的强化传热措施。

1.2.2.2 增大平均温度差

对数平均温差计算式如下:

$$\Delta t_m = (\Delta t_1 - \Delta t_2) / \ln(\Delta t_1 / \Delta t_2) \quad (1-3)$$

由传热方程式(1-1)可知,增大传热温差 Δt_m 时传热量也相应增加,从而起到强化传热的目的。由式(1-3)可知,增大传热温差的方法有两种:一是提高热流体的进口温度或降低冷流体的进口温度;二是通过传热面的布置来提高传热温差。当冷热流体顺流流动时,其平均温差的大小主要取决于两流体的温度条件和两流体在换热器中的流动形式。一般来说,物料的温度由生产工艺决定,不能随意变动,而加热介质或冷却介质的温度由于所选介质的不同,可以有很大的差异。但需指出的是,提高介质的温度必须考虑到技术上的可行性和经济上的合理性。另外,采用逆流操作或增加管壳式换热器的壳程数,均可得到较大的平均温差。

1.2.2.3 增大总传热系数

增大总传热系数,可以提高换热器的传热效率。总传热系数的计算公式为

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_C} + R_1 + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_H} + R_2} \quad (1-4)$$

式中 α_C 、 α_H ——冷、热流体的对流传热系数, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$;

R_1 、 R_2 ——间壁两侧的为污垢热阻, $\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$;

δ ——间壁厚度, mm ;

λ ——间壁材料热导率, $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ 。

由式(1-4)可见,可通过减少热阻来提高传热系数,而各项热阻所占比例不同,应设法减少对传热系数影响较大的热阻。一般来说,金属材料的壁面较薄且热导率高,不是主要的热阻;污垢热阻是可变因素,在换热器刚投入使用时污垢热阻很小,不会成为主要矛盾,但随着使用时间的延长,污垢逐渐增加,可成为阻碍传热的主要因素;对流传热热阻往往是传热过程的主要矛盾,应是着重研究的内容。提高流体的速度,使流体的紊流程度加剧,可减少层流底层的厚度,即减少了对流传热的热阻。例如在管壳式换热器中增加管程数和壳程的挡板数,可分别提高管程和壳程的流速。

1.2.3 其他强化传热方法

(1) 纳米材料强化传热^[14]

纳米流体跟纯液体相比,由于粒子与粒子、粒子与液体、粒子与壁面间的相互作用及碰撞,使得换热表面层流边界层被破坏,从而强化传热过程。相同粒子体积含量下,纳米粒子的表面积和热容量远大于毫米或微米级粒子。因此,纳米流体可降低循环泵的能量消耗,降低成本,减小热交换器的体积。由于纳米材料的小尺寸效应,其行为接近于液体分子,纳米粒子强烈的布朗运动有利于保持稳定悬浮而不沉淀,从而有效地避免了毫米或微米级粒子易产生的磨损或堵塞现象。同时,可对悬浮液流动起到润滑的作用。换热器中如果利用纳米介质换热,传热效率将大大提高,与之相匹配的各种换热器将相继开发出来,可以节约能源,降低成本。

(2) 脉动强化传热^[15]

气流中的脉动会使热传递增强,当脉动程度足够强时,气流产生逆向流动,起到强化传热的目的。脉动对热传递的影响主要在于边界层附近流动状态的改变。脉动对强化传热的影响因素主要包括:

- i. 既然脉动气流在较低的平均雷诺数下能变为紊流状态,那么脉动将使这个流动跃进为彻底的紊流流动;
- ii. 脉动造成一个声流,在接近壁面的地方造成一股轴向回流漩涡型的二次流动;
- iii. 脉动剥离了边界层,即从传热表面清除了热阻层;
- iv. 脉动增加了边界层内和靠近边界层附近区域的切应力,从而产生了较高的紊流强度。

(3) 场协同原理强化传热^[16]

场协同原理是通过改变冷热流体的流动方式来提高传热性能,即冷热流体的温度越均匀,则冷热流体温度场的协同越好,其换热效能就越高。该技术的控制原理是在主流体中加入另一种组分的物质,并控制浓度梯度与速度方向来强化对流传热。若加入的物质是某种电解质或磁介质同时通过施加外电场或外磁场,控制浓度梯度和梯度方向即可起到强化传热的作用。这为换热器的结构设计提供了理论依据,是一种新的传热强化技术。

1.3 强化传热技术的发展

强化传热技术是20世纪60年代发展起来的一门旨在改进换热器性能的新兴技术,但由于当时工业生产水平对传热强化的要求不是很迫切,对于强化传热的研究基本属于实验科学,还不是很成熟,属于第一代传热技术。从20世纪70年代石油危机开始,国际传热界加强了传热传质过程机理的研究,发展了第二代传热强化技术,以提高过程效率和节省能耗^[17]。20世纪末期,研究者重新审视换热的物理机制,从场的角度研究传热现象的控制方式,从而发展出一些与传统技术有很大不同的对流换热强化新技术,即第三代传热技术。把两种或两种以上的强化措施同时应用,以期获得更大的强化传热效果,这些都被称为复合强化技术,也被预想为第四代传热技术。例如在粗糙管内或螺旋管内再加入纽带等插入物、在含插入物的管内或内翅管中放进传热流体的添加物、粗糙管壁面有流体质量透过等^[18]。

此外,强化传热的国际权威 Bergles 将被动强化传热技术划分为三代。对换热管而言,以光管为代表的第一代传热技术;以平翅片、二维粗糙元、二维肋片等为代表的第二传热技术;以三维粗糙元、三维微肋片等为代表的第三代传热技术^[19]。第二代传热理论和技术已经建立,并在动力和过程工业中获得广泛应用,现在需要的是更先进的强化技术或第三代传

第2章 强化传热基本理论

作为不同温度流体介质进行热量交换的通用设备^[1]，换热器家族越来越庞大^[2]（图2-1），近几十年来，高新技术的发展更是直接推动着强化传热技术的不断进步^[3]。一批新型、高效、实用的强化传热新技术相继出现，并且这种繁荣景象一直持续至今。作者对1969~2011年发表的17582篇强化传热相关文献进行统计，文献年度数据直观地体现了强化传热研究的快速发展历程，且在近5年进入一个高速发展期（图2-2）。强化传热技术作为一个传统的研究领域，正在蓬勃向前发展，而且随着强化传热技术在各个领域的应用，已经从第一代发展到现今的第四代^[4,5]。

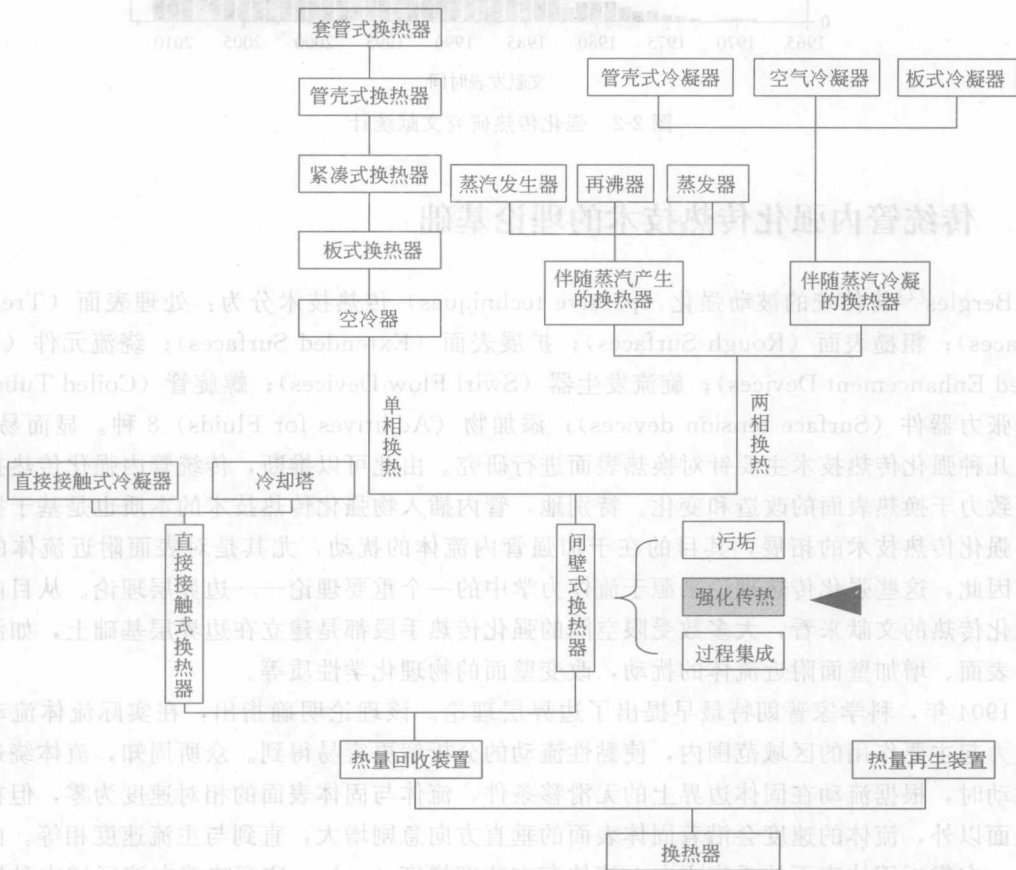


图2-1 换热器家族

强化传热技术经过多年的发展，众多学者提出了许多强化传热理论，为强化传热技术的研究和实施提供理论依据。但是，各个强化传热理论的出发点不尽相同，传统管内强化传热技术的理论基础是从热边界层出发，而核心流强化理论则重点考虑管内核心流；场协同理论和场物理量协同理论则是从流体流动与传热过程中的物理矢量、标量梯度之间的协同关系出发。

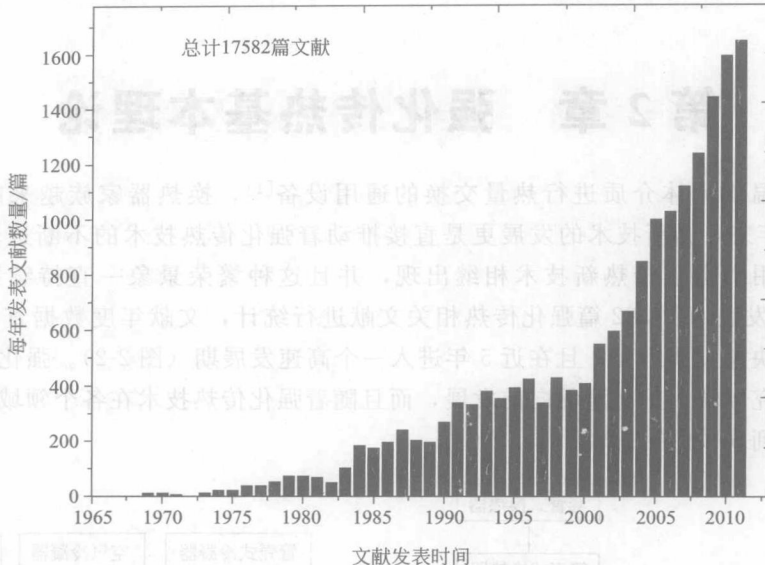


图 2-2 强化传热研究文献统计

2.1 传统管内强化传热技术的理论基础

Bergles^[4]将传统的被动强化 (passive techniques) 传热技术分为：处理表面 (Treated Surfaces)；粗糙表面 (Rough Surfaces)；扩展表面 (Extended Surfaces)；绕流元件 (Displaced Enhancement Devices)；旋流发生器 (Swirl Flow Devices)；螺旋管 (Coiled Tubes)；表面张力器件 (Surface tension devices)；添加物 (Additives for Fluids) 8 种。显而易见，以上几种强化传热技术主要针对换热表面进行研究。由此可以推断，传统管内强化传热技术主要致力于换热表面的改造和变化。特别地，管内插入物强化传热技术的本质也是基于换热表面强化传热技术的拓展，其目的在于加强管内流体的扰动，尤其是对表面附近流体的扰动。因此，这些强化传热理论来源于流体力学中的一个重要理论——边界层理论。从目前关于强化传热的文献来看，大多数受限空间的强化传热手段都是建立在边界层基础上，如添加扩展表面、增加壁面附近流体的扰动，改变壁面的物理化学性质等。

1904 年，科学家普朗特最早提出了边界层理论。该理论明确指出，在实际流体流动中黏性力起主要作用的区域范围内，使黏性流动的分析解更容易得到。众所周知，流体绕过物体流动时，根据流动在固体边界上的无滑移条件，流体与固体表面的相对速度为零，但在固体表面以外，流体的速度会沿着固体表面的垂直方向急剧增大，直到与主流速度相等。由此可见，在靠近固体表面的垂直方向上流体存在速度梯度 du/dy ，这意味着在该区域内黏性力会对流体流动起作用。普朗特的边界层理论认为，可以把流体绕固体表面的实际流动分为两个区域：①直接临近固体表面的薄层，该处的摩擦力对流体流动影响很大，黏性力的作用不可忽略；②固体表面薄层以外，流体在垂直方向上的速度梯度很小，黏性所造成的切应力可以忽略不计，可视为理想流体的无旋势流。这种在固体表面附近有很大速度梯度的薄层称为流动边界层（也称速度边界层）。

对于边界层的厚度可以通过以下方法进行估算，即在流体流动过程中，黏性的影响随着