

节 能 与 环 境 保 护 丛 书

强化传热技术

林宗虎 汪 军 李瑞阳 崔国民 等编著



化学工业出版社

节能与环境保护丛书

强化传热技术

林宗虎 汪 军 李瑞阳 崔国民 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书为《节能与环境保护丛书》之一。

本书全面系统地论述了表面式换热器中单相流体和两相流体强化传热技术，共分为10章。第1章为强化传热的意义、目的及其技术的发展等；第2~5章分别介绍了各种单相流体强制对流换热技术；第6~9章分别介绍池沸腾的强化传热、管道中强制对流沸腾换热、凝结换热、应用电场的强化传热技术；第10章还介绍了强化传热技术的工程应用。

本书可供动力工程、热能工程、化学工程和其他相关专业的工程技术人员阅读，也可作为相关专业的研究生教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

强化传热技术/林宗虎等编著. —北京: 化学工业出版社, 2006.9

(节能与环境保护丛书)

ISBN 978-7-5025-9357-5

I. 强… II. 林… III. 强化(热机)-传热 IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 117939 号

节能与环境保护丛书

强化传热技术

林宗虎 汪 军 李瑞阳 崔国民 等编著

责任编辑: 戴燕红

责任校对: 陈 静

封面设计: 关 飞

*

化学工业出版社出版发行

(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

购书咨询: (010)64518888

购书传真: (010)64519686

售后服务: (010)64518899

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市万龙印装有限公司装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 19½ 字数 511 千字

2007年1月第1版 2007年1月北京第1次印刷

ISBN 978-7-5025-9357-5

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

节能与环境保护丛书

主 编 林宗虎 院士

副主编 俞炳丰 教授

张 旭 教授

车得福 教授

序

为了全面建设小康社会、不断开创中国特色社会主义事业的新局面，必须大力推进科技进步和创新，进一步发挥科学技术对经济社会全面发展的关键性作用。要大力发展高新技术和先进适用技术。要大力加强能源领域的科技进步和创新，提高我国资源特别是能源和水资源的使用率，减少资源浪费。要大力加强生态、环境领域的科技进步和创新，降低污染物的排放，加强对废弃物的再次利用，发展循环经济。这些都是中央当前对我国广大科技人员提出的殷切希望和要求。

我国虽然资源不少，但人口众多，人均能源资源十分有限。人均化石燃料仅为世界均值的 56%，石油天然气人均可采储量仅为世界均值的 8%。水力资源可开发量虽达 3.79 亿千瓦，但人均不到 0.3 千瓦。且一次能源消耗中主要为煤炭，约占总能源消耗的 70%，即使到 2050 年，煤炭耗量预计也将占一次能源总耗量的 50%，因此环境污染严重。我国三分之一以上国土受到酸雨危害，如不采取措施，二氧化碳排放量预计将从 2000 年占全球总量的 12.7% 增加到 2020 年的 16.7%。此外，空气中的粉尘、二氧化硫和氮氧化物的污染也很严重。因此，加强节能、提高能源利用率和改善能量利用中的环境保护已成为我国经济持续发展中的一个重要课题。

随着我国国民经济发展和人民生活水平的提高，家用电器的大量使用和建筑业的迅速发展不仅使能耗进一步增大，并且引起新的环境保护问题。

为了促进和推动节能工作，改善能量利用中的环境保护，特编辑出版了这一套丛书。这套丛书共 9 本，书名分别为：《强化传热技术》，《烟气热能的梯级利用》，《蒸汽凝结水的回收及利用》，《建筑环境与建筑节能》，《热泵技术》，《城市垃圾的处理与利用技术》，《冷热电联产技术》，《热管技术》和《洁净燃烧技术》。每本著作均由知名专家根据国内外近期科研成果和工程实践执笔编著，可供大专院校师生、科研院所和工矿企业相关科技人员应用和参考。希望这套丛书能对我国的节能和环保事业的发展有所裨益。

中国工程院院士

林宗虎

前 言

在相关工程设备中采用强化传热技术，可以达到减小新设计换热器体积和质量、提高现有换热器换热能力或保证换热器能在更低温差下工作以及减少换热器阻力等目的。

随着世界经济的发展，全球能源和资源日渐短缺，研究和开发强化传热技术对于各国发展国民经济的重要作用与时俱增。

20世纪80年代中期前，有关强化传热技术的论文报告等资料主要散见于各种学术期刊。1987年林宗虎教授编著出版的《强化传热及其工程应用》一书可能是国内外第一本全面系统地论述表面式换热器中单相流体和两相流体强化传热技术的专著。此书出版后，在工程中得到了广泛的应用和引用，有效地促进了强化传热技术在我国的发展和推广，并为西安交通大学、上海理工大学等院校用做研究生教材，培育了一大批相关优秀人才。

至今，距该书出版已20年，在此期间强化传热技术在国内外都得到了迅速发展和推广。为了进一步总结和促进强化传热技术的发展及应用，我们特在该书基础上结合国内外最新相关科研成果编著了本书。

本书以论述表面式换热器的强化传热技术为主，共分10章。第1章、第7章、第10章由林宗虎编写，第2章、第8章由崔国民编写，第3章、第4章、第5章由汪军编写，第6章由王跃社编写，第9章由李瑞阳、黄烜编写。

全书采用我国法定计量单位，各章均附有参考文献，以便读者进一步查阅。

本书可作为动力工程、热能工程、化学工程和其他相关专业的研究生教材，也可供相关工程技术人员阅读参考。

限于作者水平，书中可能会存在一些不足乃至错误，敬请读者批评指正。

林宗虎等
2006年6月

目 录

1 绪论	1
1.1 强化传热的意义	1
1.2 强化传热的目的、途径及分类	2
1.3 强化传热技术的发展	6
1.4 强化传热技术的效应评价准则	7
参考文献	10
2 应用人工粗糙壁面等方法强化管内单相流体强制对流换热	12
2.1 单相流体管内对流换热概述	12
2.2 层流时管内强制对流换热强化	15
2.3 流动工况在过渡区时管内强制对流换热强化	19
2.4 紊流时管内强制对流换热强化	24
2.5 紊流时带周向凸出物管道的传热和阻力特性	36
2.6 纵向冲刷环形通道的强化传热及热力性能分析	46
参考文献	50
3 应用流体旋转法强化管内单相流体的强制对流换热	51
3.1 插有扭带的管内流体流动及传热特性	51
3.2 插有螺旋片的管子和螺纹槽管内流体流动及传热特性	62
3.3 插有螺旋线圈的管内流体流动及传热特性	69
3.4 螺旋内肋管和直内肋管的强化传热	72
参考文献	78
4 单相流体在管束中强制对流换热强化	81
4.1 单相流体冲刷光管管束时的强制对流换热概述	81
4.2 单相流体管束换热的强化方法	84
4.3 应用外壁周向人工粗糙度强化纵向冲刷管束的换热	85
4.4 应用横纹槽管强化纵向冲刷管束的换热	87
4.5 应用扩展表面强化横向冲刷管束的换热	91
4.6 扩展换热面的强化传热方法	103
4.7 应用外壁人工粗糙度强化横向冲刷管束的换热	122
参考文献	124
5 单相流体对流换热的其他强化技术	128
5.1 采用机械搅拌法强化容器中的对流换热	128
5.2 应用振动方法强化单相流体对流换热	134
5.3 应用添加剂法和抽压法强化单相流体的对流换热	139
5.4 应用复合强化传热方法强化单相流体对流换热	144
参考文献	150
6 池沸腾的强化传热技术	154
6.1 核态池沸腾换热概述	154
6.2 强化表面法	154
6.3 加入添加剂法	167
6.4 外加矢量场法	178

参考文献	184
7 管道中强制对流沸腾换热的强化传热技术	187
7.1 管道中强制对流沸腾换热概述	187
7.2 应用换热面表面粗糙法和表面特殊处理法强化传热	193
7.3 应用流体旋转法强化传热	196
7.4 应用扩展表面法强化传热	204
7.5 应用其他方法强化传热	209
参考文献	211
8 凝结换热的强化传热技术	212
8.1 凝结换热概述	212
8.2 管外凝结过程的强化技术	219
8.3 管内凝结过程的强化技术	233
8.4 珠状凝结的形成技术	235
8.5 热管及其强化传热	237
参考文献	245
9 应用电场的强化传热技术	249
9.1 电场强化传热技术概述	249
9.2 空气对流换热的电场强化技术	255
9.3 液体自然对流换热的电场强化技术	258
9.4 沸腾换热的电场强化技术	263
9.5 凝结换热的电场强化技术	274
参考文献	276
10 强化传热技术的工程应用	280
10.1 工程设备中采用强化传热技术应有的总体考虑	280
10.2 强化传热技术在锅炉设备中的应用	282
10.3 强化传热技术在凝结器、燃气轮机及其他动力设备中的应用	289
10.4 强化传热技术在制冷工程中的应用	292
10.5 强化传热技术在石油化工工程中的应用	298
10.6 强化传热技术在其他工程中的应用	301
10.7 强化传热技术的应用状况及前景	302
参考文献	304

1 绪 论

1.1 强化传热的意义

工质的流动和传热是动力、核能、制冷、化工、石油、航空、火箭与航天等工业中的常见过程。在这些工业的换热设备中广泛存在着各种传热问题。以动力工业中的火力发电厂为例，蒸汽锅炉本身就是一个大型复杂的换热器。燃料在炉膛中燃烧生成的热量，需要应用多种传热方式，通过炉膛受热面、对流蒸发受热面、过热器及省煤器加热工质，使之汽化、过热，成为能输往蒸汽轮机的符合要求的过热蒸汽。此外，在锅炉尾部还装有利用排出烟气加热燃烧所需空气的空气预热器。在火力发电厂的热力系统中还装有各式给水加热器、蒸汽凝结器、燃油加热器等，在这些设备中也都存在各式各样的传热问题。

在核电厂中，以压水堆核电厂为例，核燃料在反应堆中由于核裂变产生的大量热量先传给冷却剂，冷却剂在反应堆中吸热后在蒸汽发生器中将热量传给水，使水汽化成蒸汽，驱动汽轮发电机发电。在这些设备中，以及在核电厂系统中装设的各种加热器、蒸汽凝结器内，都存在各类传热过程。

在制冷工业中，以食品冷藏和医疗卫生事业常用的以氨为制冷剂的蒸气压缩制冷装置为例，经过压缩机压缩后的气态氨在凝结器中被冷凝为液体，液化后的高压液氨在膨胀机或节流阀中绝热膨胀，使温度下降到远低于周围环境温度。这种低温氨流体在流经蒸发器（布置在冷藏室中）时吸热蒸发而恢复到原先进入压缩机时的氨气状态。此后，再重复新的循环。在上述的以氨或其他工质为制冷剂的蒸气压缩制冷装置中，以及其他诸如蒸气喷射式和吸收式制冷装置中，都存在凝结器和蒸发器等换热器，因而也都存在传热问题。

在航空、火箭以及航天工业中，发动机及辅助动力装置在运行时析出的热量必须及时传出。在亚音速飞行时，航空发动机及辅助动力装置通常用空气或燃料油进行冷却。在高超音速飞行时，进入飞行器的空气由于气动力加热，不能再用作冷却剂，此外飞行器本身的机舱、仪器设备和结构部件也需要冷却，所以冷却只能依靠飞行前储存好的冷却剂进行。作为冷却剂的燃料油、制冷液或水等都是通过换热器吸收各种系统中的热量，因而现代飞行器均带有存在各种传热过程的换热器，如保证发动机和辅助动力装置正常运转的冷却装置、机舱冷却装置、仪表冷却装置等。在其他工业中也不难列举出存在一系列与加热、冷却、蒸馏、供暖等传热过程有关的换热器。

换热器在上述各工业中，不仅是保证工程设备正常运转的不可缺少的部件，而且在金属消耗、动力消耗和投资方面，在整个工程中占有重要份额。

据统计，在热电厂中，如果将锅炉也作为换热设备，则换热器的投资约占整个电厂总投资的70%左右。在一般石油化工企业中，换热器的投资要占全部投资的40%~50%；在现代石油化工企业中约占20%~30%。

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%。

由此可见，换热器的合理设计、运转和改进对于节省资金、材料、能源和空间而言是十分重要的。

近 30 年来, 各种工业飞速发展。由于增大设备容量可以减少设备的投资和运转费用, 各工业部门均大力发展大容量设备。火力发电设备容量已发展到 130 万千瓦的水平; 核能发电也发展到同一数量级。尖端工业如火箭、航空、航天等工业也都蓬勃发展。大容量设备在布置上要求提供尺寸小而容量大的换热器; 火箭、航空、航天等工程设备因空间及动力有限, 更需要采用尺寸小、质轻的紧凑式换热器。

此外, 由于世界上煤、石油、天然气等化石燃料资源储量有限, 能源短缺, 各国都在积极进行新能源的开发和化石燃料的高效洁净利用工作, 以解决能源紧张局面。与此同时, 还积极开展余热回收及节能工作。在可供开发的新能源中也存在各种传热问题。例如, 在太阳能利用中存在各种集热器、接收器的热损失问题和各种换热器的传热问题。在利用海洋表面海水和深层海水的温差 ($15\sim 20^{\circ}\text{C}$) 进行发电的海洋温差发电系统中, 应用海洋表面温热海水在蒸发器中加热氨等低沸点工质产生蒸气推动汽轮发电机发电, 自汽轮机排出的蒸气再在冷凝器中用深层冷海水冷凝成液体。这种发电系统的特点是传热温差很低, 因此, 蒸发器和冷凝器的体积都较大, 其投资费用约占整个电厂系统总投资的 50%。所以, 这种发电系统成功的关键在于能否制成高传热系数的换热器。在高效洁净利用化石燃料的磁流体蒸汽联合循环发电装置中, 燃料在燃烧室中燃烧产生的高温导电气体经喷管加速后进入发电通道, 高温高速气体与磁场相互作用产生电流, 自发电通道排出的排气余热可加热空气并经蒸汽发生器产生蒸汽, 后者再推动蒸汽轮机发电。在这种发电装置中, 在燃烧室、蒸汽发生器和空气预热器等部件中都存在复杂的传热问题。在利用地热发电以及形式众多的余热回收装置中, 传热更是必然遇到的课题。余热回收装置离不开换热器, 而且余热换热器常在较小的传热温差下工作, 通常要求采取有效的强化传热技术, 以提高传热量, 减小换热器的体积和质量。

近年来, 随着巨型计算机和现代微电子技术的迅速发展, 高度集成化和密集布置的大功率电子元件在电子设备中产生的热负荷可高达 $10^6\text{W}/\text{m}^2$ 以上。电子元件的有效冷却是电子设备性能和工作寿命的必要保证。对于这种超高热负荷的电子元件的冷却已成为当代高新技术发展中亟须解决的关键问题。

综上所述可见, 研究各种传热过程的强化技术并依此设计新颖的紧凑式换热器, 不仅是现代工业发展过程中必须解决的课题, 同时也是开发利用新能源和开展节能工作的紧迫任务。因而研究和开发强化传热技术对于发展国民经济的意义是十分重要的。

1.2 强化传热的目的、途径及分类

1.2.1 强化传热的目的

各种工业设备对强化传热的具体要求各不相同, 但归纳起来, 应用强化传热技术总的可以达到下列任一目的:

- ① 减小初设计的传热面积, 以减小换热器的体积和重量;
- 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 减少换热器阻力, 以减少换热器的动力消耗。

上述目的要求是相互制约的, 要同时达到这些目的是不可能的。因此, 在采用强化传热技术前, 必须先明确要达到的主要目的和任务以及达到这一主要目的所能提供的现有条件, 然后通过选择比较, 才能确定一种合用的强化传热技术。

由于工业中换热器的用途各不相同, 换热器中管道形式众多, 换热器工质种类、物性以及工质流动时所处的雷诺数 (Re) 区域差别很大, 因而很难定出一种适用于各种情况的强

化传热技术以及得出一些可确定一切强化传热技术的传热系数与阻力工况的通用计算式。

一般可采用下列方法解决强化传热技术的选用问题。

① 在给定工质温度、热负荷以及总流动阻力条件下，先用简明方法对拟采用的强化传热技术从使换热器尺寸小、质轻的角度进行比较。这一方法虽不全面，但分析表明，按此法进行比较得出的最佳强化传热技术一般在改变固定换热器三个主要性能参数（换热器尺寸、总阻力和热负荷）中的其他两个，再从第三个性能参数最佳角度进行比较时也是最好的。

② 分析需要强化传热处的工质流动结构、热负荷分布特点以及温度场分布工况，以定出有效的强化传热技术，使流动阻力最小而传热系数最大。

③ 比较采用强化传热技术后的换热器制造工艺、安全运行工况以及经济性问题。

最后可定出适用于某一换热器工况的最佳强化传热技术。

1.2.2 换热器及其工作过程

为了论述换热器中强化传热的途径，必须先对换热器及其工作过程概况做一介绍。

换热器是一种能使冷热两种流体在其中通过传热进行热量交换的装置。各种工业中的换热器尽管形式众多、功用不一，但就其工作过程而言，可分为表面式、蓄热式和混合式3种。

在表面式换热器中，冷热两种流体进入换热器后被壁面隔开，互不接触，热量由热流体通过壁面传递给冷流体。这种形式的换热器应用最广，如锅炉中的过程器，再热器、省煤器、管式空气预热器，蒸汽轮机中的凝结器、油冷却器、表面式加热器，制冷装置中的各种表面式蒸发器等，均属此类。表面式换热器又可分为管壳式、套管式、螺旋板式等品种。

蓄热式换热器的换热面本身是一个蓄热体，冷流体和热流体周期性地交替流过同一换热面。热流体流过时是加热期，热量储蓄在换热面壁面内；冷流体流过时为冷却期，壁面此时将储蓄的热量传给流体。在这种换热器中，热量传递是通过换热壁面周期性地加热和冷却来实现的。锅炉和燃气轮机中的回转式空气预热器就是一种蓄热式换热器。

混合式换热器中的热量交换是依靠冷热流体直接接触和混合来实现的，在传热的同时还存在传质过程。火力发电厂中的除氧器、冷水塔均为混合式换热器。

工程中的换热器大多是表面式换热器，而且至今强化传热技术也主要用于表面式换热器，因而本书也以表面式换热器中的强化传热技术为主进行论述。

换热器运行时，如各部分温度、压力等参数不随时间而变，则这一传热过程称为稳定传热过程。反之，如温度、压力等参数是随时间变化的，则称为不稳定传热过程。本节着重讨论稳定传热过程的强化传热技术。

1.2.3 表面式换热器的强化传热途径

1.2.3.1 表面式换热器传热计算式

由传热学可知，根据热量传递过程的物理本质的不同，热量传递有3种基本方式：导热、对流换热和辐射换热。不同传热方式遵循不同的传热规律。

实际换热器中的传热过程是一种复杂的复合传热，往往有2种或3种基本传热方式同时起作用。以锅炉的过热器为例，管外流动的高温烟气通过对流和辐射方式将热量传给过热器管子外壁，然后依靠导热将热量传给管子内壁，最后通过对流换热将热量传给管子中流动的蒸汽。如果热流体（即烟气）温度不高，辐射换热可忽略不计，则在过热器中可近似看作只有对流换热及导热在起作用。

表面式换热器稳定传热时的换热量 Q 可以应用传热学中的下列传热方程式表示：

$$Q = kA\Delta T \quad (1-1)$$

式中 k ——传热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ；

A ——换热面积, m^2 ;

ΔT ——热流体与冷流体的平均传热温差, K 。

式(1-1)表明, 换热器中的换热量除了与换热面积和平均传热温差成正比外, 还与一个表明传热过程强弱程度的传热系数 k 有关。当换热器中换热面积及平均传热温差确定时, 传热系数愈高, 则换热量愈大。因而, 要使换热器中传热过程强化, 亦即要提高换热器在单位体积、单位时间内的换热量, 可以通过 3 种途径来实现, 即: 增大平均传热温差、增加换热面积和提高传热系数。

1. 2. 3. 2 增大平均传热温差以强化传热

增大平均传热温差的方法有两种。一种是在冷、热流体的进口和出口温度一定时利用不同的换热面布置来改变平均传热温差。如果换热面的布置使冷、热流体同向流动, 则这种布置的平均传热温差最小。因而, 各类换热器的换热面都力求采用逆流或接近于逆流的布置。对于已做逆流布置的换热器, 就不可能再用改变换热面布置的方法来增大平均传热温差。另一种方法是扩大冷、热流体进出口温度的差别, 以增大平均传热温差。但是, 在实际工程中, 冷、热流体的种类及温度常受生产要求及经济性等限制, 不能随意变动。例如在化学工业中, 物料温度一般由生产工艺确定, 不能随意改动。用以加热或冷却物料的工质温度可以根据所选工质的不同而不同。但是, 加热或冷却工质本身的选择就不是任意的, 必须通过技术经济比较来确定。以化学工业中最常用的加热工质饱和水蒸气为例, 当压力为 1.586MPa 时, 相应的饱和水蒸气温度为 473K 。此后, 饱和温度每升高 2.5K , 相应的压力就要上升 0.1MPa 。压力增高会增加换热器的金属消耗量, 使设备庞大、笨重。因此, 根据技术经济比较, 当温度大于 473K 时, 饱和水蒸气就不宜作为加热工质, 此时应采用矿物油、氯苯和联苯混合物作为加热工质。此外, 加热工质温度的选择还受到被加热物料性质的限制, 也不可能选得过高。因此, 在化学工业中, 通过增大平均传热温差来强化传热的效果是有限的。

在核能工程的反应堆冷却系统以及其他一些工程设备中, 有时换热器中的平均传热温差是给定的, 这样就不能再靠增大传热温差来强化传热。

综上所述可见, 增大平均传热温差以强化传热的途径只能在有限范围内采用。

1. 2. 3. 3 增加换热面积以强化传热

通过增加换热面积以强化传热是增加换热量的一种有效途径。采用小直径管子和扩展表面换热面均可增大换热面积。管径愈小, 耐压愈高, 因而在同样金属重量下总表面积愈大。采用扩展表面换热面后, 例如采用肋片管等, 由于增加了肋片, 也增大了换热面积。因此, 在换热器中采用各种肋片管、螺纹管等扩展表面换热面, 是提高单位体积内换热面积的有效方法。肋片应加在换热器中传热较差的一侧, 这样对增强传热效果最好。

在一些较新的紧凑型换热器, 如板式和板肋式换热器中, 布置在单位体积中的换热面积要比布置在管壳式换热器中的多得多。如按 1m^3 体积内所能布置的换热面积计算, 板式换热器可达 1500m^2 , 板肋式换热器可达 6000m^2 , 应用专利制造技术制成的微型板肋式换热器可达 15000m^2 , 而管壳式换热器只有 150m^2 左右。板肋式及板式换热器在制冷、石油、化工、宇航、动力、电子设备等工业部门及节能技术中得到了较为广泛的应用。但由于布置非常紧凑, 材料不能过厚, 且为板式结构, 所以不宜在高温、高压下工作。

在高温、高压下工作的换热面, 一般采用较为简单的扩展表面换热面。例如, 在高温、高压下运行的锅炉过热器、省煤器等, 一般采用形状简单的肋片管、销钉管和鳍片管等扩展表面换热面。由于这些管束布置紧凑程度远低于板肋式及板式换热器的情况, 所以仍可采用有足够强度的耐高温、高压的厚壁管子。

采用扩展表面换热面后, 不仅增加了换热面积, 若几何参数选择合适, 同时能提高换热

器中的传热系数。但同时也会带来流动阻力增大等问题。所以，在选用或开发扩展表面换热面时应综合考虑其优缺点。

1.2.3.4 提高传热系数以强化传热

提高换热器的传热系数以增加换热量，是强化传热的重要途径，也是当前研究强化传热的重点。当换热器的平均传热温差和换热面积给定时，提高换热器中传热系数将是增大换热量的唯一方法。

传热学表明，当换热器管子壁厚不大时，在稳定传热工况下，洁净换热器的传热系数 k 可按下式近似确定：

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \quad (1-2)$$

式中 h_1 ——热流体与管子外壁之间的换热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ；

h_2 ——冷流体与管子内壁之间的换热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ；

δ ——管壁厚度， m ；

λ ——管子材料热导率， $W/(m \cdot K)$ 。

由于管子金属材料的热导率很大，管壁厚度又较薄，所以式(1-2)中的 δ/λ 可忽略不计，亦即可视为零。因此，要增大传热系数 k ，可从提高管子两侧的换热系数 h_1 及 h_2 入手。尤其要提高管子两侧中换热较差一侧的换热系数，以取得较好的强化传热效果。

提高换热系数 h_1 和 h_2 的方法很多。原则上可采用提高工质流速，使流体横向冲刷管束，消除流体流动时出现的旋涡死滞区，增加流体的扰动与混合，破坏流体边界层或层流底层的发展，改变换热面表面状况等方法来提高换热系数。对于单相流体的传热，也可根据场协同原理，采用减小速度矢量与温度梯度矢量之间夹角的方法来强化传热。

上述一些方法，对流体不发生相变的传热过程和流体发生相变的传热过程都有不同的强化传热效应，采用的具体措施也不相同。无相变的单相流体的热阻主要在层流底层，要强化传热过程应着重设法减薄层流底层的厚度；对于有相变的沸腾传热过程，提高换热系数的主要方法为增加换热面上的汽化核心及生成汽泡的频率；凝结传热过程的强化应从减薄凝结液厚度着手。所以，应用强化传热技术时，必须根据换热器的具体情况分别采用适用的有效措施。

由以上的讨论可见，采用增大平均传热温差以强化传热的途径，其应用范围有限，而且增大平均传热温差的方法在一般传热学书籍中已做了明确的阐述，因此在本书中不再进行讨论。采用增加换热面积以强化传热的途径是有效的，但同样受到各种条件的限制，换热面积不能增加过多。此外，在增加换热面积的同时往往也改变了换热面的传热系数，因而这一途径实际上与采用提高传热系数以强化传热的途径是密切相关的。所以，本书就着重论述采用提高传热系数来强化传热过程的各种技术的机理和效果。

1.2.4 强化传热技术的分类

上面已对强化传热技术做了粗略的分类，即增大平均传热温差法、增加换热面积法和提高传热系数法。强化传热技术还可从其他角度进行分类，如下所述。

从被强化的传热过程来分，可分为导热过程的强化、单相对流换热过程的强化、沸腾传热过程的强化、凝结传热过程的强化和辐射传热过程的强化。

从提高传热系数的各种强化传热技术来分，则可分为有功强化传热技术和无功强化传热技术两类，前者也称为主动强化技术、有源强化技术，后者也称为被动强化技术、无源强化技术。有功强化传热技术需要应用外部能量来达到强化传热的目的；无功强化传热技术则无需应用外部能量即能达到强化传热的目的。有功强化传热技术包括机械强化法、振动强化法、静电场法和抽压法等；无功强化传热技术包括表面特殊处理法、粗糙表面法、扩展表面

法、装设强化元件法、加入扰动流体法（添加剂法）等。

上述强化传热技术也可综合应用，以得到较好的强化传热效果。这种强化传热技术称为复合强化传热技术。

1.3 强化传热技术的发展

同其他科学技术一样，传热学科的发展是与生产力的发展密切相关的。生产发展不断对传热学科提出新的研究课题，也提供了新的研究手段，从而推动了传热学科的发展。同时，传热学科的发展又为生产发展提供了设计、运转新设备的理论和数据，反过来又促进了生产的发展。

自 18 世纪出现蒸汽机以来，蒸汽机的使用范围逐渐扩大。尤其当蒸汽机用于航海事业后，由于船舱储煤空间有限，于是从生产上提出了对蒸汽机热损失进行研究的课题，以期提高蒸汽机效率，节省用煤。此外，其他工业中广泛存在的传热问题也亟须解决。这样，就促使人们研究传热问题。早先从蒸汽轮船和机车的锅炉爆炸事件也提出了研究锅炉水循环与沸腾传热的课题。随着工业生产的发展，对传热问题的研究也日益广泛深入。到 20 世纪初，传热学开始形成一门独立学科。

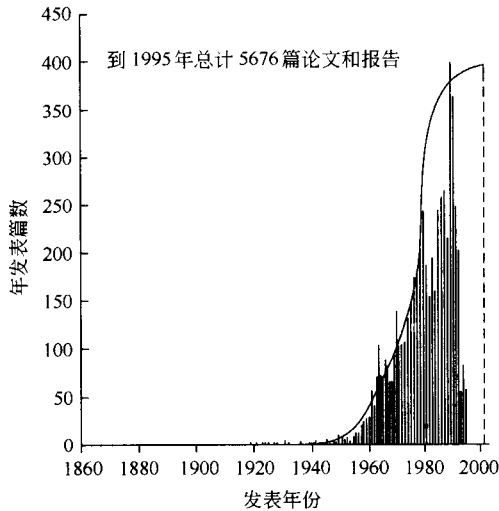


图 1-1 1995 年以前及 2001 年每年发表的强化传热论文及研究报告数

自传热学形成学科以来，强化传热始终是人们关心的重要课题。美国研究强化传热的著名专家 Bergles 教授统计了一百数十年来每年发表的强化传热论文和研究报告数量（其中不包括专利和制造厂的研究报告），按发表年份示于图 1-1。

由图 1-1 可见，每年发表的强化传热论文数量与当时的生产要求有着密切的关系。在 1920 年以前，发表的强化传热论文很少。1950 年后，工业技术有了飞速发展。动力工业设备的参数已进入高温高压阶段且容量也增加较快，航天工业及商用核电厂开始发展，对于单相流体的强化传热、工质沸腾和凝结过程的强化传热都进行了广泛的研究，每年发表的强化传热论文数量逐渐增多。1960 年后，强化传热已成为传热学的一个比较重要的专门领域而得到蓬勃发展，每年发表的论文数量有 70 多篇。1970 年后出现的世界性能源危机更加速了强化传热技术的发展，每年发表的论文增加到 100 多篇。在此期间，对于脱盐工程以及许多其他工程的两相流体换热器和单相流体换热器的强化传热进行了一系列研究。对于粗糙表面法、插入旋转元件法、加入扰动流体法、采用换热面表面振动法、流体振动法和其他技术都进行了研究。到 20 世纪 80 年代，强化传热已被学术界称为第二代传热技术，并开始有专著出版，不少高效能换热面已发展成工厂产品，各种紧凑式换热器在石油、化工、制冷、航空、航天、车辆、动力机械等工业部门得到了较普遍的使用。进入 20 世纪 90 年代后，随着三维肋管、旋涡发生器和复合强化传热等技术的采用，强化传热技术已开始由第二代向第三代发展，到 1995 年已发表的强化传热文献有 5676 种。由图 1-1 可见，强化传热论文和报告数量随年份增长的特性呈 S 型。根据 2001 年的统计，当年的论文和报告数为 400 篇左右。

今后，随着设备向大容量发展和换热器的热负荷迅速增大，随着有效利用能源、积极开发新能源以及节能工作的开展，强化传热技术一定会得到更快的发展和广泛的应用。

1.4 强化传热技术的效应评价准则

前面已经述及，在换热器中采用何种强化传热技术是由多种因素确定的。首先应该明确在换热器中采用强化传热技术的目的和要求，然后根据强化传热的目的、具体条件、制造工艺和运行安全性等进行技术经济比较，才能确定合宜的强化传热技术。

对于表面式换热器，如认为管外换热系数比管内换热系数大得多，则可近似地应用下列一些原则来衡量强化传热技术的效应。

采用强化传热技术的换热器与普通换热器的工作效应对比，一般可分为三种：第一种为在换热功率、工质流量与压力损失相同时比较采用强化传热技术的换热器与普通换热器的换热面积和体积，第二种为在换热器体积、工质流量与压力损失相同时比较采用强化传热技术的换热器与普通换热器的换热功率，第三种为在换热器体积、换热功率与工质流量相同时比较采用强化传热技术的换热器与普通换热器的压力损失。

下面分别对这3种对比导出其效应评价准则数。

1.4.1 第一种工作效应对比的评价准则数

在进行第一种工作效应对比时，采用强化传热技术的换热器与普通换热器的换热功率、工质质量流量与压力损失都相同，主要比较这两种换热器的换热面积和体积。下面根据给定的条件来推导这两种换热器的换热面积比值和体积比值。

设这两种换热器中的平均传热温差相同，且令 Q 、 G 及 Δp 分别表示换热器中的换热量、工质质量流量及流动压力损失，下角码 0 表示普通换热器的数值，无下角码者表示采用强化传热技术的换热器的数值（本节以下各式中下角码的意义与此相同）。则在第一种对比中已知条件为：

$$Q = Q_0 \quad (1-3)$$

$$G = G_0 \quad (1-4)$$

$$\Delta p = \Delta p_0 \quad (1-5)$$

这两种换热器中的换热量 Q 及 Q_0 可分别表示为：

$$Q = h \Delta T \pi d l n \quad (1-6)$$

$$Q_0 = h_0 \Delta T_0 \pi d l_0 n_0 \quad (1-7)$$

式中 h ——管内换热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ；

ΔT ——平均传热温差， K ；

d ——管子内直径， m ；

l ——管子长度， m ；

n ——管子数目。

根据式(1-3)、式(1-6)和式(1-7)，可得

$$\frac{h l n}{h_0 l_0 n_0} = 1 \quad (1-8)$$

这两种换热器中的摩擦阻力损失 Δp 和 Δp_0 可分别表示为：

$$\Delta p = f \frac{l \rho v^2}{d} \quad (1-9)$$

$$\Delta p_0 = f_0 \frac{l_0 \rho v_0^2}{d} \quad (1-10)$$

式中 v ——管中工质的平均流速, m/s;

ρ ——工质密度, kg/m³;

f ——摩擦阻力系数。

根据式(1-5)、式(1-9)和式(1-10)可得

$$\frac{flv^2}{f_0 l_0 v_0^2} = 1 \quad (1-11)$$

由于管中流速在给定流量时同管子数目成反比, 这两种换热器中的雷诺数 (Re) 之比可表示为:

$$\frac{Re}{Re_0} = \frac{v}{v_0} = \frac{n_0}{n} \quad (1-12)$$

普通换热器管子中的努谢尔特数 (Nu_0) 及摩擦阻力系数 (f_0) 值可用下面两式表示:

$$Nu_0 = c_1 Re_0^{0.8} \quad (1-13)$$

$$f_0 = c_2 Re_0^{-0.2} \quad (1-14)$$

式中 c_1 、 c_2 为比例常数。

采用强化传热技术的换热器管子中的 Nu 数和 f 值可分别用 Nu/Nu_0 及 f/f_0 表示:

$$Nu = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right)_{Re} c_1 Re^{0.8} \quad (1-15)$$

$$f = \left(\frac{f}{f_0} \right)_{Re} c_2 Re^{-0.2} \quad (1-16)$$

括号外下角码 Re 表示括号中的数值均按采用强化传热技术换热器管子中的雷诺数计算。

由于 $Nu = (hd)/\lambda$, 上面两式可改写为:

$$\frac{h}{h_0} = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right)_{Re} \left(\frac{Re}{Re_0} \right)^{0.8} \quad (1-17)$$

$$\frac{f}{f_0} = \left(\frac{f}{f_0} \right)_{Re} \left(\frac{Re}{Re_0} \right)^{0.2} \quad (1-18)$$

应用式(1-8)~式(1-18)各式, 可导出两换热器的管子数比值为:

$$\frac{n}{n_0} = \frac{(f/f_0)_{Re}^{0.5}}{(Nu/Nu_0)_{Re}^{0.5}} \quad (1-19)$$

两换热器的管子长度比为:

$$\frac{l}{l_0} = \frac{1}{(Nu/Nu_0)_{Re}^{0.9} (f/f_0)_{Re}^{0.1}} \quad (1-20)$$

由于进行对比的两种换热器中管子节距相同, 两种换热器的横截面积之比 A_c/A_{c0} 即等于其管子数目比 n/n_0 , 即

$$\frac{A_c}{A_{c0}} = \frac{n}{n_0} = \frac{(f/f_0)_{Re}^{0.5}}{(Nu/Nu_0)_{Re}^{0.5}} \quad (1-21)$$

因此, 两种换热器的体积比 V/V_0 应为:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{A_c l}{A_{c0} l_0} = \frac{(f/f_0)_{Re}^{0.4}}{(Nu/Nu_0)_{Re}^{1.4}} \quad (1-22)$$

两种换热器的换热面积比 A/A_0 在管子直径相同且未采用扩展表面时即等于式(1-19)和式(1-20)的乘积 $nl/n_0 l_0$ 。

由式(1-19)可见, 在满足以上假设条件下, 如 $f/f_0 < Nu/Nu_0$, 则采用强化传热技术的换热器管子数目可减少; 反之, 则其管子数目须增加。由式(1-22)可见, 如 $f/f_0 < (Nu/Nu_0)^{3.5}$, 则采用强化传热技术后换热器体积可缩小。

1.4.2 第二种工作效应对比的评价准则数

现在来推导第二种工作效应对比的评价准则数,即导出工质质量流量、压力损失及换热器体积相同而换热技术不同的两种换热器进行换热功率对比时的准则数。下面各计算式中的符号,下角码为0表示普通换热器的数值,无下角码者表示采用强化传热技术换热器的数值。

设两种进行对比的换热器中的管束均用同直径管子,按同一节距布置,且均无扩展表面,则两种换热器应具有相同的换热面积,即

$$\pi d l n = \pi d l_0 n_0 \quad (1-23)$$

根据两种换热器中工质质量流量及压力损失相同的前提,可导出式(1-11)及式(1-12),同时还可导出式(1-17)和式(1-18)。由这些计算式可导出下式:

$$\left(\frac{f}{f_0}\right)_{Re} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^{2.8} \quad (1-24)$$

同时还可求得

$$\frac{h}{h_0} = \left(\frac{Nu}{Nu_0}\right)_{Re} \left(\frac{n_0}{n}\right)^{0.8} \quad (1-25)$$

如两种换热器中平均传热温差相同,可得出两种换热器的换热功率比值为:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{h}{h_0} \quad (1-26)$$

由式(1-24)、式(1-25)及式(1-26)可得

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{(Nu/Nu_0)_{Re}}{(f/f_0)_{Re}^{0.286}} \quad (1-27)$$

由式(1-27)可见,当两种换热器中质量流量、压力损失及换热器体积相同时,如 $f/f_0 < (Nu/Nu_0)^{3.5}$,则采用强化传热技术的换热器可增大换热功率;反之,则将降低换热功率。由式(1-23)及式(1-24)可见,在上述假设条件下,如 $f/f_0 > 1$,将使换热器管子数目增加,但管子长度将减小。

1.4.3 第三种工作效应对比的评价准则数

现在来推导第三种工作效应对比的评价准则数,即导出工质质量流量、换热器体积和换热功率相同而换热技术不同的两种换热器在压力损失对比时的评价准则数。

应用式(1-9)、式(1-10)、式(1-12)及式(1-23),可求得

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_0} = \frac{f}{f_0} \left(\frac{Re}{Re_0}\right)^3 \quad (1-28)$$

设两种换热器中的平均传热温差相同,则可得出

$$h = h_0 \quad (1-29)$$

应用式(1-17)和式(1-29),可得

$$\frac{Re}{Re_0} = \left(\frac{Nu_0}{Nu}\right)_{Re}^{1.25} \quad (1-30)$$

将式(1-18)及式(1-30)代入式(1-28),可得

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_0} = \frac{(f/f_0)_{Re}}{(Nu/Nu_0)_{Re}^{3.5}} \quad (1-31)$$

由式(1-31)可见,在两种换热器进行压力损失或功率消耗对比时,如 $f/f_0 < (Nu/Nu_0)^{3.5}$,则采用强化传热技术换热器的功率消耗将低于普通换热器。

由上面的分析可见,对于管内流动或纵向冲刷管束的情况,在上述3种工作效应对比中,只要 $(Nu/Nu_0)^{3.5} > (f/f_0)$,则在换热器中采用强化传热技术总是有效的。