

强化传热

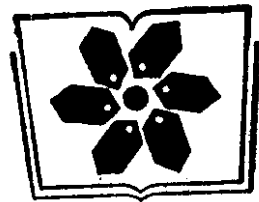


顾维藻
马重芳

神家锐
张玉明

著

科学出版社



中国科学院科学出版基金资助项目

强 化 传 热

顾维藻 神家锐 著
马重芳 张玉明

科学出版社

1990

内 容 简 介

本书是强化传热研究成果的专著。它全面、系统地叙述了强化传热的基本原理、设计方法、实验技术及工程应用。它不仅包括传导、辐射、对流(层流和湍流单相流动及凝结和沸腾两相流动)传热的无源强化以及有源强化技术,而且对强化传质技术也作了扼要阐述。书中包含国外最新研究成果,同时对我国十余年来研究作了重点介绍。内容丰富而新颖。理论部分力求简明、系统,设计计算部分讲究方便、实用,应用部分精心优选典型实例。书中附有大量参考文献,以便读者博览。

本书可供动力、冶金、石油、化工、航空、航天、材料、电子、轻工、食品和其它工程技术领域的科技人员使用,亦可作为动力机械、热能工程、工程热物理等有关专业师生及研究生的参考书。

强 化 传 热

顾维藻 神家锐 著
马重芳 张玉明

责任编辑 陈文芳

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1990年8月第一版 开本:850×1168 1/32

1990年8月第一次印刷 印张:21 5/8

印数:平 1—430 插页:精 2

精 1—1 000 字数:562 000

ISBN 7-03-001237-2/TB·35(平)

ISBN 7-03-001601-7/TB·44(精)

定 价: 平 装 24.00 元
布 脊 精 装 25.70 元

前 言

强化传热是本世纪 60 年代蓬勃发展起来的一种改善传热性能的先进科学技术。20 多年来,强化传热的研究丰富、开拓了传热学的理论,并已发展成为第二代传热技术。强化传热在工业中有着极为广泛的应用,在能源的开发、利用和节约中起着重大的有时甚至是关键性的作用。正因如此,强化传热学已成为现代热科学中一个十分引人注目的研究领域。

在现代科学技术领域里,无论动力、冶金、石油、化工、材料、制冷等工程,还是空间、电子、核能等高技术,都不可避免地涉及到加热、冷却和热量传递的问题。在能源的开发、利用中,热能传递现象更为普遍。如果说传热学的目的是研究热传播速率的话,那么强化传热研究的主要任务则是改善、提高热传播的速率,以达到用最经济的设备来传递规定的热量,或是用最有效的冷却来保护高温部件的安全运行,或是用最高的热效率来实现能源合理利用的目的。

强化传热的发展十分活跃,表现出高速度、实用性及不断迎接高技术发展的挑战等三个突出特点。迄今为止,国内外公开发表了约四千篇论文和研究报告,数百项研究成果获得了专利,强化传热的理论和技术日臻完善和成熟。强化传热的研究始终有着明确的目标和广泛的应用背景,一大批研究成果的商用化带来了显著的经济效益和社会效益。由于科学技术的飞速发展和能源的严重短缺,不断向强化传热提出新的要求,因此强化传热研究的深度和广度日益扩大并向新的领域渗透和发展。强化传热已成为保证如大功率微电子元件等强热流部件的可靠性以及实现如低品位热能开发利用等小温差有效传热的技术关键。

综上所述,把强化传热的理论和技术全面地、系统地介绍给读

者是一件非常有意义的事情。

作者从事强化传热研究 10 余年,一些研究成果曾多次在国内、外学术会议上交流。本书是在系统地总结、整理作者历年来研究成果和搜集、综合近年来国内外最新成果的基础上撰写而成的。

然而,把强化传热的基本原理、设计方法及实验技术等全面、系统地加以阐述是不容易的,主要困难有三:第一,强化传热技术因传热方式、流动状态、通道几何等不同而异。方法繁多、内容丰富、规模宏大,而本书篇幅却有限。第二,强化传热是一个新兴学科,某些研究尚处发展阶段。第三,我们仅从事强化传热宏大领域中的部分研究工作,对其不少方面缺乏直接的研究经验。尽管如此,鉴于强化传热研究的重要性和推广应用的迫切性,我们还是想方设法克服困难,努力完成这部专著。

本书共分十章。在概论里叙述了强化传热的发展、分类及其应用,提出了强化传热的评判准则,并对传导、辐射、对流三种传热方式的强化作了概括的论述。第二章和第三章分别介绍了对流传热的有源强化和无源强化技术。对由机械扰动、流体振动、传热面振动、电磁场等外部施加力激励的传热增强以及虽无外力施加但由管内插入物、涡旋流装置、添加剂、冲击射流等诱发的传热增强的机理、特性、计算方法及其应用作了详细的阐述。第四章至第六章,依照不同形状的流道几何,分别详细地论述了圆形流道内、非圆形流道内以及管外空间强化传热的规律。系统地介绍了各种粗糙化表面、肋化表面、扩展表面等强化传热的原理、影响传热增强的因素、流动阻力特性以及设计计算方法。第七章和第八章重点叙述凝结和沸腾相变传热强化的理论和技术。第九章专门列举了强化传热技术的某些应用实例。第十章概述了强化传质的理论及其工程应用。全书各章末尾均附有大量参考文献,供读者查阅。

本书第一、二、三、四章由顾维藻撰写,第六、七、十章及附录由神家锐撰写,第八章及第三章的第五节由马重芳撰写,第五、九章由张玉明撰写。由于作者水平有限,书中错误和不足之处在所难免,我们诚挚地希望读者批评、指正。

A. E. Bergles 教授为本书的撰写提供了重要资料，颜迪民教授生前对本书进行了审阅并提出了许多宝贵意见和建议。在此，我们一并表示衷心的感谢。

主要符号表

拉丁字母符号

- A 流通截面积
- a 固体接触面上的接触点半径, 流体的分子热扩散系数, 流体或传热面振动的振幅, 弯曲流道中流体的径向加速度, 指数
- $Ar = d^3 \rho_s (\rho_s - \rho_f) g \mu^{-2}$, 流化床内的阿基米德准则
- b 固体表面接触点之间的距离, 壁面厚度
- C 系数, 搅拌器功率常数, 速度比例系数
- c 系数, 搅拌器中叶轮与容器壁面间的隙宽
- c_p 等压比热, 微粒的比热
- D 直径, 扩散系数
- D_e 当量直径
- D_h 水力直径
- d 直径
- d_p 颗粒直径
- $Dn = Re \sqrt{d/D}$, 弯曲流道的迪恩准则
- E 辐射能, 电场强度, 换热强化比的时均值
- F 传热面积, 弯曲流道与直流道的摩擦系数比值, 脉动频率比
- f 摩擦系数, 流体或固体的振动频率, 交流电场频率
- f_e 电场作用的彻体力
- $Fr = \frac{u^2}{g_M D_i}$ 或 $\frac{n^2 d}{g}$, 弗鲁德准则
- G 流量
- \dot{G} 质量速度
- g 重力加速度
- $Gr = \frac{g \beta \Delta T x^3}{\nu^2}$, 格拉晓夫准则
- $Gz = \frac{\pi}{4} Re Pr \frac{d}{L}$, 格里茨准则
- H 表面硬度, 搅拌釜液面高度, 磁场强度, 流化床高度
- h 粗糙元、翅片或沟槽的高度、深度

- h_{fg} 蒸发潜热
 I 电流
 i 焓
 J 电子流密度, 贝塞尔函数
 j 换热器的传热因子, 微粒流动的通量
 K 总传热系数, 非牛顿流体的稠度系数, 矩形流道的高宽比, 内翅片的导热参数
 L 换热器传热管长度
 l 流体的混合长度
 l_0 气体分子自由程
 M 气-固悬浮流中的载荷比, 水-气雾状流中的质量比, 经过多孔壁吸出或喷入流量与进口流量之比
 M_x 流体的轴向动量
 M_o 旋转流体的角动量
 m 粗糙元的斜率, 非牛顿流体的流动行为指数, 指数
 m_i 流化床中不同颗粒直径的重量份额
 m_p 微粒或颗粒的质量
 N 风机或泵的功率, 翅片数目, 螺旋带数目, 接触点数目
 NTU 换热器的传热单元数
 $Nu = \alpha D_h / \lambda$, 努谢尔准则
 n 管数, 转数, 指数
 n_p 粒子数密度
 P 功率, 压力
 p 压力
 Δp 压力损失
 $Pa = N/m^2$, 帕
 $Po = \frac{P}{\rho n^3 d^5}$, 搅拌器的功率准则
 $Pr = \mu C_p / \lambda$, 普朗特准则
 Q 热流量
 q 热流密度
 R 半径, 总热阻, 理想气体的气体常数
 r 任意点半径, 热阻

- $Ra = GrPr$, 雷利准则
 $Re = WD_s/\nu$, 雷诺数
 S 螺旋节距, 涡流数
 s 肋节距, 扭曲带节距, 管束节距
 $St = \frac{Nu}{RePr} = \frac{\alpha}{\rho C_p w}$, 斯坦顿准则
 T 温度, 流体脉动周期
 ΔT 温差
 t 时间, 涂层或衬垫厚度
 t_c 电荷松弛时间
 Tu 流体运动的湍流度
 U 总传热系数, 湿周, 电位
 u 轴向流速
 u_θ 切向流速
 u_{mf} 流化床的临界流态化速度
 V 体积, 体积流量
 v 径向流速, 单位长度的金属体积
 W 流化床颗粒层重量, 功率, 通道宽度
 w 速度, 叶片宽度, 流道宽度
 X 汽-水混合流中的液体体积含量
 x 轴向坐标
 y 径向坐标, 扭曲比
 Z 气-固悬浮流中的微粒穿透深度

希腊字母符号

- α 对流换热系数, 辐射能的吸收率
 β 速度比 v/u , 系数, 内翅的半角, 螺旋角
 γ 内翅间的扇面夹角, 热阻比
 δ 边界层厚度, 扭曲带厚度, 间隙宽度
 ϵ 辐射率, 介电常数, 孔隙率, 热量或动量的湍流扩散系数, 接触点的相对半径
 η 翅片导热效率, 强化传热性能系数, 无量纲坐标
 θ 汽泡边界角, 壁面涡流角, 螺旋角, 无量纲温度
 λ 波长, 导热系数, 本征值

- μ 流体的运动粘性系数
- ν 流体的动力粘性系数
- ξ 阻力系数,无量纲坐标
- ρ 流体密度
- ρ_e 电荷密度
- σ 表面张力,电导率,斯蒂芬-玻耳兹曼常数
- τ 切应力,通道内的气体光学厚度
- Φ 流化床颗粒的球化率
- ϕ 圆周角,内翅管中的流体无量纲温度
- Ψ 流函数,集中参数
- ω 角速度

下 标

- 0 光滑表面或光滑通道的
- 1 管内的
- 2 管外的
- a* 实际的,表观的
- b* 主流的
- c* 对流的,接触的,核心的
- c_r* 临界的
- e* 有效的
- f* 流体的,污垢层的,带翅的
- g* 气体的
- i* 内部的
- L* 液体的
- M* 金属壁的
- m* 平均的,动量的
- o* 外部的
- p* 微粒的
- r* 辐射的
- s* 光滑的,饱和的,悬浮体的
- t* 湍流的
- v* 振动的
- θ 切向的

目 录

第一章 概论	1
§ 1.1 强化传热的发展、分类和应用	1
§ 1.1.1 强化传热的发展和分类.....	1
§ 1.1.2 不同强化传热技术的应用场合.....	4
§ 1.1.3 强化传热技术推广中存在的问题.....	7
§ 1.2 强化传热性能的评判准则.....	9
§ 1.3 导热过程的强化.....	21
§ 1.3.1 导热与接触热阻	21
§ 1.3.2 降低接触热阻的方法	23
§ 1.3.3 表面涂层对接触热阻的影响	24
§ 1.3.4 涂层或垫片降低接触热阻的实验结果	31
§ 1.4 辐射换热的强化及其在热设备中的应用.....	33
§ 1.4.1 辐射换热的基本特性	34
§ 1.4.2 表面粗糙化及氧化膜对辐射率的影响	35
§ 1.4.3 固体微粒对辐射换热的强化	37
§ 1.4.4 光谱选择性辐射表面	39
§ 1.4.5 利用辐射板增强高温通道内的传热	41
§ 1.4.6 利用热辐射特性减少能量损失	43
§ 1.4.7 辐射翅片的应用	46
§ 1.5 对流换热强化方法的概述.....	47
§ 1.5.1 传热流体的物性与强化传热	48
§ 1.5.2 对流换热强化技术概述	49
参考文献	54
第二章 对流换热的有源强化	58
§ 2.1 利用机械搅动加强流体与壁面间的传热.....	58
§ 2.1.1 搅拌釜的形状和分类	50

§ 2.1.2	叶片式搅拌器的流动及传热特性	61
§ 2.1.3	适用高粘度流体的搅拌器	67
§ 2.1.4	刮膜式搅拌器	72
§ 2.1.5	非牛顿流体在搅拌釜内的换热	74
§ 2.2	流体脉动和传热面振动时的对流换热	76
§ 2.2.1	流体在管内脉动时的对流换热	76
§ 2.2.2	利用脉动阀门或空气脉动器产生流体脉动	79
§ 2.2.3	流体脉动时换热器内的传热	81
§ 2.2.4	传热面振动时的传热特性	83
§ 2.3	电磁场作用下的对流换热	85
§ 2.3.1	电流体力学的基本方程	86
§ 2.3.2	直流电场对传热的强化	87
§ 2.3.3	电磁场中换热的增强	90
§ 2.3.4	电磁场对沸腾换热的影响	92
§ 2.3.5	凝结换热的电磁强化	96
§ 2.4	经过多孔壁有质量透过时的壁面换热	100
§ 2.4.1	经过多孔壁有质量流过时的层流换热	101
§ 2.4.2	经过多孔壁有质量流过时的湍流换热	106
§ 2.4.3	壁面有质量抽出时的凝结换热	113
参考文献	117
第三章	对流换热的无源强化	122
§ 3.1	管内插入物对传热的增强	122
§ 3.1.1	含扭曲带管内的流动及传热特性	123
§ 3.1.2	扭曲带置于管子进口部分时换热系数沿管长的变化	130
§ 3.1.3	扭曲带置于内翅管中的复合强化传热	131
§ 3.1.4	扭曲带置于粗糙管内的传热特性	132
§ 3.1.5	Kenics 静态混合器	133
§ 3.1.6	其它管内插入物	138
§ 3.2	涡旋流动的强化传热	138
§ 3.2.1	扭曲管束换热器内的传热和阻力	139
§ 3.2.2	自由旋流对换热的强化	143

§ 3.2.3	螺旋管内的换热规律	150
§ 3.3	添加物对流体传热的影响	158
§ 3.3.1	气-固悬浮体的流动及换热	158
§ 3.3.2	高温气-固两相流体被冷却时的特性	167
§ 3.3.3	水-气雾状流的传热特性	173
§ 3.3.4	液体流中添加物对传热的增强	178
§ 3.4	流化床与埋管间的传热	179
§ 3.5	射流冲击	189
§ 3.5.1	射流的流场特征	190
§ 3.5.2	射流冲击传热的基本特征	192
§ 3.5.3	射流冲击传热的计算方法	194
§ 3.5.4	射流冲击传热的个别问题	202
	参考文献	208
第四章	圆形通道内壁扰流装置的强化传热	217
§ 4.1	壁面扰流器强化传热的机理	217
§ 4.2	砂粒型粗糙管内的流动阻力和换热规律	220
§ 4.2.1	粗糙管内的流动特性	222
§ 4.2.2	粗糙面的壁面相似规律	224
§ 4.2.3	粗糙面的传热相似规律	226
§ 4.2.4	粗糙管内与光滑管内的 Pr_t 值比较	229
§ 4.3	带粗糙肋圆管内的强化传热	233
§ 4.3.1	重复肋粗糙管内换热的半经验公式	234
§ 4.3.2	用混合长度方法计算粗糙管内的换热	238
§ 4.3.3	粗糙管内阻力与传热计算方法的改进	241
§ 4.3.4	粗糙肋几何形状对流体流动阻力及传热的影响	246
§ 4.3.5	其它型式粗糙管及二维、三维粗糙元性能比较	247
§ 4.4	碾轧槽管的流动阻力与传热性能	250
§ 4.4.1	横向轧槽管的阻力和传热	251
§ 4.4.2	螺旋轧槽管内的传热	253
§ 4.4.3	轧槽管的优良特性	258
§ 4.5	带内翅片圆管内的对流换热	259
§ 4.5.1	内翅管内的层流换热	259

§ 4.5.2	内翅管内的湍流换热及其优化分析	268
§ 4.5.3	内翅管与二维粗糙管的性能比较	274
§ 4.5.4	内肋管对有相变换热的强化	275
参考文献	277
第五章	非圆形通道内的强化换热	282
§ 5.1	粗糙环形通道中的换热及其变换.....	282
§ 5.1.1	粗糙环形通道中的流动分析	283
§ 5.1.2	粗糙环形通道的传热方程	289
§ 5.1.3	粗糙环形通道中湍流换热的实验研究	296
§ 5.1.4	粗糙环形通道中湍流换热的变换	300
§ 5.2	粗糙矩形通道中的换热与流动阻力.....	306
§ 5.2.1	实验装置与测量方法	306
§ 5.2.2	光滑矩形通道内的换热和阻力	308
§ 5.2.3	肋粗糙矩形通道中的流动与换热	310
§ 5.2.4	复合粗糙面的强化换热性能	315
§ 5.2.5	扰流柱在矩形通道中的强化作用	318
§ 5.2.6	粗糙矩形通道中湍流度的测量	322
§ 5.3	三角形通道中的换热及其强化.....	326
§ 5.3.1	光滑三角形通道中的局部换热	326
§ 5.3.2	肋粗糙三角形通道中的强化换热	329
§ 5.3.3	针肋在三角形通道中的强化作用	333
§ 5.3.4	三种强化措施换热性能的比较	339
§ 5.3.5	任意顶角等腰三角形通道中湍流换热的数值计算	340
§ 5.4	弯曲矩形流道内的换热及其强化.....	348
§ 5.4.1	弯曲矩形流道的流场分布	349
§ 5.4.2	弯曲矩形流道中的湍流换热	352
§ 5.4.3	180° 弯曲矩形流道中的流动与换热.....	356
§ 5.4.4	扰流柱在弯曲流道换热中的强化作用	361
§ 5.5	粗糙管束中的湍流换热.....	363
§ 5.5.1	流体横掠光滑管束时的流动特性	364
§ 5.5.2	流体横掠管束时的压力分布与速度分布	366

§ 5.5.3	流体横掠管束时的流动阻力	369
§ 5.5.4	流体横掠光滑管束时的换热	371
§ 5.5.5	流体横掠粗糙管束时的流动特性与换热规律	374
§ 5.5.6	流体纵向冲刷粗糙管束时的流动特性及其换热规律	377
§ 5.6	楔形流道中扰流柱对传热的强化作用	383
§ 5.6.1	楔形流道中的平均换热及扰流柱的强化作用	383
§ 5.6.2	楔形流道强化换热的一个特例	386
参考文献	393
第六章	管外空间的强化传热	399
§ 6.1	管外翅片强化传热的基本原理	399
§ 6.1.1	传热分析	399
§ 6.1.2	传热增强比	402
§ 6.1.3	影响强化传热的因素	403
§ 6.1.4	强化传热潜力	405
§ 6.2	气流横掠圆翅管束的强化传热	406
§ 6.2.1	圆翅管束中的流动结构	407
§ 6.2.2	圆翅管束的局部换热系数	407
§ 6.2.3	传热和流动阻力的关联式	409
§ 6.2.4	圆翅管与其改进型翅片管的性能比较	411
§ 6.3	板式翅片的传热	414
§ 6.3.1	板式翅片表面的局部换热系数	415
§ 6.3.2	影响传热的主要因素	418
§ 6.3.3	板式翅片传热和流动阻力的关联式	422
§ 6.4	槽带板式翅片的传热和流动阻力	424
§ 6.4.1	槽带板式翅片强化传热的分析方法	424
§ 6.4.2	槽带板式翅片强化传热的机理	426
§ 6.4.3	槽带板式翅片传热的简化计算方法	429
§ 6.4.4	传热和流动阻力的关联式	432
§ 6.5	穿孔翅片的传热与流动阻力特性	434
§ 6.5.1	翅片穿孔的作用	435
§ 6.5.2	影响传热和流动阻力的主要因素	437

§ 6.5.3	穿孔翅片的性能评价	439
§ 6.5.4	穿孔翅片传热和流动阻力的实验测定	442
§ 6.6	锯齿翅片的传热强化	445
§ 6.6.1	锯齿翅片强化传热的原理	445
§ 6.6.2	翅片参数对传热和流动阻力的影响	447
§ 6.6.3	传热和流动阻力的关联式	450
参考文献	451
第七章	凝结传热的强化	459
§ 7.1	凝结传热简述	459
§ 7.1.1	两种凝结方式	459
§ 7.1.2	饱和蒸汽在管外及管内的凝结	460
§ 7.1.3	强化凝结传热的任务	461
§ 7.2	竖直管外强化凝结传热的基本原理	463
§ 7.2.1	简化模型	463
§ 7.2.2	凝结传热增强的分析和计算	466
§ 7.2.3	实验验证	469
§ 7.3	竖直沟槽表面凝结传热的强化	470
§ 7.3.1	传热模型	470
§ 7.3.2	沟槽管凝结传热的计算方法	472
§ 7.3.3	影响沟槽管凝结传热的主要因素	476
§ 7.4	水平管外的强化凝结传热	479
§ 7.4.1	重力排液模型	479
§ 7.4.2	表面张力排液模型	480
§ 7.4.3	冷凝液的滞留现象	484
§ 7.4.4	高效冷凝管	486
§ 7.5	水平管内的强化凝结传热	487
§ 7.5.1	水平管内强化凝结传热的计算	487
§ 7.5.2	不同冷凝介质的强化凝结	491
§ 7.6	膜状凝结传热的有源强化	493
§ 7.6.1	汽-液界面在电场力作用下的不稳定性	493
§ 7.6.2	强化凝结传热计算	496
§ 7.7	珠状凝结传热	498

§ 7.7.1 珠状凝结的一般理论	498
§ 7.7.2 实现珠状凝结的途径	502
参考文献	502
第八章 沸腾传热的强化	512
§ 8.1 发展简史和基本概念	512
§ 8.1.1 发展简史	512
§ 8.1.2 沸腾传热强化的基本概念	513
§ 8.1.3 沸腾强化的基本原则	517
§ 8.2 沸腾传热强化的专利技术	522
§ 8.3 若干重要的商用强化传热管	532
§ 8.3.1 HIGH FLUX 管及其它多孔介质表面管	533
§ 8.3.2 日立公司的 THERMOEXCEL-E 管	551
§ 8.3.3 GEWA-T 管	559
§ 8.4 池内沸腾强化传热的其它方法	564
§ 8.4.1 附着式强化物	564
§ 8.4.2 特殊处理的非润湿表面	567
§ 8.4.3 肋化表面	569
§ 8.4.4 振动	571
§ 8.4.5 静电场	573
§ 8.4.6 机械作用下的沸腾传热	574
§ 8.4.7 液体添加剂	575
§ 8.4.8 抽吸	576
§ 8.5 受迫对流沸腾的强化	577
§ 8.5.1 各种特殊加工和处理表面	577
§ 8.5.2 肋化表面	582
§ 8.5.3 移置式强化物	583
§ 8.5.4 涡流装置	584
§ 8.5.5 振动	586
§ 8.5.6 添加剂	587
§ 8.5.7 静电场	587
参考文献	587