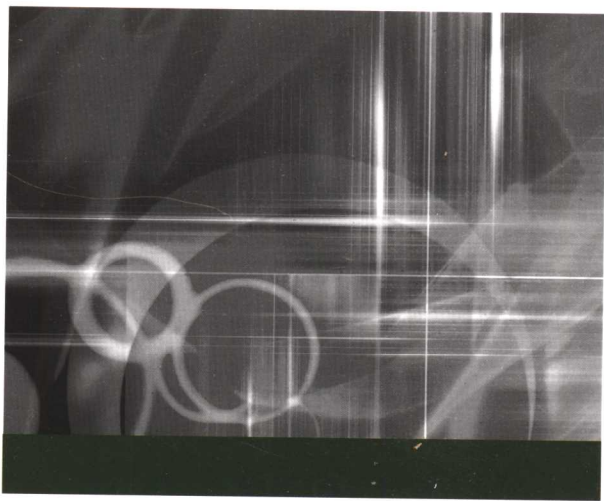


崔海亭 彭培英 编著

强化传热新技术 及其应用



Chemical Industry Press



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

强化传热新技术及其应用

崔海亭 彭培英 编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

强化传热新技术及其应用/崔海亭, 彭培英 编著.
北京: 化学工业出版社, 2005. 11
ISBN 7-5025-7857-9

I. 强… II. ①崔…②彭… III. 强化(热机)-
传热-新技术应用 IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 130244 号

强化传热新技术及其应用

崔海亭 彭培英 编著

责任编辑: 辛 田

文字编辑: 韩庆利

责任校对: 王素芹

封面设计: 尹琳琳

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

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

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷有限责任公司印装

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 11 字数 290 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7857-9

定 价: 29.00 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

前 言

自20世纪70年代初石油危机爆发以来,以能源为中心的环境、生态和社会经济问题日益加剧。世界各国充分认识到节能的重要意义,能源的合理利用已成为当今世界各国应如何良性发展工业的核心问题,各种节能技术如雨后春笋般竞相出现。迄今为止,强化传热技术在化工、动力、核能、制冷、石油乃至国防工业等领域中得到广泛应用,国内外公开发表的论文和研究报告超过6000篇,获得了数百项专利,已发展成为成熟的第二代传热技术。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了新的要求,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。世界各主要工业国都对此进行了大量的研究开发工作,力图建立强化传热新理论,并在新理论的指导下,开发第三代传热技术,包括传热传质过程控制和复合强化技术,并取得了许多成果。

本书正是作者总结本人的研究成果并收集了国内外大量最新资料整理编写而成的,包括最新出现的一些新管型的强化传热机理及其在工程上的应用、复杂通道中的强化传热问题、凝结换热的强化传热新方法以及强化传热在车辆冷却传热中的应用等内容。书中介绍了国内外换热器强化传热技术的最新进展和工业应用,阐明了各种强化传热新技术的机理,研讨了在工业中采用强化传热技术时应有的综合考虑,并附有工程实例、应用现状及展望,旨在给我国能源领域的学生和科技人员提供最新的前沿知识,使他们的知识及时得到补充与更新。本书内容新颖,而且结合作者的科研成果编写

而成，大多数论文已发表在国内外重要刊物上，且部分论文已被SCI、EI、ISTP国际三大检索收录。

本书可供化工、石化、热能动力、化工设备、轻工等部门从事传热、节能、换热设备工作的专家、工程师以及科研院所的设计人员参考；对相应专业大学本科、研究生亦有相当的参考价值。

全书编写分工如下：彭培英编写第1章、第2章、第6章、第9章和第10章；崔海亭编写第3章至第5章、第7章和第8章。全书由彭培英统稿，郭彦书、王振辉审定。

在撰写过程中，北京工业大学吴玉庭博士后、北京航空航天大学丁立副教授提出了许多宝贵意见，得到了彭宝成教授及许多同事和同行的鼓励和支持；书中引用了作者攻读博士和硕士学位期间所在单位研究集体以及许多同行的工作成果。作者谨在此一并表示诚挚的感谢。本书的出版得到河北省教育厅学术著作出版基金及河北科技大学学术著作出版基金资助，特此表示感谢。

由于作者水平有限，且强化传热技术发展迅速，创新不断，书中的不妥之处在所难免，恳切希望读者不吝批评、指正。

编者

2005年5月

目 录

| | |
|---|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 强化传热对国民经济发展的意义 | 2 |
| 1.2 对流强化传热机理分析 | 5 |
| 1.2.1 增大平均传热温差强化换热 | 5 |
| 1.2.2 增加换热面积以强化换热 | 5 |
| 1.2.3 提高传热系数以强化传热 | 6 |
| 1.3 强化传热技术的分类 | 7 |
| 1.3.1 有源强化技术 | 7 |
| 1.3.2 无源强化技术..... | 11 |
| 1.4 强化传热技术的应用..... | 32 |
| 1.5 强化传热技术的发展方向..... | 34 |
| 参考文献 | 39 |
| 第 2 章 螺旋槽纹管研究与应用 | 41 |
| 2.1 螺旋槽纹管强化传热研究..... | 42 |
| 2.1.1 螺旋槽纹管管内对流换热及阻力特性研究..... | 42 |
| 2.1.2 有相变传热螺旋槽纹管管外凝结换热..... | 53 |
| 2.1.3 螺旋槽纹管凝结换热理论方程..... | 54 |
| 2.1.4 异形凹槽螺旋槽纹管传热及流动阻力的实验研究 | 58 |
| 2.1.5 螺旋槽纹管的研究方向..... | 64 |
| 2.2 螺旋槽纹管综合性能的研究..... | 66 |
| 2.2.1 单头螺旋槽纹管与多头螺旋槽纹管传热与流阻 性能比较..... | 66 |

| | | |
|------------|-----------------------------|-----------|
| 2.2.2 | 螺旋槽纹管应力分析研究 | 67 |
| 2.2.3 | 螺旋槽纹管结垢问题 | 67 |
| 2.3 | 选用螺旋槽纹管经验计算式问题的探讨 | 68 |
| 2.3.1 | 常用的螺旋槽纹管传热及阻力特性经验计算式 | 68 |
| 2.3.2 | 螺旋槽纹管换热和阻力系数各经验公式计算结果的分析与评述 | 71 |
| 2.4 | 螺旋槽纹管管内紊流流动与换热数值研究 | 74 |
| 2.4.1 | 单头螺旋槽纹管管内流动与换热数值研究 | 74 |
| 2.4.2 | 多头螺旋槽纹管管内流动与换热数值研究 | 76 |
| 2.4.3 | 单头螺旋槽纹管管内流动和换热的数值模拟举例 | 78 |
| 2.4.4 | 数值模拟展望 | 82 |
| | 参考文献 | 83 |
| 第3章 | 旋流管管内换热与阻力实验研究 | 87 |
| 3.1 | 旋流管结构及特点 | 87 |
| 3.2 | 旋流管管型的选择 | 88 |
| 3.3 | 管内换热实验装置及实验数据的处理 | 88 |
| 3.3.1 | 实验原理 | 88 |
| 3.3.2 | 实验数据的处理 | 90 |
| 3.4 | 旋流管内阻力实验研究 | 96 |
| 3.4.1 | 实验装置 | 96 |
| 3.4.2 | 实验数据的处理 | 96 |
| 3.5 | 旋流管管内对流换热与阻力的实验研究结果分析 | 100 |
| 3.5.1 | 旋流管管内强化传热机理探讨 | 100 |
| 3.5.2 | 结构参数对传热与流阻性能的影响 | 102 |
| 3.6 | 旋流管与同类型高效传热管性能参数对比 | 105 |
| 3.6.1 | 对过去部分实验数据的重新整理 | 105 |
| 3.6.2 | 统一关联式的整理 | 105 |
| 3.6.3 | 螺旋槽纹管传热与阻力实验关联式综述 | 106 |
| 3.6.4 | 旋流管与螺旋槽纹管管内换热公式之间比较 | 107 |

| | | |
|-------------------------------|---------------------------------|------------|
| 3.6.5 | 旋流管与螺旋槽纹管管内阻力系数公式之间的比较 | 109 |
| 3.6.6 | 旋流管与光管及国内外同类型高效传热管性能参数的对比 | 109 |
| 3.7 | 旋流管的优化设计 | 113 |
| 3.7.1 | 强化管的传热特性与阻力特性 | 114 |
| 3.7.2 | 强化传热管的性能评价方法 | 115 |
| 3.7.3 | 优化设计的计算方法 | 116 |
| 3.7.4 | 优化设计计算结果分析 | 121 |
| 3.7.5 | 优化设计结果的验证 | 122 |
| 3.8 | 旋流管式换热器的实验研究 | 123 |
| 3.8.1 | 对流传热系数的分离方法 | 124 |
| 3.8.2 | 三种不同换热器的实验数据处理 | 126 |
| 3.8.3 | 全不锈钢旋流管式激光冷却器的实验研究 | 126 |
| 3.8.4 | 旋流管式机油冷却器性能实验数据处理 | 130 |
| 3.8.5 | 旋流管式燃油预热器性能实验数据处理 | 132 |
| | 参考文献 | 135 |
| 第4章 波纹管强化传热技术及应用 | | 138 |
| 4.1 | 波纹管强化传热机理 | 138 |
| 4.1.1 | 提高换热器传热系数的方法 | 138 |
| 4.1.2 | 波纹换热管强化传热机理 | 140 |
| 4.2 | 波纹管换热器的结构和特点 | 141 |
| 4.2.1 | 波纹管结构 | 141 |
| 4.2.2 | 波纹管换热器的特点 | 142 |
| 4.3 | 波纹管传热与阻力性能实验及分析 | 146 |
| 4.3.1 | 管程传热与阻力性能实验及分析 | 146 |
| 4.3.2 | 壳程传热与阻力性能实验与分析 | 147 |
| 4.4 | 波纹管换热器设计中的几个问题 | 149 |
| 4.5 | 波纹管换热器的设计 | 153 |
| 4.5.1 | 换热器型号表示方法 | 153 |

| | | |
|------------|------------------------------|------------|
| 4.5.2 | 波纹管换热器的简便设计方法 | 153 |
| 4.6 | 波纹管换热器的应用举例 | 156 |
| 4.6.1 | 波纹管换热器在供热工程中的应用 | 156 |
| 4.6.2 | 波纹管换热器在化工系统中的应用 | 157 |
| | 参考文献 | 160 |
| 第5章 | 其他异形强化管换热器研究与应用 | 162 |
| 5.1 | 横纹槽管式换热器研究与应用 | 162 |
| 5.1.1 | 横纹管的结构 | 162 |
| 5.1.2 | 横纹管强化传热机理 | 164 |
| 5.1.3 | 横纹管换热器设计方法 | 167 |
| 5.1.4 | 横纹管应用示例 | 169 |
| 5.2 | 螺旋扁管换热器传热与流阻性能研究及应用 | 171 |
| 5.2.1 | 螺旋扁管换热器的结构 | 172 |
| 5.2.2 | 螺旋扁管换热器的优点 | 172 |
| 5.2.3 | 螺旋扁管换热器的制造 | 173 |
| 5.2.4 | 螺旋扁管换热器传热阻力性能 | 174 |
| 5.2.5 | 螺旋扁管换热器的工业应用实例 | 177 |
| 5.3 | 缩放管换热器传热与流阻性能研究及应用 | 180 |
| 5.3.1 | 缩放管换热器的结构 | 181 |
| 5.3.2 | 缩放管换热器传热阻力性能 | 182 |
| 5.3.3 | 缩放管换热器应用实例 | 183 |
| 5.4 | 变截面管换热器传热与阻力性能 | 186 |
| 5.4.1 | 变截面管换热器的结构 | 186 |
| 5.4.2 | 变截面管换热器的优点 | 188 |
| 5.4.3 | 变截面管换热器传热阻力性能 | 188 |
| 5.5 | 空心环管壳式换热器研究与应用 | 192 |
| 5.5.1 | 空心环管壳式换热器结构特点 | 192 |
| 5.5.2 | 空心环管壳式换热器的使用特点 | 194 |
| 5.5.3 | 空心环管壳式换热器的应用 | 195 |
| 5.6 | 螺旋折流板换热器研究与应用 | 197 |

| | | |
|--------------------------------|------------------------------------|-----|
| 5.6.1 | 螺旋折流板换热器的结构 | 198 |
| 5.6.2 | 螺旋折流板换热器的特点 | 199 |
| 5.6.3 | 螺旋折流板换热器传热与阻力性能 | 201 |
| 5.6.4 | 螺旋折流板换热器的工业应用实例 | 202 |
| 5.7 | 螺旋椭圆扁管换热器 | 203 |
| 5.8 | 旋扭和交叉的强化管 | 206 |
| 5.9 | 复合强化传热技术 | 208 |
| 5.9.1 | 螺旋槽管与扭带的复合强化传热技术 | 208 |
| 5.9.2 | 螺旋槽管与旋流器、扭带、弹簧条的复合强化 传热技术 | 212 |
| 5.9.3 | 黏性流体内复合强化传热 | 215 |
| 5.9.4 | 振动复合强化传热 | 217 |
| | 参考文献 | 219 |
| 第6章 内插物的强化传热研究与应用 | | 222 |
| 6.1 | 内插物的种类及性能 | 222 |
| 6.1.1 | 扭带 | 222 |
| 6.1.2 | 螺旋线圈 | 224 |
| 6.1.3 | 绕花丝内插物 | 229 |
| 6.1.4 | 螺旋弹簧 | 232 |
| 6.1.5 | 静态混合器 | 235 |
| 6.2 | 常用内插物综合强化换热性能评价 | 239 |
| 6.3 | 内插物工业应用实例 | 241 |
| 6.3.1 | CT插入物的应用实例 | 241 |
| 6.3.2 | 静态混合器应用举例 | 244 |
| 6.3.3 | 绕花丝换热器应用举例 | 246 |
| | 参考文献 | 247 |
| 第7章 相变换热的强化传热方法 | | 250 |
| 7.1 | 凝结换热的强化 | 250 |
| 7.1.1 | 管外凝结传热的强化 | 252 |
| 7.1.2 | 管内凝结传热强化管 | 260 |

| | |
|---|------------|
| 7.2 沸腾传热的强化 | 265 |
| 7.2.1 沸腾传热技术的研究 | 266 |
| 7.2.2 沸腾传热强化技术的发展 | 269 |
| 7.2.3 池沸腾强化传热技术 | 270 |
| 7.2.4 流动沸腾强化传热技术 | 271 |
| 7.2.5 几种典型工业用沸腾传热强化管及其性能 | 275 |
| 参考文献 | 282 |
| 第8章 车辆中的强化传热技术 | 284 |
| 8.1 车辆用换热器的形式 | 284 |
| 8.2 车辆用换热器的强化传热表面 | 285 |
| 8.2.1 管式传热表面 | 285 |
| 8.2.2 翅片管式传热表面 | 286 |
| 8.2.3 板翅式传热表面 | 292 |
| 参考文献 | 293 |
| 第9章 强化传热技术在动力工程中的应用 | 294 |
| 9.1 不锈钢波螺旋槽管凝汽器在电厂的应用 | 294 |
| 9.2 螺旋槽管强化传热在锅炉空气预热器中的应用 | 298 |
| 9.2.1 螺旋槽管在燃煤锅炉空气预热器中的应用 之一 | 298 |
| 9.2.2 螺旋槽管在燃煤锅炉空气预热器中的应用 之二 | 300 |
| 9.2.3 螺旋槽管在燃煤锅炉空气预热器中的应用之三 ... | 302 |
| 9.3 电站冷油器的运行分析与强化传热研究 | 304 |
| 9.4 强化传热技术在高低压回热加热器中的应用 | 307 |
| 参考文献 | 307 |
| 第10章 强化传热技术在制冷化工工程中的应用 | 309 |
| 10.1 强化传热在制冷工程中的应用 | 309 |
| 10.1.1 整体针翅管和螺旋扭曲管在制冷机换热器中的 应用 | 309 |
| 10.1.2 改进型折流杆换热器用于冰机系统的氨冷 | |

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 凝器..... | 312 |
| 10.1.3 紧凑式换热器在制冷技术中的应用..... | 315 |
| 10.1.4 R134a 表面增强型蒸发强化传热管的传热性能..... | 319 |
| 10.1.5 镍合金强化传热管在溴化锂制冷机中的应用..... | 322 |
| 10.2 强化传热在化工工程中的应用..... | 323 |
| 10.2.1 高效节能换热器在氮肥工业中的应用..... | 323 |
| 10.2.2 铝多孔表面换热管强化沸腾换热的研究及其工业应用..... | 326 |
| 10.3 螺旋隔板花瓣管换热器在石化行业中的应用..... | 329 |
| 10.3.1 螺旋隔板花瓣管换热器的传热强化研究..... | 329 |
| 10.3.2 螺旋隔板花瓣管换热器在石化行业中的应用..... | 331 |
| 参考文献..... | 332 |

第 1 章

绪 论

传热是一种非常普遍的自然现象，它与生产生活密切相关。但是真正开始研究传热是在工业革命以后。由于工业大生产的出现，使传热问题摆在了人们面前，这就促使人们不断地去研究探索，到 20 世纪初，传热学开始形成自己的理论体系，成为一门独立的学科。

如果说传热学的目的是研究传热速率和温度分布的话，那么强化传热研究的主要任务是改善提高热传递的速率，以达到利用最经济的设备来传递规定的热量，或是用最经济的冷却来保护高温部件安全，或是用最高的热效率来实现能源合理利用。因此，强化传热因其在工业生产和能源利用中的特殊作用而得到不断的发展。

在实际工业生产中，应用强化传热技术最多的便是换热器。换热器在各种工业中不仅是保证工程设备正常运转不可缺少的部件，而且在金属消耗、动力消耗和投资方面占有整个工程中的重要份额。以下数据可以看出换热器或者说强化换热技术在工业中的地位，据统计^[1]，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中投资的 70% 左右；在动力消耗方面，以车辆为例，车辆冷却系统所消耗的功率要占发动机输出功率的 3%~15%。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也约占约 30%~40%。在制冷机中蒸发器的质量要占总质量的 30%~40%，其动力消耗约占总值的 20%~30%。在以氟里昂为制冷剂的现代水冷机组制冷机中，蒸发器和凝结器的质量约占总质量的 70%。

自 20 世纪 70 年代初中东石油危机爆发以来，以能源为中心的

环境、生态和社会经济问题日益加剧，世界各国充分认识到节能的重要意义，能源的合理利用已成为当今世界各国工业如何良性发展的核心问题。随着现代工业的飞速发展，能源紧张的状况愈演愈烈。为缓和能源紧张的状况，世界各国都在寻求新能源及节能的新途径。而要研究如何开发诸如核能、地热、太阳能等新能源，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，都离不开寿命周期费用最经济、综合效率最高的换热器^[2~4]。因此，从节能、节材和节约资金角度来说，世界各国都非常重视换热器强化的开发研究。

强化传热技术是指能显著改善传热性能的节能新技术^[5]，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。早在 18 世纪初就有人提出让风吹过物体表面强化对流传热，但该技术真正引起人们重视是在 20 世纪 60 年代后，由于生产和社会发展的需要，强化传热技术在 40 多年来得到了广泛发展和应用。迄今为止，强化传热技术在动力、核能、制冷、石油、化工乃至国防工业等领域中得到广泛应用，国内外公开发表的论文和研究报告超过 6000 篇，获得了数百项专利，已发展成为成熟的第二代传热技术。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了新的要求。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，世界各主要工业国都对此进行了大量的研究开发工作。目前，华南理工大学和清华大学，联合西安交通大学等国内 8 所著名高校，实现了传热界的强强联合，共同承担国家重大基础研究 973 项目“高效节能中的关键科学问题”，力图建立强化传热新理论，并在新理论的指导下，开发第三代传热技术^[2]。

1.1 强化传热对国民经济发展的意义

强化换热器传热过程就是力求使换热器在单位时间内，单位传热面积传递的热量尽可能增多^[1]。应用强化传热技术的目的是力

图以最经济（体积小、质量小、成本低）的换热设备来传递规定的热量，或是用最有效的冷却来保证高温部件的安全运行，这就要求进行合理的设计研究，制造出高效的换热器，使之节省资金、能源、金属消耗和所占的空间。对传统换热器设备研究主要集中在两大方向上^[3,4]，一是开发新的换热器品种，如板翅式、平行流式和振动盘管式等紧凑式换热器；二是对传统的管壳式换热器采用强化措施。具体地说，就是用各种强化型高效传热管^[5~10]（如螺旋槽纹管、横纹管、波纹管、缩放管、翅片管及各种管内插入物等）取代原来的普通金属光滑管，则既可节约金属管材和降低设备费用，又能显著地提高热能利用效率，降低能耗。强化传热新技术的应用，可使上述设备能耗较常规降低 20% 以上。可见，换热器的合理设计、运转和改进，对于节省资金、能源、金属和空间十分重要。因此，强化传热对于国民经济的发展具有重要的意义。

首先，国民经济的各工业部门，如石油、化工、动力、冶金、电子、航空与航天、轻工和交通运输等工业中，广泛存在着加热、冷却、蒸馏、供暖等各种传热过程，保证其热设备能够在高的热效率下安全运行和具有足够长的寿命是至关重要的。以交通运输工业部门的车辆来说，车辆发动机和车辆传动装置获得正常的热状态是它们可靠工作的必要条件。因为车辆发动机工作时，发动机燃烧室内的燃气的最高瞬时温度可达 1600~1800℃，燃气的平均温度也高达 600~800℃。而且，随着车辆对动力要求的提高，车辆发动机的平均有效压力和活塞的平均温度在不断提高，这就伴随着燃气的最高温度和平均温度也相应升高。因此，与燃气接触的气缸盖、活塞、气缸套、气门、喷油器和火花塞等受热件，由于大量吸热而使其温度升高，若不给予适当的冷却与控制，将会产生下述问题^[11]。

① 受热件结构强度迅速下降，以致承受不了正常的负载。

② 过高温度使润滑油变稀或结胶，破坏了各运动件摩擦副的正常润滑。

③ 过高温度使发动机燃烧室内的充气密度下降，导致发动机

功率下降。

④ 破坏了燃烧室内正常的燃烧，如早燃、爆燃等，从而使发动机油耗变坏，等等。

为了避免上述问题的发生，保证发动机及车辆正常可靠地工作，各类车辆都设置了由散热器、油冷却器、风扇和水泵等主要部件所组成的冷却系统，其中散热器、油冷却器等换热设备起着最主要的作用，一方面其传热能力决定了冷却系统能否将车辆受热件的热量及时散走，保证发动机和传动装置在各种不同工况下处于最佳热状态；另一方面，其体积和质量在很大程度上决定了冷却系统的体积及质量，而对于车辆来说，这方面的要求是很严格的，要求冷却系统应有最小的体积、质量和功率消耗，还要求有最低的成本。

此外，从新能源的开发及利用来看，与前面述及的国民经济各部门积极开展节约能源和金属材料消耗的情况一样，同样要求设计、制造出各类高性能的换热设备，以达到有效开发和合理利用新能源。例如，在太阳能的开发利用中，要求各类集热器、接收器的效率高而热损失少；在利用海洋表面海水和深层海水的温差（15~20℃）进行发电，以及地热利用等工程中，其热量传递大多是小温差下的传热过程，都要求采取强化传热措施，以提高传热量，减小换热器的体积和质量。

综上所述，研究各种传热过程的强化问题，设计、制造出高效紧凑式换热器，不仅是现代工业发展过程中必须解决的问题，同时也是开展节能和开发新能源的迫切任务。特别是近些年来，世界范围内出现的能源危机，使得能源和材料已成为热力系统总成本更重要的因素。为了节约能源和降低消耗，就需要更多地求助于强化传热技术。因此，研究开发强化传热技术，对于发展国民经济有着十分重要的意义。正是由于上述因素，促使世界各国对强化传热技术进行极为广泛的研究和探索，力图从理论上解释各种强化传热技术的机理，从实验数据中总结出其规律性，以便在工业上加以推广应用。

1.2 对流强化传热机理分析

关于强化传热的机理，许多文献都作了阐述。主要是根据传热的基本公式来分析影响传热的各种因素。

传热的基本计算式为

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

式中 K ——传热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ；

A ——换热面积， m^2 ；

Δt ——冷热流体的平均传热温差， K 。

可知，要想增加传热量有 3 种途径，即：增大平均传热温差 Δt 、增加换热面积 A 和提高传热系数 K 。以下从这三方面分别论述。

1.2.1 增大平均传热温差强化换热

增大平均传热温差的方法有两种。

一种是在冷流体和热流体的进出口温度一定时，通过改变换热面的布置来改变平均传热温差。如果换热面布置使冷热流体做逆向流动，则这种布置的平均传热温差最大；如果布置使冷热流体做同向流动，则这种布置的平均传热温差最小。所以各类换热器的换热面都尽量采取逆流布置。

另一种是增大冷、热流体进出口温度的差别以增大传热温差，这样虽然能增大平均传热温差，但是由于受到受热材料物理性质和实际工作条件的限制，平均传热温差不可能太大，况且有时换热器中的平均传热温差是给定的，这样就不能再靠增加传热温差来强化传热了，即传热平均温差的增加是很有限的。

另外由于平均换热温差的增加会造成很大的焓损失，所以往往是尽量减小平均传热温差。

1.2.2 增加换热面积以强化换热

增加传热面积是研究最多的一种强化传热方法，也是一种很有效的强化换热途径，特别是对于像空气这样的低普朗特数流体，其