

# 管式换热器

# 强化传热技术

钱颂文 朱冬生 李庆领 杨丽明 编著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

# 管式换热器强化传热技术

钱颂文 朱冬生 李庆领 杨丽明 编著

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

**图书在版编目(CIP)数据**

管式换热器强化传热技术/钱颂文等编著. —北京:  
化学工业出版社, 2003.4  
ISBN 7-5025-3445-8

I. 管… II. 钱… III. 化工机械-换热器, 管式-  
工程传热学 IV. TQ051.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 013303 号

---

**管式换热器强化传热技术**

钱颂文 朱冬生 李庆领 杨丽明 编著  
责任编辑: 周国庆 辛 田  
责任校对: 顾淑云  
封面设计: 潘 峰

\*

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)  
发行电话: (010) 64982530  
<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销  
北京市管庄永胜印刷厂印刷  
三河市东柳装订厂装订  
开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 12 $\frac{1}{4}$  字数 298 千字  
2003 年 4 月第 1 版 2003 年 4 月北京第 1 次印刷  
ISBN 7-5025-3445-8/TQ·1427  
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

## 序 言

强化传热的书，在国内已有好几本，作者在1990年出版的《管壳式换热器的设计原理》一书中亦曾对强化传热的几种基本管型，作者本人和该校多年来的试验研究结果、开发应用等，以几乎1/3的篇幅做了介绍。近年来国外出版了一本强化传热的专题杂志——Journal of enhanced heat exchange，专门发表国际上一些最新的强化传热研究进展的论文，且很有实用性。本书正是作者近期来总结本人和教育部华南理工大学传热与节能重点实验室以及过程装备传热室多年来的一些研究成果，并收集了大量国内外有关最新资料整理编写而成。本书除介绍了翅片管冷凝的进展、管内内插件的进展、强化传热在制冷中的应用，复合强化传热以及异形传热管和喷淋式椭圆异形管强化传热等外，以较多篇幅介绍了新型的内微翅管的冷凝和沸腾强化传热。书中以不少篇幅介绍了作者多年来试验研究的三维针翅管的试验结果，包括针翅管的沸腾强化传热。书中还介绍了国外最新进展电场强化电流体动力效应对传热，尤其是对沸腾和冷凝强化的主动强化（active enhancement）进展，这是近来国内外对此仅有的一些公开报道，具有一定新意，作者期望能引起读者的注意，以期在国内更多的对此开展试验研究的生产应用。本书还介绍了添加剂强化传热、振动强化传热以及卧式喷淋换热中的强化传热等一些国内外最新研究进展，这在其他书中和文献中还是少见的。有关主动强化传热的内容，最近国内外文献中已开始增多，本书专列一章予以介绍。

本书内插件的强化主要由朱冬生教授编写（第3.1~3.4节），包括了华南理工大学国家教育部传热与节能重点实验室的不少开发应用成果，钱颂文教授做了不少补充（主要是写了第3.5~3.7节）；强化传热在制冷中的应用由湛江海洋大学杨丽明副教授编写，深圳职业技术学院易新副教授参加；异形传热管强化传热由原青岛化工学院李庆领教授和马连湘教授编写，山东潍坊宏伟化工有限公司参加；振动强化由山东大学程林教授编写；本书其余部分都主要由钱颂文教授编写，方江敏副教授和马小明副教授以及孙萍副教授参加。此外，大庆石化总厂戴建军高级工程师和大庆石化机械厂杨开远、张智高级工程师、广东清远技校杨品莲高级工程师、武汉三联节能及环保有限公司薛建设高级工程师以及北京燕山石化华光焊接设备有限公司的同志、深圳职业技术学院邱木华、林王霖，北京颇尔过滤器公司马茜玲，湖北黄冈师范学院曾舟华等亦参加了部分编写工作。

由于作者水平有限，书中难免会有不足之处，敬请读者批评指正。

钱颂文

华南理工大学校庆五十周年、工作五十周年纪念  
2002年11月

## 内 容 提 要

本书在介绍管式换热器强化传热技术的一些基本管型和原理的基础上，介绍了国内外管式换热器强化传热技术的一些最新进展，可供化工、石化、热能动力、轻工等部门从事传热、节能、换热设备工作的专家、工程师以及设计人员参考；亦可作为大学本科、研究生的学习参考资料。

# 目 录

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 前言 .....	1
1.2 单相强化传热的原理 .....	1
1.3 相变传热强化 .....	2
1.4 空调与制冷工业中的强化传热设备 .....	3
1.5 强化措施及应用 .....	3
1.6 被动强化措施 .....	5
1.6.1 扩展表面 .....	5
1.6.2 表面处理 .....	7
1.6.3 粗糙表面 .....	7
1.6.4 管内插入物和流体置换型的强化元件 .....	7
1.6.5 旋转流场设备 .....	8
1.6.6 表面张力设备 .....	9
1.6.7 添加物 .....	9
1.7 主动强化技术 .....	9
1.8 双面强化表面 .....	9
1.9 性能评价标准 [PECS] .....	9
参考文献 .....	10
<b>第 2 章 轧槽管及其计算</b> .....	12
2.1 螺旋槽管及其强化传热 .....	12
2.1.1 强化性能与应用试验 .....	12
2.1.2 传热与流阻计算 .....	13
2.1.3 螺旋槽管双套管换热器的槽管管外强化传热 .....	16
2.1.4 螺旋槽管管外沸腾强化试验结果 .....	19
2.2 横纹管的强化传热 .....	21
参考文献 .....	22
<b>第 3 章 内插物的强化传热</b> .....	23
3.1 概述 .....	23
3.2 管内插入物结构、强化传热、防垢性能特点综述 .....	24
3.2.1 螺旋线圈和螺旋片 .....	25
3.2.2 螺旋弹簧 .....	26
3.2.3 网式、金属丝填料和螺旋刷式内插件 .....	27
3.2.4 绕花丝内插物 .....	27
3.2.5 MC 型扰动元件 .....	28
3.2.6 静态混合器 .....	28

3.2.7	片条插入物和斜插片	29
3.2.8	扭带、错开扭带、间隔扭带	30
3.2.9	交叉锯齿带	31
3.2.10	梯形 (CT) 插入物	32
3.2.11	碳化硅陶瓷换热器管内内插扁铁、麻花铁和星形内插件	32
3.3	内插物传热性能对比	32
3.3.1	对插入物进行性能评价的方法和基准	32
3.3.2	实验和数值模拟结果	33
3.4	内插物工业设计应用实例	36
3.4.1	螺旋弹簧的应用实例	36
3.4.2	交叉锯齿带的应用实例	37
3.4.3	CT 插入物的应用实例	37
3.5	内插扭带的传热与流体阻力性能和计算	39
3.5.1	计算关联式和关联线	39
3.5.2	A.W.Date 等人试验结果与比较	40
3.6	碳化硅高温陶瓷换热器内插件辐射、对流和导热耦合强化传热试验结果及比较	44
3.7	管子各种内插件关联式及性能比较	46
3.7.1	关联式	47
3.7.2	热力和流体力学性能比较	48
3.7.3	设计原则	52
	参考文献	52
<b>第 4 章</b>	<b>整体低翅片外螺纹管的传热及其强化</b>	<b>54</b>
4.1	外低翅片管卧式冷凝强化传热性能及计算	56
4.2	表面张力冷凝排液的基本原理	62
4.3	低翅片外螺纹管翅高对冷凝传热膜系数的关系	63
4.4	剪切冷凝	65
4.5	翅的最佳几何结构	67
	参考文献	68
<b>第 5 章</b>	<b>低翅片内螺纹翅片管 (简称 ISF 管) 的冷凝传热与流动沸腾传热强化</b>	<b>69</b>
5.1	内螺纹低翅片管冷凝传热强化试验	69
5.2	内螺纹低翅片管流动沸腾传热强化	71
5.3	影响内翅管冷凝和蒸发传热及压降的翅片几何结构效应	74
	参考文献	78
<b>第 6 章</b>	<b>内微翅管 (Inter-Micro-fin) 传热与强化性能</b>	<b>79</b>
6.1	内微翅管冷凝热传递与压降性能计算	79
6.1.1	内微翅管冷凝传热与压降性能	79
6.1.2	内微翅管冷凝传热与压降计算	82
6.1.3	内微翅管“制冷剂-油”混合物的冷凝计算及其与试验的比较	85
6.1.4	内微翅管冷凝传热与压降理论模型	86

6.2	几种 R22 替代物内微翅管冷凝传热强化与传热膜系数比较, 及干度与 冷凝传热的关系	95
6.3	内微翅管流动沸腾、蒸发传热与强化性能	98
6.3.1	综述	98
6.3.2	内微翅管传热与压降性能	102
6.3.3	几种 R22 制冷剂替代物 R123a、R404A、R407c 和 R410a 内微翅管 管内蒸发传热膜系数和压降及比较	103
6.3.4	内微翅管纯制冷剂和油混合物沸腾传热计算关联式和试验值	105
6.4	内微翅管湍流流动和传热的翅片几何结构效应	109
6.4.1	内矩形微翅几何结构参数的效应	109
6.4.2	不同微翅断面结构效应	112
	参考文献	115
<b>第 7 章</b>	<b>针翅管 (Pin fin Tube) 强化传热</b>	<b>116</b>
7.1	气体沿针翅管做纵向流动时传热与压降	116
7.1.1	针翅温度场	116
7.1.2	针翅翅片效率	116
7.1.3	针翅管传热膜系数	117
7.1.4	针翅管压降	117
7.2	SUNROD 针翅管气体错流传热压降试验结果	118
7.3	SUNROD 针翅管水和油液体介质传热和压降试验结果	118
7.4	针翅管的沸腾传热特性	121
7.4.1	针翅管沸腾传热强化模型	122
7.4.2	实验曲线和结果分析	125
7.4.3	针翅管沸腾传热数学模型与关联式比较	127
	参考文献	128
<b>第 8 章</b>	<b>卧式喷淋降膜与椭圆管的传热强化</b>	<b>130</b>
8.1	卧式喷淋降膜数学模型与影响因素 (光滑圆管)	130
8.2	溴化锂喷淋降膜蒸发器传热性能与喷淋翅管的传热强化	134
8.3	椭圆管水平喷淋降膜蒸发的强化	136
8.3.1	椭圆管的表面结构对喷淋降膜蒸发沸腾的影响	137
8.3.2	不同椭圆度 $E$ 对喷淋蒸发传热膜系数的影响	138
8.3.3	不同喷淋密度 $\Gamma$ 对不同 $E$ 椭圆管喷淋降膜传热膜系数的影响	138
8.3.4	截面形状 $E$ 对传热的影响	138
8.3.5	椭圆管喷淋蒸发传热膜系数 $h_e$ 的关联式	140
	参考文献	141
<b>第 9 章</b>	<b>电场强化传热——电流体动力效应 EHD 强化传热</b>	<b>142</b>
9.1	综述	142
9.2	电场强化 (EHD) 效应	142
9.2.1	EHD 效应沸腾滞后的消除	142
9.2.2	EHD 效应传热强化	143



9.2.3 EHD效应对不同管子几何结构的影响和比较 .....	144
9.3 喷淋降膜蒸发强化传热的电流体动力效应 .....	144
9.4 电流体动力效应强化管内单相流体强制对流传热 .....	146
9.5 翅片管冷凝传热电场强化效应 .....	147
9.5.1 综述 .....	147
9.5.2 涂层电极电场电流体动力效应 (EHD) 对卧式冷凝的传热强化 .....	149
参考文献 .....	154
<b>第 10 章 复合强化技术</b> .....	<b>155</b>
10.1 管外冷凝双面复合强化管 (DAC 管) .....	155
10.2 管内冷凝双侧复合强化管 .....	156
10.3 管内沸腾强化的双侧复合强化管 .....	158
10.4 带整体内螺旋翅片的 T 型翅片管管外沸腾双面复合强化管 .....	159
10.5 带管内 V 型纵槽冷凝的管外蒸发沸腾喷铝表面多孔双面相变复合强化管 .....	160
10.6 管内复合强化传热管性能 .....	160
10.6.1 内插扭带-内肋管 .....	160
10.6.2 进口轴向叶片旋流器与螺旋槽管的管内复合强化传热 .....	161
10.7 具有纵向翼形漩涡发生器椭圆管板翅的复合强化传热 .....	165
10.8 振动复合强化 .....	168
10.8.1 弹性管束振动传热特性 .....	168
10.8.2 弹性管束污垢特性 .....	169
参考文献 .....	170
<b>第 11 章 添加传热强化剂强化沸腾传热</b> .....	<b>171</b>
11.1 国外进展 .....	171
11.2 添加物对强化池核沸腾的机理 .....	172
11.3 WT 混合添加剂强化池沸腾传热 .....	174
11.4 纯水添加 R113 双组分对流沸腾传热强化 .....	176
11.5 通入惰性气体或不互溶添加物强化管外沸腾传热 .....	177
11.5.1 通入惰性气体强化管外池沸腾传热 .....	177
11.5.2 不互溶添加剂或添加物强化蒸发传热 .....	179
参考文献 .....	179
<b>第 12 章 电场强化沸腾传热</b> .....	<b>180</b>
12.1 电流体力学 .....	180
12.2 热流密度对 EHD 强化的影响 .....	180
12.3 混合工质的混合比 EHD 强化的影响 .....	182
<b>第 13 章 流体中添加物对传热的强化</b> .....	<b>183</b>
13.1 聚合物添加剂聚丙烯酰胺 (PAM) 在垂直铜管内对水的流动沸腾传热强化 .....	183
13.1.1 PAM 对流动沸腾传热的影响 .....	183
13.1.2 PAM 对流动沸腾摩擦压降的影响 .....	184
13.2 流体中添加纳米粒子强化传热 .....	185

# 第 1 章 概 述

## 1.1 前言

提高传热性能的研究是指对传热的强化。强化传热自最早有记载的传热研究起就涉及到从事这一领域的科研工作者和工业实践者<sup>[1]</sup>。近年来，能源与材料费用的不断增长大大地推动了高效节能换热器的发展。因而，相当多的研究力量放在了各式各样的强化传热表面及设备上。如今，强化传热在科研和工业应用上展现出蓬勃生机：发表的有关强化传热设备技术论文成指数上升；技术专利增长；成千上万的制造商提供的产品范围涉及从强化管到整个换热系统的强化技术。在这里，我们将详细讨论单相强化换热设备、两相强化换热设备。强化换热设备主要参考 Bergles 文献源。

首先从传热方程总传热系数的提高来考虑强化传热，如  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为代表换热管内外两侧流体的对流等给热系数，若简化到清洁而无污垢热阻 ( $\delta_{垢}=0$ ) 及设管壁材料的导热率很大，管又很薄时，于是总传热系数

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

这时传热的好坏决定于管子内外侧流体的给热系数。为便于分析和观察，将上式简化式绘成图线，如图 1-1 所示。

在  $\alpha_1 < \alpha_2$  时，当增加  $\alpha_1$ ， $K$  增加很快，直至变成等于  $\alpha_2$ ；当  $\alpha_1 > \alpha_2$  时， $K$  增加的速度很慢，再进一步增加  $\alpha_1$  时， $K$  几乎不再增加。

可以看到， $K$  值绝不会超过  $\alpha_1$  的值，且当  $\alpha_1 < \alpha_2$  时，而管外流体给热系数  $\alpha_2$  很大，甚至即使是  $\alpha_2 \rightarrow \infty$  时，总传热系数  $K$  也只能达到趋近于管子较小给热系数  $\alpha_1$  值；反之亦如此。因此，强化传热系数大的一边是没有用的，只需设法强化给热系数小的一边。

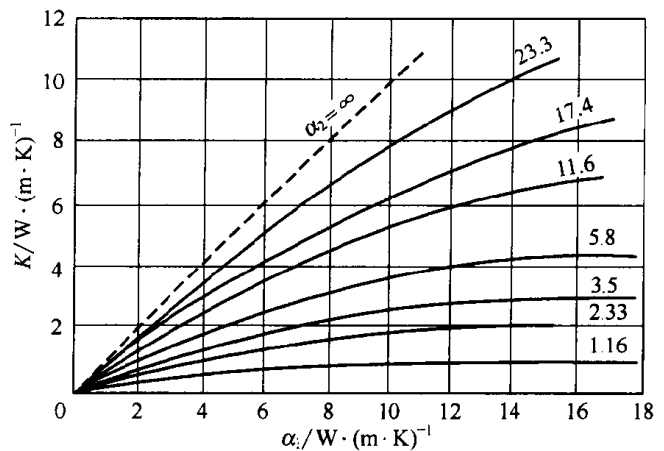


图 1-1 总传热系数  $K$  与  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  的关系

$$K = f(\alpha_1, \alpha_2)$$

## 1.2 单相强化传热的原理

单相强化传热可分为内部流动和外部流动，也可进一部分为层流和湍流。层流和湍流强化的主要机理就是利用增加二次传热表面和破坏原来未强化的流体的速度分布和温度分布场。

采用扩大传热面。例如翅片管，不但增加了传热面积，而且也减少了热阻，即强化了传

热；对于内外径为  $d_1$  和  $d_2$  的圆管壁，其两侧热阻分别为  $\frac{1}{\alpha_1 d_1}$  和  $\frac{1}{\alpha_2 d_2}$ ，即热阻不仅决定于给热系数，也决定于两侧面积的大小。为此，可在给热系数小的，即热阻大的一侧增加相应的传热面积，就可以提高  $K$  值。这对于无论是圆管、球壳和平壁，都可以借增加翅片来达到，这时热阻变为比例于  $\frac{1}{\alpha_1 F_1}$  和  $\frac{1}{\alpha_2 F_2}$ （其中  $F_1$  和  $F_2$  分别为内外侧的传热面积）。

减薄管壁。例如在溴化锂吸收式制冷机中，日本已改用壁厚为 0.6~0.8mm 的薄壁铜-镍合金管（3% Ni, 96% Cu）；而我国一般都采用  $\phi 16\text{mm} \times 1\text{mm}$  紫铜管以及  $\phi 18\text{mm} \times 1.25\text{mm}$  和  $\phi 19\text{mm} \times 2.5\text{mm}$  的无缝钢管，壁厚较大，热阻就大。而氟塑料换热管也都采用  $\phi 4 \sim 6\text{mm}$  的小管密排薄壁管（0.2~0.5mm），以增加传热面积，减少壁阻。

提高流速可以增加给热系数并减少积垢，这是强化传热的主要途径之一。日本在溴化锂制冷机中改用了这种高强度薄壁管后，可以将管内流速同时提高到 2.5~3.0m/s 以上，因而大大地强化了传热。但是增加流速，也要受到一定的限制。因增加流速，不仅阻力降增加，当壳程流速过大而流体横向流过管束时，在一定条件下可能会出现换热管的强烈振动。管子振动使壳程阻力降上升 2 倍，且换热器产生声振动时，发出极大的噪声。

### (1) 湍流强化

管内湍流表现为靠近壁面流体速度近似为零的低速区，即熟知的层流底层。大部分的热阻集中在层流底层低速区，任何粗糙表面或强化技术（如螺旋内插物、线圈插入物和凸出物等）都是用于破坏层流从而达到提高换热的目的。对于管中层流，其底层的无因次厚度为：

$$y^* = \frac{y \sqrt{G_c \tau_0 / \rho}}{v} = 5$$

$\tau_0$  为光滑管中的剪切应力。热边界层厚度  $y$  与管径  $d$  之比为：

$$\frac{y}{d} = 25 Re^{-0.875}$$

若  $Re = 3000$ ， $d = 25.4\text{mm}$ ，层流底层厚度  $y$  为 0.0762mm。因此，任何的粗糙表面和强化措施都可以破坏掉层流底层，从而提高换热。

### (2) 层流强化

层流的传热膜系数通常较低，流体速度和温度的变化分布在整个通道宽度上。故其热阻不像湍流那样都只集中在壁面附近。因此，小尺度的粗糙表面在层流中对强化传热效果不明显。通常的强化措施是产生涡流或造成湍流。

## 1.3 相变传热强化

### (1) 强化冷凝

单组分的冷凝传热热阻主要是冷凝膜厚度的导热热阻。强化冷凝可利用表面张力获取很薄的冷凝膜厚度或从冷凝表面排走冷凝液，特殊的表面几何形状或将表面进行特别处理后能达到上述效果。冷凝传热强化可在冷凝器的壳程也可在管程，因为管子的布置方式会影响冷凝器的排液特性，所以设计时要区分是水平布置还是竖直布置。

水平布置的壳程 ①短的径向翅片、波纹管、绕线管，具有成型翅尖的修正弧形翅片管。

② 采用双侧强化表面几何形状，如螺旋槽管，外表面是螺旋肋，内表面是沟槽的轧制螺纹管。

③ 在水平管的膜状冷凝方面采用表面扩展的最新发展是 Hitachi 日立的 Thermolexcel-C 和旋转面翅 (spine-fin) 表面。

水平布置的管程 密间距的内螺纹翅片、扭带内插物、重复的粗糙肋及粗糙沙粒层均可使用。

垂直管的壳程冷凝 在一定间距的一个垂直表面强化壳程的冷凝可用翅片管、波纹表面、及在竖管上沿轴向松弛地接触固定的竖直线。

## (2) 强化蒸发

强化蒸发的重要机理是薄膜态蒸发、对流沸腾和核态沸腾。核态和过渡池沸腾通常与表面条件有关,如金属特性、表面粗糙度及表面的化学性质。有几种类型的粗糙表面可减少壁面的过热度,增加峰值临界热流量。破坏膜态沸腾,针对膜态和核态沸腾的强化传热措施有如下。

① 薄膜蒸发: 波纹垂直管。

② 核态沸腾: 对核态沸腾的强化常采用表面处理,表面处理是指精巧地改造表面粗糙度,如在光管上加一层膜。或将表面变形处理成带细小通道或小孔的表面。典型的结构表面是强化表面空腔——在管表面按一定尺寸加工一些临界尺寸范围的小孔或空腔、空腔间相内连、凹形核座及整体粗糙面——强化沸腾过程的表面有三种商用类型。Trane (特灵) 用普通翅片、Hitachi (日立) 锯齿状翅片和 Weiland T 型翅片。

③ 对流沸腾: 壳程一般采用整体肋片来强化沸腾表面。管程可用整体内肋、轴向翅片和螺旋型翅片。

④ 管内流动沸腾: 多孔涂层,或特殊的整体内粗糙几何面。

## 1.4 空调与制冷工业中的强化传热设备

### (1) 制冷剂在壳程蒸发

强化管及它们的商业名字包括: ① 多孔涂层——高热流 (Union Carbide); ② 用于制冷剂壳程蒸发的低肋管: GEWA-T、GEWA-TX、GEWA-TXY、Thermoexcel-E (Hitachi)、Turbo-B (Wolverine) 和 Thermoexcel-HE。

### (2) 制冷剂的壳程冷凝

表面张力公认是决定冷凝液膜厚度的主要作用力,这一机理为如何设计产生薄膜的表面和如何将冷凝液从换热表面移走提供了有效的研究思路。如 Thermoexcel-c (Hitachi) 型和 Turbo-v 型的换热都是用带倾斜角的翅片来保持薄的制冷剂液膜。

### (3) 制冷剂管内蒸发

管内制冷剂蒸发的强化换热设备包括: ① 用螺旋线插入物等粗糙表面,内螺纹线及轧槽管; ② 扩展表面如微翅管和高肋片; ③ 旋流装置如扭带插入物。

## 1.5 强化措施及应用

强化措施可分为两种: 被动 (passitive) 措施和主动 (active) 措施。① 被动措施不需借助外功; ② 而主动措施则需利用外功。下表列出了主动和被动措施的应用。这些方法在参数文献中有详细的讨论,表 1-1 给出了主动强化和被动强化方法,可采用两种或更多种强化方法来提供比单独一种方法更大的“复合强化”。每一种强化方法都有其各自的优缺点。按 Cargles, 这些方法的效率主要取决于传热的模式。它可以包括单相自然对流直至分散流膜

沸腾。

表 1-1 强化技术

被动式技术(不需要外功)	主动式技术(需要外功)	被动式技术(不需要外功)	主动式技术(需要外功)
传热表面延伸(扩展)	机械辅助	涡旋流装置	引射或抽吸
传热表面处理	传热表面振动	表面张力装置	
粗糙表面	流体振动	液体添加剂	
位移强化装置	电场或磁场	气体添加剂	

尽管有许多强化技术被指出和实验过，但只有一小部分应用于换热器中。被动强化管相对于制造，对很多应用经济有效，并可应用于改造现有设备，而主动强化方法如管子振动等，则价值昂贵而复杂。常用主要强化技术应用范围及比例见表 1-2。

表 1-2 常用主要强化技术应用范围及比例

强化表面	单相自然对流	单相强制对流	池内沸腾	强制对流沸腾	冷凝	同时是传质的传热过程
经处理的强化表面	—	—	65	14	24	—
粗糙强化表面	2	200	15	32	15	14
扩大传热表面	*	210	28	31	75	10
涡流装置等强化技术	—	116	—	79	11	7
液体中加入强化添加剂	3	10	41	16	—	1
借气体中加入固体添加物而强化	—	132	—	—	5	2

注：“—”无应用；“\*”未考虑。

目前国外已商业化的强化传热技术主要还只限于采用某些特殊的表面几何结构，以提供每单位面积上较高  $\alpha A$  值，包括增加传热表面粗糙度（与普通光滑传热管相比称为粗糙管）和促进湍流度以增加给热系数  $\alpha$ ，或如上所述借翅片或其他手段以扩大传热面  $A$ ；以及某些翅片或特殊的成型面，由于减少了水力半径或使边界层的厚度减薄，既能扩大传热面  $A$ ，又能提供较高的  $\alpha$  值而达到传热的强化。例如单相流体的强制对流用的间断翅片的结构以及卧式冷凝的低翅片波纹管，是利用介质的表面张力来减薄冷凝液的厚度，就是采用了这种强化传热手段。

强化传热技术与换热器的结构类型、材质等有很大关系。表 1-3 是综括了目前已用的和可能采用的且具有应用价值的传热强化的一些几何结构。

表 1-3 强化传热表面几何结构的应用

类 型	商业化应用	方 式			典型材料	性 能
		强制对流	沸腾	冷凝		
1. 管内强化:						
(1)金属涂层	有	—	2	—	Al, Cu, 钢	高
(2)整体翅片	有	2	3	4	Al, Cu	高
(3)波纹管轧槽管	有	4	4	4	Al, Cu	中等
(4)整体粗糙度	有	2	3	4	Cu, 钢	高
(5)内插金属线圈	有	3	4	4	任何	中等

类 型	商业化应用	方 式			典型材料	性 能
		强制对流	沸 腾	冷 凝		
(6)移位促进器	有	2	4	4	任何	中等
(7)扭带内插物	有	2	3	4	任何	中等
2. 圆管管外强化:						
(1)涂层						
金属	有	—	2	4	Al, Cu, 钢	高(沸腾)
非金属	无	—	4	4	泰氟隆	中等
(2)粗糙度(整体)	有	3	2	4	Al, Cu	高(沸腾)
(3)粗糙物(接触式)	有	3	4	—	任何	中等(对流)
(4)纵向翅片	有	1	4	4	Al, 钢	高(对流)
(5)横向翅片						
用于气体	有	1	—	—	Al, Cu, 钢	高
用于液体/两相	有	1	1	1	任何	高
(6)波纹管轧槽管						
整体	有	—	—	2	Al, Cu	高
非整体	有	—	—	4	任何	高

注: 1—普遍使用; 2—少用; 3—某些特殊场合; 4—基本上没有使用; —表示不采用。

## 1.6 被动强化措施

### 1.6.1 扩展表面

扩展表面是紧凑式换热器和壳管式换热器最常用的强化措施, 无论是液体换热还是气体换热方式均如此。

#### (1) 气体换热扩展表面

在换热器两侧分别为气体和液体的强制对流过程中, 气体侧的换热系数一般是液体侧的 $1/50 \sim 1/10$ 左右。扩展表面用于气体侧减小其热阻。然而, 气体侧的最终热阻还会比液体侧高。

管翅式换热器强化表面的几何形状。圆形管翅式换热器中使用的强化表面形状通常包括以下几种: ①平滑圆形翅; ②开缝翅; ③冲孔且弯曲的三角形凸出物; ④分离扇形翅; ⑤钢丝圈扩展表面。如图 1-2 所示。



图 1-2 强化环形翅片的表面几何形状

所有这些形状均通过小直径金属丝线或板条提供周期性的薄边界层形成涡区, 增强涡流区传热元件间的热耗散, 从而达到强化换热效果。在低雷诺数的流动中, 必须应用这些强化

表面，很有效，这些强化措施均包含以下两个基本概念。

特殊通道形状，如波纹形通道，由于在通道中形成的二次流和边界层分离，致使流体相互渗混。

边界层的重复生长和破坏。例如百叶形 (Louvered) 翅片、针翅和某些程度的穿孔翅片。

(2) 液体的扩展表面

传热介质为液体的强化表面也大量用于管内流和管外流中。由于液体的换热系数大于气体，对于气体，对于同样翅片效率，液体中的翅片尺寸比气体中的翅片所需尺寸要短。

(3) 内扩展面

利用整体内翅管进行管内强化传热的研究有大量的结构形状，如图 1-3 所示。尤其是紫铜管和铝管已商业化大量应用，其中大部分是针对单相流。近年来，在制冷系统中，对管内几何形状增强沸腾换热的研究比较多，典型的有商品化的 Thermofin 管。另外，其他可能的方法也可以达到强化效果，包括管内粗糙表面、管内插入物，如扭带内插物和线圈等。

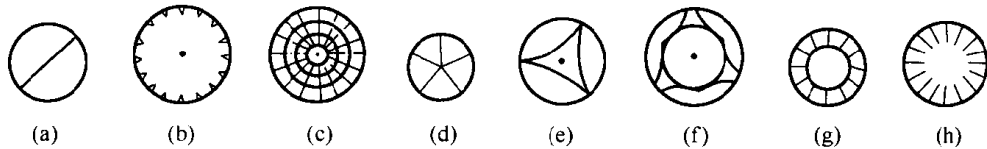


图 1-3 现已运用的管内强化表面

- (a) 光管内插扭曲带；(b) 内螺纹管；(c) 五倍 (quintuplex) 翅化管；
- (d) 光管内插星状物；(e) amatron 内翅管；(f) 内波纹面管；
- (g) 两面翅化管；(h) 直内翅管

制冷系统中，制冷剂蒸发管的强化措施趋于采用内微翅管，原因基于以下两点：①内微翅管结构可以大幅度增强换热，而伴随的流阻增大较小；②额外的材料增加远远小于其他类型的内翅管。典型的微翅管的截面图如图 1-4 所示。

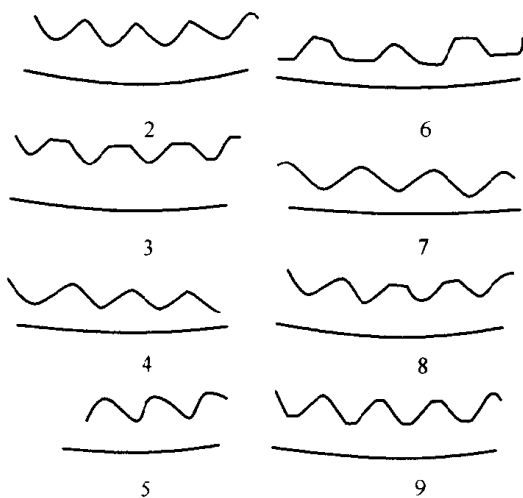


图 1-4 用于制冷蒸发器和冷凝器中微翅管的翅片剖面图

内微翅管为紫铜管，常规外径为 9.525mm，内有 60~70 个螺旋翅，翅高 0.1~0.19mm，螺旋角为 15°~25°。而其他类型的内翅结构很少超过 30 个螺旋翅，翅高也超过微翅管的若干倍，与光滑管相比，基于当量光管面积，微翅管的换热系数高 30%~80%。取决于蒸汽干度和翅的断面结构。

(4) 外低翅管

低翅管的外径通常为 19.2~25.4mm，翅高为 1.6mm 或 3.2mm，标准的翅片密度一般为 11 片/in、19 片/in、26 片/in、30 片/in 和 40 片/in (433~748 片/m)，低翅管最理想的应用对象是壳管式换热器。

典型的低翅管外表面面积是同直径光滑管的 3 倍，在管壳式换热器中，低翅管与光滑管允许互换。如果管外侧换热系数低过内侧的 1/3，通常采用外低翅管表面作为强化措施就比较经济。对于压缩气体，如中间冷却器和后冷却器，低翅管也是比较有效的，尤其用于管道中制冷剂和碳氢化合物的冷凝和蒸发。低翅管的应用主要包括以下：

- ① 冷却气体或黏性流体的显热传热；

- ② 表面张力较低的流体冷凝，低翅管强化冷凝传热效果可典型地提高 30% 左右；
- ③ 对于汽化过程，低翅管与光滑管相比，形成核沸腾的温差较低；
- ④ 在污垢流体中，污垢不易在低翅管表面加速形成，即可减少污垢的形成，比光滑管更容易用化学或机械方法清洁。

### 1.6.2 表面处理

表面处理包括表面粗糙度细小尺度的改变及连续的或非连续的表面涂层，例如疏水涂层和多孔涂层。这样的表面对相变换热的强化效果非常有效，而对单相对流换热效果不明显，因为其表面粗糙的高度不足以影响单相换热的增强。

### 1.6.3 粗糙表面

粗糙表面指管子或通道的表面形成具有一定规律性的重复肋一样的粗糙凸出微元体，其边缘垂直于流线方向。粗糙表面的作用通常选择可增强湍流度而不是增大换热表面积。粗糙表面既可适用于任何常规换热表面，也可适用于各种扩展表面。

粗糙表面可以做成许多结构形状，从随机的沙粒型粗糙度到离散的凸出物。螺旋反复肋型的粗糙度表面加工方便，且对单相湍流具有较好的传热强化效果，压力损失也较小。肋片粗糙表面的作用是产生流动分离和重新附着，其主要的参数是肋高  $e$  和螺距  $p$  如图 1-5 所示。

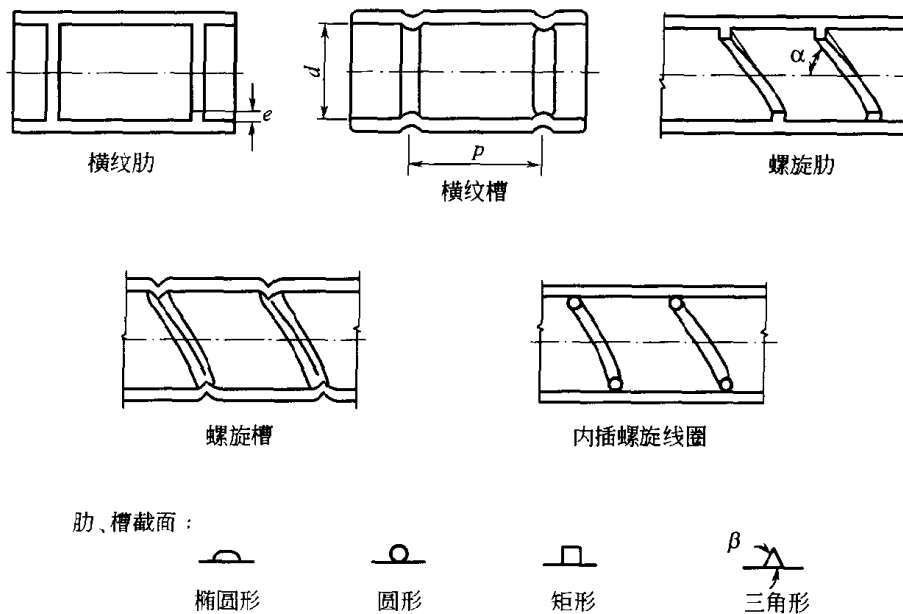


图 1-5 肋化表面的例子

粗糙表面也可以加工成整体二维或三维的粗糙微元。在所有粗糙表面类型中，三维沙粒型表面表现出最好的换热效果。表面粗糙度对高  $Pr$  数液体湍流应用很有吸引力，其传热膜系数的增加量要比压降摩擦因子的增加大得多。粗糙微元可由传统的机加工过程，如成型加工、涂层来达到。不同的内插件或环绕结构表面缠绕物也可以形成表面凸出物。对于层流，这种小尺寸的粗糙效果不明显，而插入绕曲扭带和内翅管等具有更好的强化效果。

### 1.6.4 管内插入物和流体置换型的强化元件

光滑管内插入物，管内插入物相对成本低，工艺简便，且取出清洁也容易。

#### (1) 强化机理



管内插入物可增加某一种或下列几种情况的综合作用，有利于提高换热，同时也增大流动摩擦阻力，即：

- ① 破坏流体边界层的发展，增强流动湍流度；
- ② 若插入物与管壁接触良好，可增大有效的表面换热面积；
- ③ 流动产生旋流和二次流。

#### (2) 插入元件的形状

各种插入元件的形状有以下几类：

- ① 在流动方向上产生螺旋型流动的元件，如螺旋条和扭曲带；
- ② 在管壁有良好热接触的扩展表面插入物，也增加了有效传热面积；
- ③ 贴附管壁面的插入元件，在管壁附近产生流体混合；
- ④ 可产生流体置换的插入元件使整个流动产生周期性混合。

#### (3) 流体置换的强化元件

可置换的强化元件插入流动通道中可增加强化传热表面附近的流动。这类元件一般包括：流线形、碟形静态混合器，网状或刷子状、以及线圈形插入元件。

线圈形插入元件：线圈形插入元件是一种较廉价元件，且能有效地提高换热器管内换热能力。对于需经常清洁的应用场合，它能方便更换翻新，具有整体式强化结构不可比的优点。不过，如果线圈与管内壁接触不好，也有相应明显的缺点。对于插入元件，影响强化效果的参数主要有：凸出高度、凸出元件的特征距离或间距、螺旋角度和凸出形状。

插入物对加热/冷却操作的作用，在加热模式操作过程中，旋转流能产生显著的离心对流作用，即使也可能在冷却操作中会产生相反的离心对流效应而减少对流换热系数。管内插入物（如扭带）能产生旋转流，像扭带或扭曲形状通常不用于油冷却器。而通常采用盘管或螺旋弹簧，螺旋弹簧一般不产生旋转流。

### 1.6.5 旋转流场设备

旋转流场设备包括一些几何布置或者管内插入物，这些设备可强迫管内流体产生旋转流动或二次流，类似此类设备的有：入口涡旋发生器、扭带内插物、具有螺旋形线圈的轴向芯体内插物。强化表面有几个作用：增加流体通道的长度；产生二次流；还有增加翅片效率。

#### (1) 扭带插入物

扭带插入物已得到广泛的研究，并对各种扭曲形状进行了一一比较评价，包括机械旋转扭带、管入口处的短距离扭带及沿管长间歇布置的扭带。间歇布置的“旋桨型”插入物靠流体流动带动旋转。

#### (2) 轧槽表面

轧槽管涉及周向或螺旋波纹槽。流体在螺旋的通道里伴随着二次流，而反向作用的离心作用力对二次流产生抑制作用，突发的湍流对二次流又有破坏作用。在冷凝设备中，轧槽管可增大冷凝传热膜系数，因为只有一层薄薄的冷凝液停留在轧槽顶面，大多数液体由于表面张力和重力作用已流入渠道。

在轧槽管中，内螺旋槽管比其他粗糙表面更有优势，容易制造，不易结垢，在摩擦系数增加不大的情况下，换热系数增加较多。影响轧槽表面的管子参数是：管间距、沟槽的类型、槽深度及沟槽的头数。

#### (3) 管中的扰流器

强化锅炉燃烧管最常用的方法是在管内装扰流器来增加气侧的换热系数，因而增加燃气