

> “十三五”国家重点图书
当代化工学术精品丛书·原创

强化冷凝传热 界面调控技术

SURFACE MODIFICATION FOR
CONDENSATION HEAT
TRANSFER ENHANCEMENT

张莉 徐宏 / 主编

张外借



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

“十三五”国家重点图书

当代化工学术精品丛书·原创

强化冷凝传热界面调控技术

Surface Modification for Condensation
Heat Transfer Enhancement

张莉 徐宏 主编



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

图书在版编目(CIP)数据

强化冷凝传热界面调控技术/张莉,徐宏主编. —
上海:华东理工大学出版社,2017.12
(当代化工学术精品丛书.原创)
ISBN 978-7-5628-4899-8

I.①强… II.①张…②徐… III.①传热-界面-
调控 IV.①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 320251 号

内 容 提 要

全书共分六章,第 1 章为绪论,系统介绍了冷凝传热的分类、强化冷凝传热原理及技术;第 2 章为促进滴状冷凝的表面强化方法;第 3 章具体阐述了基于分形理论的竖壁平板表面通用冷凝传热模型;第 4 章是螺旋形变管强化冷凝传热特性;第 5 章为纵槽管强化冷凝传热特性;第 6 章系统地介绍了内波外螺纹管管内冷凝强化性能及不凝气体的影响。

本书可作为高等学校化工、石化、热能动力、化工设备等相关专业本科生、研究生的学习指导书,可供从事传热、节能、换热设备工作的专家、工程师以及研究院所的设计人员参考使用。

项目统筹 / 马夫娇

责任编辑 / 韩 婷 马夫娇

装帧设计 / 靳天宇

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地址:上海市梅陇路 130 号,200237

电话:021-64250306

网址:www.ecustpress.cn

邮箱:zongbianban@ecustpress.cn

印 刷 / 上海中华商务联合印刷有限公司

开 本 / 710 mm×1000 mm 1/16

印 张 / 13.75

字 数 / 237 千字

版 次 / 2017 年 12 月第 1 版

印 次 / 2017 年 12 月第 1 次

定 价 / 88.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

冷凝现象广泛存在于工业领域和自然界中,它是石油化工、发电、能源动力、制冷空调和节能等领域中重要的换热过程之一。蒸气的冷凝模式与表面特性息息相关,根据冷凝液与冷凝表面的润湿程度可分为膜状冷凝和滴状冷凝。实现滴状冷凝是强化冷凝传热的最理想途径,其冷凝传热系数比膜状冷凝高一个数量级以上。膜状冷凝时,壁面总是被一层液膜覆盖,液膜层为传热的主要热阻。因此强化冷凝传热的途径主要有两种,即形成滴状冷凝和尽量减薄液膜厚度。

本书针对上述两种强化冷凝传热的途径来组织内容框架,作者在研究表面特性与冷凝传热之间关联机制的基础上,发明了多种表面改性强化冷凝新技术,并对各种强化技术的适用性进行了评价。主要内容包括表面合金复合镀渗、表面自身纳米晶化、表面微纳结构修饰等促进滴状冷凝的表面改性技术;表面螺旋扭曲、开纵槽、内波外螺纹等改变流体流态、改善冷凝液膜分布的界面异形化强化冷凝技术,以及多种冷凝传热模型和传热关联式的建立方法,阐明了各种强化冷凝传热技术的机理。与其他同类强化传热技术的书籍相比,本书首次将界面调控这一提法引入强化传热技术领域,聚焦通过传热界面改性方法强化冷凝传热技术及应用的介绍。

本书是在作者所在研究团队的老师、研究生的大力协助下完成的,书中所涉及的内容根据近十年来研究团队指导的博士后、博士和硕士论文工作汇总编写而成,包括侯峰、廖礼宝、齐宝金、朱登亮、杨胜、李东、任彬等,在此向他们一并表示感谢。还要感谢在成书过程中进行图表等整理工作的储华龙、叶骠、吴浩等。全书由张莉、徐宏统稿。

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,恳请读者不吝批评、指正。

张 莉

2017年2月于华东理工大学

主要符号说明

A	截面尺寸, mm	h_L	局部传热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
\bar{A}	液滴覆盖总面积, m^2	h_o	外螺纹高度; 管外传热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
A_k	第 k 代单个液滴冷凝面积, m^2	h_{oc}	椭圆管外冷凝传热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$A(r)$	半径大于 r 的液滴覆盖的面积份额	h_{os}	圆管外冷凝传热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
A_{sl}	液滴与壁面接触面积, m^2	H_s	除液盘间距; 有效长度
Bo	邦德(Bond)数	k	总传热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
c_i	系数	K	常数; 曲率
c_o	系数	L	有效换热长度, mm
c_{pl}	比热容, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Δl	间距, mm
d	圆管直径, mm	m	网格数, m^{-1} ; 冷凝液量
d_{max}	间距, mm	m_{cw}	冷却水量, kg
d_i	管内径, m	M	质量流量; 摩尔质量, $g \cdot mol^{-1}$
d_o	管外径, m	M_k	液滴对壁面的重力矩, $N \cdot m$
d_B	盒维数	n	分布指数
d_f	分形维数	\bar{N}	液滴总数, m^{-2}
D_i	线圈直径, mm	N_k	第 k 代液滴数目, m^{-2}
D_{riv}	沟流液膜宽度, mm	N_δ	直径为 δ 分形体最少个数
e	凹槽深度; 椭圆度	N_{r_k}	半径为 r_k 液滴个数, m^{-2}
E	弹性模量, MPa	N_s	核化中心密度, m^{-2}
$F(r)$	合并液滴通用尺寸分布函数, m^{-3}	p	节距, mm
$f(r)$	生长液滴通用尺寸分布函数, m^{-3}	p_{sat}	饱和蒸气压
$F(x)$	液膜的体积力	P	有效面积比率
f_s	表面面积分数	q	热通量(冷凝热流密度), $W \cdot m^{-2}$
h	冷凝面传热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	\dot{q}	局部平均热流密度, $W \cdot m^{-2}$
h_t	复合传热膜系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	\bar{q}	平均热流密度
h_{fg}	汽化潜热, $J \cdot kg^{-1}$	\dot{Q}	单位长度传热量
h_i	波纹高度; 界面管内传热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Q	传热量, W; 比例系数

Q_t	总传热量, W	W_a	液滴在冷凝面的黏附功, $N \cdot m^{-1}$
q_t	冷凝面总热通量, $W \cdot m^{-2}$	α	倾斜角, ($^\circ$); 冷凝系数
r	液滴半径, m; 材料表面粗糙度因子	α_c	冷凝常数(无不凝气体取 1)
r_c	临界半径, m	β	螺旋角, ($^\circ$)
r_k	第 k 代液滴半径, m	γ	相邻两代液滴尺度比; 界面张力(表面能)
r_{max}	液滴最大半径, m	γ^p	极性分量
r_{min}	液滴最小半径, m	γ^d	色散分量
r_s	短程有序范围, m	δ	分形体尺度, 液膜厚度, m
R	气体常数, $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$	δ_L	任意位置处的液膜厚度, m
R_{dep}	脱落直径, m	δ_R	右侧液膜厚度
Re	雷诺数	δ_r	液膜厚度
R_i	气液界面曲率半径	θ	接触角, ($^\circ$)
R_w	管壁热阻	θ_A	前进角, ($^\circ$)
S	节距, mm	θ_c	复合接触面上的表观接触角, ($^\circ$)
t	时间	θ_C	Cassie 接触角
t_s	液滴脱落周期, s	θ_e	平衡接触角, ($^\circ$)
t_c	液滴生长周期, s	θ_R	后退角, ($^\circ$)
t_{tot}	整个停留周期, s	θ_w	Wenzel 接触角(表观接触角), ($^\circ$)
t_{co}	液滴合并周期, s	θ_Y	本征接触角, ($^\circ$)
T_{sat}	饱和蒸气温度, K	λ	热导率, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
T_{cwi}	冷却水进口温度, K	λ_l	液体热导率, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
T_{cwo}	冷却水出口温度, K	λ_w	管壁热导率, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
T_i	测点温度, K	μ	动力黏度, $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
T_w	壁面温度, K	V	液滴体积, m^3
ΔT	蒸气与冷凝表面总温差(过冷度), K	ρ_l	冷凝液(液体)的密度, $kg \cdot m^{-3}$
ΔT_c	气液交界面曲率相关热阻产生的温差, K	ρ_v	蒸气的密度, $kg \cdot m^{-3}$
ΔT_d	液滴导热热阻产生的温差, K	σ	表面自由能, $N \cdot m^{-1}$
ΔT_i	气液相界面传热热阻产生的温差, K	$\Delta\sigma$	冷凝表面自由能差, $N \cdot m^{-1}$
ΔT_{IMTD}	对热传热温差, K	σ_w	气液界面张力, $N \cdot m^{-1}$
ΔT_p	滴状冷凝促进层导热热阻产生的温差, K	τ	冷凝面液滴代数
u	蒸气流速, m/s	φ_s	液固接触面积占液滴覆盖面积的百分数
V	液滴体积, m^3 ; 蒸气质量体积, $m^3 \cdot kg^{-1}$	ζ	厚度
W	液滴脱落克服总功, J		

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 冷凝传热分类	1
1.2 强化冷凝传热原理和方法	2
1.3 表面改性强化冷凝技术	3
1.4 表面异形化强化冷凝技术	5
1.4.1 水平管外	5
1.4.2 竖直管外	7
1.4.3 水平管内	8
1.5 强化冷凝的其他技术	10
1.5.1 强化滴状冷凝技术	10
1.5.2 强化膜状冷凝技术	11
1.5.3 主动强化技术	12
第 2 章 促进滴状冷凝的表面强化方法	14
2.1 表面复合渗镀强化冷凝技术	14
2.1.1 纳米 SiO_2 颗粒复合化学镀层制备方法	14
2.1.2 Ni-P-纳米 SiO_2 化学复合镀层的表面能	15
2.1.3 强化传热的效果及机理	17
2.2 表面纳米晶化强化冷凝技术	24
2.2.1 制备方法及表面结构	25
2.2.2 表面润湿性变化	33
2.2.3 强化传热的效果及机理	35
2.3 表面微纳结构修饰强化冷凝技术	45
2.3.1 制备方法及表面结构	45
2.3.2 表面润湿性变化	46

2.3.3	强化传热的效果及机理	47
第 3 章	基于分形理论的竖壁平板表面通用冷凝传热模型	65
3.1	概述	65
3.2	滴膜共存冷凝传热模型的建立	65
3.2.1	滴状区冷凝传热模型	65
3.2.2	膜状区冷凝传热模型	77
3.2.3	滴膜共存冷凝传热模型	82
3.3	传热模型影响因素分析	82
3.3.1	滴状区影响因素分析	83
3.3.2	滴膜交界区域及膜状区影响因素分析	86
3.4	模型值与文献及实验数据比较	86
3.4.1	滴状冷凝传热模型与实验值对比分析	86
3.4.2	滴膜共存冷凝传热模型与实验值对比分析	89
第 4 章	螺旋形变管强化冷凝传热特性	90
4.1	概述	90
4.2	螺旋形变管管外蒸气冷凝传热模型	91
4.2.1	螺旋形变管管外蒸气冷凝传热理论模型的建立	91
4.2.2	螺旋形变管管外蒸气冷凝传热特性理论分析	98
4.3	螺旋形变管管外蒸汽冷凝传热特性	109
4.3.1	实验装置与方法	109
4.3.2	螺旋形变管管外蒸汽冷凝传热特性的实验研究	113
第 5 章	纵槽管强化冷凝传热特性	119
5.1	概述	119
5.2	纵槽管表面膜状冷凝成膜规律	119
5.2.1	纵槽管管外冷凝传热模型	120
5.2.2	模型验证及讨论	129
5.3	纵槽管表面膜状冷凝分区模型传热分析	137
5.3.1	纵槽管表面膜状冷凝分区模型理论	137
5.3.2	分区模型法传热计算	140
5.3.3	分区模型理论验证及分析	145
5.4	槽型结构优化	152
5.4.1	槽形选择的基本原则	152

5.4.2	槽排液能力计算及槽形的初步选择	153
5.4.3	U形槽的选型设计	155
5.4.4	U形槽四区模型理论及求解	155
5.4.5	U形槽结构对冷凝传热的影响规律研究及参数优化	159
5.4.6	U形槽与V形槽性能对比	165
5.4.7	垂直纵槽管强化膜状冷凝传热实验	167
第6章	内波外螺纹管管内冷凝强化性能及不凝气体的影响研究	172
6.1	概述	172
6.2	内波外螺纹管传热特性的间接测量法及实验系统	172
6.2.1	实验系统与流程	172
6.2.2	内波外螺纹管结构参数	174
6.2.3	实验方法及数据处理	175
6.2.4	间接法测量管内传热性能的准确性验证	178
6.3	内波外螺纹管管内冷凝强化性能	180
6.3.1	传热系数的强化	180
6.3.2	流阻特性研究	183
6.3.3	综合性能评价	185
6.4	不凝气对内波外螺纹管管内冷凝特性的影响研究	185
6.4.1	混合气进口条件的影响	185
6.4.2	内波外螺纹管结构参数对冷凝的影响	187
6.4.3	混合蒸气在水平光管和内波外螺纹管内冷凝的对比分析	189
6.5	内波外螺纹管内混合气冷凝的传热分析	192
6.5.1	传热特性轴向分布规律	192
6.5.2	强化混合蒸气冷凝的机理探讨	195
	参考文献	198

第 1 章

绪 论

1.1 冷凝传热分类

蒸气的冷凝有时也称为蒸气的凝结,是指当蒸气与低于其饱和温度的表面相接触时,蒸气释放出潜热而冷凝成液相的过程。

1. 根据换热方式分类

按照不同的换热方式冷凝可分为:膜状冷凝、均匀冷凝、滴状冷凝、直接接触式冷凝、不混合工质冷凝,如图 1-1 所示。

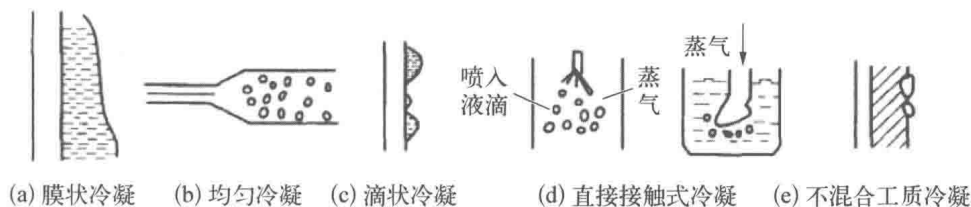


图 1-1 冷凝方式示意

膜状冷凝,发生在易于湿润的冷却壁面上,冷凝液润湿表面并形成一层完整的流动液膜。膜状冷凝的研究较为广泛和深入,在工业设备中也最为常见。

均匀冷凝,蒸气凝结成微小液滴,悬浮在气相中,形成雾状流体,又称雾状冷凝。均匀冷凝是自然界中最常见的一种凝结现象。

滴状冷凝,发生在不易润湿的冷却壁面上,冷凝液不能完全润湿表面,冷凝液呈许多大小不一、分散的液滴。相对于膜状冷凝,滴状冷凝是一种高效的换热方式,其冷凝传热系数比膜状冷凝要提高 1~2 个数量级。

直接接触式冷凝,这种冷凝现象发生在蒸气和冷液体直接接触时,可以在冷液体喷入蒸气中时产生,也可以在蒸气喷入冷液体中时发生。

不混合工质冷凝,多种蒸气混合物凝结成各种不混溶液体时,会出现不混

溶工质的冷凝现象。通常是一种液体凝结成液膜,另一种液体凝结成液滴。

2. 根据冷却壁面特点分类

按照冷却壁面的特点分类,可分为管外冷凝和管内冷凝两种。根据管子布置方式的不同,管内冷凝和管外冷凝又可分为垂直式和水平式两种。大多数冷凝器采用水平式管外凝结,此时管内管外换热系数都较高,所以总传热系数高,此外蒸气压力损失小,也容易排出不凝性气体。对于以空气为冷却介质的都采用管内冷凝,而在管外采用扩展表面,以提高空气侧的传热系数。

1.2 强化冷凝传热原理和方法

1. 滴状冷凝的强化机理

传统的蒸气冷凝形态的判别以静态接触角(又称为 Young 接触角)为依据,认为接触角 θ 小于 90° 时为膜状冷凝;反之为滴状冷凝。然而,实验发现冷凝液与壁面静态接触角在一定范围内时,蒸气冷凝形态是介于完全的膜状与滴状之间的,以膜状冷凝与滴状冷凝共同存在的混合冷凝状态存在,称为滴膜共存冷凝。该冷凝形态受冷凝表面的物理化学性质及过冷度、热通量等因素影响较大,是一种可以向滴状冷凝或膜状冷凝转变的非稳定冷凝形态。

由于固体表面的非理想性,液体在其表面流动会产生接触角滞后现象。一些学者认为以平衡接触角作为冷凝形态的判据更为合理,但在实际应用中并不方便,Min 和 Webb 等提出了以液滴在冷凝面上的后退角大于 40° 作为滴状冷凝发生与否的判据。岳丹婷等则认为只要液滴的静态接触角大于 150° ,就能在冷凝面上获得稳定滴状冷凝。曹治觉等从热力学角度通过比较同体积的球形液滴与球冠形液滴的化学势得出滴状冷凝的最小接触角为 70.67° ,并指出该值是能够实现滴状冷凝的最小接触角,在 $70.67^\circ < \theta < 90^\circ$ 的小接触角范围内出现部分滴状冷凝是可能的,在此范围内 θ 越接近 90° 越容易形成 Brown 凝并,当 θ 接近 70.67° 时 Brown 凝并困难且易形成膜状冷凝。

基于固液两相间表面能差及固液界面流动特性,马学虎等提出冷凝形态划分和冷凝传热强化的新思路,认为一定的表面过冷度下冷凝传热特性随冷凝液与冷凝表面自由能差 $\Delta\sigma$ 的变化关系应存在两个临界值。当 $\Delta\sigma$ 小于第一临界值时,冷凝形态为传统的膜状冷凝;当 $\Delta\sigma$ 大于第二临界值时,冷凝形态为

完美的滴状冷凝,其传热性能远远优于膜状冷凝;在两个临界值之间的过渡段内冷凝传热特性应该是渐进变化的,而非到第二临界点处发生突变,如图 1-2 所示。相应地,冷凝形态也将从开始的膜状冷凝开始、经过滴膜共存混合冷凝形式,最后转变为完全的滴状冷凝。

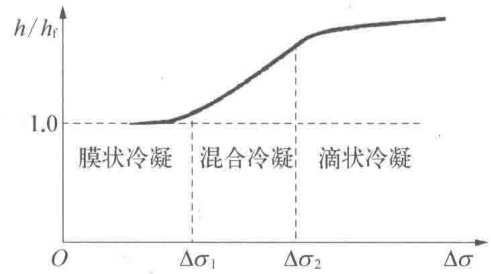


图 1-2 表面自由能差对蒸气冷凝传热的影响

2. 膜状冷凝的强化原则

尽量减小液膜层的厚度,这是强化膜状冷凝的原则。热阻取决于通过液膜层的导热。因此,尽量减小液膜层的厚度也是强化膜状冷凝的基本手段。为此可以从两个方面着手:减薄蒸气冷凝时直接黏滞在固体表面上的液膜;及时将传热表面上产生的冷凝液排走,避免其积存在传热表面上而进一步使液膜加厚。

1.3 表面改性强化冷凝技术

蒸气在固体表面上形成滴状冷凝的必要条件是该表面有较低的表面能,实验研究也证明,具有较低表面能的表面可以很好地促进滴状冷凝的形成。工业冷凝器大多由普通金属材质制成,其表面能较高且接触角较小,难以形成滴状冷凝。而要实现滴状冷凝,可以对冷凝表面进行改性,通过降低表面自由能来实现。

1. 复合沉积法

复合沉积法是将低表面能物质复合沉积在金属表面上,形成低表面能表面,降低金属表面的表面能,使蒸气在金属表面上形成滴状冷凝。何平等应用这种技术,以黄铜管和碳钢管为原料,分别采用不同工艺条件下的复合沉积过程,使表面沉积了低表面能的聚四氟乙烯(PTFE)复合沉积层,实现了蒸气滴状冷凝。在雷诺数 Re 为 $(1\sim 9)\times 10^4$ 时,复合沉积聚四氟乙烯表面的铜管表面总传热系数较膜状冷凝时提高 2~3 倍,碳钢管表面总传热系数较膜状冷凝时提高 1~3 倍。

2. 化学气相沉积

化学气相沉积(Chemical Vapor Deposition, CVD)是利用气相化合物分子携带所要沉积的原子,在一定条件下使化合物分解,并在基底上形成特定的沉积层,其包括表面吸附、配合基(如 $-H$ 和 $-CH_3$ 等)的热解或还原丢失和原

子的沉积等过程。Koch 采用等离子体增强的 CVD 技术,在铜基上制备无定形氢化处理碳膜层,并实现水蒸气滴状冷凝随膜层制备条件的不同,其表面接触角为 $65^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 。冷凝传热系数比膜状冷凝提高 $3.5\sim 11$ 倍;由于该膜层具有类似金刚石的机械性能,在连续使用 500 h 后,滴状冷凝状态仍很稳定。

3. 离子束动态混合注入

离子束动态混合注入(Dynamic Ion-beam Mixed Implantation, DIMI)是依靠载能的离子束、电子束和原子束与基体金属表面发生原子碰撞等同步相互作用,使材料表面层的结构、成分和化合价等发生变化,从而达到表面改性的目的。Rausch 等利用离子束注入技术将 N^{+} 植入钛表面,促进滴状冷凝,冷凝传热系数比 Nusselt 膜状冷凝理论值提高 5.5 倍。Rausch 还研究了不锈钢表面 N^{+} 的植入,结果使传热系数比 Nusselt 膜状冷凝理论值提高 3.2 倍。赵起对离子束注入的元素及实验条件进行了研究,发现操作条件对实验结果影响较大。杜长海用离子束动态混合注入技术,在黄铜管表面上制备了超薄聚四氟乙烯薄膜,并实现水蒸气在常压下的滴状冷凝,冷凝热通量比膜状冷凝提高 $1.5\sim 7$ 倍,传热系数比膜状冷凝提高 $3\sim 22$ 倍,滴状冷凝在较小的传热温差下具有较好的传热性能。但 DIMI 技术制备成本较高,不适于工业推广应用。

4. 分子自组装膜

分子自组装单层膜(Self Assembled Monolayer, SAM)是分子通过化学键作用,自发地吸附在固体表面上而形成热力学稳定有序膜。自组装膜的活性剂分子可分为三部分:(1) 头端基团,其通过化学键吸附钉扎于基底表面的特殊位置,使分子与基底有较强的相互作用;(2) 烷烃链或衍生基团,分子链间依靠范德瓦尔斯力相互作用;(3) 末端基团,即表面功能基团,分子自组装膜依靠这些功能基团的作用实现滴状冷凝。自组装膜是有序密堆的分子膜,其厚度在分子尺度量级,附加热阻极小。Das 在金和铜镍合金表面上制备出厚度仅 $1.0\sim 1.5$ nm 的自组装烷烃硫醇(Alkanethiol)单分子层膜,其传热系数比膜状冷凝提高 $2.7\sim 3.6$ 倍。

5. 在金属表面涂有机促进剂

常用的有机促进剂有油酸、硬脂酸、链状脂肪酸类、硫醇及褐煤蜡等。将带憎水基的有机促进剂涂覆在金属表面上,由于大多数表面活性物质的分子结构具有不对称性,当这类物质与金属表面接触时,其极性端会自发朝向金属表面,从而使金属表面自由能降低,有效实现水蒸气的滴状冷凝。胡友森通过对涂 PTFE 波槽管管外滴状冷凝传热实验研究表明:在略高于大气压的条件下, $25\ \mu\text{m}$ 的 PTFE 波槽管管外凝结换热系数为普通波槽管的 $3.81\sim 5.99$ 倍;

81 μm 的涂层波槽管传热系数最大。但由于这些涂层是靠物理或者化学吸附作用与表面结合的,结合力较弱;再加上有机涂层易脱落造成污染,因此限制了其大规模的工业应用。

1.4 表面异形化强化冷凝技术

1.4.1 水平管外

1. 粗糙表面法

粗糙表面指管子和通道表面形成具有一定规律的重复肋一样的突出微元体,粗糙表面的作用通常是增强湍流度,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,又可适用于各种扩展表面。

Spencer、Nicol 研究了粗糙表面对膜状冷凝的影响。壁面粗糙度可增加液膜的紊流度,从而强化冷凝传热。但是,当液膜流速较低、处于层流流动时,由于粗糙面淹没在层流液膜中且液膜流速缓慢,粗糙度对扰动液膜的作用不大,相反,粗糙度能滞留液膜,因此冷凝传热系数反而低于光管。

2. 扩展表面法

图 1-3 为低肋管,它是利用冷凝液的表面张力使肋片顶部的液膜减薄来强化冷凝传热的,冷凝传热系数对比光管提高了 75%~100%。低肋管的肋片间距主要由凝结液体的表面张力和蒸气对液膜的剪切力决定。用于制冷剂或其他低表面张力液体时,一般肋片密度为每厘米管长 7~14 片。低肋管一般不用于凝结水蒸气,因为水的表面张力大,在肋片间容易充满液体形成水的搭桥现象,从而降低冷凝传热系数。Briggs、Shah 等分别用实验和理论分析的方法对低肋管进行了研究,总结了冷凝传热系数的计算公式。

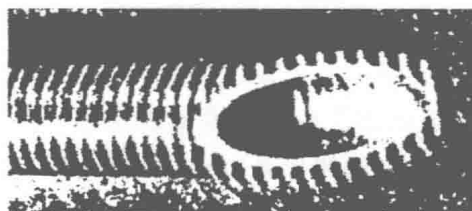


图 1-3 低肋管

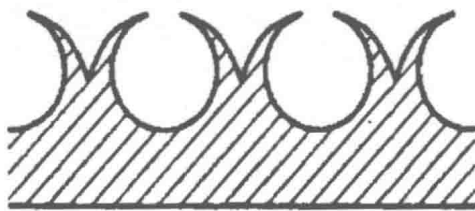


图 1-4 GEWA-TXY 管

在低肋管的基础上,德国 Weiland 公司又开发出系列 GEWA 翅片管(图 1-4),它的翅片外缘呈 V 字形,其管外冷凝传热系数比低肋管稍高,一般为低肋管的 1.2~1.6 倍。从翅片形状来看,低肋管和 GEWA 管均为二维结构

的强化管。

图 1-5 为日本日立公司 1975 年首创的 Thermoexcel - C 管(简称 C 管),由于肋片呈锯齿形,也称锯齿形肋片管。C 管的肋片高 1.2 mm,肋片密度为每厘米管长 13.8 片肋片,锯齿凹处深度约为肋高的 40%,肋尖处很薄。C 管的冷凝传热系数是低肋管的 1.5~2 倍。其强化机理主要在于三维肋片增大了非淹没区表面张力减薄冷凝表面液膜厚度的作用,且 C 管冷凝液淹没区小于相同肋间距的低肋管,淹没区内液膜分布均匀,所以冷凝传热系数大于低肋管。

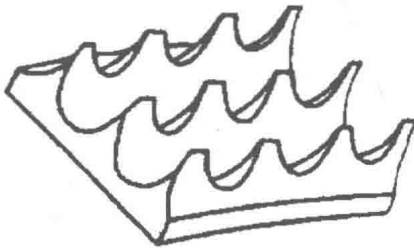


图 1-5 C 管和 CCS 管

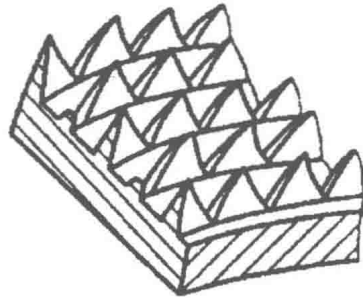


图 1-6 花瓣形翅片管

1993 年华南理工大学化工所成功地开发出了花瓣形翅片管(图 1-6),并获得国家专利。花瓣形翅片管的翅片也是三维结构,最大特点是翅片上的锯齿槽被切割到根圆,从横截面上看像个花瓣,因而得名。在相同热流密度下,花瓣形翅片管的冷凝传热系数是光滑管的 11~18 倍。花瓣形翅片管的机械加工方法简便(每小时可加工管长 30 m 以上),易于在工业中广泛地推广应用。

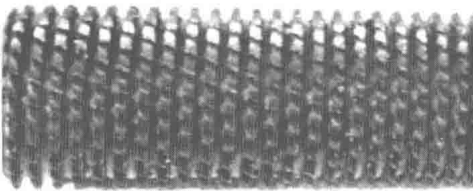


图 1-7 菱形翅片管

图 1-7 为菱形翅片管,是一种带有周向非连续三维翅片的高效传热管,其传热强化性能优于带周向连续翅片的螺纹翅片管。当用于强化冷凝传热时,由于其三维翅片的特殊结构造成翅片表面液膜的表面张力分布不均(根部大、顶部小),液膜被拉向根部,使三维翅片表面的液膜厚度大幅度减小,热阻减小,使汽态介质和管外壁的换热能力增强,从而提高换热效果。

3. 螺纹槽管

螺纹槽管在管子内壁面和外壁面上都具有螺纹槽,可同时强化冷凝侧和冷却侧的传热。Wither 研究表明如将这种双面强化传热管用于水蒸气凝结器,则当冷却水侧阻力相同时,应用这种管子后可使凝结器的管子材料

比用光管时节省 30%~50%，与光管相比冷凝侧的传热强度可提高 35%~50%。

Marto 比较了多种螺纹槽管的凝结换热效应。试验结果表明，当管子外径为 15.9 mm、螺纹节距为 9.58 mm、螺纹深度为 0.4~0.6 mm 时，螺纹槽管的凝结传热系数反而比光管低 10%左右；只有一种螺纹管的冷凝传热系数比光管高 35%。这表明螺纹槽管主要对冷却侧产生强化传热效应，传热系数比光管高 1~3 倍，因此宜在冷却侧热阻为主要热阻时使用。

1.4.2 竖管外

1. 纵槽管

1954 年德国学者 Gregorig 首先提出了利用表面张力来强化垂直壁面上层流膜状冷凝传热的方法，这一方法就是采用槽形竖壁结构，单面纵槽换热管(以下简称“纵槽管”)就是其中的一种形式，即在外表面开有纵向槽的垂直管，纵槽管及其横截面如图 1-8 所示。其原理是：蒸气在槽的表面凝结，冷凝液在表面张力的作用下由槽的顶部迅速流到槽的底部，然后在重力的作用下顺着纵槽流走。这种使冷凝换热表面的冷凝液非均匀分布的方法获得的平均冷凝传热系数要比均匀厚度液膜的传热系数高得多。为了能及时排走纵槽管表面的冷凝液，避免冷凝液进一步加厚，在纵槽管表面又设置了除液盘(图 1-8)，使纵槽管的冷凝传热性能得到了一定程度的提高。

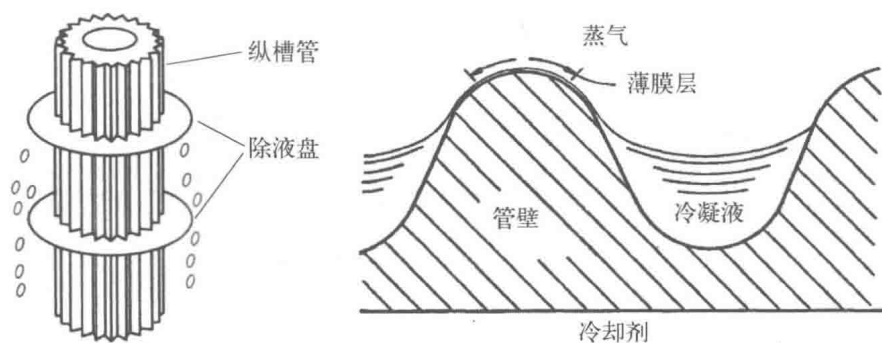


图 1-8 纵槽管及其横截面示意

Gregorig 建立了优化的槽峰曲率半径方程，但没有对槽谷的几何尺寸作出规定。继 Gregorig 之后，人们开发出了多种形式的槽，如 V 形槽、矩形槽、余弦形槽等，但是关于各种槽形的理论研究还不成熟。

2. 螺纹槽管

Newson 对垂直螺纹槽管进行过一系列试验,发现螺纹槽管在垂直布置时也能起到强化冷凝的作用。这一方面是由于螺纹槽道的作用,管壁上的冷凝液会迅速顺着螺纹槽脱离管外壁,管壁的平均液膜厚度减小。另一方面,冷却侧的对流换热也因流体的旋转而得到强化。各种螺纹槽管的传热系数都比光管高,最多可比光管高 40%~140%。

Panchal 等详细地叙述了螺纹槽管强化冷凝换热的机理:螺纹槽管增加了传热面积,其表面的几何形状使液膜产生二维流动。表面张力在整个传热过程中起到了较为重要的作用,冷凝液由表面张力拉入槽内,在管壁上形成液膜较薄的区域。冷凝传热系数随着冷凝液膜 Re 数的增加而降低,这是因为随着 Re 数的增加,沟槽中的持液量也增加,使槽峰的有效换热面积减少。当 Re 数大于 4 000 时,螺旋流产生的离心力使冷凝液脱离壁面,但同时也会有液泛现象发生。

1.4.3 水平管内

1. 微翅片管

微翅片管是通过专用机床对圆管内壁进行刻切加工而成,增大了管内传热面积,如图 1-9 所示。由于其优异的强化传热效果以及较小的压降被学者广泛研究。它主要应用在制冷行业,主要有以下两点原因:(1)翅片表面容易结垢只能用于洁净工质的冷凝;(2)其冷加工的工艺决定了其基管必须具有良好的塑性,一般情况下为铜,这就限制了它在其他行业的应用。

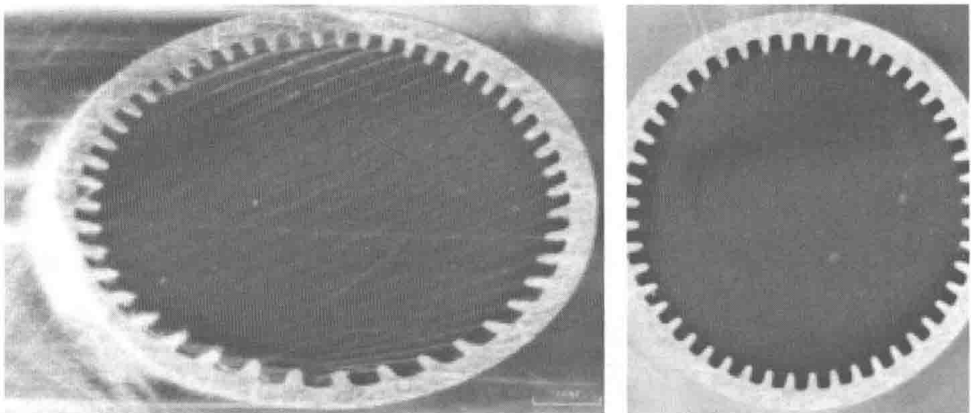


图 1-9 微翅片管截面图