

异形流道换热面 强化传热传质特性研究

张西龙 张永亮 贾进章 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

· 长 沙 ·

内容简介

本书共 8 章, 提出了异形流道换热面用于改善冷却介质在传统等截面流道内存在的温度不均匀、压降较大及冷凝液不易排出等缺点。以梯形、余弦形、抛物线形和圆弧形异形流道为研究对象, 采用理论、仿真和实验相结合的研究方法, 对流道内的传热、流动性能及冷凝规律进行研究。分析了流道内特征参数对传热、阻力及场协同性的影响。借鉴导热、对流换热问题在一般坐标系下的数学描述及推导方法, 获得异形流道内温度场、流场及异形翅片的导热和对流换热多维模型。基于 Nusselt 凝结换热理论, 并结合拉梅系数、传热学和流体力学理论, 建立流道表面膜状冷凝的理论模型。

本书可供强化传热传质、暖通空调、车辆冷却等领域的科技人员、管理人员阅读, 也可供动力机械及工程、安全科学与工程、环境科学与工程等专业的师生参考。

前 言

自中东石油危机爆发以来,以能源为中心的生态、环境和社会经济问题日益得到重视,能源能否合理利用一直都是影响各国工业、经济发展以及人民生活水平的主要因素。热交换器作为热力过程中不可缺少的设备,被广泛地应用在汽车、空调、石油、化工、冶金等行业中。热交换器的投资在一般的石油化工行业中,占据了总投资金额的45%左右,在现代石油化工企业中甚至也占了25%左右;在热电厂中,如果将锅炉看作热交换器,那么其占整个电厂投资总额的70%左右;在制冷机中,蒸发器的动力消耗占总消耗功率的25%左右。因此,合理地研制和开发制造高利用效率的热交换器正在逐步成为高效开发和能源利用的主要方法之一。

传统的流道换热面结构具有加工方便、紧凑性良好和技术成熟等优点,被广泛地应用于各种各样的热交换器场合。然而,这种等截面的结构也造成了不可避免的缺陷。对于传统的等截面流道换热面来说,冷却介质在流道入口、出口处存在温差分布不均匀的现象,从而抑制了热量由基板和翅片向冷却介质传递的能力;冷却介质在流动过程中会产生较大的压降损失;在微通道式结构中,冷凝水会凝结在流道的内部和翅片上,使得大量的冷凝水积聚于冷凝器中,并使凝结水在向外流出的过程中受到了较大的阻力,造成冷凝效率急剧降低。

针对上述传统等截面流道换热面的热交换器所存在的缺陷,本书提出了开展异形流道换热面热交换器的研究。以梯形、余弦形、抛物线形和圆弧形异形流道为研究对象,采用理论、仿真和实验相结合的研究方法,对流道内传热、流动及冷凝规律进行研究。首先,利用边界层理论对流道内温度分布展开推导,得到等截面流道内温差存在的关系。采用仿真方法获取梯形流道内不同倾角时的温差和梯形翅片内导热分布,计算了相应的传热系数和压降。结合流体力学和相似解法对不同倾角时的流动特性进行研究,得出边界层分离时的角度和原因。其次,分析了流道内特征参数对传热、阻力及场协同性的影响。基于场协同原理,以平均场协同角为评价指标,对不同参数时(包括倾角、波幅、焦距、圆半径)的场协同性和传热机理进行评估。再次,对异形流道不同结构时的传热和阻力性能进行实验研究。利用多元线性回归法对五种流道的 j 因子和 f 因子进行实验关联式拟合。为获得异形流道内温度场、流场及异形翅片内的温度分布,借鉴导热、对流换热问题在一般坐标系下的数学描述及推导方法,在曲面微元体内使用质量、动量及能量守恒方程并结合拉梅系数,建立了导热和对流换热多维模型。为分析异形流道表面冷凝过程及液膜厚度和液膜内的导热问题,基于Nusselt凝结换热理论,并结合拉梅系数、传热学和流体力学理论,建立流道表面膜状冷凝的理论模型,提出了液膜双分区模型,根据边界层理论推导和计算出分区模型中的液膜厚度方程。

本书的主要特色在于:采用实验、数值仿真和理论分析相结合的研究方法,对不同结构

参数的异形流动换热面的传热和阻力性能进行研究。具体研究内容如下:①采用理论分析和数值仿真的研究方法,以梯形流道为例,研究不同倾角时流道内温度均匀性分布、翅片内部的导热温度分布、流动过程中的压降损失以及流动特性。通过流体力学理论,并采用相似解法对梯形流道内流动特性进行理论分析,得到了流道内边界层分离的角度和原因。②对异形流道内传热和流动性能进行了数值仿真研究,并获得了各异形流道内温度场和流场。采用场协同理论,以平均场协同角为评价指标,分析了不同流道和不同特征结构参数时的强化传热机理。③建立小风洞实验台对不同异形流道结构参数的换热单元,在不同迎面风速下进行传热和阻力性能的实验。采用多元线性回归和 F 显著性检验方法对五种类型流道的 j 因子和 f 因子进行实验关联式拟合,并采用芯体体积优势因子的强化传热评价方法,对比分析不同结构参数异形流道的综合强化传热性能。④导热和对流换热多维模型建立。利用能量守恒定律并结合拉梅系数,建立一般曲面流道下的多维导热数学模型。利用质量、动量和能量守恒定律并通过拉梅系数、初始和边界条件构建对流传热问题的完整数学描述。以MATLAB平台并结合有限差分法对多维导热和对流换热模型进行求解,并与仿真和实验数据分别对比分析。⑤以拉梅系数和动量方程的一般形式为理论基础,建立了流道表面膜状冷凝的理论模型,并推导出液膜厚度方程和双分区理论模型。通过数值计算得到冷凝水量、冷凝换热系数、液膜厚度和流道表面温度梯度分布规律。

本书在撰写过程中得到了北京理工大学王义春教授、中南大学吴超教授及青岛理工大学岳丽宏教授、王在泉教授的悉心指导,在此,本人对他们为本书所做出的重要贡献表示衷心的感谢。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(编号:51204100)、中国博士后科学基金特别资助项目(编号:2017T100508)、中国博士后科学基金面上项目(编号:2016M602170)、山东省重点研发项目(编号:2017GSF20113、2018GSF121002)、山东省自然科学基金项目(编号:ZR2017PD011、ZR2018MEE002)、山东省博士后创新专项资金项目(编号:2017148)、北京科技大学教育部重点实验室开放基金(编号:ustbmslab201802)等基金项目资助,在此一并表示感谢。

最后,还要衷心感谢本书所引用参考资料的所有作者,感谢编辑对本书的出版所付出的努力。由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

张西龙
2018年5月

目 录

1 传统流道换热面的研究现状与发展趋势	(1)
1.1 传统流道换热面研究现状及进展	(1)
1.1.1 强化传热技术研究进展	(1)
1.1.2 矩形流道结构	(4)
1.1.3 圆形流道结构	(9)
1.2 传统流道换热面的研究瓶颈	(11)
1.2.1 强化传热提高瓶颈	(11)
1.2.2 流动阻力改善瓶颈	(11)
1.3 传统流道换热面的发展趋势及应用前景	(13)
1.3.1 发展趋势	(13)
1.3.2 应用前景	(13)
1.4 本章小结	(14)
2 异形流道换热面研究意义及应用	(15)
2.1 研究意义	(15)
2.2 异形流道换热面的结构特征及定义	(16)
2.3 异形流道换热面国内外研究现状	(17)
2.3.1 梯形流道结构	(17)
2.3.2 波纹形流道结构	(19)
2.3.3 横纹管结构	(20)
2.3.4 螺旋槽管结构	(21)
2.3.5 扭曲椭圆管结构	(22)
2.3.6 异形流道在冷凝传热中的研究进展	(23)
2.4 异形流道的应用	(24)
2.4.1 在车用换热器中的应用	(24)
2.4.2 在空调“两器”中的应用	(25)
2.4.3 在电子设备中的应用	(26)
2.5 本章小结	(27)

- 3 异形流道内温度均匀性分布及流动特性研究 (28)
 - 3.1 第一类渐扩形异形流道的结构特点及重要性 (28)
 - 3.2 异形流道研究中的数值模拟方法 (29)
 - 3.2.1 基本假设及数学模型 (30)
 - 3.2.2 计算模型及边界条件 (32)
 - 3.2.3 网格的划分及离散化 (33)
 - 3.2.4 控制方程 (34)
 - 3.2.5 网格独立性及数学模型验证 (36)
 - 3.3 对流换热过程中的温度均匀性分布 (37)
 - 3.3.1 流道内温差分布理论分析 (37)
 - 3.3.2 等截面流道和梯形流道内的温度分布 (40)
 - 3.4 等截面翅片和梯形翅片内导热温度分布 (47)
 - 3.4.1 等截面翅片内导热温度分布 (47)
 - 3.4.2 相同倾角时梯形翅片内导热温度分布 (48)
 - 3.4.3 不同倾角时梯形翅片内导热温度分布 (49)
 - 3.5 梯形流道内流动特性分析 (49)
 - 3.5.1 梯形流道内边界层分析 (49)
 - 3.5.2 压降损失理论分析 (52)
 - 3.5.3 流道内压降及速度场分析 (53)
 - 3.5.4 综合强化传热性能比较 (56)
 - 3.6 本章小结 (58)
- 4 异形流道特征参数对流动特性及场协同性的影响规律 (60)
 - 4.1 余弦形流道的 CFD 分析 (60)
 - 4.1.1 物理模型及结构参数 (60)
 - 4.1.2 网格划分及独立性分析 (61)
 - 4.1.3 波幅对传热和阻力性能以及温度场和速度场的影响 (61)
 - 4.1.4 余弦形流道强化传热机理 (66)
 - 4.2 抛物线形流道的 CFD 分析 (68)
 - 4.2.1 物理模型及结构参数 (68)
 - 4.2.2 网格划分及独立性分析 (69)
 - 4.2.3 焦距对传热和阻力性能以及温度场和速度场的影响 (69)
 - 4.2.4 抛物线形流道强化传热机理 (74)
 - 4.3 圆弧形流道的 CFD 分析 (75)
 - 4.3.1 物理模型及结构参数 (75)
 - 4.3.2 网格划分及独立性分析 (76)
 - 4.3.3 圆半径对传热和阻力性能以及温度场和速度场的影响 (76)
 - 4.3.4 圆弧形流道强化传热机理 (81)

4.4	不同异形流道结构综合传热性能的对比分析	(82)
4.5	本章小结	(83)
5	异形流道换热面传热和流动性能实验研究	(85)
5.1	实验样件及实验研究方法	(85)
5.1.1	实验样件设计及制作	(85)
5.1.2	风洞实验台及 CAN 总线数据采集系统	(90)
5.1.3	等功率加热方法	(98)
5.2	不同异形流道内的传热和阻力性能	(99)
5.2.1	等截面流道不同翅片结构的传热和阻力性能	(99)
5.2.2	梯形流道不同结构的传热和阻力性能	(104)
5.2.3	余弦形流道不同结构的传热和阻力性能	(106)
5.2.4	抛物线形流道不同结构的传热和阻力性能	(108)
5.2.5	圆弧形流道不同结构的传热和阻力性能	(109)
5.3	不同异形流道实验关联式的拟合	(111)
5.3.1	等截面流道实验关联式	(112)
5.3.2	梯形流道实验关联式	(114)
5.3.3	余弦形流道实验关联式	(115)
5.3.4	抛物线形流道实验关联式	(116)
5.3.5	圆弧形流道实验关联式	(117)
5.4	本章小结	(118)
6	异形流道传热过程多维理论模型建模及分析	(119)
6.1	异形流道内导热多维理论模型	(119)
6.1.1	导热问题在一般坐标系下的数学描述	(119)
6.1.2	异形曲面流道内三维导热微分方程	(121)
6.2	异形流道内对流换热多维理论模型	(124)
6.2.1	异形流道内质量守恒方程	(125)
6.2.2	异形流道内动量守恒方程	(126)
6.2.3	异形流道内能量守恒方程	(127)
6.3	异形流道内微分方程的数值计算方法	(130)
6.4	多维理论模型的验证	(133)
6.4.1	多维导热模型验证	(133)
6.4.2	多维对流换热模型验证	(134)
6.5	本章小结	(136)
7	异形流道表面膜状冷凝传热规律及流动特性研究	(137)
7.1	异形流道表面膜状冷凝传热规律	(137)
7.1.1	膜状冷凝在异形流道中的应用意义	(137)

7.1.2	异形流道模型的假设	(138)
7.1.3	异形流道表面液膜内的守恒方程	(139)
7.1.4	液膜厚度方程及其无量纲化	(141)
7.2	异形流道表面膜状冷凝分区模型理论	(142)
7.2.1	双分区物理模型依据及假设	(142)
7.2.2	I 区薄液膜模型	(143)
7.2.3	II 区厚液膜模型	(144)
7.3	膜状冷凝模型的数值计算方法和模型验证	(145)
7.3.1	液膜界面曲率的数值计算方法	(145)
7.3.2	液膜厚度方程的数值计算方法	(146)
7.3.3	表面膜状冷凝数值模拟方法及验证	(146)
7.3.4	多维膜状冷凝理论模型验证	(148)
7.4	异形流道表面液膜内传热及冷凝液流动特性	(150)
7.4.1	异形流道表面温度梯度分布规律	(150)
7.4.2	液膜厚度发展规律及冷凝液流动特性的分析	(151)
7.5	本章小结	(153)
8	结论及展望	(154)
8.1	主要研究结论	(154)
8.2	主要创新点	(156)
8.3	研究展望	(157)
	参考文献	(158)

1 传统流道换热面的研究现状与发展趋势

1.1 传统流道换热面研究现状及进展

我们规定在垂直于流动方向上各个流道截面面积保持不变的流道为传统流道,而各个流道截面面积发生周期性或非周期性改变的流道称为异形流道。常用的传统流道换热面有矩形流道、圆形流道等。

1.1.1 强化传热技术研究进展

热交换器(换热器)在实际的生产应用中,不只为工程车辆或设备的重要组成部分,在机械加工、燃油消耗等方面也是一种不可或缺的部件。若将锅炉等设备也作为换热器来看待,那么在热电厂中,换热器的成本会占整个热电厂成本的70%左右;采用传统石油提炼方法和现代石油加工方法时,换热器的成本分别占全部石油加工投资成本的40%和20%以上。

1.1.1.1 有源强化传热技术

有源强化传热技术指需要外部的力或者功所参与的强化传热方法。

它主要包括:①外部机械作用力产生的搅拌作用,可促使冷却介质充分混合;②使传热表面或者冷却介质在外力周期性或非周期性作用力下产生振动强化传热;③采用无接触式的磁场作用力提高传热表面流体混合的能力;④将相同的和不同的冷却介质喷射到流体中;⑤采用喷射的原理和技术,减小温度梯度和速度矢量之间的场协同角度。以上提到或没有提到的有源强化传热技术由于受到使用条件的限制,其应用范围也受到了一定的限制。

1.1.1.2 无源强化传热技术

无源强化传热技术则是不需要外部的力或者功的作用所采用的技术。无源强化传热技术广为熟知的方法如下。

(1)特殊的表面处理:采用化学沉积、化学反应及机械加工等方法,在传热表面上形成优越的亲水性能和多孔介质属性结构,从而促进蒸发和冷凝相变传热的发生。

(2)增大传热表面积:在单相对流换热过程中,传热表面的微小结构都能增加对流换热面积以及对壁面边界层的扰动,从而促进边界层中热量的交换。比如微肋管是其主要的形式。

(3)增加对流换热面积:由牛顿冷却方程可以知道,增加传热面积可以提高换热量,因此,在光管或者扁管内钎焊或者挤压加工出肋片可以提高总的传热面积。这种方法尤其适用

于导热系数较低的冷却介质场合, 比如空气。

(4) 被动扰流装置法: 在流道内加入或者插入凸起物对流经的冷却介质产生扰动, 从而促进冷却介质充分混合, 并获得较高的对流换热性能。在低雷诺数(Re)和高黏度液体的应用场合, 该方法显得尤为有效。

(5) 涡流发生装置: 采用特殊的翅片结构, 如波纹形翅片结构, 使流体在流动过程中产生二次流运动, 流体在流动的过程中不断地旋转, 促进了对边界层的搅动, 同时也使来流液体在旋转的作用下充分混合。插入式扭带以及螺旋片都是比较常见的二次流发生装置。

(6) 螺旋管: 利用其特殊的弯曲结构, 流体在管内不断产生二次流涡旋, 具有非常优越的强化传热效果。

(7) 纳米粒子添加物: 在普通的流体内加入一种或者多种纳米颗粒, 能够改善整个流体的导热性能。

1.1.1.3 强化传热评价准则

对于具有强化传热特性的不同翅片来说, 其在强化传热的同时, 也往往导致了相应阻力性能的提高。而换热器的设计目标是在实现强化传热的同时, 减少阻力或者不增加阻力。因此, 在换热器设计时必须综合地考虑其强化传热性能和流动阻力之间的关系。而对于不同的应用场合和应用目的来说, 换热器的设计和评价方法也是不同的。

同时, 近代数学及物理学科的发展, 也成为强化传热技术不断提高的理论源泉。人们早期只关注传热系数的提高, 而忽略摩擦阻力对泵功率消耗所带来的影响, 因此, 人们只是简单地分析强化传热前后努塞尔数(Nu)的变化以及对比分析 Nu/Nu_0 。随后人们发现, 随着传热系数的提高, 摩擦阻力也显著地增加, 人们就不得不综合考虑摩擦阻力所带来的影响。 $(Nu/Nu_0)/(f/f_0)$ 是最初用来评价综合强化传热性能的指标, 这个指标综合考虑了传热能力和阻力系数的共同影响, 并且, 该指标越大, 说明强化性能越好。如果以在相同泵功下传递热量的多少作为评价综合传热性能的指标, 那么, $PEC = (Nu/Nu_0)/(f/f_0)^{1/3}$ 评价指标比上面的 $(Nu/Nu_0)/(f/f_0)$ 评价指标更为适合。当 $PEC > 1$ 时, 表示在相同的泵功下, 采用该强化传热技术所传递的热量比相同条件下光管时的要多。由 Kays 等提出了采用传热因子(j)和摩擦因子(f)作为强化传热的指标, 其中 $j = St \cdot Pr^{2/3}$ 表示传热性能, f 表示流体在流动过程中所受到的阻力。

1957 年, 日本的田口玄一首次提出了信噪比(SN)的实验设计方案。该设计方案在提高产品质量、优化系统和产品开发等方面起到了重要的作用。而 Yun 和 Kim 却最早把信噪比应用在换热器的性能评价中, 从而实现了换热器的参数化研究和设计。他们二人运用信噪比将管翅式的翅片结构参数进行了参数化的设计, 针对 18 个不同的实验样件分析了 7 个控制因子对该翅片强化传热性能的影响。Qi 等人采用前人发表文献中的实验数据进行了参数化的研究, 分析了百叶窗翅片的各控制因子和不同水平对其整体性能的影响, 但是因为在他们所利用的原始实验数据的尺寸参数中, 百叶窗翅片间距要小于翅片开窗间距, 使得推导出的相关结论在一定程度上受到了限制。郭丽华等也通过田口方法(正交方法), 对低雷诺数的不同工况下的 11 种不锈钢锯齿形翅片采用实验与数值计算相结合的方式进行了参数化的研究。

此外, Shah 等提出通过采用表面流动优势因子(surface flow area goodness factor)和芯体体积优势因子(core volume goodness factor)来评价不同的水力直径、不同的翅片形式以及不同结构参数时的强化传热性能。

表面流动优势因子的表达式可以通过 j 、 Nu 、 f 和 Re 来定义:

$$\frac{j}{f} = \frac{Nu \cdot Pr^{-1/3}}{fRe} = \frac{1}{A_0^2 \eta_0} \left(\frac{Pr^{2/3}}{2g_c \rho} \frac{ntu \cdot \dot{m}^2}{\Delta p} \right) \quad (1.1)$$

芯体体积优势因子的表达式可以表述为:

$$\eta_0 h_{\text{std}} \alpha = \frac{c_p \mu}{Pr^{2/3} \eta_0} \frac{4\sigma_j Re}{D_h^2} \quad (1.2)$$

$$E_{\text{std}} \alpha = \frac{\mu^3}{2g_c \rho^2} \frac{4\sigma_j Re^3}{D_h^4} \quad (1.3)$$

对于强化传热机理的研究,过增元教授从另外一个视角进行了理论推导,他将对流换热问题假设成具有一定内热源的导热问题。之后,陶文铨将场协同理论推广至普通的流动过程(椭圆形方程)中。过增元教授对场协同理论的应用提出了三种特殊的情况:第一种特殊情况是流体被冷却时,速度矢量与温度梯度之间的角度为 180° ,此时两者夹角的余弦值为 -1 ,说明流体在被冷却的情况下具有最好的场协同性,因此也具有最好的冷却性能;第二种特殊情况是流体被加热时,速度矢量与温度梯度之间的角度为 0° ,此时两者夹角的余弦值为 1 ,说明流体在被加热的情况下具有最好的场协同性,因此也具有最好的加热性能;第三种特殊情况是对流换热最为不利的情况,此时的速度矢量与温度梯度之间的角度为 90° ,两者夹角的余弦值为 0 ,说明流体在被冷却或加热的情况下具有最差的场协同性,因此也具有最差的传热性能。随后,孟继安等人将场协同理论从二维的层流流动推广到了三维的层流与紊流流动,并采用数值仿真的方法进行了验证。

1.1.1.4 强化传热的研究方法

对于强化传热技术的研究,不外乎是以实验、理论和数值分析方法或者是三种方法结合在一起为研究手段来进行的。随着计算机技术的飞速发展,有限元分析方法可以很方便地求解出多种比较复杂的偏微分方程,这对复杂流场下的研究具有跨时代的意义。而与强化传热技术相关的实验设备、实验方法等都得到了质的发展。

实验研究主要是采用精度较高以及具有可视化的设备对传热过程以及流场进行观察和分析。张琳等通过采用激光多普勒测速仪设备对内置扭带式结构的管内流动状态进行了微观实验观察,同时研究了因涡旋流动而引起的管内轴向和切向湍流强度分布状态。而粒子图像测速仪(PIV)的出现也使得流场的观察成为了可能。PIV技术是一种通过追踪示踪粒子的方式得到整个测量面上全流场信息图的技术,可以定量地分析换热器管外和管内的流场。PIV技术已经成功地应用于如对振动管外流动特性的实验观察研究等诸多应用场合中。

随着计算机运行速度的加快以及计算机的微型化设计,科研人员能够更方便地对实验之外的物理模型进行研究和分析,并且数值分析的结果也越来越得到广大科研人员的重视和认可。计算机数值模拟具有较低的成本、较高的可信度,在传热学和流体力学等学科具有广泛的应用前景。本书的研究广泛地采用了数值仿真的方法来对强化传热的机理进行研究,并得出许多新颖的结论。比如对流强化传热需要结合传热学和流体力学的知识以及研究方法才能获得比较准确的模型和结果。随着理论的创新和科技水平的不断进步,实验与模拟相结合的方法成为了解决湍流问题的最佳途径。常用的数值模拟方法有大涡模拟(LES)、直接数值模拟(DNS)和雷诺平均方程(RANS)等。无论采用什么方法,在求解之前都需要将各个控制方程进行数值离散化。有限差分法(FDM)、有限元法(FEM)和谱分析法(SM)都是求解这类

方程最适用的方法。基于以上求解方法所开发的专用和通用商用软件也在工程与科研应用中得到了较好的利用，比如常用的 FLUENT 软件。

1.1.1.5 强化传热的发展方向

1990 年之后，随着强化传热技术理论研究的完善，强化传热技术也开始由第二代走向了第三代，而最近又出现了第四代强化传热技术的概念。Bergles 将传热技术划分成了四代，如表 1.1 所示。第一代传热技术是非强化传热技术，如光管的外部或内部是没有任何阻力的光滑表面；第二代传热技术是无源强化传热技术；第三代传热技术主要是采用涡流发生器、异形管来达到强化传热的；而第四代传热技术是基于以上三代的传热技术及其中的两种或者两种以上的复合强化传热技术。因此，今后强化传热的发展方向主要是第四代强化传热技术，也就是多种强化传热技术复合在一起的复合强化传热技术。本书所研究的异形流道和异形翅片结构，则是归属为第四代强化传热技术。

表 1.1 四代传热技术划分

传热技术	第一代	第二代	第三代	第四代
表面处理	光管	平直肋片	有涡流发生器的肋片	电场，有涡流发生器的肋片
肋片管	光管	平直肋片	锯齿形管	电场，锯齿形管
管内部单相流	光管	二维粗糙管	三维粗糙管	三维粗糙管，扭带等插入物
管内部蒸发	光管	大型肋片和插入物	螺旋微肋片	电场，微肋片管
管内部冷凝	光管	二维肋片	螺旋微肋片	电场，微肋片管
管外部沸腾	光管	二维肋片	金属基质	电场，三维肋片
管外部冷凝	光管	二维肋片	三维肋片	电场，三维肋片

1.1.2 矩形流道结构

矩形流道(等截面流道)主要出现在板翅式换热器中。板翅式换热器主要由扁管和翅片组成，如图 1.1 所示。水侧扁管、翅片间通道等常为等截面的矩形结构(或近似矩形)。这些板翅式换热器大多为扁管与翅片通过钎焊技术加工制作而成。这种矩形流道的强化传热表面有多种形式，可以是不间断的翅片表面，也可以是间断的翅片表面，如百叶窗翅片。隔板和翅片之间围成封闭的空间，形成了矩形空气或水通道。下面分别讨论换热器上常用的几种翅片的表面传热和阻力特性的研究现状。

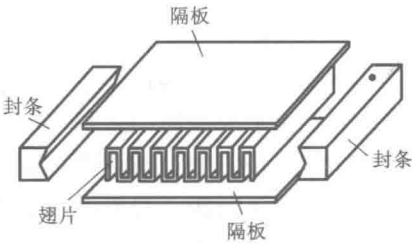


图 1.1 矩形流道结构示意图

下面分别讨论换热器上常用的几种翅片的表面传热和阻力特性的研究现状。

1.1.2.1 平直翅片

平直翅片作为所有翅片中最基本的类型,是由金属薄片制作而成的一种最为简单的翅片结构。它的特点是有很长的带光滑壁的长方形翅片,其传热和流动特性与流体在长的圆形管道中的传热和流动特性颇为相似。翅片的主要作用是扩大传热面积,而对于促进流体湍流的作用却很小,但流道长度对传热效果有明显的影响,即较长的流道长度对传热性能有较明显的促进。如图 1.2 所示为板翅式换热器中最为简单的一种翅片形式。平直翅片通过焊接的工艺方式与扁管钎焊在一起,形成了空气侧较大的对流换热面积。对于不同横向截面处的切口形状来说,平直翅片可以分为三角形和矩形。平直翅片的结构虽然简单,且强化传热性能较弱,但是它具有较小的压降阻力性能,可以大量应用于工作环境比较恶劣的多尘工况下,比如运动速度较慢的重型工程车辆(推土机和挖掘机)和农用机械(收割机等)上。在垂直于流动方向上,平直翅片在实际的应用中可以加工成三角形或矩形,与扁管组合在一起形成等截面的流道结构。

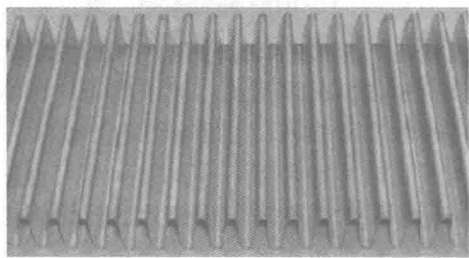


图 1.2 平直翅片

从以前所发表的科研文献可以看出,对于平直翅片的研究,主要是采用实验关联式的研究方法。因为它的结构较简单,所以科研人员关注和研究得不多。从较为完整的实验方法和数据来看, Kays 等首先对 19 种不同结构参数的平直翅片进行了测试,且他们通过采用 j 和 f 因子对平直翅片进行了评价。遗憾的是,他们研究的平直翅片的结构参数与目前换热器常用的尺寸有着很大的差别,主要表现在非间断翅片长度普遍大于目前汽车散热器芯子所采用的厚度,因此,在一定程度上限制了对其实验数据在扁平管平直翅片紧凑型换热器中的应用。Wang 等采用实验研究的方法,分别在干工况和湿工况下对平直翅片换热器的传热传质性能进行了研究。实验结果表明,在相同的结构参数下,平直翅片换热器的摩擦阻力在湿工况下要比在干工况下大 120% 左右。在管翅式平直翅片应用场合中, Pirompugd 等对不同管排排数和不同管直径的结构参数进行了实验研究,通过对 36 种不同结构的研究表明,若一直提高进口处的空气相对湿度,则不但不能提高传质性能,反而会起到相反的作用。

1.1.2.2 波纹形翅片

波纹形翅片在纵向上主要呈波纹形(或人字形),该形状可使流体的流向不断地改变,从而促进湍流状态的形成,且在弯曲处的边界层可发生微小破裂,边界层的破裂可以有效地提高强化传热性能。其冷却机制为在通道中流动时,由于被不断改变流动方向,产生二次流且边界层分离,传热效果得以急剧增强。波纹数目越多,波幅越大,其强化传热的效果也就越好。波纹形翅片作为板翅式换热器中的一种扩展强化传热表面,因其具有较简单的加工工艺和较高的强化传热性能,在当今的紧凑型板翅式换热器中得到了广泛的应用。波纹形翅片的结构如图 1.3 所示。

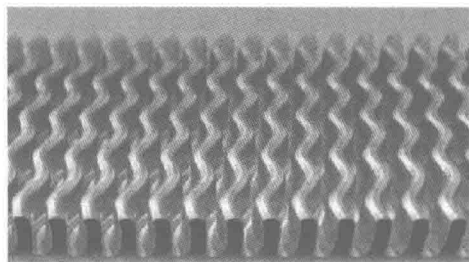


图 1.3 波纹形翅片

与平直翅片的性能相比,波纹形翅片无论是在传热性能上还是在阻力性能上都要比平直翅片具有更好的应用前景。不过,就目前的发展形势来看,对板式翅波纹形翅片换热器的实验研究还是比较有限的,同时针对波纹形翅片的强化传热和阻力性能实验的关联式等相关方面的研究也很少见诸报道。波纹形翅片在增加传热性能的同时,对阻力的影响较小。波纹形翅片的形状多种多样,主要有圆角波纹形、尖角波纹形、正弦波纹形以及阶梯波纹形等。

与平直翅片换热器一样,Kays 等人也首次针对波纹形翅片换热器进行了实验研究,并给出了三种不同的正弦波纹形翅片的具体传热和阻力实验参数和数据,但美中不足的是,他们在实验的过程中仅仅给定了波幅和波长,并没有对翅片的长度进行研究。对波纹形翅片的研究,数值仿真研究的有关文献要比实验研究的文献多得多。Asako 等在雷诺数为 $100 \sim 1000$ 的范围内,采用数值仿真的方法研究了二维稳态时三角形截面波纹形翅片的传热性能。Garg 等将有限差分法和错列式网格划分法首先应用于正弦波纹形翅片结构的数值仿真研究中。Asako 通过对圆角波纹形翅片的研究发现,利用改变翅片的几何结构参数和流体工作参数可以有效地提高强化传热性能。Yang 假定波纹形翅片表面温度恒定,并采用层流稳态周期性发展模型对圆角波纹形翅片和尖角波纹形翅片进行传热和阻力性能研究。其研究结果表明,在波纹形翅片的波峰和波谷处会产生边界层分离和涡旋的现象,并且随着流体速度的增大,这种现象更加明显。产生这两种现象的原因在于,流体运动在波纹形翅片的波峰和波谷处不会突然地完全改变方向,因此流体在流动时会在翅片表面发生分离。在雷诺数为 $200 \sim 2000$ 的范围内,Asako 等采用三维的层流模型对正弦波纹形和阶梯波纹形翅片进行了数值研究。Manglik 等研究了翅片间距为 1 mm 、波幅与波长的比值为 $0.25 \sim 1$ 的正弦波纹形翅片,并采用 2D 周期性发展的层流模型分析了不同结构参数时的强化传热特性。Zhang 等采用二维模型,针对不同翅片间距和不同波长/波幅值的正弦波纹形翅片结构的传热特性进行了研究,模拟结果显示,当翅片间距较小时,翅片内部流体的黏性力占据了主导地位,并且破坏了流体在波纹形翅片间的涡旋现象;但是,当翅片间距较大时,这种黏性力的影响变弱,流体在翅片间的涡旋现象就开始变得明显起来。Zhang 等对尖角波纹形和圆角波纹形翅片进行了实验研究,并分析了不同的空气侧雷诺数($670 < Re < 3432$)和不同的水侧雷诺数($1952 < Re < 5140$)时的波纹形翅片换热器的传热和阻力性能,得出圆角波纹形翅片比尖角波纹形翅片换热器具有更好的热工水力性能。同时,波纹形翅片结构会使翅片表面上的边界层发生周期性的中断,这促进了流体的混合,也能够产生较薄的边界层,从而促进了对流传热性能。

综合上述参考文献可以得出,对于波纹形翅片的数值仿真的计算,可以从流场和温度场的微观角度研究其强化传热及流动特性。这就在很大程度上限制了换热器的设计人员在新产品开发与设计阶段对波纹形翅片的选用和设计方案的评估。

1.1.2.3 锯齿形翅片

锯齿形翅片的结构特点是在翅片上冲压有相同距离的百叶窗式的格栅,并向流道内凸出,流体的流道被冲制成凹凸不平的结构形式,其作用是在增加流体湍流程度的同时破坏热边界层和速度边界层,从而提高强化传热过程中的传热效率。在翅片尺寸相同条件下,格栅愈多,传热效果越好,但阻力也就越大。锯齿形翅片的结构如图 1.4 所示,它是一种能连续地破坏流动边界层的有效翅片形式。除了可以抑制边界层的生长,还能在翅片的后方形成小区域的涡旋,这种涡旋虽然很小,但是数量却很多,能提高强化传热效率。

Manson 等首次通过实验的方法获得了锯齿形翅片的传热和阻力实验关联式,但是,他们

所采用的锯齿形翅片结构不同,为三个锯齿形的芯体和四个模块化的实验芯体。Kays 等通过考虑锯齿形翅片结构对形状阻力的影响,建立了其在层流状态时的边界层修正模型,并首次对锯齿形翅片的传热和流动阻力性能进行了理论研究。通过对 22 种不同结构参数形式的实验结果分析, Wieting 得到了在层流 ($Re < 1000$) 和湍流 ($Re > 2000$) 状态下锯齿形翅片的经验关联式。该关联式可以对中间过渡流状态下的传热和阻力性能进行外推,但是却会出现比较显著的误差。Manglik 等在 Kays 的实验数据基础上,重新对传热和阻力性能的实验关联式进行了拟合。该关联式对各种流动状态下的

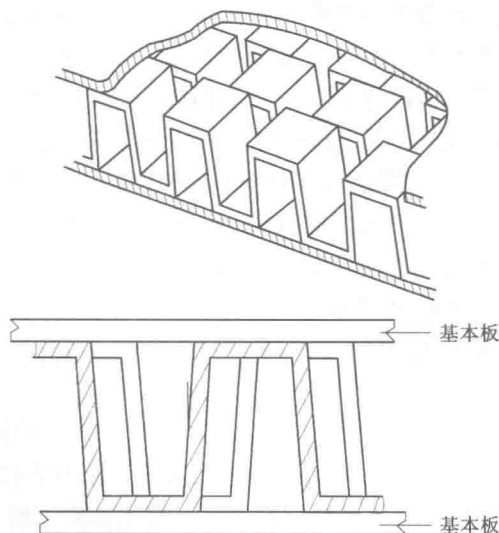


图 1.4 锯齿形翅片及其流道结构

的传热和阻力性能都具有一定的适用性,但是该关联式却具有比较复杂的数学函数关系,其所能达到的最大偏差为 20% 左右。在三维仿真模拟中, Sparrow 等将翅片的厚度看作 0 并进行了数值仿真研究,但真实的翅片结构会引起翅片尾部的涡旋,因此,他们得到的数值计算不能够获得流体在翅片前部的碰撞现象和在翅片尾部的涡旋现象。Suzuki 和 Xi 采用二维数值仿真的方法计算了不稳定区域内的流动特性,计算结果发现,在不稳定区域内会出现明显的二次流现象和自激振动现象。Mizurio 在低雷诺数范围内 ($Re < 300$) 对不同的结构参数和工作参数下锯齿形翅片的传热性能和流动性能进行了三维仿真模拟。其仿真数据表明,流体的传热系数与翅片的导热系数的比值对锯齿形翅片内的 Nu 具有很大的影响。Zhang 和 Dejong 采用实验结果与数值仿真结果相对比的方法,分析了锯齿形翅片不同的结构参数与翅片的表面传热系数、表面摩擦系数和局部努塞尔数的关系,并验证了 2D 非稳态计算结果,对传热和流动性能的研究具有重要的意义。Saidi 等采用二维仿真模型,研究了锯齿形翅片在随时间改变时的传热性能和流动性能,模拟了在自激振动区域内的瞬态传热和流动特性,并将其仿真结果与以前的参考文献进行了对比分析。Zhang 等仿真研究了空气流动方向与翅片长度方向为不同倾角时的传热和阻力性能,并利用场协同理论进行了分析,分析结果表明存在一个最佳的倾角使得锯齿形翅片换热器具有更好的热工水力性能。

综上所述可知,目前对锯齿形翅片无论是从以获得传热和阻力性能实验关联式为目的的原型实验,还是以揭示其强化传热和流动机理的数值模拟都进行了深入的研究,但是,就原型实验来说,国外研究人员对锯齿形翅片采用的实验样件与目前换热器所常采用的锯齿形翅片结构有着较大的差别,主要表现在两者之间的翅片长度大小有很大的区别。同时,锯齿形翅片的传热和阻力性能与翅片的成型工艺条件紧密相关。而国内,目前还没有对此进行系统和深入的研究。

1.1.2.4 百叶窗翅片

当今,百叶窗翅片结构被认为是板翅式换热器中最为高效的强化传热表面之一,其被广泛地应用于车辆散热器、中冷器、空调“两器”(冷凝器和蒸发器)中。针对百叶窗翅片的研究

也比较多,虽然这种翅片具有相对比较复杂的几何结构,但是该类型翅片结构在强化传热和流动阻力特性方面一直是研究热点。百叶窗翅片的结构特点是,在沿流体流动方向上,在平直翅片上等间距地切除百叶窗格栅,格栅(百叶窗片)向流道内突出,并与翅片表面形成一定的夹角。这样,既可持续地阻断边界层的发展,又可增强近壁处流体的扰流程度,实现强化传热的目的。同时,流体在翅片表面流动,由于百叶窗翅片具有一定的角度,改变流体的流动方向可加大对流体的扰动,减小边界层厚度,进而实现强化传热的目的。但是,由于其改变了流体流动方向和增加了扰流,导致阻力急剧增大,并且由于其翅片上具有微小的窗翅,容易产生脏堵和污垢,而削弱了其在一些特殊场合的应用。同时,百叶窗翅片的加工方式为滚动挤压成型,更容易实现大批量生产,是其在汽车工业及空调行业中得到广泛应用的主要原因。

对百叶窗翅片的研究主要包括两部分,一部分是实验研究,另一部分为数值研究。其中实验研究又分为原型实验和模化实验。原型实验是以获得百叶窗翅片的传热和流动阻力性能数据为目的,用于换热器的设计;模化实验一般为放大实验,更加侧重于研究空气在百叶窗翅片内流动和强化传热机理。百叶窗翅片的实物图如图 1.5 所示。

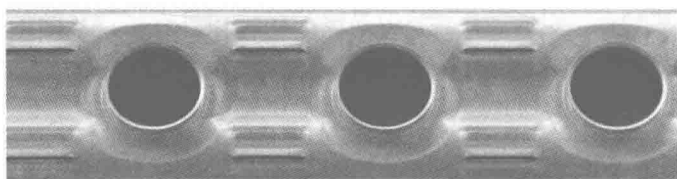


图 1.5 百叶窗翅片实物图

实验研究是对百叶窗翅片结构的热工水力性能进行研究的行之有效的方法。公开发表的研究文献主要有:1983年,Davenport等人对32种不同结构参数的百叶窗式翅片的传热和阻力性能进行了实验研究。不过他们所使用的翅片通道为三角形的通道,其结构参数与目前常采用的翅片间距相差较大。同时,他们表示所获得的拟合经验关联式可以对95%的实验数据进行预测,且误差值小于6%。随后,Achaichia和Cowell等人针对平直百叶窗翅片的传热性能进行了实验研究,与此同时,他们还证实了Davenport等人的实验研究成果,并得出在较低雷诺数的情况下,斯坦顿数随着雷诺数的增加而呈现缓慢扁平状的增长趋势。Webb和Jung等人采用在铝基体上钎焊的方法对百叶窗翅片进行了焊接,主要采用标准的波纹形翅片及不同结构参数的三角形翅片。其研究表明,采用钎焊加工工艺方法焊接的百叶窗翅片结构的换热器传热系数比圆管平直翅片换热器高约90%,但是阻力系数却仅仅高出25%左右。Rugh等人对较高的百叶窗翅片长度进行了研究,该翅片在高度方向上每米包含1960个翅片,该换热器是由两层百叶窗翅片夹着一层薄板并与扁管相连接的换热器。实验过程中该翅片结构的雷诺数范围为 $150 < Re < 300$,其中 Re 是以水力直径为定性尺寸的,所得到的实验结果与平直翅片相比较,传热系数仅仅提高了25%,但压降的增加却达到了110%。Sunden和Svantesson研究了标准的百叶窗翅片和倾斜三角形百叶窗翅片,他们的研究表明任何尺寸的百叶窗翅片表面均比光滑平直翅片表面具有更高的传热效率,标准的百叶窗翅片比倾斜翅片具有更高的斯坦顿数。Chang等人对27种不同结构参数的标准的百叶窗翅片进行了实

验研究, 结构参数分别为翅片高度、翅片长度、翅片间距、窗翅间距以及翅片管宽度, 其雷诺数范围为 100 ~ 1000, 得到了不同雷诺数情况下的传热因子 j 与摩擦因子 f 。Aoki 对不同的开窗角度和翅片间距的翅片组合进行了实验研究, 结果表明, 在低雷诺数时, 传热系数随着翅片间距的增大而不断减小。研究结果同时还表明, 传热系数随着开窗角度的增加而增大, 并当开窗角度为 $28^\circ \sim 30^\circ$ 时具有最大的传热系数。Webb 的研究表明, 采用铝钎焊的板翅式百叶窗翅片换热器的传热性能比普通的圆管式换热器高 50% 左右。Sahnoun 提出了一个典型的模型来预测百叶窗翅片的汽车散热器的传热和阻力特性; 之后, Dillen 等人在 Sahnoun 的研究基础上提出了修正后的实验关联式。

对百叶窗翅片模化实验的相关研究主要有: Beauvais 在 1973 年最先提交一张放大 10 倍的百叶窗翅片管式换热器模型的流场照片, 该照片清楚地显示了在百叶窗翅片内流体被改变方向的情况。Wong 首次采用并证实了放大模型在传热流体研究中的作用, 并对一个放大了 5 倍大小的百叶窗翅片管式换热器的热工水力性能与努塞尔数之间的关系进行了研究, 所得到的数值大小与相同雷诺数下的 1:1 原型样件的实验结果相一致。与此同时, Yun 和 Lee 等人均采用放大模型方式研究了原型翅片流动的可行性及有效性, 并能够更为有效地预测原型尺寸时翅片结构所具有的传热和流动特性。

综合上述参考文献可以看出, 冷却空气在百叶窗翅片间的流动方向从翅片方向向窗翅方向的改变最终引起了翅片表面传热系数的显著增加, 并且随着雷诺数 Re 的增加而逐渐增大。同时, 随着开窗角度和窗翅间距的增加, 冷却空气的流动方向就越来越倾向于窗翅方向。

1.1.3 圆形流道结构

如图 1.6 所示, 圆形流道主要出现在管翅式换热器中, 在冷却介质侧为圆形流道, 而在冷却空气侧则为变矩形的流道。在管翅式换热器中, 沿着管道直径方向的截面为变截面的矩形, 它通常通过胀接的方法将翅片与圆管挤压而成。

Ricardo 等对管式的流道进行了三维仿真研究, 同时并借助于 PIV 可视化的技术, 观察并分析翅片间距对传热和流动性能的影响。他们的仿真和可视化技术研究表明, 翅片间距对对流换热性能具有重要的影响, 在一定的条件下, 翅片间距一直会存在一个最优值。在国内的研究中, 康海军通过对 9 种不同结构参数(翅片高度、翅片间距和管排数)的换热器在不同雷诺数情况下进行了研究, 研究表明, 翅片间距对翅片高度的比值严重地影响管内的流动形式和边界层的形成。

在层流状态下, 翅片间距的增加会降低传热性能, 但是却能减小阻力系数。宋富强采用场协同理论原理, 对不同气流时的传热机理进行了研究。分析表明, 在低流速时, 整个计算区域内的温度梯度和速度矢量的协同性最好, 但是在管道背风侧的对流换热强度却很差。

对于非直翅片的管翅式换热器来说, 仍然可以看成是变截面的矩形流道。比如, 百叶窗翅片、桥式翅片、波纹形翅片等, 这几种翅片在平直翅片的基础上做出了轻微的变动。根据

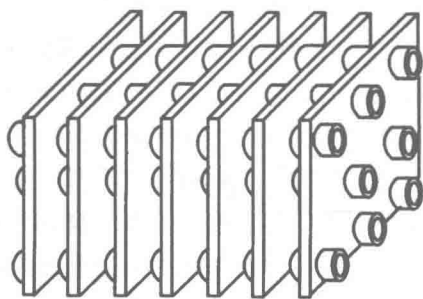


图 1.6 圆形流道