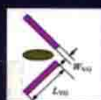


纵向涡发生器 强化传热性能研究 及其优化

唐凌虹 著



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

纵向涡发生器强化传热性能 研究及其优化

唐凌虹 著

中国石化出版社

内 容 提 要

纵向涡是第三代强化传热表面的代表形式,基于纵向涡旋在流场中的流动特性来实现强化传热的目的,纵向涡一般依靠纵向涡发生器来产生。本书对纵向涡发生器的流动与传热性能进行了实验研究、数值模拟和理论分析,应用场协同理论对纵向涡发生器强化传热机理进行解释说明,并应用遗传算法和田口方法对纵向涡发生器的结构参数进行了优化设计。

本书可作为能源、动力、低温、制冷、核能、化工、环保等相关领域研究人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

纵向涡发生器强化传热性能研究及其优化 / 唐凌虹
著. —北京:中国石化出版社, 2017. 7
ISBN 978-7-5114-4522-3

I. ①纵… II. ①唐… III. ①换热器-发生器-研究
IV. ①TK172

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 161070 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号

邮编:100020 电话:(010)59964500

发行部电话:(010)59964526

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

710×1000 毫米 16 开本 11 印张 205 千字

2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

定价:40.00 元

前 言

各种能源的利用过程通常最后都归结于热能,研究热量的传递和转化规律对研究节能机理至关重要。强化传热技术在工业中有着极为广泛的应用,在能源的开发、利用和节能中起着关键性的作用。研究出高效率、轻重量、小体积、低价格的换热器对于节省资金、节约能源有着十分重要的意义。纵向涡是第三代强化传热表面的代表形式,基于纵向涡旋在流场中的流动特性来实现强化传热的目的,纵向涡一般依靠纵向涡发生器(LVG, longitudinal vortex generator)来产生。由于纵向涡发生器作用距离远、结构简单、安装高度低,对一些具有平面或近似平面的换热结构,可以不需要大面积的机械加工就能达到强化传热的目的。

本书对纵向涡发生器的流动与传热性能进行了实验研究、数值模拟和理论分析,应用场协同理论对纵向涡发生器强化传热机理进行解释说明,并应用遗传算法和田口方法对纵向涡发生器的结构参数进行了优化设计。本书共分9章:第1章为绪论部分;第2章介绍管翅式换热器流动换热性能测试实验装置和实验数据处理方法;第3章和第4章研究了CFD形式和CFU形式纵向涡发生器翅片管翅式换热器流动换热性能,应用场协同理论对纵向涡发生器强化传热机理进行解释说明;第5章对CFU形式纵向涡发生器矩形通道流动传热性能进行了研究;第6章应用遗传算法和田口方法对纵向涡发生器的结构参数进行了优化设计;第7章对纵向涡发生器矩形通道内脉动流强化传热特性进行

了研究；第8章以压缩机中间冷却器和户外通信机柜热交换器为例，对纵向涡发生器强化传热效果进行了说明；第9章为本书的结论部分。

本书获“西安石油大学优秀学术著作出版基金”资助，在此深表感谢。

由于本书作者水平有限，书中的错误和不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

目 录

1 绪论	(1)
1.1 研究工作的背景及意义	(1)
1.1.1 换热器及其分类	(1)
1.1.2 强化传热的研究意义	(4)
1.1.3 优化设计的研究意义	(6)
1.2 纵向涡发生器强化传热研究进展	(7)
1.2.1 纵向涡发生器翅片管翅式换热器强化换热的研究进展	(8)
1.2.2 纵向涡发生器在矩形通道内流动传热性能的研究进展	(11)
1.3 强化传热的场协同理论研究进展	(13)
1.4 换热器的优化设计研究进展	(15)
1.4.1 遗传算法在换热器优化设计的研究进展	(16)
1.4.2 田口方法在换热器优化设计的研究进展	(17)
1.5 本章小结	(18)
2 纵向涡发生器翅片管翅式换热器实验研究	(20)
2.1 实验测试系统	(20)
2.1.1 测量参数及测量方法	(22)
2.1.2 实验过程	(23)
2.1.3 实验数据处理	(23)
2.1.4 实验结果不确定度分析	(26)
2.2 实验元件几何尺寸及结构参数	(27)
2.3 实验系统校核	(29)
2.4 实验结果与分析	(30)

2.4.1	管排数对换热与阻力性能的影响	(30)
2.4.2	翅片形式对换热与阻力性能的影响	(33)
2.4.3	经验关联式的确定	(35)
2.5	不同翅片实验元件换热综合性能比较	(37)
2.5.1	相同质量流量准则、相同泵功率准则、相同压降准则	(37)
2.5.2	改变外形尺寸第一准则(VG-1)	(40)
2.5.3	体积因素法准则(Volume Goodness)	(42)
2.6	本章小结	(43)

3 CFD 形式纵向涡发生器翅片管翅式换热器流动传热性能

研究.....	(44)
3.1 CFD 形式纵向涡发生器翅片管翅式换热器的数值计算	(45)
3.1.1 物理模型及数学描述	(45)
3.1.2 计算模型考核	(48)
3.2 几何参数对 CFD 形式纵向涡发生器翅片管翅式换热器的 换热阻力性能的影响	(49)
3.2.1 管排的影响	(50)
3.2.2 纵向涡发生器攻角的影响	(55)
3.2.3 纵向涡发生器长度的影响	(57)
3.2.4 纵向涡发生器高度的影响	(60)
3.2.5 翅片材料的影响	(61)
3.2.6 翅片厚度的影响	(63)
3.2.7 翅片间距的影响	(64)
3.2.8 横向管间距的影响	(65)
3.2.9 纵向管间距的影响	(66)
3.3 CFD 形式纵向涡发生器翅片管翅式换热器换热及阻力多元 变量关联式的拟合	(67)
3.4 本章小结	(72)

4 CFU 形式纵向涡发生器翅片管翅式换热器流动传热性能

研究.....	(73)
4.1 CFU 形式纵向涡发生器翅片管翅式换热器的数值计算	(73)

4.1.1	物理模型及计算方法	(73)
4.1.2	计算模型考核	(74)
4.1.3	两种形式纵向涡发生器流动传热性能比较	(74)
4.2	几何参数对流动传热性能的影响	(80)
4.2.1	攻角 α 的影响	(81)
4.2.2	长度 V_l 的影响	(81)
4.2.3	高度 V_h 的影响	(82)
4.2.4	顶点与下边界间距 x_{VG} 的影响	(82)
4.2.5	顶点与左边界间距 y_{VG} 的影响	(83)
4.3	本章小结	(84)
5	CFU 形式纵向涡发生器矩形通道流动传热性能研究	(85)
5.1	纵向涡发生器作用下矩形通道内流动换热性能的数值计算	(85)
5.1.1	物理模型及计算方法	(85)
5.1.2	计算模型考核	(88)
5.2	不同形式矩形通道流动换热性能比较	(90)
5.2.1	换热性能比较	(90)
5.2.2	阻力性能比较	(94)
5.2.3	综合换热性能比较	(95)
5.3	几何参数对流动换热性能的影响	(96)
5.3.1	椭圆支柱几何参数的影响	(96)
5.3.2	纵向涡发生器厚度的影响	(98)
5.3.3	纵向涡发生器长度的影响	(98)
5.3.4	纵向涡发生器高度的影响	(99)
5.3.5	纵向涡发生器攻角的影响	(100)
5.3.6	纵向涡发生器横向间距的影响	(101)
5.3.7	纵向涡发生器纵向间距的影响	(102)
5.4	本章小结	(102)
6	纵向涡发生器翅片换热性能的优化	(104)
6.1	基于遗传算法(GA)的换热器优化	(104)
6.1.1	遗传算法(GA)简介	(104)
6.1.2	热力设计过程结合遗传算法搜索过程	(107)

6.1.3	重量最轻为目标函数的 GA 优化	(111)
6.1.4	费用最少为目标函数的 GA 优化	(112)
6.1.5	遗传算法(GA)优化	(114)
6.2	基于田口方法的换热器优化	(115)
6.2.1	田口方法简介	(115)
6.2.2	田口方法优化	(120)
6.3	田口方法对 CFD 形纵向涡发生器翅片管翅式换热器优化	(123)
6.4	田口方法对 CFU 形纵向涡发生器翅片管翅式换热器优化	(126)
6.5	田口方法对 CFU 形纵向涡发生器矩形通道的优化	(130)
6.6	本章小结	(133)
7	纵向涡发生器矩形通道内脉动流强化传热特性研究	(134)
7.1	脉动流强化传热研究进展	(134)
7.2	物理问题数学描述及数值方法	(136)
7.3	计算结果及讨论	(138)
7.3.1	计算模型验证	(138)
7.3.2	脉动流工况矩形通道流场分布	(139)
7.3.3	脉动频率、脉动振幅和 Re 对出口温度的影响	(140)
7.3.4	脉动频率、脉动振幅和 Re 对换热性能的影响	(141)
7.3.5	脉动频率、脉动振幅和 Re 对阻力性能的影响	(142)
7.4	本章小结	(144)
8	纵向涡发生器强化传热应用案例	(146)
8.1	纵向涡发生器在压缩机中间冷却器中的应用	(147)
8.2	纵向涡发生器在通讯机柜热交换器中的应用	(150)
8.3	本章小结	(154)
9	结论及展望	(155)
9.1	主要结论	(155)
9.2	后续工作建议	(157)
	参考文献	(158)

1 绪 论

1.1 研究工作的背景及意义

1.1.1 换热器及其分类

换热器是实现两种或两种以上具有不同温度流体之间传递热量的设备，是用来使热量从热流体传递到冷流体，以满足指定的工艺要求的装置设备。换热器广泛应用于石油化工、低温制冷、动力能源、航天航空、医药、轻工等行业。例如，制冷低温系统中的冷凝器、蒸发器；汽轮机系统中加热器、回热器；空调系统中的蒸发器、风机盘管；航空系统中的加热器、回热器、化工厂中的加热器、冷却器以及压缩机的中间冷却器等。据统计，在一般的石油化工企业中，换热器的投资占企业总投资的40%~50%；在现代石油化工企业中换热器的投资约占其总投资的30%~40%。在一般的化学工业中，对换热器的投资约占企业总投资的10%~20%以上^[1]；在现代化学工业中，对换热器的投资大约占工厂设备总投资的30%。在海水淡化工艺中，其所用装置几乎全部由换热器组成^[2]。在热电厂中，如果把锅炉也看作换热器，那么换热器的投资约占电厂总投资的70%。在制冷机中，蒸发器的重量占制冷机总重量的30%~40%，其动力消耗约占总动力消耗的20%~30%^[3]。换热器不仅是维持工艺流程和运行条件所使用的必须设备，而且是二次开发能源与利用中实现余热回收、节能减排的重要设备。

由于世界上石油、天然气资源储量有限而面临着能源紧张、短缺的局面，各国致力于新能源的开发、余热的回收及节能等工作。在这一过程中，换热器也充当着一个重要的角色，其性能的好坏直接影响到能源利用的效益。另外，换热器作为一种能源利用与节约的有效设备，在余热利用、核能利用、太阳能利用和地热利用等方面也起着重要的作用。

由于换热器的用途广泛，种类繁多，因而出现了许多种分类方法^[4,5]。按照换热器的操作过程可将其分为间壁式、混合式及蓄热式。在这三类换热器中，以间壁式换热器应用最广，间壁式换热器也称为直接传热式换热器，不同温度的流

体是分开的, 热量通过间壁连续地从热流体传递到冷流体。按照换热器的结构可将其分为管型换热器、板型换热器、带有扩展表面的换热器以及蓄热型换热器, 其中管型换热器中主要包括套管式换热器、管壳式换热器, 带有扩展表面的换热器主要包括板翅式换热器和管翅式换热器。按照换热器的流动方式可将其主要分为逆流式、顺流式及叉流式。

在工程技术领域中, 常以单位体积内的换热面积作为衡量换热器紧凑程度的指标, 该指标为单侧传热面积与该侧流道体积之比称为该侧的紧凑度, 亦称为传热面积密度 β , 表达方式如下:

$$\beta = \frac{\text{某侧传热面积}}{\text{同侧流道体积}} \text{m}^2/\text{m}^3 = \begin{cases} \frac{A_h}{V_h} \text{ 或者 } \frac{A_c}{V_c}, \text{板式 / 板翅式换热器} \\ \frac{A_h}{V_{\text{total}}} \text{ 或者 } \frac{A_c}{V_{\text{total}}}, \text{管翅式 / 管壳式换热器} \end{cases} \quad (1-1)$$

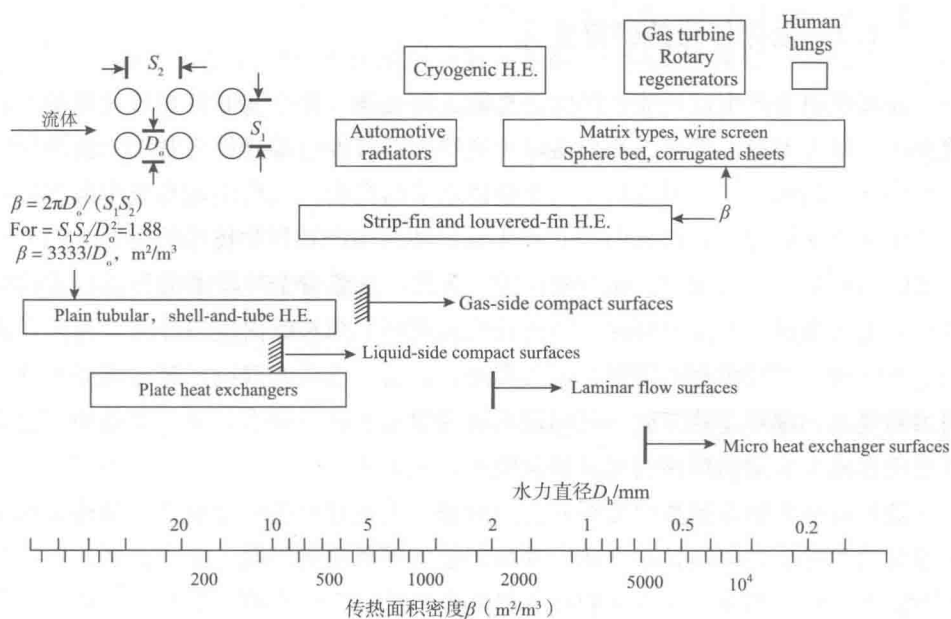
以 β 作为换热器紧凑程度的衡量标准, 与之对应的是水力直径 D_h , 水力直径 D_h 计算公式为^[6]:

$$D_h = \frac{4A_{\min}l}{A_o} \quad (1-2)$$

图 1-1 为各种换热器的传热面积密度 β 和水力直径 D_h 的大致范围^[5]。当传热面积密度 $\beta \geq 700\text{m}^2/\text{m}^3$ 或者 $D_h \leq 6\text{mm}$ 时, 称此换热器为紧凑式换热器; 当 $\beta \geq 3000\text{m}^2/\text{m}^3$ 或者 $100\mu\text{m} \leq D_h \leq 1\text{mm}$ 时, 由于水力直径的减小导致 Re 数的减小, 此时通道内的流动状态常为层流, 因而称此类换热器为层流换热器; 当 $\beta \geq 15000\text{m}^2/\text{m}^3$ 或者 $1\mu\text{m} \leq D_h \leq 100\mu\text{m}$ 时, 称为微型换热器, 此时的流动和换热和宏观情况下大不一样, 出现了许多新的问题, 正在激励着许多学者去研究。

由图 1-1 可以看出几种提高换热器紧凑程度的可能的途径为: ①减小管径。当圆管直径减小到 5mm 时, β 值可以超过 $660\text{m}^2/\text{m}^3$, 接近紧凑式换热器的最低标准, 然而直径过小带来了制造不便、管束变形、流道易堵、泵功消耗增大和加工成本上升等一系列问题。②采取各种扩展传热表面, 其主要形式有板翅式和管翅式等。在现代技术条件下, 应用这种方法不难使 β 值超过 $1000\text{m}^2/\text{m}^3$, 而且还能满足工业上对换热器的一些其它要求, 因此这两种形式的换热器成为当今紧凑式换热器的主流。另外, 还有采用板式结构、网状材料、细颗粒松散堆积和多孔介质等实现高紧凑度。

使用紧凑换热器的目的在于, 在满足指定的性能要求条件下有着更轻的重量

图 1-1 换热器的传热面积密度（紧凑度）^[5]

和小的体积。换热器的性能可表示为：

$$\frac{\Phi}{\Delta T_m} = kA_o = k\beta V \quad (1-3)$$

很明显，在已指定性能要求下 $\Phi/\Delta T_m$ ，一个具有高紧凑度 β 的换热器可以减小该换热器的体积 V 。另外由图 1-1 可以知道，具有小水力直径 D_h 的紧凑换热表面，常常会使得换热器体积减小，根据公式 (1-2) 可知，当换热器内总的换热面积 A_o 和换热器内流体流动长度 l 保持不变时，在相同质量流量下，水力直径的减小意味着换热器内的最小截面流速增大，对流换热系数 h 增大，进而总传热系数 k 增大，结果使得所需的换热面积 A_o 减小。因此，在满足结构稳定性和机械应力要求下，尽量使用小尺度的紧凑式表面，这样可使得换热器的重量减轻比体积减小更加显著。

随着我国工业的不断发展，对能源的有效利用、合理开发的要求也不断提高，因而对换热器的性能要求也日益加强。特别是对各类换热器的研究开发，必须满足各种特殊情况及苛刻条件的要求（如在高温高压下），在这些情况下的研究更显得重要。因此，在换热器的研究开发和生产上，除了要满足必须的工艺要求，还需对换热器的综合性能提出更高的要求。

1.1.2 强化传热的研究意义

能源是用来产生机械能、热能、光能、电磁能、化学能等各种形式能量的自然资源,是人类赖以生存、社会得以发展所必不可少的重要物质基础。能源开发与利用状况的改善,体现着科学技术整体水平的提高,人均用能常被用来衡量一个国家或地区综合实力的强弱^[7]。近年来,随着生产和科学技术的发展,人类对能源的需求量也日益加大,而与此同时,人类正面临着全球能源的日益枯竭的威胁和环境污染日益严重的问题,如何有效地利用能源和保护生态环境是各国面临的重大课题,对资源利用特别是能源利用,提出了更高的理论和技术层面上科学利用的要求,这对高效节能的基础理论研究提出了新的要求,开发新能源、提高能效比和减少能量消耗已引起世界各国的普遍关注。

随着新技术的发展和后工业社会的到来,人类对自然资源的需求结构正在发生着新的变化。为解决日益恶化的环境问题和资源枯竭问题,大力研制、发展各种新能源已成为当今世界发展的必然趋势。不论是再生能源还是非再生能源的发展都必须联系到人类的可持续发展。提高能源效率是缓解能源危机的一条途径,因此需要开发新的技术来实现更高的能源效率。节能的宗旨在于减小能源的损失和浪费,以使能源资源得到更有效的利用,与能源效率问题紧密相关^[8]。提高能源效率的途径从根本上说要依靠技术进步。节约能源就是要采取技术上可行、经济上合理以及环境和社会可接受的一切措施,来更加有效地利用能源。因此,提高能量转换设备、回收余热设备及用能设备的效率,是提高能源利用率,节约能源消耗的主要途径^[9]。

综上所述,为了尽快摆脱能源危机的威胁和改善经济繁荣环境恶化的局面,人类除了继续寻找、开发新型能源外,还应及早解决节约能源、科学合理用能和探索和发展节能机理等问题。

各种能源的利用过程通常最后都归结于热能,研究热量的传递和转化规律对研究节能机理至关重要。强化传热技术在工业中有着极为广泛的应用,在能源的开发、利用和节能中起着关键性的作用。在现代科学技术领域里,无论动力、石油、冶金、化工、材料、制冷、低温等工程,还是空间、电子、核能等技术,都不可避免地涉及到加热、冷却和热量传递的问题。在这些领域中,换热器已成为十分重要的工业生产设备,在现代工业生产过程中大部分燃料的能量是通过各种类型的换热器传递的。普通的换热器的性能可用许多强化措施而大幅度的改进,另外一方面某些系统需要强化的设备以便顺利的运行^[9]。因此研究出高效率、轻

重量、小体积、低价格的换热器对于节省资金、节约能源有着十分重要的意义。正是在这种背景下,强化传热技术在近年来得到了广泛的重视和飞速的发展,而且已经成为现代热科学中一个十分引人注目的研究领域^[10-13]。一大批强化换热的研究成果已广泛应用于工农业生产中,这些科研成果的商品化带来了巨大的经济效益和社会效益。

图1-2给出了应用Web of Science平台上的SCI (Science Citation Index Expanded, SCI-EXPANDED)数据库检索的各主要国家在1997年至2014年10月以“换热器”为标题发表的论文总数排在前十位的国家/地区,图中也描述了对应的每篇论文平均被引用次数。检索的论文总数为4542篇,每篇论文平均被引用次数为8.22。从图中可以看出,对于换热器的研究,美国发表的论文篇数最多,在这期间共发表论文766篇,占全球发表论文总数的18.9%。我国大陆地区共发表论文556篇,占全球论文总数的12.2%,位居全球第二位,平均每篇论文被引用次数为8.87,略高于世界平均水平;我国台湾地区虽然发表的论文总数不多(177篇),但是其平均被引用次数却最多,为13.47,远超过其他国家/地区。

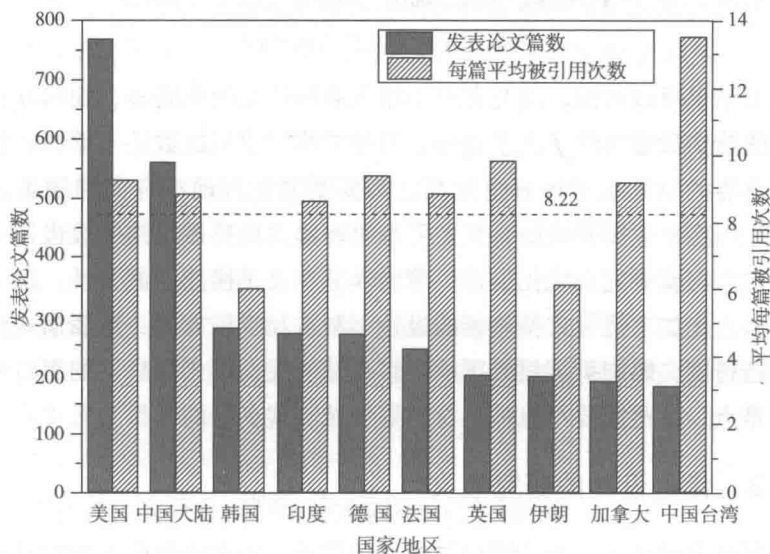


图1-2 1997年至2014年10月以“换热器”为标题发表的论文总数及引用次数

图1-3为以“换热器”为标题发表论文数量排名前4位的国家(美国、中国、韩国、印度)以及全球每年发表论文总数的比较,从图中可以看出,全球和这几个国家在这期间关于以“换热器”为标题发表的论文数量一直呈上升的趋势,从2005年开始发表的论文数量增加得比较迅速,其中中国每年论文数量增

加得最多，从 2009 年开始论文数量已经超过了美国，居全球首位。

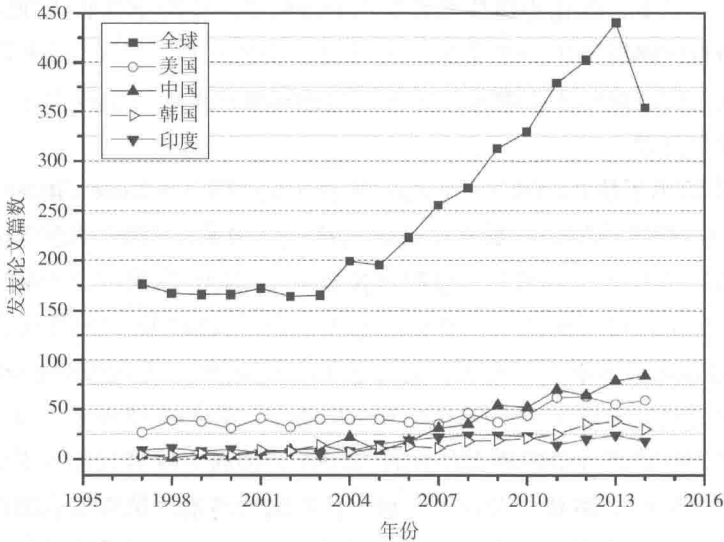


图 1-3 美国、中国、韩国、印度及全球以“换热器”
为标题发表论文总数的比较

从以上结果可以看出，研究者对于换热器的研究越来越多，我国在换热器领域已发表的论文数量虽然仅次于美国，但是平均被引用次数还不够高，这说明我国关于换热器的研究水平还有待提高，需要紧紧把握前沿方向和注重论文的质量。目前我国在换热器领域的研究主要是对表面式换热器结构的改进及对其进行数值模拟、实验研究和优化设计，薄弱环节主要是换热器的设计、加工、制造和材料方面，比如，绕管式换热器的设计、制造和承压方面，原表面式换热器的波纹板制造精度，螺旋折流板的压板、打孔和装配，板式换热器的制造和材料等都是些难点，这些需要与机械、材料等领域实现良好的学科交叉。

1.1.3 优化设计的研究意义

换热器热力设计是一个传统而又经典的课题，通常依据前人的设计经验以及结合工业要求进行设计。对换热器进行热力设计时，先设计出在污垢存在的情况下完成冷热流体热交换量的换热器几何尺寸，然后在允许的压降范围内不断调整换热器的几何结构参数，再次进行传热系数、压降计算，直到获得较合适的值。传统的换热器设计方法往往在经验选择和多次验算的基础上，或者根据前人所得的研究结果基础上进行的，一般只要满足设定的换热性能和阻力要求，即可采用

所借鉴参考的换热器形式和翅片类型,然而所得的设计结果并不一定是最优(最佳)的,或者并不一定接近最优结果。

优化问题,就是求出数学或物理问题满足限定条件下的最优解。随着科学技术和进步,在各个领域中产生了大量的复杂最优化问题。优化技术的出现,不仅可以使得设计结果显得更加优化、合理,而且可以解决传统方法所不能解决的复杂问题。

品质工程的奠基人田口玄一(Genichi Taguchi)博士认为产品质量的提高不是通过检验,而是通过设计来实现的^[14]。换热器的优化设计,指的是在操作条件、性能指标、结构及工艺等限制条件下,选择换热器的设计变量,确定设计目标,通过某种优化方法如最小二乘法、模拟退火算法、人工神经网络法、粒子群优化算法、遗传算法和田口方法等,求得最优(最佳)的一套设计变量参数,同时还可以得到在此套参数下的换热器各个性能指标。最优化方案与运行参数、经济参数有关,例如,选择较高的流速可以提高换热系数,减小所需的换热面积,从而降低换热器的投资成本,但提高流速亦会使得流动阻力增大,增加了泵或风机的功率消耗,从而又增加了换热器的运行成本。因此换热器的优化设计就是要对各种方案进行比较,选择在一定的设计目标下最好的方案^[8]。

换热器的性能不仅取决于传热元件的性能,而且常常也受到内部结构的影响。这种影响取决于内部流场、温度场的分布情况。改变换热器内部元件的尺寸或调整换热器内部空间,则会使换热器性能与初始结构有所不同,有时候甚至相差很大。因为若将全部各个影响都考虑进去,换热器内部热交换现象是复杂的,有时候任何一点结构的变化都会使得换热器性能有所改变。而这种改变往往可以通过人为来定性的去把握和控制。对换热器的优化设计则是通过优化技术对结构进行优化,使得换热器性能指标提高,对节约换热器的材料、投资及运行成本等方面有着重要的意义。

1.2 纵向涡发生器强化传热研究进展

迄今为止,传热技术的发展经历了四个阶段^[11],第一阶段以光通道为代表,传热表面或近壁区没有采取强化传热措施,如光管换热器和第一代压水堆用的燃料元件棒束等;第二阶段以平直翅片、二维肋片和带横向搅混翼的定位格架等为代表,在传热表面设置有两维作用效果的翅片或肋片,或设置带横向搅混翼的定位格架;第三阶段以纵向涡(longitudinal vortex, LV)、三维粗糙元和具有三维

效果的搅混翼组合结构为代表, 这些结构通过高效地破坏流动边界层, 加强流体扰动, 促进主流区与传热壁面附近流体间质量、动量和能量交换来实现强化传热; 第四阶段以带有静电场的翅片管为代表, 这些结构通过外加的电场来增强对流传热。所有这些强化传热技术在应用于工程之前均经历较长的机理研究和应用基础研究阶段, 以充分了解和掌握强化传热结构的作用机理, 包括作用区域、作用区域内温度场、流场、压力场的作用特征和理论计算分析技术, 这些研究成果是一项新型强化传热技术成功应用于工程领域的必要前提。

纵向涡强化技术是基于纵向涡旋在流场中的流动特性来实现强化传热的。当流体横向流过一个障碍物时, 往往会在障碍物背后产生一系列涡旋, 而这些涡旋的强烈运动, 促进了主流区与传热壁面附近的流体间质量、动量和能量的交换, 削薄或破坏边界层, 从而使传热性能增强。根据障碍物的几何形状及其安装角度的不同, 流体流过该障碍物以后, 能够产生横向或纵向涡旋, 横向涡 (transverse vortex, TV) 的主轴方向与流动方向垂直, 其流动主要是二维的; 而纵向涡绕着与来流方向平行的轴进行盘旋, 其流动总是三维的。研究结果表明, 纵向涡不仅能够使局部传热增强, 同时由于其能够在流动下游的很远范围内存在, 因此, 也能够全面提高流动传热性能, 而横向涡对全面增强流动传热的作用却小得多^[15]。

纵向涡一般依靠纵向涡发生器 (longitudinal vortex generator, LVG) 来产生。由于纵向涡发生器作用距离远、结构简单、安装高度低, 对一些具有平面或近似平面的换热结构, 可以不需要大面积的机械加工就能达到强化传热的目的。对于一些具有窄间隙通道的换热结构, 如高温叶片的冷却、窄间隙矩形通道内的对流传热、管翅式和板翅式换热器的翅片表面强化传热等, 纵向涡强化传热有着较强的应用价值。本书主要研究内容为纵向涡发生器应用于管翅式换热器的翅片表面强化传热性能和窄间隙矩形通道内的强化传热性能。

1.2.1 纵向涡发生器翅片管翅式换热器强化换热的研究进展

纵向涡发生器应用于管翅式换热器强化传热翅片表面的布置方式一般分为两种形式: 渐张式布置 (common-flow-down, CFD) 和渐缩式布置 (common-flow-up, CFU) 形式。作为第三代强化传热表面的代表形式, 近年来, 有很多关于 CFD 形式纵向涡发生器翅片管翅式换热器的流动传热性能研究的文献。

Fiebig 和 Valencia^[16,17] 实验研究了管翅式换热器管束分别以顺排和叉排布置的情形, 在每根圆管的下游设置一对三角翼纵向涡发生器。实验结果发现顺排布置传热性能可增加 55% ~ 65%, 叉排布置传热性能增加 9%。管束顺排布置时阻