

强制湍流 传热技术

安丰宝 王秀成 韩治林 主编

*TURBULENCE
HEAT EXCHANGER*



山东大学出版社

强制湍流传热技术

安丰宝 王秀成 韩治林 主编

山东大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

强制湍流传热技术/安丰宝,王秀成,韩治林主编.
济南:山东大学出版社,2003.8
ISBN 7-5607-2647-X

I. 强…

II. ①安…②王…③韩…

III. 湍流传热

IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 077328 号

山东大学出版社出版

(山东省济南市山大南路 27 号 邮政编码:250100)

山东省新华书店经销

山东旅科印务有限公司印刷

850×1168 毫米 1/32 2 插页 9 印张 235 千字

2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—2500 册

定价:22.60 元

版权所有,盗印必究

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社营销部负责调换



济南市高新技术产品
证书

根据济南市人民政府颁布
的《济南市高新技术产品认定暂
行办法》，认定 济南市
宏达供热设备有限公司 开发
的 QTA(S)H系列强制循环换热器
产品为济南市高新技术产品。
有效期：2002年至 2004 年

批准文件：济科发字[2001-841号
统一编号：011612

批准单位：济南市科学技术局

2001年12月26日



第 312812 号

共 2 页

实用新型专利证书



实用新型名称：一种强制循环换热器

设计人：安王宝 张德利

专利号：ZL 97 2 44977.9

专利申请日：1997 年 12 月 3 日

专利权人：安王宝

该实用新型已由本局依照中华人民共和国专利法进行初步审查，
决定授予专利权。



局长

姜颖

1999 年 2 月 13 日



中华人民共和国国家知识产权局

主 办

Sponsored by
State Intellectual Property Office of PRC



中国专利技术博览会
CHINA FAIR OF INVENTIONS AND NEW TECHNOLOGIES



证 书
Certificate

获奖项目

in recognition of the display of

强制满流换热器

获奖单位

presented to

济南市宏达供热设备有限公司

编号

Serial number

991119.1

颁奖日期

Awarding date

1999.4.5

中国专利技术博览会
组 织 委 员 会
Organizing Committee

中国专利技术博览会
专 家 委 员 会
Expert Committee

国家重点新产品 证书

项目名称：智能化高效节能换热器

项目编号：2002ED740079

承担单位：济南市宏达供热设备有限公司

发证时间：2002年7月

有效期：三年

批准机关：



主 编 安丰宝 王秀成 韩治林

副主编 (以姓氏笔画为序)

刘克俭 刘灿伟 李维忠 张 奎

罗佳君 赵元东

编 委 (以姓氏笔画为序)

王兰芬 王秀成 刘克俭 刘灿伟

安丰宝 李成玉 李维忠 杨文娟

张 奎 张效明 张德利 罗佳君

赵元东 黄克帅 韩治林

前 言

物理学家海森堡去世前说,要给上帝带去两道难题:相对论和湍流。

湍流,是长期的、世界公认的难题。湍流作为空间上不规则和时间上无秩序的一种非线性流体运动,这种运动表现出非常复杂的流动状态。1883年,英国的雷诺发现流体的两种流动状态——层流和湍流,并建立湍流的基本方程——雷诺方程。百余年来,世界上不少学者为了探索其中奥秘,花费了巨大精力,创造了一些实际可用的湍流模式理论和湍流统计理论,特别值得指出的是,我国周培源研究湍流逾60年,为之作出了举世公认贡献。早在20世纪30年代末40年代初,他提出了著名的剪切湍流17方程理论,在世界上首次建立了一般湍流的雷诺应力所满足的输运微分方程组,在国际上产生了重大影响并获得高度评价,他由此被公认为湍流模式理论的奠基人。1950年为了克服湍流方程不封闭而另辟蹊径,他从弄清湍流本身内部结构的物理本质着手,提出先解方程后平均的湍流理论。20世纪50年代末,他完善和发展了湍流相似理论,80年代中又把它应用到模式理论中去,获得巨大成功。1951年,前西德的Rotta发展了周培源所开创的工作,提出了完整的雷诺应力模式。他们的工作现在被公认为是以二阶封闭模式为主的现代湍流模式理论的奠基性工作。受当时计算手段限制,他们建立的十分复杂的方程组无法求解。自20世纪

60年代以后,由于计算机技术与数值方法的飞跃发展,周培源等人的理论重新获得了生命力。目前我国在联想万亿次机上已做出世界第二大规模湍流数值模拟。近30多年来,种类繁多的湍流理论和应用成果不断涌现。

相比湍流理论研究,传统流体换热理论及其应用研究起步早,似乎容易得多,发展得也较完备。经过若干代世界工程热物理界老前辈的艰苦努力,使换热器的研究达到了很高的水平。但是,随着时代的发展换热理论的发展似乎有所减缓,部分传统理论似乎已成为换热理论发展的制约力量。本书提出的强制湍流换热理论和应用技术是突破和提高传统换热理论研究的一个有益尝试,希望能给读者一点提示和帮助。

强制湍流换热器将换热器的研究和生产带入了一个崭新的历史阶段,它是湍流理论和换热理论完美结合的产物。本书介绍的湍流换热理论和实践是经过五年的研究、总结和在先辈们的理论基础之上形成的。近年来,国内外强化传热技术发展很快,特别是新型强化管技术(如强制湍流换热管)的开发和应用。本书作者与济南市宏达供热设备有限公司张德利总经理联合开发的强制湍流换热器就属于用新型传热管及强制湍流换热管开发的一种高效换热器。该产品在测试阶段即取得了巨大的成功,并且这种不用疏水器的换热器在推广阶段被广大客户迅速地认可。该产品在1997年销售150万元,1998年销售300万元,1999年销售600万元,2000年销售1200万元,2001年销售2400万元,2002年销售5000万元。通过数字可以看出,该产品已经被市场认可并取得了巨大的成功。“强制湍流换热器”新产品具有体积小、换热系数大、不结水垢等优点,经测试比其他同类换热设备在同样工况下,可减少传热面积20%~30%,节约金属管材20%以上,提高热效率2~3倍,此技术填补国内空白,达到了国内领先水平,获第七届中国专利技术博览会金奖和2000年国际专利技术产品金奖。该产

品已经创造了数个世界第一,节能水平世界第一,不结水垢的换热器世界第一,有效单位体积换热世界第一……这已经说明,强制湍流换热器是目前世界上最好的换热器型。正如著名的湍流理论应用专家高歌先生称道的:强化湍流换热技术是一个神奇。

理论推进了应用,应用丰富了理论。本著作正是在研究了流体在湍流这种特殊流态下的换热机理并在关键性应用技术上取得一系列突破后的理论成果,当然也包含了著者相关四项发明专利技术的核心内容。在概论中,根据换热器的定义介绍了各种有关的换热器,以便于读者或客户对各种换热器有一个简单的了解,并讨论了换热器的研究现状,对强制湍流换热器与传统换热器进行了比较,并总结出它的优点和在技术上有哪些突破,还介绍了换热器的评价方法。在第二章中,既介绍了流体和流体流动的主要特征,又简单地介绍了一下流体力学的湍流、紊流和层流之间的区别和划分以及主要的特征,方便读者或客户对湍流和湍流换热的认识。在第三章中,介绍了传热及其基本影响因素,用比拟理论求解强制湍流换热的方法、管子内外部的强制湍流传热、混合流的计算等问题,让读者了解一下求解湍流换热问题。在第四章中,介绍了振动的危害、湍流换热与振动的关系、基于湍流换热建立的振动模型、振动在湍流换热中的应用,让人们走出传统振动理论的误区,认识振动并有效地利用振动。在第五章中,讨论了湍流传热与经济性问题的重点介绍了经济性与流动组间的选择、流速和允许压降的确定、无相变压降的计算、有相变压降的计算以及输送机械功率。通过这些计算可以了解到湍流换热的较高经济性。在第六章中,介绍了强制湍流换热管的结构、冷凝换热、沸腾换热等换热计算问题。使大家对强制湍流换热管有一个更清楚的了解,了解到强制湍流换热的精华部分。在第七章中,在介绍了传统的管壳式换热器及无相变换热器工艺计算基础上,从性能对比角度,客观评价了强制湍流换热器,又应用网络控制技术将湍流换热器发展到

高度自动化控制的理想阶段。第八章,引入先进的纳米技术,介绍了纳米传热理论,探讨了纳米状态下的热现象和传热理论及纳米换热器。最后,为方便读者,附有“钢制管壳式换热器”相关国标。

至此,我们可以欣慰地告诉世人:湍流这个被称作“来自几十亿在随机热力学舞动中的分子流”的魔,突然间变成了我们已驯服驾驭的并能承载和传递热库的神马。禁不住油然发出心底的悦声:湍流,湍流,我爱你!

编著者

2003年7月于济南

符号说明

A 传热面积, m^2

A 折流板管孔和管子之间的泄漏流路

B 错流流路

b 折流板厚度, m

C 热容量, $C = C_p \cdot W \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{K})$

C 管束外围和壳内壁之间的旁流流路

C_p 比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

c 管间距, m

d 管径, m

d_H 折流板上管子孔径, m

D 壳径, m

D_{a1} 极限排管圆直径, m

D_w 圆缺口当量直径, m

D_b 折流板直径, m

e 圆缺口弦长, m

E 折流板与壳内壁之间的泄漏流路

f_0 理想管排摩擦系数

f 摩擦系数

F 管程分程隔板处的中间穿流流路 (单管程换热器无此流路), 进口效应因数

F_o 错流区内管子占总管数的百分数

F_{bp} 旁流区所占的面积分数 (以错流面积为基准)

F_T 平均温度校正系数

F_{ip} 对流沸腾因子

F_g 修正系数

g 重力加速度, m/s^2

G_t 总重量流速, $kg/(m^2 \cdot s)$

G 重量流速, $kg/(m^2 \cdot s)$

h_b 管内沸腾传热膜系数, $W/(m^2 \cdot K)$

h_o 局部冷凝传热膜系数, $W/(m^2 \cdot K)$

$\bar{h}_c$ 平均冷凝传热膜系数, $W/(m^2 \cdot K)$

$\bar{h}_{CN}$ 水平管束外冷凝平均传热膜系数, $W/(m^2 \cdot K)$

h_l 液体传热膜系数, $W/(m^2 \cdot K)$

h_g 气体传热膜系数, $W/(m^2 \cdot K)$

h 管内传热膜系数, $W/(m^2 \cdot K)$

h_{ideal} 理想管排壳方传热膜系数, $W/(m^2 \cdot K)$

h_m 平均传热膜系数, $W/(m^2 \cdot K)$

h_{nb} 泡核沸腾传热膜系数, $W/(m^2 \cdot K)$

h_o 壳方传热膜系数, $W/(m^2 \cdot K)$

h_{ip} 两相强制对流传热膜系数, $W/(m^2 \cdot K)$

J J 因数

J_b 旁流校正因数

J_c 折流板形体校正因数

J_r 折流板漏流校正因数

J_r 中间雷诺数 ($20 < Re < 100$) 校正因数

J_r^* 低雷诺数 ($Re \leq 20$) 校正因数

J_s 进、出口段折流板间距不等时的校正因数

K_i 各流路的阻力系数

k 导热系数, $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{K})$

l 管子有效长度(换热器两管板相对面之间的长度), m

l_c 折流板切除高度(由弦到壳内壁的垂直高度), m

$l_c\%$ 切除百分数

l_b 折流板间距, m

$(b/d)_A$ 折流板厚度与折流板上管孔同管子外径间缝隙之比, $\left(\frac{b}{d}\right)_A = \frac{2b}{d_H - d_0}$

$(b/d)_E$ 折流板厚度与壳体内径同折流板外径间缝隙之比, $\left(\frac{b}{d}\right)_E = \frac{2b}{D_i - D_b}$

L 垂直传热壁面的高度, m

L_c 旁流流路的宽度, $L_c = \frac{1}{2}[D_i - (D_{af} + c)]$

L_F 中间穿流流路的宽度, $L_F = (P_{if} - d_0 - c)$

n 中心管排处或接近中心线管排处的管间距数目

n_c 中心或中心附近管排的管子数(取计算结果的圆整偶数)

N 管束垂直列上的管数

N_b 换热器内折流板数

N_c 每一错流区内的管排数

N_{cw} 圆缺区内有效管排数

N_t 换热器内管子总数

N_b 折流板上管子数

N_{nc} 圆缺区管子数

P 温度效率

$P_i(P')$ 管心距, m

P_{if} 管束中心沟宽(管心距), m

P_p 平行于流动方向的管心距, m

P_n 垂直于流动方向的管心距, m

Δp 压力降, MPa

p_r 对比压力, $p_r = p/p_c$

p 系统压力, MPa

p_c 临界压力, MPa

Q 热负荷或传热速率, kJ 或 kJ/h

q 热通量, $q = Q/A$, W/m²

R 热容量之比, $R = (T_1 - T_2)/(t_2 - t_1)$

R_b 旁流影响压力降的校正因数

R_l 漏流影响压力降的校正因数或液相体积分率

R_v 气相体积分率

$R_{i,j}$ 进、出口段板间距离不等时对压力降影响的校正因数

$R_f (r_f)$ 污垢热阻, m² · K/W

s 滑动比

S 流通截面积, m²

$S_m (S_b)$ 中心线或靠近中心线处错流区流通截面积或 B 流路流通面积, m²

$S_b (S_E)$ 一块折流板的外缘与壳内壁之间的泄漏流截面积或称 E 流路流通面积, m²

$S_b (S_A)$ 一块折流板上管与管孔之间隙处泄漏流总面积或称 A 流路流通面积, m²

S_w 圆缺区流通截面积, m²

S_{wK} 圆缺区总截面积, m²

S_{wK} 圆缺区管子所占面积, m²

t 冷流体温度, °C

T 热流体温度, °C

$T_s (t_s)$ 饱和温度, °C

$T_w (t_w)$ 壁面温度, °C

ΔT_s 过热度 $AT = T_w - T_s, ^\circ\text{C}$

ΔT_m 平均温差 MTD, $^\circ\text{C}$

ΔT_{lm} 对数平均温差 MTD, $^\circ\text{C}$

t_v 过热蒸汽温度, $^\circ\text{C}$

u 流速, m/s

U 总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

w 重量流量, kg/s

w' 重量流量, kg/h

x 蒸汽干度或蒸汽重量分率

ΔX_w 管壁厚度, m

Z 黏度, 厘泊

◇ 正方形斜转 45° 排列

△ 正三角形排列

希腊字母

α 泡核沸腾压抑因数

γ 重度, kg/m^3

β 热膨胀体积系数, $1/\text{K}$

δ 凝液厚度, m

η 流型区域函数

λ 汽化或冷凝潜热, W/kg

μ 黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

θ 折流板切除中心角, rad

ε 热效率

σ 表面张力, N/m

φ_v 两相流气相因子

φ_l 两相流液相因子

X 马蒂内利 (Martinelli) 参数

ϵ 空隙率