

不同材质花瓣形扁通道内翅换热管的实验研究

李 智

(哈尔滨商业大学 土木与制冷工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150028)

摘 要:通过实验的方法研究了一种花瓣形扁通道内翅换热管的对流换热和阻力特性,拟合了所测 Re 范围内对流换热和阻力实验关联式,并运用相同质量流量、相同泵功率和相同阻力降这 3 种准则比较了采用不同材质时翅片管与普通光管之间的传热效果。结果表明,翅片材质对换热强化效果有较大影响,无论采用哪种材质,花瓣形扁通道内翅管均有较强的换热效果,特别是在低 Re 条件下,强化效果更加明显。

关 键 词:内翅管; 实验研究; 强化传热; 充分发展区
中图分类号: TK124 文献标识码: A

1 引 言

对流换热及其强化一直是人们研究的重要课题^[1]。采用外翅片强化管是强化管外换热的最常用方式。内翅片管是 1971 年首先由 A. E Bergles 等人提出的强化管内单相流体的换热^[2]。在此后的 30 多年时间里,内翅片管的强化传热研究取得了大量的研究成果。本文用实验的方法研究了一种花瓣形扁通道内翅高效换热管的换热及阻力特性,该翅片管翅片径向弯曲,中间加入支撑芯管,形成特殊的花瓣形通道,有较大的翘化比,整个换热管具有良好的换热效果。其结构形状如图 1 所示,几何尺寸见表 1。

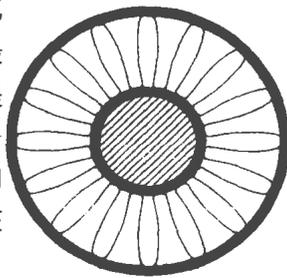


图 1 花瓣形扁通道内翅管

片管入口段采用维多辛斯基曲线喇叭口,空气经过渐缩入口后速度分布接近均匀。实验时,在管子轴向 5 个截面上分别布置热电偶,每个截面沿周向布置 3 个热电偶。在实验段后设置一个套管换热器,也采用花瓣形扁通道内翅管,通过对套管换热器数据的处理,来校核实验管测定数据的可信度(二者换热系数偏差大于 10% 被视为不可信)。

表 1 花瓣形扁通道内翅管结构尺寸

翅片数 n	管长 l/mm	翅片展开长度 l_c/mm	外管外径 D_o/mm	外管内径 D_i/mm	内管外径 d/mm	翅片厚度 δ_c/mm	翅片与管壁接触长度 δ/mm	热当量直径 D_h/mm
32	2 500	340	32	30	13	0.15	1.5	2.91

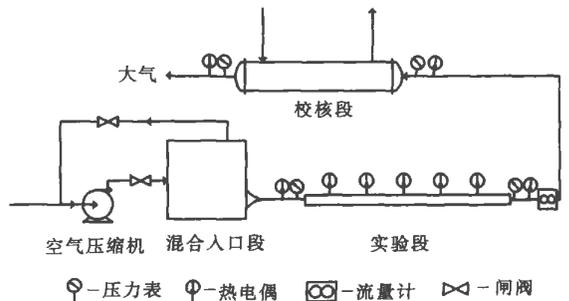


图 2 实验台系统图

传热实验采用恒热流密度法,电阻丝作为加热元件,将电阻丝均匀地缠绕在翅片管上,为了尽可能地减少散热损失,加热电阻丝外包裹石棉和海绵,实验加热两端均装有绝热良好的绝缘木来减少轴端热损失,在出口处加设辅助微调加热器来补偿出口端导热损失。

2 实验系统

如图 2 所示,整个实验系统由空气压缩机、混合入口段、实验段及校核段和数据采集系统组成。翅

3 实验结果及讨论

3.1 数据处理及实验结果

收稿日期: 2005-05-24; 修订日期: 2005-08-30

作者简介: 李 智(1979-)男,湖北石首人,哈尔滨商业大学硕士研究生,哈尔滨华龙旭节能设备制造有限公司技术部部长。

特性尺寸取当量直径, 花瓣形扁通道内翅管的当量直径按下式求得:

$$D_h = \frac{\pi(D_i^2 - d^2) - 4\delta_c l_c}{\pi(D_i + d) + 2l_c - 2n\delta} \quad (1)$$

数据处理采用文献[3]建议的方法, 通过对实验数据的整理, 得到 Reynolds 数、Moody 阻力系数 f 以及 Nusselt 数的数据如表 2 所示。

表 2 对流换热和流动阻力实验数据

Re	2 909	3 075	3 341	3 516	3 874	4 095	4 356	4 592	5 041	5 324
$100f$	4.92	4.842	4.723	4.722	4.606	4.519	4.509	4.44	4.351	4.27
Nu	11.37	11.85	13.57	13.61	14.33	14.76	15.57	16.69	17.2	17.71
Re	5 459	5 756	5 999	6 249	6 326	6 587	7 744	8 019	8 160	8 475
$100f$	4.294	4.245	4.19	4.154	4.159	4.078	3.965	3.951	3.921	3.862
Nu	18.17	19.02	19.32	19.62	20.22	20.59	21.5	23.02	23.14	24.32
Re	8 740	9 238	9 921	10 488	12 256	12 944	14 240	15 037	17 130	18 083
$100f$	3.878	3.817	3.774	3.688	3.591	3.563	3.452	3.449	3.34	3.314
Nu	25.72	25.78	26.96	28.98	29.1	21.07	31.74	33.43	34.69	36.85

3.2 对流换热和流动阻力的实验关联式

充分发展段的对流换热和阻力的整体特性可以用关联式来反映, 根据最小二乘法原理, 对实验数据拟合得到如下形式实验关联式:

$$Nu = 0.081 Re^{0.628}; f = 0.274 Re^{-0.215} \quad (2)$$

实验管的换热及阻力特性如图 3 所示, 其中换

热特性拟合最大误差为 6.64%, 流动阻力特性拟合最大误差为 1.55%, 拟合的 Re 范围为 2 900 ~ 18 100。

3.3 传热性能比较准则

广泛采用的传热性能比较准则有相同质量流量、相同泵功率和相同压降 3 种, 根据文献[4~5]的建议, 在常物性条件下, 经推导可得如下限定关系式:

相同质量流量准则:

$$(ARe/D_h)_{test} = (ARe/D_h)_{plain} \quad (3)$$

相同泵功率准则:

$$(fRe^3 A/D_h^4)_{test} = (fRe^3 A/D_h^4)_{plain} \quad (4)$$

相同压降准则:

$$(fRe^2/D_h^3)_{test} = (fRe^2/D_h^3)_{plain} \quad (5)$$

在上述约定条件下, 相同换热温差时的换热量之比为:

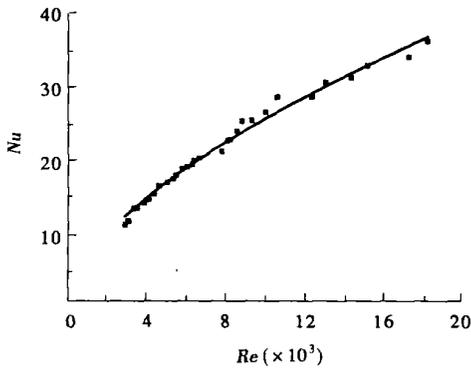
$$\frac{Q_{test}}{Q_{plain}} = \frac{[Nu(Re)F/D_h]_{test}}{[Nu(Re)F/D_h]_{plain}} \quad (6)$$

其中: test—实验所测试的内翅管; plain—普通光管。

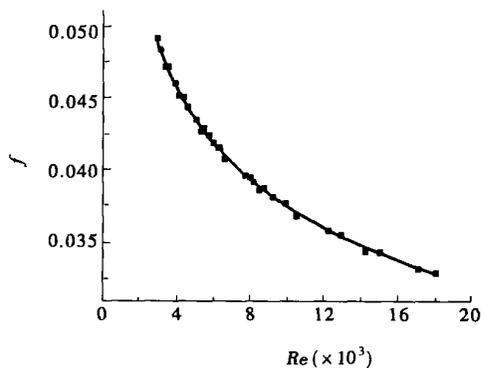
3.4 与类似内翅管的传热性能比较及讨论

文献[3]研究了 3 组波纹形内翅片换热管的传热和阻力特性, 其中 C-2 管(本文中称为比较管)具有与花瓣形扁通道内翅管相似的翅片结构, 文献[3]拟合得到比较管在充分发展段的实验关联式为:

$$Nu = 0.0155 Re^{0.779}; f = 0.342 Re^{-0.244} \quad (7)$$



(a) Nu 随 Re 的变化关系



(b) f 随 Re 的变化关系

图 3 花瓣形扁通道内翅管的换热及阻力特性

表 3 两种内翅管的 Q_{test}/Q_{plain}

翅片管及材质	相同质量流量	相同泵功率	相同压降	Re 范围
比较管(T2)	10.11~6.53	2.99~1.92	1.55~0.998	
实验管(T2)	13.84~7.8	4.83~2.66	2.67~1.45	2 400~19 000
实验管(304)	6.3~3.0	2.2~1.02	1.2~0.56	

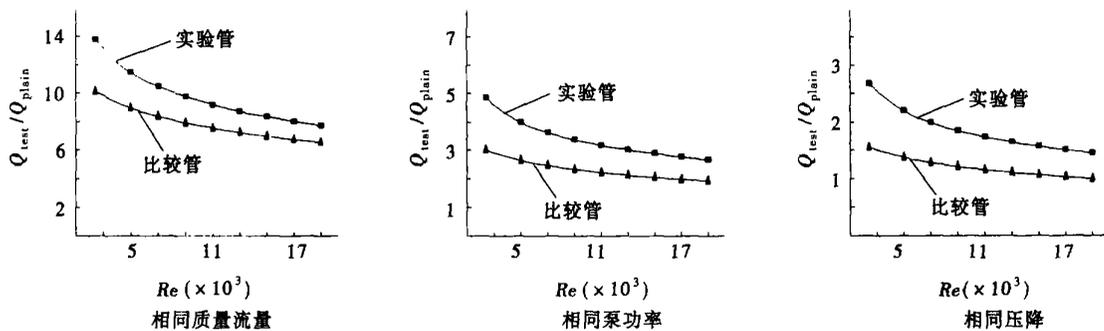


图 4 两种翅片管换热效果的比较

在 3 种准则关系式下, 表 3 及图 4 显示了两种内翅管在换热面积基本相同 (翅片管的外管与普通光管内径相同, 翅片材质都为紫铜 T2) 的情况下分别与普通光管的换热效果比较。从表 3 和图 4 可以看出, 实验管具有较好的强化换热效果, 特别是在较低 Re 时, 其强化效果十分明显, 但是随着 Re 的增加, 二者强化倍率趋于相同。实验管和比较管都在相同质量流量比较准则下具有最大的强化效果, 相同压降时强化效果最差, 这主要是由于在管内加翅片后, 换热管阻力降增大的缘故, 特别是在高 Re 时, 翅片管阻力系数较之普通光管增加明显。总体来说, 实验管都具有优于比较管的强化效果, 这主要是由于二者不同的翅片结构引起的。比较管的翅片将流体通道分隔成两个不同的区域, 一侧通道只与外管壁接触, 一侧通道只与内管壁接触, 与内管壁接触的流道内流体的换热全部依靠翅片传导。实验管具有花瓣形的流体通道, 并且在圆周方向上形成两个大小相近的小流道, 每个通道内的流体换热都通

过翅片和 outer 管壁面同时传导, 使得各个通道内的流体都能均匀换热; 另一方面, 实验管的翅片被挤压成弧形, 由于翅片本身的张力使得翅片紧紧地挤压在内外管的管壁上, 具有较小的接触热阻, 而比较管的翅片为直翅片, 没有焊接, 不能保证翅片与外管壁的紧密接触, 具有较大的接触热阻, 导致换热效果的下降。因此翅片形状及流体通道的结构对换热有很大的影响。

3.5 传热性能比较及翅片材质的讨论

一般换热器都选用金属薄壁作为介质之间的换热面, 由于金属材料具有良好的导热性能, 在整个传热过程中, 热传导形成的管壁热阻一般很小, 通常占不到整个传热过程中总热阻的 5%, 所以在研究强化传热时, 都会忽略材质对传热的影响。然而在翅片管换热器中, 特别是在高肋薄翅片时, 材质会对翅片效率产生根本的影响, 极大地影响翅片管的传热性能。

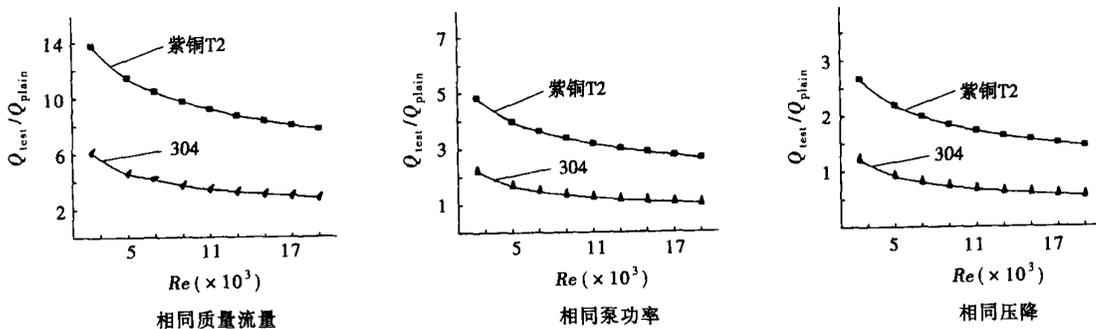


图 5 翅片材质对换热性能的影响

在 3 种准则下, 表 3 及图 5 显示了翅片材质采用常用的紫铜 T2 和 304 不锈钢时, 在换热面积基本

相同的情况下的换热效果比较。从图 5 看出, 对于高肋翅片, 虽然都采用的是具有良好导热特性的金

属材质,但是强化效果却相差较大。从表3的数据可以看出,在测试实验范围内,使用紫铜翅片时要比使用304不锈钢翅片的强化效果高出2.2~2.6倍,而且随着 Re 的增加,其倍数也会增加,甚至在相同压降准则下,如果采用304不锈钢翅片,其传热性能还不如普通光滑管,这主要是由于翅片管具有较小的当量直径和较大的湿周,导致其阻力系数大大增加。当采用导热系数相对较小的翅片材质时,随着 Re 的增加,使得翅片传热效率降低,出现了传热性能不如普通光管的情况。由此可见,虽然金属壁面的导热热阻很小,换热管的材质对换热的影响不大,但是在高肋翅片中,特别是在 Re 较大时,选用什么样的翅片材质对花瓣形扁通道内翅管强化传热效果影响很大。

4 结论

本文研究了花瓣形扁通道内翅管的对流换热及流动阻力特性,得到了Nusselt数、Moody阻力系数 f 随Reynolds数变化的实验关联式,并通过相同质量流量、相同泵功率和相同压降3种比较准则研究了其强化传热特性。结果表明,花瓣形扁通道内翅管具有良好的传热性能,在这3种准则方程式控制下,相同传热温差的传热量较之普通光管分别高7~13倍、1.7~3.8倍和0.5~1.6倍。通过与类似的内翅管进行比较,发现翅片结构和流体通道形式对换热

强化影响较大,特别是在较低 Re 时更加明显,在 $Re < 3000$,相同传热温差时,实验管的传热量较之比较管要高25%以上。通过对不同翅片材质换热管的对比,发现翅片材质对换热强化效果影响较大,在测试实验范围内,相同传热温差时的传热量在使用紫铜T2翅片时要比使用304不锈钢翅片高出2.2~2.6倍。

参考文献:

- [1] WEBB R L. Principles of enhanced heat transfer[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1994.
- [2] 尾花英郎. 热交换器设计手册(上册)[M]. 徐中权,译. 北京:石油工业出版社, 1981.
- [3] 宇波,王秋旺,陶文铨. 波纹内翅片管换热与阻力特性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(3): 334-337.
- [4] FU W S, TSENG C C, HUANG C S. Experimental study of the heat transfer enhancement of an outer tube with an inner-tube insertion[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1995, 38: 3443-3454.
- [5] YU B, NIE JH, WANG Q W, et al. Experimental study on the pressure drop and heat transfer characteristics of tubes with internal wave-like longitudinal fins[J]. Heat & Mass transfer, 1999, 35: 65-73.
- [6] 贺群武,钟文凯,罗来勤,等. 波纹内翅片管内空气强化传热特性的研究[J]. 工业加热, 2003(3): 3-4.
- [7] 贺群武,罗来勤,王秋旺,等. 波纹内翅片管对流换热与阻力特性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(4): 655-657.
- [8] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 第三版. 北京:高等教育出版社, 1998.
- [9] 英克鲁佩勒 P 弗兰克 戴威特 P 戴维. 传热的基本原理[M]. 葛新石,译. 合肥:安徽教育出版社, 1985.

理论研究

转子的正、反转对低压涡轮导向器的影响

《Теплоэнергетика》2005年6月号报导了莫斯科航空学院和俄罗斯中央航空发动机研究所针对低压涡轮转子相对于高压涡轮转子正、反转的情况,研究了它们对低压涡轮第一级导向器的影响。基于中央航空发动机研究所制定的三维方法,进行了在其转子正、反转条件下双轴燃气发生器低压涡轮第一级导向器的优化和初步设计。

在转子反转时,轮毂附近的二次流动旋涡实际消失,结果减小了第一级导向器沿轮毂和中间区域内的损失,在第一级导向器顶部区域旋涡水准实际上没有变化,所以该区域内的损失也没有变化。

与正转比较,在低压涡轮转子反转时第一级导向器内总的能量损失约减少0.015,导致第一级效率提高0.075~0.01,这时导向器内的叶片数约减少30%。

计算也表明,第一级导向器的流出角沿叶高变化不大。在转子反转时,由于尾激波强度减小,流出角减小约 0.6° 。

(吉桂明 供稿)

tive diagnosis result can be obtained through a comparison with the established rules. Then, with respect to the fault modes with the same qualitative features but different quantitative values appropriate quantitative information can be fed into the SDG in connection with a fuzzy theory. By calculating and comparing the subordination degree of the mode being diagnosed to a known fault mode a system fault can be determined. The test results of several case studies indicate that the method devised by the authors is feasible. **Key words:** sign directed graph, fault diagnosis, reasoning rules, qualitative model, quantitative analysis

不同材质花瓣形扁通道内翅换热管的实验研究 = **Experimental Study of Internally Finned Heat Exchange Tubes Made of Different Materials and with Petal-shaped Flat Channels** [刊, 汉] / LI Zhi (Institute of Civil & Refrigeration Engineering under the Harbin University of Commerce, Harbin, China, Post Code: 150028) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 624 ~ 627

Through an experimental method studied was the convective heat exchange and resistance-characteristics of internally finned heat-exchange tubes with petal-shaped flat channels. A fitting of the experimental correlation of convective heat exchange and resistance within the range of measured Reynolds number was carried out. Moreover, by employing the three criteria of equal mass flow rate, equal pump power and equal resistance compared was the heat transfer effectiveness of finned tubes and ordinary bare tubes when different materials were used. It has been found that the material used for the fins has a relatively great influence on heat-exchange intensification effectiveness. However, irrespective of the kinds of materials used, internally finned tubes with petal-shaped channels enjoy relatively high heat exchange effectiveness. The intensification effectiveness is especially conspicuous under the condition of a low Reynolds number. **Key words:** internally finned tube, experimental study, intensified heat transfer, fully developed zone

基于天然气管网压力能回收的联合循环构思 = **Combined Cycle System Concept for the Recovery of Pressure Energy of a Natural-gas Pipe Network** [刊, 汉] / WANG Song-ling, LUN Li-yong, XIE Ying-bai (Department of Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003), CUI Hong-gang (Wenzhou Power Generation Co. Ltd., Wenzhou, China, Post Code: 325602) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 628 ~ 631

With the widespread application of natural gas and the incessant development of related technologies the transmission pressure of natural-gas pipe networks is becoming higher and higher, resulting in the accumulation of tremendous pressure energy. The authors have come up with a gas and steam combined cycle system for recovering the pressure energy of a natural-gas pipe network. Through the expansion of high-pressure natural gas in an expansion engine some portion of the energy is recovered to make up for a portion of the consumed work of a compressor. The low-pressure natural gas after expansion is used to cool consecutively the compressor inlet air and steam turbine exhaust steam followed by the recovery of some portion of the flue-gas waste heat. A qualitative analysis of the economic benefit created by the relevant portion of the system flow path for the combined cycle was conducted, exhibiting the high potential of enhancing the combined cycle efficiency and of utilizing energy in a comprehensive way. **Key words:** natural-gas pipe network, pressure energy, gas and steam combined cycle, expansion engine