

天津翔悦

天津翔悦密封材料有限公司



弗莱希波·泰格
金属波纹管有限公司



温州环球阀门制造有限公司



北新集团建材股份有限公司

内螺旋外棘齿管换热特性与阻力性能的试验研究

Experimental Investigation on Heat Transfer and Pressure
Drop in Ratchet Tube With Internal Spiral Groove

华南理工大学化工与能源学院强化传热与过程节能教育部重点实验室(510640) 龙新峰

【摘要】 为满足电厂换热器无铜化的需求,研制出一种钢材质一体化新型双侧强化传热管——内螺旋外棘齿管,文中介绍了该管的结构和强化传热机理。利用通用水平式单管管外蒸汽冷凝试验装置,对以水为工质的5根不同结构参数的内螺旋外棘齿管的换热特性和流体动力学特性进行了试验研究。研究发现,所有内螺旋外棘齿管管内换热系数比光管提高了42~152%,同时阻力系数增加了48~350%。此外,本文给出了内螺旋外棘齿管管内换热系数及阻力损失的计算关联式,并对内螺旋外棘齿管的热力性能进行了评价。

【关键词】 内螺旋外棘齿管 强化传热 给水加热器 无铜化运行

【中图分类号】 TK124 文献标识码: A

Abstract: To meet the need of non-copper heating process in power plants, a new type of integer steel two-side heat transfer enhancement tube, namely ratchet tube with internal spiral groove (RISG tube), was designed and manufactured. Its geometry structure and heat transfer mechanism is briefly introduced in this paper. Using a general steam condensation testing equipment only for horizontal single tube, On 5 of each RISG tube with different structural parameters, a set of experimental tests are conducted to investigate the characteristics of heat transfer and hydromechanics. As the experimental results indicated, compared with smooth tube, the internal heat transfer coefficient of all RISG tubes are improved by 42% to 152%, and the flow resistance coefficient increased by 48% to 350%. Correlations of internal heat transfer coefficient and friction factor are given in this paper, which can be used to design preheater. Further more, performance evaluation criteria are used to obtain quantitative estimates of the benefits offered by RISG tubes with water flowing in tubes.

Key words: ratchet tube with internal spiral groove; heat transfer enhancement; feedwater preheater; no copper in boiler feedwater system

1 引言

对传热管内、外表面进行结构优化,以取得强化传热效果一直是传热学领域的重要研究课题,在管

外侧加翅片是强化管外换热的最普遍方法^[1]。相对而言，在外侧强化的同时，利用一体化内沟槽强化管内换热的研究工作开展得较少。目前国内发电机组低压加热器较多采用铜材质管，随着大容量、高参数直流锅炉的发展，电厂无铜化运行势在必行。此外，高/低压给水加热器、凝汽器等蒸汽凝结换热的管内、外侧的换热系数是同一数量级，换热强化最好采用双侧同时进行^[2]。这要求人们研制一种耐腐蚀且耐冲击的钢材质管取代凝汽器、高压加热器和低压加热器等换热器中现有的铜管。针对这一情况，笔者从节能和安全的角度设计并加工出内螺旋外棘齿管^[3]（以下简称RISG管——Ratchet tube with Internal Spiral Groove）来强化其传热，取得明显效果。本文侧重对该RISG管的管内换热和阻力特性进行试验研究。

RISG管是一种新型一体化的双侧强化传热管（外观照片如图1所示），可通过对光管采用专门模具和特殊轧制工艺，分两次成型管壁外侧曲面棘齿翅片、一次成型管壁内侧螺旋沟槽的加工方法得到。RISG管能显著地强化低表面张力介质及其混合物和含不凝性气体的水蒸气的冷凝传热，又能显著地强化空气和高粘性流体的对流冷却传热，适用于电力、化工、制冷及能源等领域的高低压回热加热、凝汽器、水冷冷凝器、空冷器及油冷却器。

本文以水为工质，对钢材质RISG管进行了换热和阻力特性试验研究，并与光滑管进行对比，分析研究了RISG管的强化效果和阻力特性，为RISG管的应用奠定理论与实验基础。



图1 内螺旋外棘齿管照片

Fig.1 Photograph of ratchet tube with internal spiral groove

2 试验装置和试验管结构参数

2.1 试验装置

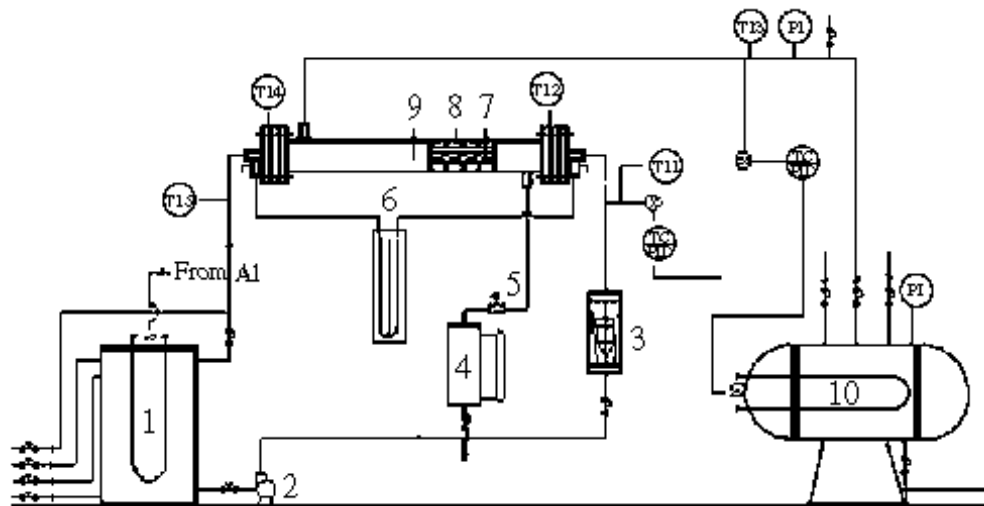
实验平台系统如图2所示，主要包括蒸汽回路，冷却水回路，电加热锅炉和恒温冷却水箱，加热控温系统，测量与监视系统。该实验设备用来进行单管水平式管外蒸汽冷凝、管内冷却水对流换热以及管内流阻的研究。

试验管装于试验装置的筒体内，构成一套管式换热器，试验管外径 $\phi 25\text{mm}$ ，内径 $\phi 19\text{mm}$ ，有效传热长度为700mm。试验过程中冷却水在试验管内流动，水蒸汽在管外环形空间中与冷却水逆向流动。水蒸汽流程大致为：电加热锅炉产生的0.4Mpa水蒸汽经入口的铜-康铜热电偶测定蒸汽温度后由上部进入套管式换热器的壳程，在壳程内RISG管外表面冷凝凝结换热后变成热水，然后经疏水器流入实验筒体下部的凝结液计量筒，再排入实验体外的计量杯，根据凝结液在计量杯中上升的高度用秒表计时以测量凝液量。锅炉的蒸汽温度由恒温控制仪控制，凝结液的液态由视镜观察。实验中控制蒸汽和冷水的进口温度，通过改变水的流量来测定不同工况时水的进出口温度。试验管外壁温度由布置在实验段6个截面上的铜-康铜热电偶来测量，取平均值作为RISG管的外壁温度。实验段进出口压差由水银压差计测量。水的大致流程为：恒温电热水槽的冷却水由离心清水泵输送并经转子流量计测定其流量，铜-康铜热电偶测定其入口温度后由右侧进入试验管的管程，使管外水蒸气凝结，然后经出口铜-康铜热电偶测定其温度后回流

到恒温水槽继续循环使用。

在试验过程中，冷却水流量由转子流量计测量，流量计量程为100~1000L/h，精度等级为2.5级。温度的测量采用0.3mm的铜-康铜热电偶，由石英温度计在水浴中进行标定，精度可达到0.02℃，并利用精密数字电压表进行显示。试验管管内流体压降采用水银压差计测量，误差不超过1mm汞柱，锅炉蒸汽压力采用0.4级的精密压力表进行监测。

通过凝结液计量筒测量凝结液体积，再查表获取对应凝结温度下凝结液的密度和汽化焓，进一步计算出凝结热作为总传热量的参考值。



1. 恒温电热水槽 2. 清水泵 3. 转子流量计 4. 凝结液计量筒 5. 疏水器 6. 水银压差计 7. 试验管
8. 视镜 9. 试验段套管 10. 电热锅炉 TI1. 冷却水进口温度 TI2. 试验管右部壁温 TI3. 蒸汽进口温度
TI4. 试验管左部壁温 TI5. 冷却水出口温度 PI. 蒸汽压力 TC/PID. 温度自动控制系统

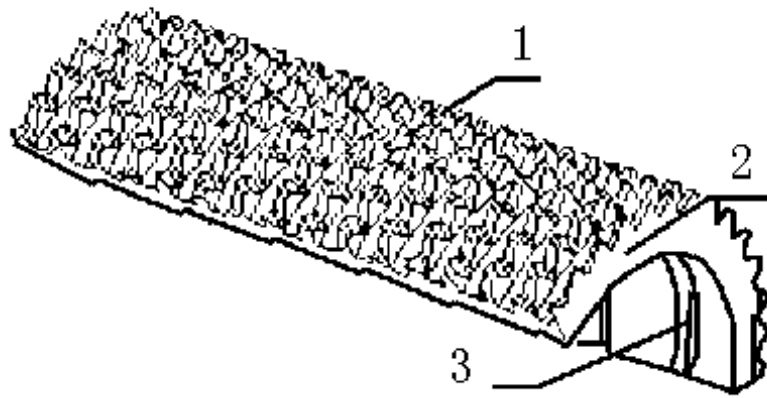
图2. 水平式单管管外蒸汽冷凝试验系统

Fig.2 General Testing system of outside steam

condensation for horizontal single tube

研制开发出的RISG管外形三维几何结构如图3所示，主要由管基体、曲面棘齿形翅片和螺旋沟槽构成。在RISG管管基体外表面，沿轴向分布着同一螺旋升角多头沟槽，并沿轴向有另一较小螺旋升角单头沟槽，各沟槽间成形出曲面棘齿翅片。每个曲面棘齿翅片与传热管基体为一体化结构，无接触热阻，且与周围的4个曲面棘齿翅片在沟槽底曲面相连。每个棘齿翅片的侧面是曲率半径相对较小的弧线构成的曲面多边形，相互连续的曲面棘齿外凸面构成整个管壁外表面的完整三维扩展表面。在RISG管的内侧面，沿轴向分布着一条较小螺旋升角的沟槽，螺旋沟槽横截面呈梯形或三角形。

RISG管外侧面强化冷凝换热的机理是：对比光滑管，增大了冷凝传热的面积，RISG管外侧面的肋化系数是光管的3倍左右。特殊的三维扩展表面结构能充分发挥冷凝液表面张力作用，使壁面连续相造成过热或过冷状态促进相变，且棘齿顶有助于促成冷凝液的不产生，并迅速从棘齿顶部流向棘齿根部，在重力的作用下从管底排出，同时冷凝液在排液点处的滞流角较小。



1. 曲面棘齿形翅片 2. 管基体 3. 螺旋沟槽

图3. 内螺旋外棘齿管外形三维几何结构

Fig.3 Three-dimension geometry structure of RISG tube

RISG管内侧面强化对流换热的机理是：在管内流动的流体受螺旋沟槽的引导, 靠近壁面的部分流体沿沟槽旋转, 流体流向不断改变, 边界层发生剥离, 诱发的二次流（螺旋流和边界层分离流）和微旋改变了流体的流动结构, 促进了近壁区流体的湍流程度加剧, 强烈地降低了滞流底层的厚度和热阻。主流体顺壁面沿轴向运动时, 两螺旋沟槽间的凸起使流体产生周期性的扰动, 引起边界层中流体质点的骚动, 发生脱体, 产生涡流, 从而加快由壁面至流体主流的热量传递, 提高表面传热系数。同时, 螺旋沟槽导致的形体阻力产生的逆向压力梯度, 使得边界层分离, 破坏了流动边界层, 加强了肋间流体与主流之间的质量和能量交换, 提高了传热速度。另外, 管内螺旋沟槽起了二次流的作用, 故其阻垢能力增强。

试验所用RISG管由 $\phi 25 \times 3$ 无缝钢管在专用设备上经专门设计的模具和特殊工艺分三次成型加工而成, 管内外侧面具有不同的几何结构, 结构参数如表1所示。

表1 实验管的几何结构参数

Table 1 Geometry configuration parameters of tested tube

试 管 编 号	管 外 径 D/mm	管 内 径 D_i/mm	管外几何结构参数						管内几何结构参数			
			翅片 高度 H/mm	第一 螺旋 头数	第一螺 旋槽深 h_1/mm	第一螺 旋角 $A/^\circ$	第二 螺旋 头数	第二螺 旋槽深 h_2/mm	第二螺 旋角 $B/^\circ$	第二螺 旋头 数	螺 导程或 节距 p/mm	槽深 e/mm
光滑 管	25	19										
1#	25	19	0.71	1	0.73	1.5	28	0.72	18	1	2.0	0.25
2#	25	19	0.82	1	0.91	1.5	28	0.83	18	1	2.5	0.35
3#	25	19	0.93	1	0.97	1.5	33	0.94	20	1	2.5	0.55
4#	25	19	0.95	1	0.98	1.5	33	0.97	20	1	3.5	0.70
5#	25	19	1.01	1	1.10	1.5	33	1.03	20	1	3.5	0.85

3.1 流动阻力试验

为了验证实验方法和测量的准确性，用清洗后的光管进行了阻力实验。阻力实验是在常温和无蒸汽的情况下进行的，通过调节水的流量，并在达到稳定工况后测取水进出实验管的压力降 ΔP ，根据范宁(Fanning)公式

$$\Delta P = f \frac{L p u^2}{D_i 2}$$

可直接求出沿程阻力系数 f ，并将实验结果与经典的光管布劳修斯公式

$$f = 0.3164 Re^{-0.25}$$

相比较，得出光管实验值与计算值之间的偏差为-4.6%~5.2%，表明所用实验方法和本实验系统测量的数据有足够的精确度。

文章作者： 龙新峰

发表时间： 2005-01-26 00:00:00

[\[关闭窗口\]](#) [\[打印文章\]](#) [\[回到顶端\]](#)