

外螺纹管在低温烟气中传热特性试验研究

田莉勤¹,张忠孝¹,胡广涛²,顾凯颖¹

(1.上海理工大学 环境与建筑学院,上海 200093;2.榆林学院 能源工程学院,陕西 榆林 719000)

摘要:为了研究外螺纹管对低温烟气传热强化的效果,搭建低温烟气余热回收试验台,通过对外螺纹管换热器和光管换热器在低温烟气中的传热试验,比较分析外螺纹管和光管 2 种换热器在不同工况下的传热系数,根据试验数据计算拟合出试验传热关联式。结果表明:外螺纹管换热器的换热系数是光管换热器的 1.05~1.09 倍;烟气流速从 4.5 m/s 增加到 7.5 m/s 时,外螺纹管换热器的换热系数增长率为 47%;工质水流速从 0.3 m/s 增加到 0.57 m/s 时,外螺纹管换热器的换热系数增长率为 2.22%;外螺纹管换热器烟气外侧的传热试验关联式 $Nu=1.14Re^{0.48}Pr^{0.3}(5\times 10^3 < Re < 9\times 10^3)$ 。

关键词:外螺纹管;低温烟气;传热系数;试验关联式

中图分类号:TK227

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2015)01-0095-04

Experimental research on heat transfer characteristics of external screwed tube in low temperature flue gas

TIAN Liqin¹,ZHANG Zhongxiao¹,HU Guangtao²,GU Kaiying¹

(1.School of Environment and Architecture,University of Shanghai for Science and Technology,Shanghai 200093,China;

2.College of Energy Engineering,Yulin University,Yulin 719000,China)

Abstract:In order to study the heat transfer effects of external screwed pipe on flue gas heat transfer at low temperature,the flue gas waste heat recovery test-bed was built.The heat transfer experiment of flue gas at low temperature in external screwed tube and steel pipe were carried out.The heat transfer coefficient of external screwed pipe and steel pipe heat exchanger under different conditions were compared.According to the experimental data,the relational test heat transfer correlation was fitted out.The results showed that the heat transfer coefficient of the external screwed pipe was 1.05 to 1.09 times higher than that of the smooth tubes.The heat transfer coefficient increased 47% as the flue gas velocity increased from 4.5 m/s to 7.5 m/s.The heat transfer coefficient increased by 2.22% as the water velocity increased from 0.3 m/s to 0.57 m/s.The heat transfer correlation of external screwed tubes was $Nu=1.14Re^{0.48}Pr^{0.3}(5\times 10^3 < Re < 9\times 10^3)$.

Key words:external screwed pipe;low temperature flue gas;heat transfer coefficient;experimental correlation

0 引 言

低温烟气余热是指现阶段尚未回收利用的、废弃的、高于环境温度的,仍具有进一步回收利用价值的烟气热能,烟气的温度一般低于 300 ℃,目前低温烟气的热能未得到有效利用,一般视为废气直接排入大气中^[1-2]。而锅炉排烟温度每降低 10~15 ℃,锅炉效率会提高 1%^[3-4]。燃煤锅炉的排烟温度为 125~140 ℃,但锅炉实际排烟温度接近 200 ℃,小型

工业锅炉排烟温度会更高^[5-7],所以高效回收锅炉尾部低温烟气余热对我国节能工作有着重要的意义。低温烟气余热具有余热资源量大、烟气不清洁、利用率低、存在低温腐蚀、余热回收设备体积庞大等问题^[8],必须利用强化换热技术实现低温余热的回收利用。翅片管可以强化烟气侧的换热,但该类型的管子存在压力损失大、积灰严重、易磨损的缺点,而外螺纹管是一种高效异形的强化传热管件,具有很好的换热性能,且具有流动阻力增加不多、抗垢能

收稿日期:2014-10-08;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.01.022

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAA03B02)

作者简介:田莉勤(1990—),女,安徽阜阳人,硕士研究生,研究方向为低温烟气余热回收。E-mail:lqtian1990@163.com

引用格式:田莉勤,张忠孝,胡广涛,等.外螺纹管在低温烟气中传热特性试验研究[J].洁净煤技术,2015,21(1):95-98.

TIAN Liqin,ZHANG Zhongxiao,HU Guangtao,et al.Experimental research on heat transfer characteristics of external screwed tube in low temperature flue gas[J].Clean Coal Technology,2015,21(1):95-98.

力强的优点^[9]。研究表明,小节距小槽深大夹角的单头螺纹管具有良好的传热和阻力综合性能^[10]。张一帆等^[11]研究了螺纹管管型结构对管内流动阻力特性的影响,得出了适应不同结构内螺纹管阻力特性的半经验公式。螺纹管的应用以液-液为主,其次是气-液^[12],广泛应用于动力、海水淡化、炼油、石油化工设备上,外螺纹管在低温烟气余热回收中的研究较少。笔者通过搭建烟气余热回收试验台,设计2种相同尺寸和结构的碳素钢外螺纹管和光管低温换热器,并进行传热试验。用加热至指定温度下的空气代替低温烟气与工质水进行换热,研究对比外螺纹管和光管在低温烟气中的传热特性,试验研究与理论相结合,拟合出外螺纹管换热器的试验传热关联式,为外螺纹管低温换热器的设计提供一定的技术和理论支持。

1 试验系统及方法

1.1 试验系统

试验台系统如图1所示,试验台由电阻炉、换热器、引风机、水箱、水泵组成。空气通过引风机引入电阻炉加热管内,空气经加热后进入换热器与管内工质进行换热,再经阀门、冷却段和流量计后排出。工质水经水箱、水泵流量计、阀门后进入换热器与低温烟气进行换热交换,最后由排水口排出。试验中所用主要设备及型号见表1,换热器的结构为逆排、逆流的蛇形管间壁式换热器,是一种锅炉低温省煤器常用管,管内的工质水和管外的低温烟气进行热交换,加热工质水。换热器采用的管型见表2。

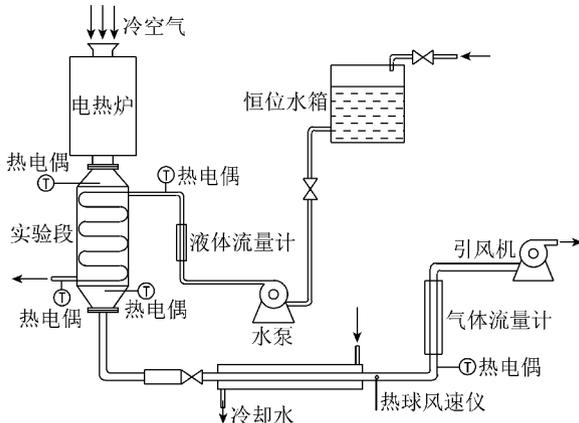


图1 烟气余热回收试验系统

1.2 试验原理与方法

试验前先对电阻炉与烟气出炉温度及烟速进行标定,标定后得到炉温与风机的试验关联式,再设定

需要的炉温值。

表1 主要试验设备

设备	型号	参数
电阻炉	SK-30-12	30 kW
引风机	JYK-7.5A	4 kW
测温仪	DM6801B	-50~200 ℃
水泵	PUN-600E	50 L/min

表2 换热管的结构尺寸

管型	基管规格/mm	材质	螺距/mm
外螺纹管	φ32×3	碳素钢(20G)	5
光管	φ32×3	碳素钢(20G)	—

试验方案中烟气进口温度 $T=160\text{ }^{\circ}\text{C}$, 烟气流速 μ 从 4.5 m/s 到 7.5 m/s , 工质流速从 0.3 m/s 到 0.57 m/s 。在 $T=160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和特定工质速度下, 改变烟气流速, 即不同烟气流速, 测定对应每种工况时工质水的进出口温度和烟气的出口温度; 在 $T=160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和特定烟气流速下, 改变工质流量, 即不同工质流速, 测定对应每种工况时工质水的进出口温度和烟气的出口温度, 由此求出换热系数 K , 换热系数 K 计算式 $K=1/(1/\alpha_1 + \delta_h/\lambda_h + \delta_{gb}/\lambda_{gb} + \delta_{sg}/\lambda_{sg} + 1/\alpha_2)$ 式中: α_1 为烟气侧放热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; δ_h 、 δ_{gb} 、 δ_{sg} 为管壁、灰污层、水垢层厚度, m ; λ_h 、 λ_{gb} 、 λ_{sg} 为管壁、灰污层、水垢层导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; α_2 为水侧放热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

烟气侧和工质侧为清洁状态, $\delta_h/\lambda_h = 0$, $\delta_{sg}/\lambda_{sg} = 0$, 故

$$\alpha_1 = \frac{1}{1/K - 1/\alpha_2 - \delta_{gb}/\lambda_{gb}} \quad (1)$$

2 试验结果分析

2.1 烟气流速

$T=160\text{ }^{\circ}\text{C}$, 20G 钢外螺纹管和光管换热器中, 烟气流速与换热系数的关系如图2所示。由图2可知, 烟气流速为 5.0 、 6.0 、 7.0 、 7.5 m/s 时, 外螺纹管换热器的换热系数比光管换热器的换热系数分别大 3.32 、 5 、 3.5 、 $6.16\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 其换热系数约是光管换热系数的 1.05 、 1.08 、 1.05 、 1.09 倍。试验结果表明: 相同进口烟气流速下, 外螺纹管换热器的换热系数比光管换热器的换热系数提高了 $5\% \sim 9\%$, 外螺纹管强化了低温烟气的换热效果。

由试验结果可以得出, 在相同条件下, 仅改变受

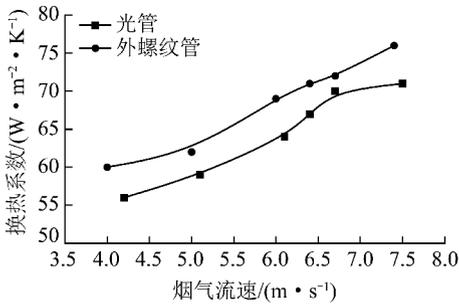


图2 20G钢换热器烟气流速与换热系数关系

热面的换热管型对换热系数有较大的影响,外螺旋管的总传热系数比光管提高5%~9%。秦富有等^[12]研究结构尺寸相同光管和外螺旋管板式换热器在相同条件下,热水-冷水之间的换热,结果表明,外螺旋管换热器比光管换热器提高总传热系数10%~17%,而本文研究的是低温烟气和水之间的换热,总系数提高5%~9%。空气的强制对流换热系数为30~100 W/(m²·K),水的强制对流换热系数为2000~5000 W/(m²·K),烟气侧的热阻远大于水侧的热阻,且低温烟气的温度低,余热的品质低,造成了余热回收效率低,故低温烟气中外螺旋换热器的换热系数的增长率比热水-冷水之间的低,为5%~9%。

烟气冲刷外螺旋管束时,受管壁上螺旋形凹槽的引导,靠近壁面的部分烟气顺着壁面沿轴向流动,产生了一个纵向漩涡,方向始终垂直与边界层中的层流流动方向,使烟气侧的边界层不断更新,热阻变小,提高了传热速率。垂直层流增加了靠近壁面烟气的扰动,外螺旋管的槽纹减少了管子壁面上凝结水的厚度,强化传热,提高了管外放热系数。外螺旋管增加了换热面积,即增加了余热回收量。所以,外螺旋管强化了低温烟气的换热,提高了换热系数。

从图2同时可以看出,烟气流速从4.5 m/s增加到7.5 m/s时,外螺旋管换热器的换热系数增加了24.5 W/(m²·K),增长率为47.5%,光管换热器的换热系数增加了14 W/(m²·K),增长率为25%,换热器的换热系数随着烟气流速的增加而增加,这是因为烟气流速越高,烟气侧换热的雷诺数就越大,紊流程度越高,烟气混合越均匀,传热系数也就越大,所以换热系数增大。

2.2 工质流速

$T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\mu = 6\text{ m/s}$,20G钢外螺旋管和光管换热器中,工质水速度与换热系数的关系如图3所示。由图3可知,外螺旋管换热器的换热系数比光

管换热器的换热系数大5.5 W/(m²·K),其换热系数是光管换热系数的1.08~1.09倍。试验结果表明:相同工质流速下,外螺旋管换热器的换热系数比光管换热器的换热系数提高了8%~9%,外螺旋管强化了低温烟气的换热效果。

从图3同时可以看出,水流速度从0.3 m/s增加到0.57 m/s时,外螺旋管换热器的换热系数增加了1.50 W/(m²·K),增长率为2.22%,光管换热器的换热系数增加了1.59 W/(m²·K),增长率为2.57%,换热器的换热系数随着工质流速的增加而稍有增大。由此可见水流速度对换热系数的影响较小,而管外烟气流速的增加使换热系数显著增加。这说明换热器的热阻主要集中在管外的烟气侧,需要强化管外的换热。

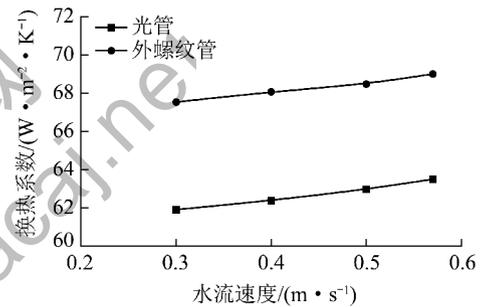


图3 20G钢换热器工质水速度和换热系数的关系

2.3 外螺旋管烟气侧传热关系式拟合

光管管内工质水侧换热系数的计算关联式见式(2)^[13]。

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (2)$$

式中: Nu 为努塞尔数; Re 为雷诺数; Pr 为工质水的普朗特数。

利用公式(1)求得外螺旋不同工况下的管外换热系数 α_1 ,将 α_1 回归拟合成以下形式的管外换热关联式:

$$\alpha_1 d/\lambda = A(\mu d/\nu)^B Pr^{0.3} \quad (3)$$

式中: d 为管直径,m; λ 为烟气导热系数,W/(m·K); A 、 B 为系数; μ 为烟气速度,m/s; ν 为烟气运动黏度,m²/s; Pr 为烟气的普朗特数。

整理试验数据以雷诺数 Re 为横坐标, $Pr^{0.3}\alpha_1 d/\lambda$ 的计算值为纵坐标,拟合外螺旋管烟气传热特性曲线,进而得到 A 、 B 系数的值,拟合得到的传热特性曲线如图4所示。本试验回归后得到了外螺旋管烟气侧传热特性曲线试验关联式。

外螺旋管: $Nu = 1.14Re^{0.48}Pr^{0.3}$,该式拟合相关度 $R^2 = 0.951$,适用范围 $5 \times 10^3 < Re < 9 \times 10^3$ 。

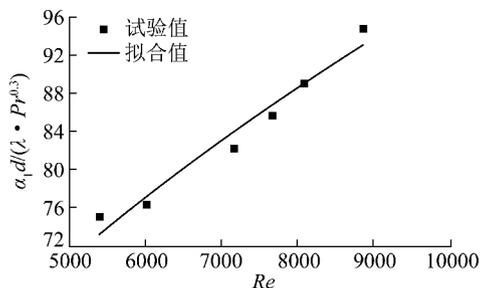


图4 外螺纹管烟气传热特性曲线关联式拟合

上式的误差为 2.85%，误差较小，且 R^2 较接近于 1，所以这个关联式具有准确性。

外螺纹管的螺纹凹槽使管外烟气产生周期性的扰动，可以加快壁面热量到管内工质水的传递，提高管外换热系数。由于强化机理的复杂性，目前还没有统一的模型、传热关联式来描述螺纹管的换热。拟合关联式是采用试验研究和理论相结合的方法得到的，可以在外螺纹管的强化机理没有达到共识的情况下，在一定的条件下，指导外螺纹管换热器在低温烟气中的设计和应用。通过试验关联式 $Nu = 1.14Re^{0.48}Pr^{0.3}$ 可求出管外放热系数 α_1 ，进而求出外螺纹管换热器的总传热系数 K 。

结合试验传热关联式，从换热器的耗材来衡量对比 2 种换热器的综合换热性能。在回收单位热量且 2 种管型换热器工况相同时，比较 2 种换热管所需要的长度，换热管的尺寸与上文试验中相同，计算条件为换热温差 $84.5\text{ }^\circ\text{C}$ ，空气流量 0.55 kg/s ， $Pr = 0.69$ ， $\lambda = 0.034\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，计算结果如图 5 所示。

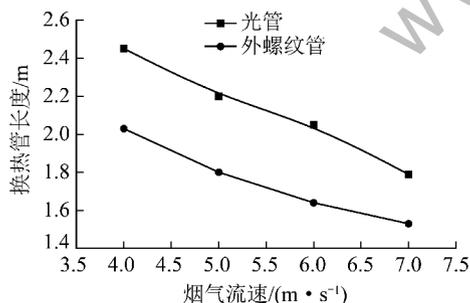


图5 同种工况下回收热时 1 kW 时 2 种换热管长度比较

根据计算得出，在同种工况下外螺纹换热管长度比光管平均少 7.2%。由于低温烟气的特点，造成低温烟气回收成本大、实际操作困难，外螺纹管可以起到强化换热，节约耗材，降低成本，缩小换热器体积的作用。

3 结 论

1) 低温烟气余热利用受到诸多限制，且传热热

阻主要集中在烟气侧，因而需采用受热面强化传热实现管内外介质间的高效换热。在相同情况下，外螺纹管换热器的换热系数明显高于光管，是光管的 1.05~1.09 倍。

2) 在试验条件下拟合得出了外螺纹管烟气外侧传热关联准则式 $Nu = 1.14Re^{0.48}Pr^{0.3}$ ，适用范围 $5 \times 10^3 < Re < 9 \times 10^3$ ，拟合相关度为 0.951，为外螺纹管在低温烟气余热回收中的应用提供了理论支持。

3) 烟气流速对总的换热系数有很大的影响。进口烟温为 $160\text{ }^\circ\text{C}$ 时，烟气流速从 4.5 m/s 增加到 7.5 m/s 时，外螺纹管换热器的换热系数增长率为 47%。

4) 工质水流速对总的换热系数影响不大。工质水流速从 0.3 增加到 0.57 m/s 时，外螺纹管换热器的换热系数增加了 $1.50\text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ ，增长率为 2.22%。

5) 结合拟合公式的计算，交换单位热量时，相同条件下外螺纹换热管长度比光管少 7.2%。

参考文献:

- [1] 连红奎,李 艳,束光阳,等.我国烟气余热回收利用技术综合[J].节能技术,2011,29(2):123-128.
- [2] 吴华新.低位烟气余热深度回收利用状况述评(I)[J].热动力工程,2012,27(3):271-275.
- [3] 杨群峰,曹 颖,董 哲,等.小型工业锅炉烟气余热利用新技术[J].节能技术,2012,30(4):342-345.
- [4] 高继录,邹天舒,李志龙,等.某 300MW 机组锅炉排烟温度偏高原因分析及治理[J].热力发电,2013,42(2):110-113.
- [5] 王金枝,肖 明,姜春敏.排烟温度对锅炉效率的影响[J].山东电力技术,2008(2):35-37.
- [6] 苏建民.锅炉烟气余热回收对静电除尘器的影响[J].洁净煤技术,2013,19(3):102-105.
- [7] 任国平.焦炉烟气余热回收发电技术分析[J].洁净煤技术,2014,20(3):87-89.
- [8] 李玉忠.发电厂燃煤锅炉烟气余热利用关键技术分析[J].节能,2014(2):40-43.
- [9] 李应军,王 秀.螺旋钢管省煤器的设计与应用[J].节能,2012(3):67-69.
- [10] 韩古忠,姚仲鹏,张 军,等.单头螺旋槽纹管管内流动和换热的数值模拟[J].北京大学学报,2001,21(3):292-295.
- [11] 张一帆,李会雄,张煜乾,等.内螺纹管管型结构对管内流动阻力特性的影响[J].工程热物理学报,2011,32(7):1161-1164.
- [12] 秦富有,王三保,王培萍,等.光管和外螺纹管换热器的性能比较[J].化学工程与设备,2008(1):28-30.
- [13] 陈一平,杨 东,吕当振,等.优化内螺纹管传热特性试验研究[J].湖南电力,2011,31(6):1-6.