

文章编号: 1000-582X(2011)10-082-04

煤粉加压气化炉对流段换热特性试验

杨震^{1,2}, 赵振兴¹, 郭琴琴², 刘宏¹, 曹子栋¹

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 上海锅炉厂有限公司, 上海 200245)

摘要: 研究了煤粉加压气化炉膜式螺旋管对流换热器在高温高压工况下的换热特性。分别以 N₂、He、N₂ 和 He 体积比为 2:1 的混合气体为试验气体, 试验时对每一种气体压力均从 0.5 MPa 开始进行, 至 3.5 MPa 结束, 在每一个压力值下, 试验段入口温度从 150 °C 升到 450 °C。通过试验研究了压力对雷诺数及换热系数的影响和不同的冲刷形式下的膜式螺旋管的换热特性。结果表明: 压力影响该管型的换热能力; 获得了不同工作条件下该管型的换热拟合式。

关键词: IGCC; 对流煤气冷却器; 换热特性

中图分类号: TK124

文献标志码: A

Study on heat transfer characteristics in a gasification convective syngas cooler

YANG Zhen^{1,2}, ZHAO Zhen-xing¹, GUO Qin-qin², LIU Hong¹, CAO Zi-dong¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Sanxi, P. R. China; 2. Shanghai Boiler Works Ltd, Shanghai 200245, P. R. China)

Abstract: This study uses high pressure single gas (He and N₂) and mixture(He + N₂) gas instead of the high pressure syngas, and the test pressure for each gas were from 0.5 MPa to 3 MPa with test temperature from 150 °C to 450 °C. The results show that the working pressure, gas composition and flow heating methods influence the high pressure gas convective heat transfer coefficient, and the effect of the working pressure is the most prominent. The average convection heat transfer coefficients are obtained for different kinds of high pressure gas in annular channel heat exchanger, and the correlations of the typical flow heating methods and its applicable condition.

Key words: IGCC; convective syngas cooler; heat transfer characteristics

整体煤气化联合循环(integrated coal gasification combined cycle, 简称 IGCC)是当今全球清洁能源利用的前沿技术^[1-2], 与普通燃煤发电技术相比, 其优势在于可以更高效地利用煤炭资源, 并大大减少燃烧污染物的排放。在荷兰和西班牙分别有 250 MW 和 300 MW 的 IGCC 电站已经投入运行。因此此项技术的完全掌握对中国的一次能源高效洁

净利用有着重要意义, IGCC 系统中关键技术之一是煤粉加压气化技术, 采用废热锅炉对高温合成气的显热回收能使 IGCC 电站效率提高约 4~5 个百分点^[3-4], 废热锅炉包含辐射废锅和对流废锅两部分, 对流废锅根据其结构形式可以分为膜式螺旋管环型通道形式、蛇型管平行通道形式、膜式垂直管屏平行通道形式等。其中膜式螺旋管环型通道对流换

收稿日期: 2011-05-18

基金项目: 国家 863 高技术基金资助项目(2007AA05Z265)

作者简介: 杨震(1968-), 男, 西安交通大学博士, 高级工程师, 主要从事热能工程方向研究, (E-mail) zzzxjt@163.com。

热器是主要形式之一,研究膜式螺旋管对流换热装置在高温高压多组份煤气工况下的换热特性,对该种形式的换热器设计及换热计算具有重要的指导意义。

近年来,很多大学和科研机构对普通螺旋管的流动与传热进行了较多的实验研究工作。如:西安交通大学对普通螺旋管圈水冷壁传热特性进行了实验研究^[5-6];东北电力大学对普通螺旋管内高压汽液两相强制对流沸腾传热分析及评价^[7-8];中国科学院工程热物理研究所的顾维藻对带不同粗糙元的环形通道中的换热和阻力进行了计算研究^[9];Zarate^[10]在实验中发现:单相水在环形流道内强迫对流换热关系式和普通通道内的不同且与环形空间的半径比有关;Sadatomi^[11]通过实验研究了环形管道的环隙宽度和内外管是否同时加热对环形管道流动换热的影响。但是目前国内外研究^[12-16]主要集中在平滑板构成的环形通道上,实验介质为单质液体。可以看出,工程中对膜式螺旋管同轴环形通道换热器还没有相关研究结果。试验以加压煤粉气化炉的对流换热器为原型来设计实验段,进而研究膜式螺旋管的换热性能。

1 实验方法及设备

1.1 实验方法

如图 1 所示,试验系统为一带有回热设备的闭合回路,试验对每一种气体工况均从 0.5 MPa 开始至 3.5 MPa 结束,在每一个压力值下,均利用电加热器控制实验温度,使试验段入口温度从 150 °C 升至 450 °C。通过对每一种形式的膜式螺旋管进行换热试验,可以研究高雷诺数条件下膜式螺旋管环形通道的换热特性。试验将压力和温度的影响转化到雷诺数和普朗特数中,所得结果具有一定的通用性。通过对实验数据整理,得出压力和冲刷形式对换热系数的影响。

1.2 实验测量仪器

试验测温仪器采用(WRNK-293 型)铠装热电偶,测温范围为-40~1 200 °C;气体的流量测量采用 LUGB 型应力涡街流量计,转换精度为±0.5%;冷却水流量测量采用 KDLD 电磁流量计,测量精确度为 0.2%;实验系统中气体的压力采用 GRT 型压力变送器进行测量;实验测量点的采集信号均输出到 IDCB-1 数字采集系统,由连接采集系统的计算机将采集到的信号保存。

1.3 对流受热面的结构形式

选择 3 种膜式螺旋管进行试验,如图 2 所示,该

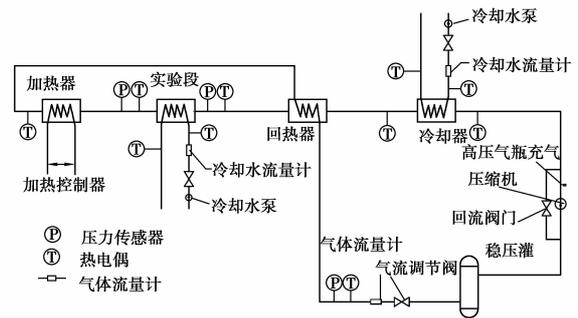


图 1 实验系统图

环形通道由 3 个同心不同直径的膜式螺旋管组成,3 圈螺旋管分别为内、中、外圈,内圈膜式螺旋管的通道采用钢板封堵不让试验气体流过,试验气体螺旋管外的环形通道内流动,冷却水在螺旋管内流动,具体尺寸见表 1,选择 3 圈进行试验,是因为工程中应用的环形通道换热面只有 3 种冲刷形式,第 1 种是内圈外侧的流体对内圈外侧进行单侧冲刷换热;第 2 种是流体对中圈换热器的双边对称冲刷换热;第 3 种是由于外圈两侧间隙不同造成的流体对外圈换热器的非对称的冲刷换热。实验中试验气体和冷却水都是采用逆流流动方式。

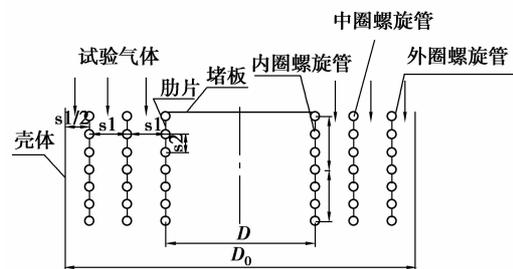


图 2 膜式螺旋管环形通道

表 1 膜式螺旋管换热器结构尺寸

d/mm	δ/mm	D/mm	S_1/d	S_2/d	L/d
10	2	150	1.6	2	13

1.4 实验气体

气化炉产生的煤气是一种多组分气体,其成分为 CO 、 H_2 、 CO_2 、 H_2O 、 CH_4 、 H_2S 、 N_2 和 COS ,其中 CO 和 H_2 的含量约为 50%~60% 和 25%~35%,是合成气的主要组成成分, CO 和 H_2 的物性对合成气传热特性的影响占主要地位,试验主要检查 CO 、 H_2 对合成气对流传热的影响。然而 CO 和 H_2 是有毒、易燃、易爆气体,考虑到安全性,实验需要采用其

他物性类似的安全气体代替 CO 和 H₂ 作为试验气体,故采用 N₂ 代替 CO,用 He 代替 H₂,分别对 2 种气体进行试验研究,并采用 N₂ 和 He 体积比为 2:1 的混气体模拟煤气进行试验研究。

2 实验结果与分析

2.1 对流换热系数的计算

将实验所采集的结果用公式(1)计算传热系数 K ,实验气体是清洁的单组份气体和气体混合物,在计算换热器化热系数时,不考虑污垢热阻的影响,利用式(2)换算对流换热系数,则式(2)变为式(3)。

$$Q = kA \Delta t_m, \quad (1)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o}}, \quad (2)$$

$$h_o = \frac{1}{\frac{1}{k} - \frac{1}{h_i} \frac{d_o}{d_i} - \frac{d_o}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i}}, \quad (3)$$

式中: Q 为膜式螺旋管内冷却水的吸热量, W ; A 为对流换热面的换热面积, m^2 ; Δt_m 为对数温差, $^{\circ}C$; K 为换热表面的传热系数, $W/m^2 \cdot K$; h_i 为水侧对流换热系数, $W/m^2 \cdot K$; λ 为换热管壁的导热系数, $W/m^2 \cdot K$; h_o 为气体的对流换热系数, $W/m^2 \cdot K$; d_o 为膜式螺旋管管子外径, mm ; d_i 为膜式螺旋管管子内径, mm 。

2.2 压力对膜式螺旋管换热系数的影响

通过对各种气体换热试验,得出了在相同温度下压力对对流换热系数的影响,由图 3~图 5 给出,从图中可见不同气体的换热系数随压力变化的趋势是相同的。在相同的温度条件下,换热系数随压力的增大逐渐增大,但其增幅越来越小,可以看出,内圈的对流换热系数远大于中圈与外圈。通过实验分析,其原因是中心通道内高温的气体在中心通道内对内圈内侧的换热表面有辐射及导热的作用,将内圈换热器的吸热量都归结为内圈外表面的对流传热,会使计算出的对流化热系数偏小,中圈的对流换热系数大于外圈,是因为外圈换热器受流体非对称冲刷造成的。从图中曲线的变化规律,可以推断通过增大压力提高换热器的换热效率是可行的,但并不是压力越大越好,在生产实践中,还要考虑到压气设备及承压设备的成本及在生产压力下的气化效率,进而得出最佳的工作压力。

2.3 膜式螺旋管环形通道换热关联式

图 6、图 7 和图 8 给出了 3 种换热方式下膜式螺旋管的 Nu 和 Re 的实验数据。由这些实验数据可

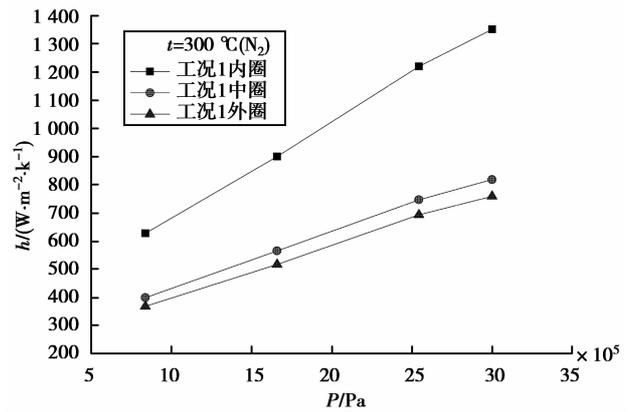


图 3 试验气体为 N₂ 时压力对对流换热系数的影响

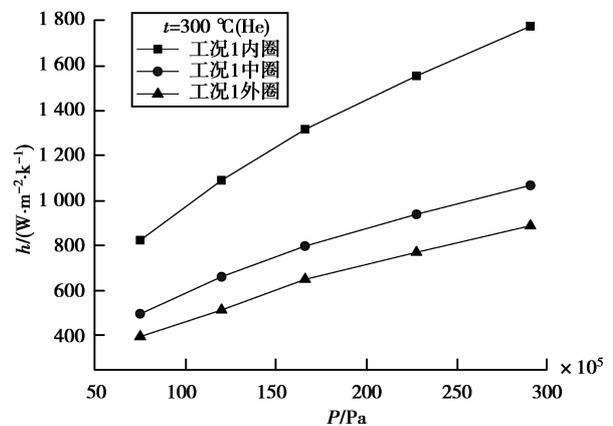


图 4 试验气体为 He 时压力对对流换热系数的影响

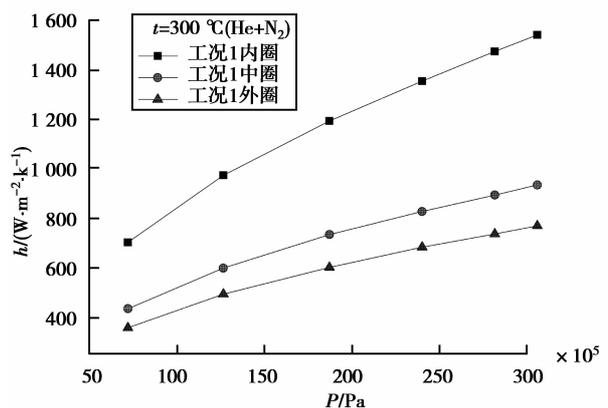


图 5 $t=300^{\circ}C$ 试验气体为 He+N₂ 时压力对对流换热系数的影响

以整理出 Nu 和 Re 的关联式,如表 2 所示。其适用范围为雷诺数 3 900 ~ 300 000,压力为 0.5 ~ 3.5 MPa。实验数据和关联式的误差均小于 10%。在实际工程应用中这样的误差是满足工程条件的。

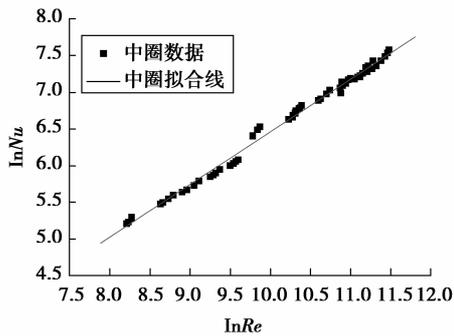


图 6 内圈数据拟合

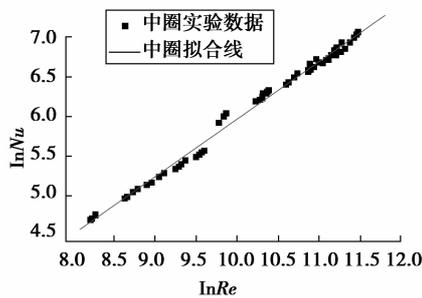


图 7 中圈数据拟合

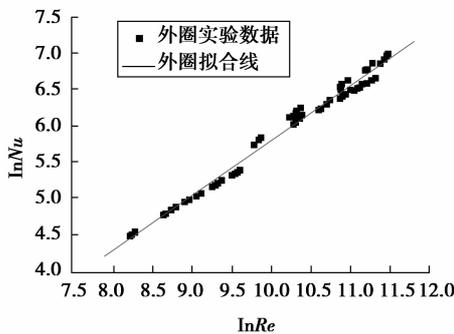


图 8 外圈数据拟合

表 2 膜式螺旋管换热拟合式

名称	Nu
内圈	$0.494 2Re^{0.7166} Pr^{0.85}$
中圈	$0.2861Re^{0.7217} Pr^{0.85}$
外圈	$0.170 9Re^{0.7559} Pr^{0.85}$

3 结 论

1) 压力对换热系数存在影响,随着压力的升高,换热系数增大。

2) 上述所列的膜式螺旋管环形通道换热器的试验关联式是在雷诺数 3 900~300 000 的范围内得到的,所以上述关联式适用于这个雷诺数范围内的传热计算,在实际工程应用中雷诺数大部分都在 3 900~300 000 范围内,所以该关联式具有很重要的工程实际意义。

3) 获得了不同冲刷条件下该管型的换热关联式。所得关联式适用于 He、N₂ 和混合气等气体。并且 3 种冲刷形式膜式螺旋管环形通道的换热系数与组合起来的膜式螺旋管环形通道换热器总的换热系数是面积加权平均的关系。

参考文献:

- [1] 韩启元,许世森.大规模煤气化技术的开发与进展[J]. 热力发电,2008,37(1):4-8.
HAN QI-YUAN, XU SHI-SEN. Development and progress in large-scale coal gasification technology[J]. Thermal Power Generation, 2008,37(1):4-8.
- [2] 许世森,张东亮,任永强.大规模煤气化技术[M].北京:化学工业出版社,2006:102-139.
- [3] 许世森,危师让.国外 4 座大型 IGCC 电站的煤气化工艺[J].中国电力,1999,32(8):60-65.
XU SHI-SEN, WEI SHI-RANG. Coal gasification technology in four large IGCC power plants abroad [J]. Electric Power,1999,32(8):60-65.
- [4] 董其伍,张垚,等.换热器[M].北京:化学工业出版社,2008:81-84.
- [5] 陈听宽,罗毓珊,胡志宏,等.超临界锅炉螺旋管圈水冷壁传热特性的研究[J].工程热物理学报,2005,25(2):247-250.
CHEN TING-KUAN, LUO YU-SHAN, HU ZHI-HONG, et al. Investigation on the heat transfer characteristics of supercritical pressure boiler spirally water wall tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 25(2): 247-250.
- [6] 唐人虎,尹飞,陈听宽.超临界变压运行直流锅炉内螺旋管螺旋管圈水冷壁的传热特性研究[J].中国电机工程学报,2005,25(16):90-95.
TANG REN-HU, YIN FEI, CHEN TING-KUAN. An investigation on heat transfer characteristics of spiral wall with internal rib in supercritical sliding-pressure operation once-through boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(16):90-95.

- hydrophobizers on the measured hydration heat development of FGD gypsum [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2008, 91 (3):225-229.
- [17] 张巨松,郑万荣,张添华,等. 影响 α 半水石膏粒度、形貌及强度的因素[J]. *沈阳建筑大学学报*, 2006, 26(6): 930-933.
ZHANG JU-SONG, ZHENG WAN-RONG, ZHANG TIAN-HUA, et al. Research of some actors on influencing the granularity, morphology and strength of Alpha-hemihydrate gypsum [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University*, 2006, 26(6):930-933.
- [18] 张巨松,孙蓬,金亮,等. 转晶剂对脱硫石膏制备 α -半水石膏形貌及强度的影响[J]. *沈阳建筑大学学报*, 2009, 25(3):521-525.
ZHANG JU-SONG, SUN PENG, JIN LIANG, et al. Influence of crystal modifier on morphology and strength of α -hemihydrate gypsum prepared by desulfurization gypsum [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University*, 2009, 25(3):521-525.
- [19] HENNING O, BROCKNER O. The optimum retarding action of citric acid on the hydration of gypsum [J]. *Zement-Kalk-Gips*, 1990(9):219-220.
- [20] 王青豪,郑辉,欧阳健明. 柠檬酸钾对尿石患者和正常人尿液凝胶中草酸钙晶体生长的影响[J]. *人工晶体学报*, 2006, 35(5):1099-1102.
WANG QING-HAO, ZHENG HUI, OUYANG JIAN-MING. Effect of potassium citrate on calcium oxalate crystallization prepared in lithogenic urines and healthy urines gel systems [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2006, 35(5):1099-1102.
- [21] VERBILOVSKII Y P, GERASHCHENKO I I, YUSHCHENKO T I, et al. Mechanochemical synthesis and study of a mixture of highly disperse silica gel with sodium and potassium chlorides, sodium Citrate and glucose [J]. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 2003, 37 (12):671-674.
- (编辑 陈移峰)
-
- (上接第85页)
- [7] 姚寿广,屠传经. 环形通道内强化传热综合热力性能分析及评价[J]. *动力工程*, 2002, 22(6): 2111-2114.
YAO SHOU-GUANG, TU CHUAN-JING. Analysis and evaluation methode for the comprehensive thermodynamic performance heat transfer enhancement in pin-fin casing tube [J]. *Power Engineering*, 2002, 22(6): 2111-2114.
- [8] 周云龙,洪文鹏,孙斌,等. 螺旋管内高压汽液两相强制对流沸腾传热试验[J]. *工程热物理学报*, 2006, 27(1): 97-99.
ZHOU YUN-LONG, HONG WEN-PENG, SUN BIN, et al. The experimental study of high pressure stem-liquid two-phase forced convection boiling heat transfer in helical-coiled tubes [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2006, 27(1):97-99.
- [9] 顾维藻. 带不同粗糙元的环形通道中的换热与阻力计算[J]. *工程热物理学报*, 1980, 1(3): 280-290.
GU WEI-ZAO. Calculation of heat transfer and frictionin concentric annuli with various forms of roughness [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 1980, 1(3): 280-290.
- [10] ZARATE J A, ROY R P, LAPORTA A. Isothermal and heated turbulent upflow in a vertical channel-part numerical simulations[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2001, 44: 1185-1199.
- [11] SADATOMI M, SATO Y. Two-phase flow in vertical noncircular channels [J]. *International Journal Multiphase Flow*, 1982, 8(6): 641-655.
- [12] MOAWED M. Experimental investigation of natural convection from vertical and horizontal helicoidal pipes in HVAC applications [J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, 46:2996-3013.
- [13] CIONCOLINI A, SANTINI L. An experimental investigation regarding the laminar to turbulent flow transition in helically coiled pipes [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2006, 30:367-380.
- [14] CONTE I, PENG X F. Numerical and experimental investigations of heat transfer performance of rectangular coil heat exchangers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29: 1799-1808.
- [15] WANG C C, LO J, LIN Y T, et al. Flow visualization of annular and delta winlet vortex generators in fin-and-tube heat exchanger application [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45: 3803-3815.
- [16] NUNTAPHAN A, KIATSIRIROAT T, WANG C C. Heat transfer and friction characteristics of crimped spiral finned heat exchangers with dehumidification[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25:327-340.
- (编辑 陈移峰)