

# 带纵肋环形烟管流动与传热试验研究

(哈尔滨工业大学) 王怀彬 杜军  
(哈尔滨理工大学) 黄波  
(哈尔滨·第七〇三研究所) 韩沐昕

**摘要:**提出了一种新型的油田加热炉强化对流换热的烟管结构——带纵内肋的环形烟管,并对其进行了流动及对流换热的试验研究,给出了换热的准则方程式。

**关键词:**纵肋; 环形烟管; 对流换热

中图分类号: TK124

## 1 引言

在油田广泛应用的U型双火筒加热炉中,烟管对流受热面的强化换热问题,一直被列为科学研究的重点。曾提出了许多强化换热的措施<sup>[1~3]</sup>,其中

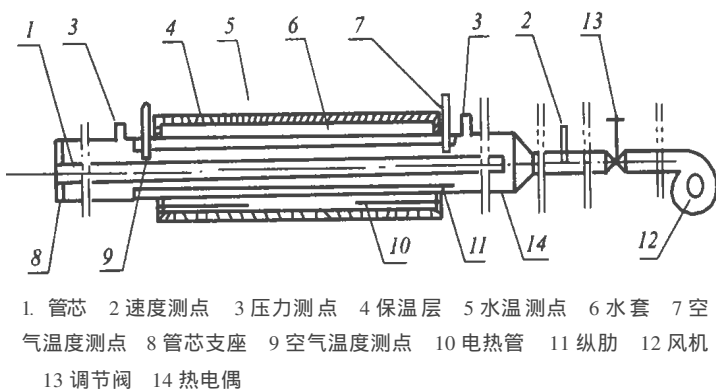


图1 试验台系统

无源强化换热方法中采用扩展表面强化效果较好,对粗糙管和内肋管的性能比较,证明了应用内肋管的最佳效果。目前关于小直径的内肋管研究较多,而对管径为600~800 mm以上的内肋管研究较少,加热炉烟管直径多在此范围内<sup>[4]</sup>。作者认为,在加热炉对流换热部分的烟管内设置纵向内肋,同样可获得良好的强化传热效果。考虑到加热炉冬夏季负荷变化较大,将引起对流受热面中烟气速度大幅度变化,从而导致该受热面积灰堵塞或传热效果急剧

下降,本文提出了一种新型的加热炉强化对流换热的烟管结构——带纵内肋的环形烟管,其芯管可视加热炉负荷的变化,有效地调节烟管内的烟速。本文对带纵内肋的环形烟管进行了初步的流动及传热规律的试验研究。

## 2 实验设备

图1所示系统是1.5 MW油田加热炉模型实验

台,比例为1:10。外筒直径 $d_1 = 80$  mm,在其内壁均匀焊有肋片数 $N = 20$ 、肋高 $H = 8$  mm的纵肋肋片。图2为带纵内肋的环形烟管试件简图(由文献<sup>[5]</sup>可知,肋片数对换热影响不显著)。实验段长度 $L = 1000$  mm,芯管采用不同的直径( $d_2 = 20$  mm、30 mm、40 mm、50 mm),芯管与外筒之间构成带纵肋的环形通道,烟管外设置有保温良好的水套,水套中均布4根电热管加热器加热,以保证均匀加热,达到试验水温,实现恒壁温换热。壁面温度由焊于壁面的热电偶测定。加热功率由水套中的电加热器确定。空气由风机送入环形通道被加热,空气进出口的温度用温度计测定,空气速度用毕托管测定,空气流量由调节阀调节。

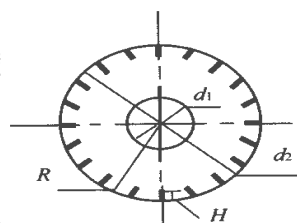


图2 带纵内肋的环形烟管试件简图

达到试验水温,实现恒壁温换热。壁面温度由焊于壁面的热电偶测定。加热功率由水套中的电加热器确定。空气由风机送入环形通道被加热,空气进出口的温度用温度计测定,空气速度用毕托管测定,空气流量由调节阀调节。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 沿程阻力试验

由沿程阻力定义式可推得不同流速下阻力系

收稿日期: 1998-12-16; 修订日期: 1999-08-24

作者简介: 韩沐昕(1973-),男,哈尔滨人,哈尔滨·第七〇三研究所工程师,硕士。邮编 150036 哈尔滨 77 信箱

数:

$$f = \frac{2d_h \Delta P}{L \rho W^2} \quad (1)$$

式中:  $\Delta P$  —— 沿程阻力, Pa

$d_h$  —— 当量直径, m

$W$  —— 工质流速, m/s  $L$  —— 沿程长度, m

$\rho$  —— 工质密度, kg/m<sup>3</sup>

工质流速用毕托管测定, 计算式如下:

$$W = \sqrt{\frac{2 \Delta P_1}{\rho} \frac{273 + t_0}{273 + t} \frac{A}{A_0}} \quad (2)$$

式中:  $\Delta P_1$  —— 斜管微压计测量的压差值, Pa

$\rho$  —— 工质密度, kg/m<sup>3</sup>

$t_0, t$  —— 分别为实验段和测速段的空气温度,

°C

$A_0, A$  —— 分别为实验段和测速段的流通截面

面积, m<sup>2</sup>

当量直径用下式求出:

$$d_h = \frac{\pi(d_1^2 - d_2^2)}{\pi(d_1 + d_2) + 2NH} \quad (3)$$

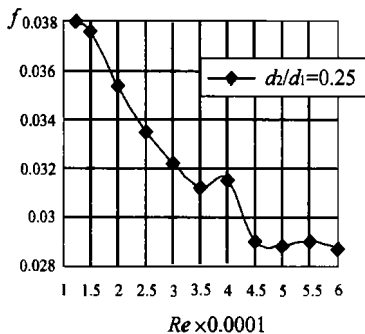


图 3 为  $d_2/d_1 = 0.25$  时, 沿程阻力系数  $f$  随  $Re$  的变化关系曲线。可以看出, 随着  $Re$  的增大,  $f$  减小; 当  $Re$  大于一定值时, 流动将进入自模化区。

图 3 沿程阻力系数  $f$  与  $Re$  的关系曲线

沿程阻力系数  $f$  随  $d_2/d_1$  变化很小。

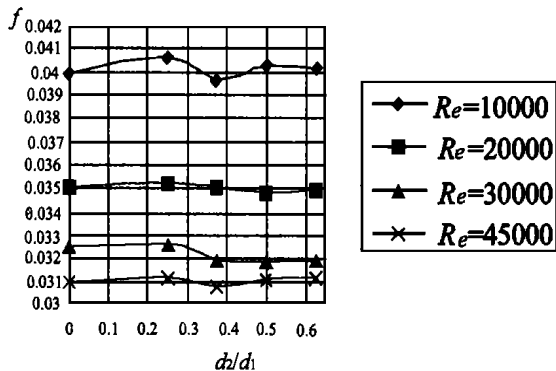


图 4 沿程阻力系数  $f$  与  $d_2/d_1$  的关系曲线

图 5 为在不同速度下沿程阻力系数  $f$  与  $d_2/d_1$  的关系曲线。可以看出, 在不同速度下, 带纵肋环形烟管沿程阻力系数与带纵肋烟管相比, 在  $d_2/d_1 = 0.25$  时沿程阻力系数增加不超过 4%。

### 3.2 传热试验

带纵肋环形烟管的对流换热系数  $\alpha$  可由下式计算:

$$\alpha = \frac{Q}{\Delta t F} \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  —— 带纵肋环形烟管受热面的换热系数, W/(m<sup>2</sup>·°C)

$\Delta t$  —— 对数平均温压, °C  $F$  —— 受热面积, m<sup>2</sup>

$$\Delta t = \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{t_1 - t_w}{t_2 - t_w}} \quad (5)$$

式中  $t_1, t_2, t_w$  分别为试验段出、进口截面空气平均温度及烟管壁面的平均温度, °C。

受热面积由下式求出:

$$F = L(\pi d_1 + 2NH) \quad (6)$$

努谢尔特数为:

$$Nu = \alpha d_h / \lambda \quad (7)$$

式中,  $\lambda$  —— 空气导热系数, W/(m·°C)

在不同的空气流速下, 进行对流换热试验, 换热系数  $\alpha$  随  $d_2/d_1$  的变化关系如图 6 所示。当  $0 \leq d_2/d_1 \leq 0.25$  时, 随  $d_2/d_1$  的增加, 由于加设肋片限制了工质流动的紊流度, 使得换热系数减小; 当  $0.25 \leq d_2/d_1 \leq 0.5$  时, 随  $d_2/d_1$  的增加,  $\alpha$  增加。原因是沿肋高方向, 肋顶部分的换热较肋根部强, 使总的换热增加; 烟管内工质流量不变时,  $d_2/d_1$  增加, 则带纵肋环形烟管区的工质平均流速增加, 从而使边界层减薄, 换热增强。在试验范围内, 带纵肋环形烟管对流换热系数比带纵肋烟管对流换热系数有

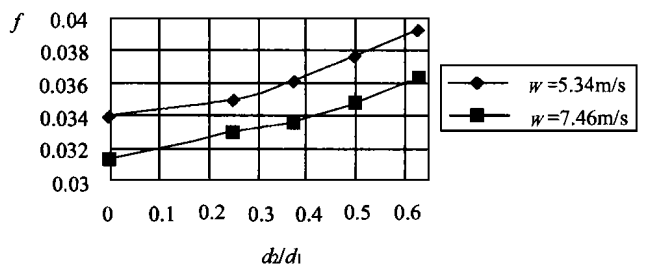


图 5 不同速度下沿程阻力系数  $f$  与  $d_2/d_1$  的关系曲线

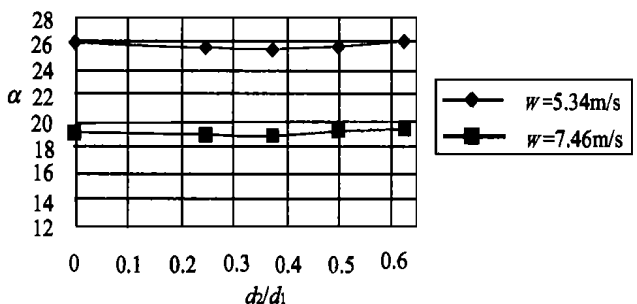


图 6 对流换热系数  $\alpha$  与  $d_2/d_1$  的关系曲线

所降低, 不超过 4%。

引入芯管修正, 对于带环形纵肋烟管的对流换热准则方程式为:

$$Nu/Nu_0 = 1 - a(d_2/d_1)^b \quad (8)$$

式中:  $Nu$ 、 $Nu_0$ ——分别是带纵肋的环形烟管及带纵肋烟管的努谢尔特数

$a$ 、 $b$ ——待定系数

对于带纵肋烟管:

$$Nu_0 = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (9)$$

式中:  $Re$ ——雷诺数,  $Pr$ ——普朗特数。

由试验确定待定系数  $a$ 、 $b$  的值为:

$$a = 0.13 \quad b = 0.57$$

换热的准则方程为:

$$Nu = Nu_0[1 - 0.13(d_2/d_1)^{0.57}] \quad (10)$$

当芯管直径  $d_2 = 0$  时,  $Nu = Nu_0$ 。

由上述试验看出, 带纵肋烟管的流动及传热效果优于带纵肋环形烟管, 但幅度不大。而带纵肋环形烟管当加热炉负荷变化时, 可由芯管有效地调节烟管内烟速, 从而避免由于负荷高、烟速大产生磨损或负荷低、烟速小产生积灰堵塞及影响传热。因此, 推荐选用带纵肋环形烟管。

### 3 结论

(1) 在带纵肋的环形烟管中沿程阻力系数  $f$  随

$Re$  增加而减小。 $Re$  大于一定值时, 流动将进入自模化区, 阻力系数  $f$  也将不再变化。

(2) 在紊流充分发展区, 对带纵肋的环形烟管及带纵肋烟管,  $Re$  相同时, 其阻力系数相差不大; 不同速度下, 在  $d_2/d_1 = 0.25$  时前者与后者相比, 沿程阻力系数增加不超过 4%。

(3) 当相对肋高  $H/R = 0.2$  时, 带纵肋的环形烟管紊流对流换热系数比带纵肋烟管的紊流对流换热系数有所降低, 但不超过 4%。

(4) 带内肋环形烟管的紊流对流换热关系式为:

$$Nu = Nu_0[1 - 0.13(d_2/d_1)^{0.57}]$$

### 参考文献

- [1] 伯特·郭尔斯. C-ENatco 公司可使 U 型管加热炉的效率提高 15%~35%. 石油工程师, 1982, 50(8):89~91
- [2] 秋林 B H. 提高火筒加热炉工作效率的途径. 机器与石油设备, 1981, (6):20~23.
- [3] Кнорре ГФ. 原油预处理的加热过程. 油矿业, 1980, (3):44~47.
- [4] 韩沐昕. 油田加热炉对流传热研究. 哈尔滨工业大学硕士论文, 1997
- [5] Patanker S V, Ivanovic M and Sparrow E u. Analysis of turbulent flow and heat transfer in internally finned tubes and annuli ASME. J. Heat Transfer, 1979, (101):29~37.

(渠 源 编辑)

### 新技术

## Sprint 喷雾中间冷却的 LM 6000 燃气轮机

据“Modern Power Systems”1998 年 9 月号报导, 在 1998 年 6 月于意大利米兰市举行的 98 年欧洲电力生产展览会上美国 GE 公司推出 Sprint 喷雾中间冷却的 LM6000 燃气轮机。

Sprint 中间冷却系统基于通过位于高压和低压压气机之间的 24 个喷雾嘴向二轴 LM 6000 燃机内喷入水雾。使用取自第八级抽气的高压空气使水雾化直径小于 20 微米的液滴。使用适当的发动机控制程序来计量水的流量。系统的雾化喷嘴将优化液滴的尺寸和水雾的分布。

由于其 30:1 的高的压比, LM 6000 十分适用于这种型式的中间冷却。通过把水雾喷入 14 级高压压气机的前面, 压气机出口温度明显降低。这就允许涡轮在与燃烧温度有关的预期的控制范围而不是在压气机出口温度限制下运行。其结果是更高的输出功率和更好的效率。

喷雾中间冷却将使 ISO 条件下的 PC/PD 型 LM 6000 输出功率增加 9%, 并使 32℃环境温度下输出功率的增加超过 20%, 同时效率略有提高。借助于每分钟向燃气轮机的压气机部分喷入 22.7—26.5 公升水, 就可使原来生产 43.5MW 功率的燃机输出 47.5MW 功率。

Sprint 技术允许营运者恢复热天损失的大部分功率, 不用承担冷却器的投资和营运费用, 并可以减少需要运行的部件。

(思娟 供稿)

**Device for Pulverized Coal-fired Boilers** [刊, 中] / Liu Shengyong, et al (Key Laboratory of Renewable Energy Sources under the Ministry of Agriculture) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 447~449

This paper expounds in detail the design and calculation of nozzles, injectors and burner cones of a liquefied petroleum gas-based ignition device for pulverized coal-fired boilers as well as ways and means for flame stabilization. Application results show that such ignition devices feature a high flame temperature, good adaptability in operation and ease of use, etc. They have broad prospects for use in utility boilers that consume no oil or only a limited amount of oil for ignition. **Key words:** pulverized coal-fired boiler, liquefied petroleum gas, forced pre-mixing, ignition device

**旋流浓淡煤粉燃烧器出口区域气固两相流动特性的实验研究 = Experimental Study of Gas-Solid Dual-phase Flow Characteristics at the Outlet Zone of a Dense-dilute Pulverized Coal-fired Swirl Burner** [刊, 中] / Li Zhiqiang, Li Rongxian, et al (Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 450~454

With the help of a three-dimensional phase Doppler particle analyzer an experimental study was conducted of the dual-phase flow characteristics at the outlet zone of a dense-dilute swirl burner. As a result, obtained are the distribution relationship of gas-solid dual-phase flow field and concentration field of the said burner under various degrees of openness of swirl blades and at different ratios of swirl secondary air and direct-flow secondary air. In addition, an analysis is also conducted of the above distribution relationship. **Key words:** dense-dilute pulverized coal-fired swirl burner, gas-solid dual-phase flow, three-dimensional Doppler particle analyzer (PDA), swirl blade openness, air flow rate proportioning

**浓淡型双调风旋流燃烧器低 NO<sub>x</sub> 特性分析 = An Analysis of the Low NO<sub>x</sub> Emission Feature of a Dense-dilute Dual-channel Swirl Burner** [刊, 中] / Yu Zhanying, Jiang Hongli, Tan Houzhang, et al (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 455~457

An experimental study is conducted of a dense-dilute dual-channel swirl burner with the help of cold-state isothermal simulation technology. On the basis of the test results the structure and features of such a burner are analyzed and a study is conducted of the characteristics of a stepped air-feed and dense-dilute combustion techniques. In addition, the major role played by a combustion stabilization ring has also been investigated. All the above has led to a better understanding of the mechanism of low NO<sub>x</sub> emission and partial load flame-stabilization of the dual-channel swirl burner. **Key words:** dual-channel swirl burner, low NO<sub>x</sub> emission, flame stabilization, experimental investigation

**带纵肋环烟管流动与传热实验研究 = An Experimental Study on the Flow and Heat Transfer in Annular Flue Gas Pipes with Longitudinal Ribs** [刊, 中] / Wang Huaibin, Du Jun, et al (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 458~460

A new type of flue gas pipe fitted with longitudinal internal ribs and featuring an intensified convection heat exchange is proposed by the authors for use on an oil-field heating boiler. An experimental study was performed of its flow and convection heat exchange with a criterion equation of heat exchange being given. **Key words:** longitudinal rib, annular flue gas pipe, convection heat exchange

**声波吹灰器的研制 = Development of a Sonic Soot Blower** [刊, 中] / Li Qiang, Sun Cengrun, Xuan Yimin (Nanjing University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 461~462

Based on the principle of hydrodynamics and acoustic resonance the authors have developed a sonic soot blower for use on heat exchangers. A relevant experimental test has been performed of its acoustic intensity performance. The experimental test and industrial application results show that the sonic soot blower under discussion can effectively remove soot deposits from heat exchangers. **Key words:** boiler, heat exchanger, sonic wave, sootblowing

**一种汽轮机转子的热应力测试系统 = A Test System for Measuring Thermal Stresses in Turbine Rotors** [刊, 中] / Gao Jingbo, Wu Xinhua, Xia Songbo, et al (Harbin Institute of technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 463~464

This paper focuses on a new system for measuring turbine rotor thermal stresses. The use of a difference measur-