

机械设备

板式换热器作为压缩机冷却器时的
传热和流阻性能*

曾文良 林培森 王世平 张正国

华南理工大学国家教育部传热与节能开放实验室(广东省广州市 510640)

摘要: 以现场的压缩空气为实验工质,对压缩空气在入字形波纹板式换热器的传热与流阻性能进行实验研究。研究结果表明,与传统的光滑管弓形隔板换热器相比,板式换热器能非常有效地强化空气侧的膜传热系数。但是板式换热器的膜传热系数是花瓣状翅片管(PF管)螺旋隔板换热器的30%~40%(以换热外表面积计算),是低肋管螺旋隔板换热器的40%~50%,然而其压力损失却是PF管螺旋隔板换热器的3~5倍,是低肋管螺旋隔板换热器的1.7~3倍。此外还从传热与流阻性能、传热效率、紧凑性和经济性等方面对板式换热器的整体性能进行了评价。

关键词: 板式换热器 压缩机 流出物 冷却器 传热系数 流体流动 压力降 实验数据

板式换热器是一种高效、紧凑的换热设备。尽管其发展已有近百年历史,且在一些部门(如食品、制药)有着比较广泛的应用,但是由于其耐温、耐压、耐腐蚀能力不足而制约了其应用范围。20世纪80年代以来,由于制造技术、垫片材料的不断进步以及传热理论不断完善,板式换热器的应用越来越受到重视。鉴于目前国内有部分厂家已经选用或者正打算选用板式换热器作为压缩机级间冷却器,但是工艺设计缺少基础数据,华南理工大学国家教育部传热与节能开放实验室开展了这方面的实验研究。

1 实验流程与方法

实验分两种方案进行,一种是保持冷却水流量不变,依次改变空气的体积流量,通过传热系数的分离求出空气侧的对流传热系数;另一种方案是保持空气的流量不变,依次改变冷却水的流量来考察冷却水对总传热系数的影响。实验过程中使用的仪表都是经过校正的,完全能够满足实验要求。该实验所用的两种换热器的几何结构参数见表1。

2 实验数据关联

2.1 传热性能数据关联

传热关联采用经验公式,关联结果如下,关联数据误差不大于±10%。

表1 实验用板式换热器的主要结构参数

换热器编号	No. 1	No. 2
板片波纹型式	人字形	人字形
板片尺寸/mm	240×650	240×650
单板面积/m ²	0.11	0.11
总板数/片	29	14
程数(气/水)	2/2	1/1

对于 No. 1 板式换热器

$$Nu_w = 0.145 8Re^{0.749 02} Pr^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0.14} \quad (1)$$

$$Nu_a = 0.003 643 7Re^{1.097 05} Pr^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0.14} \quad (2)$$

对于 No. 2 板式换热器

$$Nu_w = 0.145 8Re^{0.749 02} Pr^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0.14} \quad (3)$$

$$Nu_a = 0.034 395 1Re^{0.860 58} Pr^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0.14} \quad (4)$$

式中: Nu_w ——冷却水侧的努塞尔数;

Nu_a ——空气侧的努塞尔数;

Re ——雷诺数;

Pr ——普朗特数;

μ ——定性温度下的动力粘度, Pa·s;

μ_w ——传热管壁温度下的动力粘度, Pa·s。

2.2 流阻性能数据关联

板式换热器的压力降计算可采用以下公式

收稿日期: 1999-07-25; 修改稿收到日期: 2000-01-17。

作者简介: 曾文良, 硕士研究生, 1991年毕业于广东石油化工高等专科学校, 毕业后曾先后在长岭炼油化工总厂烷基化和MTBE等装置工作, 1997年考入华南理工大学攻读硕士学位。

* 本研究项目得到广东省自然科学基金的资助。

$$Eu = \frac{2\Delta P}{\rho u^2} \quad (5)$$

式中: Eu ——欧拉数;

ΔP ——压力降, Pa;

ρ ——流体密度, kg/m^3 ;

u ——流体流速, m/s 。

故可采用以下形式对实验数据进行关联, 关联结果如下, 关联数据误差不大于 $\pm 20\%$ 。

对于 No. 1 板式换热器

$$Eu_w = 5845.98Re^{-0.22347} (\mu/\mu_w)^{0.14} \quad (6)$$

$$Eu_a = 3536.45Re^{-0.29875} (\mu/\mu_w)^{0.14} \quad (7)$$

对于 No. 2 板式换热器

$$Eu_w = 3535.35Re^{-0.22125} (\mu/\mu_w)^{0.14} \quad (8)$$

$$Eu_a = 2920.25Re^{-0.21859} (\mu/\mu_w)^{0.14} \quad (9)$$

式中: Eu_w ——冷却水侧的欧拉数;

Eu_a ——空气侧的欧拉数。

3 实验结果及分析

3.1 传热性能实验

图1是空气侧膜传热系数与气体体流量的关系曲线, 并与空气在花瓣状翅片管(简称PF管)和低肋管螺旋隔板换热器壳程的膜传热系数进行对比; 图2是总传热系数与气体体流量的关系曲线, 且与PF管和低肋管螺旋隔板换热器的总传热系数进行对比。从图1和图2可以看出, 对于单程和两程的换热器空气侧膜传热系数和总传热系数随气体体流量的变化基本一致, 这充分说明该实验的重复性较好。由于板式换热器板片波纹的存在, 极大地激发了流体流动过程中的湍动强度, 大大地降低了流体达到湍流的临界雷诺数, 很大程度地强化了对流传热系数, 与光滑管弓形隔板换热器相比, 有了一个很大的飞跃(一般情况下空气在光滑管弓形隔板换热器壳程的膜传热系数在 $50 \sim 250 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 之间), 但是与空气在PF管和低肋管螺旋隔板换热器的壳程的传热性能相比较, 其膜传热系数是PF管螺旋隔板换热器的 $30\% \sim 40\%$, 是低肋管螺旋隔板换热器的 $40\% \sim 50\%$ 。这主要是因为, 一方面粗糙壁面传热管有效地扩充了传热外表面积; 另一方面流体在螺旋流道内流动时, 管束的外表面粗糙元非常能有效地激发流体的湍动强度, 减少换热器壳程的传热热阻。

雷诺数 Re 的关系曲线, 其结果基本上与文献值接近^[1,2]。

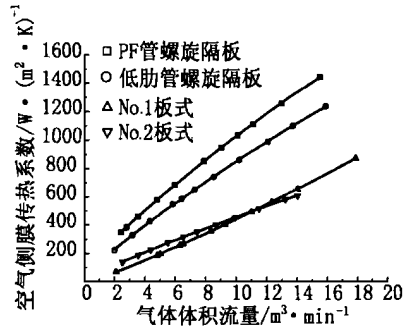


图1 空气侧膜传热系数与气体体流量的关系

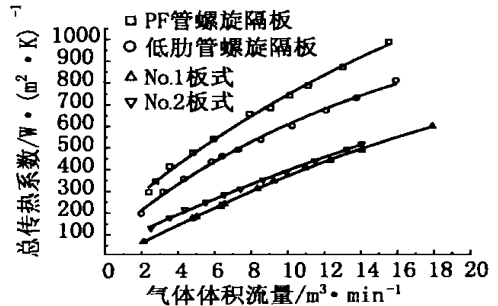


图2 总传热系数与气体体流量的关系

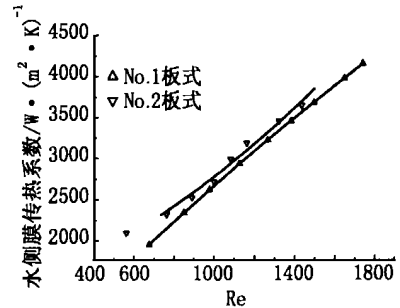


图3 水侧膜传热系数与其 Re 关系

3.2 流阻性能实验

图4是空气侧的压力降与气体体流量的关系曲线, 且与螺旋隔板换热器的流动压力降进行比较。从图4可以看出, 在同等的传热量下, 板式换热器的流动压力降是PF管螺旋隔板换热器的 $3 \sim 5$ 倍, 是低肋管螺旋隔板换热器的 $1.7 \sim 3$ 倍。板式换热器的压力降大的主要原因, 是由于板片波纹一方面强化流体流动的湍动强度, 激发漩涡的产生, 强化了流体的传热性能, 然而另一方面, 漩涡的产生在很大程度上增加了流体流动过程中的形体阻力, 而不是将流动过程中的压力损失有效地转化为传热系数的提高。但是对于螺旋隔板换热器, 特别是PF管螺旋隔板换热器, 由于流体流过管外三维翅片时, 流体与翅片以发生剪切运动为主, 而不断间隔的翅片又使得流体的传热和

图3是板式换热器水侧的对流传热系数与其

流动边界层不断发生分离,从而达到提高对流传热系数、降低流动压力降的双重目的,也就是有效地将压力降转化为传热系数的提高。图 5 是水侧流动压力降与其雷诺数 Re 的关系曲线,其结果与文献[1, 2]所提供的参考值基本上接近,这也进一步说明该实验的可靠性和准确性。

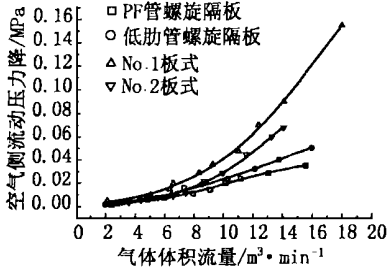


图 4 空气侧流动的压力降与气体体积流量的关系

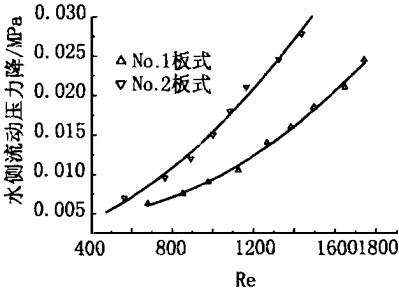


图 5 水侧流动压力降与其 Re 的关系

4 板式换热器的强化传热性能评价

文献[3]所提供的强化传热评价方法主要是从换热器的传热与流阻两个方面来进行评价的。图 6 是板式换热器空气侧的膜传热系数与其压力降的关系曲线,且与 PF 管和低肋管螺旋隔板换热器进行对比。从图 6 可以发现,板式换热器的传热与流阻性能远远低于 PF 管和低肋管螺旋隔板换热器。

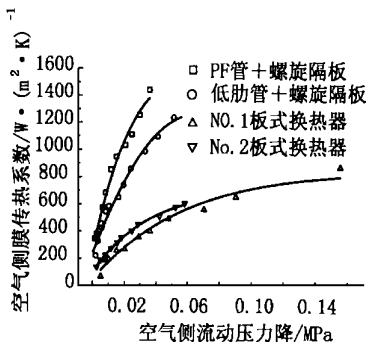


图 6 空气侧膜传热系数与其压力降的关系

从传热效率上来考察板式换热器的性能,不难发现板式换热器有它独特的优点,那就是传热效率高。图 7 是传热效率与传热单元数的关系曲

线,其中有关 1-2 型管壳式换热器的数据摘自文献 [4]。从图 7 可以看出,板式换热器的传热效率远远高出 1-2 型管壳式换热器,这主要是因为对于板式换热器,两侧流体完全呈逆流流动,而且流体在板片间流动过程中的返混极小,从而能够最大限度地减少传热过程的温差,减少换热过程的有效能损失,可以有效地提高有效能的利用效率。

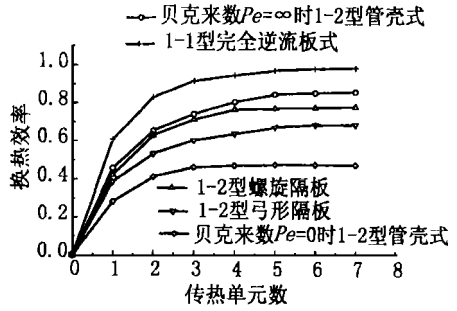


图 7 传热效率与传热单元数的关系

从紧凑性和经济性来分析板式换热器,板式换热器是当前公认的紧凑换热设备,单位体积的换热能力远远大于光滑管弓形隔板换热器,且大于 PF 管和低肋管等粗糙壁面传热管螺旋隔板换热器;在经济性方面,由于制造技术的不断进步,其价格在不断下降,性能价格比不断上升。

5 结论

板式换热器用于压缩空气的冷却时,其强化传热性能比普通的弓形隔板换热器有了一个很大的飞跃,但是与 PF 管螺旋隔板换热器相比,其传热和流阻性能相差甚远。当前由于螺旋隔板换热器制造困难,而板式换热器的价格在不断下降,垫片材料在不断发展,如果能够选择合适的垫片材料,将板式换热器应用于压缩机冷却器是可行的。板式换热器由于具有传热效率高的优点,因此最适合用于低温差过程的换热,也就是工艺过程的热回收和冷回收,最大限度地减少换热过程的有效能损失。

参考文献

- 1 杨崇麟. 板式换热器工程设计手册, 北京: 机械工业出版社, 1995. 54- 79
- 2 Muley A, Manglik R M. Enhanced heat transfer, 1997, 4: 187~ 201
- 3 林宗虎. 强化传热及其工程应用, 北京: 机械工业出版社, 1986. 7~ 11
- 4 Karal D, et al. Heat transfer engineering, 1996, 17(1): 93~ 100

(编辑 吕艳芬)

HEAT TRANSFER AND PRESSURE DROP INVESTIGATION OF PLATE HEAT EXCHANGER AS INTER-STAGE COOLER OF AIR COMPRESSOR

Zeng Wenliang, Lin Peisen, Wang Shiping, Zhang Zhengguo

*Open Laboratory of Heat Transfer and Energy Conservation of State Educational Ministry,
South China Institute of Technology (Guangzhou, Guangdong 510640)*

Abstract Using compressed air as working medium, heat transfer and pressure drop characteristics of compressed air in mixed Chevron bellows plate heat exchanger were tested. The results showed that compared to conventional smooth segment baffle heat exchanger, the plate heat exchanger (PHE) can effectively strengthen the film heat transfer coefficient of the shell side. The film heat transfer coefficient of the PHE is 30% ~ 40% of the PF (petal-shaped fin tubes) or 40% ~ 50% of the LF (low-finned tubes) heat exchanger. While the pressure drop of PHE is 3 ~ 5 times that PF helical baffle heat exchanger and 1.7 ~ 3 times that the LF helical baffle heat exchanger. The bulk characteristics of the PHE were evaluated from heat transfer and pressure drop characteristics, heat transfer efficiency, compactness and economic characters etc.

Keywords plate heat exchanger, compressor, cooler, heat transfer coefficient, fluid flow, pressure drop, experimental data

国内简讯

克拉玛依石油化工厂制氢装置脱碳系统完成改造

克拉玛依石油化工厂的烃类-蒸汽转化法制氢装置于1993年底建成投产,以天然气为原料,原设计产氢量为7500 m³/h。该制氢装置是利用引进的德国二手设备改造而成的,由脱硫、转化、中温变换、低温变换、MEA(单乙醇胺)脱碳、甲烷化工序组成。MEA脱碳工艺为五六十年代的流行工艺,存在着设备腐蚀严重、设备维护量大、产品氢纯度相对较低、能耗过高、环境污染和越冬困难等缺点和不足,因此利用1999年装置大修机会,将该脱碳工艺改造为目前比较先进的变压吸附脱碳-氢提纯工艺。改造中拆除了原来的MEA溶液脱二氧化碳系统,对原主工艺流程作了适当调整;变压吸附部分由成都华西化工研究所总承包。六个多月的运行情况表明,改造效果良好。产品氢气的纯度由90%~96%提高到99.9%以上,产品质量有了明显改善。氢纯度提高后中压加氢装置的需氢量明显减少,从3200~3600 m³/h降为1500~2200 m³/h。装置改造后由于原材料和动力消耗量减少,因此每年的操作费用可降低约145×10⁴ RMB'。

改造后从根本上解决了脱碳系统的腐蚀问题,设备的检修和维护量大大减少,其费用也相应降低。

改造前气体在经过吸收塔时易夹带液体,串入氢压机后会造成二级活塞烧损,改造后提高了氢压机的安全运行性能。

改造前脱碳系统空冷存在冬季易冻的问题,改造后此问题不再存在,提高了装置运行的安全稳定性。

改造后操作大大简化,正常情况下可实现无人操作。

装置改造时因多种原因,未考虑PSA解吸气的利用问题,将解吸气直接排放大气。解吸气中含有较多的可燃气体(如H₂, CH₄, CO),排放大气一方面造成了浪费;另一方面也污染了环境。目前国内外大部分烃类-蒸汽转化工艺制氢装置,当脱碳系统采用PSA工艺时,一般都应将解吸气引至转化炉作为燃料进行利用。因此在该装置下一次改造时,可以考虑将真空缓冲罐改为解吸气缓冲罐,增加一台消音器,将解吸气作为转化炉燃料加以利用。

(克拉玛依石油化工厂 张勇供稿)