

技术综述

文章编号: 1000-7466(2006)03-0043-05

紧凑式换热器性能比较及经济性分析

吴 恩¹, 周帼彦², 涂善东^{1,2}

(1. 南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 210009;

2. 华东理工大学 机械与动力工程学院, 上海 200237)

摘要: 在与管壳式换热器对比分析的基础上, 综合说明了常用紧凑式换热器的结构、性能及应用情况。通过具体的工程案例, 对板翅式换热器和热管换热器进行了性能比较及经济性分析, 为换热器的投资、选型提供了工程依据。

关键词: 换热器; 紧凑式; 经济性分析; 性能

中图分类号: TQ 051.501 **文献标识码:** A

Performance comparison and economic analysis of compact heat exchangers

WU En¹, ZHOU Guo-yan², TU Shan-dong^{1,2}

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology,

Nanjing 210009, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering, East

China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Compared with the conventional shell-and-tube heat exchanger, the constructions, performances and applications of various compact heat exchangers which are used widely in industries are discussed. Furthermore, based on a practical case, the performances and economic parameters of plate-fin type and heat-pipe type heat exchangers have been analyzed, which provides the basis for the investment and optimal selection of the heat exchangers.

Key words: heat exchanger; compact; economic analysis; performance

换热器是热力系统的关键设备之一, 为了节能降耗, 提高工业生产经济效益, 要求开发适用于不同工况要求的高效能换热设备。作为换热设备的主要性能指标, 高效性和紧凑性已成为近几十年来工程设计和理论研究人员的主要研究目标。

与传统换热器相比, 紧凑型换热器优越性表现在: 结构设计能诱使流体产生湍流流动以获得较高传热系数。阻止污垢形成使污垢系数较小。流程设计使冷、热流体间温差推动力达到最大值。

根据不同的工艺条件和操作工况, 近年来开发

设计了多种不同结构形式的紧凑式换热器, 已在石油、化工和制药等行业得到了广泛应用^[1~3]。其中, 板式换热器、板翅式换热器、螺旋板式换热器和热管换热器具有较为广阔的发展前景。文中分别通过这4种换热器与管壳式换热器的比较, 对紧凑式换热器的结构、性能、应用及研究进展进行了综合说明。进而以氨冷却器的设计为例, 从性能和经济性方面对常见紧凑式换热器进行了具体的分析说明。

1 板式换热器

板式换热器是以波纹板为传热面的高效、紧凑型

收稿日期: 2005-11-28

基金项目: 2004年度中石油风险创新基金项目

作者简介: 吴 恩(1980-), 女(汉族), 江苏无锡人, 在读硕士研究生, 从事高效换热设备的研究。

换热器, 早期被广泛用于食品和饮料工业, 近几年, 其应用领域扩展到化工、加工及联合工业。基于对安全性与可靠性的考虑, 使用板式换热器将会成为满足传热要求的一种经济型方法^[4]。

1.1 基本型式及特点

板式换热器有垫片密封式、半焊接式、AflaRex 全焊接式、钎焊式、Bavex 全焊接式、Platula 全焊接式、Compabloc 全焊接式及 Packinox 全焊接式等结构形式, 具有传热效率高、阻力小、结构紧凑、拆装方便及操作灵活等优点, 主要应用于供热和空调工程。

1.2 与管壳式换热器比较及应用

板式换热器紊流性高, 污垢系数极小, 在适宜工况条件下总传热系数可达 $8\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。而传统管壳式换热器传热系数还不到 $2\,500\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

曾文良等以现场的压缩空气为试验工质, 对入字形波纹板式换热器传热与流阻性能进行了试验研究, 给出了传热效率与传热单元数 NTU 的关系曲线, 见图 1^[5]。由图可知, 板式换热器的传热效率远高于 1-2 型管壳式换热器的传热效率。这主要是由于板式换热器两侧流体完全呈逆流流动, 且板片间流体返混极小, 从而最大限度地减小了传热过程的温差及有效能损失, 极大提高了有效能的利用率。

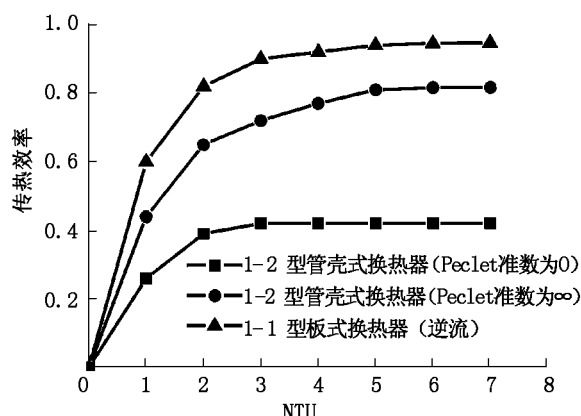


图 1 传热效率与传热单元数的关系

板式换热器突出的紧凑性和高效性也逐渐被重视, 进而在某些领域逐步代替管壳式换热器, 取得了较好的经济效益。AAD(Australian Antarctic Division) 采用板式换热器回收电力系统中产生的废热来给地面站房屋供暖^[6]。2003 年底, Casey 站试运行 Alfa Laval 板式换热器代替原管壳式换热器。全负荷运行下, 板式换热器回收热量为 113 kW , 提高了 30%, 而采用板式换热器所需要的维修保养费用还不到管壳式换热器的 50%。张家港某厂在联碱生产中, 采用 2 台入字形波纹板式换热器串联在联碱过程替代管壳式换热器, 节电收益 102.348 万元/a , 间

接创收 65.175 万元/a ^[7]。

目前, 对板式换热器的研究还在继续深入。Vlasogiannis 等尝试在板式换热器中采用两相流介质, 即采用空气和水的混合物作为冷流^[8]。试验发现, 用气液混合物做冷流时, 两相传热系数随水流速度的增加而增加, 并且所测得的传热系数比单用水做冷流的传热系数要高。

2 板翅式换热器

板翅式换热器可满足对流、错流、逆流及错逆流换热, 便于多股流流道布置, 可进行气-液、气-气、液-液间的冷却、冷凝和蒸发等过程, 是最有发展前途的新型换热设备之一。随着技术和加工工艺的提高, 对高性能板翅式换热器的研究更加深入, 其设计已向微通道和耐高压方向发展, 应用领域扩展到石油化工、空分、航空、船舶、车辆及原子能等行业。

2.1 基本型式及特点

板翅式换热器有钎焊和扩散焊 2 种基本结合型式。大多数热交换工况采用的是真空钎焊的铝制板翅式换热器, 对于腐蚀性较强的介质, 可选用真空钎焊的不锈钢板翅式换热器和钛板翅式换热器。装配时, 扩散焊比钎焊具有更多优点, 而后者具有较高的强度和较强的耐腐蚀性。

板翅式换热器的翅片有锯齿形、平直形和多孔形等型式, 可根据不同操作条件选择适宜翅片。翅片的扩展面和翅片对流体的扰流能力决定了热交换能力, 因此板翅式换热器具有结构紧凑、轻巧及传热效率高等特点。如, 微通道换热器的通道尺寸可达 $90\text{ }\mu\text{m} \times 95\text{ }\mu\text{m}$, 换热比表面积高达 $15\,000\text{ m}^2/\text{m}^3$ ^[9], 而列管式换热器一般仅为 $160\text{ m}^2/\text{m}^3$ 。国内研究开发的高压板翅式换热器耐压能力为 8 MPa , 其质量还不到管壳式换热器的 $1/5 \sim 1/10$ ^[10]。

2.2 与管壳式换热器比较及应用

在北海海洋平台上采用纯钛扩散焊接式板翅式换热器和管壳式换热器作为气体冷却器的情况对比见表 1^[11], 可见板翅式换热器具有明显的优势。

表 1 板翅式换热器与管壳式换热器对比

项 目	Rolls Laval 板翅式换热器	管壳式换热器
材料	纯钛	纯钛
设计压力/MPa	6.4	6.4
长度/m	1.1	10.0
宽度/m	1.0	1.3
空机质量/t	3.7	18.0
操作质量/t	4.0	28.0

烟台通用板翅式换热器厂为液压挖掘机配套的液压油冷却器采用了铝制板翅式换热器, 台架试验

表明,该机冷却器散热系数为 6135 机油冷却器(管壳式换热器)的 11.5 倍,散热效率为后者的 7.6 倍,散热能力是后者的 3 倍,质量仅为后者的 $1/3^{[12]}$ 。其散热性能优越,已应用于许多工程机械中。

研究发现,通过对板翅式换热器结构的优化,可获得更高的传热效率。焦安军等通过研究导流角度 α 下导流片的导流特性,发现 $\alpha=45^\circ$ 时的导流片具有良好的导流性能,而阻力特性没有较大变化^[9]。Wen 和 Li 提出对板翅式换热器封头的结构进行改进,通过在封头中安装一个尺寸合适的微孔挡板可有效改善流动时出现的流体分布不均匀情况^[13]。

3 螺旋板式换热器

螺旋板式换热器是一种由螺旋状传热板片构成的高效间壁式传热设备,其流道内的 2 种介质获得相同的流动性质,这种设计使其接近于理想热传递设备^[11]。对于易堵塞或被颗粒污染的流体,螺旋板式换热器更是理想的结构,其单一的螺旋形通道结构使得流道内流体对污垢有自冲刷作用。

3.1 基本型式及特点

螺旋板式换热器有型、型和型 3 种基本形式。螺旋板式换热器的两侧流动条件最优,流体流动均匀,不存在死角。其温度分布均匀,不存在冷角或热角,热效率和热传递因子也较高,可用于小温差传热,出口温度控制准确。移动 1 个端盖,就可以露出通道的整个表面,易于检查、清洁和维修。

3.2 与管壳式换热器比较及应用

工作条件相同的情况下,螺旋板式换热器的换热面积为 90 m^2 ,板式换热器的换热面积为 60 m^2 ,而管壳式换热器的换热面积为 $125\text{ m}^2^{[11]}$ 。三者之中螺旋板式换热器的外形尺寸最小。

在氨水生产过程中,郑燕萍和倪晓斌用 1 台螺旋板式换热器取代了原来一组管壳式换热器^[14]。分析表明,两者传热系数比为 2.69,单位面积传热量比为 3.27,工艺中的吸氨效率从 78% 提高到 96%。新疆八一钢铁集团某公司将管壳式废水冷却器改为高效节能的螺旋板式换热器,需要换热面积从 440 m^2 降低到 240 m^2 ,废水体积流量从原来的 $20\text{ m}^3/\text{h}$ 提高到 $40\text{ m}^3/\text{h}$,大大节约了低温水用量,换热效果及节能效果显著提高^[15]。

王如竹等将螺旋板式换热器其中一个通道作为热流体流道,另一个通道装入吸附剂密封起来作为吸附床,顶端法兰上带有吸附流道和解吸流道,用这样一个吸收式制冷机做制冷试验^[16]。结果表明,作为吸附设备的螺旋板式换热器适于吸附制冷系统,

其良好的传热性能使得吸附系统循环时间较短。

螺旋板式换热器在化工流程的紧凑化方面有很大的发展空间。陈亚平等采用降膜型螺旋板式换热器代替管壳式换热器应用于发生精馏器,试验发现组成的螺旋板式氨水吸收式制冷机结构紧凑且可以实现连续操作^[17]。此降膜型螺旋板式换热器还可以应用于其他化工流程。

4 热管换热器

热管是 20 世纪 60 年代中期发展起来的一种新型高效的传热元件,其导热能力可达优良金属导体的 $10^3\sim 10^4$ 倍,有超导体之称^[18]。在过去的 10 a 中,紧凑式热管换热器因其热效率高、尺寸小及设计灵活,在微小型热泵、制冷、气体及冷量存储系统小型化方面十分受欢迎^[19]。

4.1 基本型式及特点

热管束或两相热虹吸设备是热管换热器的重要概念,换热器中的热管可以分为蒸发段、绝热段和冷凝段 3 个部分。新热管包括传统热管、热管面板、回路热管、蒸汽动力学热虹吸管、微小型/小型热管和吸附热管等。不同型式的热管制成的热交换器的应用领域不同,如热管面板应用于热泵及制冷方面,吸附循环中成对应用蒸汽动力学热管和回路热管,小型热管用于电子散热或制冷方面。在吸附热管的一段设置吸附床,另一段设置冷凝设备或蒸发设备,这样比传统热管具有更大的传热传质作用^[19]。

热管换热器不需要其他动力设备,只要制定合适的交错面距离,就可以传递大量热量。其设计及制造简单方便,应用温度范围大($4\sim 3\,000\text{ K}$)。在各种温度下,可通过改变热流密度来输出热量,这是热管式换热的独特特性。作为冷凝器和蒸发器的热管换热器传热系数为 $10^3\sim 10^5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,热管热阻为 $0.001\sim 0.003\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$,因此紧凑度较高。

4.2 与管壳式换热器比较及应用

美国休斯飞机公司对热管换热器和其他类型的换热器进行了比较和评定,结果只有板翅式换热器的综合指标比较接近热管换热器^[20]。

秦皇岛市某厂采用了 RFG-480 型热管废热锅炉对 3 台造气炉进行集中余热回收^[21]。与原列管式废热锅炉系统相比,采用热管废热锅炉降低了系统阻力,单炉每小时发气量平均提高了 10%,同时入炉煤耗下降 20%,洗气水耗、电耗下降了 30%,工艺余热得到了充分回收。

Wu 等在试验条件下研究了空调系统中采用热管换热器对相对湿度控制的影响^[22]。试验结果表

明,采用热管换热器以后,空气流中的相对湿度降低至 70%~74%,说明在该空调系统中,几乎不需要额外的能量来预热输出空气,而系统的冷却能力也提高了 20%~32.7%。

5 紧凑式换热器与管壳式换热器比较算例

紧凑式换热器具有比表面积较高、NTU 较大以及传热特性较优等特点,板翅式换热器和热管换热器尤为突出。文中以氨冷却器为例,分别采用板翅式和热管式设计形式,与传统管壳式设计形式进行质量、体积及压降等指标的比较分析,氨冷却器工

艺参数见表 2。

表 2 氨冷却器工艺参数

工艺参数	热侧	冷侧
介质	甲醇+ 氨气	空气
进口温度/℃	450	23
出口温度/℃	40	—
体积流量(标准状态)/m ³ ·h ⁻¹	896	4 505

5.1 性能比较

用 VB6.0 编译程序完成设计计算,设计所选用换热器的结构、参数及计算结果见表 3。

表 3 各种型式换热器参数

结 构	板翅式换热器	热管换热器	管壳式换热器
壳体材料	316L+ LF2	碳钢	碳钢
管材	—	水-碳钢热管	碳钢
类型	平直翅片	常温热管换热器	U1000 4 1.0 274
流体流动类型	错流	逆流	—
管子排列方式	—	等边叉排	正三角形排列
设备数/台	2(串联)	1	1
换热面积/m ²	6.08(热侧)/43.24(冷侧)+ 58.50 (热侧)/109.28(冷侧)	141.11(热侧)/423.33(冷侧)	116.67(热侧)/116.67(冷侧)
质量/kg	235.04+ 128.33	5 732.93	18 429.58
体积/m ³	0.55+ 0.37	3.24	6.50
比表面积/m ² ·m ⁻³	145/306	125	36
压降/kPa	0.42(热侧)/0.31(冷侧)+ 0.32(热侧)/0.74(冷侧)	0.11(热侧)/0.56(冷侧)	1.15(热侧)/9.67(冷侧)

表 3 表明,采用紧凑式换热器设计的氨冷却器不仅在质量、体积上大大低于采用传统管壳式换热器设计的氨冷却器,而且在压降上也具有很大的优势。从换热器的比表面积来看,铝制板翅式换热器的比表面积最大,热管换热器的次之,都远高于管壳式换热器。较高的比表面积体现了换热器在紧凑性上的优势。从如图 2 所示的换热器质量与体积比较图中可以分析出,铝制板翅式换热器在质量、体积以及比表面积上都表现出很大的优势。

5.2 经济性分析

技术经济学作为实现投资决策科学化的重要手段,在技术领域已得到越来越广泛的应用^[23]。为了正确反映对氨冷却器投资方案的选择,文中分别采用费用现值与费用年值法及年计算费用法对拟定的这 3 个技术方案进行经济性分析。

5.2.1 费用现值与费用年值法

费用现值与费用年值法是费用类相对经济效益指标,费用现值与费用年值越小,其方案经济效益越好。设石化行业基准收益率 i_c 为 13.1%^[24]。费用现值与费用年值比较见表 4,综合评定结果以选用板翅式换热器为优选方案。

表 4 费用现值与费用年值比较 万元/a

方案	总投资 K	年成本 C	费用现值 Z_1 ¹⁾	费用年值 Z_2 ²⁾
板翅式换热器	7.35	1.866	21.594	2.829
热管换热器	13.11	1.589	25.240	3.306
管壳式换热器	32.53	14.719	144.889	18.980

注: 1) $Z_1 = K + C/i_c$

2) $Z_2 = C + i_c K$

5.2.2 年计算费用法

在经济计算中,不同换热器设备因使用年限不同,其维修费用和折旧费用也不相同,为此,需将不同条件所引起的费用计算条件通过折算,变为具有相同可比条件的技术经济指标进行比较与分析,这种计算方法就是年计算费用法。设国家规定的设备投资回收年限为 5 a,计算得到采用板翅式换热器、热管换热器和管壳式换热器的年计算费用分别为 3.336 万元、4.211 万元和 21.225 万元,可见采用 2 台板翅式换热器串联作为氨冷却器为最优方案。

通过设计计算分析和两种技术经济指标的计算分析,可以看出采用板翅式换热器不但紧凑性高,而且其经济性优势突出。

6 结语

文中在分析紧凑式换热器结构型式、特点及应

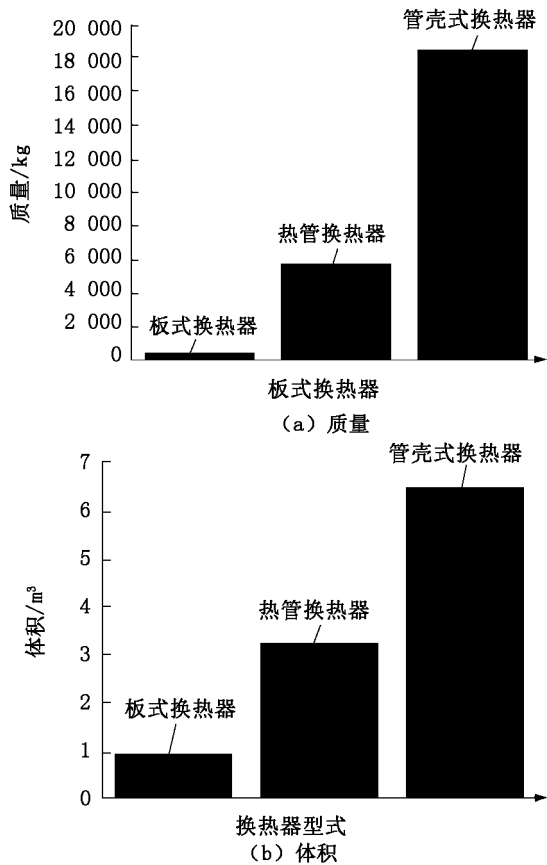


图 2 3 种换热器质量及体积比较

用的基础上,以氨冷却器为例,对紧凑式换热器以及管壳式换热器的性能进行了设计计算比较和经济性分析。结果表明,在相同的操作条件下,板翅式换热器具有较高的传热面积密度和传热效率,并且投资比较小,相对于管壳式换热器,其在质量、体积和能量消耗上都具有明显的优势。而在紧凑式换热器中,板翅式换热器在压降上的优势略低于热管换热器,从而使年运行费用微高于热管换热器年运行费用,但其初期投资较小,从而使在 5 a 回收期内承担的年计算费用较低。板翅式换热器各项指标均优于其它形式的换热器,可作为工程企业换热设备的首选形式。

致谢:南京工业大学凌祥教授、虞斌副教授及杨竣高级工程师均提出了宝贵意见,特致衷心谢忱。

参考文献:

[1] 焦安军, 厉彦忠, 陈 曦, 等. 新型紧凑式低温换热器的研究与进展[J]. 低温与超导, 2001, 29(1): 8-13.

[2] Wijeyundera N E, Ho J C, Rajasekar S. The effectiveness of a spiral coil heat exchanger [J]. Heat Mass Transfer, 1996, 23 (5): 631-632.

[3] Noie-Baghban S H, Majideian G R. Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger (HPHE) for surgery rooms in hospi-

itals [J]. Applied Thermal Engineering, 2000, 20(14): 1274-1282.

[4] Reppich M. Use of high performance plate heat exchangers in chemical and process industries [J]. International Journal of Thermal Science, 1999, 38(11): 999-1008.

[5] 曾文良, 林培森, 王世平, 等. 板式换热器作为压缩机冷却器的传热和流阻性能实验研究[J]. 流体机械, 1999, 27(12): 5-8.

[6] Smith J. Coeeration System——heat exchangers[OL]. http://www.aad.gov.au/default.asp?casid=14558, 2004.

[7] 万春雷, 贺小伟, 邵 韵, 等. 联碱 过程板式换热器替代列管式换热器[J]. 纯碱工业, 2002, 35(4): 35-36.

[8] Vlasogiannis P, Karagiannis G, Argyropoulos P, et al. Air-water two-phase flow and heat transfer in a plate heat exchanger [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2002, 28(5): 757-772.

[9] 焦安军, 厉彦忠, 张 瑞, 等. 导流片的导流角度对其性能的影响[J]. 化工学报, 2001, 52(9): 761-765.

[10] 嵇训达. 板翅式换热器开发[J]. 石油化工设备, 2000, 29(2): 40-42.

[11] Guide to compact heat exchanger [OL]. http://www.hw.ac.uk/mecWWW/hexag/CHX.pdf, 2000.

[12] 王佳文. 铝制板翅式换热器在工程机械上的应用[J]. 工程机械, 1996, (2): 35-36.

[13] Wen J, Li Y Z. Study of flow distribution and its improvement on the header of plate-fin heat exchanger [J]. Cryogenics, 2004, 44(11): 823-831.

[14] 郑燕萍, 倪晓斌. 螺旋板换热器在氨水生产中的应用[J]. 化工生产与技术, 2004, 11(5): 42-43.

[15] 杨 玲, 蒋旭东, 杨礼辉. 螺旋板换热器在蒸氨工艺中的应用[J]. 新疆钢铁, 2000, (2): 16-17.

[16] Wang R Z, Wu J Y, Xu Y X, et al. Experiment on a continuous heat regenerative adsorption refrigerator using spiral plate heat exchanger as absorber [J]. Applied Thermal Engineering, 1998, 18(1-2): 13-23.

[17] 陈亚平, 施明恒, 郝志永. 紧凑型发生精馏器的实验研究[J]. 东南大学学报, 1998, 28(S1): 50-55.

[18] 杨 锋, 林贵平. 热管换热器在汽车尾气采暖中的应用[J]. 汽车工程, 2002, 24(2): 157-160.

[19] Vasiliev L L. Heat pipes in modern heat exchangers [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(1): 1-19.

[20] 陈塞萍, 苏 平. 热管余热锅炉在低温发电中的应用[J]. 水泥, 1995, (9): 15-18.

[21] 王瑞广. 热管换热器在造气工程应用浅析[J]. 化工设计通讯, 1998, 12(4): 35-37.

[22] Wu X P, Johnson P, Akbarzadeh A. Application of heat pipe heat exchangers to humidity control in air-conditioning systems [J]. Applied Thermal Engineering, 1997, 17(6): 561-568.

[23] 王应明. 技术经济学[M]. 北京: 中国经济出版社, 1998.

[24] 徐成彬. 德尔菲方法确定基准收益率[J]. 中国工程咨询, 2002, (10): 40-42.

(张编)