

# 高效节能换热器在氮肥工业中的应用

王学生 王如竹

(上海交通大学制冷与低温工程研究所, 上海 200030)

**摘要:**描述了新型折流杆换热器的强化传热和降低壳层压力降的原理,它与传统折流板换热器相比,传热效率高,材料及能耗小。介绍了这种新型换热器在合成氨变换工段和尿素装置中的应用情况及所起的节能降耗作用,指出该高效节能换热器在设计和生产中的关键技术。

**关键词:**折流杆;管壳式换热器;强化传热;氮肥工业

中图分类号:TQ113.25

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2003)05-0042-03

## Application of high efficiency and energy saving shell-and-tube heat exchanger in nitrogen fertilizer industry

WANG Xue-sheng, WANG Ru-zhu

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The mechanisms of heat transfer enhancement and pressure drop reduction are analyzed of a new type of rod-baffle shell-and-tube heat exchanger with spiral groove tube bundles. The design of this high efficient and energy saving heat exchanger provides superior performance of heat transfer and pressure drop performance. The industrial application of this new kind of heat exchanger in transformation section and urea unit of ammonia synthesis in nitrogen fertilizer plants is introduced. The core technology in design and production of this type of exchanger is given out.

**Key words:** rod-baffle; shell-and-tube heat exchanger; heat transfer enhancement; nitrogen fertilizer industry

我国有中小氮肥厂 500 多家,其化肥总产量占全国化肥产量的一半以上。然而中小氮肥厂又是我国的耗能大户,因此节能降耗成为这些企业的主要问题。换热器是氮肥生产过程中的关键设备,而管壳式换热器由于具有耐高温、高压、处理量大、制造技术成熟等优点,在其中占有重要的地位。目前氮肥厂使用的管壳式换热器,其壳程内部大都采用传统的折流板(单弓形挡板)结构。这种换热器传热效率低,材料及能量消耗大,而且由于抗流体诱导振动能力差,易引起设备的破坏与腐蚀,使用寿命极短。因此对氮肥厂现有的这种换热器进行技术改造并对其实施设备的更新换代,已成为长期从事氮肥工业及换热设备工作者的历史重任。

### 1 高效节能换热器简介

高效节能换热器是由国外先进换热技术发展而

来。1977 年美国菲利浦石油公司 W. M. Small 等人为解决大型管壳式换热器的流体诱导振动,开发出折流杆换热器<sup>[1]</sup>,该换热器内部结构以杆式支撑替代原弓形挡板,具有抗振、高效、低压降等优点。在 20 世纪 80 年代该公司又进一步对这种换热器的流体力学与热力学的计算进行了大量理论与实验研究,并开发出了该种换热器的设计计算程序<sup>[2-3]</sup>,该技术在世界各地得到广泛应用。在吸收和消化这一先进技术的基础上,国内华南理工大学、郑州工业大学从 80 年代末也开始了对该种换热器的研究工作。步入 90 年代,国内至少有数十家高校、院所对这种换热设备进行了不同程度的理论分析与实验研究。十几年来,经过模型实验、设备试制、工业实验等研究阶段,至今已总结出包括工艺计算、结构设计、加工制造等一系列的该种换热器的设计制造技术,并已取得良好的结果。

高效节能换热器与传统的折流板管壳式换热器比较,在内部结构上有较大改进。一是壳程内部采用折流杆组成的折流栅取代折流板作管间支撑物,使壳程流体由横向流动变为平行流动。这不仅大大减少了传热死区,而且大幅度减少了流体因多次反复折流而损失的壳程压力降。二是采用螺旋槽型强化传热管,强化流体在管内外纵向冲刷时的对流传热。其强化传热的机理为:壳程流体在非传热界面的区域,如管间支撑物的局部地区,形体阻力损失很小,而大部分的流体压降可用来促进传热管传热界面上的流体湍流,能以较低的流体输送功获取较高的传热膜系数;螺旋槽管可利用粗糙的传热肋面来促进流体边界层的湍流度,减薄传热滞流底层厚度,从而强化边界层传热,管内管外的传热同时得到了强化。三是在换热器壳程进出口处设计变截面导流筒结构,使流体在壳程的分布更加均匀,换热面积得到更有效的利用,同时减少了流体对管束的冲刷。

经过近 10 年的研究与开发,目前已开发出适用于气-气、气-液、液-液无相变及有相变的新型高效节能换热器系列。新型换热器与现行管壳式换热器相比,总传热系数提高 35% 以上,壳侧阻力降减小 50% 以上,处理相同的热负荷,所需设备质量轻。实践证明,与现有传统的折流板换热器设计计算一样,高效节能换热器的设计技术已比较成熟,其流体力学与传热学计算已自成体系,其强度计算与结构设计可利用管壳式换热器国家标准(GB151—98)执行。笔者认为,全面替代传统管壳式换热器的时机已经到来,因此该项技术大规模的推广应用尤为重要。

## 2 在氮肥工业中的应用情况

氮肥生产中换热方式比较单一,绝大部分是无相变传热的 $\text{气-气}$ 、 $\text{气-液}$ 、 $\text{液-液}$ 之间的热交换,主要分布在合成氨的变换、精制、合成等工段。少数为有相变的传热,如氨的冷凝或蒸发以及水的汽化等,因此新型高效节能换热器系列非常适合在氮肥工业中应用。

### 2.1 在合成氨变换系统的应用

目前国内不少中小型合成氨厂变换系统已采用全低变工艺。该系统变换气(在进变换炉一段以前为半水煤气)的工艺流程为:半水煤气 $\rightarrow$ 焦炭过滤器 $\rightarrow$ 饱和塔 $\rightarrow$ 气水分离器 $\rightarrow$ 热交换器(管内) $\rightarrow$ 变换炉一段 $\rightarrow$ 调温加热器 $\rightarrow$ 变换炉二段 $\rightarrow$ 主热交换器(管间) $\rightarrow$ 第一水加热器 $\rightarrow$ 变换炉三段 $\rightarrow$ 热水塔 $\rightarrow$ 第二水加热器 $\rightarrow$ 冷却塔 $\rightarrow$ 脱硫装置。系统热水流程

为:热水塔 $\rightarrow$ 热水泵 $\rightarrow$ 调温加热器 $\rightarrow$ 第一水加热器 $\rightarrow$ 饱和塔 $\rightarrow$ 补充软水 $\rightarrow$ 热水塔。第二水加热器的软水为锅炉提供加热的软水,冷却塔用水为工厂大池内循环水。以上流程中的主热交换器、第一水加热器、第二水加热器及冷却塔皆为管壳式换热器,而且目前大都沿用传统的折流板结构,在该系统应用高效节能换热器有巨大的潜力。

湖北荆门化肥厂年产 6 万 t 合成氨装置,其变换系统采用全低变工艺,1997 年笔者对该厂变换系统的主热交换器、第一水加热器、第二水加热器、冷却塔 4 台设备进行了设计改造,以三门峡化工机械厂生产制造的新型换热器替代原传统的换热设备。改造后两种设备情况对比见表 1。

表 1 新老换热器的参数情况比较

| 项目                                     | 主热交<br>换器 |       | 第一水<br>加热器 |      | 第二水<br>加热器 |       | 冷却塔   |       |
|----------------------------------------|-----------|-------|------------|------|------------|-------|-------|-------|
|                                        | 旧型        | 新型    | 旧型         | 新型   | 旧型         | 新型    | 旧型    | 新型    |
| 公称直径/mm                                | 1600      | 1200  | 1200       | 900  | 1200       | 900   | 1400  | 1000  |
| 总传热系数/<br>$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ | 53.2      | 76.7  | 82.3       | 124  | 101.6      | 146.5 | 89.4  | 130.8 |
| 壳侧压力降/kPa                              | 1.15      | 0.546 | 1.83       | 0.86 | 1.83       | 0.86  | 1.57  | 0.72  |
| 换热面积/ $\text{m}^2$                     | 850       | 464   | 480        | 252  | 480        | 252   | 630   | 305   |
| 设备质量/t                                 | 18.2      | 13.1  | 12.5       | 9.4  | 12.5       | 9.4   | 15.7  | 10.8  |
| 设备投资/万元                                | 16.38     | 13.1  | 11.25      | 9.4  | 11.25      | 9.4   | 14.13 | 10.8  |

从表 1 可看出,新型换热器与旧型换热器相比,各设备总传热系数均提高 40% 以上,压力降的减少均超过 50%。而系统 4 台设备的总质量由旧型的 58.9 t 降至新型的 42.7 t,净节省钢材 16.2 t,节约一次性设备投资 10.31 万元。该系统的阻力降减少 2.4 kPa,大大降低了系统的动力消耗,节约了大量的电能。

值得说明的是,该系统的新型主热交换器的壳体采用夹套结构,使半水煤气在进入换热器的管程以前在夹套内预热,温度由 130℃ 提高到 160 ~ 170℃,不使用预腐蚀器便可解决主热交换器的露点腐蚀问题。原来主热交换器最多使用 1 ~ 2 年就因发生腐蚀破坏而被更换,而新型高效节能换热器已连续使用近 5 年,未发生腐蚀现象。节约设备的维修费及设备的重复性投资费用近 20 万元。

该系统的第二水加热器,即变换工段锅炉软水加热器,其主要目的是使变换气冷却,同时使软水的温度尽可能地提高。新型第二水加热器使软水出口温度由原先的不超过 70℃ 提高到 83℃,热回收量明

显增加。原第二水加热器内部腐蚀严重,往往使用不到半年换热管就有腐蚀穿孔现象,一年即需整台报废;而新设备内部采用变截面导流筒结构,防止了变换气对管束的垂直冲刷,解决了原加热器的腐蚀问题,现已实际运行近 5 年时间,不仅可节约设备的重复性投资及维修费用,而且因新设备传热效率高,使系统中锅炉节煤或多产蒸汽,每年直接产生经济效益 20 万元以上。

同样,笔者在山东东阿化肥厂、莱州化肥厂、河南省驻马店地区化工总厂、兰考县化肥厂等几十家企业实施过多例对合成氨厂变换系统的改造,新设备运行稳定,已为企业产生巨大的经济效益。

## 2.2 用作尿素装置的氨冷凝器

国内中小尿素装置一般均采用水溶液全循环法。在 4 万 t/a 尿素及“四改六”通用设计中,氨冷凝器为串联的 3 台卧式传统折流板管壳式冷凝器,分别为氨冷凝器 A、B、C。氨冷凝器 A 的换热面积为 110 m<sup>2</sup>,B、C 的换热面积均为 220 m<sup>2</sup>。由于液氨中存在腐蚀性极强的氨基甲酸铵溶液,设备的壳体及换热管材质均为不锈钢 1Cr18Ni9Ti,设备造价昂贵,因此采用传热效率高、质量轻的新型设备可达到节省投资的目的,选用新型的氨冷凝器后取得了较好的效果。

驻马店化肥厂的第一套尿素装置,其旧型氨冷凝器 B 仅使用一年就因腐蚀而报废,用 1 台换热面积为 130 m<sup>2</sup> 的新型氨冷凝器更换以后,不久氨冷凝器 C 也不得不更换。这样氨冷凝器 B、C 均更换为 130 m<sup>2</sup> 的新型设备。自 1994 年投用以来,虽然该厂的循环水水量偏紧,冷却塔结构陈旧,夏天时进水温高达 35~38℃(设计水温 32℃),但仍能满足尿素的正常运行,生产负荷稳定在 200 t/d 左右,尿素吨氨耗也在设计范围之内。由于使用效果好,1997 年该厂新上的第 2 套 6 万 t/a 尿素中,采用了 3 台换热面积均为 130 m<sup>2</sup> 的不锈钢新型氨冷凝器取代原来的旧型氨冷凝器 A、B、C。新旧氨冷凝器的经济参数比较见表 2。

表 2 新旧氨冷凝器的经济参数比较(单台)

| 类型 | 壳体直径/mm | 换热面积/m <sup>2</sup> | 造价/万元 |
|----|---------|---------------------|-------|
| 新型 | 700     | 130                 | 15.8  |
| 旧型 | 800     | 220                 | 22.4  |

从操作指标看,新型氨冷凝器传热效率高,同时氨冷凝器的进出口压差很小,基本为零,因此氨冷凝

后能顺利地流入液氨缓冲槽内。另外由于新型氨冷凝器质量较轻,易于在高框架上安装。该技术 1998 年又用于河南邯郸城化肥厂尿素装置氨冷的改造上,至今使用情况良好,实践证明该设备在小尿素生产中的使用是可靠的。

## 3 高效节能换热器的关键技术

(1) 高效节能换热器内的换热管大都采用正方形排列,并由折流杆组成的折流栅支承,从上下左右 4 个方位将其固定。当换热器壳体直径为 800 mm 时,折流栅宜采用单排换热管的布杆方式,即折流栅在每排换热管间都布折流杆<sup>[4]</sup>,组装后 2 个相邻的折流栅中的折流杆方向相互垂直。当换热器壳体直径 > 800 mm 时,折流栅宜采用双排换热管的布杆方式,即折流栅在每两排换热管之间布置一根折流杆,两种折流栅中的折流杆交替布于不同的 2 排换热管间<sup>[3]</sup>。组装后 2 个相邻的折流栅中的折流杆方向相互垂直。

(2) 高效节能换热器内各折流栅之间的间距与壳体直径有关。理论与实践证明:壳体直径在 600~800 mm 时,间距宜采用 150 mm;壳体直径在 900~1 200 mm 时,间距宜采用 200 mm;壳体直径在 1 300~1 600 mm 时,间距宜采用 250~300 mm。按这种关系组装的换热器在使用时可得到较高的综合性能,即较高的  $K/\Delta P$ (传热系数与压力降之比)。

(3) 螺旋槽换热管由机床轧制而成,其基本结构如图 2 所示。主要几何参数为换热管外径  $d_o$ 、壁厚  $t$ 、螺距  $s$ 、槽深  $h$ 、槽半径  $R$  及螺旋角  $\alpha$ 。这些参数对该换热管的传热强化效果及使用中的强度指标有重要的影响,实际应用时应根据换热管的规格合理选择。表 3 列出了 6 种常用规格的螺旋槽换热管尺寸参数。

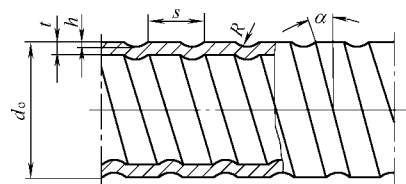


图 2 螺旋槽管结构图

(4) 高效节能换热器壳侧适用于流体速度高、雷诺数大的场合,当壳侧流体雷诺数较低或出现层流状态时,其壳侧传热效果还不及传统折流板换热器,实际设计时要特别注意。推荐的雷诺数值为 4 500 以上。  
(下转第 51 页)

3 000℃低得多,而且超临界水反应器通常为封闭体系,没有热量散发。如果废水中总有机碳的质量分数大于10%,则可实现能量自给。而焚烧炉则要求废料中总有机碳的质量分数大于30%,否则需外加燃料。更重要的是SCWO法不产生焚烧有机氯化物时的副产物二噁英等,是利用水的超临界特性进行“清洁焚烧”的新技术。因此,SCWO法必将因其本身所具有的突出优势和应用前景而得到迅速发展。

### 参考文献

- [1] 李占,刘维霞.[J].环境科学与技术,1996,19(3):41-43.
- [2] 佐古猛,佐藤真士.[J].化学と工業(H),1997,50(3):319-321.
- [3] 梁京梅,李复兴.[J].化学教育,2001,(6):7-9.
- [4] 阿尻雅文.[J].PPM(H),1994,(11):51-55.
- [5] 後藤元信.[J].ケミカルエンジニアリング(H),1999,44(9):19-24.
- [6] 福里隆一.[J].Eco Industry,1999,4(7):19-29.
- [7] 木村和明,杉田觉,小林一登,等.[J].三菱重工技报(H),1997,34(6):438-441.
- [8] 陈克宇,汪贺娟,陶巍.[J].环境科学与技术,1998,21(3):19-21.
- [9] 福本兵治,幡山厚志,加藤义重.[J].废弃物学论文志(H),1995,6(1):16-22.
- [10] Tagaya H, Suzuki Y, Kadokawa J, et al. [J]. Chemistry Letters, 1997, 19(1):47-48.
- [11] Adschiri T, Malaluan R, Hirose S, et al. [J]. J Chem Eng Japan, 1993, 26(6):76-680.
- [12] 望月和博,迫田章义,铃木基之.高温高压水処理によるもみ売の再資源化における炭素およびケイ素の物質収支[A].见:环境科学会,1999年会讲演要旨集[C](日).东京,1999.52-53.
- [13] 大門裕之,澤原雄揮,笈江幸一.[J].ケミカルエンジニアリング(日),2000,45(1):14-19.
- [14] 岸田正行,原田修,隅田卓.[J].コンパ テック(日),2000,45(2):57-60.
- [15] 横山千昭.[J].日本エネルギー学会志(日),1997,76(9):853-860.
- [16] 林石英,鈴木善三,幡野博之,等.[J].化学工学论文集(H),1999,25(3):498-500.
- [17] Ogi T, Yokoyama S. [J]. Sekiyu Gakkaishi, 1993, 36(2):73-84.
- [18] 天江俊成.[J].化学装置(H),1999,41(7):63-67.
- [19] Park S, Gloyna E F. [J]. Fuel, 1997, 76(11):999-1003.
- [20] 鈴木重俊,長瀬佳之.[J].化学工学(H),2000,64(3):146-148.
- [21] 阿尻雅文,柴田隆次,新井邦夫.[J].石油学会志(H),1997,40(4):291-297.
- [22] 村上定辨.水热反麻な利用する余剰汚泥ゼロエミッション型生物処理法[P].JP公开特许公报2000-218295,2000-08-08.
- [23] 孙德智,于秀娟,冯玉杰,等.环境工程中的高级氧化技术[M].北京:化学工业出版社,2002.159.
- [24] 雷乐成,江大攀.水处理高级氧化技术[M].北京:化学工业出版社,2001.84.
- [25] 向波涛,王涛,沈忠耀.[J].环境科学学报,2002,22(1):17-20.
- [26] 鞠美庭,汲奕君,孟庆堂.[J].城市环境与城市生态,2002,15(2):29-31.
- [27] 张莉,陆晓华.[J].化工环保,2002,22(2):115-118.
- [28] 徐明仙,林春绵,周红艺.[J].环境污染治理技术与设备,2002,15(2):29-31. ■

(上接第44页)

表3 常用螺旋槽换热规格及参数

| 规格                   | 管外径<br>$d_o/mm$ | 壁厚<br>$t/mm$ | 螺距<br>$s/mm$ | 槽深<br>$h/mm$ | 槽半径<br>$R/mm$ | 螺旋角<br>$\alpha$ |
|----------------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----------------|
| $\Phi 14 \times 2$   | 14              | 2            | 6            | 0.8          | 2             | 15°             |
| $\Phi 19 \times 2$   | 19              | 2            | 8            | 0.8          | 3             | 15°             |
| $\Phi 25 \times 2$   | 25              | 2            | 10           | 0.8          | 4             | 15°             |
| $\Phi 25 \times 2.5$ | 25              | 2.5          | 10           | 1.0          | 4             | 15°             |
| $\Phi 32 \times 3$   | 32              | 3            | 13           | 1.2          | 5             | 15°             |
| $\Phi 38 \times 3$   | 38              | 3            | 15           | 1.2          | 6             | 15°             |

高效节能换热器系列产品已在合成氨生产中得

到成功的应用。实践证明这种换热器不仅具有高效、节能、不易结垢等特点,而且彻底解决了流体振动对换热器的破坏,大大提高了设备的使用寿命。由于减少了35%以上的换热面积,设备的体积减小,质量减轻,投资降低,受到了合成氨生产厂家的普遍欢迎。

### 参考文献

- [1] Small W M, Young R K. [J]. Oil and Gas Journal, 1977, 75(37):77-80.
- [2] Gentry C C, Small W M. Int Heat Transfer Conference [C]. Munich, 1982.
- [3] Gentry C C. [J]. Chemical Engineering Progress, 1990, 86(7):48-56.
- [4] 王学生.新型RRS换热器的性能研究[D].郑州:郑州工业大学,1993. ■