

# 热虹吸管冷凝式燃气热水器设计与分析

陈世玉, 张冬青, 严婉婉, 王 铮, 汤雯雯, 夏辉辉, 赵孝保

(南京师范大学 动力工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 提出了一种应用热虹吸管进行二次换热的冷凝式燃气热水器, 从燃烧、传热和结构设计等方面对系统进行了计算与分析, 并给出了合理的设计方案. 进行了投资成本及经济收益分析, 表明该装置换热效率高、安全可靠、投资回收期短, 冷凝式燃气热水器具有推广价值.

[关键词] 热虹吸管, 二次换热, 凝结潜热, 冷凝式燃气热水器

[中图分类号] TK 124 TU 831 [文献标识码] B [文章编号] 1672-1292(2010)01-0040-04

## Design and Analysis on Condensing Gas-Water Heater With Thermosyphon as Secondary Heat Exchanger

Chen Shiyu Zhang Dongqing Yan Dandan Wang Zheng  
Tang Wenwen Xia Huihui Zhao Xiaobao

(School of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract** A condensing gas-water heater for which a secondary heat exchanger based on the thermosyphon is used is put forward. The calculation and analysis of this system is carried on in this article in terms of combustion, transmission heat and structure design etc. and a reasonable design proposal is given. The analysis from its investment cost and economic benefits is made, which shows that the system may retain the following advantages: high efficiency of heat transfer, safety and credibility, and short investment recovery period. It is believed that it has directive significance on the future market of condensing gas-water heater.

**Key words** thermosyphon, secondary heat exchanger, latent heat of condensation, condensing gas-water heater

当今能源日趋紧张, 特别是在化石燃料日益紧缺的情况下, 冷凝式燃气热水器由于比普通燃气热水器热效率高 15% 以上而得到广泛的重视, 目前已有多家公司推出冷凝式燃气热水器, 一般都是通过热交换系统进行两次换热, 当燃烧产生的烟气经过一次换热后, 其温度降低, 在经过第二次换热后, 温度降至烟气露点温度以下, 烟气中的水蒸气就会冷凝成水, 释放出潜热. 但是, 已报导的冷凝式燃气热水器采用整体化生产, 在提高热效率和节能效果的同时付出了比较巨大的经济投入, 且整体化设计使得冷凝式热水器在修理和维护方面带来诸多不便, 在长期使用的过程中也会因为余热换热器的腐蚀而带来一定的安全隐患, 因此一种集经济、节能、环保于一体的新型冷凝式燃气热水器的研究已经得到广泛关注.

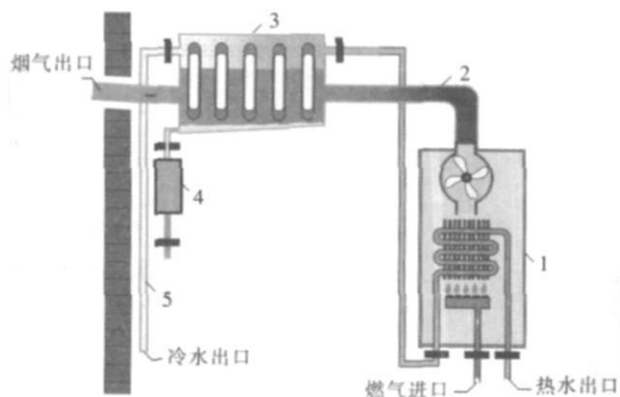
### 1 热虹吸管二次换热冷凝式燃气热水器系统

本文提出的热虹吸管二次换热冷凝式余热回收装置直接连接在普通燃气热水器排烟管道后部, 将普通热水器的进水管引至二次换热部分, 不需要对热水器做任何改动, 如图 1 所示. 因此热虹吸管二次换热装置是可以灵活组合和移植的.

热虹吸管二次换热装置换热原理如图 2 所示, 烟道尾部排放的高温烟气冲刷热管的热端, 使得热管中的工质汽化而将热量传递到热管的顶部, 而热管的顶端布置在进水管道中, 冷水在经过热管外部时吸收热

收稿日期: 2009-06-29  
基金项目: 教育部科学技术研究重点项目 (209048).  
通讯联系人: 赵孝保, 工学博士, 教授, 研究方向: 高效传热技术及节能技术. E-mail: zhao@njjnu.edu.cn

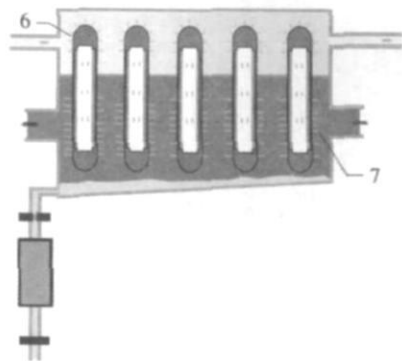
量,从而达到预热的作用,使得热效率提高约 18% 左右,热水器的热效率可达到 102% 左右。



1. 燃气热水器主设备; 2. 烟道; 3. 热虹吸管二次换热器;  
4. 冷凝水中和装置; 5. 水管道

图 1 热虹吸管二次换热冷凝式燃气热水器系统图

Fig.1 Thermosyphon secondary heat exchanger condensing gas-water heater scheme



6. 热管; 7. 肋片

图 2 热虹吸管二次换热器设备图

Fig.2 Thermosyphon secondary heat exchanger scheme

## 2 热虹吸管二次换热冷凝式燃气热水器设计计算

### 2.1 数据测试

测试环境: 环境干球温度 10.22℃, 湿球温度 5.05℃, 经查图得湿度为 63%; 冷水温度 5℃;

测试设备: JSQ 16-8L2 型热水器, 长 500mm, 宽 300mm, 厚 138mm, 烟道直径 50mm, 壁厚 1mm;

测量数据: 烟温: 267℃、273℃、271℃, 均值: 270℃;

烟气流速: 9.8m/s、9.9m/s、10.1m/s, 均值: 10m/s

### 2.2 燃烧计算

南京地区天然气组成:  $\text{CH}_4$  98%、 $\text{C}_3\text{H}_8$  0.3%、 $\text{C}_4\text{H}_{10}$  0.3%、 $\text{C}_5^+$  0.4%、 $\text{N}_2$  1%, 其低位发热量  $H_l$  为 38 631 kJ/m<sup>3</sup>, 高位发热量  $H_h$  为 42 494 kJ/m<sup>3</sup>, 经计算理论空气量  $V_0$  为 9.688 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, 理论烟气量  $V_f^0$  为 10.672 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

燃气热水器的热效率一般以燃气低热值为准, 为便于比较, 以下分析均采用燃气低热值。

以 1m<sup>3</sup> 天然气燃烧的热热水器的热平衡计算:  $H_h = Q_e + Q_p + Q_s$ , 其中,  $Q_e$  为热水器的有效利用热 /kJ,  $Q_p$  为热水器的排烟热损失 /kJ,  $Q_s$  为热水器的外壳散热损失 /kJ, 热水器的热损失主要包括排烟和散热损失两部分。

#### 2.2.1 排烟热损失 $Q_p$

排烟热损失  $Q_p$  包括烟气的显热损失  $Q_{p1}$  和排烟中水蒸气的潜热损失  $Q_{p2}$ 。

##### (a) 烟气显热损失 $Q_{p1}$

$$Q_{p1} = C_p [(\alpha - 1)V_0 + V_f^*] (t_f - t_0) = 1.06 [ (1.4 - 1)9.688 + 10.672 ] (50 - 20) = 462.6 \text{ kJ}$$

式中:  $C_p$  为 50℃ 烟气的体积比定压热容 / (kJ/(m<sup>3</sup>·℃)). 取过量空气系数  $\alpha = 1.4$  排烟温度  $t_f = 50^\circ\text{C}$ ; 天然气和空气的初始温度为  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ; 空气的相对湿度为 63%。

##### (b) 烟气潜热损失 $Q_{p2}$

本装置中通过高效换热热虹吸管使烟气中的水蒸气全部冷凝, 因此  $Q_{p2}$  取为 0

#### 2.2.2 散热损失

普通热水器的热效率一般为 84% 左右, 总的热损失为 16% 左右, 在排烟温度为 270℃ 左右时, 其散热损失约为 5%<sup>[1]</sup>。本装置采用二次换热方式, 第一级换热过程与普通热水器相同, 而第二级冷凝换热过程中烟气温度相对低得多, 其散热损失较少, 可忽略不计。因此, 冷凝式热水器的散热损失的大小可参照普通燃气热水器计算, 散热损失为 5%。即壳体的散热损失为:  $Q_s = 5\% \times H_l = 2124.7 \text{ kJ}$

#### 2.2.3 冷凝式燃气热水器的热效率

热水器的热效率为有效吸热与燃气低热值的比值, 即  $\eta$  为:

$$\eta = \frac{Q_c}{H_1} \times 100\% = \frac{H_h - Q_p - Q_s}{H_1} \times 100\% = 103.3\%.$$

按《家用燃气快速热水器》(GB 6932—94) 的规定, 燃气热水器的热效率计算为:  $\eta = \frac{c \cdot G \cdot \Delta t}{L \cdot H_1}$ , 式中,  $c$  为水的比热容  $/( \text{kJ}/( \text{kg} \cdot ^\circ \text{C} ) )$ ;  $G$  为热水器的热水产率  $/( \text{kg}/\text{h} )$ ;  $\Delta t$  为热水器的进出水温差  $^\circ \text{C}$ ;  $L$  为热水器的耗气量  $/( \text{m}^3/\text{h} )$ .

若冷凝式热水器的热效率、耗气量和热水产率分别为  $\eta$ 、 $L$  和  $G$ , 普通热水器的热效率、耗气量和热水产率分别为  $\eta_0$ 、 $L_0$  和  $G_0$ , 则冷凝式热水器在热水产率相同的情况下, 冷凝式燃气热水器的节气率为:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_0 - L}{L_0} = 1 - \frac{F_0}{F} = 1 - \frac{84}{103.3} = 18.68\%.$$

相同耗气量时热水产率提高率为:  $\frac{\Delta G}{G_0} = \frac{G - G_0}{G_0} = \frac{F}{F_0} - 1 = \frac{103.3}{84} - 1 = 22.98\%.$

2.3 结构与传热计算

热虹吸管二次换热装置的结构设计如表 1:

据燃气热水器国家能效标准技术支持报告, 8 L 燃气热水器每小时设计耗气量为  $1.38 \text{ m}^{3/2\text{J}}$ , 本设计取  $1.4 \text{ m}^3/\text{h}$ . 家用 8 L 强排式燃气热水器实测排烟管道出口烟气流速  $10 \text{ m}/\text{s}$ , 出口烟气温度  $t_f$  为  $270^\circ \text{C}$ . 为了充分利用烟气潜热, 设计二次换热部分的烟气出口温度  $t_f$  为  $50^\circ \text{C}$ , 烟气冲刷管束速度  $u$  为  $2.3 \text{ m}/\text{s}$ . 烟气流动

表 1 设计参数  
Table 1 Design parameter

装置元件	设计参数			
热管	总长度 $L$	热端长度 $L_n$	热管外径 $D$	
	140 mm	93 mm	20 mm	
肋片	肋片片数	肋间距	肋高	肋厚
	20	3 mm	10 mm	1.5 mm
二次 换热器	迎风面宽	迎风面高	换热器长	
	88 mm	96 mm	260 mm	

Re 为:  $Re_f = \frac{u_m D}{\nu} = 2862$

根据  $1000 < Re_f < 200000$  查得:  $c = 0.27$ ,  $n = 0.63$ ,  $m = 0.36$ ,  $k = 0.25$ ,  $p = 0$ .

$$Nu_f = c Re_f^n Pr_f^m \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^k \left( \frac{s_1}{s_2} \right)^p = 34.9$$
 得:  $h_c = \frac{Nu_f \lambda}{d} = 0.06 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}).$

肋片效率:  $\eta_f = 0.93$ . 单根热管传热:  $\Phi_1 = 2h_c A \Delta t \eta_f n + h_c A' \Delta t' = 0.272 \text{ kW};$

过量空气系数为 1.4 时的余热量为  $7455.78 \text{ kJ}/\text{m}^3$ , 则单位时间传热量为:  $\Phi = 2.90 \text{ kW}.$

热管根数为:  $N = \frac{\Phi}{\Phi_1} = \frac{2.90}{0.272} \approx 10.7$  根, 取 12 根.

3 热虹吸管冷凝式燃气热水器效益分析

3.1 费用分析

本装置总成本包括初装费和运行费用, 基于热虹吸管二次换热冷凝式燃气热水器的余热回收装置, 采用  $\Phi 20 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$  热管 12 支. 初投资包括热虹吸管二次换热器 500 元, 安装费 50 元, 合计 550 元, 冷凝式热水器可能享受政府 13% 的补贴, 因此总投资费用为  $500 \times (1 - 13\%)$ , 即实际投资为 485 元.

3.2 冷凝式换热器的年收益

南京市现有居民 617.17 万, 按平均每户 4 人算, 共有约 150 万用户, 市民中 57.4% 拥有燃气热水器, 31.3% 拥有电热水器, 约 7.6% 拥有太阳能热水器, 即南京市约有 86 万家庭使用燃气热水器. 且南京地区天然气低位发热量为  $38631.6 \text{ kJ}/\text{m}^3$ , 单价为 2.2 元  $/\text{m}^3$ , 热水器每天需制取  $50^\circ \text{C}$  的水  $320 \text{ L}^{[4-5]}$ . 居民每户每天用天然气量为  $1.4 \times (320 \div 8) \div 60 = 0.93 \text{ m}^3$ , 每年按 365 d 计算, 则每户每年可节约的天然气量:

$$L = \frac{0.93 \times Q_{\text{回收}} \times 365}{Q_{\text{低}}} = \frac{0.93 \times Q_{\text{回收}} \times 365}{38631} \text{ m}^3.$$

每户每年可节约花费为  $y = 2.2L$  (元).

3.3 投资回收期

本装置换热器投资回收期:  $n = (500(1 - 13\%) + 50 + 500 \times 1\% \times n) / y$ , 年运行维护系数取 1%. 计算得到: 户年节气量  $65.51 \text{ m}^3$ , 户节气年收益 144.1 元, 回收期 3.49 年, 南京市 86 万用户年收益 12384 万元.

## 4 低温腐蚀分析

冷凝式燃气热水器可以显著提高热效率,但是由于烟气中含有酸性物质,当温度降到烟气露点以下时,会形成酸性腐蚀,从而降低换热器的使用寿命<sup>[6]</sup>。

为了防止冷凝水粘附在肋片表面,将肋片下偏一定角度(约 $3^\circ$ ),如图3肋片表面的冷凝水会沿着肋片流入装置底部的冷凝水收集装置,通过液位控制阀控制冷凝水的排放,排放的冷凝水可用于冲刷马桶等家用。

二次换热器与主换热器分离布置,只需要对二次换热器进行防腐处理,减少了防腐处理量,降低了防腐造价。同时,必要时可以将二次换热器拆卸更换而不影响主换热器正常使用。

设计中对二次换热器整体进行“干粉环氧树脂有机涂料”浸涂,涂层具有良好的抗酸腐蚀与耐温性能,已有的研究表明,若热水器年运行时间按150h计算,该涂层能保证冷凝换热器至少8年的防腐蚀要求<sup>[7]</sup>,实现冷凝式热水器正常、安全和长期运行。

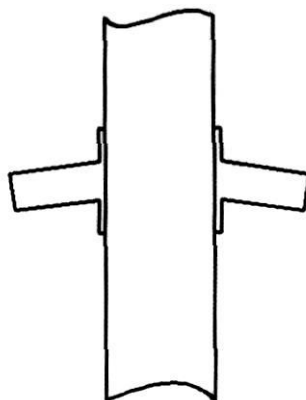


图3 肋片向下倾斜布置

Fig.3 Declining fin set

## 5 结论

本文提出的热虹吸管二次换热方案与普通冷凝式燃气热水器相比,创新性地运用了热虹吸管技术,在保证换热效果的前提下,简化了系统,提高了系统的可移植性和可推广性,使得本方案能够在大部分普通燃气热水器上得到应用。本系统在较小的初投资费用下,节能和节约运行成本均优于市场上的各类燃气热水器,在安全性及运行可靠性方面也有根本保证,并且本产品体积较小便于安装,与热水器装在一起不影响整体美观,因此本方案具有广阔的市场应用前景和节能环保意义。

## [参考文献] (References)

- [1] 谭顺民, 郑利平, 罗贤成. 冷凝式燃气热水器的节能分析[J]. 煤气与热力, 2003(5): 288-289.  
Tan Shunmin, Zheng Liping, Luo Xiancheng. Energy saving analysis of gas water heater with condensation[J]. Gas and Heat, 2003(5): 288-289 (in Chinese)
- [2] 中国标准化研究院. 燃气热水器国家能效标准技术支持报告[R]. 北京: 中国标准化研究院, 2006  
China National Institute of Standardization. Gas water heater energy efficiency standards of national technical support to the report[R]. Beijing: China National Institute of Standardization, 2006 (in Chinese)
- [3] 吴薇, 刘兆亮, 陈磊, 等. 一种蓄能型一体化太阳能热泵热水器性能分析[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2009, 9(1): 28-34  
Wu Wei, Liu Zhaoliang, Chen Lei et al. Performance analysis on a novel solar storage heat pump water heater integrated with collector/storage/evaporation[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2009, 9(1): 28-34 (in Chinese)
- [4] 王伟. 双级压缩空气源热泵热水器系统的研究[D]. 南京: 南京工业大学, 机械与动力工程学院, 2006: 64-66  
Wang Wei. Study on two-stage compression air-source heat pump water heater system[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, School of Mechanical and Power Engineering of NJUT, 2006: 64-66 (in Chinese)
- [5] 潘新新, 魏敦松. 冷凝式燃气热水器的腐蚀防护[J]. 煤气与热力, 2005, 25(8): 11-15.  
Pan Xinxin, Wei Dunsong. Anti-corrosion of condensing gas water heater[J]. Gas and Heat, 2005, 25(8): 11-15 (in Chinese)
- [6] 李丽萍, 王随林. 防腐层加工工艺对冷凝换热器的影响[J]. 煤气与热力, 2005, 25(8): 16-19.  
Liliping, Wang Suilin. Effect of process technology for anticorrosion coating on condensing heat exchanger[J]. Gas and Heat, 2005, 25(8): 16-19 (in Chinese)

[责任编辑: 刘健]