

114

研究简报

P4-P8

# 冷凝式燃气快速热水器研究

马祖林  
(城建系)

TU824.2

**摘要** 常规燃气快速热水器的热效率按 GB6932-86 标准  $\eta \geq 80\%$ , 目前燃气应用工程界正竭力在提高热效率上下功夫, 力图突破 90% 热效率大关。受各种因素制约, 国内先进厂家的产品其热效率一般在 85% 左右, 国外该型产品的热效率也在这个水平上。本文提出采用冷凝方式, 充分回收烟气中水蒸气的潜热。甲烷和天然气 ( $\text{CH}_4$  体积含量为 97% 左右) 快速热水器的热效率可达到 95% 以上, 具有显著的节能效果, 可在供气种类为高含氢和烃的地区推广应用。

**关键词** 热值, 凝结热, 热效率

冷凝式热水器, 凝结热, 热效率

中图法分类号 TS914.252

随着我国城市燃气事业的发展, 民用燃气用具已进入千家万户。其中燃气快速热水器以方便实用, 安装简单等特点, 受到人们的普遍欢迎。燃气快速热水器分为直排式、烟道式和平衡式三大类, 目前全部停留在回收烟气显热的水平上。

按照 GB6932-86 标准, 燃气快速热水器的热效率以燃气低热值考核, 并且规定  $\eta \geq 80\%$ 。当前国内外先进产品的热效率在 85% 左右。热效率计算式为:

$$\eta = \frac{G\Delta t_c}{BH_i}$$

- 式中
- $G$ — 热水器出水量 (kg/h)
  - $\Delta t$ — 进出口水温差 ( $^{\circ}\text{C}$ )
  - $B$ — 燃气消耗量 ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ )
  - $H_i$ — 燃气低热值 ( $\text{kJ}/\text{Nm}^3$  干燃气)
  - $C_p$ — 水的定压比热 ( $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )

由热效率的定义, 知  $\eta = Q_{\text{有效}}/Q_{\text{收入}}$

如果燃气燃烧生成的水蒸气全部以液态排出器外, 非常明显, 在同样的耗气量下,  $Q_{\text{收入}}$  有较大程度的增加, 其幅度取决于烟气中水蒸气的分压。也就是说取决于燃气中 H 原子的数量和过剩空气系数  $\alpha$ 。热水器标准规定  $Q_{\text{有效}}$  是常数, 增大后的  $Q_{\text{收入}}$  仍按  $BH_i$  计算热效率, 自然燃气耗量  $B$  就会有较大幅度的降低, 这就是冷凝式燃气热水器能提高热效率的原因。

\* 收稿日期: 1992-10-13.

马祖林, 男, 1950 年生, 副教授, 重庆建筑工程学院 (630045).

## 1 冷凝式燃气热水器的结构原理

研制开发的该热水器属烟道式。特点是在常规热水器的显热换热器上部串接一个冷凝换热器,在其下部设置排液装置。由于阻力增大和自然排烟能力的降低,需采用机械引风。为了提高冷凝换热器的传热效率,给水管先引入冷凝换热器,再进入蛇形盘管冷却燃烧室器壁,最后进入显热换热器。冷凝换热器的作用从传热角度讲类似于锅炉设备中的省煤器。由于凝结水呈酸性,冷凝换热器和导液部件应采用耐蚀材料。对脱硫较彻底的天然气燃烧,凝结水直接排入排水系统应该是可以的。如果燃气中硫分较高,那就有必要在热水器内设置一中和器使之达到污水排放标准。冷凝换热器的传热计算和结构设计因篇幅所限拟另文介绍。

## 2 热效率分析

燃气高热值  $H_h$  是指  $1\text{Nm}^3$  燃气完全燃烧,其烟气冷却至原始温度,其中的水蒸气以凝结水状态排出时所放出的热量。燃气低热值  $H_l$  与  $H_h$  的区别, $H_l$  仅指烟气中水蒸气仍以蒸气仍以蒸气状态排出所放出的热量,二者的差值为水蒸气的汽化潜热。与研究有关的几种燃气的热值分列如下:

氢气

$$H_l = 10794 \text{ kJ/Nm}^3$$

$$H_h = 12753 \text{ kJ/Nm}^3$$

$$H_h \text{ 较 } H_l \text{ 增值 } 18.15\%$$

甲烷

$$H_l = 35906 \text{ kJ/Nm}^3$$

$$H_h = 39842 \text{ kJ/Nm}^3$$

$$H_h \text{ 较 } H_l \text{ 增值 } 10.96\%$$

天然气(四川干气)

其组分如下(容积成分)

$$\text{CH}_4 \text{ 98.0\% } \quad \text{C}_2\text{H}_6 \text{ 0.3\% } \quad \text{C}_3\text{H}_8 \text{ 0.3\% } \quad \text{C}_4\text{H}_{10} \text{ 0.4\% } \quad \text{N}_2 \text{ 1.0\%}$$

热值为

$$H_l = 36442 \text{ kJ/Nm}^3$$

$$H_h = 40403 \text{ kJ/Nm}^3$$

$$H_h \text{ 较 } H_l \text{ 增值 } 10.87\%$$

十分明显,天然气与甲烷各项差别都很小。以下均以  $\text{CH}_4$  为代表,进行各种条件下  $\eta$  的分析。

根据实际情况,入口原始温度设为  $20^\circ\text{C}$ 。由实验结果和标准规定,常规热水器的平均排烟温度为  $180^\circ\text{C}$ , $\alpha$  一般设计为 1.20,空气含湿量  $d_a$  按常规定为  $10 \text{ g/Nm}^3$  干空气,大气压为  $760 \text{ mmHg}$ ,理论空气量  $V_a = 9.52 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3\text{CH}_4$ 。

### 2.1 理想状况下甲烷冷凝快速热水器的热效率

所谓理想状况,是指出口烟温降至入口原始温度。对照前述条件可知,烟温由 180℃ 降至 20℃ 所放出的热量由两部分组成。一部分是烟温由 180℃ 降至 20℃ 的显热,另一部分是烟温由 100℃ 降至 20℃ 时水蒸气凝结放出的热量。烟气中的水蒸气在 100℃ 以上是以过热态存在的。

首先导出常规热水器排烟温度由 180℃ 降至入口原始温度时的热效率  $\eta_2$

式中  $I_f^{180}$ —烟温为 180℃ 时的烟气显焓(kJ/Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>)

又

$$I_r = I_f + (\alpha - 1)I_f^0$$

其中

$$I_f^0 = V_{\text{RO}_2} C_{\text{RO}_2} t_f + V_{\text{H}_2\text{O}} t_f + V_{\text{N}_2} C_{\text{N}_2} t_f$$

$$I_f^0 = V_a (C_a + 1.20 C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot da) t_f$$

$$V_{\text{RO}_2} = V_{\text{CO}_2}$$

$$V_{\text{N}_2} = 0.79V_a$$

上述各式中  $V_{\text{RO}_2}, V_{\text{H}_2\text{O}}, V_{\text{N}_2}$ —烟气中三原子气体、水蒸气、氮的体积(Nm<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>)

$C_{\text{RO}_2}, C_{\text{H}_2\text{O}}, C_{\text{N}_2}$ —三原子气体、水蒸气、氮的平均定压比热(kJ/Nm<sup>3</sup>·K)

$t_f$ —烟温(℃)

$V_a$ —理论空气需要量(Nm<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>)

各值代入,整理得到

$$I_f^{180} = 3061.8 \text{ kJ/Nm}^3\text{CH}_4$$

$$H_f = 35906 \text{ kJ/Nm}^3\text{CH}_4$$

$$Q_{\text{收入}}^0 = B_2 \times 38967.8 \text{ kJ/h}$$

由 GB6932—86 标准可知,  $Q_{\text{有效}}$  为一常量,那么原型(普通型)和回收全部显热热水器的法定计算热效率有如下关系:

$$\eta_1 = Q_{\text{有效}}^0 / B_1 H_f \quad (\text{普通型})$$

$$\eta_2 = Q_{\text{有效}}^0 / B_2 H_f \quad (\text{回收显热型})$$

$$\eta_2 = \frac{B_1}{B_2} \eta_1$$

已知  $\eta_1 = 85\%$

$$Q_{\text{收入}}^0 = Q_{\text{收入}}^0$$

$$B_1 H_f = B_2 \times 38967.8$$

$$B_1 / B_2 = 1.085$$

代入前式  $\eta_2 = 92.25\%$

在此基础上,回收全部凝结热的水热器热效率为

$$Q_{\text{收入}}^0 = B_3 H_f$$

$$\eta_2 = Q_{\text{有效}}^0 / B_2 H_f$$

$$\eta_3 = Q_{\text{有效}}^0 / B_3 H_f$$

$$\eta_3 = \frac{B_2}{B_3} \eta_2$$

又

$$Q_{\text{收入}}^1 = Q_{\text{收入}}^2$$

$$B_2 H_1 = B_3 H_2$$

$$B_2/B_3 = H_2/H_1 = 1.1096$$

最终得到冷凝式甲烷热水器在进出口烟温相同时的热效率  $\eta_3 = 102\%$ 。

就目前燃气快速热水器结构形式,燃烧传热模式,工艺及材料情况来说,我们将冷凝式热水器总的热量回收率与普通热水器一样设定在 85% 是合理的,实践证明这样作也是可靠的,显而易见,由于  $Q_{\text{收入}}$  的大量增加,其法定计算热效率得到大幅度提高。

若假定热水器为绝热系统,排烟冷却至原始温度,则冷凝式甲烷热水器的最高热效率为

$$\eta_{\text{max}} = H_2/H_1 = 110\%$$

## 2.2 实际设计工况下的热效率

实际工况下,排烟温度降至原始温度是不可能的,考虑到受各项热损失的影响以及冷凝换热器的结构尺寸限制和经济性,我们认为排烟温度设计为 40°C 左右是全理的,实际排烟温度为 37°C,热效率的计算要考虑热收入项去除 37°C 以下整个烟气的显焓和潜焓,其余方法同前。

实际烟气中除水蒸气外还包括  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$ , 后三种气体在使用温度下属不凝性气体,所以要直接利用湿空气湿焓表或 I—d 图来求得饱和烟气的总焓。

由 760mmHg 湿空气 I—d 图上过程得到  $t_f = 37^\circ\text{C}$  时饱和水蒸气的总焓。

$$i_{37} = 126.02 \text{ kJ/Nm}^3 \text{ 干空气}$$

即相当于

$$i_{37} = 126.02 \text{ kJ/Nm}^3 \text{ 干烟气}$$

$t_f = 20^\circ\text{C}$ ,  $d_s = 0.01 \text{ kg/Nm}^3$  的入口条件下,相对湿度  $\varphi = 77\%$ ,饱和湿空气的总焓

$$i_{37} = 37.77 \text{ kJ/Nm}^3 \text{ 干空气}$$

即相当于

$$i_{37} = 37.77 \text{ kJ/Nm}^3 \text{ 干烟气}$$

$1\text{Nm}^3\text{CH}_4$ , 以  $\alpha = 1.2$  完全燃烧,烟温为 37°C 的排烟焓为

$$I_f^{37} = i_{37} [V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2} + (\alpha - 1)V_o]$$

各值代入

$$I_f^{37} = 1313.76 \text{ kJ/Nm}^3\text{CH}_4$$

热效率的计算方法同前

显热回收后热效率  $\eta_2$

$$Q_{\text{收入}}^1 = B_2 (I_f^{37} - I_f^{37} + H_1)$$

值代入

$$Q_{\text{收入}}^1 = B_2 \times 37654 \text{ kJ/h}$$

$$\eta_2 = \frac{B_1}{B_2} \eta_1$$

已知

$$\eta_1 = 85\%$$

则

$$\eta_2 = 89.17\%$$

凝结热回收后热效率  $\eta_3$

$$Q_{\text{收入}}^1 = B_2 (H_2 - I_f^{37})$$

值代入

$$Q_{\text{收入}} = B_3 \times 38550 \text{ kJ/h}$$

由于

$$\eta_3 = \frac{B_2}{B_3} \eta_2$$

得到排烟温度为 37℃ 时冷凝式甲烷热水器的法定计算热效率  $\eta_3$  为

$$\eta_3 = 95.8\%$$

由实验结果知道,常规热水器的排烟损失约占热收入项的 9% 左右,而冷凝式甲烷快速热水器  $t = 37^\circ\text{C}$  的排烟损失仅占热收入的 3% 左右。这部分的热量差就是显热回收量。

综上所述,在不改变常规热水器结构原理状况下,附加冷凝换热器,冷凝式甲烷快速热水器的理论热效率可超过 100%。实用热效率也在 95% 以上。考虑到自然排烟热水器在 40℃ 左右排烟温度下,自然压头不足以克服阻力顺利排烟,器内安装常温微型排气扇强制将烟气排到室外是适宜的。附加微型风扇在经济上没有大的影响,技术上除顺利排烟外,还能保证安装空间无烟气存在。该类型热水器可装设在浴室内,从根本上杜绝了困扰多年的燃气热水器中毒伤亡事故的发生。为了降低成本并使结构简化,不用排烟风扇,而采用适当提高排烟温度的方法并非不可,但是受系统阻力和出口环境风影响,系统的可靠性大大降低,可能会要求装设保温烟道以维持抽力和减少水蒸气在烟道内的凝结。这样,经济上不划算,反而使热效率降低。实践设定的低排烟温度,烟气含湿量低,不保温烟道内结露也很少。设计上将排烟扇与燃气阀联锁并设计熄火延时关闭电路,烟道内就不会有凝结水存在,以追求最大热量回收率。

### 3 结束语

本文虽然重点讨论的是冷凝式甲烷快速热水器的热效率问题,它也适合于含氢和烃燃气热水器。特别适用于脱硫较彻底的天然气( $\text{CH}_4$  成分在 98% 左右)和高氢燃气。考虑到含硫燃气燃烧产物中硫化物的存在,其分凝温度较高。国标 GB6952-86 规定排烟温度  $t_r \geq 180^\circ\text{C}$  的依据主要是结露问题。只要处理好腐蚀和排烟,冷凝式燃气热水器的经济效益和社会效益无疑都是非常巨大的。

### 参 考 文 献

- 1 G. 埃克特等,航青译,传热与伟质分析,北京,科学出版社,1983
- 2 尾花英朗等,徐忠权译,热交换器设计手册,北京,石油出版社,1981
- 3 同济大学等,燃气燃烧与应用,北京,建筑工业出版社,1988
- 4 J. C. Y. Koh, E. M. Sparrow, Intern. J. Heat Mass Transfer, 1961

(编辑:刘家凯)