

# 冷凝式热水器能量平衡及折算热负荷分析

□ 同济大学机械与能源工程学院 (201804) 周宇 秦朝葵 段鹏飞

**摘 要:** 冷凝式燃气热水器因其高能效和低污染的特点得到了广泛的关注和应用,国内对冷凝式热水器的研究还处于起步阶段,测试主要标准采用《冷凝式家用快速热水器》CJ/T 336-2010,本文阐述了冷凝式热水器的热湿平衡,并通过实验对其进一步说明,讨论了标准中折算热负荷的定义和意义,以期加深对标准的认识。

**关 键 词:** 冷凝式燃气热水器 热湿平衡 折算热负荷

## Analysis of the Energy Balance and Corrected Heat Load of Condensing Gas Water Heater

College of Mechanical and Energy Engineering, Tongji University

Zhou Yu, Qin Chaokui, Duan Pengfei

**Abstract:** Condensing Gas Water Heater has received extensive attention and was widely used due to its high efficiency and low pollution, the study of condensing gas water heater in domestic is still in its infancy, and the testing is mainly based on 《Condensing domestic gas instantaneous water heaters》CJ/T 336-2010, This article elaborated the heat and humidity balance of condensing gas water heater, and a further illustrates has been shown through experiment research, what's more, the definition and significance of corrected heat load which is mentioned in the standard has been discussed in order to deepen the understanding of the standard.

**Keywords:** Condensing Gas Water Heater heat and humidity balance corrected heat load

### 1 前言

冷凝式换热技术起源于欧洲,最早被应用于锅炉,Carlyle Ashley于1928年设计了一个被称为“Weather-maker”的燃气专利产品,这是第一个将烟气中水蒸气的冷凝用于采暖空调领域的高效率燃气加热炉<sup>[1]</sup>,而冷凝式热水器是在20世纪70年代末出现的,工作原理和冷凝式锅炉相似。冷凝式燃气热水器通过二次换

热利用烟气中水蒸气相变释放出的潜热,进一步降低排烟温度,热效率比普通的燃气热水器提高15%左右,同时烟气中的SO<sub>2</sub>等酸性气体溶于冷凝水,烟气得到净化,达到高效环保的目的。

冷凝式热水器在欧洲国家的发展已经相对成熟,产品已占热水器总量的15%以上<sup>[2]</sup>,国内对冷凝式热水器的起步相对较晚,相应的标准规范也并不成熟,目前冷凝式家用热水器测试标准主要采用《冷凝式家

用快速热水器》CJ/T 336-2010, 本文通过理论分析, 对标准中的折算热负荷的定义进行了推导, 以期对标准更透彻的理解, 此外, 分析了冷凝式热水器的能量平衡, 并通过实验测试进一步说明其能量平衡。

## 2 质量和能量平衡

与非冷凝式燃气热水器不同, 冷凝式燃气热水器需要考虑两个平衡, 即热湿平衡, 由于水分的计算存在不同的方法, 所以有必要对其能量平衡作进一步分析。

### 2.1 水蒸气和燃气混合气体的物性

含有水蒸汽的混合气体如天然气、烟气等, 若其总压为 $P$ , 相对湿度为 $RH$ , 温度为 $t$ , 根据理想气体状态方程有:

$$\text{对混合气体} \quad P - RH \cdot P_s(t) = \rho_g R_g T \quad (\text{A.1})$$

$$\text{对水蒸气} \quad RH \cdot P_s(t) = \rho_v R_v T \quad (\text{A.2})$$

式中:  $R$ ——气体常数, ( $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ );  $R = \frac{8314}{M}$

$M$ ——气体摩尔质量, ( $\text{kg/kmol}$ );

(A.2) 除以 (A.1) 有

$$\frac{\rho_v R_v}{\rho_g R_g} = \frac{RH \cdot P_s(t)}{P - RH \cdot P_s(t)} \quad (\text{A.3})$$

$$\text{或} \quad \frac{\rho_v}{\rho_g} = \frac{RH \cdot P_s(t)}{P - RH \cdot P_s(t)} \cdot \frac{R_g}{R_v} = \frac{RH \cdot P_s(t)}{P - RH \cdot P_s(t)} \cdot \frac{M_v}{M_g} \quad (\text{A.4})$$

对空气,  $M_g = 28.966$ , 对水蒸气  $M_v = 18.0154$ , 假设  $P = 101325 \text{ Pa}$ , 则有

$$\frac{\rho_v}{\rho_g} = 0.622 \frac{RH \cdot P_s(t)}{101325 - RH \cdot P_s(t)} \quad (\text{kg/kg 干空气})$$

### 2.2 冷凝式燃气热水器的热湿平衡

针对按照国家标准在实验室里安装, 尤其是配备湿式流量计的测试系统, 其输入项有: 天然气(干燥)、天然气中的水蒸气、助燃空气及空气中的水蒸气; 而输出项有: 冷凝水、烟气(干燥)及烟气中的水蒸气。各分项计算如下:

(1) 天然气(干燥)输入: 体积流量或质量流量

$$L_g^0 = L_g \frac{288.15}{288.15 + t_g} \frac{B + P_g - RH \cdot P_s(t_g)}{101325} \quad (\text{Nm}^3/\text{h}) \quad \text{或}$$

$$G_{\text{gas}} = L_g^0 \rho_g^0 \quad (\text{kg/h})$$

式中, 上标<sup>0</sup>表示标准状况下的参数

(2) 天然气带入的水蒸气

$$G_{\text{vapor-gas}} = \frac{RH \cdot P_s(t)}{B + P_g - RH \cdot P_s(t)} \frac{M_{\text{vapor}}}{M_{\text{gas}}} G_{\text{gas}} \quad (\text{kg/h})$$

(3) 助燃空气(干燥)及其带入的水蒸气

$$L_a^0 = \alpha L_g V_0 \quad (\text{Nm}^3/\text{h}) \quad \text{或} \quad G_{\text{air}} = L_a^0 \rho_a^0 \quad (\text{kg/h})$$

$$G_{\text{vapor-air}} = \frac{RH \cdot P_s(t_a)}{B - RH \cdot P_s(t_a)} \frac{M_{\text{vapor}}}{M_{\text{air}}} G_a \quad (\text{kg/h})$$

其中,  $V_0$ 为燃气燃烧所需要的理论空气量,  $\alpha$ 为过剩空气系数。

(4) 烟气体量(干燥)及其带走的水蒸气

$$L_f^0 = L_g^0 (CO_2 + N_2 + O_2) \quad (\text{Nm}^3/\text{h})$$

$$\text{或} \quad G_f = L_g^0 \rho_{\text{dr}}^0 = (CO_2 + N_2 + O_2) \quad (\text{kg/h})$$

$$G_{\text{vapor-flue}} = \frac{P_s(t_f)}{B - P_s(t_f)} \frac{M_{\text{vapor}}}{M_{\text{air}}} G_f \quad (\text{kg/h})$$

下面, 通过实验室对某品牌的冷凝式热水器的测试数据进一步说明其热湿平衡, 表1和表2分别列出了该冷凝式燃气热水器的质量平衡和能量平衡。

表1 冷凝式燃气热水器的质量平衡表

| 项目       | 单位   | 数值       | 项目      | 单位   | 数值       |
|----------|------|----------|---------|------|----------|
| 干燃气      | kg/h | 1.8434   | 干烟气     | kg/h | 55.3934  |
| 燃气带入的水蒸气 | kg/h | 0.04064  | 烟气中的水蒸气 | kg/h | 2.92701  |
| 助燃空气     | kg/h | 57.64771 | 冷凝水     | kg/h | 1.8      |
| 空气带入的水蒸气 | kg/h | 0.5905   | 计量误差    | kg/h | 0.00184  |
| 总计       | kg/h | 60.12225 | 总计      | kg/h | 60.12225 |

表2 冷凝式燃气热水器的能量平衡表

| 项目                      | 单位   | 数值     | 项目                       | 单位   | 数值     |
|-------------------------|------|--------|--------------------------|------|--------|
| $Q_{\text{gas}}$        | kJ/h | 71     | $Q_{\text{utilized}}$    | kJ/h | 80 568 |
| $H_{\text{vapor-gas}}$  | kJ/h | 104    | $Q_{\text{flue}}$        | kJ/h | 3 502  |
| $Q_{\text{air}}$        | kJ/h | 1 150  | $H_{\text{vapor-flue}}$  | kJ/h | 4 658  |
| $H_{\text{vapor-air}}$  | kJ/h | 1 498  | $Q_{\text{water-drain}}$ | kJ/h | 268    |
| $Q_{\text{gas-comb}}$   | kJ/h | 87 981 | 计量误差                     | kJ/h | 3 310  |
| $Q_{\text{water-cond}}$ | kJ/h | 4 502  |                          |      |        |
| 总计                      | kJ/h | 95 306 | 总计                       | kJ/h | 95 306 |

其能量平衡各项计算如下:

(1) 天然气显热

$$G_{gas}=c_g t_g L_g^0=1.5099 \times 2.54 \times 18.7=71 \text{ (kJ/h)}$$

(2) 天然气带入水分焓值

$$H_{vapor-gas}=(2501+1.84 t_g) G_{vapor-gas}=0.04064 \times (2501+1.84 \times 19.8)=104 \text{ (kJ/h)}$$

(3) 助燃空气显热

$$Q_{air}=c_a t_a L_a^0=\frac{1.235}{1.2254} \times 57.64771 \times 19.8=1150 \text{ (kJ/h)}$$

(4) 助燃空气带入水分焓值

$$H_{vapor-air}=(2501+1.84 t_a) G_{vapor-air}=0.5905 \times (2501+1.84 \times 19.8)=1498 \text{ (kJ/h)}$$

(5) 干烟气显热

$$Q_{flue}=c_f t_f G_{flue}=\frac{1.25404}{1.014839 \times 1.2254} \times 55.3934 \times 19.8627=3502 \text{ (kJ/h)}$$

(6) 烟气中水分焓值

$$H_{vapor-flue}=(2501+1.84 t_f) G_{vapor-flue}=2.92701 \times (2501+1.84 \times 62.7)=7658 \text{ (kJ/h)}$$

(7) 冷凝水焓值

$$Q_{water-drain}=c_w t_w G_w=4.1868 \times 35.6 \times 1.8=268 \text{ (kJ/h)}$$

(8) 燃烧释放的热量

$$Q_{gas-comb}=L_g^0 H_{gas}=2.54 \times 34638.1=87981 \text{ (kJ/h)}$$

(9) 冷凝水释放的潜热

$$Q_{water-cond}=2501 \times 1.8=4502 \text{ (kJ/h)}$$

(10) 用于加热热水的热量

$$Q_{utilized}=4.1868 \times (56.83-16.79) \times 8.01 \times 60=80568 \text{ (kJ/h)}$$

### 3 折算热负荷

在《冷凝式家用燃气快速热水器》CJ/T336-2010中,引入折算热负荷的概念,从表面上看,与之前的标准相比有不少混乱之处,其实质是按照自某个湿式流量计所测得的湿燃气体积流量,折算为基准状态下、干的设计气下的流量,以及对应此流量的热水器实际功率。

为清楚地阐述这一问题,推导计算公式过程如下:

在采用湿式流量计、测试气的情况下,大气压为 $P_a$ ,燃气表的压力为 $P_g$ ,温度为 $t_g$ ,流量读数为 $V(m^3/h)$ ;

假设在采用干式流量计、设计气的情况下,大气压为101.325kPa,燃气表的压力为 $P_g$ ,温度为15℃

(288.15K),流量为 $V_r(m^3/h)$ ;

按照压力降相等的原则,应有:

$$\frac{1}{2} \rho_{wet} V^2=\frac{1}{2} \rho_r V_r^2 \quad (B.1)$$

其中: $\rho_{wet}$ 为湿燃气在压力 $P_g$ 、温度 $t_g$ 下的密度( $kg/m^3$ );可由标准状态下湿燃气的密度折算获得,标准状态下,由于燃气和水蒸汽组成的混合气体的密度为:

$$\rho_{wet}^0=y_{dr} \rho_{dr}^0+y_s \rho_s^0 \text{ (kg/Nm}^3\text{)} \quad (B.2)$$

对总压为 $(P_g+P_a)$ 的混合气体,若水蒸汽的分压为 $P_s$ ,则:

$$y_{dr}=\frac{P_g+P_a-P_s}{P_g+P_a}; y_s=\frac{P_s}{P_g+P_a}$$

故有:

$$\rho_{wet}^0=\frac{P_g+P_a-P_s}{P_g+P_a} \rho_{dr}^0+\frac{P_s}{P_g+P_a} \rho_s^0 \text{ (kg/Nm}^3\text{)} \quad (B.3)$$

考虑温度与压力修正后,在压力 $P_g$ 、温度 $t_g$ 下的密度 $\rho_{wet}$ ( $kg/m^3$ ),为:

$$\rho_{wet}=\rho_{wet}^0 \cdot \frac{288.15}{273.15+t_g} \cdot \frac{P_g+P_a}{101.325} \text{ (kg/Nm}^3\text{)} \quad (B.4)$$

$$=\left(\frac{P_g+P_a-P_s}{P_g+P_a} \rho_{dr}^0+\frac{P_s}{P_g+P_a} \rho_s^0\right) \cdot \frac{288.15}{273.15+t_g} \cdot \frac{P_g+P_a}{101.325} \text{ (kg/Nm}^3\text{)}$$

同理,对压力为 $P_g$ 、温度为15℃的干设计气,其密度为:

$$\rho_r=\rho_r^0 \cdot \frac{101.325+P_g}{101.325} \text{ (kg/Nm}^3\text{)} \quad (B.5)$$

由式(B.1)可有:

$$V_r=V \sqrt{\frac{\rho_{wet}}{\rho_r}}=V \sqrt{\frac{\left(\frac{P_g+P_a-P_s}{P_g+P_a} \rho_{dr}^0+\frac{P_s}{P_g+P_a} \rho_s^0\right) \cdot \frac{288.15}{273.15+t_g} \cdot \frac{P_g+P_a}{101.325}}{\rho_r^0 \cdot \frac{P_g+101.325}{101.325}}} \text{ (m}^3\text{/h)}$$

将 $V_r(15^\circ\text{C}, P_g+101.325)$ 修正到标准状态( $15^\circ\text{C}, 101.325$ ),有:

$$V_r^0=V_r \cdot \frac{P_g+101.325}{101.325} \text{ (Nm}^3\text{/h)}$$

$$V_r^0=V \cdot \frac{P_g+101.325}{101.325} \sqrt{\frac{\left(\frac{P_g+P_a-P_s}{P_g+P_a} \rho_{dr}^0+\frac{P_s}{P_g+P_a} \rho_s^0\right) \cdot \frac{288.15}{273.15+t_g} \cdot \frac{P_g+P_a}{101.325}}{\rho_r^0 \cdot \frac{P_g+101.325}{101.325}}}$$

定义:

湿燃气的相对密度为:

$$d_h = \left( \frac{P_g + P_a - P_s}{P_g + P_a} \rho_{dr}^0 + \frac{P_s}{P_g + P_a} \rho_s^0 \right) / \rho_a^0 (1.2257)$$

干基准气的相对密度为:

$$d_r = \rho_r^0 / \rho_a^0 (1.2257)$$

则有:

$$V_r^0 = V \cdot \sqrt{\frac{d_h}{d_r} \cdot \frac{288.15}{273.15 + t_g} \cdot \frac{P_g + P_a}{101.325} \cdot \frac{P_g + 101.325}{101.325}}$$

故对应于干的基准气的热负荷(折算热负荷)为:

$$\phi = H_i \cdot V_r^0 = H_i \cdot V \cdot \sqrt{\frac{d_h}{d_r} \cdot \frac{288.15}{273.15 + t_g} \cdot \frac{P_g + P_a}{101.325} \cdot \frac{P_g + 101.325}{101.325}} (kW)$$

上式便是冷凝式家用燃气快速热水器中折算热负荷的定义,分析其原因可归纳为以下3点:

(1) 测试时,出于精度的考虑,必须使用湿式流量计;而实际使用时,天然气是绝对干燥的,不含有任何水分;

(2) 不同的测试场所,可能使用不同组分的天然气,计算热负荷时,必须要有统一的评价基准;

(3) 在基准状态、干设计气下的流动阻力,与

湿的测试气,所导致的流动阻力是一样的,二者的灶前压力均为2kPa。

## 4 结论

(1) 与非冷凝式燃气热水器不同,冷凝式燃气热水器需要考虑两个平衡,即热湿平衡,详细叙述了各项的计算公式,并通过实测数据进一步说明其热湿平衡。

(2) 严格推导了标准中折算热负荷的定义式,从表面上看,与之前的标准相比有不少混乱之处,其实质是按照自某个湿式流量计所测得的湿燃气流量,折算为基准状态下、干的设计气下的流量,以及对应此流量的热水器实际功率。

### 参考文献

- 熊超,秦朝葵,戴万能等. 冷凝式燃气热水器技术及应用[J]. 天然气工业, 2010; 30(2): 112-114
- 吴明华,王国志,于兰英等. 冷凝式燃气热水器的热工性能实验研究[J]. 机械设计与制造, 2013; 12: 90-92

## 工程信息

### 宜兴港华天然气高压管网接受“胃镜”检查

天然气管道内部检测因技术难度而存在的空白将成为历史。日前,宜兴港华利用高端技术,从6月上旬开始,计划用两个月时间,对全市直径508mm的天然气管道的高压管网的内壁进行“不停气”检测。宜兴市直径508mm的天然气管道的高压管网长度达25.6km,是天然气中低压管网的“主动脉”。2014年起,在已实现对管网外部常态化维护的基础上,宜兴港华“牵手”隶属中国石油天然气管道局的国内顶尖管道检测公司,经多次演练,试验出一套适合宜兴市高压管道内检测系统。整个检测过程相当于

给天然气管道做一次“胃镜”:将检测装置放置在管道内,通过对天然气压力和流速的控制,让检测器得以在管道内平稳运行,借此实现对管道内壁的诊断。检测装置运行完毕后,将出一份管道内检测评估报告,通过数据和磁力线图,清晰反映管道内壁情况,对腐蚀、变形等可做出防范与判断,并可实现问题管段的快速定位,为后续维护提供便利。据了解,检测工作并不会对宜兴市天然气正常供应造成影响。通过检测,将进一步提升全市天然气管网运行水平,维护城市运营安全。(胡凯)