

冷凝燃气锅炉评价与热效率计算

梁耀东, 李之光, 刘 峰, 徐 甫, 刘立波

(辽宁盛昌绿能锅炉公司 北京盛昌之光锅炉研发中心 北京 102600)

Evaluation and Energy Efficiency Calculation of the Condensing Boiler

LIANG Yao-dong, LI Zhi-guang, LIU Feng, XU Fu, LIU Li-bo

(Liaoning Shengchang Boiler Co. Ltd.,

Beijing Zhi-guang Boiler Research Center, Beijing 102600, China)

摘 要: 对不同排烟温度的锅炉应从能效、适用范围、造价等方面进行综合评价;指出冷凝锅炉热效率大于 100% 的推导结果不仅有误还可能引起误导,提出符合实际的按输入热量中含冷凝潜热的热效率与耗气量计算方法。

关键词: 燃气锅炉;烟气冷凝;综合评价;热效率计算方法

中图分类号:TK229.8

文献标识码:B



第一作者:梁耀东(1960-),毕业于哈尔滨工业大学动力工程系,高级工程师;主要从事锅炉、热能工程技术与产品的研发与设计工作。

0 引言

随着节能问题日益突出,冷凝燃气锅炉备受业界关注,出现大量文献加以论述推荐;其中对于冷凝效果、热效率等关键概念认识不一,“冷凝锅炉热效率超过 100%”的不科学、不切实际宣传已引起许多非专业人士的误解。因此,需要准确评估冷凝本身带来的效益与引发的负面作用,并给出符合实际的能效评价和热效率计算方法,以利于该类锅炉理性发展。

1 锅炉烟气中水蒸气冷凝问题

以往设计锅炉时,为防止烟气露点腐蚀,排烟温度取得较高,排烟热损失大,锅炉热效率不高。根据长期运行实践经验积累及技术进步,烟气露点腐蚀

问题的解决已有技术经济可行

的措施,现今锅炉设计时,基本

不受烟气露点温度的约束,可使锅炉效率大幅度提高。但是,问题并非这样简单,以下有关天然气锅炉烟气中水蒸气冷凝及其利用问题需要全面、准确理解。

(1) 壁面冷凝多于烟气冷凝

烟气中水蒸气冷凝的条件是:烟气温度(t_y)已达到或低于烟气中水蒸气分压力下的饱和温度,此饱和温度称为露点温度(t_{ld})。

露点温度随着燃气种类的变化而改变,主要取决于烟气中水蒸气份额,另外,与含硫量关系甚大。天然气基本不含硫,理论计算的天然气锅炉烟气露点温度一般为 55~60℃,分析问题,其露点温度 t_{ld} 可取 55℃。

① 壁面冷凝多于烟气冷凝

收稿日期:2015-05-08

[4]董亚民. 工业锅炉能效测试中相关问题的探讨[J]. 中国特种设备安全 2011 27(2):58-59.

[5]程静,谢常欢,吴继权. 燃气工业锅炉的耗能现状与节能途径[J]. 中国特种设备安全 2013 29(10):27-28.

[6]陈晓梅. 对于工业锅炉能效测试结果分析与改进措施[J]. 资源节约与环保 2014(6):8.

[7]R. Saidur, J. U. Ahamed, H. H. Masjuki. Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers[J]. Energy Policy, 2010, 38(5):2188-2197.

[8]李巍,江德龙. 工业锅炉能效偏低的原因分析与解决对策[J]. 节能 2013(6):68-70.

[9]尹武成. 浅谈工业锅炉燃烧节能体验的几点认识[J]. 科技资讯 2014(29):55.

[10]黄生琪,周菊华. 工业锅炉节能减排措施[J]. 设备管理与维修 2012(11):58-61.

[11]王俊雷. 潍坊地区工业锅炉现状及其节能减排的措施[J]. 科技视界 2012(18):75-63.

烟温 $t_y < t_{ld}$ ——烟气冷凝(烟气中的水蒸气呈雾状),指烟气本身的直接冷凝;

壁温 $t_{bi} < t_{ld}$ ——壁面冷凝(壁面形成水珠、水膜),指烟气接触壁面引起的冷凝。

壁温 t_{bi} 肯定低于烟温 t_y (进水(回水、给水)的放热系数明显大于烟气放热系数,故壁温仅高出水温几度,即 $t_{bi} \approx t_{\text{进水}}$) ,则壁面冷凝多于烟气冷凝,或仅存在壁面冷凝。

②壁面冷凝与烟气温度的关系

当受热面壁温降低到露点温度时,有部分水蒸

气凝结于壁面上;当主流烟气温度也低到露点温度时,水蒸气也开始凝结,此时才可能释放大量汽化潜热。

在高温烟气环境下,壁面冷凝→蒸发→再壁面冷凝→再蒸发……,无冷凝水(不“淌水”)、无潜热回收;在低温烟气环境下,壁面冷凝→水膜→有冷凝水,回收冷凝水潜热。

表1、图1给出烟管中不同排烟温度时的烟气冷凝现象。

表1 不同排烟温度时的烟气冷凝性状与现象

排烟温度 $t_{py}/^{\circ}\text{C}$	排烟温度 t_{py} 与露点 温度 t_{ld} 的比较	烟气冷凝现象	冷凝条件	壁面冷凝现象
20	$t_{py} < t_{ld}$	存在烟气冷凝	必然 $t_{\text{回水}} < t_{py} < t_{ld}$	存在壁面冷凝,大量冷凝水,见图1a
60	$t_{py} > t_{ld}$	不存在烟气冷凝	必然 $t_{\text{回水}} < t_{py} < t_{ld}$	存在壁面冷凝,部分冷凝水,见图1b
100	$t_{py} > t_{ld}$	不存在烟气冷凝	仅当 $t_{\text{回水}} < t_{ld}$	存在壁面冷凝,但烟温高于 t_{ld} ,冷凝又蒸发,少量冷凝水,见图1c
200	$t_{py} \gg t_{ld}$	不存在烟气冷凝	仅当 $t_{\text{回水}} < t_{ld}$	存在壁面冷凝,但烟温较高,冷凝后又明显蒸发,则少见冷凝水,见图1d



图1 烟管中烟气冷凝与壁面冷凝示意图

(2) 潜热回收明显少于显热回收

对于天然气锅炉,排烟温度从 200 $^{\circ}\text{C}$ 降到 60 $^{\circ}\text{C}$,每立方米天然气可多回收烟气显热 2 361 kJ/m^3 (标态);若壁温较低,当烟气中有 20% 水蒸气冷凝时,还可回收潜热 761 kJ/m^3 (标态)。则潜热回收约占全部回收的 1/4,显热回收约占全部回收的 3/4。计算表明,回收潜热不到锅炉全部吸热量的 2%。

排烟温度从 200 $^{\circ}\text{C}$ 降到 20 $^{\circ}\text{C}$,回收烟气显热

3 028 kJ/m^3 (标态);若烟气中有 40% 水蒸气冷凝,可回收潜热 1 521.6 kJ/m^3 (标态),则潜热回收约占全部回收的 1/3,显热回收约占全部回收的 2/3。回收潜热不到锅炉全部吸热量的 4%。

可见,锅炉能效的提高不能全归功于冷凝,而且冷凝的作用并不很大。

既然回收冷凝潜热比重不大,则锅炉称为“冷凝锅炉”并不确切,称为“高效锅炉”可能较适宜。

(3) 冷凝率不可能很高

当排烟温度 60 $^{\circ}\text{C}$ 时,只有烟气主流中的水蒸气经过大量不凝结气体(CO_2 、 N_2 等)接触到壁面时而冷凝,未接触到壁面的水蒸气随主流烟气而排走,因此,实际冷凝率不可能很高;而当排烟温度 100 $^{\circ}\text{C}$ 或更高,烟温较高会使壁面冷凝水再蒸发,冷凝率会更低。

烟气冷凝率目前尚无准确计算方法,冷凝率只能根据锅炉(或试验装置)实测冷凝水量换算得出。

冷凝率数据对热效率、耗气量计算很重要,但目前尚欠缺足够精确数据,当设计取值时,只能估计,或参见表2。

表2 冷凝率近似取值

进水(回水、给水)温度/ $^{\circ}\text{C}$	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50
排烟温度/ $^{\circ}\text{C}$	40 ~ 60	50 ~ 80	60 ~ 90	70 ~ 100
冷凝率 ε	0.3 ~ 0.35	0.2 ~ 0.3	0.1 ~ 0.2	0.05 ~ 0.1

我们对运行锅炉进行了精确实测,当排烟温度

80 $^{\circ}\text{C}$ 、进水温度 1 $^{\circ}\text{C}$,冷凝率才约 22%;当排烟温度

105℃、进水温度32℃,冷凝率约5%。

其它有关资料显示:

当排烟温度84℃、进水温度50℃,冷凝率只有8%^[1];

当排烟温度74~83℃、进水温度40~45℃,冷凝率30%~17%^[2];

当排烟温度60℃、进水温度15℃,冷凝率才达31%^[2]。

当排烟温度约45℃、进水温度约30℃,冷凝率才达约46%^[3]。

(4) 冷凝受热面烟气放热系数明显提高

单相气体(例如一般烟气)放热的热阻集中在紧靠固体壁面的层流边界层上(气体密度很小、质点基本无横向运动,传热能力很差),其放热系数 α 相对很低——仅几十 $\text{W}/\text{m}^2\text{℃}$ 。

若为螺纹烟管,螺纹后部一定距离内形成涡流,破坏热阻颇大的气体层流边界层,使放热系数明显提高——目前工程利用约提高1倍(尚不到100 $\text{W}/\text{m}^2\text{℃}$)^[4]。

水、汽水混合物或蒸汽冷凝放热系数相对上述烟气要大得多:水、汽水混合物的放热系数 α 高达3000~5000 $\text{W}/\text{m}^2\text{℃}$;蒸汽冷凝的放热系数 α 高达10000 $\text{W}/\text{m}^2\text{℃}$ 以上;但有1%不可溶气体时, α 约下降一半。

对于烟气冷凝放热系数:含水蒸气的烟气由于不可溶气体(烟气)占主导地位,尽管冷凝,其放热系数不可能提高很多。大量文献给出的资料表明仍与单相烟气处于同一数量级(提高不会超过10倍)。不同条件下不同结构冷凝器试验表明,放热系数 α 提高2倍、2~3倍甚至4倍,也有1.5~3倍不等^[5]。

我们对运行锅炉螺纹烟管实测(冷凝率5%~22%)得:放热系数 α 约提高1.5倍,这也使受热面有明显减少。

可见,进水温度较低时发生壁面冷凝,当烟温较高时由于冷凝水再蒸发,尽管冷凝潜热回收较少,但壁面冷凝使放热系数得以提高、受热面有所减少。

(5) 烟管(或水管)的烟气露点腐蚀问题

据长期在工业锅炉生产与质量监检第一线工作、经验丰富的工程技术人员反映,以及我们长期考察总结,对锅炉冷凝“淌水”与烟气露点腐蚀问题有

以下看法。

① “淌水”现象普遍存在

我国燃煤、燃油锅炉在锅炉启动过程或低负荷运行(进水温度较低)时,锅炉尾部低温受热面“淌水”现象经常发生(有时不太注意或未觉察),燃气锅炉尤为突出。因此,各类工业锅炉尾部低温受热面烟气冷凝现象不可避免。

② 工业锅炉烟管(或水管)因烟气露点腐蚀导致报废的情况并不突出

尽管冷凝“淌水”现象普遍存在,烟气露点腐蚀也客观存在,但是并未因此引起碳钢受热面烟气腐蚀而导致快速报废问题;由于烟气腐蚀而导致工业锅炉事故的案例也十分罕见。

③ 冷凝受热面(烟管或水管)可采用碳素钢

工业锅炉烟管或水管的壁厚一般为3~3.5mm,其强度裕度颇大(占实际壁厚的70%~80%),即使少有腐蚀,也不会影响寿命。

采用分离式螺纹烟管冷凝换热器是廉价可行的。即使运行多年以后,需要更换烟管或整体更换,既简便又经济。排烟温度约为100℃的节能器烟管钢耗不大,如采用ND钢,成本也增加不多。

2 含冷凝的燃气高效工业锅炉

(1) 排烟温度约为100℃的燃气高效工业锅炉

排烟温度约为100℃时能够满足我国工业锅炉参数系列(95/70℃)供热参数需求。

高效低应力卧式内燃燃气锅炉结构示意图2,螺纹烟管热能回收烟管筒(省煤器)布置于锅壳的侧上方。

此型锅炉按额定工况下、非冷凝状态设计;排烟温度为100℃,热效率比常规锅炉(排烟温度约为200℃)有明显提高(约5个百分点),达95%。当水温低于55℃(70%~80%额定负荷的常态工况),省煤器壁面冷凝,传热系数上升,排烟温度下降,热效率还要提高约1个百分点。

该型锅炉采用拱形管板、波形炉胆、螺纹烟管相配合,使得本体结构的柔性明显上升,运行时热应力明显下降。因此,我们将此型锅炉称为“高效低应力内燃燃气锅炉”。此型锅炉钢耗与排烟温度约为200℃的常规卧置内燃三回程对比,并无增加。此型锅炉已经过严格能效测试,相关结果见表3。

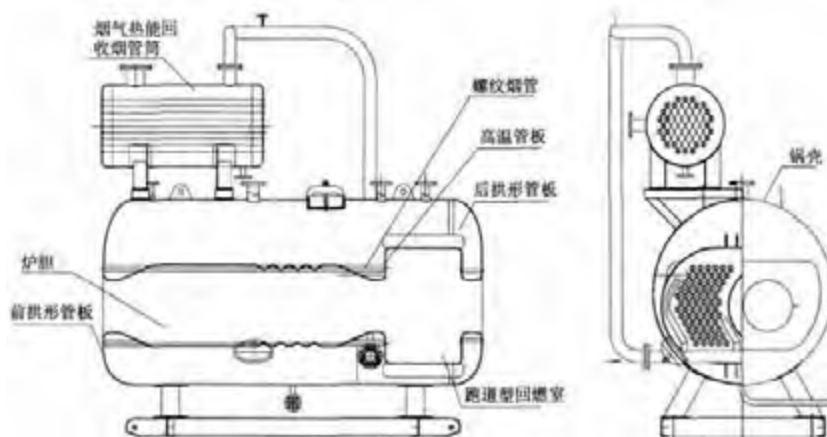


图2 高效低应力卧式内燃燃气锅炉结构示意图

表3 测试结果

项目	蒸发量 ¹⁾ /(t·h ⁻¹)	压力/MPa	给水温度/℃	排烟温度/℃	热效率	烟气阻力/Pa
原设计 ²⁾	1.0	1.0	20	100	95.1%	1 647
试验1	1.05	0.7	1	88	95.8%	1 520
试验2	1.10	0.7	32	105	95.3%	—

注:1)已考虑压力、给水温度修正; 2)烟管筒节能器受热面按放热系数增大1.5倍设计。

(2)排烟温度约为60℃的燃气高效工业锅炉

关于“国外排烟温度较低的冷凝锅炉得到较大发展”的表述,应该明确是工业锅炉还是其它用途小容量锅炉(如地热采暖、低温工艺用、生活用等)。

排烟温度为60℃(含冷凝)的燃气工业锅炉的单位耗气量相对排烟温度为100℃(不考虑冷凝)的燃气锅炉约下降4%(计算实例见后),但以下问题应予以考虑:

① 由于必须大量增加受热面积,使得制造成本明显上升——至少增加约20%,另外,烟气阻力也将增大。

② 对于工业锅炉,参数较高:我国热水型锅炉最低额定水温为95/70℃,一些蒸汽锅炉给水温度为60℃及以上,则额定参数下,壁面冷凝不存在,烟气冷凝更不可能。如果工业锅炉由高温与低温两部分组成,形成两个回路,则低温部分能够冷凝,但锅炉与系统就较为复杂。

③ 燃气锅炉应该如何发展,不应单纯追求能效,而应根据实际需要,区别对待。

3 含冷凝的燃气锅炉热效率计算方法建议

目前燃气锅炉热效率计算存在明显问题,值得研究与商榷。以低位发热量或高位发热量为基准计算含冷凝的锅炉热效率与实际热力模型皆不相符,均无实际意义。

以低位发热量 $Q_{\text{net,ar}}$ 为输入热量计算热效率,由于实际输入热量 $(Q_{\text{net,ar}} + \varepsilon R)$ (式中 ε 为冷凝率; R

为潜热)大于 $Q_{\text{net,ar}}$,必然热效率大于实际情况,甚至超过100%。许多文献推导出的热效率达100%~105%,还有更高的。

以高位发热量 $Q_{\text{gr,ar}}$ 为输入热量计算热效率,由于实际输入热量 $(Q_{\text{net,ar}} + \varepsilon R)$ 小于 $Q_{\text{gr,ar}}$,必然使热效率低于实际情况。

(1) 常规(非冷凝)锅炉热效率与耗气量计算为对比,首先回顾常规(非冷凝)锅炉的热效率计算方法。

输入热量为 $Q_{\text{net,ar}}$,于是锅炉各项热损失为:

$$\begin{aligned} q_2 &= (I_{\text{ex}} - \alpha_{\text{ex}} I_{\text{l,a}}^0) / Q_{\text{net,ar}} \\ q_3 &= Q_3 / Q_{\text{net,ar}} \\ q_5 &= Q_5 / Q_{\text{net,ar}} \end{aligned}$$

式中 q_2 ——排烟热损失, %

I_{ex} ——相应于排烟过量空气系数 α_{ex} 和排烟温度 θ_{ex} 条件下的烟气焓 kJ/m³

α_{ex} ——排烟过量空气系数

$I_{\text{l,a}}^0$ ——理论冷空气焓 kJ/m³

$Q_{\text{net,ar}}$ ——燃料收到基低位发热量 kJ/m³

q_3 ——气体不完全燃烧热损失, %

Q_3 ——气体不完全燃烧损失热量 kJ/m³

q_5 ——散热损失, %

Q_5 ——锅炉散热损失热量 kJ/m³

得

$$\eta_o = 1 - q_2 - q_3 - q_5 \quad (1)$$

则

$$B_o = Q_{\text{输出}} / (Q_{\text{net,ar}} \eta) \quad (2)$$

单位耗气量:

$$b_o = B_o / Q_{\text{输出}} = 1 / (Q_{\text{net, ar}} \eta) \quad (2')$$

可见,全部公式皆基于输入热量 $Q_{\text{net, ar}}$ 。

对于不含冷凝的常规锅炉,烟气中水蒸气不冷凝而排走,以上计算以低位发热量 $Q_{\text{net, ar}}$ 为基础体现了实际情况。

(2) 含冷凝的锅炉热效率与耗气量计算

锅炉输入热量除燃料低位发热量外,有些情况下还包括外部加热空气、蒸汽雾化等带入的热量;当烟气的热能得以回收利用时,则烟气部分冷凝释放出的潜热也应视为输入热量,即输入热量为 $Q_{\text{net, ar}} + \varepsilon R$ 。则

锅炉的各项热损失为:

$$q_{2(\text{ln})} = (I_{\text{ex}}' - \alpha_{\text{ex}} I_{\text{L, a}}^0) / (Q_{\text{net, ar}} + \varepsilon R)$$

$$q_{3(\text{ln})} = Q_3 / (Q_{\text{net, ar}} + \varepsilon R) = q_3 Q_{\text{net, ar}} / (Q_{\text{net, ar}} + \varepsilon R)$$

$$q_{5(\text{ln})} = Q_5 / (Q_{\text{net, ar}} + \varepsilon R) = q_5 Q_{\text{net, ar}} / (Q_{\text{net, ar}} + \varepsilon R)$$

$$q_{\text{ln}} = Q_{\text{ln}} / (Q_{\text{net, ar}} + \varepsilon R) \approx 0$$

式中 I_{ex}' ——扣除冷凝水分的排烟焓, kJ/m^3 (标态) $I_{\text{ex}}' = I_{\text{ex}} - \varepsilon I_{\text{H}_2\text{O}}^0$

ε ——冷凝率,排烟冷凝水占排烟烟气中水蒸气总量的份额(见表2);影响其主要因素是烟气特性(含湿量等)及排烟温度;含湿量愈大、排烟温度愈低,冷凝率愈大;其次,烟气流速、节能器结构型式等因素对冷凝率均有影响。对应某一台锅炉,相对准确的冷凝率应经实测得到。

R ——每标准立方米天然气烟气中水蒸气全部冷凝回收的潜热, kJ/m^3 (标态),它与烟气特性及冷凝温度有关,经计算得出 $R = 4\,334 \text{ kJ/m}^3$ (标态)

$q_{\text{ln}}, Q_{\text{ln}}$ ——冷凝水物理热损失,由于相对很小,忽略不计。

于是得:

$$\eta_{\text{ln}} = 1 - q_{2(\text{ln})} - q_{3(\text{ln})} - q_{5(\text{ln})} \quad (3)$$

$$\text{则 } B_{\text{ln}} = Q_{\text{输出}} / [(Q_{\text{net, ar}} + \varepsilon R) \eta_{\text{ln}}] \quad (4)$$

单位耗气量:

$$b_{\text{ln}} = B_{\text{ln}} / Q_{\text{输出}} = 1 / [(Q_{\text{net, ar}} + \varepsilon R) \eta_{\text{ln}}] \quad (4')$$

式中

$$q_{3(\text{ln})} \approx q_3$$

$$q_{5(\text{ln})} \approx q_5$$

可见,含冷凝锅炉的全部公式皆基于输入热量为 $Q_{\text{net, ar}} + \varepsilon R$ 。

以上公式中如冷凝率 $\varepsilon = 0$,即转变为前述非冷凝公式。

(3) 建议用单位耗气量直接体现锅炉能效

① 常规锅炉

长期以来,工业锅炉习惯于用热效率来表示能效。由式(2)可见,热效率与耗气量成反比,即热效率能直接反映出耗气量,而耗气量正是锅炉能效的直接体现。因此,对于常规锅炉,能效指标既可以用热效率——式(1),也可以用耗气量——式(2)来表示。

② 含冷凝的锅炉

由式(4)可见,耗气量不仅取决于热效率 η_{ln} ,还与冷凝率 ε 有关,仅热效率不能全面反映耗气量的多少。因此,对于含冷凝的锅炉,能效指标应是耗气量——式(4),而不是热效率——式(3)。

③ 用单位耗气量直接体现锅炉能效(对应不同燃料发热量)

单位耗气量计算式见式(2')与式(4')。

单位耗气量 (m^3/h) (标态) / (0.7 MW) 或 (m^3/h) (标态) / (t/h) 类似于发电锅炉的耗能指标: g (克标准煤) / ($\text{kW} \cdot \text{h}$) (度电)。

(4) 热效率与耗气量计算实例

以 0.7 MW 天然气热水锅炉,在排烟温度 200 $^{\circ}\text{C}$ 、100 $^{\circ}\text{C}$ 与 60 $^{\circ}\text{C}$ 时进行对比计算。

① 排烟温度为 200 $^{\circ}\text{C}$ 不存在冷凝

排烟热损失:

$$q_2 = \frac{I_{\text{ex}} - \alpha_{\text{ex}} I_{\text{L, a}}^0}{Q_{\text{net, ar}}} (100 - q_4) = \frac{3\,361 - 1.15 \times 252}{36\,533}$$

$$\times (100 - 1) = 8.41\%$$

取 $q_3 = 0.5\%$ (化学不完全燃烧热损失)

$q_5 = 1\%$ (散热损失)

则锅炉热效率: $\eta_o = 100 - q_2 - q_3 - q_5 = 100 - 8.41 - 0.5 - 1 = 90.09\%$

$$\text{耗气量: } B_o = \frac{100 Q_1}{\eta Q_{\text{net, ar}}} = \frac{100 \times 700}{90.09 \times 36\,533}$$

$$= 0.021\,3 \text{ m}^3/\text{s} (\text{标态}) = 76.6 \text{ m}^3/\text{h} (\text{标态})$$

单位耗气量:

$$b_o = 76.6 (\text{m}^3/\text{h}) (\text{标态}) / (0.7 \text{ MW})$$

② 排烟温度为 100 $^{\circ}\text{C}$ 不存在冷凝

$$q_2 = \frac{I_{\text{ex}} - \alpha_{\text{ex}} I_{\text{L, a}}^0}{Q_{\text{net, ar}}} (100 - q_4) = \frac{1\,667 - 1.15 \times 252}{36\,533}$$

$$\times (100 - 0) = 3.77\%$$

锅炉热效率: $\eta = 100 - q_2 - q_3 - q_5 = 100 - 3.77 - 0.5 - 1 = 94.73\%$

$$\text{耗气量: } B = \frac{100 Q_1}{\eta Q_{\text{net, ar}}} = \frac{100 \times 700}{94.73 \times 36\,533} = 0.020\,2$$

$$\text{m}^3/\text{s} = 72.8 \text{ m}^3/\text{h} (\text{标态})$$

单位耗气量:

$$b = 72.8 (\text{m}^3/\text{h}) / (0.7 \text{ MW})$$

③ 排烟温度为 60 °C

a、不考虑冷凝

排烟热损失:

$$q_2 = \frac{I_{\text{ex}} - \alpha_{\text{ex}} I_{\text{L,a}}^0}{Q_{\text{net,ar}}} (100 - q_4) = \frac{1\,000 - 1.15 \times 252}{36\,533}$$

$$\times (100 - 0) = 1.94\%$$

取 $q_3 = 0.5\%$ 、 $q_5 = 1\%$ (同上),

则锅炉热效率:

$$\eta = 100 - q_2 - q_3 - q_5 = 100 - 1.94 - 0.5 - 1 = 96.56\%$$

$$\text{耗气量: } B' = \frac{100 Q_1}{\eta Q_{\text{net,ar}}} = \frac{100 \times 700}{96.56 \times 36\,533} =$$

$$0.0198 \text{ m}^3/\text{s} (\text{标态}) = 71.4 \text{ m}^3/\text{h} (\text{标态})$$

单位耗气量:

$$b' = 71.4 (\text{m}^3/\text{h}) / (0.7 \text{ MW})$$

b、考虑冷凝

按前述 1 之(3), 取冷凝率 20% ($\varepsilon = 0.2$) 则:

$$\begin{aligned} q_{2(\text{ln})} &= \frac{I'_{\text{ex}} - \alpha_{\text{ex}} I_{\text{L,a}}^0}{Q_{\text{net,ar}} + \varepsilon R} (100 - q_4) \\ &= \frac{961 - 1.15 \times 252}{36\,533 + 0.2 \times 4\,334} \times (100 - 0) \\ &= 1.8\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{3(\text{ln})} &= q_3 \frac{Q_{\text{net,ar}}}{Q_{\text{net,ar}} + \varepsilon R} \\ &= 0.5 \times \frac{36\,533}{36\,533 + 0.2 \times 4\,334} \\ &= 0.488 \approx 0.5\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{5(\text{ln})} &= q_5 \frac{Q_{\text{net,ar}}}{Q_{\text{net,ar}} + \varepsilon R} \\ &= 1.0 \times \frac{36\,533}{36\,533 + 0.2 \times 4\,334} \\ &= 0.977 \approx 1.0\% \end{aligned}$$

式中 排烟焓 $I'_{\text{ex}} = 961 (\text{kJ}/\text{m}^3)$ (标态), 已减掉 20% 烟气中的水蒸气焓。

则锅炉热效率:

$$\eta_{\text{ln}} = 100 - q_{2(\text{ln})} - q_{3(\text{ln})} - q_{5(\text{ln})} = 100 - 1.8 - 0.5 - 1 = 96.7\%$$

$$\begin{aligned} \text{耗气量: } B_{\text{ln}} &= \frac{100 Q_1}{\eta_{\text{ln}} (Q_{\text{net,ar}} + \varepsilon R)} \\ &= \frac{100 \times 700}{96.56 \times (36\,533 + 0.2 \times 4\,268)} = \end{aligned}$$

$$0.0194 \text{ m}^3/\text{s} = 69.8 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{单位耗气量: } b_{\text{ln}} = 69.8 (\text{m}^3/\text{h}) / (0.7 \text{ MW})$$

④ 排烟温度 60 °C ($\varepsilon = 0.2$) 相对排烟温度 200 °C 的节能效益

由于显热回收与冷凝潜热回收使耗气量的减少百分数:

$$(1 - B_{\text{ln}}/B_o) \times 100 = (1 - 69.8/76.6) \times 100 = 8.88\%$$

仅由于显热回收使耗气量的减少百分数:

$$(1 - B'/B_o) \times 100 = (1 - 71.4/76.6) \times 100 = 6.79\%$$

仅由于潜热回收使耗气量的减少百分数:

$$[(B' - B_{\text{ln}})/B_o] \times 100 = [(71.4 - 69.8)/76.6] \times 100 = 2.09\%$$

可见, 冷凝潜热回收要比显热回收少得多——冷凝潜热回收不到 1/4。

⑤ 含冷凝的锅炉热力计算与热效率测试计算

a、热力计算

根据笔者单位对燃气锅炉进行的能效测试数据并参照文献[1]~文献[3]提供数据的综合分析, 当采用式(3)求热效率, 采用式(4)与(4')求耗气量时, 需参照表 2 近似选取冷凝率 ε 。当进水温度或排烟温度为低值时, 冷凝率取大值; 当进水温度或排烟温度为高值时, 冷凝率取小值。

冷凝受热面计算应考虑冷凝放热系数的提高, 见第 1 章节之(4)。

b、热效率测试计算

需要测量冷凝水量, 以确定实际的冷凝率 ε 。再按前述公式求各项热损失 $q_{2(\text{ln})}$ 、 $q_{3(\text{ln})}$ 、 $q_{5(\text{ln})}$ 并按式(3)得出测试热效率 η_{ln} 。

参考文献

- [1] 贾力, 孙金栋, 李孝萍. 天然气锅炉烟气冷凝热能回收的研究[J]. 节能与环保, 2001(1): 31-33.
- [2] 董黎明. 冷凝式锅炉热平衡计算方式初探[J]. 工业锅炉, 2010(4): 19-20, 28.
- [3] 徐俊芳, 王随林, 潘树源, 等. 天然气锅炉烟气冷凝热回收利用技术工程应用方案探讨[J]. 暖通空调, 2009(11): 128-132.
- [4] 李之光, 梁耀东, 牛全正, 等. 工业锅炉现代设计与开发[J]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [5] 车得福, 刘艳华. 烟气热能梯级利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.