

ASME 1998版与国内CFB锅炉效率计算方法比较

毛宇 周棋 龚留升 刘泰生

东方锅炉(集团)有限公司, 四川 自贡 643001

摘要: ASME PTC 4-1998 标准的引入和国家电力行业标准《循环流化床锅炉性能试验规程》DL/T964-2005 的颁布, 对循环流化床锅炉性能试验起到了规范和指导作用, 为循环流化床锅炉的性能考核试验提供了依据。本文主要就 ASME PTC4-1998 与国家电力标准 DL/T964-2005 进行比较, 并针对 ASME PTC4-1998 在实际应用过程中遇到的问题进行了探讨。

关键词: ASME PTC4-1998; DL/T964-2005; CFB 锅炉; 效率计算; 燃料效率; 毛效率

中图分类号: TK229.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2008)04-0034-05

Comparison between ASME 1998 Edition and Domestic CFB Boiler Efficiency Computation Method

Mao Yu, ZHOU Qi, GONG Liu-shen, LIU Tai-sheng

(Dongfang Boiler Group Co. Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China)

Abstract: The introduction of ASME PTC 4-1998 and the issue of CFB Boiler Performance Test Code (DL/T964-2005) provide instruction directive and specification on CFB boiler performance acceptance test. This paper compares ASME PTC 4-1998 with DL/T964-2005, and the problems encountered in the application of ASME PTC4-1998 are discussed.

Key words: ASME PTC4-1998; DL/T964-2005; CFB boiler; efficiency computation; combustion efficiency; gross efficiency

随着循环流化床技术的快速发展, 大量的循环流化床锅炉投入商业运行。由于脱硫剂的添加, CFB 锅炉效率计算方法与普通煤粉炉有所区别。采用国际标准设计制造的锅炉, 性能考核依据一般采用国际通用标准——ASME。在 ASME PTC4.1 中效率计算部分没有考虑添加脱硫剂后发生煅烧和脱硫反应对锅炉效率的影响。为满足循环流化床锅炉性能考核的需要, ASME 编委会在 PTC4.1 的基础上增加了循环流化床锅炉脱硫部分的计算内容, 对 PTC4.1 重新进行了修订并升级为 PTC4-1998, 于 1998 年正式颁布。我国在国标 GB10184-88《电站锅炉性能试验规程》的基础上, 于 2005 年颁布了电力行业标准 DL/T964-2005《循环流化床锅炉性能试验规程》, 该规程为国标 GB10184-88 的补充规程。

ASME PTC4-1998 和 DL/T964-2005 的颁布, 为循环流化床锅炉性能考核提供了依据, 对循环

流化床锅炉性能试验起到了规范和指导作用。本文主要就 ASME PTC4-1998 与 DL/T964-2005 进行比较, 并针对 PTC4-1998 在实际应用过程中遇到的问题进行探讨。

1 锅炉效率定义及表达式

在 ASME PTC4-1998 中首次引入了燃料效率的概念, 锅炉效率有燃料效率和毛效率两种表达形式; 在 PTC4.1 中用毛效率来表示锅炉效率; 国家电力标准 DL/T964-2005 以及 GB10184-88 采用毛效率。ASME 中燃料效率为输出能量与输入燃料的化学能量之比, 毛效率为输出能量与进入锅炉系统的总能量之比, 总能量是燃料输入热量加上外来热量, 或由其他来源加入到系统的能量。锅炉效率的计算有热平衡法和输入—输出能量法, 性能考核时多数采用热平衡法, 本文的比较主要针对热平衡法。

收稿日期: 2008-07-01

作者简介: 毛宇(1969-), 男, 毕业于重庆大学热能专业, 主要从事 CFB 锅炉性能研究及现场调试。

1.1 毛效率

(1) ASME 中毛效率的表达式:

$$EG_r = 100 \left[1 - \frac{Q_r L}{Q_r F + Q_r B} \right] = 100 \left[\frac{Q_r F - Q_r L + Q_r B}{Q_r F + Q_r B} \right] \quad (1)$$

式中: $Q_r L$ —损失热量总和; $Q_r F$ —燃料输入热量; $Q_r B$ —外来热量总和。

(2) GB10184-88 以及 DL/T964-2005 毛效率的表达式:

$$\eta = 100 \left[1 - \frac{\sum Q_i}{Q_r} \right] \quad (2)$$

式中: $\sum Q_i$ —各项损失热量总和; Q_r —输入热量(燃料输入热量 + 外来热)

1.2 燃料效率

ASME PTC4-1998 中燃料效率的表达式:

$$EF = 100 \left[1 - \frac{Q_r L - Q_r B}{Q_r F} \right] = 100 \left[\frac{Q_r F - Q_r L + Q_r B}{Q_r F} \right] \quad (3)$$

对于煤粉炉而言, ASME PTC4.1、PTC4-1998 与 GB10184-88 在毛效率的计算方法上大体相近, 计算结果偏差一般比较小。对循环流化床锅炉而言, 由于对添加脱硫剂脱硫过程中发生的煅烧和脱硫反应处理方式不一样, PTC4-1998 与 DL/T964-2005 在毛效率的计算方法上存在较大差异, 计算结果也相应地存在差异。

2 ASME PTC4-1998 与 DL/T964-2005 的差异

2.1 效率计算系统边界

DL/T964-2005 以送风机入口作为风系统的进口边界(见图 1), 即将送风机、暖风器划归锅炉热平衡系统内, 暖风器外来热源加热空气的热量作为外来热计入输入热量; ASME PTC4-1998 以送风机出口或利用外部热源加热的暖风器出口作为风系统的进口边界(见图 2, 仅以 CFB 锅炉为例), 利用外部热源加热的暖风器划在热平衡系统外, 其与 DL/T964-2005 存在差异, GB10184-88 风系统进口边界与 ASME PTC 相同。

对于效率计算系统边界的界定, 从锅炉厂家的设计以及供货范围来看, 各主要风机大多不属锅炉厂家设计供货范围, 其入口边界基本都在空预器入口, 锅炉热力计算也是以空预器入口作为锅炉系统热平衡边界。若是对整个发电机组的性

能考核, 则应以风机入口作为整个机组的入口边界之一。

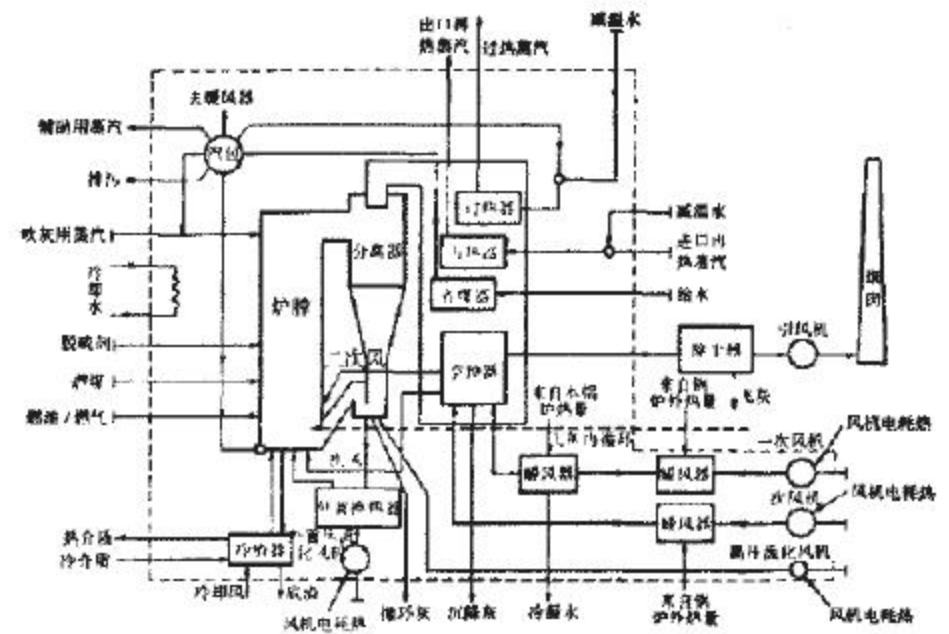


图1 DL/T964-2005 CFB锅炉系统边界

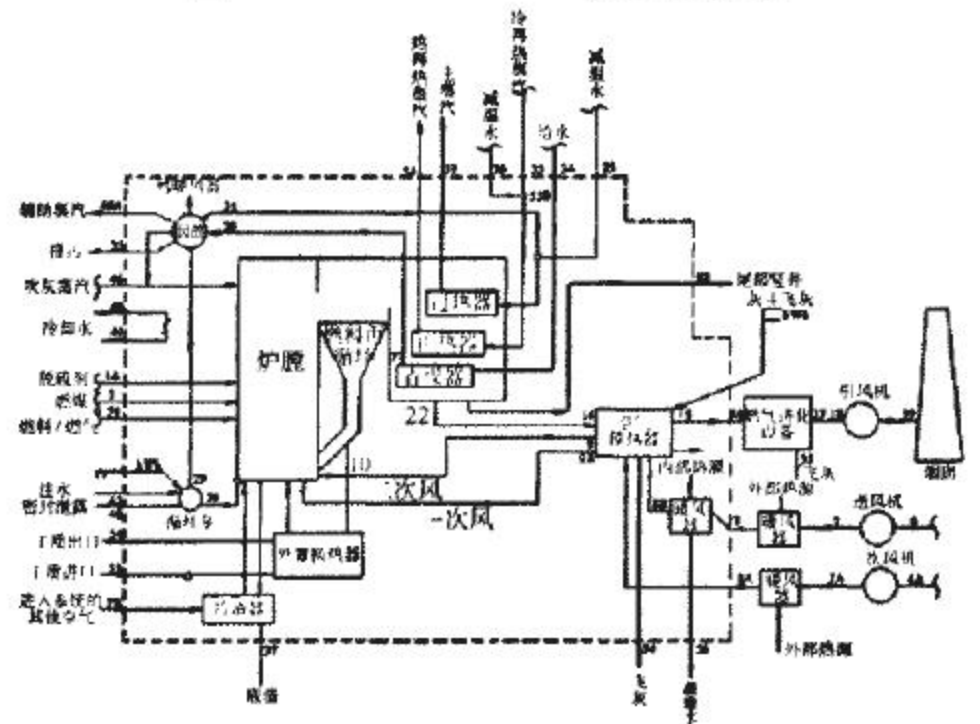


图2 ASME PTC4-1998典型的CFB锅炉系统边界

2.2 基准温度及空气进口温度

在 DL/T964-2005 和 GB10184-88 中, 规定锅炉送风机入口处空气温度为各项输入与输出能量的起算点, 即基准温度。基准点的空气温度定义为基准温度, 有标准或保证的基准温度与试验基准温度之分, DL/T964-2005 规定的标准或保证的基准温度一般为 20℃。进入锅炉系统的物质流(燃料、空气、脱硫剂)均按基准温度来计算各自的显热或损失。ASME 中的基准温度为一个参照温度, 是一定值(25℃)。ASME 标准中计算的各物质的焓值均是相对于 25℃ 的相对焓值。因此, 在计算烟气热损失和灰渣显热损失以及外来热量等项目时, 存在由于基准温度不同带来的差异。

DL/T964-2005、GB10184-88 与 ASME 对空气的进口温度基准点的选取存在差异。在 DL/T964-2005 和 GB10184-88 中, 进入锅炉系统的空气进口温度基准点为送风机入口, 即按基准

温度。在 ASME PTC4-1998 中,当采用暖风器且加热热源来自锅炉系统外时,进入锅炉系统的空气进口温度为暖风器出口的空气温度;当暖风器中加热空气的热量是由锅炉系统内部提供(锅炉产生的蒸汽),则进入锅炉系统的空气进口温度为暖风器入口的空气温度。由于 CFB 锅炉送风机压头均较高,实际运行时通过风机的空气均存在较大的温升,暖风器基本上不投用或仅在启动初期投用很短的时间,所以,ASME PTC4-1998 中 CFB 锅炉的空气进口温度可认为就是空预器入口处的空气温度。

表1 ASME PTC4-1998与DL/T964-2005基准温度的差异

项目	DL/T964-2005	ASME PTC 4-1998
基准温度	送风机入口处空气温度	77°F (25°C)

2.3 各项热损失的名称匹配

ASME 标准和国标对锅炉损失所取名称有所不同,但计算原理基本一致。ASME 中干烟气热损失、燃料水分热损失、氢燃烧生成水分的热损失、空气中水分的热损失、雾化蒸汽的热损失等 5 项之和在国标中概括为排烟热损失一项;国标中的机械未完全燃烧损失相当于 ASME 的干灰渣中可燃物热损失;散热损失相当于 ASME 的辐射对流热损失;化学未完全燃烧损失在 ASME 中分成烟气中 CO、氢和碳氢化合物三项不完全燃烧热损失。DL/T964-2005 把脱硫引起的热损失综合考虑作为单独的一项损失 q_7 ,相当于把硫化反应放热作为效率增益来考虑;ASME PTC4-1998 则把石灰石分解吸收作为损失,把硫化反应放热作为外来热量,而不作为效率增益考虑。在 ASME PTC4-1998 中还涉及生成 NO_x 的热损失项。

2.4 计算所采用的热值及输入热量

国标及电力标准 DL/T964-2005 沿用前苏联的模式,锅炉效率计算采用燃料的低位热值(LHV);ASME 标准采用燃料高位热值(HHV)进行锅炉效率计算。燃料的高位热值包括了燃烧产物中全部水蒸汽凝结成水所放出的汽化潜热,即将水蒸汽凝结成水放出的热量当作有效热量,而燃料低位热值把此部分热量当作无用热量,不予考虑。采用低位热值和高位热值为基准计算效率时,在计算

由燃料、脱硫剂产生的水蒸汽引起的排烟热损失时处理方法不同(注意燃烧空气中的水份不存在此问题。对于如油枪用雾化用蒸汽排出锅炉带来的热损失的计算方法应与雾化蒸汽带入炉内的外来热计算方法一致,即被减的基准需相同)。前者分别以排烟温度下和基准温度下水蒸汽的焓值的差为热损失,或者以排烟温度与基准温度下的水蒸汽显热差为热损失,即用水蒸汽量、水蒸汽从基准温度到排烟温度下的平均定压比热、排烟温度与基准温度差三项之乘积计算该项热损失;后者以排烟温度下水蒸汽焓与基准温度下水焓之差为热损失。

ASME PTC4-1998 中的燃料效率将燃料的高位热值作为输入热量,毛效率将燃料的高位热值和外来热量作为输入热量。外来热量包括:燃料和送入空气的物理显热(锅炉入口空气温度和基准温度之差所带入的外来热量)以及雾化蒸汽的热量;由循环泵、一次风机和烟气再循环风机等辅机的机械能转化的热量;化学反应热量,例如硫酸盐反应。外来热量可以是负值,例如,当空气温度低于基准温度时,DL/T964-2005 中输入热量为随每千克燃料或每立方米燃料输入锅炉能量平衡系统的总热量,包括燃料的应用基低位热值、燃料和脱硫剂的物理显热、用外来热源加热燃料或空气时所带入的热量以及雾化燃油所用蒸汽带入的热量、系统内主要辅机的电耗当量热。

值得一提的是:国内锅炉厂家与电厂签订的合同或技术协议经常出现锅炉热效率保证值考核依据为 ASME PTC 标准,而热效率又是以燃料低位热值计算的情况。在这种情况下,仍按 ASME PTC 标准的热效率定义、计算公式计算热效率,计算公式中涉及燃料热值则以低位热值代替;在计算排烟中水蒸汽带来的损失时,只有脱硫剂(如 CFB 锅炉采用石灰石脱硫)水份产生的水蒸汽损失按排烟温度下水蒸汽焓与基准温度下水焓之差计算,其它原因产生的水蒸汽带来的热损失的计算方法与国标相同。

2.5 灰渣中的可燃物含量

在 DL/T964-2005 中,按下式计算灰渣中的可燃物含量:

$$C = \sum \frac{\alpha_i C_i^f}{100 - C_i^f} \times \frac{(A_{\text{灰}} + A')}{100} \quad (4)$$

式中： C —燃料中未烧掉的可燃物量，%； A' —因添加脱硫剂脱硫增加的灰量，%； α_i —位置 i 处灰渣质量份额，%； C_i^f —位置 i 处灰渣中可燃物含量，%。

在 ASME PTC 4-1998 中，灰渣中可燃物含量的计算式为：

$$C_{\text{灰}} = \frac{\sum \alpha_i C_i^f}{(100 - \sum \frac{\alpha_i C_i^f}{100})} \times \frac{(A_{\text{灰}} + A')}{100} \quad (5)$$

采用计算式(4)和(5)进行计算时，当灰渣比 α_i 取相同值，计算结果是有差别的。采用 ASME PTC4-1998 计算式(5)计算的灰渣中平均可燃物含量比采用 DL/T964-2005 计算式(4)计算的值小。如，按循环流化床锅炉灰渣比为 50:50，飞灰、底渣可燃物含量分别为 15%和 1%时，两式计算的结果最大相差可达 7%。其原因是 DL/T964-2005 和 ASME PTC 对灰渣比的定义不相同，DL/T964-2005 中“灰渣比”所指的“灰渣”不包含实际灰渣中的可燃物，而 ASME PTC 则包含，计算式(4)和(5)中 α_i 意义和值实际是不同的，所以导致在 α_i 取相同值时其计算结果不同。如灰渣比采取实测，不管采用计算式(4)还是计算式(5)计算，其结果应相同。如灰渣比为商定取同一值，采用计算式(5)计算结果值小一些。

2.6 表面辐射与对流引起的损失(散热损失)

在 ASME PTC4-1998 中指出，该项损失由测定锅炉表面的平均温度和周围环境温度来间接计算。如采用实测，则需要在足够多的位置测定表面温度、环境温度和空气流速来确定具有代表性的平均值，并需要确定锅炉机组的实际散热表面积，其工作量非常大且繁琐。从目前性能试验实际实施情况来看，基本上根据设计条件由相关各方商定一个值或参照相关简化标准。DL/T964-2005 按《电站锅炉性能试验规程》(GB 10184-1988)附录 F“额定负荷下锅炉散热损失”中额定负荷下的锅炉散热损失曲线(虚线部分)计算。当明确性能测试采用 ASME 标准时，CFB 锅炉可参照 ASME PTC4.1 中的 ABMA 辐射散热损失曲线查取或参照设计值选取。

3 脱硫计算的比较

在 ASME PTC 4-1998 中，把石灰石脱硫的两个化学反应产生的反应热分割开，将石灰石分解吸热归类为热损失项，硫化反应放热归类为外来热量项，这也是按 ASME PTC4-1998 方法计算循环流化床锅炉热效率时，毛效率与燃料效率存在较大差异之处。DL/T 964-2005 中 CFB 锅炉脱硫部分的计算把前述两个反应综合起来考虑，作为一项损失(q_7)考虑。因此，在循环流化床锅炉加脱硫剂脱硫时，按不同的规程计算，热损失总和及外来热总和有一定的差异。脱硫反应热越大，该项差异越大。

例：假设不含脱硫反应热的各项损失之和为 8%，外来热为 1.2%，石灰石分解吸热为 0.9%，硫化反应放热为 1%，则依据 ASME PTC4-1998、DL/T 964-2005 计算的锅炉效率分别如下：

ASME PTC4-1998：

$$\text{燃料效率(EF)} = (1 - \frac{8+0.9-1-1.2}{100}) \times 100\% = 93.3\%$$

$$\text{毛效率(EG}_t\text{)} = (1 - \frac{8+0.9}{100+1+1.2}) \times 100\% = 91.3\%$$

DL/T 964-2005：

$$\text{毛效率}(\eta_b) = (1 - \frac{8+0.9-1}{100+1.2}) \times 100\% = 92.2\%$$

从上例可以看出，按不同标准和效率定义计算得到的效率值差异是非常大的。ASME 把石灰石脱硫过程中的两个反应割裂开，DL/T964-2005 把二者综合起来作为一项损失，相比较 DL/T964-2005 对该部分的考虑更为合理。由于采用不同标准、不同效率定义得到的效率值不同，特别是对于采用炉内石灰石脱硫的 CFB 锅炉差异更大，因此，在商务合同中对效率保证值的试验标准、采用何种效率必须明确，避免合同执行时发生分歧。

4 计算实例

某电厂 440t/h 高温高压中间再热的 CFB 锅炉，试验煤质资料： C_{ar} : 59.07%， H_{ar} : 3.27%， O_{ar} : 7.34%， N_{ar} : 1.71%， S_{ar} : 1.27%， W_{ar} : 8.6%， A_{ar} : 18.74%，HHV: 23 433 kJ/kg，LHV:

22 272 kJ/kg。测试的原始数据如下： $C_{\text{H}}=5.77\%$ ， $C_{\text{O}_2}=1.51\%$ ； $\theta_{\text{pr}}=137^\circ\text{C}$ ，空预器进口风温 $t_{\text{ky}}=40^\circ\text{C}$ ，环境温度 $t=22^\circ\text{C}$ ，石灰石量 $B_{\text{LS}}=5.6\text{t/h}$ ；空预器出口烟气排放数据： $\text{O}_2=4.3\%$ 、 $\text{CO}=48\text{ppm}$ 、 $\text{SO}_2=150$

ppm。灰渣比取商定值 46 : 54。下表列出了按 ASME PTC4-1998 标准和 DL/T964-2005 计算所得的各项损失及锅炉效率。

ASME 计算的燃料低位热值锅炉效率与

表2 按ASME PTC4-1998和DL/T964-2005计算的各项损失及锅炉效率

ASME PTC4-1998			DL/T964-2005	
项 目	HHV	LHV	项 目	LHV
各项损失 /%			各项损失 /%	
干烟气损失	4.660	4.900	干烟气损失	5.085
燃料中 H_2 燃烧生成水造成的损失	3.306	0.282	燃料中 H_2 燃烧生成水造成的损失	0.283
燃料中水分造成的损失	0.973	0.083	q_2 燃料中水分造成的损失	0.083
空气中水分引起的损失	0.130	0.136	脱硫剂中水分造成的损失	0.0016
未燃尽碳	1.531	1.612	空气中水分引起的损失	0.153
灰渣物理热损失	0.118	0.124	q_4 固体未完全燃烧损失	1.476
表面辐射和对流散热	0.286	0.286	q_3 气体未完全燃烧损失	0.020
脱硫剂煅烧吸热	0.629	0.662	q_6 灰渣物理显热损失	0.119
脱硫剂中水分造成的损失	0.019	0.0016	q_5 散热损失	0.345
CO、NO _x 损失	0.049	0.050	脱硫剂煅烧吸热损失	0.699
外来热量 /%			q_7 硫化反应热增益	-0.755
进入的干空气带入热量	0.603	0.635		
空气中的水分带入热量	0.017	0.018		
燃料物理显热	-0.017	-0.019		
硫化反应热	0.746	0.785		
脱硫剂的物理显热	-1.6E-6	-1.7E-6		
锅炉效率 /%				
燃料效率	89.65	93.36		
毛效率	88.46	92.00	毛效率	92.50

注：上述计算均未作相关修正；ASME 表面辐射和散热损失为商定值。

DL/T964-2005 存在差异。根据上述分析可知，其差异主要在于基准温度、输入热量以及脱硫反应热处理方式等的差异。按 ASME PTC4-1998 标准计算的燃料效率与燃料的高、低位热值并不严格成反比关系，原因在于化验的燃料热值与元素成分不一致等所致。

5 结语

ASME PTC4-1998 和 DL/T964-2005 均对 CFB 锅炉效率试验和计算方法作了明确规定，从而使 CFB 锅炉性能验收有据可依，二者均具有很高的技术水平和权威性，在 CFB 锅炉的效率考核实践中得到广泛应用。本文对 ASME PTC4-1998 和 DL/T964-2005 在效率定义、锅炉系统边界、基准温度、采用的燃料热值以及各项损失的计算等方面存在的差异进行了分析比较。由于 ASME PTC4-1998 和 DL/T964-2005 在效率定义、对脱硫剂煅烧吸热、脱硫反应放热的处理等方面存在差

异，导致最后计算的效率值不同，因此，锅炉制造厂与用户的合同或技术协议中，在效率保证值方面必须明确效率考核采用的标准，明确是燃料效率还是锅炉效率，避免合同执行时发生不必要的分歧。但要注意，不管是采用何种试验标准、何种效率定义(燃料效率、毛效率)，只是最后效率的计算数值不同而已，没有实质的差异，也就是说同一试验工况，计算的燃料耗量是相同的。

参考文献：

- [1] ASME Performance Test Code 4-1998
- [2] 循环流化床锅炉性能试验规程. DL/T964-2005
- [3] 电站锅炉性能试验规程. GB10184-88
- [4] 锅炉性能试验规程(ASME PTC4-1998)
- [5] 杨威, 赵森林. ASME PTC4.1 计算循环流化床锅炉效率的基本方法[J]. 电站系统工程, 1995, 11(6)
- [6] 沈芳平, 周克勤, 等. 锅炉热效率计算方法的探讨 [J]. 锅炉技术, 2004, (1)