

ICS 27.100

F 23

备案号: 15368-2005

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 964 — 2005

循环流化床锅炉性能试验规程

Performance test code for circulating fluidized bed boiler

2005-02-14 发布

2005-06-01 实施

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 导则	1
4 测试方法及测量仪器	4
5 输入—输出热量法（正平衡法）计算 CFB 锅炉热效率	6
6 热损失法计算 CFB 锅炉热效率	6
7 试验条件偏离设计值时的修正	11
8 试验报告	11
附录 A（规范性附录） 锅炉试验数据综合汇总表	12

前 言

本标准是根据原国家经济贸易委员会《关于下达 2001 年度电力行业标准制、修订计划项目的通知》（电力 [2001] 44 号文）的要求制定的。

GB/T 10184—1988《电站锅炉性能试验规程》规定了国内常规电站锅炉（煤粉锅炉等）性能鉴定试验和验收试验的现行方法，但对循环流化床（CFB）锅炉的性能试验方法未作规定。目前我国 CFB 锅炉的应用越来越多，并正在向大型化发展，100MW 和 135MW 级机组已经投运多年，200MW 和 300MW 级机组也在设计建造中。由于 CFB 锅炉与常规电站锅炉相比有其特殊性，例如锅炉底渣排放份额大且变化较大、炉内加入石灰石脱硫、设置冷渣系统等，使锅炉性能测试和计算方法较常规电站锅炉复杂。但除此之外，CFB 锅炉与常规锅炉性能试验的大多数测量项目、试验原理、试验方法、计算方法等基本相同。因此，本标准的编写仅从差异点出发，其内容作为 GB/T 10184—1988 的补充。本标准中所采用的部分符号、代号及其角标也尽量与 GB/T 10184—1988 中的一致或对应，以方便阅读和使用。

本标准附录 A 为规范性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业电站锅炉标准化技术委员会归口并解释。

本标准起草单位：西安热工研究院有限公司。

本标准主要起草人：张敏、王鹏利、肖平、许传凯。

循环流化床锅炉性能试验规程

1 范围

本标准规定了循环流化床（CFB）锅炉性能试验的方法。

本标准适用于蒸发量为 35t/h 及以上，用于发电的 CFB 锅炉。其他容量或用途的 CFB 锅炉可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

- GB/T 218 煤中碳酸盐二氧化碳含量的测定方法
- GB/T 477 煤炭筛分试验方法
- GB/T 8174 设备及管道保温效果的测试与评价
- GB/T 10184—1988 电站锅炉性能试验规程
- GB 13223 火电厂大气污染物排放标准
- DL/T 414 火电厂环境监测技术规范
- DL/T 567.6 火电厂燃料试验方法 飞灰和炉渣可燃物测定方法

3 导则

3.1 平衡边界

CFB 锅炉机组热平衡系统界限图见图 1。

3.2 热量平衡图

CFB 锅炉机组热量平衡图见图 2。

3.3 性能试验内容

CFB 锅炉性能试验包括锅炉最大连续蒸发量试验（BMCR）、额定蒸发量（BRL）下的锅炉热效率试验和烟气污染物排放特性试验等。其中，烟气污染物排放特性试验须和热效率试验同时进行。

根据需要，CFB 锅炉性能试验还可以包括锅炉最低负荷试验（无辅助燃料）及部分负荷试验等试验内容。

3.4 试验前应达成的协议

性能试验前，试验各方达成协议的项目在 GB/T 10184—1988 中 4.2 规定的基础上增加下列各条：

a) 试验物料特性指标波动的范围。

试验物料特性应符合原设计值。其中入炉燃料特性指标的允许波动（相对于设计值）范围为：

收到基低位热值， $Q_{\text{net,ar}} \pm 10\%$ （相对值）；

全水分， $M_t \pm 2\%$ （绝对值）；

收到基灰分， $A_{\text{ar}} \pm 5\%$ （绝对值）；

收到基全硫分， $S_{\text{t,ar}} \pm 0.5\%$ （绝对值）；

干燥无灰基挥发分， $V_{\text{daf}} \pm 2\%$ （绝对值）。

入炉石灰石特性指标的允许波动（相对于设计值）范围为：

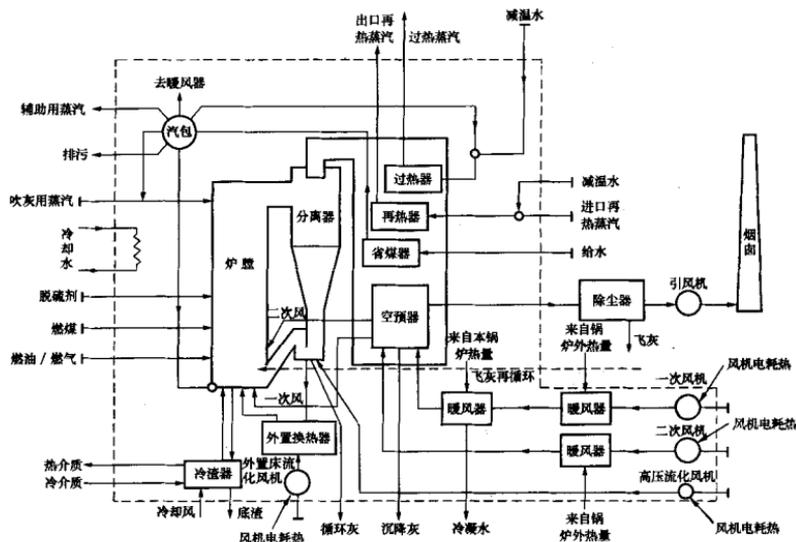


图1 CFB 锅炉机组热平衡系统界限图

全水分，不超过 $\pm 0.5\%$ （绝对值）；

收到基碳酸钙含量，不超过 $\pm 3\%$ （绝对值）。

试验燃料特性指标在上述允许波动的范围时，可不对试验计算结果进行修正；如超出此范围，应由试验各方在试验前协商同意，并可按本标准 7.2 和 GB/T 10184 的有关规定进行修正。

- b) 入炉燃料和石灰石粒径组成应尽量符合原设计特性分布曲线。入炉燃料和石灰石中超过设计最大粒径颗粒的质量百分率应不超过 5%（绝对值）。同时，一般情况下，入炉燃料和石灰石的中位径 d_{50} （筛余量为 50% 对应的粒径）与设计值的偏差应在 $\pm 10\%$ （相对值）之内。
- c) 锅炉试验运行工况的确定。锅炉试验期间的运行方式及操作参数应由锅炉生产厂家、用户和测试单位参照锅炉运行说明书，并根据现场实际运行情况和最优化工况及参数协商确定。
- d) 应根据冷渣器的使用说明书和锅炉实际运行情况确定冷渣器的投运方式并满足本标准 4.3 的有关规定。
- e) 确定各部分灰、渣份额的测定方法。

3.5 锅炉运行稳定时间

在性能试验前 CFB 锅炉稳定时间除执行 GB/T 10184—1988 中 4.5 的规定外，还应按设定的 Ca/S 摩尔比在性能试验开始前连续向炉内投石灰石脱硫运行 72h 以上（可与 GB/T 10184—1988 中 4.5 规定的 3d 稳定期同步进行）。

3.6 参数波动范围

参数波动范围除执行 GB/T 10184—1988 中 4.6 的规定外，试验期间 CFB 锅炉其他参数波动的最大允许范围见表 1。

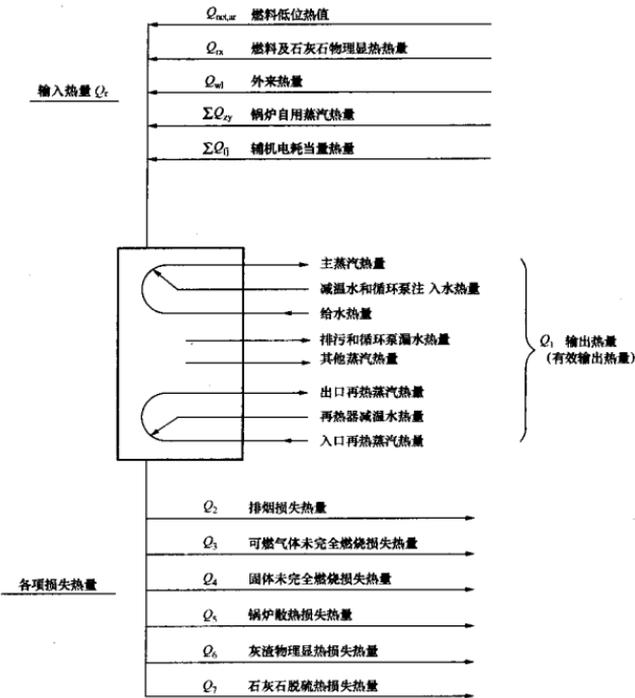


图2 CFB 锅炉机组热量平衡

表1 参数波动范围

序号	项 目	单位	短时允许波动 (相邻峰谷值)	长时间允许偏差
1	排烟氧量	%	±1.0	±0.5
2	入炉燃料量	%	±10	—
3	入炉石灰石量	%	±4	±2
4	密相区平均床温	℃	±30	±20
5	密相区床压	Pa	±500	±300

注：表中除2、3项为相对值外，其余各项均为绝对值

3.7 底渣物理显热

CFB 锅炉底渣物理显热计算参数按下述原则计算：

- a) 采用输入—输出热量法测定和计算 CFB 锅炉热效率时，如冷渣器冷却介质（流化风及冷却水）划归系统内（参见表 2），则在输出热量中加入冷渣器水的吸热项，如冷渣器冷却介质划归系统外，则无此项。

- b) 采用热损失法测定和计算 CFB 锅炉热效率时, 底渣物理显热损失计算参数按表 2 确定, 计算方法见 6.6。

表 2 底渣物理显热损失计算参数

冷渣器型式	冷却介质	冷却介质流向	底渣的物理显热损失
风水联合冷却(流化床型)	冷空气	锅炉烟风系统内	以冷渣器实测排渣温度计算
	水	机组汽水系统内	
	冷空气	锅炉烟风系统内	以冷渣器实测排渣温度计算, 但另加冷却水吸热损失
	水	机组汽水系统外	
	冷空气	锅炉烟风系统外	
水冷滚筒/蛟龙型	水	机组汽水系统内	以冷渣器实测排渣温度计算
	水	机组汽水系统外	以炉膛实测排底渣温度计算
不冷却	—	—	以炉膛实测排底渣温度计算

3.8 能量平衡基准温度

CFB 锅炉能量平衡基准温度 t_0 (试验基准温度) 为送风机入口温度。锅炉设计基准温度偏离试验基准温度时, 按 GB/T 10184—1988 中的有关规定进行修正。

3.9 试验持续时间

采用热损失法试验的持续时间不得少于 4h; 采用输入—输出法试验的持续时间不得少于 8h。

4 测试方法及测量仪器

4.1 测试方法及测量仪器

按照 GB/T 10184—1988 中的第 5 章执行。

4.2 燃料及石灰石采样

除执行 GB/T 10184—1988 中 5.6 的规定外, 应同时满足下述要求:

- 应尽可能靠近炉膛燃料进口采样。所采集样品在燃料特性、粒径及分布上应具有代表性。
- 入炉石灰石按入炉燃料采样时间间隔采样, 应从连续输送的入炉石灰石主流中采样, 采样点应尽可能靠近炉膛石灰石进料口。

4.3 灰渣采样与计量

除执行 GB/T 10184—1988 中第 5 章的规定外, 同时规定如下:

4.3.1 灰渣份额的确定。

灰渣份额应通过以下方法实际测量和计算获得:

计量试验期间排放底渣的全部质量, 并计算出底渣排渣流量 G_{dz} 与热效率计算中按正平衡迭代计算求得的锅炉总排灰流量 G_{zh} 之比的百分率, 即为底渣份额 (排底渣流量占锅炉总排灰流量的质量含量百分率) α_{dz} , 余者为飞灰份额 α_{fh} 。如所试验锅炉运行中排放部分循环灰和锅炉尾部烟道沉降灰 (少部分 CFB 锅炉排放这两部分灰) 等灰渣, 还需计量试验期间这两部分灰渣的排放质量, 计算出相应的循环灰排灰流量 G_{shh} 和沉降灰排灰流量 G_{ch} , 再分别按下列各式计算出各部分灰渣份额:

$$\alpha_{dz} = \frac{G_{dz}}{G_{zh}} \left(1 - \frac{C_{dz}^c}{100} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\alpha_{shh} = \frac{G_{shh}}{G_{zh}} \left(1 - \frac{C_{shh}^c}{100} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$\alpha_{cjh} = \frac{G_{cjh}}{G_{zh}} \left(1 - \frac{C_{cjh}^c}{100} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$\alpha_{fh} = 100 - \alpha_{dz} - \alpha_{xhh} - \alpha_{cjh} \quad (4)$$

式中：

G_{zh} ——锅炉总排灰流量（由于入炉燃料量及石灰石量难以准确计量，一般通过计量汽水侧吸热量迭代计算出锅炉总排灰流量），kg/h；

G_{dz} ——底渣排渣流量，kg/h；

G_{xhh} ——循环灰排灰流量，kg/h；

G_{cjh} ——沉降灰排灰流量，kg/h；

α_{dz} ——底渣排渣流量占锅炉总排灰流量的质量含量百分率，%；

α_{xhh} ——循环灰排灰流量占锅炉总排灰流量的质量含量百分率，%；

α_{cjh} ——沉降灰排灰流量占锅炉总排灰流量的质量含量百分率，%；

α_{fh} ——飞灰排灰流量占锅炉总排灰流量的质量含量百分率，%；

C_{dz}^c 、 C_{xhh}^c 、 C_{cjh}^c ——底渣、循环灰、沉降灰的含碳量百分率，%。

4.3.2 当确因现场条件对某部分灰渣量无法实际测定时，应由试验各方在试验前约定各部分灰渣份额，但约定值与设计值之间偏差的绝对值不应超过10%。

4.3.3 试验起始和结束时须保证一致的参数。为了准确计量灰渣量及灰渣份额，除应保证锅炉试验期间参数的波动满足本标准3.6的规定外，试验开始时和试验结束时，锅炉的蒸发量、床温、风室风量及风室风温等参数值，尤其是床压值应尽量保持一致，其最大允许偏差见表3。对于间歇排底渣的锅炉，试验各方应事先确定试验期间底渣排放的间隔时间和每次的排放量，但排渣的间隔时间不能超过30min，且对床压波动的影响不得超过本标准3.6所规定的范围。

表3 试验起始和结束时参数最大允许偏差

序号	项目	单位	最大允许偏差
1	相对蒸发量	%	±3
2	床温	℃	±10
3	床压	Pa	±100
4	相对风室风量	%	±3
5	风室风温	℃	±3

4.3.4 如锅炉容量大、排渣（灰）量过多，而现场无法实现称量整个试验期间的全部排渣（灰）量时，在运行参数符合4.3.3要求的条件下，可以采用缩短排渣（灰）计量时间的方法来测量灰渣份额，但计量时间不少于1h。

4.4 灰渣可燃物的分析

灰渣样品中可燃物含量一般通过测定（按GB/T 218）剔除灰、渣中碳酸盐二氧化碳等非可燃质成分影响后的可燃质烧失量的方法确定。

经试验各方协商同意，灰渣可燃物含量的分析也可采用下述方法：按照DL/T 567.6中的规定，分别测定同一样品在空气气氛和纯氮气气氛下的固态质量减少量，两个质量减少量百分率的差值即为样品可燃物含量。

4.5 烟气排放特性测试

按照GB/T 10184—1988和DL/T 414中的相关规定执行。

4.6 入炉燃料、石灰石和灰渣粒度的测定

入炉燃料、石灰石和灰渣粒度测定参照 GB/T 477 中的相关规定执行。对于较细颗粒（如飞灰、入炉石灰石等），在条件允许的情况下，可采用激光粒度仪进行粒度测定。

4.7 入炉燃料量与石灰石量的测定

由于对入炉燃料量的直接计量准确度较低，因此本标准反平衡计算锅炉效率中所采用的入炉燃料量（包括由此计算的灰渣总量），可采用先假定锅炉热效率，通过正平衡有效吸热量的测定计算入炉燃料量，最后按反平衡迭代计算（前后两次热效率之差不大于 0.01% 为合格）的方法确定。

入炉石灰石量可通过标定石灰石给料机等方法测定。

5 输入—输出热量法（正平衡法）计算 CFB 锅炉热效率

CFB 锅炉热效率采用输入—输出热量法（正平衡法）的计算参照 GB/T 10184—1988 中的 6.2 进行，但应作如下调整。

5.1 输入热量的计算

输入热量 Q_r 的计算除了计入 GB/T 10184—1988 中式 (23) 的各项外，还应计入系统内主要辅机（一、二次风机，高压流化风机等）的电耗当量热量 ΣQ_{f} (kJ/kg、kJ/m³)。

5.2 输出热量的计算

如冷渣器冷却介质（流化风及冷却水）划归系统内，在输出热量中应计入冷渣器水吸热项，输出热量 Q_1 按下式计算：

$$Q_1 = \frac{1}{B} [D_{\text{q1}}(h_{\text{q1}} - h_{\text{q1}}) + D'_{\text{z1}}(h_{\text{z1}} - h'_{\text{z1}}) + D_{\text{z1}}(h_{\text{z1}} - h_{\text{z1}}) + D_{\text{q1}}(h_{\text{q1}} - h_{\text{q1}}) + D_{\text{ps}}(h_{\text{ps}} - h_{\text{ps}}) + D_{\text{zm}}(h_{\text{zm}} - h'_{\text{zm}})] \quad (5)$$

式中：

D_{zm} ——冷渣器划归系统内冷却水流量，kg/h；

h_{zm} ——冷渣器划归系统内冷却水出口焓，kJ/kg；

h'_{zm} ——冷渣器划归系统内冷却水进口焓，kJ/kg。

式 (5) 中其他符号及其含义与 GB/T 10184—1988 中式 (32) 的相同。

6 热损失法计算 CFB 锅炉热效率

6.1 计算公式

CFB 锅炉热损失法（反平衡法）热效率按下式计算：

$$\begin{aligned} \eta &= 100 - \frac{Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7}{Q_r} \times 100 \\ &= 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7) \end{aligned} \quad (6)$$

式中：

η ——锅炉热效率，%；

Q_2 ——每千克（每标准立方米）燃料的排烟热损失热量，kJ/kg、kJ/m³；

Q_3 ——每千克（每标准立方米）燃料的可燃气体未完全燃烧热损失热量，kJ/kg、kJ/m³；

Q_4 ——每千克（每标准立方米）燃料的固体未完全燃烧热损失热量，kJ/kg、kJ/m³；

Q_5 ——每千克（每标准立方米）燃料的锅炉散热损失热量，kJ/kg、kJ/m³；

Q_6 ——每千克（每标准立方米）燃料的灰渣物理显热损失热量，kJ/kg、kJ/m³；

Q_7 ——每千克（每标准立方米）燃料的脱硫热损失热量，kJ/kg、kJ/m³；

Q_r ——每千克（每标准立方米）燃料的输入热量，kJ/kg、kJ/m³；

q_2 ——排烟热损失百分率，%；

q_3 ——可燃气体未完全燃烧热损失百分率，%；

- q_4 ——固体未完全燃烧热损失百分率，%；
 q_5 ——锅炉散热损失百分率，%；
 q_6 ——灰渣物理显热损失百分率，%；
 q_7 ——石灰石脱硫热损失百分率，%。

6.2 排烟热损失

锅炉排烟热损失百分率 q_2 按式 (7) 和式 (8) 计算：

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_r} \times 100 \quad (7)$$

$$Q_2 = Q_2^{gy} + Q_2^{H_2O} \quad (8)$$

式中：

Q_2^{gy} ——干烟气带走的热量，kJ/kg、kJ/m³。

$$Q_2^{gy} = V_{gy} c_{p,gy} (\theta_{py} - t_0) \quad (9)$$

式中：

V_{gy} ——每千克（每标准立方米）燃料燃烧生成的干烟气体积，m³/kg、m³/m³；

$c_{p,gy}$ ——干烟气从 t_0 到 θ_{py} 的平均比定压热容，kJ/(m³·K)；

θ_{py} ——排烟温度，℃；

t_0 ——能量平衡基准温度（试验基准温度），为实测送风机入口温度，℃。

$$V_{gy} = (V_{gy}^0)^c + (\alpha_{py} - 1)(V_{gk}^0)^c \quad (10)$$

式中：

$(V_{gy}^0)^c$ ——按收到基燃料成分，由实际燃烧掉的碳和脱硫计算的理论燃烧干烟气体积，m³/kg；

α_{py} ——实测排烟过量空气系数；

$(V_{gk}^0)^c$ ——按收到基燃料成分，由实际燃烧掉的碳和脱硫计算的理论燃烧所需干空气量，m³/kg。

$$(V_{gy}^0)^c = 1.866 \frac{C_{ar} + 0.375 S_{tar}}{100} + 0.79 (V_{gk}^0)^c + 0.8 \frac{N_{ar}}{100} + 0.7 \frac{S_{tar}}{100} \left(\frac{\beta_5 K_{gib} - \eta_d}{100} \right) \quad (11)$$

式中：

C_{ar}^c ——燃料收到基实际烧掉的碳质量含量百分率，%；

S_{tar} ——燃料收到基全硫含量百分率，%；

N_{ar} ——燃料收到基氮含量百分率，%；

β_5 ——脱硫石灰石中碳酸钙分解率，取值为 98，%；

K_{gib} ——对应于单位质量燃料的入炉石灰石中钙的摩尔数与燃料收到基全硫摩尔数之比；

η_d ——脱硫效率，%。

$$C_{ar}^c = C_{ar} - \frac{A_{js} \bar{C}}{100} \quad (12)$$

式中：

C_{ar} ——燃料收到基碳含量百分率，%；

A_{js} ——投石灰石脱硫单位燃料计算灰分含量百分率，%；

\bar{C} ——灰渣中平均碳量与燃料计算灰量之比率，%。

$$A_{js} = A_{ar} + (A_{CaSO_4} + A_{CaO} + A_{wH} + A_{zz}) \quad (13)$$

式中：

A_{ar} ——单位燃料收到基灰分质量含量百分率，%；

- A_{CaSO_4} ——单位燃料脱硫后硫酸钙生成量百分率，%；
 A_{CaO} ——单位燃料脱硫石灰石未反应氧化钙含量百分率，%；
 A_{wfj} ——单位燃料脱硫石灰石未分解碳酸钙含量百分率，%；
 A_{zz} ——单位燃料脱硫用石灰石带入杂质百分率，%。

$$A_{\text{CaSO}_4} = 0.0425 \times \eta_{\text{d}} S_{\text{L,ar}} \quad (14)$$

$$\eta_{\text{d}} = \frac{\text{SO}_2^0 - \text{SO}_2}{\text{SO}_2^0} \times 100 \quad (15)$$

$$\text{SO}_2^0 = 2 \frac{S_{\text{L,ar}}}{V_{\text{gy},1.4}} \times 10^4 \quad (16)$$

式中：

SO_2^0 ——锅炉排烟中二氧化硫气体理论计算排放值，根据 GB 13223 规定，式 (16) 中 V_{gy} 的过量空气系数为 1.4 (即 $V_{\text{gy},1.4}$)， mg/m^3 ；

SO_2 ——锅炉排烟中二氧化硫气体实测值折算为 $\alpha_{\text{gy}}=1.4$ 时干烟气中的质量含量， mg/m^3 。

$$A_{\text{CaO}} = \left\{ 1.75 \frac{S_{\text{L,ar}}}{100} \left(K_{\text{gb}} - \frac{\eta_{\text{d}}}{100} \right) - \frac{b_{\text{CaCO}_3}}{100} \left(1 - \frac{\beta_{\text{fj}}}{100} \right) \frac{\text{CaCO}_{3,\text{ar}}}{100} \frac{56}{100} \right\} \times 100 \quad (17)$$

式中：

b_{CaCO_3} ——单位燃料脱硫入炉石灰石含量百分率，%；

$\text{CaCO}_{3,\text{ar}}$ ——石灰石收到基碳酸钙含量百分率，%。

$$K_{\text{gb}} = B_{\text{shs}} \frac{\text{CaCO}_{3,\text{ar}}}{100} \frac{32}{S_{\text{L,ar}} B_{\text{rim}}} \quad (18)$$

式中：

B_{shs} ——给石灰石量，实际测量， kg/h ；

B_{rim} ——入炉煤量，迭代计算， kg/h 。

$$b_{\text{CaCO}_3} = 3.125 \frac{K_{\text{gb}} S_{\text{L,ar}}}{\text{CaCO}_{3,\text{ar}}} \times 100 \quad (19)$$

$$A_{\text{wfj}} = b_{\text{CaCO}_3} \left(1 - \frac{\beta_{\text{fj}}}{100} \right) \frac{\text{CaCO}_{3,\text{ar}}}{100} \quad (20)$$

$$A_{\text{zz}} = \left(1 - \frac{\text{CaCO}_{3,\text{ar}}}{100} - \frac{M_{\text{f}}^{\text{shs}}}{100} \right) b_{\text{CaCO}_3} \quad (21)$$

$$\bar{C} = \frac{\alpha_{\text{dz}} C_{\text{dz}}^{\text{c}}}{100 - C_{\text{dz}}^{\text{c}}} + \frac{\alpha_{\text{fh}} C_{\text{fh}}^{\text{c}}}{100 - C_{\text{fh}}^{\text{c}}} + \frac{\alpha_{\text{xhh}} C_{\text{xhh}}^{\text{c}}}{100 - C_{\text{xhh}}^{\text{c}}} + \frac{\alpha_{\text{cjh}} C_{\text{cjh}}^{\text{c}}}{100 - C_{\text{cjh}}^{\text{c}}} \quad (22)$$

式中：

C_{fh}^{c} ——飞灰含碳量的百分率，%。

$$\left(V_{\text{gk}}^{\text{c}} \right)^{\text{c}} = 0.089(C_{\text{ar}}^{\text{c}} + 0.375S_{\text{L,ar}}) + 0.265H_{\text{ar}} + 0.0167S_{\text{L,ar}} \frac{\eta_{\text{d}}}{100} - 0.0333O_{\text{ar}} \quad (23)$$

式中：

H_{ar} ——燃料收到基氢含量百分率，%；

O_{ar} ——燃料收到基氧含量百分率，%。

$$\alpha_{py} = \frac{21}{21 - (O_2 - 2CH_4 - 0.5CO - 0.5H_2)} \quad (24)$$

式中:

O_2 、 CH_4 、 CO 、 H_2 ——排烟的干烟气中氧、甲烷、一氧化碳和氢的容积含量百分率, %。

$c_{p,gy}$ 可根据烟气成分按下式计算:

$$c_{p,gy} = c_{p,CO_2} \frac{RO_2}{100} + c_{p,O_2} \frac{O_2}{100} + c_{p,N_2} \frac{N_2}{100} + c_{p,CO} \frac{CO}{100} \quad (25)$$

式中:

c_{p,N_2} 、 c_{p,CO_2} 、 c_{p,O_2} 、 $c_{p,CO}$ —— N_2 、 CO_2 、 O_2 和 CO 的平均比定压热容, 可按排烟温度从 GB/T 10184—1988 附录 C (补充件) 表 C1 中查取, 其中 $RO_2 + O_2 + N_2 + CO = 100\%$, 也可按该附录 C (补充件) 中的公式计算, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$;

RO_2 、 N_2 ——排烟干烟气中三原子气体和氮气的容积含量百分率, %。

$Q_2^{H_2O}$ ——烟气所含水蒸气的显热, kJ/kg 、 kJ/m^3 。

$$Q_2^{H_2O} = V_{H_2O} c_{p,H_2O} (\theta_{py} - t_0) \quad (26)$$

式中:

$Q_2^{H_2O}$ ——烟气中所含水蒸气的热量, kJ/kg 、 kJ/m^3 ;

c_{p,H_2O} ——水蒸气从 t_0 到 θ_{py} 温度间的平均比定压热容, 可从 GB/T 10184—1988 附录 C (补充件) 表 C1 中查取, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$;

V_{H_2O} ——烟气中所含水蒸气的体积, m^3/m^3 。

V_{H_2O} 按下式计算:

$$V_{H_2O} = 1.24 \left[\frac{9H_{\pi} + M_t}{100} + \frac{b_{CaCO_3} M_t^{sh}}{10^4} + 1.293 \alpha_{py} (V_{gk}^0)^c d_k \right] \quad (27)$$

式中:

M_t ——燃料全水分百分率, %;

M_t^{sh} ——石灰石全水分百分率, %;

d_k ——空气的绝对湿度, 可从 GB/T 10184—1988 附录 G (补充件) 的湿空气线算图查得, kg/kg 干空气。

6.3 可燃气体未完全燃烧损失

CFB 锅炉排烟中可燃气体未完全燃烧产物热量损失百分率 q_3 按下式计算:

$$q_3 = \frac{1}{Q_t} V_{gy} (126.36CO + 358.18CH_4 + 107.98H_2 + 590.79C_m H_n) \times 100 \quad (28)$$

式中其他符号及其含义与 GB/T 10184—1988 中式 (53) 的相同。

6.4 固体未完全燃烧热损失

CFB 锅炉固体未完全燃烧热损失百分率 q_4 按下式计算:

$$q_4 = \frac{337A_p \bar{C}}{Q_t} \quad (29)$$

6.5 散热损失

CFB 锅炉在额定蒸发量下的散热损失 q_5^c 计算方法为: 按 GB/T 10184—1988 附录 F (补充件) 中的虚线查得 q_5^c , 再乘以面积修正系数 f_{xz} 得出 q_5^c :

$$q_5^c = q_5^c \times f_{xz} \quad (30)$$

$$f_{sz} = \frac{F_1}{F_2 - F_0} \quad (31)$$

式中:

F_2 ——锅炉总表面积, m^2 ;

F_0 ——锅炉分离回送系统等的外表面积之和, 包括分离器、立管、回料阀和外置换热器等的表面积, m^2 。

热损失值的大小与锅炉机组的热负荷有关, 当锅炉在其他蒸发量下运行时, q_5 可按下式计算:

$$q_5 = q_5^c \frac{D^c}{D} \quad (32)$$

式中:

q_5^c ——额定蒸发量下的散热损失, %;

D^c ——锅炉的额定蒸发量, t/h ;

D ——锅炉热效率测定时的实际蒸发量, t/h 。

锅炉供货合同中对散热损失另有约定的, 可以采用约定值 (或约定的确定方法确定), 但相对偏差一般不得超过本标准规定值的 $\pm 10\%$ 。

CFB 锅炉散热损失亦可通过实际测量锅炉散热量计算得出, 试验方法按照 GB/T 8174 执行。

6.6 灰渣物理热损失

灰渣物理热损失百分率 q_6 按下式计算:

$$q_6 = \frac{A_{js}}{Q_r} \left[\frac{\alpha_{dz}(t_{dz} - t_0)c_{dz}}{100 - C_{dz}^c} + \frac{\alpha_{fh}(\theta_{py} - t_0)c_{fh}}{100 - C_{fh}^c} + \frac{\alpha_{shh}(t_{shh} - t_0)c_{shh}}{100 - C_{shh}^c} + \frac{\alpha_{cjh}(t_{cjh} - t_0)c_{cjh}}{100 - C_{cjh}^c} \right] \quad (33)$$

如冷渣器流化风划归系统内, 冷却水划归系统外时, 按下式计算:

$$q_6 = \frac{A_{js}}{Q_r} \left[\frac{\alpha_{dz}(t_{dz} - t_0)c_{dz}}{100 - C_{dz}^c} + \frac{\alpha_{fh}(\theta_{py} - t_0)c_{fh}}{100 - C_{fh}^c} + \frac{\alpha_{shh}(t_{shh} - t_0)c_{shh}}{100 - C_{shh}^c} + \frac{\alpha_{cjh}(t_{cjh} - t_0)c_{cjh}}{100 - C_{cjh}^c} + D_{lzw}(h_{lzw}^* - h'_{lzw}) \right] \quad (34)$$

式中:

t_{dz} ——离开锅炉系统边界的实测底渣温度, $^{\circ}C$;

θ_{py} 、 t_{shh} 、 t_{cjh} ——分别为锅炉排烟温度 (即飞灰温度)、离开锅炉机组热平衡系统界限边界的循环灰温度和沉降灰温度, 沉降灰温度可取沉降灰斗上部空间的烟气温度, $^{\circ}C$;

C_{dz}^c 、 C_{fh}^c 、 C_{shh}^c 、 C_{cjh}^c ——分别为底渣、飞灰、循环灰、沉降灰的比热容, 按 GB/T 10184—1988 附录 C (补充件) 查取, $kJ/(kg \cdot K)$;

D_{lzw} ——冷渣器划归系统外冷却水流量, kg/h ;

h_{lzw}^* ——冷渣器划归系统外冷却水出口焓, kJ/kg ;

h'_{lzw} ——冷渣器划归系统外冷却水进口焓, kJ/kg 。

如冷渣器冷却介质 (流化风和冷却水) 划归系统内, 则 t_{dz} 为冷渣器实测出口渣温; 如冷渣器冷却介质 (流化风和冷却水) 划归系统外或底渣不冷却时, 则 t_{dz} 以炉膛底渣排放温度计算; 如冷渣器流化风划归系统内, 冷却水划归系统外时, 采用冷渣器出口渣温, 按式 (34) 计算 (参见 3.7)。

对于设置飞灰再循环系统的 CFB 锅炉, 在计算灰渣物理热损失时, 还应计入再循环飞灰输送过程中的物理热损失 (根据循环飞灰量和进、出系统的再循环飞灰温度计算)。

6.7 石灰石脱硫热损失

石灰石脱硫热损失百分率 q_7 根据石灰石煅烧吸热反应 [见式 (35)] 与硫化放热反应 [见式 (36)],

按式 (37) 计算:

$$\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2 - 183 \text{ kJ/mol} \quad (35)$$



$$q_7 = \frac{S_{\text{car}}(57.19K_{\text{gb}}\beta_{\text{f}} - 152\eta_{\text{a}})}{Q_1} \quad (37)$$

7 试验条件偏离设计值时的修正

7.1 试验工况偏离设计值时的修正

对试验工况某些参数偏离设计值可按 GB/T 10184—1988 中第 7 章“换算到保证条件下的热效率”中规定的方法修正。

7.2 试验燃料热值偏离设计值时的修正

试验燃料特性应符合原设计值。特殊情况下,在试验燃料与设计燃料为同一类型燃料(如同为烟煤煤种)的前提下,试验燃料特性参数(如发热量)偏离设计值超出 3.4 所规定的范围时,经试验各方协商同意,可以设计燃料特性分析数据(工业分析与元素分析)替代锅炉热效率计算所有相关公式中的实测入炉燃料特性分析数据进行计算的方式进行修正。

8 试验报告

CFB 锅炉试验报告参照 GB/T 10184—1988 中的 11.1 编写,在其中表 30 的“四、主要试验结果”中另增加锅炉额定负荷(BRL)下的如下项目:

燃料收到基全硫含量 S_{car} , %;

脱硫钙硫摩尔比 K_{gb} ;

脱硫效率 η_{d} , %;

二氧化硫排放浓度(干烟气, $\text{O}_2=6\%$) SO_2 , mg/m^3 ;

氮氧化物排放浓度(干烟气, $\text{O}_2=6\%$) NO_x , mg/m^3 ;

一氧化碳排放浓度(干烟气, $\text{O}_2=6\%$) CO , mg/m^3 。

CFB 锅炉试验技术报告参照 GB/T 10184—1988 中的 11.2 编写,其中锅炉设计和试验结果综合表改用本标准中的附录 A。

附录 A
(规范性附录)
锅炉试验数据综合汇总表

锅炉试验数据综合汇总表见表 A.1。

表 A.1 锅炉试验数据综合汇总

名称		符号	单位	设计值	试验数据	
试验工况序号		No.				
试验日期						
试验持续时间		τ	h			
一、燃料和脱硫剂	燃料成分和发热量	收到基含碳量	C_{ar}	%		
		收到基含氢量	H_{ar}	%		
		收到基全硫含量	S_{Lar}	%		
		收到基含氮量	N_{ar}	%		
		收到基含氧量	O_{ar}	%		
		全水分	M_1	%		
		收到基含灰量	A_{ar}	%		
		干燥无灰基挥发分	V_{daf}	%		
	收到基低位发热量	$Q_{net,ar}$	kJ/kg			
	燃料灰分的熔融特性	变形温度	DT	°C		
		软化温度	ST	°C		
		半球温度	HT	°C		
		流动温度	FT	°C		
		燃料特性系数	β	—		
	燃料的哈氏可磨度	HGI	—			
	入炉煤粒度	大于 10mm 重量份额	R_{10}	%		
		大于 8mm 重量份额	R_8	%		
		大于 5mm 重量份额	R_5	%		
		大于 2mm 重量份额	R_2	%		
		大于 1mm 重量份额	R_1	%		
大于 0.2mm 重量份额		$R_{0.2}$	%			
燃料中位径		d_{50}	mm			
入炉燃料温度	t_r	°C				
脱硫剂特性	石灰石全水分	M_1^{st}	%			
	石灰石收到基碳酸钙含量	$CaCO_{3,ar}$	%			
	石灰石碳酸钙分解率	β_{th}	%			
	钙硫摩尔比	K_{gsb}	—			
	石灰石的哈氏可磨度	HGI _{st}	—			
入炉石灰石温度	t_{st}	°C				

表 A.1 (续)

名称		符号	单位	设计值	试验数据		
试验工况序号		No.					
试验日期							
试验持续时间		τ	h				
一、 燃料和脱 硫剂	入炉 石灰石 粒度	大于2mm重量份额	R_2	%			
		大于1mm重量份额	R_1	%			
		大于0.5mm重量份额	$R_{0.5}$	%			
		大于0.2mm重量份额	$R_{0.2}$	%			
		大于0.1mm重量份额	$R_{0.1}$	%			
		大于0.05mm重量份额	$R_{0.05}$	%			
	石灰石中位径	d_{50}^{st}	mm				
二、 水和 蒸汽	锅炉蒸发量	D	t/h				
	主蒸汽温度	t_{g1}	°C				
	主蒸汽压力	p_{g1}	MPa				
	给水流量	D_{gs}	t/h				
	给水温度	t_{gs}	°C				
	给水压力	p_{gs}	MPa				
	过热器减温水流量	D_{jw}	kg/h				
	过热器减温水温度	t_{sj}	°C				
	过热器减温水压力	p_{sj}	MPa				
	I级过热器减温水流量	$D_{jw,I}$	kg/h				
	II级过热器减温水流量	$D_{jw,II}$	kg/h				
	I级再热器减温水流量	$D_{sj,I}$	kg/h				
	II级再热器减温水流量	$D_{sj,II}$	kg/h				
	再热器减温水温度	t_{sj}	°C				
	再热器减温水压力	p_{sj}	MPa				
	再热蒸汽流量	D_{rq}	t/h				
	I级再热器进口蒸汽温度	$t'_{sq,I}$	°C				
	II级再热器出口蒸汽温度	$t'_{sq,II}$	°C				
	I级再热器进口蒸汽压力	$p'_{sq,I}$	MPa				
	II级再热器出口蒸汽压力	$p'_{sq,II}$	MPa				
	锅筒蒸汽压力	p_{gt}	MPa				
	排污水流量	D_{ps}	kg/h				
	吹灰蒸汽流量	D_{ch}	kg/h				
省煤器进口水温	t'_{sm}	°C					
省煤器出口水温	t'_{sm}	°C					

表 A.1 (续)

名称		符号	单位	设计值	试验数据	
试验工况序号		No.				
试验日期						
试验持续时间		τ	h			
三、 烟气	排烟 烟气 分析	氧含量	$(O_2)_{py}$	%		
		三原子气体含量	$(RO_2)_{py}$	%		
		一氧化碳含量	$(CO)_{py}$	%		
		氢含量	$(H_2)_{py}$	%		
		甲烷含量	$(CH_4)_{py}$	%		
		碳氢化合物含量	$(C_mH_n)_{py}$	%		
		二氧化硫排放浓度	SO ₂	mg/m ³		
		脱硫效率	η_s	%		
		一氧化氮排放浓度	NO	mg/m ³		
		二氧化氮排放浓度	NO ₂	mg/m ³		
		氮氧化物排放浓度	NO _x	mg/m ³		
		实测排烟过量空气系数	α_{py}	—		
		省煤器后烟气含氧量	$(O_2)_{sm}^*$	%		
		省煤器后实测过量空气系数	α_{sm}^*	—		
		空气预热器前烟气含 RO ₂ 量	$(RO_2)_{ky}^*$	%		
	空气预热器后烟气含 RO ₂ 量	$(RO_2)_{ky}^*$	%			
	空气预热器漏风率	A ₁	%			
	炉内 温度 分布	炉膛浓相区烟温左侧/右侧	$\theta_{xx,1}/\theta_{xx,2}$	℃		
		炉膛中部烟温左侧/右侧	$\theta_{lx,1}/\theta_{lx,2}$	℃		
		炉膛稀相区烟温左侧/右侧	$\theta_{xx,1}/\theta_{xx,2}$	℃		
		炉膛出口烟温左侧/右侧	$\theta'_{h,1}/\theta'_{h,2}$	℃		
		分离器出口烟温左侧/右侧	$\theta'_{n,1}/\theta'_{n,2}$	℃		
		过热器出口烟温左侧/右侧	$\theta'_{gr,1}/\theta'_{gr,2}$	℃		
		省煤器前烟温左侧/右侧	$\theta'_{sm,1}/\theta'_{sm,2}$	℃		
		省煤器后烟温	θ'_{sm}	℃		
排烟温度		θ_{py}	℃			
炉内 压力 分布		床压左侧/右侧	$p_{cy,1}/p_{cy,2}$	kPa		
	稀相区压力左侧/右侧	$p_{xx,1}/p_{xx,2}$	Pa			
	炉膛出口压力左侧/右侧	$p'_{h,1}/p'_{h,2}$	Pa			
	分离器出口压力左侧/右侧	$p'_{n,1}/p'_{n,2}$	Pa			
	过热器后压力	p'_{gr}	Pa			
	省煤器后压力	p'_{sm}	Pa			
	排烟压力	p'_{py}	Pa			

表 A.1 (续)

名称		符号	单位	设计值	试验数据	
试验工况序号		No.				
试验日期						
试验持续时间		τ	h			
三、 烟气	烟气 阻力	床层阻力	Δh_{cc}	kPa		
		分离器阻力	Δh_n	Pa		
		过热器阻力	Δh_{gr}	Pa		
		省煤器阻力	Δh_{sm}	Pa		
		空气预热器阻力	Δh_{ky}	Pa		
		烟道总阻力	$\Sigma \Delta h_{yd}$	kPa		
四、 空气	一次风空预器前空气温度	t'_{ky}	℃			
	一次风空预器后空气温度	t''_{ky}	℃			
	二次风空预器前空气温度	t'_{mky}	℃			
	二次风空预器后空气温度	t''_{mky}	℃			
	风室温度左侧/右侧	$t_{fs,1}/t_{fs,2}$	℃			
	二次风环形风道温度	t_{mfx}	℃			
	一次风机出口风压	p_{mj}^*	kPa			
	风室压力左侧/右侧	$p_{fs,1}/p_{fs,2}$	kPa			
	二次风机出口风压	p_{mj}^*	kPa			
	返料高压风机出口风压	p_{fg}^*	kPa			
	二次风环形风道压力	p_{mfx}	kPa			
	一次风量(风室风量)左侧/右侧	$V_{1,1}/V_{1,2}$	m ³ /h			
	二次风量左侧/右侧	$V_{11,1}/V_{11,2}$	m ³ /h			
	返料高压风量左侧/右侧	V_{fg1}/V_{fg2}	m ³ /h			
	五、 灰、 渣特 性	播煤风量	V_{bmf}	m ³ /h		
给煤密封风量		V_{mf}	m ³ /h			
冷渣风量(采用流化床式冷渣器)		V_{lzf}	m ³ /h			
底渣中灰量占总灰量质量百分率		a_{dz}	%			
飞灰中灰量占总灰量质量百分率		a_{fh}	%			
循环灰中灰量占总灰量质量百分率		a_{xsh}	%			
沉降灰中灰量占总灰量质量百分率		a_{cjh}	%			
底渣可燃物含量		C_{dz}^c	%			
飞灰可燃物含量		C_{fh}^c	%			
循环灰可燃物含量		C_{xsh}^c	%			
沉降灰可燃物含量		C_{cjh}^c	%			
底渣温度	t_{dz}	℃				
循环灰温度	t_{xsh}	℃				
沉降灰温度	t_{cjh}	℃				

表 A.1 (续)

名 称		符号	单位	设计值	试验数据	
试验工况序号		No.				
试验日期						
试验持续时间		τ	h			
六、 热平 衡与 炉膛 热强 度	排烟热损失百分率	q_2	%			
	可燃气体未完全燃烧损失百分率	q_3	%			
	固体未完全燃烧损失百分率	q_4	%			
	锅炉散热损失百分率	q_5	%			
	灰渣物理热损失百分率	q_6	%			
	石灰石脱硫热损失百分率	q_7	%			
	锅炉热效率(毛效率)	η	%			
	换算到担保值条件下的热效率	η^p	%			
	锅炉每小时燃料耗量	B	kg/h			
	锅炉每小时石灰石耗量	B_{shs}	kg/h			
	炉膛容积热负荷	q_v	MW/m ²			
炉膛截面热负荷	q_f	MW/m ²				
七、 锅炉 辅机 消耗 功率	碎煤机	P_{sm}	kW			
	煤筛分装置	P_{sf}	kW			
	上煤皮带输送机	P_{mpd}	kW			
	给煤机	P_{gm}	kW			
	一次风机	P_{lfj}	kW			
	二次风机	P_{lfj}	kW			
	返料高压流化风机	P_{efj}	kW			
	引风机	P_{yf}	kW			
	外置换热器风机	P_{wzh}	kW			
	烟气再循环风机	P_{zshf}	kW			
	冷渣风机(采用流化床式冷渣器)	P_{lfj}	kW			
	石灰石破碎机	P_{psj}	kW			
	上石灰石皮带机	P_{spd}	kW			
	播煤升压风机	P_{bmf}	kW			
	给石灰石机	P_{gsh}	kW			
	排渣刮板机	P_{gb}	kW			
	冷渣器(水冷滚筒/绞龙)	P_{lj}	kW			
	静电除尘器	P_{jdc}	kW			
	炉水循环水泵消耗功率	P_{xhb}	kW			
	其他辅机消耗功率	P_j	kW			
	锅炉辅机消耗总功率	ΣP	kW			
八、 锅炉 净效 率	发电厂发电标准煤耗	b	kg/(kW·h)			
	锅炉自用热耗	Q_{zy}	kJ/kg			
	锅炉净效率	η_j	%			