



中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1976 — 2019

半工业化循环流化床锅炉燃烧试验台 燃料试烧试验技术规范

Technical specification of fuel trial burn test for semi-industrial pilot-plant
circulating fluidized bed boiler

2019-06-04 发布

2019-10-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言 II

1 范围..... 1

2 规范性引用文件 1

3 术语与定义..... 1

4 试验装置及准备工作..... 2

5 试验方法及内容 5

6 试验数据记录与处理..... 7

7 试验结果分析与报告编写 7

附录 A（资料性附录）试验台试烧试验大纲.....9

附录 B（资料性附录）试验报告的主要内容.....10

前 言

本部分按照GB/T 1.1-2016《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本部分由中国电力企业联合会提出。

本部分由电力行业电站锅炉标准化技术委员会（DL/TC08）归口。

本部分起草单位：中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司。

本部分主要起草人：赵鹏勃、高洪培、孙献斌、肖平、黄中。

本部分为首次发布。

本部分在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

半工业化循环流化床锅炉燃烧试验台燃料试烧试验技术规范

1 范围

本部分规定了半工业化循环流化床（Circulating fluidized bed, CFB）锅炉燃烧试验台（简称“CFB燃烧试验台”）的燃料试烧试验方法。

本部分适用于热功率为1MW及以上容量的CFB燃烧试验台燃料试烧试验，其它用途的CFB燃烧试验台可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改版）适用于本文件。

- GB/T 212 煤的工业分析方法
- GB/T 213 煤的发热量测定方法
- GB/T 214 煤中全硫的测定方法
- GB/T 219 煤灰熔融性的测定方法
- GB/T 474 煤样的制备方法
- GB/T 475 商品煤样采取方法
- GB/T 477 煤炭筛分试验方法
- GB/T 1574 煤灰成分分析方法
- GB/T 2565 煤的可磨性指数测定方法
- GB/T 3286 石灰石及白云石化学分析方法
- GB/T 10184 电站锅炉性能试验规程
- GB/T 13283 工业过程测量和控制用检测仪表和显示仪表精确度等级
- GB/T 16157 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法
- DL/T 465 煤的冲刷磨损指数试验方法
- DL/T 568 试验煤种元素的快速分析方法
- DL/T 964 循环流化床锅炉性能试验规程

3 术语与定义

下列术语和定义适用于本部分。

3.1

床料 bed material

流化床点火启动前铺设在布风板上的具有一定厚度、符合一定粒度要求的固体颗粒。床料一般为循环流化床锅炉底渣或河沙。

3.2

循环物料 circulating material

分离器分离下来通过返料系统返送回炉膛的物料，以及炉膛内本身积存的物料。

3.3

流化速度 fluidized velocity

假设流化床内没有物料时空气（或烟气）通过炉膛的空截面速度。

4 试验装置及准备工作

4.1 试验装置与系统

4.1.1 CFB 燃烧试验台系统参见图 1。炉膛主体的截面积宜大于 0.08m^2 ，为保证燃料足够的燃烧行程与停留时间，炉膛有效高度应大于 18m（流化速度 3.5m/s-5m/s）。燃烧室（11）各段应有温度调节装置（水冷装置（7））以调节分离器入口温度，实现温度变化范围为 $400^{\circ}\text{C}\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ，以模拟实炉燃烧工况。

4.1.2 CFB 燃烧试验台应配套给煤系统、风烟系统、除尘器和冷却水系统等，以保证试验台具备完善的功能。

4.1.3 CFB 燃烧试验台应配备数据采集系统，并宜采用 DCS 集中监控。

4.1.4 CFB 燃烧试验台 SNCR 脱硝还原剂可在燃烧室（11）出口和高温分离器（13）之间的水平烟道择点喷入。

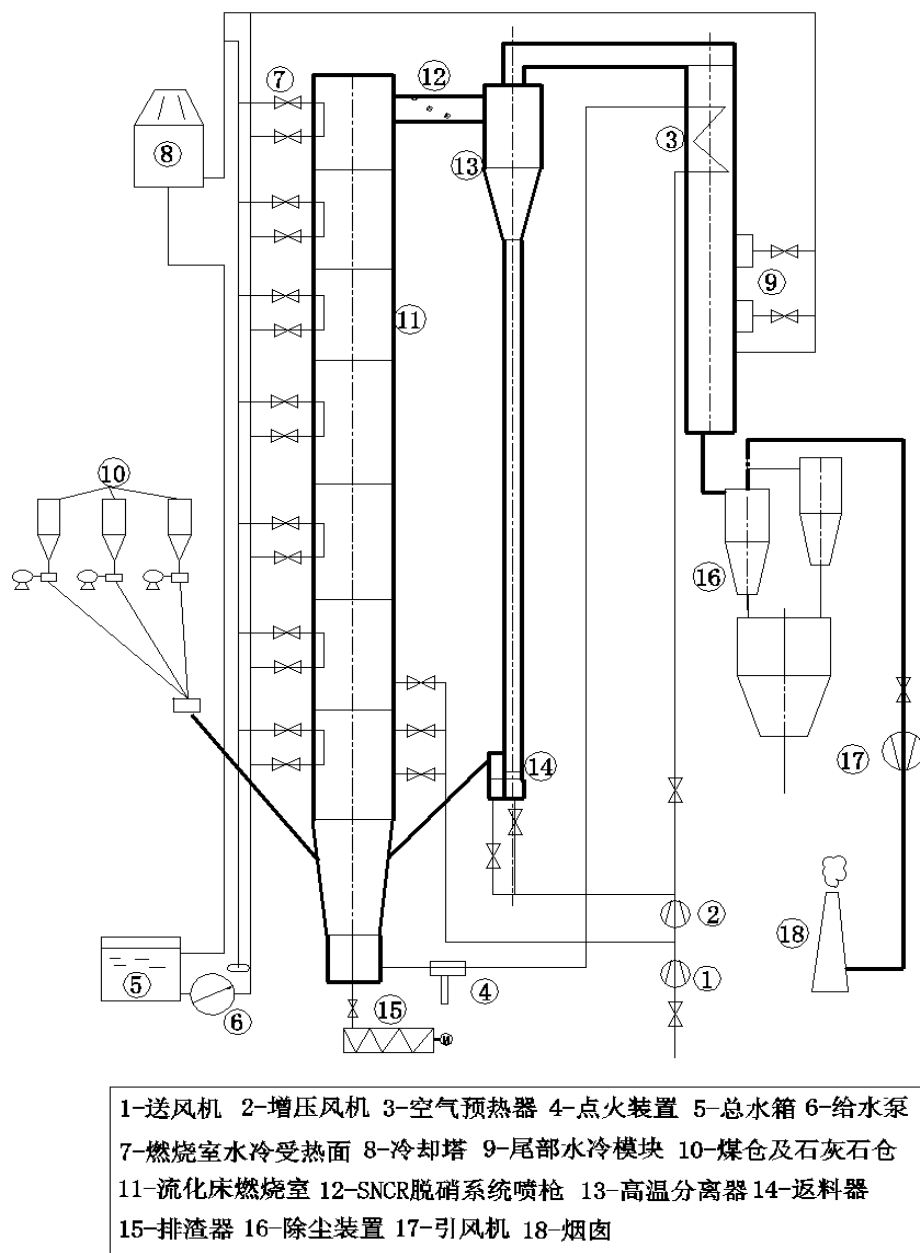


图1 CFB燃烧试验台系统参考图

4.2 试验仪器设备要求

4.2.1 CFB 燃烧试验台测试仪表精度要求为：

- a) 一次风量流量计：精确度等级为 4；
- b) 一次风温表：精确度等级为 2.5；
- c) 二次风量流量计：精确度等级为 4；
- d) 二次风温表：精确度等级为 2.5；
- e) 各段炉壁温度表（其热电偶嵌入炉膛炉壁内）：精确度等级为 0.5%；
- f) 各段烟温温度表（其热电偶嵌入烟道内）：精确度等级为 0.5%。

其他测试仪表精度要求按照 GB/T 13283 要求执行。

4.2.2 CFB 燃烧试验台应配备在线烟气分析仪，应能同时对烟气中的 O_2 、 CO_2 、 CO 、 SO_2 、 NO_2 、 NO 、 N_2O 等重要气体成份进行测量。烟气成分在线测量仪器宜采用抽吸式取样方式进行取样分析测量，取样管应设置伴热管，具体采样方法按照 GB/T16157 执行。

4.2.3 根据需要，CFB 燃烧试验台可另外加装试验仪器或烟气采集设备，对试验燃料的其它烟气成分，如气态有害微量元素和 HCl 、 HF 、二噁英等进行在线抽取测量或采样后送实验室检测。

4.3 试验设备状况检查与准备

4.3.1 应检查试验装置与系统具备启动条件，记录各主要设备部件及有关辅助设备的状态。

4.3.2 进行特殊燃烧试验时，CFB 燃烧试验台应根据需要完成必要的改进。

4.3.3 检查 CFB 燃烧试验台相关测量表计与测量系统，并完成必要的测试仪器与系统的校验、标定工作。

4.3.4 完成试验燃料和脱硫剂（石灰石等）、脱硝还原剂（尿素溶液、氨水等）的准备工作，包括将试验燃料和脱硫剂制备成合适粒度，并进行取样分析。

4.3.5 准备好点火启动所需的燃油（气）。

4.3.6 准备好合格的启动床料。

4.4 试验燃料和灰渣取样及化验

4.4.1 试验燃料和石灰石取样及化验应符合以下要求

- a) 试验燃料在其运抵 CFB 燃烧试验台后，现场进行多点采样。每点每次取样 2kg，置于密封容器内，取样结束后采用四分法混合缩分为 4 份，每份 2kg。试验方和业主方各 1 份，留底备用 2 份。试验燃料、石灰石、灰渣等采样具体方法按照 GB/T474 和 GB/T475 进行。
- b) 样品的化验内容应包括粒度筛分、工业分析、元素分析、发热量、灰熔点和灰成分等燃料特性指标，还宜采用热重分析仪对试验燃料的着火和燃尽特性进行试验研究，具体方法按照 GB/T212 和 GB/T213 执行。
- c) 石灰石可在入炉石灰石样品堆进行取样，石灰石样品的缩制程序及方法同燃料相同。样品的化验内容应包括粒度筛分、成分分析、石灰石的煅烧分解特性、脱硫特性热重分析，按照 GB/T3286 执行。

4.4.2 底渣和飞灰取样及化验

底渣在 CFB 燃烧试验台底部排渣口取样，飞灰可采用在线等速取样或在除尘器底部取样，同样采用四分法混合缩分。灰渣样品的化验内容包括灰渣中可燃物含量、粒度筛分、灰渣成分、飞灰比电阻等。

4.5 试验工况编排

4.5.1 试烧试验开始前，应根据试验目的，进行试验工况设计，编写试验大纲。试验大纲内容参见附录 A。确定各工况需调整的参数，并确定每个工况的测量项目。

4.5.2 CFB 燃烧试验台需调整的参数主要包括：

- a) 试验燃料；
- b) 不同试验燃料的掺混比例；
- c) 床温；
- d) 入炉石灰石量（钙硫摩尔比）；
- e) SNCR 脱硝系统氨氮比。

5 试验方法及内容

5.1 CFB 燃烧试验台启动

5.1.1 启动前，CFB 燃烧试验台已装填一定厚度的床料，床料宜采用最大粒径小于 1mm 的沙子或经过筛分后最大粒径小于 8mm 的底渣。

5.1.2 启动风机和点火系统，依次进行点火、投料、升温，CFB 燃烧试验台进入稳定燃烧状态。

5.1.3 调整相关试验参数到预定试验工况，按工况要求稳定运行一定时间后，开始正常工况试验。

5.2 试验参数要求

试烧试验工况测试期间，应保持主要运行参数稳定，其波动宜保证在表 1 所列范围内。测试期间，不应进行干扰测试的操作。

表 1 试验测试期间参数波动要求

序号	项目	单位	短时数据允许偏差	数据均值允许偏差
1	排烟氧量	%	± 1.0	± 0.5
2	试验燃料给入量	%	± 10	± 5
3	入炉石灰石量	%	± 4	± 2
4	密相区平均床温	$^{\circ}\text{C}$	± 30	± 20
5	密相区床压	Pa	± 800	± 500
6	SNCR 脱硝氨氮比	-	± 0.5	± 0.3
7	流化速度	m/s	± 1	± 0.5
8	燃料最大粒径	mm	± 5	± 3
注 1：表中除 2、3 项为相对值外，其余各项均为绝对值。				
注 2：考虑特殊高灰分燃料情况（收到基灰分 50% 以上），短时床压波动放宽至 $\pm 1500\text{Pa}$ ，平均床压波动放宽至 $\pm 800\text{Pa}$ 。				

5.3 试验工况要求

5.3.1 试验工况时间

试验时间应符合以下要求：

- CFB 燃烧试验台进入稳定燃烧状态后，应持续稳定运行 2h 以上方可进行正式试验工况测试；其中每个工况试验开始前，应达到并维持在预定的试验工况参数下稳定运行 1h 以上；
- 脱硫试验测试工况，应按设定的钙硫摩尔比在试验开始前连续向炉内投石灰石运行 4h 以上；
- SNCR 脱硝试验测试工况，脱硝系统应按设定氨氮比稳定投入运行 1h 以上；
- 每个工况试验测试时间应不少于 1h，对于参数波动相对较大或需要更准确结果的试验，试验持续时间应延长到 2h 以上。

5.3.2 数据记录及取样间隔

试验数据记录及取样间隔（取样频率）应符合以下要求：

- 试验燃料给入量、平均床温、运行氧量等主要系统运行参数，5min~10min 记录一次（取 DCS 采集数据平均值）；
- 一二次风量、播煤风量、炉膛压力等其它次要运行参数，30min 记录一次（取 DCS 采集数据平均值）；
- 烟气成分分析、排烟温度，5min~10min 记录一次（取 DCS 采集数据平均值）；

- d) 底渣取样, 每 60min 至少取样一次, 并应注意考虑灰渣行程产生的滞后效应影响;
- e) 飞灰取样, 采用等速取样时, 应在整个试验工况期间连续取样;
- f) 主要运行画面, 每 30min 拷屏一次。

5.3.3 试验记录

试验数据记录至少应当包括下列项目:

- a) 试验名称;
- b) 工况号及工况条件;
- c) 试验日期, 工况进行期间异常情况记录;
- d) 试验开始与结束时间;
- e) 试验时间与详细数据;
- f) 与数据处理有关的其它项目;
- g) 记录人、计算人与项目负责人。

5.4 试验内容

5.4.1 燃烧特性

燃烧特性是燃料的最重要特性之一, 主要包括:

- a) 着火;
- b) 稳定燃烧;
- c) 燃尽;
- d) 结焦;
- e) 断煤和压火。

5.4.2 床温分布特性

试烧试验应进行多工况的床温分布测试试验, 记录试验数据, 并绘制床温沿床高的分布曲线。在兼顾 NO_x 、 SO_2 排放指标和燃烧效率的前提下, 综合分析推荐 CFB 锅炉实炉设计运行的最佳床温区间。

5.4.3 污染物排放特性

污染物的排放应符合以下要求:

- a) 污染物排放试验要求试烧试验应在线测量烟气中各污染物排放值(特殊烟气成分可抽取后送实验室分析), 结合国家及地方标准, 对试烧试验各工况所测得的污染物排放数据进行全面分析, 推荐适宜的污染物排放控制策略和措施。

b) SO_2 的排放

CFB 燃烧试验台试烧试验假定煤中全硫在燃烧过程中全部生成 SO_2 , 相应的脱硫效率 η_s 按下述公式计算, 包含了自脱硫在内的总脱硫效率:

$$\eta_s = 1 - \frac{C_{\text{SO}_2} V_{\text{gy}}}{0.007 S_{\text{t,ar}}} \quad (1)$$

式中, η_s --- 脱硫效率, %;

C_{SO_2} --- 是折算到干烟气条件下实测的 SO_2 浓度, mg/m^3 (101.325kPa、0℃、6% O_2);

V_{gy} ---是 1kg 煤在过量空气系数为 1.4 条件下的干烟气量, m^3/kg (101.325kPa, 0℃、6%O₂);
 $S_{t,ar}$ ---试验燃料收到基全硫, %。

c) NO_x 的排放

CFB 燃烧试验台可进行流化床烟气选择性非催化还原法 (SNCR) 脱硝试验, 测试脱硝效率, 确定合适的氨氮比。脱硝效率 η_N (以 NO₂ 计, 6%O₂ 含量) 计算方法如下:

$$\eta_N = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

η_N —CFB 燃烧试验台 SNCR 系统脱硝效率, %;

C_1 —脱硝系统运行时系统入口处烟气中 NO_x 含量, mg/m^3 (干烟气, 101.325kPa、0℃、6%O₂);

C_2 —脱硝系统运行时系统出口处烟气中 NO_x 含量, mg/m^3 (干烟气, 101.325kPa、0℃、6%O₂)。

d) CO、N₂O、HCl、HF 等其它污染气体和二噁英的排放

测试试验各工况 CO、N₂O、HCl、HF 等其它污染气体的排放和二噁英的排放, 分析 CO、N₂O 等污染气体排放随着床温、过量空气系数等因素变化的规律。

5.4.4 灰渣特性分析

试烧试验应对所产生的灰渣应进行如下分析:

a) 试验燃料的成灰特性

试烧试验应测试各工况燃料的底渣与飞灰份额。

b) 灰渣理化特性成分及综合利用分析

试烧试验应根据实际工程需要, 对试验所取得的典型工况灰渣样进行可燃物含量、灰成分、粒度分布、飞灰比电阻等特性分析, 为电厂系统设计和灰渣的综合利用提供参考。

6 试验数据记录与处理

6.1 对 CFB 燃烧试验台多次重复测量的数据, 一般取其算术平均值作为最终测量值。在计算平均值前, 应审查测量记录, 遇有与正常读数相差较大的记录值时应加以分析。在测量过程中, 如规定的工况短期遭到破坏, 参数的变化超过运行的极限范围时, 在观察记录上应取消受到影响阶段内的全部测量读数。

6.2 试验数据的计算处理方法按照 GB/T10184 和 DL/T964 进行。

7 试验结果分析与报告编写

7.1 试烧试验工作完毕后, 应在整理试验数据、分析试验结果的基础上编写试烧试验研究报告, 对试验燃料的燃烧和污染物排放特性等试验结果进行全面的分析总结。试验报告的内容参见附录 B。

7.2 试烧试验报告应对影响试验燃料的燃烧、污染物排放特性等的主要因素进行分析, 并在此基础上给出试验燃料应用于实际工程时的意见和建议。

附录 A

(资料性附录) 试烧试验大纲的编写

A.1 试验大纲至少应包括下列内容：

- a) 试验目的和任务、试验内容；
- b) 试验设备的状况；
- c) 试验程序、测量项目、测点布置、试验工况；
- d) 试验的技术准备工作要点、试验的要求和实施；
- e) 试验的数据采集及处理方法；
- f) 试验人员组织分工和总体进度计划。

A.2 试烧试验大纲目录参见图 A1：

一、编制说明
1.1 试验大纲的编制依据
1.2 试验项目和内容
二、试验设备概述
2.1 试验设备技术规范
2.2 试验测试仪器
三、试验方法和步骤
3.1 测量项目及测量方法
3.2 试验人员分工和实施步骤
四、试验工况编排
4.1 试验燃料和石灰石的理化分析
4.2 试验工况特征内容及顺序编排
五、试验数据采集分析
5.1 试验数据采集整理
5.2 试验数据处理方法
5.3 试验结果分析
六、试验进度计划安排

图 A1 试烧试验大纲目录

附录 B

(资料性附录)

试验报告的主要内容

半工业化 CFB 燃烧试验台燃料试烧试验报告目录及内容见图 B.1.

<p>项目名称:</p> <p>一、摘要</p> <p>二、概述</p> <p>内容包括工程试烧试验的背景、依据、目的等。</p> <p>三、试烧试验项目和内容</p> <p>详细说明试验的主要研究内容。</p> <p>四、试验设备和测量仪器</p> <p>试验台系统和设备功能介绍, 应附详图, 便于详细了解试烧的流程; 同时应对试验测量仪器进行介绍。</p> <p>五、测量项目及方法</p> <p>六、试烧试验工况编排</p> <p>针对性的编排试烧试验的具体工况, 详细描述各工况的试验基本条件和特征。</p> <p>七、试烧试验结果与分析</p> <p>内容包括试验过程中对试验结果和相关影响因素的说明。试验数据汇总应包含所有的基本测量项目和重要数据计算结果。对各单项试验, 应在叙述基本测量原理的基础上, 结合试验数据分析总结, 得出试验结果。</p> <p>7.1 燃烧特性</p> <p>燃料的燃烧特性包括着火、稳燃、燃尽、结焦性和压火等。</p> <p>a) 着火特性</p> <p>根据试验台采集的数据绘制试验燃料的冷态点火特性曲线。</p> <p>b) 稳燃</p> <p>测试试验燃料稳燃的床温范围, 绘制稳燃曲线。</p> <p>c) 燃尽特性</p> <p>通过对试烧试验所得灰渣样品的可燃物分析, 再进行理论计算得到各个工况试验燃料的燃烧效率。对其统计并进行图表分析, 总结其规律和燃尽特性。</p> <p>d) 结焦特性</p> <p>在实验室内对试验的设计煤和校核煤灰熔点进行化验, 并据此初步判断煤灰结焦倾向。</p> <p>在试验台上进行试验燃料结焦特性实际试烧试验, 提高实际燃烧温度直至试验燃料结焦。最终综合判断试验燃料的结焦特性。</p> <p>e) 断煤和压火</p> <p>对试验燃料进行专项断煤和压火特性测试试验, 绘制曲线。</p> <p>f) 炉内温度场分布特性</p> <p>在兼顾 NO_x、SO_2 排放值和燃烧效率的前提下, 试烧试验应进行多工况的床温分布测试试验, 记录试验数据, 并绘制床温沿床高的分布曲线。</p> <p>7.2 污染物排放分析</p> <p>在线测量烟气中 SO_2、NO_x 及 CO 排放值, 绘制特性曲线。对试烧试验所测得的污染物排放数据进行全面分析, 并推荐实际工程污染物治理应采取的措施。</p> <p>7.3 实炉设计运行床温推荐</p> <p>综合考虑床温对燃烧效率、污染物排放值 (SO_2、NO_x 等) 的影响, 推荐实炉设计和运行的炉膛温度控制范围, 并阐述推荐理由。</p> <p>7.4 灰渣特性分析</p> <p>a) 试验燃料的成灰特性</p> <p>测试各个工况底渣飞灰份额, 通过理论计算折算灰分, 实际测量底渣量后即可计算出飞灰底渣比</p>
--

例，供实际工程参考。
b) 灰渣理化特性成分及综合利用分析
对试验所得的典型工况灰渣可燃物含量及成份物性进行分析, 为灰渣的综合利用提供决策依据。
八、结论与建议
内容包括试烧试验项目的主要结论、技术建议、推荐的优化运行方式与参数等。
九、附录
内容包括主要试验测试记录、煤及灰渣检测报告、主要工况拷屏、补充图表等对报告正文内容有帮助和起支撑作用的技术资料与文件。

图 B.1 半工业化 CFB 燃烧试验台燃料试烧试验报告目录及内容