

T/CEC

中国电力企业联合会标准

T/CEC XXXXX-XXXX

燃煤机组回转蓄热式换热器传热元件性能 测试规程

Performance test procedure for heat transfer element of rotary
regenerative heat exchanger of coal-fired unit

(征求意见稿)

20XX—XX—XX 发布

20XX—XX—XX 实施

中国电力企业联合会 发布

目 次

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 总则..... 1

5 试验前的准备工作..... 2

6 试验装置和实验室技术条件..... 2

6.1 一般要求..... 2

6.2 稳态试验系统和技术条件..... 2

6.3 瞬态试验系统和技术条件..... 3

7 试验测量参数及测量方法..... 4

7.1 环境参数..... 4

7.2 进口气体温度..... 4

7.3 出口气体温度..... 4

7.4 气体压力..... 5

7.5 气体流量..... 5

8 试验条件、试验要求和试验过程..... 5

9 试验数据处理和计算..... 6

9.1 一般要求..... 6

9.2 稳态试验数据处理计算..... 6

9.3 瞬态试验数据处理计算..... 8

10 试验报告..... 10

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

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专利的责任。

本文件由中国电力企业联合会提出。

本文件由电力行业电站锅炉标准化技术委员会（DL/TC 08）归口。

本文件起草单位：国网湖南省电力有限公司电力科学研究院、西安交通大学、西安热工研究院有限公司、东方电气集团东方锅炉股份有限公司、哈尔滨锅炉厂预热器有限责任公司、上海锅炉厂有限公司、上海交通大学、国家能源集团永州发电有限公司、南方电网电力科技股份有限公司、华电电力科学研究院有限公司、湖南省湘电试验研究院有限公司。

本文件主要起草人：

本文件为首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈到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）。

燃煤机组回转蓄热式换热器传热元件性能测试规程

1 范围

本文件规定了回转蓄热式换热器传热元件性能测试的技术要求，包括试验装置、试验条件、试验方法和测量参数、试验数据处理、试验报告编写等内容。

本文件适用于回转蓄热式换热器传热元件的传热和阻力性能测试。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 10184 电站锅炉性能试验规程

GB/T 27698.1 热交换器及传热元件性能测试方法 第1部分：通用要求

GB/T 27698.3 热交换器及传热元件性能测试方法 第3部分：板式热交换器

3 术语和定义

3.1

回转蓄热式换热器 rotary regenerative heat exchanger

由传热元件板填充的芯体作为储热介质，绕轴连续旋转，交替通过热流体和冷流体通道，实现从热流体向冷流体传递热量的换热器。

3.2

传热元件 heat transfer element

组成回转蓄热式换热器的基本元件，由定位板、波纹板或平板组成。

3.3

单吹瞬态试验 single blow test

一种采用单一流体测试传热元件性能的瞬态试验方法。进口流体温度随时间变化，记录相应的出口流体温度随时间变化曲线，通过将其与计算模型输出的出口流体温度曲线进行比较和匹配，确定测试传热元件的平均换热系数等性能参数。

4 总则

4.1 回转蓄热式换热器的传热元件，宜进行性能试验，测定其技术指标及性能。

4.2 传热元件性能试验内容，应包括传热性能和阻力性能两部分。

4.3 传热元件性能试验，可采用稳态方法或瞬态方法进行，试验装置、试验方法和数据处理方法应符合本文件的要求。

4.4 有下列情形之一时，应进行传热元件性能试验：

a) 产品试制鉴定时；

- b) 首次生产和使用的传热元件;
- c) 传热元件的结构、材质、工艺有较大改变时;
- d) 用户合同中要求进行试验时。

4.5 传热元件性能试验步骤如下:

- a) 根据试验性质、内容及要求, 编制试验大纲;
- b) 进行试验前的准备工作;
- c) 进行回转蓄热式换热器传热元件的性能测试;
- d) 整理、分析试验数据;
- e) 进行试验计算;
- f) 评估试验结果的有效性, 若不符合要求, 应重新进行试验;
- g) 编写试验报告。

5 试验前的准备工作

5.1 试验大纲应经各方协商一致, 包括以下内容:

- a) 试验目的和要求;
- b) 测试传热元件的结构尺寸、性能指标的理论计算值等;
- c) 测试项目, 以及相应的测点布置、测试方法、测试仪器等的要求;
- d) 试验工况;
- e) 试验数据的记录, 数据整理计算和结果的评估方法;
- f) 试验人员的组成和分工;
- g) 试验进度计划和安全注意事项。

5.2 应使用经过校准合格的仪器、仪表, 精确度应能满足试验要求。

5.3 正式试验开始前, 应进行预备性试验, 熟悉试验流程和操作, 培训试验人员。在各方一致认可的情况下, 预备性试验可作为一次正式性试验。

6 试验装置和实验室技术条件

6.1 一般要求

6.1.1 试验测试中, 进出传热元件的介质参数, 宜与燃煤机组实际运行参数接近, 进口烟气温度宜为 320℃-380℃。

6.1.2 测试传热元件段的入口应有整流装置, 且有足够长的稳定管段, 传热元件安装在稳定段区域。

6.1.3 试验系统中, 工作温度高于环境温度的管段应采取保温措施。

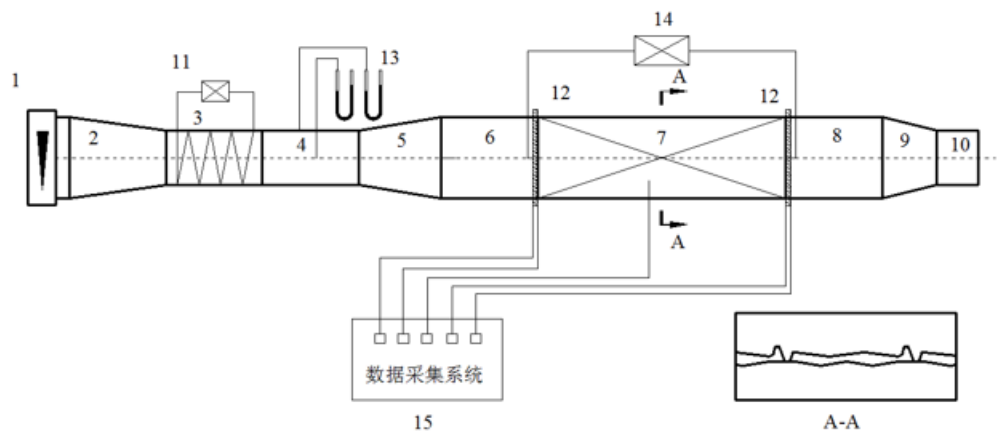
6.1.4 试验系统中, 应设有可连续调节介质流量的装置, 或采用变频风机调节介质流量。

6.1.5 试验系统中, 传热元件入口介质的温度应可调节。

6.1.6 试验系统中, 测点安装应满足 GB/T 10184 的规定。

6.2 稳态试验系统和技术条件

6.2.1 回转蓄热式换热器传热元件的稳态试验系统示意图 1。



1. 风机；2. 过渡段；3. 加热段；4. 测速段；5. 过渡段；6. 整流段；7. 试验段；8. 整流段；9. 过渡段；10. 出口段；11. 变压器；12. 热电偶网；13. 压差计；14. 压差变送器；15. 数据采集系统

图1 传热元件稳态试验系统示意

- 6.2.2 试验传热元件应包括波纹板、定位板或平板组成的一对板型。元件宽度不宜小于 300mm，长度不宜小于 500mm，且采用制造厂推荐的压紧力进行装配固定。
- 6.2.3 用恒温水浴加热传热元件实现恒壁温条件，控制在 85℃-90℃，采用热电偶监测壁面温度。
- 6.2.4 试验段中，应等距布置加热元件，保持试验中水温恒定。
- 6.2.5 试验段中介质流动的雷诺数 Re 应在 1000-10000 范围内可连续调节。
- 6.2.6 试验系统管路流量计的量程范围应与风机选型点参数、系统风量调节范围相配合。
- 6.2.7 试验段进口空气等气体介质温度应在 20℃-50℃。
- 6.2.8 试验装置应采用高温粘结剂将试验元件与试验段框架之间的间隙进行填充。

6.3 瞬态试验系统和技术条件

- 6.3.1 回转蓄热式换热器传热元件的瞬态试验系统示意图 2、图 3。

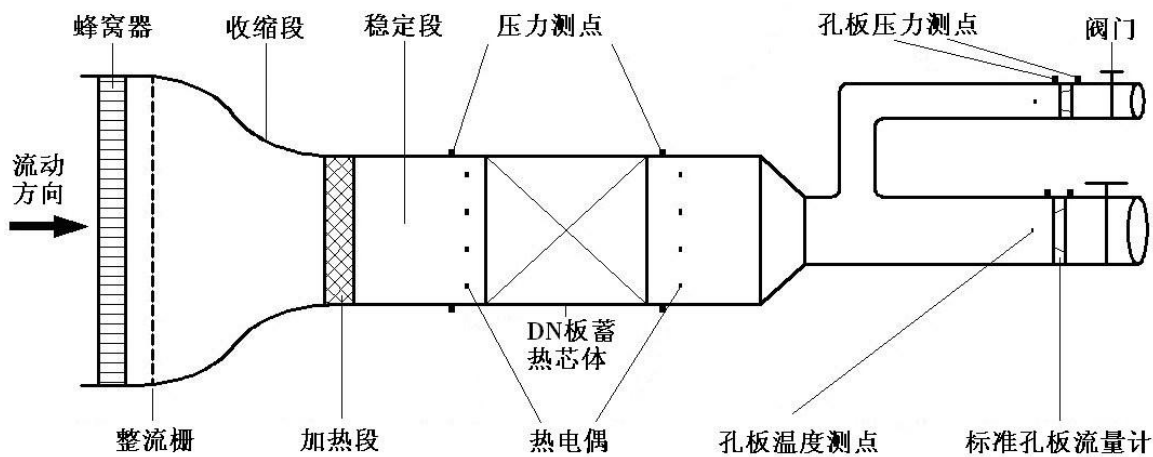


图2 传热元件瞬态试验系统（单吹瞬态试验台）示意

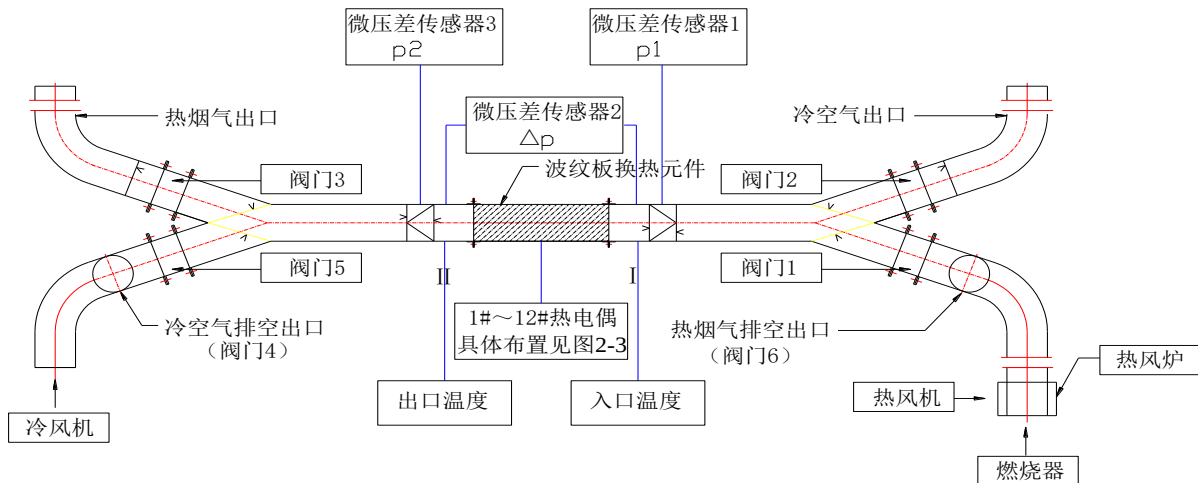


图3 传热元件瞬态试验系统（双吹瞬态试验台）示意

- 6.3.2 瞬态试验系统中，宜将冷、热介质进口风道分开独立布置。
- 6.3.3 测试传热元件段的截面尺寸，瞬态方法测试时，应不小于 $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ ，宽度方向上应包含不少于 3 个重复波纹单元。
- 6.3.4 瞬态试验系统中，传热元件进口、出口介质温度测点宜加密布置。
- 6.3.5 瞬态试验系统中，传热元件进口、出口介质温度测量元件宜选用时间常数较小的产品规格。
- 6.3.6 瞬态试验系统中，可在沿气体流动方向，在传热元件壁面等间距布置温度测点。
- 6.3.7 瞬态试验系统中，宜配置试验数据实时采集处理系统。

7 试验测量参数及测量方法

7.1 环境参数

- 7.1.1 大气压力应采用 0.075 级绝压变送器，在传热元件安装标高处测量大气压力。
- 7.1.2 大气干球、湿球温度，应在实验室通风且温度不受影响的地方用干湿球温度计测量，仪表精度不应低于 0.25%。

7.2 进口气体温度

- 7.2.1 进口气体温度测点应布置在试验段上游管道的一个公称直径截面上，数量不宜少于 3 个测点。
- 7.2.2 进口气体温度测量元件，应采用铂电阻温度计，其精度不应低于 0.25%。

7.3 出口气体温度

- 7.3.1 出口气体温度测点宜采用网格法布置，型式参考图 4，具体要求按 GB/T 10184 执行。
- 7.3.2 出口气体温度测量元件，应采用铂电阻温度计，其精度不应低于 0.25%。

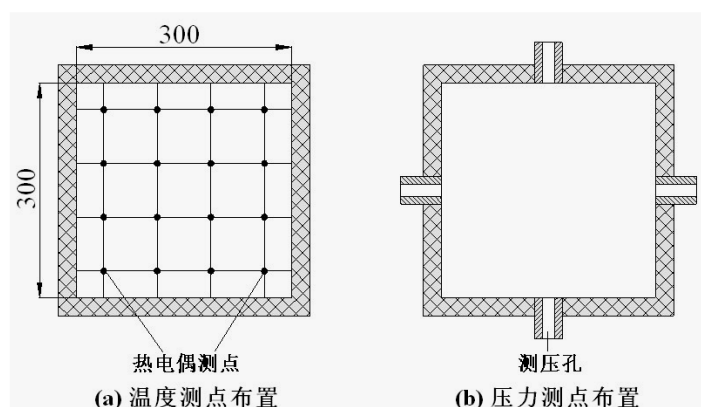


图4 气体温度和压力测点布置示意

7.4 气体压力

7.4.1 试验段上游、下游通道的壁面上，应对称布置压力测点，型式参考图 4，具体要求按 GB/T 10184 执行。

7.4.2 测量试验段进口、出口介质压力的仪表，应采用 0.075 级绝压变送器。

7.4.3 测点宜布置在距试验段进口、出口 0.5m 的截面上，且应满足距离扰流部件（变径、弯头、阀门等）下游至少 5 倍管径、上游至少 2 倍管径的条件。

7.5 气体流量

7.5.1 气体流量可采用标准孔板装置测量，或采用由介质流动差压测量值计算的风速值得到。

7.5.2 试验管段风速测量的仪表精度不应低于 1%。

7.5.3 采用皮托管测量时，应在风道截面的两个相互垂直的直径上分别按等截面法设置测点，具体按 GB/T 10184 执行。二次仪表应采用 0.075 级差压变送器。

8 试验条件、试验要求和试验过程

8.1 试验前应对试验系统进行严密性检查。

8.2 采用稳态试验方法测试时，应进行水箱无渗漏检查。

8.3 测试工作应在换热元件的各项测量参数调整稳定 30min 后进行。

8.4 每个试验工况的持续测量时间应不少于 30min。

8.5 稳态试验的过程如下：

- 将去离子水加入试验台装置的水箱，开启控制电源，使加热装置开始工作，加热水至沸腾，用温度计测量水温，直至水温恒定。
- 开启风机电源，待风机工作稳定后，调节挡板开度或风机转速，直至风道流速达到工况点。
- 视工况参数要求，决定是否开启进口空气加热器。
- 连续监测试验段进口、出口空气温度、压力参数，稳定 30min 后，记录相关试验参数，包括，试验段进口、出口空气温度，进入试验段的空气流量，试验段传热元件壁温等。
- 调节试验段进口空气流量，重复上述试验过程，直至完成方案约定的工况测试。

8.6 瞬态试验的过程如下：

- 测定记录试验传热元件的物理特性和结构特性，包括，传热元件板型、试验段堆叠传热元件对数、传热元件壁厚、搪瓷层厚度等。
- 开启数据采集系统，记录试验系统初始参数；开启风机，调整阀门到所需流量。

- c) 监视进出口截面温度值、实验段压损，待两者均不再变化时，记录压差、流量数据。
- d) 监视冷态温度初场，待实验段温度达到稳态时，打开加热器电源，加热试验段入口空气。
- e) 连续监视并记录流量大小、进出口截面空气温度随时间的变化曲线，直到出口截面处空气温度趋于渐近值为止，单工况瞬态测量过程完成。
- f) 改变流量，重复上述过程，完成对不同雷诺数 Re 下，传热元件芯体的传热、阻力性能测试。
- g) 根据测得的压差、温度、流量数据，求出空气流过蓄热元件芯体的摩擦阻力系数；
- h) 将流体进口温度、出口温度数据曲线，及其他相关参数作为输入边界条件和比较判据，根据数据处理程序，计算各工况的平均对流传热系数。

9 试验数据处理和计算

9.1 一般要求

- 9.1.1 试验工作完成后，应对测试数据的可靠性、合理性进行评价分析。
- 9.1.2 试验工况不满足要求时，应重新进行试验。
- 9.1.3 各参数测量值，取其在同一工况下的多次测量值的算术平均值参与计算。

9.2 稳态试验数据处理计算

- 9.2.1 测试段进口空气密度为，

$$\rho_{a,in} = \frac{p_{atm}}{287.1 \times (273.15 + t_{a,in})} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$\rho_{a,in}$ ——测试段进口空气密度， kg/m^3 ；
 p_{atm} ——大气压力， Pa ；
 $t_{a,in}$ ——测试段进口空气温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

- 9.2.2 测试段进口空气速度为，

$$w_{a,m} = \sqrt{\frac{2\Delta p_a}{\rho_{a,in}}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$w_{a,in}$ ——测试段进口风速， m/s ；
 Δp_a ——流量测量截面的动压差， Pa 。

- 9.2.3 测试段进口空气流量为，

$$G_a = \rho_{a,in} \times w_{a,m} \times A_m \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

G_a ——测试段进口空气流量， kg/s ；
 A_m ——测试段进口截面积， m^2 。

- 9.2.4 测试过程中，空气的吸热量为，

$$Q_a = c_{p,a} \times G_a \cdot (t_{a,out} - t_{a,in}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

Q_a ——测试过程中，空气的吸热量， W ；
 $c_{p,a}$ ——空气在测试段定性温度下的定压比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；

$t_{a,out}$ ——测试段出口空气温度，℃。

9.2.5 传热元件的换热面积，通过称重法进行确定。称量传热元件的质量，测量传热元件厚度，查取传热元件材料的密度，通过下式计算，

$$A_p = \frac{m_p}{\rho_p \cdot \delta_p} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

A_p ——传热元件对流换热面积， m^2 ；

m_p ——传热元件质量，kg；

ρ_p ——传热元件密度， kg/m^3 ；

δ_p ——传热元件厚度，m。

9.2.6 测试段的对数传热温差为，

$$\Delta t_d = \frac{(t_b - t_{a,in}) - (t_b - t_{a,out})}{\ln \frac{t_b - t_{a,in}}{t_b - t_{a,out}}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

Δt_d ——试验段的对数传热温差，℃；

t_b ——传热元件的壁面温度，℃。

9.2.7 试验过程中，传热元件与空气之间的对流换热系数为，

$$h = \frac{Q_a}{A_p \cdot \Delta t_d} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

h ——传热元件与空气之间的对流换热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ；

9.2.8 试验过程的努谢尔特准则数为，

$$Nu = \frac{h \cdot d_h}{\lambda_a} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中：

Nu ——试验过程的努谢尔特准则数，无量纲；

λ_a ——空气在测试段定性温度下的导热系数， $W/(m \cdot K)$ 。

9.2.9 试验段空气流速为，

$$w_{a,t} = \frac{G_a}{\rho_{a,t} \cdot A_t} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中：

$w_{a,t}$ ——测试段空气流速，m/s；

$\rho_{a,t}$ ——测试段空气密度， kg/m^3 ；

A_t ——测试段空气流通截面积， m^2 。采用下式计算，

$$A_t = H_p \cdot W_p \cdot \sigma_p \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中：

H_p ——试验传热元件的计算对高，m；

W_p ——试验传热元件的宽度，m；

σ_p ——试验传热元件的孔隙率，无量纲。

9.2.10 试验段空气雷诺数为，

$$Re = \frac{w_{a,t} \cdot d_h}{\nu_{a,t}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中：

Re ——试验段的空气雷诺数，无量纲；

$\nu_{a,t}$ ——试验段的空气动力粘度， m^2/s 。

9.2.11 表征传热元件换热性能的无量纲准则数为，

$$j = \frac{h}{\rho_{a,t} \cdot c_{p,a} \cdot w_{a,t}} \cdot Pr^{\frac{2}{3}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中：

j ——表征传热元件换热性能的准则数，无量纲；

Pr ——空气在测试段定性温度下的普朗特数，无量纲。

根据传热学理论，无量纲准则数 j 与试验段空气雷诺数 Re 存在以下关系，

$$j = a \cdot Re^b \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中：

a ——试验传热元件的待求拟合常数，无量纲；

b ——试验传热元件的待求拟合常数，无量纲。

根据各工况测试数据，绘制无量纲准则数 j 与试验段空气雷诺数 Re 的关系曲线，采用数值拟合方法，确定各测试传热元件的换热准则数表达式中的常数 a 、 b 的数值。

9.2.12 表征传热元件阻力性能的无量纲准则数为，

$$f = \frac{d_h}{L} \cdot \left[\frac{2\Delta p_t}{\rho_{a,t} w_{a,t}^2} - (K_c + K_e) \right] \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中：

f ——表征传热元件阻力性能的准则数，无量纲；

L ——测试段长度，m；

Δp_t ——测试段压力降，Pa；

K_c ——试验段进口压力损失系数，无量纲；

K_e ——试验段出口压力损失系数，无量纲。

根据流体力学理论，无量纲准则数 f 与试验段空气雷诺数 Re 存在以下关系，

$$f = m \cdot Re^n \quad \dots\dots\dots (15)$$

式中：

m ——试验传热元件的待求拟合常数，无量纲；

n ——试验传热元件的待求拟合常数，无量纲。

根据各工况测试数据，绘制无量纲准则数 f 与试验段空气雷诺数 Re 的关系曲线，采用数值拟合方法，确定各测试传热元件的换热准则数表达式中的常数 m 、 n 的数值。

9.3 瞬态试验数据处理计算

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/286035202145010215>