



中华人民共和国国家标准

GB/T 39836—2021

煤的燃烧结渣指数测定方法

Test methods for slagging indexes in coal combustion

2021-03-09 发布

2021-10-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

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。

本文件由中国煤炭工业协会提出。

本文件由全国煤炭标准化技术委员会(SAC/TC 42)归口。

本文件起草单位：浙江大学、西安热工研究院有限公司、上海交通大学、煤炭科学技术研究院有限公司。

本文件主要起草人：程军、刘建忠、王桂芳、姚伟、张忠孝、丁华、张宇宏。

煤的燃烧结渣指数测定方法

1 范围

本文件规定了煤的燃烧结渣指数的测定方法、试验装置、试验用仪表及方法、数据处理和计算方法。

本文件适用于电站锅炉、工业锅炉等燃用动力煤产品的燃烧结渣指数测定,适用煤种为褐煤、烟煤和无烟煤(不包括煤灰中 Na_2O 和 K_2O 总含量大于 3% 的煤种)。

本文件以方法 A 作为仲裁方法。

注:本文件还给出了煤的燃烧结渣指数测定方法 C——煤灰聚类结渣判别指数 F 法,参见附录 A。

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 219 煤灰熔融性的测定方法
- GB/T 474 煤样的制备方法
- GB/T 1574 煤灰成分分析方法
- GB/T 3715—2007 煤质及煤分析有关术语
- GB/T 19494.2 煤炭机械化采样 第 2 部分:煤样的制备
- GB/T 39833 煤的燃烧特性测定方法 一维炉法
- DL/T 567.5 火力发电厂燃料试验方法 第 5 部分:煤粉细度的测定
- DL/T 1106—2009 煤粉燃烧结渣特性和燃尽率一维火焰炉测试方法

3 术语和定义

GB/T 3715—2007 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

煤灰探针结渣判别指数 probe slagging index

S_c

用碳化硅棒作为结渣探针,根据一维炉内煤粉燃烧时探针采样的不同渣型,对相应渣型赋值计算得到煤结渣严重程度的判别指数。

3.2

软化温度 softening temperature; ST

在灰熔融性测定中,灰锥弯曲至锥尖触及托板或灰锥变成球形时的温度。

[来源:GB/T 3715—2007,3.2.57]

3.3

硅铝比 mass ratio of SiO_2 to Al_2O_3

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

煤灰中二氧化硅与三氧化二铝的质量分数之比。

3.4

硅比 mass ratio of SiO_2 in coal ash

G

煤灰中二氧化硅与煤灰主要成分(SiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 和 MgO 之和)的质量分数之比。

3.5

碱/酸比 base/acid ratio

B/A

煤灰中的碱性组分(铁、钙、镁、锰等的氧化物)与酸性成分(硅、铝、钛的氧化物)之比。

[来源:GB/T 3715—2007,3.2.61]

3.6

煤灰综合结渣判别指数 comprehensive slagging index

R

综合煤灰软化温度、硅铝比、硅比和碱/酸比按加权平均方法计算出的综合结渣判别指数。

3.7

煤灰聚类结渣判别指数 clustering slagging index

F

整体考虑煤灰软化温度、硅铝比、硅比、碱/酸比和综合结渣得出的判别指数。

4 测定方法 A(煤灰探针结渣判别指数 S_c 法)

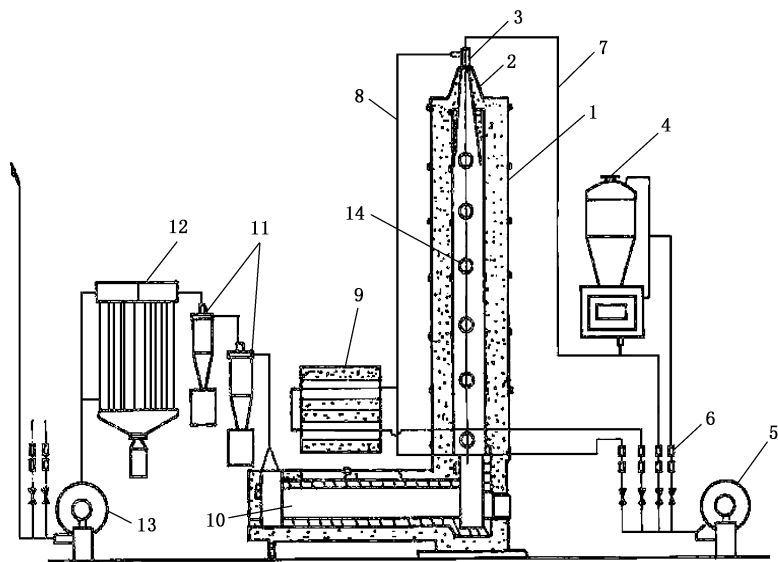
4.1 方法提要

一维炉是在试验过程中以一定量的空气流携带煤粉,进入炉膛后接受炉壁放热而着火、燃烧,以致燃尽。一维炉可以在动态条件下实现煤粉与空气的悬浮燃烧试验,燃烧着的煤粉气流沿炉膛高度方向向下运动。利用碳化硅棒作为结渣探针在一维炉内煤粉燃烧时进行采样,然后用刀片切刮碳化硅棒表面的渣样以判断渣型,对相应渣型赋值计算得到煤灰探针结渣判别指数。

4.2 试验装置

一维炉试验装置示意图如图 1 所示。一维炉试验台主要由给粉系统、加热和温度控制系统、燃烧炉体系统、风烟系统和取样分析系统等组成。一维炉炉体采用垂直布置的电加热积木式结构,主要由着火段、稳燃段和燃尽段组成。着火段上接给粉机,燃尽段末端与烟气冷却器相连,后接除尘器和引风机等。炉体底部为灰渣槽,用于收集煤粉气流燃烧所剩的灰渣。炉膛外面包覆耐火材料和保温材料以保证炉体外壁温度 $\leq 60^\circ\text{C}$ 。煤粉颗粒在炉内停留时间控制为 $2\text{ s}\sim 10\text{ s}$,可满足煤粉颗粒在炉内的燃尽要求。整个一维炉试验装置的漏风率(即漏入空气质量占该装置进口烟气质量的百分数)控制在 5% 以内。

煤粉燃烧器装于炉膛顶部,一次风携带煤粉由炉膛顶部送入,二次风布置在一次风周围也由炉膛顶部送入,一次风和二次风流量可通过流量计测量和控制。采用热风送粉,空气预热器可根据需要调节热风温度。炉膛布置电加热元件,通过控制柜结合热电偶自动控制炉壁温度。煤粉燃烧气流沿炉膛由上而下一维运动,最后高温烟气经冷却和除尘后排放。在炉膛沿轴线设置数个观测孔,插入碳化硅棒结渣探针以检验沉积物形态及其沿程变化。探针采样后用刀片切刮碳化硅棒表面的渣样以判断不同渣型,对相应渣型赋值计算得到煤灰探针结渣判别指数。



标引序号说明：

- 1 —— 炉体；
- 2 —— 炉顶；
- 3 —— 燃烧器；
- 4 —— 给粉机；
- 5 —— 送风机；
- 6 —— 流量计；
- 7 —— 次风管；
- 8 —— 二次风管；
- 9 —— 空气预热器；
- 10—— 尾部烟道；
- 11—— 除尘器；
- 12—— 烟气冷却器；
- 13—— 引风机；
- 14—— 炉膛测试。

图 1 一维炉燃烧试验装置示意图

4.3 试验用仪表

- 4.3.1 一次风和二次风温度表(测温元件为热电偶):控制温度误差为 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
- 4.3.2 一次风和二次风流量计:精确度等级为 4%。
- 4.3.3 煤粉燃烧烟气温度表(将热电偶插入炉膛中测试):精确度等级为 0.25%。

4.4 试验方法

4.4.1 煤粉制备

4.4.1.1 煤粉细度实测值

按照 GB/T 474 或 GB/T 19494.2 的要求制备煤粉,取不少于 100 g 的空气干燥煤样全部研磨,按照 DL/T 567.5 的要求筛选并计算煤粉细度,直至试验样煤样全部满足 R_{200} 和 R_{90} 细度要求, R_{200} 和 R_{90}

的计算按照式(1)和式(2)进行:

$$R_{200} = m_{200} / m \times 100 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$R_{90} = (m_{200} + m_{90}) / m \times 100 \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

R_{200} ——粒径大于 200 μm 的煤粉的质量分数, %;

R_{90} ——粒径大于 90 μm 的煤粉的质量分数, %;

m_{200} ——200 μm 筛上的煤粉质量, 单位为克(g);

m_{90} ——90 μm 筛上的煤粉质量, 单位为克(g);

m ——煤粉试样质量, 单位为克(g)。

4.4.1.2 煤粉细度计算值

试验时将煤粉细度 R_{200} 控制为 0.1~1, 按照 DL/T 1106—2009 根据式(3)控制煤粉细度 R_{90}' :

$$R_{90}' = 0.5nV_{\text{daf}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

n ——煤粉均匀性系数(取 $n=1$);

V_{daf} ——煤粉的干燥无灰基挥发分, %。

4.4.1.3 煤粉细度偏差要求

煤粉细度偏差根据式(4)计算:

$$\Delta R_{90} = |R_{90} - R_{90}'| \quad \dots\dots\dots (4)$$

R_{90} 允许偏差随 V_{daf} 升高而升高: 当 V_{daf} 小于 15% 时, ΔR_{90} 为 1~2; V_{daf} 为 15%~25% 时, ΔR_{90} 为 2~3; V_{daf} 大于 25% 时, ΔR_{90} 为 3~4。

4.4.2 试验准备

按照 GB/T 39833 试验工况的规定条件将各段炉体预热到设定温度, 先后启动引风机和送风机, 调整热风温度和过量空气系数; 启动给粉机调整给煤粉量。待一维炉内煤粉燃烧的炉膛温度和烟气成分稳定后, 根据试验煤种的着火位置将六个碳化硅结渣棒(探针)沿火焰行程在选定的测孔插入, 使各结渣棒分别处于着火初期、火焰温度最高处、中值温度及炉膛出口处。

4.4.3 探针采样

维持一维炉煤粉燃烧的稳定运行工况, 等待结渣探针上沉积足够量的灰垢渣层。探针采样的持续结渣时间根据煤的灰分含量而定, 一般为 20 min~30 min。

4.4.4 观察渣型

试验结束后, 小心地抽出结渣探针, 保持其原有状态。冷却后用刀片切刮碳化硅棒表面的渣样, 观察并记录其渣型特征。

4.5 数据处理和计算方法

4.5.1 针对 4.4 试验取得的沉积有灰渣层的结渣探针, 依次将其灰渣层的特征状态与其黏结的紧密程度来确定其各自的渣型。为便于不同煤样结渣特性的数字化对比, 将弱黏聚以上等级的渣型赋值如表 1 所示。

表 1 弱黏聚以上等级的渣型赋值

渣型	赋值 N
弱黏聚渣型 ^a	0.25
黏聚渣型 ^b	0.50
强黏聚渣型 ^c	1.00
黏熔渣型 ^d	1.75
熔融渣型 ^e	2.50
^a 碳化硅棒表面的灰层坚硬,切刮后的碳化硅棒仍会残留不规则的黏结硬渣。 ^b 碳化硅棒表面的灰层黏聚成硬渣,切刮困难,但仍能从渣棒上切刮下来。 ^c 碳化硅棒表面的灰层坚硬,切刮后的碳化硅棒仍会残留不规则的黏结硬渣。 ^d 碳化硅棒表面的沉积灰层由部分凝固渣层黏聚而成,已无法切割。 ^e 碳化硅棒表面由全熔融致密凝固渣层所覆盖,并有渣泡形成。	

4.5.2 确定出结渣最严重的渣棒,其渣型赋值为 $N_{\max}$,该渣棒观测孔的相应火焰温度为 $T_{\max}$ 。确定与该渣型相对应的表征温度 θ ,采取以下规定:如果上下两相邻观测孔仅有一观测孔的渣型低一个等级,则 θ 取为该观测孔火焰温度与 $T_{\max}$ 的平均值;如果上下两相邻观测孔的渣型都只低一个等级,则取该两观测孔中的偏高温参与平均。如果相邻观测孔的渣型仅有一个低两个等级,则取 $\theta = T_{\max} - \Delta T/4$ (式中 ΔT 为 $T_{\max}$ 与该低渣型观测孔温度的差值);如果上下两观测孔的渣型都低两个等级,则取该两观测孔中的偏高温参与 ΔT 计算。按式(5)计算探针结渣判别指数:

$$S_c = 100N_{\max}/(\theta - 1\ 000) \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$N_{\max}$ ——结渣最严重的渣型对应的赋值;

θ ——渣型相对应的表征温度值,单位为摄氏度(℃)。

5 测定方法 B(煤灰综合结渣判别指数 R 法)

5.1 方法提要

根据煤灰各组分(以氧化物表示)的百分含量计算煤的单项结渣判别指标:硅铝比($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)、硅比(G)和碱/酸比(B/A)。综合煤灰软化温度(ST)与硅铝比、硅比和碱/酸比,加权计算煤的综合结渣判别指数(R)来判断其结渣特性。煤灰软化温度(ST)测定和精确度按照 GB/T 219 执行。煤灰各组分(以氧化物表示): SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 和 TiO_2 含量测定和精确度按照 GB/T 1574 执行。

5.2 数据处理和计算方法

综合煤灰软化温度、硅铝比、硅比和碱/酸比,按式(6)经验系数加权平均方法,计算煤灰综合结渣判别指数(R):

$$R = 1.237 \times B/A + 0.282 \times \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - 0.002\ 3 \times ST - 0.018\ 9 \times G + 5.415 \dots\dots (6)$$

式中:

R ——煤灰综合结渣判别指数;

B/A ——煤灰的碱/酸比;

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ——煤灰的硅铝比；

ST——煤灰软化温度,单位为摄氏度(℃)；

G ——煤灰的硅比。

注：R 法是基于中国 300 MW~600 MW 机组大量煤样统计得到的经验系数加权平均方法。

6 结渣特性评价指标

煤的燃烧结渣特性评价指标及结渣特性分级参见附录 B。

附录 A
(资料性)
煤灰聚类结渣判别指数 F 法

A.1 方法提要

考虑煤灰软化温度、硅铝比、硅比、碱/酸比和综合结渣判别指数的综合影响,注意分级界限的聚类度,最终确定某个煤种归属于某个结渣等级的置信度,得出煤灰聚类结渣判别指数。

A.2 数据处理和计算方法

A.2.1 建立聚类因子集。选用综合结渣指数 R 、煤灰软化温度 ST 、碱/酸比 B/A 、硅比 G 和硅铝比 SiO_2/Al_2O_3 等五个结渣判别指数,组成因素集合: $X=\{R, ST, B/A, G, SiO_2/Al_2O_3\}$ 。

A.2.2 确定评判等级。选取轻微结渣、中等结渣和严重结渣三个评判等级组成评价集和: $V=\{\text{轻微结渣, 中等结渣, 严重结渣}\}$,其中五个结渣判别指数的三种结渣程度分级标准如表 A.1 所示。

表 A.1 五个结渣判别指数的三种结渣程度分级标准

结渣判别指数	轻微结渣	中等结渣	严重结渣
硅铝比(SiO_2/Al_2O_3)	<1.87	$1.87\sim2.65$	>2.65
硅比(G)/%	>78.8	$66.1\sim78.8$	<66.1
碱/酸比(B/A)	<0.206	$0.206\sim0.4$	>0.4
煤灰软化温度(ST)/ $^{\circ}C$	$>1\ 390$	$1\ 260\sim1\ 390$	$<1\ 260$
煤灰综合结渣判别指数(R)	≤ 1.5	$1.5\sim2.5$	≥ 2.5

A.2.3 对五个结渣判别指数进行无量纲化处理确定其分级标准值。为了消除不同指标数量级的差别,用待判别所有煤样中每个指标的最大值去除该指标对应的所有值(包括标准值),如表 A.2 所示。

表 A.2 煤灰五个结渣判别指数的分级标准无量纲化处理值 d

结渣判别指数	结渣等级		
	轻微结渣	中等结渣	严重结渣
SiO_2/Al_2O_3	$a_1=1.87/(SiO_2/Al_2O_3)_{\max}$	$b_1=2.26/(SiO_2/Al_2O_3)_{\max}$	$c_1=2.65/(SiO_2/Al_2O_3)_{\max}$
G	$a_2=78.8/G_{\max}$	$b_2=72.4/G_{\max}$	$c_2=66.1/G_{\max}$
B/A	$a_3=0.206/(B/A)_{\max}$	$b_3=0.303/(B/A)_{\max}$	$c_3=0.40/(B/A)_{\max}$
ST	$a_4=1\ 390/ST_{\max}$	$b_4=1\ 325/ST_{\max}$	$c_4=1\ 260/ST_{\max}$
R	$a_5=1.5/R_{\max}$	$b_5=2/R_{\max}$	$c_5=2.5/R_{\max}$

A.2.4 根据表 A.2 中煤灰五个结渣判别指数的分级标准无量纲化处理值,用式(A.1)计算出各项结渣判别指数的因子占每个评判等级中的比重,如表 A.3 所示,称之为聚类权重值 η 。

$$\eta = d_x / d_{\text{total}} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:
 d_x ——各项结渣判别指数因子对应的煤灰结渣评判等级中的无量纲化处理值;

d_{total} ——对应的煤灰结渣评判等级中所有的结渣判别指数因子无量纲化处理值之和。

表 A.3 煤灰各项结渣判别指数的聚类权重值 η_k

结渣判别指数	结渣等级		
	轻微结渣	中等结渣	严重结渣
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\eta_{a1}=a_1/(a_1+a_2+a_3+a_4+a_5)$	$\eta_{b1}=b_1/(b_1+b_2+b_3+b_4+b_5)$	$\eta_{c1}=c_1/(c_1+c_2+c_3+c_4+c_5)$
G	$\eta_{a2}=a_2/(a_1+a_2+a_3+a_4+a_5)$	$\eta_{b2}=b_2/(b_1+b_2+b_3+b_4+b_5)$	$\eta_{c2}=c_2/(c_1+c_2+c_3+c_4+c_5)$
B/A	$\eta_{a3}=a_3/(a_1+a_2+a_3+a_4+a_5)$	$\eta_{b3}=b_3/(b_1+b_2+b_3+b_4+b_5)$	$\eta_{c3}=c_3/(c_1+c_2+c_3+c_4+c_5)$
ST	$\eta_{a4}=a_4/(a_1+a_2+a_3+a_4+a_5)$	$\eta_{b4}=b_4/(b_1+b_2+b_3+b_4+b_5)$	$\eta_{c4}=c_4/(c_1+c_2+c_3+c_4+c_5)$
R	$\eta_{a5}=a_5/(a_1+a_2+a_3+a_4+a_5)$	$\eta_{b5}=b_5/(b_1+b_2+b_3+b_4+b_5)$	$\eta_{c5}=c_5/(c_1+c_2+c_3+c_4+c_5)$

A.2.5 构造隶属函数。选用半梯形函数 $f_{ij}(x)=kx+a$ (其中 k 和 a 为常数)作为确定隶属原则的函数,如图 A.1 所示。

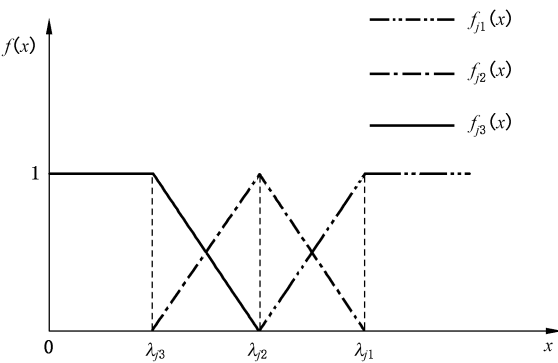


图 A.1 煤灰聚类判别结渣的隶属函数模型

A.2.6 求出聚类系数。根据式(A.2)得到每个煤样在三个结渣评判等级中(轻微结渣、中等结渣和严重结渣)对应的聚类系数 δ_{ik} (如表 A.4 所示)。

$$\delta_{ik} = \sum f_{jk} \cdot (d_{ij}) \cdot \eta_k \dots\dots\dots (A.2)$$

- 式中：
- d_{ij} ——每个煤样的五个结渣判别指数因子的归一化处理值；
 - f_{jk} ——该结渣判别指数因子对应的隶属函数；
 - η_k ——该结渣判别指数因子在该结渣等级下对应的聚类权重值,见表 A.4。

表 A.4 各煤样在三个结渣评判等级中的聚类系数 δ_{ik}

煤种	结渣等级		
	轻微结渣	中等结渣	严重结渣
煤种 1	$\delta_{a1}=\sum f_{j1} \cdot (d_{ij}) \cdot \eta_{a1}$	$\delta_{b1}=\sum f_{j1} \cdot (d_{ij}) \cdot \eta_{b1}$	$\delta_{c1}=\sum f_{j1}(d_{ij}) \cdot \eta_{c1}$
煤种 2	$\delta_{a2}=\sum f_{j2}(d_{ij}) \cdot \eta_{a2}$	$\delta_{b2}=\sum f_{j2} \cdot (d_{ij}) \cdot \eta_{b2}$	$\delta_{c2}=\sum f_{j2}(d_{ij}) \cdot \eta_{c3}$
...	...	...	...
煤种 k	$\delta_{ak}=\sum f_{jk} \cdot (d_{ij}) \cdot \eta_{ak}$	$\delta_{bk}=\sum f_{jk} \cdot (d_{ij}) \cdot \eta_{bk}$	$\delta_{ck}=\sum f_{jk}(d_{ij}) \cdot \eta_{ak}$

A.2.7 确定煤灰聚类结渣判别指数矩阵 $F=(F_1,F_2,F_3)$ 。根据各煤样轻微结渣、中等结渣和严重结渣的聚类判别结果,将其进行归一化处理得到各煤样的煤灰聚类结渣判别指数矩阵 $F=(F_1,F_2,F_3)$,如表 A.5 所示,以此判别各煤样的燃烧结渣程度。

表 A.5 各煤样的煤灰聚类结渣判别指数矩阵 $F=(F_1,F_2,F_3)$

煤种	结渣等级		
	轻微结渣	中等结渣	严重结渣
煤种 1	$F_1=\delta_{a1}/(\delta_{a1}+\delta_{b1}+\delta_{c1})$	$F_2=\delta_{b1}/(\delta_{a1}+\delta_{b1}+\delta_{c1})$	$F_3=\delta_{c1}/(\delta_{a1}+\delta_{b1}+\delta_{c1})$
煤种 2	$F_1=\delta_{a2}/(\delta_{a2}+\delta_{b2}+\delta_{c2})$	$F_2=\delta_{b2}/(\delta_{a2}+\delta_{b2}+\delta_{c2})$	$F_3=\delta_{c2}/(\delta_{a2}+\delta_{b2}+\delta_{c2})$
...	...	...	...
煤种 k	$F_1=\delta_{ak}/(\delta_{ak}+\delta_{bk}+\delta_{ck})$	$F_2=\delta_{bk}/(\delta_{ak}+\delta_{bk}+\delta_{ck})$	$F_3=\delta_{ck}/(\delta_{ak}+\delta_{bk}+\delta_{ck})$

A.3 结渣特性评价指标

根据表 A.5 各煤样的煤灰聚类结渣判别指数矩阵判断煤的结渣程度分级标准如表 A.6 所示。

表 A.6 煤灰聚类结渣判别指数的分级标准

结渣特性等级	轻微结渣	中等结渣	严重结渣
指标要求: $F=(F_1,F_2,F_3)$	$F_1>F_2$ 并且 $F_1>F_3$	$F_2>F_1$ 并且 $F_2>F_3$	$F_3>F_1$ 并且 $F_3>F_2$

附 录 B
(资料性)
结渣特性评价指标

B.1 煤灰探针结渣判别指数 S_c 法

煤粉燃烧的煤灰探针结渣判别指数 S_c 值用来判断煤的结渣严重程度。 S_c 值越大表示煤的结渣程度越严重。根据煤灰探针结渣判别指数 S_c 值评价煤粉燃烧结渣特性的等级见表 B.1。

表 B.1 煤灰探针结渣判别指数 S_c 判定煤粉燃烧结渣特性分级

结渣特性等级	严重	高	中	低
指标范围, S_c	$S_c > 0.65$	$0.45 < S_c \leq 0.65$	$0.25 < S_c \leq 0.45$	$S_c \leq 0.25$

B.2 煤灰综合结渣判别指数 R 法

煤粉燃烧的煤灰综合结渣判别指数 R 用来判断煤的结渣严重程度。 R 值越大表示煤的结渣程度越严重。根据煤灰综合结渣判别指数 R 值评价煤粉燃烧结渣特性的等级见表 B.2。

表 B.2 煤灰综合结渣判别指数 R 判定煤粉燃烧结渣特性分级

结渣特性等级	轻微结渣	中等结渣	严重结渣
指标范围, R	$R \leq 1.5$	$1.5 < R < 2.5$	$R \geq 2.5$