

# 火电厂煤粉爆炸特性测试方法的研究

王月明,相大光,张 森

(西安热工研究院有限公司,陕西 西安 710032)

**摘要:**介绍一种可调温的煤粉/空气混合物爆炸性能测试方法,试验结果表明该试验方法和评价方法能较好地反映煤粉的爆炸特性,为判别中国火电厂电力用煤的爆炸特性及制定各种防爆措施提供参考依据。

**关键词:**电厂煤粉爆炸;煤爆指数;煤粉空气混合物

中图分类号:TM621

文献标识码:A

文章编号:1006-6772(2010)02-0054-05

火力发电厂煤粉制备过程中,对于高挥发性煤种常常会遇到煤粉爆炸问题,尤其是在中储式制粉系统中,由于煤粉堆放环节较多,制粉系统很容易因煤粉自燃带入火花而引爆。随着锅炉制粉系统设计的发展,大容量锅炉都采用了直吹式制粉系统,减少了煤粉成堆放状态容易自燃的环节,且一次风速也选取了较高值,防止了一次风管回火的发生,这些措施都大大降低了制粉系统爆炸事故的发生。但由于制粉系统中的煤粉仍属于易燃易爆物质,当煤粉温度、含氧量、煤粉浓度、煤粉细度等达到一定条件时,仍将会发生着火或爆炸,损坏设备,造成损失,影响锅炉安全稳定运行。因此制粉系统的防爆已成为火力发电厂设计的重要内容之一。

煤粉浓度、煤粉挥发分、煤粉细度与可燃气体共存是引起制粉系统爆炸的内部原因,系统内的积煤和积粉、磨煤机断煤运行、出口温度过高、煤粉过细、水分过低、煤粉在粉仓中积粉过久和粉仓严重漏风,以及外来火源等是其外部原因。

在以往的设计中,一般采用煤的挥发分来判定煤的爆炸性能,事实上这种方法有一定的局限性。随着煤质特性分析技术和测试手段的发展,已增加了热重分析指标和煤粉气流着火温度指标,这些特性参数可在一定程度上反映煤粉的爆炸性能。中国新编制的《火力发电厂煤和制粉系统防爆设计技

术规程》也将这些特性参数作为评价煤粉爆炸的指标。

为了进一步深入研究煤粉爆炸原因,提高制粉系统的安全性,根据煤粉的爆炸原理,建立了专门的煤粉爆炸装置试验台,对试验煤样的爆炸性能进行测试,得出了直观的爆炸特性参数,并对该指标进行了等级划分,此特性参数可用于指导火电厂制粉系统的防爆设计。

## 1 可调温的煤粉/空气混合物爆炸装置试验台

图1为可调温的煤粉/空气混合物爆炸装置试验台的示意。该试验装置几乎所有关键条件可调,为全面研究煤粉爆炸特性提供了手段:①煤粉/空气混合物温度可调,可达到电厂几乎所有制粉系统出口风粉混合物的温度(200℃以内);②煤粉/空气混合物浓度、氧含量、煤粉细度可调;③点火能量在5~40J范围内可调;④可测试出温度、压力的瞬时变化值,确定爆炸强度。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 主要的判别方法<sup>[1-2]</sup>

(1) 挥发分指标  $V_{daf}$

收稿日期:2009-12-17

作者简介:王月明(1963—),男,上海人,教授级高工,从事电站锅炉燃煤特性研究。

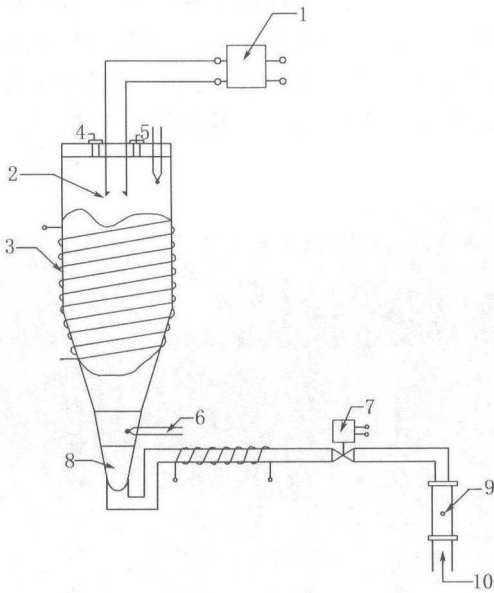


图1 可调温的煤粉/空气混合物爆炸试验台示意

- 1—高压变压整流器;2—电极;3—加热圈;  
4—防爆孔;5—测压孔;6—热电偶;  
7—电磁阀;8—煤粉;9—流量计;10—压缩空气

(2) 工业指标  $B_c$ , 该指标为原苏联据专门研究结果得出:

$$B_c = (V_{ar} + S_{t,ar}) / (FC_{ar} + M_1 + A_{ar}) \times 100$$

式中:  $V_{ar}$ 、 $S_{t,ar}$ 、 $FC_{ar}$  分别为煤收到基挥发分、收到基全硫和固定碳含量, %;

$M_1$ 、 $A_{ar}$  分别为煤中全水分和收到基灰分, %。

(3) 煤粉爆炸指数  $K_d$ , 它是考虑燃料的活性(可燃挥发分的含量及其热值)以及燃料中的惰性(燃料中灰分和固定碳的含量)的综合影响的结果。

爆炸性指数  $K_d$  按下式计算:

$$K_d = \frac{V_d}{V_{vol, que}} \quad (1)$$

$$V_{vol, que} = \frac{V_{vol} \left[ 1 + \frac{100 - V_d}{V_d} \right]}{100 + V_{vol} \frac{100 - V_d}{V_d}} \times 100 \quad (2)$$

$$V_{vol} = \left( \frac{1260}{Q_{vol}} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$Q_{vol} = \frac{(Q_{net, v, daf} - 7850 \times 4.1816 \times FC_{daf})}{V_{daf}} \quad (4)$$

$$FC_{daf} = 1 - V_{daf} \quad (5)$$

式中:

$K_d$  为煤粉的爆炸性指数;

$V_d$  为煤的干燥基挥发分, %;

$V_{vol, que}$  为燃烧所需可燃基挥发分的下限(考虑灰和固定碳), 按式(2)计算, %;

$V_{vol}$  为不考虑灰和固定碳时燃烧所需可燃挥发分的下限, 按式(3)计算, %;

$Q_{vol}$  为挥发分的热值, 按式(4)计算, kJ/kg;

$Q_{net, v, daf}$  为煤的干燥无灰基低位发热量, kJ/kg;

$FC_{daf}$  为煤的干燥无灰基固定碳含量, 按式(5)

计算;

$V_{daf}$  为煤的干燥无灰基挥发分含量, %。

(4) 热重分析指标:  $t = t_{4.1} - 25$  °C

$t_{4.1}$  为热重开始反应温度。

(5) 煤粉气流着火温度  $IT$ , 该指标综合了煤的易燃性和灰分的影响, 可大致代表煤在煤粉水分、煤粉细度、浓度、温度等情况下煤粉的爆炸特性。

上述各种判别指标的等级划分参见表1。

表1 各指标对爆炸性能等级的判别

爆炸等级	爆炸性	挥发分 $V_{daf}/\%$	工业指标 $B_c$	煤粉爆炸指数 $K_d$	热重着火温度 $t/^\circ\text{C}$	煤粉气流着火温度 $IT/^\circ\text{C}$
0	极难爆炸	< 6.5	< 7.9		< 240	> 900
I	难爆炸	6.5 ~ 10	7.9 ~ 15.5	< 1.0	240 ~ 280	> 800 ~ 900
II	中等爆炸	> 10 ~ 25	> 15.5 ~ 22.9	1.0 ~ 3.0	> 280 ~ 325	> 700 ~ 800
III	易爆炸	> 25 ~ 35	> 22.9 ~ 32.5	$\geq 3.0$	> 325 ~ 400	600 ~ 700
IV	极易爆炸	> 35	> 32.5		> 400	< 600

表2 为试验煤样的工业、元素及发热量测试结果, 表3 为相应试验煤样的爆炸试验结果, 其总体的爆炸试验条件: 煤样为空干基状态, 爆炸罐和储气罐以及煤粉的温度为 60 °C, 储气罐压力为 180 kPa, 点火能量 15 J, 而对于难爆的无烟煤、贫煤以及烟煤则将前述温度提高到了 280 °C, 煤粉质量浓度增加到 2.5 kg/m<sup>3</sup>, 仍

未发生爆炸。试验时, 煤粉细度按照下式选取:

$$R_{90} = K + 0.5 \times V_{daf}$$

其中  $K$  为系数, 对于  $V_{daf} > 25$  % 的烟煤,  $K = 4$ ;

$V_{daf} = 25$  % ~ 15 % 的煤类,  $K = 2$ ;

$V_{daf} < 15$  % 的煤类,  $K = 0$ ;

对于褐煤, 一般取  $R_{90} = 35$  %。

由表3可知,越南无烟煤、贵州无烟煤、贵州烟煤、阳城无烟煤以及潞安贫煤、高灰分的白洞煤和塔山烟煤在上述试验条件下均未发生爆炸,可见爆炸倾向低;而活鸡兔煤、大柳塔煤、宁夏宁武煤、石

圪台煤、伊敏褐煤、扎赉诺尔褐煤在较低的质量浓度下就发生了爆炸,其爆炸倾向较高;准格尔混煤、印尼煤以及宝日希勒褐煤与准格尔混煤需在较高的质量浓度下才发生爆炸,爆炸倾向中等。

表2 试验煤样的工业、元素及发热量测试结果

煤样名称	工业指标				煤粉爆炸指数		热重着火温度		煤粉气流着火温度	
	$V_{daf}/\%$		$B_c$		$K_d$		$t/^\circ\text{C}$		$T/^\circ\text{C}$	
	数值	等级	数值	等级	数值	等级	数值	等级	数值	等级
宝日希勒	44.19	极易	34.2	极易	2.88	中等	220	极易	440	极易
宝6.4:准1.6	42.76	极易	34.69	极易	2.71	中等	235	极易	460	极易
宝2.5:神2.5	39.16	易	36.8	极易	6.52	极易	272	极易	520	极易
印尼煤	48.27	极易	36.44	极易	3.98	极易	246	极易	490	极易
胜利	44.71	极易	40.64	极易	2.30	中等	217	极易	480	极易
石炭煤	39.06	极易	37.3	极易	2.21	中等	288	易	590	极易
石圪台煤	37.32	极易	36.43	极易	2.67	中等	248	极易	430	极易
准混煤	37.18	极易	35.46	极易	1.93	中等	280	易	620	易
Monto煤	50.24	极易	66.02	极易	4.68	极易	248	极易	490	极易
宁夏宁武煤	32.50	易	31.77	易	1.75	中等	248	极易	550	极易
活鸡兔	34.13	易	36.80	极易	2.27	中等	272	易	495	极易
大柳塔	37.09	极易	41.58	极易	2.89	中等	261	极易	480	极易
俄罗斯褐煤	45.71	极易	27.15	易	1.67	中等	236	极易	480	极易
准东煤	34.93	易	35.04	极易	1.66	中等	234	极易	460	极易
伊敏褐煤	44.77	极易	29.79	易	2.24	中等	226	极易	460	极易
扎赉诺尔褐煤	45.41	极易	41.24	极易	2.98	中等	224	极易	480	极易
越南无烟煤	7.77	难	6.37	极难	0.19	难	408	难	830	难
贵州无烟煤	9.31	难	8.76	难	0.21	难	368	难	840	难
贵州烟煤	26.64	易	20.1	中等	1.00	中等	328	中等	710	中等
阳城无烟煤	7.12	难	5.94	难	0.20	低	389	难	890	难
白洞	41.36	极易	28.22	易	1.28	中等	308	中等	730	中等
塔山	38.96	极易	29.89	易	1.49	中等	311	中等	750	中等
潞安贫煤	18.76	易	17.71	中等	0.87	低	349	中等	780	中等

表3 不同煤种的煤粉爆炸特性测试结果

煤样名称	工业分析指标/%			爆炸性	煤粉爆炸特性试验			
	水分 $M_{ad}$	灰分 $A_{ad}$	挥发分 $V_{daf}$		煤粉爆炸下 限质量浓度 $/(kg \cdot m^{-3})$	煤粉爆炸下 限热量浓度 $/(MJ \cdot m^{-3})$	爆炸后最 高压 $P_{max}$ /kPa	爆炸后最高 温度 $T_{max}$ /°C
宝日希勒褐煤	13.28	9.69	44.19	有	0.25	5.28	220	275
宝日希勒褐煤: 准格尔混煤=8:2	11.97	11.5	42.758	有	0.4	8.59	235	210
神华煤	5.98	7.48	34.13	有	0.35	9.21	235	255
宝日希勒褐煤: 准格尔混煤=5:5	9.63	8.45	39.16	有	0.25	5.97	240	250
印尼褐煤	7.5	8.09	48.27	有	0.4	9.61	240	230
石炭煤	3.27	22.57	39.06	有	0.35	8.01	225	270
石圪台煤	10.9	8.05	37.32	有	0.25	6.12	282	275

准格尔混煤	5.88	20.06	37.18	有	0.4	8.84	258	246
Monto 煤	8.25	11.73	50.24	有	0.2	4.91	290	250
宁夏宁武煤	12.51	7.53	32.5	有	0.2	4.63	280	260
活鸡兔煤	5.98	7.48	34.13	有	0.25	6.58	270	270
大柳塔煤	7.4	5.3	37.09	有	0.25	6.68	276	280
俄罗斯褐煤	12.4	28.24	45.71	有	0.35	5.41	278	270
准东煤	3.24	13.41	34.93	有	0.3	7.08	270	290
伊敏褐煤	16	16.84	44.77	有	0.2	3.54	210	245
扎赉诺尔褐煤	17.34	10.87	45.41	有	0.2	3.93	225	225
越南无烟煤	1.27	25.21	7.77	无	—	—	—	—
贵州无烟煤	1.13	30.01	9.31	无	—	—	—	—
贵州烟煤	0.95	37.56	26.64	无	—	—	—	—
阳城无烟煤	1.08	19.06	7.12	无	—	—	—	—
白洞煤	1.37	44.13	41.36	无	—	—	—	—
塔山煤	1.77	35.75	38.96	无	—	—	—	—
潞安贫煤	0.73	19.09	18.76	无	—	—	—	—

## 2.2 试验台煤粉爆炸指标划分

其它试验条件不变的情况下,降低煤粉质量浓度直至不再爆炸为止,并称该质量浓度为在该试验条件下的煤粉爆炸下限质量浓度。而煤粉爆炸下限质量浓度与试验煤样的单位入炉热量之积为煤粉爆炸下限热量浓度。

图2为根据试验结果,采用爆炸指数 $K_d$ 和煤粉实际爆炸情况对煤粉爆炸情况的划分。可见,当煤粉爆炸指数 $K_d$ 小于1.5时,该煤种基本无爆炸倾向;而当 $K_d$ 大于1.5,但煤粉爆炸下限热量浓度低于 $2.5 \text{ MJ/m}^3$ 时,该煤种也基本无爆炸倾向。因此可将 $K_d$ 指标作为煤粉爆炸倾向的初级判别指标,当 $K_d$ 小于1.5时,煤样基本无爆炸倾向,而当 $K_d$ 大于1.5时,需通过爆炸试验确定其爆炸特性。

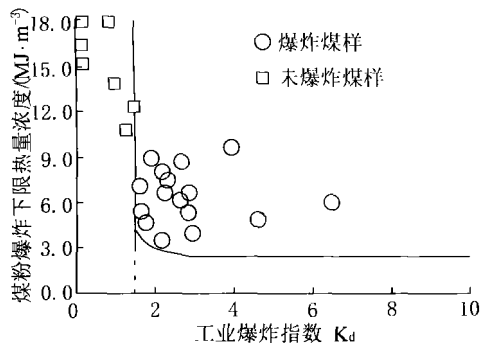


图2 爆炸指数 $K_d$ 与煤粉爆炸下限热量浓度关系

图3为煤粉爆炸下限热量浓度与干燥无灰基挥发分的相关性,根据调研情况,初步将煤种分为低

爆炸倾向、中等爆炸倾向和易爆炸倾向3种。其中低爆炸特性煤种在试验台上均未发生爆炸,而中等爆炸倾向煤种和易爆炸倾向煤种均发生了爆炸。根据电厂实际调研结果,试验中未爆炸煤种在电厂实际运行中也几乎不发生爆炸;而像神华石炭煤、准格尔煤、胜利煤、宝日希勒褐煤与准格尔的混煤爆炸倾向略微偏低,如上都电厂燃用的胜利褐煤,在 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 的环境下仍未发生爆炸事故,仅磨煤机入口膨胀节发生轻微的着火;而活鸡兔、大柳塔、宁夏宁武、石圪台等煤较易发生爆炸。

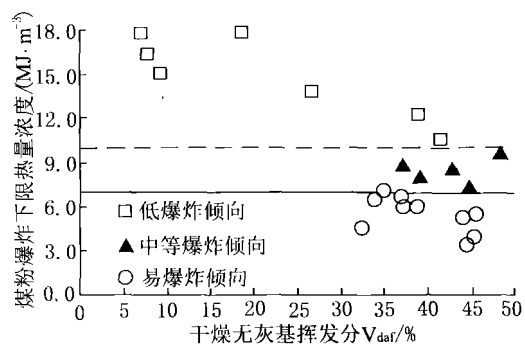


图3 干燥无灰基挥发分与煤粉爆炸下限热量浓度关系

将各煤种在电厂实际的调研结果和爆炸试验结果进行比较分析。根据煤粉爆炸下限热量浓度将煤粉爆炸倾向分为3个等级,定义煤粉爆炸下限热量浓度为ELHC,具体如下:

$ELHC \geq 10 \text{ MJ/m}^3$ , 低爆炸倾向;

$7 \text{ MJ/m}^3 < ELHC < 10 \text{ MJ/m}^3$ , 中等爆炸倾向;

$ELHC \leq 7 \text{ MJ/m}^3$ , 易爆炸倾向。

### 3 结 论

根据煤样的爆炸特性试验以及与已有爆炸指标的相关性分析表明已有指标对煤样爆炸性能的判别不够准确。爆炸指数  $K_d$  可用为煤粉爆炸的初级判别,当  $K_d$  小于 1.5 时,该煤种几乎无爆炸倾向,而当  $K_d$  大于 1.5 时,需通过爆炸试验确定煤样的爆炸性能。煤粉爆炸下限热量浓度能够较好地反映煤样的爆炸性能,也与现场调研结果接近。

### 参考文献:

- [1] 相大光、姚伟、高海宁,等. 电厂用煤煤质评价指标相关性研究及测试评价方法[R]. 西安:电力工业部热工研究院,1996.
- [2] 中华人民共和国电力行业标准,大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则[R]. 西安:电力工业部热工研究院,2002.

## Study on test methods of explosive characteristics of pulverized coal

WANG Yue-ming, XIANG Da-guang, ZHANG Sen

(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710032, China)

**Abstract:** Introduce a test method of explosive performance for temperature adjustable pulverized coal / air mixture. Test results show that the test methods and evaluation methods well reflect the explosive characteristics of pulverized coal. Provide a reference for determining the explosive characteristics of pulverized coal and developing a variety of anti-explosion measures of Chinese power plant.

**Key words:** explosion of pulverized coal; coal bust index; pulverized coal/air mixture

### 信息检索

#### 松藻煤电力公司为固硫灰渣找出路

本报讯 循环流化床锅炉产生的灰渣含硫量和含铁量高,被称为固硫灰渣,它的复用一直是个难题。重庆能源投资集团松藻煤电力公司转变思路,巧用市场手段实现灰渣外运利用,取得了突破。从 2009 年初到现在,已累计外运灰渣 12 万吨,节约灰渣处理费 360 多万元,炉渣也全部实现了外运利用。

松藻煤电公司每月大约产生 3 万吨灰渣,最初只能采取灰场填埋的方式处理,每吨的处理成本高达 30 元。日积月累,灰场的容量已接近极限,事故隐患多,环保压力相当大。因而,灰渣处理就成为亟待解决的一个问题。

为此,松藻煤电力公司成立了专门的课题小组,并积极与重庆大学联系,力求找到灰渣复用的好办法。该课题小组先后尝试了灰渣磁选法以降低含硫量和含铁量、提高锅炉床温以改变灰渣颜色、将固硫灰渣作为水泥混合材料、建水泥粉磨站自行利用等,但由于技术所限或成本太高等原因,屡屡碰壁,灰渣复用似乎走进了一条死胡同。

既然技术改造之路暂时行不通,那么就换个思路,从市场手段上想办法。松藻煤电公司于 2009 年初成立了综合利用开发部,主动上门向周边的水泥厂、砖厂推销公司的灰渣,同时出台了外运灰渣补贴规定,谁能将灰渣外运利用,不仅免费,而且还可获得一定的运费补贴。

松藻煤电公司综合利用开发部部长吴伟告诉笔者:“灰渣包括灰和渣两部分,灰主要是砖厂使用,渣则可以作为水泥掺和剂。由于我们的渣含铁量高,呈红褐色,用它作掺和剂制成的水泥也偏红,水泥厂最开始是完全不能接受的。但我们反复做工作,另外,运费补贴政策起了很关键的作用,这对水泥厂来说有利可图。后来,水泥厂主动修改了配方,解决了颜色偏红的问题,渣的外运利用才逐步走上了正轨。”据了解,松藻煤电公司灰渣外运用量不断增加,从 2009 年初的大约每月 3000 吨增加到了目前的每月 1 万吨以上,炉渣也全部实现了外运利用。

(周庆)