

根据煤质特性确定磨煤机 出口温度的防爆上限

哈尔滨电站设备成套设计研究所 张肃

本文通过对煤粉爆炸的机理和可控的防爆因素的分析,提出:通过控制热解开始温度 t_1 和堆积煤粉起燃温度 t_2 两个主要参数,来达到电厂制粉系统防爆的目的。对国内七十多种煤种的 t_1 和 t_2 试验值表明,简单地按煤的品位来划分磨煤机出口温度的防爆上限是不合适的。本文除了推荐 t_1 和 t_2 的试验方法外,还给出了用 V^* 、 A^* 和 W_{mf} 计算煤种的 t_1 和 t_2 值的公式。

磨煤机出口温度是电厂燃煤机组制粉系统设计和运行的一个主要技术参数,它的选择要综合考虑以下几方面问题:

- (1) 对不同的煤种和不同的制粉系统型式有不同的防爆上限温度 $(t_m)_{max}$;
- (2) 直吹系统不同煤种燃烧对一次风温的要求;
- (3) 不同煤种对煤粉水份的要求;
- (4) 磨煤机及制粉系统元件的极限热应力;
- (5) 锅炉机组的整体布置及参数匹配的要求;
- (6) 风粉混合物的结露温度控制。

在制粉系统设计中,(1)和(6)因素是选择磨煤机出口温度的上下限值。在设计中为了满足各方面条件,则要求这两个极限值包容的范围越宽越好。多年来,由于人们对制粉系统中气粉混合物的爆燃特性及造成爆燃的原因认识不足,不得不采取比较保守的磨煤机出口温度,限制了制粉系统参数的合理选择。

苏联于1956年颁布了《磨制及燃烧粉状燃料的设备防爆规程》,其中对磨煤机出口气粉混合物上限温度作了规定(见表1)。我国到目前为止,在电厂设计中仍参考采用这一标准。事实证明,这一限定是过于保守的,已经不能适应制粉系统的日益发展。苏联于1964年颁布的《煤粉制备和燃烧设备防爆规程》,对表1进行了修改。1973年,又对该《规程》进行再次修改(见表2)。而西德在褐煤领域采用的磨粉机出口温度高达180℃(空气、烟气混合干燥剂,风扇磨煤机直吹系统),有的试验高达240℃也还是安全的。那么,如何正确地确定磨粉机出口温度的防爆上限?首先要分析气粉混合物的爆燃机理和温度对其的影响。

表 1 1956 年苏联规定的磨煤机出口温度上限

燃料	仓储式		直吹式	
	W _v < 25%	W _v > 25%	非竖井式	竖井式
油页岩				80℃
褐煤	70℃	80℃	80℃	100℃
烟煤				130℃
贫煤	130℃		130℃	-
无烟煤	不限制		不限制	-

表 2 1964 年和 1973 年苏联规定的磨煤机出口温度上限

燃料品种	用空气干燥燃料		用空气和烟气混合干燥燃料			
	磨煤机设备					
	直吹式		中间贮仓式		直吹式	
	64 年规程	73 年规程	64 年规程	73 年规程	64 年规程	73 年规程
瘦煤	130℃	150℃	80℃	90℃	170℃	180℃
爱基巴斯土兹煤	130℃	150℃	-	90℃	170℃	180℃
烟煤	130℃	130℃	80℃	90℃	170℃	180℃
褐煤	100℃	100℃	80℃	90℃	140℃	180℃
洗削泥煤	80℃	80℃	-	-	120℃	150℃
油页岩	100℃	100℃	-	-	140℃	180℃

一、煤粉爆炸的机理

粉尘爆炸是空气中浮游中的粉尘，发生热与压力而急剧氧化燃烧的现象。煤粉也是如此。当煤粉受到加热（或部分加热）放出可燃气体与空气混合时，若有一点能量的火源，就会引起燃烧；燃烧又加速尘粒挥发物释出，这种连锁反应就产生爆炸。国外有人利用试验装置（改进型哈脱曼装置）进行了煤矿粉尘爆炸的试验，试验结果见图 1。试验表明这是一个定容系统中的绝热压缩过程，接近下限浓度的火焰温度范围在 1400~1600K (1127~1327℃)，与大规模矿井实验数据一致，制粉系统管道和设备也与实际矿井相仿。虽然气粉混合物是流动的，但相对爆炸这样短的瞬间时刻来说也可以看作一个定容系统。试验曲线与碳氢化合物燃烧的绝热火焰温度相吻合，它有力地说明了一种反应机理：煤粉热解和挥发份释放，会产生碳氢化合物和其它可燃气体，这些碳氢化合物和各种可燃气体是气相燃烧，反应速度极快。

二、燃煤电厂制粉系统中可控的防爆因素

对气粉混合物爆燃有影响的因素很多，如：煤粉浓度、氧浓度、煤粉粒度、煤中挥发分多少和热解特性及火源等。由于燃烧空气量、煤粉干燥和输送风量的要求，电厂制粉系统中气粉混合物的煤粉浓度一般为 $0.3 \sim 0.6 \text{ kg/m}^3$ ，无法低于煤粉爆炸下限浓度（该下限浓度：泥煤为 $0.16 \sim 0.18 \text{ kg/m}^3$ ；褐煤为 $0.215 \sim 0.25 \text{ kg/m}^3$ ；烟煤为 $0.32 \sim 0.47 \text{ kg/m}^3$ ）。如果煤粉的粒度大于 0.1 mm ，气粉混合物就不易发生爆炸。但电

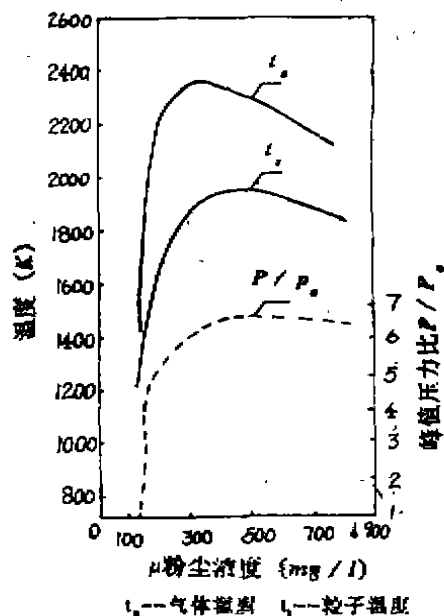


图1 改进型哈脱曼装置煤粉爆炸试验

厂由于存在经济细度的要求，煤粉的平均粒径一般只有几十微米，正是处于极易爆炸的细度范围内。通常，电厂制粉系统中可控的防爆因素为：(1) 气粉混合物中氧浓度；(2) 煤粉干燥时控制煤热解的热力条件；(3) 火源。

三、气粉混合物温度对煤粉热解和产生火源的影响

不同的煤种，有不同的热解特性。煤粉如果有足够高的温度，被加热干馏失去大部分水份之后，就会发生热解过程，释出挥发分。前期先释出 CO_2 ($200 \sim 400^\circ\text{C}$)，然后是 C_2H_4 、 C_2H_6 、 CO 、 CH_4 和 H_2 同时释放，焦油也开始形成。表3给出了用热天平与气相色谱在 $15^\circ\text{C}/\text{min}$ 加热速率下，对国内若干煤种试验的结果。事实上，在氧气氛下，存在氧化反应过程，所以煤粉在温度作用下发生热解时，也包含有表面氧化产生 CO 的过程。即使在同一温度下，不同煤种在不同氧浓度的气氛下， CO 的发生量也不一样。图2是日本当社技术研究所对褐煤和烟煤的氧化特性所做的试验结果。在低温情况下，煤粉只发生氧化，不产生热解，由于此时氧化过程十分缓慢，不会引起爆炸，但对沉积在系统内的煤粉影响就比较大了。在高温情况下，煤粉既发生热解，同时氧化的速度加快，使烃类可燃气体和 CO 快速释出，这对流动着的气粉混合物是十分危险的。若在气粉混合物中，含有一定量的烃类可燃气体和 CO 气体时，会使气粉混合物的爆炸极限氧浓度降到 10% 以下

表3 挥发分中各组分释放曲线参数表

参数 煤种	CO ₂		CO		CH ₄		C ₂ H ₄		C ₂ H ₆		H ₂							
	百分含量	T _i	T _{max}	百分含量	T _i	T _{max}	百分含量	T _i	T _{max}	百分含量	T _i	T _{max}						
龙口北皂(褐煤)	6.62	100	420	1.85	250	740	0.29	365	525	2.26	380	475	1.36	385	480	1.49	430	740
平顶山(烟煤)	1.48	210	725	1.37	395	770	0.55	425	550	2.14	415	495	2.19	375	485	1.78	430	775
贾兴(劣质烟煤)	1	385	525	1	400	770	1	405	580	1	390	525	1	390	525	1	430	750
贾庄(贫煤)	0.30	385	780	0.38	520	750	0.27	455	580	0.23	500	565	0.23	500	565	2.13	440	760
金竹山(无烟煤)	0.30	385	500	0.29	550	915	0.07	550	680	0	—	—	0	—	—	1.50	525	815
发热量			12636kJ/m ³		35880kJ/m ³		5940kJ/m ³		6485kJ/m ³		10785kJ/m ³							
着火温度 T _i			305℃		540℃		425℃		515℃		400℃							

(通常认为各煤种气粉混合物的极限氧浓度分别为：泥煤 16%，褐煤 18%，烟煤 19%，但最近有人认为褐煤为 12%，烟煤为 14%)。

此外，温度对制粉系统内火源的产生，主要有两方面的影响：

(1) 在仓储式系统或有积粉存在的直吹系统中，由于过高的温度，使积粉氧化过程加快，加上积粉散热条件又差，因此，当积蓄到一定热量之后就会产生积粉自然发火——引起制粉系统爆炸的火源。

(2) 当气粉混合物温度过高时，产生热解（在以后的讨论中，涉及“热解”一词时，包括同时发生氧化释出 CO 的过程），释放出一定量的可燃气体，烃类可燃气体的火焰传播速度一般在 50m/s 左右，而煤粉燃烧器的一次风速只有 20~35m/s，这就容易使炉膛火焰通过燃烧器一次风口，向直吹系统一次风管回火——造成制粉系统爆炸的火源。

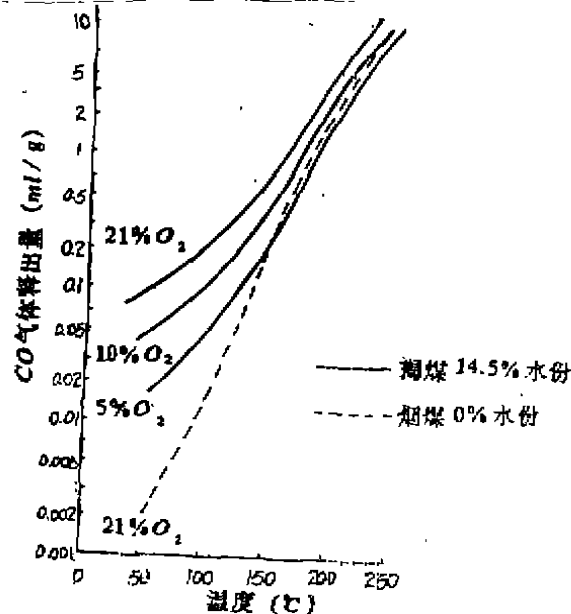


图 2 CO 气体释出量与温度、氧量的关系

通过以上分析，欲确定磨

煤机出口温度的防爆上限值，只须根据不同的制粉系统运行条件，分别确定其使用煤种的热解开始点温度 t_s ，以及堆积煤粉起燃温度 t_z 即可。

四、我国煤种的 t_s 和 t_z 值

1. 热解开始点温度试验值 t_s 及回归值 t_s'

西安热工所用示差热天平对我国 79 种动力用煤进行了微商热重试验。试验条件是：煤粉细度 $< 200\mu\text{m}$ ，纯 N_2 气氛，100mg 粉样， $20^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温速率。 t_s 数据在热天平 DTGA 微商热重分析曲线上取得。对于干馏过程结束后吸附气体增重的煤种，会出现曲线在水份释出峰后的谷与基线相交的现象，此时的 t_s 值应是谷底后上升曲线段与基线相交点。对于无上述现象的煤种，水份释出峰到挥发分释出峰之间曲线段与基线无相交点，此时则以两峰之间谷底为 t_s 值，见图 3。79 种煤的 t_s 数据表略。

用逐步回归法对试验数据进行了回归分析。由于无烟煤不发生爆炸，为提高回归精度，只对贫煤以下的 68 种煤进行回归。煤粉热解开始点温度回归值 t_s' 与煤样的可燃基挥发分 V^k 、干燥基灰份 A^k 和煤粉水份 W_{mf} 之间的关系式为：

$$t'_2 = 434.9584 - 2.8231V^r + 0.4940A^s - 10.7752W_{mf} \quad (1)$$

回归的置信水平为 99.9% ($\alpha=0.01\%$), 复相关系数为 $R_2=0.9536$, 剩余标准差为 $S_2=20.46^\circ\text{C}$, 其意义为 t_2 试验值有 95.4% 落在 $t'_2 \pm 2S_2 = t'_2 \pm 40.92^\circ\text{C}$ 范围内, 它描述回归的精度。偏相关系数: $R(V^r) = -0.7971$, $R(A^s) = 0.2689$, $R(W_{mf}) = -0.7577$. 可见 t_2 主要与 V^r 和 W_{mf} 有关, 当 V^r 升高或 A^s 下降或 W_{mf} 升高时, 则 t_2 下降。

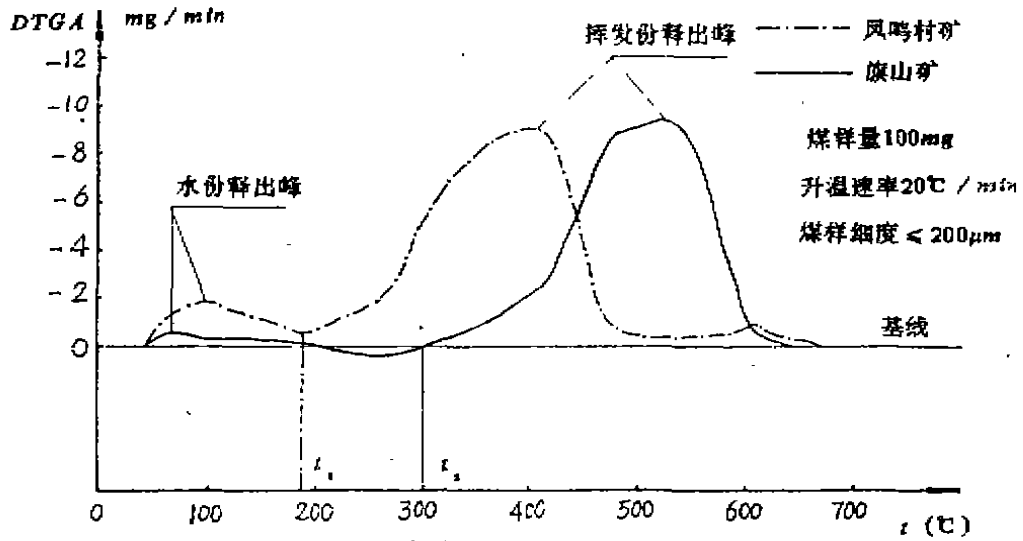


图3 微商热重分析曲线及 t_2 点确定示意

2. 堆积煤粉起燃温度试验值 t_2 及回归值 t'_2

用 Leitz II A 热显微镜对我国 72 种煤进行 t_2 值试验。试验条件是: 煤粉细度 $< 200\mu\text{m}$, 制成 $3 \times 3 \times 3\text{mm}$ 立方体放入热显微镜, 以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温速率加热, 通入纯 O_2 气体, 观察起燃, 并记录温度。 t_2 数据表略。

用逐步回归法对除无烟煤以外的 64 种煤样数据的回归分析, 得到关系式:

$$t'_2 = 203.1762 - 1.8274V^r + 1.6901A^s + 0.9792W_{mf} \quad (2)$$

回归的置信水平为 99.9% ($\alpha=0.01\%$), 复相关系数为 $R_2=0.8699$, 剩余标准差 $S_2=14.70^\circ\text{C}$, 偏相关系数为: $R(V^r) = -0.7152$, $R(A^s) = 0.7839$, $R(W_{mf}) = 0.2863$.

可见 t_2 主要与 V^r 和 A^s 有关, 当 V^r 升高或 A^s 下降或 W_{mf} 下降时, 则 t_2 下降。

3. t_1 值和 t_2 值数据 (按煤的品位归纳)

无烟煤	$t_1 = 380 \sim 525^\circ\text{C}$	$t_2 = 390 \sim 525^\circ\text{C}$
贫煤	$t_1 = 365 \sim 430^\circ\text{C}$	$t_2 = 200 \sim 260^\circ\text{C}$
劣质烟煤	$t_1 = 330 \sim 395^\circ\text{C}$	$t_2 = 250 \sim 290^\circ\text{C}$
烟煤	$t_1 = 280 \sim 390^\circ\text{C}$	$t_2 = 160 \sim 220^\circ\text{C}$
褐煤	$t_1 = 190 \sim 310^\circ\text{C}$	$t_2 = 155 \sim 190^\circ\text{C}$

可见，各品位煤之间数据重叠度很大，即使同一品位的煤，由于其煤质的差异，使其特性差异也很大。所以，简单地按煤的品位来划分 $(t_m)_{max}$ 是不合适的。应对电厂制粉系统特定的设计煤种和校核煤种进行 t_1 和 t_2 的试验。

五、磨煤机出口温度防爆上限值的确定

1. 制粉系统运行条件与 t_1 、 t_2 试验条件对比

此外， t_1 试验时，用 100mg 粉量得到的数据，应用到制粉系统也是偏于安全的。事实上，5mg 粉量的 t_1 试验，更接近于制粉系统风粉之间的换热条件。表 4 为不同粉量的试验结果对比。

表 4 试验粉量对 t_1 值的影响对照表

煤种	项目	成份			100mg 样	50mg 样	5mg 样	
		V^r	A^s	W_{mf}	20℃ / min 升温速率	20℃ / min 升温速率	20℃ / min 升温速率	50℃ / min 升温速率
		%	%	%	℃	℃	℃	℃
平庄煤(褐)		44.56	29.89	9.28	224°	235	260	300
义马煤(烟)		42.12	31.99	9.10	234°	230	245	275
杜尔泽煤(贫)		18.09	19.45	0.75	385°	295	330	370

* 此数值是用(1)式进行计算的结果

2. t_1 、 t_2 数据的应用

通过以上分析，可以肯定：本文提供的 t_1 和 t_2 试验方法和试验结果，可以安全地确定不同煤种，在不同制粉系统运行条件下，磨煤机出口温度的防爆上限 $(t_m)_{max}$ 。

(1) 仓储式系统和某些有煤粉沉积现象的直吹系统（如：磨煤机炉前布置，每台磨带一层一次风喷口，一次风管长且弯头多，低负荷运行一次风速低于 16m/s 出现煤粉沉积），要求 $(t_m)_{max} < t_1$ 。

(2) 无积粉现象的某些直吹系统（如：四角燃烧锅炉配的磨煤机是围炉布置，每台磨带一个角的燃烧器，一次风管短且弯头少），只须 $(t_m)_{max} < t_1$ 。

(3) 用空气和烟气混合干燥燃料的直吹系统，因为人们常常控制氧含量小于应用煤种的爆炸极限氧量，所以要求 $(t_m)_{max} < t_1$ 即可。

(4) 考虑到燃料的波动、运行工况的波动等因素，为安全起见， $(t_m)_{max}$ 应小于 t_1 或 t_2 值一定的差额 $\Delta t(^\circ\text{C})$ ，即

$$(t_m)_{max} = t_1 - \Delta t(^\circ\text{C}) \quad \text{或} \quad (t_m)_{max} = t_2 - \Delta t(^\circ\text{C})$$

Δt 的大小应根据现有电厂运行经验或运行试验来确定。本文通过试验数值与苏联 1973 年标准的比较，暂时推荐的 $(t_m^*)_{max}$ 选择方法见表 5。

表 5 磨煤机出口温度防爆上限选择表

干燥剂类型	空气干燥		空气+烟气干燥 $O_2 < \text{极限氧量}$	各种型式干燥
	磨出口管道设 备有积粉现象 的直吹系统	磨出口管道设 备无积粉现象 的直吹系统	所有形式 直吹系统	
制粉系统 型式				仓储式 系统
$(t_m^*)_{max}$	$t_2 - 70^\circ\text{C}$	$t_1 - 90^\circ\text{C}$	$t_1 - 50^\circ\text{C}$	$t_1 - 70^\circ\text{C}$

a. 无烟煤 $V^l < 10\%$ ，不会发生爆炸，而且 t_1 和 t_2 值很高，所以不需要对磨出口温度实行限制。

b. 仓储式系统热风送粉时，对于 $V^l > 15\%$ 的煤种，一次风温度不能超过 $(t_1 - 70)^\circ\text{C}$ ，以防煤粉热解，造成回火爆燃。

c. 本表 t_2 值是用热显微镜在纯 O_2 气氛、升温速率 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 条件下，对煤粉细度 $< 200\mu\text{m}$ ， $3 \times 3 \times 3\text{mm}$ 试样的试验数值。本表 t_1 值为用热天平在纯 O_2 气氛、升温速率 $20^\circ\text{C}/\text{min}$ 条件下，对煤粉细度 $< 200\mu\text{m}$ ， 100mg 试样的试验数值。若用 5mg 试样试验值时，表中 $(t_m^*)_{max} = t_1 - 90$ 应改为 $t_1 - 110^\circ\text{C}$ ， $t_1 - 50$ 应改为 $t_1 - 70^\circ\text{C}$ 。

d. 在没有 t_1 和 t_2 试验数据的情况下，对除无烟煤以外煤种可用 (1) 式和 (2) 式进行计算。

e. 当空气+烟气干燥时，对 O_2 的控制建议以下数值：烟煤 14%，褐煤 12%（油页岩同），泥煤 10%。

六、结 论

1. 燃煤电厂制粉系统中可控的防爆因素是：(1) 控制煤粉热解（包括氧化）的温度条件；(2) 气粉混合物的氧浓度；(3) 火源。

2. 在过高的温度条件下对制粉系统爆炸的影响是：(1) 煤粉热解放出可燃气体；(2) 加速系统内积粉的氧化过程，引起自燃，产生制粉系统爆炸的火源。

3. 不同煤种有不同的热解特性和堆积煤粉自燃特性，不应简单地按煤的挥发份高低来划分几档磨煤机出口温度防爆上限值 $(t_m^*)_{max}$ 。

4. 用热天平和热显微镜可以分析煤的热解开始点温度 t_1 和堆积煤粉起燃温度 t_2 ，这些数据可以直接用于确定不同制粉系统运行条件的 $(t_m^*)_{max}$ 值。

5. 本文通过对我国有代表性的 70 几种煤样的 t_1 和 t_2 值回归分析，找出了这两个值与煤种 V^l 、 A^s 、 W_{mf} 的关系。