

第 2 章 燃煤锅炉结渣的静态预测

2.1 根据煤灰的成分特性来预测

2.1.1 根据铁含量来预测

1. 原理

目前，人们普遍认为铁是预测结渣可能性的重要因素之一。铁主要是以黄铁矿（ FeS ）、碳酸铁（ FeCO_3 ）的形式存在于煤中，或作为杂质的形式存在于白云石、方解石中，还有少量以扇石（ $\text{Fe}_2\text{Mg}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_4$ ）、角扇石（ $\text{CaFe}_3\text{Si}_4\text{O}_{12}$ ）、赤铁矿（ Fe_2O_3 ）等其他形式存在。火焰中矿物质的初始阶段反应对积灰可以产生影响。根据煤中矿物质的类型，物理特性如密度、尺寸大小将改变，更重要的是熔化温度（表 2-1）以及由此而产生的颗粒形状将由下面表明的火焰中的瞬间反应产物来决定（图 2-1）。

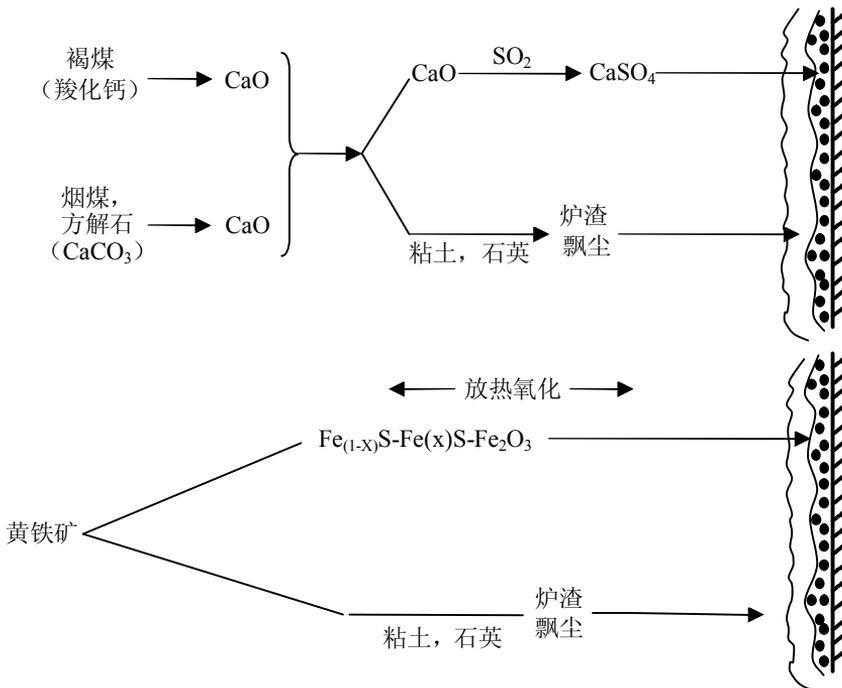


图 2-1 炉内污染形成、结渣的示意图

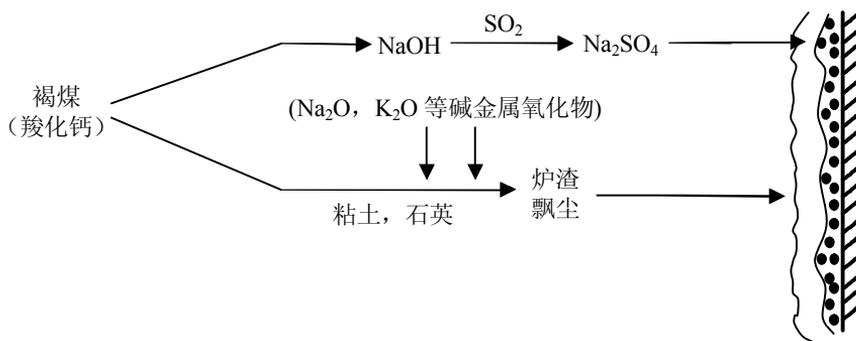
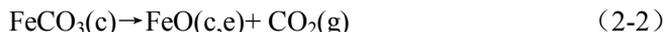


图 2-1 炉内污染形成、结渣的示意图 (续图)

表 2-1 含铁矿物质的熔化温度

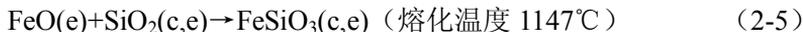
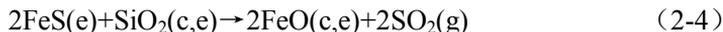
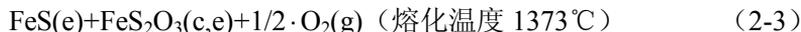
矿物名	FeS ₂	FeS	FeCO ₃	FeO
比重	5.02	4.62	3.96	5.70
熔化温度 (°C)	750 (变形温度)	1192	600 (变形温度)	1373

到达管壁的化合物决定所形成沉淀物的类型，如以下反应：



注：在上面炉内的初步反应中，式中 c 为结晶物，e 为液体，g 为气体。

从上面的反应可知，黄铁矿在燃烧区首先氧化成为磁黄铁 (FeS) 和 SO₂，而 FeS 高温 1192°C 时熔化成球形，它具有较低的阻力系数和较大的密度，因此在炉内动力的作用下达于炉墙 (管) 上有可能进一步反应生成更低熔点的物质：



FeO 的密度较 FeS 大，熔化温度也高，虽然 FeO 在火焰中熔化。当炉壁积灰较多时，它达到炉墙上才达到热平衡而凝固，从而形成结渣。同时 FeO 所形成的很多低熔点共熔体是易结渣的，FeO 造成的结渣几乎都是其形成的低熔点共熔体的结果 (如表 2-2)。

表 2-2 部分低熔点共熔体的熔点

体系	共熔体成分	熔点 (°C)
纯氧化物	CaO- Fe ₂ O ₃	1205
	CaO- FeO	1133
	Ca-SiO ₂	1436



续表

体系	共熔体成分	熔点 (°C)
含硫化物	Na ₂ S-FeS	640
	FeS-FeO	940
含铁硅酸盐	Al ₂ O ₃ ·SiO ₂ +2FeO·SiO ₂ +SiO ₂	1000~1100
	2FeO·SiO ₂ +FeO	1175
	2FeO·SiO ₂ +FeO	1180
	CaO·FeO+CaO·Al ₂ O ₃	1200
	CaO·FeO·SiO ₂ +CaSiO ₃	1093
	CaO-FeO-SiO-MgO	<1047
	SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃	1073

对炉内一次沉积的结晶相,进行 X 射线分析发现其成分基本是 Fe₂O₃,由于含铁多的沉积物膨胀系数与炉内水冷壁管材的很接近,所以,含铁附着物附着在水冷壁上以后不易清除,直到停炉^[8,9,12]。

由于煤炭中的铁氧化程度在炉内要发生变化,这对形成灰渣有很大影响,所以表征熔渣中的铁氧化程度,通常使用以下指标:

- (1) 当量 Fe₂O₃, 当量 Fe₂O₃= Fe₂O₃+1.11 FeO+1.43Fe
- (2) Fe₂O₃ 百分比 (N)。N=%·Fe₂O₃/(Fe₂O₃+1.11 FeO+1.43 Fe)

2. 判断标准

Fe₂O₃ 的百分含量小于 8, 为不结渣;

Fe₂O₃ 的百分含量在 8~15 之间, 为中等结渣;

Fe₂O₃ 的百分含量大于 15, 为强结渣。

3. 分析与讨论

(1) 煤矿中的结渣除与 Fe 的含量多少有关外,还与存在的形式有关,因此,用煤灰中的含量来预测结渣情况,如能分清铁在煤中的存在形式则判断的正确率会有所提高。

(2) 近年来,美国有学者用 Fe₂O₃/CaO 的比值作为判断烟煤型灰 (Fe₂O₃>CaO+MgO) 的结渣指标之一,推荐的界限值为:

Fe₂O₃/CaO<0.3, 为不结渣;

Fe₂O₃/CaO=0.3~3, 为中等结渣;

Fe₂O₃/CaO>3, 为严重结渣。

该方法对于判断主要由含铁量引起的煤结渣效果较好。



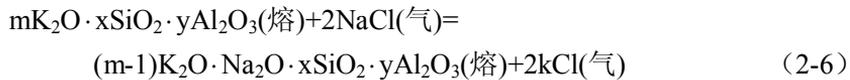
2.1.2 碱金属含量预测

在第1部分中，已经讨论了锅炉受热面结渣过程，首先由极细小飞灰、气相物质在受热面上沉积导致。这些初始沉积物引起管壁温度升高，对熔融煤灰颗粒的冷却效果变差，从而引起结渣，而碱金属正是形成初始沉积层的重要物质。

1. 机理

对于煤中的钠，其存在形式有两种，一种是无机钠，它与粘土矿物质结合在一起；另一种是有机钠，它一方面结合在羧酸中，另一方面以配位的形式出现在煤结构含碳或含氧的官能团上。钾在煤中是以无机的伊利石结构存在，而低品位煤中少部分以有机组分存在。当然由于不同国家和地区煤在原始植物、成煤过程、地质环境上存在差异，碱金属在煤中的存在形式是不完全相同的。目前，对煤中碱金属存在形态的测量普遍采用萃取的方法，即利用不同碱金属成分在不同溶液中的溶解性质的差别来确定各形态碱金属的含量，萃取液通常为水和稀硫酸，用稀硫酸萃取时，可溶的物质称为可溶碱金属，不溶的为不可溶碱金属。

煤中可溶碱金属在加热过程中会挥发，而不可溶碱金属则会以铝硅酸盐的形式存在于灰中，因此，煤中可溶性碱金属的含量已成为判断煤灰污特性的重要指标。普遍认为钠从煤中的释放有两条路径，一条是通过 NaCl 挥发，另一条是通过有机钠转换成的挥发形式，即存在于煤中的各种形式的钠在燃烧过程中均可挥发，只是煤在实际燃烧过程中钠不一定能完全释放。煤中的钾主要以硅酸盐形态存在，而硅酸盐在高温下不易挥发，钾从硅酸盐中释放是通过钠的置换作用，反应如下^[83]：



另外，氯亦是影响钾释放的一个主要因素，随着煤中的氯含量的增加，钾的释放量亦增加，但对氯的作用机理目前还不清楚。

从煤中释放出来的碱金属，不论是分子形式还是原子形式，在炉内是不能完全稳定存在的，它们会很快与其他成分反应，生成新的碱金属成分，但最终大都以碱金属氧化物形式存在，在炉膛中与碱金属相关的反应很多，从平衡态的角度来看，反应就有几十种，生成的碱金属成分也多种多样，但最终从结渣角度具有意义的成分主要有碱金属的硫酸盐、碱金属的硅酸盐、铝硅酸盐、氯化物、氢氧化物等。对于碱金属与（铝）硅酸盐的反应最后所生成的钠（铝）硅酸盐主要是通过非均相反应生成^[66,74,78]，研究显示，钠与（铝）硅酸盐的反应与煤和烟气中的氯含量有关，且钠更易与铝硅酸盐反应。氯化物的来源有两部分，一部分为煤



中释放，另一部分是释放出的碱金属原子通过均相反应生成。烟气中碱金属硫酸盐通常是通过均相气相反应生成的。由于碱金属在炉内反应很复杂，对其反应产物的研究大多利用化学热力学方法进行，在炉内的高温下，气相碱金属成分主要为碱金属氧化物。所以，分析碱金属含量主要是通过其他氧化物的含量来判断的。

2. 预测标准

煤中的碱金属氧化物对锅炉污染的影响主要是反映在对流烟道上，如煤中含灰量大或含碱金属的氧化物含量大，其积灰是严重的。

图 2-2 中给出了煤灰中的氧化物的含量对灰的沉积影响。由图可知， Na_2O 的含量对积灰有很大影响，随着氧化钠的含量增加，管子上的积灰量不断增加。

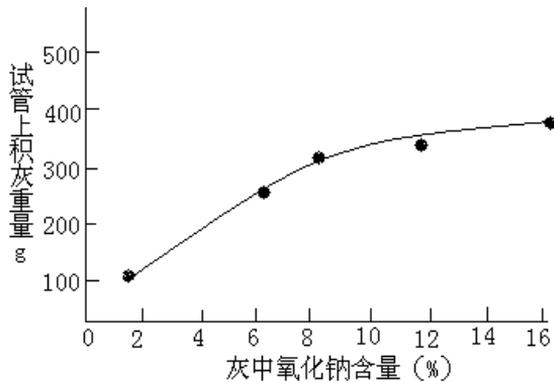


图 2-2 管子上积灰重量和煤中的钠含量的关系

当然积灰与煤灰含量也有很大关系，但在煤灰中 Na_2O 的含量较低时（灰中 $\text{Na}_2\text{O} < 1\%$ ），无论灰含量多少，积灰速度都很低，而在 $5\% \sim 10\%$ 的氧化钠含量时，积灰随煤的灰分呈指数增加，其积灰总量自然显著增加。

以 Na_2O 含量作为标准判断结渣的界值如表 2-3。

表 2-3 按照 Na_2O 含量判断结渣的界值

煤的结渣倾向	低	中	高	严重
烟煤灰（灰中 Na_2O (%)）	< 0.5	$0.5 \sim 1.0$	$1.0 \sim 2.5$	> 2.5
褐煤灰（灰中 Na_2O (%)）	< 2.0	$2 \sim 6$	$6 \sim 8$	> 8

3. 分析与讨论

(1) 美国 FW 公司对六种煤的实验研究也表明，煤中的钾的含量对结渣影响很大， $\text{K}_2\text{O} > 1\%$ 时，结渣较为严重， $\text{K}_2\text{O} < 0.2\%$ 时，几乎不结渣，为了考虑钾对积灰的影响，也可以用碱金属氧化物的总含量来预测煤灰沾污倾向，即将 Na_2O 含



量按其当量计算，如： $\text{Na}_2\text{O}=(\text{Na}_2\text{O}+0.659\text{K}_2\text{O})A/100$ ，（A 为煤的灰分）。

事实上煤灰含碱金属氧化物对锅炉的沾污主要是对流管面上的积灰。而用它判断在炉内的结渣往往有所偏差，因此，在用此金属来判断时要小心，尤其是在对烟煤型灰的判断上，其准确度都不高。

（2）美国 CE 公司用弱酸过滤法测定溶解于弱酸中的活性钠化合物含量来区分活性钠化合物和非活性钠化合物，用活性钠化合物的含量来确定煤灰的积灰倾向，由于在燃烧高温下，煤灰中活性钠化合物挥发，随烟气进入对流受热面，凝聚在对流受热面上，并和 CO_2 、 SO_2 共同作用生成低熔点复合化合物，从而使对流受热面污染而结渣，用该法来判断受热面的积灰结渣其准确性更高些。

2.1.3 根据煤灰中的氯的含量

1. 原理

氯在煤中的存在形式主要是氯碱金属和碱土金属化合物，煤中氯的含量对受热面的污染主要表现为积灰。由于煤的含氯量不同地区差别很大，我国煤的含氯量尤其是电厂所用的劣势煤其含量普遍偏低，所以，以此作为判断标准只能用于含氯量较大的动力用煤。

2. 判断限值

煤灰中氯的百分比含量：

$\text{Cl}<0.3$ ，为轻微结渣；

$\text{Cl}=0.3\sim 0.5$ ，为中等结渣；

$\text{Cl}>0.5$ ，为严重结渣。

2.1.4 利用煤灰的硅比 G

1. 机理

目前，用硅比 G 来判断煤的结渣比较普遍，其公式为：

$$G=100 \cdot \text{SiO}_2/(\text{SiO}_2+\text{当量} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{MgO}) \quad (2-7)$$

式中的几种氧化物是指它们在灰中的重量百分比。

硅比 G 是反映燃煤结渣趋势和对不同煤种进行比较其结渣趋势的一个重要指标。硅比 G 同时将几种与结渣有关的成分进行全面考虑，较大的硅比 G 意味着灰渣有较高的粘度，灰中含铁量和含钙量的增加会使粘度降低。通常把 SiO_2 含量高的结渣称为酸性渣，含量低的称为碱性渣，酸性渣的熔点和粘度都比较高，因而是不易发生结渣的。



2. 判断结渣倾向的界限值

其结渣判断界值为：

$G > 78.8$ ，为轻微结渣；

$G = 66.1 \sim 78.8$ ，为中等结渣；

$G < 66.1$ ，为严重结渣^[6,8]。

3. 分析

(1) 目前，判断煤结渣是硅比 G 是重要的依据之一，但在利用硅比 G 进行判断时，没有考虑到灰中 Al_2O_3 对结渣的影响，因此一定程度上影响它的应用范围，这是它的缺点之一。

(2) 对我国动力用煤，煤灰软化温度 t_2 与硅比 G 统计规律表明： G 增加 t_2 也增加，即硅比 G 与煤灰的变形温度 t_2 有一定的相关性。

(3) 煤灰中的 SiO_2 和 Al_2O_3 是煤灰中的主要氧化物， Al_2O_3 增加总会使灰熔点升高， SiO_2 的影响有双向性，即一方面 SiO_2 比 Al_2O_3 更容易与碱性成分形成低熔点的共熔体，使灰熔点降低；另一方面，当 SiO_2 含量高时， SiO_2 本身就会有使灰熔点升高。因此常常用 SiO_2/Al_2O_3 的比值来判断其煤的结渣性，其判断界值为：

$SiO_2/Al_2O_3 < 1.87$ ，为轻微结渣；

$SiO_2/Al_2O_3 = 2.65 \sim 1.78$ ，为中等结渣；

$SiO_2/Al_2O_3 > 2.65$ ，为严重结渣。

(4) 近年来美国部分学者用铁/钙比作为判断烟煤灰的结渣指标之一，其推荐值为：

$Fe_2O_3/CaO < 0.3$ ，不结渣；

$Fe_2O_3/CaO = 0.3 \sim 3$ ，中等结渣；

$Fe_2O_3/CaO > 3.0$ ，严重结渣^[5]。

(5) 将硅比 G 与硅/铝比、铁/钙比结合起来判断煤结渣是提高判断的准确性的途径之一。

4. 案例

案例见图 5-4 对铜陵电厂设计煤种的结渣软件分析结果。

2.1.5 根据灰中的碱/酸 (B/A) 比

1. 原理

煤灰中碱性与酸性两类氧化物含量的比称为灰的碱酸比 (B/A)：

$$B/A = (Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O) / (SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2) \quad (2-8)$$

碱/酸比中分子为碱性氧化物，具有提高灰的流动性的特性。分母中的酸性氧



化物都是增加灰的粘滞性的。由此可知，此参数越低，这种煤在固态排渣炉中就越不易发生结渣。对于应用在固态排渣炉上的煤，从防止结渣的要求来看煤灰中的酸碱性比应尽可能低于 0.5。

在高温下，煤灰中这两种氧化物相互影响相互作用形成低熔点共熔体盐。这些共熔体盐通常具有较为固定的组合形式。因此，当煤灰中酸碱性成分比值过高或过低时，灰熔点均增高。

不同的碱性成分与酸性成分形成共熔体的盐其熔点是不一样的，碱性成分的助熔性能（降低化合物的熔点性称为“助熔”）顺序是：碱>碱土>铁。

总的看来，煤灰中 SiO_2 、 Al_2O_3 的增加使灰的粘度升高，而一般情况下碱性氧化铁的增加使粘度降低，只有在 Fe_2O_3 、 CaO 超过一定范围时， CaO 等二、三价氧化物增加才使粘度升高^[5]。

2. 结渣判断界值

$B/A < 0.201$ 时，为轻微结渣；

$B/A = 0.206 \sim 0.4$ 时，为中等结渣；

$B/A > 0.4$ 时，为严重结渣。

3. 案例

见图 5-5 对马鞍山第二电厂设计煤种的分析。

2.1.6 酸碱性比与硅铝比的乘积预测结渣

1. 机理

煤燃烧后残留的煤灰成分主要由氧化物组成，氧化物根据阳离子的离子势可分为碱性与酸性两种，煤灰中的碱性氧化物成分氧化钙的含量较高且变化较大，酸性氧化物分别以氧化硅和氧化铝占绝大部分，煤灰的酸碱比 B/A 是其碱性氧化物成分含量的总和 B 与酸性氧化物成分含量总和 A 之比，即 $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$ ，硅铝比 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 其氧化硅成分与氧化铝含量成分的比，它们是反映煤灰氧化硅、氧化铝和碱性氧化物相互数量关系的重要参数。酸碱比和硅铝比通过影响煤灰的物理、化学性质进而对其结渣特性产生决定性作用。

当碱酸比 $B/A \leq 1$ 时，碱酸比的增加使得燃烧时煤灰中碱性氧化物与酸性氧化物相互作用生成低熔点的共熔物，即易熔硅铝酸盐增多，其中硅酸盐共熔物与铝酸盐中共熔物相比熔点更低^[3]，导致煤灰的软化温度 t_2 不断降低，并约在 $B/A=1$ 时降至最低点，导致使烟气中夹带的煤灰灰粒不易冷凝、在碰撞炉壁时易于发生粘附，由此烟气中的煤灰结渣情况加重，特别是含氧化铁的灰粒可以形成比重大



熔点低的熔融球体，易于穿透烟气流沉积在炉壁上；当碱酸比 $B/A > 1$ 后，随着碱酸比的增加尽管煤灰的软化温度又逐渐上升，但由于煤灰灰粒中有很多的氧化铁或氧化钙，在灰粒碰撞炉壁时可与从煤灰中升华并凝结于炉壁上的氧化硅反应，生成易熔的硅铝酸盐玻璃体而使灰粒彼此烧结。因此，煤灰中的结渣程度继续加剧，所以煤灰中结渣程度总是随碱酸比的增加而结渣倾向增强。

硅铝比的增加意味着煤灰中阻碍熔体变形的“支持形骨架”氧化铝成分的减少，以及作为玻璃生成体得到氧化硅成分的增加，因此煤灰的软化温度明显下降，并使煤灰的粘度、温度特性由高熔点晶型灰逐步转化变为塑性灰以至玻璃体灰。玻璃体、塑性灰、晶型灰这三种灰中以玻璃体灰冷凝最慢，故燃烧室最易结渣，塑性灰次之，而高熔点晶型灰冷凝最快，故最不易凝结。硅铝比的增加还使从煤灰中升华并凝结于炉壁的氧化硅增多，有利于灰粒碰撞炉壁时生成易熔的硅铝酸盐玻璃而发生烧结。因此，煤灰的结渣也是随硅铝比的增加而上升。

2. 判断结渣倾向界限值

为此，确定煤灰碱酸比与硅酸比的乘积作为动力用煤结渣指数的判别界限为：

令： $R_H = (B/A) \times (SiO_2/Al_2O_3)$ ，则：

$R_H \leq 0.30$ ，结渣轻微；

$0.30 < R_H < 0.80$ ，结渣中等；

$R_H \geq 0.80$ ，结渣严重。

2.1.7 根据硫份预测结渣

对于烟煤型 ($Fe_2O_3 > CaO + MgO$) 灰： $R_s = B/A \cdot S^g$ ， S^g 为煤干燥基硫份，引入硫份结渣指数主要是考虑煤渣中的黄铁矿硫，因为黄铁矿硫是助熔剂，容易降低灰熔点温度而引起结渣， R_s 只适用于烟煤型灰，判断界值为：

$R_s < 0.6$ ，轻微结渣；

$R_s = 0.6 \sim 2.0$ ，中等结渣；

$R_s = 2.0 \sim 2.6$ ，强结渣；

$R_s > 2.6$ ，严重结渣^[6]。

但资料显示， R_s 对我国的煤并不能很好地预测结渣倾向^[5]，即其预测的置信度不高。

2.1.8 用污染指数 R_f

玷污指数 $R_f = B/A \cdot Na_2O$ 。 B/A 指碱酸比，对于烟煤 Na_2O 指的是煤灰中钠的总含量，对于褐煤型 Na_2O 指的是可溶性钠。



(1) 对于烟煤型灰污染的界值为:

$R_f < 0.2$, 轻微结渣;

$R_f = 0.2 \sim 0.5$, 中等结渣;

$R_f = 0.5 \sim 1$, 高度结渣;

$R_f > 1$ 严重结渣。

(2) 对于褐煤结渣的判断界值为:

$R_f < 0.1$, 轻微结渣;

$R_f = 0.1 \sim 0.25$, 中等结渣;

$R_f = 0.25 \sim 0.7$, 高度结渣;

$R_f > 0.7$, 严重结渣。

对烟煤结渣污染指数 R_f 中的 Na_2O , 如果考虑到钾的影响, Na_2O 可以用 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 之和来代替, 此时的污染判断界值是:

$R_f \leq 0.6$, 不结渣;

$R_f = 0.6 \sim 40$, 严重结渣;

$R_f > 40$, 严重结渣^[5,6]。

2.2 用煤灰物理特性对结渣倾向进行预测

2.2.1 煤灰熔化的温度

1. 煤灰的熔化温度对结渣的影响

煤灰的熔点就是煤灰的熔融性, 它是动力用煤的重要指标, 并常常作为表征电站用煤的结渣性质的判断指标。目前, 判断电站锅炉煤结渣性质首选的、主要的依据仍然是煤灰熔点。煤粉颗粒在炉内燃烧时由于炉内的高温飞灰都呈熔融状态, 如果这些熔融状态的颗粒到达炉膛壁面时没有被足够冷却而仍然呈熔融状态, 它就粘附在壁面上形成结渣。有学者认为结渣的速度和程度与水冷壁周围熔融状态的灰粒占总灰粒的百分比有关, 其百分比越大结渣的程度就越大, 速度就越快, 根据这一观点在易结渣的煤中混入不易结渣的煤进行混燃 (将不同煤质混合在一起进行燃烧) 可降低结渣的程度, 这一观点已在一定范围的实践中得到证实。

煤中矿物质的来源不同, 煤燃烧后剩下的残留物即灰的成分也十分复杂, 其含量变化范围也很大, 这些成分决定了煤灰的熔融特性。在煤灰中这些成分以硅酸盐、硫酸盐及各种金属氧化物的混合物存在。当加热到一定的温度, 这些混合物就开始熔化, 随着温度的升高, 熔化的成分就逐渐增多, 而不是在某一固定温



度时能够使固态全部转化为液态，其原因在于各种成分有着各自不同的熔点。因此，煤灰熔化是在一定的温度范围，人们经常所说的灰熔点包括煤灰在熔化时的三个特征温度，即变形温度 t_1 、软化温度 t_2 和流动温度 t_3 。在电站锅炉的设计、运行中，在考虑结渣时，灰的熔点一般指的是软化温度^[13]。

2. 影响煤灰熔点的因素

(1) 煤灰中的化学成分。

煤灰中的成分是决定其熔点的基础。不同煤的成分变化很大，其熔点的变化也很明显。

煤灰是一种极为复杂的无机混合物，通常都是以氧化物的形式来表示，煤灰组分的化学分析结果表明，酸性氧化物具有提高煤灰熔融温度的作用，其含量越多，熔融温度就越高；相反，碱性氧化物却有降低煤灰熔融温度的作用，其含量越多，熔融温度就越低。酸性与碱性氧化物的相互匹配与比例增减、煤灰熔融的还原或氧化气氛等因素，常引起熔融温度的复杂变化与不同的规律性。在酸性氧化物中， Al_2O_3 和 TiO_2 在煤灰中始终起提高熔融温度的作用，而 SiO_2 的含量与煤灰熔融温度似乎无明显关系；碱性氧化物中的 CaO 和 Fe_2O_3 ，由于含量较高，对煤灰熔融性的影响较之其他几种组分更为显著。 CaO 对煤灰有助熔作用，但与 CaO 本身含量和 SiO_2/Al_2O_3 比有关。

我国绝大多数煤灰的主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 SO_3 、 Na_2O 和 K_2O 等。这些成分对煤灰熔点的影响主要是它们在熔化时形成共熔体，而这些共熔体的熔点决定了灰的熔点^[14]。研究表明：

① $SiO_2+Al_2O_3$ 的含量越高，灰的熔化温度越高， $SiO_2/Al_2O_3=1.18$ 时，灰熔点较高。

② 氧化钙是低熔点共熔体的重要组成，它对熔点的影响与 SiO_2 、 Al_2O_3 的量及比值有关。

③ 铁氧化物的含量对灰的熔点有很大的影响。煤灰的熔点随着其铁的氧化物含量的增加而下降，但因其氧化物不同，熔点变化也较大，在还原性气氛下熔点较低。对于煤灰熔点较低的煤，在当炉内出现燃烧空气量不足或区域出现供氧量不足时，结渣程度会加剧。

④ 氧化物 (Na_2O 、 K_2O 等) 在灰中的含量虽然不高，但它对灰熔点确有明显的影响，同时在高温火焰作用下，碱金属升华，温度越高升华的成分越多，升华的成分在低温下凝聚与烟气中的 SO_3 形成 K_2SO_4 、 Na_2SO_4 等易粘附灰垢的温床。从图 2-3^[5]可以看出，在总碱性 ($K_2O+Na_2O+MgO+CaO+Fe_2O_3$) 百分比小于 36% 左右时，随着总碱性物的增加，软化温度下降，而当总碱性物百分比大于 36% 左



右时，随着总碱性物百分比的增加，灰软化温度将增大。

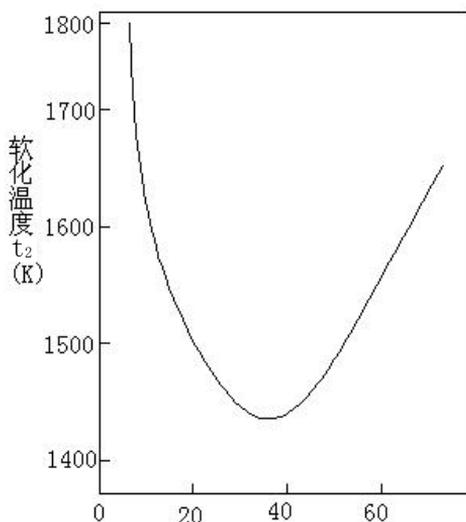


图 2-3 还原性气氛下灰碱性与软化温度的关系

(2) 矿物质对煤灰熔融性的影响。

随着科学技术的发展和先进的测试仪器的出现，人们进一步研究了矿物组成对煤灰熔融性的影响。煤灰的矿物组成实质上主要是由各种煤灰组分以不同的比例相结合而成。在加热过程中，煤灰中除各矿物组分熔融外，矿物组分间会发生反应形成无机成分；各矿物组分间还会发生低温共熔现象，从而影响灰的熔融特性^[91]。这些矿物组成对煤灰熔融性的影响可以通过考察煤灰在受热过程中的行为，用 X 射线衍射法、差热分析法、热重力分析法、Mossbauer 谱仪法、扫描电镜法、高温显微镜观察法等来确定。

日本学者川井隆夫和柴田次进^[91]研究了粘土矿物质对煤灰熔融特性的影响，发现高岭石的含量与煤灰熔融特性有很好的相关性（相关系数 $R=0.89$ ）；硬石膏（ CaSO_4 ）的存在会降低高岭石的熔融温度。这主要是因为硬石膏和高岭石发生反应形成低温共熔混合物。Unuma 等也得出类似的结论：煤灰熔融温度的显著差别取决于石英、高岭石和长石的相对含量，随着高岭石含量增加，煤灰熔融温度逐渐提高；对高岭石含量相同的煤灰而言，熔融温度随长石含量的增加而降低。

Vassilev 在研究各种煤灰化学成分对煤灰熔融性的影响的同时，也研究了各种矿物成分对煤灰熔融性的影响。他指出：煤中主要结晶矿物（>5%时）是石英、



高岭石、伊利石、长石、方解石、黄铁矿和石膏，次要矿物（在 1%~5% 范围）是方石英、蒙脱石、赤铁矿、菱铁矿、白云石、氯化物和重晶石等。通常，富含石英、高岭石、伊利石的煤，灰熔融温度较高；而蒙脱石、斜长石、方解石、菱铁矿和石膏含量高的煤，灰熔融温度较低。煤经高温灰化后，由于发生了物理化学变化，煤灰中的主要结晶矿物变成石英、粘土矿物、长石、硅酸钙、赤铁矿和硬石膏。煤灰熔融性试验表明，硅酸盐矿物含量高的煤灰，熔融温度较高；如果硅酸盐含量少，而硫酸盐和氧化物矿物含量高，则煤灰熔融温度较低。煤灰中的耐熔矿物是石英、偏高岭石、莫来石和金红石，而常见的助熔矿物是石膏、酸性斜长石、硅酸钙和赤铁矿，其质量分数在 20%~55% 变化时对煤灰熔融温度呈线性递增（或递减）关系，而后迅速变缓。目前还不能准确定量分析高温灰的矿物组成。

（3）添加剂对煤灰熔融性的影响。

煤灰熔融特性取决于煤中的矿物质组成与其氧化物的成分和配比。当选用不同物质（或氧化物）为添加剂掺入煤中后，通过煅烧熔融手段可改变煤灰的化学组成，以实现控制煤灰熔融特性的目的。研究已表明，煤灰中掺入酸性氧化物（即耐熔剂）可提高灰熔点，反之掺入碱性氧化物（也即助熔剂）可降低煤灰的熔融温度。

高岭石中主要成分之一是酸性氧化物 Al_2O_3 的晶体物质，具有牢固的晶体结构，熔点很高（ 2050°C ），在煤灰熔化过程中起“骨架”作用； Al_2O_3 含量越高，“骨架”的成分越多，熔点就越高。但由于 Al_2O_3 晶体具有固定熔点，当温度达到相关铝酸盐类物质的熔点时，该晶体即开始熔化并很快呈流体状，因此 Al_2O_3 含量越高，软化温度和熔化温度的温差就越小。王泉清和曾蒲军等人研究了在弱还原气氛中，高岭石对神木大柳塔煤灰熔融性的影响，指出使用 Al_2O_3 与 SiO_2 含量比较高的高岭石，能显著提高煤灰熔融温度，当高岭石的添加量为 27%~32%（质量分数）时，软化温度可达 1300°C 。X 射线衍射分析结果表明，添加高岭石的煤灰混合物在高温下软化熔融时，主要生成钙长石、方石英、铁橄榄石、铁尖晶石和莫来石等。

（4）助熔剂的影响。

碱性氧化物的助熔作用已为许多研究者所证实^[91]。在对重庆中梁山无烟煤煤灰添加 CaO 或石灰石测定该灰样熔点变化的研究中发现^[91]：添加 CaO 后灰熔点呈下降趋势，煤灰中 CaO 质量分数达到 10%~30% 时，灰熔点最低；当 CaO 质量分数超过 40% 时，灰熔点反而又急剧上升；这些与 Huggins 等^[91]和我国学



者姚星一等人的研究结果一致。姚星一指出： CaO 对煤灰的助熔作用与 CaO 含量以及煤灰中的 SiO_2 与 Al_2O_3 质量比有关，就我国煤而言，若煤灰中 SiO_2 与 Al_2O_3 质量比小于3， CaO 质量分数为30%~35%时，可使煤灰的熔融温度最低，质量分数超过30%~35%时，再增加 CaO ，煤灰的熔融温度又开始提高；若煤灰中 SiO_2 与 Al_2O_3 质量比大于3， SiO_2 质量分数大于50%， CaO 质量分数为20%~25%时，煤灰熔融温度最低，而后增加 CaO 含量，煤灰熔融温度又开始提高。同样，添加石灰石与添加 CaO 有相似的灰熔点变化规律，将石灰石量折算成相等的 CaO 量并与灰熔点变化作图，得出石灰石与 CaO 具有一致的助熔行为，明确表明石灰石中起助熔作用的成分是 CaO 。根据X射线衍射分析结果，在煤灰中添加 CaO 进行软化熔融时，主要生成了钙长石、钙黄长石、铝酸钙、硅钙石等几种矿物质，同时发生共熔。另外，煤中的钙大都以石灰、碳酸钙、石膏和硅酸盐等形式存在。石灰一般在 540°C 时分解，碳酸钙在 800°C 左右时分解，而石膏与硅酸盐在实验室燃烧条件下（ 825°C ）并不分解。在一般煤灰中，固定硫（指煤灰中以硫的化合物形式存在的硫，以 SO_3 计）质量分数都在5%以下，但在有些褐煤中，固定硫的质量分数可高达30%以上，同时 CaO 含量也都比较高，因此可以认为这类褐煤的煤灰中有较大量的 CaSO_4 存在。根据在煤灰中添加 CaSO_4 和当量 CaO 的试验结果， CaSO_4 含量增加后，一般均能使熔点降低，但不如增加 CaO 的效果显著。采用学者Vorres的“离子势”观点可以很好地解释碱性氧化物的助熔机理。由于酸性氧化物中酸性离子具有高的离子势（离子化合价/离子半径），碱性离子的离子势较低，离子势高的酸性阳离子易与氧结合形成复杂离子或多聚物，而碱性阳离子则为氧的给予体，能够终止多聚物集聚，降低其黏度，表现出助熔效果。

试验表明， Fe_2O_3 的助熔效果与煤灰所处的气氛性质有关。在弱还原气氛中， Fe_2O_3 以 FeO 的形态存在，与其他价态的铁相比， FeO 具有最强的助熔效果。如果煤灰中的 CaO 、碱金属氧化物等助熔组分含量较高，且硅/铝比值较高（ SiO_2 与 Al_2O_3 质量比 >3.0 ），那么在 Fe_2O_3 含量较低时，就能使煤灰熔融温度很低；对于硅/铝比较值低（ SiO_2 与 Al_2O_3 质量比 <3.0 ），且 CaO 、碱金属氧化物等组分的含量亦较低的煤灰，则在 Fe_2O_3 含量较高时，才能使其熔融温度最低。

李帆等人对重庆中梁山无烟煤煤灰的熔融研究表明，在弱还原气氛下，煤灰中添加 Fe_2O_3 后，灰熔点呈下降趋势，煤灰中 Fe_2O_3 质量分数在25%以上时，灰熔点趋于一定值，这是因为在弱还原气氛下， Fe_2O_3 被还原成活性较高的 FeO ，极易与灰样中的硅酸盐物质反应，生成铁橄榄石等含 Fe^{2+} 的化合物，与Huggins等



人的研究结果一致。根据 X 射线衍射分析结果,这一混合灰样在软化熔融温度时生成的矿物质为铁橄榄石、铁尖晶石、铁铝榴石、斜铁辉石等,这些矿物间产生低温共熔现象。

在一些煤灰中加入不同数量的 MgO 进行的试验结果表明, MgO 含量增加时,灰熔点逐渐降低,至 MgO 质量分数为 13%~17%时熔点最低,超过这个含量熔点开始增高,但由于在煤灰中 MgO 含量很少,实际上可以认为它在煤灰中只起降低熔点的作用。

(5) 添加 SiO₂ 助熔的影响。

煤灰的任一矿物组成中几乎都含有 SiO₂。由于煤灰中 SiO₂ 主要以非晶体的状态存在,很容易与其他一些金属和非金属氧化物形成玻璃体物质。玻璃体物质具有无定形结构,没有固定的熔点,它随着温度的升高而变软,并开始流动,随后完全变成液体。SiO₂ 含量越高,形成的玻璃体成分越多,所以煤灰的流动温度与软化温度之差也随着 SiO₂ 含量的增加而增加。

姚星一等人对煤灰中添加 SiO₂ 的试验中发现, SiO₂ 质量分数为 45%~60%时, SiO₂ 增加则熔点逐渐降低,当 SiO₂ 质量分数超过 60%时, SiO₂ 含量的改变对灰熔点的影响无一定规律。这主要是由于 SiO₂ 是网络形成体氧化物,而煤灰中还有许多其他氧化物,这些氧化物可分为修饰中间氧化物 (Al₂O₃ 及 Cd、Pb、Zn 的氧化物) 和修饰网络氧化物 (Na₂O、CaO 及 K、Li、Mg、Ba 的氧化物)。其中修饰中间氧化物随着不同情况分别起到形成网络和修饰网络这两种作用。修饰网络氧化物能进入网架结构内部使网络发生改变,可以使中间氧化物全部或部分由六配位化合物变为四配位化合物,从而起到补网作用。由于这三类氧化物间的相互作用使得 SiO₂ 表现出助熔的不确定性。

(6) 助剂与煤灰共熔物的特性。

黄文沂等人对福建低活性劣质无烟煤采用碱性催化剂进行催化气化后灰渣煅烧生成物特性的研究,指出碱性钠盐催化剂会与煤灰中的各种矿物质组分,即 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO 等氧化物,在适宜的煅烧温度条件下 (850~900℃) 发生共熔,生成新的复杂硅酸盐复合物,表现出较好的耐水性与耐腐蚀性。事实上,煤催化、气化后残留在煤灰中的碱性催化剂就是该煤灰在进一步煅烧过程中的助剂,其含量的大小直接影响着共熔过程和生成物的性质与结构。对福建低活性无烟煤、煤灰进行组成分析可知,该煤灰中 50%以上为 SiO₂。

煤灰煅烧过程中, SiO₂ 的活性决定了生成硅酸盐复合物的难易程度,具有“形成网络氧化物” SiO₂ 活化并使“修饰中间氧化物” Al₂O₃、Fe₂O₃ 等进入玻璃的网



络结构内，同时与“修饰网络氧化物” Na_2O 、 CaO 、 MgO 等形成稳定的硅酸盐复合物而被固定在难溶的玻璃体中，表现出良好的耐水性与耐腐蚀性，实现了催化气化合碱灰渣煅烧脱碱与无公害的目的。

(7) 煤灰熔融性与相平衡物质之间的关系。

在理论上，由相平衡关系能得到煤灰完全成为液体时的最低温度（液化温度）、煤灰完全为固体时的最高温度（固化温度），以及在中间温度时的固相和液相的组成。Kalmanovitch 等人最先提出基于 $\text{CaO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 四元相图的预测燃煤锅炉炉膛结渣倾向的方法。他们将灰分圆整成这四种氧化物物系，并标绘在相应的相图上，根据液相温度和完全凝固前的结晶过程的特征来预测结渣倾向。经与燃用灰特性差异较大煤种的六台电站锅炉的现场经验比较，此项预测方法已获得确证。

Huggins 等人就煤灰熔融温度对相平衡性质的依赖关系进行了研究，发现煤灰熔融温度与相平衡性质有良好的相关性。

李帆等人采用重庆中梁山煤灰也对煤灰熔融温度与 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 和 $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 三元相图的关系进行了研究，结果表明在高温下混合灰样的矿物组成与三元系统相图的矿物组成基本一致。学者 Vincent 采用新西兰煤灰，也对煤灰熔融温度与三元相图的关系进行了研究，结果表明根据煤灰在三元相图中的组成点可以推测其熔融温度。所谓的三元相图是指以碱性氧化物、酸性助熔氧化物和酸性非助熔氧化物为定点的正三角形相图。

Jak 等人采用 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO-FeO-Fe}_2\text{O}_3$ 五元系统预测 IGCC 煤汽化系统中的结渣状况。通过该五元系统计算得到液相温度下渣系中固相比例，为 IGCC 系统的设计和安全运行提供了有益的指导。

刘迎晖等人采用 $\text{CaO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ 五元物系的相图计算方法来预测煤灰的熔融特性及在软化温度下的矿物质组成。五元系统相图计算不仅可以预测灰熔点、相变趋势，而且它可定量预测灰渣中的晶体相和熔融相组成，因而有助于更深入完整地了解煤燃烧时矿物质的物理变化。结果表明煤灰中随着 CaO 添加量的增大，灰熔点先降低后上升，并存在一个最小值，这是由于低温共熔物形成引起的，预测结果与 X 射线衍射实验结果进行比较，有相同的趋势。

(8) 熔点与煤灰含量的关系。

灰熔点与煤灰成分灰分的关系见图 2-4，可见随着煤种的不同，约在灰分为 10%~25% 的范围灰的熔点出现最低，即煤的灰分特别高或特别低时其结渣趋势较中等灰分的煤要弱^[5,12]。



(9) 煤灰的周围的气氛。

煤灰在弱还原性气氛下熔融性较氧化性气氛下低，其原因是灰中的铁与硅、铝的氧化物形成了低熔点的硅酸盐、铝酸盐。从表 2-4 也可以看出不同气氛对煤灰熔点的影响。

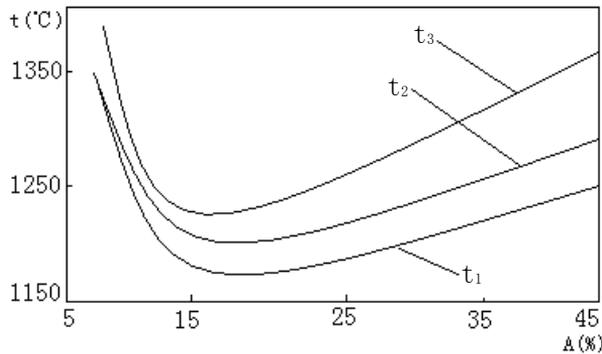


图 2-4 熔点与煤灰之间的关系

表 2-4 煤灰熔融温度与气氛的关系^[5,12]

灰样	氧化性气氛			弱还原性气氛			温度影响差值		
	t ₁	t ₂	t ₃	t ₁	t ₂	t ₃	Δt ₁	Δt ₂	Δt ₃
a	1250	1365	1390	1070	1135	1280	180	230	110
b	1385	>1580	>1580	1325	>1580	>1580	60	-	-
c	1380	>1580	>1580	1260	1580	>1580	120	-	-
d	1280	1410	1430	1115	1250	1310	165	160	120
e	1330	1580	>1580	1250	1550	1585	80	30	-
f	1250	1380	1410	1115	1250	1315	135	130	95

注：R 下标代表还原气氛，o 下标代表氧化性气氛，

$$\Delta t_1 = t_{o1} - t_{R1}, \quad \Delta t_2 = t_{o2} - t_{R2}, \quad \Delta t_3 = t_{o3} - t_{R3}$$

3. 煤灰成分与熔融温度间的研究方法

国内外许多学者经过大量的研究，提出了许多基于灰成分来预测灰熔点的方法：姚星一和王文森等人根据我国煤的特点，提出了双温度坐标法计算灰熔点；Winegarter 和 Rhodes 等人利用大量的美国煤样分析数据，通过回归分析得到预测灰熔点的不同方程式；陈文敏等人曾利用多元线性回归的分析方法对煤灰成分和煤灰熔融特性的关系进行了分析，按不同的煤灰组成成分，推导出计算不同煤灰的熔融性 ST 和 FT 的多元回归式普遍具有较高的精度；张德祥等人通过对煤灰中



矿物的化学组成与灰熔融性关系的研究, 得出 FT 回归公式计算, 煤灰熔融特征温度计算值与实测值之差小于国家标准规定的误差值 (再现性 $\leq 80^{\circ}\text{C}$); Gray 等人研究了新西兰煤灰的组成和灰熔点的关系; 平户端惠和二宫善彦等人根据煤灰中主要化学成分 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 和 CaO 与灰熔点的关系, 建立了能较准确预测煤灰熔点的多元回归方程。

文献^[27,73,105]用模糊数学方法对电站锅炉结渣特性作出判断, 考虑了燃料特性、气氛 (过量空气系数、还原性气体氛围)、燃烧温度、实际切圆直径等因素对结渣特性的影响, 预报煤灰在受热面上的结渣的准确性比单一的判别指标要高。

兰泽全等人在模糊数学原理基础上, 采用模式识别方法, 尝试性地提出将综合指数 R 与四个常规结渣指标 (软化温度 t_2 、硅比 G、硅铝比 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和碱酸比 B/A) 一起构成评判因素集。并通过沾污特性分析和粘聚特性试验及与同一模型的模糊综合评判对照, 结果表明该新模型较以前的四因素法具有更高的准确性, 从而保证了判别结果的可靠性。同时也证明了实验室煤灰明显有别于现场锅炉煤灰。

伍昌鸿和马晓茜等人采用径向神经网络分析煤灰成分与 ST 的关系。说明了: 对混煤煤灰软化温度与掺混比的非线性关系, 决定了目前采用的取单煤煤灰软化温度的加权平均值得出的线性回归公式计算的 ST 精度不高; 对 ST 非线性预测模型, 通常是利用人工神经网络映射出的。

石喜光等人采用广义神经网络建立了煤灰软化温度的模型, 并利用遗传算法的对煤灰熔点的计算进行优化。考虑固态和液态排渣锅炉对煤灰熔点的不同要求, 采用广义回归神经网络建立了煤灰软化温度模型。神经网络的输入为 7 种组分的质量分数, 以煤灰软化温度作为目标函数, 采用遗传算法寻优计算获得当煤灰软化温度最高和最低时煤灰中氧化物的组成。优化结果表明, 掺烧高钙煤或者向燃煤中添加石灰石等富含钙的原料可以降低煤灰熔点; 而增加 Al_2O_3 的质量分数可以提高煤灰熔点。

4. 灰熔点的测量方法

目前, 我国测定煤灰的熔融性的试验标准采用三角锥法。该方法要点是将煤灰制成一定尺寸的三角锥体, 在一定的介质中, 以规定的升温速度加热, 观察锥体受热过程中的形态变化, 测出三个熔融特性温度。

该测定的具体方法是:

(1) 将煤灰制成三角锥体, 为高 20mm, 底边长 7mm 的正三角形, 锥体的一个棱面垂直于底面。



(2) 气氛为三种：一种为弱还原性气氛，即炉内封入石墨或通入 $50\% \pm 10\% \text{H}_2$ 和 $50\% \pm 10\% \text{CO}_2$ 的混合气体；另一种为氧化性气氛，即炉内不放入任何含碳物质，并让空气自由流通；还有一种为强还原性气氛，即炉内通入 $100\% \text{H}_2$ 或 CO ，也可封入大量碳质材料，如石墨、焦炭。当灰锥尖端开始变圆或弯曲时，此时的温度称为变形温度 (t_1)；当灰锥弯曲至锥尖端触及托板，椎体变成球体和高度等于或小于底边长的半球体，此时的温度称为软化温度 (t_2)；当灰锥熔化成液体或展开成高度在 1.5mm 以下的薄层，此时的温度称为流动温度 (t_3)。

美国使用的煤灰特性的标准为 ASTM，其煤灰式样形状也是角锥体，高 19.1mm ，底为边长 6.4mm 的正三角形。它规定在两种气氛下测定熔融特性，即还原气氛 ($60\% \text{CO} + 40\% \text{CO}_2$)；氧化气氛为空气，并对从软化到流动点的流变形态规定为：初始变形温度，规定为灰锥尖刚刚变圆的温度，这与我国规定的方法相同；软化温度为灰锥熔成球形块，其高与底相等时的温度；半球温度为灰锥熔成半球形块，其高与底的一半相等时的温度；流动温度为熔体展成薄层，熔体层最高点高度不超过 1.59mm ($1/16\text{ft}$) 时的温度。目前，我国很多电厂也同时使用 ASTM 作为参考。

5. 用温度判断结渣的界值

在还原性气氛下用 t_1 来作为界值为：

$t_1 > 1289^\circ\text{C}$ 时，为不结渣；

$t_1 = 1108 \sim 1288^\circ\text{C}$ 时，为中等结渣；

$t_1 < 1107^\circ\text{C}$ 时，为严重结渣。

在弱还原性气氛下用软化温度 t_2 来作为煤结渣的判断指标，其判断界值为：

$t_2 > 1390^\circ\text{C}$ 时，为轻微结渣；

$t_2 = 1260 \sim 1390^\circ\text{C}$ 时，为中等结渣；

$t_2 < 1260^\circ\text{C}$ 时，为严重结渣。

据哈尔滨成套设备所对我国 250 个动力用煤的统计，该判断具有 65% 的分辨率。

6. 分析

(1) 煤灰的三温度（变形软化、熔化温度、流动温度）的测量在不同气氛下是不一样的。同时，锅炉运行时的结渣状况与炉内温度水平有关，煤灰软化温度 t_2 只表示了煤本身的结渣倾向，并不能反映炉内环境温度水平的影响，燃煤的低位发热量 Q_{dw} 大体上能反映出炉内温度水平。为此，西安热工所对锅炉结渣状况进行调查后得出经验判据为：

$t_2 > 1350^\circ\text{C}$ ，同时 $Q_{\text{dw}}^{\text{y}} = 8.5 \sim 27 \text{ (MJ/kg)}$ ，为不结渣；



$t_2 < 1350^\circ\text{C}$, 同时 $Q_{dw}^y > 12.6$ (MJ/kg), 为结渣。

(2) 美国 ASME 标准还用灰渣液化温度 FT 与变形温度 DT 的差值来衡量灰渣在水冷壁上的附着力, 当 $FT - DT < 149^\circ\text{C}$ 时, 水冷壁结渣附着力较强, 不易用吹灰器清除掉, 吹灰效果差, $FT - DT > 149^\circ\text{C}$ 时, 水冷壁结的渣呈疏松状, 易于用吹灰器清除掉, 吹灰效果好。

(3) 由灰熔融特性决定的结渣指数 R_T (熔点结渣指数)。

用高温热显微镜在不同气氛下测得的灰熔点值, 并用下面公式进行计算:

$$R_T = (\text{STH}(\text{最大值}) + 4DT(\text{最小值})) / 5 \quad (2-9)$$

其中 STH (最大值) 分别为氧化性和还原性气氛下测得的较高的半球温度, DT (最小值) 分别为氧化性和还原性气氛下测得的较低的初始变形温度。按 ASME 标准, 灰样品半球温度等于半球底宽一半时的温度。其判断界值为:

$R_T < 1149^\circ\text{C}$, 为严重结渣;

$R_T = 1149 \sim 1343^\circ\text{C}$, 为中等结渣;

$R_T > 43^\circ\text{C}$, 为不结渣。

由于煤灰的熔化温度在氧化性气氛和还原性气氛不同, 所以 ASME 标准在两种气氛下测试是值得借鉴的。

(4) 由灰渣电阻突变时的温度 T_R 来预测。

我们知道, 任何物质其固态与其液态时的电阻是完全不一样的, 煤灰颗粒也是一样, 因为煤灰熔点低时煤灰颗粒为固体状态, 灰的电阻高, 电阻与温度的关系可用下式表示:

$$\log R = K/T \quad (2-10)$$

(2-10) 式中, R 为煤灰电阻 (Ω), K 为特性常数, T 为绝对温度 (K)。

当煤灰中没有出现液相时 $\log R$ 与 K/T 呈直线关系, 温度进一步升高, 灰大部分熔化, 灰样内部出现导电离子, 煤灰的电阻有一个突然的下降, 西安热工所就是利用此原理通过测量灰渣突变电阻时的温度来预测煤的结渣倾向。

利用灰渣电阻突变温度 T_R 预测煤的结渣特性的方法简单, 误差较小, 操作容易, 是一个值得研究的新方法。

2.2.2 灰渣粘温特性评判煤质结渣倾向

1. 机理

当煤灰颗粒碰撞到炉壁时, 如果其粘度较大, 那么它就不易离开壁面, 甚至很难清除, 这就是锅炉的结渣, 煤灰的粘度和煤灰的熔点一样是影响锅炉结渣的重要因素, 而其粘度与熔点的联系非常紧密。



如图 2-5 是煤灰的降温粘度曲线，图中的 b 点是分界点，在温度降低过程中其粘度突然升高，bc 过程中灰是完全液体状态，称为真实液态熔渣，它是多种组分的复合体，从 b 点开始在降温的过程中有固相生成，形成复合晶体，同时逐渐有玻璃相生成，这种液固两相熔体称为塑性流体，b 点的粘度为临界粘度。

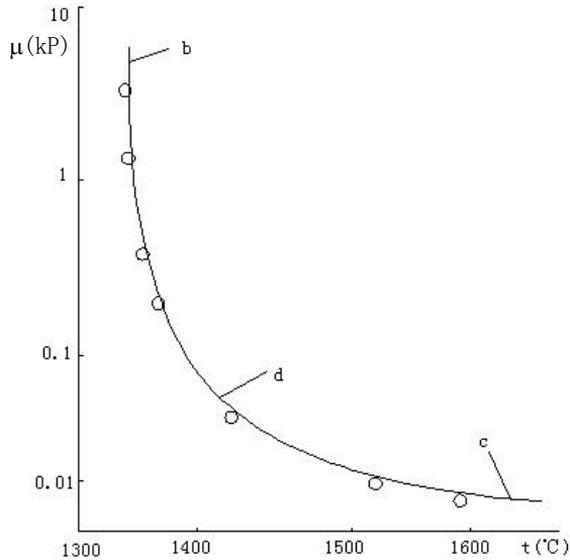


图 2-5 煤灰降温粘度曲线

2. 灰渣的粘温特性的类型

(1) 玻璃体渣，该渣不存在真实液态区和塑性液态区的分界点，它的灰熔点一般较低， $t_1=1100\sim 1250^\circ\text{C}$ ， $t_2=1200\sim 1400^\circ\text{C}$ ， $t_3=1250\sim 1450^\circ\text{C}$ ，在电站炉膛温度范围内，均可熔化为玻璃状熔渣，都有一定的结渣倾向。

(2) 结晶渣。该类熔渣的临界粘度点与准临固点（即将变为固体）几乎重合，塑性区域消失，灰熔点很高， $t_3\geq 1500^\circ\text{C}$ ，甚至 $t_1\geq 1500^\circ\text{C}$ ，在炉膛温度范围内，灰渣只有少部分组分熔融，大部分呈多孔玻璃体，粘结特性很差。

(3) 塑性渣。煤的灰渣大都属于这种类型的灰渣，这类渣塑性区域长，结晶析出和消融速度较慢，灰熔点一般较低，灰渣既可处于真实液又可处于塑性状态，由于灰渣滴和结渣层具有一定的液相湿表面，因此极易捕捉飞灰，故其结渣倾向一般较大^[5,15]。

3. 判断界值

(1) 利用高温粘度计，直接测量在不同温度下的灰渣的粘度，当渣的粘度小



于 1000P (注: 泊 $P=g/(cm \cdot s)$, 动力粘度即 $1N \cdot S/m^2=10P$) 时, 一般不易结渣, 当渣的粘度小于 1000P 时, 此时形成的液态渣其粘度较大, 易形成结渣, 当粘度小于 250P 时, 渣的流动性很好, 在水冷壁管子外形成很薄的渣层, 粘度 (500~1000P) 在塑性区, 结在水冷壁外的塑性态渣, 很难清除, 即在此区域粘度的渣对水冷壁的结渣程度最大^[14,15,16,74]。

(2) 由于直接测量渣的粘性往往较困难或不太准确, 为此, 目前大都采用 T_{250} 来作为判断煤结渣倾向的指标, T_{250} 为灰渣粘度在 250P 时所对应的温度, 其关系式为:

$$\log \mu = C + 107m / (T - 150)^2 \quad (2-11)$$

注: 该式中, μ 为灰渣的粘度 (P), 当 T_{250} 时, 作为 μ 取 250P。

$$m = 0.00835SiO_2 + 0.00601Al_2O_3 - 0.109$$

$$C = 0.0415SiO_2 + 0.0142Al_2O_3 + 0.0192MgO + 0.0276Fe_2O_3 + 0.016CaO - 3.92$$

各种物质的成分都是指其百分成分。

4. 用粘度型结渣指数 R_v 预测

$$R_v = (T_{250P}(\text{氧化}) - T_{1000P}(\text{还原})) / 97.5F_s$$

其中, $T_{250P}(\text{氧化})$ 为氧化性气氛下, 灰渣粘度为 250P 时的温度; $T_{1000P}(\text{还原})$ 为还原性气氛下灰渣粘度为 1000P 时的温度; F_s 为温度修正系数。

按此指标结渣判断界限为:

$R_v < 0.5$ 时, 为弱结渣;

$R_v = 0.5 \sim 0.99$ 时, 为中等结渣;

$R_v = 1.0 \sim 1.99$ 时, 为强结渣;

$R_v > 2.0$ 时, 为严重结渣。

5. 讨论分析

虽然利用灰渣判断结渣是一个较好的判断方法, 但在实际应用时要注意炉内壁面的气氛, 因为气氛对灰的粘度会发生非常大的变化。对某一煤灰实验研究显示, 在氧化性气氛下, 当温度在 1260 °C 时, 其粘度超过 15000P, 而在还原性气氛下, 在相同的温度时粘度下降到 100P^[5]。这种煤当炉内过量空气系数较小, 煤粉颗粒冲墙或煤灰细度不够, 极易发生结渣。

另外, 现场经常使用“长渣”、“短渣”的概念。通常将灰渣粘度随着温度的降低而缓慢增加, 即在相对宽的温度范围内, 灰渣粘度逐渐增加称为长渣; 在塑性流动下, 灰渣的粘度随着温度的降低而急剧降低称为短渣。利用此方法判断渣型虽然粗糙但方法简单明了, 可作为判断结渣的基本定性的手段, 然后再利用其他手段进行进一步更精确的分析判断。



2.2.3 用煤灰的烧结强度预测

1. 结渣机理

锅炉受热面灰的沉积通常是在低于灰的熔点下进行，而灰的沉积又是引发受热面结渣的重要因素，因为灰沉积造成壁温升高，所以，受热面积灰的清除是防止结渣的重要措施之一，而积灰的清除与烧结强度又有很大关系，同时利用烧结强度来判断受热面污染结渣较简单。

飞灰的烧结强度越大，玷污越严重，如图 2-6 表明在灰的熔化温度下烧结温度越高，烧结强度迅速增加。从图 2-7 可以看出，烧结时间越长，烧结强度迅速增加^[5,16]。由此可见：锅炉内最易结渣的区域是高烟温、高壁温且长期不吹灰的区域，因为此处的结渣不仅牢固而且不易清除。

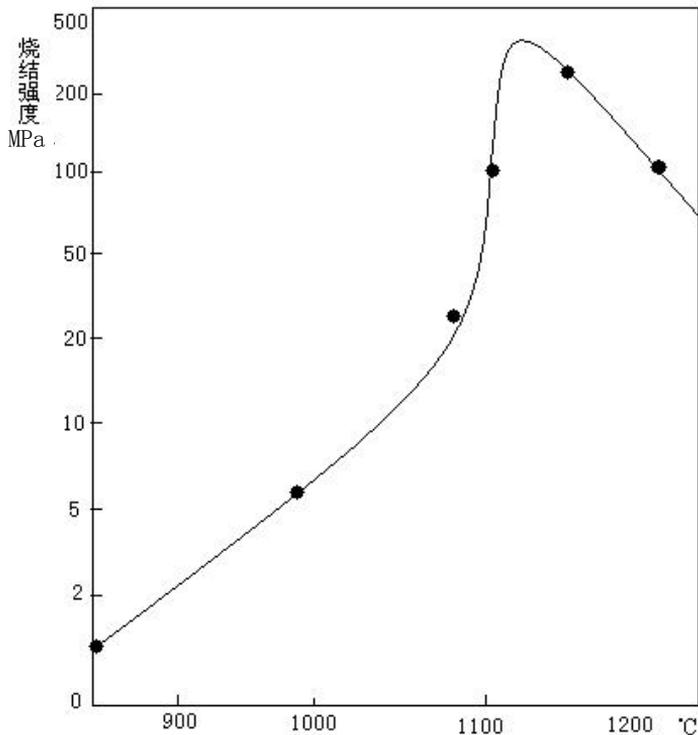


图 2-6 飞灰烧结强度与温度的关系

2. 结渣判断界值

美国 Barnhat Williarms 公司对美国东部煤的灰样在 927°C 下进行烧结实验，用烧结强度 σ_{bc} 来判断炉内结渣的倾向的界值为：



- $\sigma_{bc} < 6.89$ (MPa), 为轻度结渣;
- $\sigma_{bc} = 6.89 \sim 34.47$ (MPa), 为中等结渣;
- $\sigma_{bc} > 34.48 \sim 110.3$ (MPa), 为严重结渣。

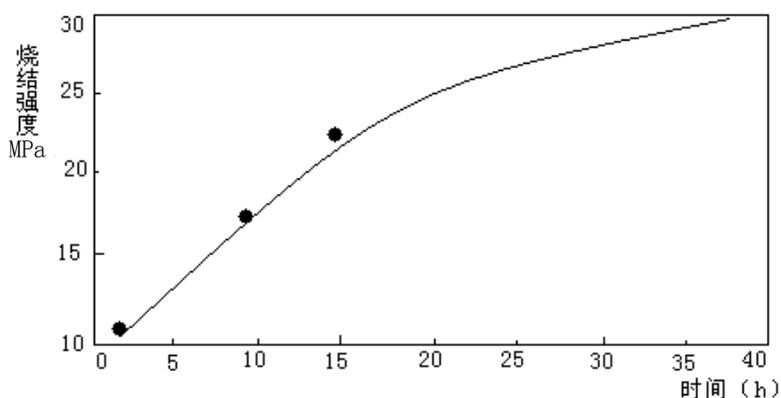


图 2-7 烧结强度随时间的变化

2.2.4 类试烧判断法

要判断煤在炉内的结渣情况，其实，如能模拟出炉内的燃烧工况进行试烧，就能较准确地进行判断结渣状况。比如将类似于水冰壁的管子插入实际炉内，管内用水冷却，来观察其表面的灰渣积聚过程、灰渣积聚的状态、灰渣自行脱落的难易与周期，这样便能预测煤的结渣情况。但这种方法做起来时间长，规模大，实验费用高。

为了克服上述试烧的缺点，用类试烧的方法进行判断结渣。该方法用炭化棒直接插入一定温度一维煤粉火焰中停留一定的时间，然后取出炭化棒，用刀切刮棒上的灰渣，按灰渣粘聚的紧密程度进行对比得出结渣倾向预测。

根据渣型特征按灰渣粘聚的紧密程度由弱到强可将灰渣划分为附着灰、微粘聚渣、弱粘聚渣、粘聚渣、强粘聚渣、粘熔渣及熔融渣七个等级。各种渣型的特点如表 2-5 所示。

表 2-5 按渣型特征划分的几种渣型的特征^[5,76]

渣型	等级代号	灰渣特征
附着灰	g	无粘紧特征，灰粒呈松散堆积状
微粘聚渣	f	外形上已有灰粒间粘聚的特征，容易切刮，切刮下的灰大部分呈疏松块状



续表

渣型	等级代号	灰渣特征
弱凝聚渣	e	灰渣粘聚特征增强，切刮仍较容易，切下渣块具有一定的硬度
凝聚渣	d	灰渣粘聚在一起，较硬，切刮困难，但仍能从渣棒上切刮下来
强粘聚渣	c	粘聚灰渣更硬，无法从渣棒上完全刮下，渣棒残留不规则的粘聚硬渣
粘熔渣	b	灰渣由熔融与半熔融渣聚起来，已无法切刮
熔融渣	a	灰渣呈完全熔融状，渣棒被流渣覆盖，并有渣泡形成

根据表 2-5 的渣型特点，属于 a 级煤灰的渣为严重结渣；b 级为高强度结渣；c、d 级为中等结渣；e、f、g 级为低结渣。

此方法判断结渣方便简单并易于现场使用。

2.2.5 根据焦渣比预测

哈尔滨工业大学的张小杰等人提出用煤的焦渣比（即煤燃烧后的炉焦重量与灰渣重量的比）预测结渣情况，利用一维热态试验台进行褐煤和混煤的结渣试验，冷却后将炉壁上的焦打下称重，与炉底收集的灰渣的重量相比，得到的值为焦渣比，根据焦渣比判断煤的结渣倾向，提出焦渣比大于 1.0 时为严重结渣煤^[44]，不论这个判断结渣的界值是否合适，但该方法确是一种判断煤结渣的新方法。同时，该方法在进一步研究混煤的结渣问题时还得出如下结论：两种结渣倾向都不强的煤进行混合燃烧，在某比例时混煤结渣性有可能比它们任何一种煤的结渣性都强，这为研究混煤的最佳掺烧配比提供了定量研究依据。

2.3 非常规判断方法

2.3.1 根据煤中的铁含量判断结渣

1. 问题的提出

前面分析煤结渣的常规判断方法时都隐含着这样的假设：煤中的矿物质均匀分布于每一煤粒中，且煤灰成分与渣层化学成分完全相同。事实上，就有机物与无机物成分而言，煤是不均匀物质。煤粉制备工程技术人员在煤的洗选过程中正是利用这一知识，即利用密度差或表面特性把煤从煤的废料或高灰分中分离出来。



煤粉制备工程中煤磨得越细，则无机物的析出能力亦越大。如图 2-8 可以看出煤块通过研磨加剧了煤与其他矿物质的分离，结果每一颗粒的物质组成不代表原煤的平均组成。

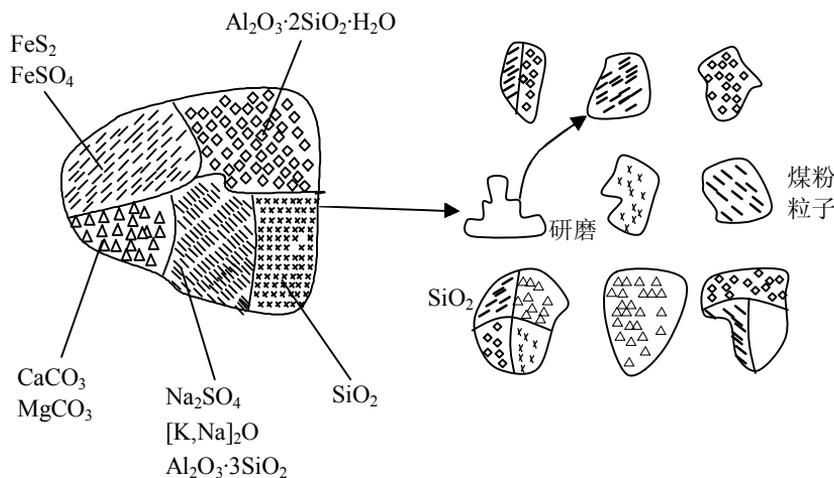


图 2-8 煤块破碎过程中矿物质偏析示意图

研究表明，磨煤能增大无机物颗粒的析出能力。40%~70%的煤粉颗粒是纯煤（只含有固有矿物质），20%~40%的颗粒是煤和矿物质（外来的和固有的矿物质）的夹杂物，10%~40%的颗粒是纯矿物质（只含外来矿物质）。比较磨煤后的煤粉颗粒的成分可以看出这些颗粒之间成分的差别很大。因为这些颗粒是处于悬浮燃烧的情况下，某一给定颗粒矿物质的特性将仅仅取决于那一颗粒的组成，当然还受到周围气氛的影响。每一颗粒将根据本身成分及周围气体的反应达到某一物理状态（粘性、烧结性、熔融性等），而不受其他处于悬浮状态下燃烧颗粒的物理状态与组成的影响。这些颗粒中，某些矿物质成分在燃烧过程中会发生选择性沉积。已知具有选择性倾向的矿物质主要是黄铁矿（ FeS_2 ），通常炉内渣样 Fe_2O_3 含量远高于原煤灰 Fe_2O_3 的含量，见表 2-6。

表 2-6 铁组成的选择性沉积^[5]

灰成分	原煤灰 (%)	水冷壁渣样 (%)
SiO_2	47.0	33.3
Al_2O_3	26.7	18.0
Fe_2O_3	14.6	43.5



续表

灰成分	原煤灰 (%)	水冷壁渣样 (%)
CaO	2.2	1.2
MgO	0.7	0.5
Na ₂ O	0.4	0.2
K ₂ O	2.3	1.6
TiO ₂	1.3	0.8

煤中铁含量是评价炉膛结渣程度的重要因素之一。用 Fe₂O₃ 含量来评价结渣倾向虽然有一定的参考价值，但往往会造成误判，原因在于该指标没有考虑铁在煤中的存在状态和分布情况。铁在煤中以黄铁矿 (FeS₂)、菱铁矿 (FeCO₃) 和铁白云石 (CaCO₃ · MgCO₃ · FeCO₃) 等形式出现。因此，能测量出煤中的黄铁矿 (FeS₂) 的含量对于判断煤的结渣情况是非常重要的。

2. 重力筛分法

(1) 煤中铁的各矿物质的特性。

煤中主要含铁矿物质的熔点和密度各不相同，如表 2-7 所示。

表 2-7 煤中主要含铁矿物质的熔点和密度^[69]

含铁矿物	主要成分的分子式	密度 (kg/m ³)	熔 (°C)
黄铁矿	FeS ₂	5000	802*
白铁矿	FeS ₂	4870	827*
菱铁矿	FeCO ₃	3830	527*
铁白云石	CaCO ₃ · MgCO ₃ · FeCO ₃	—	727*
磁黄铁矿	FeS _x	4600	1027
赤铁矿	Fe ₂ O ₃	5200	1567
磁铁矿	Fe ₃ O ₄	5140	1592
褐铁矿	Fe ₂ O ₃ · H ₂ O	4300	402**

注：*为分解温度，**为失水温度。

含铁矿物中比重较大的黄铁矿 (FeS₂) 常以纯矿物质颗粒存在于高比重煤组分中，而菱铁矿 FeCO₃ 则倾向于弥散在整个煤的机体中，研磨后不表现出富集。在燃烧过程中，FeS₂ 易形成 FeS_x 熔融液球体，它阻力小，比重大，很容易穿过烟气流到达水冷壁面，并与其他沉积物反应成低熔点化合物 (如铁橄榄石 2FeO · SiO₂，铁铝晶石 FeO · Al₂O₃) 促使受热面结渣。菱铁矿在燃烧过程中分解放出



CO₂，自身形成空心球体（煤胞），比重轻，可随烟气流流动，因而对结渣影响不大。由此可见，偏析 FeS₂ 是引起结渣，特别是形成初始沉积层的根本原因之一。

(2) 重力分析的步骤。

研究表明：重组分（即密度较大的组分）煤粉中富集 FeS₂，其含量通常占重组分煤粉含矿物质总量的 60% 以上。

重力筛分就是考虑到各煤粉之间的重度差别，用不同重度的有机溶剂（如 CHBr₃）分别将重度煤粉分离出来，并研究其矿物质的含量及分布特性^[17]。筛分步骤如图 2-9 所示。

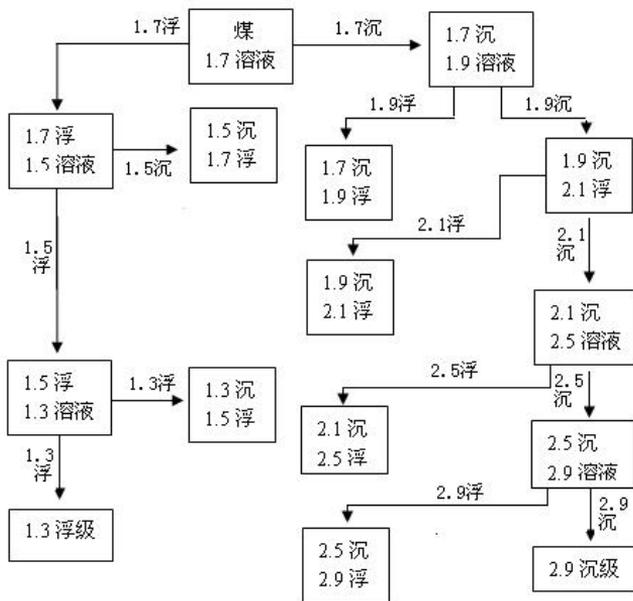


图 2-9 重力分离程序

(3) 应用重力筛分法评价煤的结渣。

国内大都以比重 $\rho > 2.50$ 组成的偏析铁含量（即 $\rho > 2.50$ 组分中 Fe₂O₃ 含量占所有筛分组分 Fe₂O₃ 含量的百分数）来评价结渣特性，国外多采用 $\rho > 2.90$ 组分的铁偏析含量作为评判指标。重组分偏析铁份额越大，说明以纯 FeS₂ 颗粒存在的数量越大，结渣倾向也就越严重。

表 2-8 为两个煤种的重力筛分结果。从灰熔点看，A、B 两种煤结渣性相近；从煤灰 Fe₂O₃ 含量来看，A 煤结渣性高于 B 煤；而从 $\rho > 2.50$ 偏析铁含量来看，B 煤结渣性远高于 A 煤，这与 CE 型煤粉炉烧 B 煤比烧 A 煤更易结渣的运行经验相符。



表 2-8 重力筛分法判断结渣特性^[17]

煤种结渣特性	A	B
变形温度 IT (°C)	1138	1165
软化温度 ST (°C)	1171	1188
半球温度 HT (°C)	1188	1210
流动温度 FT (°C)	1260	1265
煤灰 Fe ₂ O ₃ 含量 (%)	15.5	8.9
$\rho > 2.90$	12	70

美国 CE 公司采用重力筛分偏析铁含量指标来判断结渣倾向，结渣特性的基本分类界限为：

在比重为 2.9 的液体中，Fe₂O₃ 的百分含量小于 40.5 时，为轻微结渣；

Fe₂O₃ 的百分含量在 40.5~51.5 时，为中等结渣；

Fe₂O₃ 的百分含量在 51.5~68 时，为强结渣；

Fe₂O₃ 的百分含量大于 68 时，为严重结渣^[17,18]。

通过对已有文献报道的重力筛分结果与燃煤锅炉实际结渣情况相对照后，我们发现：美国 CE 公司偏析 Fe₂O₃ 含量指标应用于我国煤种结渣判别时分级界限偏宽松。以义马煤烟煤为例，该煤属于严重结渣煤，而按 CE 公司偏析铁指标评判则义马煤属于轻微结渣煤，这显然与实际情况不符。作者认为：这可能与煤粉的细度及筛分所用的有机溶剂有关，为此在表 2-9 的基础上，对我国煤种适当地将 CE 公司偏析铁分级界限作一定修改，如表 2-10 所示。当然这样划分是否合适，有待于在实际中进一步验证。

表 2-9 几种煤的重力筛分值与结渣情况^[17]

煤种	$\rho > 2.50$ 时铁的偏析 (%)	实际结渣情况
美国烟煤 A	16.68	轻微
美国烟煤 B	72.46	严重
焦作无烟煤 1	45.49	中等
焦作无烟煤 2	24.27	中等偏轻
大同烟煤	69.93	严重
铁法烟煤	2.65	轻微
曲仁混煤	13.12 ($\rho > 2.1$)	严重
新汶混煤	30.57 ($\rho > 2.1$)	严重



续表

煤种	$\rho > 2.50$ 时铁的偏析 (%)	实际结渣情况
扎贻诺尔褐煤	41.05	严重
义马烟煤	31.76	严重
韶关贫煤	≈ 0	轻微

表 2-10 重力筛分法结渣评判界值 ($\rho > 2.50$ 时)

结渣判断	<20	20~50	>50
结渣结果判断	轻微结渣	中等结渣	严重结渣

3. 磁力分析法

由于铁矿石一般为 FeS_2 和 FeS 的混合物，具有磁性，而煤中另一常见含铁化合物 FeCO_3 是没有磁性的，因此，可以利用磁力分析方法测定煤中具有磁性黄铁矿的含量，从而判断煤的结渣情况。

在进行磁力分析时，基本步骤为：首先根据国家标准进行采样缩分，作为分析试样保存；其次将煤用磨煤机磨碎成 120~400 目的颗粒进行称重；然后将煤粉颗粒放进磁感应 $B=400$ 高斯的磁力分析设备中转动 5 分钟；最后将颗粒取出再称重，两次重量之差即为吸附于桶壁上的重量，可计算出煤的磁力吸附百分比。表 2-11 是几种煤的磁力分析结果。

表 2-11 煤粉在 $B=400$ 时的磁力分析结果^[18]

煤种	磁力吸附百分比 C (%)	实际结渣情况
黄陵煤	0.025	中等
红兴隆无烟煤	0.004	轻微
红兴隆烟煤	0.007	轻微
芙蓉煤	0.035	严重
大同煤	0.040	严重
韶关煤	0.007	轻微
金竹山煤	0.011	轻微
肥田煤	0.005	轻微
阳沁煤	0.022	中等
织金煤	0.008	轻微



根据表 2-11 可以得到根据煤的磁力分析法预测结渣的界限值 C (磁力吸附百分比) 为:

$C > 0.03$ 时, 为严重结渣;

$C = 0.02 \sim 0.03$ 时, 为中等结渣;

$C < 0.02$ 时, 为轻微结渣。

4. 讨论

根据煤中的铁矿物质 (主要是 FeS_2) 的含量来预测结渣, 比单一常规结渣指标有更高的分辨率, 且已在工业实践中得到应用。铁矿物质含量的测定是通过重力偏析和磁力分析方法, 这两种方法都不复杂, 现场易于实现。

作者认为, 根据煤中的铁含量预测结渣仍有不足之处:

(1) 这两种方法只能适用于判断由含铁矿物质 (主要是 FeS_2) 引起的结渣, 对于不是由该类矿物质引起的结渣则不能用此法预测。

(2) 实际运行锅炉内结渣的影响因素很多, 该方法只能预测煤本身的结渣倾向。

(3) 无论是重力偏析还是磁力分析都与煤粉细度有关, 煤粉的细度不同其分析结果就不同, 然而目前对这两种判断方法中的煤粉细度尚无统一的规范可循。

(4) 在重力偏析的计算中未区分 Fe_2O_3 的来源, 而是认为其均系由 FeS_2 转化而来, 这显然与事实情况不符, 从这一点来看, 磁力分析较重力偏析更符合实际。

(5) 磁力分析法预测结渣的界值仅仅是通过部分煤种统计的结果, 要得到更符合实际的结渣预测界值仍有待进一步研究完善。

2.3.2 相图法

1. 相图法判断原理

本章已讨论了煤灰组分对结渣的影响, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 SO_2 、 FeO 对煤结渣都有不同程度的影响, 而且他们对结渣的影响是共同的。因此, 可用浓度三角形的形式即三元相图, 来表示对结渣的影响, 等边三角形三顶点分别表示三个组分, 用三元相图来预测结渣时, 当不同的研究者选择用不同的成分作为三角形的顶点时, 就得到不同的三元相图。目前三元相图主要有如下形式:

(1) Zinzen 相图 (三个顶点的成分为: $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$, $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SO}_2 + \text{Rest}$);

(2) Scheier 相图 (三个顶点的成分为: SiO_2 , FeO , Al_2O_3);

(3) Rankin 相图 (三个顶点的成分为: SiO_2 , Al_2O_3 , CaO);

(4) Altman 相图 (三个顶点的成分为: Al_2O_3 , Fe_2O_3 , $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SO}_2$)。



下面以 Altman 相图^[5]为例来说明相图判断结渣的原理，如图 2-10。

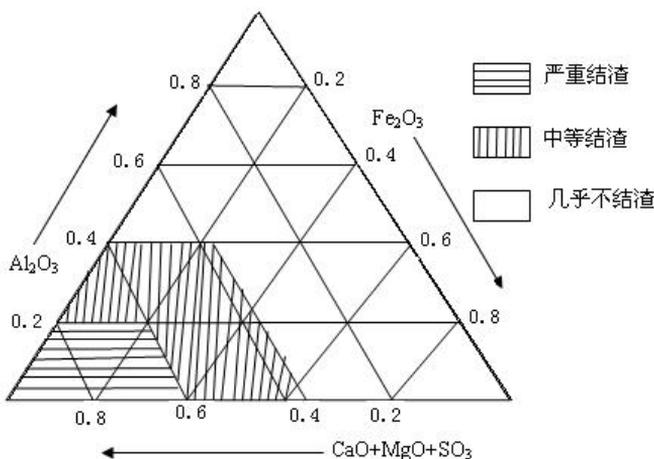


图 2-10 Altman 三元相图

同三元相图一样，将煤灰中的 CaO 、 FeO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 四种成分的复合物作为引起煤结渣的主导因素。研究表明：当熔渣 Fe_2O_3 的含量在 4.4%~28% 范围内，按 $\text{CaO-FeO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 四元相图预测的物相与实测渣层物相之间的相关性极好^[5,17]。相图法是以初始结晶相的液化温度以及完全凝固前的结晶过程来预测结渣倾向的。

资料显示，低于 800°C 时煤灰中矿物质主要是发生高岭石失水偏转成偏高岭石、白云石、方解石的分解反应等，矿物质之间基本没有反应。因此，可以将煤灰成分作为物质的起始反应点，对两种煤的配煤来说，它的煤灰组成点应该在位于两种单煤煤灰组成点之间，也即配煤与单煤的主要煤灰成分按照线性关系来处理，这样就可以利用 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ 三元图对配煤煤灰熔点特性进行预测，即可以利用三元相图对掺配煤进行筛选，并对配煤效果进行预测。

2. 分析

相图法存在的主要缺点是：

一是灰成分取自煤灰分析的结果，忽略了炉内选择性沉积现象的存在；

二是评判过程中在选择成分时存在着一定的主观因素，无论哪一种相图都是选择结渣因素的一部分煤灰成分，因此不同的相图会产生不同的结果。

尽管相图法还有不完善的地方，但资料显示运用相图法一旦判断合理，其结果与锅炉实际结渣情况能较好地吻合^[17]，而且，该方法直观明了，根据其煤灰的成分在相图中的位置就可知道其煤的结渣状况。



2.3.3 热显微镜法

研究煤的结渣，如果对于煤粉颗粒在整个加热燃烧过程中，从着火到燃尽，灰渣从变形到流动的形态变化的特性有一个清楚的了解是极其重要的，然而煤粉在炉内的燃烧是极其迅速的，我们只能通过实验室用热显微镜来详细观察和拍摄煤的整个燃烧过程和煤灰形态的变化。众多的实验发现，低熔点、高热值的煤在燃烧过程中，煤中矿物质被燃烧释放的能量所熔化，形成矿物质釉，这种矿物质釉遮盖了整个燃烧表面并且具有一定张力。根据 50 多个煤种在热显微镜下的观察统计结果，灰软化温度 t_2 低于 1350°C ，低位发热值 Q_{DW}^y 高于 13.4MJ/kg 的煤在燃烧过程中会生成釉质，这一结论与煤质结渣特性的调研结果基本吻合，见图 2-11。图中 A 线与坐标所包围的区域是结渣区，B 线与坐标所包围的区域是釉质区^[80]，可见用热显微镜观察燃烧试验来观测是否生成釉质，并由此来判断煤质的结渣特性是相当可靠的。

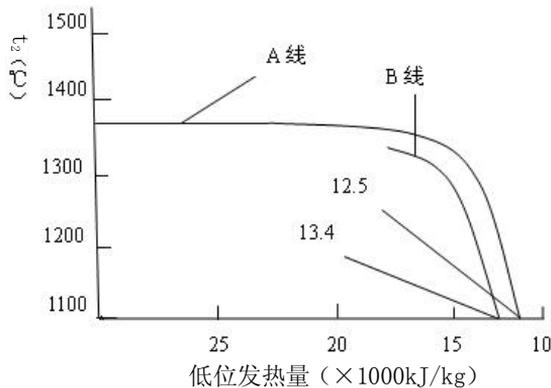


图 2-11 煤燃烧过程结渣区与釉质区的比较

煤质的结渣程度依赖于燃烧过程中生成釉质的大小，如果生成的釉质越大，釉质的曲率半径越大，其表面张力就越高，表面张力能量越大，结渣程度就越高，即釉质与管壁的粘结力就越强。从统计的结果看：

严重结渣煤生存的釉质直径在 $1\sim 0.5\text{mm}$ 左右；

一般结渣煤的釉质直径在 0.5mm 以下^[5,17]。

利用热显微镜观察煤粉颗粒所产生的釉质大小，从而判断煤粉的结渣倾向非常直观，它是实验的结果，所以完全可作为判断煤结渣的定性依据，只是其直径的大小在观察时不同的观察者会产生一定的差距，且结渣的轻重程度难以定量描述。



2.4 小结

本章主要讨论了：

1. 煤的常规结渣判断指标

在煤的常规结渣判断指标中分别讨论了：按煤灰的各种成分含量来预测煤种的结渣倾向；按煤灰的物理特性来预测煤种的结渣倾向。

2. 煤的非常规结渣特性判断指标

分别介绍了：根据煤中的铁含量判断煤质结渣；用相图法判断煤质结渣；用热显微镜法判断煤质结渣。

上面所讨论的各种结渣判断指标，都是从某一个方面对煤质结渣倾向进行预测，每个单项指标的分辨率一般都比较低。为了提高预测结渣的准确性，需要彻底了解每一指标判断结渣的机理，同时对每一个指标的应用范围、每一指标的优缺点有一个清楚的认识，最后再对每一指标进行进一步完善。本章对这些正在使用的煤质结渣特性指标进行了充分的研究讨论，其目的是让工程技术人员在使用过程中参考借鉴。

为了提高预测煤结渣的准确率，更重要的是必须根据以上所讨论的各种单一指标进行综合考虑。因此，单一指标是综合预测煤质本身结渣特性以至达到防止锅炉结渣的基础。