

煤灰熔融性的影响因素及其调控

刘涛¹, 李新新¹, 王伟林², 武加峰¹, 梁鹏¹

(1. 山东科技大学 化学与环境工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 潞安矿业集团 技术中心, 山西 长治 046204)

摘要: 综述了煤灰熔融性的影响因素及国内外研究进展。从定性和定量两个方面对煤灰化学组成与煤灰熔融性的关系进行了概述。总结了煤灰中典型的耐熔矿物质和助熔矿物质, 并分析了其在受热过程中的演变规律。结合实例, 简述了配煤、添加助剂两种调控煤灰熔融性的方法; 揭示了反应气氛、压力对煤灰熔融性的影响。在分析讨论的基础上为气化、燃烧设备排渣工艺的优化以及煤种适用范围的扩大提出了建议。

关键词: 灰熔融性; 化学组成; 矿物质; 配煤; 添加剂

中图分类号: TQ536

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2014)04-0043-07

The Affecting Factors and Regulation of Ash Fusion Characteristics

Liu Tao¹, Li Xinxin¹, Wang Weilin², Wu Jiafeng¹, Liang Peng¹

(1. College of Chemical and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Technical Center, Lu'an Mining Group, Changzhi, Shanxi 046204, China)

Abstract: The affecting factors of ash fusion characteristics and its research progress at home and abroad were reviewed in this paper. The relationship between chemical composition and ash fusibility was outlined from both quantitative and qualitative perspective. Typical refractory minerals and fluxing minerals and their evolvement in heating process were also summarized. Moreover, two methods of regulation ash fusion temperature, coal blending and adding additive were given with concrete examples, and the effect of reaction atmosphere and pressure on ash fusibility was briefly described. Recommendation for the optimization of slagging and the expansion of coal type application range was made finally.

Key words: ash fusion characteristics; ash composition; mineral; coal blending; additive

作为煤炭利用的两种重要方式, 燃烧和气化约占煤炭消费总量的 75% 和 5%^[1]。煤在热转化过程中矿物质转变成灰分, 而煤灰的熔融特性是评价气化用煤和动力用煤的一项重要指标。一方面, 对于液态排渣的气流床气化炉, 为保证正常排渣以及气化效率, 操作温度必须大于煤灰熔融温度; 另一方面, 对于固态排渣的动力用煤锅炉, 为防止炉膛受热面结渣, 一般需有较高的灰熔融温度^[2-5]。鉴于煤灰成分的复杂性及设备排渣方式的多样性, 研究煤灰熔融温度的影响因素及调控机理是非常必要的, 对于优化设备排渣工艺及扩大适用煤种范围具有重要意义。

1 煤灰化学组成与熔融特性的关系

煤灰组成复杂, 国内外学者通常用 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , Na_2O , K_2O , SO_3 和 P_2O_5 等 10

收稿日期: 2014-01-26

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2013M541940)

作者简介: 刘涛(1988—), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事能源环境方面的研究. E-mail: ltao_08@126.com

梁鹏(1976—), 男, 山西长治人, 副教授, 博士, 主要从事能源环境方面的研究, 本文通信作者.

E-mail: liangpeng202@hotmail.com

种氧化物的形式表示,而进行灰熔融特性研究时通常仅考虑前 8 种^[6]。煤灰化学组成与灰熔融性的关系可以从定性和定量两个角度分析。

1.1 定性关系

根据 Vorres 等^[7]离子势的观点,8 种氧化物可大致分为两大类:一类是阳离子势较高的酸性氧化物($\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{TiO}_2$),主要作用是提高灰熔融温度;另一类是阳离子势较低的碱性氧化物($\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{CaO}, \text{MgO}, \text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}$),可降低灰熔融温度。其中,各氧化物对灰熔融特性的作用大小顺序如下:酸性氧化物为 $\text{TiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2$;碱性氧化物为 $\text{CaO}, \text{MgO}, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Na}_2\text{O}$ ^[5,8-9]。

国内外学者常采用改变煤灰组成、人工配灰、数据统计等方法来定性分析煤灰成分对灰熔融温度的影响。刘勇晶等^[10]为扩大低灰熔点煤的适用范围,在煤灰中添加不同氧化物,研究不同氧化物对灰熔融温度的影响。而 Li 等^[11]通过水洗、酸洗、浮选的方法,得到碱性氧化物总含量不同的煤灰,发现灰熔融温度和碱性氧化物含量的变化有很好的对应关系。修洪雨等^[12]以 5 种氧化物进行了人工配灰,系统考察了 CaO 对其他 4 种成分熔融特性的影响。人工配灰虽然可以较好地反映煤灰成分对灰熔融温度的影响,但在熔化机理上人工配灰与真实煤灰之间有较大区别^[9]。

酸性组分中 SiO_2 和 Al_2O_3 通常情况能增加煤灰熔融温度,但当 SiO_2 和 Al_2O_3 含量较高或较低时,却存在诸多不确定性。当 Al_2O_3 低于 12% 时,熔点出现先降低后增加的规律^[6];随着 SiO_2 含量增加,煤灰熔融温度先降低后增加,当 SiO_2 超过 60% 时, SiO_2 含量的增加对灰熔融温度的影响无一定规律^[2,10]。 Al_2O_3 熔点 2 050 °C,在熔融过程中起“骨架”作用,但当含量较低时,决定熔点的主要是其他无机组分。 SiO_2 是网络形成体氧化物,含量较高时,能与其他修饰中间氧化物(Al_2O_3 及 $\text{Cd}, \text{Pb}, \text{Zn}$ 的氧化物)和修饰网络氧化物($\text{Na}_2\text{O}, \text{CaO}$ 及 $\text{K}, \text{Li}, \text{Mg}, \text{Ba}$ 的氧化物)相互作用表现出助熔的不确定性;而 SiO_2 含量较低时可与硅酸盐形成低温共熔体^[6,10]。因此,有时很难从 SiO_2 或 Al_2O_3 的含量变化解释熔融性的差异,有研究者发现硅铝比与煤灰的熔融性有一定的关联性^[5]。

碱性组分中, CaO 在煤灰中的含量变化较大,对灰熔融温度的影响也相对复杂。 SiO_2 量足够时,一般起到降低灰熔融温度的作用。但 CaO 单体的熔点高达 2 590 °C,当 CaO 含量增加到一定量(45% 以上)时,灰熔融温度就会随着 CaO 含量的增加而升高。 Fe_2O_3 的助熔效果与煤灰所处气氛有关。在弱还原气氛或氧化氛围中, Fe_2O_3 均起到降低灰熔点的作用。但弱还原气氛中 Fe_2O_3 被还原成 FeO , FeO 具有更强的助熔效果,因此弱还原气氛下的熔融温度要比氧化气氛低 40~170 °C^[5-6]。刘新兵等^[9]和 Liu 等^[5]认为 K_2O 等碱性氧化物若以游离态存在时能显著降低煤灰熔融温度,但多数煤灰中的 K_2O 是作为伊利石组成存在的。而伊利石受热直到熔化仍无 K_2O 析出,因此 K_2O 的助熔作用明显降低。 MgO 的助熔作用与 CaO 类似, MgO 含量为 13%~17% 时灰熔融温度最低,小于或大于这个含量灰熔融温度将升高,但由于煤灰中 MgO 含量较少,可认为它在煤灰中只起到降低熔点的作用^[6]。

1.2 定量关系

煤灰熔融温度测定受诸多因素影响,从定量角度研究煤灰成分与灰熔融温度的关系具有重要意义。一方面,可以验证测定数据的可靠性;另一方面,能够为煤灰熔融温度的调控提供依据。国内外学者提出了很多基于灰成分预测灰熔点的方法或模型,有经验公式、基于相图的预测模型、统计学算法预测等。

经验公式建立的模型分为单变量预测模型和多变量预测模型。单变量模型常用参数有碱性氧化物含量、酸碱比、 SiO_2 值等。戴爱军^[13]对 154 个煤样的灰成分进行分析,回归出了酸碱比与灰熔融性的关系式:

$$T_F = 1\,463.055 - 376.865x + 181.35x^2 - 33.485x^3 + 2.735x^4 - 0.0825x^5 \quad (1)$$

其中, x 为 $m(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)/m(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO})$ 。

张德祥等^[14]提出了用熔融指数 F_1 ($F_1 = \omega(\text{SO}_3) + \omega(\text{Fe}_2\text{O}_3) + \omega(\text{MgO}) + \omega(\text{CaO}) + \omega(\text{Na}_2\text{O}) + \omega(\text{K}_2\text{O})$, ω 为质量分数)来预测煤灰熔融温度,计算公式如下:

$$T_F = 793F_1^2 - 5\,551.5F_1 + 2\,528.3 \quad (2)$$

其中,相关系数 $r=0.9445$,误差小于国家标准(再现性 ≤ 80 °C)。

多变量预测模型中多元线性和非线性拟合的方法被广泛应用于煤灰熔融温度的研究中。姚星一^[2]根据

中国煤的特点,提出了双温坐标法(Y_w 法)预测灰熔融温度。

$$Y_{w1} = 24m(\text{Al}_2\text{O}_3) + 11m(\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2) + 7m(\text{CaO} + \text{MgO}) + 8m(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{KNaO}), b < 30\%; \quad (3)$$

$$Y_{w2} = 200 + 21m(\text{Al}_2\text{O}_3) + 10m(\text{SiO}_2) + 5m(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{KNaO} + \text{CaO} + \text{MgO}), b > 30\%。 \quad (4)$$

式中, Y_w 表示灰熔融性; $b = m(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{KNaO} + \text{CaO} + \text{MgO})$ 。

Winegartner 等^[15]收集美国地区 1 215 个样品的煤灰组成和灰熔点数据,通过多元线性回归的方法研究煤灰熔融温度预测模型,基本关系式如下:

$$y(T_D, T_S, T_H, T_F) = a_0 + aX_1 + bX_2 + cX_3 + \dots \quad (5)$$

式中, a_0, a, b, c 等为常数; X_1, X_2, X_3 等为煤灰组成或由煤灰组成得到的参数。李平等^[16]以 62 种商业用煤的灰成分和灰熔点数据,对上述四个常用经验公式的准确性和适用性进行了研究。结果表明,由于煤灰成分的复杂性和经验公式所用煤种的局限性,预测精度不够理想。总体而言,经验公式的方法相对简单,但适用范围较窄,只有当灰成分相近时才有较高的精确度^[4,17]。

基于灰组分相图的预测模型,理论上具有更高的相关性和准确性,但实际应用效果尚不理想。因为最常用的灰锥法测试结果不仅受到煤灰中液固比例的影响,而且灰锥形态变化还受矿物质相互作用的影响^[6]。此外,很多统计学算法也被用于灰熔融温度的预测中。岑可法等^[18]采用支持向量机算法对求解灰熔点问题进行了建模,并利用遗传算法对支持向量机模型的参数进行了优化。Liu 等^[17]采用 ACO-BP 神经网络对国内 80 个灰样的熔融温度进行了预测,误差较小,优于经验公式的计算结果。

2 煤灰矿物组成与灰熔融特性的关系

煤中矿物质主要有以下几类:粘土矿物,硫化物,碳酸盐,硫酸盐,氧化物和氢氧化物。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。煤中矿物质在气化和燃烧过程中经过高温后变为灰渣,此过程中矿物质间发生了复杂的变化。

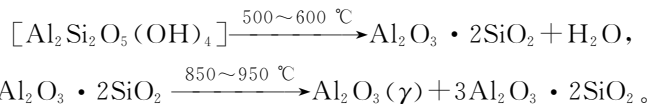
2.1 耐熔矿物质和助熔矿物质

煤灰中的主要矿物质有石英、莫来石、赤铁矿、硬石膏、长石类矿物质等,并且由于加工温度的不同,矿物质种类可能出现较大变化。煤灰中矿物可分为助熔矿物质和耐熔矿物质。煤灰中的主要耐熔矿物质有莫来石($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)、石英(SiO_2)、偏高岭石($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)、金红石(TiO_2)等;常见的助熔矿物质是硬石膏(CaSO_4)、酸性斜长石、硅酸钙($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)和赤铁矿(Fe_2O_3)等。总的来说,煤灰中硅酸盐含量低,而氧化物和硫酸盐矿物含量高,则煤灰熔融温度相对较低;硅酸盐含量较高的煤灰,则灰熔融温度一般较高。

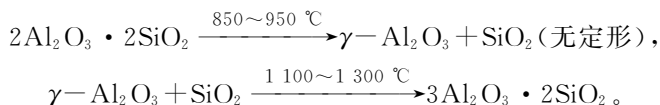
2.2 矿物质的演变

在煤的热转化过程中,煤灰中除各种矿物组分熔融外,各矿物组分间也会发生低温共熔现象,从而对煤的灰熔融温度产生影响。矿物组成对煤灰熔融性的影响可通过 X 射线衍射法、差热分析法、热重分析法、高温显微镜观察法、扫描电镜法等确定。

莫来石($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)熔点 $1\ 850\ ^\circ\text{C}$,是煤灰中重要的耐熔矿物质,它在煤灰熔融过程中起到“骨架”作用,能显著地提高煤灰的熔融温度。少量莫来石是由煤中的高岭石($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)转化得到^[6,19]:



大量的莫来石由 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 SiO_2 反应得到:

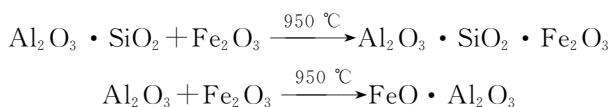


石英为原煤中的矿物质, $800\ ^\circ\text{C}$ 左右其衍射峰强度开始减弱,约在 $1\ 400\ ^\circ\text{C}$ 后,衍射峰趋于消失。一方面,虽然其元素组成并未发生变化,但是矿物形态经历了从石英到鳞石英($870\ ^\circ\text{C}$)到方石英($1\ 470\ ^\circ\text{C}$)的变

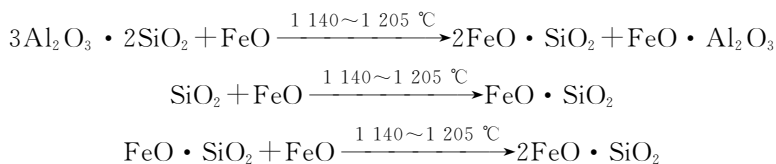
化,到 1 450 °C 时,晶体含量下降,非晶体含量明显增加;另一方面,石英与高岭石、刚玉、方钙石等其它成分在高温下发生反应,生成新的矿物质或非晶质的玻璃体物质^[6,20]。石英类的矿物质虽然有较高的熔点,但它对灰熔点的影响与其它氧化物的含量有关,这是因为不同煤灰矿物质间能够形成低温共熔体^[21-22]。

硬石膏是重要的助熔矿物质,黄镇宇等^[19]指出:硬石膏在 1 000 °C 左右分解生成 CaO 和 SO₃,该分解反应直到 1 200 °C 才结束。其生成的 CaO 是重要的助熔物质,可以与莫来石或偏高岭石反应,生成钙长石(CaO · Al₂O₃ · 2SiO₂),这样不仅消耗了在煤中起“骨架”支撑作用的莫来石,而且生成的钙长石在高温下不稳定,极易与 SiO₂, Al₂O₃ 以及硅铝酸盐类矿物质发生低温共熔。

赤铁矿(Fe₂O₃)主要来自煤中菱铁矿(FeCO₃)和黄铁矿(FeS₂)的分解,赤铁矿的含量对煤灰熔融性有较大的影响。氧化气氛中 Fe₂O₃ 可以与煤灰中的硅铝酸盐反应生成铁尖晶石(FeO · Al₂O₃)、硬绿泥石(Al₂O₃ · SiO₂ · Fe₂O₃)等:



还原气氛中,赤铁矿易被还原生成 FeO,FeO 可以与煤灰中石英(SiO₂)、莫来石等耐熔矿物质反应,生成铁橄榄石(2FeO · SiO₂)、铁斜晖石(FeO · SiO₂)、铁尖晶石(FeO · Al₂O₃)等矿物质,反应如下^[19,21]:



这些含铁矿物质在 1 100 °C 左右易发生共熔。

3 煤灰熔融温度的调控

根据煤灰化学组成、矿物组成等对煤灰熔融温度的影响,调整灰熔融温度常用方法包括配煤、添加助剂,本质上都是改变煤灰的化学组成。

以山西潞安煤为例(表 1),所用煤灰酸碱比大于 5,灰熔点 1 540 °C^[23],难以用于液态排渣的气流床气化工工艺。在潞安煤中添加助熔剂石灰石(CaCO₃)可以显著降低其灰熔点。石灰石作为煤灰助熔剂研究较多,其助熔行为与纯 CaO 几乎无差异^[6]。潞安煤灰流动温度(T_F)随 CaO 含量的变化曲线如图 1 所示,随着 CaO 含量的增加 T_F 显著降低,在 CaO 含量为 37% 时 T_F 降到 1 350 °C 以下,能够满足气流床的液态排渣要求。加入石灰石后产生的 CaO 可以与高温时产生的耐熔矿物质(莫来石、石英等)反应,作用机理如下:

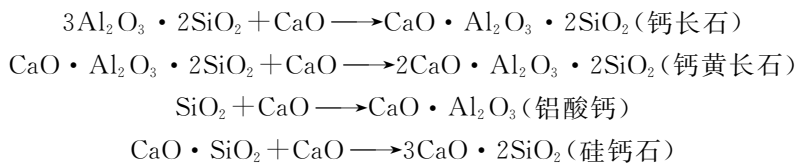


表 1 煤灰成分及酸碱比^[23-24]

Tab. 1 Coal ash composition and ash flow temperature

灰样	煤灰成分/%									酸碱比
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	
潞安煤灰	43.05	38.66	2.87	9.67	0.64	1.15	—	0.39	0.15	6.29
神木煤灰	34.75	15.22	12.13	19.95	2.37	0.53	12.29	1.06	1.71	1.50
平朔煤灰	51.13	38.58	3.55	2.90	0.33	1.70	1.20	0.45	0.15	13.50

反应生成的铝酸钙和硅钙石都是助熔矿物质,并且它们可与钙黄长石、钙长石产生低温共熔现象,从而

达到降低煤灰熔点的目的^[23]。实际使用过程中,可以根据煤灰组成利用前述预测模型确定石灰石的添加量。像石灰石这种单一助熔剂,其作用机理相对简单,助熔效果也较好。但较好的助熔效果,通常是在较大添加量(有时甚至超过30%)的前提下获得的。助剂添加量过高不仅增加了运行成本和排渣量,而且排渣热损失和氧耗量也相应增加^[25]。因此,研发相关高效助剂具有重要意义。

配煤法也是常用调整灰熔融温度的方法。如表2所示,神木煤灰中碱性氧化物(Fe_2O_3 , CaO , SO_3)含量较高,灰熔点 $<1\ 200\ ^\circ\text{C}$,燃用时炉膛会出现不同程度的结渣;而平朔煤酸性氧化物(SiO_2 , Al_2O_3)含量较高,灰熔点 $>1\ 500\ ^\circ\text{C}$,将其配入神木煤中,可以显著提高神木煤的灰熔点。如表2所示,配入平朔煤后混煤中有耐熔矿物质莫来石、铝酸钙生成,并且助熔矿物质赤铁矿、硬石膏含量明显减少^[24]。值得注意的是,由于煤灰矿物质之间的相互作用,配煤的灰熔融性变化规律要比添加单一助剂复杂得多,熔融温度变化并不与配煤比呈线性关系。但由于煤灰成分之间存在加和性,因此结合三元相图以及前述的灰熔融温度的预测模型,可以对配煤灰熔融温度进行预测,进而确定最佳配煤比。

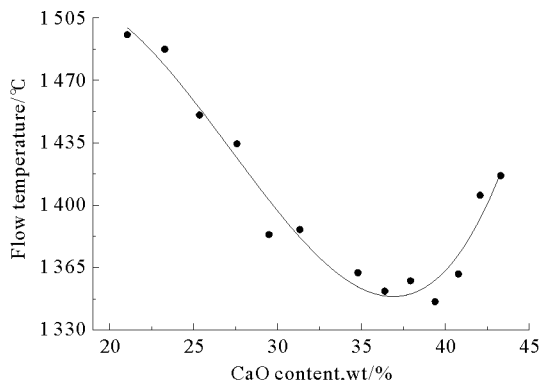


图1 CaO含量对流动温度的影响^[23]
Fig. 1 Effect of CaO content on T_F

表2 不同配煤比下灰样流动温度及矿物衍射相对强度^[24]

Tab. 2 T_F and mineral intensity in coal ash with different blending ratio

灰样	$T_F/^\circ\text{C}$	矿物 X-射线衍射相对强度				
		石英	赤铁矿	硬石膏	莫来石	铝酸钙
神木煤	1 180	14 808	4 143	14 808	—	—
30%平朔煤+70%神木煤	1 420	7 778	3 847	11 949	2 891	2 235
50%平朔煤+50%平朔煤	$>1\ 500$	7 597	3 607	9 685	3 547	2 535
平朔煤	$>1\ 500$	4 739	2 951	7 362	—	—

此外,反应气氛、压力对煤灰熔融性也有一定影响。反应气氛通常分为氧化气氛、弱还原气氛和强还原气氛。煤灰在弱还原气氛下的熔融温度均低于氧化性气氛下的熔融温度,聂明等^[26]在不同气氛条件下对不同煤种的灰熔融性进行了研究并对其结渣特性进行了分析,指出弱还原性环境气氛可显著降低煤灰熔融温度,从而使煤灰结渣特性增强。弱还原气氛与氧化气氛下的熔融温度差异会随煤灰中的 Fe_2O_3 含量增加而增加^[6]。强还原气氛下,煤灰在熔融过程中的含氧化合物被大量还原,所剩绝大部分是金属或非金属单质,而单质的熔融温度比其氧化物高很多,这导致了强还原气氛下的灰熔融温度要高于氧化气氛。压力对灰熔融特性的影响相对复杂,Jing等^[27]研究结果表明压力会影响煤灰中矿物质的反应,但依赖于反应温度的变化。例如 $900\ ^\circ\text{C}$ 时压力的增加会抑制低温矿物质的分解, $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 压力的增加却会促进低温矿物质向高温矿物质的转化。

4 结论

1)通常情况下,酸性氧化物具有提高灰熔融温度的作用;而碱性氧化物能够降低灰熔融温度。根据煤灰成分和灰熔融性的关系可以对煤灰熔融温度进行预测。在灰成分相近的情况下,经验公式的方法是一种简单可行的预测手段。因此,按照不同产煤区的煤质数据进行分类,可以获得适合该地区的煤灰熔融温度经验公式,以供有关人员参考。

2) 根据不同矿物质在煤灰中的作用, 矿物质可以分为耐熔矿物质和助熔矿物质, 高温下矿物质形态会发生转变。为扩大煤种适用范围, 可以通过添加耐熔剂或助熔剂对煤灰熔融温度进行调控。配煤能够显著改变煤的灰熔融温度, 配煤灰熔融温度变化与配煤比不呈线性关系。实际生产中合适的配煤比可以利用三元相图以及煤灰熔融温度预测模型确定。

3) 反应气氛和操作压力对煤的灰熔融温度有一定的影响, 弱还原气氛下的灰熔融温度要比氧化气氛下的低。燃煤锅炉中, 应避免煤的不充分燃烧保证炉内受热面的氧化性气氛, 以提高煤灰熔融温度, 减少锅炉受热面结渣的可能性。

参考文献:

- [1] 贺永德. 现代煤化工技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 1-9.
- [2] 姚星一. 煤灰熔点与化学成分的关系[J]. 燃料化学学报, 1965, 6(2): 151-161.
Yao Xingyi. Relationship of coal ash fusibility to chemical composition[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 1965, 6(2): 151-161.
- [3] Lolja S A, Haxhi H, Dhimitri R, et al. Correlation between ash fusion temperatures and chemical composition in Albanian coal ashes[J]. Fuel, 2002, 81(17): 2257-2261.
- [4] Song W J, Tang L H, Zhu X D, et al. Effect of coal ash composition on ash fusion temperatures[J]. Energy & Fuels, 2009, 24(1): 182-189.
- [5] Liu B, He Q, Jiang Z, et al. Relationship between coal ash composition and ash fusion temperatures[J]. Fuel, 2013, 105: 293-300.
- [6] 李文, 白进. 煤的灰化学[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 3-26.
- [7] Vorres K S. Melting behavior of coal ash materials from coal composition[J]. Division of Fuel Chemistry Preprints, 1977, 22(4): 118-142.
- [8] Vassilev S V, Kitano K, Takeda S, et al. Influence of mineral and chemical composition of coal ashes on their fusibility[J]. Fuel Processing Technology, 1995, 45(1): 27-51.
- [9] 刘新兵, 陈莞. 煤灰熔融性的研究[J]. 煤化工, 1995, 43(2): 48-52.
Liu Xinbing, Chen Chong. Research on coal ash fusibility[J]. Coal Chemical Industry, 1995, 43(2): 48-52.
- [10] 刘勇晶, 郭延红, 刘胜华. 煤灰成分对煤灰熔融特性的影响[J]. 煤炭转化, 2013, 36(1): 68-71.
Liu Yongjin, Guo Yanhong, Liu Shenghua. Influence of ash composition on fusibility of coal ash[J]. Coal Conversion, 2013, 36(1): 68-71.
- [11] Li F, Huang J, Fang Y, et al. The effects of leaching and floatation on the ash fusion temperatures of three selected lignites[J]. Fuel, 2011, 90(7): 2377-2383.
- [12] 修洪雨, 黄镇宇, 张堃, 等. CaO对煤灰主要成分熔融特性的影响[J]. 电站系统工程, 2005, 21(2): 20-22.
Xiu Hongyu, Huang Zhenyu, Zhang Kun, et al. Calcium oxide's influence on melting characteristic of main materials in coal ash[J]. Power System Engineering, 2005, 21(2): 20-22.
- [13] 戴爱军. 煤灰成分对灰熔融性影响研究[J]. 洁净煤技术, 2007, 13(5): 23-26.
Dai Aijun. Reserch on influence of ash components in coal ash on ash fusibility[J]. Clean Coal Technology, 2007, 13(5): 23-26.
- [14] 张德祥, 龙永华, 高晋生, 等. 煤灰中矿物的化学组成与灰熔融性的关系[J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2003, 29(6): 590-594.
Zhang Dexiang, Long Yonghua, Gao Jinsheng, et al. Relationship between the coal ash fusibility and its chemical composition[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2003, 29(6): 590-594.
- [15] Winegartner E C, Rhodes B T. An empirical study of the relation of chemical properties to ash fusion temperature[J]. Journal of Engineering Power, 1975, 97(3): 395-403.
- [16] 李平, 梁钦锋, 袁海平, 等. 常用预测煤灰熔融性温度经验公式的适应性研究[J]. 煤化工, 2010, 38(1): 17-23, 30.
- [17] Liu Y P, Wu M G, Qian J X. Predicting coal ash fusion temperature based on its chemical composition using ACO-BP neural network[J]. Thermochimica Acta, 2007, 454(1): 64-68.
- [18] 王春林, 周昊, 李国能, 等. 基于支持向量机与遗传算法的灰熔点预测[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(8): 11-15.

- Wang Chunlin, Zhou Hao, Li Guoneng, et al. Combining support vector machine and genetic algorithm to predict ash Fusion temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(8): 11-15.
- [19] 黄镇宇, 李燕, 赵京, 等. 不同灰成分的低熔点煤灰熔融性调控机理研究[J]. 燃料化学学报, 2012, 40(9): 1038-1043.
Huang Zhenyu, Li Yan, Zhao Jing, et al. Ash fusion regulation mechanism of coal with low melting point and different ash compositions[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(9): 1038-1043.
- [20] 李帆, 郑瑛, 邱建荣. 煤燃烧过程矿物质行为研究[J]. 工程热物理学报, 1999, 2(20): 259.
Li Fan, Zheng Ying, Qiu Jianrong. Study of behavior of mineral matters in coal during burning process[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1999, 2(20): 259.
- [21] 白进, 李文, 李保庆. 高温弱还原气氛下煤中矿物质变化的研究[J]. 燃料化学学报, 2006, 34(3): 292-297.
Bai Jin, Li Wen, Li Baoqing. Mineral behavior in coal under reducing atmosphere at high temperature[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2006, 34(3): 292-297.
- [22] 王勤辉, 景妮洁, 骆仲浚, 等. 灰成分影响煤灰烧结温度的实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 1015-1020.
Wang Qinhui, Jing Nijie, Luo Zhongyang, et al. Experiments on the effect of chemical components of coal ash on the sintering temperature[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 1015-1020.
- [23] 许志琴, 于戈文, 邓蜀平, 等. 助熔剂对高灰熔点煤影响的实验研究[J]. 煤炭转化, 2005, 28(3): 22-25.
Xu Zhiqin, Yu Gewen, Deng Shuping, et al. Experimental studies on the effect of fusion agents on high ash melting coals [J]. Coal Conversion, 2005, 28(3): 22-25.
- [24] 刘志. 配煤煤灰内矿物质转变过程与熔融特性规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 9-50.
- [25] 乌晓江, 张忠孝, 朴桂林, 等. 配煤对降低高灰熔融性煤的三元相图分析[J]. 洁净煤技术, 2007, 13(3): 64-67.
Wu Xiaojiang, Zhang Zhongxiao, Piao Guilin, et al. Analysis of coal ash fusion characteristics of high fusibility coal blending with lower's with ternary phase diagram[J]. Clean Coal Technology, 2007, 13(3): 64-67.
- [26] 聂明, 张艺漫, 张博. 气氛条件对典型煤种结渣特性影响的实验研究[J]. 锅炉制造, 2013(3): 4-8.
Nie Ming, Zhang Yiman, Zhang Bo. Experimental study on the influence of the atmosphere conditions on the typical coal slagging characteristics[J]. Boiler Manufacturing, 2013(3): 4-8.
- [27] Jing N, Wang Q, Cheng L, et al. Effect of temperature and pressure on the mineralogical and fusion characteristics of Jincheng coal ash in simulated combustion and gasification environments[J]. Fuel, 2013, 104: 647-655.

(责任编辑: 吕海亮)