

研究论文

2 种单煤混合粉磨对煤粉矿物分布影响规律研究

吴锁贞¹,王庆松²,程健林¹,高 通²,杨云飞²,张 洪²

(1.江苏方天电力技术有限公司,江苏 南京 211100;2.中国矿业大学 化工学院,江苏 徐州 221116)

摘 要:煤中矿物质分布规律直接影响锅炉结渣和超细颗粒物形成,研究了 2 种单煤混合粉磨对煤粉中矿物质分布影响规律。将准东原煤和晋城原煤分别破碎到 3 mm 以下,按照质量比 70 : 30、50 : 50、30 : 70 混合粉磨至 150 μm 以下,对各煤粉样品进行浮沉分离,研究密度组成、工业分析组成、显微组成和煤灰化学组成变化。结果发现,2 种单煤混合粉磨过程中互相影响强烈,混煤煤粉密度分布和 2 种单煤加权平均相比发生明显分化。混合粉磨使混煤中 $<1.5 \text{ g/cm}^3$ 和 $>1.7 \text{ g/cm}^3$ 组分占比下降,而 $1.5 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ 组分大幅上升;根据各密度级别煤粉挥发分和显微镜观察发现,晋城煤富集于混煤煤粉 $<1.5 \text{ g/cm}^3$ 组分中,而准东粉主要富集在 $1.6 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ 组分中;相比 2 种单煤煤粉,不同密度级别混煤煤灰化学组成分布更均匀。2 种单煤易磨性不同是混煤煤粉组成发生偏析的根本原因。

关键词:混煤;密度分离;显微观察;煤灰化学组成

中图分类号:TQ533

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2021)03-0147-06

Study on the influence of mixed pulverization of two single coals on the mineral distribution in coal blends

WU Suozhen¹, WANG Qingsong², CHENG Jianlin¹, GAO Tong², YANG Yunfei², ZHANG Hong²

(1.Jiangsu Fangtian Electric Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 2.School of Chemical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The mineral distribution in pulverized coal directly affects the fouling and slagging of furnace and the formation of particulate matter. In this paper, the influence of mixed pulverization of two single coals on mineral distribution in coal blends was studied. Zhundong raw coal and Jincheng raw coals were crushed to below 3 mm, respectively, mixed and ground to less than 150 μm according to the mass ratio of 70 : 30, 50 : 50, 30 : 70. The float-sink method with organic solutions was used to separate the pulverized raw coals and coal blends into different density fractions. The changes in density fraction, volatile matter content, maceral composition and chemical composition of coal ash were studied. It is found that the two single coals have strong interaction during mixed pulverization. The density composition of the coal blends is obviously different from the averaged ones of the two single pulverized coals. The density fractions, $<1.5 \text{ g/cm}^3$ and $>1.7 \text{ g/cm}^3$, in the three blended coals decrease, while the $1.5 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ fraction significantly increases during mixed pulverization. Both volatile matter contents and microscopic observations indicate that Jincheng coal is concentrated in the $<1.5 \text{ g/cm}^3$ fraction of the coal blends, and Zhundong coal is mainly concentrated in the $1.6 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ fraction. The chemical compositions of the blend coal ashes are more uniform in different density grades compared with the two kinds of single coals. Mechanism analysis indicates that the different grindability of the two kinds of single coal is the fundamental reason for the segregation of pulverized coal composition.

Key words: blended coal; density separation; microscopic observation; coal ash chemical composition

0 引 言

电力工业是用煤大户,我国绝大部分电厂将 2

种或更多煤炭掺配、混合粉磨再喷入锅炉燃烧,以达到改变煤燃烧特性、结渣特性和降低成本的目的^[1]。煤粉中矿物质直接影响煤粉燃烧、结渣和超

收稿日期:2020-08-06;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.20080601

基金项目:国家自然科学基金-山西低碳基金联合基金资助项目(U1510106);国家电网方天公司科技项目(SGTYHT/18-JS-206)

作者简介:吴锁贞(1968—),男,江苏镇江人,高级工程师,主要研究方向为煤炭检测技术及标准化。E-mail:15905166912@139.com

引用格式:吴锁贞,王庆松,程健林,等.2 种单煤混合粉磨对煤粉矿物分布影响规律研究[J].洁净煤技术,2021,27(3):147-152.

WU Suozhen, WANG Qingsong, CHENG Jianlin, et al. Study on the influence of mixed pulverization of two single coals on the mineral distribution in coal blends[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(3): 147-152.



移动阅读

细颗粒物形成特性,传统上假定矿物质均匀分布在有机显微组分中^[2],导致锅炉燃烧过程中分层结渣、选择性沉降等现象难以解释^[3]。随着计算机控制扫描电子显微镜(CCSEM)的发展,矿物质在煤粉中不均匀分布的观点逐渐得到认同^[4-6],煤粉颗粒被分为纯有机质颗粒、矿物-有机质交联体颗粒和独立矿物颗粒 3 种类型。Cloke 等^[7]、张洪等^[8-9]发现不同类型煤粉颗粒燃烧特性、煤焦结构和反应动力学不同,而 Yan 等^[4]、刘小伟等^[10]、Huang 等^[11]研究发现,煤粉颗粒类型直接影响粉煤灰和 PM_{2.5} 的形成以及锅炉结渣情况。

煤粉颗粒组成特性是研究煤粉燃烧和气化特性的最重要基础数据,但目前对单煤煤粉中矿物质分布规律研究较多,对混煤煤粉中矿物质分布规律及

机理研究较少^[12],且都是采取先分别粉磨再混合工艺实验室研究配煤^[13-14],与生产实际不符。本文选取熔点、变质程度差异较大的晋城无烟煤和准东煤掺配,模拟电厂生产工艺先混合、后粉磨制备煤粉,研究混合粉磨对混煤煤粉中矿物质分布影响规律,为深入研究混煤燃烧和气化特性、成灰和结渣规律奠定基础。

1 材料与试验方法

1.1 原料

试验选取新疆准东(ZD)和山西晋城(JC)原煤,其工业分析和元素分析结果见表 1,熔融性分析结果见表 2。

由表 1、2 可知,准东煤变质程度低,挥发分较

表 1 准东和晋城原煤工业分析和元素分析

Table 1 Proximate analysis and ultimate analysis of ZD and JC raw coals

Sample	Proximate analysis/%				Ultimate analysis/%				
	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{daf}	H_{daf}	N_{daf}	O_{daf}	$S_{t,d}$
ZD	9.05	14.15	25.54	51.26	80.15	3.38	0.73	14.95	0.73
JC	3.66	16.91	6.31	73.12	80.60	3.24	1.11	3.94	3.11

表 2 准东和晋城原煤熔融温度

Table 2 Ash fusion temperatures of ZD and JC raw coals

Sample	DT/℃	ST/℃	HT/℃	FT/℃
ZD	1 048	1 134	1 146	1 166
JC	1 525	1 547	1 562	1 581

高,灰分低,是优质的动力煤,但煤灰灰熔融温度较低,结渣倾向大^[15];晋城煤变质程度较高、挥发分产率低,煤灰具有较高的熔点^[16]。

1.2 混煤煤粉制备

本文模拟电厂实际生产,采取“先混后磨”工艺制备混煤煤粉。将准东和晋城原煤分别破碎到 3 mm 以下,再按照 ZD、JC 质量比 70 : 30、50 : 50、30 : 70 配合、混合粉磨,通过调整粉磨时间控制各混煤煤粉样品细度在 150 mm 方孔筛筛余(10±2)%,所得混煤煤粉样品依次编号为 H7030、H5050 和 H3070。

1.3 煤粉浮沉分离

按 GB/T 478—2008《煤炭浮沉试验方法》将苯、四氯化碳和三溴甲烷按照不同比例混合配制成密度 1.3~2.0 g/cm³ 的有机重液,对各煤粉样品进行全浮沉分离。

称取 30 g 煤粉样品放入重液管内,加入重液、搅拌分散,再放入离心机内,调整转速到 2 100 r/min,离心 10 min 后取出,过滤并回收滤液。将滤

饼放入干燥箱中,在 70~80 ℃ 下干燥 3 h,取出冷却,达到空气干燥状态时再进行称重。

考虑部分密度级产率较小,将产率低、灰分相近的密度级合并,将准东原煤粉煤样品分为<1.6、1.6~1.7 和>1.7 g/cm³ 三个密度级,依次记为 ZD1、ZD2、ZD3;将晋城原煤粉煤样品分为<1.6、1.6~1.7、1.7~2.0 g/cm³ 和>2.0 g/cm³ 四个密度级,依次记为 JC1、JC2、JC3、JC4;将混煤煤粉样品分为<1.6、1.6~1.7、1.7~1.8、>1.8 g/cm³ 四个密度级。

按照国标 GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》对各子样进行工业分析。

1.4 显微观察

将不同密度煤粉制成光片,用德国莱卡公司 MPV-sp 显微镜,以 546 nm 波长观察煤的有机和无机显微组分。

1.5 化学组成分析

采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)分析煤粉样品煤灰化学组成,所用仪器为德国 Bruker 公司生产的 S8-TIGER 型 X 射线荧光光谱分析仪,测定条件为 Rh 靶,加速电压为 40 kV,电流 67 mA。

2 结果和分析

2.1 混煤煤粉的密度组成

煤粉颗粒可分为纯有机颗粒、有机-无机交织体和独立存在的矿物质 3 种颗粒。变质程度不同的

纯有机煤粉颗粒密度在 1.3~1.7 g/cm³,黏土、石英、方解石类矿物颗粒密度在 2.4~2.6 g/cm³,硫铁矿密度在 4.9~5.2 g/cm³^[17],而有机-无机交织体的密度介于 1.7~2.4 g/cm³。因此煤粉密度反映了矿物质在煤粉中存在状态。准东、晋城原煤煤粉密度组成如图 1 所示。

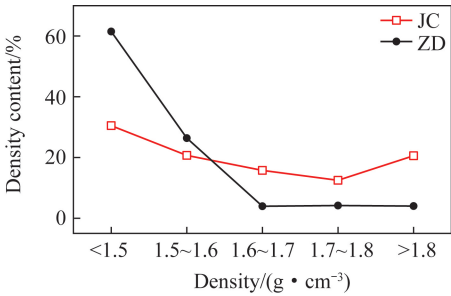


图 1 准东和晋城原煤煤粉密度组成

Fig.1 Density compositions of ZD and JC pulverized coal

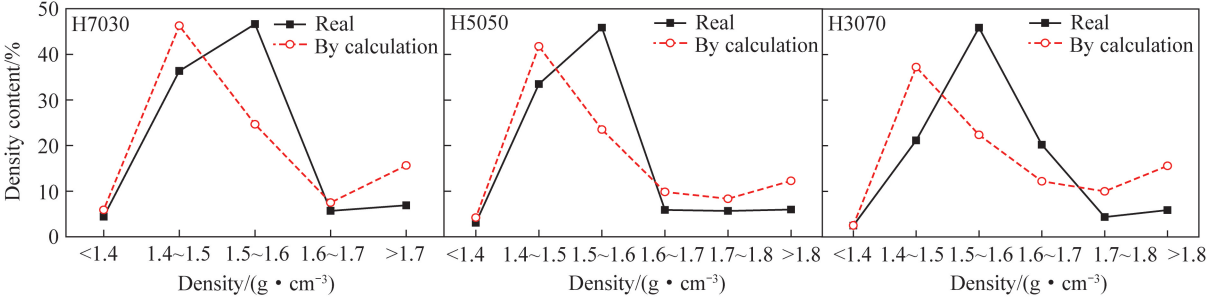


图 2 3 种混煤的密度组成与加权计算值对比

Fig.2 Density composition of three coal blend and their weight averaged value

为 46%~47%。原煤加权计算密度组成也呈峰形分布,且发生相似偏移。1.4~1.5 g/cm³密度组分实测含量明显低于其加权计算值,3 个混煤样品差异波动在 8.28%~16.08%;1.5~1.6 g/cm³密度实测含量明显大于原煤加权计算值,差异波动在 21.96%~23.49%;而>1.6 g/cm³密度组分含量的实测值大都

表 3 准东和晋城原煤煤粉不同密度级子样的挥发分变化

Table 3 *V*_{ad} variation of different density fractions in pulverized ZD and JC raw coals

Sample	<i>V</i> _{ad} /%						
	<1.4 g/cm ³	1.4~1.5 g/cm ³	1.5~1.6 g/cm ³	1.6~1.7 g/cm ³	1.7~1.8 g/cm ³	1.8~2.0 g/cm ³	>2.0 g/cm ³
ZD	33.98	29.53	28.44	12.31	8.31	7.47	5.89
JC	4.27	5.88	7.16	8.17	10.88	12.33	12.44

降。随着密度提高,其中矿物含量提高,挥发分下降。随密度提高,晋城原煤煤粉样品挥发分升高是纯有机质挥发分和矿物烧失量综合反映。由于晋城煤粉中矿物质以石英、高岭石、方解石等形式存在^[16],其中高岭石烧失量 20%,而方解石烧失量为 44%,所以>2.0 g/cm³密度子样烧失量高达 12.24%,远高于晋城原煤低密度子样挥发分 4.27%。

3 种混煤不同密度子样挥发分实测值与根据原

由图 1 可知,准东原煤煤粉样品中<1.5 g/cm³密度组分含量最高,达到了总产率的 61.49%;随密度提高,对应密度组分含量呈线性下降趋势;>1.6 g/cm³各密度级别含量基本相同,均小于 10%。与准东煤粉相比,晋城原煤煤粉各密度级别分布趋势相同但较为均匀,<1.5 g/cm³组分含量最高,达到 30.48%;随密度提高,对应密度级别组分含量呈平缓下降趋势,其中 1.7~1.8 g/cm³密度级含量最低,为 14.48%。这与张衡等^[15]、张鹏启等^[16]研究结果一致。

3 种不同配比混煤煤粉密度组成与其加权计算值对比如图 2 所示。

由图 2 可知,与 2 个原煤煤粉粒度组成分布特点完全不同,3 种不同配比混煤煤粉样品密度组成呈峰形分布,其中 1.5~1.6 g/cm³密度级含量最高,

低于加权平均计算值,差异为 7.33%~12.90%。

2.2 混煤不同密度煤粉的组成

准东煤原煤挥发分为 25.54%,而晋城煤原煤挥发分仅为 6.31%,2 种原煤煤粉不同密度级别子样挥发分和灰分测定结果见表 3。

由表 3 可知,随着密度提高,准东煤粉挥发分下

煤比例和密度子样挥发分加权计算值对比如图 3 所示。

由图 3 可知,3 种混煤样品不同密度子样挥发分实测值与加权计算值明显不同,但呈现相似的变化规律。以 H5050 混煤样品为例,≤1.5 g/cm³密度组分实测挥发分都低于理论计算值,而 1.5~1.8 g/cm³密度组分实测挥发分高于加权计算值。由于准东煤挥发分远高于晋城煤,说明混煤≤1.5 g/cm³

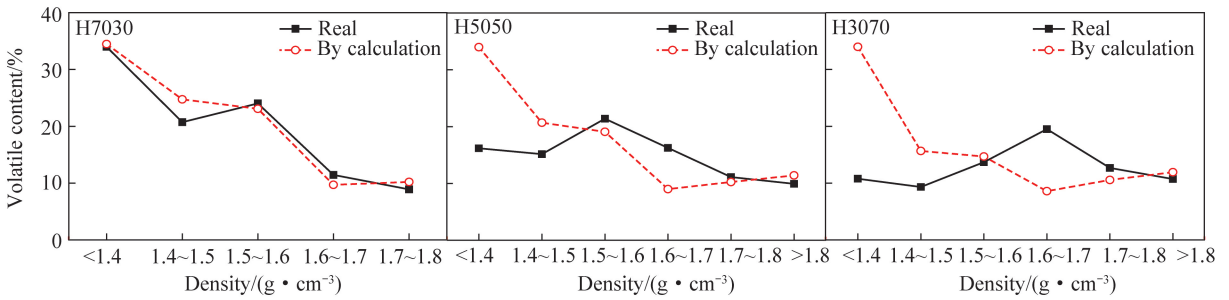


图3 3种混煤的挥发分实测值与单种煤理论加权计算值对比

Fig.3 Volatile content of three blended coal and their calculated weight-averaged results

密度组分中晋城煤实际所占比远大于配比值,而1.6~1.7 g/cm³密度组分准东煤所占比高于配比值。通过光学显微镜可以直观观察混煤不同密度级别子样中2种原煤的比例关系^[18],结果如图4所示。

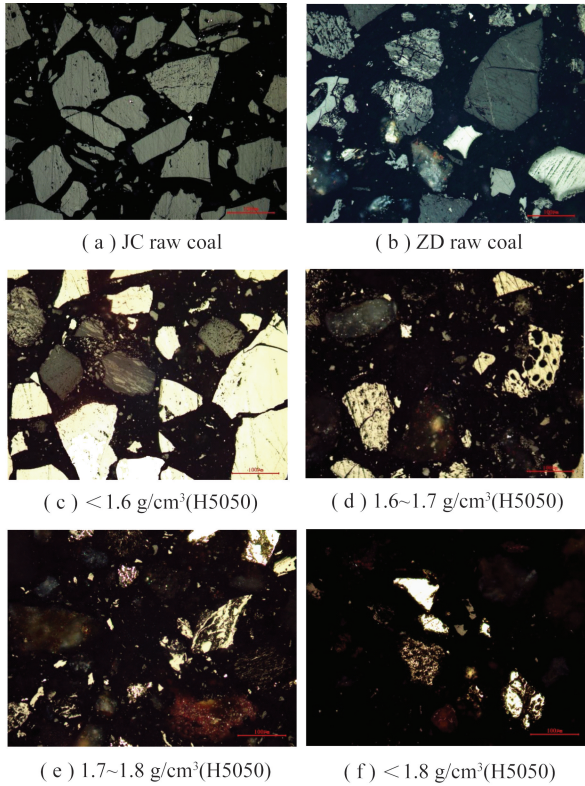


图4 原煤及混煤煤粉(H5050)各密度级光学显微镜观察

Fig.4 Opticalmicroscopic observation of raw coal and mixed coal(H5050) at different density levels

由图4可知,晋城原煤煤粉颗粒呈白色,因为无烟煤煤化程度高、反射率高;准东煤化程度低,反射率低,煤粉颗粒呈灰色。值得注意的是,无机矿物硫铁矿颗粒反射率高,在显微镜下呈亮白色。混煤H5050按准东:晋城=50:50配比,但在<1.6 g/cm³密度子样样品中,白色晋城煤粉颗粒数量明显多于灰色准东煤粉颗粒;在1.6~1.7 g/cm³和1.7~1.8 g/cm³两个密度级别子样中,准东粉煤颗粒占主导地位;在>1.8 g/cm³密度子样可以看到灰色准东

粉煤颗粒和白亮晋城煤粉颗粒都存在,其中明亮颗粒略占多数,还有大量独立存在的矿物质颗粒。显微镜观察结果与图3挥发分测定结果完全吻合,说明混合粉磨改变了混煤煤粉密度组成。

张洪等^[8,17]研究煤粉中矿物分布规律时发现,粉磨过程中煤中不同组分破碎程度不同,脆性大的组分易磨碎以小颗粒存在,而韧性大的组分不易磨细,以大颗粒存在。对于混煤,将2种不同变质程度煤研磨时,高变质程度晋城煤硬度大但较脆,低变质程度准东煤韧性大,晋城煤更易磨细,有机质和矿物质分离更彻底,而准东煤不易磨细,多存在于中密度组分中。这是工业粉磨条件下混煤中矿物质分布和原煤不同的根本原因。

2.3 混煤不同密度煤粉化学组成

化学组成直接影响煤灰熔融性,准东和晋城原煤煤粉不同密度级别子样煤灰化学组成如图5所示。

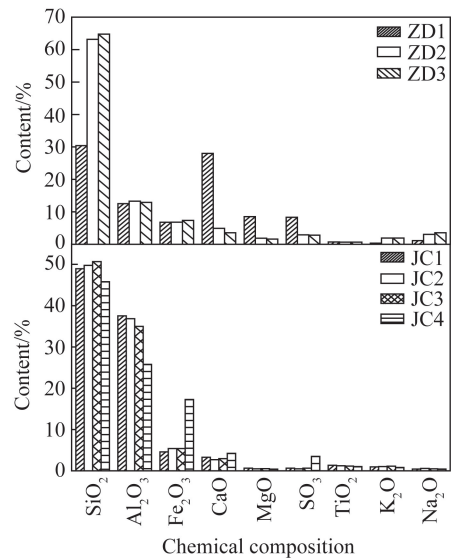


图5 准东、晋城原煤煤粉不同密度子样煤灰化学成分

Fig.5 Chemical composition of coal ash from different density samples of ZD,JC coal

由图5可知,准东、晋城煤粉样品不同密度子样化学成分和全煤相比发生了明显分化,这与人研

究结果一致^[15-16]。以混煤 H5050 为例,研究混合粉磨 对不同密度子样煤灰化学组成的影响,结果见表 4。

表 4 混煤 H5050 灰成分实际值与理论计算值对比

Table 4 Comparison of actual value and theoretical calculation value of ash composition of blended coal H5050

Sample		质量分数/%									
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	B/A
<1.6 g/cm ³	Actual	42.98	27.50	5.61	10.66	3.10	3.19	1.02	1.01	2.94	0.33
	Calculation	38.56	23.54	5.81	17.14	5.05	4.94	0.81	0.62	0.83	0.47
1.6~1.7 g/cm ³	Actual	55.38	24.12	7.77	4.46	1.19	2.19	0.92	1.37	1.72	0.21
	Calculation	57.63	23.00	6.24	4.02	1.29	1.92	0.81	1.55	2.06	0.19
1.7~1.8 g/cm ³	Actual	57.81	20.84	7.41	4.08	1.08	2.72	0.84	1.48	1.79	0.20
	Calculation	59.04	21.91	6.57	3.30	1.16	1.94	0.85	1.61	2.31	0.18
>1.8 g/cm ³	Actual	53.38	21.45	8.21	3.86	1.00	3.48	0.95	1.56	1.89	0.22
	Calculation	56.51	24.45	8.87	2.84	0.81	1.97	0.92	1.28	2.35	0.20

由表 4 可知,混煤煤粉不同密度子样煤灰化学成分实测值和加权平均计算值发生了变化,其中<1.6 g/cm³ 组分变化最明显,实测 SiO₂、Al₂O₃、Na₂O 含量实测值明显高于加权平均计算值,而 CaO、SO₃ 含量实测值明显低于加权平均计算值;>1.6 g/cm³ 各子样煤灰化学组成变化规律与<1.6 g/cm³ 组分相反。对比图 4 单煤化学组成,对于<1.6 g/cm³子样,晋城煤灰中 SiO₂、Al₂O₃ 含量明显高于准东煤,而 CaO、MgO、SO₃ 含量明显等于准东煤,说明混煤<1.6 g/cm³子样中晋城煤实际比例高于原煤配比;>1.6 g/cm³子样情况正好相反,这与 2.1、2.2 节研究结论一致。

碱酸比(B/A)与煤灰熔融性有较好相关性^[19],表 4 结果表明,混合粉磨制备的煤粉样品不同密度子样煤灰熔融性更趋于相同。

3 结 论

1)通过 3 种混煤实测密度组成与加权计算的密度组成对比,发现混合粉磨对混煤煤粉的密度组成产生较大程度的偏析,<1.5 g/cm³和>1.7 g/cm³密度组分比重下降,而 1.5~1.6 g/cm³密度组分大幅度上升。

2)3 种混煤实测挥发分与加权平均值比较和显微镜发现,晋城无烟煤富集于混煤<1.5 g/cm³密度组分中,准东粉煤主要富集在中高密度组分中,尤其是 1.6~1.7 g/cm³密度区间。

3)混煤不同密度子样实测化学组成和加权平均比较发生较大差异,其中<1.6 g/cm³组分变化最明显,SiO₂、Al₂O₃、Na₂O 含量实测值明显高于加权平均计算值,而 CaO、SO₃ 含量实测值明显低于加权平均计算值;但总体上趋于平均。

4)机理分析表明,不同煤种易磨性不同是混煤组成和性质产生分化的根本原因。

参考文献(References):

[1] 曾汉才,姚斌,邱建荣,等. 无烟煤与烟煤的混合煤燃烧特性与结渣特性研究[J]. 燃烧科学和技术,1996,2(2):181-189.
ZENG Hancai, YAO Bin, QIU Jianrong, et al. Studies of combustion and slagging characteristics for blended coal with anthracite and bituminous[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1996,2(2):181-189.

[2] 傅维镠. 煤燃烧理论及其宏观通用规律[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
FU Weibiao. The theory of coal combustion and its general law [M]. Beijing:Tsinghua University Press,2003.

[3] YANG X, INGHAM D, MA L, et al. Predicting ash deposition behaviour for co-combustion of palm kernel with coal based on CFD modelling of particle impaction and sticking[J]. Fuel, 2016, 165:41-49.

[4] YAN L, GUPTA R P, WALL T F. The implication of mineral coalescence behavior on ash formation and ash deposition during pulverized coal combustion[J]. Fuel, 2001, 80:1333-1340.

[5] 于敦喜,徐明厚,姚洪,等. 利用 CCSEM 对煤中矿物特性及其燃烧转化行为的研究[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(5): 875-878.
YU Dunxi, XU Minghou, YAO Hong, et al. Study on coal mineral properties and their transformation behavior during combustion by CCSEM[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(5): 875-878.

[6] ZHANG H, MO Y X, SUN M, et al. Determination of the mineral distribution in pulverized coal using densitometry and laser particle sizing[J]. Energy & Fuels, 2005, 19(6):2261-2267.

[7] MICHAEL Cloke, WU T, RICHELIEU Barranco, et al. Char characterization and its application in a coal burnout model[J]. Fuel, 2003, 82:1989-2000.

[8] ZHANG H, PU W X, HA S, et al. The influence of included minerals on the intrinsic reactivity of chars prepared at 900 ℃ in a drop tube furnace and a muffle furnace[J]. Fuel, 2009, 88:2303-2310.

- [9] 张洪,李欢,施海艳,等. 含内在矿物煤焦燃烧反应动力学模型研究[J]. 工程热物理学报,2010,31(8):1435-1439.
ZHANG Hong, LI Huan, SHI Haiyan, et al. Study on the kinetic models of the combustion of coal chars with included minerals [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(8): 1435-1439.
- [10] 刘小伟,姚洪,蔡攸敏,等. 煤粉密度对燃煤过程中颗粒物形成特性的影响[J]. 化工学报,2007,58(10):2567-2572.
LU Xiaowei, YAO Hong, CAI Youmin, et al. Effect of density fractionation on formation characteristics of particulate matter during coal combustion [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 58(10), 2567-2572.
- [11] HUANG Q, LI S, SHAO Y, et al. Dynamic evolution of impaction and sticking behaviors of fly ash particle in pulverized coal combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37: 4419-4426.
- [12] 郝娟,张洪,陈佳宝,等. 工业混煤煤粉中矿物质分布规律研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2012,46(4):756-763.
HAO Juan, ZHANG Hong, CHEN Jiabao, et al. Mineral distribution of industry blended coal powder [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(4): 756-763.
- [13] LI J, ZHU M, ZHANG Z, et al. Effect of coal blending and ashing temperature on ash sintering and fusion characteristics during combustion of Zhundong lignite [J]. Fuel, 2017, 195: 131-142.
- [14] 刘硕,周安宁,杨伏生,等. 配煤对煤灰熔融性及黏温特性的影响[J]. 洁净煤技术,2017,23(3):89-93.
LIU Shuo, ZHOU Anning, YANG Fusheng, et al. Effect of coal blending on ash-fusion and viscosity-temperature characteristics [J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(3): 89-93.
- [15] 张衡,张鹏启,王祖威,等. 准东粉煤不均匀熔融规律研究[J]. 洁净煤技术,2018,24(3):91-95.
ZHANG Heng, ZHANG Pengqi, WANG Zuwei, et al. Heterogeneous ash melting behavior of pulverized Zhundong coal [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(3): 91-95.
- [16] 张鹏启,杨琪琪,屠卡滨,等. 晋城粉煤灰不均匀熔融规律研究[J]. 燃料化学学报,2018,46(1):8-14.
ZHANG Pengqi, YANG Qiqi, TU Kabin, et al. Research on the uneven ash melting behavior of pulverized Jincheng coal [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2018, 46(1): 8-14.
- [17] 张洪,胡光洲,范佳鑫,等. 矿物在煤粉中的分布规律研究[J]. 工程热物理学报,2008,29(7):1231-1235.
ZHANG Hong, HU Guangzhou, FAN Jiaxin, et al. Study on the distribution of minerals in pulverized coals [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(7): 1231-1235.
- [18] 韩德馨. 中国煤岩学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1995.
HAN Dexin. China coal petrology [M]. Xuzhou: China University of mining and Technology Press, 1995.
- [19] 李文,白进. 煤的灰化学[M]. 北京:科学出版社,2013.
LI Wen, BAI Jin. Ash chemistry of coal [M]. Beijing: Science Press, 2013.