

研究简报

准东煤燃烧中矿物质转化行为的 CCSEM 研究

樊斌^{1,2}, 于敦喜¹, 曾宪鹏¹, 吕为智¹, 吴建群¹, 徐明厚¹

(¹ 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; ² 景德镇陶瓷学院材料科学与工程学院, 江西 景德镇 333403)

摘要: 在沉降炉中进行了准东煤的燃烧实验, 利用计算机控制扫描电镜技术 (computer controlled scanning electron microscopy, CCSEM) 研究了煤中矿物质的转化行为。研究表明煤中主要矿物为方解石、高岭石、含铁类物质以及未分类矿物, 燃烧后灰中石英、铁的氧化物、白云石的含量急剧增加, 未分类矿物和方解石的含量下降。同时对 3 种重要致渣元素 Na、Fe、Ca 在燃烧前后的矿物转化行为及颗粒粒径分布进行了详细研究。

关键词: 燃料; 煤燃烧; 反应; CCSEM; 矿物转化

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20151438

中图分类号: TK 24

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2016) 05—2117—07

Mineral transformation during Zhundong coal combustion by CCSEM

FAN Bin^{1,2}, YU Dunxi¹, ZENG Xianpeng¹, LÜ Weizhi¹, WU Jianqun¹, XU Minghou¹

(¹ State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

² School of Materials Science and Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403, Jiangxi, China)

Abstract: The mineralogy of Zhundong coal and its combustion-generated particles were characterized in detail by computer controlled scanning electron microscopy (CCSEM). The experiment was done on a lab-scale drop tube furnace. The results showed that there were calcite, kaolinite, pyrite, pyrrhotite, oxidized pyrrhotite and unclassified minerals in Zhundong coal. The mass fraction of quartz, iron oxide and dolomite increased sharply, while the mass fraction of calcite and unclassified minerals decreased. Also, the behaviors of Na, Fe and Ca as the important elements to the ash deposition, and their particle size distributions were investigated.

Key words: fuel; coal combustion; reaction; CCSEM; mineral transformation

引 言

准东煤田是近年在新疆探明的特大煤田, 煤炭资源预测储量 3900 亿吨, 目前累计探明资源储量 2136 亿吨, 煤田成煤面积 1.4 万平方公里, 是我国目前最大的整装煤田^[1]。以我国现在煤炭年产量计算, 一个准东煤田就能够全国使用一百年。但是,

准东煤在燃烧利用过程中容易出现炉膛水冷壁结焦, 导致锅炉炉膛出口烟温升高, 水平烟道受热面高温沾污, 积灰严重, 有时不得不停炉清焦^[2]。而煤中的矿物质是引起锅炉结渣沾污的主要原因^[3-4]。关于准东煤中矿物质的转化, 目前有不少学者进行了相关研究, 主要关注准东煤的碱金属赋存形态及灰熔融温度的影响等。如翁青松等^[5]研究了准东煤

2015-09-11 收到初稿, 2015-11-19 收到修改稿。

联系人: 于敦喜。**第一作者:** 樊斌 (1978—), 男, 博士研究生, 讲师。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB228501); 国家自然科学基金项目(51376071); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-11-0192)。

Received date: 2015-09-11.

Corresponding author: YU Dunxi, yudunxi@hust.edu.cn

Foundation item: supported by the National Basic Research Program of China (2013CB228501), the National Natural Science Foundation of China (51376071) and the Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-11-0192).

中碱金属的赋存形态对其燃烧特性的影响。范建勇等^[6]通过准东煤的灰熔融温度对其结渣特性进行了表征。赵庆庆等^[7]、王学斌等^[8]和马岩等^[9]研究了添加剂对准东煤灰熔融温度的影响。王礼鹏等^[10]通过某掺烧准东煤的电厂锅炉采样研究了准东煤混烧的沾污结渣特性。尽管上述学者对准东煤的灰熔融特性和沾污结渣特性进行了相关研究,但是其关注的是准东煤的整体矿物的转化,对于准东煤在燃烧前后的单颗粒矿物质的具体转化还不是很清楚,有待于进一步研究,以更好地了解其在燃烧过程中的迁移转化规律,从而加深对其沾污结渣机理的认识。

本文对原煤及燃烧后总灰样品的分析采用了先进的计算机控制扫描电镜 (computer controlled scanning electron microscopy, CCSEM) 技术。CCSEM 技术是传统体分析技术的重要补充,在获取矿物非均匀分布信息方面具有很大优势。CCSEM 技术是一种逐粒分析技术,它通过逐个分析大量 (>3000) 矿物颗粒,获得每个颗粒的元素组成、粒径、形状和截面积等物理参数,经过统计分析和相关处理,能够给出体分析技术无法获得的矿物非均一分布信息^[11-13]。CCSEM 数据处理主要包括矿物分类、内在与外在矿物的识别及相关统计分析。矿物类型的定义采用 Zygarlicke 等^[14]的研究结果,CCSEM 的详细分析过程可参考文献[13,15]。

1 实验部分

实验前将准东原煤进行干燥、研磨、筛分,煤粉粒径采用 63~100 μm 。准东煤原煤的工业分析和元素分析见表 1。煤粉燃烧实验在高温沉降炉中进行。高温沉降炉系统包括给粉器、反应器和取样装置 3 部分。取样管内设有水冷却装置并采用纯 N_2

表 1 原煤特性

Table 1 Raw coal properties

Proximate analysis/%				Ultimate analysis/%				
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	$O_{\text{ad}}^{\text{①}}$	N_{ad}	S_{ad}
7.25	3.56	40.13	49.06	65.77	3.95	14.60	4.36	0.51

① by difference.

淬冷,以防止煤灰颗粒的二次反应,关于实验系统的详细介绍可参考相关文献^[16]。燃烧气氛为模拟空气气氛 ($\text{O}_2/\text{N}_2 = 1:4$),给气量为 $4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,给粉速率为 $0.15 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$,燃烧温度设定为 1350°C 。煤样在该系统中进行燃烧,通过玻璃纤维滤筒收集燃烧后的总灰,总灰中含碳量经测定约 1%。

2 结果与讨论

2.1 燃烧前后矿物的组成特性

为了方便表示,在图中将煤和灰中的矿物分别用 coal 和 ash 表示。由图 1 可知,原煤中检测出的主要矿物为方解石 (calcite),高岭石 (kaolinite),其内外在形式基本各占一半,其次为黄铁矿 (pyrite),磁黄铁矿 (pyrrhotite),氧化的磁黄铁矿 (oxidized pyrrhotite),铁的氧化物 (iron oxide),再次为石英 (quartz),富硅 (Si-rich) 和富钙 (Ca-rich) 矿物,它们主要以外在矿的形式存在,还有很大一部分以未分类 (unclassified) 形式存在。图 1 还比较了煤及其灰中矿物的类型与含量。对比原煤可以发现,燃烧后煤灰中石英、铁的氧化物、白云石 (燃烧后为钙和镁的氧化物) 的含量明显增加,此外高岭石 (燃烧后为莫来石)、硬石膏、富硅和富钙矿物也有所增加,但方解石 (燃烧后为钙的氧化物) 的含量有所下降,黄铁矿、磁黄铁矿和氧化磁黄铁矿的含量为

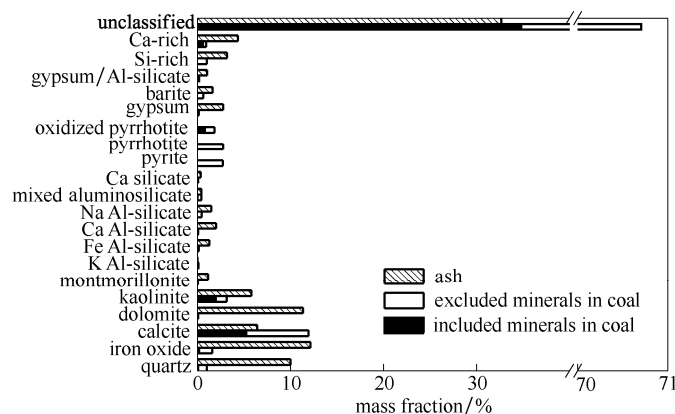


图 1 煤与灰中矿物组成

Fig.1 Minerals in coal and ash

零,说明燃烧中发生了彻底转化,生成铁的氧化物。

在 CCSEM 矿物分类中,通常将构成复杂,无法用已有规则进行分类的矿物归为未分类矿物,也称为复杂矿物。未分类矿物在准东煤中及灰中占有较大比例,因此其燃烧转化行为对颗粒物的形成也有很大影响。图 2 为煤与灰中未分类矿物氧化物成分分布,可以看出未分类矿物含 Ca、Si、Al、Mg 以及不同比例的 Fe、Na、K 等元素,表明它们实际上是组成复杂的硅酸盐,同时不难发现 Na、K、S、P 等易挥发元素在灰中未分类矿物中的含量急剧减少,表明在燃烧过程中发生了显著气化。

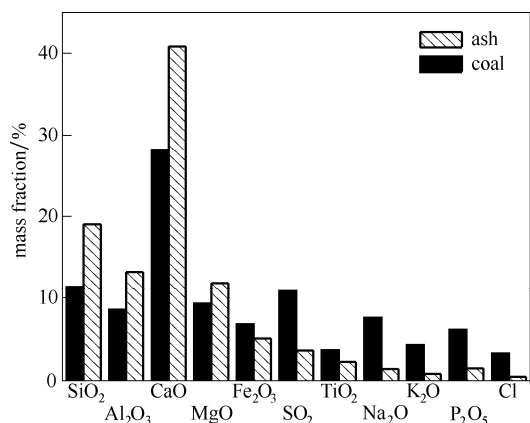


图 2 煤与灰中未分类矿物氧化物成分分布

Fig.2 Element distribution of unclassified mineral in coal and ash

2.2 燃烧前后矿物的粒径分布

图 3 比较了煤与灰中矿物颗粒的粒径分布,由图中可以发现颗粒小于 2.2 μm 的质量份额减小,表明在这个粒径下的部分颗粒发生了聚合转化为粒径大于 2.2 μm 的颗粒。22~100 μm 颗粒质量份额也是减小,这可能是由于一部分颗粒发生熔融聚合转化为大于 100 μm 的颗粒,导致 100~211 μm 颗粒

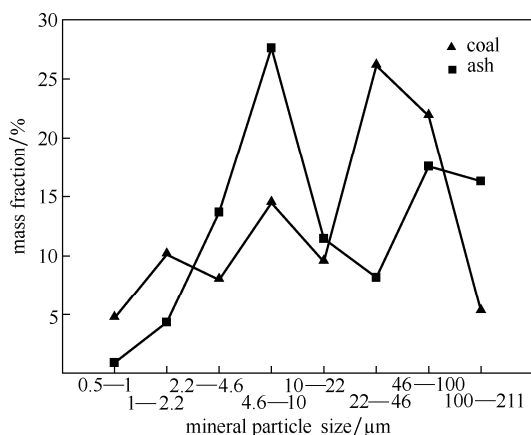


图 3 煤与灰中矿物粒径分布

Fig.3 Minerals particle size distribution in coal and ash

质量份额增加,同时一部分颗粒发生破碎导致 2.2~22 μm 颗粒质量份额增加。

下面以煤中主要的矿物质,方解石、高岭石、含铁类物质和未分类矿物(复杂矿物)为例,进一步深入分析各自的粒径转化规律。方解石为煤中常见的一种碳酸盐(另外两种碳酸盐白云石和铁白云石在本煤种中没有发现),方解石在 1200~1300 K 之间发生分解反应,生成 CaO 和 CO₂,同时在本实验中由图 4(a)可知,方解石颗粒发生了破碎,煤中大于 100 μm 的方解石颗粒发生了破碎进而转化为小粒径颗粒。Ten 等^[17]和 Yan 等^[18]都对空气气氛下方解石的破碎行为进行了研究。Ten 等^[17]利用模拟火焰研究了通过浮选得到的煤中方解石的转化行为,研究发现一个 60 μm 的方解石颗粒破碎为 10 个小颗粒。Yan 等^[18]利用沉降炉研究了一种天然方解石的转化行为,研究发现一个 45~63 μm 的方解石颗粒可破碎为 3 个小颗粒,产生的颗粒没有发生熔融和烧结。以上研究均表明在空气气氛下方解石颗粒在燃烧后均发生了破碎行为,与本实验结果是一致的。图 4(b)是煤及其灰中高岭石(莫来石)颗粒的粒径分布。高岭石是煤中重要的黏土矿物,不难发现,在 46 μm 以下,灰中莫来石含量均低于煤中高岭石含量,但是在 46 μm 以上,灰中莫来石含量急剧增加,这说明煤中小于 46 μm 的高岭石颗粒在燃烧过程中由于高温作用发生了熔融聚合形成了较大的残灰颗粒。图 4(c)是煤及其灰中含铁类物质,由图 2 可知,煤中主要含铁物质为黄铁矿、磁黄铁矿、氧化的磁黄铁矿和铁的氧化物,其粒径主要集中在 22~46 μm ,燃烧后主要转变为粒径大于 100 μm 的颗粒物。未分类的复杂矿物如图 4(d)所示,燃烧前主要集中在 22~100 μm ,燃烧后大颗粒粒径减小,主要转化为 10 μm 左右的颗粒。

2.3 重要致渣元素的转化行为

Na、Fe、Ca 是导致受热面积灰结渣的重要元素^[19-22],因此重点研究它们在燃烧过程中的转化行为具有重要的意义。由图 5 可知,钠在煤中主要是以未分类(复杂)矿物形式存在,少量以钠铝硅酸盐形式存在,燃烧后钠主要迁移到钠、钙、铁的硅铝酸盐以及富钙和富硅矿物中,未分类矿物中的钠含量急剧降低,这说明钠与硅铝酸盐等发生了相互作用。由图 6 可以看出,钠氧化物的质量份额在 100~211 μm 粒径段略有增加,但在其他粒径段内的份额均急剧减小,可能是钠在燃烧时发生了气化,形成了更小粒径(小于 0.5 μm)的颗粒,但是这部

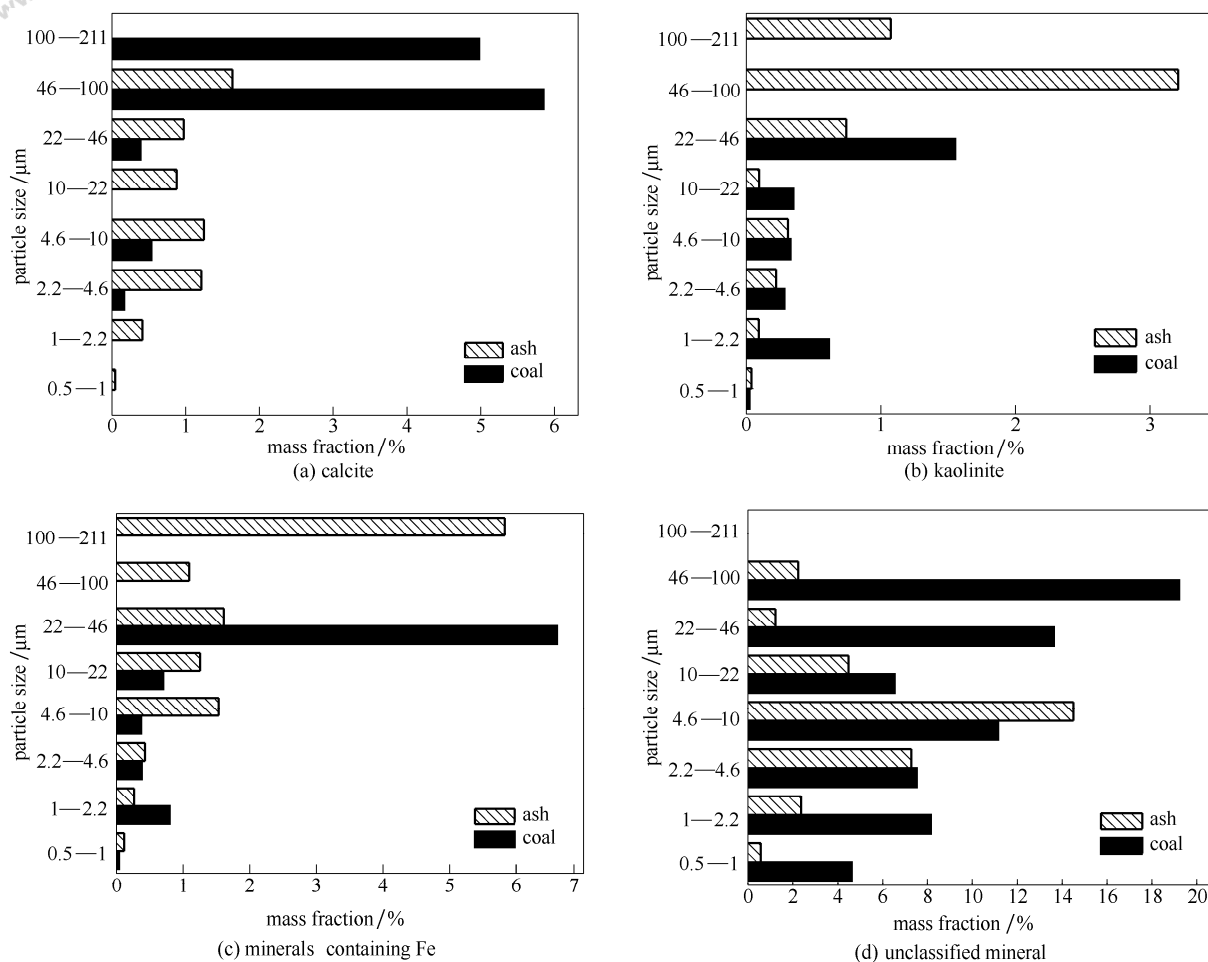


图 4 煤中主要矿物质量粒径变化

Fig.4 Minerals mass size distribution in coal and ash

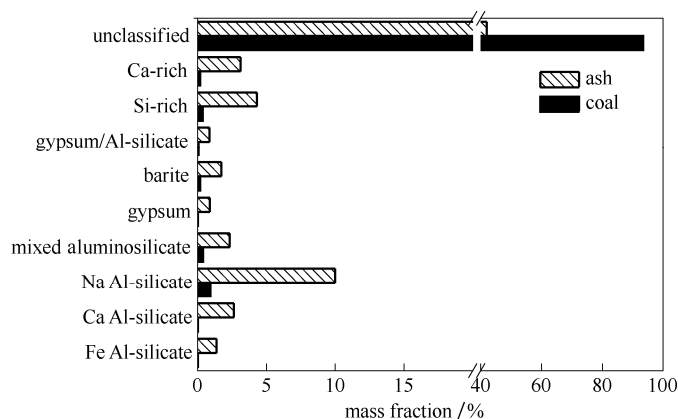


图 5 Na 在煤和灰中的矿物分布

Fig.5 Na distribution in coal and ash

分颗粒无法为 CCSEM 所检测。关于钠从煤中的释放, 已有研究^[23]表明钠从煤中释放分为两个阶段。第一阶段是在燃烧初期, 这个阶段钠实际上并没有真正从煤中挥发出来, 而是在煤中以不同形态发生相互转化。第二阶段是在燃烧后期, 钠才真正从煤

中释放出来。对于钠的释放目前研究认为有 3 种途径^[24-27]: 一是通过 NaCl 形式挥发, 二是通过有机钠转换成的 Na 原子形式挥发, 三是分别通过 Na 和 Cl 原子释放。Lee 等^[25]的研究结果认为, 钠蒸气是由煤中的 NaCl 直接蒸发而来。对于水合钠, Rassk^[27]

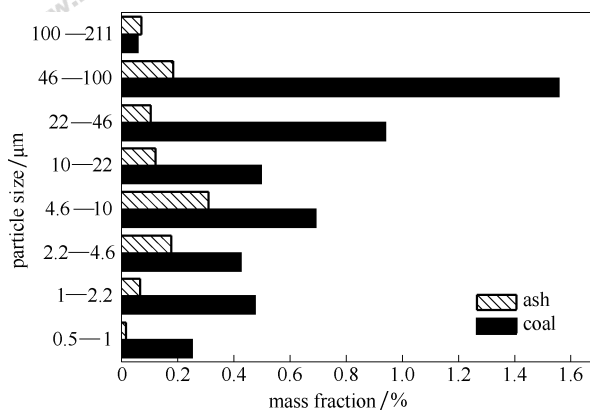


图6 Na_2O 在煤和灰中的质量粒径分布
Fig.6 Na_2O mass size distribution in coal and ash

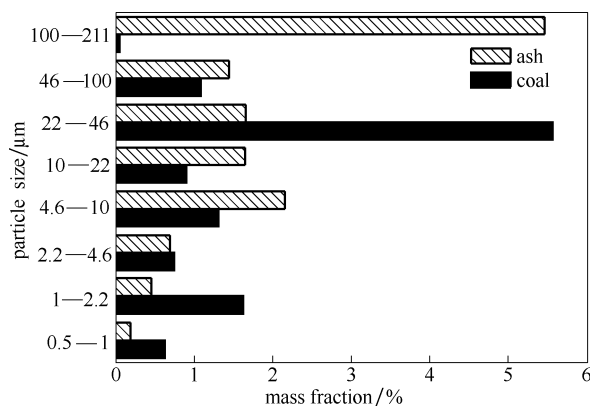


图8 Fe_2O_3 在煤和灰中的质量粒径分布
Fig.8 Fe_2O_3 mass size distribution in coal and ash

认为, 由于水分的存在, 钠在煤颗粒加热脱水的过程中会被带至颗粒表面并以 NaCl 的形式释放出来。对于有机钠, 则普遍认为通过钠原子的形式从煤中释放出来。基于铝元素示踪法的颗粒物模态识别研究^[16]表明, 小于 $0.3\ \mu\text{m}$ 的颗粒属于超细模态, 其主要的生成机理为气化凝结机理, 且其元素成分主要为易挥发元素。而目前 CCSEM 技术对于颗粒粒径小于 $0.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物无法检测, 所以可以推测从各个粒径段挥发出来的钠最终转移到小于 $0.5\ \mu\text{m}$ 的细颗粒中去了。

由图 7 可知, 煤中的 Fe 主要以黄铁矿、磁黄铁矿、氧化的磁黄铁矿以及铁的氧化物和未分类(复杂)矿物的形式存在, 而燃烧后基本上以铁的氧化物形式存在。有趣的是, 样品中以铁铝硅酸盐的形式存在的矿物含量很低, 且燃烧前后无明显变化, 表明燃烧过程中铁与硅铝酸盐之间的反应较弱。燃烧后富硅矿和铁白云石(实际是钙、铁氧化物)中 Fe 的含量升高, 表明铁与钙和硅发生了相互作用。

图 8 是铁的氧化物在煤和灰中的粒径分布, 在

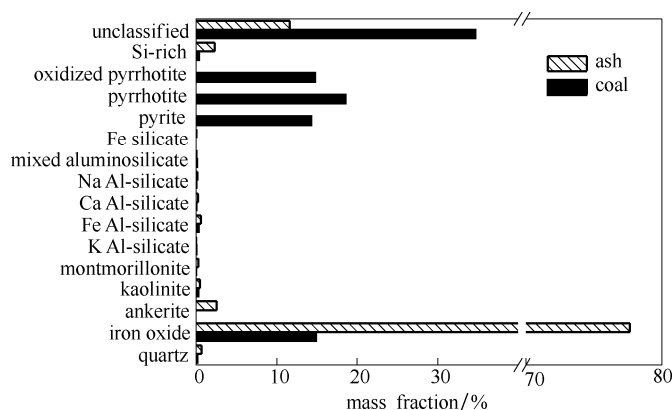


图7 Fe 在煤和灰中的矿物分布
Fig.7 Fe distribution in coal and ash

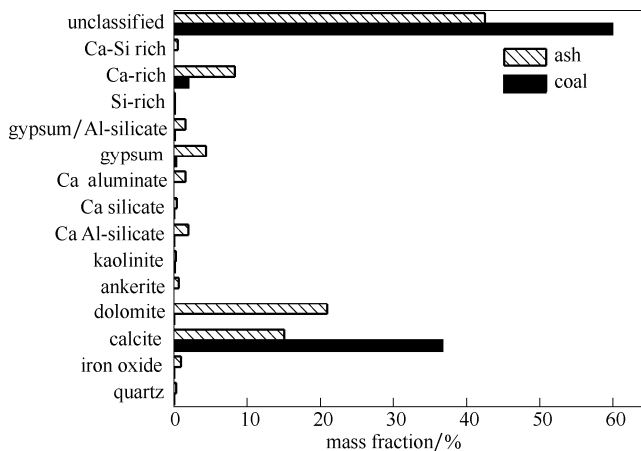


图9 Ca 在煤和灰中的矿物分布
Fig.9 Ca distribution in coal and ash

煤中其主要集中在 $22\sim46\ \mu\text{m}$, 燃烧后发生了熔融聚合, 转变为 $100\sim211\ \mu\text{m}$ 的颗粒中, 且其主要成分由图 7 可知为铁的氧化物。 $0.5\sim2.2\ \mu\text{m}$ 的含铁物质也发生了熔融聚合, 从而导致其中铁氧化物的质量份额下降。

Ca 在煤和灰中的矿物分布如图 9 所示。钙在煤中主要以未分类(复杂)矿物和方解石的形式存在, 燃烧后 Ca 发生了明显的迁移, 方解石的质量份额显著下降, 白云石(dolomite)、Ca-Al 硅酸盐、Ca 铝酸盐、石膏(gypsum)、石膏/铝硅酸盐以及富钙矿物含量均增加, 表明钙发生了硅酸盐化和硫酸盐化。同时从氧化钙在煤和灰中的质量粒径分布图(图 10)来看, 其变化趋势与图 4 中方解石和未分类(复杂)矿物质量粒径分布类似, 因为煤中的钙主要就是这两种类型的矿物存在。

3 结 论

本文利用计算机控制扫描电镜技术(CCSEM)

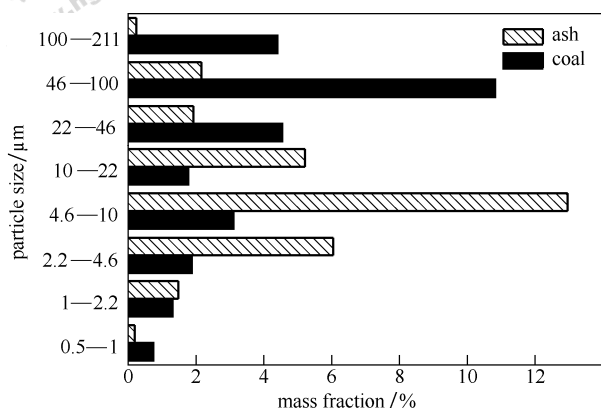


图 10 CaO 在煤和灰中的质量粒径分布

Fig.10 CaO mass size distribution in coal and ash

对准东煤在燃烧前后的矿物转化及粒径分布做了详细的表征和分析。得到以下主要结论。

(1) 准东煤中主要矿物为方解石、高岭石、含铁类物质（主要为黄铁矿、磁黄铁矿和氧化的磁黄铁矿）以及未分类（复杂）矿物，其内外在矿的形式基本为各占一半。

(2) 燃烧后，灰中石英、铁的氧化物、白云石的含量急剧增加，莫来石、硬石膏、富硅和富钙矿物都有所增加，未分类（复杂）矿物和方解石的含量有所下降。同时通过燃烧前后颗粒的质量粒径分布图，表明燃烧后颗粒发生了破碎和团聚行为。

(3) 通过对 Na、Fe、Ca 3 种对灰沉积有重要影响的元素进行分析，一部分 Na 发生了硅酸盐化，同时各个粒径段的 Na 均发生了气化。含 Fe 物质燃烧后主要转变为铁的氧化物，同时发生了熔融聚合。含 Ca 物质发生了硅酸盐化和硫酸盐化，同时颗粒发生了破碎行为。

References

- [1] 张守玉, 陈川, 施大钟, 等. 高钠煤燃烧利用现状 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, **33** (5): 1-12.
ZHANG S Y, CHEN C, SHI D Z, *et al.* Situation of combustion utilization of high sodium coal [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, **33** (5): 1-12.
- [2] 杨忠灿, 刘家利, 姚伟. 准东煤灰沾污指标研究 [J]. *洁净煤技术*, 2013, **19** (2): 81-84.
YANG Z C, LIU J L, YAO W. Fouling index of Zhundong coal ash [J]. *Clean Coal Technology*, 2013, **19** (2): 81-84.
- [3] BRYERS R W. Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1996, **22** (1): 29-120. DOI: 10.1016/S0360-1285(95)00012-7.
- [4] NARUSE I, KAMIHASHIRA D, KHAIRIL, *et al.* Fundamental ash deposition characteristics in pulverized coal reaction under high temperature conditions [J]. *Fuel*, 2005, **84** (4): 405-410. DOI: 10.1016/j.fuel.2004.09.007.
- [5] 翁青松, 王长安, 车得福, 等. 准东煤碱金属赋存形态及对燃烧特性的影响 [J]. *燃烧科学与技术*, 2014, **20** (3): 216-221.
WENG Q S, WANG C A, CHE D F, *et al.* Alkali metal occurrence mode and its influence on combustion characteristics in Zhundong coals [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2014, **20** (3): 216-221.
- [6] 范建勇, 周永刚, 李培, 等. 准东煤灰熔融温度表征结渣特性的试验研究 [J]. *煤炭学报*, 2013, **38** (S2): 478-482.
FAN J Y, ZHOU Y G, LI P, *et al.* Research on Zhundong coal's ash melting temperature characterizing its slagging characteristics [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, **38** (S2): 478-482.
- [7] 赵庆庆, 代纪邦, 金晶, 等. 添加剂对准东煤灰熔融特性的影响 [J]. *上海理工大学学报*, 2014, **36** (6): 511-515.
ZHAO Q Q, DAI J B, JIN J, *et al.* Effects of additives on Zhundong coal ash melting characteristics [J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2014, **36** (6): 511-515.
- [8] 王学斌, 魏博, 张利孟, 等. 温度和 SiO₂ 添加物对准东煤中碱金属的赋存形态及迁移特性的影响 [J]. *热力发电*, 2014, (8): 84-88. DOI:10.3969/j.issn.1002-3364.2014.08.084.
WANG X B, WEI B, ZHANG L M, *et al.* Effect of temperature and silicon additives on occurrence and transformation characteristics of alkali metal in Zhundong coal [J]. *Thermal Power Generation*, 2014, (8): 84-88. DOI:10.3969/j.issn.1002-3364.2014.08.084.
- [9] 马岩, 黄镇宇, 唐慧儒, 等. 准东煤灰化过程中的矿物演变及矿物添加剂对其灰熔融特性的影响 [J]. *燃料化学学报*, 2015, **42** (1): 20-25.
MA Y, HUANG Z Y, TANG H R, *et al.* Mineral conversion of Zhundong coal during ashing process and the effect of mineral additives on its ash fusion characteristics [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2015, **42** (1): 20-25.
- [10] 王礼鹏, 赵永椿, 张军营, 等. 准东煤沾污结渣特性研究 [J]. *工程热物理学报*, 2015, **36** (6): 1381-1385.
WANG L P, ZHAO Y C, ZHANG J Y, *et al.* Research on the slagging and fouling of Zhundong coal [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, **36** (6): 1381-1385.
- [11] WARD C R. Analysis and significance of mineral matter in coal seams [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2002, **50** (1): 135-168. DOI:10.1016/S0166-5162(02)00117-9.
- [12] HUGGINS F E. Overview of analytical methods for inorganic constituents in coal [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2002, **50** (1): 169-214. DOI:10.1016/S0166-5162(02)00118-0.
- [13] GUPTA R P, WALL T F, KAJIGAYA I, *et al.* Computer-controlled scanning electron microscopy of minerals in coal—implications for ash deposition [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1998, **24** (6): 523-543. DOI:10.1016/S0360-1285(98)00009-4.
- [14] ZYGARLICHE C J, STEADMAN E N. Advanced SEM techniques to characterize coal minerals [J]. *Scanning Microscopy*, 1990, **4** (3): 579-590.
- [15] YU D X, XU M H, ZHANG L, *et al.* Computer-controlled scanning electron microscopy (CCSEM) investigation on the heterogeneous nature of mineral matter in six typical Chinese coals [J]. *Energy & Fuels*, 2007, **21** (2): 468-476. DOI: 10.1021/ef060419w.
- [16] YU D X, XU M H, YAO H, *et al.* Use of elemental size distributions in identifying particle formation modes [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, **31** (2): 1921-1928. DOI:10.1016/j.proci.

2006. 07. 115.
- [17] TEN B H, EENKHOORN S, WEEDA M. The behaviour of coal mineral carbonates in a simulated coal flame [J]. *Fuel Processing Technology*, 1996, **47** (3): 233-243. DOI:10.1016/0378-3820(96)01012-0.
- [18] YAN L, GUPTA R, WALL T. Fragmentation behavior of pyrite and calcite during high-temperature processing and mathematical simulation [J]. *Energy & Fuels*, 2001, **15** (2): 389-394. DOI: 10.1021/ef000157c.
- [19] 兰泽全, 曹欣玉, 饶魁, 等. 电子探针分析炉内沾污结渣动态过程 [J]. *化工学报*, 2005, **56** (1): 24-29.
- LAN Z Q, CAO X Y, RAO S, *et al.* Fouling and slagging dynamic processes in boiler with electron probe microanalyzer [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2005, **56** (1): 24-29.
- [20] 吴乐, 吴建群, 罗嘉, 等. 煤样不同密度组分中致渣矿物特性的 CCSEM 研究 [J]. *化工学报*, 2014, **65** (8): 3221-3227. DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.08.050.
- WU L, WU J Q, LUO J, *et al.* CCSEM investigation on slag-inducing minerals in density-segregated coal samples [J]. *CIESC Journal*, 2014, **65** (8): 3221-3227. DOI:10.3969/j.issn.0438-1157.2014.08.050.
- [21] 吴乐, 吴建群, 于敦喜, 等. O₂/CO₂ 燃烧对神华煤 Ca 和 Fe 交互反应影响 [J]. *化工学报*, 2015, **66** (2): 753-758. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20141162.
- WU L, WU J Q, YU D X, *et al.* The influence of O₂/CO₂ combustion on interaction of Ca and Fe in Shenhua coal [J]. *CIESC Journal*, 2015, **66** (2): 753-758. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20141162.
- [22] BRYANT G W, BROWNING G J, EMANUEL H, *et al.* The fusibility of blended coal ash [J]. *Energy & Fuels*, 2000, **14** (2): 316-325. DOI: 10.1021/ef990093+.
- [23] 张军, 汉春利, 颜铮, 等. 煤中钠在燃料初期行为的研究 [J]. *燃料化学学报*, 2001, **29** (1): 49-53. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2409.2001.01.010.
- ZHANG J, HAN C L, YAN Z, *et al.* Experimental studies on the behaviour of sodium of coal in the initial stage of combustion [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2001, **29** (1): 49-53. DOI:10.3969/j.issn.0253-2409.2001.01.010.
- [24] MARSKELL W G, MILLER J M. Some aspects of deposit formation in pilot-scale pulverized-fuel-fired installations [J]. *J. Inst. Fuel*, 1956, **29** (188): 380-387.
- [25] LEE S H, TEATS F G, SWIFT W M, *et al.* Alkali-vapor emission from PFBC of illinois coals [J]. *Combustion Science and Technology*, 1992, **86** (1-6): 327-336.
- [26] 张军, 汉春利, 刘坤磊, 等. 煤中碱金属及其在燃烧中的行为 [J]. *热能动力工程*, 1999, **14** (2): 83-85. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2060.1999.02.002.
- ZHANG J, HAN C L, LIU K L, *et al.* Various forms of alkali metal in coal and its behavior during coal combustion [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 1999, **14** (2): 83-85. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2060.1999.02.002.
- [27] RASSK E. The behavior of potassium silicates in pulverized coal firing [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1982, **1** (8): 261-276.