



煤炭转化

Coal Conversion

ISSN 1004-4248, CN 14-1163/TQ



《煤炭转化》网络首发论文

题目：粉煤循环流化床锅炉燃煤的成灰和磨耗特性实验研究
作者：韩佩兴，尚曼霞，朱俊平，刘梁，黄中，刘青，柯希玮
收稿日期：2024-09-29
网络首发日期：2025-01-27
引用格式：韩佩兴，尚曼霞，朱俊平，刘梁，黄中，刘青，柯希玮. 粉煤循环流化床锅炉燃煤的成灰和磨耗特性实验研究[J/OL]. 煤炭转化.
<https://link.cnki.net/urlid/14.1163.TQ.20250126.1616.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

粉煤循环流化床锅炉燃煤的成灰和磨耗特性实验研究

韩佩兴^{1,3} 尚曼霞² 朱俊平³ 刘梁²

黄中^{1,2,4} 刘青² 柯希玮^{1,4}

(1.怀柔实验室山西研究院, 030032 太原; 2.清华大学能源与动力工程系, 100084 北京; 3.太原锅炉集团有限公司, 030008 太原; 4.北京怀柔实验室, 101499 北京)

摘要 燃煤的成灰磨耗特性是影响 CFB 锅炉物料流化特性和传热传质性能的重要因素之一。常规 CFB 锅炉成灰磨耗实验所用煤样是从 0~10 mm 粗原煤颗粒中简单筛分获得, 而粉煤循环流化床 (powdered coal-circulating fluidized bed, PC-CFB) 锅炉燃用的是由碎煤机直接制备的 0~1 mm 粉煤。破碎至 0~1 mm 的粉煤与简单筛分至 0~1 mm 的粉煤的矿物成分存在差异, 因此两者的成灰磨耗特性是不同的, 则常规 CFB 成灰磨耗实验数据可能不再适用于 PC-CFB。为此, 提出了适用于 PC-CFB 锅炉的成灰磨耗实验方法。选取交城无烟煤、朔州烟煤和红河褐煤三种煤样分别进行了常规 CFB 和 PC-CFB 成灰磨耗实验, 分析对比了两种实验条件下煤样在 0~1 mm 粒径段的成灰与磨耗数据, 并对灰样的化学组分进行测定。结果表明: 三种煤样的破碎粉煤和筛分粉煤的成灰磨耗实验数据均存在显著差异, 各煤种的破碎粉煤成灰中粗颗粒的占比均高于筛分粉煤成灰。常规 CFB 和 PC-CFB 成灰方法计算得到的粉煤成灰粒度分布在 0.2 mm~0.5 mm 区间内大体一致, 而在两端质量分数差别较大, 筛分粉煤与破碎粉煤的流化磨耗速率常数 (K_{af}) 也有明显差别, 因此原有常规 CFB 成灰磨耗实验不再适用, 验证了 PC-CFB 锅炉成灰磨耗实验方法的必要性。

关键词 粉煤循环流化床, 成灰特性, 磨耗速率, 破碎, 灰成分分析

创新点 提出了适用于粉煤循环流化床 (PC-CFB) 锅炉的燃煤成灰磨耗实验方法, 将煤样烘干筛分后, 将大于 1 mm 的各档煤样分别破碎至 0~1 mm 后再静态燃烧, 之后再行常规的成灰和磨耗实验。区别于常规方法所用煤样是由 0~10 mm 粗原煤颗粒中简单筛分获得, PC-CFB 成灰磨耗方法新增了大于 1 mm 的各粒径档煤样的破碎步骤, 解决了由燃煤矿物成分的非均质分布引发的常规成灰磨耗方法不适用于 PC-CFB 锅炉的问题; 获得了无烟煤、烟煤和褐煤三种煤样在常规方法和 PC-CFB 方法下粉煤的成灰和磨耗特性, 并分析了导致两种实验条件下粉煤成灰磨耗差异的主要因素。

创新点 适用于 PC-CFB 的燃煤成灰磨耗实验方法; 无烟煤、烟煤和褐煤的成灰磨耗特性; 灰成分 XRF 分析; 破碎粉煤和筛分粉煤成灰磨耗差异的主要因素。

中图分类号 TK16

0 引言

随着风电、太阳能发电等可再生能源的装机容量逐年提升, 其间歇性、波动性、随机性等固有属性导致其大规模的并网发电对我国电网的运行可靠性提出了更高的挑战^[1]。基于此背景, 我国火电的定位也从原来的基础保障型向负荷调节型转变, 承担着基荷、备用和调峰的重大使命^[2]。循环流化床 (CFB) 锅炉因其燃烧效率高、燃料适应性强、低负荷运行性能好、污染物控制成本低等优势, 已成为我国燃煤发电的主流^[3-4]。为进一步提高 CFB 锅炉的

*国家重点研发计划资助项目 (2022YFB4100305) 和怀柔实验室某重大专项。

第一作者: 韩佩兴, 实习研究员, E-mail: hanpeixing@sxri.hrl.ac.cn; 通信作者: 柯希玮, 博士、副研究员, E-mail: kexiwei@sxri.hrl.ac.cn

收稿日期: 2024-09-29; 修回日期: 2025-01-22

运行灵活性和可靠性,清华大学吕俊复等提出,将给煤粒径从常规的 0~10 mm 宽筛分分布变为 0~1 mm 的窄筛分分布,即发展粉煤循环流化床(PC-CFB)燃烧技术^[5]。CFB 锅炉的基本特征是存在一个很大的固体物料循环,物料的循环率、床料的粒径分布等参数决定了 CFB 锅炉的运行性能^[6-7]。PC-CFB 锅炉给煤粒度的降低改变了炉内的物料平衡,从而影响着炉内的传热传质、燃烧效率、污染物排放等特性^[8-11]。煤灰在床料中的份额达到 90%以上^[12],因此燃煤的成灰磨耗特性对研究 PC-CFB 锅炉的物料平衡至关重要。

针对流化床燃烧条件下燃料成灰磨耗特性,前人开展了较多实验研究,掌握了不同煤种的初始成灰粒径分布与灰颗粒在不同床温、流化风速下的磨耗参数。例如,ZHANG et al^[13]给出了灰的磨耗速率随表观气体流速的关系,指出磨耗速率常数随灰颗粒的粒径增大而减小;庄亚明等^[14]对南非煤和淮北烟煤进行了成灰特性研究,实验表明南非煤灰细颗粒质量占比在 40%以上,淮北烟煤细颗粒份额小于 20%,说明南非煤燃烧时更易破碎和磨损,产生大量细灰。KE et al^[15]通过实验获得了两种印度尼西亚煤种的成灰数据,分析结果表明灰的性质随其粒径发生明显改变,灰颗粒各粒径档的化学成分不同导致了其磨耗速率的差异性。LI et al^[16]研究了给煤的成灰磨耗特性,实验表明灰颗粒化学成分的不均匀性是决定其磨耗速率的关键因素,主体由 SiO₂ 和 Al₂O₃ 组成的大颗粒的磨耗速率较低,而主要由 Fe₂O₃ 和 CaO 组成的小颗粒则有较高的磨耗速率。煤灰颗粒经过燃烧和初始的快速磨耗阶段以后得到的粒度分布,即称之为该煤种的本征成灰数据^[17]。

以往的成灰磨耗实验,多参照常规模煤方式,即原煤经电厂破碎系统(一级或二级)简单破碎筛分后,将 0~10 mm 粗煤颗粒直接送入炉膛。针对该宽筛分范围内不同粒径煤颗粒(包括 0~1 mm 的细煤,定义为“筛分粉煤”),分别获得燃烧后灰颗粒粒径分布;再根据各粒度原煤颗粒质量份额,折算获得该给煤下的初始成灰分布。然而,对于 PC-CFB 燃烧系统,粗煤块经多级破碎机或磨煤机,被全部直接制备成 0~1 mm 的细颗粒(定义为“破碎粉煤”)。一个自然的问题是,“破碎粉煤”与“筛分粉煤”的成灰粒径是否一致?若煤中矿物质分布均匀且组成相似,两者理论上应接近。但实际大多数煤种矿物质分布非常不均匀,大煤块中或含有较多硬质矸石类物质,成核较大,其随原煤破碎、燃烧后保持了原有部分性质,灰颗粒较大;而筛分下来的细煤中灰核一般较小且质地偏软,燃烧后成灰也较细。因此,“筛分粉煤”的成灰磨耗特性不总是能代表“破碎粉煤”的特征,通过常规 CFB 成灰磨耗实验获得的成灰数据能否直接用于 PC-CFB 锅炉也有待商榷。

本研究选取具有代表性的无烟煤、烟煤和褐煤三种煤样,对每一种煤样分别开展常规成灰磨耗和粉煤成灰磨耗实验,对比分析了在 0~1 mm 粒径段的筛分粉煤与破碎粉煤的成灰分布和磨耗特性。最后,基于上述实验研究结果,提出了适用于 PC-CFB 燃烧技术的成灰特性实验方法和数据。

1 实验方法

1.1 原煤性质

本实验选取了朔州烟煤、交城无烟煤和红河褐煤三种煤样做分析测试,每种煤样的总质量不少于 50 kg。在实验过程中,对三种煤样做了破碎与筛分处理,各粒径档煤样的工业分析和元素分析见表 1。总体来看,三种原煤各粒径档间及各粒径档破碎前后的分析结果均相差不大。

表 1 各粒径档原煤的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analyses of raw coals with different particle sizes

粒径/mm	工业分析 w / %				元素分析 w / %					$Q_{net,ar}/$ (MJ kg ⁻¹)
	M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	
朔州 0~1	0.66	40.44	24.09	34.81	44.12	3.09	9.80	0.78	1.11	16.81
朔州 1~2	0.84	41.70	24.20	33.26	43.15	3.25	9.28	0.74	1.04	16.45
朔州 2~3.2	0.94	45.42	22.93	30.71	39.41	3.09	9.40	0.68	1.06	14.91
朔州 3.2~6	1.22	41.22	23.38	34.18	43.14	3.24	9.31	0.75	1.12	16.41
朔州 6~8	1.09	44.50	23.86	30.55	40.61	3.17	8.98	0.71	0.94	15.32
朔州 8~10	1.12	45.45	22.79	30.64	39.42	3.14	9.21	0.67	0.99	14.93
朔州 0~1* (1~2)	0.82	44.40	23.55	31.23	40.62	3.04	9.41	0.71	1.00	15.39
朔州 0~1* (2~3.2)	0.99	42.80	24.06	32.15	41.76	3.11	9.57	0.73	1.04	15.92
朔州 0~1* (3.2~6)	1.04	43.69	23.45	31.82	41.12	3.06	9.41	0.72	0.96	15.63
朔州 0~1* (6~8)	1.20	41.06	23.91	33.83	43.47	3.20	9.24	0.77	1.06	15.63
朔州 0~1* (8~10)	1.18	39.74	24.45	34.63	44.99	3.29	9.01	0.79	1.00	17.20
交城 0~1	0.37	45.43	10.63	43.57	45.21	2.33	4.25	0.67	1.74	16.86
交城 1~2	0.46	44.81	10.32	44.41	45.71	2.58	3.74	0.63	2.07	17.00
交城 2~3.2	0.43	40.67	10.32	48.58	49.63	2.48	4.03	0.69	2.07	18.74
交城 3.2~6	0.43	47.58	10.33	41.66	42.21	2.22	4.41	0.65	2.50	15.70
交城 6~8	0.43	52.02	10.32	37.23	38.12	2.12	5.32	0.77	1.22	13.68
交城 8~10	0.57	51.26	10.88	37.29	38.79	2.15	5.61	0.64	0.98	14.04
交城 0~1* (1~2)	0.39	40.16	10.25	49.20	49.70	2.54	4.54	0.72	1.95	18.76
交城 0~1* (2~3.2)	0.43	43.58	10.17	45.82	46.76	2.43	4.14	0.65	2.01	17.45
交城 0~1* (3.2~6)	0.49	51.51	10.04	37.96	38.76	2.10	4.70	0.58	1.86	14.06
交城 0~1* (6~8)	0.52	42.96	11.06	45.46	47.28	2.49	4.24	0.67	1.84	17.70
交城 0~1* (8~10)	0.55	49.85	10.41	39.19	41.04	2.26	4.39	0.71	1.20	14.97
红河 0~1	2.74	26.82	37.57	32.87	47.84	3.56	14.05	1.42	3.57	18.15
红河 1~2	2.80	22.03	38.85	36.32	51.49	3.76	15.07	1.52	3.33	19.55
红河 2~3.2	3.06	19.78	39.57	37.59	53.34	3.91	14.99	1.54	3.38	20.30
红河 3.2~6	2.86	20.59	39.59	36.96	53.30	3.97	14.44	1.56	3.28	20.29
红河 0~1* (1~2)	3.17	21.25	38.83	36.75	52.26	3.89	14.80	1.53	3.10	19.84
红河 0~1* (2~3.2)	3.10	19.99	39.28	37.63	53.16	3.98	15.04	1.56	3.17	20.19
红河 0~1* (3.2~6)	3.29	17.98	40.34	38.39	54.37	3.96	15.63	1.63	3.14	20.81

*破碎粉煤，括号内为破碎前粒径

1.2 成灰和磨耗实验

研究表明，在流化床燃烧条件下，煤颗粒的破碎与磨损对最终灰分粒度分布的影响是独立的，只和煤种有关，且颗粒的磨损程度与系统向其提供的能量有关^[18-19]。因此，机械筛分得到的成灰数据与流化床得到的结果可以互相转换^[20]。基于此原理，清华大学提出了静态燃烧与冷态振筛（SCCS）相结合的实验方法来进行煤种的成灰磨耗特性研究^[12]。

在机理层面，CFB 流化系统对灰颗粒的激励是流化介质向颗粒提供的能量，而在振动系统中则是机械振动为颗粒提供能量，这两种激励对颗粒的影响是相同的^[21-22]。因此，可用机械振筛的简单方式来模拟颗粒在流化床内复杂的磨耗过程。

文献^[23]指出灰颗粒的磨耗速率随时间下降并趋于一个常数，定义颗粒磨耗速率下：

$$R = -\frac{1}{m} \frac{dm}{dt} \quad (1)$$

式中： R 为颗粒的磨耗速率， min^{-1} ； m 为某一时间时特定尺寸的颗粒的质量， kg 。

在流化床系统中，灰颗粒的流化磨耗速率 R_{af} 与过量气体流速成正比，与流化磨耗速率常数 K_{af} 成正比^[24]，其可表示如下：

$$R_{af} = K_{af} (U_g - U_{mf}) \quad (2)$$

式中： K_{af} 是流化磨耗速率常数， m^{-1} ； U_g 为表观流化速度， m/s ； U_{mf} 为最小流化速度， m/s 。

在振筛磨耗系统中，灰颗粒的磨耗速率与振动能量有关，振动能量可通过振幅体现，因此振筛磨耗速率 R_{as} 可表示为^[22]：

$$R_{as} = K_{as} A^2 \quad (3)$$

式中： K_{as} 为振筛磨耗速率常数， $1/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ； A 为振动幅度， m 。

如上所述，流化系统与振筛系统对灰颗粒的激励是一致的， R_{as} 与 R_{af} 可通过关联式相互转化，通过静态燃烧和冷态振筛得到灰颗粒的 K_{as} 可以转化为 K_{af} ^[12]。

本研究基于 SCCS 方法，提出了如下的实验方案：选取具有代表性的无烟煤、烟煤和褐煤三种煤样，对每一种煤样分别开展常规成灰和粉煤成灰实验。实验流程如图 1 所示，具体操作步骤如下：

(1) 常规成灰磨耗实验

- a) 将煤样放置于预先升温至 130°C 的鼓风干燥箱中烘干 4~6 h，完全干燥后密封保存；
- b) 使用电磁振筛机对煤样进行燃烧前筛分，筛分时间为 15 min，得到 0~1 mm，1~2 mm，2~3.2 mm，3.2~6 mm，6~8 mm 和 8~10 mm 六个粒径档；
- c) 将各粒径档煤样送入电阻炉中进行静态燃烧，燃烧温度设置为 850°C ，时长为 6 h 以上，保证煤样得到充分燃烧。各粒径档煤样最终的成灰质量不低于 300 g；
- d) 将不同粒径档原煤的灰样，分别送入振筛试验台进行筛分，振筛机的振幅设置为 2 mm。每 10 min 测量一次每一档灰样的质量份额变化，灰样在初始阶段质量份额变化很快，随着时间的增加，质量份额变化减小，当质量份额趋于不变时，即认为达到稳定磨耗阶段，质量分布为本征成灰分布。振筛机上的标准筛从下到上依此为 $30 \mu\text{m}$ ， $60 \mu\text{m}$ ， $100 \mu\text{m}$ ， $150 \mu\text{m}$ ， $200 \mu\text{m}$ ， $300 \mu\text{m}$ ， $400 \mu\text{m}$ ， $500 \mu\text{m}$ ， $1000 \mu\text{m}$ ， $2000 \mu\text{m}$ ， $3200 \mu\text{m}$ ， $6000 \mu\text{m}$ ， $8000 \mu\text{m}$ ，灰样共分 14 档。

(2) 粉煤成灰磨耗实验

- a) 煤样的烘干与燃烧前筛分，处理同常规成灰磨耗实验；
- b) 在进行静态燃烧前，除 0~1mm 粒径档外，将其他各粒径档煤样分别破碎至 0~1 mm，标记为 0~1*(x~x)破碎粉煤，括号内是破碎前粒径范围。本文使用鄂式破碎机对煤样进行破碎，将所研究的大于 1 mm 粒径档煤样破碎后过 1 mm 粒径筛网，将大于 1 mm 的煤颗粒反复破碎，直至其 1 mm 以上粒径在该档煤样质量分数占比小于 5%。各粒径档原煤破碎后的粉煤粒径分布见图 2；

c) 和 d) 步骤同前述常规成灰磨耗实验。

1.3 灰样性质测试

取筛分粉煤和破碎粉煤的 $400 \mu\text{m}$ ~ $500 \mu\text{m}$ 灰样做 X 射线荧光法 (XRF) 测试，以对其元素组成进行定量分析，各元素均以氧化物形式存在。在进行 XRF 测试之前，所有样品都被研磨成小于 0.2 mm 的粉末。

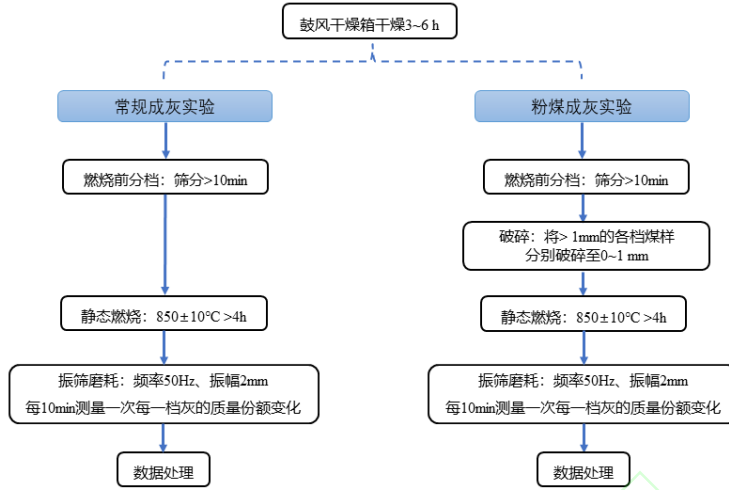


图1 成灰磨耗实验流程

Fig.1 Flow chart of ash formation and attrition experimental

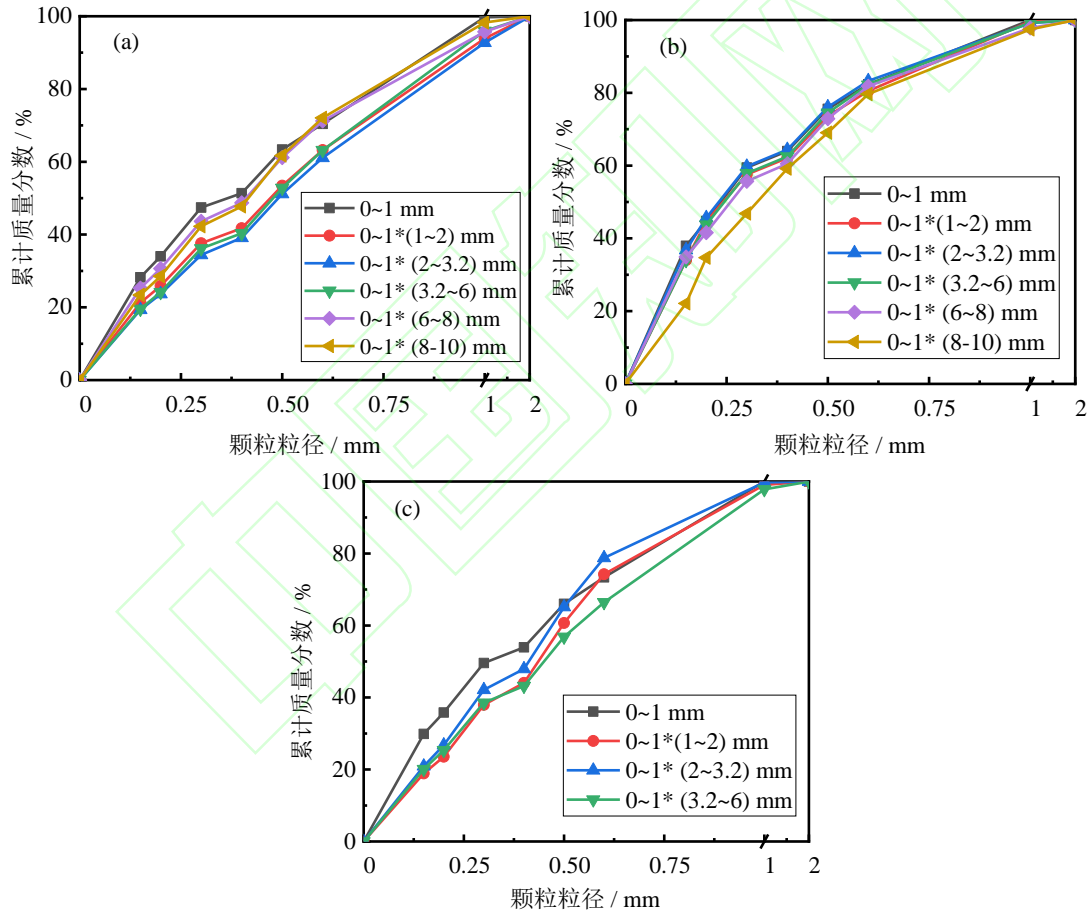


图2 粉煤的粒度分布

Fig.2 Particle size distribution of powdered coals

a—朔州烟煤; b—交城无烟煤; c—红河褐煤

2 结果与讨论

2.1 常规成灰实验

三种煤样的常规成灰矩阵如图3所示。朔州烟煤的本征成灰为双峰分布，且成灰的粗颗粒（与各粒径档原煤粒度相同的灰样）占比较高（大于30%），其中，1 mm~2 mm，2 mm~3.2

mm 和 3.2 mm~ 6 mm 三个粒径档粗颗粒占比接近 50%，说明其一二次破碎特性和磨耗特性较差；交城无烟煤成灰也呈双峰分布，粗颗粒占比最高，其余集中于 100 μm~ 300 μm 粒径段。红河的成灰粒度分布有所不同，粗颗粒和细颗粒质量占比较高，而处于中间粒度范围内的灰颗粒则占比较小。

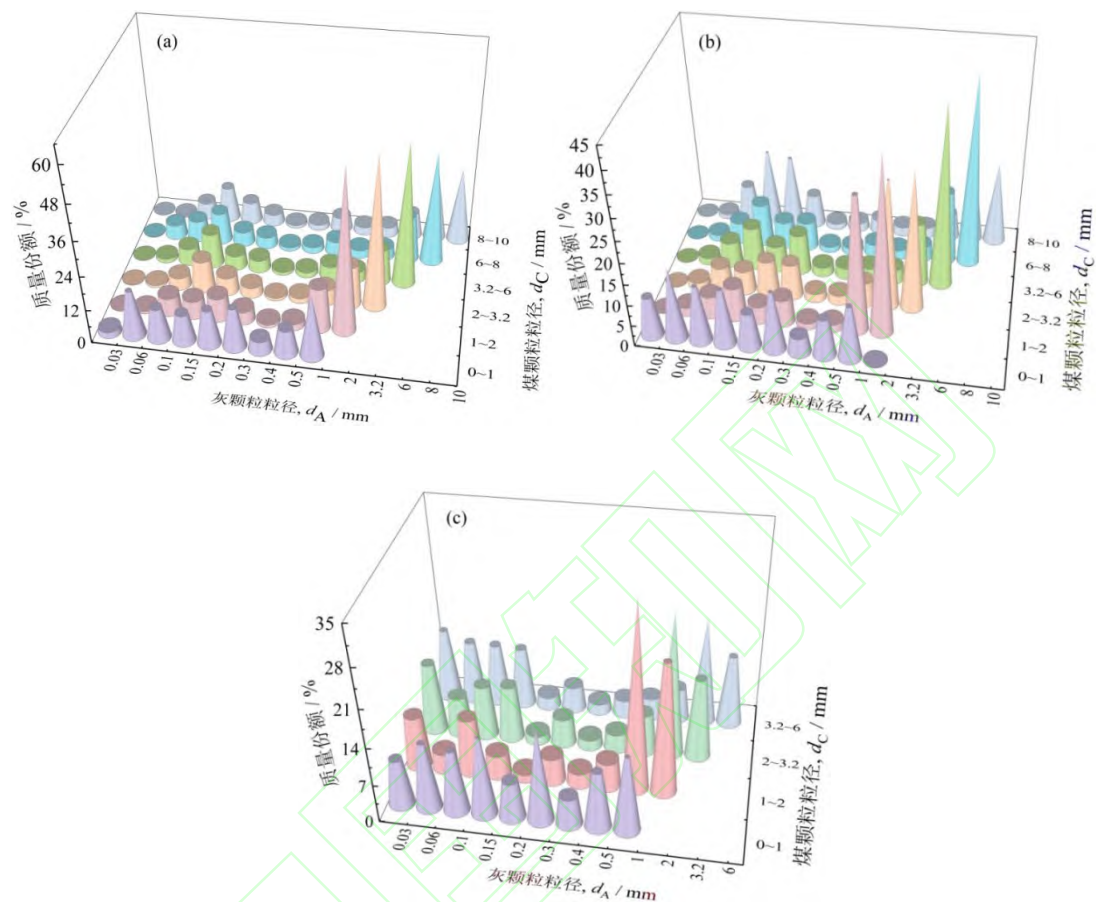


图3 三种燃煤的成灰矩阵

Fig.3 Ash formation matrix of three types of raw coals

a—朔州烟煤；b—交城无烟煤；c—红河褐煤

2.2 PC-CFB 成灰实验

图 4 所示为三种燃煤的 PC-CFB 成灰矩阵，图中 X 向坐标为成灰的颗粒粒径，Y 向坐标为筛分粉煤和各档破碎粉煤，由图可以看出，三类煤种的破碎粉煤与筛分粉煤的成灰分布均差别较大，各煤种的破碎粉煤成灰中粗颗粒占比均高于筛分粉煤，整体成灰的平均粒径也高于筛分粉煤。

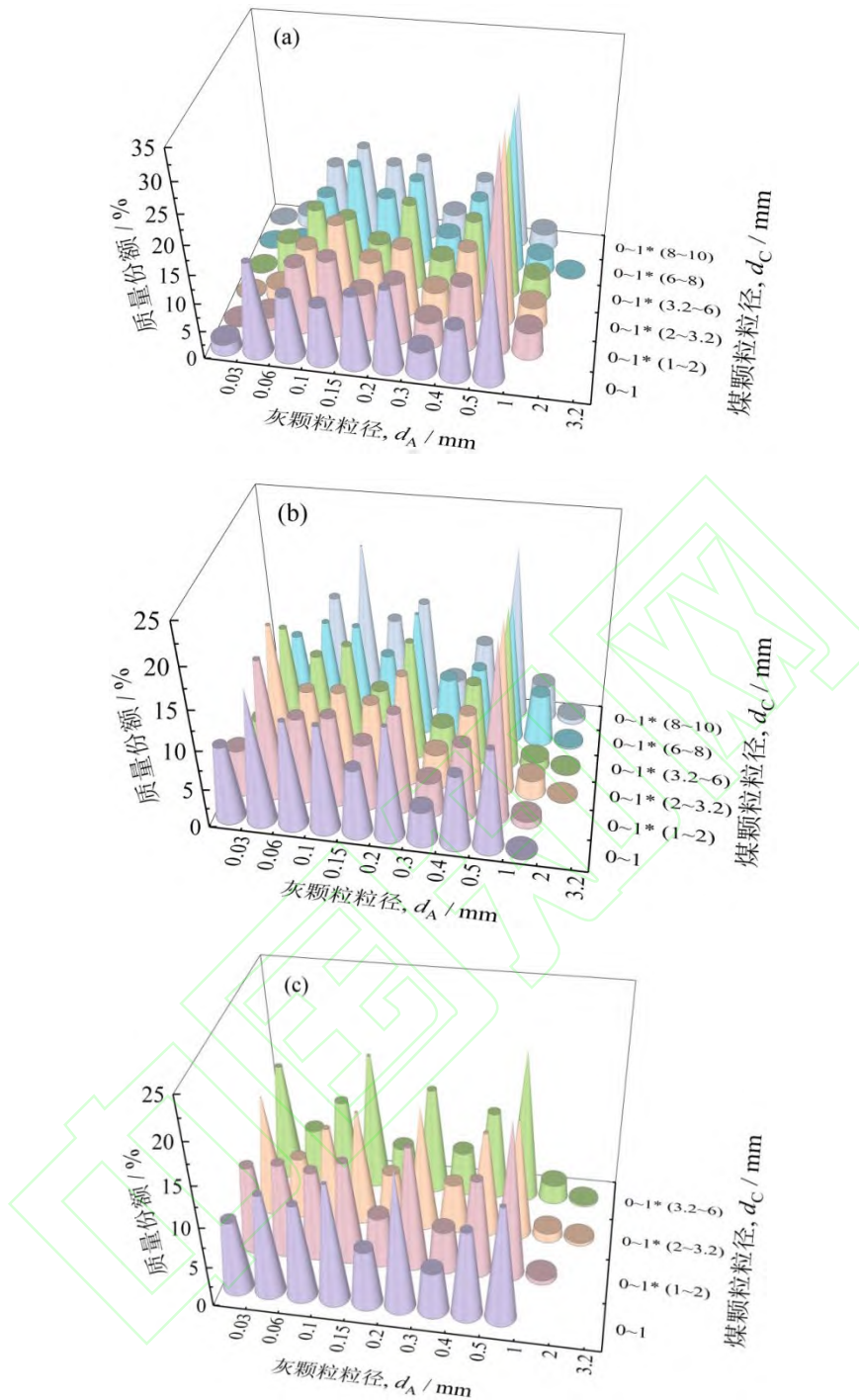


图 4 三种燃煤的粉煤成灰粒度分布

Fig.4 Ash particle size distribution of three types of powdered coals

a—朔州烟煤；b—交城无烟煤；c—红河褐煤

对于交城和朔州煤样，破碎粉煤与筛分粉煤的成灰粒度分布区别较明显——筛分粉煤灰中细颗粒质量占比较高。对于红河褐煤，与交城和朔州的破碎粉煤灰中细颗粒质量占比很小的情况不同，红河破碎粉煤灰中细颗粒的质量占比均高于 20%。

为了比较常规 CFB 成灰特性与 PC-CFB 成灰特性，图 5a 所示为电厂给煤原煤粒径分布，并以此作为加权计算基准，分别按照常规 CFB 成灰方法（筛分 0~1 mm 煤颗粒直接燃烧成灰）和 PC-CFB 成灰方法（全部破碎至 0~1 mm，结合图 4 成灰矩阵，按照各粒径档原煤颗粒质量份额线性叠加），对粉煤成灰粒度分布进行计算。按两种方法得到的粉煤成灰灰

度分布如图 5 所示，考虑到实验过程粗煤颗粒在使用破碎机破碎时不能保证全部煤样均破碎为 1 mm 以下，为了与实验保持一致，在图 5 上给出了大于 1 mm 的粒径占比。

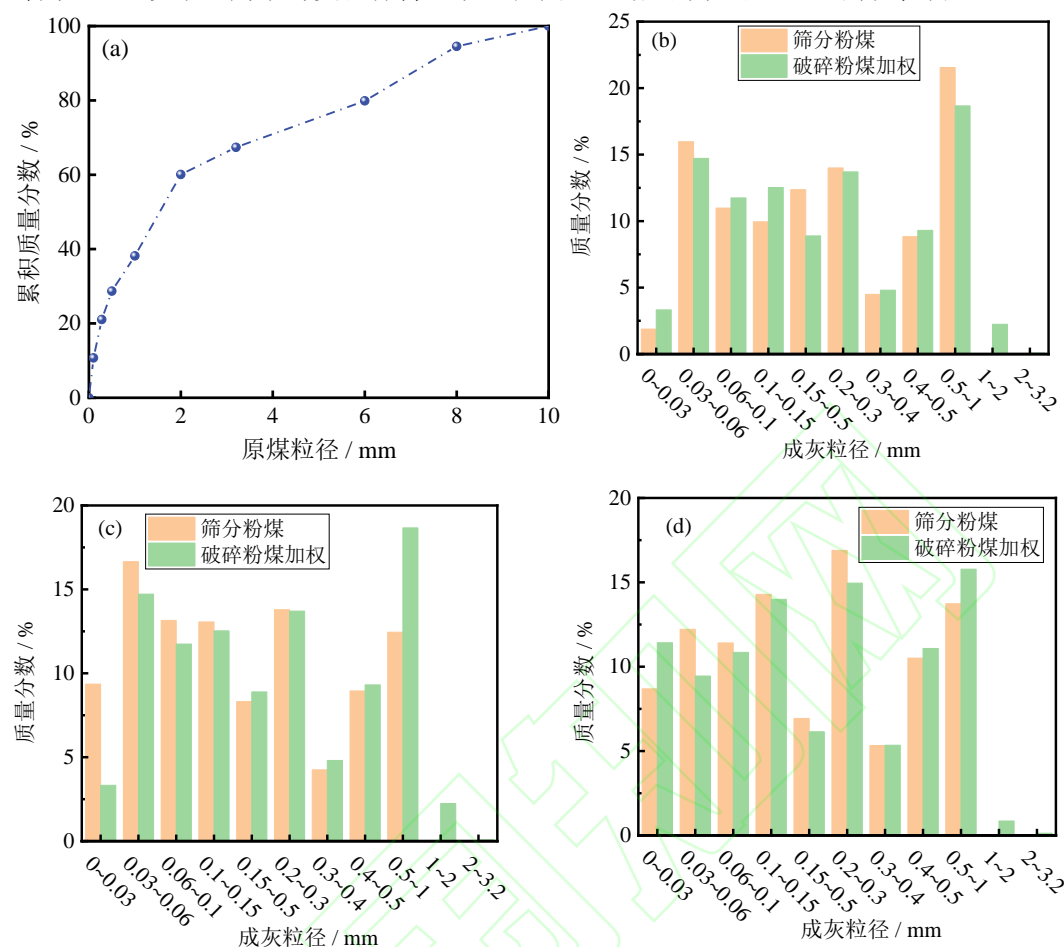


图 5 粉煤成灰粒度分布计算

Fig.5 Calculation results of ash particle size distribution of powdered coals

a—原煤粒径分布；b—朔州粉煤成灰粒度分布比较；c—交城粉煤成灰粒度分布比较；
d—红河粉煤成灰粒度分布比较

两种成灰方法计算得到的粉煤成灰粒度分布在 0.2 mm~0.5 mm 区间内大体一致，而在两端质量分数差别较大，相差近 10%。造成这种差别的原因与不同粒径煤颗粒中灰核分布及其性质有关。原始细煤中灰核更小且分散，质地也偏软；而粗煤颗粒中灰核偏大且更硬^[25]，即使破碎至粉煤后仍在一定程度上保留了原来的灰分特性，因此燃烧后成灰粒度也偏大。由此可以看出，不能直接将原有常规 CFB 成灰实验数据作为 PC-CFB 锅炉计算的输入参数。

2.3 磨损特性

图 6 所示为三种煤样的流化磨损速率常数随原煤粒径档的变化，各煤种筛分粉煤与破碎粉煤的 K_{af} 有明显差别。三种煤样的 K_{af} 在各档粉煤间呈现出不同的变化趋势。交城与红河的破碎粉煤灰的 K_{af} 明显高于筛分粉煤灰，并且随着原煤粒径的增大， K_{af} 有增大的趋势，而朔州粉煤灰的 K_{af} 则呈现出相反的趋势。有研究认为磨损在一定程度上取决于颗粒的总暴露面积，然而对于各档粉煤灰（0.4 mm~0.5 mm）而言，暴露面积相近，同时该因素在破碎模式中并非是关键，因此我们推测造成这种差异的原因主要与灰分自身的物理化学性质相关。

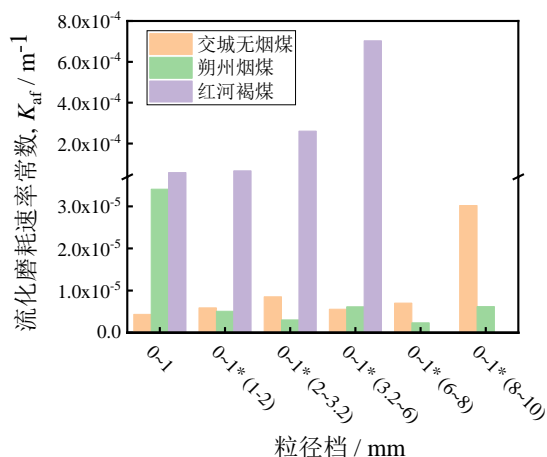


图 6 三种燃煤的流化磨损速率常数

Fig. 6 Fluidization attrition rate constants of three types of coal

为对比分析筛分粉煤与破碎粉煤灰样化学组成的区别，通过 XRF 获得了三种煤样的筛分粉煤与 0~1* (3.2~6) mm 破碎粉煤灰样的元素组成。由图 7 可知，筛分粉煤与破碎粉煤灰的元素组成差别较大。研究表明，高 Si, Al 含量通常对应较低的 K_{af} ，使灰分更耐磨损，而高 Ca 含量则一般代表软的灰颗粒^[26]。相较于筛分粉煤，交城和红河破碎粉煤的 Si 含量更低，而 Ca, S 含量更高，因而 K_{af} 较高，在锅炉中容易被磨圆、磨小，这也从化学组成的层面上解释了这两种煤样破碎粉煤的流化磨损速率常数高于筛分粉煤的问题。而朔州煤样的破碎粉煤的 Si, Al 含量较高，也对应了该煤种的破碎粉煤 K_{af} 更低的现象。

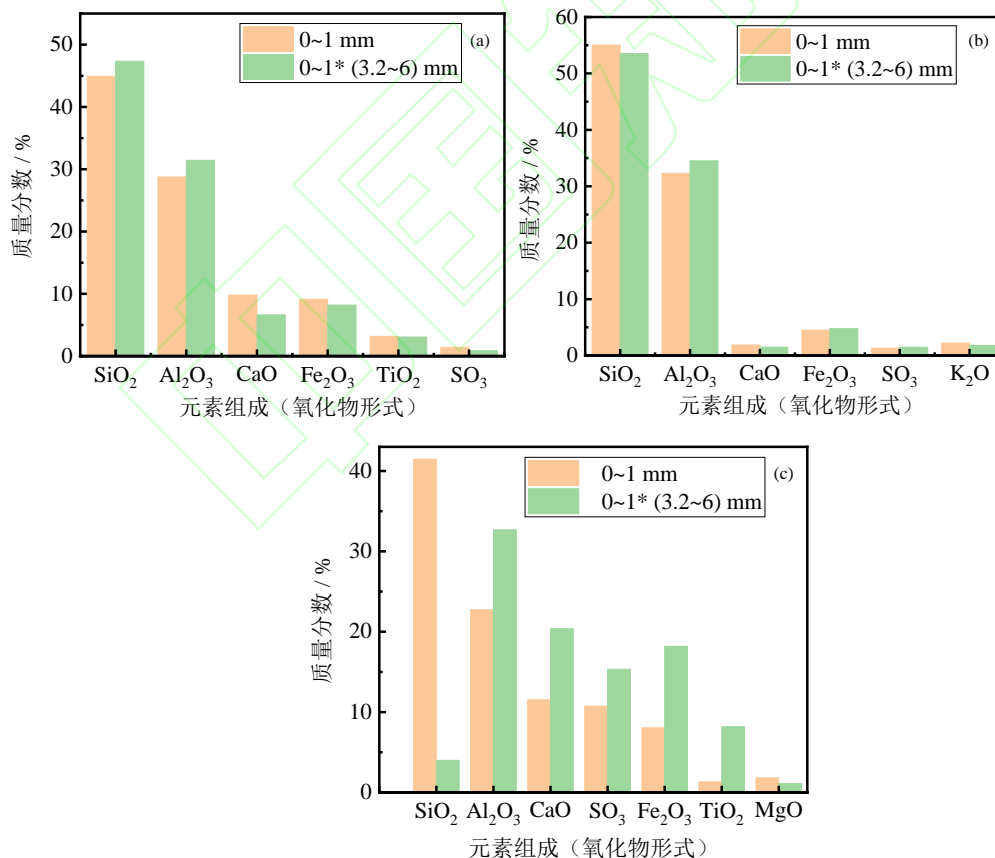


图 7 三种燃煤灰颗粒的主要元素组成

Fig.7 Major elemental components of ash for three types of coal

a—朔州烟煤；b—交城无烟煤；c—红河褐煤

3 结 论

1) 交城和朔州煤样破碎粉煤与筛分粉煤的成灰粒度分布区别较明显——筛分粉煤灰中细颗粒质量占比较高, 而红河褐煤破碎粉煤的细颗粒占比很高。常规 CFB 成灰方法和 PC-CFB 成灰方法计算得到的粉煤成灰粒度分布在 0.2 mm~0.5 mm 区间内大体一致, 而在两端质量分数差别较大, 造成这种差别的原因与不同粒径煤颗粒中灰核分布及其性质有关。

2) 对粉煤的磨耗特性分析表明, 筛分粉煤与破碎粉煤的流化磨耗速率系数具有较大差别。交城与红河的破碎粉煤灰的 K_{af} 明显高于筛分粉煤灰, 并且随着破碎粉煤原始粒径的增大有增大的趋势; 而朔州各档粉煤灰的 K_{af} 则呈现出相反的趋势。

3) XRF 分析结果表明, 造成筛分粉煤灰与破碎粉煤灰之间差异的主要原因是两者的化学组分存在较大差别。

参 考 文 献

- [1]. 陈国平, 董 昱, 梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17):5493-5506.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17):5493-5506.
- [2]. 汤仔华, 宋国良, 宋维健, 等. 循环流化床锅炉快速变负荷调节技术研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6):2279-2292.
TANG Zihua, SONG Guoliang, SONG Weijian, et al. Research progress on rapid variable load regulation technology of circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6):2279-2292.
- [3]. LECKNER Bo. Fluidized bed combustion: mixing and pollutant limitation[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1998, 24(01):31-61.
- [4]. JOHNSON J E. Formation and reduction of nitrogen oxides in fluidized-bed combustion[J]. Fuel, 1994, 73(9):1398-1415.
- [5]. 吕俊复, 周 托, 张 扬, 等. 碳中和目标下循环流化床锅炉技术的展望[J]. 动力工程学报, 2022, 42(11):1005-1012.
LYU Junfu, ZHOU Tuo, ZHANG Yang, et al. Prospect of the circulating fluidized bed boiler technology for the goal of carbon neutralization[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11):1005-1012.
- [6]. 刘雪敏, 尹炜迪, 汪佩宁, 等. 循环流化床锅炉床压降对其燃烧效率的影响[J]. 煤炭学报, 2016, 41(10):2484-2489.
LIU Xuemin, YIN Weidi, WANG Peining, et al. Effect of bed pressure drop on combustion efficiency of CFB boilers[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(10):2484-2489.
- [7]. 武振国, 杨楚轲, 张守玉, 等. 变负荷下循环流化床锅炉内燃烧行为研究进展[J/OL]. 煤炭转化. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/14.1163.TQ.20241127.1716.004.html>.
- [8]. 李国胜, 潘燕龙, 刘众元, 等. 循环流化床锅炉物料浓度分布的影响因素分析[J]. 热能动力工程, 2018, 33(3):133-137.

- LI Guosheng, PAN Yanlong, LIU Zhongyuan, et al. Analysis of Influencing Factors of the Solid Concentration Distribution in Circulating Fluidized Bed Boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(03):133-137.
- [9]. 吕俊复, 尚曼霞, 柯希玮, 等. 粉煤循环流化床燃烧技术[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1):430-437.
- LYU junfu, SHANG Manxia, KE Xiwei, et al. Powdered coal circulating fluidized bed combustion technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(01):430-437.
- [10]. 吕俊复, 蒋 苓, 柯希玮, 等. 碳中和背景下循环流化床燃烧技术在中国的发展前景[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1):514-522.
- LYU Junfu, JIANG Ling, KE Xiwei, et al. Future of circulating fluidized bed combustion technology in China for carbon neutralization[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1):514-522.
- [11]. DE DIEGO L F, LONDONO C A, WANG X S, et al. Influence of operating parameters on NO_x and N_2O axial profiles in a circulating fluidized bed combustor[J]. Fuel, 1996, 75(08):971-978.
- [12]. 杨海瑞, 肖显斌, 吕俊复, 等. CFB 锅炉内成灰特性的实验研究方法[J]. 化工学报, 2003, 54(08):1183-1187.
- YANG Hairui, XIAO Xianbin, LYU Junfu, et al. Experimental technique on coal ash formation in CFB combustion[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2003, 54(08):1183-1187.
- [13]. ZHANG Huili, DEGRÈVE J, BAEYENS J, et al. Powder attrition in gas fluidized beds[J]. Powder Technology, 2016, 287:1-11.
- [14]. 庄亚明, 赵 明, 吴守城, 等. 两种煤成灰特性对比试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(20):3289-3294.
- ZHUANG Yaming, ZHAO Ming, WU Shoucheng, et al. Experimental Study on Ash Formation Characteristics of Two Coals[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(20):3289-3294.
- [15]. KE Xiwei, LI Dongfang, ZHANG Man, et al. Ash formation characteristics of two Indonesian coals and the change of ash properties with particle size[J]. Fuel Processing Technology, 2019, 186:73-80.
- [16]. LI Dongfang, KE Xiwei, YANG Hairui, et al. The ash formation and attrition characteristics of an Indonesia lignite coal ash for a 550 MWe ultra supercritical CFB boiler[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2019, 147:579-586.
- [17]. 唐 治. 流化床燃烧条件下煤的成灰特性实验研究[D]. 北京: 清华大学能源与动力工程系, 2001:1-57.
- TANG Zhi. Experimental Study on the Ash Formation Behavior of Coal under the Condition of Fluidized Bed Combustion[D]. Beijing: Tsinghua University. Department of Energy and Power Engineering, 2001:1-57.
- [18]. YANG Hairui, XIAO Xianbin, LYU Junfu, et al. Experimental technique on coal ash formation in CFB combustion[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering-China, 2003, 54(8):1183-1187.
- [19]. 吕俊复, 杨海瑞, 张建胜, 等. 流化床燃烧煤的成灰磨耗特性[J]. 燃烧科学与技术, 2003, 9(1):1-5.

- LYU Junfu, YANG Hairui, ZHANG Jiansheng, et al. Investigation on the ash size distribution and attrition during the coal combustion in fluidized bed[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*[J]. 2003, 9(1):1-5.
- [20]. YUE Guangxi, WANG Lan, LI Yan, et al. Ash size formation characteristics in CFB coal combustion[A]. *Proceedings of 4th International Conference on Fluidized Bed Combustion*[C]. New York, 1993.
- [21]. 李海明, 杨海瑞. 煤的成灰磨耗特性对循环流化床内物料平衡的影响[J]. *煤炭转化*, 2004, 27(1):36-40.
- LI Haiming, YANG Hairui. Relevance of ash attrition to solids particle size distribution in CFB boiler[J]. *COAL CONVERSION*, 2004, 27(1):36-40.
- [22]. 赵石铁, 杨海瑞, 吕俊复, 等. 循环流化床锅炉燃煤的成灰和磨耗特性研究[J]. *能源研究与利用*, 2004, (05):14-17.
- ZHAO Shitie, YANG Hairui, LYU Junfu, et al. Investigation on the ash size distribution and attrition during the coal combustion in fluidized bed[J]. *Energy Research and Utilization*, 2004(5):14-17.
- [23]. KONO H. Attrition rates of relatively coarse solid particles in various types of fluidized beds[R]. Institute of Gas Technology, Chicago, IL, 1980.
- [24]. MERRICK D, HIGHLEY J. Particle size reduction and elutriation in a fluidized bed process[J]. *AICHe Symposium Series*, 1974, 70(137):366-378.
- [25]. WANG Tao, YANG Hairui, WU Yuxin, et al. Experimental study on the effects of chemical and mineral components on the attrition characteristics of coal ashes for fluidized bed boilers[J]. *Energy and fuels*, 2012, 26(02):990-994.
- [26]. WANG Jinwei, ZHAO Xinmu, LI Shaohua, et al. Influence of coal ash components on attrition characteristics in circulating fluidized bed[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering-China*, 2007, 58(3): 739-744.

Experimental study on ash formation and attrition characteristics of coal for powdered circulating fluidized bed boiler

**HAN Peixing^{1,3} SHANG Manxia² ZHU Junping³ LIU Liang²
HUANG Zhong^{1,2,4} LIU Qing², KE Xiwei^{1,4}**

(1. Shanxi Research Institute of Huairou Laboratory, 030032 Taiyuan, China; 2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, 100084 Beijing, China; 3. Taiyuan Boiler Group Company, Limited, 030008 Taiyuan, China; 4. Beijing Huairou Laboratory, 101499 Beijing, China)

ABSTRACT The ash formation and attrition characteristics of coal are one of the important factors affecting the fluidization characteristics and heat and mass transfer performance of CFB boilers. The coal samples used in the ash formation and attrition experiments of conventional CFB boilers are obtained by simply screened from 0-10 mm coarse raw coal particles, while the PC-CFB boiler uses 0-1 mm pulverized coal directly prepared by the coal crusher. The mineral composition of pulverized coal crushed to 0-1 mm is different from that of pulverized coal simply screened to 0-1 mm, hence the ash formation and attrition characteristics of the both are different. Consequently,

the ash formation and attrition experimental data of conventional CFB may not be applicable to PC-CFB. Therefore, an experimental method of ash formation and attrition characteristics suitable for PC-CFB boiler was proposed. Three kinds of coal samples, Jiaocheng anthracite, Shuozhou bituminous coal and Honghe lignite, were selected to carry out conventional CFB and PC-CFB ash formation and attrition experiments respectively. The ash formation and attrition data of coal samples in the particle size range of 0-1 mm under the two experimental conditions were analyzed and compared, and the chemical composition of ash samples was determined. The results show that there are significant differences in the ash formation and attrition experimental data of the fragmented powdered coal and the screened pulverized coal of the three coal samples. The proportion of coarse particles in the ash of the fragmented powdered coal of each coal type is higher than that of the screened pulverized coal. The distribution of ash particle size of powdered coal ash calculated by the conventional CFB and the PC-CFB ash formation method tends to be consistent in the range of 0.2-0.5 mm. However, there is a significant difference at both ends. The fluidization attrition rate constant (K_{af}) of the screened pulverized coal and the fragmented powdered coal is also significantly different. Therefore, the original conventional CFB ash formation and attrition experiment is no longer applicable, which verifies the necessity of the ash formation and attrition experimental method of the PC-CFB boiler.

KEYWORDS powdered coal circulating fluidized bed, ash formation characteristics, attrition rate, fragmentation, ash composition analysis

HIGHLIGHTS An experimental method of coal ash formation and attrition applicable to powdered coal circulating fluidized bed (PC-CFB) boiler was proposed. After the coal sample was dried and screened, the coal samples larger than 1 mm were crushed to 0-1 mm and then burned statically, later, the conventional ash formation and attrition experiments was carried out. Different from the conventional method, the coal sample was obtained by simple screened from 0 - 10 mm coarse raw coal particles, the PC-CFB ash formation and attrition method adds the fragmentation steps of coal samples with different particle sizes larger than 1 mm, which solves the problem that the conventional ash formation and attrition method caused by the heterogeneous distribution of coal mineral components is not suitable for PC-CFB boilers. The ash formation and attrition characteristics of anthracite, bituminous coal and lignite under conventional CFB and PC-CFB method were obtained, and the main factors leading to the difference of ash formation and attrition of pulverized coal under two experimental conditions were analyzed.

HIGHLIGHTS An experimental method of coal ash formation and attrition suitable for PC-CFB; ash formation and attrition characteristics of anthracite, bituminous coal and lignite; XRF analysis of ash composition; the main factors of the difference of ash formation and attrition characteristics between the screened pulverized coal and the fragmented powdered coal.