

DOI: 10.19666/j.rlfed.202310156

新疆高碱高氯煤燃烧条件下细颗粒物生成特性研究

许猛¹, 马金荣², 王建江¹, 魏博¹, 陈丽娟¹, 安田田¹

(1.新疆大学化工学院, 新疆煤炭清洁转化与化工过程重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017;

2.新疆新业能源化工有限责任公司, 新疆 五家渠 831300)

[摘要] 为比较新疆地区典型高碱煤和高氯煤在燃烧条件下颗粒物生成特性, 采用三段式高温沉降炉系统开展在空气气氛下燃烧准东煤和沙尔湖煤的实验, 分析燃烧后颗粒物特征。采用 Dekati 低压撞击器 (Dekati low pressure impactor+, DLPI+) 进行了颗粒物的分级收集, 对其质量粒径分布、元素分布特性以及颗粒物微观形貌进行了讨论分析。结果表明: 2 种煤样燃烧生成的颗粒物均呈现双模态分布, 沙尔湖煤的细颗粒物产率明显高于准东煤; 细模态颗粒物的主要成分是 Na 和 Cl, 准东煤与沙尔湖煤产生的 PM₁₀ 中的 Cl 占原煤中 Cl 质量的 11.8% 和 28.9%, Na 占煤灰中 Na 质量的 2.66% 和 7.53%; 高含量的碱金属和 Cl 会促进细颗粒物生成, 沙尔湖原煤中的 Cl 大量迁徙进入颗粒物中, 对细模态颗粒的生成贡献较大。

[关键词] 高氯煤; 高碱煤; 颗粒物; 碱金属; 煤燃烧

[引用本文格式] 许猛, 马金荣, 王建江, 等. 新疆高碱高氯煤燃烧条件下细颗粒物生成特性研究[J]. 热力发电, 2024, 53(1): 46-52. XU Meng, MA Jinrong, WANG Jianjiang, et al. Study on the formation characteristics of fine particulate matter under the combustion condition of high-alkali and high-chlorine coal in Xinjiang[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(1): 46-52.

Study on the formation characteristics of fine particulate matter under the combustion condition of high-alkali and high-chlorine coal in Xinjiang

XU Meng¹, MA Jinrong², WANG Jianjiang¹, WEI Bo¹, CHEN Lijuan¹, AN Tiantian¹

(1. Key Laboratory of Coal Clean Conversion & Chemical Engineering Process, School of Chemical Engineering and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

2. Xinjiang Xinye Energy and Chemical Co., Ltd., Wujiacqu 831300, China)

Abstract: In order to compare the particle formation characteristics of typical high-alkali and high-chlorine Xinjiang coal under combustion conditions, a three-stage high temperature drop tube furnace was used to carry out the combustion experiment of Zhundong coal (ZD) and Shaerhu coal (SEH) in air atmosphere. The characteristics of particulate matter after combustion were analyzed. Particulate matters were collected by Dekati low pressure impactor+ (DLPI+) and the mass-based particle size distribution, elemental compositions and morphology were discussed. The results showed that the particulate matter produced by the combustion of the two coal samples presents a double-peaked model. The fine particle yield of SEH is significantly higher than that of ZD. The main components of sub-micron particles were Na and Cl. The Cl in PM₁₀ accounts for 11.8% and 28.9% of the Cl content in ZD and SEH raw coal, and Na accounts for 2.66% and 7.53% of the Na content in ZD and SEH coal ash. High levels of alkali metals and Cl promoted the formation of fine particles. A large amount of Cl in SEH raw coal migrated into particles and contributed greatly to the formation of sub-micron particles.

Key words: high-chlorine coal; high-alkali coal; particulate matter; alkali metal; coal combustion

收稿日期: 2023-10-03 网络首发日期: 2023-12-11

基金项目: 新疆维吾尔自治区煤的灰化学理论基础及应用创新团队(2023D14010); 新疆维吾尔自治区天池英才-青年博士项目(51052300571)

Supported by: Science & Technology Department of Xinjiang Uygur Autonomous Region Tianshan Innovation Team (2023D14010); Xinjiang Uygur Autonomous Region Tianchi Talents-Young Doctor Program (51052300571)

第一作者简介: 许猛(1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为燃煤颗粒物, xm180126@163.com。

通信作者简介: 魏博(1985), 男, 教授, 主要研究方向为煤炭清洁利用, weiboxju@163.com。

新疆煤炭是一种极具潜力的能源,储量巨大,占我国煤炭储量的近 40%^[1],且开发条件相对优越,具有广阔的开发利用前景^[2]。近年来,新疆准东、哈密等地区发现的煤中 Na、Ca 等碱金属及碱土金属的含量均高于我国其他地区的动力用煤,部分煤种还具有高氯的特点,在燃用过程中出现严重的锅炉结渣和尾部受热面沾污积灰现象,大大限制了其应用^[3-4]。在煤基质中,碱金属和碱土金属(alkali and alkaline earth metal, AAEM)主要以水溶性和可交换离子的形式存在。高温条件下,AAEM 蒸气通过冷凝成核等方式形成细颗粒物^[5]。而煤中的 Cl 质量分数在超过 0.25% 时,其燃烧产生的烟气及颗粒物(PM)会造成金属设备的腐蚀,同时释放到烟气中的 Cl 也加剧了环境污染^[6]。

现有研究表明,燃料中高含量的 Cl 元素可以显著促进细颗粒物的形成^[7],富含 Cl 和 AAEM 的气溶胶在冷凝和成核后加剧了受热面的沉积、结渣和腐蚀^[8-9]。排放到大气中的燃煤颗粒物粒径小,比表面积大,易附带有毒、有害物质(重金属、微生物等),对人体健康和环境有严重危害。颗粒物生成过程与煤中矿物质的赋存形态以及燃烧条件密切相关。曾宪鹏等^[10]在空气气氛下研究不同燃烧温度时燃煤细颗粒物的生成特性,结果表明当燃烧温度升高时,细颗粒物中的 Mg 和 Ca 含量增加,Na 和 S 含量减少。徐义书等^[11]在掺混有不同浓度 HCl 的模拟空气中研究 3 种准东煤燃烧后颗粒物的形成机制,结果表明 HCl 促进了 NaCl 形式矿物蒸气的形成,进而促进成核形成超细颗粒物。Li 等人^[12]研究了准东煤在 25 kW 自稳燃烧炉燃烧过程中细颗粒物的形成,其结果表明

PM_{0.4} 主要由硫酸钠组成,随着粒度的增大,铝硅酸盐成为细颗粒的主要成分。阮仁晖等^[13]研究了新疆准东高碱煤、淮南低碱煤及混煤在燃烧过程中细颗粒物的排放特性。发现低碱煤燃烧产生的细颗粒物量明显减少,同时发现 Ca、Fe 在混烧降低 PM₁₀ 过程中具有重要作用。前期研究重点关注了煤中碱及碱土金属对燃煤颗粒物的生成特性影响,而对煤中同时存在高碱及高氯特征的沙尔湖煤和高碱准东煤在燃烧过程中颗粒物生成特性对比的研究较少。Na 和 Cl 在煤燃烧过程中的迁移率对研究细颗粒物的形成机理具有重要意义,在煤燃烧过程中,高碱及高氯特征对细颗粒物的生成均有促进作用。前期重点关注分析了 Na 的作用。

本文在前人研究的基础上,对 Na 和 Cl 的释放以及迁移进入颗粒物中的含量做了更加细致的定量分析,为高碱高氯煤的高效清洁利用提供参考。

本文选取了典型的高碱煤(准东煤)和高氯煤(沙尔湖煤)在高温沉降炉系统上进行空气气氛下的煤燃烧实验。实验采用 Dekati 低压撞击器(Dekati low pressure impactor+, DLPI+)对燃烧后颗粒物分级取样,研究了颗粒物的质量产率粒径分布、颗粒物元素分布特性和微观形貌,对比了高碱和高氯煤中 Na、Ca、Cl、S 等元素对细颗粒物生成特性的影响,对 Na 和 Cl 的释放和迁移特性做了定量分析。

1 材料和方法

1.1 实验材料

准东煤(ZD)和沙尔湖煤(SEH)2种煤样的工业分析和元素分析见表1,煤灰成分分析见表2。

表 1 煤的工业分析和元素分析

单位: w/%

Tab.1 Proximate and ultimate analysis of coal samples

样品	工业分析				元素分析					
	M _{ad}	A _{ar}	V _{daf}	FC _{ar}	C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	N _{ar}	S _{tar}	Cl _{ad}
ZD	9.35	3.28	31.23	46.16	53.27	2.48	10.49	0.49	0.40	0.084
SEH	11.23	4.68	32.55	47.70	53.46	2.50	14.11	0.54	0.12	0.485

表 2 煤的灰成分分析

单位: w/%

Tab.2 The ash compositions of coal samples

样品	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	SiO ₂	SO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO ₂
ZD	8.49	0.50	31.26	10.73	7.88	21.59	5.22	7.94	0.10	0.64	0.21
SEH	4.32	0.24	35.86	7.24	16.62	14.20	13.29	7.64	0.04	0.27	0.21

煤样经过干燥、破碎和筛分,粒径达到 $100\ \mu\text{m}$ 以下。由表 1 可见,SEH 中 C1 质量分数为 0.485%,是 ZD 的 5 倍以上。由表 2 可见:2 种煤样灰分中 Na_2O 质量分数均超过 4%,其中 ZD 灰中 Na_2O 为 8.49%,SEH 为 4.32%,2 种煤均属于高碱煤;与此同时,2 种煤灰中 CaO 的质量分数相近,均在 32% 左右;ZD 灰中 SiO_2 和 Al_2O_3 低至 7.88% 和 5.22%, SO_3 质量分数较 SEH 更高,达到 21.59%。

1.2 煤燃烧和颗粒物取样

本实验采用三段式高温沉降炉系统进行煤燃烧后颗粒物取样分析,如图 1 所示。炉管采用 3 段长度相同的 99% 刚玉管连接而成,可耐受 $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ 的高温。3 段刚玉管的接缝处使用高温胶粘结,可以保证在连接处具备较好的密封性。刚玉管内径为 $50\ \text{mm}$,炉膛恒温区长度约 $60\ \text{cm}$ 。

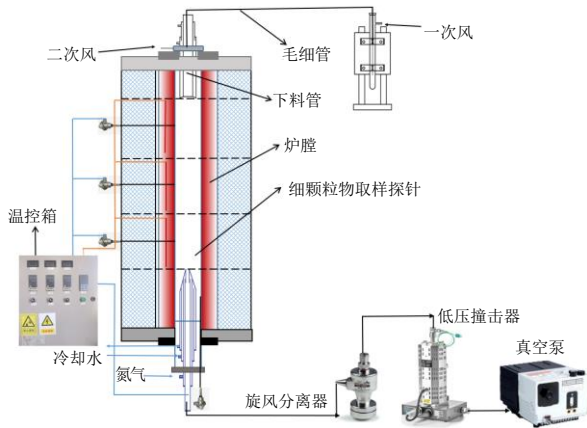


图 1 三段式高温沉降炉系统
Fig.1 Sketch of the three-stage high temperature drop tube furnace

沉降炉顶部布置有给料系统,给料系统由自行设计的微量振动流态化给粉装置、水冷给粉管、供气系统组成。煤粉由 $1.5\ \text{L}/\text{min}$ 的一次风携带,通过水冷下料管将煤粉投放至炉膛恒温区。给煤量约为 $280\ \text{mg}/\text{min}$ 。二次风由下料管与反应器的间隙中送入,流量为 $3\ \text{L}/\text{min}$ 。一、二次风均为空气。2 种煤燃烧时其过量空气系数在 3.2 左右,较大的过量空气系数可以保证煤粉完全燃烧^[4]。为确保实验数据的可靠性,每组实验重复 3 次。煤粉燃烧后的颗粒物通过水冷取样管取样。为了防止颗粒物发生聚集,取样的同时通入 $10\ \text{L}/\text{min}$ 的 N_2 淬冷并稀释烟气。取样管出口烟气通过旋风分离器分离空气动力学直径大于 $10\ \mu\text{m}$ 的飞灰,随后烟气进入 DLPI+ 进行颗粒物粒径分级。空气动力学直径为 D_{50} (μm) 的颗粒

的捕获效率为 50%。DLPI+ 第 1—14 级撞击基板的 D_{50} 分别为 0.015 6、0.030 3、0.054 1、0.094 3、0.154 0、0.254 0、0.380 0、0.600 0、0.943 0、1.620 0、2.460 0、3.640 0、5.340 0、9.840 μm ,在 DLPI+ 装置内的颗粒物收集基底铝箔片表面涂抹松脂 (Apiezon-H 润滑脂),以捕集燃烧后颗粒物。为避免降温对颗粒物取样的影响,取样过程采用加热套的方式对取样枪、分离器及 DLPI+ 各段管道进行实时加热保温,保温温度为 $120\ ^\circ\text{C}$ 。沉降炉燃烧区炉膛温度为 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$,颗粒物取样点烟气温度为 $600\ ^\circ\text{C}$ 。

1.3 颗粒物分析方法

通过高精度天平 (德国 赛多利斯 MSA6.6S, 精度为 $0.001\ \text{mg}$) 称量实验前后的铝箔片质量,获得收集到的颗粒物质量。将收集到的颗粒物进行扫描电子显微镜-能谱仪 (荷兰飞纳 Pure Plus) 测试,分析颗粒物元素。

2 结果与讨论

2.1 颗粒物的质量-粒径分布

图 2 为 2 种煤燃烧后颗粒物质量-粒径分布。

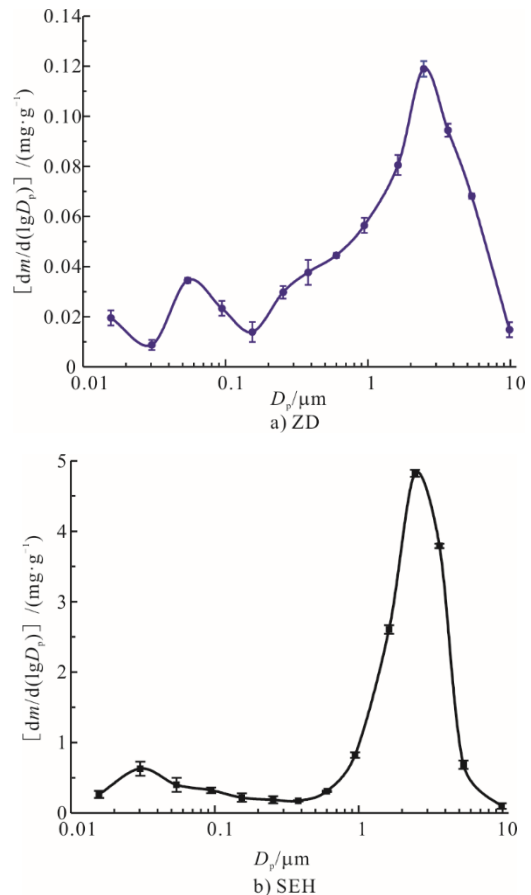


图 2 PM_{10} 质量-粒径分布曲线
Fig.2 Mass-particle size distribution of PM_{10}

由图 2 可以看出，燃烧生成的颗粒物均呈现双模态分布，ZD 细模态颗粒与粗模态颗粒过渡点的颗粒物粒径在 0.2 μm 处，而 SEH 过渡点颗粒物粒径为 0.4 μm。SEH 在亚微米粒径范围内的质量峰位于 0.030 μm 处，峰值为 0.630 mg/g（以单位质量的煤计，下同）；在超微米粒径范围内的质量峰位于 2.459 μm 处，峰值为 4.822 mg/g。ZD 在亚微米粒径范围内的质量峰位于 0.054 μm 处，峰值为 0.023 mg/g；在超微米粒径范围内的质量峰位于 2.459 μm 处，颗粒物产率为 0.119 mg/g。一般认为，亚微米颗粒的形成主要与相应成分气化、成核和凝结过程有关，随着成核形成的纳米级颗粒浓度的增加，蒸气饱和度逐渐降低，此时大量的无机蒸气（特别是易气化的碱金属）会以这些颗粒为核心，在其表面发生异相凝结。凝结不会影响颗粒数目，但会增加颗粒粒径^[15]。根据表 2 的灰成分来看，ZD 比 SEH 具有更多的碱金属 Na，这可能是 ZD 比 SEH 的亚微米范围内峰值粒径更大的原因。2 种煤在超微米粒径范围内质量峰值的粒径相同，SEH 的颗粒物产率整体高于 ZD。

2.2 元素分布特性

为了说明 2 种煤的细颗粒物生成特征，绘制了 DLPI+14 个撞击基板上的 PM₁₀ 的元素组成。C 和 O 不是研究的重点，去除这 2 种元素可以避免松脂的影响。燃煤产生的 PM₁₀ 主要由 Fe、Ca、K、Cl、S、P、Si、Al、Mg 和 Na 等元素组成。图 3 给出了 ZD 和 SEH 燃烧产生的 PM_{0.4} 的元素组成。PM_{0.4} 主要由 Na、Mg、Ca、Fe、S、Cl 组成。从第 1 级（D₅₀=0.015 6 μm）到第 6 级（D₅₀=0.254 0 μm）颗粒物的元素组成中，SEH 和 ZD 中的 Na 和 Cl 质量分数总和分别大约在 80% 和 70%，其中 SEH 中 Cl 质量分数较 ZD 高了约 10%。随着颗粒物粒径的增大，Na、Cl 的质量分数呈下降趋势，而 Ca 的质量分数逐渐升高。Si、K、Mg、Al 的总质量分数较低，在每一级上都不超过 10%。ZD 中 S 在每一级约占 10%，而 SEH 几乎不含 S，这是由于 ZD 原煤和灰中的 S 质量分数高于 SEH。煤中碱金属和碱土金属在高温燃烧过程中，易气化挥发，通过成核、冷凝、团聚等机制转化为 PM_{0.4}。Na、K、S 的气化程度最强，但根据煤的灰成分分析，K 的质量分数很低。Fe、Ca、Mg 的气化程度中等。Fe 元素主要通过离子交换态 Fe 元素的挥发、含铁矿物的氧化或分解转化为 PM_{0.4}。元素 Si 和 Al 的气化程度很低，特别是 Al，质量分数不超过 5%。

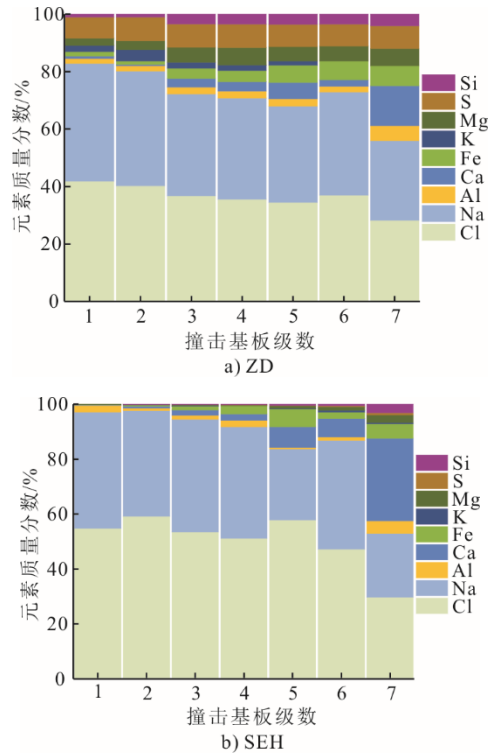


图 3 PM_{0.4} 的元素组成
Fig.3 The elemental mass fractions of PM_{0.4}

图 4 为 ZD 和 SEH 燃烧产生的 PM_{0.4-10} 的元素组成。

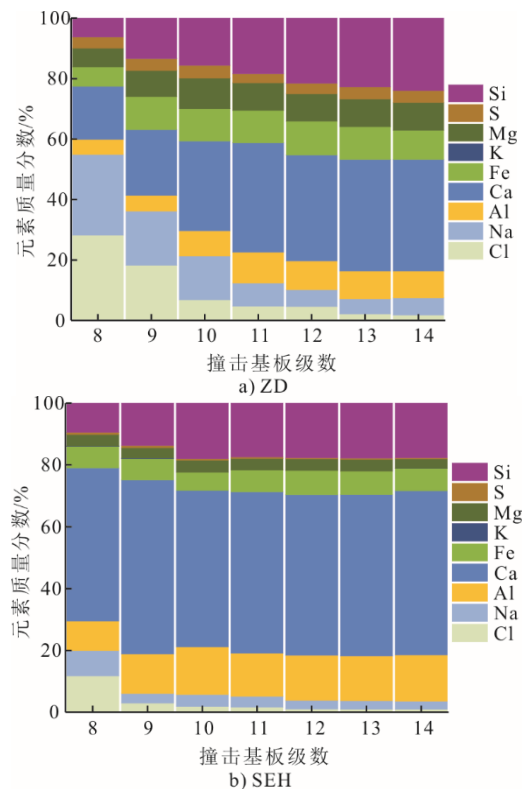


图 4 PM_{0.4-10} 的元素组成
Fig.4 The elemental mass fractions of PM_{0.4-10}

由于 $PM_{0.4-10}$ 的形成机制主要包括焦炭或矿物质的破碎和聚结^[16], 因此其元素组成 (尤其是 PM_{1-10}) 与原煤灰分的元素组成较为接近。 $PM_{0.4-10}$ 主要由 Si、Al、Ca 和 Fe 组成, 占 9 种无机元素质量的 65%~85%。由于 $PM_{0.4-10}$ 元素组成受粒径影响较小, 其中的 Na、Cl 元素的质量分数显著低于 $PM_{0.4}$, Na、Cl 元素的质量分数随粒径的增大而减小, Ca、Si 元素的质量分数随粒径的增大而增大。

为更清晰地阐明颗粒物中主要无机元素与颗粒物尺寸的关系, 采用摩尔比的方法^[12]对 ZD 和 SEH 中的 $[2x(\text{Ca})+2x(\text{Mg})+x(\text{Na})+x(\text{K})]/[2x(\text{S})+x(\text{Cl})]$ 进行计算, 以便对颗粒物形成机制进行分类^[17]。其中, x 代表元素的摩尔分数, 其摩尔比随粒径的变化曲线如图 5 所示。

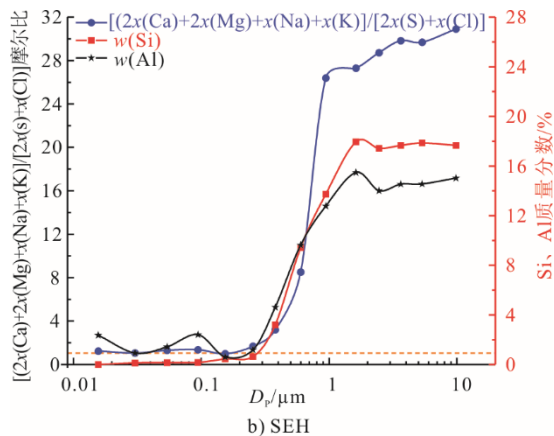
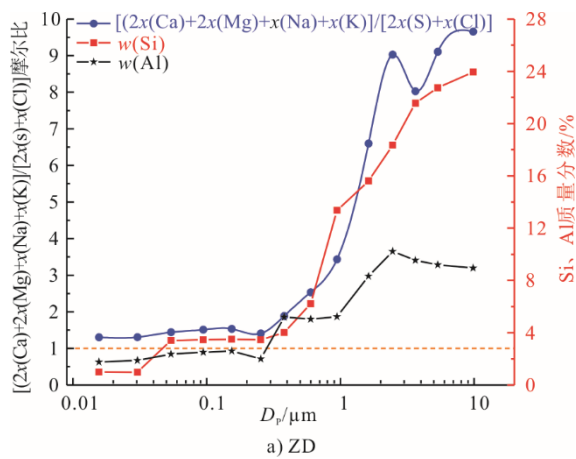


图 5 $[2x(\text{Ca})+2x(\text{Mg})+x(\text{Na})+x(\text{K})]/[2x(\text{S})+x(\text{Cl})]$ 摩尔比和 Si、Al 的质量分数与细颗粒尺寸的关系
Fig.5 Molar ratio of $[2x(\text{Ca})+2x(\text{Mg})+x(\text{Na})+x(\text{K})]/[2x(\text{S})+x(\text{Cl})]$ and mass fractions of Si, Al as a function of fine particle size

由图 5 可以看出: 当颗粒粒径小于 $0.4 \mu\text{m}$ 时, 摩尔比基本不随颗粒粒径变化; 颗粒粒径大于 $0.4 \mu\text{m}$

时, 摩尔比开始增加。这表明颗粒成分在 $0.4 \mu\text{m}$ 发生变化。已有研究表明, $0.4 \mu\text{m}$ 是颗粒成分发生明显变化的转折粒径^[18]。当粒径小于 $0.4 \mu\text{m}$ 时, $[2x(\text{Ca})+2x(\text{Mg})+x(\text{Na})+x(\text{K})]/[2x(\text{S})+x(\text{Cl})]$ 的值为 1~2; 特别对于 SEH 而言, 上述摩尔比保持在 1 左右, 这说明氯化物和硫酸盐是在该模式下的主要成分。但当粒径大于 $0.4 \mu\text{m}$ 时, 摩尔比会迅速增大, 显示出与 Si、Al 质量分数相同的增加趋势, 说明此粒径范围的主要成分是硅酸盐和铝硅酸盐。同时也表明, $PM_{0.4}$ 的形成机理与 $PM_{0.4-10}$ 有很大的不同。Ruan^[14]和 Li^[12]的研究均发现, $0.4 \mu\text{m}$ 是 $[2x(\text{Ca})+2x(\text{Mg})+x(\text{Na})+x(\text{K})]/[2x(\text{S})+x(\text{Cl})]$ 摩尔比的转变点。

图 6 为 PM_{10} 中 $x(\text{Cl})/x(\text{S})$ 摩尔比与粒径的关系。

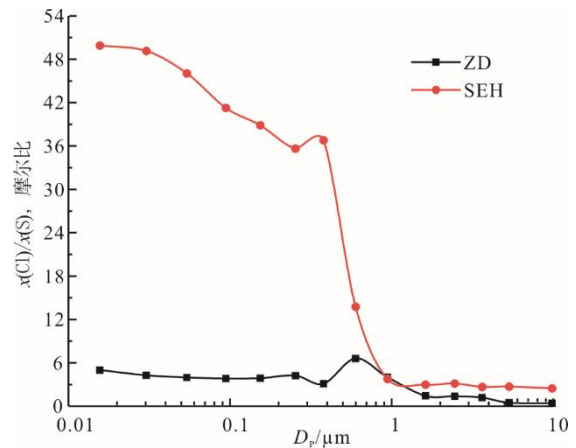


图 6 $x(\text{Cl})/x(\text{S})$ 摩尔比与颗粒物粒径的关系
Fig.6 Molar ratio of $x(\text{Cl})/x(\text{S})$ as a function of fine particle size

SEH 燃烧产生的颗粒物中 Cl 的质量分数远大于 S 的质量分数, 而 ZD 燃烧产生的颗粒物中 S 的质量分数比 SEH 高, Cl 的质量分数比 SEH 低。对于 SEH, Na 和 Cl 是 $PM_{0.4}$ 的主要元素组成, Na 和 Cl 的摩尔比约为 1, 表明 SEH 的 $PM_{0.4}$ 成分主要为 NaCl, 这由图 5 的摩尔比也可以得到验证。对于 ZD, Na、Cl 和 S 是 $PM_{0.4}$ 的主要元素组成, 因此 ZD 的 $PM_{0.4}$ 的主要成分可能是 NaCl 和 Na_2SO_4 。

各级基板上 Cl、Na、S 的绝对质量产率如表 3 所示。Cl 在 ZD 与 SEH 产生的 PM_{10} 中的总质量产率分别为 0.0992 mg/g 和 1.4027 mg/g , 分别占原煤中 Cl 质量的 11.8% 和 28.9%, 可见 SEH 中 Cl 更多地迁徙进入微细颗粒物中。S 在 ZD 与 SEH 产生的 PM_{10} 中的总质量产率分别为 0.1100 mg/g 和 1.2621 mg/g , 分别占原煤中 S 元素质量的 31.6% 和 9.17%, 这是由于

ZD 原煤中 S 元素质量分数更高。Na 在 ZD 与 SEH 产生的 PM_{10} 中的总质量产率分别为 0.030 8 mg/g 和 0.063 6 mg/g, 分别占煤灰中 Na 质量分数的 2.66% 和 7.53%, 与 Cl 特征相似。综上, 当煤同时具备高碱及高氯特征时, 燃烧后更容易生成细颗粒物。

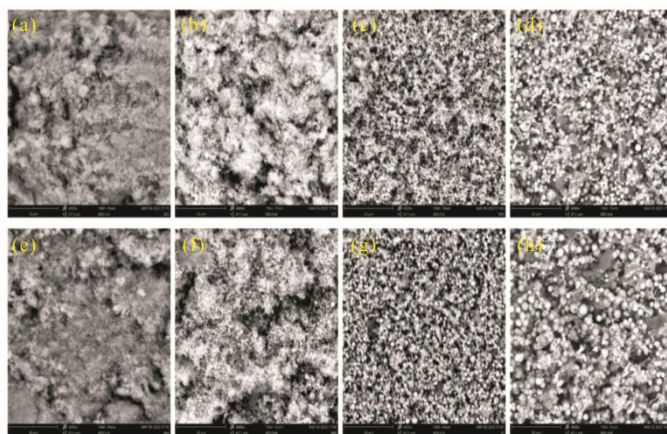
表 3 各级基板上 Cl、Na、S 的绝对质量产率 单位: mg/g
Tab.3 Absolute mass yield of Cl, Na and S on all levels of substrate

基板级数	ZD-Cl	ZD-Na	ZD-S	SEH-Cl	SEH-Na	SEH-S
1	0.008 2	0.008 0	0.001 4	0.145 1	0.112 0	0.000 1
2	0.003 5	0.003 5	0.000 7	0.372 8	0.242 1	0.000 1
3	0.012 7	0.012 3	0.002 8	0.214 3	0.163 9	0.000 1
4	0.008 3	0.008 2	0.001 9	0.164 9	0.130 6	0.000 2
5	0.004 8	0.004 7	0.001 1	0.126 4	0.056 4	0.000 4
6	0.011 0	0.010 7	0.002 3	0.088 4	0.074 2	0.000 5
7	0.010 6	0.010 5	0.003 0	0.051 5	0.040 0	0.001 2
8	0.012 6	0.011 9	0.001 7	0.036 2	0.025 0	0.002 3
9	0.010 3	0.010 1	0.002 3	0.024 1	0.026 0	0.005 6
10	0.005 5	0.011 7	0.003 4	0.048 7	0.101 1	0.014 3
11	0.005 7	0.009 0	0.003 6	0.081 0	0.164 4	0.022 7
12	0.004 4	0.005 2	0.003 3	0.041 3	0.105 8	0.013 6
13	0.001 5	0.003 4	0.002 7	0.007 0	0.018 2	0.002 3
14	0.000 3	0.000 8	0.000 6	0.001 0	0.002 5	0.000 3
总质量产率	0.099 2	0.110 0	0.030 8	1.402 7	1.262 1	0.063 6

2.3 颗粒物的微观形貌

图 7 给出了 DLPI+撞击基板第 3 级 ($D_{50}=0.094 3 \mu\text{m}$)、第 7 级 ($D_{50}=0.380 0 \mu\text{m}$)、第 9 级 ($D_{50}=0.943 0 \mu\text{m}$) 以及第 11 级 ($D_{50}=2.460 0 \mu\text{m}$) 颗粒物的微观形貌。

由图 7 可见, ZD 与 SEH 燃烧生成的亚微米颗粒基本上都是球形颗粒。由前面的讨论可知, 这些亚微米颗粒主要由煤中矿物质的气化、成核、凝结及凝聚等过程形成, 在表面张力的作用下, 通过气化—凝结机理形成的颗粒基本上呈球形。第 3 级和第 7 级基板的颗粒形貌呈白色絮状。根据能谱分析, 这些颗粒主要含 Na、Cl 2 种元素, 可推断其成分主要是 NaCl。在第 11 级基板上, 收集到的颗粒物绝大多数是球形颗粒。通过能谱分析, 这种光滑的球形颗粒含 Si、Al 较多, 可能是铝硅酸盐。其余的少量颗粒形状不规则, 可能是煤中矿物质在高温下熔融后冷却形成的。同时, 可以观察到有一些大颗粒上粘附着一些细小颗粒, 这也说明细小颗粒在大颗粒上聚结可能是大颗粒生长的主要途径之一。



(a)—ZD, $D_{50}=0.094 3 \mu\text{m}$; (b)—ZD, $D_{50}=0.380 0 \mu\text{m}$; (c)—ZD, $D_{50}=0.943 0 \mu\text{m}$;
(d)—ZD, $D_{50}=2.460 0 \mu\text{m}$; (e)—SHE, $D_{50}=0.094 3 \mu\text{m}$; (f)—SHE, $D_{50}=0.380 0 \mu\text{m}$;
(g)—SHE, $D_{50}=0.943 0 \mu\text{m}$; (h)—SHE, $D_{50}=2.460 0 \mu\text{m}$ 。

图 7 颗粒物的微观形貌

Fig.7 Morphology of fine particles

3 结论与建议

本文对高碱准东煤和高碱高氯沙尔湖煤进行颗粒物生成特性研究, 得出了以下结论:

1) 沙尔湖煤的颗粒物质量产率比准东煤高 1 个数量级。沙尔湖煤的细模态峰值粒径为 $0.03 \mu\text{m}$, 峰值为 0.630 mg/g ; 准东煤的峰值粒径位于 $0.054 \mu\text{m}$ 处, 峰值为 0.023 mg/g 。准东煤与沙尔湖煤的粗模态峰值粒径均在 $2.459 \mu\text{m}$ 处, 颗粒产率分别为 0.119 mg/g 和 4.822 mg/g 。

2) 2 种煤燃烧后颗粒物元素组成相差不大。

$PM_{0.4}$ 的主要成分均为 NaCl, Na 和 Cl 对细模态颗粒物生成贡献较大; $PM_{0.4-10}$ 的主要元素为 Ca 和 Si。煤中高质量分数的 Cl 促进了细颗粒物的形成。

3) 准东煤与沙尔湖煤产生的 PM_{10} 中的 Cl 分别占原煤中 Cl 质量的 11.8% 和 28.9%, Na 分别占煤灰中 Na 的 2.66% 和 7.53%。当煤同时具有高碱及高氯特征时, 燃烧后更容易生成细颗粒物, 建议在燃烧前通过水洗等方式去除煤中的 Cl 和 Na。

[参考文献]

[1] BLOCH H, RAFIQ S, SALIM R. Economic growth with

- coal, oil and renewable energy consumption in China: prospects for fuel substitution[J]. *Economic Modelling*, 2015, 44: 104-115.
- [2] 孟建强. 准东煤燃烧及结渣特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 1.
MENG Jianqiang. Research on combustion and slagging characteristics of Zhundong coal[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 1.
- [3] 李良钰, 谭厚章, 王学斌, 等. 高氯煤的研究进展和应用技术现状[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(11): 4040-4060.
LI Liangyu, TAN Houzhang, WANG Xuebin, et al. Research progress and applied technical status of high chlorine coal utilization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(11): 4040-4060.
- [4] 陶玉洁, 张彦威, 周俊虎, 等. 准东煤在燃烧过程中的矿物演变过程及Na、Ca释放规律[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(5): 1169-1175.
TAO Yujie, ZHANG Yanwei, ZHOU Junhu, et al. Mineral conversion regularity and release behavior of Na, Ca during Zhundong coal's combustion[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(5): 1169-1175.
- [5] SONG G, SONG W, QI X, et al. Transformation characteristics of sodium of Zhundong coal combustion/gasification in circulating fluidized bed[J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(4): 3473-3478.
- [6] TILLMAN D A, DUONG D, MILLER B. Chlorine in solid fuels fired in pulverized fuel boilers-sources, forms, reactions, and consequences: a literature review[J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(7): 3379-3391.
- [7] MLONKA-MĘDRALA A, MAGDZIARZ A, KALEMBA-REC I, et al. The influence of potassium-rich biomass ashes on steel corrosion above 550 °C[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 187: 15-28.
- [8] WANG X, XU Z, WEI B, et al. The ash deposition mechanism in boilers burning Zhundong coal with high contents of sodium and calcium: a study from ash evaporating to condensing[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 80: 150-159.
- [9] WANG X, RUAN R, YANG T, et al. Sulfate removal by kaolin addition to address fouling in a full-scale furnace burning high-alkaline Zhundong coal[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(11): 12823-12830.
- [10] 曾宪鹏, 于敦喜, 樊斌, 等. 不同温度下准东煤燃烧颗粒物的生成特性[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(11): 2690-2695.
ZENG Xianpeng, YU Dunxi, FAN Bin, et al. Particulate matter formation characteristics during Zhundong coal combustion at different temperatures[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(11): 2690-2695.
- [11] 徐义书, 刘小伟, 张鹏辉, 等. 高氯准东煤中典型矿物元素对颗粒物生成的影响[J]. *化工学报*, 2017, 68(4): 1558-1565.
XU Yishu, LIU Xiaowei, ZHANG Penghui, et al. Impacts of typical mineral matter in Zhundong coal on formation of particulate matter[J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(4): 1558-1565.
- [12] LI G, LI S, HUANG Q, et al. Fine particulate formation and ash deposition during pulverized coal combustion of high-sodium lignite in a down-fired furnace[J]. *Fuel*, 2015, 143: 430-437.
- [13] 阮仁晖, 谭厚章, 王学斌, 等. 高碱煤燃烧过程细颗粒物排放特性[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(4): 1056-1062.
RUAN Renhui, TAN Houzhang, WANG Xuebin, et al. Emission characteristics of fine particles during combustion of high alkali coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(4): 1056-1062.
- [14] RUAN R, TAN H, WANG X, et al. Evolution of particulate matter in the post-combustion zone of Zhundong lignite[J]. *Fuel*, 2020, 281: 118780.
- [15] 隋建才. 燃煤过程中亚微米颗粒形成与排放的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008: 1.
SUI Jiancai. Study on submicron particle formation and emission during coal combustion[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008: 1.
- [16] GAO Q, LI S, ZHAO Y, et al. Mechanism on the contribution of coal/char fragmentation to fly ash formation during pulverized coal combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 2831-2839.
- [17] GAO Q, LI S, YUAN Y, et al. Role of minerals in the evolution of fine particulate matter during pulverized coal combustion[J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(3): 1815-1821.
- [18] RUAN R, TAN H, WANG X, et al. Characteristics of fine particulate matter formation during combustion of lignite riched in AAEM (alkali and alkaline earth metals) and sulfur[J]. *Fuel*, 2018, 211: 206-213.

(责任编辑 刘永强)