

文章编号: 1671-6612 (2024) 05-679-06

# 煤电厂排烟中颗粒物分布特性研究

王 巍 崔艳艳

(国家能源集团胜利发电厂 锡林浩特 026000)

**【摘 要】** 通过采集燃煤锅炉静电除尘器进出口的颗粒物,研究了粒径范围为 0.03 $\mu\text{m}$ ~10.0 $\mu\text{m}$  颗粒物的浓度、粒径分布、扩散特性以及颗粒物通过静电除尘器的穿透率和颗粒物的元素组成等。实验结果显示,PM<sub>10</sub>的粒径呈现双峰态分布。燃煤锅炉向大气排放的颗粒物中,PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>1</sub>的占比较大。当添加石灰石吸附剂用于脱硫时,排放的颗粒物除了燃煤产生的之外,石灰石也产生了新的颗粒物。颗粒物通过静电除尘器的穿透率会随着粒径变化,在粒径 0.01~1 $\mu\text{m}$  范围内有明显峰值,静电除尘器对粒径小于 0.1 $\mu\text{m}$  的颗粒物收集效果不佳。PM<sub>10</sub>中各元素的分布也不相同。

**【关键词】** 燃煤电厂; 颗粒物浓度; 粒径分布; 穿透率; 元素分布

中图分类号 TU5 文献标志码 A

## Research on the Characteristics of Particulate Matter in Coal-fired Power Plants

Wang Wei Cui Yanyan

(CHN ENERGY SHENGLI POWER PLANT, Xilinhot, 026000)

**【Abstract】** This article studied the particle size range of 0.03 $\mu\text{m}$  to 10.0 $\mu\text{m}$  by collecting particles from the inlet and outlet of electrostatic precipitators in coal-fired boilers. The research content mainly includes the concentration, particle size distribution, diffusion characteristics, as well as the penetration rate of particles through electrostatic precipitators and the elemental composition of particles. The experimental results showed that the particle size of PM<sub>10</sub> exhibited a bimodal distribution. PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub> accounted for a relatively large proportion of particulate matter emitted into the atmosphere by coal-fired boilers. When adding limestone adsorbent for desulfurization, in addition to the particles generated by coal combustion, limestone also produced new particles. The penetration rate of particulate matter through electrostatic precipitators varied with particle size, ranged from 0.01 $\mu\text{m}$  to 1 $\mu\text{m}$ . The electrostatic precipitator had poor collection effect on particles with a particle size less than 0.1 $\mu\text{m}$ . The distribution of each element in PM<sub>10</sub> is also different.

**【Keywords】** Coal fired power plants; Particle concentration; Particle size distribution; Penetration rate; Element distribution

## 0 引言

2005 年,中国约 70%的电力能源由煤炭燃烧提供,总共消耗超过 16 亿吨的煤。随着电力需求的增加,煤炭消耗也不断增加。锅炉燃煤发电的过程中会产生大量含颗粒物的细粉煤灰。

目前,PM<sub>10</sub>(空气动力学直径小于 10 微米的颗粒物)已被证明有害人体健康,因为它含有多种

微量金属化合物,并且可以深入人体肺部。燃煤发电厂的颗粒物排放量巨大且有害人体健康。因此,对燃煤产生的颗粒物特性的研究和减少燃煤发电厂向大气排放颗粒物至关重要。现场研究<sup>[1-3]</sup>和实验室研究<sup>[4-6]</sup>发现,燃煤产生的污染物颗粒在粒径方面呈双峰分布。粒径较大的颗粒称为粗颗粒,它是由矿物聚结和矿物焦化形成的。粒径较小的颗粒

物被称为细颗粒或亚微米颗粒物（粒径为  $1\mu\text{m}$  或更小），是由矿物的蒸发和随后的冷凝形成的。文献研究表明<sup>[1]</sup>，亚微米颗粒物的含量较高，约占总颗粒物质量的 2%。对亚微米颗粒物的化学元素分析发现，颗粒物中包括汞、砷、锌和铊等，这些化学元素会对人体健康带来巨大威胁，如汞具有很强的挥发性和毒性，攻击人体的神经系统<sup>[7]</sup>。铊类似于砷，对健康的危害是多方面的，可引发多器官的组织学和功能上的异常改变，严重还可导致癌变<sup>[8]</sup>。

Zheng<sup>[9]</sup>等对燃煤电厂大气污染控制装置中有害微量元素进行了研究，结果表明，粉煤灰中主要微量元素为汞（58~93.3%）、砷（75.2~95.3%）、镉（78.2~94.9%）、硒（79.4~96.6%）、铬（73.8~89.2%）及铅（86.5~99.5%）。Fu<sup>[10]</sup>等研究了煤电厂排放气体和烟气脱硫石膏中铬、铅、镉、铜、锌和砷的分布及化学形态。研究结果表明，微量金属主要残留于粉煤灰（88.0~98.7%）和脱硫石膏（1.26~4.33%）中。粉煤灰中微量金属对生态系统没有风险或低风险，而脱硫石膏中微量金属元素对生态系统显示中风险或高风险。Wang<sup>[11]</sup>等对燃煤电厂中废气、煤、粉煤灰、底灰、石膏、石灰石、补给水、烟气脱硫废水和静电除尘器废水中的微量元素进行测量，结果表明，大部分微量元素分布于粉煤灰中，少量存在于底灰中。

然而，对燃煤电厂的研究主要集中在粉煤灰、废水、脱硫石膏等排放物，针对排放物中颗粒物分

布特性的研究仍然较少。

本文对中国的两家燃煤电厂中的 4 台锅炉燃烧产生的污染物颗粒进行取样研究。在静电除尘器的进出口采用 13 级低压冲击器收集排放的颗粒物，能收集的粒径范围为  $0.03\sim 10\mu\text{m}$ 。主要研究了  $\text{PM}_{10}$  的颗粒物的浓度、粒径分布、扩散特性、穿透率和元素浓度，为进一步加强煤电厂排放有害污染物颗粒的控制提供参考。

## 1 实验

### 1.1 燃煤锅炉描述

本研究在两个燃煤电厂进行，分别为电厂 I 和电厂 II。两个电厂分别选取两组锅炉进行实验测试，电厂 I 中锅炉分别以 A、B 表示，电厂 II 中锅炉分别以 C、D 表示。锅炉 A、B 为高功率锅炉，最大功率为 200MW，锅炉 C、D 为低功率锅炉，功率分别为 50MW、25MW。实验时，锅炉 A 分别以 200、170、140MW 三种荷载频率运行，锅炉 B 以 200MW 负荷运行，锅炉 C 分别以 50、42、38MW 低荷载运行，锅炉 D 以 25MW 荷载运行。锅炉 A、B、C 采用煤作为燃料，锅炉 D 的燃料为煤炭+天然气+石灰。锅炉 A 采用低氮氧化物燃烧器，其他三台采用传统燃烧器。燃烧器一层为点火燃烧器，二、三层为浓淡燃烧器。4 台锅炉的除尘装置均为 5 级电场静电除尘器。燃煤锅炉的详细信息见表 1。

表 1 锅炉参数

Table 1 Parameters of the boiler

工厂	锅炉	功率/MW	运行负/MW	除尘器	燃料	燃料器
I	A	200	200/170/140	5 级静电除尘器	煤	低氮氧化物燃烧器
	B	200	200	5 级静电除尘器	煤	传统燃烧器
II	C	50	50/42/38	5 级静电除尘器	煤	传统燃烧器
	D	25	25	5 级静电除尘器	煤炭+天然气+石灰	传统燃烧器

### 1.2 样本采集

颗粒物样本在静电除尘器的进出口采集，实验中在每个取样口位置分别取样 3 次，每个测点连续采样时间不得少于 3min，总采样气体不少于  $1\text{m}^3$ 。采样系统示意图如图 1 和 2 所示，包括采样口、旋流分离器、低压冲击器和真空泵。在实验过程中，

先由采样探头收集烟道中的排放废气，采样口轴线与气流流线的夹角不得大于  $5^\circ$ ，废气首先经过气动截止直径约为  $10\mu\text{m}$  的旋流器分离，去除粒径较大颗粒物，剩余颗粒物进入冲击器分离收集。实验中使用的是 13 级低压冲击器，可以分离的直径范围为  $0.03\sim 0.05\mu\text{m}$ ， $0.05\sim 0.10\mu\text{m}$ ， $0.10\sim 0.15\mu\text{m}$ ，

0.15~0.26 $\mu\text{m}$  , 0.26~0.38 $\mu\text{m}$  , 0.38~0.60 $\mu\text{m}$  , 0.60~0.95 $\mu\text{m}$  , 0.95~1.58 $\mu\text{m}$  , 1.58~2.36 $\mu\text{m}$  , 2.36~3.95 $\mu\text{m}$  , 3.95~6.60 $\mu\text{m}$  , 6.60~9.80 $\mu\text{m}$  , 9.80~10.0 $\mu\text{m}$ 。根据不同测量目的, 收集瓶选用不同的收集膜, 在测量粒径质量分布时, 选用铝膜, 分析颗粒物元素含量时采用有机膜。通过真空泵的烟气流量约为 10L/min。采样前先测量烟道流速, 根据真空泵流量选取合适喷嘴取样, 以保证整个采样过程是在等速条件下进行。采样系统安装电伴热防止废气中的水汽凝结。

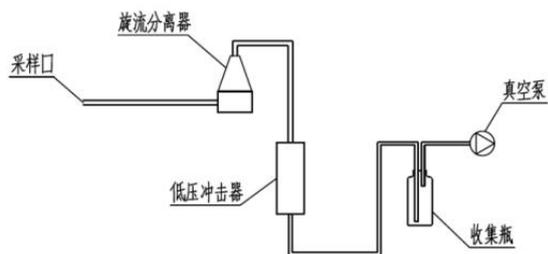


图 1 采样系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of sampling system.



图 2 采样点示意图

Fig.2 Schematic diagram of sampling points

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{PM}_{10}$ 粒径分布

实验测量了 4 台锅炉静电除尘器的进出口处颗粒物质量浓度随粒径的变化。实验对废气中的一氧化氮、一氧化碳、二氧化硫和氧气的浓度进行连续监测, 结果如图 3、4 所示, 图上数据以 A 锅炉为例, 其他锅炉数据相似。图中数据为在采样口测量 3 次得到的测量结果统计。

从图 3 可以发现, 亚微米颗粒的粒径在 0.1 $\mu\text{m}$  处到达一个峰值; 0.1 $\mu\text{m}$ ~0.3 $\mu\text{m}$  的粒径范围质量浓

度逐渐减小, 随后呈逐渐增长趋势; 当粒径大于 10 $\mu\text{m}$ , 峰值模态逐渐消失。图 4 体现静电除尘器出口处质量浓度随粒径的变化, 模态与进口处相似, 粗颗粒在粒径 2 $\mu\text{m}$  处出现峰值。

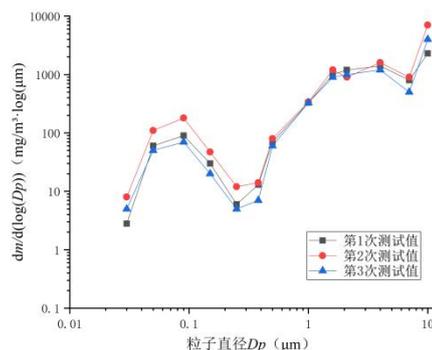


图 3 静电除尘器入口处粒径分布

Fig.3 Particle size distribution at the inlets of ESP.

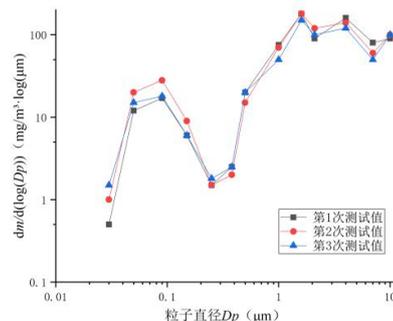


图 4 静电除尘器出口处粒径分布

Fig.4 Particle size distribution at the outlets of ESP.

### 2.2 颗粒物排放特性

表 2 为实验测量 4 台锅炉静电除尘器进出口的颗粒物质量浓度数据。通过表中数据可以得到, 在静电除尘器入口,  $\text{PM}_{10}$  的含量最高占锅炉产生总颗粒物含量的 1.15%;  $\text{PM}_{2.5}$  约占总颗粒物含量的 2%~7%,  $\text{PM}_{10}$  约占总颗粒物含量的 4%~19%。在静电除尘器出口, 对于高负荷运行的锅炉, 即运行负荷为 200、170、140MW 时, 静电除尘器出口处,  $\text{PM}_{10}$  的质量分数均可达到 100%, 其他工况下,  $\text{PM}_{10}$  的质量分数亦是最高。因此, 可以得到静电除尘器收集的污染物颗粒主要为  $\text{PM}_{10}$ , 然而对  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_1$  收集效率不高, 则燃煤锅炉排放至大气的颗粒物以  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_1$  为主。

表 2 实验锅炉静电除尘器进出口颗粒物质量浓度情况记录

Table 2 Summary of test boiler (ESP inlet), total particulate matter (TP) mass concentration and PM emission

锅炉	运行负荷 (MW)	PM <sub>10</sub> 质量浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> 质量浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>1</sub> 质量浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	TP 质量浓度 (g/m <sup>3</sup> )	PM <sub>10</sub> /TP (%)	PM <sub>2.5</sub> /TP (%)	PM <sub>1</sub> /TP (%)
静电除尘器进口	A	200	1330.1	552.3	79.1	18.6	7.16	2.97
	A	170	1352.2	544.4	106.9	19.4	6.98	2.81
	A	140	965.7	421.1	81.8	22.9	4.22	1.84
	B	200	1034.2	549.9	93.8	20.9	4.94	2.63
	B	50	4732.8	1721.0	209.1	25.0	18.92	6.88
	C	42	1436.4	561.5	61.1	18.1	7.94	3.10
	C	38	2167.2	900.1	114.9	13.5	16.05	6.67
	D	25	978	180.1	71.0	6.2	15.79	2.91
静电除尘器出口	A	200	7.2	6.6	3.3	0.0072	100	91.08
	A	170	13.6	9.3	5.7	0.0136	100	68.38
	A	140	9.9	8.7	4.2	0.0099	100	87.88
	B	200	121.5	76.4	27.2	0.1215	100	62.92
	B	50	19.8	12.7	3.8	0.0612	32.35	20.78
	C	42	11.0	10.6	4.1	0.0362	30.39	29.28
	C	38	11.6	10.7	4.9	0.0276	42.03	38.77
	D	25	19.8	12.7	2.1	0.0575	34.46	22.13

D 锅炉的燃料为煤炭+天然气+石灰。从表 2 数据可以看到, D 锅炉静电除尘器进口处总颗粒物质量浓度仅为 6.2g/m<sup>3</sup>, 说明相对于 A, B, C 种类的锅炉, 燃料内含有天然气时, 燃烧产生的颗粒物最少。而 PM<sub>1</sub> 的含量占总颗粒物含量的 1.15%, 相比于以煤为燃料的 A, B, C 锅炉, D 锅炉燃烧产生的亚微米颗粒含量最高。

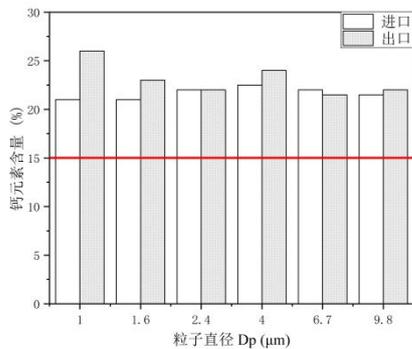


图 5 颗粒物和原煤灰中钙元素的含量  
Fig.5 Ca content in PM and ash

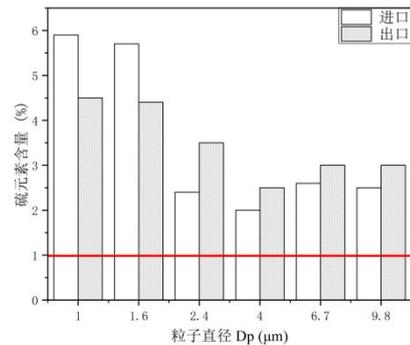


图 6 颗粒物和原煤灰中硫元素的含量  
Fig.6 Sulphur content in PM and ash

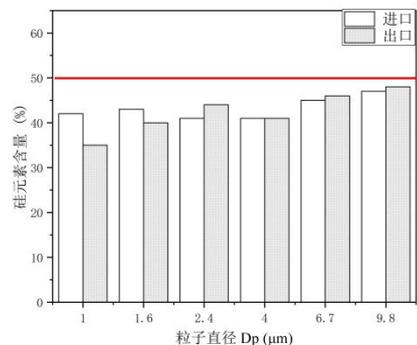


图 7 颗粒物和原煤灰中硅元素的含量  
Fig.7 Si content in PM and ash

另外, D 锅炉采用石灰石作为吸附剂脱硫, 如图 5 所示, 高温灰中钙元素含量约为 15%,  $PM_{1-10}$  中钙元素含量平均约为 22%。颗粒物中的钙含量高于原煤灰中的钙含量。这是由于石灰石增加了  $PM_{10}$  的排放量, 原理根据方程式  $CaCO_3=CaO+CO_2$ , 静电除尘器进出口颗粒物中钙元素的含量高于原煤灰中钙元素的含量。并且, 除了燃煤产生的颗粒物以外, 还会有石灰石反应所产生的新的颗粒物。如图 6、7 所示, 高温灰中硫含量约为 1%,  $PM_{1-10}$  中硫含量平均约为 3%; 高温灰中硅元素的含量约为 50%,  $PM_{1-10}$  中硅元素的平均含量约为 45%。所以, 对多种颗粒物元素的控制也是有必要的。

### 2.3 $PM_{10}$ 通过静电除尘器的穿透率

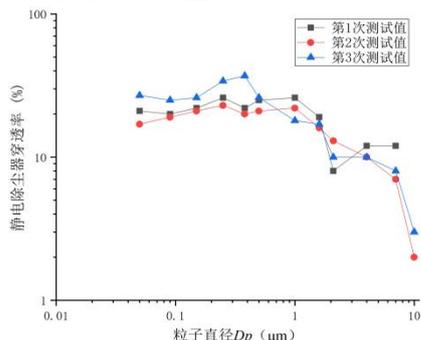


图 8 粒子穿透静电除尘器的百分比

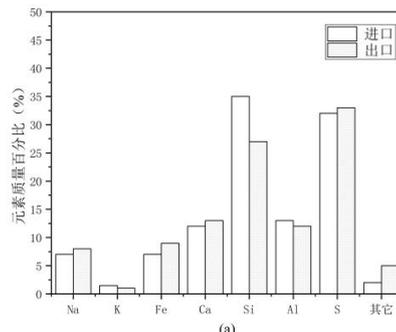
Fig.8 Percentage of penetration of particles through ESP

静电除尘器对粗颗粒的捕集效率基本能达到 100%, 对于  $10\mu m$  以下颗粒物的捕集效率不一, 如图 8 所示, 随着粒径的增大, 通过静电除尘器的穿透率总体呈现下降趋势, 而亚微米颗粒的穿透率基本稳定在 15%~40%。其他工况下也是相似结果, 这就说明捕集效率与锅炉和燃料的种类无关, 可能是由静电除尘器的除尘原理决定的。静电除尘器的微粒去除方式主要有扩散充电和电场充电两种。粒径小于  $0.1\mu m$  的颗粒以扩散充电为主, 粒径大于  $1\mu m$  的颗粒以电场充电为主。然而这些方式对亚微米颗粒除尘效果都不佳,  $0.1\sim 1\mu m$  的颗粒, 处于这两种除尘机理的过渡区, 导致除尘效率降低, 所以在  $0.01\sim 1\mu m$  之间会出现一个峰值。

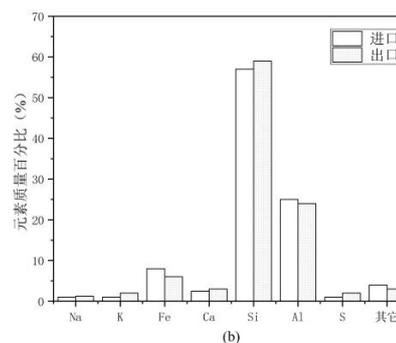
### 2.4 颗粒物的元素分布

颗粒物的元素分布如图 9 所示, 图中为锅炉 A、B 的数据, (a)、(c) 中测量粒径范围为  $0.1\mu m\sim 1.0\mu m$ , (b)、(d) 测量粒径范围为  $1.0\mu m\sim 4.0\mu m$ 。结果显示,  $0.1\mu m\sim 1.0\mu m$  粒径颗粒物中 Si 和 S 的含量都在 30% 以上, 占主要成分,

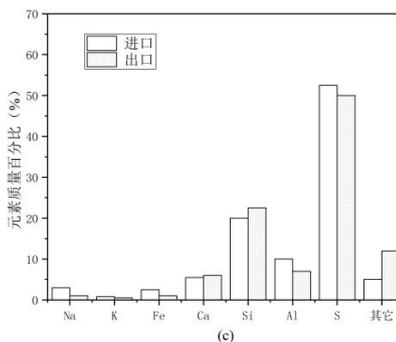
其中 Si 为耐火元素, 这表明燃烧过程中在  $PM_1$  中很有可能形成硫酸盐。Ca 和 Al 的含量在 10%~15% 左右, Na、K、Fe 也存在一定含量。 $1.0\mu m\sim 4.0\mu m$  粒径颗粒物中 Si 和 Al 的含量均较高。造成这种分布差异的因素主要有两点, 一是每个元素的汽化速率。二是原煤中各元素的初始形态, 对  $PM_{10}$  的元素分布有重要影响。原煤中含有 Na、K、Ca 三部分, 一部分以有机结合的形式存在; 一部分以酸溶盐的形式存在, 包括碳酸盐、氧化物、氢氧化物和硫酸盐, 这两种形式的化学元素主要在燃烧过程中汽化冷凝, 最终存在于  $PM_1$  中。另一部分以酸不溶性铝硅酸盐和硅酸盐的形式存在, 最终存在于  $1.0\mu m\sim 4.0\mu m$ 。而对于耐火元素 Fe, Si 和 Al, 汽化不强, 主要存在于  $1.0\mu m\sim 4.0\mu m$  粒径范围内。



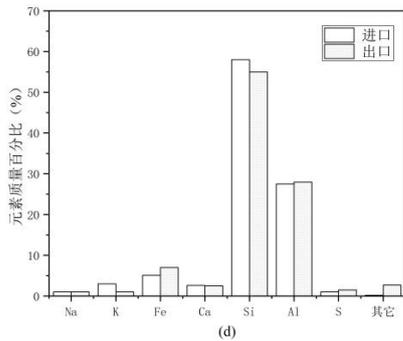
(a) 锅炉 A,  $0.1\mu m\sim 1.0\mu m$



(b) 锅炉 A,  $1.0\mu m\sim 4.0\mu m$



(c) 锅炉 B,  $0.1\mu m\sim 1.0\mu m$



(d) 锅炉 B, 1.0µm~4.0µm

图 9 颗粒物中的元素分布

Fig.9 Elements distribution of particulate

### 3 结论

通过实验对两个燃煤电厂 4 台锅炉所排放颗粒物的采集研究发现:

(1) PM<sub>10</sub> 的粒径呈典型的双峰分布。在静电除尘器入口处,亚微米颗粒的粒径在 0.1µm 处到达一个峰值; 0.1µm~0.3µm 的粒径范围质量浓度逐渐减小, 随后呈逐渐增长趋势; 当粒径大于 10µm, 峰值模态逐渐消失。在静电除尘器出口, 亚微米颗粒的粒径分布与进口处相似, 粗颗粒在粒径 2µm 处出现峰值。

(2) 燃煤电厂向大气排放的颗粒物以亚微米颗粒为主, 尤其是 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>1</sub>。

(3) 在锅炉中添加石灰石作为吸附剂脱硫时, 除了燃煤产生的颗粒物外, 石灰石还产生了新的颗粒物。

(4) 静电除尘器对亚微米颗粒除尘效果都不佳, 颗粒物的穿透率在粒径 0.01~1µm 之间存在峰值。

(5) 粒径 0.1µm~4.0µm 的颗粒物范围中各元素的分布不同。粒径 1.0µm~4.0µm 范围中主要存在 Si、Al 和 Fe。粒径 0.1µm~1.0µm 范围中主要含有 S、Si、Ca。

#### 参考文献:

[1] McElroy M, Carr C. Size distribution of fine particles

from coal combustion[J]. Science, 1982,215(4528): 13-19.

[2] Mohr M, Ylätaalo S, Klippel N, et al. Submicron fly ash penetration through electrostatic precipitators at two coal power plants[J]. Aerosol Science and Technology, 1996, 24(3):191-204.

[3] Ylätaalo S, Hautanen J. Electrostatic Precipitator Penetration Function for Pulverized Coal Combustion[J]. Aerosol Science & Technology, 1998,29(1):17-30.

[4] Flagan R, Taylor D. Laboratory studies of submicron particles from coal combustion[J]. Symposium (International) on Combustion, 1981,18(1):1227-1237.

[5] Buhre B, Hinkley J, Gupta R, et al. Submicron ash formation from coal combustion[J]. Fuel, 2005,84(10): 1206-1214.

[6] Quann R, Sarofim A. Vaporization of refractory oxides during pulverized coal combustion[J]. Symposium on Combustion, 1982,19(1):1429-1440.

[7] 程轲,王艳,薛志钢.《火电厂大气污染物排放标准》实施对燃煤电厂大气汞减排的影响[J].环境科学研究,2015,28(9):1369-1374.

[8] 于云江,王菲菲,房吉敦,等.环境砷污染对人体健康影响的研究进展[J].环境与健康杂志,2007,24(3):181-183.

[9] Zheng C, Wang L, Zhang Y, et al. Partitioning of hazardous trace elements among air pollution control devices in ultra-low-emission coal-fired power plantst[J]. Energy & Fuels, 2017,31(6):6334-6344.

[10] Fu B, Liu G, Mian M, et al. Characteristics and speciation of heavy metals in fly ash and FGD gypsum from Chinese coal-fired powerplantst[J]. Fuel, 2019, 2(251):593-602.

[11] Wang J, Zhang Y, Liu Z. Coeffect of Air Pollution Control Devices on Trace Element Emissions in an Ultralow Emission Coal-Fired Power Plant[J]. Energy & Fuels, 2019,33(1):248-256.