

文章编号:1671-6833(2024)06-0137-06

# 商业生物质成型燃料燃烧颗粒物排放特性分析

杨伟<sup>1</sup>, 冯世龙<sup>1</sup>, 辛善志<sup>2</sup>, 李贺勇<sup>1</sup>, 韩勇<sup>3</sup>, 朱有健<sup>1</sup>

(1. 郑州轻工业大学 新能源学院, 河南 郑州 450002; 2. 江汉大学 工业烟尘污染控制湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430056; 3. 郑州轻工业大学 能源与动力工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**为探究商业成型燃料燃烧颗粒物排放特性,采用立式固定床反应器进行砂光粉、棉秆、竹屑的燃烧试验,分析燃烧颗粒物粒径分布规律和主要元素组成,并探讨各元素含量对颗粒物排放的影响。结果表明:PM<sub>10</sub> 的排放量从高到低依次为棉秆、砂光粉和竹屑,排放量分别为 27.76, 20.83 和 9.65 mg/m<sup>3</sup>。3 种成型燃料产生的颗粒物均以亚微米颗粒物 PM<sub>1</sub> 为主,PM<sub>1</sub> 在 PM<sub>10</sub> 中占比均超过 90%。其中,PM<sub>1</sub> 主要以碱金属氯化物和硫化物为主,PM<sub>1-10</sub> 主要以 Ca、Mg 硅酸盐为主。相关性分析表明生物质灰含量与 PM<sub>1</sub> 排放量正相关,而 Mg+Ca 的质量分数、(Mg+Ca) 与 Si 物质的量之比与 PM<sub>1-10</sub> 排放量正相关。

**关键词:**生物质; 秸秆; 商业成型燃料; 燃烧; 颗粒物; 排放

**中图分类号:**TK6;S216.2;X513

**文献标志码:**A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2024.06.004

生物质具有二氧化碳零排放的特性,其有效利用可替代化石能源减少温室气体排放,是应对全球变暖的重要措施之一。但其能量密度低、运输成本高等问题限制了规模化使用。压缩致密成型是提高能量密度的方式,所制备的成型燃料可广泛应用于供暖、发电和化学品制备等领域,相关研究近年来日益受到关注。生物质热利用会产生气体和固体污染物,其中固体污染物主要为颗粒物,会污染大气环境诱发多种疾病。

现有研究表明生物质颗粒物在我国主要城市颗粒物总量的占比为 10%~20%。与煤炭等相比,生物质产生的细颗粒物(<1 μm)更多,更难被脱除。生物质内在结构、粒径、无机组分和燃烧温度等是影响颗粒物排放的主要因素。Yang 等<sup>[1]</sup>发现木质素含量高的生物质产生颗粒物较少,且高温能减少颗粒物生成。Magalhaes 等<sup>[2]</sup>发现减少生物质粒径能降低 PM<sub>2.5</sub>(粒径小于 2.5 μm 的颗粒物)排放。Namkung 等<sup>[3]</sup>发现 K、Cl、S 含量与颗粒物排放量正相关。Han 等<sup>[4]</sup>发现易气化元素是产生细颗粒物主

要来源,烘焙预处理能减少这些元素向颗粒物的转化。Cheng 等<sup>[5]</sup>通过引入磷酸改性高岭土添加剂,实现颗粒物低水平排放。Li 等<sup>[6]</sup>则选用 NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 添加剂,减少细颗粒物生成。

上述研究主要关注粉末样品,而商业成型燃料制备过程受到挤压预处理,因此其污染物排放会受到影响。Yang 等<sup>[7]</sup>研究显示挤压预处理后生物质燃烧区间更为集中和剧烈。Jia<sup>[8]</sup>发现商业成型燃料的燃烧特性较好。Zhang 等<sup>[9]</sup>研究表明相同能量下,商业成型燃料重金属排放明显低于未成型燃料。Pałaszynska 等<sup>[10]</sup>发现成型燃料的一氧化碳和一氧化氮排放量均处于较低水平。Zhang 等<sup>[11]</sup>发现商业成型燃料的 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放量低于现有标准。这表明针对商业成型燃料燃烧特性、重金属释放、气体污染物排放的研究已比较充分,但是对于颗粒物排放的影响尚不明确。鉴于此,有必要系统研究商用成型燃料燃烧过程颗粒物排放特性,明确我国商业成型燃料燃烧特点,指导生物质燃料的应用和推广。

基于此,本文选取 3 种商业成型燃料,在立式固

收稿日期:2024-05-10;修订日期:2024-06-03

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(232300421338,242300420364);江汉大学工业烟尘污染控制湖北省重点实验室开放课题(HBIK2022-11);国家自然科学基金资助项目(52376215);河南省科技攻关(232102320203)

作者简介:杨伟(1988—),男,河南安阳人,郑州轻工业大学讲师,博士,主要从事固体废弃物的清洁化、资源化利用,E-mail:weiyang1988@zzuli.edu.cn。

引用本文:杨伟,冯世龙,辛善志,等.商业生物质成型燃料燃烧颗粒物排放特性分析[J].郑州大学学报(工学版),2024,45(6):137-142.(YANG W, FENG S L, XIN S Z, et al. Analysis of particulate matter emission characteristics of commercial biomass pellet combustion[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(6): 137-142.)

定床反应炉中进行燃烧实验,收集颗粒物并进行粒径分布、元素组成等分析,明确商业成型燃料颗粒物排放特性,为成型燃料清洁利用提供理论指导。

1 实验

1.1 实验材料

所用商业成型燃料砂光粉、棉秆和竹屑为直径

10 mm 的颗粒。其工业分析、元素分析和低位发热量见表 1,灰分分析结果见表 2。

1.2 实验系统及方法

实验在立式固定床实验系统上进行,如图 1 所示,主要包括给料装置、电加热炉、不锈钢反应器、气体供给装置、旋风分离器、颗粒物回收系统等,具体参数见文献[12]。

表 1 样品的工业分析、元素分析和发热量

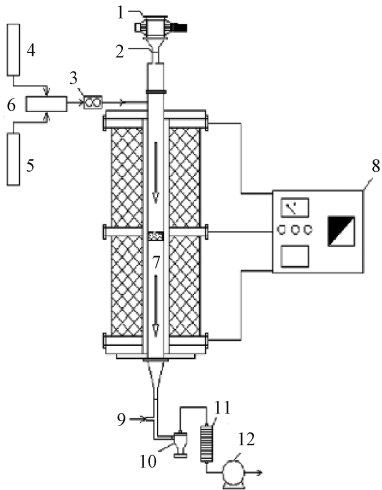
Table 1 Proximate analysis, ultimate analysis and low heating value of the samples

样品	工业分析质量分数/%				元素分析质量分数/%					低位发热量/ (MJ·kg <sup>-1</sup> )
	水分	灰分	挥发分	固定碳	碳	氢	氮	硫	氧	
砂光粉	4.75	2.32	66.19	26.74	48.91	4.73	1.97	0.14	37.18	17.30
棉秆	8.10	6.60	69.54	15.76	45.29	5.95	0.99	0.19	32.88	17.72
竹屑	5.00	0.94	80.56	13.50	48.35	6.22	0.22	0.14	39.13	18.43

表 2 样品的灰分分析

Table 2 Analysis of ash composition of the samples

样品	w(MgO)	w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(SiO <sub>2</sub> )	w(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	w(SO <sub>3</sub> )	w(Cl <sub>2</sub> O)	w(K <sub>2</sub> O)	w(CaO)	w(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
砂光粉	24.30	3.49	15.78	1.82	1.02	0.56	2.87	49.67	0.45
棉秆	7.95		10.04	19.19	6.46	1.98	19.58	31.9	2.75
竹屑	10.08	3.06	19.14	9.72	6.65	1.51	36.16	10.4	1.65



1—星型阀给料装置;2—燃料进口;3—质量流量计;4—氮气;  
5—氧气;6—混气瓶;7—不锈钢多孔挡板;8—热电偶和温度控制器;  
9—稀释空气;10—旋风分离器;11—低压冲击采样装置;  
12—真空泵。

图 1 立式固定床燃烧实验系统

Figure 1 Vertical fixed bed combustion device

本实验成型燃料为 0.1 g 小圆柱,使用星型阀给料器每分钟投入 1 个颗粒,共计投入 20 个颗粒,总燃烧时间 20 min。能够保证给料均匀性和连续性,同时保证完全燃烧,有利于颗粒物收集和成分分析,实验温度选取 1 123 K。反应器达到预定温度后,通入空气并维持 20 min。飞灰颗粒随着气体进入旋风分离器分离大于 10 μm 的粗颗粒,小于等于

10 μm 细颗粒 PM<sub>10</sub> 随烟气进入低压撞击式采样装置(DLPI,芬兰),收集不同空气动力学直径的颗粒物。

1.3 样品分析

使用 DLPI 将 10 μm 以下颗粒物按照空气动力学直径分为 13 级收集,详细介绍可见文献[13]。使用百万分之一天平(0.001 mg, SartoriusM2P, Germany)对 13 级颗粒物称量并得到随粒径分布变化曲线图。实验重复 3 次以保证结果准确性。在环境扫描电子显微镜(ESEM-EDS, Quanta 200, Netherlands)中使用能谱分析颗粒物元素组成。

2 结果与讨论

2.1 成型燃料燃烧颗粒物排放特性

如图 2 所示,3 种燃料的 PM<sub>10</sub> 排放呈双模态分

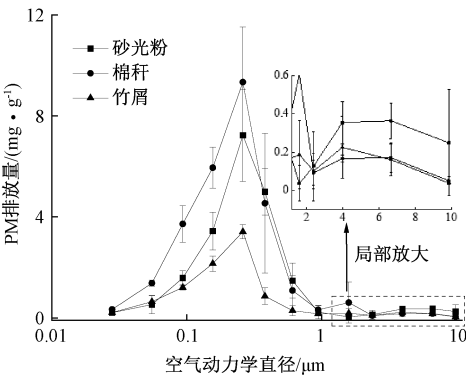


图 2 3 种燃料燃烧时的颗粒物粒径分布

Figure 2 Particle size distribution of the three fuels

布,可分为亚微米颗粒  $PM_1$  (粒径小于  $1\text{ }\mu\text{m}$  的颗粒物)和超微米颗粒  $PM_{1-10}$  (粒径为  $1\sim 10\text{ }\mu\text{m}$  的颗粒物)。 $PM_1$  排放量在  $0.26\text{ }\mu\text{m}$  附近达到峰值; $PM_{1-10}$  产率较低,砂光粉和棉秆的  $PM_{1-10}$  峰值位于  $6.6\text{ }\mu\text{m}$  附近,而竹屑则位于  $4\text{ }\mu\text{m}$  附近。

表 3 为不同粒径颗粒物排放量。在表 3 中,棉

秆  $PM_{10}$  排放量最高,为  $27.76\text{ mg/m}^3$ ,砂光粉为  $20.83\text{ mg/m}^3$ ,竹屑最少,仅为  $9.65\text{ mg/m}^3$ 。3 种燃料的颗粒物主要由  $PM_1$  组成,比例均超过 90%。对比  $PM_1$  在  $PM_{10}$  中的占比,棉秆最高为 95.89%,竹屑最低为 92.60%。但是竹屑  $PM_1$  中超细微米颗粒  $PM_{0.1}$  占比较高,为 23.05%。

表 3 不同粒径段的颗粒物排放量

Table 3 Particulate matter yields with different aerodynamic diameters						
样品	$PM_{0.1}$ 排放量/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$PM_1$ 排放量/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$PM_{1-10}$ 排放量/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$PM_{10}$ 排放量/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$PM_{0.1}$ 与 $PM_1$ 排放量之比/%	$PM_1$ 与 $PM_{10}$ 排放量之比/%
砂光粉	$2.31\pm0.69$	$19.70\pm4.91$	$1.13\pm0.28$	$20.83\pm4.69$	11.75	94.57
棉秆	$5.44\pm0.70$	$26.68\pm7.13$	$1.09\pm0.82$	$27.76\pm7.95$	20.38	95.89
竹屑	$2.06\pm0.39$	$8.93\pm0.50$	$0.71\pm0.27$	$9.65\pm0.59$	23.05	92.60

2.2 颗粒物元素组成

由图 3 可知, $PM_1$  主要由碱金属硫化物和氯化物构成,其中钾盐在  $PM_1$  中占比最高。这与生物质钾含量高有关,与文献[13]研究结果相符合。表 4 显示  $PM_1$  的  $n(\text{Na}+\text{K})$  与  $n(\text{Cl})$  的比均远大于 1,而  $n(\text{Na}+\text{K})$  与  $n(\text{Cl}+2\text{S})$  的比则接近于 1,说明  $PM_1$  中碱金属硫化物含量高于氯化物。Niu 等<sup>[14]</sup> 发现高温下碱金属 K 和 Na 易挥发,并在降温过程与 S、Cl 结合生成小颗粒晶体,随后团聚、成长,形成细颗粒物。

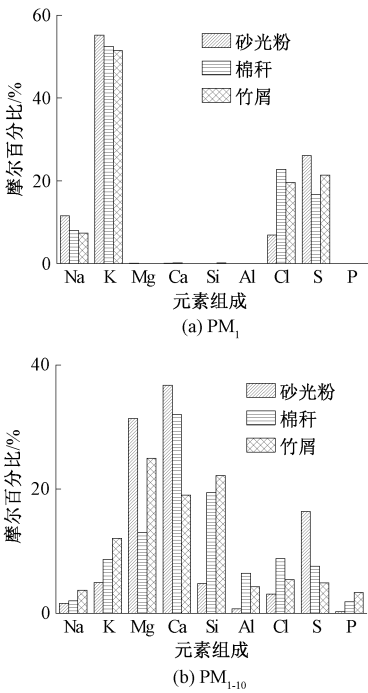


图 3  $PM_1$  和  $PM_{1-10}$  的元素组成

Figure 3 Elemental composition of  $PM_1$  and  $PM_{1-10}$

砂光粉  $PM_{1-10}$  主要由 Ca、Mg、S、K 和 Si 构成,这与其灰分组成(表 2)一致。砂光粉  $PM_{1-10}$  中  $n(\text{Na}+\text{K})/n(\text{Si})$  和  $n(\text{Mg}+\text{Ca})/n(\text{Si})$  分别为 1.36

表 4 颗粒物中主要元素物质的量之比

Table 4 Molar ratios of major elements in particulate matter				
样品	$PM_1$		$PM_{1-10}$	
	$n(\text{Na}+\text{K})/$ $n(\text{Cl})$	$n(\text{Na}+\text{K})/$ $n(\text{Cl}+2\text{S})$	$n(\text{Na}+\text{K})/$ $n(\text{Si})$	$n(\text{Mg}+\text{Ca})/$ $n(\text{Si})$
砂光粉	9.65	1.13	1.36	14.11
棉秆	2.66	1.08	0.55	2.31
竹屑	3.00	0.94	0.71	1.98

和 14.11,进一步说明碱土金属是  $PM_{1-10}$  主要来源。对于棉秆和竹屑, $PM_{1-10}$  主要由 Ca、Si 和 Mg 构成,同样与灰分组成呈正相关,表 4 显示  $n(\text{Na}+\text{K})/n(\text{Si})$  分别为 0.55 和 0.71,说明碱金属对  $PM_{1-10}$  贡献较小。棉秆和竹屑的  $n(\text{Mg}+\text{Ca})/n(\text{Si})$  小于砂光粉,表明碱土金属和 Si 在  $PM_{1-10}$  生成中居于同等重要地位。Li 等<sup>[15]</sup> 发现生物质内在碱土金属会释放并氧化为 CaO 和 MgO,这些氧化物既可以直接转化为  $PM_{1-10}$  颗粒,也可以和气态碱金属( $\text{KCl}$ 、 $\text{K}_2\text{SO}_4$  等)发生异相凝结,形成  $PM_{1-10}$  颗粒(记为机制 1)<sup>[16]</sup>。除上述机制外,Gao 等<sup>[17]</sup> 还发现碱土金属可以和硅/磷反应生成硅酸盐/磷酸盐化合物,再经破碎和聚并形成  $PM_{1-10}$  颗粒(记为机制 2)。

图 4 显示砂光粉  $PM_{1-10}$  中几乎不含 P,Si 含量也较低,说明其生成路径主要为机制 1。棉秆和竹屑  $PM_{1-10}$  中碱土金属和 Si 含量较高,且含有一定量的 P,因此推测主要为机制 2。

2.3 相关性分析

本研究燃烧温度为  $1\text{ }123\text{ K}$ ,燃烧时间和空气量充足,因此是完全燃烧,灰分是颗粒物主要来源。将颗粒物分为  $PM_1$  和  $PM_{1-10}$  进行研究,旨在通过相关性分析,讨论灰分含量与  $PM_1$  和  $PM_{1-10}$  排放之间的关联。2.2 节表明  $PM_1$  和  $PM_{1-10}$  排放与 K、Si、碱土

金属等含量有关。Zhang 等<sup>[18]</sup>发现煤灰分与  $\text{PM}_{10}$  存在正相关。Shao 等<sup>[19]</sup>发现烘焙生物质灰含量与  $\text{PM}_{0.1-1}$  存在正相关。本节深入探究 PM 排放量与灰含量、无机组分含量及物质的量之比之间的相关性,结果见图 4 和图 5。

图 4 显示灰含量越高, $\text{PM}_1$  排放量也越高,灰含量与  $\text{PM}_1$  排放量线性相关度为 0.84,其线性相关性公式为  $X=2.78Y+9.30$ 。随着 K 含量升高, $\text{PM}_1$  排放量并未明显上升,线性相关度仅为 0.43。生物质 90% 以上 K 以游离态存在,燃烧过程易挥发,同时受 Si、Al、P 等影响,因此 K 释放量与 K 含量并不呈线性关系<sup>[20]</sup>。S、Cl 与  $\text{PM}_1$  排放量线性相关度较弱,分别为 0.55 和 0.63。 $n(\text{K})/n(\text{Si})$  与  $\text{PM}_1$  排放量之间线性相关度仅为 0.01, Si 与 K 反应比较复杂,因此  $n(\text{K})/n(\text{Si})$  与颗粒物排放的关联不宜用线性关系进行分析<sup>[21]</sup>。综上所述,灰含量与  $\text{PM}_1$  排放量具有较高线性相关度。

对于  $\text{PM}_{1-10}$ ,图 5 显示灰含量、K、S、Cl、P、Si 含量、 $n(\text{K})/n(\text{Si})$  与  $\text{PM}_{1-10}$  排放量的拟合度都比较低,分别为 0.39,0.04,0.12,0.17,0.15,0.55 和 0.30。

但是 Mg+Ca 的含量、 $n(\text{Mg}+\text{Ca})/n(\text{Si})$  与  $\text{PM}_{1-10}$  排放量具有较强相关性,相关度分别为 0.79 和 0.97,其相关性公式为  $X=0.02Y+0.73$  和  $X=0.10Y+0.58$ 。这说明 Mg+Ca 含量、 $n(\text{Mg}+\text{Ca})/n(\text{Si})$  与  $\text{PM}_{1-10}$  排放量具有较高线性相关度。

本文研究显示棉秆  $\text{PM}_{10}$  产量高达  $27.76\text{ mg/m}^3$ ,砂光粉为  $20.83\text{ mg/m}^3$ ,而竹屑仅有  $9.65\text{ mg/m}^3$ 。对比  $\text{PM}_1/\text{PM}_{10}$  的值,棉秆依旧最高,为 95.89%,竹屑最低,为 92.60%。表明使用棉秆时,颗粒物排放将是需要重点关注的污染物。竹屑超细微米颗粒  $\text{PM}_{0.1}$  占比较高,为 23.05%,颗粒物粒径越小,越难以被脱除,因此对于竹屑,还需要加强相关研究,降低超细颗粒物排放。总体上,3 种商业成型燃料颗粒物都以  $\text{PM}_1$  为主,分析表明灰含量与  $\text{PM}_1$  排放量具有较高相关性,因此制备生物质成型燃料时,建议进行脱灰预处理,从源头降低灰含量。使用其他成型燃料时,可以根据灰含量预测颗粒物排放,预留颗粒物脱除装置安装位置。再结合实际燃烧情况,综合决定是否加装除灰装置。

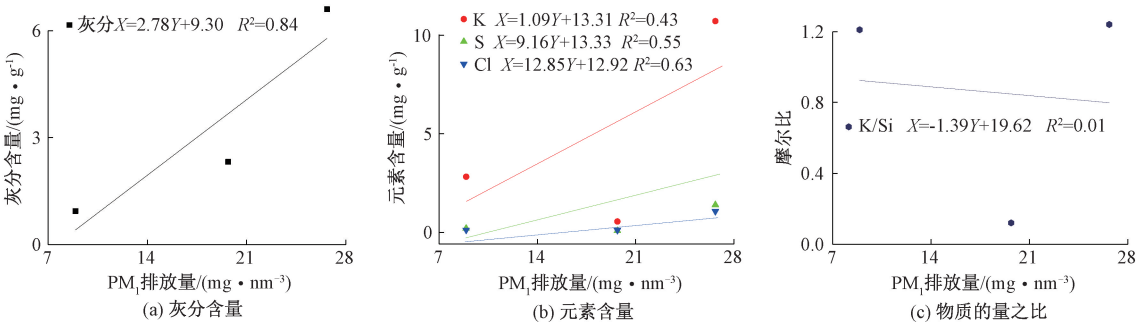


图 4  $\text{PM}_1$  相关性分析  
Figure 4 Correlation analysis of  $\text{PM}_1$

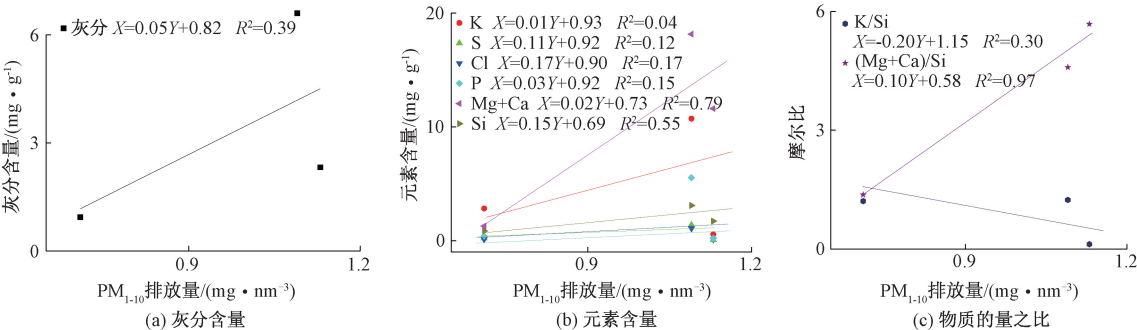


图 5  $\text{PM}_{1-10}$  相关性分析  
Figure 5 Correlation analysis of  $\text{PM}_{1-10}$

3 结论

本文分析了 3 种商业生物质成型燃料颗粒物排

放特性,结论如下。

(1)棉秆的  $\text{PM}_{10}$  排放量最高,为  $27.76\text{ mg/m}^3$ ,其次是砂光粉,为  $20.83\text{ mg/m}^3$ ,竹屑最低,仅为



9.65 mg/m<sup>3</sup>。

(2)PM<sub>1</sub> 主要以碱金属氯化物和硫化物为主,而 PM<sub>1-10</sub> 主要以 Ca、Mg、硅酸盐为主。

(3)相关性分析显示灰含量与 PM<sub>1</sub> 排放量具有明显线性关联,而 Mg+Ca 含量、 $n(\text{Mg}+\text{Ca})/n(\text{Si})$  与 PM<sub>1-10</sub> 排放量具有较强线性相关性。

## 参考文献:

- [1] YANG W, ZHU Y J, CHENG W, et al. Characteristics of particulate matter emitted from agricultural biomass combustion[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(7): 7493–7501.
- [2] MAGALHAES D, KAZANC F. Influence of biomass thermal pre-treatment on the particulate matter formation during pulverized co-combustion with lignite coal[J]. *Fuel*, 2022, 308: 122027.
- [3] NAMKUNG H, PARK J H, LEE Y J, et al. Performance evaluation of biomass pretreated by demineralization and torrefaction for ash deposition and PM emissions in the combustion experiments [J]. *Fuel*, 2021, 292: 120379.
- [4] HAN J K, YU D X, WU J Q, et al. Effects of torrefaction on ash-related issues during biomass combustion and co-combustion with coal. Part 1: elemental partitioning and particulate matter emission[J]. *Fuel*, 2023, 334: 126776.
- [5] CHENG W, ZHU Y J, SHAO J A, et al. Mitigation of ultrafine particulate matter emission from agricultural biomass pellet combustion by the additive of phosphoric acid modified Kaolin [J]. *Renewable Energy*, 2021, 172: 177–187.
- [6] LI Y, TAN Z W, ZHU Y J, et al. Effects of P-based additives on agricultural biomass torrefaction and particulate matter emissions from fuel combustion [J]. *Renewable Energy*, 2022, 190: 66–77.
- [7] YANG W, LYU L D, HAN Y, et al. Effect of densification on biomass combustion and particulate matter emission characteristics [J]. *Atmosphere*, 2022, 13(10): 1582.
- [8] JIA G H. Combustion characteristics and kinetic analysis of biomass pellet fuel using thermogravimetric analysis [J]. *Processes*, 2021, 9(5): 868.
- [9] ZHANG W, ZHU Y. Evaluation of metal emissions from biomass fuel combustion in China [J]. *Energy & Environment*, 2014, 25(1): 93–104.
- [10] PAŁASZYŃSKA K, JUSZCZAK M. Gaseous emissions during agricultural biomass combustion in a 50 kW moving step grate boiler [J]. *Chemical and Process Engineering*, 2018, 39: 197–208.
- [11] ZHANG R K, XU G H, LI B Q, et al. Analysis of the pollution emission system of large-scale combustion of biomass briquette fuel in China [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 169: 928–936.
- [12] YANG W, ZHU Y J, LI Y, et al. Mitigation of particulate matter emissions from co-combustion of rice husk with cotton stalk or cornstalk [J]. *Renewable Energy*, 2022, 190: 893–902.
- [13] YANG W, ZHU Y J, CHENG W, et al. Effect of minerals and binders on particulate matter emission from biomass pellets combustion [J]. *Applied Energy*, 2018, 215: 106–115.
- [14] NIU Y Q, TAN H Z, HUI S E. Ash-related issues during biomass combustion: alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2016, 52: 1–61.
- [15] LI C Z. Importance of volatile-char interactions during the pyrolysis and gasification of low-rank fuels-A review [J]. *Fuel*, 2013, 112: 609–623.
- [16] YANI S, GAO X P, WU H W. Emission of inorganic PM<sub>10</sub> from the combustion of torrefied biomass under pulverized-fuel conditions [J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(2): 800–807.
- [17] GAO X P, YANI S, WU H W. Emission of inorganic PM<sub>10</sub> during the combustion of spent biomass from mallee leaf steam distillation [J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(8): 5171–5175.
- [18] ZHANG L, NINOMIYA Y. Emission of suspended PM<sub>10</sub> from laboratory-scale coal combustion and its correlation with coal mineral properties [J]. *Fuel*, 2006, 85(2): 194–203.
- [19] SHAO J A, CHENG W, ZHU Y J, et al. Effects of combined torrefaction and pelletization on particulate matter emission from biomass pellet combustion [J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(9): 8777–8785.
- [20] 张长森, 李聪聪, 代稳月, 等. K 负载 Sn<sub>0.4</sub>Ce<sub>0.6</sub>O<sub>2</sub> 对碳烟的催化燃烧性能研究 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2023, 44(4): 74–79.  
ZHANG C S, LI C C, DAI W Y, et al. Study on catalytic combustion performance of carbon smoke with K-supported Sn<sub>0.4</sub>Ce<sub>0.6</sub>O<sub>2</sub> [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2023, 44(4): 74–79.
- [21] POLLEX A, ZENG T, KHALSA J, et al. Content of potassium and other aerosol forming elements in commercially available wood pellet batches [J]. *Fuel*, 2018, 232: 384–394.

Analysis of Particulate Matter Emission Characteristics of Commercial Biomass Pellet Combustion

YANG Wei<sup>1</sup>, FENG Shilong<sup>1</sup>, XIN Shanzhi<sup>2</sup>, LI Heyong<sup>1</sup>, HAN Yong<sup>3</sup>, ZHU Youjian<sup>1</sup>

(1. New Energy College, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China; 2. Hubei Key Laboratory of Industrial Fume & Dust Pollution Control, Jiangnan University, Wuhan 430056, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In order to investigate particulate matter (PM) emission characteristics from the combustion of commercial biomass pellet, a fixed-bed reactor was used to conduct combustion experiments of wood dust, cotton stalk and bamboo dust. The particle size distributions and main element composition of PM were analyzed. And the influence of element content on PM emission was discussed. It was found that the yields of PM<sub>10</sub> from high to low was cotton stalk, wood dust and bamboo dust, and the yields were 27.76, 20.83 and 9.65 mg/m<sup>3</sup>, respectively. The PMs were mainly composed of submicron particles (PM<sub>1</sub>), and the proportion of PM<sub>1</sub> to PM<sub>10</sub> was more than 90%. PM<sub>1</sub> was mainly composed of alkali metal chloride and sulfide, while PM<sub>1-10</sub> was mainly composed of compounds formed by calcium magnesium silicate. Correlation analysis showed that there was a positive correlated between biomass ash content and PM<sub>1</sub> yield, while the content of Mg+Ca and  $n(\text{Mg}+\text{Ca})/n(\text{Si})$  were linearly correlated with PM<sub>1-10</sub> yield.

**Keywords:** biomass; straw; commercial biomass pellet; combustion; particulate matter; emission

(上接第 106 页)

Large Eddy Simulation of Wind Load Interference Effects on Tandem Double Hemispherical Domes with Different Spacing

ZHENG Deqian<sup>1</sup>, YAN Wei<sup>1</sup>, LI Liang<sup>1</sup>, ZHAO Lingyu<sup>2</sup>, MA Wenyong<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. China Communications Logistics Planning and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200231, China; 3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** Based on the spatially-averaged large eddy simulation method, the wind interference effect of the tandem double hemispherical domes was numerically studied considering different center spacing. The effectiveness of the present numerical simulation method and parameter settings was firstly verified by comparison between results of large eddy simulation and the wind tunnel test on the tandem double hemispherical dome with center spacing of 160 m. Then the wind pressure distribution characteristics on the tandem double hemispherical domes surface with the center spacing of 160 m and 190 m were compared and analyzed to study the influence of the interference effect. In conjunction with the simulated unsteady flow field, the mechanism of the influence on wind loads with different center spacing was investigated. Similar tendency was observed for the distribution of the mean and fluctuating wind pressure coefficients of the tandem double spherical shell roof with different center spacing. The blocking effect of the upstream roof weakened the positive pressure on the windward surface of the downstream roof. However, the blocking effect of the downstream roof would intensify the flow separation of the upstream roof when the spacing was small, resulting in a significant increase in the local wind suction on the top skylight. As the spacing increased, the separated vortex on the leeward surface of the upstream roof could change from small-scale strip vortex to large-scale arc-shaped one, leading to more significant wind pressure fluctuations on the roof skylight, upstream leeward surface, and downstream windward surface.

**Keywords:** hemispherical domes; wind load; large eddy simulation; interference effect; flow field mechanism