

磷酸二氢钱对生物质燃烧过程中颗粒物排放特性的影响

樊纪原¹, 朱有健², 吴贵豪¹, 成伟¹, 刘恒¹, 邵敬爱¹, 杨海平¹, 陈汉平¹

(1. 华中科技大学, 湖北省武汉市430074; 2. 郑州轻工业大学能源与动力工程学院, 河南省郑州市450002)

摘要: 使用立式管式炉燃烧装置研究不同添加比例的磷酸二氢钱对生物质燃烧过程中颗粒物 (particulate matter, PM) 排放特性的影响。研究表明, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

的添加可有效减少颗粒物总量 PM_{10} 。尤其是 PM_{10}

的排放量, 并且减排效果与P/K摩尔比密切

相关。当P/K摩尔比为1时, PM_{10} 和 PM_{10}

的减排效果最好, 分别达到44.43%和30.70%。

减排主要是由于 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与玉米秆中的K盐反应生成K-Ca磷酸盐, K-Mg磷酸盐化合物, 将K固定在底灰中, 有效抑制了K盐向气相中释放并最终达到降低PM排放的目的。研究结果可为玉米秆燃烧过程中颗粒物减排提供理论支撑。

0引言

生物质作为一种可再生能源, 具有资源储量丰富、分布广泛、环境友好和碳中性等优点, 其大规模利用可有效缓解化石能源使用带来的能源危机和环境污染[1]。我国是农业大国, 秸秆资源储量丰富。据统计我国每年新增约9亿吨农作物秸秆, 目前得以有效处置的秸秆占比较低, 大量的农作物秸秆由于处置不当造成了一系列的问题, 如露天焚烧造成的大气污染, 粉碎还田造成的病害增多和粮食减产等。秸秆的能源化利用不仅可以有效的处置大量废弃秸秆, 还可用于供热和发电, 实现“能源与环境”的双赢。目前国家十三五规划明确鼓励农业秸秆制备生物质成型燃料用于供热和发电, 以部分替代燃煤。但由于秸秆中碱金属和氯元素含量较高, 导致燃烧过程颗粒物排放量高, 在一定程度上加剧了雾霾、污染等环境问题, 严重制约了生物质的规模化推广应用。

以往研究表明, 生物质中碱金属的存在是燃烧过程中生成颗粒物的重要因素。Yang等[2]研究了四种中国常见的生物质在燃烧过

程中颗粒物的排放特性, 发

现秸秆类生物质燃烧产生的颗粒物主要由亚微米颗粒物

(PM_{10}

)组成, 且排放量明显高

于林业废弃物, 其中玉米秆燃烧产生的颗粒物总量

高达 $88.35\text{mg}/\text{m}^3$

。研究表明[3], 生物质中碱金属含量对颗粒物的排放有显著影响, 生物质在成型过程中常使用羧甲基纤维素钠 (sodium carboxymethyl

cellulose, CMC) 作为黏结剂, 由于引入了大量的Na, 导致其在燃烧过程中颗粒物排放量大幅增加。

目前, 相关学者对生物质燃烧过程中颗粒物减排进行了一定的研究, 主要手段有引入添加剂及生物质混烧等。Bafver等[4]发现燕麦壳在燃烧过程中引入高岭土可有效降低颗粒物的排放量, 而石灰石的加入几乎没有影响。Yang等[5]选取3种无机矿物质添加剂与棉秆混烧, 发现硅藻土的引入对亚微米颗粒物的减排量达18.65%, 而高岭土和氢氧化钙对颗粒物的生成并没有抑制作用, 甚至会增加排放。

木材与农林废弃物混烧, 当木材的含量高于50%时, 也可降低颗粒物的排放水平[6]。可见, 传统的钙基添加剂, 硅铝基添加剂对于生物质燃烧过程中颗粒物的减排效果较为一般。磷基添加剂由于其与碱金属有较高的反应活性, 易反应生成磷酸盐化合物, 并且可以改善灰的熔融特性, 成为近几年研究的热点。Qi等[7]用磷酸二氢钱作为添加剂与秸秆制成成型燃料并燃烧, 发现磷基添加剂明显改善了成型燃料的灰熔融和结渣问题, 并有效抑制了K元素的析出, 这主要是因为磷基添加剂与K元素反应生成了K-Ca-P高熔点化合物。研究表明[8], 当添加剂掺混比例P/K摩尔比为1.0-2.0时, 灰熔点提升效果最显著。磷酸盐添加剂有很强的固K作用, 可以有效地抑制K的释放。燃烧过程中颗粒物的排放是一个复杂的过程, 受多种物理化学作用的影响, 而目前关于磷酸盐添加剂对生物质燃烧过程中颗粒物排放的影响还未有研究。

本文使用立式管式炉燃烧装置, 考察 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

添加剂对玉米秆燃烧过程中颗粒物排放特性的影响以及不同混合比例对颗粒物排放的影响。本文研究成果可为生物质燃烧供热和发电的规划化应用提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验样品

玉米是我国广泛种植的农作物，我国每年产生的玉米秆约占农业秸秆总量的32.5%[9]。本研究选取玉米秆（MS）为原料，样品取自中国湖北武汉市周边乡村，其工业分析、元素分析和热值见表1。实验所用原料经粉碎，筛分出粒径范围在150~250 μm之间的粉末，并置于105℃烘箱中干燥24h备用。玉米秆在600℃条件下低温灰化，采用X射线荧光光谱仪（EagleIII，America）分析其组成，结果见表2。实验选用的磷基添加剂为 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ （ammonium dihydrogen phosphate，ADP），购买于国药化学试剂有限公司，纯度为分析纯。

表 1 玉米秆样品的工业分析和元素分析

Tab. 1 Proximate and ultimate analysis of CS (on dry basis).

样品	元素分析/%								$Q_{\text{net, db}} /$ (MJ/kg)
	V_{db}	A_{db}	FC_{db}	C	H	N	S	O^a	
玉米秆	76.20	4.16	19.64	48.59	6.28	1.31	0.18	39.47	13.49

注：db：干燥基，a：通过差减法获得。

表 2 玉米秆标准灰及燃烧底灰元素组成分析(干燥基)

Tab. 2 Ash chemical composition of CS (on dry basis)

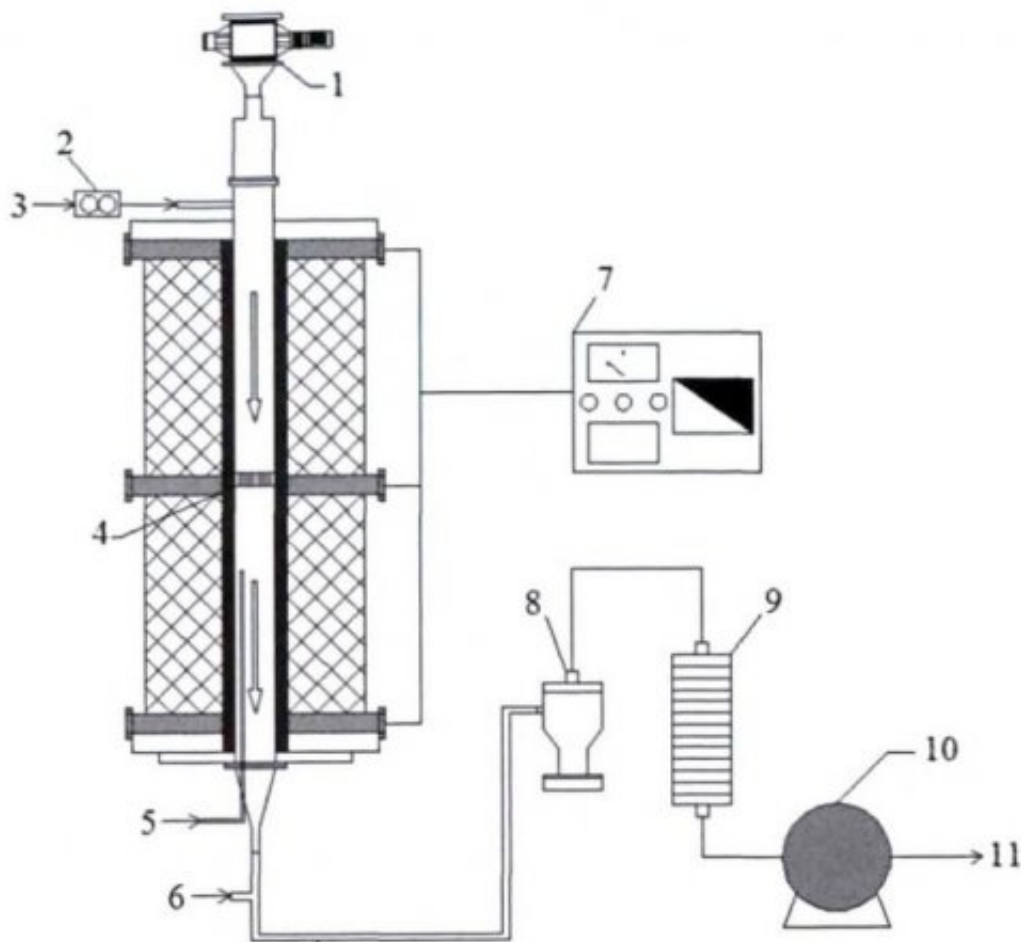
样品	K_2O	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	Cl
玉米秆标准灰	25.50	6.57	3.60	1.78	41.56	5.89	3.79	11.31
CS	34.44	8.33	8.37	—	37.86	37.86	37.86	37.86
ADP0.5	29.23	4.69	4.14	—	26.30	26.30	26.30	26.30
ADP1	26.28	3.91	4.15	—	24.04	24.04	24.04	24.04
ADP2	17.85	2.73	2.77	—	16.60	16.60	16.60	16.60

注：玉米秆标准灰为根据标准 600℃灰化后所得灰分，燃烧底灰为立式管式炉燃烧实验所得灰分。

将干燥的 $NH_4H_2PO_4$ 与玉米秆分别按照P/K摩尔比为0.5、1、2充分机械混合均匀后备用。

1.2实验装置和实验设计

燃烧实验在如图1所示的立式管式炉反应器上进行。



1—压电式给料机；2—质量流量计；3—空气；4—不锈钢多孔挡板；
5—空气；6—稀释气体；7—热电偶和温度控制器；8—旋风分离器；
9—低压冲击采样装置；10—真空泵；11—排气。

图 1 立式管式炉试验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of
the fixed bed experimental system

反应器为长1600mm，内径55mm的不锈钢反应器，反应器内部使用不锈钢多孔筛板模拟固定床炉篦。根据前期实验测试，综合烤炉燃烧燃尽率和高温灰融化烧结问题，设置反应温度为900℃，在该温度下碳转化率>95%[3]。实验开始前，将反应器加热至指定温度并保温30min使反应器温度稳定。原料通过压电式给料机并在载气的夹带下进入反应器，给料速率为0.2g/min，反应持续30min。反应器上部通入空气，气流量为3L/min，下部通入2L/min的二次风和5L/min的稀释气体保证其燃烧完全且达到低压冲击采样装置（Dekati low pressure impactor, DLPI, Dekati, 芬兰）正常工作所需的气流量。燃烧后烟气经氮气稀释后依次流经旋风分离器和DLPI，分别收集空气动力学直径大于10 μm和小于10 μm (PM₁₀) 的粉尘颗粒。每组工况重复4次，以确保实验结果的可重复性。前3组重复试验用涂有艾皮松脂的铝片收集颗粒物，之后称重并获得平均值用于计算颗粒物的质量粒径分布，第4组实验使用聚碳酸酯膜片收集颗粒，用于后续的各类表征。

1.3样品分析方法

每组实验结束后，收集DLPI基板上的颗粒物。将涂有艾皮松脂的铝片上收集到的颗粒物用电子微量天平（0.001mg，Sartorius M2P，Germany）称量，计算平均值并绘制颗粒物的质量粒径分布曲线。使用X射线荧光光谱仪（XRF，EA GLEIII，EDAX Inc. USA）对聚碳酸酯膜片上收集到的颗粒物进行元素组成分析，每级样品至少选择3处不同的区域进行扫描并求平均值。取少量颗粒物黏附于碳带上，用计算机控制扫描电子显微镜（computer controlled scanning electron microscope，CCSEM，Quanta200，荷兰FEI公司）对其微观形貌进行分析。

2 结果与讨论

2.1 颗粒物排放特性

玉米秆原样及添加不同比例ADP添加剂燃烧产生的颗粒物质量粒径分布曲线如图2所示。可以看出，玉米秆燃烧颗粒物质量粒径分布曲线呈双峰分布，最大峰值出现在 $0.38\ \mu\text{m}$ 左右，另一个较小峰峰值出现在 $2.38\ \mu\text{m}$ 左右。表3为不同粒径段颗粒物质量的产率以及 PM_{10} 在 PM_{10} 中的占比。可以看出玉米秆燃烧生成的颗粒物总量为 10.03mg/g ，主要以 PM_{10} （ 7.97mg/g ）为主，占 PM_{10} 的79.47%，添加不同比例的ADP后颗粒物的质量粒径分布与原样一致，也呈双峰分布并以 PM_{10} 为主，但其对PM排放量影响显著。总体来讲，在原样中添加不同比例的ADP使得总的 PM_{10} 排放量呈现先降低后增加的趋势， PM_{10} 排放量在P/K摩尔比为1时最低为 6.96mg/g ，继续增加ADP添加量使得P/K摩尔比为2时， PM_{10} 的排放量达到了 11.51mg/g （高于原样的排放量）。

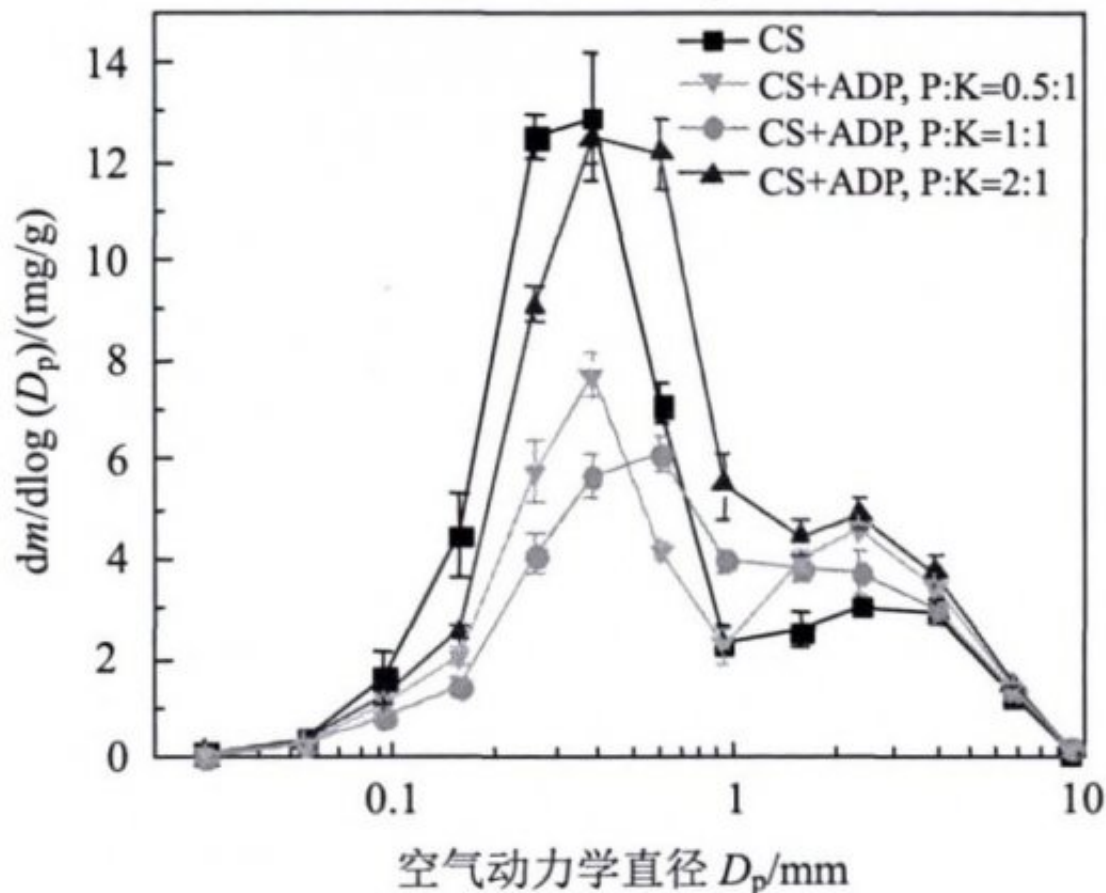


图2 不同ADP添加比例下玉米秆燃烧产生的颗粒物质量粒径分布曲线

Fig. 2 Particle size distributions(PSDs) of PM from corn stalk combustion with ADP additives

表3 燃料燃烧过程中PM_{0.1}, PM_{0.1-1}, PM₁, PM_{1-2.5}, PM_{2.5}, PM_{2.5-10}, PM₁₀及PM₁与PM₁₀的比率

Tab. 3 Yields of PM_{0.1}, PM_{0.1-1}, PM₁, PM_{1-2.5}, PM_{2.5}, PM_{2.5-10}, and the ratio of PM₁ to PM₁₀ from the combustion of the fuels

样品	PM _{0.1} /(mg/g)	PM _{0.1-1} /(mg/g)	PM ₁ /(mg/g)	PM _{1-2.5} /(mg/g)	PM _{2.5} /(mg/g)	PM _{2.5-10} /(mg/g)	PM ₁₀ /(mg/g)	(PM ₁ /PM ₁₀)%
CS	0.466±0.095	7.511±0.303	7.977±0.348	1.122±0.079	9.099±0.427	0.939±0.047	10.038±0.474	79.47
CS+ADP,P:K=0.5:1	0.324±0.042	4.256±0.214	4.581±0.197	1.713±0.035	6.293±0.221	1.117±0.030	7.410±0.235	61.82
CS+ADP,P:K=1:1	0.240±0.004	4.193±0.176	4.433±0.173	1.494±0.101	5.927±0.096	1.029±0.112	6.956±0.087	63.73
CS+ADP,P:K=2:1	0.382±0.074	8.100±0.241	8.482±0.307	1.859±0.088	10.340±0.391	1.171±0.078	11.511±0.468	73.68

ADP的添加对不同粒度的颗粒物的生成量影响不同。对于超细颗粒物(PM_{0.1}),ADP的添加均使得超细颗粒物的排放量有一定程度的降低。当P/K摩尔比为0.5时,超细颗粒物的排放量为0.324mg/g,与玉米秆原样相比降低了30.5%。P/K摩尔比增至1时,超细颗粒物的排放量继续降低至0.24mg/g,但继续增加P/K摩尔比至2时,超细颗粒物的排放量则增至0.382mg/g,与原样相比仅降低了18%。对于细颗粒物PM₁,当P/K摩尔比为0.5-1时,PM₁的排放量相比原样降低了42.6%~44.4%。随着ADP添加量的继续增加(P/K摩尔比=2),此时PM₁

的排放量为8.482mg/g，相比原样增加了6.3%。对于粗

颗粒物 PM_{1-10}

，在玉米秆中添加不同比例的ADP在不同程度上增加了粗颗粒物的排放量，增幅为22.4%-47.0%。此外由于ADP在不同程度上减少了 PM_1 的排放量并增加了 PM_{1-10}

的排放量，因此其降低了亚微米颗粒物 PM_1 在 PM_{10}

中的占比。与原样相比，当P/K摩尔比为1时， PM_1 的占比从79.47%降至63.73%。

可以看出，在合适的ADP添加比例下（P/K摩尔比MI

）， $NH_4H_2PO_4$ 对细颗粒物 PM_1 是有明显的抑制作用的， PM_1

最高可减排约50%。但是当 $NH_4H_2PO_4$ 添加量过高时，反而会使 PM_1

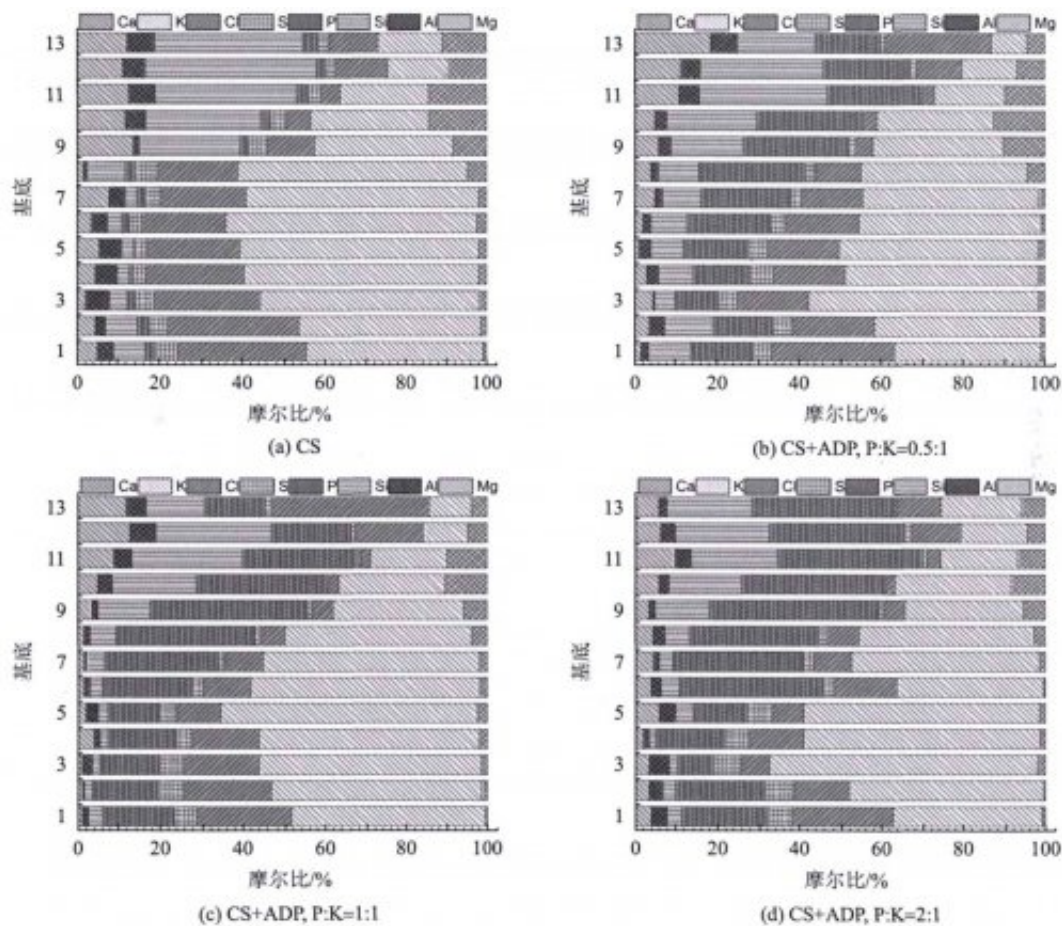
有略微升高。因此需要对 $NH_4H_2PO_4$ 添加量进行控制以免造成颗粒物减排的副作用。

2.2 颗粒物化学成分分析

玉米秆原样及添加不同比例ADP后玉米秆燃烧产生的 PM_{10}

的化学组成如图3所示，图中纵坐标1-13分别对应DLPI中第1-13级收集到的颗粒物样品。可以看出，玉米秆燃烧生成的 PM_1

（第1-8级）主要元素组成为K和Cl以及少量的S，Si，Al等。表4为根据不同粒径颗粒物的化学成分计算所得到的K/Cl，K/（Cl+2S），K/（Cl+2S+P）摩尔比。可以看出，玉米秆燃烧产生的 PM_1 主要由KCl组成。



纵坐标基底 1-13 分别对应的颗粒物空气动力学直径为 0.028, 0.057, 0.094, 0.15, 0.26, 0.38, 0.61, 0.94, 1.58, 2.36, 3.95, 6.6, 9.8 μm 。

图 3 玉米秆原样及添加不同比例 ADP 燃烧产生的颗粒物元素组成

Fig. 3 Elemental composition of PM from corn stalk combustion with ADP additives

表 4 颗粒物 K/Cl, K/(Cl+2S), K/(Cl+2S+P)摩尔比

Tab. 4 Molar ratio of K/Cl, K/(Cl+2S), K/(Cl+2S+P) of PM

样品	K/Cl			K/(Cl+2S)			K/(Cl+2S+P)		
	PM _{0.1}	PM ₁	PM ₁₋₁₀	PM _{0.1}	PM ₁	PM ₁₋₁₀	PM _{0.1}	PM ₁	PM ₁₋₁₀
CS	1.91	2.70	3.40	1.44	2.04	1.69	1.35	1.93	1.42
CS+ADP, P:K=0.5:1	2.57	2.55	4.29	1.75	1.77	3.07	1.23	0.95	0.66
CS+ADP, P:K=1:1	2.76	3.92	2.99	1.66	2.85	2.42	1.10	1.02	0.51
CS+ADP, P:K=2:1	6.08	3.95	4.72	2.47	2.44	3.62	1.62	0.91	0.48

从表4可以看出, 原样中K/Cl和K

/ (Cl+2S) 摩尔比分别为2.7和2.04, 这表明PM₁中除KCl和K₂SO₄

外, 还应有一部分其他的含钾化合物。Zhu等[3]在研究竣甲基纤维素添加剂对几种生物质燃烧PM排放的影响时认为部分碱金属Na是以Na₂CO₃

和NaOH的形式释放至气相中。因此, 可以推断PM₁中其他含钾化合物应为KOH和K₂CO₃

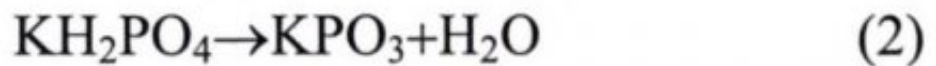
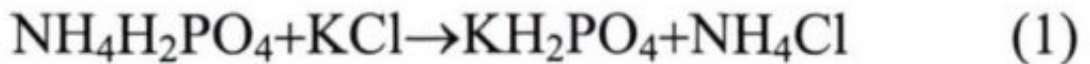
。碱金属化合物(如KCl等)通常熔点较低, 在高温燃烧过程中易挥发释放到气相中并随烟气排出炉膛, 当外界温度降低到熔点以下时, 这些气态碱金属盐通过均相成核或异相凝结生成细颗粒物。这些气态无机盐在随烟气排出的过程中由于温度的降低使得蒸汽的饱和蒸气压降低, 当达到对应饱和状态时会首先通过均相成核(homogeneous nucleation)形成几纳米至几十纳米的微粒[10]。这些形成的微粒的粒径可通过以下两种主要途径得到增长: 1) 无机蒸汽通过异相凝结(heterogeneous condensation)作用沉积在已形成的微粒表面, 使得颗粒粒径增加[11]; 2) 所形成的微粒进行无规则的布朗运动, 在此过程中相互碰撞并通过聚并(coalescence)和凝聚(agglomeration)作用[12]分别形成粒径小于1 μm 的大颗粒或团聚物(PM₁)。另外, PM₁

中还有少量Si, 表明碱金属硅酸盐在燃烧过程中碰撞、破碎也可形成部分亚微米颗粒物[2], 但从元素组成中可以看到Si含量较低, 因此其对PM₁形成的贡献较低。

与PM₁化学组成不同, PM₁₋₁₀ (第9—13级) 主要由Si, Ca, Mg, K组成, 并有少量的P, Al, Cl和S。从化学组成中可以看出, PM₁₋₁₀ 应主要由K-Ca/Mg的硅酸盐组成, 此外Cl和S的存在, 表明PM₁₋₁₀ 中还含有少量的KCl和K₂SO₄。燃烧过程中玉米秆中灰分可通过复杂的反应形成硅酸盐化合物, 由于焦炭表面温度通常要比环境温度高200~300 [13], 部分矿物质灰会发生不同程度的熔融 (melting) 因此颗粒间可通过熔融-聚合、黏附小颗粒灰分、碰撞破碎等作用形成粒径在1~10μm的颗粒[3]。部分大颗粒外源矿物质也可直接通过碰撞破碎作用而形成粒径在1~2.5μm范围内的颗粒。此外, 大量碱金属K、Cl和S等在PM₁₋₁₀中的存在表明气态碱金属在矿物颗粒表面的异相凝结 (heterogeneous condensation) 也对PM₁₋₁₀的形成起重要作用[11]。

添加ADP后, PM₁和PM₁₋₁₀中P含量均大幅增加且随着P/K摩尔比的增大, 颗粒物中P的含量也相应增大。由表4可知, 当ADP添加量P/K摩尔比为0.5, 1, 2时, PM₁中K/(Cl+2S+P)的摩尔比分别为0.95, 1.0和0.91, 均在1附近, 说明添加ADP后玉米秆燃烧产生的PM₁中主要成分为K的氯化物, 硫酸盐及磷酸盐。此时PM₁中, K除KCl和K₂SO₄形式存在外, 剩余的K与P的摩尔比约为1, 表明PM₁中钾的磷酸盐是以KPO₃的形式存在。贡长生等[14]表明在80~100℃时NH₄H₂PO₄与KCl反应生成KH₂PO₄和NH₄Cl (见方程1), 同时KH₂PO₄在温度高于240~260℃时可直接脱水生成KPO₃ (见方程2), 因此可以推断在混有ADP的玉米秆在进入反应器时, NH₄H₂PO₄与KCl快速反应生成KH₂PO₄, KH₂PO₄进一步分解为KPO₃。KPO₃的熔点仅为807℃, 融化的KPO₃可通过挥发-冷凝形成亚微米颗粒物。

从图3 (b) — (d) 中可以看出, 添加ADP使得PM₁₋₁₀中磷含量显著增加, 并且其P含量随ADP添加量的增加而呈现明显的增加趋势, 此时PM₁₋₁₀应主要由碱/碱土金属的硅酸盐和磷酸盐共同组成。在碱土金属Ca和Mg存在时, ADP可与K盐和碱土金属化合物反应, 生成高熔点难挥发性的磷酸钾盐和K-Ca/Mg磷酸盐化合物, 可有效抑制了K盐向气相中的挥发形成PM₁, 从而达到降低PM₁排放量的目的。所形成的磷酸盐化合物也可通过熔融聚并以及碰撞破碎等作用而形成粒径在1~10 μm的颗粒并增加PM₁₋₁₀的排放量。这与3.1中PM₁₋₁₀随ADP的添加而增加相符。



2.3 颗粒物微观形貌及EDX分析

玉米秆原样及ADP添加量为P/K摩尔比=1时典型颗粒物的表面形貌如图4所示, 对应的EDX分析见表5。由图4 (a) 可以看出, 玉米秆原样产生的PM, 由一些球形小颗粒凝聚或团聚而成, EDX结果显示其 (点1) 主要由KCl组成。此外, 点1中K/(Cl+2S) 的比值为1.79, 表明其化学成分除了KCl外还有一定的KOH或K₂CO₃组成, 这与3.2中分析相一致。从图4 (c) 可以看出, 添加ADP后, PM₁颗粒的表面形貌无明显改变。但

是从表5中元素组成可以清楚看到（点3），此时PM₁的化学组成主要为KPO₃和KCL。这表明添加ADP后KPO₃的挥发-冷凝也对PM₁的形成起重要作用。

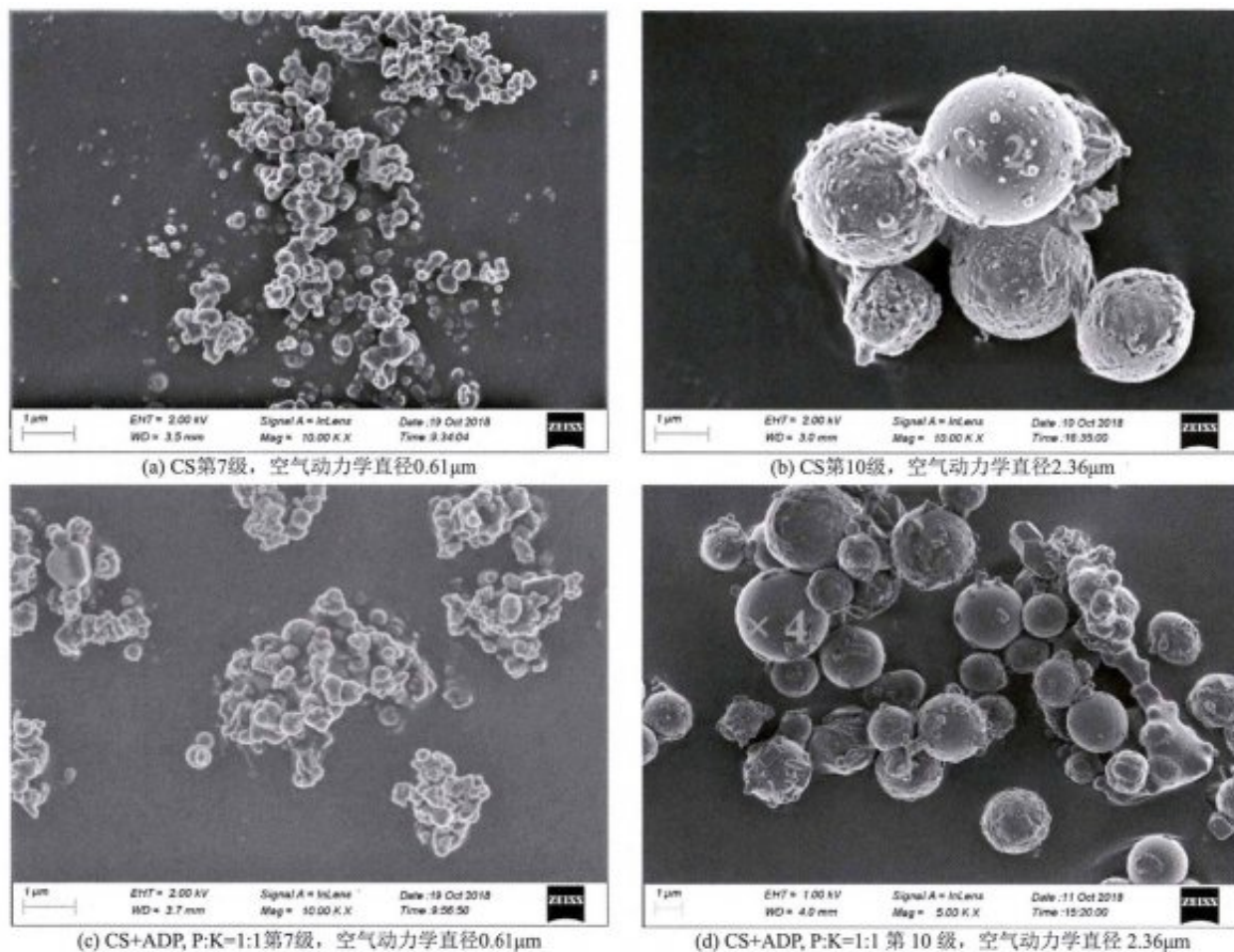


图4 样品燃烧生成颗粒物的典型形貌

Fig. 4 Typical morphologies of particulate matters generated during the combustion of the fuels

表5 颗粒物典型部位元素组成(摩尔)

Tab. 5 EDX results of the spots

%

样品	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca
1	11.26	4.99	4.05	2.31	4.02	20.41	50.98	1.98
2	15.45	—	33.80	1.85	7.14	0.39	32.33	9.03
3	4.52	—	10.51	37.21	—	11.85	35.92	—
4	14.92	—	27.33	33.30	0.42	0.24	19.46	4.33

由图4（b）可知，玉米秆原样燃烧PM₁₋₁₀多为一些规则的圆球状颗粒，部分球状颗粒表面较为光滑而部分表面较为粗糙，颗粒之间相对松散、独立且表面通常附着有一定的不规则状的小颗粒。使用EDX对球状颗粒表面进行分析（点2），发现其化学组成主要为K、Si、Ca、

Mg (含量由高到低)等组成,可以推测其主要成分为K-Ca/Mg的硅酸盐。此外,对附着在球状颗粒表面的不规则状小颗粒进行分析表明其主要为KCl小颗粒,这表明KCl颗粒在大颗粒表面的异相凝结(heterogeneous condensation)也对PM₁₋₁₀的形成起重要作用。添加ADP后对PM₁₋₁₀的形貌也无显著影响,但从EDX结果中可以看到,添加ADP后PM₁₋₁₀的主要元素组成为P、K、Si、Ca、Mg(含量由高到低),故此时除了原有的K-Ca/Mg的硅酸盐,还产生了较多的K-Ca/Mg的磷酸盐。ADP可与灰分中的碱金属和碱土金属化合物反应形成复杂的磷酸盐化合物,这些磷酸盐尤其是碱土金属化合物通常具有较高的熔点而保留在底灰中。部分磷酸盐化合物(如KPO₃, Ca(PO₃)₃等)以及一些硅酸盐和磷酸盐的共融物[13]熔点较低,可通过熔融聚并等作用形成粒径处于微米级别的圆球状颗粒物,因此会增加PM₁₋₁₀的排放量。

2.4底灰化学组成分析

样品燃烧后所得底灰的化学组

成如表2所示。从表中可以看到原样底灰中主要由K₂O和SiO₂组成并含有一定量的MgO和CaO, P₂O₅及其他组分含量均较低(<5%)。这说明此时灰分主要由K-Ca/Mg硅酸盐组成,并且K₂

O含量很高

,很可能以低熔点的碱

金属硅酸盐存在。这与燃烧后底灰发生了一定

的熔融相一致。添加NH₄H₂PO₄后灰分中P₂O₅

含量显著增高,达到32.78~57.86%。此时灰分主要由P₂O₅, K₂O和SiO₂

组成,表明其主要由碱金属磷酸盐和硅酸盐组

成。可以看出,添加NH₄H₂PO₄后灰分中底灰中P₂O₅和K₂

O占比超过60%,从化学成分组成来讲是一种潜在的化肥替代产品,可用于制备复合肥产生一定的经济附加值。

3结论

本文使用立式管式炉燃烧装置研究了NH₄H₂PO₄添加剂对玉米秆燃烧PM排放的影响,主要结论如下:

1) 玉米秸秆原样燃烧产生的颗粒物呈双峰分布且主要由亚微米颗粒物(PM₁)组成。

2) NH₄H₂PO₄的添加可有效减少颗粒物总量PM₁₀尤其是PM₁

的排放量,并且减排效果与P/K摩尔比密切

相关。当P/K摩尔比为1时,PM₁和PM₁₀的减排效果最好,分别达到44.43%和30.70%。

3) NH₄H₂PO₄与玉米秆中的K盐反应生成的K-

Ca/Mg磷酸盐化合物,可将K固定在大粒径灰分中,有效抑制了K盐向气相中释放并最终达到降低PM排放的目的。

参考文献

- [1] Srirangan K, Akawi L, Moo-Young M, et al. Towards sustainable production of clean energy carriers from biomass resources[J]. Applied Energy, 2012, 100: 172-186.
- [2] Yang Wei, Zhu Youjian, Cheng Wei, et al. Characteristics of particulate matter emitted from agricultural biomass combustion[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(7): 7493-7501.
- [3] Zhu Youjian, Yang Wei, Fan Jiyuan, et al. Effect of sodium carboxymethyl cellulose addition on particulate matter emissions during biomass pellet combustion[J]. Applied Energy, 2018, 230: 925-934.
- [4] Båfver L S, Rönnbäck M, Leckner B, et al. Particle emission from combustion of oat grain and its potential reduction by addition of limestone or kaolin[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90(3): 353-359.
- [5] Yang Wei, Zhu Youjian, Cheng Wei, et al. Effect of minerals and binders on particulate matter emission from biomass pellets combustion[J]. Applied Energy, 2018, 215: 106-115.
- [6] Zeng T, Weller N, Pollex A, et al. Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: influence on gaseous and total particulate matter emissions and applicability of fuel indices[J]. Fuel, 2016, 184: 689-700.
- [7] Qi Jianhui, Li Hui, Han Kuihua, et al. Influence of

- ammonium dihydrogen phosphate on potassium retention and ash melting characteristics during combustion of biomass[J]. *Energy*, 2016, 102: 244-251.
- [8] Wang Qian, Han Kuihua, Wang Jiamin, et al. Influence of phosphorous based additives on ash melting characteristics during combustion of biomass briquette fuel[J]. *Renewable Energy*, 2017, 113: 428-437.
- [9] Chen Xiaoguang. Economic potential of biomass supply from crop residues in China[J]. *Applied Energy*, 2016, 166: 141-149.
- [10] Xu Minghou, Yu Dunxi, Yao Hong, et al. Coal combustion-generated aerosols: formation and properties [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(1): 1681-1697.
- [11] Sippula O, Lind T, Jokiniemi J. Effects of chlorine and sulphur on particle formation in wood combustion performed in a laboratory scale reactor[J]. *Fuel*, 2008, 87(12): 2425-2436.
- [12] Lim M T, Phan A, Roddy D, et al. Technologies for measurement and mitigation of particulate emissions from domestic combustion of biomass: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 49: 574-584.
- [13] Zhu Youjian, Piotrowska P, Van Eyk P J, et al. Cogasification of australian brown coal with algae in a fluidized bed reactor[J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(3): 1686-1700.
- [14] 贡长生. 现代磷化工技术和应用-上册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- Gong Changsheng. Technology and application of advanced phosphorus chemical engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013(in Chinese).

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/172532.html>