

O_2/CO_2 和 O_2/N_2 气氛下煤粉燃烧的着火性能和 NO_x 排放特性

冯 艳, 曹文健, 楚化强, 顾明言

(安徽工业大学 能源与环境学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要:采用Fluent软件模拟煤粉在 O_2/CO_2 、 O_2/N_2 气氛下的燃烧情况,对比2种气氛下煤粉的着火性能及 NO_x 的排放特性,并模拟 O_2/CO_2 气氛下氧气含量对不同粒径(18, 79 μm)煤粉燃烧情况的影响,重点研究煤粉燃烧的着火距离。结果表明:氧气含量相同时,与 O_2/N_2 气氛相比, O_2/CO_2 气氛下18 μm 煤粉(超细煤粉)的着火距离较大,79 μm 煤粉的着火距离较小;在 O_2/CO_2 气氛下,随着氧气含量的增加,2种粒径的煤粉着火距离都减小,且当氧气含量较低时,着火距离随氧气含量变化较大, NO 的析出及其峰值位置提前。

关键词:煤粉燃烧; O_2/CO_2 气氛;着火距离; NO_x

中图分类号:TK 16 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-7872.2017.01.001

Ignition Performance and NO_x Emission Characteristy of Pulverized Coal Combustion under O_2/CO_2 and O_2/N_2 Atmosphere

FENG Yan, CAO Wenjian, CHU Huaqiang, GU Mingyan

(School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China)

Abstract: Fluent software was employed to simulate the combustion of pulverized coal under the O_2/CO_2 , O_2/N_2 atmosphere. The ignition characteristics and NO_x emission characteristics of the two kinds of cases were compared. The influence of oxygen content on the combustion of pulverized coal with different particle sizes (18, 79 μm) was simulated under O_2/CO_2 atmosphere, and the ignition distance of pulverized coal combustion was studied. The results show that when the oxygen content is the same, compared with O_2/N_2 atmosphere, the ignition distance of 18 μm pulverized coal (superfine pulverized coal) under O_2/CO_2 atmosphere is larger, and the ignition distance of 79 μm pulverized coal is smaller. Under O_2/CO_2 atmosphere, the ignition distance decreases with the increase of oxygen content. When the oxygen content is low, the ignition distance varies greatly with the oxygen content, and the precipitation and the peak value of NO decrease with the increase of O_2 content in advance.

Key words: pulverized coal combustion; O_2/CO_2 atmosphere; ignition distance; NO_x

目前,我国 NO_x 、 SO_2 的排放量居世界第一,其中60%以上的 NO_x 排放来源于以煤为主的化石燃料的燃烧,因此研究和改善煤粉的燃烧情况具有重要意义。上世纪80年代,富氧燃烧概念和富氧燃烧技术被首次提出,由于富氧燃烧技术既节能又能够降低污染物排放,因此被发达国家称为“资源创造性技术”。对于煤粉

收稿日期:2016-11-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51676002, 51376008, 51306001);安徽省自然科学基金项目(1408085QE100);国家重大科学仪器设备开发专项基金资助项目(2012YQ220119)

作者简介:冯艳(1989—),女,安徽淮北人,硕士生,主要研究方向为富氧燃烧特性分析。

通信作者:楚化强(1982—),男,山东菏泽人,副教授,博士,主要研究方向为燃烧检测及传热分析。

在 O_2/CO_2 和 O_2/N_2 不同气氛下燃烧 NO_x 的排放特性,国内外学者已开展了一定研究。文献[1-4]表明,当 O_2 含量相同时, O_2/CO_2 气氛下,煤粉燃烧 NO 的排放浓度比 O_2/N_2 气氛下小, NO 下降幅度为20%~40%;Hu等^[5]研究了富氧气氛(氧气体积分数为0.20,0.50,0.80,1)下 NO_x 的排放特性,结果表明,单位质量的燃料完全燃烧所需的理论空气质量与实际供给的空气质量之比小于0.8时, NO_x 的排放随之增加而增大,大于0.8时迅速降低;文献[6-8]表明,加入小粒径煤粉可以改善煤粉燃烧特性。

煤粉着火距离是燃烧过程中一个重要的物理量,在锅炉燃烧中,一般期望煤粉进入炉膛后,在距离喷嘴不远处就能稳定着火,如果在距离喷嘴较远处着火,会使喷嘴烧坏或者喷嘴处出现结渣;如果在距离喷口较远处着火会推迟整个燃烧过程,致使煤粉来不及烧完就离开炉膛,增大机械不完全燃烧损失。此外着火推迟还会使火焰中心上移,造成炉膛出口处的对流受热面结渣。开展煤粉着火距离的研究可使煤粉更稳定、有效燃烧。余岳峰等^[9]根据煤粉燃烧火焰图像,推导出煤粉着火和熄灭2种情形的判别函数,并根据煤粉着火的判据,给出了最小距离判别准则;文献[10-12]分别给出了不同的着火距离确定方法。为进一步探究富氧气氛下煤粉的燃烧特性,笔者借鉴文献[10]中采用的方法确定煤粉的着火距离,研究富氧气氛及氧含量对煤粉燃烧 NO_x 排放和着火距离的影响,对丰富富氧燃烧具有一定的意义。

1 沉降炉煤粉燃烧模拟

1.1 沉降炉尺寸及网格划分

以神府煤为研究对象,采用Fluent软件模拟神府煤在富氧气氛、不同氧气含量下的燃烧情况。燃烧装置为沉降炉,沉降炉炉体由两段圆柱体组成:进气段和燃烧室。一次风和煤粉进口的内径为6 mm,外径为12 mm,二次风进口内径为12 mm,外径为20 mm;沉降炉总长1 110 mm,燃烧室长1 060 mm,直径60 mm。沉降炉模型尺寸及结构如图1。

采用Gambit软件建立沉降炉的三维结构,并对其边界条件的设置和网格划分。文中采用的沉降炉为轴对称结构,为节省计算量,只对燃烧室的1/4结构进行模拟。采用三角形单元(Tet/Hybrid),网格类型选用TGrid类型,对模型进行网格划分。

1.2 模型选择

Fluent软件中的模型选择对煤粉燃烧数值计算结果有重要影响,煤粉燃烧的模拟过程包括气相连续场及气相(连续相)与煤粒(非连续相)间相互作用模型的建立和选择。Fluent模拟煤粉燃烧,组分模型选择非预混燃烧模型;多相流模型采用离散相模型;辐射模型采用离散坐标法(DO)模型;脱挥发分和燃烧模型分别采用单速率模型和扩散动力模型;采用随机轨道模型计算颗粒轨迹;采用标准的 $k-\epsilon$ 双方程模型模拟气相的湍流运输和气相湍流燃烧。

2 模拟工况及模型验证

2.1 模拟工况及边界条件

煤粉燃烧的模拟工况如表1,煤粉的工业分析和元素分析如表2。表2中:M表示水分;A表示灰分;V表示挥发分;FC表示固定碳;下标ad表示空气干基;下标d表示干燥基。模拟的边界条件为:一次风的风速为1.093 m/s、温度为323 K;煤粉的温度为323 K、流量为 8.330×10^{-6} kg/s;二次风的风速为1.740 m/s、温度为525 K,压力为 1.013×10^5 Pa。

2.2 模型验证

为验证文中沉降炉模型及Fluent软件中模型参数选择的有效性,将工况15、16的模拟结果与文献[13]相同工况下的实验结果进行对比,结果如图2。从图2可以看出,工况15、16的模拟结果与文献[13]的实验结果最大相对误差分别为5.84%,6.59%,但模拟结果与文献实验结果整体趋势吻合较好,表明本文建立的沉降炉

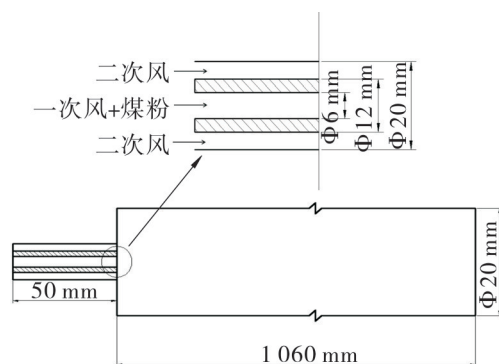


图1 沉降炉模型尺寸

Fig. 1 Model size of drop tube furnace

模型是可靠的。

表1 模拟工况

Tab. 1 Simulation conditions

工况	气氛(体积分数)	粒径/ μm	工况	气氛(体积分数)	粒径/ μm
1	0.21O ₂ /0.79N ₂	18	9	0.50O ₂ /0.50CO ₂	18
2	0.21O ₂ /0.79N ₂	79	10	0.50O ₂ /0.50CO ₂	79
3	0.29O ₂ /0.71N ₂	18	11	0.60O ₂ /0.40CO ₂	18
4	0.29O ₂ /0.71N ₂	79	12	0.60O ₂ /0.40CO ₂	79
5	0.29O ₂ /0.71CO ₂	18	13	0.70O ₂ /0.30CO ₂	18
6	0.29O ₂ /0.71CO ₂	79	14	0.70O ₂ /0.30CO ₂	79
7	0.40O ₂ /0.60N ₂	18	15	0.21O ₂ /0.79CO ₂	18
8	0.40O ₂ /0.60N ₂	79	16	0.21O ₂ /0.79CO ₂	79

表2 神府煤的工业与元素分析(w%)

Tab. 2 Primary and ultimate analysis of Shenfu coal(w%)

工业分析				元素分析					
M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	FC _{ad}	C _d	H _d	O _d	N _d	S _d	A _d
11.44	4.75	31.59	52.22	70.43	4.52	18.33	1.02	0.34	5.36

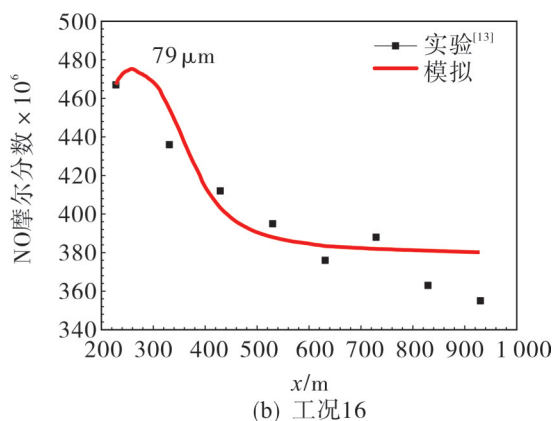
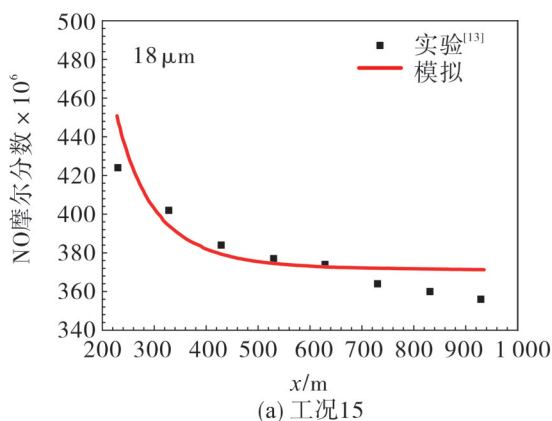


图2 工况15、16下中心轴线上NO摩尔分数的模拟值与实验值的比较

Fig. 2 Comparison of simulation and experimental values of NO on the central axis at case 15 and 16

3 模拟结果及分析

3.1 氧化气氛对煤粉燃烧的影响

图3为煤粉在不同气氛下燃烧中心轴线上温度分布的模拟结果。从图3可以看出,18 μm 煤粉在距喷嘴0~0.04 m范围内就可着火,79 μm 的煤粉在0.04~0.16 m范围内着火,说明小粒径煤粉先着火,主要表现为在轴线方向上在距喷嘴较远处出现温度跃升。因为小粒径煤粉的比表面积大,颗粒内部扩散距离小,挥发分析出速率增大,燃烧加剧,使温度快速升高。比较工况5、6(0.29O₂/0.71CO₂气氛,体积分数,下同)与工况1、2(0.21O₂/0.79N₂气氛,体积分数)发现,煤粉在这2种气氛下的燃烧温度分布相似,这与文献[14]的结果吻合,但0.29O₂/0.71N₂下煤粉燃烧温度比0.29O₂/0.71CO₂(体积分数)气氛下高,

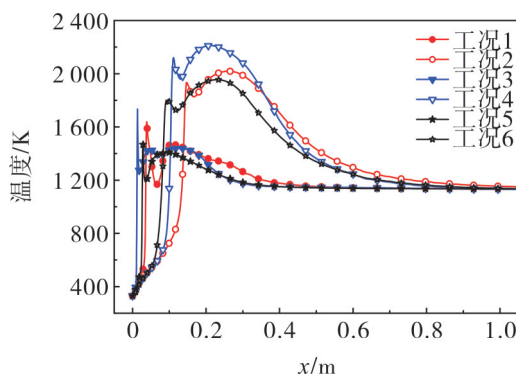


图3 不同气氛下煤粉燃烧数值模拟中心轴线上温度分布
Fig. 3 Temperature distribution on the central axis of numerical simulation of pulverized coal combustion under different atmospheres

因为 $0.29\text{O}_2/0.71\text{CO}_2$ 气氛下 CO_2 浓度较高,且比热容较大,当吸收相同热量时升高的温度较低;另一方面,由于 CO_2 较高的辐射特性增强了辐射换热,也使炉膛温度降低。对于2种不同粒径的煤粉,79 μm 煤粉燃烧温度高、产生的 CO_2 浓度也高,导致辐射换热效果增强,烟气温度降低较多,而18 μm 煤粉燃烧温度低,产生的辐射换热量少,温降也小。

Faúndez等^[15]、樊越胜等^[16]研究发现,着火通常伴随着温度的跃升和烟气组分的剧烈变化。文中将烟气温度跃升的位置作为着火位置,着火位置距喷嘴的距离即为着火距离。根据Semenon着火理论,着火条件的判据为 $dT/dx > 0$ 和 $d^2T/dx^2 = 0$ ^[10](T 为沉降炉中心轴线上温度; x 为沉降炉的轴向距离)轴线温度曲线的拐点即为着火点,着火点对应的轴线距离即为着火距离。根据图4所示确定着火距离的方法,得到不同气氛下的着火距离,结果如表3。

由表3可以看出,0.21 $\text{O}_2/0.79\text{N}_2$ 、0.29 $\text{O}_2/0.71\text{N}_2$ 气氛下18 μm (着火距离的数量级,10⁻²)煤粉和79 μm (着火距离数量级,10⁻¹)煤粉燃烧的着火距离相差一个数量级,这与图3结果吻合。煤粉在 N_2 气氛下随着氧气含量的增加,着火距离减小,这是氧气含量增加使挥发分快速着火所致。相比于0.29 $\text{O}_2/0.71\text{N}_2$ 气氛,0.29 $\text{O}_2/0.71\text{CO}_2$ 气氛下18 μm 煤粉着火延迟,因为 CO_2 的高比热使炉膛温度变化较慢,从而使挥发分达到着火的时间延长,主要表现为着火距离增大。沉降炉中心轴线上NO质量分数分布如图5。

由图5可以看出:工况5、6(0.29 $\text{O}_2/0.71\text{CO}_2$ 气氛)煤粉燃烧中心轴线上NO的质量分数分布情况与空气气氛下相似;与工况3、4(0.29 $\text{O}_2/0.71\text{N}_2$ 气氛)相比(氧气体积分数相同),工况5、6(0.29 $\text{O}_2/0.71\text{CO}_2$ 气氛)沉降炉出口处大粒径煤粉燃烧NO排放量减少明显,约为原来的1/3,且随着粒径的减小差距逐渐减小,因为大粒径(79 μm)煤粉在0.29 $\text{O}_2/0.71\text{CO}_2$ 气氛燃烧生成的CO远多于0.29 $\text{O}_2/0.71\text{N}_2$ 气氛下生成的CO,较高的CO使NO的还原增加,导致NO生成大量减少,故大粒径煤粉燃烧对NO的生成具有较强的抑制作用。对于18 μm 煤粉,气氛由0.29 $\text{O}_2/0.71\text{N}_2$ 变为0.29 $\text{O}_2/0.71\text{CO}_2$ 时CO生成量变化较小,对NO生成的抑制作用较小。总的来看,在工况5、6(0.29 $\text{O}_2/0.71\text{CO}_2$)气氛下煤粉燃烧排放的NO量较工况3、4(0.29 $\text{O}_2/0.71\text{N}_2$)气氛下减少,因为 O_2/CO_2 气氛中存在高浓度CO,使部分NO发生还原反应,此外CO还促使煤焦表面形成活性C,催化煤焦与NO之间的反应。

图6是不同气氛下沉降炉出口处NO的质量分数。由图6可看出:在 CO_2 气氛下粒径对出口NO的质量分数影响较小,而在 N_2 气氛下影响较大;随着煤粉粒径的增大,气氛的影响作用加强,在粒径为79 μm 时, N_2 气氛下氧气体积分数由0.21增加到0.29时,出口处NO的质量分数显著增大;而粒径18 μm 时出口处NO质量分数却明显减小,说明氧气体积分数的增加对NO的生成不起决定性的作用,在模拟结果中发现当氧体积分数为0.29时,由于挥发分的快速剧烈燃烧,消耗大量氧气,使CO生成量增加,中心截面上较先出现CO,氧气体积分数为0.21、0.29时,中心截面上CO的平均质量分数分别为1.31%和2.06%,说明氧气体积分数为

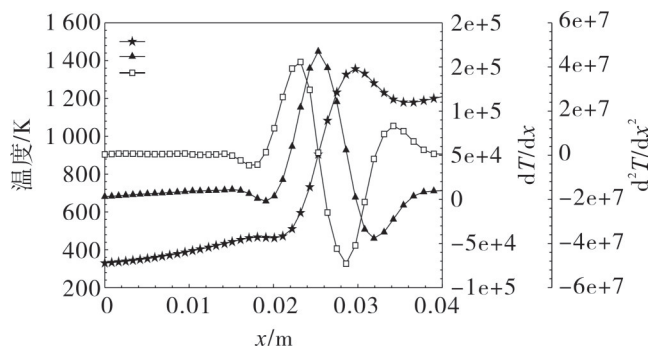


图4 18 μm 煤粉着火距离的确定

Fig. 4 Determination of ignition distance of 18 μm pulverized coal

表3 工况1~6下煤粉的着火距离

Tab. 3 Ignition distance of pulverized coal under case 1 to 6

工况	气氛(体积分数)	粒径/ μm	着火距离/m
1	0.21 $\text{O}_2/0.79\text{N}_2$	18	0.025 3
2	0.21 $\text{O}_2/0.79\text{N}_2$	79	0.109 3
3	0.29 $\text{O}_2/0.71\text{N}_2$	18	0.011 0
4	0.29 $\text{O}_2/0.71\text{N}_2$	79	0.102 5
5	0.29 $\text{O}_2/0.71\text{CO}_2$	18	0.016 5
6	0.29 $\text{O}_2/0.71\text{CO}_2$	79	0.086 7

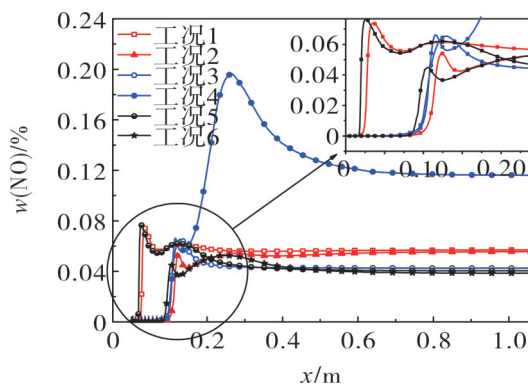


图5 不同气氛下中心轴线上NO质量分数分布

Fig. 5 Distribution of NO mass fraction on the central axis under different atmospheres

0.29时CO对NO生成的抑制作用较强。

3.2 O₂/CO₂气氛下粒径对煤粉燃烧的影响

在相同氧气体积分数下,O₂/CO₂气氛可以减少煤粉燃烧NO的生成,并可通过增加氧浓度来改变燃烧特性。O₂/CO₂气氛下不同氧气体积分数和粒径对煤粉燃烧影响的数值模拟结果如图7。图7表明,79 μm煤粉燃烧的温度比18 μm煤粉燃烧的高,但是着火延迟。表4为工况5~10煤粉燃烧的着火距离,图8为不同氧气含量下煤粉燃烧的着火距离。综合表4和图7,8可知:18,79 μm煤粉在氧气体积分数由0.29增加到0.40过程中,随着氧气体积分数的增加,其着火距离减小较快,而对氧气体积分数由0.40增加到0.50,0.50增加到0.60过程中这种趋势减缓;18 μm煤粉在氧气体积分数由0.60增加到0.70过程中着火距离减小更快,而79 μm煤粉的着火距离在此过程中几乎没有变化。

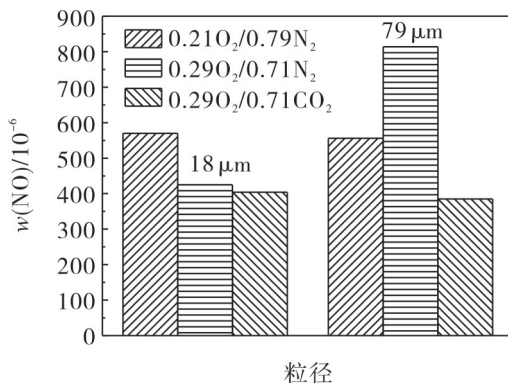
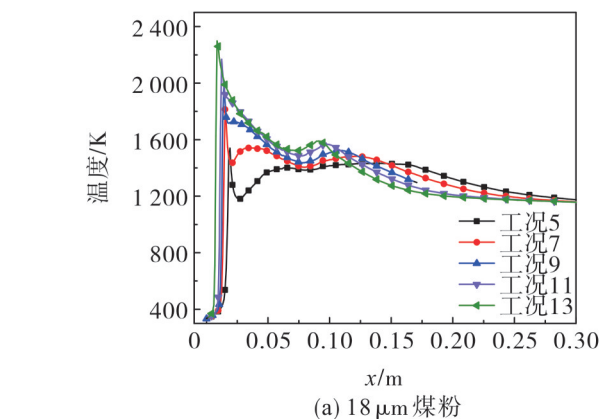
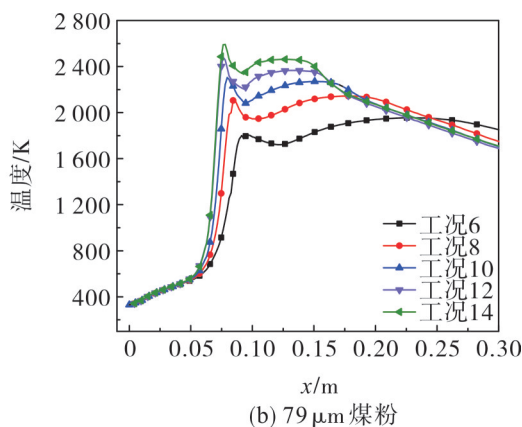


图6 出口NO质量分数

Fig. 6 Mass fraction of NO at the furnace outlet



(a) 18 μm煤粉



(b) 79 μm煤粉

图7 不同氧气体积分数下中心轴上的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution on the central axis with different oxygen volume fractions

煤粉燃烧轴线方向上O₂、CO、CO₂等浓度变化如图9。由图9可知:煤粉着火的方式主要是异相着火,在氧气体积分数由0.29增加到0.40过程中因为氧气体积分数较低,增加氧气体积分数使到达颗粒表面的氧气更多,碳更易着火,着火距离降低较快;在氧气体积分数由0.40增加到0.50,0.50增加到0.60过程中,再增加氧气体积分数对颗粒表面碳的着火影响较小,因煤粉颗粒表面的碳有限;氧气体积分数由0.60增加到0.70过程中18 μm煤粉着火距离变化较大,因为挥发分大量提前析出,几乎和焦炭同时燃烧,使着火距离迅速减小。

3.3 O₂/CO₂气氛下氧气含量对煤粉燃烧的影响

不同氧气体积分数下煤粉燃烧在中心轴线上NO分布质量分数如图10。从图10可以看出,2种粒径煤粉燃烧沿中心轴线上NO分布规律相似。表5分别为18、79 μm煤粉在不同氧气体积分数下NO峰值的坐标,图11为不同氧气体积分数下中心轴线上NO峰值坐标。从表5和图11可知:当氧气体积分数由0.29增加到0.60时,18 μm煤粉燃烧出现2个NO峰值,随着氧气含量的增加NO析出提前,NO的第二个峰值向喷嘴处靠近,且峰值变大;氧气体积分数0.29增加到0.40,NO的第一个峰值随着氧气体积分数的增大,峰值向喷嘴处靠近,且峰值变大,但在氧气体积分数由0.40增加到0.50,0.50增加到0.60过程中,NO峰值位置提前,但峰值

表4 工况5~10煤粉的着火距离

Tab. 4 Ignition distance of pulverized coal from case 5 to 10

工况	气氛(体积分数)	粒径/μm	着火距离/m
5	0.29O ₂ /0.71CO ₂	18	0.016 5
6	0.29O ₂ /0.71CO ₂	79	0.086 7
7	0.40O ₂ /0.60CO ₂	18	0.013 3
8	0.40O ₂ /0.60CO ₂	79	0.076 3
9	0.50O ₂ /0.50CO ₂	18	0.012 2
10	0.50O ₂ /0.50CO ₂	79	0.069 1

减小,这是因随着氧气体积分数的增加,挥发分中还原气体,如CO、HCN、NH等含量增加,对NO的还原作用增强所致;当氧气体积分数为0.70时,NO只存在一个峰值,峰值增大。而79 μm 煤粉燃烧出现2个NO峰值,随着氧气含量的增加NO析出提前,峰值位置提前,峰值增加。18 μm 煤粉燃烧较早析出NO。

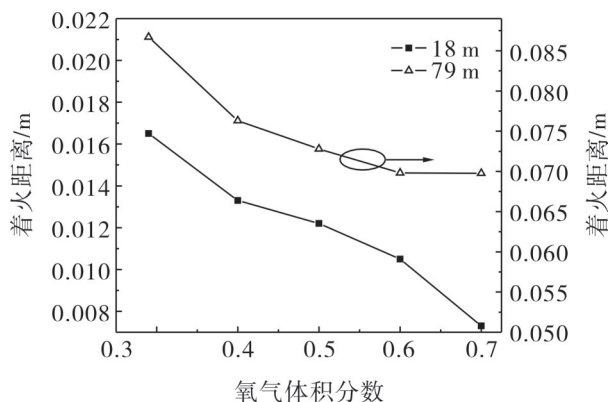


图8 不同氧气含量下煤粉的着火距离

Fig. 8 Ignition distance of pulverized coal under different oxygen contents

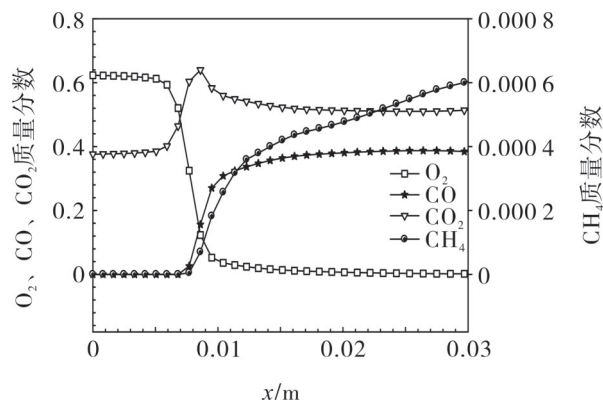
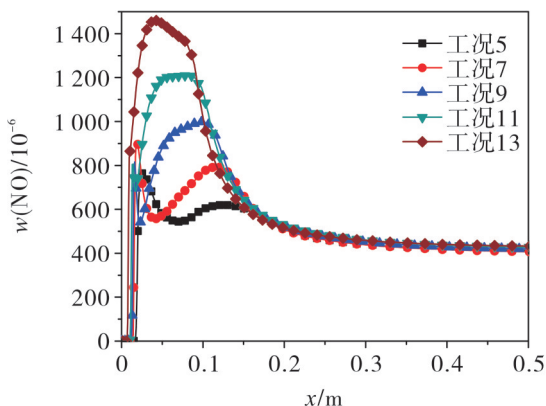
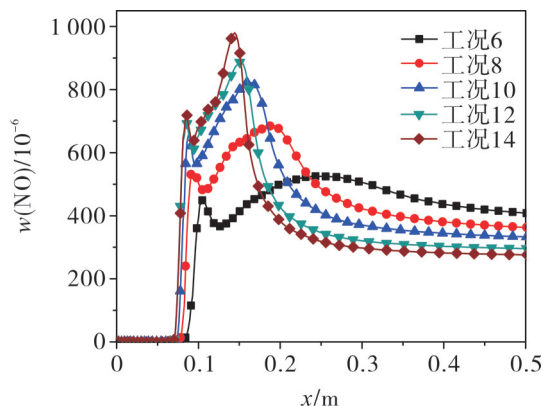


图9 轴线方向上O₂、CO、CO₂、CH₄含量变化

Fig. 9 Content variation of O₂, CO, CO₂, CH₄ on the axial direction



(a) 18 μm 煤粉



(b) 79 μm 煤粉

图10 不同氧气含量下中心轴线上NO的质量分数

Fig. 10 Mass fraction of NO on the central axis under different oxygen contents

表5 18 μm 煤粉在不同氧气含量下NO峰值坐标

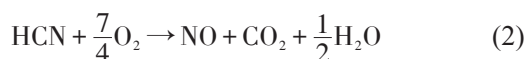
Tab. 5 NO peak coordinates of 18 μm pulverized coal at different oxygen contents

氧气体积分数	18 μm		79 μm	
	第一个NO峰值位置 (x_1, y_1)	第二个NO峰值位置 (x_2, y_2)	第一个NO峰值位置 (x'_1, y'_1)	第二个NO峰值位置 (x'_2, y'_2)
0.29	(0.026 3,761.64)	(0.128 7,616.81)	(0.104 5,446.79)	(0.243 3,525.00)
0.40	(0.018 7,906.85)	(0.118 0,791.78)	(0.095 2,522.30)	(0.192 4,684.12)
0.50	(0.015 9,809.59)	(0.098 6,998.63)	(0.088 6,652.65)	(0.160 9,822.56)
0.60	(0.013 8,757.53)	(0.073 4,1 187.67)	(0.085 1,693.11)	(0.152 2,889.08)
0.70	(0.041 2,1 454.79)	(0.041 2,1 454.79)	(0.084 8,718.28)	(0.144 6,978.08)

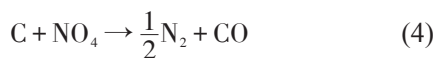
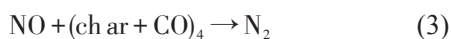
注:峰值位置坐标中 x 表示轴向距离, m ; y 坐标表示NO质量分数, 10^{-6} 。

从异相反应分析,氧气含量增加,促进焦炭表面活性氮被氧化成NO。NO均相反应,氧气含量增加,提高挥发分N向NO的转化几率;挥发分中N主要以HCN和NH₃的形式存在,而HCN在低氧浓度下生成N₂,在高氧浓度下生成NO,所以氧气含量增加有助于HCN向NO的转化,使NO生成量增加,反应方程为:





氧气含量增加时,降低了气氛的还原性,使CO的浓度降低,NO被还原的量减少,还使焦炭直接氧化,减少对NO的还原,如下式所示:



4 结 论

基于Fluent软件模拟粒径为18,79 μm的煤粉在O₂/CO₂、O₂/N₂气氛下的燃烧情况,分析氧化剂气氛、氧气含量改变对煤粉燃烧特性的影响,得到以下主要结论:

- 1) 2种粒径煤粉在N₂气氛下随着氧气体积分数的增加,着火距离减小,相比于0.29O₂/0.71N₂气氛,18 μm煤粉在0.29O₂/0.71CO₂气氛下着火延迟;
- 2) 在O₂/CO₂和O₂/N₂气氛下,粒径为79 μm的煤粉在氧体积分数为0.29时,O₂/CO₂气氛下出口处的NO_x质量分数更低,而在O₂/N₂气氛下随着氧含量的增加,煤粉着火提前;
- 3) 在O₂/CO₂气氛下,18,79 μm煤粉的着火距离均随着氧气含量的增加而减小,当氧气体积分数由0.60增加到0.70时,对于79 μm煤粉,着火距离趋于定值,而18 μm煤粉的着火距离却快速降低;
- 4) 当氧气体积分数由0.29增加到0.60时,18 μm煤粉燃烧出现2个NO峰值,当氧气体积分数为0.7时,只存在一个NO峰值,而79 μm煤粉燃烧过程中存在2个NO峰值。

参考文献:

- [1] 黄岸永,李小川,姜秀民,等. CO₂气氛中超细煤粉热解含氮气体释放规律[J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20(4):356-361.
- [2] 毛玉如,方梦祥,骆仲泱,等. 富氧气氛下循环流化床煤燃烧试验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(2):188-191.
- [3] 李庆钊,赵长遂,武卫芳,等. O₂/CO₂气氛下燃煤NO排放特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009(23):33-39.
- [4] 刘彦,周俊虎,方磊,等. O₂/CO₂气氛煤粉燃烧及固硫特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8):24-228.
- [5] HU Y, NAITO S, KOBAYASHI N, et al. CO₂, NO_x and SO₂ emissions from the combustion of coal with high oxygen concentration gases[J]. Fuel, 2000, 79(15):1925-1932.
- [6] 武层层,顾明言,李红,等. O₂/CO₂气氛下煤粉粒径分布对火焰传播的影响[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2016, 33(3): 205-209.
- [7] 马标,顾明言,楚化强,等. O₂/CO₂气氛超细煤粉与常规粒径煤粉混合燃烧特性[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2013, 30(4):356-360.
- [8] 易宝军,张立麒,黄芳,等. 不同粒径煤粉在O₂/CO₂气氛下的燃烧特性[J]. 燃烧科学与技术, 2013, 19(3):248-253.
- [9] 余岳峰,赵铁成. 煤粉燃烧火焰着火判据[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(9):1253-1256.
- [10] JOVANOVIĆ R, MILEWSKA A, SWIATKOWSKI B, et al. Sensitivity analysis of different devolatilisation models on predicting ignition point position during pulverized coal combustion in O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmospheres[J]. Fuel, 2012, 101:23-37.
- [11] FAN JR, ZHANG X D, CEN K F. Study on coal combustion characteristics in a W-shaped boiler furnace[J]. Fuel, 2001, 80(3):373-381.
- [12] 聂欣,吕明,周志军,等. 煤粉气流在高温空气中着火距离的数值试验研究[J]. 热力发电, 2010, 39(3):13-18.
- [13] 张雨航. O₂/CO₂气氛下不同粒径煤粉燃烧相互作用及对NO生成影响[D]. 马鞍山:安徽工业大学, 2014:54-56.
- [14] 呼畔. 煤粉富氧燃烧过程的数值模拟[D]. 鞍山:辽宁科技大学, 2012:39-41.
- [15] FAÚNDEZ J, ARENII A, RUBIERA F, et al. Ignition behaviour of different rank coals in an entrained flow reactor[J]. Fuel, 2005, 84(17):2172-2177.
- [16] 樊越胜,司鹏飞,曹子栋. 富氧煤粉气流着火机理的实验研究[J]. 动力工程学报, 2011, 31(1):33-36.

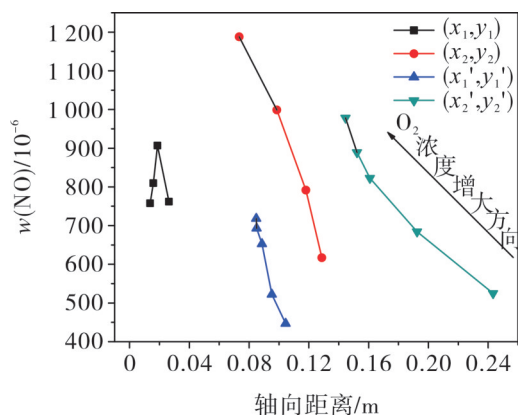


图11 不同氧气含量下中心轴线上NO峰值的坐标
Fig. 11 Coordinate of NO peak on the central axis for different oxygen contents