DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201711074

O_2/CO_2 条件下煤泥球团的燃烧特性实验研究

王 辉[1],杨大伟[1],刘松霖[1],王翔宇[1],宋 畅[2],段 炼[3]

(1.哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院,哈尔滨 150001;2.神华国能集团有限公司, 北京 100033;
3.中船重工集团有限公司哈尔滨七〇三研究所,哈尔滨 150036)

摘 要: 在水平管式炉中 O_2/CO_2 条件下对山西吕梁烟煤煤泥进行燃烧实验,研究颗粒直径及氧气体积分数对预干燥煤泥球团燃烧特性的影响. 采用热电偶测量煤泥球团燃烧过程中内部温度的变化,并通过高清摄像机同步记录预干燥煤泥球团的燃烧过程. 在炉温为 800 ℃、氧气体积分数分别为 10%、20%、30%、40%以及 50%的条件下,对 6~12 mm 范围内 4 个不同直径的煤泥球团进行燃烧实验研究. 结果表明:不同氧气体积分数下的预干燥煤泥球团呈现出不同的着火方式;煤泥球团内部达到的最高温度随着氧气体积分数的提高而提高,但与煤泥球团直径关系不大;同一粒径下,富氧燃烧条件有助于煤泥的燃尽;煤泥着火延迟时间随氧气体积分数的提高而减少.

关键词: 煤泥;富氧燃烧;内部温度;着火延迟;燃尽时间

中图分类号: TQ534 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2019)01-0045-07

Experimental investigation on the combustion characteristics of coal slime pellet in O_2/CO_2

WANG Hui[1], YANG Dawei[1], LIU Songlin[1], WANG Xiangyu[1], SONG Chang[2], DUAN Lian[3]

(1.School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2.Shenhua Guoneng Energy Group Corporation Limited, Beijing 100033, China;
3.703 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Harbin 150036, China)

Abstract: To understand combustion characteristics of Lvliang bituminous coal slime from Shanxi Province and to study the effects of changing particle diameter and oxygen volume fraction, O_2/CO_2 combustion experiments of coal slime pellets were carried out, in which the thermocouple was used to online measure the inner temperature during the combustion process, and simultaneously the whole combustion process was monitored by a high-resolution camera. The results indicate that the dry coal slime pellets show different ignition modes at 800 ℃ under different conditions of 10%~50% O_2 concentrations. The maximum inner temperature of the coal slime pellets increases with the increasing of volume fraction, but irrelated with its diameter. The enrichment of oxygen facilitates burnout of the coal slime pellets with same particle sizes. The ignition delay time decreases as the volume fraction increases.

Keywords: coal slime; oxy-fuel combustion; inner temperature; combustion delay; burnout time

随着中国经济的快速发展,对能源资源的需求与日俱增,环境污染问题日趋严重,对传统煤炭资源的清洁利用要求越来越高 ,使得煤炭洗选的比例逐年提高,但随之而来的就是煤炭洗选过程中的副产品煤泥的产量逐年增多[1]. 煤泥具有高水分、高灰分、低热值及黏度大等特性[2-3],且存在长距离输送困难,大量煤泥长期堆积还会造成环境污染等问题[4-6]. 因此煤泥的资源化清洁利用变得越发重要.

富氧燃烧作为最可行的燃煤碳减排技术之一,能够实现对 CO_2 的大规模捕集, 还有利于控制污染物的排放[7-9]. 在富氧气氛下由于其氧气浓度高于常规空气条件下的氧气浓度,因此能够使燃料的燃烧特性得到改善. Niu 等[10]对污泥的热重分析研究表明,富氧条件下着火及燃尽温度随氧浓度的提高而降低,且与在空气条件下相比,富氧条件的综合燃烧特性指数较高. Zhuo 等[11]在 N_2/O_2 和 CO_2/O_2 气氛下对纺织污泥和煤的混合物进行热重实验,发现随着氧气浓度的提高,在两种条件下的燃烧特性均会得到改善. Meng 等[12]对煤矸石进行 N_2/O_2 和 CO_2/O_2 气氛下的燃烧实验,发现增加氧气浓度,可降低煤矸石的着火及燃尽温度,使燃尽时间提前,与空气条件相比,富氧条件下活化能也随着氧气浓度的提高而降低. 刘国伟等[13]在 O_2/CO_2 气氛下对不同煤种进行不同体积分数(21%、30%、40%、70%、100%)氧气的热重分析实验,结果显示,提高氧气浓度均可降低各煤种着火温度及燃尽温度,同时还会使煤的着火时间提前,燃尽时间缩短. 李皓宇等[14]在循环流化床中,进行了空气条件

收稿日期: 2017-11-14
基金项目: 国家重大研发计划(2016YFB0600203)
作者简介: 王 辉(1977—),男,教授,博士生导师
通信作者: 王 辉,wanghui_hb@hit.edu.cn

下半焦燃烧与体积分数为 50%O_2烟气再循环富氧条件下的半焦燃烧对比实验,结果表明,与空气条件相比,在体积分数 50%O_2烟气再循环条件下,半焦的燃烧效率得到提高,同时 NO 及 CO 的排放均较空气条件下低,而且在体积分数 50%O_2时,流化床中仍能实现稳定的运行. Chen 等[15]对石化废水污泥的热解及燃烧特性进行了富氧条件下的热重实验,在富氧燃烧中随着氧气浓度的增加,燃烧特征温度降低,燃烧速率及燃烧指数增加. Richter 等[16]对比研究了生物质、烟煤、无烟煤及煤泥球团燃烧过程,研究结果显示煤泥球团的燃烧与煤的燃烧类似,仍然可作为一种有价值的能源资源. 卜昌盛等[17]对单个煤颗粒进行流化床条件下的燃烧实验,结果表明,与空气条件相比,在O_2/CO_2条件下,由于O_2在CO_2中的扩散速率比N_2条件下的低,达到相同的燃烧速率需提高富氧气氛中O_2的浓度. Zhou[18]研究了在N_2/O_2气氛下不同氧气浓度及热流条件下煤泥球团的着火及燃烧特性,发现在不同条件下煤泥着火方式不同,且在不同的热流条件下煤泥会呈现不同的着火方式. Wang 等[19]在空气条件下对干煤泥球团进行燃烧实验,发现煤泥的燃烧行为与煤泥种类有关. 方立军等[20]对 1 mm 的煤粒进行体积分数 10%~80%O_2条件下的富氧燃烧实验,同样发现提高氧气浓度可以提高煤粒的燃烧性能.

目前对煤泥在O_2/CO_2气氛下的燃烧研究还鲜见报道,本文在O_2/CO_2条件下,通过实时测量燃烧过程中煤泥内部温度变化与高清摄像机相结合的方法,研究不同氧气的体积分数对不同尺寸煤泥球团燃烧特性的影响. 获取煤泥在富氧气氛下燃烧特性的相关数据.

1 实验装置及方法

1.1 实验装置

实验系统由气瓶、混气罐、气体质量流量计(S49_32/MT 精度±0.2%/F.S)、水平管式炉、高清摄像机(索尼 FDR-AX100E,25fps)及 K 型铠装热电偶(直径 1 mm,响应时间<0.5 s)等组成,如图 1 所示.

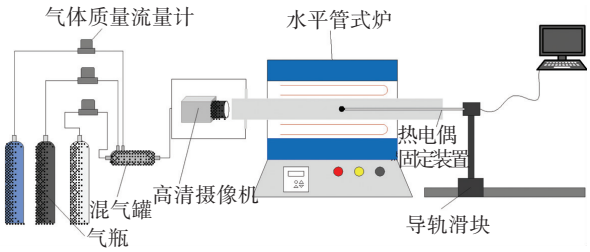


图 1 实验系统

Fig.1 Diagram of combustion system

1.2 实验方法

实验中通过调整质量流量计来获得不同比例CO_2与O_2的气体,在混气罐中混合均匀后通入炉中,得到不同氧气浓度的实验条件. 炉内温度由温度控制器进行设定并通过炉中的热电偶反馈进行自动调节以维持恒定. 高清摄像机与水平炉同轴放置,用来观察记录煤泥球团在整个燃烧过程中的表观变化过程. 通过将直径为 1 mm 的细热电偶插入预先制好并带有小孔的煤泥球中,以此来实时记录整个燃烧过程中煤泥内部温度变化. 煤泥球团的小孔直径与热电偶直径相同,煤泥球团可与热电偶紧密结合. 热电偶外部还套有与固定装置连接的钢玉管,起到对热电偶的支撑作用.

1.3 实验样品及实验条件

实验用煤泥样品为山西吕梁烟煤煤泥,其工业分析与元素分析见表 1. 实验前先将煤泥制成多颗不同直径的煤泥球团,在干燥箱中以 105 ℃温度干燥至恒重,然后对同一直径的煤泥球团挑选出质量相等的进行实验. 实验中采用的炉温为 800 ℃、氧气的体积分数为 10%~50%,干燥的煤泥球团直径分别为 6、8、10、12 mm,质量分别为:149、345、646、1140 mg(误差±1 mg),如图 2 所示.

表 1 工业分析及元素分析

Tab.1 Proximate and ultimate analysis %

工业分析(质量分数)				元素分析(质量分数)				
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	O_{ad}	N_{ad}	S_{ad}
0.94	55.84	17.01	26.21	32.00	2.59	7.32	0.63	0.68

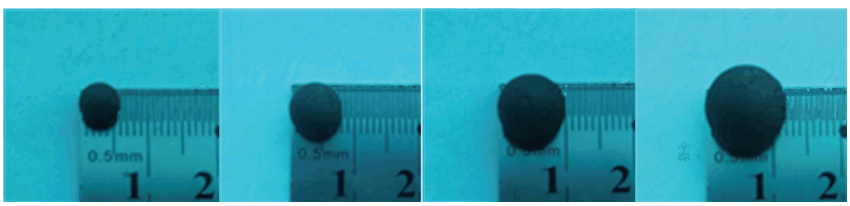


图 2 不同粒径的煤泥球团

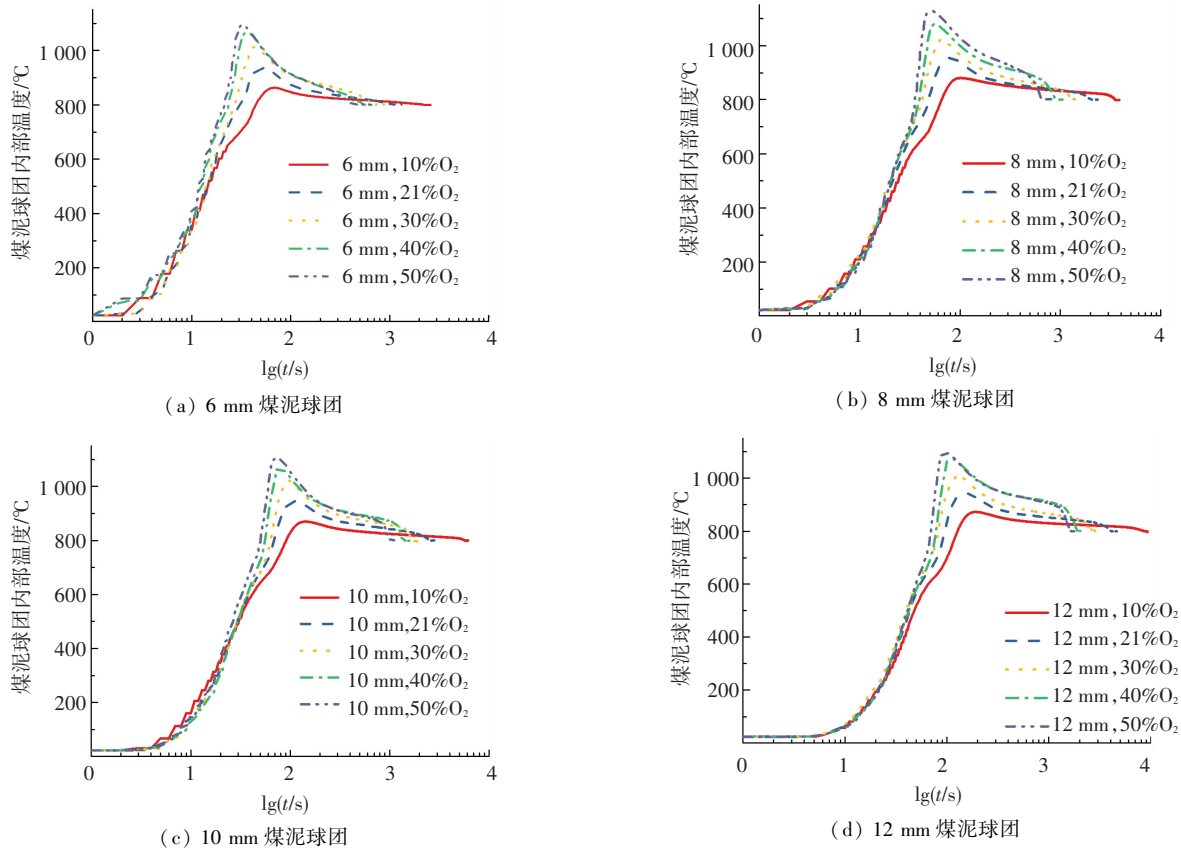
Fig.2 Coal slime pellets of different sizes

2　实验结果及分析

2.1　实验中煤泥球团内部温度变化

不同直径的煤泥球团在不同氧气体积分数下，燃烧过程中的内部温度变化如图 3 所示.

由图 3 可知，吕梁的煤泥球团燃烧过程中内部温度的变化可分为 3 个阶段. 第 1 阶段为温度快速升高直至超过炉温的阶段，在这一过程中煤泥球团内部温度迅速升高至炉温以上并达到最高温度，此阶段包含挥发分的析出及燃烧过程. 第 2 阶段为内部温度缓慢下降的阶段，此阶段的初期温度下降相对明显，后期温度下降非常缓慢. 此阶段为煤泥球团焦炭的燃烧阶段，燃烧时间占据整个燃烧过程的绝大部分. 第 3 阶段为煤泥的燃尽阶段，在此阶段煤泥球团内部温度快速下降，达到炉温后维持不变.



（a）6 mm 煤泥球团　（b）8 mm 煤泥球团

（c）10 mm 煤泥球团　（d）12 mm 煤泥球团

图 3　煤泥球团内部温度变化曲线

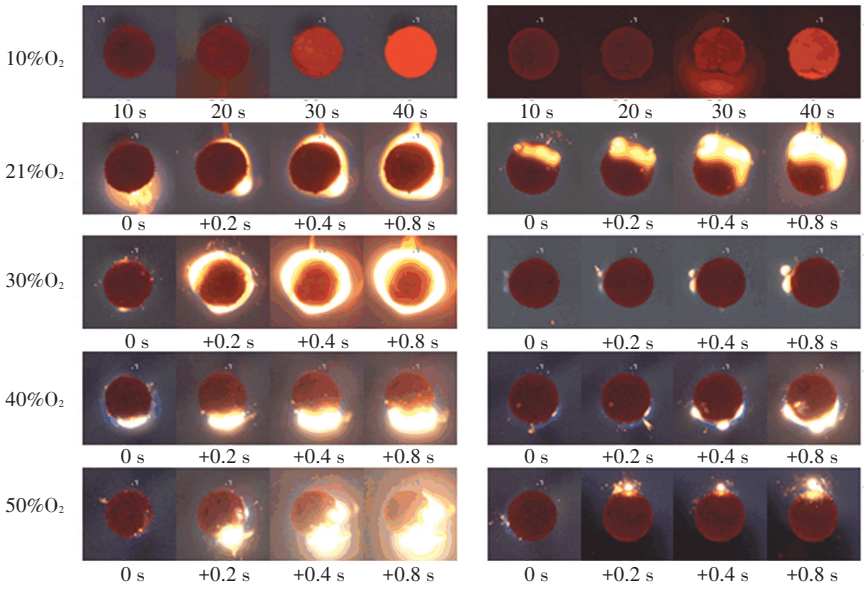
Fig.3　Internal temperature variation curve of coal slime pellets

2.2　氧气浓度及煤球粒径对着火方式的影响

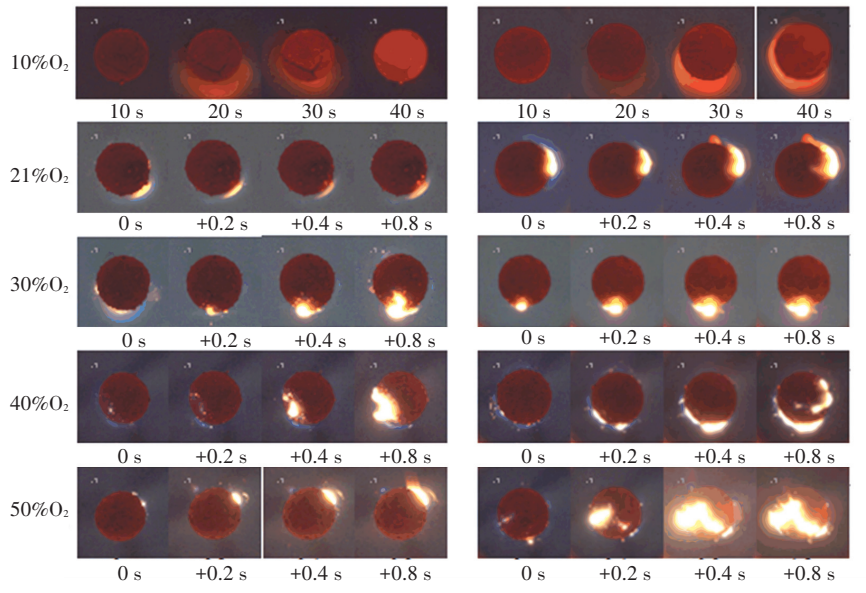
根据不同的着火现象，煤的着火方式可分为挥发分的均相着火、焦炭的异相着火及煤的异相着火[18,21]. 挥发分的均相着火所对应的现象为着火瞬间可观察到挥发分析出时在颗粒外表面或周围特定区域燃烧时形成的火焰；焦炭的异相着火对应一个颗粒逐渐由暗变亮的缓慢过程，并不伴随外围火焰的产生；而煤的异相着火一般表现为伴随着颗粒逐渐由暗变亮，在颗粒的局部表面处出现亮斑或光亮的区域但几乎没有火焰产生. 在不同体积分数氧气条件下，煤泥球团着火及燃烧过程有所区别，见图 4.

在 O_2/N_2 气氛下热流条件不同时，文献[18]的研究也得到了类似的结论. 由图 4（体积分数 10%～50%O_2，图中 0 s 对应着火瞬间）着火图像可以看出，当氧气体积分数为 10%时，着火方式为焦炭的异相着火，但燃烧过程中在煤泥球团周围会出现橘黄色的烟，且粒径越大越明显. 当氧气体积分数为 21%～50%时会呈现不同的着火方式：对 6～12 mm 的煤泥球团在体积分数为 21%、30%O_2时，着火方式为挥发分的均相着火；在体积分数为 40%及 50%O_2 时为煤的异相着火. 而煤泥球团的尺寸在体积分数为 21%～50%O_2时对着火方式没有影响. 对不同尺寸的煤泥球团，在 21%～30%O_2条件下的均相着火时因较小煤泥球团的挥发分析出速率比大的煤泥球团快，所以着火时大球团形成的挥发分火焰没有小球团的明显，但最初观察到的着火现象均为挥发分的均相着火. 与参考文献[18]中 O_2/N_2 条件下实验结果相比，尽管均发现煤泥的着火方式不同，但本文在 O_2 体积分数为 10%时是焦炭的异相着火；在相近的热流条件及相同氧气体积分数下，文献[18]结果

为挥发分的均相着火. 造成这种差异的原因可归结为:1) O_2 在 CO_2 中的扩散速率比 N_2 条件下低; 2)"O_2/ CO_2气氛下挥发分的着火延迟时间大于在 O_2/N_2气氛,尤其是在低氧气体积分数(10%)时[22]".



(a)6 mm 煤泥球团着火过程 (b)8 mm 煤泥球团着火过程



(c)10 mm 煤泥球团着火过程 (d)12 mm 煤泥球团着火过程

图 4 不同体积分数氧气下着火过程

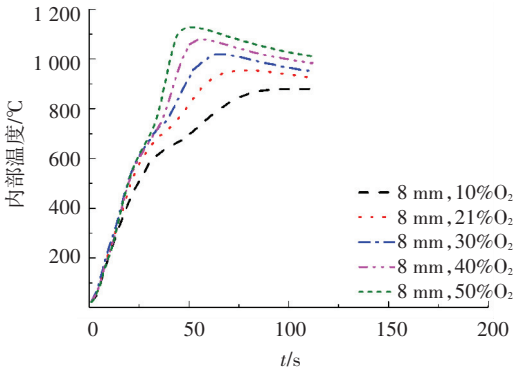
Fig.4 Ignition and combustion phenomena at different oxygen concentrations

2.3 初始阶段温升速率的变化

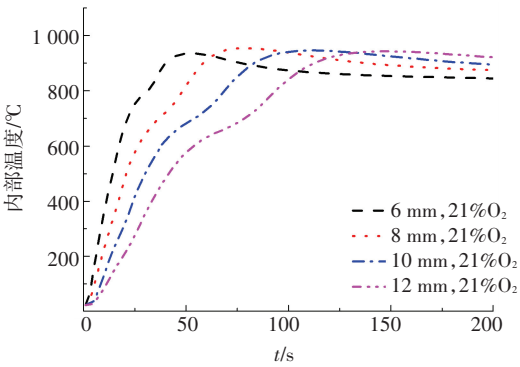
在不同的氧气体积分数及煤泥球团粒径条件下,对比煤泥球团燃烧过程中内部温度的变化,发现当氧气体积分数相同而煤泥球团直径不同时,粒径越小温升速率越快,如图 5. 原因是小粒径的煤泥球团比表面积比较大,在相同热流条件下,小粒径的煤泥球团较大粒径的煤泥球团温升速率更快. 当氧气体积分数不同而煤泥球团的粒径相同时,在挥发分着火之前的一段时间煤泥球团的内部温升速率几乎相同. 但是当煤泥球团开始燃烧时,不同氧气体积分数下的煤泥温升速率开始出现显著的差别,氧气体积分数越高煤泥球团的内部温升速率越快.

在煤泥球团最高温度附近,短期内煤泥球团内部温度变化比较平缓,将温度变化不超过最高温度的 2%定义为高温平缓阶段. 在不同氧气体积分数条件下不同粒径的煤泥球团从初始时刻到达高温平

缓阶段所用的时间见表 2. 由表 2 可知，从初始时刻至高温平缓阶段所用的时间随着氧气体积分数的增加逐渐缩短，随着粒径的增加逐渐延长.



（a）不同体积分数氧气



（b）不同直径煤泥团

图 5　初始阶段煤泥球团内部温度曲线

Fig.5　Initial internal temperature curves of coal slime pellets

表 2　到达平缓阶段所用时间

Tab.2　Time taken to reach the gentle phase　　s

粒径/mm	氧气体积分数/%				
	10	21	30	40	50
6	55	43	39	32	30
8	81	65	60	51	46
10	116	92	86	72	64
12	152	122	116	98	85

2.4　着火延迟时间

从煤泥球团进入炉内指定位置时刻起到着火瞬间所用的时间作为着火延迟时间. 在不同体积分数氧气和煤泥球团粒径条件下着火延迟时间变化如图 6. 着火延迟时间随氧气体积分数的升高而降低，且降低的幅度随着氧气体积分数增大而逐渐减小. 煤的着火受温度、氧浓度、气流速度等多个因素影响[23-24]，在本实验条件下炉温及热流速率是恒定的，因此煤泥球团的着火主要受到氧气体积分数的影响. 当粒径相同时，氧气体积分数越高着火延迟时间越短，而对不同粒径的煤泥球团，由前面的结果可知小粒径的煤泥球团温升速率快，因此在相同的条件下小粒径的煤泥球团较易着火.

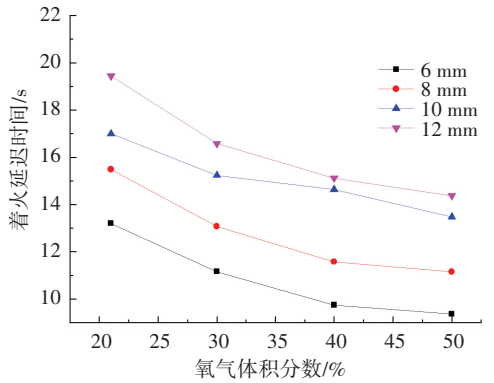
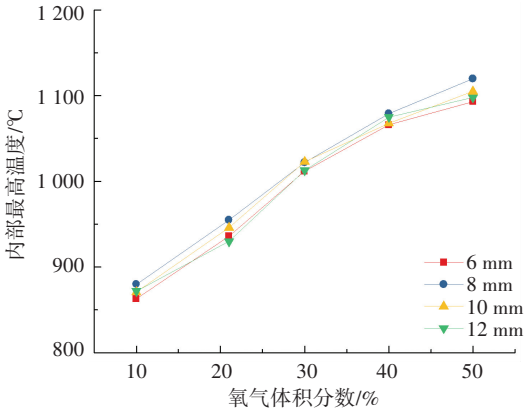


图 6 着火延迟时间

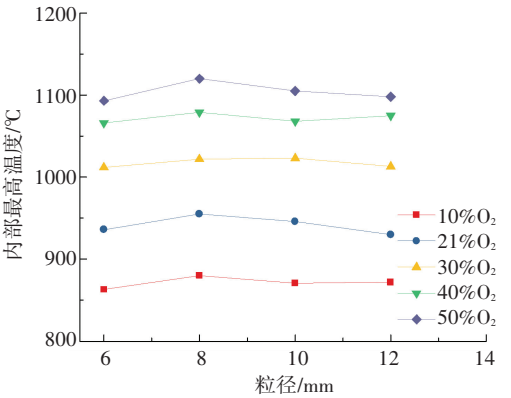
Fig.6　Ignition delay time

2.5　内部最高温度

煤泥球团内部最高温度的变化如图 7 所示. 由图 7 可知，煤泥球团最高温度随氧气体积分数的提高而提高，而受煤泥球团直径大小的影响则不太显著. 由于在高温段煤泥的反应主要是焦炭的异相燃烧，其反应程度主要受到 O_2 扩散到煤泥球团内部反应区速率的影响[22]. 当氧气体积分数增大时，在其他条件相同的情况下，O_2 扩散到煤泥球团反应区的速率增加，使反应加剧从而导致内部温度随着氧气体积分数的增大而升高.



（a）不同体积分数氧气



（b）不同煤泥球团直径

图 7　煤泥球团内部最高温度

Fig.7　Maximum temperature at different oxygen concentrations

当氧气体积分数相同而煤泥粒径尺寸不同时，煤泥球团内部的最高温度与煤泥球团的尺寸关系不是很大，进一步说明内部的最高温度主要受氧气体积分数的影响.

2.6 燃尽时间

燃尽时间定义为从煤泥球团进入炉内指定位置时刻起到内部温度最终达到炉温所需时间，与 Bu 等[25]在流化床中对焦炭球团的研究中的燃尽时间定义相同. 当氧气体积分数相同时，燃尽时间随着煤泥球团直径的增大而增加，如图 8 所示.

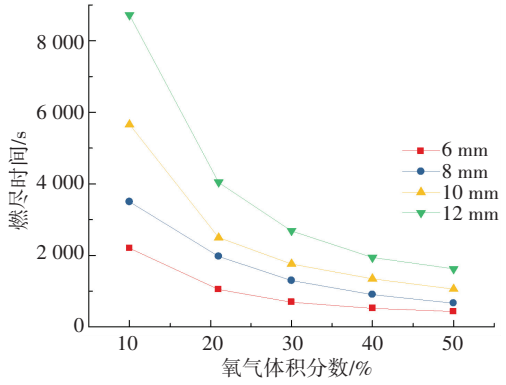


图 8 不同体积分数氧气时燃尽时间

Fig.8 Burnout time at different oxygen concentrations

随着氧气体积分数的提高，同一直径的煤泥球团，其燃尽时间逐渐缩短. 氧气体积分数从 10% 升至 30%时燃尽时间会大幅度降低，当氧气体积分数在 30%以上时燃尽时间尽管也会逐渐减小，但其降低的幅度逐渐变小，尤其是对于小粒径的煤泥球团来说这种趋势更为明显. 由于不同粒径的煤泥球团比表面积不同，随着氧气体积分数的提高，比表面积大的小粒径煤泥球团受氧气体积分数的影响相对较小，所以，小粒径煤泥球团随着氧气体积分数提高燃尽时间降低的幅度较小. 从图 2 中相同粒径煤泥球团的内部温度变化曲线可知，煤泥球团燃烧过程中的大部分时间为第二阶段焦炭的燃烧. 其燃烧时外表面的燃尽部分会形成一层灰层，使得 O_2 扩散至煤泥球团内部的阻力增加，燃烧速率下降. 在一定范围内，当氧气体积分数增大时，O_2 向内部反应层扩散的速率增加，反应速率加快，从而使得燃尽时间变短. 但是当氧气体积分数达到一定值后，O_2 通过灰层向球团内部扩散速率的增幅减小，使燃烧速率的增幅减小. 因此会导致在氧气体积分数增加到一定的值后燃尽时间缩短的幅度减小. 基于前述试验，由于 O_2 在 CO_2 中的扩散速率比 N_2 条件下低，可推断若想达到与空气条件相同的燃烧速率，富氧条件下氧气体积分数必须要高于空气条件下的氧气体积分数，这与文献[17]结论类似.

3 结 论

1) 提高氧气体积分数可以改善煤泥球团的燃烧特性. 随着氧气体积分数的提高，煤泥球团着火提前，燃尽时间逐渐缩短.

2) 在不同体积分数氧气条件下，预干燥煤泥球团会呈现不同的着火方式. 在氧气体积分数较低时，其着火方式为焦炭的均相着火，随着氧气体积分数进一步提高，着火方式由挥发分均相着火逐渐向煤的异相着火转变.

3) 随着氧气体积分数增高，煤泥内部的最高温度逐渐增加，煤泥球团燃烧过程中内部的最高温度受煤泥球团尺寸的影响较小.

参考文献

[1] ZHAO C, LUO K. Sulfur, arsenic, fluorine and mercury emissions resulting from coal-washing byproducts: a critical component of China's emission inventory [J]. Atmospheric Environment, 2017, 152: 270. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.12.001

[2] MA Xingmin, ZHAO Q Z, GAO S G, et al. Suction characteristics of a thick material pump at high concentrations of coal slime [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2008, 18(2): 210. DOI: 10.1016/S1006-1266(08)60044-9

[3] 倪明江, 罗卫红, 黄国权, 等. 煤水混合物在流化床燃烧过程中的凝聚结团现象 [J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1986, 20(6): 43
NI Mingjiang, LUO Weihong, HUANG Guoquan, et al. Agglomeration of CWM in fluidized bed combustor [J]. Journal of Zhejiang University, 1986, 20(6): 43

[4] 司玉成, 杜美利. 煤泥利用研究进展[J]. 广东化工, 2017 (4): 79
SI Yucheng, DU Meili. Research progress of slime utilization [J]. Guangdong Chemical Industry, 2017 (4): 79

[5] 李宁, 雷宏彬, 田忠文, 等. 煤泥资源化利用关键技术研究分析 [J]. 煤炭工程, 2011, 43(12): 100
LI Ning, LEI Hongbin, TIAN Zhongwen, et al. The research and analysis of key technology of coal slime utilization [J]. Coal Engineering, 2011, 43(12): 100

[6] LIU H B, LIU Z L. Recycling utilization patterns of coal mining waste in China [J]. Resources Conservation & Recycling, 2010, 54(12): 1331. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.05.005

[7] MATHEKGA H I, OBOIRIEN B O, NORTH B C. A review of oxy-fuel combustion in fluidized bed reactors [J]. International Journal of Energy Research, 2016, 40(7): 878. DOI: 10.1002/er.3486

[8] NIU S L, HAN K H, LU C M. Characteristic of coal combustion in oxygen/carbon dioxide atmosphere and nitric oxide release during this process [J]. Energy Conversion & Management, 2011, 52(1): 532. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.07.028

[9] WANG C, LEI M, LIU H, et al. Combustion characteristics and nitric oxide release of the pulverized coals under oxy-enrich conditions [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(44): 14355. DOI: 10.1021/ie301097c

[10] NIU S, CHEN M, LI Y, et al. Evaluation on the oxy-fuel combustion behavior of dried sewage sludge [J]. Fuel, 2016, 178: 129. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.03.053

[11]ZHUO Z, LIU J, SUN S, et al. Thermogravimetric characteristics of textile dyeing sludge coal and their blend in N_2/O_2, and CO_2/O_2, atmospheres [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111: 87. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.09.089

[12]MENG F, YU J, TAHMASEBI A, et al. Pyrolysis and combustion behavior of coal gangue in O_2/CO_2 and O_2/N_2 mixtures using thermogravimetric analysis and a drop tube furnace [J]. Energy & Fuels, 2013, 27(6): 2923. DOI: 10.1021/ef400411w

[13]刘国伟，董芃，韩亚芬，等. 富氧条件下煤燃烧特性的热重分析实验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报，2011，43(1)：104
LIU Guowei, DONG Peng, HAN Yafen, et al. Experimental study on combustion characteristics of coals under enriched-oxygen condition by thermo-gravimetric analysis[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(1): 104

[14]李皓宇，李诗媛，李伟，等. 半焦循环流化床高氧气浓度燃烧气体污染物排放特性试验研究[J]. 中国电机工程学报，2017，37(9)：262. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.160601
LI Haoyu, LI Shiyuan, LI Wei, et al. Experimental study on gaseous pollutant emission characteristics of semi-coke combustion in an oxy-fuel circulating fluidized bed with high oxygen concentration[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 262. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.160601

[15]CHEN J B, MU L, CAI J C, et al. Pyrolysis and oxy-fuel combustion characteristics and kinetics of petrochemical wastewater sludge using thermogravimetric analysis [J]. Bioresource Technology, 2015, 198: 115. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.09.011

[16]RICHTER D, KIJO-KLECZKOWSKA A, KOSOWSKA-GOLACHOWSKA M, et al. Analysis of the combustion process of coal slurry pellets in a circulating fluidized bed [J]. Rynek Energii, 2017, 4(131): 91

[17]卜昌盛，庄亚明，刘道银，等. 单颗粒流化床富氧燃烧特性研究[J]. 工程热物理学报，2015，36(5)：1143
BU Changsheng, ZHUANG Yaming, LIU Daoyin, et al. Fluidized bed combustion of a single coal particle in oxy-fuel environments [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(5): 1143

[18]ZHOU K, LIN Q, HU H, et al. The ignition characteristics and combustion processes of the single coal slime particle under different hot-coflow conditions in N_2/O_2 atmosphere [J]. Energy, 2017, 136: 173. DOI: 10.1016/j.energy.2016.02.038

[19]WANG H, LIU S, WANG X, et al. Ignition and combustion behavior of coal slime in air [J]. Energy & Fuels, 2017, 31(10): 11439. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b01960

[20]方立军，于澜. 富氧环境下煤粒燃烧特性的热重实验[J]. 燃烧科学与技术，2014，20(4)：297
FANG Lijun, YU Lan. Thermo-gravimetric experiment on combustion performance of coal particle in oxygen-enriched environments [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014, 20(4): 297

[21]PONZIO A, SENTHOORSELVAN S, YANG W, et al. Ignition of single coal particles in high-temperature oxidizers with various oxygen concentrations[J]. Fuel, 2008, 87(6): 974. DOI: 10.1016/j.fuel.2007.06.027

[22]卜昌盛. 煤颗粒流化床富氧燃烧机理研究[D]. 南京：东南大学，2015
BU Changsheng. Investigation on mechanism of oxy-fuel coal combustion fluidized beds [D]. Nanjing: Southeast University, 2015

[23]LIU B, ZHANG Z, ZHANG H, et al. An experimental investigation on the effect of convection on the ignition behaviour of single coal particles under various O_2, concentrations [J]. Fuel, 2014, 116(6): 77 DOI: 10.1016/j.fuel.2013.07.112

[24]KATALAMBULA H, JUNICHIRO HAYASHI A, CHIBA T, et al. Dependence of single coal particle ignition mechanism on the surrounding volatile matter cloud [J]. Energy & Fuels, 1997, 11(5): 1033. DOI: 10.1021/ef9700240

[25]BU C, PALLARÈS D, CHEN X P, et al. Oxy-fuel combustion of a single fuel particle in a fluidized bed: char combustion characteristics, an experimental study [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 287(3): 649. DOI: 10.1016/j.cej.2015.11.078

（编辑　杨　波）