DOI: 10.11883/1001-1455(2016)05-0215-06

粉尘-CO/H_2 杂混合物爆燃特性研究*

刘原一[1],李文广[2],谭厚章[1],张 兰[2],王学斌[1]
(1.西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室,陕西 西安 710049;
2.河南省锅炉压力容器安全检测研究院,河南 郑州 450008)

摘要:实验研究了半开放环境下煤粉-CO/H_2 杂混合物中粉尘种类、粒径、质量浓度对其爆燃特性的影响规律。结果表明:杂混合物中粉尘颗粒对爆燃特性的影响主要是挥发分析出吸热和挥发分参与反应两种作用相互竞争的结果。对于高挥发分煤粉,挥发分析出参与反应占主要地位,混合物的爆燃强度随着挥发分含量升高而逐渐升高;对于低挥发分煤粉,挥发分析出的吸热作用大于挥发分参与反应的作用,导致了爆燃强度的降低。对于银北煤等普通烟煤,随着粉尘质量浓度的增加,混合物的爆燃强度呈 U 型变化趋势;对于低挥发分的焦炭粉末,其爆燃强度随粉尘质量浓度的变化不明显。

关键词:爆燃;粉尘;一氧化碳;氢气;锅炉
中图分类号:O389;TK16 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

预防煤质变化情况下的炉膛爆燃是火力发电站锅炉安全运行的必要环节。电站锅炉的冷灰斗区域中有着复杂的粉尘环境,且附着在受热面上的焦块落入冷灰斗底部的水封后可能由气化反应生成一氧化碳(CO)、氢气(H_2)等可燃性气体,进而导致局部爆燃[1],进而影响机组的安全经济运行。

王育德等[2]、曲志明等[3]和毕明树等[4]通过对甲烷-煤粉混合爆燃实验研究,发现当煤粉加入量较少时,混合物爆压、爆速很低,处于爆燃状态,而当煤尘质量浓度升高至 368 g/m^3 时,煤尘出现稳定爆轰;在一定粒径范围内,爆压和火焰传播速度随着煤尘粒度的减小而增大;在最优配比条件下,与单一甲烷空气或煤尘空气混合物相比,甲烷煤尘空气混合物的爆压和爆速明显增加。刘义等[5]和张引合等[6]分别研究了甲烷-煤尘混合系爆燃下限的变化规律,结果表明增大甲烷在整个混合系中配比或者煤尘中挥发分的含量,煤尘的爆燃下限明显会降低;而煤尘粒径对爆燃下限则影响较小。Y. F. Khalil[7]研究混合有活性炭的灰在氢气/空气的混合物中爆燃参数的影响,结果显示:所有灰与氢气浓度配比下的混合物所产生的爆燃压力和最大压力上升速率均大于单纯的氢气/空气混合物爆燃参数。D. Castellanos 等[8]研究了不同粒度分散性对铝粉尘爆燃强度的影响,发现在一定范围内,粒度分散性越高,爆燃超压越高。

由以上可见,针对甲烷-煤粉这一杂混合物的爆燃特性已经有了较为细致的研究成果,然而针对冷灰斗区域环境中 CO/H_2 气体和煤粉、焦炭粉、粉煤灰等粉尘杂混合物的爆燃特性尚缺乏细致的实验数据。因此本文中将对不同粉尘种类、粒径、质量浓度对 CO/H_2 爆燃特性的影响进行实验研究。

1 实 验

1.1 实验装置

实验系统为立式爆燃试验台,包含配气系统、给粉系统、点火系统、爆燃管腔和测量系统 5 个部分,如图 1 所示。为了与实际炉膛中的环境尽可能相似,本实验采用半开放的实验管腔,其上段尺寸为 ∅42 mm×1 000 mm,壁厚 3 mm,下段管腔尺寸为∅60 mm×1 000 mm,壁厚为 3.5 mm,两段无重合部分。管腔下半段均匀布置 3 个 DYTRAN-1 300 V 压电式压力传感器,从上到下编号依次为 A、B、C,传感器采样频率为 500 kHz,灵敏度为 1.45 μV/Pa(±5%)。数据采集系统为 DEWE-1201 便携式数据采

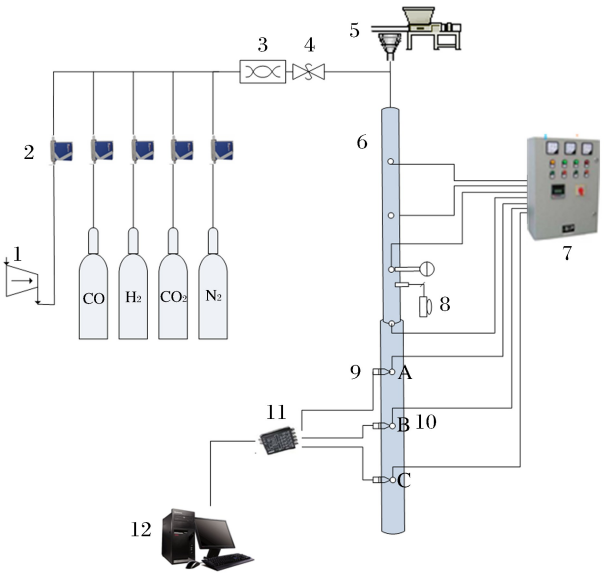
* **收稿日期**:2015-07-02; **修回日期**:2016-01-04
基金项目:国家自然科学基金项目(51376147);国家自然科学基金青年科学基金项目(51406149)
第一作者:刘原一(1990—),男,博士; **通信作者**:谭厚章,tanhz@mail.xjtu.edu.cn

集系统,最高采样率为 100 kHz。

1.2 实验准备

通过调节各气体组分的体积流量对管内混合气的当量比例进行控制,混合气总流量为 1 L/s。为使混合气浓度均匀,在实验管道前安装一段混合格栅,实验前对混合格栅后的气体质量浓度进行标定以确保混合均匀。管道内送气 1 min 后开启微量螺旋给粉机送粉,并持续送粉至实验结束。通过观察,送粉 1 min后,管内粉尘可以达到均匀分布。此时点火并记录实验数据。

实验中采用"弱点火",在该点火条件下可以实现杂混合物中气相组分的直接爆燃,又不会产生爆轰或者固相组分的直接着火,这与本研究背景下的实际着火情况更为接近。



1-air pump 2-flow meter 3-mixing grille 4-Check valve
5-quantitative spiral conveyor 6-reaction pipeline
7- thermo couple temperature controller
8- temperature controller ignite 9- igniter pressure transducer
10- pressure transducer thermo couple 11- DAQ card
12-computer

图 1 实验系统

Fig. 1 Experiment system

1.3 实验工况

考虑到锅炉炉膛环境中的实际情况,杂混合物中加入体积分数为 10%的 CO_2 作为稀释气体,CO/H_2 与空气中的 O_2 按照化学当量比混合。

1.3.1 粉尘种类对爆燃特性的影响

为了研究粉尘种类对气体-粉尘杂混合物爆燃特性的影响规律,本实验选取 3 种煤粉、1 种粉煤灰和 1 种焦炭粉作为实验样品。5 种粉尘的工业分析如表 1 所示,焦炭粉是利用银北煤为原料,在 N_2 环境和 1 300 ℃条件下通过沉降炉制备得到。

表 1 实验用煤粉的工业分析

Table 1 Industrial analysis of the coal sample

成分	质量分数/%					质量放热/(MJ·kg^{-1})
	水分	灰分	挥发分	固定碳	全硫	
蒙西(MX)煤样	16.77	10.38	38.92	45.56	1.16	16.70
宁东(ND)煤样	9.32	23.69	34.12	45.59	0.20	20.20
银北(YB)煤样	0.56	35.56	26.53	47.08	1.01	19.05
银北(YB)焦样	2.42	46.28	5.68	49.44	0.72	17.78
粉煤灰	0.07	95.51	1.04*	3.45	/	/

*:灰分含量为把粉尘样品中外部水分去除后的干燥基含量

1.3.2 粉尘粒径对爆燃特性的影响

对电站锅炉冷灰斗区域进行粉尘取样并对其进行粒径分析,实验中根据分析结果选取 50～80、80～160 和 160～200 μm 三种粒径范围作为实验工况。

1.3.3 粉尘质量浓度对爆燃特性的影响

冷灰斗区域的粉尘质量浓度在 10～20 g/m^3 左右,故本实验中设定粉尘质量浓度范围为 3～35 g/m^3。

2 结果与分析

杂混合物典型爆燃特性曲线如图 2 所示,由图可见杂混合物在点火后会直接形成迅速上升的爆燃波,通过分析波峰可得到相应的爆燃超压,最大压力上升速度和爆燃波传播速度等。

2.1　粉尘种类对爆燃强度的影响

图 3 所示为粉尘种类对杂混合物爆燃超压和最大压力上升速率的影响规律。图 3(a)中的 5 种粉尘颗粒粒径均为 50～80 μm，挥发分含量从左到右依次降低。对于含粉煤灰的杂混合物，其爆燃超压与纯气体工况相似，可维持较高的爆燃强度水平，而挥发分含量较低的焦炭粉会使杂混合物的爆燃强度降低。对比 3 种煤粉，随着挥发分含量逐渐升高，混合物的爆燃超压也逐渐增强。此外不论何种粉尘，A、B、C 三个测点(如图 1 所示)的爆燃超压均先升高后降低，这表明爆燃压力在管腔内先聚集后释放的过程。

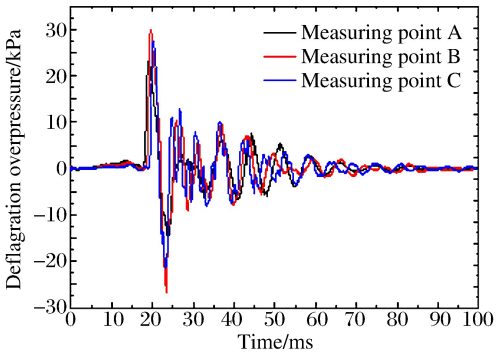


图 2　杂混合物爆燃压力-时间关系

Fig. 2　Deflagration overpressure-time curves

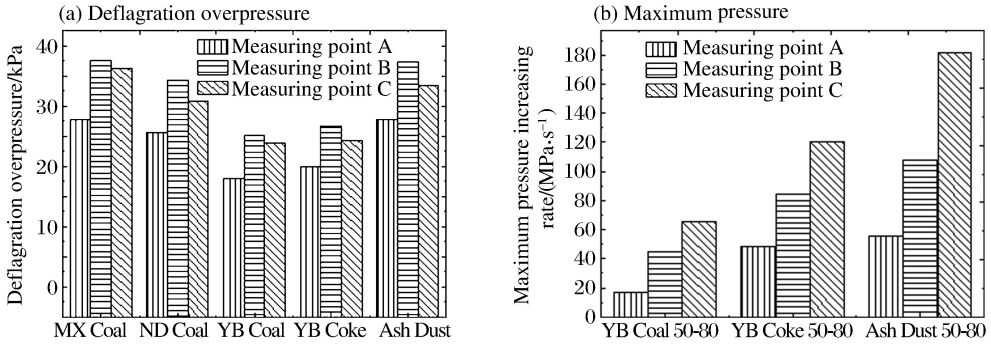


图 3　不同粉尘作用下杂混合物爆燃强度

Fig. 3　Deflagration severity on different dust-CO/H_2 hybrid mixtures

对后三种粉尘最大压力上升速率进行分析如图 3(b)所示，其变化规律与爆燃超压相似，粉煤灰作用下的气体爆燃最大压力上升速度最高，约为 180 MPa/s，焦炭粉次之，而煤粉最低，约 65 MPa/s。不同于爆燃超压，三个测点的最大压力上升速率依次升高。

不同粉尘种类对 CO/H_2 杂混合物爆燃强度的影响主要由粉尘挥发分含量的不同所引起。当挥发分含量很低时，如粉煤灰，其在爆燃过程中几乎没有挥发分的析出，用于挥发分析出的热量也很少，从而可使杂混合物的爆燃强度维持在较高的水平；对于含有一定挥发分但含量又不高的粉尘，如本试验中的焦炭粉和银北粉煤，爆燃过程中挥发分的析出会吸收大量的热量，但是析出的挥发分重新参与反应又不足以弥补热量损失，从而导致杂混合物爆燃强度降低；随着挥发分含量继续升高，相比吸热作用，大量析出的挥发分重新参与反应开始占据优势地位，混合物的爆燃超压又逐渐升高。

2.2　粉尘粒径对爆燃强度的影响

图 4 所示为不同煤粉粒径对混合物爆燃超压和最大压力上升速率的影响。由图 4 可见，对于银北煤，在本试验研究的粒径范围内，混合物的爆燃超压和最大压力上升速率均随着粉尘粒径的减小而降低。银北煤挥发分含量适中，其组成的杂混合物在爆燃过程中挥发分析出吸热占优势地位。此时颗粒粒径越小，其比表面积越大，在极短的爆燃反应过程中，挥发分越容易快速的析出，吸收的热量也越多，从而对杂混合物爆燃强度的影响也越明显。

胡双启等[9]在研究超细煤粉在密闭管道内的爆燃特性时发现，随着粒径的减小，爆燃产生的压力及压力上升速率都将增大。这是因为一方面本研究所用的粉尘粒径相比超细粉尘要大得多，这时杂混合物在弱点火条件下的爆燃主要是由混合物中气相可燃物的点燃所引爆的，粉尘颗粒处于被点燃的状态，这与粉尘直接起爆的机理并不相同。另一方面，由于半开放的试验管腔，粉尘受热析出的部分挥发分并没有来得及参与爆燃反应就已经被冲击波压出管腔之外，导致了能量的损失。这是与炉膛内实际情况

相似的，也是本试验爆燃超压较低的原因之一。

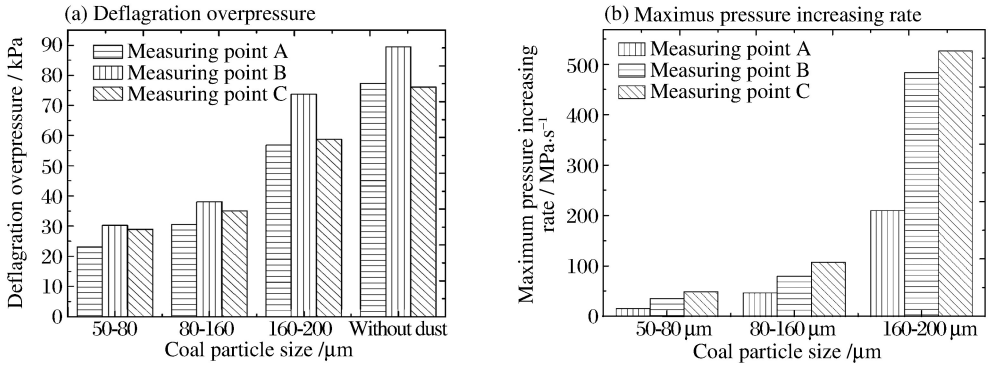


图 4 煤粉粒径对杂混合物爆燃强度影响

Fig. 4 Influence of particle size on deflagration severity

2.3 粉尘质量浓度对爆强度性的影响

各种类粉尘-CO/H_2 杂混合物的爆燃最大压力上升速率随粉尘质量浓度变化关系如图 5 所示。对于粒径为 50～80 μm 的煤粉颗粒，随着管腔内粉尘质量浓度从4 g/m³升高到34.1 g/m³，混合物爆燃超压先降低后升高。当粉尘质量浓度为 15 g/m³ 时，爆燃最大压力上升速率达到最小值，约3.2 MPa/s；而对于粒径范围为 80～160 μm 的煤粉颗粒，随着粉尘质量浓度的增加，混合物的爆燃超压同样呈先下降后上升的 U 型曲线趋势，在 11.5 g/m³ 左右时达到最小值约 4.1 MPa/s。图 5(c)为在粒径为 50～80 μm 的焦炭粉作用下爆燃超压随粉尘质量浓度的变化情况，可见随着粉尘质量浓度的增加，最大压力上升速率存在波动但并没有明显的变化趋势。

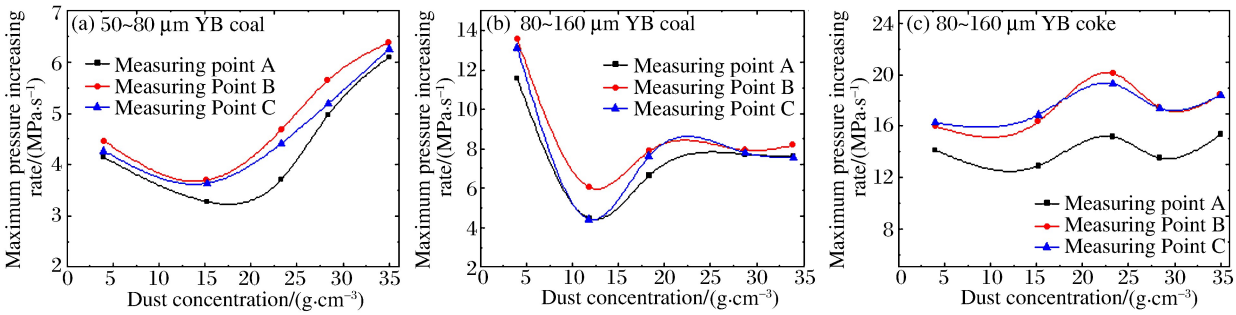


图 5 粉尘质量浓度对最大压力上升速率影响

Fig. 5 Influence of dust concentration on the maximum pressure increasing rate

最大压力上升速率这种先下降后上升的变化规律是因为在粉尘质量浓度较低时，爆燃过程中析出挥发分所需的热量较少，气体燃烧释放的热量可使爆燃强度维持在较高的水平；而当粉尘质量浓度增大到一定程度后，尽管粉尘颗粒在析出挥发分的过程中吸收一定的热量，但挥发分本身参与爆燃反应又在一定程度上维持了总体混合物的爆燃强度。这两种作用相互竞争，使得压力峰值随粉尘质量浓度的增加呈 U 型曲线变化。50～80 μm 煤粉作用曲线的极小值点相比 80～160 μm 煤粉作用曲线的极小值点出现在更高的粉尘质量浓度处，这说明在挥发分析出和挥发分自身参与爆燃的竞争关系中，挥发分析出的吸热作用占优势。而焦炭粉作用曲线不明显的变化规律是由于焦炭粉中挥发分含量很低，上诉两种竞争关系均很弱所致。

2.4 粉尘对气体爆燃下限的影响

图 6 为在 CO_2 体积分数为 10%条件下，50～80 μm 的粉尘种类对 H_2 爆燃下限的影响规律。由图 6 可见，相比纯气体条件，煤粉的加入使得混合气体的爆燃下限略有上升，灰分的加入对爆燃下限的影响几乎没有，而焦炭粉的加入使得混合物的爆燃下限有较为明显的降低。这说明，相比煤粉和粉煤灰，焦炭粉的加入使得混合物更容易进入爆燃区域。这是因为在火花塞点火起爆的过程中，随着煤粉的加

入，挥发分析出的吸热降低了火花塞电极间的热量积累，从而升高了爆燃下限。而焦炭粉多孔的结构可以促进电极间的热量累积，从而在一定程度上降低爆燃下限。粉煤灰挥发分很低且不存在多孔的形态结构，因而对爆燃下限的影响很小。

图 7 所示为煤粉粒径对爆燃下限的影响规律。由图可见，相比单纯的可燃性气体，不同粒径煤粉作用下的杂混合物的爆燃下限均略有升高。对比三种粒径，160～200 μm 的银北煤粉对混合物爆燃下限的影响最小，这是因为在这种较大的煤粉粒径下，粉尘几乎来不及参与反应。粒径较小的 50～80 μm 银北煤样，在点火过程中，拥有很低点火能的挥发分的快速析出，这些挥发分明显的降低了混合物的最低点火能，增加了其爆燃的可能性，因而虽然有不少热量被吸收，但混合物的爆燃下限几乎保持不变。而 80～160 μm 的煤粉粒径介于上述两者之间，少量挥发分的析出吸收了热量但又不足以降低混合物的最低点火能，因而其爆燃下限最高。

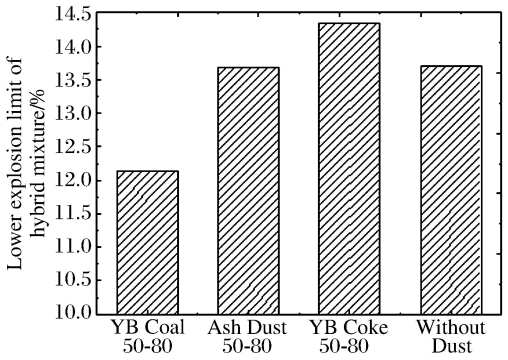


图 6 粉尘种类对爆燃下限的影响

Fig. 6 Influence of dust category on lower deflagration limit

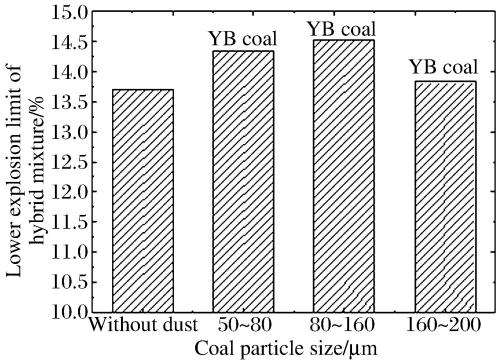


图 7 煤粉粒径对爆燃下限的影响

Fig. 7 Influence of coal particle size on lower deflagration limit

3 结　论

在半开放弱点火条件下，粉尘颗粒对气体爆燃特性的影响如下：

(1) 粉尘对杂混合物爆燃特性的影响主要是由于粉尘中挥发分析出吸热和重新参与爆燃反应两种作用相互竞争的结果。对高挥发分煤粉，挥发分析出参与反应占主导，增大爆燃强度；而对低挥发分煤粉，颗粒的吸热作用占主导，降低爆燃强度；

(2) 对于银北煤，随着粒径减小到 50 μm，混合物的爆燃强度逐渐减弱，随着粉尘浓度从 3 g/m^3 增加到 35 g/m^3，混合物的爆燃强度先降低后升高；而大于 160 μm 的煤粉颗粒对混合物的爆燃强度几乎没有影响；对于无挥发分的焦炭粉、飞灰颗粒，其爆燃强度随粉尘浓度的变化不明显；

(3) 在相同粒径条件下，对于易挥发分细煤粉，混合物的爆燃强度会随着挥发分含量的升高而升高，但低挥发分含量的焦炭颗粒会降低其爆燃强度；

(4) 在相同粒径条件下，细煤粉使混合物爆燃下限略有升高，焦炭粉可降低爆燃下限，而粉煤灰爆燃下限其影响不大，这分别是由于煤粉挥发分析出吸热和焦炭多孔结构减小了电极间散热所导致。

参考文献：

[1] 刘原一，朱轶铭，熊英莹，等. N_2/CO_2 气氛对 CO/H_2 爆燃特性影响研究[J]. 燃烧科学与技术，2014，20(5)：383-387.

Liu Yuanyi, Zhu Yiming, Xiong Yingying, et al. Study on the influence of N_2/CO_2 on deflagration characteristics of CO/H_2[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014, 20(5): 383-387.

[2] 王育德，曲志明. 煤尘浓度和粒度对煤尘燃烧爆燃特性影响的实验研究[J]. 中国矿业，2013，22(8)：136-140.

Wang Yude, Qu Zhiming. Experimental study of the impact of coal dust concentration and particles on combustion

and explosion characteristic [J]. China Mining Magazine, 2013,22(8):136-140.

[3] 曲志明,王育德.甲烷煤尘燃烧爆燃试验研究[J].中国安全科学学报,2012,22(11):55.
Qu Zhiming, Wang Yude. Experimental study on methane and coal dust combustion and explosion[J]. China Safety Science Journal, 2012,22(11):55.

[5] 刘义,孙金华,陈东梁,等.甲烷-煤尘复合体系中煤尘爆燃下限的实验研究[J].安全与环境学报,2007,7(4):129-131.
Liu Yi, Sun Jinhua, Chen Dongliang, et al. On lower limit of explosive coal dust in coal dust mixture with methane [J]. Journal of Safety and Environment, 2007,7(4):129-131.

[6] 张引合,张延松,任建喜.煤尘对低浓度瓦斯爆燃的影响研究[J].矿业安全与环保,2007,33(6):20-21.
Zhang Yinhe, Zhang Yansong, Ren Jianxi. The study on the influence of coal dust on deflagration of low concentration methane[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2007,33(6):20-21.

[7] Khalil Y F. Experimental investigation of the complex deflagration phenomena of hybrid mixtures of activated carbon dust/hydrogen/air[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013,26(6):1027-1038.

[8] Castellanos D, Carreto-Vazquez V H, Mashuga C V, et al. The effect of particle xize polydispersity on the explosibility characteristics of Aluminum dust[J]. Powder Technology, 2014,254:331-337.

[9] 胡双启,晋日亚,谭迎新.管道条件下超细煤粉尘的爆燃特性研究[J].中北大学学报(自然科学版),2008,29(3):228-231.
Hu Shuangqi, Jin Riya, Tan Yingxin. Study on the explosive characteristics of super fine coal dust in tube[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2008,29(3):228-231.

Experimental study on deflagration parameters of dust-CO/H_2 hybrid mixture

Liu Yuanyi[1], Li Wenguang[2], Tan Houzhang[1], Zhang Lan[2], Wang Xuebin[1]

(1. *MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an* 710049, *Shaanxi, China*;
2. *Henan Province Institute of Boiler and Pressure Vessel Safety Testing, Zhengzhou* 450008, *Henan, China*)

Abstract: In the present work, we carried out an experimental study of the influence of the coal dust categories, concentration and particle size on the coal dust-CO/H_2 hybrid mixture's deflagration characteristics in a semi-open environment. The results indicate that the influence of the dust on the hybrid mixture's deflagration is mainly the outcome of the competitive relation between two opposite effects, the heat absorption for volatile releasing and the reaction of the released volatile. For the high volatile coal dust, the deflagration reaction of the released volatile dominates, which makes the deflagration severity gradually rise with the rising of the volatile content; while for the low volatile coal dust, the heat absorption for the volatile dominates, which reduces the deflagration severity. For bitumite like the Yinbei coal, with the increase of the dust concentration, the deflagration severity varies with a U-shaped tendency, while for the coke dust with a low volatile content, the change of the deflagration severity with the dust concentration is not obvious.

Keywords: deflagration; dust; carbon monoxide; hydrogen; boiler

(责任编辑 王小飞)