

郑 斌,刘永启,刘瑞祥,等. 煤矿乏风预热催化氧化装置的起动性能[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1084-1088. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1190

Zheng Bin, Liu Yongqi, Liu Ruixiang, et al. Starting characteristics of ventilation air methane preheating catalytic oxidation reactor [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1084-1088. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1190

## 煤矿乏风预热催化氧化装置的起动性能

郑 斌,刘永启,刘瑞祥,陈 帅,毛明明,孟 建

(山东理工大学 交通与车辆工程学院, 山东 淄博 255049)

**摘 要:** 搭建了煤矿乏风预热催化氧化实验装置, 试验研究了当量加热功率、流量比例系数、进气甲烷体积分数对其起动性能的影响规律。结果表明: 随着当量加热功率的增加, 起动时间和起动能耗量均减少; 随着流量比例系数的增加, 起动时间和起动能耗量均明显增加; 进气甲烷体积分数变化对升温曲线的影响不大, 随着进气甲烷体积分数的增加, 起动时间仅略微减少。当流量比例系数为 0.35~0.40、当量加热功率为 18~20 kW 时, 起动时间、起动耗能量和氧化床入口温度的平均增加速率均较小, 装置起动性能良好。

**关键词:** 预热催化氧化装置; 煤矿乏风; 起动时间; 起动能耗量

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2014)06-1084-05

### Starting characteristics of ventilation air methane preheating catalytic oxidation reactor

ZHENG Bin, LIU Yong-qi, LIU Rui-xiang, CHEN Shuai, MAO Ming-ming, MENG Jian

(School of Traffic and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** The ventilation air methane (VAM) preheating catalytic monolithic reactor was built. The effects of the equivalent heating power, the flow proportionality coefficient and the methane concentration on the starting characteristics of preheating catalytic monolithic reactor were studied experimentally. The results show that with the increase of the equivalent heating power, the starting time consumption and starting power consumption decrease. With the increase of the flow proportionality coefficient, the starting time consumption and starting power consumption increase. The variations of temperature rise profile at various methane concentrations is little. With the increase of the methane concentration, the starting time consumption decreases hardly. When the flow proportionality coefficient from 0.35 to 0.40 and the equivalent heating power from 18 kW to 20 kW, the starting time consumptions, the starting power consumptions and the average rise ratios of oxidation bed inlet temperature are small, the excellent starting characteristics is exhibited.

**Key words:** preheating catalytic monolithic reactor; ventilation air methane; starting time consumption; starting power consumption

煤矿瓦斯的主要成分为甲烷, 是气体能源, 也是煤矿生产中最大安全隐患, 通常采用大量通风将其排

放到大气当中(称为煤矿乏风), 中国因采煤每年排放大量的甲烷<sup>[1-3]</sup>, 开展煤矿乏风利用技术研究, 对

收稿日期: 2013-08-22 责任编辑: 张晓宁

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863) 资助项目(2009AA063202); 山东省科技发展计划资助项目(2012GGX10417); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2011EL017)

作者简介: 郑 斌(1982—), 男, 山东淄博人, 讲师, 硕士。Tel: 0533-2782616, E-mail: sdutzb@163.com。通讯作者: 刘永启(1965—), 男, 山东枣庄人, 教授, 博士。Tel: 0533-2782616, E-mail: liuyq65@163.com

有效利用现有资源和减少温室气体排放均具有非常重要的意义<sup>[4-7]</sup>。煤矿乏风中的甲烷含量很低,一般在0.10%~0.75%之间波动,利用难度大,目前有效处理煤矿乏风的方式是逆流氧化技术,包括热逆流氧化和催化逆流氧化。在热逆流氧化方面,山东理工大学<sup>[8-13]</sup>、Krzysztof<sup>[14]</sup>、大连理工大学<sup>[15]</sup>、中国矿业大学等<sup>[16-19]</sup>在氧化性能、阻力性能、混合性能和流动分布等方面开展了系统的研究,为热逆流氧化技术的应用提供了有力支持;在催化逆流氧化方面,Juan Yin<sup>[20]</sup>、Shi Su<sup>[21]</sup>、蒲舸<sup>[22]</sup>研究了甲烷体积分数、流量等因素对其氧化性能的影响规律。由于逆流氧化技术需要周期性改变流动方向以实现可靠的热反馈,导致其存在换向工作可靠性要求高、氧化床温度场周期性波动、装置体积大、风机耗能高等问题。

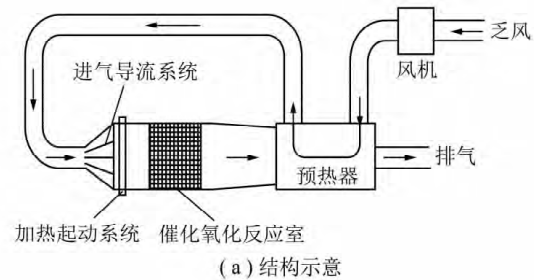
山东理工大学提出了一种利用氧化后乏风排气经换热器预热未反应乏风、预热乏风经催化剂完成氧化反应的煤矿乏风预热催化氧化技术<sup>[23]</sup>,该技术避免了逆流氧化技术的换向,使氧化温度场更为稳定可靠,而且热量回收率高、结构紧凑、流动阻力小。氧化装置低能耗、少用时、安全稳定的顺利起动,是实现装置稳定运行的基本前提。笔者利用自行研制的煤矿乏风预热催化氧化实验装置,试验研究了当量加热功率、流量比例系数、进气甲烷浓度等因素对其起动性能的影响规律。

## 1 实验装置与实验方法

煤矿乏风预热催化氧化试验台如图1所示,试验台处理能力为1 000 m<sup>3</sup>/h(标况),试验台由催化氧化反应室、预热器、进气导流系统、加热起动系统、风机和数据采集系统组成。催化氧化反应室内由蜂窝陶瓷式催化剂构成催化氧化床,催化剂采用堇青石蜂窝陶瓷作为第1载体, $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为第2载体,以贵金属Pd为主要活性组分,开孔密度为200目;预热器采用间壁式气-气板式换热器,内部采用双向波纹板以强化传热;进气导流系统由多块导流板组成,以保证进气均匀;加热起动系统采用电加热方式;数据采集系统为自行设计的PLC控制柜,实现对进气流量、进气甲烷体积分数、温度等参数的实时采集与存储。

进气流量利用孔板流量计进行测量,流量计具有温压自补偿功能,测量范围100~1 200 m<sup>3</sup>/h(标况),误差0.5%;进气甲烷浓度测量采用德国rbr测量技术公司的J2KN型多功能烟气分析仪,CH<sub>4</sub>测量范围0~4%,误差0.001%;温度测量采用标准K型热电偶,热电偶T<sub>1</sub>~T<sub>5</sub>布置在催化剂陶瓷的进气面,布置

情况如图2所示。模拟煤矿乏风由天然气和空气配制而成,天然气中CH<sub>4</sub>的纯度为99.9%。



(b) 实景图

图1 煤矿乏风预热催化氧化试验台

Fig. 1 VAM preheating catalytic oxidation reactor

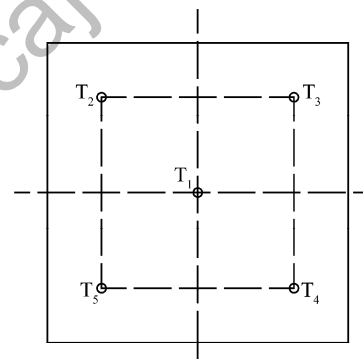


图2 热电偶布置示意

Fig. 2 Experimental arrangement of thermocouples

煤矿乏风预热催化氧化试验台工作原理为: 常温的新鲜乏风流经预热器、进气导流系统并由电加热器加热后进入反应室,在催化氧化床内被氧化,氧化反应放出的热量一部分进入陶瓷氧化床蓄热,一部分由排气携带在预热器内将热量传递给新鲜乏风,降温后的排气最终排入到大气中。

实验利用氧化床入口温度变化、起动时间和起动能耗来评价其起动性能,其中氧化床入口温度为催化剂陶瓷进气面5个温度测量值的平均值,起动时间为氧化床入口温度达到475℃(前期大量实验结果表明:当氧化床入口温度达到475℃时,煤矿乏风即可实现催化氧化反应)所需的时长。主要实验条件为当量加热功率、流量比例系数和进气甲烷体积分数,其中:当量加热功率为每1 000 m<sup>3</sup>/h(标况)乏风设计处理量所需的加热功率值,流量比例系数为起动

风量与正常运行乏风设计处理量的比值。主要实验条件变化范围为: 当量加热功率为 16 ~ 20 kW; 流量比例系数为 0.35 ~ 0.45; 进气甲烷体积分数 0 ~ 0.3%。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 当量加热功率的影响

图 3 为不同当量加热功率时氧化床入口温度的升温变化曲线( 流量比例系数为 0.35), 由图可知: 在启动初期, 不同当量加热功率下氧化床入口温度的增加速率均较快, 升温曲线较陡, 各升温曲线差异较小; 随着加热时间的延长, 温度增加速率均下降, 升温曲线逐渐变平缓。当量加热功率越大, 增加速率下降越慢, 升温曲线变平缓的趋势越慢。

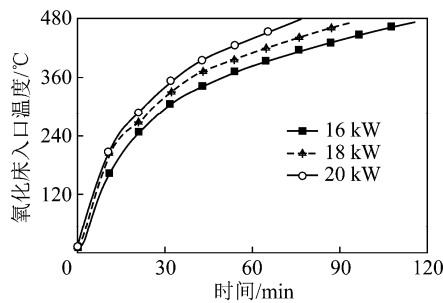


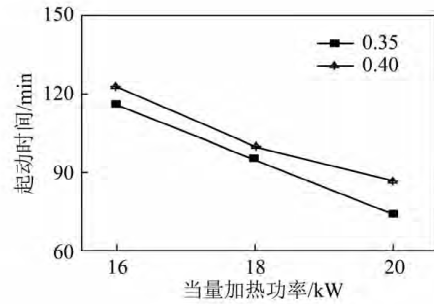
图 3 当量加热功率变化对氧化床入口温度的影响

Fig. 3 Variations of temperature rise profile at various equivalent heating powers

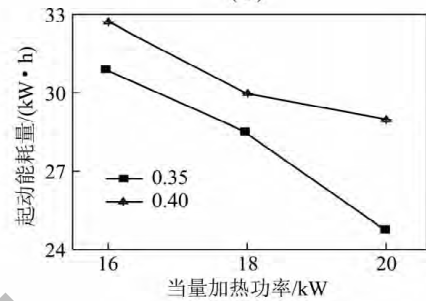
图 4 为当量加热功率变化对启动时间、启动能耗量的影响曲线, 由图可知: 随着当量加热功率增加, 启动时间和启动能耗量均减少。当流量比例系数为 0.35、当量加热功率为 20 kW 时, 启动时间为 74 min, 启动能耗量为 24.7 kW · h, 较当量加热功率为 16 kW 时的启动时间减少了 36.2%, 启动能耗量减少了 20.1%。由此可见, 当量加热功率的适度增加可以有效地减少启动时间和启动能耗量。基于启动迅速且耗能少的原则, 当量加热功率为 18 ~ 20 kW 时, 装置的启动性能较好, 同时在该范围内, 氧化床入口温度的平均增加速率仅为 4.75 ~ 6.41 °C/min, 说明对催化剂陶瓷的热冲击也较小, 因此最佳当量加热功率为 18 ~ 20 kW。

### 2.2 流量比例系数的影响

图 5 为不同流量比例系数时氧化床入口温度的升温变化曲线( 当量加热功率为 20 kW), 由图可知: 在启动初期, 不同流量比例系数下氧化床入口温度的增加速率均较快, 升温曲线较陡, 各升温曲线差异较小; 随着加热时间的延长, 温度增加速率均下降, 升温曲线逐渐变平缓。流量比例系数越大, 增加速率下降



(a)



(b)

图 4 当量加热功率变化对启动时间和启动能耗量的影响  
Fig. 4 Variations of starting time consumption and starting power consumption at various equivalent heating powers

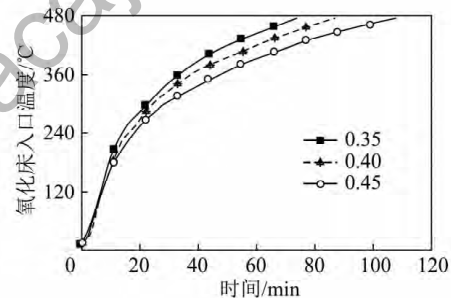


图 5 流量比例系数变化对氧化床入口温度的影响

Fig. 5 Variations of temperature rise profile at various flow proportionality coefficients

越快, 升温曲线变平缓的趋势越显著。

图 6 为流量比例系数变化对启动时间、启动能耗量的影响曲线, 由图可知: 随着流量比例系数增加, 启动时间和启动能耗量均明显增加。当量加热功率为 20 kW 时, 当流量比例系数由 0.35 增加至 0.45, 启动时间和启动能耗量增加了 45.9%; 而当量加热功率为 18 kW 时, 启动时间和启动能耗量则增加了 66.3%。当流量比例系数为 0.35 ~ 0.40 时, 启动时间、启动能耗量和氧化床入口温度的平均增加速率均较小, 此范围为最佳流量比例系数。

### 2.3 进气甲烷体积分数的影响

图 7 为进气甲烷浓度变化对氧化床入口温度和启动时间的影响曲线( 当量加热功率为 20 kW, 流量比例系数 0.35), 由图可知: 在整个启动过程中, 进气甲烷体积分数变化对升温曲线的影响不大, 仅在启动

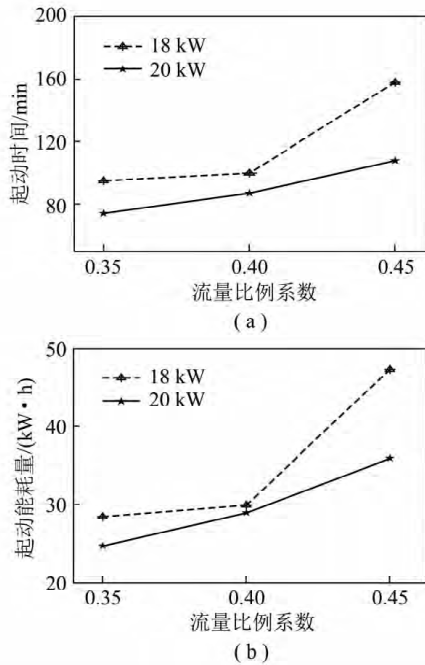


图6 流量比例系数变化对起动时间和起动能耗量的影响

Fig. 6 Variations of starting time and starting power consumption at various flow proportionality coefficients

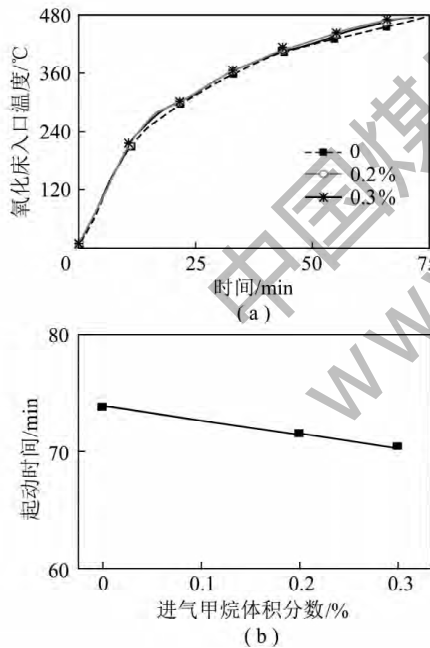


图7 进气甲烷浓度变化对氧化床入口温度和起动时间的影响

Fig. 7 Variations of temperature rise profile and starting time consumption at various methane concentrations

末期产生微小的分离现象,当进气甲烷体积分数由0增加到0.3%时,起动时间仅减少4.4%。这是因为由于甲烷体积分数非常低,同时仅有微少量的甲烷因为碰撞等原因在经过电加热丝时发生氧化放热,因此进气甲烷体积分数对起动性能的影响较小。

### 3 结 论

(1) 在起动初期,不同当量加热功率下各升温曲线差异较小,随着加热时间的增加,升温曲线逐渐变平缓,当量加热功率越大,升温曲线变平缓的趋势越慢。随着当量加热功率的增加,起动时间和起动能耗量均减少。

(2) 起动前期,流量比例系数变化对升温曲线的影响较小,起动中后期,流量比例系数越大,升温曲线变平缓的趋势越显著,随着流量比例系数的增加,起动时间和起动能耗量均明显增加。

(3) 在整个起动过程中,进气甲烷体积分数变化对升温曲线的影响不大,随着进气甲烷体积分数的增加,起动时间仅略微降低。

(4) 当流量比例系数为0.35~0.40、当量加热功率为18~20 kW时,起动时间、起动能耗量和氧化床入口温度的平均增加速率均较小,起动性能较好。

### 参考文献:

- [1] Ozgen Karacan C, Felicia A Ruiz. Coal mine methane: A review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction [J]. International Journal of Coal Geology 2011, 86: 121-156.
- [2] Karakurt I, Aydin G, Aydinler K. Mine ventilation air methane as a sustainable energy source [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011, 15(2): 1042-1049.
- [3] 桑逢云, 赵国泉. 通风瓦斯利用技术比较与设备选择 [J]. 中国煤层气 2010, 7(2): 44-46.  
Sang Fengyun, Zhao Guoquan. Comparison of VAM utilization technology and equipments selection [J]. China Coalbed Methane 2010, 7(2): 44-46.
- [4] 杨仲卿, 张力, 唐强. 超低浓度煤层气能源化利用技术研究进展 [J]. 天然气工业 2010, 30(2): 115-118.  
Yang Zhongqing, Zhang Li, Tang Qiang. Research progress in the utilization of ventilation air methane as an energy source [J]. Natural Gas Industry 2010, 30(2): 115-118.
- [5] Liu Jianzhong. The control of coal mine gas and coordinated exploitation of coal bed methane [J]. Journal of Coal Science & Engineering (China) 2009, 15(3): 267-272.
- [6] Luo Daocheng, Liu Junfeng. Experimental study of enhancing coal-bed methane recovery by carbon dioxide injection driving methane [J]. Journal of Coal Science & Engineering (China) 2010, 16(4): 356-371.
- [7] 刘伟, 钱高峰. 高突矿井瓦斯网状抽采与利用技术 [J]. 煤炭科学技术 2011, 39(9): 63-66.  
Liu Wei, Qian Gaofeng. Gas net drainage and utilization technology of high outburst mine [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(9): 63-66.
- [8] 郑斌, 刘永启, 刘瑞祥, 等. 煤矿乏风的蓄热逆流氧化 [J]. 煤炭学报 2009, 34(11): 1475-1478.

- Zheng Bin, Liu Yongqi, Liu Ruixiang, et al. Oxidation of coalmine ventilation air methane in thermal reverse-flow reactor [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(11): 1475-1478.
- [9] 刘永启, 张振兴, 高振强, 等. 乏风瓦斯蓄热氧化床阻力特性的数值模拟 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 946-950.  
Liu Yongqi, Zhang Zhenxing, Gao Zhenqiang, et al. Numerical simulation on resistance of the regenerative oxidation bed for ventilation air methane [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 946-950.
- [10] 刘永启, 陈香春, 高振强, 等. 抽放瓦斯与乏风混合器的性能研究 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1145-1149.  
Liu Yongqi, Chen Xiangchun, Gao Zhenqiang, et al. Studying on performance of the mixer for drained coalmine methane and ventilation air methane [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1145-1149.
- [11] 毛明明, 刘永启, 高振强, 等. 热逆流反应器的流动均匀性实验研究 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(8): 1349-1353.  
Mao Mingming, Liu Yongqi, Gao Zhenqiang, et al. Experimental investigation of flow uniformity in a thermal reverse-flow reactor [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8): 1349-1353.
- [12] 刘永启, 刘瑞祥, 高振强. 矿井乏风氧化装置 [P]. 中国专利: CN 201292859, 2009-08-19.  
Liu Yongqi, Liu Ruixiang, Gao Zhenqiang. Mine VAM gas oxidation device [P]. China Patent: CN201292859, 2009-08-19.
- [13] 刘永启, 刘瑞祥, 高振强. 矿井乏风瓦斯热氧化装置 [P]. 中国专利: CN101464062, 2009-06-24.  
Liu Yongqi, Liu Ruixiang, Gao Zhenqiang. Mine VAM gas thermal oxidation device [P]. China Patent: CN101464062, 2009-06-24.
- [14] Krzysztof Gosiewski, Anna Pawlaczyk. A study on thermal combustion of lean methane-air mixtures: simplified reaction mechanism and kinetic equations [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 154: 9-16.
- [15] Xie Maozhao, Shi Junrui, Deng Yangbo, et al. Experimental and numerical investigation on performance of a porous medium burner with reciprocating flow [J]. Fuel, 2009, 88: 206-213.
- [16] Song Zhengchang, Lin Boquan. Numerical simulation of excess-enthalpy combustion flame propagation of coal mine methane in ceramic foam [J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(2): 248-253.
- [17] 孙继平. 基于物联网的煤矿瓦斯爆炸事故防范措施及典型事故分析 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1172-1176.  
Sun Jiping. The accident prevention measure and analysis based on internet of things in the gas explosion of coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1172-1176.
- [18] 陈先锋, 陈明, 张庆明, 等. 瓦斯爆炸火焰精细结构及动力学特性的实验 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 246-249.  
Chen Xianfeng, Chen Ming, Zhang Qingming, et al. Experimental investigation of gas explosion microstructure and dynamic characteristics in a semi-vented pipe [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 246-249.
- [19] 邓明, 张国枢, 陈清华. 基于瓦斯涌出时间序列的煤与瓦斯突出预报 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 260-263.  
Deng Ming, Zhang Guoshu, Chen Qinghua. Forecast of coal and gas outburst based on time series of gas concentration [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 260-263.
- [20] Juan Yin, Shi Su. Thermodynamic characteristics of a low concentration methane catalytic combustion gas turbine [J]. Applied Energy, 2010, 86(6): 2102-2108.
- [21] Shi Su, Jenny Agnew. Catalytic combustion of coal mine ventilation air methane [J]. Fuel, 2006, 85(9): 1201-1210.
- [22] 蒲舸, 李文俊, 闫云飞. 超低浓度甲烷气体催化燃烧数值模拟 [J]. 重庆大学学报, 2010, 33(4): 60-64.  
Pu Ge, Li Wenjun, Yan Yunfei. Numerical simulation of catalytic combustion of extremely low concentration  $\text{CH}_4$  [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(4): 60-64.
- [23] 刘永启, 刘瑞祥, 王延遐. 煤矿乏风预热催化氧化器 [P]. 中国专利: CN102218286 A, 2011-08-19.  
Liu Yongqi, Liu Ruixiang, Wang Yanxia. Mine VAM gas preheating catalytic monolithic reactor [P]. China Patent: CN102218286 A, 2011-08-19.