

煤矿乏风蓄热氧化发电技术及应用研究

栗鲁平

(山西潞安矿业集团有限责任公司 瓦斯研究院,山西 长治 046299)

摘 要:利用热逆流氧化反应器,基于热逆流氧化原理与乏风蓄热氧化发电原理,结合瓦斯氧化燃烧与爆炸机理,研究了煤矿乏风瓦斯蓄热氧化发电技术,并对现场应用进行了分析。研究结果表明:低浓度甲烷在蓄热氧化过程中,蓄热体产生周期性的吸热与放热,实现了周期性的、稳定的循环实验,实现了热风量的并联提取和精确调节,提高了甲烷的氧化效率,满足了乏风蓄热氧化发电核心设备的要求。

关键词:煤矿乏风;蓄热氧化;甲烷;周期性

中图分类号:TD71

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Ventilation Air Methane Thermal Storage Oxidation and Power Generation Technology and Application in Coal Mine

LI Luping

(Gas Research Institute, Shanxi Lu'an Group Co., Ltd., Changzhi 046299, China)

Abstract: Based on the principle of thermal reversal oxidation and the principle of ventilation air methane (VAM) thermal storage oxidation and power generation, as well as the mechanism of gas oxidation combustion and explosion, the thermal reversal oxidation reactor was used to study the VAM thermal storage oxidation power generation technology, and the field application was also analyzed. The results showed that, during the thermal storage oxidation of low concentrated methane, the regenerator produced periodic endothermic and exothermic reaction to realize the periodic and stable cycle experiments, to achieve the parallel extraction and precise adjustment of hot air volume, to increase the oxidation efficiency of methane, to meet the requirements of the core equipment of the VAM thermal storage power generation.

Key words: ventilation air methane in coal mine; thermal storage oxidation; methane; periodicity

煤矿乏风是指为了保证井工煤矿安全生产,在开采煤炭之前通过矿井通风的方式将矿井瓦斯浓度降低并排到大气中的混合气体,一般情况下,排到大气中的甲烷含量为 1% 左右^[1-2]。2018 年,我国煤炭总产量为 35 亿 t,经估算,共向大气中排放瓦斯约 270 亿 m³,约 1 600 万 t(瓦斯密度按 0.718 kg/m³ 计算),相当于排放二氧化碳当量 3.7 亿 t。由于煤矿乏风中有效成分甲烷浓度很低、富集较难^[3-4],经

常被直接排放到大气中,这样,不仅造成了资源的极度浪费,而且带来了环境污染^[5-7]。可见,煤矿乏风的有效利用对于加快建设资源节约型、环境友好型社会具有重大意义^[8]。

本文主要利用热逆流氧化反应器,基于热逆流氧化原理,结合瓦斯氧化燃烧及爆炸机理,通过瓦斯蓄热氧化实验和现场应用,实现了热风量的并联提取及精确调节,提高了甲烷的氧化效率,为煤矿乏风

* 收稿日期:2019-07-28

作者简介:栗鲁平(1979—),男,山西沁县人,大学本科,工程师,从事瓦斯灾害防治与利用工作。

蓄热氧化发电技术提供了一定的理论及应用研究基础。

1 煤矿乏风蓄热氧化原理

1.1 热逆流氧化反应器原理

乏风热氧化技术主要是通过热逆流氧化反应器来实现的,热逆流氧化反应器由反应器床层、换向阀和电加热装置等组成,其中,反应器床层两端装有桂土材料或陶瓷类的蓄热介质,中部设有燃烧室、换热器等热交换装置,其运行原理见图1^[9]。

由图1可以看出,热逆流氧化反应运行过程为:利用电加热器或高温烟气将反应器装置内部的温度升高,直至达到乏风的自燃点1000℃以上,打开阀a与阀d,煤矿乏风即按图1中实线路径经反应器发生氧化反应并释放出热量,其中一部分用来加热下段的蓄热陶瓷并通过中部的换热器抽取多余的热量,经热交换后的低温烟气由阀d排出;之后,关闭阀a与阀d,打开阀b与阀c,煤矿乏风即按图1中虚线路径流动,下段的蓄热陶瓷积蓄的大量热量将煤矿乏风加热至1000℃,反应器内发生二次氧化反应并释放出热量,反应释放的热量积蓄于上段蓄热陶瓷后,低温烟气则由阀c排出,此时,一个反应周期结束^[10-11],如此不断重复即可完成反应过程。

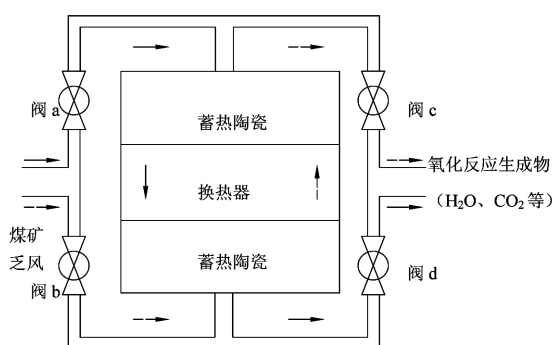


图1 热逆流氧化反应器原理示意图

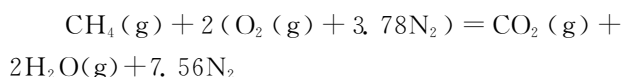
Fig.1 Thermal reversal oxidation principle

1.2 乏风蓄热氧化发电原理

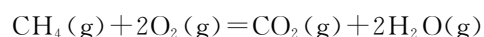
煤矿乏风蓄热氧化发电最关键的就是高温蓄热式氧化装置,其原理为:通过高温蓄热式氧化装置把煤矿乏风导入反应腔,使煤矿乏风瞬间氧化为水和二氧化碳,并释放出大量氧化热。其中,大部分热量被导入换热器或余热锅炉,用于生产饱和或过热蒸汽供矿井用热或热电联供;一小部分则用于维持设备的反应。一般情况下,当煤矿乏风中的甲烷浓度达到0.25%时,氧化装置所释放出的热量就可以维持其自身的氧化反应;当达到0.8%时,则可提供过热蒸汽来用于拖动蒸汽机组发电。

1.3 瓦斯氧化燃烧/爆炸机理

当甲烷在空气中完全燃烧时,其充分反应的体积当量为:



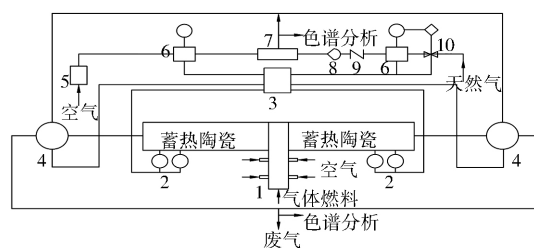
常温常压下,当甲烷在空气中的混合气体浓度为5%~15%,并遇火源达到自燃温度时,甲烷就会在空气中发生剧烈的氧化反应并产生大量的热量,当产生的热量无法释放出去时,反应体系温度就会迅速上升,分子动能增加,致使有效碰撞次数增加,进而产生更多的热量^[12],如果在短暂的时间内无法得到有效控制时就会发生爆炸,其反应化学方程式为:



2 煤矿乏风蓄热氧化实验

2.1 煤矿乏风蓄热氧化实验装置

煤矿乏风蓄热氧化实验主要采用如图2所示的通风瓦斯蓄热氧化实验装置进行,该实验装置主要由装置本体、配气系统、启动燃烧器与测控系统等组成。其中,装置本体为2700mm×600mm×500mm的长方体,两侧各布置一组蓄热陶瓷,中部设空腔,外壁采用保温材料进行保温处理;配气系统采用民用天然气与空气的混合物模拟不同浓度下低浓度甲烷的混合气体,并用气相色谱分析仪对混合气体的甲烷浓度进行测量;启动燃烧器用来为装置进行预热启动;测控系统主要用来对设备进行流量与压力等数据的测量及对装置进行控制。



1-燃烧器;2-热偶;3-PLC;
4-换向阀;5-过滤器;6-流量计;7-混合器;
8-单向阀;9-止回阀;10-电磁阀

图2 通风瓦斯蓄热氧化装置

Fig.2 Ventilation air methane thermal storage oxidation equipment

2.2 煤矿乏风蓄热氧化实验结果

根据煤矿乏风蓄热氧化原理与实验设计,实验对甲烷体积浓度为0.6%、气流速度为1.18m/s、切换周期为60s进行了模拟,图3为蓄热氧化装置启动与稳定状态下的轴向温度分布图。

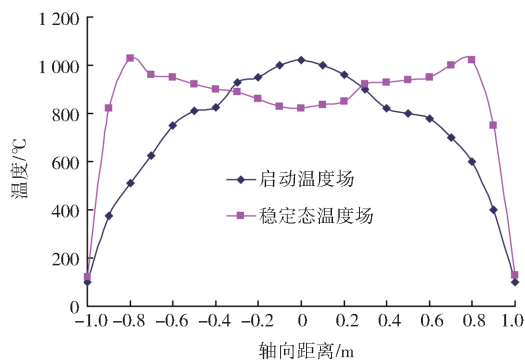


图 3 启动与稳定状态下轴向温度分布图

Fig. 3 Axial temperature distribution in startup and steady state

分析图 3 可以看出,低浓度甲烷在实验过程中完全反应并向蓄热体放热,气流与蓄热体之间实现了热量传递的平衡,在实验装置内形成梯形轴向温度分布。实验装置内存在着明显的散热现象,并于轴向中部形成温度峰值,之后两侧开始出现温度降低的现象,并且其温度场在两侧基本呈对称状,造成轴向中部出现一个马鞍型的温度降低凹槽。

同时,以 60 s 作为一个实验周期,每隔 10 s 对数据进行一次记录,图 4 为一个实验周期内不同时刻温度曲线图。

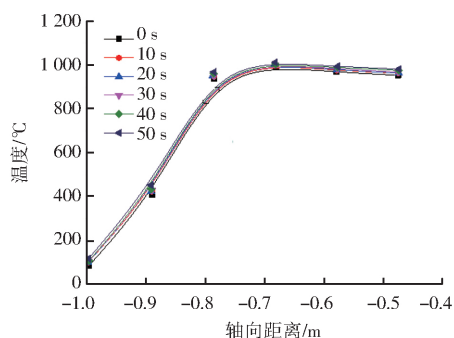


图 4 一个周期内温度分布曲线图

Fig. 4 Temperature distribution curves in one cycle

由图 4 可以看出,从开始到 10 s 期间,已经氧化的高温烟气向蓄热体放热,进而导致装置内部温度持续升高;从 10 s 到 30 s 期间,温度继续升高,但其速度比前 10 s 有稍微变缓的趋势,至 30 s 时刻达到该实验周期的最高温度值;从 30 s 到 60 s 期间,温度开始逐渐下降,并在 60 s 时刻出现与 0 s 时刻重合的现象。由此可见,实验装置中温度场在经过一个完整的实验周期后实现了自我的重复,并可周而复始地进行循环实验过程。

实验过程中,同时对装置中测点进行了 10 min 的温度数据采集,得到实验过程中测点的温度变化如图 5 所示。

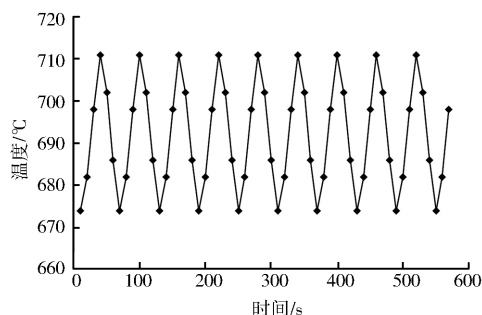


图 5 测点温度变化规律图

Fig. 5 Temperature change law of measuring points

由图 5 可以看出,实验过程中的温度测点反映了实验装置中 10 min 内的温度变化特征,温度值伴随着波峰波谷的出现呈周期性的规律变化,说明了实验过程中蓄热体产生了周期性的吸热与放热,实现了周期性的重复,证明该实验装置已进入了稳定的循环实验状态。

3 现场应用

为了测试煤矿乏风瓦斯蓄热氧化发电技术性能,本次研究选择在煤矿乏风瓦斯和抽采瓦斯量大、气源比较稳定可靠的潞安集团高河煤矿对该技术进行现场应用测试,试验采用由美国杜尔系统有限公司生产的蓄热氧化装置,该试验装置主要技术参数如下:

- 1) 单台处理煤矿乏风量: $9 \times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{h}$;
- 2) 允许乏风甲烷浓度: 0.27% ~ 1.20%;
- 3) 出口热风温度: 954°C;
- 4) 启动总耗电: 564 kW(max);
- 5) 运行总电耗: 260 kW。

现场试验共采用了 12 台同能力的蓄热氧化装置,处理乏风总能力为 $1.08 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$,当装置满负荷运行时,每年可摧毁甲烷 $1.08 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

在煤矿乏风甲烷浓度为 1.2% 的条件下,蒸汽压力为 9.8 MPa、蒸汽温度为 540 °C、锅炉效率为 0.9 时,通过试验测试,可用热量随甲烷浓度的降低而缓慢减小,甲烷浓度由 1.2% 降低到 0.5% 的过程中,产生的蒸汽量随甲烷浓度降低呈线性减小的关系。

在氧化装置热风参数保持稳定的条件下,预计小时处理乏风量 $1.08 \times 10^6 \text{ m}^3$,年处理乏风达 $9.4 \times 10^9 \text{ m}^3$,年发电量可达 $2.4 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,当实现年供电量 $2.4 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 时,每年可减少温室气体排放 $1.40 \times 10^6 \text{ t}$ 二氧化碳当量,相当于节约标煤 $8.08 \times 10^4 \text{ t}$ 。

针对高河煤矿乏风瓦斯蓄热氧化发电技术的应用,实现了热风量的并联提取和精确调节,提高了甲烷的氧化效率,满足了乏风蓄热氧化发电核心设备的要求。

4 结论

1)通过理论分析研究建立了热逆流氧化反应模型,分析了瓦斯燃烧及爆炸机理,实现了煤矿乏风瓦

斯周期性的蓄热氧化。

2)通过煤矿乏风蓄热氧化实验,得出低浓度甲烷在蓄热氧化过程中,蓄热体产生了周期性的吸热与放热,实现了周期性的、稳定的循环实验。

3)通过对高河煤矿乏风瓦斯蓄热氧化发电技术的应用研究,实现了热风量的并联提取和精确调节,提高了甲烷的氧化效率,并满足了乏风蓄热氧化发电核心设备的要求。

参考文献:

- [1] 许慧娟,李杰. 煤矿乏风瓦斯收集技术试验研究[J]. 中州煤炭,2015(8):8-10.
XU Huijuan,LI Jie. Experimental Study on Technology of Ventilation Air Methane Collection [J]. Zhongzhou Coal,2015(8):8-10.
- [2] 张玉明. 低浓度瓦斯掺混技术在乏风氧化中的应用[J]. 矿业安全与环保,2015,42(4):40-43.
ZHANG Yuming. Application of Low-concentration Gas Mixing Technology in Mine Ventilation Air Methane Oxidation [J]. Mining Safety & Environmental Protection,2015,42(4):40-43.
- [3] 刘永后,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 Coal Mine Methane and Ventilation Air Methane [J]. Journal of China Coal Society,2011,36(7):1145-1149.
- [4] 解安昌,李传兵. 风排瓦斯回收利用发电系统设计[J]. 工程建设与设计,2015(7):94-96.
XIE Anchang,LI Chuanbing. Design on the Ventilation Shaft Exhaust Gas Recycling Power System [J]. Construction & Design for Project,2015(7):94-96.
- [5] 马晓钟. 大佛寺煤矿瓦斯氧化工程应用安全措施[J]. 矿业安全与环保,2013,40(2):39-42.
MA Xiaozhong. Safety Measures for Gas Oxidation Engineering Application in Dafosi Coal Mine [J]. Mining Safety & Environmental Protection,2013,40(2):39-42.
- [6] 李冬梅,任伟娜,李圣强,等. 立式乏风氧化装置的开发与应用[J]. 能源与节能,2013(10):5-6.
LI Dongmei,REN Weina,LI Shengqiang,*et al.* Development and Application of Vertical VAM Oxidation Device [J]. Energy And Energy Conservation,2013(10):5-6.
- [7] 贫利民. 煤矿乏风及低浓度瓦斯氧化发电技术探讨[J]. 中国煤层气,2015,12(2):41-44.
YUN Limin. Discussion on Power Generation Technology for VAM and Low-concentration CMM[J]. China Coalbed Methane,2015,12(2):41-44.
- [8] 郑志,石清树,王树立. 天然气压力能回收装置热力学分析[J]. 节能技术,2009,27(5):396-400.
ZHENG Zhi,SHI Qingshu,WANG Shuli. Thermodynamic Analysis on Pressure Energy Recovery Equipments of Natural Gas [J]. Energy Conservation Technology,2009,27(5):396-400.
- [9] 高娟. 煤矿乏风催化氧化技术的数值模拟研究[D]. 北京:北京化工大学,2014.
- [10] 李强,龙伍见,霍春秀. 矿井乏风瓦斯氧化发电技术研究进展[J]. 矿业安全与环保,2012,39(4):81-84.
LI Qiang,LONG Wujian,HUO Chunxiu. Research Progress in Coal Mine Gas Oxidation Power Generation Technology [J]. Mining Safety and Environmental Protection,2012,39(4):81-84.
- [11] 郑斌,刘永后,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 Coal Mine Ventilation Air Methane in Thermal Reverse-flow Reactor [J]. Journal of China Coal Society,2009,34(11):1475-1478.
- [12] 万晓辉. 高锰酸钾氧化氟喹诺酮类抗生素的动力学和反应历程研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

(编辑:樊 敏)