

# 矿井回风流瓦斯富集回收原理及其试验研究

邹德蕴 程卫民 刘义磊 刘志刚

(山东科技大学 矿山灾害预防控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266510)

**摘 要:**针对低浓度 CH<sub>4</sub> 氧化发电技术(只能利用 3% ~ 4% 的 CH<sub>4</sub>) 存在效益低的相关技术问题, 在调查分析的基础上总结了我国矿井回风流中 CH<sub>4</sub> 浓度普遍较低(0.05% ~ 0.50%) 的情况及回收利用的现实意义。基于 CH<sub>4</sub> 分子的固有物理性和羽浮性, 分析总结了静止空气中 CH<sub>4</sub> 分子做浮积运动的基本条件。结合实验结果和结论, 提出了对矿井回风流中的 CH<sub>4</sub> 进行富集回收的技术思路, 在详尽分析了矿井通风机回风口扩散装置中风流能量转换与守恒定律的时空位置关系基础上, 提出构建从矿井总回风中分离富集 CH<sub>4</sub> 的技术思想及回收装置。

**关键词:**矿井回风流; 富集回收; 超低浓度瓦斯; 浮积运动

中图分类号:TD712.67 文献标志码:A

## Research on the principle and experiment of recovering enrichment gas from return air in mine

ZOU De-yun, CHENG Wei-min, LIU Yi-lei, LIU Zhi-gang

(Ministry of Education's Key Lab of Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

**Abstract:** According to the relevant technical issues of low benefit from using low density CH<sub>4</sub> oxidation to generate electricity(only use 3% ~ 4% of CH<sub>4</sub>) based on the investigation and analysis, this paper summarized the situation of China CH<sub>4</sub> in return air was generally in low concentration(0.05% ~ 0.50%). Based on the inherent physical property and floatability of CH<sub>4</sub> molecular, it analyzed and summarized general conditions for the buoyancy and gathered motion of CH<sub>4</sub> molecular. With the experimental results and conclusions, the paper put forward the technology ideas and recovery equipment of separating gas was constructed from main return air based on the detailed analysis of the space-time relationship between energy transformation and conservation law in the mine ventilator diffusion system.

**Key words:** mine return air; enrichment and recovery; extreme low concentration gas; buoyancy and gathered motion

CH<sub>4</sub> 既可作为清洁能源利用, 同时又是一种温室气体, 它在大气中的温室效应强度是等量 CO<sub>2</sub> 的 21 倍, 且严重消耗大气平流层中的臭氧<sup>[1]</sup>。CH<sub>4</sub> 排放引起的气候异常以及对臭氧层的破坏作用, 已经成为全世界共同面临的重大问题。通过调查与统计分析不难得知, 每年来自煤炭开采而释放至大气层中的 CH<sub>4</sub> 数目惊人, 矿井回风系统日复一日、年复一年排放的 CH<sub>4</sub> 总量是最大的工业 CH<sub>4</sub> 排放源, 全球瓦斯排放的 70% 来自煤矿回风流<sup>[2]</sup>(中国为 90%<sup>[3]</sup>)。表 1 仅为调研统计的几个 CH<sub>4</sub> 源地矿井总排放情况, 可看出矿井回风中排放 CH<sub>4</sub> 虽体积浓度较低或极低, 但总量不可忽视。

表 1 矿井回风瓦斯调查情况

Table 1 Surveys of mine return air

矿 井	年产量/ 万 t	总回风量/ (m <sup>3</sup> · min <sup>-1</sup> )	回风 CH <sub>4</sub> 浓度/%	按回风 CH <sub>4</sub> 浓度计算的年 排放量/万 m <sup>3</sup>
济三矿	607	20 300	0.05	533.48
朝川一矿	45	3 700	0.06	116.68
朝川二矿	56	5 700	0.05	149.80
平煤四矿	300	19 800	0.13	1 352.89

近年来, 随着环境恶化问题的日益严重, 解决和治理矿井排放的低浓度瓦斯已经成为我国乃至全世界

界的紧迫任务。因此急需建立完善的低浓度瓦斯富集回收理论与工程技术, 研发出符合生产实际需要的有针对性的矿井回风流瓦斯富集回收装备。

## 1 矿井 CH<sub>4</sub> 利用方式及存在的问题

### 1.1 矿井 CH<sub>4</sub> 利用现状

矿井 CH<sub>4</sub> 利用技术受多种关联技术发展的制约, 单就其原产地条件就难以保证形成规模化的投资模式与投资效益, 不易大力发展。CH<sub>4</sub> 的传统利用方式<sup>[4]</sup>是按照 CH<sub>4</sub> 浓度的不同进行加工利用(表 2), 低浓度 CH<sub>4</sub> 的利用受采用的技术路线方法的制约, 及其应用工程造价高、经济效益低, 实现起来困难等关键技术的影响, 目前尚未或达不到完全工程化。

表 2 不同浓度范围甲烷处理及利用现状

Table 2 Treatment and effective use of various concentrations of methane

CH <sub>4</sub> 浓度	技术	工程适用性和存在问题
80% 以上	除杂质直接利用	对抽采 CH <sub>4</sub> 浓度要求较高, 适用范围有限
30% ~ 80%	高浓度瓦斯发电机组发电	对抽采 CH <sub>4</sub> 浓度有要求, 浓度不稳定导致系统可靠性低
4% ~ 30%	低浓度瓦斯发电技术	CH <sub>4</sub> 利用率低
4% 以下	氧化利用	环保意义大, 工程价值低

从表 2 可以看出, 较高浓度的 CH<sub>4</sub> 利用价值较高且工艺简单, 而较低浓度的 CH<sub>4</sub> 则利用困难且效率非常低, 工程应用达不到连续性。目前我国对高浓度瓦斯的抽采利用技术已处世界前列, 然而却忽视了(或滞后)大量低浓度瓦斯利用技术的研究, 使其应用工程现状不尽人意, 它所带来的环境问题和资源浪费是非常严重的。

低浓度 CH<sub>4</sub> 燃烧氧化技术是近几年出现的一项代表性新技术, 尤其是浓度为 1% ~ 4% 的 CH<sub>4</sub> 氧化技术。1994 年英国首先把瓦斯燃烧发电技术应用到处理矿井乏风 CH<sub>4</sub>, 收到了良好的效果<sup>[5]</sup>。中国的 CH<sub>4</sub> 燃烧氧化利用技术以山东胜动集团的 CH<sub>4</sub> 氧化技术装备为代表, 氧化能力达到 60 000 m<sup>3</sup>/h<sup>[6]</sup>。新汶矿业集团赵官煤矿应用此技术装备对浓度低达 4% 的 CH<sub>4</sub> 进行发电, 达到了初步设计要求。然而利用该技术原理建造的装置存在两个方面的问题: 首先是当通风系统排放的瓦斯浓度过低时(低于 3%), 氧化效率极低, 甚至出现氧化反应间歇性问题, 这时只有减排功效而达不到利用节能的效果, 需要连续的电

能加热, 甚至无法正常工作; 其次就是通风系统排放的瓦斯浓度不稳定性带来的问题, 如发热量不稳定等, 给后续利用带来难题<sup>[7]</sup>。简而言之, 氧化装置对 CH<sub>4</sub> 浓度范围是有限定要求的, 否则无法正常工作。

### 1.2 CH<sub>4</sub> 分离技术研究现状

早在 20 世纪 70 年代就有人提出对矿井回风流中 CH<sub>4</sub> 分离收集的想法, 但是未引起足够的重视。1979 年抚顺煤炭研究所王佑安、吴志雄<sup>[8]</sup>曾利用一个容积为 10 L 的储气瓶进行 CH<sub>4</sub> 浮升分离试验研究。通过插入距瓶底不同深度的 5 根玻璃管取气样, 以测定和分析不同深度 CH<sub>4</sub> 浓度分布情况, 当时的试验结果是静止状态下瓶中不同深度处的 CH<sub>4</sub> 浓度是均匀分布, 没有出现期待中的 CH<sub>4</sub> 积聚层, 从而得出无法利用自然分离的方法来分离空气中 CH<sub>4</sub> 分子的结论, 进而得出无法从矿井风流中回收 CH<sub>4</sub> 的学说。笔者分析认为是当时的实验条件导致实验结果不够理想, 储气瓶中 CH<sub>4</sub> 分子处于孤立系统中, 气体分子运动均受到约束。气体分子只能做布朗运动<sup>[9]</sup>, 不能按其固有物理属性做浮升积聚运动, 封闭的孤立系统致使 CH<sub>4</sub> 浮升分离试验现象不明显, 从而导致理论分析实验结果的不理想, 此次实验未能揭示和解释 CH<sub>4</sub> 自然浮升积聚这一固有的客观现象。长期以来许多科研工作者通过多种手段研究说明矿井顶板 CH<sub>4</sub> 超限现象, 如梁栋等<sup>[10]</sup>提出密度变化引起的体积力作用于空气上, 从而出现因密度差产生对流运动即煤壁 CH<sub>4</sub> 自然上浮积聚运动来说明顶板 CH<sub>4</sub> 层的形成; 傅培舫等<sup>[11]</sup>在采集大量全真模拟实验数据的基础上, 提出了瓦斯逆流聚集层的概念等等, 说明顶板 CH<sub>4</sub> 超限的现象。这些理论和学说都注重采场煤壁 CH<sub>4</sub> 涌出条件下的 CH<sub>4</sub> 扩散和浮升积聚现象。目前大多研究成果尚未能深入对其进行研究, 将 CH<sub>4</sub> 浮升积聚运动推广和总结为一种普遍的客观规律, 并应用于矿井低浓度 CH<sub>4</sub> 富集回收技术的研究。

矿井回风气流中 CH<sub>4</sub> 体积含量普遍较低, 多为超低浓度, 见表 1。因此存在直接燃烧氧化热值极低、输送困难等技术问题。追寻一种实用有效的低浓度 CH<sub>4</sub> 回收利用技术成为需要迫切解决的问题。

## 2 矿井回风流 CH<sub>4</sub> 富集回收原理

### 2.1 CH<sub>4</sub> 分子的浮积运动

由文献[11]在重力场大气压下, 取 CH<sub>4</sub> 与空气混合气体注入如图 1 所示具有足够高度的非孤立系统中。在非孤立系统中, CH<sub>4</sub> 在空气中充分依其固有物理属性做浮升积聚运动, 在经历一定高度  $z$  和时间

$t$  的时空过程后, 形成  $\text{CH}_4$  分子富集层。 $\text{CH}_4$  分子的这种自由扩散运动的结果使混合气体永不能达到均匀状态。综合分子扩散理论及  $\text{CH}_4$  和空气物理性能参数的固有差异性的理论学习研究, 揭示和推知  $\text{CH}_4$  分子在非孤立系统中具有永远做浮升积聚运动的物理属性, 简称浮积运动属性, 除非受到热力学势的逆向干扰。

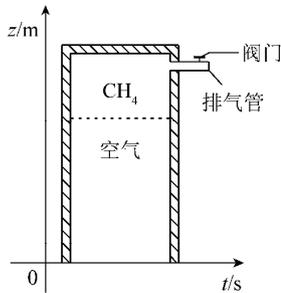


图 1 重力场大气压下  $\text{CH}_4$  在空气中的分布状态

Fig. 1 Schematic drawing of  $\text{CH}_4$  distribution in air under the gravitational field and atm

在等温条件, 结合 FICK 定律, 以及气体重力场中压力分布公式

$$p = p_0 \exp(-Gz) \quad (1)$$

得出等温条件下高度为  $z$  的重力场中  $\text{CH}_4$  浓度分布函数表达式为

$$C_m = C_0 \exp(Gz) \quad (2)$$

式中,  $C_0$  为  $z=0$  时的  $\text{CH}_4$  浓度, %;  $G$  为气体分子重力,  $G = mg/(kT)$ ;  $p_0$  为  $z=0$  时的大气压, Pa;  $m$  为气体的平均分子量, kg/mol;  $k$  为 boltzman 常数,  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K;  $T$  为绝对温度, K。

式(1)、(2)揭示与说明了  $\text{CH}_4$  与空气的混合气体在等温条件下, 即热力学势恒定条件下, 处于非孤立系统中的  $\text{CH}_4$  分子的分离原理。在重力场作用下  $\text{CH}_4$  分子充分做浮积运动, 充分呈现出与空气相比  $\text{CH}_4$  密度低的固有浮升积聚属性。

## 2.2 矿井回风流 $\text{CH}_4$ 富集回收原理

由  $\text{CH}_4$  气体自身的理化性质所致, 气态  $\text{CH}_4$  分子易在空间积聚形成瓦斯层<sup>[12]</sup>。在标准状态下,  $\text{CH}_4$  分子的体积密度为  $0.716 \text{ kg/m}^3$ , 相对空气(密度为  $1.293 \text{ kg/m}^3$ ) 的比重为  $d_n = 0.554$ 。此外, 瓦斯密度  $\rho$  的大小与气体压力  $P$ 、温度  $T$  的数学式为  $\rho = m/22.4 \times P/T \times P_n/T_n$ , 用  $\rho = f(P, T)$  表示三者间的变量函数关系, 然  $P$  又是  $z$  和  $T$  的函数,  $P = f(z, T)$ , 故有  $\rho = f(z, T)$ 。不难理解, 密度  $\rho$  越小, 其空间赋存状态呈现出越活泼的羽浮性, 而  $\text{CH}_4$  分子在空气中的运动受气体重力场高度  $z$  和温度  $T$  影响显著, 故此只要保持充分的气体重力场高度  $z$ , 以及温度  $T$  恒定或不受

热力势的逆向干扰即逆向效应, 维护瓦斯的物理属性, 即浮积运动属性<sup>[13]</sup>。根据流体力学伯努利方程及能量守恒定律, 以及流体异重流理论的已有研究成果综合分析, 结合现场测试资料和相关实验的研究证明: 在风机排风口处的扩散装置中, 风机给予回风流场的动压能在风流达到扩散器出口处最终几乎完全转化为静压能与位能<sup>[14]</sup>, 使得在扩散器出口  $A-A$  截面处的瓦斯气体与同标高处的大气压力值相等, 或总是存在一个与同标高大气压力值相等的水平位置  $A-A$  截面, 如图 2 所示。

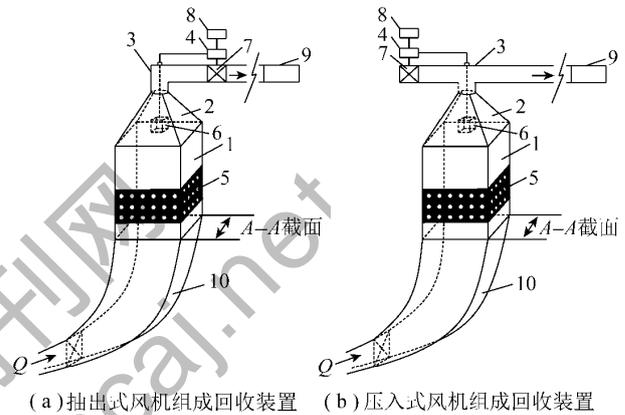


图 2 矿井回风流  $\text{CH}_4$  富集回收原理

Fig. 2 The principle of  $\text{CH}_4$  enrichment from mine return air

1—回风流稳流段; 2—分离富集段; 3—瓦斯回收段; 4—控制装置; 5—通气孔; 6—瓦斯探头; 7—风机; 8—电源; 9—应用区; 10—通风机扩散器

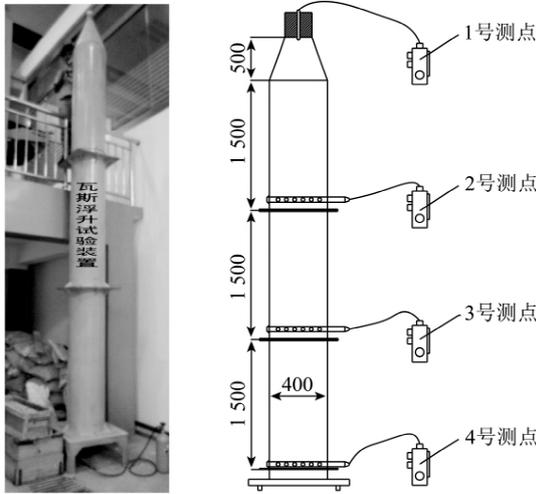
在图 2 的  $A-A$  截面上构建一个形状和尺寸都利于重力场下  $\text{CH}_4$  分子浮积运动的结构装置,  $\text{CH}_4$  气体经过  $A-A$  面的结构装置后呈蠕变浮升至稳定羽浮态势。这时  $\text{CH}_4$  分子气体在重力场内做分子自由运动——分子的羽浮扩散, 其物理属性达到充分释放状态且表现出显著的上升羽浮性,  $\text{CH}_4$  分子做以浮积运动为主流的羽浮上升积聚,  $\text{CH}_4$  分子进入横截面为喇叭口状的扩大区域, 形成上层区域为瓦斯富集层、下层为空气层的异重流, 达到分离富集瓦斯目的。通过构建在  $A-A$  截面上的回收装置进行抽取或采用压入式风机构造虹吸管原理的回收装置对富集的高浓度瓦斯进行区域化输移集中量化回收, 为后续规模化加工利用创造良好的基本条件。工程中最宜将装置建于厂房内, 并注意防止外界大气温度影响, 图 2 中通气孔 5 起到平衡装置外大气压力作用。

## 3 低浓度 $\text{CH}_4$ 富集回收实验

### 3.1 实验方法

自行设计的瓦斯分离回收管道装置如图 3 所示, 实验装置尺寸如图 3(b) 标注尺寸, 形状为圆柱形。

另备罐装纯瓦斯一瓶, AQQ—1 型光学瓦斯检定器及柔性浮胶管。



(a) CH<sub>4</sub>浮升试验装置照片 (b) CH<sub>4</sub>浮升试验装置检测方式

图 3 CH<sub>4</sub>浮升试验装置及检测方式

Fig. 3 Experimental system and detection method diagram of CH<sub>4</sub> floating

在底部通过柔性导管向试验装置内注入一定量的纯瓦斯,使得装置内瓦斯达到预定浓度,每隔一段时间,通过装置上的测量导管对装置的上部、中部、下部、底部设计的 4 个测点记录瓦斯浓度。

### 3.2 实验结果及分析

实验验证了 CH<sub>4</sub> 分子的扩散性及强力的羽浮性。在装置底部通入 CH<sub>4</sub> 气体后不足 1 min 内,只能在试验装置的底部 4 号测点测得定量的 CH<sub>4</sub> 分子存在。经过 2 min 后,各测点均检测到浓度不同的 CH<sub>4</sub> 存在,并且上部 1 号测点的 CH<sub>4</sub> 浓度要高于下部测点的 CH<sub>4</sub> 浓度。此后的 10 min CH<sub>4</sub> 分子与空气分子达到了充分的相对运动扩散,形成沿高度方向的正向 CH<sub>4</sub> 浓度梯度分布,如图 4 所示。

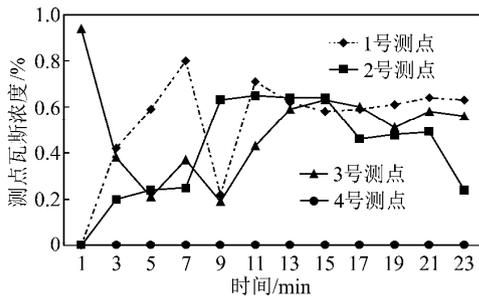


图 4 测点 CH<sub>4</sub> 气体浓度随时间变化

Fig. 4 Diagram of CH<sub>4</sub> consistency change by time on different points

在图 4 中,可看出在沿高度  $z$  方向上 CH<sub>4</sub> 浓度呈正向梯度分布,即  $dc/dz > 0$  符合  $C = C_0\varphi(z)$  函数关

系,且能得知最终 CH<sub>4</sub> 浓度逐渐趋于稳定分布,并形成 CH<sub>4</sub> 层,瓦斯分子运动速度为 2.0 ~ 2.5 m/min。

当持续从底部注入 CH<sub>4</sub> 气体 20 min 左右时,同样可观测到整个试验装置内 CH<sub>4</sub> 浓度分布基本稳定并呈现出沿高度方向正浓度梯度分布状态(表 3)。

表 3 CH<sub>4</sub> 气体稳定浓度梯度分布  
Table 3 Concentration gradient distribution after CH<sub>4</sub> stabilized

时间/ min	CH <sub>4</sub> 浓度/%			
	4 号测点	3 号测点	2 号测点	1 号测点
21	0	0.54	0.56	0.68
23	0	0.51	0.56	0.67

值得注意,在上述试验之前做过几次预试验,当试验装置底部密封时,使 CH<sub>4</sub> 气体处于近乎孤立系统中,检测结果发现底部密封条件下瓦斯浮升效果不明显。当试验装置底部被打开数个直径为 6 mm 小孔,CH<sub>4</sub> 浮升效应,即浮积运动现象极为明显。因此笔者对原有试验装置进行了改进,并在顶端增设了侧壁带有对流小孔的长方体状储气箱,储气箱尺寸为 500 mm × 200 mm × 300 mm,如图 5 所示。

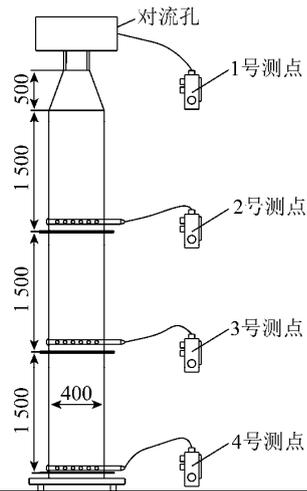


图 5 增设储气箱的 CH<sub>4</sub> 浮升试验装置

Fig. 5 Gas enrichment experimental system with added oxygen tank

利用图 5 改进后的装置再做实验,从底部注入一定量 CH<sub>4</sub> 气体 14 min 后,3、4 号测点 CH<sub>4</sub> 浓度记录为零,1、2 号测点 CH<sub>4</sub> 浓度虽有微小变化,但一直保持 1 号测点 CH<sub>4</sub> 浓度高于 2 号测点,形成稳定的 CH<sub>4</sub> 浓度梯度(CH<sub>4</sub> 层),实验结果如图 6 所示。

应用图 5 所示实验装置揭示和说明: ① 到达 1.5 ~ 2.0 m 高度时,瓦斯气体呈现浮积运动现象; ② 考虑温度的影响,给予充分的温度稳定平衡时间,风流稳流段即瓦斯浮积运动段高度取 2.0 ~ 2.5 m 预计

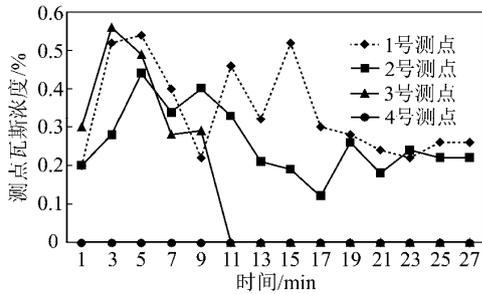


图 6 增设储气箱的实验结果

Fig. 6 Experimental results of gas enrichment system with added oxygen tank

满足要求; ③ 富集装置结构形状采用扩散喇叭口形(图 2、3), 有利于瓦斯富集和容纳储存富集量要求。本试验装置是符合客观规律的  $\text{CH}_4$  浮积回收装置, 充分达到和呈现了  $\text{CH}_4$  分子做浮积运动的自然对流的时空条件, 实现低浓度瓦斯的富集回收, 尤其是 0 ~ 1% 超低浓度范围的矿井总回风  $\text{CH}_4$  为浮积回收应用工程技术对象。

## 4 结 论

(1)  $\text{CH}_4$  分离富集技术是对矿井回风流中  $\text{CH}_4$  治理和利用的关键技术, 有效的分离富集技术可以达到“减排”和“节约”双重功效。

(2) 理论分析与试验研究表明利用  $\text{CH}_4$  分子自身羽浮性分离瓦斯气体的理念是科学合理的, 通过工程技术实现对矿井回风流  $\text{CH}_4$  富集回收是可行的, 该项技术的推广应用能够解决超低浓度瓦斯发电存在的氧化效率低的问题<sup>[15]</sup>。

(3) 通过试验模拟验证, 矿井回风流  $\text{CH}_4$  分离富集技术具有良好的工程可行性和应用前景。当然这些研究结论和实验研究途径还存在一定的局限性, 尚处初步的研究阶段, 尚有诸多理论与实验研究工作: 如结合流场分析容纳  $\text{CH}_4$  富集层的回收装置的形状、尺寸以及温度对回收效果的影响等等。

(4) 分析研究表明瓦斯的理化性、浮积效应及浮积运动受温度干预影响显著, 因此瓦斯富集回收装置应考虑防止热力势的逆向效应。

## 参考文献:

[1] Gosiewski K, Matros Y S, Warmuzinski K, et al. Homogeneous vs. catalytic combustion of lean methane-air mixtures in reverse-flow reactors[J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(10): 5 010 - 5 019.

[2] 马晓钟. 矿井乏风(通风瓦斯)甲烷氧化技术经济及社会效益分析[A]. 2007 国际甲烷市场化大会暨展览会论文集[C]. 2007.

[3] 李宏军, 胡予红. 中国煤矿甲烷对温室气体贡献量的初步评估

[J]. 中国煤层气, 2008, 5(2): 15 - 17.

Li Hongjun, Hu Yuhong. Preliminary evaluation on the contribution of CMM to greenhouse gas emissions in China[J]. China Coalbed Methane, 2008, 5(2): 15 - 17.

[4] 刘文革, 韩甲业, 赵国泉. 我国矿井通风瓦斯利用潜力及经济性分析[J]. 中国煤层气, 2009, 6(6): 3 - 8.

Liu Wenge, Han Jiaye, Zhao Guoquan. Potential and economic analysis of VAM utilization in China[J]. China Coalbed Methane, 2009, 6(6): 3 - 8.

[5] 理查德·马特斯. 逆流反应器矿井乏风瓦斯发电技术简介[J]. 中国煤层气, 2004, 1(2): 44 - 46.

Richard Matttus. Introduction of the vocsidizer technology in power generation utilizing VAM[J]. China Coalbed Methane, 2004, 1(2): 44 - 46.

[6] 王鑫阳, 杜金. 浓度低于 1% 的矿井瓦斯氧化技术现状及前景[J]. 煤炭技术, 2008(9): 1 - 3.

Wang Xinyang, Du Jin. Present situation and prospect of oxidation technology about mine methane with concentration less than 1% [J]. Coal Technology, 2008(9): 1 - 3.

[7] 马晓忠. 煤矿乏风氧化装置的研制[J]. 矿业安全与环保, 2011(1): 17 - 20.

Ma Xiaozhong. The last development of air and oxidation device in mine [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2011(1): 17 - 20.

[8] 王佑安, 吴志雄. 沼气比空气轻, 沼气能“上浮”吗? [J]. 煤矿安全, 1979(6): 29 - 32.

Wang Youan, Wu Zhixiong. Methane lighter than air, methane can “rise”? [J]. Safety in Coal Mines, 1979(6): 29 - 32.

[9] 东南大学等七所工科院校. 物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.

[10] 梁栋. 矿内瓦斯运移规律及其应用[D]. 北京: 中国矿业大学北京研究生部, 1996.

[11] 傅培舫, 赵以蕙. 空气中沼气的迁移和输送[J]. 中国矿业大学学报, 1993, 22(2): 75 - 83.

Fu Peifang, Zhao Yihui. The migration of methane in mine air[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1993, 22(2): 75 - 83.

[12] 邹德蕴, 张广文. 矿井环境气体理化性与控制技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002.

[13] 邹德蕴, 李学武, 崔建明. 矿井气压分层测深与测量仪表的研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(3): 285 - 288.

Zou Deyun, Li Xuewu, Cui Jianming. Study of atmospheric pressure layering depth measurement theory and surveying instrument [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(3): 285 - 288.

[14] 吴强, 王海桥. 主要通风机扩散器流速分布模拟与动压损失研究[J]. 中国矿业, 2003, 12(3): 53 - 56.

Wu Qiang, Wang Haiqiao. Simulation of flow field and velocity field of diffuser of mines main ventilator and calculation of its kinetic energy loss [J]. China Mining Magazine, 2003, 12(3): 53 - 56.

[15] 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): 1 475 - 1 478.

Zheng Bin, Liu Yongqi, Liu Ruixiang, et al. Oxidation of coal mine ventilation air methane in reverse-flow reactor [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(11): 1 475 - 1 478.