

利用浮力富集乏风瓦斯的可行性研究

王世贤¹ 乔继延² 陈力² 穆春明¹ 邢天亮³ 丁雁生²

- (1. 郑煤集团告成煤矿, 河南省登封市, 452470;
2. 中国科学院力学研究所, 北京市海淀区, 100190;
3. 郑煤集团技术中心, 河南省郑州市, 450042)

摘要 对于开采低渗透难抽采煤层的高瓦斯矿井, 因抽采浓度低而难以利用, 现场有利用浮力富集乏风中瓦斯的设想, 本文研究其可行性。现场试验表明, 瓦斯浓度沿着高度方向差别很小, 不存在实际意义上的富集。理论分析认为, 离析态的瓦斯在浮力作用下可能产生积聚, 但积聚不是瓦斯富集而是稀释; 气体自发的扩散和通风, 使风流中的瓦斯由离析态迅速转变为非离析态, 非离析态瓦斯在重力场中的分离程度可以忽略不计。

关键词 瓦斯 乏风瓦斯 浮力富集 瓦斯富集 扩散 通风 离析态 非离析态

中图分类号 TD712.51 **文献标识码** A

Study on feasibility of ventilation air methane accumulation in coal mine by buoyant force

Wang Shixian¹, Qiao Jiyan², Chen Li², Mu Chunming¹, Xing Tianliang³, Ding Yansheng²

- (1. Gaocheng Coal Mine of Zhengzhou Coal Industry Group, Dengfeng, Henan 452470, China;
2. Insitute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Haidian, Beijing 100190, China;
3. Technological Center of Zhengzhou Coal Industry Group, Zhengzhou, Henan 452470, China)

Abstract Due to low suction concentration, it is difficult to utilize the methane in coal mine with low permeability and high methane concentration. An idea of methane accumulation by buoyant force was planned to be applied to the coal mine, so its feasibility was discussed in this paper. It was proved that the methane was difficult to enrich because of little difference in methane concentration in the vertical direction. Theoretically, segregated methane possibly accumulated by buoyant force, however, it was not methane enrichment but dilution. Owing to the diffusion and ventilation, the methane changed fast from isolation to non-isolation state, while the segregating degree of non-segregation methane was negligible in the gravity field.

Key words gas, gas of muddy wind, buoyant force enrichment, gas enrichment, diffusion, ventilation, segregation, non-segregation

1 引言

乏风瓦斯流量非常大, 浓度低, 对乏风瓦斯进行富集的研究开发是一个困难的课题。膜分离技术、变压吸附和真空变压吸附技术处于研究阶段, 其中变压吸附技术由于具有能耗低、操作方便、常温下连续运行等优点受到较多的关注。

还有一种可能的途径。鉴于瓦斯与空气密度之比为 0.55, 假如可以利用浮力富集乏风中的瓦斯,

那么, 这的确是一种事半功倍的好方法。本文接受郑州煤业集团的委托, 在告成煤矿研究利用浮力富集乏风瓦斯的可行性。

早在 20 世纪 70 年代, 王佑安通过井下试验和室内实验证实, 一旦甲烷和空气混合均匀, 甲烷不会因为密度较小而上浮。在近期, 邹德蕴等得出的结论是“利用 CH₄ 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流 CH₄ 富集回收是可行的”。根据了解, 目前

仍然有利用重力浮升富集瓦斯的有关研究。

因此，有必要对这个问题进行深入研究。本文根据现场试验和理论分析，研究乏风瓦斯的浮力富集，给出了否定结论，即利用浮力不能实现具有实际意义的瓦斯—空气分离，其基本原因是气体分子的扩散和通风条件下产生的湍流，使得利用浮力实现乏风瓦斯富集不可行。

2 告成煤矿地面泵站试验

2.1 试验简介

告成煤矿的瓦斯抽采分别由地面泵站和井下泵站完成。地面泵站瓦斯浓度不稳定，常在 3%~5% 附近波动。在试验时，为了使待测气体的压力保持恒定，从地面泵站采集的瓦斯，送入高 4 m 的圆筒形塑料试验容器中。用光干涉式甲烷测定仪监测不同高度处的瓦斯浓度。试验时，温度基本保持恒定。根据测得的瓦斯浓度随时间变化曲线，研究地面泵站混合气体中的瓦斯是否可以在重力下分离。圆筒形试验容器示意图见图 1。



图 1 塑料圆筒容器示意图

2.2 试验结果和分析

以测量的时间为横轴，以上、下采样孔瓦斯浓度的比值为纵轴，共测量 9 组数据，每组数据测量时间为 2 h，绘制 9 条试验曲线见图 2。

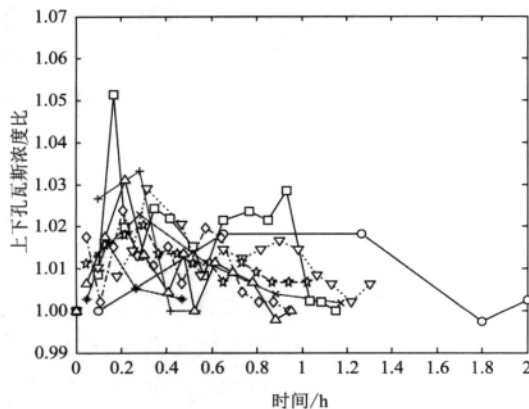


图 2 地面泵站试验曲线

利用浮力富集乏风瓦斯的可行性研究

根据图 2 可知，上下采样孔瓦斯浓度的比值略大于 1，但是最大的也只达到 1.05。测量说明，瓦斯浓度只能在 3%~5% 的基础上再提高百分之几，相当于实际浓度提高了万分之几。显然，这是没有实际意义的。

因此，根据地面泵站试验，得出初步结论：在重力作用下，乏风中的瓦斯不存在具有实际意义的富集。

3 井下巷道试验

3.1 试验简介

为了进一步判断井下乏风中的瓦斯是否能富集，在井下巷道内采集乏风做试验，试验地点选在告成煤矿—100 m 总回风巷。试验时，用塑料膜圆筒在回风大巷迎风兜取 CH₄ 浓度低于 1% 的乏风，并用钢管夹密封，事先预留了高度不同的可密封的采气口，垂直悬挂于风流较小的辅助巷道，然后用光干涉瓦斯检定仪定时测量瓦斯浓度。同样地，采用塑料容器是为了保持待测气体压力恒定，进行试验时，温度基本恒定。测量装置如图 3 所示。

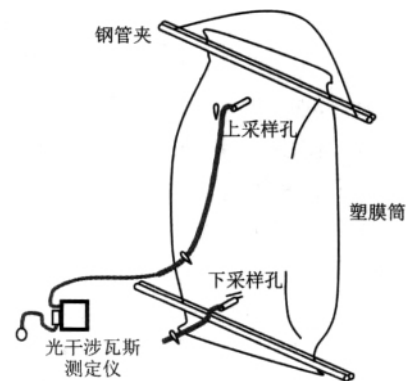


图 3 井下巷道试验装置示意图

3.2 试验结果和分析

以测量的时间为横轴，以上、下采样孔瓦斯浓度的比值为纵轴，共绘制 4 组曲线，见图 4。

定义瓦斯的平均浓度为：

$$C_0 = \frac{C_a + C_b}{2} \quad (1)$$

瓦斯的可分离度为：

$$r_c = \frac{C_a - C_0}{C_0} \quad (2)$$

式中： C_a ——上采样孔的瓦斯浓度，%；

C_b ——下采样孔的瓦斯浓度，%；

C_0 ——瓦斯的平均浓度，%；

r_c ——瓦斯的可分离度，%。

根据图4的数据, 每组数据的瓦斯可离度的平均值依次为13%、3%、2%和0%, 4组数据的总平均值为4.5%。

因此, 在浓度低于1%的条件下, 即使瓦斯的分离度最高达到百分之十几, 仍然是没有工业应用价值的。

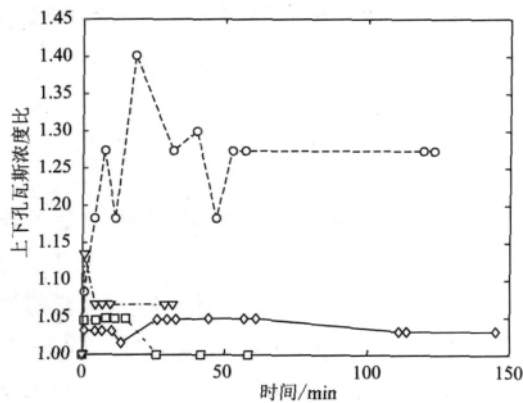


图4 -100 m 总回风巷采集瓦斯的上下浓度比曲线

4 理论分析

根据文献, 若流体以分子的尺度进行分散和混合, 相应的混合态和混合过程称为非离析态和微观混合; 若流体以微团或流体块的形式相混合, 每一微团是一个独立的运动单元, 且具有均一组成和相同的停留时间, 但不与周围的其他微团进行物质交换, 相应的混合态和混合过程称为完全离析态和宏观混合; 介于完全离析态和非离析态之间为不同程度的部分离析态。

在地面泵站试验和井下巷道试验中, 瓦斯处于部分离析态, 绝大部分瓦斯与空气已经混合, 但是没有完全达到分子水平上的完全混合。因此, 能有极少部分瓦斯由于密度差可以分离出来。

由于气体分子的无序运动, 瓦斯由离析态向非离析态的转化是不可逆的。因此, 能够离析的瓦斯会越来越来。特别是在通风的条件下, 井下乏风中的瓦斯不仅自发地扩散, 而且由一般意义的扩散转化为强制扩散。这样, 瓦斯浓度在空间的均匀效果更强, 瓦斯由离析态向非离析态的转化效率更高。在告成煤矿, 井下泵站抽采的瓦斯浓度约为3%, 在距离排放管口1 m处, 瓦斯浓度大约降到1%, 也说明在强制扩散机制下, 瓦斯与空气的搅混效率是很高的。或者说, 在强制扩散机制下, 高浓瓦斯由离析态向非离析态的转化效率是很高的。也就是说, 在强制扩散机制下, 经过很短的距离和很短的

时间, 绝大部分瓦斯会很快变成非离析态, 而不能从空气中分离出来。

在井下, 由煤壁和掘进面瞬间涌出的高浓度瓦斯, 相对于巷道气体来说处于离析态, 由于高浓度瓦斯比巷道气体轻, 在浮力的作用下向上运动, 可能会发生顶板瓦斯积聚现象。但是, 发生积聚属于瓦斯的稀释过程, 并不是富集过程。

这是因为, 由于气体分子的无序运动产生自发的扩散, 和上浮运动产生的对流, 使高浓度瓦斯与周围气体混合而向非离析态过渡, 浓度逐渐降低。当巷道风速达到一定值时, 巷道底板集中涌出的瓦斯只沿风流方向运移而上浮趋势消失, 即瓦斯不再发生积聚。

根据气体分子运动理论, 在温度为 T 的平衡态下, 重力场中的分子数密度沿着高度方向遵守玻耳兹曼分布律, 表达式为:

$$n = n_0 \cdot \exp\left(-\frac{Mgh}{RT}\right) \quad (3)$$

式中: n_0 ——参考平面处的分子数密度, 无量纲;

h ——相对于参考平面的高度, m;

M ——分子的摩尔质量, kg/mol;

g ——重力加速度, 9.8 m/s^2 ;

R ——普适气体常量, J/mol·K;

n ——高度为 h 处的分子数密度, 无量纲。

根据玻耳兹曼分布律, 在地球重力加速度作用下, 气体的分子数密度沿着高度方向虽然有变化, 但是变化非常小。对于空气—瓦斯混合气体而言, 假如在地面处的甲烷和空气的分子数密度各为 n_0 , 此时瓦斯浓度为50%, 即使在高度为10 m处(已经远大于普通巷道的高度), 甲烷分子数密度为 $n_C = 0.999 \cdot n_0$, 空气分子数密度为 $n_A = 0.998 \cdot n_0$, 瓦斯浓度只上升到50.03%, 差别非常小, 不具有实际意义。除非地球的重力加速度增大1000倍, 那么在高度为10 m处, 甲烷分子数密度为 $n_C = 0.55 \cdot n_0$, 空气分子数密度为 $n_A = 0.32 \cdot n_0$, 瓦斯浓度上升到63%, 这时差别才表现出来。或者, 在实际的重力加速度下, 在距地面很高的地方, 比如在高度为10000 m处, 两种气体的分子数密度也是有明显差别的。

如果参照核工业中分离六氟化铀的方法, 利用旋风产生很大的离心加速度, 也可以使轻重气体分离。根据计算, 当离心机半径为 10^{-1} m 量级、原始甲烷浓度为3%时, 如果 (下转第111页)

斯超限。

(3) 现场实测表明, 采用瓦斯尾巷抽排采空区瓦斯之后, 上隅角瓦斯浓度平均值为 0.5%~0.8%, 日瓦斯浓度平均值稳定在 0.6%~0.9%之间, 瓦斯浓度最大值超过 1.2%的情况较少, 工作面预警断电次数减少, 说明瓦斯尾巷发挥了很好的作用, 促进了工作面持续增产。

参考文献:

- [1] 程远平, 付建华, 俞启香. 中国煤矿瓦斯抽采技术的发展 [J]. 采矿与安全工程学报, 2009 (2)
- [2] 袁亮. 留巷钻孔法煤与瓦斯共采技术 [J]. 煤炭学报, 2008 (8)
- [3] 俞启香. 矿井瓦斯防治 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992
- [4] 程远平, 俞启香. 煤与远程卸压瓦斯安全高效共采试验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2004 (2)
- [5] 王德明. 矿井通风与安全 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005

(上接第 106 页) 切向旋转速度为 100 m/s, 那么瓦斯浓度可以提高到 3.1%; 切向旋转速度为 600 m/s, 瓦斯浓度提高到 7.6%。但是, 从工业成本角度看, 这样做显然是没有意义的。

5 结论

(1) 告成煤矿地面泵站和井下巷道试验表明, 乏风中的瓦斯只有极少部分处于离析态, 不具有实际的意义。

(2) 离析态的瓦斯可能产生积聚, 但是积聚属于浓度稀释的过程, 不是富集。

(3) 气体分子自发的扩散, 特别是在通风条件下, 高浓瓦斯由离析态向非离析态的转化效率是很高的。

(4) 在气体分子无序运动的作用下, 瓦斯由离析态向非离析态的转化是不可逆的。

(5) 在平衡态下, 瓦斯浓度在重力场中沿着高度方向虽然有变化, 但是变化非常小, 不具有实际意义。

(6) 利用浮力富集乏风中的瓦斯是不可行的。

参考文献:

- [1] 彭贤强, 张宝生, 储王涛, 刘玲莉. 中国煤层气开发综合效益评价 [J]. 天然气工业, 2008 (3)
- [2] 黄盛初, 刘文革, 赵国泉. 中国煤层气开发利用现高瓦斯综放面尾巷抽排瓦斯效果数值分析

- [6] 石必明. 高瓦斯煤层综放工作面瓦斯防治现状与展望 [J]. 中国煤炭, 2000 (6)
- [7] 何毓俊, 吴继园. 瓦斯尾巷在低透气性厚煤层放顶煤开采中的应用 [J]. 煤炭科学技术, 2009 (4)
- [8] 王志玉. 内错尾巷在寺河矿 2308 综采放顶煤工作面的应用 [J]. 华北科技学院学报, 2004 (4)
- [9] 吴继园, 何毓俊, 陈玉明. 鹤壁四矿综放工作面优化设计的思考 [J]. 煤炭科学技术, 2005 (8)
- [10] 王兆丰, 李宏, 杨宏民等. 采空区瓦斯治理及利用实践 [J]. 煤炭科学技术, 2011 (4)
- [11] 薛军正, 张启. 内错尾巷在高瓦斯矿井中的应用实践 [J]. 山西煤炭, 2007 (2)

作者简介: 陈芳 (1986—), 男, 陕西镇巴县人, 中国矿业大学采矿工程系在读硕士研究生, 现从事采矿方法与安全保障技术方面的研究。

(责任编辑 梁子荣)

状及发展趋势 [J]. 中国煤炭, 2009 (1)

- [3] 张增平. 煤矿低浓瓦斯提纯技术及经济性分析 [J]. 中国煤层气, 2010 (1)
- [4] 刘应书, 李永玲, 张辉, 杨雄, 刘文海. 煤矿低浓度瓦斯及其分离富集技术 [J]. 气体分离, 2010 (1)
- [5] 兰治淮, 刘青源, 余兰金. 变压吸附法提浓煤矿低浓度瓦斯过程中的脱氧及抑爆技术研究与应用 [J]. 中国煤炭, 2011 (3)
- [6] 邹德蕴, 程卫民, 刘义磊, 刘志刚. 矿井回风流瓦斯富集回收原理及其试验研究 [J]. 煤炭学报, 2011 (9)
- [7] 戴干策, 陈敏恒. 化工流体力学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005
- [8] 梁栋. 矿内瓦斯运移规律及其应用 [D]. 北京: 中国矿业大学, 1996
- [9] 张三慧. 大学物理学第二册, 热学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999
- [10] 张存镇. 离心分离理论 [M]. 北京: 原子能出版社, 1987
- [11] 肖啸庵. 同位素分离 [M]. 北京: 原子能出版社, 1999

作者简介: 王世贤 (1974—), 男, 河南镇平人, 本科, 工程师, 2009 年毕业于河南理工大学, 现任郑州煤电股份有限公司告成煤矿总工程师。

(责任编辑 梁子荣)