文章编号: 1000-1964(2006)01-0011-04

含氮气三相泡沫的固氮及惰化特性

周福宝[1], 王德明[1], 张玉良[2], 李 祥[2]
(1. 中国矿业大学 能源与安全工程学院, 江苏 徐州 221008;
2. 宁夏煤业集团公司, 宁夏 银川 750004)

摘要: 通过实验, 研究了不同浆液体积分数的三相泡沫中氮气的释放速率; 以此为基础分析了含氮气三相泡沫对封闭火区气体的惰化特性; 应用三相泡沫固氮及惰化特性对宁夏煤业集团白芨沟矿的火区进行了成功惰化; 防止了瓦斯爆炸的发生, 保证了矿山救护队员施工的安全. 实验及现场应用结果表明: 三相泡沫能有效地将氮气封存于浆液之中, 增强火区惰化的持久性, 且适于惰化具有漏风源的封闭火区.

关键词: 矿井火灾; 三相泡沫; 固氮; 惰化
中图分类号: TD 753.4 文献标识码: A

Nitrogen Fixation of Three-Phase Foam and Its Inerting Properties

ZHOU Fu-bao[1], WANG De-ming[1], ZHANG Yu-liang[2], LI Xiang[2]
(1. School of Mineral and Safety Engineering,
China University of Mining & Technology, Xu hou, Jiangsu 221008, China;
2. Ningxia Coal Industry Group, Yinchuan, Ningxia 750004, China)

Abstract: The experiment was conducted to study the release rates of nitrogen from three-phase foam with different slurry concentrations. Based upon the experimental results, theoretical analysis was made to examine the characteristics of three-phase foam inerting the gases in the underground fire one. Furthermore, the three-phase foam was successfully used for inerting the gases in the fire one in Baijigou Coal Mine of Ningxia Coal Industry Group. It prevented the possibility of gas explosion and protected the safety of the mine rescue team members. The results obtained from the experiment and the practical applications indicate that the three-phase foam has a good inerting effect. It can remain the nitrogen within the water slurry and enhance the long-standing inerting effect. It can be applicable for inerting of fire one with air leakage.

Key words: mine fire; three-phase foam; nitrogen fixation; inerting

煤炭自燃是我国煤矿的主要自然灾害之一. 为防治煤炭自燃, 国内外广泛采用灌浆、注凝胶、注惰气等技术[1-8]. 这些技术对保证矿井安全生产起了重要作用, 但还存在一些不足: 黄泥灌浆易形成拉沟现象, 造成浆水的流失; 水玻璃-铵盐凝胶会产生有毒有味的氨气; 高分子凝胶成本高; 惰气易随漏风扩散, 不易滞留于火区. 为了综合固、液、气的灭火性能, 中国矿业大学在国家自然科学基金项目的资助下率先在国内提出了三相泡沫防治煤炭自燃的一种新思路, 研制了配套的装备, 并在大屯姚桥矿、枣庄柴里矿、宁夏白芨沟矿、抚顺老虎台矿以及铁法大兴矿进行了成功的推广应用[9], 特别是, 在宁夏白芨沟矿特大型火区的治理中, 含氮气的三相泡沫更是取得了显著绩效[10]. 三相泡沫具有覆盖、

收稿日期: 2004-12-31
基金项目: 国家自然科学基金项目(50274068); 教育部博士点基金项目(20020290001); 国家重点基础研究"973"项目(2001CB40960102)
作者简介: 周福宝(1976-), 男, 江苏省南京市人, 讲师, 工学博士(博士后), 从事矿井火灾基础理论及防治技术方面的研究.
E-mail: f. hou@ cumt. edu. cn Tel: 0516-83885080

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

降温、惰化等防灭火功能. 前期的研究工作更多集中于三相泡沫的灭火性能, 本文结合现场应用实例, 研究含氮气三相泡沫的固氮及惰化特性.

1 氮气的释放特性

黄泥或粉煤灰浆液经发泡后, 氮气进入浆液中使其体积膨大, 形成三相泡沫. 三相泡沫注入防灭火区域, 在各种因素的作用下稳定性下降, 泡沫破灭. 三相泡沫破灭的过程中释放出氮气, 氮气进一步惰化火区. 惰化效果取决于三相泡沫的固氮特性.

三相泡沫的固氮特性指的是氮气能有效地封存于浆液之中, 从而在防灭火区域中保持相对长的滞留时间, 进而形成对火区更为有效的惰化. 它与氮气的释放特性相反. 研究三相泡沫中氮气的释放特性即可揭示三相泡沫的固氮特性. 图 1 为实验测得的发泡剂体积分数为 1.0% 时, 不同固液比的三相泡沫中氮气释放总量随时间的变化关系曲线. 图 2 为不同固液比的三相泡沫中氮气的释放速率随时间的变化关系.

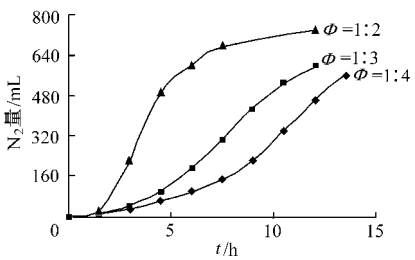


图 1 三相泡沫中氮气的释放总量随时间的变化关系
Fig. 1 Variation of accumulated nitrogen release quantity with time in three-phase foam

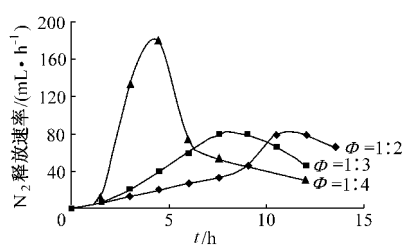


图 2 三相泡沫中氮气的释放速率随时间的变化关系
Fig. 2 Variation of nitrogen release rate with time in three-phase foam

由图 1 和 2 可知:

1) 在不考虑外界环境的影响因素(如机械破坏、高温灼烧等) 下, 三相泡沫的初始氮气释放量和释放速率都是很小的.

如 Φ= 1∶4, T= 1.5 h, 氮气的释放量 Q= 20 mL. 这表明三相泡沫注入防灭火空间的过程中, 受自身稳定性的影响而释放出的氮气是很少的, 即三相泡沫形成后具有良好的固氮特性.

2) 相同时间内, 浆液体积分数越低, 氮气的释放总量越大.

3) 三相泡沫中的气体释放速率呈现明显的抛物线型, 具有峰值.

3 条曲线都说明三相泡沫中氮气的初始释放速率是比较小的, 随时间的推移释放速率不断增大, 到达峰值后, 释放速率又开始下降.

4) 三相泡沫中氮气的最大释放速率出现的时刻与浆液体积分数密切相关, 浆液体积分数越低, 最大释放速率出现的越早, 浆液体积分数越高, 最大释放速率出现的越晚.

图 2 中浆液体积分数 Φ= 1∶4 时, 三相泡沫形成 8.25 h 后氮气的释放速率最大; 浆液体积分数 Φ= 1∶3 时, 三相泡沫形成 4.5 h 后释放速率最大; 浆液体积分数 Φ= 1∶2 时, 三相泡沫形成 10.5 h 后释放速率最大.

2 惰化特性的分析

如图 3 所示, 封闭火区空间(煤矿井下采空区) 内有一定量的气体流入和流出, 并有含氮气的三相泡沫注入. 假设: 1) 火区内各种气体已混合均匀且无化学反应, 无气体吸附、吸收现象; 2) 三相泡沫中氮气释放后短时间内即与封闭空间内气体混合均匀; 3) 三相泡沫的气相成分中氮气的体积分数为 C_N; 4) 不考虑煤层瓦斯和 CO_2 等其它气体的涌入量. 则可建立如下关系式

$$\frac{dC}{d\tau} = (mkC_N + q_iC_i - q_eC)/V, \qquad (1)$$

式中: C 为封闭火区内氮气组分的体积分数, %; τ 为时间, s; V 为封闭火区的体积, m^3; q_i 为流入封闭火区的气体流量, m^3/s; C_i 为流入火区气体组分中的氮气体积分数, %; q_e 为流出封闭火区的混合气体流量, m^3/s; m 为封闭空间的三相泡沫质量, kg; k 为单位质量的氮气的释放速率, m^3/(kg·s).

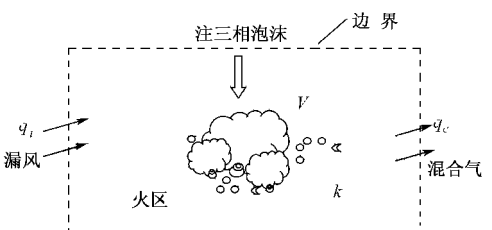


图 3 煤矿井下的封闭火区示意图
Fig. 3 Schematic of a sealed fire one of an underground mine

当边界条件为 τ= 0, C= C_0 时, 求解上述微分方程得

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$C = \frac{q_i C_i + mkC_N}{q_e} - \left(\frac{q_i C_i + mkC_N}{q_e} - C_0 \right) \exp\left(- \tau \frac{q_e}{V} \right). \quad (2)$$

由式(2)知, 当 $\tau \to \infty$, 有

$$C_\infty = \frac{q_i C_i + mkC_N}{q_i}, \quad (3)$$

式中: C_∞为时间无限长情况下的火区气体组分中的极限氮气体积分数, %, 如火区进、出风量较小, 则 $C_\infty = C_N$. 《煤矿安全规程》(2001 年版)规定氮气防灭火时注入的氮气体积分数不小于 97%, 取 C_N = 97%.

根据式(2)可以作出曲线如图 4 所示.

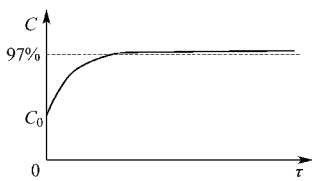


图 4　注入封闭火区内三相泡沫的惰化特性

Fig. 4　Inerting properties of three-phase foam infused into fire one

由图 4 可知, 三相泡沫对封闭火区的惰化效果, 主要取决于以下几个方面: 1) 同等条件下, 注入封闭火区的三相泡沫质量越大, 则惰化效果越好. 2) 三相泡沫中氮气的释放速率 k 越大, 则三相泡沫的惰化效果越明显. 由前文三相泡沫的释放特性知, 减少浆液中固相材料的比例可加快三相泡沫中气体的释放速率, 因此, 为增强火区的惰化效果, 可适当减少浆液的体积分数. 3) 三相泡沫的气体组分中的氮气体积分数 C_N 对封闭火区的惰化效果影响显着.

三相泡沫中氮气组分的体积分数主要受制氮装置的影响. 参考《煤矿安全规程》(2001 年版)的氮气防灭火的体积分数规定, 采用三相泡沫惰化封闭火区时制氮体积分数不得小于 97%.

3　应用实例

宁夏煤业集团公司白芨沟矿是中国优质“太西”无烟煤的生产基地, 年产能力达 240 万 t. 矿井煤层瓦斯含量大, 属高沼气矿井, 煤层自然发火期为 12 个月, 煤尘有爆炸危险. 2003 年 10 月 24 日, 白芨沟矿发生特大瓦斯爆炸, 造成全矿井封闭(封闭空间为 1 000 多万 m^3), 形成我国建国以来最大的煤矿井下火区(300 多万 m^3). 白芨沟矿是宁夏煤业集团公司的经济支柱, 年利润超过亿元, 因此, 尽快灭火、启封火区并恢复生产具有重大经济和社会效益. 为此, 宁夏煤业集团公司与中国矿业大学联合组成课题组, 对灭火、抑爆、缩封及火区启封的关键技术进行研究.

2004 年 6 月, 矿井在缩封 1660 运一川时遇到技术难题, 巷道位置见图 5. 1660 运一川的地表区域是沟谷地带, 开采裂隙遍布, 漏风相当严重. 运一川与发现明火的 1676 回一川相通, 缩封期间的灌浆出水温度表明运一川附近区域还存在高温异常区. 为了加快火区缩封的进度, 1660 运一川的缩封工作必须及早完成. 为了保障 1660 运一川施工的安全, 需保证该地点处于惰化状态, 并防止 1660 中巷内 40% 以上的高体积分数瓦斯涌入 1660 运一川*. 由于该区域的漏风十分严重, 如通过地面钻孔注氮气, 氮气易随漏风源扩散, 且氮气的密度较空气小, 难以到达运一川底部区域. 这就使得注氮不能对运一川形成有效的惰化. 鉴于此, 课题组提出利用三相泡沫的固氮特性惰化运一川附近采空区的技术方案. 由于三相泡沫的密度较气体大得多, 含氮气三相泡沫更容易下落到火区底部. 氮气的密度比空气略小, 因此, 从火区底部释放出的氮气能对更大范围的空间进行惰化.

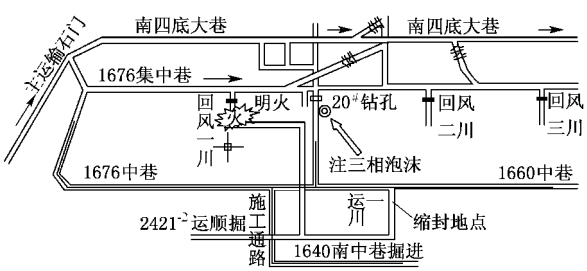


图 5　矿井巷道及火区位置示意图

Fig. 5　Schematic of mine tunnels and fire one

制氮装置为 JXZD-700 型碳分子筛变压吸附式制氮机, 其主要技术参数见表 1.

表 1　制氮装置的技术参数

Table 1　Technical parameters of nitrogen-making equipment

安装地点	流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	纯度/%	出口压力/MPa	装机功率/kW	启动时间/min
南四山头	700	≥97	0.1～0.5	132×2	≤30

由三相泡沫的惰化特性知, 提高氮气的体积分数 C_N 可提高火区的惰化效果. 再根据制氮装置的流量与氮气体积分数成反比的特点, 将制氮装置的氮气流量限制在 600 m^3/h, 此时氮气体积分数达

* 周福宝, 复杂条件下水封巷道的防爆缩封技术. 王德明, 周福宝主编: 第十二届矿井通风学术年会论文集. 海南, 三亚, 2004 年 11 月, 252-259.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

98%以上. 为了加快三相泡沫的氮气释放速率 k, 减少了泥浆中的黄土量, 将土水比限制在 1∶6. 地面钻孔注三相泡沫惰化火区的主要技术参数如表 2 所示.

表 2 地面钻孔注三相泡沫的主要技术参数

Table 2 Technical parameters of infusing three-phase foam into bore holes

制浆量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	土水比	氮气量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	发泡倍数	发泡剂消耗量/($t \cdot h^{-1}$)	钻孔
20	1∶6	600	≥20	0.06	20# (孔深 144 m)

20# 钻孔从 6 月 9 日开始注三相泡沫. 6 月 12 日 14∶30 时, 救护队在锁风状态下进入运一川探查, 结果表明运一川内气体状态良好, 具备施工密闭的条件(见表 3). 6 月 12 日 17∶00～6 月 13 日 5∶00期间, 受天气的影响, 20# 钻孔停注三相泡沫, 运一川内的 O_2 体积分数持续上升, 至 6 月 13 日 3: 30, O_2 体积分数已升至 10%, CH_4 体积分数已升至 6.0%, CH_4 处于爆炸界限内. 为保证施工人员的人身安全, 撤出施工密闭的救护队员. 经现场工程技术人员的努力, 6 月 13 日 5: 00 时 20# 钻孔恢复注三相泡沫. 6 月 13 日 10 时, 救护队再次进入运一川探查. 结果表明: 注了 5 h 的三相泡沫后, 运一川内的 O_2 体积分数已降至 7.4%, CH_4 体积分数已降至 4.0%. 运一川已具备施工条件, 救护队随即继续施工并完成了运一川的密闭.

表 3 1660 运一川的探查结果

Table 3 Testing result of Yunyichuan, No. 1660

日期	时间	$\varphi(O_2)$/%	$\varphi(CH_4)$/%	气温/℃	O_2 体积分数趋势	是否注三相泡沫
6 月 12 日	14∶30	4	4.8	16	稳定	是
6 月 13 日	3∶30	10	6.0	24	持续上升	否
6 月 13 日	10∶30	7.4	4.0	20	稳定	是

上述实例表明: 在漏风强度较大的该区域, 三相泡沫停注 13 h 后 O_2 体积分数才上升至 10%. 这表明原先注入火区的三相泡沫在固氮特性作用下, 没有及时释放出氮气, 随着泡沫稳定性的降低, 这部分氮气逐渐释放出并保持了对该区域的惰化, 减缓了 O_2 体积分数升高的速率.

4 结 论

本文研究了含氮气三相泡沫的固氮及惰化特性, 介绍了其在抢险救灾中的应用实例. 通过本文的研究可得出如下结论:

1) 含氮气三相泡沫的密度比空气大得多, 能携带氮气下落到火区的底部, 从而对更大范围内的火区空间形成惰化;

2) 含氮气三相泡沫能有效地将氮气固存于浆液之中, 增强了火区惰化的持久性, 避免了通常注入火区的氮气易随漏风源很快流失的缺点;

3) 为了增强三相泡沫的惰化效果, 一方面要提高制氮装置的氮气纯度, 另一方面可适当降低浆液中固相材料的比例.

参考文献:

[1] 戚颖敏. 矿井防灭火(煤矿安全手册, 第四篇)[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991: 75–174.

[2] 王省身, 张国枢. 矿井火灾防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990: 14–43.

[3] 徐精彩, 郭兴明, 邓 军. 煤层火灾耐温高水胶体直接灭火技术[J]. 煤炭科学技术, 2000, 28(3): 4–6.
XU Jing-cai, GUO Xing-ming, DENG Jun. Technology of mine fire direct extinguishing with temperature resistance high water gel for seam fire[J]. Coal Science and Technology, 2000, 28(3): 4–6.

[4] 高广伟. 中国煤矿氮气防灭火的现状与未来[J]. 煤炭学报, 1999, 24(1): 48–51.
GAO Guang-wei. The present state and prospects for nitrogen fire prevention and fire elimination technology in coal mines of China [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(1): 48–51.

[5] ADAMUS A. Technical note: Review of nitrogen as an inert gas in underground mines[J]. Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa, 2001, 54(3): 60–61.

[6] SINGH R V, Tripathi D D. Fire fighting expertise in Indian coal mines[J]. Journal of Mines Metals & Fuels, 1996, 44(6): 210–212.

[7] BANERJEE S C. Spontaneous Combustion of Coal and Mine Fire[M]. Rotterdam: A A Balkema, 1985. 101–122.

[8] WU C. Test of chemical suppressants for fire prevention in mines with sulphide ores[J]. Mineral Resources Engineering, 2000, 9(2): 255–264.

[9] 王德明. 矿井防灭火新技术 —— 三相泡沫[J]. 煤矿安全, 2004, 35(7): 16–18.
WANG De-ming. A new technology of three-phase foam for mine fire control[J]. Safety in Coal Mine, 2004, 35(7): 16–18.

[10] 周福宝, 税晓云, 章永久, 等. 地面钻孔大流量注三相泡沫技术及其应用[A]. 付建华: 煤矿瓦斯灾害防治理论研究与工程实践[C]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005: 279–283.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(责任编辑 陈其泰)