

文章编号: 0253 - 9993 (2005) 04 - 0443 - 04

含氮气三相泡沫惰化火区的机理及应用研究

周福宝¹, 王德明¹, 章永久², 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: 针对漏风较大的火区, 提出了采用含氮气三相泡沫惰化的新技术. 建立了含氮气三相泡沫惰化有漏风源封闭火区的数学模型, 得出了影响三相泡沫惰化效果的主要因素和三相泡沫惰化火区的机理. 应用含氮气三相泡沫对特大型煤矿井下火区进行了成功的惰化, 防止了瓦斯爆炸, 保证了施工安全. 研究表明: 含氮气三相泡沫克服了普通注氮方式下注入火区的氮气易随漏风源很快流失的缺点, 增强了火区惰化状态的持久性.

关键词: 火区; 三相泡沫; 惰化效果; 漏风

中图分类号: TD753.4 **文献标识码:** A

Inerting mechanism of three-phase foam containing nitrogen and its application to underground fire zone

ZHOU Fu-bao¹, WANG De-ming¹, ZHANG Yong-jiu², ZHANG Yu-liang², LI Xiang²

(1. School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. Ningxia Coal Industry Group, Yinchuan 750004, China)

Abstract: The new approach was put forward that utilized three-phase foam containing nitrogen to make underground fire zone with big air leakage keep inert. The mathematic model was set up to investigate the inerting effect of three-phase foam on the sealed zone of mine fire. Accordingly, the major factors determining the inerting effect were obtained as well as the inerting mechanism. Beyond that, an example was presented that three-phase foam containing nitrogen was successfully applied to make a super-large zone of underground mine fire remain inert. This prevented gas explosion and protected the safety of the mine rescue team members. The results indicate that the three-phase foam is much better at the long-standing inerting effect than the general mode of infusion of nitrogen that is easy to leak out of fire zone quickly.

Key words: fire zone; three-phase foam; inerting effect; air leakage

注氮是国内外广泛应用的煤矿火灾防治技术^[1~4]. 但在火区漏风强度较大的情况下, 注入火区的氮气易随漏风扩散, 难以滞留于火区, 不易保持对火区的持续性惰化. 集固、液、气相的防灭火性能于一身. 中国矿业大学率先在国内提出了三相泡沫防治煤炭自燃的新思路, 研制了配套装备 (获国家发明专利)^[5], 在大屯姚桥矿、枣庄柴里矿、抚顺老虎台矿、宁夏白茆沟矿以及铁法大兴矿进行了成功的应用^[6]. 三相泡沫具有良好的固氮特性, 适于惰化有一定漏风强度的火区. 本文研究含氮气三相泡沫的惰化机理, 介绍其在特大型浅埋火区治理中的应用.

收稿日期: 2005 - 01 - 17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50274068); 教育部博士点基金资助项目 (20020290001); 国家重点基础研究“973”项目 (2001CB40960102)

作者简介: 周福宝 (1976 -), 男, 江苏南京人, 讲师, 博士后. Tel: 0516 - 3885080, E - mail: f.zhou@cumt.edu.cn

1 数学模型

如图 1所示，封闭火区（井下采空区）内有一定的气体流入和流出，并有含氮气的三相泡沫注入。假设：火区内各种气体已均匀混合且无化学反应，无气体吸附、吸收现象；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；三相泡沫的气相成分中氮气的浓度为 C_N ；不考虑煤层瓦斯和 CO_2 等其它气体的涌入量。

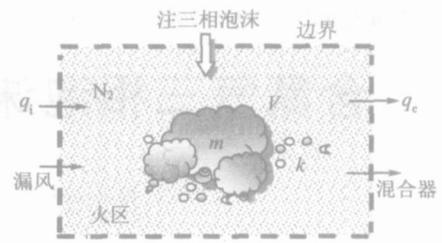


图 1 封闭火区模型

Fig. 1 A sealed fire zone underground model

采用类似文献 [7] 的分析方法，以氮气组分作为火区惰化效果的考察指标，可建立如下关系式

$$\frac{dC}{dt} = (m k C_N + q_1 C_i - q_e C) / V, \tag{1}$$

式中， C 为封闭火区内氮气组分的浓度，%； t 为时间，s； m 为三相泡沫质量，kg； k 为氮气的释放速率， $m^3 / (kg \cdot s)$ ； q_1 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浓度，%； q_e 为流出火区的混合气体流量， m^3 / s ； V 为封闭火区的体积， m^3 。

边界条件为 $t=0, C=C_0$ ，求解式 (1) 得

$$C = \frac{q_1 C_i + m k C_N}{q_e} - \left(\frac{q_1 C_i + m k C_N}{q_e} - C_0 \right) \exp\left(- \frac{q_e}{V} t \right), \tag{2}$$

由式 (2) 知，当 $t \rightarrow \infty$ 时，有

$$C = \lim_{t \rightarrow \infty} C = \frac{q_1 C_i + m k C_N}{q_e}, \tag{3}$$

式中， C 为经过持续惰化后火区中氮气组分的极限浓度，%。

2 讨论与分析

2.1 三相泡沫特性对惰化效果的影响

三相泡沫的特性包括制氮装置的氮气纯度 C_N 、三相泡沫的释放速率 k 及注入火区的质量 m 。这几项都反应在式 (2) 中。为了表示方便，可记 $\psi = m k C_N$ ，则式 (2) 可转换为

$$C = \frac{q_1 C_i + \psi}{q_e} - \left(\frac{q_1 C_i + \psi}{q_e} - C_0 \right) \exp\left(- \frac{q_e}{V} t \right). \tag{4}$$

取 $\psi_1 < \psi_2 < \psi_3$ ，作出 $C = f(t, \psi)$ ， $i=1, 2, 3$ ，如图 2 所示。三相泡沫的惰化效果取决于参数 ψ ， ψ 取决于三相泡沫的质量 m 、氮气纯度 C_N 和氮气释放速率 k 。

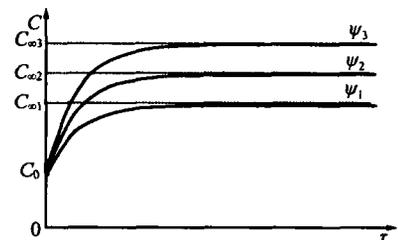


图 2 不同 ψ 值的 N_2 浓度随时间的变化曲线

Fig. 2 Variation of nitrogen concentration with time under different ψ

(1) m 对火区惰化效果的影响 注入火区的三相泡沫质量 $m = \rho_f n Q_s$ ，其中 ρ_f 为三相泡沫的密度， kg/m^3 ； Q_s 为浆液的体积流量， m^3 / s ； n 为发泡倍数，一般为 10 ~ 30。注入火区的三相泡沫质量决定于三相泡沫的生成量和灌注时间。生成量由发泡倍数、制浆流量和密度所确定。制浆量一定时，发泡倍数 n 越大，三相泡沫的氮气含量越大。因此，增大发泡倍数 n ，增加注三相泡沫的时间，可增强惰化效果。现场研究表明，当三相泡沫的发泡倍数 $10 < n < 30$ ，三相泡沫的密度为 $33 kg/m^3 < \rho_f < 100 kg/m^3$ 。标准状态下的空气密度为 $\rho_a = 1.2 kg/m^3$ ， $\rho_f \gg \rho_a$ ，因此，若从地面钻孔向火区注三相泡沫和注氮，三相泡沫在重力作用下更易到达火区底部。

(2) k 对火区惰化效果的影响 三相泡沫的释放速率 k 受浆液中的固液比值影响较大。图 3 为最佳发泡剂浓度 (1.0%) 时，实验测定的不同 ψ 值的氮气释放总量和释放速率随时间的变化关系。由图 3 可

知： 相同时间内，浆液浓度越低，氮气的释放总量越大。

在不受外界环境的影响时，三相泡沫的初始氮气释放量和释放速率均较小。如 $\phi = 1.4$, $T = 1.5$ h, 氮气的释放量为 20 mL。这表明三相泡沫注入防火空间的初始阶段，受自身稳定性的影响而释放出的氮气很少，即具有良好的固氮特性。浆液浓度越低，氮气的最大释放速率出现的越早；反之出现的越晚。图 3 中 $\phi = 1.4$, 三相泡沫形成 4.5 h 后氮气的释放速率 k 最大； $\phi = 1.3$, 8.25 h 后 k 最大； $\phi = 1.2$, 10.5 h 后 k 最大。 k 越大，三相泡沫的惰化效果越明显，因此，在不影响固氮特性前提下，可适当降低浆液浓度以增强惰化效果。

(3) C_N 对火区惰化效果的影响 三相泡沫中氮气组分的浓度越高，形成的三相泡沫惰化效果越好。氮气由制氮装置提供， C_N 等于制氮装置的氮气纯度。我国《煤矿安全规程》(2001年版)规定，氮气防火时的氮气浓度不小于 97%。鉴于此，采用三相泡沫惰化火区时，为了保证惰化效果，制氮装置的浓度也应不小于 97%。

2.2 三相泡沫惰化机理

通过上述论述，含氮气三相泡沫惰化火区的机理可概括为：黄泥或粉煤灰浆液经发泡装置发泡后，氮气进入浆液中，浆液体积膨大，形成三相泡沫。三相泡沫通过钻孔注入火区后，由于其密度比空气大得多，在自重的作用下，大量的三相泡沫能下落到火区底部，由于其初始阶段的稳定性较好（释放出的氮气体积较少），大量的氮气仍能有效地富集于浆液之中，注入火区底部的三相泡沫在外在因素（高温、碰撞）和内在因素（自身稳定性）的共同作用下释放出氮气，能有效地保持对火区的持久惰化。惰化效果主要取决于三相泡沫的灌注量、氮气的释放速率和制氮装置的纯度。

3 现场应用

宁夏煤业集团公司白茆沟矿是我国著名的“太西”无烟煤的生产基地。矿井煤层瓦斯含量大，属高沼气矿井。2003 - 10 - 24 矿井发生特大瓦斯爆炸事故，造成全矿封闭（封闭空间约为 1 000 万 m^3 ），形成约 300 万 m^3 的特大型火区。白茆沟矿是宁夏煤业集团公司的经济支柱，年利润达数亿元，尽快灭火并恢复生产意义重大。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。在课题组指导下，矿井爆炸后 1 个多月就安全地恢复了综采工作面的生产，1 零 1 个月后全面恢复生产，取得了显著的经济和社会效益。期间，课题组长期驻守现场，攻克了多项技术难题，1660 运一川的惰化即是其中之一。

(1) 技术方案的提出 1660 运一川为 2421 区段的运输横川（图 4），区段的煤层厚度平均为 20 m，分 2 层进行综放开采，上分层已采完。该区域地表为贺兰山沟谷，采深 50 ~ 100 m，受采动影响，地面裂隙遍布，漏风严重。运一川附近的 1676 回一川曾发现明火，明火是在巷道处于完全水封状态下靠裂隙的微循环漏风供氧而维持燃烧的。缩封期间的灌浆出

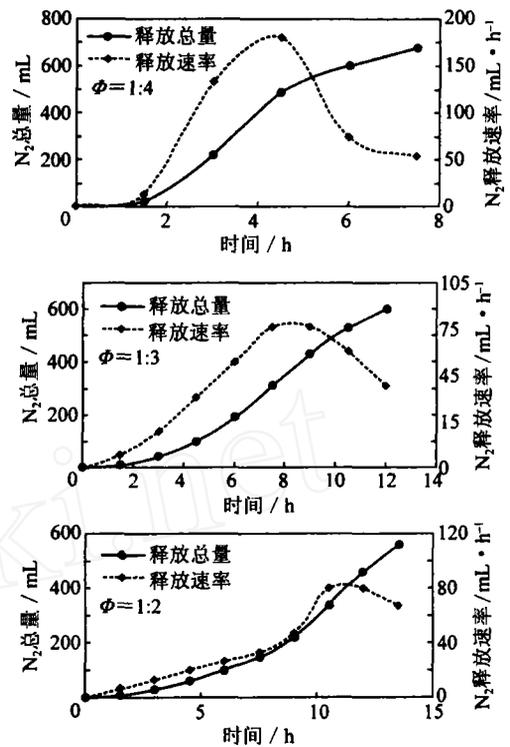


图 3 三相泡沫中氮气的释放总量和速率随时间的变化关系

Fig. 3 Variation of released nitrogen quantity and release rate with time

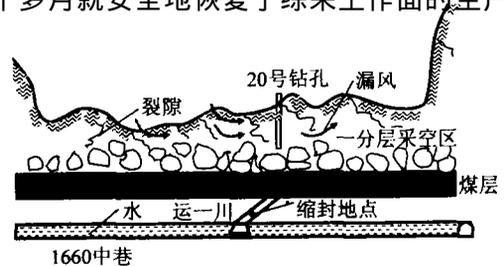


图 4 矿井巷道及火区位置

Fig. 4 Schematic of mine tunnels and fire zone

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, 必须及早完成 1660 运一川的缩封工作. 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% 以上的高浓度瓦斯涌入运一川^[8]. 由于该区域漏风严重, 地面钻孔强烈出风, 如通过钻孔注氮, 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, 不能对运一川进行有效的惰化. 鉴于此, 课题组提出含氮气三相泡沫惰化运一川的技术方案.

(2) 应用及效果 制氮采用 JXZD - 700 型碳分子筛变压吸附式制氮机, 正常状态下制氮量为 $700 \text{ m}^3/\text{min}$, 氮气纯度为 97%. 为了提高火区惰化的效果, 可提高制氮装置的纯度. 根据制氮装置的流量与氮气纯度成反比的特点, 将流量限制在 $600 \text{ m}^3/\text{h}$, 氮气浓度达 98% 以上. 为了加快氮气的释放速率 k , 减少了泥浆中的黄土量, 土水比 = 1.6. 2004 - 06 - 09, 20 号钻孔开始注三相泡沫. 6 月 12 日 14:

30 时, 救护队对运一川进行缩封探查, 结果表明运一川内氧含量只有 4%, 具备施工密闭的条件 (表 1).

6 月 12 日 17: 00—13 日 5: 00, 受天气的影响, 20 号钻孔停注三相泡沫, 运一川内的 O_2 浓度持续上升, 至 6 月 13 日 3: 30, O_2 浓度升至

10%, CH_4 浓度升至 6.0%, 为保证安全, 撤出正在施工的救护队员. 6 月 13 日 5: 00 时 20 号钻孔连夜恢复注三相泡沫. 6 月 13 日 10 时, 救护队再次探查. 结果表明: 注 5 h 三相泡沫后, 运一川内的 O_2 浓度降至 7.4%, CH_4 浓度降至 4.0%. 运一川已基本具备施工条件, 救护队继续施工并完成运一川的密闭. 应用表明: 在大漏风火区, 含氮气的三相泡沫能进行有效惰化. 此外, 本例中三相泡沫停注 13 h 后 O_2 浓度才上升至 10%. 这表明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来, 延缓了 O_2 浓度升高的速率.

4 结 论

研究了含氮气三相泡沫的惰化机理, 介绍了其在抢险救灾中的应用. 通过本文的研究可知: 含氮气三相泡沫的密度比空气大得多, 在自重的作用下能下落到火区底部, 由于其初始阶段的稳定性较好, 大量的氮气能有效地留存于浆液之中, 注入火区底部的三相泡沫在内、外在因素的作用下持续地释放出氮气, 能从更大范围内惰化火区. 采用含氮气三相泡沫惰化火区, 克服了普通注氮方式下注入火区的氮气易随漏风源很快流失的缺点, 增强了火区惰化的持久性.

感谢宁夏煤业集团公司, 特别是公司所属的石炭井生产指挥部和白茆沟矿各级领导和工程技术人员对本文现场研究工作的大力支持!

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 徐承林, 张丑红. 氮气抑爆灭火技术 [J]. 煤矿安全, 1997, 28 (3): 37 ~ 40.
- [3] Adamus A. Review of the use of nitrogen in mine fires [J]. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology, 2002 (111): A89 ~ A98.
- [4] Banerjee S C. Spontaneous combustion of coal and mine fire [M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1985. 113 ~ 122.
- [5] 王德明, 张仁贵, 李增华, 等. 防治煤炭自燃的三相泡沫发生装置 [P]. 中国专利: 02148411.2, 2004 - 12.
- [6] 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.
- [7] 周心权, 吴兵. 矿井火灾救灾理论与实践 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996. 238 ~ 245.
- [8] 周福宝. 复杂条件下水封巷道的防爆缩封技术 [A]. 王德明, 周福宝. 第十二届矿井通风学术年会论文集 [C]. 三亚, 2004. 252 ~ 259.