

注氮条件对采空区自燃“三带”的影响

黄显华, 顾北方, 靳晓华

中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083

摘要 研究了采空区注氮参数与“三带”分布情况的关系, 并利用研发的火源定位软件分析了注氮条件对采空区自燃“三带”的影响。结果表明, 合理的注氮位置基本上位于散热带和氧化带交界处, 但一般情况下, 建议将注氮位置设置到氧化带内。当注氮达到稳定后, 可以发现氧气分布出现回缩并整体前移的现象, 尤其是在进风侧氧化带范围大大减少的情况下, 注氮效果比较明显。

关键词 注氮参数; 采空区; 自燃“三带”

中图分类号 TD75

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.18.003

Effect of Nitrogen Injection Conditions on the Spontaneous Combustion “Three Zones” in Goafs

HUANG Xianhua, GU Beifang, JIN Xiaohua

School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

Abstract This paper studies the theory concerning relationships between nitrogen injection parameters and distribution of the “three zones” in goafs, and uses fire source location software to analyze the effect of nitrogen injection on the spontaneous combustion “three zones”. The results show that reasonable nitrogen injection is located at the border of the heat dissipation zone and oxidation zone. Under general conditions, nitrogen injection is suggested to be located in the oxidation zone. When nitrogen injection became stable, oxygen distribution showed a retraction and overall forward lead, especially when the oxidation zone was significantly reduced in the wind side, showing an apparent nitrogen injection effect.

Keywords nitrogen injection; goaf; spontaneous combustion “three zones”

中国每年因煤层自燃引起的矿井火灾数达百起以上, 其中以内因火灾居多, 导致煤炭资源损失量在2亿t左右, 平均发火率为0.318次每百万t^[1]。煤层自燃不仅会造成大量煤炭资源的烧毁, 危及矿井的安全生产, 还会造成国土资源的严重破坏, 进而引发一系列的生态环境问题, 对人民身体健康和社会经济的发展带来极大的危害^[2,3]。据统计, 全国统配和重点煤矿中有自然发火危险的矿井约占47%, 且绝大部分发生在采空区附近。当采空区浮煤具备良好的漏风供氧和蓄热条件时, 会造成采空区浮煤自燃, 危及工作面的正常回采。

中国多采用全部垮落法处理采空区的回采工作面, 此法

采空区丢煤多, 产生遗煤大面积的危险性堆积, 极易引起煤炭自燃, 且这些易发火点往往在顶板高冒处或采空区深部, 这时采用注氮灭火效果最为显著。为更好地了解注氮以后采空区风流场的变化规律, 通常采用观察自燃“三带”范围变化, 但对于大多数矿井来说现场实测数据相当有困难。基于以上因素, 加强对采空区煤的氧化规律的研究, 分析注氮工艺对采空区“三带”分布的影响, 通过建立采空区多孔介质模型, 并对其设置边界条件, 利用软件模拟进行分析, 准确划分出自燃“三带”范围, 确定最佳注氮参数, 显得十分必要。

收稿日期: 2014-02-28; 修回日期: 2014-03-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U126214)

作者简介: 黄显华, 高级工程师, 研究方向为矿井通风与煤矿安全, 电子邮箱: 347550412@qq.com

引用格式: 黄显华, 顾北方, 靳晓华. 注氮条件对采空区自燃“三带”的影响[J]. 科技导报, 2014, 32(18): 26-30.

1 采空区火源定位软件

软件以开滦项目为依托,是基于有限体积法基础开发的,现场人员通过输入采空区的基本参数和专业参数,模拟采空区稳态和非稳态情况下采空区的速度场、温度场、压力场及氧气浓度,并基于 OpenGL,实现了采空区模型的三维可视化以及采空区的速度场、温度场、压力场、氧气浓度的可视化,并能根据氧气浓度和漏风强度可视化划分采空区自燃三带(散热带、自燃带、窒息带)。除了上述功能,本软件还提供灌浆计算、注氮计算、自然发火区预测、程序升温实验计算程序、采空区火源定位等多种功能,供现场人员使用,以提高煤矿自燃综合治理能力。火源定位软件主界面如图1所示。

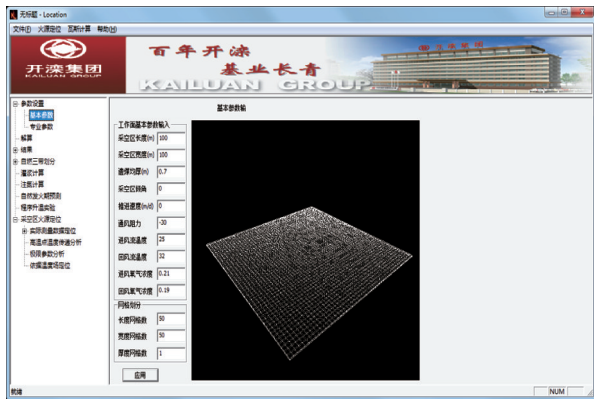


图1 火源定位软件主界面

Fig. 1 Main interface of the fire location software

2 注氮参数与“三带”分布情况的关系

2.1 注氮工艺

在常温常压下,氮气的分子结构和化学性质非常稳定,很难与其他物质发生化学反应,是一种良好的灭火用惰性气体。理论与实践表明,当氧含量降低至5%~10%时,煤的氧化自燃受到抑制,而氧含量低于2%时,则可使燃烧熄灭并阻止其复燃。氮气防灭火技术以其特有的物理性质,丰富的氮气资源,简单的注氮工艺,使其成为矿井防灭火的一项重要技术。

2.2 注氮参数与“三带”分布情况的关系

2.2.1 最佳注氮量

在进风口侧埋管向采空区释放氮气,注氮引起的风压梯度变化很小,可忽略不计,采空区漏风阻力不变,则采空区漏风强度不变,漏入采空区的空气量减小,注氮口以内的采空区氧浓度下降。假设注入的氮气全部随漏风风流进入采空区内,则

$$Q' = Q - Q_N \quad (1)$$

式中, Q' 为注氮后工作面向采空区的漏风量, m^3/s ; Q 为注氮前采空区漏风量, m^3/s ; Q_N 为注氮量, m^3/s , $Q_N < Q$ 。

如果 $Q_N > Q'$, $Q' < 0$, 采空区的气体就会向工作面泄露。

而在实际情况下,采空区注氮量远小于工作面向采空区的漏风量,即 $Q_N \ll Q'$ 。若制氮机产生的氮气中氧含量为 C_N , 则注氮口附近氧浓度为

$$C'(x_N) = \frac{C(x_N) \cdot Q' + Q_N \cdot C_N}{Q} = \frac{C(x_N) \cdot Q - [C(x_N) - C_N]}{Q} \quad (2)$$

$$= C(x_N) - [C(x_N) - C_N] \cdot Q_N / Q$$

式中, x_N 为注氮口位置, $C(x_N)$ 为注氮前氧浓度, %; $C'(x_N)$ 为注氮后氧浓度, %; C_N 为氮气中的氧浓度, %, $C_N < C(x_N)$ 。

由式(2)可知,当 $C_N < C(x_N)$ 时, $C'(x_N) < C(x_N)$, 说明注氮降低了采空区内的氧气浓度, 否则, 如果 $C_N > C(x_N)$, $C'(x_N) > C(x_N)$, 则说明注氮增加了采空区内的氧浓度。

假设注氮口恰好位于散热带与氧化带的交界处, 则注氮后的氧化带宽度可按式(3)计算:

$$\Delta x' = \frac{C_0}{V_0 \cdot n} \cdot \bar{Q} \cdot \ln \frac{C'(x_A)}{C_{min}} \quad (3)$$

$$= \frac{C_0}{V_0 \cdot n} \cdot \bar{Q} \cdot \ln \frac{C(x_A)}{C_{min}} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{C_N}{C(x_A)} \right) \cdot Q_N / Q \right]$$

式中, $C(x_A)$, $C'(x_A)$ 分别为交界处注氮前后的氧浓度, %; $\Delta x'$ 为注氮后采空区内氧化带宽度, m; C_0 为进气口氧气浓度, mol/m^3 ; V_0 为实验测算的耗氧速度, $mol/(m^3 \cdot s)$; \bar{Q} 为漏风强度, m/s ; n 为采空区隙率, %; x 为采空区内某点到工作面的距离, m; C_{min} 为下限氧浓度, mol/m^3 。

注氮前后氧化带宽度的关系为

$$\Delta x' = \frac{C_0}{V_0 \cdot n} \cdot \bar{Q} \cdot \ln \frac{C(x_A)}{C_{min}} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{C_N}{C(x_A)} \right) \cdot Q_N / Q \right] \quad (4)$$

令

$$\Delta L = \frac{-C_0}{V_0 \cdot n} \cdot \bar{Q} \cdot \ln \left[1 - \left(1 - \frac{C_N}{C(x_A)} \right) \cdot Q_N / Q \right] \quad (5)$$

则 $\Delta x' = \Delta x - \Delta L$ 。

式中, ΔL 为注氮前后氧化带宽度的变化量, m。

由式(5)可以看出, C_N 越小, Q_N 越大, ΔL 就越大。

当 $C_N = 0$ 时,

$$\Delta L = \frac{-C_0}{V_0 \cdot n} \cdot \bar{Q} \cdot \ln \left[1 - \left(1 - \frac{C_N}{C(x_A)} \right) \cdot Q_N / Q \right] \quad (6)$$

由式(3)可知,当 $C'(x_A) = C_{min}$ 时, $\Delta x' = 0$, 此时的注氮量, 即为最佳注氮量, 其值可由式(7)推出:

$$Q_{N0} = \frac{C(x_A) - C_{min}}{C(x_A) - C_N} \cdot Q \quad (7)$$

式中, Q_{N0} 为最佳注氮量, m^3/s ;

由式(7)可知, 当 $C_N = 0$ 时, 最佳注氮量 $Q_{N0} = (1 - C_{min}/C(x_A))Q$ 。

2.2.2 注氮位置与注氮前后氧化带位置的关系

在实际生产中,注氮口位置与采空区自燃氧化带宽度有一定的关系,一般而言是相对固定的。实际情况下的采空区漏风强度并非均衡,一般距工作面越近,漏风强度越大,反

之,漏风强度则越小。采空区某点到工作面距离与漏风强度之间呈非线性关系,类似于负指数变化。

$$Q(x) = k_1 Q_0 e^{-k_2 x} \quad (8)$$

式中, k_1 、 k_2 为常数; $Q(x)$ 为距工作面 x 处的漏风量, m^3/s ; Q_0 为采空区 $x \rightarrow 0$ 处的漏风量, m^3/s 。

为简化计算,近似认为采空区漏风量呈线性变化,且注入氮气中氧含量为零,即 $C_N = 0$, 则

$$Q(x) = Q_0 \cdot k_1 \cdot (1 - k_2 x) \quad (9)$$

则由式(9)得

$$C'(x_N) = \frac{C(x_N)}{Q_0 \cdot k_1 \cdot (1 - k_2 x_N)} \cdot [Q_0 \cdot k_1 \cdot (1 - k_2 x_N) - Q_N] \quad (10)$$

由式(10)可以看出,注氮口位置 x_N 不同,注氮后的氧浓度 $C'(x_N)$ 也不同。

当注氮口位于散热带与氧化带的交界处时:

$$C'(x_N) = \frac{C(x_A)}{Q_0 \cdot k_1 \cdot (1 - k_2 x_A)} \cdot [Q_0 \cdot k_1 \cdot (1 - k_2 x_A) - Q_N] \quad (11)$$

则氧化带宽度 $\Delta x'$ 由式(11)近似得

$$\Delta x' = \frac{C_0}{V_0 \cdot n} \cdot Q \cdot \ln \frac{C'(x_A)}{C_{\min}} < \Delta x \quad (12)$$

当注氮口位于散热带 $x_N < x_A$ 时:

$$C''(x_N) \approx \frac{C_A}{Q_0 \cdot k_1 \cdot (1 - k_2 x_N)} \cdot [Q_0 \cdot k_1 \cdot (1 - k_2 x_N) - Q_N] \quad (13)$$

由于 $x_N < x_A$, 由式(13)知, $Q_N > Q_A$, 则 $C(x_N) > C''(x_N) > C'(x_N)$

$$\Delta x'' = \frac{C_0}{V_0 \cdot n} \cdot Q \cdot \ln \frac{C''(x_A)}{C_{\min}} < \Delta x' < \Delta x \quad (14)$$

由式(14)可知,注氮口位于散热带时注氮后的氧化带宽度,要比注氮口位于氧化带与散热带交界处时大。

当注氮口处于氧化带内时,即 $x_B > x_N > x_A$: 此时氧化带宽度要分成两部分计算,一部分为 x_A 到 x_N 的区域,这个区域氧浓度与注氧前相同;另一部分为 x_N 到 x_B (x_B 是工作面距离氧化带与窒息带交界处之间的距离),这部分区域的氧浓度由于注氮后发生变化而引起氧化带宽度变化,即

$$\Delta x'' = (x_N - x_A) + (x_B - x_A) \quad (15)$$

假设采空区空隙率均匀,氧的消耗完全由煤的氧化和吸附造成,则氧气消耗量为

$$dC = -V dt \quad (16)$$

$$\text{又, } dt = \frac{dx}{U}, \quad U = \frac{\bar{Q}}{n}, \quad V = \frac{V_0}{C_0} g C,$$

故

$$dC = -\frac{V_0 \cdot n}{C_0 \cdot \bar{Q}} \cdot C \cdot dx \quad (17)$$

式中, V 、 V_0 分别为采空区浮煤耗氧速度和实验测算耗氧速度, $mol/(m^3 \cdot s)$; U 为氧化带的风速, m/s 。

在 x_N 处,注氮前 $C(x_N)$ 由式(17)积分得

$$C(x_N) = -C(x_A) \exp \left[\frac{v_0 \cdot n}{C_0 \cdot \bar{Q}} (x_N - x_A) \right] \quad (18)$$

$$(x_N - x_A) = \frac{C_0}{V_0 \cdot n} \cdot Q \cdot \ln \frac{C(x_A)}{C(x_N)} \quad (19)$$

注氮后 $C'''(x_N)$ 由式(19)得

$$C'''(x_N) = \frac{C(x_N)}{Q_0 \cdot k_1 \cdot (1 - k_2 x_N)} \cdot [Q_0 \cdot k_1 \cdot (1 - k_2 x_N) - Q_N] \quad (20)$$

$$(x_N - x_A) = \frac{C_0}{V_0 \cdot n} \cdot Q \cdot \ln \frac{C'''(x_N)}{C_{\min}} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \Delta x''' &= (x_N - x_A) + (x_B - x_N) \\ &= \frac{C_0 \cdot Q}{V_0 \cdot n} \left[\ln \frac{C(x_A)}{C(x_N)} + \ln \frac{C'''(x_N)}{C_{\min}} \right] \end{aligned} \quad (22)$$

$$= \frac{C_0 \cdot Q}{V_0 \cdot n} \left[\ln \frac{C(x_A)}{C_{\min}} + \ln \frac{C'''(x_N)}{C(x_N)} \right]$$

$$\Delta x = \frac{C_0 \cdot Q}{V_0 \cdot n} \ln \frac{C(x_N)}{C'''(x_N)} \quad (23)$$

$$\Delta x - \Delta x''' = \frac{C_0 \cdot Q}{V_0 \cdot n} \cdot \ln \frac{C(x_N)}{C'''(x_N)} \quad (24)$$

式(24)表明,当注氮口位于采空区氧化带内时,氧化带缩小的范围取决于注氮口处注氮前、后的氧浓度之比 $C(x_N)/C'''(x_N)$ 。因此当采空区漏风量呈线性变化时,最佳的注氮口位置是使该处的氧浓度在注氮后恰好等于下限氧浓度,即 $C'(x_N) = C_{\min}$, 此时 $x_B - x_N = 0$ 。根据式(24)得到最佳注氮口位置为

$$x_0 = \frac{1}{k_2} \left[1 - \frac{Q_N \cdot C(x_0)}{Q_0 \cdot k_1 [C(x_0) - C_{\min}]} \right] \quad (25)$$

式中, x_0 为最佳注氮口位置, m 。

3 注氮情况下采空区“三带”分析

采空区工作面长 100 m, 宽 100 m。采空区空隙率分布考虑 x 、 y 方向不同,其他相关参数如算例。模拟工作情况见表 1。

表 1 模拟工况点

Table 1 Simulated operation points

序号	注氮位置/m	注氮量/($m^3 \cdot h^{-1}$)
1	10	10, 20, 40, 60, 80
2	20	10, 20, 40, 60, 80
3	30	10, 20, 40, 60, 80
4	40	20
5	50	20
6	60	20

从图 2 和图 3 可以看出,未注氮情况下进风侧氧气活动范围较大,随着向采空区深入逐渐衰减,进回风侧呈不对称分布,按照目前采用的漏风速度或者氧气浓度三带划分标准,上限漏风强度取 0.001 m/s,下限漏风强度取 0.0015 m/s。上限氧气浓度 18%,下限氧气浓度 10%,氧化带最大宽度大致位于工作面靠后 25~70 m 左右。未注氮前,采空区依据氧气浓度划分氧化带的深度为 54.5 m 左右,依据速度场划分,氧化带的深度为 30 m 左右。

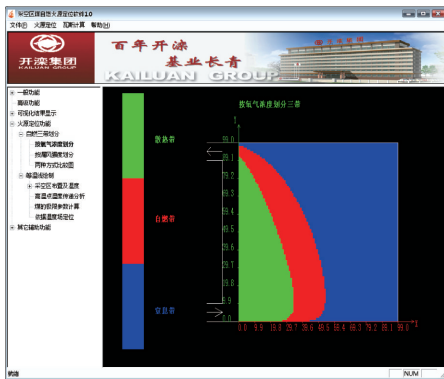


图2 未注氮时采空区氧气“三带”分布
Fig. 2 "Three zones" of oxygen field with no nitrogen injection

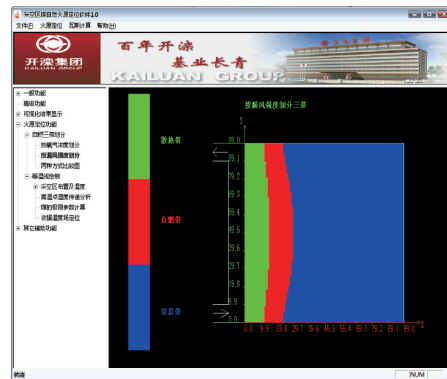


图3 未注氮时采空区漏风强度“三带”分布
Fig. 3 "Three zones" of air leakage intensity in the goaf with no nitrogen injection

经注氮达到稳定后可以发现氧气分布出现回缩并整体前移,尤其是进风侧氧化带范围大大减少,注氮效果明显。然后采用不同的注氮流量和注氮位置观察氧化带分布规律以确定最佳注氮参数。对不同注氮方案下软件导出的数据进行整理,可以得到不同注氮位置下最大氧化带宽度的变化

规律。从图4和图5可知,注氮可以使得采空区氧气浓度“氧化带”变窄,但是使得速度场“氧化带”变宽,并向采空区深部移动。从图6可以看出,采空区在10~30m注氮时,效果比较明显。从图7可以看出,注氮量增大,氧化带变窄,采用60 m³/h,基本上可以抑制氧气浓度场“氧化带”。

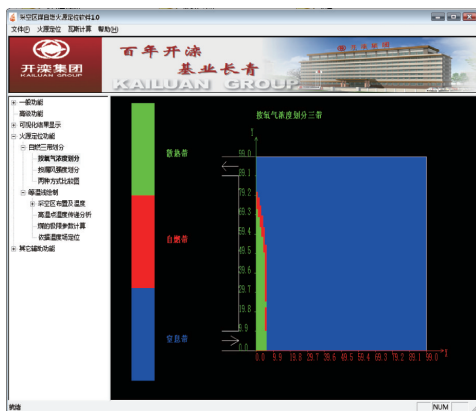


图4 “20 m”注氮(注氮量60 m³/h)情况下采空区氧气“三带”分布
Fig. 4 "Three zones" of oxygen field with nitrogen injection of 60 m³/h

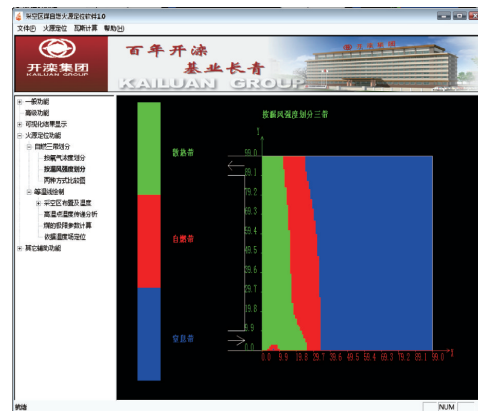


图5 “20 m”注氮(注氮量60 m³/h)情况下采空区漏风强度“三带”分布
Fig. 5 "Three zones" of air leakage with nitrogen injection of 60 m³/h

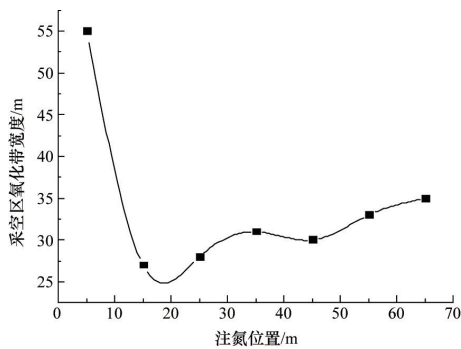


图6 20 m³/min 注氮量下注氮位置和最大氧化带宽度关系
Fig. 6 Relations between nitrogen injection spot and width of oxidization zone with 20 m³/min nitrogen injection of 20 m³/min

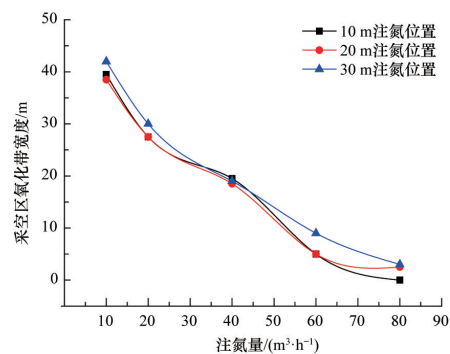


图7 注氮位置处注氮量和最大氧化带宽度关系
Fig. 7 Relations between nitrogen injection capacity and width of oxidization zone

取 20 m 为合适的注氮位置,对不同注氮量和最大氧化带宽度进行回归分析,可以得到得最大氧化带宽度 L 和注氮量 q 的关系:

$$L = -0.5276q + 40.698 \quad (26)$$

由于氧化带宽度应满足以下关系式:

$$L \leq \tau v + d \quad (27)$$

式中, τ 为实验室测定的煤样最短发火期, d ; v 为工作面推进平均速度, m/d ; d 为停产检修时间, d 。因此,注氮量 q 应满足

$$q \geq \frac{(\tau v + d) - 40.698}{0.5276} \quad (28)$$

从注氮量和氧化带宽度的关系可以看到,随着注氮量的增大,曲线趋于平缓,单纯靠增加注氮量防火效果不够明显,并且考虑到设备的注氮能力有限,所以应该配合注浆,堵漏等措施一并使用,实现综合防治。

4 结论

结合采空区“三带”区域划分理论,采用自行开发采空区火源定位软件,模拟了注氮条件下采空区三带运移规律。理论分析注氮对采空区漏风场的影响,并对其进行数值模拟。

1) 合理的注氮位置基本上位于散热带和氧化带交界处,但一般情况下,建议将注氮位置设到氧化带内。合理注氮量应该综合考虑采空区两端压差、注氮位置后,再进行分析。

2) 当注氮达到稳定后,可以发现氧气分布出现回缩并整体前移的现象,尤其是在进风侧氧化带范围大大减少的情况下,注氮效果比较明显。

参考文献(References)

[1] 方树林. 中国煤矿灾害防治技术的研究现状与发展趋势[J]. 洁净煤技术, 2012, 18(1): 90-94.
Fang Shulin. Research status and development tendency of coal mine disaster prevention and control technology in China[J]. Clean Coal Technology, 2012, 18(1): 90-94.

[2] 李旭东, 蒋曙光, 刘松, 等. 煤自燃反应微观机理过程论[J]. 煤矿安全, 2011(2): 117-121.
Li Xudong, Jiang Shuguang, Liu Song, et al. Microscopic mechanism expounds coal spontaneous combustion reaction[J]. Safety in Coal Mines, 2011(2): 117-121.

[3] 戴广龙. 煤低温氧化过程中微晶结构变化规律研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 322-325.
Dai Guanglong. Research on microcrystalline structure change regularity in the coal low temperature oxidation process[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 322-325.

[4] 宋永津. 煤矿均压防灭火[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
Song Yongjin. The pressure of coal mine for fire extinguishing[M]. Beijing: Coal Industry Publishing House, 2001.

[5] 李宗翔, 李海洋, 贾进章. Y形通风采空区注氮防火的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2005, 30(5): 51-55.
Li Zongxiang, Li Haiyang, Jia Jinzhang. Numerical simulation of preventing spontaneous combustion by nitrogen injection in goaf of Y-type ventilation face[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(5): 51-55.

[6] 马汉鹏, 王德明, 何启林. 注氮对综放面采空区内 O_2 的浓度和“三带”宽度的影响[J]. 煤矿安全, 2006(1): 11-13.
Ma Hanpeng, Wang Deming, He Qilin. Nitrogen injection to fully-mechanized face goaf in the O_2 concentration and influence of the width of the "three zones"[J]. Safety in Coal Mines, 2006(1): 11-13.

[7] 姚元领, 胡泊, 李洁莹, 等. 综放面采空区注氮前后“三带”分布数值模拟[J]. 煤矿安全, 2011(1): 13-16, 21.
Yao Yuanling, Hu Po, Li Jieying, et al. Numerical simulation on distribution of "three zones" in gob of full-mechanized caving face before and after being injected nitrogen[J]. Safety in Coal Mines, 2011(1): 13-16, 21.

[8] 吴玉国, 郭剑明, 张东坡, 等. 综放工作面连续注氮下采空区气体分布及“三带”变化规律[J]. 煤炭学报, 2011, 36(6): 964-967.
Wu Yuguo, Wu Jianming, Zhang Dongpo, et al. Distribution law of gas and change rule of "three zones" in the goaf of fully mechanized top-coal caving working face under the continuous nitrogen injection[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(6): 964-967.

[9] 代晓亮, 张人伟, 毕岩峰. 综放面采空区“三带”范围的测定与注氮防火技术的应用[J]. 煤矿安全, 2011(12): 85-86, 89.
Dai Xiaoliang, Zhang Renwei, Bi Yanfeng. Fully-mechanized face goaf "three zones" and nitrogen injection for determination of the scope of application of the technology of fire[J]. Safety in Coal Mines, 2011(12): 85-86, 89.

[10] 张东坡. 易自燃特厚煤层综放面采空区注氮防火技术研究与应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
Zhang Dongpo. Study and application on the technique of nitrogen injection against fire in spontaneous combustion thick seam gob[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.

(责任编辑 吴晓丽)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿: www.kjdb.org。