

# 注氮条件下采空区自燃带划分及影响区域判定

赵文彬<sup>1</sup>, 王金凤<sup>2</sup>, 闵耀涛<sup>1</sup>, 赵厚春<sup>3</sup>, 贾海滨<sup>3</sup>

(1. 山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 化学与环境工程学院, 山东 青岛 266590;  
3. 山东省天安矿业有限公司 星村煤矿, 山东 曲阜 273155)

**摘要:** 为研究注氮工艺对采空区自燃带划分的影响, 根据对星村煤矿3号煤层采空区5个测点所测指标气体浓度变化规律进行分析, 提出了注氮影响条件下的采空区自燃五带划分方法, 即: 散热带、受注氮影响产生的自燃带、窒息带、注氮结束后产生的自燃带和窒息带。研究表明: 受注氮影响产生的自燃带和窒息带范围会发生转移, 成为自燃易发区域; 提出了基于指标气体的SPSS相关性分析判定注氮影响的采空区范围, 结果表明, 注氮过程中进风侧2、4号测点周围指标气体与注氮量相关性强, 该区域受注氮影响较大; 位于采空区进回风巷侧的1、5号测点附近, 注氮影响较弱; 相关性分析注氮影响区域与现场实测一致。

**关键词:** 注氮; 采空区自燃; 指标气体; 自燃带区域划分

**中图分类号:** TD75 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)03-0060-05

## Division on spontaneous combustion zone and judgement on influence zone of goaf under the condition of nitrogen injection

Zhao Wenbin<sup>1</sup>, Wang Jinfeng<sup>2</sup>, Min Yaotao<sup>1</sup>, Zhao Houchun<sup>3</sup>, Jia Haibin<sup>3</sup>

(1. School of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. School of Chemical and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. Xingcun Mine, Shandong Tian'an Mining Company Limited, Qufu 273155, China)

**Abstract:** In order to study the nitrogen injection affected to the division of the spontaneous combustion zone in the goaf, based on the analysis on the index gas concentrations measured at the five measuring points in No. 3 seam goaf of Xingcun Mine, a division method of spontaneous combustion five zones in the goaf under the condition of nitrogen injection was provided and they were the heat emission zone, the spontaneous combustion zone and suffocation zone occurred by the influences of the nitrogen injection, the spontaneous combustion zone and suffocation zone occurred after the nitrogen injection completed. The study showed that the scope of the spontaneous combustion zone and suffocation zone occurred by the influences of the nitrogen injection would have a migration occurred and would become a spontaneous combustion region. The paper proposed that the SPSS correlation analysis of the index gas could be applied to judge the goaf scope influenced by the nitrogen injection. The result showed that in the nitrogen injection process, the index gas around No.2 measuring point at the air income side was highly related to the nitrogen injection volume. The region highly influenced by the nitrogen injection was located near No. 1 and 5 measuring points at the air income gateway of the goaf. The nitrogen injection influence was low and the correlation analysis of the nitrogen injection influence region was the same to the site measurement.

**Key words:** nitrogen injection; spontaneous combustion of goaf; index gas; division of spontaneous combustion zone

## 0 引言

国内外学者对深部矿井采空区自燃“三带”分布

进行了大量研究, 现场一般通过观测采空区氧浓度、温度变化划分散热带、自燃带和窒息带; 科学合理的采空区自燃“三带”划分对于判断采空区浮煤自燃危

收稿日期: 2015-10-20; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2016.03.012

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAK06B07)

作者简介: 赵文彬(1976—)男, 山东泰安人, 副教授, 博士。Tel: 13969794417 E-mail: zhwb1976@163.com

引用格式: 赵文彬, 王金凤, 闵耀涛, 等. 注氮条件下采空区自燃带划分及影响区域判定[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 60-64.

Zhao Wenbin, Wang Jinfeng, Min Yaotao, et al. Division on spontaneous combustion zone and judgement on influence zone of goaf under the condition of nitrogen injection[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 60-64.

险性及综合防灭火有重要意义<sup>[1-4]</sup>; 然而传统易自燃煤层采空区自燃“三带”划分中, 当采空区  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  等指标气体超限时, 采用的预防性注氮工艺中氮气的注入又将影响采空区自燃“三带”的原有分布。

文献[2-4]分别从现场实践、理论研究及数值模拟试验等方面对采空区注氮防灭火的最优参数进行了研究, 但大多仅根据经验判断出最佳注氮口位置及注氮量, 而对采空区不同注氮区域及注氮量所产生的注氮效果缺乏对比分析与系统研究<sup>[5-12]</sup>。笔者选取星村煤矿 3302 工作面为试验地点, 研究了注氮条件下深部矿井采空区自燃带的划分, 并对采空区注氮效果进行科学评判。

## 1 矿井概况及采空区自燃带划分指标确定

星村煤矿主采 3 煤开采深度超过千米, 煤层厚度 8 m, 煤层的自燃倾向性等级为 II 类, 属自燃煤层<sup>[1]</sup>。煤层自燃对矿井安全生产构成严重威胁。星村煤矿 3302 工作面长 110 m, 开切眼处共布置测点 5 个, 如图 1 所示。现场采样利用气相色谱观测其指标气体浓度变化, 观测时间集中于 2014 年 4 月 18 日—5 月 7 日。期间由于工作面  $\text{CO}$  浓度异常, 于 4 月 25 日—5 月 28 日在采空区采取注氮工艺处理<sup>[2-4]</sup>。随着  $\text{CO}$  浓度下降, 注氮停止。

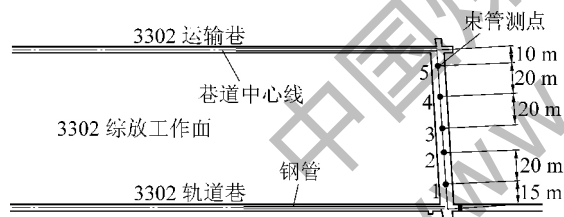


图 1 3302 工作面束管测点布置

Fig. 1 Beam tube points layout in No. 3302 working face

星村煤矿煤层自燃指标气体  $\text{CO}$  在煤氧化自燃过程中出现较早、生成量较大、浓度增长速度也较快, 其浓度与煤体温度之间存在明显的对应关系, 是煤自燃早期预测非常灵敏的指标气体, 工作面初期煤自燃现象应以  $\text{CO}$  作为指标性气体来掌握煤炭自燃情况<sup>[13-15]</sup>。空气中的  $\text{O}_2$  体积分数为 20.93%, 根据工作面煤层自燃测定数据分析, 传统采空区自燃“三带”可采用耗氧量中  $\text{O}_2$  浓度变化划分, 其采空区自燃“三带”划分标准为: 散热带  $\text{O}_2$  体积分数  $>18\%$ ; 氧化带  $10\% \sim 18\%$ ; 窒息带  $<10\%$ <sup>[13]</sup>。

## 2 注氮条件下的采空区自燃带分布规律

各测点推进距离  $L$  与  $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}$  体积分数等参

数的关系曲线如图 2 所示。

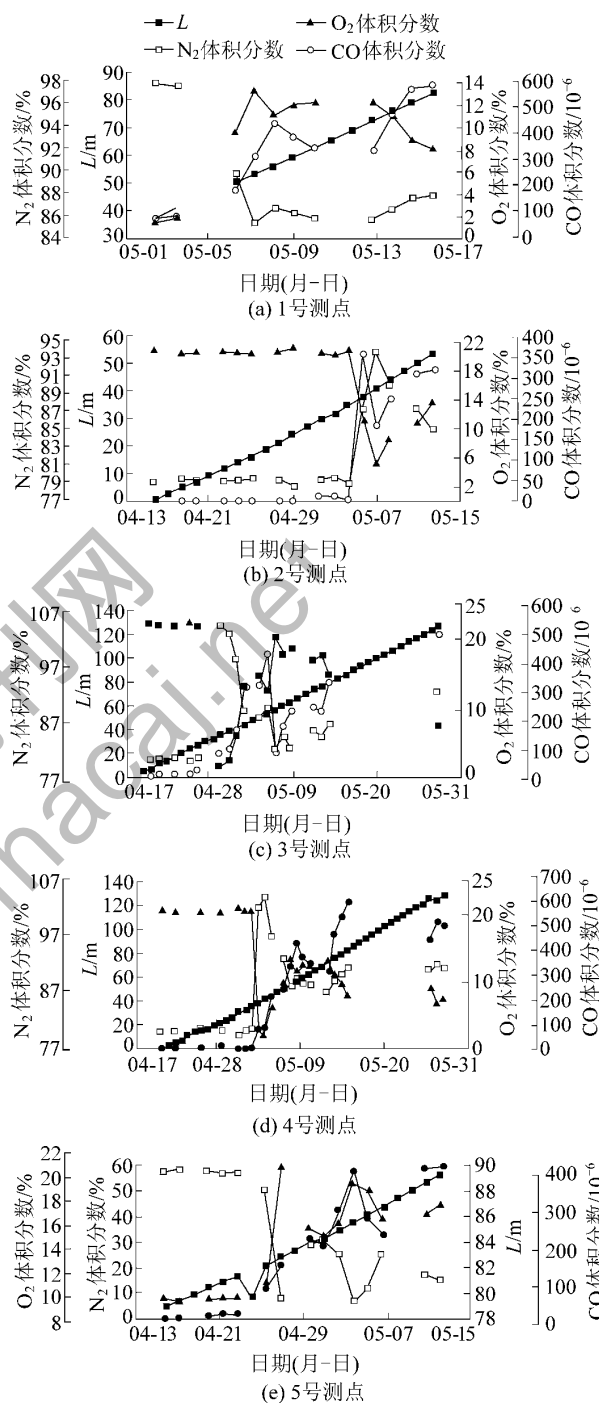


图 2 各测点参数变化曲线

Fig. 2 Parameters change curves of measuring points

1)  $\text{CO}$  浓度开始处于较平稳状态, 随着推进距离增加略有上升, 特别是在 2014 年 5 月 1 日左右上升至一个极点(工作面中部 3 号测点, 回风侧 5 号测点除外), 接着略有下降, 至 5 月 5 日有所回升, 总体上在 5 月 1 日之后呈上升的趋势, 5 月 2 日前后发生变化, 5 月 7 日后, 先上升后下降, 最终保持平稳。

1号测点CO浓度在5月5日—7日急剧上升,煤层自然发火进入加速期;随后上升幅度变缓并最终保持稳定;2号测点在5月2日后先升后降;3、4号测点从5月1日到5月6日,CO浓度变化大幅上升至极点;从5月7日开始,CO浓度反而急剧下降,5月10日后逐渐稳定且稍有增长。

5号观测点CO浓度正常,4月25日后开始下降,至4月26日最低,4月28日略有回升,5月1日下降,随后上升至5月4日升至最高后下降。

2)  $O_2$ 浓度在4月30日之前处于平稳略有下降状态,受注氮影响,各测点在5月1日浓度急剧降至最低点后,各测点的浓度先后出现变化,最终保持平衡状态。注氮前,位于进风侧的1号测点,由于冒落顶板矸石未能压实,随着工作面的推进, $O_2$ 浓度变化较小,随着冒落矸石的压实, $O_2$ 浓度略有下降;受注氮影响,该测点 $O_2$ 体积分数在5月1日突然降至10%以下,注氮结束后, $O_2$ 浓度开始回升,至5月6日升至最高值后(10%~18%),开始在10%左右反复震荡,5月12日后开始快速下降。

受注氮影响其余各点(2、3、4、5号测点)先后在5月1日前后 $O_2$ 体积分数快速降低至10%以下,随着注氮量及推进距离的增加,各测点 $O_2$ 体积分数将在10%左右浮动,注氮结束后, $O_2$ 浓度略有回升。各测点 $O_2$ 浓度变化规律同1号测点。

3)  $N_2$ 浓度在每个测点的变化均不同。

1号测点5月1日前,工作面采空区挡风帘后部轨道巷侧 $N_2$ 浓度变化幅度较小,此时注氮过程对该点的影响较小,相关数据表明该段时间内测点周围空间风流通道顺畅,区域位于散热带范围,之后下降,在5月6日—12日期间先保持平稳状态,随后略有上升。

2号测点4月25日开始注氮,但此处指标气体浓度较稳定,表明此处受自然发火影响较小,注氮工艺对其影响不大。5月1日后,随着进风侧轨道巷顶板冒落,受进风区域风流影响变小,注氮量增加后, $N_2$ 浓度急剧上升,5月2日达到定点后缓慢下降。

3、4号测点4月30日前 $N_2$ 浓度变化较小,至5月1日, $N_2$ 浓度突然升高,随后略有下降,后至5月7日略有回升,这表明该时间段内,注氮开始影响测点周围。

5号测点4月25日前处于平稳状态,4月26日注氮后, $N_2$ 浓度急剧上升,至极大点后下降,4月29日后开始逐渐上升,注氮结束后有所下降但趋于平稳。

由此可见,注氮工艺对采空区煤自燃氧化有一定抑制作用,对 $O_2$ 、CO影响较明显,表明注氮工艺有利于抑制采空区煤层氧化与自然发火。推进距离与 $O_2$ 浓度变化呈负相关,注氮期间 $O_2$ 浓度变化明显,自燃带的范围受注氮工艺影响。

### 3 注氮条件下采空区自燃带划分

#### 3.1 采空区指标气体分布规律

对3302工作面采空区的5个测点观测可知,由于CO浓度在4月25日左右发生异常,对采空区进行了注氮,5号观测点指标气体浓度变化规律性较好;其余4个测点4月25—30日 $O_2$ 浓度变化较小,相应 $N_2$ 、CO指标气体浓度无变化,表明工作面开切眼附近该阶段漏风通道顺畅;5月1日前后各测点 $O_2$ 浓度下降迅速,表明此时漏风通道不畅,同时注氮量的增加稀释了原有的 $O_2$ 和CO等气体。随着注氮量及推进距离的增加及矸石冒落压实,各测点 $O_2$ 体积分数降至10%以下,分别进入窒息带;注氮结束后,5个测点 $O_2$ 浓度开始回升,自燃“三带”范围发生转移;最终各观测点 $O_2$ 体积分数最终降至10%以下完全进入“窒息带”。根据采空区传统自燃“三带” $O_2$ 浓度变化划分依据,对注氮条件影响下的自燃带分布见表1,采空区自燃带划分如图3所示。

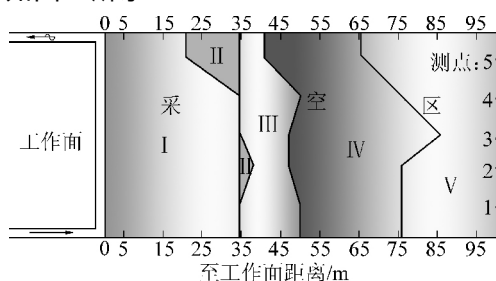


图3 3302工作面采空区自燃带分布

Fig. 3 Spontaneous combustion zone distribution of goaf in No. 3302 working face

#### 3.2 采空区自燃带划分及特点

由图3可知,受注氮影响,传统采空区自燃带划分成5个区域(表1),其特点如下:

区域I:靠近工作面的散热带,该区域靠近工作面,采空区漏风通道畅通,漏风严重,区域内氧气体积分数较高,大于18%,煤蓄热条件较差,所产生的CO主要是深部矿井采空区围岩散热自燃氧化形成。

区域II:采空区散热带向自燃带正常过渡时,由于CO浓度异常,为防止采空区煤层自燃,向采空区

注氮 ,区域内部分氧气体积分数降至 18% 以下 ,且浓度下降迅速。该区域一般位于散热带向自燃带过

渡区域 ,指标气体变化主要受注氮影响 ,部分区域快速进入自燃带后又进入窒息带 ,该区域一般较窄。

表 1 注氮条件下采空区自燃带分布规律

Table1 Spontaneous combustion zone distribution law in goaf under the condition of nitrogen injection						m
测点编号		5 号	4 号	3 号	2 号	1 号
注氮前	散热带范围	0~20.9	0~34.6	0~34.6	0~34.6	0~34.6
	散热带范围	0~20.9	0~34.6	0~34.6	0~34.6	0~34.6
	自燃带范围	20.9~34.6	—	—	34.6~37.7	—
注氮期间	窒息带范围	34.6~40.8	34.6~50.1	34.6~47.0	37.7~47.0	34.6~50.1
	自燃带范围	40.8~65.6	50.1~75.8	47.0~85.5	47.0~75.8	50.1~75.8
注氮结束后	窒息带范围	>65.6	>75.8	>85.5	>75.8	>75.8
	自燃带范围					

区域Ⅲ: 受注氮影响出现的窒息带 ,该窒息带并非真正意义上的窒息带 ,其氧气浓度主要受注氮的影响 ,采空区窒息带范围与注氮时间、注氮量等参数密切相关 ,一旦注氮停止 ,该区域自燃概率随之上升。

区域Ⅳ: 注氮停止后 ,随着所注氮气量的释放 ,该区域内氧气浓度有所回升 ,由原先的窒息带重新进入自燃带。这表明 ,此区域的窒息带是受注氮影响临时形成 ,注氮结束后 ,如不考虑其自燃带的转移 ,易忽视该区域危险性使其自燃概率增大 ,观测数据表明注氮结束后该区域 CO 浓度显著升高 ,应是该区域向自燃带转移的结果。

区域Ⅴ: 随着推进距离的增加 ,O<sub>2</sub> 浓度逐渐降低 ,当氧气体积分数再次降低至 10% 以下时 ,采空区将再次进入窒息带; 采空区自燃“三带”发展过程中 ,受注氮影响 ,该窒息带范围小于正常采空区自燃“三带”范围。

对 5 个区域分析可以看出 ,由于采空区内指标气体 CO 浓度异常 ,采用注氮工艺进行预防 ,CO 作为自然发火的指标气体其灵敏度较好; 传统自燃三带范围受注氮工艺影响 ,范围发生变化和转移 ,注氮停止后区域Ⅲ、Ⅳ周围自然发火概率增加 ,在采空区自燃防治时应引起重视。

4 注氮系统对采空区观测点的影响

受注氮影响 ,各观测点指标气体发生变化; 为考虑注氮系统对采空区自燃“三带”分布的影响 ,特考虑不同注氮时期、不同注氮位置 ,指标气体氮气、氧气、CO 三类指标气体的相关性分析 ,见表 2。

1) 注氮过程相关性分析。由表 2 可以看出 ,对于 5 号观测点 ,N<sub>2</sub> 浓度变化与 CO 呈正相关趋势; 4 月 25 日注氮后 ,随着注氮量的增加 ,其相关性降低; 注氮结束后 ,N<sub>2</sub> 浓度降低 ,但 CO 浓度有回升趋势后渐趋平稳 ,2 种气体呈弱负相关且相关性较差。

整个注氮过程中 ,N<sub>2</sub> 浓度与 O<sub>2</sub> 呈显著负相关;

表 2 注氮影响下 N<sub>2</sub> 与 CO、O<sub>2</sub> 指标气体相关性分析  
Table2 Correlation analysis of index gas N<sub>2</sub> and CO, O<sub>2</sub> under the influence of nitrogen injection

测点编号	阶段	相关性参数	N <sub>2</sub> 与指标气体相关性	
			CO	O <sub>2</sub>
5 号	注氮前	P 相关性	0.800	-0.996 **
		显著性(双侧)	0.104	0
	注氮中	P 相关性	0.493	-0.989 **
		显著性(双侧)	0.320	0
	注氮后	P 相关性	-0.080	-0.984 **
		显著性(双侧)	0.898	0.002
1 号	注氮后	P 相关性	-0.730 *	-0.973 **
		显著性(双侧)	0.011	0
2 号	注氮后	P 相关性	-0.901 *	-0.998 **
		显著性(双侧)	0.037	0
3 号	注氮后	P 相关性	-0.399	-0.995 **
		显著性(双侧)	0.199	0
4 号	注氮后	P 相关性	-0.746 **	-0.976 **
		显著性(双侧)	0.005	0

注: \* 为在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\* 为在 0.01 水平(双侧)上极显著相关; - 表示负相关性。

受注氮影响 ,N<sub>2</sub> 浓度变化趋势与 O<sub>2</sub> 变化规律相关性下降 ,表明采空区 O<sub>2</sub> 变化受外界干扰 ,其变化趋势规律性变差; 注氮结束后 ,O<sub>2</sub> 浓度先增后降 ,其浓度变化与氮气减缓趋势相关性变差。

2) 注氮结束后 ,1—5 号测点相关性分析。注氮结束后 ,对 N<sub>2</sub> 浓度变化与 CO 的相关性分析可知 ,2 种指标气体浓度变化呈负相关性 ,这表明 N<sub>2</sub> 浓度的增加对抑制 CO 的产生有明显作用; 5 个测点的 CO 与 N<sub>2</sub> 负相关性排序由弱到强为: 5、1、3、4、2 号 ,其中 2 号测点负相关性最显著 ,达到 -0.901 ,采空区中部 2 号测点附近利用注氮改变采空区自燃“三带”范围的防灭火效果较好; 这与 2 号测点所处的预埋注氮管位置相吻合; 进回风侧 1、5 号测点位于工作面进回风巷采空区附近 ,受工作面进回风影响 ,2 种指标气体相关性较差。注氮结束后 ,N<sub>2</sub> 浓度变化与 O<sub>2</sub> 呈负相关性 ,随着 N<sub>2</sub> 浓度的降低 ,采空区 O<sub>2</sub> 浓度有一定的回升。其负相关指标由弱到强排序为: 2、

3、5、4、1号。这说明,注氮结束后,氧气浓度变化较小的为1号测点,其所处采空区自燃“三带”区域较为稳定;2号区域受注氮影响较为明显,其采空区自燃“三带”范围变化最大;3号其次,由于对采空区进行堵漏措施,回风侧5号测点注氮量对 $O_2$ 有一定抑制作用,现场实测也验证了评判结果的正确性。

## 5 结 语

通过3302工作面采空区观测点指标气体的变化规律,将受注氮工艺影响的采空区自燃带划分为:区域Ⅰ——散热带;区域Ⅱ——受注氮影响产生的自燃带;区域Ⅲ——受注氮影响产生的窒息带;区域Ⅳ——注氮结束后的自燃带;区域Ⅴ——窒息带。对5个区域分析可以看出,CO作为自然发火的指标气体其灵敏度较好;注氮影响下,传统采空区自燃“三带”范围将发生变化,当注氮停止,区域Ⅲ、Ⅳ将会转移,自然发火概率较高;结合观测数据,利用SPSS软件分析注氮量与 $N_2$ 、 $O_2$ 和CO的相关性,以此判定了注氮工艺影响最大的区域为2号观测点位置。

## 参考文献(References):

- [1] GB/T 20104—2006 煤自燃倾向性色谱吸氧鉴定法[S].
- [2] 鲁杰,张磊,陈连城. “三带”技术在防治采空区自燃中的应用[J]. 山东煤炭科技, 2012(2): 196-197.  
Lu Jie, Zhang Lei, Chen Liancheng. Application of “Three Zones” technology in controlling goaf spontaneous combustion [J]. Shandong Coal Technology, 2012(2): 196-197.
- [3] 郝永,刘杰,王长元,等. 综放工作面超厚煤层注氮防灭火技术应用[J]. 煤矿安全, 2008, 39(4): 41-43.  
Hao Yong, Liu Jie, Wang Changyuan, et al. Application of feeding nitrogen in extra-thick coal seam of comprehensive mechanized and breaking props coal mining [J]. Safety in Coal Mines, 2008, 39(4): 41-43.
- [4] 刘华锋,张人伟,段汉文,等. 综放采空区“三带”观测及注氮防灭火研究[J]. 能源技术与管理, 2009(3): 58-60.  
Liu Huafeng, Zhang Renwei, Duan Hanwen, et al. Observations of fully mechanized caving face goaf “three zones” and research of Nitrogen injection against fire [J]. Energy Technology and Management, 2009(3): 58-60.
- [5] 赵文彬,张守勇,王金凤,等. 鑫安煤矿复杂地质构造3号煤自燃规律研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(S2): 346-350.  
Zhao Wenbin, Zhang Shouyong, Wang Jinfeng, et al. Xin'an coal mine complex geological structure number 3 and the study of spontaneous combustion law [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S2): 346-350.
- [6] 朱光丽,赵文彬,张守勇,等. 基于数值拟合的1307工作面“三带”分布规律预测研究[J]. 煤炭工程, 2015(1): 92-94.  
Zhu Guangli, Zhao Wenbin, Zhang Shouyong, et al. Prediction research of “three zones” distribution law in 1307 face based on numerical fitting [J]. Coal Mine Engineering, 2015(1): 92-94.
- [7] 殷春伟. 深部大倾角综放工作面采空区自燃三带研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(S1): 97-99, 101.  
Yin Chunwei. The study of goaf spontaneous combustion three zone in large inclined angle fully mechanized caving face [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(S1): 97-99, 101.
- [8] 马成军,白利文,申立华. 采空区自燃“三带”分布规律及影响因素分析[J]. 华北科技学院学报, 2008, 5(1): 24-26.  
Ma Chengjun, Bai Liwen, Shen Lihua. Analysis of distribution regularity and Influence factors of spontaneous combustion “three zones” in goaf [J]. North China Science and Technology College Journal, 2008, 5(1): 24-26.
- [9] 张勋. 塔山煤矿综放面采空区自燃“三带”研究[D]. 抚顺: 辽宁工程技术大学, 2011.
- [10] 邓凯,袁树杰. 综采工作面煤炭自燃“三带”的划分及实测[J]. 煤矿安全, 2012, 43(5): 141-146.  
Deng Kai, Yuan Shujie. The division and analysis of fully mechanized caving face goaf spontaneous combustion three zone [J]. Safety in Coal Mine, 2012, 43(5): 141-146.
- [11] 余明高,常绪华,贾海林,等. 基于Matlab采空区自燃“三带”的分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 600-604.  
Yu Minggao, Chang Xuhua, Jia Hailin, et al. Analysis of spontaneous combustion three zone in goaf based on Matlab [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 600-604.
- [12] 王志强,李鹏飞,王磊,等. 再论采场“三带”的划分方法及工程应用[J]. 煤炭学报, 2013, 38(2): 287-293.  
Wang Zhiqiang, Li Pengfei, Wang Lei, et al. Method of division and engineering use of “three band” in the stope again [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(2): 287-293.
- [13] 王德明. 矿井火灾学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008: 115-125, 192-203.
- [14] 陈全. 采空区三带划分指标的研究[J]. 煤炭工程师, 1997, 3(3): 12-15.  
Chen Quan. The study of goaf with divided three zones indicators [J]. Coal Engineer, 1997, 3(3): 12-15.
- [15] 谢军,薛生. 综放采空区空间自燃三带划分指标及方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 65-67.  
Xie Jun, Xue Sheng. The delimiting indexes of space spontaneous combustion three zones in fully mechanized caving face goaf [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(1): 65-67.