

鲁西煤矿 3_109 工作面自然发火危险度分析

孙路路^{1,2}, 王庆照³, 林雪礼³, 周建³

(1. 山东科技大学 资源与环境工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266590;

3. 山东鲁能鲁西矿业有限公司, 山东 济宁 272053)

摘要:为进一步明确鲁西煤矿的煤炭自然发火危险性,根据现有的煤炭自然发火安全评价方法,结合鲁西煤矿实际情况,优选采用印度学者贝纳基提出的预测方法,对鲁西煤矿 3_109 工作面自然发火危险度进行了分析。分析结果得出 3_109 工作面自然发火危险隶属度为 28.86%,有自然发火的可能性,为 3_109 工作面的防灭火工作提供了理论支持,也为相似条件下工作面自然发火危险度分析提供了依据。

关键词:自然发火;危险度;分析方法;防灭火;危险隶属度

中图分类号:TD75

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2012)02-0074-07

Analysis of the Risk Degree of Spontaneous Combustion in 3_109 Coalface of Luxi Colliery

SUN Lulu^{1,2}, WANG Qingzhao³, LIN Xueli³, ZHOU Jian³

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of

Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, Ministry of Education, Shandong University of

Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

3. Shandong Lineng Luxi Mining Co. Ltd, Jining, Shandong 272053, China)

Abstract: In order to further clarify the risk degree of coal spontaneous combustion in Luxi colliery, the risk degree of coal spontaneous combustion in 3_109 coalface of the colliery was analyzed according to existed safety evaluation method of coal spontaneous combustion and combining with the actual situation of the colliery and the prediction method put forward by Indian scholar Benaki which was optimally selected. The analysis result indicates that risk membership grade of coal spontaneous combustion in 3_109 coalface is 28.86% and there is possibility of coal spontaneous combustion, providing theoretical support for the fire prevention and fighting in 3_109 coalface and the scientific basis for the analysis of risk degree of coal spontaneous combustion in such coalfaces with similar conditions.

Key words: spontaneous combustion; risk degree; analysis method; fire prevention and fighting; risk membership grade

矿井火灾是煤炭生产中的自然灾害之一,已成为制约矿井安全生产和高效开采的主要因素^[1]。煤炭自然发火是矿井火灾的主要形式,约占矿井火灾总数的 90%^[2]。对煤的自然发火危险度进行科学、系统、准确的分析,也一直是国内外矿井火灾研究的重点方向^[3]。国内外专家学者建立了很多煤炭自燃危险度分析方法,如模糊聚类分析法、灰色传统理论分析法、计算机模拟方法等,但真正用于指导实际生产的却很少。

收稿日期:2011-10-20

基金项目:山东省科技发展计划应急项目(2010GSF10808)

作者简介:孙路路(1987—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事矿山灾害预测与防治方面的研究。

E-mail:sunlukdck@sina.com

王庆照(1967—),男,山东临沂人,高级工程师,主要从事采矿工程方面的研究与技术工作。

E-mail:lin74lin04@sina.com

以往的煤炭自然发火危险度分析,对矿井的实际情况考虑不够全面,分析结果准确性和说服力不高^[4]。因此,本研究以现场实测数据为基础,从便于现场实际应用出发,全面考虑现场实际情况,采用印度学者贝纳基提出的预测方法,对鲁西煤矿 3₁₀₉ 工作面煤炭自然发火危险度进行了综合分析。

1 矿井概况

鲁西煤矿位于山东省济宁市境内,井田北距汶上县约 17 km,南距济宁市任城区 15 km。矿井采用立井开拓方式,设计规模 45 万 t/a,2010 年原煤产量达 76.51 万 t。矿井现主采 3_F 煤层,现阶段布置 1 个综采工作面和 8 个掘进工作面。鲁西煤矿开采下组煤采用走向长壁采煤法和综合机械化开采,顶板管理方式为全部垮落法。矿井采用中央并列抽出式的通风方法,即副井进风、主井回风。矿井通风:容易时期的等积孔为 2.9 m²,困难时期的等积孔为 2.3 m²,属通风容易矿井。3_F 煤层属自燃煤层,最短自然发火期为 64 d。

2 评价方案的确定

目前最具代表性的煤炭自然发火危险度分析方法主要有以下四种^[5]。

1) 波兰学者奥尔平斯基提出的计算自然发火危险性指数公式

$$P_s = S_{zb} + (S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 + S_7) \quad (1)$$

其中: P_s —系统中含发火危险性机率; S_{zb} —煤的自然发热敏感性; S_1 —遗留在矿井和采空区内的煤; S_2 —采用的开采方法; S_3 —通风方法; S_4 —采空区漏风; S_5 —煤层湿度; S_6 —开采深度; S_7 —通风强度。

根据开采技术条件,将 $S_1 \sim S_7$ 、 S_{zb} 进行计分,即可得出波兰煤矿自然发火危险性指数。计算结果 $P_s < 120$ 时,认为是安全的;反之,则是不安全的。

2) 德国蒙坦咨询公司提出了包括煤的内在自然发热特性在内的 10 个指标,每个指标按其权数乘以危险性指数(0~10),然后相加计算总分。据此算得危险值小于 100 时,认为危险性低,超过 200 时,认为危险性高。

3) 加拿大学者芬·查克拉夫蒂和科克雷恩提出了如下评价自然发火危险性大小的方法^[6],即:

$$\text{自然发火危险性指数} = \text{煤自燃倾向性指数} \times \text{环境指数}$$

煤自燃倾向性指数决定于煤的自然发热敏感性,而环境指数由遗失煤量、裂隙形成和通风系统压力差等 3 个参数决定。偏离正常值时,则认为是不安全的。

4) 印度学者贝纳基提出的预测方法:用 22 个描述开采技术条件的参数对 10 个煤炭自燃因素的效应给出危险性指数进行记分,危险性极高的指数为 0.75~1.0;危险性高的指数为 0.5~0.75;危险性中等的指数为 0.25~0.5;危险性低的指数小于 0.25。将各评判指数相加,计算总的发火危险指数,最大指数值为 22。当此值在 11 以上时,就会有超过 50% 的危险机率,则被认为是不安全的。

四种煤炭自然发火危险度分析方法中,印度学者贝纳基提出的方法考虑的因素最全面,准确度较高,而且易于与现场的生产实践相结合,故采用该方法对鲁西煤矿 3₁₀₉ 工作面煤炭自然发火危险度进行分析。

3 煤炭自然发火危险度分析模型

3.1 评价指标体系的建立及评判标准

根据煤炭自然发火机理,采空区自然发火危险程度 U 主要由 3 个分指标构成:煤的自燃倾向性 Y_1 、持续的漏风供氧条件 Y_2 、聚热散热条件 Y_3 ^[7]。每一分指标又有若干次一级的分指标构成,全部指标共 16 项。

1) 煤的自燃倾向性 Y_1

① 煤的吸氧速率 X_1 , mL/g; ② 还原煤样与氧化煤样的着火温度差 X_2 , °C。

2) 漏风供氧条件 Y_2

① 采空区漏风风流氧浓度 X_3 , %; ② 采空区漏风持续时间 X_4 , d; ③ 煤的破碎性 X_5 ; ④ 采空区两侧风压差 X_6 , Pa; ⑤ 采空区封闭质量 X_7 ; ⑥ 顶板及采空区处理 X_8 ; ⑦ 采区巷道布置方式 X_9 ; ⑧ 采煤方法 X_{10} ; ⑨ 通风方式 X_{11} ; ⑩ 煤层倾角 X_{12} , (°)。

3) 聚热散热条件 Y_3

① 采空区风速 X_{13} , m/min; ② 自燃带长度与推进速度比 X_{14} , d; ③ 采空区遗煤状况 X_{15} , %; ④ 区域围岩温度 X_{16} , °C。

评价指标体系各指标的评判标准如表 1 所示。

表 1 自然发火危险度评判指标体系评判标准表

Tab. 1 The judging standard of evaluation index system of coal spontaneous combustion risk degree

评判值	高	较高	中等	低
评价因素	1~0.75	0.75~0.50	0.50~0.25	0.25~0
X_1 /(ml/g)	>0.8	0.4~0.8	<0.4	
X_2	I 级	II 级	III 级	IV 级
X_3 /%	10~18			>18 或 <10
X_4 /d	>T	$2T/3 \leq X_4 \leq T$		$X_4 < T/2$
X_5	IV 类	III 类	II 类	I 类
X_6 /Pa	≥ 500	$30 \leq X_6 < 500$	$200 \leq X_6 < 350$	<200
X_7	差	一般	中等	较好
X_8	坚硬顶板, 全部垮落法, 冒落块大	顶板中等稳定, 全部垮落法, 冒落块度大	III 类顶板, 冒落块度中等	顶板松软或采空区有注浆
X_9	巷道布置在煤层中或外错、内错式布置, 分采同掘	无煤柱开采且无填充措施		区段巷道重叠或分层分掘布置
X_{10}	分层开采			一次采全高
X_{11}	Y 型或 Z 型通风			U 型或 W 型通风
X_{12}	>45°	25°~45°	10°~25°	0°~10°
X_{13} /(m/min)	0.10~0.24			>0.24 或 <0.10
X_{14} /d	>T			<T
X_{15} /%	<80	80~85	85~90	>90
X_{16} /°C	>45.0	32.5~45.0	20.0~32.5	<20

3.2 评价指标权重的确定

由于各评判指标对自然发火危险程度 U 的影响不同, 故先采用层次分析法(AHP 法)确定各指标的权重^[8]。层次分析法主要分为四个步骤: ① 建立层次结构模型; ② 构造判断矩阵; ③ 层次单排序及其一致性检验; ④ 层次总排序及其一致性检验。

结合采空区自然发火的相关机理和影响因素及鲁西煤矿的实际情况, 确定指标权值的递阶层次结构模型, 如图 1 所示。

根据指标权值的递阶层次结构模型可构造出评判指标层次判断矩阵 U - Y 和 Y - X 如下。

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} U & Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ Y_1 & y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ Y_2 & y_{12} & y_{22} & y_{23} \\ Y_3 & y_{13} & y_{23} & y_{33} \end{bmatrix} \quad \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} Y_1 & X_1 & X_2 \\ X_1 & x_{11} & x_{12} \\ X_2 & x_{12} & x_{22} \end{bmatrix} \quad \mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} Y_3 & X_{13} & X_{14} & X_{15} & X_{16} \\ X_{13} & x_{1313} & x_{1314} & x_{1315} & x_{1316} \\ X_{14} & x_{1413} & x_{1414} & x_{1415} & x_{1416} \\ X_{15} & x_{1513} & x_{1514} & x_{1515} & x_{1516} \\ X_{16} & x_{1613} & x_{1614} & x_{1615} & x_{1616} \end{bmatrix}$$

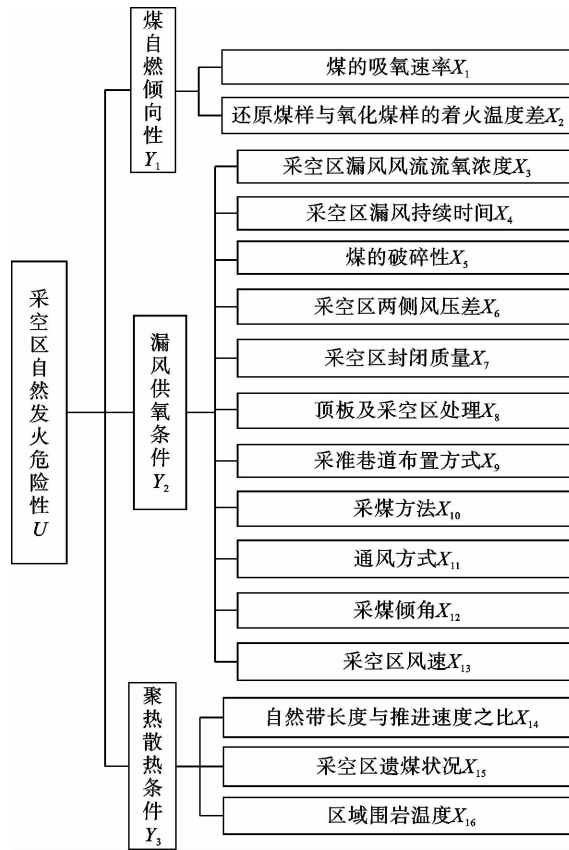


图 1 指标权值的递阶层次结构图

Fig. 1 Hierarchical structure of index weights

$$A_4 = \begin{bmatrix} Y_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_6 & X_7 & X_8 & X_9 & X_{10} & X_{11} & X_{12} \\ X_3 & x_{33} & x_{34} & x_{35} & x_{36} & x_{37} & x_{38} & x_{39} & x_{310} & x_{311} & x_{312} \\ X_4 & x_{43} & x_{44} & x_{45} & x_{46} & x_{47} & x_{48} & x_{49} & x_{410} & x_{411} & x_{412} \\ X_5 & x_{53} & x_{54} & x_{55} & x_{56} & x_{57} & x_{58} & x_{59} & x_{510} & x_{511} & x_{512} \\ X_6 & x_{63} & x_{64} & x_{65} & x_{66} & x_{67} & x_{68} & x_{69} & x_{610} & x_{611} & x_{612} \\ X_7 & x_{73} & x_{74} & x_{75} & x_{76} & x_{77} & x_{78} & x_{79} & x_{710} & x_{711} & x_{712} \\ X_8 & x_{83} & x_{84} & x_{85} & x_{86} & x_{87} & x_{88} & x_{89} & x_{810} & x_{811} & x_{812} \\ X_9 & x_{93} & x_{94} & x_{95} & x_{96} & x_{97} & x_{98} & x_{99} & x_{910} & x_{911} & x_{912} \\ X_{10} & x_{103} & x_{104} & x_{105} & x_{106} & x_{107} & x_{108} & x_{109} & x_{1010} & x_{1011} & x_{1012} \\ X_{11} & x_{113} & x_{114} & x_{115} & x_{116} & x_{117} & x_{118} & x_{119} & x_{1110} & x_{1111} & x_{1112} \\ X_{12} & x_{123} & x_{124} & x_{125} & x_{126} & x_{127} & x_{128} & x_{129} & x_{1210} & x_{1211} & x_{1212} \end{bmatrix}$$

判断矩阵元素值的确定采用 1~9 及其倒数的标度方法,该标度方法按一定标度将各指标间的相对重要性量化,并将标度值排列成一方阵,进而构成判断矩阵。1~9 标度法如表 2 所示。

根据该标度方法,采用幂法求得各层次单排序和重要性权值如表 3 所示。由各层次单排序和重要性权值得到层次总排序及其一致性检验如表 4 所示。

3.3 自然发火危险度分析及危险性程度分类

1) 自然发火危险度分析方法

根据自然发火危险性的影响因素及各因素的权重,自然发火危险程度 U 的评价可用以下两种方法求得。

表 2 1~9 标度法表

Tab. 2 Method of 1~9 scale

标度	含义	标度	含义
1	表示 x_i 与 x_j 同等重要	9	表示 x_i 比 x_j 极端重要
3	表示 x_i 比 x_j 重要	2,4	上述两相邻判断值
5	表示 x_i 比 x_j 明显重要	6,8	
7	表示 x_i 比 x_j 很重要		

表 3 递阶层次单排序表

Tab. 3 The single sequencing table of hierarchical structure

	Y_1	Y_2	Y_3	ω_k	$\lambda_{max}=3$							
Y_1	1	1	1	0.33	$CI=0$							
Y_2	1	1	1	0.33	$CR=0$							
Y_3	1	1	1	0.33								
	X_1	X_2	ω_{1j}	$\lambda_{max}=2$								
X_1	1	1.5	0.6	$CI=0$								
X_2	0.67	1	0.4	$CR=0$								
Y_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	ω_{1j}	$\lambda_{max}=10.7$
X_3	1	0.33	2	0.5	2	2	3	2	2	2	0.135	$CI=0.0774$ $CR=0.052$
X_4	3	1	3	1	2	4	2	0.33	2	2	0.161	
X_5	0.5	0.33	1	0.33	0.5	1	1	0.5	2	0.5	0.057	
X_6	2.0	1	3	1	2	2	2	0.5	2	2	0.14	
X_7	0.5	0.5	2	0.5	1	2	2	0.5	2	2	0.093	
X_8	0.5	0.25	1	0.5	0.5	1	1	0.5	2	0.5	0.058	
X_9	0.33	0.5	1	0.5	0.5	1	1	0.5	1	0.5	0.05	
X_{10}	0.5	3	2	2	2	2	2	1	3	2	0.171	
X_{11}	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0.33	1	0.5	0.049	
X_{12}	0.5	0.5	2	0.5	0.5	2	2	0.5	2	1	0.081	
Y_3	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	ω_{1j}	$\lambda_{max}=4.06$						
X_{13}	1	0.5	2	2	0.278	$CI=0.02$						
X_{14}	2	1	2	2	0.396	$CR=0.02$						
X_{15}	0.5	0.5	1	1	0.163							
X_{16}	0.5	0.5	1	1	0.163							

表 4 递阶层次总排序表

Tab. 4 The overall sequencing table of hierarchical structure

序号	X_i	ω_{kj}	ω_i	总排序号	序号	X_i	ω_{kj}	ω_i	总排序号
1	X_1	0.60	0.20	1	9	X_9	0.06	0.02	15
2	X_2	0.40	0.13	2	10	X_{10}	0.02	0.06	5
3	X_3	0.14	0.05	10	11	X_{11}	0.05	0.02	16
4	X_4	0.16	0.05	8	12	X_{12}	0.08	0.03	12
5	X_5	0.06	0.02	14	13	X_{13}	0.28	0.09	4
6	X_6	0.14	0.05	9	14	X_{14}	0.40	0.13	3
7	X_7	0.09	0.03	11	15	X_{15}	0.02	0.05	6
8	X_8	0.06	0.02	13	16	X_{16}	0.16	0.05	7

总一致性检验: $CRC=0.0480$, 符合一致性检验要求

① 分层次评价

中间层次指标 Y_k 对 U 的评价值：
$$Y_k = \sum_{i=1}^n \omega_{kj} \gamma_{kj} \quad (2)$$

其中： n —第 k 个指标中的单指标个数； ω_{kj} — y_k 的第 j 个单指标对 Y_k 的权重， $\sum \omega_{kj} = 1$ ； γ_{kj} — y_k 的第 j 个单指标对 U 的评价值。

U 的总评价值：
$$U = \sum_{K=1}^3 y_k \omega_k \quad (3)$$

其中： ω_k —第 k 个指标对 U 的权重。

② 总目标评价

依据多目标决策法，按最高积分求各因素对 U 的综合评价值：

$$U = \sum_{i=1}^m \gamma_i \omega_i \quad (4)$$

其中： m —单指标个数； γ_i —各单指标对 U 的隶属度(评价值)； ω_i —各单指标对 U 的权重。

2) 危险性程度的分类

根据国内学者对我国不同矿区煤层自然发火危险性的研究，通过模糊聚类分析，可将我国煤矿自然发火危险度分为以下四类^[9]，如表 5 所示。

表 5 煤层自燃危险度分类表

Tab. 5 Classification of risk degree of coal spontaneous combustion

分类	I 类	II 类	III 类	IV 类
	很危险	危险	可能自燃	不自燃
危险性隶属度	>0.53	0.53~0.30	0.30~0.15	<0.15

I 类说明该采空区遗煤的自燃倾向性、供氧氧化条件和聚热散热条件均极有利于自然发火。如不及时采取专门的防治措施，就一定会自然发火；II 类说明该区域易自然发火，需及时采取专门措施；III 类说明该区域可能自燃，但危险性不高，应注意加强观测；IV 类一般不会发生自然发火，不需要采取专门措施。

4 鲁西煤矿 3_109 工作面自然发火危险度分析

鲁西煤矿煤层最短自然发火期为 64 d，测定自燃倾向性较大。煤的吸氧量为 0.93 mL/g，煤的破碎性较小。顶板及采空区处理采用坚硬顶板全部垮落法，冒落块度大，采煤方法采用一次采全高方法，通风方式为“U”型通风，回采率为 95%，采煤推进速度为每月 95 m，煤层倾角 2°~19°，平均为 6°。采空区漏氧浓度在 10%~18%之间，有利于煤的氧化自燃。采空区风速大约在 0.24 m/min。采空区两端风压差，静压约为 110 Pa；围岩温度约为 19℃。依据该矿的实际情况，确定 3_109 综采工作面自然发火危险度各单因素评判指标如表 6 所示。

表 6 3_109 工作面自然发火危险性单因素评价表

Tab. 6 Single factor evaluation table of coal spontaneous combustion risk degree in 3_109 coalface

因素	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
实际值标值	6.4	III 级	<10%	64 d	I 级	110 Pa	较好	泥岩
评判值 γ_i	0.60	0.30	0	0.25	0.50	0.25	0.20	0
因素	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}
实际值标值	分层分掘	一次采全高	U 型通风系统	6°	0.24 m/min	5 d	95%	19℃
评判值 γ_i	0.15	0.20	0.25	0.25	0.25	0.20	0.15	0.10

根据分析模型分层对 3_109 综采工作面进行分析:

$$y_1 = \omega_{11} \gamma_1 + \omega_{12} \gamma_2 = 0.48,$$

$$y_2 = \omega_{23} \gamma_3 + \omega_{24} \gamma_4 + \omega_{25} \gamma_5 + \omega_{26} \gamma_6 + \omega_{27} \gamma_7 + \omega_{28} \gamma_8 + \omega_{29} \gamma_9 + \omega_{210} \gamma_{10} + \omega_{211} \gamma_{11} + \omega_{212} \gamma_{12} = 0.1973,$$

$$y_3 = \omega_{313} \gamma_{13} + \omega_{314} \gamma_{14} + \omega_{315} \gamma_{15} + \omega_{316} \gamma_{168} = 0.18945,$$

$$U = y_1 \omega_1 + y_2 \omega_2 + y_3 \omega_3 = 0.2886278.$$

通过计算确定 3_109 工作面自然发火危险隶属度为 28.86%，根据表 5，属Ⅲ类。3_109 工作面为可能自然发火工作面。

5 结论

通过对鲁西煤矿 3_109 工作面自然发火危险度的分析可知，3_109 综采工作面自然发火危险隶属度为 28.86%，属Ⅲ类，说明 3_109 采空区遗煤的自然倾向性、供氧氧化条件和聚热散热条件有可能会发生自然发火。应当对 3_109 工作面及时采取相关的预测预报与防治措施，消除自然发火隐患，从而杜绝煤炭自然发火事故的发生。

参考文献:

- [1]程卫民. 矿井煤炭自燃的综合防治技术及其实践[J]. 西北煤炭, 2007, 5(3): 17-22.
CHENG Weimin. Comprehensive prevention technology and practice of coal self-igniting in mine[J]. Northwest Coal, 2007, 5(3): 17-22.
- [2]王刚, 程卫民, 周刚. 综放工作面采空区自燃“三带”分布规律的研究[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(1): 18-22.
WANG Gang, CHENG Weimin, ZHOU Gang. Study on distribution of three zones of gob spontaneous combustion in fully mechanized caving face[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2010, 37(1): 18-22.
- [3]牛宝云, 郭立稳, 张嘉勇, 等. 煤层自然发火危险性综合评估[J]. 河北理工学院学报, 2006, 28(3): 5-9.
NIU Baoyun, GUO Liwen, ZHANG Jiayong, et al. Spontaneous combustion risk assessment in coal seam[J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 2006, 28(3): 5-9.
- [4]VANCE W E, CHEN X D. The rate of temperature rise of a subbituminous coal during spontaneous combustion in an adiabatic device; The effect of moisture content and drying methods[J]. Combustion and Flame, 1996, 106(3): 261-270.
- [5]孟祥军. 东滩煤矿 3 层煤自然发火特性的实验研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2011, 30(4): 17-21.
MENG Xiangjun. Experimental features of spontaneous combustion in 3rd seam of dongtan colliery[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2011, 30(4): 17-21.
- [6]谢军, 程卫民, 梁开武, 等. 梁宝寺煤矿易燃厚煤层综放面的防灭火技术实践[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(12): 45-47.
XIE Jun, CHENG Weimin, LIANG Kaiwu, et al. Practices on fire prevention and control technology for fully mechanized caving mining face in spontaneous combustion thick seam in Liangbaosi Mine[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(12): 45-47.
- [7]张国枢, 谢应明, 顾建明. 煤炭自燃微观结构变化的红外光谱分析[J]. 煤炭学报, 2003, 28(5): 473-476.
ZHANG Guoshu, XIE Yingming, GU Jianming. Infrared spectral analysis of microstructure change during the coal spontaneous oxidation[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(5): 473-476.
- [8]TEVRUCHTM L E, GRIFFITHSP R. Activation energy of air-oxidized bituminous coals[J]. Energy & Fuel, 1989, 3(4): 522-527.
- [9]王从陆, 伍爱友, 蔡康旭. 煤炭自燃倾向性实验研究及指标气体优选[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(10): 131-134.
WANG Conglu, WU Aiyu, CAI Kangxu. Experimental study on tendency of coal spontaneous combustion based on CO concentration[J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(10): 131-134.