

文章编号: 1673-3363-(2014)05-0809-05

# 急倾斜综放开采顶板裂隙发育规律对 瓦斯抽采影响研究

张勇, 张保, 李立, 张世青, 刘金凯, 赵健健

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

**摘要** 为了研究急倾斜走向长壁放顶煤开采顶板裂隙发育规律及其对瓦斯抽采的影响, 结合弹塑性力学和断裂力学相关理论分析了急倾斜煤层裂隙扩展的力学准则, 将瓦斯流动通道进行了分区: 瓦斯孤立通道区、瓦斯过渡通道区和瓦斯网络通道区; 对宝积山煤矿急倾斜特厚煤层走向长壁放顶煤开采在不同煤层倾角条件下上覆岩层裂隙发育规律进行了分析, 得到了随着角度变化瓦斯流动通道区域形态的变化规律。研究表明: 瓦斯网络通道区上部为高位人工导向通道贯穿的主要区域, 该区域分布范围随着煤层倾角增大而趋于工作面上端头, 其高度也增大; 根据数值模拟和理论计算可确定瓦斯抽采方案, 在工程实践中取得良好效果。

**关键词** 急倾斜煤层; 裂隙发育; 瓦斯流动通道; UDEC 数值模拟; 瓦斯抽采

**中图分类号** TD 353

**文献标志码** A

## Study on the effect of roof fracture development on gas drainage in steep full-mechanized caving mining

ZHANG Yong, ZHANG Bao, LI Li, ZHANG Shiqing, LIU Jinkai, ZHAO Jianjian

(School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract** In order to study the roof fracture development and its effect on gas drainage during steep long wall full-mechanized caving mining, combined with relevant theories of elastic-plastic mechanics and fracture mechanics, the mechanics criterion of fracture development in steep coal seam mining has been analyzed, and the gas flow channel has been partitioned as gas isolated channel area, gas transition area and gas network area. Furthermore, the overlying rock fracture development during steep super high coal seam long wall top coal caving mining under the condition of different dip angle of coal seam in Baojishan coal mine has been analyzed, and the changing rules of gas flow channel's area configuration with the seam angle changing has been obtained. The results of the study shows that the upper part of gas network area are the main areas that the artificial guide channel should run through, and the distribution range of the areas tends to the upper face end and its height increases with the seam angle increasing. The gas drainage plan can be determined according to numerical simulation and theoretical calculation, which will achieve good effect in engineering practice.

**Key words** steep coal seam; fracture development; gas flow channel; UDEC numerical simulation; gas drainage

收稿日期: 2013-03-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB201204); 中央高校基本科研业务费项目(2011YZ05)

作者简介: 张勇(1968—), 男, 北京市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事采矿工程方面的研究。

E-mail: johnzy68@163.com

Tel: 010-62331388

我国西部赋存有大量  $45^\circ$  以上的急倾斜煤层, 且随着煤矿开采强度的不断增大, 促使大倾角及急倾斜煤层的开采问题越来越引起高度重视。煤层倾角的变化必将引起顶煤及上覆岩层的重量沿岩层面的切向滑移力及作用于层面的垂直压力重新分布, 从而改变了上覆岩层的运动规律, 显现出与缓倾斜及近水平煤层开采不相同的矿压及裂隙发育特征<sup>[1]</sup>。国内外学者对急倾斜煤层开采顶板垮落及矿压显现规律进行研究, 而对急倾斜煤层覆岩采动裂隙发育规律与瓦斯抽采间关系鲜有研究<sup>[2-4]</sup>。本文分析了急倾斜煤层覆岩裂隙扩展力学原理并对覆岩进行了瓦斯通道的分区, 以靖远煤业宝积山煤矿为工程背景, 通过理论分析和数值模拟对急倾斜覆岩采动裂隙发育规律及范围进行了分析, 为该矿急倾斜工作面特厚煤层开采中瓦斯抽采方案的确定提供了科学依据, 确保该工作面的安全高效回采。

## 1 急倾斜煤层覆岩裂隙扩展力学原理

急倾斜煤层工作面上覆岩层受到采动影响后, 内部出现应力重新分布, 采空区两侧煤壁外形成支承压力区, 即压力增高区, 采空区为卸压区, 即压力降低区<sup>[5]</sup>。

岩体存在原生裂隙, 在未受到采动影响时, 岩体内裂隙是孤立的。在受到采动应力影响时, 原生裂隙发生扩展, 也会产生新的次生裂隙, 这些裂隙成为了岩体内瓦斯流动的主要通道, 见图 1。

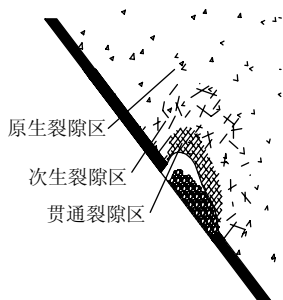


图 1 上覆岩层裂隙分区

Fig.1 Cracks partition of Overlying rock

### 1.1 原生裂隙区

在原岩应力和应力开始增高的区域, 受采动影响不大, 原生裂隙处于平衡状态, 且次生裂隙不发育, 此区域裂隙长度较短、张开度小、随机分布、彼此孤立。

### 1.2 次生裂隙区

在应力增高和应力开始降低的区域, 岩体原生

裂隙由于受到压应力、拉应力、剪切应力而扩展产生次生裂隙。

1) 当岩体受到压应力时, 根据格里菲斯强度理论, 裂隙服从拉应力准则, 以单轴抗拉强度  $R_t$  来度量, 裂隙扩展的力学准则<sup>[6]</sup>为

$$\begin{cases} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{8(\sigma_1 + \sigma_3)} \geq R_t & \text{if } \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \geq -\frac{1}{3} \\ \sigma_3 = -R_t & \text{if } \frac{\sigma_3}{\sigma_1} < -\frac{1}{3} \end{cases} \quad (1)$$

当  $\frac{\sigma_3}{\sigma_1} \geq -\frac{1}{3}$  时, 次生裂隙扩展方向为  $2\beta$ , 其中

$$\beta = \frac{1}{2} \arccos \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2(\sigma_1 + \sigma_3)}; \text{ 当 } \frac{\sigma_3}{\sigma_1} < -\frac{1}{3} \text{ 时, 次生裂隙扩}$$

展方向与裂隙方向相同。

2) 当岩体受到拉应力时, 属于双向受拉型裂隙扩展和发育。原生裂隙发生弯折扩展, 且产生次生裂隙。服从最大正应力准则的中心斜裂隙拉伸模型, 岩体发生弯折扩展的临界应力  $\sigma_{cr}$ <sup>[7]</sup>为

$$\sigma_{cr} = \frac{\cos \frac{\theta_0}{2} \left( K_1 \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_2 \sin \theta_0 \right)}{\sqrt{\pi a} \cos^2 \frac{\theta_0}{2} \sin \beta \left( \sin \beta \cos \frac{\theta_0}{2} - 3 \cos \beta \sin \frac{\theta_0}{2} \right)} \quad (2)$$

式中:  $K_1$  为格里菲斯应力强度因子;  $K_2$  为威斯特噶尔应力强度因子;  $\theta_0$  为裂隙间断裂角;  $\beta$  为裂隙与最大主应力夹角;  $a$  为裂隙长度的 0.5 倍。

3) 当岩体都受到剪切应力时, 原生裂隙发生剪切扩展并产生次生裂隙, 服从比应变能准则的中心裂隙剪切模型,  $S$  为应变能密度因子<sup>[8-9]</sup>:

$$S = \frac{\tau^2 a}{16\mu} [(k+1)(1-\cos \theta) + (1+\cos \theta)(3\cos \theta - 1)] \quad (3)$$

式中:  $\tau$  为岩体所受剪切力;  $\theta$  为开裂角;  $k$  为常数;  $\mu$  为泊松比。当  $\frac{\partial^2 S}{\partial \theta^2} > 0$  时, 裂隙发生剪切扩展。

综上所述, 次生裂隙区围岩由于受采动应力的影响, 原生裂隙之间有新的采动裂隙, 产生次生裂隙, 此区域裂隙特点为裂隙长度较长, 且形成局部贯通的网络裂隙, 但区域之间贯通性较差, 呈现采动裂隙密集、次生裂隙局部贯通、区域内裂隙网络化特征。

### 1.3 贯通裂隙区

在应力降低区, 围岩应力显著降低, 原生裂隙发育程度较高, 岩体次生裂隙间发生拉剪复合型破坏而贯通, 如图 2 所示, 任意原生裂隙  $AB$ ,  $CD$  扩展产生次生裂隙  $AF$ ,  $CE$  与张拉裂纹  $EF$  连通而贯

通成裂隙网络。裂隙间的贯通强度<sup>[10]</sup>为

$$\sigma_1 = \frac{h\sigma_t(\sin\alpha + f_r \cos\alpha) - 4lc_r + B\sigma_3}{A} \quad (4)$$

式中： $h$  为原生裂隙垂直间距； $\sigma_t$  为单轴抗拉强度； $\alpha$  为张拉裂纹倾角； $f_r$  为岩石摩擦因数， $c_r$  为岩石黏聚力； $l$  为次生裂隙长度； $A$ 、 $B$  为贯通函数。

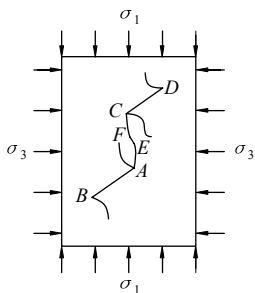


图 2 次生裂隙间贯通示意图

Fig.2 Diagram of secondary fissures transfixion

随着围岩卸压破坏，裂隙发育程度较高，任意两局部裂隙网络通过上述裂纹拉剪扩展而贯通形成裂隙网络，裂隙分布、角度等无规律性，裂隙间相互作用影响关系复杂。其特点是裂隙长度较大、张开度较大，互相切割，呈网络化特征，且有可能与采场或巷道联通。

## 2 急倾斜煤层瓦斯流动通道分区

根据瓦斯流动性可将急倾斜煤层覆岩分为 3 个区域：瓦斯孤立通道区、瓦斯过渡通道区和瓦斯网络通道区。与水平煤层不同，急倾斜煤层开采后岩体沿倾向滑移至采空区下部，由于倾角较大，采空区下部压实，形成的瓦斯通道分布范围也显现出与水平煤层不同的新特点，如图 3 所示<sup>[11]</sup>。

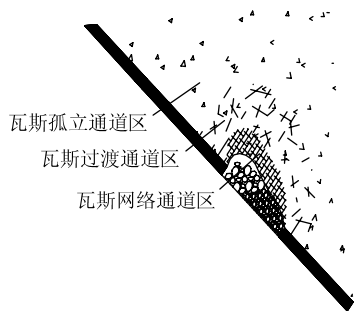


图 3 急倾斜煤层覆岩瓦斯通道分区

Fig.3 Gas channel partition of overlying strata of steep coal seam

### 2.1 瓦斯孤立通道区

在原生裂隙区，岩体整体移动，有少数垂向瓦斯通道，原生裂隙间沟通不充分，难以形成瓦斯局

部通道网络，为瓦斯孤立通道区。该区域岩体渗透性和瓦斯流动性差，不适与人工导向通道贯通<sup>[12]</sup>。

### 2.2 瓦斯过渡通道区

在次生裂隙区，岩体相对完整，维持层状分布，单向和双向裂隙互相贯通，原生裂隙间贯通形成局部瓦斯流动通道，但未形成网络状的瓦斯通道，为瓦斯孤立-网络过渡通道区。该区域岩体内瓦斯渗透性有所增强，瓦斯流动性增加，但未形成瓦斯聚集，仍不适与人工导向通道贯通。

### 2.3 瓦斯网络通道区

在贯通裂隙区，岩体已经破坏，瓦斯局部流动通道间互相贯通，瓦斯通道分布密集，随机性较高，呈现瓦斯通道网络化特征，为瓦斯网络通道区。该区域渗透性较大，瓦斯流动性显著增加，瓦斯上浮在其上部形成瓦斯聚集，为采空区高位人工导向通道贯通重点区域。

## 3 UDEC 数值模拟

以靖远煤业宝积山煤矿为例，采用 UDEC 数值模拟，考虑煤层倾角对裂隙发育的影响，建立不同煤层倾角模型，分别为 30°、45°和 60°。着重研究各煤层倾角模型在工作面推进过程中顶板的破坏情况和上覆岩层的裂隙发育情况和扩展规律，为后期人工导向通道贯通区域确定提供理论依据。

### 3.1 工作面概况

宝积山矿为高瓦斯矿井，704 工作面开采煤层结构单一，煤厚较为稳定，厚度平均 11 m，为特厚煤层，倾角 45°~62°之间，平均 53°，局部达到 62°，属于大倾角煤层，工作面埋深 424~535 m。煤层较硬、较脆，节理、裂隙发育。工作面煤层顶底板岩性：煤层伪顶为高炭质泥岩，直接顶为粉砂岩、泥岩层，随采随落；基本顶为紫红色为主的杂色、团块状细砂岩，直接底为 9.64 m 厚的细砂岩。工作面采用急倾斜走向长壁综采放顶煤采煤法一次采全高，顶板管理采用全部垮落法。

### 3.2 模型的建立

根据宝积山煤矿地质资料得知顶板煤岩层都是由 2 种或者 2 种以上不同岩性的岩石互层组成，对模型力学性质接近和厚度较小的岩层进行组合，建立沿 704 工作面走向的二维 UDEC 数值模型，长 180 m，高 200 m。根据现有地质资料，将数值模型简化为 6 个不同岩层。在基本顶上部施加 12.5 MPa 的垂直方向载荷表示上覆岩层对模型的作用力。与工作面平行距其 30 m 处设置观测线，观测线上设

置若干观测点,通过观测点记录各点位移。各煤岩层的力学特征见表 1。

表 1 煤岩层力学参数

Table 1 Mechanical parameters of coal and rock

岩性	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	体积 模量/ GPa	剪切 模量/ GPa	内摩 擦角/ (°)	内聚 力/ MPa	抗拉 强度/ MPa
砾粗砂岩	2 500	8.5	7.8	34	4.2	4.6
泥岩	2 400	5.9	5.2	33	2.1	1.4
粉砂岩	2 530	8.3	7.4	35	3.1	3.4
煤	1 470	2.2	2.0	28	1.8	0.8
细粒砂岩	2 500	10.6	9.0	35	4.5	3.8
中粗砂岩	2 510	8.3	7.4	31	3.6	3.2

3.3 数值模拟结果

由于工作面推进过程中将引起上覆岩层垂直方向的变形和破坏,而且破坏情况会随煤层倾角的变化而不同。如图 4 所示为不同倾角煤层的瓦斯网络通道分布范围,深色区域为裂隙发育区域。

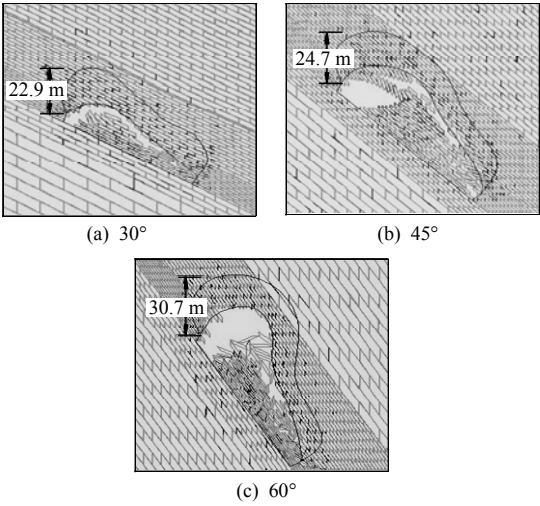


图 4 不同倾角煤层瓦斯网络通道分布范围  
Fig.4 Distribution of gas network channel in different angle inclined seam

由图 4 知,采空区及其上方附近岩体存在大量次生裂隙且发育程度很高,局部网络互相贯通形成瓦斯贯通网络,裂隙网络贯通区域边缘分布少数局部裂隙网络和次生裂隙,未形成贯通网络,不适于瓦斯抽采。随着角度增大,瓦斯网络通道分布形态也随之变化,趋于回风巷上方及其外侧,是瓦斯抽采的重点区域,如表 2。图 5 为观测线测得各测点垂直方向位移。由图可知,煤层倾角越大,上端头顶板位移量越大,与不同倾角煤层采空区瓦斯网络通道分布规律一致,顶板下沉量峰值越靠近上端

头,而下端头顶板位移量越小。

表 2 不同倾角瓦斯流动通道分布规律

Table 2 Distribution law of the different inclination gas flow channel

煤层 倾角/(°)	瓦斯网络 通道区高度/m	分布形态
30	22.9 m	不对称马鞍形
45	24.7 m	不对称的凹形枕,上轮廓线大致呈抛物线,马鞍形消失或不明显
60	30.7 m	不完整鸭形

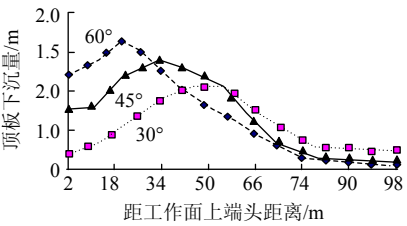


图 5 不同倾角煤层顶板下沉量监测曲线  
Fig.5 Different angle coal seam roof subsidence monitoring curve

4 急倾斜煤层顶板瓦斯人工导向通道

顶板走向人工导向通道抽采瓦斯工艺是利用急倾斜工作面采空区及其上覆岩层移动和裂隙发育规律进行的一种瓦斯抽采方法,裂隙随顶板垮落由直接顶、基本顶逐渐向上发育<sup>[13]</sup>。现场通过回风巷布置高位抽采钻场和采空区瓦斯抽采管路 2 种人工导向通道进行瓦斯抽采。根据上述理论及数值模拟结果分析该倾角煤层高位钻孔最佳高度为 26.2~27.3 m,且由于煤层倾角较大,钻孔位置位于回风巷外侧上方。钻场设计位置如图 6 所示<sup>[14-15]</sup>。

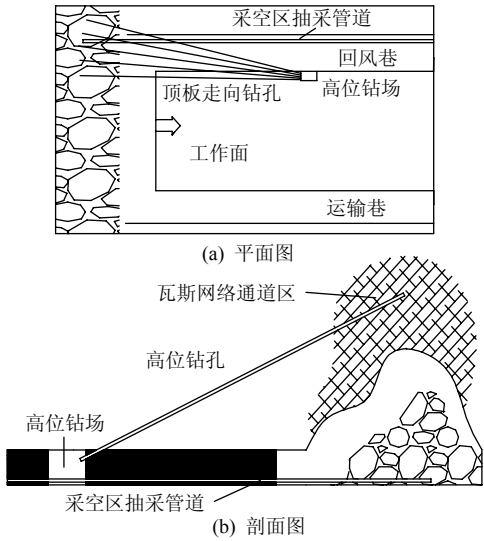


图 6 人工导向通道布置示意图  
Fig.6 Diagram of artificial guide channel layout

沿回风巷每隔 20 m 施工开挖高位抽采钻场进入煤层顶板，在钻场中向工作面采空区方向沿走向施工钻孔，图中由下至上为 1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>钻孔，5<sup>#</sup>钻孔延伸至裂隙带边缘下方约 4.5 m 处。根据理论计算可得各高位抽采钻孔参数见表 3。

表 3 高位抽采钻孔  
Table 3 High level borehole

钻孔号	方位角/(°)	仰角/(°)	孔深/m
1 <sup>#</sup>	17	11.3	31.3
2 <sup>#</sup>	28	23.1	39.6
3 <sup>#</sup>	39	33.4	44.8
4 <sup>#</sup>	47	40.7	48.7
5 <sup>#</sup>	55	47.3	51.4

工程实施后，对各钻孔瓦斯抽采进行了观测。抽采结果表明：各钻孔瓦斯抽放体积分数和流量均较高，尤其 4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>钻孔抽放效果更明显，且 4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>钻孔理论上位于瓦斯网络通道区上部，说明此区域为高位瓦斯人工导向通道最佳位置；瓦斯抽采方案明显减轻了工作面风排瓦斯工作量，提高了工作面生产能力，综合治理效果显著。

5 结 论

1) 结合弹塑性力学及断裂力学相关理论，分析了急倾斜煤层覆岩原生裂隙区、次生裂隙区和贯通裂隙区 3 个区域裂隙扩展分别服从不同力学准则，为急倾斜煤层瓦斯赋存规律及流动通道分区提供了理论依据。

2) 将急倾斜煤层瓦斯流动通道分为瓦斯孤立通道区、瓦斯过渡通道区和瓦斯网络通道区，瓦斯网络通道区上部瓦斯聚集，为瓦斯治理人工导向通道贯通主要区域。

3) 以宝积山煤矿为工程背景，通过建立不同角度数值模型，该矿倾角煤层高位钻孔布置于工作面上端头顶板区域，且最佳高度为 26.2~27.3 m；利用数值模拟、理论计算和工程实践相结合的方法，验证了本文对裂隙分布规律理论分析的正确性，为急倾斜特厚煤层矿井瓦斯抽采提供了一种新方法和技术手段。

参考文献：

[1] 章黎明. 王家山煤矿大倾角厚煤层综放采场矿压规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(12): 22-26.  
ZHANG Liming. Research on ground behavior law of fully mechanized caving mining face in deep inclined

seam of Wangjiashan Mine[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(12): 22-26.

[2] 黄庆享, 黄克军, 刘素. 急倾斜煤层长壁开采顶板结构与来压规律模拟[J]. 陕西煤炭, 2011(3): 31-35.  
HUANG Qingxiang, HUANG Kejun, LIU Su. Steeply inclined coal seam longwall mining roof structure and pressure numerical simulation[J]. Shaanxi Coal, 2011(3): 31-35.

[3] 王慧杰. 急倾斜煤层走向壁式开采基本顶垮落规律研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.

[4] 胡国忠. 急倾斜多煤层俯伪斜上保护层开采的关键问题研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.

[5] 王兆刚, 丁凌霄, 巩利斌. 急倾斜煤层的开采及矿山压力显现规律[J]. 陕西煤炭, 2009(4): 33-35.  
WANG Zhaogang, DING Lingxiao, GONG Libin. On the mining of steep seam and its laws of strata behaviors[J]. Shaanxi Coal, 2009(4): 33-35.

[6] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 26-28.

[7] 王自强, 陈少华. 高等断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 90-99.

[8] 程靳, 赵树山. 断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 29-33.

[9] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 209-214.

[10] 陈卫忠, 伍国军, 杨建平, 等. 裂隙岩体地下工程稳定性分析理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 233-234.

[11] 杜计平, 孟宪瑞. 采矿学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009: 391-393.

[12] 张国枢. 通风安全学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007: 215-223.

[13] 袁亮. 卸压开采抽采瓦斯理论及煤与瓦斯共采技术体系[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 1-8.  
YUAN Liang. Theory of pressure-relieved gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 1-8.

[14] 王海锋, 程远平, 沈永铜, 等. 高产高效工作面顶板走向钻孔瓦斯抽采技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(2): 168-171.  
WANG Haifeng, CHENG Yuanping, SHEN Yongtong, et al. Gas drainage technology of along-strike roof drills in working face with high production and efficiency[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(2): 168-171.

[15] 刘林. 急倾斜煤层采空区瓦斯抽采钻孔参数研究[J]. 煤炭技术, 2009, 28(1): 81-82.  
LIU Lin. Research on parameters of gas drilling bore in steep coal seam gob[J]. Coal Technology, 2009, 28(1): 81-82.