

文章编号: 0253 - 9993(2012) 09 - 1437 - 07

# 高强度开采覆岩离层瓦斯通道特征及 瓦斯渗流特性研究

刘洪永<sup>1 2 3</sup> 程远平<sup>1 2</sup> 陈海栋<sup>1 2</sup> 孔胜利<sup>1 2</sup> 徐超<sup>1 2</sup>

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 煤矿瓦斯治理国家工程研究中心, 江苏 徐州 221116; 3. 山西焦煤集团有限责任公司博士后科研工作站, 山西 太原 030022)

**摘 要:** 根据上覆煤岩层的破断和裂隙发育情况, 将穿层裂隙通道直径大于  $10^{-1}$  mm 的区域定为采动瓦斯通道发育区。基于砌体梁理论, 研究了关键层控制下的离层断裂带瓦斯通道的发育特征, 并基于 Kozeny - Carman 准则建立了瓦斯通道流态的判定方法, 依据其内瓦斯的流动状态将上覆岩瓦斯通道的发育沿纵向由下到上分为瓦斯紊流通道区、瓦斯过渡流通道区和瓦斯渗流通道区, 并根据离层断裂带瓦斯通道的发育规律, 构建了以高位瓦抽采巷为主要手段的瓦斯过渡流通道区人工导流方法。最后通过以阳泉新景煤矿 80201 工作面卸压瓦斯抽采现场试验, 反演得到了工作面上覆岩采动瓦斯通道的演化规律及其对瓦斯导向流动规律的影响, 并对瓦斯过渡流通道区内瓦斯的流态进行了判定, 验证了本文提出的理论计算方法和采动瓦斯通道分区的正确性和可行性。

**关键词:** 高强度开采; 采动瓦斯通道; 瓦斯渗流特性; 流态; 关键层

**中图分类号:** TD713.6 **文献标志码:** A

## Characteristics of mining gas channel and gas flow properties of overlying stratum in high intensity mining

LIU Hong-yong<sup>1 2 3</sup>, CHENG Yuan-ping<sup>1 2</sup>, CHEN Hai-dong<sup>1 2</sup>, KONG Sheng-li<sup>1 2</sup>, XU Chao<sup>1 2</sup>

(1. Faculty of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. National Engineering Research Center of Coal Gas Control, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Post-doctoral Scientific Research Station in Shanxi Coking Coal Group Co., Ltd., Taiyuan 030022, China)

**Abstract:** According to the breakage and fracture developing of overlying strata, the layer with fracture diameter of more than  $10^{-1}$  mm is the mining gas channels development area. Based on the theory of voussoir beam structure, the characteristic of gas channel development in the overburden under the key stratum was studied, and the identification method of the gas pattern were established for gas flow in gas channel based on Kozeny-Carman criterion. Then the overlying rock was divided into turbulent channel area, transitional circulation channel area and seepage channel area, according to the gas pattern in gas channels, and the artificial diversion method for transitional circulation channel area was set up by taking high level suction roadway as main means. Finally, the evolution law of gas channel and its influence on gas guidance flow was inversed by field test at working face 80201 in Xinjing Coal Mine of Yangquan Coal Industry (Group) Co., Ltd., and the gas pattern was classified for transitional circulation channel area, which verified the correction and rationality of the theoretical method and the classification for mining gas channel proposed in this paper.

**Key words:** high intensity mining; mining gas channel; gas flow characteristics; gas pattern; key stratum

收稿日期: 2012-05-21 责任编辑: 常琛

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB201204); 国家自然科学基金面上资助项目(51074160, 50904068); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010QNA03)

作者简介: 刘洪永(1982—), 男, 山东潍坊人, 讲师, 博士。Tel: 0516-83885948, E-mail: Lhyeven@163.com

多年的开采实践证明,保护层开采及被保护层卸压瓦斯抽采技术是防治煤与瓦斯突出最有效、最经济的区域性措施之一<sup>[1-3]</sup>,该技术不仅可以避免长期与突出危险煤层短兵相接的状态,而且提高了防治煤与瓦斯突出措施的安全性和可靠性。

生产实践发现,离层断裂带是邻近层瓦斯汇聚与人工截留的重点区域,保护层的相关瓦斯抽采措施主要集中在此区域。多年的实践发现<sup>[4]</sup>,保护层工作面及邻近层卸压瓦斯可采用专用瓦斯排放巷配合走向高位抽采巷,或专用瓦斯排放巷低角度钻孔配合走向高位抽采巷进行有效治理。但随着综采及综放开采、大采高综采、大采高综放开采等高产高效的综合机械化采煤方法的普遍应用,工作面围岩的堆积结构、瓦斯通道形态发生变化,采掘空间邻近煤岩层瓦斯的运移及聚积形态也随之改变,从而导致工作面瓦斯涌出难以控制,上隅角瓦斯易超限,尤其在高瓦斯厚煤层和邻近层较多的近距离煤层群开采条件。为了提高瓦斯抽采工程的有效性和瓦斯治理的效果,需要对上覆岩离层断裂带瓦斯通道的发育特征及对卸压瓦斯流态的影响进行深入研究,以期获得卸压瓦斯汇聚和富集区的通道特征及瓦斯渗流特性。

但目前国内外许多学者多把研究重点要么集中在单纯从采场矿压与岩层控制角度研究采动卸压的影响高度和范围<sup>[5-9]</sup>,要么从仅对采场瓦斯运移、涌出规律和分布特点进行研究<sup>[10-12]</sup>,而对高强度开采条件下采动瓦斯通道的发育形态、对瓦斯运移与汇聚的影响及对应的人工导流方法的研究较少<sup>[13-15]</sup>。

本文将阳泉矿区新景煤矿大采高综放开采为背景,研究高强度开采条件下覆岩的结构变化、瓦斯通道变化形态及渗流特性,为离层断裂带瓦斯人工高效导流提供理论基础。

### 1 离层断裂带瓦斯通道特征及发育规律

采场覆岩可视为一系列岩层的有序组合,而层状组合的覆岩中有一层或几层较为坚硬的厚岩层在整个上覆岩体的变形与破坏中起主要的控制作用,这种对岩体活动全部或局部起决定作用的岩层称为关键层<sup>[16]</sup>,前者称为主关键层,后者称为亚关键层。采场覆岩中的关键层未破断失稳前,以弹性地基结构形式产生挠曲下沉变形,并在关键层下部产生不协调性的连续变形离层。主关键层与亚关键层之间、亚关键层与亚关键层之间变形的不协调将形成岩层移动中的离层和各种瓦斯通道分布。因此,关键层在对上覆岩层的运动起控制作用同时,也控制着采动瓦斯通道的动态延展。覆岩采动瓦斯通道随关键层的断裂而跳

跃式向上发展,但最终形态不受关键层的决定,而受岩层的弯曲程度和软弱岩层的变形控制。控制覆岩移动和裂隙动态扩展的关键层必将影响着上覆煤岩卸压瓦斯的流动与汇聚。

多年的研究发现,采场覆岩周期来压期间,顶板结构失稳形式一般分为滑落失稳和回转变形失稳,只有当覆岩断裂块体同时满足不发生滑落失稳和回转变形失稳两个条件时才能形成平衡结构体<sup>[17]</sup>。覆岩断裂失稳的结构模型如图 1 所示。

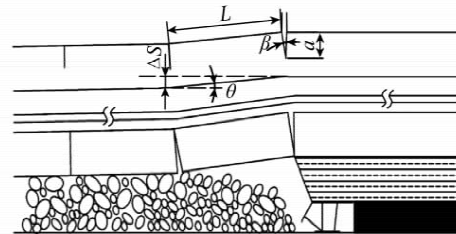


图 1 覆岩断裂失稳的结构模型

Fig. 1 Structure failure model of mining overburden

$\Delta S$ —离层量;  $\theta$ —回转角;  $L$ —关键层周期断裂步距;  $\beta$ —岩层破断裂缝的张开角度;  $a$ —破断裂隙在层厚方向的长度

根据砌体梁安全结构中的力学分析,岩层内部第  $i$  关键层结构上下位岩层的不协调离层量<sup>[18]</sup>为

$$\Delta S = [m - \sum h_i (K_i - 1)] (e^{-\frac{x}{2L_{i+1}}} - e^{-\frac{x}{2L_i}}) \quad (1)$$

式中,  $\sum h_i$  为第  $i$  组关键层结构到煤层顶板的垂距,  $m$  其中  $h_i$  为第  $i$  组关键层的厚度,  $m$ ;  $K_i$  为第  $i$  组关键层内岩层的残余碎胀系数,一般取 1.15 ~ 1.33<sup>[19-20]</sup>;  $m$  为煤层的采高,  $m$ ;  $x$  为以工作面的位置为原点的走向距离,  $m$ ;  $L_i$  为第  $i$  组关键层结构的周期断裂步距,  $m$ ,  $L_i = h_i \sqrt{\frac{\sigma_T}{3q}}$ , 其中  $\sigma_T$  为第  $i$  组关键层的抗拉强度,  $\text{MPa}$ ;  $q$  为第  $i$  组关键层的自重及其上覆岩层的载荷,  $\text{MPa}$ 。

由图 1 可知,当关键岩层弯曲下沉而未完全破断时,岩层的破断通道长度小于该岩层的厚度 ( $a_i < h_i$ ),此时瓦斯通道尚未形成,瓦斯导流能力较差;当岩层破断面的切应力超过其剪切强度时,岩层完全破断 ( $a_i = h_i$ ),此时瓦斯通道形成,瓦斯导流能力迅速提升。

由直径大于  $10^{-1} \text{ mm}$  的可见孔或裂隙组成的瓦斯通道是构成层流及紊流混合渗透的区间,并决定了煤的宏观破坏面<sup>[21]</sup>,卸压瓦斯可沿此通道全部或部分自然排放。因此可以将覆岩断裂通道直径大于  $10^{-1} \text{ mm}$  的区域称为采动瓦斯通道发育区(下称“通道发育区”),通道发育高度以外区域内的卸压瓦斯是不能实现自然排放的。

## 2 离层断裂带瓦斯渗流特性

瓦斯在采动瓦斯通道内的流态判别准则可由 Kozeny - Carman 准则<sup>[22]</sup> 表达

$$Re = \frac{\rho V e^{\frac{1}{2}}}{\mu} = \frac{V e^{\frac{1}{2}}}{\nu} \quad (2)$$

式中  $\rho$  为流体密度  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $V$  为当地渗流速度  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\mu$  为流动的动力黏性系数  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ;  $\nu$  为流体的运动黏性系数  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $e$  为渗流场的当地渗透系数  $\text{m}^2$ ,  $e$

$$= \frac{D_m^2 \bar{\varphi}^2}{180(1 - \bar{\varphi}^2)}$$

其中  $D_m$  为离层断裂带内破断岩块

的平均粒度  $\text{m}$ ,  $\bar{\varphi}$  为当地平均孔隙率  $\%$ ,  $\bar{\varphi} = 1 -$

$$\frac{m - \sum h_i (K_i - 1) (e^{-\frac{x}{2L_{i+1}}} - e^{-\frac{x}{2L_i}})}{\sum h_i + h_i}$$

根据 Kozeny - Carman 准则<sup>[22]</sup>, 瓦斯在采动瓦斯通道的流态依据雷诺数可分为 3 个区域: 层流区、过渡区和紊流区, 如图 2 所示。

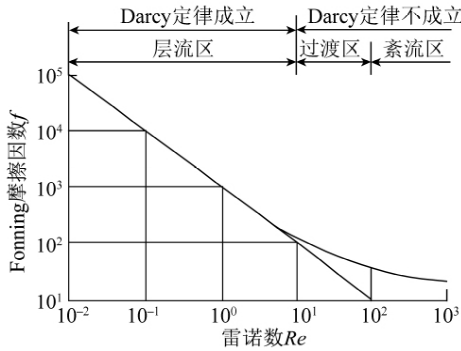


图 2 采动瓦斯通道瓦斯流态的分类

Fig. 2 Classification of gas pattern in mining gas channel

对比实验室相似模拟试验和现场观察结果, 可将上覆岩瓦斯通道按瓦斯流态进行纵向分区(图 3), 由下到上依次为:

### (1) 瓦斯紊流通道区。

瓦斯紊流通道区位于工作面顶板垮落带内, 瓦斯紊流通道的分布具有很强的随机性, 与工作面采高、垮落带岩块大小和排列状况、顶板岩性及原始应力等因素有关。瓦斯紊流通道区渗透性大, 瓦斯运移状态以紊流为主, 其高度与垮落带相同, 一般为采高的 6 ~ 10 倍。此区域雷诺数  $Re < 10$ , 瓦斯流态属层流渗流, 可由达西定律(Darcy)描述<sup>[23]</sup>。

### (2) 瓦斯过渡流通道区。

瓦斯过渡流通道区位于离层断裂带中下部。区内覆岩相对完整, 仍为层状分布, 单向或双向通道纵横交错, 部分通道相互沟通, 形成瓦斯通道网络, 煤岩渗透性增加显著, 瓦斯运移状态为非线性渗流。瓦斯

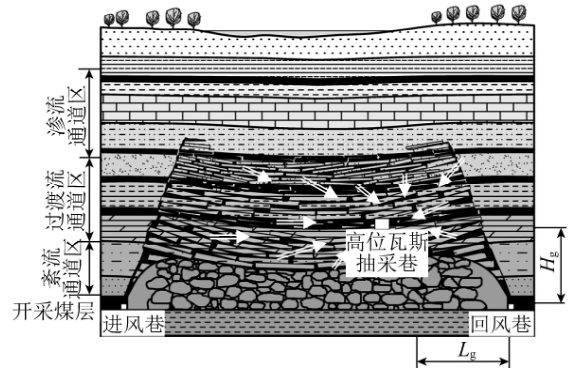


图 3 离层破断带瓦斯人工导流方法示意

Fig. 3 Sketch of gas artificial diversion in separation failure zone

$L_g$ —高位瓦斯抽采巷距回风巷的水平距离, 一般为 50 ~ 60 m;

$H_g$ —高位瓦斯抽采巷距煤层顶板的垂直距离, 一般为 8 ~ 12 倍采高。过渡流通道区的高度约为采高的 10 ~ 15 倍。此区域雷诺数一般在 10 ~ 100, 瓦斯流动处于线性渗流到紊流之间的过渡流区, 属非线性渗流, 达西定律(Darcy)不再适用, 其流动控制方程可用指数型模型或 Darcy - Forchheimer 模型描述<sup>[24-25]</sup>。

### (3) 瓦斯渗流通道区。

瓦斯渗流通道区位于离层断裂带上部和弯曲下沉带, 该区覆岩整体移动, 通道沟通不充分, 很难形成瓦斯通道网络, 煤岩渗透性仅比原始状态有些许增加, 瓦斯运移状态为层流。瓦斯渗流通道区的高度约为采高的 15 ~ 25 倍。此区域雷诺数一般大于 100, 瓦斯流动进入紊流区, 服从 Navier - Stokes 方程<sup>[26]</sup>。

## 3 离层断裂带瓦斯人工导流方法

根据前面的分析知, 煤层采出后, 在采场上覆离层断裂带内可形成以下两类瓦斯通道: 一类是垂直或斜交于岩层的穿层破断通道, 部分或全部穿过煤岩分层, 是上覆岩层下沉受拉及上位岩层受剪而产生; 另一种是沿层面的离层通道, 是因岩层间力学性质差异较大, 岩层下沉变形不协调所致。两类瓦斯通道使离层断裂带的渗透性显著增加, 穿层通道是卸压瓦斯越层逾渗的主要通道, 离层裂隙则为卸压瓦斯的汇聚、富集提高了空间。

对于高瓦斯、煤与瓦斯突出煤层来说, 虽然在回采前已通过保护层开采和煤层瓦斯预抽等区域瓦斯抽采措施降低了煤层瓦斯含量, 消除了突出危险, 但煤层中还残余部分可解吸瓦斯, 特别是采用预抽煤层瓦斯技术, 煤层中残存的可解吸瓦斯含量较高。在开采过程中煤中可解吸瓦斯含量会受采动卸压影响解吸出来涌入采掘作业场所, 且工作面产量越大, 从煤中解吸出来的瓦斯总量也就越多。此外, 开采层顶底板内赋存有不可采煤层时, 工作面开采过程中, 邻近

层瓦斯将大量涌入工作面 给工作面带来极大的安全隐患。

实践发现 ,受瓦斯涌出的来源、瓦斯在空气中存在浮升力及工作面通风负压等因素的综合作用 ,离层断裂区往往是瓦斯汇聚、富集的主要区域 ,加之此区域渗透性较高 ,若在采场顶板合适的位置布置一个汇 ,将此区域汇集的瓦斯抽采并输送出此区域 ,则可有效解决上邻近层的卸压瓦斯向采掘空间的涌入 ,保证工作面的安全高效开采。目前 ,在离层断裂区布置的汇 ,通常选用高位瓦斯抽采巷(下称“高抽巷”) ,以拦截上邻近层的卸压瓦斯向采场空间的涌入。

高抽巷根据其在工作面的空间位置可分为走向高抽巷和倾斜高抽巷 ,但其适用条件不同。走向高抽巷适用于厚煤层或顶板赋存有多层高瓦斯煤层、瓦斯涌出量大的工作面。高抽巷在采场的空间位置如图 3 所示 ,一般布置在工作面中部偏回风巷一侧 ,平距回风巷 50 ~ 60 m ,垂距煤层顶板 8 ~ 12 倍采高。为解决工作面初采期间瓦斯治理问题 ,可适当降低高抽巷末端的层位 ,还可在高抽巷的末端向工作面开切眼方向施工下向穿层钻孔 ,或是利用倾斜联络巷将高抽巷与回风巷联通 ,使高抽巷提前抽采到邻近层瓦斯 ,降低工作面初采期间邻近瓦斯向工作面的涌入<sup>[27]</sup>。

#### 4 现场试验验证

为了验证离层断裂带瓦斯通道的发育规律和瓦斯渗流特性 ,在阳泉煤业(集团)有限责任公司新景煤矿 80201 工作面进行了瓦斯涌出特征的现场试验研究。

试验区内 15 号煤层瓦斯含量较低 ,但由于邻近赋存有 6 8 9 ,11 ,12 号等不稳定局部可采或不可采煤层及含有大量瓦斯的 K<sub>3</sub> 和 K<sub>4</sub> 灰岩(图 4)。虽然主采的 15 煤层瓦斯含量不高 ,但其采高大 ,开采后影响的范围较广 ,受影响的邻近煤层较多 ,致使 15 煤层工作面开采过程中瓦斯涌出量极大。前期的实践发现 ,上邻近层涌出量占整个工作面瓦斯总涌出量的 90% 以上。

##### 4.1 15 号煤层离层断裂带瓦斯通道发育特征及人工导流方法

根据新景煤矿 80201 工作面煤层柱状图 ,选取表 1 的物理力学参数 ,运用关键层判定理论<sup>[28]</sup>对 15 号煤层上覆岩的关键层进行了判别 ,80201 工作面 15 号煤层上方 150 m 范围内有四层亚关键层 ,分别为层厚分别为 23.2 ,18.4 和 15 m 的砂质泥岩及层厚为 15.4 m 的泥岩关键层。各关键层及其对瓦斯通道发育的控制高度 ,详见表 1。

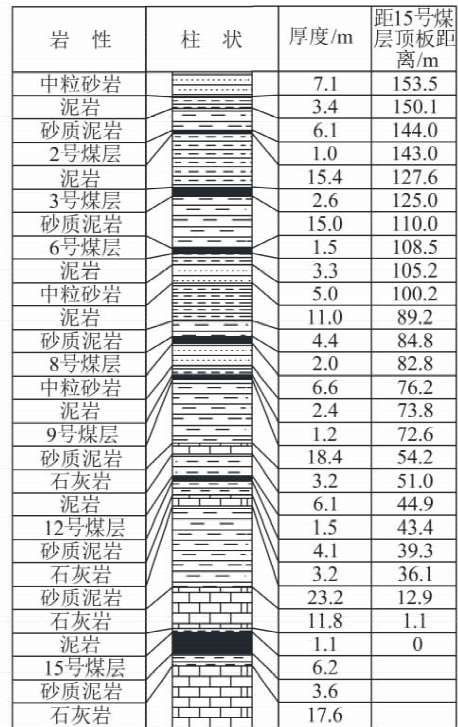


图 4 新景煤矿 80201 工作面岩层柱状图

Fig. 4 Rock stratum comprehensive columnar section of working face 80201 in Xinjing Coal Mine

表 1 80201 工作面上覆岩关键层对瓦斯通道发育的控制高度  
Table 1 Control height of key stratum to gas channel development in working face 80201

亚关键层	岩性	初始断裂步距/m	距 15 号煤层顶板距离/m	所控制的瓦斯通道高度/m
4	泥岩	29.21	127.6	160.0
3	砂质泥岩	31.27	110.0	127.6
2	砂质泥岩	40.06	54.2	110.0
1	砂质泥岩	41.43	12.9	54.2

由表 1 可知 ,80201 工作面上覆岩采动瓦斯通道的延展受关键层的控制有呈现如下特征:当工作面的推进至 55.33 m 时 ,采动瓦斯通道延展至 12.9 m 的第 1 亚关键层下;当工作面推进至 96.76 m 时 ,第 1 亚关键层断裂 ,采动瓦斯通道延展距 54.2 m 的第 2 亚关键层下 ,即覆岩离层断裂带开始发育。

考虑到瓦斯人工导流效果和高抽巷施工成本等因素 ,并结合工程实践经验 ,将高抽巷布置在 15 号煤层上部的 11 号煤层 ,垂距工作面顶板 60 ~ 70 m ,平距回风巷 60 m ,横截面积 5 m<sup>2</sup> ,高抽巷末端距切眼的水平距离为 25 m。因此 ,15 号煤层 80201 工作面采用“U+I”通风方式与走向高抽巷法治理瓦斯 ,即:回风巷、内错尾巷和高抽巷 3 条巷道治理瓦斯。

##### 4.2 瓦斯人工导流效果及流态分析

现场考察试验对 80201 工作面回采期间的分源瓦斯治理的效果进行了统计,如图 5 所示。从图中可以看出 80201 工作面回采期间,高抽巷平均瓦斯抽采量达到了  $30 \text{ m}^3/\text{min}$ ,最大为  $46.5 \text{ m}^3/\text{min}$ ,占整个工作面瓦斯涌出了 80% 以上。这说明高抽巷在离层断裂带的层位是合适的,对邻近煤层瓦斯的人工导流获得了良好的效果。

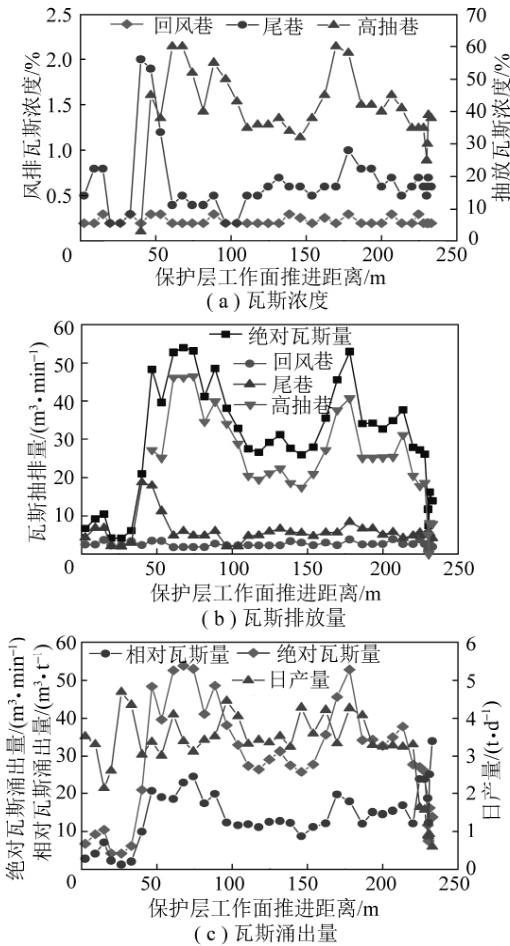


图 5 保护层 80201 工作面瓦斯浓度、瓦斯排放量、涌出量及产量与工作面推进距离的对应关系

Fig. 5 Drainage volume in different gas control measures with working face 80201 advancement

由于瓦斯涌出受控于瓦斯通道的发育,而瓦斯通道又受控于关键层的垮断,因此,15 号煤层 80201 工作面瓦斯涌出规律可由离层断裂带瓦斯通道发育特征来解释:当 80201 工作面推进到 40 m 后,高抽巷下伏煤岩体出现卸压且并形成了一定数量的采动瓦斯通道,导致邻近层向回采工作面的瓦斯涌出量逐渐增大。而后随着采动瓦斯通道的进一步发育,高抽巷与工作面回采空间导通,在高抽巷抽采负压的作用下,回采工作面上邻近层的卸压瓦斯被拦截导入高抽巷,高抽巷瓦斯浓度出现第 1 个峰值,达到了 60%,瓦斯抽采量达到了  $46.2 \text{ m}^3/\text{min}$ ,与此对应工作面其他瓦

斯治理工程的瓦斯抽排量开始下降。随着工作面的继续推进,第 1 亚关键层达到了初始跨距后垮落,造成工作面上覆岩层更大范围内的卸压,赋存于 K3 和 K4 灰岩、12 号煤层及 11 号煤线等储气层中的瓦斯不同程度的沿采动瓦斯通道涌向回采空间,使工作面瓦斯涌出量逐渐增加,导致回采工作面瓦斯涌出量第 3 峰值的出现,达到了  $53.88 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

根据前期的回采实践,15 号煤层顶板的碎胀系数取为 1.2,周期来压步距为 30 m,岩体断裂后的平均长度取 15 m,高抽巷最大混合抽采量为  $90 \text{ m}^3/\text{min}$ ,可由式(2)得到第 2 亚关键层组内瓦斯流态的计算参数,详见表 2。

表 2 80201 工作面离层断裂带瓦斯渗流特性参数  
Table 2 Gas flow properties in separation failure zone of working face 80201

参量	孔隙率 $\varphi/\%$	渗透系数 $e/\text{m}^2$	最大渗流速度 $V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	雷诺数 $Re$
数值	18.57	$5.23 \times 10^{-6}$	0.25	37.99

由表 2 可知,80201 工作面高抽巷瓦斯流动的雷诺数  $Re$  为  $37.99 > 10$ ,由图 2 可知,过渡流通道区瓦斯的流态为非线性层流。这验证了本文提出的采动瓦斯通道分区的正确性和合理性。

### 5 结 论

(1) 覆岩采动瓦斯通道随关键层的断裂而跳跃式向上发展,但最终形态不受关键层的决定,而受岩层的弯曲程度和软弱岩层的变形控制。控制覆岩移动和裂隙动态扩展的关键层必将影响着上覆煤岩卸压瓦斯的流动与汇聚。根据上覆煤岩层的移动、变形和破断发育情况,将穿层裂隙通道直径大于  $10^{-1} \text{ mm}$  的区域定为采动瓦斯通道发育区。

(2) 基于砌体梁理论,研究了关键层控制下的离层断裂带瓦斯通道的发育特征,并基于 Kozeny - Carman 准则建立了瓦斯通道流态的判定方法,并依据其内瓦斯的流动状态将上覆岩瓦斯通道的发育沿纵向由下到上分为瓦斯紊流通道区、瓦斯过渡流通道区和瓦斯渗流通道区。

(3) 根据离层断裂带瓦斯通道的发育规律,构建了以高位瓦抽采巷为主要手段的瓦斯过渡流通道区人工导流方法,并以阳泉矿区新景煤矿地质条件为背景,研究了高强度开采条件下上覆煤岩采动瓦斯通道的扩展特征并确定了瓦斯人工导流的具体方法和参数。通过卸压瓦斯抽采现场试验效果的分析,反演得到了工作面上覆岩采动瓦斯通道的演化规律及其对

瓦斯导向流动规律的影响,并对瓦斯过渡流通道区内瓦斯的流态进行了判定,验证了本文提出的理论计算方法和采动瓦斯通道分区正确性和可行性,为离层断裂带瓦斯人工高效导流提供了理论基础。

#### 参考文献:

- [1] 俞启香,程远平,蒋承林,等.高瓦斯特厚煤层煤与卸压瓦斯共采原理及实践[J].中国矿业大学学报,2004,33(2):127-131.  
Yu Qixiang, Cheng Yuanping, Jiang Chenglin, et al. Principles and applications of exploitation of coal and pressure relief gas in thick and high-gas seams [J]. Journal of China University of Mining & Technology 2004, 33(2): 127-131.
- [2] 程远平,俞启香,袁亮.上覆远程卸压岩体移动特性与瓦斯抽采技术[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2003,22(4):483-486.  
Cheng Yuanping, Yu Qixiang, Yuan Liang. Gas extraction techniques and movement properties of long distance and pressure relief rock mass upon exploited coal seam [J]. Journal of Liaoning Technical University 2003, 22(4): 483-486.
- [3] 程远平,俞启香,袁亮,等.煤与远程卸压瓦斯安全高效共采试验研究[J].中国矿业大学学报,2004,33(2):132-136.  
Cheng Yuanping, Yu Qixiang, Yuan Liang, et al. Experimental research of safe and high-efficient exploitation of coal and pressure relief gas in long distance [J]. Journal of China University of Mining & Technology 2004, 33(2): 132-136.
- [4] 袁亮.松软低透煤层群瓦斯抽采理论与技术[M].北京:煤炭工业出版社,2004.  
Yuan Liang. Theory and technology of gas drainage and capture in soft multiple coal seams of low permeability [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House 2004.
- [5] 彭永伟,齐庆新,李宏艳,等.高强度地下开采对岩体断裂带高度影响因素的数值模拟分析[J].煤炭学报,2009,34(2):145-149.  
Peng Yongwei, Qi Qingxin, Li Hongyan, et al. Numerical simulation and analysis on influencing factors of fractured zone height of high-strength underground mining [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 145-149.
- [6] 许家林,王晓振,刘文涛,等.覆岩主关键层位置对导水裂隙带高度的影响[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2):380-385.  
Xu Jialin, Wang Xiaozhen, Liu Wentao, et al. Effects of primary key stratum location on height of water flowing fracture zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 380-385.
- [7] 马亚杰,武强,章之燕,等.煤层开采顶板导水裂隙带高度预测研究[J].煤炭科学技术,2008,36(5):59-62.  
Ma Yajie, Wu Qiang, Zhang Zhiyan, et al. Research on prediction of water conducted fissure height in roof of coal mining seam [J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(5): 59-62.
- [8] 张平松,刘盛东,舒玉峰.煤层开采覆岩破坏发育规律动态测试分析[J].煤炭学报,2011,36(2):217-222.  
Zhang Pingsong, Liu Shengdong, Shu Yufeng. Analysis on dynamic testing results of distortion and collapsing of the top rock by geophys-
- ical method during mining of coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 217-222.
- [9] 付玉平,宋选民,邢平伟,等.浅埋厚煤层大采高工作面顶板岩层断裂演化规律的模拟研究[J].煤炭学报,2012,37(3):366-371.  
Fu Yuping, Song Xuanmin, Xing Pingwei, et al. Study on simulation of caving and evolution law of roof strata of large mining height work-face in shallow thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 366-371.
- [10] 姜福兴,孔令海,刘春刚.特厚煤层综放采场瓦斯运移规律[J].煤炭学报,2011,36(3):407-411.  
Jiang Fuxing, Kong Linghai, Liu Chungang. Gas emission laws of fully-mechanized sublevel caving mining in extra-thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 407-411.
- [11] 王旭锋,张东升,李国君,等.铁法矿区高瓦斯低透气性煤层群卸压煤层气抽采钻孔布置[J].煤炭学报,2011,36(8):1296-1301.  
Wang Xufeng, Zhang Dongsheng, Li Guojun, et al. Boreholes layout of coal mine methane drainage for high gassy and low permeability coal seams in Tiefa coalfield [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8): 1296-1301.
- [12] 王海锋,程远平,吴冬梅,等.近距离上保护层开采工作面瓦斯涌出及瓦斯抽采参数优化[J].煤炭学报,2010,35(4):590-594.  
Wang Haifeng, Cheng Yuanping, Wu Dongmei, et al. Gas emission and parameter optimization of gas extraction in mining face of short distance protective seam [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 590-594.
- [13] 李树刚,钱鸣高.综放开采覆岩离层裂隙变化及空隙渗流特性研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(5):604-607.  
Li Shugang, Qian Minggao. Study on bed-separated fissures of overlying stratum and interstice permeability in fully-mechanized top coal caving [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 604-607.
- [14] 齐庆新,彭永伟,汪有刚,等.基于煤体采动裂隙场分区的瓦斯流动数值分析[J].煤矿开采,2010,15(5):8-10.  
Qi Qingxin, Peng Yongwei, Wang Yougang, et al. Numerical analysis of methane flow based on districting coal body's crack field induced by mining [J]. Coal Mining Technology, 2010, 15(5): 8-10.
- [15] 黄炳香,刘长友,许家林.采动覆岩破断裂隙的贯通度研究[J].中国矿业大学学报,2010,39(1):45-49.  
Huang Bingxiang, Liu Changyou, Xu Jialin. Research on through degree of overlying strata fracture fissure induced by mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 45-49.
- [16] 钱鸣高,缪协兴.岩层控制中的关键层理论研究[J].煤炭学报,1996,21(3):225-230.  
Qian Minggao, Miao Xiexing. Theoretical study of key stratum in ground control [J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(3): 225-230.
- [17] 付玉平,宋选民,邢平伟,等.大采高采场顶板断裂关键块稳定性分析[J].煤炭学报,2009,34(8):1027-1031.

- Fu Yuping, Song Xuanmin, Xing Pingwei, et al. Stability analysis on main roof key block in large mining height workface [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1027 - 1031.
- [18] 钱鸣高, 缪协兴. 采场上覆岩层结构的形态与受力分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(2): 97 - 106.  
Qian Minggao, Miao Xiexing. Theoretical analysis on the structural form and stability of overlying strata in longwall mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(2): 97 - 106.
- [19] 郭广礼, 缪协兴, 张振南. 老采空区破裂岩体变形性质研究 [J]. 科学技术与工程, 2002, 2(5): 44 - 47.  
Guo Guangli, Miao Xiexing, Zhang Zhennan. Research on ruptured rock mass deformation characteristics of longwall goafs [J]. Science Technology and Engineering, 2002, 2(5): 44 - 47.
- [20] 邓喀中, 周鸣, 谭志祥, 等. 采动岩体破裂规律的试验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(3): 261 - 264.  
Deng Kazhong, Zhou Ming, Tan Zhixiang, et al. Study on laws of rock mass breaking induced by mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1998, 27(3): 261 - 264.
- [21] 于不凡. 煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册(修订版) [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005.  
Yu Bufan. Technical manual of coal mine gas control and utilization (revision) [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2005.
- [22] 贝尔. 多孔介质流体动力学 [M]. 李竞生, 陈崇希, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
- [23] 周世宁, 孙辑正. 煤层瓦斯流动理论及其应用 [J]. 煤炭学报, 1965(1): 24 - 37.  
Zhou Shining, Sun Jizheng. Coal seam gas flow theory and its application [J]. Journal of China Coal Society, 1965(1): 24 - 37.
- [24] Thauvin F, Mohanty K K. Network modeling of non-Darcy flow through porous media [J]. Transport in Porous Media, 1998, 31(1): 19 - 37.
- [25] 孙培德. 煤层瓦斯流场流动规律的研究 [J]. 煤炭学报, 1987, 12(4): 74 - 82.  
Sun Peide. Study of flow in gas flow fields of coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 1987, 12(4): 74 - 82.
- [26] 胡千庭, 梁运培, 刘见中. 采空区瓦斯流动规律的 CFD 模拟 [J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 719 - 723.  
Hu Qianting, Liang Yunpei, Liu Jianzhong. CFD simulation of goaf gas flow patterns [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 719 - 723.
- [27] 朱建功, 赵长春. 采用走向高抽巷治理综放面上邻近层瓦斯的研究 [J]. 山西煤炭, 1997, 17(4): 26 - 30.  
Zhu Jianguo, Zhao Changchun. A study on gas governing by high gas drainage gate on strike at up-near seam of the full-mechanized mining caving face [J]. Shanxi Coal, 1997, 17(4): 26 - 30.
- [28] 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.  
Qian Minggao, Shi Pingwu. Mining pressure and strata control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.