

开采煤层顶板环形裂隙圈内走向长钻孔法抽放瓦斯研究

刘泽功^{1,2}, 袁亮³, 戴广龙², 石必明², 卢平¹, 涂敏²

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026; 2. 安徽理工大学资源开发与
管理工程系, 安徽淮南 232001; 3. 淮南矿业集团公司, 安徽淮南 232001)

[摘要] 开采煤层工作面的瓦斯主要来源于该煤层、采空区和邻近层的卸压解吸瓦斯。由于煤层松软, 顺层钻孔施工难, 不便钻孔抽放瓦斯。若对采空区实施大面积抽放, 工程难度大, 而且抽不出高浓度瓦斯。因此, 寻找瓦斯运移的裂隙通道和瓦斯富集区, 实施有效的瓦斯抽放工程是实现高效瓦斯抽放的技术关键。采用实验室相似材料试验、数值模拟计算和工业性试验研究方法, 研究寻找采场上覆岩层中环形裂隙圈形成机理和位置, 把抽放钻孔布置在环形裂隙圈内, 进行“环形裂隙圈内走向长钻孔法”瓦斯抽放。这种瓦斯抽放技术使低透气性高瓦斯煤层的开采和瓦斯抽放分层区进行, 在开采层工作面采煤, 在顶板层裂隙区抽放卸压瓦斯, 对流向工作面上隅角的瓦斯起到了截流作用, 解决了松软低透气性高瓦斯煤层群开采瓦斯抽放困难的关键技术难题。该瓦斯抽放技术在淮南矿区高瓦斯工作面的应用结果表明, 采煤工作面瓦斯抽放率达到60%以上, 实现煤层群首采煤层安全、高效、集约化开采。

[关键词] 煤层顶板; 相似材料试验; 数值计算; 环形裂隙圈; 瓦斯抽放

[中图分类号] TD712 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)05-0032-07

1 引言

开采煤层瓦斯抽放技术已有较深入的研究, 并在高瓦斯煤层开采时得到广泛应用, 目前通常采用未卸压抽放和卸压抽放2类^[1]。未卸压瓦斯抽放对于松软、低透气煤层, 由于顺层钻孔成孔率低, 有时甚至无法施工, 不便进行顺层抽放; 而采用穿层钻孔预抽瓦斯, 又因煤层透气性差, 有效抽放半径小, 瓦斯抽放率低、效果差。卸压抽放中如何将抽放钻孔布置在大量卸压解吸瓦斯富集区, 是实现高效瓦斯抽放的关键。开采煤层工作面回风流中的瓦斯主要来源于该煤层、采空区和邻近层的卸压解吸瓦斯。若对采空区实施大面积抽放, 工程难度大, 而且抽不出高浓度瓦斯。为此, 作者提出如何寻找采场周围瓦斯运移的裂隙通道、瓦斯富集区和高效瓦斯抽放新方法。

2 开采煤层顶板环形裂隙圈形成机理

2.1 环型裂隙圈形成的力学分析

煤层顶底板由若干层性质各异的煤岩层组成, 当煤层被采出, 顶板悬空到一定极限时, 直接顶板岩层跨落, 随着采面的推进, 顶板较坚硬的岩层或称关键层跨落^[2], 称为初次来压。以后随着采面的推进, 每隔一定周期关键层跨落一次, 工作面也就形成了周期来压^[3]。根据开采沉陷学和顶板岩层控制的研究成果^[3,4], 采空区上覆岩层存在冒落、离层破断、弯曲下沉“三带”。冒落带经历了冒落、受压、压实过程。离层破断带又称裂隙带, 经历裂隙发育、充分发育、压实的过程。文献[5]基于关键层理论研究成果, 通过相似材料模拟实验、图像分析和数值模拟计算等方法, 得出从开切眼开始, 随着工作推进, 采动裂隙不断发展, 采空

[收稿日期] 2003-09-09

[基金项目] “十五”国家重点科技攻关资助项目(2001BA80313411); 教育部科学技术重点资助项目(02070); 安徽省自然科学基金资助项目(0004710)

[作者简介] 刘泽功(1960-), 男, 安徽凤台县人, 安徽理工大学教授, 中国科学技术大学博士研究生

区中部裂隙最为发育的结论。当采出面积达一定值后，位于采空区中部的顶板岩层裂隙趋于压实，而在采空区四周存在连通的离层裂隙发育区，其形状与老顶岩板破断的“O-X”形类似，钱鸣高院士称其为“O”形圈。由于“O”形圈的存在，人们对采空区卸压瓦斯抽放越来越重视，但如何寻找卸压瓦斯富集区，是高效抽放瓦斯的关键。

开采煤层顶板内瓦斯富集区除了与开采方式、通风方式有关外，还与顶板岩层移动特征有关。根据开采模拟试验和现场观测^[5]，采空区四周顶板岩层处在悬空状态，采空区顶板岩层移动是一跨落下陷过程，在靠近煤壁由于顶板没有完全冒落，存在较多的空洞，顶板内的裂隙在相当长的时期内存在。对采空区四周煤壁上覆岩层取其一进行受力分析。图 1 描述了模拟试验的回采工作面回风巷上覆顶板岩层破坏特征。取图中的 AOB 层进行分析，AO 段处在煤岩体中，BO 段处在悬臂位置，并且上面承受一定的荷载，主要来自上覆岩层。载荷 q 分布不均匀，以 O 点为中心的一定范围内的载荷接近于零，该层可看作为悬臂梁受力状态。根据岩层破坏特征，该层的底面 cd 段因弯曲受岩石层挤压、上面 ef 段受拉，同时该岩层还受到剪应力作用^[6-8]，将产生剪裂隙或上面产生张裂隙，这些裂隙大部分与岩层面斜交，自煤壁向采空区方向破断呈 55°角向上延伸^[6]，沟通上下层面。这些裂隙在相当长时间内不会压实，其诸多裂隙构成的裂隙区边界形似环状圈。文献 [2] 也描述了煤层开采后将引起上覆岩层的移动与破断，从而在覆岩中形成采动裂隙。其裂隙分为离层裂隙和竖向破断裂隙，前者是随岩层下沉在层与层之间出现的沿层面裂隙，它使煤层产生膨胀变形而使瓦斯卸压，并使卸压瓦斯沿离层裂隙流动；后者是随岩层下沉破断形成的穿层裂隙，它是沟通上、下岩层间瓦斯流动的通道。

2.2 环形裂隙圈形成的物理模拟

模型设计以淮南潘一矿 C13-1 煤层为实验原型，采深 570 m，煤厚 5.6 m，采高 3 m，沿煤层顶向下分层开采，日进尺 3 m。顶底板煤岩物理特性见图 2。

模型几何尺寸为 3 m×0.3 m×0.9 m (长×宽×高)，每 2 h 采一次，采高 3 cm，每日进 6 刀，进尺 3.6 cm，走向推进 180 cm，模型线比 1:100。用液压加载系统加载，替代上覆岩层重力作用效

果。模型的岩层内分别布置了电阻应变式微压力盒和电阻式位移计，应用微机自动测试系统来测试由开采导致的岩层内应力变化和位移变化。

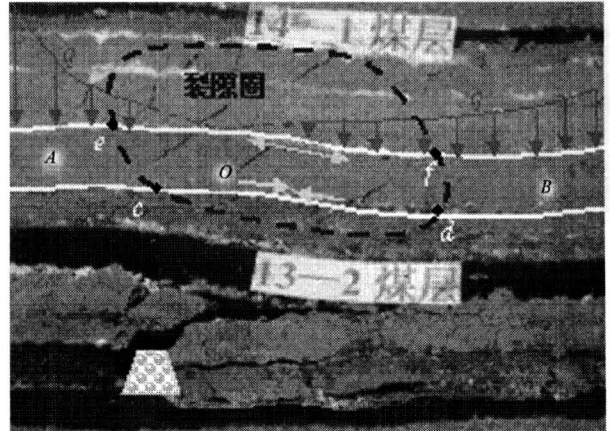


图 1 环形裂隙圈形成的力学原理
Fig.1 The mechanical principal of forming annular fracture areas

岩层柱状	序号	岩性	厚度/m	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	重力密度/kN·m ⁻³
	14	粉沙岩	2.13	1.80	-	25.11
	13	C ₁₃₋₁ 煤	0.56	0.15	7.30	14.00
	12	黏土岩	1.66	1.20	-	25.79
	11	粉质黏土岩	2.60	2.10	-	26.47
	10	细纱岩	6.88	3.10	69.60	25.80
	9	粉沙质黏土岩	1.52	1.50	45.50	25.79
	8	泥质沙岩	1.54	2.00	38.30	25.13
	7	粉沙岩	0.36	1.80	34.60	25.11
	6	粉沙质黏土岩	1.05	1.10	43.00	25.79
	5	C ₁₃₋₂ 煤	1.23	0.20	7.30	14.00
	4	粉沙质黏土岩	5.79	2.00	48.80	26.47
	3	碳质页岩	0.10	0.10	7.40	14.00
	2	C ₁₃₋₁ 煤	5.60	-	7.30	14.00
	1	黏土岩	6.00	1.10	43.40	25.79

图 2 煤岩层柱状及其物理参数
Fig.2 Coal terrane pillared plot and its physical parameters

模拟结果显示，顶板岩层所受荷载是靠层与层之间的接触传递的，当层与层之间出现离层时，作用在离层岩层上的荷载为零，采空区周边的岩层如悬臂梁，在岩层内形成拉、压应力区。根据测试结果，采动过程采场周边岩层移动特征见图 3。

顶板岩层的位移曲线有 2 个拐点。拐点 A 两侧的岩层上表面受拉，下表面受压。拐点 B 两侧的岩层上表面受压，下表面受拉。岩层在受拉、压的过程中产生许多裂隙，即拐点 A 上面及拐点 B 下面产生张裂隙。这些破断裂隙十分发育，是存集或沟通瓦斯的通道。相似模拟结果表明：淮南矿区开采 C₁₃₋₁煤层时，靠采空区一侧，在工作面上风巷倾斜向下方向 0~30 m 裂隙发育充分。即以上

风巷为界，垂直煤层向上 8~25 m，倾斜向下 0~30 m 为裂隙充分发育区。

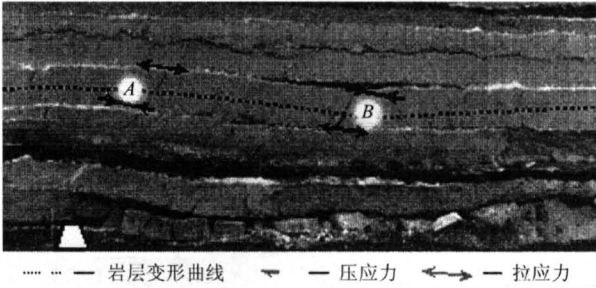


图 3 采动过程中采场周边岩层移动特征

Fig.3 The terrane movement character around stope in the course of excavation

3 开采煤层顶板环形裂隙圈特征数值模拟

3.1 理论基础

将流体力学中研究质点运动的拉格朗日元法移植到固体力学中，将研究固体力学中的区域划分为网格，其网格结点就相当于流体质点，然后按时间步长用拉格朗日法来研究网格结点的运动^[9,10]。

3.2 模型建立

走向长壁回采工作面计算模型是一个三维空间问题。为全面掌握回采期间工作面采空区上覆岩层、巷道围岩的活动变形情况，在简化的情况下，设计成二维计算模型，即沿工作面的走向和倾斜方向设计 2 个计算模型。走向长壁工作面的布置方式如图 4 所示，走向模型 I 和倾斜模型 II 如图 5 (a)，(b) 所示，分别是基于图 4 中的 A-A 和 B-B 剖面建立的，其中模型 II 考虑了煤层倾角等影响因素。

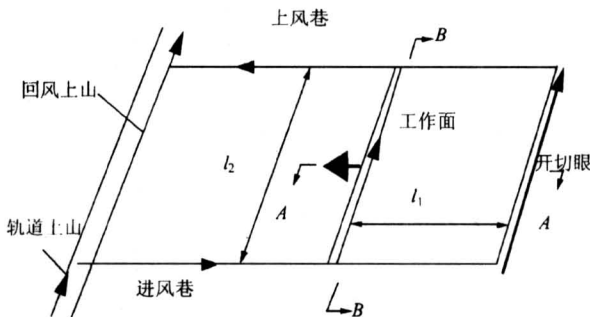


图 4 走向长壁工作布置示意图

Fig.4 The disposal of longwall working face along the strike

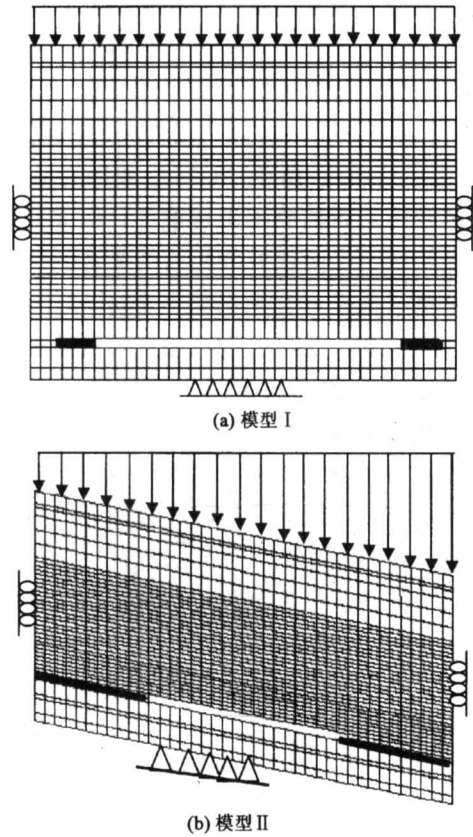


图 5 计算模型

Fig.5 Calculation model

边界条件：对于模型 I，左边界为工作面，右边界为开切眼侧。分别在垂直方向上产生位移，以“|0”作为移动符号。模型下部是煤层的底板，为固定边界，以“△”作为标记符号。上面为工作面和自由边界，一般为基岩层加地表。对于模型 II，左边界为工作面上风巷，右边界为工作面下风巷，分别在垂直方向上产生位移，以“|0”作为移动符号。下面是煤层的底板，为固定边界，以“△”作为标记符号。上面为工作面和自由边界，一般为基岩层加地表。

3.3 数据准备及模拟结果

以淮南潘一矿 C₁₃₋₁ 煤层回采工作面的基础参数（见 2.2 节所述）和图 1 所示煤岩柱状的物理参数为数值模拟的原始数据。

模型 I 的计算结果如图 6 所示，该图为计算模型采过 81 m 时，覆岩 X 方向应力等值线图。从图中可以看出，在垂直方向上，采后顶板岩层靠近采空区处，煤层顶板往上约 6~8 m 应力等值线较密，且紊乱，是冒落带的上界。煤层顶板往上约 28~32 m 处应力等值线较为稀疏，且值也较小，

表现为拉应力，且应力等值线在垂直于顶板方向上拉应力逐渐减小而趋于零。这说明该处岩层张裂、离层、裂隙已很发育，岩层失去对应力的抵抗作用。这一区域带是裂隙带度高的上界。在距煤层垂直距离 24 m 处水平方向上，煤壁后方 0~30 m 处应力为零，说明此处离层最为发育。由图中还可以看出，采动覆岩裂隙边界在煤壁一侧约为 60°角向内，在开切眼一侧约为 65°角向内。

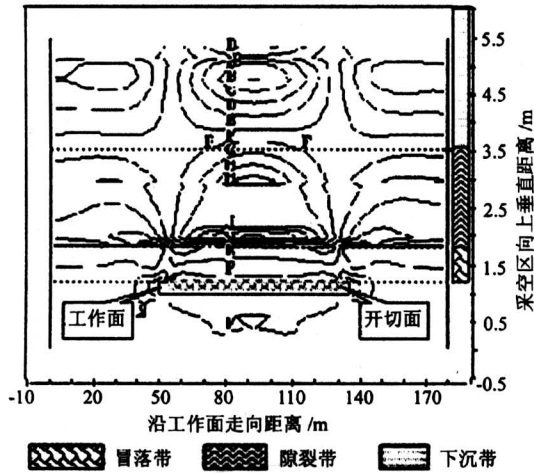


图 6 模型 I 模拟计算结果

Fig.6 Simulated calculation of model I

模型 II 的计算结果如图 7 所示。该图是距采煤工作面 20 m 处顶板覆岩的 X 方向应力等值线。从图中可以看出，工作面的上风巷以上 6~28 m 处应力等值线较为稀疏，且应力较小，岩层下部为拉应力，说明该处岩层离层发育，冒落或断裂已经开始。从图 7 的应力分析可见：煤层采出后，在工作面上风巷倾斜向下方向 0~30 m 裂隙发育充分。即以上风巷为界，向上 8~25 m，倾斜向下 0~30 m 为裂隙充分发育区。

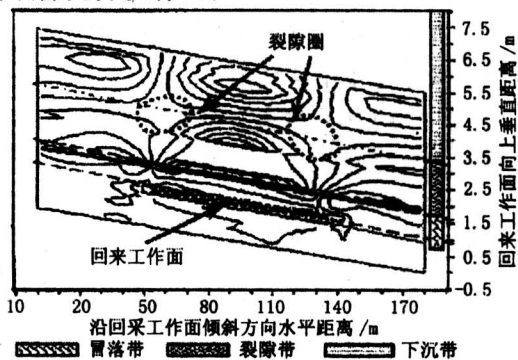


图 7 模型 II 模型计算结果

Fig.7 Simulated calculation of model II

4 瓦斯运移通道及瓦斯富集区

4.1 瓦斯运移通道

对于实行分层开采或者煤层群开采的工作面，由于开采煤层的顶板弯曲下沉、底板臃起，产生许多微裂隙，使顶、底板煤岩层透气性系数成百倍增加，这些微裂隙是瓦斯移动的主要通道^[11,12]。由于瓦斯轻于空气的特性，来自于该煤层和邻近层的大量卸压解吸瓦斯涌向采空区，主要富集在采空区周边顶板裂隙中^[13,14]。

4.2 瓦斯富集区及探测

在层流状态下，当瓦斯与空气共存时，由于瓦斯较空气轻，瓦斯总是漂浮在最上层。采空区上覆顶板岩层内裂隙中瓦斯流动的速度比层流状态下低，处在扩散和渗流状态。来自于下分层和邻近层的卸压瓦斯除部分被风流带走外，其余流向采空区顶板裂隙圈，并从上向下逐步充填。淮南矿区开采 C₁₃₋₁煤层时，在工作面后方采空区和上风巷顶板裂隙中的瓦斯浓度测试结果如图 8，图 9 所示。

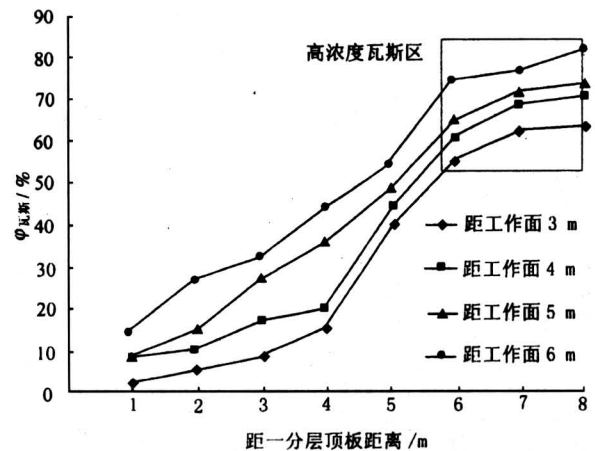


图 8 工作面后方采空区顶板裂隙中瓦斯浓度分布

Fig.8 Disposal of gas concentration in gob roof fractures behind working face

图 8，图 9 表明工作面后方采空区顶板 6 m 以上，风巷上方顶板 6 m 以上的岩层中的瓦斯体积分数达到 50% 以上，可见是高浓度瓦斯区。根据顶板裂隙的物理模拟试验结果，破断裂隙充分发育区也是高浓度瓦斯区，如图 10 所示。瓦斯与空气共存，瓦斯具有向上漂移性，处在上风巷上部的“裂隙圈”是瓦斯富集区。此区域是布置顶板抽放瓦斯钻孔的理想区域。

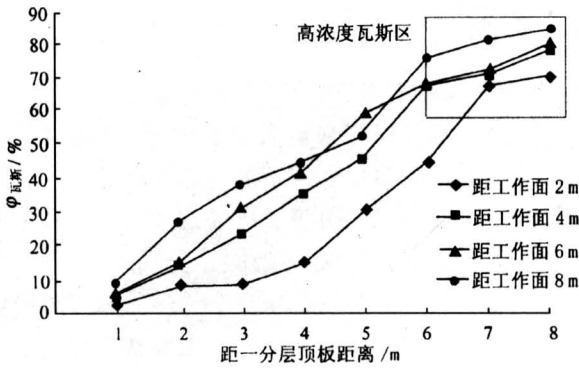


图9 风巷上方顶板裂隙中瓦斯浓度分布
Fig.9 Disposal of gas concentration Disposal of gas concentration

5 “环形裂隙圈内走向长钻孔法”抽放瓦斯试验

5.1 抽放钻孔布置

在原始煤层顶板岩层中开挖一个钻场，抽放瓦斯钻孔的开孔位置应在以后采动卸压形成的环形裂隙圈内。将抽放瓦斯钻孔沿煤层走向布置在顶板岩层的环形裂隙圈内，其抽放布置原理如图11所示。为了减少工程量，抽放钻孔应尽可能的深一些，试验钻孔深度大都在100 m以上。煤层具有一定的倾角，瓦斯总是沿裂隙通道向上运移，所以将抽放钻孔布置在采场的上边界裂隙圈内。

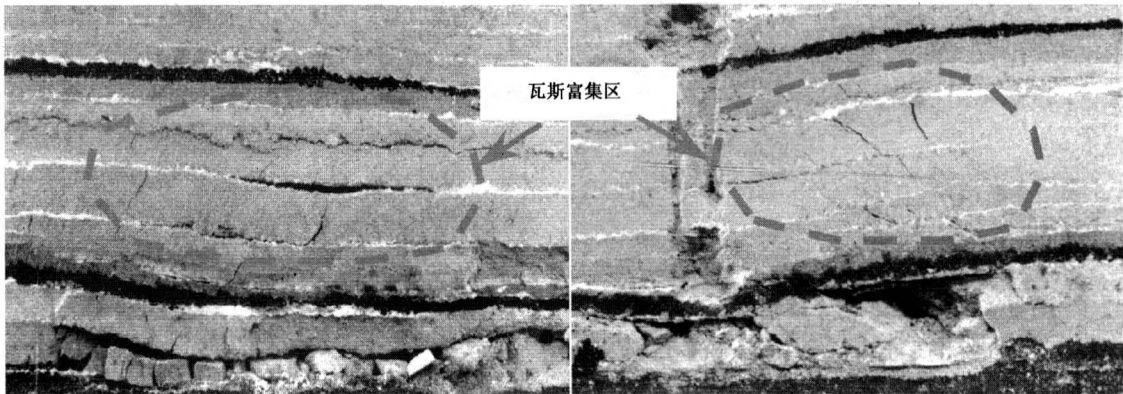


图10 “环形裂隙圈”——瓦斯富集区
Fig.10 “annular fracture area”——Gas zone of enrichment

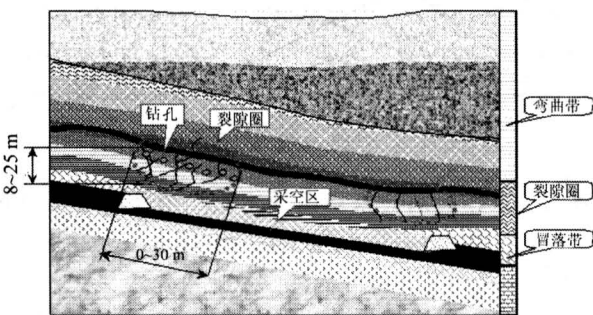


图11 环形裂隙圈内走向长钻孔法抽放瓦斯布置原理

Fig.11 The disposal of gas suction by the long drilling method along the strike of annular fracture areas

5.2 抽放参数

现场试验时，在3个瓦斯抽放钻场分别布置了6, 8, 10个孔，并分钻场、单个钻孔考察在不同

的孔口负压下的瓦斯抽放效果。结果表明抽放钻孔的数量、孔口负压与抽放瓦斯量关系密切。抽放钻孔太多就会降低孔口负压，而抽放孔口负压太高又将导致抽放管道交接处和封孔处漏气增大。因此，对于开采瓦斯含量12~22 m³/t，厚度3 m以上的煤层，以防止回采工作面瓦斯浓度超限为目标，同时考虑钻孔工程量与经济效益。经反复试验得出了最佳钻孔数量为1个钻场内8~10个孔，最佳抽放负压为16~20 kPa。试验工作面的瓦斯抽放动力、钻孔数和抽放量间的关系如图12所示。

5.3 施工工艺

在原始煤层顶板岩层中开挖一个钻场，打钻的开孔位置应在采动卸压形成的环形裂隙圈内。采用聚胺脂材料封孔。试验时，钻孔封孔深度>6 m。

5.4 试验结果

淮南矿区从1998年开始，先后在潘一矿2111(3)工作面、潘三矿1761(3)工作面进行顶板环

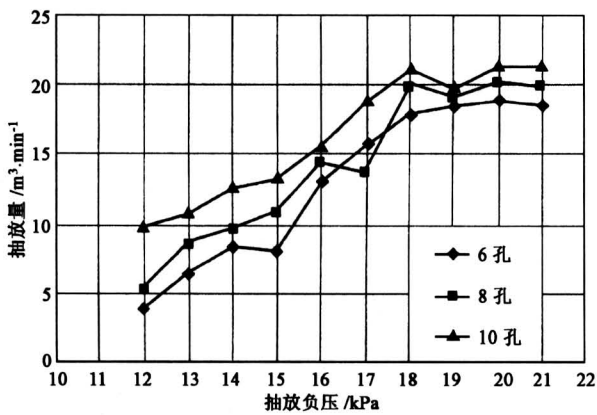


图 12 抽放动力、钻孔数和瓦斯抽放量的关系

Fig. 12 The relation of suction power, numbers of drills and gas

表 1 应用长钻孔抽放瓦斯矿工作面试验效果对比表

Table 1 The correlation table of experimental result of working face adopting long-drill gas drainage

试验工作面	配风量 /m³·min⁻¹	瓦斯涌出量 /m³·min⁻¹	风排瓦斯 /m³·min⁻¹	抽放瓦斯 /m³·min⁻¹	回风瓦斯平均体积分数 %	月平均超限次数 /	采面日产量 /t	采面抽放率 /%
2111(3)	2 020	37.78	20.0	18.4	0.9	1.8	2 800	48
1761(3)	1 530	38.0	17.0	20.78	1.14	2.2	3 175	55

注：1761 (3) 瓦斯涌出量超过 30 m³·min⁻¹，抽放后按 1.2% 放限管理，而 2111 (3) 虽然涌出量达 38 m³·min⁻¹，但瓦斯抽放后，回风瓦斯按 1% 管理。

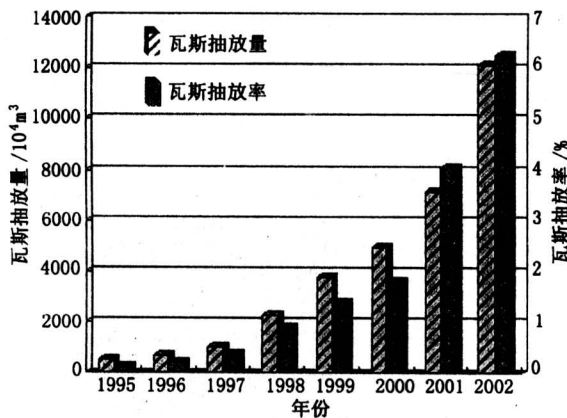


图 13 1995—2002 年矿区瓦斯抽放量对比

Fig. 13 The contrast of mine gas drainage volume in

6 结语

根据相似材料试验和数值计算，进行了开采煤层顶板受采动影响上覆岩层冒落移动特征及岩层裂隙形成机理研究；根据煤层赋存特征研究了寻找“环形裂隙圈”分布位置的方法。研究结果表明

形裂隙圈内顺层长钻孔抽放瓦斯试验，见表 1^[7,15]。

由表 1 可见，环形裂隙圈内走向钻孔抽放瓦斯纯量达 19~20 m³/min，抽放率达 48% 以上。创造了同类条件下工作面推进速度、产量的最高记录。

图 13 是 1995—2002 年间淮南矿区高瓦斯矿井实行钻孔抽放瓦斯技术前后，瓦斯抽放量和抽放率对比图。

淮南矿区全面推广应用环形裂隙圈内走向长钻孔抽放瓦斯技术后，全矿区采煤工作面由 70 个减少到 35 个，井下生产环节相对简化，安全管理环节减少，从而降低事故发生率，平均工作面单产由 600 t/d 提高到 2 000 t/d；

“环形裂隙圈”分布在上风巷上部靠采空区一侧，此“环形裂隙圈”也是高浓度瓦斯富集区。

松软低透气性高瓦斯煤层群开采的矿区，首采煤层的瓦斯灾害防治是一大技术难题。目前较安全的技术保障是进行瓦斯抽放，但是由于煤层松软、透气性低，瓦斯抽放困难。开采煤层顶板“环形裂隙圈内走向长钻孔法”瓦斯抽放机理的研究及应用，为解决首采煤层瓦斯抽放难题提供了有效途径。

参考文献

- [1] 俞启香, 王凯, 杨胜强. 中国采煤工作面瓦斯涌出规律及其控制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29 (1): 9~14
- [2] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 茅献彪. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000. 111~119, 173~189
- [3] 何国清, 杨伦, 凌庆娣, 等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994
- [4] 陈炎光, 钱鸣高. 中国煤矿采场围岩控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994. 111~119, 173~189

- [5] 钱鸣高, 许家林. 覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究 [J]. 煤炭学报, 1998, 23 (5): 466~469
- [6] 涂敏, 刘泽功. 煤体采动顶板裂隙发育研究与应用 [J]. 煤炭科学技术, 2002, 30 (7): 54~56
- [7] 袁亮, 刘泽功. 淮南矿区开采煤层顶板抽放瓦斯技术研究 [J]. 煤炭学报, 2003, 28 (2): 149~152
- [8] 侯忠杰. 断裂带老顶的判别准则及在浅埋煤层中的应用 [J]. 煤炭学报, 2003, 28 (1): 8~12
- [9] 张二海, 陈庆寿, 冉恒谦. 显式拉格朗日差分法在链子崖危岩体锚固工程中的应用 [J]. 探矿工程, 1998, (6): 36~39
- [10] 叶建设, 刘泽功. 顶板巷道抽放采空区瓦斯的应用研究 [J]. 淮南工业学院学报, 1999, 19 (2): 32~36
- [11] Jeffrey R G, Chol S K. Stimulation for methane-gas recovery from coal [A]. Rocky Mountain Regional meeting of SPE (C). Wyoming: SPE Production & Facilities, 1998. 200~207
- [12] Kolesar J E, Ertekin T. The unsteady-state nature of sorption and diffusion phenomena in the structure of coal: part 1—theory and mathematical formulation [J]. SPE Formation Evaluation, 1990, 21 (3): 81~88
- [13] Harry P, et al. Computation of gas pressure profiles relevant to outbursting in coal mines [J]. Int J Num & Analy Methods in Geomechanics, 1987, 25 (11): 1101~1129
- [14] McKee C R, et al. Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas [J]. SPE formation Evaluation, 1984, 11 (2): 599~605
- [15] 刘泽功. 高位巷道抽放采空区瓦斯实践 [J]. 煤炭科学技术, 2001, 29 (12): 10~13

Study on Coal Seam Roof Gas Drainage from the Strike of Annular Fracture Areas by the Long Drill Method

Liu Zegong^{1,2}, Yuan Liang³, Dai Guanglong², Shi Biming², Lu Ping¹, Tu Min²

(1. *University of Science and Technology of China, The State Key Lab of Fire Science, Hefei 230026, China*; 2. *Anhui University of Science and Technology, Department of Resources Exploration & Management Engineering, Huainan, Anhui 232001, China*; 3. *Huainan Mining Group Co. Huainan, Anhui 232001, China*)

[Abstract] Gas in working faces is mainly produced in the destressing and desorption process of the coal bed, gobs and adjacent strata. The coal beds are too soft to carry out bedding drilling and draw gas effectively. If gob gas suction is adopted in a large area, the project will prove not only extremely difficult, but also fail to draw out gas of high concentration. Therefore, efficient gas suction is technically determined by seeking fracture aisles for gas movement and gas zone of enrichment. In the course of mining and destressing, gas originating from large destressing areas will go through the fracture aisles of the full development areas and gather in annular fracture areas. The similar material experiments in the laboratory, the numerical simulation and the in-situ study are applied in this work in order to find the location of annular fracture areas in overlying formation. The long-drill method for gas suction along the strike of annular fracture areas is adopted. Mining in coal beds with gas of high concentration and low permeability and gas suction can be operated separately. During mining activities in the working faces, gas released from roof fracture areas will not flow into upper corners, so the technically drilling problem in soft coal beds with low permeability and high concentration gas can be solved. The application of this technology in the working faces of the gassy mines in Huainan shows that gas suction rate is above 60 percent, making it possible to mine safely, efficiently and intensively.

[Key words] coal seam; similar material experiment; numerical simulation; gas drainage; annular fracture area