

我国煤矿覆岩采动裂隙带卸压瓦斯抽采技术研究进展

林海飞,李树刚,赵鹏翔,肖 鹏,潘红宇,刘 超
(西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西 西安 710054)

摘要:采动裂隙带卸压瓦斯抽采是工作面瓦斯防治的主要方法,介绍了采动裂隙动态演化规律的研究现状,分析了卸压瓦斯抽采原理。根据瓦斯抽采直接通道的不同,总结提出采动裂隙带瓦斯抽采分类方法;基于工作面瓦斯绝对涌出量的大小,提出采动裂隙带瓦斯抽采技术的分级选择法。对各类采动裂隙带瓦斯抽采方法的优缺点、布置方式进行了分析论述,给出了具体的设计方法以及技术参数,并结合现场实例说明了各种抽采方法的效果。最后通过总结概括采动裂隙带瓦斯抽采技术的研究现状,指出采动裂隙带演化模型三维化、瓦斯高效抽采技术参数精准化以及瓦斯抽采技术装备智能化是覆岩采动裂隙带瓦斯抽采未来的研究重点及发展趋势。

关键词:采动裂隙带;瓦斯抽采;模型三维化;参数精准化;装备智能化

中图分类号:TD712 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2018)01-0028-08

Research progress on pressure released gas drainage technology of mining cracking zone in overburden strata of coal mine in China

LIN Haifei, LI Shugang, ZHAO Pengxiang, XIAO Peng, PAN Hongyu, LIU Chao

(School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract:The pressure released gas drainage of the mining racking zone was the main gas prevention method of the coal mining face. The paper introduced the research status on the dynamic evolution law of the mining cracking and analyzed the pressure released gas drainage principle. According to the different direct channels of gas drainage, the paper summarized and provided the gas drainage classification method of the mining cracking zone. Based on the gas absolute emission volume from the coal mining face, a classification selection method of the mining cracking zone gas drainage technology was provided. The paper had an analysis statement on the advantage and disadvantage as well as the layout method of gas drainage method in different mining cracking zone, provided the certain design method and the technical parameters and explained the effect of different drainage method with the site cases. Finally, with the summarization and conclusion on the research status of the gas drainage technology in the mining cracking zone, the paper pointed out that the 3D evolution model of the mining cracking zone, accuracy technical parameters of the high efficient gas drainage and the intelligent gas drainage technology and equipment would be the future research focus and development tendency of the gas drainage from the mining cracking zone of the overburden strata.

Key words:mining cracking zone; gas drainage; three-dimensional model; parameter accuracy; equipment intelligent

0 引言

我国是一个煤炭资源大国,也是煤炭生产和消费大国。据统计,我国煤炭资源总量在埋深2 000 m以

浅为5.57万亿t^[1],在一次能源生产和消费结构中分别占77%和62%^[2]。目前我国煤矿井工开采比例达到97%,随着长期大规模的开发,我国煤矿以每年10~20 m的速度向深部延深,越来越多矿井进入深部

收稿日期:2017-08-08;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.est.2018.01.004

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51734007,51674192,51604219,51774235);新疆煤及煤层气工程技术研究中心建设资助项目(2015013)

作者简介:林海飞(1979—),男,山西天镇人,教授,博士。Tel:029-85587450,E-mail:lhaifei@163.com

引用格式:林海飞,李树刚,赵鹏翔,等. 我国煤矿覆岩采动裂隙带卸压瓦斯抽采技术研究进展[J]. 煤炭科学技术,2018,46(1):28-35.

LIN Haifei, LI Shugang, ZHAO Pengxiang, et al. Research progress on pressure released gas drainage technology of mining cracking zone in overburden strata of coal mine in China[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1):28-35.

开采阶段。深部开采煤层瓦斯含量、瓦斯涌出量急剧增大,瓦斯超限、煤与瓦斯突出等现象愈加频繁^[1-2],已成为制约矿井安全高效生产的因素之一。同时,瓦斯也对大气环境有害,其对臭氧层破坏及产生的温室效应分别是CO₂的7倍和21倍。但与灾害性相对,瓦斯还是一种与煤伴生的高热、洁净能源,我国埋深2 000 m以浅瓦斯赋存约36.8万亿m³。

如安全高效抽采瓦斯,可防治瓦斯灾害,减少大气污染,同时作为清洁能源利用,达到矿井安全生产、环境保护与新能源供给等多重效应^[3-4]。由于我国大部分矿区煤层瓦斯赋存具有“三高两低”特征^[5-6](三高:煤层高瓦斯含量、高可塑性结构、高吸附瓦斯能力;两低:煤层渗透率低、强化措施下煤层常规破裂裂隙占比低),卸压瓦斯抽采仍是今后重点。笔者分析了我国煤矿采动裂隙带卸压瓦斯抽采的重要性,探讨了采动覆岩裂隙演化形态,分析抽采采动裂隙带卸压瓦斯原理;提出采动裂隙带卸压瓦斯抽采分类方法及选择原则,总结各种抽采方法的技术原理、优缺点及关键参数,并提出今后的发展趋势。

1 采动裂隙带卸压瓦斯抽采的重要性

1.1 瓦斯抽采对保障煤矿安全生产的作用

2002年我国提出“先抽后采,监测监控,以风定产”的瓦斯治理工作方针,经过多年科技攻关、技术改造和加大监管监察力度,煤矿瓦斯治理科技、装备和管理水平都取得了巨大进步。由我国煤矿瓦斯事故与瓦斯抽采量情况(图1)对比可知,我国煤矿瓦斯抽采量及利用量迅速增长,2016年煤矿瓦斯抽采量173亿m³,利用量90亿m³,分别是2001年的16.65倍和16.21倍;瓦斯事故起数及死亡人数呈逐年下降趋势,2016年煤矿瓦斯事故23起、死亡183人,分别比2001年下降了96.97%和92.81%。

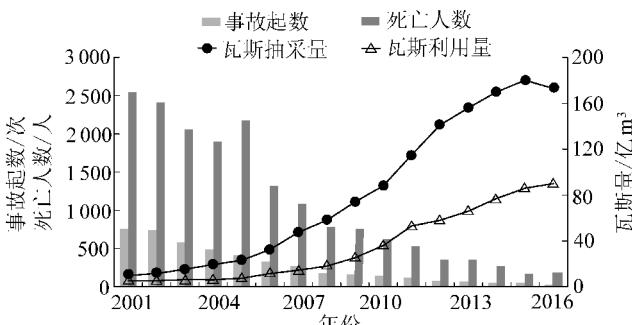


图1 我国煤矿瓦斯事故及瓦斯抽采与利用量

Fig. 1 Gas accident and gas extraction and utilization of coal mine in China

将煤矿瓦斯事故起数及死亡人数与瓦斯抽采量进行对比发现(图2),两者符合负指数关系。这充分说明,随着瓦斯抽采量的快速增加,可减少工作面瓦斯的涌出,降低瓦斯积聚及超限次数,保证矿井的安全生产。

1.2 采动裂隙带瓦斯抽采的作用

我国含煤地层一般经历了成煤后的强烈构造运动,煤层内生裂隙系统遭到破坏,成为低透性的高延性结构,使大部分矿区煤层瓦斯赋存明显存在“三高两低”特征。尤其是煤层低渗透率,这使得采前预抽瓦斯效果与美国、澳大利亚等国家相比不甚理想,决定了地面预抽煤层瓦斯难度较大,先采气后采煤技术仍需进一步发展。据统计,2016年我国地面瓦斯抽采量45亿m³,约占瓦斯抽采总量的26.01%。

煤层瓦斯主要以吸附于孔隙表面及承压于煤岩体孔、裂隙内的状态赋存,在岩体应力与瓦斯压力下处于相对平衡状态,但在采动影响下会被打破,煤岩体随之变形破裂,渗流结构得到改变,瓦斯得以解吸、扩散、渗流、运移。因此,煤层开采后采动裂隙带卸压瓦斯抽采仍将是今后的研究重点,对于防治工作面瓦斯超限具有重要作用。

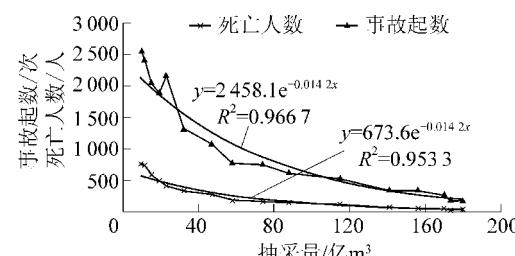


图2 瓦斯抽采量与瓦斯事故关系

Fig. 2 Relationship between gas extraction and gas accident

2 采动裂隙带卸压瓦斯抽采原理

2.1 采动覆岩裂隙演化形态及模型

煤层开采后,瓦斯运移及储集依赖于采场覆岩裂隙发育演化规律及其形态。钱鸣高院士等^[7]基于关键层理论,提出煤层采动后上覆岩层采动裂隙呈两阶段发展规律并形成“O”形圈分布特征。林柏泉等^[8]提出采动裂隙带是“回”形圈的分布。杨科等^[9]得到覆岩采动裂隙具有“∩”型高帽状、前低后高驼峰状、前后基本持平驼峰状、前高后低驼峰状等特征。齐庆新等^[10]认为工作面前方煤体存在反“C”形裂隙发育带。文献[6,11-12]将采动裂隙分为采空区顶板环形裂隙区、裂隙带内竖向裂隙发育

区及远程卸压煤层裂隙发育区。近年来,袁亮院士等^[13]运用实时监测、数值模拟,建立了低透气煤层群瓦斯高效抽采的高位环形裂隙体及其判别方法。李树刚^[14]提出采场覆岩破断裂隙和离层裂隙贯通后在空间上分布是采动裂隙椭抛带。笔者基于采动裂隙椭抛带模型,结合采动裂隙“O”形圈特征,提出采动裂隙圆矩梯台带的工程简化模型^[15],如图3、图4所示,图中FZ1为破断裂隙区,FZ2为离层裂隙区,CZ1为断破压实区,CZ2为离层压实区。

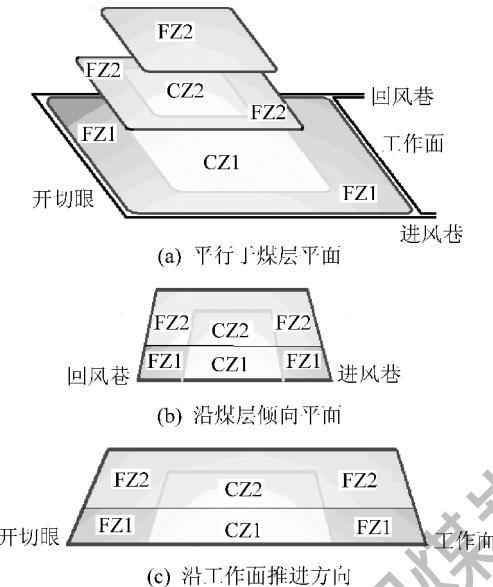


图3 主关键层触研前采动裂隙带形态

Fig. 3 The shape of mining fracture zone before the main key stratum touches the gangue

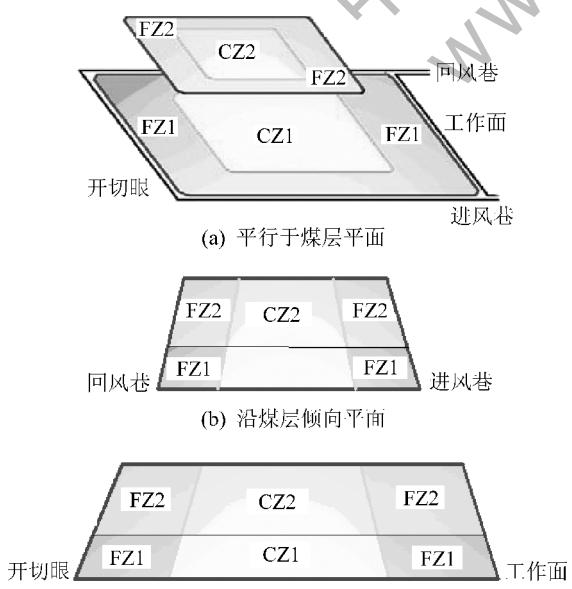


图4 主关键层触研后采动裂隙带形态

Fig. 4 The shape of mining fractured zone after main key stratum touches gangue

2.2 采动覆岩裂隙带抽采瓦斯原理

通常工作面推进到一定距离后,开切眼、工作面和进回风巷构成的几何图形为矩形,当覆岩层面离层和穿层破断裂隙贯通后,在平行于煤层平面的矩形框内存在环状裂隙发育区,在环形圈中部是压实裂隙,如工作面足够长,可形成类似于经过圆倒角的矩形,如工作面较短或裂隙带上方,则形成椭圆形结构,如图3a、图4a所示。垂直于煤层剖面上,主关键层触研前,垮落的最上位亚关键层上方与未垮关键层间裂隙发育,其下方在进风巷、回风巷、开切眼及工作面附近裂隙发育,采空区中部裂隙压实,裂隙区及压实区边界线可近似为直线,从外形上看呈梯形状,如图3b、图3c所示;随工作面推进,当主关键层触研后,采空区中部被压实,但四周裂隙仍可保持,裂隙区及压实区边界也近似为直线,从外形看也呈梯形状,如图4b、图4c所示。于是,在整个采场覆岩中形成了一个“采动裂隙圆角矩形梯台带”(简称梯台带)。

根据采动裂隙类型,梯台带可分为破断裂隙发育区及离层裂隙发育区,破断裂隙发育区中气体在水平和竖向上可贯通流动,离层裂隙发育区中气体主要在水平方向上流动。由于瓦斯具有升浮、扩散和渗流特性,大面积的卸压瓦斯将由裂隙通道汇集到裂隙发育区,即梯台带中瓦斯解吸流动明显,是瓦斯运移的主要通道,也是瓦斯积聚的重要场所。如将瓦斯抽采钻孔、巷道或管路布置到该区域,就可保证瓦斯抽采效果。

3 采动裂隙带瓦斯抽采技术

3.1 采动裂隙带瓦斯抽采方法类别及选择

3.1.1 采动裂隙带瓦斯抽采方法类别

目前采动裂隙带瓦斯抽采方法主要是按照瓦斯涌出来源,将其划归到邻近层卸压瓦斯抽采、采空区抽采或者围岩抽采,这类分类方法可能导致具体的方法有所交叉,如高位钻孔瓦斯抽采法,可能是邻近层卸压瓦斯抽采方法,也可能是采空区瓦斯抽采方法。为尽量减少具体分类方法的重叠交叉,作者根据已有瓦斯抽采方法的分类思想,对采动裂隙带瓦斯抽采方法进行专门划分(图5),第1层次以直接抽采瓦斯通道的方式为依据,划分为钻孔、巷道和管路等瓦斯抽采法;第2层次为具体的瓦斯抽采方法,如走向高抽巷、地面钻孔抽采、采空区插管抽采等方法;煤矿生产实践中,不可能采用单一方法来解决工

作面瓦斯问题,需要采用多种瓦斯抽采方法来实现综合抽采治理。

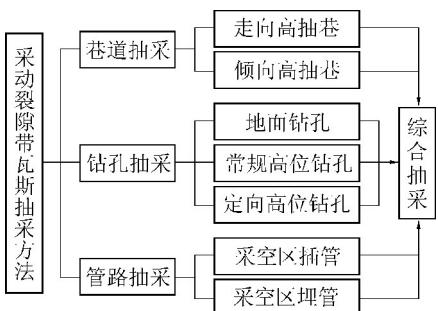


图5 采动裂隙带瓦斯抽采方法分类

Fig. 5 Classification of gas extraction method in mining fractured zone

3.1.2 采动裂隙带瓦斯抽采方法选择

采动裂隙带瓦斯抽采一般是工作面回采后应用,因此需保证工作面的安全回采条件。对于煤与瓦斯突出矿井采煤工作面,采用区域和局部综合防突措施后,满足《防治煤与瓦斯突出规定》方可回采;高瓦斯矿井采煤工作面,满足《煤矿瓦斯抽采基本指标》方可回采。工作面回采前,根据煤层赋存、瓦斯赋存、工作面条件等预测工作面瓦斯涌出量,参考《煤矿瓦斯治理五十条经验》、NB/T 51003—2012《采煤工作面瓦斯综合治理设计规范》可分级选择采动裂隙带瓦斯抽采方法,见表1。

表1 采动裂隙带瓦斯抽采方法选择

Table 1 Selection of gas drainage method in mining fractured zone

工作面瓦斯涌出量/(m ³ ·min ⁻¹)	瓦斯抽采方法
≤10	插管或埋管或高位钻孔抽采
10~20	常规高位钻孔抽采为主插管或埋管抽采为辅
20~50	瓦斯抽采巷、定向高位孔或地面孔抽采为主,插管或埋管抽采为辅
≥50	抽采巷、高位钻孔、埋管、地面钻井等综合抽采

3.2 采动裂隙带瓦斯抽采方法

3.2.1 巷道抽采采动裂隙带瓦斯方法

巷道抽采采动裂隙带瓦斯方法主要有走向和倾斜高抽巷,优点是抽采流量大、抽采期长及抽采率高,缺点是掘进成本高、施工周期长等。

1) 走向高抽巷抽采瓦斯方法。顶板走向高抽巷是沿走向在覆岩采动裂隙带布置一条巷道来抽采

瓦斯(图6),高抽巷抽采瓦斯效果与布置层位、距回风巷平距、始抽距离(抽出瓦斯时工作面推过高抽巷端头的长度d)、抽采负压等参数有关。

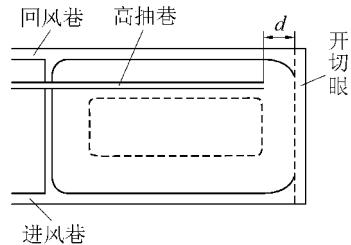


图6 走向高抽巷布置示意

Fig. 6 Layout of high level drainage roadway

山西天池煤矿高抽巷抽采瓦斯实践表明^[16],对于不易自燃煤层,走向高抽巷一般布置在断裂带、与煤层顶板距离30 m(6~7倍采高),与回风巷平距30 m(1/3~1/6工作面斜长),抽采负压15~25 kPa,高抽巷抽采瓦斯效果较好;如103综放工作面瓦斯抽采纯量最高为50.7 m³/min,平均35.1 m³/min,抽采量占瓦斯涌出量的54%~66%。陕西彬长矿区高抽巷抽采采动裂隙带瓦斯的实践表明,对于开采易自燃煤层,为减小采空区漏风量,强化瓦斯与火协同防治效果,一般将高抽巷布置在冒落带、与煤层顶板25 m,与回风巷平距25 m,抽采负压25~32 kPa,瓦斯抽采效果较好;如大佛寺煤矿40108工作面,瓦斯抽采纯量最高40 m³/min,平均28 m³/min,抽采量占瓦斯涌出量的70%,杜绝了工作面瓦斯超限及采空区遗煤自然发火。

2) 倾向高抽巷抽采瓦斯方法。倾向高抽巷一般与外错尾巷联合使用,在尾巷沿倾向施工斜巷到顶板一定层位后再平巷25~40 m,来抽采裂隙带瓦斯,一个工作面走向长内可布置4~5条倾向高抽巷(图7)。

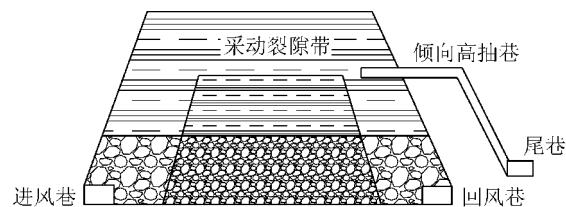


图7 倾向高抽巷布置示意

Fig. 7 Layout of inclined high level drainage roadway

阳泉矿区倾向高抽巷抽采裂隙带瓦斯实践证明^[17],倾向高抽巷一般终口位置与回风巷平距1/4~1/6工作面斜长(为25~40 m),抽采负压在10~14 kPa时,抽采效果显著。如阳泉五矿8108综

放工作面采用倾向高抽巷抽采裂隙带瓦斯,抽采半径可达320 m,回风巷瓦斯体积分数为0.5%。

3.2.2 钻孔抽采瓦斯方法

1)地面钻孔抽采瓦斯方法。地面钻孔抽采采动裂隙带瓦斯是从地面施工的瓦斯抽采钻孔,以抽采覆岩因受采动影响而解吸出来的游离瓦斯,如图8所示,该方法具有抽采范围大、抽采期长及不受井下巷道工程施工条件限制等优点,目前已被诸如淮南、淮北、铁法、宁煤等矿区广泛使用,缺点是施工成本高、适用于埋藏较浅的煤层。根据地面钻进开孔与终孔的空间位置,可分为“|”型和“L”型等形式,其设计关键参数有钻孔直径、深度、位置、结构、间距及数量等。

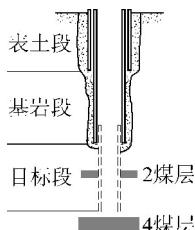


图8 地面钻孔结构示意

Fig. 8 The structure of ground borehole

根据铁法矿区地面钻孔抽采采动裂隙带瓦斯实践表明^[18],钻孔终孔在垂直方向上布置于断裂带下1/3处,在工作面倾斜方向上布置于靠回风巷(1/3~1/2)工作面斜长处,第一孔位置距开切眼一般大于初次来压步距5~10 m,合理间距不小于100~150 m,钻孔结构主要依据地层结构、抽采量和工作面采动裂隙带高度确定,一般分3次开孔,第1段为表土段(下表层套管,固孔),第2段为基岩段(下技术套管,固孔),第3段为目标段(下产气管,不固孔)。地面钻孔抽采采动裂隙带瓦斯可取得良好的效果,单孔日产量最高2.8万m³,平均瓦斯体积分数80%以上。

2)常规高位钻孔抽采瓦斯方法。常规高位钻孔是在回风巷施工低位钻场,或在回风巷或其他巷道开口施工高位钻场,在钻场或无煤柱开采沿空留巷内利用非定向钻机施工斜向钻孔(图9)。该方法具有施工时间短、施工效率高、抽采效果较好等优点,已成为我国许多矿井工作面瓦斯治理的主要技术;为减少工程量、提高瓦斯抽采效果,淮南矿区构建了以留巷钻孔替代多岩巷的抽采瓦斯的煤与瓦斯共采理论和技术体系^[19],在留巷内布置高位抽采钻孔,实现了连续抽采瓦斯与工作面采煤同步推进。

高位钻孔抽采采动裂隙带方法的关键参数是钻

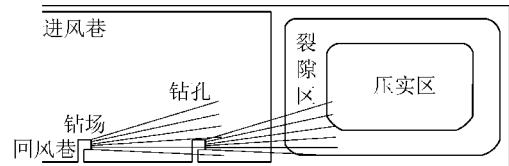


图9 常规高位钻孔布置示意

Fig. 9 Layout of conventional high level borehole

场层位及其间距,钻孔直径、终孔点与煤层顶板垂距、终孔点与回风巷平距、钻孔数量以及压茬长度,抽采负压等。根据我国大部分矿区应用高位钻孔抽采裂隙带瓦斯实践表明,高位钻孔一般按三花眼布置,每个钻场布置5~10个钻孔,钻孔长度及直径按照施工钻具能力决定,但一般长度不小于80 m,直径不小于75 mm,钻孔终孔点布置于冒落带上部、断裂带下部,沿倾斜方向控制在与回风巷平距30~50 m区域,为保证过钻场高位钻孔的抽采效果,钻孔需要有一定的搭接长度,一般不小于30~40 m;为提高钻孔有效利用率,钻场最好布置于煤层顶板,钻场间距与钻孔长度及压茬长度有关,一般不小于40~50 m。如新疆硫磺沟煤矿(4-5)04工作面^[20],高位钻场在回风巷帮起坡45°掘进至煤层顶板,钻场间距65 m,每个钻场10个钻孔,钻孔直径75 mm、长度100 m,分2排布置,钻孔终孔与煤层顶板9~34 m,与回风巷中线距离左偏1.3 m~右偏22.7 m,压茬长度35 m;钻孔平均瓦斯抽采体积分数23%,抽采量占绝对瓦斯涌出总量的49.94%~89.88%,高位钻孔正常抽采期间未发生瓦斯超限现象。

3)定向高位钻孔抽采瓦斯方法。常规高位钻孔存在有效抽采段小、钻孔利用率较低、层位定位不准、抽采效果不稳定等问题,尤其是低位钻场施工的穿层钻孔。为改善这些问题,部分矿区已在高位钻场使用大功率钻机,应用钻杆稳定器来施工大直径水平长钻孔;尤其是近年来随着施工钻具的发展,许多矿井在低位钻场使用定向钻机施工高位长钻孔来抽采裂隙带瓦斯,以控制钻孔轨迹、提高钻孔利用率、强化瓦斯抽采效果,该方法是今后主要发展的瓦斯抽采方法。定向高位钻孔主要采用滑动定向钻进技术和复合定向及回转扩孔钻进技术^[21]。定向高位钻孔一般在每个钻场布置3~5个钻孔,长度300~800 m,直径可达200~300 mm,如图10所示。

沈阳红菱煤矿主采12号煤,厚1.5~2.0 m,钻场与12号煤顶板垂距15~20 m,每个钻场施工2~3个走向长钻孔,钻孔直径153 mm,最大孔深339 m;

考察期间,单孔抽采瓦斯纯量最高达 $9.11\text{ m}^3/\text{min}$,平均 $5.16\text{ m}^3/\text{min}$,瓦斯抽采体积分数最高95%,平均48%。寺河煤矿W1305工作面主采3号煤层,平均厚度6.1m,将定向高位钻孔钻场布置于W13052巷3、6、9号联络巷^[22],每个钻场布置4个定向高位钻孔,孔径153mm,孔深372~390m,与回风巷平距15~50m,与煤层顶板垂距27~30m;考察期间,单孔最大瓦斯抽采流量达 $30\text{ m}^3/\text{min}$ 以上,平均 $9.89\text{ m}^3/\text{min}$ 。

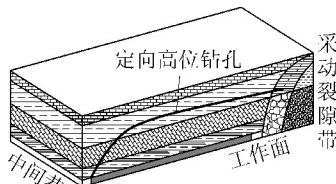


图10 定位高位钻孔布置示意

Fig. 10 Layout of directional high level borehole

3.2.3 管路抽采瓦斯方法

1)采空区插管抽采瓦斯方法。插管法是将抽采管吊挂在顶板上,插入上隅角,吸气口贴近上隅角尚未冒落空间的顶部及上帮煤壁。随着工作面的推进,拆下前端一段管路,如此反复(图11),该方法简便易行,但对采动裂隙带瓦斯流场影响较小,瓦斯抽采体积分数偏低(一般小于5%),其关键参数是插入段与切顶线的距离、抽采管径及负压等。如陕西富源煤业党家河煤矿104综采工作面^[23],插管深度3~5m,直径300mm,抽采负压40kPa,抽采瓦斯体积分数最高达6%,平均瓦斯纯量 $3.5\text{ m}^3/\text{min}$ 。

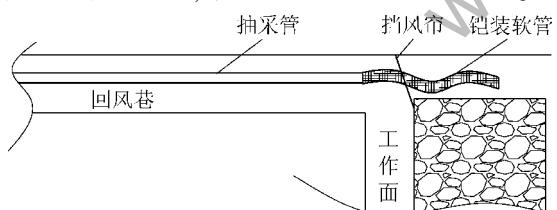


图11 采空区插管抽采瓦斯布置示意

Fig. 11 Layout of gas extraction by inserting pipe

2)采空区埋管抽采瓦斯方法。埋管抽采瓦斯技术是在回风巷敷设一趟瓦斯抽采管,常见埋管的抽采管吸气口位于采空区底板处,瓦斯抽采体积分数不高(一般在5%~10%)。为提高该方法的瓦斯抽采效果,可采用埋立管或“T”形管等方式,将吸气口抬高,如图12所示。淮北朱庄煤矿回风巷每15m设置一个连接立管的三通,利用2个立管进行埋管抽采,瓦斯抽采体积分数一般约8.15%,最高达10%以上。

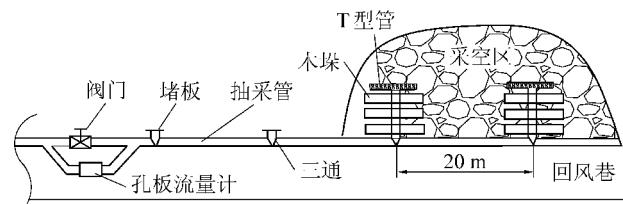


图12 采空区埋管抽采瓦斯布置示意

Fig. 12 Layout of gas extraction by buried pipe in goaf

3.2.4 采动裂隙带瓦斯综合抽采技术

当一个矿井工作面回采期间绝对瓦斯涌出量超过一定值时,一种瓦斯抽采方法无法解决瓦斯问题时,必须进行采动裂隙带的综合抽采,才能保证安全生产。以淮南矿区朱集煤矿1111(1)深井工作面为例介绍^[24],该工作面开采11₋₂煤层,均厚1.2m,平均倾角3°,采用阶段性沿空留巷方式,工作面回采期间,绝对瓦斯涌出量平均 $43.64\text{ m}^3/\text{min}$,应用地面钻孔、埋管、常规高位钻孔等综合瓦斯抽采技术。

工作面施工6个地面钻孔,间距约260m,钻孔与轨道巷平距64~85m,穿过11₋₂煤层,终孔与11₋₂煤层底板距离10m,1号钻孔与开切眼距离205m;轨道巷布置2趟抽采管路,在开切眼封闭墙处布置1趟D325mm管道,留巷充填墙体1号和2号埋管处布置D273PE管1趟,布置D426mm铁管1趟作为随采随抽;常规高位钻孔分为2种,一种在平巷每隔40m施工2个钻孔至13₋₁煤层顶板,另一种布置高位钻场,钻场间距100m,在钻场内施工9个高位钻孔,孔径133mm,压茬长度大于20m,终孔点距11₋₂煤层顶板大约12m。

考察期间,工作面瓦斯抽采量 $34.27\text{ m}^3/\text{min}$,瓦斯抽采率78.54%,回风巷瓦斯体积分数0.33%,消除了工作面瓦斯超限,工作面平均日产煤量3 462t,实现了矿井的安全高效生产。

4 采动裂隙带瓦斯抽采技术发展趋势

采动裂隙带瓦斯抽采是工作面瓦斯防治的方法之一,在大部分煤矿已取得良好效果,但由于采动覆岩裂隙演化及瓦斯运移的复杂性,瓦斯抽采技术的前瞻性、协同性仍有所不足,需进一步研究以下问题。

4.1 采动裂隙带演化模型三维化

采动覆岩移动及结构演化最好是将其视为空间结构模型来研究其运动演化与瓦斯运移的内在联

系,从而更好揭示平面岩层运动理论所难以解释的瓦斯运移规律,需综合应用三维物理相似材料模拟、数值模拟及现场观测,进一步研究采场覆岩移动及裂隙演化三维空间规律及形态。由于采场覆岩结构及物理力学特性的复杂性及差异性,煤层开采后形成的裂隙带形态也有所不同,工作面斜长、采高、推进距离、推进速度、覆岩岩性、煤层倾角、埋深等因素均对其形态有所影响,需要构建考虑这些参数影响的裂隙带多因素数学力学模型,进而分析采动裂隙带动态演化机制;应用分形理论、统计论、随机理论、模糊理论等研究采动裂隙带参数的表征方法,尤其是三维空间采动裂隙参数的定量表征。

4.2 瓦斯高效抽采技术参数精准化

目前部分矿区采动裂隙带瓦斯抽采方法的选择及布置参数确定仍凭经验方法,需系统地将卸压瓦斯储运规律与覆岩采动裂隙演化规律、矿山压力分布规律等有机结合;同时,对于采动覆岩破裂与瓦斯储运规律的研究,大部分是单一考虑开采煤层对于覆岩卸压增透效应、瓦斯动力弥散、渗流效应,而采场覆岩破裂与瓦斯运移规律相当复杂,既有瓦斯弥散、渗流,也包括采动裂隙与瓦斯流动耦合作用,需采用固气耦合物理相似材料模拟、数值模拟及现场精准探测等方法,同步研究多因素影响下的采动裂隙场、瓦斯运移场等多场耦合规律,研究采动裂隙带介质的渗流参数、工作面风流流动参数及几何边界条件、瓦斯抽采方式等对抽采效果的影响规律,从而准确定量瓦斯抽采系统参数。

4.3 瓦斯抽采技术装备智能化

在准确辨识出采动裂隙带瓦斯富集区域,优选出瓦斯抽采方法,定量确定瓦斯抽采系统的布置参数及抽采参数,如何将瓦斯抽采系统(尤其是抽采钻孔)精确施工到相应位置,同时在抽采过程中如何精确反馈抽采效果进而调整瓦斯抽采参数,需要研究大直径长钻孔钻进智能定位技术及装备,瓦斯抽采效果智能评判体系、评判模型及调控系统。

5 结 论

1) 我国大部分矿区煤层瓦斯具有“三高两低”的特征,采动裂隙带瓦斯抽采仍将是今后研究重点;采场覆岩裂隙发育演化规律及其形态可用“采动裂隙圆矩梯台带”的工程简化模型来表征,把瓦斯抽采钻孔、巷道或管路布置到该区域,可保证瓦斯抽采效果。

2) 根据直接抽采瓦斯通道的方式,将采动裂隙带瓦斯抽采方法分为钻孔、巷道和管路等方式;按工作面瓦斯绝对涌出量的不同($\leq 10 \text{ m}^3/\text{min}$, $10 \sim 20 \text{ m}^3/\text{min}$, $20 \sim 50 \text{ m}^3/\text{min}$, $\geq 50 \text{ m}^3/\text{min}$),分级选择采动裂隙带瓦斯抽采方法。

3) 采动裂隙带巷道抽采瓦斯技术具有抽采流量大、抽采期长及抽采率高等特点,钻孔抽采瓦斯法具有施工时间短、效率高、效果较好等优点,定向高位钻孔抽采法钻孔轨迹可控、抽采效果好,是今后发展的主要方法,管路抽采瓦斯法具有成本低、简单等优点,但抽采效果较差,一般只作为辅助手段。

4) 为提高采动裂隙带瓦斯抽采效果,提出采动裂隙带演化模型三维化、瓦斯高效抽采技术参数精准化、瓦斯抽采技术装备智能化是今后研究的重点及发展趋势。

参考文献(References):

- [1] 谢和平,高 峰,鞠 杨.深部岩体力学研究与探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [2] 袁 亮.我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J].煤炭学报,2016,41(1):1-6.
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1-6.
- [3] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等.我国煤与瓦斯共采:理论、技术与工程[J].煤炭学报,2014,39(8):1391-1397.
XIE Heping, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, et al. Theory technology and engineering of simultaneous exploitation of coal and gas in China [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1391-1397.
- [4] 李树刚,林海飞,赵鹏翔,等.采动裂隙椭抛带动态演化及煤与甲烷共采[J].煤炭学报,2014,39(8):1455-1462.
LI Shugang, LIN Haifei, ZHAO Pengxiang, et al. Dynamic evolution of mining fissure elliptic paraboloid zone and extraction coal and gas [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1455-1462.
- [5] 李树刚,李生彩,林海飞,等.卸压瓦斯抽取及煤与瓦斯共采技术研究[J].西安科技大学学报,2002,22(3):247-249.
LI Shugang, LI Shengcai, LIN Haifei, et al. Technique of drawing relieved methane and simultaneous extraction of coal and coakbed methane[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2002, 22(3): 247-249.
- [6] 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 tech-

- nique system of integrated coal production and gas extraction [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 1–8.
- [7] 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.
QIAN Minggao, XU Jialin. Study on the “O-SHAPE” circle distribution characteristics of mining-induced fractures in the overlying strata [J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(5): 466–469.
- [8] 赵保太,林柏泉.“三软”不稳定低透气性煤层开采瓦斯涌出及防治技术 [M].徐州:中国矿业大学出版社,2007.
- [9] 杨科,谢广祥.采动裂隙分布及其演化特征的采厚效应 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1092–1096.
YANG Ke, XIE Guangxiang. Caving thickness effects on distribution and evolution characteristics of mining induced fracture [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 1092–1096.
- [10] 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 bodys crack field induced by mining [J]. Coal Mining Technology, 2010, 15(5): 8–10.
- [11] 刘泽功,袁亮,戴广龙,等.开采煤层顶板“环形裂隙圈内走向长钻孔”抽放瓦斯研究 [J].中国工程科学, 2004, 6(5): 32–38.
LIU Zegong, YUAN Liang, DAI Guanglong, et al. Study on coal seam roof gas drainage from the strike of annular fracture areas by the long drill method [J]. Engineering Science, 2004, 6(5): 32–38.
- [12] 卢平,袁亮,程桦,等.低透气性煤层群高瓦斯采煤工作面强化抽采卸压瓦斯机理及试验 [J].煤炭学报, 2010, 35(4): 580–585.
LU Ping, YUAN Liang, CHENG Hua, et al. Theory and experimental studies of enhanced gas drainage in the high gas face of low permeability coal multi-seams [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 580–585.
- [13] 袁亮,郭华,沈宝堂,等.低透气性煤层群煤与瓦斯共采中的高位环形裂隙体 [J].煤炭学报, 2011, 36(3): 357–365.
YUAN Liang, GUO Hua, SHEN Baotang, et al. Circular overlying zone at longwall panel for efficient methane capture of multiple coal seams with low permeability [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 357–365.
- [14] 李树刚,石平五,钱鸣高.覆岩采动裂隙椭抛带动态分布特征研究 [J].矿山压力与顶板管理, 1999, 16(3/4): 44–46.
LI Shugang, SHI Pingwu, QIAN Minggao. Study on the dynamic distribution features of mining fissure elliptic paraboloid zone [J]. Ground Pressure and Strata Control, 1999, 16(3/4): 44–46.
- [15] 林海飞,李树刚,成连华,等.覆岩采动裂隙带动态演化模型的实验分析 [J].采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 298–303.
LIN Haifei, LI Shugang, CHENG Lianhua, et al. Experimental analysis of dynamic evolution model of mining-induced fissure zone in overlying strata [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 298–303.
- [16] 林海飞,李树刚,索亮,等.走向高抽巷合理层位的FLUENT数值模拟 [J].辽宁工程技术大学学报, 2014, 33(2): 172–176.
LIN Haifei, LI Shugang, SUO Liang, et al. Numerical simulation on reasonable position of strike high roadway with FLUENT [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2014, 33(2): 172–176.
- [17] 游浩,李宝玉,张福喜.阳泉矿区综放工作面瓦斯综合治理技术及应用 [M].北京:煤炭工业出版社, 2008.
- [18] 秦跃平,姚有利,刘长久.铁法矿区地面钻孔抽放采空区瓦斯技术及应用 [J].辽宁工程技术大学学报, 2008, 27(1): 5–8.
QIN Yueping, YAO Youli, LIU Changji. Technology of surface boreholes for drainage of goaf gases and application in Tiefa Mining area [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2008, 27(1): 5–8.
- [19] 袁亮.留巷钻孔法煤与瓦斯共采技术 [J].煤炭学报, 2008, 33(8): 898–902.
YUAN Liang. Technology of simultaneous extraction of coal and gas with boreholes drilled in retained roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(8): 898–902.
- [20] 赵鹏翔,李树刚,刘殿福,等.倾斜综放工作面采动卸压瓦斯高位钻孔抽采技术研究 [J].煤炭工程, 2017, 49(5): 76–79.
ZHAO Pengxiang, LI Shugang, LIU Dianfu, et al. Research on mining pressure relief gas drainage from high level borehole in inclined fully mechanized top coal caving face [J]. Coal Engineering, 2017, 49(5): 76–79.
- [21] 赵建国.煤层顶板高位定向钻孔施工技术与发展趋势 [J].煤炭科学技术, 2017, 45(6): 137–141, 195.
ZHAO Jianguo. Construction technology and development tendency of high level directional drilling in seam roof [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 137–141, 195.
- [22] 许超,刘飞,方俊.高位定向长钻孔瓦斯抽采技术及抽采效果分析 [J].煤炭工程, 2017, 49(6): 78–81.
XU Chao, LIU Fei, FANG Jun. Effect analysis of gas drainage with high level directional long drilling [J]. Coal Engineering, 2017, 49(6): 78–81.
- [23] 于宝种.上隅角不同插管深度瓦斯抽采效果研究 [J].煤矿安全, 2017, 48(7): 169–172.
YU Baozhong. Research on gas drainage effect with different depth of cannula in upper corner [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(7): 169–172.
- [24] 卢平,方良才,童云飞,等.深井煤层群首采层Y型通风工作面采空区卸压瓦斯抽采与综合治理研究 [J].采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 456–462.
LU Ping, FANG Liangcai, TONG Yunfei, et al. Relieved gas drainage and comprehensive control in gob of Y-type coal face in the first coal seam mining of deep multi-seams [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3): 456–462.