

采动区瓦斯地面井破断防护研究及应用

孙东玲^{1,2,3}, 付军辉^{1,2,3}, 孙海涛^{1,2}, 李日富^{1,2}, 王 然^{1,2}

(1. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆 400037; 2. 中国煤炭科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037;
3. 山东科技大学, 山东 青岛 266590)

摘要:为攻克采动区瓦斯地面井抽采中井筒易破断的技术难题,采用“避”、“让”、“防”、“疏”的技术理念优化完善了采动区地面井瓦斯抽采技术。用“避”的理念,得到了采动区地面井井位布置规律;用“让”的理念,完善了局部固井技术,提出了局部固井方法,“让”出了水平移动量;用“防”的理念,开发了局部防护装置,偏转结构、伸缩结构及厚壁刚性结构;用“疏”的理念,研发了悬挂完井技术,解决了三开筛管段泥沙堵孔难题。在晋煤岳城矿进行了工程应用,YCCD-02 井连续抽采 35 个月,累计抽采瓦斯量约 1 300 万 m³。地面井抽采后,工作面回风巷瓦斯体积分数下降了 58.75%,上隅角瓦斯体积分数下降了 56%。该技术保障了煤矿回采的安全,具有推广价值。

关键词:采动区地面井;瓦斯抽采;布井规律;安全防护

中图分类号:TD712 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2018)06-0017-07

Study and application of gas surface well broken protection in mining area

SUN Dongling^{1,2,3}, FU Junhui^{1,2,3}, SUN Haitao^{1,2}, LI Rifu^{1,2}, WANG Ran^{1,2}

(1. National Key Lab of Gas Disaster Monitoring and Emergency Technology, Chongqing 400037, China;
2. Chongqing Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Chongqing 400037, China;
3. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract:In order to overcome the technical problem of the well body easy breakdown in the gas drainage of the gas surface well in the mining area, a technical conception with “avoiding”, “yielding”, “prevention” and “drainage” was applied to optimize and improve the gas drainage technology of the surface well in the mining area. With the application of the “avoiding” theory, the layout law of the surface wells in the mining area was obtained. With the application of the “yielding” theory, a local cementing technology was improved, local cementing method was provided and a horizontal displacement value was “yielded”. With the application of the “prevention” conception, the local protection device, deflection structure, telescopic structure and thick wall rigid structure were developed. With the application of the “drainage” conception, the suspension well completion technology was researched and developed and the sand jammed problem at the three open screen pipe section was solved. An engineering application was conducted in Yuecheng Mine of Jincheng Anthracite Coal Mining Group, No. YCCD-02 well was continuously drained with 35 months and the total drained gas volume was about 13 million m³. After the gas drainage operation of the surface well, the gas volume fraction in the air returning gateway of the coal mining face was reduced by 58.75% and the gas volume fraction in the upper corner was reduced by 56%. The technology protected the safety mining of the mine, and would have promotion value.

Key words: gas surface well in mining area; gas drainage; well layout law; safety protection

0 引 言

对于高瓦斯及煤与瓦斯突出矿井,瓦斯治理是

煤矿安全生产的重点。井下煤层钻孔、顶板钻孔、顶板巷道及邻近层抽采受井下空间、时间限制较大,不能完全解决煤矿井下的瓦斯问题^[1-4]。经过多年的

收稿日期:2017-12-12;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.06.003

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045001,2016ZX05067001);国家自然科学基金资助项目(51374236);重庆市基础与前沿专项资助项目(cstc2015jcyjBX0076)

作者简介:孙东玲(1963—),男,山东聊城人,研究员。通讯作者:付军辉,博士研究生,E-mail:fuphy@163.com

引用格式:孙东玲,付军辉,孙海涛,等.采动区瓦斯地面井破断防护研究及应用[J].煤炭科学技术,2018,46(6):17-23.

SUN Dongling, FU Junhui, SUN Haitao, et al. Study and application of gas surface well broken protection in mining area[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 17-23.

研究,发现通过地表施工地面井抽采是一种较好的方法。采动区地面井瓦斯抽采是指在采煤工作面距井位一定距离布置采动区地面井,随着工作面的回采,采场覆岩扰动逐渐加剧,在覆岩一定范围内将产生富集瓦斯的裂隙场,通过地面井抽采裂隙场内的瓦斯,实现治理采煤工作面瓦斯的的目的。当采煤工作面推进井位后,地面井继续抽采采动稳定区的瓦斯,解决采空区瓦斯的隐患^[5-8]。但是煤层回采过程中会产生剧烈的上覆岩层运动,地面井井身极易被破坏;同时,地面井井壁受涌水等影响,筛孔抽采段极易被泥沙堵塞,造成地面井的抽采寿命有限,限制了该技术的应用。

因此,笔者从采动区地面井瓦斯抽采的总体技术思路展开分析,对各关键技术进行深入研究,优化完善采动区地面井瓦斯抽采技术。

1 采动区地面井防护技术思路

煤炭开采后,上覆岩层不可避免地会发生移动、旋转及下沉,采动区煤层气地面井受此影响将发生一定程度的变形破坏。而覆岩移动、旋转及下沉过程中,各岩层所受应力或变形作用是不相同的。避开应力集中区或变形强烈区,选择受应力小或变形小的区域布井,便能较好地保护地面井套管的变形破坏,但采动区地面井布置的目的是为了抽采瓦斯,还需考虑抽采瓦斯的效果。因此,提出第1个技术理念:用“避”的理论,分析地面井结构稳定性最好且抽采效果好的区域,确定地面井的井位。

确定了采动区地面井瓦斯抽采井的井位后,需设计地面井的井身结构,提出3个地面井结构设计的技术理念:用“让”的理念,完善局部固井技术,“让”出岩层水平移动量;用“防”的理念,开发局部安全防护装置,包括偏转结构、伸缩结构、厚壁刚性结构等,进行地面井井身局部重点防护;用“疏”的理念,研发悬挂完井技术,解决三开筛管段泥沙堵孔难题。通过对上述技术的掌握,可以形成一套有效的采动区地面井瓦斯抽采技术。

2 基于“避”的理念的布井技术

采动区地面井布井需兼顾地面井结构稳定性和瓦斯抽采,因此,对采场覆岩移动特征、瓦斯富集区域的研究格外重要。

2.1 地面井结构稳定分析

在回采煤层时上覆岩层移动中,主要影响因素

是岩层,岩石特性相对影响较小。岩石是弹脆性体,岩体可以看成是“线弹性体+弱面”的结构体。开采后上覆岩层的移动可以看成是由层面分割而成的多层梁弯曲,每一梁均满足接触滑移状态。对于层面分割而成的复合岩梁,由覆岩移动的复合等效岩梁模型^[9-13]可知,充分采动时等效岩梁的挠曲曲线总体呈抛物线型,在梁两固定端附近呈上凸形,在梁中点附近呈下凹形,如图1所示。图中A、B点为上凸和下凹的拐点,C点为采场中部最大沉降点,其值为 w_{\max} , L 为采场长度。

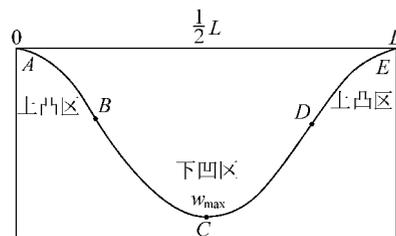


图1 等效岩梁的挠曲线分布

Fig.1 Distribution of deflection curve of equivalent rock beam

随着回采工作面推进,开采空间从有限开采发展到半无限开采。应用概率积分法,半无限开采时,地表移动盆地走向主断面内挠度方程^[14-15]为

$$w(x) = w_0 \int_0^{\infty} \frac{1}{r} e^{-\pi \frac{(x-r-s)^2}{r^2}} ds \quad (1)$$

式中: $w(x)$ 为 $s=0 \sim \infty$ 范围内各开挖单元的开采引起的下沉量的总和,如图2所示,将上覆岩层坐标 xoz 原点向左偏移,选在采动影响范围边界处; r 为地表采动影响半径; w_0 为所研究岩层的最大沉陷值; β 为主要影响角; H 为煤层埋深; m 为煤层厚度; s' 为下沉曲线的拐点偏移距; s 为开采单位的横坐标; x 为地面点的横坐标。

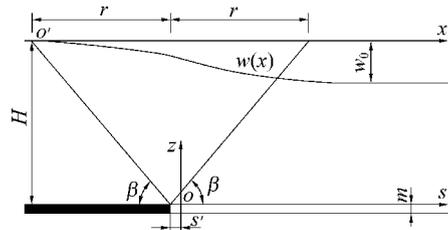


图2 半无限开采时地表下沉示意

Fig.2 Semi-infinite mining surface subsidence schematic

将覆岩变形按梁变形理论,梁挠曲线的近似微分方程:

$$w(x)'' = -\frac{M(x)}{EI_z} \quad (2)$$

式中: $M(x)$ 为岩梁弯矩; E 为岩层弹性模量; I_z 为横截面对中性轴 z 的惯性矩, $I_z = \frac{bh^3}{12}$, 其中 b 为岩层宽度, h 为岩性厚度。

再结合梁的弯曲变形方程, 可得

$$\sigma = \frac{M(x)y}{I_z} \quad (3)$$

式中: σ 为等效岩梁结构横截面正应力; y 为所求应力点到中性轴 z 的距离。

对于岩层本身发生的变形。设岩梁结构满足线弹性关系 $\sigma = E\varepsilon$, 式中 ε 为岩层应变, 由等效岩梁结构横截面正应力可得:

$$\begin{cases} \varepsilon = -\frac{2\pi w_0}{r_Y^3} y (x-r_Y) e^{-\frac{(x-r_Y)^2}{r_Y^2}} \\ \varepsilon^\circ = -\frac{2\pi w_0}{r_Y^3} y \left[(x-r_Y) e^{-\frac{(x-r_Y)^2}{r_Y^2}} - (x-r_Y-l) e^{-\frac{(x-r_Y-l)^2}{r_Y^2}} \right] \end{cases} \quad (4)$$

式中: ε° 为有限开采条件下的岩层应变; r_Y 为所求水平面上的采动影响半径; l 为走向有限开采时的计算长度。

岩层变形分布曲线关于岩梁中点呈对称分布状态, 在由拐点向梁固定端约 $0.4r_Y$ 附近变形达到最大值。在充分开采时, 岩梁结构沿中性面的变形分布曲线如图 3 所示。

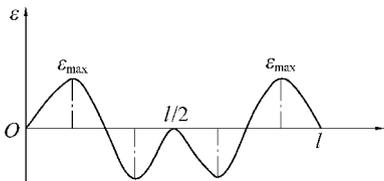


图 3 充分开采时岩层应变分布

Fig.3 Distribution of rock deformation during full exploitation

通过对岩层移动变形特征分析, 可以优选出避开岩层移动变形强烈的区域布置, 因此, 可得基于“避”的理念的采动区地面井布井技术。作为地面井区域性技术, “避”开覆岩移动危险区域对采动区地面井的成功是至关重要的。从而更能保障地面井结构的稳定性。

2.2 瓦斯富集区域分析

通过煤矿井下开挖的相似模拟试验, 得出了采动裂隙基本形态, 将覆岩裂隙场分为 4 个区^[8], 分别为采动未影响区(A区)、支撑覆岩裂隙区(B区)、裂隙发育区(C区)及重新压实裂隙区(D区), 如图 4 所示。

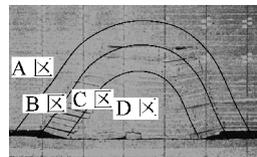


图 4 采动裂隙形态

Fig.4 Mining fracture morphology

从图 4 裂隙形态可看出, 煤层倾斜方向竖向裂隙剖面形态大致为抛物线形态, 从空间上看, 整体裂隙形态是一个近似的椭抛面。裂隙发育区(C区)存在内椭抛面和外椭抛面, 内椭抛面是外椭抛面向内偏移了基本顶破断岩(B块)的长度, 在采动稳定区与实体煤接触的四周均会形成 B 块, 而位于内外椭抛面之间存在大量的裂隙, 是瓦斯富集的主要区域。经上述分析, 结合采场覆岩“三带”的基本规律, 确定了采场覆岩的裂隙空间位置。

2.3 地面井布井原则

取地面井结构稳定区与裂隙空间区域的“交集”, 便可得最佳的采动区地面井布井位置。结合 GPS 定位系统、井上下对照分析等, 形成了采动区地面井布井技术。

基于上述分析, 提出了采动区地面井的布井原则: 采动区地面井应布置在地表沉降拐点连线偏向采场中线的一定区域, 在内外椭抛面之间的区域内, 且位于工作面回风巷侧, 如图 5 所示。在回避矿区广泛分布的陷落柱的前提下, 选择综合安全系数最高的区域进行布井, 尽量回避大采高造成的覆岩剧烈下沉的影响, 当回采工作面推进到钻井位置前后一倍采动影响半径范围内时, 应加速通过该区域, 以降低回采工作期间的剧烈扰动。

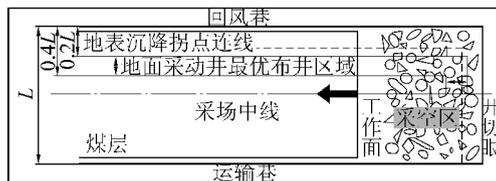


图 5 采动区地面井井位布置

Fig.5 Mining area ground well location layout

3 地面井井身结构及安全防护技术

通过对地面井变形破坏特征进行分析, 结合采动区瓦斯地面井的特点, 一般采用三开的井身结构, 设计一开位于基岩下 $15 \sim 20$ m, 二开位于采场裂隙带上边缘, 三开穿透煤层 $5 \sim 15$ m。在高位位置处安

设安全防护装置。

3.1 基于“让”的理念的局部固井技术

常规的原始煤层地面井压裂增透技术采用全井段固井的办法,由于原始煤层覆岩的岩移量很小,一般不会在地面井井身结构产生破坏。采动区瓦斯地面井要经历工作面回采过程,而岩层移动变形对地面井的影响非常大。依据模拟试验和理论研究可知,覆岩移动(水平移动、离层移动等)从下向上是逐渐减缓的。结合采动区地面井特点,在地面井上端采用局部固井措施,给地面井下端水平移动较强烈的区域“让”有一定的水平位移空间。尽管通过加大地面井直径和套管钢级及尺寸能达到较好的效果,但从经济上是不合理的。根据一般采场覆岩层的厚度(一般采深200~900 m,晋城矿区3号煤层450 m左右)决定覆岩水平应力是非常大的,因此,“让”覆岩有一定的水平移动的空间,无疑是一种较好的方法。

通过对覆岩的分析,提出了基于“让”的理念的局部固井技术,局部固井技术如图6所示。

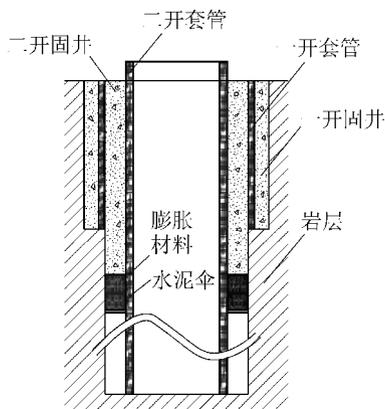


图6 局部技术固井示意

Fig.6 Partial cementing technology diagram

采用的局部措施如下:

1)分析覆岩的岩性特征,将固井位置终点布置在岩性强度中等的岩性中,深度范围大于一开深度,小于二开深度的1/3。

2)在下二开套管时,在套管上的设定位置上安设4~5个水泥伞并缠绕膨胀材料,水泥伞的作用是阻止固井水泥进入二开下端,在下管后,把发泡材料填充二开环空空间,再掺混一定量的干水泥灰和水。

3)待材料膨胀和水泥凝固后,再从地表向二开环空内灌入水泥浆进行固井。

4)候凝后,局部固井完成。二开下部的环空空间可作为覆岩水平移动的空间余量,此方法对缓解

地面井变形破坏具有较好的效果。

3.2 基于“防”的理念的局部防护技术

尽管优选了采动区地面井的布井位置,但由于覆岩存在厚度、强度、刚度均较大的岩层,在地面井轴向上仍存在地面井较易破坏的区域。而将采动区地面井的井身结构均按最危险的区域设计,经济上是不合理的。因此,可通过分析覆岩层的结构特征及力学行为,判断在轴向上覆岩层中的高危破坏位置,在高位位置上安设防护装置。

通过分析采场覆岩的结构特征发现^[16-17]:①采场上覆岩层的运动形式主要有层间剪切滑移运动,受两相邻岩层相对滑移特性的影响,两岩层界面处钻井易发生剪切变形破坏;②随着煤层的回采,采场上覆岩层中关键层(或组合关键层)下通常发生明显的离层位移。③在组合岩梁内,钻井套管易发生非均匀挤压变形,井身结构变形破坏是2种或3种形式综合作用下发生的。

对采场覆岩的移动规律进行分析,对以上3种覆岩移动对地面井的变形破坏进行安全防护,开发了3种采动区地面井井身结构防护装置。

3.2.1 防剪切破坏装置

为防止地面井套管受采动影响而发生剪切破坏,需要在发生剪切破坏的部位安装一抗剪切的装置,使得岩层间发生剪切时,该结构装置能随着上下岩层面的滑移发生一定角度的偏移,减弱岩层面的剪切滑移对原有套管的刚性破坏。因此,研发了地面井偏转装置,该装置主要包括:旋转头1、压盖2、密封条3、螺纹套4、“O”型圈5和旋转套6等6个部分,偏转防护装置如图7所示。

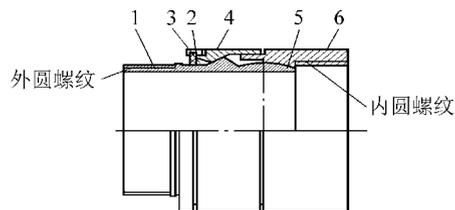


图7 偏转防护装置示意

Fig.7 Assembly drawings of deflection devices for protection

3.2.2 防拉伸破坏装置

为防止地面井套管受采动影响而发生离层拉伸破坏,需要在发生拉伸破坏的部位安设抗拉伸防护装置,使得岩层间发生离层时,该装置能随着上下岩层的分离方向发生一定量的伸缩,减弱离层对套管的刚性破坏。地面井套管伸缩装置允许该装置在轴

线方向具有一定的伸长和缩短的能力。因此,研发了地面井伸缩装置,主要包括:筒体 1、活塞杆 2、“O”型圈 3、安全销 4、导向套 5 和 V 型油封 6 等 6 个部分,伸缩防护装置如图 8 所示。

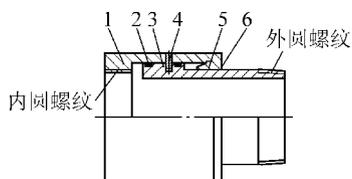


图 8 伸缩防护装置示意

Fig.8 Stretching and shortening protection device schematic

3.2.3 厚壁刚性装置

为防治在岩层内发生套管挤压破坏,需要在发生挤压破坏的部位安设厚壁刚性防护装置,在岩层间发生挤压破坏时,厚壁刚性的装置能抵抗大部分组合岩梁内的挤压力,保障抽采煤层气的畅通性。根据工程防护的需求,厚壁刚性防护结构的主体长度可以取为 2、4、6 m 三个标准。结构以壁厚 46 mm 的 API 标准 N80 Q 类非标套管为主体进行加工,防护结构端部及转角部位应全部采用圆角处理,以消除应力集中,如图 9 所示。

在安装防护装置之前,根据地层的详细资料结合地面井套管损坏的模型进行高危位置的判断,根据判断结果在合理岩层层位安装相应的防护装置。

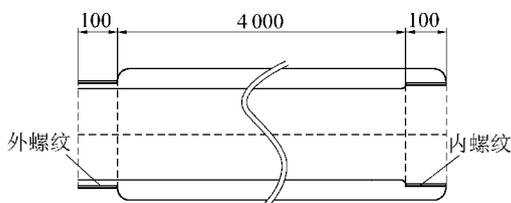


图 9 厚壁刚性防护装置装配

Fig.9 Assembly drawings of thick-walled rigid devices for protection

3.3 基于“疏”的理念的悬挂完井技术

采动区地面井三开通道畅通对采动区地面井瓦斯抽采至关重要。一是三开套管轴向上通道要畅通;二是三开套管与岩壁之间的通道要畅通。三开通道处于覆岩移动变形严重的区域,同时受井壁较破碎及涌水等影响,筛孔抽采段极易被泥沙堵塞。采用悬挂完井,保证三开套管的一定的移动空间,并且优化设计三开套管筛孔的尺寸对保障三开通道畅通尤为重要。

根据采动区地面井特点和三开筛管的布置形式,提出基于“疏”的理念开发了筛管悬挂完井技

术^[18],主要的实施方法为:

1) 预先在二开的最下端一根套管的底部的内侧焊接 4 块挡套,4 块挡套在套管内侧十字对称布置,然后下放二开套管并固井,候凝结束钻三开井身段。

2) 在三开最上端一根生产套管外侧焊接一环形挂套,并在环形挂套下侧同样焊接 4 块十字对称布置的钢锥。

3) 在三开最上端的生产套管上端连接 2 段螺纹短节,下紧上松螺纹短节与生产套管连接,上紧下松螺纹短节上端与钻杆连接,以实现钻机正转时,下紧上松螺纹短节为松开过程。

4) 三开钻井结束后,用钻杆下放三开生产套管,在预计生产套管上的环形挂套快至挡套上时,需慢慢下放,以减少挡套上侧的冲击。

5) 通过钻机缓慢正转使十字对称的钢锥刚好进入套管内侧十字布置的挡套空隙处。然后上提钻杆,通过地面的拉力计可判断生产套管是否下放好,精确下放悬挂生产套管完毕,如图 10 所示。



(a) 下紧上松螺纹短节



(b) 三开环形挂套



(c) 二开十字挡套

图 10 悬挂完井装置实物

Fig.10 Suspended well completion device

三开筛管作为煤层气抽采的采集管,其强度与透气孔的设计具有非常重要的意义,基于“疏”的理念,对三开筛管的筛孔尺寸进行了设计,为了加强套管的强度安全并保障抽采透气效果,三开筛管孔的尺寸规格如图 11 所示。三开筛管孔的尺寸如此加工有以下 3 个优点:①保障三开筛管强度、刚度影响较小;②十字交叉布置的长条形通道能保障抽采通道不会完全堵塞;③悬挂于二开套管内侧,允许三开筛管一定量的水平摆动,摆动有利于防止通道完全堵塞。

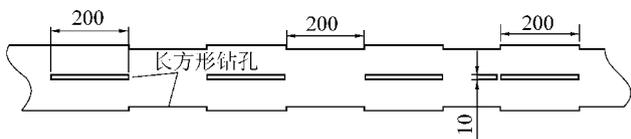


图 11 三开筛孔管尺寸

Fig.11 Three open sieve tube size

4 工程应用

应用“避”、“让”、“防”及“疏”等理念形成布井、结构设计及安全防护技术,在晋城矿区施工 30 口采动影响区地面井,均取得较好的瓦斯抽采效果。以岳城矿 YCCD-02 井为例,该井布置在岳城矿 1303 工作面,距开切眼 700 m,距回风侧 35 m,工作面长 158.1 m。通过对钻井变形破坏特征进行分析,结合采动区瓦斯地面井的特点,采用三开的井身结构,设计一开位于基岩下 20 m 左右,套管采用 J55 型 API 套管,二开布置在地表以下至裂隙带上部处,采用抗剪性能较好的 N80 套管,在二开采用局部固井措施,局部固井位置需根据覆岩剪切发生位置进行确定。三开套管的透气钻孔位于煤层上方 5 m,三开筛管悬挂完井,三开井身穿透煤层,井型结构如图 12 所示。

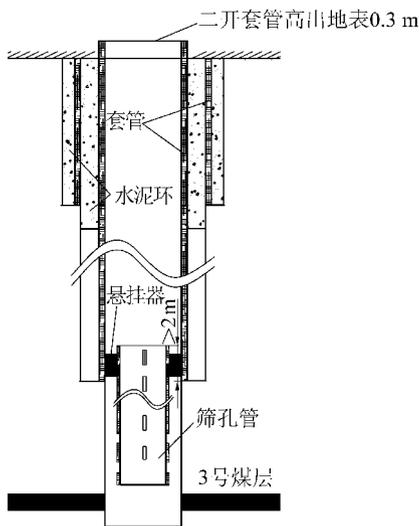


图 12 采动区地面井井身结构

Fig.12 Mining area ground well shaft structure

岳城矿 YCCD-02 采动影响区并于 2014 年 5 月 25 日开始进行煤层气抽采,该井经历了上分层和下分层回采双重采动影响效应。在回采下分层时开始抽采,在工作面推至井位处时,抽采瓦斯纯量最大 3.79 万 m^3/d ,地面井投运后平均抽采瓦斯量 1.15 万

m^3/d ,最高抽采煤层气体积分数 62.6%,平均煤层气体积分数 42.42%,抽采时间 35 个月,累计抽采瓦斯量约 1 300 万 m^3 ,抽采数据如图 13 所示。

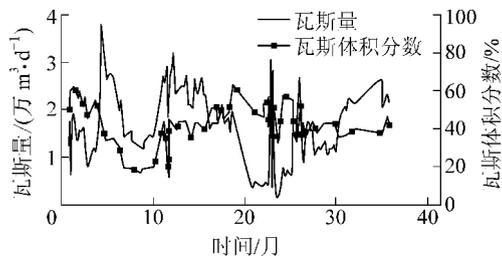


图 13 地面井瓦斯抽采数据

Fig.13 Gas drainage data of ground well

实施抽采后,开采工作面回风巷瓦斯体积分数下降幅度达到 58.75%,上隅角瓦斯体积分数下降了 56%,回风巷平均瓦斯体积分数仅 0.33%。工作面回风巷和上隅角瓦斯浓度显著下降,成功消除采空区瓦斯对工作面安全生产的制约,见表 1。

表 1 地面井抽采后工作面瓦斯变化

Table 1 Change of gas in working face after drainage of ground well

项 目	上隅角瓦斯 体积分数/%	回风巷瓦斯 体积分数/%	工作面瓦斯涌出 量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)
未启用采动井抽采	0.50	0.80	8.24
启用采动井抽采后	0.22	0.33	3.40

5 结 论

1) 根据采动区地面井瓦斯抽采特点,提出了总体技术思路:用“避”的理论,分析了地面井结构稳定性最好且抽采效果好的区域,确定地面井的井位。用“让”的理念,完善了局部固井技术,“让”开岩层水平移动量;用“防”的理念,开发了局部防护装置,偏转结构、伸缩结构、厚壁刚性结构等;用“疏”的理念,研发了悬挂完井技术,解决了三开筛管段泥沙堵孔难题。

2) 得到了采动区地面井的井位布置规律:采动区地面井应布置在地表沉降拐点连线偏向采场中线的一定区域,位于内外椭抛面之间且在工作面回风巷侧。

3) 设计了采动影响区地面井钻井结构,在晋城矿区进行了工程应用,取得了很好的抽采瓦斯效果,解决了采煤工作面瓦斯治理难的问题,保障了煤矿回采的安全,取得了很好社会经济效果,具有很好的推广价值。

参考文献(References):

- [1] 张 军,孙东玲,黄旭超,等.地面钻井抽采采动区域瓦斯技术的试验研究[J].矿业安全与环保,2007,34(1):1-5.
ZHANG Jun, SUN Dongling, HUANG Xuchao, *et al.* Experimental research on gas drainage technology in ground drilling area [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2007, 34 (1): 1-5.
- [2] 孙东玲,孙海涛.煤矿采动区地面井瓦斯抽采技术及其应用前景分析[J].煤炭科学技术,2014,42(6):49-52.
SUN Dongling, SUN Haitao. Gas extraction technology of coal mining face and its application prospects [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 42 (6): 49-52.
- [3] 李日富,梁运培,张 军.地面钻孔抽采采空区瓦斯效率影响因素[J].煤炭学报,2009,34(7):942-946.
LI Rifu, LIANG Yunpei, ZHANG Jun. Influencing factors of gas efficiency in goaf of ground borehole [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34 (7): 942-946.
- [4] 周福宝,夏同强,刘应科,等.地面钻井抽采卸压煤层及采空区瓦斯的流量计算模型[J].煤炭学报,2010,35(10):1639-1643.
ZHOU Fubao, XIA Tongqiang, LIU Yingke, *et al.* Calculation model for gas drainage in surface drilled during the process of pressure relief coal seam and goaf [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35 (10): 1639-1643.
- [5] 郭 亮,付军辉,李日富.井上下联合抽采瓦斯技术在岳城矿的应用[J].矿业安全与环保,2013,40(2):59-61.
GUO Liang, FU Junhui, LI Rifu. Application of combined gas and gas drainage technology in Yuecheng Mine [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2013, 40 (2): 59-61.
- [6] 孙海涛,郑颖人,郭盛强,等.地面井层面拉剪破坏模型及极限分析判识方法[J].中国矿业大学学报,2013,42(1):31-38.
SUN Haitao, ZHENG Yingren, GUO Shengqiang, *et al.* A model for the shear failure of ground surface and its limit analysis and identification [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2013, 42 (1): 31-38.
- [7] 付军辉.采动影响下地面井瓦斯抽采技术与应用研究[J].中国煤层气,2014,11(6):36-40.
FU Junhui. Research on technology and application of gas drainage in surface mine under mining influence [J]. China Coalbed Methane, 2014, 11 (6): 36-40.
- [8] 孙海涛,刘东燕,梁运培.地面抽采钻井的剪切变形破坏模型及关键层影响效应分析[J].重庆大学学报,2009,32(5):550-555.
SUN Haitao, LIU Dongyan, LIANG Yunpei. Analysis of shear deformation and failure mode of surface drilling and drilling with effect of key layer [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32 (5): 550-555.
- [9] 刘东燕,孙海涛,梁运培.采动影响下采区上覆岩层层间剪切滑移模型分析[J].岩土力学,2010,31(2):609-614.
LI Dongyan, SUN Haitao, LIANG Yunpei. Analysis of interlaminar shear-slip model of overburden strata under mining influence [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (2): 609-614.
- [10] LIU Jianzhong, SUN Haitao, HU Qianting. Surface borehole synthesis tension deformation fracture time-space rule [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22 (4): 447-602.
- [11] 胡千庭,孙海涛.煤矿采动区地面井逐级优化设计方法[J].煤炭学报,2014,39(9):1907-1913.
HU Qianting, SUN Haitao. An optimization method of ground level well design in mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39 (9): 1907-1913.
- [12] SUN Haitao, HU Qianting, HUANG Shengshu. Model on surface borehole squeezing deformation fracture [J]. Journal of Coal Science & Engineering (China), 2009, 15 (3): 304-307.
- [13] 孙东玲,李日富.煤矿采动稳定区煤层气地面井抽采技术及应用[J].煤炭科学技术,2016,44(5):34-38,49.
SUN Dongling, LI Rifu. Drainage technology and application of coalbed methane surface well in mining stable area of coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44 (5): 34-38, 49.
- [14] 孙海涛.采动影响下地面钻井的变形破坏机理研究[D].重庆:重庆大学,2008.
- [15] 贺天才,王保玉,田永东.晋城矿区煤与煤层气共采研究进展及急需研究的基本问题[J].煤炭学报,2014,39(9):1779-1785.
HE Tiancai, WANG Baoyu, TIAN Yongdong. Development and issues with coal and coalbed methane simultaneous exploitation in Jincheng mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39 (9): 1779-1785.
- [16] 袁 亮.低透高瓦斯煤层群安全开采关键技术研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(7):1370-1379.
YUAN Liang. Key technique of safe mining in low permeability and methane-rich seam group [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (7): 1370-1379.
- [17] 胡千庭,梁运培,林府进.采空区瓦斯地面钻井抽采技术试验研究[J].中国煤层气,2006,3(2):3-6.
HU Qianting, LIANG Yunpei, LIN Fujin. Test of drawing technology on surface borehole in coal mine goaf [J]. China Coalbed Methane, 2006, 3 (2): 3-6.
- [18] 付军辉,林府进,孙海涛,等.采动区地面煤层气开发悬挂生产套管的研究及实践[J].矿业安全与环保,2014,41(3):82-84.
FU Junhui, LIN Fujin, SUN Haitao, *et al.* Study and practice of developing production casing with coalbed methane over mining area [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2014, 41 (3): 82-84.