



## 强突出煤层“内保护层”构建理论及工程实践

辛新平 杨程涛 魏建平 刘勇 王一彤 徐向宇

### 引用本文:

辛新平, 杨程涛, 魏建平, 等. 强突出煤层“内保护层”构建理论及工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 267–281.  
XIN Xinping, YANG Chengtao, WEI Jianping. Theory and engineering practice of constructing “inner protection layer” for strongly prominent coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 267–281.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0386>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 深部远距离煤层群卸压主控因素及首采层优选方法研究

Study on main control factors of pressure relief of deep and long distance coal seam group and optimization method of initial mining  
煤炭科学技术. 2021, 49(8): 154–161 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5998a94e-fdad-4446-9b8d-c01aaf0cf566>

#### 地面钻井抽采被保护层采动区卸压瓦斯技术研究

Study on pressure relief gas drainage technology in mining area of ground drilling in protected layer  
煤炭科学技术. 2019(11) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0d19c692-9246-45b1-b64d-5c0c524b2859>

#### 煤与瓦斯突出煤层群安全高效开采技术体系与展望

Technical system and prospect of safe and efficient mining of coal and gas outburst coal seams  
煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1a52ace6-8596-41a3-92a0-77db8b62455c>

#### 半煤岩工作面保护层开采的卸压机理及回采设备选型

Study on mechanism of pressure relief and selection of key equipment for protective layer of semi-coal rock working face  
煤炭科学技术. 2019(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0e92043f-7de0-4165-8ea1-79fb3a4dc35b>

#### 煤层顶板水害风险保护系数法评价技术研究

Study on evaluation technology of coal seam roof water hazard risk with protection coefficient  
煤炭科学技术. 2024, 52(3): 180–188 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0992>

#### 下保护层开采参数与保护效果定量关系研究

Study on quantitative relationship between mining parameters of lower protective layer and protection effect  
煤炭科学技术. 2019(11) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4ea5d835-c8eb-421f-a869-cbe21c9f7677>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

## 安全科学与工程



移动扫码阅读

辛新平, 杨程涛, 魏建平, 等. 强突出煤层“内保护层”构建理论及工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 267–281.

XIN Xinping, YANG Chengtao, WEI Jianping, *et al.* Theory and engineering practice of constructing “inner protection layer” for strongly prominent coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 267–281.

## 强突出煤层“内保护层”构建理论及工程实践

辛新平<sup>1</sup>, 杨程涛<sup>2,3</sup>, 魏建平<sup>4</sup>, 刘勇<sup>4</sup>, 王一彤<sup>1</sup>, 徐向宇<sup>4</sup>

(1. 河南能源集团有限公司, 河南 郑州 450046; 2. 河南能源集团研究总院有限公司, 河南 郑州 450046; 3. 河南省低渗突出煤层煤与瓦斯共采工程技术研究中心, 河南 郑州 450046; 4. 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:**保护层开采是煤矿瓦斯灾害防治最有效的技术手段, 适用于有保护层可采的多煤层(群)等。对于无保护层可采的强突出单一煤层, 随着采深加大、开采强度增加、构造更加复杂等多重因素叠加影响, 应力与瓦斯耦合型灾害成为主导。为消除煤与瓦斯突出危险, 目前采取的诸如机械扩孔、水力冲孔、水射流割缝和水力压裂等措施均能较好地提高抽采效果, 但未能实现均匀卸压、均匀增透和消除应力异常, 存在一定的消突局限性。如何实现瓦斯高效抽采和高效消突是长期遏制该类煤层安全高效开采的主要技术瓶颈。研究结合河南能源集团所属突出矿井“零距离保护层”分层开采、穿层钻孔卸压增透强化抽采消突的工程实践, 通过优化穿层钻孔设计、合理选择卸压措施和精准计量掏出煤量, 强化卸压消突效果考察, 实现大区域连片均匀卸压, 形成了在煤层内构建类似保护层的消突途径, 提出了“构建内保护层技术”, 实现了强力均匀卸压、高效抽采, 实现煤层快速消突。总结以河南能源焦煤公司为代表的突出矿井瓦斯治理技术发展历史及经验, 开展单一厚煤层“构建内保护层技术”研究, 阐释了“构建内保护层”消突的科学内涵、消突机理构建方法, 开发了内保护层消突效果评价技术, 构建了强突出单一煤层内保护层消突技术体系并制定了相关企业标准。提出强突出单一煤层主动构建内保护层的消突理念, 创新了保护层开采的内涵和外延, 为强突出单一煤层高效消突提供了较完善的技术体系和较为坚实的理论基础及技术手段。

**关键词:** 内保护层; 强突出煤层; 消突技术; 消突评价; 抽采效果

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)12-0267-15

## Theory and engineering practice of constructing “inner protection layer” for strongly prominent coal seams

XIN Xinping<sup>1</sup>, YANG Chengtao<sup>2,3</sup>, WEI Jianping<sup>4</sup>, LIU Yong<sup>4</sup>, WANG Yitong<sup>1</sup>, XU Xiangyu<sup>4</sup>

(1. Henan Energy Group Limited, Zhengzhou 450046, China; 2. Henan Energy Group Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450046, China; 3. Henan Engineering Research Center of Simultaneous Extraction of Coal and Gas with Low Permeability and Outburst Coal Seam, Zhengzhou 450046, China; 4. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Protective layer mining is the most effective technical means to prevent and control coal mine gas disaster, which is applicable to multiple coal seams (groups) with protected seams available for mining. With the influence of multiple factors such as increasing mining depth, mining intensity and more complex tectonics, the stress and gas coupling type of disaster for a single strong protrusion coal seam without protective layer has become the dominant. In order to eliminate the risk of coal and gas protrusion, the current measures such as mechanical reaming, hydraulic punching, water jet cutting and hydraulic fracturing can better improve the extraction effect, but fail to achieve uniform pressure relief, uniform penetration and eliminate stress anomalies, there are certain limitations to the elimination of protrusion. How to achieve efficient gas extraction and high-efficiency outburst elimination is the main technical bottleneck that has long curbed the safe and efficient mining of this type of coal seam. The study combined the engineering practice of “zero-distance protective

收稿日期: 2023-03-21

责任编辑: 宫在芹

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0386

作者简介: 辛新平(1966—), 男, 河南武陟人, 教授级高级工程师, 博士。E-mail: xxp353@163.com

通讯作者: 杨程涛(1983—), 男, 河南获嘉人, 高级工程师。E-mail: byctat@163.com

layer” stratified mining and unloading pressure and increasing penetration of penetrating boreholes to enhance the extraction and eliminate outburst in prominence mine belonging to Henan Energy Group. The effect of pressure-releasing enhancement and outburst elimination was investigated by optimizing the design of penetrating boreholes, reasonably selecting the pressure releasing measures and accurately metering the amount of coal hollowed out. The effect of pressure releasing to eliminate outburst was strengthened, the uniform pressure releasing in a large area was realized, and a way of eliminating outburst by constructing a similar protective layer in the coal seam was formed. The “construction of inner protective layer technology” was proposed to achieve strong and uniform pressure relief, efficient extraction and rapid outburst elimination in coal seam. Summarizing the development history and experience of gas management technology in protruding mines represented by Henan Energy Coking Coal Company, the research on the “construction of inner protective layer technology” for single thick coal seam was carried out, the scientific connotation of “constructing inner protective layer” to eliminate outburst was explained, the mechanism of eliminating outburst was revealed, and the constructing method was formed. The effect evaluation technology of inner protective layer to eliminate outburst was developed, a technology system for eliminating outburst in the inner protective layer of a single coal seam with strongly outburst was constructed, and the related enterprise standard was formulated. The proposed concept of actively constructing the inner protective layer to eliminate outburst in a single coal seam with strongly outburst has innovated the connotation and extension of protective layer mining, and provided a more complete technical system and a more solid theoretical basis and technical means for the efficient outburst elimination in a single coal seam with strongly outburst.

**Key words:** inner protective layer; strong outburst seam; outburst prevention technology; evaluation of outburst elimination; extraction effect

## 0 引言

煤炭是我国的基础能源,在较长时期内仍将是我国的主体能源并发挥着国家能源安全稳定供应压舱石的作用<sup>[1]</sup>。我国浅部煤炭资源逐渐枯竭,深部资源开采成为必然趋势。随着开采深度和开采强度的增大,地应力、瓦斯压力和地温不断增加,采动影响也越来越大,深部煤炭采掘过程将伴随着更加复杂的煤与瓦斯突出灾害,严重威胁煤矿安全生产<sup>[2-5]</sup>。

在煤层群条件下,应优先采用保护层开采措施,该项技术多煤层有效增透卸压、实现大面积消突上具有重要作用。开采保护层是被公认为最有效、最经济的区域防突措施,《防治煤与瓦斯突出细则》规定<sup>[6]</sup>：“具备开采保护层条件的突出危险区,必须开采保护层”。对于不具备保护层开采条件的单一突出煤层目前主要采用预抽煤层瓦斯区域防突措施,《防治煤与瓦斯突出细则》针对区域防突措施提出了多种区域瓦斯抽采消突方式。其中,最为常用的是穿层钻孔和顺层钻孔瓦斯抽采技术。但对强突出单一煤层主要适合采用穿层钻孔预抽,并采取人为增透措施强化瓦斯抽采消突。

煤层卸压与煤体裂缝改造是低渗煤层增透两个主要技术途径,目前单一低渗煤层增透技术主要可分为水力化技术、爆破类技术、钻扩类技术以及其他新技术。其中,水力化技术主要包括:水力压裂、水射流(磨料水射流)割缝、水力冲孔等;爆破类技术主要包括:深孔爆破、CO<sub>2</sub>相变致裂、高压空气爆破致裂、可控冲击波等;钻扩类技术主要包括:大直径钻

孔、超短半径侧钻等;其他新技术包括注液氮冷加载、微波辐射、超声波、变频气动致裂、化学增透等。由此可见,对强突出煤层,卸压增透抽采消突技术更多层面考虑低渗煤层的增透抽采消突效应,对卸压消突因素考虑不足,缺少对相关增透措施的大区域连片均匀卸压消突理论及构建方式等的研究,导致穿层钻孔卸压增透预抽煤层瓦斯技术,在局部煤岩层卸压、增透强化抽采等方面虽然取得较好的效果,但仍存在消突范围小、时间长、消突区域不均衡等关键技术问题。在无保护层开采条件下,通过对煤层强制卸压,致使煤层大范围均匀卸压,形成类似于在煤层内部构建保护层的卸压开采效果,实现高效消突等,需要开展深入的理论研究、工程实践及配套技术装备研发。

笔者以焦作矿区为研究对象,以地质勘探为基础,利用底抽巷精准施工均匀、高密度穿层钻孔,通过穿层钻孔均匀合理掏煤,在单一煤层内形成“内保护层”,均匀卸压、增透构建内保护层,使其达到保护层开采的卸压消突效果。即以煤层卸压消突为目标,以内保护层消突技术参数和高效构建内保护层技术装备为依托,以系统保障体系和消突效果考察为保障,实现构建的内保护层全域穿层钻孔“布孔均匀密集、卸煤科学高效、邻孔串气相透、卸压均匀充分”,通过均匀卸压与瓦斯抽采实现区域高效消突。

## 1 内保护层技术科学内涵

保护层开采是目前最为有效的区域防突手段,因此《煤矿安全规程》和《防治煤与瓦斯突出细则》中



明确规定,具备开采保护层条件的突出危险区必须开采保护层作为区域防突措施。但对于不具备保护层开采条件的单一突出厚煤层,《细则》也明确指出:“利用上分层或者上区段开采后形成的卸压作用保护下分层或者下区段…”<sup>[6]</sup>。这种卸压保护作用与保护层开采的消突原理殊途同归。

虽然在分层开采过程中,顶分层开采后对底分层起到较好的卸压保护作用,但突出煤层在顶分层开采过程中仍然存在突出危险性。因此笔者借鉴单一突出煤层分层开采的卸压消突作用,提出了内保护层技术。该技术是以卸除突出发生的应力条件与增透强化抽采相结合的高效消突措施,通过合理设计穿层钻孔间距、优化不同煤层的卸压措施和合理的掏出煤量,强化卸压抽采及消突效果考察,实现大区域连片均匀卸压增透,可形成类似于在煤层内构建类似保护层的消突途径,实现全区域充分卸压、快速消突。

焦作矿区主采煤层为山西组二<sub>1</sub>,在其上部或下部赋存着一层厚度为 0.2~1.2 m 的构造软分层,这一构造软分层突出危险性极大。为此,结合焦作矿区煤层赋存实际情况,并在单一煤层分层开采和保护层开采的理论基础上,提出了针对单一突出煤层构建内保护层的技术思想,根据软分层厚度或硬煤

层赋存条件,构建内保护层消突技术的原理分别如图 1、图 2 所示。

第Ⅰ阶段,在煤层底板岩巷中,利用水力冲孔、气动柔性刀具、超高压水力割缝、磨料水射流等高效破煤卸压技术手段,提前将煤层顶部或底部的构造软煤掏出,也可在硬煤层中通过水力割缝等技术掏煤,减少强突出煤体的总量,以密集钻孔、强效卸煤的方式在单一煤层内部主动构建出保护层。

第Ⅱ阶段,在构建内保护层的卸压作用下,软煤分层因应变软化而产生塑性流变,硬煤因应力降低而发生膨胀变形,煤层整体孔裂隙得到发育,煤层瓦斯压力梯度降低,煤层弹性潜能和瓦斯膨胀能开始释放。

第Ⅲ阶段,煤层实现区域连片均匀卸压,煤层孔裂隙充分发育透气性增加,形成“邻孔串气”效应,利用顶板“源汇抽采”技术,煤层瓦斯压力及含量得到快速下降,煤层弹性潜能及瓦斯膨胀能降至临界突出能量以下,煤层整体实现消突。

构建内保护层技术以地质勘探为基础,以煤层卸压消突为目标,以内保护层消突技术参数和高效构建技术装备为依托,以消突效果考察和系统保障体系为保障,实现穿层钻孔的“布孔均匀密集、卸煤科学高效、邻孔串气相透、卸压均匀充分”,统筹了

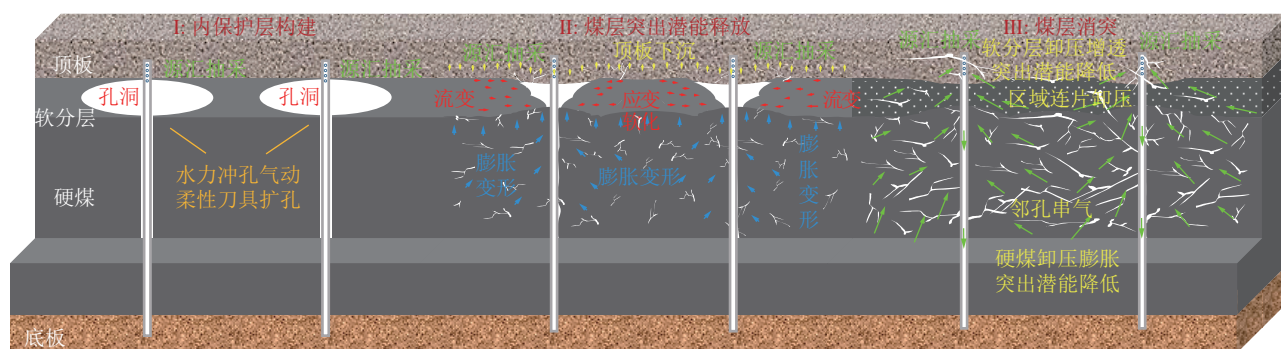


图 1 软分层较厚时内保护层构建技术原理

Fig.1 Principle of construction technique for inner protective layer when encountering thicker soft delamination

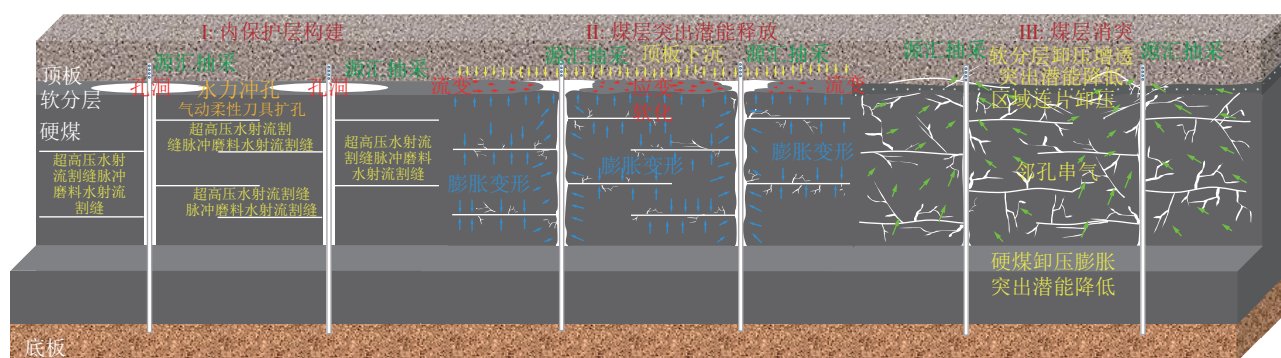


图 2 软分层较薄或硬煤层中构建内保护层技术示意

Fig.2 Technical for construction of an inner protective layer in soft stratification or hard coal seam

煤层区域高效均匀卸压和瓦斯抽采,适用于单一突出煤层的主动构建保护层的消突理念。

## 2 构建内保护层消突力学判据及评判指标

### 2.1 煤与瓦斯突出的能量条件

煤与瓦斯突出是一种复杂的动力现象,涉及岩石力学、渗流力学、地球物理学等多领域的复杂问题,突出机理至今仍是国际性、世纪性难题。但究其根源,突出过程实际上是能量的转移、聚积和释放过程,这个过程必须满足热力学第一定律。因此从能量守恒的角度,可总体上描述突出发生的条件。对于某一范围内的煤岩体,煤与瓦斯突出的能量条件可以表示如下<sup>[7]</sup>:

$$W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = A_1 + A_2 + A_3 \quad (1)$$

式中:  $W_1$  为突出范围内煤岩体的弹性势能;  $W_2$  为突出范围内煤岩体的瓦斯内能;  $W_3$  为突出范围内煤岩体的重力势能;  $W_4$  为周围煤岩体对突出范围内煤岩体所做的功;  $A_1$  为煤岩体的破碎功;  $A_2$  为煤岩体的抛做功;  $A_3$  为其他能量耗散,如煤体发热、声发射等。

式(1)所表达的是突出发生必然遵守的能量条件。在突出发动中,由于突出煤体的弹性模量远小于煤层顶、底板岩石的弹性模量,导致煤层顶板、底板弹性潜能对突出做功远小于煤体弹性潜能,同时煤壁失稳后顶底板可能来不及快速下沉对煤体做功,煤体就已经被抛出了。其次,突出范围内煤岩体的重力势能  $W_3$  只在一些特殊的开采环境中,才会对突出的发生起到一定作用,因此为了便于计算和分析,可忽略顶板、底板对煤层做功及重力势能。同时也不考虑其他的如声发射、热量散散等的能量损耗<sup>[8]</sup>。近似的认为瓦斯内能和煤体弹性潜能是突出的主要能量来源。这样,发生煤与瓦斯突出的能量关系可简化为式(2):

$$W_1 + W_2 = A_1 + A_2 \quad (2)$$

### 2.2 突出过程中煤层释放的弹性势能

为了便于分析,以煤巷掘进为研究对象,将掘进工作面看作半无限体内的球形孔洞,同时兼顾地应力分布特征,建立煤与瓦斯突出应力模型,如图3所示。其中  $R_0$  为原生破裂带半径;  $R_p$  为塑性区半径;  $L$  为掘进进尺。

模型将掘进工作面前方区域分为 2 部分,分别为靠近掘进头的塑性区和塑性区之外的弹性区。由图3可知,掘进工作面前方推进  $L$  后,部分弹性区转化成为塑性区。根据对煤样破坏过程能量演化规律可知,煤岩破坏后煤体弹性能释放且瓦斯膨胀能突

变。因此,掘进工作面前方煤体由弹性区转换为塑性区后将引起能量变化,该部分即为能量释放区,如图中  $V_s$ <sup>[9-11]</sup>。

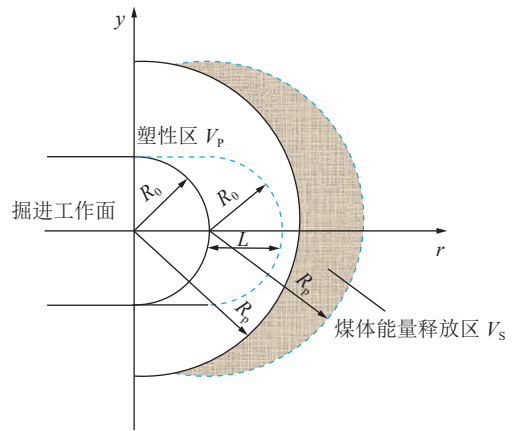


图3 煤与瓦斯突出三维结构模型和微元体模型

Fig.3 Three-dimensional structural model and micro-element model of coal and gas protrusion

通过岩石力学的计算,在工作面前方塑性区内,由平衡微分方程和摩尔-库仑强度准则组成的方程组,以及边界条件:当  $r=R_0$  时,  $\sigma_r=0$ ,可计算得出塑性区范围  $R_p$  为:

$$R_p = R_0 \left[ \frac{3(\sigma_0 + c \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{(3 + \sin \varphi) c \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{4 \sin \varphi}} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_0$  为地应力, MPa;  $\varphi$  为内摩擦角, ( $^\circ$ );  $c$  为黏聚力, MPa。

在弹性区内,由平衡微分方程、几何方程和本构方程,以及边界条件:  $r=+\infty$  时,  $\sigma_r=\sigma_0$ , 当  $r=R_p$  时,  $\sigma_r=\sigma_{rp}$ 。能量释放区内煤体释放的能量可表示为

$$W_1 = \int_{V_s} U^e dV = \iiint_{V_s} U^e \sin \psi r^2 d\psi d\theta dr \quad (4)$$

式中:  $U^e$  为单位体积煤体可释放的弹性应变能;  $\mu$  为泊松比;  $V_s$  为煤体弹性释放区体积。

式(4)中各积分变量的取值范围,可通过图4中的各参数的关系求得,设掘进前,破裂带球心为  $O$ , 进尺  $L$  后,新的破裂带球心为  $O_1$ ,  $OO_1=L$ , 假设原破裂带、新破裂带半径均为  $R_p$ 。

过  $O$  画一条直线,与  $x$  轴夹角为  $\theta_A$ , 与原塑性区、新塑性区分别相交于  $A'(R_p, \psi_A)$ ,  $A(R_A, \psi_A)$ , 能量释放区内煤体释放的能量可表示为

$$W_1 = \frac{\pi}{E} \int_0^{\arccos \frac{L}{2R_p}} d\psi \int_{R_p}^{L \cos \psi + \sqrt{R_p^2 - L^2 - \sin^2 \psi}} [(3 - 6\mu) \sigma_0 + \frac{3R_p^2 k^2 (1 + \mu)}{2r^6}] r^2 dr \quad (5)$$

式中:  $k = -\sigma_0 + c \cot \varphi \left[ \left( \frac{R_p}{R_0} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - 1 \right]$ 。

对式(5)进行数值积分, 即可求得煤层弹性释放能。

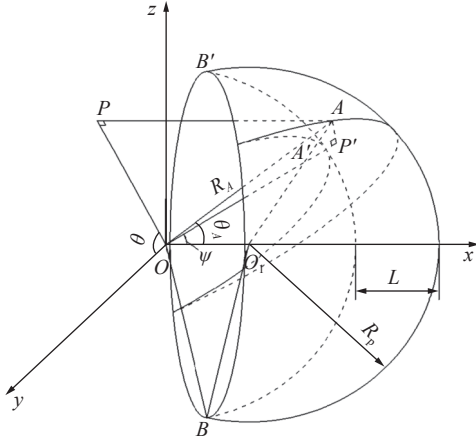


图 4 弹性势能释放区积分变量取值范围示意

Fig.4 Schematic of value ranges for the integral variable within the elastic potential release region

### 2.3 突出过程中煤层瓦斯膨胀内能

#### 1) 突出过程中煤层瓦斯膨胀内能的计算方法。

瓦斯膨胀能是突出过程的重要动力来源<sup>[12]</sup>。目前瓦斯膨胀能确定主要基于能量计算公式进行。但由于突出实际工况的复杂性, 能量公式没有统一的理论假设, 导致现阶段膨胀能计算公式繁多, 且进行膨胀能计算所必需的参与突出过程的瓦斯量确定也没有统一方法<sup>[13]</sup>。为此, 以目前主流的膨胀能计算公式进行分析和计算。根据热力学定理及突出的实际工况, 将突出过程看作为等温多变过程, 膨胀内能可按式(6)进行计算:

$$W_2 = V P_0 \ln \left( \frac{P_0}{P_a} \right) \quad (6)$$

式中:  $P_a$  为大气压, MPa;  $P_0$  为突出煤层瓦斯压力, MPa;  $V$  为参与突出的瓦斯体积,  $\text{m}^3$ 。

#### 2) 参与突出过程中瓦斯量的计算。

突出发生时, 能够释放出来参与做功的瓦斯内能包括两部分, 一部分是游离态的瓦斯体积; 另一部分是吸附态的瓦斯。

游离瓦斯在能量释放区范围内参与突出的游离瓦斯含量可用下式计算。

$$V_f = n V_s \quad (7)$$

式中:  $V_f$  为参与突出过程中游离瓦斯体积,  $\text{m}^3$ ;  $n$  为煤体孔隙率;  $V_s$  为煤体能量释放区体积。

刘明举等<sup>[14]</sup>认为, 参与突出的瓦斯量大于游离瓦斯含量, 小于瓦斯总含量。李成武等<sup>[15]</sup>认为, 参与

突出的瓦斯量与突出煤体内游离瓦斯含量接近。胡千庭等<sup>[7]</sup>采用一定比例的游离瓦斯膨胀能来表征吸附瓦斯的能量大小。为了准确性和可行性, 借鉴胡千庭的思路, 将参与突出吸附瓦斯含量采用一定比例的游离瓦斯含量来表征。能量释放区内参与突出的瓦斯膨胀内能则可通过下式表示, 同时通过试验测定,  $\eta = 1.5 \sim 2$ 。

$$W_2 = \eta n V_s P_0 \ln \left( \frac{P_0}{P_a} \right) \quad (8)$$

#### 3) 突出过程中煤体破碎功。

基于破碎功的基本计算原理, 根据前人对全国各主要突出矿井 21 个煤样的冲击破碎试验得到煤体破碎功的表达式<sup>[16]</sup>为

$$A_1 = 46.914 f^{1.437} Y_{P1}^{1.679} V_s \rho \quad (9)$$

式中:  $Y_{P1}$  为破碎成 0.2 mm 以下粒度煤样质量占总煤样质量的百分比, 取 20;  $\rho$  为煤体密度。

#### 4) 突出过程中煤体抛出功。

煤体的抛出功就是碎煤抛出时的动能<sup>[17]</sup>:

$$A_2 = \frac{V_s \rho v^2}{2} \quad (10)$$

式中:  $A_2$  为煤的抛出功;  $v$  为碎煤抛出的速度, m/s, 根据前苏联“红色国际工会”矿杰列卓夫卡煤层的突出实测资料, 抛出碎煤的速度在 17.6 ~ 55.5 m/s。

### 2.4 内保护层消突评判分析

在煤与瓦斯突出的历程中, 地应力、瓦斯压力、煤的物理力学性质, 三者共同决定了煤与瓦斯突出的危险程度。煤与瓦斯突出与三者之间的关系可以用式(11)表达<sup>[18]</sup>。

$$F = f(\sigma, P, G) \quad (11)$$

式中:  $\sigma$  为煤层的应力状态;  $P$  为煤层瓦斯情况;  $G$  为煤层的力学性质。

将式(5)、(8)、(9)和(10)代入式(11), 得到煤与瓦斯突出的能量条件为

$$\begin{aligned} & \frac{\pi}{E} \int_0^{\arccos \frac{L}{2R_p}} d\psi \int_{R_p}^{L \cos \psi + \sqrt{R_p^2 - L^2 - \sin^2 \psi}} [(3 - 6\mu)\sigma_0 + \\ & \frac{3R_p^2 k^2 (1 + \mu)}{2r^6}] r^2 dr + \eta n V_s P_0 \ln \left( \frac{P_0}{P_a} \right) = \\ & 46.914 f^{1.437} Y_{P1}^{1.679} V_s \rho + \frac{V_s \rho v^2}{2} \end{aligned} \quad (12)$$

根据式(12)编制计算程序, 可计算出不同地应力条件下, 发生煤与瓦斯突出的临界压力。

结合焦作矿区煤层基本情况: 主采煤层山西组二<sub>1</sub>煤, 煤层中存在一层软分层, 厚度为 0.2 ~ 1.2 m, 无临近开采煤层, 煤层厚度 6 ~ 7 m。经现场实测, 软分层煤体  $f$  值为 0.2 ~ 0.3, 而硬煤  $f$  值为 0.5 ~ 2.0。



根据式(12),可分别计算出软煤和硬煤在不同地应力条件下,发生煤与瓦斯突出的临界瓦斯压力。在此,

选取软煤 $f$ 值为 0.2,硬煤 $f$ 值为 0.5 的极限情况。软煤和硬煤相关参数取值及计算结果见表 1 和表 2。

表 1 软、硬煤突出临界瓦斯压力计算参数值  
Table 1 The critical gas pressure values for outburst soft and hard coal

类型	弹性模量/MPa	黏聚力/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	孔隙率/%	巷道半径/m	掘进进尺/m	$\eta$
软煤	800	0.4	0.28	30	6	3	1	2
硬煤	1 200	3	0.3	35	4	3	1	2

表 2 软、硬煤不同应力条件下的突出临界瓦斯压力值  
Table 2 Outburst critical gas pressure values for soft and hard coals under different stress conditions

$f$	$\sigma_0$												MPa
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	
0.2	1.48	1.26	1.10	0.95	0.84	0.73	0.66	0.6	0.53	0.47	0.42	0.39	
0.5	2.81	2.25	1.87	1.59	1.40	1.25	1.13	1.03	0.94	0.87	0.81	0.77	

目前,焦作矿区下属各矿井开采深度已达到 500 m,实测地应力为 14 MPa。根据表 1,软煤与硬煤在 14 MPa 地应力环境下,理论突出临界瓦斯压力分别为 0.6 MPa 和 1.03 MPa。经现场实测瓦斯压力为 1.62 MPa,大于理论突出临界瓦斯压力,因此煤层具有突出危险性。

图 5 为焦作矿区软、硬煤在不同地应力与理论突出临界瓦斯压力关系的图。由图 5 可知,无论是构造软煤还是硬煤,突出临界瓦斯压力均随地应力的降低而升高,降低煤层地应力可有效起到防治煤与瓦斯突出的作用。但从曲线的陡峭程度来看,煤体 $f$ 值越大,地应力对临界突出瓦斯压力越敏感,即小幅度地降低煤层地应力,就可大幅提高突出临界煤层瓦斯压力,是由于硬煤弹性模量较大,煤体释放的弹性能是突出发动过程中的主要能量来源,地应力的减少可有效降低煤层自身突出总能量储备。而煤体 $f$ 值越小,地应力对突出临界瓦斯压力的敏感度越低,即构造软煤降低应力的消突效果无法像硬煤那样显著,因为构造软煤的强度低,煤层瓦斯的膨胀能是突出发动过程中的主要能量来源。综上所述,硬煤的卸压消突作用要优于煤层瓦斯抽采,而软煤瓦斯抽采的消突作用要优于煤层卸压。

开采保护层是目前较为有效的区域防突技术措施,而该技术的本质是使被保护层得到充分卸压,自身的弹性储能得到有效释放,从而引起煤层发生膨胀变形。同时,《细则》中规定:“若经实际考察被保护层的最大膨胀变形量大于 3%,则检验和考察结果可适用于具有同一保护层和被保护层关系的其

他区域。”因此,煤层充分卸压是消除突出的首要任务。

构建“内保护层”技术是针对单一煤层特殊的保护层开采消突技术,煤层的充分卸压同样是该技术所要达成的首要目标。同时,考虑到瓦斯膨胀内能对煤与瓦斯突出过程中的作用,尤其是软煤。结合目前焦作矿区地应力 14 MPa、瓦斯压力 1.62 MPa 软、硬复合煤层的开采环境分析可知:

1)对于硬煤而言,在目前的开采煤层底板标高 500 m,实测地应力 14 MPa,可计算得出当前开采深度的理论突出临界瓦斯压力为 1.03 MPa,实测煤层瓦斯压力为 1.62 MPa,大于理论突出临界瓦斯压力,因此,存在突出危险性。为实现硬煤层的有效消突,在不进行煤层瓦斯预抽的情况,煤层应力需从 14 MPa 降至 5.9 MPa 后,卸压程度达到 58% 以上,理论上可以实现消除煤层突出危险性。

2)对于软煤而言,即使卸压程度达到了 100%,软煤所处应力为 0,其理论突出临界瓦斯压力 1.48 MPa,实际煤层瓦斯压力仍高于理论临界瓦斯压力,因此软煤无法像硬煤那样,仅靠煤层卸压就可到达消突的目的,须在对软煤进行卸压的同时,进行瓦斯抽采才能达到消突的目的。

3)针对焦作矿区特殊的复合煤层,以煤层总体预抽率为 30% 为前提条件,对于软分层其卸压程度至少应达到 40% 以上,而硬煤理论上即使不卸压也可消除突出危险,但考虑到硬煤卸压对煤层弹性潜能的释放作用,以及对煤层增透强化抽采的效果,硬煤卸压程度也应达到 10% 以上。

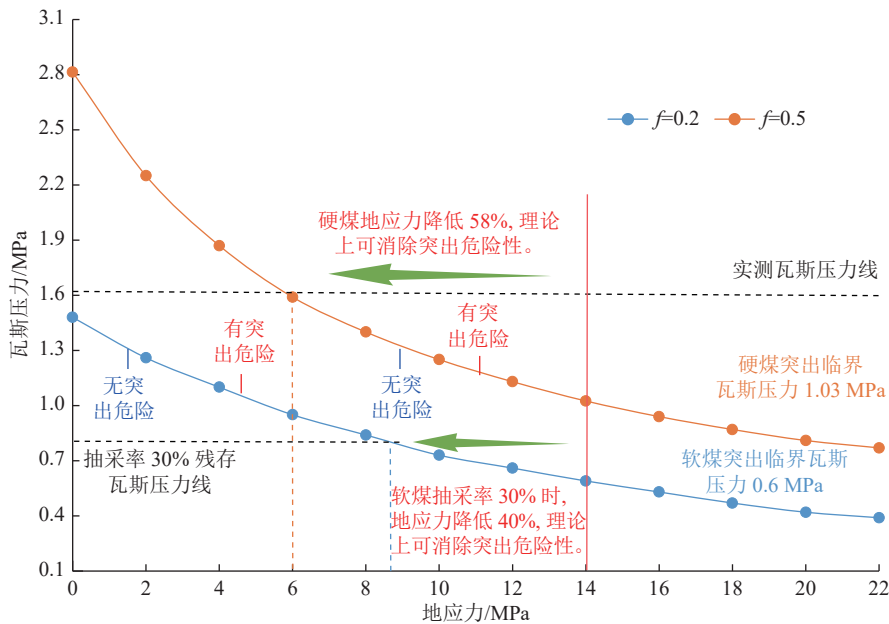


图 5 焦作矿区地应力与突出临界瓦斯压力的关系

Fig.5 Relationship between geostress and outburst critical gas pressure in Jiaozuo mining area

3 内保护层构建技术参数研究

3.1 内保护层构建正交试验方案

为了指导不同地质条件下的内保护层参数构建, 设计了正交试验, 研究不同地质条件及不同施工参数下的内保护层构建消突效果, 通过分析不同条件下卸压控制范围内的最薄弱点应力、应变变化规律, 结合前文突出判定力学依据, 分析各施工参数下是否消突, 选择合适的目标函数, 构建内包层施工效果预测模型, 并结合预测模型分析得出各影响因素的权重, 最终为后续现场施工提供指导。

方案中, 构建了 4 种不同地质条件下的正交试验分析表, 分别是构建上部内保护层正交模拟方案, 构建下部内保护层正交模拟方案, 全软煤时正交模拟方案以及全硬煤时正交模拟方案。详细参数见表 3—表 6。

3.2 多元线性回归分析

运用 SPSS 软件进行多元线性回归分析, 由于各个自变量的单位不一样, 自变量前系数的大小并不能说明该因素的重要程度, 因此需要将所有变量包括因变量都先转化为标准分, 再进行线性回归, 此时得到的回归系数就能反映对应自变量的重要程度。详细计算结果如下:

工况 1: 在构建上部内保护层时, 通过改变钻孔倾角、出煤量、孔间距、原始应力及软分层厚度来进行正交分析, 以卸压后软、硬分层的卸压程度、变形量为目标值。结合焦作矿区的煤层瓦斯压力及构建

内保护层的消突力学判据, 以煤层瓦斯抽采率 30% 为前提条件, 获得不同应力条件下软、硬煤的消突卸压指标进行判定。结合理论判据可知, 突出危险性的消除主要通过应力卸压程度进行判定, 因此根据正交试验结果, 以最薄弱点的卸压程度为目标函数, 以钻孔倾角、出煤量、孔间距、原始应力及软煤厚度

表 3 构建上部内保护层正交试验分析(工况 1)

Table 3 Orthogonal test scheme for construction of upper inner protective layer (working condition 1)

编号	钻孔倾角/ (°)	出煤量/ (t·m <sup>-1</sup> )	孔间距/ m	原始应力/ MPa	软煤厚度/ m
1	45	0.6	5	12	0.3
2	45	1	6	10	0.9
3	30	0.6	6	16	0.6
4	60	0.8	6	14	0.3
5	30	0.4	4	10	0.3
6	30	1.0	5	14	1.2
7	60	0.4	5	16	0.9
8	30	0.8	7	12	0.9
9	75	0.8	5	10	0.6
10	45	0.8	4	16	1.2
11	60	1.0	4	12	0.6
12	45	0.4	7	14	0.6
13	75	0.4	6	12	1.2
14	60	0.6	7	10	1.2
15	75	1.0	7	16	0.3
16	75	0.6	4	14	0.9



表 4 构建下部内保护层正交试验分析(工况 2)

Table 4 Orthogonal test scheme for construction of lower inner protective layer (working condition 2)

编号	钻孔倾角/ (°)	出煤量/ (t·m <sup>-1</sup> )	孔间距/ m	原始应力/ MPa	软煤厚度/ m
1	45	0.6	5	12	0.3
2	45	1.0	6	10	0.9
3	30	0.6	6	16	0.6
4	60	0.8	6	14	0.3
5	30	0.4	4	10	0.3
6	30	1.0	5	14	1.2
7	60	0.4	5	16	0.9
8	30	0.8	7	12	0.9
9	75	0.8	5	10	0.6
10	45	0.8	4	16	1.2
11	60	1.0	4	12	0.6
12	45	0.4	7	14	0.6
13	75	0.4	6	12	1.2
14	60	0.6	7	10	1.2
15	75	1.0	7	16	0.3
16	75	0.6	4	14	0.9

表 5 全软煤正交试验正交试验方案(工况 3)

Table 5 Orthogonal test scheme for all-soft coal (working condition 3)

编号	钻孔倾角/(°)	出煤量/(t·m <sup>-1</sup> )	孔间距/m	原始应力/MPa
1	60	0.6	7	14
2	60	1.0	5	10
3	75	0.6	6	10
4	45	0.4	5	14
5	30	0.6	5	12
6	75	1.0	4	14
7	30	1.0	7	16
8	75	0.8	6	16
9	30	0.8	6	14
10	60	0.8	4	12
11	45	0.8	7	10
12	45	1.0	6	12
13	60	0.4	6	16
14	75	0.4	7	12
15	30	0.4	4	10
16	45	0.6	4	16

作为因变量,同时采用多元线性回归的方法对上述数据进行拟合可得到如下拟合方程:

表 6 全硬煤正交试验分析(工况 4)

Table 6 Orthogonal test scheme for all-hard coal (working condition 4)

编号	钻孔倾角 /(°)	原始应力 /MPa	孔间距 /m	割缝长度 /MPa	割缝数量 /个	割缝高度 /cm
1	45	3.5	10	0.3	2	2
2	60	3.5	12	0.9	4	2
3	30	2.5	10	0.9	8	4
4	30	2.0	16	0.9	2	2
5	30	2.5	14	0.3	6	2
6	30	3.5	14	0.6	2	8
7	60	2.5	16	1.2	2	8
8	75	2.5	10	0.6	4	2
9	45	3.0	10	0.9	2	6
10	75	3.0	10	1.2	2	2
11	75	2.0	14	0.9	2	6
12	60	3.0	14	0.3	2	6
13	45	2.5	12	0.3	2	6
14	60	2.0	10	0.6	6	6
15	30	3.5	10	1.2	8	6
16	30	2.0	10	0.3	2	2
17	60	2.0	10	0.3	2	4
18	30	2.0	12	1.2	6	2
19	30	3.0	16	0.3	4	6
20	30	3.0	12	0.6	2	4
21	30	2.0	10	0.3	4	8
22	75	2.0	12	0.3	8	8
23	45	2.0	16	0.6	8	2
24	75	3.5	16	0.3	6	4
25	45	2.0	14	1.2	4	4

$$F_s = 88.35 - 0.10692A + 30.7395B - 9.44055C - 0.3564D + 4.3065E \quad (13)$$

$$F_h = 22.36038 - 0.02706A + 7.77975B - 2.38928C - 0.0902D + 1.089917E \quad (14)$$

式中:  $A$  为钻孔倾角, (°);  $B$  为出煤量, t/m;  $C$  为钻孔间距, m;  $D$  为原始应力, MPa;  $E$  为软分层厚度, m;  $F$  为卸压程度, %。

公式(13)和(14)即为工况 1 条件下软、硬煤最薄弱点卸压程度的预测模型,将钻孔倾角、出煤量、孔间距、原始应力及软煤厚度各参数进行归一化处理,然后结合预测模型的斜率可计算得到各因素的影响程度,如图 6 所示。可以看出,各因素对软、硬煤卸压效果的影响程度排列次序是一致的,各影响因素对卸压程度影响大小依次为钻孔间距>出煤量>

钻孔倾角>原始应力>软煤厚度,其中以钻孔间距和出煤量影响最为重要。

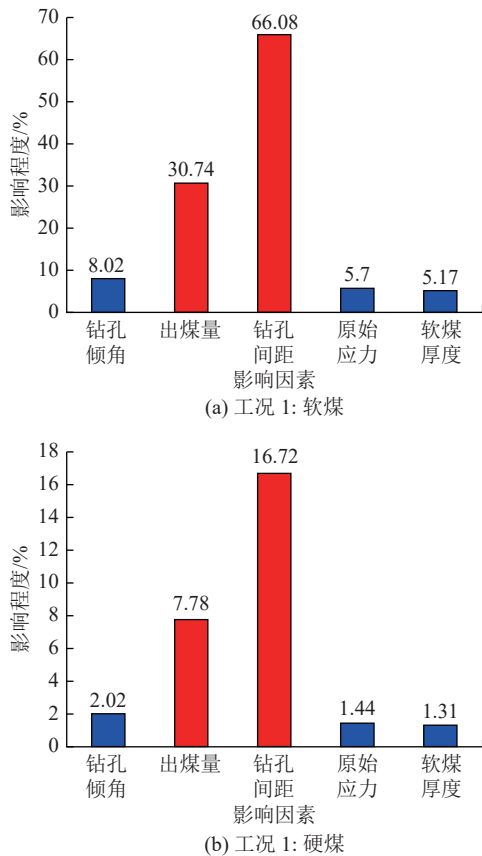


图 6 工况 1 软、硬煤卸压因素影响程度

Fig.6 Working condition 1 the influence degree of unloading pressure factors for soft and hard coal

工况 2: 当内保护层在下部时,通过改变钻孔倾角、出煤量、孔间距、原始应力及软煤厚度来进行正交分析,以卸压后软、硬分层的卸压程度、变形量为目标值。得到如下拟合方程:

$$F_s = 89.37025 - 0.09739A + 32.453B - 9.4122C - 0.50215D + 4.412833E \quad (15)$$

$$F_h = 23.11718 - 0.02381A + 8.300563B - 2.41224C - 0.14301D + 1.260708E \quad (16)$$

公式(15)和(16)即为工况 2 条件下软、硬煤最薄弱点卸压程度的预测模型,同时将钻孔倾角、出煤量、孔间距、原始应力及软煤厚度各参数进行归一化处理,然后结合预测模型的斜率可计算得到各因素的影响程度,如图 7 所示。可以看出,各因素对软、硬煤卸压效果的影响程度排列次序是一致的,各影响因素对卸压程度影响大小依次为钻孔间距>出煤量>原始应力>钻孔倾角>软煤厚度,其中以钻孔间距和出煤量影响最为重要。

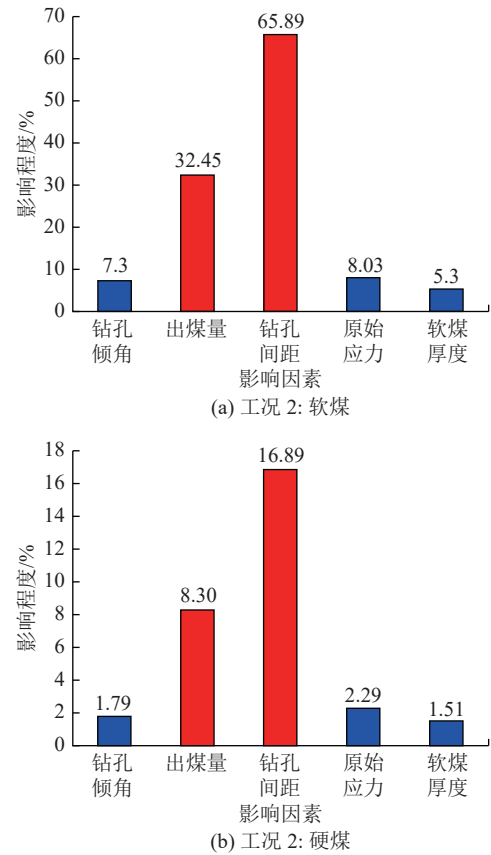


图 7 工况 2 软、硬煤卸压因素影响程度

Fig.7 Working condition 2 the influence degree of unloading pressure factors for soft and hard coal

工况 3: 当煤层为全软煤时,通过改变钻孔倾角、出煤量、孔间距、原始应力及软煤厚度来进行正交分析,以卸压后软、硬分层的卸压程度、变形量为目标值。得到如下拟合方程:

$$F_{cs} = 95.03289 - 0.11547A + 36.51363B - 10.8599C - 0.37059D \quad (17)$$

公式(17)即为工况 3 条件下最薄弱点卸压程度的预测模型,同时将钻孔倾角、出煤量、孔间距及原始应力等参数进行归一化处理,然后结合预测模型的斜率可计算得到各因素的影响程度,如图 8 所示。可以看出,各影响因素对卸压程度影响大小依次为钻孔间距>出煤量>钻孔倾角>原始应力,其中以钻孔间距和出煤量影响最为重要。

工况 4: 当煤层为全硬煤时,通过改变钻孔倾角、孔间距、原始应力、割缝长度、割缝数量、割缝高度等来进行正交分析,以卸压后煤层的卸压程度、变形量为目标值。得到如下拟合方程:

$$F_{ch} = 12.19388 - 0.00797A - 2.08122C - 0.03963D + 2.92902G + 0.263529H + 0.168I \quad (18)$$

式中:  $G$  为割缝长度, m;  $H$  为割缝数量, 个;  $I$  为割缝

高度, cm;  $F$  为最薄弱点卸压程度, %。

式(18)即为工况 4 条件下最薄弱点卸压程度的预测模型, 同时将钻孔倾角、孔间距、原始应力、割缝长度、割缝数量、割缝高度等参数进行归一化处理, 然后结合预测模型的斜率可计算得到各因素的影响程度, 如图 9 所示。可以看出, 各因素对卸压程度影响大小依次为钻孔间距>割缝长度>割缝数量>割缝高度>原始应力>钻孔倾角, 其中以钻孔间距和割缝长度影响最为重要。

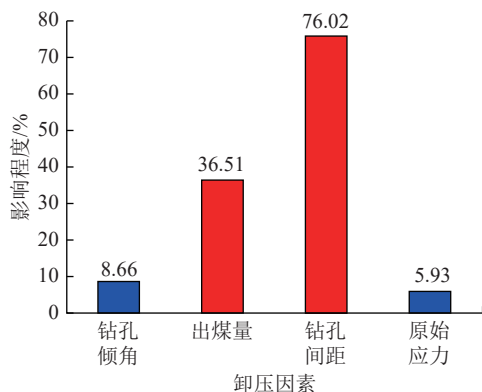


图 8 工况 3 全软煤卸压因素影响程度

Fig.8 Working condition 3 the influence degree of unloading pressure factors for all-soft coal

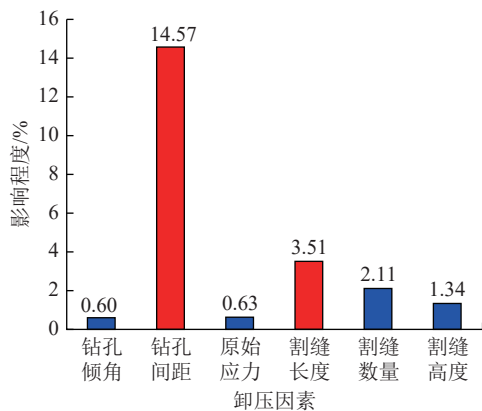


图 9 工况 4 全硬煤卸压因素影响程度

Fig.9 Working condition 4 the influence degree of unloading pressure factors for all-hard coal

## 4 内保护层构建技术研究

在煤层构建内保护层能够对煤层进行充分卸压并提高煤层透气性, 达到消突目的, 通过正交试验给出了不同地质条件煤层构建内保护层的技术参数。根据煤层硬度及软、硬分层分布特征, 划分了内保护层构建方法体系。在此基础上, 根据内保护层构建方法体系, 针对性地研制或完善了内保护层构建技术。不同地质条件煤层内保护层构建技术研发思路如图 10 所示。

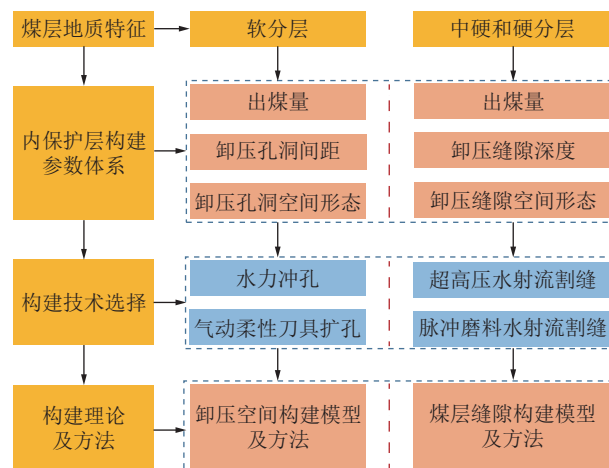


图 10 内保护层构建技术研究思路

Fig.10 Technical solution of inner protective layer construction

根据煤层硬度及软、硬分层分布特征, 划分了内保护层构建方法, 在软分层采用水力冲孔或柔性刀具扩孔构建内保护层, 在中硬分层采用超高压水射流割缝构建内保护层, 在硬及中硬分层采用脉冲磨料水射流割缝构建内保护层。构建技术归纳总结如下:

1) 软分层水力冲孔构建内保护层技术。水力冲孔构建内保护层适用于构造煤发育、打钻时喷孔、夹钻、瓦斯压力与瓦斯含量高的低透气性难以抽采的突出煤层和地区。根据煤层地质条件确定卸压空间形态和体积后, 结合煤体力学强度, 确定冲孔压力、冲孔时间及转速。依据确定的冲孔压力及钻速确定高压柱塞泵及液压马达选型。

2) 软分层气动柔性刀具扩孔构建内保护层技术。气动柔性刀具破煤技术应用在全软煤层增透过程中, 以高压气体替代水动力带动柔性刀具破煤, 避免水力化措施在松软煤层应用时的塌孔、水锁等负面效果<sup>[19]</sup>。气动柔性刀具扩孔是一种无水化卸压增透技术, 从根源上解决了塌孔、堵孔等问题, 实现了松软煤层精准卸压。与水力冲孔构建内保护层方法相同, 确定气体压力、流量及扩孔时间。依据确定的气体压力及流量确定高压气泵及气动螺杆泵选型。

3) 中硬分层超高压水射流割缝构建内保护层技术。超高压水力割缝技术适用于构造煤不发育、坚固性系数大、难以冲孔卸压的突出煤层和地区。通过在煤层中形成连续均匀卸压缝网构建内保护层, 调控封孔宽度、深度和分布控制卸压程度和范围。结合超高压水射流破煤理论, 确定水射流割缝压力、流量, 明确喷嘴选型、布置方式和高压泵组选型。

4) 预混合脉冲磨料水射流割缝构建内保护层适



用范围。在坚固性系数大于 1 的坚硬煤层中, 超高压水射流无法形成有效缝隙, 不能达到煤层均匀卸压的目的。采用脉冲磨料水射流割缝能够在坚硬煤层中形成均匀缝隙, 达到构建内保护层的目的。该技术使用的设备包括预混搅拌罐、混砂电机、注浆泵、压力表、高压旋转水尾、钻杆、一体化钻头。一体化钻头包括射流喷嘴和转换阀芯, 通过转换阀芯调节射流喷嘴的开关<sup>[20]</sup>。根据煤层地质条件, 结合内保护层构建消突原理, 确定割缝空间形态和体积后, 依据煤体力学强度, 确定射流压力、流量和磨料质量流量, 继而确定设备选型。

## 5 内保护层构建消突效果评价技术体系

对于焦作矿区单一煤层采用水力冲孔、水力割缝等卸压抽采消突技术措施, 可以有效地将大量的煤体冲蚀掉, 引起煤层破坏卸压, 形成大面积的连通孔洞, 释放地应力的同时增加瓦斯解吸有效面积和通道, 起到构建煤层内保护层的消突效果。为对单一煤层构建内保护层消突技术的效果进行评价, 必须建立行之有效的内保护层构建消突效果评价技术体系。

在焦煤公司下属的九里山矿、中马村矿和古汉山矿进行了构建内保护层消突技术的工程试验, 根据前述理论研究及现场考察的相关数据结果, 按照构建钻孔的卸压有效影响半径确定内保护层构建钻孔的间距, 并严格按照构建钻孔的设计参数施工。

### 5.1 构建内保护层煤层变形卸压效果评价

传统水力冲孔等水力化措施通常采用单孔卸煤量来考察卸煤效果, 但单孔卸煤量是一个粗略的统计参数, 且容易导致钻孔之间卸煤不均匀; 实际上钻孔卸煤量的多少主要取决于钻孔内煤层段的长度, 钻孔施工的角度、位置、长度等参数不同, 都会导致钻孔内的煤层段长度出现差异<sup>[21]</sup>。

在单一煤层内保护层构建消突过程中, 采用“密集钻孔、高效卸煤、邻孔串气、均匀卸压”的技术思想构建内保护层达到煤层大面积卸压增透的效果。通过对九里山矿、中马村矿和古汉山矿二<sub>1</sub>煤层内保护层构建过程中的单孔、组孔、区段的卸煤量进行统计分析, 可以看出更为科学的卸煤量统计参数应当是“卸煤率”, 即“区段内平均每米煤孔段钻孔对应的卸煤量”, 在孔内卸煤过程中应尽量减少各钻孔的卸煤量相对差异性, 并在钻孔控制区域内达到一定的卸煤总量。

对九里山矿、中马村矿和古汉山矿二<sub>1</sub>煤层内保

护层构建过程中的单孔、组孔、区段的卸煤量进行统计分析, 计算了内保护层构建过程中单孔、组孔、区段控制区域的卸煤率。

九里山矿 1613 中间底抽巷第一区段的单孔卸煤率为 0.56 ~ 0.96 t/m, 组孔的卸煤率为 0.60 ~ 0.83 t/m, 区段的平均卸煤率为 0.67 t/m, 该区段内构建钻孔的卸煤总量为控制区域内煤炭储量的 33%。

中马村矿 3901 运输底抽巷的单孔卸煤率为 0.62 ~ 1.30 t/m, 组孔的卸煤率为 0.70 ~ 0.80 t/m, 区段的平均卸煤率为 0.76 t/m, 该区段内构建钻孔的卸煤总量为控制区域内煤炭储量的 38%; 中马村矿 3901 上中间底抽巷的单孔卸煤率为 0.53 ~ 1.52 t/m, 组孔的卸煤率为 0.56 ~ 0.95 t/m, 区段的平均卸煤率为 0.75 t/m, 该区段内构建钻孔的卸煤总量为控制区域内煤炭储量的 37%。

古汉山矿 1606 工作面底抽巷第 6 区段的单孔卸煤率为 0.50 ~ 1.14 t/m, 组孔的卸煤率为 0.50 ~ 0.82 t/m, 区段的平均卸煤率为 0.59 t/m, 该区段内构建钻孔的卸煤总量为控制区域内煤炭储量的 26%。

根据统计分析 1 000 多个钻孔数据以及矿井在实际生产中统计的相关数据, 在目前的钻孔布置方式下, 确定达到煤层内保护层构建消突效果的单孔卸煤率为不小于 0.60 t/m, 并针对具有软分层赋存的层位应加强卸煤措施, 加大卸煤量, 区段内钻孔卸煤总量不得低于控制区域内煤炭储量的 20%, 保证内保护层构建的效果。

### 5.2 构建内保护层瓦斯抽采效果评价

1) 单孔瓦斯抽采情况。基于对内保护层构建后煤层瓦斯抽采钻孔抽采参数的准确监测, 对比分析了普通钻孔和内保护层构建消突技术钻孔在瓦斯抽采期间单个钻孔、单组钻孔及区段钻孔的瓦斯抽采情况。

在九里山矿 1613 中间底抽巷对每个钻孔都进行了整个抽采生命周期的钻孔流量及瓦斯浓度的测定, 选择 3 组具有代表性的典型钻孔进行统计分析, 对比钻孔具有相同的钻孔施工参数见表 7, 各对比钻孔在抽采期间的瓦斯抽采浓度及瓦斯纯量测定结果如图 11 所示。

从九里山矿 1613 中间底抽巷单孔瓦斯抽采情况对比可以看出, 内保护层构建消突技术实施后, 由于在煤层顶部形成较大的孔洞和蠕变卸压区, 导致煤层被充分损伤卸压, 下部原生结构煤体膨胀卸压变形, 煤层中瓦斯流动的通道显著增加, 考察钻孔的瓦斯抽采浓度和纯量显著提高。

表 7 1613 中间底抽巷单孔瓦斯抽采对比钻孔参数

Table 7 Comparison parameters of single-hole gas extraction drilling for 1613 intermediate bottom extraction roadway

对比组	钻孔倾角	煤段长度/m	钻孔总长度/m
I	41°20′	13	35
	41°20′	13	34
II	80°20′	7	18
	80°	7	16.5
III	6°	18	48
	6°	18	49

与普通钻孔相比较,构建内保护层后穿层抽采钻孔的瓦斯抽采浓度在 30% 以上的高浓度瓦斯抽采期平均为 263 d,而普通钻孔的高浓度瓦斯抽采期平均仅为 33 d;构建内保护层后穿层抽采钻孔单孔瓦斯抽采纯量最高为  $0.38 \text{ m}^3/\text{min}$ ,而普通钻孔的单孔瓦斯抽采纯量最高为  $0.06 \text{ m}^3/\text{min}$ ;与普通钻孔相比,构建内保护层穿层抽采钻孔的高浓度瓦斯抽采期提高了 8 倍,单孔最高瓦斯抽采纯量提高了 6.3 倍。

2)组孔瓦斯抽采情况。与单孔抽采浓度对比类似,分别在九里山矿 1613 中间底抽巷和 1605 底抽巷选取了具有代表性的 2 组参数类似的瓦斯抽采钻孔,每组各 21 个钻孔,煤段总长度均为 239.0 m,将抽采过程中对比组钻孔的瓦斯浓度及百米纯量的变化进行统计,结果如图 12 所示。

从图 12 中组孔的瓦斯抽采情况对比曲线变化情况可以看出,与普通钻孔相比,构建内保护层穿层钻孔能够显著提高煤体中瓦斯运移能力,使瓦斯抽采效率显著提高。在统计组孔瓦斯抽采数据中,构建内保护层穿层钻孔的组孔高浓度瓦斯抽采期达到 220 d,最大百米钻孔瓦斯抽采纯量为  $2.99 \text{ m}^3/(\text{min}\cdot\text{hm})$ ,且有近 180 d 百米钻孔抽采纯量高于  $0.2 \text{ m}^3/(\text{min}\cdot\text{hm})$ ;而普通钻孔的组孔高浓度瓦斯抽采期仅为 40 d,最大百米钻孔瓦斯抽采纯量为  $0.57 \text{ m}^3/(\text{min}\cdot\text{hm})$ ,仅有 20 d 百米钻孔抽采纯量高于  $0.2 \text{ m}^3/(\text{min}\cdot\text{hm})$ 。

瓦斯抽采的 450 d 内,构建内保护层穿层钻孔的组孔平均百米瓦斯抽采纯量为  $0.285 \text{ m}^3/(\text{min}\cdot\text{hm})$ ,普通钻孔平均百米瓦斯抽采纯量为  $0.038 \text{ m}^3/(\text{min}\cdot\text{hm})$ 。以上组孔的瓦斯抽采数据表明,与普通钻孔相比,构建内保护层穿层钻孔的组孔高浓度瓦斯抽采期提高了 4.5 倍,最大百米瓦斯抽采纯量提高了 5.2 倍,450 d 内平均百米钻孔瓦斯抽采纯量提高了 7.5 倍。

3)区段钻孔瓦斯抽采情况。对九里山矿 1613

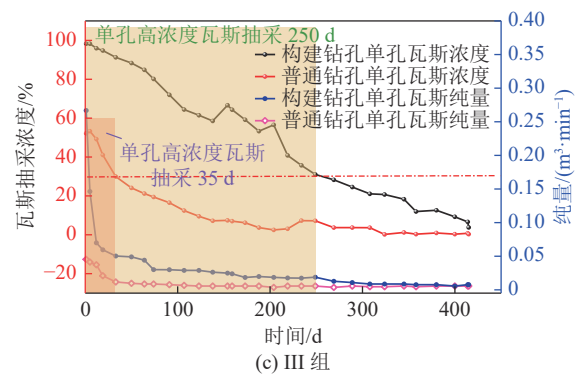
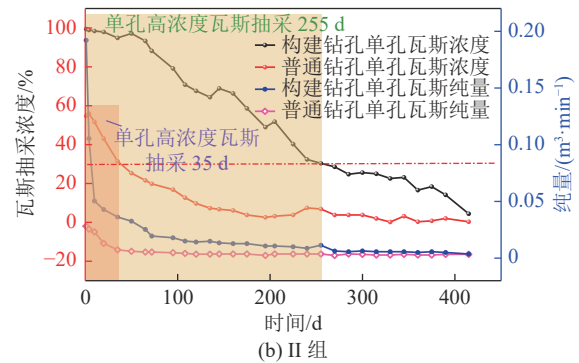
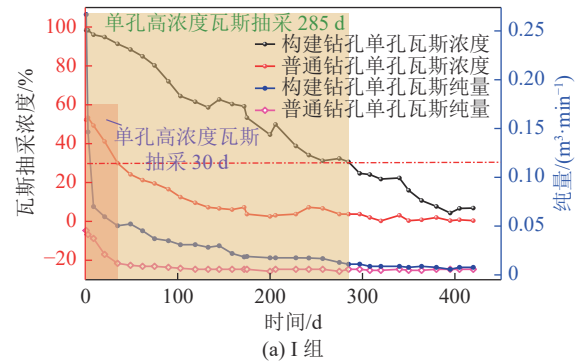


图 11 九里山矿 1613 中间底巷单孔瓦斯抽采情况对比  
Fig.11 Comparison of single-hole gas extraction in 1613 intermediate bottom roadway of Jiulishan Coal Mine

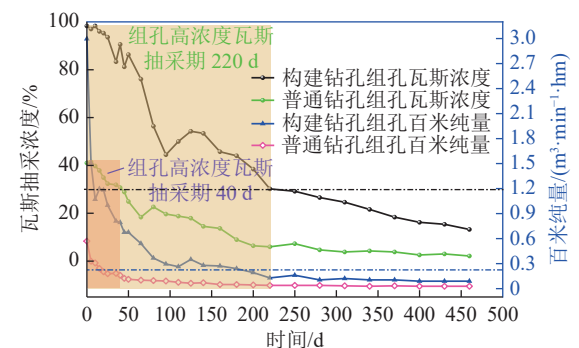


图 12 九里山矿 1613 中间底巷组孔瓦斯抽采情况对比  
Fig.12 Comparison of group-holes gas extraction situation of 1613 intermediate bottom roadway in Jiulishan Coal Mine

中间底抽巷第一区段的瓦斯抽采情况进行了统计分析,该区段在进行内保护层构建消突措施实施过程

中共施工 32 组 674 个钻孔,其中煤孔总长度 7 918.8 m,在煤层内保护层构建过程中所有钻孔的总出煤量为 5 346.56 t,该区段控制区域的煤孔段平均卸煤率 0.67 t/m,该区段内构建钻孔的卸煤总量为控制区域内煤炭储量的 33%,并选取了以往条件类似、煤孔总长度基本相同的普通钻孔治理区段进行了对比分析,其瓦斯抽采浓度及百米钻孔抽采纯量对比曲线分别如图 13 和图 14 所示。

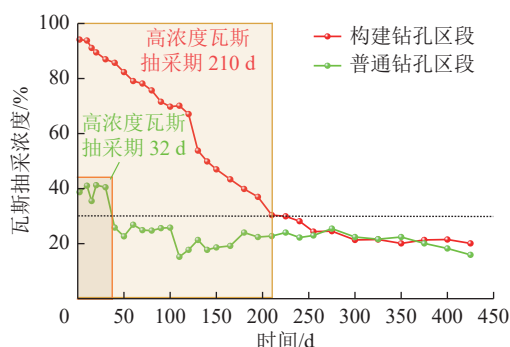


图 13 区段钻孔瓦斯抽采浓度对比

Fig. 13 Comparison of gas extraction concentration in zone borehole

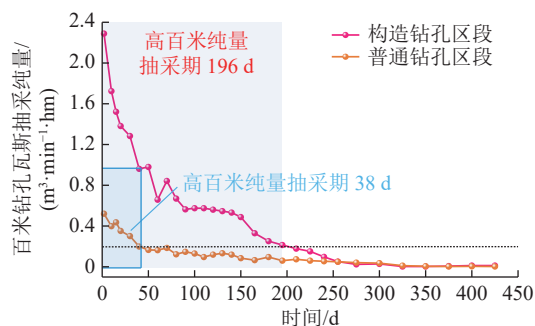


图 14 区段钻孔瓦斯抽采百米纯量对比

Fig. 14 Comparison of 100-meter pure volume for gas extraction in section borehole

从内保护层构建消突钻孔与普通钻孔区段,在抽采期间内的瓦斯纯量及百米纯量中可以看出,内保护层构建消突措施钻孔比普通钻孔能够显著提高钻孔瓦斯抽采浓度,瓦斯浓度在 30% 以上的高浓度瓦斯抽采期有 210 d,百米瓦斯抽采纯量在  $0.2 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{hm})$  以上的时间有 196 d;而普通钻孔在抽采期间,高浓度瓦斯抽采期只有 32 d,百米瓦斯抽采纯量在  $0.2 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{hm})$  以上的时间只有 38 d;与普通钻孔相比,构建内保护层穿层钻孔的区段钻孔高浓度瓦斯抽采期提高了 6.6 倍,百米瓦斯抽采纯量在  $0.2 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{hm})$  以上的时间提高了 5.2 倍。

综合以上,对内保护层构建消突钻孔和普通钻孔在瓦斯抽采期间单个钻孔、单组钻孔及区段钻孔

的瓦斯抽采情况进行对比分析。从所测得的钻孔瓦斯抽采负压和浓度、百米钻孔瓦斯抽采量等参数,可以得出内保护层构建消突技术实施后,由于将大量的煤体冲蚀掉,在煤层顶部形成较大的连通孔洞和卸压区,导致煤层充分卸压,下部原生结构煤体膨胀变形,煤层中瓦斯流动的通道显著增加,钻孔的瓦斯抽采浓度和纯量显著提高,显著提高了煤体中瓦斯运移能力,瓦斯抽采效率显著提升,该消突技术实施后取得了较好的瓦斯抽采效果,减少了突出煤层消突的时间。

### 5.3 内保护层构建技术消突效果评价体系

1)内保护层构建消突效果的日常评价指标。内保护层构建消突技术主要通过水力冲孔、柔性刀具破煤扩孔、超高压水力割缝、脉冲磨料水射流割缝等技术,达到破硬煤、割缝槽、冲孔洞等强力卸煤的目的,导致煤层破坏卸压,形成大面积的连通孔洞,增加瓦斯解吸有效面积和通道的同时释放地应力,起到构建煤层内保护层的消突效果,因此,在内保护层构建过程中,应按照理论研究及现场考察的卸压有效影响半径,确定内保护层构建钻孔的间距,并严格按照构建钻孔的设计参数施工。

结合对焦作矿区 3 对矿井典型工作面煤层变形卸压效果的统计分析,提出了更为科学的卸煤量统计参数——“卸煤率”,即“区段内平均每米煤孔段钻孔对应的卸煤量”。经统计九里山矿 1613 中间底抽巷第一区段的单孔卸煤率为  $0.56 \sim 0.96 \text{ t/m}$ ,组孔的卸煤率为  $0.60 \sim 0.83 \text{ t/m}$ ,区段的平均卸煤率为  $0.67 \text{ t/m}$ ,该区段内构建钻孔的卸煤总量为控制区域内煤炭储量的 33%;中马村矿 3901 上运输底抽巷的单孔卸煤率为  $0.62 \sim 1.30 \text{ t/m}$ ,组孔的卸煤率为  $0.70 \sim 0.80 \text{ t/m}$ ,区段的平均卸煤率为  $0.76 \text{ t/m}$ ,该区段内构建钻孔的卸煤总量为控制区域内煤炭储量的 38%;中马村矿 3901 上中间底抽巷的单孔卸煤率为  $0.53 \sim 1.52 \text{ t/m}$ ,组孔的卸煤率为  $0.56 \sim 0.95 \text{ t/m}$ ,区段的平均卸煤率为  $0.75 \text{ t/m}$ ,该区段内构建钻孔的卸煤总量为控制区域内煤炭储量的 37%;古汉山矿 1606 工作面底抽巷第六区段的单孔卸煤率为  $0.50 \sim 1.14 \text{ t/m}$ ,组孔的卸煤率为  $0.50 \sim 0.82 \text{ t/m}$ ,区段的平均卸煤率为  $0.59 \text{ t/m}$ ,该区段内构建钻孔的卸煤总量为控制区域内煤炭储量的 26%。根据研究分析数据以及各矿井在实际生产中统计数据,将内保护层构建钻孔的间距应按考察研究的钻孔卸压有效影响半径确定、达到煤层内保护层构建消突效果的卸煤率不小于每米煤孔  $0.60 \text{ t}$ ,在实施过程中应尽量减少各



钻孔的卸煤量相对差异性,且钻孔卸煤总量不得低于控制区域内煤炭储量的 20%,作为日常评价指标,并应对软分层赋存的层位加强卸煤措施,加大卸煤量,增大卸煤率,确保内保护层构建后各钻孔的连通性和煤层的全域卸压,保证内保护层构建的效果。

2)内保护层构建煤层卸压均匀性及多物理场叠加区评价指标。在单一煤层内保护层构建消突过程中,采用“密集钻孔、孔内卸煤、孔孔贯通、均匀卸压”的技术思想构建内保护层达到煤层大面积卸压增透的效果。内保护层构建是钻孔连片卸压形成的,容易在各钻孔影响范围的叠加区形成消突效果的薄弱区,根据传统钻孔经验易产生应力集中、卸压程度低、煤层渗透性差等现象。

为保证内保护层的构建效果,通过对内保护层构建消突技术实施过程中多物理场叠加区的应力、变形、透气性等参数的考察和分析,提出内保护层构建消突效果评价的辅助指标 I:煤层垂向膨胀变形量不低于 3‰,用来表征煤层中内保护层的形成和煤体的膨胀变形程度。

同时,通过对内保护层构建后煤层瓦斯抽采情况的进行实时跟踪观测,提出内保护层构建消突效果评价的辅助指标 II:单孔初始抽采浓度不低于 30%,单孔、组孔、区段钻孔的瓦斯抽采浓度在 30% 以上的高浓度抽采期不低于 90 d,瓦斯抽采率差异性系数低于 10%,瓦斯抽采累计时间不少于设计预抽期,最终以残存瓦斯压力和瓦斯含量均小于“双六”指标进行评判。

通过对内保护层构建消突技术煤层变形卸压、瓦斯抽采效果的评价以及对构建内保护层后多物理场叠加区卸压效果的考察验证,在充分结合构建内保护层消突技术特点及现场工程实际的基础上,提出了单一煤层构建内保护层消突技术的效果评价技术体系和指标,如图 15 所示。

## 6 结 论

1)提出了强突出单一煤层构建内保护层消突技术思想,阐释了构建内保护层消突的科学内涵。构建内保护层技术以煤层卸压消突为目标,以地质勘探为基础,以内保护层消突技术参数和高效构建技术装备为依托,以消突效果考察和系统保障体系为保障,实现穿层钻孔的“布孔均匀密集、卸煤科学高效、邻孔串气相透、卸压均匀充分”,统筹了煤层区域高效均匀卸压与瓦斯抽采,提出适用于强突出单一煤层的主动构建内保护层的消突理念。通过多个

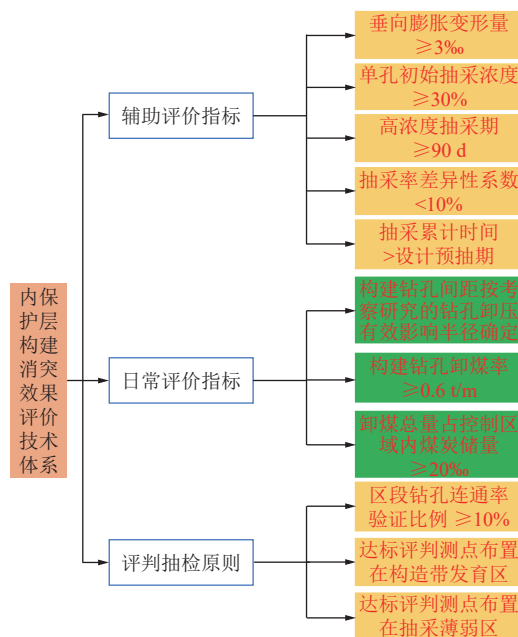


图 15 内保护层构建消突效果评价技术指标

Fig.15 Evaluation indexes of effect of eliminating outbursts for internal protective layer construction

采掘工作面构建内保护层的工程实践,说明此方法是科学、安全和高效的。

2)揭示了构建内保护层消突机理及消突力学评判依据。从地应力和瓦斯压力的角度,基于发生煤与瓦斯突出的能量方程,确定了煤层开采时发生煤与瓦斯突出能量条件。明确了不同硬度煤体突出主控因素和卸压消突力学判据:硬煤卸压消突效果优于软煤,硬分层仅靠掏煤卸压到一定程度即可达到消突效果,软分层卸压配合瓦斯抽采也可达到消突;试验研究条件下, $f$  为 0.5 时,当卸压程度达到 58% 以上,可实现煤层消突,在瓦斯预抽率 15% 前提下,卸压程度达到 10% 即可实现消突; $f$  为 0.2 时,在瓦斯预抽率 30% 前提下,卸压程度达到 40% 即可实现消突效果。

3)形成了内保护层构建方法体系。根据煤体软硬分层结构划分 4 种工况,研究了不同煤层赋存、钻孔间距、出煤量、软分层厚度、钻孔角度、原始应力、水力割缝参数等条件下,构建内保护层时的卸压程度及煤层变形量的主控因素及变化规律。通过正交实验模拟分析了 4 种工况不同内保护层构建条件下,钻孔施工参数的卸压效果,结合多元线性回归的方法,分析了不同影响因素对消突效果的影响程度,构建了钻孔控制范围内最薄弱作用点的卸压程度预测模型,形成了内保护层构建方法体系,为构建内保护层消突技术提供了施工参数确定依据。

4)建立了内保护层消突效果评价体系。针对不

同瓦斯地质条件,在确保合理钻孔布置前提下,提出了采用“卸煤率”作为内保护层构建效果的日常考察指标,煤层垂向膨胀变形量、瓦斯抽采浓度和抽采差异性等为辅助评价指标;每米煤孔的卸煤率为不小于0.60 t/m,钻孔卸煤总量不得低于控制区域内煤炭储量的20%。

# 参考文献(References):

- [1] 王恩元,张国锐,张超林,等.我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J].煤炭学报,2022,47(1):297-322.  
WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, *et al.* Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 297-322.
- [2] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].煤炭学报,2019,44(5):1283-1305.  
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [3] 张建民,李全生,张勇,等.煤炭深部开采界定及采动响应分析[J].煤炭学报,2019,44(5):1314-1325.  
ZHANG Jianmin, LI Quansheng, ZHANG Yong, *et al.* Definition of deep coal mining and response analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1314-1325.
- [4] 袁亮.深部采动响应与灾害防控研究进展[J].煤炭学报,2021,46(3):716-725.  
YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster pre-vention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716-725.
- [5] 何满潮.深部建井力学研究进展[J].煤炭学报,2021,46(3):726-746.  
HE Manchao. Research progress of deep shaft construction mechanics[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 726-746.
- [6] 国家安全生产监督管理总局.防治煤与瓦斯突出细则[M].北京:煤炭工业出版社,2019.
- [7] 胡千庭,文光才.煤与瓦斯突出的力学作用机理[M].北京:科学出版社,2013.
- [8] 王刚,武猛猛,王海洋,等.基于能量平衡模型的煤与瓦斯突出影响因素的灵敏度分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(2):238-248.  
WANG Gang, WU Mengmeng, WANG Haiyang, *et al.* Sensitivity analysis of factors affecting coal and gas outburst based on a energy equilibrium model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 238-248.
- [9] 吴财芳,秦勇,傅雪海,等.煤基块弹性能及其与地质控制因素之间的关系[J].中国矿业大学学报,2005,34(5):636-639.  
WU Caifang, QIN Yong, FU Xuehai, *et al.* Coal matrix flexibility energy and the relation with geological controlling factors[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(5): 636-639.
- [10] 康红普,吴志刚,高富强,等.煤矿井下地质构造对地应力分布的影响[J].岩石力学与工程学报,2012,31(S1):2674-2680.  
KANG Hongpu, WU Zhigang, GAO Fuqiang, *et al.* Effect of geological structures on in-situ stress distribution in underground coal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 2674-2680.
- [11] 张庆贺.煤与瓦斯突出能量分析及其物理模拟的相似性研究[D].济南:山东大学,2017.  
ZHANG Qinghe. Analysis of coal and gas outburst and research on similarity of physical simulation for it[D]. Jinan: Shangdong University, 2017.
- [12] 魏风清,史广山,张铁岗.基于瓦斯膨胀能的煤与瓦斯突出预测指标研究[J].煤炭学报,2010,35(S1):95-99.  
WEI Fengqing, SHI Guangshan, ZHANG Tiegang. Study on coal and gas outburst prediction indexes base on gas expansion energy[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S1): 95-99.
- [13] 刘彦伟,浮绍礼,浮爱青.基于突出热动力学的瓦斯膨胀能计算方法研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2008,27(1):1-5.  
LIU Yanwei, FU Shaoli, FU Aiqing. Study on the calculating methods of gas expansion energy base on thermo kinetic of outburst[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2008, 27(1): 1-5.
- [14] 刘明举,颜爱华.煤与瓦斯突出的热动力过程分析[J].焦作工学院学报(自然科学版),2001,20(1):1-7.  
LIU Mingju, YAN Aihua. Thermodynamic process analysis of coal and gas outbursts[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology (Natural Science), 2001, 20(1): 1-7.
- [15] 李成武,解北京,曹家琳,等.煤与瓦斯突出强度能量评价模型[J].煤炭学报,2012,37(9):1547-1552.  
LI Chengwu, XIE Beijing, CAO Jialin, *et al.* The energy evaluation model of coal and gas outburst intensity[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1547-1552.
- [16] 蒋承林,俞启香.煤与瓦斯突出的球壳失稳机理及防治技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,1998.
- [17] 王刚,武猛猛,程卫民,等.煤与瓦斯突出能量条件及突出强度影响因素分析[J].岩土力学,2015,36(10):2974-2982.  
WANG Gang, WU Mengmeng, CHENG Weimin, *et al.* Analysis of energy conditions for coal and gas outburst and factors influencing outburst intensity[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2974-2982.
- [18] 唐巨鹏,任凌冉,潘一山,等.高地应力条件煤与瓦斯突出模拟试验研究[J].煤炭科学技术,2022,50(2):113-121.  
TANG Jupeng, REN Lingran, PAN Yishan, *et al.* Simulation test study on coal and gas outburst under conditions of high in-situ stress[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 113-121.
- [19] 刘勇,魏建平,徐向宇,等.一种松软煤层中气动柔性刀具破煤卸压增透装置和方法[P].中国:ZL114483028A,2022-05-13.
- [20] 刘勇,魏建平,刘笑天,等.一种利用超前预混合脉冲磨料水射流破煤增透装置及方法[P].中国:ZL114000826A,2022-02-01.
- [21] 张荣.复合煤层水力冲孔卸压增透机制及高效瓦斯抽采方法研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.  
ZHANG Rong. Research on the stress relief and permeability increase mechanism and high-efficiency gas drainage method on a composite coal seam [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.