



移动扫码阅读

任培良,刘彦伟,韩红凯,等.冲煤率对煤层卸压增透及瓦斯抽采的影响规律研究[J].煤炭科学技术,2022,50(10):102-109.
REN Peiliang, LIU Yanwei, HAN Hongkai, *et al.* Study on influence laws of coal flushing rate on coal seam stress relief and gas extraction[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(10): 102-109.

冲煤率对煤层卸压增透及瓦斯抽采的影响规律研究

任培良^{1,2},刘彦伟^{3,4},韩红凯^{3,4},王 迪⁵,左伟芹^{3,4},李运强^{3,4},史 灿^{3,4}

(1.北京科技大学 土木与资源工程学院,北京 100083;2.义煤集团新安县云顶煤业有限公司,河南 洛阳 471800;
3.河南理工大学 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地,河南 焦作 454003;4.河南理工大学
安全科学与工程学院,河南 焦作 454003;5.义马煤业集团孟津煤矿有限责任公司,河南 洛阳 471142)

摘 要:合理确定水力冲孔冲煤率,是保障水力冲孔措施取得良好卸压增透效果的关键,对指导不同煤层瓦斯赋存条件下,煤层瓦斯在规定预抽期内实现抽采达标具有重要意义。根据孟津煤矿的煤层瓦斯地质条件,运用数值模拟和现场试验的手段,研究了冲煤率对煤层卸压增透及瓦斯抽采效果的影响规律。结果表明:水力冲孔技术能够有效提高钻孔周围煤体的卸压范围,且随着冲煤率的增大,钻孔间煤体所处的应力状态,由邻近钻孔煤体处于卸压区、中部煤体处于增压区,逐渐过渡至两钻孔间所有煤体均处于卸压区。水力冲孔冲煤率越高,钻孔间煤体的卸压程度越大,引起煤体渗透率呈数量级的增大,邻近钻孔煤体的渗透率增大了上千倍,从而造成了抽采后煤层瓦斯含量的降低幅度越大,煤层瓦斯的预抽效果越好。应根据煤层的瓦斯赋存条件,选择合理水力冲孔冲煤率的煤层瓦斯预抽方案,对于厚煤区和瓦斯富集区,应加大水力冲孔冲煤率。采用预抽—水力冲孔—2 次抽采的工序,可降低冲孔前钻孔周围煤体的瓦斯含量和瓦斯压力,使得水力冲孔期间钻孔发生喷孔的次数及强度显著降低,利于防治水力冲孔时发生喷孔及瓦斯的异常涌出。预抽时间越长,煤层的残余瓦斯含量越低,但随着抽采时长的增大,煤层残余瓦斯含量的降低速率有减缓趋势。基于上述研究成果,成功指导了孟津煤矿 12050 工作面不同煤层瓦斯赋存条件下,煤巷条带煤层瓦斯的安全高效预抽。

关键词:水力冲孔;冲煤率;瓦斯抽采;煤与瓦斯突出;煤层卸压增透

中图分类号:TD712 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2022)10-0102-08

Study on influence laws of coal flushing rate on coal seam stress relief and gas extraction

REN Peiliang^{1,2}, LIU Yanwei^{3,4}, HAN Hongkai^{3,4}, WANG Di⁵, ZUO Weiqin^{3,4}, LI Yunqiang^{3,4}, SHI Can^{3,4}

(1.School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Yima Coal Industry(Group) Xin'an Yunding Coal Mine Co., Ltd., Luoyang 471800, China; 3.State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 4.School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China 5.Yima Coal Industry(Group)Mengjin Coal Mine Co., Ltd., Luoyang 471142, China)

Abstract: Reasonable determination of the hydraulic punching rate is the key to ensure the hydraulic punching measures can achieve good pressure relief and permeability improvement effects, and it is of great significance to meet the standard of coal seam gas drainage in the specified pre-drainage period for different coal seam gas conditions. According to the geological conditions of coal seam gas in Mengjin Coal Mine, the influence laws of coal punching rate on coal seam pressure relief, permeability improvement and gas extraction were studied by means of numerical simulation and field test. The results show that the hydraulic punching technology can effectively improve the pressure relief range of the coal mass around the boreholes, and with the increase of the coal punching rate, the stress state of the coal

收稿日期:2021-11-02 责任编辑:常 琛 DOI:10.13199/j.cnki.cst.ZGCS-012
基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2020M682291,2022T150194);河南省高校基本科研业务费专项资金资助项目(NSFRF210307)
作者简介:任培良(1980—),男,河南开封人,高级工程师,硕士。E-mail:276607046@qq.com
通讯作者:韩红凯(1991—),男,河南辉县人,讲师,硕士生导师,博士。E-mail:hkh@hpu.edu.cn

body between the boreholes gradually converts from stress relief zone and the stress concentration zone to stress relief zone. The higher the coal punching rate, the greater the degree of pressure relief of the coal body between the boreholes, resulting in an order of magnitudes increase for the coal permeability. The coal permeability adjacent to the boreholes increases by thousands of times, thus resulting in the greater reduction of the coal seam gas content after extraction, and the better the pre-extraction effect of coal seam gas. According to the gas occurrence conditions of the coal seam, a coal seam gas pre-extraction plan with reasonable coal punching rate should be selected. For thick coal areas and gas-enriched areas, the hydraulic punching rate should be increased. The process of gas pre-drainage, hydraulic punching-second gas extraction can reduce the coal seam gas content and gas pressure around the boreholes before hydraulic punching, so that the numbers and intensity of spraying holes during hydraulic piercing can be significantly reduced, which is conducive to prevent and control the occurrence of spraying holes and abnormal gas emission during hydraulic punching. The longer the gas pre-extraction time, the lower the residual gas content of coal seam. However, the reduction rate of residual coal seam gas content tends to slow down with the increase of the extraction time. The research results successfully guided the safe and efficient gas pre-drainage of coal roadway strip for working face 12050 with different coal seam gas conditions in Mengjin Coal Mine.

Key words:hydraulic punching; coal punching rate; gas drainage; coal and gas outburst; coal seam pressure relief and permeability improvement

0 引言

我国大部分煤矿煤层透气性低,瓦斯抽采难度大,矿井的安全生产受到严重威胁^[1-2]。水力冲孔、水力割缝、水力压裂等水力化卸压增透技术是煤储层改造,实现瓦斯安全高效抽采、防治煤与瓦斯突出的有效措施^[3-6]。水力冲孔是利用高压水冲击、破坏钻孔周围煤体,形成空洞,煤体在应力重新分布过程中运移并产生裂隙,利于瓦斯卸压排放,达到防治突出的目的^[7-10]。

冲煤率(冲出煤量/控制区域原始煤量)是水力冲孔技术的关键技术参数之一,水力冲孔冲煤率主要受冲孔钻孔个数和单孔冲煤量的影响。广大学者针对水力冲孔冲煤率对煤层卸压增透效果的影响开展了大量研究。王恩元等^[4]实测发现,水力冲孔后钻孔周围煤体出现明显卸压、裂隙发育,增加了煤层透气性,提高了煤层瓦斯的预抽效果。郝富昌等^[11]研究发现,单孔水力冲孔冲煤量越多,煤体渗透率增大幅度越大。郭献林^[12]实测研究发现,煤巷条带消突中水力冲孔冲煤率达到1%时,煤巷条带能取得良好的消突效果。文献[11,13-14]通过数值模拟研究发现,单孔冲出煤量越多,煤体卸压与增透范围越大。但文献[15-17]提出,单孔水力冲孔冲出煤量并非越多越好,冲出煤量过大时,会影响瓦斯的抽采浓度,也十分不利于煤巷掘进时的顶板支护。王俊铭等^[18]现场试验发现,单孔冲煤量较小时无法取得理想的卸压增透效果,冲煤量越大,越有利于煤层消突,但冲煤后形成的残余空洞体积较大时,会造成瓦斯积聚,煤巷掘进过程中易发生瓦斯超限等不利影响。此外,研究发现,单孔冲煤量过大时,周围煤体大幅运移可能导致串孔现象,难以保证瓦斯的抽

采效果,白白增加了投入^[15,18]。

可见,冲煤率会影响煤层瓦斯预抽效果,合理的冲煤率是保障水力冲孔措施取得良好卸压增透效果的关键。由于同一地质条件下,煤层越厚,在成煤过程中生成的瓦斯量越大,且越有利于瓦斯的保存,煤厚与煤层原始瓦斯含量之间存在明显的正相关性^[19]。因而,不同煤层瓦斯赋存条件下,应采用不同水力冲孔冲煤率的煤层瓦斯预抽方案。比如在厚煤区、瓦斯富集区,应加大水力冲孔冲煤率。但从前人的研究成果来看,通过增大单孔冲煤量提高冲煤率,易形成冲孔空洞,造成瓦斯积聚,甚至影响煤巷掘进支护。因此,笔者重点研究单孔水力冲孔冲煤量一定时,增大水力冲孔数量提高冲煤率,对煤层卸压增透以及瓦斯抽采效果的影响。根据孟津煤矿的煤层瓦斯赋存条件,运用数值模拟和现场试验的手段,开展了不同水力冲孔冲煤率的煤层瓦斯预抽试验,研究了冲煤率对煤层卸压增透及瓦斯抽采效果的影响规律。

1 不同水力冲孔冲煤率的煤层瓦斯预抽方案

孟津煤矿主采的二₁煤层煤质松软、透气性低,煤体破坏类型为Ⅲ~Ⅴ级,属贫煤。煤体坚固性系数为0.12~0.46,透气性系数为 $0.048\ 9\ \text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,瓦斯放散初速度为10.5~24.0,瓦斯含量为7.97~16.37 m^3/t ,瓦斯压力为0.90~3.10 MPa,属煤与瓦斯突出煤层,矿井深受煤与瓦斯突出灾害的威胁。

矿井采用穿层钻孔预抽煤层瓦斯的区域防突措施,结合水力冲孔卸压增透技术,即每个水力冲孔钻孔每米煤孔冲出煤量不小于1 t,且单孔冲出煤量不小于5 t,取得了一定的防突效果。但孟津煤矿在预抽煤层瓦斯中存在着以下亟待解决的难题:如何保

证不同的煤层瓦斯赋存区域,在规定预抽期内能够实现抽采达标,不同煤层瓦斯含量区域水力冲孔冲煤率(水力冲孔钻孔的数量及布置方式)应如何确定。冲孔期间喷孔严重,常造成钻机附近及回风流瓦斯异常,不但严重影响制约着矿井消突进度,还对矿工人身安全构成了极大的威胁。

为解决孟津煤矿不同煤层瓦斯赋存条件下,预抽二₁煤层瓦斯中存在水力冲孔冲煤率难以确定的问题,设计了不同水力冲孔冲煤率的煤层瓦斯预抽方案,研究了水力冲孔冲煤率对煤层卸压增透及瓦斯抽采效果的影响,钻孔布置见表1和图1。

表1 预抽煤层瓦斯钻孔布置方案

Table 1 Drilling parameters of pre-drainage coal seam gas

预抽方案 编号	水力冲孔 钻孔编号	未水力冲孔 钻孔编号	冲煤率/ %
①	—	1号~7号,8号~14号	0
②	8号,10号, 12号,14号	1号~7号	1.7
③	8号~14号	1号~7号	3.0
④	8号~14号,2号, 4号,6号	1号,3号, 5号,7号	4.3
⑤	1号~7号, 8号~14号	—	6.0

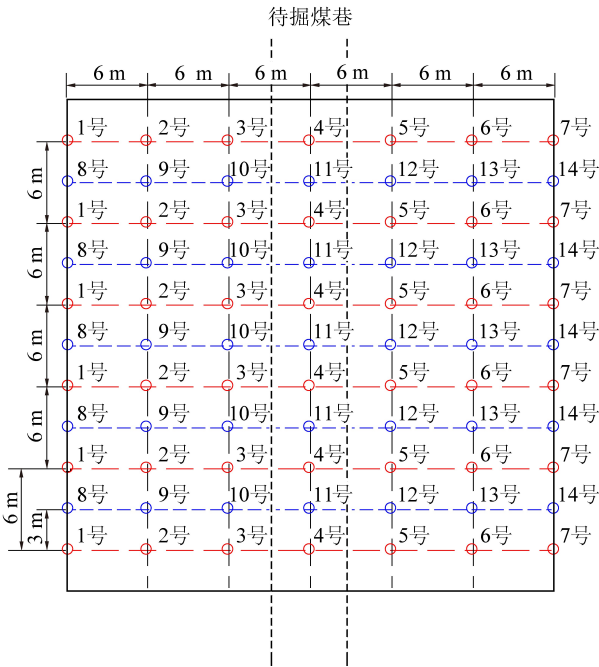
方案①施工图1中编号为1号~14号钻孔,所有钻孔均不进行水力冲孔,冲煤率为0。方案②仅施工图1中编号为8号,10号,12号,14号和1号~7号钻孔,对8号,10号,12号,14号钻孔进行水力冲孔,冲煤率为1.7%。方案③施工图1中编号为1号~14号钻孔,对8号~14号钻孔进行水力冲孔,冲煤率为3%,1号~7号钻孔不进行水力冲孔。方案④施工图1中编号为1号~14号钻孔,对8号~14号,2号,4号和6号进行水力冲孔,冲煤率为4.3%,1号,3号,5号和7号钻孔不进行水力冲孔。方案⑤施工图1中编号为1号~14号钻孔,所有钻孔均进行水力冲孔,冲煤率为6%。

各方案中无论穿层钻孔是否进行水力冲孔,所有钻孔均用于长时间连续预抽煤层瓦斯。未水力冲孔钻孔半径为0.05 m,水力冲孔钻孔单孔冲煤量取1 t/m,水力冲孔后钻孔半径扩大至0.64 m。

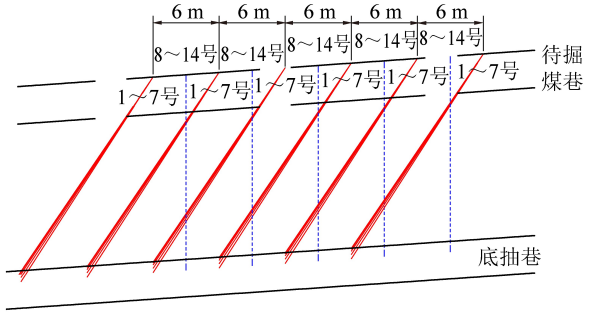
2 不同水力冲孔冲煤率对煤层卸压增透及瓦斯抽采效果的影响

2.1 数值模型参数

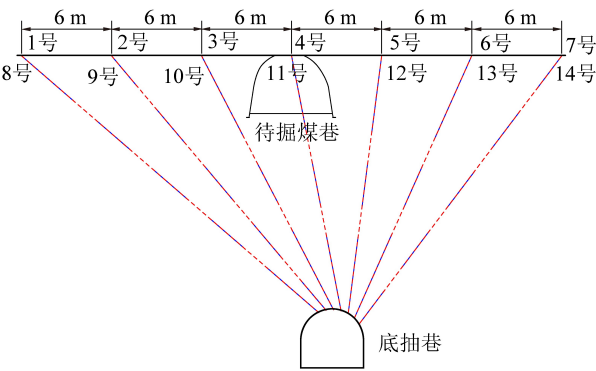
根据上节不同水力冲孔冲煤率的煤层瓦斯预抽方案,利用 Comsol Multiphysics 软件,模拟研究了不同水力冲孔冲煤率对煤层卸压增透及瓦斯抽采效果的影响。根据表1的煤层瓦斯预抽方案①~⑤,分



(a) 抽采钻孔终孔位置平面示意



(b) 抽采钻孔布置倾向剖面示意



(c) 抽采钻孔布置走向剖面示意

图1 预抽煤层瓦斯穿层钻孔布置示意

Fig.1 Layout of pre-drainage coal seam gas boreholes

别对应建立了 5 个数值计算模型 I ~ V,模型平面尺寸为 76 m×76 m,各模型的计算参数见表 2,模型中煤层原始瓦斯含量取孟津煤矿实测的最大瓦斯含量为 16.37 m³/t。

表 2 模型基本计算参数

Table 2 Basic calculation parameters of the model					
弹性模量/ MPa	泊松比	原始孔隙率/%	原始瓦斯含量/ (m ³ ·t ⁻¹)	瓦斯动力黏度/ (10 ⁻⁵ Pa·s)	原始渗透率/ 10 ⁻¹⁸ m ²
1 500	0.3	3.38	16.37	1.08	3.2

2.2 不同水力冲孔冲煤率下煤层瓦斯抽采效果

抽采时长为 120 d 时,不同水力冲孔冲煤率的煤层瓦斯预抽方案下,煤层的残余瓦斯含量分布如图 2 所示,控制区域内煤层的最大残余瓦斯含量见表 3。

表 3 不同水力冲孔冲煤率下煤层的最大残余瓦斯含量

Table 3 Maximum residual gas content of coal seam under different hydraulic punching flushing rates				
模型编号	预抽方案编号	冲煤率/%	120 d 后最大残余瓦斯含量/ (m ³ ·t ⁻¹)	瓦斯含量降低值/ (m ³ ·t ⁻¹)
I	①	0	14.14	2.23
II	②	1.7	12.59	3.78
III	③	3.0	9.76	6.61
IV	④	4.3	6.31	10.06
V	⑤	6.0	4.93	11.44

由表 3 可知,不同冲煤率的煤层瓦斯预抽模型 I ~ V,抽采钻孔控制范围内煤层的最大残余瓦斯含量分别降至 14.14、12.59、9.76、6.31 和 4.93 m³/t。与煤层原始瓦斯含量 16.37 m³/t 相比,瓦斯含量降低值分别为 2.23、3.78、6.61、10.06 和 11.44 m³/t。可见,抽采时间为 120 d 时,不同水力冲孔冲煤率的煤层瓦斯预抽方案下,冲煤率越高,煤层瓦斯含量降低幅度越大,煤层瓦斯的预抽效果越好。

《河南省强化煤矿安全生产暂行规定》要求“残余瓦斯压力及含量降到 0.6 MPa 和 6 m³/t 以下后,方可进入煤层进行采掘作业”。由上述分析可知,冲煤率影响着煤层瓦斯含量的降低幅度。则不同煤层原始瓦斯含量条件下,应采用不同水力冲孔冲煤率的煤层瓦斯预抽方案。在厚煤区和瓦斯富集区,应加大水力冲孔的冲煤率,才能保障抽采 120 d 后煤层的残余瓦斯含量低于 6 m³/t。

2.3 不同水力冲孔冲煤率下煤层卸压增透效果

图 1 所示的不同水力冲孔冲煤率的煤层瓦斯预抽方案,其实质差异在于抽采钻孔是否采用水力冲孔技术以及水力冲孔钻孔的间距不同。预抽方案②~⑤中,相邻两个水力冲孔钻孔中心的最远距离分别为 13.5、8.5、7.5、6.7 m,预抽方案①相邻 2 个钻孔的最远距离与预抽方案⑤相同,但抽采钻孔未进行水力冲孔。

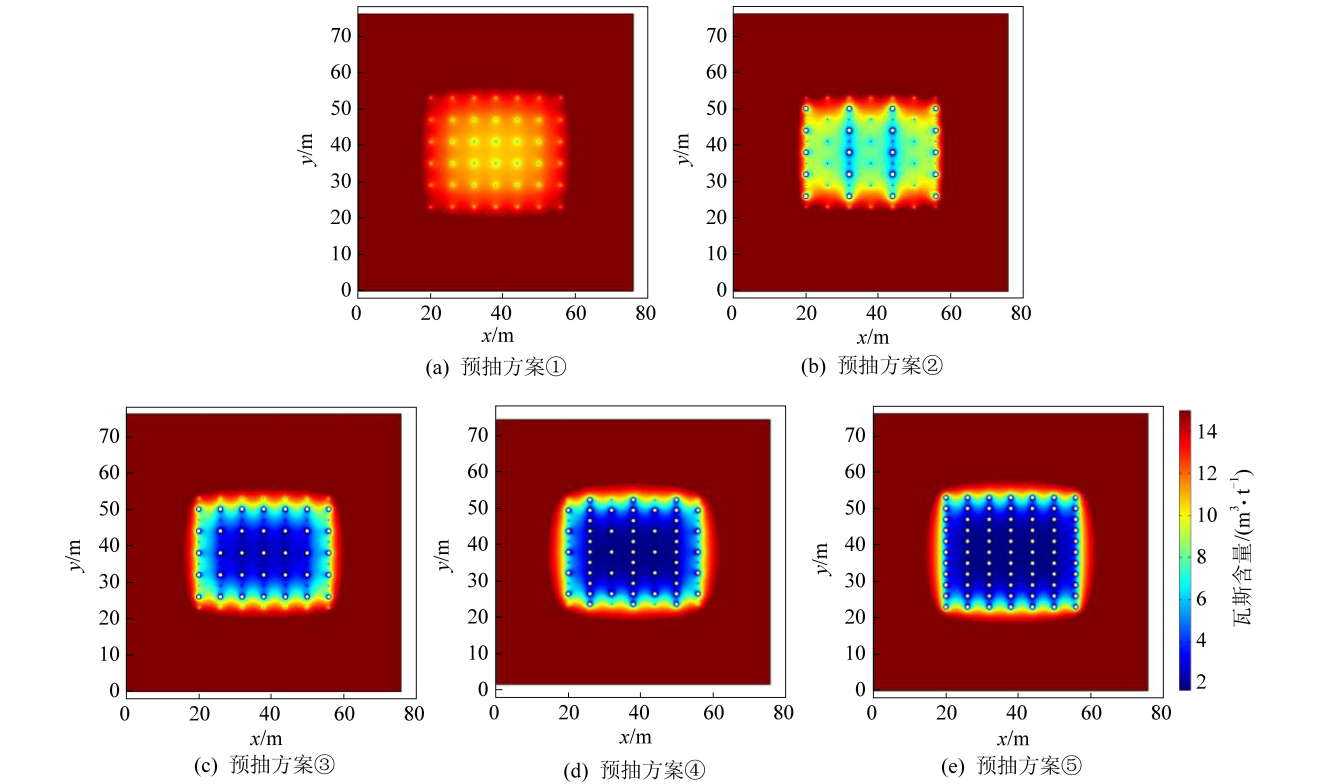


图 2 不同冲煤率下煤层残余瓦斯含量分布

Fig.2 Distribution of residual gas content in coal seam under different coal flushing rates

为探究不同方案中水力冲孔冲煤率影响煤层瓦斯预抽效果的原因,得出不同水力冲孔冲煤率下煤层的卸压增透规律。结合模型Ⅰ~Ⅴ,建立了相邻2个钻孔的数值计算模型Ⅰ-1~Ⅴ-5,分析了是否采用水力冲孔技术以及不同水力冲孔钻孔间距,对钻孔间渗透率、应力场分布的影响规律。模型尺寸参数和计算参数分别见表4和表2,模型Ⅲ-3如图3所示,其他模型可根据表4中的参数,对模型Ⅲ-3进行尺寸修改后得到。

表4 模型尺寸参数

Table 4 Model size parameters

模型编号	对应预抽方案编号	冲煤率/%	钻孔间距/m	钻孔半径/m
Ⅰ-1	①	0	6.7	0.05
Ⅱ-2	②	1.7	13.5	0.64
Ⅲ-3	③	3	8.5	0.64
Ⅳ-4	④	4.3	7.5	0.64
Ⅴ-5	⑤	6	6.7	0.64

模型Ⅰ-1~Ⅴ-5两个钻孔间煤体的渗透率分布如图4所示。钻孔周围煤体的应力分布决定了渗透率的分布,模型Ⅰ-1~Ⅴ-5两个钻孔间煤体的应力分布结果如图5所示。由图4和5可知,邻近钻孔煤体的渗透率增大了上千倍,这是由于邻近钻孔煤体的垂直应力低于原始应力,处于卸压区,发生了塑性变形破坏,引起了煤体裂隙的大量发育,从而导致了邻近钻孔煤体渗透率呈数量级的增大。模型Ⅰ-1钻孔周围煤体渗透率增大范围(约为0.35 m)远低于模型Ⅱ-2~Ⅴ-5(约为3.7 m),这是由于模型Ⅰ-1未采用水力冲孔技术,模型Ⅰ-1钻孔周围煤体卸压区范围明显低于模型Ⅱ-2~Ⅴ-5,水力冲孔后卸压区范围显著增大所致,水力冲孔后钻孔周围煤体渗透率增大范围是未水力冲孔钻孔的10.6倍。

此外,模型Ⅰ-1~Ⅴ-5钻孔间煤体的平均渗透率逐渐增大,分别为 $2.32\times10^{-17}\text{ m}^2$ 、 $5.37\times10^{-17}\text{ m}^2$ 、 $8.85\times10^{-17}\text{ m}^2$ 、 $1.02\times10^{-16}\text{ m}^2$ 和 $1.16\times10^{-16}\text{ m}^2$,而且模型Ⅱ-2~Ⅴ-5钻孔间煤体渗透率处于原始渗透率的范围依次明显减小,模型Ⅴ-5钻孔间煤体渗透率均高于原始渗透率。上述煤层瓦斯渗透率分布规律的形成原因在于,模型Ⅰ-1和Ⅱ-2两个钻孔间中部煤体垂直应力高于原始地应力,处于增压区。而模型Ⅲ-3~Ⅴ-5两个钻孔间煤体垂直应力逐渐降低,且均低于原始地应力而处于卸压状态,垂直应力卸压程度逐渐增大。同时模型Ⅰ-1~Ⅴ-5两个

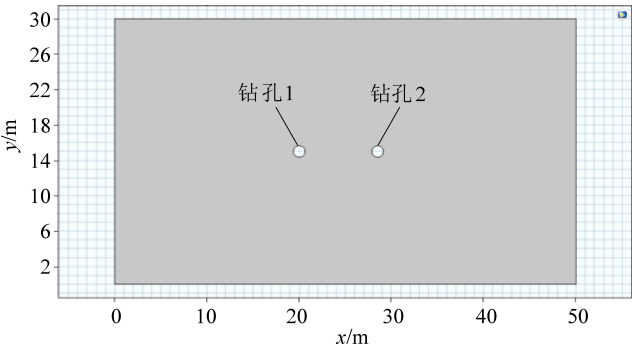


图3 模型Ⅲ-3
Fig.3 Model Ⅲ-3

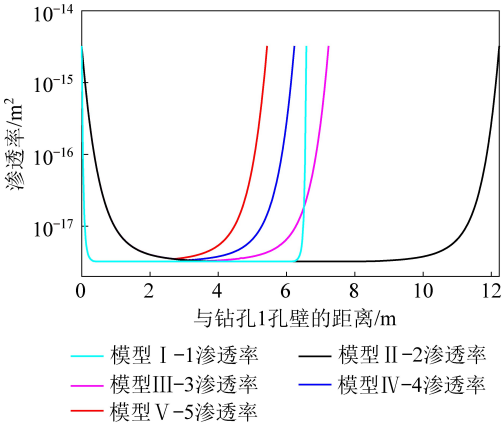


图4 不同模型两个钻孔间煤体的渗透率分布
Fig.4 Permeability distribution of coal between two boreholes with different models

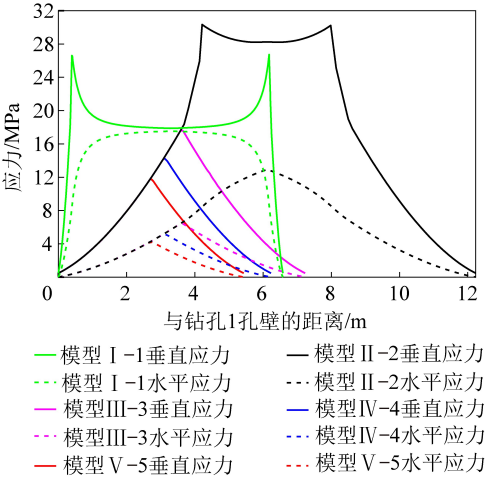


图5 不同模型两个钻孔间煤体的应力分布
Fig.5 Stress distribution of coal between two drill holes in different models

钻孔间煤体的水平应力均低于原始应力,水平应力大小上模型Ⅰ-1>Ⅱ-2>Ⅲ-3>Ⅳ-4>Ⅴ-5,水平应力卸压程度逐渐增大。

可见,随着瓦斯预抽方案中水力冲孔冲煤率的

增大,钻孔间煤体的渗透率显著增大。这是由于水力冲孔冲煤率越大,钻孔间煤体的卸压程度逐渐增大所致,水平应力方向上,钻孔间煤体所受的水平应力逐渐降低,且均低于原始应力;垂直应力方向上,由邻近钻孔煤体处于卸压区、中部煤体处于增压区,逐渐过渡至两钻孔间所有煤体均处于卸压区。这是导致 2.2 节中水力冲孔冲煤率越高的瓦斯预抽方案,煤层瓦斯含量降低幅度越大的根本原因。

3 预抽—水力冲孔—2 次抽采的现场试验

3.1 试验方案

为解决孟津煤矿预抽煤层瓦斯中水力冲孔喷孔严重、易造成瓦斯超限的问题,并对第 2 节的模拟结论进行验证,在 12030 工作面轨道底抽巷 776~806 m 开展了现场试验。由于试验区煤层原始瓦斯含量为 9.25~10.78 m³/t,为保障抽采 120 d 后煤层残余瓦斯含量低于 6 m³/t,根据第 2 节不同水力冲孔冲煤率煤层瓦斯预抽方案下,煤层瓦斯含量的降低值,选取表 1 方案③水力冲孔冲煤率为 3%的煤层瓦斯预抽方案,开展了现场试验。

高地应力和瓦斯压力是造成水力冲孔中出现喷孔和瓦斯异常涌出的根源,因而钻孔预抽一段时间,待钻孔周围瓦斯压力和瓦斯含量有所降低后再实施冲孔作业,利于防治喷孔及瓦斯的异常涌出。利用 2.3 节的模型 I-1,可以得出未实施水力冲孔技术条件下,不同抽采时间时钻孔周围煤体的瓦斯分布,钻孔抽采 10 d 后的瓦斯分布如图 6 所示。由图 6 中可以看出,抽采 10 d 后钻孔周围瓦斯压力和瓦斯含量均发生了显著降低,钻孔 1 m 范围内煤层瓦斯压力(原始瓦斯压力 1.5 MPa)降低幅度超过了 28%,利于防治水力冲孔过程中发生喷孔以及瓦斯超限。

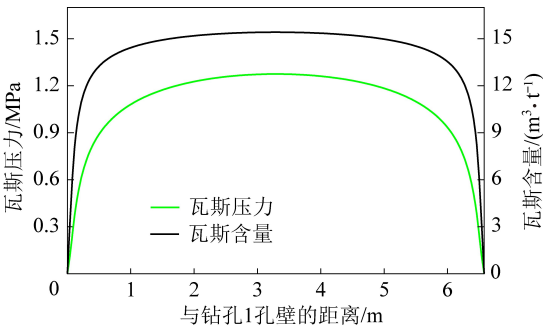


图 6 模型 I-1 钻孔抽采 10 d 后两钻孔间的瓦斯分布
Fig.6 Gas distribution between two boreholes after 10 days of drainage in model I-1

试验区采用预抽—水力冲孔—2 次抽采的工序,即煤层瓦斯预抽方案③穿层钻孔施工完成后,先

预抽一定时间(一周左右)煤层瓦斯,待瓦斯含量和瓦斯压力有所下降后,再对需要冲孔的钻孔进行水力冲孔,同时观测喷孔及瓦斯异常涌出的防治效果。最后利用所有钻孔长时间连续预抽煤层瓦斯,并考察试验区煤层瓦斯的预抽效果。

3.2 试验效果分析

采用预抽—水力冲孔—2 次抽采的工序后,经现场观测,水力冲孔期间钻孔喷孔的次数及强度均明显降低。水力冲孔喷孔率由原来的 1.52 次/孔下降至试验区的 0.71 次/孔,喷出煤量和瓦斯异常涌出次数亦出现明显降低。采用先抽后冲孔的工序,有效降低了水力冲孔期间钻孔的喷孔次数及强度、瓦斯的异常涌出,提高了施工的安全性。

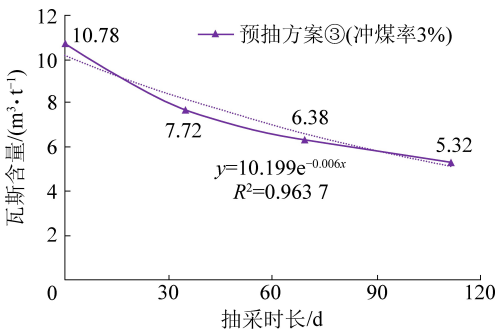


图 7 试验区残余瓦斯含量随抽采时长的变化曲线
Fig. 7 Variation curve of residual gas content with drainage time in test area

此外,试验过程中分别在抽采时长为 35、69 和 111 d 时,测试试验区煤层的残余瓦斯含量,分别为 7.72、6.38 和 5.32 m³/t,试验区煤层残余瓦斯含量随抽采时长的变化曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出,抽采时间越长,煤层的残余瓦斯含量越低,但随着抽采时长的增大,煤层残余瓦斯含量的降低速率有减缓趋势。对图 7 的曲线进行拟合分析,可以得出方案③煤层瓦斯预抽方案下,煤层残余瓦斯含量随抽采时长的变化曲线方程。进而可以计算出采用方案③预抽煤层瓦斯 120 d 后,煤层的残余瓦斯含量为 4.96 m³/t,低于 6 m³/t,验证了第 2 节模拟结果的正确性。

4 现场应用

孟津煤矿 12050 工作面运输巷 0~535 m,实测煤层原始瓦斯含量为 3.99~15.42 m³/t;运输巷 536~953 m,实测煤层原始瓦斯含量为 3.32~8.85 m³/t。为保障抽采 120 d 后煤层残余瓦斯含量低于 6 m³/t,根据第 2 节不同水力冲孔冲煤率煤层瓦斯预抽方案下,煤层瓦斯含量的降低值,运输巷

0~535 m段可采用表 1 水力冲孔冲煤率为 4.3%的煤层瓦斯预抽方案(方案④);运输巷 536~953 m 段可采用表 1 水力冲孔冲煤率为 1.7%的煤层瓦斯预抽方案(方案②)。穿层钻孔均采用预抽—水力冲孔—2 次抽采的工序。

12050 工作面运输巷 0~535 m 控制区域内煤炭储量 9.98 万 t,水力冲孔累计冲出煤量 0.45 万 t,实际冲煤率为 4.5%,累计抽采瓦斯量 36.7 万 m³,实测煤层残余瓦斯含量为 1.86~5.84 m³/t,平均为 4.08 m³/t,煤巷掘进中回风流瓦斯体积分数为 0.02%~0.18%。运输巷 536~953 m 控制区域内煤炭储量 14.08 万 t,水力冲孔累计冲出煤量 0.30 万 t,实际冲煤率为 2.1%,累计抽采瓦斯量 44.1 万 m³,实测残余瓦斯含量为 1.65~4.86 m³/t,平均为 3.94 m³/t,煤巷掘进中回风流瓦斯体积分数为 0.03%~0.19%。水力冲孔过程中钻孔喷孔的次数及强度显著低于未采取“预抽—水力冲孔—2 次抽采工序”的其他工作面水力冲孔钻孔。巷道掘进期间,实测最大钻屑量 S 为 4.3 kg/m,最大钻屑瓦斯解吸指标 Δh_2 为 120 Pa,均符合要求;未遇见冲孔空洞,煤巷支护容易,实现了巷道的安全快速掘进。

运输巷 536~953 m 处实测煤层瓦斯含量由 8.85 m³/t 降至 4.86 m³/t,下降了 3.99 m³/t。运输巷 0~535 m 处实测最大煤层瓦斯含量为 15.42 m³/t,若运输巷 0~535 m 处采用 536~953 m 处的煤层瓦斯预抽方案,将无法在同样预抽期内实现抽采达标。实际上,运输巷 536~953 m 处水力冲孔冲煤率虽然比 0~535 m 的区域减少了 54%,但煤层的最大和平均残余瓦斯含量均低于运输巷 0~535 m 处,回风流最大瓦斯体积分数也基本等于运输巷 0~535 m 处。运输巷 536~953 m 处比 0~535 m 处的工程效率得到了显著提升,大幅减少了水力冲孔钻孔的数量和冲出煤量,大幅降低了工程量,缩短了工期,节省了大量的人力、物力,同样取得了良好的瓦斯预抽效果。12050 工作面煤巷条带煤层瓦斯的安全高效预抽以及运输巷的安全快速掘进,再次证实了根据煤层原始瓦斯含量大小,选择不同水力冲孔冲煤率煤层瓦斯预抽方案的合理性和必要性。

5 结 论

1)不同煤层瓦斯含量赋存条件下,应采用不同水力冲孔冲煤率的煤层瓦斯预抽方案。冲煤率越高,煤层瓦斯含量降低幅度越大,煤层瓦斯预抽效果越好。厚煤区和瓦斯富集区,应加大水力冲孔冲煤率。

2)水力冲孔冲煤率影响煤层瓦斯预抽效果的根源在于,随着水力冲孔冲煤率的增大,钻孔间煤体的水平应力逐渐降低,且均低于原始应力;垂直应力上,由邻近钻孔煤体处于卸压区、中部煤体处于增压区,逐渐过渡至两钻孔间煤体均处于卸压区,从而造成了钻孔间煤体渗透率的显著增大。

3)采用预抽—水力冲孔—2 次抽采的工序,引起水力冲孔前钻孔周围煤体瓦斯含量和瓦斯压力出现了降低,从而减小了水力冲孔时发生喷孔的次数及强度,提高了施工的安全性。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] 李元林,刘 勇,王 沉,等.高瓦斯低透气性煤层深孔预裂爆破增透技术研究及应用[J].中国安全生产科学技术,2020,16(9):71-76.
LI Yuanlin, LIU Yong, WANG Chen, et al. Research and application of deep hole pre - splitting blasting technology for permeability enhancement in high gas and low permeability coal seam [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(9): 71-76.

[3] 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(2):297-322.
WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas out-burst control and protection in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022,47(2):297-322.

[4] 王恩元,汪 皓,刘晓斐,等.水力冲孔孔洞周围煤体地应力和瓦斯时空演化规律[J].煤炭科学技术,2020,48(1):39-45.
WANG Enyuan, WANG Hao, LIU Xiaofei, et al. Spatio temporal evolution of geostress and gas field around hydraulic punching borehole in coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1):39-45.

[5] 曹焱林.水力化技术防治煤与瓦斯突出研究现状及展望[J].煤矿安全,2020,51(10):60-66.
CAO Yaolin. Research status and prospect of coal and gas outburst prevention and control by hydraulic technology[J]. Safety in Coal Mines,2020,51(10):60-66.

[6] 王 亮,廖晓雪,褚 鹏,等.瓦斯抽采穿层钻孔扩造穴卸压增透机理研究[J].煤炭科学技术,2021,49(5):75-82.
WANG Liang, LIAO Xiaoxue, CHU Peng, et al. Study on mechanism of permeability improvement for gas drainage by cross-seam cavitation borehole[J] Coal Science and Technology, 2021, 49(5):75-82.

[7] 陈冬冬,孙四清,张 俭,等.井下定向长钻孔水力压裂煤层增透技术体系与工程实践[J].煤炭科学技术,2020,48(10):84-89.

- CHEN Dongdong, SUN Siqing, ZHANG Jian, *et al.* Technical system and engineering practice of coal seam permeability improvement through underground directional long borehole hydraulic fracturing [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10): 84-89.
- [8] 魏建平,李 波,刘明举,等.水力冲孔消突有效影响半径测定及钻孔参数优化[J].煤炭科学技术,2010,38(5):39-42.
WEI Jianping, LI Bo, LIU Mingju, *et al.* Measurement on effective influence radius of hydraulic flushing borehole to eliminate outburst and borehole parameters optimization[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(5): 39-42.
- [9] 刘彦伟,任培良,夏仕柏,等.水力冲孔措施的卸压增透效果考察分析[J].河南理工大学学报(自然科学版),2009,28(6): 695-699.
LIU Yanwei, REN Peiliang, XIA Shibo, *et al.* Analysis of pressure relief and permeability improvement effect of hydraulic flushing[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2009, 28(6): 695-699.
- [10] 李树刚,杨二豪,林海飞,等.深部开采卸压瓦斯精准抽采体系构建及实践[J].煤炭科学技术,2021,49(5):1-10.
LI Shugang, YANG Erhao, LIN Haifei, *et al.* Construction and practice of accurate gas drainage system for pressure relief gas in deep mining [J] Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 1-10.
- [11] 郝富昌,孙丽娟,左伟芹.考虑流变特性的水力冲孔孔径变化规律及防堵孔技术[J].煤炭学报,2016,41(6):1434-1440.
HAO Fuchang, SUN Lijuan, ZUO Weiqin. Hydraulic flushing aperture variation and anti-blocking technology considering rheological property[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1434-1440.
- [12] 郭献林.新安煤田水力冲孔消突效果研究[D].焦作:河南理工大学,2011.
GUO Xianlin. Research of the effects on outburst elimination of the hydraulic flushing in Xin'an Coal Field[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011.
- [13] 郝富昌,孙丽娟,刘明举.考虑卸压和抽采效果的水力冲孔布孔参数优化研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(5): 756-763.
HAO Fuchang, SUN Lijuan, LIU Mingju. Research on boreholes space optimization of hydraulic flushing considering press relief and gas drainage effect [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(5): 756-763.
- [14] 朱红青,顾北方,靳晓华,等.水力冲孔影响范围数值模拟研究与应用[J].煤炭技术,2014,33(7):65-67.
ZHU Hongqing, GU Beifang, JIN Xiaohua, *et al.* Numerical simulation on effective influence radius of hydraulic borehole flushing [J]. Coal Technology, 2014, 33(7): 65-67.
- [15] 袁德铸,李学臣.低透气性煤层水力冲孔增透合理冲孔煤量的确定[J].煤矿安全,2016,47(9):180-182.
YUAN Dezhu, LI Xuechen. Determination of reasonable punching coal amount through hydraulic flushing permeability increasing in low permeability coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(9): 180-182.
- [16] 李 波,张路路,孙东辉,等.水力冲孔措施研究进展及存在问题分析[J].河南理工大学学报(自然科学版),2016,35(1): 16-22.
LI Bo, ZHANG Lulu, SUN Donghui, *et al.* Hydraulic flushing research progress and its existed problems analysis. [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2016, 35(1): 16-22.
- [17] 宝 坤.薛湖煤矿穿层水力冲孔煤体变形机理研究[D].焦作:河南理工大学,2017.
BAO Kun. Study on coal deformation mechanism of hydraulic borehole flushing passing through floor strata in Xuehu Coal Mine [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2017.
- [18] 王俊铭,刘 擎,宝 坤,等.考虑串孔影响的穿层水力扩孔合理冲煤量研究[J].中国安全生产科学技术,2019,15(1): 93-99.
WANG Junming, LIU Qing, BAO Kun, *et al.* Research on reasonable coal-flushing quantity of perforated hydraulic reaming considering influence of string-hole [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(1): 93-99.
- [19] 刘明举,牟全斌,魏建平,等.新安煤矿瓦斯赋存规律及影响因素探讨[J].煤矿安全,2007(11):60-62.
LIU Mingju, MOU Quanbin, WEI Jianping, *et al.* Discussion on gas occurrence law and influencing factors in Xinan Coal Mine [J]. Safety in Coal Mines, 2007(11): 60-62.