分析研究

文章编号:1671-251X(2019)03-0012-06　　DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17400

潘西煤矿低瓦斯煤层喷孔动力显现规律研究

聂凤祥[1,2]，　郭海峰[3]

(1.中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院，北京　100083；
2.莱芜市万祥矿业有限公司，山东 济南　271100；
3.北京科技大学 土木与资源工程学院，北京　100083)

扫码移动阅读

摘要:为揭示潘西煤矿深部低瓦斯煤层喷孔动力显现规律,在潘西煤矿 6198 工作面对瓦斯含量与采动应力进行了现场测试,并采用 FLAC^{3D}软件对 6198 工作面前方应力分布进行了模拟分析,总结了工作面瓦斯含量和应力分布规律,分析了低瓦斯煤层喷孔动力显现机制。研究结果表明:① 潘西煤矿 6198 工作面整体瓦斯含量偏低,采深越大,瓦斯含量越高。② 受断层影响,工作面前方应力集中系数最大为 1.36。③ 潘西煤矿 6198 工作面低瓦斯煤层喷孔等动力显现现象是高应力作用下煤体破碎、瓦斯压力作用下煤体喷出的过程;煤体释放的内部潜能和瓦斯内能为煤体破碎和移动提供能量,与浅部煤层相比,深部低瓦斯煤层喷孔动力显现所需的瓦斯膨胀能阈值降低。

关键词:煤炭开采；深部开采；低瓦斯煤层；动力显现；喷孔；低指标；瓦斯含量；采动应力

中图分类号:TD712　　文献标志码:A

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20190219.0926.001.html

Research on dynamic appearance regularity of blow-out from drilling hole in low gas coal seam of Panxi Coal Mine

NIE Fengxiang[1,2]，　GUO Haifeng[3]

(1.College of Resources and Safe Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2.Laiwu Wanxiang Mining Co., Ltd., Jinan 271100, China; 3. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract:In order to reveal dynamic appearance regularity of blow-out from drilling hole in deep low gas coal seam of Panxi Coal Mine, field tests of gas content and mining stress were carried out in 6198 working face of Panxi Coal Mine, and simulation analysis of stress distribution in front of 6198 working face was also done by use of FLAC^{3D} software. Distribution regularities of gas content and stress in the working face were studied, and dynamic appearance mechanism of blow-out from drilling hole in low gas coal seam was analyzed. The study results show that gas content in 6198 working face is low in general, and the greater mining depth is, the higher gas content is. Affected by faults, the maximum stress concentration factor in front of the working face is 1.36. Dynamic appearance of blow-out from drilling hole in low gas coal seam in 6198 working face of Panxi Coal Mine is a process of coal body crushing under

收稿日期:2019-01-22;**修回日期**:2019-02-16;**责任编辑**:李明。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801408)。

作者简介:聂凤祥(1965－),男,山东新泰人,高级工程师,博士研究生,研究方向为瓦斯灾害治理,E-mail:niefx65@163.com。

引用格式:聂凤祥,郭海峰.潘西煤矿低瓦斯煤层喷孔动力显现规律研究[J].工矿自动化,2019,45(3):12-17.

NIE Fengxiang,GUO Haifeng. Research on dynamic appearance regularity of blow-out from drilling hole in low gas coal seam of Panxi Coal Mine[J]. Industry and Mine Automation,2019,45(3):12-17.

high stress and then spraying under gas pressure. Internal potential released by coal body and gas internal energy can provide energy for coal body to break and move. Compared with shallow coal seam, threshold of gas expansion energy decreases which causes dynamic appearance of blow-out from drilling hole in deep low gas coal seam.

Key words: coal mining; deep mining; low gas coal seam; dynamic appearance; blow-out from drilling hole; low index; gas content; mining stress

0　引言

随着国民经济的发展,中国对能源的需求日益增加,煤炭开采深度以平均每年 10～25 m 的速度递增,煤岩动力灾害时有发生,严重威胁矿井安全生产。目前,中国开采深度超过 1 000 m 的矿井达 47 座,最大开采深度达 1 500 m[1]。深部煤层赋存条件复杂,特别是高应力条件下,煤岩流变性增强,表现出与浅部煤层不同的变形破坏特征,煤岩动力灾害机制发生变化,致灾门槛降低,无法应用浅部开采的灾害判别方法。部分在浅部煤层尚未达到灾害发生临界值的矿井,进入深部开采后灾害频发,对深部开采矿井的安全生产造成重大威胁。深部开采条件下,煤岩动力灾害变得更加复杂,预测和防治难度更大[2-5]。

针对煤炭深部开采过程中低指标灾害的机制及防治技术,国内学者进行了大量研究。谢和平等[6]认为深部岩石力学行为明显区别于浅部,加之赋存环境的复杂性,致使深部开采中发生的灾害比浅部更多,强度更大,致灾机理更加复杂。何满潮等[7-8]认为随着煤层埋深增大,强度低的围岩塑性会增强;浅部的中硬岩进入深部后会转化为软岩,表现出高应力、大变形的特征。赵旭生[9]从概念、危害及产生原因等方面对深部开采时的“低指标突出现象”进行了分析,并提出了相应的对策。崔树江等[10]针对深部矿井低指标突出灾害频发的现象,提出了一种较为简便的预测指标选择和临界值确定方法。张建国[11]针对典型的低指标煤与瓦斯突出现象,基于地质构造的形成机制和空间分布特征,研究了地质构造对煤与瓦斯突出的控制作用。李云波等[12]从区域构造演化、“三软”煤层分布及瓦斯内能释放等方面探讨了低临界值瓦斯动力现象发生的机理及地质控制作用。

新汶矿业集团有限责任公司潘西煤矿为深部低瓦斯矿井,煤层瓦斯压力普遍低于 0.2 MPa,但该矿 6198 工作面在回采过程中多次出现喷孔等现象,造成瓦斯超限,严重影响矿井的安全高效生产。由于以往对瓦斯动力显现的研究主要集中在高瓦斯煤层,对于深部低瓦斯煤层喷孔现象的研究尚不多见,对于低瓦斯煤层特别是深部开采条件下的低瓦斯煤层动力显现规律尚无定论,所以无法有针对性地制定低瓦斯煤层动力显现治理措施。目前,该矿主要基于浅部开采的经验进行治理,效果欠佳。

深部煤岩动力现象主要受应力、瓦斯等因素影响。潘西煤矿 6198 工作面埋深超过 1 200 m,应力明显高于浅部开采煤层。回采过程中,不同区域的瓦斯涌出量变化较大,这可能与煤层瓦斯赋存情况有关。基于此,本文通过在 6198 工作面布置瓦斯含量取样点和应力测点,测试研究煤层的瓦斯分布特征与应力的演化特征,并结合煤体变形破坏的能量变化过程,研究该矿瓦斯喷孔特征,以期揭示该矿深部低瓦斯煤层喷孔动力显现规律,并提出有针对性的防治措施。

1　矿井概况

1.1　工程地质

潘西煤矿位于山东省济南市莱芜区,后六采区最大采深已达 1 350 m,矿压显现较大,巷道变形严重。后六采区现开采 19 号煤层,煤层倾角为 26°;厚度为 0.74～4.05 m,平均厚度为 2.17 m;含夹矸 1～3 层,夹矸厚度为 0.10～1.06 m,平均厚度为 0.23 m,结构较复杂,夹矸厚度由西向东逐渐变大。煤层以暗煤为主,镜煤和亮煤次之,层理节理发育,硬度小,较松散,断口呈参差状或贝壳状,属半亮型煤。煤的普氏系数为 0.506～0.513。由于煤层应力较大,煤层在地应力作用下发生破坏,导致钻孔变形较大,钻孔内煤体破坏后被瓦斯带出而发生喷孔的风险大。矿井地质构造复杂,工作面受断层影响严重,煤体周围空间的地应力分布不均匀,在断层附近形成较大的应力集中区。

1.2　喷孔动力显现

在潘西煤矿后六采区 6198 工作面进行瓦斯含量测试过程中,取样点钻孔排出大量煤粉,期间一直伴随卡钻、吸钻等现象,钻进速度缓慢,严重影响施工进度,随后发生喷孔现象,颗粒极小的碎煤和煤粉被瓦斯不断从钻孔深部带出,但该区域实测瓦斯含

量仅有 1.88 m^3/t。

在 6198 工作面运输巷与石门连接处进行瓦斯压力测试时，取样点在打钻过程中出现卡钻、抱钻等现象，由于应力较大，钻机轴部发生断裂，导致井下瓦斯解吸试验无法进行。

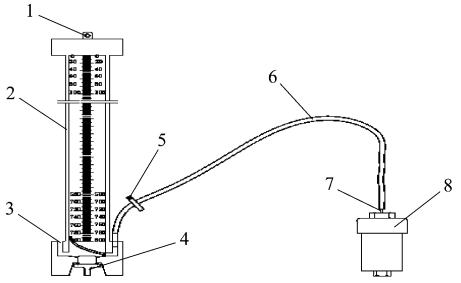
在－1100 辅助运输巷进行瓦斯含量测试时，取样点在钻孔施工过程中出现卡钻、顶钻等现象，煤层顶板频繁出现动力现象，且声音较大。钻孔钻进速度缓慢，排出的煤粉量巨大，当钻机钻进 8 m 时发生喷孔现象，再继续钻进过程中出现响煤炮现象，巷道瞬间布满粉尘和煤尘，能见度极低，但实际测试该区域的瓦斯含量仅有 2.13 m^3/t。

以上均是在煤层瓦斯含量较低的情况下发生的喷孔和其他动力显现现象，即低指标现象。这在以往浅部开采时较为少见。为研究低指标喷孔的发生机制，深入研究了 6198 工作面的瓦斯与应力分布情况。

2 测试方案

为分析潘西煤矿 6198 工作面喷孔动力显现规律，本文对瓦斯含量和工作面的应力分布情况进行了现场测试。其中，煤层原始瓦斯含量测试根据 GB/T 23250—2009《煤层瓦斯含量井下直接测定方法》进行。

瓦斯含量测试方案：选择无地质构造区域施工顺层钻孔取样，钻孔长度为 20 m，将取出的煤样迅速放入煤样罐中，用排水法测试井下瓦斯解吸量，现场记录观测数据，直到液面不再下降，现场解吸结束。井下瓦斯解吸测试如图 1 所示。



1－吊环；2－量管；3－排水口；4－底塞；5－弹簧夹；6－排气管；7－阀门；8－煤样罐

图 1 井下瓦斯解吸测试

Fig. 1 Underground gas desorption test

应力测试方案：在 6198 工作面进风巷，每隔 20 m 施工深度为 14 m 的应力监测钻孔。应力传感器布置如图 2 所示。为了准确测得工作面前方采动应力分布规律，选择效果较好的 2 个传感器，在传感器与工作面距离逐渐缩短的过程中监测应力分布状况，研究采动应力分布规律。

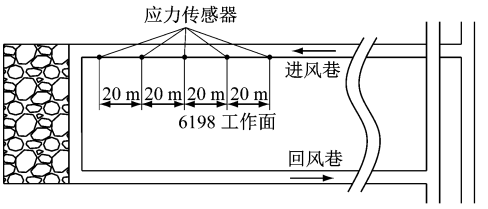


图 2 应力传感器布置

Fig. 2 Layout of stress sensors

3 测试结果分析

3.1 6198 工作面瓦斯分布规律

井下瓦斯含量取样点分布如图 3 所示。根据井下瓦斯解吸量和实验室瓦斯解吸量，得到 6198 工作面煤层不同区域瓦斯含量，见表 1。

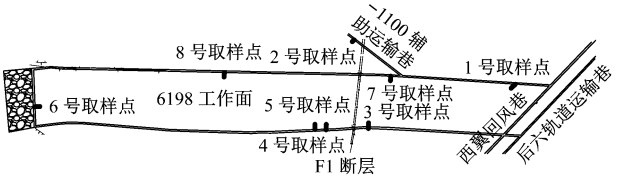


图 3 井下瓦斯含量取样点分布

Fig. 3 Distribution of underground gas content sampling points

表 1 取样点瓦斯含量

Table 1 Gas content in sampling points $m^3 \cdot t^{-1}$

取样点	瓦斯含量	取样点	瓦斯含量
1 号取样点	1.89	5 号取样点	1.67
2 号取样点	2.13	6 号取样点	1.88
3 号取样点	1.67	7 号取样点	1.47
4 号取样点	1.78	8 号取样点	1.64

由表 1 可知，6198 工作面平均煤层瓦斯含量为 1.71 m^3/t（多取样点平均值），而－1100 辅助运输巷（2 号取样点处）煤层瓦斯含量为 2.13 m^3/t，表明随着煤层埋深增加，煤层瓦斯含量有增大趋势。这符合煤层瓦斯赋存的一般规律。6198 工作面煤层瓦斯含量较小，但取样过程中瓦斯动力显现频发，如喷孔、响煤炮等。发生卡钻、抱钻、喷孔及响煤炮现象的 1，2，6 号取样点煤层瓦斯含量分别为 1.89，2.13，1.88 m^3/t，较其他取样点瓦斯含量大。

3.2 工作面前方应力分布规律

文献[13-15]研究表明：受采动影响，煤层原始应力会出现转移。煤层回采前，工作面煤体受 3 个方向的应力，达到应力平衡状态；工作面向前方推进过程中，原有的应力平衡被打破，应力重新分布，最终达到新的平衡。在这种动态平衡过程中，首先在煤壁附近形成较高的集中应力，当集中应力达到煤

体的屈服强度后,这部分煤体首先发生屈服变形,集中应力向煤体深部转移,达到新的应力平衡后,工作面形成卸压区、应力集中区和原始应力区。

随着 6198 工作面不断向前推进,得到工作面前方应力分布曲线,如图 4 所示。监测的应力均为采动应力,其大小为相对值。

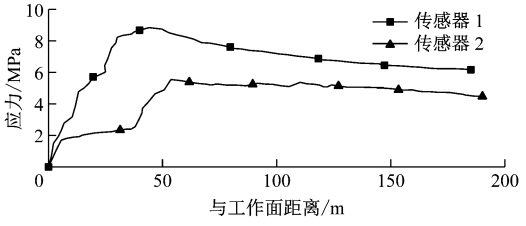


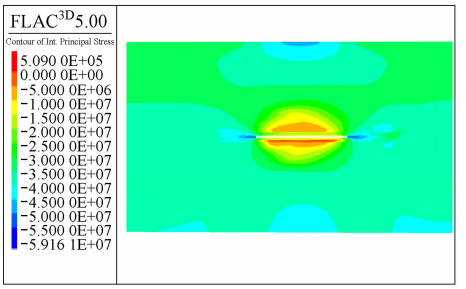
图 4　工作面前方应力分布曲线

Fig. 4　Stress distribution curves in front of working face

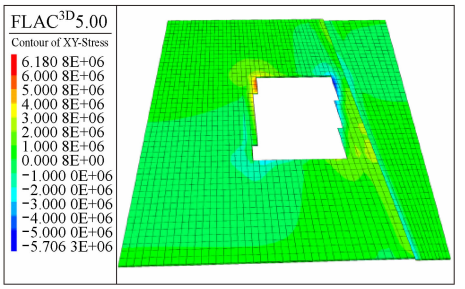
从图 4 可看出,传感器 1 和传感器 2 所测应力具有相同的变化规律:沿工作面推进方向,应力随着与工作面距离的增加先迅速增大,达到峰值后开始缓慢下降,最后到达原始应力区,应力降到原始应力。由于工作面前方处于卸压区,煤体破碎,部分弹性能得到释放,使集中应力向深部转移,所以应力较小。随着与工作面距离的增加,应力逐渐增大,传感器 1 距工作面前方 44 m 时,峰值应力达到 8.84 MPa,应力集中系数为 1.36,然后应力开始缓慢下降,传感器 1 距工作面前方 120 m 左右时,应力降至原始应力。传感器 2 距工作面前方 54 m 时,峰值应力达到 5.55 MPa,应力集中系数为 1.16,然后应力开始缓慢下降,距工作面前方 130 m 左右时,应力基本降至原始应力。

由此可得出 6198 工作面前方的应力分布规律:峰值应力在工作面前方 40～60 m 处;在该距离之前,随着与工作面距离的增加,应力逐渐增大;达到峰值应力之后,应力开始缓慢下降,在工作面前方 120～130 m 处到达原始应力区。

现场测试得到的工作面采动应力均为相对值,并非真实值。为了更准确地得到研究区域的采动应力,根据潘西煤矿 6198 工作面的煤岩赋存条件,应用 FLAC^{3D}软件建立了工作面计算模型。模型尺寸为 500 m×500 m×300 m(长×宽×高),煤层及其顶底板等岩层均按实际厚度进行模拟。上部 1 200 m 岩层采用均布载荷代替,模型计算采用 Mohr-Coulomb 准则,根据地质报告等确定岩层的物理力学参数。模型底面限制垂直移动,上边界施加均匀载荷 30 MPa,以模拟上覆岩层自重,模型侧边界压力均为 30 MPa,模型初始位移和速度均按零计算。以初始应力 25 MPa 对采动影响下 6198 工作面前方应力分布进行分析,结果如图 5 所示。



(a) 各煤岩层应力分布



(b) 煤层应力分布

图 5　采动影响下工作面前方应力分布

Fig. 5　Stress distribution in front of working face under mining influence

从图 5 可看出,煤层在回采过程中,不同位置的应力各不相同:受采动影响较小的区域,应力为 31.3 MPa;受采动影响较大的区域,应力高达 61.0 MPa,约为原始应力的 1.95 倍。受采动影响后,煤岩体原始应力平衡被打破,采动应力体系开始寻求新的平衡,重新分布的应力在工作面前方出现应力集中区。随着回采距离的增大,采动应力一直处于变化的过程,当重新分布的应力超过煤岩体屈服强度时,工作面周围的煤岩体发生破坏。

研究结果表明,工作面前方存在卸压区、应力集中区和原始应力区。在卸压区,煤体已发生屈服,内部形成大量裂隙,煤体已大量破碎,其内部赋存的大部分弹性能得到释放,承载能力降低,煤体应力向深处转移;在工作面前方 40～60 m 区域,由卸压区进入应力集中区,应力越来越高,且达到峰值,此处煤体变形破裂过程强烈,煤体承受最大应力;当到达工作面前方 120～130 m 之后,煤体应力越过应力集中区,进入原始应力区。

4　低瓦斯煤层喷孔动力显现机制分析

由表 1 可知,6198 工作面煤层瓦斯含量不大,属于瓦斯含量较低的煤层,但在打钻过程中发生喷孔、响煤炮等现象,属于低指标动力显现煤层。其原因在于,潘西煤矿属于深部矿井,工作面埋深普遍超过 1 200 m,垂向应力超过 30 MPa,煤体在高应力环

境下发生流变变形，煤体强度远低于周围载荷水平，煤层破坏严重，煤质多呈粉末状，手捻即可粉碎。因此，煤层回采前，工作面煤体即处于稳态向非稳态的临界状态，动力现象发生的阈值比常规情况下低。煤矿井下巷道、采掘工作面等处煤岩体在地应力、瓦斯压力共同作用下产生变形，微破裂不断发生、发展。当煤岩体变形达到临界状态时，遇到打钻工艺扰动后，煤岩体变形失稳，蓄能的弹性变形区煤岩体释放能量，发生喷孔现象；当蓄能的弹性变形区煤岩体与储存的瓦斯同时或先后释放能量时，发生应力-瓦斯作用的动力灾害。

喷孔现象是煤体在内部潜能和瓦斯内能共同作用下，将煤体进行破碎并从煤层钻孔中抛出的过程。喷孔作为动力显现现象，其发生过程遵守能量守恒定律，即喷孔前后总能量不变。在喷孔过程中，煤体内部潜能和煤体中集聚的瓦斯内能为煤体破碎和移动提供动力，这些能量分别为煤体的破碎和抛出提供能量(即破碎功和抛出功)。

含瓦斯煤的破坏由煤体弹性潜能和瓦斯膨胀能共同提供动力。当煤体物理参数和破碎程度一定时，采动应力越大，煤层可释放的潜能越大。

浅部矿井地应力较小，煤体完整程度较高，煤体破碎需要瓦斯做功，消耗一定量的瓦斯膨胀能，发生喷孔现象需要有较大的瓦斯压力。当开采延伸至深部，煤体处于较高的应力作用下，内部潜能较大，能为煤体的破碎提供更多动力。一旦受到较大扰动，如采掘速度加快或遇到断层，煤体受到较大的不均衡力后破碎充分，只需很少的瓦斯膨胀能就可将煤体喷出，发生喷孔等动力显现现象。深部开采条件下低瓦斯煤层喷孔发生过程如图 6 所示。

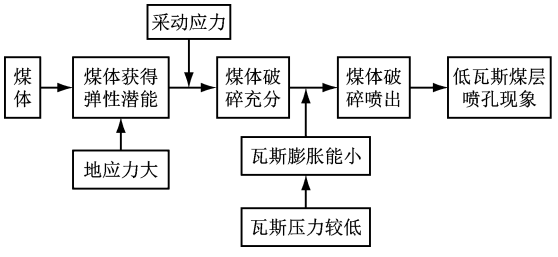


图 6 低瓦斯煤层喷孔发生过程

Fig. 6 Occurrence process of blow-out from drilling hole in low gas coal seam

研究表明，潘西煤矿 6198 工作面低瓦斯煤层喷孔现象的本质为构造应力和采动应力影响下煤体弹性潜能增大，使煤体充分破碎，从而降低了动力显现现象所需的瓦斯膨胀能阈值，导致煤层在较少的瓦斯内能参与下发生动力显现现象。

5 结论

(1) 潘西煤矿 6198 工作面整体瓦斯含量较低，且采深越大，瓦斯含量越高。

(2) 现场实测表明，潘西煤矿 6198 工作面前方应力的分布状态与理论一致，存在卸压区、应力集中区和原始应力区，受断层影响，最大应力集中系数为 1.36。

(3) 潘西煤矿 6198 工作面低瓦斯煤层喷孔等动力显现现象是高应力作用下煤体破碎、瓦斯压力作用下煤体从钻孔喷出的过程。煤体释放的内部潜能和瓦斯内能为煤体破碎和移动提供能量，与浅部煤层相比，深部低瓦斯煤层喷孔动力显现所需的瓦斯膨胀能阈值降低。

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] 潘一山. 煤与瓦斯突出、冲击地压复合动力灾害一体化研究[J]. 煤炭学报，2016，41(1)：105-112.
PAN Yishan. Integrated study on compound dynamic disaster of coal-gas outburst and rockburst [J]. Journal of China Coal Society，2016，41(1)：105-112.

[3] 姜福兴，杨光宇，魏全德，等. 煤矿复合动力灾害危险性实时预警平台研究与展望[J]. 煤炭学报，2018，43(2)：333-339.
JIANG Fuxing，YANG Guangyu，WEI Quande，et al. Study and prospect on coal mine composite dynamic disaster real-time prewarning platform[J]. Journal of China Coal Society，2018，43(2)：333-339.

[4] 朱丽媛，李忠华，刘瀚琦. 深部开采煤岩瓦斯动力灾害统一发生机制及监测技术[J]. 安全与环境学报，2017，17(3)：937-942.
ZHU Liyuan，LI Zhonghua，LIU Hanqi. Consequential mechanism and the monitoring technique for the gassy coal rock dynamics disaster in the deep mining [J]. Journal of Safety and Environment，2017，17(3)：937-942.

[5] 舒龙勇，齐庆新，王凯，等. 煤矿深部开采卸荷消能与煤岩介质属性改造协同防突机理[J]. 煤炭学报，2018，43(11)：3023-3032.
SHU Longyong，QI Qingxin，WANG Kai，et al. Coordinated prevention mechanism of pressure-relief and coal and rock properties modification for coal and gas outburst in deep mining of coal mines[J]. Journal

of China Coal Society,2018,43(11):3023-3032.

[6] 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.

[7] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(16):2803-2813.

[8] 何满潮,彭涛.高应力软岩的工程地质特征及变形力学机制[J].矿山压力与顶板管理,1995(2):8-11.
HE Manchao, PENG Tao. Engineering geological characteristics and deformation mechanics mechanism of high stress soft rock[J]. Ground Pressure and Strata Control,1995(2):8-11.

[9] 赵旭生."低指标突出现象"原因分析及防范对策[J].煤矿安全,2007,38(5):67-69.
ZHAO Xusheng. Cause analysis and preventive measures of "low index prominence"[J]. Safety in Coal Mines,2007,38(5):67-69.

[10] 崔树江,许建斌,王吉生.低指标突出问题在突出危险性预测中的分析[J].华北科技学院学报,2010,7(4):30-32.
CUI Shujiang,XU Jianbin,WANG Jisheng. Analysis of low index outburst problem in outburst risk prediction[J]. Journal of North China University of Science and Technology,2010,7(4):30-32.

[11] 张建国.平顶山矿区构造环境对煤与瓦斯突出的控制作用[J].采矿与安全工程学报,2013,30(3):432-436.
ZHANG Jianguo. Control effect of structure environment to coal and gas outburst in Pingdingshan mining area [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2013,30(3):432-436.

[12] 李云波,姜波,张玉贵.新密矿区低临界值瓦斯动力现象及机理[J].煤田地质与勘探,2015,43(6):1-7.
LI Yunbo,JIANG Bo,ZHANG Yugui. Low-threshold coal and gas outburst dynamic phenomenon and mechanism in Xinmi coal mining area [J]. Coal Geology & Exploration,2015,43(6):1-7.

[13] 钱鸣高,刘听成.矿山压力及其控制[M].北京:煤炭工业出版社,1999.

[14] 刘晓斐,王恩元,何学秋,等.回采工作面应力分布的电磁辐射规律[J].煤炭学报,2007,32(10):1019-1022.
LIU Xiaofei, WANG Enyuan, HE Xueqiu, et al. Electromagnetic radiation laws of the stress distribution in working face[J]. Journal of China Coal Society,2007,32(10):1019-1022.

[15] 杨贺,邱黎明,汪皓,等.远距离下保护层开采上覆煤岩层采动应力场数值模拟研究[J].工矿自动化,2017,43(6):37-41.
YANG He, QIU Liming, WANG Hao, et al. Numerical simulation research on mining stress field of overlying coal-rock seam under far distance lower protective seam mining [J]. Industry and Mine Automation,2017,43(6):37-41.