

1 文章编号: 1001-1986(2012)06-0034-05

唐山矿区构造应力场特征及其对冲击地压的影响

宋佩德¹, 朱绍军¹, 潘结南²

(1. 河南省煤田地质局一队, 河南 新郑 451150;
2. 河南理工大学资源环境学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 河北唐山矿冲击地压的发生除了受开采技术条件、煤层顶底板岩石学特征等因素影响外, 主要受赋存环境的影响, 其中地应力条件是一个重要的影响因素。以唐山矿构造应力分布规律为背景, 对不同水平构造应力条件下回采工作面煤层及其顶底板围岩的三维场进行了数值分析, 系统研究了构造应力对煤层及其顶底板围岩的冲击地压的影响。结果表明, 在煤矿开采过程中, 高水平构造应力对采区煤层及其顶底板围岩的应力场和能量场的分布规律具有重要影响。高构造应力条件下, 煤层及其顶底板围岩中的高水平应力为冲击地压的发生提供了力源条件, 而在高地应力环境下所积聚的大量弹性应变能为冲击地压的发生提供了能量条件。

关键词: 构造应力; 冲击倾向性; 冲击地压; 数值分析; 弹性应变能

中图分类号: TD324 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2012.06.008

Tectonic stress and its influence on rock burst in Tangshan mining area

SONG Peide¹, ZHU Shaojun², PAN Jienan²

(1. The First Team of Henan Coal Geology Bureau, Xinzheng 451150, China;
2. School of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Occurrence of rock burst in Tangshan mining area is not only controlled by mining conditions, roof controlling methods and lithologic characters of roof and floor, but also influenced by the environmental factors such as tectonic stress, ground water and so on. Among them, tectonic stress is one of the important factors to influence the potential of coal and rock burst during coal mining. Based on the field data of geological structures and occurrences of rock burst in Tangshan mining area, three-dimensional fields in coal bed and its surrounding rock were modeled and analyzed under different tectonic stress conditions by using numerical modeling software FLAC^{3D}. Results show that tectonic stress has obvious influence on the distribution of stress field and energy field in coal bed and its surrounding rock. Under high structural stress conditions, high horizontal stress is the source of force and elastic strain energy stored in coal bed and its surrounding rock is the source of energy to induce to rock burst during coal mining.

Key words: tectonic stress; bursting potential; rock burst; numerical study; elastic strain energy

冲击地压是一种力学过程十分复杂的动力现象, 是煤矿重大突发灾害之一。冲击地压是指在一定地应力作用下, 由于受采动影响, 煤(岩)体力学系统局部失稳时, 煤(岩)体中积聚的大量弹性变形能以突然、急剧、猛烈的形式释放, 并导致煤(岩)体瞬间破坏, 伴随大量煤(岩)粉的突出, 造成矿山井巷的破坏及人员伤亡^[1-3]。

煤矿开采过程中矿压分布规律和顶板岩体的变形、破坏过程历来是采矿界研究的重点和难点课题^[4], 也是研究矿井冲击地压、矿震等矿井动力现象必须

关注的热点问题。工作面开采过程中, 煤层及其顶底板围岩的冲击倾向性是由煤层及其顶底板围岩的应力场、位移场和能量场的分布规律决定的。而煤系岩石的变形、破坏特征及能量变化规律, 除受煤系岩石本身的岩石学特征影响外^[5-8], 主要受赋存环境的影响, 其中地应力条件是一个重要影响因素。随着煤矿开采向深部推进, 深部煤岩体应力愈高, 高应力所导致的矿压显现、冲击地压现象发生频率更高、强度更大、危害程度更加严重, 已成为制约深部矿井开采的重要因素之一^[9-10]。因此, 在进行回采工

收稿日期: 2012-04-16

基金项目: 河南省重点科技攻关项目(082102290017); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目(2009GGJS-038)

作者简介: 宋佩德(1963—), 男, 甘肃山丹人, 高级工程师, 从事煤田地质工作。

作面煤岩冲击倾向性分析和评价过程中, 必须考虑地应力条件对采面应力场和能量场的影响。河北唐山矿是我国冲击地压发生较为严重的矿区之一, 唐山矿冲击地压事故主要发生在 5 煤、8-9 煤合区煤层的开采中。自 1964 年 6 月 7 日发生第一次冲击地压以来, 随着煤矿开采深度和广度的增加, 冲击地压日趋严重。据统计已发生了 90 余次, 其中有人人员伤亡和破坏的 11 次, 给生产和安全造成极大威胁^[11]。因此, 详细分析唐山矿区矿压的显现规律和冲击地压的发生情况, 系统研究唐山矿区构造地质特征和应力场分布规律, 深入探讨唐山矿构造应力场对深部煤层开采冲击地压危险性的影响, 从而为唐山矿深部开采冲击地压有效预测和防治提供科学依据。

工作面开采过程中煤层及其顶底板围岩的应力、应变和能量的动态演化过程是一种非常复杂的非线性力学物理过程。利用目前一般的力学解析方法很难求解其复杂的全过程。由于煤层及其顶底板围岩内部的复杂性和观察条件的限制, 顶板岩体的三维场的实际观测资料较少。而数值模拟计算技术作为力学分析工具已被广泛应用于理论分析与工程应用^[12-18], 因此, 在对回采工作面煤层及其围岩进行冲击倾向性评价和冲击地压危险性预测时, 对煤层采动过程中地应力条件对采面应力场分布特征和能量场演化规律影响进行系统的理论分析和数值模拟研究就显得尤为重要。

1 构造应力场特征

开平煤田位于中国东部纬向构造体系与华夏构造体系的复合构造带内。开平向斜总的延伸为 NE 方向, 并向 SW 方向倾伏。从酒里村以北至古冶村, 轴向转为 NEE, 古冶村以东则近 EW 方向延展。该向斜的西北翼, 地层产状急陡, 常呈直立甚至倒转, 并伴随有较多的压性(或压扭性)断裂, 而东南翼则地层产状平缓(一般为几度至十几度), 构造简单。向斜轴偏向于西北翼一侧, 为一轴面向 NW 方向倾斜的不对称向斜。向斜北端, 其轴向转为东西方向, 与东西向构造有联合的趋势。唐山煤矿隶属于开平煤田, 位于开平向斜西北翼的西南端, 为半掩盖式矿井, 位于中央区井口北侧的煤层出露于地表, 向西向南方向逐渐被第四纪沉积物所覆盖, 地层走向为北东、南西。唐山断裂带是区内 1 条与褶皱相伴生的复杂断裂构造带, 主要展布于所在背斜的东南翼和开平向斜的西北翼, 由一系列相互平行的 NNE-NE 向断裂组成, 控制着本区的地震与地质构造活动。

张宏伟等在开滦井田荆各庄矿、唐山矿、钱家

营矿和范各庄矿进行了原岩应力测量(表 1、表 2)。开滦矿区最大主应力范围为 27.4~34.3 MPa, 方位角 131°~148°; 最小主应力范围为 12~18 MPa, 方位角 41°~53°。说明开滦矿区原岩应力是以水平压应力为主导, 它与工程地质调查和巷道变形调查结果是吻合的。设岩体平均容重为 27 kN/m³, 则最大水平主应力与自重压力(γH , γ 为岩体容重, H 为埋深)的比值为 1.5~2.4, 可见矿区内存在较大的构造应力。唐山矿实测最大主应力值 29~33 MPa, 方位角 131°~148°, 说明唐山矿属水平构造应力场。在构造应力场作用下, 会使巷道顶底板发生剪切破坏, 继而出现岩层错动和底板岩层的膨胀, 造成围岩变形和发生冲击地压现象, 这已被唐山矿的生产实践所证实。如南翼 11 水平运输大巷, 其巷道走向与最大水平主应力方向近于垂直, 该巷道为砌碛支护, 在构造应力作用下, 顶底板岩体受到剪切破坏造成碛顶岩体破碎, 巷道底鼓严重, 并产生局部冒顶堵塞运输大巷。又如南翼 5251 工作面风道, 顶板较为完整, 底鼓达 0.8 m, 两帮煤壁破碎, 其深度达 0.4~0.8 m, 时常有板炮发生(小型冲击地压)。1998 年 8 月 9 日, 铁二区 T2155 工作面, 采至向斜轴部时, 由于构造应力较大, 发生一次冲击地压, 工作面运输机被掀起 0.2 m。南翼 5287N 工作面位于唐山矿 F4 号大断层附近, 构造应力集中, 加之顶板为巨厚的中细砂岩, 十分坚硬, 在构造应力和垂直应力的作用下, 顶板巨厚砂岩中积蓄了大量的弹性应变能, 在开采过程中发生过一次较大规模的冲击地压, 造成了较为严重的破坏后果。

表 1 开滦矿区原岩应力值测量结果*

Table 1 The measured ground stress in Kailuan coal field

应力类别	应力值/MPa	方位角/(°)	倾角/(°)
σ_1	27.4~34.3	131~148	3~4
σ_2	12.8~20	58~78	
σ_3	12~18	41~53	29.5~31.7

表 2 唐山矿区原岩应力值测量结果*

Table 2 The measured ground stress in Tangshan mining area

测点位置	测点深度/m	岩性	主应力值 /MPa		方位角 /(°)	倾角 /(°)
801 大巷	830	细砂岩	σ_1	29.5	131	2.8
			σ_2	21.3		78
			σ_3	12	41	11.2
801 绕道	830	中砂岩	σ_1	33.3	148	8.7
			σ_2	20.2		58.5
			σ_3	18.5	53	29.9

*开滦矿区应力测量与构造应力场课题鉴定报告, 张宏伟等, 1998。

根据唐山矿多年的井下观测,巷道走向和回采推进方向与水平主应力方向平行或其夹角为锐角的巷道和工作面,顶底板稳定性较好,其变形破坏幅度小,发生冲击地压的可能性也小,而与水平主应力方向近于垂直的巷道,其变形破坏程度大,在局部构造应力较集中的区域,发生冲击地压的可能性较大。

2 不同构造应力条件下采面冲击地压的数值分析

2.1 计算模型与力学参数

为了分析构造应力对煤层及其顶底板围岩冲击地压的影响,特建立了 5 个模型,即初始水平应力场分别为 0 MPa、10 MPa、20 MPa、30 MPa 和 40 MPa,用以进行对比分析。计算模型边界条件确定如下。

a. 模型前后和左右 4 侧施加水平方向的约束,

即边界水平速度为零,只允许边界节点沿垂直方向移动。

b. 模型底部为固定边界,即底部边界节点水平、垂直速度均为零。

c. 模型的 X 方向水平初始应力场分别为 0 MPa、10 MPa、20 MPa、30 MPa 和 40 MPa。

d. 模型的顶部施加 $\sigma_z = \gamma H = 0.027 \times 650 = 17.55$ MPa 的垂直应力作用在上部边界上。

数值模拟采用的软件为美国 Itasca Consulting Goup Inc 开发的三维快速拉格朗日分析程序 FLAC-3D(Three Dimensional Fast Lagrangian Analysis of Continua),该程序能较好地模拟地质材料在达到强度极限或屈服极限时发生的破坏或塑性流动的力学行为,特别适用于分析渐进破坏和失稳以及模拟大变形。模型的基本力学参数见表 3。

表 3 模型的计算力学参数

Table 3 Mechanical parameters of models

岩性	容重/(g·cm ⁻³)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)	粘聚力/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
砂质泥岩	2.63	116.68	2.2	36	7.11	22.14	0.178
灰色中粗粒石英砂岩	2.72	143	6.91	31	14	28	0.28
中粒石英砂岩	2.68	103.2	10.1	36.72	13	26.7	0.22
煤	1.39	18	2.31	31.81	5.09	4.5	0.32
深灰色泥岩	2.52	76.5	4.7	38.4	7	16	0.34
粉细砂岩	2.76	101.3	6.66	36.49	18	22	0.2
砂质泥岩	2.56	94.54	5.2	37	6.33	17	0.3

2.2 构造应力对煤层及顶底板围岩应力场分布的影响

构造应力对煤层及其顶底板围岩应力场分布特征的影响非常明显。图 1 为工作面推进 10 m 后,不同构造应力条件下煤层顶板、煤层及煤层底板沿工作面走向(X 方向)水平主应力分布图,从图中可以看出,随着构造应力的增加,煤层及其顶底板围岩的水平主应力都得到显著提高,但其变化特征各有差异。

从图 1a 中煤层顶板水平主应力分布特征与构造

应力的关系可以看出,当工作面推进 10 m 后,采空区顶板水平主应力随构造应力的增大而显著增加,当构造应力为零时,顶板拱顶处 X 方向水平主应力值为 3.15 MPa,低于工作面前方顶板中的 X 方向最大水平应力值(6.09 MPa);随着构造应力的增加,顶板拱顶处水平应力逐渐增加,当构造应力为 20 MPa 时,顶板拱顶处的 X 方向水平主应力值为 27.7 MPa,高于工作面前方顶板中的 X 方向最大水平应力值(25.7 MPa)。也就是说,随着构造应力的增加,顶板拱

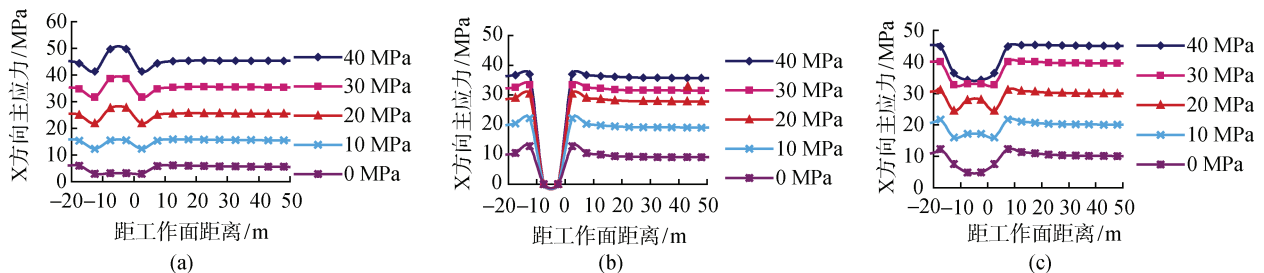


图 1 不同构造应力下煤层及其围岩中 X 方向水平主应力沿工作面走向分布图

Fig. 1 Horizontal stress distribution of coal seams and their surrounding rocks along the strike of working face with different confining pressures

a—煤层顶板; b—煤层; c—煤层底板

顶在 X 方向水平侧向应力的作用下, 顶板拱顶处水平应力集中程度逐渐增加, 当应力超过其极限强度时, 就会发生剪切破坏, 如当构造应力为 40 MPa 时, 顶板拱顶处的 X 方向水平应力达 49.8 MPa, 已经发生了剪切破坏。构造应力对煤层中 X 方向水平主应力的影响也表现为(图 1b): 随构造应力的增加, 煤层中 X 方向水平主应力逐渐增加, 但应力集中系数逐渐减小, 且最大水平主应力出现在工作面前方 3~5 m 处。煤层底板中 X 方向最大水平主应力出现在工作面前方 5~10 m 处(图 1c), 但随着构造应力的增加, 应力集中区有向前推进的趋势, 如当构造应力为 10 MPa 时水平应力集中区位于工作面前方 7.5 m 处, 而当构造应力为 40 MPa 时则位于工作面前方 17.5 m 处, 这可能是因为随着构造应力的增加, 煤层底板发生剪切破坏而应力得到释放, 从而使底板应力集中区向工作面前方推进。在采空区底板中央 X 方向水平应力随着构造应力的增加而增加, 当构造应力增加到一定程度时底板发生剪切破坏而释放应力, 应力水平不再显著增加。

2.3 构造应力对煤层及顶底板围岩能量场分布的影响

构造应力对煤层及其顶底板围岩能量场分布规律的影响也非常明显。图 2 为工作面推进 10 m 后, 不同构造应力条件下煤层顶板、煤层及煤层底板能量密度沿工作面走向分布图, 从图中可以看出, 随着构造应力的增加, 煤层及其顶底板围岩的能量密度显著提高。如当构造应力由 10 MPa 变为 30 MPa 时, 距工作面水平距离 43 m 处, 煤层顶板的能量密度由 8 013.278 9 J/m³ 增加到 22 958.115 J/m³; 煤层的能量密度由 40 627.228 J/m³ 增加到 84 165.638 J/m³; 煤层底板的能量密度由 10 810.327 J/m³ 增加到 35 032.505 J/m³。然而, 煤层及其顶板底围岩中能量密度集中区出现的位置有所差异, 主要表现在以下

几个方面:

a. 煤层顶板中能量集中区的位置是随着构造应力的变化而变化的(图 2a), 当侧压力系数小于 1.2(即构造应力小于 20 MPa)时, 煤层顶板中能量集中区出现在工作面前方 5~10 m 处; 随着侧压力系数的增加, 采空区拱顶处的能量密度逐渐增加, 当侧压力系数达到 1.7 时, 采空区拱顶处的能量密度为 25 505.797 J/m³, 大于工作面前 5~10 m 处的能量密度值(23 533.181 J/m³)。也就是说, 随着构造应力的增加, 采空区拱顶处能量密度增加较快, 能量积聚较多, 发生冲击破坏的可能性较大, 冲击倾向性较强, 往往也是首先发生破坏的区域。

b. 煤层中能量密度随着侧压力系数(或构造应力)的增加而增加(图 2b), 其能量密度集中区发生在工作面前方 3~5 m 处, 而且随着构造应力的增加, 工作面前方能量集中系数有所减缓, 如构造应力为 10 MPa 时的能量密度集中系数为 1.9, 而构造应力为 30 MPa 时能量密度集中系数为 1.3。但总体上, 随着侧压力系数(或构造应力)的增加, 煤层中能量密度显著提高。

c. 煤层底板中能量密度随构造应力的变化规律如图 2c 所示, 即煤层底板中的能量密度也是随着构造应力的增加而明显增加。煤层底板中能量密度集中区出现在工作面前方 5~10 m 处, 但随着构造应力的增加, 能量密度集中区有向前推进的趋势, 如当构造应力为 10 MPa 时, 能量密度集中区位于工作面前方 7.5 m 处, 而当构造应力为 40 MPa 时则位于工作面前方 17.5 m 处, 这可能是因为随着构造应力的增加, 煤层底板发生剪切破坏而释放能量, 从而使底板能量密度集中区向工作面前方推进。在采空区底板中央能量密度随着构造应力的增加而增加, 当构造应力增加到一定程度时底板发生剪切破坏而释放能量, 能量密度不再显著增加。

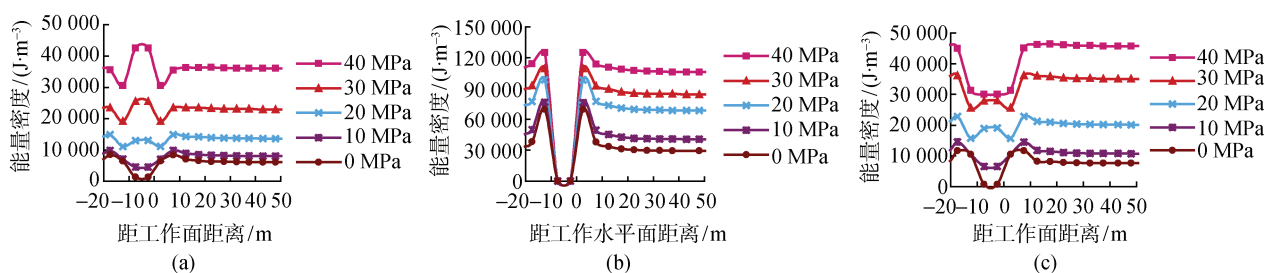


图 2 不同构造应力下煤层及其围岩岩能量密度沿工作面走向分布图

Fig. 2 Energy density distribution of roof along the strike of working face with different confining pressures

a—煤层顶板; b—煤层; c—煤层底板

3 结论

a. 唐山矿区位于 NE 开平向斜的西北翼的西南端, 区内发育的是 1 条与褶皱相伴生的复杂断裂构

造带, 主要展布于所在背斜的东南翼和开平向斜的西北翼, 由一系列相互平行的 NNE-NE 向断裂组成, 且皆为压性断层, 控制着本区的地震与地质构造活

动。唐山矿实测原岩地应力(最大主应力值 29~33 MPa, 方位角 131°~148°; 最小主应力为 12~18 MPa, 方位角 41°~53°)表明, 唐山矿区现今地应力场为水平构造应力场(最大水平主应力与自重压力(γH)的比值为 1.5~2.4)。

b. 高的水平构造应力场是唐山矿冲击地压发生的一个重要影响因素。数值模拟表明, 随着水平构造应力的增加, 煤层及其顶底板围岩的应力集中程度和能量积聚水平都大大提高。煤层开采过程中, 煤层及其顶底板围岩中的高水平构造应力为冲击地压的发生提供了力源条件, 而在高地应力环境下所积聚的大量弹性应变能为冲击地压的发生提供了能量条件。高的水平构造应力的存在使煤层及其顶底板围岩的冲击地压危险性大大增强, 当应力和能量积聚到一定程度时, 在坚硬顶板的拱顶处以及煤层的支承压力区往往会发生瞬时脆性破坏, 从而导致冲击地压的发生。

参考文献

- [1] 赵本钧. 冲击地压及其防治[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995.
- [2] BLAKE W. Rockburst mechanics[J]. Quarterly of the Colorado School of Mines, 1972, 67: 1-64.
- [3] LINKOV A M. Rockbursts and the instability of rock masses[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1996, 33(7): 727-732.
- [4] 孟召平. 煤层顶板沉积岩体结构及其顶板稳定性的影响[D]. 北京: 中国矿业大学, 1999.
- [5] MENG Zhaoping, PAN Jienan. Correlation between petrographic characteristics and failure duration in clastic rocks[J]. Engineering Geology, 2007, 89 (2): 258-265.
- [6] PAN Jienan, MENG Zhaoping, HOU Quanlin, et al. Influence of the roof lithological characteristics on rock burst: a case study in Tangshan colliery, China[J]. Geomechanics and Engineering, 2009, 1(2): 143-154.
- [7] 潘结南, 孟召平, 刘保民. 煤系岩石成分、结构与其冲击倾向性关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4422-4427.
- [8] PAN Jienan, MENG Zhaoping. Genesis of rock bursts in collieries and its controlling factors under deep mining condition[C]. Progress in Safety Science and Technology (VOL.IV), Science Press, 2004: 302-307.
- [9] 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.
- [10] 谢和平, 彭苏萍, 何满潮. 深部开采基础理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [11] 李新元. 坚硬顶板断裂振动型冲击地压机理研究及其工程应用[D]. 北京: 中国矿业大学, 2005.
- [12] WHITTLES D N, LOWNDES I S, KINGMAN S W, et al. Influence of geotechnical factors on gas flow experienced in a UK longwall coal mine panel[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006(43): 369-387.
- [13] CAI M. Influence of intermediate principal stress on rock fracturing and strength near excavation boundaries - Insight from numerical modeling[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008(45): 763-772.
- [14] HEUZE F E, MORRIS J P. Insights into ground shock in jointed rocks and the response of structures there-in[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007(44): 647-676.
- [15] ZHU Q Z, KONDO D, SHAO J F, et al. Micromechanical modeling of anisotropic damage in brittle rocks and application[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008(45): 467-477.
- [16] WOLF K H, BRUINING H. Modeling the interaction between underground coal fires and their roof rocks[J]. Fuel, 2007(86): 2761-2777.
- [17] HAKAMI H. Rock characterization facility (RCF) shaft sinking - numerical computations using FLAC[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001(38): 59-65.
- [18] 孟召平, 王保玉, 徐良伟, 等. 煤炭开采对煤层底板变形破坏及渗透性的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(2): 39-43.

(上接第 33 页)

间长; 抽采量大; 抽采浓度高; 抽采半径大; 一井多用(既可抽采动区煤层瓦斯, 也可抽采空区瓦斯); 施工工期短; 工程费用低。地面钻井抽采卸压区的煤层瓦斯技术能很好地解决低透气性煤层的瓦斯抽采难题, 为实现矿井煤、气资源一体化开采及矿井瓦斯灾害区域治理提供了有效途径。

为使该技术得以推广应用, 关键是要提高钻井的成井率。而成井的关键在于钻井布置、结构设计、采气层位及井底层位的合理选择、钻井施工技术与管理等关键环节。由于地面钻井抽采卸压区的煤层瓦斯是在采动塌陷影响区进行的, 因此要提高地面钻井抽采瓦斯的成井率, 必须研究岩层移动规律,

结合具体的地质条件, 合理设计每个钻井的具体参数, 对影响成井的关键环节层层把关。另外, 受采动影响使地应力重新分布, 将对钻井产生极强的破坏力, 因而需进一步探索钻井的保护措施。

参考文献

- [1] 袁亮. 松散低透煤层群瓦斯抽采理论与技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [2] 陈金华. 地面钻井抽采上覆远距离煤层卸压瓦斯的试验研究[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(13): 23-26.
- [3] 许令要. 地面钻井瓦斯抽采技术研究与实践[J]. 煤矿开采, 2008, 13(3): 95-96.
- [4] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.