

碎软煤层顶板长钻孔定向压裂瓦斯超前治理工程实践

贾秉义 李树刚 陈冬冬 张群

引用本文:

贾秉义, 李树刚, 陈冬冬, 等. 碎软煤层顶板长钻孔定向压裂瓦斯超前治理工程实践[J]. *煤田地质与勘探*, 2025, 53(3): 34–43.

JIA Bingyi, LI Shugang, CHEN Dongdong, et al. Engineering practice of advance gas control for crushed soft coal seams through directional fracturing using a long borehole in the coal seam roof[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(3): 34–43.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.07.0430>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碎软煤层顶板梳状长钻孔水力压裂区域瓦斯高效抽采模式

High-efficiency regional gas drainage model after hydraulic fracturing of comb-shaped long boreholes in the roof of broken soft and low permeability coal seam

煤田地质与勘探. 2022, 50(8): 29–36 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.03.0195>

中硬低渗煤层定向长钻孔水力压裂瓦斯高效抽采技术与应用

Technology and application of high efficiency gas extraction by directional long borehole hydraulic fracturing in coal seams of medium hardness and low permeability

煤田地质与勘探. 2020, 48(6): 103–108,115 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.06.014>

贵州青龙煤矿碎软煤层区域瓦斯递进式抽采技术

Progressive gas extraction technology in broken soft coal seam of Qinglong coal mine, Guizhou Province

煤田地质与勘探. 2020, 48(5): 48–52 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.05.006>

煤矿井下顶板梳状长钻孔分段压裂强化瓦斯抽采实践

Practice of enhanced gas extraction by staged fracturing with comb-shaped long hole in coal mine roof

煤田地质与勘探. 2021, 49(2): 70–76 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.02.009>

煤层顶板定向长钻孔水力加砂分段压裂技术与装备

Research on hydraulic fracturing technology and equipment of directional long drilling with sand in coal seam roof

煤田地质与勘探. 2022, 50(8): 37–44 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.03.0201>

煤矿井下硬煤层顺层长钻孔分段压裂强化瓦斯抽采技术及应用

Enhanced gas drainage technology by staged fracturing in long bedding borehole in hard coal bed of underground coal mine and its application

煤田地质与勘探. 2022, 50(8): 72–81 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.04.0229>



移动阅读

贾秉义, 李树刚, 陈冬冬, 等. 碎软煤层顶板长钻孔定向压裂瓦斯超前治理工程实践[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 34–43. doi: [10.12363/issn.1001-1986.24.07.0430](https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.07.0430)
JIA Bingyi, LI Shugang, CHEN Dongdong, et al. Engineering practice of advance gas control for crushed soft coal seams through directional fracturing using a long borehole in the coal seam roof[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(3): 34–43. doi: [10.12363/issn.1001-1986.24.07.0430](https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.07.0430)

碎软煤层顶板长钻孔定向压裂瓦斯超前治理工程实践

贾秉义^{1,2}, 李树刚², 陈冬冬¹, 张 群¹

(1. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077;

2. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:【目的和方法】针对碎软强突煤层瓦斯含量高、压力大, 区域预抽钻孔施工过程中喷孔强度大易造成瓦斯超限, 钻孔施工效率低等问题, 在分析现有区域瓦斯超前抽采卸压技术现状及适应性、近煤层顶板钻孔间接压裂的裂缝扩展延伸特征研究基础上, 提出了泥岩层顶板长钻孔套管内定向喷砂射孔分段水力加砂压裂区域瓦斯超前抽采卸压技术, 并根据地层特征优化设计了钻孔孔身结构。在安徽淮北芦岭煤矿开展了现场工程试验, 完成 1 个钻孔的钻探施工和套管固孔, 孔深 520 m, 下入一级套管 110 m, 直径 219 mm, 二级套管 520 m, 直径 114.3 mm, 水泥浆带压固孔。分 9 段进行射孔压裂, 累计射孔 39 次, 形成 78 个孔眼; 单段注液量 210~420 m³, 最大泵注压力 17.8~28.3 MPa, 加砂比例 2.5%~3.3%。【结果与结论】压裂钻孔抽采第 257 天时, 累计抽采瓦斯纯量超过 8×10⁵ m³, 区域预抽率达 15.5%。压裂钻孔水平段左右两侧 0~15 m 和 15~30 m 范围内瓦斯体积分数降幅分别达 27.05% 和 11.36%; 距压裂钻孔平面距离 0、15 m 处瓦斯压力由 2.78 MPa 分别降低至 1.14 MPa 和 1.75 MPa, 压力降低幅度超过 37%。区域瓦斯超前抽采卸压效果明显, 技术可行性和有效性得到了验证。超前抽采卸压区域预抽钻孔百孔喷孔率和喷孔强度分别降低了 57.89% 和 67.11%; 预抽钻孔一次成孔率提高 19%, 补孔率降幅达 74.87%, 钻机施工平均台班效率同比提高了 34%。预抽钻孔施工期间, 未发生瓦斯异常事件, 安全效益显著。该技术可为类似地质条件矿井瓦斯灾害超前治理提供借鉴, 已进一步推广至淮南矿区。

关键词: 碎软煤层; 超前抽采卸压; 定向压裂; 顶板长钻孔; 泥岩; 瓦斯抽采

中图分类号: TD713 文献标志码: A 文章编号: 1001-1986(2025)03-0034-10

Engineering practice of advance gas control for crushed soft coal seams through directional fracturing using a long borehole in the coal seam roof

JIA Bingyi^{1,2}, LI Shugang², CHEN Dongdong¹, ZHANG Qun¹

(1. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China;

2. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: [Objective and Methods] The crushed soft coal seams susceptible to intense coal and gas outbursts exhibit high gas content and pressure. Consequently, during borehole drilling for regional gas pre-drainage in such coal seams, high blowout intensity is prone to cause gas overrun and low drilling efficiency. To accelerate its development, this study analyzed the status and adaptability of existing technologies for regional advance gas drainage and pressure relief, as well as the fracture propagation characteristics of coal seam roofs during indirect fracturing using boreholes near the roofs. Accordingly, this study proposed an advance gas drainage and pressure relief technology for crushed soft coal seams with mudstone roofs, which integrates directional sandblasting perforation and proppant injection-based segmen-

收稿日期: 2024-07-01; 接收日期: 2025-02-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52174207); 中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金项目(2021XAYJSQ07)

第一作者: 贾秉义, 1988 年生, 男, 山西朔州人, 博士研究生, 副研究员。E-mail: jiabingyiccteg@126.com

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

ted hydraulic fracturing within the borehole casing. Furthermore, this study optimized the borehole structure based on stratigraphic characteristics. To verify the proposed technology, this study conducted a field engineering experiment at the Luling coal mine, Huaibei mining area, Anhui Province, completing the drilling and casing cementing of a 520-m-deep borehole. The casing cementing was achieved using a 110-m-long surface casing (diameter: 219 mm), a 520-m-long intermediate casing (diameter: 114.3 mm), and cement slurry injection under pressure. The borehole was divided into nine segments for perforation and fracturing, with 78 holes formed through 39 perforations. The hydraulic fracturing was implemented with single-segment fluid injection volumes ranging from 210 m³ to 420 m³, maximum pumping pressures from 17.8 MPa to 28.3 MPa, and injected proppant ratios from 2.5% to 3.3%. **[Results and Conclusions]** After 257 days of gas drainage from the borehole subjected to fracturing, the cumulative pure gas production exceeded 8×10⁵ m³, with a regional pre-drainage rate reaching up to 15.5%. The gas volume fractions within ranges of 0–15 m and 15–30 m on both sides of the borehole's horizontal section decreased by 27.05% and 11.36%, respectively. Concurrently, the gas pressure at planar distances of 0 m and 15 m from the borehole decreased from 2.78 MPa to 1.14 MPa and 1.75 MPa, respectively, with decreasing amplitude exceeding 37%. These results suggest significant effects of regional advance gas drainage and pressure relief, substantiating the feasibility and effectiveness of the proposed technology. In the zone undergoing advance gas drainage and pressure relief, the blowout rate and intensity of boreholes for gas pre-drainage decreased by 57.89% and 67.11%, respectively. Furthermore, the one-time hole-forming rate and hole-supplementing rate of these boreholes increased by 19% and decreased by 74.87%, respectively, with the average shift meterage per of drilling rigs within the same time interval increasing by 34%. No gas anomalies occurred during the borehole drilling, suggesting significant safety benefits. The proposed technology can serve as a reference for the advance control of gas disasters in mines with similar geologic conditions and has been applied to the Huainan mining area.

Keywords: broken-soft coal seam; advance gas drainage and pressure relief; directional fracturing; long borehole in the roof; mudstone; gas drainage

我国碎软低渗煤层广泛发育,该类煤层通常具有瓦斯含量高、压力大、煤层破碎、地应力条件复杂等特征^[1-2]。据统计,全国约三分之一的矿井为高瓦斯或煤与瓦斯突出矿井,随着瓦斯治理理念、技术和装备的不断地进步,我国煤矿瓦斯灾害得到了有效遏制,煤矿瓦斯事故整体呈下降趋势。但是近年来较大、重大瓦斯事故仍时有发生,瓦斯灾害仍然是矿井安全生产中主要的危险因素^[3-4]。瓦斯高效抽采是治理瓦斯灾害,保障矿井安全生产的根本措施^[5-6]。针对碎软强突煤层,通常采用顶底板岩石巷道+密集穿层钻孔的模式进行条带瓦斯抽采以达到消突的目的。但是与顶底板岩层及中硬煤层相比,碎软煤层具有弹性模量低、泊松比高、瓦斯压力大等特征,这些特征导致瓦斯抽采钻孔施工过程中喷孔强度大、大量的煤渣排出,携带的瓦斯扩散至采掘空间中,易导致作业空间瓦斯超限,甚至造成人身伤害,威胁矿井安全生产^[7-10]。

超前抽采降低煤层瓦斯压力,减轻喷孔强度,是提高钻探施工效率,防止出现喷孔导致瓦斯超限的有效途径。为此,安徽淮南、淮北,陕西韩城,河南平顶山等矿区采用保护层开采技术,有效降低了被保护层的煤层瓦斯含量和瓦斯压力。相关学者开展了地面水平井间接压裂抽采煤层瓦斯技术研究,并在两淮、山西、贵州等地进行了应用,取得了良好的瓦斯抽采效果,为强突煤层超前抽采卸压提供了新的技术路径^[11-14]。陕西韩城、山西阳泉等矿区开展了顶(底)板定向长钻孔裸眼分段

压裂抽采煤层瓦斯技术研究和工程应用,瓦斯抽采效果显著提升^[15-17]。虽然开采保护层技术是在瓦斯超前治理的一种有效方法,但需具备多煤层赋存和能够满足瓦斯抽采的合理层间距;地面分段压裂水平井技术,也因易与煤矿井下已有巷道导通而无法在矿井生产区和准备区实施,且需要适宜的地形条件和较长的预抽时间,因此,上述两种技术不能完全满足当前碎软强突煤层瓦斯区域抽采超前卸压的要求^[9-10,18-19]。顶板定向长钻孔裸眼分段压裂技术需要在煤层顶板的砂岩、粉砂岩等稳定岩层中进行施工,若顶板为泥岩,且厚度较大,则水力压裂施工过程中泥岩层遇水膨胀,易使水力压裂工具串遇阻,出现孔内事故,且形成的裂缝容易闭合,影响瓦斯抽采效果^[20-21]。因此,亟待开发针对厚层泥岩顶板的定向长钻孔分段水力压裂技术,以完善碎软强突煤层区域瓦斯超前抽采卸压技术体系,为矿井区域瓦斯预抽工程实施提供支撑。

安徽淮北矿区芦岭煤矿地质条件复杂,瓦斯灾害严重,主采的8号煤层具有厚度大、煤层碎软、瓦斯含量高、瓦斯压力大等特点,存在预抽钻孔工程量大、施工困难,易出现喷孔,钻机台班效率低(出现喷孔征兆需要停钻进行抽采卸压)等问题。8号煤层顶板以泥岩为主,厚度较大。为此,笔者以芦岭煤矿8号煤层为研究对象,开展了碎软强突煤层顶板泥岩层长钻孔定向压裂瓦斯超前抽采卸压技术研究,并分析了卸压效果,以期为类似地质条件矿井瓦斯治理提供借鉴。

1 顶板长钻孔定向压裂瓦斯超前治理技术

1.1 技术思路

在紧邻煤层的顶板泥岩层中布置定向长钻孔,为了防止出现孔内事故,保证水力压裂施工顺利,采用套管固孔技术对全孔段进行固孔。通过定向射孔技术向煤层方向射孔,射穿套管和水泥环预制导向裂缝,运用分段水力加砂压裂技术,在导向裂缝的诱导下,形成向煤层方向扩展延伸的缝网,并用支撑剂支撑缝网,为瓦斯运移提供通道(图 1)。煤层中的瓦斯在压力差、浓度差和抽采负压的共同作用下通过裂缝向钻孔运移后被抽出,随着煤层中瓦斯不断被抽出,煤层瓦斯压力快速降低,进而实现瓦斯超前抽采卸压的目的。

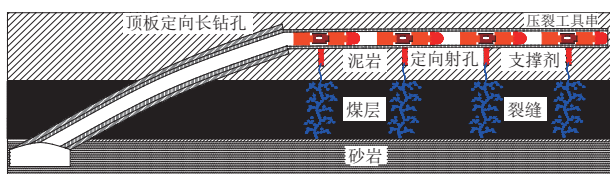


图 1 顶板长钻孔定向压裂瓦斯超前治理技术

Fig.1 Schematic diagram showing technology for advance gas control through directional fracturing using long boreholes in the coal seam roof

1.2 定向压裂裂缝穿层扩展主控因素

大量的工程实践均表明,在煤层顶板施工钻孔,并采取水力压裂等增透措施后,裂缝可以由顶板延伸至煤层,能够有效地进行瓦斯抽采。且与在煤层中直接压裂相比,由于顶板的相对脆性使压裂缝沿横向扩展延伸更快,由此产生的撕裂、拉扯作用使得煤层中压裂缝随其扩展延伸,从而在碎软煤层中造出了更长的高导流压裂缝^[2,11-13]。

针对顶板间接压裂裂缝扩展机理、特征与主控因素,相关学者围绕起裂位置、顶板与煤层的有效应力差、施工排量、垂向应力等因素,通过理论分析、数值模拟、相似物理实验等手段开展了大量的研究工作^[22-25]。结果表明:在钻孔与煤层间距较近时,满足一定的注入排量,裂缝均能穿透顶板岩层向煤层方向扩展延伸。但是对于起主导作用的因素,并未形成统一的认知,比较普遍的认识是泵注排量越大,起裂位置与煤层的距离越小,裂缝扩展越容易。与地面压裂相比,受装备能力、作业空间、供水条件等因素制约,井下压裂存在泵注排量较小(通常小于 $60 \text{ m}^3/\text{h}$);压裂钻孔轨迹控制(起裂点与煤层的间距)难度大等问题。因此,主要围绕起裂位置(钻孔与煤层的间距)、泵注排量两个因素开展研究和工程实践。

为了弄清较小排量下顶板定向压裂裂缝穿层扩展延伸特征,以芦岭煤矿 8 号煤层及顶板的力学参数为背

景,采用 ABAQUS 数值模拟软件中的 XEFM(扩展有限元)模块对当前井下压裂工况条件下裂缝扩展特征进行模拟分析。钻孔与煤层的间距分别设置为 3、5、7、9 m,泵注排量分别设置为 1、2、3、4 m^3/min 。根据压裂目标层位及地层岩性剖面数据,选取 5 层主要岩层建立水力压裂数值模拟模型,岩层参数如图 2 所示,地层总厚度为 35.6 m。网格尺寸为 0.2 m。单元类型为 CPE4P(四节点孔压单元)。压裂液注入点位于 8 号煤层上部的泥岩层中,压裂液为清水。为清楚观察裂缝形态,模拟结果显示裂缝比例均放大 100 倍。

1) 钻孔与煤层间距对裂缝扩展的影响

数值模拟研究了当注入排量固定为 $1 \text{ m}^3/\text{min}$,压裂液注入时间均为 300 s 时,钻孔与煤层的距离从 3 m 增大至 9 m 时的裂缝扩展形态(图 2)。

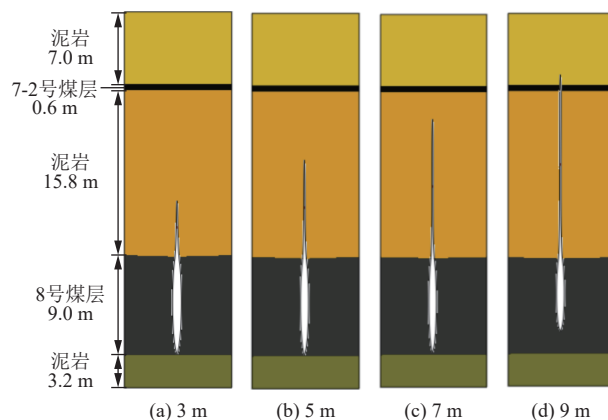


图 2 钻孔与煤层不同间距的裂缝扩展特征

Fig.2 Fracture propagation characteristics under different borehole-coal seam distances

模拟结果表明,当距离为 3、5、7 m 时,裂缝均可穿透煤层。而当距离为 9 m 和 10 m 时,裂缝仅在 8 号煤层中延伸一定高度,并未贯穿煤层。距离越大,裂缝穿层扩展所需时间越长。

2) 不同泵注排量对裂缝扩展的影响

数值模拟研究了当钻孔与煤层的间距均为 3 m,注入时间为 300 s 时,压裂施工排量从 $1 \text{ m}^3/\text{min}$ 增大至 $4 \text{ m}^3/\text{min}$ 时的裂缝扩展形态,结果如图 3 所示。

模拟结果表明,在 4 种压裂施工排量下,裂缝均实现了穿层扩展,由岩层进入煤层。当排量为 $3 \text{ m}^3/\text{min}$ 时,裂缝下端 277.6 s 到达模型下部边界。当排量为 $4 \text{ m}^3/\text{min}$ 时,裂缝下端 221.7 s 到达模型下部边界。排量越大,越有利于裂缝快速穿层扩展进入煤层。

但是由于模拟过程中滤失量较小,裂缝穿过砂泥岩界面、泥岩和煤层界面用时较短。因此,实际施工过程中应该尽量缩小钻孔与煤层的间距,同时增大泵注排量。

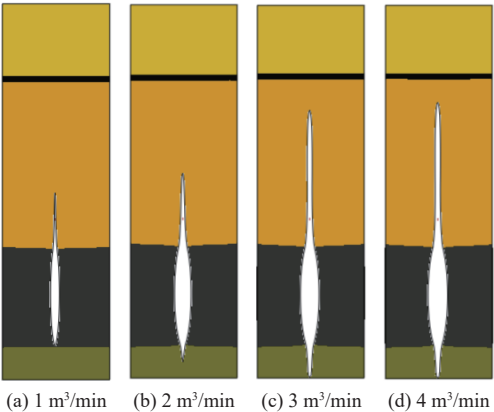


图 3 不同排量的裂缝扩展特征

Fig.3 Fracture propagation characteristics under different injection rates of fracturing fluids

2 试验区概况与试验方案设计

2.1 试验区概况

芦岭煤矿位于宿东复式向斜南西翼,构造条件复杂,为煤与瓦斯突出矿井。矿井碎软煤层发育、煤层透气性差、瓦斯含量高、压力大,瓦斯治理工作量大,难度高。工程试验地点Ⅱ9410综放工作面位于矿井Ⅱ水平的Ⅱ84采区,矿井Ⅱ水平的现代地应力最大主应力 20.0~34.1 MPa,以近东西向为主;最小主应力 7.0~12.0 MPa,以近南北向为主,且大于自重应力,属于高应力值区水平构造应力场。试验工作面平均走向长度 505 m,倾向长度 150 m,主采下石盒子组 8 号、9 号煤层,层间距平均为 3 m,层间岩性为泥岩。两层煤联合开采,工作面巷道布置于 9 号煤层中。工程试验目标煤层为 8 号煤层,该煤层赋存稳定,结构简单,厚度 8.08~9.63 m,平均 8.76 m,倾角 5°~20°,平均 10°,埋藏深度 520~570 m。8 号煤层遭受强烈的韧性变形改造,以糜棱煤、鳞片煤为主,碎粒煤仅见于煤层上部 and 下部;煤体坚固性系数为 0.11~0.61,以小于 0.50 为主。煤层宏观煤岩组分主要为亮煤和暗煤,有少量镜煤条带。宏观煤岩类型属半暗~半亮型煤。试验区煤层原始瓦斯压力 2.76 MPa,最大原始瓦斯含量 13.2 m³/t。8 号煤层顶板岩性为泥岩,灰色,块状,厚层状,致密,含植物化石,局部含薄层粉砂岩和炭质泥岩,中部含煤线,厚度为 9.48~24.62 m,平均 15.83 m(图 4)。8 号煤层及顶板岩层力学参数见表 1,天然抗拉强度为 0.56~0.94 MPa,软化系数为 0.34~0.44^[8,26-27]。

2.2 试验方案设计

1) 压裂钻孔设计

根据研究区煤层赋存特征和巷道布置情况,设计压裂钻孔平面上位于Ⅱ9410工作面机巷外侧,开孔点位于 9 号煤层下方的底抽巷,钻孔穿过 9、8 号煤层后沿



图 4 Ⅱ84 采区地层综合柱状图

Fig.4 Composite stratigraphic column of the Ⅱ84 mining area

表 1 8 号煤层及顶板岩层力学参数
Table 1 Mechanical parameters of the No.8 coal seam and its roof strata

| 岩层 | 弹性模量/ GPa | 泊松比 | 抗压强度/ MPa | 抗拉强度/ MPa | 变形模量/ GPa |
|-----|--------------|------|--------------|--------------|--------------|
| 砂岩 | 27.63 | 0.43 | 131.40 | | 20.24 |
| 泥岩 | 9.26 | 0.19 | 40.10 | 3.70 | 5.92 |
| 8号煤 | | | 5.59 | | |

顶板钻进,钻探施工过程中控制钻孔与煤层的间距在 5 m 以内,终孔点位于Ⅱ9410工作面切眼外 15 m,孔深 520 m。钻孔采用二级孔身结构(图 5),一级孔深至 8 煤层顶板,孔径 300 mm,下入 219 mm 钢套管固孔;二级孔径 172 mm(至孔底),下入 114.3 mm 石油套管固孔。为了使试验过程中孔内涌出的瓦斯被及时抽走,避免向作业空间扩散造成瓦斯超限,设计开孔段孔深 7 m,孔径 300 mm,下入 250 mm PVC 套管固孔,以便连接孔口防喷装置。钻孔设计参数汇总见表 2。

选用 ZDY12000LD 型煤矿用履带式全液压定向钻机,配套使用 BLY390 型煤矿井下钻探用泥浆泵车,宽翼片螺旋钻杆。

2) 定向喷砂射孔设计

目前常用的射孔技术有聚能弹爆炸射孔、水力喷砂射孔等。但是由于煤矿井下为受限作业空间,聚能弹

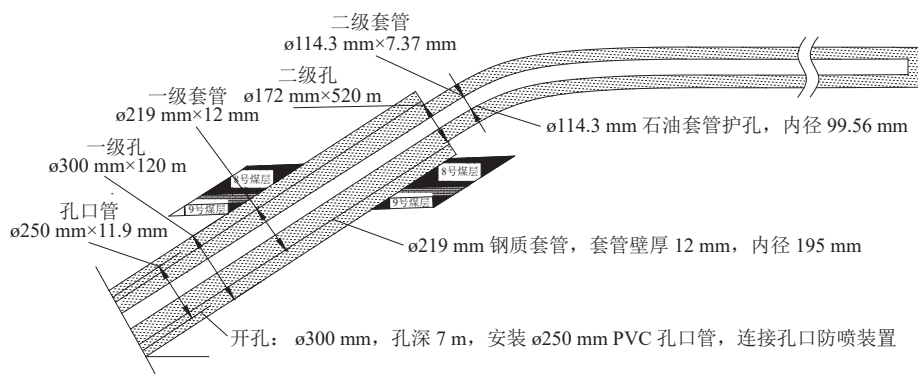


图 5 压裂钻孔孔身结构

Fig.5 Schematic diagram showing the structure of the borehole subjected to fracturing

表 2 压裂钻孔设计参数

Table 2 Design parameters for the borehole subjected to fracturing

| 开孔方位/(°) | 开孔倾角/(°) | 主设计方位/(°) | 一级套管/m | 二级套管/m | 终孔方位/(°) | 终孔倾角/(°) | 孔深/m |
|----------|----------|-----------|--------|--------|----------|----------|------|
| 268 | 22 | 254 | 120 | 520 | 254 | 4 | 520 |

爆炸产生的火花易引发煤矿井下事故,故该技术不具备在井下应用条件。水力喷砂射孔技术是利用带喷嘴的喷射工具产生高速流体射透套管、水泥环,并在高速流体的持续作用下,在地层中形成一组裂缝,在射孔液中加入石英砂能够显著增加流体的冲击力,提高射孔效率^[20,28]。根据钻孔轨迹,将定向长钻孔分为若干段,利用定向喷砂射孔技术,分别对每段向煤层方向喷砂射孔,射穿套管和水泥环,形成压裂导向裂缝,从而使水力压裂裂缝优先向煤层方向扩展。

射孔数量越多,套管的泄流面积越大,作用于单个孔眼上的水力压裂能量越小。由于井下分段水力加砂压裂泵组排量和煤矿巷道供水能力有限,考虑孔眼间相互干扰、泄流面积等因素,设计每个压裂段定向喷砂射孔 5 次,每次形成 2 个孔眼,孔眼间距 0.3 m,射孔长度 3.0 m,单段累计 10 个孔眼。

3) 分段水力加砂压裂设计

根据钻孔轨迹,将定向长钻孔分为若干段,首先进行定向喷砂射孔预制裂缝,之后进行分段水力加砂压裂。采用双封单卡拖动式分段水力压裂施工工艺,喷射位置位于分段水力加砂压裂 2 个座封点之间,如图 6 所示。

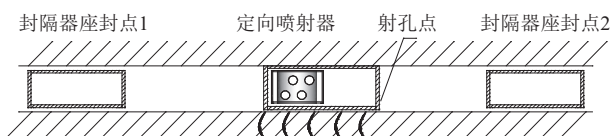


图 6 定向射孔位置与分段压裂坐封点关系

Fig.6 Schematic diagram showing the relationship between the position of directional perforation and the packer setting points of segmented fracturing

由于 8 号煤层顶板为泥岩,选择压裂液为清水+KCL,支撑剂为石英砂。为了使支撑剂向裂缝远端延伸,

设计携砂液加注前期采用 212~425 μm (70~40 目)的石英砂,后期采用 425~850 μm (40~20 目)的石英砂。单段注液量约为 207 m^3 ,其中前置液 67 m^3 ,携砂液 120 m^3 ,顶替液 20 m^3 。加砂比例 2%~3%,单段加砂量 4.76 t。

3 关键技术措施

通过前述分析可知,工程实践的主控因素为钻孔与煤层的间距以及泵注排量。但是由于国内尚未开展过井下小排量、低砂比套管内喷砂射孔,因此,有效的射穿套管也是工程试验成败的关键。

3.1 钻孔与煤层间距控制

相关研究表明,压裂钻孔与煤层的间距越小越有利于裂缝的穿层扩展^[22,29]。因此,通过控制钻孔轨迹进而使钻孔与煤层保持在一定间距范围内是影响工程试验成败的重要因素。

由于本次压裂钻孔不施工分支孔,综合考虑裂缝穿层扩展与钻探施工安全,压裂钻孔与 8 号煤层的间距应尽可能小,但是不得钻遇 8 号煤层(防止钻遇原始煤体导致喷孔造成瓦斯超限)。由于煤层的起伏变化,对钻孔的轨迹精度要求较高,当前的定向钻进技术由于测量系统与钻头距离较远,且不具备岩性识别的功能,方位伽马等技术探测范围较小,目前暂无成熟的煤矿井下定向钻进随钻煤岩层界面探测技术^[30-32],因此,精准的剖面设计是控制钻孔与煤层间距的关键。

区域地质条件变化、煤层起伏,顶板岩性变化等因素是钻孔施工、钻孔轨迹控制的关键,因此,区域地质条件精细分析是钻孔轨迹精准控制的基础。通过收集研究区及周边已有的 8 号煤层厚度、顶底板高程等地质资料;区域地质特征、地应力场特征等文献资料;进行井下补充勘查,采集 8 号煤层厚度、煤层原始瓦斯参

数以及顶板岩石力学参数等信息,结合采集的资料,对原有地质资料,进行反演分析,精细解译,为钻探施工、钻孔轨迹精细设计与精准控制、分段水力加砂压裂参数优化设计与施工、卸压抽采效果分析提供指导和依据(图7)。

3.2 井下双泵并联扩排增流技术

前述分析可知加大泵组排量,有利于提升裂缝穿层扩展能力,提高压裂施工效果。受井下压裂泵组能力限制,泵组排量较小。为了提升压裂效果,在现有供水条件下,采用双泵并联工艺扩大泵组排量,提高压裂液流速。每台压裂泵组都配备远程操控系统,并在管路连接处安设阀门,以便实现泵组的独立/同步运行(图8)。

本次工程实践所用1号压裂泵组额定排量为 $60\text{ m}^3/\text{h}$,2号泵组额定排量为 $48\text{ m}^3/\text{h}$,二者同时运行可实现 $108\text{ m}^3/\text{h}$ 注入排量(表3)。

3.3 小排量穿套管裂缝预制技术

目前煤矿井下主要以水力喷砂射孔为主,为了保证对8号煤层成功实施分段压裂,射孔必须要求穿透钢套管、水泥环和部分泥岩,诱导压裂缝在8号煤层中延伸。试验钻孔所用二级套管钢级为P110,套管外径 114.3 mm ,壁厚 7.37 mm 。为检验定向喷砂射孔技术能否有效射穿所用套管,进行了物理模拟试验。用水泥和压裂钻孔的钻屑按照1:1的比例加工了试件,试件尺寸为长×宽×高= $1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1\text{ m}$,在试件中部安装了固孔用套管。试验参数如下:泵注排量 $23\text{ m}^3/\text{h}$,泵注压力

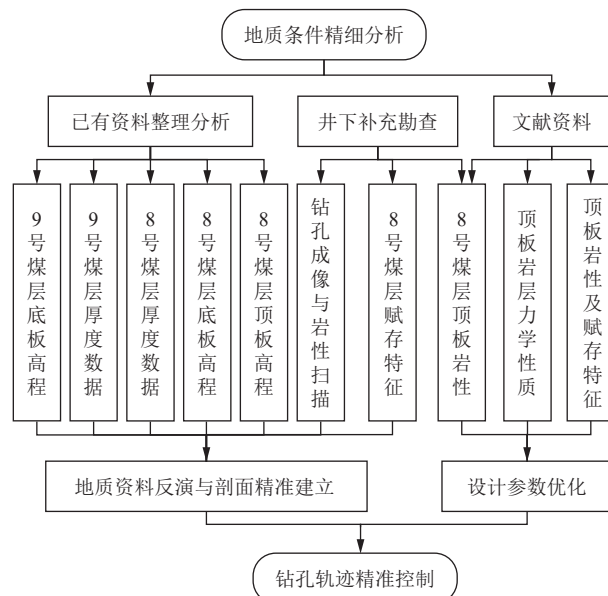


图7 钻孔轨迹控制流程

Fig.7 Flow chart of borehole trajectory control

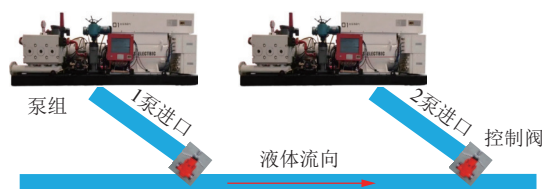


图8 双泵并联系统

Fig.8 Schematic diagram of the dual-pump parallel system

22 MPa ,喷射液为清水+石英砂,砂比3%,现场通过视频进行远程监控。

表3 压裂钻孔水力压裂施工情况统计

Table 3 Statistics of hydraulic fracturing construction of the borehole

| 压裂段 | 射孔距离/m | 孔眼数量/个 | 坐封距离/m | 压裂液用量/ m^3 | | | 最大泵注压/ MPa | 最大排量/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$ | 石英砂 | | 氯化钾用量/t |
|-----|---------|--------|---------|---------------------|-------|--------|---------------------|--|-------|---------|---------|
| | | | | 合计 | 前置液量 | 携砂液量 | | | 砂水比/% | 石英砂质量/t | |
| 1 | 491~494 | 10 | 486~504 | 210 | 80.50 | 109.24 | 21.7 | 109.40 | 2.5 | 4.56 | 2.16 |
| 2 | 448~451 | 10 | 441~459 | 232 | 92.60 | 111.02 | 24.0 | 94.40 | 2.7 | 5.01 | 2.20 |
| 3 | 405~408 | 10 | 399~417 | 225 | 90.00 | 93.30 | 24.6 | 106.09 | 2.8 | 4.36 | 1.85 |
| 4 | 362~365 | 8 | 356~374 | 220 | 81.44 | 107.34 | 22.5 | 92.00 | 2.8 | 5.02 | 2.13 |
| 5 | 319~322 | 10 | 313~331 | 240 | 87.94 | 108.91 | 29.9 | 98.58 | 3.1 | 5.64 | 2.16 |
| 6 | 276~279 | 10 | 270~288 | 232 | 85.34 | 114.28 | 34.1 | 103.62 | 3.3 | 6.30 | 2.26 |
| 7 | 233~236 | 10 | 228~246 | 215 | 89.82 | 94.44 | 25.1 | 100.66 | 2.8 | 4.42 | 1.87 |
| 8 | 190~193 | 10 | 183~201 | 220 | 91.44 | 97.34 | 25.5 | 98.30 | 3.1 | 5.04 | 1.93 |
| 9 | | | 127 | 420 | | | 18.4 | 93.11 | | | 3.45 |

如图9所示,在现有装备技术条件下,该套管能够顺利射穿。喷射持续 2 min 即可将厚度 7.37 mm 的钢质套管射穿,喷射 4 min 水泥试件射孔深度达 46 cm 。

4 工程试验及效果分析

4.1 现场试验情况

在芦岭煤矿Ⅱ9410综放工作面完成了1个顶板长钻

孔的钻探施工,钻孔位于8号煤层顶板,钻孔深度 520 m ,钻遇岩层主要为泥岩和砂质泥岩。下入P110的石油套管 520 m ,水泥浆固孔,注浆压力 11 MPa 。运用3.1节的钻孔轨迹控制技术,实现了钻孔轨迹的精准控制,除钻孔降倾角段与煤层间距较大外,其余均小于 5 m ,钻孔起裂位置基本满足裂缝穿层扩展需求。

依据钻孔实钻轨迹,结合钻孔孔身结构和钻遇地层

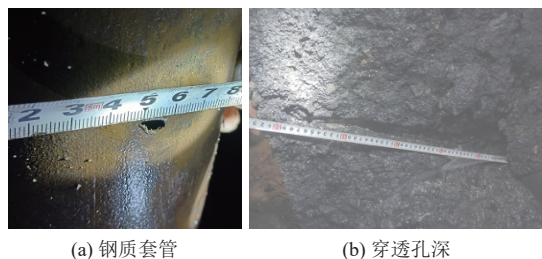


图 9 定向喷砂射孔试验

Fig.9 Directional sandblasting perforation experiment

岩性特征,设计距孔底 25 m 为第 1 压裂段,压裂段间距为 40 m,单孔压裂 9 段,其中第 1—第 8 段为分段水力加砂压裂;第 9 段为整体压裂,压裂液为清水。为了检验不同孔眼数量对压裂试验的影响,调整第 4 段的射孔参数为 4 次,形成 8 个孔眼,其他 7 段均射孔 5 次,各 10 个孔眼。压裂钻孔累计射孔 39 次,形成 78 个孔眼。

采用双封单卡拖动管柱式分段水力加砂压裂工艺,单段注液量 210~420 m³,最大泵注压力 18.4~31.5 MPa。该孔累计注入压裂液 2 214 m³,累计注入石英砂 40.34 t,注入氯化钾 20 t。施工过程中根据泵注压力、注入排量等变化情况,对实际施工参数进行了微调,各段施工情况详见表 3。

4.2 试验效果分析与考察

4.2.1 泵注压力曲线分析

分段水力加砂压裂过程中泵注压力整体呈锯齿状波动状态,且每一段加砂压裂过程中均出现了多次不同程度的地层破裂情况。统计了压裂过程中地层破裂情况(压降大于 0.8 MPa 的事件),第 1—第 8 段水力加砂压裂过程中共发生 219 次较为明显的压降。

如图 10 所示,压裂试验过程中地层发生了多次明显的破裂,最大压降 4.1 MPa,单段最大压降次数 91 次,表明地层中裂缝的起裂—填砂—扩展—延伸等过程,在地层中形成较为复杂的裂缝系统,为瓦斯超前抽采卸压提供了通道。

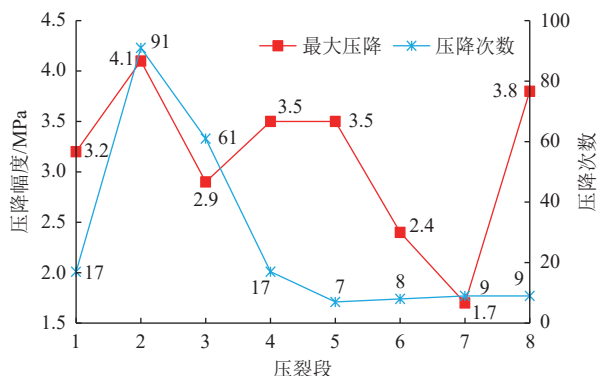


图 10 分段压裂施工明显压降次数和压降幅度

Fig.10 Curving showing the number and amplitude of significant pressure drops during segmented fracturing

4.2.2 压裂钻孔瓦斯抽采效果分析

分段水力加砂压裂试验完成后将钻孔连接至抽采系统,并安装在线抽采计量装置进行单独计量。

如图 11 所示,压裂钻孔抽采体积分数和抽采纯量整体呈上升趋势。抽采初期,压裂钻孔孔内水量较大,抽采甲烷体积分数和抽采纯量均较低,但是随着抽采时间的增加,孔内水量减少,瓦斯抽采甲烷体积分数和抽采纯量均显著增加,最大抽采纯量达 3 542 m³/d,最高抽采甲烷体积分数达 75.00%。抽采 5 个月后,抽采甲烷体积分数和抽采纯量均出现了一定程度的下降,随后均恢复上升趋势。截至 2024 年 3 月 31 日,累计抽采 196 d,抽采甲烷体积分数 4.54%~75.00%,平均 53.49%,标况瓦斯抽采纯量 176~3 542 m³/d。出水量较小后,监测周期内日均瓦斯标况抽采纯量超过 2 500 m³,累计抽采瓦斯近 45.16 万 m³,总体瓦斯抽采效果较好,验证了分段水力加砂压裂的有效性。

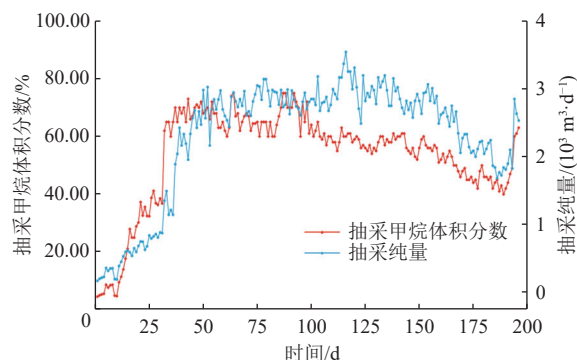


图 11 压裂钻孔抽采曲线

Fig.11 Gas drainage curves of the borehole subjected to fracturing

4.2.3 煤层瓦斯含量和压力降低情况分析

截至 2024 年 5 月 31 日,累计抽采 257 d,压裂区域累计抽采瓦斯超过 80 万 m³,区域预抽率达 15.5%。经现场实测,压裂钻孔水平段左右两侧 0~15 m 范围内煤层瓦斯含量由 13.2 m³/t 降至 8.58~10.69 m³/t,平均 9.63 m³/t,平均降幅达 27.05%;15~30 m 范围内瓦斯含量由 13.2 m³/t 降至 10.72~12.67 m³/t,平均 11.70 m³/t,平均降幅达 11.36%。与压裂钻孔平面距离 0、15 m 处瓦斯压力由 2.78 MPa 分别降低至 1.14 MPa 和 1.75 MPa,压力降低幅度>37%。区域瓦斯超前抽采卸压效果明显,技术有效性得到了进一步验证。

4.2.4 预抽钻孔喷孔率与喷孔强度变化情况分析

通过超前区域预抽,降低了该区段 8 号煤层的瓦斯压力与瓦斯含量。通过对穿层预抽钻孔施工过程中喷孔率和喷孔强度进行统计分析,II 948 区段(邻近的未压裂区域)喷孔率为 15.2%,II 9410 区段(压裂区域)喷孔率为 6.4%,喷孔率降低了 57.89%;平均每孔喷煤量

从 7.6 t 降至 2.5 t, 降幅达 67.11%。喷孔率和喷孔强度大幅减少, 为区域预抽钻孔施工提供了安全保障。

4.2.5 预抽钻孔施工效率分析

通过区域超前抽采, 煤体瓦斯含量和瓦斯压力降低, 减少了预抽钻孔施工过程中因孔内瓦斯含量高等因素造成的停机抽采卸压环节, 钻孔一次成功率显著提升。邻近的 II 948 区段钻孔一次成孔率 79.7%, II 9410 区段钻孔一次成孔率达到 94.9%, 一次成孔率提高 19%; 未卸压区域钻孔补孔率为 20.3%, 卸压区域钻孔补孔率为 5.1%, 降幅达 74.87%, 预抽钻孔施工效率大幅提升(图 12)。

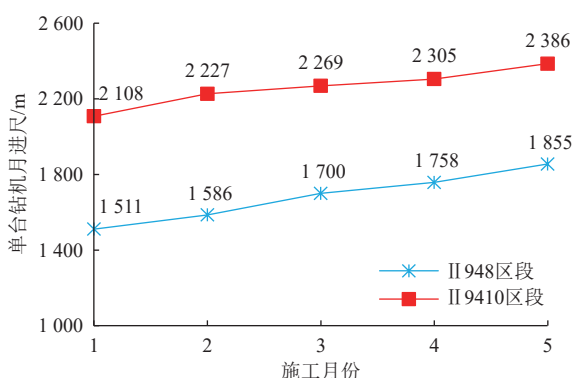


图 12 钻机施工台班效率对比

Fig.12 Comparison of meterage per shift for drilling rig

通过区域超前抽采卸压, 简化了预抽钻孔施工流程, 减少了施工过程中异常处置次数, 钻机搬家次数减少, 钻机综合台班效率显著提升。如图 11 所示, 在相同的时间区间, II 948 区段钻机平均台班效率为 1 682 m/月; 超前抽采卸压后, II 9410 区段钻机平均台班效率为 2 259 m/月, 同比提高了 34%。

II 9410 区段钻孔施工期间, 杜绝了瓦斯异常事件, 与 II 948 区段相比, 降低了补孔率与喷孔强度, 减少了喷孔次数, 降低了施工风险与职工劳动强度, 钻孔施工期间未发生瓦斯预警事故, 安全效益显著。目前该技术成果已进一步推广至淮南矿区张集、顾北等煤矿, 应用前景广阔。

5 结论

(1) 以安徽淮北芦岭煤矿为例, 提出碎软强突煤层顶板泥岩层长钻孔套管内定向喷砂射孔分段水力加砂压裂区域瓦斯超前抽采卸压技术, 优化设计钻孔结构, 并在井下开展工程实践。

(2) 结合数值模拟结果和现场工程实践表明, 通过长钻孔套管内定向压裂技术, 可实现 219 次有效压降(>0.8 MPa), 最大压降 4.1 MPa; 瓦斯含量最大降幅达 27.05%; 瓦斯压力降低幅度>37%; 与未卸压区相比, 喷

孔率降低 57.89%, 喷孔强度降低 67.11%, 一次成孔率提高 19.00%, 补孔率降低 74.87%, 钻机平均台班效率提高 34%。压裂区域累计抽采瓦斯超过 80 万 m³, 区域预抽率达 15.5%, 该技术能够有效地进行区域瓦斯抽采, 实现超前治理保障井下安全生产。

(3) 顶板泥岩层长钻孔套管内定向喷砂射孔分段水力加砂压裂技术, 其工程实践参数是结合现有装备能力、作业环境等条件综合确定, 理论支撑还需进一步深化, 后续会开展工程参数适配性研究, 以便更好地将理论与工程实践相结合, 进一步提升应用效果。

致谢: 工程实践过程中得到了淮北矿业集团曹佩永、王庆永、李健、肖富刚, 芦岭煤矿耿宁、纪文涛等同志的大力支持和帮助, 在此表示衷心的感谢。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 程远平, 王成浩. 构造煤变形能及在煤与瓦斯突出中的作用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 645–663.
CHENG Yuanping, WANG Chenghao. Deformation energy of tectonic coal and its role in coal and gas outbursts[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 645–663.
- [2] 张群, 降文萍, 姜在炳, 等. 我国煤矿区煤层气地面开发现状和技术研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 139–158.
ZHANG Qun, JIANG Wenping, JIANG Zaibing, et al. Present situation and technical research progress of coalbed methane surface development in coal mining areas of China[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 139–158.
- [3] 张超林, 刘明亮, 王恩元, 等. 煤层渗透性对煤与瓦斯突出的影响规律及控制机理[J]. 煤炭学报, 2024, 49(12): 4842–4854.
ZHANG Chaolin, LIU Mingliang, WANG Enyuan, et al. Influence law and control mechanism of coal seam permeability on coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(12): 4842–4854.
- [4] 郑凯歌. 碎软低透煤层底板梳状长钻孔分段水力压裂增透技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(2): 272–281.
ZHENG Kaige. Permeability improving technology by sectional hydraulic fracturing for comb-like long drilling in floor of crushed and soft coal seam with low permeability[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(2): 272–281.
- [5] 林海飞, 黄猛, 李志梁, 等. 注气驱替抽采瓦斯技术在高瓦斯突出矿井煤巷掘进中的试验[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(3): 10–12.
LIN Haifei, HUANG Meng, LI Zhiliang, et al. Test of forced gas drainage technology by air injection for gas replacement in coal roadway driving of high gassy and outburst mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2016, 43(3): 10–12.
- [6] 翟成, 丛钰洲, 陈爱坤, 等. 中国煤矿瓦斯突出灾害治理的若干

- 思考及展望[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(6): 1146–1161.
- ZHAI Cheng, CONG Yuzhou, CHEN Aikun, et al. Reflection and prospect on the prevention of gas outburst disasters in China's coal mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(6): 1146–1161.
- [7] 聂超, 王毅, 姚亚峰. 碎软煤层空气定向钻进煤粉运移规律数值模拟研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(3): 175–180.
- NIE Chao, WANG Yi, YAO Yafeng. Numerical simulation of pulverized coal migration law in air directional drilling in broken soft coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(3): 175–180.
- [8] 贾建称, 陈晨, 董夔, 等. 碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂高效抽采煤层气技术研究[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(12): 1873–1881.
- JIA Jiancheng, CHEN Chen, DONG Kui, et al. Research on the technology of high efficient to drainage CBM by multistage fracturing in horizontal well along the roof of broken soft and low permeability coal seam[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(12): 1873–1881.
- [9] 张群, 孙四清, 降文萍. 碎软低渗煤层煤矿区煤层气勘探开发关键技术及发展方向[J]. 石油学报, 2024, 45(5): 855–865.
- ZHANG Qun, SUN Siqing, JIANG Wenping. Key technologies and development direction of CBM exploration and development in coal mine area of fractured soft and low permeability coal seams[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(5): 855–865.
- [10] 桑树勋, 皇凡生, 单衍胜, 等. 碎软低渗煤储层强化与煤层气地面开发技术进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 196–210.
- SANG Shuxun, HUANG Fansheng, SHAN Yansheng, et al. Technology processes of enhancement of broken soft and low permeability coal reservoir and surface development of coalbed methane[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 196–210.
- [11] 张群, 葛春贵, 李伟, 等. 碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂煤层气高效抽采模式[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 150–159.
- ZHANG Qun, GE Chungui, LI Wei, et al. A new model and application of coalbed methane high efficiency production from broken soft and low permeable coal seam by roof strata-in horizontal well and staged hydraulic fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 150–159.
- [12] GAO Deli, BI Yansen, XIAN Bao'an. Technical advances in well type and drilling & completion for high-efficient development of coalbed methane in China[J]. Natural Gas Industry B, 2022, 9(6): 561–577.
- [13] 李雪娇, 陈帅, 甄怀宾, 等. 碎软煤层夹矸间接压裂开发煤层气技术研究[J]. 钻采工艺, 2022, 45(5): 69–74.
- LI Xuejiao, CHEN Shuai, ZHEN Huaibin, et al. Study on indirect fracturing technology for CBM development in the parting of broken soft coal seams[J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(5): 69–74.
- [14] 周加佳. 水平井分段压裂技术在煤层气开发中的应用实践[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(8): 27–30.
- ZHOU Jiajia. Application practice of horizontal well segmental fracturing technology in CBM exploitation[J]. Coal Geology of China, 2019, 31(8): 27–30.
- [15] 冯达晖. 煤矿井下分段水力压裂梳状定向长钻孔钻进技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(5): 8–12.
- FENG Dahui. Research on the technology of comb-shaped long directional hole drilling by segmented hydraulic fracturing in underground coal mine[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(5): 8–12.
- [16] 贾秉义, 陈冬冬, 吴杰, 等. 煤矿井下顶板梳状长钻孔分段压裂强化瓦斯抽采实践[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 70–76.
- JIA Bingyi, CHEN Dongdong, WU Jie, et al. Practice of enhanced gas extraction by staged fracturing with comb-shaped long hole in coal mine roof[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2): 70–76.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 杨科, 刘帅. 深部远距离下保护层开采多关键层运移-裂隙演化-瓦斯涌出动态规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(5): 991–1000.
- YANG Ke, LIU Shuai. Rule of multi-key strata movement-fracture evolution-dynamics of gas emission in deep long distance lower protective layer mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(5): 991–1000.
- [20] 刘乐, 张俭, 方秦月, 等. 碎软低渗煤层顶板定向长钻孔水力加砂分段压裂工程应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(8): 91–100.
- LIU Le, ZHANG Jian, FANG Qinyue, et al. Application of hydraulic sand staged fracturing in directional long drilling of roof in broken soft and low permeability coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 91–100.
- [21] 孙四清, 李文博. 井下碎软煤层顶板加砂分段压裂瓦斯高效抽采技术[J]. 工矿自动化, 2022, 48(12): 101–107.
- SUN Siqing, LI Wenbo. High-efficiency gas extraction technology of staged fracturing roof with sand of underground broken and soft coal seam[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(12): 101–107.
- [22] 王晶, 段静, 李丹丹, 等. 沁水盆地 15 号煤层顶板分段压裂水平井适应性及产气效果预测[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(6): 16–20.
- WANG Jing, DUAN Jing, LI Dandan, et al. Coal No.15 roof staged fracturing horizontal well adaptability and gas production effect prediction in Qinshui Basin[J]. Coal Geology of China, 2022, 34(6): 16–20.
- [23] 龚迪光, 曲占庆, 李建雄, 等. 基于 ABAQUS 平台的水力裂缝扩展有限元模拟研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1512–1520.
- GONG Diguang, QU Zhanqing, LI Jianxiong, et al. Extended finite element simulation of hydraulic fracture based on ABAQUS platform[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(5): 1512–1520.
- [24] 许耀波, 张培河, 范宗洋, 等. 碎软煤层顶板水平井穿层压裂裂

- 缝扩展规律及敏感因素分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(2): 420–428.
- XU Yaobo, ZHANG Peihe, FAN Zongyang, et al. Fracture propagation law and sensitive factors analysis of layer–penetrating fracturing in the horizontal well within roof strata of broken–soft coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(2): 420–428.
- [25] LI D Q, ZHANG S C, ZHANG S A. Experimental and numerical simulation study on fracturing through interlayer to coal seam[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21: 386–396.
- [26] 杨伟超, 徐宏杰, 刘会虎, 等. 芦岭煤矿 10 号煤层瓦斯赋存及其控制因素综合评价[J]. 煤矿安全, 2024, 55(2): 27–34.
- YANG Yichao, XU Hongjie, LIU Huihu, et al. Gas occurrence of No.10 coal seam and comprehensive evaluation of its control factors in Luling Coal Mine[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(2): 27–34.
- [27] 田花永. 芦岭煤矿 II 水平地应力场特征及其对巷道变形影响研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2010.
- TIAN Huayong. Study on ground stress of second level and its influence to the roadway deformation of Luling Coal Mine[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2010.
- [28] 秦利峰, 刘忠, 刘玉明, 等. 水力喷射压裂工艺在郑庄里必区块煤层气开发中的应用[J]. 中国煤层气, 2016, 13(4): 30–33.
- QIN Lifeng, LIU Zhong, LIU Yuming, et al. Application of hydro-jet fracturing technology of CBM exploitation in Zhengzhuang Libi Block[J]. China Coalbed Methane, 2016, 13(4): 30–33.
- [29] 张玉浩, 杨永康, 王晨龙. 碎软煤层顶板水力压裂多裂缝穿层扩展规律研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(12): 63–71.
- ZHANG Yuhao, YANG Yongkang, WANG Chenlong. Study on the law of multi–fracture through–layer propagation of crushed soft coal seam roof by hydraulic fracturing[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(12): 63–71.
- [30] 武强, 王显辉, 曾一凡, 等. 基于 EWOA–VMD 的钻孔弹性波处理与煤岩识别方法[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(5): 857–871.
- WU Qiang, WANG Xianhui, ZENG Yifan, et al. Drilling elastic wave processing and coal–rock identification method based on EWOA–VMD[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(5): 857–871.
- [31] 陈泽平, 闫保永, 王国震, 等. 煤矿井下随钻测量技术研究现状及展望[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(6): 130–134.
- CHEN Zeping, YAN Baoyong, WANG Guozhen, et al. Research status and prospect of MWD technology in coal mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(6): 130–134.
- [32] 陈龙, 陈刚, 张冀冠. 矿用随钻动态方位伽马仪器的研制与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(1): 86–91.
- CHEN Long, CHEN Gang, ZHANG Jiguan. Development and application of a mine–used dynamic azimuth gamma instrument while drilling[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(1): 86–91.

(责任编辑 吴敏杰)