

超大采高工作面厚硬顶板压裂卸压技术研究及应用

雷亚军¹, 冯彦军², 康红普^{2,3,4}, 赵福堂¹, 尚晓光^{2,4,5}, 王 锐², 王 鹏², 张 震², 任建超¹,
赵凯凯², 郑仰发², 刘晓刚²

(1. 陕西陕煤曹家滩矿业有限公司, 陕西 榆林 719000; 2. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 3. 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室, 北京 100013; 4. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013; 5. 中煤陕西能源化工集团有限公司, 陕西 榆林 719000)

摘 要: 针对超大采高厚硬顶板综采工作面面临的超大开采空间、强矿压显现及超高煤壁稳定性控制等难题, 以世界首个 10 m 超大采高综采工作面——曹家滩煤矿 122104 工作面为研究背景, 系统开展了厚硬顶板压裂卸压机理、真三轴水力压裂裂缝重构试验、三维裂缝扩展流固耦合数值模拟、大流量复合压裂技术与工艺、水力压裂效果监测与评价等方面的研究。研究表明: 厚硬顶板水力压裂卸压作用机制主要体现在结构调控、应力转移、能量释放、强度劣化等方面; 延安组相较于直罗组脆性矿物含量更高, 易形成复杂裂缝网络; 排量由 1 m³/min 增至 5 m³/min, 裂缝平均半径由 21.9 m 增至 32.5 m, 增幅约为 48.40%, 排量越大水力裂缝尺度越大。研发了井下厚硬顶板水力压裂卸压技术及大流量压裂装备, 开发了磨料射流预切缝与 5 m³/min 大流量复合压裂技术工艺, 提出了一种井下长水平钻孔定向水力压裂“一场一策”分区设计理念, 形成了一种动态更新压裂层位和压裂方案的井下长水平钻孔定向水力压裂方法, 并在曹家滩煤矿开展了工程应用试验, 实现了 10 m 超大采高工作面矿压显现的科学有效防控。通过地面微震实时监测技术实时捕捉裂缝网扩展轨迹, 有效指导了水力压裂方案的优化, 并获得了顶板水力裂缝空间展布特征。开展了水力压裂实施效果的多因素综合评价, 对液压支架工作阻力、工作面周期来压步距和持续距离、来压动载系数、微震事件及能量等进行综合分析, 综合评价了水力压裂效果。井下试验结果表明: 曹家滩煤矿井下水力裂缝以水平裂缝为主, 沿钻孔两侧扩展平均距离约为 80 m, 有效弱化了工作面范围内上覆厚硬、完整顶板, 实现了区域顶板结构有效调控; 通过区域压裂技术将厚硬岩层组提前预裂, 减小了来压步距和动载系数, 保障了 10 m 超大采高工作面安全高效生产。

关键词: 特厚煤层; 10 m 超大采高; 厚硬顶板; 复合压裂; 区域卸压

中图分类号: TD324 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)04-1907-28

Research and application of pressure relief technology for fracturing thick hard roof in super-high mining face

LEI Yajun¹, FENG Yanjun², KANG Hongpu^{2,3,4}, ZHAO Futang¹, SHANG Xiaoguang^{2,4,5}, WANG Rui²,
WANG Peng², ZHANG Zhen², REN Jianchao¹, ZHAO Kaikai², ZHENG Yangfa², LIU Xiaogang²

(1. Shaanxi Caojiatan Mining Co., Ltd., Yulin 719000, China; 2. Coal Mining Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China; 4. Coal Mining Branch, China Coal

收稿日期: 2024-11-10 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1378

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2023YFC2907502); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (52404129);
天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项资助项目 (2023-TD-ZD003-003)

作者简介: 雷亚军 (1968—), 男, 陕西兴平人, 正高级工程师, 硕士。E-mail: 770306629@qq.com

通讯作者: 冯彦军 (1980—), 男, 山西文水人, 研究员, 博士。E-mail: cristiarno@163.com

引用格式: 雷亚军, 冯彦军, 康红普, 等. 超大采高工作面厚硬顶板压裂卸压技术研究及应用[J]. 煤炭学报, 2025, 50(4): 1907-1934.

LEI Yajun, FENG Yanjun, KANG Hongpu, et al. Research and application of pressure relief technology for fracturing thick hard roof in super-high mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(4): 1907-1934.



移动阅读

Research Institute, Beijing 100013, China; 5. China Coal Shaanxi Energy and Chemical Group Co., Ltd., Yulin 719000, China)

Abstract: Aiming at the problems of super-large mining space, strong ore pressure and ultra-high coal wall stability control faced by full-mechanized mining face with ultra-large mining height and thick hard roof, this paper takes the 122104 working face of Caojiatan Coal Mine, the world's first ultra-10 m super-mechanized mining face, as the research background. Systematic research on pressure relief mechanism of heavy hard roof fracturing, true triaxial hydraulic fracturing fracture reconstruction experiment, three-dimensional fracture propagation fluid-structure coupling numerical simulation, high-flow composite fracturing technology and process, hydraulic fracturing effect monitoring and evaluation are carried out. The results show that the pressure relief mechanism of hydraulic fracturing of thick hard roof is mainly embodied in structural regulation, stress transfer, energy release, strength deterioration and so on. Compared with Zhiluo formation, Yan'an Formation has a higher content of brittle minerals and is easy to form complex fracture network. The average fracture radius increases from 21.9 m to 32.5 m with the displacement increasing from 1 m³/min to 5 m³/min, an increase of about 48.40%. The larger the displacement, the larger the hydraulic fracture scale. The hydraulic fracturing pressure relief technology and high-flow fracturing equipment for thick hard roof have been developed. The composite fracturing technology of abrasive jet pre-cut slit and 5 m³/min large flow rate was developed, and a "one game, one policy" zoning design concept of directional hydraulic fracturing for long horizontal drilling was proposed. A set of directional hydraulic fracturing methods for long horizontal drilling with dynamic update of fracturing zones and fracturing plans was formed, and engineering application tests were carried out in Caojiatan Coal Mine. It has realized scientific and effective prevention and control of ore pressure in 10 m super-high working face. The surface microseismic real-time monitoring technology captures the spread track of the fracture network in real time, effectively guides the adjustment of hydraulic fracturing scheme, and obtains the spatial distribution characteristics of roof hydraulic fractures. The multi-factor comprehensive evaluation of hydraulic fracturing effect is carried out, and the working resistance of hydraulic support, the pressing step distance and continuous distance of working face cycle, the dynamic load coefficient, microseismic events and energy are comprehensively analyzed to evaluate the hydraulic fracturing effect. The underground test results show that the underground hydraulic cracks in Caojiatan Coal mine are mainly horizontal cracks, and the average spreading distance along both sides of the borehole is about 80 m, which effectively weakens the overlying thick and complete roof within the working face, and realizes the effective control of regional roof structure. By using zone fracturing technology, the thick hard rock group is pre-fractured in advance, reducing the pressure step and dynamic load coefficient, and ensuring the safe and efficient production of 10 m super-high mining face.

Key words: extra-thick coal seam; 10 m super large mining height; thick and hard roof; compound fracturing; regional pressure relief

0 引 言

我国厚煤层的储量约占全国煤炭储量的 44%, 千万吨级矿井均以厚煤层开采为主。经过近 60 a 的发展, 我国厚煤层一次截割高度逐步提升, 2009 年, 神华集团有限责任公司补连塔煤矿 7 m 超大采高工作面投产, 建成首个 7 m 超大采高工作面, 取得了良好的经济效益; 2016 年, 兖矿能源集团股份有限公司金鸡滩煤矿建成首个 8.2 m 超大采高工作面, 拉开了 8 m 级采高综采工作面的序幕; 2018 年, 被称为“世界第一高”的国能神东煤炭集团有限责任公司 8.8 m 超大采高智能综采工作面在上湾煤矿生产运行。经过多年的技术储备及经验积累, 国能神东煤炭集团补连塔煤矿、陕煤集团神木张家峁矿业有限公司张家峁煤矿、

山西东泰鑫源煤业有限公司等先后采用 8 m 采高综采工艺。但 8 m 以上超大采高开采面临的综采工作面围岩控制难度大、缺乏超高开采装备等难题, 严重制约了超大采高采煤工艺的进一步发展。大采高综放或综采矿井, 工作面回采活动对覆岩扰动较大, 顶板灾害特别是压架灾害频繁, 严重威胁采矿设备和人员安全。如麟游县崔木煤矿 302 工作面 2013 年 10 月 19 日有 95 部支架压死, 造成设备损坏、涌水和停产 3 个月, 造成经济损失高达 2.8 亿元; 补连塔煤矿综采工作面大面积压架灾害, 导致矿井停产 2 个月, 经济损失近 2 亿元^[1-3]。

针对特厚煤层, 为提高煤炭资源回收率、释放优质产能, 中煤科工开采研究院有限公司联合陕西陕煤曹家滩矿业有限公司共同开发了 10 m 超大采高智能

化综采成套技术与装备。围绕超大采高综采工作面面临的超大开采空间、超强矿压以及超高煤壁稳定性控制等难题开展攻关, 提出超大采高工作面顶板灾害综合防治技术体系。

超大采高综采工作面开采空间大、矿压显现强烈, 强扰动岩层运动导致围岩结构极易失稳, 片帮和冒顶难以控制。顶板多个厚硬岩层活动诱发工作面支架立柱油缸变形、压爆、支架大面积压死, 严重制约了超大采高工作面安全高效生产^[4-6]。基于此, 笔者团队提出厚硬顶板区域水力压裂卸压技术防治超大采高工作面矿压显现的成套工艺。国内外学者在水力压裂岩层控制理论、技术、装备及应用方面开展了大量研究与探索^[7-10]。其中应力是引起采矿工程地下空间围岩变形与破坏的根本驱动力, 大范围、高集中应力是煤矿井下采动应力的显著特点^[11]。水力压裂卸压法旨在利用高压流体注入坚硬岩层形成裂缝网络, 降低岩层强度和完整性, 改变岩层结构及失稳条件, 降低采动应力影响范围和集中程度。康红普等^[12-14]在水力压裂原理、参数、机具、施工工艺及压裂效果评价等方面开展攻关, 阐述了千米深井、软岩、强采动巷道支护-改性-卸压协同控制原理, 形成了巷道支护-改性-卸压协同控制技术, 在强采动巷道围岩控制取得良好应用效果。宋振骥等^[15]提出以“应力主控”为核心的巷道围岩释能主控技术体系, 通过卸压降低或者转移围岩周边高应力, 配合释能防冲支护结构, 实现坚硬顶板靶向预裂卸压控制开采空间岩体灾变的目标。黄炳香等^[16]提出坚硬顶板水压致裂控制的理论与成套技术框架, 阐明定向压裂临空坚硬悬顶的断顶线位置适当内错煤柱的原理, 给出了采动岩体水压致裂的时空关系及确定方法。刘长友等^[17]阐释了人工裂化煤岩体的弱结构体特征, 分析了煤岩裂化弱结构体随裂缝长度、角度、间距及组数变化对宏观应力的改变规律, 提出了基于煤岩裂化弱结构体的应力转移理论框架。陈绍杰等^[18]提出底板动压巷道压裂弱结构体应力转移控制技术, 通过在底板岩层应力传递路径上实施水力压裂, 制造特定空间形态的水压裂缝网, 形成压裂弱结构体, 降低巷道区域范围内的应力。吴拥政等^[19]提出深部冲击地压巷道“卸压-支护-防护”协同防控技术, 开发了长、短孔分段水力压裂工艺, 认为压裂改变了厚层坚硬岩层冲击能量释放形式, 有效抵御了高动、静叠加载荷。LIU等^[20]提出沿钻孔轴向预制裂缝定向水力压裂缩短悬顶长度的降冲技术, 采用预制裂缝定向压裂试验, 研究了不同应力差异系数下裂缝起裂压力和裂缝偏转程度。HE等^[21]认为采用预制裂缝定向水力压裂可有效弱化坚硬岩体, 并分析

了各种因素及其组合对预制裂缝扩展轨迹的影响。夏永学等^[22]开发了磨砂射流轴向切顶技术, 通过在巷道顶板钻孔内实施预制轴向裂缝、定向水力压裂等工序, 使巷道走向和倾向方向上均形成最有利于顶板垮落的人造裂缝网, 以实现最佳卸压效果。潘俊锋等^[23]提出建立煤层顶板地面、井下千米水平孔分段致裂卸压系统, 提前破坏冲击危险区域上覆顶板的完整性, 使得载荷向更完整顶板区域迁移, 为井下掘进、回采提供低应力作业大环境, 也使得冲击地压丧失启动的重要载荷条件。于斌等^[24]基于弹性薄板理论, 构建不同切顶工艺、多种组合边界条件下的近场坚硬顶板初次和周期破断力学模型, 揭示了近场坚硬顶板定向造缝采场卸压机理, 形成了大空间采场远近场坚硬顶板井上下控制理论及技术体系。郑凯歌等^[25]提出了煤矿井下定向长钻孔裸眼分段水力压裂“高/低”位协同超前区域防治冲击地压灾害技术模式, 工程试验表明顶板微震事件频次、总能量、顶板来压步距及来压范围均降低。杨俊哲等^[26]研究了厚硬顶板覆岩破断特征, 提出了低位关键层“悬臂梁”回转破断促使动静叠加载荷过灾害阈值引发的矿压动力灾害发生的机理, 揭示了顶板弱化治理矿压动力灾害的有效性, 据此研发了坚硬顶板分段水力压裂超前弱化治理技术。尚晓光等^[27-29]通过研究压裂前后巨厚坚硬顶板运动特征, 提出水力压裂改变了厚硬顶板的运动形式, 并通过理论研究、数值模拟及现场试验进行了验证。

水力压裂技术在煤矿围岩控制领域主要用于常规工作面坚硬难垮顶板控制、高应力巷道围岩卸压及冲击地压防治, 但其在超大采高综采工作面矿压防治方面的应用尚属首次, 亟待建立超大采高厚硬顶板水力压裂矿压灾害防治理论与技术体系。坚硬顶板压裂卸压效果与岩石物理力学性质、岩体结构、地应力等地质力学条件, 及压裂钻孔布置、压裂施工参数等众多因素有关。只有充分了解顶板特征、水力裂缝扩展形态, 提出合理的压裂工艺及方案, 才能取得较好的压裂效果^[30-31]。笔者以世界首个 10 m 超大采高综采工作面——曹家滩煤矿 122104 工作面为背景, 综合采用理论分析、原位测试、实验室试验、数值模拟、现场试验等研究方法, 开发超大采高工作面厚硬顶板压裂卸压技术, 并开展工程应用试验, 以实现了超大采高工作面矿压的有效防控。

1 厚硬顶板水力压裂卸压机制

1.1 超大采高工作面概况

曹家滩煤矿 122104 综采工作面位于 12 盘区东翼, 北侧为未开采的实体煤, 南侧为 122106 采空区,

开切眼位于井田东部边界,巷道开口位于 12 盘区大巷保护煤柱内。开采煤层 2⁻² 煤,平均煤厚 10.5 m,采用一次采全高的综合机械化采煤工艺,工作面倾向长 300 m,走向长 5 977 m,地质储量约 24 850 t。工作面于 2023 年 9 月 20 日开始回采,截至 2023 年 11 月 27 日,已推采至 199 m,如图 1 所示。

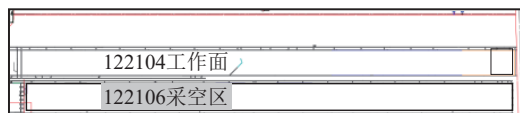


图 1 122104 工作面采掘平面

Fig.1 122104 mining plan of working face

2-2 煤层直接顶以粉砂岩为主,表现为深灰色,泥质胶结,块状层理;基本顶以中粒砂岩为主,表现为灰白色,成分以石英为主,长石次之,分选中等,次圆状,泥质胶结,小型交错层理;直接底以粉砂岩为主,表现为灰白色,块状层理,夹细粒砂岩薄层。表 1 为 122104 工作面范围内 T6 钻孔揭露地层结构。

表 1 T6 钻孔地层参数

Table 1 T6 borehole formation parameters.

地层系统	层序号	岩性	厚度/m
直罗组	14	粗粒砂岩	12.80
	13	细粒砂岩	0.90
	12	泥质粉砂岩	1.10
	11	细粒砂岩	6.30
	10	泥岩	1.40
	9	粉砂岩	11.60
	8	泥岩	1.70
延安组	7	煤	0.40
	6	粉砂质泥岩	1.60
	5	粉砂岩	5.10
	4	中粒砂岩	6.90
	3	细粒砂岩	11.90
	2	中粒砂岩	36.20
	1	2 ⁻² 煤	2.10

1.2 厚硬顶板水力压裂卸压机理综述

厚硬顶板水力压裂卸压作用示意如图 2 所示,图中显示了支护系统、顶板系统和裂缝网络系统。支护系统由煤壁、支架、采空区矸石组成,顶板系统包括近场和远场顶板,裂缝网络系统包括水力裂缝网络和已激活的天然裂隙。水力压裂卸压法旨在通过压裂形成的裂缝网络调控顶板系统结构,进而实现对应力场和能量场的干涉,削减顶板系统对支护系统的负面影响。

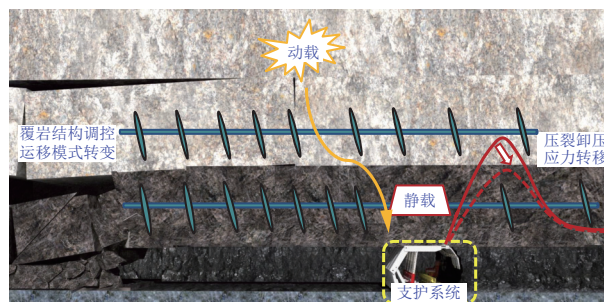


图 2 厚硬顶板水力压裂卸压作用示意

Fig.2 Diagram of pressure relief action of hydraulic fracturing of thick hard roof

厚硬顶板水力压裂卸压作用机制主要体现在结构调控、应力转移、能量释放、强度劣化等方面。

1) 水力压裂厚硬顶板结构调控机制。坚硬顶板具有厚度大、整体性强、自承能力强的特点。在顶板中持续注入高压流体,岩石产生损伤断裂,水力裂缝起裂扩展。破坏岩体基质制造人工新裂缝,同时诱导天然裂缝开启或滑移,形成了主裂缝、分支缝及已激活的天然裂缝构成的裂缝系统。基于水力压裂实现岩体的宏细观结构的改造,将坚硬完整顶板分层或分块,降低了坚硬顶板连续性和整体性^[16,32]。此外,在开采扰动下,岩体内部裂缝进一步发育,促使顶板分层或分段破断垮落,基于水力压裂实现对远近场顶板破断结构和运移模式的有效调控^[24,33]。

2) 水力压裂厚硬顶板应力转移机制。坚硬顶板易形成大面积悬顶,采空区难以压实,导致采空区四周形成大范围、高峰值的采动应力分布。水力裂缝能够切落低位或高位悬顶,诱导采动应力向远场岩体转移,降低支护体承受的静载荷,改善支护系统应力环境^[12,15]。同时,压裂能够促进顶板及时破断垮落并充填采空区,促使“煤壁-支架-采空区已垮落的矸石”支护系统的形成,提高支护系统的稳定性。

此外,远场厚硬顶板破断形成的动载荷向支护系统传递过程中,压裂关键弱化区内岩体强度低且裂缝较为发育,应力扰动下弱化区岩体易发生剪切错动,阻碍动载荷向支护系统的有效传递,产生应力均化效应^[17-18],降低工作面矿压显现程度。水力压裂通过弱化应力源和阻断应力传递路径,实现采动应力转移或削减,优化支护系统应力环境。

3) 水力压裂厚硬顶板提前释放弹性能。厚硬顶板岩层因弯曲、变形积聚大量弹性能,顶板突然破断失稳弹性能瞬间释放、动载显现剧烈。水力压裂破坏厚硬岩层强度及完整性,减小厚硬岩层破断长度和能量释放量,岩层的储能能力和能量释放能力也有所降低,实现从源头上削减弹性能积聚^[34-35]。此外,应力

波传递经过压裂弱化区, 裂缝系统间多重反射与透射导致应力波振幅衰减及波速降低, 且随着裂缝尺度的增大应力波的衰减程度越明显。弱化区的存在阻碍了应力波的传播, 加剧了应力波能量的衰减。压裂弱化区成为一个阻挡应力波传递的屏障, 削减了动载应力波对支护系统的负面影响。

4) 水力压裂厚硬顶板强度弱化机制。水岩物理、化学和力学作用导致岩石内部成分和微观结构的变化, 水沿着岩石内部的微小裂纹、裂隙渗透到矿物颗粒之间, 其润滑和软化作用使得岩石的内摩擦因数、黏聚力不同程度降低。岩石含有的黏土矿物成分, 如蒙脱石、绿泥石等, 遇水易发生化学反应, 导致其溶解、移位、分散等。黏土矿物在水岩作用下吸水膨胀, 产生拉应力, 宏观上表现出拉裂破坏, 萌生裂隙。水岩作用下岩石内部晶体颗粒强度与胶结程度降低, 岩石抗压强度、抗剪强度、弹性模量、黏聚力以及内摩擦角等力学参数发生劣化^[36-37]。此外, 由于裂缝网络的产生加剧了岩体强度劣化, 导致顶板稳定性降低, 自承力下降。

2 基于 X 射线衍射矿物组分分析

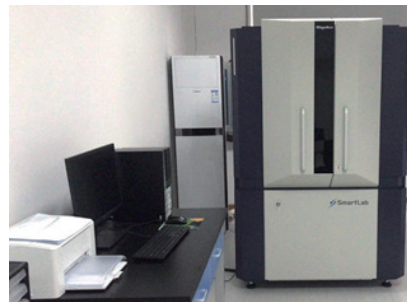
本试验采用理学 SmartLab SE X 射线衍射仪, 如图 3a 所示。全套装置由 X 射线衍射箱、恒温系统、数据采集控制系统 3 个主要部分组成。试验结果见表 2、表 3, 钻取曹家滩煤矿 122104 工作面煤层顶板 0~100 m 岩心, 取厚度大于 5 m 的砂岩岩心进行室内试验, 试件编号按照 T6 钻孔地层参数中的层序号进行编号, 干片制备方法如图 3b 所示。

从试验结果可以看出, 曹家滩煤矿 122104 工作面上方 100 m 范围内岩石黏土矿物含量最高, 其次为斜长石、石英、钾长石, 含少量菱铁矿与黄铁矿。直罗组岩心黏土矿物质量分数为 41.9%~51.3%, 延安组岩心黏土矿物质量分数为 29.5%~42.5%。黏土矿物以高岭石为主, 含少部分伊利石和绿泥石及伊/蒙混层, 其中伊/蒙混层中蒙皂石层占比 20%, 伊利石层占比 80%。蒙皂石是一种水敏型矿物, 与水发生反应, 体积膨胀, 降低储层渗透率。石英、钾长石、斜长石为脆性矿物, 脆性矿物含量越高, 越容易形成复杂裂缝网络。延安组脆性矿物含量高于直罗组, 即延安组相对于直罗组压裂更易形成复杂裂缝网络。

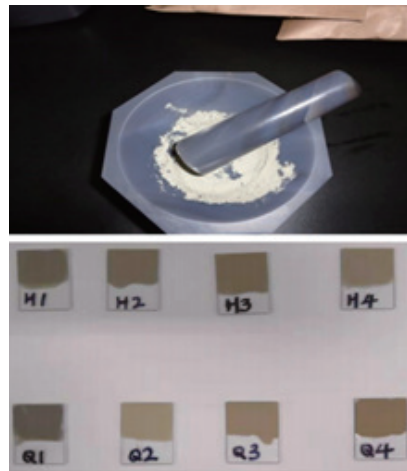
3 超大采高工作面顶板试样真三轴水力压裂试验

3.1 真三轴水力压裂试验系统

采用真三轴水力压裂试验系统开展顶板岩石的



(a) 射线衍射仪 SmartLab SE X



(b) 干片制备方法示意

图 3 X 射线衍射矿物组分试验

Fig.3 Mineral component test by X-ray diffraction

水力压裂试验, 试验设备如图 4 所示。试验设备默认适用尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块, 主要包括主机、三联油源、伺服油源、增压缸及数据测控等系统。

取曹家滩顶板砂岩岩块, 并将其加工成 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块。根据地应力测试报告, X 方向施加围压 23.4 MPa, Y 方向施加 12.8 MPa, Z 方向施加 8 MPa。选用清水溶液作为试验中使用的压裂液。试验详细的外部三轴应力条件和压裂液使用情况见表 4。

3.2 水力裂缝的三维重构

选用具有最高可达 450 kV 的高压射线源的工业计算机断层扫描 (Computed Tomography, CT) 成像系统来完成压裂后试件的扫描, 如图 5 所示。

对于扫描得到的 CT 图像要进行相应的图像处理: 引入多阈值的图像分割方法对 CT 图像中的不同结构进行提取, 然后在 MATLAB 软件中自编代码对算法进行实现, 得到了阈值分割后的图像。处理后的图像中只包含有 3 种灰度值的像素, 分别代表基质、颗粒和裂缝。然后将处理好的图像导入 Mimics 软件进行图像的三维重构, 重构过程如图 6 所示, 重构模型中, 红色部分则代表基质, 黄色部分代表水力裂缝。

表 2 T6 钻孔全岩矿物分析结果
Table 2 Results of mineral analysis of whole rock in T6 hole

试件编号	成分质量分数/%							脆性矿物占比/%
	石英	钾长石	斜长石	方解石	菱铁矿	黄铁矿	黏土	
2-1	13.6	13.8	39.7	0	0.6	0	32.3	67.1
2-2	14.4	9.8	43.5	0	1.0	0	31.3	67.7
3-1	15.4	17.0	37.2	0	0.9	0	29.5	69.6
3-2	18.7	11.2	34.2	0	1.7	0	34.2	64.1
4-1	16.1	15.4	31.6	0	1.5	0.4	35.0	63.1
5-1	22.2	14.4	23.3	0	1.1	0.6	38.4	59.9
9-1	29.4	9.9	23.8	0	1.8	0.9	34.2	63.1
9-2	28.1	4.7	22.9	0.3	1.2	0.3	42.5	55.7
11-1	19.2	13.0	32.9	0	0	0.4	34.5	65.1
14-1	24.0	22.8	1.4	0	0	0.5	51.3	48.2
14-2	11.7	15.5	28.4	0.4	0	2.1	41.9	55.6

表 3 T6 钻孔黏土矿物分析结果
Table 3 Results of clay mineral analysis in T6 hole

试件编号	黏土矿物质量分数/%				伊(蒙)混层/%		蒙皂石质量分数/%
	伊利石	高岭石	绿泥石	伊(蒙)混层	蒙皂石层	伊利石层	
2-1	12	75	9	4	20	80	0.26
2-2	8	84	7	1	20	80	0.06
3-1	8	73	15	4	20	80	0.24
3-2	19	49	25	7	20	80	0.48
4-1	7	83	8	2	20	80	0.14
5-1	17	57	18	8	20	80	0.61
9-1	14	63	14	9	20	80	0.62
9-2	13	70	12	5	20	80	0.43
11-1	11	75	8	6	20	80	0.41
14-1	5	83	8	4	20	80	0.41
14-2	7	82	9	2	20	80	0.17

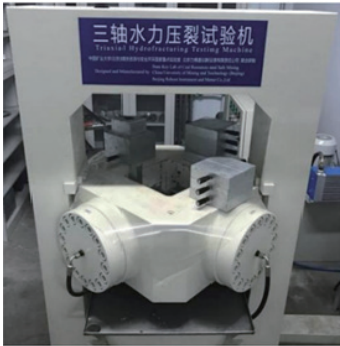


图 4 真三轴水力压裂试验设备

Fig.4 True triaxial hydraulic fracturing experimental equipment

3.3 水力裂缝重构结果

从前文试验中得到压裂后试件、压裂曲线及三维裂缝重构结果如图 7 所示。从压裂曲线可知,水压缓慢增大直至达到破裂压力,水压峰值约为 20.94 MPa,

表 4 水力压裂试验的应力条件和压裂液选取
Table 4 Stress conditions and fracturing fluid selection in hydraulic fracturing experiments

试件	三轴应力			压裂液	
	σ_h /MPa	σ_H /MPa	σ_z /MPa	黏度/(mPa · s)	排量/(mL · min ⁻¹)
1	12.8	23.4	8	1.0	10
2	12.8	23.4	8	1.0	10

注: σ_h 为最小水平主应力; σ_H 为最大水平主应力; σ_z 为垂直应力。

裂缝起裂并迅速扩展至边界,进而导致水压迅速下降。由三维裂缝重构结果可知,三维裂缝面呈现一定程度的起伏不平,但裂缝整体趋近于水平方向。

4 超大采高工作面顶板压裂三维数值模拟

采用三维流固耦合数值模拟开展裂缝三维形态

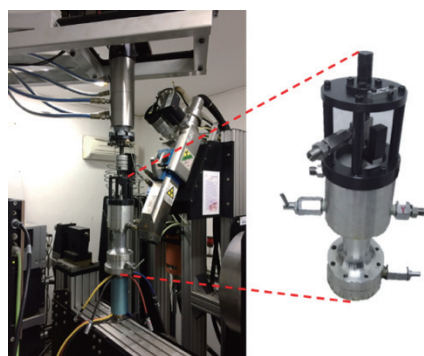


图5 原位三轴加载 CT 成像系统

Fig.5 In-situ triaxial loading and CT imaging system

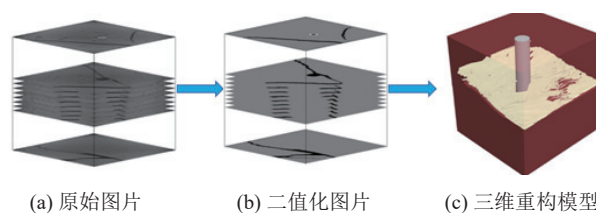


图6 三维裂缝重构过程

Fig.6 3D fracture reconstruction process

与扩展方位研究,分析不同排量下的裂缝扩展过程及形态。图8为基础模型示意,根据地应力测试报告,垂直应力为 8 MPa、最大水平主应力 23.4 MPa、最小水平主应力 12.8 MPa。

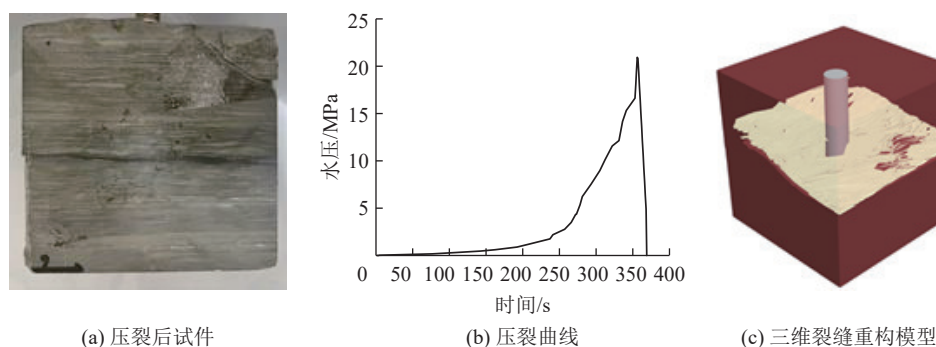


图7 注入排量为 10 mL/min 时裂缝的形态

Fig.7 Fracture morphology when injection displacement is 10 mL/min

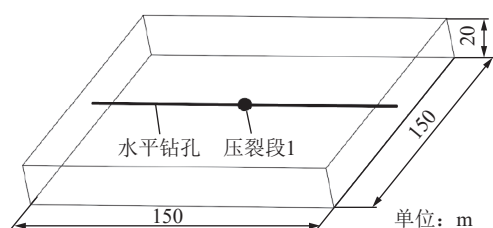
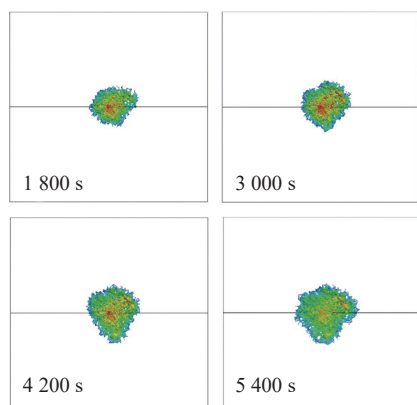


图8 顶板三维水力压裂基础模型示意

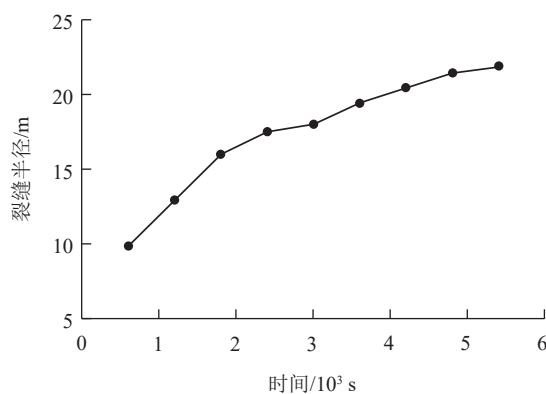
Fig.8 Diagram of roof 3D hydraulic fracturing foundation model

图9为排量 $1 \text{ m}^3/\text{min}$ 时不同压裂时间裂缝扩展形态。由图9可知,水力裂缝呈现椭圆状自相似扩展特征,裂缝主要沿着水平面扩展。随着注水时长增加,裂缝半径及扩展面积逐渐增大,注水时长达 2 400 s 后,裂缝平均半径和面积增速减缓。注水 600、2 400、5 400 s 时的裂缝半径分别约为 9.9、17.5、21.9 m。

图10为不同排量下裂缝扩展形态。由图10可知裂缝平均半径随着排量增加而增大,压裂时间为 5 400 s 时,排量从 $1 \text{ m}^3/\text{min}$ 增至 $5 \text{ m}^3/\text{min}$ 的过程



(a) 裂缝形态 (俯视图)



(b) 裂缝尺度统计

图9 不同压裂时长下裂缝扩展形态及尺度

Fig.9 Fracture growth morphology and scale under different fracturing duration

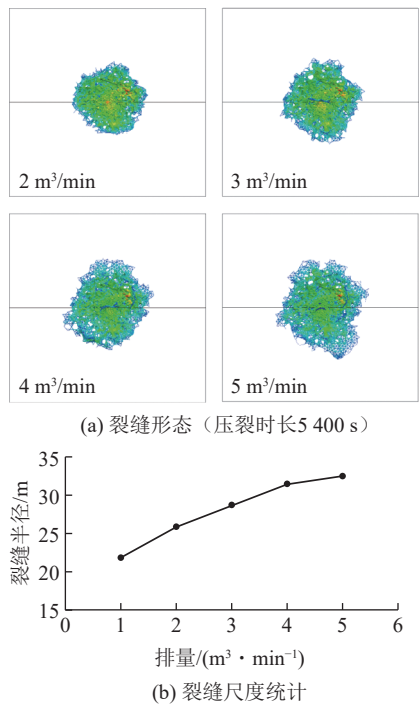


图 10 不同排量下裂缝扩展形态及尺度

Fig.10 Fracture growth morphology and scale under different displacement

中,裂缝平均半径从 21.9 m 增至 32.5 m,增幅约为 48.40%,可见,排量越大水力裂缝尺度越大。

在同一层位设置 3 条水平钻孔,采用分段压裂的方式开展压裂模拟,图 11 为顶板水平孔分段压裂裂缝展布模拟结果。由图可见,分段压裂裂缝主要为水平展布,而在垂向方向上未见显著扩展,裂缝近似以椭圆形向四周延展。压裂裂缝扩展会扰动局部应力场进而影响相邻裂缝扩展路径。相邻裂缝可能朝向某一优势方位扩展或产生裂缝抑制。

表 5 曹家滩煤矿水压致裂地应力测量结果

Table 5 Hydraulic fracturing in-situ stress measurement results of Caojiatan coal mine

测点序号	测段埋深/m	压裂参数/MPa			主应力/MPa			破裂方向	岩性
		P_b	P_r	P_s	σ_H	σ_h	σ_z		
1	284.0	11.06	4.07	3.34	4.75	2.74	7.10	N46.9°E	泥质粉砂岩
2	290.5	7.39	3.94	3.28	4.83	2.85	7.26	—	细粒砂岩
3	292.0	7.42	3.42	2.41	2.77	1.89	7.30	—	泥质粉砂岩
4	301.0	—	15.63	12.32	20.47	11.89	7.53	N33.5°E	中粒砂岩
5	302.5	—	18.55	11.85	16.17	11.44	7.56	—	中粒砂岩
6	304.0	—	15.63	10.97	16.48	10.57	7.60	—	中粒砂岩
7	305.5	—	16.82	10.34	13.43	9.96	7.64	—	细粒砂岩
8	306.5	—	13.87	8.65	11.33	8.28	7.66	—	细粒砂岩
9	308.0	—	14.30	8.88	11.62	8.52	7.70	—	细粒砂岩
10	309.5	—	14.64	9.36	12.75	9.02	7.74	—	细粒砂岩
11	316.0	—	4.08	3.42	5.62	3.14	7.90	—	细粒砂岩

注: P_b 为岩层破裂压力; P_r 为重张压力; P_s 为瞬时停泵压力。

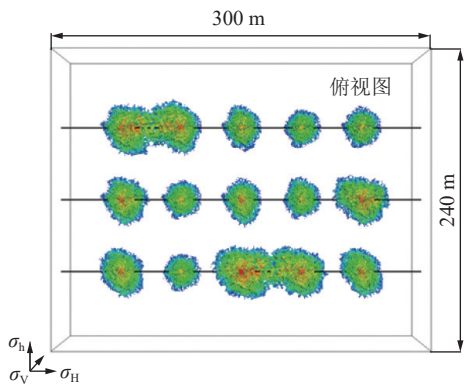


图 11 曹家滩顶板水平孔分段水力裂缝展布示意

Fig.11 Diagram of fracture distribution in Caojiatan roof horizontal hole

5 大流量复合压裂技术与工艺

围绕超大采高工作面矿压控制难题,研发了井下厚硬顶板水力压裂卸压技术及大流量压裂装备,开发了磨料射流预切缝与 5 m³/min 大流量复合压裂成套技术工艺,形成了适用于 10 m 特厚煤层超大采高工作面井下多层厚硬顶板水力压裂卸压技术。

5.1 基于地质力学综合测试的压裂层位确定方法

为了详细掌握顶板压裂岩层原岩应力场、岩石强度性质、岩石结构形态等参数,开发研制了 SYY-56 型小孔径水压致裂地应力测量装置、WQCZ-56 型小孔径井下巷道围岩强度触探测定装置、全景钻孔电子窥视。

在曹家滩煤矿 122104 综采工作面内回风巷 5 600 m 里程上覆岩层 60 m 处采用自主研发的 SYY-56 型小孔径水压致裂进行地应力测量试验,测量结果见表 5。由表 5 可知,埋深 301.0~309.5 m 范围内水平主应力

最大,垂直应力最小。根据试验结果,最大水平主应力方向平均为N40.2°E。图12为钻孔主应力值随深度变化的曲线。从图中可以看出,最大水平主应力、最小水平主应力均随深度的变化波动性的变化,变化幅度较大。

在122104综采工作面辅助运输巷共布置窥视孔和强度测试孔13个及1个测井钻孔,在回风巷共布置窥视孔和强度测试孔9个,布置10个测井钻孔,顶板原位综合测试点平面布置如图13所示。

部分顶板岩层原位强度值和岩层窥视分层测试结果和综合测试结果如图14、图15所示。从图中可以看出:①里程5600 m上覆岩层16.6~42.9 m范围内有2层强度超过80 MPa、完整性较好的砂岩组;②里程5300 m上覆岩层0~77.6 m范围内岩层分层较多,岩层强度处于48~66 MPa;③里程3800 m上覆岩层4.9~72.3 m范围内有4层强度超过60 MPa、完整性较好的砂岩组;④里程3300 m上覆岩层11.9~88.8 m范围内有4层强度超过65 MPa、完整性较好的砂岩组。

5.2 磨料射流预切缝技术工艺

5.2.1 磨料射流预切缝技术原理与工艺

磨料水射流技术的基本原理是在水力压裂前使用高压水射流和磨料颗粒高速冲击岩石,产生切割作用,形成一定尺寸的孔道,水力压裂过程中孔道诱导水力裂缝沿着孔道的方向扩展,从而实现定向改造厚硬顶板的目的。喷枪是磨料射流射孔技术的核心关键部件,水砂浆体通过喷枪上的喷嘴产生高速射流,进行切割作业,设备如图16所示。

磨料射流切缝技术工艺流程:①启泵,将泵的流量提至设计流量,泵出口压力应与喷砂压力相匹配;②加砂及提黏剂,将加砂比例稳定在5%~7%,同时提黏剂的流量按照预定的比例加入;③射孔,射孔时间不应少于10 min;④停砂,射孔时间达到设计要求后停止加砂;⑤顶替,停砂后用清水或悬浮液清洗管路,确保压裂管与孔眼间无积砂;⑥停泵,确保管路无积砂后,关闭高压水泵;⑦下一段射孔,减少压裂管柱长度,将喷枪回退至下一个位置,重复上述步骤①~⑥,直到最后一段射孔;⑧连续射孔,采用后退式射孔(由深到浅),射孔示意如图17所示。

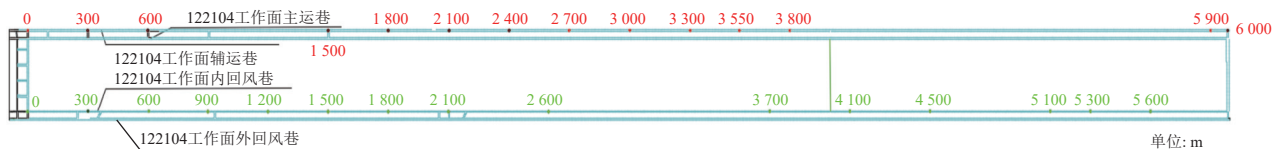


图13 顶板原位测试点平面布置

Fig.13 Roof in-situ test point plane layout

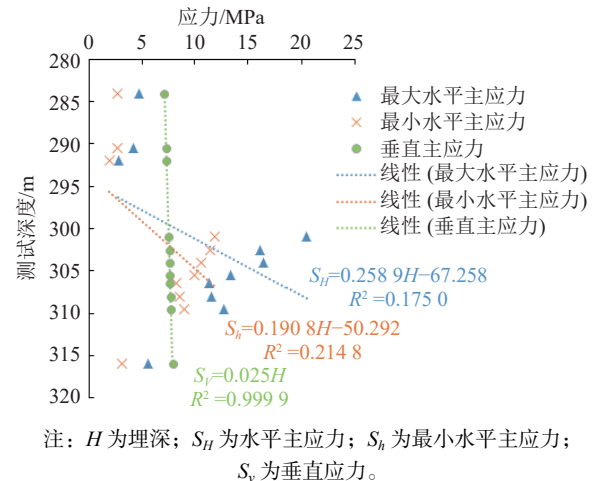


图12 钻孔主应力值随深度变化趋势

Fig.12 Change trend of borehole principal stress value with depth

5.2.2 磨料射流预切缝井下试验研究

为了研究磨料射流预切缝与常规水力压裂压裂效果的差异,在122104工作面里程3800~4400 m进行了2个压裂孔井下试验,射孔位置如图18所示,压裂层位为煤层上方14 m的砂岩层。其中,F5-12号井下压裂孔共压裂50段,段间距为15 m,其中磨料射流预切缝水力压裂与常规水力压裂各为25段;F5-9号井下压裂孔共压裂36段,段间距为15 m,其中磨料射流预切缝水力压裂与常规水力压裂各为18段。试验过程中,磨料射流设计参数见表6。

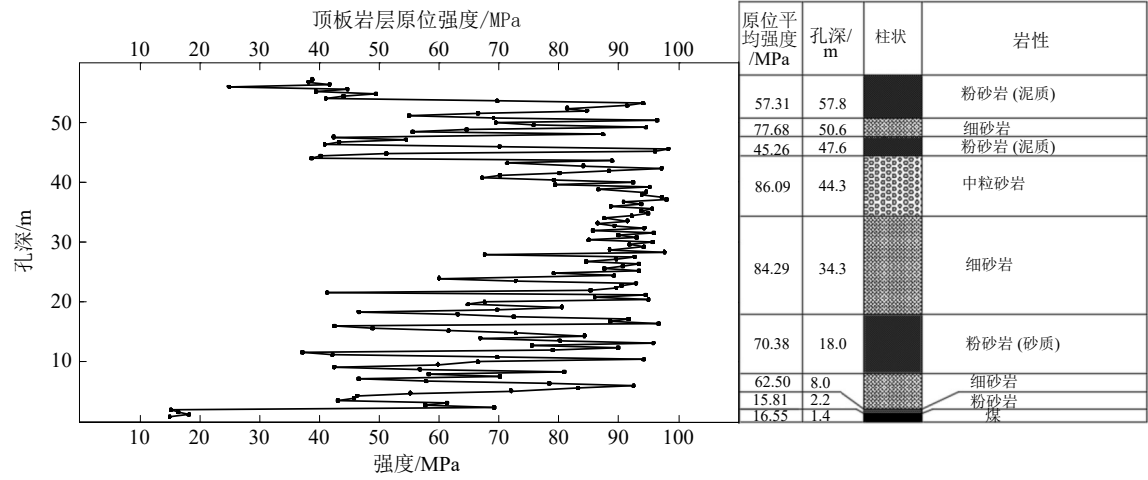
F5-12号孔与F5-9号孔压裂持续时间和压裂过程中返水情况等试验现象见表7、表8。从表中可以看出,F5-12号孔磨料射流压裂持续时间达到40 min的段数为22段,正常压裂持续时间达到40 min的段数为19段,未出现返水现象的磨料射流压裂比正常压裂多2段。F5-9号孔磨料射流压裂持续时间达到40 min的段数为16段,正常压裂持续时间达到40 min的段数为13段,未出现返水现象的磨料射流压裂比正常压裂多1段。因此,磨料射流预切缝后压裂试验效果较常规压裂具有显著的优势。

5.2.3 磨料射流切缝有效性验证

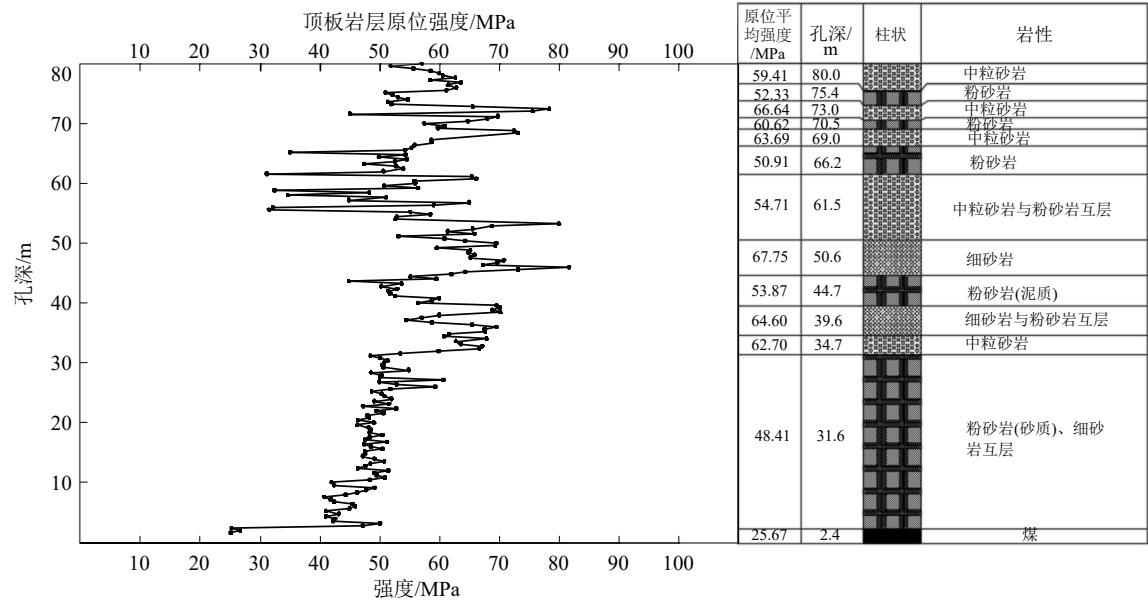
在122105工作面进行了固孔套管切缝先导试验,对10 mm厚的钢材套管进行了磨料射孔切割,射孔后套管孔眼的长度平均为19.1 mm,如图19所示。

将同一压裂钻孔内射孔复合压裂与未射孔压裂的数据进行对比见表 9。

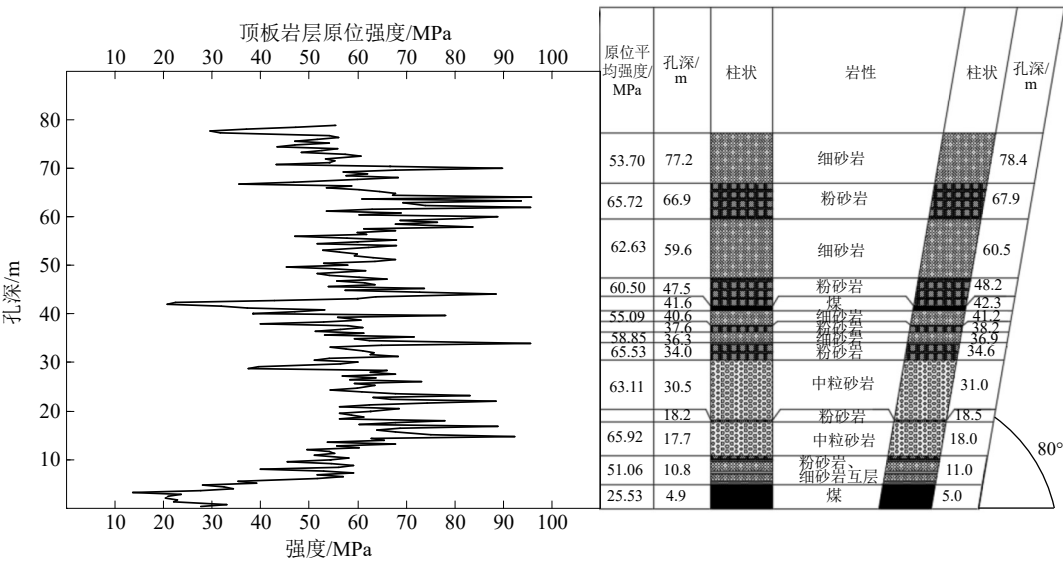
磨料射流后压裂时裸眼孔道没有返水现象, 而常规压裂 15 min 后孔道大量返水, 影响了水力压裂的



(a) 回风巷5 600 m里程测试结果



(b) 回风巷5 300 m里程测试结果



(c) 运输巷3 800 m里程测试结果

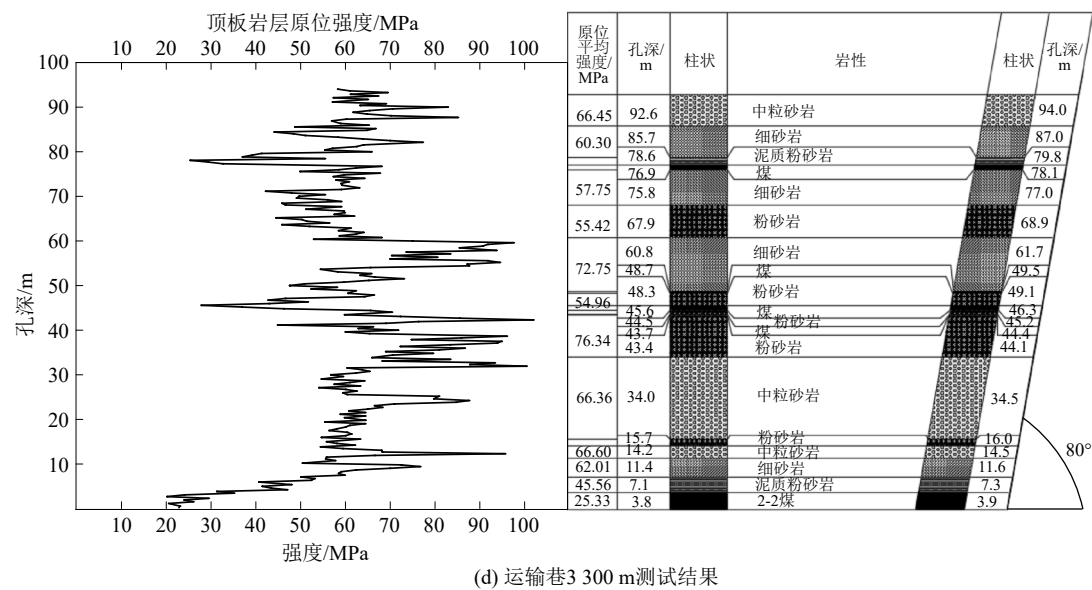


图 14 部分顶板岩层原位强度值、岩层窥视分层测试结果

Fig.14 In-situ strength values of some roof strata and stratification test results of rock strata peep

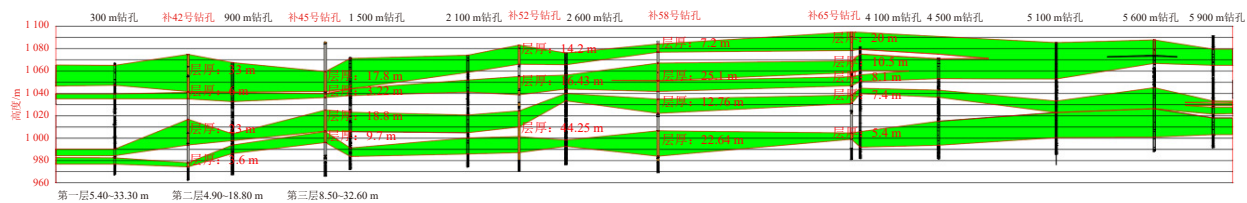


图 15 122104 工作面综合测试结果剖面

Fig.15 122104 working face “one field one strategy” zoned fracturing design scheme



(a) 磨料射流混砂撬



(b) 磨料射流喷枪

图 16 磨料射流混砂撬与喷枪

Fig.16 Abrasive jet sand mixing skid and spray gun

工,说明磨料射流后再进行压裂,压裂效果优于常规压裂。从磨料射流后压裂和常规压裂返水与压裂时间上分析,磨料射流后压裂时间充足并且孔道无返水,由此说明磨料射流后压裂比常规压裂造缝能力更强,压裂效果更好。

5.2.4 磨料射流水力压裂卸压效果验证

2024-04-08—2024-05-29 期间内,在 3 800 m 压

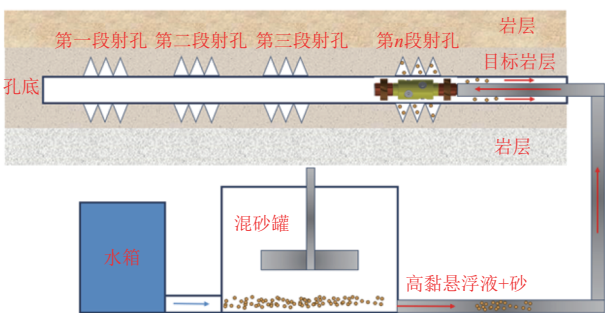


图 17 连续磨料射孔示意

Fig.17 Diagram of continuous perforation

裂钻场覆盖区内,发生在顶板中的微震事件为 939 个,2 次方能量事件 753 个,占总微震事件的 80.19%,微震事件总能量为 5.3×10^5 J,如图 20a 所示。顶板上方 0~40 m 和 40~80 m 微震总能量分别为 1.66×10^5 J (占微震总能量的 31.66%) 和 3.59×10^5 J (占微震总能量的 68.34%),如图 20b 所示。

由图 20 可以看出,磨砂射流后,发生在煤层上方 20 m 以下的微震总能量最低,而煤层上方 25、55 m 层位采用常规水力压裂后,煤层上方 20~60 m 范围内微震总能量占比最高,因此说明磨砂射流效果显著。

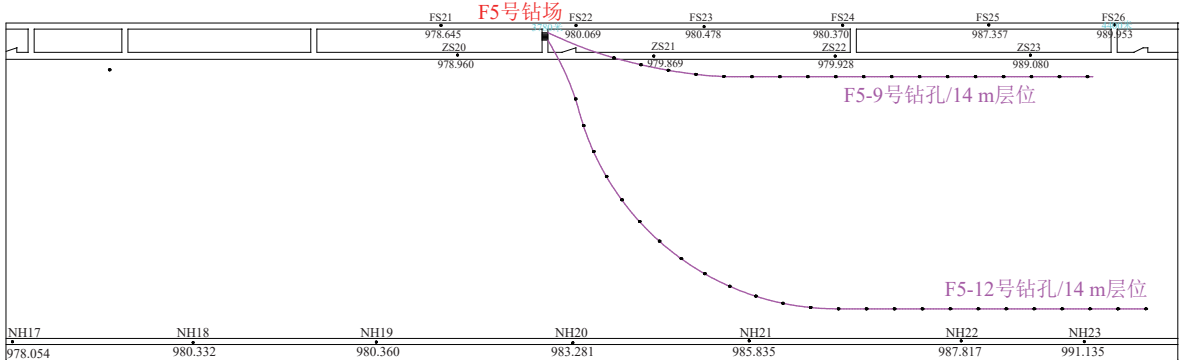


图 18 射孔位置示意

Fig.18 Perforation position diagram

表 6 磨料射流设计参数

Table 6 Abrasive jet design parameters

射孔排量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	射孔泵压/ MPa	射孔用时/ min	洗孔用时/ min	磨料量/ 袋	悬浮液 用量/L
1.0~1.5	12	10	12~13	20~25	30~35

表 7 F5-12 号孔试验

Table 7 F5-12 hole test

压裂方式	磨料射流 复合压裂	常规压裂
总段数	25	25
压裂持续时间达到40 min段数	22	19
未返水段数	7	5
少量返水段数	15	14
持续压裂时间小于40 min且大量返水段数	3	6

表 8 F5-9 号孔试验

Table 8 F5-9 hole test summary

压裂方式	磨料射流 复合压裂	常规压裂
总段数	18	18
压裂持续时间达到40 min段数	16	13
未返水段数	3	2
少量返水段数	13	11
持续压裂时间小于40 min且大量返水段数	2	5

2024-04-13—2024-05-29 期间, 122104 工作面共推采约 600 m(推进里程 4 399~3 800 m), 共发生周期来压 45 次。液压支架压力云图如图 21 所示, 可以

表 9 磨料射流前后压裂数据对比

Table 9 Comparison of fracturing data before and after abrasive jet

压裂类型	压裂位置/m	时长/min	稳定压力/MPa	最大压力/MPa	排量/(($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$))	备注
复合压裂	762	40	17.7	18.5	101	无返水现象
常规压裂	747	15	18.5	19.6	103	正常压裂15 min后, 返水较大



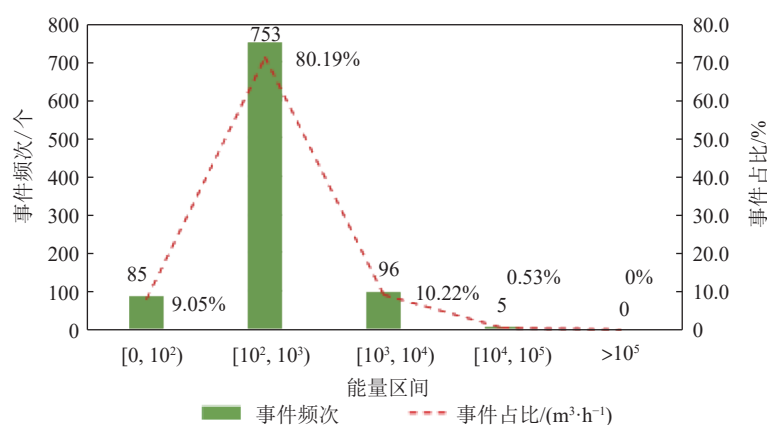
图 19 射孔后套管孔眼测量

Fig.19 Casing hole measurement after perforation

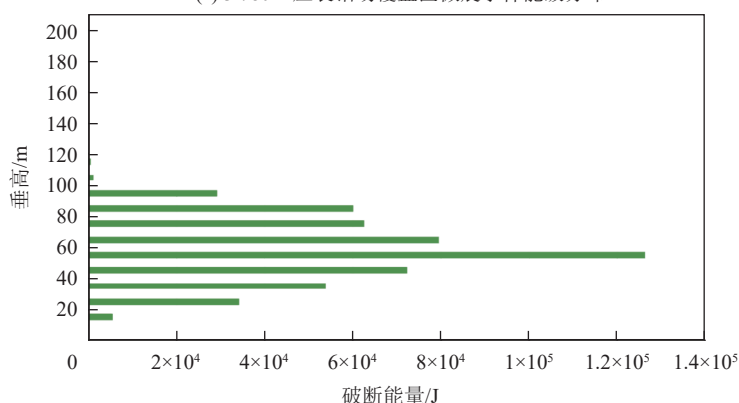
看出工作面来压大致可以分为 2 个阶段: 第 1 阶段 (2024-05-01—2024-05-15) 内, 来压影响范围较大 (第 30~115 支架)、持续距离较长 (平均大于 9 m)、倾向同步性强 (集中性来压); 第 2 阶段 (2024-05-16—2024-06-03), 工作面来压影响范围较小 (第 40~95 支架)、持续距离较短 (平均 6 m)、倾向同步性降低 (分散性来压), 整体来压强度呈降低趋势。

随着推进距离的增加, 122104 工作面 5 600、5 300、4 700、4 400、3 800 m 钻场, 来压持续距离分别为 10.6、12.4、9.9、10.3、7.2 m, 如图 22 所示。从图中可以看出, 随着工作面推进距离增大, 来压持续距离整体呈下降趋势。其中, 在 3 800 m 磨砂射流钻场区域内, 来压持续距离最小。

122104 工作面 5 600、5 300、4 700、4 400、3 800 m 钻场立柱平均压缩量分别为 425、631、425、375、222 mm, 如图 23 所示。从图中可以看出, 随着工作面



(a) 3 800 m 压裂钻场覆盖区微震事件能级分布



(b) 微震总能量垂向分布特征

图 20 F1 钻场全钻孔监测成果

Fig.20 F1 drill site full borehole monitoring results

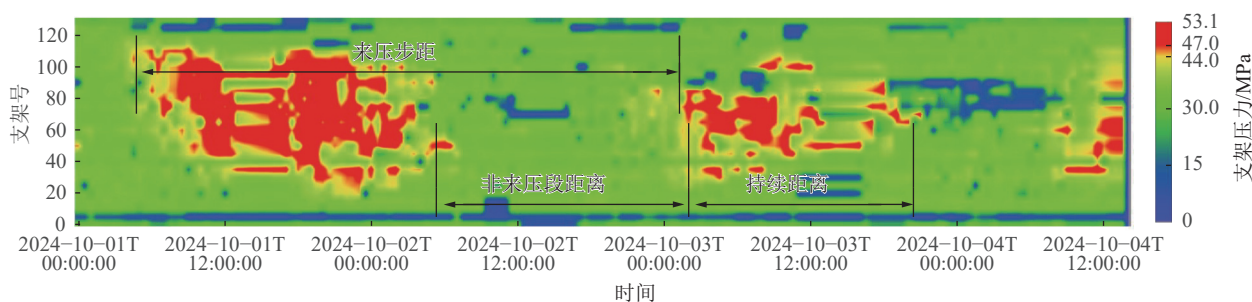


图 21 3 800 m 钻场里程覆盖区域工作面来压云图

Fig.21 3 800 m drilling field mileage covering area of working face to press cloud map

推进距离的增加,立柱平均压缩量整体呈下降趋势。其中,3 800 m 钻场区域内,立柱平均压缩量最小。

综上所述,采用磨砂射流后,微震总能量、周期来压步距、来压持续距离及立柱平均压缩量均最小,因此,磨砂射流较常规水力压裂预裂效果更好,能够有效降低厚硬顶板运动释放的能量,显著减小来压强度、来压步距及来压持续距离。

5.3 大流量远程集控压裂泵组研发

由于施工场景、供电标准、运输尺寸、防爆标准和工艺不同,石油行业的压裂设备不能直接在煤炭领域使用。因此,中煤科工开采研究院攻关开发了大流

量远程集控压裂泵组,单套压裂泵组的流量设计为 1.5 m³/min,多套并联以增大输出流量,开发的并联泵组最大流量可达到 5 m³/min,显著提升了地层改造的能力和效率。

图 24a 为智能大排量压裂泵组入井联调图片和井下实物拍摄图片。图 24b、24c 分别为远程集控大排量压裂泵组集控平台软件系统和井下压裂大容量拼接水箱图片。

5.4 复合压裂技术工艺

水力压裂的工艺流程分为 8 个阶段,分别为起泵、稳压坐封、注入压裂、煤层起裂、裂缝扩展、停泵、自

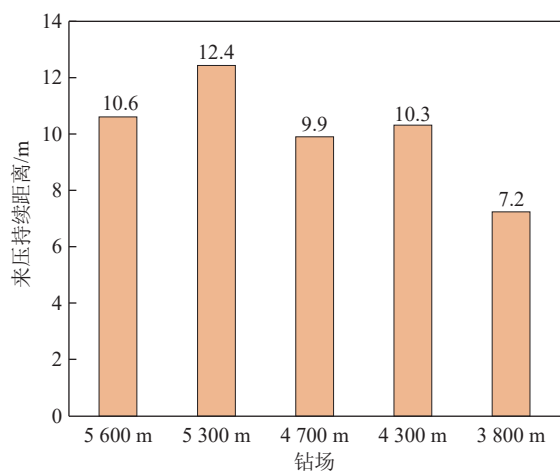


图 22 不同钻场的来压持续距离对比图

Fig.22 Comparison of pressure duration distances of different drilling sites

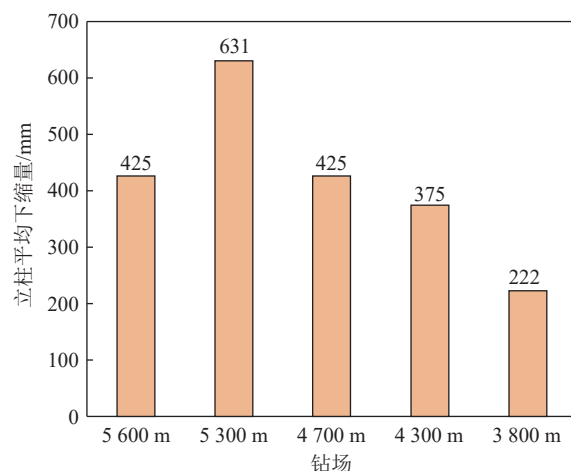


图 23 不同钻场立柱平均压缩量对比

Fig.23 Comparison of average compression amount of column in different drilling sites



(a) 智能大排量压裂泵组入井联调照片



(b) 智能大排量压裂泵组集控平台软件图片



(c) 井下压裂用大容量拼接水箱

图 24 智能大排量压裂泵组装备

Fig.24 Intelligent large displacement fracturing pump set equipment

然滤失降压、管路卸压。

5.4.1 井下长水平孔定向钻探工艺流程

定向钻机配套 CM-DDS 随钻轨迹测量装置, 该装置主要用于煤矿井下钻探施工过程中的效果检测, 可随钻测量钻孔倾角、方位、工具面等参数, 同时可实现钻孔参数、轨迹的实时显示, 便于钻探人员随时了解钻孔施工情况, 并及时调整工具方向和工艺参数, 使钻孔尽可能按照设计的轨迹延伸。长水平孔定向钻探工艺流程如图 25 所示。

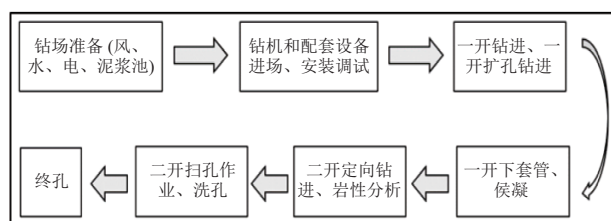


图 25 长水平孔定向钻探工艺流程

Fig.25 Long horizontal hole directional drilling process flow chart

5.4.2 井下长水平孔定向水力压裂工艺

井下长水平孔水力压裂技术原理: 当完成定向钻孔施工和压裂工具串送入指定位置后, 通过双封隔器单卡压裂目标层位段, 利用在封隔器中设计平衡泄压通道, 实现了高压管柱压裂液与封隔器压力的平衡传递; 当压裂液达到设定压力后封隔器实现完全坐封, 继续注入压裂液达到设定压力后, 定压器打开, 实现压裂段的压裂。压裂施工过程中, 高压压裂液不断注入岩层中, 促使作用于目标岩层的水压力逐渐升高, 当压力大于岩层破裂压力后, 顶板的弹性余能以动能形式释放, 促使治理目标层位产生新的裂缝系统, 其裂缝扩展主要是通过目标岩层自生基质孔裂隙、层理裂隙与压裂形成新的裂缝沟通、发育、延展及贯穿。图 26 所示为长水平孔定向水力压裂示意。

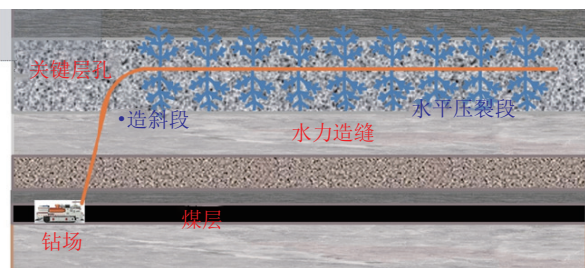


图 26 长水平孔定向钻孔水力压裂示意

Fig.26 Hydraulic fracturing diagram of long horizontal hole directional drilling

井下长水平孔压裂工艺主要由压裂设备优选、压裂工具组合、工具选型、泵注流程等组成, 如图 27

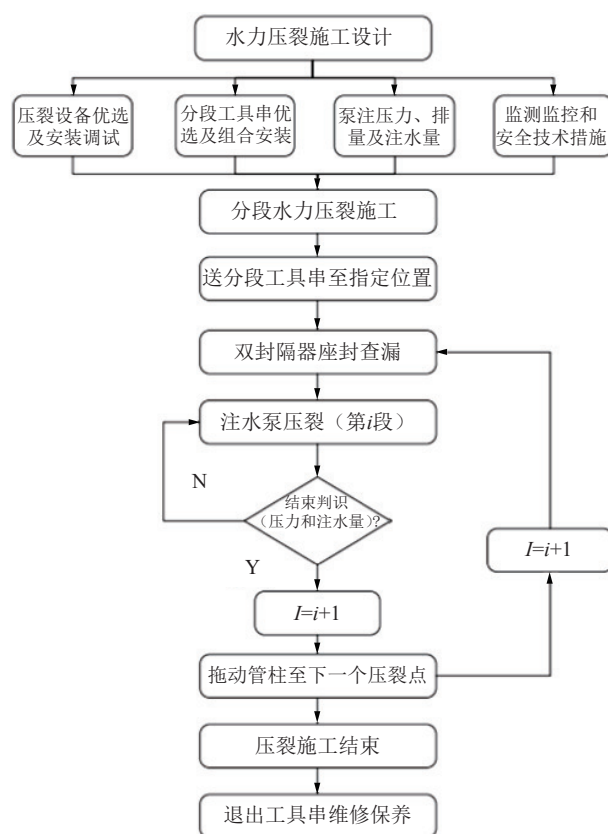


图 27 长水平孔定向钻孔水力压裂工艺流程

Fig.27 Flow chart of hydraulic fracturing process for directional drilling of long horizontal holes

所示。

5.5 “一场一策”分区设计水力压裂方案

由 5.1 节地质力学综合测试结果可知, 同一工作面条件下, 不同位置、不同层位的地应力、岩性、天然裂隙情况及岩体强度存在较大差异, 若所有压裂场均采用一种压裂方案, 形成的人工缝网往往与预期的结果差异很大, 因此提出了一种井下长水平钻孔定向水力压裂“一场一策”分区设计理念。水力压裂前, 在每一个压裂场进行井下取心、岩体强度原位测量、井下测井、地应力测量等工作, 然后根据详实丰富的覆岩立体综合测试数据, 进行该压裂场的压裂层位确定和压裂方案的设计。基于此, 形成了一套动态更新压裂层位和压裂方案的井下长水平钻孔定向水力压裂工艺。

曹家滩煤矿 122104 工作面初采压裂方案如图 28 所示。定向长钻孔覆盖区域为 5 600 m 至开切眼, 主要施工层位为煤层上方 13、30、80 m 的砂岩层。13 m 层位钻孔间距为 73 m, 30 m 层位钻孔间距为 66~73 m, 80 m 层位钻孔间距为 140 m; 单孔压裂一段为 30 m, 一段时长为 90 min, 瞬时压力平均为 21 MPa, 平均流量为 73 m³/h。

根据 122104 工作面综合测试结果剖面图, 曹家滩煤矿 122104 工作面正常回采期间“一场一策”分区

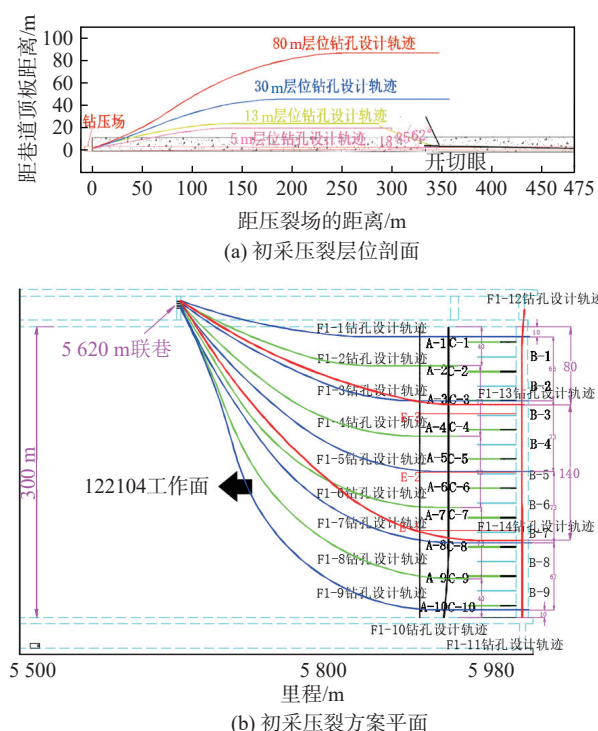
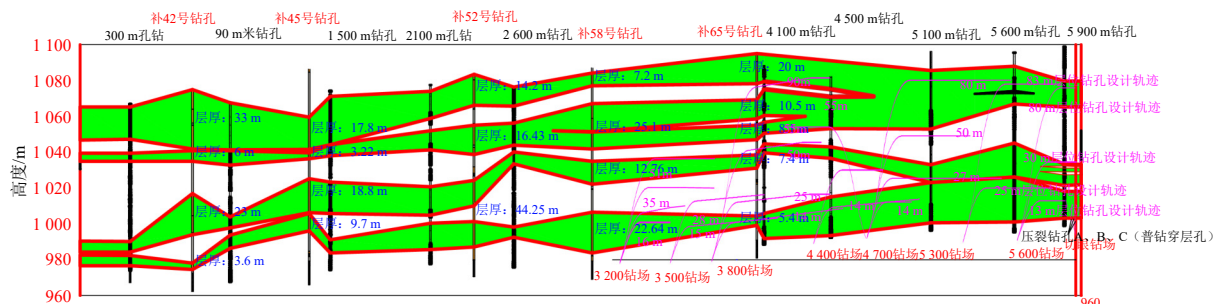


图28 122104工作面初采压裂方案

Fig.28 Fracturing plan of 122104 working face



注：图中50 m等均为该层位钻孔轨迹。

图29 122104工作面“一场一策”分区压裂设计方案

Fig.29 122104 working face “one field one strategy” zoned fracturing design scheme

F2-1 第1段压裂施工曲线如图30所示。从图中

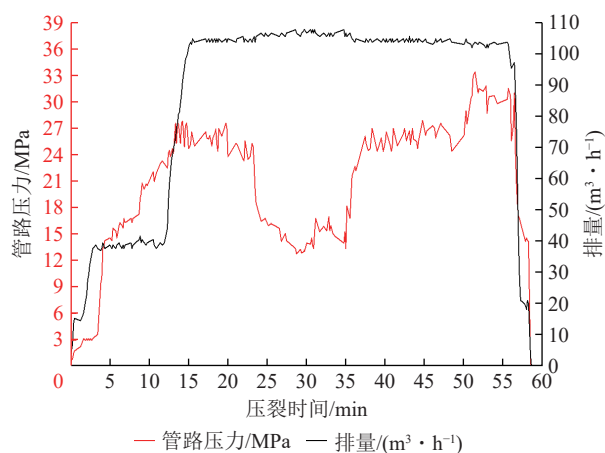


图30 F2-1第1段压裂施工曲线

Fig.30 F2-1 section 1 fracturing construction curves

压裂方案如图29所示。压裂初期共设计了7个钻场(5600 m联巷压裂场、5300 m联巷压裂场、4700 m联巷压裂场、4400 m联巷压裂场、3800 m联巷压裂场、3500 m联巷压裂场和3200 m联巷压裂场), 5600 m里程F1压裂场共设计13、30、80 m这3个层位; 5300 m里程F2钻场共设计25、83这2个层位; 4700 m里程F3钻场共设计14、27、50、55、80 m这5个层位; 4400 m里程F4钻场共设计14、34 m这2个层位; 3800 m里程F5钻场共设计14、25、50、90 m这4个层位; 3500 m里程F6钻场共设计15、28 m这2个层位; 3200 m里程F7钻场共设计16、27、35、51 m这4个层位, 完全覆盖了122104工作面面宽300 m范围。

5.6 区域压裂结果分析

水力压裂施工曲线是整个水力压裂过程期间排量与水压造缝真实状态的写照, 也是判断水力压裂是否成功的关键, 水力压裂每一个细小的环节都将在施工曲线中清晰的表现出来。本文由于篇幅的原因, 分别选取F2-1~F2-3压裂段水力压裂过程进行分析。

可以看出, 水力压裂持续时间为58 min 36 s, 开始—1 min 40 s为启泵阶段, 1 min 40 s—3 min 28 s为稳压坐封阶段, 3 min 28 s—13 min 13 s为注入压裂阶段, 13 min 13 s—13 min 43 s为岩层起裂阶段, 岩层破裂时管路压力为27.60 MPa, 13 min 51 s—56 min 25 s为裂缝扩展阶段, 裂缝延伸时油管压力为18.2 MPa, 56 min 33 s—57 min 50 s为压裂结束停泵阶段, 瞬时停泵时管路压力为24.4 MPa, 57 min 50 s—58 min 13 s为自然滤失降压阶段, 58 min 13 s—58 min 36 s为管路卸压阶段。岩层起裂和裂缝扩展阶段, 排量基本保持稳定, 油管压力波动性地逐渐升高和降低, 油管压力波动明显, 整个压裂过程中水力裂缝逐渐形成。

图31为F2-2第1段压裂施工曲线。从图中可以看出, 水力压裂持续时间为94 min 26 s。开始—1 min

11 s 为启泵阶段; 1 min 49 s—7 min 19 s 为稳压坐封阶段; 7 min 19 s—13 min 36 s 为注入压裂阶段; 13 min 36 s—14 min 37 s 为岩层起裂阶段, 岩层破裂时管路压力为 34.40 MPa; 14 min 37 s—92 min 41 s 为裂缝扩展阶段, 裂缝延伸时油管压力为 33.5 MPa; 92 min 41 s—92 min 41 s 为压裂结束停泵阶段, 瞬时停泵时管路压力为 28.4 MPa; 92 min 41 s—93 min 9 s 为自然滤失降压阶段; 93 min 9 s—94 min 26 s 为管路卸压阶段。岩层起裂和裂缝扩展阶段, 排量基本保持稳定, 油管压力波动明显, 整个压裂过程中水力裂缝逐渐形成。

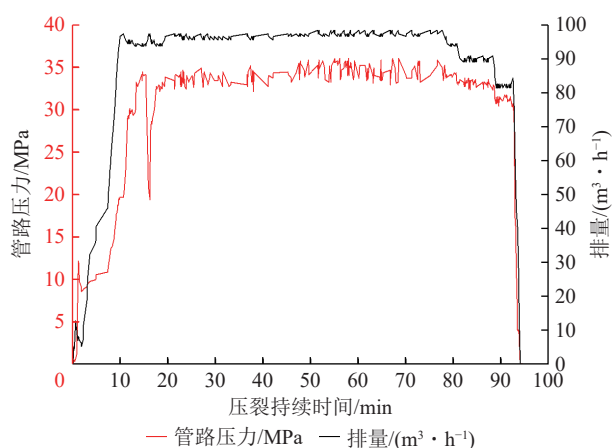


图 31 F2-2 第 1 段压裂施工曲线

Fig.31 F2-2 stage 1 fracturing construction curves

图 32 为 F2-3 第 1 段压裂施工曲线。从图中可以看出, 水力压裂持续时间为 95 min 13 s。开始—1 min 39 s 为启泵阶段; 1 min 39 s—6 min 47 s 为稳压坐封阶段; 6 min 47 s—19 min 29 s 为注入压裂阶段; 19 min 29 s—19 min 44 s 为岩层起裂阶段, 岩层破裂时管路压力为 31.40 MPa; 19 min 29 s—90 min 39 s 为裂缝扩展阶段, 裂缝延伸时油管压力为 23.20 MPa; 93 min 38 s—94 min 2 s 为压裂结束停泵阶段, 瞬时停

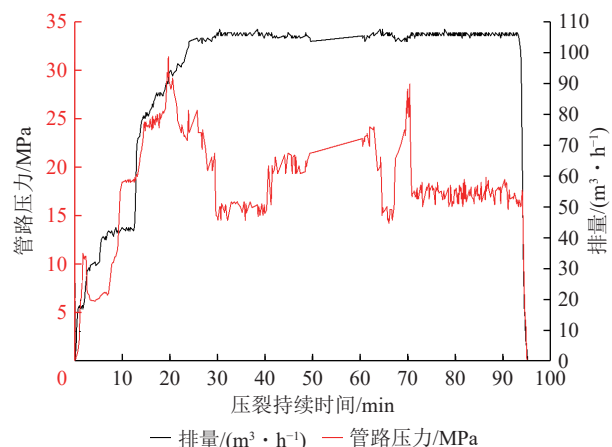


图 32 F2-3 第 1 段压裂施工曲线

Fig.32 F2-3 stage 1 fracturing construction curves

泵时管路压力为 16.2 MPa; 94 min 2 s—94 min 39 s 为自然滤失降压阶段; 94 min 39 s—95 min 13 s 为管路卸压阶段。

6 区域压裂缝网监测及效果评价

地面微震监测是压裂中定量评估缝网展布的主要方法, 可分析水力裂缝的长度、宽度、高度及方位角等空间发育特征和压裂改造范围。除采用地面微震监测系统监测水力裂缝的展布情况外, 另采用工作面矿压监测预警平台、钻孔应力计等, 监测工作面周期来压、支架工作阻力及动载系数、超前支承压、顶板下沉等参数, 通过分析水力压裂前后工作面矿压显现程度的变化综合评价水力压裂的实施效果。

6.1 微震实时监测水力裂缝扩展技术

6.1.1 地面实时微震监测布置方案

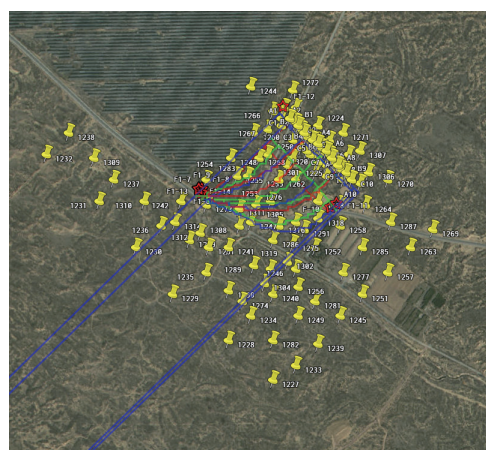
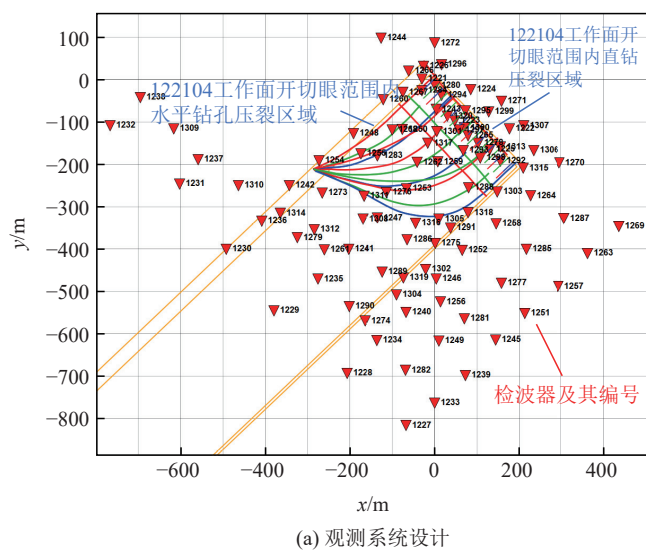
地面微震监测系统主要有星形大排列、标准网格和稀疏台阵 3 种。在设计观测系统时有一个重要的设计原则, 即排列东西或南北的长度应为储层埋深的 1.5~2.0 倍为佳。以曹家滩煤矿埋深 $d=320$ m 的储层为例, 微地震信号频率下限 $f=4.5$ Hz, P 波最小速度 $V=1\ 500$ m/s, 波长 $\lambda \approx V/f \approx 333$ m, 最小成像孔径为 $x \approx \sqrt{(d+\lambda/2)^2 - d^2} \approx 367$ m, 即检波器排列的东西半长与储层埋深相当, 东西全长约为储层埋深的 2 倍。实践中综合考虑征地范围、地震震波衰减和经济性, 观测系统设计时调整为 1.5 倍, 在重点区域进行检波器加密处理。

曹家滩煤矿 122104 工作面顶板埋深约 320 m, 按照不同钻场的地形特征、数据接收质量及噪声源情况采取不同的设计方案, 使其组成地面微震监测观测系统。图 33 所示为实际布设的地面微震监测观测系统, 检波器埋深 0.3 m, 检波器间距为 50 m, 水平钻孔正上方加密布设检波器, 采用钻场覆盖式布设。

6.1.2 微震实时监测技术

由地面三分量智能节点地震仪及其配套数字采集系统实时记录微震波形数据, 并通过 4G 网络实时上传至云服务器, 自动更新显示每分钟收到新的波形数据并检测该波形中是否包含压裂微震事件, 如果检测到微震事件, 处理软件将自动对该事件进行定位并计算矩震级和能量, 定位结果实时展示在软件 3 个二维视图 (XY 平面、XZ 侧视和 YZ 侧视) 中, 如图 34 所示。微震事件自动检测和自动定位的计算时间均在 2 s 内完成。

图 35 所示为陕煤曹家滩煤矿 122104 工作面水力压裂微震监测的典型水力压裂事件 (2023-09-02 T04:29:00 这 1 min 的监测数据), 图中显示的为 Z 分量微震记录, 可以清楚地看到有效的 P 波初至, 右侧



(b) 野外检波器分布卫星图

图 33 曹家滩 122104 工作面开切眼与 F1 钻场监测观测系统及地面检波器分布

Fig.33 Monitoring and observation system of Caojiatan 122104 working face and F1 drilling field and distribution of ground detector

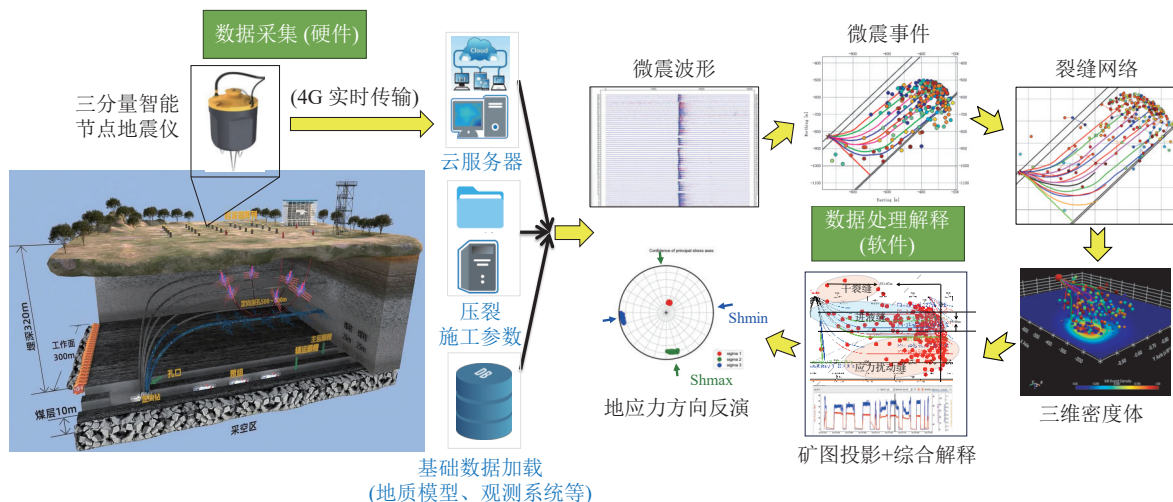


图 34 地面微震实时监测系统示意

Fig.34 Schematic diagram of ground microseismic real-time monitoring system

显示了 3 个平面 (XY 平面、 YZ 平面、 XZ 平面) 的事件定位结果。

微地震实时监测数据处理流程如图 36 所示, 通过对测井资料进行平滑处理进而获得水平层状速度模型。不同于石油领域的缝网监测, 煤炭领域水力压裂监测时受多种采掘活动如采煤机割煤、覆岩运动等的影响, 采集的原始数据中会受到非水力压裂破岩事件的干扰, 因此在数据处理环节必需加入水力压裂事件的判别。同时, 井下定向深孔压裂为裸眼孔压裂, 未进行射孔, 无法利用射孔信号来校正模型和标定误差, 因此本文提出利用采煤机截割事件来进行速度模型的校正和标定误差。

6.1.3 微震实时监测结果

1) F1 钻场 (里程 5 600~5 977 m) 监测结果。F1 钻场共压裂 14 个钻孔, 共压裂 146 段, 共监测到

2 024 个水力压裂微震事件, 平均每个孔监测到 146 个事件, 使用不同颜色代表不同钻孔发生的微震事件 (冷色代表先发生, 暖色代表后发生)。图 37a 为 F1 钻场 XY 平面事件点密度图, 图 37b 为 F1 钻场微震事件点 XZ 方向的三维投影。根据微震监测结果可知: 整体改造区域水力裂缝网络缝长为 493.31 m, 缝宽为 429.79 m, 低层位孔缝高为 30 m, 高层位孔缝高为 27 m, 水力裂缝扩展范围在水平、垂直方向上均完全覆盖了预压区域。

图 38 所示为 F1 钻场水平钻孔水力裂缝网络全景图, 缝网参数见表 10。F1 钻场缝网改造范围覆盖整个钻孔区域并向钻孔外围扩展一定距离, 平均每个孔缝长为 334 m、缝宽为 73 m、缝高为 28 m, 水力裂缝网络分支指数平均大于 4, 各段形成复杂的水力裂缝网络, 其中南翼和北翼裂缝网络基本对称, 压裂效

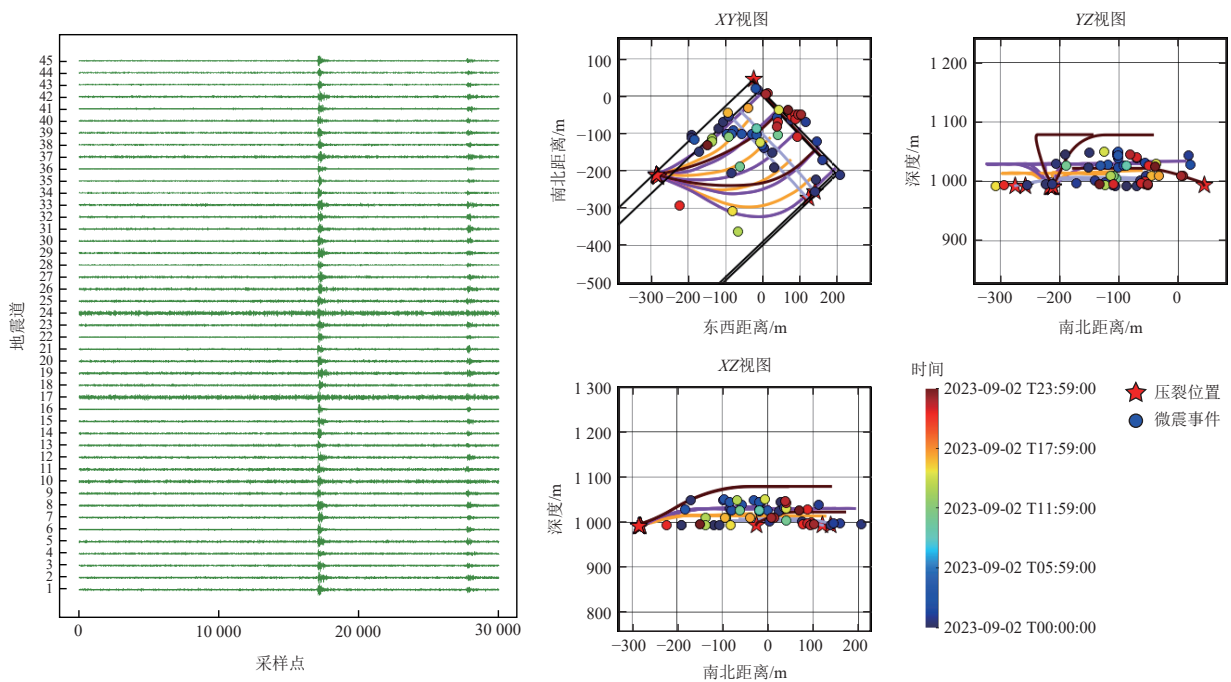


图 35 实时监测画面 (含原始波形数据和定位的结果)

Fig.35 Real-time monitoring picture (including raw waveform data and positioning results)

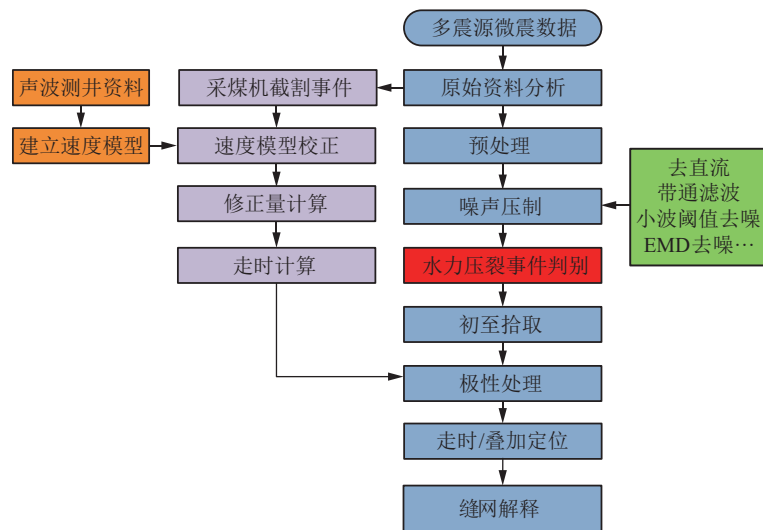


图 36 数据处理流程

Fig.36 Data processing process

果良好。

2) F2 钻场 (里程 5 300~5 600 m) 监测结果。F2 钻场共布置 6 个钻孔, 共计压裂 78 段, 共监测到 173 个水力压裂微震事件, 平均每个孔 13 个事件, 相比 F1 钻场, 微震事件数目明显减少。图 39a 为 F2 钻场 XY 平面事件点密度图, 图 39b 为微震事件在 XZ 方向的投影。根据微震监测结果可知: 水力裂缝网络缝长 490.30 m、缝宽 266.64 m、低层位孔缝高 30 m, 高层位孔缝高 35 m, 水力裂缝扩展范围较大。

由二维密度图评估压裂范围, F2 钻场各钻孔缝网参数统计结果见表 11, 图 40 所示为 F2 钻场水力压裂

缝网全景图。F2 钻场压裂后裂缝均覆盖整个钻孔区域并向钻孔外围扩展一定距离, 平均每个孔缝长 316 m、缝宽 60 m、缝高 30 m; 水平钻孔正上方微震事件较多, 各段形成较复杂的水力裂缝网络, 其中南翼和北翼裂缝网络基本对称, 压裂改造效果整体较好。

3) F3 钻场 (里程 4 700~5 300 m) 监测结果。F3 钻场共布置 16 个钻孔, 共计压裂 222 段, 共监测到 2 172 个水力压裂微震事件, 平均每个孔监测到 136 个事件, 相比 F2 钻场, 微震事件数目明显增加。图 41a 为 F3 钻场的 XY 平面事件点密度图, 图 41b 为微震事

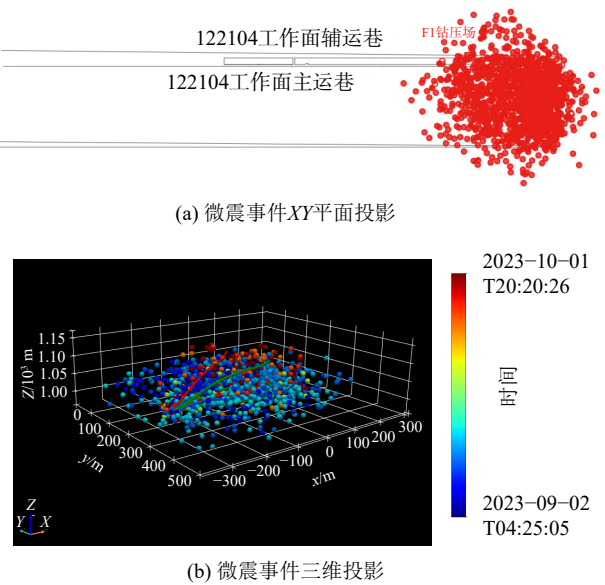


图 37 F1 钻场全钻孔监测成果

Fig.37 F1 drill site full borehole monitoring results

件在 XZ 方向的三维投影。根据微震监测结果可知：水力裂缝缝长 853.48 m，缝宽 386.31 m，低层位孔缝高 38 m，中层位孔缝高 37 m，高层位孔缝高 38 m，水力裂缝扩展范围较大。

图 42 为 F3 钻场水力裂缝网络全景图，各个钻孔缝网参数见表 12。F3 钻场平均每个孔缝长 484 m、缝宽 108 m、缝高 34 m，各段形成复杂的水力裂缝网络，其中南翼和北翼裂缝网络基本对称，达到预期效果。

6.2 水力压裂卸压效果的多因素综合评价

6.2.1 水力压裂后整体来压特征

截至 2024 年 3 月底，工作面在 5 600、5 300、

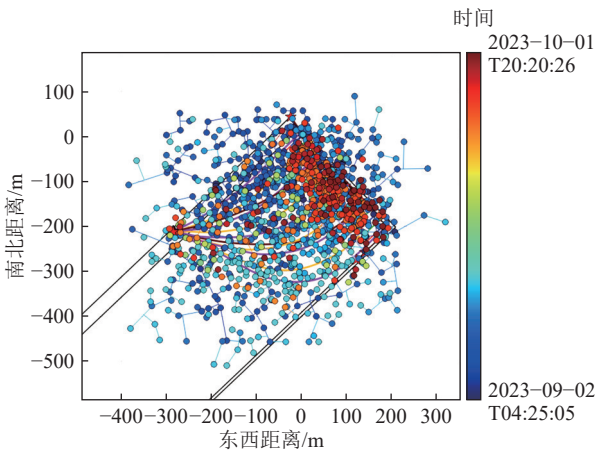


图 38 F1 钻场 F1-1~F1-14 水平钻孔水力裂缝网络全景图
Fig.38 Panoramic view of hydraulic fracture network of horizontal drilling holes F1-1 to F1-14 in F1 drilling field

4 700 m 压裂区域内分别发生周期来压 17、13、28 次。随着推进距离增加，各压裂钻场覆盖区域内工作面来压步距、持续距离及来压强度均呈现“先增后降”趋势，具体如图 43—图 46 所示。

F1 压裂钻场覆盖区域内，工作面周期来压步距为 5.65~28.7 m，平均周期来压步距为 18.34 m；来压持续距离为 2.2~19.8 m，平均来压持续距离为 10.27 m；立柱压缩量为 61.33~772.10 mm，平均值为 425.35 mm，最大压缩量为 141.0~1 417.0 mm，均值为 770.44 mm。

F2 压裂钻场覆盖区间内，工作面历次周期来压步距为 9.2~31.5 m，均值为 23.69 m；持续距离为 8.3~17.0 m，均值为 12.38 m；立柱压缩量为 131.90~

表 10 F1 钻场各水平钻孔缝网参数统计表

Table 10 F1 drilling field each horizontal drilling seam network parameter statistics table

钻孔编号	压裂段数	微震数量	缝长/m	缝宽/m	缝高/m	孔深/m	压裂时长/min	总流量/m ³
F1-1	9	86	324.17	72.37	28.29	372	489	599.84
F1-2	7	116	271.22	62.86	22.92	300	525	639.39
F1-3	10	71	362.05	78.17	21.62	390	589	723.63
F1-4	7	10	247.24	57.23	20.19	336	527	641.33
F1-5	11	179	363.67	62.74	38.28	432	791	980.95
F1-6	9	7	295.36	52.05	43.08	384	493	599.21
F1-7	13	161	281.57	78.18	28.80	483	1 107	1 401.66
F1-8	11	56	352.85	48.69	21.99	447	635	705.43
F1-9	15	247	440.18	92.95	38.99	546	1 626	1 998.93
F1-10	13	287	323.49	82.52	26.48	300	831	944.50
F1-11	13	316	257.55	71.59	21.05	300	1 121	1 271.69
F1-12	6	150	316.14	116.24	23.34	300	503	617.21
F1-13	10	158	377.22	72.20	25.94	396	810	985.14
F1-14	12	197	467.30	76.89	28.29	474	677	763.88

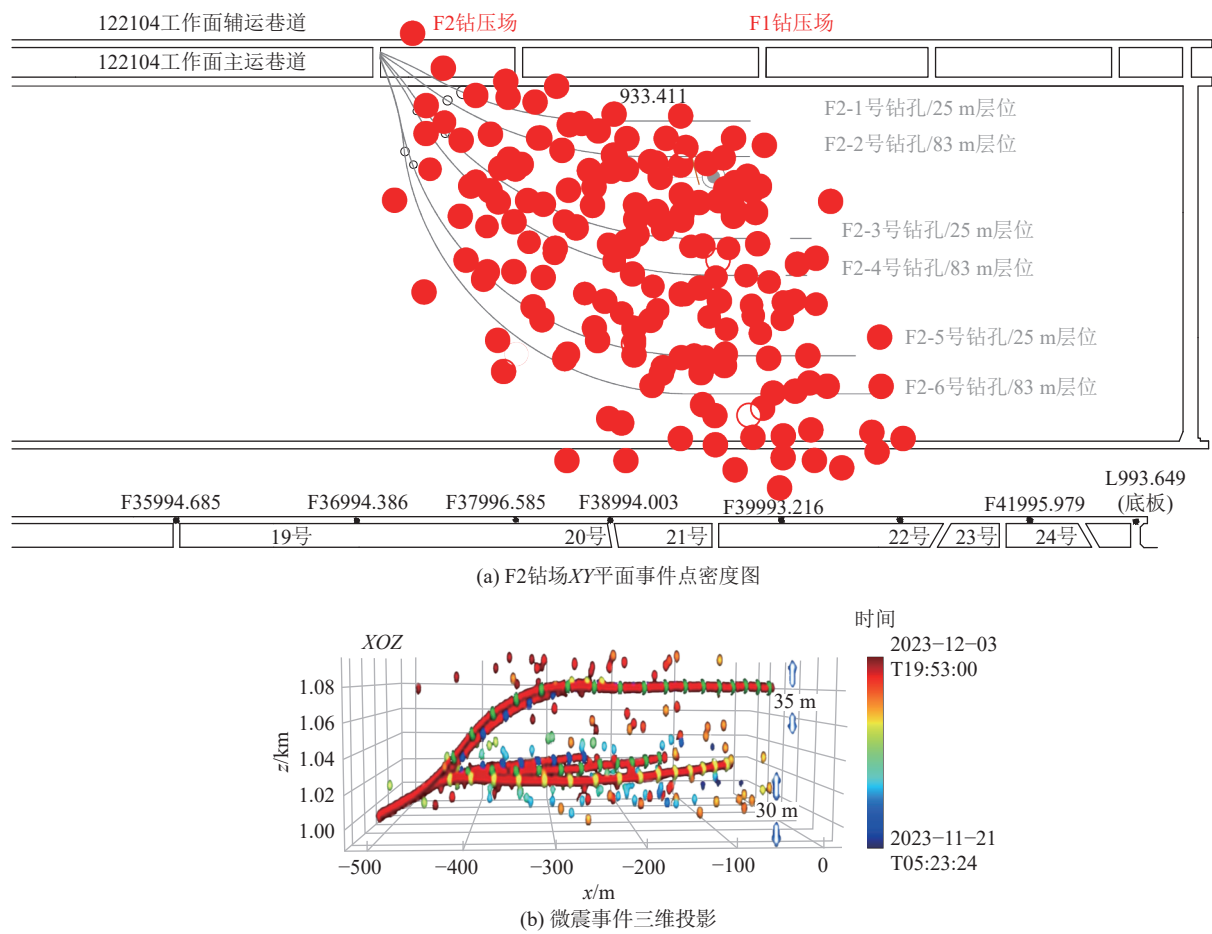


图 39 F2 钻场全钻孔监测成果

Fig.39 F2 drilling field full borehole monitoring results

表 11 F2 钻场各水平钻孔缝网参数统计

Table 11 Statistics of parameters of horizontal drilling seam mesh in F2 drilling field								
钻孔编号	压裂段数	微震数量	缝长/m	缝宽/m	缝高/m	孔深/m	压裂时长/min	总流量/m ³
F2-1	9	23	267.63	67.57	29.96	327	691	1 851.0
F2-2	10	34	277.48	51.13	28.35	351	733	1 603.6
F2-3	12	24	327.62	55.52	24.98	423	920	2 168.0
F2-4	14	32	323.62	73.29	34.91	453	772	2 407.0
F2-5	15	26	326.93	54.69	28.96	540	1 237	1 825.2
F2-6	18	34	370.04	57.30	34.51	609	1 413	3 161.0

953.70 mm, 均值为 630.99 mm, 最大压缩量为 358.090~2 164.0 mm, 均值为 1 304.62 mm。与“F1 覆盖区”相比,工作面来压步距、持续距离,以及来压强度明显增大。

F3 压裂钻场覆盖区间内,工作面历次周期来压步距为 7.5~37.2 m, 均值为 18.09 m; 持续距离为 2.2~23.0 m, 均值为 9.39 m; 立柱最大压缩量为 186.0~2 452.0 mm, 均值为 848.79 mm。与“F2 覆盖区”相比,工作面来压步距、持续距离呈降低趋势,来压强度明显减弱。

6.2.2 大周期来压特征

截至 2024 年 3 月底,工作面在 5 600、5 300、4 700 m 压裂钻场区域分别发生“大周期”强来压 6、8、7 次。随着推进距离增加,各压裂钻场覆盖区域内工作面“大周期”来压步距、持续距离以及来压强度均呈现“先增后降”趋势,具体如图 47 所示。

在 F1 压裂钻场覆盖区域内,工作面历次“大周期”来压步距为 15.30~28.70 m, 均值为 23.57 m; 持续距离为 6.0~16.7 m, 均值为 10.67 m; 立柱压缩量为 464.00~772.10 mm, 均值为 645.34 mm, 最大压缩量

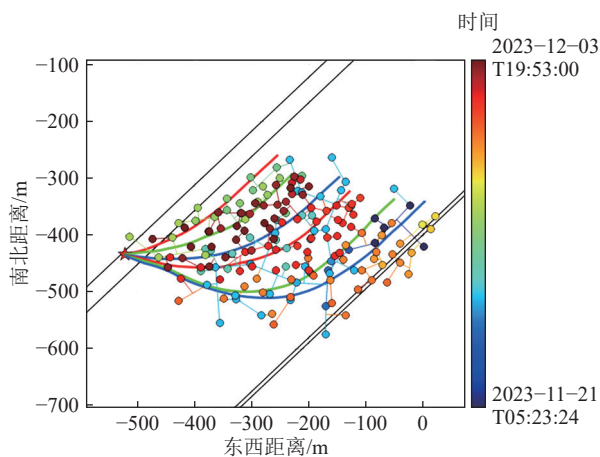


图 40 F2 钻场水力裂缝网络全景图

Fig.40 Panoramic view of hydraulic fracture network in F2 drilling field

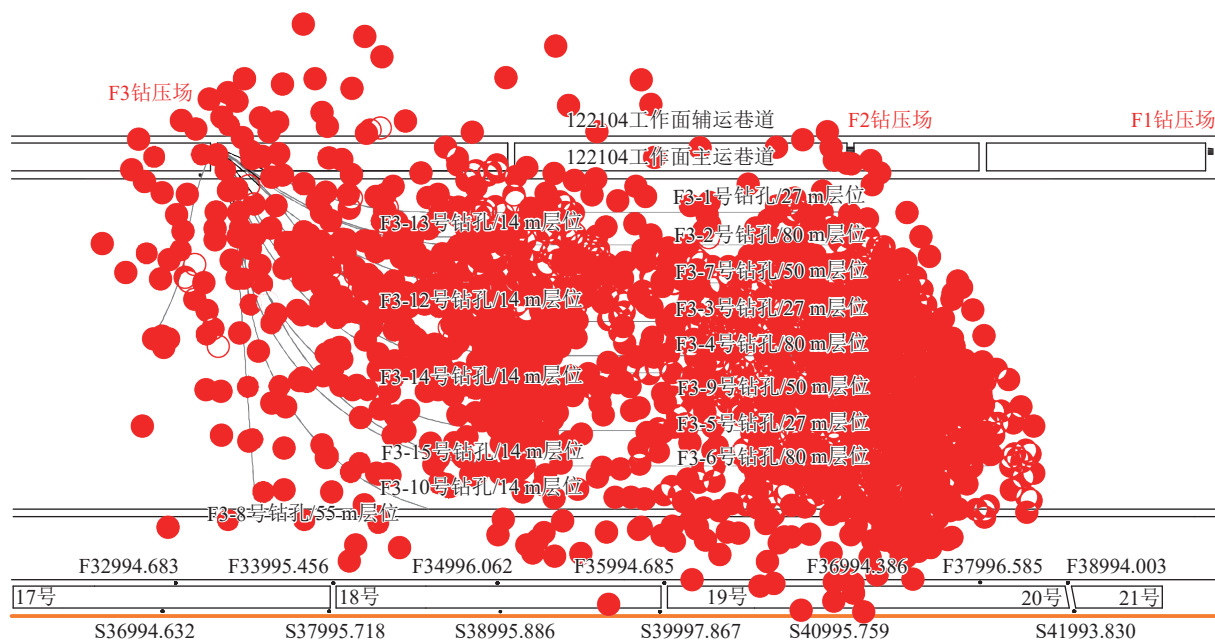
为 785.0~1 417.0 mm, 均值为 1 130.83 mm。

在 F2 压裂钻场覆盖区间内, 工作面历次“大周期”

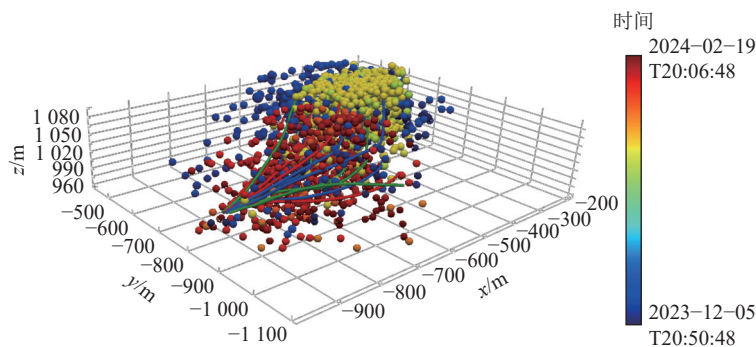
来压步距为 21.10~31.5 m, 均值为 27.14 m; 持续距离为 9.6~17.0 m, 均值为 13.58 m; 立柱压缩量为 618.7~953.7 mm, 均值为 758.4 mm, 最大压缩量为 1 105.0~2 164.0 mm, 均值为 1 543.1 mm。与 F1 压裂钻场覆盖区相比, “大周期”来压步距、持续距离以及来压强度明显上升。

在 F3 压裂钻场覆盖区间内, 工作面历次“大周期”来压步距为 16.40~37.20 m, 均值为 25.26 m; 持续距离为 6.90~14.60 m, 均值为 10.32 m; 立柱压缩量为 445.0~1 265.0 mm, 均值为 697.59 mm, 最大压缩量为 771.0~2 452.0 mm, 均值为 1 311.43 mm。与 F2 压裂钻场覆盖区相比, “大周期”来压步距、持续距离呈降低趋势, 来压强度明显减弱。

由以上分析可知, 5 600、5 300、4 700 m 压裂钻场推进里程内, 工作面“强来压”发生的频次整体呈“先增大后降低”趋势, 每推进 100 m 的强来压发生频



(a) F3钻场的XY平面事件点密度图



(b) 微震事件三维投影

图 41 F3 钻场全钻孔监测成果

Fig.41 F3 drilling site full borehole monitoring results

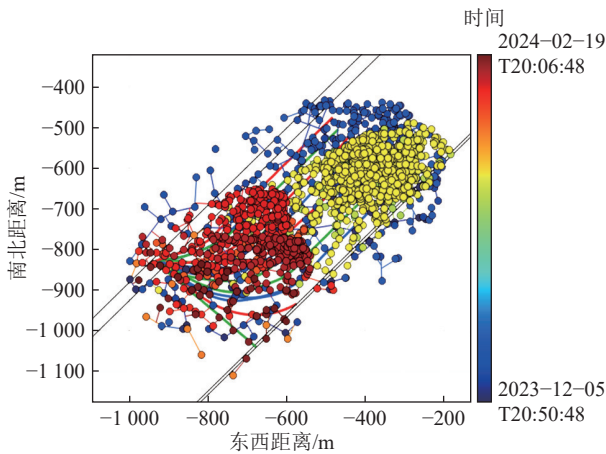


图42 F3 钻场水力裂缝网络全景图

Fig.42 F3 drilling site hydraulic fracture network panorama
次分别为 1.63、3.00、1.33 次。

6.2.3 水力压裂后顶板强度和完整性

自推采以来, 顶板岩层 10^4 以上大能量微震事件

主要聚集在 5 300 m 压裂钻场覆盖区域内, 在 5 600、4 700 m 钻场覆盖区域内, 大能量微震事件空间密度相对较低。这说明, 在 5 600、5 300、4 700 m 压裂钻场覆盖区域内, 顶板岩层的完整性和强度整体呈现先增大后降低的趋势。

6.2.4 水力压裂后支架工作阻力分析

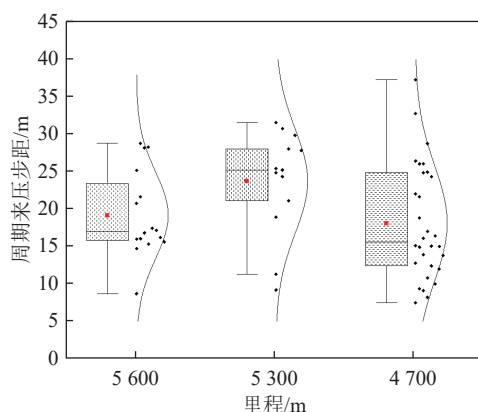
工作面在 5 600、5 300、4 700 m 压裂钻场覆盖区域内, 支架工作阻力频率如图 48 所示。从图中可以看出, 支架工作阻力分布特征如下: ① 0~24 000 kN 的“低阻区间”占比分别为 80.8%、74.3%、81.4%, “低阻区间”占比在 5 300 m 钻场区间内最低, 呈现先降后增趋势; ② 24 000~28 000 kN 的“中阻区间”占比分别为 7.5%、9.3% 和 10.7%; ③ > 28 000 kN 的“高阻区间”占比分别为 11.8%、16.4% 和 8%; 在 5 300 m 压裂钻场区间内最高, 呈现“先增后降”趋势。

综上分析可知, 与 5 600、4 700 m 压裂钻场区域

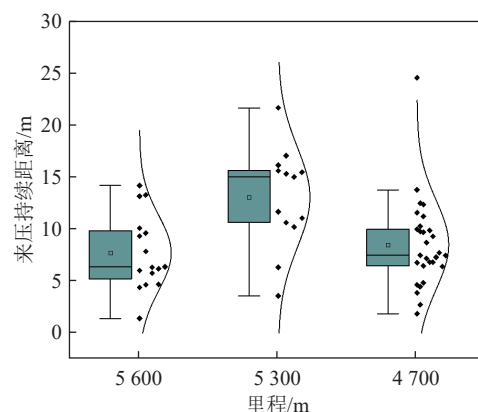
表 12 F3 钻场各水平钻孔缝网参数统计表

Table 12 F3 drilling field each horizontal drilling seam mesh parameters statistical table

钻孔编号	压裂段数	微震数量	缝长/m	缝宽/m	缝高/m	孔深/m	压裂时长/min	总流量/ m^3
F3-1	11	67	561.71	93.30	38.78	591	851	2 615.85
F3-2	12	45	485.61	93.07	30.69	603	1 310	4 060.00
F3-3	13	52	587.79	91.88	34.77	684	1 319	4 225.13
F3-4	14	156	550.45	131.74	37.96	708	1 157	3 673.20
F3-5	14	57	572.07	99.57	33.93	750	1 533	4 491.13
F3-6	15	272	576.44	102.66	32.78	744	1 850	6 162.81
F3-7	15	233	531.07	99.90	34.30	630	1 085	3 842.90
F3-8	9	11	330.62	129.55	24.60	333	658	2 583.42
F3-9	11	847	617.27	108.63	36.27	756	916	4 054.05
F3-12	21	59	366.71	102.30	35.28	354	717	2 009.79
F3-13	18	219	313.78	98.11	36.03	291	414	1 158.59
F3-14	21	178	402.31	93.42	31.05	372	706	1 971.57
F3-15	25	32	487.86	152.77	32.91	429	950	2 584.60
F3-16	23	38	389.93	113.27	30.02	402	822	2 231.88



(a) 来压步距对比



(b) 来压持续距离对比

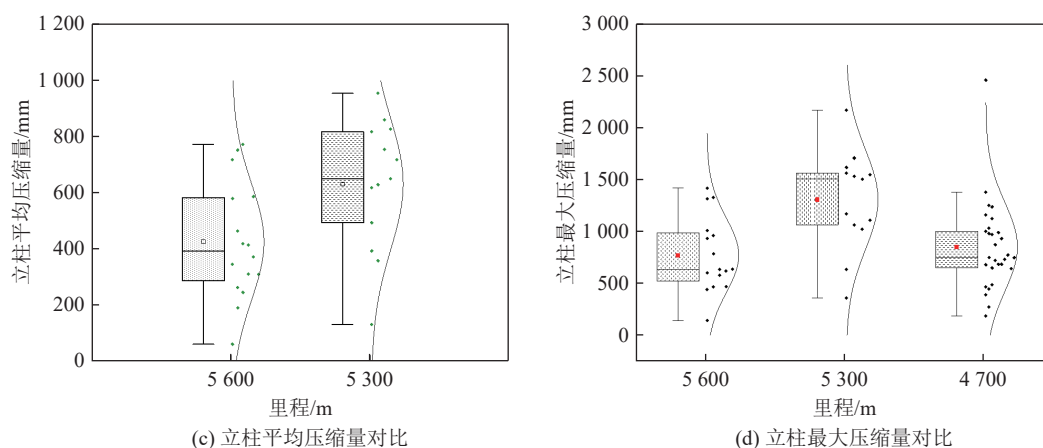


图 43 不同钻场覆盖推进区段内来压特征对比

Fig.43 Comparison of pressure characteristics in different drilling fields

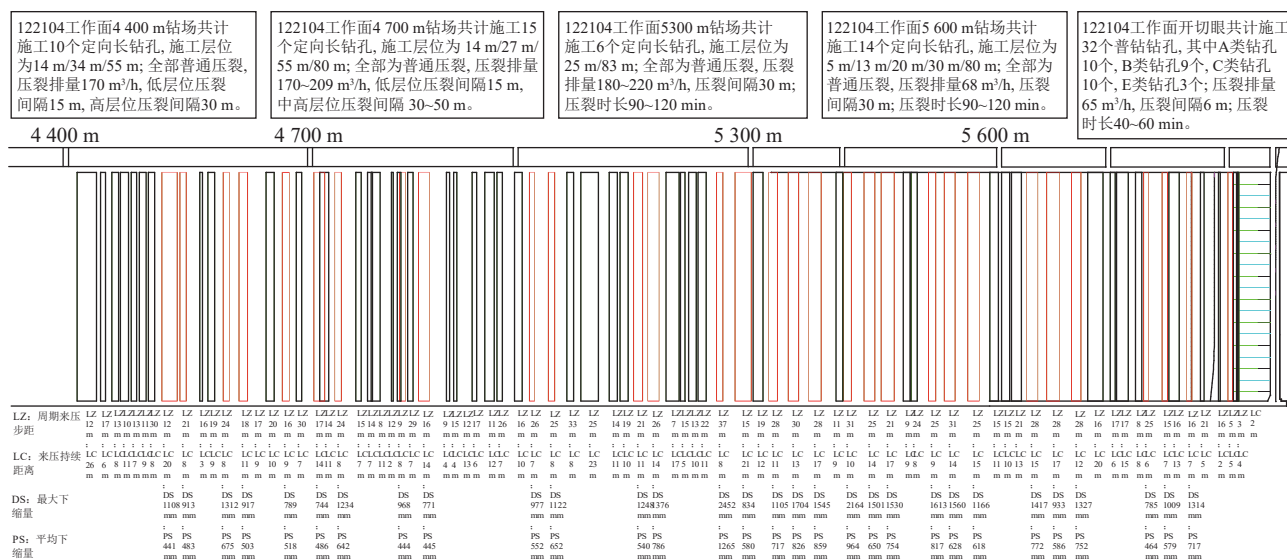


图 44 122104 工作面压裂区整体来压及立柱压缩量示意

Fig.44 122104 face fracturing zone overall pressure and column compression diagram

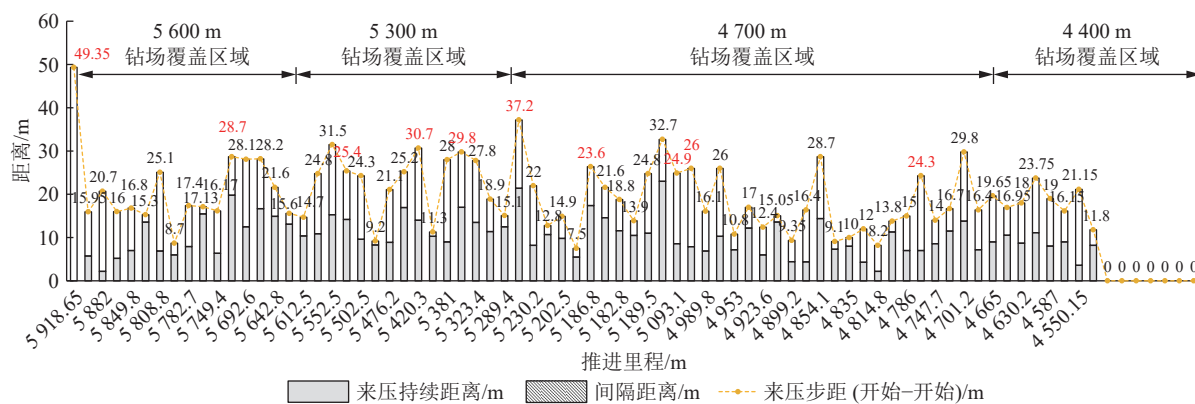


图 45 不同钻场覆盖里程区段工作面来压步距和持续距离变化

Fig.45 Press step distance and sustained distance vary according to working face covered by different drilling fields

相比,在5300 m压裂钻场区域内,支架工作的“中低阻力区间降低、高阻区间上升”,在5300 m压裂钻场区域内,支架额定工作阻力的富余系数相对减小,工

作面来压强度增大。与此同时,在5600、5300、4700 m钻场覆盖里程区域内,支架仍以中低阻力工作区间为主,说明支架选型合理、具有较好的适应性,并能够适

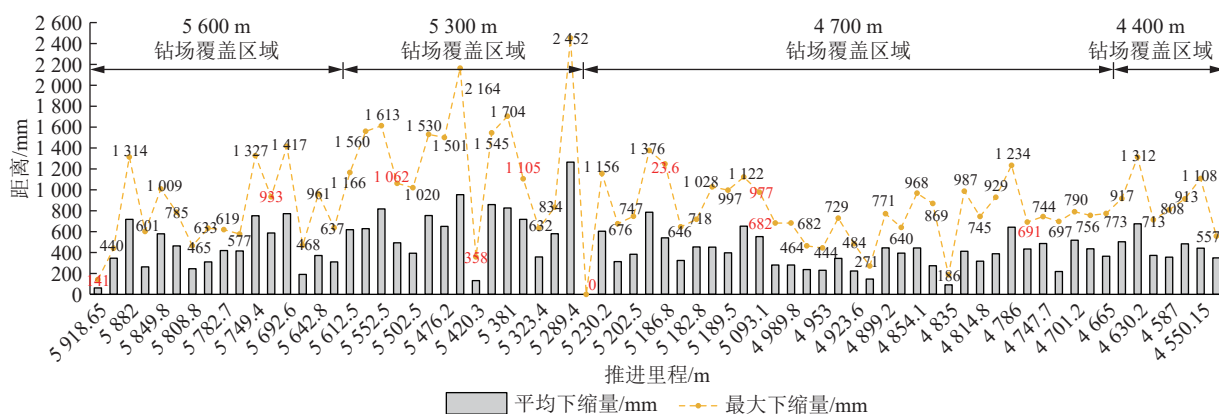


图46 不同钻场覆盖里程区段工作面来压支架立柱下缩量变化

Fig.46 Shrinkage under support column varies by covering working face in different drilling fields

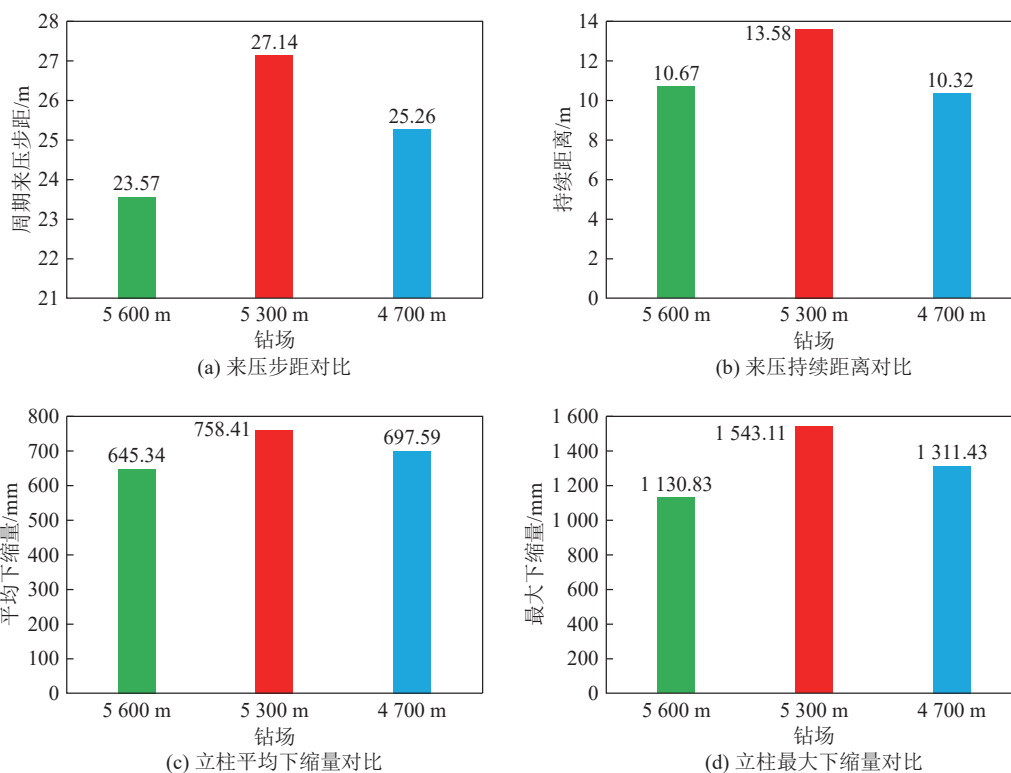


图47 同压裂钻场区域“大周期”来压特征对比

Fig.47 Compared with “big period” pressure characteristics in fracturing drill field area

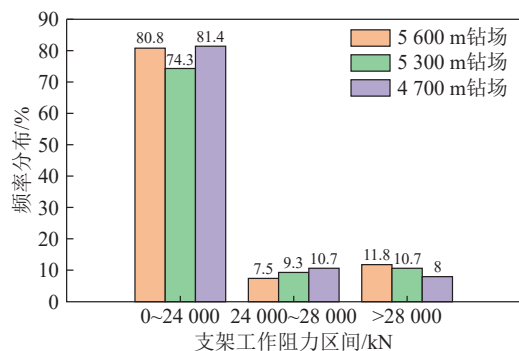


图48 各压裂钻场里程区段支架工作阻力频率分布

Fig.48 Frequency distribution of working resistance of support in mileage zone of each fracturing drilling field

应超大采高工艺下的顶板支护需求。

6.2.5 水力压裂后覆岩运动能量演化规律

各钻场覆盖区内的微震事件平面分布分别如图49所示。在F1钻场覆盖区域内,共发生微震事件478个,3次方及以上能量事件99个,占比20.71%;在F2钻场覆盖区域内,共发生微震事件402个,3次方及以上能量事件147个,占比36.57%;在F3钻场覆盖区域内,共发生微震事件759个,3次方及以上能量事件284个,占比37.42%。从顶板破断强度上看,大能量微震事件主要聚集在F2钻场覆盖区域内,而在前后相邻的F1、F3钻场覆盖区域内,大能量微震事件空间密度相对较低。

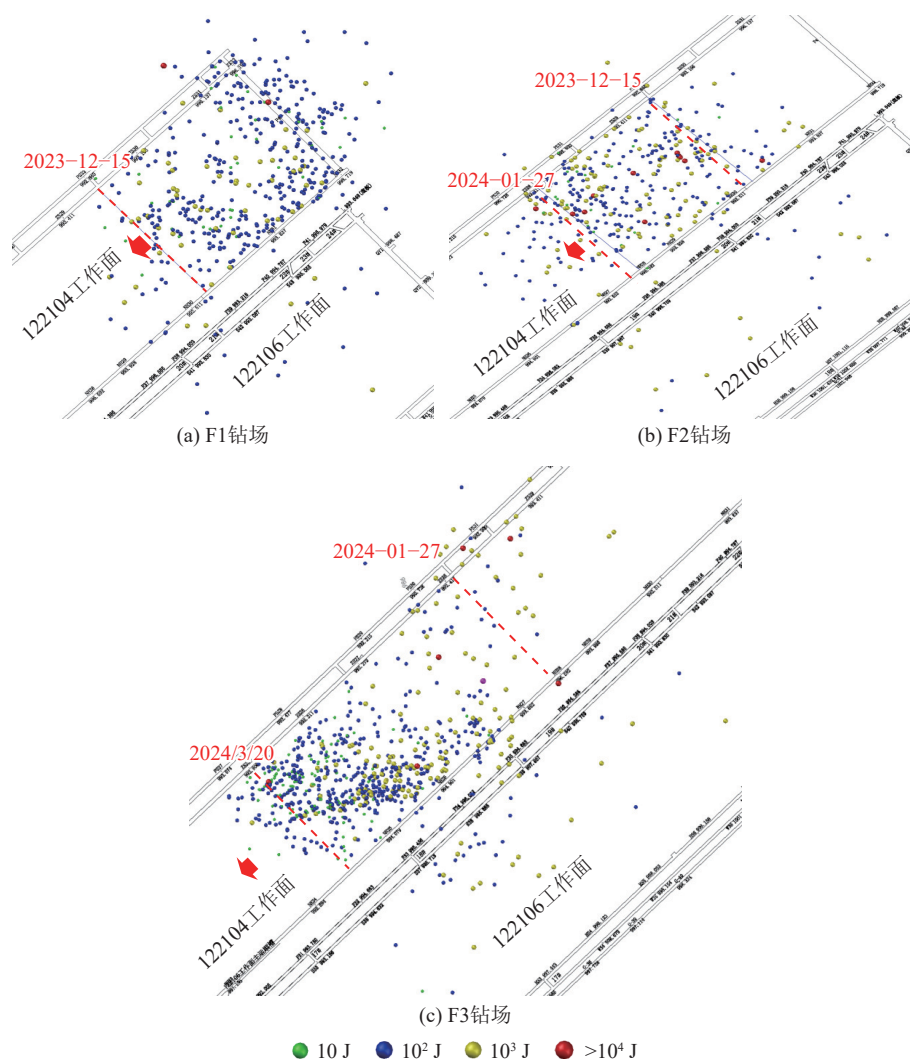


图 49 不同钻场覆盖区内的顶板破断微震事件分布

Fig.49 Distribution of roof breaking microseismic events in covered areas of different drilling fields

综上所述,区域水力压裂技术有效弱化了坚硬顶板的强度,一定程度上削弱了工作面强矿压。工作面回采过程中,厚硬顶板能够及时垮落,避免了大面积岩层垮落,改善了工作面围岩应力环境,液压支架工况良好,确保了 10 m 超大采高工作面安全生产,为工作面安全、高效生产提供了保障。

7 结 论

1) 为了解决超大采高厚硬顶板综采工作面面临的超大开采空间、超强矿压显现及超高煤壁稳定性控制等难题,针对顶板控制型强矿压显现巷道掘进、回采不同阶段,提出针对厚硬顶板开展井下区域性水力压裂方法,以实现改造顶板岩体结构、应力场及能量场的目的。厚硬顶板压裂卸压机理主要体现在:调控厚硬顶板宏观结构、诱导采动应力向远场岩体转移、从源头上削减积聚的弹性能、弱化厚硬顶板强度。

2) 通过 X 射线衍射矿物组分分析,研究了不同岩

层组内的脆性矿物含量,其中延安组较直罗组含量高,易形成复杂裂缝网络。开展了超大采高工作面顶板试样真三轴水力压裂试验和三维裂缝重构,并采用三维流固耦合数值模拟开展了裂缝三维形态与扩展方位研究。研究表明,排量由 $1 \text{ m}^3/\text{min}$ 增至 $5 \text{ m}^3/\text{min}$,裂缝平均半径由 21.9 m 增至 32.5 m,增幅约为 48.40%,排量越大水力裂缝尺度越大。

3) 开发了磨料射流预切缝与 $5 \text{ m}^3/\text{min}$ 大流量复合压裂技术工艺,提出了一种井下长水平钻孔定向水力压裂“一场一策”分区设计理念,形成了一种动态更新压裂层位和压裂方案的井下长水平钻孔定向水力压裂方法。基于此,确定了超大采高工作面井下工作面定向钻孔区域水力压裂顶板层位、压裂钻孔布置及参数,并在曹家滩煤矿开展了现场试验,实现了超大采高工作面矿压显现的科学有效防控。

4) 以世界首个 10 m 超大采高综采工作面——曹家滩煤矿 122104 工作面为试验点,系统开展了井下

厚硬顶板大流量复合水力压裂卸压工程。各压裂井场覆盖里程段内工作面“大周期”的来压步距、持续距离,以及来压强度整体均呈现先增后降趋势;顶板岩层的完整性降低,强度呈现先增大后降低的趋势;压裂钻场覆盖里程区间内,支架以中低阻力工作区间为主;微震事件中3次方以上中高能量事件占比呈现出与工作面来压强度相类似的先增后降趋势。通过井下厚硬顶板大流量复合水力压裂卸压工艺确保了10 m 超大采高工作面安全、高效生产。

参考文献(References):

- [1] 徐刚,张春会,蔺星宇,等.基于分区支承载力学模型的综放工作面顶板矿压演化与压架预测[J].煤炭学报,2022,47(10):3622-3633.
XU Gang, ZHANG Chunhui, LIN Xingyu, et al. Predicting ground pressure evolution and support crushing of fully mechanized top coal caving face based on zoning support mechanical model[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3622-3633.
- [2] 徐刚,张震,杨俊哲,等.8.8 m 超大采高工作面支架与围岩相互作用关系[J].煤炭学报,2022,47(4):1462-1472.
XU Gang, ZHANG Zhen, YANG Junzhe, et al. Interaction between support and surrounding rock in 8.8 m super mining height working face[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1462-1472.
- [3] 徐刚,张春会,张震,等.综放工作面顶板灾害类型和发生机制及防治技术[J].煤炭科学技术,2023,51(2):44-57.
XU Gang, ZHANG Chunhui, ZHANG Zhen, et al. Types, occurrence mechanisms and prevention techniques of roof disasters in fully-mechanized top coal caving face[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 44-57.
- [4] 王国法,庞文辉,李明忠,等.超大采高工作面液压支架与围岩耦合作用关系[J].煤炭学报,2017,42(2):518-526.
WANG Guofa, PANG Yihui, LI Mingzhong, et al. Hydraulic support and coal wall coupling relationship in ultra large height mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 518-526.
- [5] 康红普,徐刚,王彪谋,等.我国煤炭开采与岩层控制技术发展40 a 及展望[J].采矿与岩层控制工程学报,2019,1(2):7-39.
KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(2): 7-39.
- [6] 于斌,霍丙杰.坚硬顶板岩层控制[M].北京:科学出版社,2019.
- [7] 赵凯凯.坚硬顶板区域水力压裂裂缝三维扩展机理研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2021.
ZHAO Kaikai. Study on three-dimensional propagation mechanism of hydraulic fracturing cracks in hard roof area[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2021.
- [8] KANG H P, JIANG P F, WU Y Z, et al. A combined “ground support-rock modification-destressing” strategy for 1 000-m deep roadways in extreme squeezing ground condition[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 142: 104746.
- [9] FAIRHURST C. Fractures and fracturing - hydraulic fracturing in jointed rock[C]//ISRM International Conference for Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing. Effective and sustainable hydraulic fracturing. Lisbon: ISRM, 2013.
- [10] ZHAO K K, STEAD D, KANG H P, et al. Investigating the interaction of hydraulic fracture with pre-existing joints based on lattice spring modeling[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 122: 103534.
- [11] 康红普,高富强.煤矿采动应力演化与围岩控制[J].岩石力学与工程学报,2024,43(1):1-40.
KANG Hongpu, GAO Fuqiang. Evolution of mining-induced stress and strata control in underground coal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(1): 1-40.
- [12] 康红普,姜鹏飞,冯彦军,等.煤矿巷道围岩卸压技术及应用[J].煤炭科学技术,2022,50(6):1-15.
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, FENG Yanjun, et al. Destressing technology for rock around coal mine roadways and its applications[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 1-15.
- [13] 康红普,冯彦军.煤矿井下水力压裂技术及在围岩控制中的应用[J].煤炭科学技术,2017,45(1):1-9.
KANG Hongpu, FENG Yanjun. Hydraulic fracturing technology and its applications in strata control in underground coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 1-9.
- [14] 康红普,姜鹏飞,黄炳香,等.煤矿千米深井巷道围岩支护-改性-卸压协同控制技术[J].煤炭学报,2020,45(3):845-864.
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, HUANG Bingxiang, et al. Roadway strata control technology by means of bolting-modification-destressing in synergy in 1 000 m deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 845-864.
- [15] 宋振骥,文志杰,蒋宇静,等.采动力学与岩层控制关键理论及工程应用[J].煤炭学报,2024,49(1):16-35.
SONG Zhenqi, WEN Zhijie, JIANG Yujing, et al. Theory and application of mining mechanics and strata control[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 16-35.
- [16] 黄炳香,赵兴龙,陈树亮,等.坚硬顶板水压致裂控制理论与成套技术[J].岩石力学与工程学报,2017,36(12):2954-2970.
HUANG Bingxiang, ZHAO Xinglong, CHEN Shuliang, et al. Theory and technology of controlling hard roof with hydraulic fracturing in underground mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 2954-2970.
- [17] 刘长友,刘江伟.煤岩体裂化的弱结构体应力转移原理及应用[J].采矿与安全工程学报,2022,39(2):359-369.
LIU Changyou, LIU Jiangwei. Principle and application of stress transfer of weak structure body in coal-rock mass cracking[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(2): 359-369.
- [18] 陈绍杰,刘江伟,李亚康,等.底板动压巷道压裂弱结构体应力转移控制技术[J].煤炭科学技术,2024,52(1):106-116.
CHEN Shaojie, LIU Jiangwei, LI Yakang, et al. Stress transfer control technology for fracturing weak structural bodies in subgrade dynamic pressure roadways[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 106-116.
- [19] 吴拥政,付玉凯,何杰,等.深部冲击地压巷道“卸压-支护-防护”协同防控原理与技术[J].煤炭学报,2021,46(1):132-144.
WU Yongzheng, FU Yukai, HE Jie, et al. Principle and technology of “pressure relief-support-protection” collaborative prevention and

- control in deep rock burst roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 132–144.
- [20] LIU Z H, REN X K, LIN X, et al. Effects of confining stresses, pre-crack inclination angles and injection rates: Observations from large-scale true triaxial and hydraulic fracturing tests in laboratory[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(4): 1991–2000.
- [21] HE Q Y, SUORINENI F T, MA T H, et al. Parametric study and dimensional analysis on prescribed hydraulic fractures in cave mining[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 78: 47–63.
- [22] 夏永学, 张晨阳, 杜涛涛, 等. 磨砂射流轴向切顶压裂工艺研发及应用[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(S1): 36–44.
- XIA Yongxue, ZHANG Chenyang, DU Taotao, et al. , Process research and application of axial roof cutting technology of abrasive jet and fracture[J]. *Journal of Coal Science*, 2024, 49(S1): 36–44.
- [23] 潘俊锋, 陆闯, 马小辉, 等. 井上下煤层顶板区域压裂防治冲击地压系统及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 106–115.
- PAN Junfeng, LU Chuang, MA Xiaohui, et al. System and application of regional fracking of coal seam roof on and under the ground to prevent rockburst[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 106–115.
- [24] 于斌, 邵阳, 匡铁军, 等. 大空间采场远近场坚硬顶板井上下控制理论及技术体系[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(5): 1875–1893.
- YU Bin, TAI Yang, KUANG Tiejun, et al. Theory and technical system of control of far-near field hard roofs from ground and underground in a large space stope[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 1875–1893.
- [25] 郑凯歌, 袁亮, 杨森, 等. 基于分区弱化的复合坚硬顶板冲击地压分段压裂区域防治研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(2): 322–333.
- ZHENG Kaige, YUAN Liang, YANG Sen, et al. Study on prevention and control of rock burst staged fracturing area of composite hard roof based on zoning weakening[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(2): 322–333.
- [26] 杨俊哲, 郑凯歌, 王振荣, 等. 坚硬顶板动力灾害超前弱化治理技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(10): 3371–3379.
- YANG Junzhe, ZHENG Kaige, WANG Zhenrong, et al. Technology of weakening and danger-breaking dynamic disasters by hard roof[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(10): 3371–3379.
- [27] 尚晓光, 朱斯陶, 姜福兴, 等. 地面直井水压致裂防控巨厚硬岩运动型矿震试验研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(S2): 639–650.
- SHANG Xiaoguang, ZHU Sitao, JIANG Fuxing, et al. Experimental study on the prevention and control of mine earthquake by high pressure water fracturing of huge thick strata in vertical shaft[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S2): 639–650.
- [28] SHANG X G, ZHU S T, JIANG F X, et al. Study on dynamic disaster mechanisms of thick hard roof induced by hydraulic fracturing in surface vertical well[J]. *Minerals*, 2022, 12(12): 1537.
- [29] SHANG X G, ZHU S T, JIANG F X, et al. Study on mine earthquakes mechanism and ground vertical well hydraulic fracturing shock absorption in thick hard rock mine[J]. *Sustainability*, 2023, 15(6): 5122.
- [30] 康红普, 冯彦军, 张震, 等. 煤矿井下定向钻孔水力压裂岩层控制技术及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 31–44.
- KANG Hongpu, FENG Yanjun, ZHANG Zhen, et al. Hydraulic fracturing technology with directional boreholes for strata control in underground coal mines and its application[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 31–44.
- [31] 康红普, 冯彦军, 赵凯凯. 煤矿岩层压裂技术与装备的发展方向[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2024, 6(1): 1–4.
- KANG Hongpu, FENG Yanjun, ZHAO Kaikai. Development trends in hydraulic fracturing technology and equipment for strata control in underground coal mines[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2024, 6(1): 1–4.
- [32] 潘俊锋, 康红普, 闫耀东, 等. 顶板“人造解放层”防治冲击地压方法、机理及应用[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(2): 636–648.
- PAN Junfeng, KANG Hongpu, YAN Yaodong, et al. The method, mechanism and application of preventing rock burst by artificial liberation layer of roof[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 636–648.
- [33] 张俊文, 宋治祥, 刘金亮, 等. 煤矿深部开采冲击地压灾害结构调控技术架构[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(2): 27–36.
- ZHANG Junwen, SONG Zhixiang, LIU Jinliang, et al. Architecture of structural regulation technology for rock burst disaster in deep mining of coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 27–36.
- [34] 窦林名, 白金正, 李许伟, 等. 基于动静载叠加原理的冲击矿压灾害防治技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(10): 1–8.
- DOU Linming, BAI Jinzheng, LI Xuwei, et al. Study on prevention and control technology of rockburst disaster based on theory of dynamic and static combined load[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(10): 1–8.
- [35] 齐庆新, 潘一山, 李海涛, 等. 煤矿深部开采煤炭动力灾害防控理论基础与关键技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(5): 1567–1584.
- QI Qingxin, PAN Yishan, LI Haitao, et al. Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1567–1584.
- [36] 陈光波, 李谭, 杨磊, 等. 水岩作用下煤岩组合体力学特性与损伤特征[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(4): 37–46.
- CHEN Guangbo, LI Tan, YANG Lei, et al. Mechanical properties and damage characteristics of coal-rock combined samples under water-rock interaction[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(4): 37–46.
- [37] 刘新荣, 傅晏, 郑颖人, 等. 水岩相互作用对岩石劣化的影响研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2012, 8(1): 77–82, 88.
- LIU Xinrong, FU Yan, ZHENG Yingren, et al. A review on deterioration of rock caused by water-rock interaction[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, 8(1): 77–82, 88.