



地质构造隐蔽致灾因素透明化勘查技术

王海军 郑三龙 王相业 董敏涛 吴艳 马良 杨伟 朱玉英

引用本文:

王海军, 郑三龙, 王相业, 等. 地质构造隐蔽致灾因素透明化勘查技术[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 173–188.

WANG Haijun, ZHENG Sanlong, WANG Xiangye. Transparent exploration technology for hidden disaster-causing factors of geological structure: taking Tunbao Coal Mine in Xinjiang as an example[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 173–188.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0559>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

薄煤层智能开采工作面煤层透明化地质勘查技术

Transparent geological exploration technology of coal seam on the working surface of intelligent mining of thin coal seam
煤炭科学技术. 2022, 50(7): 67–74 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4115181f-fba2-4a87-84d1-3cc2f05bb6ac>

煤矿地质透明化典型应用场景及关键技术

Typical application scenes and key technologies of coal mine geological transparency
煤炭科学技术. 2022, 50(7): 1–12 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/22e87d78-e0b2-4abe-bee7-93a15998961b>

煤矿智能地质保障系统研究进展与展望

Research progress and prospects of coal mine intelligent geological guarantee systems
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 334–348 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2125>

基于透明地质大数据智能精准开采技术研究

Research on intelligent and precision mining technology based on transparent geological big data
煤炭科学技术. 2021, 49(1): 286–293 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.026>

智能开采透明工作面地质模型梯级优化试验研究

Experimental study on cascade optimization of geological models in intelligent mining transparency working face
煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/623337c8-793e-4eeb-acf6-95ef8f50260e>

煤炭安全智能开采地质保障系统软件开发与应用

Development and application of geological guarantee system software for safe and intelligent coal mining
煤炭科学技术. 2022, 50(7): 13–24 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/696834e4-c513-445b-a884-a948d5c17e60>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王海军, 郑三龙, 王相业, 等. 地质构造隐蔽致灾因素透明化勘查技术——以新疆屯宝煤矿为例[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 173–188.

WANG Haijun, ZHENG Sanlong, WANG Xiangye, *et al.* Transparent exploration technology for hidden disaster-causing factors of geological structure: taking Tunbao Coal Mine in Xinjiang as an example[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 173–188.



王海军, 男, 陕西榆林人, 副研究员, 硕士生导师。陕西省科技好人, 国家矿山安全监察局、神木市能源局、榆林市政策咨询决策等煤炭地质专家, 《工矿自动化》青年编委。研究方向: 煤矿隐蔽致灾因素一体化技术、煤与煤层气综合勘查技术、地质透明化勘查技术。主要成果: 承担全国主要煤矿区煤与煤层气综合勘查工程 10 余项, 陕西省地质勘查基金项目 2 项, 煤矿企业委托项目 100 余项, 获省部级科技进步一等奖 1 项、二等奖 1 项, 授权国家发明专利 2 余项, 发表论文近 50 篇。

地质构造隐蔽致灾因素透明化勘查技术

——以新疆屯宝煤矿为例

王海军¹, 郑三龙², 王相业¹, 董敏涛¹, 吴 艳¹, 马 良¹, 杨 伟³, 朱玉英¹

(1. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 国家能源集团新疆能源有限责任公司屯宝煤矿, 新疆 昌吉 831113;

3. 国家能源集团新疆能源有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要: 煤矿隐蔽致灾因素是制约矿井安全、高效、绿色、智能化开采的关键地质因素, 透明地质是实现煤矿隐蔽致灾因素探测的重要技术手段, 其中地质构造透明化勘查是重中之重。为建立适用于不同地质条件或煤矿区的地质构造隐蔽致灾因素透明化勘查技术体系, 首先在对构造隐蔽致灾因素分析的基础上, 提出了区域构造分析入手, 地面、井下联合调查的构造隐蔽致灾因素快速排查技术体系, 高效圈定矿井地质构造异常发育区、分析其分布规律; 基于以往地面地质勘查钻孔资料和三维地震勘探数据初步分析全井田煤层厚度、断裂构造以及顶底板构造起伏形态; 采用槽波勘探、定向钻探、超前物探、随采随掘地震、巷道快速写实等综合技术手段, 对采掘工作面的地质构造逐级透明化; 采用理论分析、工程类比、数值模拟、相似材料模拟、现场工程验证等方法, 对地质构造类型、属性特征与煤层厚度、煤岩体结构、瓦斯涌出量、瓦斯压力、顶板矿压的相关性进行分析, 研究在开采条件下采掘工作面过断裂构造不同区内的瓦斯参数、顶板/矿压灾害的响应规律, 通过特征参数阈值选取实现工作面构造隐蔽致灾因素的监测和预警; 利用数字化技术实现对不同地质构造及其灾害属性的数字化表达, 通过建模软件实现对构造隐蔽致灾因素的三维透明化显示; 构建了区域构造地质研究、隐蔽致灾因素精细勘查、致灾威胁性科学评价、地质构造透明化 4 个层级的地质构造隐蔽致灾因素逐级透明化勘查技术体系, 并在屯宝煤矿进行了工程实践。研究结果表明: 屯宝煤矿地质构造类型复杂, 不仅发育有地堑式、地垒式、雁列式、挠曲等断裂构造样式, 同时发育有小型冲刷带、断层及其破碎带等; 复杂地质构造是诱发矿井瓦斯突出、顶板灾害、应力集中以及矿井冲击地压显现等矿井灾害的关键性地质因素, 断层对巷道应力集中的影响范围为 10~15 m, 对工作面的影响范围为 20~30 m; 工作面内存在瓦斯富集区, 瓦斯含量与瓦斯涌出量的分布具有明显分带性, 且分带性受断层的控制; 煤层瓦斯的含量、瓦斯涌出量随着工作面与断层的距离变化呈现对数相关性, 在距离断层 25 m 处出现明显增加, 在大于 25 m 区域变化不大, 在小于 25 m 区域随着距

收稿日期: 2024-06-23

责任编辑: 李 莎

DOI: 10.12438/cst.2024-0559

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目 (2022JQ-458); 中煤科工西安研究院(集团)有限公司科技创新基金资助项目 (2024XAPT02)

作者简介: 王海军(1985—), 男, 陕西榆林人, 研究员。E-mail: wanghaijun10000@163.com

离的减小呈指数型增大。工作面初次来压位置前后 20 m、工作面见方前后 30 m 为中等冲击危险区域,采空区煤柱影响区、终采线前后 50 m、落差大于 4 m 的断层前后 30 m 等区域为弱冲击危险区域;冲击地压、顶板和瓦斯等多种矿井灾害的隐蔽致灾因素叠合区域为灾害防治的重点区域。研究成果实现了构造复杂区域地质构造隐蔽致灾因素与矿井灾害透明化的无缝衔接,为煤矿区传统的地质勘查向数字化、智能化的发展提供了可行的技术路径。

关键词: 煤矿安全;隐蔽致灾因素;地质透明化勘查;地质保障技术;断层;智能开采;透明地质

中图分类号: TD67

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)09-0173-16

Transparent exploration technology for hidden disaster-causing factors of geological structure: taking Tunbao Coal Mine in Xinjiang as an example

WANG Haijun¹, ZHENG Sanlong², WANG Xiangye¹, DONG Mintao¹, WU Yan¹, MA Liang¹,
YANG Wei³, ZHU Yuying¹

(1. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. Tunbao Coal Mine of CHN Energy Xinjiang Energy Co., Ltd., Changji 831113, China; 3. CHN Energy Group Xinjiang Energy Co., Ltd., Urumqi 830000, China)

Abstract: Hidden disaster-causing factors in coal mines are key geological factors that restrict the safety, high efficiency, green and intelligent mining, and transparent geology is an important technical means to realize the detection of hidden disaster-causing factors in coal mines, among them, geological structure transparent exploration is the most important. In order to build a transparent exploration system for hidden disaster-causing factors of geological structure that applies to different geological conditions or coalfield areas, first, based on analysis of factors causing hidden structural disasters, technical system of rapid investigation of factors causing structural hidden disasters is put forward, which is based on the regional structural analysis and the joint investigation of the ground and underground, effectively delineate the mine geological structure anomaly development area and analyze its distribution law. Based on the previous borehole data and 3D seismic data, the coal seam thickness, fault structure and roof and floor structure undulation patterns are analyzed. Comprehensive technical means such as channel wave exploration, directional drilling, advanced geophysical prospecting, earthquake while mining/driving, cuttings recording, rapid realistic description of roadway are adopted, further realizing the gradual transparency of the geological structure of the mining face, adopting the methods of theoretical analysis, engineering analogy, numerical simulation, similar material simulation, field engineering verification. Correlation between geological structure types, attribute characteristics and mine disasters, such as coal seam thickness, coal rock mass structure, gas emission, gas pressure, roof strata behavior, is analyzed. Response law of gas parameters and roof/ground pressure disasters in different areas of the mining face passing through the fault structure under the mining condition is studied. Monitoring and early-warning of the hidden disaster-causing factors of the face structures are realized by selecting the threshold value of the characteristic parameters, and the digital expression of the different geological structures and their disaster attributes is realized by using the digital technology, 3D transparent display of hidden disaster-causing factors is realized by modeling software. The technical system of geological structure exploration with 4 levels of regional structure geology research, exploration of hidden disaster-causing factors, scientific evaluation of disaster-causing threat and geological structure transparency is constructed, and carried out engineering practice in Tunbao Coal Mine. the results show that the types of geological structures in coal mine are complex, and there are not only graben type, barrier type, echelon type and flexure type of fault structures, but also small-scale scouring zone, fault and fracture zone. Complex geological structure is the key geological factor to induce mine gas outburst, roof disaster, stress concentration and mine rock burst. The influence of faults on stress concentration of roadway is 10 ~ 15 m, and the influence on working face is 20 ~ 30 m. There are gas enrichment areas in the working face, the distribution of gas content and gas emission has obvious zonation, and the zonation is controlled by faults. The content of coal seam gas and the amount of gas emission show logarithmic correlation with the distance between the working face and the fault, and increase obviously at the distance of 25 m from the fault, and change little in the area of more than 25 m, in the region less than 25 m, it increases exponentially with the decrease of distance. 20 m before and after the first pressure position and 30 m after the face-to-face are medium impact danger areas, the coal pillar affected area in goaf, 50 m before and after the final line, and 30 m before and after the fault with drop greater than 4 m are weak impact risk areas. The overlapping area of hidden disaster-causing factors such as rock burst, roof and gas, is the key area of disaster prevention and control. The research result realizes seamless connection between the hidden disaster-causing factors of geological structure and the mine disaster, and provides a feasible technical path for the development of traditional geological exploration in coal mine area to digitalization and intelligentization.

Key words: coal mine safety; hidden disaster-causing factors; geologically transparent exploration; geological guarantee technology; fault; intelligent mining; transparent geology

0 引言

煤矿智能化开采是煤矿企业迈向高质量发展的必由之路^[1-3],而煤矿隐蔽致灾因素是制约矿井安全、高效、绿色、智能化开采的关键地质因素^[4-6]。透明地质是实现煤矿隐蔽致灾因素勘查的重要技术手段^[6-7],其中地质构造透明化勘查是重中之重。地质构造不仅控制和影响工作面煤层厚度、煤层顶底板起伏形态,也是矿井水害、顶板/矿压、瓦斯、火灾、煤尘等多种矿井灾害的隐蔽致灾因素,因此,地质构造隐蔽致灾因素的透明化勘查是实现煤矿智能开采的关键技术,尤其是地质构造复杂的矿井。为此,以地质构造条件复杂的国家能源集团新疆能源有限责任公司屯宝煤矿为研究背景,以实现矿井高水平智能化建设为目标,以制约煤矿安全、高效开采的关键性地质因素地质构造为切入点开展研究。

屯宝煤矿位于新疆淮南煤田硫磺沟矿区,目前国内外学者关于新疆淮南煤田地质构造的研究多集中在区域大尺度构造形成机制、演化、控煤及煤层气富集模式^[8-10]和构造样式、岩浆侵入^[11-12]以及煤层气富集机理^[13-14]等方面;构造与矿井灾害的研究主要为断层的导水性、不同属性断层顶板矿压显现规律、断层的加固与注浆改造、工作面及其巷道过断层的安全技术措施等;煤矿区地质构造及其异常区的精细探测主要采用地面二/三维地震技术^[15-16]、井下采煤工作面的槽波勘探^[17-20],工作面回采前的无线电坑透勘探^[21],采掘工作面的地面、井下瞬变电磁勘探^[22]和微动勘探^[23]以及钻孔窥视等物探方法。上述勘探技术基本解决了煤矿区地质构造的宏观发育特征及其采掘工作面地质构造与富水异常的圈定问题,基本可以保障煤矿的安全开采并为灾害治理提供靶区。但是,随着近年来智能开采理论和工程实践的发展,煤矿智能开采对地质构造探测提出了更高的要求^[17,19],主要体现在对煤层厚度及其顶底板构造起伏形态的控制达到亚米级别,对小型断裂构造的探测要求做到超前、精准的控制。为实现工作面地质透明化,随采地震、随掘地震^[24-26]、采掘工作面的地质雷达^[27]、孔中瞬变电磁勘探^[21]、孔中地质雷达^[28]、钻孔多参数地球物理测井、孔间电法CT^[29]、孔间地震波CT^[30]、缪子勘探^[31]等多种地质及其构造透明化探测技术应用而生,为透明地质^[2,6,32-34]提供了有效的物探技术支持。但物探的多解性和井下物探的局限性,导致其无法完全解决所有的问题,还需以地质分析为背景,进一步结合地质钻探进行精细地解释。因此,构造地质^[35]、沉积环境及其灾害关

系研究^[36-39]等先进的技术被应用于煤矿智能开采地质保障。此外,常规钻探和井下定向钻探技术被广泛应用于煤矿井下工作面煤岩界面探查^[7,40-41]、孔内物探工作开展、超前瓦斯治理^[42-43]、探放水^[1,44]、注浆防灭火^[45]、坚硬顶板超前弱化改造^[46]、冲击地压灾害防治等^[46-47]矿井灾害的探查与防治以及各类隐蔽致灾因素的专项探查与治理。但上述研究仍缺乏针对不同地质条件或煤矿区的系统性勘查技术。

为从根本上解决这一问题,提出煤矿地质构造隐蔽致灾因素透明化勘查的思路,采用区域及矿井构造分析,智能开采工作面超前物探、钻探、测试化验等综合探查地质构造特征,结合各类灾害如瓦斯、顶板、冲击地压等灾害探查成果,分析地质构造与隐蔽致灾因素的关系,并通过数字化、三维地质建模^[3,6,34,48-49]实现对智能开采工作面构造隐蔽致灾因素的逐级透明。

1 构造地质特征

1.1 区域构造地质特征

淮南煤田位于准噶尔盆地南缘中段冲断带的齐古断褶带东部。准噶尔盆地南缘为典型的陆相多旋回叠合盆地,经历了印支、燕山及喜马拉雅多期强烈构造运动的叠加改造,构造特征及地层展布极其复杂^[8-9],形成了现今“东西分段、南北分带”的构造格局(图1)。硫磺沟矿区西起三屯河,东至乌鲁木齐河,北以乌鲁木齐西大断裂为界,南抵柴窝堡盆地。其构造线展布与天山褶皱带方向基本一致^[9],由一系列呈北东东方向展布的背向斜、逆冲断裂组成(图1a)。区内主要发育喀拉扎背斜、西山逆断层、阿克德向斜、头屯河向斜、桌子山背斜、小梁子逆断层及郝家沟背斜。区内中生代盆地受燕山期和喜山期构造运动影响,地层发生多次强烈隆起和夷平,地层倾角 $11^{\circ} \sim 34^{\circ}$,局部达 $50^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 。

屯宝井田西山窑组厚度约225 m,含煤16层,含煤系数约17.98%。可采煤层9层,分别为4、5、7、9、10、14⁻¹、14⁻²、15⁻¹、15⁻²,可采煤层厚度为13.16~74.96 m,平均37.83 m,可采含煤系数为16.81%。

1.2 矿井构造特征

屯宝井田整体为缓倾斜单斜构造,地层走向呈北东—南西,倾向北西,地层倾角 $10^{\circ} \sim 24^{\circ}$ 。受背向斜构造影响,区内断层较发育,以高角度正断层为主,断层走向以北北西、北西向为主,倾向以北东向为主,南西向次之(图1b)。正断层多表现为张性,分布密集,断层倾角普遍为 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$,断层规模较大。逆断

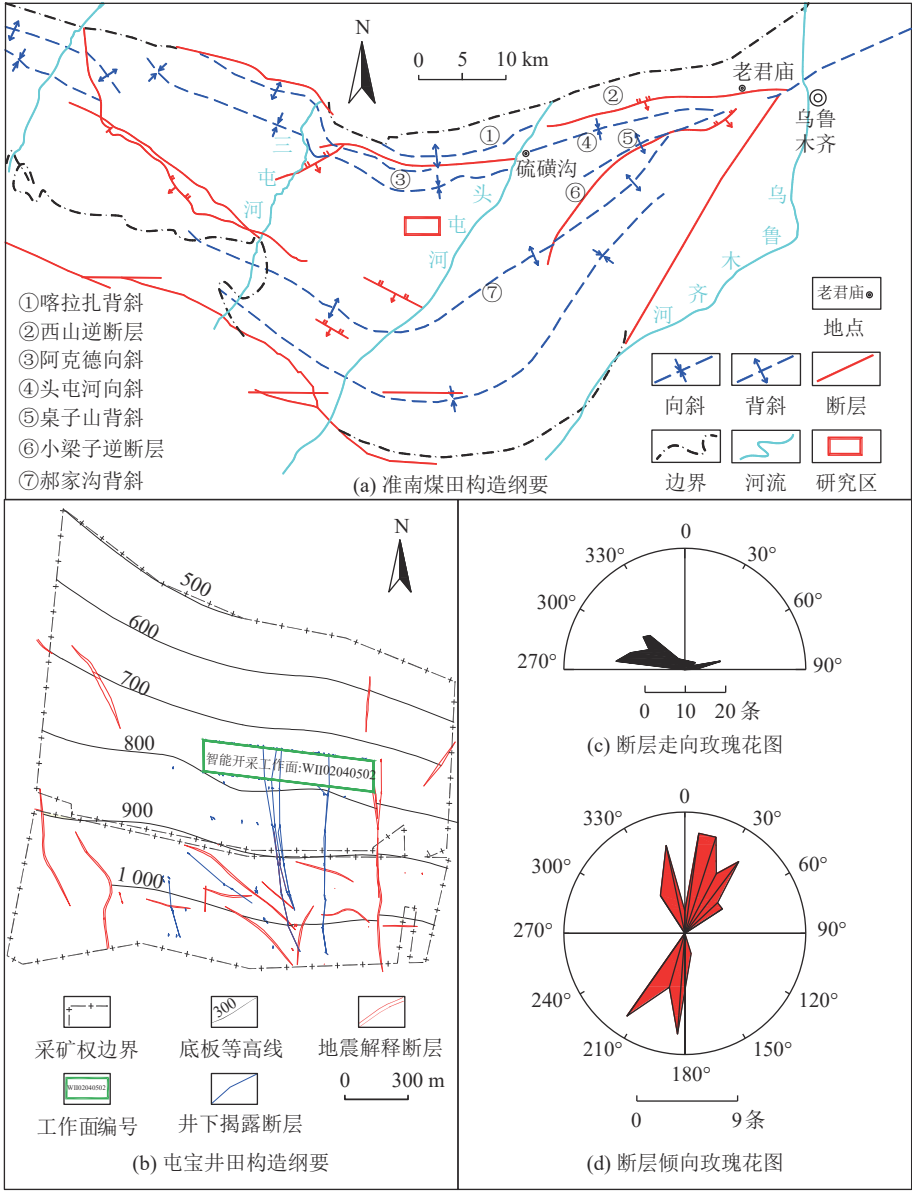


图 1 矿井构造特征

Fig.1 Characteristics of mine structure

层多为压性, 断层倾角普遍为 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ (图 1c、图 1d), 破坏作用较强, 断层面后期被上覆泥岩充填, 表现为封闭性断层。井田内三维地震解释断层 17 条, 其中, 落差 $30 \sim 50$ m 断层共 2 条, 落差 $10 \sim 20$ m 断层共 3 条, 落差 $5 \sim 10$ m 断层共 7 条, 落差 $0 \sim 5$ m 断层共 5 条。矿井采掘过程中揭露断层(断点)83 条, 多为落差小于 5 m 的正断层。

屯宝煤矿开采 4~5 煤层, 经多年的开采揭示, 目前主要矿井灾害隐蔽致灾因素类型为坚硬顶板、冲击地压、瓦斯富集, 上述灾害与构造隐蔽致灾因素存在密切的关系, 制约矿井设计、采掘工程部署以及煤矿安全、高效、绿色、智能化开采, 其中断层是最主要的构造隐蔽致灾因素^[50-53]。屯宝煤矿作为国家

能源集团新疆能源的首批智能化建设示范矿井, 其中瓦斯和矿井冲击地压隐蔽致灾因素的透明化是重点示范方向。确定研究对象为 WII02040502 智能开采工作面, 其地质构造较为典型, 具有示范意义。

2 透明化勘查技术体系

透明地质是实现工作面智能开采的前提, 而地质透明化勘查是实现透明地质的关键性技术手段。因此, 需要根据不同煤矿区地质构造条件和煤矿智能化建设需求, 探索并构建一套适应于该区域或矿井的工作面地质透明化勘查技术体系。针对屯宝煤矿地质特征和多年的生产实践, 归纳总结各类地质分析、综合勘查工程, 综合分析各类技术适用性及其

有效性。以制约煤矿安全、高效、绿色、智能化开采的关键性隐蔽致灾因素为切入点,构建面向智能开

采的地质构造透明化勘查技术框架(图 2),在此基础上详细介绍各类技术及其勘查效果。

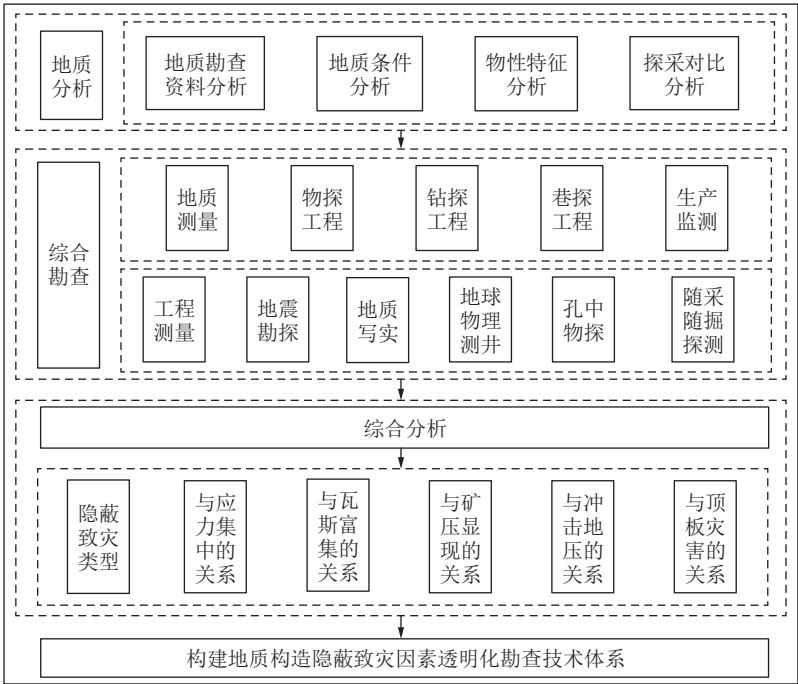


图 2 构造隐蔽致灾因素透明化技术框架

Fig.2 Technical framework of transparent hidden disaster-causing factors of geological structure

2.1 构造透明化勘查技术

2.1.1 地震勘探技术

地震勘探技术包括地面的二/三维地震勘探和井下工作面的槽波勘探技术。其中三维的地震勘探技术可以实现对 5 m 以上断层的识别、煤层顶底板构造起伏形态、古河流冲刷带以及煤层厚度的解释;槽波勘探技术可用于对采煤工作面内部小型地质构造如断层、冲刷带、挠褶带等进行超前探测,结合地质及其钻探进行物探异常的地质构造属性解释。槽波探查发现 WII02040502 工作面内发育多条断裂构造,显示存在异常区 8 处(图 3)。

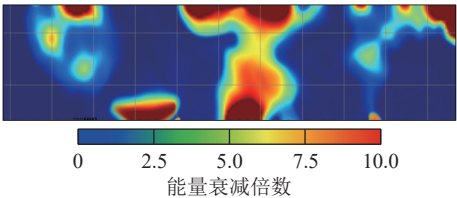


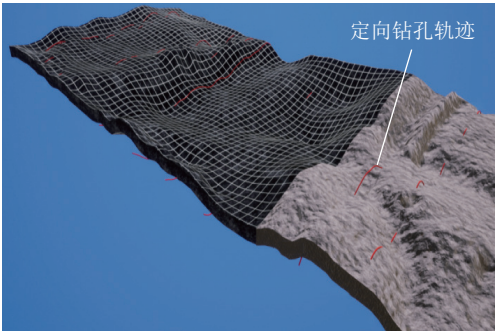
图 3 无线电波透视和透射法槽波探查成果

Fig.3 Radio wave perspective and transmission method slot wave detection results

2.1.2 地质钻探技术

利用地面钻探、井下常规超前钻探及井下定向钻探(图 4a)等地质钻探技术,在钻探过程中对钻并

液消耗量、钻探工艺参数、钻井岩屑的变化进行统计、分析,可第一时间获取孔内地质构造(如断层、破碎带等)的特征信息。同时,根据煤岩层及其界面的特征对煤岩石界面进行定向钻探,配合岩屑编录、钻效分析、钻孔窥视等技术,可以实现智能工作面煤岩界面定向钻探识别[7],并利用三维地质建模技术实现对



(b) 基于定向钻孔的工作面三维地质模型

图 4 工作面定向钻探及三维地质模型
Fig.4 Directional drilling exploration and 3D geological model

工作面煤层的模型构建(图 4b)。

屯宝煤矿钻遇断层具有憋泵、泥浆消耗量大或孔内漏失、孔口岩屑返渣变少变大、钻进效率底下、掉块卡钻等钻探响应特征。

2.1.3 地质写实

地质写实通过对煤矿井下掘进工作面及巷道和回采工作面开切眼揭露的剖面进行定期测量和素描写实,记录煤层厚度、煤层顶底板岩性、煤岩体结构、

煤层及其夹矸、标志层、地层产状以及裂缝等特征的变化,如图 5 所示。

屯宝煤矿发育的地质构造类型包括正逆断层相关的地堑(图 5a)、地垒式断裂组合(图 5b)、雁列式组合(图 5c)和挠曲构造(图 5d)以及煤层厚度的突变带、断层破碎带等构造形式。WII02040502 工作面主要发育 8 条断层,断层落差 0.40 ~ 5.70 m,以正断层为主,断面倾角 $15^{\circ} \sim 78^{\circ}$,以高倾角为主。

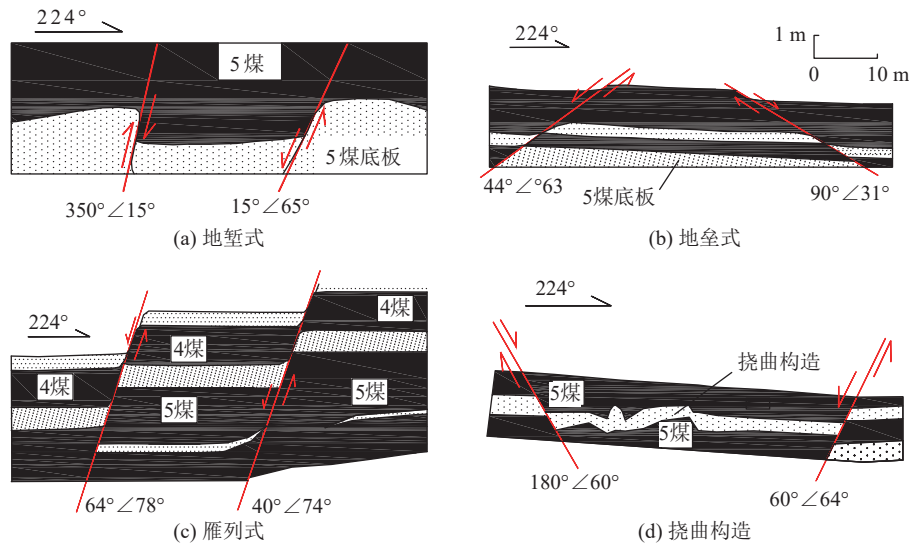


图 5 煤矿井下巷道写实编录

Fig.5 Realistic catalog of underground roadways in coal mines

2.1.4 地球物理测井技术

地球物理测井技术包括地面常规的地球物理测井技术、井下地球物理多参数测井等技术。井下多参数地球物理测井技术(图 6a)可以实现对全钻孔段岩性、裂缝、断层、岩浆侵入等地质构造的可视化成像,完成对钻孔电视、自然伽马、视电阻率、自然电位、激发极化电位、孔斜等多参数的孔内地球物理测井参数的获取,为岩性识别、断层带、顶板富水性等探查提供定量和定性解释。断层破碎带具有高自然伽马、高电阻率等特点。

2.1.5 孔中物探技术

适应于解决地质构造的孔中物探技术包括钻孔窥视、孔中地质雷达、孔间 CT 等技术。其中钻孔窥视(图 6b)是地面和井下应用最广泛的技术,可以实现对超前探测钻孔、定向钻探钻孔地层岩性及其断层破碎带、裂缝等地质构造的解释和识别(图 6c、图 6d)。

2.1.6 随采/随掘探测技术

随采/随掘探测技术通过在工作面回采前方/掘进巷道后方提前安置地震传感器,利用采煤机、掘进

机截割煤壁时产生的震动信号,实时接收地震波在遇到断层、陷落柱、采空区等异常时产生的反射波。随采/随掘地震信号通过光纤环网实时传输到地面处理后,利用专用处理软件开展大规模的并行计算,动态生成掘进巷道前方地质构造的成像结果,可以满足快速掘进对超前探测精度、速度要求^[22-23]。

2.2 地质构造与矿井灾害关系分析

采用数值模拟、相似材料模拟、监测监控、理论分析等多种技术手段对矿井地质构造(如断层、褶皱)与矿井灾害进行分析,运用数值统计、回归分析、相关性分析等多种分析方法,综合研究不同类型的地质构造隐蔽致灾因素与矿井灾害的关系。重点研究地质构造与应力集中区分布的关系,地质构造带瓦斯富集特征及其地质构造附近瓦斯异常涌出的规律,采掘工作面过断裂构造煤层顶板移近和变形以及矿压显现特征。

2.2.1 断裂构造与应力集中的关系

WII02040502 工作面通过断层时,在断层破碎带影响范围内出现煤岩松散、破碎,巷道围岩应力集中,巷道底鼓,顶板下沉等问题,由此导致断层带 300 m

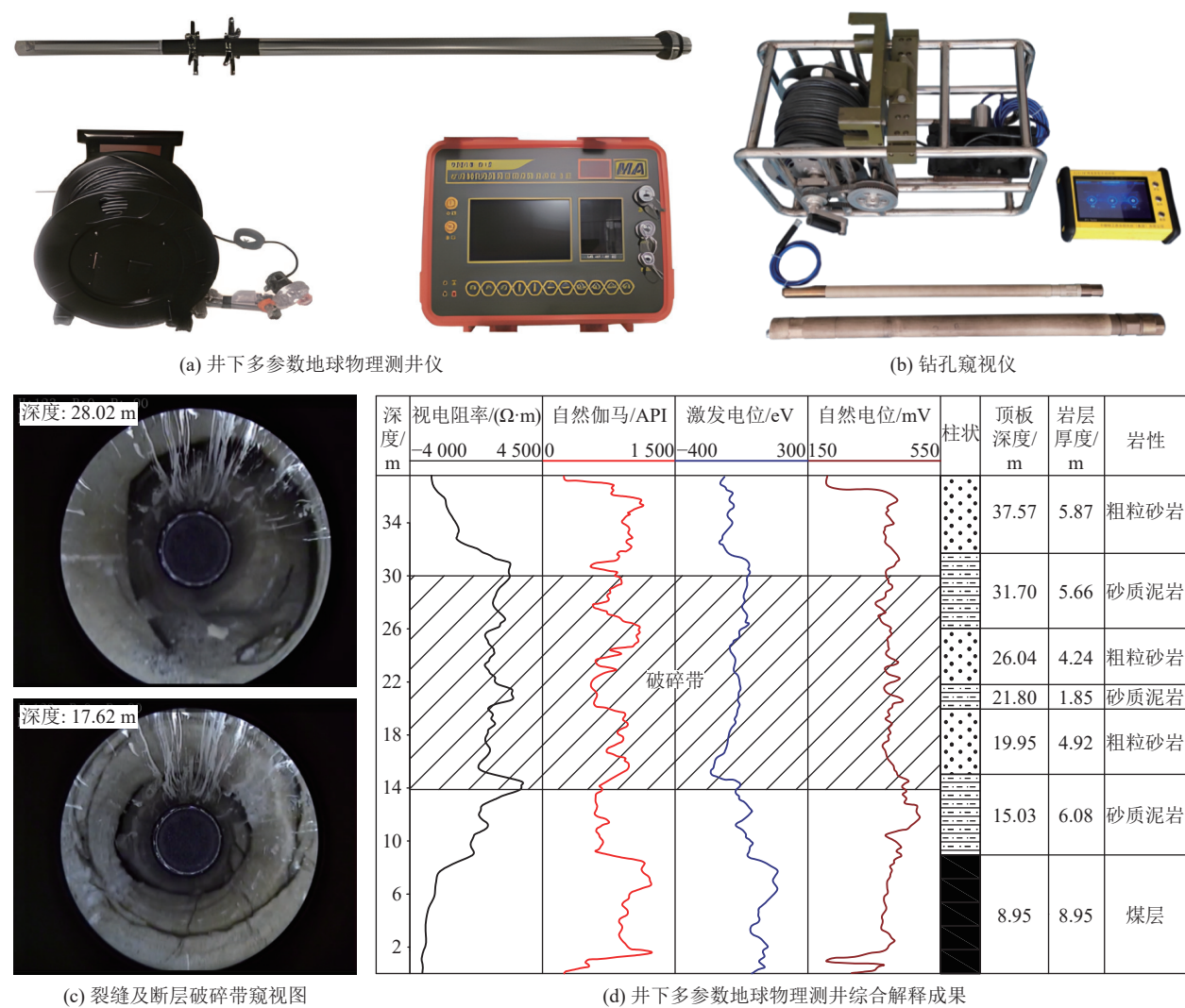


图 6 地球物理测井技术及孔中物探成果

Fig.6 Geophysics logging techniques and geophysical results in holes

范围内两帮移近量超过 1 m，底鼓达 0.50 m，对工作人员及其设备构成严重威胁。因此，需要在查明构造的前提下进一步查明断裂构造对应力集中的影响及其范围。

对工作面过 T₂ 断层期间巷道不同位置锚杆应力监测和煤柱侧应力分布规律进行研究，结果表明：

1) PASAT-M 应力探测结果(图 7)显示，受 T₂ 断层影响，围岩应力在距断层 20 ~ 30 m 范围内出现应力集中区域，将其划分为中等危险区域，运输巷一侧的影响范围较回风巷一侧大。

2) 回风巷与运输巷煤柱侧锚杆应力变化趋势基本相似，距离工作面越远越小；受断层的影响两巷道锚杆应力峰值出现明显的差异性，表现为运输巷应力峰值出现在超前工作面 10 ~ 15 m，工作面回风巷为 5 ~ 10 m。

因此，断层对工作面巷道的影响在 10 ~ 15 m 出

现应力峰值，工作面过断层 20 ~ 30 m 范围出现的应力集中区是冲击地压灾害防治重点区域。

2.2.2 断裂构造与瓦斯富集的关系

对工作面瓦斯含量、瓦斯涌出量、钻孔窥视、裂缝统计、采样点与断层面的距离等参数进行统计和分析。工作面瓦斯分布特征如图 8 所示，断层附近瓦斯参数变化规律如图 9 所示。结果发现：

1) 工作面煤层瓦斯含量为 2.10 ~ 2.86 m³/t，在正常区域瓦斯含量为 2.10 ~ 2.30 m³/t；工作面瓦斯涌出量为 6.39 ~ 14.39 m³/min，工作面存在瓦斯富集区。

2) 工作面瓦斯含量与瓦斯涌出量的分布具有明显分带性，表现为在 F₁ ~ F₂ 断层、开切眼与 F₆ 断层间的瓦斯含量相对低，而在 F₃ ~ F₇ 断层间为瓦斯富集带。瓦斯含量与瓦斯涌出量呈明显的正相关性(图 9a)。

3) 工作面瓦斯的含量、涌出量受断层的控制，其

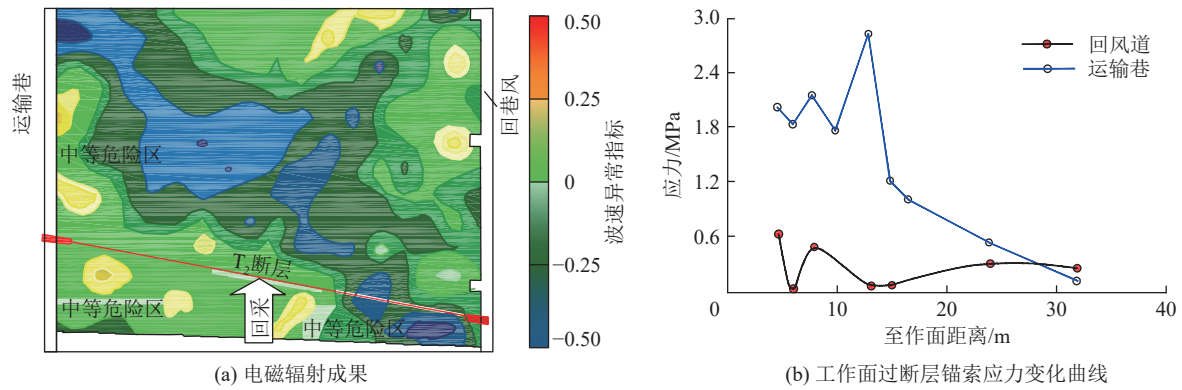


图7 断层附近应力状态

Fig.7 Stress state near fault

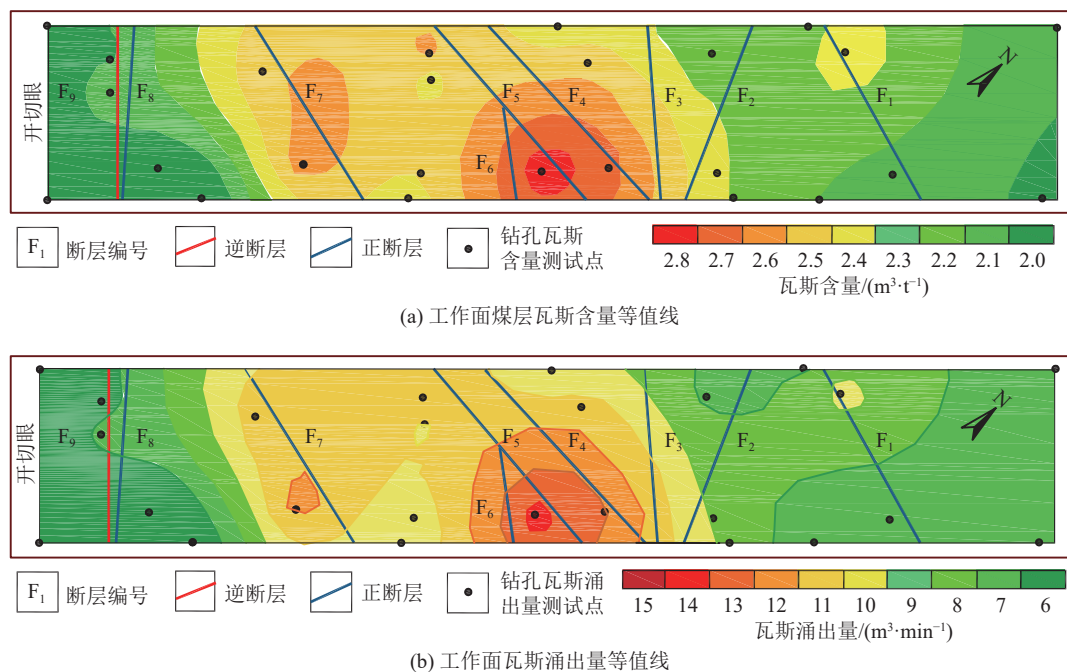


图8 工作面瓦斯分布特征

Fig.8 Characteristics of gas distribution of working face

中 F_3 断层带、 $F_4 \sim F_5$ 断层带间存在 2 个相对较高富集区,因此,该区域是瓦斯突出防治的重点区域。

4)通过对工作面断层及其裂缝的统计、分型分维度与瓦斯含量关系分析,工作面瓦斯的含量或涌出量与断裂构造的分型维数呈对数关系,相关性显著(图 9b)。

5)煤层瓦斯的含量、瓦斯涌出量随着工作面与断层的距离变化呈现对数相关性,相关性显著(图 9c、图 9d);瓦斯的含量、瓦斯的涌出量在距离断层 25 m 处出现明显的增加,在大于 25 m 区域变化不大,在小于 25 m 区域随着距离的减小呈指数型增大。这一结论与前述的断层对应力集中的影响是一致的,因此,距离断层 25 m 区域是顶板冒落和瓦斯突出灾害的隐蔽致灾因素叠合区域,为重点防治区域。

2.2.3 断裂构造与矿压显现的关系

断层对煤岩层的物质结构和构造应力场分布的影响程度取决于断层性质(包括断层倾角、断层充填情况,断层面形态等)、断层围岩性质(断层面的抗剪强度和岩体的抗拉强度)以及地应力状态。断层面上的剪应力等于断层面的抗剪强度时,断层就处于临界不稳定状态,此时轻微的扰动就可能引发断层活化,甚至导致强烈的冲击地压。断层极大地扰乱了地应力场的分布,这种对地应力的扰乱只是发生在断层附近有限范围内,超过一定距离,地应力分布恢复正常状态,因此,查明这一范围对冲击地压的探测防治具有指导意义。通过现场监测、数值模拟与相似材料模拟等多种方式综合研究表明:

1)针对应力集中区的围岩运动宏微观监测,结

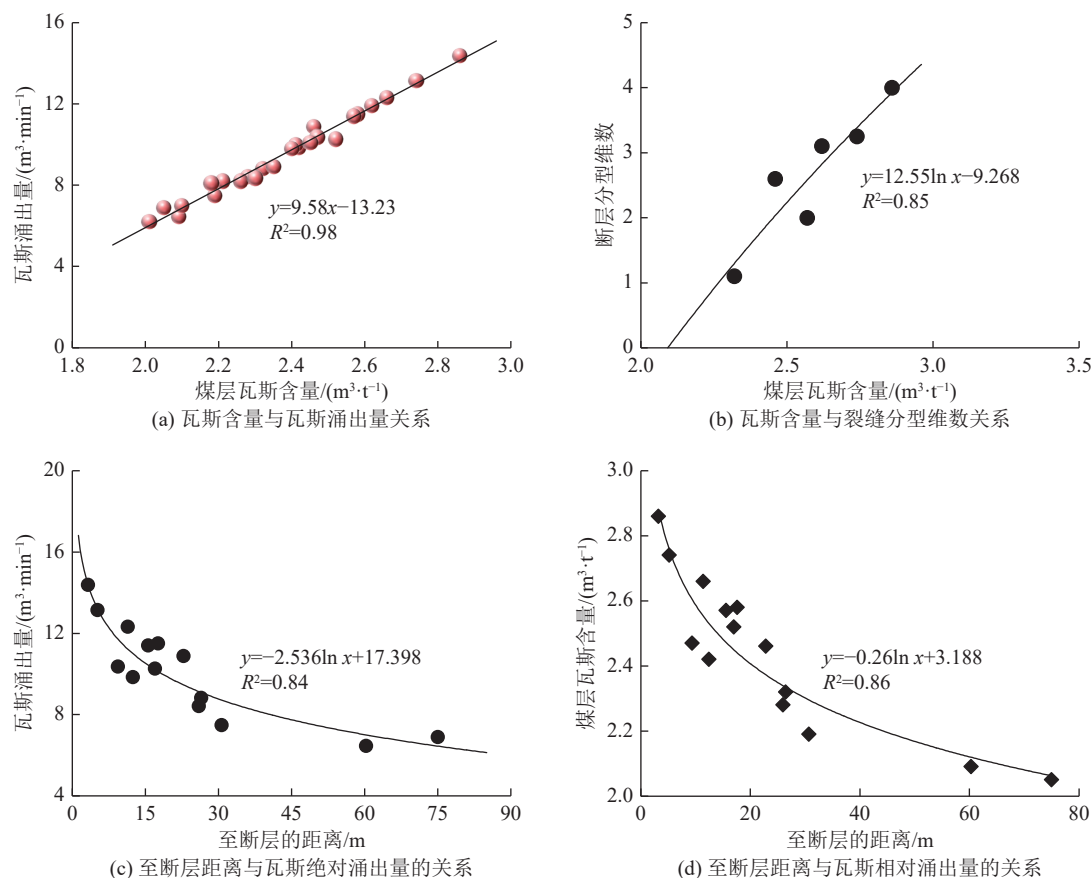


图9 断层附近瓦斯参数变化规律

Fig.9 Variation of gas parameters near faults

果显示在距离工作面前方 3~15 m 是压力升高区,其中 5 m 是峰值区,随后降低,孔内裂缝的密度明显增加;在开采扰动条件下工作面过断层及其破碎带煤岩体应力与变形加剧断层的活化,容易形成工作面片帮和大量冒顶以及冲击地压的显现(图 10a)。

2)由于断层破坏了煤岩层的连续性,采动应力演化规律变得异常复杂。当工作面逐渐靠近断层时,超前支承压力的正常前移受阻,使得采场覆岩压力大部分作用在采煤工作面和断层面之间的煤体上,导致该部分煤体支承压力大幅度增加(图 10b—图 10d)。

3)从对断层附近采掘活动的数值模拟分析(图 11a、图 11b)可以看出,当工作面在断层一侧向断层推进时,工作面前方的垂直应力和水平应力均有明显的集中现象,由于构造区域存在地质构造应力场,通常使煤岩体的构造应力尤其是水平构造应力增加。在支承压力异常和构造应力异常的双重影响下,断层带附近煤岩发生压力型冲击的可能性将会加大。

4)相似材料模拟(图 11c)、数值模拟与工作面回

采矿压监测、巷道变形、锚索应力应变等结果具有高度的相同性,表明数值模拟参数及模型选择合理,相似材料模拟配比及开挖方法得当,可以揭示工作面过断层矿压及冲击地压显现的机理。

因此,工作面初次来压位置前后 20 m 和工作面见方前后 30 m 为中等冲击危险区域,采空区煤柱影响区、停采线区域前后 50 m、落差大于 4 m 的断层前后 30 m 等为弱冲击危险区域^[52]。

2.3 地质构造隐蔽致灾因素勘查技术体系

通过对上述各技术的分析结合煤矿多年的生产实践和应用效果检验,形成了适应于屯宝煤矿的地质构造隐蔽致灾因素勘查技术体系,如图 12 所示。

构建的智能开采工作面的构造隐蔽致灾地质因素勘查技术体系可分为 4 个层级:①区域构造地质研究。②隐蔽致灾因素的勘查,隐蔽致灾因素勘查重点针对矿井智能开采工作面而开展,以历史资料分析快速圈定工作面地质构造类型及其潜在的隐蔽致灾因素,在此基础上针对地质构造和隐蔽致灾因素类型,选择合适的物探技术(如槽波、坑透、随采随掘探测、测井或孔中物探等)

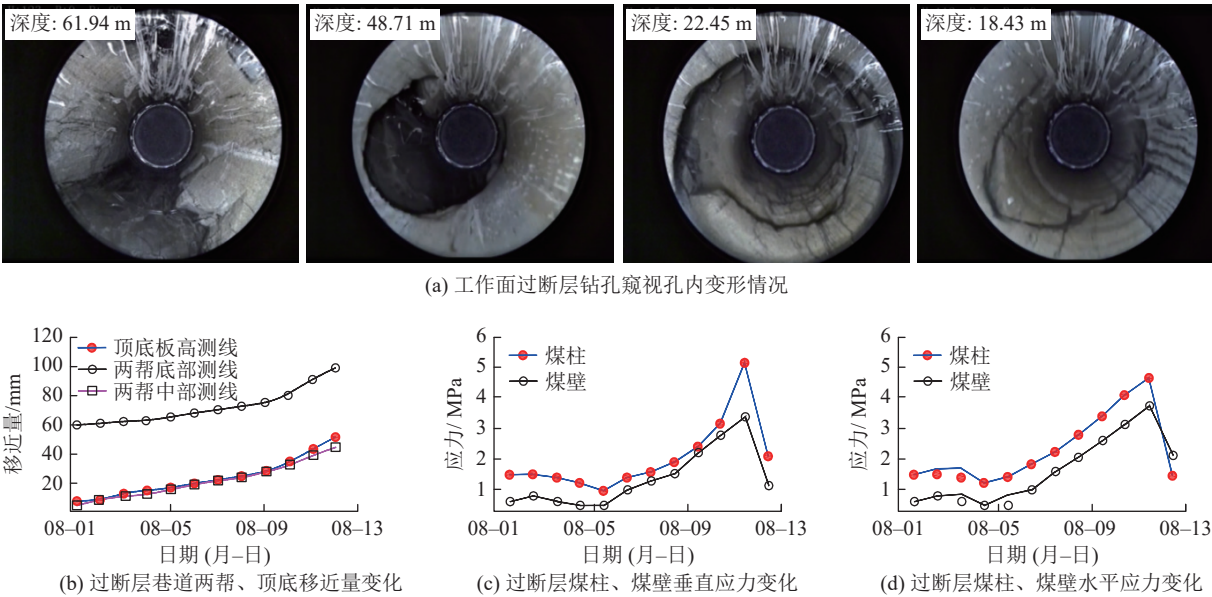


图 10 工作面过断层矿压显现现场监测特征^[53]

Fig.10 On-site monitoring characteristics of ground pressure behavior in working face passing fault^[53]

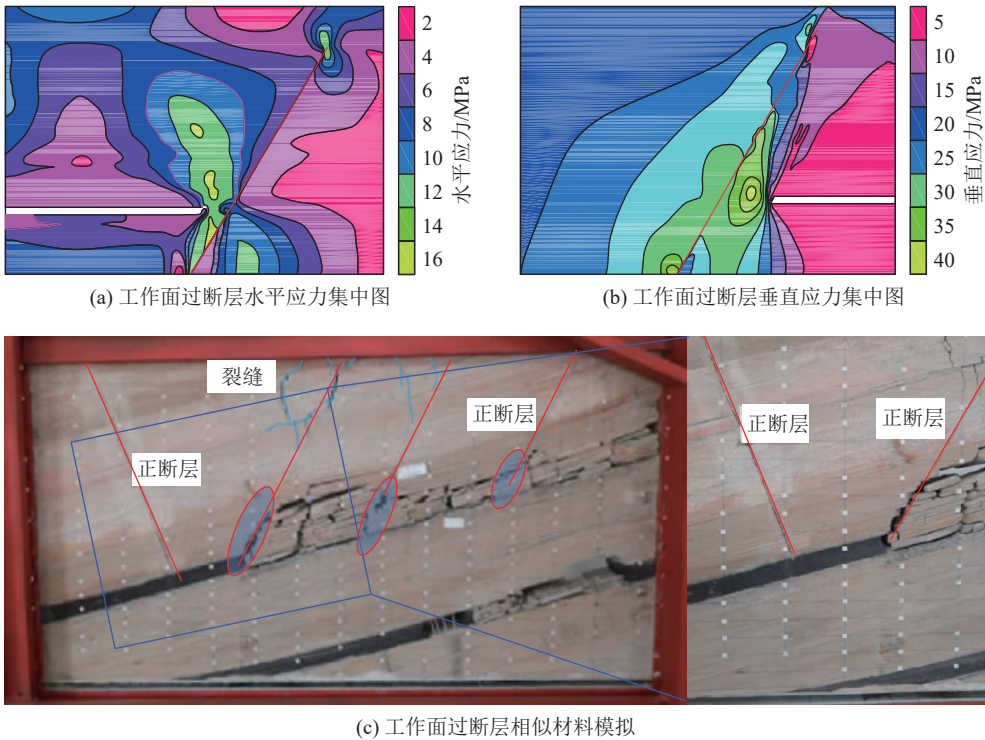


图 11 工作面过断层顶板覆岩结构运移规律^[52]

Fig.11 Movement law of overburden structure of working surface over fault roof plate^[52]

进一步确定物探的异常区和隐蔽致灾因素的特征；在物探圈定的基础上开展钻探验证（如定向钻探的超前探测、采样测试等），获取隐蔽致灾因素评价或探测治理的关键性数，保障巷道快速掘进及工作面的快速回采；在生产过程中根据生产揭露和监测监控资料及数据，动态调整隐蔽致灾因素范围及其评价参数。③在探测和获取参数后采用

理论分析、数值模拟、相似材料模拟、工程类比等方式，进行地质构造隐蔽致灾因素评价，根据评价结果提出针对性探查防治措施和工程治理方案。④最终，通过相关性分析、数字化技术、数据融合以及三维地质建模技术，将隐蔽致灾因素调查、分析、评价的成果三维呈现，实现构造隐蔽致灾因素的透明化。

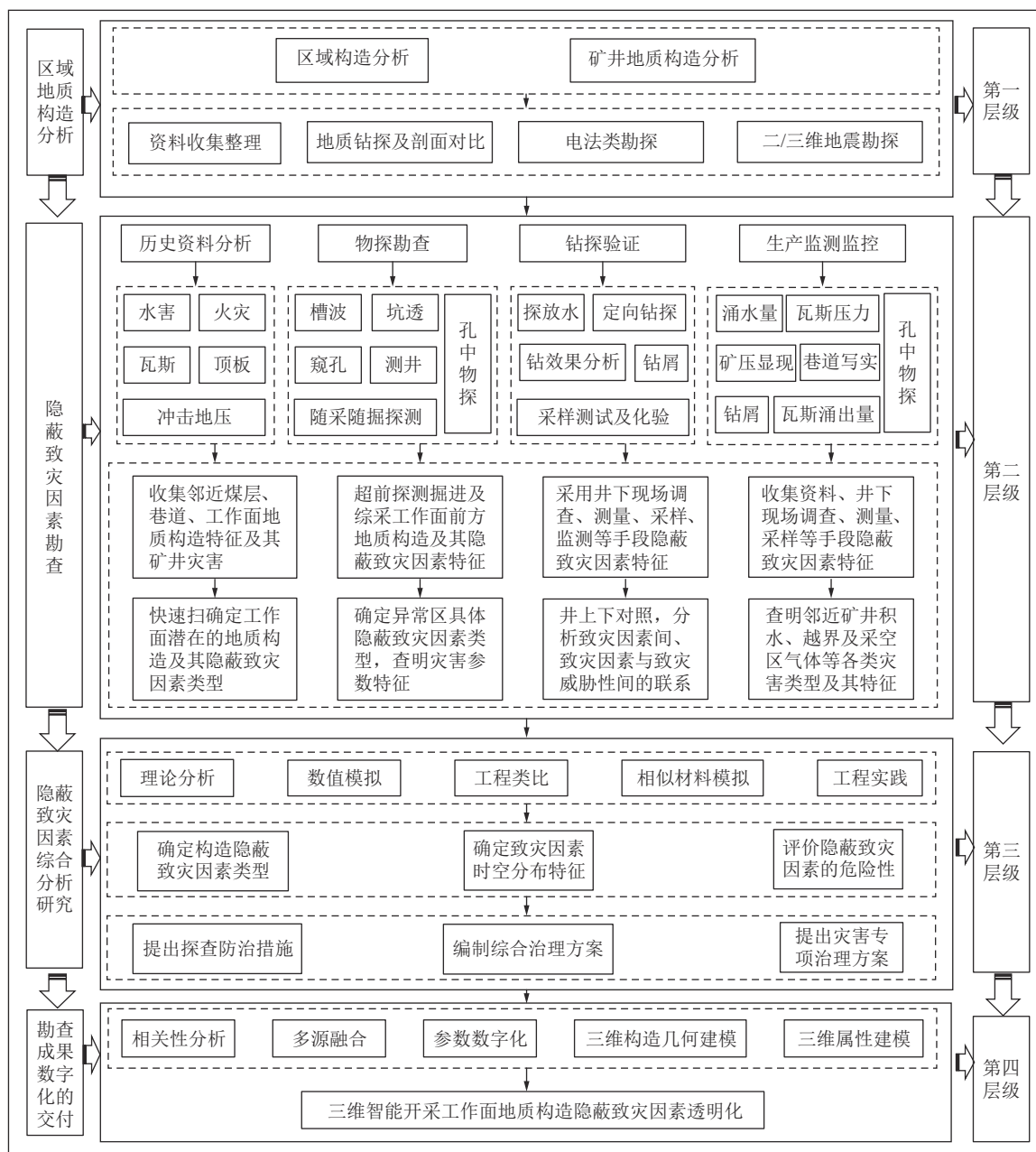


图 12 地质构造隐蔽致灾因素勘查技术体系

Fig.12 Technology system of geological structure hidden disaster-causing factor exploration

3 构造隐蔽致灾因素透明化技术

3.1 多源数据融合

3.1.1 数据源分析

屯宝煤矿 WII02040502 工作面先后采用了三维地震、无线电波透视、槽波勘探、井下钻探、巷道写实编录等技术手段对工作面断层进行精细探查。但技术手段不同导致成果数据类型多样、格式不统一，探测工程空间范围不同，解释成果的精度也有所差别。本次三维地质建模数据来源主要包括：钻孔数据，如钻孔名称、孔口坐标、终孔深度、孔斜数据、分层数据等，巷道写实、超前探煤孔写实等地质写实数

据均以钻孔数据进行处理；通过轨迹测井计算得到的各煤层分界面、煤层厚度等资料；三维地震数据，如导入的已解释好的地震数据，其格式为 SEG-Y，加载前经时深转换处理；槽波数据，如断层、褶皱等地质地质构造发育情况；生产数据，如矿压监测数据、瓦斯参数测试数据、邻近工作面地质构造及隐蔽致灾因素特征等。

3.1.2 数据综合

数据融合的基础是数据的集成与综合，即将不同的数据源通过坐标转换、数据投影等方法进行数据归一化处理。以工作面地理坐标为约束，将三维

地震成果、槽波勘探、井下钻探数据成果转换为工作面绝对坐标,为数据处理做好准备。

数据集成后,对多源数据进行选取、位移、化简等操作,将其统一在同一比例尺上。

3.1.3 数据融合分析

不同的物探、钻探、实测手段针对同一地质构造可解释出不同的成果,即便是同一技术手段,也会解释出不同的结果,处理这一矛盾是数据融合主要解决的问题。本次三维地质建模以矿井高精度三维地震解释成果为基础,以地面钻孔资料进行地质地震标定,以巷道写实数据、探煤厚钻孔数据为约束,对三维地震数据、槽波数据和无线电波透视数据进行校正。数据流经过以上 3 个层次顺序处理,最终形成三维建模数据。

3.2 复杂断层三维可视化建模

3.2.1 断层建模

1)生成断面:将断层建模数据通过一定的空间插值方法进行计算,生成断面。断面生成过程需控制断面垂向延伸长度,生成的断面根据该断面钻孔断点进行校正(图 13a)。

2)断面校正:为保证计算生成的断面与实际断层展布规律一致,对生成的断面进行人工校正。编辑断面形态,使之与巷道揭露信息一致。根据断层复杂接触关系及多期次断层与地层切割关系,修正断层发育情况(图 13b)。

3.2.2 地层模型

关键层面模型:工作面模型以煤层为关键层面进行建模,采用多点统计学方法进行煤层形态空间插值建模,通过计算机多种曲面插值算法,计算地层面,根据钻孔分层点校正地层面,设置地层接触关系

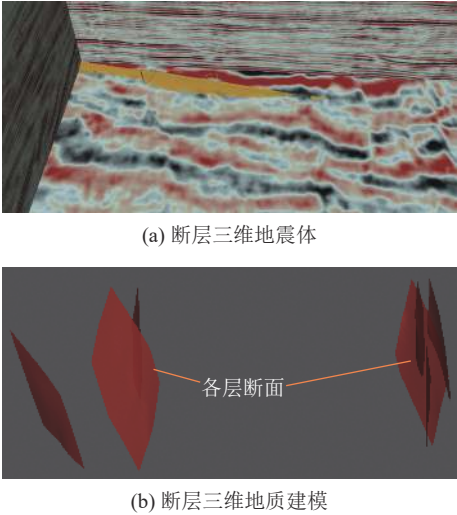


图 13 三维地震体及其断层建模

Fig.13 3D modeling of seismic body and its fault

等,进而建立地层格架模型(图 14)。确定工作面地层起伏、煤层厚度变化信息,与断层展布模型切割相交,对交线平滑处理后形成工作面静态三维地质模型(图 15)。

三维地层体模型:断层模型与关键层面模型(图 15、图 16)建立后,对层面进行纵向网格剖分,内插形成多个地层网格,垂向网格结合平面网格进行三维网格化,最终建立地层模型。

3.3 构造隐蔽致灾因素透明化

采用数字化技术将上述隐蔽致灾因素进行数字化表达,如断层导致的应力集中区在断层分布的 20 m 范围内,瓦斯含量及其涌出量异常区分布在断层面 25 m 附近,断层导致的巷道变形、工作面回采应力、应变等矿压显现在 30 m 范围等阈值指标进行危险区的圈定;同时,结合地质构造引发的如煤层厚度的

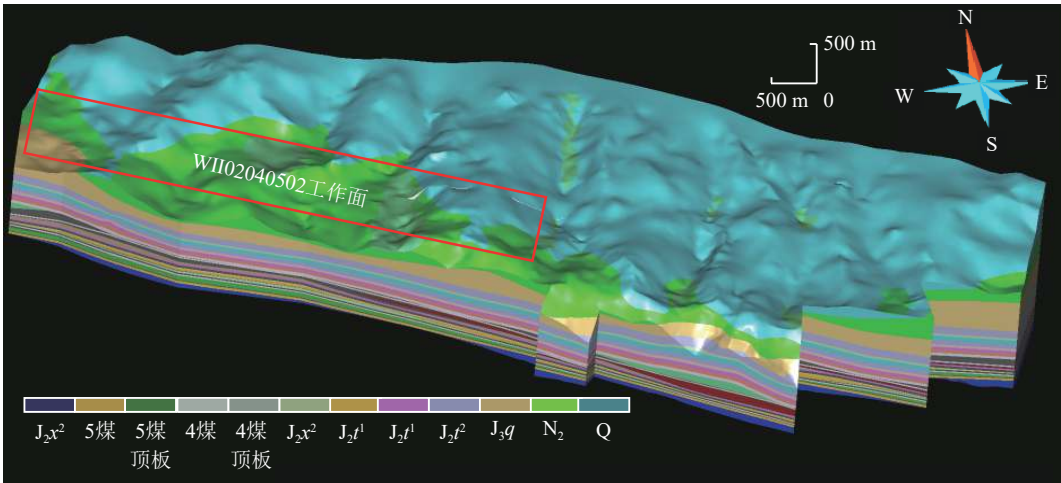


图 14 地层格架三维地质模型

Fig.14 3D geological model of stratigraphic lattice

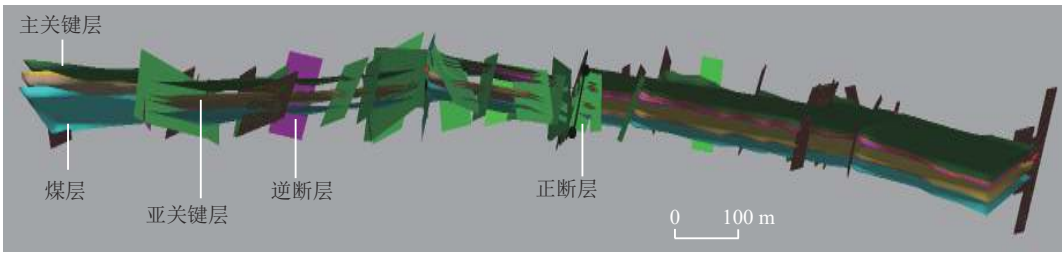


图 15 断层及关键层面三维静态地质模型
Fig.15 3D static geological model of faults and critical layers

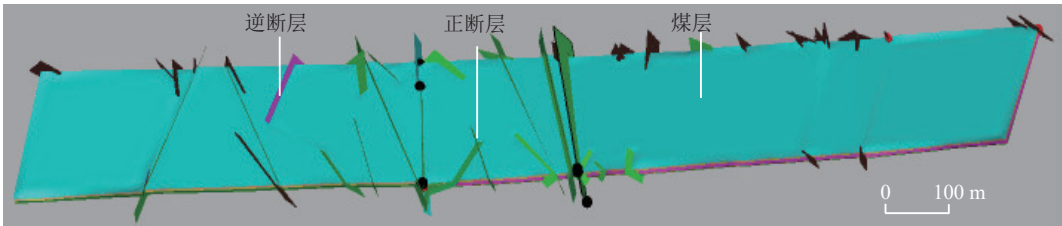


图 16 工作面煤层及断层三维地层体模型
Fig.16 3D stratigraphic model of coal seam and fault in working face

变化突变带、应力集中区、挠褶带等隐蔽致灾因素进行三维灾害属性建模。
最终，将地质模型(如地层、构造、煤层厚度及其

顶底板起伏)与构造隐蔽致灾因素属性模型进行融合，建立 WII02040502 工作面构造隐蔽致灾因素三维透明化模型(图 17)。

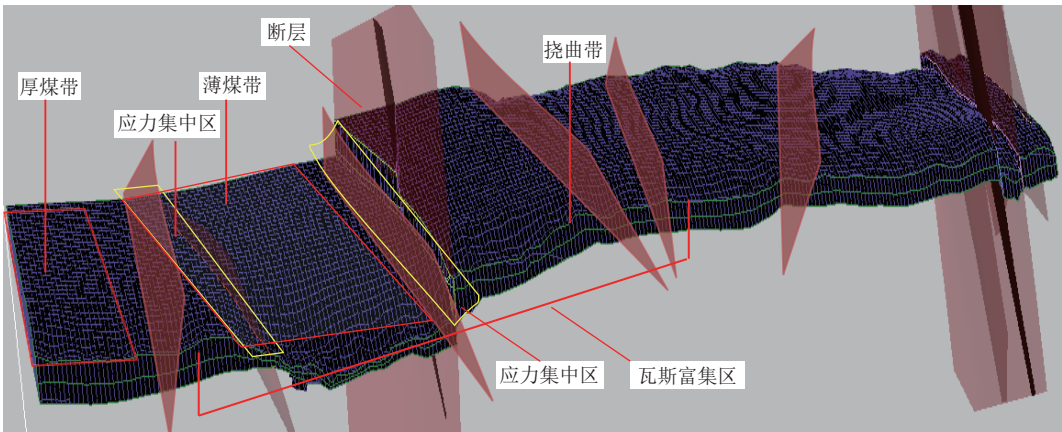


图 17 三维地质构造隐蔽致灾因素分布
Fig.17 Distribution map of hidden disaster-causing factors in 3D geological structures

由图 17 可知，WII02040502 工作面存在的构造隐蔽致灾因素包括由 8 条断层构造导致的应力集中区、煤层厚度突变带、瓦斯富集区、挠褶带等类型。上述各类因素的叠加区域为高危险区，单一因素区为中等危险区，其他区域为低危险区。煤矿存在因断层而诱发矿井冲击地压显现、瓦斯突出、采掘工作面过断层顶板冒顶、应力集中等矿井灾害风险。

4 结 论

1)构建了煤矿智能开采工作面构造隐蔽致灾因素透化勘查技术体系，以屯宝煤矿为研究对象、以

WII02040502 智能开采工作面为工程背景，实现了对该工作面隐蔽致灾因素的快速调查、多手段综合勘查、多方法的分析与评价，最终，采用数字化、相关性分析技术、三维建模实现了对构造隐蔽致灾因素的三维透明化展示，形成了区域构造地质研究、隐蔽致灾因素精细勘查、致灾威胁性科学评价、地质构造透明化的 4 个层级的逐级地质构造隐蔽致灾因素透明化勘查技术体系。

2)查明了屯宝煤矿总体构造形态为单斜构造背景上发育有断层、挠褶皱及其低幅度的褶曲构造，其中以断裂构造为主，断裂构造的发育严重的制约着

矿井采掘工程面的设计和部署,同时威胁着煤矿的安全、高效、绿色、智能化开采。

3)屯宝煤矿与地质构造相关的隐蔽致灾因素包括断层诱发的地应力集中、煤层厚度突变、煤层瓦斯富集、煤岩体结构特征变化、巷道掘进冒顶、工作面回采强矿压显现、顶板冲击地压显现等矿井灾害致灾因素,其中冲击地压和瓦斯突出是主要的矿井灾害类型。

4)研究成果对新疆自治区矿井智能化建设、隐蔽致灾因素透明化勘查具有借鉴意义。此外,上述研究成果为屯宝煤矿智能化建设和煤矿隐蔽致灾因素勘查治理的初步成果,后续将隐蔽致灾因素透明化与灾害的监测预警相融合,实现煤矿隐蔽致灾因素透明化与预警联动。

参考文献(References):

- [1] 董书宁,刘再斌,程建远,等.煤炭智能开采地质保障技术及展望[J].*煤田地质与勘探*,2021,49(1):21-31.
DONG Shuning, LIU Zaibin, CHENG Jianyuan, *et al.* Technologies and prospect of geological guarantee for intelligent coal mining[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 21-31.
- [2] 王国法,任怀伟,赵国瑞,等.煤矿智能化十大“痛点”解析及对策[J].*工矿自动化*,2021,47(6):1-11.
WANG Guofa, REN Huaiwei, ZHAO Guorui, *et al.* Analysis and countermeasures of ten “pain points” of intelligent coal mine[J]. *Journal of Mine Automation*, 2021, 47(6): 1-11.
- [3] 卢新明,阚淑婷.煤炭精准开采地质保障与透明地质云计算技术[J].*煤炭学报*,2019,44(8):2296-2305.
LU Xinming, KAN Shuting. Geological guarantee and transparent geological cloud computing technology of precision coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2296-2305.
- [4] 王海军,王相业,吴艳,等.井巷煤层精细对比技术[J].*地质论评*,2024,70(S1):263-265.
WANG Haijun, WANG Xiangye, WU Yan, *et al.* Fine contrast technology of coal seam in mine roadway[J]. *Geological Review*, 2024, 70(S1): 263-265.
- [5] 袁亮,张平松.煤炭精准开采透明地质条件的重构与思考[J].*煤炭学报*,2020,45(7):2346-2356.
YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Framework and thinking of transparent geological conditions for precise mining of coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2346-2356.
- [6] 刘再斌,刘程,刘文明,等.透明工作面多属性动态建模技术[J].*煤炭学报*,2020,45(7):2628-2635.
LIU Zaibin, LIU Cheng, LIU Wenming, *et al.* Multi-attribute dynamic modeling technique for transparent working face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2628-2635.
- [7] 刘小雄,王海军.薄煤层智能开采工作面煤层透明化地质勘查技术[J].*煤炭科学技术*,2022,50(7):67-74.
LIU Xiaoxiong, WANG Haijun. Transparent geological exploration technology of coal seam on the working surface of intelligent mining of thin coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(7): 67-74.
- [8] 高北斗,王海超,田继军,等.淮南煤田硫磺沟矿区向斜-承压式煤层气富集模式[J].*现代地质*,2020,34(2):281-288.
GAO Beidou, WANG Haichao, TIAN Jijun, *et al.* Syncline-confined-water model of coalbed methane enrichment area in Liuhuanggou mining area, southern Junggar Coalfield[J]. *Geoscience*, 2020, 34(2): 281-288.
- [9] 高崇龙,王剑,刘明,等.淮南侏罗-白垩纪原型盆地边界变迁及其沉积物源响应[J].*地球科学*,2024,49(1):103-122.
GAO Chonglong, WANG Jian, LIU Ming, *et al.* Boundary changes of Jurassic-cretaceous prototype basin of southern Junggar and responses of sedimentary provenance and depositional systems[J]. *Earth Science*, 2024, 49(1): 103-122.
- [10] 鲁雪松,赵孟军,张凤奇,等.准噶尔盆地南缘前陆冲断带超压发育特征、成因及其控藏作用[J].*石油勘探与开发*,2022,49(5):859-870.
LU Xuesong, ZHAO Mengjun, ZHANG Fengqi, *et al.* Characteristics, origin and controlling effects on hydrocarbon accumulation of overpressure in foreland thrust belt of southern margin of Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(5): 859-870.
- [11] 王海军.柳江盆地岩浆侵入对煤层顶板岩石力学特征的影响[J].*煤炭学报*,2020,45(11):3879-3894.
WANG Haijun. Influence of magma intrusion on rock mechanics characteristics of coal seam roof in Liujiang Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(11): 3879-3894.
- [12] 王海军.柳江盆地岩浆活动对主力煤田水文地质特征的影响[J].*煤炭学报*,2021,46(5):1670-1684.
WANG Haijun. Influence of magmatic activities in Liujiang Basin on hydrogeological characteristics of main coalfields[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1670-1684.
- [13] 汤达祯,杨曙光,唐淑玲,等.准噶尔盆地煤层气勘探开发与地质研究进展[J].*煤炭学报*,2021,46(8):2412-2425.
TANG Dazhen, YANG Shuguang, TANG Shuling, *et al.* Advance on exploration-development and geological research of coalbed methane in the Junggar Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2412-2425.
- [14] 王海军,刘善德,马良,等.盘关向斜火烧铺井田重烃含量异常的控制因素[J].*煤炭学报*,2022,47(9):3421-3441.
WANG Haijun, LIU Shande, MA Liang, *et al.* Controlling factors of abnormal heavy hydrocarbon content in Huoshaopu mine field of Pansyncline[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(9): 3421-3441.
- [15] 木宗勇.屯宝煤矿三维地震勘探地震属性对断层解释的应用[J].*科技创新与应用*,2016,6(14):26.
- [16] 刘万里,张学亮,王世博.采煤工作面煤层三维模型构建及动态修正技术[J].*煤炭学报*,2020,45(6):1973-1983.
LIU Wanli, ZHANG Xueliang, WANG Shibao. Modeling and dynamic correction technology of 3D coal seam model for coal-mining face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 1973-1983.

- [17] 程建远, 王保利, 范涛, 等. 煤矿地质透明化典型应用场景及关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 1-12.
CHENG Jianyuan, WANG Baoli, FAN Tao, *et al.* Typical application scenes and key technologies of coal mine geological transparency[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 1-12.
- [18] 王保利, 程建远, 崔伟雄, 等. 采煤工作面随采地震探测技术研究进展: 以贵州岩脚矿 12701 工作面为例[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S1): 406-413.
WANG Baoli, CHENG Jianyuan, CUI Weixiong, *et al.* Research progress of seismic-while-mining detection technology in coal face: an case study in 12701 working face in Guizhou Yanjiao Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 406-413.
- [19] 程建远, 朱梦博, 王云宏, 等. 煤炭智能精准开采工作面地质模型梯级构建及其关键技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2285-2295.
CHENG Jianyuan, ZHU Mengbo, WANG Yunhong, *et al.* Cascade construction of geological model of longwall panel for intelligent precision coal mining and its key technology[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2285-2295.
- [20] 吴国庆, 马彦龙. 地质透明化工作面内多种异常体的槽波解释方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 149-160.
WU Guoqing, MA Yanlong. Research on the interpretation method of channel waves for various abnormal bodies in geologically transparent working faces[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 149-160.
- [21] 吴文慧. 无线电波透视技术在回采工作面隐伏构造探测中的应用[J]. 山西冶金, 2022, 45(3): 304-305.
WU Wenhui. Application of radio wave perspective technology in concealed structure detection of mining face[J]. Shanxi Metallurgy, 2022, 45(3): 304-305.
- [22] 范涛. 基于钻孔瞬变电磁的煤层气压裂效果检测方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3195-3207.
FAN Tao. Coalbed methane fracturing effectiveness test using bore-hole transient electromagnetic method[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3195-3207.
- [23] 晏雁. 微动勘探技术在煤矿隐蔽致灾地质因素探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2024, 21(4): 578-586.
YAN Yan. The application of microtremor exploration technology in the detection of hidden disaster causing geological factors in coal mines[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2024, 21(4): 578-586.
- [24] 袁亮, 张平松. TBM 施工岩巷掘探一体化技术研究进展与思考[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 21-32.
YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Research progress and thinking on integrated tunneling and detection technology of rock roadway with TBM[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 21-32.
- [25] 王保利, 程建远, 金丹, 等. 煤矿井下随掘地震震源特征及探测性能研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(1): 10-19.
WANG Baoli, CHENG Jianyuan, JIN Dan, *et al.* Characteristics and detection performance of the source of seismic while excavating in underground coal mines[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(1): 10-19.
- [26] 程建远, 陆自清, 蒋必辞, 等. 煤矿巷道快速掘进的“长掘长探”技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 404-412.
CHENG Jianyuan, LU Ziqing, JIANG Bici, *et al.* A novel technology of “long excavation/long detection” for rapid excavation in coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 404-412.
- [27] 蒋必辞, 程建远, 李萍, 等. 基于钻孔雷达的透明工作面构建方法[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(1): 128-135.
JIANG Bici, CHENG Jianyuan, LI Ping, *et al.* Construction method of transparent working face based on borehole radar[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(1): 128-135.
- [28] 刘四新, 宋梓豪, 程建远, 等. 利用钻孔雷达探测煤矿井下顶底板界面的数值模拟研究[J]. 世界地质, 2021, 40(3): 711-720.
LIU Sixin, SONG Zihao, CHENG Jianyuan, *et al.* Numerical simulation research on detecting underground coal mine roof and floor using borehole radar[J]. Global Geology, 2021, 40(3): 711-720.
- [29] 姬勇力, 李智强, 宋加加, 等. 一种低阻地层孔间电磁波 CT 正反演方法[J]. 电波科学学报, 2023, 38(4): 657-664, 685.
JI Yongli, LI Zhiqiang, SONG Jiajia, *et al.* A cross-hole electromagnetic CT forward and inversion method in low resistivity formation[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023, 38(4): 657-664, 685.
- [30] 蒋辉, 赵晓鹏, 赵永贵. 双通道跨孔雷达 CT 原理与应用[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(2): 814-822.
JIANG Hui, ZHAO Xiaopeng, ZHAO Yonggui. Principle and application of dual-channel cross-bore radar CT[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(2): 814-822.
- [31] LIU G R, YAO K Q, NIU F Y, *et al.* Deep investigation of muography in discovering geological structures in mineral exploration: a case study of Zaozigou gold mine[J]. Geophysical Journal International, 2024, 237(1): 588-603.
- [32] 毛善君, 鲁守明, 李存禄, 等. 基于精确大地坐标的煤矿透明化智能综采工作面自适应割煤关键技术研究及系统应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 515-526.
MAO Shanjun, LU Shouming, LI Cunlu, *et al.* Key technologies and system of adaptive coal cutting in transparent intelligent fully mechanized coal mining face based on precise geodetic coordinates[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 515-526.
- [33] 王嘉伟, 王海军, 吴汉宁, 等. 基于三维地质建模技术的煤矿隐蔽致灾因素透明化研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(3): 71-81, 121.
WANG Jiawei, WANG Haijun, WU Hanning, *et al.* Research on transparency of hidden disaster causing factors in coal mines based on 3D geological modeling technology[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(3): 71-81, 121.
- [34] 靳德武, 李鹏, 赵春虎, 等. 采场三维充水结构地质建模及动态可视化实现[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 143-149.
JIN Dewu, LI Peng, ZHAO Chunhu, *et al.* Geological modeling and implementation on dynamic visualization of three-dimensional water filling structure in stope of underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 143-149.

- [35] 王海军, 刘善德, 马良, 等. 盘县煤田滑脱构造特征及其研究意义[J]. *中国煤炭地质*, 2023, 35(2): 1-9, 16.
WANG Haijun, LIU Shande, MA Liang, *et al.* Characteristics of detachment structures and research significance in Panxian coal field[J]. *Coal Geology of China*, 2023, 35(2): 1-9, 16.
- [36] 王海军, 马良. 陕北侏罗纪煤田三角洲平原沉积环境及其岩石力学特征[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(3): 61-69.
WANG Haijun, MA Liang. Study on sediment environment and rock mechanics characteristics of the delta plain of Jurassic coalfield in northern Shaanxi[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(3): 61-69.
- [37] 王海军. 煤层顶板沉积环境对其稳定性影响研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(2): 178-184.
WANG Haijun. Study on impact of sedimentary environment to stability of seam roof[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(2): 178-184.
- [38] 王海军, 刘善德, 马良, 等. 面向智能化开采的矿井煤层岩层综合对比技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(2): 24-38.
WANG Haijun, LIU Shande, MA Liang, *et al.* Comprehensive correlation technology of coal and rock layers in mines for intelligent mining[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(2): 24-38.
- [39] 韩珂, 王海军. 强冲击地压矿井煤层顶板覆岩结构研究: 以孟村煤矿为例[J]. *中国煤炭地质*, 2024, 36(3): 47-59.
HAN Ke, WANG Haijun. Study on roof deposition characteristics of coal seam in high underground pressure: a case study of the Mengcun Coal Mine[J]. *Coal Geology of China*, 2024, 36(3): 47-59.
- [40] 原长锁, 王峰. 综采工作面透明化开采模式及关键技术[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(3): 11-15, 31.
YUAN Changsuo, WANG Feng. Transparent mining mode and key technologies of fully mechanized working face[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(3): 11-15, 31.
- [41] 薛国华. 基于透明地质的综采工作面三维煤层建模[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(4): 135-141.
XUE Guohua. Three-dimensional coal seam modeling of fully mechanized working face based on transparent geology[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(4): 135-141.
- [42] 孙四清, 李文博, 张俭, 等. 煤矿井下长钻孔分段水力压裂技术研究进展及发展趋势[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(8): 1-15.
SUN Siqing, LI Wenbo, ZHANG Jian, *et al.* Research progress and development trend of staged hydraulic fracturing technology in long-borehole underground coal mine[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(8): 1-15.
- [43] 李泉新, 许超, 刘建林, 等. 煤矿井下全域化瓦斯抽采定向钻进关键技术与工程实践[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(8): 3108-3116.
LI Quanxin, XU Chao, LIU Jianlin, *et al.* Key technology and practice of directional drilling for gas drainage in all the mining time and space in underground coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(8): 3108-3116.
- [44] 石智军, 姚克, 姚宁平, 等. 我国煤矿井下坑道钻探技术装备40年发展与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(4): 1-34.
SHI Zhijun, YAO Ke, YAO Ningping, *et al.* 40 years of development and prospect on underground coal mine tunnel drilling technology and equipment in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(4): 1-34.
- [45] 陈庆丰. 屯宝煤矿近距离煤层开采综合防灭火技术研究与应用[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2017.
CHEN Qingfeng. Research and application of comprehensive fire prevention and extinguishing technology in close-distance coal seam mining in Tunbao Coal Mine[D]. Beijing: Chinese Institute of Coal Science, 2017.
- [46] 郑凯歌, 杨俊哲, 李彬刚, 等. 基于垮落充填的坚硬顶板分段压裂弱化解危技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(5): 77-87.
ZHENG Kaige, YANG Junzhe, LI Bingang, *et al.* Collapse filling-based technology of weakening and danger-solving by staged fracturing in hard roof[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(5): 77-87.
- [47] 王国法, 潘一山, 赵善坤, 等. 冲击地压煤层如何实现安全高效智能开采[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(1): 1-14.
WANG Guofa, PAN Yishan, ZHAO Shankun, *et al.* How to realize safe-efficient-intelligent mining of rock burst coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(1): 1-14.
- [48] 李鹏, 程建远. 回采工作面煤层三维建模技术及其在智能开采中的应用[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(8): 156-161.
LI Peng, CHENG Jianyuan. 3D modeling technology of coal seam in working face and its application in intelligent mining[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(8): 156-161.
- [49] 孟凡刚, 马亚杰, 王国华, 等. 基于钻孔勘探数据的煤层厚度分布与构造预判[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(8): 233-237, 211.
MENG Fangang, MA Yajie, WANG Guohua, *et al.* Seam thickness distribution and tectonic prediction based on exploration data from drilling[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(8): 233-237, 211.
- [50] 张清清. 断层破碎区动压巷道稳定性分析及支护参数优化[J]. *煤炭技术*, 2022, 41(4): 49-52.
ZHANG Qingqing. Stability controlling analysis and support parameters optimization of roadway with dynamic pressure in fault broken zone[J]. *Coal Technology*, 2022, 41(4): 49-52.
- [51] 李海潮. 屯宝矿综放工作面煤柱巷道围岩破坏特征与控制对策[J]. *煤炭技术*, 2021, 40(11): 35-40.
LI Haichao. Destruction characteristics and control countermeasures of coal pillar roadway in fully mechanized caving face of tunbao mine[J]. *Coal Technology*, 2021, 40(11): 35-40.
- [52] 刘明, 曹民远, 吴玉海, 等. 屯宝煤矿逆断层破碎带巷道变形控制研究[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(4): 98-103.
LIU Ming, CAO Minyuan, WU Yuhai, *et al.* Research on deformation control of roadway in reverse fault fracture zone of Tunbao Coal Mine[J]. *Journal of Mine Automation*, 2020, 46(4): 98-103.
- [53] 来兴平, 郑建伟, 陈建强, 等. 断层影响区破碎煤岩体深层临界失稳范围确定[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(S1): 1-5.
LAI Xingping, ZHENG Jianwei, CHEN Jianqiang, *et al.* Comprehensive identification of rock-coal mass internal critical destabilization in fault influenced broken zone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(S1): 1-5.