



深部煤层群井上下联合逐级递进防突方法与关键技术

张永将 徐军见 李思乾

引用本文：

张永将, 徐军见, 李思乾. 深部煤层群井上下联合逐级递进防突方法与关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 115–127.
ZHANG Yongjiang, XU Junjian, LI Siqian. Method and key technologies of underground and surface combined stepwise progressive anti-outburst for deep coal seam groups[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 115–127.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.20250507>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤与瓦斯突出煤层群安全高效开采技术体系与展望

Technical system and prospect of safe and efficient mining of coal and gas outburst coal seams

煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1a52ace6-8596-41a3-92a0-77db8b62455c>

深部远距离煤层群卸压主控因素及首采层优选方法研究

Study on main control factors of pressure relief of deep and long distance coal seam group and optimization method of initial mining

煤炭科学技术. 2021, 49(8): 154–161 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5998a94e-fdad-4446-9b8d-c01aaf0cf566>

倾斜碎软煤层群煤层气协调开发关键技术

Key technologies for coordinated development of coalbed methane in inclined soft coal seam groups: a case study of Aiweigou Mining Area

煤炭科学技术. 2024, 52(1): 211–220 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0005>

煤矿区煤层气“四区联动”井上下联合抽采模式与技术体系

Mechanism and technical system of ground and underground combined drainage of CBM in “four region linkage” in coal mining area

煤炭科学技术. 2022, 50(12): 14–25 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.mcq22-1076>

近距离煤层群煤与瓦斯高效共采技术体系研究——以山西吕梁沙曲矿区为例

High efficiency simultaneous extraction technology system of coal and gas in close-distance seam group: taking shaqu mining area in luliang, shanxi province as an example

煤炭科学技术. 2021, 49(2): 122–137 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.016>

近距离煤层群多分支水平井井孔对接控压抽采技术

Multi-branch horizontal well hole docking pressure control extraction technology for close distance coal seam group

煤炭科学技术. 2025, 53(S1): 42–56 <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0201>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张永将,徐军见,李思乾.深部煤层群井上下联合逐级递进防突方法与关键技术[J].煤炭科学技术,2025,53(8):115-127.

ZHANG Yongjiang, XU Junjian, LI Siqian. Method and key technologies of underground and surface combined stepwise progressive anti-outburst for deep coal seam groups[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 115-127.



张永将,男,安徽宿州人,研究员,博士生导师,博士。中国煤炭科工集团有限公司首席科学家、重庆研究院瓦斯研究分院院长。研究方向:煤矿瓦斯灾害防治。获省部级科技进步奖30余项,其中一等奖10项、二等奖15项。获孙越崎青年科技奖、全国煤炭青年五四奖章等称号;主持国家重点研发计划、国家自然基金等项目80余项,授权发明专利40项、国际专利8项;发表论文100余篇,其中SCI收录15篇、Ei收录25篇,出版专著3部,编写行业标准8项。

深部煤层群井上下联合逐级递进防突方法与关键技术

张永将^{1,2},徐军见^{1,2,3},李思乾¹

(1. 中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆 400037; 2. 煤矿灾害防控国家重点实验室,重庆 400037; 3. 煤炭科学研究院,北京 100013)

摘要:现代化高产高效矿井仍面临抽掘采接替紧张的局面,对防突技术治理的区域范围、超前时间提出更高要求,为突破现有瓦斯治理技术体系在近/远距离煤层群协同抽采、井上下逐级防突方面的瓶颈,系统阐述了井上下联合“时空抽采、逐级递进”防突原理,构建了“地面超前预抽降突-井下强化抽采消突-多煤层协同治理”的立体防控方法,融合地面井时空超前优势与井下作业精准控制能力,形成矿井级区域预控、采区级协同治理、工作面级精准消突的3级递进防控体系,针对近、远距离煤层群不同特征,分别提出“地面井广覆盖、井下高效抽”和“井下强化卸压、地面井多源抽”防突模式。综合运用数值模拟、理论分析和现场试验方法,系统构建了以主井与分支井夹角、分支井数量等为关键要素的多分支水平井参数优化技术,形成了融合水平井钻头空间磁场感应模型与高精度传感器数据的地面多分支井与井下定向钻孔对精准对接技术,分析了应力场-裂隙场-瓦斯渗流场3场耦合演化规律,揭示了深部煤层瓦斯富集靶区分布特征,结合地质条件与抽采时空衔接需求,提出了“单井区域最大化”与“全区密集型”多源井群协同布置模式。近距离煤层群高效抽采技术在沙曲一号煤矿应用,实现SQN-0501三口多分支水平井抽采1a总产气量7 273 175.4 m³,日均产气量约2万m³;远距离煤层群卸压抽采关键技术在朱集西煤矿的应用表明,地面井累计抽采13-1煤层卸压瓦斯728.3万m³,抽采率高达81.4%,瓦斯含量显著降低。近、远距离煤层群井上下联合防突技术体系的成功应用验证了该技术体系在提升瓦斯抽采效率、降低突出风险方面的有效性,为深部煤层群安全开采提供了重要技术支撑。

关键词:突出煤层群;井上下联合抽采;逐级递进防突;立体防突方法;远/近距离煤层群

中图分类号:TD713 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2025)08-0115-13

Method and key technologies of underground and surface combined stepwise progressive anti-outburst for deep coal seam groups

ZHANG Yongjiang^{1,2}, XU Junjian^{1,2,3}, LI Siqian¹

(1. China Coal Technology Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China; 2. National Key Laboratory of Coal Mine Disaster

收稿日期:2025-04-13 策划编辑:朱恩光 责任编辑:钱小静 DOI: 10.12438/cst.2025-0507

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52474277);国家重点研发计划资助项目(2023YFC3009003);重庆市自然科学基金资助项目(CSTB2022NSCQ-MSX0373)

作者简介:张永将(1981—),男,安徽宿州人,研究员,博士。E-mail: zhangyj_1026@163.com

Prevention and Control, Chongqing 400037, China; 3. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Modern high-yield and high-efficiency mines still face the situation of tight replacement among roadway driving, mining and extraction, and put forward higher requirements for the regional scope and advanced time of outburst prevention and control technology. In order to break through the bottlenecks of the existing gas control technology system in the coordinated extraction of near/far coal seam groups and the step-by-step outburst prevention both on the surface and underground, the principle of “spatiotemporal extraction and step-by-step progression” for outburst prevention with the combination of surface and underground operations is systematically expounded. A three-dimensional prevention and control method of “surface advanced pre-extraction for outburst reduction – underground enhanced extraction for outburst elimination – coordinated governance of multiple coal seams” is constructed. By integrating the advantages of spatiotemporal advance of surface wells and the precise control ability of underground operations, a three-level progressive prevention and control system of mine-level regional pre-control, mining area-level coordinated governance and working face-level precise outburst elimination is formed. According to the different characteristics of near and far coal seam groups, the outburst prevention modes of “wide coverage by surface wells and efficient extraction underground” and “enhanced pressure relief underground and multi-source extraction by surface wells” are respectively proposed. By comprehensively using numerical simulation, theoretical analysis and field test methods, a parameter optimization technology for multi-branch horizontal wells with key elements such as the angle between the main well and branch wells and the number of branch wells is systematically constructed. A precise docking technology between surface multi-branch wells and underground directional boreholes is formed by integrating the spatial magnetic field induction model of horizontal well bits and the data of high-precision sensors. The coupling evolution law of the stress field, fracture field and gas seepage field is analyzed, and the distribution characteristics of gas enrichment target areas in deep coal seams are revealed. Combined with the geological conditions and the requirements of the spatiotemporal connection of extraction, the collaborative layout modes of “maximization of a single well area” and “intensive layout in the whole area” for multi-source well groups are proposed. The high-efficiency extraction technology for near coal seam groups is applied in Shaqu No.1 Coal Mine. The total gas production of three multi-branch horizontal wells SQN-0501 after one-year extraction is 7 273 175.4 m³, with an average daily gas production of about 20 000 m³. The key technology of pressure relief extraction for far coal seam groups is applied in Zhuji West Coal Mine. The surface wells have cumulatively extracted 7.283 million m³ of gas from the No.13-1 coal seam, with an extraction rate as high as 81.4%, and the residual gas content is significantly reduced. The effectiveness of this technical system in improving gas extraction efficiency and reducing outburst risks is verified, providing important technical support for the safe mining of deep coal seam groups.

Key words: outburst-prone coal seam groups; integrated surface-underground gas extraction; stepwise progression outburst prevention; three-dimensional outburst prevention methodology; widely / closely coal seam groups

0 引言

随着煤炭资源向深部转移,深部煤层群开采面临高地应力、高瓦斯压力及低渗透率等问题,煤与瓦斯突出灾害严重、防治难度加大^[1]。目前,我国已形成以井下措施为主的“先区域、后局部”2个“四位一体”综合防突技术体系^[2],在煤与瓦斯突出灾害防控方面专家学者从地面、井下不同方向开展了一系列深入研究,并取得了显著成效。地面瓦斯治理方面,随着钻井技术进步,地面井压裂技术逐渐在煤层增透领域应用,形成了多分支水平井、U型井、L型井、V型井等多井型技术体系^[3-6]。其中,定向钻进与水力压裂相结合的煤层水平井压裂技术,大幅提高了煤层增透效率^[7];针对松软煤层的顶板水平井分段压裂预抽技术,通过顶板岩层压裂形成高渗透率的人工裂隙网络,改善瓦斯运移条件,提高瓦斯抽采效果^[8];针对改造效果并不理想的破碎、强突出煤层,国内学者提出地面井造穴或割缝卸压技术,利用机

械或水力手段在煤层内形成局部空腔或裂隙网络,实现应力场-裂隙场协同调控,进一步提升了瓦斯抽采效果^[9-11]。在此基础上,结合井下抽采工程,提出了井上下联合抽采的“三区联动”瓦斯综合治理模式,以及地面井分区式瓦斯抽采技术,为深部复杂条件的瓦斯高效治理提供了重要技术路径^[12-15]。井下瓦斯治理方面,现有技术主要包括保护层开采、煤层瓦斯预抽两大类^[16-17]。实践证明,保护层开采是兼具经济性和有效性的区域措施^[18],专家学者在煤与瓦斯安全高效共采^[19-21]、保护层开采机理及其效果^[22-23]、被保护层消突范围^[24]等方面做出了突出贡献;针对不具备保护层开采条件煤层,主要采用煤层瓦斯预抽技术^[2],并形成了巷道、普通钻孔、定向长钻孔等多种瓦斯抽采方式^[25-26],针对低渗煤层开发了水力冲孔、水力割缝、水力压裂、松动爆破、CO₂驱替、液氮致裂等系列煤层增透技术^[27-31],为复杂地质条件下的瓦斯治理提供了重要支撑。然而,现代化高产高效矿井仍时常面临抽掘采接替紧张的局面,

对防突技术治理的区域范围、超前时间提出更高要求,传统井下单一防突模式存在消突范围受限、时空协同性不足等问题,难以满足深部复杂地质条件下安全开采的需求^[32]。防突技术措施正向先抽后建、井上下联合方向发展,以期实现更高效的煤与瓦斯突出灾害防控,为煤炭行业的高质量发展提供有力保障。然而,现有技术体系在近/远距离煤层协同卸压、井上下逐级防突等方面仍存在瓶颈,针对深部矿井煤与瓦斯突出安全高效防控难题,笔者深入剖析井上下联合“时空抽采、逐级递进”防突原理,提出近、远距离井上下联合抽采防突典型模式,并针对性研发了联合防突关键技术,取得显著成效。

1 深部矿井煤与瓦斯突出井上下联合防控方法

1.1 井上下联合“时空抽采、逐级递进”防突原理

宏观层面,井上下联合防突技术即构建“地面超前预抽降突-井下强化抽采消突-多煤层协同治理”的逐级递进瓦斯灾害防控架构,该架构突破传统单一井下治理的局限性,融合井上不受采掘空间限制、井下精准控制的优势,通过地面井与井下钻孔的空间协同、降突与消突的时间衔接,形成“井上措施时间换空间、井下措施空间换时间”井上下联合防突“时空转换-优势互利”的立体防控网络,其核心内涵在于综合利用地面工程的时空超前优势和井下作业的精准治理特点,构建“矿井级区域预控-采区级协同治理-工作面级精准消突”的3级递进防控模式,实现从矿井区域到局部的多尺度联合防突^[33]。井上下“时空抽采、逐级递进”防突内涵如图1所示。

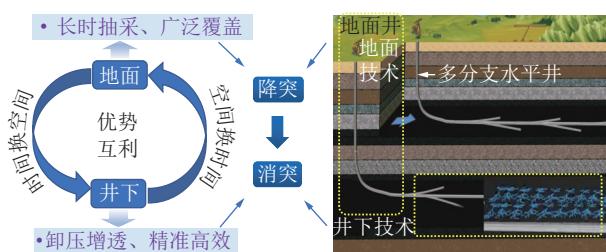


图1 井上下“时空抽采、逐级递进”防突内涵

Fig.1 Connotation of underground and surface “temporal and spatial extraction, stepwise progressive” anti-outburst

微观层面,井上下联合防突的核心在于煤层群瓦斯立体抽采,即从降低煤岩弹性势能、瓦斯内能以及增加煤体强度3个方面入手,协同疏解地应力和高能瓦斯,实现煤层群时空协同卸压增透,“多煤层-区域-局部”逐级递进消突^[15]。深部煤层群联合防突原理如图2所示。

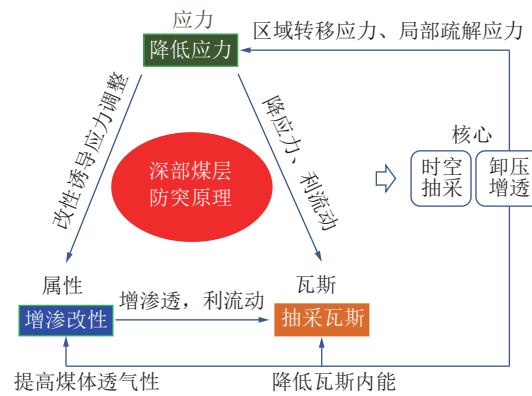


图2 深部煤层群联合防突原理

Fig.2 Principle of joint anti-outburst for deep coal seam groups

多煤层协同疏解地应力是通过调整煤层内应力场的时空分布,影响瓦斯的赋存-运移特性及煤体的物理力学响应。通过同时对多个煤层进行卸压处理,可以有效降低煤层中的地应力水平,减少煤体弹性势能,降低瓦斯内能,降低煤与瓦斯突出风险;同时,地应力的降低还能改善煤体的结构和物理力学性质,增加煤层孔隙率和渗透性,促进瓦斯的排放和扩散,从而降低煤层中的瓦斯含量和压力,减少瓦斯的积聚和突出现象。而瓦斯抽采又能降低煤层瓦斯含量与压力,加速瓦斯解吸和释放,降低瓦斯聚集与突出风险。因此,在降低煤体应力、提高煤体透气性和降低瓦斯内能三者相互作用下,实现应力-渗流-损伤协同演化、深部煤层群联合防突。

其中,缝网对瓦斯抽采起到重要作用。密集的裂缝网络能显著提升煤层渗透率:煤层天然存在微小孔隙和裂隙,结合人工干预形成的裂缝网络,为瓦斯渗流构建更高效的通道网络,这些相互连通的裂缝,使瓦斯流动时的阻力大幅减小,渗透率增加。缝网促进瓦斯解吸:缝网扩展导致煤体局部应力集中程度降低,形成卸压区带,促进吸附态瓦斯向游离态转化。同时,复杂缝网可延伸至煤层深处及周边区域,使瓦斯在浓度梯度、压力梯度共同驱动下向抽采钻孔汇聚,提升抽采效率和抽采量。

1.2 井上下联合抽采防突典型模式

在井上下联合防突原理基础上,分别针对近、远距离煤层赋存特点提出相应的防突模式。根据近距离煤层群层间采动相互影响大、需煤层群联合消突的特点,提出了近距离煤层群“地面井广覆盖、井下高效抽”井上下联合防突典型模式,解决近距离煤层群开采瓦斯涌出大、一体消突井下钻孔施工难、工程量大的问题;根据远距离煤层群具有层间采动卸压效应、需优选首采层的特点,提出了远距离煤层群“井下强化卸压、地面井多源抽”井上下联合防突典

型模式,解决远距离被保护层有效卸压保护范围小、边界区域卸压不充分的问题。

1.2.1 近距离煤层群“地面井广覆盖、井下高效抽”防突模式

近距离煤层群具有层间距小(通常<10 m)、应力分布耦合性强及瓦斯动态运移复杂等特征,导致开采过程中应力场叠加、瓦斯场互馈及煤体损伤累积,其防突重点在于解决层间应力传递、跨层瓦斯运移及多煤层协同卸压难题,据此提出“地面井广覆盖、井下高效抽”防突模式,即地面采用多分支水平井多煤层广域覆盖,井下采用定向长钻孔对接水平井,高效抽采降突,定向梳状孔同时覆盖多煤层精准消突。如图3所示。

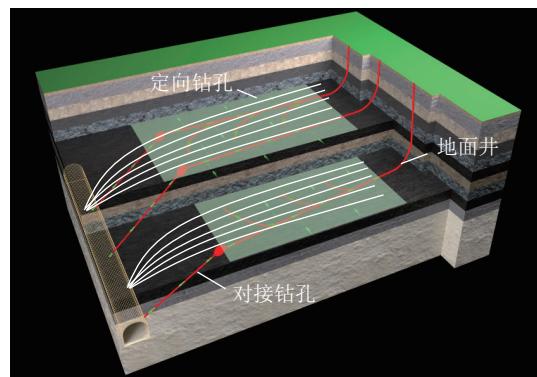


图3 近距离煤层群防突模式

Fig.3 Anti-outburst mode for closely-spaced coal seam groups

该模式充分发挥地面多分支水平井的规模和空间优势,通过合理设计井位、层位和分支方向,增加多分支水平井煤层覆盖范围,定向长钻孔精准对接地面多分支水平井,形成高效的瓦斯抽采通道,贯通井上下抽采空间,实现瓦斯高效抽采,降低煤层瓦斯含量、压力和煤层突出危险程度。同时,在煤层群内布置定向梳状钻孔群覆盖多煤层,提高瓦斯抽采效果。该模式结合了地面井和井下抽采优势,通过地面广域布井与井下精准调控的时空协同,实现对近距离煤层群的广域覆盖和高效抽采,消除瓦斯突出风险,为近距离煤层群安全回采提供有力保障。

近距离煤层群井上下联动过程如图4所示(其中, W_z 为准备区瓦斯含量; P_z 为准备区瓦斯压力),从抽采时间维度方面,规划区地面井超前预抽降突,规划区向准备区转换的过程中,其阈值由煤层原始瓦斯含量决定,通过长期预抽,突出指标不一定能降低至《防治煤与瓦斯突出细则》中规定的 $8 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 0.74 MPa 以下,其阈值可表示为 $W_G < \beta W_0$ (其中, W_G 为规划区瓦斯含量; W_0 为国家对煤与瓦斯突出煤层

规定的瓦斯含量; β 为小于1的系数);准备区结合定向孔均匀抽采消突,其阈值必须满足国家对煤与瓦斯突出方面所规定的瓦斯含量小于 $8 \text{ m}^3/\text{t}$ 且瓦斯压力小于 0.74 MPa ,规划区与准备区可在时间上有部分重叠,以提供抽采效率;生产区局部水力割缝强化卸压补充抽采,由于各地方对于本地区内煤与瓦斯突出的做出进一步严格规定,其煤与瓦斯突出的指标进一步收紧,其残余瓦斯含量和压力指标为 $W_s < 8\alpha \text{ m}^3/\text{t}$, $P_s < 0.74\alpha \text{ MPa}$,其中, W_s 为生产区瓦斯含量; P_s 为生产区瓦斯压力; α 为小于1的系数。从抽采空间维度上说,规划区主要采用地面井与井下钻孔对接抽采,准备区地面井抽采与井下定向长钻孔抽采并存,生产区以井下钻孔补充抽采为主,抽采钻孔布置如图3所示。

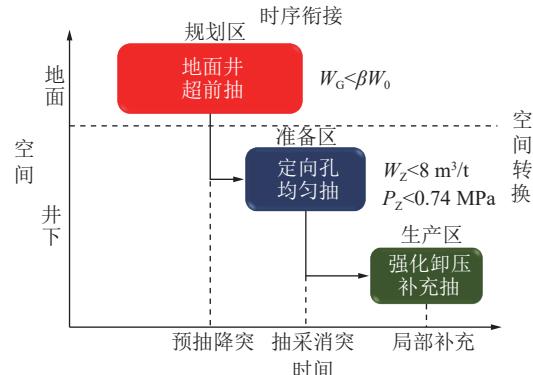


图4 近距离煤层群井上下联动模式

Fig.4 Coordinated linkage mode of underground-surface for closely-spaced coal seam groups

1.2.2 远距离煤层群“井下强化卸压、地面井多源抽”瓦斯治理模式

远距离煤层群(层间距 $\geq 50 \text{ m}$)因层间距大、被保护层卸压程度小,垂直裂隙不发育,卸压瓦斯大多在层内运移。该类煤层群开采时,首采层卸压效应难以全部传递至被保护层,导致被保护层卸压带减小、渗透率提升不足,形成远距离煤层群瓦斯赋存非均衡性显著及采动应力场多源叠加的特征。据此,提出“井下强化卸压、地面井多源抽”的瓦斯治理模式,即井下首采层采用切压联合卸压增渗,地面采用地面井多源抽采煤层群卸压瓦斯,结合穿层钻孔切缝实现被保护层范围“扩界”,如图5所示。

该模式首采层采用切压联合卸压增渗技术结合高效的抽采方法,降低瓦斯压力和含量,消除煤与瓦斯突出风险,再通过合理的开采顺序和布局,使首采层开采后形成的卸压区能够有效传递到被保护层,增加远距离煤层渗透性,为瓦斯抽采创造有利条件。

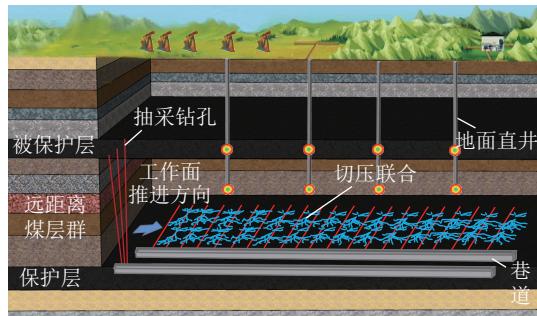


图 5 远距离煤层群瓦斯治理模式

Fig.5 The gas control mode for far coal seam groups

地面井对远距离煤层群的卸压瓦斯及首采层采空区瓦斯进行多源抽采,结合穿层钻孔切缝技术,在被保护层范围内进行穿层钻孔切缝,扩大被保护层范围,进一步提高瓦斯抽采效果,实现被保护层范围的“扩界”。该模式将井下强化卸压与地面井多源抽采相结合,通过首采层切压联合卸压增渗、区域高效抽采消突以及地面井多源抽采和穿层钻孔切缝等技术,有效提高远距离煤层群的瓦斯抽采效果,降低瓦斯突出风险。

远距离煤层群井上下联动过程如图 6 所示,首采层通过割压联合技术卸压增透处理后,随即开展瓦斯强化抽采,待满足安全开采条件时启动回采工序,与此同时,地面井同步展开布井作业,既远距离同步抽采被保护层卸压瓦斯及首采层采空区瓦斯,针对卸压效果不充分的局部区域,则通过井下钻孔进行补充抽采,抽采钻孔布置如图 5 所示,最终构建起立体化、分区域的瓦斯治理网络;由此可见,首采层与被保护层三区进程并非平行推进,而是两者存在一定时间差,利用首采层与被保护层三区进程间的时间差,强化被保护层瓦斯抽采,解决远距离煤层群在保护层开采后被保护层抽采不充分的难题。

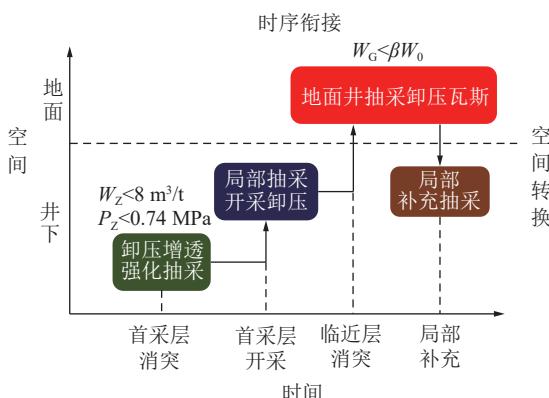


图 6 远距离煤层群井上下联动模式

Fig.6 Coordinated underground-surface linkage mode for widely-spaced coal seam groups

2 近距离煤层群高效抽采关键技术及应用

近距离煤层群井上下联合模式的特点是“地面井广覆盖、井下高效抽”,地面井广覆盖即要确保抽采范围覆盖设计区域,又要兼顾工程量,研发了多分支水平井的井网布置技术;地面打井井下抽采的对接抽采技术既利用了多分支水平的立体抽采网络,又借助井下钻孔的疏导优势提高了抽采强度,为确保多分支水平井与井下定向长钻孔的精准对接,针对性开发了“井-孔”对接技术,如图 7 所示。

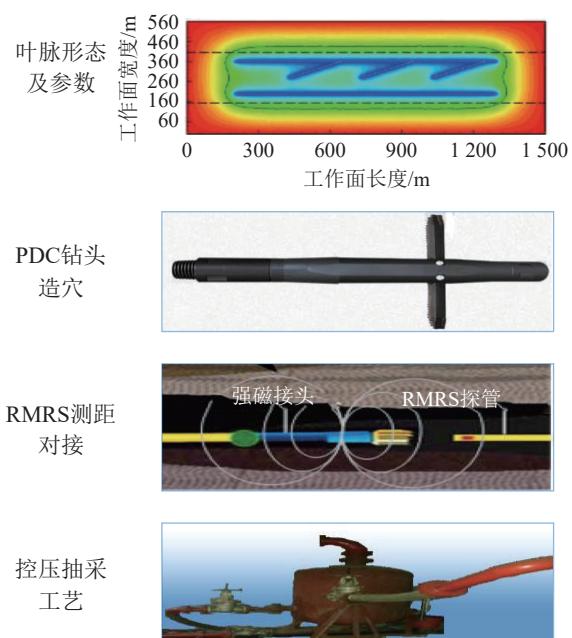


图 7 近距离煤层群高效抽采关键技术

Fig.7 Key technologies for high-efficiency gas drainage in close-range coal seam groups

2.1 多分支水平井井网布置技术

多分支水平井抽采效果受煤层地质条件和工程设计参数共同影响。煤层地质条件包括煤层厚度、瓦斯压力、瓦斯含量、渗透性以及裂隙发育特征等,这些因素是抽采效果的基础条件;工程设计参数则包括主井与分支井的夹角、分支井距对接口的距离、分支井的数量等。因此,结合地质条件设计分支井参数优化井网布置,是提高多分支水平井产能的关键途径。

主井与分支井夹角对抽采效率具有显著影响。设定主井长 1 000 m、分支长 300 m、分支井距对接口 500 m。通过分析主井与分支井夹角(分别为 15°、30°、45°、60°、75°、90°)对抽采效率的影响,发现夹角由 15°至 90°时,日产气量从 8 757 m³提升至 9 644 m³,增幅达 10.1%;但夹角超过 75°后增产效益

显著减弱,如图8a所示。该现象源于角度变化对井间干扰效应和有效控制范围的双重作用,较大夹角可有效降低主、分支间的流场干扰,扩展分支井在煤层中的控制区域,当夹角超过临界值后,井间距的几何扩展速率趋于平缓,导致干扰强度的变化幅度收窄,增产效率递减,因此,综合考虑施工成本主井与分支井夹角40°~60°较为合适。

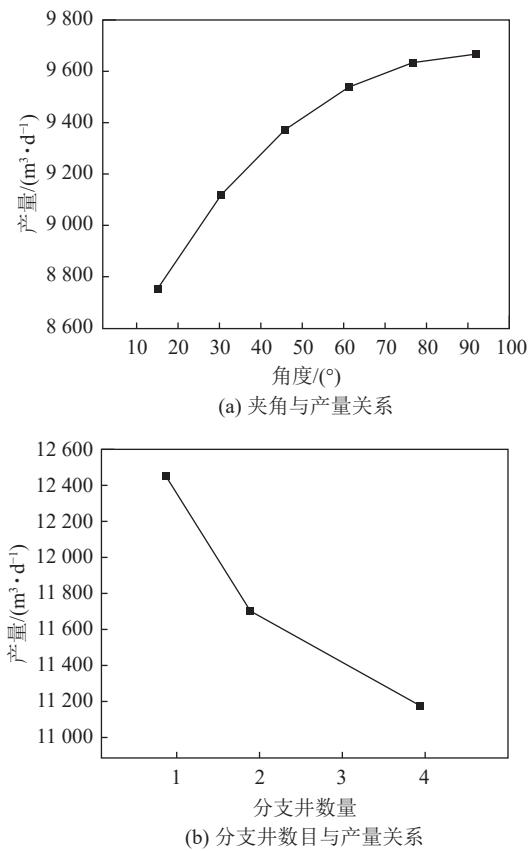


图8 分支井参数设计

Fig.8 The design of branch well parameters

总进尺恒定条件下,分支井数量与分支井产能呈现负相关关系。通过对比不同数量分支井的产气速率数据(图8b)发现,随着分支井数目增加,分支井产气速率呈现递减趋势。这主要归因于分支井数量增多导致单个分支井与主井间距缩短,加剧了主井与分支井间的流体干扰效应,进而形成产能抑制区,综合考虑产气速率和分支覆盖面积,分支井数目以3个为宜。

2.2 井上下“井-孔”精准对接技术

井上下“井-孔”精准对接抽采是通过地面多分支井与井下定向长钻孔高精度空间匹配,实现煤层瓦斯立体抽采,该技术依托高精度中靶导向系统,在地面施工水平井的同时,井下布置定向钻孔,同时建立水平井钻头周围空间磁感应强度计算模型,根据

定向长钻孔磁场传感器测量所得磁感应强度,计算对接点与水平井钻头源的相对空间位置,适时调整钻头姿态,使之朝对接点钻进,精准引导两者在目标煤层实现“点对点”连通,形成“地面井-对接孔-采动裂隙”一体化瓦斯运移网络,结合控压抽采技术,解决地面抽采系统工程建设受限、地面井排采效率低等难题。“井-孔”精准对接高效抽采技术原理如图9所示。

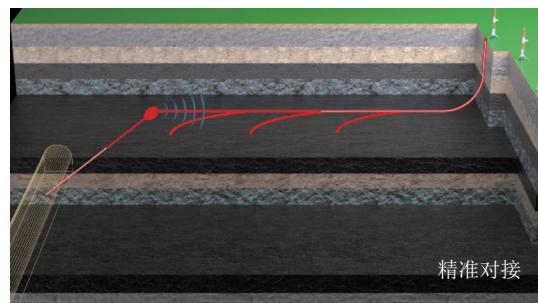


图9 “井-孔”精准对接高效抽采技术原理
Fig.9 Principle of precise “well-hole” docking for efficient gas extraction

以钻头为原点建立井-孔对接坐标系如图10所示, O 点为水平井钻头位置, P 点为对接点位置,可计算 P 点与 O 点所在平面的倾角 θ 以及 P 点与 O 点相对前进方向的夹角 γ ^[34]。

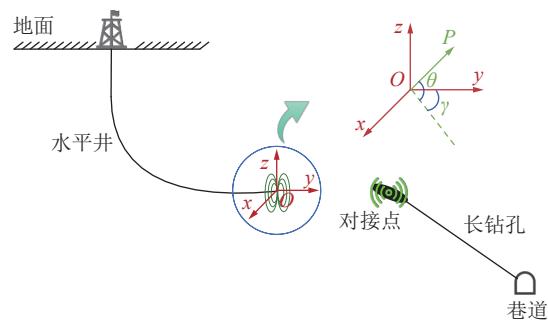


图10 井孔精准对接模型
Fig.10 Model of precise well-hole docking

$$\theta = \arctan \frac{3}{4B_x/B_z} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{8}{9} \left(\frac{B_{xy}}{B_x} \right)^2} \right] \quad (1)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{B_x}{B_y} \right) \quad (2)$$

式中: B_x 为 x 方向的的磁感应强度, T; B_y 为 y 方向的的磁感应强度, T; B_z 为 z 方向的的磁感应强度, T; B_{xy} 为 xy 方向的的磁感应强度, T。

由此可计算钻头相对于对接点距离 d 。

$$x = \sqrt[3]{\frac{3\mu_0 m \sin \theta \cos \theta \sin \gamma}{4\pi B_x}} \cos \theta \sin \gamma \quad (3)$$

$$y = \sqrt[3]{\frac{3\mu m \sin \theta \cos \theta \sin \gamma}{4\pi B_y}} \cos \theta \sin \gamma \quad (4)$$

$$z = \sqrt[3]{\frac{3\mu m \sin \theta \cos \theta \sin \gamma}{4\pi B_z}} \sin \theta \quad (5)$$

$$d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (6)$$

式中: μ 为煤体磁导率, H/m ; m 为等效磁矩, $A \cdot m^2$ 。

由此计算的井下对接钻孔参数见表 1。

表 1 井下对接钻孔设计参数

Table 1 Design parameters of underground docking drilling holes

钻孔 编号	孔口坐标			方位角 $\gamma/(^{\circ})$	仰角 $\theta/(^{\circ})$
	X	Y	Z(口/终)		
XC41	4 149 020	485 370	443 / 495	264.87	25.23
XC42	4 149 176	485 342	477 / 493	258.03	18.03
XC5	4 149 101	485 355	461 / 487	258.03	18.93

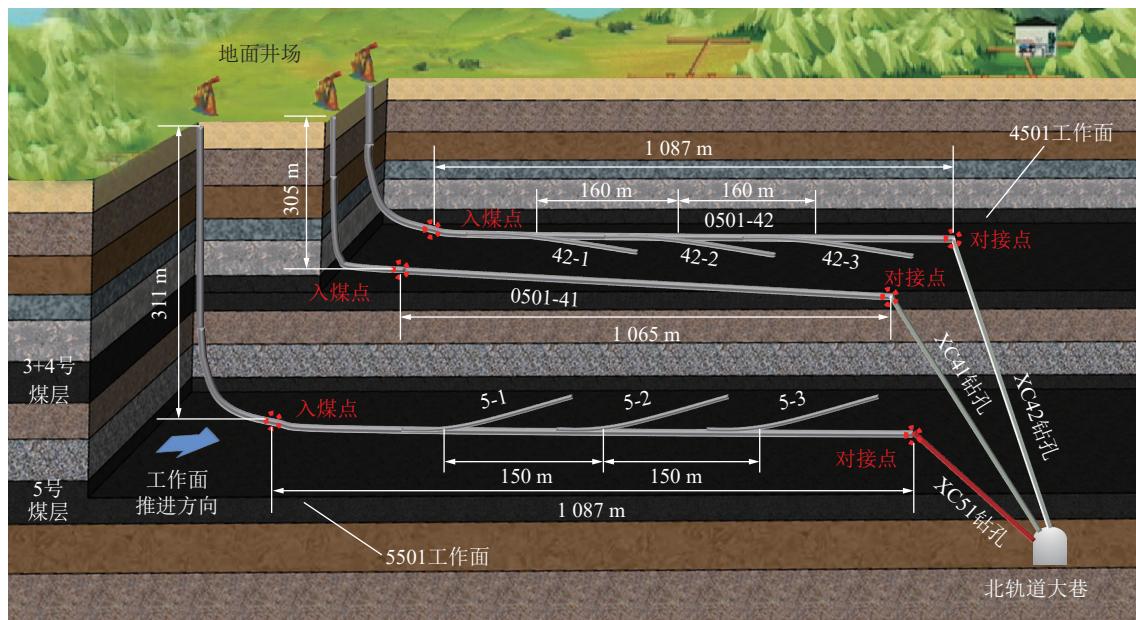


图 11 地面多分支水平对接井组工程方案

Fig.11 Engineering scheme of ground multi-branch horizontal drilling wells

3 远距离煤层群卸压抽采关键技术及应用

远距离煤层群井上下联合模式的特点是“井下强化卸压、地面井多源抽”，首采层采用切压联合卸压增渗消除煤与瓦斯突出风险，首采层开采后形成的卸压区能够有效传递到被保护层，共同起到井下强化卸压的作用；地面井同时对保护层采空区瓦斯和被保护层卸压瓦斯进行抽采，其中的关键就在于

2.3 沙曲一号矿工程应用

基于以上分析对沙曲一号煤矿 4501 和 5501 工作面多分支水平对接井组进行布置。井场选在五采区首采工作面开切眼上方，水平井目标煤层为 3+4 号及 5 号煤层。因地面井场条件限制，3+4 号煤层设计 2 口水平对接井，5 号煤层设计 1 口水平对接井。

3+4 号煤层：SQN-0501-42 井设计 3 支分支，分支间距 270 m 左右，分支长度 280~400 m，主、分支井的夹角为 45°，主支主要预抽 4501 轨道巷掘进区域煤层瓦斯，分支预抽工作面区域煤层瓦斯；SQN-0501-41 井不设计分支，主要预抽 4501 工作面胶带巷掘进区域的煤层瓦斯。

5 号煤层：SQN-0501-5 井设计 3 支分支，分支间距 300 m，分支长度 400~510 m，主、分支井的夹角为 45°，用于 5501 工作面预抽，如图 11 所示。

以上 SQN-0501 三口多分支水平井抽采 1 a 总产气量 7 273 175.4 m³，日均产气量约 2 万 m³，实测日产气量曲线如图 12 所示。

掌握瓦斯富集区位置及合理的布井方式，笔者团队针对性研发了抽采靶点精准定位技术、多源联合抽采井空间布置方法。如图 13 所示。

3.1 抽采靶点精准定位技术

采用 COMSOL 流固耦合数值模拟方法，分析深部远距离煤层群开采围岩应力场、渗流场及邻近层卸压场分布，从应力演化、裂隙发育、瓦斯富集 3 场演化精准定位瓦斯富集靶点。

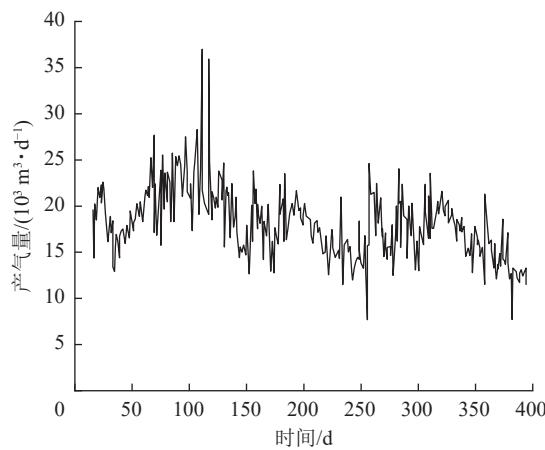
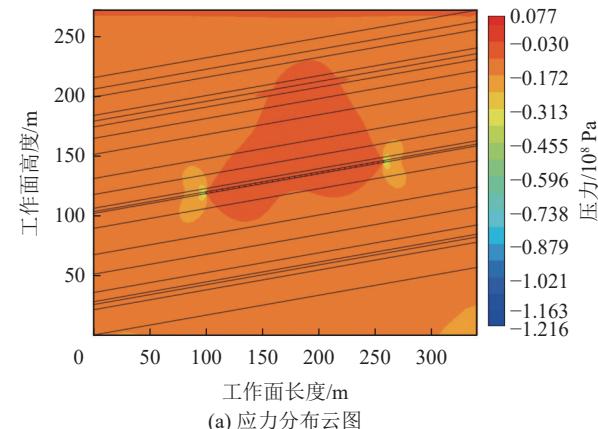


图 12 SQN-0501 三口多分支水平井抽采数据

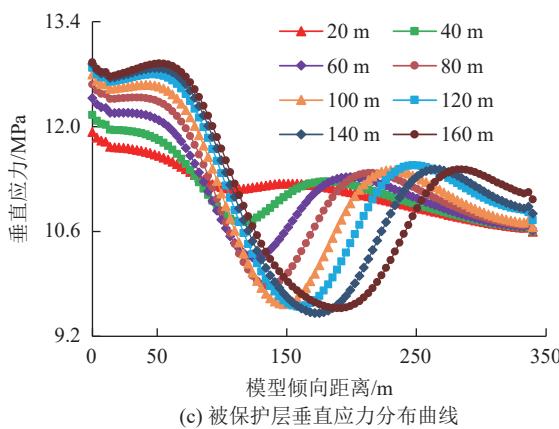
Fig.12 Gas extraction data of SQN-0501 three multi-branch horizontal wells

3.1.1 深部远距离煤层开采覆岩破坏规律

深部远距离煤层开采后应力、塑性区分布云图、被保护层垂直应力分布曲线如图 14 所示。深部远距离煤层开采过程中, 覆岩破坏呈现多阶段动态演化特征: 初始开采阶段, 开采扰动导致覆岩产生分带性破坏, 近煤层岩体完全垮落, 中部岩层产生贯通裂隙, 上部岩层呈现整体弯曲变形, 其中垮落带岩体呈



(a) 应力分布云图



(c) 被保护层垂直应力分布曲线

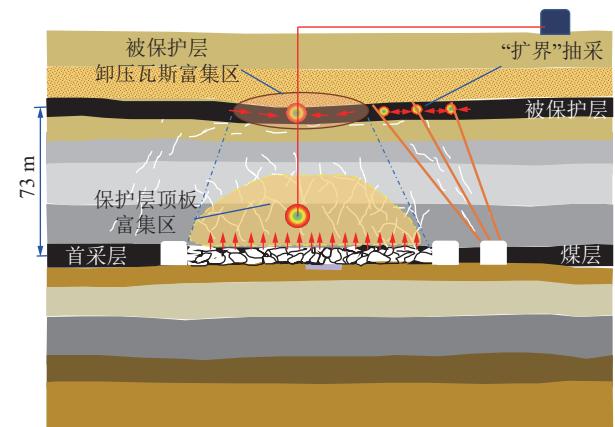
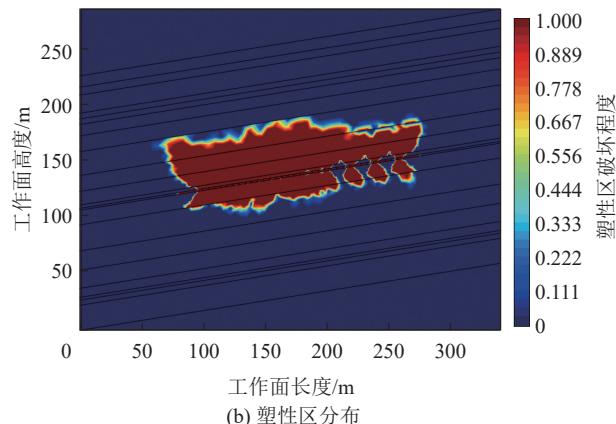


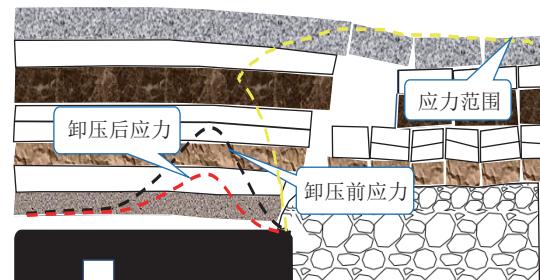
图 13 地面井卸压瓦斯多源高效抽采技术

Fig.13 Technology of multi-source efficient gas extraction by ground well depressurization

不规则堆积, 断裂带发育倾向性离层裂隙并逐渐向上扩展, 弯曲带则表现为整体下沉变形, 如图 14b 所示; 随着开采范围扩大, 覆岩关键层发生周期性破断, 导致应力场重新分布, 工作面超前支承压力峰值向煤体深部转移, 采空区后方形成卸压区, 垂直应力呈现“V”形态, 前后支撑分别位于煤壁和采空区矸石区域, 如图 14c 所示。同时, 深部高应力环境下, 原岩应力与采动应力叠加作用加剧了顶板离层和结构



(b) 塑性区分布



(d) 覆岩破坏结构示意

图 14 深部远距离煤层开采覆岩破坏规律

Fig.14 Law of overburden strata damage during deep far coal seam mining

面分离, 裂隙网络逐渐向上方扩展并伴随剪应力集中, 使得覆岩破坏范围显著扩大, 这一过程中, 覆岩裂隙带高度与应力集中区范围受岩层力学性质、采高及开采速度等因素共同影响^[35]。

3.1.2 深部远距离煤层群开采瓦斯富集规律

深部远距离煤层开采后瓦斯渗流场、被保护层瓦斯压力分布及远距离煤层群瓦斯富集区特征, 如图 15 所示。

由图 15 可以看出, 随着保护层工作面不断推进, 在采动卸压作用下上被保护煤层内游离瓦斯以及解吸瓦斯不断向采空区运移, 渗流速度不断增加, 卸压范围不断扩大, 渗流场基本上呈“双曲线”状, 中间渗流速度最大, 边缘逐渐减小直至趋近于 0。综合深部

远距离煤层开采覆岩破坏规律, 受采动应力-裂隙场动态演化与多煤层赋存结构的耦合控制, 煤层瓦斯运移呈现典型的三维空间分异特征, 即上向被保护层解吸瓦斯优势运移区、竖向楔形高浓度瓦斯聚集区和顶板环状瓦斯富集区, 如图 15c、图 15d 所示, 顶板环形瓦斯富集区位于层间岩柱弹性支撑区下方, 受上覆关键层弯曲下沉产生的挤压-剪切应力场控制, 孔隙压力梯度诱导游离瓦斯向该区域汇聚; 竖向楔形瓦斯富集区发育于层间裂隙贯通带内, 受渗流-扩散耦合作用主导, 瓦斯沿穿层裂隙与离层空间形成优势运移通道; 上向被保护层解吸瓦斯富集区即高位裂隙带瓦斯富集区, 位于邻近层煤体发生膨胀变形区, 以离层裂隙为主, 煤层的透气性显著增加^[22]。

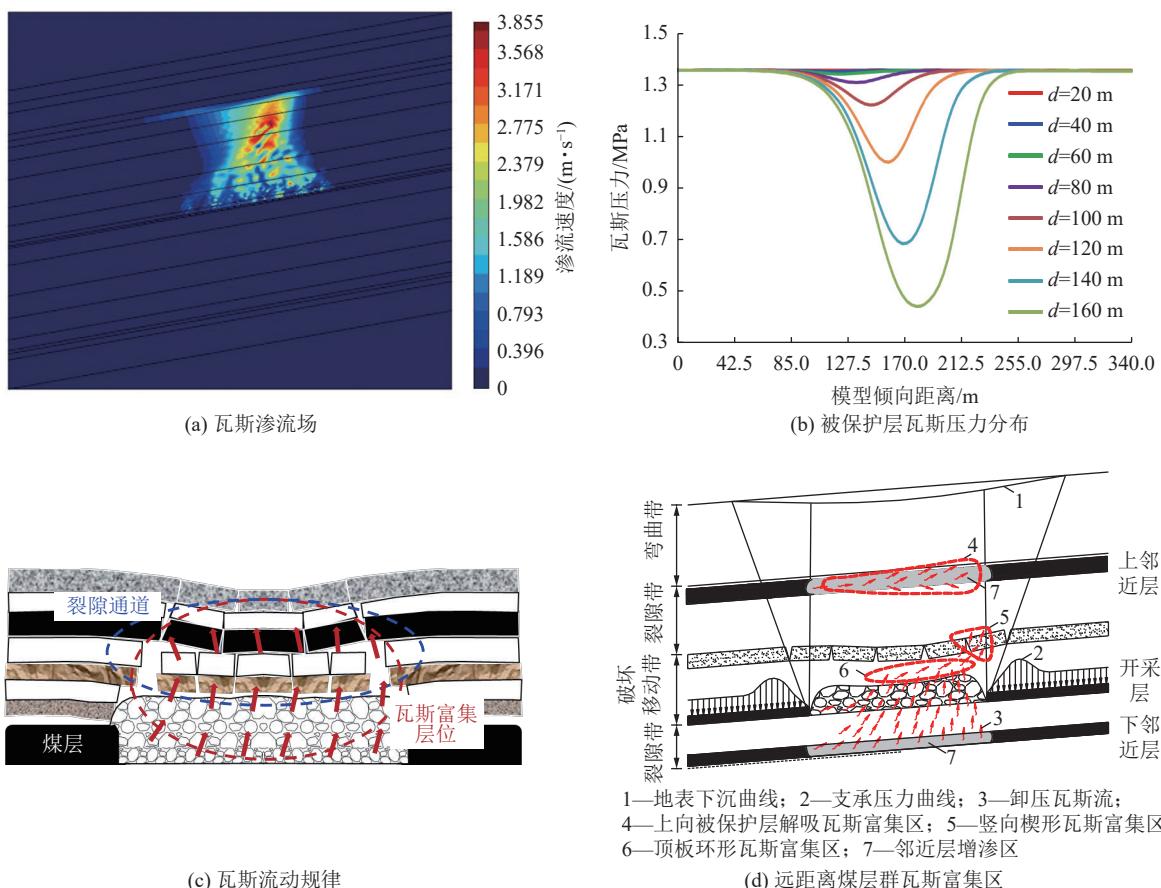


图 15 深部远距离煤层群开采瓦斯富集规律
Fig.15 Law of gas enrichment during deep far coal seam group mining

3.2 多源联合抽采井空间布置方法

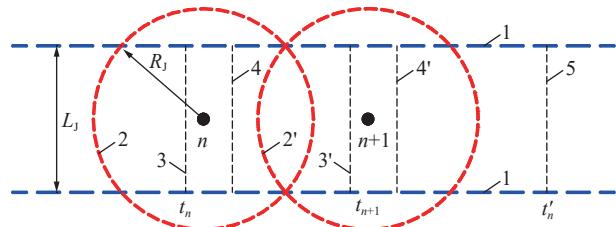
多源联合抽采井空间布置方法是一种综合考虑地质条件、瓦斯赋存情况、开采过程等多种因素以实现高效瓦斯抽采的技术手段, 其核心在于通过优化井位和层位的选择, 结合不同抽采方式, 实现多气源的立体抽采; 通过上述分析, 能够合理确定抽采井层位, 针对性井位开展了地面井卸压抽采衔接关系及

井群布置方式研究。

3.2.1 地面井卸压抽采衔接关系

地面井卸压抽采, 随着抽采时间的变化, 抽采效果表现为先增大、后持续稳定、再衰减的规律, 为了使地面井达到高效卸压抽采, 应当缩短抽采上升期影响、保证稳定期抽采、减少衰减期抽采。地面井一定时间下卸压抽采防突有效半径为 R_j 、走向控制的

卸压有效宽度为 L_j , 其合理的抽采时空衔接关系计算如图 16 所示。



1—地面井群沿走向有效控制范围; 2—单一地面井卸压抽采有效范围; 3—抽采井、接续井超前启动抽采采动位置; 4—抽采井、接续井稳定期开始采动位置; 5—抽采井稳定末期采动位置

图 16 地面井卸压抽采衔接关系计算

Fig.16 Calculation of the connection relationship of ground well depressurization and gas extraction

由图 16 可知, 上一口地面井开始抽采时间计为 t_n , 则其下一口地面井的合理启抽应位于其抽采效果上升期内, 其上下限距上口井的距离分别为

$$S_{n+1} = \sqrt{4R_j^2 - L_j^2} \quad (7)$$

$$S'_{n+1} = \sqrt{4R_j^2 - L_j^2} + L_s \quad (8)$$

式中: S_{n+1} 为接续地面井启抽位置与上口井启抽位置的上限, n 为第 n 口井; S'_{n+1} 为接续地面井启抽位置与上口井启抽位置的下限; L_s 为单一地面井卸压抽采效果上升期范围; R_j 为地面井卸压抽采防突有效半径; L_j 为走向控制的卸压有效宽度。

假设保护层工作面的推进度为 v , 接续地面井卸压抽采相对于上口井启抽时间 t_n 的启抽时间为

$$\frac{\sqrt{4R_j^2 - L_j^2}}{v} \leq t_{n+1} - t_n \leq \frac{\sqrt{4R_j^2 - L_j^2} + L_s}{v} \quad (9)$$

地面井卸压抽采稳定期后抽采效率逐渐降低, 其衰减受多种因素影响, 但单井的抽采瓦斯总量仍会继续增加, 具体停抽时间以防突有效抽采达标的范围和指标要求及具体条件下的单井极限抽采半径综合确定, 但理论分析可以确定单一地面井高效卸压抽采的相对采动距离和抽采时间, 具体公式为

$$S'_n = L_s + L_w \quad (10)$$

$$t'_n - t_n = \frac{L_s - L_w}{v} \quad (11)$$

式中: S'_n 为抽采井稳定期保护层工作面相对采动距离; t'_n 为单一地面井高效抽采时间。

多源联合抽采是同时对保护层采空区瓦斯和被保护层卸压瓦斯进行抽采, 其高效抽采的持续时间较长, 因此, 卸压抽采的地面井非单一接续的衔接关系, 一般情况下将存在多口相邻地面同时抽采的情况。

3.2.2 井群布置方式

采动井抽采影响范围、有效防突半径呈椭圆形分布, 沿工作面推进方向的影响半径明显大于垂直工作面推进方向, 因此, 结合常规的长壁工作面布置参数及地面井卸压抽采衔接关系, 从沿发挥最优抽采效能考虑, 分别设计了单井区域最大化井群布置方式和全区密集型井群布置方式, 如图 17 所示。

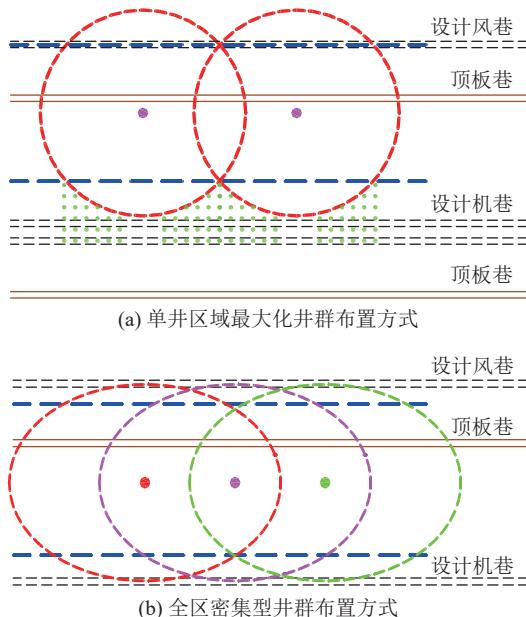


图 17 井群布置方式
Fig.17 Layout of well groups

单井区域最大化井群布置方式“大间距、广覆盖”为特征, 综合考虑井位与长壁工作面的相对位置、井与井之间的间距等因素, 通过优化单井布置, 使其能够覆盖尽可能大的瓦斯富集区域。首先通过精确的地质和瓦斯赋存情况分析, 选择最佳井位, 以覆盖最大的瓦斯富集区域; 其次精心设计井间距, 以避免抽采区域的重叠, 同时确保每个井都能有效地抽采其覆盖范围内的瓦斯; 最后井位布置需要与长壁工作面的推进方向和速度相协调, 以确保在工作面开采过程中, 瓦斯能够被及时有效地抽采; 该方式适用于瓦斯富集区域较为集中且明确的情况。全区密集型井群布置方式则采用“小井距”策略, 侧重于在整个开采区域内通过密集布置抽采井, 以实现全区范围内的瓦斯高效抽采, 该方式适用于瓦斯分布较为分散或复杂的情况。

3.3 朱集西煤矿应用效果

为检验远距离煤层群“井下强化卸压、地面井多源抽”瓦斯治理及关键技术合理性, 在试验矿井朱集西矿 11501 工作面进行应用。11501 工作面 11-2 煤层厚 1.45~1.80 m, 平均 1.57 m; 13-1 煤层为 11-2 煤

层的上覆煤层, 层间距 70 m, 煤厚均值 4 m(变化范围 3.92~4.22 m), 瓦斯含量 8.39 m³/t, 煤层稳定性好, 顶底板主要为泥岩层, 局部存在粉砂岩和细砂岩夹层。

由上述分析计算得知 11-2 煤层开采形成的垮落带最大高度为 6.6~11.6 m, 裂隙带高度最大为 34.4~52.2 m, 裂隙带中上部为瓦斯富集区, 地面井

终孔位于 11-2 煤层顶板 25 m 较为合理。根据单井区域最大化布井模式, 在 11501 工作面中部沿走向依次布置 6 口地面井, 相邻钻井间距为 240 m。其中, 1 号地面井位于工作面开切眼侧 50 m, 6 号地面井距终采线约 230 m, 所有钻井设计深度均为 1 052 m, 布置平面如图 18 所示。

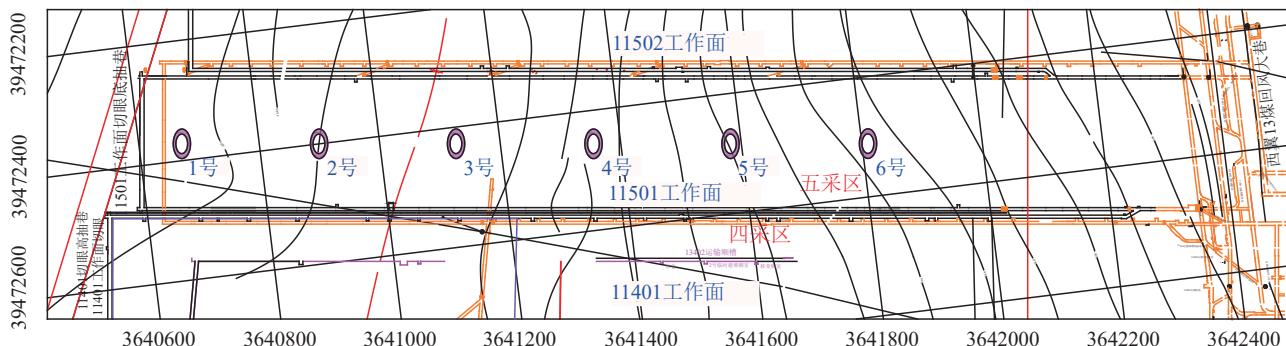


图 18 11501 工作面采动井布置平面
Fig.18 Plan of mining-induced wells for face 11501

11501 工作面回采期间, 采用地面井孔累计抽采瓦斯 728.3 万 m³, 结合被保护区原始瓦斯含量计算 13-1 煤层瓦斯抽采率约为 81.4%, 同时测试 13-1 煤层残余瓦斯含量 2.17~5.25 m³/t, 小于区域防突措施效果检验指标 8 m³/t, 防突措施有效。地面井抽采数据如图 19 所示。

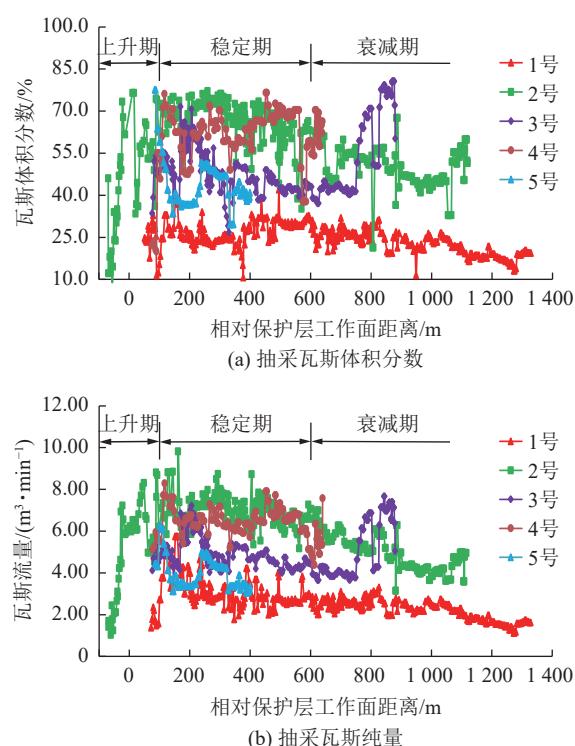


图 19 地面井抽采数据
Fig.19 Gas extraction data of ground wells

4 结 论

1) 阐明了深部煤层群井上下联合“时空抽采、逐级递进”防突原理, 确定了“地面超前预抽降突-井下强化抽采消突-多煤层协同治理”逐级递进的瓦斯灾害防控架构, 提出了近距离煤层群“地面井广覆盖、井下高效抽”防突模式、远距离煤层群“井下强化卸压、地面井多源抽”瓦斯治理模式。

2) 近距离煤层群充分考虑主井与分支井夹角、分支井距对接口距离、分支井数量等工程设计参数, 计算水平井钻头与对接点相对位置, 实现多分支水平井井网合理布置和“井-孔”精准对接, 在沙曲一号煤矿应用, 实现 SQN-0501 三口多分支水平井抽采 1 a 总产气量 7 273 175.4 m³, 日均产气量约 2 万 m³。

3) 远距离煤层群从应力演化、裂隙发育、瓦斯富集 3 场演化精准定位瓦斯富集靶点, 通过优化井位和层位、确定合理布井方式, 实现远距离煤层群卸压瓦斯及首采层采空区瓦斯多气源立体抽采, 在朱集西煤矿应用, 地面井累计抽采 13-1 煤层瓦斯 728.3 万 m³, 抽采率约为 81.4%, 保障被保护区安全回采。

参考文献(References):

- [1] 甘林堂. 煤矿开采动力灾害事故分析及防治对策研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 74~80.
GAN Lintang. Analysis of coal mining dynamic disasters and study on prevention countermeasures[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 74~80.

- [2] 王恩元, 张国锐, 张超林, 等. 我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 297–322.
WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 297–322.
- [3] 姜在炳, 李浩哲, 方良才, 等. 紧邻碎软煤层顶板水平井分段穿层压裂裂缝延展机理[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 922–931.
JIANG Zaibing, LI Haozhe, FANG Liangcai, et al. Fracture propagation mechanism of horizontal wells adjacent to broken soft coal seam roof by staged cross-layer fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 922–931.
- [4] 王志荣, 胡凯, 杨杰, 等. 软煤储层顶板水平井穿层工况下压裂缝扩展模型[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(6): 20–25.
WANG Zhirong, HU Kai, YANG Jie, et al. Extension model of fracturing cracks of translayer horizontal well in roof of soft coal reservoir[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(6): 20–25.
- [5] 杨科, 张寨男, 华心祝, 等. 煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术研究进展、关键科学问题与展望[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 944–964.
YANG Ke, ZHANG Zhainan, HUA Xinzhu, et al. Research progress, key scientific issues, and prospects of segmented fracturing and pressure relief gas drainage technology for coal seam roof horizontal wells[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 944–964.
- [6] 秦玉霞, 李国富, 张永成, 等. 碎软低渗煤层顶板水平井定向压裂技术提高单井产量[J]. 石油钻采工艺, 2025, 47(1): 121–130.
QIN Yuxia, LI Guofu, ZHANG Yongcheng, LIULiangliang, LI De-hui, ZHANG Wei, BAI Yang. Directional fracturing technology for horizontal wells in fractured soft andlow-permeability coal seam roof to increase single well production[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2025, 47(1): 121–130.
- [7] 刘见中, 孙海涛, 雷毅, 等. 煤矿区煤层气开发利用新技术现状及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 258–267.
LIU Jianzhong, SUN Haitao, LEI Yi, et al. Current situation and development trend of coalbed methane development and utilization technology in coal mine area[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 258–267.
- [8] 庞涛, 姜在炳, 惠江涛, 等. 煤系水平井定向射孔压裂裂缝扩展机制[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(4): 68–75.
PANG Tao, JIANG Zaibing, HUI Jiangtao, et al. Fracture propagation mechanism in directional perforation and hydraulic fracturing of coal seam horizontal wells[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(4): 68–75.
- [9] 刘厅, 翟成, 童校长, 等. 强突煤层地面丛式井造穴卸压辅助石门揭煤技术[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 144–157.
LIU Ting, ZHAI Cheng, TONG Xiaochang, et al. Technology of cavity completion in surface cluster wells for assisting rock cross-cut coal uncovering in high outburst coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 144–157.
- [10] 程斌, 姜在炳, 赵龙, 等. 空气动力造穴技术原理及单井掏煤量计算方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 850–858.
CHENG Bin, JIANG Zaibing, ZHAO Long, et al. Principle of aerodynamic cave-making technology and calculation method of single well coal extraction[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 850–858.
- [11] 张东亮. 井巷揭煤地面预抽辅助消突技术[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 49–55.
ZHANG Dongliang. Auxiliary outburst prevention techniques by surface pre-drainage for coalbed exposed in tunnel and mine shaft[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3): 49–55.
- [12] 姜小强, 樊少武, 程志恒, 等. 基于井上下联合抽采的三区联动瓦斯综合治理模式[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(6): 107–113.
JIANG Xiaoqiang, FAN Shaowu, CHENG Zhiheng, et al. Three region linkage comprehensive gas control model based on ground and underground gas joint drainage[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 107–113.
- [13] 赵和平, 王向东. 基于“三区联动”的近距离突出煤层群区域瓦斯治理技术体系研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(9): 138–142.
ZHAO Heping, WANG Xiangdong. Research on regional gas control technology system of short distance outburst coal seam group based on “three area linkage” [J]. Coal Technology, 2022, 41(9): 138–142.
- [14] 李延河. 地面井分区式瓦斯抽采技术体系及工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 100–108.
LI Yanhe. Surface well partition gas extraction technology system and engineering practice[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 100–108.
- [15] 程志恒, 陈亮, 苏士龙, 等. 近距离煤层群井上下联合防突模式及其效果动态评价[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1635–1647.
CHENG Zhiheng, CHEN Liang, SU Shilong, et al. Outburst prevention mode of ground and underground technology joint and its dynamic evaluation in contiguous coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1635–1647.
- [16] 袁亮, 王恩元, 马衍坤, 等. 我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1825–1845.
YUAN Liang, WANG Enyuan, MA Yankun, et al. Research progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1825–1845.
- [17] 程远平, 俞启香, 袁亮, 等. 煤与远程卸压瓦斯安全高效共采试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 132–136.
CHENG Yuanping, YU Qixiang, YUAN Liang, et al. Experimental research of safe and high-efficient exploitation of coal and pressure relief gas in long distance[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 132–136.
- [18] 王伟, 程远平, 袁亮, 等. 深部近距离上保护层底板裂隙演化及卸压瓦斯抽采时效性[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 138–148.
WANG Wei, CHENG Yuanping, YUAN Liang, et al. Floor fracture evolution and relief gas drainage timeliness in deeper underground short-distance upper protective coal seam extraction[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 138–148.
- [19] 程远平, 俞启香, 周红星, 等. 煤矿瓦斯治理“先抽后采”的实践与作用[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(4): 389–392, 410.
CHENG Yuanping, YU Qixiang, ZHOU Hongxing, et al. Practice and effectiveness of “draining gas before coal mining” to

- prevent gas from bursting[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2006, 23(4): 389–392, 410.
- [20] 薛东杰, 周宏伟, 孔琳, 等. 采动条件下被保护层瓦斯卸压增透机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(10): 1910–1916.
- XUE Dongjie, ZHOU Hongwei, KONG Lin, et al. Mechanism of unloading-induced permeability increment of protected coal seam under mining[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(10): 1910–1916.
- [21] 袁亮. 卸压开采抽采瓦斯理论及煤与瓦斯共采技术体系[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(1): 1–8.
- YUAN Liang. Theory of pressure-relieved gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(1): 1–8.
- [22] 王中华, 曹建军. 深部远距离煤层群卸压主控因素及首采层优选方法研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(8): 154–161.
- WANG Zhonghua, CAO Jianjun. Study on main control factors of pressure relief of deep and long-distance coal seams group and optimization method of initial mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(8): 154–161.
- [23] 刘洪永, 程远平, 赵长春, 等. 保护层的分类及判定方法研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2010, 27(4): 468–474.
- LIU Hongyong, CHENG Yuanping, ZHAO Changchun, et al. Classification and judgment method of the protective layers[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2010, 27(4): 468–474.
- [24] 袁亮, 薛生. 煤层瓦斯含量法确定保护层开采消突范围的技术及应用[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(9): 1786–1791.
- YUAN Liang, XUE Sheng. Defining outburst-free zones in protective mining with seam gas content-method and application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(9): 1786–1791.
- [25] 程远平, 付建华, 俞启香. 中国煤矿瓦斯抽采技术的发展[J]. *采矿与安全工程学报*, 2009, 26(2): 127–139.
- CHENG Yuanping, FU Jianhua, YU Qixiang. Development of gas extraction technology in coal mines of China[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2009, 26(2): 127–139.
- [26] 郭明杰, 郭文兵, 赵高博, 等. 长壁开采覆岩内水平定向长钻孔位置特征与卸压瓦斯抽采机理[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(10): 3750–3765.
- GUO Mingjie, GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, et al. Position characteristics of horizontal-directional long boreholes in overlying strata and drainage mechanism of pressure-relief gas in longwall mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(10): 3750–3765.
- [27] 张永将, 黄振飞, 季飞. 基于水力割缝卸压的煤岩与瓦斯动力灾害防控技术[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(4): 133–141.
- ZHANG Yongjiang, HUANG Zhenfei, JI Fei. Prevention and control technology of coal-rock and gas dynamic disaster based on water jet slotting pressure relief[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(4): 133–141.
- [28] 曹佐勇, 王恩元, 何学秋, 等. 近距离突出煤层群水力冲孔卸压瓦斯抽采及效果评价研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021,
- 38(3): 634–642.
- CAO Zuoyong, WANG Enyuan, HE Xueqiu, et al. Effect evaluation of pressure relief and gas drainage of hydraulic punching in short-distance coal seam group with the risk of outburst[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(3): 634–642.
- [29] 郭德勇, 张超, 李柯, 等. 松软低透煤层深孔微差聚能爆破致裂机理[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(8): 2583–2592.
- GUO Deyong, ZHANG Chao, LI Ke, et al. Mechanism of millisecond-delay detonation on coal cracking under deep-hole cumulative blasting in soft and low permeability coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2583–2592.
- [30] 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, 17.
- 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, 17.
- [31] 田苗苗, 张磊, 薛俊华, 等. 液氮致裂煤体技术研究现状及展望[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(7): 191–198.
- TIAN Miaomiao, ZHANG Lei, XUE Junhua, et al. Study and prospect of liquid nitrogen fracturing coal technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(7): 191–198.
- [32] 李云鹏, 张宏伟, 苏怀瑞, 等. 复杂坚硬岩层井上下联合水力压裂控制技术研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(4): 704–713.
- LI Yunpeng, ZHANG Hongwei, SU Huairui, et al. Research on control technology of coordinated hydraulic fracture under complicated hard rock strata condition[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(4): 704–713.
- [33] 张永将, 邹全乐, 杨慧明, 等. 突出煤层群井上下联合抽采防突模式与关键技术[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(10): 3713–3730.
- ZHANG Yongjiang, ZOU Quanle, YANG Huiming, et al. Joint ground and underground gas extraction mode and its key technology for outburst coal seam group[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(10): 3713–3730.
- [34] 王彦祺. 煤层气 V 型水平井远端对接工艺技术研究[J]. *油气藏评价与开发*, 2013, 3(6): 61–65.
- WANG Yanqi. Research on distal joint technology of CBM V shape horizontal wells[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2013, 3(6): 61–65.
- [35] 程志恒, 陈亮, 邹全乐, 等. 近距离煤层群煤与瓦斯高效共采技术体系研究: 以山西吕梁沙曲矿区为例[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(2): 122–137.
- CHENG Zhiheng, CHEN Liang, ZOU Quanle, et al. Study on high-efficiency co-mining technology system of coal and gas in contiguous seams: A case study of Shaqu Mining Area in Lüliang, Shanxi Province[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(2): 122–137.