

文章编号: 0253-2697(2024)05-0855-11 DOI:10.7623/syxb202405007

碎软低渗煤层煤矿区煤层气勘探开发关键技术及发展方向

张群 孙四清 降文萍

(中煤科工西安研究院(集团)有限公司 陕西西安 710077)

摘要: 依托2011—2020年国家科技重大专项,开展了碎软低渗煤层煤矿区煤层气勘探开发技术研究,梳理形成了适合于碎软低渗煤层的煤层气高效开发方式、储层参数确定技术、抽采效果预测模拟技术、抽采关键技术的成果体系,提出了压裂煤层顶底板岩层、煤炭采动卸压两种途径能实现碎软低渗煤层煤层气高效开发的认识。研发了地面井煤层密闭取心-气含量精确测试技术,提出了基于温度-压力综合吸附模型的气含量预测技术、顶板水平井分段压裂与采动井煤层气抽采的预测模拟技术。这些成果为准确评价碎软低渗煤层含气性和开发潜力提供了有效手段。建立了地面顶板水平井分段压裂与煤矿井下长钻孔分段压裂的技术工艺流程。基于取得的研究成果,在安徽省、山西省、陕西省等地区的多个煤矿进行了现场工程试验,获得了碎软低渗煤层煤层气地面开发和井下抽采的重大突破。综合碎软低渗煤层煤层气储层特性及煤矿区实际需求,提出在煤矿区今后应重点关注深井保压密闭取心技术、钻孔轨迹精准控制技术、智能压裂与排采技术、煤矿井上下联合分段压裂技术等领域。

关键词: 煤矿区;碎软低渗煤层;煤层气;勘探开发;关键技术;发展方向

中图分类号: TE132

文献标识码: A

Key technologies and development direction of CBM exploration and development in coal mine area of fractured soft and low permeability coal seams

Zhang Qun Sun Siqing Jiang Wenping

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

Abstract: Depending on the major national science and technology projects from the "12th Five-year Plan" to the "13th Five-year Plan", efforts are made to carry out technical research on the exploration and development of coalbed methane (gas) in coal mining areas with fractured soft coal seams of low permeability. Through summarizing the results, the paper establishes the system involving the high-efficient coalbed methane (CBM) exploration and development mode, technique for determining reservoir parameters, prediction and simulation technique of extraction and production effect, as well as key technologies for extraction and production, which are applicable to CBM exploration in the fractured soft and low permeability coal seams. Further, it is suggested that the efficient development of CBM (gas) can be achieved by coal seam roof or floor strata fracturing and pressure-relief coal mining. An accurate test technology is developed for measuring coal seam sealed coring gas content in the surface well. Moreover, the paper proposes the prediction technology of gas content based on the temperature-pressure comprehensive adsorption model, and also the prediction and simulation technology of staged fracturing in roof horizontal well and gas extraction in mining well. These achievements can provide an effective means for accurately pre-evaluating the gas-bearing capacity and development potential of fractured soft coal seams with low permeability. Additionally, the technological process of staged fracturing in horizontal well and long borehole in underground coal mine has also been established. Based on above results, field engineering tests have been carried out in several coal mines in Anhui, Shanxi and Shaanxi Provinces, achieving a great breakthrough in surface well development and underground extraction of CBM (gas) from fractured soft and low permeability coal seams. Based on the characteristics of CBM reservoirs in fractured soft and low permeability coal seams and the actual demands from coal mining areas, it is proposed that in the future, more attention should be paid to the fields including deep well pressure-maintaining sealed coring technology, precise control technology of drilling trajectory, intelligent fracturing and drainage technology, as well as subsection hydraulic fracturing technology in underground coal mines.

Key words: coal mining area; fractured soft and low permeability coal seam; coalbed methane; exploration and development; key technologies; development trend

引用: 张群, 孙四清, 降文萍. 碎软低渗煤层煤矿区煤层气勘探开发关键技术及发展方向[J]. 石油学报, 2024, 45(5): 855-865.

Cite: ZHANG Qun, SUN Siqing, JIANG Wenping. Key technologies and development direction of CBM exploration and development in coal mine area of fractured soft and low permeability coal seams[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(5): 855-865.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 41972167)资助。

第一作者及通信作者: 张群, 男, 1958年7月生, 2002年获煤炭科学研究总院西安分院博士学位, 现为中煤科工西安研究院(集团)有限公司研究员、博士生导师, 主要从事煤层气勘探开发研究工作。Email: zhangqun@cctegxian.com

中国煤矿区煤层气资源丰富,22个省(区)煤矿区煤层气资源约为 $29.17 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[1],其中高瓦斯和突出矿井的开采煤层中95%为低渗煤层^[2-3]。据预测,未来100年内煤炭仍将在中国多能互补现代能源体系中扮演稳定器和压舱石的重要角色^[4-5],加强中国主要煤矿区煤层气规模化开发、瓦斯高效治理,有助于切实践行国家碳达峰碳中和(“双碳”)目标。碎软低渗煤层普遍具有煤体破碎、渗透性低、煤层气含量大等特点,依据中国典型煤矿区井下原地观测结果,从煤体结构角度对煤层气抽采影响层次对碎软低渗煤层特征进行厘定,其内涵主要包括:煤层外观表现为整体或者其中一个、多个分层被破碎成碎片状、碎块状、碎粒状、粉末状、鳞片状,煤中原有的天然裂隙网络系统被毁坏甚至消失;弹性模量小、泊松比大;渗透率通常小于 0.1 mD ^[6-7]。碎软低渗煤层这些先天劣势,使得常规煤层气勘探开发技术不能照搬应用^[8-9],如地面与井下钻孔取心率低,煤层气含量测试结果误差大;碎软煤层中钻进困难、压裂造缝短、排采易煤粉堵塞,垂直井与水平井产气效果总体很差^[10]。

2011年,中煤科工西安研究院(集团)有限公司(以下简称西安研究院)及其联合单位依托国家科技重大专项,研发了适用于碎软低渗煤层煤层气勘探开发的系列技术与装备,并已成功应用于淮北、淮南、晋城等矿区的煤层气抽采工程,获得了碎软低渗煤层气开发的重大突破,笔者重点介绍取得的勘探开发关键技术并指出其发展方向。

1 碎软低渗煤层煤层气关键开发技术及应用效果

1.1 地面预抽——煤层顶板岩层分段压裂水平井

1.1.1 高效开发方式

煤层气水力压裂工程实践表明,煤岩层弹性模量大、泊松比越小、岩石脆性越好,破裂造缝越容易,

压裂效果越好。与顶底板岩层及硬煤层相比,碎软煤层具有弹性模量低、泊松比高、强度低、水平地应力较小等特征^[11],直接在煤层中压裂容易在压裂缝两侧形成一定厚度的塑性变形区,导致裂缝扩展压力升高、向远处延伸困难,故压裂缝短而宽,难以达到理想的增产效果。

以淮北矿区芦岭煤矿8号煤层为研究对象,开展了直接压裂碎软煤层顶板牵引煤层造缝的物理模拟实验和数值模拟研究,以进一步验证顶底板岩层比煤层更有利于压裂发生且压裂缝更容易扩展的推测。设计并建立了表征人工顶板-煤层-底板3层结构的三维相似材料物理模型,开展了围压作用下的顶板岩层水平井水力压裂物理模拟实验。主要考虑了模型相似、材料相似、边界条件相似、几何尺寸相似、压裂程序相似等原则^[11]。通过对煤粉、粗砂、水泥、水等相似材料进行混配试验,确定了人工煤层、顶板、底板的相似材料最佳配合比,制备了大尺寸3层结构的工程压裂模拟试件,进行了多组围压作用下的水平井水力压裂物理模拟试验。同时,在设定注入排量等压裂施工参数条件下,应用ABAQUS软件和FracproPT压裂数值模拟软件模拟了相应的压裂裂缝特征^[12]。

数值模拟结果显示,顶板压裂时煤层中形成的压裂缝长度达到168.4 m,为直接在碎软煤层中裂缝的5.9倍(表1)。

表1 碎软低渗煤层顶板与煤层压裂缝模拟结果
Table 1 Simulation results of fracturing fracture in the roof and coal seam

分类	压裂缝长度/m	缝高/m	缝宽/cm
煤层中压裂	25.1	23.5	3.60
煤层顶板压裂	168.4	19.0	2.63

物理模拟实验均显示,在一定的间距和注入液条件下,裂缝均能够从顶板岩层向下穿层扩展贯穿煤层(图1)。在煤层顶板中压裂不仅产生了垂直压裂缝,

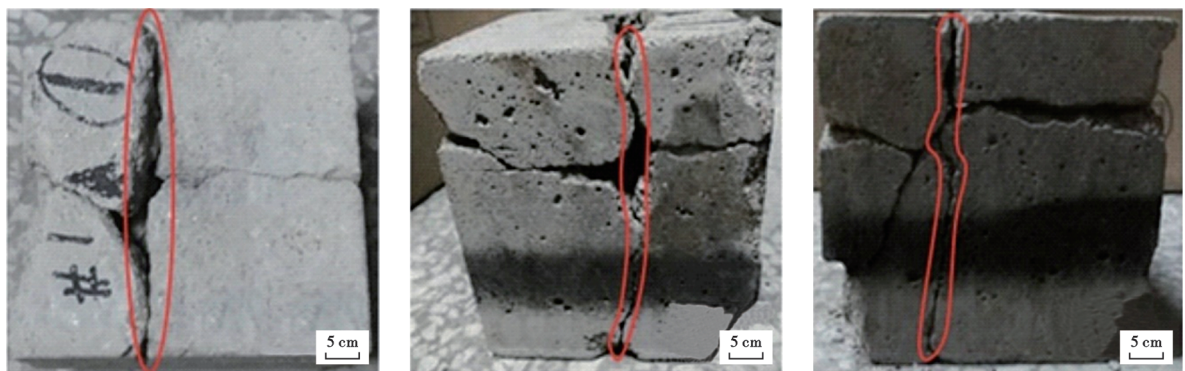


图1 碎软煤层顶板压裂牵引煤层物理模拟实验结果

Fig. 1 Simulation test results of fractured soft coal seam roof pulling coal seam construction

并且压裂缝在地应力梯度作用下从顶板向下切入了煤层,顶板的相对脆性使压裂缝沿横向扩展延伸更快,由此产生的撕裂、拉扯作用使得煤层中压裂缝随其扩展延伸,从而在碎软煤层中造出了更长的高导流压裂缝。

依据实验及模拟结果,西安研究院及联合单位依托“十二五”(2011—2015 年)国家科技重大专项,首次提出了煤层顶板水平井分段压裂高效开发煤层气方式^[6](图 2),采用远端对接直井的 U 型水平井,将水平井水平段布置在距离煤层约 2 m 的顶板岩层中;水平段下套管固井,并采用泵送桥塞+向下定向射孔联作的分段压裂工艺,实施大液量、大排量、中砂比的高强度压裂作业,最后在垂直井进行排水产气。

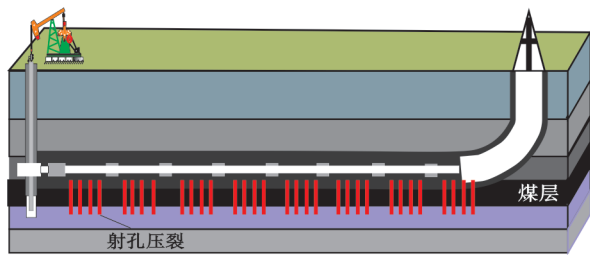


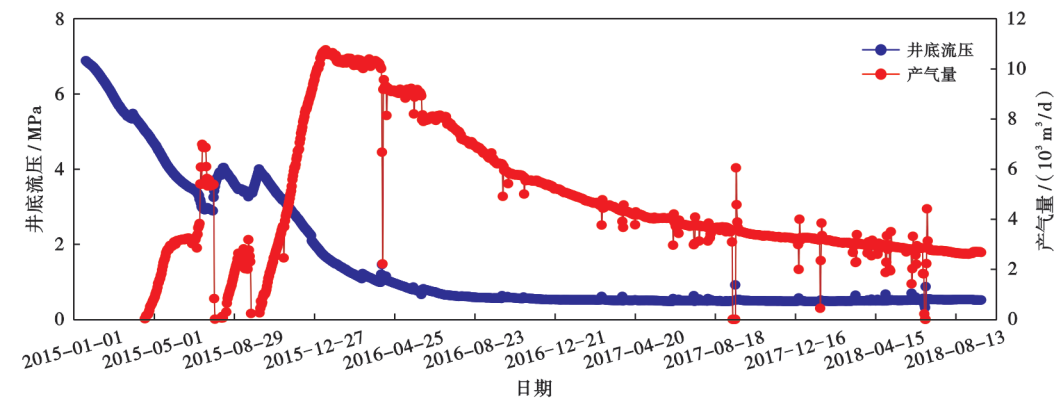
图 2 煤层顶板岩层水平井分段压裂开发煤层气技术模式

Fig. 2 Technique mode of CBM development by staged fracturing of horizontal well in coal seam roof strata

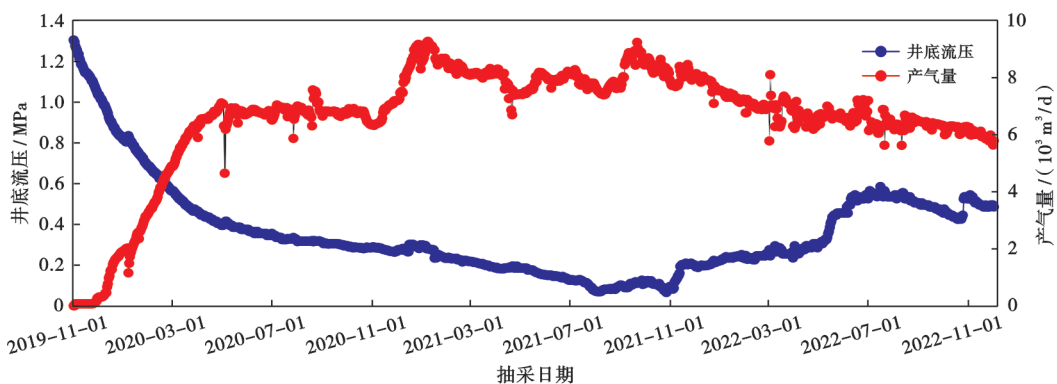
1.1.2 关键技术及应用效果

根据提出的地面顶板水平井分段压裂方式特点,研究了所涉及的关键技术及其工艺流程:①设计远端水平对接 U 型井组的井身结构及钻井参数;②优选确定水平井段布置的目标煤层顶板岩层层位;③施工远端垂直井,并进行声波测井,获取煤储层参数、顶底板力学参数、岩层地应力曲线;④在水平井直井段施工导眼井钻穿煤层,获取自然伽马和视电阻率测井曲线,确定水平井段钻进跟踪的顶板岩层层位;⑤采用地质导向钻井技术施工水平井段,下套管固井;⑥泵送可钻式桥塞分段分隔,采用向下定向射孔方式诱导压裂缝优先向下延伸穿透煤层;⑦实施光套管、大液量、大排量、中砂比的高强度压裂作业;⑧在垂直井进行井底流压实时监测、低套压、慢控稳的精细排采。

目前,地面顶板水平井分段压裂技术已在中国累计施工 60 余口井。其中,首口井建设于淮北矿区芦岭煤矿,该井最高产气量突破 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,连续 3 个月、6 个月和 12 个月的平均产气量分别高达 $10000 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $9000 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $8000 \text{ m}^3/\text{d}$ [图 3(a)],抽采 4.5 年累积产气量为 $700 \times 10^4 \text{ m}^3$;山西潞安矿区余吾煤矿实施的 1 组水平井 3 年抽采期间产气量一直稳定在 $6000 \sim 9000 \text{ m}^3/\text{d}$ [图 3(b)]。



(a) 淮北芦岭煤矿 8 号煤



(b) 潞安余吾煤矿 3 号煤

图 3 碎软低渗煤层顶板分段压裂水平井排采曲线

Fig. 3 Hydrocarbon extraction and production curve of horizontal well during staged fracturing in fractured soft coal seam roof strata

1.2 地面采动抽采——L型水平井

1.2.1 抽采方式

煤炭采动下地面煤层气抽采是煤矿区的特有方式。其依据为煤层开采剧烈活动产生的大量裂隙增强了煤岩层渗透性的原理,主要用于回采工作面开采过程中和开采后的煤层气抽采^[13]。该方式具有抽采时间短、气量大、甲烷浓度低的特点。“十二五”(2011—2015年)之前,煤炭采动下地面井主要为垂直井方式^[14-16],单井抽采范围有限,一个回采工作面通常需要布署4口以上的垂直井,存在占地面积大、投资高、抽采有盲区等问题。依托国家科技重大专项,探讨了采动下地面水平井抽采方式可行性及其关键技术。

依据所开展的煤炭开采相似物理模拟实验、FLAC 3D 应力数值模拟、地面采动抽采井现场动态监测等工作,揭示了采动下地面井抽采范围及边界具有时间和空间的双重动态变化特点。按照开采位置前后,将采动对上覆煤岩层的影响分为采动前方和后方两大类。前方未开采区域划分为4个阶段,依次为卸压阶段(工作面开采位置至前方约15m)、应力集中阶段(前方15~45m)、卸压阶段(45~65m)、近原始条件阶段(>65m)。采动后方已开采区域划分为3个阶段,从开采位置向后依次为卸压阶段(从开采位置到约40m)、应力恢复阶段(40~250m)、压实后稳定阶段(>250m)^[17](图4)。卸压阶段地应力远小于原始应力,煤岩原有裂隙大幅扩张、新生裂隙大量发育,渗透性增强,呈现出煤层气卸压增流效应,非常有利于煤层气抽采^[18-20]。应力集中阶段地应力可达原岩应力的2~4倍^[14],形成自然应力集中屏障。该区域煤岩层原有裂隙闭合、渗透性降低,煤层气渗流减弱,阻挡了前方未开采区域煤层气体向后方运移。采动后方3个阶段分布范围大,煤岩层渗透性比原始条件都有不同程度的提高,采用水平井方式更具有优势,据此提出了煤炭采动下地面L型水平井抽采方式(图5)。因此,将水平井水平段布置在开采煤

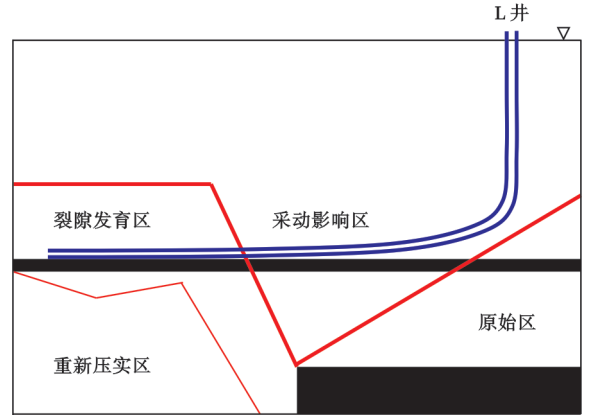


图5 煤矿采动地面L型井抽采技术
Fig. 5 Schematic diagram of extraction technique of the surface L-shaped mining well in coal mining areas

层上部采动裂隙发育区和采动影响区^[21],沿工作面走向方向且面向回采方向布置水平段。

1.2.2 关键技术及应用效果

煤炭采动地面L型水平井煤层气抽采方式融合了“地面垂直井”“地面采动区井”和“井下水平井”抽采技术优点,可应用在两种场景^[22]:①单一煤层开采模式,以晋城矿区为代表,主要针对采动影响下本煤层卸压煤层气、兼邻邻近层的煤层气,已在寺河煤矿、成庄煤矿、新景煤矿、屯兰煤矿等进行了成功应用,均取得了突破;②煤层群模式,以淮北矿区为代表,利用保护层开采对被保护层煤层气产生卸压作用,采用地面L型水平井抽采被保护层和保护层卸压煤层气。

2011—2015年,晋煤集团在寺河煤矿施工了1口地面L型水平井抽采3号煤层回采工作面煤层气,水平井采用三开井身结构,垂向投影位于距工作面巷道30~80m范围内,工作面推过切眼314m时,水平井开始抽采运行,抽出的甲烷体积分数最高达96%、平均为80%,日抽采煤层气纯量最高为31600m³、平均为22000m³,总抽采煤层气量超过300×10⁴m³(图6)。该井抽采后工作面上隅角煤层气降幅达46.5%,大大提高了工作面煤炭开采效率^[20]。

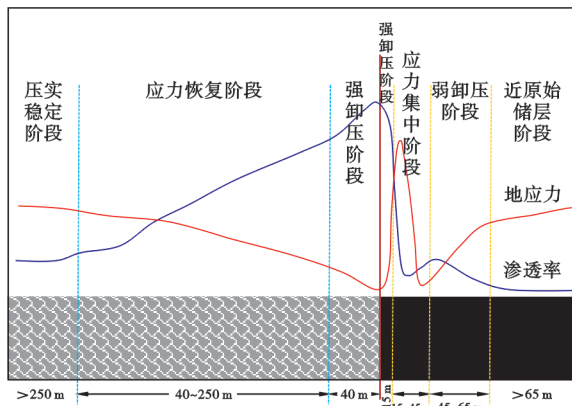


图4 采动影响范围分带变化特征

Fig. 4 Zonal variation characteristics of mining influence area

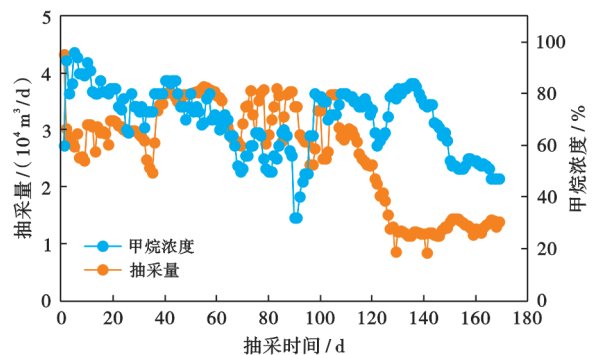


图6 晋城矿区寺河煤矿某采动L型井抽采曲线

Fig. 6 Extraction curve of a L-shaped mining well in Sihe coal mine, Jincheng mining area

1.3 井下抽采——长钻孔分段压裂技术

1.3.1 关键技术及设备

2016—2020 年国家科技重大专项执行期间,响应煤矿瓦斯区域防治和煤层气资源开发战略的实际需要,研究了煤矿井下定向长钻孔分段水力压裂技术与装备,以解决穿层钻孔、顺层短钻孔技术压裂覆盖范围小、压裂不均衡、单孔产气量低等问题^[23-29]。

研发了井下煤岩层裸眼定向长钻孔不动管柱和动管柱分段压裂技术^[30](图 7),前者在工程应用中钻孔长度突破了 500 m、实现单孔 5 段压裂,后者钻孔长度突破了 800 m、实现单孔 17 段压裂。研制了 $\Phi 73$ mm 和 $\Phi 89$ mm 两种规格裸眼分段压裂工具,工具耐压能

力整体达到 70 MPa 以上。同时,研制了井下低压端加砂压裂泵组装置(图 8—图 9),压力可达到 70 MPa、排量达到 90 m³/h、携砂比达到 20%。

依据上述技术与设备,提出了井下两类碎软煤层围岩(顶底板)分段压裂区域增透煤层气高效抽采技术模式,分别为顶板/底板梳状钻孔分段压裂模式(图 10)、顶板定向长钻孔加砂分段模式(图 11)。

煤层顶板/底板梳状钻孔模式在近邻煤层的砂岩或砂质泥岩中施工主孔,沿主孔间隔一定距离向煤层方向开分支孔,进入煤层后并适当延伸;整个钻孔施工完毕后,采用分段压裂方式对每个分支钻孔由里向外逐一压裂改造,形成分支钻孔与围岩和煤层中形成的

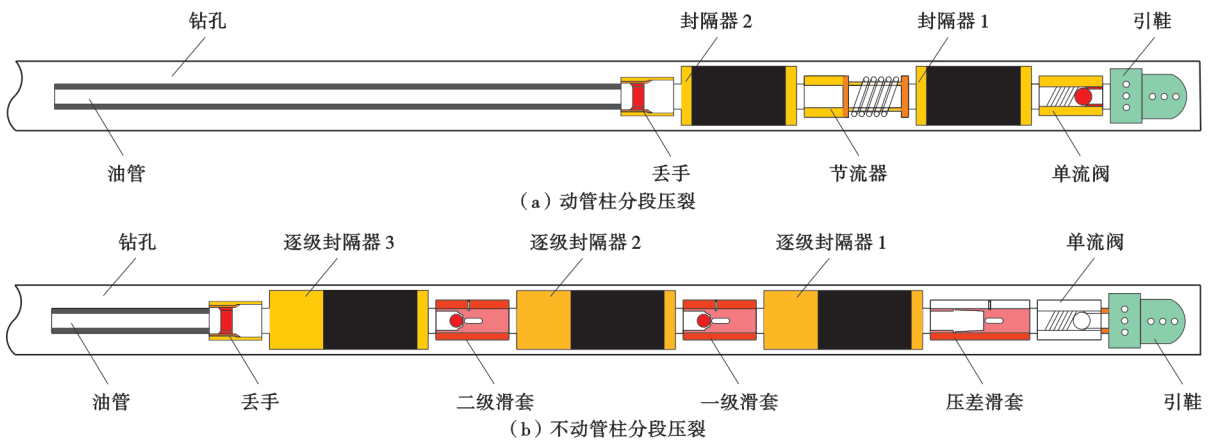


图 7 煤矿井下裸眼分段水力压裂工具组合

Fig. 7 Schematic diagram of staged hydraulic fracturing tool combination for open hole in coal mine

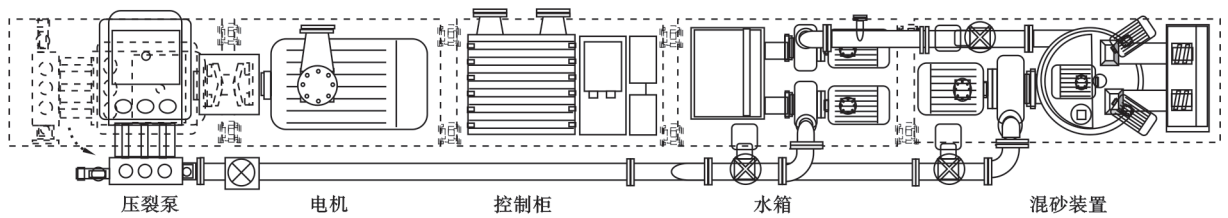


图 8 低压端加砂压裂泵组设计

Fig. 8 Design of low pressure end sand fracturing pump group in coal mine



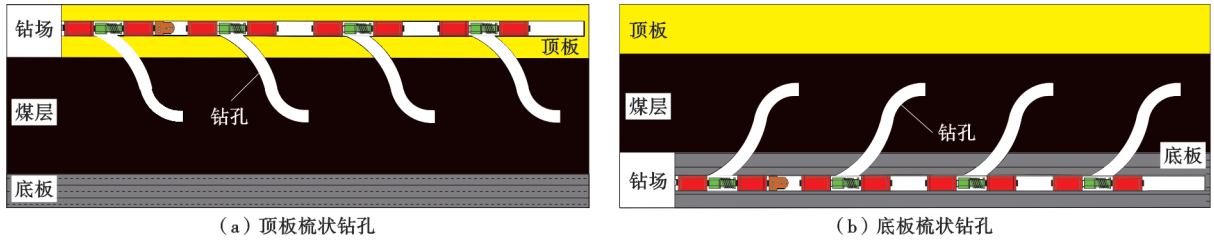
图 9 低压端加砂压裂泵组

Fig. 9 Low pressure end sand fracturing pump group in coal mine

复杂裂缝网络通道,使得煤层气快速运移产出。顶板定向长钻孔模式,沿着紧邻煤层顶板砂岩或砂质泥岩中施工定向长钻孔,采用加砂分段压裂工艺沿着定向长钻孔由里向外逐一压裂,压裂顶板岩层形成的裂缝将煤层沟通并在煤层中进一步延伸,从而在煤层、顶板围岩和钻孔之间形成稳定复杂的裂缝网络,实现煤层气长期稳定抽采。

1.3.2 应用效果

顶板/底板梳状钻孔分段压裂模式与顶板定向长钻孔加砂分段模式分别在山西阳泉矿区和陕西韩城矿区进行了成功应用。其中,顶板梳状钻孔模式在韩



(a) 顶板梳状钻孔

(b) 底板梳状钻孔

图 10 煤层顶底板梳状钻孔分段压裂

Fig. 10 Staged fracturing of comb-shaped borehole in coal seam roof or floor

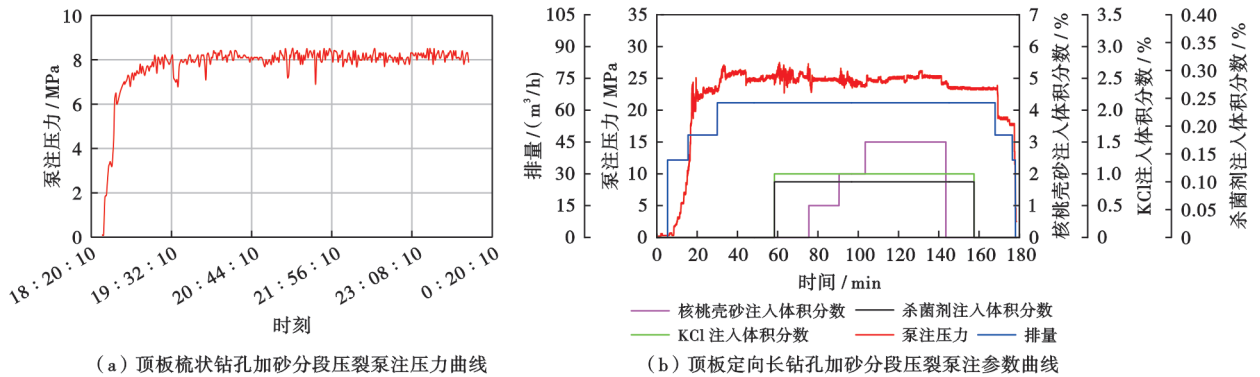


图 11 煤层顶板定向长钻孔分段压裂

Fig. 11 Staged fracturing directional long borehole in roof

城矿区桑树坪煤矿 3 号煤层顶板进行了工程试验, 实施主孔 588 m、8 个分支孔, 在主孔分 4 段对整个梳状钻孔进行了分段水力压裂[图 12(a)], 压入液体量共

为 2012 m³, 最大泵注压力达 8.74 MPa, 压裂影响半径最大为 39.6 m、最小为 20.3 m; 73 d 抽采煤层气纯量为 480~2776 m³/d, 平均为 1559 m³/d, 百米钻孔抽采量是同区域常规抽采钻孔的 4.8 倍。顶板定向长钻孔模式在阳泉新景公司煤矿进行了工程试验, 在 3 号煤层顶板实施 2 个定向长钻孔, 都进行了加砂分段压裂[图 12(b)], 最大泵注压力分别为 21.3 MPa、29.6 MPa, 压入液体量分别为 963.9 m³、1844.7 m³, 加砂量分别为 13.1 t、23.4 t, 压裂影响半径为 20~38 m, 100 d 抽采煤层气纯量分别为 1025.1 m³/d 和 2810.6 m³/d。



(a) 顶板梳状钻孔加砂分段压裂泵注压力曲线

(b) 顶板定向长钻孔加砂分段压裂泵注参数曲线

图 12 不同模式分段压裂泵注参数曲线

Fig. 12 Pump injection parameter curves of the staged fracturing under different models

2 气含量确定技术

2.1 测试技术

煤层气含量是煤层气勘探开发及煤矿瓦斯治理的关键地质参数, 采用地面常规取心方法, 存在煤心暴露、气体大量逸散的问题^[31-32], 估算的损失气量也具有误差大、结果偏低的弊端^[33-36]。依托“十二五”国家科技重大专项项目, 研发形成了煤层钻进、取心、测试一条龙的技术与设备^[36]。

针对碎软煤层易破碎、水敏性强、胶结性差等特点, 研发了双径 PDC 密闭取心钻头(图 13), 即内、外径钻头组合形式, 内钻头与外钻头之间采用螺纹连接, 可依据煤体破坏程度及时更换内径钻头; 前端小径钻

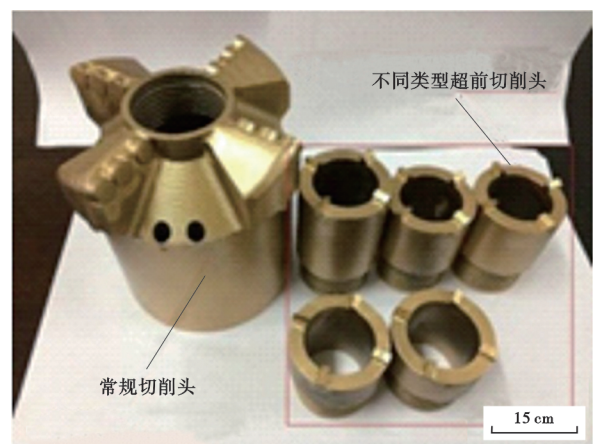


图 13 双径 PDC 密闭取心钻头

Fig. 13 Double-diameter PDC sealed coring bit

头进行钻进取心,后端大径钻头进行钻进成孔。

研制的专用密闭取心设备为外筒、内筒、液压传递筒“三筒单动”结构,外筒总长为 2 150 mm、直径为 12 mm,内筒长为 1 200 mm、直径为 38 mm,容积为 1 360 mL,取心内筒下端密闭球阀直径为 38 mm,可采取煤(岩)心直径达 38 mm。其中,内筒存储煤心和解吸器,上下端均与球阀相连,保证煤心密封保压;上端球阀外侧安装一个解吸阀门,便于煤心提至地面后进行解吸气测量,实现了取心与气含量测试一体化。

密闭取心设备和技术分别在淮南、淮北矿区下属典型高突矿井进行了 2 口地面井的工程试验,采用密闭取心和常规取心两种方式共采集到试验样品 8 组,其中密闭试验样品 5 组、常规试验样品 3 组,密闭取心方式煤心采取率为 62.73%~75.00%,平均值为 70.21%。对比了两种方式的气含量测试结果,淮北矿区 3 个密闭取心所测气含量为 10.50~12.21 m³/t、平均为 11.14 m³/t,常规取心所测气含量为 8.70 m³/t,前者比后者平均增幅超过 28%;淮南矿区 2 个密闭取心所测气含量为 7.19~7.87 m³/t、平均为 7.53 m³/t,2 个常规取心所测气含量为 5.92~6.04 m³/t、平均为 5.98 m³/t,密闭取心比常规方法平均增幅超过 25%(表 2)。

表 2 地面井煤层气含量测定密闭取心技术参数及采取结果
Table 2 Technical parameters of sealed coring technology for the determination of coalbed gas content in surface wells

地区	样品编号	深度/m	取心方式	采取率/%	煤层气含量/(m ³ /t)
淮北矿区	HB-1	673.6~674.8	密闭	74.17	10.50
	HB-2	674.8~675.9	密闭	69.09	10.72
	HB-3	678.1~679.2	密闭	62.73	12.21
	HB-4	676.8~678.1	常规	77.69	8.70
淮南矿区	HN-1	736.4~737.0	密闭	75.00	7.87
	HN-2	737.6~738.9	密闭	70.06	7.19
	HN-3	738.9~739.9	常规	71.00	6.04
	HN-4	739.9~740.7	常规	68.75	5.92

2.2 预测技术

近年来深部煤层气勘探开发逐渐兴起,投资方希望能在钻井工程实施前及早掌握深部煤层气含量等关键参数、了解煤层气资源开发潜力。常规情况下,人们主要采用类比法或吸附实验法预测煤层气含量结果,但二者都有不同程度的误差,吸附实验法虽较类比法误差小,但因 Langmuir 等温吸附模型仅能获取单一储层温度下吸附量,气含量预测结果也存在很大误差。

西安研究院基于气煤、焦煤、贫煤、无烟煤等代表性煤级煤样不同温度(20℃、30℃、40℃、50℃)高压等温吸附实验,首先提出了煤吸附甲烷的温度—压力综合吸附模型:

$$V = De^{mRT \ln \frac{p}{p_c}} \left(\frac{T}{T_c} \right)^k \quad (1)$$

该模型为吸附量和温度、压力的综合关系式。经

大量数据检验,温压综合模型的预测结果与吸附实验数据非常吻合,平均相对偏差小于 5%^[37-38]。基于同一煤某一温度甲烷等温吸附实验结果,利用该温压综合吸附模型并结合煤层地温梯度和储层压力梯度数据,可以预测该煤层任一深度、温度、压力条件下的甲烷吸附量(图 14),进而可以预测煤层气含量。

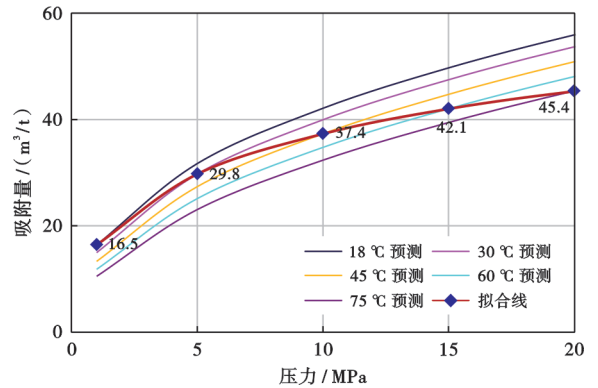


图 14 基于 30℃ 条件下煤样的等温吸附实验数据的温度—压力综合吸附模型预测的甲烷吸附曲线

Fig. 14 Methane adsorption curve predicted by T-P comprehensive adsorption model based on the isothermal adsorption experimental data of a coal sample at 30 °C

表 3 列出了气煤、焦煤、贫煤、无烟煤的 D 、 m [式(1)] 计算结果,供相同或相邻煤阶煤参考使用。

表 3 主要煤阶煤的吸附特征常数
Table 3 Adsorption characteristic constants of main coals

煤阶	m	D
气煤	2.53×10^{-4}	23.09
焦煤	1.95×10^{-4}	29.32
贫煤	1.79×10^{-4}	43.34
无烟煤	1.93×10^{-4}	52.99

以实际无烟煤样品为例,地表温度为 20℃、地温梯度为 3℃/hm,煤层储层压力梯度为 0.85 MPa/hm、含气饱和度为 80%, D 、 m 吸附特征常数参考表 3 中的无烟煤数据。根据式(1)预测该煤层 800~2 000 m 范围的甲烷吸附量、气含量(表 4),其中 800~1 000 m 范围预测结果

表 4 某地无烟煤深部吸附量与气含量预测结果

Table 4 Prediction results of deep adsorption capacity and gas content of anthracite in a certain area

煤层埋深/m	地层温度/K	地层压力/MPa	吸附量/(m ³ /t)	气含量/(m ³ /t)
800	317	6.8	32.14	25.71
1 000	323	8.5	34.82	27.85
1 200	329	10.2	37.05	29.64
1 400	335	11.9	38.95	31.16
1 600	341	13.6	40.59	32.48
1 800	347	15.3	42.03	33.62
2 000	353	17.0	43.28	34.62

为 $25.71 \text{ m}^3/\text{t}$ 、 $27.85 \text{ m}^3/\text{t}$ ，与地面钻孔的平均实测结果 $25.50 \text{ m}^3/\text{t}$ 非常相近，表明该方法具有比较高的准确性。

3 产量预测模拟技术

煤层气抽采工程前的产能预测是预先评判工程部署科学性、投资经济性的依据，也是唯一手段。目前，国内外煤层气产能预测模拟技术仅涉及到常规垂直井、水平对接井、多分支水平井等，尚没有系统的分段压裂水平井和采动区抽采井的模拟技术。西安研究院依托“十二五”国家科技重大专项，对碎软煤层顶板水平井分段压裂、地面采动井（垂直井、L型水平井）的产量预测模拟方法进行了攻关，并开发了相应软件。

3.1 地面预抽

针对煤层顶板水平井分段压裂开发方式特点，建立了基于等效导流能力的模拟方法，其关键点包括：①通过网格局部加密+高导流系数相结合方式体现水平井分段压裂特点；②为迎合非均质性较强储层要求严格特点，提出了主要储层参数网格精细化赋值的处理方法；③针对煤层气不同开发要求的不同工况条件，分别建立了定日产气量、定日产水量、定井底流压的排采制度；④形成了依据抽采井实际生产数据进行产量拟合的方法，实现了对不确定性地质参数的较准确修正。利用该模拟方法体系，已对安徽省数口煤层顶板水平井进行了模拟应用，模拟结果与实际情况比较吻合(图15)^[39]。

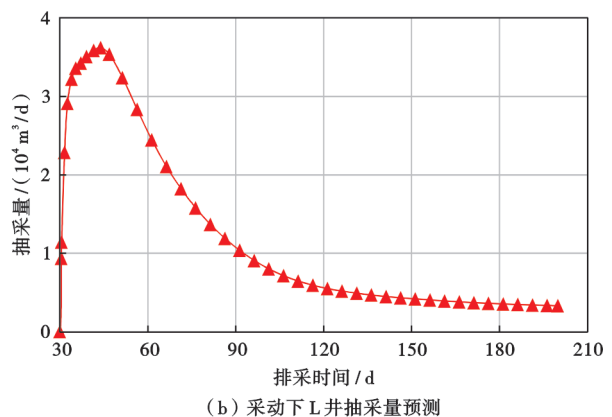
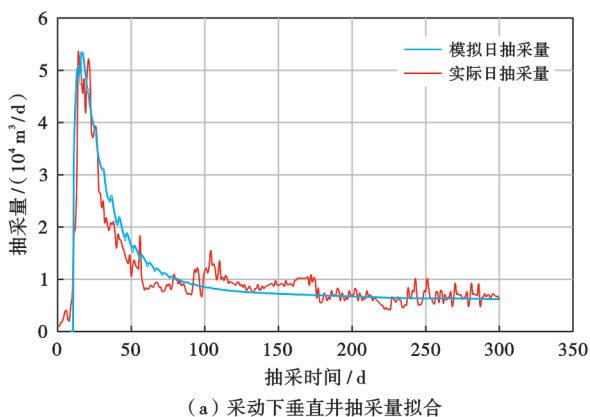


图16 采动井抽采量预测

Fig. 16 Prediction of hydrocarbon extraction and production of mining well

4 碎软低渗煤层煤层气开发发展方向

4.1 深井保压密闭取心技术

中国煤层埋深为 $1000\sim 2000 \text{ m}$ 的范围内煤层气资源量约为 $22.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，占总资源量的 61.2% ^[41-42]。对大多数煤矿区，随着浅部可采煤炭资源的减少，煤炭

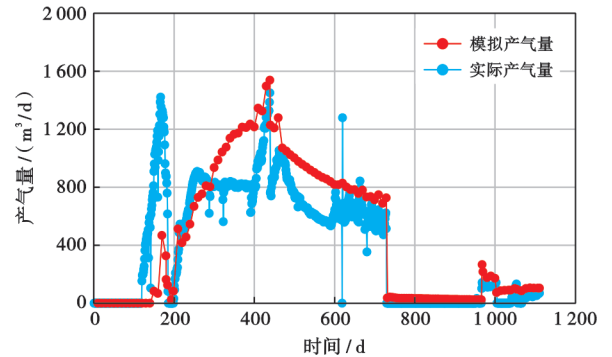


图15 淮南矿区某顶板分段压裂水平井产气量模拟

Fig. 15 Daily production simulation of staged fractured horizontal well in the roof strata in Huainan mine

3.2 采动下抽采

采动地面L型水平井技术融合了水平井和煤炭采动卸压抽采特点，抽采效果模拟具有特殊性。执行“十二五”国家科技重大专项期间，依据物理模拟与现场井监测实验，揭示了煤炭采动影响范围及边界的时间和空间双重动态变化特征，查明了采动区上部岩层视渗透率随工作面推进位置到煤层气井之间距离变化的规律，构建了采动区煤储层视渗透率模型，建立了采动区煤层气井抽采模拟的概化地质模型、数学和数值模型；借助 Microsoft Visual Studio 2013 集成开发环境，采用 C 软件语言开发了模拟软件^[40]，实现了采动下垂直井和 L 型井的抽采效果模拟预测(图16)。

开采逐渐向深部过渡。深部煤层具有储层压力增大、游离气比例高等特点^[43-44]。今后尚需进一步研发深井保压密闭取心技术与设备，以准确获得深部煤层气含量、评估深部煤层气资源开发潜力。

4.2 低成本钻孔轨迹精准控制技术

碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂技术、地面采

动L型水平井抽采技术,其水平段对钻井层位和轨迹控制都具有特殊要求,前者要求水平段位于紧邻煤层的顶板岩层中,一般距离煤层1~2m范围,太近或太远都会对后期压裂改造产生不利影响;后者要求L型井水平段位于开采煤层采动形成的裂隙带范围,两种技术对钻孔轨迹控制要求苛刻。目前,国内外所用工艺成本高、精度差,今后尚需研发低成本的钻进轨迹控制技术。

4.3 智能压裂与排采技术

近年来国际石油、天然气公司与高科技公司合作,将人工智能技术引用到油气勘探开发工程,大大提升了油气行业的智能化水平。煤层气压裂工程是最庞大的工程环节,排采工程是最后环节也是最关键环节之一,两者工程效果的好坏直接影响了产气量高低。目前,智能技术已被一些煤层气开发公司引入到压裂参数及工艺优化、排采制度智能化、设备智能选型、风险智能预警等方面,大部分应用属于浅尝辄止状态,没有真正从煤层气开发机理和技术特色的出发点展开,没有形成完整的智能化链条。基于中国资源绿色、健康、集约式的产业发展需求,当下迫切需要加强煤层气智能开发技术的科研投入力度,尽快实现煤层气地质与工程的一体化和智能化。

4.4 井地联合分段压裂技术

井地联合分段水力压裂是利用地面大排量、高压、携砂压裂泵组,通过垂直井将大排量、高压力的携砂液引入到煤矿井下,对井下施工批量煤岩定向长钻孔进行分段水力压裂,实现煤矿井下“井工厂”压裂改造作业新模式。井地联合分段水力压裂技术能大幅度增大钻孔压裂影响范围、提升压裂改造效果、降低压裂施工成本。当前,该技术模式还存在较多的技术难题,诸如地面垂直井与井下压裂施工作业区巷道的精准对接、近水平大直径定向长钻孔下套管和固孔、定向长钻孔套管内分段射孔及压裂、大排量高压携砂分段压裂远程智能操控施工作业等方面。

5 结论

(1) 依托国家科技重大专项,提出了压裂煤层顶板岩层、煤炭采动卸压方式能实现碎软低渗煤层煤层气高效开发的认识,奠定了碎软低渗煤层地面煤层气开发技术的理论基础。

(2) 研发了地面井煤层密闭取心-气含量精确测试技术与设备,提出了基于温度压力综合吸附模型的气含量预测技术,形成了顶板分段压裂水平井与地面采动L型水平井抽采模拟技术,建立了顶板水平井分段压裂开发技术及工艺流程、煤矿井下长钻孔分段压

裂技术。基于这些研究成果,在安徽省、山西省、贵州省等多个煤矿区进行了工程试验应用,取得了碎软低渗煤层地面煤层气开发和井下抽采的重大突破。

(3) 根据碎软低渗煤层特性及煤矿区煤层气开发、瓦斯治理需求,提出了煤矿区今后煤层气勘探开发的研究方向,包括深井保压密闭取心技术、钻孔轨迹精准控制技术、智能压裂与排采技术、煤矿井上下联合分段压裂技术等。

符号注释: V —甲烷吸附量, m^3/t ; D 、 m —吸附特征常数; T —吸附平衡温度, K ; p_c —甲烷的临界压力,取值 4.59 MPa; T_c —甲烷临界温度,取值 190.4 K; R —理想气体常数,取值 8.31 J/(mol·K); k —参数,取值 2.7。

参 考 文 献

- [1] 张子敏. 全国重点煤矿区瓦斯(煤层气)赋存规律和控制因素[D]. 焦作:河南理工大学,2016:45-51.
ZHANG Zimin. Gas (coalbed methane) occurrence and control factors in key coal mining areas of China[D]. Jiaozuo: Henan University of Technology,2016:45-51.
- [2] 雷毅. 松软煤层井下水力压裂致裂机理及应用研究[D]. 北京:煤炭科学研究总院,2014.
LEI Yi. Study on mechanism and application of hydraulic fracturing in soft seam underground mine[D]. Beijing:China Coal Research Institute,2014.
- [3] 张群. 关于我国煤矿区煤层气开发的战略性思考[J]. 中国煤层气,2007,4(4):3-5.
ZHANG Qun. Strategic thinking on coal mine methane development in China[J]. China Coalbed Methane,2007,4(4):3-5.
- [4] 王国法,任世华,庞义辉,等. 煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J]. 煤炭科学技术,2021,49(9):1-8.
WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, et al. Development achievements of China's coal industry during the 13th Five-Year Plan period and implementation path of "dual carbon" target[J]. Coal Science and Technology,2021,49(9):1-8.
- [5] 刘峰,郭林峰,赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]. 煤炭学报,2022,47(1):1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(1):1-15.
- [6] 张群,葛春贵,李伟,等. 碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂煤层气高效抽采模式[J]. 煤炭学报,2018,43(1):150-159.
ZHANG Qun, GE Chungui, LI Wei, et al. A new model and application of coalbed methane high efficiency production from broken soft and low permeable coal seam by roof strata-in horizontal well and staged hydraulic fracture[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(1):150-159.
- [7] 张群,降文萍,姜在炳,等. 我国煤矿区煤层气地面开发现状及技术研究进展[J]. 煤田地质与勘探,2023,51(1):139-158.
ZHANG Qun, JIANG Wenping, JIANG Zaibing, et al. Present

- situation and technical research progress of coalbed methane surface development in coal mining areas of China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 139-158.
- [8] 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.
- [9] 王永辉,卢拥军,李永平,等. 非常规储层压裂改造技术进展及应用[J]. *石油学报*, 2012, 33(S1): 149-158.
WANG Yonghui, LU Yongjun, LI Yongping, et al. Progress and application of hydraulic fracturing technology in unconventional reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(S1): 149-158.
- [10] 罗平亚,朱苏阳. 中国建立千亿立方米级煤层气大产业的理论与技术基础[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1755-1763.
LUO Pingya, ZHU Suyang. Theoretical and technical fundamentals of a 100 billion-cubic-meter-scale large industry of coalbed methane in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1755-1763.
- [11] GIDLEY J L. 水力压裂技术新发展[M]. 蒋闾,单文文. 北京:石油工业出版社,1995:188-228.
GIDLEY J L. Recent advances in hydraulic fracturing [M]. JIANG Tian, SHAN Wenwen, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 188-228.
- [12] 巫修平. 碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂裂缝扩展规律及机制研究[D]. 北京:煤炭科学研究总院,2017.
WU Xiuping. Research on control mechanism of fracture propagation of multi-stage hydraulic fracturing horizontal well in roof of broken soft and low permeable coal seam[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2017.
- [13] 袁亮. 松软低透煤层群瓦斯抽采理论与技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,2004:36-72.
YUAN Liang. Theory and technology of gas drainage and capture in soft multiple coal seams of low permeability[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2004: 36-72.
- [14] 梁云培. 淮南矿区地面钻井抽采瓦斯技术实践[J]. *采矿与安全工程学报*, 2007, 24(4): 409-413.
LIANG Yunpei. Practice of methane drainage by surface well drilling in Huainan mining area[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2007, 24(4): 409-413.
- [15] 袁亮. 卸压开采抽采瓦斯理论与煤与瓦斯共采技术体系[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(1): 5-12.
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): 5-12.
- [16] 袁亮,郭华,李平,等. 大直径地面钻井采空区采动区瓦斯抽采理论与技术[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(1): 1-8.
YUAN Liang, GUO Hua, LI Ping, et al. Theory and technology of goaf gas drainage with large-diameter surface boreholes[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(1): 1-8.
- [17] JIANG Wenping, ZHAO Long, CHENG Bin. Variation characteristics of coal rock layer and gas extraction law of surface well under mining pressure relief[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(4): 298.
- [18] 许家林,钱鸣高. 地面钻井抽放上覆远距离卸压煤层气试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2000, 29(1): 78-81.
XU Jialin, QIAN Minggao. Study on drainage of relieved methane from overlying coal seam far away from the protective seam by surface well[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2000, 29(1): 78-81.
- [19] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等. 我国煤与瓦斯共采:理论、技术与工程[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8): 1391-1397.
XIE Heping, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, et al. Theory, technology and engineering of simultaneous exploitation of coal and gas in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1391-1397.
- [20] 李军军,李国富,郝海金,等. 过采空区抽采下组煤层气技术及工程应用初探——以晋城寺河井田为例[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(4): 96-104.
LI Junjun, LI Guofu, HAO Haijin, et al. Technology of across-goaf drainage of coalbed methane from a lower coal seam group and its primary application: taking Sihe mine field as an example [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(4): 96-104.
- [21] 赵继展,张群,张培河. 煤矿采动条件下煤层气储层模型及应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(6): 34-39.
ZHAO Jizhan, ZHANG Qun, ZHANG Peihe. C coalbed methane reservoir model under mining conditions and its application[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(6): 34-39.
- [22] 降文萍,柴建禄,张群,等. 基于煤层气与煤炭协调开发的地面抽采工程部署关键技术进展[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(12): 50-61.
JIANG Wenping, CHAI Jianlu, ZHANG Qun, et al. Key technology progress of surface extraction project deployment based on coordinated development of CBM and coal[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(12): 50-61.
- [23] 代志旭. 高压水力压裂技术在瓦斯综合治理中的研究与应用[J]. *煤炭工程*, 2010(12): 82-84.
DAI Zhixu. Research and application of high pressure hydraulic fracturing technology to mine gas comprehensive control [J]. *Coal Engineering*, 2010(12): 82-84.
- [24] 吕有厂. 水力压裂技术在高瓦斯低透气性矿井中的应用[J]. *重庆大学学报*, 2010, 33(7): 102-107.
Lǚ Youchang. Application the hydraulic fracturing technology in the high pressure and low permeability mine [J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33(7): 102-107.
- [25] 卫修君,王满. 平顶山矿区单一突出煤层瓦斯抽采新技术[J]. *煤炭科学技术*, 2012, 40(12): 42-47.
WEI Xiujun, WANG Man. New gas drainage technology of single outburst seam in Pingdingshan mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2012, 40(12): 42-47.
- [26] 贾秉义,李树刚,陈冬冬,等. 煤矿井下高压端连续水力加砂压裂增透技术与装备研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(8): 54-61.
JIA Bingyi, LI Shugang, CHEN Dongdong, et al. Study of technologies and equipment of continuous hydraulic sand fracturing for permeability enhancement at high pressure side of coal mine downhole[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(8): 54-61.
- [27] 雷毅,武文宾,陈久福. 松软煤层井下水力压裂增透技术及应用

- [J]. 煤矿开采, 2015, 20(1): 105-107.
- LEI Yi, WU Wenbin, CHEN Jiufu. Technology of underground permeability improvement of soft coal-seam with hydrofracture and its application[J]. Coal Mining Technology, 2015, 20(1): 105-107.
- [28] 蔡峰, 刘泽功. 深部低透性煤层上向穿层水力压裂强化增透技术[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 113-119.
- CAI Feng, LIU Zegong. Simulation and experimental research on upward cross-seams hydraulic fracturing in deep and low-permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 113-119.
- [29] 陈冬冬, 王建利, 贾秉义, 等. 碎软煤层顶板梳状长钻孔水力压裂区域瓦斯高效抽采模式[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(8): 29-36.
- CHEN Dongdong, WANG Jianli, JIA Bingyi, et al. High-efficiency regional gas drainage model after hydraulic fracturing of comb-shaped long boreholes in the roof of broken soft and low permeability coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(8): 29-36.
- [30] 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.
- [31] 杨兆彪, 秦勇, 王兆丰, 等. 钻井液条件下煤芯煤层气解吸扩散行为及其影响[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(5): 624-628.
- YANG Zhaobiao, QIN Yong, WANG Zhaofeng, et al. Behaviors and influencing factors of desorption-diffusion of methane from coal core under drilling fluid medium[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(5): 624-628.
- [32] 孟艳军, 汤达祯, 许浩, 等. 煤层气解吸阶段划分方法及其意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(5): 612-617.
- MENG Yanjun, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Division of coalbed methane desorption stages and its significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(5): 612-617.
- [33] KISSELL F N, MCCULLOCH C M, ELDER C H. The direct method of determining methane content of coalbeds for ventilation design [R]. Report of Investigations 7767, 1973: 1-22.
- [34] 张群, 范章群. 煤层气损失气含量模拟试验及结果分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(12): 1649-1654.
- ZHANG Qun, FAN Zhangqun. Simulation experiment and result analysis on lost gas content of coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(12): 1649-1654.
- [35] 范章群. 煤层气损失气含量模拟试验及估算模型探讨[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2009.
- FAN Zhangqun. Study on simulation experiment and estimate method for coalbed methane lost gas content[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2009.
- [36] 杨兆彪, 秦勇, 王兆丰, 等. 钻井液条件下煤芯煤层气解吸-扩散模型及逸散量求取[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(2): 171-177.
- YANG Zhaobiao, QIN Yong, WANG Zhaofeng, et al. Desorption-diffusion model and lost gas quantity estimation of coalbed methane from coal core under drilling fluid medium[J]. Science China Earth Science, 2010, 53(4): 626-632.
- [37] 孙四清, 张群, 郑凯歌, 等. 地面井煤层气含量精准测试密闭取心技术及设备[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2523-2530.
- SUN Siqing, ZHANG Qun, ZHENG Kaige, et al. Technology and equipment of sealed coring for accurate determination of coalbed gas content in ground well[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2523-2530.
- [38] 张群, 崔永君, 钟铃文, 等. 煤吸附甲烷的温度-压力综合吸附模型[J]. 煤炭学报, 2008, 33(11): 1272-1278.
- ZHANG Qun, CUI Yongjun, ZHONG Lingwen, et al. Temperature-pressure comprehensive adsorption model for coal adsorption of methane[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(11): 1272-1278.
- [39] 方良才, 李贵红, 李丹丹, 等. 淮北芦岭煤矿煤层顶板水平井煤层气抽采效果分析[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(6): 155-160.
- FANG Liangcai, LI Guihong, LI Dandan, et al. Analysis on the CBM extraction effect of the horizontal wells in the coal seam roof in Luling coal mine in Huaibei[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(6): 155-160.
- [40] 赵继展. 煤矿采动区煤层气井产能数值模拟及应用研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2018.
- ZHAO Jizhan. Study on numerical simulation and application of gob coal seam gas well productivity in longwall working face [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2018.
- [41] 钱凯, 施振生, 林世国, 等. 中国煤层气的产业化进程与发展建议[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(6): 831-840.
- QIAN Kai, SHI Zhensheng, LIN Shiguo, et al. Industrialization progression and development suggestions for coalbed methane of China[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(6): 831-840.
- [42] 刘成林, 朱杰, 车长波, 等. 新一轮全国煤层气资源评价方法与结果[J]. 天然气工业, 2009, 29(11): 130-132.
- LIU Chenglin, ZHU Jie, CHE Changbo, et al. Methodologies and results of the latest assessment of coalbed methane resources in China[J]. Natural gas industry, 2009, 29(11): 130-132.
- [43] 秦勇, 申建. 论深部煤层气基本地质问题[J]. 石油学报, 2016, 37(1): 125-136.
- QIN Yong, SHEN Jian. On the fundamental issues of deep coalbed methane geology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(1): 125-136.
- [44] 陈世达, 汤达祯, 侯伟, 等. 深部煤层气地质条件特殊性与储层工程响应[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1993-2006.
- CHEN Shida, TANG Dazhen, HOU Wei, et al. Geological particularity and reservoir engineering response of deep coalbed methane[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1993-2006.

(收稿日期 2023-07-03 改回日期 2024-01-26 编辑 王培玺)