



移动扫码阅读

孔祥喜,唐永志,李平,等.淮南矿区松软低透煤层煤层气开发利用技术与思考[J].煤炭科学技术,2022,50(12):26-35.
KONG Xiangxi, TANG Yongzhi, LI Ping, *et al.* Thinking and utilization technology of coalbed methane in soft and low permeability coal seams in Huainan Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 26-35.

淮南矿区松软低透煤层煤层气开发利用技术与思考

孔祥喜¹,唐永志¹,李平¹,王传兵^{1,2},陈建¹,李琰庆^{1,2},袁本庆³,陈本良^{1,2},叶敏¹

(1.淮南矿业(集团)有限责任公司,安徽淮南 232001;2.煤炭开采国家工程技术研究院,安徽淮南 232001;

3.中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆 400037)

摘要:为解决淮南矿区松软低透气性突出煤层群条件下煤层构造复杂、多源瓦斯涌出、抽采流量衰减快、岩巷与钻孔成本高、低(超低)浓度煤层气利用率低等制约煤层气资源高效开发难题,通过分析煤层群条件下保护层卸压井上下立体抽采煤层气开发模式,提出较为适用的、与淮南矿区煤层群开采条件下煤与煤层气协调开发模式配套的六大关键技术,即:地面水平分段压裂井煤层气抽采技术,煤层气抽采巷道盾构快速施工技术,井下松软煤层煤层气强化抽采技术,地面采动区井卸压煤层气抽采技术,“以孔代巷”施工技术,低浓度煤层气梯级利用技术。配套关键技术应用表明:形成的碎软煤层顶板水平井分段压裂工艺及精细化排采技术,有效提高煤层气预抽产量;煤矿深井巷道全断面硬岩掘进机大幅提高巷道掘进效率,实现硬岩掘进自动化、少人化;井下水力压裂加砂、超高压水力割缝实现井下大区域卸压增透;Ⅲ、Ⅳ型地面采动区井在煤层群采动卸压瓦斯治理方面可以取代顶板高抽巷,且减少其他措施工程量,减小投入成本和工期;“以孔代巷”技术显著提升了复杂顶板中高位定向钻孔成功质量;低浓度煤层气梯级利用技术大幅减少了煤层气排放量;六大关键技术保障了淮南矿区安全生产,提高了煤、煤层气产量与煤层气利用水平。最后,针对地面水平井水力压裂煤储层改造技术作业成本高、产量低、范围小与采动井存在破断风险、超低浓度煤层气梯级利用规模小等问题,提出了深部煤层气精准地质导向、超大规模高效储层体积改造、抽采效果评价技术、采动区地面井稳定持续抽采技术、井下大面积智能水力化增透技术、“一井多用”协同抽采煤层气技术、全浓度煤层气综合利用技术的发展方向。

关键词:松软低透煤层;煤层气;地面水平井分段压裂;采动区地面井;强化抽采;梯级利用;以孔代巷

中图分类号:TD712.5

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2022)12-0026-10

Thinking and utilization technology of coalbed methane in soft and low permeability coal seams in Huainan Mining Area

KONG Xiangxi¹, TANG Yongzhi¹, LI Ping¹, WANG Chuanbing^{1,2}, CHEN Jian¹, LI Yanqing^{1,2}, YUAN Benqing³, CHEN Benliang^{1,2}, YE Min¹

(1. Huainan Mining Group Corporation Limited, Huainan 232001, China; 2. National Engineering & Technology Academy for Coal Mining, Huainan 232001, China; 3. China Coal Technology Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: In order to solve the problems that restrict the efficient development of coalbed methane resources under the conditions of soft and low permeability outburst coal seams in Huainan Mining Area, such as complex coal seam structure, multi-source gas emission, rapid decline of drainage flow, high rock roadway and drilling costs, and low (ultra-low) concentration coalbed methane utilization rate, six key technologies suitable for the coordinated development mode of coal and coalbed methane under the condition of coal seam group mining in Huainan mining area are put forward, namely: coalbed methane extraction technology of ground level staged fracturing wells, shield rapid

收稿日期:2022-09-11 责任编辑:朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.mcq22-38

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05068)

作者简介:孔祥喜(1962—),男,安徽六安人,教授级高级工程师,硕士。

通讯作者:李琰庆(1982—),男,河南南阳人,高级工程师,硕士。Tel: 0554-2168005, E-mail: liyq115@126.com

construction technology of coalbed methane extraction roadways, enhanced extraction technology of underground soft coalbed methane, coalbed methane extraction technology of pressure relief in ground mining area, the construction technology of "replacing roadways with holes", and cascade utilization technology of low concentration coalbed methane. The application of supporting key technologies shows that staged fracturing technology and refined drainage and production technology of roof horizontal wells in broken and soft coal seam have effectively improved the pre pumping production of coalbed methane; The full face hard rock roadheader in deep coal mine roadway greatly improves the roadway excavation efficiency, realizing the automation and less humanization of hard rock excavation; Sand adding of hydraulic fracturing and ultra-high hydraulic slotting have realized pressure relief and permeability enhancement in large areas underground coal mine; Type III and IV surface mining area wells can replace the roof high drainage roadway in the treatment of pressure relief gas in coal seam group mining, and reduce the coalbed methane drainage intensity of other measures; The technology of "replacing roadways with holes" has significantly improved the quality of successful directional drilling at middle and high levels in complex roof; Cascade utilization technology of low concentration coalbed methane has greatly reduced the emission of coalbed methane. The six key technologies have guaranteed the safe production in Huainan mining area, and comprehensively improved the output of coal and coalbed methane and the utilization level of coalbed methane. Six key technologies ensure the safe production in Huainan mining area, and comprehensively improved the output of coal and coalbed methane and the utilization level of coalbed methane. Finally, in view of the problems such as high operation cost, low production, small scope of hydraulic fracturing coal reservoir reconstruction technology for surface horizontal wells, and the risk of breakage of mining wells, and small scale of cascade utilization of ultra-low concentration coalbed methane, the development direction of deep CBM precise geological guidance, super large scale efficient reservoir volume transformation, pumping effect evaluation technology, stable and continuous pumping technology of surface wells in mining areas, underground large area intelligent hydraulic enhanced permeability technology, "one well with multiple uses" collaborative pumping CBM technology, and full concentration CBM comprehensive utilization technology are proposed.

Key words: soft and low permeability coal seam; coalbed methane; staged fracturing of surface horizontal wells; surface wells in mining area; strengthen drainage; cascade utilization; replacing roadway with drilling

0 引 言

煤炭与煤层气(煤矿瓦斯)同源共生,煤层气是赋存在煤层及煤系地层的烃类气体,是优质清洁能源^[1]。2021年煤炭占我国一次能源消费结构的56%左右;同时,我国煤层气资源量丰富,2000 m以浅地质资源量30.05万亿 m^3 ^[2]。煤层气开发与煤炭开采密切相关,煤炭开采显著提高了煤层气抽采效率,而煤层气抽采降低了矿井瓦斯灾害的发生和减少温室气体的排放。我国先后开展了大量煤层气资源的评价、勘探、开发、利用技术研究工作,在煤层透气性系数较高的沁水盆地南部和鄂尔多斯东缘北部等地区建设了多个煤层气产业化开发利用示范工程。晋城矿区地面煤层气抽采发展迅速,建成了全国最大的煤矿区煤层气地面抽采示范基地,日产气量高达300万 m^3 ^[3]。同时,属性为松软低透气性煤层的煤层气资源的安全高效抽采已成为我国煤层气规模化发展和煤矿瓦斯灾害治理的卡脖子难题,主要表现为单井产气量低,一般直井产气量为300~500 m^3/d 、水平井为1000~2000 m^3/d ,开发效果差,技术上未取得实质性突破^[4]。赋存有松软低透气性煤层的煤矿一般为高突矿井,在这类煤层中施工的抽采瓦斯钻孔,成孔困难,抽采效果差,严重制约煤炭安全高效生产^[5-6]。同时,碎软低渗煤层分布广泛,煤层气资源较

丰富,高效抽采和利用清洁煤层气资源,可以缓解我国的石油和天然气供给紧张的局面,因此开展碎软低渗煤层的煤层气抽采技术研究具有重要的理论意义和实用价值。

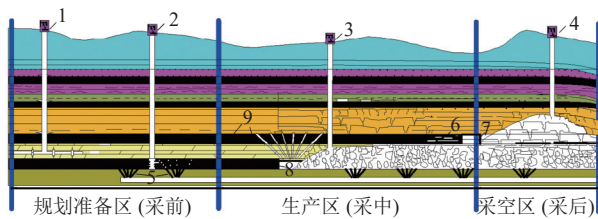
淮南矿区预测2000 m以浅煤层气资源量4900.38亿 m^3 ,是华东煤层气储量最大的地区^[7-8]。矿区内煤层赋存具有显著松软低渗特征:埋藏深(300~1500 m),煤层群赋存(8~15层),地压大(700 m以深进入高应力区),瓦斯含量高(12~26 m^3/t)、瓦斯压力大(高达6.7 MPa),煤体松软(煤的坚固性系数0.2~0.8)、透气性低(渗透率0.001~0.01 $\times 10^{-15}$ m^2)。针对松软低渗煤层的煤层气抽采,形成以井下抽采为主、地面抽采为辅的开发特点,从井下底板岩巷穿层孔抽采条带瓦斯、保护层卸压开采、穿层孔与顺层孔抽采工作面瓦斯、瓦斯抽采强化措施到地面垂直压裂井、采动区井等多种技术^[9],虽取得了一定的效果,但在松软低渗煤层中成本高、时间长,抽采效果差^[10],难以满足矿井煤层气高效抽采与煤炭资源安全高效协调开发。

基于此,笔者通过分析“十一五”“十二五”“十三五”国家科技重大专项《大型油气田及煤层气开发》项目在淮南矿区煤层群开采条件下煤层气抽采示范成果,总结其煤与煤层气协调开发模式及六大开发关键技术,并根据目前存在问题,提出具体思考,以

期为类似条件煤矿煤层气资源安全高效开发提供技术参考。

1 煤与煤层气协调开发模式

根据淮南矿区煤与煤层气资源赋存地质条件、资源分布特点、资源开发现状、采掘规划,围绕煤层群条件下煤炭开采的全过程,以煤层卸压开采为基本原理,煤层气与煤炭协调一体化开发,形成了煤层群条件下保护层卸压井上下立体抽采煤层气开发模式(图1)。



1—地面水平分段压裂井; 2—准备区地面压裂井; 3—地面采动区井; 4—地面采空区井; 5—穿层钻孔; 6—顺层钻孔; 7—采空区埋管; 8—保护层(首采层); 9—被保护层(卸压层)

图1 煤层群条件下煤与煤层气一体化开发模式

Fig.1 Integrated development model of coal and coalbed methane under condition of coal seam group

模式主要特点是将2种资源的协调开发在时间上分为煤炭的采前、采中、采后三个阶段,空间上分为规划准备区、生产区、采空区三区域,三阶段与三区域相互对应,且随煤炭采掘活动的推进,三阶段与三区域在时空上不断演化。

规划准备区(采前):提前5~10 a进行煤层气与煤炭协调开发统一规划,选择保护层与被保护层,在煤炭未开发区域,采用地面垂直井、地面水平分段压裂井等技术进行大面积区域性预抽煤层气,在煤炭的开拓准备区利用地面垂直井和底(顶)板穿层钻孔进行小面积条带预抽,抽采目标为:煤层瓦斯含量 $W < 8 \text{ m}^3/\text{t}$ 、瓦斯压力 $P < 0.74 \text{ MPa}$,煤层气整体采收率为30%~50%。

生产区(采中):为保证煤层气与煤炭资源一体化安全高效开发,井上下联合抽采,在煤巷掘进和工作面回采区域,实施以井下煤层气抽采为主、地面采动区钻井为辅的方式进行立体化煤层气抽采,以保证煤矿井下煤层气(瓦斯)抽采满足《煤矿瓦斯抽采基本指标》的要求,煤层采前预抽1~3 a,采中抽采1~2 a。针对煤层群赋存,先开采保护层,利用保护层采动卸压作用,抽采保护层和被保护层煤层气,最终实现保护层与被保护层煤层气和煤炭的安全回采。

采空区(采后):保护层和被保护层煤炭开采后,采空区存在大量余煤,煤岩继续释放煤层气,受采动影响,上下邻近层的煤层气会向采空区汇集,为减少采空区煤层气涌出量,应实施采空区地面钻井、井下采空区埋管抽采相结合的方式进行采空区煤层气抽采,进一步回收煤层气资源,防止回风瓦斯超限。

2 煤层气开发关键技术

基于淮南矿区煤层松软低渗赋存特征,依据建立的煤与煤层气协调开发模式,从地面高效、井下可靠及地面首选、井下配套角度进行煤层气高效开发关键技术的研发。规划区采用地面水平分段压裂井大区域预抽技术,实现碎软低渗煤层地面井强化增产;为降低煤层气抽采巷道掘进安全风险,提高掘进效率,实现煤层气抽采巷道本质安全型快速掘进的技术目标,准备区煤层气抽采巷道采用盾构快速施工技术;同时准备区采用水力压裂加砂及超高压水力割缝增渗强化抽采技术,实现难抽煤层井下高效增渗及区域、局部增渗协调补充;生产区采用采动区井、“以孔代巷”技术实现卸压瓦斯最大化抽采;矿井抽采煤层气通过梯级利用技术实现高效利用和节能环保。六大关键技术的示范应用实现了淮南矿区减人增效,全面提高了煤、煤层气产量与煤层气利用水平

2.1 地面水平分段压裂井煤层气抽采技术

《防治煤与瓦斯突出细则》规定“煤层瓦斯压力达到3 MPa的区域应当采用地面井预抽煤层瓦斯,或者开采保护层,或者采用远程操控钻机施工钻孔预抽煤层瓦斯”,随着深部煤层瓦斯含量、压力的增加,实施煤层气地面预抽的要求迫在眉睫。

2014—2017年,淮北矿区芦岭矿以8号煤层为研究对象,通过在紧邻碎软煤层的顶板岩层部署LG01-H试验水平井进行煤层气开发,达到最高日产气 $10\,746 \text{ m}^3$ 的良好效果,为碎软煤层煤层气开发提供了一条新途径^[11-13]。

2018年以来,淮南矿区施工了6口煤层气水平井(新谢1-1、新谢1-2、PX2-1、PX1-1、PX2-2、PX1-2)。6口煤层气水平井有效钻井进尺13 038 m,平均单井有效进尺2 173 m,沿煤层顶底板钻水平孔长度5 889 m,平均单井完成水平井长度981 m,其中沿煤层底板钻井有效进尺2 156 m,水平井长度1 005 m。按照段长60~80 m进行分段射孔压裂,射孔段数77段,累计射孔厚度338 m,射孔孔数3 380孔。第

一段采用连续油管或油管传输方式射孔,其余各段采用泵送桥塞—射孔联作进行分段射孔,选择适合139.7 mm套管内径的可钻式桥塞和大孔径89 mm射孔枪弹,根据各段轨迹特点选择每段1~3簇射孔方式,压裂段数77段,平均单井13段;采用压裂液采用活性水+自缔合压裂液混合体系,提高造缝携砂能力,完成压裂液入井149 505 m³,平均单井压裂液入井24 918 m³;支撑剂选用40~70目(粒径0.38~0.212 mm)、20~40目(粒径0.83~0.38 mm)、16~20目(粒径1.18~0.83 mm)石英砂,提高裂缝剖面导流能力,压入支撑剂5 679 m³,平均单井947 m³。采用“大排量(14 m³/min)、控液量、强加砂”的压裂模式,增加裂缝沟通效果。

目前,6口试验井全部产气,累计产气236.6×10⁴ m³,最高单井累产气64.1×10⁴ m³,单井最高日产气量3 158 m³,PX2-2井排采如图2所示。表明目前这种开发方式对淮南矿区松软碎低透煤层煤层气开发和瓦斯地面治理具有一定的技术可行性。

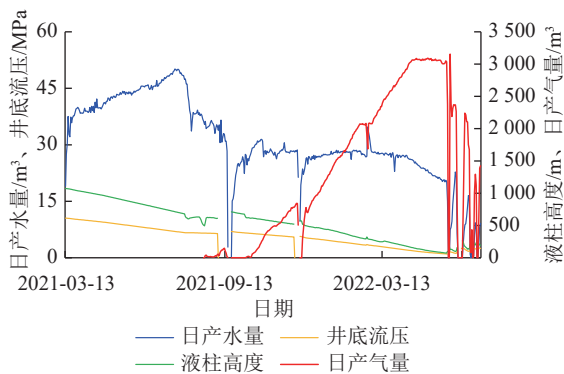


图2 PX2-2井生产情况

Fig.2 Drainage production of well PX2-1

2.2 煤层气抽采巷道盾构快速施工技术

随煤矿开采深度和煤与瓦斯突出威胁程度的增加,岩巷工程量逐年增长。淮南矿区岩巷工程量达16万m/a,且硬岩巷道占总岩巷工程量的40%左右。岩巷安全、快速掘进对于保证煤矿安全生产、采掘接替意义重大^[14-15]。

煤矿深井巷道全断面硬岩掘进机(图3),设备部件采用模块化、轻量化和紧凑化设计,可经立井井筒

运输,并在井下巷道内由有轨矿车、单轨吊车等煤矿常用设备运输、拆装、转场。设备部件在始发硐室组装后,借助反力架始发进入掘进巷道,并通过始发油缸和撑靴配合实现全断面掘进机始发,始发装置体积小,解决了深埋硐室狭小空间内无法使用反力架始发的技术难题。设计研发煤矿深井巷道全断面硬岩掘进机作业线,巷道底部安装带式输送机排矸,顶部铺设单轨吊轨道用以运输人员、材料,实现掘进、支护、排矸、运输同步施工(图4)。

煤矿用盾构机作业已在淮南矿区多座矿井的煤层气抽采巷道掘进工程中成功应用,主要适用于煤层气绝对涌出量大于30 m³/min、顶板为硬岩的采煤工作面。顾桥矿实现掘进最高日进尺达到40.2 m,月进尺600.6 m,创造国内煤矿深井硬岩巷道掘进最高纪录。所需施工人员减少40人,降低了煤层气抽采巷道掘进安全风险,提高了掘进效率,实现煤层气抽采巷道本质安全型快速掘进。

2.3 井下松软煤层煤层气强化抽采技术

2.3.1 水力压裂加砂增透技术

煤矿井下常规水力压裂技术形成的裂缝在地应力和岩层自重作用下会逐渐闭合,堵塞钻孔瓦斯运移通道,使压裂效果持续时间短,降低其技术优势^[16]。在压裂液中加入支撑剂可有效防止裂缝闭合,保障水力压裂施工效果,提高钻孔瓦斯抽采效率。

针对淮南矿区煤的坚固性系数 $f < 0.5$ 、煤层气压力 $P > 2$ MPa的碎软煤层,研发的高压端连续加砂水力压裂装备,通过气动阀组控制,形成压裂液的定向快速流动,冲击混骨料仓室,形成紊流,从而实现混砂。高压水路分两路:一路进入混骨料仓,一路进入携骨料仓,其中进入混骨料仓的高压水流冲击进行混砂,之后高压水携带石英砂进入携骨料仓进一步混合均匀进入压裂管路,注入压裂钻孔,具体如图5所示。

压裂装备额定压力56 MPa,容积5.50 m³,其中混骨料仓4.68 m³,加骨料仓0.82 m³。设计的水力压裂加砂增透系统,能够实现连续加砂,在不拆解重装系统条件下实现施工故障的排查和处理,全程采用远程控制操作。通过高压电磁阀和远程泵组操作系

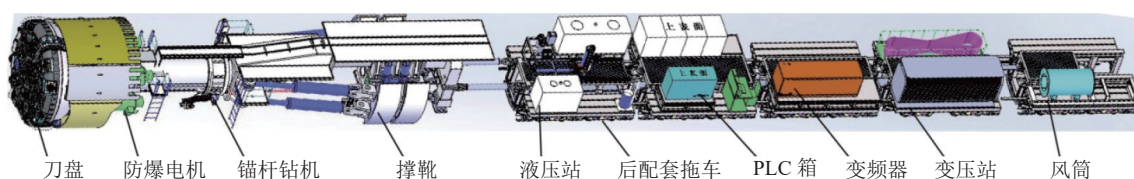


图3 煤矿深井巷道全断面硬岩掘进机结构

Fig.3 Structure of full section hard rock roadheader in deep roadway of coal mine

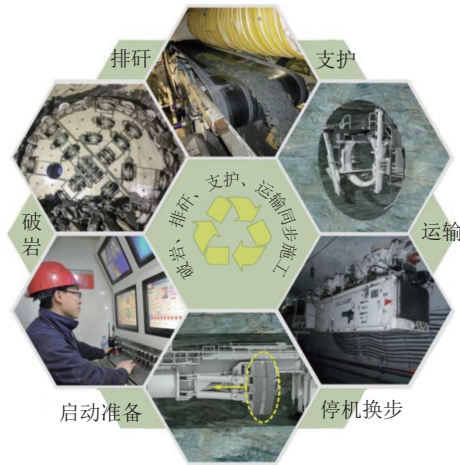


图4 全断面硬岩掘进机施工流程

Fig.4 Construction process of full section hard rock roadheader

统,实现远程、可控、定量加砂的压裂施工,保证了施工安全和加注压裂液与石英砂比例。

潘三矿水力压裂加骨料每 10 m³ 水加砂 9.6 kg,增透影响范围平均 24 m,增透钻孔百孔瓦斯抽采纯量是常规未压裂钻孔的 2~15 倍,加骨料增透钻孔瓦斯抽采混含量、抽采纯量、百孔瓦斯抽采量分别是清水压裂钻孔的 5.00、2.38、2.03 倍。解决了目前地面水力压裂加骨料增透装备体积大、功率高、系统连接复杂,对施工条件要求较高,无法直接应用于煤矿井下的难题。

2.3.2 超高压水力割缝卸压增透技术

针对矿区煤的坚固性系数 $0.5 \leq f < 0.8$ 、煤层气压力 $P < 2$ MPa 的煤层,采用超高压水力割缝卸压增透装备与技术。装备额定工作压力 100 MPa,流量 125 L/min,实行动力源头、传输通道、传输连接、割缝操作四重安全防护;实现钻割一体功能,水压小于

15 MPa 时割缝器前端开启,低压钻进;水压大于 15 MPa 时前端关闭,进行割缝^[17-19]。

丁集矿 1351(1) 运输巷底板巷施工的 308 个钻孔,单孔割缝刀数 2~3 刀,单刀割缝时间 12~20 min,平均单孔割缝时间 40 min,单孔出煤量 0.7~1.7 t。抽采浓度 53%~85%、抽采纯量 3.10~3.66 m³/min;与未割缝相比,抽采纯量增加 2.2~2.8 倍。

2.4 地面采动区井卸压煤层气抽采技术

卸压煤层气抽采地面钻井具有抽采量大、抽采浓度高、抽采半径大的优点,可以提高保护层及被保护层瓦斯抽采率、缓解通风压力,同时取代底板岩巷和网格格式穿层钻孔,减少井下钻孔工程量^[20]。地面钻井具有“一井多用”的功能,保护层工作面开采后,地面钻井可以加以技术改造为采空区抽采井,抽采保护层采空区瓦斯;在工作面采至钻井前一定距离任意时间施工完毕即可,既利用了采动区煤层瓦斯卸压的高效抽采条件,又减少了井下瓦斯抽采工程与采掘作业相互干扰,可以改善井下安全环境和职工的工作条件,是一种抽采效率高、易于规模化推广应用的技术方法^[21]。

地面采动区井的井身结构对煤层采动后的井孔稳定性有重要影响^[22],淮南矿业集团自 2002 年开始试验第一口采动区卸压煤层气地面钻井以来,前后设计了 4 种井身结构。其中: I 型、II 型在厚表土层与基岩界面附近易发生剪切破坏,较为成功并已推广应用的是 III 型和 IV 型井,其主要特点如下:

1) 针对卸压瓦斯抽采钻井的特点,打破常规钻井设计思路,引入“上止下泄”以及“硬抗”和“避让”相结合的设计理念,采用石油固井加强上部松散层止水、增大内层套管壁厚,将花管孔段扩大近一倍等

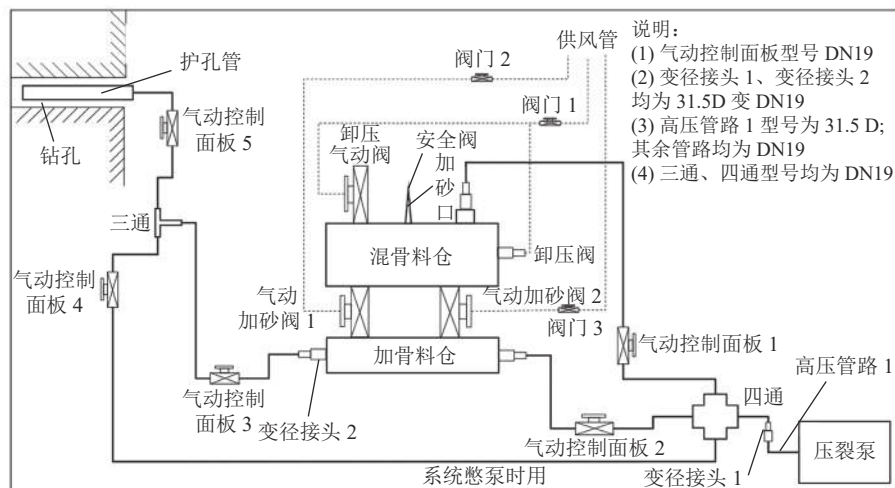


图5 水力压裂加骨料增透试验系统连接

Fig.5 Connection of hydraulic fracturing and aggregate permeability test system

多项举措^[23]。

2) 施工中采用 PDC 掏穴钻头将被保护煤层顶板至保护煤层顶板地层瓦斯抽采花管段孔径扩大。给花管预留一定的外环空间进行“避让”，可以有效缓冲岩层在采动后产生的剪切、挤压力对花管的破坏，从而有效地保护花管在采动影响后能够保留完好的出气通道^[24]。另外可以使目标层的出气表面积增大，有效增加钻井煤层气产量。

3) 在花管与套管的连接上进行了改进，这种改进既增大了钻孔的过气断面，同时花管和实管采用同径，更易于钻孔的洗井工作。

4) 基岩面以下工作管石油套管壁厚增大到 1 倍左右，花管壁厚增大近 40%，这些施工工艺的改进都将有效增强工作管抵抗采动破坏影响，保证钻孔有良好的出气通道。

Ⅲ型和Ⅳ型井井身结构如图 6 所示，可以适应矿区厚表土层、覆岩含水层、覆岩大扰动、煤泥混合物堵塞花管等显著的工程地质条件。

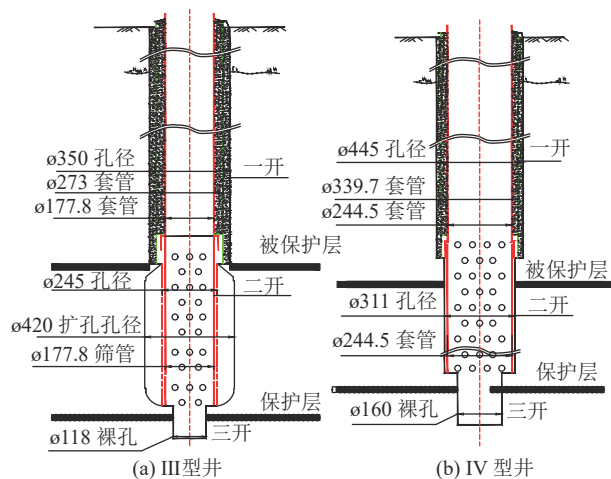


图 6 Ⅲ型、Ⅳ型井井身结构

Fig.6 Wellbore structure of type III and IV wells

淮南矿区已成功实施Ⅰ型井 59 口、Ⅱ型井 43 口、Ⅲ型井 171 口、Ⅳ型井 20 口，最大单井煤层气抽采总量 645 万 m^3 ，平均单井煤层气抽采总量 159.5 万 m^3 。同时，地面钻井抽采浓度在 40% 以上，满足了高浓度煤层气发电机组需求，具有良好的经济效益。

2.5 “以孔代巷”施工技术

顶板高位定向钻孔代替高抽巷技术(简称“以孔代巷”)，具有轨迹可控、施工时间短、抽采瓦斯效果稳定、经济效益显著等优势，被广泛应用于工作面采空区瓦斯治理，用于抽采顶板裂隙带瓦斯^[25-26]。

淮南矿区煤层顶板结构复杂，多为破碎带、软硬交互、多夹层、地质构造发育等，钻孔爬坡孔段复杂

地层存在成孔困难、复杂地层存在塌孔与堵孔风险，进而导致钻孔憋压、卡钻等问题，优化施工装备，利用 ZDY15000 型全液压坑道钻机、泥浆泵车、泥浆脉冲无线随钻测量装置、螺杆马达(规格 1.75°、1.25°)、整体式螺旋钻杆，采用复合定向钻机与复合排渣技术。该装备增大了泵量，从 390 L/min 增加到 460 L/min，使冲洗液紊流运动；螺旋钻杆旋转产生旋转流场，增加岩屑运移速度、降低岩屑粒度，搅动岩屑使其处于悬浮状态，降低岩屑床高度，提高岩屑清除能力。

大角度快速穿越主动防塌工艺^[27]：当局部孔段地层不稳定或易缩径时，采用大角度穿越技术进行施工，即增大钻孔与不稳定地层的夹角，使钻孔快速穿过不稳定地层，减少在不稳定地层中的距离，然后采用 1.5°或 1.75°大弯角螺杆马达大弯角螺杆马达迅速调整钻孔倾角，使钻孔进入目标地层并沿目标地层长距离延伸。

复杂顶板局部孔段扩孔防堵工艺：钻孔钻过破碎带或泥岩缩径带后，换用大直径扩孔钻头进行扩孔；将钻孔直径扩大超出先导孔孔径，然后继续施工先导孔的技术方法，进行扩孔；扩孔后钻孔环状间隙增大，排水排渣更加通畅，减少了塌孔卡钻和泥岩缩径抱钻的风险。

多孔联合注浆与单孔分级注浆加固工艺：多孔联合注浆技术对孔口段破碎煤岩层进行整体强化，既可提高套管孔段施工时的孔壁稳定性，又可为穿层孔段注浆上压提供基础，并可避免后期抽采漏气，确保高效抽采，主要参数：注浆钻孔长度可设计为 9~12 m；注浆扩散半径可设计为 1.5~2.0 m。分级注浆加固工艺对穿层孔段破碎地层整体强化，通过充填破碎裂隙，增强岩体胶结强度，减少冲洗液向孔壁渗漏；易破碎和软化缩径段孔壁保持稳定。

钻孔全程护孔工艺：钢筋管用过渡接头连接，第一根筛管焊装钻牙，用钻机动力推进；孔内遇阻时，钻机旋转推进； $\phi 73$ mm、 $\phi 89$ mm 钢筋管安装长度平均达到 500 m 以上，护孔比例超 96%，最大安装长度 728.5 m。

顾桥矿 1 212(3)工作面施工的大直径定向钻孔替代高抽巷，钻孔整体抽采浓度达 20%~30%，抽采纯量 12 m^3/min 以上，抽采效果能够替代高抽巷。

2.6 低浓度煤层气利用技术

淮南矿区瓦斯利用的总体思路是“应抽尽抽，能用尽用，以用促抽”、“低浓瓦斯就地利用，高浓瓦斯联网共享”。矿区现有地面抽采泵站 15 座，装备抽

采泵 104 台, 额定装机功率 78 450 kW, 装机抽采能力 54 388 m³/min。

淮南矿区瓦斯综合利用途径主要有 3 种: ①高浓度瓦斯(浓度 30% 以上), 主要用于高浓机组发电; ②低浓度瓦斯(浓度 10%~30%)主要用于低浓机组发电, 部分用于煤泥烘干; ③浓度 10% 以下超低浓瓦斯主要用于蓄热氧化。目前, 矿区共有发电机组 90 台, 总装机功率 68 034 kW。其中, 高浓瓦斯机组 9 台, 装机规模 13 134 kW; 低浓瓦斯发电机组 81 台, 装机规模 54 900 kW。主力机型基本为集装箱式, 便于根据各矿气源丰欠情况及时调配。

丁集矿率先建设超低浓度(0.2%~1.2%)瓦斯蓄热氧化项目(图 7), 装备 2 台艾森曼瓦斯氧化炉, 配套一台 1 000 kW 背压式汽轮发电机组和一台 3 000 kW 凝汽式汽轮发电机组, 2019 年投入运行以来运行良好。丁集矿是淮南矿区瓦斯综合利用效果最好的矿井, 真正实现了抽采瓦斯“全资源”利用, 矿井抽采的煤层气利用率由原来的 56% 提高到 95% 以上, 每年

可以利用低浓度瓦斯量 1 800 万 m³, 年发电量 2 100 万 kWh 左右。实现了节能环保, 减少 NO_x、SO₂ 等气体的排放, 保护环境又起到节能效果, 每年可减少 CO₂ 的排放量约 25 万 t。

3 技术发展与思考

3.1 存在问题

煤层气开发六大关键技术保障了淮南矿区安全生产, 提高了煤、煤层气产量与煤层气利用水平, 但面对松软低渗煤层赋存及深部煤层瓦斯动力灾害复杂性和多变性, 地面水平井水力压裂煤储层改造技术作业成本高、产量低、范围小、采动井存在破断风险、超低浓度煤层气利用率低等系列问题, 主要有:

1) 地面水平分段压裂井煤层气抽采技术: 间接储层压裂的水平井轨迹控制不同于传统在目标层内钻孔导向, 较页岩气水平井和薄储层水平井导向技术难度大, 导向仪器、技术和方法需要突破; 深部煤储层改造技术作业成本仍很高, 对比投入产气量却较低; 压裂裂缝监测精度和准确度低, 不能满足储层压裂改造评价的需求; 压裂液体系不满足低伤害且规模改造的需求^[28-29]; 尚未建立水平井压裂抽采效果评价技术与标准体系。

2) 采动区地面钻井煤层气抽采技术: 受采动影响, 部分钻井在某些位置易产生断裂, 直接影响抽采效率和抽采时间, 通过“十三五”的研究和示范, 在一定程度上解决了这一难题, 但在采场水平应力较大的区域, 仍然对采动区地面钻井构成较大威胁, 有必要对井身结构进一步研究改进。

3) 水力化强化卸压增透技术: 水力化强化卸压增透技术已在煤矿广泛应用, 但在低渗煤层效果不明显, 难以适应开采煤层条件的复杂变化; 智能化水平总体偏低, 技术协同性不足, 尚未实现精准卸压增透, 影响了煤层气的高效抽采。

4) 煤与煤层气协调开发技术: 仍以单项气资源开发为主, 虽在个别矿井或区域单井产量新高, 但整体上在协调开发技术改进与储备方面存在一定不足, 难度较大, 给煤层气产业高质量发展带来挑战。

5) 煤层气全浓度利用技术: 我国煤矿采掘活动每年产生的煤层气约 300 亿 m³, 每年抽采利用煤层气约 50 亿 m³, 剩余约 250 亿 m³ 的煤层气尚未得到利用^[30]。煤矿中煤层气抽采量中约 80% 以上属于采空区或采动卸压区抽出的, 其中 70% 以上煤层气浓度低于 30%, 甚至有相当一部分抽采煤层气浓度低

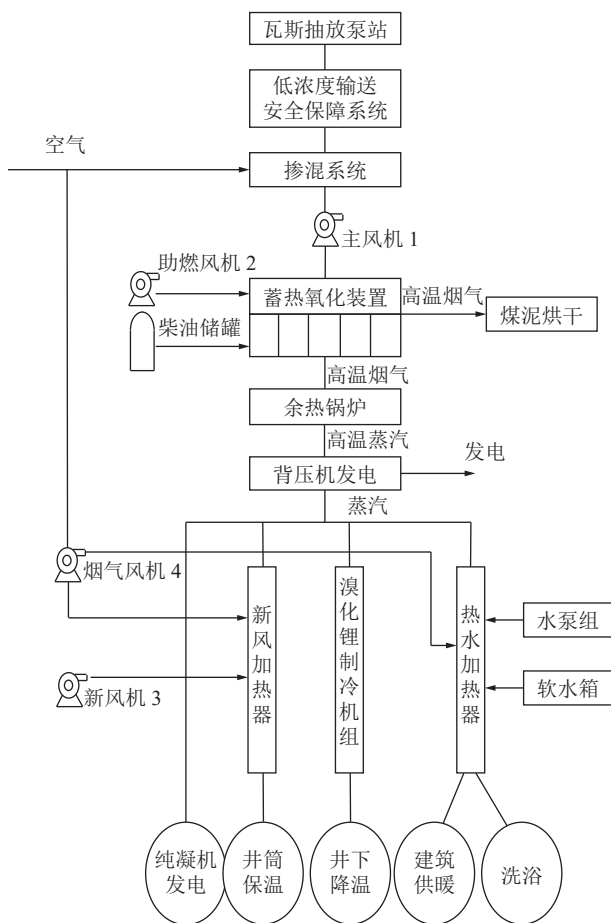


图 7 低(超低)浓度瓦斯蓄热氧化能量梯级利用工艺流程

Fig.7 Technological process of cascade utilization of low (ultra-low) concentration gas heat storage and oxidation energy

于10%^[31],低浓、超低浓煤层气是制约其利用重中之重。

3.2 发展方向

3.2.1 深部煤层气精准地质导向、超大规模高效储层体积改造、抽采效果评价技术

围绕碎软低透煤层条件,研究顶、底板水平井精准地质导向、钻进、完井、分段压裂、抽采效果评价等技术,提高水平井产气量和消突范围。

1) 精准地质导向。构建水平井钻进过程地质导向动态模型,研究水平段实钻地层动态识别与精准定位,以及钻后测井系列优化选取及精准定层技术。

2) 超大规模高效储层体积改造技术。开展深部煤层可压性综合评价技术、水平段簇间距优化技术、缝网体积表征技术研究,提升单段改造效果;开展地质—工程—一体化建模和施工工艺优化技术研究,优化注入排量、砂比、液体黏度随注入时机的调整等参数;研发低成本、低伤害、可变黏、可重复利用压裂液,满足大砂量携砂和低前置液比造缝需求。

3) 抽采效果评价技术。研究地面井抽采效果评价方法,建立评价指标体系,研发压裂裂缝随钻检测技术与装置。

3.2.2 采动区地面井稳定持续抽采技术

1) 利用L型、S型等复杂井型的钻进轨迹定向的特征,避开难以钻进或防护的构造区或含水层,研制适合定向井钻进的配套设备、固井工艺及防塌钻井液,缓解水平井段塌孔现象,形成安全可靠的完井技术及配套装备。

2) 针对富含水、岩性多变、高地应力等复杂地质条件及高强度开采影响条件,研制适合的钻进配套装备、新型布井、完井技术、套管筛管护孔材料与装备,实现生产井段“破而不断、断而不堵”。

3) 采用快速全景实时或三维反演探测技术,明确采动区地面井变形破坏方式及原因,针对性提出改造修复方案,实现采动井规模化高效持续抽采。

3.2.3 井下大面积智能水力化增透技术

1) 针对分段水力压裂技术,研制井下绿色智能分段加砂水力压裂高效抽采技术、智能化超高压水力割缝+致裂联合增透技术、纳米材料能量源可控冲击波储层致裂技术、智能造穴泄压增渗技术等,开发煤层特征参数智能感知与分析技术,实现煤层内精准造穴泄压。

2) 针对超高压水力割缝卸压增渗技术,研究形成煤层区域缝槽智能设计方法、深孔切缝多级传导定向技术,研发钻切协同作业自动调控技术及装置及切缝参数智能匹配、切缝过程自适应动态协调控

制、切缝参数反馈评价、智能算法及平台,实现大区域精准智能割缝。

3.2.4 “一井多用”协同抽采煤层气技术

针对碎软突出煤层群中煤层气开发,研发可用于保护层预抽(顶板水平井)、保护层工作面推进中被保护层卸压煤层气抽采、采空区煤层气抽采的采前、采中、采后“一井多用”技术,从而实现压裂井→采动区井→采空区井煤层气开发的连续使用,最大限度抽采煤层群的煤层气,如图8所示。

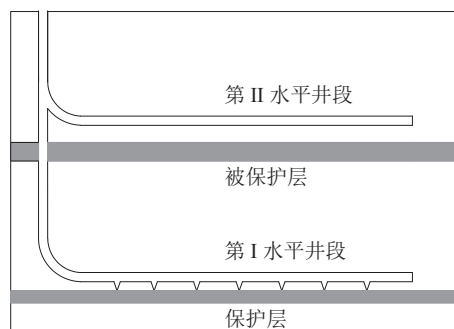


图8 “一井多用”技术

Fig.8 One-hole multi-purpose technology

3.2.5 全浓度煤层气综合利用技术

系统研究1%~3%、3%~9%、10%~30%以及>30%浓度瓦斯利用技术,破解不同浓度区间瓦斯利用技术难题,实现全浓度瓦斯安全高效利用。

1) 1%~3%浓度瓦斯蓄热氧化技术。构建低浓度瓦斯蓄热氧化数学模型,建立低浓度瓦斯蓄热氧化实验装置三维模型,研究蜂窝蓄热体对气流流动的影响,开展蓄热材料热疲劳试验,研发安全高效的低浓度瓦斯蓄热氧化技术,提高低浓度瓦斯蓄热氧化装置甲烷转化率和装置寿命。

2) 3%~9%浓度瓦斯安全稳定燃烧技术。针对爆炸极限范围内瓦斯安全稳定燃烧的技术难题,研究不同浓度、流量、压力、温度、湿度、杂质含量等情况下,直接燃烧不同阶段特性和直燃技术适用的甲烷浓度范围和安全不爆炸边界条件;开展安全点火、脱火、回火、驻燃、防爆特性研究,研发直燃过程控制技术和装备,形成成套低浓度甲烷安全稳定直接燃烧技术装备。

3) 10%~30%浓度瓦斯利用提质增效技术。围绕提质增效目标,开展余热降温脱水、在线阻火清洗及气源稳定控制技术,构建新型低浓度瓦斯发电技术体系,探索10%~30%浓度瓦斯新型高效低耗利用技术。

4) >30%浓度瓦斯转化提纯技术。开展甲烷化学转化制氢、合成氨过程和物理提纯机理研究,研发

转化控制技术和装备,实现高效化工转化及浓缩提纯,提高30%以上瓦斯利用效益。

4 结 语

随着煤矿开采深度、强度的增加,碎软低透气性煤层的煤层气安全高效抽采已成为煤炭行业必须面对和亟需解决的问题,必须坚持地面先行、井下补充的战略,且需要借助智能化工具,引进消化吸收创新国内外先进适用技术,实现工程连续施工,才能突破煤矿区“软煤、低透、高应力”条件下煤层气开发和煤矿瓦斯治理难题。

参考文献(References):

- [1] 秦勇, 吴建光, 李国璋, 等. 煤层气开采模式探索及先导工程示范[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(7): 2513–2522.
QIN Yong, WU Jianguang, LI Guozhang, *et al.* Patterns and pilot project demonstration of coal measures gas production[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2513–2522.
- [2] 张道勇, 朱杰, 赵先良, 等. 全国煤层气资源动态评价与可利用性分析[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(6): 1598–1604.
ZHANG Daoyong, ZHU Jie, ZHAO Xianliang, *et al.* Dynamic assessment of coalbed methane resources and availability in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6): 1598–1604.
- [3] 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.
- [4] 杨陆武, 崔玉环, 王国玲. 影响中国煤层气产业发展的技术和非技术要素分析[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(8): 2400–2411.
YANG Luwu, CUI Yuhuan, WANG Guoling. Analysis of technical and regulational aspects affecting China CBM progresses[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2400–2411.
- [5] 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.
- [6] 贾建称, 陈晨, 董夔, 等. 碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂高效抽采煤层气技术研究[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(12): 1873–1881.
JIA Jiancheng, CHEN Chen, DONG Kui, *et al.* Research on the technology of high efficient to drainage CBM by multistage fracturing in horizontal well along the roof of broken soft and low permeability coal seam[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(12): 1873–1881.
- [7] 安士凯, 徐翀, 陈永春. 淮南矿区卸压煤层气井变形破坏特征研究[J]. *煤炭工程*, 2016, 48(10): 88–91.
AN Shikai, XU Chong, CHEN Yongchun. Deformation and destruction characteristics of released coal-bed methane well in Huainan mine area[J]. *Coal Engineering*, 2016, 48(10): 88–91.
- [8] 赵干, 廖斌琛. 淮南矿区煤层气开发利用现状及展望[J]. *中国煤层气*, 2007, 4(4): 12–15.
ZHAO Gan, LIAO Binchen. Current status and prospect of CMM development and utilization in Huainan Coal Mining Area[J]. *China Coalbed Methane*, 2007, 4(4): 12–15.
- [9] 申宝宏, 刘见中, 雷毅. 我国煤矿区煤层气开发利用技术现状及展望[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(2): 1–4.
SHEN Baohong, LIU Jianzhong, LEI Yi. Present status and prospects of coalbed methane development and utilization technology of coal mine area in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(2): 1–4.
- [10] 张芬娜, 张皓, 綦耀光, 等. 共采技术现状与在煤系气共采中的适应性分析[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(S1): 203–208.
ZHANG Fenna, ZHANG Hao, QI Yaoguang, *et al.* Adaptability analysis and co-exploration technology status summary in coal-bearing gas[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(S1): 203–208.
- [11] 许耀波, 朱玉双, 张培河. 紧邻碎软煤层的顶板岩层水平井开发煤层气技术[J]. *天然气工业*, 2018, 38(9): 70–75.
XU Yaobo, ZHU Yushuang, ZHANG Peihe. Application of CBM horizontal well development technology in the roof strata close to broken-soft coal seams[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(9): 70–75.
- [12] 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, 169.
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 and Exploration*, 2020, 48(6): 155–160, 169.
- [13] 李彬刚. 淮北芦岭井田煤层气地面抽采技术研究[J]. *煤炭工程*, 2017, 49(7): 90–92.
LIN Bingang. Research on surface CBM drainage technology in Luling coal field of Huaibei[J]. *Coal Engineering*, 2017, 49(7): 90–92.
- [14] 唐永志. 淮南矿区煤炭深部开采技术问题与对策[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(8): 19–24.
TANG Yongzhi. Technical problem and countermeasures to deep coal mining in Huainan Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(8): 19–24.
- [15] 程桦, 唐彬, 唐永志, 等. 深井巷道全断面硬岩掘进机及其快速施工关键技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(9): 3314–3324.
CHENG Hua, TANG Bin, TANG Yongzhi, *et al.* Full face tunnel boring machine for deep-buried roadways and its key rapid excavation technologies[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(9): 3314–3324.
- [16] 陈建, 贾秉义, 董瑞刚, 等. 煤矿井下水力压裂加骨料增透瓦斯抽采技术应用[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(2): 90–94.

- CHEN Jian, JIA Bingyi, DONG Ruigang, *et al.* Application of hydraulic fracturing and aggregate injecting for permeability enhancement in underground coal mine gas extraction[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(2): 90–94.
- [17] 曹建军. 超高压水力割缝卸压抽采区域防突技术应用研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(6): 88–94.
- CAO Jianjun. Application research on regional outburst prevention technology of ultra - high pressure hydraulic slotpressure in relief drainage area[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(6): 88–94.
- [18] 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.
- [19] 张永将, 陆占金. 超高压水力割缝煤层增透成套装置研制及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(10): 97–104.
- ZHANG Yongjiang, LU Zhanjin. Development and application of complete set of anti-reflection equipment for ultra-high pressure hydraulic seam cutting[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(10): 97–104.
- [20] 甘林堂. 地面钻井抽采保护层采动区卸压瓦斯技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(11): 110–115.
- GAN Lintang. Study on pressure relief gas draiage technology in mining area of ground drilling in protected layer[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(11): 110–115.
- [21] 孙东玲, 孙海涛. 煤矿采动区地面井瓦斯抽采技术及其应用前景分析[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(6): 49–52,39.
- SUN Dongling, SUN Haitao. Application prospect analysis on gas drainage technology of surface well in mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(6): 49–52,39.
- [22] 孙海涛. 成庄煤矿采空区煤层气地面井抽采试验[J]. *矿业安全与环保*, 2014, 41(1): 1–3,19.
- SUN Haitao. Test of gas drainage from gob area by surface wells in Chengzhuang Coal Mine[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2014, 41(1): 1–3,19.
- [23] 陈 建, 李 朝, 张臻豪. 淮南矿业集团防治煤与瓦斯突出技术及管理经验[J]. *中国安全生产科学技术*, 2014, 10(S1): 147–152.
- CHEN Jian, LI Chao, ZHANG Zhenhao. Huainan mining group, prevention and cure of coal and gas outburst technology and management experience[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2014, 10(S1): 147–152.
- [24] 张臻豪, 刘 涛. 深厚表土层高地应力矿井地面钻井抽采瓦斯技术[C]//第三届全国煤矿机械安全装备技术发展高层论坛暨新产品技术交流会议论文集, 徐州: 中国矿业大学出版社, 2012: 305–309.
- [25] 童 碧, 许 超, 刘 飞, 等. 淮南矿区瓦斯抽采中以孔代巷技术研究及工程实践[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(4): 33–39.
- TONG Bi, XU Chao, LIU Fei, *et al.* Technology research on borehole in place of roadway and its engineering practice in gas drainage of Huainan Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(4): 33–39.
- [26] 童 碧, 许 超, 王 鲜, 等. 淮南矿区复杂顶板高位定向孔复合排渣钻进技术[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(S1): 140–143.
- TONG Bi, XU Chao, WANG Xian, *et al.* ompound slag removal technology of high directional drilling for complex roof in Huainan Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(S1): 140–143.
- [27] 李泉新, 石智军, 田宏亮, 等. 我国煤矿区钻探技术装备研究进展[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(2): 1–6,12.
- LI Quanxin, SHI Zhijun, TIAN Hongliang, *et al.* Progress in the research on drilling technology and equipment in coal mining areas of China[J]. *Coal Geology amp; Exploration*, 2019, 47(2): 1–6,12.
- [28] 徐凤银, 闫 霞, 林振盘, 等. 我国煤层气高效开发关键技术研究进展与发展方向[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(3): 1–14.
- XU Fengyin, YAN Xia, LIN Zhenpan, *et al.* Research progress and development direction of key technologies for efficient development of coalbed methane in China[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2022, 50(3): 1–14.
- [29] 杨陆武. 难动用煤层气资源的高产开采技术研究—论煤层气资源的特殊性及其开发工程中的“窗-尾效应”[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 32–39.
- YANG Luwu. Produce high rate gas from poor CBM reservoir—Study on CBM resource types and “Window-Longtail Effects” of reservoir during delivering gas[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 32–39.
- [30] 孙景来. 煤与煤层气协调开发机制研究[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(10): 62–65,70.
- SUN Jinglai. Study on coordinative development mechanism of coal and coalbed methane[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(10): 62–65,70.
- [31] 熊云威. 煤矿区低浓度煤层气梯级利用技术研究进展[J]. *矿业安全与环保*, 2018, 45(4): 121–124.
- XIONG Yunwei. Research progress on the cascade utilization technology of low concentration cbm in coal mine area[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2018, 45(4): 121–124.