



近距离煤层群多分支水平井井孔对接控压抽采技术

陈亮 程志恒 罗欣 于宏阳 张喆睿 王朋 王向东

引用本文:

陈亮, 程志恒, 罗欣, 等. 近距离煤层群多分支水平井井孔对接控压抽采技术[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(S1): 42–56.
CHEN Liang, CHENG Zhiheng, LUO Xin. Multi-branch horizontal well hole docking pressure control extraction technology for close distance coal seam group[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(S1): 42–56.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0201>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

对称多分支水平井煤层气水电模拟试验研究

Hydroelectric simulation test of coalbed methane in symmetric multi branch horizontal wells

煤炭科学技术. 2022, 50(10): 135–142 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f546e85b-4cfc-40be-a0ed-5bc104f857e8>

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>

叠层多分支水平井精准建造陷落柱堵水塞技术

Technology of accurately constructing collapse column water plugging plug in laminated multi branch horizontal wells

煤炭科学技术. 2022, 50(7): 244–251 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a8271762-7c31-444a-a722-f7a9ab2d4ba9>

淮南矿区煤层顶板分段压裂水平井抽采技术及效果研究

Study on technology and effect of gas extraction in horizontal well with segmental hydraulic fracture in roof of coal seam in Huainan mining area

煤炭科学技术. 2024, 52(4): 155–163 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1937>

煤层气水平井井型结构分析及钻完井技术优化

Analysis on well type structure and optimization of associated drilling technology of CBM horizontal wells

煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0ba95d16-0798-4366-b6f0-3029133ac398>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

陈亮,程志恒,罗欣,等. 近距离煤层群多分支水平井井孔对接控压抽采技术[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(S1): 42–56.

CHEN Liang, CHENG Zhiheng, LUO Xin, *et al.* Multi-branch horizontal well hole docking pressure control extraction technology for close distance coal seam group[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(S1): 42–56.

近距离煤层群多分支水平井井孔对接控压抽采技术

陈亮¹,程志恒¹,罗欣²,于宏阳¹,张喆睿¹,王朋¹,王向东³

(1. 华北科技学院 矿山安全学院, 河北 廊坊 065201; 2. 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院 北京 100083;

3. 华晋焦煤有限责任公司 山西 吕梁 033000)

摘要:为解决近距离煤层群准备区地面井抽采时间长、井下钻孔难以衔接导致矿井抽-掘-采整体失衡、产能受限的问题,以山西吕梁沙曲井田为例,通过理论分析、数据统计得出井田地地质构造、水动力条件对煤层气成藏的影响,煤层气储层特征及含气性分布。基于不同条件下多分支水平井抽采效果数值模拟分析确定了分支形态、长度、间距、数量及角度的合理参数;建立了多分支水平井与井下钻孔对接的三维数学模型,给出二者相对距离及角度的解析解,并根据钻井测斜、综合录井保障井身轨迹控制和精准钻进,结合井下深孔固孔工艺及装置,确立了井孔高效对接的整套流程,进而提出先正压后负压的控压抽采工艺,且研发了孔口高压缓冲罐、多级气渣分离罐成套装置,并阐明其关键参数及工作原理。同时,构建了该技术应用转化效果的综合评价函数,确立由准备区转向生产区过程的安全、效益及转化三维动态评价指标及临界值。研究表明:①确定羽状、混合型分支井分别适用于准备区和生产区,分支长度300~400 m,分支数量为4~8个、分支与主支夹角30°为宜;对接抽采前期正压为0.5 MPa,后期抽采负压为20 kPa;②五采区试验区内井孔对接抽采的单井日产量达到1.3万 m³/d,是常规井的3.3倍;区内安全指标均降至临界值以下,3+4号与5号煤层同步消突;吨煤钻孔量较原来降低55%,准备区 π_2 和生产区转化率 π_s 分别为93%、90%,整体转化率为83.7%,煤层气产能提高了465万 m³/a,解放优质煤量50万 t。

关键词: 近距离煤层群;多分支水平井;井孔对接;控压抽采;综合评价

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)S1-0042-15

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

CHEN Liang¹, CHENG Zhiheng¹, LUO Xin², YU Hongyang¹, ZHANG Zherui¹, WANG Peng¹, WANG Xiangdong³

(1. School of Mine Safety, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China; 2. School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3. Huajin Coking Coal Co., Ltd., Lyuliang 033000, China)

Abstract: In order to solve the problems of long extraction time of surface wells in the preparation area of close distance coal seam group and difficult connection of underground boreholes, which lead to the overall imbalance of mine extraction-excavation-mining and limited production capacity. Taking Shaqu well field in Lyuliang city, Shanxi province as an example, through theoretical analysis and data statistics, the geological structure of coalbed methane accumulation in the well field, the influence of hydrodynamic conditions, coalbed methane reservoir characteristics and gas-bearing distribution are obtained. Based on the numerical simulation analysis of the extraction effect of multi-branch horizontal wells under different conditions, the reasonable parameters of branch shape, length, spacing, number and angle are determined. A three-dimensional mathematical model for the docking of multi-branch horizontal wells and downhole boreholes was es-

收稿日期: 2025-01-12

责任编辑: 朱恩光

DOI: 10.12438/cst.2025-0201

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(52204133); 河北省自然科学基金面上资助项目(E2024508055); 廊坊市科技支撑计划资助项目(2023013099)

作者简介: 陈亮(1987—),男,河南信阳人,副教授,博士后。E-mail: sezichan@126.com

通讯作者: 罗欣(1989—),女,河南焦作人,博士研究生。E-mail: luoxin8262008@qq.com

tablished, and the analytical solutions of the relative distance and angle between the two were given. According to the drilling inclinometer, comprehensive mud logging to ensure wellbore trajectory control and precise drilling, combined with the downhole deep hole cementing process and device, the whole process of efficient docking of boreholes was established, and then the pressure-controlled extraction process of positive pressure first and negative pressure second was proposed. The complete set of device for high-pressure buffer tank and multi-stage gas-slag separation tank was developed, and its key parameters and working principle were clarified. At the same time, the comprehensive evaluation function of the application and transformation effect of the technology is constructed, and the three-dimensional dynamic evaluation index and critical value of safety, benefit and transformation from the preparation area to the production area are established. The results show that: ①It is determined that the mixed pinnate and mixed branch wells are suitable for the preparation area and the production area respectively, the branch length is 300 ~ 400 m, the number of branches is 4 ~ 8, and the angle between the branch and the main branch is 30°. The positive pressure in the early stage of docking extraction is 0.5 MPa, and the negative pressure in the later stage is 20 kPa; ②The daily output of single well in the test area of the fifth mining area reached 13 000 m³/d, which was 3.3 times that of conventional wells. The safety indexes in the area are reduced to below the critical value, and the No. 3+4 and No.5 coal seams are synchronously eliminated. The drilling volume per ton of coal was reduced by 55 % compared with the original, the π_2 in the preparation area and the conversion rate π_2 in the production area were 93% and 90%, respectively. The overall conversion rate was 83.7%, the production capacity of coalbed methane is increased by 4.65 million m³/a, and 0.5 million tons of high-quality coal are liberated simultaneously.

Key words: close distance coal seam group; multi-branch horizontal well; well-hole docking; pressure control extraction; comprehensive evaluation

0 引 言

煤炭是我国的主体能源,在能源保供中发挥“压舱石”和“稳定器”作用^[1]。目前,我国高瓦斯及煤与瓦斯突出矿井占比 34%,随着开采深度增加会继续升高^[2]。进入近距离煤层群开采环境,瓦斯涌出呈现一层开采、多层卸压的特点,传统单一地面井或井下钻孔抽采无法满足多层协同高效抽采消突的要求^[3],尤其在煤炭开采的规划区和准备区,由于地面井抽采时间长、井下钻孔难以衔接导致矿井抽-掘-采整体失衡、产能受限的问题凸显,故开展地面井与井下长钻孔对接连抽技术研究意义重大。

多分支水平井技术发源于上世纪 50 年代石油开发领域,因其“井控面积广、产气量大”等特点逐渐被引入煤层气抽采^[4-5],先后在加拿大西部煤田、美国圣胡安盆地及澳大利亚昆士兰地区成功应用^[6]。2004 年我国第 1 口煤层气多分支水平井在山西大宁煤矿实践成功,随后在宁武盆地^[7]、沁水盆地^[8-9]、鄂尔多斯盆地^[10-13]等区块陆续进行工程应用,在井型结构、钻井液防漏、钻完井方面形成一系列钻完井成套工艺。同时诸多学者基于数值模拟及理论分析对多分支水平井的对称性结构^[14-15]、分支数量等参数^[16-18]进行分析和确定。近年来,在鄂尔多斯盆地东缘、安徽“两淮”煤田等煤层群开采条件下的多分支水平井煤层气抽采技术发展迅速,例如水平井煤层钻进轨迹控制^[4,19]、多分支水平井分段压裂^[10,20]、压裂液振荡解堵^[21]等关键技术。此外,在多分支水平井对接方面研究多集中在双水平井、水平井与普

通立井、U 型井之间,主要采用 SAGD^[22]、MCT^[23]及 RMRS^[24] 3 种磁导向装备与系统,可实时测算对接参数并保障井身钻进轨迹控制。综上,前人研究多集中在多分支水平井井型形态结构、钻完井工艺装备以及井井之间对接,但针对多分支水平井与井下定向长钻孔对接技术、对接抽采工艺配套装备开发鲜有研究,且其效果综合评价不成体系。

笔者基于近距离煤层群煤层气成藏特点、储层特征及含气性分布,从多分支水平井形态设计、井孔测距定位及对接方法、控压抽采工艺装备 3 方面入手,系统性研究多分支水平井与井下定向钻孔高效对接抽采关键技术与装备,确立井孔对接全流程及过程关键参数,同时建立转化效果综合评价模型,可为同类型条件煤气共采提供依据。

1 目标区煤层气地质背景

沙曲井田地处山西省柳林县,属于鄂尔多斯盆地东缘的河东煤田,煤层气资源丰富,占全省 21.2%,是山西省煤矿区煤层气开发的“甜点区”。

1.1 构造水文地质条件

该井田位于晋西褶皱带中部,整体呈由东向西北缓倾斜的单斜构造。北部为聚财塔地堑,东部为王家会背斜、中阳向斜,西邻黄河,由东向西发育有宽缓的吴堡-柳林鼻状构造。整体构造简单,地层倾角平缓,一般为 3°~7°,局部地段受小褶曲及断层影响可达 18°~23°,煤层埋深西深东浅。

沙曲井田处于柳林泉岩溶水系统,如图 1 所示,其主要含水层为煤系地层下方的奥陶系马家沟组灰

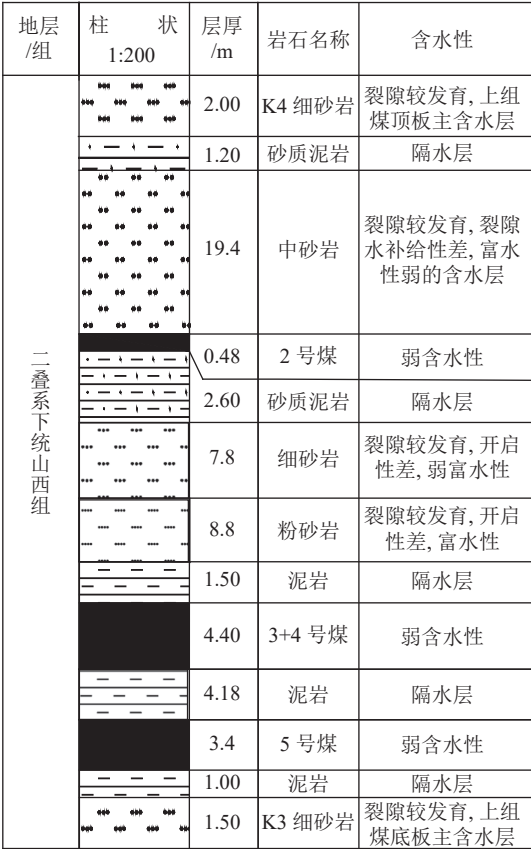


图 1 沙曲井田上组煤水文综合柱状图

Fig.1 Hydrological comprehensive histogram of upper coal group in Shaqu minefield

岩,富水性强,其次为石炭系上统太原组灰岩(L1~L5)岩溶、裂隙承压水含水层组(细、中、粗粒

砂岩),赋存裂隙潜水-承压水,岩溶裂隙不发育,且易被岩石碎屑充填。井田煤系地层为含、隔水层相互叠置的组合结构,隔水层多为泥岩和砂质泥岩,致密性好,厚度较大,地下水的整体补给迳流条件差,富水性一般较差,水动力条件整体上呈现水流封闭作用,利于煤层气保存。

1.2 储层物性特征

井田可采煤层为山西组(2、3、4、5号煤层)及太原组(6、8、9、10号煤层),各煤层平均厚度为0.8~4.3 m,其埋深自东向西,逐渐变深(由83 m至810 m),从山西组至太原组,煤质逐步由JM、SM到SM、PS,其中,4号煤为优质主焦煤,有“中国瑰宝”之称。沙曲一号矿井在井田北翼,3号煤层与4号煤层合并,属于典型的近距离煤层群突出矿井,设计产能5.0 Mt/a,2024年度矿井绝对瓦斯涌出量为225.3 m³/min,相对涌出量42.83 m³/t。

1.2.1 含气量

见表1,上组煤地勘期间测得瓦斯含量为6.05~15.42 m³/t,瓦斯压力为0.74~2.40 MPa,煤体吸附常数a值为24.57~32.76 m³/t,b值为0.28~0.73 MPa⁻¹,含量梯度为2.06~2.15 m³/t/100 m,其含气饱和度为21.4%~56.9%,属于欠饱和状态,受井田东翼王家会背斜影响,以及北部聚财塔大断裂影响,井田整体煤层瓦斯含量分布呈西高东低、南高北低的特点。

表 1 上组煤层瓦斯基础参数

Table 1 Upper group coal seam gas basic parameters

煤层编号	瓦斯含量/ (m ³ ·t ⁻¹)	瓦斯压力/ MPa	吸附常数a/ (m ³ ·t ⁻¹)	吸附常数b/ MPa ⁻¹	含气饱和度/ %	瓦斯压力增长梯度/ (MPa·100 m ⁻¹)	瓦斯含量增长梯度/ [m ³ ·(t·100 m) ⁻¹]
2号	7.92~12.10	0.74~1.85	25.09~25.53	0.62~0.73	31.7~47.5	0.44	2.06
3+4号	6.05~14.59	0.97~2.15	24.57~25.62	0.41~0.56	24.6~56.9	0.28	2.02
5号	6.36~15.42	1.41~2.40	31.19~32.76	0.28~0.29	21.4~47.1	0.24	2.15

1.2.2 渗透率

上组煤层渗透性表征参数见表2,煤层透气性系数为1.99~3.78 m²/(MPa²·d),均可进行煤层气开发,其中3+4号煤层透气性系数较好;煤层钻孔瓦斯流量衰减系数为0.052~0.038 d⁻¹,属于可抽采煤层。煤层孔隙结构中,微孔与小孔体积占比66.31%~71.74%,中孔占比14.01%~17.97%,大孔占比11.61%~17.27%,其中3+4号煤层中、大孔较发育,微、小孔孔隙体积占主导,说明上组煤吸附性强、煤层气主要以吸附态为主,故煤储层增透强化可进一步提高煤层气抽采量。

表 2 上组煤层渗透性表征参数

Table 2 Upper group coal seam permeability characterization parameters

煤层编号	煤层透气性系数/ [λm ² ·(MPa ² ·d) ⁻¹]	渗透率/ mD	孔隙率/%
2号	2.12~2.17	0.052~0.054	3.56
3+4号	3.52~3.78	0.088~0.095	2.68
5号	1.99~2.23	0.050~0.056	5.52

1.2.3 储层压力

沙曲井田上组煤层埋深小于1 000 m,压力系数0.53~1.18,上组煤储层压力为2.91~9.9 MPa,储层

压力梯度为 0.41 ~ 1.12 MPa/100 m, 整体上属于欠压—正常地层, 有利于煤层气开发。此外, 覆岩结构为典型泥砂岩交互地层, 各煤层上方均有泥质软岩覆盖, 有利于煤层气封存, 储气性较好。

1.3 煤层气开发现状

目前, 晋煤蓝焰公司、中联煤层气公司、华晋煤层气公司在沙曲一矿、二矿井田范围内共施工煤层气井 342 口(图 2)。根据煤层气赋存条件及生产规划可分为普通地面井(规划区或浅埋区为主)、L 型井(准备区或煤层赋存稳定区为主)及防突压裂井(深埋区及突出危险严重区)。总体概况如下: 1) 晋煤蓝焰公司施工地面煤层气井 166 口, 其中, 直井 140 口(含 12 口防突井), L 型井 26 口, 均在沙曲二矿井田内; 2) 中联煤层气公司: 共施工地面煤层气井 174 口。其中, 在沙曲一矿井田内施工 34 口(L 型井 15 口、地面井 19 口); 在沙曲二矿井田内 140 口(直井 111 口、防突压裂井 29 口)。3) 华晋煤层气公司施工地面井 1 口、L 型井 1 口。

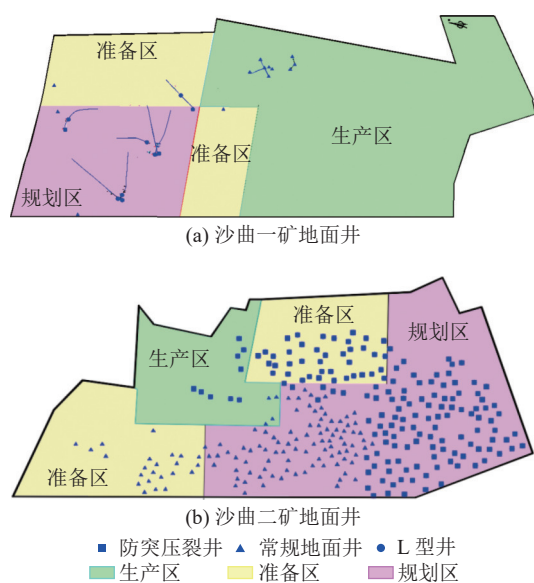


图 2 沙曲井田已有地面井分布

Fig.2 Distribution of surface wells in Shaqu minefield

近 5 年来, 沙曲井田晋煤蓝焰公司地面井累计抽采瓦斯纯量 3 236.3 万 m^3 , 中联煤层气公司抽采瓦斯纯量 15 244.2 万 m^3 , 华晋煤层气公司为 1 569.7 万 m^3 , 3 家公司共计抽采量 20 050.2 万 m^3 , 但平均单井日产量仅为 3 211 m^3/d , 单井抽采量不佳、有效抽采范围较小且多煤层协同联抽性差, 此外, 由于煤、气产权分离, 煤层气公司的地面井设计较少考虑煤、气安全高效协调共采。

但从采煤时空顺序及安全条件角度分析, 根据《防治煤与瓦斯突出细则》(2019)及《煤矿瓦斯抽采

达标暂行规定》(2011)相关要求: 须将煤层瓦斯含量、压力降至临界值以下, 原始煤体由规划区逐步转入生产区, 方可进行采掘生产。由于地面井单井抽采影响范围有限、衰减期快、整体抽采时间长等因素, 导致井下煤炭开采的生产区和准备区抽采达标煤量不足、消突时间长, 造成矿井抽—掘—采衔接失衡、优质煤炭产能被制约的局面, 因此, 亟需一种基于井孔对接抽采的多煤层区域化消突技术来解决该问题。

2 多水平多分支水平井井孔对接抽采技术

地面多分支水平井主支和分支在煤层中广泛延伸时, 可沟通煤层割理微裂隙和裂缝系统, 增加井眼在煤层中的波及面积和卸压区域, 然后与井下千米钻孔对接转入井下抽采, 提升煤层气抽采量及煤层消突效率, 其对接抽采理论、关键技术参数及配套装备有待进一步研发。

2.1 分支形态及井身结构优化

2.1.1 分支形态优化

基于羽状叶脉、平行叶脉和二者混合叶脉特征, 将沙曲井田 3+4 号煤层多分支水平井形态设计为 3 种方案(如图 3), 3 种方案对应的主支长度为 1 100 m, 其中羽状叶脉型分支为 6 个, 分支长度、角度及间距分别为 240 m、 20° 、150 m; 混合型分支为 6 个, 分支长度、角度及间距分别为 240 m、 20° 、300 m, 主支间距为 160 m。

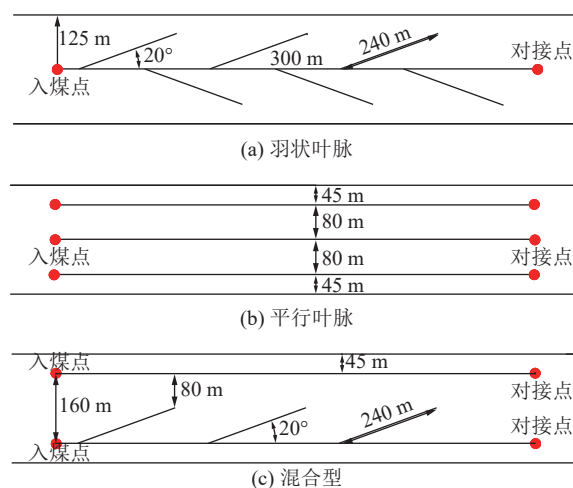


图 3 3+4 号煤层仿生多分支水平井型布置方案

Fig.3 No. 3+4 coal seam bionic multi-branch horizontal well layout scheme

根据 3+4 号煤层及瓦斯赋存条件(见表 3), 采用 Comsol 数值模拟软件对 3 种形态水平井布置方案抽采效果进行模拟预测, 通过不同抽采时长下煤层瓦斯压力分布云图, 图中黑色实线为瓦斯压力达

表 3 3+4 号煤层物理参数
Table 3 No.3+4 coal seam physical parameters

物理参数	符号	值
煤体杨氏模量/MPa	E	2 713
煤骨架杨氏模量/MPa	E_s	8 469
煤体密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	ρ	1 370
煤体初始渗透率/ m^2	k_0	$0.065\times\text{e}^{-15}$
瓦斯动力黏度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	μ	1.84
Langmuir b 值/ MPa^{-1}	b	0.57
Langmuir 体积/($\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)	a	0.028 7
抽采负压/MPa	p_i	-0.01
泊松比	ν	0.35
煤体初始孔隙率	φ_0	0.037

标(<0.74 MPa)分界线,黑色虚线为工作面巷道布置区域,对比分析 3 种布置方案对应有效抽采范围、降压及均匀性等指标。

如图 4 所示,当抽采时间为 240 d 时,平行叶脉型、混合型的主/分支钻孔间煤层瓦斯压力分别降至 0.8 MPa 与 0.91 MPa,羽状叶脉型抽采控制区域煤体瓦斯卸压不均匀,局部仍高达 1.15 MPa;抽采时间达 730 d 时,平行叶脉型、混合型抽采控制区域瓦斯压力降至 0.74 MPa,其两侧 1 100 m 巷道进入有效消突范围,羽状叶脉型抽采影响区的巷道处瓦斯压力仍>0.74 MPa,且卸压最不均匀;抽采时间达 1 095 d,3 种布置方案对应的影响范围扩大至一个整体,对应瓦斯抽采有效影响半径达到 52 m,平行叶脉型有效影响区域瓦斯压力均值降至 0.4 MPa;混合型对应瓦斯压力降至 0.5 MPa;羽状叶脉型对应瓦斯压力降至 0.65 MPa,且消突不均匀。此外,平行叶脉型和混合型对应的有效消突面积基本相同,约为 $1\,100\times290\,\text{m}^2$,可覆盖巷道外侧 15 m,羽状叶脉型的仅为 $945\times250\,\text{m}^2$ 。

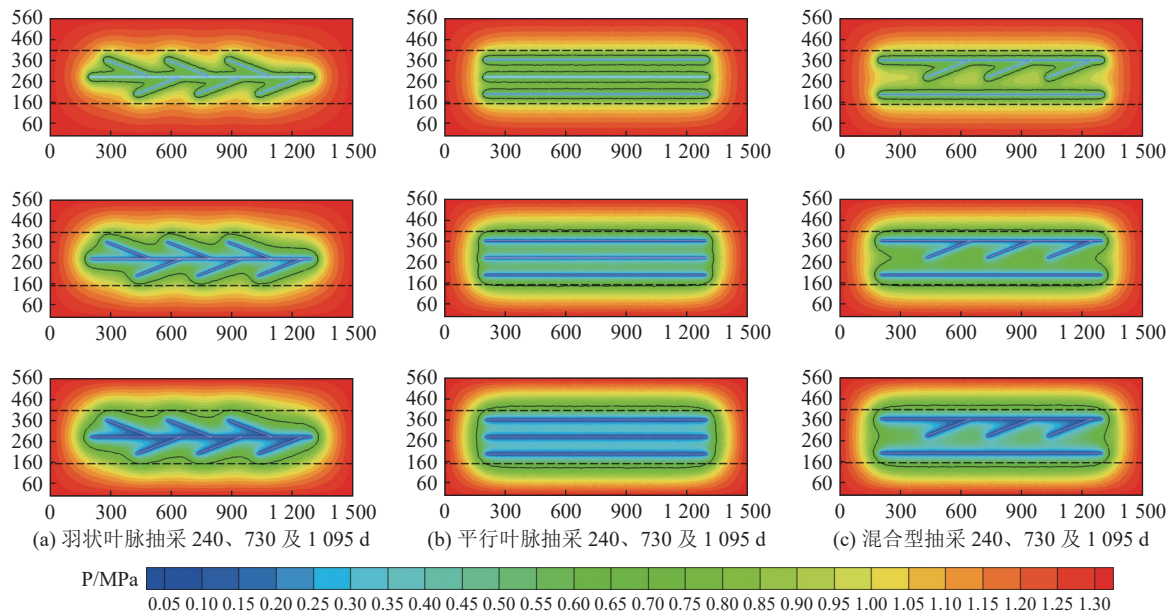


图 4 不同分支形态不同抽采时间下煤层瓦斯压力变化

Fig.4 Change trend of coal seam gas pressure under different branch forms in different extraction time

综合分析,平行叶脉型和混合型的工程投入可知,含 3 口主支的平行叶脉型工程造价为 1 557.8 万元>混合型工程造价 1 287.4 万元,同时,前者需施工 3 口主井,工程进尺量较后者多出 734 m,相应施工周期也较长。因此,从快速、均匀抽采消突角度来讲,混合型较好,适用于煤炭生产区;从单井消突面积、施工成本与工期控制角度,羽状型适用于煤炭准备区,因此,沙曲井田 3+4 号煤层(当前处于生产区)应优先选择混合型多分支水平井。

2.1.2 分支关键参数

多分支水平井的主支长度、分支数目、夹角、分

支间距等因素均影响着其抽采防突效率。其中,主、分支夹角影响着水平井分支抽采影响范围、输送局部阻力,通过数值模拟分析夹角 $15^\circ\sim90^\circ$ 时产气速率(图 5),在抽采前期(<312 d) 15° 夹角抽采效率优势明显,分支与主支距离近,局部钻井分支密度大、流体阻力小,导致前期抽采速率大,但随着时长增加衰减较快,按照地面井抽采寿命不低于 2 000 d(约 5 年)来预测夹角 30° 对应平均产气速率为 $4\,079.77\,\text{m}^3/\text{d}$,超过其他夹角至少 $203\,\text{m}^3/\text{d}$,故夹角选在 30° 附近抽采效果佳。

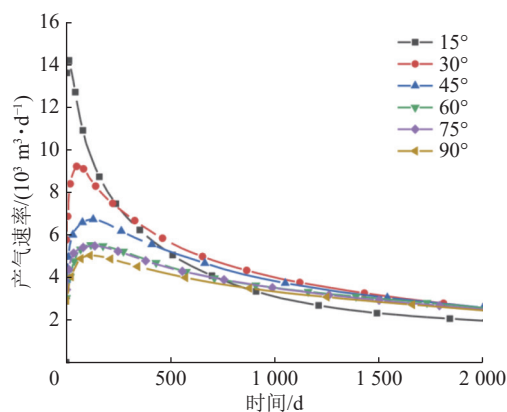


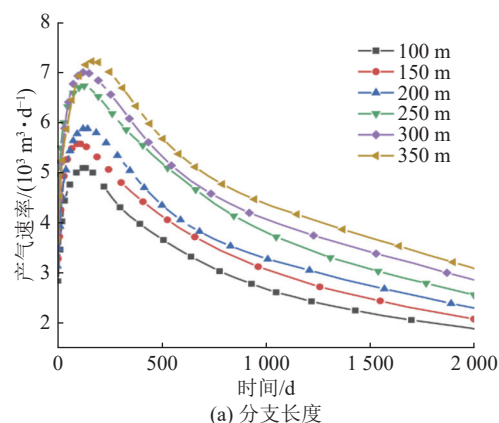
图5 主、分支夹角对产气速率影响

Fig.5 Influence of angle between main branch and branch on gas production rate

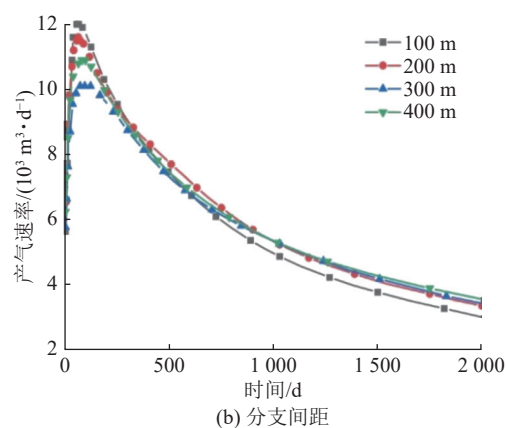
通过对比分析 100 ~ 350 m 分支长度对应的水平井产气速率可知(图 6a),二者间呈现明显正相关性,分支长度增加可增大分支井井壁煤体暴露面积及煤层气汇集总量,但工程成本随之增高;其次,对比分析 100 ~ 400 m 分支间距的水平井产气速率(图 6b)可知,分支间距越短,局部钻井密度大,且各分支影响范围出现交叉叠加效应,故在抽采前期的 109 d 分支长度越短,其产气速率越大,进入中后期,分支长度越短其产气速率衰减快,抽采至 2 000 d 时,分支间距 200 与 300、400 m 对应的产气速率为 4 682.63、4 692.90、4 695.81 m³/d,累计产气量差距 <2.32%,所以分支间距 300 ~ 400 m 为合理值域;对比分析 4 ~ 20 个分支对应水平井产气速率可知(图 6c),分支越多,抽采前期产量速率大,其工程成本高,进入中后期,分支越多产量速率衰减越快,抽采至 2000 d 时,4、8 个分支对应的产量速率较高,分别为 5 451.69、5 419.73 m³/d,二者累计产气量相差仅 0.59%,故分支个数 4 ~ 8 个较为合理。

2.1.3 3 开井身结构

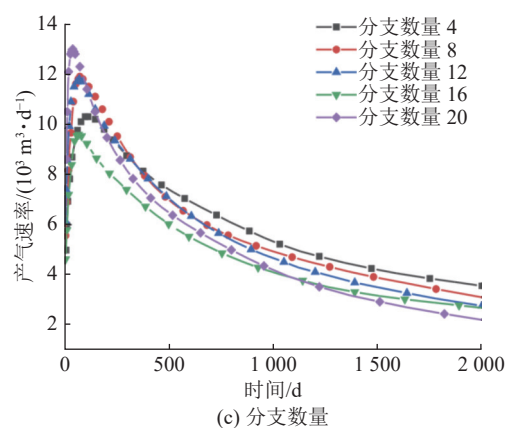
根据沙曲井田地层岩性结构特征及煤层赋存特征,本次水平井井身结构设计为 3 开(如图 7):1 开用 $\phi 311.15$ mm 钻头垂直钻进,穿过风化层后进入坚硬岩石 10 m,深约 120 m,下入 $\phi 244.5$ mm 套管,钢级 J55、壁厚 8.94 mm,固井水泥返至地面;2 开用 $\phi 215.9$ mm 钻头钻至入煤点,下入 $\phi 177.8$ mm 套管,钢级 J55、壁厚 9.19 mm, G 级水泥固井,水泥返至地面,此阶段钻井从造斜点 (130 m 处) 开始按中小曲率半径钻进并拐向水平,其造斜率为 $6^\circ \sim 20^\circ/30$ m;3 开用 $\phi 152.4$ mm 钻头沿目标煤层钻进直至终孔,属于水平段,按照设计分别施工主分支及分支,最终与井下瓦斯抽采钻孔进行连通,施工完成后下入



(a) 分支长度



(b) 分支间距



(c) 分支数量

图6 不同抽采参数下产气速率变化趋势

Fig.6 Variation trend of gas production rate under different extraction parameters

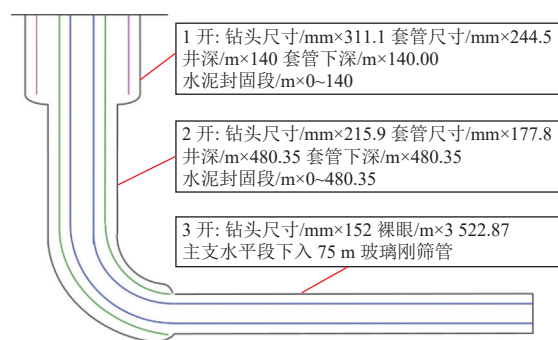


图7 水平井 3 开井身结构示意图

Fig.7 Horizontal well three open well casing structure diagram

ø89 mm(外径)玻璃钢筛管。

由于沙曲井田上组煤层有松软、裂隙发育、表面积大、吸附性强、压力低等特点,导致拐弯段钻进过程中易垮塌、裂缝渗漏,且 3 号煤层与 4 号煤层中间含 0.05 ~ 0.32 m 的夹矸层,易出现携岩困难、润滑难等问题。故钻井 1 开、2 开使用清水钻进,依靠地层自然造浆形成垢土浆钻井液。3 开使用无固相聚合物钻井液,主要材料为黄原胶、羧甲基纤维素钠和 KCL; 钻井液性密度控制在 1.03 ~ 1.08 g/cm³,黏度为 28 ~ 40 s,失水速率 < 0.2 mL/30 min。

2.2 井孔对接技术

多分支水平井与井下对接钻孔在煤层中能否对接取决于井孔测距准确性及钻孔施工,故本次研究开发包含三级孔身结构、深孔造穴及孔口段注浆固孔等成套钻孔改造工艺,同时基于电磁测距法推导了对接靶点与磁短节的空间相对位置的三维反演,结合钻井轨迹精确控制等技术,提出分支井与井下钻孔对接的全套流程规范及关键环节的临界值,其技术原理如图 8 所示。

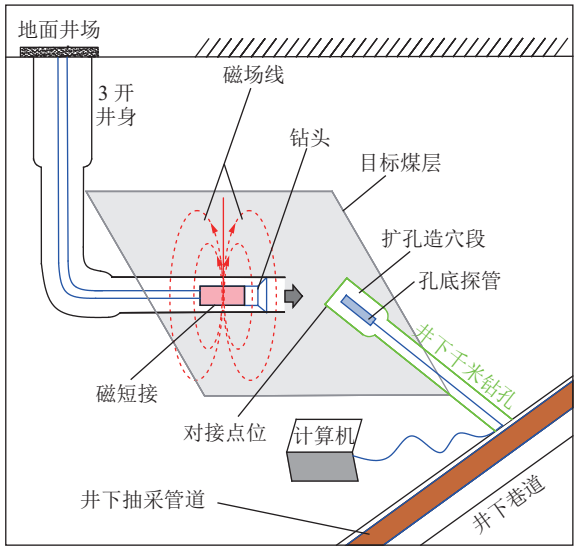


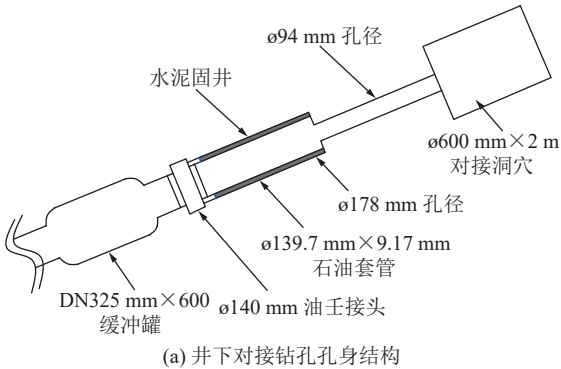
图 8 分支水平井与井下定向钻孔对接原理

Fig.8 Docking principle of branch horizontal well and down-hole directional drilling

2.2.1 三级孔身结构与造穴固孔技术

井下对接钻孔改造包括三级孔身结构、深孔造穴及固孔等关键环节,首先钻孔开口位置应选择在岩体相对完整区段,钻孔整体采用三级孔身结构设计(如图 9a): 开孔段(由钻孔总长度及地面井压力而定,一般不低于 130 m)采用 VLD-1000S 型钻机及 ø178 mm 钻头进行钻进,成孔后下入 N80 级 ø139.7×9.17 mm 的石油套管,注入水泥固孔;中孔段采用 ø94 mm 钻头,裸孔钻至终孔;终孔后在终孔 2 m 段

更换造穴钻头进行扩孔,洞穴规格为 ø600 mm×2 m,最后下放探管(如图 9c)。



(a) 井下对接钻孔孔身结构



(b) 机械造穴装置



(c) 孔底探管(可接收电磁信号)

图 9 井下对接钻孔孔身结构及配套装置

Fig.9 Downhole docking drilling hole body structure and supporting device

为保证井、孔在煤层中精准对接,在定向钻孔终孔段,采用 PDC 金刚复合片刀杆式造穴钻头,并用钻具把特殊设计的机械装置送入造穴孔段,进而控制高压水流打开造穴工具的切削齿(如图 9b),在钻具带动下旋转切削完成设计尺寸洞穴。

为避免钻孔开口段因应力扰动引起塌孔、控制孔内气液压力以及便于接入井下抽采管路,需下套管并固孔。钻孔 1 开完成后,下入 ø139.7 mm×9.17 mm 石油套管,孔口套管长度为 2 m。套管壁外使用钢质扶正器,使套管在孔内居中,孔口管外端以油壬接头连接,并在钻周打设 4 根锚索以固定孔口套管,防止固井注浆或孔内压力过大将套管顶出造成事故。套管固定之后开始注浆固井,待水泥浆液由套管中空返出为止,水泥浆液的水灰比 0.75 : 1,掺入 5% 水玻璃(42 Be),凝固时间 > 48 h。固孔后先扫孔,再用泥浆泵向孔内泵入清水进行套管抗压试验,试验压力为 2 MPa,试验过程中孔口压力 30 min 压降小于 0.3 MPa,且孔口套管周边无渗水。

2.2.2 基于电磁测距的三维反演

RMRS(旋转电磁测距系统)反演法多用于煤层气水平井与直井连通,本次首次把该系统用于水平井与井下定向钻孔精准对接。由于水平井中磁短节和井下对接孔探管难以控制在同一垂面且存在方位差,为保证对接精度要求,建立基于旋转磁偶极子为原点的三维动态坐标系(如图 10b),根据探管内接受磁信号的强度和方位进行井、孔距离与角度的三维反演。

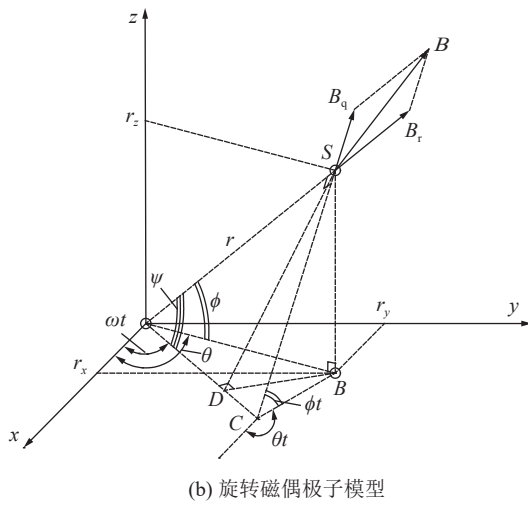
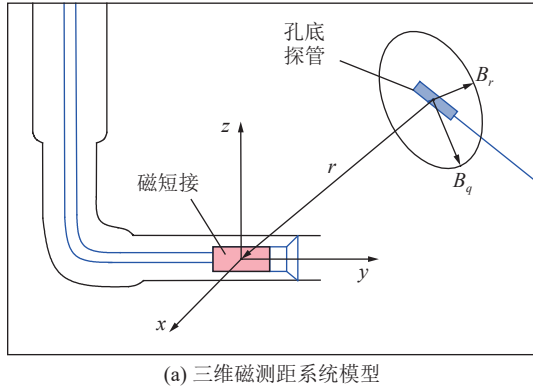


图 10 旋转磁场测距系统数学建模

Fig.10 Mathematical modeling of rotating magnetic field ranging system

如图 10 所示,磁短节(坐标原点 O)到探管(S 点)的距离为 r ,旋转磁短节在 S 处产生的磁感应强度为 B ,沿直线距离方向的强度为 B_r ,垂直于直线方向的强度为 B_q ,二者计算公式见式(1)。

$$\begin{cases} B_r = \frac{m}{2\pi r^3} \cos \psi \\ B_q = \frac{m}{4\pi r^3} \sin \psi \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为磁短节的有效磁距; ψ 为 \overline{OS} 与 \overline{OD} 的夹角,其中 \overline{OS} 为磁短节到 S 点位的矢量, \overline{OD} 为磁短节旋转 ωt 角度时, \overline{OB} 在该角度的方向矢量。

同时,磁短节到探管距离在 x 、 y 、 z 3 轴的投影分别为 r_x 、 r_y 、 r_z ,见式(2)。

$$\begin{cases} r_x = r \cos \phi \cos \theta \\ r_y = r \cos \phi \sin \theta \\ r_z = r \sin \phi \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ 为 r 在 XOY 面投影 \overline{OB} 与 x 轴夹角; ωt 为 t 时刻磁短节顺时针旋转的角度; ϕ 为 \overline{OS} 与平面 XOY 的夹角; ϕ_t 为 \overline{CS} 与 \overline{CB} 的夹角; \overline{CS} 为 S 点沿 B_q 方向延长线与平面 XOY 的交点的方向矢量; \overline{CB} 为 \overline{CS} 在平面 XOY 投影的方向矢量,进而得出 \overline{OB} 、 ψ 、 ϕ_t 、 θ_t 、 \overline{BC} 的表达式。

$$\overline{BD} = \overline{OD} - \overline{OB} = r_y \cos \omega t - r_x \sin \omega t \quad (3)$$

$$\psi = \sin^{-1} \frac{\sqrt{\overline{BD}^2 + r_z^2}}{r} \quad (4)$$

$$\phi_t = \sin^{-1} \frac{r_z}{r \tan \psi} \quad (5)$$

$$\overline{BC} = r \tan \psi \cos \phi_t \quad (6)$$

$$\theta_t = \frac{\pi}{2} + \omega t + \cos^{-1} \frac{\overline{BD}}{\overline{BC}} \quad (7)$$

根据式(1)中 B_r 、 B_q 沿 x 、 y 、 z 方向进行分解可得 B_x 、 B_y 、 B_z ,见式(8)。

$$\begin{cases} B_x = B_r \cos \phi \cos \theta + B_q \cos \phi_t \cos \theta_t \\ B_y = B_r \cos \phi \sin \theta + B_q \cos \phi_t \sin \theta_t \\ B_z = B_r \sin \phi + B_q \sin \phi_t \end{cases} \quad (8)$$

通过系统模型可知,随着旋转磁短节及其产生的椭圆性磁场规律,当 $\omega t = \theta \pm \pi/2$ 且 $\psi = \pi/2$,对应的磁感应强度 BT_{\min} 处于最低;当 $\omega t = \theta \pm \pi$ 且 $\psi = \phi$,对应的磁感应强度 BT_{\max} 达到最大,二者计算式见式(9),综合 BT_{\max} 和 BT_{\min} 可计算得出磁短节与探管之间的距离 r 和夹角 ψ 的解析解见式(10)和式(11)。

$$\begin{cases} BT_{\min} = B \Big|_{\psi=\frac{\pi}{2}} = \frac{m}{4\pi r^3} \\ BT_{\max} = B \Big|_{\psi=\phi} = \frac{m}{4\pi r^3} \sqrt{3\cos^2 \phi + 1} \end{cases} \quad (9)$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{m}{4\pi |BT_{\min}|}} \quad (10)$$

$$\phi = \cos^{-1} \sqrt{\frac{BT_{\max}^2}{3BT_{\min}^2} - \frac{1}{3}} \quad (11)$$

基于上述理论计算方法,结合实际井、孔综合信息,得出井孔对接过程测距导向计算步骤:1)统计分析多分支水平井与对接钻孔的综合信息,基于水平井钻进过程随钻监测系统(MWD)可获取井身轨迹

信息、水平井钻盘平面高度;同时,采用定向钻机导向仪可记录井下对接钻孔轨迹信息以及扩孔造穴段的竣工几何尺寸;当水平井和对接钻孔达到一定距离,采用 RMRS 电磁定向测距系统反馈二者初步位置信息;2)基于第 1 步获取井孔综合信息,建立三维空间坐标系,计算出井下钻孔孔底坐标与多分支井井口坐标的偏移量,进而在探管和磁短节的三维坐标数值上减去偏移量;3)提取对接钻孔探管采集的磁信号数据,对井下钻孔和水平井的相对位置进行测斜计算,绘制水平井、对接钻孔的轨迹剖面图,预估二者对接相对位置;4)综合井孔特征信息、探管数据及测斜结果,结合前述电磁测距导向计算方法,确定水平井与对接钻孔的距离及相对方位。

2.2.3 井孔精准对接流程及工艺关键

1)井孔精准对接流程

多分支水平井与井下定向钻孔精准对接流程:①基于目标区预计对接位置与井下巷道开拓情况,确立井下对接孔钻场(尺寸:6 m×5 m×4.5 m),从该钻场向目标煤体对接点位施工对接定向钻孔,在钻进距孔底 2 m 时需扩孔造穴,并在孔底预留探管以便后期井孔对接;②根据已完孔底坐标,水平井从地面钻至目标煤层距离对接点位 70 m 时停钻,钻头更换为旋磁马达,随钻旋转过程中会发射电磁波信号,探管可实时接收信号;③采用 RMRS 系统反馈钻头与对接点位的相对位置及坐标,进而实时调整钻头切削面和方向,确保与对接钻孔方向一致;④钻至距对接靶点 10 m 时,撤出孔底探管,后续沿既定方向盲打,直至井孔贯通。

2)钻井轨迹控制工艺

多分支水平井施工过程具有拐弯段长、分支多、主支沿煤钻进且超千米等特点,须加强设计井身的轨迹控制保证井孔高效对接。在水平井施工前中期(距离对接靶点 70 m 以前)采用 YST-48R 泥浆脉冲随钻测斜仪进行定向施工,其主要由扶正器、定向探管、伽玛探管、脉冲发生器、电池、压力传感器、打捞头、循环套、远程数据处理器和专用数据处理仪组成。工作时由随钻探管测量井底参数,并通过泥浆脉冲传输至地面,远程计算机系统将泥浆脉冲解析后显示,定向工程师根据反馈信息采用滑动钻进、复合钻进、调整工具面、选择不同钻具组合等手段进行钻井轨迹的控制。同时,结合岩屑录井、伽玛随钻以及钻时录井获取各地层地质信息,结合地勘报告中标志层特征,准确判断层位、获取地层信息,使钻井按照预定轨迹行进。在水平井施工后期(距靶点

70 m 以后)采用 RMRS 电磁测距仪进行高精度控制,结合对接钻孔探管测量数据综合解析,工程师进而实时调整钻进参数,以保障钻井全段轨迹可控。

3)井孔高效对接工艺

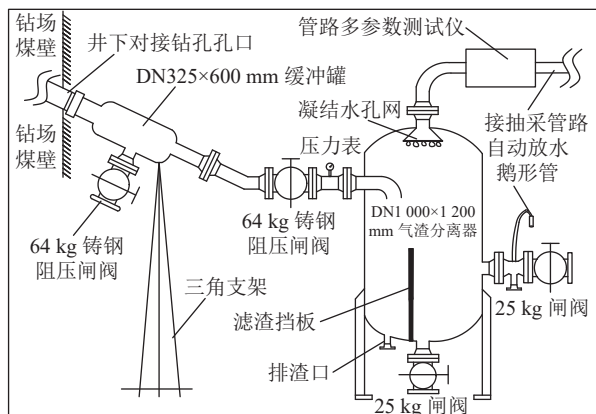
当水平井钻进距离对接钻孔约 70 m 时,将旋转磁接头连接于钻头之后。钻具组合:钻头+旋转磁接头+马达+无磁钻挺+MWD+钻杆。对接钻孔孔底探管可采集旋转磁接头产生的磁场强度值(H_x 、 H_y 和 H_z),并通过软件准确计算出井、孔的距离和当前钻头位置,同步获取当前测点的闭合方位并预测钻头处方位变化,进而调整工具面及方向,及时将井眼方向纠正至洞穴中心的位置,距靶点 10 m 时,撤出孔底探管,朝靶点实施盲打,直至击中靶点,并根据地面泵压骤降(短时间下降值超过一半)及钻进液反失(>10 s)特征信息,结合井下对接钻孔有无泥浆返出,判定井孔对接与否。值得注意要点:更换旋磁接头节点对应的井孔距离以及探管撤出后的钻井盲打均对钻井团队的钻井经验和综合能力要求较高,否则对接易失败;井孔贯通后,对接分支井井眼内残余钻井液及大块煤岩钻屑等固体物质沉积易造成连接孔堵塞,需经过通井作业并安装缓冲、分离装置后进入井下抽采系统。

2.3 对接后控压抽采装备与工艺

2.3.1 对接后缓冲分离连抽装置

井孔对接初期,在多分支水平井钻进液柱压力(可达 8 MPa)以及煤层原始瓦斯压力(可达 2.15 MPa)作用下,混杂大块煤岩块三相高压混合冲击流具有较强破坏力,因此,本次研发对接缓冲分离连抽整体装置(如图 11)具有耐高压冲击、卸压保护及多级分离的特点,主要包括高压缓冲罐和多级气渣分离罐,采用 $\phi 108 \times 10$ mm 型钢管连接缓冲罐、分离罐及抽采管路,其中缓冲罐由 DN325×600 mm 型缓冲罐体、64 kg 铸钢阻压闸阀及三角支架组成,罐体壁厚达 10 mm,其抗压强度达 8~10 MPa,通过缓冲罐两端的高压阀门控制、调节可达到缓冲、泄压的作用,并排出较大煤岩块体。立式气渣分离罐体尺寸为 DN1000×1 200 mm 型,左侧进气端装有 64 kg 铸钢阻压闸阀及压力表,右侧进气端装有 25 kg 阻压闸阀及自动放水器,下部有 25 kg 阻压闸阀及固体排渣口,罐体内部下方安置有滤渣挡板,顶部有出气口并安装过滤水孔网,装上多参数测定仪后接入井下抽采系统。

多级气渣分离罐工作原理:由缓冲罐进来的气渣混合物经 64 kg 闸阀先进入分离罐体左侧,受重力



(a) 结构



(b) 实物

图 11 对接后孔口缓冲分离连抽装置示意

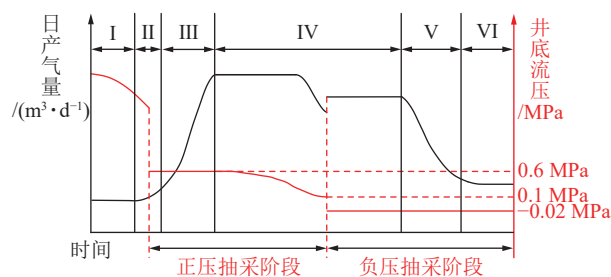
Fig.11 Schematic diagram of orifice buffer separation and continuous pumping device after docking

作用,气渣混合物直接坠入箱体左侧由壁面和挡板构成的水槽中,经过挡板的滤渣作用,实现一级固液分离,然后打开右侧 25 kg 闸阀降低罐体内外压差,排出罐内积存钻进液;罐体顶部出气口的凝结水网进一步对进入箱体的含煤层气的气水混合物进行二次分离,有效减少水汽进入抽采主管路;由于中小颗粒钻渣会在罐体左侧淤积会影响分离罐工作效率,故关闭左侧闸阀、打开右侧闸阀,然后打开底部排渣口,清理分离罐内的淤泥,保持罐体空间及排渣分离顺畅。

2.3.2 逐级控压抽采工艺

由 1.3 小节可知,3+4 号煤层存在着大量的封闭孔隙和由微小喉结沟通的半封闭孔隙,大部分的吸附态瓦斯赋存其中。有实验证明^[25],煤体中瓦斯的解吸受时间和孔隙压力影响,经短时间大流量的抽采后,当煤体中瓦斯的解吸速率<抽采速率时,原本沟通孔裂隙之间的喉道结构会因微观环境中的孔隙压力不足发生闭合。因此,井孔对接后采用逐级控压抽采工艺(如图 12),即抽采前期采用正压抽采,通过孔外缓冲—分离装置球阀控制单位时间内的采气

量进行匀速抽采,保证钻井分支中的气体维持正压状态,在井孔内形成“憋压”,经过长时抽采后(约 1 年),钻井分支中的气体压力匀速下降至井下大气压力,煤体中瓦斯得到较好的解吸和释放;在抽采中后期,再利用抽采系统的孔口负压(约 20 kPa)对煤体进行二次激励,进一步强化抽采延长稳产期,最终实现煤体的完全卸压和产气量的最优化。此外,井孔贯通后接入井下抽采支管,整体转入井下抽采,地面井口采用套管固井、井口封闭即可,无需征地建造专门地面井抽采系统,可大幅节省工程支出。



I—未见气段; II—初见阶段; III—产气上升段; IV—产气稳定段; V—产气衰减段; VI—废弃段

图 12 控压抽采下产气量与压力变化趋势

Fig.12 Change trend of gas production and pressure under controlled pressure extraction

根据朗格缪尔吸附理论,得出煤层气井目标煤层的临界解吸压力 P_{lin} 表达式(12):

$$P_{lin} = \frac{V_s P_L}{V_L - V_s} \quad (12)$$

式中: V_s 为目标区实测瓦斯含量,取平均为 $10.32 \text{ m}^3/\text{t}$; V_L 为煤体理论吸附极限值,取 a 值平均为 $25.095 \text{ m}^3/\text{t}$; P_L 为煤体理论吸附压力,取 b 值倒数的平均 1.788 MPa 。代入式(12)中得出 $P_{lin}=1.21 \text{ MPa}$,综合考虑地面井排采经验和煤矿井下煤层瓦斯压力的直接测定方法(AQ/T 1 047—2007)^[26]中主动快速测压法中注入气体压力值,正压抽采阶段正压值设置为 $P_{lin}/2$,即 0.6 MPa 。

对比分析沙曲井田已施工的 L 型井,其未见气及初见气阶段持续 121 d,随着井底流压迅速降低,单井日产气量大幅跃升至 $8\,092 \text{ m}^3/\text{d}$,自然降压条件下,产气上升阶段解吸速率快,但维持时间短;稳产期平均日产量达 $3\,892 \text{ m}^3/\text{d}$,由图 13 可知随着压力自然衰减,日产气量持续下降,1 年后进入衰减期,势必影响累计抽采量。综合预测采用控压抽采工艺可实现双重激励煤层气抽采,提高日均产气量同时大幅延长稳产期时间,保证煤体的完全卸压和产气量最优。

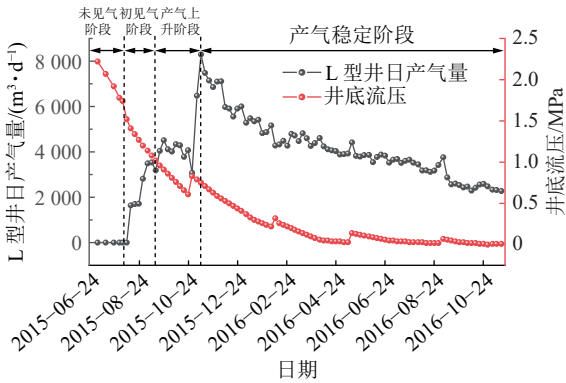


图 13 L 型井日产气量与压力变化趋势
Fig.13 L type well daily gas production and pressure change trend

3 井孔对接抽采效果综合评价方法

井孔对接抽采根本目的是消除煤层突出危险性(安全目标)和释放优质煤、气产能(经济目标),在其持续抽采过程中,待采煤层依次由规划区进入准备区直至生产区,除《防治煤与瓦斯突出细则》(2019)规定的安全指标以及煤气产能效益指标外,针对井孔对接抽采工程量的三区分布、成本及三区联动时效性等动态转化指标研究较少,故应建立其综合评价指标体系。

3.1 构建综合评价指标体系

为了定量评价钻井/钻孔工程量三区分布的合理性及其联动转化时效性,本次引入吨煤钻井/钻孔量 Z 及抽采时效性 η ,结合生产安全性、煤气产能指标构成三区联动的三维评价指标体系(如图 14),其中安全生产指标作为一级指标,在转入准备区时选取《防突细则》的煤层残余瓦斯含量 W_{cy} 、压力 P_{cy} ,转入生产区时选用《煤矿瓦斯抽采达标暂行规定》中表的可解吸瓦斯含量 W_j 和残余瓦斯压力 P_{cy} ,一级指标是三区转化成功的先决条件;其次,二级指标煤气产能指标在准备区、生产区的评价指标为煤层气抽采量 Q_i 、消突/达标煤量 G_x/G_d ,可反映出经济效益;此外,二级指标转化效率指标在准备区、生产区的评价指标为吨煤钻井/钻孔量 Z 、时效性 η ,间接反映的是成本投入。

由于多分支水平井井孔对接抽采主要用于准备区向生产区转化过程,本次转化评价指标选取准备区和生产区,该二区的安全生产指标均通过实测获取,煤、气产能指标是基于实际抽采、生产情况计算得来,转化效率指标根据井孔施工量及抽采时长计算分析,进而得出井孔对接抽采下二区联动各评价指标及其与时间表达式见表 4。

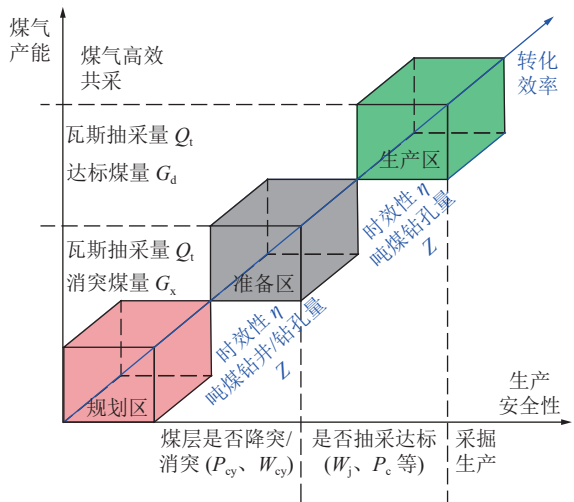


图 14 三区转化动态评价指标示意
Fig.14 Schematic diagram of dynamic evaluation index of three-zone transformation

表 4 准备区-生产区动态评价指标
Table 4 Dynamic evaluation index of preparation area-production area

	准备区	生产区
$W(t)$	实测	实测
$P(t)$	实测	实测
$G(t)$	$(hMpv t - Q_d - Q_x)K_1$	$\sum M \rho_i h_i D_i t K_2$
$Q(t)$	$Q_x \cdot 1440 t + \sum Q_i \cdot t$	$Q_s \cdot 1440 t + \sum Q_j \cdot t$
$Z(t)$	$\sum (L_1 + L_2) t / G_x$	$\sum L_i t / G_d$
$\eta(t)$	t / T_z	t / T_s

注释: M 为煤层厚度, m; t 为煤层气抽采时长, d; Q_i 为地面井及平均日产量, m^3/d ; v 、 D_i 分别掘进面、工作面日进尺, m/d; K_1 、 K_2 分别准备区、生产区煤炭采出率, %; Q_d 、 Q_x 为地质因素和压煤引起不可采煤量, t; h_i 为回采面斜长平均值, m; L_1 、 L_2 分别为单井、单台钻机的钻进效率, m/d, T_z 、 T_s 为准备区、生产区设计理论抽采时长, d。

3.2 动态定量评价函数

为实现准备区向生产区转化过程定量评价,给出一级安全指标有效转化率函数 η_{W_i} 和 η_{P_i} , 当该函数值均 <1 , 相应该区的瓦斯含量、压力指标降至安全指标以下, 该阶段转化成功, 可进一步分析煤气产能、转化效率分析; 否则说明安全不达标, 直接判定该阶段转化失败。

$$\begin{cases} \eta_{W_i} = \frac{W_i}{W_{Li}} & W_{Li} \in \text{各区段起始临界值} \\ \eta_{P_i} = \frac{P_i}{P_{Li}} & P_{Li} \in \text{各区段起始临界值} \end{cases} \quad (13)$$

式中: 准备区的 W_i 、 P_i 起始临界值为 $8 m^3/t$ 、 $0.74 MPa$, 生产区的起始临界值 W_{Li} 、 P_{Li} 为《煤矿瓦斯抽采达标暂行规定》中附表 1, 按照沙曲一矿日产量为 $7437 t/d$,

对应的可解吸含量为 $5 \text{ m}^3/\text{t}$, 进而得出临界残余瓦斯含量 $6.92 \text{ m}^3/\text{t}$, 基于朗格缪尔公式反算出临界瓦斯压力为 0.68 MPa ;

定义二级指标综合转化率函数 π_i , C_i 、 G_i 分别为煤层气、煤炭各阶段有效转化量, Z_i 对应阶段的吨煤钻井/孔量, S_q 、 S_m 、 S_z 分别为煤层气、煤炭单价及钻井/井每米单价, E_i 为各阶段煤气共产的期望利润 (煤气产值-钻井/孔成本), η_{ti} 为各阶段的时效性指标; 假设各阶段转化利润效益值的权重为 θ , 时效性的权重为 $1-\theta$, 各阶段转化效果评价函数 π_i 见式(14)。

$$\pi_i = \theta \frac{C_i S_q + G_i S_m - S_z G_i Z_i}{E_i} + (1-\theta)(1-\eta_{ti}) \quad (14)$$

根据各阶段依次转化的递进制约性, 定义准备区向生产区转化的整体效率函数 Y 为各阶段效率函数 π_i 的乘积, 见式(15)。

$$Y = \pi_z \pi_s \quad (15)$$

式中: π_z 为规划区转入准备区综合转化率; π_s 为准备区向生产区综合转化率。

4 现场应用及综合评价

4.1 沙曲井田井孔对接工程应用

根据矿井采掘规划及地面地貌, 选定沙曲井田五采区首采工作面(3+4号煤层 4501 工作面以及 5 号煤层 5501、5502 工作面), 共设计 3 口多分支水平井井孔对接抽采工程(如图 15), 其中, 在 3+4 号煤层

4501 工作面(生产区)布置 SQN-0501-41、SQN-0501-42 2 口多分支水平井, 采用混合型设计, 主支均位于 4501 工作面顺槽附近 $10 \sim 45 \text{ m}$ 范围, 有利于顺槽掘进预抽消突, 二者间距 180 m , SQN-0501-42 主支有 2 个分支 42-1、42-2, 分支长度为 400 m , 分支间距为 300 m , 分支角度为 30° , 主支长度为 1042 m ; 在井下北轨道大巷施工的对接钻孔 XC42、XC41 的长度分别为 83.94 m 、 124.50 m 。5 号煤层尚处于准备区初期, 煤层大巷尚未开拓, 短期无采掘规划, 因此在 4501 下部的 5 号煤区域施工 1 口 SQN-0501-51, 采用叶脉型设计, 包含 1 个主支、4 个羽状分支, 由于 5 煤短期采掘规划不涉及、抽采时间可延长, 且多分支可覆盖 5501 和 5502 工作面, 分支长度为 $360 \sim 470 \text{ m}$, 分支间距为 300 m , 分支角度为 28° , 主支长度为 890 m 。

4.2 效果综合评价

以 SQN-0501-42 井为例(如图 16), 统计分析 2019 年 8 月始连续抽采 366 d 的产气速率及累计产气量曲线变化, 日均产量 $13\,001.59 \text{ m}^3$, 总产量 $4\,758\,582.90 \text{ m}^3$ 。在产气阶段初期(Ⅱ)上升速率较快, 随后进入产气上升期(Ⅲ)日产气速率最高达 $1.42 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 然后进入抽采稳定期平均日产量为 $1.36 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 井底流压控制在 0.5 MPa , 转入负压抽采阶段(Ⅴ)日产量稍有下降, 随后进入二次稳产期, 为 $1.32 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。相比原 L 型井抽采效果(如图 14),

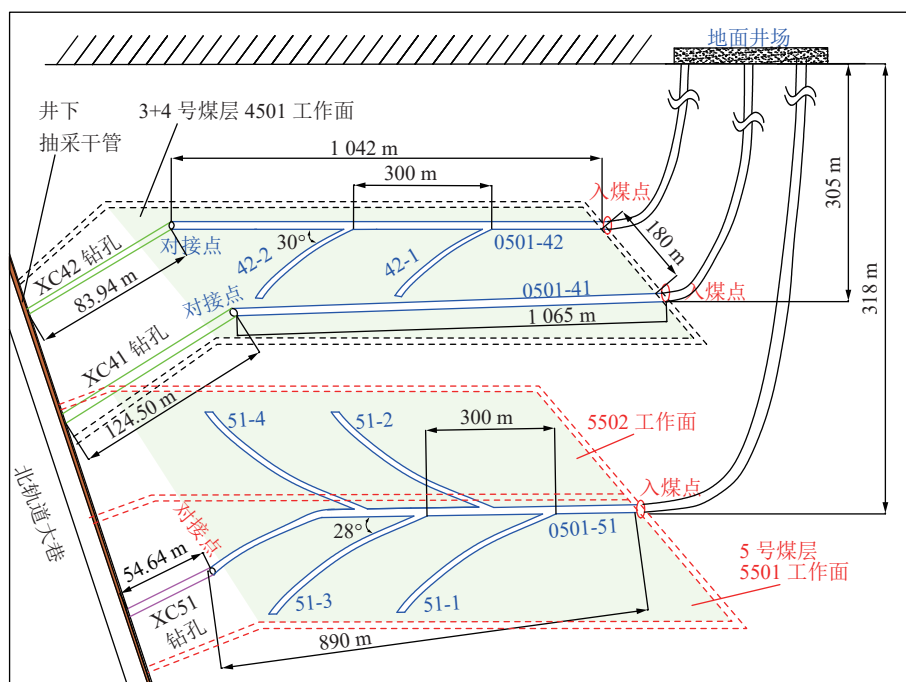


图 15 五采区多分支水平井井孔对接工程示意

Fig.15 Schematic diagram of multi-branch horizontal well hole docking project in No.5 mining area

平均日产量为其 3.3 倍,且在负压抽采阶段出现明显的二次稳产期,提高了累计抽采量。

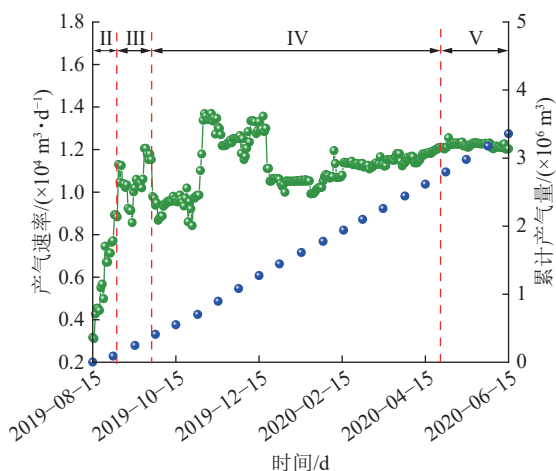
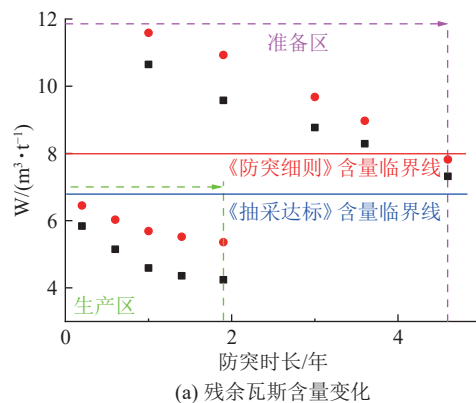


图 16 SQN-0501-42 井产气量统计

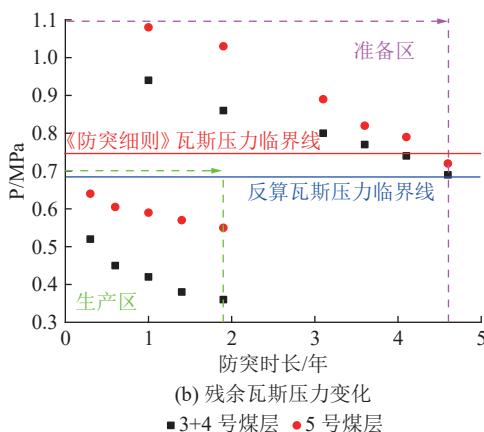
Fig.16 Statistical chart of gas production in SQN-0501-42 well

基于沙曲一矿防突人员在 3+4 号煤层、5 号煤层目标区(4501 及 5501 工作面)残余瓦斯含量与瓦斯压力测试结果(如图 17),本次试验工作面在规划区抽采时间短,在初进准备区时 3+4 号煤层 $W_{cy}=7.32 \sim 10.65 \text{ m}^3/\text{t}$, $P_{cy}=0.70 \sim 0.94 \text{ MPa}$; 5 号煤层 $W_{cy}=7.96 \sim 11.89 \text{ m}^3/\text{t}$, $P_{cy}=0.72 \sim 1.08 \text{ MPa}$ 。在初进生产区 3+4 号煤层 $W_{cy}=4.24 \sim 5.84 \text{ m}^3/\text{t}$, $P_{cy}=0.36 \sim 0.52 \text{ MPa}$; 5 号煤层 $W_{cy}=5.36 \sim 6.45 \text{ m}^3/\text{t}$, $P_{cy}=0.55 \sim 0.64 \text{ MPa}$ 。转入生产区后,煤层瓦斯含量与瓦斯压力均降至临界值以下,可进行安全生产,此外准备区进入生产区的时间平均为 2.8 年,相比原有的边掘边抽+回采面预抽的消突方式,消突用时减少 32%。

统计分析原有抽采方式下二采区 4201 工作面的钻井/孔的总进尺为 28.7 万 m,工作面总产量为 220 万 t,对应的吨煤钻孔量为 0.13 m/t;采用多分支水平井井孔对接抽采下 4501 工作面的钻井/孔的总进尺(考虑本煤层局部强化抽采及采空区抽采的钻孔量)为 9.4 万 m,预计该工作面产量为 148 万 t,其吨煤钻孔量为 0.06 m/t,较前者降低 55%。进一步定量分析井孔对接抽采下准备区向生产区的转化效果,根据矿井实际开采情况,试验区的煤层气日产量达到 2.95 万 m^3 ,计算消突煤量 162 万 t,优质主焦煤市场单价按照 1200 元/t,多分支水平井与对接钻孔总进尺为 6471.83 m,相应成本为 3406 万元,矿井准备区预期转化利润效益为 17.44 亿,准备区预抽时间为 2.1 年,生产区预抽时间为 1 年,代入公式 (13) 和公式 (14) 可得出准备区 π_z 和生产区转化率 π_s 分别为 93%、90%,进而得出井孔对接抽采的整体转化率



(a) 残余瓦斯含量变化



(b) 残余瓦斯压力变化

■ 3+4 号煤层 ● 5 号煤层

图 17 沙曲一矿上组煤安全指标转化示意

Fig.17 Safety index transformation diagram of upper group coal in Shaqu No.1 Mine

为 85.5%,且抽采时间减少 32%,煤层气产能提高了 465 万 m^3/a ,解放优质煤量 50 万 t,经济效益显著。

5 结 论

1) 基于不同形态多分支水平井数值模拟预测分析指出羽状、混合型分支井分别适用于准备区和生产区,分支间距 300 ~ 400 m、分支与主支夹角 30° 为宜,分支长度与抽采量、覆盖范围成本比,具体可根据投入产出比而定。

2) 给出了多分支水平井井孔对接流程,基于电磁测距原理推导了井孔相对位置(距离及角度)的三维空间解析解,提出了井下深孔造穴固孔、井身轨迹控制、井孔测距定向对接关键技术。

研发了孔口高压缓冲罐、多级气渣分离罐成套装置,给出了其关键参数及工作原理,提出了先正压后负压的控压抽采工艺,确立目标区的抽采前期正压为 0.5 MPa,负压为 20 kPa。

3) 构建了安全、效益及转化指标一体的三维动态评价指标体系,并在目标区进行多分支水平井井孔对接抽采效果综合评价,安全指标均降至临界值

以下,煤层气产能提高了 465 万 m^3/a ,解放优质煤层 50 万 t,吨煤钻孔量较原来降低了 55%,整体转化率为 83.7%。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 陈亮,程志恒,王宏冰,等.厚煤层沿空留巷变形漏风机制及多元协同防治技术[J].煤炭科学技术,2024,52(10):114-126.
CHEN Liang, CHENG Zhiheng, WANG Hongbing, et al. Deformation and air leakage mechanism of gob-side entry retaining and multiple collaborative prevention and control technology in thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(10): 114-126.
- [3] 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.
- [4] 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 coalbed methane development in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 1-14.
- [5] 秦勇,袁亮,胡千庭,等.我国煤层气勘探与开发技术现状及发展方向[J].煤炭科学技术,2012,40(10):1-6.
QIN Yong, YUAN Liang, HU Qianting, et al. Status and development orientation of coal bed methane exploration and development technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(10): 1-6.
- [6] 穆永亮.沙曲一矿多分支井仿叶脉顺层布井基础研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2021.
MU Yongliang. Basic research on in-seam layout of multilateral well by imitating leaf veins in Shaqu No. 1 Mine[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021.
- [7] 王剑,崔秀奇,杨国军.煤层气多分支水平井施工工艺[J].煤炭工程,2010,42(2):30-31.
WANG Jian, CUI Xiuqi, YANG Guojun. Construction technology of multi-branch horizontal well of coalbed methane[J]. Coal Engineering, 2010, 42(2): 30-31.
- [8] 杨建超,李贵红,刘钰辉,等.晋城地区煤层气井多层面合采效果评价[J].煤田地质与勘探,2019,47(6):26-31.
YANG Jianchao, LI Guihong, LIU Yuhui, et al. Evaluation of coalbed methane drainage effect for multi-target seams in Jincheng region[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(6): 26-31.
- [9] 李国富,付军辉,李超,等.山西重点煤矿采动区煤层气地面抽采技术及应用[J].煤炭科学技术,2019,47(12):83-89.
LI Guofu, FU Junhui, LI Chao, et al. Surface drainage technology and application of CBM in key mining areas of Shanxi Province[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(12): 83-89.
- [10] 徐凤银,闫霞,李曙光,等.鄂尔多斯盆地东缘深部(层)煤层气勘探开发理论技术难点与对策[J].煤田地质与勘探,2023,51(1):115-130.
XU Fengyin, YAN Xia, LI Shuguang, et al. Theoretical and technological difficulties and countermeasures of deep CBM exploration and development in the eastern edge of Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 115-130.
- [11] 林柏泉,李庆钊,原德胜,等.彬长矿区低煤阶煤层气井的排采特征与井型优化[J].煤炭学报,2015,40(1):135-141.
LIN Baiquan, LI Qingzhao, YUAN Desheng, et al. CBM production character and surface well selection in Binchang low rank coal field[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 135-141.
- [12] 李进朋,张勋,黎凤岐,等.基于模糊结构元多分支水平井瓦斯抽采多因素群评价[J].煤炭科学技术,2019,47(2):114-119.
LI Jinpeng, ZHANG Xun, LI Fengqi, et al. Multi-factor group evaluation of gas drainage in multi-branch horizontal well based on fuzzy structural element[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 114-119.
- [13] 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.
- [14] 郭晓阳,邓存宝,凡永鹏,等.煤层多分支水平井叶脉仿生瓦斯抽采实验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(12):2418-2427.
GUO Xiaoyang, DENG Cunbao, FAN Yongpeng, et al. Experimental study on leaf vein bionic gas drainage of multi-branch horizontal wells in coal seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(12): 2418-2427.
- [15] 刘云亮,郑凯歌.双煤层多分支水平井煤层气开采技术研究及应用[J].中国煤炭,2019,45(3):47-50,69.
LIU Yunliang, ZHENG Kaige. Research and application of CBM mining technology in multi-branch horizontal wells with double coal seams[J]. China Coal, 2019, 45(3): 47-50, 69.
- [16] 李艳昌,刘海龙,贾进章.对称多分支水平井煤层气水电模拟试验研究[J].煤炭科学技术,2022,50(10):135-142.
LI Yanchang, LIU Hailong, JIA Jinzhang. Hydroelectric simulation test of coalbed methane in symmetric multi branch horizontal wells[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(10): 135-142.
- [17] 史宁,潘霄.多分支水平井技术提高煤层透气性机理分析及数值模拟[J].世界科技研究与发展,2010,32(6):808-809,831.
SHI Ning, PAN Xiao. Mechanism analysis and numerical simulation of multi-lateral horizontal wells on improvement of gas permeability[J]. World Sci-Tech RSD, 2010, 32(6): 808-809, 831.
- [18] 徐加祥,赵洋,董丹丹,等.考虑煤层割理的多分支水平井煤层

- 气开发数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(07): 3167–3177.
- XU Jiaxiang, ZHAO Yang, DONG Dandan, et al. Numerical simulation of coalbed methane development in multi-branch horizontal wells considering coal seam cleavage[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(07): 3167–3177.
- [19] 简阔, 马斌, 许晓晨, 等. 低压低渗煤层气多分支水平井开发关键技术研究: 以沁水盆地郑庄区块 15 号煤层为例[J]. 钻探工程, 2023, 50(6): 99–106.
- JIAN Kuo, MA Bin, XU Xiaochen, et al. Research on key technologies for developing multi-branched horizontal of CBM wells in low pressure and low permeability coal reservoirs[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(6): 99–106.
- [20] 桑树勋, 韩思杰, 周效志, 等. 华东地区深部煤层气资源与勘探开发前景[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(4): 403–415.
- SANG Shuxun, HAN Sijie, ZHOU Xiaozhi, et al. Deep coalbed methane resource and its exploration and development prospect in East China[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(4): 403–415.
- [21] YANG Y, CUI S Q, NI Y Y, et al. Key technology for treating slack coal blockage in CBM recovery: A case study from multi-lateral horizontal wells in the Qinshui Basin[J]. *Natural Gas Industry B*, 2016, 3(1): 66–70.
- [22] WU J B, FANG H, HUANG X M, et al. An online MFL sensing method for steel pipe based on the magnetic guiding effect[J]. *Sensors*, 2017, 17(12): 2911.
- [23] 苏忠奇. 井间旋转磁场建模及定位算法研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2023.
- SU Zhongqi. Research on modeling and location algorithm of rotating magnetic field between wells[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2023.
- [24] 曹东建. 小井间距磁导向定位技术研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
- CAO Dongjian. Research on magnetic guiding positioning technology of small well spacing[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023.
- [25] 戴楠. 大佛寺煤层气水平井降压与产气的耦合分析 [D]. 西安: 西安科技大学, 2018.
- DAI Nan. Coupling analysis of depressurization and gas production in horizontal wells of coalbed methane in Dafosi[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018.
- [26] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿井下煤层瓦斯压力的直接测定方法: AQ/T 1047—2007[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007.