

穿越采空区氮气钻井工艺应用研究

李 兵^{1,2,3}, 张永成^{1,2,3}, 王 森⁴

(1.煤与煤层气共采国家重点实验室,山西 晋城 048000; 2.山西晋城无烟煤矿业集团有限责任公司,山西 晋城 048000;
3.易安蓝焰煤与煤层气共采技术有限责任公司,山西 晋城 048000;
4.山西蓝焰煤层气集团有限责任公司,山西 晋城 048000)

摘要:以寺河矿区穿越采空区氮气钻井试验为背景,通过分析煤层取心测试数据,指出钻井穿越 3 号煤层采空区抽采 9+15 号煤层瓦斯的必要性。利用“三带”理论明确了 3 号煤层采空区顶板以上 74.4 m 及底板以下 22.73 m 为钻井漏失带,采用氮气钻井穿越该层段有助于安全高效施工;优化了穿越采空区氮气钻井的三开井身结构;根据穿越采空区氮气钻井工艺需要,配套设计了地面钻井工艺流程。氮气钻井工艺在寺河矿区试验的成功,证明该工艺的可行性,对穿越采空区钻井技术的研究和推广应用具有重要的指导意义。

关键词:采空区;瓦斯;氮气钻井;寺河矿区

中图分类号:P634.5;TD713 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)02-0035-05

Application of nitrogen drilling process in goaf of coal mine

LI Bing^{1,2,3}, ZHANG Yongcheng^{1,2,3}, WANG Sen⁴

(1.State Key Laboratory of Coal and CBM Co-mining, Jincheng Shanxi 048000, China;
2.Shanxi Jincheng Anthracite Mining Group Co., Ltd., Jincheng Shanxi 048000, China;
3.Yi'an Lanyan Coal and CBM Co-mining Technology Co., Ltd., Jincheng Shanxi 048000, China;
4.Shanxi Lanyan Coalbed Methane Group Co., Ltd., Jincheng Shanxi 048000, China)

Abstract: Based on nitrogen drilling testing in the goaf of Sihe coal mine, the necessity of drilling through the goaf in 3# coal seam to extract gas from 9+15# coal seam was proposed by analyzing the testing data of cores recovered from the coal seam. Based on “three band” theory, it was confirmed that there are drilling leakage zones present in 3# coal seam, which are located at 74.4m above the roof and 22.73m below the floor of the goaf respectively. Using nitrogen fluid to drill these zones can ensure drilling safety and improve the drilling efficiency. In order to meet the requirement of nitrogen drilling, the well structure with three sections and the surface drilling process were optimized. The successful application of the nitrogen drilling process in Sihe mine indicates that this process can be used in the goaf of coal mine, which provides an important guide for the research and application of drilling technology in goaf.

Key words: goaf; gas; nitrogen drilling; Sihe mining area

0 引言

传统的多层煤炭开采方法是“先厚后薄、自上而下”的下行式开采程序为主,为降低采空区下伏煤层瓦斯含量,保障下组煤层安全高效开采,国内已经开展了穿越采空区抽采下伏煤层瓦斯地面预抽钻井试

验,取得了较好的预抽效果^[1-4]。与常规地面预抽井相比,穿越采空区钻井最大的施工难度在于采用清水钻进穿越采空区时钻井液漏失,不能建立正常的循环;采用空气钻进穿越采空区,会将一部分空气注入与采空区瓦斯混合,增加煤矿井下生产安全隐

收稿日期:2018-04-26; **修回日期:**2018-11-30 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2019.02.006

基金项目:山西省面上青年基金项目(编号:201701D221234);山西省煤层气联合研究基金项目(编号:2016012010);山西省煤基重点科技攻关项目(编号:MQ2014-04)

作者简介:李兵,男,汉族,1968年生,煤与煤层气共采国家重点实验室副主任,钻探工程专业,主要从事煤层气开发利用工程研究和管理工作,山西省晋城市南村镇四方教育城重点实验室,LB13753688292@126.com。

引用格式:李兵,张永成,王森.穿越采空区氮气钻井工艺应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(2):35-39.

LI Bing, ZHANG Yongcheng, WANG Sen. Application of nitrogen drilling process in goaf of coal mine[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(2):35-39.

患,如何安全高效穿越采空区钻进值得探讨。近年来,国内外各油田积极推广应用以氮气为循环介质的钻井技术,取得了不错的效果,但在煤层气开发领域,以氮气作为循环介质的钻井技术研究及应用极少^[5-7]。为此,以晋煤集团寺河矿区穿越采空区钻井试验为例,首次尝试穿越采空区氮气钻井的工艺方法,来探讨该工艺的可行性。

1 试验区域概况

晋城寺河矿区位于沁水煤田南部,奥陶系灰岩为煤系地层基底。根据寺河矿地质报告,寺河矿主要煤系地层为二叠系下统山西组(P_1s)和石炭系上统太原组(C_3t),平均厚度 136.02 m。含煤 14 层,煤层总厚 14.67 m,含煤系数 10.8%,煤层倾角平均为 5°,其中 3 号和 15 号为主要可采煤层,3 号煤层平均厚度为 6.31 m,15 号煤层平均厚度为 2.5 m,9 号为大部可采煤层,平均厚度为 1.2 m,其余为不可采煤层。

由于寺河矿采用下行开采顺序采煤,部分地区 3 号煤层成为采空区,使得这些地区 9 号、15 号煤层瓦斯未进行有效的地面预抽。取心测试结果表明,寺河矿 9 号煤层平均瓦斯含量为 17.84 m³/t;15 号煤层平均瓦斯含量为 24.10 m³/t。根据国家安全生产的相关要求,高瓦斯矿井必须通过地面预抽将瓦斯降低到国家要求的标准以下方可进行开拓部署^[8-9]。因此,考虑穿越 3 号煤层采空区施工地面预抽井,对 9+15 号煤层瓦斯采取先抽后采,保障煤矿安全生产,实现瓦斯的高效利用。

2 施工层段的优选

在寺河矿区曾开展过穿越采空区抽采下伏煤层瓦斯地面预抽钻井试验,取得了较好的预抽效果,但在穿越采空区钻井过程中需要解决水钻漏失严重及空气钻安全隐患等相关问题。为完善穿越采空区钻井工艺,开展了穿越采空区氮气钻井试验研究。相对于常规钻井,氮气钻井优势主要表现在能够保护储层、提高机械钻速和减少或避免井漏等多个方面;但是,氮气钻井成本较高,而对于穿越采空区氮气钻井工艺来说,由于开采卸压的影响,采空区附近岩层并不稳定,整个穿越采空区钻井过程存在卡钻具的风险。针对以上劣势,要求优化穿越采空区氮气钻井层段,首先需要穿越采空区氮气钻井施工层段

进行研究。

2.1 “上三带”理论

工作面开采以后,根据“上三带”理论,上覆岩层受采动影响的变形带由下而上的岩层移动分为垮落带、裂隙带、弯曲下沉带。其中,垮落带由上覆岩层垮落岩石组成;裂隙带随着工作面的推进发生变形与位移,从而裂隙比较发育;两者与采空区具有直接的导通作用^[10-12]。为预防井漏和保障井下安全,穿越采空区钻井过程中,要求进入裂隙带之前开始更换氮气作为介质进行钻进。根据相关研究成果及寺河矿生产地质报告的结论,对寺河矿 3 号煤层采空区上部裂隙带最大高度进行计算,为氮气钻井层段的选择提供理论依据。相关计算公式如下:

(1) 垮落带最大高度

$$H_k = \frac{100 \sum M}{4.7 \sum M + 19} \pm 2.2 \quad (1)$$

式中: H_k ——跨落带高度, m; $\sum M$ ——累计采厚, m。

(2) 裂隙带最大高度

$$H_{li} = 20\sqrt{\sum M} + 10 \quad (2)$$

式中: H_{li} ——裂隙带最大高度, m。

寺河矿开采 3 号煤层的平均厚度为 6.1 m,取采高 $\sum M = 6.1$ m,根据(1)式可计算垮落带最大高度为 15.00 m(跨落带计算取最大值),根据式(2)可计算裂隙带最大高度 59.40 m。依据上述计算结果可知,氮气钻井穿越采空区层段初始位置选择在煤层顶板 74.4 m 以上,即钻至煤层顶板 74.4 m 左右时考虑更换氮气作为介质进行钻井。

2.2 “下三带”理论

国内学者从预防底板突水的角度对采场下伏煤岩体的破坏状态进行了分析,煤层底板的“下三带”为:底板导水破坏带、有效隔水层保护带和承压水导升带^[13-15]。对穿越采空区钻井来说,钻遇采动导水裂隙带会出现和采空区沟通的情形,这是钻井过程中需要考虑的因素,氮气钻井穿越采空区设计考虑钻穿导水裂隙带后固井,进行封固漏失带,而后更换常规钻井方式至目的层完钻。因此,需要确定采动导水裂隙带的深度来指导氮气钻井穿越采空区工艺。底板导水裂隙带的经验公式为:

$$h_1 = 0.0085H + 0.1665a + 0.1079L - 4.3579 \quad (3)$$

式中: h_1 ——底板导水裂隙带最大高度, m; H ——开采深度, m; a ——煤层倾角, ($^\circ$); L ——工作面的长度, m。

根据研究区的位置考虑取开采深度 H 为 550 m,煤层倾角 a 为 5° ,工作面的长度 L 为 200 m,则底板导水裂隙带最大高度为 22.73 m。因此,采用氮气钻井穿越采空区层段要求钻至 3 号煤层采空区底板 22.73 m 以下进行固井封固采空区,以便后续采取常规方式进行钻进,节约能耗和成本。

通过“三带”理论分析可知,寺河矿区 3 号煤层采空区顶板以上 74.4 m 及底板以下 22.73 m 为受煤矿开采影响的钻井漏失层段,因此考虑在钻遇该层段过程中采用氮气作为循环介质进行钻进,保障安全施工。

2.3 井身结构设计

通过以上研究结果,穿越采空区钻孔要综合考虑地层剖面、采空区及井下复杂情况来设置井身结构。优化设计后的井身结构采用三开井身结构,一开 $\varnothing 425$ mm 的钻头常规钻井开孔,钻入基岩 10 m 完钻,下入 $\varnothing 377.7$ mm 的表层地质套管,防止地表粘土坍塌;二开 $\varnothing 311.15$ mm 的钻头常规钻进至 3 号采空区顶板以上 75 m,更换钻井方式为氮气钻井至 3 号煤层底板以下 23 m 后完钻,下入 $\varnothing 244.5$ mm 的套管,水泥返高至 3 号煤层顶板,封固采空区段漏失层段;三开 $\varnothing 215.9$ mm 的钻头钻进,钻穿 15 号煤层底板以下 30 m 后完钻,下入 $\varnothing 139.7$ mm 的石油套管,水泥返高至 3 号煤层顶板以上 100 m(见图 1)。

3 氮气钻井工艺流程

穿越采空区氮气钻井就是以高压氮气作为介质,用空压机对空气进行初级加压,初级加压的空气通过汇总管线输送到制氮机,制氮机分离生产出氮气输送到增压机组,增压机对氮气进行再次增压,通过总管线将高压氮气经立管三通注入钻具内(中间设置单流阀、旁通阀和放空管线),氮气在流经钻头时冷却钻头,携带钻屑,再通过井口及排砂管线排出,排砂管装置上部接入多参数瓦斯传感器监测装置,下部接入除尘器和除尘水口,最后将岩屑注入到岩屑池,以此实现穿越采空区氮气钻井任务^[16-17]。具体流程见图 2。

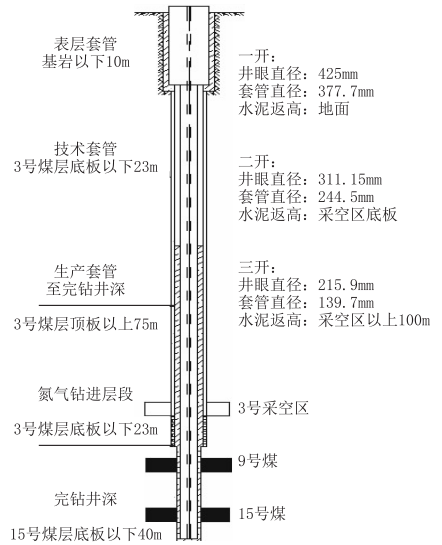


图 1 穿越采空区氮气钻井井身结构设计
Fig.1 Wellbore structure design of nitrogen drilling process in goaf of coal mine

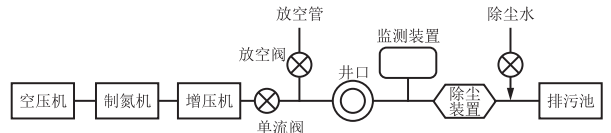


图 2 氮气钻井穿越采空区工艺流程
Fig.2 Technological process of nitrogen drilling process in goaf of coal mine

为使岩粉能顺利吹出井外,注氮气钻进施工时应保证氮气注入量 $< 100 \text{ m}^3/\text{min}$,注入压力 $< 3.0 \text{ MPa}$ 。根据地面工艺流程设计配套相应的设备方案,选用空压机 5 台,工作压力为 $2.1 \sim 3.5 \text{ MPa}$,排量为 $40 \text{ m}^3/\text{min}$;选用制氮机 2 台,每台制氮机进气压力为 2.4 MPa ,排气压力为 2.2 MPa ,排量为 $60 \text{ m}^3/\text{min}$;选用增压机 3 台,每台增压机进气压力为 2.4 MPa ,排气压力为 6.9 MPa ,排量为 $69 \text{ m}^3/\text{min}$;此外,要求增压机与钻井设备之间高压软管耐压能力不得低于 12 MPa ,在此压力下能实现连续稳定工作。主要配套设备参数及数量见表 1。

表 1 主要配套设备参数及数量
Table 1 Parameters and quantity of main equipment

类型	进气压力/ MPa	排气压力/ MPa	排量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	数量/ 台
增压机	2.4	6.9	69	3
制氮机	2.4	2.2	60	2
空压机	2.1~3.5		40	5

4 现场应用

4.1 应用情况

现以 SHCK-X 井为例。SHCK-X 井是为寺河矿区设计的一口穿 3 号煤层采空区抽采 9+15 号煤层气的一口地面预抽井,根据“三带”理论,该井 480~583 m 层段为受采空区影响的漏失带,对该层段采用氮气钻井施工,施工过程及工艺如下所述。

SHCK-X 井于 2017 年 6 月 12 日一开采用空气钻井,一开钻具组合为 $\varnothing 425$ mm 潜孔锤钻头+冲击器+ $\varnothing 159$ mm 钻铤+转换接头+ $\varnothing 127$ mm 钻杆,钻压 10~20 kN,转速 42~45 r/min,钻进至 65.27 m,下入 J55- $\varnothing 377.7$ mm 表层套管至 65.27 m,固井水泥返深至地面;二开初期采用空气钻进,钻具组合为 $\varnothing 311.15$ mm 潜孔锤钻头+冲击器+ $\varnothing 159$ mm 钻铤+转换接头+ $\varnothing 127$ mm 钻杆,钻压 20~60 kN,转速 45~66 r/min,钻进至 485 m 左右出现漏失,分析认为进入了受采空区影响的施工井

段,这与以上“三带”理论分析的结论基本吻合,此时启用氮气地面钻井设备系统,更换氮气作为钻井介质,钻压 40~80 kN,转速 45~72 r/min,氮气钻井钻进至 583 m,下入 J55- $\varnothing 377.7$ mm 技术套管至 579.01 m,固井水泥返深至 560.56 m(3 号煤层采空区底板位置);三开钻具组合为 $\varnothing 215.9$ mm 潜孔锤钻头+冲击器+ $\varnothing 159$ mm 钻铤+转换接头+ $\varnothing 127$ mm 钻杆,钻压 20~80 kN,转速 45~72 r/min,采用空气作为介质钻进至 684 m 完钻,下入 J55- $\varnothing 139.7$ mm 生产套管至 681.51 m,固井水泥返深至 459.70 m(达到或接近 3 号煤层顶板以上 100 m),主要钻井工艺参数见表 2。氮气钻井工艺在 SHCK-X 井的成功应用,证明穿越采空区氮气钻井工艺可行,对解决采空区下伏煤层瓦斯治理起到了极大地促进作用,且钻井施工中不会对煤矿井下安全生产造成隐患。

表 2 主要钻井工艺参数

Table 2 Main drilling techniques and parameters

钻进井段	钻井介质	钻具组合	钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)	进尺/m
一开	空气	$\varnothing 425$ mm 潜孔锤钻头+冲击器+ $\varnothing 159.00$ mm 钻铤+转换接头+ $\varnothing 127$ mm 钻杆	10~20	42~45	0~65.27
二开	空气	$\varnothing 311.15$ mm 潜孔锤钻头+冲击器+ $\varnothing 159.00$ mm 钻铤+转换接头+ $\varnothing 127$ mm 钻杆	20~60	45~66	65.27~485
	氮气		40~80	45~72	485~583
三开	空气	$\varnothing 215.9$ mm 潜孔锤钻头+冲击器+ $\varnothing 159.00$ mm 钻铤+转换接头+ $\varnothing 127$ mm 钻杆	20~60	45~72	579.01~681.51

4.2 经济效益评价

常规清水钻进穿越采空区会产生严重的井漏,采用单一的堵漏方法难以从根本上解决问题;空气穿越采空区钻井安全隐患较大,特别是对煤矿井下开采会造成不可预知的后果。因此,穿越采空区钻井除了要考虑工程施工成本以外,主要考虑安全风险和隐患,采用惰性气体氮气作为介质实施穿越采空区钻井既保障了施工成功又杜绝了安全隐患。

寺河矿区采用氮气穿越采空区钻井估算单井工程费用按 350 万元/井计算(含后期相关工程),根据统计,寺河矿区过采空区抽采 9+15 号煤层气井单井实现稳产气量可达 2000~8000 m³/d,矿井抽采 1 m³ 瓦斯成本约为 3.5 元,每口井气量按 2000 m³/d 计算,年生产期按 300 d,年生产成本按 60 万元计,可为企业节约瓦斯抽采费用 150 万元/年。无论从经济角度还是从社会角度考虑,该技术效益都很显著。

5 结论

(1)由于寺河矿采用下行开采顺序,部分地区 3 号煤层成为采空区,使得这些地区 9 号、15 号煤层未进行有效的地面预抽。为保障相应煤层开采的安全生产,过 3 号煤层采空区施工地面预抽井,对 9+15 号煤层采取地面瓦斯预抽措施甚为必要。

(2)氮气钻井在保护储层、提高机械钻速、减少或避免井漏等方面优势明显,但成本较高,通过“三带”理论分析寺河矿 3 号煤层采空区顶板以上 74.4 m 及底板以下 22.73 m 为受开采影响的漏失层段,采用氮气作为循环介质进行钻井穿越该层段能够实现安全高效地穿越井下采空区。

(3)使用 5 台空压机并联接入制氮机,制出氮气后通过 3 台增压机增压进入孔底的施工方案满足工艺要求,保障穿越采空区钻井施工的顺利进行。

氮气钻井工艺在 SHCK-X 井的成功应用,证明穿越采空区氮气钻井工艺可行,对解决采空区下伏煤层瓦斯治理起到了极大地促进作用,且施工中

不会对煤矿井下安全生产造成隐患。

参考文献(References):

- [1] 陈秀艳,刘启蒙,李鹏飞.厚煤层下行式分层开采底板破坏规律研究[J].煤炭技术,2017,36(8):63-65.
CHEN Xiuyan, LIU Qimeng, LI Pengfei. Study on floor failure law in thick coal seam under downward slicing mining[J]. Coal Technology, 2017,36(8):63-65.
- [2] 曹树刚,邹德均,白燕杰,等.“三软”薄煤层群沿空留巷区段上行式开采研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(3):322-327.
CAO Shugang, ZOU Dejun, BAI Yanjie, et al. Study on upward mining of sublevels for gob-side entry retaining in three-soft thin coal seam group[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012,29(3):322-327.
- [3] 陈平安.大直径瓦斯孔穿越采空区施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):209-214.
CHEN Pingan. Construction technology for large diameter gas drainage borehole through coalmine gob area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(10):209-214.
- [4] 齐治虎,曹伟,张晓昂,等.空气钻井在穿越采空区煤层气井中的应用[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会.第十八届全国探矿工程(岩土钻掘工程)技术学术交流会论文集.北京:地质出版社,2015:558-560.
QI Zhihu, CAO Wei, ZHANG Xiaoang, et al. Application of air drilling in coalbed methane wells crossing goaf[C]// Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Eighteenth National Exploration Engineering (Drilling and Tunneling) Academic Conferences. Beijing: Geological Publishing House, 2015:558-560.
- [5] 黄雪琴,孟庆昆.液氮应用于干热岩钻探的可行性探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(2):22-25.
HUANG Xueqin, MENG Qingkun. Feasibility study on application of liquid nitrogen in hot dry rock drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(2):22-25.
- [6] 李洪,汪海阁,杨成新,等.库车东部致密砂岩气藏氮气欠平衡钻井技术[J].石油天然气学报,2013,35(11):94-97.
LI Hong, WANG Haige, YANG Chengxin, et al. Techniques of nitrogen underbalanced drilling in tight sandstone gas reservoirs in the eastern Kuqa area[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013,35(11):94-97.
- [7] 杨虎.裂缝性储层充氮欠平衡钻井流体参数设计图版与实例[J].中国石油勘探,2017,22(6):118-124.
YANG Hu. Hydraulic parameter design chart of aerated nitrogen underbalanced drilling and application in fractured reservoirs[J]. China Petroleum Exploration, 2017,22(6):118-124.
- [8] 防治煤与瓦斯突出规定[J].劳动保护,2009,(8):115-125.
Regulations on prevention and control of coal and gas outburst[J]. Labour Protection, 2009,(8):115-125.
- [9] 许太山.高瓦斯矿井综合瓦斯抽采技术实践[J].煤炭科学技术,2012,40(12):52-54,96.
XU Taishan. Practice on comprehensive gas drainage technology in high gassy mine[J]. Coal Science and Technology, 2012,40(12):52-54,96.
- [10] 王志强,李鹏飞,王磊,等.再论采场“三带”的划分方法及工程应用[J].煤炭学报,2013,38(S2):287-293.
WANG Zhiqiang, LI Pengfei, WANG Lei, et al. Method of division and engineering use of “three band” in the stope again[J]. Journal of China Coal Society, 2013,38(S2):287-293.
- [11] 曹丁涛,李文平.煤矿导水裂隙带高度计算方法研究[J].中国地质灾害与防治学报,2014,25(1):63-69.
CAO Dingtao, LI Wenping. Estimation method for height of fractured zone with water flow in coal mining area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014,25(1):63-69.
- [12] 魏久传,李白英.承压水上采煤安全性评价[J].煤田地质与勘探,2000,28(4):57-59.
WEI Jiuchuan, LI Baiying. Security evaluation of coal mining above the confined aquifers[J]. Coal Geology & Exploration, 2000,28(4):57-59.
- [13] 柳聪亮,谭志祥,李培现,等.底板采动导水破坏带深度求取方法研究[J].煤矿开采,2010,15(5):38-41.
LIU Congliang, TAN Zhixiang, LI Peixian, et al. Calculation methods for depth of floor water-conductive fissure zone induced by mining[J]. Coal Mining Technology, 2010,15(5):38-41.
- [14] 严桂凤,董青红.趋势面分析在预测底板采动导水破坏带深度中的应用[J].矿业安全与环保,2013,40(2):52-54.
YAN Guifeng, DONG Qinghong. Application of trend-surface analysis in prediction of floor water flowing fractured zone depth[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2013,40(2):52-54.
- [15] 杨少华.元坝须家河组氮气钻井可行性评价与配套方案推荐[D].四川成都:西南石油大学,2015.
YANG Shaohua. Feasibility evaluation and matching scheme recommendation of nitrogen drilling in Xujiahe formation of Yuanba[D]. Chengdu Sichuan: Southwest Petroleum University, 2015.
- [16] 杨毅,齐彬,黄琳,等.氮气钻井与筛管完井在中浅油层开采中的利用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(10):5-8.
YANG Yi, QI Bin, HUANG Lin, et al. Application of nitrogen drilling and screen pipe completion in middle-shallow oil reservoir mining[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(10):5-8.

(编辑 韩丽丽)