



移动扫码阅读

毕延森,高德利,鲜保安,等.复杂煤体结构煤储层水平井复合管柱完井方法研究[J].煤炭科学技术,2023,51(10):189-197.

BI Yansen, GAO Deli, XIAN Baoan, *et al.* Study on horizontal completion with composite tubular string in coal reservoir with complex coal structure[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 189-197.

复杂煤体结构煤储层水平井复合管柱完井方法研究

毕延森¹,高德利¹,鲜保安²,李贵川³

(1. 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室,北京 102249; 2. 河南理工大学资源环境学院,河南焦作 454000;

3. 中联煤层气有限责任公司,山西太原 030000)

摘要:针对煤体结构破坏变形程度差异性与物理特征非均质性强,水平井眼钻遇煤储层的煤体结构复杂,单井完井与增产技术方法单一等问题,为了实现水平井分段完井与适应性增产,提出了复杂煤体结构煤储层水平井复合管柱完井技术,设计了外层套管与筛管复合完井管柱、内层作业油管柱与配套分段完井工具,完善了双管柱受力和相关水力计算模型。在山西省阳泉地区 15 号煤层开展了复合管柱完井现场试验:将长度为 659.5 m 的复合管柱下入水平井中至 1 591 m 井深,煤层水平井眼被封隔为 4 段,采用双管柱结构完成了水力循环解除管柱遇阻、洗井、胀封管外封隔器及煤层分段完井等作业环节的现场测试。基于该试验水平井的工程数据,采用有限差分法计算了双管柱受力,并进行了相关水力计算,结果表明:内层管柱增加了完井管柱下入过程中的侧向力,井下管柱与井壁之间的摩擦阻力增加了 5 642.75 N。喷头压降与内层管柱水力循环压耗是影响井下双管柱水力循环压耗的主要因素,双管柱下入过程中水力循环排量控制在 16~20 L/s,以清除井眼内固相颗粒及维持井壁稳定;洗井作业时排量提升至 20~24 L/s,以消除井壁煤层的钻井液伤害。通过研究与现场试验,证明了煤层气水平井复合管柱完井技术具有先进性和可行性,为复杂煤体结构煤储层水平井多样化与适应性增产改造工程提供了可靠的作业基础。

关键词:复杂煤体结构;煤储层;水平井;复合管柱完井;双管柱

中图分类号:TE921

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2023)10-0189-09

Study on horizontal completion with composite tubular string in coal reservoir with complex coal structure

BI Yansen¹, GAO Deli¹, XIAN Baoan², LI Guichuan³

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 3. China United Coalbed Methane Co., Ltd., Taiyuan 030000, China)

Abstract: Aiming at the problems such as large deformation difference of coal structure, strong heterogeneity of physical properties, complex coal structure during horizontal drilling, single completion & stimulation technology and so on, a completion technology with composite tubular string for coalbed methane (CBM) horizontal well is proposed. Completion tools, inner operation tubing and outer completion string are designed. The outer completion string is composed of casing and screen pipe. The mechanics and hydraulics calculation model of dual tubular string are optimized. A field test of this completion technology had been accomplished in No. 15 coal seam in Yangquan, Shanxi Province, China. A dual tubular string of 659.5 m was run into the depth of 1591 m, and the horizontal well section in coal seam is divided into four sections by external casing packers (ECP). The tests of dual tubular string running, hydraulic circulation removing dual tubular string blocking and sticking, well washing, ECP expansion sealing and segmental completion in coal seam were accomplished. Based on the engineering data of this well, the force of dual tubular string was calculated by finite difference method, and the related hydraulic calculation was carried out. The results show that the inner tubing increases the lateral force of completion string, and the friction resistance on downhole tubular string increases by 5642.75 N. The pressure of completion tubular string is mainly affected by hy-

收稿日期:2022-10-11 责任编辑:宫在芹 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1659

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(52234002)

作者简介:毕延森(1986—),男,山东东营人,博士研究生。E-mail: biyansen2014@163.com

通讯作者:高德利(1958—),男,山东禹城人,教授,博士。E-mail: gaodeli_team@126.com

draulic loss of inner tubing and nozzles. The recommended displacement of hydraulic circulation is 16~20 L/s to remove rock and cuttings and maintain wellbore stability during completion string running. The displacement is increased to 20~24 L/s to eliminate the damage of drilling fluid to shaft wall during well washing operation. The research and field test verified the feasibility and innovation of the completion technology with composite tubular string for horizontal well, which provides a reliable basis for horizontal well diversified and adaptive stimulation in coal reservoir with complicated structure.

Key words: complex coal structure; coal reservoir; horizontal well; composite tubular column completion; dual tubular column

0 引言

水平井完井与增产技术逐渐成为煤层气高效开发的关键技术,并面临更加复杂的煤层条件^[1]。在各种地质作用下,煤体内部受破坏变形程度差异导致煤储层垂直方向煤体结构呈现显著差异性,例如沁水盆地南部山西组3号煤层上部煤体结构以原生结构为主,中、下部主要为碎裂与碎粒结构^[2-3]。鄂东盆地东南缘的韩城区块山西组5号煤的煤体结构自上而下依次呈现原生、碎裂和碎粒结构,区块平面内三种煤体结构呈现分区、分带特征^[4]。同时,煤层水平井钻进过程中地层起伏变化,导致实钻井眼轨迹在不同煤体结构的煤岩之间交互穿行。在碎软煤层顶板钻水平井的成功率明显高于碎软煤层^[5-7],配合定向射孔与压裂技术进行煤层改造增产,但是受地质构造及导向仪器精度等因素影响,煤层顶板水平钻进中也经常钻遇碎软煤层。

原生结构或以原生结构为主的碎裂煤体内部破坏变形程度相对较低^[8],可通过水平井分段压裂技术进行增产改造,产气过程中煤粉产出量少,在沁水盆地南部、鄂东盆地东缘与阜康地区等煤层水平井分段密集压裂后,平均日产气量超过 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[2,9]。碎粒和糜棱结构的煤层由于煤体内部结构破碎变形程度较高,水力压裂过程中难以形成有效人工裂缝,压裂后煤粉产出严重,影响单井煤层气产量和采收率^[10-12]。常规油气井针对储层非均质性、含水及出砂问题,相关人员提出了水平井筛管分段完井工艺技术,水平井内完井筛管外安装有管外封隔器,后续下入作业管柱进行管外封隔器胀封作业^[13]。碎裂与碎粒结构的煤体内部裂缝发育、含气量与渗透率相对较高,水平井双管柱筛管完井技术能够提高煤体结构破碎的煤层水平井完井筛管下入成功率,有效支撑井壁、控制煤粉并消除井壁煤岩钻井液伤害^[14-17]。煤层气水平井注氮技术可解除筛管外环空与近井煤层的堵塞,沟通煤层内部裂缝与孔隙,提高煤层渗透性与甲烷采收率^[18-19]。但是,研究与实践表明笼统注气方式对水平井段整体增产与提采效率很低^[20-22];同时,多种煤体结构交互分布使煤层呈现力学与物性特征的

强非均质性,笼统注氮方式无法满足复杂煤体结构煤层水平井增产及提采需求。连续油管带双封隔器拖动压裂技术是油气井增产的成熟工艺技术^[23-24],对碎软煤层分段筛管完井后进行注氮,可解决笼统注氮方式无法有效改造强非均质煤层的问题。水平井下入套管(不固井)后水力喷射分段压裂技术被应用于软硬交互煤层增产,原生结构的煤层井段人工压裂形成的裂缝扩展延伸至软煤层,以提高软硬煤的压裂增产效果^[3],但是该技术未封隔套管与井壁之间环空,未能消除煤层强非均质性对煤储层改造的影响。

复杂煤体结构煤储层是指同煤层中煤体结构破坏变形差异性,呈现原生、碎裂、碎粒和糜棱结构交互分布,导致煤储层力学与物性特征呈现强非均质性。现场工程实践表明,复杂煤体结构煤储层中水平井实钻井筒剖面多呈现不同的煤体结构相见分布,单一的完井与增产技术无法适应复杂煤体结构煤层水平井高效开发需求。因此,笔者开展复杂煤体结构煤储层水平井复合管柱完井方法研究,根据煤层的煤体结构、力学及物性特征选择筛管完井或套管射孔完井,并采用管外封隔器分段封隔完井管柱与井壁之间的环空,可为水力喷射、可控冲击波、注氮气和水力压裂等适应性增产作业提供有利条件,为煤层气稳定产出与煤粉控制提供保障。

1 复合管柱完井技术机理

1.1 复合管柱完井工艺机理

煤层水平井复合管柱完井技术主要包括采用筛管完井与套管完井,根据水平井段煤层煤体结构差异性,首先优化设计完井筛管与套管组合方式,进而确定管外封隔器的数量和安装位置,如图1所示。管外封隔器用于封隔井眼与完井管柱的环空,以实现复杂煤体结构煤层水平井眼分段完井。完井管柱内部为作业油管柱,两层管柱通过悬挂器与上部钻杆连接并延伸至井口。内层管柱在外层复合完井管柱(筛管柱+套管柱)下入过程中可建立井筒水力循环,清除井底堆积的煤屑,保障完井管柱下入安全。完井管柱下至设计位置后,通过内层管柱向煤层井筒注入破胶液,降解滞留的钻井液,清除井壁泥饼,

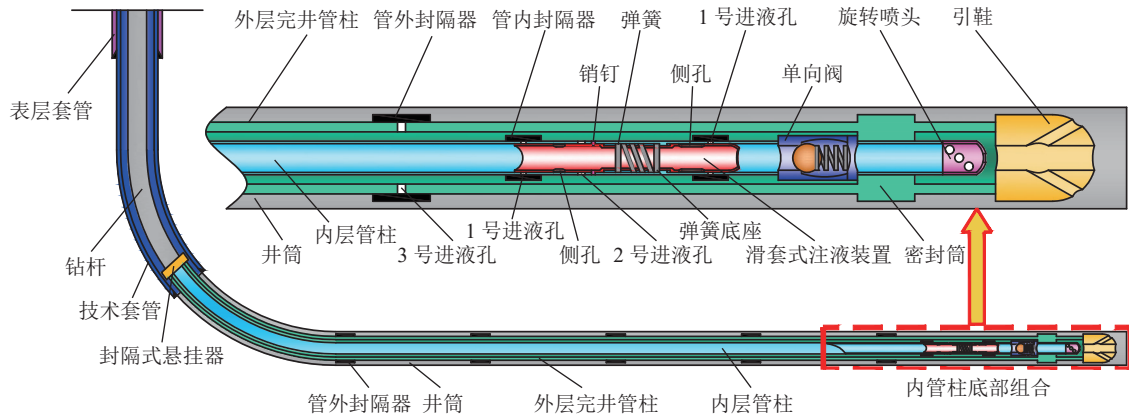


图1 煤层水平井复合管柱完井结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of horizontal completion with composite liner in coal seam

恢复近井煤储层的渗透性。最后,通过内层管柱底部组合逐个对完井管柱外封隔器进行液压胀封,完成水平井段煤层的分段完井作业。

煤层水平井眼的分段与封隔是复合管柱完井与增产的前提,水平井复合管柱完井工艺采用双管柱结构与滑套式注液装置。如图1所示,双管柱外层为筛管、套管、裸眼封隔器、定位套管、密封筒与引鞋(带侧向水眼)组成的完井管柱,简称外层管柱;内层为油管、2个管内封隔器、滑套式注液装置、单向阀与旋转喷头组成的作业管柱,简称内层管柱,双管柱通过悬挂器与上部钻杆连接,并延伸至井口。在双管柱下入过程中,旋转喷头位于密封筒与引鞋之间的套管内,钻井液流经钻杆、膨胀式悬挂器与内管柱后,由引鞋喷射冲洗井底堆积的煤屑,钻井液携带煤屑流经外管柱与井壁之间环空、钻杆与技术套管之间环空后上返至地面。双管柱下至设计位置后,通过悬挂器将外管柱悬挂于技术套管内壁,进而完成双层管柱之间的分离。拖动内层管柱使两个管内封隔器移动至管外封隔器两端定位套管位置,投球后液压剪切滑套式注液装置销钉,一级压力下流体经1号进液孔进入管内封隔器并完成其胀封;继续加压至二级压力,打开注液装置的侧孔,流体经2号、3号进液孔进入管外封隔器。管外封隔器注液压力达到预设值后其内部保压装置关闭3号进液孔,完成管外封隔器胀封后卸载内管柱的压力,注液装置的弹簧推动滑套上行并关闭侧孔,管内封隔器收缩复位,拖动内管柱逐个完成管外封隔器胀封后起出钻杆与内层管柱。

1.2 复合管柱完井技术关键装置及工艺流程

滑套式注液装置是液压式管内封隔器与管外封隔器胀封的关键装置,两个液压式管内封隔器连接

于滑套式注液装置两端,其间距不超过液压式裸眼封隔器两端定位套管的长度。双管柱下入过程中,底部组合如图2a所示,进入引鞋与密封筒之间套管内的作业油管(带喷头)长度可补偿双层管柱长度差值。双管柱遇阻或下至设计井深时,由内层管柱建立井筒钻井液循环,清除水平井底堆积煤屑,解除遇阻或完成洗井作业,如图2b所示。完成洗井作业后上提内层管柱,使2个管内封隔器横跨于管外封隔器两侧,向内层管柱投入金属球,并开泵注入洗井液驱动金属球到达滑套式注液装置前端的弧面球座,封闭内层管柱过液通道,如图2c所示。继续向内管柱内泵入洗井液,滑套在一级液压作用下剪断销钉并下行,1号进液孔与内管柱连通,洗井液由1号进液孔进入两个液压式管内封隔器,使其封隔内管柱与外管柱之间环空,如图2d所示。继续向内管柱内泵入洗井液,滑套在二级液压作用下压缩弹簧下行,2号进液孔与侧孔连通,洗井液流经侧孔、2号和3号进液孔进入液压式管外封隔器,其胶筒在液压下膨胀,并封隔外管柱与井壁之间环空,如图2e所示。停泵后卸载内管柱压力,弹簧推动滑套上行,并关闭2号进液孔,液压式管内封隔器胶筒内液体进入内管柱并回缩,管外封隔器在其内部保压装置下保持胀封状态,如图2f所示。完成单个管外封隔器胀封后,拖动内层管柱,重复上述步骤,逐个完成所有管外封隔器胀封,完成水平段井筒的分段完井。

2 工程计算模型

软杆模型^[25]与刚性模型^[26]是井下管柱力学经典计算模型,高德利^[27-28]采用有限差分法进一步完善井下管柱力学计算模型,并提出大位移井延伸极限量化计算模型,包括机械延伸极限、裸眼延伸极限和水力延伸极限。基于上述管柱受力模型与水力计

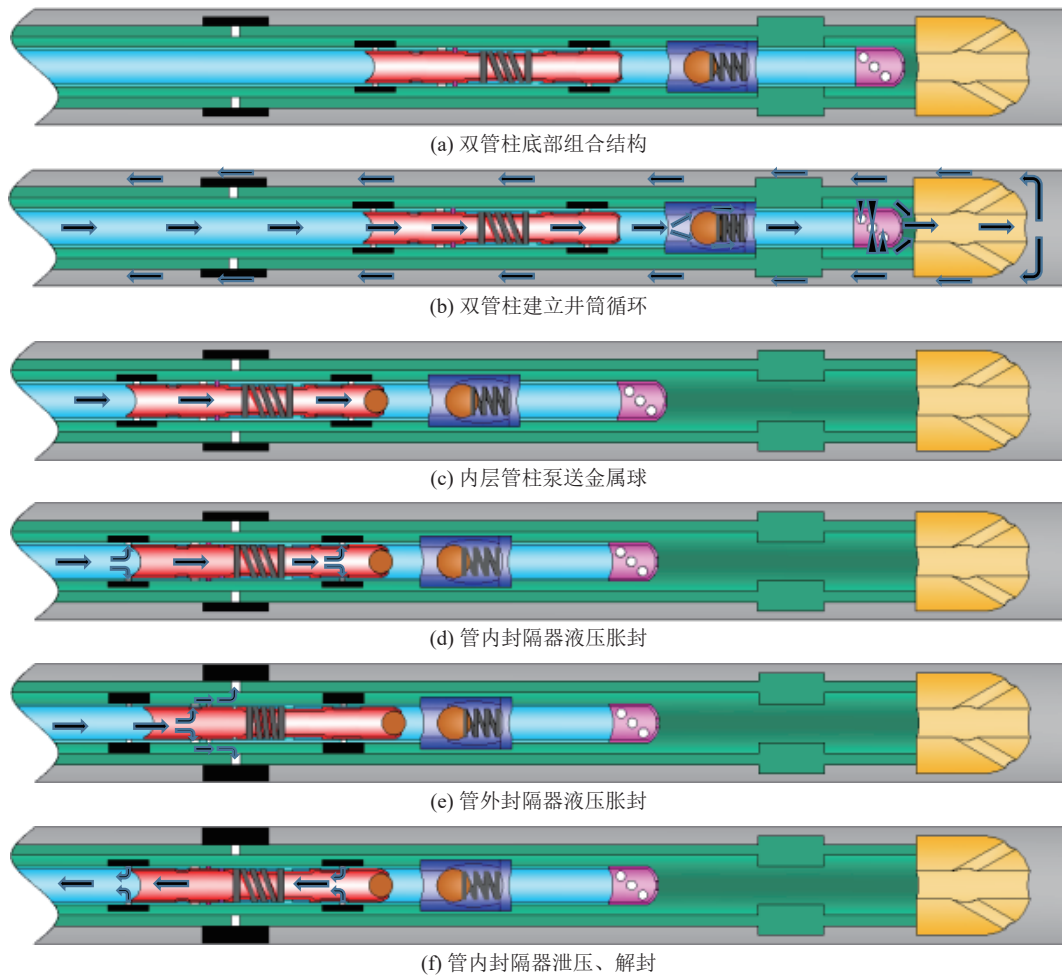


图2 水平井完井管柱外封隔器的胀封工艺流程

Fig.2 Expansion sealing process of ECP in horizontal well

算模型,以管柱螺旋屈曲和井下管柱水力损耗为约束条件,优化水平井双管柱受力与水力计算模型,对试验井的双管柱进行管柱力学与水力计算,为煤层水平井复合管柱完井工艺设计与控制提供理论依据。

2.1 假设条件

①完井管柱采用软杆模型;②采用三维井眼轨迹计算模型;③外管柱与井壁完全接触,管柱与井眼曲率相同;④忽略管柱上的剪力;⑤内管柱与外管柱完全接触,忽略管柱接头与刚性井下工具影响;⑥未考虑管柱动载荷的影响;⑦不计流体黏滞阻力对管柱力学与水力学计算影响。

2.2 井下管柱受力计算模型

采用迭代法计算水平井三维井筒的管柱轴向力,将井下管柱自下而上进行均匀离散,管柱微元下端轴向力为 T_{i+1} ,侧向力 F_n ,上端轴向力 T_i ,管柱微元轴向力计算公式如下^[29]:

$$T_i = T_{i+1} + \frac{L_s}{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)} [q \cos \bar{\alpha} \pm \mu (F_E + F_n)] \quad (1)$$

式中: i 为管柱微元编号。

管柱弯曲变形引起的侧向力为 F_E ,计算公式如下:

$$F_E = \begin{cases} 0, T(i) < F_{cr} \\ \frac{r_c T(i)^2}{8EI}, F_{cr} < T(i) < F_{hel} \\ \frac{r_c T(i)^2}{4EI}, T(i) > F_{hel} \end{cases} \quad (2)$$

单位长度管柱侧向力 F_n 为计算公式:

$$F_n = \frac{\sqrt{F_{ndp}^2 + F_{np}^2}}{L_s} \quad (3)$$

$$\begin{cases} q = q_2 + q_3, L > L_{dp} \\ q = q_1, L \leq L_{dp} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\bar{\alpha}$ 为管柱微元长度内井眼轨迹平均井斜角, ($^\circ$); μ 为外管柱与井壁之间摩擦因数,无量纲,下钻时取“+”,起钻时取“-”; θ 为管柱微元全角变化, ($^\circ$); L_s 为管柱微元长度, m; q 为完井管柱微元在井筒液体中的重力, N/m; q_1 为单位长度钻杆在井筒液体中的重力, N/m; q_2 为单位长度的内管柱在井筒液体中的重力, N/m; q_3 为单位长度的外管柱在井筒液体中的重

力, N/m; L 为管柱长度(从上往下), m; L_{dp} 为钻杆长度(从上往下); E 为钢材的弹性模量, Pa; I 为管柱横截面的惯性矩, m^4 ; r_c 为内外管柱或管柱与井壁之间的间隙, m; F_{ndp} 为全角平面的侧向力, N; F_{np} 为垂直于全角平面的侧向力, N。

2.3 井下管柱水力计算模型

忽略接头与短接造成的局部压力损失, 井下管柱水力损耗为 P_{sum} , 主要包括钻杆内外、内管柱内部、外管柱与井壁环空的循环压耗和喷嘴压降, 计算公式如下:

$$P_{sum} = P_1 + P_2 + P_3 \quad (5)$$

井下管柱管内压力损耗为 P_1 , 计算公式为

$$P_1 = \sum \frac{\rho}{g} v_p^2(i) f_p L_s \left(\frac{2}{d_i(i)} \right), \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

井下管柱与井壁之间环空的压力损耗为 P_2 , 计算公式为

$$P_2 = \sum v_a^2(i) \rho f_a L_s \left[\frac{2}{d_h - d_o(i)} \right], \quad i = 1, 3 \quad (7)$$

喷嘴处的压降为 P_3 , 计算公式为

$$P_3 = \frac{\rho v_f^2}{2C_d^2} \quad (8)$$

式中: ρ 为井筒液体密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; $v_p(i)$ 为管内液体流速($i=1$ 为钻杆, $i=2$ 时为内管柱); f_p 为管内流动摩擦因数, 无量纲; $d_i(i)$ 为管柱内径($i=1$ 为钻杆, $i=2$ 时为内管柱), m; $v_a(i)$ 为环空液体流速($i=1$ 为钻杆与套管环空, $i=3$ 时为外管柱与井壁环空); f_a 为环空流动摩擦因数, m/s; $d_o(i)$ 为管柱外径($i=1$ 为钻杆, $i=3$ 时为外管柱), m; d_h 为井眼直径, m; v_f 为喷嘴处流体流速, m/s; C_d 为喷嘴系数, 无量纲。

2.4 约束条件

忽略井下管柱正弦屈曲对管柱摩阻影响, 仅考虑管柱螺旋屈曲对井内管柱运动摩阻的影响, 计算公式^[30-32]如下:

$$F_{hel} = \begin{cases} 5.55(EIq^2)^{\frac{1}{3}}, & L < L_V \\ \frac{12EI}{r_c R} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{r_c R^2 q \sin \theta}{8EI}} \right), & L < L_B \\ 2(2\sqrt{2}-1) \sqrt{\frac{EIq \sin \theta}{r_c}}, & L < L_H \end{cases} \quad (9)$$

式中: F_{hel} 为管柱螺旋屈曲临界载荷, N; R 为曲率半径, m; L 为管柱长度, m; L_V 为直井段长度区间, m; L_B 为弯曲段长度区间, m; L_H 为水平井段长度区间, m。

3 现场试验

3.1 工程计算

3.1.1 井下管柱受力计算

试验井为一口停产水平井, 其二开采用 177.8 mm

套管下至 947.25 m, 三开采用 152.4 mm 钻头侧钻至 1 600 m 完钻。完井外管柱组合为 $\phi 127$ mm 引鞋 + $\phi 114.3$ mm 套管/筛管 + $\phi 146$ mm 裸眼封隔器; 内管柱组合为 $\phi 94$ mm 引鞋 + $\phi 60.3$ mm 油管 + $\phi 94$ mm 单流阀短节 + $\phi 60.3$ mm 油管短节 + $\phi 94$ mm 管内封隔器 + $\phi 60.3$ mm 油管 + $\phi 94$ mm 滑套式注液器 + $\phi 94$ mm 管内封隔器 + $\phi 94$ mm 安全接头; 作业管柱为 $\phi 88.9$ mm 钻杆延伸至地面。

针对该井实钻井眼轨迹与井身结构, 基于双管柱结构与井下管柱力学计算模型, 采用软件进行编程, 并计算该井双管柱受力, 完井管柱与技术套管之间摩擦因数设为 0.25, 完井管柱与井壁之间摩擦因数设为 0.35。双管柱与单层管柱的力学数值计算结果进行对比, 如图 3a 所示, 双管柱与单层管柱(套管或筛管)下至设计井深时, 井口的轴向力分别为 64 443.98、70 086.73 N; 如图 3b 所示, 双管柱与单层管柱(套管或筛管)上部作业管柱为相同钻杆, 在井斜角较小时管柱受到的侧向力相差较小, 随着井斜角与方位角增加, 双管柱受到的侧向力大于单层管柱(套管或筛管), 在水平段管柱受到的侧向力平均增幅超过 34 N/m。因此, 相比单层管柱(套管或筛管), 双管柱在弯曲段与水平段承受更大侧向力, 其下入过程中管柱受到更大的摩阻。同时, 数值计算结果显示, 该井双管柱下入过程中未发生螺旋屈曲, 现场施工过程中双管柱发生遇阻, 经过活动管柱与水力循环后, 解除遇阻并下至井底。

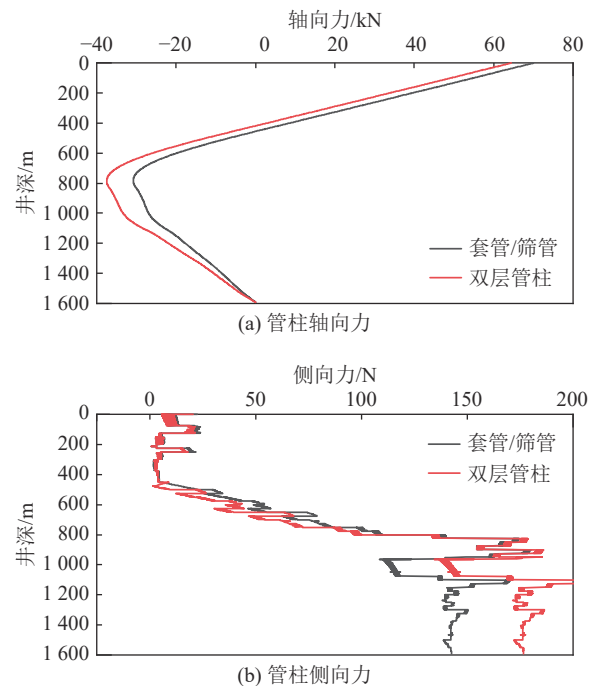


图 3 完井管柱轴向力与侧向力曲线

Fig.3 Axial force and lateral force curve of completion string

3.1.2 井下管柱水力计算

该井钻井液为幂律流体,密度 $\rho=1.05\text{ g/cm}^3$,流性指数 $n=0.5$,稠度系数 $k=0.47\text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ 。基于双管柱结

构与水力计算模型,采用软件编程并计算井下管柱水力损耗,进行井下管柱压耗分布及影响因素分析,如图4所示。

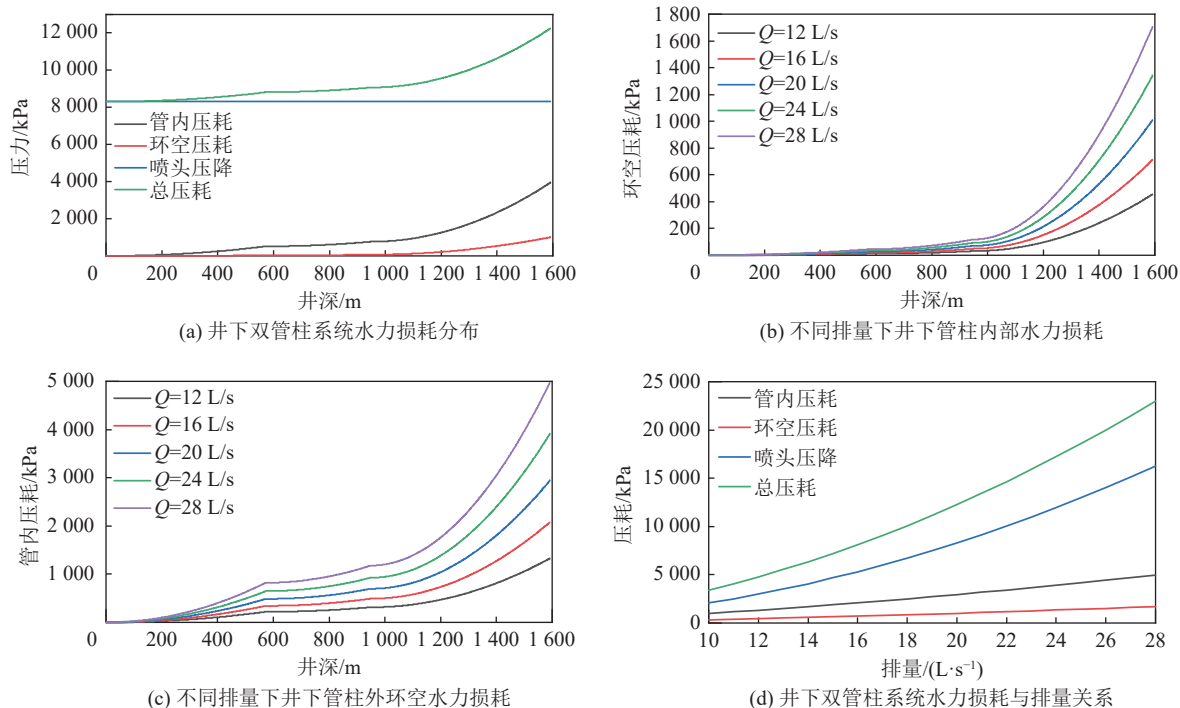


图4 水平井双管柱系统水力循环压耗曲线

Fig.4 Hydraulic loss of dual pipe system in horizontal well

如图4a所示,在泵排量20 L/s条件下,双管柱及作业管柱下至1592 m时,井下管柱内、管柱外环空、喷头压降与总压耗分别为3956.30、1010.62、8302.13、12258.43 kPa,喷头较高的压降以提供喷嘴高压水射流,冲击管柱前端堆积煤屑,以保障完井管柱顺利通过遇阻段。井下管柱的外环空包括钻杆与技术套管之间环空、管外环空双管柱与井壁组成的两个环空(即外管柱与井壁之间环空、内外管柱之间环空),如图4b、4c所示,管内与管外环空的水力压耗随着井深与排量增加而增大。如图4d所示,在双管柱下至井底时,井下管柱循环总压耗随着排量增加显著上升,其中喷头压降为主要因素,内管柱水力压耗为次要因素,管外环空水力压耗最小。根据该井煤层条件,双管柱下入过程中遇阻时的水力循环排量控制在16~20 L/s,防止煤层漏失与维持井壁稳定;在洗井作业时排量提升至20~24 L/s,增加环空排量以消除井壁泥饼与近井煤储层钻井液伤害。

3.2 试验概况

该试验井位于沁水盆地东北缘的阳泉地区,该区太原组15号煤层平均厚度为3.27 m,前期钻井取

心显示本区太原组15号煤层的煤体结构破碎变形严重,以碎粒煤为主,部分层段含有碎裂煤和糜棱煤,如图5所示。煤储层非均质性显著,煤心气测渗透率最小值 $0.0339\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,最大值 $15.3375\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,主要集中在 $0.1\times 10^{-3}\sim 0.5\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,其中渗透率值较大的岩心都是由于含有贯穿整个岩心的裂缝,完整煤岩岩心的渗透率峰值主要集中在 $0.05\times 10^{-3}\sim 0.2\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间。针对该区15号煤体结构破碎与强非均质性的特征,开展水平井复合管柱完井增产技术现场试验,该井煤层进尺和钻遇率分别为544 m、83.5%,水平井段实钻井眼轨迹与地层情况如图6所示(蓝色方框内为非煤地层)。该井水平段下入套管与筛管共计659.54 m,采用悬挂器固定于上层技术套挂内壁,通过4个裸眼封隔器将水平段分为4段,

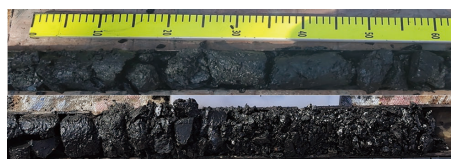


图5 区内太原组15号煤取心照片

Fig.5 Photo of No.15 coal core

其分段长度分别为 160.47、152.07、155.24、154.42 m，为后期储层分段增产改造提供封隔条件，裸眼封隔器与管内封隔器如表 1、表 2 和图 7 所示。该井在

试验前处于停产状态，煤层水平井眼分段完井后采用可控冲击波增透，投产后产气量达到 1 200 m³/d。

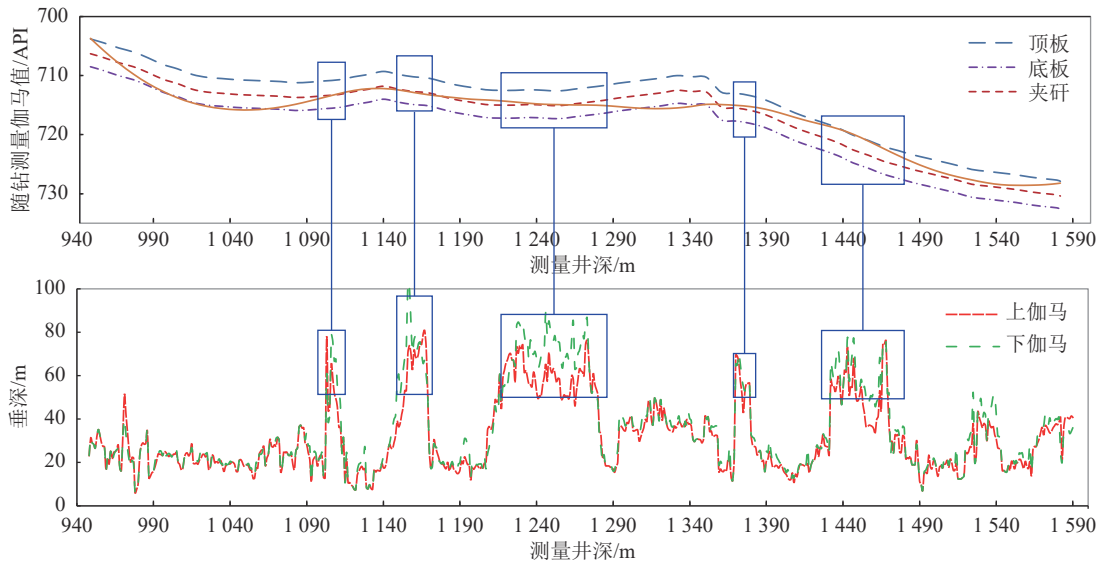


图 6 实钻水平井眼轨迹与随钻实测地层伽马值曲线

Fig.6 Horizontal wellbore trajectory and formation gamma curves

表 1 管外封隔器规格参数

Table 1 Specification parameters of ECP

序号	参数	取值
1	最大外径/mm	146
2	工具总长/mm	1 500
3	膨胀系数	1.4 ~ 1.6
4	内通径/mm	100
5	密封面长度/mm	1 100
6	启动压力/MPa	1 ~ 2
7	工作压力/MPa	20
8	适应井径/mm	152.4
9	工作直径/mm	155~241



(a) 管外封隔器 (b) 管内封隔器

图 7 管外封隔器与管内封隔器

Fig.7 Photo of ECP and tubing packer

表 2 管内封隔器规格参数

Table 2 Specification parameters of tubing packer

序号	参数	取值
1	最大外径/mm	94
2	内通径/mm	42
3	总长/mm	850
4	适用套管内径/mm	100-110
5	密封压差/MPa	20
6	工作温度/°C	120
7	扣型	23/8TBG

4 结 论

1)采用煤层水平井复合管柱完井方法，可以实现水平井段碎软煤筛管完井及原生煤层套管射孔完井，为后期差异性、多样化和适应性的煤储层增产改造提供了可靠的分段与封隔条件。

2)对双管柱受力和水力损耗的数值计算与分析结果，可为煤层气水平井复合管柱完井设计控制提供理论指导；通过优化设计双管柱结构与配套完井工具，可以实现双管柱入井、洗井及胀封裸眼封隔器等一趟完井作业，从而提高了作业效率减少了储层伤害。

3)通过现场试验表明,提出的煤层水平井复合管柱完井方法,可为复杂煤体结构煤层水平井适应性增产工程提供新技术支撑,具有良好的推广应用前景。

参考文献(References):

- [1] 高德利,毕延森,鲜保安. 中国煤层气高效开发井型与钻完井技术进展[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 1-18.
GAO Deli, BI Yansen, XIAN Baoan. Technical advances in well types and drilling & completion for high-efficient development of coalbed methane in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 1-18.
- [2] 曹运兴,石 玢,田 林,等. 低渗低压煤层水平井密集多簇压裂高效开发技术及应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(10): 3512-3522.
CAO Yunxing, SHI Bin, TIAN Lin, *et al.* Development and application of dense multi-cluster fracturing in horizontal wells for low permeability and low pressure coal reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(10): 3512-3522.
- [3] 许耀波,郭盛强. 软硬煤复合的煤层气水平井分段压裂技术及应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 1169-1177.
XU Yaobo, GUO Shengqiang. Technology and application of staged fracturing in coalbed methane horizontal well of soft and hard coal composite coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 1169-1177.
- [4] 边利恒,熊先钺,王 伟,等. 韩城区块煤体结构分布规律及射孔优化方法[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S1): 209-215.
BIAN Liheng, XIONG Xianyue, WANG Wei, *et al.* Distribution law of coal structure and perforation optimization method in Han cheng block[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 209-215.
- [5] ZHU Qingzhong, YANG Yanhui, WANG Yuting. Engineering geological models for efficient development of high-rank coalbed methane and their application e Taking the Qinshui Basin for example[J]. Natural Gas Industry B, 2018(5): 185-192.
- [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] 巫修平,张 群. 碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂裂缝扩展规律及控制机制[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(2): 268-276.
WU Xiuping, ZHANG Qun. Research on controlling mechanism of fracture propagation of multi-stage hydraulic fracturing horizontal well in roof of broken soft and low permeability coal seam[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(2): 268-276.
- [8] 魏迎春,闵洛平,常东亮,等. 基于测井资料的临汾区块煤体结构识别及其分布规律[J]. 中国煤炭, 2017, 44(4): 35-40.
WEI Yingchun, MIN Luoling, CHANG Dongliang. Structure identification and distribution regularities of coal in Linfen block based on well logging data[J]. China Coal, 2017, 44(4): 35-40.
- [9] 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.
- [10] PALMER I D, KUTAS G M. Hydraulic fracture height growth in San Juan Basin coalbeds. In: low permeability reservoirs symposium[C]. Low Permeability Reservoirs Symposium, Denver, Colorado, 1991.
- [11] PALMER I. Coalbed methane completions: a world view[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 82(3/4): 184-195.
- [12] TAO S, PAN Z J, TANG S L, *et al.* Current status and geological conditions for the applicability of CBM drilling technologies in China: a review[J]. International Journal of Coal Geology, 2019, 202: 95-108.
- [13] 魏新芳,徐 鑫,余金陵,等. 水平井分段完井工具的室内试验及现场应用[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(2): 55-57.
WEI Xinfang, XU Xin, YU Jinling, *et al.* Laboratory test and field application of horizontal segregated completion tools[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(2): 55-57.
- [14] XIAN Baoan, LIU Gaofeng, BI Yansen, *et al.* Coalbed methane recovery enhanced by screen pipe completion and jet flow washing of horizontal well double tubular strings[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 99: 104430.
- [15] 毕延森,鲜保安,张晓斌. 煤层气水平井玻璃钢筛管完井工艺技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(5): 106-111.
BI Yansen, XIAN Baoan, ZHANG Xiaobin. Fiber reinforced plastic screen pipe completion technology of coalbed methane horizontal well[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 106-111.
- [16] 鲜保安,王 力,张晓斌,等. 双管柱筛管完井技术在沁水煤层气区块水平井开发中的应用[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(4): 59-62.
XIAN Baoan, WANG Li, ZHANG Xiaobin, *et al.* Application of double string screen completion in horizontal wells of Qinshui CBM Block[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(4): 59-62.
- [17] 鲜保安,张 龙,哈尔滨·吐尔松,等. 煤层气储层伤害机理与水平井双层管柱筛管完井技术[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(9): 122-129.
XIAN Baoan, ZHANG Long, HA ERHENG·Tu'er song, *et al.* Damage mechanism of CBM reservoirs and double-layered screen pipes in the horizontal well completion[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(9): 122-129.
- [18] 李贵川,张锦虎,邓 拓,等. 煤层气水平井注氮增产改造技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(5): 54-58.
LI Guichuan, ZHANG Jinhui, DENG Tuo, *et al.* Gas output improvement and reconstruction technology of coalbed methane horizontal well by nitrogen injection[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 54-58.
- [19] 曹运兴,石 玢,周 丹,等. 煤层气低产井高压氮气闷井增产改造技术与应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2556-2565.

- CAO Yunxing, SHI Bin, ZHOU Dan, *et al.* Study and application of stimulation technology for low production CBM well through high pressure N₂ injection-soak[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2556–2565.
- [20] 尹 虎, 刘 辉, 李 黔, 等. 提高稠油水平井注蒸汽效率的技术研究[J]. *石油天然气学报*, 2011, 33(12): 119–123, 174–175.
YIN Hu, LIU Hui, LI Qian, *et al.* Technical research on improving efficiency of steam injection in horizontal wells for heavy oil reservoirs[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2011, 33(12): 119–123, 174–175.
- [21] 易勇刚, 张传新, 于会永, 等. 新疆油田水平井分段完井注汽技术[J]. *石油钻探技术*, 2012, 40(6): 79–83.
YI Yonggang, ZHANG Chuanxin, YU Huiyong, *et al.* Segregated completion and subsection steam injection for horizontal wells in Xinjiang Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2012, 40(6): 79–83.
- [22] 杜晓雪. 水平井分段完井分段注汽技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018: 1–2.
DU Xiaoxue. study on segregated completion and segregated steam injection technology for horizontal wells[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2018: 1–2.
- [23] 谢朝阳, 冯程斌, 谢建华. 大庆油田水平井分流压裂技术[J]. *油田化学*, 2007, 24(4): 310–315.
XIE Chaoyang, FENG Chengbin, XIE Jianhua. Distributary multiple hydrofracturing of horizontal wells in Daqing Oil Field[J]. *Oilfield Chemistry*, 2007, 24(4): 310–315.
- [24] 张春辉. 连续油管结合双封单卡压裂技术应用[J]. *石油矿场机械*, 2014, 43(5): 60–62.
ZHANG Chaohui. Application of coiled tubing frac technique using double-sealing and single-stick[J]. *Oil Field Equipment*, 2014, 43(5): 60–62.
- [25] JOHANCSEK C A, FRIESE D B, DAWSON R. Torque and drag in directional wells—prediction and measurement[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1984, 36(6): 987–992.
- [26] HO H S. An improved modeling program for computing the torque and drag in directional and deep wells[J]. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas*, 1988.
- [27] 高德利, 刘希圣, 徐秉业. 井眼轨迹控制[M]. 东营: 石油大学出版社, 1994.
- [28] GAO D L, TAN C J, TANG H X. Limit analysis of extended reach drilling in South China Sea[J]. *Petroleum Science*, 2009, 6(2): 166–171.
- [29] 高德利. 油气井管柱力学与工程[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 2006.
- [30] WU J, JUVKAM-WOLD H C. Coiled tubing buckling implication in drilling and completing horizontal wells[J]. *SPE Drilling & Completion*, 1995, 10(1): 16–21.
- [31] WU J, JUVKAM-WOLD H C. The effect of wellbore curvature on tubular buckling and lockup[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 1995, 117(3): 214–218.
- [32] WU J, Juvkam-Wold H C. Helical buckling of pipes in extended reach and horizontal wells—part 2: frictional drag analysis[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 1993, 115(3): 196–201.