

煤层气水平井捞砂技术优化与工程应用

张飞 王一兵 程璐 梅文博 杨琦 申文杰 曹超 来鹏 廖正凯 鲜保安 毕延森

引用本文:

张飞, 王一兵, 程璐, 等. 煤层气水平井捞砂技术优化与工程应用[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 220–230.

ZHANG Fei, WANG Yibing, CHENG Lu, et al. Optimization and application of sand bailing technology for coalbed methane horizontal wells[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(3): 220–230.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.11.0711>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤层气水平井开发的理论技术初探

Preliminarily exploring the theories and technologies for coalbed methane production using horizontal wells: Comparison of conditions for coalbed methane and shale gas exploitation

煤田地质与勘探. 2024, 52(4): 47–59 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.11.0794>

郑庄北中深部煤层气水平井产能影响因素及开发技术优化

Factors influencing the productivity and technology optimization of horizontal wells for moderately deep coalbed methane in the northern Zhengzhuang block

煤田地质与勘探. 2024, 52(6): 21–32 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.09.0594>

煤层气储层伤害机理与水平井双层管柱筛管完井技术

Damage mechanism of CBM reservoirs and double-layered screen pipes in the horizontal well completion

煤田地质与勘探. 2022, 50(9): 122–129 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.12.0811>

煤层气水平井无导眼地质导向钻进技术

Geosteering technology and CBM horizontal well drilling without pilot hole

煤田地质与勘探. 2020, 48(1): 233–239 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.01.032>

煤层气L型水平井防窜气排采控制方法研究

Anti-channeling methods for coalbed methane production using L-type horizontal wells

煤田地质与勘探. 2024, 52(5): 77–87 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.10.0660>

煤层顶板分段压裂水平井地质适应性分析与施工参数优化

Geological adaptability analysis and operational parameter optimization for staged fracturing horizontal wells in coal seam roof

煤田地质与勘探. 2022, 50(3): 183–192 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.01.0037>



移动阅读

张飞, 王一兵, 程璐, 等. 煤层气水平井捞砂技术优化与工程应用[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 220–230. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.11.0711

ZHANG Fei, WANG Yibing, CHENG Lu, et al. Optimization and application of sand bailing technology for coalbed methane horizontal wells[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(3): 220–230. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.11.0711

煤层气水平井捞砂技术优化与工程应用

张 飞^{1,2}, 王一兵³, 程 璐^{1,2}, 梅文博^{1,2}, 杨 琦^{1,2}, 申文杰^{1,2}, 曹 超^{1,2},
来 鹏³, 廖正凯³, 鲜保安^{4,5}, 毕延森^{4,5,*}

(1. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100015; 2. 三气共采省技术创新中心, 山西 太原 030032; 3. 新疆亚新煤层气投资开发(集团)有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830009; 4. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454003; 5. 河南省非常规能源地质与开发国际联合实验室, 河南 焦作 454003)

摘要: 【目的和方法】煤层气水平井生产面临完井管柱沉砂堆积、管壁结垢和卡泵等问题, 导致煤层气产量下降或停产, 严重制约了煤层气连续稳定生产, 机械捞砂方式清除井筒内煤粉和沉砂, 是恢复和提高水平井煤层气产量的有效工艺技术。针对煤层气水平井机械捞砂管柱密封性差、捞砂效率低和沉砂固结等难题, 优化设计并加工了爪式刮板笔尖、破砂钻头、偏心翻板和机械式旋转工具等。基于水平井机械式捞砂泵原理, 将水力附加轴向力引入管柱力学模型建立了管柱-水力耦合力学模型, 提出了水平井捞砂作业参数优化方法, 通过工程实例分析捞砂泵单冲程往复周期对储砂管内流体流动速度和煤粉运移能力影响、翻板吸入口开放度对水力附加轴向力影响, 对比分析管柱-水力耦合力学模型与常规力学模型计算管柱轴向力结果。【结果和结论】结果表明: (1) 爪式刮板笔尖通过结构优化提高了水平井管底沉砂破除效率, 机械式旋转工具配合破砂钻头和卡簧结构解决了管壁固结沉砂破除难题, 偏心翻板与球式单流阀增加了固-液两相流通过面积和密封性。(2) $\phi 110$ mm 捞砂泵在单冲程往复周期 60 s 条件下, 可运移颗粒直径不超过 2.5 mm 煤屑, 含有少量粒径 3~12 mm 煤屑, 能够有效运移水平井筒内堆积煤粉颗粒至储砂管内部; 捞砂泵上行、下行工况下管柱轴向力比常规起下钻分别增加 906.94 N、减小 37.41 N, 提高了捞砂作业管柱受力计算准确性。(3) 优化后的捞砂工具和工艺技术在沁水盆地 10 口水平井进行现场应用, 单井捞砂量和单次捞砂量分别提高 1.5 倍、0.9 倍, 日均产气量和日均产水量分别增加 1 483.7、2.18 m³, 为煤层气水平井高产稳产提供技术支撑, 适用于中浅埋深煤层筛管完井和套管射孔完井的水平井及大斜度井, 对推动煤层气高效开发具有重要实际意义。

关键词: 煤层气; 水平井; 捞砂工具; 管柱-水力耦合模型; 工程应用

中图分类号: TE257 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2025)03-0220-11

Optimization and application of sand bailing technology for coalbed methane horizontal wells

ZHANG Fei^{1,2}, WANG Yibing³, CHENG Lu^{1,2}, MEI Wenbo^{1,2}, YANG Qi^{1,2}, SHEN Wenjie^{1,2},
CAO Chao^{1,2}, LAI Peng³, LIAO Zhengkai³, XIAN Bao'an^{4,5}, BI Yansen^{4,5,*}

(1. China United Coalbed Methane Co., Ltd., Beijing 100015, China; 2. Provincial Center of Technology Innovation for Coal Measure Gas Co-Production, Taiyuan 030032, China; 3. Xinjiang Yaxin Coalbed Methane Investment and Development (Group) Co., Ltd., Urumqi 830009, China; 4. School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 5. Henan International Joint Laboratory for Unconventional Energy Geology and Development, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: [Objective and Methods] Coalbed methane (CBM) horizontal wells face challenges such as sand accumula-

收稿日期: 2024-11-18; 接收日期: 2025-02-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52234002, 42230814)

第一作者: 张飞, 1983 年生, 男, 陕西咸阳人, 高级工程师。E-mail: zhangfei2@cnooc.com.cn

*通信作者: 毕延森, 1986 年生, 男, 山东东营人, 博士, 讲师。E-mail: biyansen2014@163.com

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

tion in completion strings, pipe wall scaling, and pump sticking, leading to declined CBM production or shutdown of these wells. This severely restricts continuous, stable CBM production. Removing pulverized coals and sands from wellbores through mechanical sand bailing is recognized as an effective technique to restore and improve the CBM production of horizontal wells. To address challenges such as poor string sealing performance, low efficiency, and sand consolidation in mechanical sand bailing, this study created optimized tools including claw-shaped scraper tips, sand-breaking drill bits, eccentric flaps, and mechanical rotating tools. By introducing hydraulic additional axial force into the mechanical model of the sand bailing string based on the working principle of pumps for mechanical sand bailing in horizontal wells, this study established a string-hydraulic coupling mechanical model. Accordingly, this study proposed a method for optimizing sand bailing operation parameters. Through engineering application, this study analyzed the impacts of the single-stroke reciprocating cycle of the sand bailing pump on the fluid flow velocity in sand storage pipes and pulverized coal migration, as well as the impact of the opening degree of the flap's suction port on hydraulic additional axial force. Additionally, this study compared and analyzed the axial forces calculated using the string-hydraulic coupling model and a conventional mechanical model. [Results and Conclusions] The results indicate that claw-shaped scraper tips improve sand-breaking efficiency at the horizontal well bottom through structural optimization. The mechanical rotating tool, combined with sand-breaking drill bits and clip springs, effectively addresses the challenge of consolidated sand removal. Furthermore, the eccentric flap and ball-type check valve enhance the area of solid-liquid phases flowing through the flap and the string sealing performance. Under a single-stroke reciprocating cycle of 60 s, the $\phi 110$ -mm sand bailing pump can transport coal debris with particles diameters ≤ 2.5 mm and a small quantity of coal debris with particle sizes ranging from 3 mm to 12 mm, thus effectively transporting pulverized coals accumulating within wellbores into sand storage pipes. Compared to the conventional tripping, the axial forces of the sand bailing string increased by 906.94 N and decreased by 37.41 N, respectively under upward/downward conditions of the sand bailing pump, suggesting improved calculation accuracy of forces applied to the string. Field applications to 10 horizontal wells in the Qinshui Basin demonstrated that optimized tools and technologies increased single-well and per-operation sand bailing volumes by 1.5 times and 0.9 times, respectively, with the gas and water production rising by 1 483.7 m³/d and 2.18 m³/d, respectively. The optimized tools and technologies provide technical support for stable high-yield CBM horizontal wells. They apply to horizontal and highly deviated wells with screen or perforated casing completions in coal seams at medium-to-shallow depths, holding great practical significance for efficient CBM exploitation.

Keywords: coalbed methane (CBM); horizontal well; sand bailing tools; string-hydraulic coupling model; engineering application

水平井是我国煤层气高效开发关键技术, 针对浅部煤层结构与物理特征差异性形成了适用性井型与完井增产技术措施^[1-2], 水平井大规模水力压裂增产技术实现了深部煤层气产量突破, 推动深部煤层气勘探开发^[3-4]。针对煤体结构破碎储层, 形成了水平井双管柱筛管完井增产^[5-7]、复合管柱完井增产^[8-9]与超短半径水平井完井等技术^[10-11], 实现复杂结构煤层低成本高效开发。水平井筛管完井与储层压裂后均无法避免储层煤粉产出或支撑剂反吐问题, 在水平井生产管柱内形成沉砂床, 造成地层流体通道堵塞、产量下降或停产^[12-14]。同时, 水平井产出煤粉或支撑剂过量堆积会造成卡泵事故, 影响煤层气连续稳定生产^[15-16]。

煤层气水平井捞砂作业的目的是清除生产管柱内煤粉和沉砂, 以疏通地层流体产出通道, 恢复或提高单井产量。水力冲砂^[17]和机械捞砂^[18]技术是井筒清砂主要工艺, 煤层低压特征与排水产气机制不适用水力冲砂, 主要采用机械捞砂方式清除生产管柱内沉砂^[19-20]。目前, 煤层气水平井捞砂泵外径主要为 $\phi 70$ 、 $\phi 80$ mm, 并安置于直井段^[19-20], 长距离水平段对捞砂泵和管柱密

封性要求高。捞砂管柱前端采用斜面笔尖、单门翻板进行破砂、捞砂, 存在管柱密封性差、沉砂反流问题, 改进后砂铲提高了密封性, 但是有效过流面积有限^[19], 水平井机械捞砂管柱密封性与沉砂通过性问题仍未有效解决。部分煤层气水平井存在生产管柱沉砂固结(结垢)现象, 常规捞砂工具依靠管柱上下往复冲击难以破碎沉砂, 制约了捞砂完成率与效率^[21]。可旋转式捞砂泵传递井口扭矩至特殊笔尖^[22-23], 在一定程度上破除沉砂, 但是油管承受扭矩有限, 未能有效解决固结沉砂破除难题。以上问题造成管内沉砂残留、修井周期长、作业成本高, 严重影响了单井产量恢复, 亟需进行工具与工艺优化, 提高作业效率与效果。首先, 优化设计笔尖结构, 改变水平井生产套管内沉砂受力方式, 提高沉砂破除效率; 其次, 优化捞砂管柱底部管柱组合, 采用机械旋转工具配合破砂钻头, 将上部管柱轴向力转化为扭矩, 旋转钻除固结沉砂(结垢), 通过卡簧装置避免大块固结沉砂反流; 最后, 采用旋转轴偏心设置与球面密封设计, 提高翻板流固两相流有效通过面积和密封性, 采用球式单流阀设计提高储砂管密封性。通过上述工具与工艺

优化措施提高煤层气水平井捞砂作业效率与质量。

1 机械负压捞砂工具与管柱结构优化

基于现有煤层气水平井机械捞砂工具,优化设计捞砂泵规格、笔尖、球式单流阀、卡簧与破砂钻头等工具,优化组合作业管柱。如图 1 所示,爪式笔尖提高堆积沉砂层捞砂效率,偏心翻板提高沉砂或煤粉有效过流面积,球式单流阀防止储砂管砂或煤粉反流,优化后捞砂泵可进入完井管柱内部,结合密封性提升捞砂效率。针对水平井未固结沉砂或煤粉采用刮板式笔尖进行破砂,沉砂或煤粉在捞砂泵往复轴向运动产生的吸力作用下通过

爪式刮板笔尖、偏心翻板和球式单流阀进入储砂筒,流体经过捞砂泵出口排出,完成单次捞砂。管柱结构如图 1a 所示。刮板式笔尖难以破除水平井完井管柱固结沉砂或煤粉,更换为破砂钻头、卡簧与机械式旋转工具,如图 1b 所示。在作业管柱发生遇阻时,给破砂钻头施加钻压,机械式旋转工具将轴向运动转换为旋转运动,产生扭矩驱动破砂钻头破碎固结沉砂或煤粉,在捞砂泵抽吸作用下经过单向卡簧、偏心翻板和球式单流阀进入储砂筒,流体经过捞砂泵出口排出,完成单次捞砂。经过多次捞砂直至达到储砂筒许用容量或捞砂泵安全工作载荷,起出作业管柱,完成单趟捞砂作业。

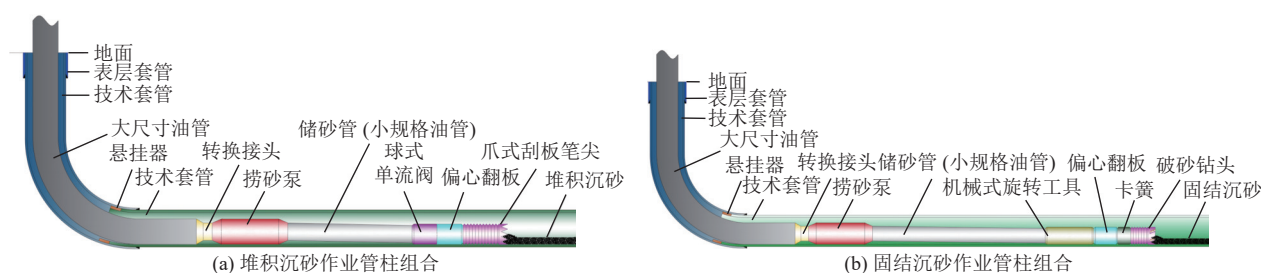


图 1 煤层气水平井机械捞砂管柱结构

Fig.1 Diagrams showing the structures of mechanical sand bailing strings for CBM horizontal wells

优化后捞砂工具与管柱结构提高了捞砂管柱密封性和捞砂泵工作效率,高效破除水平管柱固结沉砂层,提高单次捞砂体积,增加作业管柱下入长度,减少作业频次和周期。

1.1 爪式刮板笔尖

现有捞砂作业管柱前端笔尖为常规斜面笔尖(图 2a),笔尖尖端在完井管柱内几何位置无法控制,当笔尖尖端位于完井管柱底部时,对沉砂产生力矩 M_1 (图 2b),破砂效率最高;当笔尖尾端位于完井管柱底部时沉砂对其产生力矩 M_2 ,甚至导致笔尖上移,无法清

除完井管柱底部沉砂或煤粉。为了提高水平井完井管柱沉砂层破砂效率和清除效果,笔尖前端设计为 7 个爪式破砂牙,每个破砂牙为向内斜面设计;笔尖管外设计为锥形刮板,用于破坏管柱内侧面沉砂;笔尖中间设计分流隔板,防止笔尖筒被沉砂堵塞造成捞砂失效(图 3a)。爪式刮板笔尖任意尖端位于完井管柱底部时,尖端对岩屑产生力矩 M_3 (图 3b),破除沉砂层;尖端之间“V”形槽位于管柱底部时,其斜面对沉砂产生力矩 M_4 ,破除沉砂层。

图 2b 中受力公式如下:

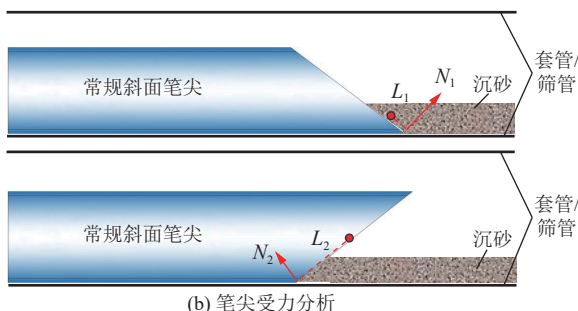
$$\begin{cases} M_1 = N_1 L_1 \\ M_2 = N_2 L_2 \end{cases} \quad (1)$$

图 3b 中受力公式如下:

$$\begin{cases} M_3 = N_3 L_3 \\ M_4 = \sum M_i \end{cases} \quad (2)$$



(a) 常规笔尖实物



(b) 笔尖受力分析

图 2 水平管柱内常规斜面笔尖与沉砂受力分析

Fig.2 Analysis of forces applied to a conventional bevel tip and sands in a horizontal casing

1.2 破砂钻头与卡簧

水平井完井管柱沉砂或煤粉存在固结现象,常规笔尖和捞砂方式难以破除结块,为了有效清除完井管柱底部固结沉砂或煤粉,优化设计破砂钻头,前端采用平式耐磨端面,前端管壁周向分布 3 个 L 形槽口,各槽口沿径向镶嵌 4 个 PDC 复合片,用于旋转破除固结沉砂层(图 4a)。破砂钻头末端安装卡簧,弹性簧片可正向通过沉砂或煤屑,并防止沉砂或煤屑返出(图 4b)。

1.3 偏心翻板与球式单流阀

如图 5a 所示,常规翻板在内外压力平衡时处于关

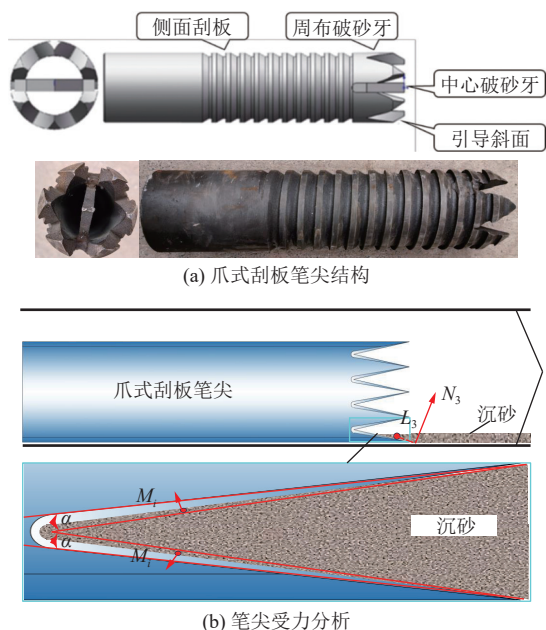


图 3 爪式刮板笔尖与沉砂在水平管柱内受力分析

Fig.3 Analysis of forces applied to claw-shaped scraper tip and sands in a horizontal casing



图 4 破砂钻头与卡簧

Fig.4 Sand-breaking drill bit and clip spring assembly

闭状态; 捞砂泵抽吸力和沉砂撞击力作用下翻板打开, 旋转轴与翻板限制翻板打开程度, 打开后通道形状为月牙状, 限制流体和沉砂过流面积, 在如图 5b 所示, 在沉砂冲击力作用下造成旋转轴失效。如图 6a 所示, 翻板偏心设计解除旋转轴对翻板旋转限制, 翻转角度达到 90° , 有效增加沉砂和流体通道, 避免旋转轴损坏导致翻板失效。翻板采用球面设计, 提高密封性, 适用于抽吸并储存大颗粒沉砂或煤屑。对于出砂或煤粉粒径较小水平井, 捞砂管柱安装球式单流阀, 控制小颗粒固相随流体单向进入储砂管, 防止固相流体反流, 如图 6b 所示。

1.4 机械旋转工具

如图 7 所示, 工具总长 2.48 m, 外筒直径 81 mm, 旋转内筒直径 70 mm, 伸缩行程 0.6 m, 旋转 2 圈。井

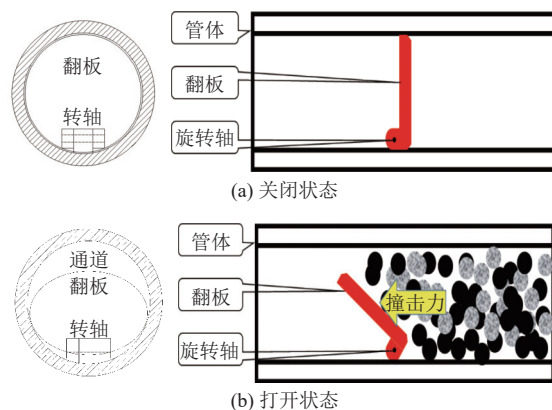


图 5 常规翻板及其工作原理

Fig.5 Conventional flap and its working principle

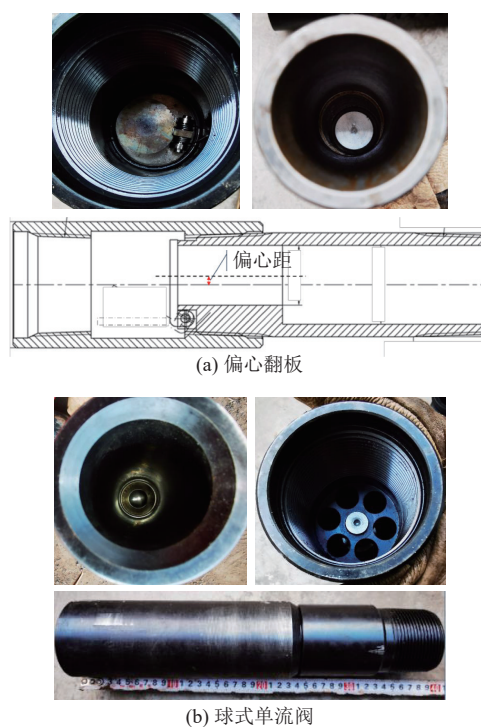


图 6 偏心翻板与球式单流阀

Fig.6 An eccentric flap and ball-type check valve

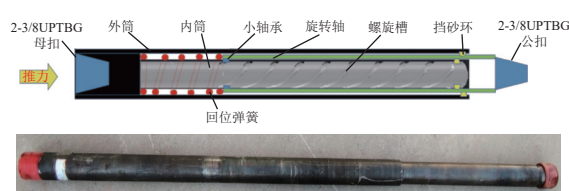


图 7 机械旋转工具

Fig.7 Mechanical rotating tool

下捞砂作业管柱遇阻时, 轴向加载压力至机械式旋转工具, 工具内旋转内筒沿螺旋槽转动, 驱动破岩钻头旋转破除固结沉砂层, 压缩弹簧储存弹性势能; 上提管柱, 旋转内筒在回位弹簧弹性势能作用下轴向复位, 完成单次旋转破砂; 重复上述步骤驱动机械式旋转工具与破岩钻头旋转破除水平井完井管柱底部固结沉砂。

2 水平井捞砂作业参数优化

2.1 假设条件

- (1) 井眼为规则圆形, 井壁对油管柱为刚性支撑, 管柱外壁与井壁连续完全接触。
- (2) 油管柱与井筒曲率相同。
- (3) 忽略管柱振动影响。
- (4) 井下管柱轴向以拉力为正、压力为负。
- (5) 油管柱匀速运动, 油管柱与完井管柱内壁之间为库伦摩擦。
- (6) 固相颗粒为密度和摩擦角均匀规则球体。
- (7) 井筒介质为清水, 忽略流体黏度影响。
- (8) 捞砂井低产或停产状态, 煤层气产出很少, 忽略煤层气对捞砂泵水力学与管柱力学参数计算影响。

2.2 约束条件

1) 管柱安全下入约束条件

油管柱发生螺旋屈曲后附加阻力增加, 管柱甚至发生自锁, 以油管柱螺旋屈曲临界值作为井下管柱安全下入约束条件^[24-26]。

$$\begin{cases} F_{hel}^1 = 5.55(EIq_t^2)^{\frac{1}{3}} \\ F_{hel}^2 = \left(\frac{12EI}{rR}\right)\left(1 + \sqrt{1 + \frac{rR^2q_t\sin\alpha}{8EI}}\right) \\ F_{hel}^3 = 2(2\sqrt{2}-1)\sqrt{\frac{EIq_t\sin\alpha}{r}} \end{cases} \quad (3)$$

2) 沉砂运移临界速度

基于水平井筒颗粒运移模型, 以煤粉颗粒运移所需流体流速作为沉砂运移临界速度 v_c ^[27-28], 笔尖或破砂钻头吸入口流速与储砂管内流速 v 为:

$$v > v_c \quad (4)$$

3) 捞砂泵安全工作能力

考虑捞砂泵工作稳定性与密封性, 以捞砂泵密封失效压力作为捞砂泵安全工作能力。

$$p_f(t) + p_t + p_{in} + p_p \leq c_s p_s \quad (5)$$

4) 储砂管最小长度

储砂管与完井管柱之间摩擦阻力大于捞砂泵轴向活塞运动阻尼时才能避免储砂管在完井管柱内轴向移动, 保证捞砂泵正常作业。

$$L_s > \frac{F_h}{\mu q_s} \quad (6)$$

2.3 管柱-流体力学耦合模型

高德利等^[29]基于经典管柱力学建立了井下管柱力学模型计算井下管柱轴向力。

$$\frac{dF_i}{dL} = -EI\kappa_i \frac{d\kappa_i}{dL} - q_i \cos\alpha \pm N_i \mu \quad (7)$$

综合考虑捞砂作业过程中管内流体流动摩阻产生的附加轴向力 F_h , 将管内流体流动压耗计算模型^[30]引入上述井下管柱力学模型, 采用有限差分法计算井下作业管柱轴向力, 计算公式如下:

$$\frac{dF_i}{dL} = -EI\kappa_i \frac{d\kappa_i}{dL} - q_i \cos\alpha \pm N_i \mu \pm F_h, \begin{cases} \text{if } i = 1, F_h \neq 0 \\ \text{else, } F_h = 0 \end{cases} \quad (8)$$

捞砂泵轴向上行时, 管内流体流动附加轴向力为:

$$F_h = (p_f(t) + p_t + p_{in} + p_p) A_s \quad (9)$$

其中, $t = \frac{(2j+1)T}{2}$

捞砂泵轴向下行时, 管内流体流动附加轴向力为:

$$F_h = (p_{out} + p_p) A_s \quad (10)$$

储砂管内流体流动压力损耗^[29-31]为:

$$p_t = \frac{2f\rho_t L_s v^2}{d} \quad (11)$$

捞砂泵吸入口与排除口压力降^[32]为:

$$\begin{cases} p_{in} = \frac{0.513559\rho_t q^2}{c^2 A_{in}^2} \\ p_{out} = \frac{0.513559\rho_t q^2}{c^2 A_{out}^2} \end{cases} \quad (12)$$

以储砂管固相颗粒运移临界流速为约束, 捞砂泵抽吸冲程周期为:

$$T \leq \frac{2L_s A_s}{v} \quad (13)$$

2.4 水平井捞砂工艺关键流程

(1) 根据通井作业井深确定捞砂作业深度, 利用井下管柱力学模型^[29], 采用有限差分法计算井下管柱轴向力, 以管柱螺旋屈曲临界载荷作为约束条件评价捞砂管柱下入可靠性, 进行管柱结构优化; (2) 基于井组产出煤粉统计数据预测出砂粒径, 采用水平井筒颗粒运移模型^[27-28]计算出煤粉运移临界流速, 优化设计储砂管长度与捞砂泵位置; (3) 基于本文提出采用管柱-流体耦合力学模型式(8), 采用有限差分法计算管柱轴向力, 以管柱螺旋屈曲临界载荷和捞砂泵安全工作能力为约束条件, 优化得到最佳捞砂泵单冲程往复周期和储砂管内流体流速参数; (4) 利用优化后管柱组合与作业参数完成捞砂作业后起钻, 主要工艺流程(图 8) 如下。

3 工程应用及效果

截至 2024 年 9 月底, 优化后水平井机械捞砂技术与装备在沁水盆地现场应用 10 口煤层气水平井, 在鄂东盆地东缘区块现场应用 1 口煤层气水平井, 总计推广应用超过 20 余口井。结合单井工程算例分析与整体应用效果分析对该技术进行评价。

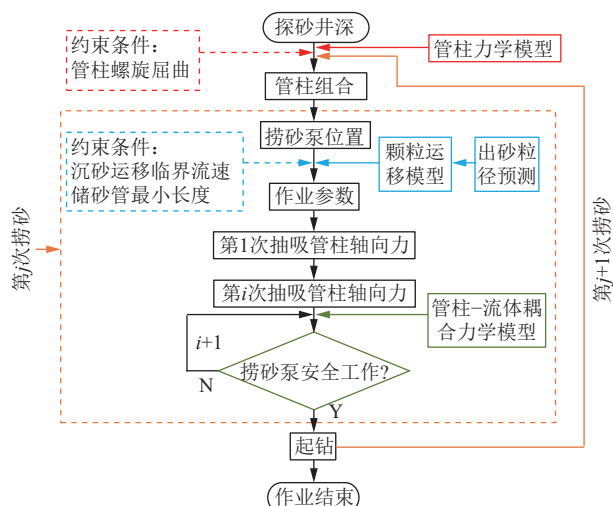


图8 水平井捞砂工艺流程优化

Fig.8 Optimized flow chart of the sand bailing process for horizontal wells

3.1 单井工程算例

沁水盆地 No.9 井目的层为石炭-二叠系太原组 15 号煤, 采用三开井身结构, 二开下入 $\phi 177.8$ mm 技术套管至 813 m, 三开下入 $\phi 114.3$ mm 钢筛管至 1 781.04 m, 悬挂器安置于 789 m, 水平段完井筛管长度 992.04 m, 捞砂作业管柱组合如图 9 所示。 $\phi 110$ mm 捞砂泵内筒 95.25 mm, 冲程 4.5 m。

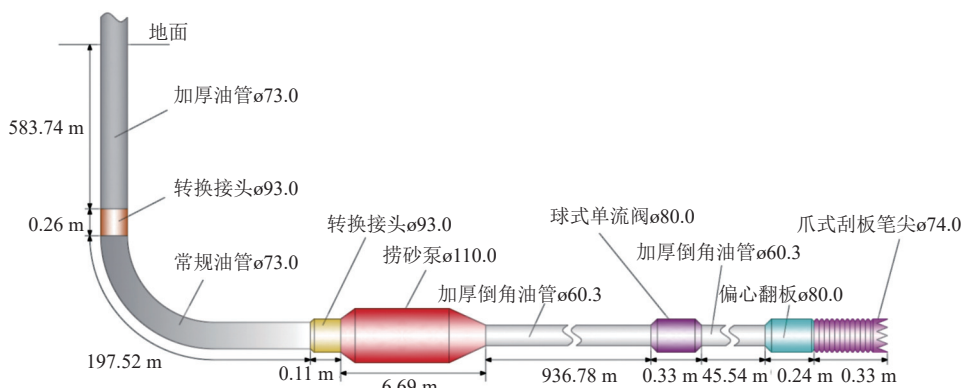


图9 No.9井捞砂作业管柱组合

Fig.9 Schematic diagram showing the assembly of the sand bailing string for the No.9 well

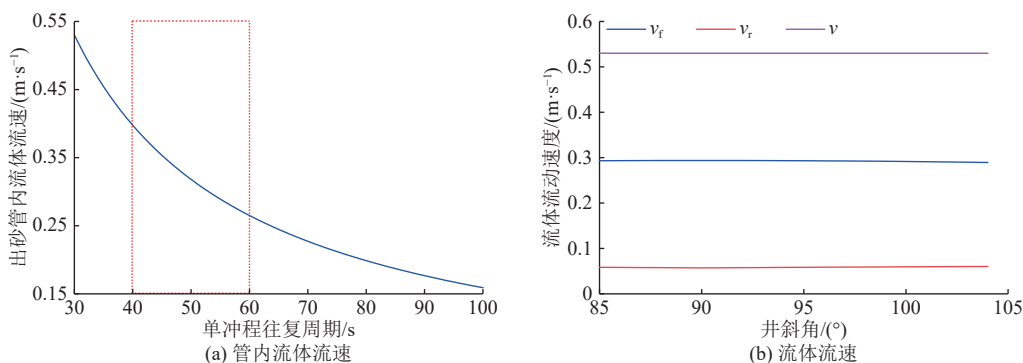


图10 煤粉临界运移流速与出砂管内流体流速

Fig.10 Curving of the critical migration velocity of pulverized coals and suction flow velocity in the sand storage pipe

3.1.1 煤粉运移流速计算分析

沁水盆地柿庄南区块 10 口水平井采集分析产出煤粉最大粒径 $237.74 \mu\text{m}$ ^[33], 捞砂泵到井底井段井斜角变化范围为 $85^\circ \sim 104^\circ$, 井筒流体为地层水, 计算得出煤粉运移临界流体流速。捞砂泵单冲程往复周期与储砂管内流速关系如图 10a 所示, 储砂管内流体流速随捞砂泵单冲程往复周期增加呈现非线性减小趋势, 结合捞砂泵现场应用情况, 单冲程往复周期 40~60 s 时捞砂泵工作最为稳定。如图 10b 所示, 根据水平井内固相颗粒运移计算公式^[34]得到煤粉翻滚运移临界流体流速 v_f 为 0.0614 m/s , 煤粉漂浮运移临界流体流速 v_t 为 0.29375 m/s ; 捞砂泵单冲程往复周期为 60 s 时储砂管内流体流动速度为 0.53 m/s , 可滚动方式运移粒径小于 2.5 mm 的煤屑颗粒, 可漂浮运移粒径小于 0.8 mm 的煤屑颗粒。如图 11 所示, 现场捞砂作业捞出固相以煤粉为主, 含有少量煤粒, 极少煤块, 较大颗粒主要以推动方式进入笔尖, 偏心翻板吸入口被部分封闭, 导致局部流速增加, 运移少量较大颗粒进入储砂管中, 个别大颗粒被直接推入储砂管内。

3.1.2 管柱力学计算分析

假设地层流体密度为 1000 kg/m^3 , 动力黏度为 $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 捞砂泵单冲程往复周期为 60 s, 初次单冲程往复周期内, 管柱内流体流动压力损耗计算结果见表 1。

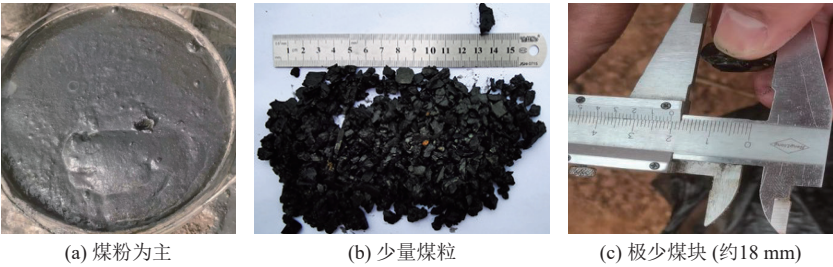


图 11 作业现场捞出煤屑、煤泥与煤块
Fig.11 Coal debris, slimes, and blocks fished out from the horizontal well

如图 12a 所示, 油管柱在 1 772 m 井深起下钻轴向力分别为 19 389.93、62 939.84 N, 未发生螺旋屈曲。如图 12b 所示, 在捞砂泵井深位置捞砂起钻和常规起钻管柱井口轴向力分别为 52 962.95、52 056.01 N, 水力压耗增加管柱轴向力 906.94 N, 捞砂下钻工况管柱轴向力分布见表 2。如图 12c 所示, 在捞砂泵井深位置捞砂下钻和常规下钻管柱井口轴向力分别为 32 316.43、32 353.84 N, 水力压耗减小管柱轴向力 37.41 N, 捞砂起钻工况管柱轴向力分布见表 3。

表 1 井筒流体流动压力损耗计算结果

Table 1 Calculated loss of fluid flow pressures in a wellbore

参数	数值	参数	数值
p_i/MPa	9.59×10^{-2}	$p_r(r=T/2)/\text{MPa}$	7.02×10^{-4}
p_m/MPa	4.47×10^{-4}	A_s/m^2	7.13×10^{-4}
p_p/MPa	5.33×10^{-4}	$F_{h\text{-}Drag}/\text{N}$	729.51
p_{out}/MPa	4.47×10^{-4}	$F_{h\text{-}Push}/\text{N}$	46.18

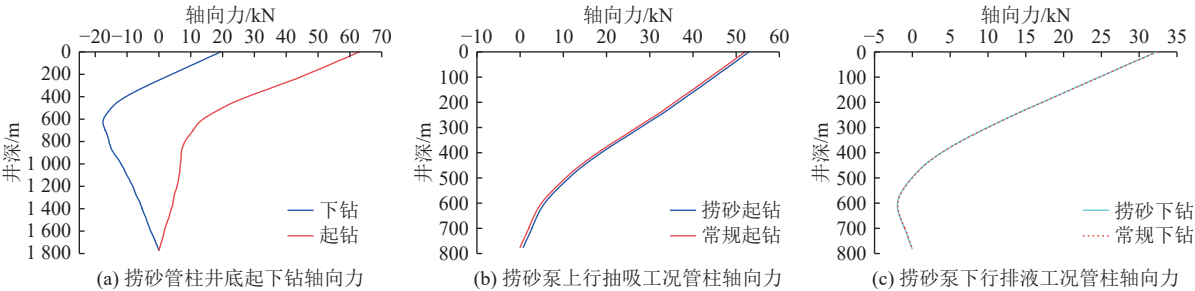


图 12 水平井捞砂作业管柱轴向力
Fig.12 Axial force curves of the sand bailing string in the horizontal well

表 2 沁水盆地煤层气水平井捞砂作业数据统计

Table 2 Statistics of sand bailing data of CBM horizontal wells in the Qinshui Basin

井号	水平段长度/m	捞砂次数	捞砂长度/m	煤泥体积/L	煤屑、煤块体积/L	单井捞砂完成率/%
No.1	613.35	1	607.26	1 010	20	99.01
No.2	766.41	4	766.07	2 700	42	99.96
No.3	638.87	3	634.30	2 560	50	99.28
No.4	855.25	5	848.82	6 190	17	99.25
No.5	768.57	2	359.53	1 140	6	46.78
No.6	678.99	4	476.87	4 930	83	70.23
No.7	866.88	5	770.50	14 020	191	88.88
No.8	677.08	3	672.64	2 720	38	99.34
No.9	992.04	3	983.18	5 970	37	99.11
No.10	759	3	733.17	2 400	450	96.60

注: 单井捞砂完成率/% = $\frac{\text{捞砂长度}}{\text{水平段长度}} \times 100\%$ 。

上述研究表明, 采用管柱-水力耦合力学模型计算得到管柱受力比常规管柱力学计算结果更贴捞砂作业管柱受力情况。随着捞砂管柱前端翻板吸入口沉砂堆积, 开放度由 100% 减小至 5%, 管柱井口轴向力与水力附加轴向力分别非线性增长 2 484.01、1 996.67 N 增长

趋势基本一致, 翻板吸入口开放度不小于 40% 时, 轴向力均增长缓慢; 翻板吸入口开放度 30% 减小至 15% 时, 轴向力均缓慢增加; 板吸入口开放度 15% 减小至 5% 时, 轴向力均显著增加, 如图 13 所示。

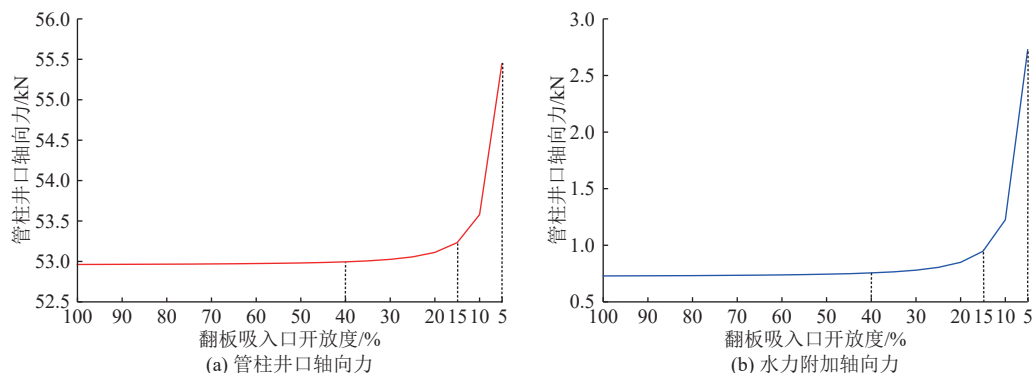


图13 翻板吸入口开放度与管柱轴向力关系

Fig.13 Curves of the relationship between the opening degree of the flap's suction port and the axial force of the sand bailing string

3.2 现场应用效果

3.2.1 施工效果

沁水盆地现场施工10口煤层气水平井筛管内捞砂作业,累计捞砂进尺6 852.34 m,单井最长捞砂进尺992.04 m。单井平均捞砂完成率89.84%,其中6口捞砂完成率超过99%;No.5井由于井下筛管异常,捞砂完成率为46.78%;No.6井和No.7井捞砂完成率分别为70.23%、88.88%,分析原因为井身轨迹复杂,煤层固结严重,作业管柱拖压严重,影响管柱前端轴向力传递;累

计捞出黑水煤泥43 640 L,颗粒煤块934 L,详细数据见表2。

3.2.2 捞砂效果

水平井机械负压工具与作业参数优化后,提高了捞砂作业下入长度,破砂和捞砂效率提升。工具和工艺优化后平均单井捞砂总量由1 844.5 L增加至4 614.8 L,提高1.5倍(图14);单井捞砂量平均值由624.1 L增加至1 215.4 L,提高0.9倍(图15)。

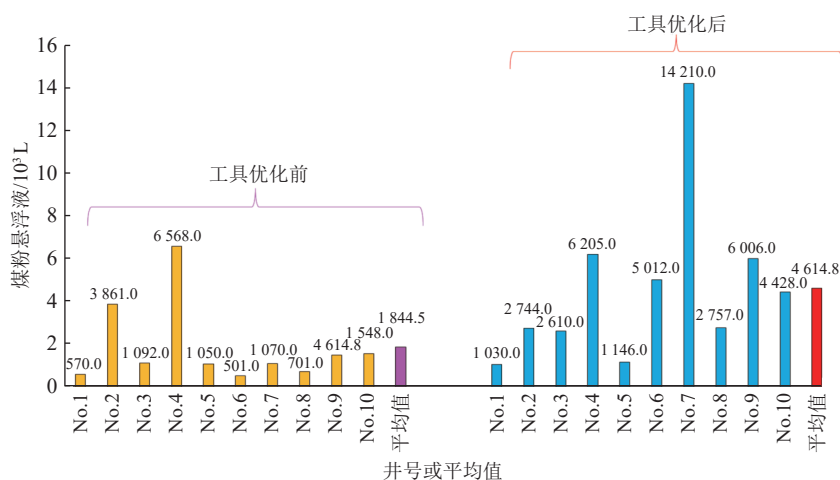


图14 捞砂工具与工艺优化前后单井总捞砂效果对比

Fig.14 Comparison of single-well total sand bailing volume before and after tool and process optimization

3.2.3 捞砂前后产量分析

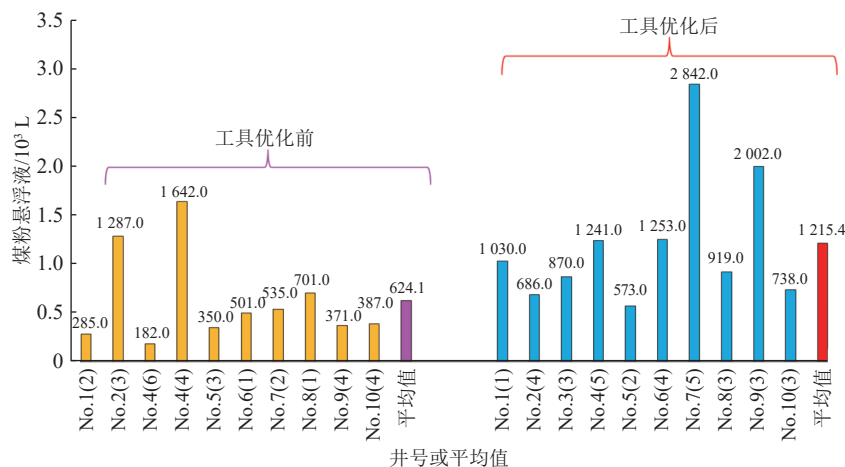
对比分析10口井捞砂前后2个月产水量与产气量的平均值,以评价捞砂作业效果。如图16所示,捞砂作业后单井平均日产水量由0.45 m³增加至2.63 m³,增量-0.16~8.20 m³,平均值为2.18 m³。如图17所示,捞砂作业后单井平均日产气量由4 574.10 m³增加至6 057.80 m³,单井日产气增加量为212~4 166 m³,平均1 483.70 m³。

如图18所示, No.7由于煤粉产出,稳定产气量由4 000 m³/d减产至131 m³/d,捞砂作业后恢复至

1 086 m³/d,产气量提高7.29倍; No.1井捞砂作业后日均产气量由12 283 m³恢复至16 449 m³。现场应用表明,优化后的捞砂技术解除了水平井筒煤粉堆积造成的减产或停产问题,提高了单井产水量与产气量。

4 结论

(1) 研制了爪式刮板笔尖、破砂钻头、偏心翻板和机械式旋转工具等装置,具有破砂效率高、旋转破除固结沉砂、高效密封等优势,解决了水平井机械捞砂管柱密封性差、捞砂效率低和沉砂固结等难题。



注: No.5(3) 为 No.5 井捞砂作业 3 次。

图 15 捞砂工具与工艺优化前后单井次平均捞砂效果对比

Fig.15 Comparison of average single-well, per-operation sand bailing volume before and after tool and process optimization

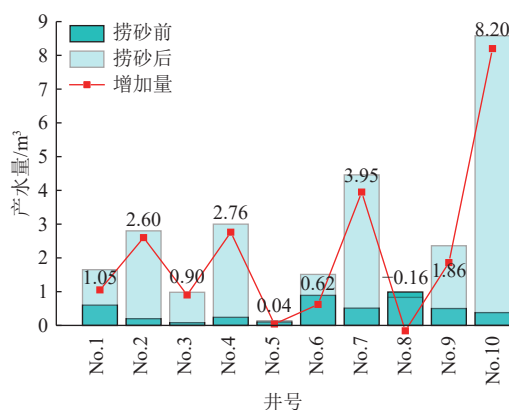


图 16 捞砂前后水平井产水量变化

Fig.16 Variations in the water production of horizontal wells before and after sand bailing

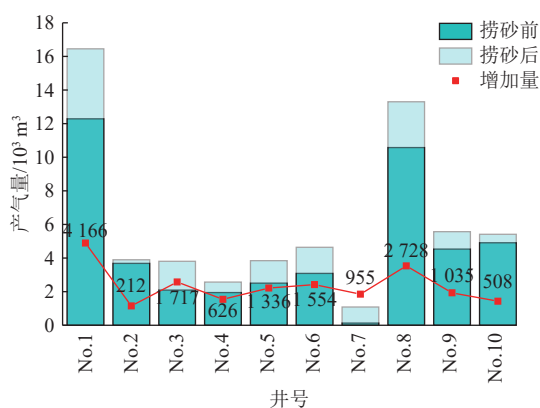


图 17 捞砂前后水平井产气量变化

Fig.17 Variations in the gas production of horizontal wells before and after sand bailing

(2) 优化后的管柱-流体耦合力学模型阐明了捞砂泵工作过程中水力循环压耗对井下管柱力学作用机制,准确揭示捞砂作业管柱力学行为,优化后工艺流程为捞砂作业提供技术指导。

(3) 研制的捞砂工具串和优化后的工艺技术在沁水

盆地 10 口水平井进行现场应用,单井平均捞砂完成率 89.84%,单井捞砂效率提高 1.5 倍,日均产气量和日均产液量分别提高 1483.7、2.18 m³,实现了中浅煤层气水平井生产管柱捞砂解堵和恢复产量目标,深部煤层气水平井需要进一步提高单趟捞砂作业效率以减少起下钻频次。

符号注释:

A_s 为捞砂泵活塞截面积, m^2 ; A_m 为捞砂泵吸入口过流面积, m^2 ; A_{out} 为捞砂泵排出口过流面积, m^2 ; c 为流量系数,取 0.95~0.98; c_s 为捞砂泵额定工作载荷安全系数,取 0.9; d 为储砂管内径, m ; dL 为管柱微元长度, m ; E 为油管柱弹性模量, Pa ; f 为管柱内流体流动时的摩擦因数; F_{h-Drag} 为捞砂管柱上行工况管内流体流动压耗附加力, N ; F_{h-Push} 为捞砂管柱下行工况管内流体流动压耗附加力, N ; F_t 为油管柱轴向拉力, N ; “+”代表下放管柱,“-”代表上提管柱; F_h 为管内流体流动压耗附加力, N ; F_c 为捞砂泵内筒活塞运动阻尼, N ; F_{hel}^1 、 F_{hel}^2 、 F_{hel}^3 分别为油管柱在直井段、弯曲段和水平段螺旋屈曲临界载荷, N ; I 为油管柱截面惯性矩, m^4 ; j 为正整数; L_c 为捞砂泵冲程, m ; L_1 为 N_1 与常规笔尖斜面沉砂质心之间力臂, m ; L_2 为 N_2 与常规笔尖斜面质心之间力臂, m ; L_3 为 N_3 与爪式刮板笔尖斜面沉砂质心之间力臂, m ; L_s 为储砂管(包含笔尖、翻板等附件)长度, m ; M_1 为正压力 N_1 与力臂 L_1 产生的力矩, $N \cdot m$; M_2 为正压力 N_2 与力臂 L_2 产生的力矩, $N \cdot m$; M_3 为正压力 N_3 与力臂 L_3 产生的力矩, $N \cdot m$; M_i 为笔尖 V 形槽斜面对沉砂产生力矩, $N \cdot m$; N_1 为常规笔尖斜面沉砂受到正压力, N ; N_2 为常规笔尖斜面受到正压力, N ; N_3 为爪式刮板笔尖单个尖端斜面沉砂受到正压力, N ; n 为正整数; p_t 储砂管流体流

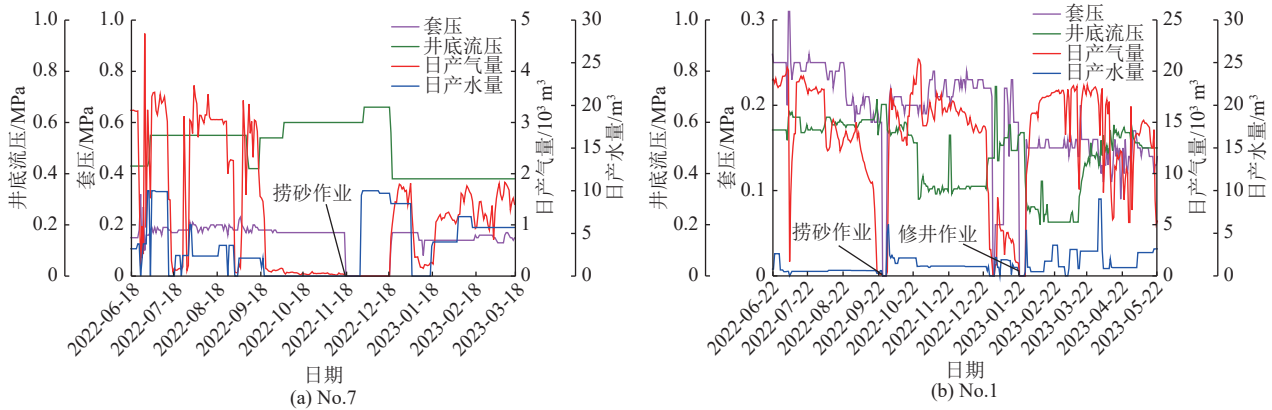


图 18 捞砂作业后水平井生产曲线
Fig.18 Production curves of horizontal wells after sand bailing

动压耗, MPa; p_p 为捞砂泵内筒流体流动压耗, MPa; $p_f(t)$ 为翻板吸入口压力降, MPa; p_m 为捞砂泵吸入口压力降, MPa; p_{out} 为捞砂泵排出口压力降, MPa; p_l 为储砂管流体流动压耗, MPa; p_s 为捞砂泵密封失效压力, MPa; q_l 为油管柱微元在井筒介质中重力, N; q_t 为油管柱微元在井筒介质中重力, N; q_s 为储砂管在井筒流体介质中重力, N; q 为抽吸流量, m^3 ; r 为油管与完井管柱之间的间隙, m; R 为井眼曲率半径, m; T 为捞砂泵内简单冲程往复周期, s; t 为捞砂泵作业时间, s; v_f 为煤粉颗粒悬浮运移临界流速, m/s; v_r 为煤粉颗粒滚动运移临界流速, m/s; κ_i 为井眼曲率, m^{-1} ; α 为井斜角, ($^\circ$); N_l 为油管柱与完井管柱之间接触力, N; μ 为油管与完井管柱之间摩擦因数; ρ_f 为钻井液密度, kg/m^3 。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] GAO Deli, BI Yansen, XIAN Bao'an. Technical advances in well type and drilling & completion for high-efficient development of coalbed methane in China[J]. *Natural Gas Industry B*, 2022, 9(6): 561–577.
- [2] 鲜保安, 高德利, 徐凤银, 等. 中国煤层气水平井钻完井技术研究进展[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1974–1992.
XIAN Bao'an, GAO Deli, XU Fengyin, et al. Research progress of coalbed methane horizontal well drilling and completion technology in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1974–1992.
- [3] XU Fengyin, HOU Wei, XIONG Xian Yue, et al. The status and development strategy of coalbed methane industry in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(4): 765–783.
- [4] 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.
- [5] XIAN Bao'an, 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.
- [6] 鲜保安, 张龙, 哈尔恒·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 Bao'an, ZHANG Long, HA ERHENG·Tu'ersong, 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.
- [7] 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 Bao'an, ZHANG Xiaobin. Fiber reinforced plastic screen pipe completion technology of coalbed methane horizontal well[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(5): 106–111.
- [8] 杨睿月, 黄中伟, 李根生, 等. 煤层气水平井水力喷射分段造穴技术探索[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(9): 3284–3297.
YANG Ruiyue, HUANG Zhongwei, LI Gensheng, et al. Investigation of hydraulic jet multistage cavity completion in coalbed methane horizontal wells[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(9): 3284–3297.
- [9] 毕延森, 高德利, 鲜保安. 煤层气水平井筛管密集分段径向射流增透方法[J]. *石油钻采工艺*, 2024, 46(1): 119–129.
BI Yansen, GAO Deli, XIAN Bao'an. Dense segmented radial jetting stimulation method of screen tube in coalbed methane horizontal well[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2024, 46(1): 119–129.
- [10] 毕延森, 鲜保安, 石小磊, 等. 超短半径水平井液压驱动非金属完井筛管下入长度计算[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(4): 818–827.
BI Yansen, XIAN Bao'an, SHI Xiaolei, et al. The extending length calculation of hydraulic drive non-metallic completion screen pipe running into ultra-short radius horizontal well[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(4): 818–827.
- [11] 毕延森, 鲜保安, 高德利. 煤层气 T 型水平井柔性筛管泵送下入技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(11): 170–175.

- BI Yansen, XIAN Bao'an, GAO Deli. Study on technology of flexible screen running for T-shaped CBM wells with pumping method[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(11): 170–175.
- [12] 陈振宏, 王一兵, 孙平. 煤粉产出对高煤阶煤层气井产能的影响及其控制[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(2): 229–232.
- CHEN Zhenhong, WANG Yibing, SUN Ping. Destructive influences and effectively treatments of coal powder to high rank coalbed methane production[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(2): 229–232.
- [13] 刘春花, 刘新福, 周超. 煤层气井排采过程中煤粉运移规律研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2015, 43(5): 23–26.
- LIU Chunhua, LIU Xinfu, ZHOU Chao. Migration patterns of coal powder in coal reservoirs during the well drainage[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2015, 43(5): 23–26.
- [14] 曹立虎, 张遂安, 张亚丽, 等. 煤层气水平井煤粉产出及运移特征[J]. *煤田地质与勘探*, 2014, 42(3): 31–35.
- CAO Lihu, ZHANG Sui'an, ZHANG Yali, et al. Investigation of coal powder generation and migration characteristics in coalbed methane horizontal well[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2014, 42(3): 31–35.
- [15] 陶树, 汤达祯, 许浩, 等. 沁南煤层气井产能影响因素分析及开发建议[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(2): 194–198.
- TAO Shu, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Analysis on influence factors of coalbed methane wells productivity and development proposals in southern Qinshui Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(2): 194–198.
- [16] 魏迎春, 孟涛, 张劲, 等. 不同煤体结构煤储层与煤层气井产出煤粉特征的关系: 以鄂尔多斯盆地东缘柳林区块为例[J]. *石油学报*, 2023, 44(6): 1000–1014.
- WEI Yingchun, MENG Tao, ZHANG Jin, et al. Relationship between coal reservoirs with different coal structures and the characteristics of coal fines produced in CBM wells: A case study of Liulin Block at the eastern margin of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(6): 1000–1014.
- [17] 宋彦武. 连续冲砂工艺技术的开发与应用[J]. *石油机械*, 2004, 32(8): 40–42.
- SONG Yanwu. Development and application of continuous sand washing technology[J]. *China Petroleum Machinery*, 2004, 32(8): 40–42.
- [18] 孙永壮, 杜丙国, 邵宣涛. 机械捞砂工艺研究[J]. *石油学报*, 2006, 27(6): 125–127.
- SUN Yongzhuang, DU Bingguo, SHAO Xuantao. Research on mechanical sand-bailing technology[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(6): 125–127.
- [19] 张晓飞, 刘征, 王德桂, 等. 煤层气水平井低伤害负压捞砂工艺[J]. *煤炭技术*, 2020, 39(12): 32–34.
- ZHANG Xiaofei, LIU Zheng, WANG Degui, et al. Low damage negative pressure sand bailing technology for CBM horizontal wells[J]. *Coal Technology*, 2020, 39(12): 32–34.
- [20] 朱焕玺. L 型煤层气水平井捞砂技术的研究与应用[J]. *中国煤层气*, 2020, 17(6): 9–11.
- ZHU Huanxi. Research and application of sand bailing technology in L-type coalbed methane horizontal wells[J]. *China Coalbed Methane*, 2020, 17(6): 9–11.
- [21] 郑瑞波. 井口传扭式钻进捞砂工艺的研究与应用[J]. *石油机械*, 2015, 43(4): 109–113.
- ZHENG Ruibo. Development and application of the wellhead torque-transmitting bailing-while-drilling techniques[J]. *China Petroleum Machinery*, 2015, 43(4): 109–113.
- [22] 张永红, 李玉魁, 葛东. 煤层气井机械捞砂技术[J]. *中国煤层气*, 2005, 2(1): 22–23.
- ZHANG Yonghong, LI Yukui, GE Dong. Mechanical sand fishing technology in coalbed methane well[J]. *China Coalbed Methane*, 2005, 2(1): 22–23.
- [23] 屈建红, 倪拥军, 刘杰. 煤层气水平井旋塞式捞砂工艺技术及其现场应用[J]. *石化技术*, 2022, 29(4): 6–7.
- QU Jianhong, NI Yongjun, LIU Jie. Plug sand bailing technology and its field application in CBM horizontal wells[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2022, 29(4): 6–7.
- [24] WU Jiang, JUVKAM-WOLD H C. Coiled tubing buckling implication in drilling and completing horizontal wells[J]. *SPE Drilling & Completion*, 1995, 10(1): 16–21.
- [25] WU Jiang, 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.
- [26] WU J, JUVKAM-WOLD H C, LU R. Preventing helical buckling of pipes in extended reach and horizontal wells[C]//American Society Mechanical Engineers. Energy-Sources Technology Conference. Houston: 1993.
- [27] 张好林, 李根生, 王伟, 等. 水平井井筒清洁临界流速简化模型[J]. *钻采工艺*, 2014, 37(4): 5–8.
- ZHANG Haolin, LI Gensheng, WANG Wei, et al. Simplified model of critical fluid velocity for hole cleaning of horizontal well[J]. *Drilling & Production Technology*, 2014, 37(4): 5–8.
- [28] BI Yansen, GAO Deli, XIAN Bao'an. The maximum installation depth for a pre-drilled liner with floating inner tubing in horizontal well in tectonically deformed coal seams[J]. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 2024, 35(2): 159–181.
- [29] 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.
- [30] 樊洪海. 实用钻井流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014.
- [31] GALLEGO F, SHAH S N. Friction pressure correlations for turbulent flow of drag reducing polymer solutions in straight and coiled tubing[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2009, 65(3/4): 147–161.
- [32] 沈忠厚. 水射流理论与技术[M]. 东营: 石油大学出版社, 1998.
- [33] 赵泽, 孔鹏, 张浩亮, 等. 煤层气井煤粉产出规律特征及主控因素研究[J]. *中国煤层气*, 2024, 21(3): 12–15.
- ZHAO Ze, KONG Peng, ZHANG Haoliang, et al. Research on characteristics and main control factors of coal powder production in coalbed methane wells[J]. *China Coalbed Methane*, 2024, 21(3): 12–15.
- [34] BI Yansen, GAO Deli, XIAN Bao'an. The maximum installation depth for a pre-drilled liner with floating inner tubing in horizontal well in tectonically deformed coal seams. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 2024, 35(2): 159–181.

(责任编辑 范章群)