

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2023061

引用格式: 赵金, 赵星, 蔡鹏, 等. 连续管多孔喷嘴射流工具研制与清洗参数优化 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(3): 83-89.

ZHAO Jin, ZHAO Xing, CAI Peng, et al. Development of coiled tubing jet tools with multi-hole nozzles and cleaning parameter optimization [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(3): 83-89.

连续管多孔喷嘴射流工具研制与清洗参数优化

赵 金¹, 赵 星², 蔡 鹏³, 彭 齐⁴, 饶嘉骥⁵

(1. 长江大学机械工程学院, 湖北荆州 434023; 2. 成都北方石油勘探开发技术有限公司, 四川成都 610501; 3. 中海油安全技术服务有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057; 4. 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 5. 中国石油玉门油田分公司环庆采油厂, 甘肃庆阳 735019)

摘 要: 连续管尺寸与喷嘴射流参数、泵车参数不匹配导致清洗效果较差, 针对该问题, 模拟了连续管、喷嘴组合及泵车水力参数的匹配关系, 通过试验分析了射流速度、喷嘴直径、喷嘴数量、移动速度和除垢剂对油管清洗效果的影响, 基于分析结果研制了新型多孔喷射清洗工具, 并进行了清洗参数优化。研究表明, 在管柱安全和管内空间允许的条件下, 选择大尺寸连续管, 可降低管内摩阻和提高流体返出速度; 针对井深不超过 3 000 m 的井 $\phi 73.0$ mm 油管除垢, 选用 $\phi 50.8$ mm 连续管, 柱塞直径 114.3 mm, 泵冲 90 min^{-1} , 功率 580 kW 的泵车, 可获得最优施工排量。针对七个泉油田油管除垢, 采用清水+5% 盐酸+1% 除垢剂, 射流除垢工具安装 5 个 $\phi 3.5$ mm 喷嘴, 施工排量 550~600 L/min, 移动速度为 5 m/min 时, 除垢效果较好。连续管射流除垢技术具有安全、环保、无污染等特点, 应用前景广阔。

关键词: 连续管; 水射流清洗; 旋转喷射; 射流工具; 参数优化; 清洗效率

中图分类号: TE24 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2023)03-0083-07

Development of Coiled Tubing Jet Tools with Multi-Hole Nozzles and Cleaning Parameter Optimization

ZHAO Jin¹, ZHAO Xing², CAI Peng³, PENG Qi⁴, RAO Jiaqi⁵

(1. School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei, 434023, China; 2. Chengdu North Petroleum Exploration and Development Technology Co. Ltd., Chengdu, Sichuan, 610501, China; 3. Zhanjiang Branch of CNOOC Safety & Technology Services Co. Ltd., Zhanjiang, Guangdong, 524057, China; 4. CNPC Engineering Technology R&D Company Limited, Beijing, 102206, China; 5. Huanqing Oil Production Plant, PetroChina Yumen Oilfield Company, Qingyang, Gansu, 735019, China)

Abstract: To solve the problem of poor cleaning effects caused by incorrect matching of coiled tubing (CT) sizes with nozzle jet parameters and pumper parameters, the influences of jet velocities, nozzle diameters, number of nozzles, movement velocities, and scale removers on tubing cleaning effects were studied through laboratory experiments by simulating the matching relationship among CTs, nozzle combinations, and hydraulic parameters of pumpers. Based on the analysis results, a new type of multi-hole jet cleaning tool was designed, and the parameters of which were optimized. The research shows that under the condition that the string is safe, and the space in the tubing is large, the CT with a large size can be selected to reduce the friction in the tubing and increase the flow return velocity. For the scale removing of $\phi 73$ mm tubing with the well depth of less than 3 000 m, the optimal construction displacement can be obtained by selecting a $\phi 50.8$ mm CT, a pumper plunger diameter of 114.3 mm, a pump speed of 90 min^{-1} , and a power of 580 kW. For the scale removing of tubing in Qigequan Oilfield, clean water was mixed with hydrochloric acid of 5% and a scale remover of 1%, the jet scale removing tool was equipped with five $\phi 3.5$ mm nozzles. In that case, the construction displacement is 550~600 L/min, and the movement velocity is 5 m/min. The results shows a good scale removing effect. CT jet scale removing technology is safe, environmentally friendly, and pollution-free, it has a great prospect for broad application.

Key words: coiled tubing; water jet cleaning; rotary jet; jet tool; parameter optimization; cleaning efficiency

收稿日期: 2022-12-26; 改回日期: 2023-05-20。

作者简介: 赵金 (1988—), 男, 湖北荆州人, 2010 年毕业于长江大学石油工程专业, 2021 年获西南石油大学油气田开发工程专业博士学位, 讲师, 主要从事非常规油气开发理论与技术及连续管作业工艺与工具的研究和教学工作。E-mail: zhaojin@yangtzeu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目“多物理场流固耦合支撑剂动态架桥缝网时空演化规律研究”(编号: 52204025) 资助。

油井在生产一段时间后,会出现结垢、结蜡等问题,导致管柱内径大幅缩小甚至堵塞,严重影响油井的生产和后期作业^[1-4]。随着水射流技术不断发展,连续管射流清洗技术已逐步应用于油井作业,其主要特点是在不起出井下管柱的情况下直接清洗管柱中的污垢,大大缩短作业时间,降低生产成本。国内外学者进行了大量相关研究,其中磨料水射流在除锈清洗和切割领域的研究已较为深入^[5]。李根生等人^[6-9]在水射流冲击破岩、射流流场数值模拟等方面做了大量的工作;连续管光纤实时遥测系统已被应用于沙特现场、海底生产管线、中东地区等不同应用场景的管柱除垢作业中^[10-12]。斯伦贝谢公司也推出了连续管清洗地面管线技术及评估方法,强调在连续管清洗作业前,需预先模拟施工压力,以确定施工排量与液体携屑能力是否匹配^[13]。目前有关射流清洗的研究大多采用数值模拟方法,主要集中在射流流场、速度分布等的模拟^[14-17],有关连续管多孔喷嘴射流清洗井下管柱的研究较少。连续管由于尺寸紧凑、摩阻高等,常规清洗工具的施工参数与其不匹配,导致施工压力高、射流速度低、清洗效果差、成功率低。

为此,笔者通过模拟计算优选了连续管尺寸、喷嘴直径、喷嘴数量和泵车参数,并在此基础上,通过喷嘴射流反推力实现自旋转与井筒全方位扫描清洗,同时采用阻尼脂限速,防止转速过快损坏配套部件,研制了旋转喷射清洗工具。通过室内试验分析了射流速度、喷嘴直径、喷嘴数量、移动速度以及除垢剂对油管清洗效果的影响,并根据试验结果优选了施工参数,进行了现场试验。

1 连续管射流清洗原理

传统管柱除垢方法需将管柱从井底起出,由于连续管具有快速起下、带压作业等优势,连续管作业技术已被广泛应用于油气井生产作业中^[18-19]。连续管射流清洗技术在管柱除垢中的优势体现在无需起出井下管柱,直接利用水射流清洗结垢,实现带压循环移动除垢,提高了施工效率,避免了垢样沉淀。

连续管旋转喷射清洗利用高压泵将地面流体升压,经过连续管输送至清洗工具内,在喷嘴出口形成高能射流。在高能射流反推力的作用下,喷头进行旋转运动,形成高压旋转射流。当旋转射流冲击力大于污垢抗拉、抗剪切强度时,污垢破碎被射流冲洗下来^[20-21]。连续管旋转喷射清洗的效果主要受

连续管尺寸、施工排量、泵压、环空返速、喷嘴孔径和数量等因素的影响。

2 连续管多孔喷射工具设计与优化

2.1 连续管尺寸优选

以井深不超过3000 m的井 $\phi 73.0$ mm油管除垢为例,介绍如何优选连续管尺寸。连续管尺寸的优选主要考虑连续管与油管的环空间隙(环空1)、油管与套管环空流速(环空2)、连续管内摩阻、油管与套管环空摩阻等。环空1间隙太小,连续管下入易遇阻;环空2流速太小,液体携带能力差,井筒内污垢返出困难。管内摩阻太高,喷嘴的孔径和数量匹配难度高,易导致施工泵压过高。为了优选合适尺寸的连续管,假定连续管的长度为3500 m、壁厚为4.45 mm,循环介质采用清水,流态为紊流。施工过程中,泵压一般不超过65 MPa,喷嘴压降一般为20 MPa,因此连续管内摩阻和油套环空摩阻须控制在45 MPa以内。连续管内摩阻和油套环空摩阻计算方法见参考文献[22-23],不同尺寸连续管的最大环空流速、最大施工排量、最大环空间隙计算结果如表1和图1所示。

随着连续管尺寸增大,最大施工排量和最大环空流速增大,但环空1间隙逐渐减小,不利于连续管起下。当连续管摩阻限压43.5 MPa时,选用 $\phi 60.3$ mm连续管,此时最大施工排量为1100 L/min,环空2流速可达2.58 m/s。此时,施工排量和环空2流速虽满足要求,但环空1间隙仅0.85 mm,不满足连续管作业技术要求。因此,选用 $\phi 50.8$ mm连续管,最大施工排量650 L/min、环空1间隙5.6 mm、最大环空流速1.48 m/s。而 $\phi 31.8$ 、 $\phi 38.1$ 和 $\phi 44.5$ mm连续管对应的施工排量上限和环空流速过低,喷嘴数量和孔径尺寸的选择受限,无法满足清洗要求,因此,选用 $\phi 50.8$ mm连续管施工,施工排量与喷嘴的数量和孔径匹配的空间更大,可满足工程要求。

2.2 喷嘴优化设计

为了进一步研究 $\phi 50.8$ mm连续管与喷嘴数量和孔径组合的匹配关系,还需研究施工排量在650 L/min以下、喷嘴压降接近20 MPa条件下,不同施工排量下喷嘴压降和射流速度的变化情况。射流清洗工具喷嘴的分布主要受喷嘴孔径、数量、射流速度的影响。喷嘴孔径太小,清洗过程中容易堵塞。相同施工排量下,喷嘴数量越多,射流速度越低,无法破碎污垢。为了研究施工排量对喷嘴孔径

表 1 不同尺寸连续管水力参数计算结果

Table 1 Hydraulic parameter calculation results of different CTs

外径/mm	内径/mm	排量/(L·min ⁻¹)	环空1间隙/mm	环空2流速/(m·s ⁻¹)	管内摩阻/MPa	环空2摩阻/MPa
60.3	51.4	1 100	0.85	2.58	41.60	3.91
50.8	41.9	650	5.60	1.48	43.10	1.52
44.5	35.6	420	8.75	0.96	42.90	0.69
38.1	29.2	250	11.95	0.57	43.70	0.27
31.8	22.9	130	15.10	0.30	43.20	0.08

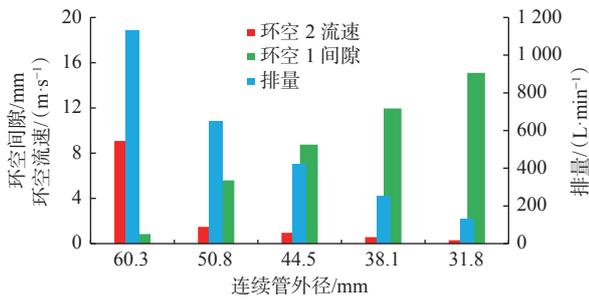


图 1 连续管尺寸优选
Fig.1 CT size optimization

和数量、射流速度及喷嘴压降的影响,假定喷嘴流量系数为 0.85,流体为清水,计算了直径分别为 4.5, 4.0 和 3.5 mm 等 3 种喷嘴组合的压降和射流速度,结果见图 2 和图 3。

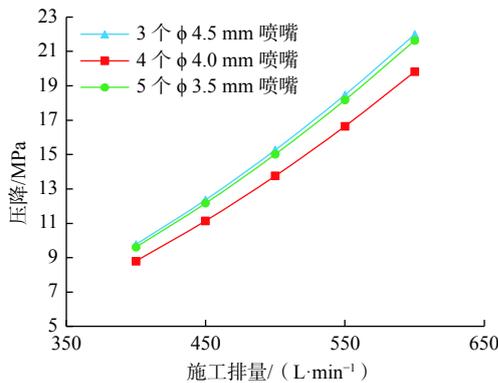


图 2 不同喷嘴组合压降与施工排量的关系

Fig.2 Relationship between pressure drop and displacement of different nozzle combinations

由图 2 和图 3 可看出:当施工排量在 400~600 L/min 时,3 种喷嘴组合的射流速度均在 130~210 m/s,压降在 8.80~21.98 MPa;当施工排量增加 100 L/min 时,3 种喷嘴组合的压降增加 5~6 MPa,射流速度增加 30~40 m/s,可见施工排量对射流参数影响较大。不同喷嘴组合连续管摩阻均满足施工泵压要求,当喷嘴压降一定时,喷嘴数量增加,射流

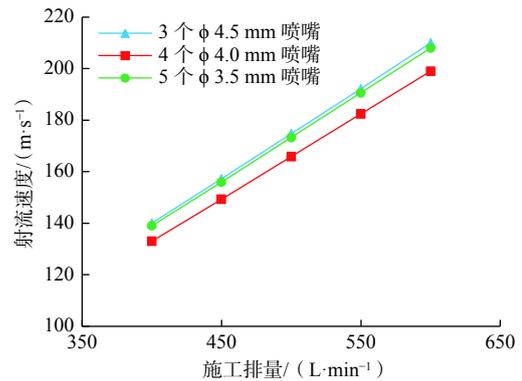


图 3 不同喷嘴组合射流速度与施工排量的关系

Fig.3 Relationship between jet velocity and displacement of different nozzle combinations

清洗范围增大,此时增加施工排量,射流速度随之增加,更利于清洗和垢样返排。因此,选用 $\phi 50.8$ mm 连续管,施工排量为 600 L/min、配备 5 个 $\phi 3.5$ mm 喷嘴时,除垢效果更好。

2.3 泵车参数优选

在实际施工过程中,现有泵车排量大多为阶梯式调控,实际排量很难精确达到优选排量。施工排量对射流速度和喷嘴压降较为敏感,因此在采用连续管多孔喷射作业时,需要泵车精确控制排量。为优选泵车参数,需进一步研究泵车参数与优选排量 600 L/min 的匹配关系,确定不同柱塞直径、泵冲、输入功率对应的泵车工作排量,常用的泵车性能参数见表 2。

当泵冲大于 90/min 时,4 种不同直径柱塞对应的最小排量为 652 L/min($\phi 95.3$ mm 柱塞)。由上述计算结果可知,在该排量下,泵压将超过 65 MPa,不利于安全施工。当泵冲为 90/min 时,采用 $\phi 114.3$ mm 柱塞,输入功率为 580 kW,排量为 563 L/min,接近优选排量,选择 $\phi 50.8$ mm 连续管、配备 5 个 $\phi 3.5$ mm 喷嘴,泵压低于 65 MPa,可满足施工要求。此外,针对连续管作业,研发小排量(1 000 L/min 以内)可无级调控的泵车对射流参数的精确控制至关重要。

表 2 泵车性能参数
Table 2 Pumper performance parameters

柱塞直径/ mm	不同泵冲下的排量和压力									
	90/min		150/min		200/min		250/min		300/min	
	排量/ (L·min ⁻¹)	压力/ MPa								
95.3	391	80	652	62.10	869	46.60	1086	37.30	1303	31.10
101.6	445	70	741	54.70	988	41.00	1236	32.80	1483	27.30
114.3	563	55	938	43.20	1251	32.40	1564	25.90	1876	21.60
127.0	695	45	1158	35.00	1544	26.20	1931	21.00	2317	17.50
输入功率/kW	580		750		750		750		750	

2.4 多孔射流工具结构设计

针对井深不超过 3 000 m 的井 $\phi 73.0$ mm 油管除垢, 基于上述优选参数, 设计了多孔射流清洗工具。该工具主要由上接头、密封圈、轴套、轴承、筒套、阻尼块、芯轴、挡块、压盖、喷嘴等部分组成, 如图 4 所示。芯轴的喷头内布置了 3 排喷嘴, 每排喷嘴相位角为 90°, 可安装 5 个清洗喷嘴, 5 个喷嘴与芯轴分别成 15°, 45°和 90°。喷嘴直径 3.0~5.0 mm, 施工前可根据泵压及排量, 安装合适直径和数量的喷嘴。该工具通过喷嘴射流反推力进行自旋转, 实现对井筒全方位扫描清洗, 同时为避免喷头旋转失速, 工具内部采用限速结构。在中部腔体内注入高黏度阻尼脂, 利用阻尼脂对旋转轴的粘滞力, 将喷头的旋转速度控制在合理的范围内, 防止转速过快导致配套部件损坏, 工具最大外径 43.0 mm, 长 0.43 m。施工过程中, 该工具可与多种规格连续管作业机和泵车配套, 同时由于其外径小、长度短, 喷嘴数量多, 下井过程中不易遇阻、清洗效果好、应用范围广。

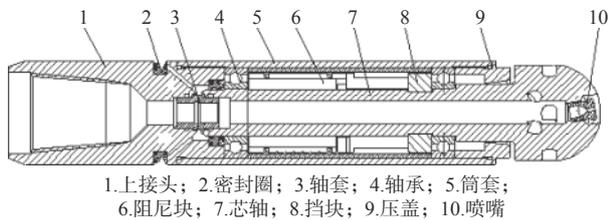


图 4 旋转喷射工具结构示意图
Fig.4 Structure of rotary jet tool

3 射流除垢试验

上述研究仅通过理论研究了施工排量与连续管摩擦阻、环空摩擦阻、环空返速、喷嘴数量、射流速度等

的关系以及泵压与泵车参数的匹配关系, 但还需通过试验进一步分析实际结垢油管的清洗效果, 并确定有效射流速度、喷嘴直径和数量、除垢剂类型和连续管移动速度对清洗效果的影响。试验所用高压泵额定工作压力为 80 MPa。利用液压调速缸控制射流除垢工具的移动速度。试验时的循环介质为清水, 结垢油管来自七个泉油田。试验装置如图 5 所示。

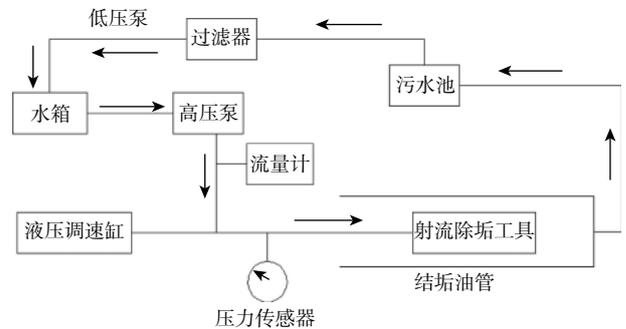


图 5 射流除垢试验流程

Fig.5 Experimental flow of jet scale removing

3.1 射流速度影响

为确定施工过程中射流速度对油管清洗效果的影响, 针对结垢油管(外径 73.0 mm, 内径 62.0 mm)进行射流清洗试验, 射流速度分别为 153, 173 和 203 m/s, 每一组排量除垢时间 20 min, 每次清洗后, 分别用塞规对油管通井, 测定油管内径, 对比清洗效果, 试验结果如表 3 和图 6 所示。

由表 3 和图 6 可看出: 当射流速度保持在 153 m/s 时, 仅清除部分结垢; 当射流速度为 173 m/s 时, 油管内壁清洗效果好, 清洗效果为 81%; 射流速度增至 203 m/s, 清洗效果增幅有限, 但此时对应排量会导致环空返速升高, 携垢能力增强。因此, 射流清

表 3 不同射流速度对清洗效果的影响

Table 3 Influence of different jet velocities on cleaning effect

试样	结垢油管 内径/mm	射流速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	清洗效果, %	喷射效果
试样1	59.0	153	56	铁垢残留
试样2	56.0	173	81	少量铁垢残留
试样3	56.0	203	84	少量铁垢残留

注: 清洗效果=清洗前后油管外径变化量/(标准油管外径-清洗前油管外径)。

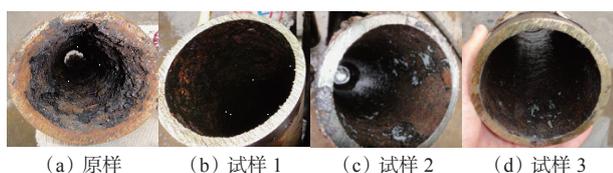


图 6 不同喷速油管清洗效果

Fig.6 Influence of different jet velocities on tubing cleaning

洗速度应不低于 173 m/s, 进一步证实排量为 550~600 L/min 时, 配备 5 个 $\phi 3.5$ mm 喷嘴, 对应射流速度为 190~208 m/s, 可满足要求。

3.2 喷嘴参数影响

喷嘴直径和数量直接影响了射流速度和射流清洗污垢的范围, 试验分析泵车排量 563 L/min 下不同喷嘴组合对油管除垢效果的影响, 射流速度分别为 195.70, 185.76 和 194.10 m/s, 其中 3 个 $\phi 4.5$ mm 喷嘴均匀分布在喷头上; 4 个 $\phi 4.0$ mm 喷嘴与喷头中心轴线成 90° ; 5 个 $\phi 3.5$ mm 喷嘴有 2 个与喷头中心轴线成 90° , 2 个与喷头中心轴线成 45° , 1 个与喷头中心轴线成 15° 。喷嘴参数和清洗效果见表 4。

表 4 不同喷嘴直径和数量清洗效果对比

Table 4 Comparison of cleaning effect with different nozzle diameters and numbers

喷嘴 数量	喷嘴直 径/mm	射流速 度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	结垢油管 内径/mm	清洗 效果, %	备注
3	4.5	195.70	56	83	污垢残留
4	4.0	185.76	56	85	少量污垢残留
5	3.5	194.10	56	87	少量腐蚀物附着

3 种喷嘴组合, 清洗污垢效果差别较小, 但 5 个 $\phi 3.5$ mm 喷嘴组合由于喷嘴多, 扫描范围大, 清洗效果最好, 因为位于 15° 方向的喷嘴首先能清除正前方的污垢; 位于 45° 方向的 2 个喷嘴能清除油管壁附着的垢; 位于 90° 方向的 2 个喷嘴能进一步清除残留

的硬垢层, 覆盖范围广。上述 3 个方向的 5 个喷嘴在喷射的同时, 还利用喷射产生的反推力产生扭矩, 使喷头高速旋转, 确保每个喷嘴都能 360° 对油管进行喷射清洗, 提升了清洗效果。

3.3 除垢剂影响

当水垢、油污垢、腐蚀垢类垢, 结垢严重时, 为了提高除垢效率, 需添加一定量除垢剂。进行清洗介质为清水+5% 盐酸+1% 除垢剂时的清洗试验, 以清水作为对照, 分析清洗效果。射流除垢工具采用 5 个 $\phi 3.5$ mm 喷嘴。为观测油管清洗效果, 将油管直接剖开, 原始垢样如图 7 所示, 清水清洗的效果如图 8 所示, 除垢剂的清洗效果如图 9 所示。



图 7 原始垢样

Fig.7 Original scale sample



图 8 清水清洗效果

Fig.8 Cleaning effect with water



图 9 除垢剂配液除垢效果

Fig.9 Cleaning effect with scale remover

由图 7—图 9 可知: 采用清水, 无法清除管壁内的铁屑垢; 采用除垢剂溶液, 油管中的铁锈大部分被清除, 油管内壁均见金属亮斑, 其原因在于试验过程中工具被固定, 清洗范围有限。

3.4 移动速度影响

在实际施工中, 连续管的起下速度对清洗效果具有一定影响。为此, 采用 4 组结垢油管, 将喷头旋转速度均控制在 100~200 r/min, 进行连续管不同移动速度下的清洗试验, 结果见表 5。由表 5 可看出:

连续管的移动速度越低, 结垢油管清洗地越干净; 当连续管的移动速度为 5 m/min 时, 除垢效果较好。

表 5 移动速度对清洗效果的影响

Table 5 Influence of movement velocities on cleaning effect

试样	原油管内径/mm	移动速度/(m·min ⁻¹)	清洗效果, %	备注
1	54.0	15	78	内壁残留大量腐蚀物
2	54.0	10	82	内壁残留部分垢
3	54.0	8	87	内壁残留少量垢
4	54.5	5	92	油管内壁基本干净

4 现场试验

TX-17 井是七个泉油田的一口生产直井, 该井完钻井深 3 200 m, 油层深度 3 120~3 125 m。地层压力系数为 0.92~1.13, 测井解释渗透率 11.5 mD、孔隙度 15%、含油饱和度 20%, 射孔投产后含水率 50%。生产油管外径 73.0 mm, 内径 62.0 mm。由于温度压力、地层水矿化度等因素的影响, 生产过程中井筒结垢严重, 造成油管内通道堵塞致使该井减产。采用常规修井手段, 用高密度钻井液液压井易造成钻井液漏失, 污染地层, 作业周期长、成本高, 且产能恢复成功率不理想。为疏通井筒, 利用通井刮削的机械除垢方式对井筒进行了处理, 但受刮削工具尺寸影响, 井筒仍有大量残余垢。为弥补机械除垢方法的不足, 采用多孔旋转射流喷射工具进行连续油管清洗。

选用 $\phi 50.8$ mm 的 3 500 m 长连续管, 工具组合由上至下依次为连接器、双活瓣单流阀、液压丢手、扶正器、多孔旋转喷射清洗工具(5 个 $\phi 3.5$ mm 喷嘴), 泵车柱塞直径为 114.3 mm, 循环介质为 2% KCl 溶液。工具入井初始载荷为 -5 kN, 下至井深 250 m 时, 载荷为 0 kN, 下至井深 1 000 m 时, 载荷为 35 kN, 下至井深 2 000 m, 载荷为 80 kN。当连续管下至井深 2 536 m 时, 开始进行除垢作业。开泵排量 563 L/min, 泵压 58 MPa, 泵入 5% 盐酸+1% 除垢剂 10 L 后, 泵入换 KCl 溶液 30 L 进行顶替, 连续管顺利通过。继续下入, 连续管在井深 2 780, 3 012, 3 120 和 3 125 m 处遇阻, 继续循环, 连续管下入速度控制在 5 m/min, 反复起下连续管进行清洗除垢, 最终连续管成功下至井深 3 140 m, 洗井成功, 清洗效率达 90%。施工后油井产量由 1 t/d 恢复至 35 t/d, 连

续油管射流清洗技术有效解决了油井因结垢而导致的停产问题, 降低了生产成本。

5 结论

1) 在管柱安全和连续管入井空间允许的条件下, 采用大尺寸连续管, 施工排量、喷嘴直径和数量及泵车参数匹配的空间更大。

2) 针对井深不超过 3 000 m 的井、清洗 $\phi 73.0$ mm 油管, 选用 $\phi 50.8$ mm 连续管、配备 5 个 $\phi 3.5$ mm 喷嘴, 采用 $\phi 114.3$ mm 柱塞、泵冲 90/min 的泵车, 可达到作业要求。

3) 对于七个泉油田的油管除垢, 射流速度应不低于 173 m/s, 采用清水+5% 盐酸+1% 除垢剂的介质可提高铁垢清洗效果。TX-17 井射流除垢试验表明, 连续油管射流清洗技术可有效解决油井因结垢导致的停产问题, 具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

References

- [1] 沈晓明, 李根生, 马加计, 等. 油管结垢机理及水力清垢技术研究[J]. 石油钻探技术, 1996, 24(3): 43-45.
SHEN Xiaoming, LI Gensheng, MA Jiayi, et al. Study on scaling mechanism and hydraulic cleaning technology of tubing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1996, 24(3): 43-45.
- [2] 彭兴, 周玉仓, 朱智超, 等. 延川南深部煤层气井防漏堵漏技术[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(1): 47-52.
PENG Xing, ZHOU Yucang, ZHU Zhichao, et al. Antileaking and lost circulation control technology for deep coalbed methane well in the Yanchuannan Block[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(1): 47-52.
- [3] 张锦宏. 中国石化页岩油工程技术现状与发展展望[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(4): 8-13.
ZHANG Jinhong. Present status and development prospects of Sinopec shale oil engineering technologies[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 8-13.
- [4] 张启龙, 许杰, 高斌, 等. 以抑制管柱结垢腐蚀为目标的注水井水源选择方法研究及应用[J]. 表面技术, 2019, 48(11): 290-296.
ZHANG Qilong, XU Jie, GAO Bin, et al. Research and application of water source selection method for water injection well aiming at inhibiting scaling and corrosion of pipe string[J]. Surface Technology, 2019, 48(11): 290-296.
- [5] 弓永军. 磨料水射流切割技术研究现状及其发展趋势[J]. 液压与气动, 2016(10): 1-5.
GONG Yongjun. Research status and development trend of abrasive water jet cutting technology[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2016(10): 1-5.
- [6] 李敬彬, 李根生, 黄中伟, 等. 新型旋转射流多孔喷嘴流场的分析[J]. 流体机械, 2015, 43(7): 32-36.
LI Jingbin, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Flow field study on a new kind swirling multi-orifices nozzle[J]. Fluid Machinery,

- 2015, 43(7): 32–36.
- [7] 李根生, 马加骥, 陈洪兵, 等. 高压水射流清除油管结垢的研究 [J]. 石油钻采工艺, 1995, 17(2): 61–64.
LI Gensheng, MA Jiayi, CHEN Hongbing, et al. Study on the descaling of calcium carbonate on water-injection pipeline by high pressure water jet[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1995, 17(2): 61–64.
- [8] 张逸群, 胡萧, 武晓亚, 等. 旋转射流冲蚀天然气水合物试验及数值模拟研究 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(3): 24–33.
ZHANG Yiqun, HU Xiao, WU Xiaoya, et al. Experimental and numerical simulation study of natural gas hydrate erosion by swirling jet[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(3): 24–33.
- [9] 武晓光, 黄中伟, 李根生, 等. “连续管+柔性钻具”超短半径水平井钻井技术与现场试验 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(6): 56–63.
WU Xiaoguang, HUANG Zhongwei, LI Gensheng, et al. Research and field test of ultra-short radius horizontal drilling technology combining coiled tubing and flexible BHA[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(6): 56–63.
- [10] ESPINOSA G M A, LEAL J A, DRIWEESH S M, et al. First time live descaling operation in Saudi using coiled tubing fiber optic real-time telemetry rugged tool, foamed fluid and pressure fluid management system[R]. SPE 182763, 2016.
- [11] DELGADO E, RODRIGUES V, FAGUNDES L. Customized sub-sea production flowline cleanout with coiled tubing from a floating production storage and offloading vessel[R]. SPE 199836, 2020.
- [12] ALDUAJI A N, AL-BENSAAD Z, ESPINOSA M, et al. Recent enhancements for coiled tubing descaling treatments in Middle East[R]. SPE 205891, 2021.
- [13] HASSIG FONSECA S, SERRANO D, VILLACRES C, et al. Methodology to remediate and evaluate surface flowline capacity with coiled tubing cleanouts[J]. SPE Production & Operations, 2022, 37(3): 520–532.
- [14] 李晓红, 卢义玉, 向文英. 水射流理论及在矿业工程中的应用 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2007: 1–2.
LI Xiaohong, LU Yiyu, XIANG Wenying. Water jet theory and its application in mining engineering[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2007: 1–2.
- [15] 薛永志. 高压水射流冲击下煤岩损伤诱导机制及分布特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
XUE Yongzhi. Study on the inducement and distribution of damage in coal impacted by high pressure water jets[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [16] 邹德永, 陈雅辉, 赵方圆, 等. 斧形 PDC 齿破岩规律数值模拟研究 [J]. 特种油气藏, 2021, 28(6): 137–143.
ZOU Deyong, CHEN Yahui, ZHAO Fangyuan, et al. Study on rock breaking rules of axe-shaped PDC cutter with numerical simulation[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(6): 137–143.
- [17] ZHAO Jian, ZHANG Guicai, XU Yiji, et al. Mechanism and effect of jet parameters on particle waterjet rock breaking[J]. Powder Technology, 2017, 313: 231–244.
- [18] 柳军, 杜智刚, 牟少敏, 等. 连续油管分簇射孔管柱通过能力分析模型及影响因素研究 [J]. 特种油气藏, 2022, 29(5): 139–148.
LIU Jun, DU Zhigang, MU Shaomin, et al. Analysis model and influencing factors of passability of coiled tubing conveying clustered perforating string[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(5): 139–148.
- [19] 庞德新, 艾白布·阿不力米提, 焦文夫, 等. 超深气井连续油管多径组合管柱作业新工艺 [J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 112–118.
PANG Dexin, ABULIMITI Aibaibu, JIAO Wenfu, et al. A new technology for the multi-diameter combination operation of coiled tubing in ultra-deep gas wells[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(3): 112–118.
- [20] TEIMOURIAN R, SHABGARD M R, MOMBER A W. De-painting with high-speed water jets: Paint removal process and substrate surface roughness[J]. Progress in Organic Coatings, 2010, 69(4): 455–462.
- [21] TAYLO R, CHAPMAN G. Cleaning pipelines using high-pressure water jets[J]. Materials Performance, 1991, 30(9): 25–28.
- [22] 陈庭根, 管志川. 钻井工程理论与技术 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2000: 142–162.
CHEN Tinggen, GUAN Zhichuan. Drilling engineering theory and technology[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2000: 142–162.
- [23] 田野, 蒋东雷, 马传华, 等. 钻柱偏心旋转对环空摩阻压降影响的数值模拟研究 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 42–49.
TIAN Ye, JIANG Donglei, MA Chuanhua, et al. Numerical simulation of the effects of eccentric rotation of the drill string on annular frictional pressure drop[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(5): 42–49.

[编辑 曹耐]