

Study and application of optimization of sand control technology in circulation filling in Su Bei oilfield

Xiaowen Liu

Zhongsheng East China Oil and Gas Branch, Taizhou Oil Production Plant, Taizhou, Jiangsu, 225300, China

Abstract

The shallow Fusan Formation oil reservoir in the Northern Jiangsu Oilfield is currently under artificial water flooding development. Due to poor reservoir cementation and other issues, the oil wells experience severe sand production. After evaluating the pros and cons of various sand control technologies, a mechanical circulation filling sand control method was chosen. The sand particle size of the shallow Fusan Formation was analyzed using sieving methods, and the Tausch & Corley method, Sauvier method, and Karpoff method were used to comprehensively evaluate and select the optimal gravel size of 1.180mm for filling. This optimized and upgraded the circulating filling sand control process, successfully implementing sand control for four oil wells, restoring a daily production of 9.32t of oil. This resulted in the development of a set of mechanical circulation filling sand control technologies suitable for the shallow Fusan Formation oil wells in the Northern Jiangsu Oilfield.

Keywords

Northern Jiangsu oilfield; sand production from oil Wells; mechanical sand prevention; gravel size; process optimization

苏北油田循环充填防砂技术优化研究与应用

刘晓文

中石化华东油气分公司泰州采油厂，中国·江苏泰州 225300

摘要

苏北油田浅层阜三段油藏为人工水驱开发阶段，因储层胶结差等原因，油井出砂严重，综合防砂技术优缺点后选择机械循环充填防砂技术。使用筛析法对浅层阜三段地层砂粒径分析，采用Tausch & Corley法、Saucier法、Karpoff法综合评价优选出充填砾石尺寸为1.180mm，优化升级了循环充填防砂工艺技术，成功实施四口油井防砂工作，共计恢复日产油9.32t，形成了适用于苏北油田浅层阜三段油井的机械循环充填防砂配套技术。

关键词

苏北油田；油井出砂；机械防砂；砾石尺寸；工艺优化

1 引言

水驱开发油藏随着注水开发时间的延长，受生产制度不合理、含水上升等因素影响，粘土矿物膨胀运移造成骨架砂转换为松散砂开始流失，造成油井大量出砂。苏北油田浅层阜三段油藏储层岩性以粉砂岩为主，胶结类型为孔隙式-线接触胶结，扫描电镜显示矿物颗粒疏松接触，粒间孔极为发育，近年来该开发该层系油井出砂情况日益严重。油井出砂不仅导致产能降低，还会影响正常生产工况，出砂严重甚至造成近井地带地层垮塌、引起套管变形^[1]，因此需要采取有效的防砂技术进行治理。

目前主流防砂方法有化学防砂和机械防砂^[2]。化学防砂需要将固砂剂挤入地层胶结固化，施工完成后井筒内不留

机械装置，但其可靠性低、有效周期短、且较大影响地层渗透力。机械防砂主要为砾石充填防砂法，形成多层滤沙屏障，具有防砂效果明显、使用周期长等优点，缺点是施工工艺复杂、砾石尺寸选择不合适会影响防砂效果和产能^[3]。本文针对机械循环充填防砂技术开展了工艺优化设计，并优选适应浅层阜三段的砾石尺寸平衡挡砂和渗透率要求。

2 砾石尺寸选择研究

砾石充填防砂技术是在油井内下入滤砂管柱，然后用合适尺寸的砾石挤压循环充填至滤砂管柱外部，封挡炮眼及近井地带，建立挡砂屏障，其原理就是用较粗的砾石挡住地层砂，而较粗的砾石又被滤砂管挡住，所以选择合适尺寸的充填砾石尤为关键。

2.1 浅层阜三段砂样实验

选取浅层阜三段典型出砂井砂样，采用筛析法进行粒径分析，分析结果（见表1）和砂样累计分布曲线（如图1）显示，砂样粒径中值为0.18mm。

【作者简介】 刘晓文（1992-），男，中国山东威海人，本科，工程师，从事采油注水管理及工程工艺研究。

表 1 浅层阜三段典型砂样粒径分析

粒径, mm	重量, g	累加重量, g	百分比	累加百分比
≥0.80	6.91	6.91	1.39%	1.39%
~ 0.60	6.63	13.54	1.33%	2.72%
~ 0.50	2.73	16.27	0.55%	3.26%
~ 0.40	3.74	20.01	0.75%	4.01%
~ 0.35	4.63	24.64	0.93%	4.94%
~ 0.30	5.04	29.68	1.01%	5.95%
~ 0.25	26.61	56.29	5.34%	11.29%
~ 0.20	105.90	162.19	21.24%	32.53%
~ 0.15	205.64	367.83	41.25%	73.78%
~ 0.10	124.17	492.00	24.91%	98.69%
~ 0.05	6.55	498.55	1.31%	100.00%

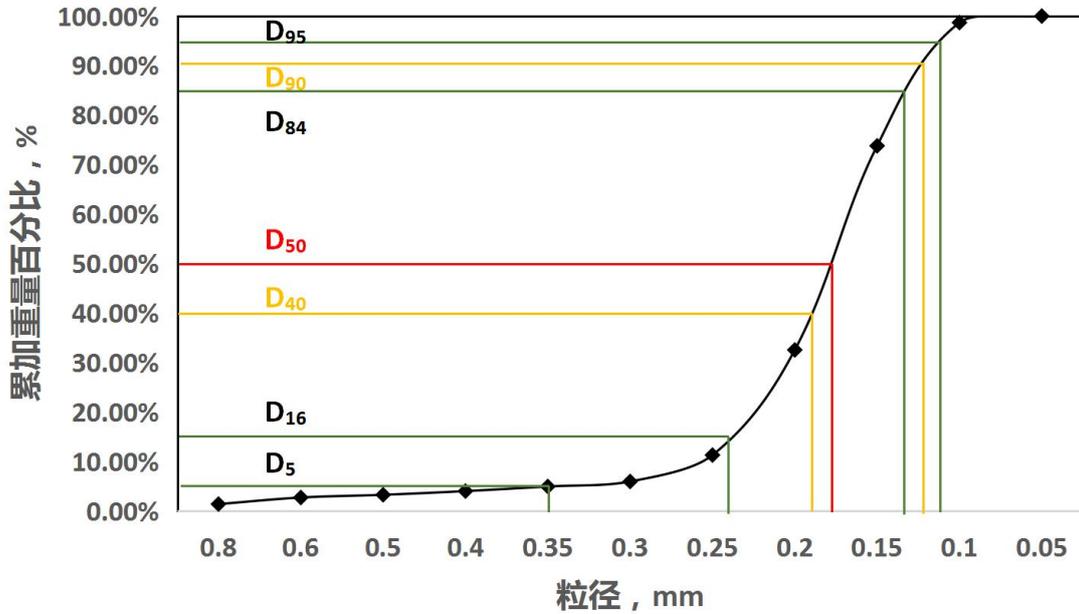


图 1 砂样累计分布曲线

充填防砂设计砾石尺寸除了考虑地层砂粒径中值的影响，还需要考虑地层砂分选性、均匀性等参数的影响。依据标准偏差法，采用公式（1）计算该砂样的分选系数。

$$\sigma = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6} \quad (1)$$

$$\phi_{84} = -\log_2 D_{84} \quad (2)$$

$$\phi_{16} = -\log_2 D_{16} \quad (3)$$

$$\phi_{95} = -\log_2 D_{95} \quad (4)$$

$$\phi_5 = -\log_2 D_5 \quad (5)$$

公式（1）中， σ 为分选系数。公式（2）中 D_{84} 为 84% 累计质量对应的粒径值。

D_5 、 D_{16} 、 D_{95} 释意同 D_{84} 。

根据分选性评价标准： $\sigma \leq 0.5$ ，分选性良好； $0.5 < \sigma \leq 1.0$ ，分选性中等； $1.0 < \sigma \leq 2.0$ ，分选性差； $\sigma > 2.0$ ，分选性极差。分选性越差，所需的充填砾石尺寸范围越大，防砂难度越高。

地层砂均匀系数计算公式为：

$$C = \frac{D_{40}}{D_{90}} \quad (6)$$

公式(6)中, C为均匀系数。D₄₀为40%累计质量对应的粒径值, D₉₀为90%累计质量对应的粒径值。

根据均匀性评价标准: C≤5, 颗粒均匀; 5 < σ ≤8, 颗粒不均匀; σ > 8, 颗粒极不均匀。

经计算, 苏北油田浅层阜三段地层砂分选系数为0.468, 分选性良好; 均匀系数为1.52, 颗粒均匀。较好的地层砂条件便于采取砾石循环充填防砂工艺。

2.2 砾石尺寸选择

砾石尺寸是砾石充填防砂技术的关键参数, 尺寸过小, 挡砂效果好, 但增加了表皮系数, 影响油井产能; 尺寸过大能够保障渗透率, 但是挡砂效果必然打折扣^[4-5]。目前常用的防砂充填层砾石尺寸设计方法包括 Tausch & Corley 法、Saucier 法、Karpoff 法等^[6]。

Tausch & Corley 法建立在半对数筛析曲线基础上, 它建议最小充填砾石尺寸为4倍 D₁₀, 最大充填砾石尺寸为6倍 D₁₀。

Saucier 法建立在完全挡砂的机理上, 选用充填砾石的粒度中值为地层砂粒度中值的5-6倍^[5], 此时砾石充填带的有效渗透率最大。

Karpoff 法考虑了地层砂均匀系数影响, 当均匀系数小于3时, 最小充填砾石尺寸为5倍 D₅₀, 最大充填砾石尺寸为10倍 D₅₀。

结合三种方法得到充填砾石的设计范围, 见表2。

表2 充填砾石尺寸范围

设计方法	尺寸范围
Tausch & Corley 法	min=1.04mm, max=1.56mm
Saucier 法	0.9mm ≤ 粒径中值 ≤ 1.08mm
Karpoff 法	min=0.9mm, max=1.8mm

为了保证较好挡砂效果, 合理优化充填砾石尺寸, 结合目前市场常用石英砂产品, 针对浅层阜三段出砂油井治理优选40目石英砂(1.180mm)进行充填防砂施工。

3 循环充填工艺优化设计

机械循环充填防砂工具主要包括 PFS 充填工具, 绕丝筛管, 可溶性扶正器, 正反扣安全接头等, 管柱整体组成见图2。防砂作业时, 将防砂管柱下入油井内, 滤砂管正对产层, 滤砂管之上用封隔器封隔上部井段, 迫使地层产出液通过挡砂屏障流入井筒, 将地层砂挡在挡砂屏障外。

3.1 PFS 充填工具

用于油井防砂作业中, 起悬挂管柱和密封作用。一趟管柱实现反循环洗井, 正打压密封和开启充填通道, 正循环挤压充填, 反洗清砂, 正转丢手等全部充填施工。

3.2 绕丝筛管

防砂筛管是机械防砂技术的核心部件, 对防砂效果和

油井产量有很大的影响, 相关实验结果表明, 筛管合理挡砂精度与地层砂中值粒径相关但并无明显的定量关系, 一般设计缝隙宽度为地层砂 D₅₀ 的1.52倍。地层砂的细质组分粒径及均匀系数对挡砂效果有直接影响^[7]。

在机械循环充填防砂工艺中, 防砂筛管作为第二道挡砂屏障, 要求其能阻挡最小充填砾石即可, 过滤精度要小于最小充填砾石尺寸的2/3^[8]。根据充填砾石选用尺寸(1.180mm), 另外考虑到地层砂突破砾石充填层的影响, 设计绕丝筛管缝隙尺寸为0.25mm。

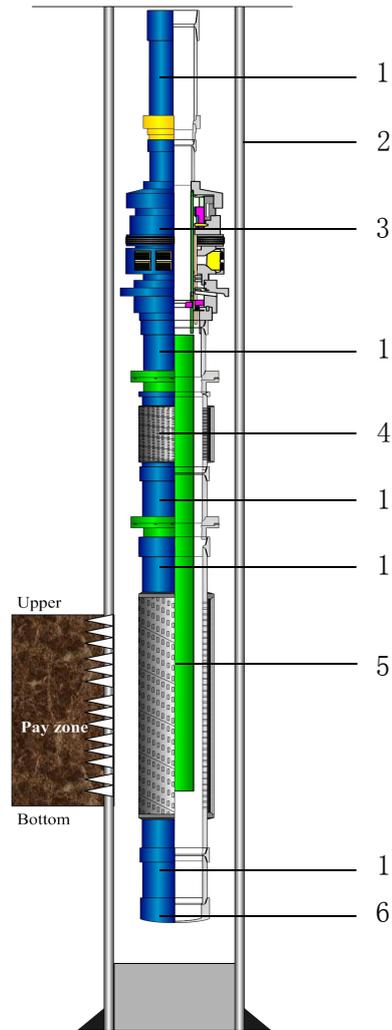


图2 机械循环充填防砂管柱结构

1- 油管; 2- 套管; 3- PFS 充填工具; 4- 绕丝筛管(信号筛管); 5- 绕丝筛管; 6- 堵头

设计井下循环充填防砂管柱结构中, 在绕丝筛管的上下端连接正反扣安全接头, 主绕丝筛管段长度覆盖射孔井段且上下超出3m, 信号筛管下界高于主绕丝筛管上界20m, 保障循环充填砾石过程中压力信号反馈时筛套环空中已有足够的充填高度。

3.3 可溶性扶正器

扶正防砂管柱, 保障筛套环空充填形成厚薄均匀的挡

砂屏障；可溶性材质便于防砂管柱后期打捞。

4 现场应用

苏北油田浅层阜三段油藏油井为定向井，最大井斜30°左右，采用五寸半套管完井。以J2-7-10井为例：生产套管外径为139.7mm，壁厚7.72mm，射孔井段1718.71-1721.60m，人工井底1759.93m。

4.1 方案设计

设计充填防砂管柱结构自下而上依次为Φ73.02mm丝堵+Φ73.02mm油管1根（带可溶性扶正器1个）+Φ88.90mm正反扣安全接头+Φ88.90mm绕丝筛管9.6m（带可溶性扶正器1个）+Φ88.90mm正反扣安全接头

+Φ73.02mm油管2根（带可溶性扶正器1个）+Φ88.90mm正反扣安全接头+Φ88.90mm信号筛管2.4m+Φ73.02mm油管1根（带可溶性扶正器1个）+Φ73.02mm油管短节4m+充填工具PFS-115+提升短节+Φ73.02mm加厚油管至井口，充填工具卡点1679.05m。

为简化施工工艺，不安装底界沉砂封隔器，循环充填防砂砾石用量为充填工具卡点深度以下，人工井底深度以上，油管套管与防砂管柱之间的容积量，计算J2-7-10井充填砂量为8.00m³。

根据固体颗粒在液体中沉降速度计算方法，采用油田产出处理水，评价了排量和携砂比的关系，优化设计了施工泵注程序（见表3）。

表3 施工泵注程序

序号	名称	排量 m ³ /min	液量 m ³	累计纯液量 m ³	累计混砂液量 m ³	砂浆密度 kg/L	砂比 %	砂量 m ³	累计砂量 m ³	阶段施工时间 min
1	前置液 (5%黏土稳定液)	2.0	20.0	20.0	20.0					10
2	携砂液	2.0	20.0	40.0	40.0					10
3	携砂液	2.0	20.0	60.0	61.0	1.05	5	1.0	1.0	10
4	携砂液	2.0	10.0	70.0	71.9	1.09	10	0.9	1.9	5
5	携砂液	2.0	8.0	78.0	81.0	1.13	15	1.1	3.0	4
6	携砂液	2.0	8.0	86.0	90.4	1.16	20	1.4	4.4	4
7	携砂液	2.0	6.0	92.0	97.7	1.19	25	1.3	5.7	3
8	携砂液	2.0	6.0	98.0	105.2	1.21	30	1.5	7.2	3
9	携砂液	2.0	1.8	99.8	107.5	1.24	35	0.5	7.7	1
10	携砂液	2.0	1.0	100.8	108.8	1.26	40	0.3	8.0	1
11	顶替液	2.0	6.0	106.8	114.8	1.01			8.0	3
合计			106.8					8.0		53

4.2 施工组织方案

- (1) 探冲砂：下入笔尖冲砂至人工井底，洗净井筒；
- (2) 通井：下入φ116mm通井规通井至人工井底，确定套管内径畅通，确保防砂管柱顺利下入；
- (3) 刮管：下入GX-T140刮管器清洁井筒内壁；
- (4) 验套：下入φ114mmRTTS封隔器打压验证油层以上套管完整性；
- (5) 根据方案设计下入循环充填防砂管柱，到位后反循环洗井1倍井筒容积，后小排量正打压坐封，逐级升压，在4.00MPa、8.00MPa、12.00MPa各稳压5min，上提管柱较原悬重增加20kN负荷验证充填工具是否坐封。持续升压至压力突降为零，开启循环充填通道；
- (6) 根据泵注程序完成挤压充填施工，后反洗井至出口干净无砂；
- (7) 丢手：正转管柱丢手，起出充填工具以上油管；

(8) 探冲砂：下Φ42.00mm冲管探至防砂管柱丝堵位置，确定有无砂面，有砂则冲砂；

(9) 下入生产管杆完成机抽复产。

4.3 效果分析

J2-7-10井在油井出砂前为供液不足生产，日产液量3.10t，含水14.0%，日产油量2.67t，出砂后砂埋油层导致不产液。采用机械循环充填防砂后，稳定日产液量2.16t，含水8.0%，日产油量1.99t，产出液取样化验未见地层砂。J2-7-10井采用机械循环充填防砂后，虽然液量相较出砂前损失30.32%，但防砂后油井保障了稳定生产，机械循环充填防砂还是取得了较好的效果。

根据J2-7-10井成功实施例在苏北油田浅层阜三段另外三口油井推广机械循环充填防砂工艺，共计恢复日产油7.33t（见表4），稳定生产后产出液取样化验均未见砂。

表 4 油井防砂前后生产情况对比

井号	出砂砂埋不出液前正常产量			机械循环充填防砂后稳定产量		
	日液量, t	日油量, t	含水, %	日液量, t	日油量, t	含水, %
C8-7	4.20	1.76	58.1	4.00	1.52	62.0
C8-9	7.50	2.40	68.0	4.20	1.26	70.0
J2-2-5	8.20	5.00	39.0	7.00	4.55	35.0

5 结论

(1) 针对苏北油田浅层阜三段油藏出砂情况, 机械循环充填防砂技术能够满足防砂要求, 保障油井正产生产, 防砂效果良好。(2) 针对苏北油田浅层阜三段地层砂特性, 优选的充填砾石尺寸和优化设计的防砂管柱结构及施工参数是挤压循环充填防砂技术成功实施的关键。(3) 根据已实施的四口油井生产情况对比, 机械循环充填防砂技术会造成一定的产能损失, 四口井合计损失 24.5% 的日产液量, 单井损失量有大有小, 在可接受范围内。此防砂技术增加了一层挡砂屏障, 势必造成表皮系数增加, 影响渗透率, 在防砂需求和产量损失方面还有进一步优化的空间, 故还需要针对单井出砂情况持续研究优化充填砾石尺寸来平衡挡砂性能和保持渗透率的要求。

参考文献

[1] 李豪豪. 油井出砂的危害及防砂技术分析[J]. 西部探矿工

程,2021,33(04):95-96.

- [2] 田飞. 浅谈海上油气井出砂机理及防砂工具[J]. 石化技术, 2019,26(09):240-241.
- [3] 朱英斌. 采油井中出砂原因分析及防砂技术研究[J]. 石油和化工设备,2022,25(07):44-48.
- [4] 张硕. 砾石充填防砂技术分析与研究[J]. 内江科技,2022,43(09):22-23.
- [5] 文云飞. 挤压充填防砂在ZH41-52NX井的应用[J]. 复杂油气藏,2016,9(04):76-79.
- [6] 李彦龙,胡高伟,刘昌岭,等. 天然气水合物开采井防砂充填层砾石尺寸设计方法[J]. 石油勘探与开发,2017,44(06):961-966.
- [7] 董长银,张清华,高凯歌,等. 机械筛管挡砂精度优化实验及设计模型[J]. 石油勘探与开发,2016,43(06):991-996.
- [8] 吕祥斌. 机械防砂技术优化与升级[J]. 内蒙古石油化工,2023,49(06):84-87.