

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2019106

形状记忆筛管自充填防砂完井技术

段友智^{1,2}, 艾爽^{1,2}, 刘欢乐^{1,2}, 岳慧^{1,2}

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 2. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 针对独立筛管防砂完井无法支撑井壁、有效期短的问题, 以及砾石充填防砂完井工艺复杂、易砂堵、费用高的不足, 提出了利用一趟管柱实现长裸眼环空充填的形状记忆筛管完井技术。在优化设计形状记忆筛管机械结构的基础上, 研究了形状记忆筛管生产工艺, 研制了形状记忆防砂筛管, 并对其性能进行了试验评价, 形成了形状记忆筛管自充填防砂完井工艺。现场试验结果表明, 形状记忆防砂筛管膨胀性能优越、能完全充填环空和炮眼, 且膨胀后的渗透性好、挡砂精度高。形状记忆筛管自充填防砂完井技术施工工艺简单、能适应不规则井眼, 具有很好的推广应用价值。

关键词: 完井; 防砂; 筛管; 形状记忆聚合物; 自充填; 膨胀试验

中图分类号: TE257⁺.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2019)05-0086-05

Shape Memory Screen Self-Packing Sand Control Completion Technology

DUAN Youzhi^{1,2}, AI Shuang^{1,2}, LIU Huanle^{1,2}, YUE Hui^{1,2}

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 100101, China)

Abstract: In view of the shortcomings of stand-alone screen sand control completions, which include insufficient borehole support and short valid period, as well as the complicated process of gravel packing sand control completion, sand plugging-prone and high cost, a one-run shape memory screen completion technology was proposed to realize the long open-hole annulus packing. On the basis of optimizing the mechanical structure of shape memory screen, the production process of shape memory screen was formed, and the performance evaluation experiment of shape memory screen was conducted by utilizing the developed screen performance evaluation device, so as to form the shape memory screen self-packing sand control completion process. The results of downhole test showed that the self-packing shape memory sand control screen had superior expansion performance, and could completely fill the annulus and perforation tunnels, with good permeability and high sand retaining precision after expansion. The shape memory screen self-packing sand control completion technology is easy to operate, adapts to irregular wellbores, and is a good potential candidate for adoption in the future.

Key words: completion; sand control; screen line; shape memory polymer; self-packing; expanding experiment

目前, 独立筛管防砂完井技术和砾石充填防砂完井技术的应用比较广泛^[1-4]。筛管完井具有不用射孔、试油工艺简单的优点, 但修井作业难度大、易污染油层。砾石充填完井是先下入独立筛管, 随后下入充填管柱, 通过地面泵送携砂液实现井眼环空的充填, 具有防坍塌、耐冲蚀和防砂有效期长等优势, 但存在施工工艺复杂、易砂堵和充填长度受限等不足。因此, 提出了形状记忆筛管防砂完井技术, 只需下入一趟管柱将处于压缩状态的形状记忆筛管送入井底, 利用地层温度激发筛管膨胀, 实现充填环空、支撑井壁和过滤挡砂的功能。形状记忆

筛管防砂完井的充填长度不受限制^[5-6], 能够以独立筛管的完井工艺达到砾石充填的完井效果^[7-8],

收稿日期: 2019-05-21; 改回日期: 2019-08-26。

作者简介: 段友智 (1976—), 男, 山东东营人, 2000 年毕业于青岛大学化学工程专业, 2007 年获中国石油大学 (华东) 油气田开发专业硕士学位, 2010 年获中国石油大学 (华东) 油气田开发专业博士学位, 高级工程师, 主要从事完井工艺、油气井防砂及提高采收率方面的研究工作。E-mail: duanyz.sripe@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项“海相碳酸盐岩超深油气井关键技术”(编号: 2017ZX05005-005)、“高压低渗油气藏固井完井技术”(编号: 2016ZX05021-005) 及中国石化科技攻关项目“水平井环空自充填防砂完井技术研究”(编号: P16012) 部分研究内容。

大幅缩短施工周期和减少地面配套装置, 可用于长水平段水平井、复杂结构井及海上平台等井场条件受到限制油气井的防砂完井, 应用前景广泛^[9-10]。为此, 笔者设计了形状记忆筛管的机械结构, 研制了国内首支形状记忆筛管样机, 利用室内性能评价装置优化了筛管材料体系, 配套了形状记忆筛管防砂完井工艺, 并进行了现场试验, 验证了形状记忆筛管自充填防砂完井技术的可行性和适用性。

1 形状记忆筛管结构设计及加工

形状记忆筛管防砂完井技术的核心是温敏性形

状记忆筛管, 其结构包括打孔基管、侧流保护套、形状记忆材料及可溶保护涂层(见图1)。其中, 最内层是 $\phi 88.9$ mm 打孔基管, 圆孔在管体上呈螺旋式分布, 孔径、孔密可调; 第二层侧流保护套是由不锈钢材料316L和镍合金编织的桥式金属滤网, 可提高过流面积、降低筛管堵塞概率; 第三层是压缩态温敏性形状记忆材料, 在特定温度下激发可以发生膨胀, 紧贴套管内壁或者裸眼井壁; 最外层是可溶保护材料, 可防止入井过程中筛管提前膨胀, 降低下入风险。设计基于 $\phi 88.9$ mm 基管的形状记忆筛管, 长度 9.80 m, 膨胀前最大外径 133.0 mm, 膨胀后外径 190.0 mm, 适用于 $\phi 152.4$ mm 裸眼井防砂完井。

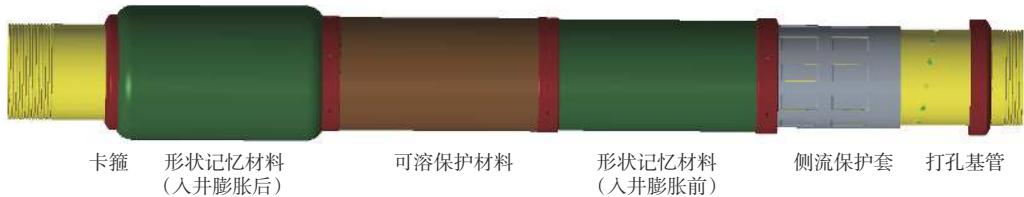


图 1 形状记忆筛管的基本结构
Fig.1 Structure of shape memory screen

形状记忆筛管的核心部件是形状记忆材料。对不同形状记忆材料的记忆温度、变形能力、恢复力、耐水解、耐酸碱和成本等方面进行比较, 优选了综合性能优异的形状记忆聚氨酯作为形状记忆材料的原料^[11-17]。通过优化单体配比, 制得了形变温度 60~91 °C 的形状记忆聚氨酯, 可满足不同深度储层完井的需求。

将研制的形状记忆聚氨酯及其他成分组成的混合物料按照一定的充填系数注入发泡装置, 使材料在密闭的模具内发泡, 当其膨胀到充满模腔时, 由于模腔的束缚, 模具内压力提高, 材料逐渐固化, 得到规定尺寸和结构的原始态形状记忆材料。对成型工艺进行优化, 使成型后的原始态形状记忆材料均质性好, 机械强度高, 无需进行后固化。

设计加工了浇注成型后的原始态形状记忆材料心轴脱除装备, 在内孔结构保持完整的状态下, 可快速脱除原始态形状记忆材料浇注成型时形成中心孔的心轴。研制了原始态形状记忆材料夹具及内孔处理工装, 可实现长度 2.00 m 的圆筒形原始态形状记忆材料内孔的去皮及尺寸修正, 修正后的尺寸规则、利于压缩。

原始态形状记忆材料受热刺激软化后, 在恒定应力下变形, 其形状随着温度降低而固定, 称为变形态^[18]。为适用 $\phi 152.4$ mm 井眼的完井要求, 将外

径 190.0 mm、内径 90.0 mm 的原始态形状记忆材料压缩为外径 133.0 mm、内径 88.0 mm 的变形态形状记忆材料, 以便研制筛管。其技术难点为: 为了确保完井管柱安全下入及完井后对环空的密实充填, 原始态形状记忆材料必须在体积被压缩为原始体积的 1/4 后仍然为规则的圆形, 且可在充填环空后恢复为原始态。为此, 研发了 18 瓣式形状记忆材料压缩定型装备。该装备的曲柄滑块机构及四连杆机构连接的 18 瓣压条呈周向分布, 液压工作站驱动 9 个液缸对 18 瓣压条进行径向压缩。原始态(压缩前)和变形态(压缩后)形状记忆材料试样如图 2 所示。



图 2 不同状态的形状记忆材料试样
Fig. 2 Prototypes of shape memory materials in different states

最后, 将变形态形状记忆材料套在装有侧流保护套的打孔基管上, 形状记忆材料之间通过连接环连接, 端部用端环固定, 形成形状记忆筛管。

2 形状记忆筛管性能评价

为了评价形状记忆筛管性能,研发了全尺寸形状记忆防砂筛管性能评价试验装置,可实时、定量监测形状记忆筛管试样在膨胀过程和膨胀后的试验参数,评价不同体系形状记忆筛管的膨胀性能、渗流性能和挡砂性能,据此对形状记忆材料配方和筛管结构进行优化。其中,模拟井筒的内径为 152.4 mm,形状记忆筛管的外径为 133.0 mm。

一组典型的形状记忆筛管试样的膨胀过程如图 3 所示。从图 3 可以看出,形状记忆筛管试样开始膨胀时的温度为 42 ℃,膨胀到位的温度为 62 ℃。从膨胀过程上看,膨胀速率小于 1.6 mm/h,即便在 62 ℃ 条件下,最后的 3.0 mm 也需要 12 h 才能膨胀到位,给形状记忆筛管入井提供了充足的施工时间。同时,由于原始态形状记忆材料的外径远大于井筒,形状记忆筛管在膨胀到位后仍具有继续膨胀能力,因此可以在裸眼井中进行应用。

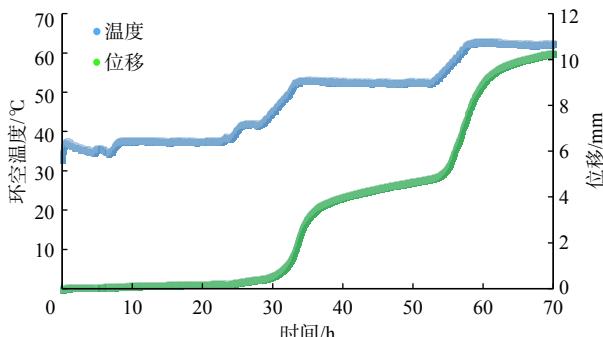


图 3 形状记忆筛管的膨胀过程曲线

Fig. 3 Expansion process curve of shape memory screen

制作了不同配方的形状记忆筛管试样 38 套,进行了激发膨胀启动温度、不同温度梯度对膨胀速率的影响、环空充填率等功能性模拟试验及充填完成后的渗透率、挡砂精度和抗堵塞等 48 组性能测试试验。结果表明,形状记忆筛管试样采用温度激发膨胀后的外径圆整度高,外形恢复率大于 90%,可实现环空的密实充填。同时,形状记忆筛管试样具有非常好的渗流性能和挡砂性能,膨胀后的渗透率可高达 10 D 级,挡砂精度达 0.061 mm。

3 形状记忆筛管防砂完井工艺

与传统的泵送砂浆砾石充填完井相比,形状记

忆筛管自充填防砂完井工艺简单,无需任何额外工序和工具。由于形状记忆筛管膨胀后可以完全充满环空,不会从环空出砂,因此可以用不带封隔功能的悬挂器悬挂,或者在井底支撑时采用丢手接头。以直井为例,只需一趟管柱将形状记忆筛管下入目的层,试提管柱,判断筛管在地层温度作用下膨胀到位后,将其悬挂或进行丢手作业,即可起出管柱,完成完井作业(见图 4)。

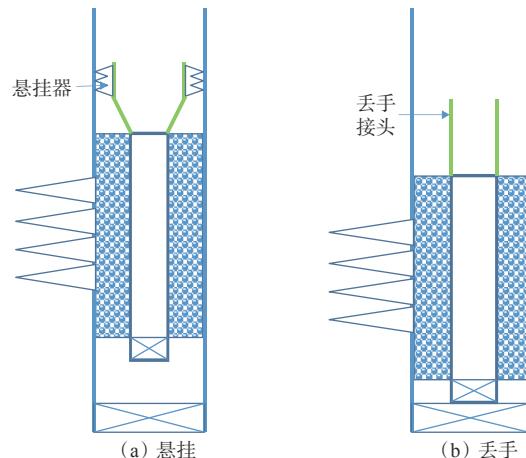


图 4 形状记忆筛管直井防砂完井工艺

Fig. 4 Sand control completion process with shape memory screen in vertical well

4 现场试验

为了进一步验证形状记忆筛管的性能,在中国海油 JJSY-1 井进行了极限膨胀性能试验和环空自充填试验。

形状记忆筛管极限膨胀试验管柱包括油管短节+2 个温度计托筒+形状记忆筛管+扶正器+变扣接头+钻杆,如图 5 所示。工具入井后,下至井深 400.00, 800.00, 1 000.00, 1 200.00, 1 300.00, 1 400.00, 1 500.00, 1 600.00 和 1 700.00 m 处分别静止 10 min, 随后缓慢下入探底, 静置 8 h 后缓慢提出管柱。试验时的地表温度为 10.9 ℃, 地温梯度为 3.11 ℃/100 m, 为环空自充填试验提供了基础数据。起出的形状记忆筛管外形规则、无磨损,且已实现完全膨胀,与未入井的原始尺寸的形状记忆筛管相比,外径明显扩大,可达 191.1 mm。极限膨胀性能试验结果表明,形状记忆筛管完成充填后仍有 20% 以上的膨胀余量,可实现不规则裸眼井环空的完全充填,并具有良好的井壁支撑性能。

环空自充填试验时,首先下入组合套管,包括套

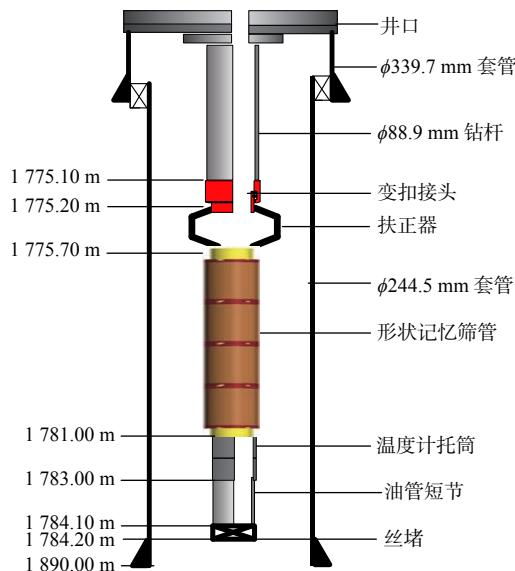


图 5 形状记忆筛管自由膨胀试验管柱

Fig. 5 Free expansion test string with shape memory screen

管丝堵+ $\phi 177.8$ mm 短套管+ $\phi 177.8$ mm 打孔套管+ $\phi 244.5$ mm 套管(见图 6), 然后下入试验管柱, 包括油管短节+扶正器+形状记忆筛管+丢手短节+油管短节+变扣接头+钻杆, 下入到位 4 h 后, 分别试提管柱, 上提力由 539.5 kN 增大到 597.8 kN, 初步判断筛管已经贴近套管内壁。静置 6 h 后从井口关闭套管, 清水以 $0.1\sim0.5$ m^3/min 排量进行反循环, 压力表无明显读数, 表明膨胀后的筛管径向渗透率高。继续静置 40 h, 投球加压至 15.0 MPa, 丢手后起出试验

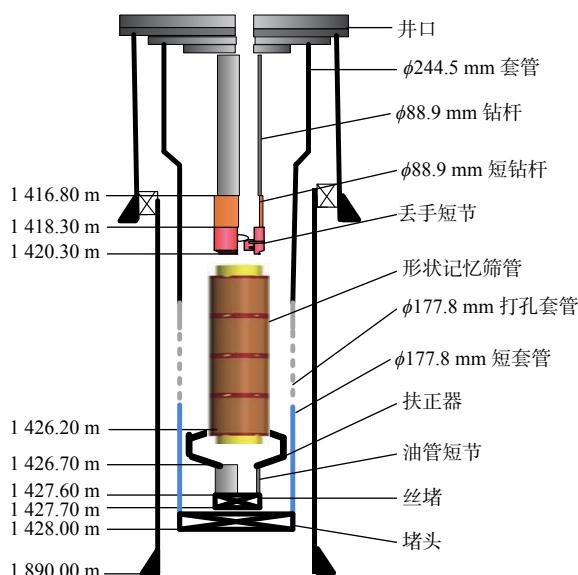


图 6 形状记忆筛管环空自充填试验管柱

Fig. 6 Annulus self-packing test string with shape memory screen

管柱和套管, 测得筛管外径为 158.1 mm, 略大于套管内径, 说明环空已完全充填; 测得形状记忆筛管在射孔孔眼中的膨胀高度为 5.9 mm, 说明形状记忆筛管不仅能完全充填环空, 还能进一步充填射孔孔眼, 实现了从挡砂到防止出砂的跨越。环空自充填试验结果表明, 自充填完井施工时间短, 环空和射孔孔眼充填率均为 100%, 充填层渗透率高, 满足现场生产要求。

极限膨胀性能试验和环空自充填试验结果表明, 自主研制的形状记忆筛管满足现场应用要求, 具备现场推广条件。形状记忆筛管自充填防砂完井工艺与传统的泵送砂浆砾石充填工艺完全不同, 可大幅度简化海上油气井充填完井、多层系分段砾石充填完井及长水平段水平井分段充填完井的施工工艺, 并减少施工设备, 缩短完井周期, 降低综合生产成本, 提高施工安全性及环保性。

5 结 论

1) 基于形状记忆筛管的新型防砂完井技术利用井下热力激发形状记忆筛管发生膨胀, 实现环空密实充填, 可大幅简化传统砾石充填完井的施工工艺, 减少施工装备, 降低施工风险。

2) 设计了形状记忆筛管的结构, 自主研发了形状记忆筛管生产线, 加工了形状记忆筛管, 评价优化了形状记忆筛管性能, 成型后的原始态筛管无拼接、易加工、均质性好, 压缩后外形规则、无缺失, 加热膨胀后可密实充填环空, 筛管渗透率及挡砂精度高。

3) 配套形成了形状记忆筛管自充填防砂完井工艺, 现场试验表明, 形状记忆筛管下入性好, 膨胀性能优越, 井壁支撑能力强。

参 考 文 献

References

- [1] 于法浩, 蒋召平, 白健华, 等. 渤海油田稠油水平井防砂筛管耐温能力的确定 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(6): 65–70.
YU Fahao, JIANG Zhaoping, BAI Jianhua, et al. Determination of the temperature resistance capacity of sand control screen liner in horizontal heavy oil wells in the Bohai Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(6): 65–70.
- [2] 郝宙正, 左凯, 刘禹铭, 等. 中短半径井眼固井防砂一体化管柱研究与试验 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(2): 99–104.
HAO Zhouzheng, ZUO Kai, LIU Yuming, et al. Research and testing of the integrated string for cementing and controlling sand in a medium-short radius wellbore[J]. Petroleum Drilling Techniques,

- 2019, 47(2): 99–104.
- [3] 韩耀图, 刘鹏, 林家昱, 等. 侧钻水平井固井充填防砂一体化工艺的应用: 以曹妃甸 11-2 油田为例 [J]. 断块油气田, 2018, 25(3): 390–393.
HAN Yaotu, LIU Peng, LIN Jiayu, et al. Application of cementing and gravel packing sand control integrated technology to sidetracked horizontal well: taking Caofidian 11-2 Oilfield as an example[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(3): 390–393.
- [4] 魏爱拴, 陈胜宏, 许杰, 等. 海上油田固井防砂一体化技术 [J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(5): 570–573.
WEI Aishuan, CHEN Shenghong, XU Jie, et al. Integrated cementing and sand control technology in offshore oilfields[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(5): 570–573.
- [5] METCALFE P. Expandable sand screen technology increases production[J]. World Oil, 2000, 221(2): 94–95.
- [6] MCMILLIN K. Using expandable sand screens in unconsolidated formations[J]. Offshore, 2000, 1(11): 52–53.
- [7] WANG Xiuli, OSUNJAYE G. Advancement in open hole sand control applications using shape memory polymer[R]. SPE 181361, 2016.
- [8] GBENGA O, TARIK A. Open hole sand control optimization using shape memory polymer conformable screen with inflow control application[R]. SPE 183947, 2017.
- [9] 王垚, 李春福, 林元华, 等. SMA 在石油工程中的应用研究进展 [J]. 材料导报, 2016, 30(增刊 2): 98–102, 107.
WANG Yao, LI Chunfu, LIN Yuanhua, et al. Research progress of application of SMA in petroleum engineering[J]. Materials Reports, 2016, 30(Supplement2): 98–102, 107.
- [10] 光新军, 王敏生. 海洋天然气水合物试采关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2016, 44(5): 45–50.
GUANG Xinjun, WANG Minsheng. Key production test technologies for offshore natural gas hydrate[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(5): 45–50.
- [11] 张福强. 形状记忆高分子材料 [J]. 高分子通报, 1995, 16(1): 34–42.
ZHANG Fuqiang. Shape memory polymer materials[J]. Polymer Bulletin, 1995, 16(1): 34–42.
- [12] 童征, 裴晓含, 沈泽俊, 等. 橡胶基增强型热致形状记忆复合材料体系 [J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 1005–1013.
TONG Zheng, PEI Xiaohan, SHEN Zejun, et al. An enhanced thermo-actuated shape memory polymer composite coupled with elastomer[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6): 1005–1013.
- [13] 孙德旭, 陈雪, 梁伟, 等. 聚氨酯类自膨胀防砂材料制备及性能评价 [J]. 油田化学, 2016, 34(2): 217–221.
SUN Dexu, CHEN Xue, LIANG Wei, et al. Preparation and performance evaluation of polyurethane-expandable material in sand control[J]. Oilfield Chemistry, 2016, 34(2): 217–221.
- [14] 李昕, 李树材. 形状记忆聚氨酯的性能研究及应用 [J]. 化工新型材料, 2013, 41(6): 171–174.
LI Xin, LI Shucui. Progress of performance and application research of shape memory polyurethane[J]. New Chemical Materials, 2013, 41(6): 171–174.
- [15] 蓝承东. 形状记忆聚氨酯的制备及性能研究 [D]. 广州: 广东工业大学材料与能源学院, 2015.
LAN Chengdong. Preparation and property of shape memory polyurethane[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, School of Materials and Energy, 2015.
- [16] 李帅, 张均, 陈建君, 等. 形状记忆聚氨酯泡沫的制备与性能研究 [J]. 聚氨酯工业, 2019, 34(2): 20–22.
LI Shuai, ZHANG Jun, CHEN Jianjun, et al. Preparation and properties of shape memory polyurethane foam[J]. Polyurethane Industry, 2019, 34(2): 20–22.
- [17] 崔航, 王锋, 胡剑青, 等. 形状记忆聚氨酯材料的研究进展 [J]. 材料导报, 2017, 31(3): 1–6, 31.
CUI Hang, WANG Feng, HU Jianqing, et al. Research progress of shape memory polyurethane materials[J]. Materials Review, 2017, 31(3): 1–6, 31.
- [18] 王敏生, 光新军, 孔令军. 形状记忆聚合物在石油工程中的应用前景 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(5): 14–20.
WANG Minsheng, GUANG Xinjun, KONG Lingjun. The prospects of applying shape memory polymer in petroleum engineering[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(5): 14–20.

[编辑 藤春鸣]