

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2022101

引用格式: 匡韶华, 吕民, 杨洪, 等. 形状记忆膨胀颗粒防砂材料性能评价 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 88-93.

KUANG Shaohua, LYU Min, YANG Hong, et al. Performance evaluation of sand control material of swelling shape-memory particles [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(5): 88-93.

形状记忆膨胀颗粒防砂材料性能评价

匡韶华¹, 吕民¹, 杨洪², 王磊¹, 佟姗姗¹

(1. 中国石油辽河油田分公司钻采工艺研究院, 辽宁盘锦 124010; 2. 中国石油新疆油田分公司重油开发公司, 新疆克拉玛依 834000)

摘 要: 针对油气井开采过程中的出砂问题, 提出采用温敏性形状记忆聚合物材料填充射孔孔道的新型防砂方法, 以达到简化施工程序、降低防砂成本和延长防砂有效期的目的。优选形状记忆聚氨酯泡沫作为原料, 加工成粒径 3~6 mm 的不规则颗粒, 并在颗粒外表面涂覆环氧树脂和固化剂, 制备成膨胀颗粒防砂材料, 试验评价了该防砂材料的膨胀性能、耐高温性能、抗压强度、过流性能、挡砂性能和耐介质性能。试验结果表明: 该防砂材料在温度 60~70 °C 下开始膨胀, 最高适应温度 90 °C; 膨胀系数 200 %, 在约束空间中膨胀胶结后可形成整体硬质挡砂屏障, 抗压强度 4.5 MPa, 渗透率 90 D, 可阻挡粒径大于 0.15 mm 的地层砂; 其过流性能和抗堵塞能力明显高于树脂涂覆砂防砂材料。该防砂材料防砂形成的挡砂屏障具有高渗透、高强度和抗堵塞的特点, 利用该材料防砂具有成本低、施工简单和不留管柱等优点, 具有很好的推广应用价值。

关键词: 形状记忆聚合物; 膨胀颗粒; 防砂; 过流性能; 挡砂性能

中图分类号: TE358⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2022)05-0088-06

Performance Evaluation of Sand Control Material of Swelling Shape-Memory Particles

KUANG Shaohua¹, LYU Min¹, YANG Hong², WANG Lei¹, TONG Shanshan¹

(1. Drilling & Production Technology Research Institute, PetrChina Liaohe Oilfield Company, Panjin, Liaoning, 124010, China; 2. Heavy Oil Development Company, PetrChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang, 834000, China)

Abstract: To solve the problem of sand production that occurs during oil and gas well exploitation, a new sand control method of filling perforation channels with a temperature-sensitive shape-memory polymer was proposed with the goals of simplifying the construction procedure, reducing sand control cost, and prolonging the effective period of sand control. Shape-memory polyurethane foam was selected as the raw material, processed into irregular particles of 3–6 mm in particle size, then coated with epoxy resin and curing agents on the outer surface. A sand control material of swelling particles was thus prepared, and its swelling performance, temperature resistance, compressive strength, flow performance, sand retention, and medium resistance were evaluated by testing. The results showed that this sand control material started to swell at the temperature of 60–70 °C and its maximum adaptive temperature was 90 °C. With a swelling coefficient of 200%, this material could form a monolithic sand retention barrier after it swelled and cemented in a confined space. The barrier exhibited a compressive strength of 4.5 MPa and a permeability of 90 D. It is capable of retaining formation sand above 0.15 mm in particle size. The flow performance and anti-clogging ability of the proposed material were significantly superior to those of the sand control material of resin-coated sand. The proposed sand control material deserves promotion and application because the sand retention barrier it forms when applied to sand control is highly permeable, high-strength, and anti-clogging, and sand control with this material has the advantages of low cost, simple construction, and leaving no strings.

Key words: shape-memory polymer; swelling particle; sand control; flow performance; sand retention performance

收稿日期: 2022-01-23; 改回日期: 2022-08-11。

作者简介: 匡韶华 (1985—), 男, 湖南郴州人, 2007 年毕业于长江大学石油工程专业, 2010 年获西南石油大学油气井工程专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事油井防砂工艺技术方面的研究工作。E-mail: kuangshaohua@163.com。

基金项目: 辽河油田科技攻关项目“储层出砂预测与防砂新技术探索”(编号: 2020KJ-16-01) 资助。

地层出砂是疏松砂岩油气藏开采过程中存在的突出生产问题之一。解决油气井出砂问题的主要途径是采取防砂措施来控制地层出砂。经过多年的研究与应用,已形成了机械防砂和化学防砂 2 大类防砂技术,包括独立筛管防砂、砾石充填防砂、压裂防砂、人工井壁防砂和化学固砂等多种防砂技术^[1]。形状记忆材料是一种具有形状记忆效应的新型智能材料,受到国内外广泛关注^[2-3]。近些年,石油科技工作者开始探索将该材料应用在石油工程中^[4-11],其中,利用形状记忆高分子材料(SMP)研发的形状记忆防砂筛管已在现场成功应用^[12-17],验证了该材料应用于防砂技术的可行性和适应性。该技术只需下入一趟防砂完井管柱,利用井底温度使形状记忆筛管膨胀充填环空,能够以独立筛管完井的简单工艺实现砾石充填完井效果,大幅缩短了施工周期、减少了地面配套装置。形状记忆防砂筛管在水平井裸眼完井中具有明显优势,但是在射孔套管完井中存在成本高、后期管柱打捞难度大等局限性。

为此,笔者提出了膨胀颗粒防砂技术思路:形状记忆材料加工成具有膨胀性和渗透性的膨胀颗粒,将其填充于射孔孔道来实现防砂功能。采用形状记忆聚氨酯泡沫和树脂涂覆技术,制备了膨胀颗粒防砂材料,通过室内试验评价了该材料的膨胀性能、温度影响性、抗压强度、过流性能、挡砂性能和耐介质性能,以期为该防砂材料的现场应用提供依据。

1 膨胀颗粒防砂材料制备及防砂原理

1.1 膨胀颗粒防砂材料制备

通过对比不同形状记忆材料的激发温度、形状恢复能力、耐酸碱性、加工性能和成本,优选出形状记忆聚氨酯泡沫作为膨胀颗粒防砂材料的原材料^[13-17]。该材料具有开孔泡沫结构及形状记忆恢复性能好、机械强度高、激发温度可调、孔眼尺寸可控、渗透性好等特点,阻挡地层砂的同时可允许流体通过,从而起到防砂过流作用。油田常用的地层砂多为粉砂、细砂和中砂,粒径一般为 0.05~0.50 mm,这也是防砂的主要粒径范围^[18]。按照经典的 2/3 架桥原理^[19],并考虑适度防砂原则,选用泡沫孔径为 0.05~0.35 mm 的形状记忆聚氨酯泡沫制备膨胀颗粒防砂材料。

将已发泡成型的原始态形状记忆聚氨酯泡沫放入专用模具中,加热到玻璃化转变温度以上使其软化,同时施加三轴压力使其变形,冷却后定型,得到

变形态的形状记忆聚氨酯泡沫。取出变形态的形状记忆聚氨酯泡沫,采用切割或破碎工艺,将其加工成不同形状和粒径的膨胀颗粒。

通过不断优化防砂材料的配方、发泡工艺、颗粒形状和颗粒粒径,评价了多种膨胀颗粒的膨胀性能、膨胀温度和力学强度,基于膨胀颗粒“进得去、出不来”(能够顺利进入射孔孔眼,膨胀后不容易返排吐出)的原则,最终确定采用粒径 3~6 mm、形状不规则的膨胀颗粒(如图 1)作为防砂材料,并测试了其关键技术参数:粒径 3~6 mm,密度 0.98~1.10 g/cm³,膨胀系数 200%,激发温度 70℃,膨胀时间 4 h,适用于储层温度不高于 90℃ 的油藏。



图 1 膨胀颗粒防砂材料

Fig.1 Sand control material of swelling particles

为了保证膨胀颗粒防砂材料进入射孔孔道后能够形成完整的防砂屏障,防止膨胀颗粒防砂材料随流体排出,借鉴树脂涂覆砂原理^[20],在膨胀颗粒外表面包覆树脂涂层,待膨胀颗粒完全膨胀后,树脂涂层发生胶结固化反应,膨胀颗粒胶结成一体,形成整体硬质防砂屏障。测试不同树脂与固化剂体系的胶结特性,结果表明:以酚醛树脂为涂层材料,后期需要注入稀盐酸固化剂;以酚醛树脂+NL 固化剂为涂层材料,对携砂液性能影响较大;以环氧树脂+T31 固化剂为涂层材料,固化时间短、固化放热,固化时间不易控制;以环氧树脂+539 固化剂为涂层材料,需要温度达到 120℃ 以上才能固化;以环氧树脂+650 固化剂为涂层材料,固化时间容易控制,但固结强度低;以环氧树脂+650 固化剂+113 固化剂为涂层材料,固化时间易控制,固结强度高。由测试结果可知,环氧树脂+650 固化剂+113 固化剂作为膨胀颗粒的涂层材料比较合适。环氧树脂+650 固化剂+113 固化剂涂层的固化时间约为 8 h,大于膨胀颗粒的膨胀时间,且膨胀后不影响膨胀颗粒的过流性能。

1.2 膨胀颗粒防砂材料的防砂原理

将上述方法制备的膨胀颗粒防砂材料加入携砂

液,利用泵车将其泵入射孔孔道中(见图(2a));然后注入热流体,提高井底温度,激发膨胀颗粒产生体积膨胀,自适应射孔孔道结构,实现饱和充填。同时,膨胀颗粒外表面的树脂涂层发生胶结固化,形成整体防砂屏障,实现射孔孔道有效封堵(见图(2b)),最终形成具有渗透性和高强度的防砂层,阻止地层砂产出而允许地层流体通过。

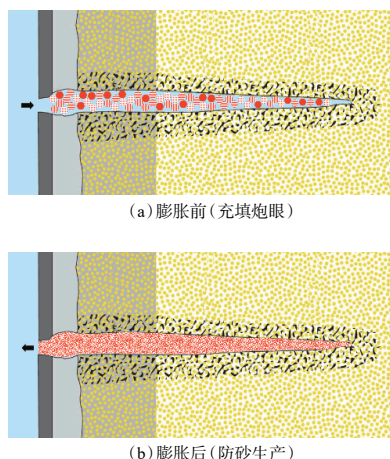


图2 膨胀颗粒防砂材料的防砂原理

Fig.2 Principle of sand control by swelling particles

采用泵后加砂装置,利用热洗冲砂作业配套的水泥车和管柱,将其泵入射孔孔道,即可实现防砂,材料用量少,作业时间短,前期准备工作量小,节省人力,HSE风险低。

2 性能评价

2.1 膨胀性能

各取10 g未涂覆树脂的膨胀颗粒分别放入60, 70, 80, 90和100℃烘箱中,观察其在不同温度下的膨胀时间和膨胀情况,结果如图3、图4所示。

从图3可以看出:随着温度升高,膨胀颗粒的膨

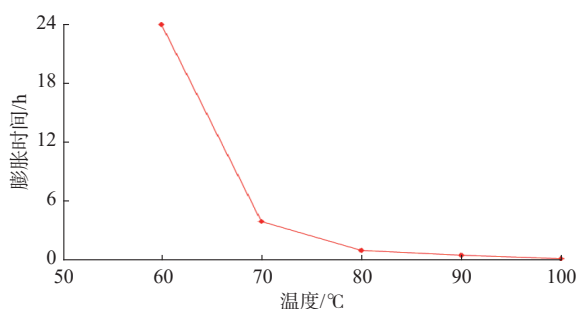


图3 膨胀颗粒膨胀时间与温度的关系曲线

Fig.3 Relationship between the swelling time of swelling particles with temperature

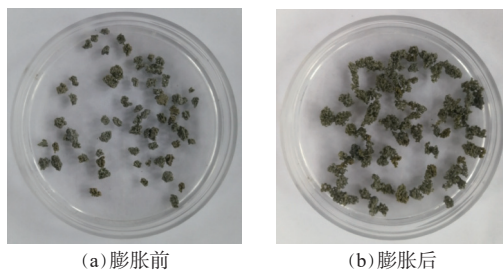


图4 膨胀颗粒膨胀前后的形貌

Fig.4 Appearance of swelling particles before and after swellings

胀速度加快;温度60℃时膨胀速度缓慢,膨胀时间长达24 h;温度70℃时膨胀速度急剧加快,出现拐点,对应的膨胀时间约为4 h;温度80~100℃时膨胀速度进一步加快,但加快幅度减缓。膨胀颗粒形状完全恢复之后,颗粒体积增大2倍,即膨胀系数为200%。从图4可以看出,膨胀颗粒膨胀后重新恢复原始态,呈现出蜂窝状开孔泡沫结构,为膨胀颗粒的过流和挡砂提供可能。

2.2 耐温性能

将未涂覆树脂的膨胀颗粒放入高温烘箱中,从50℃开展逐渐升温,每个温度下保持30 min,观察膨胀颗粒的变化情况,并对膨胀颗粒进行轻度碾压,判断其力学性能变化,确定膨胀颗粒的激发温度和耐温极限。膨胀颗粒在不同温度下的变化如图5所示。

从图5可以看出:温度50℃时膨胀颗粒无明显变化,温度70℃时开始出现膨胀现象,温度90℃时膨胀充分、表现出高弹性;温度120℃时膨胀颗粒受压变形明显,但是冷却后仍保持较高强度;温度250℃时未出现熔融现象,但是颜色发生明显变化,出现焦化现象,冷却后变脆,强度降低明显。由此可以看出,膨胀颗粒的合理激发温度为70℃,适应储层温度不高于90℃的油藏,耐温极限为250℃。

由高分子材料理论^[21]可知,随着温度升高,高分子材料从玻璃态逐步向高弹态和黏流态转变。形状记忆聚氨酯材料的激发温度即为玻璃化转变温度。在玻璃化转变温度以下,高分子聚合物处于玻璃态时,分子链和链段都不能运动,其强度高;在玻璃化转变温度以上,高分子聚合物处于高弹态,分子链虽不能移动,但是链段开始运动,表现出高弹性,温度继续升高时,链段运动加剧,弹性增加,在压缩状态下容易变形。

2.3 胶结性能及充填效果

取20 g未涂覆树脂的膨胀颗粒倒入烧杯中,加

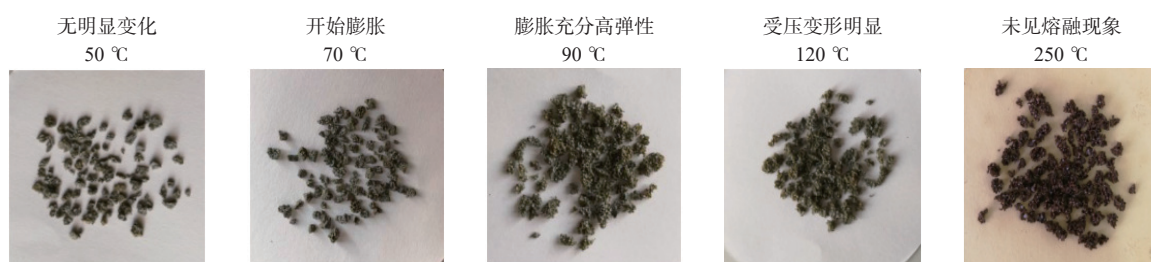


图 5 膨胀颗粒随温度的变化情况

Fig.5 Change in swelling particles with temperature

入 1 g 环氧树脂与固化剂的混合液,充分搅拌,让树脂均匀涂覆在膨胀颗粒表面;将其装入 $\phi 25.0 \text{ mm} \times 40.0 \text{ mm}$ 的玻璃管中,轻微压实,两端采用金属滤网封闭,置于恒温水浴中,在温度 $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下养护 12 h。取出玻璃管,敲碎得到膨胀颗粒胶结岩心,观察膨胀颗粒的胶结性能和填充效果,结果见图 6。

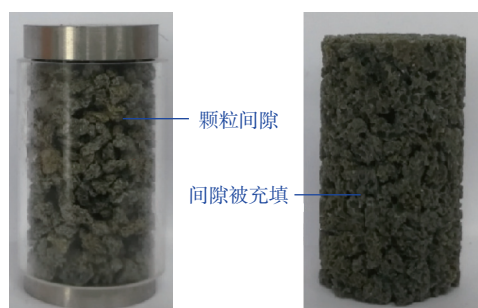


图 6 膨胀颗粒胶结定型前后对比

Fig.6 Comparison of swelling particles before and after cementation setting

从图 6 可以看出:膨胀前,膨胀颗粒之间存在较大的空隙;膨胀后,在约束空间中通过颗粒间的相互挤压作用,颗粒间的空隙基本被填满,并且可以自适应空间结构。同时,膨胀后膨胀颗粒表面的树脂涂层发生固化反应,将膨胀颗粒胶结成一体,形成完整的挡砂屏障。由于膨胀颗粒在原始状态下具有开孔泡沫结构,膨胀之后,泡沫孔眼重新恢复,并且不受树脂涂层的影响,保持连通状态。

2.4 抗压强度

参照树脂涂覆砂岩心抗压强度的测试方法^[22],将制作的膨胀颗粒防砂材料胶结岩心放置于压力试验机上,施加轴向压力,直至胶结岩心发生破坏,测试其无侧限抗压强度(UCS),测得膨胀颗粒胶结岩心的无侧限抗压强度为 4.5 MPa ,高于辽河油田大部分出砂井的生产压差($1 \sim 3 \text{ MPa}$),满足树脂涂覆砂行业标准($\geq 4 \text{ MPa}$)要求^[23]。

2.5 过流性能

将膨胀颗粒防砂材料胶结岩心外侧密封,装入

$\phi 25.0 \text{ mm} \times 200.0 \text{ mm}$ 玻璃管的一端,上部倒入清水,观察清水通过膨胀颗粒胶结岩心的流动情况,可以看到清水在膨胀颗粒防砂材料胶结岩心中的流动顺畅,不断流,呈现出“低阻”流态。

将膨胀颗粒防砂材料胶结岩心装入渗透率测试仪,采用清水测试其渗透率为 90 D。将 20/40 目石英砂装入 $\phi 25.0 \text{ mm}$ 金属管,两端用金属网固定,使石英砂保持压实状态,放入渗透率测试仪中,采用清水测试其渗透率为 18.56 D。将 20/40 目的涂覆石英砂和涂覆陶粒制成 $\phi 25.0 \text{ mm}$ 的胶结岩心,放入渗透率测试仪中,采用清水测试其渗透率分别为 10.34 和 30.67 D。从不同防砂材料渗透率测试结果看,膨胀颗粒防砂材料的渗透性明显优于涂覆石英砂和涂覆陶粒。膨胀颗粒防砂材料表现出优良过流性能的根本原因在于其孔隙度高、孔眼连通性好。

2.6 挡砂性能

为了测试膨胀颗粒防砂材料对不同粒径地层砂的挡砂效果和抗堵性能,将膨胀颗粒防砂材料胶结岩心装入渗透率测试仪中,在膨胀颗粒防砂材料胶结岩心前端分别填充粒径 0.250, 0.212, 0.150, 0.120 和 0.106 mm 的地层砂(见图 7),清水以 250 m/min 排量恒速驱替,记录驱替压差和出口端砂样质量,并且在每次驱替结束后,清洗膨胀颗粒防砂材料胶结岩心表面的砂粒,测其渗透率,结果见图 8、表 1。

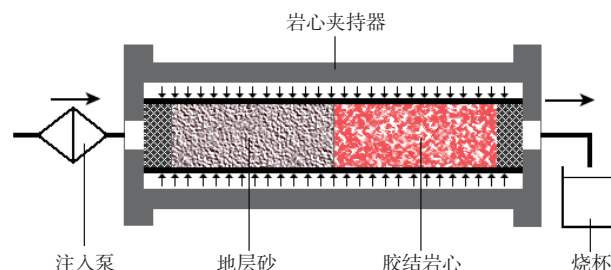


图 7 挡砂性能测试原理

Fig.7 Principle of sand retention performance test

从图 8 可以看出,随着地层砂粒径减小,驱替压差有所增大,但是驱替压差整体都比较平稳,没有

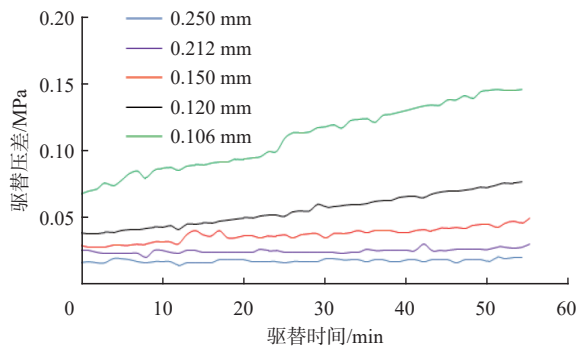


图8 不同粒径地层砂的驱替压差

Fig.8 Displacement pressure difference of formation sand with different particle sizes

表1 不同粒径地层砂的出砂量及驱替后的渗透率

Table 1 Sand production of formation sand with different particle sizes and permeability after displacement

地层砂粒径/mm	出砂量/g	渗透率/D
		92.3
0.250	未出砂	91.5
0.212	未出砂	91.2
0.150	0.004	86.3
0.120	0.011	84.8
0.106	0.035	79.4

出现驱替压差大幅升高的现象。从表1可以看出:对于粒径大于0.15 mm的地层砂,驱替时基本不出砂;对于粒径小于等于0.15 mm的地层砂,驱替时有少量出砂,说明膨胀颗粒防砂材料胶结岩心能够完全防住粒径大于0.15 mm的砂粒,并允许少量粒径小于0.15 mm的砂粒通过;对于不同粒径的地层砂,驱替后膨胀颗粒防砂材料胶结岩心的渗透率均有所降低,但是整体降低幅度比较小,最大降低幅度只有13.9%,说明其抗堵性能优良。

为了对比膨胀颗粒与树脂涂覆砂的挡砂效果和抗堵性能,分别在膨胀颗粒防砂材料和涂覆砂胶结岩心的前端填充粒径0.106~0.550 mm的地层砂,用清水以250 m/min排量恒速驱替,测试驱替压差和出砂量。测试结果表明,膨胀颗粒防砂材料胶结岩心后端见微量出砂,而涂覆砂胶结岩心后端未见出砂。图9为膨胀颗粒防砂材料和涂覆砂胶结岩心驱替压差随驱替时间的变化情况。从图9可以看出,膨胀颗粒防砂材料胶结岩心的驱替压差基本保持平稳;涂覆砂胶结岩心的驱替压差随驱替时间增长不断增大,且明显高于膨胀颗粒防砂材料胶结岩心。因此,相比于涂覆砂,膨胀颗粒防砂材料具有

更高的孔隙度和渗透率,其过流阻力更小,能够允许少量细粉砂通过,具有更优良的抗堵性能。

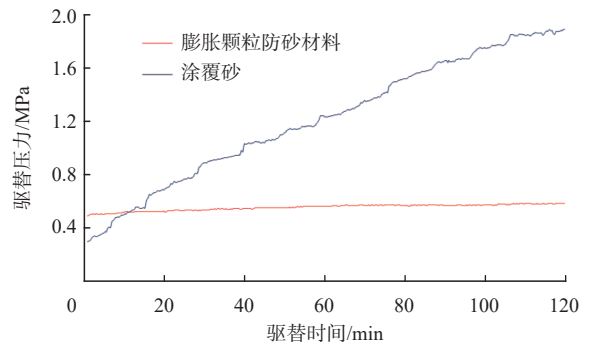


图9 膨胀颗粒防砂材料与涂覆砂的驱替压差

Fig.9 Displacement pressure difference between sand control material of swelling particles and resin sand

2.7 耐介质性能

在60℃下,将膨胀颗粒防砂材料胶结岩心放入不同介质(15%盐酸、pH值为10的碱液、柴油和油井采出水)中分别浸泡10和30 d,冲洗烘干后,测其浸泡前后的质量,结果见表2。

表2 膨胀颗粒防砂材料在不同介质中浸泡前后的质量
Table 2 Mass of sand control material of swelling particles before and after soaking in different media

浸泡介质	膨胀颗粒防砂材料胶结岩心质量/g		
	浸泡前	浸泡10 d	浸泡30 d
15%盐酸	6.874	6.863	6.854
pH值10碱液	6.803	6.794	6.762
柴油	6.947	6.965	6.996
地层水	6.785	6.781	6.783

从表2可以看出,随着浸泡时间增长,膨胀颗粒防砂材料胶结岩心在不同介质中浸泡后的质量与浸泡前相差不多,可见膨胀颗粒防砂材料具有良好的耐酸、碱、油和地层水的性能。

3 结论与建议

1)提出了膨胀颗粒充填防砂技术新思路。基于形状记忆聚氨酯泡沫和树脂涂层技术,研制出具有膨胀性和渗透性的膨胀颗粒防砂材料,填充到射孔道中,可形成整体硬质挡砂屏障。

2)室内性能评价结果表明,膨胀颗粒防砂材料在温度60~70℃时开始膨胀,适用储层温度不高于90℃的油藏;膨胀系数200%,在约束空间中膨

胀胶结后可形成整体硬质挡砂屏障, 抗压强度4.5 MPa, 渗透率92 D, 可阻挡粒径大于0.15 mm的地层砂; 其过流性能和抗堵塞能力要明显高于树脂涂覆砂; 具有良好的耐酸、碱、油和地层水的性能。

3) 利用膨胀颗粒防砂材料进行防砂具有高渗透、高强度、抗堵塞、低成本、施工简单、不留管柱等优点。但是, 采用切割和破碎工艺加工膨胀颗粒时存在加工效率低、废料率高等问题, 需要进一步优化膨胀颗粒的加工工艺。

参 考 文 献

References

- [1] 董长银. 油气井防砂技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2009.
DONG Changyin. Sand control technology in oil and gas wells[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2009.
- [2] 朱光明, 魏堃, 王坤. 形状记忆聚合物及其在航空航天领域中的应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(8): 168–171.
ZHU Guangming, WEI Kun, WANG Kun. Shape memory polymers for aeronautic & space applications[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2010, 26(8): 168–171.
- [3] 张新民. 智能材料研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(6): 57–63.
ZHANG Xinmin. The research process of smart materials[J]. Fiber Reinforced plastics/Composites, 2013(6): 57–63.
- [4] MANSOUR A, EAEKACHA C, TALEGHANI A D, et al. Smart lost circulation materials for productive zones[R]. SPE 187099, 2017.
- [5] SANTOS L, TALEGHANI A D, LI Guoqiang. Expandable diverting agents to improve efficiency of refracturing treatments[R]. URTEC 2697493, 2017.
- [6] TAKEGHANI A D, LI Guoqiang, MOAYERI M. The use of temperature-triggered polymers to seal cement voids and fractures in wells[R]. SPE 181384, 2016.
- [7] SANTOS L, TALEGHANI A D, LI Guoqiang. Smart expandable proppants to achieve sustainable hydraulic fracturing treatments[R]. SPE 181391, 2016.
- [8] 暴丹, 邱正松, 赵欣, 等. 基于温敏形状记忆特性的智能化堵漏材料研究展望[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(3): 265–272.
BAO Dan, QIU Zhengsong, ZHAO Xin, et al. Outlook on the research on intelligent LCM with temperature sensitive shape memory property[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019, 36(3): 265–272.
- [9] 暴丹, 邱正松, 叶链, 等. 热致形状记忆“智能”型堵漏剂的制备与特性实验[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 106–115.
BAO Dan, QIU Zhengsong, YE Lian, et al. Preparation and characteristic experiment of thermotropic shape memory “intelligent” plugging agent[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 106–115.
- [10] 王照辉, 崔凯潇, 蒋官澄, 等. 基于形状记忆环氧树脂聚合物的温敏可膨胀型堵漏剂研制及性能评价[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(4): 412.
WANG Zhaohui, CUI Kaixiao, JIANG Guancheng, et al. Development and evaluation of a temperature-sensitive expandable lost circulation material made from a shape memory epoxy polymer[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2020, 37(4): 412.
- [11] 王宝田, 杨倩云, 杨华. 形状记忆聚合物型温控膨胀堵漏剂 SDP 制备技术[J]. 钻井液与完井液, 2022, 39(1): 41–45.
WANG Baotian, YANG Qianyun, YANG Hua. Research on preparation technology of temperature-controlled expansion plugging agent based on shape memory polymer[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2022, 39(1): 41–45.
- [12] WANG Xiuli, OSUNJATE G. Advancement in openhole sand control applications using shape memory polymer[R]. SPE 181361, 2016.
- [13] OSUNJATE G, ABDELFAHATTAH T. Open hole sand control optimization using shape memory polymer conformable screen with in-flow control application[R]. SPE 183947, 2017.
- [14] 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, 2017, 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, 2017, 34(2): 217–221.
- [15] 段友智, 艾爽, 刘欢乐, 等. 形状记忆筛管自充填防砂完井技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(5): 86–90.
DUAN Youzhi, AI Shuang, LIU Huanle, et al. Shape memory screen self-packing sand control completion technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(5): 86–90.
- [16] 段友智, 刘欢乐, 艾爽, 等. 形状记忆筛管膨胀性能测试[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(4): 83–88.
DUAN Youzhi, LIU Huanle, AI Shuang, et al. Test of the expansion performance for shape memory screens[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(4): 83–88.
- [17] 段友智, 侯倩, 刘锦春, 等. 完井用多孔形状记忆聚合物的性能影响因素研究[J]. 石油钻探技术, 2020, 49(2): 67–71.
DUAN Youzhi, HOU Qian, LIU Jinchun, et al. Study on the influencing factors of the properties of porous shape memory polymer for well completion[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 49(2): 67–71.
- [18] 何生厚, 张琪. 油气井防砂理论及其应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2003.
HE Shenghou, ZHANG Qi. Theory and application of sand control in oil and gas wells[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2003.
- [19] 张琪. 采油工程原理与设计[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000.
ZHANG Qi. Principle and design of oil production engineering[M]. Dongying: Petroleum University Press, 2000.
- [20] 李怀文, 孙涛, 王超, 等. 超低温新型树脂涂敷砂及人工井壁防砂技术[J]. 石油学报, 2016, 37(增刊2): 112–116.
LI Huaiwen, SUN Tao, WANG Chao, et al. The new ultralow-temperature resin coated sand and artificial borehole wall sand control technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(supplement 2): 112–116.
- [21] 何平笙. 新编高聚物的结构与性能[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
HE Pingsheng. New edition of structure and properties of polymer[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [22] SY/T 5270—2000 化学防砂人工岩心抗折强度、抗压强度及气体渗透率的测定[S].
SY/T 5270—2000 Test method for flexural strength, compression strength and air permeability of chemical sand consolidation in man-made core[S].
- [23] SY/T 5274—2016 树脂涂覆砂技术要求[S].
SY/T 5274—2016 Technical requirements resin coated sand[S].