

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2022023

引用格式: 汤龙皓, 王彦玲, 张传保, 等. 基于形状记忆聚合物的温敏型堵漏材料制备与评价 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 70-75.

TANG Longhao, WANG Yanling, ZHANG Chuanbao, et al. Preparation and evaluation of thermosensitive plugging materials based on shape memory polymers [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(5): 70-75.

基于形状记忆聚合物的温敏型堵漏材料制备与评价

汤龙皓^{1,2}, 王彦玲³, 张传保³, 许 宁³

(1. 中国石化胜利油田分公司技术检测中心, 山东东营 257000; 2. 中国石化胜利油田检测评价研究有限公司, 山东东营 257000; 3. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

摘 要: 传统堵漏材料对裂缝性漏失的封堵存在不足, 针对该问题, 将形状记忆聚合物材料引入封堵作业, 利用其“温控形变”特性, 制备出温敏型堵漏材料; 采用热机械动力分析仪和形状恢复试验, 评价了其玻璃态转变温度和形状记忆性能; 通过裂缝封堵模拟试验, 评价了温敏型堵漏材料的裂缝封堵效果, 并探索了其裂缝封堵机理。研究结果表明: 温敏型堵漏材料的形变温度(即玻璃态转变温度)可根据漏失层段位置需求在温度 80~120 ℃ 范围内进行调控, 形状记忆性能优异(形状恢复率大于 95%), 且耐温性能良好, 初始热解温度 230~258 ℃, 可适用于温度 80~120 ℃ 的地层, 与传统堵漏材料复配后可封堵 3~5 mm 裂缝。研究结果可为研制和应用新型材料封堵裂缝提供参考。

关键词: 裂缝性漏失; 形状记忆聚合物; 温敏性; 封堵材料; 玻璃态转变温度; 模拟试验

中图分类号: TE28⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2022)05-0070-06

Preparation and Evaluation of Thermosensitive Plugging Materials Based on Shape Memory Polymers

TANG Longhao^{1,2}, WANG Yanling³, ZHANG Chuanbao³, XU Ning³

(1. Technology Inspection Center, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong, 257000, China; 2. Sinopec Shengli Oilfield Testing and Evaluation Research Co., Ltd. Dongying, Shandong, 257000, China; 3. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao, Shandong, 266580, China)

Abstract: Considering the insufficient ability of traditional plugging materials to seal fractured leakage, shape memory polymers (SMPs) were introduced for plugging. A thermosensitive plugging material was prepared based on SMPs for their “temperature-controlled deformation” property. Then, its glass transition temperature and shape memory performance were evaluated by the thermo-mechanical dynamic analyzer and shape recovery test. Moreover, the simulation tests of fracture plugging were carried out to assess the plugging capability of the polymers on fractures and explore the plugging mechanism. The research results indicated that the deformation temperature(glass transition temperature) of the thermosensitive plugging material could be regulated in the range of 80–120 ℃ according to the locations of the leakage layers, featuring excellent shape memorizing performance (with a shape recovery ratio of more than 95%). In addition, the temperature resistance of this material was good, with the initial pyrolysis temperature between 230 and 258 ℃, which meant that the material could be applied in a formation temperature environment of 80–120 ℃. The compound of this material and the traditional plugging material could successfully seal the fractures with width ranging from 3–5 mm. The research results can provide a reference for the preparation and application of this new material to fracture plugging.

Key words: fracture leakage; shape memory polymer; thermosensitive; plugging material; glass transition temperature; simulation test

随着油气勘探开发的不断深入, 开采所遇到的地层情况越来越复杂, 尤其在钻遇破碎、弱胶结地

层或裂缝溶洞发育地层时, 井漏问题十分严重。我国川东北地区、胜利油田和塔里木盆地等钻井过程

收稿日期: 2021-11-11; 改回日期: 2022-06-09。

作者简介: 汤龙皓(1989—), 男, 山东东营人, 2011年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业, 2022年获中国石油大学(华东)油气田开发工程专业博士学位, 主要从事新型油田化学材料的研发工作。E-mail: 872591331@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目“超深井安全高效井筒工作液构建及调控方法基础研究”(编号: U1762212)资助。

中都出现了较为严重的井漏问题, 据统计, 井漏发生率占钻井总数的 25%~30%, 其中严重井漏损失占井漏总损失的 70% 以上^[1-3]。封堵大型裂缝时, 常规堵漏材料由于自身尺寸与地层中裂缝开度不匹配, 承压能力低, 耐温能力差, 无法形成有效的封堵架桥结构, 导致封堵作业效率低^[4-5]。

形状记忆聚合物具有独特的形状记忆功能, 已经在多个领域得到应用, 并且逐步成为了高分子研究方面的新热点^[6-7]。形状记忆聚合物受到外界施加的相关刺激后, 可以实现从现存形状到原有设定形状的形态转换^[7-10]。这种特有的转换性能使形状记忆聚合物在航天元件、医学器材、电子设备和建材原料等方面都具有十分重要的潜在价值。目前, 形状记忆材料也已引入石油工程, 开始应用于油气管线连接、膨胀水泥和防砂管等方面^[11-12]。

考虑形状记忆聚合物能够改变外在形貌, 可将其引入裂缝堵漏相关研究中^[13-15]。比如, 温敏型堵漏水泥浆应用温度 60~140 ℃, 承压 7 MPa, 现场应用中可有效解决固井漏失问题^[16]; 胜利油田研制的温控型膨胀堵漏剂 SDP 具备一定的高温可膨胀性及力学强度, 可用于裂缝堵漏^[17]。然而, 在制备这些堵漏材料过程中, 大多数的化学反应可控性不好, 存在反应产率较低等问题。为此, 笔者基于点击化学反应高效的优势, 结合形状记忆聚合物温敏形变的特点, 研制出一种温敏型堵漏材料。室内评价认为, 该堵漏材料有别于常规堵漏材料, 具有自适应裂缝开度、耐温性好、承压能力较高和易加工等特点。研究结果对研制和应用新型智能堵漏材料具有参考借鉴价值。

1 温敏型堵漏材料的制备与结构表征

1.1 材料制备

根据环氧-巯基点击化学反应原理^[18], 环氧基在叔胺类催化剂的催化作用下可与巯基进行开环反应形成空间网络结构, 从而制得环氧树脂形状记忆聚合物。按环氧基与巯基化学计量比 1:1 称取环氧树脂 E-51、固化剂季戊四醇四-3-巯基丙酸酯(PMP)及改性剂三缩水甘油基对氨基苯酚(TGE); 将适量 E-51、PMP、TGE 及催化剂 2-EMI 倒入三口烧瓶中, 抽真空搅拌 0.5 h, 以除去混合物中的气泡; 然后, 将混合物倒入模具中, 采用三段式升温(80 ℃/3 h, 120 ℃/1 h, 150 ℃/1 h)进行固化反应; 反应结束后, 待其自然冷却脱模, 即得到温敏型形状记忆聚合物

样品(记为 E-MP)。共制得 E-MP10、E-MP20 和 E-MP30 等 3 种温敏型形状记忆聚合物样品, 具体配方见表 1。

表 1 形状记忆聚合物单体配比
Table 1 Composition of SMP monomer

样品	质量分数, %			
	E-51	PMP	TGE	2-EMI
E-MP10	55.85	37.66	6.21	0.28
E-MP20	48.17	39.40	12.04	0.39
E-MP30	40.99	41.11	17.57	0.33

对温敏型形状记忆聚合物样品 E-MP10、E-MP20 和 E-MP30 粉碎造粒, 可得粒径 8/10 目、10/20 目不等的样品颗粒。

1.2 结构表征

采用 Nicolet 750 傅里叶红外光谱仪, 测定了环氧树脂单体和固化剂季戊四醇四-3-巯基丙酸酯固化反应前后的红外光谱, 确定了官能团的反应程度, 扫描范围 400~4 000 cm^{-1} 。形状记忆聚合物 E-MP 固化反应前后的红外光谱如图 1 所示(图 1 中, 虚线指官能团的波数位置, 指引线所指为官能团)。

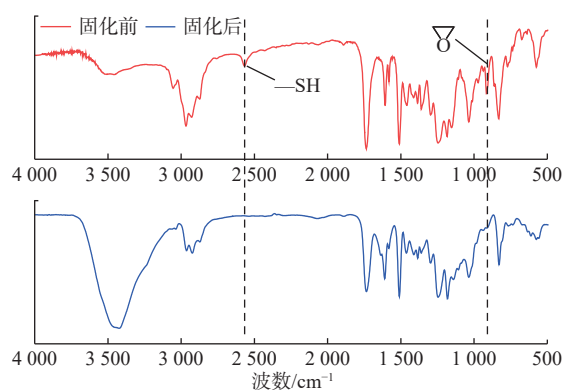


图 1 形状记忆聚合物 E-MP 固化反应前后的红外光谱
Fig.1 Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) of SMP E-MP before and after the curing process

由图 1 可知, 固化反应前, 环氧基的特征吸收峰在 908~930 cm^{-1} 处, 巯基的特征吸收峰在 2567 cm^{-1} 处较明显, 而反应后红外光谱曲线的同一位置没有出现任何吸收峰, 这表明环氧基和巯基在固化反应中参与并完全反应^[6-7]。酯基 C=O 的伸缩振动峰和—CH 的伸缩振动峰分别出现在 1742 和 2931 cm^{-1} 处, 这些区域没有明显的光谱差异, 表明没有其他官能团与它们发生反应。由此可说明, 环氧基与巯基发生了交联反应, 并形成了形状记忆聚合物。

2 温敏型堵漏材料性能评价

利用热重分析和热机械动力分析方法,分别评价了温敏型堵漏材料的耐温性和玻璃态转变温度,通过试验分析了其形状记忆性能,并考察了环境温度对其形状记忆性能的影响,并根据长裂缝封堵模拟试验结果评价了基于环氧树脂形状记忆聚合物温敏型堵漏材料的封堵效果。

2.1 耐温性能

由热重分析曲线可以确定形状记忆聚合物的可承受工作温度范围,由热机械动力分析结果可知形状记忆聚合物的形变温度(即玻璃态转变温度)。为此,利用TG209F1热重分析仪(TGA)进行耐温性能试验, N_2 流量100 mL/min,升温速率10 °C/min,温度范围25~600 °C。利用TAQ800动态热机械分析仪(DMA)进行热机械动力分析,升温速率3 °C/min,温度范围20~200 °C,样品尺寸 (40 ± 0.02) mm $\times$ (10 ± 0.02) mm $\times$ (3 ± 0.02) mm。

用DMA测出的形状记忆聚合物试样的玻璃态转变温度和用TGA分析样品的热解温度及耐温范围见图2和表2。

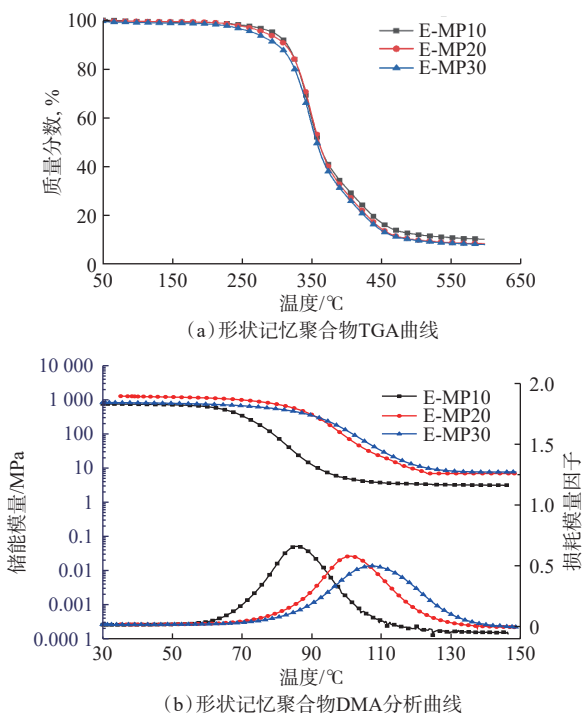


图2 不同配比形状记忆聚合物的热性能测试结果

Fig.2 Thermal properties of SMPs with different compositions

由图2和表2可知,形状记忆聚合物的初始分

表2 不同配比形状记忆聚合物的耐温性能

Table 2 Temperature resistance of SMPs with different compositions

样品	热解温度/°C		玻璃态转变温度/°C
	t_5	t_{50}	
E-MP10	230.5	336.5	86.2
E-MP20	255.0	366.6	101.4
E-MP30	258.2	367.4	107.5

注: t_5 为样品质量损失5%时的外界温度,°C; t_{50} 为样品质量损失50%时的外界温度,°C。

解温度为230~258 °C,可适用于地层高温环境。随着TGE含量增大,样品的玻璃态转变温度有升高趋势,E-MP10、E-MP20和E-MP30的玻璃态转变温度分别为86.2、101.4和107.5 °C。这是因为,聚合物网络体系的交联点逐渐变多且更为紧密,这也造成网络体系中分子链段受到的束缚更大,分子链段需要吸收更多的外界能量才能运动伸展,因此,玻璃态转变温度升高。这也为制备适应于不同地层漏失段的堵漏材料提供了依据,可以根据地层的不同温度选择合适的配比,来制备形状记忆聚合物。

2.2 形状记忆性能

温敏型形状记忆堵漏材料受到外界高温环境的刺激激活后,因形状记忆聚合物自身特性,形状恢复,体积膨胀,从而可在较大裂缝间建立架桥结构,达到封堵效果。为了解形状记忆聚合物的形状恢复效果,进而分析其形状恢复率、形状恢复速度对裂缝封堵效果的影响,进行了“U形”形状恢复试验。试验步骤:1)将制备的矩形样品放入水浴锅,待温度加热至高于玻璃态转变温度 t_g 时将样品弯曲成U形,并保持2 min,记录最大弯曲角度 θ_b ;2)将弯曲的样品移至冷水中,保持外力恒定2 min,记录形状固定后的角度 θ_{fix} ;3)将弯曲成型后的样品再放入温度升至 t_g 的水浴锅中,待样品恢复到最大程度,记录角度 θ_{fin} 和恢复时间 t ;根据试验数据计算形状记忆聚合物的形状固定率(R_f)和形状恢复率(R_r):

$$R_f = \frac{\theta_{fix}}{\theta_b} \quad (1)$$

$$R_r = \frac{\theta_{fix} - \theta_{fin}}{\theta_{fix}} \quad (2)$$

根据试验结果,绘制了不同配比下形状记忆聚合物的形状恢复率与时间的关系曲线(见图3),归纳了不同配比下形状记忆聚合物的形状恢复性能数据(见表3)。

由图3和表3可知,E-MP10、E-MP20和E-MP30

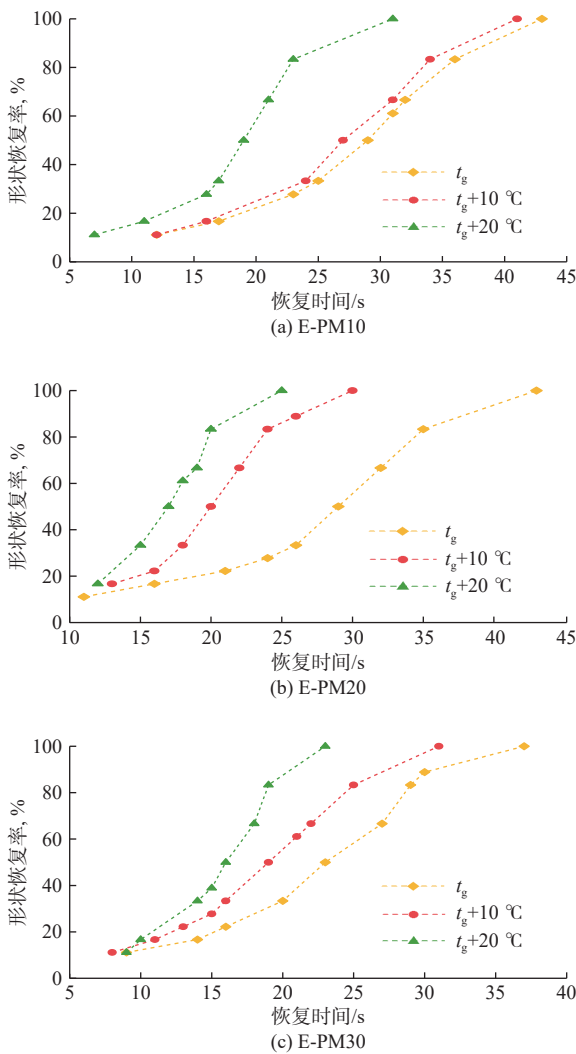


图 3 不同配比形状记忆聚合物的形状恢复率与时间的关系
Fig.3 Relationship between shape recovery ratio and time of SMPs with different compositions

表 3 不同配比形状记忆聚合物的形状恢复性能
Table 3 Shape recovery performance of SMPs with different compositions

样品	形状固定率, %	形状恢复率, %	不同温度的形状恢复时间/s		
			t_g	$t_g+10^\circ\text{C}$	$t_g+20^\circ\text{C}$
E-MP10	98	100	37	22	22
E-MP20	98	100	43	30	25
E-MP30	98	100	43	41	31

等 3 种不同配比的形状记忆聚合物均能在较短时间内 ($t < 50\text{ s}$) 完成形状恢复过程, 且恢复程度较好 ($R_r=100\%$)。从图 3 还可以观察到, 形状恢复率曲线呈 S 形三段式: 第 1 阶段, 在外界能量的刺激下, 聚合物内部的软段分子链逐渐开始运动, 因而初始

阶段形状恢复速率缓慢, 时间较长; 第 2 阶段, 外界不断给聚合物内部更多的可自由活动的分子链段提供能量, 导致恢复速率明显提升, 恢复率接近 80%; 第 3 阶段, 聚合物内部储存的应力近乎耗尽, 形状记忆聚合物以缓慢的速率恢复至初始形状^[1]。

2.3 高温膨胀性能

上述基于形状记忆聚合物的温敏型堵漏材料, 要求耐温度 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 以上的高温环境, 并通过形状变形恢复达到架桥封堵效果。为此, 开展了高温膨胀性能试验: 1) 利用钻井液封堵性能评价装置模拟地层条件 ($120\text{ }^\circ\text{C}$ 、 20 MPa), 用电热恒温干燥箱模拟高温环境, 评价颗粒在高温环境中的膨胀性能; 2) 为了在深部地层裂缝实现架桥封堵, 将制备好的形状记忆聚合物粉碎成小颗粒状, 以便进入裂缝内; 3) 采用颗粒筛分法测定颗粒的粒径分布特征, 并选用 d_{50} 和 d_{90} 作为颗粒膨胀前后的粒径特征参数; 4) 由地层高温激发产生形状恢复膨胀, 由压缩成型的片状或颗粒状恢复为初始的块状, 从外观上达到“膨胀”效果。形状记忆聚合物的高温膨胀性试验结果如图 4 所示。

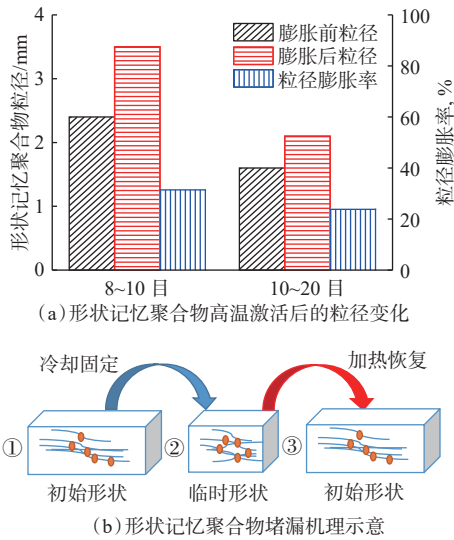


图 4 形状记忆聚合物的高温膨胀性
Fig.4 High-temperature expansibility of SMPs

由图 4(a)可知, 形状记忆聚合物颗粒在受热激活后发生了较大程度的体积膨胀, 8/10 目聚合物颗粒的粒径由 2.4 mm 增大至 3.5 mm , 10/20 目聚合物颗粒的粒径由 1.6 mm 增大至 2.1 mm , 粒径膨胀率分别为 31.4% 和 23.8%。试验结果说明, 形状记忆堵漏材料可以在高温环境下实现形状恢复, 并完成架桥封堵。

2.4 与钻井液的配伍性

为了评价温敏型堵漏材料与钻井液的配伍性,进行了形状记忆聚合物对钻井液流变性的影响试验。首先配制由膨润土、羧甲基纤维素(CMC-LV)和自来水组成的基浆,然后将其与温敏型形状记忆聚合物配制成堵漏工作液,通过流变仪评价堵漏工作液在老化(老化条件为在温度 120 ℃ 下滚动 12 h)前后的流变性能变化,结果见表 4。

表 4 形状记忆聚合物对钻井液流变性的影响
Table 4 Effect of SMPs on rheology of drilling fluids

试验浆	测试条件	表观黏度/ (mPa·s)	塑性黏度/ (mPa·s)	动切力/ Pa
基浆	老化前	34.5	17.0	15.0
	老化后	33.5	18.0	14.0
基浆+E-MP	老化前	35.0	16.0	16.0
	老化后	34.0	17.5	14.5

注:基浆为4.0%膨润土+0.4%CMC-LV+水。

由表 4 可知,基浆中加入 E-MP 经过高温老化后,其表观黏度和动切力与基浆相比并没有明显变化,流变性较好,说明 E-MP 对钻井液的流变性能没有影响,其与钻井液的配伍性好。

2.5 封堵效果

采用实验室自制长裂缝封堵模拟试验装置(见图 5),评价温敏型堵漏材料的封堵效果。长裂缝封堵模拟试验装置主要由楔形长裂缝(100 cm)模块、数据采集系统和增压装置组成,可通过设置不同压力、温度及剪切速率来模拟钻井液堵漏的静态、动态过程。楔形长裂缝模块由 2 块半圆形的钢板和相匹配的环形箍组成,材质为耐高温高压的不锈钢,2 块钢板中间加工出凹槽模拟裂缝。

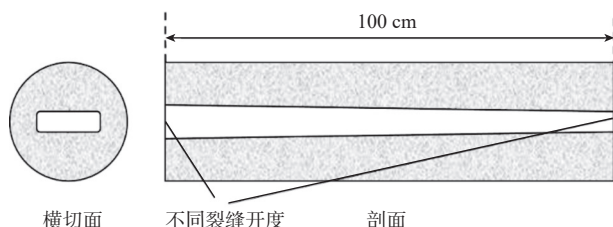


图 5 长裂缝封堵模拟试验装置示意

Fig.5 Test device for long fracture plugging simulation

模拟了常规堵漏工作液和温敏型堵漏工作液在不同压力、温度下对不同开度裂缝的封堵情况,结果见表 5。

表 5 裂缝封堵试验结果

Table 5 Results of fracture plugging experiment

堵漏 工作液	裂缝开度/ mm	温度/ ℃	封堵突破 压力/MPa	漏失量/ mL	封堵 效果
1	3×2	25	0	全漏	无效
		100	0	全漏	无效
2	3×2	25	0	全漏	无效
		100	12.8	23	有效
	4×3	100	11.5	36	有效

注:堵漏工作液1为常规堵漏工作液,配方为4.0%膨润土+0.4%CMC-LV+0.2%FIB+4.0%QJD(8/10目)+3.0%QJD(10/20目)+水;堵漏工作液2为含有形状记忆聚合物颗粒的温敏型堵漏工作液,配方为4.0%膨润土+0.4%CMC-LV+0.2%FIB+4.0%QJD(8/10目)+3.0%QJD(10/20目)+3.0%E-MP(8/10目)+3.0%E-MP(10/20目)+水。

由表 5 可知,在室温(25 ℃)和高温(100 ℃)环境下,常规堵漏工作液无法封堵较大裂缝;含有形状记忆聚合物颗粒的温敏型堵漏工作液在室温环境下的封堵效果不佳,但随着环境温度升高,聚合物颗粒逐步变形膨胀,堵漏材料开始在裂缝处形成承压堵漏层,并且针对不同开度的裂缝,温敏型堵漏工作液也具备一定的堵漏能力。分析认为,温敏型堵漏材料能够在地层高温环境中进行有效封堵,其主要原因是分子结构中拥有储存应力的固定相和受外界温度刺激后能够运动伸展的可逆相,固定相一般是通过化学反应得到的交联结构,而可逆相是随温度变化在玻璃态与橡胶态之间进行可逆性转变的相结构,具备这 2 种结构的聚合物即可在合适的刺激源下恢复形状,基于此所制备的堵漏材料能够在高温环境下的裂缝中形成可承压的堵漏层^[17-18]。

3 结 论

1) 基于形状记忆聚合物研制了温敏型堵漏材料,可根据实际地层堵漏需求调节其粒径大小和玻璃态转变温度,形状恢复率和形状固定率均较好(≥98%),形状恢复时间短,可有效封堵地层裂缝。

2) 形状记忆聚合物颗粒初始热解温度为 230~258 ℃,玻璃态转变温度为 86.2~107.5 ℃,耐温性能良好,可适用于高温地层环境,且随着固化剂含量增大,该聚合物的玻璃态转变温度有升高趋势。

3) 温敏型堵漏材料中的形状记忆聚合物颗粒是通过粉碎形成的,粒径较小,因而可以随钻井液运移至地层裂缝内,在地层高温刺激下可恢复形状并在裂缝内架桥,从而达到封堵效果。

参 考 文 献

References

- [1] 张希文, 李爽, 张洁, 等. 钻井液堵漏材料及防漏堵漏技术研究进展[J]. 钻井液与完井液, 2009, 26(6): 74–76.
ZHANG Xiwen, LI Shuang, ZHANG Jie, et al. Research progress on lost circulation materials and lost circulation control technology[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2009, 26(6): 74–76.
- [2] 程鹏至, 易德文, 梅林德, 等. 新型堵漏材料的研制及性能评价[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(3): 51–55.
CHENG Pengzhi, YI Caiwen, MEI Linde, et al. The development and evaluation of a set of new lost circulation material[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2016, 33(3): 51–55.
- [3] 何龙, 史堃, 杨健, 等. 裂缝性地层堵漏材料承压性能及材料优选研究[J]. 钻采工艺, 2019, 42(2): 42–44.
HE Long, SHI Kun, YANG Jian, et al. Study on pressure-bearing property and material optimum selection of leakage-plugging materials for fractured formation[J]. *Drilling & Production Technology*, 2019, 42(2): 42–44.
- [4] 黄贤杰, 董耘. 高效失水堵漏剂在塔河油田二叠系的应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(4): 159–162.
HUANG Xianjie, DONG Yun. The application of the highly effective lost circulation additive in the Permian in Tahe Oilfield[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2008, 30(4): 159–162.
- [5] 张歧安, 徐先国, 董维, 等. 延迟膨胀颗粒堵漏剂的研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(2): 21–24.
ZHANG Qi'an, XU Xianguo, DONG Wei, et al. Study and application of granular postponed-swelling LCM[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2006, 23(2): 21–24.
- [6] 蒋建军, 胡毅, 陈星, 等. 形状记忆智能复合材料的发展与应用[J]. 材料工程, 2018, 46(8): 1–13.
JIANG Jianjun, HU Yi, CHEN Xing, et al. Development and application of shape memory intelligent composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(8): 1–13.
- [7] 王焱, 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.
WANG Yao, LI Chunfu, LIN Yuanhua, et al. Research progress of application of SMA in petroleum engineering[J]. *Materials Reports*, 2016, 30(supplement 2): 98–102.
- [8] 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, 2021, 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*, 2021, 49(2): 67–71.
- [9] KUMAR K S S, NAIR C P R. Hydrophobic shape memory poly(oxazolidone-triazine) cyclomatrix networks with high transition temperatures[J]. *RSC Advances*, 2014, 4(6): 2969–2973.
- [10] PARAMESWARANPILLAI J, RAMANAN S P, JOSE S, et al. Shape memory properties of epoxy/PPO-PEO-PPO triblock copolymer blends with tunable thermal transitions and mechanical characteristics[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56(47): 14069–14077.
- [11] 汤龙皓, 王彦玲, 李永飞, 等. 热致型形状记忆聚合物的研究现状与应用进展[J]. 机械工程材料, 2019, 43(9): 1–7.
TANG Longhao, WANG Yanling, LI Yongfei, et al. Research status and application progress of thermal-induced shape memory polymer[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2019, 43(9): 1–7.
- [12] 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.
- [13] 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 experiments of intelligent lost circulation materials based on thermally shape memory polymer[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(1): 106–115.
- [14] 潘一, 徐明磊, 郭奇, 等. 钻井液智能堵漏材料研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(9): 9223–9230.
PAN Yi, XU Minglei, GUO Qi, et al. Research progress of smart plugging materials for drilling fluid[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(9): 9223–9230.
- [15] 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): 412–420.
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): 412–420.
- [16] 刘学鹏. 温敏堵漏水泥浆体系研究与应用[J]. 钻探工程, 2022, 49(2): 110–116.
LIU Xuepeng. Research and application of the temperature sensitive plugging cement slurry system[J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(2): 110–116.
- [17] 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.
- [18] KAUR J, SAXENA M, RISHI N. An overview of recent advances in biomedical applications of click chemistry[J]. *Bioconjugate Chemistry*, 2021, 32(8): 1455–1471.

[编辑 令文学]