

温敏型形状记忆聚合物及其在雄安新区 热储钻进的应用展望

蒋 欧, 曹 伶, 郑秀华*

(中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 雄安新区地热资源丰富, 其深部蓟县系雾迷山组碳酸盐岩热储是目前首要的目标储层。其碳酸盐岩热储高度发育地裂隙网使得钻井中存在钻井液严重漏失与储层伤害问题, 导致地热井产能下降。为在实现地热钻井裂隙封堵的同时不伤害热储层, 从而最大程度地提高地热井产能, 本文提出应用温敏型形状记忆聚合物对温度响应的形状记忆特性以实现雄安新区裂隙型碳酸盐岩热储钻进过程中屏蔽暂堵。温敏型形状记忆聚合物既能够有效地应对雄安新区目标热储由于裂隙发育而造成的钻井液漏失问题, 在地热井生产时又能够完全离开储层裂隙从而最大程度实现热储保护, 是一种具有发展潜力的裂隙型热储屏蔽暂堵技术, 为雄安新区高效地热钻井及热储保护技术提供一种新的技术手段。

关键词: 地热钻井; 碳酸盐岩热储; 裂隙封堵; 温敏型形状记忆聚合物; 屏蔽暂堵; 雾迷山组; 雄安新区

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)S1-0291-08

Temperature sensitive shape memory polymer and its application expectations during geothermal reservoir drilling in Xiong'an New Area

JIANG Ou, CAO Ling, ZHENG Xiuhua*

(China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: There are abundant geothermal resources underlying in Xiong'an New Area, and the Wumishan carbonate geothermal reservoir of Jixian System has been the prior target geothermal reservoir so far. Highly developed fracture network of Wumishan carbonate geothermal reservoir in Xiong'an New Area leads to severe lost circulation of drilling fluid during geothermal drilling, and thus geothermal reservoir damage, which causes the decline of geothermal well productivity. In order to achieve the shielding of fractures during geothermal drilling in conjunction with reservoir protection, which aims at maximum productivity improvement, it is proposed that the application of shape memory polymer with shape memory effect sensitive to temperature could be feasible for temporary shielding during drilling in Wumishan fractured carbonate geothermal reservoir in Xiong'an New Area. Temperature sensitive shape memory polymer is capable of effectively dealing with the lost circulation problem induced by highly fractured target geothermal reservoir, while guarantees the maximum geothermal reservoir protection by thoroughly exiting from the fractures, and its application is a promising temporary shielding technology for fractured carbonate geothermal reservoir, which provides a novel technological method for efficient drilling and geothermal reservoir protection in Xiong'an New Area.

Key words: geothermal drilling; carbonate geothermal reservoir; fracture sealing; temperature sensitive shape memory polymer; temporary shielding; Wumishan formation; Xiong'an New Area

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-08-27 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.045

基金项目: 雄安新区科技创新专项“雄安新区地热资源高效钻井与开采新型技术应用研究”(编号: 2022XAGG0500); 国家自然科学基金项目“钻井液在 EGS 热储环境下反应及其对热储伤害机制研究”(编号: 42172342)

第一作者: 蒋欧, 男, 汉族, 1999 年生, 博士研究生在读, 地质工程专业, 从事钻井液对热储伤害机理及热储保护钻井液技术研究工作, 北京市海淀区学院路 29 号, 3002220034@email.cugb.edu.cn。

通信作者: 郑秀华, 女, 汉族, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 从事高温地热能勘探开发与钻/完井教学与研究, 北京市海淀区学院路 29 号, xiuhuazh@cugb.edu.cn。

引用格式: 蒋欧, 曹伶, 郑秀华. 温敏型形状记忆聚合物及其在雄安新区热储钻进的应用展望[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 291-298.

JIANG Ou, CAO Ling, ZHENG Xiuhua. Temperature sensitive shape memory polymer and its application expectations during geothermal reservoir drilling in Xiong'an New Area[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 291-298.

0 引言

地热能作为清洁、可再生且储量大的新能源,极具未来发展潜力^[1]。雄安新区地热资源丰富,为实现能源清洁、高效的供应,开发地热能是一种有效方式^[2]。雄安新区地热资源主要赋存于浅部新近系砂岩热储及深部蓟县系雾迷山组碳酸盐岩地层,其中深部碳酸盐岩热储是迫切探明的目标热储^[3-4]。雄安新区碳酸盐岩热储裂隙网络较发育^[5],钻遇裂隙发育层时容易发生严重漏失^[6-7]。但雄安新区碳酸盐岩热储沟通性与储水性较差,使得储层渗透性低^[5],钻井过程中一旦发生漏失,钻井液中的固相颗粒将会进一步造成热储渗透性伤害^[8],不利于地热资源的高效开发。因此,亟需针对雄安新区裂隙性碳酸盐岩热储,应用有效的堵漏技术实现高效钻进与热储保护。

常规碳酸盐岩地层堵漏技术包括桥接堵漏材料、水泥浆封堵、化学凝胶堵漏等^[9],通常不能完全从封堵层分离,因而造成一定程度的储层伤害。屏蔽暂堵技术作为近年来发展的堵漏技术,在钻井过程能暂时封堵裂隙,减缓钻井液漏失;而在开采过程时,暂堵材料能与封堵裂隙几乎完全分离,不影响地热井产能。目前用于屏蔽暂堵的材料包括酸溶材料、降解材料及形状记忆材料^[10-12],形状记忆聚合物(SMP, shape memory polymer)基于形状记忆效应的智能堵漏使其更具应用前景^[13],且前人已对SMP作为堵漏材料进行了室内实验评价,并在现场面对砂岩渗透性漏失及煤层裂隙性漏失取得了良好的堵漏效果^[14]。

综上所述,利用SMP材料进行雄安新区雾迷山组裂隙性热储的屏蔽暂堵具有可行性。为实现SMP材料堵漏技术与地热储层的匹配,一方面需要了解地热储层特征,另一方面需要根据热储特征通过材料选择、化学合成等方式调控与热储特征匹配的SMP材料性能。因此,本文首先调研了雄安新区雾迷山组地热储层特征。其次介绍了温敏型SMP的相关特性。在上述基础上,提出了将SMP材料应用于雄安新区雾迷山组裂隙性热储屏蔽暂堵的一种方案,并通过室内实验评价了本文合成的一种SMP材料应用于该方案的相关性能指标,旨在为雄安新区地热资源高效钻井与开采提供一种新的技术手段。

1 雄安新区地热资源概况

1.1 区域地质概况

雄安新区位于华北盆地区(Ⅲ级)的廊坊—衡水火山—沉积盆地(Ⅳ级),西北侧靠近太行山隆起,向东北为燕山褶皱带,西南侧毗邻沧县隆起。区内包括容城凸起、牛驼镇凸起、高阳低凸起及霸县凹陷、保定凹陷、饶阳凹陷等,断裂构造发育^[15]。区内发育地层及对应岩性由新到老包括新生界第四系,新近系砂岩、泥岩和砾岩,古近系砂岩、泥岩、页岩和砾岩,寒武系白云岩和泥岩,蓟县系白云岩、白云质砂岩、石英砂岩、白云质泥灰岩和页岩,长城系长石石英砂岩、石英岩、白云岩、页岩、砂岩和砂页岩,太古宙片麻岩^[15]。

1.2 地热储层特征

雄安新区新生界地温梯度由太行山前小于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 向东至霸县、饶阳凹陷逐渐增加达 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 左右,容城凸起与牛驼镇凸起新生界以下基岩地温梯度范围多为 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。雄安新区大地热流值主要集中在 $56.0\sim 66.0\text{ mW}/\text{m}^2$,高阳低凸起大地热流值略高于容城、牛驼镇凸起^[16]。新生界沉积层松散且孔隙度较小,热导率低^[17],与泥岩及页岩组成了雄安新区热储盖层,深部储层主要为中元古界蓟县系雾迷山组地层及长城系高于庄组,其中雾迷山组地层为目前的热储主力^[18-19]。

蓟县系雾迷山组热储岩性主要为碳酸盐岩,类属白云岩,包括灰色白云岩,硅质白云岩夹紫红、灰褐色泥质白云岩,该组顶界埋深基本在 1000 m 之下,大部分埋深在 3000 m 左右,厚度范围为 $760\sim 1400\text{ m}$ ^[15,18,20]。该组地温梯度范围在 $0.2\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ^[18]。

岩溶孔/裂隙发育是雄安新区雾迷山组热储的重要特征^[5,20-21]。马峰等^[5]对雄安新区深部碳酸盐岩裂隙层进行了测井解译,将裂隙层分为3类,见表1。该组孔隙度为 6.0% 的岩石占比达 85.9% ,其中孔隙度 $1\%\sim 6\%$ 占比 61.3% ,为主要孔隙度分布范围,最大孔隙度达 22.4% ,平均孔隙度为 3.39% 。该组岩石渗透率分布广泛,范围在 $0.01\sim 1000\text{ mD}$,其中 $0.01\sim 100\text{ mD}$ 占比 87.8% ^[20]。

该组裂隙走向主要为近NE向,其次为近EW向;倾向主要为近SW向,其次为近NW向;倾角总体范围为 $50^{\circ}\sim 90^{\circ}$,中高角度裂隙占比更大;面积裂隙频率总体范围为 $0.07\sim 13.6\text{ 条}/\text{m}^2$,平均 $5.34\text{ 条}/$

表1 雄安新区雾迷山组裂隙层分类

裂隙层类型	泥质体积分数	孔隙度	渗透率
I	≤5%	≥8%	≥10 mD
II	5%~10%	4%~8%	1~10 mD
III	10%~20%	2%~4%	0.1~1 mD

m²;面积裂隙率总体范围为0.36~12.3 m/m²,平均5.83 m/m²;裂隙率总体范围为2~7 m/m²;裂隙长度总体范围为0.85~26.29 m,平均2.5 m;裂隙开度总体范围为0.36~1500 μm,平均147.24 μm,裂隙特征汇总见表2。

表2 雄安新区雾迷山组裂隙特征^[20]

裂隙特征	总体范围	平均值	备注
走向			主要为近NE向,其次为近EW向
倾向			主要为近SE向,其次为近NW向
倾角/(°)	50~90		中高角度裂隙占比更大
面积裂隙频率/(条·m ⁻²)	0.07~13.6	5.34	主要在0~7,≥8也较多
面积裂隙率/(m·m ⁻²)	0.36~12.3	5.83	主要在2~7
裂隙长度/m	0.85~26.29	2.5	主要在0~1,大多≤3,≤3长度均值1.2
裂隙开度/μm	0.36~15000	147.24	主要在10~500,基本≤5000,≤5000开度均值95.16

发育的裂隙组成局部裂隙发育带,是热储主要的储水及导水通道^[21],中高角度倾角的裂隙则提供了地下水的垂向流通通道,有利于深部热储水源的补给^[20]。

尽管裂隙发育,裂隙中的泥质充填极大地影响了裂隙导流能力,因此在地热钻井过程中需要考虑保护热储发育裂隙,避免裂隙内部进一步充填堵塞。

2 温敏型 SMP

2.1 温敏型 SMP 化学组成

形状记忆聚合物(SMP)是指具有可变形且可暂时保持变形后形状,在受到如光、磁、温度、湿度或

pH值等特定外界刺激后又可回复原始恒定形状的一类聚合物^[21],对温度响应的SMP即温敏型SMP,其基本合成材料为环氧树脂单体和交联剂,还包括催化剂和增韧剂。

2.1.1 环氧树脂单体

环氧树脂单体是组成环氧树脂的含2个及以上环氧基的小分子有机化合物,环氧基开环后,可与含酸酐、胺基等官能团的有机小分子进行聚合,或在自由基的攻击下发生自由基反应,最终形成大量不同分子量的高分子链并交联构成空间网络结构。

2.1.2 交联剂

交联剂是与环氧树脂单体反应联接形成高分子链,且使高分子链之间相互交联的有机小分子,聚酚类、酸酐类与芳香族多胺是SMP合成常用的高温型交联剂^[22]。

聚酚是由酚类化合物为底物、过氧化酶为催化剂、过氧化氢为氧化剂得到的一种新型酚类有机小分子化合物^[23]。由于苯环存在大π键,羟基氧原子的p轨道可与大π键形成p-π共轭,使由酚羟基形成的自由基更稳定而容易生成。聚酚中通常含有酚醚键或过氧键,加热则可产生自由基,通过自由基进攻环氧树脂单体引发链式反应形成高分子链。

含氧酸脱去一分子或几分子水则形成对应的酸酐。酸酐类有机小分子的酸酐结构与环氧树脂单体中环氧基聚合,两者之间形成酯基联接^[20]。

芳香族多胺是指含有两个及以上胺基的芳香族化合物。环氧树脂单体开环后与胺基发生酰基化反应形成酰胺键联接^[22]。

2.1.3 催化剂

环氧树脂单体的开环聚合一般需要催化剂以使得反应顺利进行。胺类催化剂是高效的环氧基开环聚合反应催化剂^[23],在温敏型SMP合成中应用广泛^[24]。胺类物质催化环氧基开环,从而促进了环氧树脂单体与交联剂的聚合^[23],其原理与芳香族多胺作为交联剂的原理基本相同。因此,使用芳香族多胺作交联剂时,同时也可起到催化作用^[22]。

2.1.4 增韧剂

SMP作为堵漏材料需承受一定压力。为避免SMP在承压下发生破坏,导致粒度降级而封堵失效^[24],要求SMP具有良好的韧性以匹配抗压强度。空心玻璃微珠^[22]、聚甘油醚^[25]等是常用于SMP暂堵材料的增韧剂,但与SMP相容性较差。超支化增

韧剂是由小分子有机化合物合成的有机高分子化合物,例如聚酯醚,其分子结构中支化点多且末端官能团丰富,包括羟基、羧基或环氧基团等反应型官能团,可参与由环氧树脂单体与交联剂组成的交联网络,因而是一种优异的环氧树脂增韧剂^[26]。

2.2 温敏型SMP温度响应原理

温敏型SMP温度响应的基本原理概括为动态成键^[27]。在温度刺激前,聚合物内部分子链部分结构可通过氢键、金属配位键或化学键的形式相互联接,在联接成键的约束下,内部分子链处于冻结态,宏观上材料表现为坚硬。当材料受到外界刺激时,形成联接的键断开,使得材料内部分子链可以相对活动,宏观上材料则表现为高弹态^[28-9],见图1。

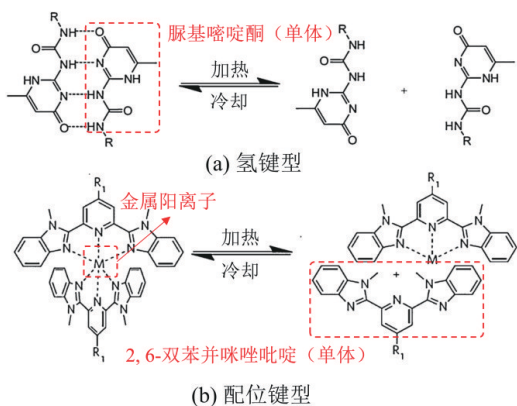


图1 温敏型SMP动态成键示意

温敏型SMP内部主要包括2部分:(1)可逆相,即SMP结构中随温度变化发生冻结态和高弹态互相转变的部分;(2)固定相,是聚合物在变形过程中能够记住材料初始形状的部分^[24,30]。可逆相与固定相共同决定了温敏型SMP温度响应的形状记忆特性。

2.3 温敏型SMP制备

温敏型SMP制备主要包括4步:(1)通过固化、注塑、成型、冷却等工艺,使得可逆相结晶、固定相硬化,形成初始形状;(2)将SMP加热至温度大于玻璃化转化温度,施加外力对软化的SMP进行二次赋形;(3)保持施加外力并将温度冷却至玻璃化转化温度之下,使材料保持二次形状,卸载外力;(4)当温度加热到玻璃化转化温度以上,可逆相软化,固定相的恢复应力使SMP恢复初始形状^[22,24],见图2。其中,玻璃化转化温度(T_g)是指温敏型SMP由坚硬且似

玻璃状态转化为柔韧状态的临界温度^[13],由于聚合物单体为环氧树脂单体,因而转化温度(T_{trans})等价于 T_g 。

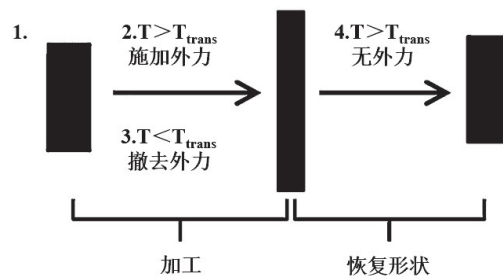


图2 温敏型SMP制备流程示意^[28]

2.4 温敏型SMP特性

温敏型SMP特性主要包括物理、化学、形状记忆、热稳定及力学特性^[22,24,31],见图3。物理特性包括形状与密度;化学特性包括化学成分与结构。化学特性既影响SMP密度,又影响SMP的 T_g 。环氧树脂单体、交联剂、增韧剂的选择与交联度均会使 T_g 发生变化^[25]。

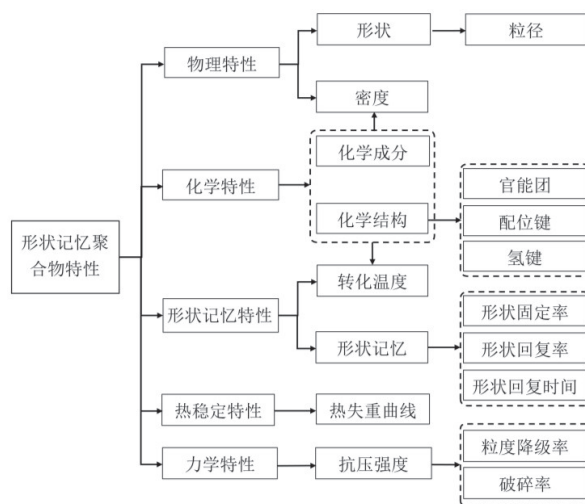


图3 温敏型SMP特性

形状记忆特性包括转化温度与评价形状记忆性能的3项指标,即形状固定率、形状回复率与形状回复时间。形状固定率表征聚合物高温形变后在低温下被固定的能力;形状回复率表征聚合物经历热机械变形后回复原始形状的能力;形状回复时间则是聚合物由二次形状向初始形状回复到一定程度时所消耗的时间^[22,24]。

温敏型SMP的热稳定特性是为保证其在热储高温下不会因分解而导致封堵失效^[22]。力学特性主要包括抗压强度,以堵漏材料抗压粒度降级率及破碎率为指标进行评价,从而确保材料承压条件下的堵漏能力^[24]。

3 温敏型SMP在雄安新区裂隙型热储的应用

3.1 屏蔽暂堵原理

基于温敏型SMP的裂隙型热储屏蔽暂堵原理见图4。温敏型SMP对温度响应的形状记忆特性是其作为堵漏材料的基本原理,且温敏型SMP具有质量轻而易于钻井液携带、易于调控玻璃化转化温度及二次赋形和成本低的应用优势^[31]。

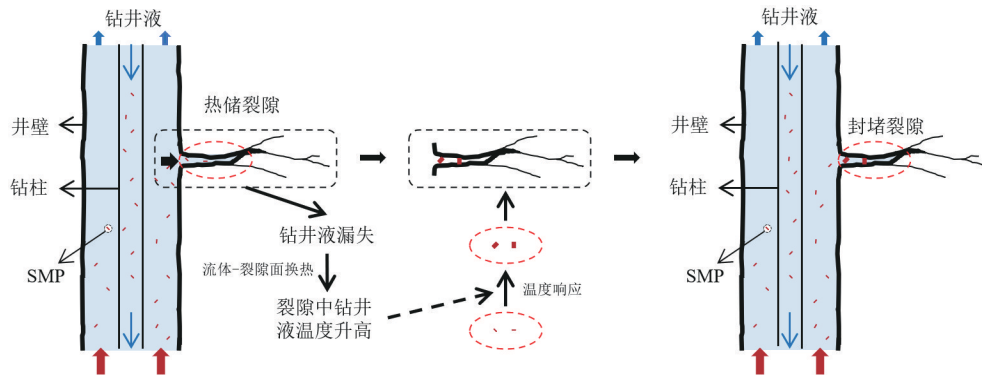


图4 基于温敏型SMP实现裂隙型热储屏蔽暂堵示意

首先需探明钻遇热储地层的特征,包括热储温度及裂隙发育情况。其次,根据热储温度与地层发育裂隙尺寸设计SMP的 T_g 及二次赋形尺寸,二次赋形后形状尺寸略小于热储裂隙开度的SMP随钻井液漏失进入裂隙中,在大于 T_g 的热储高温刺激下体积膨胀,从而紧密地封堵裂隙,阻止钻井液进一步经由裂隙发生漏失^[25]。除体积膨胀外,由于形状回复对应的应力释放,使得SMP材料与裂隙面形成的桥架结构更紧密^[13],因而堵漏效果显著优于其他类型桥架堵漏材料。

雄安新区雾迷山组碳酸盐岩热储属于水热型热储,地热能开采方式为取热水。根据《地热钻探技术规程》(DZ/T 0260—2014)及《水文水井地质钻探规程》(DZ/T 0148—2014),在地热钻井后,对目标含水层需通过洗井的方式去除泥皮、疏通孔/裂隙。对碳酸盐岩热储洗井时,可选择酸洗,使得裂隙面发生溶蚀,SMP材料与裂隙面相对松动;选择的洗井流体密度应一定程度低于地层压力,使得SMP材料在压差作用下随洗井液从裂隙中流出,裂隙完全解堵,见图5。

3.2 室内实验评价

上述方案表明,热储SMP材料的温度-形状记忆特性关系及尺寸是其应用可行性的关键因素。本

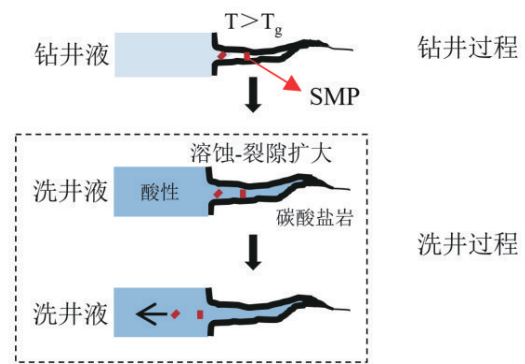


图5 温敏型SMP裂隙解堵示意

文以双酚A二缩水甘油醚环氧树脂单体(DGEBA)与固化剂4,4'-二氨基二苯甲烷(DDM)为原料,合成了一种固化剂占比为14%的SMP材料,如图6所示。

对合成的产物,通过排水体积法测定其平均体积密度为 1.36 g/cm^3 ,进而通过傅里叶红外光谱分析,得到其傅里叶红外图谱如图7所示。由图7可知,合成产物相较于双酚A二缩水甘油醚存在亚氨基-NH-,表明固化剂与树脂单体之间相互反应形成高分子链。

SMP材料的形状回复率 R_s ,由下式计算:

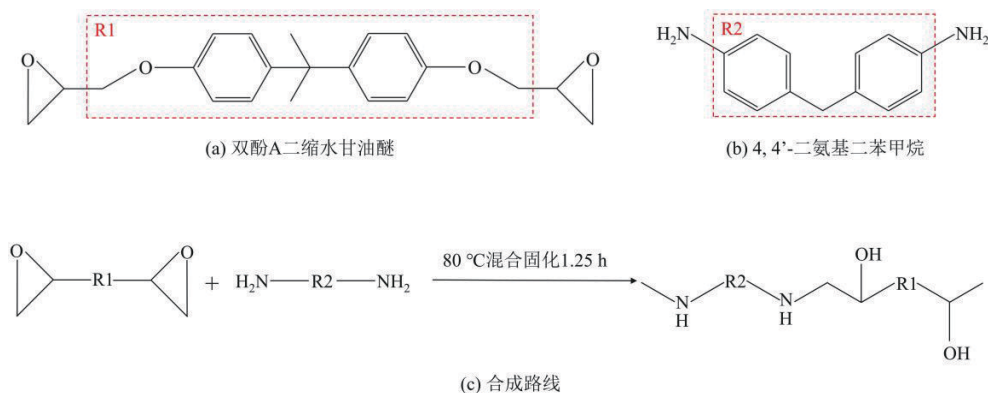


图6 温敏型SMP合成路线示意

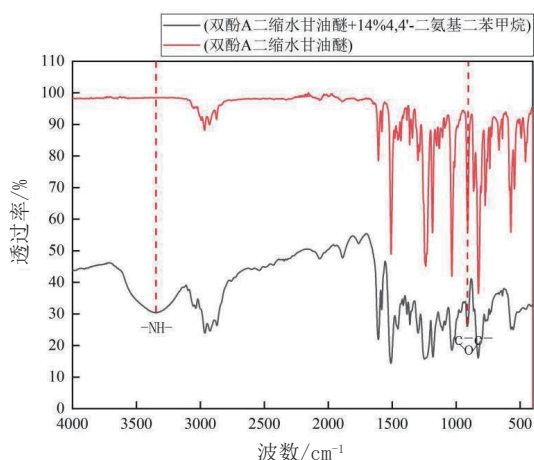


图7 树脂单体加入固化剂前后傅里叶红外图谱对比

$$R_r = \frac{\theta_i}{\theta_{\text{fixed}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中： θ_i ——回复角度； θ_{fixed} ——材料初始固定角度。

通过折叠展开法研究了不同温度下合成SMP材料的形状回复率，如图8所示。

由图8可知，当温度达到75℃及以上时，合成

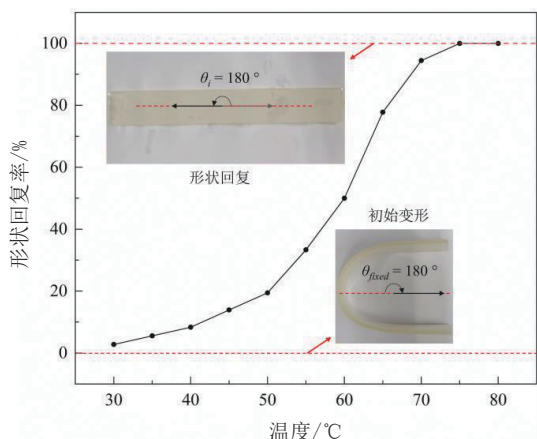


图8 合成SMP材料温度-形状回复率关系

SMP材料形状回复率为100%。对雄安新区深部地热储层，3000 m左右地温已超过80℃^[16]，因而在雄安新区热储温度下，本文合成SMP材料可最大程度发挥形状记忆特性。此外，为进一步确定适用于地热钻进堵漏的SMP材料尺寸，利用青岛海通达专用仪器厂生产的HOD.FA型无渗透滤失仪，通过氮气加压的方式进行了中压常温条件下的模拟裂缝堵漏实验。首先，将SMP材料加工为10目、10~20目、20~40目、40~80目、80~100目及100~150目颗粒；其次，配置基浆体系：0.25%碳酸钠+3%膨润土+0.5%黄原胶；最后，将不同目数及占比的SMP材料颗粒加入基浆体系中，通过变频高速搅拌机充分混合，作为模拟堵漏的SMP基浆体系。

根据雄安新区雾迷山组热储裂隙开度范围，制备了裂隙开度为1 mm的裂隙碳酸盐岩岩样，将其置于无渗透滤失仪底部，而后加入不同SMP基浆体系，封闭滤失仪并打开氮气加压，记录不同实验组的钻井液漏失量，以及漏失时间，结果汇总见表3。由表3可知，复配多种不同粒径的SMP材料可更好地实现裂缝型漏失的封堵。

3.3 应用展望

雄安新区雾迷山组碳酸盐岩热储裂隙发育，地

表3 SMP模拟裂缝堵漏实验结果

编号	堵漏体系	漏失量/ mL	漏失时 间/s
1	300 mL 基浆	150	180
2	240 mL 基浆	120	150
3	500 mL 基浆+0.7% (10~20)目 +0.8% (20~40)+1.2% (40~80)目 SMP	0	/

热钻井与地热井生产存在矛盾。目标热储生产受控于裂隙,但发育的裂隙导致了地热钻井过程的严重漏失,污染储层,造成热储产能下降。钻井液漏失的直接结果是钻井液损失,导致钻井成本的直接损失;此外,漏失还极大增大了钻井过程的非生产时间^[12,32],导致钻井成本的间接损失。

目前,漏失仍是困扰雄安新区地热钻井的问题之一^[6-7],尤其在钻遇雾迷山组裂隙型碳酸盐岩热储时容易发生漏失。据统计,雄安新区截至2019年完成的8口地热井在雾迷山组均发生严重漏失,极大地阻碍了雄安新区地热资源开发^[7],部分地热井堵漏技术汇总见表4。

表4 雄安新区部分地热井堵漏技术汇总

井号	堵漏方式	缺点	参考文献
容东热5-1X	充气钻井	增加设备与辅助作业时间	[7]
D03	清水顶漏钻进	岩屑漏失进入储层	[32]
D15	添加随钻堵漏剂	储层涌水量偏低	[33]

将温敏型SMP应用于雄安新区裂隙型碳酸盐岩热储的屏蔽暂堵,在提高堵漏成功率的同时减小对储层的伤害,从而增加储层出水量,提高热储产能。基于现场应用与实验评价,针对SMP材料在雄安新区雾迷山组裂隙型热储屏蔽暂堵技术研究还需开展如下工作:

(1)雄安新区碳酸盐岩热储岩石孔/裂隙特征的研究。通过对雄安新区地热井进行超声成像测井,并对测井结果进行解释,从而获取钻孔周围地层中裂隙的位置、倾角、倾向及形态等参数^[5]。还可对钻取岩心利用岩心渗透率仪、FIB-SEM及纳微米CT扫描等测试手段,进一步通过图形处理研究岩石孔隙类型、裂隙形态、孔隙度、渗透性及连通性。基于热储岩石孔/裂隙特征,制备形态匹配于雄安新区裂隙型碳酸盐岩热储的SMP材料。

(2)设计形状记忆特性与热储特征相匹配的温敏型SMP。根据雄安新区地热地质条件,明确钻遇碳酸盐岩热储温度及埋深。设计温敏型SMP材料的 T_g 与热储温度适应,即热储温度需高于材料的 T_g ,使得温敏型SMP受热储高温刺激后能够膨胀而

封堵裂隙。同时设计温敏型SMP承压能力与热储埋深匹配,使封堵于一定埋深热储裂隙层的SMP能承受对应深度的钻井液液柱压力及地应力等压力。

通过选择不同环氧树脂单体或交联剂单体、接枝改性、控制反应类型等方式设计聚合物分子链结构并组成不同的交联网络结构,控制SMP材料交联度^[15],从而调控温敏型SMP的 T_g 。温敏型SMP材料韧性的调控除控制基本合成材料及合成结构外,还可通过在SMP合成过程中添加与基本合成材料相容性良好的增韧剂以提高材料韧性。

4 结语

雄安新区良好的地热地质条件决定了其丰富的地热资源,其深部雾迷山组碳酸盐岩地层是目标热储。雾迷山组热储孔/裂隙发育,发育的裂隙有助于地热井生产,也导致地热钻井时易发生漏失,污染储层,降低产能。温敏型SMP遇热($>T_g$)膨胀回复二次赋形的形状记忆特性使其在压缩态时可随钻井液进入热储裂隙,受热储高温膨胀而紧密封堵裂隙,极大地减少了钻井液漏失;通过酸化洗井的方式又可以使SMP堵漏材料与裂隙充分分离,最大限度恢复热储产能。基于温敏型SMP温度响应机制及承压封堵机理,合成适应于雄安新区雾迷山组裂隙型碳酸盐岩热储的SMP暂堵材料,是实现雄安新区高效地热钻井及热储保护的一个可行方案。

参考文献:

- [1] 汪集旸,胡圣标,庞忠和,等.中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J].科技导报,2012,30(32):25-31.
- [2] 朱守先.基于结构优化演进的雄安新区碳中和路径选择[J].中国人口·资源与环境,2023,33(4):115-124.
- [3] 韩征,崔一娇,王树芳,等.基于蒙特卡罗法的地热资源评价——以河北省雄县地热田为例[J].城市地质,2015,10(4):58-62.
- [4] 王贵玲,高俊,张保健,等.雄安新区高阳低凸起区雾迷山组热储特征与高产能地热井参数研究[J].地质学报,2020,94(7):1970-1980.
- [5] 马峰,王贵玲,朱喜,等.雄安新区深部碳酸盐岩热储强化增产试验研究[J].工程科学学报,2022,44(10):1789-1798.
- [6] 赵长亮,王勇军,聂德久,等.雄安新区D19井破碎热储层气举反循环钻进技术[J].钻探工程,2022,49(4):137-143.
- [7] 刘义彬,杨旭,季小娜,等.充气钻井在雄安地热恶性漏失井的研究应用[J].内蒙古石油化工,2019,45(7):103-105.
- [8] You Z., Berikovetsky P., Badalyan A., et al. Formation dam-

- age and fines migration in geothermal reservoir (modeling and field case study) [C]//39th Workshop on Geothermal Energy Reservoir Engineering, 2021.
- [9] 王林杰,徐堪社.碳酸盐岩地层裂缝性漏失堵漏技术探讨[J].内蒙古石油化工,2017,43(1):85-86.
- [10] Liu D., Kang Y., Liu Q., et al. Laboratory Research on Fracture-Supported Shielding Temporary Plugging Drill-In Fluid for Fractured and Fracture-Pore Type Reservoir[J]. Journal of Chemistry, 2017; 1-8.
- [11] 谭慧静,周丹,陈德南,等.用于高温地热井泡沫水泥泡沫剂性能研究[J].地质与勘探,2015,51(6):1181-1186.
- [12] Cesar V., Saeed S., John T., et al. Challenges and opportunities of geothermal drilling for renewable energy generation [C]//Geothermal Resources Council Transactions, 2020, 44: 904-918.
- [13] Ahmed M., Arash T., Saeed S., et al. Smart lost circulation materials for productive zones[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2019,9:281-296.
- [14] 杨倩云,王宝田,杨华,等.形状记忆聚合物型温控膨胀堵漏剂的制备及应用[J].钻井液与完井液,2021,38(2):189-195.
- [15] 朱喜,王贵玲,马峰,等.雄安新区地热资源潜力评价[J].地球科学,2023,48(3):1093-1106.
- [16] 马岩,张保建,闫金凯,等.雄安新区深部储热构造探测研究与地热井优选技术[J].地球学报,2022,43(5):699-710.
- [17] 李卫卫,饶松,唐晓音,等.河北雄县地热田钻井地温测量及地温场特征[J].地质科学,2014,49(3):850-863.
- [18] 戴明刚,雷海飞,胡甲国,等.雄安新区顶面埋深在3500m以浅的中元古界热储可采地热资源量和开发参数评估[J].地质学报,2019,93(11):2874-2888.
- [19] 王贵玲,张汉雄,张薇,等.雄安新区地热资源的开发利用[J].中国高新科技,2021,85(1):46-47.
- [20] 戴明刚,汪新伟,刘金侠,等.雄安新区起步区及周边地热资源特征与影响因素[J].地质科学,2019,54(1):176-191.
- [21] Musaab M., Saeed S., Li G., et al. Loss circulation prevention in geothermal drilling by shaped memory polymer[J]. Geothermics, 2021,89:101943.
- [22] 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.
- [23] 王宜鹏,洪海兵,曾科,等.酶催化聚酚及其衍生物的合成和热性能[J].高分子材料科学与工程,2009,25(8):5-7.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 黄凯,胡贤飞,沈泉锦,等.环氧封端的超支化聚酯醚增韧环氧树脂研究[J].热固性树脂,2020,35(3):49-54,60.
- [27] Zou W., Dong J., Luo Y., et al. Dynamic covalent polymer: from old chemistry to modern day innovations[J]. Advanced Materials, 2017,29(14):1606100.
- [28] Zhao Q., Jerry H., Xie T. Recent progress in shape memory polymer: New behavior, enabling materials, and mechanistic understanding[J]. Progress in Polymer Science, 2015, 49-50: 79-120.
- [29] Wojeteki J., Meador A., Rowan J. Using the dynamic bond to access microscopically responsive structurally dynamic polymers [J]. Nature Materials, 2011,10(1):14-27.
- [30] Mondal S. Recent developments in temperature responsive shape memory polymers[J]. Mini-Reviews in Organic Chemistry, 2009,6(2):114-119.
- [31] 孙金声,白英睿,程荣超,等.裂缝性恶性井漏地层堵漏技术研究进展与展望[J].石油勘探与开发,2021,48(3):630-638.
- [32] 樊腊生,贾小丰,王贵玲,等.雄安新区D03地热勘探井钻探施工实践[J].钻探工程,2021,48(3):630-638.
- [33] 高鹏举,董向宇,马峰,等.雄安新区D15地热勘探井钻探施工技术[J].钻探工程,2021,48(3):106-112.

(编辑 荐华)