

形状记忆聚合物在石油工程中的应用前景

王敏生, 光新军, 孔令军

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘 要:形状记忆聚合物(SMP)是国内外广泛关注的新材料之一,近几年开始开展在石油工程中的应用研究。在分析形状记忆聚合物记忆效应机理和在石油工程中应用优势的基础上,介绍了国外形状记忆聚合物在石油工程中的应用现状,提出了其在智能堵漏钻井液、可膨胀水泥、智能膨胀支撑剂、重复压裂转向剂和防砂筛管中的应用前景,指出了在石油工程中应用的关键技术,包括形状记忆物理机理、特定结构设计、井下力学演变规律及预测和形状记忆聚合物体系性能参数优化。建议围绕以上关键技术涉及的基础理论、工艺技术进行研究,通过现场试验,尽快将形状记忆聚合物应用于石油工程,以提高油气勘探开发效益,降低作业成本。

关键词:形状记忆聚合物;堵漏钻井液;可膨胀水泥;膨胀支撑剂;重复压裂转向剂;筛管;应用前景

中图分类号:TE242 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2018)05-0014-07

The Prospects of Applying Shape Memory Polymer in Petroleum Engineering

WANG Minsheng, GUANG Xinjun, KONG Lingjun

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: Shape memory polymer is one of the most highly recognized new materials in the world. In recent years, the research and experimental application of such materials have been implemented in petroleum engineering. This paper explains the memory effect mechanism of such polymers and its advantages in petroleum engineering. It also analyzes its application in foreign petroleum engineering, and proposes potential applications in smart plugging drilling fluids, swellable cement, intelligent expandable proppant, re-fracturing diverting agents and sand control screens liner. In addition, it describes the related key technologies in petroleum engineering including physical mechanism of shape memory, specific structural design, evolution law and prediction of downhole mechanics, and parameters optimization of the shape memory polymer system. A study of the basic theories and technologies based on those key technologies mentioned above is recommended. Further, we are recommending incorporating such polymers into petroleum engineering applications as soon as possible through field tests to improve the benefits of oil and gas exploration and development and to reduce the cost of operations.

Key words: shape memory polymer; plugging drilling fluid; swellable cement; expandable proppants; re-fracturing diverting agent; screen liner; application prospect

形状记忆是指具有初始形状的材料经形变固定后,在加热等外部刺激条件下,又可使其恢复初始形状的现象。形状记忆材料是具有形状记忆效应的一类智能材料,包括形状记忆陶瓷(SMC)、形状记忆合金(SMA)和形状记忆聚合物(SMP)。形状记忆陶瓷变形能力差,极大地限制了其在石油工程中的应用;形状记忆合金是一种较为普遍的形状记忆材料,是基于晶体结构的马氏体和奥氏体相互转变来

收稿日期:2018-02-18; **改回日期:**2018-07-05。

作者简介:王敏生(1973—),男,河南信阳人,1995年毕业于江汉石油学院钻井工程专业,2009年获中国石油大学(华东)油气井工程专业博士学位,教授级高级工程师,主要从事钻井工艺及石油工程战略规划方面的研究。E-mail: wangms. sripe@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技攻关项目“石油工程技术装备发展趋势与战略对策”项目(编号:P15163)和中石化石油工程公司科技攻关项目“石油工程公司参谋支撑研究”(编号:SG17-31J)部分研究内容。

实现记忆功能,我国于 20 世纪 90 年代开始探索其在石油工程中的应用,目前已经应用在非螺纹管接头、金属封隔器和井下控制阀等方面^[1];与形状记忆陶瓷和形状记忆合金相比,形状记忆聚合物具有密度小、可生物降解、形变量大等特点,一直是智能材料领域的研究前沿和热点,并已应用于航空航天、医药、土木和自动化等领域^[2-3]。近年来,国外开始将形状记忆聚合物应用于石油工程,取得了诸多进展,并有部分技术实现了工业化应用。A. K. Mansour 等人^[4-5]开展了形状记忆聚合物在钻井液堵漏剂中的应用研究,评价了不同压力、温度条件下智能堵漏钻井液的堵漏效果。A. D. Taleghani 等人^[6]研究了形状记忆聚合物在膨胀水泥浆中的应用,评价了不同形状记忆聚合物加量下水泥石的膨胀率和力学特性。L. Santos 等人^[7-8]研究了形状记忆聚合物在膨胀支撑剂和压裂转向剂中的应用,评价了膨胀支撑剂的导流能力和压裂转向剂的暂堵性能。G. Osunjaye 等人^[9-10]研究了形状记忆聚合物在裸眼防砂筛管中的应用,并实现了现场应用。童征等人^[11]探索将形状记忆聚合物应用于井下工具,提出了基于形状记忆聚合物的封隔器初步设计方案。为了拓展形状记忆聚合物材料在石油工程领域应用,促进我国石油工程技术跨界融合创新发展,笔者分析了形状记忆聚合物记忆效应机理、在石油工程中的应用优势和应用进展,指出了其在石油工程中的应用的关键,为我国石油工程应用形状记忆聚合物提供了借鉴和研发思路。

1 形状记忆聚合物记忆效应机理及优势

1.1 记忆效应机理

聚合物本身并不具有形状记忆效应,通过特定的加工可以使聚合物具有形状记忆效果,即聚合物的功能化。形状记忆聚合物通过传统挤出或注入成型处理后,形成初始状态(形状 B);在外部环境刺激下,聚合物变形,变成临时状态(形状 A);工业应用时,在外部环境刺激下,聚合物恢复到原始状态(形状 B),这种处理和恢复过程可以重复多次,图 1 为热刺激形状记忆聚合物记忆效应机理^[12]。

形状记忆聚合物是由固定相和高分子链段组成的弹性聚合物网络,固定相决定了聚合物网络的永久形状,通过化学或物理作用交联,固定相为化学交联结构的 SMP 称为热固性形状记忆聚合物,固定

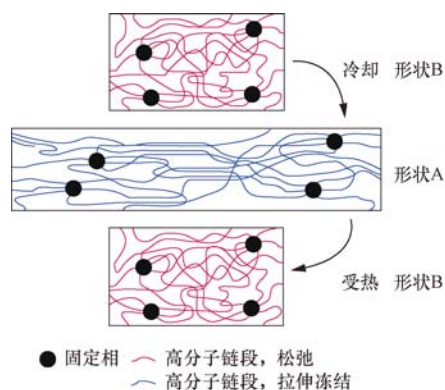


图 1 热刺激形状记忆聚合物记忆效应机理

Fig. 1 Memory effect mechanism of the thermally induced shape memory polymer

相通过物理交联的 SMP 称为热塑性形状记忆聚合物。高分子链段是一种可逆相,在转变温度的作用下可以转变为玻璃态或熔融态,转变温度相当于形状记忆聚合物的控制开关,当聚合物环境温度低于转变温度时,分子链段处于冻结状态,材料形状固定不变(形状 A),当聚合物环境温度高于转变温度时,分子链段处于高弹状态,可在外力作用下发生伸展(形状 B),从而使材料发生宏观形变。在此过程中分子内能不变,只是聚合物网络的高分子链段特征结构属性及熵弹性行为。

形状记忆聚合物的刺激方式包括热刺激、化学刺激、电刺激、磁刺激和光刺激。热刺激是目前最普遍且最直接的刺激方式,热量由外部环境直接传递给 SMP,激发其发生形状记忆效应。化学刺激是通过周围介质来刺激聚合物发生形变,包括 pH 值、水相、油相和氧化还原反应等。电刺激和磁刺激都是间接的热刺激方式,在聚合物中添加导电材料或磁性颗粒,在电场或磁场的作用下将电能或磁场能转换成热能,使聚合物发生形变。光刺激是利用聚合物分子链上的光致变色基团来实现形状记忆效应,对聚合物结构特征要求较高。

1.2 在石油工程中的应用优势

形状记忆聚合物作为高分子聚合物材料,除具备高分子材料的基本特征(如蠕变、应力松弛)外,还具有形状记忆效应,在石油工程领域的应用优势主要体现在以下几个方面:1)变形大,形状记忆聚合物具有较高的应变恢复能力,最高可达 800%;2)强度大,能够通过调节性能提高强度,满足井下高温高压环境的需要;3)密度低,一般为 $1.0 \sim 1.3 \text{ g/cm}^3$,与钻井液和完井液的密度相当,配伍性较好;4)刺激方

式多,可通过地层温度、井下流体 pH 值和油水介质等进行激活;5)激活温度可调,可以根据井下实际温度调整聚合物的响应温度,易于实施,可控性好;6)激活时间短,可在较短的时间内完成处理和形状恢复。

2 石油工程应用分析

2.1 智能堵漏钻井液

钻进低压地层和裂缝性地层过程中钻井液会发生漏失,增加钻井液用量和钻机非作业时间,降低钻井效率,增加钻井成本。当发生恶性漏失时,甚至会引发井喷等安全事故。虽然钻井液堵漏材料研究近年来取得了较大进展,但堵漏材料还存在大尺寸堵漏颗粒堵塞堵漏工具、堵漏材料伤害储层、封堵失效和强化井筒能力有限等缺陷。

形状记忆聚合物作为一种钻井液添加剂,可以用于钻井堵漏作业,并具有良好的配伍性。基于形状记忆聚合物的智能堵漏钻井液泵送至井下后,聚合物堵漏材料在地层温度作用下激活,膨胀后有效封堵地层裂缝,达到强化井筒的目的,同时释放的应力不会破坏地层,也不会堵塞井下工具。路易斯安那州立大学 A. K. Mansour 等人开展了基于形状记忆聚合物的智能堵漏钻井液研究,数值模拟表明,形状记忆聚合物堵漏材料在井下条件下膨胀的释放应力达 10 MPa,提高了井筒周向应力,封堵压力达 35 MPa,能够有效封堵裂缝,对强化井筒起重要作用。物理模拟结果表明,形状记忆聚合物堵漏材料的膨胀率受井下压力的影响较大,压力越大,膨胀率越小,堵漏效果越差。形状记忆聚合物与纤维复合堵漏材料混合后,堵漏效果较单一的形状记忆聚合物堵漏效果更好。试验结果表明:100 °C 下,加入 1.2% 的形状记忆聚合物堵漏剂堵漏效果明显,50 °C 下,形状记忆聚合物没有被完全激活,堵漏效果不明显;由 1.2% 形状记忆聚合物与 1.2% 纤维组成的复合堵漏剂在 100 和 50 °C 温度下的堵漏效果都比较明显(见图 2)^[4-5]。

2.2 可膨胀水泥

油气井固井时,水泥在凝结过程中产生收缩是导致水泥环失效的重要因素之一,国内外针对该问题开发了一系列可膨胀水泥浆体系,但现有可膨胀水泥添加剂都是通过与水泥的化学反应来实现膨

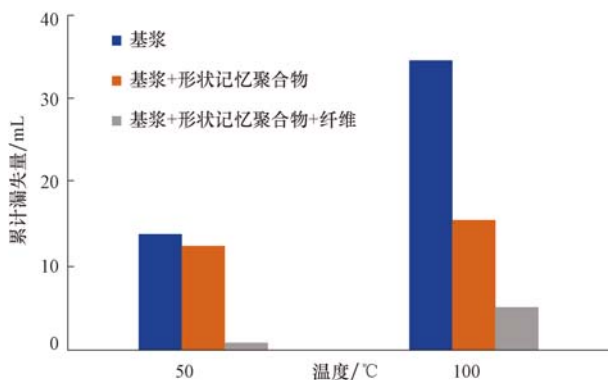


图 2 不同堵漏浆堵漏时钻井液累计漏失量

Fig. 2 Comparison of cumulative losses with different plugging muds

胀,一定程度影响了水泥石的力学性能。

形状记忆聚合物作为可膨胀水泥添加剂,可在 50~120 °C 内膨胀,不与水泥浆中的水和化学组分发生反应,对水泥石的力学性能影响较小,能防止水泥石微孔隙与微裂隙的生成,从而提升水泥环的整体完整性,是一种具有较好应用前景的可膨胀水泥添加剂。形状记忆可膨胀水泥添加剂主要成分是离子交联型半晶质聚合物-沙林树脂,采用热力-机械循环加载工艺制备完成后,SMP 可在常温状态下保持形态固定并可长期存放,温度升高至临界温度后可快速恢复到初始形态,促使水泥石膨胀。

路易斯安那州立大学 A. D. Taleghani 等人^[6]开展了形状记忆可膨胀水泥浆体系的室内试验研究,试验结果表明,水泥石膨胀率与 SMP 加量呈线性关系(见图 3)。SMP 加量为 5% 时,水泥石膨胀率约为 0.47%;推算可知 SMP 加量提高至 9% 时,水泥石膨胀率约为 1.00%。

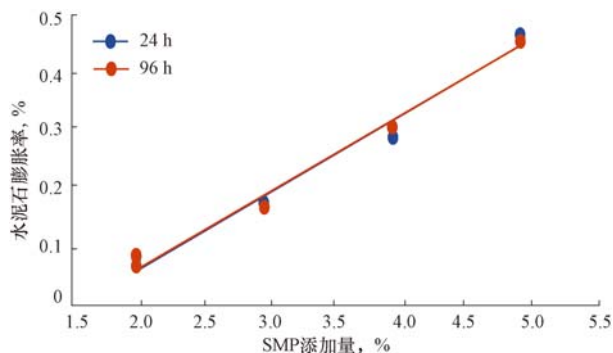


图 3 90 °C, 21 MPa 条件下水泥石膨胀率与 SMP 加量的关系

Fig. 3 Expansion rate of cement paste with the dosage of SMP under 21MPa at 90 °C

此外, SMP 为惰性物质, 不会与水泥浆组分发生化学反应, 在 90°C 、 21 MPa 条件下, 测试了 SMP 不同加量下的水泥石抗压强度与弹性模量 (见表 1)。测试结果表明, SMP 不会影响水泥浆的流变性能与稠化时间, 但会一定程度降低水泥石的抗压强度与弹性模量。SMP 加量从 0 增至 5% 时, 水泥石抗压强度下降约 39%, 弹性模量下降约 33%。上述现象说明, 添加 SMP 后水泥石抗压强度虽然有所降低, 但即使添加 5% SMP, 水泥石的抗压强度还能满足现场作业要求, 水泥石脆性降低, 延展性增强。

表 1 不同 SMP 加量下的水泥石抗压强度与弹性模量

Table 1 Compressive strength and elastic modulus of cement paste under various SMP dosages

SMP 加量, %	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa
0	29.65	1 111.37
2	25.86	913.69
3	23.96	840.75
5	18.10	741.40

2.3 智能膨胀支撑剂

水力压裂是实现低渗透油气藏经济有效开发的主要技术措施, 水力压裂深层或偏软储层时, 支撑剂破碎或嵌入地层会影响裂缝导流能力, 继而影响单井试气和稳产。

热固性形状记忆聚合物材料可以制成智能膨胀支撑剂, 在压裂过程随压裂液泵入地层, 在地层温度刺激作用下, 智能支撑剂的膨胀性充分释放, 膨胀后的支撑剂可以起到保持或进一步增加缝宽的作用, 进而提高裂缝导流能力。此外, 在低渗透油气藏加砂压裂时, 返排压裂液残液的过程中裂缝内支撑剂会发生回流, 严重时甚至发生井筒出砂或砂埋管柱等复杂情况。在裂缝内激活智能膨胀支撑剂产生人工屏障, 可防止支撑剂回流井筒。智能膨胀支撑剂在储层温度条件下激活膨胀释放的应力达 $10\sim 30\text{ MPa}$, 足以开启储层中的一些微小裂缝, 而不至于压碎岩石。施工注入过程比较简单, 无需单独压裂泵注设备, 可随常规支撑剂一起按照压裂设计分批注入。图 4 为压裂裂缝内智能支撑剂激活前后裂缝的形态。

为了验证智能膨胀支撑剂的导流特性, 路易斯安那州立大学 L. Santos 等人开展了导流能力试验,

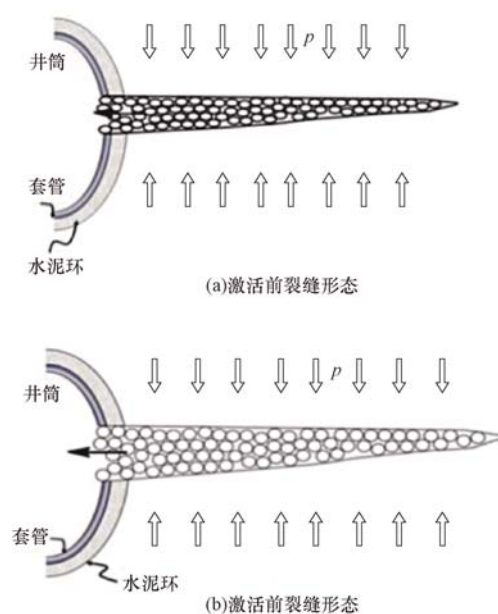


图 4 SMP 智能膨胀支撑剂激活前后的裂缝形态

Fig. 4 Fracture morphologies before and after the activation of SMP intelligent expandable proppant

并进行了数值模拟计算^[7]。结果表明: 智能膨胀支撑剂的弹性模量及激活膨胀后释放的应力对裂缝导流能力的影响最为显著 (见图 5 和图 6)。

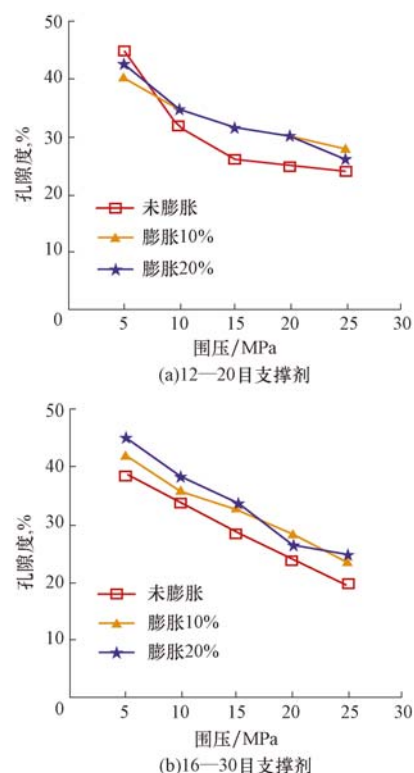


图 5 不同粒径智能支撑剂充填后不同膨胀状态下的孔隙度

Fig. 5 Porosities of various particle sizes of intelligent proppant under different expansion states

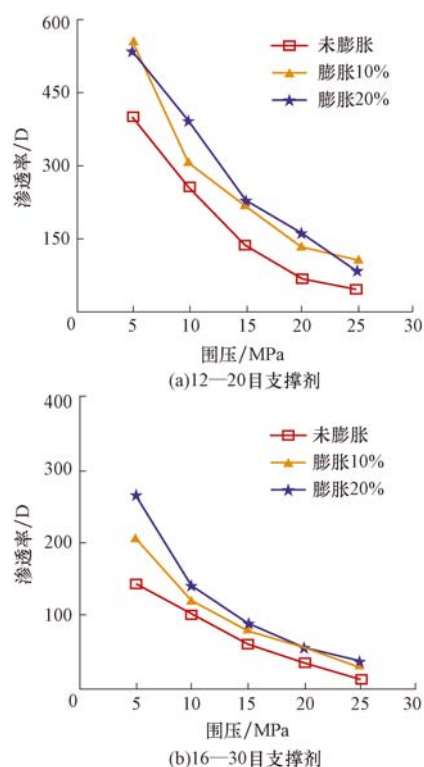


图6 不同粒径智能支撑剂充填后不同膨胀状态下的渗透率
Fig.6 Permeability of various particle sizes of intelligent proppant under different expansion states

从图5和图6可以看出,密度 0.95 g/cm^3 、弹性模量 520 MPa 的智能膨胀支撑剂,在 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 、不同围压下受温度激活后的粒径膨胀率分别为 10% 和 20% 时,对应的充填支撑剂堆积孔隙度可提高 10% 以上,渗透率可提高 $25\%\sim 100\%$ 。智能支撑剂粒径膨胀 10% 和 20% 对渗透率和孔隙度的影响并不大。支撑剂颗粒越大,与裂缝面接触面积越小,支撑剂产生的形变越大,效果越差。与常规支撑剂相比,智能支撑剂支撑效果不显著,主要是由于在高闭合应力条件下支撑剂弹性模量太小,导致产生的形变过大,影响了支撑效果,需要研发弹性模量更大的智能膨胀支撑剂。

2.4 重复压裂转向剂

与钻新井相比,重复压裂技术可以在最小投入的情况下提高油气产能,据统计,重复压裂成本是新钻井钻完井成本的 $20\%\sim 35\%$,压裂后能恢复至初始产量的 $31\%\sim 76\%$,Bakken页岩气田的重复压裂井初始产能甚至高于新井初始产能。同时,重复压裂井的产量递减率要比新钻井低^[13]。由于机械转向的施工工序复杂,页岩油气重复压裂越来越多地采用化学转向取代机械转向。化学转向剂通过临时封堵

之前的裂缝,使压裂流体发生转向产生新的裂缝,形成更加复杂的裂缝网络。

目前,化学转向剂主要是将生物聚合物微颗粒与轻质压裂细砂组合在一起形成暂堵体系,压裂结束后化学转向剂中的生物聚合物微颗粒会在设定的井筒温度、压力或一定 pH 值下发生自然降解(化学解堵),随返排压裂液排出,不影响生产,而留下的压裂细砂则继续支撑裂缝,保持生产通道畅通。化学转向剂受成本、井下温度和压力的影响,仍处在研发阶段。添加有形状记忆聚合物的重复压裂转向剂泵入井下后,在地层温度的刺激下膨胀,对初始裂缝进行临时封堵,使压裂液压开新的裂缝,压裂结束后,转向剂可以通过生物或化学降解,使隔离的裂缝与井筒保持连通。

路易斯安那州立大学 L. Santos 等人^[8]对形状记忆聚合物压裂转向剂的桥接能力进行了室内评价,为了验证该转向剂的性能,采用数值模拟分析了转向剂颗粒粒径对封堵能力的影响。物理模拟表明:在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 下形状记忆聚合物转向剂完全膨胀,5 min后完全封堵裂缝,承压能力达 35 MPa 。数值模拟表明:形状记忆聚合物转向剂粒径越大,封堵裂缝的时间越短;形状记忆聚合物转向剂粒径越小,封堵裂缝的时间越长。这是由于暂堵发生在近井筒处,小粒径聚合物会深入裂缝深处,需要更长的时间封堵裂缝。现场施工时需要根据施工参数和地层参数来确定转向剂的粒径。

2.5 形状记忆防砂筛管

裸眼完井能够提高油气产能,传统的裸眼防砂完井技术包括独立筛管完井、可膨胀筛管和裸眼砾石充填完井,裸眼砾石充填完井技术被认为是高效的防砂完井技术,并能够减少堵塞和冲蚀。然而,并不是所有油气藏都适用裸眼砾石充填完井技术,其缺陷包括与环空封隔工具不匹配、页岩层段和长水平段砾石充填难度大等,贝克休斯 G. Osunjaye 等人^[10]采用形状记忆聚合物研发了形状记忆防砂筛管,其力学性能、化学稳定性、滤失性、抗腐蚀能力和可膨胀特性均满足现场要求,能够替代常规砾石充填完井。

形状记忆防砂筛管是将聚合物置于多孔钢管的外侧,原始固定形态外径稍大于井筒直径,在加工过程中,SMP受热压缩后防砂筛管直径变小,附着在中心管的外侧,可以顺利下入井底;下放到井下指定位置后,SMP在井底温度、洗井液和驱替液中活性

物质的激活下,恢复到原始形状,与井壁紧密贴合,并将残余应力作用于井壁。SMP 材料具有良好的滤失性,其复杂的孔隙结构能够挡住不同粒径的砂粒,从而保持高渗透率(约 40 D),与裸眼砾石充填完井的渗透率相当;残余应力避免了其他防砂技术中经常发生的砂堵等情况^[9-10]。

2013 年 3 月,日本进行了第一次海洋天然气水合物试采,采用砾石充填防砂完井工具,试采第 6 天出砂导致筛管堵塞,出砂量大大高于预期,使试采作业停止。2017 年 5 月,日本进行了第二次海洋天然气水合物试采,共试采 2 口井,为了防止储层出砂,采用了形状记忆聚合物防砂装置 GeoFORM,第一口井的防砂工具在地面膨胀后下入井下,第二口井的完井防砂工具在井下与化学品接触后膨胀并与井壁紧密贴合。试采时,大粒径砂粒不能通过聚合物孔隙,不会造成堵塞的粉砂和黏土可以通过,从而保证气体流入井筒的压力损失最小,2 口井分别试采 12 和 24 d,累计产气量分别为 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $20.0 \times 10^4 \text{ m}^3$,较第一次试采周期明显提高,达到了预期的试采效果^[14-15]。

3 石油工程应用关键技术

形状记忆聚合物在石油工程领域具有广阔的应用前景,但大部分还停留在实验室阶段,现场应用还需要提高相变可靠性、机械强度和化学耐久性等。因此,需要开展形状记忆物理机理、特定结构设计、井下力学演变规律及预测和体系参数优化等方面的研究,提高形状记忆性能和综合性能,满足油气井筒作业需要。

3.1 形状记忆物理机理研究

以形状记忆聚合物分子结构相变为基础的微观力学方法和以黏弹理论为基础的松弛效应方法对形状记忆聚合物的研究和发展起到了至关重要的作用,但力学研究体系还未建立,SMP 形状记忆效应机理还有待深入研究,这对于 SMP 的结构设计、井下力学演变规律及预测和性能参数优化等具有重要的指导作用。

3.2 特定结构设计

SMP 虽然具有优异的形状记忆功能,但在石油工程中应用时还需要根据井下特定环境、利用分子设计和材料改性技术进行特定的结构设计,使其具

备与井下环境相适应的特性,如用于钻完井流体或工具时与井下温度或油气水介质相适应的形变特性、用于智能堵漏钻井液与重复压裂转向剂时的生物可降解特性等。

3.3 井下力学演变规律及预测

形状记忆聚合物的形状记忆效应不仅仅是由材料本身的分子结构特征决定,还与外力载荷、外场作用、应变能存储与释放等因素有关。除了开展形状记忆聚合物的分子结构特征设计外,还需要耦合井下温度、压力和油气水介质等因素进行形状记忆聚合物力学行为的演变规律及预测研究。

3.4 形状记忆聚合物性能参数优化

目前应用于石油工程的 SMP 综合性能还不够理想,还有待利用物理模拟和数值模拟手段进行参数优化,满足井下温度和压力要求,如用于可膨胀水泥时 SMP 的加量和密度优化,用于智能支撑剂时 SMP 的粒径、密度、弹性模量、泊松比和膨胀应力的优化,用于防砂筛管时防砂网孔眼直径、膨胀率等的优化。

4 结论与建议

1) 形状记忆聚合物具有变形大、强度大和激活时间短的特点,能够应用于智能堵漏钻井液添加剂、可膨胀水泥添加剂、智能膨胀支撑剂和重复压裂转向剂等。

2) 形状记忆聚合物在井下的力学性能、化学稳定性、抗腐蚀能力和可膨胀特性均较好,能够应用于裸眼防砂筛管、井下膨胀封隔器等井下工具。

3) 形状记忆聚合物在石油工程中的应用大部分还处于室内研究阶段,还需要开展形状记忆物理机理研究、特定结构设计、井下力学行为演变规律及预测、性能参数优化等关键技术的研究,以提高作业流体或工具的应用效果和可靠性。

4) 国内石油企业应积极与相关高校或科研机构跨界合作,针对形状记忆聚合物在石油工程中应用的关键技术开展基础理论和工艺技术前瞻研究,尽快实现形状记忆聚合物在石油工程中的现场应用。

致谢:论文撰写过程中,中国石化石油工程技术研究院王海涛博士、陆沛青博士帮助完成了资料收集工作,在此表示感谢!

参 考 文 献

References

- [1] 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):98-102,107.
WANG Yao, LI Chunfu, LIN Yuanhua, et al. Research progress of application of SMA in petroleum engineering[J]. Materials Review, 2016, 30(supplement 2): 98-102, 107.
- [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 and 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,2013,40(6):57-63.
ZHANG Xinmin. The research process of smart materials[J]. Fiber Reinforced plastics/Composites, 2013, 40(6): 57-63.
- [4] MANSOUR A K, EZEAKACHA C, TALEGHANI A D, et al. Smart lost circulation materials for productive zones[R]. SPE 187099, 2017.
- [5] MANSOUR A K, TALEGHANI A D, LI G. Smart lost circulation materials for wellbore strengthening[R]. ARMA-2017-0492, 2017.
- [6] TALEGHANI A D, LI G, 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 G. Smart expandable proppants to achieve sustainable hydraulic fracturing treatments[R]. SPE 181391, 2016.
- [8] SANTOS L, TALEGHANI A D, LI G. Expandable diverting agents to improve efficiency of refracturing treatments[R]. URTEC-2697493, 2017.
- [9] WANG X, OSUNJAYE G. Advancement in openhole sand control applications using shape memory polymer[R]. SPE 181361, 2016.
- [10] OSUNJAYE G, ABDELFAHATTAH T. Open hole sand control optimization using shape memory polymer conformable screen with inflow control application[R]. SPE 183947, 2017.
- [11] 童征,沈泽俊,石白茹,等. 基于形状记忆聚合物的封隔器研制[J]. 石油机械,2014,42(6):69-71.
TONG Zheng, SHEN Zejun, SHI Bairu, et al. Development of shape memory polymer-based packer[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(6): 69-71.
- [12] BEHL M, LENDLEIN A. Shape-memory polymers[J]. Materialstoday, 2007, 10(4): 20-28.
- [13] 叶海超,光新军,王敏生,等. 北美页岩油气低成本钻井技术及建议[J]. 石油钻采工艺,2017,39(5):552-558.
YE Haichao, GUANG Xinjun, WANG Minsheng, et al. Low-cost shale oil and gas drilling and completion technologies used in North America and the suggestions[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(5): 552-558.
- [14] 张炜,邵明娟,田黔宁. 日本海域天然气水合物开发技术进展[J]. 石油钻探技术,2017,45(5):98-102.
ZHANG Wei, SHAO Mingjuan, TIAN Qianning. Technical process of a pilot project to produce natural gas hydrate in Japanese waters[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(5): 98-102.
- [15] 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):45-51.
GUANG Xinjun, WANG Minsheng. Key production test technologies for offshore natural gas hydrate[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(5): 45-51.

[编辑 滕春鸣]