

# 新型可溶暂堵绳结性能及应用研究

郑健<sup>1\*</sup>, 罗鑫<sup>1</sup>, 岳文翰<sup>2</sup>, 肖勇军<sup>1</sup>, 陈智<sup>1</sup>, 刘丙晓<sup>1</sup>, 古志斌<sup>1</sup>

(1. 四川长宁天然气开发有限责任公司, 四川 宜宾 644000;

2. 中国石油西南油气田公司页岩气研究院, 四川 成都 610000)

**摘要:**为考察暂堵绳结尺寸对封堵性能的影响,以可降解材料聚乳酸(PLA)、聚乙醇酸(PGA)熔融纺丝制备暂堵绳结,考察了暂堵绳结直径、尾翼长度和尾翼条数对其封堵性能的影响,并研究了 PGA/PLA 质量比对暂堵绳结降解性能和承压性能的影响。结果表明,在 90℃ 条件下,随绳结尺寸增加封堵率整体呈先提高再稳定后降低的规律,当绳结直径大于 18 mm、尾翼条数超过 6 条、尾翼长度在 35~50 mm 范围内时封堵性能最佳;绳结降解率随 PGA/PLA 质量比的增大而增大,绳结承压能力与 PGA/PLA 质量比成反比,当 PGA/PLA 质量比为 80/20 时,绳结在清水中 26 h 完全溶解,在 0.1% 滑溜水和 30 000 mg/L 的盐水中 23 h 降解率可达 100%,承压能力在 PGA/PLA 质量比为 50/50 时可达 50 MPa。

**关键词:**聚乳酸;聚乙醇酸;绳结尺寸;封堵性能;暂堵压裂;水平井;页岩气藏

中图分类号:TE357.12

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)S2-0274-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S2.049

## Research on the performance and application of a new type of dissolvable temporary plugging rope knots

ZHENG Jian<sup>1\*</sup>, LUO Xin<sup>1</sup>, YUE Wen-han<sup>2</sup>, XIAO Yong-jun<sup>1</sup>, CHEN Zhi<sup>1</sup>,  
LIU Bing-xiao<sup>1</sup>, GU Zhi-bin<sup>1</sup>

(1. Sichuan Changning Natural Gas Development Co., Ltd., Yibin 644000, China;

2. Shale Gas Research Institute, PetroChina Southwest Oilfield & Gasfield Company, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** In order to investigate the effect of the size of the temporary plugging rope knot on the blocking performance, the temporary plugging rope knot was prepared by melt spinning of degradable materials, poly(lactic acid) (PLA) and poly(glycolic acid) (PGA), and the effects of the diameter of the temporary plugging rope knot, the length of the tails and the number of tails were investigated, and the effect of the mass ratio of PGA/PLA on the degradation and pressure-bearing properties of the temporary plugging rope knot was also investigated. The results show that, under 90℃, the blocking rate increases with the increase of knot size, and then decreases after stabilisation, and the best blocking performance is achieved when the diameter of the knot is larger than 18 mm, the number of tail strips is more than 6, and the length of the tail strips is in the range of 35–50 mm; the degradation rate of the knots increases with the increase of the mass ratio of PGA/PLA, and the pressure-bearing capacity of the knots is inversely proportional to the mass ratio of PGA/PLA. When the mass ratio of PGA/PLA was 80/20, the knot was completely dissolved in water for 26 h, and the degradation rate could reach 100% in 0.1% slippery water and 30 000 mg/L brine for 23 h. The pressure-bearing capacity of the knot could reach 50 MPa in the case of the mass ratio of PGA/PLA was 50/50.

**Key words:** poly(lactic acid); poly(glycolic acid); knot size; plugging performance; temporary plugging and fracturing; horizontal wells; shale gas reservoirs

页岩气藏水平井体积压裂过程中,暂堵转向改造技术由于工艺简单已成为储层改造核心技术之一,其常用的暂堵剂有颗粒、纤维、暂堵球等类型,通过暂堵剂封堵簇间孔眼来实现射孔簇均匀开启,以此提高裂缝进液效率和作业效率<sup>[1-7]</sup>。目前,暂堵绳结作为一种环保新型暂堵材料逐步应用于各大页岩气水平井开发现场。2016年,美国油服厂商 Thru Tubing Solutions 推出 SlicFrac 技术,将绳结应用于美国 17 个盆地 1611 口井,完成单井最长 55 级压裂,单日最高压裂 9 段,节约单井施工时间大于 50%,增

产效果较好<sup>[8]</sup>;而国内中石油长庆油田于 2021 年在页岩油、致密气开展了直井和水平井绳结暂堵实验,平均暂堵升压 15 MPa,暂堵升压效果较好;浙江油田、中石油工程院、中石油煤层气等也在部分区块进行了绳结暂堵技术的实验,均取得了一定成果<sup>[9-13]</sup>。而暂堵压裂施工过程中发现,单一材料如聚乙醇酸(PGA)制备的绳结存在生产工艺复杂、生产成本过高等问题<sup>[14-16]</sup>;此外,对于绳结直径、尾翼长度及条数等尺寸因素对绳结封堵性能的影响研究较少<sup>[17-18]</sup>,绳结尺寸对其封堵性能的影响规律尚不

收稿日期:2024-03-12;修回日期:2024-07-17

基金项目:中国石油科学研究与技术开发项目(2019F-31)

作者简介:郑健(1979-),男,硕士,高级工程师,主要从事地质勘探及压裂液新材料研究工作,通讯联系人, zheng\_jian@petrochina.cn。

清晰。

为此,笔者采用高强度刚性可降解材料 PGA 和 PLA 并添加适量增塑剂 PBAT 复合制备了一种暂堵绳结,研究了绳结尺寸对其封堵性能的影响规律,考察了 PGA 含量对绳结降解、承压性能的影响,并对现场应用结果进行了分析。

## 1 实验部分

### 1.1 材料与仪器

材料:聚乳酸(PLA)、聚乙醇酸(PGA),工业级,深圳光华伟业股份有限公司生产;聚丙烯酰胺乳液减阻剂 SZJ-1,四川申和新材料科技有限公司生产;聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯(PBAT),工业级,硕泰新材料(深圳)有限公司生产;模拟地层水为标准盐水,组成为 2.0% KCl + 5.5% NaCl + 0.45% MgCl<sub>2</sub> + 0.55% CaCl<sub>2</sub>。

实验仪器:可视化射孔孔眼暂堵实验装置、模拟射孔孔眼承压性能评价装置、多组分纺丝机,自制;WE-1000B 型数显式液压万能试验机,济南中路昌试验机制造有限公司生产;FA22048 型电子天平,上海佑科仪器仪表有限公司生产;DK-98IIA 型电热恒温水浴锅,金坛市国旺实验仪器厂生产。

### 1.2 绳结制备方法

将可降解材料 PGA、PLA 和增塑剂 PBAT (15%) 分别在 120℃ 下烘干,利用多组分纺丝机将干燥的 PGA、PLA 和 PBAT 分别用单螺杆挤出机熔融挤出,再按照不同质量比过有捻并丝工艺(捻系数为 0.5)制成直径约 1 mm 的纤维细线,纤维细线按照 8~10 股编织为纤维细绳,根据不同尺寸绳结大小,选择单股或多股纤维绳混合编织成为单结状或球结状的结构,并将绳结两端尾翼打散,烘干即可制成暂堵绳结,如图 1 所示。



图 1 暂堵绳结结构示意图

### 1.3 实验评价方法

#### 1.3.1 暂堵绳结尺寸优化实验

采用可视化暂堵实验物模装置模拟不同尾翼长度、条数、直径的暂堵绳结(PGA/PLA 质量比为 50/

50)在管道内的进孔效率。大型可视化暂堵实验物模装置由储液装置、泵入装置、绳结投放装置、大型可视化管道等组成(如图 2 所示)。储液罐容积为 1 m<sup>3</sup>;泵入装置采用齿轮泵,最大排量为 200 L/min;可视化管道为有机玻璃材质,长 2 m,直径为 140 mm,厚 10 mm,耐压 0.6 MPa,一端连接泵入装置,后段封堵。实验在 89 mm 型射孔弹的射孔孔径基础上,考虑到实际施工过程中炮眼会因压裂液、石英砂和陶粒等支撑材料的冲蚀变得不规则<sup>[19]</sup>,因此在管道上设置 3 个射孔孔眼,孔眼直径为 13 mm。

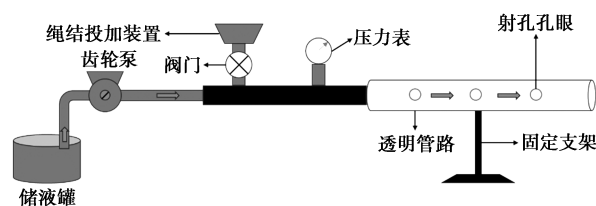


图 2 可视化暂堵绳结封堵模拟实验装置

实验步骤:首先往储液罐中加入清水,打开齿轮泵开关,调制一定频率,按照设计泵送排量开始绳结封堵实验,待绳结投放装置中的绳结泵注完成,关闭齿轮泵开关,记录可视化管道中暂堵绳结的进孔情况。

实验设计:为满足模拟孔眼尺寸封堵需要,根据页岩气现场施工暂堵球尺寸要求,采用 4 种暂堵绳结 ZDSJ,直径分别是 ZDSJ-1 14~16 mm、ZDSJ-2 16~8 mm、ZDSJ-3 18~20 mm、ZDSJ-4 20~22 mm,对 4 个直径范围的暂堵绳结 ZDSJ 进行封堵性能测试。排量为 0.1~0.2 m<sup>3</sup>/min,每组均间隔 15 s 依次投加 3 个暂堵绳结,每种尺寸绳结投加 10 次,并测定绳结的封堵率(3 个暂堵绳结全部坐封孔眼次数与投加总次数之比)。

#### 1.3.2 绳结降解性能评价

取 1 个暂堵绳结称重记为  $M_1$ ,置于 500 mL 的密封瓶中;加入 400 mL 的清水,然后将样品置于一定温度的恒温水浴锅中,分别在不同的溶解时间点将绳结样品用滤纸过滤,并放入 105℃ 电热鼓风干燥箱中烘干 24 h,最后称重暂堵绳结的剩余质量记为  $M_2$ ,计算暂堵绳结中的降解率  $R$ :

$$R = [(M_1 - M_2) / M_1] \times 100\% \quad (1)$$

式中: $M_1$  为暂堵绳结的原始质量,g; $M_2$  为暂堵绳结的剩余质量,g。

#### 1.3.3 模拟射孔孔眼承压性能评价

模拟射孔孔眼承压性能评价装置如图 3 所示。评价装置中驱替泵最大注入压力可达到 70 MPa;将

暂堵绳结及其液体加入中间容器内,其体积为 2 L;模拟射孔孔眼置于夹持器内,夹持器外可加围压,前后连有压力传感器,可测压差,实验所有管线均可承压 50 MPa 以上,保证实验安全。

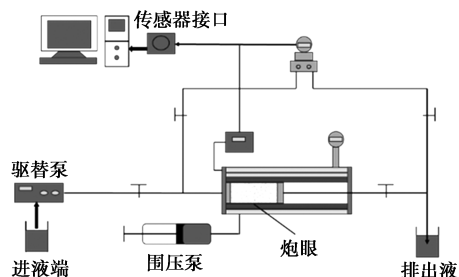


图 3 模拟射孔孔眼承压性能评价装置

测试过程中逐步增加压力,压力从 15 MPa 开始以 5 MPa 递增逐级加压,每级加压稳定 3 min,以打压压力突然降低 10% 以上为承压压力的判定依据,该压力即为暂堵绳结承压压力。

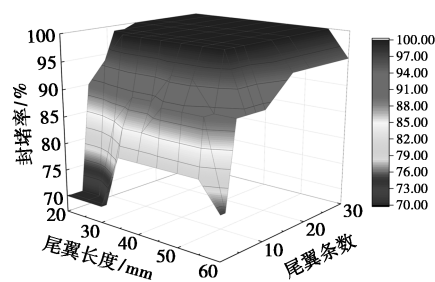
## 2 暂堵绳结原材料优选

以可降解材料 PGA 作为暂堵绳结主要材料,其具有优良的自降解性能、对环境无毒无危害,但存在生产成本过高的问题。因此,在 PGA 的基础上加入一定比例的 PLA,在降低成本的同时达到优化绳结封堵性能的目的。PGA、PLA 中均含有不稳定的酯基,在一定温度条件下,酯基在清水中会发生水解反应,使得 PGA、PLA 裂解为可溶于水的醇和酸,最终降解为  $\text{CO}_2$  和水<sup>[20]</sup>。

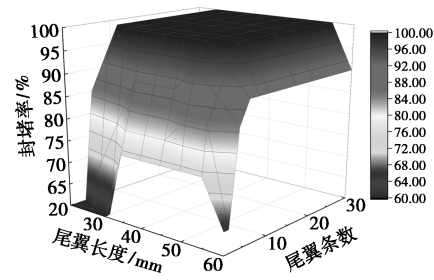
## 3 暂堵绳结尺寸对封堵性能的影响

在页岩气水平井暂堵转向压裂施工过程中,暂堵绳结主要针对射孔产生的炮眼进行封堵,由于射孔弹本身的射孔原理以及加砂过程中石英砂、陶粒等支撑剂的冲蚀,炮眼形状及尺寸将变得极不规则。若暂堵绳结尺寸小于炮眼直径,则会因为尺寸不匹配被压入炮眼中,无法有效封堵炮眼,导致暂堵效果不明显;绳结尺寸大于炮眼直径,会增加绳结坐封到炮眼上的难度,极易被压裂液冲走。因此,选择 4 种不同直径的暂堵绳结,在排量  $0.1 \sim 0.2 \text{ m}^3/\text{min}$  条件下测试其不同尾翼长度和条数下的封堵率,考察绳结直径、尾翼长度、尾翼条数等参数对封堵性能的影响,结果如图 4 所示。

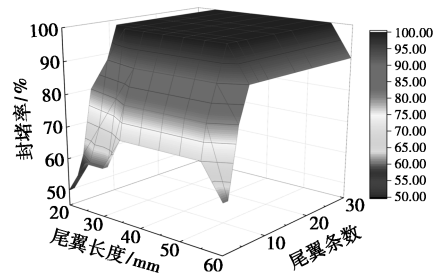
从图 4 中可以看出,当尾翼条数少于 6 条、尾翼长度小于 35 mm 时,封堵率整体上随绳结直径增大而减小,封堵率最大可达 85%。这是由于尾翼条数



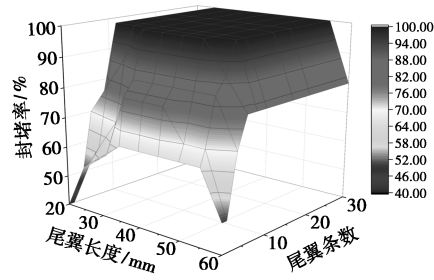
(a) 14~16 mm



(b) 16~18 mm



(c) 18~22 mm



(d) 20~22 mm

图 4 不同直径暂堵绳结尾翼条数和长度与封堵率关系图

过少及尾翼长度过短导致其在清水中的悬浮效果较差,使其不能及时准确地到达孔眼处完成封堵;而 4 种暂堵绳结均表现出尾翼条数越多、尾翼越长,封堵率越高的趋势,说明暂堵绳结两端尾翼细丝越细、越长,绳结进孔封堵效率越高。

当尾翼条数大于 6 条、尾翼长度在 35~50 mm 范围内时,4 种直径的绳结封堵率均为 100%,其封堵效果与绳结直径无明显关联。

当尾翼条数大于 6 条、尾翼长度大于 50 mm 时,封堵率则与绳结直径、绳结尾翼长度均呈负相关

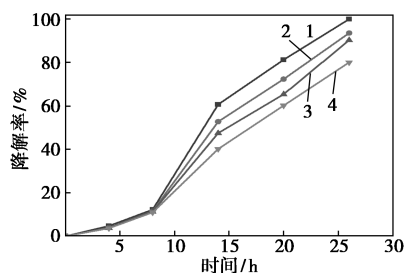
趋势,由于绳结尾翼过长,使得尾翼之间互相缠绕,降低了绳结在清水中的悬浮能力<sup>[21]</sup>,导致绳结对炮眼的封堵性能下降。

因此,为保障绳结对孔眼的封堵效率,暂堵绳结尾翼条数至少6条,尾翼长度取35~50 mm为最佳。

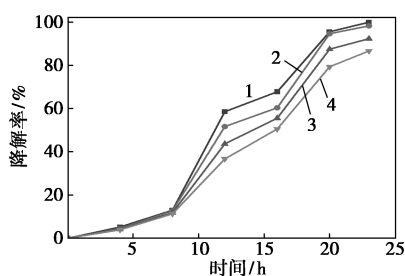
## 4 PGA质量分数对降解和承压性能的影响

### 4.1 PGA质量分数对降解性能的影响

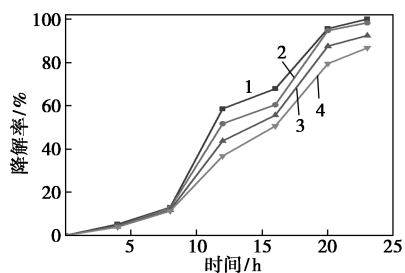
选择直径为18~20 mm、尾翼条数为6条、尾翼长度为35 mm、不同PGA/PLA质量比制备的暂堵绳结,将其置于90℃清水、0.1%乳液聚合物滑溜水和盐水(30 000 mg/L)中进行降解实验,结果如图5所示。从图5中可以看出,不同PGA/PLA质量比的暂堵绳结在清水、滑溜水和盐水中的降解率均随时间的增加而增加。相同溶解时间下,暂堵绳结在清水和滑溜水中的溶解率与PGA/PLA的质量比呈



(a) 清水



(b) 0.1%乳液聚合物滑溜水



(c) 盐水(30 000 mg/L)

1— $m(\text{PGA})/m(\text{PLA})=80/20$ ; 2— $m(\text{PGA})/m(\text{PLA})=70/30$ ;  
3— $m(\text{PGA})/m(\text{PLA})=60/40$ ; 4— $m(\text{PGA})/m(\text{PLA})=50/50$

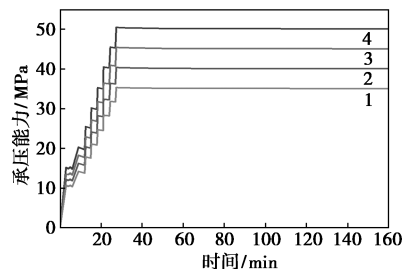
图5 90℃条件下不同质量比的暂堵绳结在清水和滑溜水中的降解实验结果

正相关,当PGA/PLA质量比为80/20时,绳结在清水和滑溜水中的溶解率均为最高,当在清水和滑溜水中的溶解时间分别为26 h和23 h时,溶解率均可达100%。在清水中,当溶解时间小于8 h时,PGA中含有的酯基与水分初步接触,酯基开始发生水解,暂堵绳结溶解缓慢;当溶解时间大于8 h时,酯基与清水充分接触,其水解速率大大提高,并生成大量可溶性水溶酸(乙醇酸),导致绳结溶解速率快速增加,直至完全溶解。

在滑溜水和盐水中,PGA/PLA质量比为80/20、溶解时间小于8 h时,暂堵绳结的溶解速率更快,相对于清水中分别提高了0.1%/h和0.13%/h;当溶解时间大于8 h时,绳结溶解速率均快速增加,相对于清水中分别提高了0.93%/h和0.91%/h。这是由于滑溜水中的部分酰胺基水解成羧酸基,加快了PGA的水解反应速率,而在盐水中则是由于PGA水解生成的酸与大量含钙、镁离子的盐类物质发生反应,促进了PGA的水解。

### 4.2 PGA质量分数对承压性能的影响

根据前置实验结果,选择直径18~20 mm、尾翼条数6条、尾翼长度35 mm的暂堵绳结,测试了不同PGA/PLA质量比的ZDSJ-3暂堵绳结在固定孔径上的承压能力,结果如图6所示。



1— $m(\text{PGA})/m(\text{PLA})=80/20$ ; 2— $m(\text{PGA})/m(\text{PLA})=70/30$ ;  
3— $m(\text{PGA})/m(\text{PLA})=60/40$ ; 4— $m(\text{PGA})/m(\text{PLA})=50/50$

图6 直径18~20 mm暂堵绳结承压测试曲线

从图6中可以看出,不同PGA/PLA质量比下暂堵绳结承压性能均表现出随时间增加而先增大后稳定的规律,在27 min时承压均达到最大;暂堵绳结的承压能力随PGA/PLA质量比的增大而减小;当PGA/PLA质量比为50/50时,绳结承压能力最强,可达到50 MPa,可保证绳结在井底压力上升时也能封堵炮眼,不会因此脱落,满足施工要求。

## 5 现场应用分析

绳结暂堵转向技术在页岩气藏水平井压裂施工中累计应用4井次28段,施工成功率100%,暂堵平

均升压最低为 5.3 MPa, 最高为 9.7 MPa, 而暂堵球平均升压最高仅为 2.7 MPa, 说明绳结暂堵效果提升明显, 如表 1 所示。

表 1 暂堵绳结与暂堵球暂堵效果对比

暂堵类型	井号	暂堵段数	绳结尺寸/mm	投加比例/%	暂堵排量/(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	平均升压/MPa
暂堵球	威 202H56-X	10	18~22	30~90	6.0	2.6
	威 202H56-X	13	18~22	40~90	6.5	2.7
	威 202H56-X	11	18~22	35~60	6.5	1.5
	YS112HX-5	31	18~22	27~82	6.0~7.0	1.8
暂堵绳结	宁 216H1-X	11	18~22	30~70	4.0~6.0	9.7
	宁 209H51-X	7	18~22	33~50	6.0~15.5	6.4
	宁 209H1X-3/4	8	18~22	30~40	4.0~6.0	7.5
	宁 209H3X	2	16~22	30	4.0~6.0	5.3

其中宁 216H1-X 采用暂堵转向压裂技术, 目的层温度为 91.3℃, 第 8 段, 射孔方式为连续油管射孔; 定面射孔, 孔密 10 孔/m、相位角为 60°、射孔孔径为 7 mm、16 簇、4 孔/簇、每簇 0.3 m, 共计 64 孔。该段暂堵采用直径为 18~22 mm 暂堵绳结进行暂堵, 绳结投加数量为 30 颗, 比例为射孔数的 47%, 分 2 次投加。在整个压裂施工中期阶段停泵后采用特制投送装置将暂堵绳结以排量 4.0~5.0 m<sup>3</sup>/min 进行泵送, 暂堵绳结达到射孔孔眼后, 第 1 次绳结投加后压力上涨 8.1 MPa, 第 2 次绳结投加后压力上涨 10.2 MPa, 如图 7 所示。

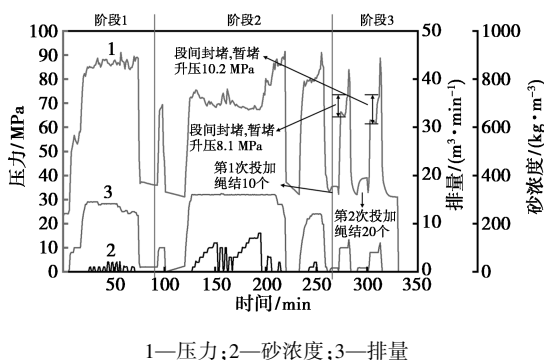


图 7 宁 216H1-X 井第 8 段段间绳结暂堵压裂施工曲线

采用微地震监测技术对目标地层裂缝形成情况进行监测, 结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 该段可分为 3 个阶段进行分析, 阶段 2 中, 微地震监测整体东侧微地震事件比西侧多, 且分布范围较广; 推

测该区域存在天然裂缝带; 分析井筒中部区域附近未监测到事件, 推测射孔簇未开启。阶段 3 为绳结封堵阶段, 微地震监测整体均在井筒远端发生, 井筒周围并未监测到微地震事件, 从压裂曲线上看本阶段 2 次绳结封堵套压都有一个明显的上升过程, 结合监测的微地震事件分布稀疏和方向性明确的特点来看, 本次暂堵效果较好。

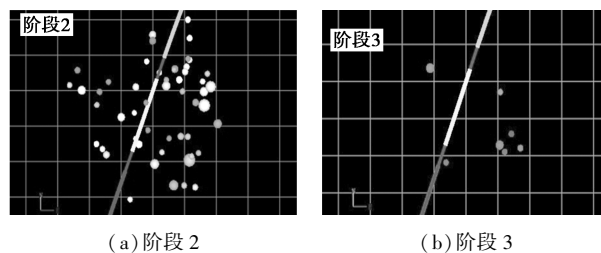


图 8 宁 216H1-X 井第 8 段微地震监测结果

宁 216H1-4 井第 15 段段内绳结暂堵压裂施工曲线如图 9 所示。第 15 段, 射孔方式为电缆射孔; 定面射孔, 孔密 16 孔/m、相位角为 60°、射孔孔径为 11.6 mm、7 簇、8 孔/簇、0.5 m/簇、56 孔。本段暂堵采用直径为 18~22 mm 暂堵绳结进行段间暂堵, 绳结投加数量为 20 颗, 比例为射孔数的 36%。在压裂施工中期阶段停泵后采用特制投送装置将暂堵绳结以排量 4.0~5.0 m<sup>3</sup>/min 进行泵送, 暂堵绳结达到合适位置后, 绳结投加后压力上涨 4.1 MPa, 绳结投加后暂堵升压效果明显, 利于低渗地层的压裂及天然气运移通道的形成。

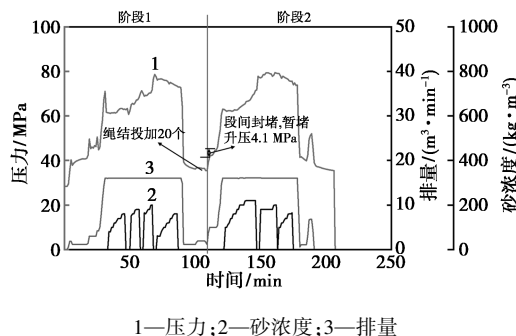


图 9 宁 216H1-4 井第 15 段段内绳结暂堵压裂施工曲线

第 15 段的微地震监测结果如图 10 所示。从图 10 中可以看出, 该段可分为 2 个阶段: 阶段 1 中, 整体加砂困难, 后期压裂到 3 000 m<sup>3</sup> 液量时加砂难度降低。从微地震监测结果显示, 在井筒东侧事件分布较多且延伸更远, 西侧微地震事件较东侧少, 且部分分布在近井筒附近, 没有向外延伸, 本段微地震事件前端事件较少, 有向第 16 段延伸的趋势; 阶段 2 中, 从压裂曲线上看本阶段 2 次绳结暂堵都有明显

的压力抬升,结合监测的微地震事件分布稀疏和方向性明确的特点来看,本次暂堵效果较好。

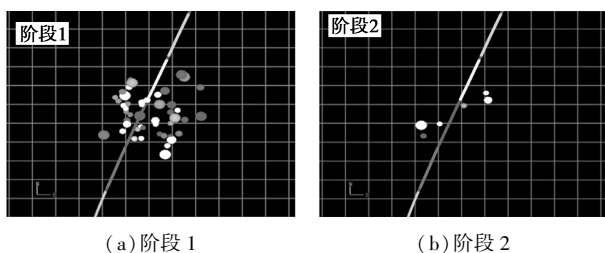


图10 宁216H1-X井第15段微地震监测结果

## 6 结论

(1)以PGA、PLA为原料制备了一种暂堵绳结,并明确了绳结直径、尾翼条数、长度等参数对封堵性能的影响。在模拟地层温度90℃条件下,封堵率整体上随绳结直径、尾翼长度、尾翼条数增加均呈现出先增大再平稳后减小的趋势。当绳结直径大于18 mm、尾翼条数超过6条、尾翼长度在35~50 mm范围内时封堵效率最高,达到100%。

(2)在90℃条件下,绳结溶解率与PGA/PLA质量比呈正相关,且PGA/PLA质量比为80/20时,在清水、0.1%滑溜水和30 000 mg/L盐水中的溶解率均达到最大,清水中26 h可完全溶解,其余2种体系中23 h溶解率可达100%;绳结承压能力随PGA/PLA质量比增大而减小,当PGA/PLA质量比为50/50时,承压能力可达到50 MPa。

(3)现场应用结果表明,绳结暂堵平均升压最高可达9.7 MPa,段间及段内孔眼封堵后压力上升幅度较大,大大提高了射孔簇裂缝的改造程度。

### 参考文献

[1] 吴奇,胥云,王腾飞,等.增产改造理念的重大变革—体积改造技术概论[J].天然气工业,2011,31(4):7-12.  
 [2] 夏海帮.页岩气井双暂堵压裂技术与现场试验[J].石油钻探技术,2020,48(3):90-96.  
 [3] 熊春明,石阳,周福建,等.深层油气藏暂堵转向高效改造增产技术及应用[J].石油勘探与开发,2018,45(5):888-893.  
 [4] 吴宝成,周福建,王明星,等.绳结式暂堵剂运移及封堵规律实

验研究[J].钻采工艺,2022,45(4):61-66.  
 [5] 龚蔚,袁灿明.多级暂堵转向技术在高石梯—磨溪储层改造中的应用[J].天然气地球科学,2017,28(8):1269-1273.  
 [6] 刘彝,杨辉,吴佐浩.强变形暂堵转向压裂技术研究及应用[J].钻井液与完井液,2022,39(1):114-120.  
 [7] 张照阳,陈越美,鲍晋,等.页岩气藏压裂暂堵超分子凝胶体系研究[J].钻井液与完井液,2022,39(6):767-775.  
 [8] Rhonda D. Diverter system allows operators to maintain more consistent stimulation volume [J]. E&P: A Hart Energy Publication, 2017,90(7):76.  
 [9] 王纪伟,康玉柱,张殿伟,等.非常规储层压裂暂堵剂研究应用进展[J].特种油气藏,2021,5(28):1-9.  
 [10] 郭建春,赵志红,赵金洲,等.水平井投球分段压裂技术及现场应用[J].石油钻采工艺,2009,31(6):86-95.  
 [11] 臧传贞,姜汉桥,邹雨时,等.基于射孔成像监测的多簇裂缝均匀起裂程度分析:以准噶尔盆地玛湖致密砾岩为例[J].石油勘探与开发,2022,49(2):1-9.  
 [12] 吕瑞华,刘奔,安琳.水平井转向压裂用暂堵球运移封堵规律研究[J].石油机械,2020,48(7):117-122.  
 [13] 王艳林,方正魁,刘林泉,等.新型可降解纤维暂堵转向压裂技术研究及应用[J].钻采工艺,2020,43(6):5.  
 [14] Peng X, Zhang Q J, Yu R J, et al. Research of a self-adaptive high-performance re-fracturing technology with knot temporary plugging in a thin reservoir with high stress [J]. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 2023, 58(6): 1027-1034.  
 [15] Senters C W, Johnson M D, Leonard R S, et al. Diversion optimization in new well completions [C] // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition. The Woodlands: Society of Petroleum Engineers, 2018.  
 [16] 吴宝成,周福建,王明星,等.绳结式暂堵剂运移及封堵规律实验研究[J].钻采工艺,2022,45(4):61-66.  
 [17] Xu J W, Wang J, Wang M X, et al. Performance research and field application of the knot temporary plugging agent [J]. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 2022, 58(3): 544-553.  
 [18] Patil V P, Sandt J D, Kolle M, et al. Topological mechanics of knots and tangles [J]. Science, 2020, 367(6473): 71-75.  
 [19] 张旺,吕永国,李忠宝,等.绳结暂堵塞性能研究及现场应用[J].中外能源,2022,27(12):63-69.  
 [20] 雷秀秀.聚乙交酯基聚氨酯结构与性能研究[D].镇江:江苏科技大学,2020.  
 [21] 朱碧波,张涛.一种新型自适应柔性暂堵封隔压裂技术的应用[J].石化技术,2023,30(11):64-66. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志,邮发代号82—67。