文章编号:1673-2677(2026)01-0058-10 DOI:10.12388/j.issn.1673-2677.2026.01.007
引用:杨柳青,王海波,刘智敏,等.运用3D打印技术模拟裂缝及评估钻井堵漏效果新方法[J].新疆石油天然气,2026,22(1):58-67.
Cite:YANG Liuqing,WANG Haibo,LIU Zhimin,et al. A new method for simulating fractures and evaluating drilling plugging effectiveness based on 3D printing[J]. Xinjiang Oil & Gas,2026,22(1):58-67.

运用3D打印技术模拟裂缝及评估钻井堵漏效果新方法

杨柳青[1],王海波[2],刘智敏[3],曾欣[4],刘明[3]
(1.中国石油集团川庆钻探工程有限公司,四川成都 610056;2.中石化石油工程技术研究院有限公司,北京昌平 102206;3.中国石油集团川庆钻探工程有限公司钻井液技术服务公司,四川成都 610051;4.中国石油集团川庆钻探工程有限公司井下作业公司,四川成都 610052)

摘 要:井漏是钻井工程的关键技术难题。当前实验室模拟裂缝性漏失主要依赖钢板缝、金属薄片及砂床等传统方法,难以充分还原真实漏失地层中裂缝的走向、迂曲程度及表面粗糙度等复杂特征,导致堵漏材料在复杂地层条件下的现场应用成功率普遍偏低。提出一种将漏层真实裂缝模拟与3D打印技术相结合的创新方法,通过三维成像重构技术扫描实际漏层岩样,建立数字岩心模型,并应用3D打印技术制作模拟岩心,显著提高了对地层裂缝真实结构的还原度与契合度。在此基础上,采用特制的高温高压动态循环堵漏评价装置,开展多尺度复合缝的系统性承压实验,对比分析了多种堵漏配方在3D打印模拟岩心与传统钢板缝中的封堵性能差异,构建一套适用于真实裂缝模拟与堵漏评价的新方法。经现场试验验证,优化后的堵漏配方一次性堵漏成功率提升至83%,显著增强了堵漏作业的可行性与经济性。研究成果为实现复杂地层裂缝性漏失的高效与精准封堵提供了有效技术支撑,对提升钻井工程效率及油气资源开采保障能力具有重要意义。

关键词:裂缝性漏失;3D打印;模拟岩心;堵漏评价;钻井
中图分类号:TE282 **文献标识码:**A

A New Method for Simulating Fractures and Evaluating Drilling Plugging Effectiveness Based on 3D Printing

YANG Liuqing[1], WANG Haibo[2], LIU Zhimin[3], ZENG Xin[4], LIU Ming[3]
(1. CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Chengdu 610056, Sichuan, China; 2. Research Institute of Petroleum Engineering Technology Co., Ltd., Sinopec, Changping 102206, Beijing, China; 3. Drilling Fluid Technical Service Company, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Chengdu 610051, Sichuan, China; 4. Downhole Service Company, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Chengdu 610052, Sichuan, China)

Abstract: Lost circulation is a critical technical challenge in drilling engineering. Current laboratory simulations of fracture-induced lost circulation primarily rely on traditional methods such as steel plate fractures, metal sheets, and sand beds, which fail to adequately replicate complex characteristics of actual thief zones, including the fracture orientation, tortuosity, and surface roughness. As a result, the field application success rate of plugging materials under complex geological conditions is still generally low. This paper proposes

基金项目:国家自然科学基金面上项目"深井、超深井水基钻井液失水造壁性与流变性调控机理研究"(52274008)。
第一作者:杨柳青(1973-),2005年毕业于伊利诺伊大学香槟分校机械工程专业,博士,中国石油集团川庆钻探工程有限公司企业首席专家,目前从事钻完井工程研究与智能制造相关工作。(E-mail)yangliuq_sc@cnpc.com.cn
通讯作者:王海波(2000-),2025年毕业于西南石油大学材料工程专业,硕士,助理工程师,目前从事钻井液处理剂研发与现场应用工作。(E-mail)207189600@qq.com

an innovative method that integrates realistic fracture simulation of thief zones with 3D printing technology through 3D imaging reconstruction. Actual rock samples of thief zones are scanned to establish digital core models, and 3D printing is applied to creating simulated cores, which significantly improves the fidelity and compatibility to real fracture structures. On this basis, a customized high temperature high pressure dynamic circulation plugging apparatus is used to conduct systematic pressure bearing experiments of multi-scale composite fractures. The sealing performance of various plugging formulations are compared and analyzed between 3D printed cores and traditional steel plate fractures, and a new methodology applicable to realistic fracture simulation and plugging evaluation is constructed. Field testing has validated that the optimized plugging formulation presents a one-time success rate of 83%, significantly enhancing the operational feasibility and economic viability of plugging operations. This method provides effective technical support for the efficient and precise sealing of complex formation fractures and contributes substantially to improved drilling efficiency and security of oil and gas resource recovery.

Key words: fracture-induced lost circulation; 3D printing; simulated core; plugging evaluation; drilling

在石油与天然气开采过程中,钻井井漏问题严重制约了钻井工程效率与安全性,带来多重不容忽视的危害[1-2]。井漏首先导致钻井液持续大量漏失,显著增加钻井液材料成本及配套处理费用,同时因频繁补充钻井液导致非生产时间延长,整体钻井作业经济性受到影响[3-5]。更为严重的是,钻井液的漏失会破坏井筒与地层之间的压力平衡,可能导致井壁失稳、地层坍塌等严重后果,进而诱发卡钻、甚至井眼报废等恶性事故,严重威胁作业安全;在极端情况下,井筒压力失控还可能引发井喷事故,造成灾难性后果[6-9]。井漏还会直接影响后续测井与固井作业质量,井眼条件恶化可能导致测井数据失真、固井胶结质量不佳,从而降低完井质量和油气井长期生产效能[10-11]。此外,钻井液侵入可对储层造成不同程度的损害,导致孔隙堵塞、渗透率下降,严重影响储层产能及最终采收率[12]。

据不完全统计,仅2024年全年,国内某钻探公司在现场处理井漏中采用桥塞堵漏250次(一次堵漏成功率64%),其中井深超6 000 m桥塞堵漏施工65次(一次堵漏成功率57%);随钻堵漏185次(一次堵漏成功率64.9%),其中井深超6 000 m随钻堵漏施工22次(一次堵漏成功率50%)。上述数据表明,当前现场一次性堵漏成功率总体仍处于较低水平。为提高现场井漏治理成功率,最大限度降低井漏带来的时间与经济损失,应从源头强化技术支撑,尤其是要系统强化室内评价工作[13]。通过精准分析目标地层的裂缝开度、走向及发育规律等关键参数,优选并优化钻井液堵漏配方,为现场制定更加科学、高效且适应性强的堵漏方案提供技术支撑。

3D打印技术作为第三次工业革命代表之一,在油气开采领域的应用逐渐广泛。目前针对应用3D打印加工方法制造PDC钻头的研究相对较多,但研究多集中于钻头模型的制备阶段,有关钻头实际制造与现场应用试验的研究仍较为欠缺[14]。刘八仙[15]将3D打印技术引入PDC钻头及牙轮-PDC混合钻头的模具制造过程中。现场应用证明,采用3D打印技术制备的新型钻头破岩效率显著提升,机械钻速提高25.8%,平均进尺增加7.7%。在石油炼化领域,Li[16]等采用3D打印技术制备了FMZSM-5和3D-PFMY催化剂,并将其用于正己烷催化裂解反应。实验结果表明,该类催化剂表现出更优异的稳定性与低碳烯烃选择性。目前3D打印技术应用于钻井液堵漏评价的报道相对较少,相关技术进展有限。刘永贵等[17]借助铝箔来调整裂缝间宽度,以此来形成微纳米地层裂缝。Savari等[18]通过钢板来建立楔形缝,楔形缝评价模型的优点在于可以更好评价地层裂缝的承压能力。杨决算等[19]通过对真实岩心进行人工造缝,在裂缝中铺垫锡纸,可通过填充的锡纸厚度来决定裂缝宽度。闫晶等[20]将不同厚度的薄片与胶凝材料相结合来建立地层裂缝模型,裂缝宽度可通过金属薄片来调整。程鹏至等[21]利用不同大小的钢珠进行孔缝的模拟。Magzoub等[22]采用岩心柱劈裂法,并在裂缝面间嵌入铝板垫片,制得了宽度1 mm、高度2.54 cm、长度34.29 cm的人工裂缝岩心。这些方法虽可在一定程度上模拟裂缝宽度,但难以真实反映地层裂缝的产状、走向及迂曲特征,致使室内评价实验与现场实际应用还存在一定偏差,难以达到理想的堵漏效果。

3D打印技术基于数字模型,通过逐层堆积粉末材料实现复杂结构的快速与高精度制造[23-24]。相比于传统钢板直缝或垫片的加工方法,3D打印技术具有制造周期短、精度高、可定制性强等优势,能够更真实地再现裂缝形态及地层表面粗糙度,显著提升实验的可靠性与真实性[25]。目前钻井液封堵评价模拟介质只能体现地层直缝、大尺度斜缝,难以模拟实际地层中迂曲交错、网络纵横裂缝的问题。只有先明确裂缝宽度及走向,才能选择出合理堵漏材料以及配方,制定专项堵漏方案。本文将3D打印技术引入到裂缝模拟当中,并以此为中心建立一种适用于裂缝性漏失的堵漏模拟新方法,为这一问题的解决提供了新的技术思路,对石油与天然气的高效开发具有重要意义。

1 漏层数字岩心的建模及3D打印

1.1 漏层数字岩心建模

三维重构成像技术已在石油与天然气领域中得到应用，主要用于岩心的油气驱替[26]及观测岩心的微观孔隙结构及裂缝展布等[27]。其技术原理是让X射线从不同方向穿过被扫描的样品，同时利用特定探测装置测量X射线沿不同辐射路线的穿透量，从而获得物体各个断面的图像（投影数据）。基于图像重建算法，利用所获得的投影数据可重建样品内部结构的断层图像，清晰呈现其内部构造，最终输出样品的CT扫描图像。三维重构成像技术工作原理如图1所示。本研究采用的实验岩心样品取自川南某页岩气区块，如图2所示；扫描后得到的部分断面图像如图3所示。

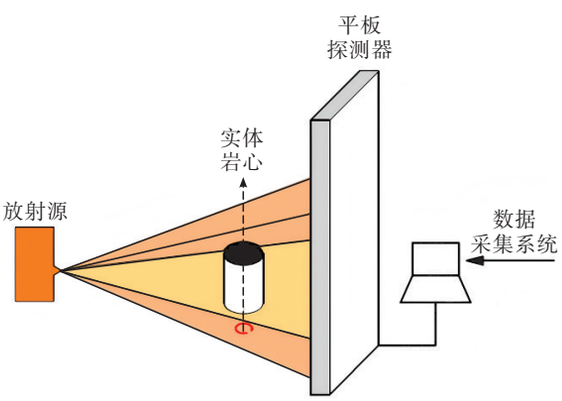


图1 三维重构成像技术工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the working principle of 3D reconstruction imaging technology

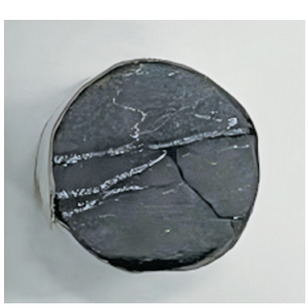
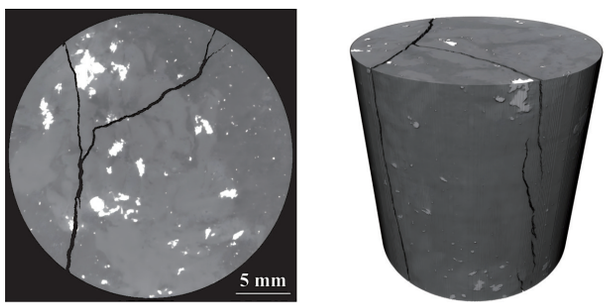


图2 实验用扫描岩心

Fig. 2 Scanned core for 3D reconstruction imaging

岩心CT扫描过程中，受设备自身噪声、X射线散射及探测器精度等因素影响，重建出的灰度图像常含有伪影与噪声[28]，难以真实还原岩心结构特征。为降低原始CT图像的噪声水平，减轻因图像质量下降对后续定量分析的不利影响，将裁剪后的原始CT图像导入AVIZO软件，采用中值滤波算法去除盐噪声与胡椒噪声。此类降噪处理是图像预处理的典型步骤，有助于提升后续分割及边缘检测等操作的准确性与可靠



(a) XY平面 (b) YZ平面

图3 部分断面扫描图像

Fig. 3 Part of cross-sectional scan images

性[29]。经过滤波处理后，孔隙与基质之间的过渡更为自然，边界更加平滑，同时有效保留了图像中的关键结构信息。实验岩心图像处理前后对比如图4所示。

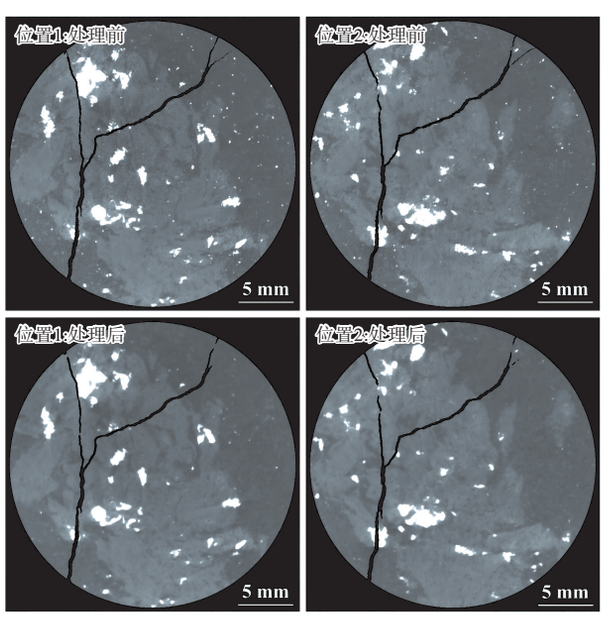


图4 滤波处理后的图像

Fig. 4 Images after filtering

随后，对降噪后的灰度图像进行二值化处理。根据原始图像中各像素的灰度差异，将岩石骨架与孔隙结构区分开来[30]。借助图像分割技术，可将灰度图像转换为二值图像，并通过平滑处理初步建立骨架与孔隙的二元表征，未连通的孔隙及孤立孔隙被有效剔除，得到可用于进一步分析的最终图像。该图像保留了主要的孔隙网络结构，为后续三维建模奠定了良好基础。在此基础上，可利用专业建模软件实现孔缝结构的可视化重建与定量分析。分割处理后的图像如图5所示，该图展示了经AVIZO软件处理后的数字岩心三维模型，其中蓝色区域表示孔缝空间，灰色部分代表岩石基质。可以观察到，岩心内部存在一个呈“Y”字形分布的贯穿性片状连通结构，这一特征构成了该岩样主要的孔缝网络系统。

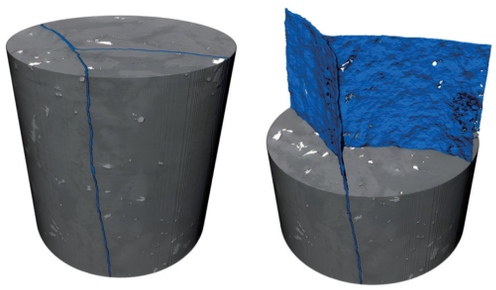


图5　分割处理后的图像

Fig. 5　Images after segmentation

基于前期岩心CT扫描处理后得到的二值化图像,采用Rhino软件进行建模操作,最终得到建立好的STL格式文件,可详细模拟再现地层裂缝网络的形态、大小及走向,如图6所示。通过构建一种可拆解的模拟岩心,能更加直观、精准地观察堵漏材料在裂缝内部的具体位置,清晰地判断堵漏塞的致密程度,以及在持续的高温高压环境下堵漏材料的稳定性和变化情况,为室内堵漏研究提供强有力的可视化支撑与精确分析依据。

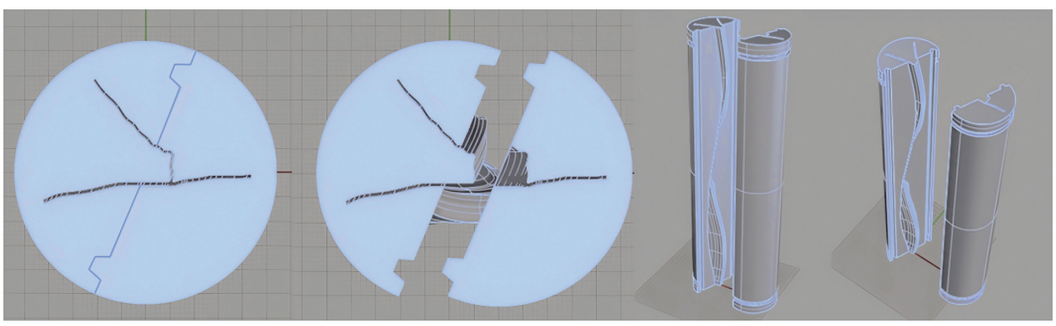


图6　Rhino岩心模型

Fig. 6　Rhino core model

1.2　漏层数字岩心3D打印

目前3D打印技术可分为两大类:基于激光光源的成型技术(光固化成型工艺、选区激光熔化工艺、选区激光烧结工艺、电子束熔融成型工艺、分层实体制造工艺)[31],基于喷射成型的打印技术(熔融沉积制造工艺、三维印刷成型工艺、浆料直写工艺)[32]。本研究采用选区激光烧结工艺(SLS),该工艺具有打印精度高、微小孔缝刻画精度高、打印速度快等优点[33]。先在打印平台上铺一层粉末,使用激光束扫描第一层要打印的部分,并使其烧结在一起,形成第一个切片;然后打印平台下移一层,铺上新的粉末层,再次使用激光束扫描新一层区域并烧结;重复以上步骤,直到打印完成[34]。选区激光烧结工艺流程如图7所示。

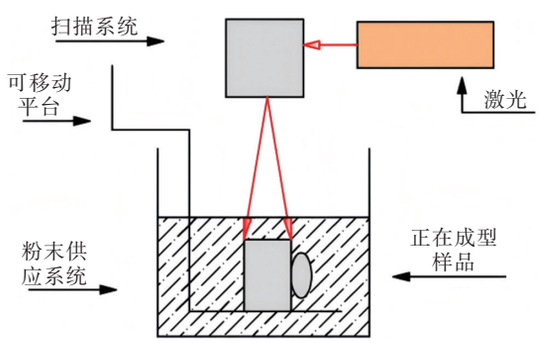


图7　选区激光烧结工艺流程图

Fig. 7　SLS workflow

3D打印材料的选用对打印成品属性至关重要,是3D打印技术缺一不可的物质基础。目前3D打印材料种类高达百余种,主要包括工程塑料、光敏树脂、生物树脂、热固性塑料、高分子凝胶、金属材料、陶瓷材料和复合材料等[35]。

为更好模拟地层真实情况,选用的3D打印材料应具备良好的抗温能力和承压能力。本次实验材料选用聚酰胺碳纤维(PA6-CF),属于复合材料类,其具体性能参数见表1。PA6-CF是通过添加碳纤维来提高材料的机械性能。一般来说,高质量的PA6-CF丝材碳纤维含量为25%~30%,碳纤维增强材料有着显著提升的刚度,强度和耐热性,并具有出色的层间结合力。PA6-CF的密度约为1.2 g/cm^3,抗温可达215 ℃,是一种具有高强度,高抗冲击力和抗温能力的3D打印材料。

表1　PA6-CF性能参数

Tab. 1　Performance parameters of PA6-CF

杨氏模量/MPa (XY平面)	杨氏模量/MPa (YZ平面)	拉伸强度/MPa (XY平面)	拉伸强度/MPa (YZ平面)	弯曲模量/MPa (XY平面)	弯曲强度/MPa (XY平面)	抗温/℃
7 453±656	4 354±206	105.0±5.0	67.7±4.7	8 339±369	169.0±4.7	215

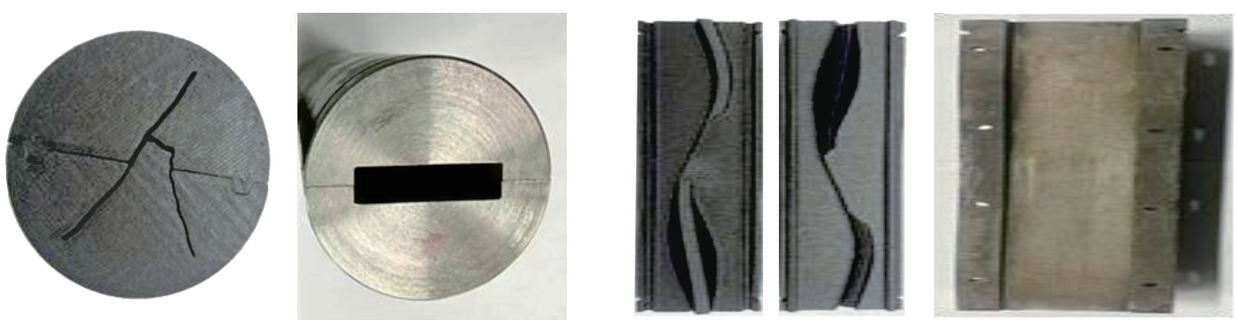
连续纤维复合树脂材料3D打印过程中的层厚、打印速度及喷头打印温度等工艺参数都会对最终零件质量造成影响。合适的工艺参数在保证产品质量、提高产品尺寸精度、减少废料、提高生产效率和降低生产成本方面起着重要作用，工艺参数的选择至关重要[36]。本研究具体选用的打印参数见表2。

通过建立好的Rhino模型，打印材料PA6-CF，基于选区激光烧结工艺(SLS)，采用FARSOON HT251P打印机进行3D打印。打印实物与钢板缝对比如图8所示。可以看出传统钢板缝隙模型仅限于评估线性裂缝，并且裂缝表面较为平滑，这与实际地层裂缝的复杂性有差异。3D打印的模拟岩心不仅能精确模拟裂缝的大小和走向，与实际漏层裂缝相匹配，还可复现地层裂缝的一些表面粗糙特征，能更真实地反映地层的自然状态。这种高度仿真的模拟岩心为裂缝封堵实验提供了更为准确的实验条件。

表2 选区激光烧结工艺3D打印工艺参数

Tab. 2 SLS 3D printing process parameters

参数名称	参数选择
喷嘴直径/mm	0.4
喷嘴温度/℃	280
平台温度/℃	70
室温/℃	25±5
层厚/mm	0.1
打印速度/(mm·s^{-1})	60
填充密度/%	20



(a) XY平面 (b) YZ平面

图8 3D打印模拟岩心与传统钢板缝对比

Fig. 8 Comparison between the 3D printing simulated core and traditional steel plate fracture

2 裂缝性地层堵漏模拟评价新方法

2.1 实验试剂及仪器

2.1.1 实验试剂

实验配方基于钾聚磺钻井液体系，实验选取常用的堵漏材料类型，材料具体参数见表3。

表3 堵漏材料相关参数

Tab. 3 Parameters of plugging materials

堵漏材料系列	主要成分	代号	粒径/目	形貌
FDJ	纤维果壳	FDJ-1	6~40	颗粒状
		FDJ-2	2~20	颗粒状
WNDK	方解石	WNDK-1	10~20	颗粒状
		WNDK-2	20~40	颗粒状
		WNDK-3	40~60	颗粒状
JD-5	纤维树脂	JD-5	20~60	粉末状

2.1.2 实验仪器

为更准确模拟钻遇裂缝性漏层时钻井液的堵漏情况，利用特制的高温高压动态循环堵漏仪来进行评价。该装置具有特定的夹持器，可适配针对不同地层裂缝定制的3D打印模拟裂缝或钢板缝，钻井液泵入速率高，工作压力最大可达70 MPa，工作温度可达200 ℃。装置主要技术参数见表4。

表4 装置主要技术参数

Tab. 4 Main technical parameters of the plugging apparatus

参数名称		参数范围
工作压力/MPa		0~70
传感器压力/MPa		0~80
实验温度/℃		室温~200
流速/(mL·min^{-1})		0~500
活塞容器容量/L		0~30
搅拌系统转速/(r·min^{-1})		0~4000
循环釜容量/L		0~40
岩心夹持器	直径/mm	50
	长度/mm	50~320

高温高压动态循环堵漏仪实物装置如图9所示，结构示意图如图10所示。堵漏浆活塞容器通过管线

与钻井液循环釜上方接口连通,使堵漏浆与钻井液充分混合;漏层3D打印岩心置于岩心夹持器当中,钻井液循环釜与岩心夹持器通过外部的温控系统模拟井下温度环境;岩心夹持器出口通过管线与顶替浆活塞容器相连;顶替浆活塞容器下连接一个天平计量容器,可实时观测钻井液出液量,通过电脑上的数据采集软件自动记录压力传感器实时压力变化数据。



图9　高温高压动态循环堵漏仪实物图

Fig. 9　Photo of the HTHP dynamic circulation plugging apparatus

2.2　实验步骤

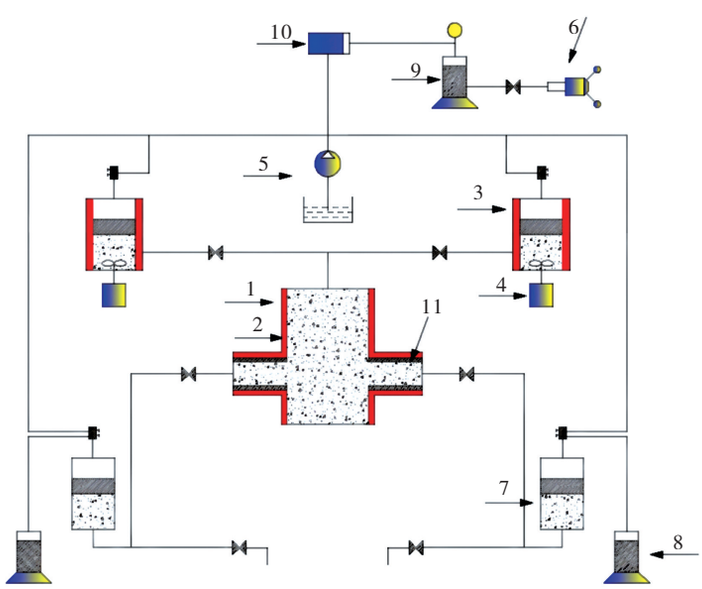
①配制堵漏浆,利用高速旋转搅拌器在2 000 r/min下搅拌30 min;

②将模拟岩心放入岩心夹持器内;

③将温控系统设定到180 ℃,待循环釜与岩心夹持器等容器都达到相应温度后进行下一步实验;

④将堵漏浆倒入循环釜中,以恒流模式开启加压泵加压到1.0 MPa,待漏失稳定后以2.0 MPa的压力梯度继续加压,每个压力点稳定加压10 min;

⑤若加压过程中出现漏失量迅速增加,岩心夹持器入口端压力传感器记录数值急剧下降且未恢复,则认为堵漏塞被破坏,记录最大压力点作为该裂缝封堵层的承压能力。



1-钻井液循环釜;2-温控系统;3-堵漏浆活塞容器;4-搅拌系统;5-增压泵;6-手动泵;7-顶替浆活塞容器;8-天平计量容器;9-压力缓冲容器;10-回压阀;11-岩心夹持器

图10　高温高压动态循环堵漏仪结构示意图

Fig. 10　Structural diagram of the HTHP dynamic circulation plugging apparatus

2.3　实验模拟结果讨论

2.3.1　实验用堵漏配方及方案设计

结合现场堵漏成功率较高的堵漏配方设计了9种实验配方,见表5。

在相同堵漏配方条件下,实验对比了3D打印模拟岩心与钢板模拟缝的封堵效果。每组配方均分别开展实验,累计完成18组正反向承压堵漏实验,系统评价不同配方在两类模拟介质中的承压堵漏性能。其中,钢板缝为楔形直缝,具体为规格1.0~1.5 mm、2.0~4.0 mm和6.0~7.0 mm的楔形缝板;3D打印模拟岩心为通过地层岩心CT扫描得到的三套模拟岩心。

2.3.2　双向承压对比"封门"效应

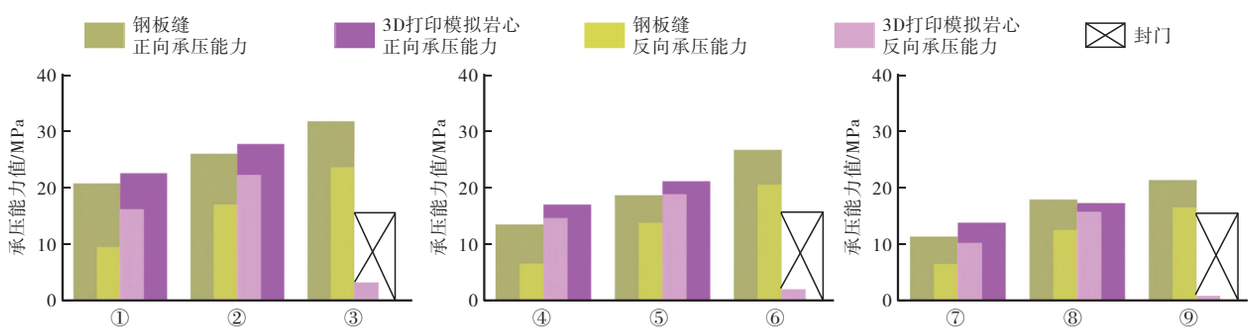
通过对比正向与反向的承压值,可以准确评估该堵漏配方是否在裂缝入口处引起了"封门"现象。"封门"效应会产生暂时阻止钻井液漏失的假象,表现为裂缝入口被暂时封堵,但在重新建立循环过程中,受钻井工具扰动影响,裂缝外部形成的封堵层易发生脱落,导致原有漏失通道重新开放,再次引发漏失。该现象与渗透性漏失的失稳机制相似,均源于对地层裂缝实际开度认识不足,以及所采用堵漏材料的粒径级

表5 实验配方

Tab. 5 Experimental formulations

复合缝宽/mm	配方序号	堵漏配方
1.0~1.5	①	6%JD-5+12%FDJ-1
	②	6%JD-5+10%FDJ-1+2%WNDK-3
	③	6%JD-5+6%FDJ-1+6%WNDK-3
2.0~4.0	④	6%JD-5+8%FDJ-1+4%FDJ-2
	⑤	6%JD-5+6%FDJ-1+4%FDJ-2+1%WNDK-2+1%WNDK-3
	⑥	6%JD-5+3%FDJ-1+3%FDJ-2+3%WNDK-2+3%WNDK-3
6.0~7.0	⑦	6%JD-5+4%FDJ-1+4%FDJ-2+4%FDJ-3
	⑧	6%JD-5+3%FDJ-1+3%FDJ-2+3%FDJ-3+1%WNDK-1+1%WNDK-2+1%WNDK-3
	⑨	6%JD-5+1%FDJ-1+1%FDJ-2+1%FDJ-3+3%WNDK-1+3%WNDK-2+3%WNDK-3

配不够合理[37-38]。若存在“封门”,钻井液在正向承压时会表现出较高的承压能力,但在反向承压条件下其封堵性能显著下降,表现出异常失效行为,即判断为发生了“封门”现象。实验结果如图11所示。



(a) 1.0~1.5 mm复合缝 (b) 2.0~4.0 mm复合缝 (c) 6.0~7.0 mm复合缝

图11 3D打印模拟岩心与钢板缝极限承压值测定结果

Fig. 11 Test results of the pressure bearing limit for the 3D printing simulated cores and steel plate fractures

在实验过程中,发现3D打印模拟岩心中有配方③、配方⑥和配方⑨正向承压能力值较高,但反向承压能力值只有2~4 MPa,认为此时堵漏材料在裂缝入口处产生了“封门”现象。

2.3.3 单向承压验证“封门”机制

为进一步验证“封门”现象,用配方③、配方⑥和配方⑨在3D打印模拟岩心中只进行正向承压实验。实验结束后取出3D打印模拟岩心进行观测,发现堵漏剂在裂缝入口处发生了堆积,导致“封门”现象。正向承压模拟岩心实物照片见图12所示。

在钻井液封堵裂缝的实验中,传统钢板缝在配方③、配方⑥、配方⑨中表现出了较之前两组配方更强的承压能力。图12中,在更接近真实裂缝形态的3D打印模拟岩心中,由于裂缝表面具有一定粗糙度,与漏层孔隙裂缝不匹配的较大刚性颗粒不易进入裂缝深部,反而容易在入口处发生架桥和堆积,形成初步却松散的封堵层;与此同时,由于堵漏配方中细小颗粒与纤维类材料的浓度相对不足,无法有效填充架桥后遗留的孔隙,导致封堵层内部结构不够致密。综上,在正向承压条件下,配方③、配方⑥、配方⑨可表现出较高的瞬时承压能力;然而在反向承压测试中,封堵层因结构薄弱而发生失效,表现出承压性能显著下降的异常现象,判断为典型的“封门”。

“封门”现象的产生与刚性堵漏材料的浓度过高有关。刚性堵漏材料沉降后在裂缝入口处聚集架桥,形成临时封堵层,当采用高浓度、大颗粒堵漏浆时,在外部压力驱动下,大量颗粒同步进入裂缝,加剧了这一入口架桥过程。这种封堵层并不稳定,在后续起下钻激动或钻井液密度提升等工况下极易失效,不仅会诱导复漏,还可能促使裂缝进一步扩展,显著增加堵漏作业的难度与复杂性。在堵漏施工过程中,刚性大颗粒堵漏剂的浓度控制尤为关键。浓度过高不仅易造成堵漏剂在入口处堆积和“封门”,还会阻碍裂缝深部的有效封堵。应合理控制该类堵漏剂的浓度、避免局部过度堆积,成为确保封堵效果和预防“封门”的核心措施。



(a) 配方③正向承压实验后模拟岩心截面　　(b) 配方⑥正向承压实验后模拟岩心截面



(c) 配方⑨正向承压实验后模拟岩心截面

图12　部分实验配方在3D打印模拟岩心中产生的“封门”现象

Fig. 12 "Door sealing" phenomena in cases of 3D printing simulated core experiments by some experimental formulations

通过钢板缝室内对比实验,发现虽然使用高浓度刚性粒子堵漏剂的配方在钢板缝评价中显示出更好的极限承压值,但在更接近实际地层条件的3D打印模拟岩心实验中,可能会因为“封门”现象而影响堵漏效果。3D打印模拟岩心因其能够更真实模拟地层裂缝的复杂性,再现地层裂缝网络的形态、规模、走向、迂曲程度和连通性,成为更准确和科学的室内评价方法来评估堵漏配方的效果。通过在实验室中进行科学的堵漏配方评价,优化堵漏材料的配方和施工方法,能减少现场施工的风险和成本,提高堵漏作业的效率和成功率,提高勘探开发的效果。

3　现场应用

川南某页岩气A区块茅口组、栖霞组、梁山组及石牛栏组地层均易发生漏失。本研究在室内采用3D打印模拟岩心,结合裂缝性地层堵漏模拟装置,对堵漏浆配方进行了系统评价与优选,形成了适用于易漏地层的堵漏浆体系。在A区块试验了6口井的堵漏作业,一次堵漏成功率达83%,有效突破了以往一次堵漏成功率低的瓶颈,为区块内油气资源的高效开发提供了可靠技术支撑。现场试验井堵漏浆配方见表6;试验井数据详见表7。

表6　堵漏浆配方

Tab. 6 Formulations of the lost circulation control slurry

试验井	配方
A-1	6%JD-5+5%FDJ-1+2%WNDK-2+2%WNDK-3+2%XJL
A-2	6%JD-5+6%FDJ-1+4%FDJ-2+2%WNDK-1+3%WNDK-2+2%WNDK-3+3%XJL
A-3	6%JD-5+5%FDJ-1+2%FDJ-2+2%WNDK-1+2%WNDK-2+1%WNDK-3+2%XJL
A-4	6%JD-5+5%FDJ-1+2%FDJ-2+2%WNDK-1+2%WNDK-2+2%WNDK-3+3%XJL
A-5	6%JD-5+2%FDJ-1+3%WNDK-3+2%XJL
A-6	6%JD-5+6%FDJ-1+4%FDJ-2+2%WNDK-1+2%WNDK-2+1%WNDK-3+3%XJL

表7　堵漏作业现场试验结果

Tab. 7 Field test results of plugging operations

试验井	漏失层位	漏失时井深/m	施工工艺	是否一次性堵漏成功
A-1	石牛栏组	2 307	承压堵漏	是
A-2	茅口组	1 035	承压堵漏	否(第二次堵漏成功)
A-3	栖霞组	1 295	承压堵漏	是
A-4	栖霞组	2 087	承压堵漏	是
A-5	梁山组	1 281	承压堵漏	是
A-6	茅口组	1 010	承压堵漏	是

现场试验井承压堵漏施工后，在后续起下钻及提高钻井液密度等工况下堵漏施工井段均未出现复漏现象，表明所优选的堵漏浆体系在漏失裂缝中形成了致密且强度高的封堵层，有效规避了“封门”风险，展现出良好的封堵稳定性和承压能力。

4 结论及展望

1）通过CT扫描真实岩心，对原始灰度图像进行图像处理，随后利用Rhino软件建模构建3D打印模拟岩心。对比传统裂缝模拟方法，3D打印技术可以更加真实地反映出裂缝的真实构造。

2）对比了3D打印模拟岩心与传统钢板缝在正反向承压堵漏实验中的表现。证明3D打印模拟岩心能够更真实地模拟地层裂缝的复杂形态，为承压堵漏配方的优选提供了一种更为科学、准确的堵漏评价新方法。

3）基于3D打印模拟岩心，结合特制的高温高压动态循环堵漏评价装置对堵漏配方进行了系统的室内优化评价。优化后的堵漏配方在现场应用中一次成功率提升至83%，表明其能够提高复杂裂缝性地层的堵漏效果，具备良好的推广价值。

4）目前由于3D打印技术分辨率受限，其并不能充分还原地层岩石的真实纳米孔隙。

参考文献

[1]孙金声，王韧，龙一夫. 我国钻井液技术难题、新进展及发展建议[J]. 钻井液与完井液，2024，41(1)：1-30.
SUN Jinsheng，WANG Ren，LONG Yifu. Challenges，developments，and suggestions for drilling fluid technology in China [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid，2024，41(1)：1-30.

[2]孙金声，杨景斌，白英睿，等. 深层超深层钻井液技术研究进展与展望[J]. 石油勘探与开发，2024，51(4)：889-898.
SUN Jinsheng，YANG Jingbin，BAI Yingrui，et al. Research progress and development of deep and ultra-deep drilling fluid technology[J]. Petroleum Exploration and Development，2024，51(4)：889-898.

[3]罗平亚，王路一，白杨. 深井超深井钻井液技术应用现状及发展展望[J]. 钻采工艺，2024，47(2)：10-18.
LUO Pingya，WANG Luyi，BAI Yang. A review of technical status and development expectation of drilling fluids for deep and ultra-deep wells[J]. Drilling & Production Technology，2024，47(2)：10-18.

[4]孙金声，蒋官澄，贺垠博，等. 油基钻井液面临的技术难题与挑战[J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2023，47(5)：76-89.
SUN Jinsheng，JIANG Guancheng，HE Yinbo，et al. Technical difficulties and challenges faced by oil-based drilling fluid [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)，2023，47(5)：76-89.

[5]孙金声，杨景斌，吕开河，等. 深层超深层钻井技术研究现状与展望[J]. 新疆石油天然气，2025，21(2)：1-14.
SUN Jinsheng，YANG Jingbin，LV Kaihe，et al. Research status and prospects of deep and ultra-deep drilling technology [J]. Xinjiang Oil & Gas，2025，21(2)：1-14.

[6]DUAN Y，DONG X，HAO Y，et al. A novel evaluation technique for mudcake of drilling fluid based on the nuclear magnetic resonance method[J]. SPE Journal，2024，29(4)：1765-1785.

[7]余朝毅. 四川盆地深层页岩气钻井关键技术新进展及发展展望[J]. 天然气工业，2024，44(3)：1-9.
SHE Chaoyi. New progress and development prospect of key technologies for drilling of deep shale gas wells in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry，2024，44(3)：1-9.

[8]YANG M，LI M C，WU Q，et al. Experimental study of the impact of filter cakes on the evaluation of LCMs for improved lost circulation preventive treatments[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering，2020，191：107152.

[9]ZHANG J，FENG Y，HE B，et al. Wellbore strengthening for addressing lost circulation in fractured formations：A comprehensive review[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2024，58(1)：1-32.

[10]范翔宇，蒙承，张千贵，等. 超深地层井壁失稳理论与控制技术研究进展[J]. 天然气工业，2024，44(1)：159-176.
FAN Xiangyu，MENG Cheng，ZHANG Qiangui，et al. Research progress in the evaluation theory and control technology of wellbore instability in ultra-deep strata [J]. Natural Gas Industry，2024，44(1)：159-176.

[11]ZHANG J Y，KANG Y L，DENG Y H，et al. An experimental evaluation method of drilling fluid lost control efficiency considering loss types[J]. Frontiers in Physics，2023，11：1-14.

[12]杨兆中，李扬，饶政，等. 注入水水质对SN-1井区油藏采收率影响研究[J]. 油气藏评价与开发，2020，10(6)：103-109、114.
YANG Zhaozhong，LI Yang，RAO Zheng，et al. Impact of injected water quality on oil recovery ratio of reservoir in Wellblock-SN-1 [J]. Reservoir Evaluation and Development，2020，10(6)：103-109，114.

[13]刘锋报，尹达，魏天星，等.塔里木山前盐底恶性漏失沉降堵漏技术[J].新疆石油天然气，2024，20(4)：1-7.
LIU Fengbao，YIN Da，WEI Tianxing，et al. Settling plugging Technology for severe lost circulation at the salt bottom of Tarim piedmont zone[J]. Xinjiang Oil & Gas，2024，20(4)：1-7.

[14]LIU B，WANG Y，JIANG J，et al. Application of three-dimensional printing technology to the manufacture of petroleum drill bits[J]. Processes，2023，11(9)：2706.

[15]刘八仙. 3D打印技术在石油钻头中的应用探究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版)，2023，44(6)：47-52.
LIU Baxian. Application of three-dimensional printing technology to manufacture of petroleum drill bits[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Sciences Edition)，2023，44(6)：47-52.

[16]LI X，LI W B，REZAEI F，et al. Catalytic cracking of n-hexane for producing light olefins on 3D-printed monoliths of MFI and FAU zeolites[J]. Chemical Engineering Journal，2018，333：545-553.

[17]刘永贵，宋涛，徐用军. 高温深井微裂缝封堵评价方法及其应用——以松辽盆地徐深气田为例[J]. 天然气工业，2016，36(2)：78-83.
LIU Yonggui，SONG Tao，XU Yongjun. A new evaluation

method for micro-fracture plugging in high-temperature deep wells and its application: A case study of the Xushen Gas Field in the Songliao Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016,36(2):78-83.

[18]SAVARI S, WHITFILL D L, WALKER J. Lost circulation management in naturally fractured reservoirs[C]//SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, January 2016:SPE-184706-MS.

[19]杨决算. 裂缝性泥页岩地层封堵材料优选方法研究与应用[J]. 西部探矿工程,2019,31(4):103-106.
YANG Juesuan. Research and application of optimization method of fractured shale formation plugging materials[J]. West-China Exploration Engineering, 2019, 31(4): 103-106.

[20]闫晶. 封堵评价用微裂缝岩心的模拟及模拟封堵实验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(5):18-21.
YAN Jing. Simulation of core with micro cracks used in plugging evaluation and plugging simulation experiment[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(5):18-21.

[21]程鹏至,易偲文,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 Siwen, 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.

[22]MAGZOUB M, SALEHI S, LI G Q, et al. Loss circulation prevention in geothermal drilling by shape memory polymer[J]. Geothermics,2021,89:101943.

[23]游娜,樊春明,段树军,等. 增材制造技术在井下工具中应用及问题分析[J]. 石油矿场机械,2021,50(1):62-68.
YOU Na, FAN Chunming, DUAN Shujun, et al. Application and problem analysis of additive manufacturing in downhole tools[J]. Oil Field Equipment,2021,50(1):62-68.

[24]张学军,唐思熠,肇恒跃,等. 3D打印技术研究现状和关键技术[J]. 材料工程,2016,44(2):122-128.
ZHANG Xuejun, TANG Siyi, ZHAO Hengyue, et al. Research status and key technologies of 3D printing[J]. Journal of Materials Engineering,2016,44(2):122-128.

[25]刘鑫,余翔,张奔. 中美3D打印技术专利比较与产业发展对策研究[J]. 情报杂志,2015,34(5):41-46.
LIU Xin, YU Xiang, ZHANG Ben. China-US 3D printing patent comparison study and implications for Chinese industry development[J]. Journal of Intelligence,2015,34(5):41-46.

[26]李宜强,何书梅,赵子豪,等. 基于剩余油动用规律的高含水油藏水驱扩大波及体积方式实验[J]. 石油学报,2023,44(3):500-509.
LI Yiqiang, HE Shumei, ZHAO Zihao, et al. Experiment on enlargement of swept volume by water flooding in high water cut reservoir based on the remaining oil displacement law [J]. Acta Petrolei Sinica,2023,44(3):500-509.

[27]肖雯. 基于三维重构技术的裂缝扩展规律研究[J]. 复杂油气藏,2016,9(4):72-75.
XIAO Wen. Study on propagation law of fractures based on 3D reconstruction technique[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs,2016,9(4):72-75.

[28]BEERES M, GRAF T, HERRMANN E, et al. Reduction of image noise in high-pitch CT imaging of the abdomen using a first generation iterative reconstruction algorithm-a phantom study[J]. International Journal of Diagnostic Imaging, 2015,2(1):29.

[29]NING G. Two-dimensional Otsu multi-threshold image segmentation based on hybrid whale optimization algorithm[J]. Multimedia Tools and Applications, 2022, 82(10): 15007-15026.

[30]王涛,叶艳,朱金智,等. 基于3D扫描打印技术的裂缝性堵漏模拟新方法[J]. 钻井液与完井液,2023,40(5):571-577.
WANG Tao, YE Yan, ZHU Jinzhi, et al. Research on a new method for simulation of fractured plugging based on 3D scanning and printing technology [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid,2023,40(5):571-577.

[31]LEI Y, CHEN X, LI Z, et al. A new process for customized patient-specific aortic stent graft using 3D printing technique [J]. Medical Engineering and Physics,2020,77:80-87.

[32]杨彦安,李鹤,穆保霞. 陶瓷3D打印技术研究进展[J]. 硅酸盐通报,2024,43(5):1600-1614.
YANG Yanan, LI He, MU Baoxia. Research progress of ceramic 3D printing technology[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2024,43(5):1600-1614.

[33]张靓,冯辉霞,徐海东,等. 新型碳纳米管复合吸波材料研究进展[J]. 化工新型材料,2022,50(8)7-11、18.
ZHANG Liang, FENG Huixia, XU Haidong, et al. Research progress on new type CNTs composite absorbing material[J]. New Chemical Materials,2022,50(8):7-11,18.

[34]魏瑛康,李嘉旭,王岩,等. 增材制造技术在金刚石工具制备中的应用研究进展[J]. 粉末冶金技术,2024,42(6):652-664、673.
WEI Yingkang, LI Jiaxu, WANG Yan, et al. Research progress on additive manufacturing technology in diamond tool preparation [J]. Powder Metallurgy Technology, 2024, 42(6):652-664,673.

[35]MUSLIMIN M, SYIFA N C S, NUGROHO S E, et al. Utilization of recycled LDPE (r-LDPE) plastic and galangal stem fiber for the development of 3D printing filaments[J]. Materials Science Forum,2024,11(34):125-134.

[36]KYRATSIS V, TZOTZIS A, KORLOS A, et al. Investigation of the fabrication parameters' Influence on the tensile strength of 3D-printed copper-filled metal composite using design of experiments[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing,2024,8(6):278-278.

[37]朱明明,孙欢,孙艳,等. 遇水反应型堵漏工作液及配套工具研究与应用[J]. 石油钻探技术,2023,51(4):1-10.
ZHU Mingming, SUN Huan, SUN Yan, et al. Research and application of water reaction type plugging fluid and supporting tools[J]. Petroleum Drilling Techniques,2023,51(4):1-10.

[38]周忠亚. 复兴地区页岩气井油基钻井液井壁稳定和防漏堵漏技术[J]. 钻井液与完井液,2024,41(3):305-317.
ZHOU Zhongya. Use oil based drilling fluid to stabilize borehole wall and prevent and control mud losses in Fuxing Area [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid,2024,41(3):305-317.

(修改回稿日期:2025-12-15　编辑:何园)