

引用格式:许成元,阳洋,蒲时,等.基于高效架桥和致密填充的深层裂缝性储层堵漏配方设计方法研究[J].油气藏评价与开发,2022,12(3):534-544.

XU Chengyuan, YANG Yang, PU Shi, et al. Design method of plugging formula for deep naturally fractured reservoir based on efficient bridging and compact filling[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(3): 534-544.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.03.016

# 基于高效架桥和致密填充的深层裂缝性储层堵漏配方设计方法研究

许成元<sup>1</sup>, 阳洋<sup>1</sup>, 蒲时<sup>2</sup>, 康毅力<sup>1</sup>, 李大奇<sup>2</sup>, 张杜杰<sup>2</sup>, 闫霄鹏<sup>1</sup>, 杨斌<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610500; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 102206)

**摘要:** 钻井液漏失是制约深层超深层钻井的重要工程技术难题, 储层段井漏是钻完井阶段最严重的储层损害方式。利用桥接堵漏材料对裂缝漏失通道进行封堵, 是储层段钻井液漏失控制的主要方式。但是, 桥接堵漏配方设计常采用经验或者半经验的方法, 导致一次堵漏成功率低, 堵漏效果差。通过 CFD-DEM 模拟(一种典型的基于欧拉-拉格朗日参考系的离散模拟方法), 明确了架桥滞留、堆积填充、承压封堵是裂缝封堵层形成过程中的 3 个关键环节, 考虑堵漏材料的高效架桥和致密填充, 基于“绝对架桥加量”概念和紧密堆积理论, 提出了承压堵漏实验配方设计新方法。采用“绝对架桥加量”为优化参数, 确定配方中架桥材料加量; 利用“补差法”改进了传统紧密堆积理论, 克服了其对粒度分布不连续或重叠分布的各级填充材料适应性差的缺陷, 确定堵漏配方中填充材料加量。室内实验和现场试验结果表明, 深层裂缝性储层堵漏配方设计方法, 可实现深层裂缝性储层堵漏配方快速高效设计, 有效保证深层裂缝性储层堵漏配方封堵裂缝效果, 有效减少堵漏配方中材料总用量, 节约材料成本。提出的方法为深层裂缝性储层堵漏配方设计提供了新思路 and 理论依据。

**关键词:** 深层裂缝性储层; 井漏; 堵漏配方; 架桥与填充; 绝对架桥加量; 紧密堆积理论

中图分类号: TE357

文献标识码: A

## Design method of plugging formula for deep naturally fractured reservoir based on efficient bridging and compact filling

XU Chengyuan<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>1</sup>, PU Shi<sup>2</sup>, KANG Yili<sup>1</sup>, LI Daqi<sup>2</sup>, ZHANG Dujie<sup>2</sup>, YAN Xiaopeng<sup>1</sup>, YANG Bin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Drilling fluid loss is an important engineering and technical problem that restricts deep and ultra-deep drilling, and the well loss in reservoir interval is the most serious reservoir damage mode in drilling and completion stage. It is the main way to control lost circulation to use the bridging plugging material to block the fracture leakage channel. However, the design of bridge plugging formula often adopts the empirical or semi-empirical method, leading to low plugging success rate and poor plugging effect. By the CFD-DEM simulation, it is clear that the bridge retention, accumulation filling and pressurized plugging are three key links in the formation process of fracture sealing layer. Considering the efficient bridging and compact filling of the plugging material, and based on the concept of “absolute bridge addition” and the theory of tight packing, a new experimental formula design method for pressurized plugging is proposed. “Absolute bridging amount” is used as a optimization parameter to determine the bridging material amount in the formula. The traditional compact packing theory is improved by the “complementation method”,

收稿日期: 2021-07-08。

**第一作者简介:** 许成元(1988—), 男, 博士, 博士生导师, 副教授。主要从事储层保护理论与技术、工作液漏失控制、颗粒物质力学与颗粒流领域的科研与教学工作。地址: 四川省成都市新都区新都大道 8 号, 邮政编码: 610500。E-mail: chance\_xcy@163.com

**基金项目:** 国家自然科学基金项目“基于逾渗和固液两相流理论的裂缝性储层工作液漏失损害预测与控制”(51604236); 国家自然科学基金项目“海相深层油气富集机理与关键工程技术基础研究”(U19B6003); 四川省科技计划项目“保护储层并改善优势天然裂缝导流能力的钻井预撑裂缝堵漏基础研究”(2018JY0436); 非常规油气层保护四川省青年科技创新研究团队项目“保护储层并改善优势天然裂缝导流能力的钻井预撑裂缝堵漏基础研究”(2021JDTD0017)。

which overcomes its defects of poor adaptability to the filling materials with discontinuous or overlapping particle size distribution, and determines the filling material addition in the plugging formula. The results of laboratory and field experiments show that the proposed method can realize the rapid and efficient design of the formula for deep naturally fractured reservoir, effectively ensure the sealing effect of the formula for deep naturally fractured reservoir and reduce the total amount of materials in the formula and save the material cost. The proposed method provides a new idea and theoretical basis for the design of plugging formula for deep naturally fractured reservoir.

**Keywords:** deep naturally fractured reservoir; lost circulation; plugging formula; bridging and filling; absolute bridge addition; compact packing theory

裂缝性储层工作液漏失控制是石油与天然气工程领域的热点和难点问题<sup>[1-3]</sup>。井漏不仅会消耗大量工作液和堵漏材料,直接造成重大经济损失,而且会增加非生产时间,延长钻井周期,影响勘探开发进程,甚至还会诱发卡钻、井塌、井喷等事故。储层段漏失则严重妨碍油气及时发现,大幅降低油气产量<sup>[4-5]</sup>。如何有效封堵储层裂缝,避免漏失导致的储层损害和井下事故,是亟待解决的问题。能否有效封堵储层裂缝,堵漏配方是关键。当前堵漏配方设计常采用经验或者半经验的方法,该方法缺乏科学依据,导致出现堵漏材料大量浪费、裂缝封堵质量不理想等问题,堵漏配方设计方法亟待完善。因此,根据储层裂缝特征,设计具有高封堵质量的堵漏配方具有重要意义。

为了达到有效封堵储层裂缝与储层保护的要求,国内外学者在堵漏配方设计与优化方面做了大量研究。堵漏配方优化理论方面,适用于石油工业的理想充填理论(Ideal Packing Theory)在20世纪70年代被提出。ALBERTY<sup>[6]</sup>应用理想充填理论,对堵漏材料粒度进行优选,通过实验验证了“应力笼”方法的准确性。张金波等<sup>[7]</sup>基于理想充填理论,研发了对应的应用软件,并取得了理想的现场应用效果。张世锋等<sup>[8]</sup>基于改进的理想充填理论提出了堵漏颗粒粒度分布设计方法。堵漏材料加量设计研究方面,王书琪等<sup>[9]</sup>提出,当架桥材料含量保持在10%~20%,纤维材料保持在5%~15%,堵漏材料的总含量保持20%~35%时,能够有效封堵裂缝。刘金华等<sup>[10]</sup>通过实验结果发现,采用多种材料协同封堵具有较好的裂缝封堵效果,并且指出堵漏材料中颗粒材料、片状材料、纤维材料和聚合物的最佳配比为5:2:2:1。康毅力等<sup>[11]</sup>针对毫米级宽度裂缝评价了刚性颗粒、弹性粒子以及纤维3种封堵材料协同堵漏效果,并结合实验结果分析了不同材料协同封

堵的机理。许成元等<sup>[12-17]</sup>通过实验及模拟的手段,发现架桥材料加量与材料粒径缝宽比、裂缝摩擦系数之间的定量关系,并提出“临界架桥加量”与“绝对架桥加量”概念。

通过对目前国内外堵漏配方优化理论、堵漏配方加量优化原则等研究进展的调研总结发现,当前对堵漏配方设计方法的研究,仍存在以下不足:①由于裂缝性储层堵漏机理不明确,使得当前堵漏配方优化多依赖经验,科学指导性不强<sup>[18]</sup>;②配方设计方法对粒度分布不连续或重叠分布的各级填充材料适应性差;③缺少有效的堵漏材料加量的确定方法(表1)。

为解决上述问题,本研究取得了以下进展:①基于CFD-DEM裂缝封堵层结构形成模拟结果,将裂缝封堵分为架桥滞留、堆积填充、承压封堵3个关键阶段,进一步明确了裂缝性储层堵漏机理。在明确堵漏机理的基础上,基于“绝对架桥加量”概念和改进的紧密堆积理论,分别确定了堵漏配方中的架桥材料与填充材料加量,提出了基于高效架桥和致密填充的裂缝性储层堵漏配方设计方法。②通过上述方法设计的堵漏配方,相比于利用经验或者半经验确定的配方,具有更高的承压能力、更低的累计漏失量及更少的材料总用量。③改进了紧密堆积理论,提出了填充材料加量设计新方法—补差法。综上,提出基于高效架桥和致密填充的配方设计方法,为深层裂缝性储层堵漏配方设计提供了新思路和理论依据。

## 1 裂缝性储层堵漏配方设计方法

### 1.1 裂缝封堵过程模拟与堵漏配方设计思路

耦合计算流体力学与离散元方法的CFD-DEM方法是模拟裂缝封堵层结构形成过程的有效手段。

表1 堵漏配方设计理论与方法<sup>[7-17]</sup>  
Table 1 Design theory and method of plugging formula<sup>[7-17]</sup>

理论方法	研究内容	技术要点	不足
配方设计理论	理想充填理论及对理论的改进	基于理想充填理论,优选材料粒度,提高封堵层稳定性	材料的粒度分布需连续,对粒度分布不连续或重叠分布的各级填充材料适应性差
材料加量设计方法	架桥、纤维材料加量范围	从形态对进行分类,并给出每种材料加量的大致范围	仅给出加量范围,未明确各种材料的具体加量值
	颗粒材料、片状材料、纤维材料和聚合物加量比	确定不同形态材料加量的比值	仅给出各种材料加量比,未明确各种材料加量的具体值
	毫米级宽度裂缝封堵材料协同堵漏效果	评价刚性、弹性以及纤维材料协同堵漏效果及协同封堵的机理	未明确3种封堵材料协同堵漏时的各自加量
	架桥材料加量确定原则	确定有概率架桥的最低架桥浓度及绝对发生架桥的最低架桥浓度	考虑架桥材料的加量,未考虑填充材料的相应加量

根据常见的裂缝性储层裂缝几何特征,选用楔形裂缝作为裂缝模型的几何形态,裂缝入口和出口宽度分别设定为3 mm和1 mm,裂缝长度设定为50 mm,接近室内实验常用裂缝模块尺寸。CFD-DEM模拟中,堵漏材料相关参数依据裂缝性储层最常用的方解石类堵漏材料进行设置,堵漏材料摩擦系数采用COF-1型堵漏材料表面摩擦系数测量装置测得<sup>[19]</sup>,堵漏材料与钻井液基本参数见表2。模拟结果表明,架桥滞留、堆积填充、承压封堵是裂缝封堵层形成的3个关键环节(图1)。

堵漏浆固液两相沿缝长方向运移,初始阶段颗粒浓度较低,堵漏材料运移通过裂缝尖端,未能形成架桥。随着堵漏材料不断进入裂缝,裂缝内局部颗粒浓度升高,颗粒—颗粒、颗粒—裂缝间相互作用增加,与裂缝宽度匹配的堵漏材料发生架桥;后续堵漏材料在形成的架桥后不断堆积与填充,逐渐演变为稳定的封堵层,裂缝内沿缝长方向形成压力梯度。封堵层至缝尖处为低压区,封堵层至缝口处为高压区,封堵层起到了承压的作用。

认识到架桥滞留、堆积填充、承压封堵在裂缝封堵层形成过程中的关键作用。考虑堵漏材料在裂缝中的架桥滞留和堆积填充过程,基于“绝对架桥加量”概念和紧密堆积理论,设计堵漏配方中架桥材料与填充材料加量,形成完整的堵漏配方,提出堵漏配方设计新方法。以“绝对架桥加量”为优化参数,设计配方中架桥材料加量;紧密堆积理论指导填充材料加量设计,但传统紧密堆积理论对粒度分布不连续或重叠分布的各级填充材料适应性差。提出“补差法”改进传统紧密堆积理论,设计堵漏配方中填充

表2 堵漏材料与钻井液基本参数

Table 2 Basic parameters of plugging material and drilling fluid

性质参数	赋值
颗粒密度(kg/m <sup>3</sup> )	2 700
颗粒等效直径与裂缝出口宽度比	0.4~1.0
颗粒入射速度(m/s)	0.5
流体初始速度(m/s)	0.5
动力黏度(mPa·s)	50
流体密度(kg/m <sup>3</sup> )	1 700
回弹系数	0.5
杨氏模量(Pa)	10 <sup>9</sup>
泊松比	0.3
摩擦系数	0.8

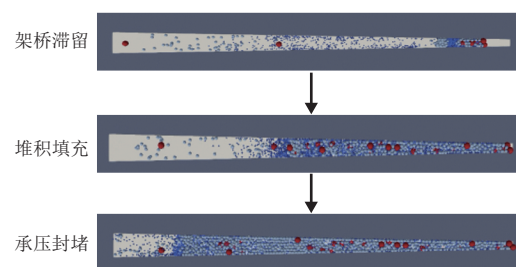


图1 裂缝封堵过程CFD-DEM模拟结果

Fig. 1 CFD-DEM simulation results of fracture sealing process

材料加量。利用设计的配方开展室内承压堵漏实验,对比设计前后堵漏配方承压能力和累计漏失量。

## 1.2 考虑绝对架桥的架桥材料加量确定方法

考虑到架桥滞留过程在裂缝封堵层形成过程中

的重要作用,以及对形成的封堵层强度、稳定性的影响,提高架桥材料在裂缝中的架桥概率很有必要。因此,优化设计架桥材料在堵漏配方中的加量具有重要意义。架桥材料加量确定的方法可参考许成元等<sup>[12]</sup>提出的“临界架桥加量”与“绝对架桥加量”概念:当材料加量较低时,无法发生架桥,即架桥概率为零;当材料加量增加到某一临界值后,开始有一定概率发生架桥,此加量即为临界架桥加量;随着材料加量继续增加,架桥概率也逐渐上升,当架桥概率达到100%时,对应的加量即为绝对架桥加量;当材料加量高于绝对架桥加量时,裂缝内一定发生架桥,即架桥概率为100%。参考上述理论,通过“绝对架桥加量”概念设计配方中架桥材料加量,架桥概率随架桥材料加量变化关系如图2所示,表明架桥概率与架桥材料加量及材料粒径与裂缝宽度比值有关。图2中材料粒径指材料的 $D_{90}$ 值,裂缝宽度指裂缝入口宽度值。此处加量均为体积百分比。

为了便于实验过程中材料称取,根据式(1)将体积百分比换算为堵漏配方材料加量 $C_{am}$ (质量体积比):

$$C_{am} = \frac{\rho_p C_{av}}{1 - C_{av}} \quad (1)$$

式中: $C_{am}$ 为用材料质量与原浆体积之比表示的绝对架桥加量,g/mL; $C_{av}$ 为用材料体积与堵漏浆体积之比表示的绝对架桥加量,%; $\rho_p$ 为架桥材料密度,g/mL。

通过“绝对架桥加量”概念确定的架桥材料加量,其数值能得到该研究的理论支撑;此外,该加量在能有效架桥的基础上,能保证更多的填充材料进入裂缝内部形成有效的封堵层,封堵层结构的稳定性以及致密性将得到理论的保障。

### 1.3 考虑紧密堆积的填充材料加量确定方法

#### 1.3.1 连续粒度分布的紧密堆积理论

堆积填充过程是裂缝封堵层形成过程中的关键环节,其本质为堵漏材料颗粒在裂缝内的堆积填充,颗粒的高效堆积、致密填充是裂缝封堵的一大追求。因此,合理设计堵漏配方中填充材料的加量对裂缝封堵层的形成、封堵层结构致密性具有至关重要的作用。为了达到最大的颗粒堆积效率,国内外学者做了大量的研究,并提出了一系列的颗粒紧密堆积理论和模型,并在水泥浆、耐火材料、陶瓷、公路沥青

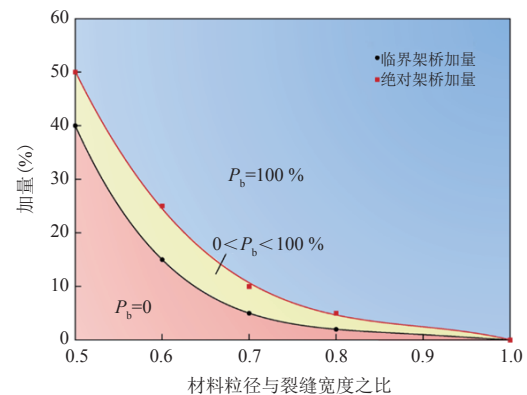
等领域得到广泛应用<sup>[20-23]</sup>。目前最为典型的颗粒紧密堆积模型之一为Dinger-Funk模型。该模型的理论基础是:体系中最大颗粒的间隙恰能为次大的第二粒级所充满,第二粒级的间隙又恰能为第三粒级所充满,并以此类推,便可取得最高的堆积效率<sup>[24]</sup>。DINGER和FUNK给出了颗粒在紧密堆状态下的数学表达式:

$$\frac{C_D}{100} = \frac{\left(\frac{D}{D_L}\right)^\eta - \left(\frac{D_S}{D_L}\right)^\eta}{\left(\frac{D_L}{D_L}\right)^\eta - \left(\frac{D_S}{D_L}\right)^\eta} = \frac{D_i^\eta - D_S^\eta}{D_L^\eta - D_S^\eta} \quad (2)$$

式中: $C_D$ 为小于 $D_i$ 的颗粒累积分数,%; $D_i$ 为颗粒的粒径,mm; $D_L$ 为颗粒的最大粒径,mm; $D_S$ 为颗粒的最小粒径,mm; $\eta$ 为分布模数。

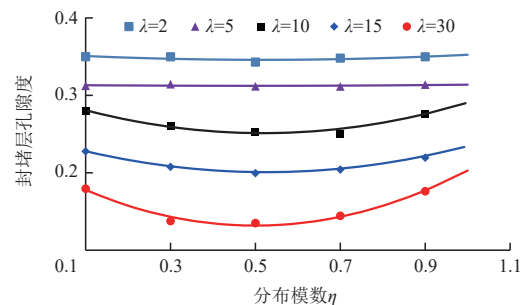
#### 1.3.2 改进的紧密堆积理论

关于式(2)中分布模数 $\eta$ 的取值,国外学者



注: $P_b$ 为材料架桥概率。

图2 架桥材料加量确定图(摩擦系数为0.8)<sup>[12]</sup>  
Fig. 2 Bridge material quantity determination plate (The coefficient of friction is 0.8)<sup>[12]</sup>



注:摩擦系数为0.8。

图3 不同缝宽粒径比条件下封堵层孔隙度与分布模数关系

Fig. 3 Relation between porosity of sealing layers and distribution modulus of different seam width to particle size ratio ( $\lambda$ )

OQUENDO-PATIÑO等<sup>[25]</sup>对此做了较为深入的研究:考虑材料粒径与裂缝宽度比值条件下,研究 $C_D$ 值与分布模数 $\eta$ 的关系,笔者基于此研究结果,探索了材料堆积密度与分布模数 $\eta$ 的关系,结果见图3。图3中 $\eta$ 为分布模数, $\lambda$ 为裂缝宽度与材料粒径之比,封堵层孔隙度表征 $C_D$ 值,封堵层孔隙度越低,材料堆积越紧密, $C_D$ 值越大。本实验中,在满足最大堆积效率的前提下,并考虑裂缝封堵层形成过程中大颗粒材料对架桥效率的影响,取分布模数 $\eta=0.5$ 。

利用式(2)紧密堆积理论模型计算出堵漏材料的具体粒径分布范围;将堵漏材料在区间内具体粒径分布范围相减,则为材料的体积占比:

$$\varphi = \frac{(D_{i90}^\eta - D_S^\eta) - (D_{i10}^\eta - D_S^\eta)}{D_L^\eta - D_S^\eta} \quad (3)$$

式中: $\varphi$ 为材料体积占比,%; $D_{i90}$ 为区间内最大粒径,mm; $D_{i10}$ 为区间内最小粒径,mm。

再确定最大粒径材料(即架桥材料)的质量体积比,从而确定其余材料(即填充材料)的质量体积比。

当堵漏材料密度相同,堵漏材料质量体积比为:

$$C_i = \frac{C_m \varphi_i}{\varphi_m} \quad (4)$$

式中: $C_i$ 为材料质量体积占比,%; $C_m$ 为最大粒径材料质量占比,%; $\varphi_i$ 为材料 $i$ 的体积占比,%; $\varphi_m$ 为最大粒径材料的体积占比,%。

当堵漏材料密度不同时,堵漏材料质量体积比为:

$$C_i = \frac{\rho_i C_m \varphi_i}{\rho_m \varphi_m} \quad (5)$$

式中: $\rho_i$ 为材料 $i$ 的密度, $g/cm^3$ ; $\rho_m$ 为材料 $m$ 的密度, $g/cm^3$ 。

需要指出的是,紧密堆积理论适用于体系中各材料粒度分布连续的情况,当体系中各材料粒度分布不连续或重叠分布,该方法有一定局限。考虑到绝大多数情况下堵漏材料粒度分布不连续、重叠,在利用紧密堆积理论对配方填充材料加量设计前,需对堵漏材料粒度分布进行优化,使体系中所有材料粒度连续分布,因此,提出“补差法”以解决该问题。

补差法:当体系中各材料粒度分布不连续、重叠,通过适当放大或缩小体系中部分材料粒径边界值,形成新的粒度分布,使整个体系中各材料粒度分布连续、无重叠。具体方法如下:

①假设堵漏浆配方中存在 $n$ 种组分的堵漏材料,各组粒径分布范围分别为: $[x_1, x_2], [x_3, x_4], [x_5, x_6],$

$\dots, [x_{n-1}, x_n]$ 。其中, $x_1$ 和 $x_n$ 分别为体系中最大颗粒粒径和最小颗粒粒径。

②采用“补差法”将各组划分分为连续分布体系: $\left[ x_1, \frac{x_2 + x_3}{2} \right], \left[ \frac{x_2 + x_3}{2}, \frac{x_4 + x_5}{2} \right], \left[ \frac{x_4 + x_5}{2}, \frac{x_6 + x_7}{2} \right], \dots, \left[ \frac{x_{n-2} + x_{n-1}}{2}, x_n \right]$ 。

“补差法”实际上是通过适当放大或缩小体系中部分材料粒径边界值,将原本存在离散分布或者交叉分布的颗粒变成连续分布体系。

综上,以紧密堆积理论及Dinger-Funk模型为基础,通过确定该理论模型中分布模数 $\eta$ 的值、优化体系中所有材料的粒度分布,可实现对紧密堆积理论的改进。

改进的紧密堆积理论一方面优化了堵漏配方中各级材料的粒度分布,另一方面指导堵漏配方中填充材料的加量,该加量符合颗粒的紧密堆积模型,堆积率高,空隙率低。配方中材料进入裂缝内部以后,一定程度上按照紧密堆积模型进行堆积,形成的裂缝封堵层,其结构致密性将得到保障。

#### 1.4 裂缝性漏失堵漏配方设计实例

选取不同粒径的GYD及LCC100-8(7~10目)、SDL、BYD、NTS-M(细)等为实验所用堵漏材料。粒度分布是堵漏材料关键几何参数,决定堵漏材料作用原理与堵漏效果,是堵漏配方设计与优选的基础;堵漏材料密度在配方设计时对材料加量起决定作用。对实验所用材料粒度及密度进行分析,材料种类、粒度及密度分析结果如表3所示。材料粒度分布为 $D_{10}-D_{90}$ 。

将表3的7种材料组合为A、B两个体系。体系A包括:GYD(中)、GYD(细)、SDL、BYD四种材料,其中GYD(中)为架桥材料,其余材料为填充材料;体系B包括:GYD(粗)、LCC100-8(7~10目)、GYD(中)、NTS-M(细)、GYD(细)、SDL,其中GYD(粗)为架桥材料,其余材料为填充材料。体系A匹配的裂缝模块为入口端3 mm、出口端1 mm的楔形模块,体系B匹配的裂缝模块为入口端5 mm、出口端3 mm的楔形模块。通过体系A、B,设计出2种不同的堵漏配方。

##### 1.4.1 架桥材料加量设计

据图2,结合表3中材料粒度、密度参数及裂缝

表3 堵漏材料粒度及密度分析结果  
Table 3 Particle size and density analysis results of plugging material

序号	材料	粒度 $D_{10}$ (mm)	粒度 $D_{50}$ (mm)	粒度 $D_{90}$ (mm)	密度( $g/cm^3$ )
1	GYD(粗)	3.39	5.25	6.84	1.05
2	GYD(中)	2.21	3.08	4.21	1.05
3	GYD(细)	1.19	2.06	2.72	1.05
4	SDL	0.02	0.09	0.16	1.10
5	LCC100-8(7~10目)	3.36	3.71	4.36	2.70
6	BYD	0.03	0.05	0.19	3.00
7	NTS-M(细)	1.78	2.29	3.31	1.42

模块宽度参数,可确定体系A中架桥材料GYD(中)绝对架桥加量为1%,体系B中架桥材料GYD(粗)绝对架桥加量为1%,此加量为通过式(1)换算之后的质量体积比。加量设计结果见表4。

#### 1.4.2 填充材料加量设计

首先通过“补差法”优化两体系中所有材料的粒度分布,体系A、B优化结果分别见表5、表6。

之后通过改进的紧密堆积理论设计体系A、B中填充材料的加量,对于体系A:优化后的材料粒度分布情况见表5,通过式(3)计算BYD材料在体系A中的体积百分比。

将  $D_{i10}=0.001$  及  $D_{i90}=0.11$ 、 $D_s=0.001$ 、 $D_L=4.21$  代入式(3),其中分布模数  $\eta$  取0.5,可得其体积百分比  $\varphi=14.9\%$ 。同理可得SDL、GYD(细)、GYD(中)在体系A中的体积百分比分别为24.4%、37.0%、23.7%。

由于体系A中各材料密度不同,最后通过式(5)计算BYD材料在体系A中的质量体积比。

将  $\varphi=14.9\%$  代入式(5),结合表3中BYD、体系A中最大粒径材料GYD(中)的密度分别为  $\rho_i=3.00 g/cm^3$ ,  $\rho_m=1.05 g/cm^3$ ,以及由1.3.1节中确定的GYD(中)质量体积比为1%,上面确定的体系A中最大粒径材料GYD(中)体积百分比为23.7%,可得BYD材料在体系A中的质量体积比  $C_i=1.8\%$ 。同理可得体系A中其他填充材料SDL、GYD(细)在体系A中的质量体积比分别为1.1%、1.5%。故体系A经“绝对架桥加量”概念、改进的紧密堆积理论设计出的配方如表5所示。

同理,体系B经“绝对架桥加量”概念、改进的紧密堆积理论设计出的配方见表6。

表4 两体系架桥材料加量设计结果  
Table 4 Design results of material loading for two systems

体系编号	架桥材料	$D_{90}$ (mm)	裂缝宽度(mm)	粒径缝宽比	设计加量(%)
A	GYD(中)	4.21	3~1	1.41	1
B	GYD(粗)	6.84	5~3	1.37	1

注:设计加量为通过式(1)换算之后的质量体积比。

表5 根据体系A设计出的堵漏配方  
Table 5 Plugging formula design for system A

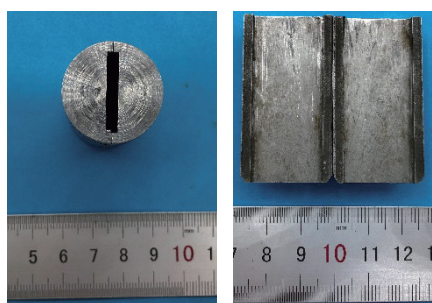
材料	初始粒径范围(mm)	优化粒径范围(mm)	体积百分比(%)	质量体积比(%)
GYD(中)	[2.21, 4.21]	[2.47, 4.21]	23.7	1.0
GYD(细)	[1.19, 2.72]	[0.68, 2.47]	37.0	1.5
SDL	[0.02, 0.16]	[0.11, 0.68]	24.4	1.1
BYD	[0.001, 0.20]	[0.001, 0.11]	14.9	1.8

表6 根据体系B设计出的堵漏配方  
Table 6 Plugging formula design for system B

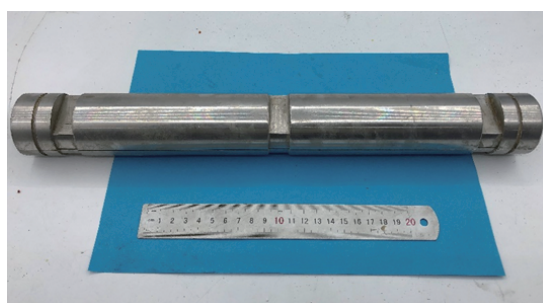
材料	初始粒径范围(mm)	优化粒径范围(mm)	体积百分比(%)	质量体积比(%)
GYD(粗)	[3.39, 6.84]	[3.88, 6.84]	26.2	1.0
LCC100-8(7~10目)	[3.36, 4.36]	[3.79, 3.88]	0.9	0.1
GYD(中)	[2.21, 4.21]	[2.76, 3.79]	11.5	0.4
NTS-M(细)	[1.78, 3.31]	[2.25, 2.76]	6.5	0.3
GYD(细)	[1.19, 2.72]	[0.68, 2.25]	27.3	1.0
SDL	[0.02, 0.16]	[0.02, 0.68]	27.6	1.1

## 2 室内实验

现开展室内承压堵漏实验,从岩心尺度方面对该方法的可行性进行验证。室内实验通过不同规格的裂缝模块进行评价,分别为入口端3 mm、出口端1 mm的柱塞样1(直径25.0 mm,长度50.0 mm),及入口端5 mm、出口端3 mm的柱塞样2(直径38.0 mm,长度380.0 mm),如图4所示。



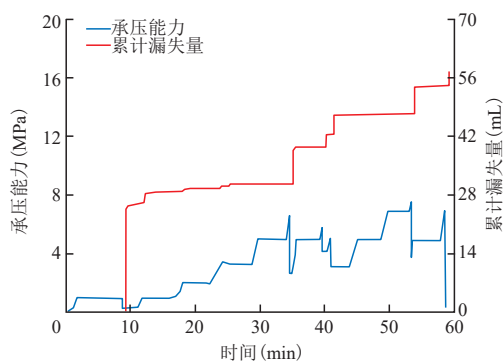
a. 楔形钢质柱塞样1



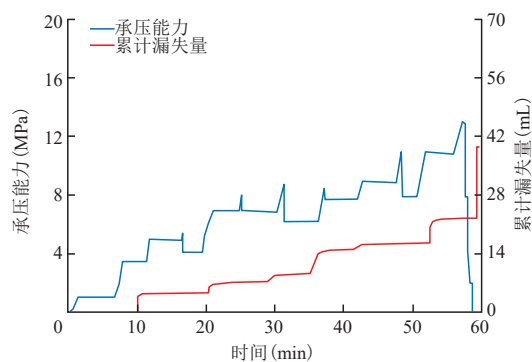
b. 楔形钢质柱塞样2

图4 实验用楔形钢质柱塞

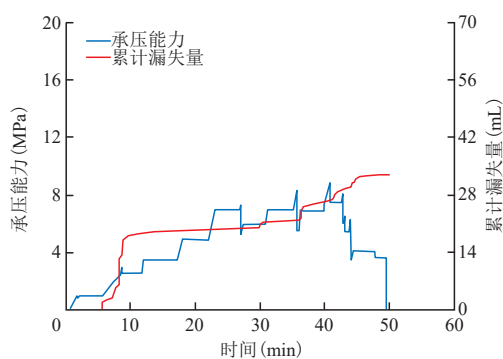
Fig. 4 Wedge steel plunger for experiment



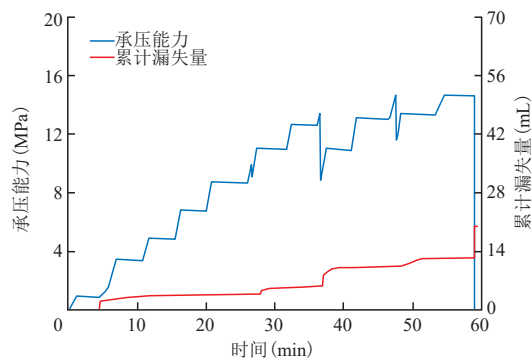
a. 配方#1-1实验结果



b. 配方#1-2实验结果



c. 配方#2-1实验结果



d. 配方#2-2实验结果

图5 室内承压堵漏实验结果

Fig. 5 Indoor pressurized plugging test results

实验配方见表7。其中:配方#1-2、#2-2分别为1.3节中A、B体系经“绝对架桥加量”概念、改进的紧密堆积理论设计的配方;配方#1-1、#2-1分别为包含A、B体系所有材料的室内经验配方。配方#1-1、#1-2以柱塞样1为裂缝模块,以高温高压小岩心裂缝堵漏仪进行评价;配方#2-1、#2-2以柱塞样2为裂缝模块,以高温高压全直径岩心裂缝堵漏仪进行评价,通过累计漏失量与封堵层承压能力表征裂缝承压堵漏效果,实验结果见表7和图5。

表7 室内承压堵漏实验配方及结果  
Table 7 Formula and results of indoor pressurized plugging experiment

编号	配方	材料总加量 (%)	承压能力 (MPa)	累计漏失量 (mL)	裂缝模块	备注
#1-1	基浆+2 %GYD(中)+6 %GYD(细)+3 %SDL+3 %BYD	14.0	6.9	57.7	入口端 3 mm、出口端 1 mm	室内经验配方
#1-2	基浆+1 %GYD(中)+1.5 %GYD(细)+1.1 %SDL+1.8 %BYD	5.4	12.9	39.5	入口端 3 mm、出口端 1 mm	优化设计配方
#2-1	基浆+1.5 %GYD(粗)+1 %LCC100-8(7-10目)+3 %GYD(中)+5 %GYD(细)+3 %NTS-M(细)+3 %SDL	16.5	7.5	33.0	入口端 5 mm、出口端 3 mm	室内经验配方
#2-2	基浆+1 %GYD(粗)+0.1 %LCC100-8(7-10目)+0.4 %GYD(中)+0.3 %GYD(细)+1.0 %NTS-M(细)+1.1 %SDL	3.9	15.0	20.4	入口端 5 mm、出口端 3 mm	优化设计配方

### 3 现场应用

室内承压堵漏实验结果验证了基于高效架桥和致密填充的裂缝性储层堵漏配方设计方法在岩心尺度方面的可行性,现通过在新疆塔里木盆地库车山前某区块A井的实际应用,进一步验证该方法在地层尺度方面的可行性。

新疆塔里木盆地库车山前某区块A井,四开钻进至井深 6 846.9 m 发生漏失(排量 20 L/s,漏速 7.2 m<sup>3</sup>/h,降排量至 8 L/s,漏速 10.8 m<sup>3</sup>/h),后吊灌起钻至套管内(井口液面不可见),配置浓度为 16 %堵漏浆,出口一直未返,需进行专项堵漏作业。对漏失原因进行分析,结果表明,钻遇库姆格列木群组膏泥岩段,岩性以中厚层—厚层状褐色、灰褐色含膏泥岩、膏质泥岩、泥岩为主,夹薄层—中厚层状泥质粉砂岩、膏质细砂岩,地层裂缝、微裂缝发育,地层承压能力低,在高激动压力下容易发生压裂性漏失。以高承压桥堵材料设计室内堵漏配方#A-1:基浆+4 %NTS-M(中粗)+3.5 %NTS-S(II型,中粗)+2.5 %NTS-S(I型,粗)+2 %GYD(粗)+3 %GYD(中粗)+2.8 %GYD(细)+8 %GT-MF+0.8 %NT-2(1/8"),使用高温高压多功能水平井损害评价仪进行裂缝封堵层承压能力与累计漏失量测试实验,结果见图6。

由图6可看出,室内配方形成的裂缝封堵层承压能力为 7 MPa,累计漏失量为 35.8 mL。现场应用时通过基于高效架桥和致密填充的裂缝性储层堵漏配方设计方法对室内堵漏配方进行了优化设计,设计后堵漏配方#A-2:基浆+1.5 %NTS-M(中粗)+2 %NTS-S(II型,中粗)+4.4 %NTS-S(I型,粗)+1 %GYD(粗)+1.8 %GYD(中粗)+2.2 %GYD(细)+5.6 %GT-MF+0.7 %NT-2(1/8"),在井深 6 848 m 进行了专项堵

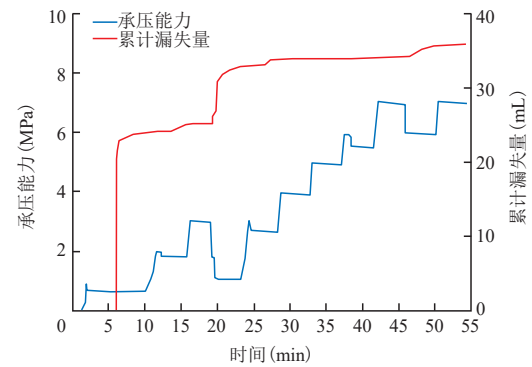


图6 室内配方封堵层承压能力与累计漏失量结果  
Fig. 6 Pressure bearing capacity and cumulative leakage of sealing layer by indoor formula

漏一次,堵漏成功,注堵漏浆循环基本不漏(泵压 23 MPa,漏失当量 24.7 mL),满足下步施工工艺需求。实例分析表明,架桥材料及填充材料的加量严重影响着裂缝封堵层的结构稳定性及承压能力。通过基于高效架桥和致密填充的裂缝性储层堵漏配方设计方法设计出的堵漏配方,可大幅提高地层承压能力和堵漏成功率。

### 4 讨论

基于理论研究和 CFD-DEM 模拟,通过 2 组室内实验和 1 组现场试验验证,提出的裂缝性储层堵漏配方设计方法相比于常规经验法/半经验法,设计的堵漏配方在承压能力、累计漏失量、材料总用量 3 个方面具有明显优势(图7)。

#### 1) 承压能力

封堵层承压能力强弱是裂缝封堵层结构稳定性的综合反映,封堵层承压能力越大,裂缝封堵层抵抗外力的能力越强,结构越稳定。图 7a 表明,相比于常

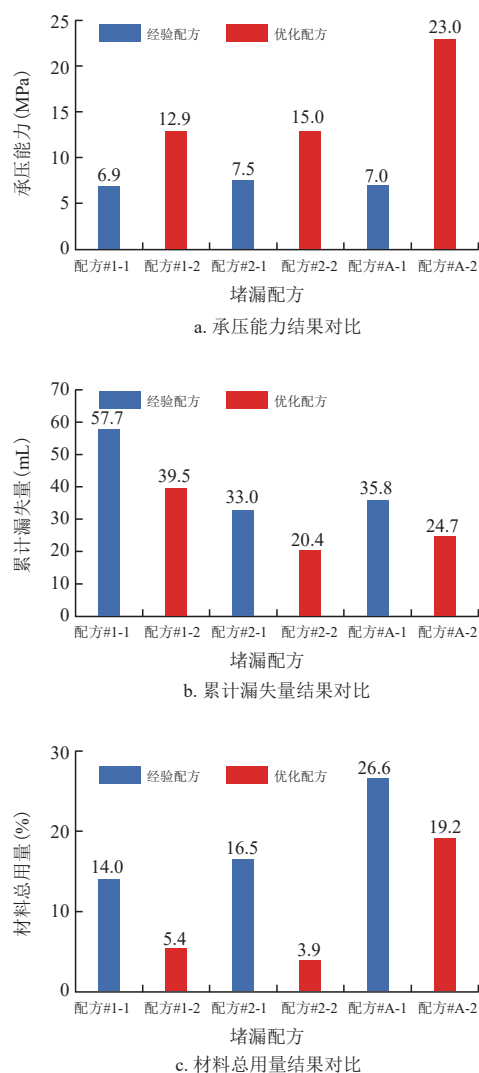


图7 不同配方承压能力、累计漏失量、材料总用量结果对比

Fig. 7 Comparison of pressure bearing capacity, cumulative loss and total material consumption of different formulations

规经验配方,优化配方的承压能力得到极大提升,同比增加101%、100%、229%。一方面,优化配方中架桥材料的加量在能有效架桥的基础上,保证更多的填充材料进入裂缝内部形成有效的封堵层,封堵层结构更加稳定、致密,封堵层承压能力更高,验证了“绝对架桥加量”的可行性。另一方面,架桥材料加量过多可能导致架桥材料在裂缝入口端大量堆积,即使是较小的材料也无法再进入裂缝内部,不能形成有效、致密的封堵层,甚至出现“封门”现象。

## 2) 累计漏失量

累计漏失量指从堵漏材料进入裂缝到裂缝封堵

层被破坏时的钻井液漏失量。累计漏失量的大小是裂缝封堵层结构致密性的综合反映。累计漏失量越小,裂缝封堵层结构越致密。图7b表明,相比于常规经验配方,优化配方的累计漏失量明显降低,累计漏失量同比减少32%、38%、31%。优化配方中,填充材料由改进的紧密堆积理论进行确定,其加量符合颗粒的紧密堆积模型,配方中,材料进入裂缝内部以后,一定程度上按照紧密堆积模型进行堆积,形成的裂缝封堵层堆积率更高,空隙率更小,封堵层结构更加致密,故优化配方累计漏失量更低。

## 3) 材料总用量

材料用量是配方选择时需考虑的重要因素。图7c表明,相比于常规经验配方,优化配方的材料总用量显著减少,同比减少61%、76%、28%。优化配方设计方法中架桥材料的加量参考“绝对架桥加量”概念,即架桥概率达到100%时的最低材料加量。通过该理论确定架桥材料加量,进一步确定填充材料加量,最终形成完整堵漏配方,保障了材料的低用量。

基于高效架桥和致密填充的深层裂缝性储层堵漏配方设计方法设计的配方,实现了快速高效设计裂缝性储层堵漏配方,有效保证了裂缝性储层堵漏配方封堵裂缝的效果,相比于常规经验配方,其材料总用量更低,承压能力更高,累计漏失量更低,裂缝封堵效果更好。

## 5 结论

1) 基于高效架桥和致密填充的裂缝性储层堵漏配方设计方法考虑了堵漏材料在裂缝中的架桥滞留及堆积填充过程,以相关方法理论为支撑,设计配方架桥材料以及填充材料加量,提高了架桥材料在裂缝中的架桥概率,提升了填充材料在裂缝中的堆积效率,从而优化了裂缝封堵质量。

2) 基于高效架桥和致密填充的裂缝性储层堵漏配方设计出的配方,其承压能力更大,累计漏失量更低,材料总用量更少。

3) 改进的紧密堆积理论对不连续的颗粒粒度分布优化效果较好,弥补了紧密堆积理论在该方面的不足。

## 参考文献

- [1] 徐同台,刘玉杰. 钻井工程防漏堵漏技术[M]. 北京:石油工业出版社,1997.  
XU Tongtai, LIU Yujie. Technology of lost circulation

- prevention and control during drilling engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [2] 孙金声,汪世国,张毅,等.水基钻井液成膜技术研究[J].钻井液与完液,2003,20(6):6-10.  
SUN Jinsheng, WANG Shiguo, ZHANG Yi, et al. Study on membrane generating technology of water based drilling fluid [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2003, 20(6): 6-10.
- [3] 孙金声,许成元,康毅力,等.致密/页岩油气储层损害机理与保护技术研究进展及发展建议[J].石油钻探技术,2020,48(4):1-10.  
SUN Jinsheng, XU Chengyuan, KANG Yili, et al. Research progress and development recommendations covering damage mechanisms and protection technologies for tight/shale oil and gas reservoirs[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(4): 1-10.
- [4] 张杜杰,金军斌,陈瑜,等.深部裂缝性致密储层随钻堵漏材料补充时机研究[J].特种油气藏,2020,27(6):158-164.  
ZHANG Dujie, JIN Junbin, CHEN Yu, et al. Study on the supplement timing of leakage stoppage materials while drilling for deep fractured tight reservoirs [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(6): 158-164.
- [5] 刘厚彬,崔帅,孟英峰,等.裂缝性碳酸盐岩微观组构及力学性能研究[J].特种油气藏,2020,27(1):155-161.  
LIU Houbin, CUI Shuai, MENG Yingfeng, et al. Drilling & production engineering micro-mechanical structure and mechanical properties of fractured carbonate rock[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(1): 155-161.
- [6] ALBERTY M W, MCLEAN M R. Fracture gradients in depleted reservoirs—drilling wells in late reservoir life[C]// Paper SPE-67740-SM presented at the SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Netherlands, February 2001.
- [7] 张金波,鄢捷年,赵海燕.优选暂堵剂粒度分布的新方法[J].钻井液与完井液,2004,21(5):4-7.  
ZHANG Jinbo, YAN Jienian, ZHAO Haiyan. A new method for optimizing the size distribution of temporary plugging agent[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2004, 21(5): 4-7.
- [8] 张世锋,王相,崔新颖,等.基于改进理想充填理论的堵漏颗粒粒度分布设计方法[J].常州大学学报(自然科学版),2021,33(3):54-59.  
ZHANG Shifeng, WANG Xiang, CUI Xinying, et al. Modified ideal packing theory to optimize size distribution of plugging particle for fracture lost circulation control[J]. *Journal of Changzhou University (Natural Science Edition)*, 2021, 33(3): 54-59.
- [9] 王书琪,唐继平,张斌,等.塔里木山前构造带高密度钻井液堵漏技术[J].钻井液与完井液,2006,23(1):76-77.  
WANG Shuqi, TANG Jiping, ZHANG Bin, et al. Plugging technology of high density drilling fluid in tarim piedmont structural belt[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2006, 23(1): 76-77.
- [10] 刘金华,王治法,常连玉,等.复合堵漏剂DL-1封堵裂缝的室内研究[J].钻井液与完井液,2008,25(1):50-52.  
LIU Jinhua, WANG Zhifa, CHANG Lianyu, et al. Indoor study on plugging crack with compound plugging agent DL-1[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2008, 25(1): 50-52.
- [11] 康毅力,余海峰,许成元,等.毫米级宽度裂缝封堵层优化设计[J].天然气工业,2014,34(11):88-94.  
KANG Yili, YU Haifeng, XU Chengyuan, et al. An optimal design for millimeter-wide fracture plugged zones[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(11): 88-94.
- [12] 许成元,张敬逸,康毅力,等.裂缝封堵层结构形成与演化机制[J].石油勘探与开发,2021,48(1):202-210.  
XU Chengyuan, ZHANG Jingyi, KANG Yili, et al. Structural formation and evolution mechanisms of fracture plugging zone [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1): 202-210.
- [13] MONDAL S, WU C H, SHARMA M M. Coupled CFD-DEM simulation of hydrodynamic bridging at constrictions[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, 84: 245-263.
- [14] SUN H, XU S, PAN X D, et al. Investigating the jamming of particles in a three-dimensional fluid-driven flow via coupled CFD-DEM simulations[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 114: 140-153.
- [15] XU C Y, XIE Z C, KANG Y L, et al. A novel material evaluation method for lost circulation control and formation damage prevention in deep fractured tight reservoir[J]. *Energy*, 2020, 210: 118574.
- [16] XU C Y, KANG Y L, YOU L J, et al. Lost-circulation control for formation-damage prevention in naturally fractured reservoir: Mathematical model and experimental study[J]. *SPE Journal*, 2017, 22(5): 1654-1670.
- [17] 许成元,闫霄鹏,康毅力,等.深层裂缝性储集层封堵层结构失稳机理与强化方法[J].石油勘探与开发,2020,47(2):399-408.  
XU Chengyuan, YAN Xiaopeng, KANG Yili, et al. Structural failure mechanism and strengthening method of plugging zone in deep naturally fractured reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(2): 399-408.
- [18] 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.  
SUN Jinsheng, BAI Yingrui, CHENG Rongchao, et al. Research progress and prospect of plugging technologies for fractured formation with severe lost circulation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 630-638.
- [19] 康毅力,王凯成,许成元,等.深井超深井钻井堵漏材料高温老化性能评价[J].石油学报,2019,40(2):215-223.  
KANG Yili, WANG Kaicheng, XU Chengyuan, et al. High-temperature aging property evaluation of lost circulation materials in deep and ultra-deep well drilling[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(2): 215-223.
- [20] 闫宏伟,袁飞,李亚杰,等.埋地管道泄漏内封堵装置设计与研究[J].石油机械,2020,48(4):142-148.  
YAN Hongwei, YUAN Fei, LI Yajie, et al. Design and research of internal sealing device for buried pipeline leakage[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(4): 142-148.
- [21] 陈俊文,于浩,张玉明,等.双金属衬里复合管制管过程紧密度影响因素研究[J].石油机械,2021,49(2):133-142.  
CHEN Junwen, YU Hao, ZHANG Yuming, et al. Study on the

- influencing factors of compactness of bimetal-lined composite pipe during forming process[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(2): 133-142.
- [22] 吕晓平,田径,王向阳,等.钻井液油水比对2Cr13套管摩擦学性能的影响[J].石油机械,2020,48(9):121-127.  
LYU Xiaoping, TIAN Jing, WANG Xiangyang, et al. The effect of oil-water ratio of drilling fluid on the tribological properties of 2Cr13 casing[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(9): 121-127.
- [23] 宣扬,刘珂,郭科佑,等.顺北超深水平井环保耐高温低摩擦阻钻井液技术[J].特种油气藏,2020,27(3):163-168.  
XUAN Yang, LIU Ke, GUO Keyou, et al. Environmental anti-temperature low-friction drilling fluid technology of ultra-deep horizontal well in Shunbei oil & gas field[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(3): 163-168.
- [24] SAVARI S, WHITFILL D L, JAMISON D E, et al. A method to evaluate lost circulation materials—investigation of effective wellbore strengthening applications[J]. SPE Drilling & Completion, 2014, 29(3): 329-333.
- [25] OQUENDO-PATIÑO W F, ESTRADA N. Densest arrangement of frictionless polydisperse sphere packings with a power-law grain size distribution[J]. Granular Matter, 2020, 22(4): 1-8.

(编辑 常燕)

## 《油气藏评价与开发》2023年征稿启事

尊敬的作者:您好!非常感谢您对《油气藏评价与开发》的关心和支持!

《油气藏评价与开发》坚持面向油气田科研与生产,促进我国油气田勘探开发水平的提高,加快石油及天然气工业发展的办刊方针,密切关注世界能源发展趋势,以服务国家能源战略为首要任务,着力推动石油天然气勘探开发技术创新,促进实现全面可持续、高质量发展,围绕党中央、国务院重大能源战略部署,全面报道石油天然气勘探开发进展,重点突出科技创新,在刊载常规油气勘探开发先进技术成果的同时,紧跟油气开发科技前沿,把握能源发展脉搏,近年来围绕非常规能源出版了“页岩气、煤层气、天然气水合物、CO<sub>2</sub>驱油及CCUS”等多期专题期刊,在行业内取得较好反响。

2023年计划围绕“页岩气、页岩油、煤层气、CCUS、地热”等领域开展出版工作,诚挚地邀请您为以上专题撰稿。论文要求如下:

### 1. 内容

有创新(新理论、新进展、新认识、新观点、新领域、新技术、新工艺、新产品、新工具、新建议、新评价、新方案),未曾发表,可优先考虑但不限于以下方向:

1)与以上领域相关的热点、重点、难点、瓶颈,提出有建设性、可操作性、科学有效的合理化建议。

2)与以上领域科研和生产相关的创新、改进、优化、完善做法等。

3)贴近以上领域生产科研一线、贴近前沿理论研究方面的思考和建议。

### 2. 题目

题目注意体现创新性和技术亮点。投稿请备注:2023年XX专题投稿。

### 3. 投稿

请按照《油气藏评价与开发》投稿指南中规范论文格式,并通过官方网站<http://red.magtech.org.cn/>投稿,投稿截止时间为2022年12月31日。

### 4. 论文采用

投稿须经过编辑部三审制及外审双盲审制审查程序,通过后方能被刊出。

### 5. 咨询

编辑部联系人:王晓蕾 电话:025-66201779

李颖洁 电话:025-66201780

《油气藏评价与开发》编辑部

2022年5月19日