

# 裂缝性地层防漏堵漏力学机制研究

曾义金<sup>1</sup>, 李大奇<sup>1</sup>, 杨春和<sup>2</sup>

- (1. 中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100101;  
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 井漏是制约安全、快速、高效钻井的技术瓶颈。为了提高防漏堵漏效率, 基于断裂力学理论, 采用理论分析和数值模拟方法, 研究堵漏材料在裂缝内不同位置架桥及考虑不同封堵效率的裂缝尖端应力强度因子、井周有效切向应力及裂缝宽度大小。研究表明, 井筒压力一定时, 裂缝越长, 裂缝宽度和裂缝尖端应力强度因子越大; 堵漏材料在裂缝开口处架桥时, 井周有效切向应力提高最多, 裂缝尖端应力强度因子最小, 承压堵漏效果越好; 缝内压力越低, 井周有效切向应力提高越多, 裂缝尖端应力强度因子越小。钻井中应根据裂缝宽度变化范围, 选择合理的颗粒尺寸, 使架桥位置靠近井筒, 并随钻加入防漏堵漏材料, 及时封堵微裂缝, 防止裂缝持续扩展; 同时使用优化的粒度分布及高性能的堵漏材料, 形成致密封堵层, 可以提高地层承压能力, 有效预防井漏。通过现场试验验证, 研究结果对现场防漏堵漏工作具有很好的指导意义。

**关键词:** 石油工程; 裂缝; 断裂; 防漏堵漏; 数值模拟; 井筒强化

**中图分类号:** TE 21

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2016)10-2054-08

## Leakage prevention and control in fractured formations

ZENG Yijin<sup>1</sup>, LI Daqi<sup>1</sup>, YANG Chunhe<sup>2</sup>

- (1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** Leakage is a big problem for the safety and efficiency of drilling. The fracture aperture, circumferential stress and stress intensity factor of fracture tip were studied in the case of bridging or sealing in different fracture locations with the numerical method. The results show that, when the wellbore pressure is constant, the longer the fracture, the larger the stress intensity factor and the fracture aperture. The bridging location in the fracture opening has the best effect, with the circumferential effective stress enhanced the most and the stress intensity factor the lowest. The lower the fracture pressure, the more enhanced the circumferential effective stress and the smaller the stress intensity factor. Suitable particle size should be chosen in accordance with the fracture aperture while drilling. Sealing micro-fractures quickly and efficiently by constantly adding LCMs and using high-performance LCMs can prevent the occurrence of pernicious mud loss effectively, and improve the pressure bearing capacity of the formation.

**Key words:** petroleum engineering; fracture; fracture; lost circulation prevention and control; numerical simulation; wellbore strengthening

**收稿日期:** 2015-09-11; **修回日期:** 2015-10-19

**基金项目:** 国家科技重大专项资助项目(2011ZX5005-006)

Supported by the National Science and Technology Major Project of China(Grant No. 2011ZX5005-006)

**作者简介:** 曾义金(1964-), 男, 2003 年于中国石油大学(北京)油气井工程专业获博士学位, 现任教授级高工, 主要从事石油工程技术方面的研究工作。E-mail: zengyj.sripe@sinopec.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1268

# 1 引 言

油气钻井中经常出现“漏、喷、塌、卡”等井下复杂与事故，预防及控制井壁失稳一直是该领域的前沿性课题<sup>[1-5]</sup>。海相碳酸盐岩地层油气资源丰富，但地质条件异常复杂，工程作业艰难，风险大，费用高，耗时长，钻井中井漏发生率高。井漏不但损失大量钻井液，伤害油气层，还可能引发井壁坍塌、卡钻、井喷等一系列复杂或事故，甚至会导致井眼报废，产生重大经济损失<sup>[6-7]</sup>。四川盆地川东北地区钻井过程中几乎每口井都发生过井漏，如 SM-1 井钻至井深 3 573 m 时，突遇嘉陵江组二段高压气层，在压井过程中又造成上部低压层漏失，由于上、下部地层压力相差悬殊，导致多次承压堵漏失败，最后被迫用凝胶+水泥将下部高压层封住，填井侧钻，经济损失惨重。

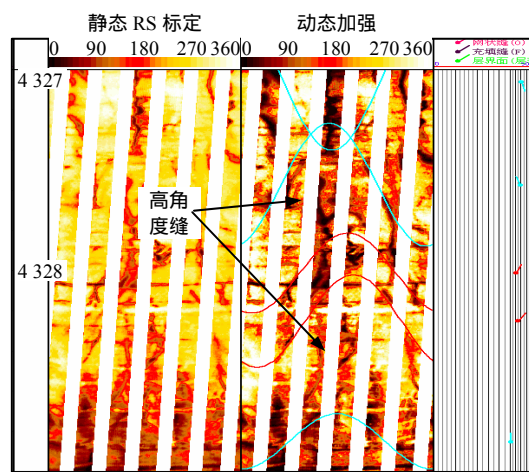
随着常规油气资源逐步衰竭，钻井已走向超深层、复杂地层及非常规油气层，复杂的地质环境及特殊钻井工艺使得井漏问题更加突出。虽然前人进行了大量的研究和实践，但绝大部分集中在堵漏材料和堵漏配方研发上。未能直接探讨发生堵漏的机制和措施的原理，在探讨机制方面的研究更多的是力学或化学方面的经典分析。现场作业时，还是以经验为主，导致堵漏作业成功率低，承压效果不理想<sup>[8-12]</sup>。近 10 a 来，国内外学者开始越来越重视机制研究。M. W. Alberty 和 M. R. Mclean<sup>[13]</sup>提出“应力笼”模型，从增加井周应力的角度解释了提高地层承压能力的机制；F. E. Dupriest<sup>[14]</sup>提出了裂缝闭合压力理论；H. Wang 等<sup>[15-17]</sup>利用边界元法建立模型，分别讨论了封堵和支撑裂缝两种方式对承压能力的影响；Y. Feng 等<sup>[18]</sup>利用有限元法对“应力笼”模型进行研究，采用线弹性、孔弹性及渗流等模型，均得到一致的规律，即在缝口架桥可以提高井周切向应力；王 贵等<sup>[19-20]</sup>分别建立了承压堵漏数学模型，讨论了承压堵漏的影响因素；康毅力等<sup>[21]</sup>分析了低承压能力地层的漏失机制，并提出了 3 种井筒强化理论。目前，上述各种模型虽在现场已有成功应用的例子，但还不能完全解释现场实际情况，学术界对防漏堵漏机制的认识仍存在较大争论<sup>[22]</sup>。本文利用岩石断裂力学理论，采用理论分析和有限元数值模拟方法，深入研究了防漏堵漏的力学机制，并开展了现场应用，以期为裂缝性地层防漏堵漏和承压堵漏技术的选择或研发提供理论支持。

# 2 裂缝性地层漏失机制

井漏需要具备 3 个基本条件：正压差、漏失通道和漏失空间。而裂缝性地层恰恰存在漏失通道和漏失空间(见图 1)，因此相对与致密地层更易发生漏失。根据钻井液与地层相互作用机制，将漏失分为 3 类：压裂性漏失、裂缝扩展性漏失和大型裂缝溶洞漏失<sup>[23]</sup>。压裂性漏失发生在不含显著裂缝的地层中，通常是因为井内压力大于破裂压力所致，钻井液压裂地层而发生井漏的原理同水力压裂类似。裂缝扩展性漏失发生在微裂缝地层中，裂缝在井筒压力作用下逐渐变宽并延伸，钻井液进入裂缝系统而导致漏失，这种情况较为常见，漏失压力为裂缝扩展压力，常采用断裂力学理论进行解释。大型裂缝溶洞性漏失则发生在裂缝尺寸较大，且裂缝较为发育的地层中，在钻井中通常表现为钻遇即漏，该类地层的漏失压力一般略大于地层孔隙压力。



(a) 岩心观察



(b) 成像测井

图 1 天然裂缝

Fig.1 Natural fractures

传统理论认为压裂性漏失的漏失压力为破裂压力。然而，钻井中钻头破岩时会在钻头附近诱发微裂缝，钻具振动和原地应力释放也会诱发微裂缝。这些微裂缝可以看作岩石缺陷，它更容易在井内压力作用下扩展。采用传统理论得到的破裂压力往往高于漏失压力。为此，采用断裂力学理论进行研究更为合理。裂缝尖端应力强度因子是否大于临界应力强度因子是判别裂缝扩展的准则，即

$$K_I < K_{Ic} \quad (1)$$

式中： $K_I$ 为裂缝尖端应力强度因子(MPa·mm<sup>1/2</sup>)， $K_{Ic}$ 为临界应力强度因子(MPa·mm<sup>1/2</sup>)。

裂缝尖端应力强度因子与地应力、井筒压力和缝内压力有关，根据应力叠加原理，可得

$$K_I = K_I(\sigma_H) + K_I(\sigma_h) + K_I(P_w) + K_I(P_f) \quad (2)$$

式中： $K_I(\sigma_H)$ ， $K_I(\sigma_h)$ ， $K_I(P_w)$ 和 $K_I(P_f)$ 分别为 $\sigma_H$ ， $\sigma_h$ ， $P_w$ 和 $P_f$ 引起的裂缝尖端应力强度因子(MPa·mm<sup>1/2</sup>)。

假设裂缝长度为 $2a$ ，裂缝尖端应力强度可用Winter解析解<sup>[24]</sup>计算，即

$$K_I = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \sigma_y(x, 0) \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} dx \quad (3)$$

式中： $\sigma_y(x, 0)$ 为裂缝面上的应力。

由式(3)可见，在地应力和井内压力一定的条件下，钻井液进入微裂缝后会导致缝内压力作用有关的应力强度因子增加，如果该增量足够大，使得 $K_I$ 达到 $K_{Ic}$ ，亦会导致井漏。为此，控制微裂缝扩展是强化井筒承压，预防井漏的一种方式。

### 3 防漏堵漏理论模型

#### 3.1 封堵层形成

防漏堵漏钻井液是由大尺寸的架桥材料，中间尺寸的充填材料，小尺寸的变形材料，以及堵漏基浆所组成<sup>[25]</sup>。当钻遇天然裂缝或人工诱导裂缝时，在井内压力与地层压力之差的作用下防漏堵漏钻井液开始流入裂缝。首先，大尺寸的架桥材料在裂缝内通过桥接、阻挂或堆积等方式形成桥塞，中小尺寸的堵漏材料及钻井液固相相对桥塞进一步充填，最终在裂缝内形成具有一定承压能力的低渗透封堵层，阻止后续钻井液的漏失，如图2所示。

#### 3.2 裂缝受力分析

封堵层形成后，在裂缝内建立了一个阻止井内流体和压力传递的物理屏障。封堵层外部为井筒压力，内部为缝尖压力，封堵层在井筒压力与缝内压

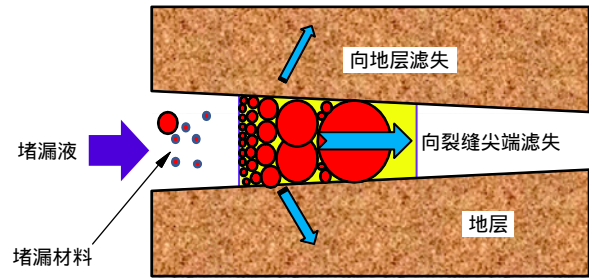


图2 封堵层形成示意图

Fig.2 Diagram of the formation for plugging zone

力之差的作用下对裂缝壁面形成了一定的作用力(见图3)。为了便于分析，将缝内压力分为3段，即

$$P_f = \begin{cases} P_w & (r_w < r < x_{wb}) \\ P_b & (x_{wb} < r < x_b) \\ P_t & (x_b < r < a) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $P_f$ 为缝内压力(MPa)， $P_w$ 为井筒压力(MPa)， $P_b$ 为封堵层段压力(MPa)， $P_t$ 为缝尖压力(MPa)。

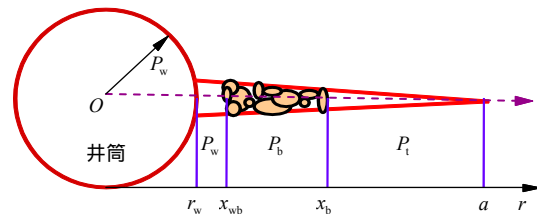


图3 缝内压力分布

Fig.3 Pressure distribution in fracture

根据经典岩石力学理论，裂缝闭合应力为

$$P_c = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left( 1 + \frac{r_w^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left( 1 + 3 \frac{r_w^4}{r^4} \right) - P_w \frac{r_w^2}{r^2} \quad (5)$$

式中： $P_c$ 为裂缝闭合应力(MPa)， $\sigma_H$ 为最大水平主应力(MPa)， $\sigma_h$ 为最小水平主应力(MPa)。

裂缝面上的法向应力为

$$P_c - P_f = \begin{cases} \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left( 1 + \frac{r_w^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left( 1 + 3 \frac{r_w^4}{r^4} \right) - P_w \left( 1 + \frac{r_w^2}{r^2} \right) & (r_w < r < x_{wb}) \\ \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left( 1 + \frac{r_w^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left( 1 + 3 \frac{r_w^4}{r^4} \right) - P_w \frac{r_w^2}{r^2} + P_b & (x_{wb} < r < x_b) \\ \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left( 1 + \frac{r_w^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left( 1 + 3 \frac{r_w^4}{r^4} \right) - P_w \frac{r_w^2}{r^2} + P_t & (x_b < r < a) \end{cases} \quad (6)$$

法向应力为正，裂缝为闭合状态，法向应力为负，裂缝为开启状态。

### 3.3 裂缝稳定性模型

根据式(3)和(5)可得裂缝尖端应力强度因子分量，即

$$K_I(\sigma_h) = -\sigma_h \sqrt{r_w} \left[ (\pi b)^{\frac{1}{2}} \left( 1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{1}{b} \right) + 2(b^2 + 1) \left( \frac{b^2 - 1}{\pi b^7} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (7)$$

$$K_I(\sigma_H) = 2\sigma_H \sqrt{r_w} \left( \frac{b^2 - 1}{\pi b^7} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$K_I(P_w) = 2P_w \sqrt{r_w} \left( \frac{b^2 - 1}{\pi b^3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$K_I(P_r) = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a P_r \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} dx \quad (10)$$

其中，

$$b = 1 + a / r_w$$

将式(7)~(10)代入式(2)，可求得裂缝尖端应力强度因子  $K_I$  的理论值。据此，可以判断承压堵漏过程中裂缝是否稳定。

## 4 承压堵漏数值模拟

含有裂缝的井眼，井周应力比较复杂，现有理论难以给出精确的解析解。为了研究堵漏作业过程中的井周应力变化及裂缝宽度变化情况，明确提高承压能力的力学机制，建立了承压堵漏的有限元模型，并以川东北一口井实际情况为实例，进行了数值模拟分析。

### 4.1 基本假设

- (1) 岩石介质均质、各向同性；
- (2) 岩石为线弹性变形体；
- (3) 存在与井眼相交的单条垂直裂缝；
- (4) 封堵层厚度为 20 mm。

### 4.2 堵漏物理模型及有限元模型

堵漏的物理模型如图 4 所示。根据线弹性力学理论，本研究属于二维平面应变问题，裂缝沿着最大主应力的方向，由于对称性，取模型的 1/4 进行分析。建立的有限元模型如图 4 所示。图 4 中  $GA$  圆弧为井筒， $AC$  为裂缝段，假设堵漏材料在点  $B$

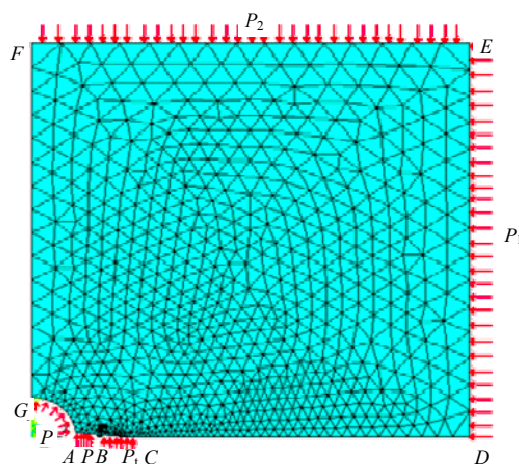


图 4 裂缝堵漏有限元模型

Fig.4 Finite element model of sealing crack

架桥，即分析过程中， $GA$  及  $AB$  段施加井筒有效压力  $P$ ， $BC$  施加压力  $P_1$  的有效压力，考虑封堵效果差异， $P_1$  取不同的压力值。 $CD$  和  $FG$  段为对称段，施加对称边界约束。 $DE$  段施加最大有效水平地应力  $P_1$ ， $EF$  段施加最小有效水平地应力  $P_2$ 。

### 4.3 地层岩石力学参数选取

根据川东北气田某地层大量岩石力学参数的统计分析，该地区 5 427.55 m 深度地层的岩石力学参数：弹性模量为  $7.626 \times 10^4$  MPa；泊松比为 0.239；毕奥特系数  $\alpha = 0.5$ ；孔隙压力  $P_0 = 60$  MPa；最大水平地应力 98 MPa；最小水平地应力 88 MPa；井筒压力  $P_w$  取 98 MPa。

根据有效应力理论，有限元模型中有效载荷如下：最大有效水平地应力为 68 MPa；最小有效水平地应力为 58 MPa；井筒有效压力为 68 MPa。

## 5 研究结果

裂缝长度分别选取 100，200 和 400 mm，选择不同的架桥位置及缝内压力，研究了不同情况下的裂缝尖端应力强度因子、井周有效切向应力及裂缝宽度大小。

### 5.1 裂缝尖端应力强度因子

防止裂缝扩展和延伸是堵漏作业成败的关键。根据断裂力学理论，裂缝稳定性与裂缝尖端应力强度因子紧密相关，因此研究了不同条件下的裂缝尖端应力强度因子。表 1~3 中负值没有实际的物理意义，表明裂缝已经闭合，负数的绝对值越大，裂缝越稳定，可用来表征裂缝稳定程度。表 1 表明，未封堵裂缝前，裂缝越长尖端应力强度因子越大，裂

表 1 封堵前后的裂缝尖端应力强度因子  
Table 1 Crack tip stress intensity factors before and after sealing

$L/mm$	$P_f/MPa$	$L_{AB}/mm$	封堵情况	$K_I/(MPa \cdot mm^{1/2})$
100	68	0	未封堵	246.9
100	30	0	完全封堵	- 152.1
200	68	0	未封堵	315.5
200	30	0	完全封堵	- 317.4
400	68	0	未封堵	383.9
400	30	0	完全封堵	- 548.0

表 2 不同架桥位置的裂缝尖端应力强度因子

Table 2 Crack tip stress intensity factors of different bridging locations

$L/mm$	$P_f/MPa$	$L_{AB}/mm$	封堵情况	$K_I/(MPa \cdot mm^{1/2})$
200	30	0	完全封堵	- 317.4
200	30	25	完全封堵	- 276.8
200	30	50	完全封堵	- 219.6
200	30	100	完全封堵	- 105.5
200	30	150	完全封堵	38.3

表 3 不同缝内压力下的裂缝尖端应力强度因子

Table 3 Crack tip stress intensity factors of different fracture pressures

$L/mm$	$P_f/MPa$	$L_{AB}/mm$	封堵情况	$K_I/(MPa \cdot mm^{1/2})$
200	30	0	完全封堵	- 317.4
200	40	0	封堵好	- 150.8
200	50	0	封堵	15.7
200	60	0	封堵差	182.3
200	68	0	封堵失效	315.5

缝越不稳定。封堵裂缝后尖端应力强度因子变为负值，裂缝重新开启的难度增加。表 2 表明，应力强度因子受封堵位置的影响较大，在裂缝开口处封堵应力强度因子最小，在裂缝尖端附近封堵应力强度因子最大。由表 3 可知，缝内压力越低，裂缝尖端应力强度因子越小。因此，在裂缝开口处架桥及降低缝内压力有利于裂缝稳定。

### 5.2 井周有效切向应力

为了考察封堵后的裂缝承压能力，评价堵漏效果，研究了堵漏前后的井周有效切向应力。假设架桥位置在裂缝入口处，不同长度裂缝封堵前后的井周有效切向应力如图 5 所示。由此可见，封堵后井周有效切向应力明显增大，井筒被强化，地层承压能力得到提高。以 200 mm 长的裂缝为例，不同架桥位置的井周有效切向应力如图 6 所示， $L1$  表示封堵前的裂缝长度， $L2$  表示封堵后的裂缝长度。可见

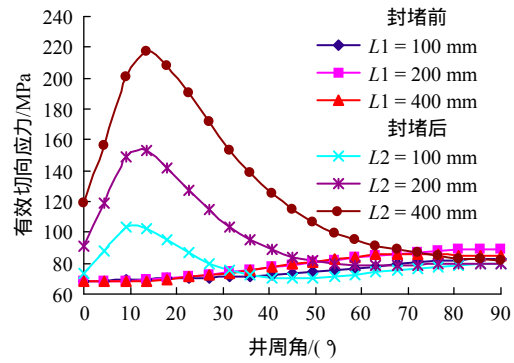


图 5 封堵前后有效切向应力

Fig.5 Effective tangential stresses before and after sealing

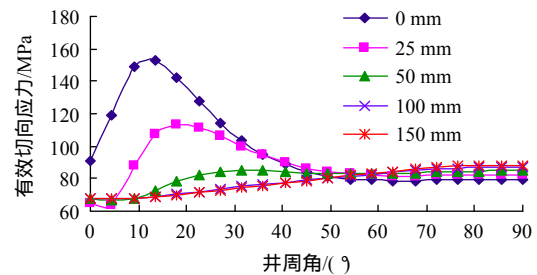


图 6 不同架桥位置下的有效切向应力

Fig.6 Effective tangential stresses of different bridging locations

架桥位置越靠近井筒，井周有效切向应力越大。不同缝内压力的井周有效切向应力如图 7 所示，可见缝内压力越低，井周切向应力越大，地层承压能力越高。

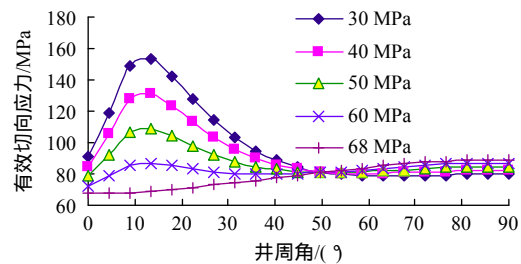


图 7 不同缝内压力下的有效切向应力

Fig.7 Effective tangential stresses under different fracture pressures

### 5.3 裂缝宽度预测

准确地预测裂缝宽度有利于选择合适的防漏堵漏材料，高效、快速地封堵裂缝。数值模拟表明，裂缝长度为 100，200 和 400 mm 时，裂缝宽度预测结果如图 8 所示。结果表明，随着裂缝长度增加，裂缝宽度也在不断增加；缝长为 400 mm 时的裂缝宽度为 100 mm 的 2~3 倍；封堵后裂缝宽度显著变小，远离井筒的裂缝已经完全闭合。以 200 mm 长

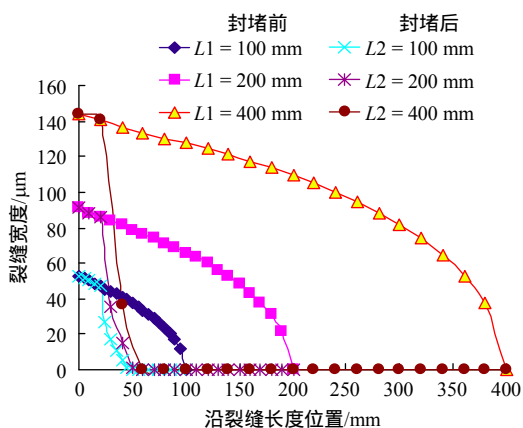


图 8 封堵前后的裂缝宽度

Fig.8 Crack apertures before and after sealing

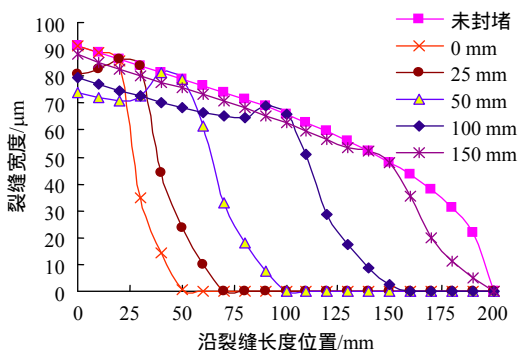


图 9 不同架桥位置下的裂缝宽度

Fig.9 Crack apertures of different bridging locations

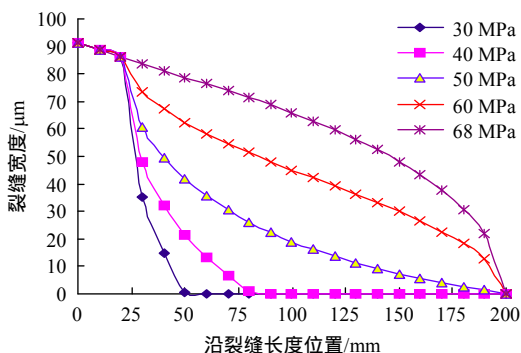


图 10 不同缝内压力下的裂缝宽度

Fig.10 Crack apertures under different fracture pressures

的裂缝为例，缝尖压力  $P_i$  为孔隙压力时，不同架桥位置封堵后的裂缝宽度见图 9。由图 9 可见，裂缝被封堵后封堵层至缝尖端裂缝(BC 段)大部分闭合，且架桥位置越靠近井筒裂缝闭合越严重。不同缝内压力的裂缝宽度如图 10 所示，由此可见缝内压力越低，裂缝宽度闭合程度越大，对承压堵漏越有利。

## 6 结果探讨

压裂性漏失和裂缝扩展性漏失是由微裂缝产生

或天然裂缝开启开始的。井漏初期，裂缝较短，根据图 8 及表 1 的计算结果可知，此时的裂缝尖端应力强度因子和裂缝宽度均较小。随着钻井液进一步漏失，裂缝开始延伸，裂缝宽度迅速增加，应力强度因子也逐渐变大，裂缝扩展变的相对容易，防漏堵漏难度增加。原本与裂缝宽度相匹配的防漏堵漏材料因裂缝宽度的增加而漏入地层深处，防漏堵漏措施失效。为确保取得较好的防漏堵漏效果，需要确定裂缝的初始宽度及可能的宽度变化范围，增大堵漏材料的粒径，并采用随钻堵漏方式，确保在第一时间把裂缝堵死、封牢，防止漏失逐步升级，并最终演化为恶性井漏，把井漏制止在初始阶段。在另一个侧面也表明，一旦控制措施不当引发井漏，裂缝将以加速的形式扩展，同时裂缝宽度逐步变大，大量钻井液漏入地层，承压堵漏将变得更加困难。

地层承压能力增量是评价防漏堵漏效果的重要指标。为了钻进下部高压地层、易塌地层及防止因起下钻等产生的波动压力把地层重新压漏，需要尽量提高地层的承压能力。井周有效切向应力反映了裂缝重新开启的难易程度，井周有效切向应力越大，裂缝张开所需要的压力越大，地层可承受的井筒有效液柱压力越高，二次井漏的可能性越小。其他条件相同时，架桥位置及缝内压力是影响井周有效切向应力的 2 个关键因素。架桥位置与架桥粒子的大小同裂缝宽度的匹配程度相关，架桥粒子较小时，会在裂缝深部架桥，较大时在裂缝开口处架桥。根据现有的架桥理论，在裂缝宽度一定的情况可以控制架桥位置。然而，实际钻井中由于井筒压力的变化及裂缝的扩展，裂缝宽度是处于动态变化之中的，故应明确裂缝宽度变化范围。缝内压力与地层的渗透性及堵漏材料的封堵效果有关。井漏发生时，压力首先从井筒传入裂缝内部，然后再从裂缝内部传向地层。在裂缝内快速地形成致密封堵层，可以减缓井筒压力传播，防止缝内压力增加。同时，地层渗透性越好，缝内压力耗散速度越快，缝内压力也越低。图 6 及表 2 的结果表明，在裂缝开口处架桥井周有效切向应力提高最大，且堵漏后应力强度因子为负，裂缝保持稳定。实际堵漏时应确保封堵层有一定厚度，以便于能够承受一定的压差，防止因厚度太薄被破坏。因此，准确预测裂缝宽度，并使用封堵效率高的防漏堵漏材料是提高地层承压能力，提高堵漏成功率的有效措施。

## 7 现场应用

川东北地区钻井液漏失现象较为普遍，几乎所有构造钻探中均发生过井漏。在统计的40口井中，有37口井发生了井漏，共发生漏失458次，漏失发生率高达92.5%，漏失钻井液总计达51 696.48 m<sup>3</sup>，经济损失十分严重。为了更好地解决该地区的井漏问题，以防漏堵漏力学机制为指导原则，在PG-A井飞仙关组—长兴组段地层，开展了现场试验。

邻井在该段地层均发生了井漏，平均漏失量达150 m<sup>3</sup>，为此该井发生井漏的概率极大。根据堵漏力学机制得到的新认识，及时、高效地封堵微裂缝十分重要。为此，采用了随钻防漏方法。一旦裂缝被钻开，防漏堵漏材料便可以第一时间封堵诱导微裂缝。为了提高封堵效果，要求防漏堵漏配方符合理想充填理论和d<sub>90</sub>架桥原则，需要清楚诱导裂缝的宽度。将该井地应力代入式(5)，可得沿着诱导裂缝方向上的裂缝闭合压力，如图11所示。

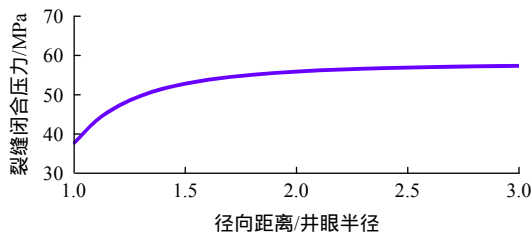


图 11 裂缝面的裂缝闭合应力

Fig.11 Crack closure stresses along the direction of maximum principal stress

由图11可见，距离井眼中心2.3倍井眼半径处裂缝闭合应力开始趋于稳定。如果不能及时封堵住微裂缝，在井筒压力作用下，缝内压力将不断增加。当缝内压力大于闭合压力后，微裂缝将张开，裂缝尖端应力强度因子将由负值变为正值。根据裂缝扩展准则，当裂缝尖端应力强度因子大于岩石本身的临界应力强度因子时，将会导致裂缝扩展，引发严重井漏。因此，对1.3倍长的裂缝进行数值模拟，求得开口处的裂缝宽度为65 μm。为了提高承压能力，需要在开口处较短距离内架桥。故此，根据开口处的裂缝宽度对防漏堵漏配方进行设计。配方如下：原浆+1.0%复合暂堵剂(100~200目)+1.0%的刚性颗粒(250目)+2.5%细目碳酸钙(300目)+2.0%细目碳酸钙(1 250目)+(1~2)%变形粒子。现场对钻井液取样，进行了粒度分析，结果见图12。钻井液中固

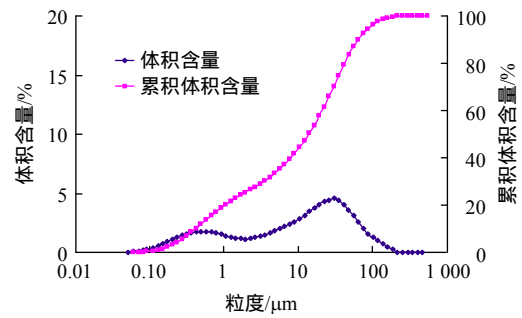


图 12 PG-A 井钻井液粒度分布

Fig.12 Particle size distribution of drilling fluid in well PG-A

相粒度分布为： $d_{10} = 0.42 \mu\text{m}$ ； $d_{50} = 13.98 \mu\text{m}$ ； $d_{90} = 65.05 \mu\text{m}$ 。防漏堵漏配方d<sub>90</sub>与裂缝宽度匹配，防漏堵漏配方达到设计要求。

采用该配方揭开易漏地层，钻进中未发生井漏，封堵层承压达10 MPa以上。说明经过合理设计的随钻防漏堵漏技术能够有效地预防漏失，提高地层承压能力。

## 8 结论及建议

(1) 基于断裂力学理论，考虑漏失的发生及封堵层的形成，建立了堵漏数学模型和有限元模型，明确了架桥位置、封堵效率和裂缝宽度对井漏预防及承压能力的影响。

(2) 钻井作业诱发的微裂缝在井筒压力作用下会导致裂缝尖端应力强度因子增加，如不加以控制，可能会引发裂缝扩展，最终导致井漏。

(3) 架桥越靠近井筒，缝内压力越低，越有利于提高地层承压能力。为此，堵漏颗粒大小应与裂缝开口处的裂缝宽度相匹配，且形成的封堵层应尽量致密。

(4) 井筒压力一定时，裂缝越长，缝宽越大和裂缝尖端应力强度因子也越大，堵漏难度也越大，及时、高效地封堵裂缝，防止裂缝增长是防漏堵漏成功的关键之一。

(5) 现场应用表明，根据防漏堵漏力学机制设计的方案可以有效提高地层承压能力，预防井漏发生，对防漏堵漏作业具有重要的意义。

### 参考文献(References)：

[1] 刘玉石. 地层坍塌压力及井壁稳定对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14) : 2 421 - 2 423. (LIU Yushi. Collapse pressure and precautions for stability of wellbore wall[J]. Chinese Journal of Rock

- Mechanics and Engineering ,2004 ,23(14) :2 421–2 423.(in Chinese))
- [2] 杨春和,曾义金,吴文,等. 深层盐岩本构关系及其在石油钻井工程中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10) : 1 678–1 682.(YANG Chunhe, ZENG Yijin, WU Wen, et al. Constitutive relationship of deep salt rock and its application to petroleum drilling engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10) : 1 678–1 682.(in Chinese))
- [3] 陈勉. 我国深层岩石力学研究及在石油工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14) : 2 455–2 462.(CHEN Mian. Review of study on rock mechanics at great depth and its applications to petroleum engineering in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14) : 2 455–2 462.(in Chinese))
- [4] 陈新,杨强,何满潮,等. 考虑深部岩体各向异性强度的井壁稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16) : 2 882–2 888.(CHEN Xin, YANG Qiang, HE Manzhao, et al. Stability analysis of wellbore based on anisotropic strength criterion for deep jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16) : 2 882–2 888.(in Chinese))
- [5] 刘向君,刘洪,罗平亚,等. 钻井液浸泡对库车组泥岩强度的影响及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 2) : 3 920–3 925.(LIU XiangJun, LIU Hong, LUO Pingya, et al. Research on effect of drilling fluid on Kuqa shale strength behavior and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.2) : 3 920–3 925.(in Chinese))
- [6] 徐同台,刘玉杰,申威. 钻井工程防漏堵漏技术[M]. 北京:石油工业出版社, 1997 : 1–3.(XU Tongtai, LIU Yujie, SHEN Wei. Preventing and plugging lost circulation technique in drilling engineering[M]. Beijing : Petroleum industry press, 1997 : 1–3.(in Chinese))
- [7] 刘大伟. 川东北裂缝漏失性碳酸盐岩储层损害机理及保护技术研究[硕士学位论文][D]. 成都:西南石油大学, 2006.(LIU Dawei. Study on the formation damage mechanism and damage control technologies of fractural and lossed carbonate reservoir in si chuan basin northeast area[M. S. Thesis][D]. Chengdu : Southwest Petroleum University, 2006.(in Chinese))
- [8] NAVARRETE R C, HIMES R E, SEHEULT J M. Applications of xanthan gum in fluid-loss control and related formation damage[R]. SPE 59535, 2000.
- [9] ASTON M S, ALBERTY M W, MCLEAN M R, et al. Drilling fluids for wellbore strengthening[R]. SPE 87130, 2004.
- [10] RUSSELL K A, COCKBURN C, MACLURE R, et al. Improved drilling performance in troublesome environment[R]. SPE 90373, 2004.
- [11] SAMUEL M, MARCINEW R, AL-HARBI M, et al. A new solids-free non-damaging high temperature lost-circulation pill : development and first field applications[R]. SPE 81494, 2003.
- [12] IVAN C D, BRUTON J R. Making a case for rethinking lost circulation treatment in induced fracture[R]. SPE 77353, 2002.
- [13] ALBERTY M W, MCLEAN M R. A physical model for stress cages[R]. SPE 90432, 2004.
- [14] DUPRIEST F. E. Fracture closure stress(FCS) and lost returns practices[R]. SPE 92192, 2005.
- [15] WANG H, TOWLER B F, SOLIMAN M Y. Fractured wellbore stress analysis : sealing cracks to strengthen a wellbore[R]. SPE 104947, 2007.
- [16] WANG H, SWEATMAN R, ENGELMAN B, et al. Best practice in understanding and managing lost circulation challenges[J]. SPE Drilling and Completion, 2008, 23(2) : 168–175.
- [17] WANG H, SOLIMAN M Y, TOWLER B F. Investigation of factors for strengthening a wellbore by propping fractures[J]. SPE Drilling and Completion, 2009, 24(3) : 441–451.
- [18] FENG Y, ARLANOGLU C, PODNOS E, et al. Finite-element studies of hoop-stress enhancement for wellbore strengthening[J]. SPE Drilling and Completion, 2015, 30(1) : 38–51.
- [19] 王贵,蒲晓林. 提高地层承压能力的钻井液堵漏作用机理[J]. 石油学报, 2010, 31(6) : 1 009–1 012.(WANG Gui, PU Xiaolin. Plugging mechanism of drilling fluid by enhancing wellbore pressure[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6) : 1 009–1 021.(in Chinese))
- [20] 杨沛,陈勉,金衍,等. 裂缝承压能力模型及其在裂缝地层堵漏中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3) : 479–487.(YANG Pei, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Crack pressure bearing model and its application to plugging of fractured formation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3) : 479–487.(in Chinese))
- [21] 康毅力,许成元,唐龙,等. 构筑井周坚韧屏障:井漏控制理论与方法[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(4) : 473–479.(KANG Yili, XU Chengyuan, TANG Long, et al. Constructing a tough shield around the wellbore :Theory and method for lost-circulation control[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(4) : 473–479.(in Chinese))
- [22] SALEHI S, NYGAARD R. Evaluation of new drilling approach for widening operational window : implications for wellbore strengthening[R]. SPE 140753, 2011.
- [23] 李大奇,康毅力,刘修善,等. 基于漏失机理的碳酸盐岩地层漏失压力模型[J]. 石油学报, 2011, 32(5) : 900–904.(LI Daqi, KANG Yili, LIU Xiushan, et al. The lost circulation pressure of carbonate formations on the basis of leakage mechanisms[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5) : 900–904.(in Chinese))
- [24] 谢和平,陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京:科学出版社, 2004 : 191–192.(XIE Heping, CHEN Zhonghui. Rock mechanics[M]. Beijing : Science Press, 2007 : 191–192.(in Chinese))
- [25] 石晓兵,熊继有,陈平,等. 高陡复杂构造裂缝漏失堵漏机理研究[J]. 钻采工艺, 2007, 30(5) : 24–26.(SHI Xiaobing, XIONG Jiyou, Chen Ping, et al. Study on the lost circulation and sealing mechanism in complex high dip crack formation[J]. Drilling and Production on technology, 2007, 30(5) : 24–26.(in Chinese))