

文章编号: 0253-2697(2018)05-0587-10 DOI:10.7623/syxb201805010

裂缝封堵失稳微观机理及致密承压封堵实验

邱正松¹ 暴丹¹ 刘均一² 陈家旭¹ 钟汉毅¹ 赵欣¹ 陈晓华³

(1. 中国石油大学石油工程学院 山东青岛 266580; 2. 中石化石油工程技术服务有限公司胜利石油工程公司钻井工程技术公司 山东东营 257064; 3. 中国石油化工股份有限公司华北油气分公司 河南郑州 450006)

摘要: 裂缝性地层堵漏过程中, 桥接堵漏材料形成的封堵层受力学因素影响易发生失稳破坏, 导致封堵层承压能力较低, 产生重复性漏失。基于裂缝封堵层微观结构受力分析, 探讨了挤压破碎失稳、摩擦滑动失稳、剪切错位失稳、渗透漏失失稳等4种封堵失稳破坏形式, 提出了粒度降级率、表面摩擦系数、剪切强度、堆积孔隙比等评价封堵失稳的特征参数; 给出了裂缝致密承压封堵物理模型, 即通过合理的堵漏材料类型和粒径级配优化控制, 有利于在裂缝入口端附近形成致密承压封堵层。研制了长裂缝封堵模拟实验装置, 开展了致密承压封堵模拟实验研究。实验表明, 不同类型堵漏材料优化协同作用, 可增大封堵层抗压强度、表面摩擦系数和抗剪切强度, 形成紧密堆积结构, 易在裂缝入口端附近形成致密承压封堵层, 提高裂缝封堵突破压力, 预防井漏。

关键词: 裂缝性井漏; 封堵失稳; 致密承压封堵; 堵漏材料特征评价; 堵漏模拟实验方法

中图分类号: TE254.2

文献标识码: A

Microcosmic mechanism of fracture-plugging instability and experimental study on pressure bearing and tight plugging

Qiu Zhengsong¹ Bao Dan¹ Liu Junyi² Chen Jiaxu¹ Zhong Hanyi¹ Zhao Xin¹ Chen Xiaohua³

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Shandong Qingdao 266580, China; 2. Drilling Engineering and Technology Company, Shengli Petroleum Engineering Company, Sinopec Oilfield Service Corporation Shandong Dongying 257064, China; 3. Sinopec North China Company, Henan Zhengzhou 450006, China)

Abstract: While plugging fractured formations, the sealing zone formed by loss circulation materials are prone to instability due to the effects from mechanical factors, resulting in low pressure bearing ability of sealing zone and repetitive loss. Based on the micro-structural stress analysis of fractured sealing zone, this study explores the compressive-crush instability, friction-sliding instability, shear-dislocation instability and seepage-loss instability pattern of sealing zone, and then proposes the characteristic parameters for evaluating plugging instability, such as granularity degradation rate, surface friction coefficient, shear strength and packing pore ratio. The pressure bearing and tight plugging physical model is put forward, i. e., by controlling the reasonable loss circulation material types and particle size gradation optimization, it is favorable to form pressure bearing and tight sealing zone near the inlet end of fracture. The experimental apparatus with long fracture slot is newly developed to carry out pressure bearing and tight plugging simulation experiment and the experiment indicate that different loss circulation materials are synergized to improve compressive strength, surface friction coefficient and shear strength for forming tight packing structure, prone to generate pressure bearing and tight sealing zone near the inlet end of fracture and improve plug breaking pressure to prevent loss.

Key words: fracture loss circulation; plugging instability; pressure bearing and tight sealing; characteristic evaluation of loss circulation materials; plugging simulation experiment method

引用: 邱正松, 暴丹, 刘均一, 陈家旭, 钟汉毅, 赵欣, 陈晓华. 裂缝封堵失稳微观机理及致密承压封堵实验[J]. 石油学报, 2018, 39(5): 587-596.

Cite: QIU Zhengsong, BAO Dan, LIU Junyi, CHEN Jiaxu, ZHONG Hanyi, ZHAO Xin, CHEN Xiaohua. Microcosmic mechanism of fracture-plugging instability and experimental study on pressure bearing and tight plugging[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(5): 587-596.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. U1562101)、国家科技重大专项(2017ZX05032-004-005, 2017ZX05005-005-006, 2016ZX05048)和中国博士后科学基金面上项目(2017M612344)资助。

第一作者及通信作者: 邱正松, 男, 1964年8月生, 1985年获华东石油学院学士学位, 2001年获石油大学(华东)博士学位, 现为中国石油大学(华东)石油工程学院教授、博士生导师, 主要从事井壁稳定理论与防塌防漏钻井液技术、复杂深层超高温超深井钻井液关键技术、海洋深水钻井液完井液技术等科研及教学工作。Email: qiuzs63@sina.com

裂缝性漏失是钻井过程中较为常见和复杂的一种漏失形式^[1-2],尤其是毫米级裂缝漏失具有漏失速度快、堵漏时间长、堵漏效率低等特点^[3],其主要原因是堵漏材料类型和粒径优选不当,在裂缝中形成的封堵层受各种力学因素影响而失稳破坏,造成重复性漏失。为此,国内外学者进行了大量的研究,但大多集中在防漏堵漏机理、防漏堵漏材料研制、防漏堵漏配方优化等方面^[4-9],而对封堵层微观结构受力分析、封堵层失稳形式和微观机理、堵漏材料特征参数评价等缺乏系统深入研究。Kumar等^[10]测试分析了堵漏材料的物理性能(圆球度、凹凸度等)和力学性能(强度、弹性特征),发现当复配使用碳酸钙颗粒和弹性石墨时封堵性能更好。邱正松等^[11]借鉴微观颗粒物质力学“强力链”原理,提出了堵漏材料的颗粒强度、颗粒弹性、颗粒表面摩擦等精细化评价指标,并优化了不同开度楔形裂缝的强化致密承压封堵配方。康毅力等^[3]评价了刚性颗粒、弹性粒子以及纤维3种封堵材料协同作用机理及堵漏效果。张韵洋^[12]基于弹性力学理论和颗粒物质力学基础,针对封堵层整体位移和结构破坏的失效形式,模拟计算了封堵层承压能力。余继平^[13]基于系统科学中的突变理论,构建封堵系统失稳物理模型和数学模型,分析影响封堵系统承压失稳因素及机理。许成元等^[14]基于颗粒物质力学理论基础,揭示了摩擦失稳和剪切失稳两种封堵层结构破坏形式,并建立了裂缝封堵层承压能力分析模型。

目前,针对封堵层及堵漏材料在裂缝中的受力特性以及裂缝封堵层失稳破坏形式研究不够深入,缺少堵漏材料特征参数的评价指标以及高效优化设计方法。笔者基于裂缝封堵层微观结构受力分析,探讨了裂缝封堵层失稳破坏形式及微观机理,提出了评价封堵层失稳形式的特征参数,给出了裂缝致密承压封堵物理模型;研制了长裂缝封堵模拟实验装置,开展了致密承压封堵模拟实验研究。

1 裂缝封堵层微观结构受力

微观上,裂缝致密承压封堵层可近似为封堵材料颗粒物质体系。颗粒物质体系是由大量离散颗粒组成的体系,颗粒体系的宏观改变和强度特性等主要取决于颗粒个体的空间排列及相互作用力^[15]。桥接堵漏材料经钻井液携带进入地层裂缝后,经架桥、堆积、填充等作用形成封堵层。堵漏材料在进入裂缝过程中,受到钻井液渗透力作用;形成封堵层后,在水平方向上受井眼流体压力和地层孔隙压力作用,在垂直方向上受裂缝闭合压力作用,在3个力的综合作用下,封堵层与裂缝壁面产生摩擦力。另外,封堵层内部颗粒与颗

粒之间相互挤压,产生法向力和切向力等接触应力。总之,裂缝封堵层在外力和内部接触应力共同作用下,处于力学平衡状态,形成了致密承压的“封堵隔墙”(图1),预防或控制钻井液漏失。

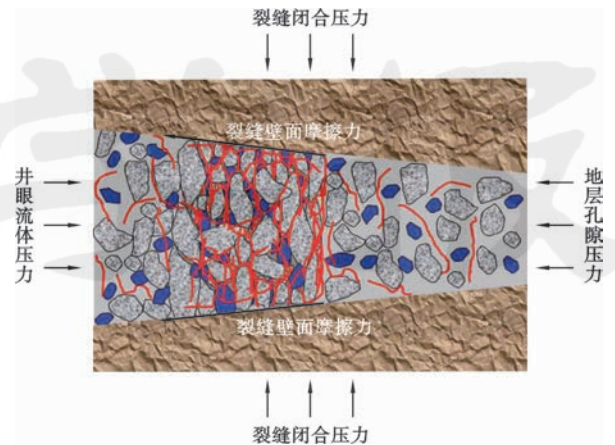


图1 裂缝封堵层受力示意

Fig. 1 Schematic of fracture sealing zone under stress

1.1 钻井液对堵漏颗粒的渗透力

渗透力是土力学中的一个重要的物理量^[16-18],其定义为土体中水的流动对土骨架所施加的作用力。当土体孔隙中的水处于运动状态时,将对土颗粒产生沿流向推动力和边界摩擦力作用,因此,渗透力包含了对土颗粒的动水压力和拖拽力两种不同性质的力,其反作用力是土颗粒对于渗透水流的阻力。渗透力计算式为^[19]:

$$J = n\gamma_i i V_0 \quad (1)$$

渗透力公式中,水为牛顿流体,而大多数钻井液为非牛顿流体,此时假设钻井液为牛顿流体,如图2所示。钻井液携带堵漏颗粒进入裂缝,钻井液流动作用转化为动水压力,推动颗粒在裂缝中移动;钻井液具有黏滞性,其流动相对于颗粒边界具有摩擦力作用,因此钻井液流动对堵漏颗粒具有拖拽力作用。堵漏颗粒受到钻井液的动水压力和拖拽力作用向裂缝深处运移。

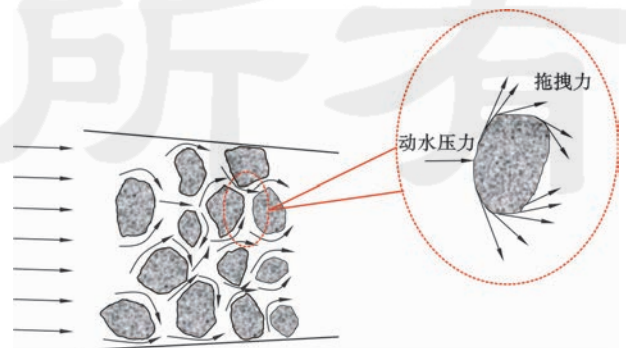


图2 钻井液对堵漏颗粒的渗透力示意

Fig. 2 Schematic of seepage force of drilling fluid on plugging particles

1.2 堵漏颗粒与颗粒之间的接触应力

堵漏材料在裂缝中架桥、堆积和填充形成封堵层的过程,微观尺度上是从细小结构单元(单颗粒)逐渐形成整体的、具有一定强度结构的过程;细观尺度上是颗粒之间相互挤压产生接触应力,从而形成力链结构的过程;宏观上是颗粒逐渐堆积、挤压形成封堵层的过程。形成封堵层后,颗粒之间紧密堆积、相互挤压,产生不同的接触应力,从而形成不同强度的力链,这些力链相互连接构力链网络,非均匀地贯穿于封堵层内部,影响封堵层稳定性^[20]。

外力作用下,堵漏颗粒与颗粒之间相互挤压,在接触点附近发生局部变形,产生接触法向力,符合 Hertz 接触理论^[21]。将堵漏颗粒近似为球形,则可建立球形颗粒接触时的受力分析模型(图 3)。

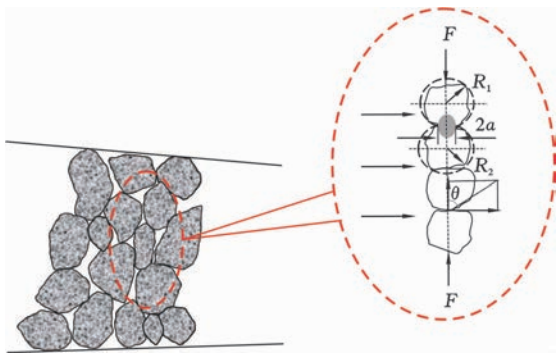


图 3 堵漏颗粒之间受力分析示意

Fig. 3 Schematic of stress analysis between plugging particles

当两颗粒受压力 F 的作用沿径向相互挤压时,在接触处发生局部变形,形成一个半径为 a 的椭圆接触面,其半径远远小于两球的半径 R_1 和 R_2 。按照 Hertz 假设,接触区域的压力呈半球体分布形式,接触中心法向应力最大,为 σ_N ,由 Hertz 公式可知椭圆接触面半径为:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3FR_1R_2}{4(R_1+R_2)} \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)} \quad (2)$$

则颗粒之间接触中心法向应力:

$$\sigma_N = \frac{3F}{2\pi a^2} =$$

$$\frac{1}{\pi} \sqrt[3]{6F \left[\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) / \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \right]^2} \quad (3)$$

若考虑颗粒之间的切向应力,应将颗粒放在力链结构中处理(图 3)。力链中颗粒间切向应力^[14]:

$$\tau = \sigma \tan \theta = \sigma \mu = \frac{3kxd\mu}{2\pi La^2} \quad (4)$$

1.3 封堵层与裂缝壁面之间摩擦力

在井眼流体和地层孔隙压差作用下,封堵层受水

平方向压力作用为^[14]:

$$F_{\Delta p} = \Delta p H W \quad (5)$$

封堵层受垂直方向的裂缝闭合应力,在水平方向压差作用下与裂缝壁面产生摩擦力:

$$f = 2p_0 W l (1 - \phi) \mu_0 \quad (6)$$

封堵层保持稳定的条件为:

$$F_{\Delta p} \leq f \quad (7)$$

2 裂缝封堵层失稳破坏形式

2.1 挤压破碎失稳

由式(3)可知,颗粒接触中心法向应力受外力、颗粒物性参数(粒径、弹性模量、泊松比)的影响。堵漏材料在裂缝中形成封堵层后,当外力超过堵漏材料的抗压强度时,堵漏材料受挤压发生破碎,在井底压差作用下随钻井液流向裂缝深处,从而无法在裂缝中架桥封堵,导致漏失重新发生,即发生挤压破碎失稳(图 4)。

2.2 摩擦滑动失稳

研究表明^[22-23],堵漏材料在裂缝入口端附近形成封堵层,可有效封堵和支撑裂缝,增大周向应力,阻止裂缝延伸扩展,为较理想的裂缝封堵位置。由式(7)可知,若封堵层受水平方向压力大于其与裂缝壁面的摩擦力,则封堵层沿裂缝壁面滑向裂缝尖端,发生摩擦滑动失稳(图 5),导致大量钻井液漏失。

2.3 剪切错位失稳

当封堵层承受的外力超过其剪切强度时,发生局部失稳破坏,称为封堵层剪切错位失稳(图 6)。封堵层剪切强度与其内部力链结构强弱有关,封堵层内部力链结构的强弱受以下因素影响^[24]:① 堵漏颗粒平均配位数,即每个颗粒与周围颗粒接触的数量;② 堵漏颗粒平均接触力,即颗粒之间相互挤压时在接触区域产生的力;③ 颗粒之间的切向应力 τ ,由式(4)可知, τ 与颗粒劲度系数、表面摩擦系数等参数有关。当颗粒之间堆积疏松、平均接触力小、颗粒表面光滑时,封堵层内部形成弱力链结构,此时在较小的外力作用下力链发生破坏和断裂,宏观表现为封堵层剪切错位失稳。

2.4 渗透漏失失稳

堵漏颗粒受到钻井液的动水压力和拖拽力作用下不断发生运移,当缺少大粒径架桥颗粒时,堵漏材料不能在裂缝入口端附近进行架桥封堵,在渗透力作用下移动至裂缝深处,导致大量钻井液漏失[图 7(a)];由式(1)可知,堵漏颗粒堆积孔隙度越大,钻井液对其渗透力越大,当缺少小粒径填充颗粒时,此时虽然能在裂缝中进行架桥,但颗粒堆积疏松,渗透力作用显著,钻井液继续向地层深处漏失,导致堵漏作业的失败[图 7(b)];

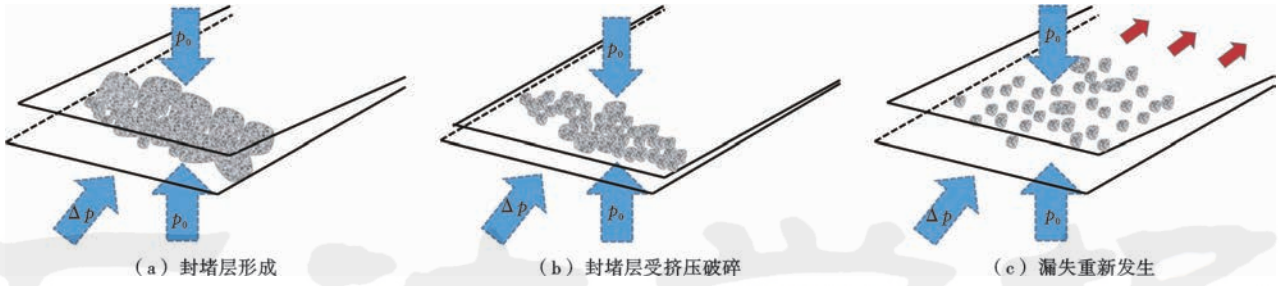


图4 封堵层挤压破碎失稳形式示意

Fig. 4 Schematic of compressive-crush instability pattern in sealing zone

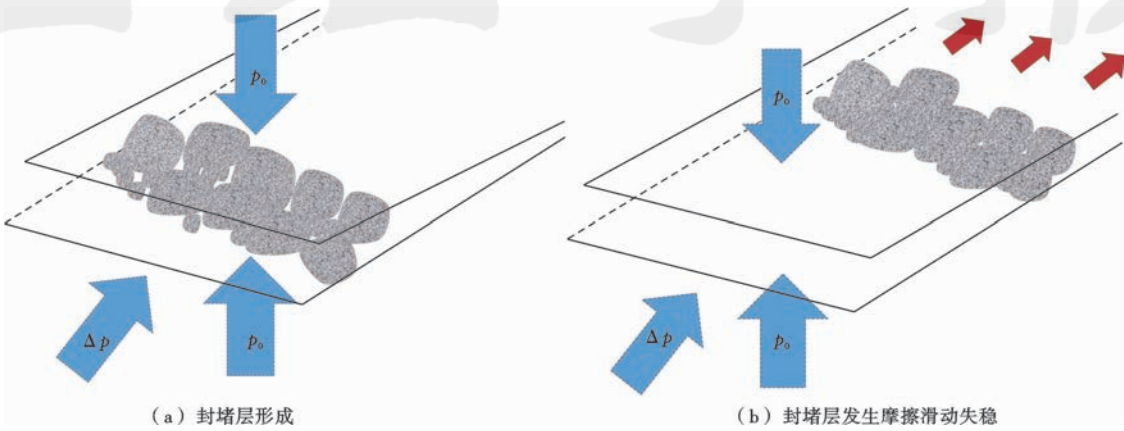


图5 封堵层摩擦滑动失稳形式示意

Fig. 5 Schematic of friction-sliding instability pattern in sealing zone

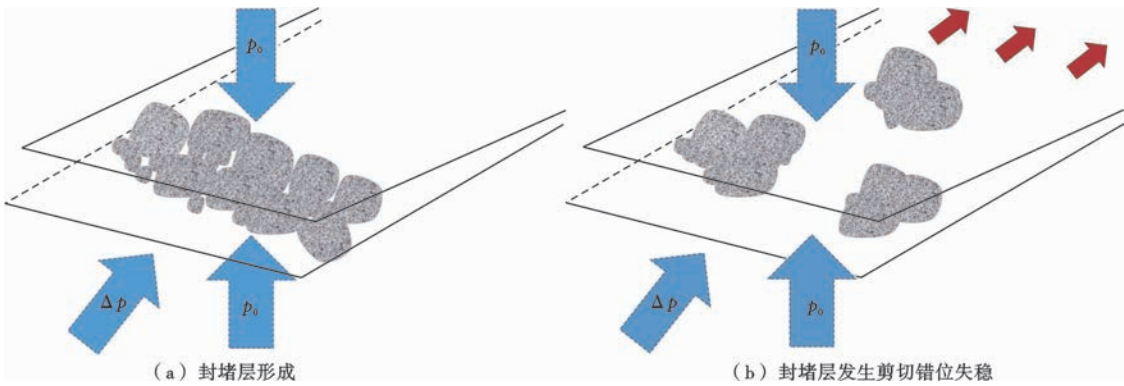


图6 封堵层剪切错位失稳形式示意

Fig. 6 Schematic of shear-dislocation instability pattern in sealing zone

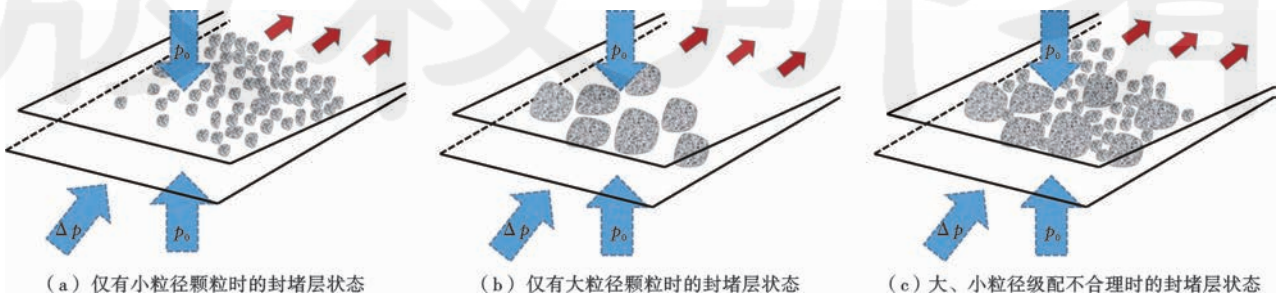


图7 封堵层渗透漏失失稳形式示意

Fig. 7 Schematic of seepage-loss instability pattern in sealing zone

堵漏颗粒大、小粒径级配不合理时同样造成颗粒间堆积疏松,造成钻井液不断漏失[图7(c)]。因此当堵漏颗粒粒径级配不合理时,在钻井液渗透力作用下易发生渗透漏失失稳。

2.5 多种力耦合作用下的失稳形式

堵漏材料在裂缝中形成封堵层的过程中,在多种力耦合作用下,裂缝封堵层失稳破坏形式有以下情况:①发生一种失稳破坏形式;②多种失稳破坏形式同时发生;③以一种失稳破坏形式为主,伴随其他失稳破坏形式的发生。多种力耦合作用下封堵层失稳破坏形式的发生取决于堵漏材料类型、性质、粒径级配以及裂缝壁面的凹凸性、粗糙度等。当堵漏材料抗压强度不足时,容易受挤压发生破碎,从而伴随着滑动摩擦失稳和渗透漏失失稳的发生;当堵漏材料表面光滑时,形成的封堵层与裂缝壁面之间的摩擦力、堵漏材料之间的摩擦力较小,易发生摩擦滑动失稳和剪切错位失稳;由于裂缝壁面凹凸不平,作用在封堵层高度上的裂缝闭合压力不同,如果封堵层受裂缝闭合压力较小,则容易发生剪切错位失稳和摩擦滑动失稳;当堵漏材料类型单一且粒径级配不合理时,则4种失稳破坏形式有可能同时发生。因此,在进行堵漏材料及配方优化设计时,

应综合考虑多种力耦合作用下的裂缝封堵层失稳破坏形式。

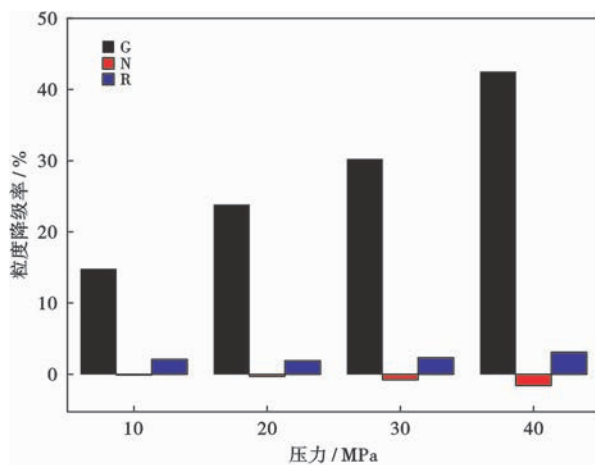
3 堵漏材料特征参数及致密承压封堵物理模型

3.1 粒度降级率

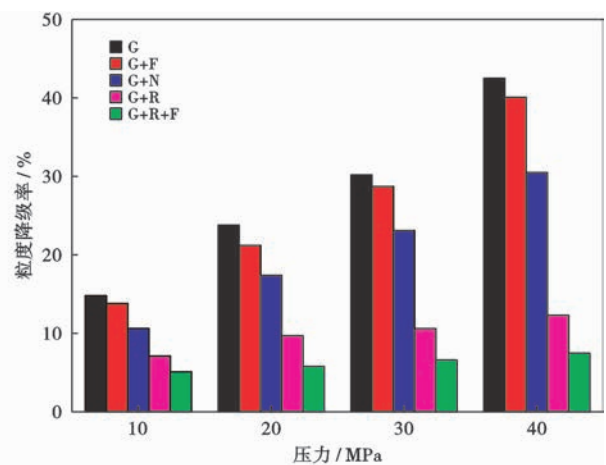
堵漏材料应具有较高的抗压强度,有效预防挤压破碎失稳。采用压力机向堵漏材料加压模拟裂缝闭合压力,以 D_{90} 粒度降级率 D_{sc} 为评价指标,体现颗粒受压前后 D_{90} 粒度变化情况,评价不同类型堵漏材料的抗压强度^[25]。 D_{sc} 值越低,颗粒抗压强度越大。

$$D_{sc} = \left[\frac{D(90) - D'(90)}{D(90)} \right] \times 100\% \quad (8)$$

实验表明[图8(a)],碳酸钙颗粒(G) D_{sc} 值明显高于其他材料,受压后发生严重破碎,属于脆性材料;果壳颗粒(N) D_{sc} 值出现负数,受压后颗粒发生屈服变形,属于塑性材料;弹性橡胶颗粒(R) D_{sc} 值较小,且随压力增加几乎保持不变,属于弹性材料。现场堵漏作业中,单独使用刚性颗粒(如碳酸钙颗粒)时抗压强度较低,易发生挤压破碎失稳,因此实验考察组合堵漏材料的抗压强度。



(a) 单一类型堵漏材料



(b) 不同类型堵漏材料组合

图8 不同堵漏材料D90粒度降级率

Fig. 8 D90 granularity degradation rate of different plugging materials

实验表明[图8(b)],碳酸钙颗粒和弹性橡胶颗粒复配后, D_{sc} 值显著降低,增大了抗压强度。当加入纤维材料(F)后,纤维进一步充填颗粒间孔隙,起到一定的缓冲作用, D_{sc} 值进一步降低。综上所述,刚性颗粒、弹性颗粒、纤维材料协同作用,粒度降级率低,抗压强度高,可有效预防封堵层发生挤压破碎失稳。

3.2 表面摩擦系数

封堵层与裂缝壁面之间应具有较大的摩擦力,有效预防摩擦滑动失稳。由式(6)可知,堵漏材料的表面摩擦

系数是影响封堵层发生摩擦滑动失稳的主要因素。采用摩擦系数测试仪,测试不同类型堵漏材料的表面摩擦系数。

实验表明(图9),碳酸钙颗粒(G)、果壳(N)表面摩擦系数较低,而弹性橡胶(R)表面摩擦系数较高,组合堵漏材料的表面摩擦系数随弹性橡胶体积分数的增多而增大,碳酸钙颗粒、弹性橡胶、纤维材料(F)合理组合,具有较高的表面摩擦系数,有助于增加封堵层与裂缝壁面之间的摩擦力,从而有利于在裂缝入口端附近形成封堵层,可有效预防封堵层发生摩擦滑动失稳。

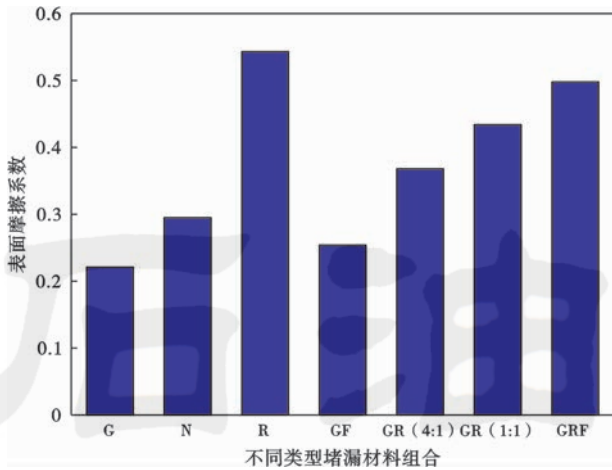


图9 不同类型堵漏材料组合表面摩擦系数

Fig. 9 Surface friction coefficients of different types of plugging material combinations

采用 ISH500 显微镜摄像头观察不同类型堵漏材料微观形貌,借助 Powers 提出的球形度图示^[26]分析可知,碳酸钙颗粒是具有高球形度的亚球形颗粒,表面粗糙度低,表面摩擦系数小;弹性橡胶颗粒是具有低球形度的半棱角状颗粒,表面粗糙度较高,表面摩擦系数大;纤维是细长的非球形颗粒,长径比高,起到充填拉筋作用,增强封堵层与裂缝壁面之间的摩擦作用。

3.3 剪切强度

封堵层应具有较高的剪切强度,有效预防剪切错位失稳。由式(4)可知,力链中颗粒之间的切应力与堵漏材料类型、表面摩擦系数等有关。当单独使用颗粒状、片状堵漏材料时,颗粒之间往往形成弱力链结构,易发生剪切错位失稳。混凝土领域研究发现,纤维加筋技术能有效弥补传统混凝土剪切强度的不足^[27]。同样,堵漏作业中加入纤维材料也能增加封堵层的剪切强度。采用四联应变控制式直剪仪,测试堵漏颗粒和纤维材料混合试样的剪切强度^[28]。常用黏聚力 c 和内摩擦角 φ 评价混合试样的剪切强度。

实验表明(图 10),混合试样黏聚力随纤维加量而增加。当纤维加量从 0 增加到 0.15% (质量分数,下同)时,黏聚力增加了 15.6%,但当纤维加量从 0.15% 增加到 0.25% 时,黏聚力增加了 41.2%。当纤维加量小于 0.15% 时,混合试样内摩擦角没有明显变化,但当纤维加量大于 0.15% 时,混合试样的内摩擦角随着纤维加量显著增加。

纤维材料能增强裂缝封堵层的剪切强度,可从离散纤维界面作用和密集纤维成网作用^[29]两个方面分析解释。离散纤维被周围的颗粒紧紧包裹,两者在剪切过程中共同受力出现错动趋势,一方面产生摩擦力

阻止纤维和颗粒的相对滑动,另一方面纤维承受拉应力分担外部荷载作用,而且纤维弯曲部位还会对颗粒产生约束作用,限制颗粒变形,这些界面力的存在均能提高封堵层的剪切强度。另外,大量纤维在封堵层内部常呈现密集的空间网状结构,形成三维受力网,当纤维受外力作用产生位移趋势时,会遇到相邻其他纤维的阻止作用,使得外力能够在纤维之间叠加传递,使载荷分布到更广的区域,提高封堵层的剪切强度。因此,混合试样中纤维含量增大到一定程度时,除了具有离散纤维界面作用外,还会叠加三维成网拉筋作用,从而导致封堵层黏聚力和内摩擦角显著增大,封堵层剪切强度增大。

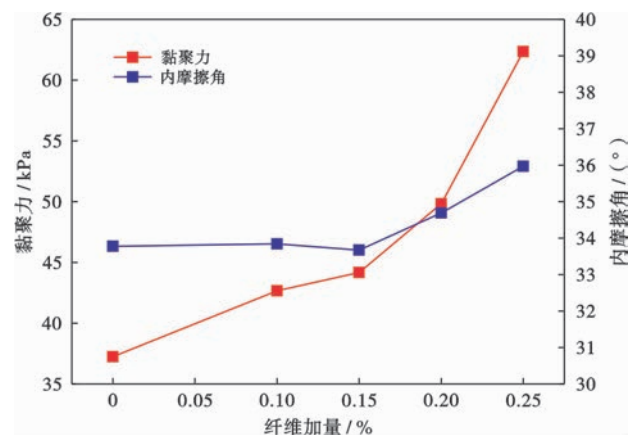


图10 纤维与堵漏颗粒混合试样的剪切强度指标随纤维加量的变化

Fig. 10 Shear strength index of the mixed sample of fiber and particle with the increase of fiber



图11 纤维与颗粒协同封堵层微观结构扫描电镜照片

Fig. 11 SEM photos of the microstructure for sealing zone by fibers and particles synergy

3.4 堆积孔隙比

由式(1)可知,钻井液对堵漏颗粒渗透力与颗粒堆积孔隙度有关,堵漏颗粒粒径级配合理,颗粒堆积孔隙度小,钻井液对颗粒产生的渗透力小,能有效预防渗透

漏失失稳; 另外, 紧密堆积后颗粒之间接触的概率增加, 颗粒平均配位数增加, 连接形成强力链的概率增加, 增强了封堵层的整体强度。采用堆积孔隙比评价堵漏材料堆积致密程度。称取 500 g 堵漏材料装于试样筒中, 放于振实台上, 表面施加盖板和 5 kg 重物, 调节振实台频率 80 Hz, 振动 30 min 后停止, 记录此时的堆积体积值 V , 计算颗粒堆积孔隙比 e :

$$e = V / [\sum (M_i / \rho_i)] - 1 \quad (9)$$

可以看出, e 越小则体系堆积越致密^[30]。堵漏材料粒径分布一般划分为 1—4 类, 见表 1。

表 1 堵漏材料粒度分析区间划分标准

Table 1 Classification standard of particle size distribution for plugging materials

类别	目数	粒径/mm
1	10~20	2.0~0.9
2	20~40	0.9~0.45
3	40~80	0.45~0.2
4	>80	<0.2

实验表明(图 12), 对于同一类型堵漏材料, 通过合理粒径级配可显著降低堆积孔隙比。碳酸钙颗粒(G)中加入弹性橡胶(R)后, 受压后由于弹性变形特征进一步充填于颗粒空隙之间, 减小堆积孔隙比; 加入纤维材料(F)后, 由于纤维高长径比, 可进一步充填于颗粒空隙之间, 减小颗粒堆积孔隙比, 提高封堵层堆积致密程度。因此通过不同类型堵漏材料复配和合理的粒径级配, 可降低堆积孔隙比, 有效预防封堵层发生渗透漏失失稳。

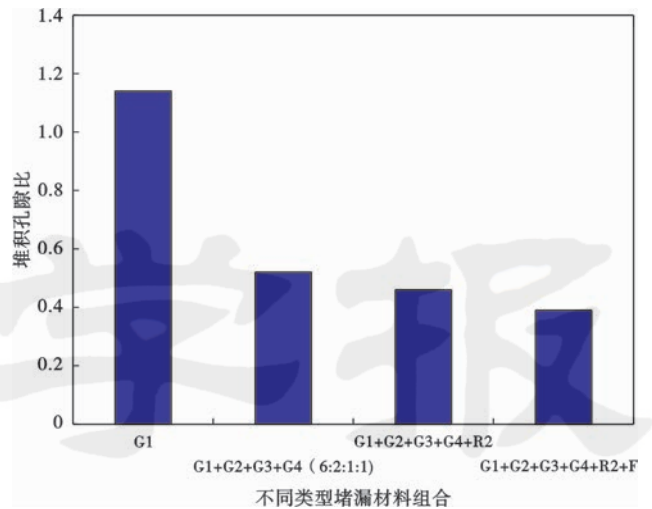


图 12 不同类型堵漏材料组合的堆积孔隙比

Fig. 12 Packing pore ratios of different plugging material combinations

3.5 裂缝致密承压封堵物理模型

基于裂缝封堵失稳微观机理分析, 裂缝封堵层在内外应力作用下应保持平衡稳定状态, 在裂缝入口端附近形成致密承压封堵层, 有效封堵和支撑裂缝, 也有利于阻止裂缝延伸扩展, 提高地层承压能力, 预防井漏。因此, 在堵漏材料特征参数分析的基础上, 分析给出了裂缝致密承压封堵物理模型(图 13), 探讨钻井液致密承压封堵过程及微观机理。刚性颗粒、弹性颗粒和纤维材料协同作用, 可增加封堵层摩擦系数(抗摩擦滑动失稳)、剪切强度(抗剪切错位失稳), 减小颗粒粒度降级率(抗挤压破碎失稳)、颗粒堆积孔隙比(抗渗透

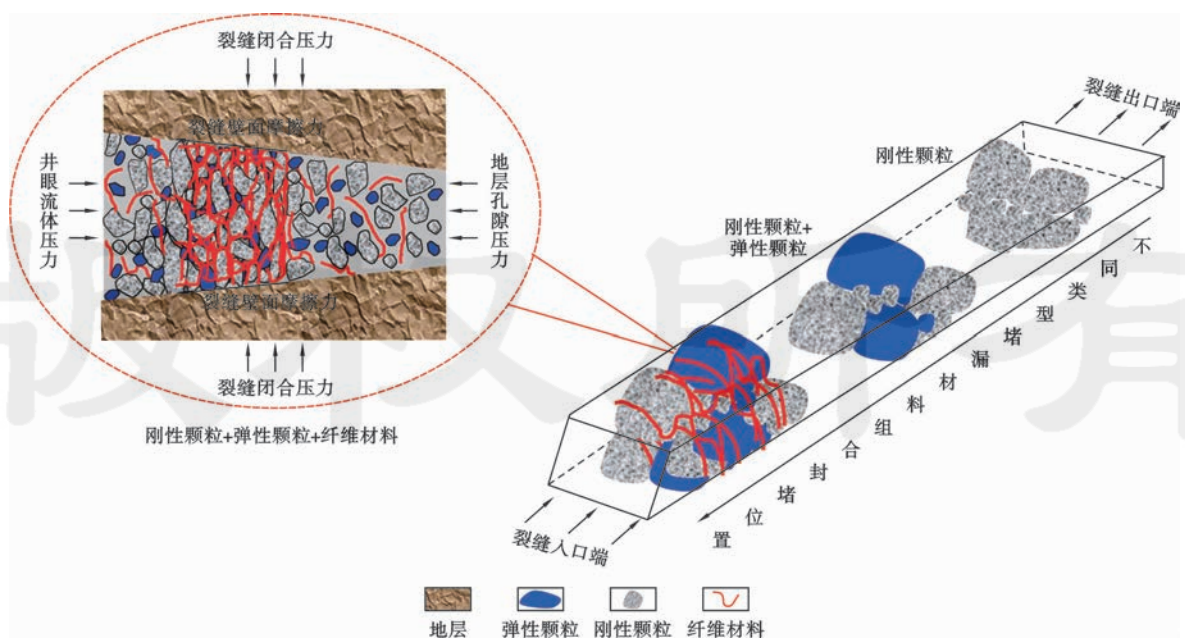


图 13 裂缝致密承压封堵作用物理模型示意

Fig. 13 Schematic of pressure bearing and tight plugging physical model

漏失失稳),可有效预防多种力耦合作用下的裂缝封堵层失稳破坏。仅使用刚性颗粒时,易发生挤压破碎、摩擦滑动、剪切错位等失稳形式,会在裂缝深处架桥堆积;弹性颗粒的加入可降低颗粒粒度降级率,提高封堵层抗压强度,增加表面摩擦系数;纤维材料能显著提高裂缝封堵层的剪切强度,同时纤维长径比较大,可弯曲变形充填于颗粒空隙中,提高封堵层的致密性。因此,通过合理的堵漏材料类型组合和粒径级配优化控制,有利于在裂缝入口端附近形成致密承压封堵层,提高承压能力,预防或减少漏失。

4 长裂缝封堵模拟实验

目前常用的钻井液防漏堵漏模拟实验装置采用的实验裂缝模块厚度不足,无法模拟地层裂缝深度实际情况。采用较薄的裂缝模块进行实验时,即使粒径级配合理,堵漏材料可能来不及在裂缝中完成架桥、堆积和填充等过程而流出裂缝,与实际堵漏动态过程不符。因此,为了更好地模拟井下堵漏过程实际情况,考察堵漏材料在裂缝中的封堵位置及堆积微观结构状态,研制了长裂缝封堵模拟实验装置(图 14)。

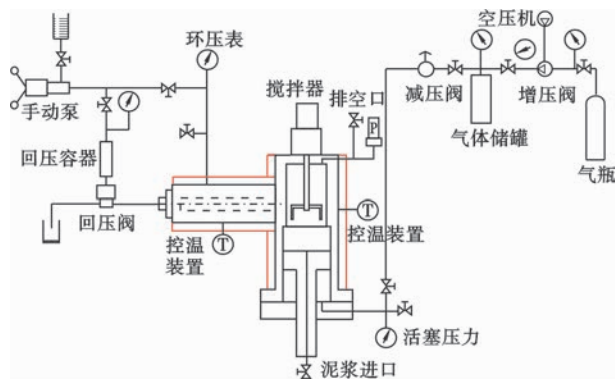


图 14 自制长裂缝封堵模拟实验装置原理示意
Fig. 14 Schematic of self-made plugging experiment apparatus with long fracture slot

装置由高温高压钻井液釜体、岩心夹持器、温度和压力测量控制系统及数据采集处理系统等 4 大部分组成,通过氮气向钻井液釜体中活塞加压,驱动堵漏浆进入水平摆放的长裂缝,实现封堵过程,并实时采集钻井液注入压力、釜体温度、岩心夹持器温度等参数。该装置可采用不同开度楔形长裂缝(最长达 100 cm)的实验模块,模拟不同温度、压力及剪切速率下钻井液的动态或静态堵漏过程。利用封堵突破压力、封堵漏失量和封堵有效区域(封堵层位置和厚度)等指标,实验评价封堵作用效果。封堵突破压力是裂缝封堵层所能承受的最大临界压力^[31],以免产生重复漏失。合理组合堵漏材料进入裂缝后,会在有效封堵区域内自适应形

成致密承压封堵层(封堵位置和厚度存在差异),封堵理想情况下,可在裂缝入口端附近形成致密承压的封堵区域^[32],实验结束后,将两对称缝板打开后,呈现裂缝封堵区域。封堵漏失量是指封堵实验达到稳定时漏失的钻井液体积。

选择长度为 100 cm、裂缝开度为 2 mm×1 mm 的楔形裂缝实验模块,通过刚性碳酸钙颗粒(G)、弹性橡胶颗粒(R)、合成纤维材料(F)等不同类型堵漏材料的优化协同作用,研究其形成致密承压封堵层的微观机理。

由致密承压封堵优化实验可知(图 15、图 16,表 2),仅使用刚性颗粒时,封堵突破压力较低,漏失量较大,封堵有效区域靠近裂缝出口端,未达到理想的封堵状态;刚性颗粒复配弹性颗粒或纤维材料后,封堵突破压力升高,漏失量减少,且封堵有效区域逐渐靠近裂缝入口端;刚性颗粒、弹性颗粒、纤维材料组合并通过合理的粒径级配优化控制,封堵突破压力提高至 15 MPa,漏失量降低为 40 mL,封堵有效区域更靠近裂缝入口

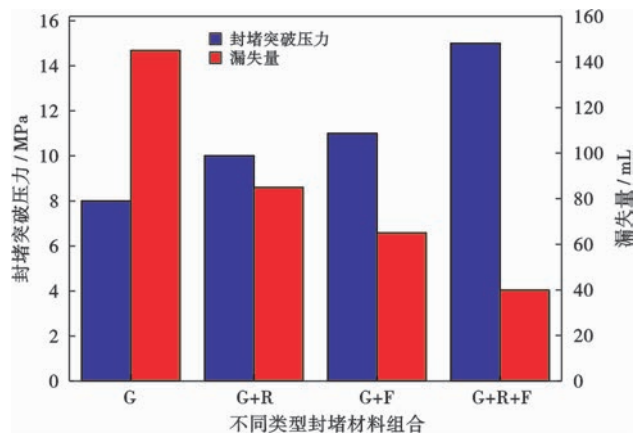


图 15 不同类型堵漏材料组合的裂缝封堵实验结果
Fig. 15 Experiment results of fracture plugging for different plugging material combinations

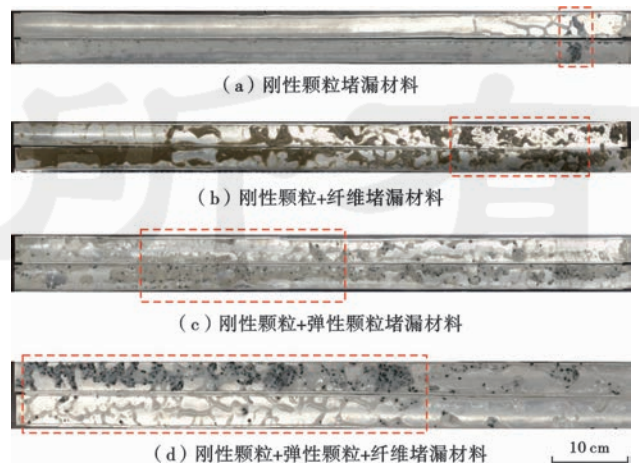


图 16 不同类型堵漏材料组合的裂缝封堵区域
Fig. 16 Fracture sealing zones for different plugging material combinations

表2 2 mm×1 mm 楔形长裂缝致密承压封堵配方评价实验结果

Table 2 Evaluation experiment results of pressure bearing and tight plugging formulas with 2 mm×1 mm long tapered slot

不同类型堵漏材料组合	封堵配方	封堵突破压力/MPa	封堵有效区域位置/cm	封堵有效区域厚度/cm	封堵漏失量/mL
刚性颗粒	4%G1+2%G2+3%G3+2%G4	8	92~93	1	145
刚性颗粒+弹性颗粒	4%G1+1%R1+2%G2+1%R2+3%G3+1%R3+2%G4	10	22~60	38	85
刚性颗粒+纤维材料	4%G1+2%G2+3%G3+2%G4+0.2%F	11	67~96	29	65
刚性颗粒+弹性颗粒+纤维材料	4%G1+1%R1+2%G2+1%R2+3%G3+1%R3+2%G4+0.2%F	15	4~66	62	40

端(4~66 cm),有效预防封堵层失稳破坏。其中,图 16 中左端为裂缝入口端。

5 结论

(1) 基于裂缝封堵微观结构受力分析,探讨了挤压破碎失稳、摩擦滑动失稳、剪切错位失稳、渗透漏失失稳等封堵层失稳破坏形式,揭示了封堵失稳微观机理;提出了堵漏材料粒度降级率、表面摩擦系数、剪切强度、堆积孔隙比等评价封堵失稳的特征参数。

(2) 给出了裂缝致密承压封堵层物理模型。不同类型堵漏材料组合优化协同作用,可减小粒度降级率和堆积孔隙比,增大表面摩擦系数和剪切强度,可有效预防裂缝封堵层的失稳破坏。

(3) 研制了长裂缝封堵模拟实验装置,优化了不同类型堵漏材料组合配方,通过合理的堵漏材料类型和粒度级配优化控制,易在裂缝入口端附近形成致密承压封堵层,提高裂缝封堵承压能力,减少封堵漏失量。

符号注释: J —渗透力, N; γ_f —流体重度, N/m^3 ; i —水力梯度; V_0 —土体体积, m^3 ; n —土体孔隙率; F —堵漏颗粒受法向压力大小, N; a —堵漏颗粒接触面椭圆半径, m; R_1 、 R_2 —堵漏颗粒近似为球型时的半径, m; σ_N —堵漏颗粒接触中心法向应力大小, Pa; E_i —堵漏材料弹性模量, MPa; μ_i —堵漏材料泊松比; k —颗粒的劲度系数, N/m; x —整条力链变形量, m; L —力链长度, m; d —颗粒直径, m; σ —颗粒接触应力大小, Pa; τ —颗粒之间的切向应力大小, Pa; θ —颗粒之间摩擦角, ($^\circ$); μ —颗粒表面摩擦系数; F_{dp} —封堵层受水平压力大小, N; Δp —井眼流体和地层孔隙压差, Pa; H —封堵层高度, m; W —封堵层宽度, m; f —封堵层与裂缝面摩擦力大小, N; p_0 —裂缝闭合应力大小, Pa; l —封堵层长度, m; ϕ —封堵层孔隙度; μ_0 —封堵层与裂缝壁面之间的摩擦系数; D_{sc} —堵漏颗粒粒度降级率; $D(90)$ —堵漏颗粒受压前累计粒度分布数达到 90% 时所对应的粒径, μm ; $D'(90)$ —颗粒受压后累计粒度分布数达到 90% 时所对应的粒径, μm ;

c —堵漏颗粒和纤维混合试样黏聚力, kPa; φ —堵漏颗粒和纤维混合试样内摩擦角, ($^\circ$); e —颗粒堆积孔隙比; V —堵漏材料堆积体积总和, cm^3 ; ρ_i —堵漏材料密度, g/cm^3 ; M_i —堵漏材料质量, g; 下标 i 表示不同类型堵漏材料, $i = 1, 2, \dots, n$; G —刚性碳酸钙颗粒; R —弹性橡胶颗粒; F —合成纤维材料。

参考文献

- [1] 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 capacity model and its application to plugging of fractured formation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 479-487.
- [2] 王明波,郭亚亮,方明君,等. 裂缝性地层钻井液漏失动力学模拟及规律[J]. 石油学报, 2017, 38(5): 597-606.
WANG Mingbo, GUO Yaliang, FANG Mingjun, et al. Dynamics simulation and laws of drilling fluid loss in fractured formations[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(5): 597-606.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 吕开河,邱正松,魏慧明,等. 自适应防漏堵漏钻井液技术研究[J]. 石油学报, 2008, 29(5): 757-760.
LÜ Kaihe, QIU Zhengsong, WEI Huiming, et al. Study on techniques of auto-adapting lost circulation resistance and control for drilling fluid[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(5): 757-760.
- [6] 张康卫,李宾飞,袁龙,等. 低压漏失井氮气泡沫连续冲砂技术[J]. 石油学报, 2016, 37(S2): 122-130.
ZHANG Kangwei, LI Binfei, YUAN Long, et al. Nitrogen foam continuous sand flushing technique in low-pressure wells with lost circulations[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(S2): 122-130.
- [7] 胡成亮,何丕祥,蒋官澄,等. 修井作业自降解防漏堵漏体系[J]. 石油学报, 2016, 37(S2): 150-157.
HU Chengliang, HE Pixiang, JIANG Guancheng, et al. Self-degradation plugging system during workover operation[J]. Acta

- Petrolei Sinica, 2016, 37(S2): 150-157.
- [8] 王平全, 李再钧, 裴勋勇, 等. 用于钻井堵漏和封堵的特种凝胶抗冲稀性能[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 697-701.
WANG Pingquan, LI Zaijun, NIE Xunyong, et al. Anti-dilution properties of a special gel applied to loss circulation control in drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 697-701.
- [9] 刘合, 杨清海, 裴晓含, 等. 石油工程仿生学应用现状及展望[J]. 石油学报, 2016, 37(2): 273-279.
LIU He, YANG Qinghai, PEI Xiaohan, et al. Current status and development prospect of petroleum engineering bionics[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(2): 273-279.
- [10] KUMAR A, SAVARI S, WHITFILL D, et al. Wellbore strengthening: the less-studied properties of lost-circulation materials[R]. SPE 133484, 2010.
- [11] 邱正松, 刘均一, 周宝义, 等. 钻井液致密承压封堵裂缝机理与优化设计[J]. 石油学报, 2016, 37(S2): 137-143.
QIU Zhengsong, LIU Junyi, ZHOU Baoyi, et al. Tight fracture-plugging mechanism and optimized design for plugging drilling fluid[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(S2): 137-143.
- [12] 张韵洋. 薄弱地层封堵承压能力研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
ZHANG Yunyang. The calculation method research of weak formation sealing pressure-bearing capacity[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [13] 余继平. 页岩井周地层一封堵带系统突变失稳机理[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
SHE Jiping. Catastrophic instability mechanism to system consisted of plugging zone and rock in shale formation[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [14] XU Chengyuan, KANG Yili, CHEN Fei, et al. Analytical model of plugging zone strength for drill-in fluid loss control and formation damage prevention in fractured tight reservoir[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 149: 686-700.
- [15] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1-3.
SUN Qicheng, WANG Guangqian. Introduction to particle matter[M]. Beijing: Science Press, 2009: 1-3.
- [16] 卢廷浩. 土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
LU Tinghao. Soil mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [17] 李广信. 论土骨架与渗透力[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1522-1528.
LI Guangxin. On soil skeleton and seepage force[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1522-1528.
- [18] 蒋中明, 龙芳, 熊小虎, 等. 边坡稳定性分析中的渗透力计算方法考证[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2478-2486.
JIANG Zhongming, LONG Fang, XIONG Xiaohu, et al. Study of calculation methods of acting force of seepage in slope stability analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2478-2486.
- [19] LI Xiangsong, MING Haiyan. Seepage driving effect on deformations of San Fernando dams[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24(12): 979-992.
- [20] 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.
- [21] JOHNSON K L. Contact mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [22] 宋丁丁, 邱正松, 王灿, 等. 基于 ABAQUS 的井壁强化数值模拟研究[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(3): 15-19.
SONG Dingding, QIU Zhengsong, WANG Can, et al. Numerical simulation of borehole wall strengthening using ABAQUA[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(3): 15-19.
- [23] 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): 1009-1012.
WANG Gui, PU Xiaolin. Plugging mechanism of drilling fluid by enhancing wellbore pressure[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6): 1009-1012.
- [24] 孙其诚, 辛海丽, 刘建国, 等. 颗粒体系中的骨架及力链网络[J]. 岩土力学, 2009, 30(S1): 83-87.
SUN Qicheng, XIN Haili, LIU Jianguo, et al. Skeleton and force chain network in static granular material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S1): 83-87.
- [25] 刘均一. 井壁强化钻井液技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2016.
LIU Junyi. Study on wellbore strengthening drilling fluid technology[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2016.
- [26] POWERS M C. A new roundness scale for sedimentary particles [J]. Journal of Sedimentary Research, 1953, 23(2): 117-119.
- [27] 李建, 唐朝生, 王德银, 等. 基于单根纤维拉拔试验的波形纤维加筋土界面强度研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1696-1704.
LI Jian, TANG Chaosheng, WANG Deyin, et al. Single fiber pull-out tests on interfacial shear strength of wave-shape fiber-reinforced soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1696-1704.
- [28] 王德银, 唐朝生, 李建, 等. 纤维加筋非饱和黏土的剪切强度特性[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1933-1940.
WANG Deyin, TANG Chaosheng, LI Jian, et al. Shear strength characteristics of fiber-reinforced unsaturated cohesive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1933-1940.
- [29] 高磊, 胡国辉, 杨晨, 等. 玄武岩纤维加筋黏土的剪切强度特性[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S1): 231-237.
GAO Lei, HU Guohui, YANG Chen, et al. Shear strength characteristics of basalt fiber-reinforced clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S1): 231-237.
- [30] 刘清秉, 项伟, BUDHU M, 等. 砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 190-197.
LIU Qingbing, XIANG Wei, BUDHU M, et al. Study of particle shape quantification and effect on mechanical property of sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 190-197.
- [31] SAVARI S, WHITFILL D L, JAMISON D E, et al. A method to evaluate lost circulation materials-investigation of effective wellbore strengthening applications[R]. SPE 167977, 2014.
- [32] 王在明, 邱正松, 徐加放, 等. 复合堵漏中平衡区域及其在新型堵漏仪中的应用[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 143-145.
WANG Zaiming, QIU Zhengsong, XU Jiafang, et al. Balance area of compound lost circulation control and its application in novel lost circulation simulator[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 143-145.