

# 裂缝性地层桥接堵漏技术发展综述与展望

孙金声<sup>1,2\*</sup>, 杨景斌<sup>1</sup>, 白英睿<sup>1</sup>, 吕开河<sup>1</sup>, 王金堂<sup>1</sup>, 王韧<sup>2</sup>

1 中国石油大学(华东)石油工程学院, 青岛 266580

2 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 北京 102206

\* 通信作者, sunjdsri@cnpc.com.cn

收稿日期: 2023-08-01

国家自然科学基金(No.52288101、No.51991361、No.52074327) 联合资助

**摘要** 我国 83% 深层油气有待开发, 向深层进军获取油气资源是保障国家能源安全的重大战略任务。而裂缝性地层井漏是制约超深层油气钻井的关键“卡脖子”难题。研发专用堵漏材料形成高效堵漏技术, 提高深层裂缝性地层一次堵漏成功率, 是钻井工程领域当前研究和实践的重点之一。桥接堵漏是裂缝性漏失地层最常用的堵漏技术之一。因此, 本文对裂缝性地层桥接堵漏技术进行了详细的综述, 概括了桥接堵漏材料的分类、作用机理以及桥接堵漏配方的设计方法和组成, 阐述了提高裂缝性地层桥接封堵层稳定性的机制和承压堵漏机理, 厘清了桥接封堵层的形成、破坏和结构演化机制。同时, 展望了裂缝性地层桥接堵漏技术的发展前景, 对于实现高效安全钻井、加快超深层油气开发进程、保障国家能源安全具有重要意义。

**关键词** 裂缝性地层; 桥接堵漏技术; 堵漏材料; 承压堵漏机理; 封堵层演化机制

## Review and prospect of bridging plugging technology in fractured formation

SUN Jinsheng<sup>1,2</sup>, YANG Jingbin<sup>1</sup>, BAI Yingrui<sup>1</sup>, LV Kaihe<sup>1</sup>, WANG Jintang<sup>1</sup>, WANG Ren<sup>2</sup>

1 School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China

2 CNPC Engineering Technology Research Institute Co., LTD., Beijing 102206, China

**Abstract** In China, 83% of deep oil and gas remains to be developed, and it is a major strategic task to secure national energy security to enter deep oil and gas resources. However, lost circulation in fractured formation is the key “stuck neck” problem restricting ultra-deep oil and gas drilling. The research and development of special plugging materials to form efficient plugging technology and improve the success rate of plugging in deep fractured formations is one of the focuses of current research and practice in drilling engineering field. Bridge plugging is one of the most commonly used plugging techniques in fractured leakage formation. Therefore, this paper gives a detailed review on the bridging plugging technology of fractured formation, summarizes the classification of bridging plugging materials, the mechanism of action, the design method and composition of bridging plugging formula, expounds the mechanism of improving the stability of the bridging plugging layer of fractured formation and pressure plugging mechanism, and clarifies the formation, failure and structural evolution mechanism of the bridging plugging layer. Meanwhile, the development prospect of fracture formation bridging plugging technology is prospected, which is of great significance for realizing efficient and safe drilling, speeding up the process of ultra-deep oil and gas development, and ensuring national energy security.

**Keywords** fractured formation; bridging plugging technology; plugging material; pressure plugging mechanism; evolution mechanism of the plugging layer

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.04.032

引用格式: 孙金声, 杨景斌, 白英睿, 吕开河, 王金堂, 王韧. 裂缝性地层桥接堵漏技术发展综述与展望. 石油科学通报, 2023, 04: 415-431  
SUN Jinsheng, YANG Jingbin, BAI Yingrui, LV Kaihe, WANG Jintang, WANG Ren. Review and prospect of bridging plugging technology in fractured formation. Petroleum Science Bulletin, 2023, 04: 415-431. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.04.032

## 0 引言

我国石油和天然气消费需求逐年增长,油气供应对外依存度居高不下,2022年我国原油对外依存度71.2%,远超50%的国际安全警戒线,天然气对外依存度40.2%,严重危及国家能源安全。习近平总书记在考察调研胜利油田时强调,能源的饭碗必须端在自己手里;二十大报告中强调要“加大油气资源勘探开发和增储上产力度”。我国经济高质量发展对石油天然气需求仍将强劲增长,加大国内油气资源勘探开发力度是保障国家能源安全的重大战略,高效开发超深层油气是保证端好能源饭碗的当务之急。

我国深层超深层油气资源总量达671亿t油当量,占油气资源总量超34%,目前探明率仅为17%。近年来,我国油气开发深度从深层逐渐拓展到超深及特深层,不断突破有效资源保持深度下限。塔里木、四川、渤海湾等盆地相继探明超深层油气,开辟了增储上产新战场(图1)。目前,攻克万米超高温高压油气开采技术与装备已被列入2020—2035年国家油气科技重大专项

战略规划,中石油、中石化在“十四五”期间规划部署了数百口8000~10000 m超深—特深井,正在实施万米特深层勘探计划,开启了超深—特深层油气开发的序幕。

超深层地质条件复杂,普遍发育多尺度裂缝甚至溶洞,工程环境苛刻,钻井工程复杂事故多。裂缝性井漏是超深层钻井过程中最常见且难以治理的工程复杂事故之一,已成为制约我国超深油气地层钻井提质增效和勘探开发进度的“拦路虎”(图2)<sup>[1]</sup>。据统计,全世界井漏发生率占钻井总数的20%~25%,每年用于堵漏费用高达40亿美元<sup>[2]</sup>;美国、加拿大等北美地区碳酸盐岩、页岩等油气藏钻井过程中发生恶性井漏的井数约占钻井总数的40%;中东地区碳酸盐岩裂缝性油藏钻井过程中发生恶性井漏的井数占比超过30%,井漏损失时间占比超过50%<sup>[3]</sup>。我国油气钻井工程同样面临井漏难题,据中国石油集团油田工程技术服务公司统计,近年来中石油国内和海外区块钻井复杂事故总损失时间中,井漏导致的损失占比均超过70%,每年井漏损失时间超3500天,年均直接经济损失超

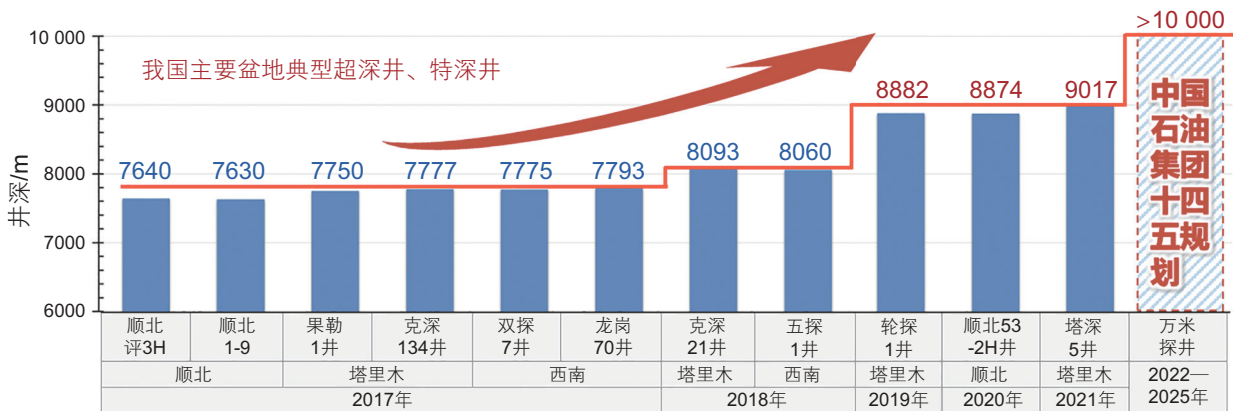


图1 我国超深层油气钻井深度不断取得新突破

Fig. 1 China's ultra-deep oil and gas drilling depth continues to make new breakthroughs

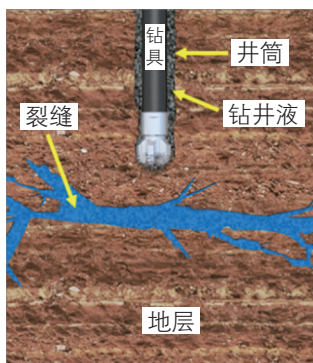


图2 裂缝性地层井漏示意图

Fig. 2 Schematic diagram of leakage in fractured formation

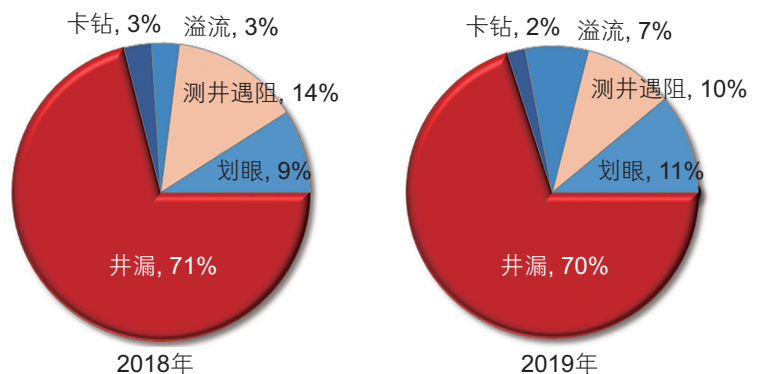


图3 中石油集团钻井事故复杂损失时间分类统计

Fig. 3 Classification and statistics of complex loss time in drilling accidents of CNPC

40 亿元(图 3)。塔里木油田 2019—2021 年完钻的 320 口井中,有 275 口井发生漏失 1646 井次,水基钻井液漏失量超 21 万 m<sup>3</sup>,油基钻井液漏失量超 3.6 万 m<sup>3</sup>,经济损失巨大。因此,裂缝性地层井漏已成为制约油气勘探开发进度的世界性难题。

裂缝性地层井漏理论与技术研究方面,以经典的“应力笼”理论为基础,国内外学者相继提出了“裂缝封尾”、“阻渗带”、“强固环”等理论,并在此基础上形成了系列钻井液承压堵漏技术<sup>[4]</sup>,对于小尺度裂缝漏失地层取得了较好应用效果,但是针对裂缝性恶性漏失地层的一次堵漏成功率仍然较低,堵漏方法难以复制<sup>[5]</sup>。随钻堵漏技术类似于人为建立“人造井壁”屏蔽环,可提高井壁正反方向的承压能力,可以适用于复杂构造地层,裂缝发育地层等低承压条件的地层<sup>[6]</sup>。常用的随钻堵漏技术有桥塞随钻堵漏技术,物理法随钻堵漏技术,化学法随钻堵漏技术等<sup>[7]</sup>。虽然,许多堵漏技术已经被开发或应用于石油钻井工程中,总体来说,钻井堵漏还存在诸多问题。由于井漏发生情形的复杂性和难以预见特性,依然缺乏行之有效的堵漏材料和方法,而且堵漏一次成功率低。中石油塔里木库车山前地区巨厚盐层漏失段一次堵漏成功率低于 40%(图 4);川渝地区二开断层水基漏失段一次堵漏成功率低于 10%,三开裂缝地层油基漏失段桥堵和水泥的一次堵漏成功率分别仅为 16%和 10%(图 5);中石化顺北地区志留系裂缝性漏失地层的一次堵漏成功率低于 25%;沙特阿拉伯 Ghawar 油田二叠系 Khuff 组裂缝性地层的一次堵漏成功率低于 20%。

桥接堵漏是解决裂缝性地层井漏问题的有力手段之一,在塔里木、西南、长庆等地区的应用比起超 70%,美国 90%的井漏均采用桥接堵漏来处理<sup>[8]</sup>,在全球油气井堵漏范围内的应用占比超 65%。桥接堵漏

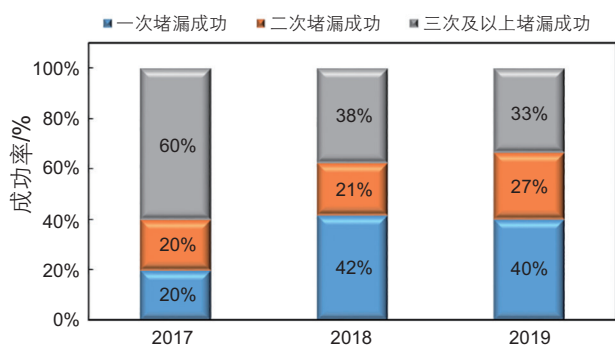


图 4 塔里木库车山前盐膏层堵漏成功率统计  
Fig. 4 Statistics of successful plugging rate of salt paste layer in Kuqa Mountain front, Tarim

材料按其形状可分为 3 大类,即颗粒状材料、纤维状材料和片状材料。其中,颗粒状材料在堵漏过程中卡住漏失通道的“喉道”,起“架桥”作用;纤维状材料在形成封堵层中纵横交错,相互拉扯,起悬浮拉筋作用;片状材料在堵漏过程中主要起填充作用<sup>[9]</sup>。利用不同形状及尺寸的桥接堵漏材料与钻井液复配在裂缝内架桥、堆积和充填,形成阻断流体压力传递和流体介质通过的裂缝封堵层,具有致密结构和高承压能力特征<sup>[10-11]</sup>。但常用的桥接堵漏材料粒径与地层漏失通道尺寸的匹配性差。由于重力沉降、缝内冲刷、井筒压力波动等因素的影响,在裂缝宽度较大、纵向延伸较高的大裂缝,尤其是溶洞中不易驻留,高温稳定性不佳,导致封堵层承压能力低。因此,研发具备抗高温、强级配、高稳定性等一体化特性的功能型堵漏新材料,揭示其裂缝堵漏机理,可为深层裂缝性地层堵漏提供新材料、新机理和新方法借鉴。

综上,高效堵漏材料及其作用机理等基础研究的创新和突破,是提高超深层桥接堵漏一次成功率的关键,也是当今国内外的攻关热点。基于此,本文对裂缝性地层桥接堵漏技术进行了详细的综述,概括了桥接堵漏材料的分类、作用机理以及桥接堵漏配方的设计方法和组成,阐述了提高裂缝性地层桥接封堵层稳定性的机制和承压堵漏机理,厘清了桥接封堵层的形成、破坏和结构演化机制。同时,展望了裂缝性地层桥接堵漏技术的发展前景,为保障我国超深层油气安全高效钻井提供理论支撑,对于加快超深层油气开发进程、保障国家能源安全具有重要意义。

## 1 裂缝性地层桥接堵漏材料研究现状

随着油气勘探开发向深层—超深层拓展,钻井过

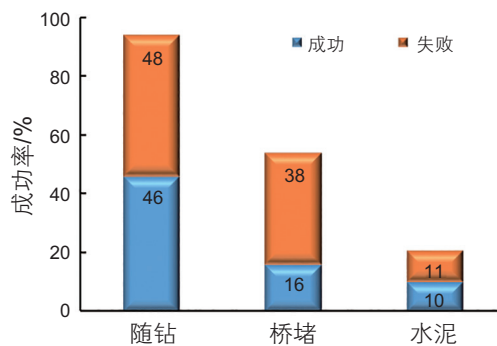


图 5 川渝页岩气井三开油基堵漏效果统计  
Fig. 5 Statistics of oil-based plugging effect of three openings in Sichuan-Chongqing shale gas Wells

程中遇到的地质条件愈加复杂, 裂缝性井漏问题异常突出, 恶性漏失频发。桥接堵漏方法具有材料来源广、成本低廉、现场施工工艺简便等优点, 受到了国内外相关领域学者的广泛关注。

### 1.1 桥接材料分类及作用机理

堵漏材料是实现堵漏成功的基础和关键。堵漏材料对钻井液漏失条件和漏失类型的适用性决定了其作用效果。国内外专家学者相继研发了桥接类、高失水类、可固化类、吸液膨胀类和柔性凝胶类等多种类型的堵漏材料。目前, 桥接堵漏材料是油田现场普遍使用的一种堵漏材料, 桥接堵漏材料的类型、几何及力学性能等对封堵层的承压能力起着至关重要的作用。

桥接堵漏材料是由颗粒状、纤维状、片状等惰性材料按照一定的质量比和粒度级配形成的复合堵漏材料。常用的桥接材料有核桃壳、碳酸钙、纤维、云母片等。孙金声<sup>[1]</sup>认为桥接堵漏材料的作用机理主要是通过漏失通道内架桥、拉筋、堆积、填充等作用形成致密的封堵层, 适用于渗透性或漏失不严重的地层。许成元等人<sup>[12]</sup>研究了桥接堵漏材料在裂缝中的动态封堵性能, 认为裂缝封堵层的形成可分为滞留阶段和封堵阶段, 如图6所示, 滞留阶段通常经历桥接结构的形成—破坏—改造, 最终趋于稳定, 封堵阶段是后续进入裂缝的堵漏材料在稳定桥接结构的基础上快速堆积并持续压实, 形成裂缝封堵带。Amanullah等人采用椰枣核研发了系列桥接颗粒状堵漏材料, 对2 mm

缝宽裂缝的承压封堵能力达10 MPa以上<sup>[13]</sup>。康毅力等人<sup>[14]</sup>通过分析核桃壳、碳酸钙等桥接堵漏材料的形貌、粒度分布及力学性质等建立了深井超深井钻井桥接堵漏材料高温老化性能评价方法和指标体系, 认为桥接堵漏材料高温老化失效是深井超深井裂缝封堵层结构破坏并在储层段发生重复性漏失的一个重要因素。目前关于桥接堵漏材料的研发以刚性材料为主, 主要研究刚性材料的粒径、形貌、强度等关键参数对桥接堵漏效果的影响规律, 对于热固性树脂等功能型桥接材料, 国内外学者也开展了探索性研究。

针对裂缝性地层漏失通道大、常规桥接堵漏材料堵漏效率低等问题, 立足“刚性材料架桥+柔性材料固化充填”思路, 结合热固性树脂固化前变形能力强、固化后强度高应用特点, 在钻井液堵漏领域具有广阔的应用前景。Lv等人制备了一种水下高温慢固化的环氧树脂堵漏体系(图7)<sup>[15]</sup>, 可以很容易地穿过模拟地层裂缝, 并在120 °C条件下进行固化, 固化后的环氧树脂具有良好的抗压强度, 能够有效封堵裂缝, 可应用于油气钻井过程中的钻井液堵漏。Batista等人使用聚对苯二甲酸乙二醇酯改性的聚酯树脂作为堵漏材料<sup>[16]</sup>, 具有较高的抗压强度和较低的粘度, 在封堵弃井和补救作业中具有良好的应用。Knudsen等人制备了一种热固性树脂堵漏剂, 成功地处理了中东海气田井中的稠油泥浆漏失<sup>[17]</sup>。Maryam等采用纤维改性的聚丙烯进行堵漏, 该堵漏材料在玻璃转化温度以上可实现自适应、自黏结封堵漏失通道, 在0.2 inch

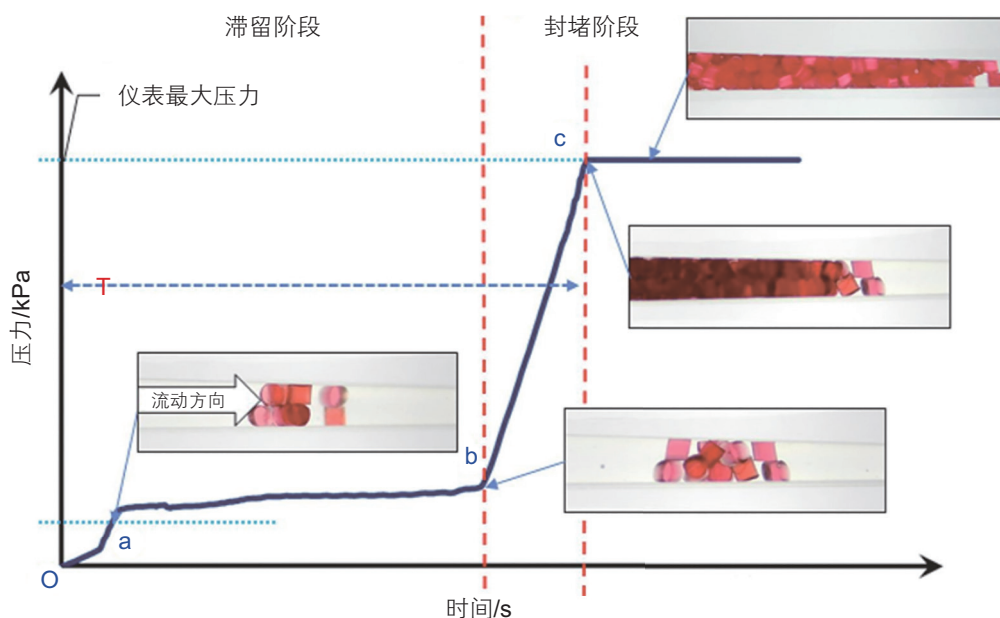


图6 桥接堵漏材料在裂缝中的驻留状态和压力<sup>[12]</sup>

Fig. 6 Residence state and pressure of bridging plugging materials in fractures<sup>[12]</sup>

的裂缝中承压能力高达 5 MPa，性能优于常规堵漏材料<sup>[18]</sup>。王在明采用双酚A环氧树脂、酮亚胺、偶联剂 KH550 和硬脂酸钙等合成了一种胶黏材料<sup>[19]</sup>，将其涂覆在桥接堵漏材料上，可形成具有自固结特性的堵漏剂，在 110 °C 温度固化后抗压强度达高到 4.6 MPa。

针对常用化学堵漏剂抗温性能差、承压封堵能力弱，无法有效封堵深层复杂漏失地层的问题，王建华等人制备了一种油基钻井液用改性树脂抗高温防漏堵

漏剂<sup>[20]</sup>，在 180 °C 高温条件下对宽裂缝漏失通道的封堵承压极限达到 6 MPa，可满足高温高压漏失地层中的钻井液堵漏目的。Li 等人采用连续乳液聚合法制备了丁苯乙烯树脂/纳米 SiO<sub>2</sub> (SBR/SiO<sub>2</sub>) 复合材料，分析了 SBR/SiO<sub>2</sub> 的分散和封堵机理(图 8)<sup>[21]</sup>。该研究为解决钻井过程中油基钻井液造成的井筒失稳和储层损害提供了一条途径，通过添加堵漏剂可在页岩地层中形成致密滤饼，减少流体漏失。郭钢等人通过改性环

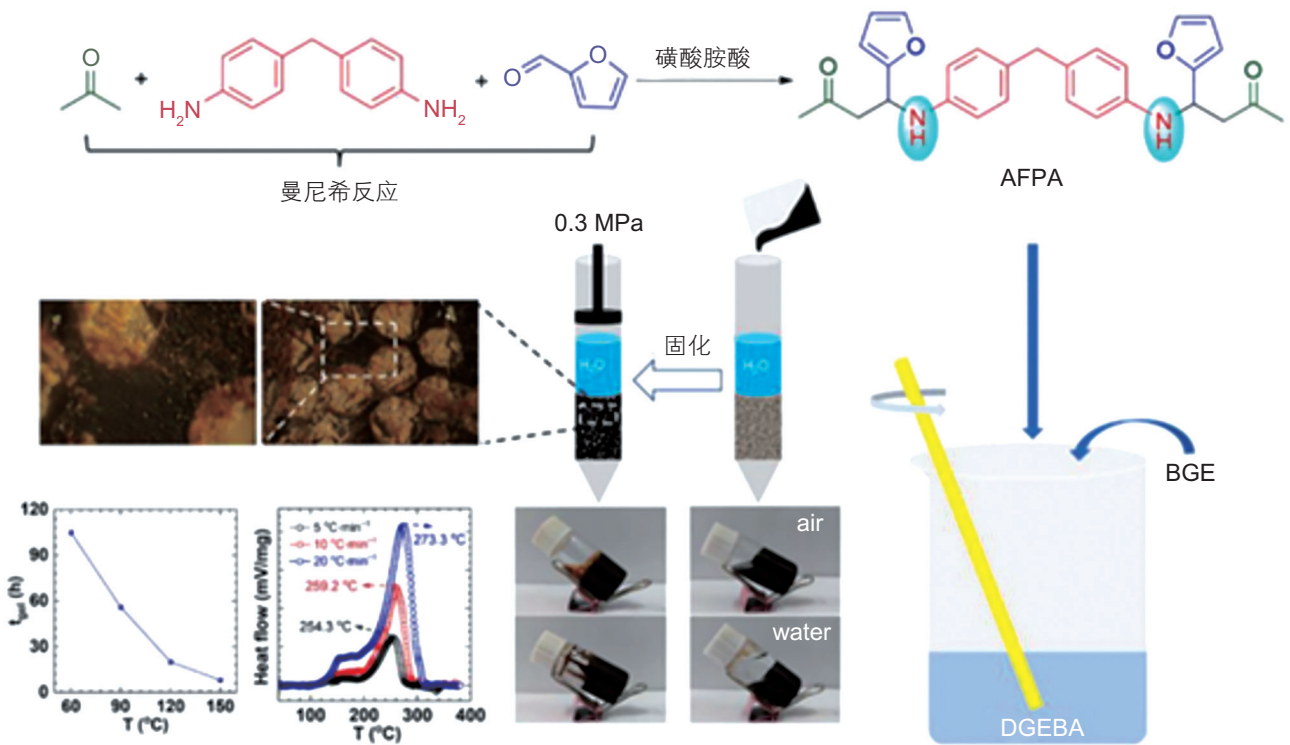


图 7 水下高温慢固化环氧树脂堵漏剂制备过程示意图<sup>[15]</sup>

Fig. 7 Schematic diagram of preparation process of underwater high temperature slow curing epoxy resin plugging agent<sup>[15]</sup>

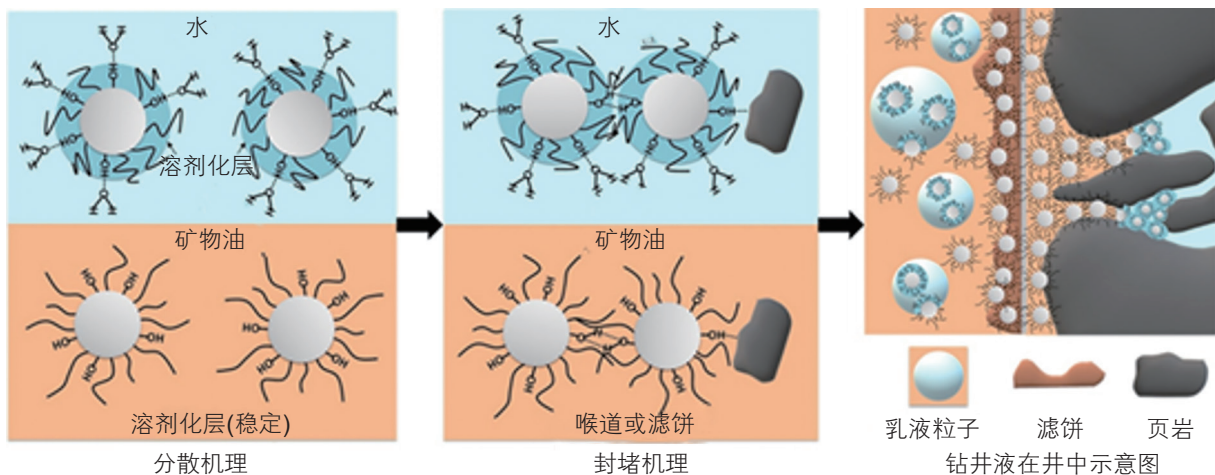


图 8 丁苯乙烯树脂/纳米 SiO<sub>2</sub> 复合材料分散性和堵漏机理示意图<sup>[21]</sup>

Fig. 8 Schematic diagram of dispersibility and plugging mechanism of butadiene resin/nano-SiO<sub>2</sub> composites<sup>[21]</sup>

氧树脂形成了液态堵漏树脂体系<sup>[22]</sup>, 具有低黏、易注入、固化时间可控、耐压强度高等特点, 在长庆油田镇A井及华B井套管堵漏作业应用效果良好, 为油田稳产增产提供一条新的技术途径。陈大钧等人对以环氧树脂和酚醛树脂复配物为主体材料的堵漏剂进行了改性研究<sup>[23]</sup>, 改性后的环氧-酚醛树脂堵漏剂固化时间可控、强度高, 具有较好的抗高温老化性能以及化学稳定性能, 对岩心孔隙的封堵率在98%以上, 对岩心裂缝的封堵率在80%以上。赖小林等人研制了一种新型双网络吸水树脂堵漏剂<sup>[24]</sup>, 具有很高的抗压强度和很好的韧性, 能够长期耐受150℃高温, 可用于深井超深井堵漏作业。

## 1.2 桥接堵漏配方设计方法

桥接堵漏配方设计应优先考虑与漏失通道尺寸相匹配的粒度分布。桥接堵漏材料及其配方粒度分布的获取方法有实验测试法和粒度分布函数预测法。国内外学者围绕裂缝性地层堵漏配方设计开展了大量研究。Vickers考虑粒度分布特征值 $D_{90}$ 、 $D_{75}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{25}$ 、 $D_{10}$ 与最大缝宽的关系, 提出了指导堵漏配方设计的Vickers准则<sup>[25]</sup>。Whitfill认为粒度分布均值与平均裂缝宽度相当时封堵效果最优, 提出了堵漏配方设计的 $D_{50}$ 准则<sup>[26]</sup>。Razavi提出了基于双峰特征的最优累积粒度分布方程, 用于指导裂缝封堵配方设计<sup>[27]</sup>。Lee开展了单裂缝封堵过程CFD-DEM模拟, 基于堆积效率和无量纲漏失速率指标, 对比了具有单峰和双峰粒度分布特征的堵漏配方封堵裂缝效果的差异<sup>[28]</sup>。Mehravian等针对井周组合宽度裂缝性漏失, 提出了多峰粒度分布堵漏配方设计方法<sup>[29]</sup>。朱金智等人基于单一桥接堵漏材料粒度分布实测数据, 提出了采用分段三次Hermite插值法预测桥接堵漏材料及配方粒度分布的新方法<sup>[30]</sup>。基于分段三次Hermite插值法的新方法对桥接堵漏材料配方粒度分布的表征更加准确,

堵漏配方的预测累积粒度分布曲线与实测数据高度吻合, 不需要预先设定粒度分布函数形式, 且适用于具有多峰粒度分布的颗粒物料, 可用于预测不同配比颗粒混合物的粒度分布。康毅力等人开展了室内2 mm裂缝封堵实验, 优选出了有效的桥接封堵材料, 形成了封堵层优化配方, 最终提出针对毫米级裂缝的堵漏材料优化组合, 认为对毫米级裂缝进行架桥封堵的最优材料组合为刚性颗粒、弹性粒子与纤维材料, 其形成封堵层示意图如图9所示<sup>[31]</sup>。唐文泉等人优选了高强度架桥材料、填充材料和纤维材料, 按1/3~2/3架桥理论确定不同材料的粒径范围, 按SAN-2工程分布理论确定了各种粒径的体积配比, 形成了抗高温高强度交联堵漏配方<sup>[32]</sup>。李峰等人优选了刚性颗粒、柔弹性颗粒和有机纤维材料等不同类型的堵漏材料, 优化了1~4 mm不同开度的裂缝堵漏配方, 承压能力达8 MPa<sup>[33]</sup>。根据国内外学者的研究, 封堵不同裂缝和孔隙尺寸, 需要对多种材料的粒径及其体积进行设计。然而, 现有的深层裂缝性地层堵漏配方设计方法主要以粒度分布为指标, 仅考虑了裂缝封堵致密性, 无法兼顾裂缝封堵承压能力, 未实现裂缝封堵层力学-几何结构协同优化, 导致深层裂缝性地层堵漏效果常难以复制, 一次堵漏成功率普遍偏低。

## 1.3 桥接堵漏配方组成和应用

准确快速预测堵漏材料及其配方粒度分布是桥接堵漏配方数字化、智能化设计的关键。许成元等人提出的堵漏材料定量评价优选方法, 可系统评价堵漏材料几何、力学和化学参数, 实现对堵漏材料定量评分和快速优选, 如图10所示<sup>[34]</sup>。采用优选材料所形成的配方封堵承压能力大于15 MPa, 并在塔里木盆地深层裂缝性储层2口井堵漏现场试验验证了该方法的可靠性, 有效提高了裂缝封堵效果。暴丹等人通过不同类型抗高温堵漏材料的粒径级配和浓度控制, 优化得

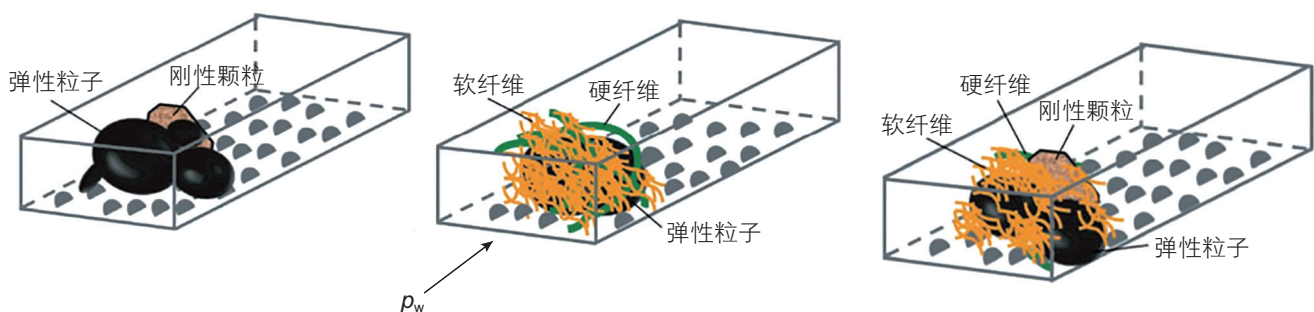


图9 刚性颗粒、弹性粒子与纤维材料形成封堵层示意图<sup>[31]</sup>

Fig. 9 Schematic diagram of the sealing layer formed by rigid particles, elastic particles and fiber materials<sup>[31]</sup>

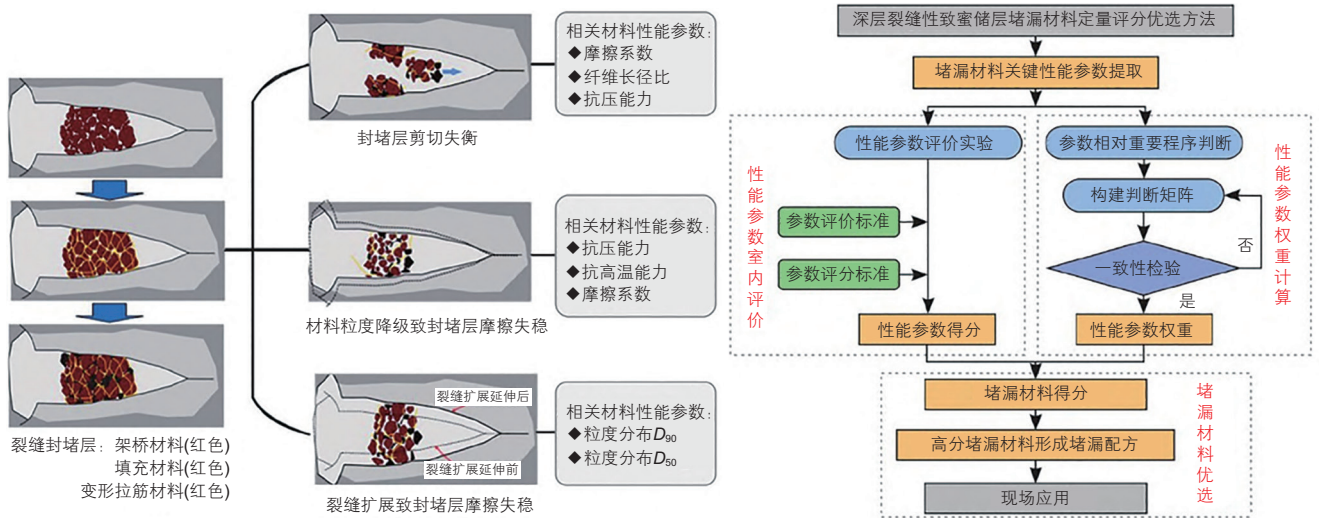


图 10 深层裂缝性地层堵漏材料关键性能参数及定量评分优选图<sup>[34]</sup>

Fig. 10 Optimization diagram of key performance parameters and quantitative scores of plugging materials in deep fractured formations<sup>[34]</sup>

到了不同裂缝开度的抗高温致密承压封堵工作液配方，其高温封堵承压能力 $\geq 10$  MPa，最高可达 15 MPa<sup>[35]</sup>。王书琪等人研究出了一套适合不同地层不同漏速的高密度桥接堵漏配方，在却勒 101、群 6 井堵漏和提高地层承压能力，施工 5 次，一次成功率为 100%<sup>[36]</sup>。张沛元等人采用桥接堵漏材料由细到粗、浓度由低到高的边配边注的逐级渐进法施工，有效提高了堵漏成功率和减少重复井漏的可能性<sup>[37]</sup>。现场应用该方法施工 6 口井、7 井次，成功率为 100%。目前，虽然国内外专家学者相继建立了深层裂缝性地层堵漏材料定量评分模型，并形成了桥接堵漏材料定量评分优选方法，但是常规桥接堵漏配方仍以漏速大小来决定堵漏材料粒度、浓度及注入量，易发生堵漏浆全部漏失或大颗粒封门现象，堵漏成功率不高或出现重复井漏。

桥接堵漏是解决裂缝性地层井漏问题的有效方法之一。利用不同形状及尺寸的桥接堵漏材料，以不同浓度与钻井液复配，通过堵漏浆流动过程中在裂缝内架桥、堆积和充填，形成裂缝封堵层。但常用桥接堵漏材料与裂缝尺度级配性差，现有技术无法准确反映地下裂缝尺度，因而难以科学优选桥接堵漏材料的粒径范围，导致桥接材料与裂缝尺度级配性不强，易在小裂缝入口“封门”或在大裂缝内“难驻留”。

## 2 裂缝性地层桥接封堵层稳定性研究现状

裂缝封堵层细观结构稳定性控制着宏观结构承压能力，进而影响工作液漏失控制效果。裂缝封堵层的

结构稳定性是决定漏失控制效果的关键因素。国内外学者围绕裂缝封堵层结构稳定性，分别在裂缝封堵层结构特征、堵漏材料性能参数提取、裂缝封堵层细观结构表征、裂缝封堵层承压失稳机理等方面开展了大量研究。

### 2.1 桥接封堵层力学稳定性研究现状

裂缝封堵层是由堵漏材料组成的离散颗粒物质体系，裂缝封堵层结构研究已成为防漏堵漏理论与技术发展的重要方向。关于裂缝封堵层结构特征，康毅力等人认为地层承压能力强化理论主要包括应力笼、阻渗带和强固环理论，提高地层承压能力的最终目的是建立井筒液柱压力与地应力场和地层压力场的平衡(图 11)<sup>[38]</sup>。裂缝扩展与延伸、渗流效应和地层压力衰竭是弱化地层承压能力的主要因素。闫霄鹏等人明确了承压过程裂缝封堵层强弱力链演化特征，基于网络科学方法提取了裂缝封堵层细观力链网络，揭示了裂缝封堵层结构失稳细观力学机制，如图 12 所示<sup>[39]</sup>。关于堵漏材料性能参数提取，Aston 等人提出“应力笼”加固井壁方法，该方法要求堵漏材料需具有一定的抗压强度，以确保裂缝封堵层形成后能够支撑裂缝张开<sup>[40]</sup>。Xu 等人通过数学模型和对堵漏强度和堵漏效率的模拟，确定了堵漏材料的关键力学参数，建立了考虑剪切破坏的裂缝封堵强度模型，并采用计算流体力学和离散元耦合方法对裂缝封堵效率进行了模拟，提出了一种优化材料选择的综合方法<sup>[41]</sup>。Kang 等人提出了堵漏材料磨蚀粒度降级测定方法，探讨了堵漏材

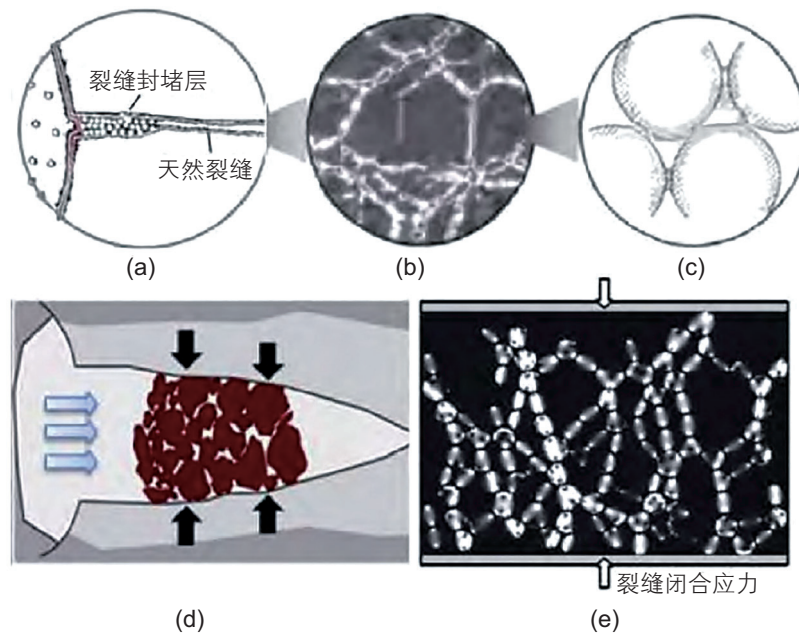


图 11 封堵层的多尺度结构及力链网络<sup>[38]</sup>

Fig. 11 Multi-scale structure and force chain network of the plugging layer<sup>[38]</sup>

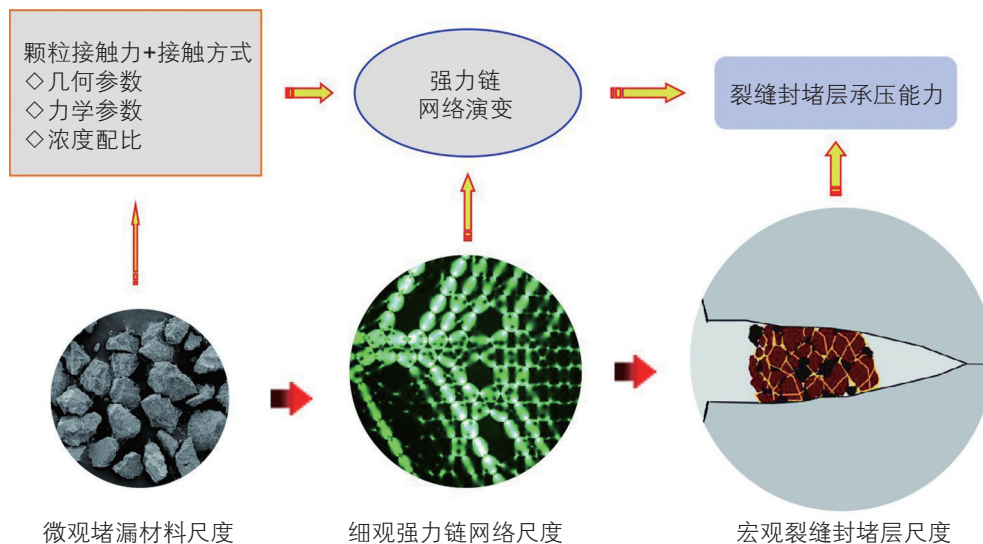


图 12 裂缝封堵层多尺度力学框架<sup>[39]</sup>

Fig. 12 Multi-scale mechanical framework of fracture plugging layer<sup>[39]</sup>

料磨蚀粒度降级主要控制因素<sup>[42]</sup>。关于裂缝封堵层微观结构表征, Yan等人基于颗粒物质力学理论, 考虑裂缝封堵层结构剪切失稳模式, 引入光弹实验法研究裂缝封堵层结构, 提出了裂缝封堵层微观结构表征光弹实验法<sup>[43]</sup>。关于裂缝封堵层结构承压稳定性方面, Kumar等人指出, 钻井过程反复漏失的主要原因是裂缝闭合或张开导致的裂缝封堵层结构破坏<sup>[44]</sup>。Xu等人考虑了裂缝封堵层摩擦失稳和剪切失稳模式, 建立了裂缝封堵层强度模型<sup>[45]</sup>。尽管目前国内外专家对裂缝封堵层结构稳定性研究取得了一定的进展, 但是由于

缺少对超高温高压条件下承压过程裂缝封堵层动态微观力学参数提取与微观结构演化的精细刻画, 裂缝封堵层结构失稳微观力学机制尚不明确, 桥接材料在裂缝内架桥堆积, 在井筒与地层压差作用下形成挤压封堵层, 其结构强度易受井筒压力波动等因素影响而降低甚至“溃散”, 导致堵漏失效。

## 2.2 桥接封堵层高温稳定性研究现状

随着油气资源勘探开发领域的不断拓展, 逐渐走向陆地深层超深层、海洋深水深层、高温地热以及干



热岩等复杂高温地层，而常用的堵漏材料难以满足超高温环境的需求。因此，超深层高温环境给桥接堵漏带来了更为严峻的挑战，对堵漏材料的抗温能力、抗压强度、稳定性及漏层滞留能力等提出了更高的要求。Yan通过对桥接封堵层颗粒间力的分析，描述了封堵层的多尺度结构(图 13)<sup>[46]</sup>。结合裂缝性储层的地质特征和钻井作业特点，提出了封堵带结构稳定性的表征方法。熊正强等人通过对桥接堵漏材料抗温性能筛选及不同堵漏材料粒度匹配研究，以刚性颗粒、矿物纤维、变形颗粒、屏蔽降滤失材料及高温保护剂为原料研制了一种抗 200 °C 高温随钻堵漏剂 GPC-200，具有良好的抗高温封堵性能<sup>[8]</sup>。段永贤等人研制了一种超深水平井架桥颗粒堵漏材料 CQ-GXJQ，该堵漏材料具有粒度可调、抗高温、机械强度高优点，可作为刚性架桥粒子用于超深水平井桥接堵漏技术中<sup>[47]</sup>。李家学等人研制的惰性、抗高温、高强度、不规则颗粒状刚性颗粒堵漏材料，使用随钻封缝即堵技术在迪那地区应用后相比于邻井漏失量减少 73.6%，漏失次数减少 67%<sup>[6]</sup>。为了提高随钻堵漏剂的抗温性能，也有选用抗高温填充变形材料作为主要原料，采用一定的加工工艺制备抗高温随钻堵漏剂。例如，王富华等人以废橡胶制品为主要原料，经脱硫改性以及配合活性剂与增效剂制备了一种抗 150 °C 高温桥接型防漏堵漏剂 LD<sup>[48]</sup>。王先兵等人利用果壳具有的柔韧性、硬度高、抗高温以及变形性好等特点，先后以杏仁壳、多种天然果壳为主要原料，经初级粉碎、脱脂、干燥、超微粉碎及造粒等加工工艺研制了新型抗温达 160 °C 的随钻堵漏剂 ZTC-1<sup>[49]</sup>。目前国内外研究表明，桥接

类堵漏材料资源丰富，但随着高温高压井的不断增多，需要采用抗温性能更优的桥接堵漏材料，如矿物纤维、抗高温橡胶颗粒、弹性石墨、抗高温吸水树脂变形颗粒等，通过粒度匹配及各组分加量比例调节，研制耐高温随钻堵漏剂。

### 2.3 桥接封堵层稳定性评价方法

裂缝封堵层的结构稳定性，是决定漏失控制成败的关键因素。大多数的封堵失效和重复漏失都与封堵层结构失稳有关。徐江等人采用新型裂缝封堵评价装置对桥塞封堵裂缝的动态过程进行了分析，探索了桥接堵漏材料在裂缝中的封堵规律，揭示了粒度连续分布的桥接堵漏材料在裂缝中形成多级封堵层现象<sup>[7]</sup>。苏晓明等人提出了封堵层气蚀剪切失效概念，构建了封堵层气蚀剪切失效的物理模型，并借助颗粒物质力学理论，对封堵层气蚀剪切失效过程进行了深入研究，揭示了封堵层气蚀剪切失效机理，如图 14 所示<sup>[50]</sup>。许成元等人采用耦合计算流体力学-离散元(CFD-DEM)方法模拟了裂缝封堵层结构形成过程，采用自主研发的表征封堵层细观力链网络的光弹实验系统模拟了裂缝封堵层结构承压演化过程，揭示了裂缝封堵层结构形成与演化机制，形成了堵漏材料优选与堵漏配方设计新方法<sup>[51]</sup>。李松等人应用有限元法模拟了封堵层对裂缝变形、井周切向应力及裂缝尖端应力强度因子等裂缝变形因素的影响，探索了封堵层存在下的裂缝变形行为，量化了封堵层对裂缝变形程度的影响<sup>[52]</sup>。Yang 等人研究了纤维浓度、长径比、直径、密度、刚度、旋光度、泊松比等因素对页岩孔隙封堵效

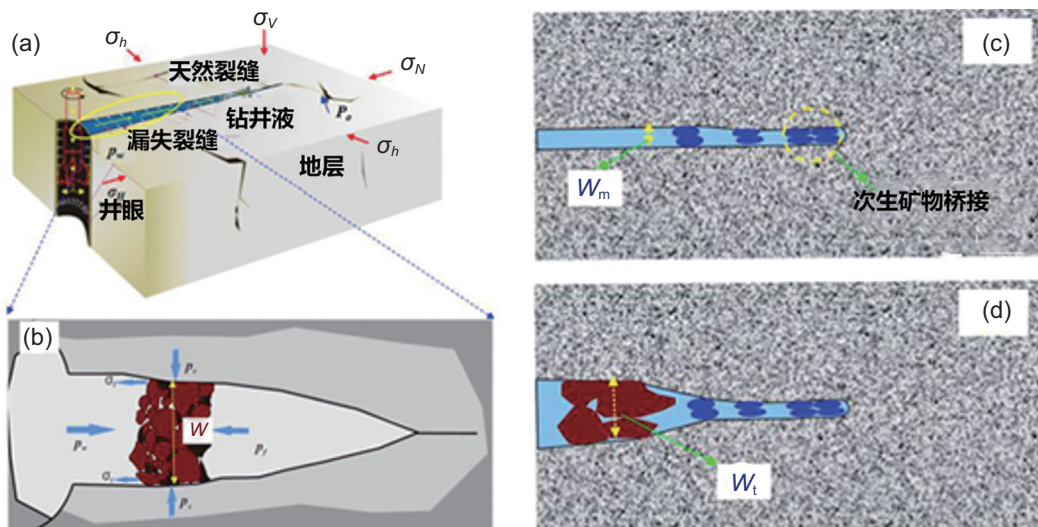


图 13 桥接封堵层的多尺度结构稳定性<sup>[46]</sup>

Fig. 13 Multi-scale structural stability of the bridging plugging layer<sup>[46]</sup>

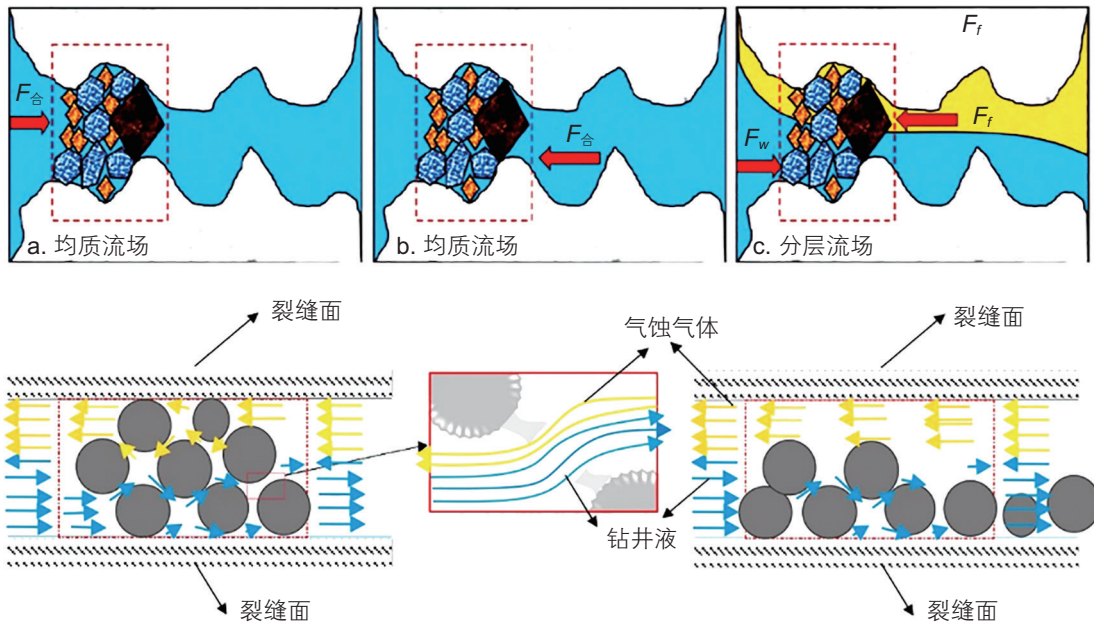


图 14 不同流场中封堵层结构及剪切失稳过程示意图<sup>[50]</sup>

Fig. 14 Schematic diagram of plugging layer structure and shear instability process in different flow fields<sup>[50]</sup>

率的影响<sup>[53]</sup>,建立了基于纤维的离散元流固耦合封堵模型,阐明了纳米纤维在页岩孔隙中的动态迁移和封堵过程。邱正松等人<sup>[54]</sup>采用计算流体力学-离散元耦合方法对桥接颗粒运移和封堵的微观过程进行了研究,明确了颗粒形状、杨氏模数、粒径分布和流体动力粘度对架桥效率的影响。Pu等人采用计算流体力学-离散元方法建立井筒-裂缝模型,研究封堵液在裂缝中的流动特性<sup>[55]</sup>。该模型特别考虑了井壁与堵漏浆之间的相互作用,认为封堵层的演化过程可划分为4个阶段。同时,封堵层的初始结构主要为双球桥,封堵层的形成位置和随后的施工速度分别取决于颗粒大小和浓度,优化颗粒组合可以有效提高封堵层的结构稳定性。

目前,提高桥接封堵层的高温和力学稳定性是提高堵漏成功率的关键,抗高温和高强度是超深层钻井堵漏材料的必备性能之一,现有果壳、纤维等常规桥接材料高温易碳化或降解,封堵层长期稳定性能较差,复漏风险高,难以满足日益增多的深层钻井堵漏需求。因此,研发具备抗高温、强级配、高稳定性等一体化特性的功能型堵漏新材料,揭示其裂缝堵漏机理,可为深层裂缝性地层堵漏提供新材料、新机理和新方法借鉴。

### 3 裂缝性地层桥接承压堵漏机理研究现状

堵漏材料在裂缝压力下进入裂缝中,通过架桥、

堆积、充填实现对裂缝性地层的封堵,桥接作用是形成封堵层的关键,桥接封堵层的形成破坏演化及不同堵漏配方中处理剂的相互作用将直接影响到封堵层的致密性和结构强度,从而影响承压稳定性,明确裂缝性地层桥接承压堵漏机理,对于堵漏材料研发和封堵配方设计意义重大。

#### 3.1 桥接堵漏材料封堵理论

目前关于堵漏材料架桥封堵的粒度设计理论或规则较多并且不统一。比较常用的堵漏材料架桥设计的理论和规则有:1/3架桥理论、屏蔽暂堵理论、理想充填理论、 $D_{50}$ 规则、 $D_{90}$ 规则等。针对孔隙和小尺度裂缝,Abrams等人提出了适用于封堵孔隙型地层的1/3架桥理论<sup>[56]</sup>。国内学者对“1/3架桥理论”进一步发展提出了“屏蔽暂堵理论”,认为当架桥粒子与储层孔隙平均孔径的1/3~2/3匹配时,地层孔喉处的桥堵最稳定<sup>[57]</sup>。继承经典的“屏蔽暂堵”理论,吕开河等人提出了基于微裂缝地层储层保护的预交联凝胶颗粒镶嵌暂堵机理和自适应堵漏机理<sup>[58]</sup>。“1/3架桥理论”及“屏蔽暂堵理论”已在防漏堵漏与储层保护领域取得了不少的应用成果,但在某些情况下,并不能达到一种最佳的堵漏和储层保护效果。国内外学者应用颗粒堆积效率最大值原理并依据大量试验的结果,提出了对暂堵剂颗粒尺寸进行优选的“理想充填理论”。认为当颗粒累计体积分数与粒径的平方根成正比时,颗粒的堆积效率达到最高,可实现颗粒的理想充填<sup>[59]</sup>。对于

中-大尺度裂缝的架桥封堵,张金波等人以“理想充填理论”和“ $D_{90}$ 规则”为基础,充分考虑了对不同尺寸孔喉的暂堵,提出了一种有利于对中、高渗透储层实施暂堵和保护的新方法<sup>[60]</sup>。

在桥接承压堵漏机理方面,邱正松等人提出通过合理的颗粒类型、粒度级配与浓度控制,刚性颗粒、弹性颗粒、纤维材料等协同封堵裂缝,形成具有“强力链网络”的致密承压封堵层,可显著提高地层承压能力<sup>[61]</sup>。孙金声基于封堵实验和颗粒物质力学方法研究表明,桥接封堵层的形成过程经历从惯性流、弹性流到准静态流的颗粒流态变化过程,揭示了封堵层形成的本质及破坏的驱动能量,提出了钻井液防漏堵漏颗粒优选规则<sup>[62]</sup>。许成元等人以颗粒物质力学为基础,构建了裂缝性地层封堵层失稳模式,同时考虑地层高温、高压和高应力条件,建立了裂缝性地层堵漏材料定量评分模型,指出堵漏材料、传递力链颗粒群或颗粒团簇、裂缝漏失通道中裂缝封堵层3个尺度构成了裂缝封堵层的多尺度结构<sup>[63]</sup>,链接微观堵漏材料性质和宏观封堵层承压性能的桥梁为细观力链网络结构(图15)。目前桥接材料承压堵漏机理的研究主要集中的刚性颗粒材料之间的力学作用方面,对于柔性材料作用机理研究较少,尤其是关于刚柔复合材料在裂缝内的堵漏机理研究较少;此外,没有涉及堆积过程的桥接颗粒形貌甚至化学形态变化,因而无法解释包含化学或相态变化的桥接承压堵漏过程。

在化学凝胶承压堵漏机理方面,罗平亚院士(2007)提出了针对裂缝性恶性漏失的“隔断式凝胶段塞堵漏机理”,其核心是裂缝中凝胶应当“流得进、

冲不稀、停得住、排得开、填得满、隔得断、抗得住”<sup>[64]</sup>。Sweetman研究表明,存在于凝胶段塞中的从井筒至地层的压降,使得作用在裂缝尖端的压力降低,防止裂缝扩张,因此应强化凝胶自身以及与裂缝壁面之间的胶结强度,提高压降窗口<sup>[65]</sup>。白英睿(2015)发现实现聚合物凝胶对地层孔缝成功封堵的前提是:“聚合物凝胶坝”自身内聚力及其与孔缝壁面的粘滞力之和大于“胶坝”封隔前后地层的流体压差(图16)<sup>[66]</sup>。狄丽丽指出预交联膨胀性凝胶颗粒主要通过“架桥堆积、吸液膨胀、挤压充填”机理对漏失通道进行封堵<sup>[67]</sup>。王中华等认为凝胶颗粒具有“变形虫”特征,会在漏失压差作用下在孔缝中向前变形蠕动,直至在窄缝处产生架桥、堆积、变形封堵,防止裂缝中压力传播和诱导扩展<sup>[68]</sup>。目前化学凝胶材料承压堵漏机理的研究主要集中在地下交联凝胶的承压封堵和地面交联凝胶颗粒的膨胀变形封堵等方面,漏失通道内凝胶材料的运移、充填、堵塞等机理研究有待深入研究。

综上,国内外研究者们通过分析堵漏材料在裂缝中的运移、充填过程,形成了系统的适用于孔隙或小裂缝的封堵机理,这些理论的出现对于孔隙或小裂缝中桥接堵漏材料的粒度级配及体系配方优化起到了指导作用。但针对深井中大裂缝中高地应力环境下承压能力不足的封堵层失稳机理研究仍不足,需要针对大裂缝性漏失地层重新厘定堵漏材料的粒度级配设计理论和方法。

### 3.2 桥接封堵层的形成、破坏和结构演化机制

桥接封堵层的形成、破坏和演化过程直接影响到

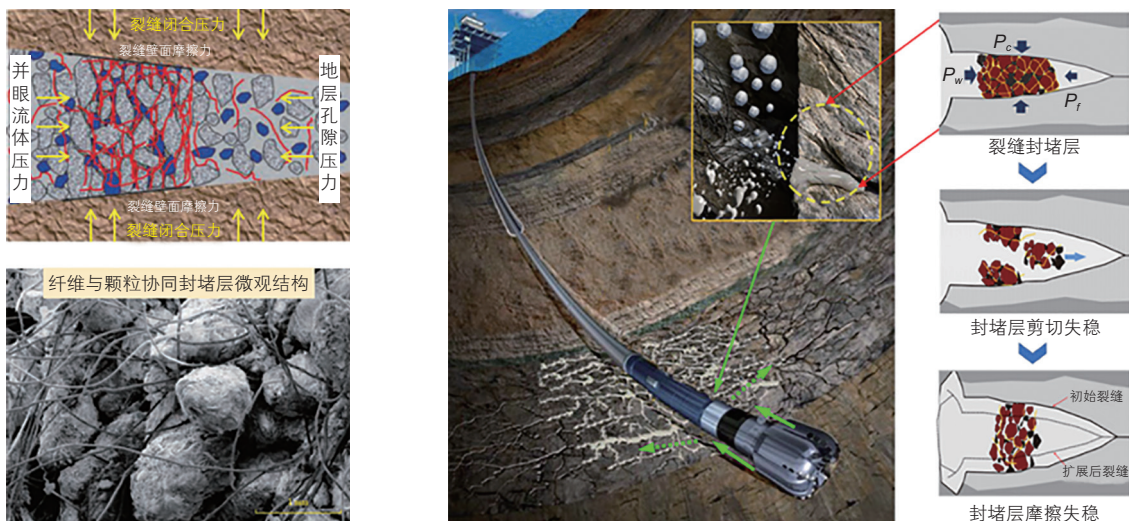


图15 桥接封堵层微观结构和失稳破坏模式结构<sup>[63]</sup>

Fig. 15 Microstructure and failure mode structure of bridging plugging layer<sup>[63]</sup>

封堵层的强度。许成元等人采用耦合计算流体力学-离散元模拟了裂缝封堵层结构形成过程,指出架桥概率是决定封堵层结构形成和裂缝封堵效率的关键因素(图17)<sup>[51]</sup>。同时,基于颗粒物质力学理论,探索分析了摩擦失稳和剪切失稳2种封堵层结构破坏形式。张韵洋等人研究认为力链的数量和强度是形成稳定封堵层的关键<sup>[5]</sup>。当封堵层数量足够多且足够强时封堵层更为稳定。邱正松等人基于裂缝封堵微观结构受力分析,探讨了封堵层失稳破坏形式,提出了将堵漏材料粒度降级率、表面摩擦系数、剪切强度、堆积孔隙比等作为评价封堵失稳的特征参数<sup>[61]</sup>。康毅力等人分析了低承压能力地层致漏机理,概括出应力笼、阻渗带和强固环3种地层强化理论,建立了不同理论指导,明确了弱化地层承压能力的主要因素<sup>[38]</sup>。但是在目前的研究中对于封堵层形成过程中的受力情况及破坏过程的失稳形式的研究尚浅,缺少有效的堵漏材料在演化过程中的评价指标及高效优化设计方法。

桥接堵漏材料的类型、组合、配比、浓度对于封堵裂缝性地层是否能成功封堵漏失层位至关重要。冯永存等人以CFD-DEM数值理论为基础,研究了颗粒浓度、颗粒级配对于桥堵效果的影响(图18),认为桥堵颗粒浓度存在着一个“桥堵窗口”,低于“桥堵窗口”下限不能实现有效封堵,而高于这一“窗口”对桥堵效率影响不大<sup>[69]</sup>。康毅力等人评价了刚性颗粒、弹性粒子以及纤维3种封堵材料协同堵漏效果,指出在协同封堵过程中,刚性颗粒起到骨架作用,弹性粒子起到增加摩擦力作用,纤维材料起到充填作用<sup>[31]</sup>。邱正松等人基于微观颗粒物质力学“强力链”基本原理,揭示了基于微纳米尺度的钻井液致密承压封堵机理,给出了钻井液强化致密承压封堵优化设计方法,即通过合理的颗粒类型、粒度级配与浓度控制,刚性颗粒、弹性颗粒、纤维材料等协同封堵裂缝,可形成具有“强力链网络”的致密承压封堵层,显著提高地层承压能力<sup>[70]</sup>。材料的外形和性能直接影响到封堵层

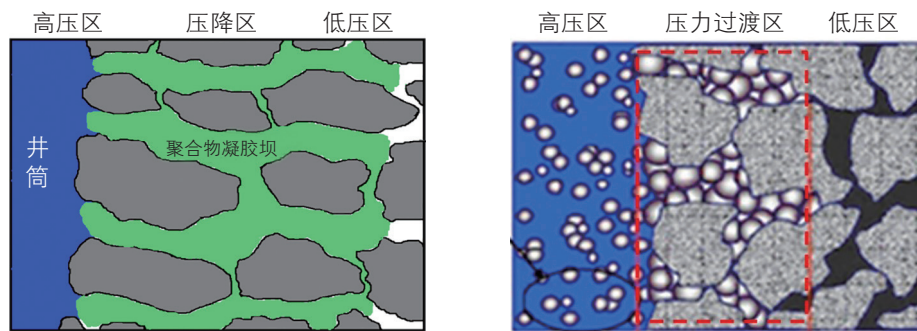


图16 聚合物凝胶坝及凝胶粒子封堵机理示意图<sup>[66]</sup>

Fig. 16 Schematic diagram of polymer gel dam and gel particle plugging mechanism<sup>[66]</sup>

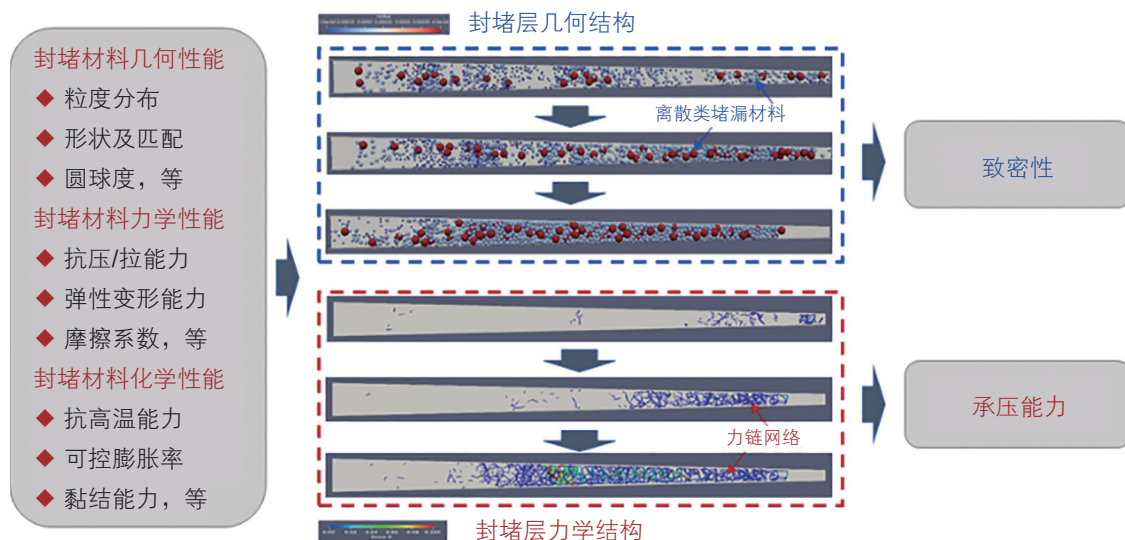


图17 裂缝封堵层几何结构和力学结构与致密性和承压能力的关系<sup>[51]</sup>

Fig. 17 Relation between geometrical and mechanical structure of fracture plugging layer and its density and bearing capacity<sup>[51]</sup>

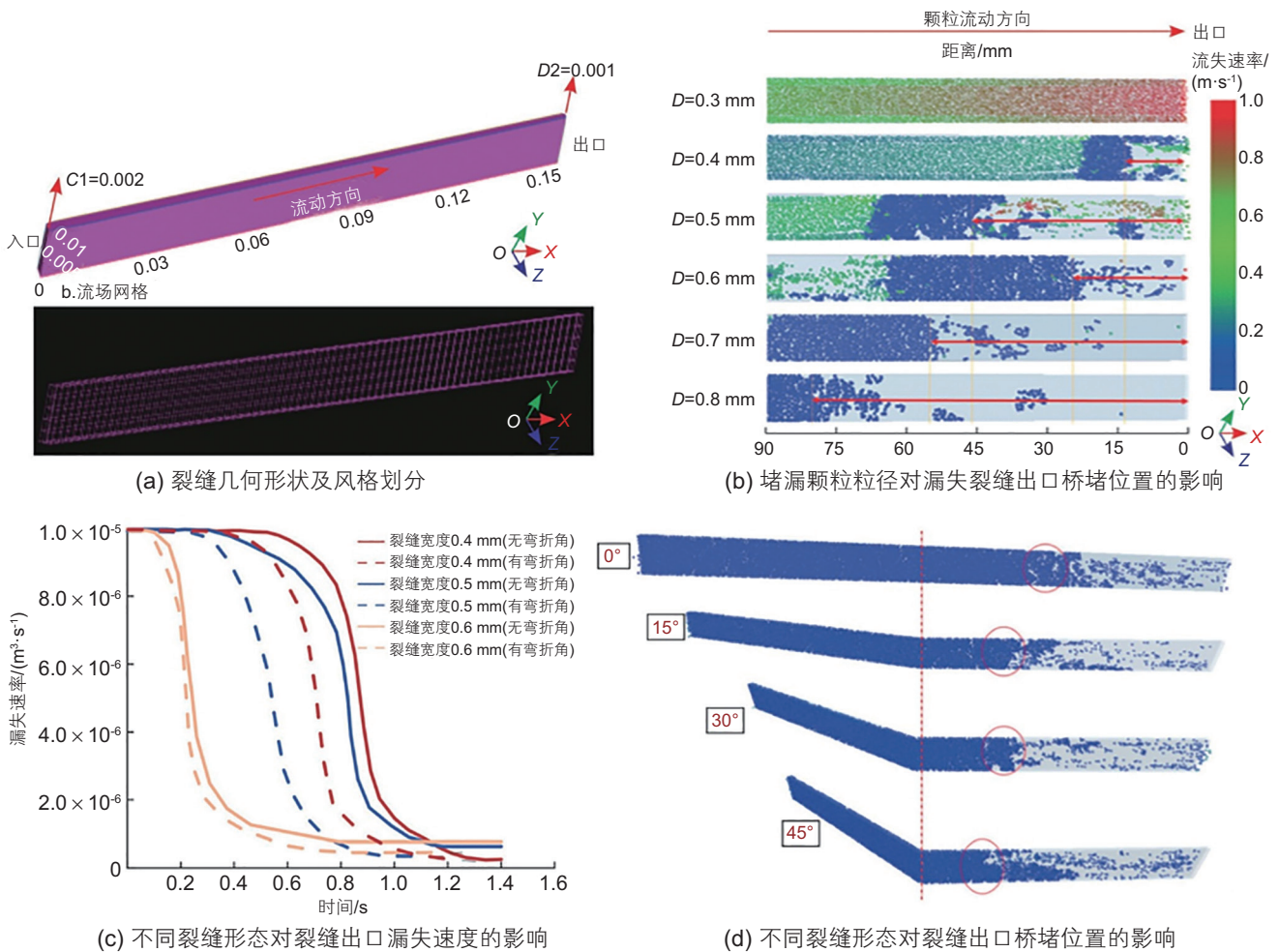


图 18 堵漏颗粒粒径对漏失裂缝出口漏失速率及桥堵位置的影响<sup>[69]</sup>

Fig. 18 Influence of plugging particle size on leakage rate and bridge plugging position at leakage fracture outlet<sup>[69]</sup>

的强弱, Kumar 等人分析了材料的圆度、凹凸度等对封堵层的影响, 认为将碳酸钙与弹性石墨碳(RGC)材料结合使用可以有效地提高地层的完整性<sup>[44]</sup>。但目前大尺度裂缝中桥接堵漏机理研究主要基于不同类型刚性颗粒材料之间的堆积充填作用, 以刚性力学结构演化为主, 对于功能型桥接材料发生熔融形态变化等而引发的物理化学协同作用的研究较少。

#### 4 结论与展望

裂缝性地层井漏是制约超深层油气钻井的关键“卡脖子”难题。桥接堵漏是一种常用且较为见效的堵漏方法, 但目前常用桥接堵漏材料抗高温性能弱、材料粒径与裂缝尺度级配性差、裂缝中颗粒堆积桥接封堵层稳定性不佳, 导致裂缝封堵无效或复漏风险高, 难以满足日益增多的超深层油气钻井堵漏需求。因此, 裂缝性地层桥接堵漏要想获得成功, 堵漏材料的级配

和浓度必须满足 3 个条件: 一是堵漏材料要“架得住桥”; 二是堵漏材料要具有“嵌入”、“填充”作用; 三是桥堵浆要有“滞留”和“挂阻”效果。所以, 建议未来应根据漏失和堵漏机理建立可视化模型量化堵漏材料粒径与裂缝尺度的匹配性, 进而确定堵漏材料与裂缝漏失通道的级配关系, 同时研发具有裂缝空间形态自适应特性的桥接堵漏材料。

现有基于架桥、充填和堆积理论的裂缝封堵机理, 主要反映裂缝封堵层几何结构形成机制, 无法描述封堵层力学结构形成和承压演化规律, 无法解释封堵层承压能力不足的根本原因。现有以粒度分布为主要指标的深层裂缝性地层堵漏 配方设计方法, 主要考虑了封堵层几何结构的致密性, 无法有效兼顾封堵层力学结构的承压稳定性, 亟待建立基于裂缝封堵层几何—力学结构协同优化的裂缝封堵新方法。因此, 厘清微观堵漏材料性质—细观力链网络结构—宏观封堵层承压性能关联机制, 搭建起微观堵漏材料性质与宏观封

堵层力学性能的桥梁,对创新和完善深层裂缝性地层封堵理论与方法具有重要的科学意义。

提高超深裂缝性地层堵漏成功率的关键在于提高三维裂缝中桥接封堵层的稳定性,强化封堵层内部以及封堵层与裂缝壁面之间的力学结构是提高封堵层稳定性的基础。超深层、超高温、高压和高盐等复杂地质条件下,常用桥接颗粒间的物理架桥堆积作用形成封堵层的力学稳定性受井筒与地层之间的压差作用影

响大。使用热固性树脂堵漏剂作为功能型桥接材料与常用桥接材料复配使用,在超深裂缝中可通过高温固化作用将常规桥接封堵层由物理堆积体变为物化固结体,使之免受井筒与地层之间的压差作用影响,不仅可以显著增强桥接封堵层内部的力学稳定性,而且可以增强封堵层与裂缝壁面之间的力学作用,提高封堵层在裂缝中的驻留能力,进而提高桥接堵漏一次成功率。

## 参考文献

- [1] 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(03): 630-638. [SUN J S, BAI Y R, CHENG R C, et al. Research progress and prospect of plugging technologies for fractured formation with severe lost circulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(03): 630-638.]
- [2] FENG Y, GRAY K E. Review of fundamental studies on lost circulation and wellbore strengthening[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 152: 511-522.
- [3] FIDAN E, BABADAGLI T, KURU E. Use of cement as lost circulation material-field case studies [J]. IADC/SPE Asia Pacific drilling technology conference and exhibition, 2004.
- [4] 王贵. 提高地层承压能力的钻井液封堵理论与技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2012. [WANG G. Research on drilling fluid plugging theory and technology for improving formation pressure bearing capacity[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.]
- [5] 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 Y Y. Research on sealing and bearing capacity of weak strata [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.]
- [6] 李家学,黄进军,罗平亚,等. 随钻防漏堵漏技术研究[J]. 钻井液与完井液, 2008(03): 25-28+85. [LI J X, HUANG J J, LUO P Y, et al. Research on drilling leakage prevention and plugging technology[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2008(03): 25-28+85.]
- [7] 徐江,石秉忠,王海波,等. 桥塞封堵裂缝性漏失机理研究[J]. 钻井液与完井液, 2014, 31(01): 44-46+98. [XU J, SHI B J, WANG H B, et al. Study on mechanism of bridge plug plugging fracture leakage[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2014, 31(01): 44-46+98.]
- [8] 熊正强,陶士先,蒋睿,等. 抗高温随钻封堵材料研究进展[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(12): 33-36. [XIONG Z Q, TAO S X, JIANG R, et al. Research progress of high temperature resistant loss circulation material while drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(12): 33-36.]
- [9] 牛四兆. 防漏堵漏钻井液新技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2007. [NIU S Z. Research on new technology of leak-proof and plugging drilling fluid[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2007.]
- [10] LI J, QIU Z, ZHONG H, et al. The thermal and chemical effect on wellbore strengthening treatment in shale formation[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 74: 103102.
- [11] 康毅力,经浩然,许成元,等. 颗粒形状对裂缝封堵层细观结构稳定性的影响[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2021, 43(03): 81-92. [KANG Y L, JING H R, XU C Y, et al. Effects of particle shape on the meso-structure stability of fracture plugging zones[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science & Technology Edition), 2021, 43(03): 81-92.]
- [12] XU C, ZHANG H, KANG Y, et al. Physical plugging of lost circulation fractures at microscopic level[J]. Fuel, 2022, 317: 123477.
- [13] AMANULLAH M. Characteristics, behavior and performance of ARC Plug-A date seed-based sized particulate LCM[J]. SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, 2016.
- [14] 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(02): 215-223. [KANG Y L, WANG K C, XU C Y, et al. High-temperature aging property evaluation of lost circulation materials in deep and ultra-deep well drilling[J]. ACTA PETROLEI SINICA, 2019, 40(02): 215-223.]
- [15] LV K, ZHU Q, YIN H, et al. Slow curing of epoxy resin underwater at high temperatures[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2022, 61(46): 16935-16945.
- [16] BATISTA W G S, COSTA B L S, AUM P T P, et al. Evaluation of reused polyester resin from PET bottles for application as a potential barrier material[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 205: 108776.
- [17] KNUDSEN K, LEON G A, SANABRIA A E, et al. First application of thermal activated resin as unconventional LCM in the Middle East[J]. Abu Dhabi international petroleum exhibition and conference, 2015: D021S35R02.

- [18] ABDOLLAHI K M, JAFARI B T, GHOTBI C, et al. Experimental investigation of mechanical behavior and microstructural analysis of bagasse fiber-reinforced polypropylene (BFRP) composites to control lost circulation in water-based drilling mud[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 100: 104490.
- [19] 王在明, 许婧, 张艺馨, 等. 自固结堵漏剂性能评价及现场应用[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(06): 62–66. [WANG Z M, XU J, ZHANG Y X, et al. Performance evaluation and field application of self-consolidating plugging agents[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(06): 62–66.]
- [20] 王建华, 王玺, 柳右善, 等. 油基钻井液用改性树脂类抗高温防漏堵漏剂研究[J]. *当代化工研究*, 2021(03): 150–152. [WANG J H, WANG X, LIU B S, et al. Study on high temperature resistant plugging agent of modified resin for oil based drilling fluid[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2021(03): 150–152.]
- [21] LI W, JIANG G, NI X, et al. Styrene butadiene resin/nano-SiO<sub>2</sub> composite as a water-and-oil-dispersible plugging agent for oil-based drilling fluid[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, 606: 125245.
- [22] 郭钢, 李琼玮, 杨立华, 等. 长庆油田套管堵漏用有机树脂研发及应用[J]. *钻井液与完井液*, 2019, 36(05): 659–662. [GUO G, LI Q W, YANG L H, et al. Development and application of organic resin for controlling loss of borehole fluids in cased hole[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2019, 36(05): 659–662.]
- [23] 陈大钧, 雷鑫宇, 李文涛, 等. 环氧-酚醛复配树脂堵漏剂的改性研究[J]. *钻井液与完井液*, 2012, 29(04): 87–88. [CHEN D J, LEI X Y, LI W T, et al. Modification and evaluation on epoxy-phenolic resin LCM[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2012, 29(04): 87–88.]
- [24] 赖小林, 王中华, 邓华江, 等. 双网络吸水树脂堵漏剂的研制[J]. *石油钻探技术*, 2011, 39(04): 29–33. [LAI X L, WANG Z H, DENG H J, et al. Development of a dual texture resin sealing agent for plugging lost circulation[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(04): 29–33.]
- [25] VICKERS S. Compactness in locales and in formal topology[J]. *Annals of Pure and Applied Logic*, 2006, 137(1): 413–438.
- [26] WHITFILL D. Lost circulation material selection, particle size distribution and fracture modeling with fracture simulation software[J]. *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*, 2008: SPE-115039-MS.
- [27] RAZAVI O, VAJARGAH A K, VANOORT E, et al. Optimization of wellbore strengthening treatment in permeable formations[J]. *SPE Western Regional Meeting*, 2016: SPE-180467-MS.
- [28] LEE J, LIM E. Comparisons of Eulerian-Eulerian and CFD-DEM simulations of mixing behaviors in bubbling fluidized beds[J]. *Powder Technology*, 2017, 318: 193–205.
- [29] MEHRABIAN A, PÉREZ A D, SANTANA C. Wellbore-stability analysis considering the weak bedding planes effect: a case study[J]. *SPE Drilling Completion*, 2018, 33(04): 377–384.
- [30] 朱金智, 任玲玲, 陆海英, 等. 桥接堵漏材料及其配方粒度分布预测新方法[J]. *钻井液与完井液*, 2021, 38(04): 474–478. [ZHU J Z, REN L L, LU H Y, et al. A new method of predicting the bridging lost circulation materials and their particle size distribution[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2021, 38(04): 474–478.]
- [31] 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 Y L, YU H F, XU C Y, et al. An optimal design for millimeter-wide fracture-plugged zones[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(11): 88–94.]
- [32] 唐文泉, 王晓军, 王成彪, 等. 抗温高强度交联堵漏配方研究与应用[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(23): 161–165. [TANG W Q, WANG X J, WANG C B, et al. Research and application about anti-temperature high-strength cross-linking plugging formulation[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(23): 161–165.]
- [33] 李峰, 黄强, 黄哲, 等. 毫米缝洞承压堵漏浆配方优化及现场试验[J]. *钻采工艺*, 2021, 44(06): 115–119+42. [LI F, HUANG Q, HUANG Z, et al. Formula and field trial of pressurized sealing slurry for millimetre fractured vuggy[J]. *Drilling & Production Technology*, 2021, 44(06): 115–119+42.]
- [34] 许成元, 张洪琳, 康毅力, 等. 深层裂缝性储层物理类堵漏材料定量评价优选方法[J]. *天然气工业*, 2021, 41(12): 99–109. [XU C Y, ZHANG H L, KANG Y L, et al. Quantitative evaluation and selection method of physical plugging materials in deep fractured reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(12): 99–109.]
- [35] 暴丹, 邱正松, 邱维清, 等. 高温地层钻井堵漏材料特性实验[J]. *石油学报*, 2019, 40(07): 84. [BAO D, QIU Z S, QIU W Q, et al. Experiment on properties of lost circulation materials in high temperature formation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(07): 84.]
- [36] 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(01): 76–77+91. [WANG S Q, TANG J P, ZHANG B, et al. Plugging technology of high density drilling fluid in Tarim fore-mountain structure zone[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2006(01): 76–77+91.]
- [37] 张沛元. “逐级渐进法”桥接堵漏工艺[J]. *钻井液与完井液*, 2010, 27(02): 67–92. [ZHANG P Y. Progressive bridge plugging technology for lost circulation[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2010, 27(02): 67–92.]
- [38] 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(04): 473–479. [KANG Y L, XU C Y, TANG L, et al. Constructing a tough shield around the wellbore: Theory and method for lost-circulation control[J]. *Petroleum*

- Exploration and Development, 2014, 41(04): 473–479.]
- [39] 闫霄鹏, 许成元, 康毅力, 等. 基于力链网络表征的裂缝封堵层结构失稳细观力学机制[J]. 石油学报, 2021, 42(06): 765–775. [YAN X P, XU C Y, KANG Y L, et al. Mechanical mechanism of meso-structure instability of fracture plugging zone based on the characterization of force chain network[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(06): 765–775.]
- [40] ASTON M, ALBERTY M W, MCLEAN M, et al. Drilling fluids for wellbore strengthening[J]. IADC/SPE drilling conference, 2004.
- [41] XU C, YAN X, KANG Y, et al. Friction coefficient: A significant parameter for lost circulation control and material selection in naturally fractured reservoir[J]. Energy, 2019, 174: 1012–1025.
- [42] KANG Y, TAN Q, YOU L, et al. Experimental investigation on size degradation of bridging material in drilling fluids[J]. Powder Technology, 2019, 342: 54–66.
- [43] YAN X, XU C, KANG Y, et al. Mesoscopic structure characterization of plugging zone for lost circulation control in fractured reservoirs based on photoelastic experiment[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 79: 103339.
- [44] KUMAR A, SAVARI S, WHITFILL D L, et al. Wellbore strengthening: the less-studied properties of lost-circulation materials[J]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2010.
- [45] XU C, KANG Y, YOU L, et al. Lost-circulation control for formation-damage prevention in naturally fractured reservoir: mathematical model and experimental study[J]. SPE Journal, 2017, 22(05): 1654–70.
- [46] YAN X, KANG Y, XU C, et al. Fracture plugging zone for lost circulation control in fractured reservoirs: Multiscale structure and structure characterization methods[J]. Powder Technology, 2020, 370: 159–175.
- [47] 段永贤, 舒小波, 李有伟, 等. 一种超深水平井堵漏材料室内评价研究[J]. 当代化工, 2017, 46(02): 246–249. [DUAN Y X, SHU X B, LI Y W, et al. Experimental evaluation research on a kind of ultra-deep horizontal well plugging material[J]. Contemporary Chemical Industry, 2017, 46(02): 246–249.]
- [48] 王富华, 魏振禄, 亢连礼, 等. 一种新型钻井防漏堵漏剂的研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2006, (03): 42–85. [WANG F H, WEI Z L, KANG L L, et al. Study and application of a new type LCM[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006, (03): 42–85.]
- [49] 王先兵, 陈大钧, 蒋宽, 等. 一种新型随钻堵漏剂ZTC-1的生产工艺及性能评价[J]. 钻井液与完井液, 2009, 26(05): 29–31. [WANG X B, CHEN D J, JIANG K, et al. The preparation and evaluation of a new lost circulation material ZTC-1[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2009, 26(05): 29–31.]
- [50] 苏晓明, 吴若宁, 赵常举, 等. 塔中区块高温高压裂缝性气藏封堵层气蚀剪切失效机理[J]. 地质科技通报, 2022, 41(04): 21–29. [SU X M, WU R N, ZHAO C J, et al. Failure mechanism of cavitation-induced shear of the plugging layer in high-temperature high-pressure fractured gas reservoirs in the Tazhong block, NW China[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(04): 21–29.]
- [51] 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(01): 202–210. [XU C Y, ZHANG J Y, KANG Y L, et al. Structural formation and evolution mechanisms of fracture plugging zone[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(01): 202–210.]
- [52] 李松, 康毅力, 李大奇, 等. 堵漏封堵层对裂缝稳定性影响模拟研究[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(10): 1963–1971. [LI S, KANG Y L, LI D Q, et al. Numerical investigation into the influence of plug zone on fracture deformation in lost circulation controlling[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(10): 1963–1971.]
- [53] YANG X, XIE J, YE X, et al. Sealing characteristics and discrete element fluid dynamics analysis of nanofiber in nanoscale shale pores: Modeling and prediction[J]. Energy, 2023, 273: 127229.
- [54] 邱正松, 高健, 赵欣, 等. 深水疏松砂岩储层微粒运移损害的控制方法[J]. 石油学报, 2022, 43(07): 1016–25. [QIU Z S, GAO J, ZHAO X, et al. Control methods for fines migration damage in deepwater unconsolidated sandstone reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(07): 1016–1025.]
- [55] PU L, XU P, XU M, et al. Numerical simulation on particle-fluid flow in fractured formations: Evolution law of plugging layers [J]. Energy, 2023, 274: 127450.
- [56] ABRAMS A. Mud design to minimize rock impairment due to particle invasion[J]. Journal of Petroleum Technology, 1977, 29(05): 586–592.
- [57] 蒲晓林, 罗向东, 罗平亚. 用屏蔽桥堵技术提高长庆油田洛河组漏层的承压能力[J]. 西南石油学院学报, 1995(02): 78–84. [PU X L, LUO X D, LUO P Y. The pressure bearing capacity of leakage layer of Luohe Formation in Changqing Oilfield is improved by shielding bridge plugging technology[J]. Journal of Southwestern Petroleum Institute, 1995(02): 78–84.]
- [58] 吕开河, 邱正松, 宋元森. 保护油层自适应随钻堵漏钻井液技术研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(05): 683–689. [LV K H, QIU Z S, SONG Y S. Study on auto-adapting lost circulation curing drilling fluid with reservoir protection characteristics in drilling process[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(05): 683–689.]
- [59] 张凤英, 鄢捷年, 杨光, 等. 理想充填暂堵新方法在吐哈丘东低渗透气田的应用[J]. 钻采工艺, 2009, 32(06): 88–90. [ZHANG F Y, YAN J N, YANG G, et al. Application of a new ideal packing temporary plugging method in Tuha low permeability reservoir[J]. Drilling



- & Production Technology, 2009, 32(06): 88–90.]
- [60] 张金波, 鄢捷年. 钻井液中暂堵剂颗粒尺寸分布优选的新理论和新方法[J]. 石油学报, 2004(06): 88–91. [ZHANG J B, YAN J N. New theory and method for optimizing the particle size distribution of bridging agents in drilling fluids[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004(06): 88–91.]
- [61] 邱正松, 暴丹, 刘均一, 等. 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(05): 587–596. [QIU Z S, BAO D, LIU J Y, et al. Microcosmic mechanism of fracture-plugging instability and experimental study on pressure bearing and tight plugging[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(05): 587–596.]
- [62] 雷少飞, 孙金声, 白英睿, 等. 裂缝封堵层形成机理及堵漏颗粒优选规则[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(03): 597–604. [LEI S F, SUN J S, BAI Y R, et al. Formation mechanisms of fracture plugging zone and optimization of plugging particles[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(03): 597–604.]
- [63] 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(02): 399–408. [XU C Y, YAN X P, KANG Y L, et al. Structural failure mechanism and strengthening method of plugging zone in deep naturally fractured reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(02): 399–408.]
- [64] 王平全, 李再钧, 聂勋勇, 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(04): 697–701. [WANG P Q, LI Z J, NIE X Y, et al. Anti-dilution properties of a special gel applied to loss circulation control in drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(04): 697–701.]
- [65] SWEATMAN R, WANG H, XENAKIS H. Wellbore stabilization increases fracture gradients and controls losses/flows during drilling[J]. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, 2004: SPE–88701–MS.
- [66] BAI Y, XIONG C, WEI F, et al. Gelation study on a hydrophobically associating polymer/polyethylenimine gel system for water shut-off treatment[J]. Energy & Fuels, 2015, 29(2): 447–458.
- [67] 狄丽丽, 张智, 段明, 等. 超强吸水树脂堵漏性能研究[J]. 石油钻探技术, 2007, (03): 33–36. [DI L L, ZHANG Z, DUAN M, et al. Research of plugging ability of super-absorbent resin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007(03): 33–36.]
- [68] 王中华. 国内钻井液处理剂研发现状与发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(03): 1–8. [WANG Z H. Present status and trends in research and development of drilling fluid additives in China[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(03): 1–8.]
- [69] 冯永存, 马成云, 楚明明, 等. 刚性颗粒封堵裂缝地层漏失机制数值模拟[J]. 天然气工业, 2021, 41(07): 93–100. [FENG Y C, MA C Y, CHU M M, et al. Numerical simulation on the mechanism for rigid particle plugging of leakage in fracture formations[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(07): 93–100.]
- [70] 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 Z S, LIU J Y, ZHOU B Y, et al. Tight fracture-plugging mechanism and optimized design for plugging drilling fluid[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(S2): 137–143.]

(编辑 杨雅露)