文章编号:1000-4092(2023)04-729-07

井漏地层钻井液堵漏材料研究现状与展望*

刘 静[1],马 诚[1],杨 超[2],钟飞升[3],罗根祥[1]

(1.辽宁石油化工大学石油化工学院,辽宁 抚顺 113001;2.中国石化大连石油化工研究院,辽宁 大连 116045;3.彰武县联信铸造硅砂有限公司,辽宁 阜新 123200)

摘要:井漏是制约油气钻井工程质量和效率提高的主要技术问题。提高一次性堵漏成功率是保障全球油田"安全、高效、经济"钻井的迫切需求。总结了钻井液漏失机理,介绍了架桥、高失水、固化、聚合物凝胶类、智能材料等各类堵漏材料的性质和相互作用机理,明确了各堵漏材料存在的问题。桥接堵漏材料价格低廉、操作简单、来源广泛、对钻井液流变性的影响小,但其粒径与地层漏失通道匹配性差,配方复杂。高失水类堵漏材料使用简单、见效快、封堵成功率高,但其组成复杂、失水速率难控制、不易解堵。可固化类堵漏材料拥有高的承压封堵能力,价格便宜,配制和操作工艺简单,但施工安全风险高。聚合物凝胶类堵漏材料对漏失通道的自适应性强、有良好的黏滞阻力和抗剪切稀释能力。然而,其抗高温能力较低、长期封堵性较差、与钻井液配伍性差、成胶时间不易控制。智能类堵漏材料可智能适应各种复杂地层、针对性强、对地层伤害性小,但其堵漏机理需进一步完善,材料的适应性需进一步提高。提出了堵漏材料未来发展的方向,如研发智能型堵漏材料和深井与超深井高温井钻井液堵漏材料。

关键词:堵漏材料;漏失机理;井漏;钻井液;综述
文献标识码:A **DOI:**10.19346/j.cnki.1000-4092.2023.04.025
中图分类号:TE254:TE358 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**

0 前言

井漏不仅消耗大量的钻井液,延长钻井时间,若处理不当,还会造成井眼塌陷、井喷、卡钻等一系列复杂情况[1-2]。井漏严重制约钻井的速度,大幅增加非生产时间,造成重大经济损失[3]。据统计,在北美,钻井过程中发生严重井漏的井数约占钻井总数的40%[4];在中东,裂缝性碳酸盐岩储层钻井过程中出现严重井漏的井占30%以上,井漏时间占50%[5]。2017年和2018年,在中国石油集团国内外区块复杂钻井事故造成的总损失时间中,井漏造成的损失时间占70%以上,年均直接经济损失超过40亿元[1]。目前,有效解决井漏问题非常具有挑战性,尤其是裂缝地层中的严重井漏。井漏控制率低,增加了钻井的时间,对经济造成了重大损失[6]。因此,井漏已成为一个全球性问题,限制了油气勘探和开发的进展。

石油和天然气钻井工程的进步伴随着井漏控制技术的发展,堵漏材料是这些方法的关键[7]。国内外学者研究了不同类型的堵漏材料,对于渗透性和小微裂缝性地层发生的井漏问题得到了较好解决[8-9]。本文系统论述了钻井液漏失机理和堵漏材料的研究现状,探讨了堵漏材料中存在的不足之处,对未来钻井液堵漏材料的发展进行了展望。

* **收稿日期:**2022-11-28;**修回日期:**2023-03-15。
基金项目:辽宁省教育厅科学研究经费项目"低温固化阻水透油覆膜砂研究"(项目编号L2020005),辽宁省兴辽英才计划项目"高效环保石油石化化学品"(项目编号XLYC1902053),中国石化科技部项目"多功能钻采化学品的开发及应用"(项目编号421034)。
作者简介:刘静(1998—),女,辽宁石油化工大学无机化学专业在读硕士研究生(2017—),从事复合材料及钻井液处理剂方面的研究,E-mail:3164687941@qq.com。马诚(1982—),男,教授,本文通讯联系人,从事油田化学品的研究,通讯地址:113001辽宁省抚顺市望花区丹东路西段一号辽宁石油化工大学石油化工学院,E-mail:kkmc2002@163.com。

1 钻井液漏失机理的研究

明确漏失的原因和机理是选择合理堵漏的先决条件。如果漏失机理不清楚，就会造成封堵的盲目性，不能准确选择合适的堵漏材料。井漏发生的原因主要有：(1)钻井过程中，井筒内部压力大于地层压力时，钻井液通过漏失通道进入地层；(2)地层内部存在大的孔隙、裂缝和溶洞性地层，钻井时遇到该地层钻井液发生漏失。

相关学者建立了相应的漏失模型。李大奇等[10-11]将漏失划分为裂隙或溶洞性漏失、压裂性漏失和封闭裂隙重张扩展性漏失，提出了一维线性漏失模型和二维H-B流型钻井液漏失模型，并且使用分形理论描述其断裂粗糙度[12]。王明波等[13]根据流体力学原理，把裂缝视为具有倾角的平面粗糙度、指数变形和倾角的二维单条裂缝，把钻井液看作宾汉流体，利用分形理论进行裂缝模拟，建立了带倾角的二维粗糙裂缝内宾汉流体漏失动态模型。Zhai等[14]研究了由一维裂缝扩展引起的诱导裂缝泄漏动力学模型。该模型考虑了裂缝动态宽度变化和裂缝张开度。Ozdemirtas等[15-16]研究了二维H-B流动式钻井液漏失模型。Lietard等[17]研究了裂缝中的宾汉流体漏失模型，建立了单个无限裂缝中的宾汉流体漏失的平面径向流动模型。根据动量守恒原理，建立了压力梯度和平均速度之间的关系。Majidi等[18-19]建立了考虑裂缝线性变形的H-B流型钻井液光滑裂缝径向漏失模型。通过对漏失机理的研究，认识到堵漏材料对井漏问题的重要性，为优选堵漏材料提供了依据。

2 钻井液堵漏材料的研究

国外对于钻井工程中遇到的漏失和堵漏机理的研究较早。中国从20世纪60年代开始对堵漏材料进行研究，此时期对漏失层的性质认识不全面且堵漏材料的种类有限。20世纪80年代，堵漏材料的种类逐渐丰富。此后，钻井液堵漏材料由单一堵漏到复合堵漏。钻井堵漏材料的发展可分为3个阶段：见漏即堵、开发新型堵漏材料、复合堵漏材料。对于井漏问题，堵漏材料是钻井过程中必不可少的一部分，是成功封堵的基础和关键。传统堵漏材料种类较多，应用广泛。随着对堵漏材料的深入研究，出现了新型堵漏材料。各种类型的堵漏材料见表1。

表1 不同类型的堵漏材料

类型	典型堵漏材料	堵漏机理
桥接类	石英砂、云母片、矿物纤维等	惰性材料桥接、加固、填充、堵塞等[20-23]
高失水类	粉煤灰、石棉纤维、硅藻土等	快速失水，固相颗粒快速聚集堵塞泄漏通道，并在泄漏现场紧密堆积[1, 24-25]
聚合物凝胶类	聚丙烯酰胺凝胶、生物凝胶、聚乙烯醇凝胶等	交联成胶、带有特殊官能团的高分子链缠绕或缔合
可固化类	水泥、硅酸盐、矿渣等	固化，形成高强度固结体，与地面黏合[26]
智能类	形状记忆金属、记忆聚合物、智能凝胶等	通过环境刺激的自激活物理化学反应来密封泄漏[27-28]

2.1 桥接堵漏材料

近年来，国内外已有大量关于桥接堵漏材料的报道[29-31]。桥接类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[1]，常见的有核桃壳、锯末和云母等。

为了有效解决塔里木盆地中部异常高温高压碳酸盐岩缝洞型储层钻井过程中的缝洞双重损失问题，苏晓明等[9]研究了一种具有高酸溶性和锯齿状表面的刚性封堵材料，其与木质素纤维、弹性材料和碳酸钙在混合网中复合，形成新型的复合堵漏材料。该堵漏材料抗温高达180 ℃，裂缝封堵承压9 MPa以上，可用于封堵高温高压地层。在天然裂缝较大的地区，井漏是一个很难克服的挑战。对于发生严重至全部损失的区域，Savari等[32]研究了基于颗粒的堵漏材料。该酸溶性堵漏材料可以在10%盐酸和10%甲酸中溶解，可有效封堵大裂缝地层。

在钻井液中使用桥接类堵漏材料，不会对钻井液的流变性有很大的影响，而且取材容易、操作简便、价格便宜、来源广，在现场应用广泛。桥接堵漏材料能有效封堵因孔隙和裂缝所导致的渗漏问题，虽然在一定程度上改善了钻井液井漏的问题，但仍存在一些不足。如对漏失通道的适应性差，在大溶洞或大裂缝地层中容易被冲走。在深井的钻井过程中，由桥接堵漏材料形成的裂缝封堵层不稳定，

容易被破坏，导致钻井液流失。

2.2　高失水堵漏材料

高失水堵漏材料在地层压强和钻井液柱压力差下会迅速失水，堵漏浆中的固相成分不断聚集、变稠，形成滤饼，进一步压实、填塞漏失通道，起到堵漏作用。与高失水堵漏材料相关的研究如表2所示。除此之外，常见的高失水堵漏材料有雪佛龙菲利普斯公司研发的DiasealM堵漏材料。其以碎纸屑、石灰、硅藻土为原材料，技术简便、堵漏成功率高、堵漏效果显著，已在各地数千口井中推广使用。高失水堵漏材料使用方便，对高渗透地层的堵漏成功率高。但是高失水堵漏材料对漏失通道的适应性较差，在洞穴或大裂缝地层中容易被冲走。

表2　不同的高失水堵漏材料

堵漏材料	耐温性/℃	抗压性/MPa	优点	应用
高效失水堵漏材料HHH[33]	90	10	高失水、高强度、高承压性	塔河油田S119-3井
抗高温承压堵漏材料[34]	180	12	具有良好的抗温和抗压能力	徐闻X3井
高滤失堵漏材料FPA[35]	120	7	良好的耐温性和悬浮稳定性	XX1611井XX78-2井

2.3　聚合物凝胶类堵漏材料

与其他类型的堵漏材料相比，压缩变形显著的凝胶类材料可以自适应地进入不同尺寸的泄漏通道，不管通道的形状如何，在泄漏通道中形成高强度的封堵层，适用于不同尺寸的损失通道[6]。凝胶堵漏材料主要利用化学交联反应或通过分子间的相互作用形成具有三维网络结构的高强度凝胶，以堵塞复杂地层中的钻井液漏失通道[36-37]。

针对常规化学凝胶堵漏材料抗高温和力学性能差的问题，白英睿等[38]以锂皂石为增韧剂和无机交联剂、自制反应性微凝胶为有机交联剂、γ-甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷为硅源，与丙烯酰胺、甲基丙烯酸等反应，合成一种杂化交联复合凝胶材料。该材料的流变力学性能优异，在140 ℃条件下老化48 h后的储能模量高于4 kPa、损耗模量高于1 kPa。

对于裂缝地层，常规封堵材料具有尺寸不合适和强度低的缺点，导致首次封堵不成功，成本增加。Fan等[39]研究的聚合物封堵凝胶主要由丙烯酰胺单体制成，并辅以羧基和羟基的反应性单体。其凝胶胶化时间被控制在实际应用所需的时间内，可以顺利进入交叉裂缝并封堵裂缝。该材料的承载力可达21 MPa，反向承载力可达20 MPa。张新民等[40]研发的特种凝胶在水溶液中由于分子之间的相互作用，大分子链自发聚合，形成动态的物理交联网，从而堵塞漏失层。该特种凝胶已成功应用于四川、长庆和吐哈油田，获得了良好的堵漏效果。

聚合物凝胶堵漏材料具有固相含量低、凝胶不受漏失通道的限制、较强的抗稀释能力的特点，在大的裂缝或溶洞中不易被冲走。不足之处是抗高温能力差，在高温条件下的长期稳定性差，凝胶的形成时间和凝胶的强度不易控制。

2.4　可固化类堵漏材料

可固化类堵漏材料一般由固化剂、悬浮稳定剂和缓凝剂等材料组成[24]。水泥和其他材料组成的体系为可固化堵漏材料，是近年来国内外研究的热点。水泥是典型的可固化材料，例如波特兰水泥堵漏材料[41]和Sarawak Shell Berhad公司的水泥堵漏材料[42]。

近年来，国内外学者一直在进行水泥品种的研究[43-45]，通过使用水泥添加剂、改进工艺等，提高了水泥浆的可泵性、缩短了水泥固化时间、改善了水泥的早期强度和稳定性。哈里伯顿公司开发的“一袋式”封堵技术的高压封堵能力为20 MPa，并采用“测试挤压清洗液+挤压水泥浆”的间歇式水泥挤压工艺，在南海西部莺歌海盆地高压封堵了10多口井的漏失，封堵成功率达到100%[46]。除了水泥材料外，贝克休斯公司开发的MAGNE-SET可固化堵漏材料，是由镁与氧化钙的混合物与水发生反应而生成的高强度固体，用于严重井漏或无泥浆返回等情况[1]。为了解决恶行漏失及储层段漏失控制难题，张浩等[47]以1%聚氧乙烯醚、0.5%羟乙基纤维素、15%氯化钙、10%碳酸氢钠和5%海藻酸钠为原料，制备了一种新型可酸溶固化堵漏材料。该材料抗钻井液污染能力强，8 mm裂缝封堵带承压可达18 MPa，固结体渗透率达0.81×10^{-3} μm^2。该堵漏材料可以有效封堵恶性漏失地层，且可用于储层段漏失控制，从而达到保护储层的目的。

可固化类堵漏材料的最大特点是在堵漏后具

有较高的承压能力和较高的固结强度。可固化堵漏材料具有原料广泛、价格低廉、制造工艺简便等特点。然而，其施工安全风险很高，抵抗高盐度地层水污染和稀释的能力差，容易导致卡钻、被裂缝或溶洞中的水稀释和冲走等问题[26]。

2.5 智能型堵漏材料

随着新应用和新材料的兴起，智能堵漏材料得到了进一步的发展。智能型堵漏材料是一种能自主感知外界刺激，且对漏失地层做出反应的堵漏材料。智能型堵漏材料包括智能形状记忆材料、智能凝胶材料、智能膜等智能型材料。目前，智能堵漏材料的研究主要分为智能形状记忆材料和智能凝胶。在智能堵漏材料中，时间控制凝胶堵漏材料、形状记忆聚合物材料和形状记忆合金材料具有更好地适应高温高压地质条件的性能。

2.5.1 智能形状记忆堵漏材料

智能形状记忆堵漏材料有形状记忆金属和形状记忆聚合物两种。形状记忆金属主要原料组成为Ni-Ti合金、Ti-Ni-Pd合金、Ti-Nb合金、Au-Cd合金等，具有良好的延展性能和抗疲劳性能，环保无污染、承压能力高，但研制成本较高、形变量低。形状记忆聚合物主要原料组成为水泥、苯乙烯-丁二烯共聚物、聚氨酯等，具有原料来源广、成本低、变形量大的优点，但部分材料的耐温性低。

目前，基于形状记忆金属开发的智能堵漏材料主要以Ni-Nb、Ti-Ni-Pd、Ti-Ni等形状记忆合金为原料，与水泥基涂料、树脂涂料等其他材料复合。形状记忆合金是一类具有记忆功能的高性能材料，当受到外界刺激如温度变化或磁力改变时，能够记忆或保持以前的形态[27]。田陆飞[48]研制的水泥基智能堵漏材料主要由水泥基涂层、形状记忆合金、填料等组成。智能堵漏材料进入泄漏地层后，受到温度的刺激产生温度敏感效应。此时，材料内的形状记忆合金将变形产生应变力，导致外壳破裂和脱落，直到完全恢复原先的直线状态。多个线性记忆合金相互重叠，形成桥塞堵塞，内部碳酸钠使堵塞液快速凝固，加快堵塞速度。

形状记忆聚合物是指具有初始形状，在外部环境刺激下又恢复原始形状的聚合物[27]。与热塑性形状记忆聚合物相比，热固性形状记忆聚合物具有高刚度、高强度、高稳定性、高尺寸稳定性和高耐腐蚀性，是堵漏材料的首选。Magzoub等[49]采用的热固性温度触发聚合物在室温下具有较高的抗压强度和硬度，玻璃化转变温度高达150 ℃。在此基础上，开发的热固性形状记忆聚合物与雪松纤维相匹配，以解决泄漏问题。对于井漏使用的堵漏材料存在破坏生产区、堵塞钻井工具或无法密封裂缝的问题，Mansour[50]研究了一种由阴离子形状记忆聚合物制成的智能堵漏材料，通过地层自然热激活，可以有效封闭裂缝且不会损坏生产层，加固井筒。

2.5.2 智能凝胶堵漏材料

智能凝胶堵漏材料不受地层孔隙大小的影响，可以自由流入任何孔道。对于溶洞性、裂缝性等严重漏失的地层，智能凝胶堵漏材料可以通过挤压变形充满漏失地层，达到封堵漏失地层的目的。

Jiang等[5]基于部分水解聚丙烯酰胺和树脂封装引发剂，制备了具有胶凝时间可控和高温下高凝胶强度的交联聚合物凝胶HTCMG，通过树脂的热塑性来延长胶凝时间。在150 ℃时，HTCMG的突破压力为9.8 MPa。Qu等[51]制备的新型丙烯酰胺共聚物/酚醛树脂凝胶具有良好的抗冲洗液性能、抗高盐度盐水性能和抗原油性能。填砂实验、经凝胶处理的岩心渗透率测试以及其他封堵材料测试均表明，智能凝胶具有良好的封堵性能。除此之外，还有*N*,*N*-二甲基氨乙基甲基丙烯酰胺-乙二醇二甲基丙烯酸酯共聚物水凝胶[52]、聚丙烯酸/聚*N*,*N*-二甲基丙烯酰胺互穿网络水凝胶[53]、应力敏感性凝胶堵漏剂[54-55]等智能型堵漏材料。

总之，智能堵漏材料与其他堵漏材料的不同在于可以自主对漏失地层做出感应判断，可自主适应各种复杂地层，力学性能优异，可显著提高堵漏效率，在钻井液堵漏领域具有广阔的应用前景。但是目前对智能型堵漏材料的研究大多处于基础研究阶段且注重理论性，大部分尚未进行现场应用。

3 结论与展望

井漏材料是成功控制井漏的基础和关键。国内外相继开发出不同类型的堵漏材料，可以在一定程度上解决裂缝性地层的堵漏问题。然而，缺乏能有效解决深井和超深井高温井钻井液损失的高效堵漏材料，开发高效智能堵漏材料以实现裂缝地层的长期稳定封堵至关重要。

对未来钻井液堵漏材料的发展应注意以下几个方面。(1)优化现有堵漏材料性能。桥接堵漏材料和高失水堵漏材料的关键是在堵漏过程中形成具有高承压能力的封堵层，避免漏失重复发生，增强堵漏效果，提高堵漏成功率。聚合物凝胶可提高抗温能力和延迟胶凝能力。可固化堵漏材料能提高抗稀释能力。(2)加强智能堵漏材料和关键设备的研发，建立钻井液漏失相关领域的数据库，将智能型堵漏材料应用到钻井工程中。(3)传统堵漏材料与新型堵漏材料之间的协同，开发有针对性的复合堵漏材料。(4)研发深井和超深井高温井钻井液堵漏材料。

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(3)：630-638.

[2] FAN X Y. Description of complex drilling geological environment [M]. Beijing：Petroleum Industry Press，2012：1-2.

[3] CAI W J，DENG J G，FENG Y C，et al. Developing a geomechanics-modeling based method for lost circulation risk assessment：A case study in Bohai Bay，China [J]. J Pet Sci Eng，2022，210：110045-110054.

[4] FENG Y C，GRAY K E. Review of fundamental studies on lost circulation and wellbore strengthening [J]. J Pet Sci Eng，2017，152：511-522.

[5] JIANG G C，DENG Z Q，HE Y B，et al. Cross-linked polyacrylamide gel as loss circulation materials for combating lost circulation in high temperature well drilling operation [J]. J Pet Sci Eng，2019，181：106250-106258.

[6] LAVROV A. Lost circulation：Mechanisms and solutions [M]. London：Gulf Professional Publishing，2016：1-2.

[7] CUI K X，JIANG G C，YANG L L，et al. Preparation and properties of magnesium oxysulfate cement and its application as lost circulation materials [J]. Pet Sci，2021，18(5)：1492-1506.

[8] 许明标，赵明琨，侯珊珊，等. 油基桥架堵漏剂的研究与应用[J]. 断块油气田，2018，25(6)：799-802.

[9] 苏晓明，练章华，方俊伟，等. 适用于塔中区块碳酸盐岩缝洞型异常高温高压储集层的钻井液承压堵漏材料[J]. 石油勘探与开发，2019，46(1)：165-172.

[10] 李大奇. 裂缝性地层钻井液漏失动力学研究[D]. 成都：西南石油大学，2012：30-31.

[11] 李大奇，曾义金，刘四海，等. 基于分形理论的粗糙裂缝钻井液漏失模型研究[J]. 石油钻探技术，2017，45(4)：46-52.

[12] XUE Y，LIU J，RANJITH P G，et al. Experimental investigation of mechanical properties，impact tendency，and brittleness characteristics of coal mass under different gas adsorption pressures [J]. Geomech Geophys Geo-Energy Geo-Resour，2022，8(5)：1-20.

[13] 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.

[14] ZHAI X P，CHEN H，LOU Y S，et al. Prediction and control model of shale induced fracture leakage pressure [J]. J Pet Sci，2021，198：108186-108194.

[15] OZDEMIRTAS M，BABADAGLI T，KURU E. Effects of fractal fracture surface roughness on borehole ballooning [J]. Vadose Zone J，2009，8(1)：250-257.

[16] OZDEMIRTAS M，KURU E，BABADAGLI T. Experimental investigation of borehole ballooning due to flow of non-Newtonian fluids into fractured rocks [J]. Int J Rock Mech Min Sci，2010，47(7)：1200-1206.

[17] LIETARD O，SPIVEY J P. Revisiting pressure transient testing of hydraulically fractured wells：A single，simple and exact analytical solution covering bilinear，linear，and transition in between flow regimes [C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. Texas，2011.

[18] MAJIDI R，MISKA S Z，YU M，et al. Quantitative analysis of mud losses in naturally fractured reservoirs：The effect of rheology [C]//SPE Western Regional and Pacific Section AAPG Joint Meeting. America，2008.

[19] MAJIDI R，MISKA S Z，YU M，et al. Modeling of drilling fluid losses in naturally fractured formations [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. America，2008.

[20] ALSHUBBAR G，NYGAARD R，JEENNAKORN M. The effect of wellbore circulation on building an LCM bridge at the fracture aperture [J]. J Pet Sci Eng，2018，165：550-556.

[21] KHALIFEH M，KLUNGTVEDT K R，VASSHUS J K，et al. Drilling fluids-lost circulation treatment [C]//SPE Norway One Day Seminar. Texas，2019.

[22] NASIRI A，GHAFFARKHAH A，DIJVEJIN Z A，et al. Bridging performance of new eco-friendly lost circulation materials [J]. Pet Explor Dev，2018，45(6)：1154-1165.

[23] WANG G，HUANG YJ，XU S J. Laboratory investigation of the selection criteria for the particle size distribution of granular lost circulation materials in naturally fractured reservoirs [J]. J Nat Gas Sci Eng，2019，71：103000-103007.

[24] 李伟，白英睿，李雨桐，等. 钻井液堵漏材料研究及应用现状与堵漏技术对策[J]. 科学技术与工程，2021，21(12)：4733-4743.

[25] YANG J B，SUN J S，BAI Y R，et al. Status and prospect of drilling fluid loss and lost circulation control technology in fractured formation [J]. Gels，2022，8(5)：260-274.

[26] XU B H，YUAN B，GUO J H，et al. Novel technology to reduce risk lost circulation and improve cementing quality using

managed pressure cementing for narrow safety pressure window wells in Sichuan Basin [J]. J Pet Sci Eng, 2019, 180: 707–715.

[27] 沈浩坤, 孙金声, 吕开河, 等. 水基钻井液有机处理剂智能化研究进展与应用展望[J]. 油田化学, 2022, 39(1): 155–162.

[28] 潘一, 徐明磊, 郭奇, 等. 钻井液智能堵漏材料研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(9): 9223–9230.

[29] 程鹏至, 易偲文, 梅林德, 等. 新型堵漏材料的研制及性能评价[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(3): 51–55.

[30] 康毅力, 郭昆, 游利军, 等. 考虑地应力及缝宽/粒径比的钻井堵漏材料抗压能力评价[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(1): 39–47.

[31] 康毅力, 张敬逸, 许成元, 等. 刚性堵漏材料几何形态对其在裂缝中滞留行为的影响[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(5): 26–34.

[32] SAVARI S, WHITFILLD L, WALKER J. Acid-soluble lost circulation material for use in large, naturally fractured formations and reservoirs [C]//SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. America, 2017.

[33] 黄贤杰, 董耘. 高效失水堵漏剂在塔河油田二叠系的应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(4): 159–162.

[34] 李胜, 田璐, 薛玉志, 等. 北部湾盆地徐闻X3井抗高温承压堵漏技术[J]. 天然气工业, 2011, 31(10): 73–77.

[35] 侯士立, 刘光艳, 黄达全, 等. 高滤失承压堵漏技术[J]. 钻井液与完井液, 2018, 35(1): 53–56.

[36] ZHAI K J, YI H, LIU Y, et al. Experimental evaluation of the shielded temporary plugging system composed of calcium carbonate and acid-soluble preformed particle gels (ASPPG) for petroleum drilling [J]. Energ Fuel, 2020, 34(11): 14023–14033.

[37] ZHU D Y, XU Z H, SUN R X, et al. Laboratory evaluation on temporary plugging performance of degradable preformed particle gels (DPPGs) [J]. Fuel, 2021, 289: 119743–119753.

[38] 白英睿, 张启涛, 孙金声, 等. 杂化交联复合凝胶堵漏剂的制备及其性能评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(4): 176–184.

[39] FAN X Y, ZHAO P F, ZHANG Q G, et al. A polymer plugging gel for the fractured strata and its application [J]. Materials, 2018, 11(5): 856–876.

[40] 张新民, 聂勋勇, 王平全, 等. 特种凝胶在钻井堵漏中的应用[J]. 钻井液与完井液, 2007 (5): 83–84.

[41] BOSMA M G R, CORNRLISSEN E K, REIJRINK P M T, et al. Development of a novel silicone rubber/cement plugging agent for cost effective thru´tubing well abandonment [C]//IADC/SPE drilling conference. Texas, 1998.

[42] ALI M, TAOUTAOU S, SHAFQAT A U, et al. The use of self-healing cement to ensure long-term zonal isolation for HPHT wells subject to hydraulic fracturing operations in Pakistan [C]// IPTC 2009: International Petroleum Technology Conference. Texas, 2009: cp-151-00005.

[43] 幸雪松, 孙翀, 许明标, 等. 提高水泥层间封隔能力的低密度弹性密封水泥浆性能评价[J]. 油田化学, 2022, 39(2): 222–227.

[44] 马疆, 苏洪生, 徐新纽, 等. 准噶尔盆地南缘深井、超深井超高温超高密度水泥浆体系研究及应用[J]. 新疆石油天然气, 2021, 17(3): 18–24.

[45] 陈荣耀, 宋建建, 武中涛, 等. 耐高温高密度防腐固井水泥浆[J]. 钻井液与完井液, 2022, 39(5): 601–607.

[46] 杨仲涵, 罗鸣, 陈江华, 等. 莺歌海盆地超高温高压井挤水泥承压堵漏技术[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(3): 47–51.

[47] 张浩, 余继平, 杨洋, 等. 可酸溶固化堵漏材料的封堵及储层保护性能[J]. 油田化学, 2020, 37(4): 581–586.

[48] 田陆飞. 高效承压智能堵漏复合材料的制备与性能研究[D]. 济南: 济南大学, 2011: 14 –15.

[49] MAGZOUB M, ANYAEZU T, SALEHI S, et al. Evaluating seal ability of blended smart polymer and fiber additive for geothermal drilling with the effect of fracture opening size [J]. J Pet Sci Eng, 2021, 206: 1–11.

[50] MANSOUR A K A. Experimental study and modeling of smart loss circulation materials; advantages and promises [M]. Baton Rouge, Louisiana: Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College, 2017: 2–3.

[51] QU W J, YU P Z. Intelligent gel as a high-performance plugging agent in deep wells [J]. Acta Geol Sin, Engl Ed (USA), 2019, 93(S1): 192.

[52] MAZIED N A, ISMAIL S A, ABOU TALEB M F. Radiation synthesis of poly [(dimethylaminoethyl methacrylate) -*co*- (ethyleneglycol dimethacrylate)] hydrogels and its application as a carrier for anticancer delivery [J]. Radiat Phys Chem, 2009, 78 (11): 899–905.

[53] AOKI T, KAWASHIMA M, KATONO H, et al. Temperature-responsive interpenetrating polymer networks constructed with poly (acrylic acid) and poly (*N*, *N*-dimethylacrylamide) [J]. Macromolecules, 1994, 27(4): 947–952.

[54] JOHNSON L, MURPHY P, ARSANIOUS K. Improvements in lost-circulation control during drilling using shear-sensitive fluids [C]//Canadian International Petroleum Conference. Canada, 2000.

[55] QUINN D, SUNDE E, BARET J F. Mechanism of a novel shear-sensitive plugging fluid to cure lost circulation [C]//SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. Texas, 1999.

Current Status and Prospects of Drilling Fluid Plugging Materials for Lost Circulation Formations

LIU Jing[1], MA Cheng[1], YANG Chao[2], ZHONG Feisheng[3], LUO Genxiang[1]

(*1. School of Petrochemical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun, Liaoning 113001, P R of China; 2. Dalian Research Institute of Petroleum and Petrochemicals, Sinopec, Dalian, Liaoning 116045, P R of China; 3. Zhangwu Lianxin Foundry Silica Sand Company, Ltd, Fuxin, Liaoning 123200, P R of China*)

Abstract: Lost circulation is the main technical problem that restricts the improvement of quality and efficiency of oil and gas drilling engineering. Improving the success rate of one-time plugging is an urgent need to ensure "safe, efficient, and economical" drilling in global oilfields. This paper summarized the leakage mechanism of drilling fluid, introduced the properties and interaction mechanism of various plugging materials such as bridging, high water loss, curing, polymer gel and smart materials, and then clarified the problems existing in current plugging materials. The bridging and plugging material was inexpensive, easy to operate, widely sourced, and had little impact on the rheological properties of drilling fluid. However, its particle size had poor compatibility with the leakage channel of formation. Furthermore, its formula was complex. High water loss plugging material was easy to use, effective, and had a high success rate in plugging. But it had some deficiencies. For example, the composition was complex, the water loss rate was difficult to control, and the blockage was not easy to remove. Curable plugging material was inexpensive, had high pressure sealing ability, and simple preparation and operation processes. However, its construction safety risks were high. Polymer gel plugging material had strong adaptability to leakage channels, good viscous resistance and anti-shearing dilution ability. However, its high-temperature resistance was low, long-term sealing performance and compatibility with drilling fluid were poor. Furthermore, the gelation time was difficult to control. Intelligent plugging material could intelligently adapt to various complex formations. It had strong pertinence and little damage to the formation. However, its plugging mechanism and adaptability needed to be further improved. The future development direction of plugging materials was proposed, such as the development of intelligent plugging materials and drilling fluid plugging materials for high-temperature well in deep and ultra deep wells.

Keywords: *plugging material; leakage mechanism; lost circulation; drilling fluid; review*

(上接第722页。continued from p. 722)

theoretical study on the synergistic inhibition effect of pyridine derivatives and sulfur-containing compounds on the corrosion of carbon steel in CO_2-saturated 3.5 wt% NaCl solution [J]. Molecules, 2018, 23:3270.

[18] TANG J L, HU Y X, WANG H, et al. Complicated synergistic effects between three corrosion inhibitors for Q235 steel in a CO_2-saturated 3.5 wt% NaCl solution [J]. Int J Electrochem Sci, 2019, 14:2246-2264.

[19] KOKALJ A. Corrosion inhibitors: physisorbed or chemisorbed? [J]. Corros Sci, 2022, 196:109939.

[20] 项斯芬，严宣申，曹庭礼，等. 无机化学丛书·典藏版(第四卷)[M]. 北京：科学出版社，2018：352-359.

Synergistic Corrosion Inhibition Effects of Pyridine Quaternary Ammonium Salt and Antimony Cation at High Temperature Acidizing

LI Jia[1], SUN Yadong[1], WANG Hu[2]

(*1. Sichuan Chuanqing Downhole Technology Company Ltd, Deyang, Sichuan 618000, P R of China; 2. School of Materials Science and Engineering, Southwest Petroleum University, Chendu, Sichuan 610500, P R of China*)

Abstract: As important ingredients in corrosion inhibitor at high temperature acidizing, pyridine quaternary ammonium salt and antimony salt have been universally used in application. In this paper, chemical soaking at high temperature and high pressure and electrochemical measurements was carried out to investigate the synergistic corrosion inhibition effects between pyridine quaternary ammonium salt (BDJ) and Sb_2O_3 on N80 steel in 20%HCl solution. The performance of the formed film at different conditions was analyzed using contact angle, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), X-ray diffraction (XRD) and attenuated total reflectance (ATR). The mechanism of film forming process of acidizing corrosion inhibitor relating BDJ and Sb_2O_3 was proposed. The results showed that there existed in apparent synergistic corrosion inhibition between BDJ and Sb_2O_3. With the increase of Sb_2O_3 concentration, the inhibition efficiency was remarkably enhanced. When adding corrosion inhibitor of 2% BDJ+0.5% Sb_2O_3, the corrosion rate of N80 steel decreased to 18.0 g/(m^2·h), which was far less than the requirement of 45 g/(m^2·h), as a result, the inhibition efficiency increased over 95%. The mixture inhibitor shifted the potential positively and decreased the corrosion tendency thermodynamically. The protective film was consisted of compound film with Sb and BDJ inside, which effectively enlarged the contact angle and inhibited the acid corrosion.

Keywords: *corrosion inhibitor in acidizing; pyridine ammonium quaternary salt; antimony cation; synergistic effect*