

钻井液防漏堵漏材料研究进展

赵福豪, 黄维安

(中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要:井漏是钻井工程中常见的技术难题,影响施工进度,导致成本增高。防漏堵漏材料对有效预防和治理不同工况下的井漏问题十分重要。近年来国内外研发了各类防漏堵漏材料,主要有高酸溶、智能型、抗高温、吸油膨胀型等类型。对各种防漏堵漏材料的特点、适应性和作用机理进行了分析。其中智能型堵漏材料 SD-SLCM 的膨胀温度可控,能实现智能封堵;页岩地层开发大量使用油基钻井液,一些聚合物材料能通过吸收和储集油分子达到体积膨胀效果,可有效解决该类储层漏失问题。尽管防漏堵漏材料的研究已取得较大进展,但智能型等新型材料的研究正处于初始阶段,化学堵漏材料合成方法和原料比较单一;此外,针对严重漏失地层和纳微米级漏失的堵漏效果并不理想,都是需要进一步研究解决的问题。

关键词:钻井;地层漏失;堵漏;钻井液

中图分类号:TE254 **文献标志码:**A

Research progress on prevention and plugging materials for drilling fluid lost circulation

ZHAO Fuhao, HUANG Weian

(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao 266580, China)

Abstract: Lost circulation is a common technical problem in drilling engineering, which affects the construction and causes the cost to increase day by day. Therefore, leak prevention and plugging materials are very important to effectively prevent and manage lost circulation under different working conditions. In recent years, various anti-leakage and plugging materials have been developed at home and abroad, mainly including high acid solubility, intelligent type, high-temperature resistance, oil-absorbing expansion type, and other types. And then it is analyzed the characteristics, adaptability, and action mechanism of various anti-leakage and plugging materials. Among them, the expansion temperature of the smart plugging material SD-SLCM is controllable, which can realize intelligent plugging. Oil-based drilling fluids are widely used in the development of shale formations. Some polymer materials can achieve volume expansion by absorbing and storing oil molecules, which can effectively solve this type of reservoir leakage problem. Although the research on leak prevention and plugging materials has made great progress, the research on smart and other new materials is in the initial stage, and the synthetic methods and raw materials of chemical plugging materials are relatively simple; in addition, it is not ideal that the plugging effect for serious leakage formation and nano micron leakage, which is an urgent problem for researchers.

Key words: drilling; lost circulation; plugging; drilling fluid

井漏是钻井工程中最常见的技术难题之一^[1],目前在深层超深层、深水、非常规油气勘探中仍存在严重的漏失问题^[2]。井漏严重制约了钻井速度,造成巨大的经济损失,甚至对储层产生不可估量的损害。目前,传统堵漏材料种类日益丰富,各种工农业废弃物被加工成经济环保的堵漏材料,化学类堵漏材料种类繁多、应用广泛,根据各自性能特点可对不同漏层有效封堵。国内外也研制和开发了很多新

型的钻井液防漏堵漏材料,如具有形状记忆特性的智能型堵漏材料,针对纳微米孔隙漏失地层的纳微米堵剂等。本文介绍了桥接、高失水、聚合物凝胶、膨胀型、无机凝胶以及随钻堵漏材料的特点、作用

收稿日期:2020-03-27;改回日期:2020-05-16。

第一作者简介:赵福豪(1997—),在读硕士研究生,主要从事油气井化学工程领域研究。E-mail:zhaofuhao321@163.com。

机理,对目前堵漏材料研究中存在的问题进行了探讨,对未来发展趋势提出了建议。

1 国内外防漏堵漏材料研究现状

1.1 桥接堵漏材料

桥接堵漏材料如果壳、纤维、云母片等,其作用机理有挂阻“架桥”、“拉筋”、堵塞与嵌入、渗滤、膨胀、“卡喉”等。具有价格便宜、施工工艺简单且来源广的特点,因此被广泛应用。通过将废旧轮胎橡胶、榴莲皮、果树纤维、农业废弃物、牡蛎壳等废旧材料加工^[3-4],可制成环保型堵漏材料。近年来学者们也研制了适用于不同漏失情况的新型桥接堵漏材料,如深水钻井可降解纤维^[5],高酸溶纤维堵漏剂SDSF^[6],新型抗高温堵漏材料SDHTP-1和SDHTF-1^[7],利用温敏形状记忆材料研制出的智能堵漏剂^[8-9]等。

1.2 新型桥接堵漏材料

1.2.1 热致形状记忆智能型堵漏剂SD-SLCM^[9]

将酸酐类高温交联剂与环氧聚合物单体在胺类催化剂的作用下发生反应,合成具有形状记忆特性的聚合物。这种聚合物制成的堵漏颗粒可依据漏层温度调控其玻璃化转变温度,具有高温高压下膨胀率高(D90粒度增长率40%)、破碎率小(10%)等特性,可适用于3~5 mm不同缝宽的裂缝,承压大于11 MPa,实现智能封堵。

1.2.2 高酸溶堵漏材料

Savari等人针对大裂缝地层研究出酸溶性堵漏颗粒^[10],可封堵5 mm宽裂缝,配合其他材料可对7 mm裂缝进行有效封堵,堵漏剂中的酸溶性成分可在10% HCl或10%甲酸中完全溶解。陈家旭等人为解决常用纤维堵漏材料酸溶性较差的问题,研制了高酸溶纤维堵漏剂SDSF^[6],酸溶率可达95%,抗温能力达150℃,在水基钻井液中分散性良好,耐碱性能优良。

1.3 复合堵漏材料

1.3.1 新型抗高温堵漏材料SDHTP-1和SDHTF-1^[7]

高温地层长时间堵漏作业中,新型抗高温高强度刚性架桥颗粒(SDHTP-1)稳定性好,不易沉降,不易破碎;新型抗高温高强度堵漏纤维(SDHTF-1)不易降解,分散性好,断裂强度高。通过不同类型堵漏材料的级配和浓度控制,得到高温下(220℃)封堵承压能力大于10 MPa,各种性能良好的封堵工作液配方。

1.3.2 新型油基桥架堵漏剂DualGUARD^[11]

针对涪陵页岩气油基钻井液,以亲油类材料、高强度颗粒和片状材料为主,引入纤维类材料及酸溶性矿物质刚性材料及超细活性物质(分别起拉筋作用、渗率作用),配制成堵漏剂DualGUARD。可用于封堵1~2 mm,2~4 mm,4~8 mm砂床及1 mm,2 mm,3 mm裂缝,抗温70~150℃,封堵承压7.0~10.0 MPa,堵漏成功率70%。

1.4 高失水堵漏材料

高失水堵漏浆液进入漏失层后,通过液柱压力和地层压力的压差作用迅速失水,堵漏浆中的固相成分不断聚集、变稠,并形成滤饼,进一步压实、填塞漏失通道,达到堵漏效果。形成的堵塞具有高渗透性的微孔结构及整体充填特性,可透气、水,而钻井液会迅速失水,形成光滑平整的滤饼,进而加强漏失通道的封堵。在堵剂中混入一定量的颗粒状惰性材料可起到桥接作用,封堵大漏失通道,Savari等人提出添加网状泡沫材料可提高该类材料对大尺寸裂缝的封堵效果^[12]。卢小川等人针对断层破碎带井漏的特点,结合海上工程实际,研制出了一种堵塞形成快、滤饼强度高的酸溶性高失水固化堵漏剂STP(承压能力7 MPa,酸溶率高于80%)^[13]。田军等人将微米级颗粒、聚合物纤维、凝胶复配成一种快速滤失固结堵漏材料ZYSD^[14],具有滤失快(10~15 s)、封堵承压强(18.5 MPa)等特点,已在32井次应用,一次堵漏成功率达87.5%。

1.5 凝胶堵漏材料

聚合物凝胶和无机凝胶都是钻井工程中常用的堵漏材料。其中聚合物凝胶对漏失通道适应性好、固相含量低、抗稀释、流动增堵能力强、有润滑性,有利于减少卡钻^[15]、再堵性良好。可分为预交联聚合物和有特殊结构的不交联聚合物两种,可配合其他堵漏材料使用。

1.5.1 预交联聚合物凝胶

预交联聚合物凝胶是把单体和交联剂在地面混合后泵入漏失层,在地温条件下的一定时间里产生有一定强度的凝胶,起到封堵作用。Jiang等人研制的聚丙烯酰胺凝胶HTCMG可在80~150℃范围内形成凝胶,且可调节胶凝时间,在150℃可有效堵塞3 mm裂缝,封堵承压9.8 MPa^[16]。彭振斌等人将3%聚乙烯醇+0.8%硼砂+0.3%二丁酯+0.3%羧甲基纤维素钠在35℃、pH=10时产生交联反应,制成成胶时间18 min、最大承压达6.0 MPa的聚乙烯醇凝胶堵漏剂^[17],成交时间可在0.1~10 h内调控。抗高温可降解凝胶

堵剂P(AM-DGCL)^[18]可解决普通凝胶在高温下成胶时间短、强度低且难破胶的问题,150℃下成胶时间2~13 h,拉伸强度0.042 5 MPa,16 h破胶率95%。

1.5.2 井下交联聚合物凝胶

应用最为广泛的一种不需要交联的聚合物是西南石油大学研制的特种凝胶ZND^[19],对封堵恶性漏失层有较好效果。近年,王勇等人依据超分子化学理论研发了一种超分子堵漏凝胶^[20],该凝胶可在不同深度、不同温度地层中与周围介质结合成牢固的整体,形成高粘弹性高强度的凝胶段塞封堵漏层,对0.15~1.5 mm的孔隙,封堵承压达7.5 MPa,在克205井等3口井进行应用,堵漏效果好,降低了钻井成本。

1.5.3 无机胶凝

无机胶凝堵漏材料主要包括水泥、石膏、石灰等混合浆液,以水泥为主。封堵漏层后有很高的承压能力,来源广、价格便宜、施工工艺简单。各种特殊性质水泥(触变性、快干性、膨胀)及各种高效的速凝剂、缓凝剂的研制成功,大大拓宽了该类堵漏材料的使用范围。Liu等人提出建筑行业广泛应用的地聚合物用于钻井行业,可与非水基钻井液(NAFs)混合,实现快速胶凝^[21]。

1.5.4 有机无机复合凝胶

李韶利等人研制了一种可对胶凝时间进行调节的复合堵漏剂CTJ^[22],其适应温度范围广(30~80℃),承压强度大(14 MPa),对渗透性、大孔隙、裂缝性、溶洞性漏失的堵漏效果都很好,现场应用45口井,成功率80%。宋元洪等人通过在水泥浆中加入高分子凝胶堵漏剂(CPA)提高了堵漏水泥浆体系的堵漏性能^[23]。

1.6 膨胀型堵漏材料

1.6.1 吸水膨胀型堵漏材料

一些聚合物颗粒或纤维材料能够吸取溶液中的水,膨胀几十甚至几百倍,对严重漏失的地层产生架桥封堵作用,也可通过压实充填进一步提高堵漏效果。Song等人研制的柔性堵漏颗粒^[24]可耐150℃高温,在盐水中膨胀7倍。应春业等人研制的一种新型吸水膨胀堵漏剂^[25]具有膨胀量适中、弹性模量高等特点,与国内常规堵漏剂相比,可节约2 000~4 000元/吨。Jothibasu Ramasamy等人研究的吸水膨胀型堵剂^[26]由两部分组成,含丙烯酸聚合物等吸水材料的部分与NaOH溶液接触后吸水膨胀,在10.4 MPa、121℃条件下可封堵2 mm裂缝。此外,凝胶微球

堵漏剂WQ-5^[27]、体膨颗粒堵漏剂TP-2^[28]等凝胶材料也有优良的堵漏性能。

1.6.2 吸油膨胀型堵漏材料

页岩地层钻井多采用油基钻井液,裂缝性漏失经常发生。可使用含有亲油聚合物、树脂等材料的吸油膨胀型堵剂进行有效防漏堵漏。这些材料有大量的聚合物链,链上的亲油基团对油分子有吸收作用,它们互相缠绕形成三维网络交联结构,是很好的储集空间。刘伟等人研制了吸油膨胀型堵漏剂G337^[29],在90℃时1 h吸油率120%,堵漏配方用于1~5 mm封板实验承压7 MPa,在2.10~2.45 g/cm³密度条件下的井段试验,渗漏量控制在10 m³以内。李红梅等人研制了一种具有吸油膨胀性的高分子树脂材料YDLJ-1^[30],室温下5 h膨胀量达5倍,可抗150℃高温,正向封堵突破压力大于15 MPa,现场试验表明可减少漏失量,缩短堵漏时间。

1.7 随钻堵漏材料

随钻堵漏材料可加入到钻井液中实现边钻边堵,投入少、方法简单且节省较多的处理井漏时间。在孔隙型-裂缝性漏失层,堵漏材料在压差作用下进入漏层,封堵近井筒的漏失通道,起到防漏堵漏作用。根据作用原理,可分为骨架材料和填充变形材料。

1.7.1 骨架材料

该类材料可在裂缝端口处形成填塞层,提高承压能力。常用的有纤维、刚性颗粒等。苏晓明等人针对高温地层研究了抗高温、高承压的堵漏剂^[31];艾正清等人研制的多面锯齿状铝合金颗粒GYD^[32]可用于超深致密砂岩气藏油基钻井液,GYD颗粒能在油相中分散完全,莫氏硬度接近5~6,酸溶率可达90%以上,实现钻进中地层缝内高流动阻力和高承压的“高刚性架桥+纤维成网+变形填充”封堵功能。对于地层中一些纳微米级孔隙和裂缝,常规封堵材料不能起到很好的效果,因此近年来对纳米封堵剂的研究有所增加,如AM/AMPS/NVP三元共聚物纳米堵剂^[33]、纳米二氧化硅凝胶^[34]等,纳米材料具有颗粒小、团聚程度低等优势,能在液体介质中均匀且稳定地分散。西南石油大学以SnCl₄·5H₂O和苯并咪唑为主研制的NF-1纳米封堵剂^[35],是一种粒度达91.4 nm的一维无机纳米材料,在3%的膨润土基浆中添加5%的NF-1,测得30 min滤失量为12.8 mL(105℃、3.5 MPa),说明该纳米封堵材料性能优异,封堵效果好。

1.7.2 填充变形材料

此类材料可变形、膨胀,充填骨架材料间形成的微小孔隙,起压实填充作用。常用的有凝胶、沥青、弹性石墨、橡胶、树脂等。可变形的凝胶与其他材料复配使用,可有效提高封堵防漏效果,如针对非均质储层的温敏变形封堵剂SMFIELD-2^[36]、刘文堂等人研制的油基钻井液用球状凝胶复合封堵剂^[37]、马文英等人研制的凝胶微球BAG-1^[38]、中海油服用磺化沥青与其他材料的复配物研制成一种抗高温油基钻井液封堵剂PF-MOSHIELD^[39]。蒋官澄等人针对常规堵漏材料难以对非均质强的渗透地层实现随钻封堵的难题,合成了疏水缔合聚合物JD^[40],聚合物之间形成了尺寸约为0.1~0.2 μm的疏水缔合结构,并与膨润土间形成动态网架结构,具有良好的封堵性能。

2 结论

(1)目前堵漏材料种类多样,能处理大部分常规漏失问题,但可用于严重漏失地层的堵漏剂品种有限,常用的水泥堵剂会被地层中的液相冲蚀、稀释而失去效果,需开发抗冲释、强滞留的固结类堵漏剂。

(2)化学类堵漏材料适用性好、种类多,应用最为广泛,但仍存在产品质量不易控制、现场配置程序复杂、高温耐久性差、承压能力较低等不足,需开展针对性的改进。其合成单体多为丙烯酰胺、丙烯酸等,比较单一,有待于进一步探索更经济高效的原料及合成方法。

(3)研制耐高温、高强度的桥接堵漏材料是当务之急。

(4)形状记忆型智能材料、纳微米堵漏剂等新型堵漏材料的研究尚处于初步阶段,应加强其适应性和综合性能的研究。

参考文献:

- [1] 黄汉仁.钻井流体工艺原理[M].北京:石油工业出版社,2016.
- [2] 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.
- [3] 康力,鲜明,杨国兴,等.废旧汽车轮胎橡胶颗粒堵漏材料的研究与应用[J].钻井液与完井液,2016,33(4):69-73.
- [4] NASIRI A, AHMADREZA G, AZIMI D Z, et al.新型环保型堵漏剂性能评估[J].石油勘探与开发,2018,45(6):1082-1091.
- [5] NANA D, BUYERS G, BURTON D, et al. Successful application of self-degradable lost circulation control pill in managed pressure drilling for a deepwater well [C]// IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, Singapore: Society of Petroleum Engineers, 2016.
- [6] 陈家旭,李兆丰,邱正松,等.高酸溶纤维堵漏剂的实验研究[J].钻井液与完井液,2018,35(5):41-45.
- [7] 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(7):846-857.
- [8] MANSOUR A K, TALEGHANI A D. Smart loss circulation materials for drilling highly fractured zones [C]// SPE/ IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE: Society of Petroleum Engineers, 2018.
- [9] 暴丹,邱正松,叶链,等.热致形状记忆“智能”型堵漏剂的制备与特性实验[J].石油学报,2020,41(1):106-115.
- [10] SAVARI S, WHITFILL D 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, Manama, Kingdom of Bahrain, Society of Petroleum Engineers, 2017.
- [11] 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.
- [12] SAVARI S, ROLFSON J, WILLIAMS R, et al. Reticulated foam enhanced high fluid loss squeeze LCM for severe lost circulation management in highly fractured formations [C]// SPE Deepwater Drilling and Completions Conference, Galveston, Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 2016.
- [13] 卢小川,赵雄虎,王洪伟,等.固化承压堵漏剂在渤海油田断层破碎带的应用[J].钻井液与完井液,2014,31(4):47-49.
- [14] 田军,刘文堂,李旭东,等.快速滤失固结堵漏材料ZYSD的研制及应用[J].石油钻探技术,2018,46(1):49-54.
- [15] ZHU Q, WANG Y, ZHANG Y, et al. Successful Applications of a novel compound lost circulation additive with variable structure [C]// SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, Dammam, Saudi Arabia: Society of Petroleum Engineers, 2018.
- [16] JIANG Guancheng, DENG Zhengqiang, HE Yinbo, et al. Cross-linked polyacrylamide gel as loss circulation materials for combating lost circulation in high temperature well drilling operation [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 181: 106250.

- [17] 彭振斌,张闯,李凤,等.聚乙烯醇凝胶堵漏剂的室内研究[J].天然气工业,2017,37(6):72-78.
- [18] 郭永宾,颜帮川,黄熠,等.高温成胶可降解聚合物凝胶堵漏剂的研制与评价[J].钻井液与完井液,2019,36(3):293-297.
- [19] 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,2007,24(5):83-84.
- [20] 王勇,蒋官澄,杜庆福,等.超分子化学堵漏技术研究与应用[J].钻井液与完井液,2018,35(3):48-53.
- [21] LIU Xiangyu, AUGHENBAUGH K, LEE H, et al. Geopolymer-synthetic based mud hybrid cements for primary cementing and lost circulation control[C]//SPE International Conference on Oilfield Chemistry, Montgomery, Texas, USA; Society of Petroleum Engineers, 2017.
- [22] 李韶利,郭子文.可控胶凝堵漏剂的研究与应用[J].钻井液与完井液,2016,33(3):7-14.
- [23] 宋元洪,杨蓉,庄建山,等.高分子凝胶堵漏剂的研究[J].钻井液与完井液,2016,33(5):92-97.
- [24] SONG Lifang, LV Kaihe, ZHANG Zhan. Synthesis of a flexible particle as a lost circulation material in drilling fluids [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 237(5): 052059.
- [25] 应春业,高元宏,段隆臣,等.新型吸水膨胀堵漏剂的研发与评价[J].钻井液与完井液,2017,34(4):38-44.
- [26] RAMASAMY J, AMANULLAH M. Two component lost circulation material for controlling seepage to moderate losses[C]//SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, Dammam, Saudi Arabia; Society of Petroleum Engineers, 2017.
- [27] 李小瑞,张宇,杨南.预交联凝胶微球堵漏剂的性能评价[J].油田化学,2016,33(4):581-584,595.
- [28] 吴轩宇,任晓娟,李盼,等.用于裂缝性地层的体膨颗粒钻井液堵漏剂TP-2的制备与性能研究[J].油田化学,2016,33(2):191-194.
- [29] 刘伟,柳娜,张小平.膨胀型油基防漏堵漏钻井液体系[J].钻井液与完井液,2016,33(1):11-16.
- [30] 李红梅,申峰,吴金桥,等.新型油基钻井液堵漏剂性能[J].钻井液与完井液,2016,33(2):41-44.
- [31] 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.
- [32] 艾正青,叶艳,刘举,等.一种多面锯齿金属颗粒作为骨架材料的高承压强度、高酸溶随钻堵漏钻井液[J].天然气工业,2017,37(8):74-79.
- [33] AN Yuxiu, JIANG Guancheng, QI Yourong, et al. Synthesis of nano-plugging agent based on AM/AMPS/NVP terpolymer [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 135: 505-514.
- [34] SHAMLOOH M, HAMZA A, HUSSEIN I A, et al. Investigation of the rheological properties of nanosilica-reinforced polyacrylamide/polyethyleneimine gels for wellbore strengthening at high reservoir temperatures [J]. Energy & Fuels, 2019, 33(7): 6829-6836.
- [35] 黄进军,刘伟,李春霞.纳米封堵剂NF-1的制备与性能评价[J].钻井液与完井液,2016,33(5):15-18,24.
- [36] 李建山.杭锦旗区块防塌防漏钻井液技术[J].钻井液与完井液,2019,36(3):308-314.
- [37] 刘文堂,郭建华,李午辰,等.球状凝胶复合封堵剂的研制与应用[J].石油钻探技术,2016,44(2):34-39.
- [38] 马文英,刘昱彤,钟灵,等.油基钻井液封堵剂研究及应用[J].断块油气田,2019,26(4):529-532.
- [39] 王伟,赵春花,罗健生,等.抗高温油基钻井液封堵剂PF-MOSHIELD的研制与应用[J].钻井液与完井液,2019,36(2):153-159.
- [40] 蒋官澄,刘冲,贺垠博,等.随钻堵漏用疏水缔合聚合物的作用机理分析[J].钻井液与完井液,2017,34(1):50-53,59.

(编辑 韩 枫)