

膨胀堵漏材料及堵漏工艺研究进展

严君凤, 蒋炳, 罗显梁, 吴金生
(中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川成都 611734)

摘要:在新一轮战略找矿行动中,为了更好地完成大量的钻探工作,减少冲洗液的漏失,降低钻探施工成本,应加强膨胀堵漏材料的研究和应用。本文综述了吸水膨胀材料、吸油膨胀材料、形状记忆形变堵漏材料的合成方法;为适应钻孔堵漏的需求,提高膨胀材料的强度、抗盐性以及延迟膨胀技术;采用膨胀堵漏材料进行堵漏时的施工工艺。为膨胀堵漏材料的推广应用提供指导。

关键词:膨胀堵漏材料;吸水膨胀材料;吸油膨胀材料;形状记忆形变材料;智能堵漏;堵漏工艺

中图分类号:P634.6;TE254 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0056-07

Research progress in expansion plugging materials and plugging technology

YAN Junfeng, JIANG Bing, LUO Xianliang, WU Jinsheng

(Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: In the new round of strategic mining operations, in order to better complete large amounts of drilling work, reduce drilling fluid leakage and drilling costs, the research and application of the expansion plugging materials should be carried out. Therefore, the synthesis methods of water absorption expansion, oil absorption expansion, and shape memory deformation plugging materials are reviewed in this article. The plugging technology using expansion plugging materials is adopted in order to meet the needs of drilling plugging such as improve the strength, salt resistance, and delay expansion. It can provide guidance for propagation of the expansion plugging materials.

Key words: expansion plugging material; expansion after water absorption material; expansion after oil absorption material; shape memory shape-shifting material; intelligent plugging; plugging technology

矿产资源是经济社会发展的重要物质基础,面对日益复杂的国际环境,为了提升国内能源资源保障能力,我国十四五规划了《新一轮找矿突破战略行动》;2023年全国自然资源工作会议全面启动了新一轮战略性矿产国内找矿行动。要围绕加强重要能源矿产国内勘探开发和增储上产,突出紧缺和大宗战略性矿产,以重要含油气盆地和重点成矿区带为重点,根据地质工作程度分类施策实施勘查找矿。钻探工作必将大量布置,在实施过程中钻孔漏失问题始终是地质勘探开发需要解决的一个

主要技术难点,若及时发现和处理,大量泥浆材料不仅被漏失,而且占用钻探施工时间,降低钻探效率,还可能引发井塌、井喷和卡钻等恶性事故,甚至导致整个钻孔报废,造成不可挽回的重大经济损失。

近年来通过广大钻探科技人员的不懈努力,在堵漏技术方面取得了众多科研成果,堵漏材料的品种也不断增多,解决了许多钻孔漏失的实际问题。膨胀类堵漏材料具有吸水或吸油后体积膨胀和变形性等优点,通过自动调节体积膨胀的程度适应不

收稿日期:2023-05-23; 修回日期:2023-07-25 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.009

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“复杂地层钻探关键技术智能升级与应用示范”、“绿色勘查与水平定向钻探技术示范”(编号:DD20221652)

第一作者:严君凤,男,汉族,1963年生,正高级工程师,探矿工程专,从事钻探堵漏、泥浆技术研究、水文地质钻探工艺及成井技术以及地质灾害应急抢险施工技术,285759978@qq.com。

引用格式:严君凤,蒋炳,罗显梁,等.膨胀堵漏材料及堵漏工艺研究进展[J].钻探工程,2023,50(S1):56-62.

YAN Junfeng, JIANG Bing, LUO Xianliang, et al. Research progress in expansion plugging materials and plugging technology [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1):56-62.

同形状、多种尺寸的漏失通道,不受漏失通道形状和尺寸的影响,可以解决桥接类堵漏材料和高失水类堵漏材料无法解决的自适应堵漏问题,在钻探施工中得到了大量应用。

1 膨胀堵漏材料

膨胀堵漏材料由于自身分子结构的特点,含有较多的亲水或亲油基团,同时具有一定的交联度,既不溶于水、也不溶于有机溶剂。通过亲水或亲油基团吸水或吸油后体积发生膨胀,而记忆功能恢复材料是通过温度或其他外力刺激恢复原来的形状,当它们进入到漏失通道后就能根据其所需形状、尺寸进行调节来适应漏失通道,从而达到智能封堵漏失的目标。

1.1 吸水膨胀材料

1.1.1 吸水膨胀材料类型及合成

吸水膨胀材料是一种新型高分子材料,利用高吸水树脂进行性能改进后与其它材料配合用于钻孔堵漏,根据聚合采用的单体和添加材料类别不同主要分为:吸水膨胀类聚合物、矿物复合类吸水膨胀材料、天然产物改性膨胀材料等;高聚物可以采用本体聚合、溶液聚合、反相悬浮聚合、反相乳液聚合,也可以通过辐射交联聚合、辉光放电等离子聚合、超声波法等方法制备^[1-2]。单体分子结构中含亲水的羧基、酰胺基等,在引发剂作用下容易聚合,例如:丙烯酸、丙烯酸甲酯、甲基丙烯酸甲酯、丙烯酰胺、丙烯腈、醋酸乙烯酯等,其聚合物可以和无机多价离子或具有双官能团的有机物进行交联而形成吸水性能很好的膨胀堵漏材料。作为膨胀堵漏材料研究得较多的是非离子单体丙烯酰胺,这是缘于含有吸水性强酰胺基团,耐盐性较好^[3];另外酰胺基团又为吸附基团,可增加膨胀材料在地层中的吸附能力,提高驻留能力^[4]。

吸水膨胀材料的性能主要取决于在制备时单体的中和度,选取的交联剂、引发剂、添加剂,聚合反应时对温度、时间的控制。翟科军等^[5]以丙烯酸(AA)、丙烯酰胺(AM)、2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸(AMPS)为单体,N,N-亚甲基双丙烯酰胺为交联剂,过硫酸铵-亚硫酸氢钠为引发剂,控制AA与AM质量比8:2,AMPS与AA、AM质量总和的1:20,AA中和度在80%时进行聚合。该膨胀材料在淡水和6%氯化钠溶液中360 min吸液倍率分别达

102~234 g/g和17~23 g/g。欧阳传湘等^[6]以丙烯酰胺、丙烯酸和二甲基二丙烯酰胺基磺酸钠为共聚单体,以过硫酸铵引发剂,XNWJ-3为化学交联剂,SP-80为分散剂,采用反相悬浮聚合法合成了一种良好膨胀性能的新型耐温微球堵漏剂。该耐温微球具有较强的耐温耐盐性,承压能力可达8 MPa以上。

利用安全、高效、操作简单的微波和超声波也可引发吸水材料的聚合反应。葛华才等^[7]不添加任何引发剂,利用微波辐射下产生的自由基引发壳聚糖-丙烯酸发生聚合,制备的吸水材料可吸水511 g/g、在盐水中吸液126 g/g,产品结构与自由基引发剂合成的类似,这是因为壳聚糖是含有-OH和-NH₂侧链的大分子,在微波作用下这些基团发生每秒高达数亿次的快速旋转,这直接导致特定基团反应速率的加快,同时使壳聚糖分子中侧链基团的O-H和N-H键断裂,从而产生自由基引发聚合反应。王艳丽等^[8]采用超声波清洗器(功率150 W)为超声来源,在不加引发剂和没有气氛保护环境下,用NMBA作为交联剂,制备了AM/AMPS共聚高吸水性树脂。因为超声波作用于液体时会产生“超声空化”现象,瞬间产生5000 K和500 atm的局部高温高压,加热和冷却速度达10⁹ Ks⁻¹,足以使液相内化合物的化学键断裂而引发聚合反应^[9]。在最佳合成条件下研制的该膨胀材料能够吸收生理盐水102倍。

1.1.2 提高强度的方法

由于高吸水树脂吸水后的强度显著降低,难以满足堵漏实际需求,必须通过一些技术方法提高其强度来满足应用需求。研究发现:交联密度越大,高吸水性树脂的凝胶强度越高,可以通过添加无机物、改变颗粒表面结构、与弹性体接枝等方法提高膨胀材料吸水后的强度。自然界蕴含丰富的粘土矿物(膨润土、高岭土、坡缕石、海泡石、伊利石、硅藻土、蛭石、滑石等)是一种很好的添加剂,因为在其表面有大量活性基团-OH存在,片层之间有大量阳离子可供交换,能够改善吸水材料的网络结构、提高综合性能。通过在高聚物中添加粘土矿物既可提高膨胀材料吸水后的强度;也可降低生产成本,有利于膨胀材料的推广应用,其中使用最多的是膨润土和高岭土。

膨润土中主要成分是蒙脱石,它具有较好的物理、化学稳定性,作为多官能团的无机材料其性能主

要受蒙脱石品质的影响,能与有机物单体(丙烯酸、丙烯酰胺、丙烯腈、顺丁烯二酸酐等)或多元共聚物进行接枝聚合,在一定程度上也起到了交联剂的作用,能够和聚合反应中的交联剂一起对膨胀材料的交联密度产生影响,增大空间阻碍性从而提高合成材料吸水膨胀后的强度,但过多膨润土会使膨胀材料的吸水性能显著下降,加入膨润土的质量份数一般控制在10%~30%。探矿工艺所严君凤早在1997年就开展膨胀堵漏材料研究,通过添加非金属材料膨润土提高膨胀堵漏材料的强度,小型化生产了膨胀堵漏材料用于贵州地质勘探孔堵漏。余丽秀等^[10]研究了适于工业化应用的高吸水量膨润土/聚合物多元复合高吸水材料制备技术优化,生产工艺选用以尽量简化反应条件为原则,主要特征为免通氮气、普通搅拌方式分散、常温快速聚合,使制备条件更便于工业化推广。

高岭土主要由层状硅酸盐矿物高岭石组成,高岭石是1:1层型硅铝结构,既为硅氧四面体和铝氧八面体之间层层交替排列而成,层与层之间用氢键连接,晶层之间连接紧密、粘附能较大,水分不易进入晶层中间,但其表面存在羟基,亲水性较强^[11];具有良好的可塑性、烧结性、绝缘性、较高的耐火度、化学稳定性等特性,高岭土经深加工处理后的粉体具有较大的表面积,可以更好地与有机单体复合共聚。沈上越等^[12]采用煅烧高岭土与聚丙烯酸-聚丙烯酰胺复合共聚,复合材料最佳合成条件为:丙烯酰胺用量为15%,引发剂用量为0.25%,交联剂用量为0.08%,中和度为80%,煅烧高岭土添加量为60%时,复合材料吸蒸馏水倍率达646 g/g,常温放置15 d和50℃放置6 h后的保水率分别为61.5%和87.1%。

两种矿物原料复合同时加入到高聚合物中形成共聚,可以发挥两者间的协同作用。梁瑞婷等^[13]采用凹凸棒石与膨润土组成复合粘土,与聚丙烯酸钠进行聚合,研究表明:聚合反应速率和粘土的种类有关,膨润土对聚丙烯酸钠活性自由基链的链转移或链终止速率常数比凹凸棒更大;在相同膨润土和凹凸棒用量下,添加凹凸棒的吸水树脂其平衡吸水倍率更高,但吸水速率更慢。将膨润土和凹凸棒复合,可发挥两者间的协同作用,在保持较高的平衡吸水倍率的同时,提高吸水速率。

1.1.3 耐盐性改进方法

吸水膨胀材料受盐的影响吸水能力会下降,一价盐和多价盐对吸水膨胀材料的吸水能力影响是不同的。一价盐如钾盐、钠盐、铵盐,该类盐的存在,使聚合物链同性斥力减弱,也使离子浓度梯度减少,线型聚合物粘度降低,而交联聚合物膨胀倍率降低,造成吸水倍率显著下降。多价盐的影响比较复杂,当多价金属盐存在时不仅产生上述一价盐同样的影响外,而且形成新的交联体,甚至线型聚合物变成非线型、多价交联聚合物,造成该类材料膨胀率降低,吸水能力显著下降^[14-15]。

为了吸水膨胀材料更好地适应钻井液环境,需要提高该类材料的耐盐性,通过采取在聚合时引入非离子型亲水单体改善其耐盐性。胡鹏等^[16]采用玉米芯/膨润土复合丙烯酸(AA)-丙烯酰胺(AM)高吸水树脂,利用玉米芯纤维作为树脂网络的基本骨架,在AA与AM最佳质量比为0.3时,吸收0.9%盐水的的能力达152.5 g/g,该聚合物是环境友好材料,60 d即可降解52%。Doo-Won Lim等用丙烯酸与聚乙烯醇硫酸钠(SPS)乳液聚合,研制了互穿网络结构的高吸水性树脂,发现其吸收生理盐水的能力最高达211.4 g/g;崔英德等^[17]采用引入聚乙烯醇硫酸钠(SPS),与聚丙烯酸钠通过静态溶液聚合法合成了互穿网络共聚物,该聚合物吸收0.9%氯化钠盐水的的能力达97.7 g/g;吸收0.1%氯化钙盐水的的能力提高1倍。SPS可以提高聚丙烯酸钠高吸水性树脂的离子化程度和网络结构的离子电荷浓度,增大离子间的静电斥力和聚合物链的扩张能力,因而可以提高其耐盐性。

1.2 吸油膨胀材料

吸油膨胀材料主要是利用亲油性的单体作为聚合物的基本单元,经过适度交联后,得到具有三维网络交联结构或者微孔结构的低交联度聚合物。由于聚合物的单体具有很强的亲油性,使得聚合物分子中存在着大量的亲油基团,这些基团与油品分子之间的相互作用力推动了聚合物对油品的吸收作用。王建华等^[18]以对苯乙烯磺酸钠、丙烯酰胺、丙烯酸丁酯、丙烯酸十八酯、二甲基二烯丙基氯化铵为反应单体,制备了吸油膨胀堵漏剂,实验证明:该堵漏剂热稳定好,在120℃下吸油后体积膨胀3~4倍。张凡等^[19]利用疏水单体苯乙烯、聚乙烯醇、吸油单体合成了吸油膨胀堵漏材料,在1 h左右的吸油率达到

200%。

油基钻井液由于成本和环境保护的问题,在实际应用较为有限,但随着高温深井、海上钻井、页岩气水平井段、大斜度定向井等各种复杂、高难度钻探任务的出现,近年油基钻井液不断受到关注。油基钻井液几乎不与水敏性地层矿物发生反应,具有非常强的页岩抑制性、润滑性好、热稳定性好等优点,有利于保持井壁稳定,对于高温深井和水敏性地层具有明显的优势,然而油基钻井液成本很高,一旦出现漏失对施工费用造成的损失难以估量,但油基钻井液条件下堵漏材料研究甚少。页岩地层裂隙较多,遇水易膨胀,在钻井施工中容易发生裂缝型井漏,且大多采用昂贵的油基钻井液,针对该类地层刘政^[20]等利用吸油膨胀材料与刚性颗粒、纤维复配研发出1~5号WNPD L系列堵漏材料,该材料对三类基础油均具有较好的吸油膨胀能力,与油基钻井液也具有很好的配伍性,在室温下吸油膨胀率较低、随着井内温度的升高吸油膨胀率不断提高,有利在施工现场调配堵漏浆液,在自201H2-5井应用效果良好。李红梅^[21]等研发了具有可膨胀性和较好韧性的YDLJ-1吸油膨胀堵漏剂,正向封堵突破压力大于15 MPa,该材料能够在150℃老化30 d仍然具有变形特性和较高的抗压强度,5 h最大吸油量可达其干重的5倍,在延长油田云页平1-1井得到应用并获得良好的堵漏效果。

1.3 形状记忆聚合物

形状记忆聚合物是由固定相和高分子链段组成的弹性聚合物网络,聚合物网络的永久形状由固定相决定,高分子链段是形状记忆聚合物的控制开关,属于可逆相^[22]。在环境温度低于转变温度时,聚合物分子链段处于冻结状态,材料形状固定不变(形状A);在环境温度高于转变温度时,聚合物分子链段处于高弹状态,通过外力的作用使材料发生宏观形变(形状B),在此过程中分子内能不发生变化,仅仅是聚合物高分子链段特征结构属性及熵弹性行为。王照辉等^[23]研发的SMP-LCM堵漏剂,属于形状记忆新型膨胀型堵漏材料,其特性触发方式为热刺激,通过控制高聚物内部交联链段的比例来调节堵漏材料颗粒的响应温度,可以通过控制内部孔隙含量来调节膨胀倍率,不需要吸收水分即可实现体积膨胀,不会对钻井液的性能产生恶劣影响。在未进入漏层之前可以保持原粒径,进入漏失通道后会在地层温

度作用下实现快速体积膨胀。暴丹等^[24]合成了热致形状记忆智能堵漏剂SD-SLCM,可以根据交联度调控堵漏剂的玻璃化转变温度(在72.86~102.35℃)来适应漏层温度的需求,该材料的形状固定率及回复率>99%。该材料在激活前为片状,容易进入裂缝,通过钻孔漏层温度激活后发生热致膨胀形状恢复为立方体块状,能够自适应匹配各种宽度的裂缝,在钻孔底部高温高压环境下架桥封堵裂缝。杨倩云等^[25]研制了温度触变模式的抗温、承压形变聚合物膨胀堵漏剂SDP系列,SDP105在常温下抗压强度高达71.62 MPa,即使在玻璃化转变温度以上10℃,抗压强度仍可达17.21 MPa。将该温控膨胀堵漏剂与刚性颗粒、弹性颗粒、柔性纤维等复配材料,在宁夏兴1井进行了堵漏现场应用,一次堵漏成功率100%,解决了延安组煤层裂缝性反复漏失问题。

2 控制膨胀技术

由于常见类吸水膨胀材料吸水速度太快,导致堵漏材料还未进入漏失通道前就发生膨胀,在漏层表面形成堆积,不能在漏失通道中形成致密承压封堵层。通过对膨胀材料表面进行包覆处理;大分子改性设计、物理掺杂、引入温度敏感官能团、控制交联密度等方法,可赋予膨胀堵漏材料新的特性来满足钻探堵漏施工现场的需求。

2.1 表面包覆技术

利用疏水聚合物材料,通过喷涂、凝封或包衣等方式对高吸水树脂进行处理,可以制备一种可控膨胀堵漏材料。在泵送至漏层前几乎不膨胀,当其到达漏层时在温度作用下包衣膜融化,膨胀材料被释放、迅速膨胀,达到定位堵漏的目的,可以有效地封堵漏失地层,提高漏失地层的承压能力。薛玉志等^[26]为了满足环境保护的要求,摒弃有毒溶剂溶解石蜡的方法,对普通包衣机进行改进,增加了加热熔融装置,将融化的石蜡对吸水树脂进行包覆。在最优的包覆工艺参数:喷枪高度10 cm、转速45 r/min、空气流量60 L/min,研制的可控膨胀堵漏剂对钻井液性能影响不大,试验证明在室温下吸水率仅为5%,当温度升至64℃时吸水率可达92.5倍。张歧安等^[27]借助化学键和分子间力的作用,选用合适的疏水物质,对聚合物颗粒表面进行化学改性,依靠疏水分子或分子膜的作用,阻止水分子快速进入聚合

物中,延缓聚合物与水分子的作用。

2.2 接枝疏水高分子

通过在聚合反应中控制交联密度及引入填充材料,使其在常温下具有较低的膨胀速度,更易进入漏失通道;在井底高温下或特定条件下(碱性)可加快膨胀速度,有利于快速形成封堵层,降低钻井液漏失量。臧晓宇等^[28]采用酰胺类单体、二甲基二烯丙基氯化铵研制了新型延迟膨胀堵漏剂SDSAP,通过加入改性纤维及钠膨润土,使其复合在凝胶网络内,从而改变堵漏材料的结构,并进一步支撑定形作用改善产品力学性能,获得良好的吸水膨胀性能、抗盐性能,以及吸水膨胀后良好的抗压性能。史野等^[29]采用丙烯酸、丙烯酸甲酯、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸衍生物、N,N-亚甲基双丙烯酰胺为原料,合成了可延迟膨胀堵漏剂BZYD-1。该膨胀堵漏剂热稳定性好,抗温达150℃;由于BZYD-1中的亲水基团磺酸基、羧基都被疏水化,因此在常温下不发生吸水膨胀。在室温时,清水浸泡几乎不发生吸水膨胀,碱性条件下浸泡4h的膨胀率 $\geq 50\%$;当温度升至80℃时,碱性条件下吸水膨胀率达到1780%,具有显著的延迟膨胀效果,承压能力可达4 MPa。

3 膨胀材料膨胀堵漏机理

3.1 膨胀材料吸液膨胀机理

膨胀材料在结构上是含有大量亲水性基团、具有一定交联度的空间网络结构,它是由化学交联与树脂分子链间的相互缠绕物理交联构成的,依靠树脂内部的三维网络空间的作用,吸收大量的自由水贮存于聚合物内实现体积膨胀。膨胀材料吸水过程是非常复杂的,未吸水时,高分子长链相互靠拢、缠绕在一起形成网状结构,从而达到整体上的紧固程度;当膨胀材料与水相遇时,存在亲水基与水分子的水合作用、高分子电负性强的氧原子形成氢键作用、疏水基团与水的相互作用^[30],使高分子网束张开,在网内外形成离子浓度差,从而造成网结构内外产生渗透压,水分子在渗透压作用下向高分子网结构内渗透直到达到平衡,所吸收的水在加压、加热下也不易脱水,具有较强的保水能力。

3.2 膨胀材料堵漏机理

膨胀材料产品大多为颗粒型,对于裂缝型、缝洞型漏失较为适合。堵漏施工时,膨胀堵漏材料在漏失压差作用下不断进入漏失通道,在水基钻井液或

油基钻井液中浸泡后吸液发生体积膨胀,在孔隙喉道处、裂缝变小或弯曲处通过架桥、捕集、沉积作用等产生封堵。由于产生漏失的裂缝的开度、深度具有不确定性,膨胀堵漏颗粒进入钻孔的漏层后,由于自身具有较强的变形性,使其能够自适应不同形状的裂缝或孔洞,可以满足不同裂缝尺寸的需求,解决了裂缝或孔洞对堵漏材料的选择效应,弥补了传统堵漏材料级配很难合理的缺陷;由于膨胀颗粒本身吸液(水或油)使得体积不断膨胀,在漏层内具有一定的扩张填充和内部挤紧、压实作用,且封堵强度随着时间增加而逐渐增大,膨胀堵漏材料颗粒发生弹性变形使封堵层的渗透性进一步降低,从而达到封堵漏失的目的,如果匹配刚性材料、纤维材料将会形成坚实的封堵层。

4 膨胀材料堵漏工艺

钻孔大部分漏失通常是由裂缝引起的,自然裂缝和孔洞漏失约占70%,诱导裂缝漏失约占20%,其他漏失约占10%,裂缝性地层漏失造成的损失占漏失花费的90%^[31],膨胀堵漏材料较适合裂缝引起的漏失。堵漏成功与否的关键是对井漏层位的准确判定,尤其是能否在较短时间内实时判断出漏点位置,更是保证堵漏的针对性和堵漏成功率的关键。为了提高堵漏成功率,必须全面了解钻孔的岩性、地层孔隙压力系数,正在使用的冲洗液性能等,根据对岩心观察,分析、判断漏失情况并匹配相应的膨胀堵漏材料,采取合适的方法把膨胀堵漏材料送到漏失位置,泵送灌注和专用工具投送是经常采用的技术手段。

4.1 泵送灌注

长庆西峰油田侏罗系洛河组下部地层埋深在700~1100 m,垂直和水平裂缝发育。钻孔存在垂直长裂缝,由裂缝型地层造成的严重漏失引起井漏,并且漏速大,钻井液有进无出。采用水泥堵漏效果不理想,有些井用水泥堵漏10多次均失败。左凤江等^[32]针对该地区漏失特点,引入遇水延迟膨胀新型堵剂,增加长纤维堵漏材料加大在长裂缝中的缠绕程度,采取两步法泵送堵漏浆,首先配制封堵小尺寸缝隙(≥ 4 mm的裂缝),然后再配制封堵更大裂缝尺寸系列水化膨胀复合堵漏剂,在长庆油田白马北区水源BMBS3井一次堵漏成功。

伊拉克 Halfaya 油田区块地质结构复杂,多个层

位裂缝发育,地层承压能力差,钻进过程中极易发生间断性、持续性漏失。由于孔隙尺寸、裂缝宽度分布广,在同一段漏失地层中各种尺寸的孔隙、裂缝同时存在。以前在Halfaya油田使用的桥接堵漏材料(果壳、云母、单封、碳酸钙颗粒等)只能封堵某些特定宽度范围的裂缝或孔隙,对其它尺寸的孔隙、裂缝难以形成有效的封堵层。黄峥等^[33]利用水化膨胀堵漏材料吸水后自身具有较大的弹性变形能力,呈不规则多面体,易与裂缝产生较大的摩擦力,在外力作用下产生形变,面对不同宽度的裂缝、孔隙,在压差的作用下水化膨胀堵漏材料就会变形被“挤”入裂缝、孔隙中,随着体积不断膨胀进一步阻止颗粒移动,形成致密的封堵层。在伊拉克Halfaya油田HF076、M266井采取静止堵漏方法,对于漏速5~10 m/h采用水化膨胀复合堵漏剂(Bz-SealSTA)进行堵漏;对于漏速在10~20 m/h时,采用水化膨胀复合堵漏剂-I型(BZ-SealSTAI);对于漏速在20~30m/h时,采用水化膨胀复合堵漏剂-II型(BZ-SealSTA II)进行封堵,取得了良好的堵漏效果。

4.2 专用工具定点投送

为了防止膨胀材料堵漏未进入漏失地层前就发生膨胀,关键是如何控制好膨胀时间,采用专用投送工具把膨胀堵漏材料输送到确定的漏失地层是一种较好的方法。探矿工艺所宋军等^[34]针对矿产勘探小口径钻孔,设计了专用投送工具将膨胀堵漏材料准确送到漏失位置,该方法堵漏无需使用携带液。当高膨胀材料用专用工具送入孔内漏失层时,然后通过水力作用将堵漏材料排出投送工具进入裂隙,达到封堵漏失的目的。当孔内出现漏失时,强行钻穿漏失层0.5 m左右,将堵漏工具置于孔口,装入高膨胀堵漏材料,然后接上钻杆慢速将其送入孔底;开泵送水,同时慢转钻杆,待导管下行约1 m时,将钻杆上下提动几次,再继续慢转下入导管到底,待钻杆接手与紧面接手对接上后,提上堵漏工具等待一段时间后开泵试钻。李志宏等^[35]设计了一种定点投送工具,组件包括:盲板浮鞋、循环短节、胶塞座、安全接头以及与之配套使用的专用胶塞等。由于HSW-1遇水膨胀具有固化时间短的特征,采用专用工具投送膨胀堵漏材料形成了该堵漏工艺,将膨胀堵漏材料装填于特殊管管串之中,特殊管管串的上下分别连接有胶塞座和盲板浮鞋,用以将怕潮禁水的膨胀堵漏材料与钻杆、井筒内的钻井液相互分隔,

该工艺主要针对漏失速率为20~100 m³/h的恶性漏失井,在鄂尔多斯盆地天环陷西翼一口定向采油井彭291-77井成功堵漏。

王海涛等^[36]在唐山丰南地区煤田钻探施工时钻遇大裂隙,将干燥的高岭土和吸水膨胀树脂混合后装入6 m长的 $\varnothing 73$ mm岩心管中,用粘土搓成泥球把岩心管底部封住,为了阻止吸水膨胀树脂在中途遇水发生膨胀,起不到堵漏的效果,用锤子夯实,使堵漏材料与孔内泥浆隔离。做好准备工作后,将岩心管下入到预判的漏失层位以上1 m处,开泵将堵漏材料顶入到钻孔内,通过液柱压力的作用,吸水膨胀树脂又被压入裂隙中。20 min后,开泥浆泵试循环,这时孔内开始返水,说明堵漏取得成效。为了保证堵漏的效果,继续等待了8 h的膨胀时间,下钻扫孔,泵压和孔内返水情况均正常,说明成功封堵住漏失。该工艺具有膨胀堵漏材料用量少、效果显著、操作简单、易于掌握、有利于应用推广。

5 结论及建议

(1)本文对吸水、吸油膨胀堵漏材料近年的研究和堵漏应用情况进行了总结,通过广大科技人员大量的不断研究,提高了高吸水树脂吸水后强度和改进了材料的耐盐性,使得该类堵漏材料在钻探堵漏方面得到了较好的应用,但很多研究工作停留在实验室阶段,仍需加强钻探现场应用研究。

(2)在生产方面工业化速度进展极其缓慢,需要继续加强这方面的研究工作;包覆法用于堵漏材料延迟膨胀还存在包衣材料选择范围小、包覆不均匀、包覆工序复杂等缺陷需要进一步改进才能得到更好的推广应用。

(3)在堵漏工艺方面,钻探施工时难以准确获取漏失通道开口尺寸,为了提高堵漏成功率,如何保障膨胀堵漏材料在进入裂隙前不膨胀,使其进入裂隙后更好地发挥膨胀堵漏功能,仍需加强这方面的研究工作。

(4)由于油基钻井液成本太高,吸油膨胀材料研究较少,近年由于页岩气水平孔钻进的需求,需要加大这方面的研究工作,才能更好地促进页岩气的开发利用和满足一些特殊钻孔的需求。

(5)复杂地层井漏对堵漏材料的综合性能提出了更高的要求,形状记忆材料展现出良好的膨胀行为可控性,能够感知并响应外界环境变化进行形状

恢复,可以弥补传统惰性材料和吸水树脂颗粒膨胀材料的不足,应该加强该类材料的研究,根据钻孔漏失层的情况,准确制备形状记忆材料以满足钻探堵漏的需求,实现智能化堵漏是广大钻探科技人员不断努力的方向。

参考文献:

- [1] 马妍春,李辉云,张伟娜,等.高吸水树脂制备方法的研究进展[J].吉林省教育学院学报,2014,30(6):146-148.
- [2] 孙宾宾,杨博.高吸水性树脂超声波法制备研究进展及趋势[J].化学工程师,2014,223(4):30-32.
- [3] 严君凤.新型堵漏材料的合成[J].钻井液与完井液,1998,15(1):42-44.
- [4] 赖小林,王中华,郭建华,等.吸水材料在石油钻井堵漏中的应用[J].精细石油化工进展,2010,11(2):17-21.
- [5] 翟科军,范胜,方俊伟,等.吸水膨胀树脂复合堵漏剂的研发与性能评价[J].油田化学,2021,38(2):196-203.
- [6] 欧阳传湘,刘鹭炬.钻井液用耐温微球堵漏剂的研制及性能评价[J].科学技术与工程,2014,14(32):201-205.
- [7] 葛华才,黄国荣,文庆柄.无引发剂下微波辐射法制备壳聚糖-丙烯酸高吸水材料[J].材料导报,2007,21(11A):85-87.
- [8] 王艳丽,谭德新,魏广超.AM/AMPS高吸水性树脂的超声制备与性能研究[J].化工新型材料,2008,36(6):61-63.
- [9] 程艳玲,徐祖顺,易昌凤.超声引发聚合反应的研究[J].胶体与聚合物,2008,26(1):37-39.
- [10] 余丽秀,张然,孙亚光,等.丙烯酸盐/膨润土/淀粉共聚复合高吸水材料制备研究[J].非金属矿,2005,28(6):18-20.
- [11] 吴哲超,祝宝东,王莹,等.粘土矿物/聚合物复合高吸水材料研究进展[J].硅酸盐通报,2015,34(9):2557-2561.
- [12] 沈上越,夏开胜,范力仁,等.煅烧高岭土/PAA-AM高吸水保水复合材料的合成与性能研究[J].功能材料,2007,(1):154-156.
- [13] 梁瑞婷,李锦凤,周新华,等.凹凸棒/膨润土聚丙烯酸钠复合吸水树脂的合成及其吸水速率[J].化工新型材料,2008,36(3):36-38.
- [14] Hutadilok N, Mochimasu T, Hisamori H, et al. Carbohydr Res, 1995,268:143-149.
- [15] 李云开,许廷武,周春发等.金属离子对聚丙烯酸钾-丙烯酰胺共聚型SAP交替吸水吸盐特征的影响[J].高分子材料科学与工程,2010,26(3):39-42.
- [16] 胡鹏,范莹,贺龙强.玉米芯/膨润土复合高吸水性树脂的制备及降解研究[J].焦作大学学报,2022,(3):78-82.
- [17] 崔英德,郭建维,刘卅,等.静态溶液聚合法合成SA-IP-SPS型高吸水树脂[J].化工学报,2003,54(5):665-669.
- [18] 王建华,王玺,柳丙善,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,(3):150-152.
- [19] 张凡,许明标,刘卫红,等.一种油基膨胀堵漏剂的合成及其性能评价[J].长江大学学报(自然科学版),2010,7(3):507-509.
- [20] 刘政,李茂森,蒋学光.川渝页岩气井油膨胀随钻防漏堵漏技术及应用[J].天然气勘探与开发,2021,44(1):118-124.
- [21] 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.
- [22] 王敏生,光新军,孔令军.形状记忆聚合物在石油工程中的应用前景[J].石油钻探技术,2018,46(5):14-20.
- [23] 王照辉,崔凯潇,蒋官澄,等.基于形状记忆环氧树脂聚合物的温敏可膨胀型堵漏剂研制及性能评价[J].钻井液与完井液,2020,37(4):412-420.
- [24] 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.
- [25] 杨倩云,王宝田,杨华,等.形状记忆聚合物型温控膨胀堵漏剂的制备及应用[J].钻井液与完井液,2021,38(2):189-195.
- [26] 薛玉志,唐代绪,刘振东,等.可控膨胀堵漏剂包覆工艺技术研究[J].钻井液与完井液,2008,25(5):23-25.
- [27] 张歧安,徐先国,董维,等.延迟膨胀颗粒堵漏剂的研究与应用[J].钻井液与完井液,2006,23(2):21-24.
- [28] 臧晓宇,邱正松,暴丹,等.新型延迟膨胀堵漏剂特性实验研究[J].钻井液与完井液,2020,37(5):602-607.
- [29] 史野,左洪国,夏景刚,等.新型可延迟膨胀类堵漏剂的合成与性能评价[J].钻井液与完井液,2018,35(4):62-65.
- [30] 刘廷栋,刘京.高吸水性树脂的吸水机理[J].高分子通报,1994,(3):181-185.
- [31] 徐同台,刘玉杰,申威,等.钻井工程防漏堵漏技术[M].北京:石油工业出版社,1997.
- [32] 左凤江,丁玉兴,虞海法,等.水化膨胀复合堵漏工艺技术[J].钻井液与完井液,2006,23(5):56-58.
- [33] 黄峥,董殿彬,宁军明,等.水化膨胀型凝胶堵漏技术在伊拉克油田的应用[J].钻采工艺,2014,37(3):95-97.
- [34] 宋军,严君凤.高膨胀材料堵漏技术及工艺[J].西部探矿工程,2000,(1):89-90.
- [35] 李志宏,陈鹏伟,高果成.适用于鄂尔多斯盆地天环塌陷西翼的体膨胀堵漏工艺[J].钻井液与完井液,2018,35(1):61-65.
- [36] 王海涛,张远丰,李魁广,等.吸水膨胀树脂的堵漏应用效果[J].中国煤炭地质,2012,24(8):95-97.

(编辑 王文)