

文章编号:1000-4092(2023)04-736-07

油井水泥悬浮剂的研究进展*

武磊^{1,2,3}, 赵宝辉^{1,2,3}, 侯薇^{1,2,3}, 石凌龙^{1,2,3}, 董子越^{1,2,3}, 邹双^{1,2,3}

(1. 天津中油渤星工程科技有限公司, 天津 300451; 2. 中国石油天然气集团公司钻井工程重点实验室, 天津 300451; 3. 油气钻完井技术国家工程研究中心, 天津 300451)

摘要:油井水泥浆沉降稳定性是水泥浆施工性能的重要指标之一。随着勘探开发逐步朝着深井、超深井方向发展,特别是近年来井深接近万米,井底的温度将达到240℃以上,对油井水泥浆的稳定性提出了更高的要求。传统悬浮剂往往在提高悬浮稳定性的基础上,对水泥浆流变性造成不利影响,不利于复杂井况固井施工。针对油井水泥悬浮剂的国内外研究现状进行调研,系统阐述了悬浮剂主要种类及其作用机理,重点对当前悬浮剂研究的优化情况进行分析,包括无机和有机高分子材料优选复配和共聚单体优选或接枝共聚等技术,为今后油井水泥悬浮剂研发提供借鉴。

关键词:油井水泥;悬浮剂;耐高温及超高温;研究现状;综述

文献标识码:A **DOI:**10.19346/j.cnki.1000-4092.2023.04.026

中图分类号:TE256+.6

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 前言

随着石油和天然气勘探开发的深入推进,勘探开发对象日益复杂,剩余油气资源40%以上分布在5000 m以下的深部地层中,深井、超深井成为了油田未来增储上产的主要来源^[1]。固井是石油钻井的一个重要环节,在复杂地质和复杂工况条件下,保证固井质量和固井安全是油气井固井技术面临的严峻挑战和关键技术难题^[2]。为保证固井质量,需要在水泥浆中加入降失水剂、缓凝剂、减阻剂、悬浮剂等外加剂,以调整水泥浆的性能,满足固井施工要求。其中,悬浮剂是一类阻止水泥浆中颗粒沉降,维持水泥浆体系稳定的油井水泥外加剂^[3]。水泥浆的稳定性差会引发水泥浆固相颗粒沉降、水泥环分布不均匀及顶部形成游离液等问题。随着深井、超深井等井况变得越发复杂,安全密度窗口变

窄,即使在中低温条件下依然存在水泥浆沉降稳定性问题,高密度水泥浆在高温条件下问题更加突出^[4]。

悬浮剂是解决水泥浆稳定性的关键外加剂。悬浮剂主要用于调节水泥浆的沉降稳定性,其作用机理主要有:(1)悬浮剂通过提高水泥浆体系的黏滞阻力,增加固相颗粒的下沉摩擦力,降低下沉运动,达到悬浮稳定效果^[5];(2)悬浮剂通过范德华力、氢键等作用力的相互作用,在水泥浆中形成网状结构,对水泥固相颗粒形成有效承托,阻止颗粒的沉降,维持水泥浆的沉降稳定性^[5-7];(3)悬浮剂可以提高水泥浆的静切力,在静切力作用下,水泥颗粒被束缚在浆体的网状结构中,维持水泥浆体系的稳定性,阻止颗粒沉降^[4,6]。

本文综述了国内外近年来油井水泥悬浮剂的研究进展,并在此基础上分析了油井水泥悬浮剂的未来发展趋势,以期促进高性能油井水泥悬浮剂更

* 收稿日期:2023-04-23;修回日期:2023-06-30。

基金项目:中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目“深井超深井优快钻井技术研究”课题“复杂超深井固井密封完整性技术研究”(项目编号 2021DJ4105)。

作者简介:武磊(1994—),男,工程师,南开大学农药学博士(2022),天津中油渤星工程科技有限公司(工作站)和南开大学(流动站)联合培养在读博士后(2022—),从事油井水泥外加剂及水泥浆体系方面的研究,E-mail:wul.cpoe@cnpc.com.cn。

好更快发展。

1 油井水泥悬浮剂的研究现状

目前国内外主要的油井水泥悬浮剂材料包括无机材料和有机高分子材料两大类。

1.1 无机材料悬浮剂

无机材料主要包括超细材料和黏土类物质。

1.1.1 超细材料悬浮剂

超细材料因粒径小、比表面积大等特点,具有较高的表面活性,可减小水泥浆中固相颗粒间的间距,提高范德华力,因此加入水泥浆后会起到增稠作用^[8]。常用的水泥浆超细材料包括微硅、纳米材料、超细粉煤灰等。

微硅的主要成分为二氧化硅,能填充水泥颗粒间的孔隙,具有较好的增稠作用,可提高水泥浆浆体的稳定性,具有一定的耐高温防沉降作用。然而随着微硅掺量的逐渐加大,浆体稠度会显著提升,不利于配浆下灰。

纳米材料的颗粒粒径小,具有较高的比表面积、表面能以及表面活性。在水泥浆中注入合适的纳米材料可显著改善其综合性能^[9]。Kodippili等^[10]发现,在水泥浆中添加纳米二氧化硅(NS)可显著加快水泥水化速度,同时对水泥浆起到有效增稠作用,达到维持水泥浆悬浮稳定的效果。李波等^[11]测试了不同NS掺量的水泥浆性能,研究表明,随着NS掺量(0.5%~2%)的增大,水泥浆体系的黏度增大,游离液量和密度差均逐渐减至0,可显著提高水泥浆体系的稳定性。杨洪雨等^[12]发现,在水泥浆中掺入液体NS,NS在水泥浆中通过范德华力、氢键作用形成聚集体,提高水泥浆的触变性,可显著改善水泥浆的稳定性。相关机理如图1所示。

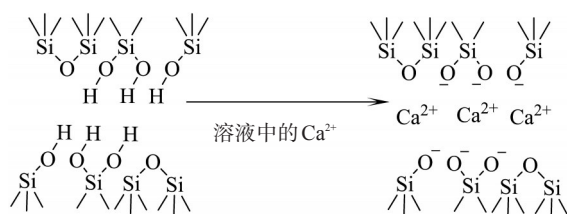


图1 纳米二氧化硅悬浮剂的悬浮作用机理^[12]

综合来看,单独使用纳米材料时,随着掺量的增加,纳米材料易发生团聚,对水泥浆的流变性能的不利影响也逐渐凸显^[13]。

粉煤灰的化学成分以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主,可作为一种注浆材料。Burgos等^[14]研究发现,在水泥浆中添加超细粉煤灰,粉煤灰在水泥浆中释放大量的 SiO_2 和 Al_2O_3 ,与水泥浆体系中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成C凝胶,可显著降低水泥浆的需水量,并保持水泥浆较好的稳定性(图2)。然而,随着超细粉煤灰掺量的增加,水泥浆流动度出现明显下滑^[15]。

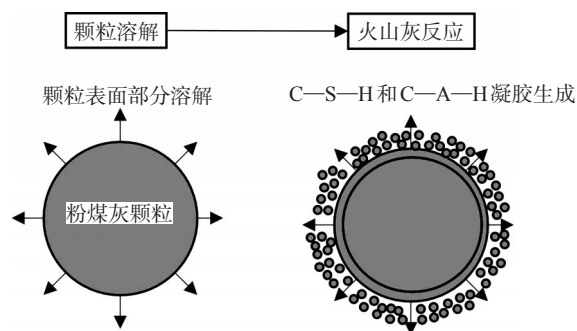


图2 粉煤灰悬浮剂的反应机理

1.1.2 黏土类物质悬浮剂

黏土类物质多具有较好的热稳定性,在高温下水化程度高,能通过形成网状结构,实现有效增黏,提高水泥浆的悬浮能力^[16]。膨润土、蛭石、海泡石等是水泥浆中常用的黏土类物质。

膨润土的主要含量是蒙脱石,蒙脱石的层间结合力弱,在水介质中会充分分散,呈现不同的颗粒缔合模式(图3)。在水泥浆中,蒙脱石颗粒表面均携带同种电荷,颗粒间相互排斥,具有较好的悬浮性能^[17-22]。

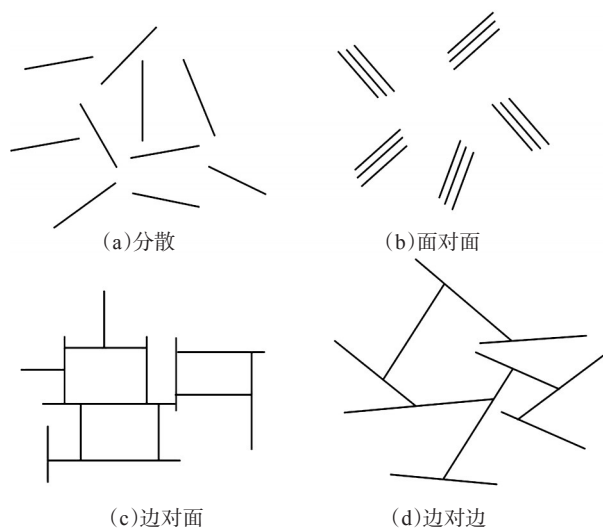


图3 蒙脱石在水介质中的悬浮模式

Noureddine等^[20]研究发现,随着水泥浆中膨润土含量(8%~18%)的增加,水泥浆的稳定性得到了明显的改善。梅娟^[21]采用先低温煅烧再挤压钠化的新工艺大幅增强了高层电荷蒙脱石的分散悬浮性,随后通过酸和铵盐预处理再水洗后钠化的方式制备了悬浮稳定性和增稠性更好的类天然钠基蒙脱石。通过改变蒙脱石层间离子的种类和数目,降低层间水分子的空间位阻,进一步提升了蒙脱石的悬浮性能。张超凡等^[22]以焦磷酸钠为改性剂,使用球磨机通过机械力化学作用对钙基膨润土进行改性,改性后钠离子置换膨润土层间的钙离子,改性膨润土在水泥浆中的悬浮性能显著提高,有利于增强水泥浆体系的悬浮性。

海泡石是一种具有极强吸附能力的黏土矿物,其块体交错形成了贯穿整个结构的通道和孔道,同时拥有巨大的比表面积,表现出超强的吸附能力,在水中分散而形成网架结构,可以有效承托水泥浆中的固相颗粒(图4)。在添加海泡石后,水泥浆的滤失量减小,流动性增强,悬浮稳定性得到明显改善^[23]。

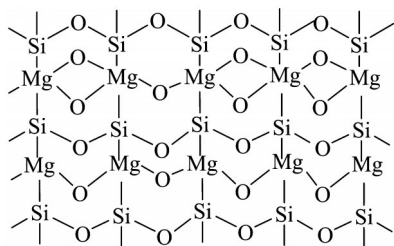


图4 海泡石悬浮剂的网架结构

Gonzalo等^[24]研究发现,将海泡石加入MgO-SiO₂体系的纤维水泥中,可促进水泥浆体的水化,改善纤维水泥的稳定性。郑锟等^[25]研究发现,在油井水泥体系中添加海泡石可明显改善水泥浆的沉降稳定性。性能测试结果表明,在密度为1.85 g/cm³的常规密度水泥浆中加入2%的海泡石,并在60℃下循环养护16 h后,水泥石上下密度差小于0.005 g/cm³。

黏土类物质一般具有较高的耐热性能,对温度的依赖性较小,主要通过增稠的方式提升水泥浆的稳定性。然而,当掺量增加到一定程度后,黏土类物质会明显增加水泥浆的初始稠度,严重影响现场混灰和泵送,因而限制了其在水泥浆体系中的应用。

1.2 有机高分子材料悬浮剂

有机高分子类材料悬浮剂主要包括天然高分子及其改性材料与合成高分子材料。

1.2.1 天然高分子材料悬浮剂

天然高分子及其改性材料悬浮剂主要包括瓜尔胶、威兰胶等天然胶类以及纤维素类等。

瓜尔胶作为一种大分子天然亲水胶体,在水中不会产生结团现象,即使在盐分含量很高的体系中仍能保持稳定^[26]。张俊然等^[27]测试了几种不同天然高分子材料对水泥粉土的持水特性,研究表明,瓜尔胶等天然高分子材料在水合作用下容易形成水凝胶,填充水泥颗粒间的孔隙,提高水泥浆的黏度和稠度,从而保持水泥浆的沉降稳定性。

威兰胶是一种天然发酵而成的生物胶,具有较好的耐温性能^[28]。威兰胶本身具有假塑性流体特征(搅稀作用),在静止状态下展现出较好的悬浮性能^[29]。孙洪波等^[30]研究发现,随着威兰胶掺量(0.05%~0.20%)的增加,水泥浆中的游离液逐渐减少,水泥浆的上下密度差小于0.05 g/cm³。威兰胶通过在水泥浆中形成网状结构,有效束缚自由水,抑制了水泥浆的沉降。

黄原胶是一种天然的生物高聚物,其具有高黏度、悬浮性和触变性等特点,常被作为悬浮剂添入水泥浆中^[31]。针对黄原胶在高温下出现黏度下降的问题,聂军芳等^[32]以黄原胶为基础,将2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)、二甲基二烯丙基氯化铵(DMDAAC)与N-乙烯基吡咯烷酮(NVP)等共聚单体接枝到黄原胶上得到了耐温性能好的改性黄原胶。性能测试结果表明,在130℃下,未添加改性黄原胶的常规密度水泥浆体系的上下密度差接近0.1 g/cm³;而改性黄原胶掺量为1%时,水泥浆的上下密度差小于0.011 g/cm³。改性黄原胶通过增加水泥浆体系的稠度,保持常规水泥浆的沉降稳定性。然而,黄原胶在高温下具有较强的缓凝作用,会影响水泥稠化时间^[33],因此,采用黄原胶作为水泥浆悬浮剂还需进一步提高其耐温性能,同时降低其副作用。

天然高分子材料在水泥浆中通过氢键作用力形成水凝胶,在水泥浆中形成网状结构,增加水泥固相颗粒之间黏结性,阻止颗粒的沉降,提高水泥浆的稳定性(图5)。

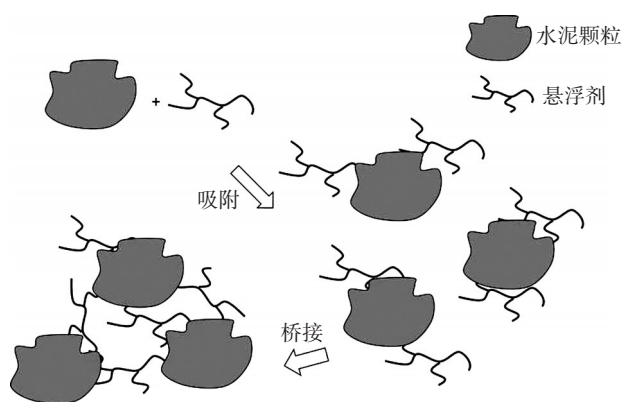


图5 天然高分子材料悬浮剂的悬浮作用机理

随着深井固井日益复杂,井底温度越来越高,而天然生物胶的耐温性能较差,在高温下易发生降解失效,限制了此类物质在高温水泥浆体系中的应用。

1.2.2 合成高分子材料悬浮剂

2-丙烯酰胺基-甲基丙磺酸(AMPS)类聚合物可通过增加水泥浆液的黏度及水泥颗粒间的黏滞性能来提高浆体的稳定性。

针对低压易漏地层低密度水泥浆悬浮沉降失稳的问题,陈小荣等^[34]以*N*-乙烯基己内酰胺(NVCL)、AMPS和丙烯酰胺(AM)为单体,采用溶液聚合法制得的悬浮剂PFH-118,加量为1.25%时,在不同温度的养护条件下低密度水泥浆的上下密度差均小于0.03 g/cm³。悬浮剂通过在水泥浆中形成网状结构阻止水泥颗粒沉降,提高水泥浆的稠度,使得低密度水泥浆体系具有较好的沉降稳定性。

Feng等^[35]选用NVCL、AMPS、*N,N*-二甲基丙烯酰胺(DMAA)为单体,通过自由基溶液聚合法制备悬浮剂PAND,评价了不同温度(40~120℃)下PAND对低密度水泥浆的沉降稳定性,实验结果表明,加入0.8%的PAND可显著减少水泥浆游离液的形成;固化后水泥柱上部和下部的密度差小于0.01 g/cm³。悬浮剂PAND在水泥浆中形成了分子间疏水缔合网络结构,增加了水泥浆体系的稠度,维持了低密度水泥浆体系的稳定性。

合成高分子材料在固井外加剂中发展很快,但在高温条件下,合成高分子材料存在聚合物链段断裂、解聚或基团脱除等降解反应,使聚合物的相对分子质量变小,体系黏度降低,导致水泥浆的悬浮性和稠度下降,稳定性变差^[36-37]。为满足更高温环

境应用的需求,可通过分子设计,引入不同的基团提高合成高分子材料的耐温性能,抑制聚合物在高温下的降解反应,改善水泥浆体系在高温下的悬浮能力和稳定性。

2 油井水泥悬浮剂的优化

2.1 对无机材料的优化

无机材料悬浮剂的优化从以下几个方面开展:利用无机材料较好的耐温性,筛选出更合适的无机材料,制备具有热稳定性的悬浮剂;对无机材料进行改性,解决其添加定量后对水泥浆的明显增稠问题,方便下灰和泵送;此外,将筛选的无机材料与有机高分子材料进行复配,使其优势互补,开发新型悬浮剂。

卢海川等^[3]根据悬浮剂作用机理,将两种具有明显增稠效果、一定的触变性且耐温性能强的材料进行复配,研制了耐高温、副作用小的固井悬浮剂T-1,添加1%悬浮剂T-1可显著改善常规密度水泥浆体系的在90℃下的沉降稳定性。

针对高温高压深井中水泥浆沉降稳定性变差的问题,瞿志浩等^[38]选用AMPS、AM和*N*-乙烯基吡咯烷酮(NVP)为单体制备了具有强悬浮能力的共聚物,并将该共聚物与无机矿物材料进行复配制得的抗高温悬浮剂B,在200℃下,悬浮剂B掺量为1.5%~2.5%时,可控制水泥浆体系的上下密度差小于0.04 g/cm³,从而维持常规密度水泥浆在高温下的稳定性。聚合物中NVP链节因侧链具有吡咯环状取代基团,能通过提高聚合物侧链刚性改善共聚物耐温性能;无机矿物能在水泥浆中迅速形成网架结构,与共聚物协同保持常规密度水泥浆在高温下的沉降稳定性。

李长城等^[39]通过硅烷偶联剂对纳米二氧化硅进行改性,将其接枝异丁烯醇聚氧乙烯醚(TPEG),制得改性纳米二氧化硅T-NS,研究其对水泥浆性能的影响。T-NS通过有机分子间的空间位阻斥力,抑制纳米材料的团聚效应,从而使纳米材料在溶液中分散均匀,增强悬浮性能。

通过优选复配制得的悬浮剂可在一定程度上避免“高温稀释”导致的水泥浆沉降问题,但复配产品易受到原材料品控影响,原材料获取途径受限;此外,如何改善复配制备工艺以达到减少制备成本

是该方向的研究热点。通过改性制得的悬浮剂可在一定程度上缓解无机材料增稠的副作用,但仍未从根本上解决无机材料对水泥浆严重的增稠效果,有待进一步开发。

2.2 对有机高分子材料的优化

有机高分子材料悬浮剂的优化从以下几个方面开展:针对水泥浆高温稀释问题,在悬浮剂中引入耐温疏水单体,提高聚合物的疏水性,增强疏水缔合效应,有效补偿由于升温导致的水泥浆体系黏度下降的问题,提高聚合物在高温下的悬浮性能;针对聚合物高温失效的问题,在聚合物中引入可增强聚合物侧链刚性的共聚单体,提高共聚物的空间位阻,增强悬浮剂的热稳定性,改善抗温和耐剪切性能。

王成文等^[40]筛选耐温性能好的DMAA单体和疏水单体(HCZW-50),将其与AM、AMPS通过溶液聚合法制得了聚合物TV-1。水泥浆高温稳定性试验结果表明,在155℃下,未加聚合物的高密度水泥浆的上下密度差为0.771 g/cm³;而加入0.3% TV-1后,水泥浆的上下密度差降为0.022 g/cm³,有效调控水泥浆的沉降稳定性。聚合物在不同温度下的聚集行为如图6所示。随着温度的升高,TV-1的侧链进一步伸展,侧链之间疏水缔合形成空间网架结构,维持高密度水泥浆体系在高温下的沉降稳定性。

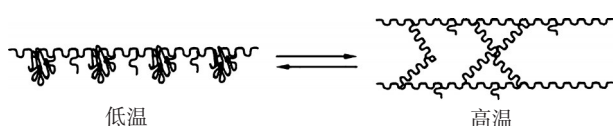


图6 TV-1在不同温度下的聚集行为^[40]

刘湘华等^[41]选用AMPS、AM和疏水单体N-烷基丙烯酰胺(N-AAM)制得的高温悬浮剂,能够改善高密度水泥浆在高温下的稳定性。陈新等^[42]以AM、AMPS和疏水单体(HW-18)为单体制得了适用于水泥浆体系的疏水缔合聚合物,可改善常规密度硅粉水泥浆体系在高温下的沉降稳定性。Qian等^[43]以AMPS、AM、季铵盐单体N,N-十八烷基二甲基烯丙基氯化铵(DMAAC-18)和NVP为原料制得了一种四元疏水聚合物P-AN18,可在200℃下保证常规密度水泥浆的稳定性。

赵启阳等^[5]以AMPS、AM、NVP和DMAAC

为原料,研制了一种四元共聚物P(AADN)。如图7所示,该P(AADN)在水溶液中存在分子链的相互交联,形成不规则空间网状结构。

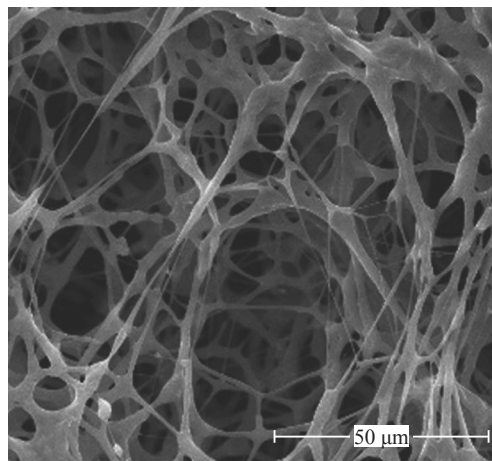


图7 P(AADN)水溶液的SEM照片^[5]

水泥浆稳定性试验结果表明,在200℃下,P(AADN)掺量为0.2%时,水泥石的上下密度差小于0.04 g/cm³,较好地保持了常规密度水泥浆的稳定性。

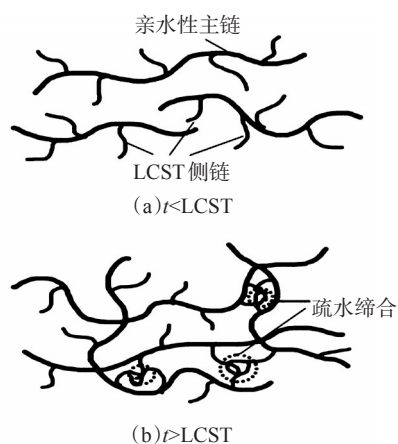
罗敏等^[44]以AM、苯乙烯磺酸钠(SSS)、N,N-二乙基丙烯酰胺(DEAA)为单体制得了三元共聚物悬浮剂GX,将GX加入水泥浆后,在高温下形成了以水泥颗粒为中心、聚合物为支链的交联结构,可保持常规密度水泥浆在高温下的稳定性。

杨启贞^[45]以苯乙烯磺酸钠(SSS)、DMAA和NVP为原料制备的聚合物P(SDN),在150℃下可保持常规密度水泥浆的沉降稳定性。

如上聚合物均通过引入苯环或吡咯环取代基以提高其侧链刚性,提高聚合物的空间位阻,使聚合物具备更好的耐温性能。

郭锦棠等^[46]以丙烯酸(AA)和AMPS的聚合物作为主链,将DEAA和DMAA的聚合物作为侧链连接到主链上制得疏水缔合聚合物悬浮剂,悬浮作用机理见图8。将悬浮剂加入水泥浆后,在高温下悬浮剂中的侧链发生相转变,实现聚合物分子间缔合,形成空间网状结构,可保持常规密度水泥浆在高温下的稳定性。

通过分子设计引入疏水基团或刚性基团,改善高分子材料类悬浮剂的耐温性能,可缓解由于“高温稀释”导致的水泥浆的沉降问题,但目前报道的高分子类悬浮剂的“低温增稠”问题仍未得到有效

图8 温敏缔合物的悬浮作用机理^[46]

解决,还需要综合考虑引入其他基团提高有机高分子类悬浮剂的性能。

3 结束语

针对无机材料类悬浮剂的优化,当前国内外的研究主要是采取复配的方式进行。然而,复配产品易受到原材料的品控影响,应尽量选择获取途径广、生产品控较好的原料。若能同时改善复配工艺实现降低生产成本是复配研究的一个重要方向。

针对有机高分子类悬浮剂的优化,当前报道的研究主要是通过分子设计的方式进行。通过分子设计,针对性的引入不同类型的单体,达到提高聚合物的综合性能的目的,将是解决聚合物“低温增稠、高温变稀”问题的重要手段之一。

除此以外,基于无机材料和有机高分子材料自身的特点,将聚合物通过化学方式与无机材料结合,使悬浮材料向着复合材料多功能的方向转变,兼具两种材料的优势,制备综合性能良好的悬浮剂材料,将成为未来悬浮剂研究的一个重要发展方向。

参考文献:

- [1] 刘硕琼,齐奉忠. 中国石油固井面临的挑战及攻关方向[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(6): 6-11.
- [2] 齐奉忠,冯宇思,韩琴. 国内外固井技术发展历程与研究方向[J]. 石油科技论坛, 2018, 37(5): 35-39.
- [3] 卢海川,邢秀萍,谢承斌,等. 新型固井悬浮剂的开发[J]. 钻井液与完井液, 2014, 31(1): 60-63.
- [4] 张玉平,杨远光,宋元洪,等. 超高温超高密度防气窜水泥浆[J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(4): 51-54.
- [5] 赵启阳,尧艳,严海兵,等. 固井用聚合物高温悬浮剂的合成及性能研究[J]. 合成化学, 2021, 29(6): 532-537.

- [6] 吴积善. 试论泥石流浆体的静切力[J]. 泥沙研究, 1981, (4): 38-49.
- [7] 赵启阳,尧艳,严海兵,等. 固井用聚电解质-疏水缔合复合悬浮稳定剂的制备与性能评价[J]. 油田化学, 2022, 39(2): 228-233.
- [8] 王相田,胡黎明,顾达,等. 超细颗粒分散过程分析[J]. 化学通报, 1995(5): 13-17.
- [9] 李秋超,范颖芳,赵宇龙,等. 纳米改性水泥基材料流变性研究进展[C]//第31届全国结构工程学术会议论文集(第I册). 北京: 工程力学杂志社, 2022: 306-313.
- [10] KODIPPILI DULANI P A, DREW ROBIN A L, NOKKEN MICHELLE R. Effects of nanosilica as suspensions on the hydration and the microstructure of hardened cement paste[J]. Transport Res Rec, 2021, 2675(9): 4-10.
- [11] 李波,陆永伟. 纳米二氧化硅对固井水泥浆性能的影响[J]. 河南科技, 2019, 13: 96-99.
- [12] 杨洪雨. 液态纳米二氧化硅对水泥浆性能影响研究[J]. 西部探矿工程, 2017, 29(7): 84-85.
- [13] 郑少军. 深水高固相低密度固井水泥浆设计与性能研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2022.
- [14] BURGOS MONTES O, ALONSO M M, PUERTAS F. Viscosity and water demand of limestone- and fly ash-blended cement pastes in the presence of superplasticisers[J]. Constr Build Mater, 2013, 48: 417-423.
- [15] 王军龙,陶涛,张抖,等. 超细粉煤灰在水泥生产中的应用途径研究[J]. 水泥, 2022, 550(12): 5-9.
- [16] 徐明,张清,钟福海,等. 低密度水泥浆高温悬浮稳定剂的研究及应用[C]//2012年固井技术研讨会论文集. 北京: 石油工业出版社, 2012: 339-343.
- [17] 安舒玉,韩枫,刘蕾,等. 膨润土和硫铝酸盐水泥改性生物炭对铅的吸附[J]. 化学工程, 2022, 50(10): 19-24.
- [18] CALABRIA-HOLLEY J, PAPATZANI S, NADEN B, et al. Tailored montmorillonite nanoparticles and their behavior in the alkaline cement environment[J]. Appl Clay Sci, 2017, 143: 67-75.
- [19] ADACHI Y, KAWASHIMA Y T, GHAZALI M. Rheology and sedimentation of aqueous suspension of Na-montmorillonite in the very dilute domain[J]. Kona Powder Part J, 2020, 37: 145-165.
- [20] NOUREDDINE M, BENYOUNES K, BENMOUNAH A. Study of the impact of bentonite on the physico-mechanical and flow properties of cement grout[J]. Cogent Eng, 2018, 5(1): 1446252.
- [21] 梅娟. 改性蒙脱石的流变特性及机理分析[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.
- [22] 张超凡,管学茂,张海波,等. 机械力化学改性钙基膨润土提高注浆材料的稳定性[J]. 材料导报, 2019, 33(20): 3408-3412.

- [23] 杨全训. 海泡石的提纯与加工[J]. 化工矿山技术, 1990, (4): 38-41.
- [24] MÁRMOL G, SAVASTANO H, FUENTE E, et al. Effect of sepiolite addition on fibre-cement based on MgO-SiO₂ systems [J]. Cement Concrete Res, 2019, 124: 105816.
- [25] 郑锟. 海泡石油井水泥体系结构与性质研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2005.
- [26] 邹时英, 王克, 殷勤俭, 等. 瓜尔胶的改性研究[J]. 化学研究与应用, 2003, 15(3): 317-320.
- [27] 张俊然, 赵鑫鑫, 姜彤. 3种生物聚合物改良粉土的持水特性研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2157-2164.
- [28] KAMAL H K. Frost durability of concrete containing viscosity-modifying admixtures[J]. Aci Mater J, 1995, 92(6): 625-633.
- [29] 张皓南. 威兰胶对水泥及混凝土基本性能的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [30] 孙洪波, 马春旭, 刘孟慧等. 掺生物胶固井水泥浆性能研究[J]. 科技视界, 2017(9): 244-245.
- [31] 周珍, 谢明辉, 夏建业, 等. 多种搅拌型式下高黏黄原胶混合过程研究[J]. 化学工程, 2014, 42(5): 51-55.
- [32] 聂军芳. 耐温型黄原胶基油井水泥浆增稠剂的制备[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [33] 陈宇珊, 李玉婷, 刘来宝, 等. 黄原胶对普通硅酸盐水泥性能的影响及机理研究[J]. 混凝土世界, 2023, 163(1): 60-64.
- [34] 陈小荣, 曲先伟, 李志宏. 固井用大温差低密度水泥浆悬浮稳定剂的制备与性能[J]. 合成化学, 2022, 30(1): 21-27.
- [35] QIAN F, JIA F J, PENG Z G, et al. Preparation, characterization, and evaluation of suspension stabilizer for low-density cement slurry for cementing[J]. J Appl Polym Sci, 2022, 139(43): e53058.
- [36] 张清, 徐明, 钟福海, 等. 高温悬浮稳定剂 DRY-S2 的研究及应用[J]. 钻井液与完井液, 2013, 30(3): 61-63.
- [37] 杨勇. 新型抗高温水泥悬浮剂的研制与现场试验[J]. 石油勘探技术, 2016, 44(3): 44-49.
- [38] 瞿志浩, 孙晓杰, 朱海金, 等. 新型抗高温水泥浆体系的研究及应用[J]. 天然气技术与经济, 2019, 13(3): 44-48.
- [39] 李长城, 杨勇, 冉千平, 等. 改性纳米二氧化硅对水泥砂浆性能影响的研究[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(9): 81-85.
- [40] 王成文, 王桓, 薛毓铨, 等. 高密度水泥浆高温沉降稳定调控热增黏聚合物研制与性能[J]. 石油学报, 2020, 41(11): 1416-1424.
- [41] 刘湘华. 油井水泥浆高温悬浮稳定剂的开发及性能研究[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(5): 605-609.
- [42] 陈新. 热增黏聚合物合成及对水泥浆沉降稳定性的影响研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
- [43] QIAN F, CHEN X W, PENG Z G, et al. Synthesis and properties of temperature-tolerance resistant hydrophobically associating polymer suspension agent using response surface method [J]. Colloid Surface A, 2021, 627: 127117.
- [44] 罗敏, 黄盛, 何旭晟, 等. 耐 200 °C 固井水泥用悬浮剂的制备与性能表征[J]. 钻井液与完井液, 2022, 39(4): 472-480.
- [45] 杨启贞. 响应面法优化制备水溶性热增黏聚合物及其水泥浆增稠性能[J]. 合成化学, 2022, 30(08): 654-662.
- [46] 郭锦棠, 董美美, 于永金, 等. 温敏增稠固井水泥外加剂的合成与性能研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(6): 597-602.

Research Progress of Oil Well Cement Suspension

WU Lei^{1,2,3}, ZHAO Baohui^{1,2,3}, HOU Wei^{1,2,3}, SHI Linglong^{1,2,3}, DONG Ziyue^{1,2,3}, ZOU Shuang^{1,2,3}

(1. Tianjin Boxing Engineering Science & Technology Company Ltd, CNPC, Tianjin 300451, P R of China; 2. Key Laboratory of Drilling Engineering, CNPC, Tianjin 300451, P R of China; 3. National Engineering Research Center of Oil & Gas Drilling and Completion Technology, Tianjin 300451, P R of China)

Abstract: The settlement stability of cementing slurry is one of the important indicators of cement slurry construction performance. With the more complex well conditions such as deep wells and ultra-deep wells, especially in recent years, the well depth is extended to 10 000 meters, therefor the temperature of the bottom of the well will reach more than 240 °C. Consequently, it poses a challenge to the stability of cementing slurry. Previously the suspending agents can improve the suspension stability, but reduce the rheological property of cementing slurry, which is detrimental to well cementing under complex well conditions. By summarizing the research status of oil well cement suspension, the main types and mechanisms of suspending agents were systematically discussed. Additionally, the optimization of current suspension agents was analyzed, including the optimal compounding of inorganic and organic polymer materials, the optimization of comonomers, as well as the graft copolymerization, which would provide reference for research of oil well cement suspension.

Keywords: oil well cement; suspending agent; high and ultra-high temperature resistance; research status; review