

地质钻探堵漏用盐水水泥浆的实验研究

杨宽才^{1,2}, 孔二伟^{1,2}

(1. 河南省第四地质勘查院有限公司, 河南 郑州 450001;
2. 河南省小口径钻探工程技术研究中心, 河南 郑州 450001)

摘要:在我国青海、新疆等干旱地区,部分矿区现场水为卤水,含盐量较高,水泥堵漏时需要采用盐水配制水泥浆。室内通过对多种水泥外加剂的优选,研制了一套地质钻探堵漏用盐水水泥浆体系,对其常规性能和堵漏性能进行了综合评价。结果表明:该体系具有良好的流动性、降失水性和沉降稳定性;早期抗压、抗折强度更大,终凝时间更短,5%氯化钠对于水泥浆有明显的早强、促凝作用;在30 MPa、45~75℃下的稠化时间为110~170 min,浆体稳定,稠化特性良好,可有效封堵1~3 mm的孔板、缝板。盐水水泥浆体系在类似地区的裂缝性地层堵漏作业中将有良好的应用前景。

关键词:地质钻探;裂缝性地层;堵漏;盐水水泥浆;氯化钠

中图分类号:P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)05-0095-06

Experimental study on salt-water cement slurry for plugging in geological drilling

YANG Kuancai^{1,2}, KONG Erwei^{1,2}

(1. The Fourth Geological Exploration Institute Co. Ltd of Henan Province, Zhengzhou Henan 450001, China;

2. Research Center of Slim-hole Drilling Engineering Technology in Henan Province, Zhengzhou Henan 450001, China)

Abstract: In Qinghai, Xinjiang and other arid areas of China, some mining site water is brine with high salt content. For convenience, salt water is used to prepare cement plugging slurry. A set of salt-water cement plugging slurry system for geological drilling is developed through the selection of various cement admixtures, and the conventional and plugging properties have been comprehensively evaluated. The results showed good fluidity, filtration reducing property and sedimentary stability, the early compressive and flexural strength of the system is greater, and the final coagulation time is shorter. 5% sodium chloride shows obvious early strength and promoting coagulation for cement slurry. The thickening time of the system at 30MPa and 45~75℃ is 110~170min, the slurry is stable, and the thickening characteristics are good, which can effectively plug up the orifice and seam plate. The saltwater cement slurry system has a good application prospect in the plugging operation of fractured formation in similar areas.

Key words: geological drilling; fractured formation; plugging; salt-water cement slurry; NaCl

0 引言

钻探过程中,由于地层存在天然孔隙、裂缝及溶洞,会发生不同程度的漏失,淡水水泥浆体系被广泛地用于各种堵漏作业中^[1-5]。如应用于松软煤层的加固用泡沫水泥浆,针对固井过程中不能泵送大的堵漏颗粒材料而研究的温敏堵漏水泥浆体系,

以及针对地热井漏失研发的基于压力平衡条件下“戴帽”固井注水泥技术等,利用水泥浆进行封堵解决钻进过程中的漏失问题^[6-8]。我国青海、新疆等地的矿区常年干旱缺水,水资源分布不均,施工用水需要从偏远水源地运输,且部分矿区供水多为盐(卤)水,严重影响钻探施工进度。对夹杂高压盐水

收稿日期:2023-06-07; 修回日期:2023-07-10 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.05.014

第一作者:杨宽才,男,汉族,1983年生,高级工程师,勘查技术与工程专业,主要从事勘察工程研究工作,河南省郑州市高新技术开发区科学大道81号地质科技大厦12楼1209室,157099086@qq.com。

引用格式:杨宽才,孔二伟.地质钻探堵漏用盐水水泥浆的实验研究[J].钻探工程,2023,50(5):95-100.

YANG Kuancai, KONG Erwei. Experimental study on salt-water cement slurry for plugging in geological drilling[J]. Drilling Engineering, 2023,50(5):95-100.

层的盐膏地层,导致固井质量差的主要原因是石膏蠕变和盐水侵入,破坏水泥浆性能,进而影响固井质量^[9]。针对这种淡水资源难以获取的情况,必须设计研发相应的盐水水泥浆堵漏体系。有研究证实,盐类对水泥有双重作用,当盐浓度 $<10\%$ 时,表现为一定的促凝现象,特别是盐的含量 $<5\%$ 时有明显的早强作用;当盐浓度 $>10\%$,有一定的缓凝作用,浓度越大,稠化时间越长^[10-13]。

目前,国内盐水水泥浆多用于盐膏层、盐水层固井,对通过盐类提高堵漏效果的研究相对较少。张弛等^[14]通过胶乳增强水泥的弹性形变、增强韧性,开发了盐水浓度 15% 的低温胶乳盐水水泥浆体系,适用于浅层盐穴储气库井固井;罗刚等^[15]通过优选抗盐抗高温的缓凝剂和降失水剂,提出了NaCl浓度 18% 的高温盐水水泥浆体系,可抗 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温;丹美涵^[16]优选出一套以 25% NaCl和 5% KCl高盐混合水配制水泥浆,同时配套抗盐降失水剂、分散剂、缓凝剂等外加剂,解决了因高盐混合水配浆可能带来的水泥浆增稠、触变等问题;陈良等^[17]利用盐对粉质泥岩抑制水化膨胀作用,构建了以 10% KCl盐水的聚合物KCl盐水水泥浆体系,适用于粉质泥岩地层固井;Niu等^[18]研究了氯盐和表面活性剂对纳米二氧化硅在水泥浆分散状况的影响,结果表明表面活性剂和氯盐的协同作用可以改善纳米材料在水泥浆液中的分散情况。

在国外,Campos等^[19]设计出 12% MgCl₂的盐水水泥浆来克服凝胶化问题,同时利用较高的抗压强度进行堵漏;Al Moajil等^[20]设计以 5% CaCl₂配合Mn₃O₄来实现3 h内速凝的高密度水泥浆体系用于深井钻探,但对于外加剂的加量要求偏高;Kang等^[21]研究了硫铝酸钙水泥与淡水和盐水结合对比强度变化的实验,结果表明与盐水结合的硫铝酸钙水泥容易形成更为致密的水泥基体,从而提高水泥力学性能;Reddy等^[22]发现 8% 浓度以内的NaCl和Na₂SO₄可明显缩短水泥的诱导期,提供堵漏效率。

基于此,笔者从控制水泥浆凝结时间、稠化时间和堵漏性能的角度出发,优选抗盐性能优良的外加剂以克服盐的负面影响,研制了一套满足地质钻探裂缝性地层堵漏作业要求的盐水水泥浆体系,以期提高地质钻探工作效率。

1 实验材料与仪器

1.1 实验材料

1.1.1 分散剂

氯化钠(NaCl)属于强电解质,它的电解会抑制水泥颗粒在水中的溶解,且含盐的水泥浆一般流动性较差^[14],必须选用合适的分散剂来改善水泥浆的流变性,十二烷基硫酸钠(SDS)属阴离子亲水性表面活性剂,与阴离子配伍性良好,可以使水泥浆悬浮液中水化产物的表面保持较高的亲水性,吸附在水泥颗粒表面而形成双电层,抑制水泥表面产生薄膜,降低水泥颗粒的表面张力,从而使结构粘度降低、需水量减少^[23]。表面活性剂可以保持水泥颗粒与水分子之间的连接,有助于减少水泥颗粒自身间的吸附作用,使絮凝水泥颗粒间包裹的水释放出来,促进水泥在盐水中充分溶解,改善水泥颗粒的分散均匀性,提高体系的化学稳定性,因此采用SDS作为分散剂。

1.1.2 稳定剂

微硅粉是水泥浆中常用的稳定悬浮剂,微硅分散后会形成较为稳定的溶胶,使得水泥颗粒不易发生沉降,优选的微硅粒径集中在 $1\sim 10\text{ }\mu\text{m}$,可以起到滚珠、充填、悬浮增强的作用,同时达到紧密堆积的目的。

1.1.3 增粘剂

在水泥浆泵送的过程中,水泥浆的粘度、切力过大或过小都会带来不利的影响,NaCl抑制了水泥的溶解,使得水泥浆粘度偏低,需要加入适量的增粘剂,提高水泥浆的抗离析能力,提高浆液粘度和悬浮稳定性。因此,对几种地质钻探现场常用的增粘剂HV-CMC、PAM、HV-PAC、XC进行测试,结果如表1所示,可以看出在盐水水泥浆中,XC的抗盐性能最好、提粘效果最佳。

表1 几种增粘剂的性能对比

Table 1 Performances comparison of various viscosifiers

增粘剂	表观粘度/ (mPa·s)	塑性粘度/ (mPa·s)	动切力/ Pa
0.3%XC	44.5	24	20.5
0.3%HV-CMC	33	23	10
0.5%PAM	23	14	9
0.5%HV-PAC	16.5	9	7.5

注:配方为水+P.O 42.5水泥+ 5% NaCl,水灰比0.6。

1.1.4 降失水剂

普通的降失水剂多为线性高分子化合物,线性高分子遇盐后会卷曲并互相缠绕,无法形成控制失水所要求的网状结构,因此选择抗盐性能好的降失水剂尤为重要。RK-14S是一种新型水溶性聚合物,通过吸附和聚水泥颗粒的双重作用,在水泥浆中形成弱胶联的胶体,可稳定的嵌入泥滤饼,减小孔隙尺寸,有效地通过提高水相粘度和降低滤饼渗透率来降低水泥浆滤失量。

1.1.5 堵漏材料

采用聚丙烯纤维(长度6~13 mm)作为主要的堵漏材料,纤维作为惰性材料,加量较少时基本不影响水泥浆的常规性能(如流动性),同时能够提升水泥的抗压、抗折强度,在地层裂缝处可以起到网格化和拉筋作用。同时,采用高固相堵漏材料Strata-vanguard作为桥塞封堵剂,其颗粒级配丰富(有片状,也有粗颗粒和细颗粒),适用于各种缝宽裂缝的封堵,其外观如图1所示。



图1 高固相堵漏材料 Strata-vanguard

Fig.1 Strata-vanguard high solid loading plugging materials

通过复配实验,确定所用水泥浆配方为(相对水的质量分数):

1号盐水水泥浆:P.O 42.5普通硅酸盐水泥+水+5% NaCl+0.6% SDS+3.3% 微硅粉+0.3% XC+2% RK-14S,水灰比为0.6。

2号淡水水泥浆:P.O 42.5普通硅酸盐水泥+水+0.6% SDS+3.3% 微硅粉+0.3% XC+2% RK-14S,水灰比为0.6,用于对比。

3号堵漏用盐水水泥浆:P.O 42.5普通硅酸盐水泥+水+5% NaCl+0.6% SDS+3.3% 微硅粉+0.3% XC+2% RK-14S+0.3% 聚丙烯纤维+3% Strata-vanguard高固相堵漏材料,水灰比为0.6,用于评价堵漏性能。

笔者通过在青海某地采取卤水样,其矿化度为151.16 g/L,但前期研究发现,直接用其配制卤水水泥浆时,由于矿化度较高、盐类较多(如NaCl、KCl、CaCl₂、MgCl₂),水泥浆性能难以调控。室内采用5%NaCl溶液(pH值7)来模拟盐水,此时可起促凝作用,可避免NaCl浓度较高(如超过10%)时对水泥浆的缓凝作用。

1.2 实验仪器与实验方法

实验仪器:OWC-9360型恒速搅拌器、OWC-9480A型增压稠化仪、YH-40B型标准恒温恒湿养护箱、ZCYA-300C型微机控制抗压抗折试验机、ZNN-D6型六速旋转粘度计、NLD-3型水泥胶砂流动度测定仪、维卡仪、ZNS-5A型中压堵漏仪。

实验方法:按照《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011)对水泥浆的流变特性、力学性能、凝结时间、稠化时间等性能进行测试,参考石油天然气行业标准《钻井液用桥堵漏材料室内试验方法》(SY/T 5840—2007)对水泥浆的堵漏性能进行测试。

2 实验结果及讨论

2.1 常规性能

1号、2号水泥浆的常规性能如表2所示,其中沉降稳定性 $\Delta\rho$ 是在常温下静置2 h后水泥浆的上下密度差。裂缝性地层的承压能力普遍偏低,需要控制水泥浆的密度为较低水平。该盐水水泥浆的密度为1.66 g/cm³,可避免由于水泥浆密度过高,将地层“压漏”的情况。由表2可以看出,盐水与淡水水泥浆在流变参数方面差异不大,说明NaCl对该体系的流变性影响很小;盐水水泥浆在降滤失性和沉降稳定性方面与淡水水泥浆相差不大,说明水泥与所选择的外加剂之间配伍、相容性良好,其流动度 ≥ 23 cm,钻探现场易于配置,可满足现场施工泵送的要求。

2.2 力学性能

将配置好的1号、2号水泥浆倒入模具中,在养护箱中25℃条件下恒温养护3天、7天,脱模后通过ZCYA-300C型微机控制抗压抗折试验机测得水泥试块的抗压、抗折强度,如表3所示。可以看出,在抗压和抗折强度方面,盐水水泥浆都优于淡水水泥浆,原因是5%的NaCl具有明显的早强作用,加入NaCl后会在水泥浆中的游离Cl⁻和物理吸附Cl⁻的比例提高(比例会随着水化龄期的延长而降低),水

表2 水泥浆的常规性能

Table 2 Regular performances of cement slurries

配方编号	水泥浆类型	密度/(g·cm ⁻³)	$\theta_{600}/\theta_{300}/\theta_{200}/\theta_{100}/\theta_6/\theta_3$	FL/mL	流动度/cm	$\Delta\rho/(g\cdot cm^{-3})$	初始稠度/Bc
1	盐水水泥浆	1.66	193/128/100/87/15/9	17.5	23.2	0.01	20
2	淡水水泥浆	1.66	220/135/109/91/17/10	17	21.7	0.01	25

注:FL为0.69 MPa下30 min所测滤失量

泥中会不断形成氯铝酸钙,提高水泥的早期强度^[24];同时,NaCl在一定程度上可以抑制水泥内部的孔隙发育,提高水泥的致密性,使盐水水泥试块强度发展更快,其初期的抗压强度>10 MPa/3 d,满足地质钻探堵漏作业中对水泥强度的要求。

表3 水泥试块的抗压、抗折强度

Table 3 Compressive strength and flexural strength of testing cement blocks

配方编号	水泥浆	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		3 d	7 d	3 d	7 d
1	盐水水泥浆	11.74	12.81	2.31	2.75
2	淡水水泥浆	8.84	10.32	1.70	2.03

2.3 凝结时间

在堵漏作业中,由于水泥凝结时间过早导致来不及施工或凝结时间过迟导致施工周期长而影响施工进度情况屡见不鲜,因此研究水泥浆的凝结时间从而确定合适时间泵入水泥浆具有重要意义。采用维卡法测定1号、2号水泥浆在常温条件下的初凝、终凝时间如表4所示。从3组平行数据可以看出,NaCl的存在对于水泥浆的初凝时间影响较小,但明显缩短了水泥浆的终凝时间,说明低浓度的盐可以有效促进水泥的凝结,从而缩短堵漏时间,提高堵漏效率。

表4 水泥浆的初凝与终凝时间

Table 4 Initial and final setting time of cement slurries

序号	盐水水泥浆		淡水水泥浆	
	初凝	终凝	初凝	终凝
1	2h45min	6h30min	2h49min	8h15min
2	3h10min	6h45min	3h18min	9h20min
3	3h10min	7h5min	3h20min	8h35min

2.4 稠化时间

1号水泥浆的稠化时间通过OWC-9480A型增压稠化仪测得,其在30 MPa、45~75℃梯度下的稠

化时间如表5所示。图2为水泥浆在65℃下的稠化曲线,可以看到,该稠化曲线接近直角稠化,上升过程较为平稳,没有出现包心、上台阶等现象。在初始稠度结束后,过渡时间短,上升快,水泥浆的固-液状态时间短,有利于水泥浆的防窜性能^[25]。水泥浆在稠化过程中没有发生因NaCl带来的闪凝、超缓凝现象,说明该体系克服了盐的负面影响,具有易于控制的稠化特性。

表5 盐水水泥浆在不同条件下的稠化时间

Table 5 Thickening time of saltwater slurry under different conditions

序号	温度/℃	压力/MPa	稠化时间/min	初始稠度/Bc
1	45	30	161	23
2	55	30	155	21.5
3	65	30	132	22
4	75	30	114	23

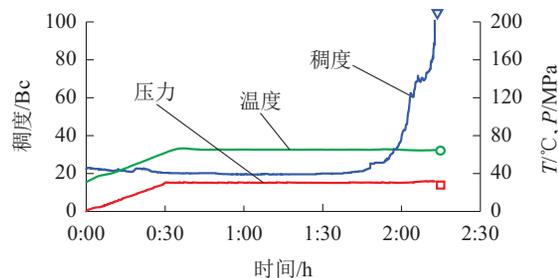


图2 盐水水泥浆在30 MPa、65℃下的稠化曲线

Fig.2 Thickening curve of saltwater cement slurry at 30MPa and 65℃

2.5 封堵性能

模拟裂缝性地层的漏失,采用静态测试法,通过ZNS-5A型中压堵漏仪评价3号水泥浆对孔板1~3 mm和缝板3 mm的封堵能力,在压力0.69 MPa的条件下,记录15 min内漏失的水泥浆体积,结果如表6、表7所示。图3所示为水泥浆对3 mm孔板的封堵情况,图4为封堵形成的泥饼干燥取下后的局部效果。

由表6、表7可见,盐水水泥浆的封堵效果明显。

表6 1~3 mm 孔板的封堵实验结果

Table 6 Plugging test results of 1~3mm orifice plate

孔板尺寸/mm	实验压力/MPa	漏失量/mL
1	0.69	5
		4.7
		6
2	0.69	15.5
		16.8
		16.3
3	0.69	60.3
		65
		68.7

表7 1~3 mm 缝板的封堵实验结果

Table 7 Plugging test results of 1~3mm seam plate

孔板尺寸/mm	实验压力/MPa	漏失量/mL
1	0.69	2.8
		3.5
		3.8
2	0.69	11
		12.3
		11.8
3	0.69	53.6
		55
		58.9



图3 3 mm 孔板的封堵效果

Fig.3 Plugging effect of 3mm orifice plate

对于1~2 mm 的孔板和缝板,当水泥和 Strata-vanguard 颗粒进入裂缝中时,在压力作用下迅速脱水而有效堆积堵塞裂缝;对于3 mm 的孔板和缝板,由于裂缝相对更大,颗粒不足以封堵裂缝,此时聚丙烯纤维在裂缝附近交织形成网状结构,将裂缝



图4 干燥后的局部泥饼

Fig.4 Partial dried mud cake

通道由大变小,堵漏颗粒继续在裂缝中架桥堆积,同时水泥浆会形成致密的滤饼,完全封堵裂缝界面^[26]。

3 结论

(1)研制的水泥浆体系具有良好的流变性、降失水性和沉降稳定性,与相应的淡水水泥浆相比差异不大,易于配制,可满足现场施工泵送要求。同时,本文仅基于5%氯化钠提出盐水水泥浆体系,如在其他地区应用,应对水泥浆体系进行适当调整。

(2)NaCl对于水泥浆有明显的早强、促凝作用,与淡水水泥浆相比,盐水水泥浆早期的抗压、抗折强度更大,终凝时间更短,可提高堵漏效率。

(3)该体系在30 MPa、45~75 °C下的稠化时间为110~170 min,浆体稳定,稠化特性良好,便于堵漏作业。

(4)该体系可有效封堵1~3 mm 的孔板、缝板,这是因为聚丙烯纤维材料具有网格化和拉筋作用,同时高固相堵漏材料 Strata-vanguard 级配丰富,这些特点有助于提高水泥浆在较复杂漏失地层中的堵漏作业成功率。

参考文献(References):

- [1] 薛玉志,刘振东,唐代绪,等.裂缝性地层堵漏配方及规律性研究[J].钻井液与完井液,2009,26(6):28-30.
XUE Yuzhi, LIU Zhendong, TANG Daixu, et al. Study on the formulation of lost circulation control fluid and the laws of lost circulation control for fractured formations[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2009, 26(6): 28-30.
- [2] 徐同台,刘玉杰,申威.钻井工程防漏堵漏技术[M].北京:石油工业出版社,1997.
XU Tongtai, LIU Yujie, SHEN Wei. Drilling Engineering Leak Prevention and Sealing Technology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.

- [3] 张希文,李爽,张洁,等. 钻井液堵漏材料及防漏堵漏技术研究进展[J]. 钻井液与完井液, 2009, 26(6): 74-76.
ZHANG Xiwen, LI Shuang, ZHANG Jie, et al. Research progress on lost circulation materials and lost circulation control technology[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2009, 26(6): 74-76.
- [4] 贾利春,陈勉,侯冰,等. 裂缝性地层钻井液漏失模型及漏失规律[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 95-101.
JIA Lichun, CHEN Mian, HOU Bing, et al. Drilling fluid loss model and loss dynamic behavior in fractured formations[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 95-101.
- [5] 吕斌,侯力伟,王克诚. 新型承压堵漏水泥浆体系的室内研究[J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(4): 51-53.
LÜ Bin, HOU Liwei, WANG Kecheng. Laboratory research of new sealing under pressure cement slurry system [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2011, 28(4): 51-53.
- [6] 李子硕,薛曼,李智,等. 松软煤层加固用泡沫水泥浆的实验研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(3): 130-138.
LI Zishuo, XUE Man, LI Zhi, et al. Experimental study of foamed cement slurry for soft coal seam reinforcement[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3): 130-138.
- [7] 刘学鹏. 温敏堵漏水泥浆体系研究与应用[J]. 钻探工程, 2022, 49(2): 110-116.
LIU Xuepeng. Research and application of the temperature sensitive plugging cement slurry system [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2): 110-116.
- [8] 景龙,李兴权,鲍石磊,等. 基于压力平衡条件下“戴帽”固井注水泥技术探讨[J]. 钻探工程, 2023, 50(2): 79-84.
JING Long, LI Xingquan, BAO Shilei, et al. Discussion of cement injection technology for “cap” cementation based on balanced pressure condition[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 79-84.
- [9] 张敬涛,王晓亮. Y油田盐膏层固井水泥浆及前置液性能评价[J]. 化学工程师, 2022, 36(12): 58-62, 41.
ZHANG Jingtao, WANG Xiaoliang. Performance evaluation of cementing slurry and preflush for salt gypsum formation in Y Oilfield[J]. Chemical Engineer, 2022, 36(12): 58-62, 41.
- [10] Cunningham Willis C, Smith Dwight K. Effect of salt cement filtrate on subsurface formations[J]. Journal of Petroleum Technology, 1968, 20(3): 259-264.
- [11] Slagle Knox A, Smith Dwight K. Salt cement for shale and bentonitic sands[J]. Journal of Petroleum Technology, 1963, 15(2): 187-194.
- [12] Goodwin Korwin. J., Phipps Keith. Salt free cement—An alternative to collapsed casing in plastic salts[J]. Journal of Petroleum Technology, 1983, 36(2): 320-324.
- [13] Ismail S. A. A., Khalaf Fouad. Effectiveness of low-salt cement opposite salt bodies[C]//Middle East Oil Show. SPE-25542-MS, 1993.
- [14] 张弛,刘硕琼,徐明,等. 低温胶乳盐水泥浆体系研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2013, 30(2): 63-65.
ZHANG Chi, LIU Shuoqiong, XU Ming, et al. Research on low temperature latex brine cement slurry system [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2013, 30(2): 63-65.
- [15] 罗刚,舒福昌,向兴金. 高温盐水泥浆体系的室内研究[J]. 海洋石油, 2009, 29(2): 92-96.
LUO Gang, SHU Fuchang, XIANG Xingjin. Laboratory study of high-temperature saltwater cement slurry[J]. Offshore Oil, 2009, 29(2): 92-96.
- [16] 丹美涵. 抗盐高性能水泥浆体系研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2021, 38(2): 249-254.
DAN Meihan. Study and application of a high-performance salt-resistant cement slurry [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2021, 38(2): 249-254.
- [17] 陈良,彭博,黄敏. 聚合物氯化钾水泥浆体系性能评价及应用研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2015, 12(25): 14-16.
CHEN Liang, PENG Bo, HUANG Min. Performance evaluation and application of polymer potassium chloride cement slurry system in well GK-1 [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(25): 14-16.
- [18] Niu X, Feng G, Han Y, et al. Synergistic effect of surfactant and chlorine salt on dispersion of nano-SiO₂ and performance of cement-based grout containing a large amount of bentonite[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 131: 104587.
- [19] Campos Gilson, Simao Cristina Alex, Miranda Cristiane Richard de, et al. Salt tolerant cement systems to mitigate gelling effect[C]//IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference. SPE-170477-MS, 2014.
- [20] Al Moajil Abdullah M., Nasr-El-Din Hisham A., Kar Yusuf, et al. Dispersants for cement and salt contaminated manganese tetraoxide high-density water-based drilling fluids[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. SPE-177935-MS, 2015.
- [21] Kang C, Kim T. Influence of brine on hydration reaction of calcium sulfoaluminate and slag blended cement[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e02159.
- [22] Reddy B. R., Contreras Elizabeth Q., Boul Peter J. Relating cement additive performance to mix water composition for deep water and salt zone applications[C]//Deepwater Drilling and Completions Conference. SPE-180344-MS, 2016.
- [23] 腾新荣. 表面物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
TENG Xinrong. Surface Physical Chemistry [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [24] 王复生,朱元娜,孙胜泉. 氯化钠对普通硅酸盐水泥的早强作用和结合方式的试验研究[C]//“全国特种混凝土技术及工程应用”学术交流会暨2008年混凝土质量专业委员会年会论文集. 西安: 2008: 184-189.
WANG Fusheng, ZHU Yuanna, SUN Shengquan. Experimental study on the early strength effect and bonding mode of sodium chloride on ordinary Portland cement[C]//Proceedings of the Academic Exchange Conference on “National Special Concrete Technology and Engineering Applications” and the 2008 Annual Meeting of the Concrete Quality Professional Committee. Xi'an: 2008: 184-189.
- [25] 杨现禹,岳也,蔡记华. 化学发泡式泡沫水泥浆稠化实验方法对比与分析[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(2): 96-100.
YANG Xianyu, YUE Ye, CAI Jihua. Comparison and analysis of thickening experiment methods for chemically foamed cement slurry [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(2): 96-100.
- [26] 谷穗,乌效鸣,蔡记华. 纤维水泥浆堵漏实验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(4): 4-6.
GU Sui, WU Xiaoming, CAI Jihua. Sealing experiment research on fiber cement slurry [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(4): 4-6.

(编辑 荐华)