

调整井固井用低温早强防窜乳液的研究与应用

翟翔宇

(1. 中国石油集团大庆钻探工程有限公司工程技术研究院, 黑龙江 大庆 163000; 2. 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 黑龙江 大庆 163000)

摘要:大庆油田受长期注水调整开发影响,地下压力系统复杂,平面区域的异常高压区广泛分布,同时油层具有埋藏浅、环境温度低等特点。在固井环节,水泥浆受低温环境影响,水化速率下降,浆体结构发展缓慢,另外水泥浆在胶凝过程中易被地层高压流体侵入,导致水泥环的封固能力下降。本文从“晶核诱导”促进水泥水化理论出发,利用化学沉淀法制备水化硅酸钙溶胶早强剂(记为DQZ-1),其加量为2%~10%时40℃×8h水泥石抗压强度较净浆提高39%~153%。微观分析DQZ-1加速水泥水化产物的生成,低温环境早强效果良好。为了增强水泥浆体系低温早强与防窜性能,添加水化硅酸钙与胶乳组分,针对两者接触发生的破乳、沉降分层、稠度高等问题,研选聚羧酸盐MD,使水泥浆维持低初始稠度的同时早强效果明显。研选高聚物溶胶X,使体系拥有良好的防沉降性能,在合理配伍后,制备出一种性能稳定的早强防窜乳液复合剂(记为DZK)。该复合剂可促进油井水泥水化,生成更多的水化产物,水泥浆性能系数SPN值小于3,且静胶凝强度过渡时间较净浆缩短81%。低温早强防窜乳液复合剂在大庆油田应用23口调整井,固井质量优质率100%,油层优质井段比例达96.3%,取得良好的试验效果。

关键词:固井水泥浆;水化硅酸钙;胶乳;低温早强;防窜乳液;调整井;大庆油田

中图分类号:TE256⁺.6;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)04-0081-08

Research and application of low-temperature and early-strength anti-diversion emulsion for adjustment well cementing

ZHAI Xiangyu

(1. Engineering Technology Research Institute, CNPC Daqing Drilling Engineering Company Limited, Daqing Heilongjiang 163000, China; 2. State Key Laboratory of Continental Shale Oil, Daqing Heilongjiang 163000, China)

Abstract: Due to long-term water injection for development adjustment in the Daqing Oilfield, the underground pressure system has become complex, with extensive distribution of abnormally high-pressure zones within the formation. Additionally, the oil reservoirs are characterized by shallow burial depth and low ambient temperatures. These conditions reduce the hydration rate and slow down the structural development of cement slurry during the cementing process, as it is affected by low-temperature environments. Consequently, during the gelling process, the cement slurry is prone to invasion by high-pressure formation fluids, resulting in compromised sealing capacity of the cement sheath. Based on the “crystal nucleus induction” theory, this study synthesized hydrated calcium silicate using a chemical precipitation method to prepare a hydrated calcium silicate sol accelerator (designated as DQZ-1). Evaluation showed that with a DQZ-1 dosage of 2%~10%, the 8-hour compressive strength of cement cured at 40℃ increased by 39%~153% compared to neat slurry. Microscopic analysis confirmed that DQZ-1 accelerated the formation of cement hydration products, demonstrating excellent early-strength performance in low-temperature environments. To enhance both the low-temperature early strength and anti-channeling properties of the cement slurry system, hydrated calcium silicate and latex components were incorporated. However, issues such as demulsification, settling stratification, and high slurry consistency arose due to their interaction. To address these, polycarboxylate MD was selected, enabling the

收稿日期:2025-03-26; 修回日期:2025-05-16 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.04.011

作者简介:翟翔宇,男,汉族,1989年生,工程师,地质工程专业,硕士,主要从事完井液与测井技术研究工作,黑龙江省大庆市红岗区八百垅南路37号,zxy050781@163.com。

引用格式:翟翔宇.调整井固井用低温早强防窜乳液的研究与应用[J].钻探工程,2025,52(4):81-88.

ZHAI Xiangyu. Research and application of low-temperature and early-strength anti-diversion emulsion for adjustment well cementing [J]. Drilling Engineering, 2025,52(4):81-88.

cement slurry to maintain low initial consistency while achieving significant early strength. Additionally, a polymer colloid X was chosen to impart excellent anti-settling properties to the system. Through rational formulation, a stable early-strength and anti-channeling emulsion composite (designated as DZK) was developed. This composite promotes oil well cement hydration, generating more hydration products. The cement slurry's performance coefficient (SPN) was lower than 3, and the static gel strength transition time was shortened by 81% compared to the neat slurry. The low-temperature early-strength and anti-channeling emulsion composite was field-tested in 23 adjustment wells in the Daqing Oilfield. It achieved a 100% cementing quality excellence rate, with 96.3% of the oil-bearing sections rated as excellent, demonstrating outstanding field application results.

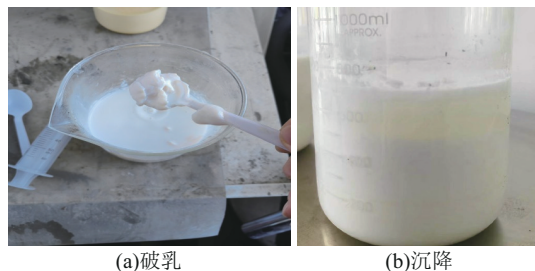
Key words: cementing slurry; hydrate calcium silicate; latex; low-temperature early strength; anti-channeling emulsion; adjustment well; Daqing Oilfield

0 引言

大庆油田经过长期的调整开发,受储层非均质性、断层遮挡、单砂体内部注采关系、油井套损等因素影响,形成了复杂多样的异常高压区域,高压区内压力系数平均1.75以上^[1]。该类井的井底温度低,水泥浆强度发展缓慢,固井后胶凝失重易发生层间混窜问题,固井质量难以保障,直接影响油气井的开发和使用寿命。针对大庆油田调整井井底温度低且伴有异常高压层的固井难点,经过调研,考虑将水化硅酸钙品种与胶乳有效结合,应对水泥浆低温水化速率缓慢及高压层易窜易侵的问题。水化硅酸钙品种作为早强剂领域的研究热点,王政等^[2]以“晶核诱导”原理,通过在水泥浆中投入水化硅酸钙品种,减少了水化时C-S-H的成核势垒,使水化产物水化硅酸钙凝胶易快速析出。雷凤珍等^[3]研究了聚羧酸减水剂对水化硅酸钙品种的粒径及早期强度的影响,发现高酸醚比的聚羧酸减水剂形成的晶核具有更小的粒径,加速浆体水化反应,提高水泥早期抗压强度;胶乳防窜剂具有成膜、弹性填充、降低渗透率等多维度作用,研究时间可溯源于20世纪,从单一成膜发展到多功能协同,围绕“弹性化、致密化、功能化”发挥防水、气窜性能,特别适用于高压层固井。

但是胶乳与水化硅酸钙溶胶配伍后,体系稳定性变差,易发生沉降分层、破乳现象(见图1)。经分析水化硅酸钙与胶乳粒子的电荷差异导致电荷中和或屏蔽效应,降低了粒子间的排斥力,使粒子聚集形成絮凝体,进而沉降^[4];另外,两者混合后改变了整个体系的流变特性,如水化硅酸钙溶胶被稀释,粒子间发生迁移和沉降,降低悬浮稳定性。稳定性变差导致了外加剂乳液体系的浓度发生梯度变化,直接影响则是纵向从上到下的水泥浆稠化时

间越来越短,给施工安全及固后压稳造成了隐患。因此需要研发能改良体系稳定性的处理剂,形成一种稳定的低温早强防窜乳液复合剂,以满足调整井固井低温早强、高压防窜的需求。



(a)破乳 (b)沉降

图1 乳液发生破乳、沉降

Fig.1 The emulsion undergoes demulsification and sedimentation

本文从合成水化硅酸钙出发,研发出具有良好早强效果的水化硅酸钙溶胶;后研选聚羧酸型分散剂及高聚物溶胶稳定剂,解决了水化硅酸钙溶胶与胶乳接触发生的水泥浆初始稠度过高、静置发生沉降的问题,并对配伍形成的乳液复合剂进行了早强、防窜等性能评价,最后通过现场试验评价应用效果。

1 实验准备

1.1 实验材料

四水合硝酸钙、五水偏硅酸钠、聚羧酸母液、硅烷偶联剂、胶乳防窜剂、G级油井水泥等。其中,四水合硝酸钙、五水偏硅酸钠为市场可采购的分析纯试剂,聚羧酸母液与胶乳防窜剂为大庆钻探工程技术研究院自研产品。聚羧酸母液以酸醚比8:1合成,粉体有效含量>95%,分子量40000;胶乳防窜剂代号DHL,主要成分为丁苯胶乳,pH值7,密度

1.02 g/cm³, 表观黏度 14 mPa·s, 固相含量 50%。

1.2 实验方法

依据《油井水泥试验方法》制备水泥浆, 进行抗压强度、稠化、失水等常规性能评价试验; 利用 5265 型静胶凝强度仪测试静胶凝强度过渡时间评价抗气窜性能, 测试水泥石长期抗压强度发展趋势, 实验方法依据《水泥浆静胶凝强度测定方法》; 利用 7150 型气窜模拟分析仪评价水泥浆防气窜性能, 实验方法依据《油井水泥外加剂评价方法 第 5 部分: 防气窜剂》, 实验中涉及的外加剂混配方式均为湿混, 实验配方及实验条件按照正文描述为准。

2 实验过程、结果及讨论

2.1 水化硅酸钙溶胶 DQZ-1 的制备及性能评价

2.1.1 水化硅酸钙溶胶 DQZ-1 的制备

水化硅酸钙溶胶的合成机理见图 2, 制备方法: 将聚羧酸母液配制成质量浓度为 10%~15% 的溶液。将质量浓度为 10%~20% 的四水合硝酸钙溶液与质量浓度为 10%~20% 的五水偏硅酸钠溶液以低速率同时滴加到底液中。设定温度为 25℃, 通氮气持续搅拌, 搅拌速度不低于 1000 r/min, 并控制体系 pH 值在 10.0~12.0 之间, 反应期间加入硅烷偶联剂, 得到外观乳白色的溶胶液体。主要成分为水化硅酸钙与聚羧酸高分子, 密度 1.11~1.15 g/cm³, 固相含量 21%±1%, 代号记为 DQZ-1 早强剂。

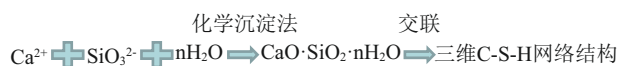


图 2 水化硅酸钙溶胶制备机理

Fig.2 Mechanism diagram of the preparation of hydrated calcium silicate sol

2.1.2 DQZ-1 的结构表征及微观结构

图 3 为 DQZ-1 提纯样品的红外图谱, 如图所示, 674 cm⁻¹ 和 957 cm⁻¹ 处出现了水化硅酸钙的特征吸收峰^[5]; 在 1080 cm⁻¹ 处出现的强吸收峰对应于 Si-O-Si 的不对称伸缩振动, 以及 1643 cm⁻¹ 处的 Si-O 弯曲振动峰, 说明了 DQZ-1 存在硅氧四面体网络结构^[6]; 在 2074 cm⁻¹ 处检测到的 Si-C 键伸缩振动峰以及 1384 cm⁻¹ 处的 Si-O-C/Si-R 键特征峰, 表明硅烷偶联剂参与水化硅酸钙合成反应, 通过水解-缩合机制与晶核表面键合, 赋予有机官能团^[7]; 在 2764、2887、2942 cm⁻¹ 处出现了对应聚羧酸中 -CH₃、-CH₂

伸缩振动峰, 此外 1790 cm⁻¹ 处的 C=O 伸缩振动峰出现聚羧酸的羧酸基团, 表明聚羧酸分子也参与了反应, 其通过静电斥力和空间位阻效应促进 C-S-H 均匀成核与生长, 提高 C-S-H 的均匀性^[4], 说明 DQZ-1 为经过硅烷偶联剂、聚羧酸分散剂改性后的 C-S-H 产物。

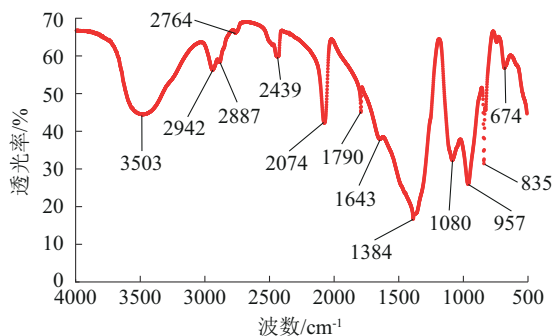


图 3 DQZ-1 红外图谱

Fig.3 The infrared spectrum of DQZ-1

图 4 为 DQZ-1 提纯样品的衍射图谱, 如图所示, DQZ-1 在 2θ 为 28.77°、31.59° 处出现了托贝莫来石的明显特征衍射峰^[8], 不同于水泥水化产物 C-S-H 凝胶在该角度出现非晶态的弥散、宽缓峰, 表明该 C-S-H 为结晶相的水化硅酸钙。因此, 本文制备的 DQZ-1 产品为结晶状的 C-S-H 溶胶。

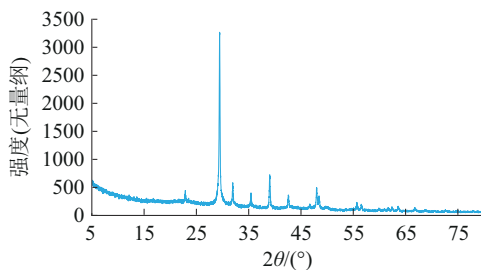


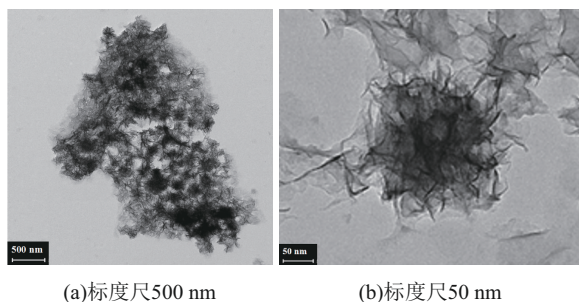
图 4 DQZ-1 衍射图谱

Fig.4 The diffraction pattern of DQZ-1

用 TEM 观察 DQZ-1 溶胶颗粒的形貌见图 5。制备的 C-S-H 溶胶颗粒基本呈球状, 粒径在 100~200 nm 之间, 颗粒之间存在一定聚集, 粒子间的边界模糊, 球状周围延伸出纤维状物质, 具有较大的延伸面积, 球状颗粒间相互连接形成网络结构^[9]。

2.1.3 DQZ-1 对油井抗压强度的影响

评价水化硅酸钙溶胶 DQZ-1 对油井水泥抗压强度的影响, 试验条件 40℃×常压, 配方: G 级油井



(a)标度尺500 nm

(b)标度尺50 nm

图5 DQZ-1溶胶的TEM照片

Fig.5 TEM images of DQZ-1

水泥+(2.0%~10.0%)DQZ-1+水(试验配方中的百分数为占水泥质量的百分比,以下同类皆按此计算),液固比0.44,试验结果见图6。

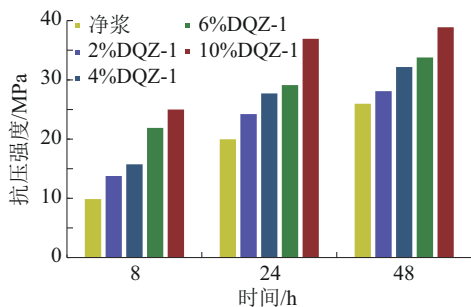


图6 不同加量DQZ-1的水泥石抗压强度

Fig.6 Compressive strength of cementite with different dosage of DQZ-1

如图6所示,DQZ-1加量在2%~10%的水泥石较净浆水泥石8 h抗压强度提高了39%~153%,24 h抗压强度提高了21%~85%。另外,随DQZ-1加量由2%提高到10%,制备的水泥浆并没有出现下灰困难的现象,分析是由于DQZ-1内部聚羧酸组分起到空间位阻作用^[10],使水化硅酸钙和水泥颗粒达到合适的分散协同作用。对于抗压强度长期发展趋势的试验(见图7),模拟调整井井底温度、压力(40℃×15.9 MPa)试验条件,用静胶凝强度分析仪对3%DQZ-1水泥浆进行养护,由发展曲线可知水泥石8 h抗压强度发展到15.2 MPa,28 d强度持续增长到47.5 MPa,长期抗压强度发展没有降低,分析是由于DQZ-1的主要成分为水化硅酸钙溶胶,这与水泥主要水化产物水化硅酸钙凝胶的化学成分一致,并没有掺入对水泥石强度发展有负向影响的成分。因此,DQZ-1能使油井水泥的早期强度明显提高,中后期强度平稳发展。

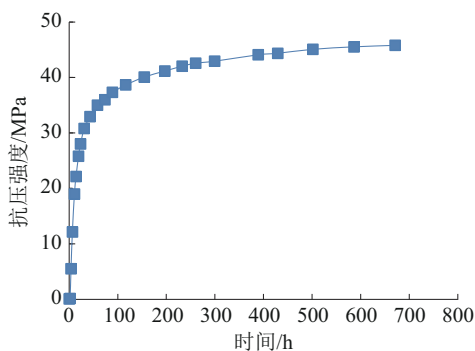
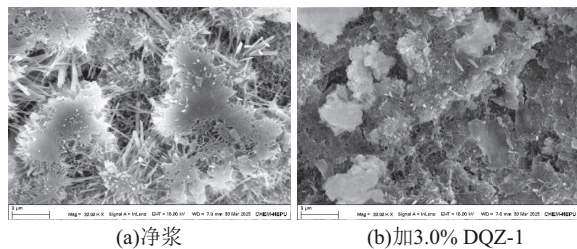


图7 DQZ-1的水泥石抗压强度发展曲线

Fig.7 Development curve of compressive strength of cement stone of DQZ-1 under pressure

2.1.4 DQZ-1对油井水泥微观结构的影响

利用SEM扫描电子显微镜对净浆水泥石及加有3.0%DQZ-1的硬化水泥石进行微观分析,养护条件为27℃×24 h,微观结构见图8。在同等放大倍数下,净浆水泥石的微观结构表现为水化产物多为针棒状的水化硅酸钙,水化产物间相互拼凑搭接,结构不够紧密,同时产物间孔隙较多;加有3.0%DQZ-1的硬化水泥石则更多表现出云朵团簇状的水化硅酸钙及片状氢氧化钙晶体,水化产物间胶结致密,形成了连续、重叠的晶体聚集体,与净浆水泥石比较结构更有层次感。



(a)净浆

(b)加3.0% DQZ-1

图8 水泥石的微观结构(标度尺2 μm,放大2万倍)

Fig.8 Microstructure of cement stone (scale 2 μm, magnification 2000 times)

利用X射线衍射仪对净浆水泥石与添加3.0%DQZ-1水泥石分析,养护条件27℃×24 h。如图9所示,从X衍射表征的结果分析,净浆图谱还未参与水化反应的C₃S与C₂S衍射峰强度很高,其他含DQZ-1的水泥石C₃S与C₂S的衍射峰强度明显降低,说明DQZ-1促进了水化反应进行。由于水化产物C-S-H凝胶为不定型结构^[11],在XRD图谱无法明确区分,而水化产物Ca(OH)₂衍射峰明显增强,并出现了少量的钙矾石(Aft)衍射峰,说明DQZ-1

加速了水泥水化产物的生成。调研分析DQZ-1水泥水化程度加深的原因,是DQZ-1内部的水化硅酸钙成分降低了水化产物C-S-H凝胶的结晶势垒来促进水化,早期C-S-H凝胶的大量生成消耗了浆体中 Ca^{2+} 和 SiO_3^{2-} ,使水泥熟料进一步溶解水化,促进了更多水化产物的生成^[12]。结合宏观对水泥石抗压强度的影响,证明了制备的水化硅酸钙溶胶DQZ-1对水泥水化有良好的促进作用。

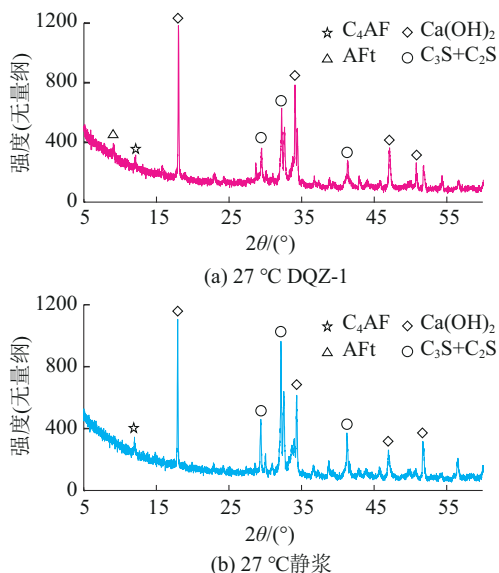


图9 水泥石的XRD图谱

Fig.9 XRD patterns of cement stone

2.2 低温早强防窜乳液复合剂制备研究

通过试验证明,DQZ-1低温早强性能明显,胶乳防窜剂DHL可形成的高黏性、高柔性聚合物胶膜及胶粒,使水泥浆具有优异的防窜性能,拟将DQZ-1与DHL有效结合,形成一种低温早强防窜乳液复合剂,以应对调整井多压力层系的固井难点。

2.2.1 DQZ-1与DHL配伍出现的问题

DQZ-1溶胶虽然自身性能稳定,但是在与胶乳防窜剂DHL配伍后,出现初始稠度过高、外加剂体系沉降、甚至破乳的问题。分析主要是由于电荷冲突、离子干扰及密度差异导致体系失稳,需要选择适宜的稳定剂和分散剂,确保体系均匀分散,达到良好的平衡状态。

2.2.2 体系流动分散性控制的优化

通过研选分散剂解决DQZ-1与DHL稠化初始稠度过高的问题,选取3类共5种分散剂,配方:G级油井水泥+3.0%DQZ-1+10%胶乳防窜剂DHL+

分散剂+水,液固比0.44,评价试验结果见表1,其中各分散剂加量均是使水泥浆流动度达到22 cm,满足现场施工设定。

表1 分散剂对水泥浆性能影响数据

Table 1 Data sheet on the effect of dispersants on the properties of cement pastes

分散剂种类	加量/ %	40 °C×15.9 MPa 初始稠度/Bc	40 °C×8 h抗 压强度/MPa
MD(聚羧酸类)	0.1	11	16.1
JK(聚羧酸类)	0.2	15	12.4
SG(聚羧酸类)	0.8	30	15.5
SM(密胺树脂类)	0.2	40	12.1
SXY(酮醛缩聚物类)	0.3	40	13.1

对比表1中数据分析,在满足相同流动度的情况下,聚羧酸类分散剂MD加量仅为0.1%且不影响水泥石抗压强度;另外,图10表示未加MD的水泥浆体系在30 min时间内稠化曲线快速上升至50 Bc,而加MD的稠化曲线初稠值低且维持70 min内稠度值在30 Bc以下,这有利于固井泵送及后期顶替。综上比较,研选MD作为体系分散剂。

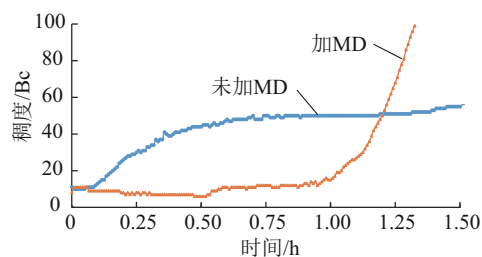


图10 稠化曲线

Fig.10 Thickening curves

研究分析聚羧酸盐MD有良好的乳化、吸附和空间位阻作用,为长侧链的梳状结构。通过分子基团设计与优化酸醚比,提高侧链分散排斥效应,增强主链络合吸附作用,使分子结构中亲水性官能团吸附在水泥颗粒及DQZ-1表面。疏水基团可以使水泥、DQZ-1及胶乳颗粒表面形成空间位阻,破坏颗粒间的絮凝结构,使体系暂时处于均匀分布的稳定状态。此外,分散剂MD与DQZ-1溶胶的内部分散组分为同一类型,能更好地发挥协同增效作用。为了量化分散剂MD对晶核体系的流动分散控制效果,添加不同加量MD进行流变性测试,数据见表

2. 随着MD由0.10%增加到0.20%,水泥浆流性指数 n 呈增大趋势且大于0.70,稠度系数 k 呈减小趋势且小于1.00,为良好的流变施工参数。综上,聚羧酸盐MD解决了体系初始稠度过高的问题,且低加量即可明显改善流变性能。

表2 添加MD的水泥浆流变性能参数
Table 2 Parameters of rheological properties of cement paste with MD addition

MD加量/%	六 速	n 值	k 值/(Pa·s ^{n})
0	16/23/59/76/93/125	0.47	2.31
0.10	8/10/60/110/148/235	0.72	0.81
0.15	6/8/55/93/130.5/218.5	0.78	0.50
0.20	5/7/45/77/109/186	0.81	0.34

2.2.3 体系悬浮稳定性控制的优化

通过研选稳定剂解决DQZ-1与DHL体系静置后发生分层、沉淀的问题。选取4种稳定剂,配方:G级油井水泥+3.0%DQZ-1+0.15%MD+稳定剂+水,液固比0.44,评价试验结果见表3。

表3 稳定剂对水泥浆性能影响数据
Table 3 Data sheet on the effect of stabilisers on the properties of cement paste

稳定剂种类	加量/%	流动度/ cm	40℃成石 纵向密度 差/(g·cm ⁻³)	40℃×8 h 抗压强度/ MPa
X(合成聚合物类)	0.4	22	0.01	16.5
Y(生物胶类)	0.1	15	0.02	14.1
Z(纤维素类)	0.05	15	0.03	10.2
H(树脂胶粉类)	0.1	18	0.03	11.2

表3表明,合成高聚物X相对于其他稳定剂,具有成石稳定性好,早强与流动度不受影响等特点。分析是由于合成高聚物X在高速搅拌后提高了液相黏度及切力,X内含聚丙烯酰胺类物质,高分子长链结构及通过氢键形成空间网络交联方式,表现出一定触变性,拥有良好的防沉降性能。为了量化溶胶X对外加剂体系静置后浓度变化的影响,制定评价外加剂体系稳定性的试验方法:配制外加剂体系后放置于烧杯(规格1000 mL),常温静置24 h,分别抽取体系的顶部段与底部段溶液配制水泥浆,进行稠化时间试验,用各自稠度到达100 Bc的时间值相减的差值来判定,差值越小,判定体系稳定性越好。

试验结果,当溶胶X的加量为0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%,差值分别为30、22、8、0、0 min。从结果分析,在溶胶X加量增大时,稠化时间差值变小,加量达到0.6%~0.8%时,稠化时间差值为0,说明体系未发生沉降。另外,体系静置24 h后,没有加溶胶X的外加剂体系发生沉降,0.4% X的外加剂体系外观上层有轻微析水,加入0.6%溶胶X的外加剂体系外观均一。综上,高聚物溶胶稳定剂X,通过增黏提切、构建交联网络使外加剂体系经过长时间静置均匀稳定,解决了DQZ-1在胶乳DHL中悬浮稳定性不佳的问题。

在分散剂MD及稳定剂X基础上,通过合理配伍,形成了低温早强防窜乳液复合剂(记为DZK),DZK体系主要组成为:(7~10)%DQZ-1+(22~24)%DHL+(0.5~1.0)%MD+(1.5~2.5)%X+(63~70)%水(外加剂体系百分比为质量占比)。

2.3 低温早强防窜乳液复合剂DZK性能评价

2.3.1 常规性能评价与水泥浆性能系数SPN值

配方:G级油井水泥+DZK,液固比0.39~0.44。DZK水泥浆常规性能测试与评价数据见表4,DZK与常规早强防窜体系性能对比见表5。

表4 不同密度下水泥浆的各项试验数据
Table 4 Various test data of cement paste at different densities

指 标	密度 ρ /(g·cm ⁻³)		
	1.91	1.95	1.97
水灰比 W/C	0.44	0.41	0.39
流动度/cm	23.0	22.5	22.0
滤失量 FL_{API} /mL	17.0	15.0	13.0
初稠 C_0/Bc	11	13	14
T_{30Bc} /min	75	68	60
T_{100Bc} /min	90	80	70
$P_{sh}(27\text{℃})$ /MPa	8.2	9.4	11.0
$P_{sh}(40\text{℃})$ /MPa	16.5	17.7	19.1

注:(1)失水试验条件40℃×7.0 MPa,稠化试验条件40℃×15.9 MPa;(2) T_{30Bc} —水泥浆稠度为30 Bc的时间; T_{100Bc} —水泥浆稠度为100 Bc的时间; P_{sh} —8 h抗压强度。

由表4、表5可见,DZK水泥浆具有低初始稠度及高流动度,稠化时间满足调整并短稠化时间的要求,可保障施工连续性并提高顶替效率,施工性能优良。滤失量低,均小于20 mL,浆体稳定性高,

表5 DZK与常规早强防窜体系性能比较
Table 5 Performance of DZK and conventional early strength anti-displacement system

指 标	常规体系	DZK体系
27℃×8 h抗压强度/MPa	5.8	8.2
40℃×8 h抗压强度/MPa	11.2	16.5
40℃凝结时间/min	180	130
40℃×6.9 MPa滤失量/mL	45	17
40℃×15 d渗透率/mD	0.011	0.005

注:两种水泥浆体系密度均为1.91g/cm³。

27℃×8 h抗压强度大于8.0 MPa,40℃×8 h抗压强度大于16.0 MPa,相对于常规早强防窜体系,DZK水泥浆早强性能明显,浆体结构发展迅速且渗透率低,有利于维持水泥环的完整性。

计算水泥浆性能系数 $SPN^{[13]}$:

$$SPN = FL_{API} (\sqrt{T_{100Bc}} - \sqrt{T_{30Bc}}) / \sqrt{30} \quad (1)$$

将对应参数带入公式,密度为1.91、1.95、1.97 g/cm³的水泥浆 SPN 值分别为2.57、1.92、1.40,均在1~3之间,DZK水泥浆的防气窜性能良好。

2.3.2 抗窜性能评价

针对高压层易发生气窜,评价DZK对水泥浆静胶凝强度过渡时间的影响,见图11。试验条件40℃×15.9 MPa,DZK水泥浆净浆静胶凝强度过渡时间为12 min,较相同试验条件下的净浆缩短81%;试验条件27℃×10 MPa,DZK水泥浆静胶凝强度过渡时间为43 min,较相同试验条件下的净浆缩短33%。过渡时间的缩短体现出DZK体系加速了水泥浆由液态向胶凝固态的转变,这一转变加快了水泥浆的防窜能力^[14]。图12为防窜水泥浆45℃时抗窜能力评价曲线,从水泥浆胶凝状态到水泥石凝结状态,孔隙压力不断下降,气层压力、上覆压力均维持稳定,气窜量维持0 mL,从水泥浆到水泥石均抵抗住气层的压力,没有发生气窜。

综上,DZK水泥浆具有优异的早强性能和防气窜性能,低温早强防窜乳液复合剂适合长垣油田调整井高压层系的特点。

3 低温早强防窜乳液复合剂现场应用

该材料在大庆油田南某区、喇嘛甸南中西某区及萨尔图中西某区的23口调整井进行了现场应用,有效封隔浅气层、高压层等复杂层段,测井结果表明固井优质率100%,平均油层优质井段比例

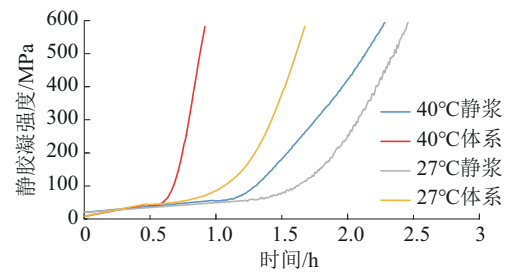
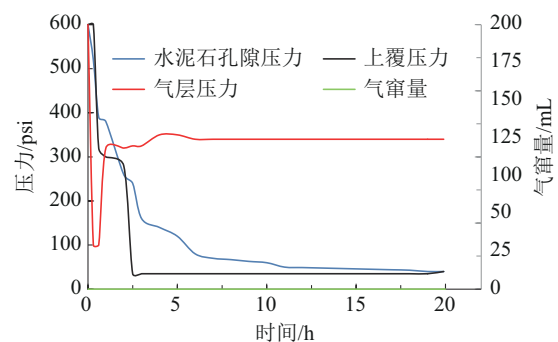


图11 对比净浆的DZK水泥静胶凝强度发展曲线

Fig.11 Development curve of static cementitious strength of DZK cement against net paste



注: 1 psi=6894.76 Pa

图12 DZK体系抗窜评价曲线

Fig.12 Evaluation curve of scuttling resistance of DZK system

96.3%,与区块临井平均油层优质井段相比,油层优质井段比例提高6个百分点。

其中,在喇嘛甸南中西某区,地下发育浅层气、气顶气、断层等,地面和地下形势复杂^[15],且试验区域存在套损,易发生固井高压层水气窜,固井质量保障难度增加。在试验井喇3-斜PSX,纵向剖面上高渗层、高压层相间存在,该井储层特点颗粒粗、泥质含量少、孔隙度大、渗透性好。另外,油层萨一组压力高,最高压力系数达到1.80,层间压差7.46 MPa,不易压稳,固井质量保障难度大。本井应用加重冲洗隔离液+G级净浆封固0~600 m非目的层段+DZK水泥浆封固600~1200 m的油层目的段的施工设计。现场施工正常,混拌水泥浆正常下灰、密度控制1.91~1.95 g/cm³,水泥浆流动性良好,注灰泵量1.9~2.1 m³/min,注压7~4 MPa,替压4~14 MPa,泵送、顶替顺利进行,施工过程中无窜无漏现象,井口返出5 m³密度约为1.91 g/cm³的水泥浆,48 h声幅测井表明应用段为优质,体现出DZK水泥浆与地层、套管间胶结良好,现场试验效果良好。

4 结论

(1)制备出适用于油井水泥的水化硅酸钙溶胶早强剂DQZ-1,能使水化产物快速大量生成,提高油井水泥早期强度。

(2)配伍早强剂DQZ-1与防窜剂DHL,形成低温早强防窜乳液复合剂DZK,该材料具有早强、流变性能好、防窜性能优良的特点。

(3)现场试验23口调整井,水泥浆混配平稳,密度均匀,固井质量优质率100%,平均油层优质井段比例96.3%,取得了较好的应用效果,该体系可推广应用用于调整井高压层固井。

参考文献(References):

- [1] 杨秀天. 大庆油田调整井固井技术研究[J]. 西部探矿工程, 2024, 36(7): 28-31, 35.
YANG Xiutian. Research on cementing technology for adjustment wells in Daqing oilfield[J]. West-China Exploration Engineering, 2024, 36(7): 28-31, 35.
- [2] 王政, 杨英姿, 李家和. 水化硅酸钙晶种的制备及对水泥强度的影响[J]. 材料科学与工艺, 2007, 15(6): 789-791, 796.
WANG Zheng, YANG Yingzi, LI Jiahe. Preparation of C-S-H-phase nuclei and its effects on compressive strength of cement[J]. Materials Science and Technology, 2007, 15(6): 789-791, 796.
- [3] 雷风珍, 雷蕾, 康阳阳, 等. 聚羧酸减水剂的酸醚比对水化硅酸钙晶种早强作用的影响[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(7): 1649-1659.
LEI Fengzhen, LEI Lei, KANG Yangyang, et al. Impact of acid ether ratio of polycarboxylate ether on early strength enhancement of calcium silicate hydrate seed[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(7): 1649-1659.
- [4] 尤丽莎, 傅中, 吴华强, 等. 无皂高分子纳米胶乳粒子的制备与稳定[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2001, 14(4): 474-478.
YOU Lisha, FU Zhong, WU Huaqiang, et al. Preparation and stabilization of emulsifier-free macromolecule nanoparticle latex[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2001, 14(4): 474-478.
- [5] 张美环, 贾涵, 刘荣, 等. 硅酸钙分子结构及热变性中红外光谱研究[J]. 杭州化工, 2022, 52(2): 15-18.
ZHANG Meihuan, JIA Han, LIU Rong, et al. Middle infrared spectroscopy study of calcium silicate molecule structure and thermal denaturation[J]. Hangzhou Chemical Industry, 2022, 52(2): 15-18.
- [6] 崔素萍, 郭红霞, 王辰, 等. 纳米无定形C-S-H凝胶颗粒及其结构表征[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(3): 531-534.
CUI Suping, GUO Hongxia, WANG Chen, et al. Synthesis and characterization of amorphous calcium-silicate hydrate (C-S-H) nanoparticles[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(3): 531-534.
- [7] 褚奇, 杨枝, 李涛, 等. 硅烷偶联剂改性纳米SiO₂封堵剂的制备与作用机理[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(4): 47-50.
CHU Qi, YANG Zhi, LI Tao, et al. Preparation and analyses of Nano SiO₂ plugging agent modified with silane coupling agent[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(4): 47-50.
- [8] 佟钰, 王朔, 马秀梅. 水化硅酸钙的晶型调控及其对吸/放湿性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(1): 83-87.
TONG Yu, WANG Shuo, MA Xiumei. Crystallinity regulation of calcium silicate hydrate and its influence on moisture absorption/desorption properties[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(1): 83-87.
- [9] 陈娇, 于诚, 慕儒, 等. 纳米水化硅酸钙的制备及对水泥水化影响的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(5): 1429-1440.
CHEN Jiao, YU Cheng, MU Ru, et al. Research progress on preparation of Nano calcium silicate hydrate and its influence on cement hydration[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(5): 1429-1440.
- [10] 刘晓, 罗奇峰, 管佳男, 等. 功能型聚羧酸分散剂材料分子设计的研究进展[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(10): 1192-1203.
LIU Xiao, LUO Qifeng, GUAN Jianan, et al. Research progress in molecular design of functional polycarboxylic acid dispersant materials[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(10): 1192-1203.
- [11] 张朝阳, 蔡熠, 孔祥明, 等. 纳米C-S-H对水泥水化、硬化浆体孔结构及混凝土强度的影响[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(5): 585-593.
ZHANG Zhaoyang, CAI Yi, KONG Xiangming, et al. Influence of Nano C-S-H on cement hydration, pore structure of hardened cement pastes and strength of concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(5): 585-593.
- [12] 唐芮枫, 张佳乐, 王子明, 等. C-S-H纳米晶种及其对水泥水化硬化的促进作用综述[J]. 材料导报, 2023, 37(9): 105-120.
TANG Ruifeng, ZHANG Jiale, WANG ZI Ming, et al. C-S-H nano-seed and its promoting effect on cement hydration and hardening: a review[J]. Materials Reports, 2023, 37(9): 105-120.
- [13] 魏浩光. 纳米液硅防窜水泥浆体系性能研究及应用[J]. 科技和产业, 2022, 22(4): 385-388.
WEI Haoguang. Performance research and application of liquid nano-silica anti-channeling cement slurry system[J]. Science Technology and Industry, 2022, 22(4): 385-388.
- [14] 朱海金, 高继超, 邹双, 等. 胶凝过渡态水泥浆防气窜能力评价方法[J]. 钻井液与完井液, 2023, 40(6): 793-797, 805.
ZHU Haijin, GAO Jichao, ZOU Shuang, et al. Method of evaluating the capacity of gas channeling prevention of a cement slurry in gelling transition-state[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2023, 40(6): 793-797, 805.
- [15] 孙庆萍, 纪学雁. 对喇嘛甸油田浅气层的认识[J]. 大庆石油地质与开发, 2002, 21(4): 6-8.
SUN Qingping, JI Xueyan. Recognition to shallower gas layer in lamadian oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2002, 21(4): 6-8.

(编辑 王跃伟)