

地热井固井中硅酸盐水泥体系的技术现状及发展趋势

陈瑶¹, 谭慧静^{1*}, 王胜¹, 郑秀华², 朱文茜³, 叶有¹

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 3. 河南大学建筑工程学院, 河南 郑州 475004)

摘要: 在地热井建井过程中, 为保证出口水温、提高井筒耐久性, 固井不可或缺。地热井固井目前仍主要采用G级油井水泥, 但地温梯度大、钻遇破碎裂隙性地层多以及存在腐蚀性介质等复杂环境, 对传统硅酸盐水泥体系提出更严苛的性能要求。本文从抗高温、耐腐蚀及低密度三方面对硅酸盐水泥体系的现有技术效果及未来发展趋势进行了梳理, 结果表明: 克服水泥石高温性能劣化的最常用手段为掺入硅粉或硅砂, 通过降低体系钙硅比调整水化产物类型以减缓强度衰退; 水泥防腐剂已从单一的有机/无机惰性材料, 发展为水性胶乳、酸响应型胶乳以及有机/无机复合多元防腐体系; 通过吸水增黏物质、低密度减轻剂或充气泡沫等形成的轻质水泥体系, 仍存在密度保持难、强度发展慢、稳定性差等缺点。未来应着重开展水泥石强度衰退机理的主控因素分析和新型强度衰退抑制剂的研发; 建立多相动态冲刷条件, 开展水泥石本体及胶结二界面受腐蚀机理研究; 兼顾地热井固井复杂环境, 辅以纤维等堵漏材料, 形成耐高温抗腐蚀轻质防漏水泥体系。针对地热井固井环境, 全面梳理现有硅酸盐水泥体系的技术现状及发展趋势, 可为地热水泥的研发方向提供参考。

关键词: 地热井固井; 硅酸盐水泥体系; 性能劣化; 防腐措施; 轻质防漏

中图分类号: TE256⁺.6; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)03-0001-11

Technical status and trends of portland cement system in geothermal well cementing

CHEN Yao¹, TAN Huijing^{1*}, WANG Sheng¹, ZHENG Xiuhua², ZHU Wenxi³, YE You¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Zhengzhou Henan 475004, China)

Abstract: In geothermal well construction, cementing is indispensable to ensure the outlet water temperature and enhance wellbore durability. Currently, class G cement remains the primary choice for geothermal well cementing. However, complex environments such as large geothermal gradients, fractured formations and the presence of corrosive media require more strict performance requirements for traditional portland cement systems. This paper analyzes existing technical strategies and future development trends of portland cement systems from three aspects: high-temperature resistance, corrosion inhibition, and low-density performance. The results indicate that the most

收稿日期: 2024-12-23; 修回日期: 2025-03-25 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.03.001

基金项目: 四川省科技计划资助项目(编号: 2023NSFSC0781); 国家自然科学基金青年项目(编号: 41902322); 雄安新区科技创新专项(编号: 2022XAGG0500); 成都理工大学珠峰科学研究计划(编号: 80000-2020ZF11411)

第一作者: 陈瑶, 女, 汉族, 2000年生, 硕士研究生, 土木工程专业, 研究方向为地热井固井水泥等, 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, chenyaoo@stu.cdut.edu.cn。

通信作者: 谭慧静, 女, 汉族, 1990年生, 副教授, 硕士生导师, 地质工程专业, 主要从事地热钻井流体相关的教学与科研工作, 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, tanhuijing18@cdut.edu.cn。

引用格式: 陈瑶, 谭慧静, 王胜, 等. 地热井固井中硅酸盐水泥体系的技术现状及发展趋势[J]. 钻探工程, 2025, 52(3): 1-11.

CHEN Yao, TAN Huijing, WANG Sheng, et al. Technical status and trends of portland cement system in geothermal well cementing [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3): 1-11.

commonly used method to overcome the deterioration of high-temperature performance of cement is adding silica powder or silica sand and reducing the calcium silicon ratio of the system to adjust the hydration product type. Corrosion inhibitors have evolved from single organic/inorganic inert materials to water-based latex, acid responsive latex, and organic/inorganic composite multi-component anti-corrosion systems. The lightweight cement system formed by absorbing water and tackifier, low density reducing agent or foam still has some shortcomings, such as difficult density maintenance, slow strength development, poor stability, etc. In the future, emphasis should be placed on analyzing the main controlling factors of the strength degradation mechanism of cement and developing new strength degradation inhibitors. Establish multiphase dynamic corrosion conditions and conduct research on the corrosion mechanism of cement stone body and bonding interface. Forming a high-temperature resistant, corrosion-resistant, lightweight leak proof cement system by taking into account the complex environment of geothermal cementing and supplementing with fiber or other sealing materials. Facing the geothermal cementing environment, a comprehensive understanding of the current technical status and development trends of the existing portland cement system can provide reference for the research and development direction of geothermal cement.

Key words: geothermal well cementing; portland cement systems; performance degradation; anti-corrosion measures; lightweight cement for lost circulation control

0 引言

地热能作为一种分布广泛、储量丰富、供能稳定的清洁可再生能源,有望支撑绿色低碳发展和能源结构转型^[1]。由于干热岩高效开发技术尚不完善,目前我国地热能开发仍以水热型为主^[2-3]。规模化开采的水热型地热资源主要赋存于砂岩和碳酸盐岩热储中。其中,碳酸盐岩热储常因岩溶裂隙发育而具有良好的垂向渗流和水平径流条件,是最具开发潜能的主力储层^[4-5]。钻井是中深层地热能开发的必要手段,高度发育的裂隙和孔洞在保证地层有充分的流动通道的同时也导致钻井施工中易出现漏失、坍塌和井壁失稳等复杂情况^[6]。一方面,钻进中为降低施工成本和钻井风险须采取堵漏措施,在无法建立钻井液循环时,应采用水泥进行堵漏^[7-8]。另一方面,为保证出口水温、提高井筒耐久性,固井环节不可或缺。但地热井固井过程中的高温、高压伴随腐蚀性流体等复杂条件,对传统硅酸盐水泥材料提出了诸多技术挑战。

本文在研究地热水泥面临主要技术挑战的基础上,系统总结了地热井固井硅酸盐水泥体系现有技术策略、效果、存在问题及未来发展趋势。我国地热资源开发正处于蓬勃发展的关键阶段,全面梳理硅酸盐水泥体系的技术现状及发展趋势,可为地热井固井水泥体系的选择及攻关方向提供参考。

1 地热井固井材料的技术难点

我国不同地区地温梯度差异较大,代表性地热井测温曲线如图1所示^[9]。随着技术发展、科学探

索及能源需求的提高,钻探持续向深部地层发展。与油气井相比,地热钻井有以下特点:地温梯度高,埋深变化大;地层破碎而且常不稳定;裂隙高度发育,易发生井漏;地层中常含有腐蚀性流体等^[10]。

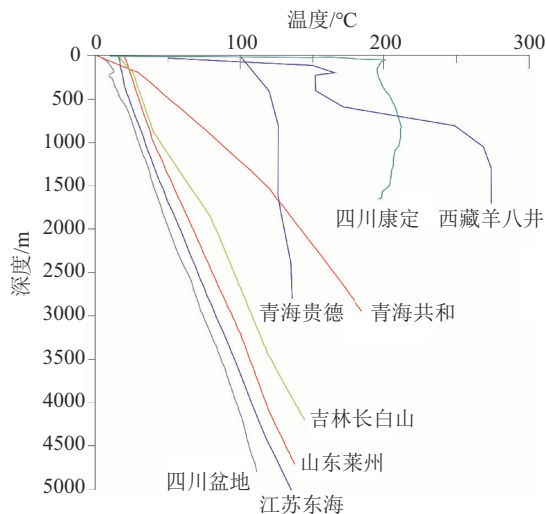


图1 我国代表性地热井测温曲线^[9]

Fig.1 Temperature measurement curve of representative geothermal wells in China

1.1 高温下强度衰退严重

高温下水泥石的强度衰退及结构劣化,一直是困扰深层油气及地热井固井的关键问题^[11]。目前,地热井固井主要采用G级油井水泥,根据文献调查,其抗压强度随养护温度及时间的演变过程如图2所示^[12-16]:(1)水泥石48h养护强度随温度升高呈阶梯式下降;(2)存在110℃与150℃两个强度下降

临界节点;(3)110℃以上水泥强度随养护时间的延长而迅速下降。

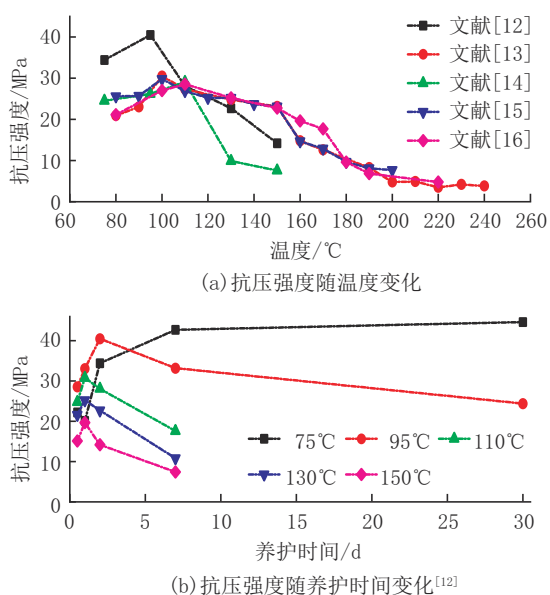


图2 高温下油井水泥抗压强度衰减规律
Fig.2 The reduction of cement compressive strength under high temperature

临界温度以上,水泥石强度严重衰退的同时渗透率大幅度升高,破坏水泥环完整性,导致其封隔地层、保护套管的作用失效,降低地热井的使用寿命。其根本原因是硅酸盐水泥熟料中的常见矿物硅酸二钙(C_2S)、硅酸三钙(C_3S)、铝酸三钙(C_3A)和铁铝酸四钙(C_4AF),在临界温度以下主要水化产物为 $CSH(II)$ 和 C_2SH_2 型水化硅酸钙、氢氧化钙(CH)、钙矾石(AFt)和单硫型水化硫铝酸钙(AFm),微观结构致密、强度较高,当温度超过110℃后,低强度高碱度的 $\alpha-C_2SH$ 和 C_3SH_2 逐渐增多, AFt 和 AFm 则逐渐消失,形成了水化铝酸钙(C_3AH_6)和水石榴石($C_3AS_2H_2$)。其中,强度较低、联结力较差的 $\alpha-C_2SH$ 为粗大的结晶连生体,使水泥石结构局部应力集中和增大,导致水泥石高温强度下降,内部孔隙增多、渗透率提高^[17]。

1.2 地热流体腐蚀

地热流体中常含有: H^+ 、 Cl^- 、 H_2S 、 CO_2 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 等多种离子与气体^[18]。因此,地热井常处于高温高压且富含 CO_2 、 H_2S 的盐水环境中。腐蚀性流体在固井水泥环中泄漏的主要通道如图3所示^[19]。水环境下 CO_2 对水泥石的腐蚀作

用方式大致有淋滤作用、溶蚀作用、碳化收缩作用、高矿化度地层水的协同作用等四种^[20-21]。腐蚀后水泥石的力学行为由两种竞争机制的反应速率决定: $CaCO_3$ 沉淀和 HCO_3^- 的浸出^[22]。地层中通常 CO_2 含量比 H_2S 多很多,在2种气体联合腐蚀条件下,以 CO_2 的腐蚀占主导地位,且 H_2S 与 CO_2 具有一定的竞争和协同效应, H_2S 对水泥石的腐蚀在溶液环境下也更严重^[23]。其协同腐蚀机理包括:(1)与 $Ca(OH)_2$ 发生中和反应,引起水泥石碱度降低而导致 $C-S-H$ 、 AFt 、 AFm 等水化产物分解;(2)腐蚀过程主要发生在孔隙液中,产物晶体的不断生长导致孔隙内产生拉应力,进一步破坏水泥石结构、促进了酸性物质的侵入。除此之外,地层水中的多种腐蚀性离子,如 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 也会加剧酸性物质对水泥石的腐蚀,尤其是 SO_4^{2-} ^[24]。

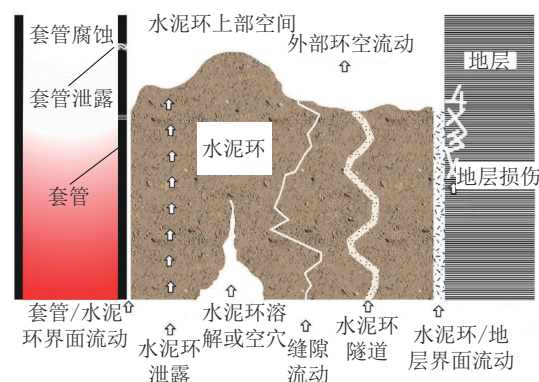


图3 腐蚀性流体在井筒中泄漏的主要通道^[19]
Fig.3 The main channels through which corrosive fluids leak in the wellbore

1.3 破碎地层的堵漏及固井

高温热液型地热资源主要集中在构造板块活跃区,地层裂缝裂隙高度发育,甚至存在厘米级裂缝^[25]。地热储层岩石具有硬度高、研磨性强的特点,同时地层存在破碎和不稳定的特征。而地热井中生产层通常又是漏失层,地层压力低,这对钻井和固井都提出了特殊要求^[10]。在非储层段钻遇大裂隙和溶洞时,发生失返性漏失且依靠棉籽、木屑等惰性堵漏材料无法建立循环时,就需要结合水泥进行联合堵漏。其方式为向钻孔内灌入水泥,待水泥凝固后钻穿水泥塞,在孔内留下薄层的水泥环保护孔壁,实施过程如图4所示^[26-27]。由于裂隙地层承压能力低、漏点多等特点,为保证水泥返高、防止

固井漏失,需要用低密度甚至超低密度($\leq 1.10 \text{ g/cm}^3$)的水泥浆体系来完成层间封隔^[28]。降低水泥浆密度不仅能减少固井时漏失,还可以大幅度提高水泥环的保温能力,有利于提高采出水温度,对地热能的高效开采具有重要意义^[29-30]。

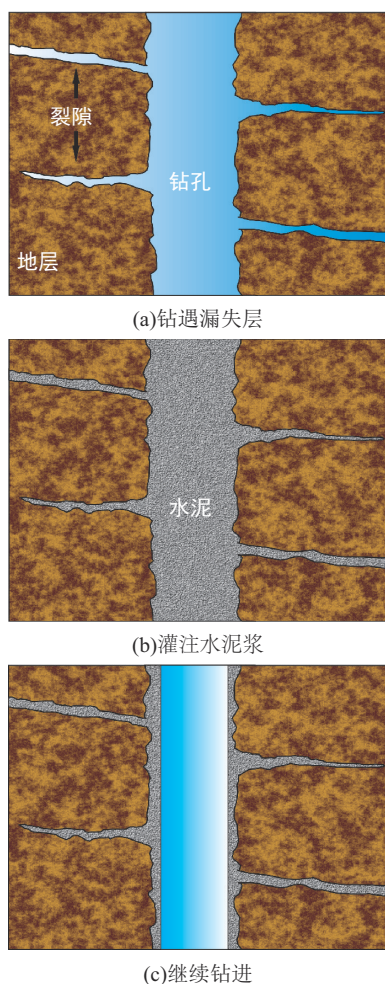


图4 利用水泥封堵破碎地层的操作过程
Fig.4 Operation process of using cement to seal fractured formation

2 硅酸盐水泥体系的研究现状

自19世纪石油工业兴起以来,随钻井深度的提高,固井水泥性能随温度的变化过程开始逐渐受到关注。早期认识是,硅酸盐水泥石的强度在常压下随温度升高而逐渐提高。直至1954年,美国石油协会才发现当温度超过 110°C 时,净浆水泥石强度会出现衰退^[31]。随后十年, 110°C 是油井水泥强度快速衰退转折点的观念逐步确立。1964年,研究人员在探讨 700°F (即 371°C)地热蒸汽井固井材料时,

总结了G级水泥比较适合地热井,添加 $30\%\sim 60\%$ 水泥质量的硅粉是抵抗高温强度衰退及渗透率增加的有效手段^[32]。自此至今,经过数十年的发展,形成了以G级水泥为主的地热井固井水泥体系。

2.1 抗高温水泥体系

由于硅酸盐水泥高温强度衰退的主要原因是低强度高碱度水化产物 $\alpha\text{-C}_2\text{SH}$ 和 C_3SH_2 的逐渐增多。通过掺入 SiO_2 降低水泥总钙硅比(C/S),促使高温下水化产物转变为性能相对较好的雪硅钙石($\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_{5.5}$)和硬硅钙石($\text{C}_6\text{S}_6\text{H}$),一直是克服水泥石高温性能衰退的主要手段。

二氧化硅的添加通常是以物理粉磨方式制备不同粒径的硅粉/砂,形成粗细搭配的高温强度稳定剂。充分利用粗硅砂对强度衰退的抑制和细硅粉的水硬活性,共同构成具有晶相结构稳定水化产物的耐高温水泥体系。20世纪90年代,安策^[12]、杨远光等^[14]就指出硅砂比例应视水泥类型、养护条件等确定。21世纪初,张景富等^[33]明确了水泥石中硅砂的较优加量为 $30\%\sim 40\%$ 。路飞飞等^[34]提出,粗硅粉有利于抑制长期强度衰退,而细硅粉活性更强,能增加水泥石早期抗压强度,降低水泥石渗透率。Krakowiak等^[35]的研究表明,细硅砂可以抑制粗硅砂的溶解,进而可以在水泥石中形成更小的孔隙。而刘会斌等^[36]则建立了不同温度下硅粉使用标准(包括掺量、纯度、粒径)。但随着钻探持续向深部地层发展,井底温度超过 200°C 的高温深井、超深井逐渐增多。此时,加砂水泥石中原本性能相对较好的雪硅钙石($\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_{5.5}$)为主的水化产物体系,转变为硬硅钙石($\text{C}_6\text{S}_6\text{H}$)、硅灰石($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$),并释放出 SiO_2 ,即硅溶出。该过程受环境中的硅饱和程度影响,因此可提高硅砂比例至 65% 甚至 70% ,提高硅饱和程度以减少硅溶出^[37-38]。

与常用物理粉磨硅粉、硅砂中的晶体 SiO_2 不同,更加活泼、平均粒径更小的无定型 SiO_2 ,广泛存在于硅灰(150 nm)、气相二氧化硅(100 nm)、纳米二氧化硅($<50 \text{ nm}$)等形式中。早期研究中,作为铁合金生产中分离出副产品的微硅(硅灰),因其火山灰活性较大首先受到关注。20世纪80年代,Grabowski等^[39]对比了硅灰与硅粉对水泥石孔隙率及强度的影响。近年来,平均粒径更小的气相二氧化硅、粉末及溶胶态的纳米 SiO_2 ,因其对水泥微孔隙的填充及在水泥矿物表面的吸附,可缓解水泥水

化产物的高温脱水,也逐渐被加以利用^[40-43]。其他富含非晶态 SiO₂的物质如稻壳灰、废弃玻璃粉等,也具有抑制水泥石高温强度衰退的作用^[44-45]。但为充分利用无定型 SiO₂的火山灰活性,材料比表面积通常更高,对水泥浆工作性能不利。因此,从不同晶态硅源的高温溶解控制机制差异性^[46]及保证水泥浆工作性能出发,地热水泥中硅源应采用不同粒径的晶体硅为主、辅以少量非晶硅。

此外,针对高 SiO₂含量水泥体系在超高温和长龄期下仍无法从根本上解决水化产物的转变及性

能劣化问题,抑制高温强度衰退的其他外加剂,如高温缓凝剂^[46]、高岭土及其煅烧产物^[47]、促凝剂^[48]等,以及特种增强材料,如高温增强材料^[49]、防衰退材料^[50]、强度稳定剂^[51]等,成为最新的研究热点。通过外加剂高温下对水化产物转变的抑制作用,其自身的相变与脱水吸热分解反应,其活性氧化物对水泥石表面的附着及桥联填充作用,可制备最高适用于 350 ℃的高温硅酸盐水泥体系。

代表性的高温强度抑制剂见表 1。

表 1 代表性的高温强度衰退抑制剂种类、加量及效果汇总					
Table 1 Summary of representative types, dosage, and effects of high temperature strength decline inhibitors					
种 类	发表时间	添加剂种类及加量	养护时间/d	温度/℃	强度/MPa
硅粉与硅砂	2002	30% 硅砂 ^[33]	2	110	20~30
		16%0.09 mm+24%0.18 mm 硅粉 ^[34]		145	18.4
	2016	16%0.09 mm+24%0.18 mm 硅粉 ^[34]	1	155	20.6
		22%0.18 mm+35%0.125 mm 硅粉 ^[34]		145	19.5
		22%0.18 mm+35%0.125 mm 硅粉 ^[34]		155	21
无定型 SiO ₂	2019	0.5% 纳米 SiO ₂ 粉末+0.7% 玄武岩纤维 ^[40]	2	150	12~14
		0.3% 纳米 SiO ₂ 粉末+1.0% 玄武岩纤维 ^[40]		200	8~10
	2019	2% 纳米 SiO ₂ 溶胶 ^[41]	1	150	21.56
	2018	40% 稻壳灰 ^[44]	7	300	22.11
	2022	40%45 μm 废弃玻璃粉 ^[45]	180	150	31.85
其他外加剂	2012	3% 无氯促凝剂 CN-1+40% 石英砂 ^[48]	7	315	20.21
	2019	10% 防衰退材料+30% 石英砂 ^[49]	28	250	56.1
	2020	10% 高温特种增强材料+50%200 目石英砂 ^[50]	7	350	41.3
	2020	40% 自研高温稳定剂 ^[51]	2	450	16.9

2.2 耐腐蚀水泥体系

长久以来,水泥防腐都是油气和地热井固井领域的重要技术问题,对水泥石受 CO₂和 H₂S 等介质腐蚀的机理也逐渐明确;防腐材料从无机富硅材料、无机/有机惰性防腐材料,逐步发展至与水泥体系相容性更好的水性胶乳、酸响应型胶乳,以及多元复合的防腐剂体系。

水泥石易受 CO₂等酸性介质腐蚀的主要原因,同样是体系内高 Ca 含量导致的水化产物具有高碱性。因此,加入活性富硅质材料,如微硅、硅粉、粉煤灰、矿渣和偏高岭土等,降低钙硅比以抑制高碱度水化产物生成以及火山灰活性物质水化过程对 Ca(OH)₂的消耗,可进一步降低水泥石碱度^[52]。而通过添加消泡剂提高浆体密度、掺入碳纳米管

(CNTs)抑制有害孔(大于 0.1 μm)的产生,或加入膨润土等无机超细惰性填充材料,可通过降低水泥石渗透率减缓酸性物质向基体内的渗透腐蚀^[53-54]。

有机超细惰性材料(丁苯胶乳、环氧树脂等)在纳米级颗粒的填充效应基础上,伴随水泥水化反应进行,环绕水泥颗粒的水被消耗、聚合物乳液局部体积分数升高而聚集,形成的空间网络状非渗透薄膜包裹水泥基体^[55-56],可避免水泥颗粒与腐蚀介质的接触,从而有效减小腐蚀深度。此外,为解决聚合物乳液在高钙离子浓度下产生的破乳现象并减少固化剂的使用,研究人员利用表面活性剂复配、非离子型乳化剂、接枝改性和自交联反应等多种方式开展了聚合物乳液的亲水改性研究^[57-59]。并另辟蹊径研发了酸响应型水溶性高分子乳液防腐剂,该

乳液在酸性条件下发生缩聚反应,生成不溶于水、耐酸碱、具有网络状结构的固体膜,以屏蔽酸性介质^[60]。

目前,充分利用无机材料对水泥碱度的降低以及有机聚合物的成膜填充作用,进行协同防腐的有机/无机复合防腐体系发展迅速。其中,比较有代表性的是纳米 SiO₂/胶乳复合体系,如无定型 SiO₂/

胶乳/超细沥青复合体系^[61]及纳米 SiO₂/丁苯胶乳/环氧树脂复合防腐乳剂^[62]。另外,丙烯酸类聚合物微球(PSAC)、聚合物与羟基磷灰石复配的防腐体系,也可提高水泥抗腐蚀性能。

代表性的腐蚀测试条件、水泥石性能演变以及防腐措施数据见表2。

表2 典型实验条件、腐蚀深度、力学性能变化规律以及采用的防腐措施

Table 2 Typical experimental conditions, corrosion depth, changes in mechanical properties, and anti-corrosion measures

防腐材料	腐蚀环境条件(分压;温度;时间)	纯水泥(对照组)			改 性 后		
		腐蚀深度/mm	强度衰减/%	渗透率变化/%	腐蚀深度/mm	强度衰减/%	渗透率变化/%
0.03% 碳纳米管(CNTs) ^[54]	总压 20.7 MPa; 60 °C; 60 d		26.25	30.82		3.65	0.94
12% 胶乳(SBR) ^[55]	总压 16 MPa, CO ₂ 分压 4.0~5.5 MPa; 150 °C; 21 d	5	29.19	37.67	<2	0.61	17.6
水性环氧乳液 ^[57]	CO ₂ 、H ₂ S 混合气体, 21 MPa; 160 °C; 90 d	基体 2/3	51.0	470	基体 1/5	3.4	0
AMPS-水性环氧树脂 ^[58]	湿法, CO ₂ 分压 8 MPa; 90 °C; 30 d	严重	50.3		<2	18.2	
酸环境响应型聚合物 ^[60]	总压 10 MPa, CO ₂ 分压 3 MPa; 90 °C; 60d		24.36	36.43		9.12	-15.01
8% HTHP-CRA(纳米 SiO ₂ :丁苯胶乳:环氧树脂=1:4:1) ^[62]	总压 56 MPa, CO ₂ 分压 7.3 MPa, H ₂ S 分压 0.37 MPa; 150 °C; 120 d, 0.4 MPa NaCl 溶液	贯穿	37.94	8.52	5.4	12.92	0.59

2.3 低密度水泥体系

低密度水泥被广泛应用于油气领域低压易漏地层及长封固段的固井作业中,是降低静液压力防止漏失、减少储层污染的重要手段^[63]。但目前针对地热特殊环境的低密度水泥浆体系仍然较少。20世纪80年代,美国Brookhaven实验室最早开始利用表面活性剂和多类型中空微球,结合硅酸盐水泥、高铝水泥和磷酸钙水泥等制备了轻质地热水泥^[64-65]。国内郑秀华课题组^[66-68]自2013年起,先后利用膨润土、粉煤灰、漂珠、空心玻璃微珠等,与硅粉共同形成了多套密度在1.0~1.4 g/cm³范围内可调的低密度地热水泥浆体系。李图^[69]针对肯尼亚地热井固井中温度特别高、裂缝特别发育、回填次数特别多的复杂局面,筛选粉煤灰制备了高温低密度防漏失水泥浆体系。

我国油气井固井领域对低密度水泥体系的研究始于20世纪60年代,但此后20年的研究进展不大,1980年后才得到广泛地研究和大面积推广应用^[70]。近年来,随着油气勘探开发向深层及复杂地

层发展,深井与超深井数量增加,多压力层系、长封固段和低压易漏地层的固井施工中水泥浆的漏失低返更加突出,低密度、超低密度(≤ 1.10 g/cm³)固井技术日益成熟。目前降低水泥浆密度的主要方法及其优缺点如下:

(1)加入膨润土、粉煤灰等吸水或增黏物质,增大水灰比、控制自由水。水泥浆密度取决于水灰比大小,而不是减轻剂本身密度大小或掺量多少。其优点是成本低,且其密度不会随压力的增大而改变。但因水灰比大导致强度发展较慢、失水量难控制、渗透率高,且密度调节有限(≥ 1.40 g/cm³)。

(2)加入漂珠、空心玻璃微珠、玻化微珠等减轻剂,依靠密闭中空材料本身降低浆体密度。相同密度下体系水灰比小,因而游离液含量和渗透率较低。但除成本较高的人造空心玻璃微珠抗压强度足够外,其他减轻剂在高压下易破碎难以保持完整,且易出现微珠上浮、水泥沉降的问题。

(3)充气泡沫水泥浆。包含通过气泵注氮气的机械充气法和利用化学试剂反应产生气体的化学

发泡法两种^[71]。浆体密度与充气量直接相关,水泥浆井下密度可降至 $0.5\sim 0.6\text{ g/cm}^3$,但受压力和温度的影响较大,一般只有在压力低于 0.5 MPa 时才能保证其低密度,因此更适用于浅表层高漏失、大裂缝地层的固井。

鉴于低密度水泥浆普遍存在的高压条件下密度难保持、稳定性差、失水量大、流变性差、强度发展缓慢和体积收缩严重等缺点,多元复合减轻体系应运而生。如漂珠/粉煤灰/硅灰复合表面活性剂的减轻体系^[72],漂珠/微细水泥体系^[73],漂珠/微硅体系^[74],空心微珠/微硅/粉煤灰体系^[75],玻璃微珠/漂珠/微硅/粉煤灰/矿渣多元复合体系^[76]。图5中总结了多种单一减轻剂与多元复合减轻剂形成水泥浆体系的密度、养护温度与48 h抗压强度之间的对应关系。总体来说,相对于单一减轻剂体系,相同养护条件下多元复合体系更容易在较低的密度范围内达到相对较高的抗压强度。

3 面临的问题及未来发展趋势

3.1 目前面临的问题

现有抗高温、耐腐蚀及低密度水泥浆体系研究为我国高温油气井固井材料的设计及开发提供了重要支撑和实践指导。然而,针对地热井固井中的诸多挑战仍存在以下几方面不足:

(1)研究中主要考虑了服役环境温度、石英砂级配及掺量、水化产物种类对水泥石高温性能的影响,而封固段岩石成分和地层流体对高温水泥石中硅溶出过程的影响并未考虑。

(2)研究主要探索了腐蚀环境下水泥本体的性能劣化规律及机理,而腐蚀引起胶结二界面处的泄露危害不容忽视。并且,此前测试多数建立在静态腐蚀条件下,欠缺对井底富含 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 耦合多离子溶液的化学腐蚀和流体冲蚀作用的综合考虑。

(3)现有低密度水泥主要通过降低浆体液柱压力,防止高压引起地层破裂及储层损害,对堵漏作用考虑不足,对裂缝性地层的适用性还有待提高。

3.2 未来发展方向

针对水泥石高温强度衰退的现象,应着重开展高温水泥石强度衰退机理的主控因素分析,综合地层岩石成分及地下水情况,考虑封固段地层矿物硅含量和水环境,以特种增强材料为主,进行新型强度衰退抑制剂的研发。

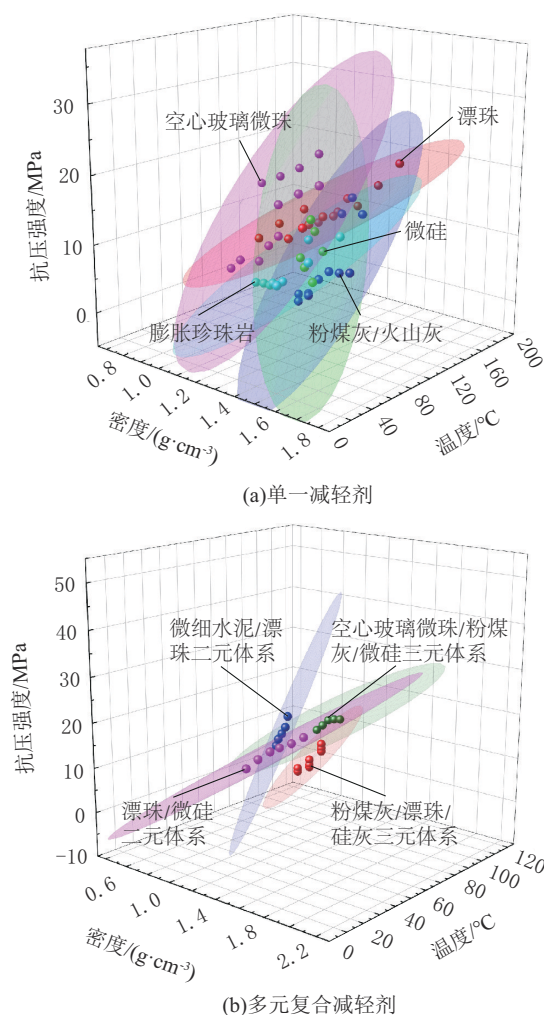


图5 轻质水泥浆体系的密度-温度-强度关系

Fig.5 Density-temperature-strength plot of lightweight cement slurry system

腐蚀测试中应分析岩石表面存在泥饼引起收缩及开裂,以及储层中方解石、白云石等碳酸盐矿物与酸性介质反应,导致的固井胶结界面性能劣化现象。建立动态冲刷实验系统,开展高温高压富含酸性介质的多相腐蚀条件下,水泥石本体及胶结界面的性能演变规律、受腐蚀机理及多元复合的泄露防治措施研究。

地热井固井复杂环境下低密度水泥浆体系研制的要点应包含:(1)在保证低密度的同时,优先选择承压能力高的减轻剂;(2)在紧密堆积理论的基础上,利用材料的填充作用、级配调节作用和水化作用共同提高体系的力学性能;(3)在裂缝发育的严重漏失层,应增加纤维等堵漏材料,利用其堆积和架桥作用在井壁形成网状结构,进而有效封堵;

(4)充分考虑地热井固井腐蚀环境,提高轻质水泥的耐腐蚀性能。最终形成一套具有密度低、流变性好、稳定性强、滤失量小、强度高的耐高温抗腐蚀轻质地热井固井水泥浆体系。

4 结论

相对于油气井固井,地热井固井水泥主要面临高温强度衰退、高温高压多离子溶液腐蚀、地层漏失的三大技术挑战,目前仍普遍采用G级油井水泥为主的材料体系。本文总结了针对硅酸盐水泥抗高温、防腐蚀及低密度技术措施的研究现状、面临的问题及未来发展趋势,得出以下主要结论。

为克服水泥石的高温性能劣化,最常用的手段是将由晶体 SiO_2 组成的硅粉及硅砂掺入油井水泥中,通过降低体系钙硅比、改变水化产物类型以减缓强度衰退。而多种形式的活性无定形 SiO_2 、耐高温特种增强材料和缓凝剂等是目前的研究热点。

为减少与腐蚀介质接触、改变水化产物耐腐蚀性能及提高水泥基质致密性,水泥防腐剂已从单一的有机/无机惰性材料等,发展为水性胶乳、酸响应型胶乳以及有机/无机复合多元防腐体系。

低密度、超低密度($\leq 1.10 \text{ g/cm}^3$)固井技术日益成熟,但通过吸水增黏物质、低密度减轻剂或充气泡沫等形成的轻质水泥体系,仍存在密度保持难、强度发展缓慢、稳定性差等缺点。

未来应开展超高温下水泥石强度衰退机理的主控因素分析及新型强度衰退抑制剂的研发;开展多相动态冲刷腐蚀条件下水泥石本体及胶结界面的性能演变规律、受腐蚀机理及多元复合的泄露防治措施研究;综合减轻剂的高强低密度、粒径级配、火山灰活性,辅以外加剂、纤维等,形成性能优良的耐高温抗腐蚀轻质地热井固井水泥体系。

参考文献(References):

- [1] 李德威,王焰新.干热岩地热能研究与开发的若干重大问题[J].地球科学,2015,40(11):1858-1869.
LI Dewei, WANG Yanxin. Major issues of research and development of hot dry rock geothermal energy [J]. Earth Science, 2015, 40(11): 1858-1869.
- [2] 余春梅,张超,杨宇,等.川西地热资源综合梯级利用[J].天然气勘探与开发,2021,44(3):102-111.
YU Chunmei, ZHANG Chao, YANG Yu, et al. Cascade utilization of geothermal resources in western Sichuan province [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2021, 44 (3) :

- 102-111.
- [3] 李根生,武晓光,宋先知,等.干热岩地热能开采技术现状与挑战[J].石油科学通报,2022,7(3):343-364.
LI Gensheng, WU Xiaoguang, SONG Xianzhi, et al. Status and challenges of hot dry rock geothermal resource exploitation [J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7(3): 343-364.
- [4] 庞忠和,庞菊梅,孔彦龙,等.大型岩溶热储识别方法与规模化可持续开采技术[J].科技促进发展,2020,16(3):299-306.
PANG Zhonghe, PANG Jumei, KONG Yanlong, et al. Large-scale karst thermal storage identification method and large-scale sustainable mining technology [J]. Innovation in China, 2020, 16(3): 299-306.
- [5] 汪集暘,庞忠和,孔彦龙,等.我国地热清洁取暖产业现状与展望[J].科技促进发展,2020,16(3):294-298.
WANG Jiyang, PANG Zhonghe, KONG Yanlong, et al. Status and prospects of geothermal clean heating industry in China [J]. Science & Technology for Development, 2020, 16 (3) : 294-298.
- [6] 蒋欧,曹伶,郑秀华.温敏型形状记忆聚合物及其在雄安新区热储钻进的应用展望[J].钻探工程,2023,50(S1):291-298.
JIANG Ou, CAO Ling, ZHENG Xiuhua. Temperature sensitive shape memory polymer and its application expectations during geothermal reservoir drilling in Xiong'an new area [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 291-298.
- [7] Finger J T, Blankenship D A. Handbook of best practices for geothermal drilling: ND2011-6478 [R]. Albuquerque, NM: Sandia National Lab, 2012.
- [8] 钱洪强,王娟,孙玉东,等.天津地区地热钻井中地层漏失分析及堵漏方法选择[J].地质调查与研究,2016,39(3):226-230.
QIAN Hongqiang, WANG Juan, SUN Yudong, et al. Analysis of leakage formation and selection of leaking stoppage methods in geothermal well drilling in Tianjin area [J]. Geological Survey and Research, 2016, 39(3): 226-230.
- [9] 庞忠和,罗霖,程远志,等.中国深层地热能开采的地质条件评价[J].地学前缘,2020,27(1):134-151.
PANG Zhonghe, LUO Ji, CHENG Yuanzhi, et al. Evaluation of geological conditions for the development of deep geothermal energy in China [J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27 (1) : 134-151.
- [10] 李亚琛,段晨阳,郑秀华.高温地热钻井的最佳实践[J].地质与勘探,2016,52(1):173-181.
LI Yachen, DUAN Chenyang, ZHENG Xiuhua. Best practices for High-Temperature geothermal drilling [J]. Geology and Exploration, 2016, 52(1): 173-181.
- [11] 张宏军,张明昌,刁胜贤,等.高温抗盐水泥浆体系在胜利油田深探井的应用[J].钻井液与完井液,2005,22(S1):75-77.
ZHANG Hongjun, ZHANG Mingchang, DIAO Shengxian, et al. Application of a high temperature and salt-resisting cement slurry system in deep exploration wells of Shengli oilfield [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005, 22(S1): 75-77.
- [12] 安策.G级水泥在深井固井中的应用研究[J].钻井液与完井液,1995,8(3):39-42.
AN Ce. Cementing deep well with class G cement [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 1995, 8(3): 39-42.
- [13] 高莉莉.超深井固井水泥石性能变化规律研究[D].大庆:东

- 北石油大学, 2010.
- GAO Lili. A study on the properties of oil cement stone in ultra-deep well[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2010.
- [14] 杨远光, 陈大钧. 高温水热条件下水泥石强度衰退的研究[J]. 石油钻采工艺, 1992(5):33-39.
- YANG Yuanguang, CHEN Dajun. Study on strength decline of cement stone under high temperature hydrothermal conditions [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1992(5):33-39.
- [15] 杨智光, 崔海清, 肖志兴. 深井高温条件下油井水泥强度变化规律研究[J]. 石油学报, 2008, 29(3):435-437.
- YANG Zhiguang, CUI Haiqing, XIAO Zhixing. Change of cement stone strength in the deep high temperature oil well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3):435-437.
- [16] 马丁, 刘佳琳, 饶鸿飞. 热采井抗高温长效水泥固井技术与现场应用[J]. 内蒙古石油化工, 2014(17):80-84.
- MA Ding, LIU Jialin, RAO Hongfei. The technology research and field application of resistance to high temperature and long-acting cementing[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2014(17):80-84.
- [17] 张景富. G级油井水泥的水化硬化及性能[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- ZHANG Jingfu. Hydration, hardening and properties of class G oilwell cement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.
- [18] Nogara J, Zarrouk S J. Corrosion in geothermal environment; Part 1: Fluids and their impact[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82, Part 1:1333-1346.
- [19] 窦浩宇. 二氧化碳注入及封存条件下井筒水泥结构完整性研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
- DOU Haoyu. Study on well cement structure integrity under conditions of CO₂ injection and storage [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2022.
- [20] 严焱诚, 陈大钧. 油气井中CO₂的腐蚀防护与综合利用[J]. 全面腐蚀控制, 2003, 17(6):22-24.
- YAN Yancheng, CHEN Dajun. The corrosion protection and comprehensive utilization of CO₂ in oil gas field[J]. Total Corrosion Control, 2003, 17(6):22-24.
- [21] 陈杰. CCUS地质封存中CO₂对油井水泥碳化腐蚀研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- CHEN Jie. Investigation of carbonation degradation of oil well cement for CCUS geological sequestration[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2020.
- [22] Omosebi O, Maheshwari H, Ahmed R, et al. Degradation of well cement in HPHT acidic environment: Effects of CO₂ concentration and pressure[J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 74:54-70.
- [23] 郭小阳, 辜涛, 李早元, 等. 水湿环境下硫化氢对固井水泥石的腐蚀机理[J]. 天然气工业, 2015, 35(10):93-98.
- GUO Xiaoyang, GU Tao, LI Zaoyuan, et al. Corrosion mechanism of Hydrogen sulfide on well cement under water wet environments[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(10):93-98.
- [24] 吴广军. CO₂埋存条件下的油井水泥石腐蚀机理研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
- WU Guangjun. Study on corrosion mechanism of oil well cement under CO₂ storage conditions[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2020.
- [25] 光新军, 王敏生. 高温地热高效开发钻井关键技术[J]. 地质与勘探, 2016, 52(4):718-724.
- GUANG Xinjun, WANG Minsheng. Key drilling technologies for efficient development of High-Temperature geothermal resources[J]. Geology and Exploration, 2016, 52(4):718-724.
- [26] 申岚, 谭慧静, 宋柏睿, 等. 地热井暂堵型水泥基透水材料的试验研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(S1):243-248.
- SHEN Lan, TAN Huijing, SONG Bairui, et al. Research and development of cement-based temporary plugging permeable material[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1):243-248.
- [27] 王胜, 欧兴贵, 解程超, 等. 钻井利器之“护壁堵漏材料”[J]. 钻探工程, 2024, 51(3):157-161.
- WANG Sheng, XingguiOU, XIE Chengchao, et al. The story of a drilling weapon: wall protection and plugging materials[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3):157-161.
- [28] 吴天乾, 宋文宇, 谭凌方, 等. 超低密度水泥固井质量评价方法[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(1):65-70.
- WU Tianqian, SONG Wenyu, TAN Lingfang, et al. Evaluation method for cementing quality of ultra-low-density cement [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(1):65-70.
- [29] 张丰琰, 李立鑫. 地热井固井水泥石传热性能研究现状及展望[J]. 钻探工程, 2021, 48(12):54-64.
- ZHANG Fengyan, LI Lixin. Research status and prospect of thermal transfer performance of cement in geothermal wells[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(12):54-64.
- [30] 曹灶开, 谭慧静, 廖麟祥, 等. 表面改性玻化微珠增强地热保温固井水泥研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1):202-207.
- CAO Zaokai, TAN Huijing, LIAO Linxiang, et al. Research on surface modified vitrified microbeads for enhanced geothermal insulation cement[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1):202-207.
- [31] Swayze M. Effect of high temperature on strength of oil-well cements (mid-continent district study committee on cementing practices and testing of oil-well cements)[J]. Drilling and Production Practice, 1954; API-54-072, .
- [32] Ostroot G W. Cementing geothermal steam wells[J]. Journal of Petroleum Technology, 1964, 16(12):1425-1429.
- [33] 张景富, 俞庆森, 徐明, 等. G级油井水泥的水化及硬化[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(2):167-171, 177.
- ZHANG Jingfu, YU Qingsen, XU Ming, et al. Hydration and hardening of class G oilwell cement[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2002, 30(2):167-171, 177.
- [34] 路飞飞, 王永洪, 刘云, 等. 顺南井区高温高压防气窜尾管固井技术[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(2):88-91, 95.
- LU Feifei, WANG Yonghong, LIU Yun, et al. Anti-channeling HTHP Liner Cementing Technologies Used in Block Shunnan [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(2):88-91, 95.
- [35] Krakowiak K J, Thomas J J, James S, et al. Development of silica-enriched cement-based materials with improved aging resistance for application in high-temperature environments [J]. Cement and Concrete Research, 2018, 105:91-110.
- [36] 刘会斌, 李建华, 庞合善, 等. 青海共和盆地干热岩GR1井超高温固井水泥浆技术[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(2):

- 202-208.
- LIU Huibin, LI Jianhua, PANG Heshan, et al. Ultra-high Temperature cement slurry for cementing well GR1 penetrating hot dry rock formations in Gonghe basin, Qinghai[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(2):202-208.
- [37] Reddy B R, Zhang J L, Ellis M. Cement strength retrogression issues in offshore deep water applications-Do we know enough for safe cementing[C]//Paper presented at the Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA, 2016: OTC-27012-MS.
- [38] 庞学玉, 秦建鲲, 王治国, 等. 深层超高温水泥浆体配方及其强度衰退机理[J]. *天然气工业*, 2023, 43(7):90-100.
- PANG Xueyu, QIN Jiankun, WANG Zhiguo, et al. Formula of cementing slurry system for ultra-high temperature conditions of deep wells and its strength retrogression mechanism[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(7):90-100.
- [39] Grabowski E, Gillott J E. The effect of initial curing temperature on the performance of oilwell cements made with different types of silica[J]. *Cement and Concrete Research*, 1989, 19(5):703-714.
- [40] 蒋贵. 热储层开采纳米SiO₂-玄武岩纤维复合水泥基固井材料研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- JIANG Gui. Nano SiO₂-basalt fiber composite cement-based cementing materials: application to thermal reservoir mining[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [41] 王成文, 陈新, 周伟, 等. 纳米SiO₂溶胶缓解油井水泥高温强度衰退的作用机理[J]. *天然气工业*, 2019, 39(3):72-79.
- WANG Chengwen, CHEN Xin, ZHOU Wei, et al. Working mechanism of nano-SiO₂ sol to alleviate the strength decline of oil well cement under high temperature[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(3):72-79.
- [42] 蒋国盛, 郑少军, 代天, 等. 纳米二氧化硅在固井水泥浆中的应用研究进展[J]. *钻探工程*, 2021, 48(1):68-74.
- JIANG Guosheng, ZHENG Shaojun, DAI Tian, et al. Research status of nano-silica application in well cementing slurry[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(1):68-74.
- [43] 王胜, 吴丽钰, 蒋贵, 等. 深孔纳米复合水泥基护壁堵漏材料研究[J]. *钻探工程*, 2021, 48(12):7-13.
- WANG Sheng, WU Liyu, JIANG Gui, et al. Nano composite cement based wellbore protection and plugging materials for deep drilling[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(12):7-13.
- [44] Vidal A V, Araujo R G S, Freitas J C O. Sustainable cement slurry using rice husk ash for high temperature oil well[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 204:292-297.
- [45] 李成, 耿晨梓, 代丹, 等. 废弃玻璃粉对水泥石高温抗压强度和微观结构的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(9):3219-3226.
- LI Cheng, GENG Chenzi, DAI Dan, et al. Effect of waste glass powder on high temperature compressive strength and microstructure of cement stone[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41(9):3219-3226.
- [46] 陈大钧. LC缓凝剂对高温下水泥石强度的影响[J]. *西南石油学院学报*, 1992, 14(3):87-93.
- CHEN Dajun. Effect of LC retarder on strength of cement at high temperature[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1992, 14(3):87-93.
- [47] 高元, 李长江, 刘仍光. 超高温井固井水泥浆体系研究与应用[J]. *钻探工程*, 2025, 52(1):109-114.
- GAO Yuan, LI Xiaojiao, LIU Rengguang. Study on cement slurry system in ultra-high temperature well[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(1):109-114.
- [48] 李早元, 关素敏, 谢鹏, 等. 热采井固井水泥无氯促凝剂CN-1作用机理研究[J]. *油田化学*, 2012, 29(4):394-397.
- LI Zaoyuan, GUAN Sumin, XIE Peng, et al. Study on the effect and mechanism of non-chlorine coagulant in heavy crude oil thermal wells cementing[J]. *Oilfield Chemistry*, 2012, 29(4):394-397.
- [49] 于永金, 丁志伟, 张弛, 等. 抗循环温度210℃超高温固井水泥浆[J]. *钻井液与完井液*, 2019, 36(3):349-354.
- YU Yongjin, DING Zhiwei, ZHANG Chi, et al. A cement slurry used at ultra-high circulation temperature of 210 °C[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2019, 36(3):349-354.
- [50] 张华, 靳建洲, 刘明涛, 等. 稠油热采井抗350℃高温硅酸盐基水泥浆[J]. *钻井液与完井液*, 2020, 37(3):363-366.
- ZHANG Hua, JIN Jianzhou, LIU Mingtao, et al. A 350 °C high temperature silicate cement slurry used in cementing heavy oil thermal production wells[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(3):363-366.
- [51] 刘景丽, 彭松, 何武, 等. 一种油井水泥石高温稳定剂[J]. *钻井液与完井液*, 2020, 37(3):367-370.
- LIU Jingli, PENG Song, HE Wu, et al. A high temperature stabilizer for set cement[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(3):367-370.
- [52] Bu Y H, Du J P, Guo S L, et al. Properties of oil well cement with high dosage of metakaolin[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 112:39-48.
- [53] Costa B L S, Freitas J C O, Araujo R G S, et al. Analysis of different oil well cement slurry formulations exposed to a CO₂-rich environment[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2021, 51:101636.
- [54] 窦倩, 王涛, 张书勤, 等. 碳纳米管固井水泥复合材料抗腐蚀及力学性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(11):3703-3711.
- DOU Qian, WANG Tao, ZHANG Shuqin, et al. Research on corrosion resistance and mechanical properties of Carbon nanotubes reinforced cement-based composites[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(11):3703-3711.
- [55] 周仕明, 王立志, 杨广国, 等. 高温环境下CO₂腐蚀水泥石规律的实验研究[J]. *石油钻探技术*, 2008, 36(6):9-13.
- ZHOU Shiming, WANG Lizhi, YANG Guangguo, et al. Researches of CO₂ corrosion to cement stone at high temperature[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2008, 36(6):9-13.
- [56] 于林, 谭慧静, 任阳, 等. 三高条件对弹性水泥浆性能的影响及短期腐蚀机理[J]. *钻井液与完井液*, 2023, 40(2):222-232.
- YU Lin, TAN Huijing, REN Yang, et al. Study on the influence of elastic toughness cement slurry performance and short-term corrosion mechanism under HPHTHS conditions[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2023, 40(2):222-232.
- [57] 代丹, 罗宇维, 赵琥, 等. 油气田防腐固井用水性环氧乳液的制备及应用研究[J]. *涂料工业*, 2016, 46(6):17-22.
- DAI Dan, LUO Yuwei, ZHAO Hu, et al. Preparations of waterborne epoxy emulsion for anticorrosive cementing slurry in

- oil-gas field [J]. Paint & Coatings Industry, 2016, 46 (6): 17-22.
- [58] 杨启贞. 油井水泥防腐用水性树脂 A-E44 的制备及性能[J]. 合成化学, 2021, 29(11): 939-944.
- YANG Qizhen. Preparation and properties of waterborne epoxy resin A-E44 for oil well anticorrosion [J]. Chinese Journal of Synthetic Chemistry, 2021, 29(11): 939-944.
- [59] 严海兵, 王纯全, 尧艳, 等. 自交联水性环氧树脂的合成及其对油井水泥耐 CO_2 - H_2S 腐蚀性能的强化作用[J]. 合成化学, 2022, 30(12): 930-936.
- YAN Haibing, WANG Chunquan, YAO Yan, et al. Synthesis of self-crosslinking waterborne epoxy resin and its strengthening effect on CO_2 - H_2S corrosion resistance of oil well cement [J]. Chinese Journal of Synthetic Chemistry, 2022, 30(12): 930-936.
- [60] 彭志刚, 张健, 冯茜, 等. 环境响应型聚合物对水泥石抗 CO_2 腐蚀性能的影响[J]. 石油学报, 2018, 39(6): 703-711.
- PENG Zhigang, ZHANG Jian, FENG Qian, et al. Effects of environmental responsive polymer on the anti- CO_2 corrosion performance of set cement [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(6): 703-711.
- [61] Yang Y A, Yuan B, Wang Y Q, et al. Carbonation resistance cement for CO_2 storage and injection wells [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 146: 883-889.
- [62] Xu B H, Yuan B, Wang Y Q, et al. H_2S - CO_2 mixture corrosion-resistant Fe_2O_3 -amended wellbore cement for sour gas storage and production wells [J]. Construction and Building Materials, 2018, 188: 161-169.
- [63] 刘璐, 李明, 郭小阳. 一种新型低密度矿渣固井液[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(6): 68-72.
- LIU Lu, LI Ming, GUO Xiaoyang. A new low density slag cementing slurry [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(6): 68-72.
- [64] Sugama T, Carciello N. Sodium metasilicate-modified lightweight high alumina cements for use as geothermal well-cementing materials [J]. Advanced Cement Based Materials, 1996, 3(2): 45-53.
- [65] SUGAMA T, LIPFORD B. Hydrothermal light-weight Calcium phosphate cements: use of polyacrylonitrile-shelled hollow microspheres [J]. Journal of Materials Science, 1997, 32(13): 3523-3534.
- [66] 张新明. 西藏高温地热井低密度固井水泥研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- ZHANG Xinming. Research on lightweight cements for high temperature geothermal wells in Tibet [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2013.
- [67] 冯建月. 高温地热井微珠超低密度水泥的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- FENG Jianyue. Research on ultra light weight hollow glass microspheres cement for high temperature geothermal wells [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2014.
- [68] 周丹. 高温地热井泡沫水泥的实验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- ZHOU Dan. Study on foamed cement for high temperature geothermal wells [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2015.
- [69] 李图. 肯尼亚地热井固井水泥浆体系研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
- LI Tu. Research on the cementing slurry system in Kenya's geothermal wells [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018.
- [70] 王群. 我国低密度水泥研究与应用概况[J]. 钻采工艺, 1991, 14(2): 1-8.
- WANG Qun. Overview of research and application of low density cement in China [J]. Drilling & Production Technology, 1991, 14(2): 1-8.
- [71] 卢海川, 王琼, 郭秋实, 等. 国内外固井低密度水泥浆体系研究综述[J]. 精细石油化工进展, 2020, 21(4): 13-17.
- LU Haichuan, WANG Qiong, GUO Qiushi, et al. Overview of domestic and foreign low density cement slurry systems for well cementing [J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2020, 21(4): 13-17.
- [72] 张雄, 林晓东, 阳运霞. 漂珠-微泡沫低密度油井水泥的试验研究[J]. 水泥, 2007(9): 17-20.
- ZHANG Xiong, LIN Xiaodong, YANG Yunxia. Study of low-density oil well cement containing floating ball and mini-foam [J]. Cement, 2007(9): 17-20.
- [73] 李勇, 李小燕. 微细水泥/漂珠低密度水泥浆体系的研制[J]. 精细石油化工进展, 2008, 9(8): 13-15.
- LI Yong, LI Xiaoyan. Preparation and evaluation of fine cement/floating bead low-density cement slurry system [J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2008, 9(8): 13-15.
- [74] 耿建卫. 一种低温早强低密度水泥浆[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(4): 65-68.
- GENG Jianwei. Study and application of low temperature early strength low density cement slurry [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2017, 34(4): 65-68.
- [75] 田宝振, 覃毅, 高飞, 等. ZG112 深井低密度高强度韧性水泥浆固井技术[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(3): 288-293.
- TIAN Baozhen, QIN Yi, GAO Fei, et al. The cementing technology of low-density, high-strength tough cement slurry for the deep well ZG112 [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(3): 288-293.
- [76] Yue J P, Liu Z N, Wang J, et al. A Low-Cost and Low-Density cement slurry system suitable for a shallow unconsolidated stratum [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020(1): 1628281.

(编辑 王跃伟)