

中深层地热井新型耐高温固井材料研制

吴景华, 吕涛, 谢俊革, 冯海涛, 魏四平

(长春工程学院勘查与测绘工程学院, 吉林 长春 130021)

摘要: 地热能是一种清洁环保且可永续利用的能源, 随着“双碳”目标的提出, 地热能日渐成为实现净零排放目标的重要力量。随着地热资源开发不断深入, 高温高压深井日益增多, 国内地热井已达到 5000 m 深度。高温高压环境易引起固井材料强度衰退、外加剂失效和失水量过大等问题, 对于高温固井材料性能要求越来越高, 为此需要一种浆体稳定性优异、稠化时间可控、结石体强度高、绿色环保的新型耐高温固井材料。通过分析固井材料组分作用机理, 进行正交试验和极差分析, 研制了一种适用于中深层地热井的抗高温 (120 °C) 固井材料。试验结果表明, 固井材料的密度、析水率、结石率、稠化时间、失水量、防窜性、结石体抗压强度和抗折强度等性能均满足中深层地热井的固井工程要求。

关键词: 中深层地热井; 固井材料; 抗高温; 稳定性; 微观结构

中图分类号: TE256⁺.6; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)04-0061-08

Development of new high-temperature-resistant cementing materials for medium-deep geothermal wells

WU Jinghua, LÜ Tao, XIE Junge, FENG Haitao, WEI Siping

(School of Surveying and Mapping Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun Jilin 130021, China)

Abstract: Geothermal energy is a kind of clean, environmentally friendly and sustainable energy. With the proposal of “dual carbon” goals, geothermal energy is becoming an important force to achieve the goal of net-zero emissions. With the continuous development of geothermal resources, the number of high-temperature and high-pressure deep geothermal wells is increasing, and the domestic geothermal wells have reached a new depth of 5000 meters. High-temperature and high-pressure environment is easy to cause the strength decline of cementing materials, admixture failure and excessive water loss, so the performance of high-temperature cementing materials is increasingly required. Therefore, a new high-temperature cementing material with excellent slurry stability, controllable thickening time, high stone strength and environmental protection is needed. Through analyzing the mechanism of cementing material components, orthogonal test and range analysis, a kind of high-temperature (120 °C) resistant cementing material suitable for medium and deep geothermal wells is developed. The test results show that, the properties of cementing material such as density, water extraction rate, stone rate, thickening time, water loss, channeling resistance, stone compressive strength and flexural strength meet the requirements of cementing engineering in middle and deep geothermal wells.

Key words: medium-deep geothermal well; cementing material; high-temperature resistance; stability; microstructure

0 引言

我国作为人口大国, 能源消耗量巨大, 随着社会经济不断发展, 使用传统能源带来的环境问题日益严重。自 2020 年以来, 随着我国能源结构的不断

优化, 清洁能源使用占比不断提高, “双碳”目标的提出也为新能源发展提供契机^[1]。地热能作为一种清洁环保且可永续利用的能源^[2], 被广泛应用于供暖制冷、发电、旅游及养殖等多个领域, 是能源可持

收稿日期: 2024-10-12; 修回日期: 2025-02-17 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.04.008

基金项目: 吉林省发改委项目“吉林省地热能开发利用产业化关键技术研究”(编号: 2023C033-3)

第一作者: 吴景华, 男, 汉族, 1964 年生, 教授, 岩土工程专业, 博士, 长期从事地质钻探技术研究和教学工作, 吉林省长春市朝阳区同志街 3066 号, 779521616@qq.com。

引用格式: 吴景华, 吕涛, 谢俊革, 等. 中深层地热井新型耐高温固井材料研制[J]. 钻探工程, 2025, 52(4): 61-68.

WU Jinghua, LÜ Tao, XIE Junge, et al. Development of new high-temperature-resistant cementing materials for medium-deep geothermal wells[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(4): 61-68.

续发展的重要组成部分^[3-4]。大力开发地热产业对节能减排、调整能源结构、保障能源安全具有重大意义^[5]。

在中深层地热能提取中,固井作业和固井材料的选择是重要一环,固井材料的优劣直接影响固井质量^[6-7],对后续地热能安全高效提取至关重要。随着深层超深层地热的开发,地层温度和压力也随之上升^[8],对于固井材料的性能要求进一步提高^[9]。

目前采用较多的中深层地热井固井材料是波特兰油井水泥,其缺点是在高温高压条件下稠化时间不足且抗压强度较低,无法满足固井和后续作业的要求。改进方法是加入相关高温稳定材料,如缓凝剂、降失水剂和强度外加剂等^[10-11]。高密度水泥浆体系利于压稳地层,平衡地层压力。水泥浆体系中单一因素极易受温度的影响出现稠化反转或失效^[12]。因此研制性能优良的水泥浆体系尤为重要。

1 中深层地热井对固井材料性能的要求

通过大量前期试验,中深层地热井固井材料选用水泥基浆液体系,其主要性能要求如下。

1.1 密度

纯水泥的密度一般为 $3.15\sim 3.20\text{ g/cm}^3$,对于G级油井水泥,造浆率通常为 $0.763\sim 0.755$,固井中最佳密度不超过 1.91 g/cm^3 。通过控制水泥浆密度,减少水泥浆与地层之间的压差,防止井漏和井壁坍塌^[13],平衡地层压力的同时确保良好的固井效果^[14]。要配制性能参数均满足固井作业要求的水泥浆体系,必须结合固井现场情况,选择合适的水固比。通过试验确定的水固比为0.5。

1.2 水泥浆稠化时间

水泥浆初始具有一定流动性,随着地层温度和压力的提高,水泥浆体系不断发生水化作用,水泥浆液发生聚结而变稠^[15],最终停止流动,发生这些物理化学变化所用时间即为稠化时间。测定水泥浆稠化时间常用仪器为增压稠化仪,根据《油井水泥试验方法》(GB/T 19139—2012),模拟环境压力为 64.8 MPa ,升压速率为 898 kPa/min ,温度为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$,升温升压时间为 66 min ^[16]。结合中深层地热井深度及工艺要求,稠化时间确定不应小于 2 h 。

1.3 水泥浆防窜性能

高温高压地热井在成井时易伴随气窜现象,可能引发井喷等事故。现有研究主要从水泥浆失水、

稠化过渡时间以及静胶凝强度过渡时间等评价防窜性能。结合文献资料,本文采用SPN值作为判断固井材料防窜性能优良的指标,一般SPN值不超过3为防窜性能良好^[17]。

1.4 析水率和结石率

对于高温固井材料,浆液的稳定性十分重要,析水率和结石率是一项重要的直接体现指标。水泥浆液析水率过大或结石率过小都严重影响固井质量。析水率越小越好,不应超过 1% ,且结石率不应低于 95% 。

1.5 失水量

固井作业时,水泥浆失水易引起环空水固比降低,水泥浆密度上升^[18],流变性能和顶替效率降低,导致顶替压力增大,易发生井漏等。同时,水泥浆失水量过大,在井壁上形成泥饼,泥饼过厚会削弱水泥浆与地层的胶结质量,在水泥固化后形成窜流通道,导致防窜性能变差。结合中深地热井实际经验, 30 min 失水量不宜超过 50 mL 。

1.6 结石体抗压强度

抗压强度是结石体力学性能的一项重要指标,直接反映了结石体能否承载围岩压力,为地热井提供支撑^[19]。根据油井水泥试验方法要求,使用高温养护釜对水泥进行养护,养护温度为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$,养护压力为 20.7 MPa 。根据中深地热井施工要求,水泥石在养护 14 d 后抗压强度不应低于 20 MPa ,且养护 28 d 后强度趋于稳定,不再衰减。

1.7 结石体抗折强度

水泥石在发生弯曲破坏时,所受最大应力即为水泥石抗折强度^[20]。抗折强度过低,水泥结石体在受到地层应力作用时易发生破坏和压碎^[21],严重影响固井的整体质量和寿命。结合文献资料及工程经验,养护 3 d 的抗折强度不应低于 4.5 MPa 。

2 固井材料研制

2.1 固井材料组分分析

2.1.1 组分构成

查阅相关文献资料,经过前期的大量基础试验,所研制固井材料的组分主要包括:水泥,水,强度外加剂硅粉,降失水剂微硅,复配缓凝剂X+硼砂,减阻剂磺化单宁,消泡剂正辛醇。其中水泥选用由水硬性硅酸钙为主要成分的高抗硫酸盐型(HSR)G级油井水泥^[22],选用硅粉的目数为325目。

2.1.2 各组分作用机理

硅粉^[23]目前作为主要的强度外加剂,颗粒级配较合理,加入浆液后能减少和消除沉淀、分层的现象。同时可使固化物的抗拉、抗压强度增大,且耐磨性能提高,并能增大固化物的导热系数。因此加入硅粉可以有效防止水泥石在高温下强度退化,提升水泥石抗压、抗折强度。

加入X+硼砂($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)作为复配缓凝剂,X缓凝剂能显著改善水泥浆的流动性,对水泥结石体强度没有明显影响。硼砂在水泥表面生成了硼酸钙,包裹在水泥颗粒的周围并形成保护膜,阻碍了水泥的水化进程,使水泥浆体凝结时间延长^[24]。当硼砂加入的量不充足时,所形成的硼酸钙无法对水泥颗粒完全包裹,缓凝效果较差。

磺化单宁作为常用的减阻剂,热稳定性良好,能够明显改善水泥浆的流动性^[25],与复配缓凝剂共同改善水泥浆的稠化时间,并减少水泥结石体强度降低程度。

微硅作为降失水剂,其中 SiO_2 与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 接触将吸水发生二次反应,生成一种黏性的胶状硅酸,硅酸与氢氧化钙反应,最后生成水硬性硅酸钙水合物C-S-H(B)。未反应的微硅颗粒聚集充填在水泥孔隙中,束缚水泥孔隙中的自由水。因此选择微硅作为减少自由水的降失水剂。加入微硅能有效降低水泥浆的析水、泌水作用,提高浆体的稳定性,同时降低水泥泵送过程中所受阻力。掺入微硅对水泥石强度几乎没有影响。

正辛醇($\text{C}_8\text{H}_{18}\text{O}$)是一种有机化合物,属于饱和脂肪醇。经过前期试验,发现加入少量正辛醇,消除固井材料产生的气泡效果表现良好,且能长时间

抑泡,分散性能优异。

2.2 固井材料配方优选

2.2.1 正交试验设计

经过大量试验,并对数据进行处理分析,水固比和正辛醇的最优添加量已经确定:水固比为0.5,正辛醇加量为0.06%(占水泥干粉质量百分比)。

为获得优选配方,采用四因素三水平的正交试验对各组分的含量进行优选。根据初选配方的结果:30%硅粉+3%微硅+G级水泥+1.4%复配缓凝剂+0.6%磺化单宁+0.06%正辛醇,水固比为0.5,确定正交试验因素水平见表1。

表1 正交试验因素水平

Table 1 Orthogonal test factor level

水 平	因 素			
	A	B	C	D
	硅粉/%	微硅/%	(X+硼砂)/%	磺化单宁/%
一水平因素	20	2	1.2	0.5
二水平因素	30	3	1.4	0.6
三水平因素	40	4	1.6	0.7

注:(1)水的加量为水泥+硅粉+微硅质量总和的百分比(水固比为0.5);复配缓凝剂(X+硼砂)和磺化单宁加量均为占水泥干粉质量的百分比。(2)复配缓凝剂X与硼砂的质量比为1:1。

2.2.2 正交试验结果分析

根据各因素的不同水平对于测试结果中稠化时间、抗压强度、析水率和失水量的影响,依据数理统计的计算方法,将各项数据填入表中,进行极差分析,进而确定因素的主次顺序。正交试验结果见表2,对4个评价指标的极差分析结果见表3~6。

分析表3,4个因素对于稠化时间影响的极差从

表2 正交试验结果

Table 2 Orthogonal test results

试验序号	硅粉(A)	微硅(B)	X+硼砂(C)	磺化单宁(D)	稠化时间/min	1 d抗压强度/MPa	析水率/%	失水量/mL
1	1(20%)	1(2%)	1(1.2)	1(0.5)	83.52	21.74	0.63	66.20
2	1	2(3%)	2(1.4)	2(0.6)	140.68	20.69	0.47	43.23
3	1	3(4%)	3(1.6)	3(0.7)	257.81	20.70	0.23	30.43
4	2(30%)	1	2	3	144.07	22.81	0.73	64.00
5	2	2	3	1	244.55	23.66	0.43	40.70
6	2	3	1	2	84.66	23.44	0.13	31.90
7	3(40%)	1	3	2	286.49	24.79	0.70	62.13
8	3	2	1	3	83.35	24.40	0.27	47.60
9	3	3	2	1	124.39	24.51	0.03	31.57

表3 各组分对稠化时间影响的极差分析

Table 3 Range analysis of the effect of each component on thickening time

极 差	因 素			
	硅粉(A)	微硅(B)	X+硼砂(C)	磺化单宁(D)
K_1	8.13	8.58	4.19	7.60
K_2	7.95	7.85	6.94	8.64
K_3	8.22	7.87	13.17	8.06
k_1	2.710	2.860	1.397	2.533
k_2	2.650	2.617	2.313	2.880
k_3	2.740	2.623	4.390	2.687
极差	0.27	0.73	8.98	1.04
因素主次	C→D→B→A			

表4 各组分对养护1 d抗压强度影响的极差分析

Table 4 Range analysis of the effect of each component on the compressive strength after 1 day of curing

极 差	因 素			
	硅粉(A)	微硅(B)	X+硼砂(C)	磺化单宁(D)
K_1	63.13	69.34	69.58	69.91
K_2	69.91	68.75	68.01	68.92
K_3	73.70	68.65	69.15	67.91
k_1	21.043	23.113	23.193	23.303
k_2	23.303	22.917	22.670	22.973
k_3	24.567	22.883	23.050	22.637
极差	10.57	0.69	1.57	2.00
因素主次	A→D→C→B			

表5 各组分对析水率影响的极差分析

Table 5 Range analysis of the effect of each component on the water separation rate

极 差	因 素			
	硅粉(A)	微硅(B)	X+硼砂(C)	磺化单宁(D)
K_1	1.33	2.06	1.03	1.09
K_2	1.29	1.17	1.23	1.30
K_3	1.00	0.390	1.36	1.23
k_1	0.443	0.687	0.343	0.363
k_2	0.430	0.390	0.410	0.433
k_3	0.333	0.130	0.453	0.410
极差	0.33	1.67	0.33	0.21
因素主次	B→A→C→D			

大到小:C>D>B>A,各因素从主到次的排序为:X+硼砂(C),磺化单宁(D),微硅(B),硅粉(A)。分析表4,4个因素对于养护1 d抗压强度影响的极

表6 各组分对失水量影响的极差分析

Table 6 Range analysis of the effect of each component on water loss

极 差	因 素			
	硅粉(A)	微硅(B)	X+硼砂(C)	磺化单宁(D)
K_1	139.86	192.33	132.9	145.7
K_2	136.60	131.53	139.7	138.8
K_3	141.3	93.90	146.7	133.26
k_1	46.620	64.11	44.3	48.567
k_2	45.533	43.84	46.567	46.267
k_3	47.100	31.30	48.9	44.42
极差	4.7	98.43	13.8	12.44
因素主次	B→C→A→D			

差从大到小:A>D>C>B,各因素从主到次的排序为:硅粉(A),磺化单宁(D),X+硼砂(C),微硅(B)。分析表5,4个因素对于析水率影响的极差从大到小:B>A>C>D,各因素从主到次的排序为:微硅(B),硅粉(A),X+硼砂(C),磺化单宁(D)。分析表6,4个因素对于失水量影响的极差从大到小:B>C>A>D,各因素从主到次的排序为:微硅(B),X+硼砂(C),硅粉(A),磺化单宁(D)。

2.2.3 优选配方确定

根据表3以稠化时间为依据,以接近2.5 h为宜,得出最优配方 $A_2B_2C_2D_1$ 。根据表4以抗压强度为依据,以抗压强度更大为宜,得出最优配方 $A_3B_1C_3D_1$ 。根据表5以析水率为依据,以析水率更小为宜,得出最优配方 $A_3B_3C_1D_1$ 。根据表6以失水量为依据,以失水量更小为宜,得出最优配方 $A_2B_3C_1D_2$ 。

整理通过正交试验所得数据,采用数理统计的方法对4项性能指标进行分析,最终确定的最优固井材料配方为: $A_3B_3C_2D_3$,即:40%硅粉+4%微硅+G级油井水泥+1.4%复配缓凝剂+0.7%磺化单宁+0.06%正辛醇,水固比为0.5。

3 固井材料性能测试

3.1 浆液密度测试

使用液体密度计测定密度所用仪器为。调平后,将待测水泥浆液倒入左侧桶内,调整使气泡居中,测得水泥浆液密度为 1.72 g/cm^3 ,此密度值的水泥浆可满足固井工艺要求。

3.2 浆液稠化时间测试

试验使用BSRD HTD-8040型增压稠化仪测

定水泥浆液稠化时间,设备设定程序为66 min内升至120℃和64.8 MPa。试验结果表明,水泥浆液在很长一段时间内稠度基本保持平稳,后逐渐上升,在2 h 35 min后稠度达到100 Bc,曲线见图1。

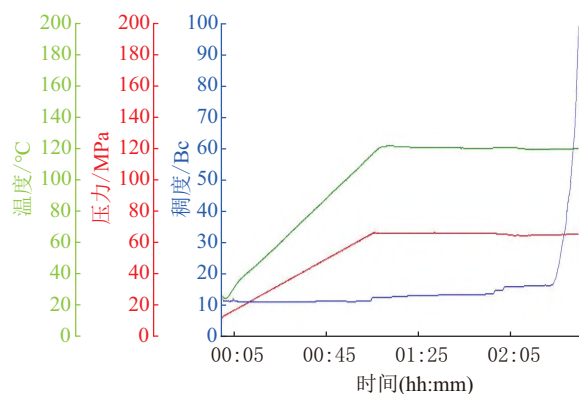


图1 水泥浆稠化试验曲线

Fig.1 Slurry thickening test curve

3.3 浆液析水率和结石率测试

将配制的水泥浆液倒入量程为100 mL的量筒,随后密封量筒口,静置一定时间,记录析水和结石情况。试验在常温和100、120、140℃四种温度下进行,测得浆液的析水率和结石率见图2。

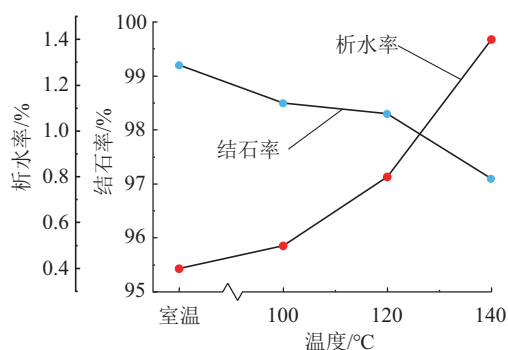


图2 不同温度环境下水泥浆析水率和结石率

Fig.2 Water extraction rate and stone rate of slurry under different temperature environment

分析数据图可以看出,常温和100、120℃温度条件下,浆液的析水率均低于1%,且结石率均高于95%,因此可以判断在这些温度条件下优化配方所配制浆液较为稳定。当环境温度为140℃时,析水率为1.4%,但结石率仍高于95%,可以认为浆液仍具有较好稳定性。总结:不同温度条件下,终选配方所配制浆液均能表现出析水率较小同时结石率

较高的特性,这对于地热固井作业十分有利^[26]。

3.4 浆液失水量测试

根据GB/T 19139—2012规范要求,对于温度高于90℃的试验,采用水泥浆在增压稠化仪中搅拌,使用静态滤失仪进行失水量测定,收集滤液并分别记录0.5、1、2、5 min等时间的累计滤失量^[27],失水量曲线见图3。

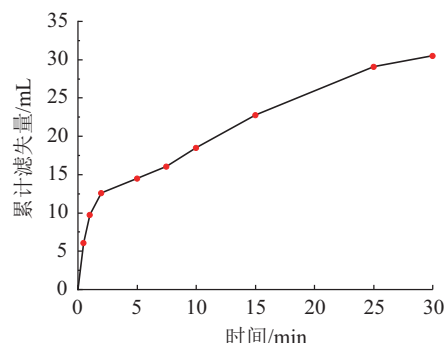


图3 水泥浆累计失水量随时间变化曲线

Fig.3 Slurry cumulative water loss curve with time

根据累计失水量变化曲线可以看出,水泥浆液在120℃条件下,30 min失水量为30.5 mL,满足实际经验要求30 min失水量不超过50 mL,浆液稳定性良好。

3.5 浆液防窜性能评价

将水泥浆稠化过渡时间与水泥浆失水速率综合考虑为水泥浆性能系数SPN,计算公式如下:

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

式中:SPN——水泥浆防窜性能评价系数; FL_{API} ——水泥浆API失水量; t_{100Bc} ——水泥浆在稠度试验中达到100 Bc所用的时间; t_{30Bc} ——水泥浆在稠度试验中达到30 Bc所用的时间。

根据稠化试验及失水量测定可知: $FL_{API}=30.5$ mL, $t_{30Bc}=148$ min, $t_{100Bc}=155$ min,代入公式计算得 $SPN=1.58<3$,表明该水泥浆液防窜性能良好,有利于提高固井质量。

3.6 结石体抗压强度测试

水泥养护使用BSRD-7021型增压养护釜,试验模拟条件为:温度维持120℃,压力维持20.7 MPa。结石体抗压强度测试使用YAW-300C型水泥胶砂抗压抗折试验机,最终浆液结石体测试性能参数见图4及表7、表8。

通过图表数据可知,水泥结石体在养护1~14 d

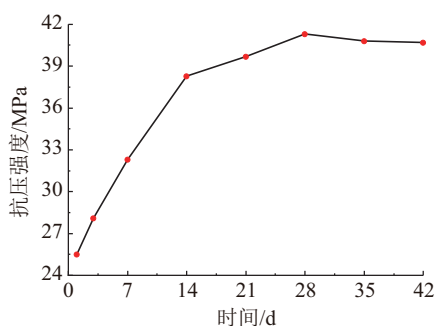


图4 水泥结石体抗压强度随时间变化曲线

Fig.4 Curve of compressive strength of cement stone with time

表7 抗压强度随养护时间变化

Table 7 The compressive strength varies with the curing time

养护时间/d	1	3	7	14	21	28	35	42
抗压强度/MPa	25.5	28.1	32.3	38.3	39.7	41.3	40.8	40.7

表8 抗压强度平均变化速率

Table 8 The average rate of change in compressive strength

时间周期/d	1~3	3~7	7~14	14~21	21~28
平均变化速率/(MPa·d ⁻¹)	1.3	1.05	0.86	0.2	0.23

内抗压强度增长较快,养护14~28 d内抗压强度仍在增长,但增长速率明显降低,28 d以后,强度略有衰退,但仍保持较高抗压强度。试验结果表明固井材料满足对抗压强度的要求。

3.7 结石体抗折强度测试

水泥在120℃条件下养护3 d,结石体抗折强度测试使用YAW-300C型水泥胶砂抗压抗折试验机。抗折试验测定结果见图5,水泥养护3 d抗折强度为5.4 MPa,能够满足固井作业需要。

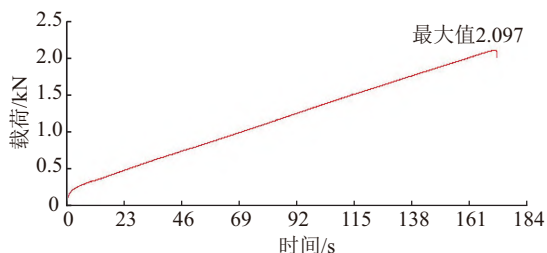


图5 水泥结石体3 d抗折强度试验曲线

Fig.5 3 day bending strength test curve of cement stone body

3.8 结石体高温作用机理分析

在120℃条件下,对水泥基固井材料在养护不同龄期(1、3、7、14、28、35 d)进行SEM(扫描电子显微镜)微观结构扫描,结果如图6所示。

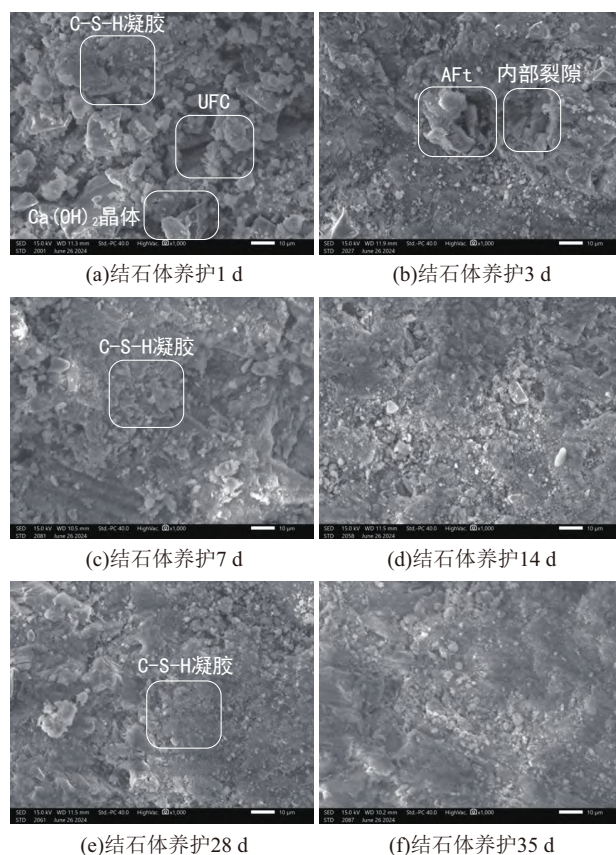


图6 不同养护龄期水泥结石体电镜微观结构图

Fig.6 Electron microscope microstructure of cement stones at different curing ages

在水泥水化反应早期阶段,如图6(a)、(b)所示,大部分水泥颗粒表面会生成凝胶状的膜层,同时伴随 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体产生,但也有一部分未进行水化反应的水泥颗粒。在此阶段中水化反应不完全,水化产物较少,晶体尺寸相对较小,水泥颗粒之间未形成联系结构^[28]。配方中硅粉具有较独特的细度,且 SiO_2 含量很高,较小的球状硅粉填充包裹在水泥颗粒之间,使固井材料具有更好的级配。对于小粒径的硅粉颗粒,由于其表面能量相对较高,导致颗粒间相互聚集,但各颗粒的界面较清晰。在硅粉与 C_3S 发生二次水化反应的早期,硅粉在碱侵蚀影响下,形成以硅粉颗粒为中心的C-S-H凝胶体^[29],凝胶体相互之间紧密接触,形成致密的结构,在絮状凝胶体中

形成有一定结晶度的向外辐射的纤维C-S-H,致密凝胶体交织成网状结构。随着养护龄期不断增加,如图6(c)、(d)所示,体系中产生大量的C-S-H凝胶和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,同时形成大量的包覆层,水泥水化反应过程受到一定阻碍^[30],但此阶段在水泥硬化的浆体内部,已经初步形成网状结构,强度也有很大提升。当包覆层在结晶压力和渗透压力的作用下逐渐被破坏后,水泥颗粒进一步发生水化反应,产生的大量水化产物相互交叉,逐步形成一个整体。微硅的作用为降低泌水、防止水分在晶体表面凝聚,从而提高界面过渡区的密实度并减小其厚度^[31]。微硅可以填充水泥颗粒间孔隙,与水泥的水化产物生成凝胶体,同时与碱性材料MgO反应生成凝胶体,结石体中大量的气孔消失,更加致密,提高强度并降低透气性和透水性,同时降低 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量,大大减少水泥结石体的碳化缺陷,并提高结石体抗渗性和耐久性。在水泥水化反应进入后期时,如图6(e)、(f)所示,反应速率渐趋减慢,此过程中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量不断减少,C-S-H凝胶等水化产物不断增多,共同成为水泥硬化浆体的主要结构^[32],不断产生并堆积的水化产物填充于之前充满水或空气的间隙,水泥石内部形成更致密均匀的结构,整体强度不断提高。

结合不同养护龄期微观结构发展情况可以看出,通过多种外加剂之间的互补,使得水泥结石体微观结构合理,研制的水泥基固井材料在高温高压条件下具有优越的力学性能^[33]。

4 结论

(1)通过正交试验确定新型高温固井材料配方为:40%硅粉+4%微硅+1.4%复配缓凝剂(X+硼砂)+0.7%磺化单宁+0.06%正辛醇+G级油井水泥,水固比为0.5。

(2)新型高温固井材料密度为 1.72 g/cm^3 ,稠化时间为2:35:05,失水量为30.5 mL/30 min,析水率为0.8%,结石率为98.3%,SPN值为1.58。水泥结石体抗压强度在前期随养护时间延长而增大,抗压强度在养护14 d后可达38.3 MPa,28 d后达到41.3 MPa,之后抗压强度基本不再衰减。水泥结石体抗折强度养护3 d能达到5.4 MPa,符合工程要求。

(3)研制的水泥基固井材料具有良好的工程性能,其造价低廉,环保且制备简便,稠化时间可控,能够满足中深层地热井固井的需要。

参考文献(References):

- [1] 陈春瑞,李晶,王峥,等.松辽盆地北部地热资源分布特征及开发对策[J].大庆石油地质与开发,2024,43(4):215-222.
CHEN Chunrui, LI Jing, WANG Zheng, et al. Distribution characteristics and development strategy of geothermal resources in northern Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(4): 215-222.
- [2] Shen P Y, Lukes J R. Impact of global warming on performance of ground source heat pumps in US climate zones [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 101: 632-643.
- [3] 张丰琰,李立鑫,韩丽丽.保温水泥在中低温地热井中的应用及建议[J].地质与勘探,2022,58(2):410-419.
ZHANG Fengyan, LI Lixin, HAN Lili. Application and suggestions of the thermal insulation cement in mid-low temperature geothermal wells [J]. Geology and Exploration, 2022, 58(2): 410-419.
- [4] 卢予北.地球气体运移与地热资源形成机制研究[J].钻探工程,2024,51(2):1-7.
LU Yubei. Study on migration of the earth interior gases and the formation mechanism of geothermal resources [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 1-7.
- [5] 丁栋.地热资源勘探开发技术与发展方向[J].石化技术,2024,31(4):85-87.
DING Dong. Geothermal resource exploration and development technology and development direction [J]. Petrochemical Industry Technology, 2024, 31(4): 85-87.
- [6] 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.
- [7] 叶辉兵,张所邦,胡胜华,等.中深层地热井开采对套管与水泥环性能影响的研究[J].钻探工程,2024,51(5):93-100.
YE Huibing, ZHANG Suobang, HU Shenghua, et al. Research on the influence of middle-deep geothermal well exploitation on the performance of casing and cement sheath [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 93-100.
- [8] 徐蒙,王璐,王李昌,等.高温水基钻井液研究及应用进展[J].地质与勘探,2023,59(4):901-908.
XU Meng, WANG Lu, WANG Lichang, et al. Research and application progress of high-temperature water-based drilling fluid [J]. Geology and Exploration, 2023, 59(4): 901-908.
- [9] Anwar R, Elmoneim H A. Acid prohibitive flexible cement enables long term zonal isolation in high temperature high pressure well [C]//Paper presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. Abu Dhabi, UAE, 2020: SPE-203308-MS.
- [10] 刘合,杜庆龙,高兴军,等.高含水老油田深度开发面临挑战及发展方向[J].大庆石油地质与开发,2024,43(4):15-24.
LIU He, DU Qinglong, GAO Xingjun, et al. Challenges and development direction for deep development of high water-cut mature oilfields [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(4): 15-24.
- [11] 高元,李小江,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 Xiaojang, LIU Rengguang. Study on cement slurry system in ultra-high temperature well [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 109-114.

- [12] 金勇,邓成辉.高温高压井固井水泥浆体系研究[J].辽宁化工,2022,51(8):1166-1169.
JIN Yong, DENG Chenghui. Research on cement slurry system for high temperature and high pressure wells[J]. Liaoning Chemical Industry, 2022, 51(8):1166-1169.
- [13] 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.
- [14] 王晶朴,全田,季海亮,等.水泥密度与变密度测井技术在固井质量检测中的试验[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(7):44-46.
WANG Jingpiao, QUAN Tian, JI Hailiang, et al. Tests of cement density and variable density logging technology in cementing quality testing[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2022, 42(7):44-46.
- [15] 王旭方,王骁,王伟智,等.油井水泥稠化时间检验标准样品稳定性研究[J].中国水泥,2021(S1):199-201.
WANG Xufang, WANG Xiao, WANG Weizhi, et al. Study on the stability of standard samples for cement thickening time inspection in oil wells[J]. China Cement, 2021(S1):199-201.
- [16] 张福铭,肖伟,朱思佳,等.超高温高密度防腐防窜水泥浆[J].钻井液与完井液,2024,41(4):506-514.
ZHANG Fuming, XIAO Wei, ZHU Sijia, et al. An Ultra-High temperature high density corrosion inhibitive Anti-Channeling cement slurry[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2024, 41(4):506-514.
- [17] 方国伟.固井水泥浆防气窜性能评价方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2009.
FANG Guowei. Research on the gas-channeling prevention performance evaluation method of cement slurry [D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2009.
- [18] 郭子涵,李明,杨燕,等.近年来油井水泥降失水剂研究现状概述[J].现代化工,2015,35(10):49-53.
GUO Zihan, LI Ming, YANG Yan, et al. Current status of fluid loss reducers for oil well cement in recent years[J]. Modern chemical industry, 2015, 35(10):49-53.
- [19] Wang C W, Wang R H, Zhou W D, et al. The use of a novel spacer and Ultralow-Density cement system to control lost circulation in Coalbed-Methane wells[J]. SPE Drilling & Completion, 2015, 30(1):76-85.
- [20] 吕寅,池召坤,齐广华.水泥混凝土抗折性能影响研究[J].混凝土世界,2013(3):82-87.
LV Yin, CHI Zhaokun, QI Guanghua. Study on the influence of flexural properties of cement concrete[J]. China Concrete, 2013(3):82-87.
- [21] 张运俊.冻融作用下纤维改性水泥铁尾矿砂的抗折性能研究[J].西部交通科技,2023(9):42-45.
ZHANG Yunjun. Study on flexural properties of fiber-modified cement Iron tailings sand under freeze-thaw action[J]. Western China Communication Science & Technology, 2023(9):42-45.
- [22] 邵一臻,赵福金,荆京,等.山西干热岩GR1井高温固井技术研究与实践[J].钻探工程,2022,49(6):42-47.
XI Yizhen, ZHAO Fujin, JING Jing, et al. Research and practice of cementing slurry technology for Well GR1 in Shanxi high temperature hot dry rock[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6):42-47.
- [23] Tang W C, Wang Z, Liu Y, et al. Influence of red mud on fresh and hardened properties of self-compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 178:288-300.
- [24] 桂雨,廖宜顺,蒋卓.硼砂对硫酸盐水泥水化行为的影响研究[J].硅酸盐通报,2016,35(11):3720-3723.
GUI Yu, LIAO Yishun, JIANG Zhuo. Effect of borax on the hydration behavior of sulphoaluminate cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(11):3720-3723.
- [25] 庞少聪,安玉秀,马京缘,等.耐高温降粘剂SMT/AMPS的研制与性能评价[J].应用化工,2022,51(8):2194-2199.
PANG Shaocong, AN Yuxiu, MA Jingyuan, et al. Development and performance evaluation of high temperature resistant viscosity reducer SMT/AMPS [J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(8):2194-2199.
- [26] 孙浩程,柴肇云,沈玉旭,等.纳米硅溶胶改性水泥基材料性能及机理分析[J].太原理工大学学报,2023,54(2):264-271.
SUN Haocheng, CHAI Zhaoyun, SHEN Yuxu, et al. Performance and mechanism analysis of nano-silica Sol modified cement-based materials[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2023, 54(2):264-271.
- [27] 王世林,徐蒙,黄晓倩.基于正交试验的水泥浆液降失水研究[J].黑龙江交通科技,2023,46(5):11-13.
WANG Shilin, XU Meng, HUANG Xiaoqian. Research on water loss reduction of cement slurry based on orthogonal test [J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2023, 46(5):11-13.
- [28] 彭小芹,兰聪,王淑萍,等.水化硅酸钙粉体对水泥水化反应过程及机理的影响[J].建筑材料学报,2015,18(2):195-201.
PENG Xiaoqin, LAN Cong, WANG Shuping, et al. Effects of the C-S-H powder on the hydration process and mechanism of cement[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(2):195-201.
- [29] Provis J L, Bernal S A. Geopolymers and related alkali-activated materials[J]. Annual Review of Materials Research, 2014, 44:299-327.
- [30] 易家俊,左晓宝,黎亮,等.水泥水化过程的概率模型及其微结构演变的数值模拟[J].材料导报,2023,37(18):145-151.
YI Jiajun, ZUO Xiaobao, LI Liang, et al. Probabilistic model of cement hydration and numerical simulation on its microstructure evolution[J]. Materials Reports, 2023, 37(18):145-151.
- [31] 王秀红,崔琪.微硅粉对纤维增强水泥耐久性影响的试验研究[J].混凝土与水泥制品,2007(3):47-49.
WANG Xiuhong, CUI Qi. Experimental study on effect of micro-silica powder on durability of fiber-reinforced cement[J]. China Concrete and Cement Products, 2007(3):47-49.
- [32] 肖建敏,李辉,雷睿欣.碱矿渣水泥早期反应产物微观结构演化过程[J].建筑材料学报,2024,27(5):381-390.
XIAO Jianmin, LI Hui, LEI Ruixin. Microstructural evolution of early reaction products in Alkali-Activated slag cement at early age[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(5):381-390.
- [33] 胡蝶.低密度早强固井水泥浆体系研究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(3):10-12,15.
HU Die. Research on cement slurry system of low-density early-strength cementing [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2023, 43(3):10-12, 15.

(编辑 王跃伟)