

页岩气钻探胶凝时控水泥基护壁堵漏材料研究

任正炼, 蹇黎明*, 王 胜, 陈礼仪, 袁进科, 谭慧静

(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)

摘要: 针对我国页岩气等深部钻探面临的严重漏失与孔壁失稳难题, 本文提出了一种胶凝时控的护壁堵漏思路, 并在硅酸盐水泥的基础上复配有机酸、氟化钠、三乙醇胺及硫酸铝, 成功研制一种胶凝时控水泥基护壁堵漏材料, 实现对浆液凝结时间的精准调控, 同时采用析因试验优化配方并建立可泵期(PPD)及可泵期与初凝时间间隔(IST)预测模型, 结合热重分析与扫描电镜揭示其水化机理。结果表明: 该材料表现出良好的胶凝时控特性, 并具备较快的凝结响应能力, PPD可在10~60 min内精准调控, IST最小为12 min; 7 d抗压强度达18.8~27.5 MPa, 可满足工程强度需求。热重与微观分析表明: 四种外加剂早期均抑制水泥熟料水化反应, 后期均转化为促进作用, 且存在明确的抑制-促进转换节点; 四种外加剂通过动态协同作用形成“早期抑制-后期促进”双效调控机制, 赋予浆液胶凝时控特性; 其中有机酸仅短期抑制水化, 7 d后C-S-H大量生成, 结构致密化保障长期强度。本研究解决了传统水泥浆堵漏中浆液流失与凝结时效难以兼顾的难题, 为深部页岩气钻探护壁堵漏提供了新的技术支撑。

关键词: 页岩气钻探; 护壁堵漏; 水泥基材料; 胶凝时控; 水化机理

中图分类号: P634.8; TE28⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)02-0115-09

Study on cement-based materials with controllable gelation time for wellbore protection and leakage sealing in shale gas drilling

REN Zhenglian, JIAN Liming*, WANG Sheng, CHEN Liyi, YUAN Jinke, TAN Huijing

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China)

Abstract: To address the severe mud loss and borehole wall instability encountered in deep drilling operations such as shale gas exploration in China, this study proposes a gelation time-controlled strategy for wellbore stabilization and leakage sealing. A corresponding gelation time-controlled cement-based wellbore protection and leakage sealing material was successfully developed by compounding Portland cement with organic acid, sodium fluoride, triethanolamine, and aluminum sulfate, enabling precise regulation of the slurry's setting behavior. The formulation was optimized through factorial design, and predictive models were established for the pumpable period (PPD) and the interval between pumpable period and initial setting time (IST). The hydration mechanism was elucidated using thermogravimetric (TG-DTG) analysis and scanning electron microscopy (SEM). Results demonstrate that the material exhibits excellent gelation time-control characteristics and rapid setting response: the PPD can be precisely adjusted within 10~60 min, with a minimum IST of 12 min; the 7-day compressive strength ranges from 18.8 to 27.5 MPa, meeting engineering strength requirements. TG-DTG and microstructural analyses indicate that all four admixtures initially inhibit cement clinker hydration, later transitioning into a promoting effect, with a distinct inhibition-to-acceleration

收稿日期: 2025-11-25; 修回日期: 2026-01-08 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.02.013

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“纳米复合水泥浆液低温水化过程与流变凝固特性研究”(编号: 41672362); 珠峰科学研究计划项目“青藏高原深部找矿快速绿色智能钻进关键技术研究”(编号: 80000-2025ZF11411)

第一作者: 任正炼, 男, 汉族, 2000年生, 硕士研究生, 地质工程专业, 研究方向为钻掘工程材料, 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, 416799912@qq.com。

通信作者: 蹇黎明, 男, 汉族, 1996年生, 讲师, 地质工程专业, 博士, 主要从事钻掘工程方面的教学与科研工作, 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, 1256737787@qq.com。

引用格式: 任正炼, 蹇黎明, 王胜, 等. 页岩气钻探胶凝时控水泥基护壁堵漏材料研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(2): 115-123.

REN Zhenglian, JIAN Liming, WANG Sheng, et al. Study on cement-based materials with controllable gelation time for wellbore protection and leakage sealing in shale gas drilling[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(2): 115-123.

transition point. Their dynamic synergistic interaction establishes a dual-effect control mechanism characterized by "early inhibition and late promotion", which confers the gelation time-control property. Notably, organic acid only temporarily retards hydration, leading to substantial formation of C-S-H gel and microstructural densification after 7 days, thereby ensuring long-term strength development. This research resolves the longstanding engineering challenge of balancing slurry loss control and setting efficiency in conventional cement-based sealing operations, providing a novel technical solution for wellbore stabilization and leakage sealing in deep shale gas drilling.

Key words: shale gas drilling; wellbore protection and leakage sealing; cement-based material; gelation time control; hydration mechanism

0 引言

我国是全球页岩气资源最丰富的国家之一。根据评估,我国页岩气技术可采资源量位居世界前列,主要分布在四川盆地、鄂尔多斯盆地、塔里木盆地、松辽盆地、江汉盆地等地区^[1]。页岩气是我国天然气增产量的最重要来源之一,“十四五”规划及更长远目标都明确提出要大力提升页岩气勘探开发力度。然而,相比北美,我国优质页岩气藏普遍埋藏更深(多在3500 m以深,甚至超过4500 m)^[2],多伴随复杂地质条件,开采难度较高。再加之页岩气地层多以泥岩、砂岩、页岩、炭质板岩、灰岩为主^[3],此类地层在构造运动影响下裂隙极其发育,岩层破碎,钻探过程极易发生孔壁失稳、坍塌和钻井液漏失等施工难题。

为应对钻进过程中孔壁失稳与钻井液漏失等工程问题,采用钻井液调控、水泥浆液、化学浆液、惰性堵漏材料及套管等多种技术。《地质钻探护壁堵漏技术规程》(DZ/T 0410—2022)^[4]中依据不同地层的漏失特征,对相应技术路径作出了规定,指出当地层发生中等漏失乃至失返性漏失时,应优先采用水泥浆液进行封堵。大量工程实践也表明,水泥浆液在深部复杂地层条件下具备较强的封堵能力。例如,泸州深层页岩气Y101H3-4井储层埋深达4000 m,钻井液漏失问题极为严重,常规堵漏手段难以奏效,最终通过新型油基水泥浆液实现了漏层封堵^[5]。王胜建等^[6]基于黔北正安地区页岩气钻探实例指出,当漏失速度超过10 m³/h时,水泥浆液在通道封堵方面具有显著优势。同样,在黔地4井^[7]、湘永地1井^[8]及川南威远、长宁、泸州等页岩气区块^[9],水泥浆液均被广泛应用于破碎或强裂隙地层的漏失封堵与孔壁支护。然而,复杂多变的井下环境对水泥浆液的性能提出了更高要求,尤其体现在浆液稠化行为与施工适应性的协同控制方面。为保证深孔条件下浆液具备足够的可操作时间,通

常需要选用适宜的缓凝剂调控其凝结行为^[10]。但从整体应用效果来看,常规水泥浆液存在的水化反应速率慢、候凝时间长等问题,易导致浆液沿裂隙或溶蚀通道持续流失,难以实现目标层位的有效封堵^[11]。相关工程实践亦验证了这一不足,例如在新乌地1井^[12]、长宁页岩气区块^[13],当钻遇严重漏失地层时,即便采用多技术手段协同封堵,仍难以取得理想效果。综上所述,极端漏失工况下水泥浆液不仅需要具备良好的可泵性,更应在进入封堵层位后快速凝结硬化,以实现“以浆止浆”的高效封堵目标。

在此背景下,引入“胶凝时控”理念成为协调上述矛盾的关键。针对不同孔深条件下水泥浆液灌注性能的差异化需求,利用外加剂在水泥水化过程中所表现出的抑制-促进双重调控效应,实现对浆液胶凝时序的精准控制。通过对水化反应的阶段性抑制,浆液在可泵期内保持良好的流动性,满足深孔条件下的长距离输送要求。当浆液进入目标封堵层位后,调控机制由抑制转向促进,推动体系由流态迅速向固态转变,实现深部复杂地质条件下的高效封堵,维护孔壁稳定。

鉴于此,本文提出了一种胶凝时控水泥基护壁堵漏材料的研制思路,在赋予浆液速凝特性的同时,实现凝结时间在十几至几十分钟范围内的可控调节,为页岩气钻探提供一种兼顾深孔泵送性能与快速封堵效果的新型技术方案。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用硅酸盐水泥标号P·C42.5(PC),符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2023)对水泥材料的性能规定,其基本矿物成分及性能参数如表1所示。

经过大量试验探索^[14-15],得出以水泥浆为基材,以硫酸铝(AS)和有机酸(YS)为流变控制剂,以氟化钠(NF)为稠化控制剂,以及三乙醇胺(TEA)作为胶

表 1 水泥矿物成分及性能参数
Table 1 Mineral composition and performance index of PC

主要矿物成分					物理参数		力学参数(28 d)	
C ₃ S/%	C ₂ S/%	C ₃ A/%	C ₄ AF/%	石膏/%	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa
44.0	20.1	6.6	13.3	13.7	≥350	3.0~3.15	42.5	6.5

凝控制剂的速凝材料体系,该体系所有外加剂均为分析纯,其中有机酸组分为羟基羧酸类化合物。

1.2 试验方法

根据配浆需求,称取设计用量的硅酸盐水泥、有机酸、硫酸铝、氟化钠、三乙醇胺和清水备用,其中外加材料体系的加量按胶凝材料质量百分比计算。将 1/2 有机酸与全部设计质量的硫酸铝、三乙醇胺加入到总用水量 2/5 的清水中,在室温条件下充分搅拌,使其完全溶解并完成络合。随后向该络合液中加入氟化钠,持续搅拌至溶解,即制得速凝溶液。将剩余的 1/2 有机酸溶解至余下的 3/5 清水中,搅拌均匀后加入硅酸盐水泥,制备得到水泥基浆液。将速凝溶液与水泥基浆液充分混合,即可得到胶凝时控护壁堵漏材料。

参考相关规范及文献^[16-18],试验中对胶凝时控护壁堵漏材料的流动度、可泵期、凝结时间及抗压强度进行测试,测试仪器有截锥圆模、维卡仪,YAS-300 型微电脑液压测试仪。为系统分析胶凝时控水泥的水化机理,采用 STA-40 型综合热分析系统对水泥结石体进行热重(TG-DTG)测试,获取样品在升温过程中的质量变化及热效应特征,表征其水化反应进程与产物演化的规律。同时,利用 NanoSEM 450 型场发射扫描电子显微镜对水泥结石体的微观形貌进行观测,重点分析水化产物的组成特征、空间分布及结构形态,为揭示材料胶凝时控性能的微观机制提供支撑。

2 胶凝时控护壁堵漏材料试验研究

2.1 析因试验结果

在已有的研究基础上^[14],得出适用于护壁堵漏的外加剂加量范围为有机酸 0.25%~0.45%、硫酸铝 0.6%~1%、氟化钠 0.3%~0.7%、三乙醇胺 0.075%~0.175%。为实现水泥浆液胶凝时控,遵循析因试验思路,共设计 20 组试验,并对浆液初始流动度、可泵期、初凝时间、7 d 抗压强度进行测试,结果见表 2。

由表 2 可知,所配制的 20 组护壁堵漏浆液流动性较好,初始流动度维持在 22.5~30 cm 范围;可泵期可控,维持在 7~78 min;力学强度高,7 d 抗压强度最低 18.8 MPa,最高 27.5 MPa。考虑到护壁堵漏的实际工程需求,根据上述析因试验结果,选择可泵期、可泵期与初凝时间间隔作为浆液时控性能的核心调控指标,采用 Minitab 软件建立预测模型,见式(1)、式(2), R^2 分别为 92.82%、98.99%。

$$PPD=128.6+86.3\times A-398.8\times B-221.6\times C-58.4\times D+613\times B\times C+103.1\times C\times D$$
(1)

$$IST=350+26.9\times A-1688\times B-436.4\times C-64.7\times D+2169\times B\times C+106\times B\times D+48.4\times C\times D$$
(2)

式中:PPD——可泵期,min;IST——可泵期与初凝时间间隔,min;A——有机酸加量,%;B——三乙醇胺加量,%;C——氟化钠加量,%;D——硫酸铝加量,%。

2.2 配方优化

为验证模型合理性,对表 2 中 20 组试验进行预测值计算,并与实测值对比,如图 1 所示。

由图 1 可知,根据析因试验数据所建立的预测模型准确度较高,模型对于浆液可泵期和可泵期与初凝时间间隔的预测值与实测值较为接近,很好地反映了所研制配方的胶凝时控特性。在实际钻孔护壁堵漏过程中,可泵期往往由目标层位深度确定,而可泵期与初凝时间间隔则应越小越好,从而保证浆液进入漏失地层后迅速凝结硬化。以此即可减小候凝时间,抑制堵漏材料流失。因此,在采用预测模型进行配方优化时,对于可泵期宜设置为“望目”,而可泵期与初凝时间间隔则宜设置为“望小(以最小化响应指标作为优化目标)”。遵循这一原则,可得出适用于不同孔深的胶凝时控护壁堵漏材料配方,具体如表 3 所示。

由表 3 可知,本文提出的胶凝时控护壁堵漏材料可泵期在 10~60 min 均可调控,且各组配方均能在可泵期结束后迅速凝结硬化。总体来说实现了

表2 析因试验结果

Table 2 Test results of factorial experiment

序号	有机酸/%	三乙醇胺/%	氟化钠/%	硫酸铝/%	流动度/ cm	可泵期/ min	初凝时间/ min	7 d抗压强度/ MPa
1	0.25	0.175	0.3	1	22.5	15	30	21.3
2	0.45	0.075	0.7	1	26	25	50	23.1
3	0.25	0.175	0.3	0.6	26.5	32	59	23.4
4	0.25	0.075	0.7	1	28	15	35	23.9
5	0.35	0.125	0.5	0.8	27	25	65	23.5
6	0.25	0.175	0.7	1	28.5	19	26	23.9
7	0.35	0.125	0.5	0.8	27	25	60	23.8
8	0.25	0.075	0.7	0.6	30	7	30	24.3
9	0.45	0.175	0.3	0.6	27	51	79	19.1
10	0.35	0.125	0.5	0.8	28	26	59	22.6
11	0.25	0.075	0.3	0.6	27	40	174	24.8
12	0.45	0.075	0.7	0.6	28	26	57	18.8
13	0.25	0.175	0.7	0.6	29	13	32	20.7
14	0.25	0.075	0.3	1	24.5	48	148	24.3
15	0.45	0.175	0.7	1	27	31	47	19.0
16	0.45	0.175	0.3	1	24	38	62	22.5
17	0.45	0.175	0.7	0.6	28.5	22	45	22.9
18	0.45	0.075	0.3	0.6	27	78	203	25.6
19	0.45	0.075	0.3	1	25	56	172	27.5
20	0.35	0.125	0.5	0.8	28	26	64	24.3

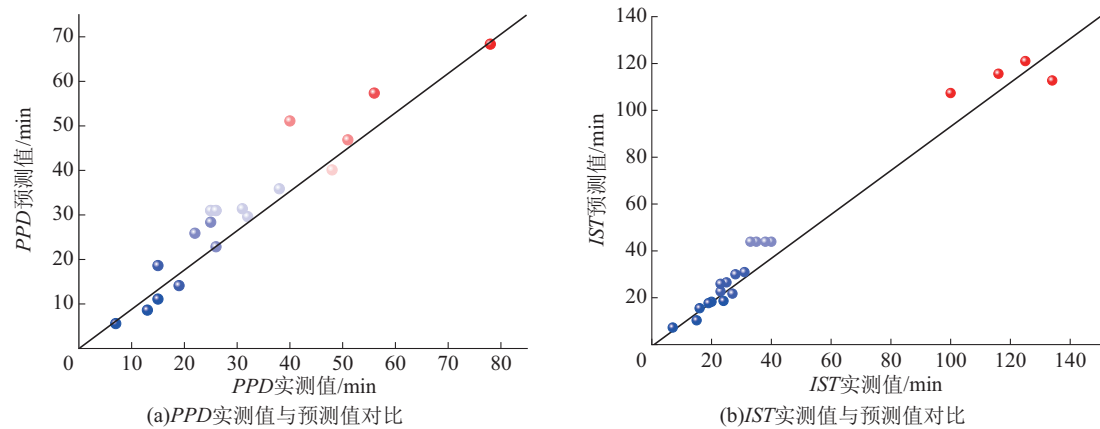


图1 预测模型验证

Fig.1 Validation of the rationality of the prediction model

护壁堵漏的设计目标,相比于普通速凝类水泥浆液具有更强的工程适用性。

3 胶凝时控护壁堵漏材料水化机理分析

3.1 热重测试结果分析

为分析所研制的胶凝时控护壁堵漏材料中不

同外加剂的作用机理,以优化配方为基准组,在此基础上分别增加有机酸、硫酸铝、氟化钠及三乙醇胺加量,进行3、7 d热重测试,结果如图2所示。

各试样的热重测试曲线呈现相同的失重趋势,即存在三个明显的下降段:100~200 ℃内的质量损失主要归因于水化硅酸钙(C-S-H)、钙矾石(AFt)

表3 胶凝时控护壁堵漏材料优化配方
Table 3 Optimized formula for wellbore protection and leakage sealing materials

序号	配 方				性 能	
	有机酸/%	三乙醇胺/%	氟化钠/%	硫酸铝/%	PPD/min	IST/min
1	0.25	0.175	0.7	0.7	10	12
2	0.25	0.173	0.3	0.96	20	14
3	0.43	0.175	0.7	1	30	15.6
4	0.45	0.175	0.3	0.85	40	22.8
5	0.45	0.175	0.3	0.6	46	30.6
6	0.45	0.127	0.3	0.6	60	76

的脱水失重,400~500℃条件下氢氧化钙(CH)开始出现脱羟基引起的质量损失,600~800℃区间主要为碳酸钙(CaCO_3)受热脱碳。当养护龄期为3d时,在水泥熟料的前期水化反应过程中,有机酸、硫酸铝、氟化钠和三乙醇胺这四种添加剂对水泥的水化作用表现出较高的一致性,均存在不同程度的抑制水化作用。以基准组为参照,3d养护龄期条件下增加四种外加剂的测试组TG数据表明,试样的总烧失量分别下降1.5%、6.3%、4.1%、4.8%,由此可以判定,不同外加剂对水泥前期水化的抑制能力排序为硫酸铝>三乙醇胺>氟化钠>有机酸。

有机酸和硫酸铝测试组的各水化产物吸热峰均存在不同程度的削弱,但其特征吸热峰的变化趋势和峰位与基准组基本一致。这主要源于硫酸铝和有机酸在水泥熟料颗粒表面生成的抑制膜^[14],且硫酸铝的增加促进了硫酸盐与铝酸三钙(C_3A)之间的反应,导致硫铝酸盐由“欠硫”转变为“富硫”状态^[19-20],过高的 SO_4^{2-} 浓度进一步抑制了水化反应的进行。此外,加入氟化钠和三乙醇胺的测试组试样DTG曲线在100~200℃的特征吸热峰出现明显右移,考虑到C-S-H的失重主要集中在100~120℃,而AFt的失重区间为105~150℃,峰位的右移说明试样中生成了更多的AFt相。上述现象的产生源于氟离子与醇胺通过络合作用促进了水泥熟料溶解,促使大量AFt形成^[21],生成的大量AFt与C-S-H凝胶及有机酸颗粒共同吸附于熟料表面,形成保护层。受此保护层影响,水泥浆液具有一个短暂的“水化钝化期”,并在此期间保持良好的可泵性。

如图2(b)所示,随着水化反应的持续推进,当养护龄期达7d时,测试组的烧失量相较基准组分

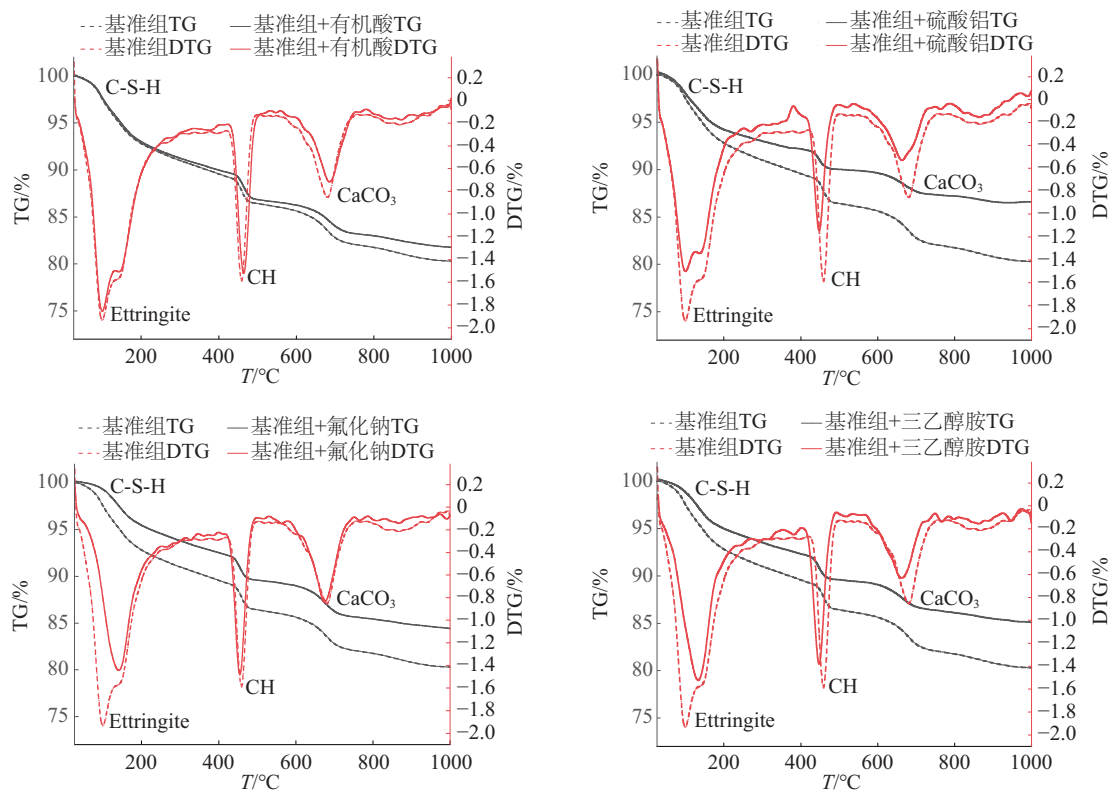
别提升2.4%、1.4%、0.2%、0.2%,这一变化表明不同外加剂在作用过程中均存在由“抑制水化”至“促进水化”的转换节点,其促进效应显著程度为有机酸>硫酸铝>氟化钠≈三乙醇胺。其中,加入有机酸的测试组在100℃表现出显著增强的吸热峰,表明C-S-H的生成量明显增加。由于多元材料体系在前期形成的保护层抑制了水泥水化的进行,而随着水化反应的演进,水泥熟料中的铝酸盐逐渐溶解, Al^{3+} 、 Ca^{2+} 与 OH^- 等离子在熟料表面不断富集。当离子浓度达到临界阈值后,渗透压驱使前期形成的保护层转变为可渗透状态^[15],其屏障作用随之减弱。至此,大量离子得以渗出并与外加剂中的促进组分接触,从而使使得外加剂的促水化作用重新占据主导地位。

为进一步分析胶凝时控水泥体系的水化程度,根据各试件在400~500℃之间的质量损失计算CH含量,得出养护龄期为3、7d的试样CH含量,结果见表4。

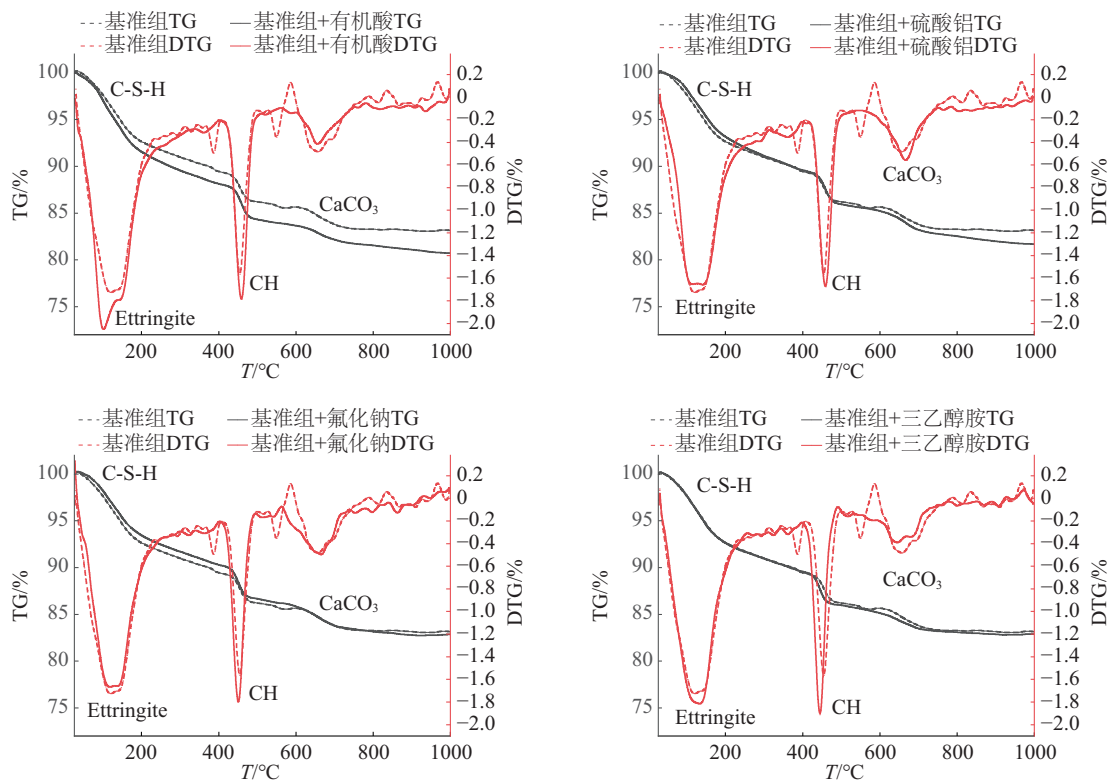
不同养护龄期、不同外加剂条件下的测试组CH相对含量表明:随着养护龄期的变化,各组试样的CH含量均呈现上升趋势,水化反应的持续进行生成了更多的水化产物,其中基准组CH含量增加0.39%,其余测试组增量分别为2.81%、6.16%、2.91%与3.58%。当养护龄期为3d时,由于不同外加剂的抑制作用,各测试组CH含量相较于基准组分别降低0.05%、4.08%、0.9%、1.71%,当龄期提升至7d时,各测试组CH含量相对基准组分别增加了2.37%、1.69%、1.62%、1.48%。由3d龄期的抑制水化到7d龄期的促进水化现象也表明,多元材料体系存在一个关键的作用转换节点。综上所述,不同外加剂在早期与后期的差异化调控作用,使得水泥体系呈现出较为典型的动态演化特征,尤其是有机酸组在抑制阶段后的促进效应最为显著。在多元材料体系的抑制-促进双重调节机制作用下,浆液胶凝时控特性得以实现精准把控。

3.2 水化产物微观结构分析

热重数据结果表明,在水化早期,硫酸铝对水泥水化的抑制作用最明显,然而随着水化反应的持续推进,各外加剂逐渐由抑制转向促进作用,其中有机酸表现出最强的促进驱动力,其次为硫酸铝。为进一步阐明有机酸与硫酸铝对水泥水化反应的调节机制,对测试组物相演化特征进行微观分析,结果如图3所示。



(a)3d养护龄期



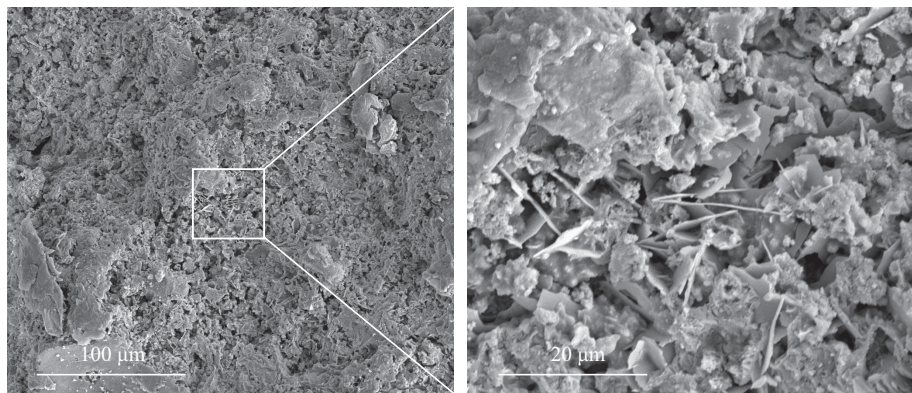
(b)7d养护龄期

图2 热重分析结果

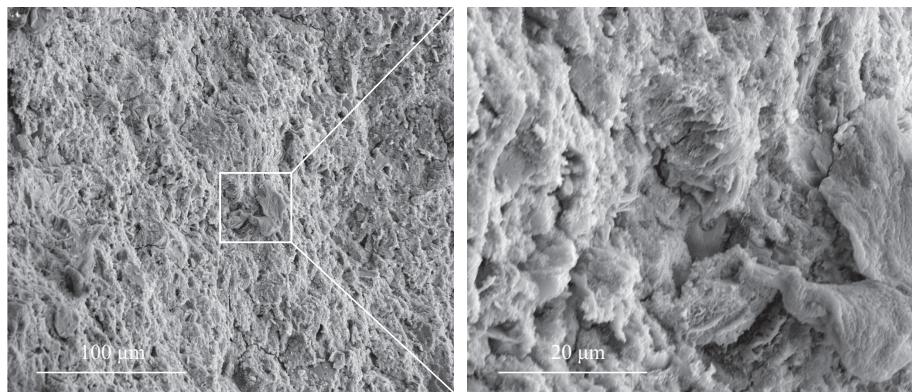
Fig.2 Results of thermogravimetric analysis

表 4 CH 含量
Table 4 Content of CH

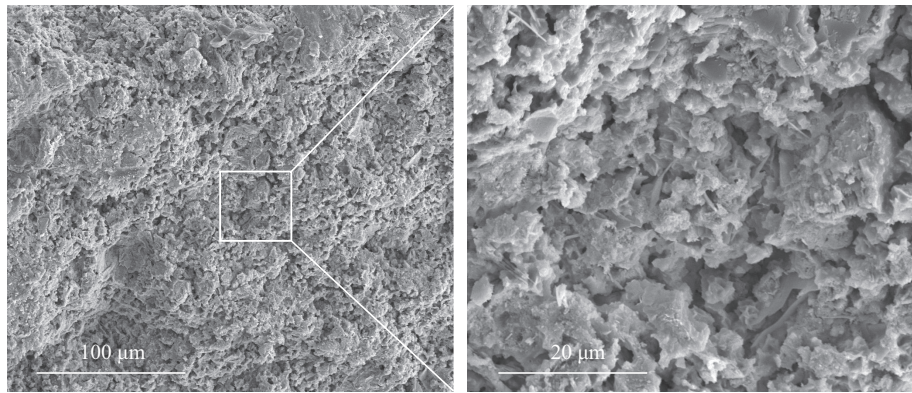
龄期/d	基准组/%	基准组+有机酸/%	基准组+硫酸铝/%	基准组+氟化钠/%	基准组+三乙醇胺/%
3	12.91	12.86	8.83	12.01	11.2
7	13.3	15.67	14.99	14.92	14.78



(a)基准组水化7 d



(b)增加有机酸组水化7 d



(c)增加硫酸铝组水化7 d

图 3 扫描电镜试验结果

Fig.3 Results of SEM test

由图 3(a)可知,当养护龄期为 7 d 时,基准组仍存在大量未水化的硅酸盐水泥熟料,其主要水化产

物 C-S-H 生成不足,水泥结石体内存在较多微空隙,胶结质量差,力学强度相对较低。图 3(b)显示,

增加有机酸的测试组水化产物结构更加致密,未水化的硅酸盐水泥熟料减少,更多的C-S-H等水化产物得以生成,当水泥样品被放大至5000倍时,可见结石体内部分布的单硫型水化硫铝酸钙(AFm)。结合热重数据综合分析,当水泥养护至7 d时,有机酸的早期抑制作用已转化为对水泥水化的促进作用,测试组生成的C-S-H、AFt与CH较基准组更多,且其在160℃左右的吸热峰表明对应的水化产物AFm^[22]生成量有所增加。

图3(c)表明,增加硫酸铝的测试组水泥结石体较基准组水化更加充分,可见大量六方片状CH生成,同时观察到AFm产物附着于水泥体结构表面。根据前述热重数据计算结果可知该组CH含量最高,这缘于硫酸铝的加入提高了体系中 SO_4^{2-} 的浓度,使得早期水化产物倾向于转化为AFt。但随着 SO_4^{2-} 的消耗,水化生成的AFt不稳定,导致其向AFm转化^[23-24],由此体系中的AFt含量降低,这与图2(b)中硫酸铝测试组100~150℃区间内吸热峰峰值降低的结果相对应。

由此可见,尽管多元材料体系的引入在早期对水泥水化及强度发展存在一定的抑制作用,但随着水化反应的持续进行,这种抑制效应逐渐减弱并进一步转化为促进效应。随时间推移,体系中的水化产物不断增多并构建起更为完整的空间网络结构,使得水泥结石体微观结构趋于致密化,推动机械强度稳步提升。试验结果也表明,该多元材料体系的加入不会对水泥的长期强度产生不利影响。

4 结论与建议

为赋予水泥基材料胶凝时控特性,使其适用于不同孔深的护壁堵漏工作,本文在前期大量探索的基础上提出有机酸、氟化钠、三乙醇胺及硫酸铝的复配方案,并通过析因试验完成了配方研制。在此基础上还通过微观分析手段明确了不同外加剂对水泥水化的调控机理,得出以下结论。

(1)以有机酸(YS)0.25%~0.45%、三乙醇胺(TEA)0.075%~0.175%、氟化钠(NF)0.3%~0.7%和硫酸铝(AS)0.6%~1%的加量复配后,可在10~60 min范围内调节水泥浆液可泵期。结合析因试验设计,还实现了浆液可泵期到初凝时间间隔最小化,提升了水泥浆液在不同孔深条件下的护壁堵漏适用性。

(2)本文所研制的护壁堵漏材料中,不同外加剂对水泥硅酸盐熟料和铝酸盐熟料的水化速率调控程度有所不同,在水化抑制和水化促进作用间有效建立了动态平衡,并且这种状态可通过调整不同外加剂加量进行改变,从而赋予水泥浆液胶凝时控特性。

(3)胶凝时控护壁堵漏水泥中的多元材料体系在早期会抑制水化反应,但随着水化过程的推进,这种抑制作用逐渐减弱,并在转化节点变为对水泥水化的促进作用。试验数据显示,所研制配方7 d力学性能优异,平均可超过20 MPa。

当前胶凝时控护壁堵漏材料的研发与评价多聚焦于常温、常规化学条件,而页岩气等深部钻探工程面临高温、高矿化度等复杂地质与化学环境,其适应性与服役行为仍有待系统性研究。未来研究应重点关注该材料在复杂环境下的性能演化,开展高温条件下浆液流变行为、胶凝时序及力学性能的研究,阐明温度对水化反应动力学及胶凝时控效果的影响机制,并结合高盐矿化度环境,探讨不同离子环境与矿化度水平对浆液胶凝过程、凝结特性及微观结构演化的作用规律。

参考文献(References):

- [1] 程涌,郭宇丰,陈国栋,等.中国页岩气资源潜力、分布及特点[J].昆明冶金高等专科学校学报,2017,33(5):17-24.
CHENG Yong, GUO Yufeng, CHEN Guodong, et al. On resource potential, distribution and characteristics of shale gas in China[J]. Journal of Kunming Metallurgy College, 2017, 33(5):17-24.
- [2] 邹才能,董大忠,杨桦,等.中国页岩气形成条件及勘探实践[J].天然气工业,2011,31(12):26-39.
ZOU Caineng, DONG Dazhong, YANG Hua, et al. Formation conditions and exploration practice of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12):26-39.
- [3] 赵洪波,朱芝同,梁涛,等.页岩气基础地质调查钻井技术研究进展及展望[J].中国地质,2023,50(2):376-394.
ZHAO Hongbo, ZHU Zhitong, LIANG Tao, et al. Shale gas geological survey drilling technologies: Progress and prospect[J]. Geology in China, 2023, 50(2):376-394.
- [4] 中华人民共和国自然资源部.地质钻探护壁堵漏技术规程:DZ/T 0410—2022[S].北京:地质出版社,2022.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Code of practice for wall protecting and leakage plugging in geological drilling: DZ/T 0410—2022[S]. Beijing: Geological Publishing House, 2022.
- [5] 李奎.泸州深层页岩气呼吸性地层井漏堵漏方法及对策分析——以Y101H3-4井为例[J].钻探工程,2022,49(5):106-110.
LI Kui. Plugging of breathing formation in deep shale gas wells

- in Luzhou: Taking Well Y101H3-4 for example[J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(5): 106-110.
- [6] 王胜建,迟焕鹏,庞飞,等.黔北正安地区页岩气钻探工程难点与对策研究[J]. *地质与勘探*, 2023, 59(1): 162-169.
- WANG Shengjian, CHI Huanpeng, PANG Fei, et al. Challenges and solutions of drilling engineering in the Zheng'an area of northern Guizhou Province [J]. *Geology and Exploration*, 2023, 59(1): 162-169.
- [7] 王宗友,陈刚,乔生贵.页岩气调查黔地4井钻探技术[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, 45(2): 1-6.
- WANG Zongyou, CHEN Gang, QIAO Shenggui. A brief discussion on the drilling technology of shale gas survey in qiandi well-4 [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(2): 1-6.
- [8] 奎中,黄晟辉.湘永地1井钻探施工技术[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, 45(8): 28-33.
- KUI Zhong, HUANG Shenghui. Drilling construction technology for xiangyongdi well-1 [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(8): 28-33.
- [9] 万夫磊,王培钢,范生林.川南页岩气钻井井漏特征及堵漏技术研究与应[J]. *石油科技论坛*, 2022, 41(2): 85-91.
- WAN Fulei, WANG Peigang, FAN Shenglin. Leakage characteristics of shale gas wells drilled in southern Sichuan and plugging technology research and application [J]. *Oil Forum*, 2022, 41(2): 85-91.
- [10] 于浩洋,李云洲,何万通.YL型有机缓凝剂的制备及其应用[J]. *钻探工程*, 2024, 51(3): 131-135.
- YU Haoyang, LI Yunzhou, HE Wantong. Preparation and application of YL organic retarders [J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(3): 131-135.
- [11] Zhang C, Yang J S, Fu J Y, et al. Optimal formulation design of polymer-modified cement based grouting material for loose deposits [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 261: 120513.
- [12] 张统得,李正前,蒋炳,等.塔里木盆地油气地质调查新乌地1井钻探工艺技术[J]. *中国地质调查*, 2019, 6(4): 58-63.
- ZHANG Tongde, LI Zhengqian, JIANG Bing, et al. Drilling technology of well Xinwudi1 in oil and gas geological survey of Tarim Basin [J]. *Geological Survey of China*, 2019, 6(4): 58-63.
- [13] 黎凌,李巍,欧阳伟.遇水快速膨胀胶凝堵漏技术在长宁页岩气区块的应用[J]. *钻井液与完井液*, 2019, 36(2): 181-188.
- LI Ling, LI Wei, YANG WeiOU. Application of a fast-swell-ing gel lost circulation material in shale gas drilling in block Changning [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2019, 36(2): 181-188.
- [14] 赵晓彦,蹇黎明,何同继,等.一种单双液同体系注浆材料及其制备方法:CN202311554788.6[P].2023-11-21.
- ZHAO Xiaoyan, JIAN Liming, He Tongji, et al. A single-liquid and double-liquid grouting material of the same system and its preparation method: CN202311554788.6[P].2023-11-21.
- [15] Jian L M, Zhao X Y, Yan H Y, et al. Formulation of a cement-based grout characterizing controllable gelation time and its modification mechanism [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 419: 135516.
- [16] 王文臣.钻孔冲洗与注浆[M].北京:冶金工业出版社,1996.
- WANG Wenchen. *Drilling and Grouting* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.混凝土外加剂匀质性试验方法:GB/T 8077—2012[S].北京:中国标准出版社,2013.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. *Methods for testing uniformity of concrete admixture: GB/T 8077—2012* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.喷射混凝土用速凝剂:GB/T 35159—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. *Flash setting admixtures for shotcrete: GB/T 35159—2017* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [19] Quennoz A, Scrivener K L. Interactions between alite and C₃A-gypsum hydrations in model cements [J]. *Cement and Concrete Research*, 2013, 44: 46-54.
- [20] Han J G, Wang K J, Wang Y, et al. Study of aluminum sulfate and anhydrite on cement hydration process [J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(4): 1105-1114.
- [21] 李强强.高铁用醇胺类早强剂对水泥石力学性能及微观结构的影响[D].北京:北京交通大学,2019.
- LI Qiangqiang. Influences of alkanolamine accelerators used in high-speed railway on the mechanical properties and microstructure of hardened cement pastes [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [22] 张洪.碳酸钙对硫铝酸盐水泥水化及性能影响[D].大连:大连理工大学,2024.
- ZHANG Hong. The effect of calcium carbonate on the hydration and performance of sulfoaluminate cement [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024.
- [23] 欧阳东升.速凝剂对水泥基材料强度发展与耐久性的影响研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2025.
- OUYANG Dongsheng. Study on the effect of accelerators on the strength development and durability of cement-based materials [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2025.
- [24] Baquerizo L G, Matschei T, Scrivener K L, et al. Hydration states of AFm cement phases [J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 73: 143-157.

(编辑 王跃伟)