护壁泥浆对灌浆水泥的劣化机理及抗污染优化

李 建[1]，杨 康[1]，高自全[1]，严祥锋[1]，田仁俊[2]，高千园[1]，田 芯[1]，王 胜[2*]
（1.中国水利水电第七工程局成都水电建设工程有限公司，四川 成都 610213；2.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：针对西南深山峡谷地区水电站建设工程中护壁泥浆残留与水泥浆接触污染导致胶结面强度弱化、灌浆质量下降的问题，通过室内试验，研究3种典型护壁泥浆与水泥净浆以不同体积比混合后的接触污染效应，测试了混合浆体的流动度、凝结时间及不同龄期抗压强度，并结合扫描电镜微观分析，揭示了泥浆对灌浆水泥的性能劣化规律及作用机理。结果表明：泥浆残留显著劣化水泥净浆性能，膨润土基泥浆主要通过颗粒包裹层抑制水化并诱发干缩裂隙；黄原胶无固相泥浆因有机–无机界面脱黏导致结构崩解，20%掺量时1 d强度损失率高达93.8%，且完全丧失可泵性。基于此，通过外加剂筛选与正交试验，优选出水灰比0.4、掺入0.1%减水剂、0.25%早强剂及0.55%纳米二氧化硅的高性能抗污染灌浆配方，其可泵期达80 min，终凝时间180 min。该优化配方1 d强度达18.8 MPa，较普通净浆提升10倍以上，流动度26.0 cm；在泥浆污染环境下，力学性能提升幅度显著，有效抵抗了水化抑制与收缩破裂，显著增强了抗泥浆污染能力，为复杂地层灌浆施工提供了理论依据与技术支撑。

关键词：护壁泥浆；灌浆水泥；灌浆质量；接触污染；抗污染性能；劣化机理；正交试验；性能优化
中图分类号：P634；TV543 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-9686(2026)06-0126-11

Deterioration mechanism of grouting cement induced by wall-protecting mud and anti-contamination optimization

LI Jian[1], YANG Kang[1], GAO Ziquan[1], YAN Xiangfeng[1], TIAN Renjun[2],
GAO Qianyuan[1], TIAN Xin[1], WANG Sheng[2*]
(1. *Chengdu Hydropower Construction Engineering Co., Ltd. of China Water Resources and Hydropower Seventh Engineering Bureau, Chengdu Sichuan* 610213, *China*; 2. *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu Sichuan* 610059, *China*)

Abstract: To address the problems of cementation strength weakening and grouting quality deterioration caused by contact contamination between residual wall-protecting mud and cement slurry during hydropower station construction in deep mountain and canyon areas of Southwest China, laboratory tests were conducted to investigate the contact contamination effects of three typical wall-protecting muds mixed with neat cement paste at different volume ratios. The fluidity, setting time, and compressive strength at different ages of the mixed slurries were tested, and scanning electron microscopy (SEM) microanalysis was performed to reveal the deterioration patterns and mechanisms of mud on the performance of grouting cement. The results show that mud residue significantly deteriorates the performance of neat cement paste. Bentonite-based muds primarily inhibit hydration and induce drying shrinkage cracks through particle coating layers, while xanthan gum non-solid-phase mud causes structural disintegration due to organic-inorganic interface debonding. At a 20% mixing ratio, the 1-day strength loss rate of the latter reaches as high as 93.8%, with a

收稿日期：2026-03-23；**修回日期**：2026-04-28 **DOI**：10.12143/j.ztgc.2026.06.014
基金项目：中国水利水电第七工程局有限公司科技项目（编号：2025-1020-95-45）
第一作者：李建，男，汉族，1983年生，常务副经理，高级工程师，水利水电工程专业，长期从事水利水电施工一线生产与管理工作，四川省成都市温江区花都大道西段9号，19289937@qq.com。
通信作者：王胜，男，汉族，1982年生，钻掘教研室主任，教授，博士生导师，地质工程专业，博士，长期从事钻探新工艺与新材料的科研与教学工作，四川省成都市成华区二仙桥东三路1号，yongyuandewangsheng@sina.com。
引用格式：李建，杨康，高自全，等.护壁泥浆对灌浆水泥的劣化机理及抗污染优化[J].钻探工程，2026，53(6)：126-136.
LI Jian, YANG Kang, GAO Ziquan, et al. Deterioration mechanism of grouting cement induced by wall-protecting mud and anti-contamination optimization[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(6): 126-136.

complete loss of pumpability. Based on these findings, through admixture screening and orthogonal tests, a high-performance anti-contamination grouting formulation was optimized with a water-cement ratio of 0.4, incorporating 0.1% superplasticizer, 0.25% early-strength agent, and 0.55% nano-silica. Its pumpable period reaches 80 min, and the final setting time is 180 min. This optimized formulation achieves a 1-day strength of 18.8 MPa, which is more than 10 times higher than that of ordinary neat cement paste, along with a fluidity of 26.0 cm. Under mud contamination conditions, its mechanical properties are significantly improved, effectively resisting hydration inhibition and shrinkage cracking, and markedly enhancing the anti-mud contamination capability. This study provides a theoretical basis and technical support for grouting construction in complex strata.

Key words: wall-protecting mud; grouting cement; grouting quality; contact contamination; anti-contamination performance; deterioration mechanism; orthogonal test; performance optimization

0　引言

西南深山峡谷地区水电站建设的工程实施过程中,岩体强度与完整性存在显著空间差异,给钻孔施工与基础灌浆处理带来严峻挑战。钻孔灌浆是改善岩体质量、确保基础防渗、实施堵漏的关键技术手段,堵漏是保证钻进工作安全、快速及持续进行的重要技术环节[1]。但在钻孔完成后,护壁泥浆在孔内的残留会干扰后续灌浆水泥的正常水化与胶结过程,导致灌浆体形成缺陷、界面胶结强度弱化,进而引发固井质量下降、形成潜在渗漏通道等一系列技术问题。所以开展护壁材料对灌浆质量影响的研究,对于保障复杂地质条件下基础处理工程质量具有重要意义。

近年来,国内外学者围绕护壁泥浆与灌浆材料的相互作用开展了一系列研究。王涛等[2]通过室内试验研究了泥浆固水比、膨润土替代率和废弃泥浆黏粒含量对注浆材料性能的影响,发现废弃泥浆制备的砂浆具有更优的流动性能,但存在泌水现象明显和强度偏低的问题。这一研究揭示了泥浆残留对灌浆材料性能的双重影响。韩璐等[3]研究了黄河泥沙对水泥材料性能的影响,发现泥沙的掺入导致浆体凝结时间缩短、流动性下降,其中$CaCO_3$为水泥水化提供成核位点,加速水泥早期水化进程,但同时也抑制钙矾石向单硫型硫铝酸钙的转变。Arbad等[4]系统研究了低含量油基泥浆(OBM)污染对API H级水泥浆长期完整性的影响,测试发现在75 ℃养护7 d后水泥结石体的抗压强度降低达23%,而3.2%污染时强度降低39%。这一研究揭示了低含量泥浆污染对水泥性能的显著劣化效应。Beach等[5]早在20世纪50年代就指出,水泥浆与钻井液的混合是导致路易斯安那州和德克萨斯州油田50%固井失败的主要原因。此外,有学者研究了聚丙烯酰胺聚合物对磷石膏基注浆材料性能的影响,发现聚合物水解对新鲜浆体的初期水化有不利影响[6]。李书进等[7]利用盾构施工产生的废弃泥沙与水泥复合制备了高性能环保型注浆材料,研究了水固比、砂胶比、减水剂掺量对注浆料稠度、流动度、凝结时间、结石率、泌水率、抗压强度等性能的影响。此外有学者针对高含泥率废弃粉质土砂配制盾构壁后注浆浆液进行了试验研究,结果表明废弃粉质砂的添加可以缩短浆液凝结时间,提高浆液稳定性,同时会导致浆液流动度与早期强度小幅度降低[8]。许桂莉[9]针对目前钻井液与水泥浆接触污染机理不完全明确的问题,研究了聚阴离子纤维素(PAC)对水泥浆结构和性能的影响,研究结果表明,随着PAC加量的增加,水泥浆的流变性变差,水泥浆固化体的抗压强度降低。舒计城等[10]研究了膨化前后2种状态膨润土对水泥浆液稳定性的影响,试验结果表明,膨化后膨润土水泥浆液泌水率性能优于未膨化膨润土,但效果有限。

然而,现有研究聚焦于泥浆和注浆材料自身性能优化,对于不同护壁材料对灌浆水泥性能的影响规律研究仍相对匮乏,泥浆残留对水泥水化过程的干扰机制尚不清晰,严重制约了复杂地质条件下护壁材料的精准选用与灌浆质量的可靠保障。基于此,本文针对护壁材料与灌浆材料接触污染导致灌浆质量难以保障的问题,通过室内模拟试验,研究3种典型护壁泥浆配方对水泥净浆流动度、凝结时间及力学性能的影响规律,揭示泥浆残留对灌浆水泥性能的影响机理,并在此基础上进行改善,研制适用于泥浆污染环境的抗污染灌浆水泥浆配方,以期为复杂地层灌浆施工提供理论依据与技术支撑。

1　试验材料与方法

1.1　试验材料与仪器

试验所用水泥为拉法基425硅酸盐水泥,外加

剂包括聚羧酸减水剂(JS)、氯化钙早强剂(LH)和纳米二氧化硅(纳米HG)等,泥浆材料主要包括钠基膨润土、黄原胶、腐殖酸钾、羟丙基淀粉、无水碳酸钠、羧甲基纤维素钠等。

试验仪器主要包括苏氏漏斗、电子天平、小型泥浆搅拌机、六速旋转黏度计、API滤失仪、高温高压滤失仪、微机控制电液伺服压力试验机、水泥净浆搅拌机、水泥试块养护箱、4 cm×4 cm×4 cm的水泥试块模具。

1.2 试验方法

研究显示,0.8%的微量泥浆污染即可使强度显著降低[4],因此本研究选用体积占比为10%、20%的护壁泥浆进行接触污染试验,以模拟钻孔护壁残留的中等污染情况(介于微量污染与废浆高掺量之间)。采用水泥净浆搅拌机先慢速(自转140 r/min,公转62 r/min)搅拌2 min,停15 s刮浆,再快速(自转285 r/min,公转125 r/min)搅拌2 min制备混合浆液,使用养护温度20±2 ℃、相对湿度(RH)≥90%的养护箱养护成型后,以2400±200 N/s的荷载速率测定相应抗压强度等性能参数(每组性能参数测定均设置3组平行试验组取平均值),并与未污染的水泥净浆进行对比,分析护壁泥浆对灌浆水泥质量的影响规律。针对该影响规律,添加水泥外加剂进行改善,试验涉及减水剂、早强剂和纳米材料筛选。通过设置不同掺量组别,以早期抗压强度为主要评价指标,流动度和凝结时间为辅助参考,优选单种类外加剂掺量后评估优化配方在泥浆接触条件下的抗污染性能,开展水泥净浆与优化配方接触污染性能前后对比试验。将3种护壁泥浆分别与优化配方水泥浆按1:9和2:8的体积比混合制模后测定流动度、凝结时间及早期抗压强度,并与水泥净浆污染试验的性能参数进行对比,综合评价优化水泥浆配方的抗泥浆污染性能。

2 试验结果与分析

2.1 材料选取

2.1.1 泥浆

本次研究主要考虑工程上常用的3种不同泥浆,分别是普通膨润土泥浆、3%膨润土含量的低固相泥浆、黄原胶配制的无固相泥浆。普通膨润土泥浆通常采用6%钠基膨润土作为主要固相材料,通过其中矿物的水化膨胀作用形成稳定的胶体体系,从而具备适当的黏度、悬浮能力及护壁功能,这类泥浆在桩基施工和地下连续墙等常规工程中应用广泛[11]。低固相泥浆将膨润土含量控制在3%左右,显著降低了体系中的固相含量,常用于渗透性较强的地层中,在软土地层和砂层隧道工程中具有显著优势。无固相泥浆利用生物聚合物作为增黏成分,常用于油气田开发、页岩地层和高渗透性地层等特殊工程[12]。3种泥浆配比与性能参数见表1。

表1 护壁泥浆参数

Table 1 Wall protection mud parameters

代号	泥浆种类	漏斗黏度/s	滤失量/[mL·(30 min)$^{-1}$]	膨润土含量/%	纯碱含量/%	CMC含量/%	黄原胶含量/%	腐殖酸钾含量/%	羟丙基淀粉含量/%
N-1	普通膨润土泥浆	23.3	11.6	6	0.2	0.2	0	0	0
N-2	低固相泥浆	21.5	14.8	3	0.2	0.2	0	0	0
N-3	无固相泥浆	80.0	26.0	0	0.2	0	0.4	0.2	1.0

2.1.2 水泥浆

当前常用的注浆材料主要包括水泥浆、水泥-水玻璃双液浆、黏土固化浆液等,硅酸盐水泥是工程中比较常见的注浆材料,所以本次试验选用拉法基425硅酸盐水泥配制水泥净浆,水泥净浆配比见表2。

表2 水泥净浆性能参数

Table 2 Performance parameters of cement paste

名称	水灰比	JS掺量/%	流动度/cm	1 d抗压强度/MPa	3 d抗压强度/MPa	7 d抗压强度/MPa
水泥净浆	0.4	0.1	24.5	1.6	20.5	25.7

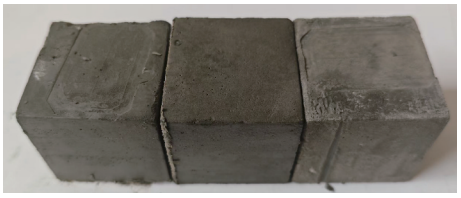
2.2　接触污染性能影响规律

在接触污染试验中,污染试块的性能参数见表3,各试验组的水泥结石体成型情况如图1所示,利用场发射扫描电镜对各试验组1 d水泥试块进行系统表征,如图2所示。

表3　混合浆液性能参数

Table 3　Performance parameters of mixed slurry

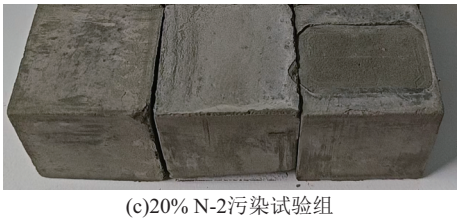
泥浆种类	混合比例	流动度/cm	1 d强度/MPa	3 d强度/MPa	7 d强度/MPa
N-1	1:9	22.5	0.5	6.6	12.5
	2:8	24.3	0.3	2.1	7.4
N-2	1:9	23.0	0.8	8.8	20.7
	2:8	26.3	0.4	3.7	9.7
N-3	1:9	7.5	0.3	9.4	13.2
	2:8	9.5	0.1	3.5	5.2



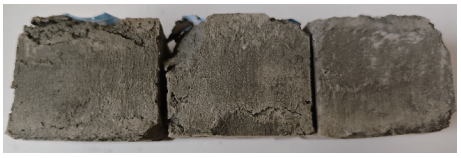
(a)水泥净浆1 d成型



(b)20% N-1污染试验组



(c)20% N-2污染试验组

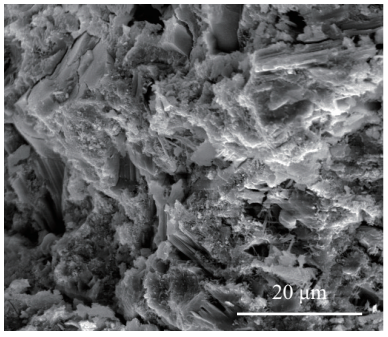


(d)20% N-3污染试验组

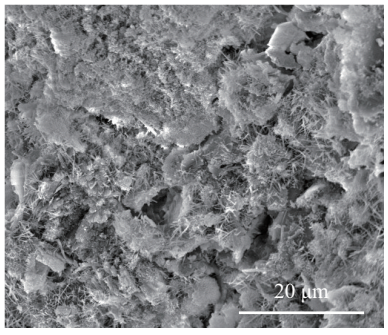
图1　各试验组水泥结石体成型情况

Fig.1　Molding condition of cement consolidated bodies in each experimental group

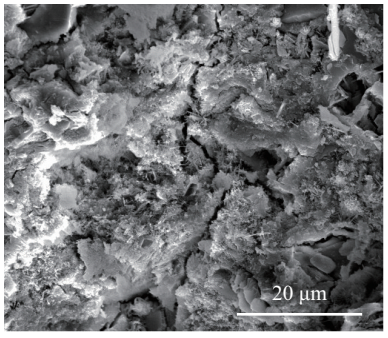
结合表3试验数据可知,不同掺量下3种泥浆与水泥浆接触污染后,均不同程度影响了浆体的流动度与早期抗压强度。随着泥浆掺量由10%增至20%,水泥净浆的流动度呈上升趋势,而1 d强度呈下降趋势。10%掺量时,N-1、N-2、N-3的1 d强度损失率分别为68.8%、50.0%、81.3%;20%掺量时,N-3的损失率高达93.8%。这表明,泥浆掺量增加所引入的额外水分虽改善了浆体流动性,但也加剧了对水泥水化的抑制,导致早期强度进一步劣化。



(a)水泥净浆试验组



(b) 20% N-1污染试验组



(c) 20% N-3污染试验组

图2　各接触污染试验组1 d微观电镜图

Fig.2　SEM micrograph of cement paste in the contact contamination test group(1-day)

不同泥浆对水泥浆性能的影响存在显著差异。在流动度方面,N-1与N-2污染后的水泥浆体流动度基本处于22～26 cm的正常范围,而N-3污染后流动度仅为7.5～9.5 cm,较基准净浆降低60%以上,流动性严重下降,难以满足施工要求。在强度方面,N-1

与N-2的抑制作用主要源于膨润土颗粒包裹水泥颗粒表面,阻碍水化反应进行[13]。其中N-2因膨润土含量较低,对水化抑制相对较轻,故表现出更高的早期强度。N-3的劣化程度最为严重,分析认为黄原胶覆盖水泥颗粒表面同样会抑制水泥水化[14]。

从微观结构分析,N-1与N-2泥浆接触污染后水泥浆体系的破碎现象与水泥-膨润土结石体的孔隙结构密切相关。如图2(b)所示,20% N-1污染试验组微观结构中出现了明显的膨润土包裹层,该层覆盖于水泥颗粒及水化产物表面,阻碍了水泥与水的正常接触,从而抑制水化进程。与水泥净浆致密的微观结构相比,这种包裹层导致体系内部孔隙增加、胶结能力下降。尽管膨润土水化后会形成微小孔隙并部分填充原有大孔隙[15],且较高含量(6%)的膨润土可填充水泥水化孔隙形成相对密实的结构,从而使其破碎程度较N-3更轻,但膨润土对水化的抑制作用仍使体系强度显著下降,无法完全抵抗干燥收缩产生的应力,因此试样仍存在一定程度的破碎。

相比之下,N-3中黄原胶的掺入对强度的影响更为剧烈。掺量为20%时,1 d强度仅0.1 MPa,较基准组降低93.8%,试块呈现明显的松散、破碎特征。从微观结构角度分析,黄原胶虽能形成网状骨架结构,但这种有机高分子网络与无机水化产物之间的界面结合较弱,导致胶结面出现明显裂缝,从而使成型结构呈现松散、破碎状态。已有研究表明,黄原胶的加入可提高浆体的稳定性,改善其抗离析性能[14];然而,如图2(c)所示,这种有机-无机复合结构在干燥收缩过程中易发生界面脱黏,形成微裂纹。加之极低的早期强度,试块在脱模和养护过程中难以承受自身的收缩应力,最终导致严重破碎。

综上,泥浆污染对水泥浆体系的破坏作用随掺量增加而加剧。其中,膨润土基泥浆(N-1、N-2)主要通过颗粒包裹层抑制水化并诱发干缩裂隙,黄原胶基泥浆(N-3)则因有机-无机界面脱黏和极低强度引发结构崩解。

2.3 水泥浆液抗污染性能改善

一般工程中所使用的灌浆材料应具有“高强度、早稳定、易流动、低成本”等性能,据此,结合泥浆与水泥净浆的接触污染试验分析得出的规律,对水泥净浆进行改良。其中“高强度”与“早稳定”可以通过添加纳米材料和早强剂来实现,“易流动”可以通过加入减水剂来实现。

2.3.1 减水剂优选

水泥净浆在与N-3泥浆接触污染试验中流动度性能的削弱十分显著,而减水剂作为一种能够有效改善水泥基材料工作性能的外加剂,可使水泥基材料的流动度大幅提高,浆体表现出更好的均匀性和可泵性,为后续灌浆作业提供必要的工作性能基础[16]。

如图3、图4所示,在掺入减水剂后,浆体的流动度均有不同程度提升,说明减水剂能够有效改善浆体的流动性能。红色参照线代表当前水泥基体系的基准参照值,对比不同类型减水剂的作用效果可知,掺入JS的试验组对于材料1 d抗压强度提升效果显著优于FDN及SMF组。进一步分析JS不同掺量对浆体性能的影响可知,0.15%掺量的JS试验组1 d抗压强度与流动度均为最优,且其流动度达到25.5 cm的优质水平,满足后续施工对其性能的要求。研究表明,减水剂掺量存在最佳阈值,当掺量过低时分散效果不足,浆体流动性受限,而当掺量过高时,过量的减水剂分子可能包裹在水泥颗粒表面,阻碍水化产物的正常生成与搭接,反而不利于强度的持续发展[17]。

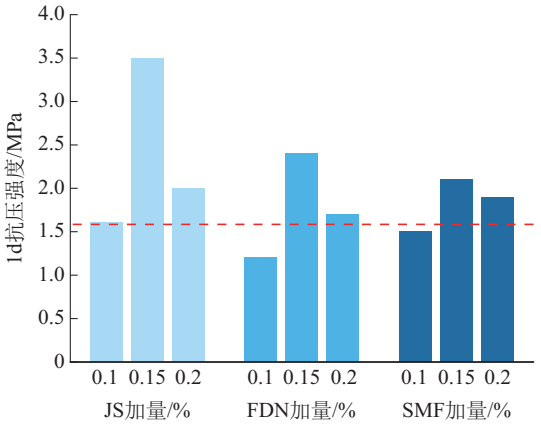


图3 减水剂掺量对水泥浆液1 d强度影响

Fig.3 Effect of superplasticizer dosage on the 1-day strength of cement slurry

综合强度发展与流动度两项关键指标,本研究最终筛选出0.15%掺量的JS作为后续试验的基础配比。该掺量下浆液在保证优良流动性的同时,能够获得理想的早期及中期强度提升效果,为后续水泥基材料性能研究提供了稳定、可靠的材料基础。

2.3.2 早强剂优选

根据减水剂试验组的显示,相较于水泥净浆的1 d抗压强度表现,掺入减水剂后的强度有一定提

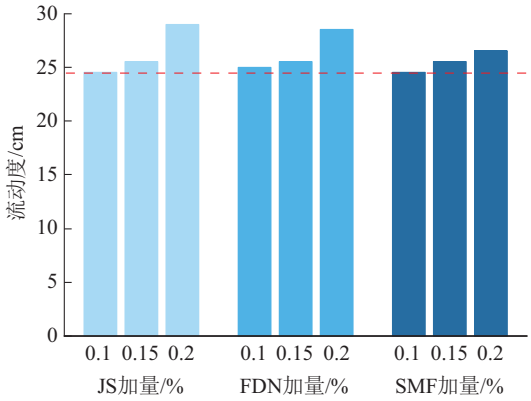


图4　减水剂掺量对水泥浆液流动度影响

Fig.4　Effect of superplasticizer dosage on the fluidity of cement slurry

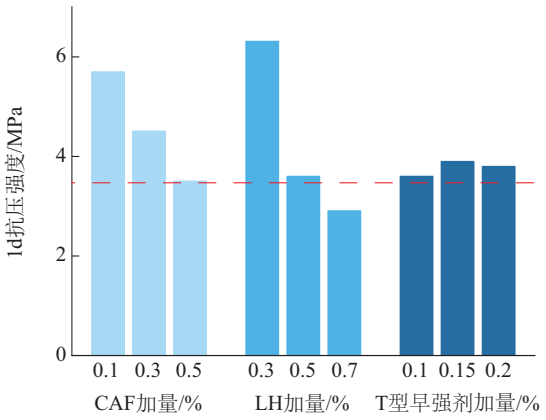


图5　早强剂掺量对水泥浆液1 d强度影响

Fig.5　Effect of early strength agent dosage on the 1-day strength of cement slurry

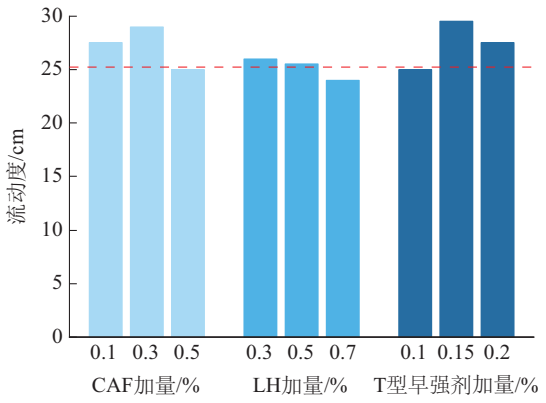


图6　早强剂掺量对水泥浆液流动度影响

Fig.6　Effect of early strength agent dosage on the fluidity of cement slurry

升,但是用于灌浆作业远远不够,而早强剂能提高混凝土早期强度,加速水化,缩短养护时间,并且能改善施工性能,增强抗冻性,降低冻害风险,提高施工效率和质量[18]。

如图5、图6所示,在掺入早强剂后,浆液流动度仍然处于24～29 cm的优质水平,而浆体固化形成的水泥结石体早期强度整体呈上升趋势,多数试验组的强度均高于基准水平。然而,在0.7%LH与0.2%T型早强剂组合的试验组中,1 d抗压强度出现低于基准线的现象。初步分析认为,该现象可能与早强剂掺量过高有关,当掺量超过一定阈值时,外加剂对水泥水化过程的促进作用被抑制,甚至由于离子浓度过高或水化产物分布不均,反而不利于早期强度的发展[19]。对比不同类型早强剂的作用效果可知,掺量为0.3%的LH在提升1 d抗压强度方面显著优于CAF及T型早强剂。结合流动度测试结果,该组的浆体流动度达到26 cm,满足后续施工与研究对其性能的要求。

综合强度发展与流动度两项关键指标,筛选出0.3%掺量的LH作为后续试验的基础配比。该掺量下,浆液在保证优良流动性的同时,也能获得较为理想的早期强度提升效果,为后续材料抗污染等性能研究提供了稳定、可靠的材料基础。

2.3.3　纳米材料优选

上述研究表明,泥浆与水泥基材料之间的接触污染会破坏水泥结石体的结构完整性,诱发界面缺陷,进而导致表层损伤与剥落。在水泥基体系中引入纳米颗粒,利用其“填充效应”与“成核效应”协同优化材料微观结构,提高体系密实度与界面结合强度,加速水泥水化反应进程,提升早期强度并促进浆体快速固结[20]。

如图7、图8所示,整体来看,流动度没有明显变化,但随着纳米材料的掺入,浆液固化形成的水泥结石体强度有所提升,均高于纯水泥基浆的早期强度水平。掺入纳米HG后,结石体强度显著提高,但随着掺量进一步增加,强度出现轻微下降趋势。纳米TSG与CAS的作用规律与纳米HG基本一致,即在低掺量条件下对强度具有一定促进作用,而高掺量时则表现出不利影响。研究表明,当纳米颗粒的掺量较低时,纳米材料能够通过填充孔隙与促进水化反应,优化浆体微观结构。而当掺量过高时,在范德华力及静电作用下纳米颗粒易发生团聚,削弱其分散效果,同时纳米颗粒对自由水的强吸附会

降低水灰比，增加浆体内部流动阻力，导致结构缺陷增多，从而引起结石体强度下降[21]。

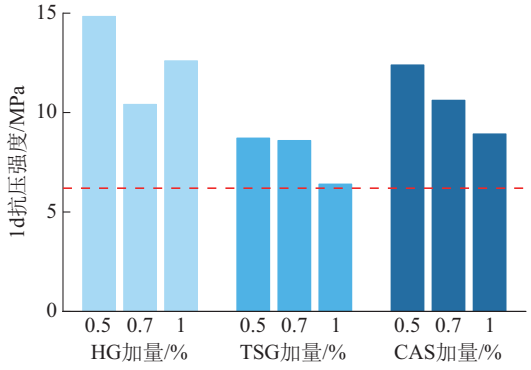


图7 纳米材料掺量对水泥浆液1 d强度影响

Fig.7 Effect of nanomaterial dosage on the 1-day strength of cement slurry

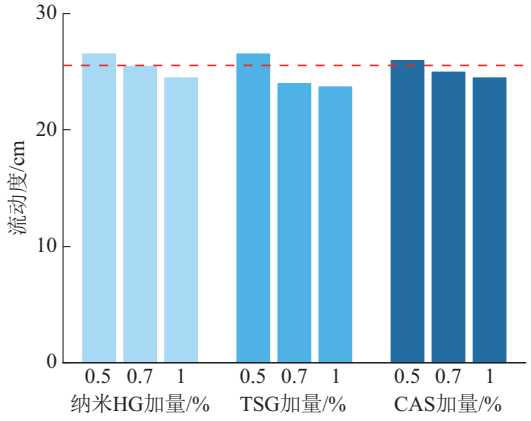


图8 纳米材料掺量对水泥浆液流动度影响

Fig.8 Effect of nanomaterial dosage on the fluidity of cement slurry

综合对比3种纳米材料的作用效果可以看出，纳米HG在0.5%掺量条件下，水泥结石体1 d抗压强度的提升显著优于TSG与CAS，流动度性能也达到26 cm的优质水平。为满足水泥基材料抗污染性能研究对早期强度的需求，选取0.5%掺量纳米HG作为基础浆液。在该掺量水平下，体系可兼顾早期强度的提升与微观结构的优化，为后续性能研究提供稳定且可靠的材料基础。

2.4 最终优化配方试验研究

为保障试验的科学性与准确性，同时为进一步研究和改进提供参考，将筛选出的水泥浆配方进行正交试验。试验设置为三因素三水平，具体的三因素为水泥浆试验中筛选出的因子1为JS加量，因子2为LH加量，因子3为纳米HG加量，如表4所示，正交试验具体试验数据见表5。

表4 正交试验设计

Table 4 Orthogonal experimental design

编号	JS含量/%	LH含量/%	纳米HG含量/%
1	0.10	0.25	0.45
2	0.10	0.30	0.55
3	0.10	0.35	0.50
4	0.15	0.25	0.55
5	0.15	0.30	0.50
6	0.15	0.35	0.45
7	0.20	0.25	0.50
8	0.20	0.30	0.45
9	0.20	0.35	0.55

表5 正交试验性能数据

Table 5 Orthogonal experiment performance data

编号	流动度/cm	可泵期/min	1 d强度/MPa	3 d强度/MPa	初凝时间/min	终凝时间/min
1	24.5	60	17.5	33.1	140	170
2	23.5	65	16.1	32.8	200	250
3	24.0	60	16.7	22.5	210	260
4	24.0	75	17.7	27.2	195	235
5	24.0	70	14.8	30.4	195	225
6	23.5	60	14.9	27.4	235	295
7	25.0	58	15.2	21.7	220	280
8	25.5	65	15.2	20.9	230	280
9	23.5	60	13.7	27.2	200	260

根据正交试验表5的数据找出最佳的因素水平组合，验证试验结果的可靠性。参数求和平均值越大表明该水平越好，各因素对应的参数求和平均值如图9所示。当JS处于0.1%，LH处于0.25%，纳米HG处于0.55%时，1 d抗压强度最高，凝结时间最短。以1 d抗压强度为主要指标，综合流动度与凝结时间数据可知，优化配方的水泥浆液早期强度表现突出，流动性能优异，且凝结时间得到了有效缩短，说明筛选出的材料在确保其强度稳定发展的同时，对其流动度亦有所改善，凝结时间适当。

根据裂隙注浆材料需要具有“高强度、强稳定、易流动”等性能筛选最终水泥浆配方，确定最终配方为0.4水灰比，0.1%的JS，0.25%的LH，0.55%的纳米HG，测量出其具体性能参数见表6。

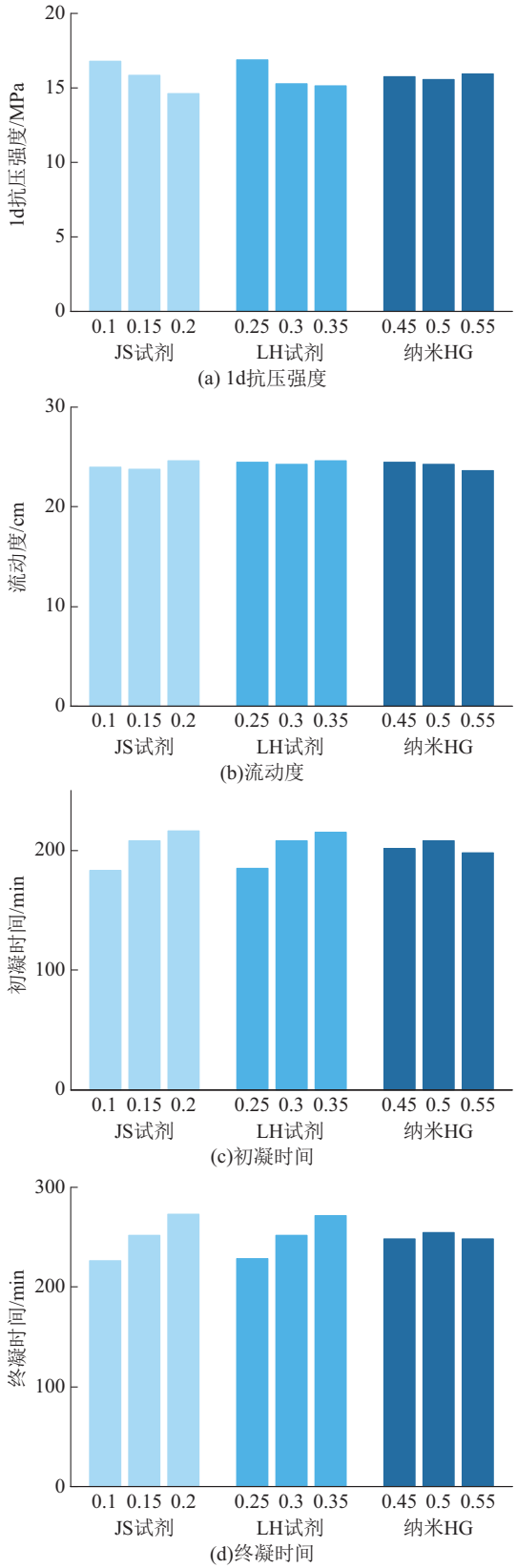


图9　各因素对应参数求和平均值

Fig.9　Average value of parameter summation for each factor

表6　最终优化水泥浆配方性能参数

Table 6　Final optimised cement formulation performance parameters

流动度/cm	可泵期/min	1 d强度/MPa	3 d强度/MPa	初凝时间/min	终凝时间/min
26.0	80	18.8	35.0	130	180

3　优化配方的抗污染性能

为对比最终优化水泥浆液与水泥净浆抗污染性能的改善,配制优化水泥浆分别与3种泥浆以不同比例混合的浆液,数据见表7。为对比优化水泥浆凝固成型的抗污染性,配制优化水泥浆与N-3泥浆以2:8体积比例污染混合的浆液,成型情况如图10、图11所示,优化配方与泥浆接触污染试验组的1 d扫描电镜微观图如图12所示。

表7　优化水泥浆与3种泥浆以不同比例混合性能数据

Table 7　Performance data of optimized cement mixed with three types of slurry at different ratios

泥浆代号	比例	流动度/cm	1 d强度/MPa	3 d强度/MPa	7 d强度/MPa
N-1	1:9	26.0	3.7	9.2	15.0
	2:8	29.0	1.6	5.0	9.2
N-2	1:9	27.5	5.5	12.2	22.6
	2:8	28.5	2.6	7.6	11.5
N-3	1:9	14.2	2.5	11.3	16.2
	2:8	16.0	2.0	4.8	7.3



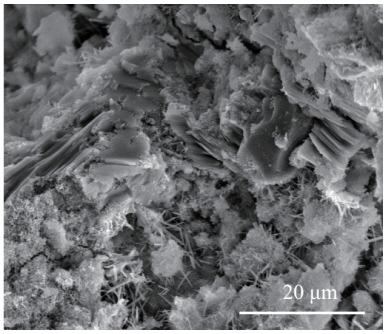
图10　N-3泥浆与水泥净浆2:8比例污染成型

Fig.10　Appearance of N-3 slurry and neat cement paste mixture (2:8) after contamination

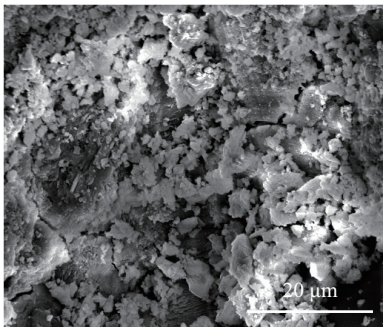


图11　N-3泥浆与优化水泥浆2:8比例污染成型

Fig.11　Appearance of N-3 slurry-optimized cement mixture (2:8) after contamination



(a) 20% N-1污染试验组



(b) 20% N-3污染试验组

图12 优化配方接触污染试验组1 d微观电镜图

Fig.12 SEM micrograph of the optimized formulation in the contact contamination test group(1 d)

如图10、图11所示，与前述水泥净浆受泥浆污染后出现严重破碎、结构松散的现象相比，优化配方的性能显著改善。在宏观成型方面，水泥净浆在N-1、N-2、N-3泥浆污染条件下普遍存在的破损、开裂及脱模困难等缺陷，在优化水泥浆配方中均得到有效抑制，试块表面完整，结构基本保持稳定，表明优化配方能够降低泥浆污染对水泥浆凝固硬化过程的不利影响。

进一步从微观结构分析(图12a、b)，优化配方的污染试验组中可清晰观察到典型的水泥熟料矿物及其水化产物，主要包括钙矾石(AFt)与氢氧化钙(CH)等。这与前文所述膨润土体系因水化抑制导致强度不足、黄原胶体系因有机-无机界面脱黏而产生微裂纹的机理形成鲜明对比。具体而言，N-1与N-3污染组中水泥净浆微观结构曾出现的明显裂隙，在优化组中已得到显著改善，整体结构更为致密，颗粒间结合紧密，未见因收缩应力或界面脱黏引发的贯穿性裂缝。上述结果表明，优化配方能够维持正常的水化进程与结构完整性，从而有效抵抗泥浆污染所诱发的早期强度损失及收缩破裂风险。

为定量评价泥浆污染对水泥浆体系强度的影响，定义指标劣化率=(基准净浆强度－污染后浆液强度)/基准净浆强度×100%，反映净浆受污染后的强度损失程度，恢复率=污染优化配方强度/纯优化配方强度×100%，反映优化配方受污染后的强度保留程度。相应劣化率与恢复率如图13、图14所示。

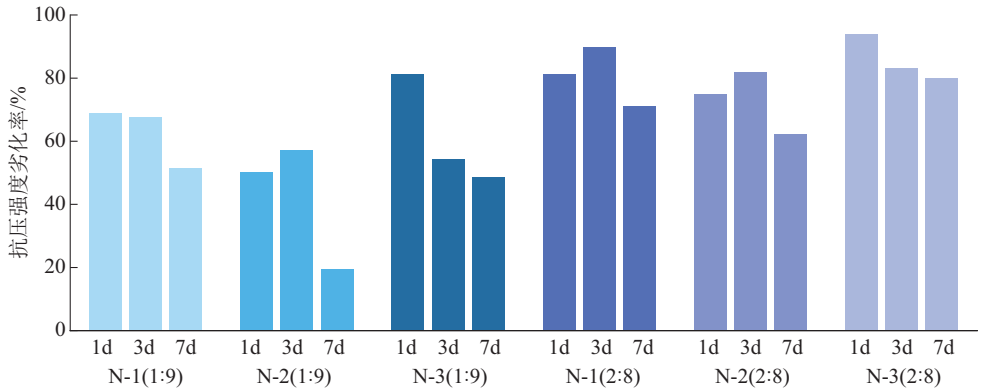


图13 净浆污染后抗压强度劣化率

Fig.13 Deterioration rate of compressive strength of cement paste after contamination

结合各试验组劣化率与恢复率可知，净浆组1 d劣化率达68.8%～93.8%，3、7 d劣化率普遍超50%，早期强度损失严重。优化组虽仍有强度损失(1 d恢复率10.6%～29.3%，3、7 d恢复率略升但均＜50%)，但绝对强度较净浆显著提升。

N-1优化组1 d强度较净浆提高5～7倍，3、7 d强度提高1.5～2倍。净浆组1 d劣化率68.8%～81.3%，优化组1 d恢复率19.7%～8.5%(随掺量增

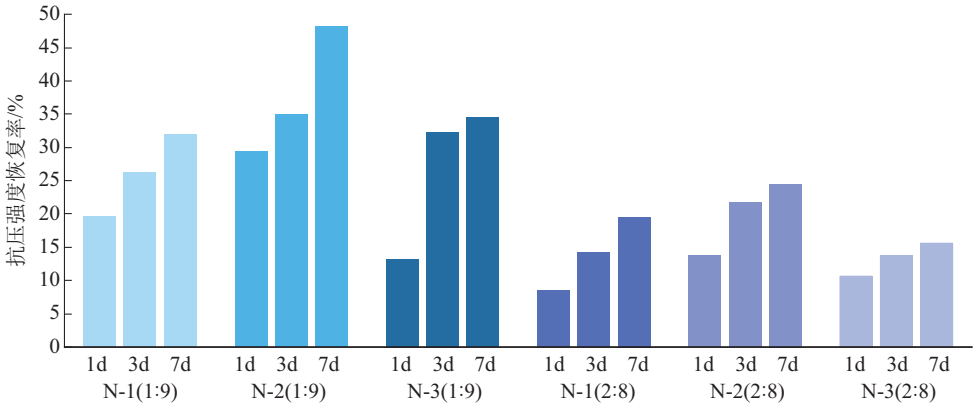


图14　优化后抗压强度恢复率

Fig.14　Recovery rate of compressive strength after optimization

加下降),表明优化配方抗早期污染能力优于后期。N-2优化组1 d强度较净浆提高6～7倍,3 d强度提高1.5～2倍,7 d强度提升较小。净浆组7 d劣化率仅19.5%,优化组7 d恢复率达48.2%(最高),表明优化配方对N-2中后期强度保留能力最强。N-3优化组1 d强度较净浆提高8～9倍(净浆组1 d劣化率81.3%～93.8%),3、7 d强度提升平缓。优化组恢复率仅10.6%～34.5%,但绝对强度满足可泵要求,表明优化配方对强污染(黄原胶)早期改善效果最突出。

综上,净浆组的劣化率普遍超过70%,优化组恢复率20%～50%,虽未达纯净状态,但实现了数倍至近十倍的强度提升,显著增强抗污染能力。

4　结论

文章针对钻孔残留泥浆影响注浆质量及优化注浆材料开展研究,通过水泥浆与泥浆混合对比试验、外加剂筛选及正交试验,得出以下结论。

(1)验证了泥浆残留对水泥净浆性能的劣化作用,护壁泥浆的残留会显著劣化水泥净浆的工作性能与力学性能。膨润土基泥浆污染后,水泥净浆流动度出现小幅下降,各阶段抗压强度明显降低,且劣化程度随泥浆固相含量和污染比例的增加而加剧。黄原胶无固相泥浆对水泥浆性能的劣化更为严重,污染后水泥净浆的可泵性完全丧失。

(2)针对复杂裂隙地层注浆需求,优化所得高性能注浆材料配方为水灰比0.4,掺入0.1% JS减水剂、0.25% LH早强剂及0.55%纳米HG改性材料。该配方具备优异的综合性能,可泵期达80 min,凝结时间180 min,1 d早期强度高达18.8 MPa,较普通水泥净浆提升10倍以上,流动度达26.0 cm,具有良好的裂隙充填能力。

(3)抗污染性能试验表明,优化材料在泥浆污染环境下表现出良好的性能稳定性。普通水泥净浆1 d劣化率高达68.8%～93.8%,而优化材料1 d恢复率为10.6%～29.3%,绝对强度显著高于净浆。其中,黄原胶无固相泥浆污染下净浆劣化最重(93.8%),优化材料恢复效果相对最好;膨润土基泥浆污染下优化材料中后期恢复率(3、7 d)可达24%～48%,结构完整性明显提高。

参考文献(References):

[1] 王胜,欧兴贵,解程超,等.钻井利器的故事之“护壁堵漏材料”[J].钻探工程,2024,51(3):157-161.
WANG Sheng, OU Xinggui, XIE Chengchao, et al. The story of a drilling weapon: Wall protection and plugging materials[J]. Drilling Engineering, 2024,51(3):157-161.

[2] 王涛,刘慧刚,郝钢,等.泥水盾构施工废弃泥浆对同步注浆材料性能的影响[J].科学技术与工程,2022,22(32):14434-14442.
WANG Tao, LIU Huigang, HAO Gang, et al. Influence of waste slurry from slurry shield construction on the properties of synchronous grouting materials[J]. Science Technology and Engineering, 2022,22(32):14434-14442.

[3] 韩璐,周爱平,孙柯,等.黄河泥沙对水泥材料性能及微结构的影响[J].山东大学学报(工学版),2025,55(3):121-127.
HAN Lu, ZHOU Aiping, SUN Ke, et al. Influence of Yellow River sand on the mechanical properties and microstructure of cementitious materials[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025,55(3):121-127.

[4] Arbad N, Teodoriu C, Amani M. Effect of low OBM contamination on long-term integrity of API class H cement slurries-experimental study [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2023,220(Part B):111191.

[5] Beach H J, Goins W C, Jr. A method of protecting cements against the harmful effects of mud contamination[J]. Transactions of the AIME, 1957,210(1):148-152.

[6] Wang Z, Ouyang G, Sun T, et al. Valorization of phosphogypsum into sustainable binder in grouting engineering: Effect of polyacrylamide on slurry stability, leaching behaviour, hydration and performance[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 199: 107238.

[7] 李书进,刘源涛,厉见芬,等.盾构废弃泥沙再生制备高性能注浆材料的试验研究[J].材料导报,2021,35(S2):275-278.
LI Shujin, LIU Yuantao, LI Jianfen, et al. Experimental study on preparation of high performance grouting material from waste sand of shield tunnel construction[J]. Materials Reports, 2021, 35(S2):275-278.

[8] 方忠强,袁锐,孙统立,等.高含泥率废弃粉质土砂配制盾构壁后注浆浆液试验研究[J].现代隧道技术,2023,60(3):182-188.
FANG Zhongqiang, YUAN Rui, SUN Tongli, et al. Study on grout test for wall grouting of the shield built of waste silty soil and sand with high silt content[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023,60(3):182-188.

[9] 许桂莉.聚阴离子纤维素对川渝地区固井用水泥浆性能的影响研究[J].能源化工,2023,44(5):70-75.
XU Guili. Study on the effect of polyanionic cellulose on the properties of cement slurry in Sichuan-Chongqing region[J]. Energy Chemical Industry, 2023,44(5):70-75.

[10] 舒计城,马晓斌,孙旭涛,等.膨润土膨化前后对水泥基净浆浆液稳定性影响分析[J].四川建筑,2023,43(6):226-228.
SHU Jicheng, MA Xiaobin, SUN Xutao, et al. Analysis of the impact of bentonite expansion on the stability of cement-based paste before and after expansion[J]. Sichuan Architecture, 2023,43(6):226-228.

[11] 杨瑞芳,陈浩,史夏杰,等.嵌岩灌注桩单桩竖向极限承载力标准值新旧规范对比[J].建筑结构,2023,53(S2):2417-2420.
YANG Ruifang, CHEN Hao, SHI Xiajie, et al. Comparison of standard value vertical ultimate bearing capacity of single rock-socketed cast-in-place pile with old and new codes[J]. Building Structure, 2023,53(S2):2417-2420.

[12] 杨双春,王月超,潘一,等.环保型黄原胶添加剂在石油开采中的研究应用进展[J].现代化工,2017,37(9):40-43,45.
YANG Shuangchun, WANG Yuechao, PAN Yi, et al. Study and application of environmental friendly xanthan gum in petroleum exploitation[J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(9):40-43,45.

[13] 王泽东,周盛涛,方文,等.膨润土改性水泥土力学特性试验研究[J].硅酸盐通报,2019,38(10):3287-3292.
WANG Zedong, ZHOU Shengtao, FANG Wen, et al. Experimental study on mechanical properties of cement soil modified by bentonite[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019,38(10):3287-3292.

[14] LI Xiuhao, WANG Zhiheng, LIU Yankai, et al. Properties of cement grout doped with xanthan gum and welan gum at high hydration temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2024,420:135664.

[15] 徐超,李丹,黄亮.水泥-膨润土泥浆固结体渗透性与微观结构的关系[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(6):819-823.
XU Chao, LI Dan, HUANG Liang. Relationship between permeability and microstructure of cement bentonite slurry concretion[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(6):819-823.

[16] 刘明,张磊,杨文,等.不同结构聚羧酸减水剂对水泥-硅灰浆体黏度和吸附行为的影响[J].硅酸盐学报,2022,50(2):445-451.
LIU Ming, ZHANG Lei, YANG Wen, et al. Effect of polycarboxylate superplasticizer with different structure on viscosity and adsorption behavior of cement-silica fume paste[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022,50(2):445-451.

[17] ZHANG Yanrong, KONG Xiangming, LU Zhenbao, et al. Effects of the charge characteristics of polycarboxylate superplasticizers on the adsorption and the retardation in cement pastes[J]. Cement and Concrete Research, 2015,67:184-196.

[18] 庞超明,唐志远,杨志远,等.水泥基材料中的早强剂及其作用机理综述[J].材料导报,2023,37(9):21110247.
PANG Chaoming, TANG Zhiyuan, YANG Zhiyuan, et al. Early strengthening agent in cementitious composites and its function mechanism: a review[J]. Materials Reports, 2023,37(9):21110247.

[19] 张金龙,唐孟雄,衷从浩,等.纳米C-S-H晶核早强剂对水泥早期水化的影响[J].硅酸盐通报,2025,44(1):21-30.
ZHANG Jinlong, TANG Mengxiong, ZHONG Conghao, et al. Effect of nano-C-S-H seeds early-strength agent on early hydration of cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2025,44(1):21-30.

[20] 李天乐,庞少聪,赵洛,等.近十年纳微米堵漏剂研究进展[J].应用化工,2023,52(7):2107-2111.
LI Tianle, PANG Shaocong, ZHAO Luo, et al. Research progress of nano-micron plugging agent in recent ten years[J]. Applied Chemical Industry, 2023,52(7):2107-2111.

[21] XU Zhenhai, GUO Zhaoheng, LI Shujun, et al. Effect of nano-SiO_2 on rheology and early hydration of cement containing high volume slag[J]. Construction and Building Materials, 2024,411:134539.

(编辑 王跃伟)