基于光频域反射技术的纳米复合注浆锚杆锚固性能研究*

李双辉[1]，仝曦[2]，杜春海[2]，黄磊[1]，叶武[3]，陈然[4]，曹桂乾[1]，吕利[1]

(1.中国地质大学(武汉) 湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站， 湖北 武汉 430074；
2.重庆白马航运发展有限公司， 重庆 408527；
3.浙江海川地矿科技有限公司， 浙江 杭州 310015；
4.长江水利水电开发集团(湖北)有限公司， 湖北 武汉 430010)

摘要：为了探究纳米二氧化硅(NS)对超细水泥性能的影响，并评估其在注浆锚杆中的应用效果，设置不同NS掺量的试验组，系统开展了流动度、初凝时间、结石体力学性能、SEM微观结构及拉拔性能等测试，并利用光频域反射技术(OFDR)对拉拔过程中的应变进行监测。结果表明：NS的掺入会降低纳米复合注浆材料的流动度和初凝时间，提升材料的早期水化反应速率；NS掺量为2%时，结石体的抗压和抗折强度达到最优，微观结构更加致密；拉拔试验和OFDR光纤监测显示，纳米复合注浆锚杆的极限承载力提升至210 kN，荷载-位移曲线表现出更强的延性和更高的残余强度，锚杆杆体的应变更均匀，局部应变突变减少。研究结果验证了纳米复合注浆材料在提高锚固性能方面的可行性和有效性，为岩土工程中锚固系统的优化提供了技术支持。

关键词：纳米复合注浆锚杆；纳米二氧化硅；光频域反射技术；拉拔试验；锚固性能

中图分类号：TD353^{+}.6　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)03-0180-11

Research of the Anchoring Performance of Nano-Composite Grouted Bolts Based on Optical Frequency Domain Reflectometry

LI Shuanghui[1], *TONG Xi*[2], *DU Chunhai*[2], *HUANG Lei*[1], *YE Wu*[3], *CHEN Ran*[4], *CAO Guiqian*[1], *LYU Li*[1]

(1.Badong National Observation and Research Station of Geohazards,
China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;
2.Chongqing White Horse Shipping Development Co., Ltd., Chongqing 408527, China;
3.Zhejiang Haichuan Geology and Mining Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310015, China;
4.Changjiang Water Resources and Hydropower Development Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: To investigate the influence of Nano-SiO_2 (NS) on the performance of ultrafine cement and evaluate its application efficacy in grouted bolts, test groups with varying NS dosages were established. A series of tests, including fluidity, initial setting time, mechanical properties of the grouted body, SEM microstructure, and pullout performance, were systematically conducted. Furthermore, optical frequency domain reflectometry (OFDR) was employed to monitor the strain distribution during the pullout process. The results indicate that the incorporation of NS decreases the fluidity and initial setting time of the nano-composite grouting materials while accelerating the early hydration reaction rate. At an optimal NS dosage of 2%, the compressive and flexural strengths of the grouted body are maximized, and the microstructure becomes significantly denser. The pullout tests and OFDR fiber monitoring reveal that the ultimate bearing capacity of the nano-composite grouted bolt is elevated to 210 kN. Additionally, the load-displacement curve exhibits enhanced ductility and higher residual strength; concurrently, the strain distribution along the bolt rod is more uniform, with a reduction in abrupt local strain variations. These findings verify the feasibility and effectiveness of nano-composite grouting materials in improving anchoring performance, providing robust technical support for the optimization of anchoring systems in geotechnical engineering.

Key words: Nano-composite grouted bolt, Nano-SiO_2, Optical frequency domain reflectometry, Pullout test, Anchoring performance

---

* **收稿日期**：2025-02-25
基金项目：杭州市建设科研项目(2024364)；重庆乌江白马航电枢纽工程安全监测项目(CGJ-HF-BM-003-[JA]2021-03)
作者简介：李双辉(2000—)，男，江苏扬州人，硕士研究生，主要从事岩土加固新材料与新技术等方面的工作。E-mail：1202211518@cug.edu.cn
通信作者：黄磊(1986—)，男，江西赣州人，研究员，博士生导师，主要从事岩石锚杆(索)、地质灾害预警等方面的研究工作。E-mail：huanglei@cug.edu.cn

0 引言

随着岩土工程的发展,注浆锚杆因其良好的加固效果和广泛的适用性,已成为边坡支护、隧道加固和地下工程等领域的重要加固手段[1-3]。注浆材料是注浆锚杆的核心组成部分,其性能直接影响锚杆的承载能力和长期稳定性[4-6]。因此,开发高性能注浆材料成为当前研究的热点方向之一。

传统水泥浆液存在颗粒粗大、流动性差、泌水率高及早期强度低等缺陷,限制了其在细裂隙岩土体中的注入性和加固效果[7]。超细水泥因其颗粒粒径小、比表面积大,在提高浆液稳定性和注入性能方面具有明显优势[8]。但单一使用超细水泥仍存在浆液稳定性不足、水化速率慢、强度发展滞后等问题。近年来,纳米材料的引入为改善水泥基材料性能提供了新的思路。其中,纳米二氧化硅(Nano-SiO_2,NS)作为一种高活性的无机纳米填料,因其较高的反应活性、良好的分散性和微细填充效应[9-11],得到了学者们的广泛关注。

目前,已有学者对使用 NS 增强材料性能进行了研究。刘昌智等[12]利用 NS 改善混凝土性能,发现掺入 NS 后混凝土的抗压强度提升了 20%左右。HUANG 等[13]采用 NS 对氯氧镁水泥进行改性,发现掺入 NS 后氯氧镁水泥的力学性能和耐水性能得到显著改善。ZHAO 等[14]利用 NS 对土壤进行加固,发现掺入 NS 后,土壤的弹性模量提高了 2 倍。此外,其他学者[15-20]也对 NS 增强材料进行了相关研究。综上,国内外对于利用 NS 增强材料性能已有一定的研究基础,但将 NS 与超细水泥复合应用于注浆锚杆领域的研究仍较为有限。目前,关于此类复合浆料的流动性、凝结时间、力学性能以及应用效果等方面,尚缺乏系统性的理论与实践研究。

因此,本文利用 NS 增强超细水泥的物理力学性能,研制了一种纳米复合注浆材料,分析了 NS 掺量对注浆材料流动性、初凝时间、力学性能以及微观结构的影响规律,并利用光频域反射技术(Optical Frequency Domain Reflectometry, OFDR)开展光纤监测,研究了纳米复合注浆锚杆的应用效果,以推动纳米复合注浆材料在岩土工程中的实际应用。

1 试验材料与方法

1.1 试验原材料

选用山东某公司生产的 K700 超细水泥,平均粒径为 22 μm。NS 溶胶由德州某公司提供,为无色透明状液体,平均粒径为 8~15 nm,具有优良的分散性,可与水或浆体均匀混合。

锚固围岩采用工程中较为常见的粉砂岩进行试验,如图 1 所示,粉砂岩的具体参数见表 1。经测试,试验用粉砂岩的单轴抗压强度为 87.58 MPa。采用高强度未风化的粉砂岩试样,确保了锚杆在发生拉拔破坏时,围岩不会产生明显的变形或破坏。为了制作室内大尺寸粉砂岩注浆锚杆模型,用钻芯机在中间钻取直径为 40 mm 的贯通钻孔以进行锚杆注浆。

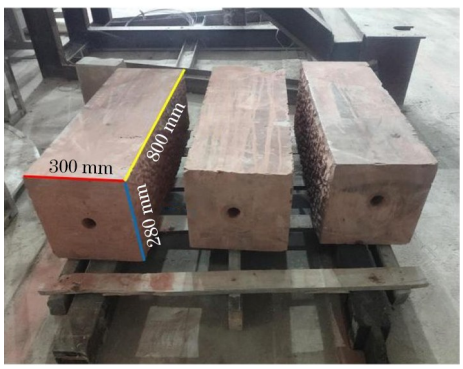


图 1 粉砂岩试样

Fig.1 Siltstone specimens

表 1 粉砂岩参数

Table 1 Parameters of siltstone

风化程度	密度/(kg/m³)	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
未风化	2 350	87.58	5.2	0.26

考虑到锚固模型黏结段长度较长,锚杆杆体在拉拔过程中易出现较大的弹塑性变形,甚至出现钢筋拉断等问题,从而影响试验结果。采用直径为 20 mm 的 PSB500 高强精轧螺纹钢,长度为 1.4 m,锚杆力学参数见表 2。

表 2 锚杆参数

Table 2 Bolt parameters

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	弹性模量/GPa
575.6	720.8	22	200

为了避免水中的离子杂质对纳米复合材料产生影响,采用 UPTA-10 型超纯水仪对自来水进行过滤。该仪器采用先进的反渗透(RO)技术结合离子交换、电去离子(EDI)和紫外消毒等多重净化手段,可高效制备电阻率达到 18.2 MΩ·cm 的超纯水,以减少水中离子杂质对化学试剂及试样的性能造成

影响。

1.2 纳米复合注浆材料制备

为了研究 NS 掺量对纳米复合注浆材料结石体力学性能的增强规律,共设置 3 个梯度的 NS 掺量和 1 个对照组(NS 掺量=0),为了控制变量,水灰比均设置为 0.5,试验配比见表 3。

表 3 纳米复合注浆材料试验配比

Table 3 Test mix ratio of nano-composite grouting material

组别	NS 掺量/%	超细水泥用量/(kg/m³)	去离子水用量/(kg/m³)
1	0	1 000	500
2	1	1 000	500
3	2	1 000	500
4	3	1 000	500

制备时,首先将去离子水、NS 溶胶依次加入到搅拌锅中,用微型搅拌器快速搅拌 3～5 min 使 NS 在去离子水中均匀分散,获得分散液;随后,将超细水泥加入到分散液中,并通过 NJ-160 型搅拌机进行搅拌。

1.3 流动度试验

按照设计配比称量浆液材料,保证配比精确。采用机械搅拌器或人工搅拌,使浆液均匀。搅拌时间一般为 2～3 min,确保无结块、无明显气泡。在标准试验台上放置流动度测定仪。在标准试模内填充拌合好的浆液(分两层,每层击实 10～15 次)。用抹刀刮平表面,提起试模,使浆液自由流动并扩展,通过测量浆液扩展的直径来确定流动度。取两个垂直方向的扩展直径,计算平均值作为最终流动度。

1.4 初凝时间测定试验

记录水泥全部加入水中至初凝状态的时间作为初凝时间,单位为“min”。试件在湿气养护箱中养护至加水后 30 min 时进行第一次测定。测定时从湿气养护箱中取出试模放到试针下,降低试针与水泥净浆表面接触距离。拧紧螺丝 1～2 s 后,突然放松,使试针垂直自由地沉入水泥净浆中。观察试针停止沉入或释放试针 30 s 时指针的读数。临近初凝时每隔 5 min 测定一次,当试针沉至距底板 4±1 mm 时,为水泥达到初凝状态。当达到初凝时应立即重复测一次,当两次结论相同时才能定为达到初凝状态。

1.5 浆液结石体无侧限抗压和抗折试验

使用 YAW-300D 全自动水泥抗压抗折强度试验机对各组试样开展力学试验。各组试样在模具中硬化,并在水中养护达到 3 d 后,使用 YAW-300D 全自动水泥抗压抗折强度试验机测试其强度。

1.6 微观试验

采用赛默飞 Apreo™ S 型环境扫描电子显微镜对试样进行微观形貌扫描。在扫描前采用 LEICA EM ACE600 设备对试样表面进行喷金处理,增强试样表面导电性以方便显微观察。

1.7 拉拔试验

将锚杆居中放置在围岩钻孔孔道中,随后向孔内注浆,养护 3 d 形成强度后进行拉拔试验。采用 SH-50D 型电动锚杆拉拔仪进行荷载施加,荷载的施加范围为 0～500 kN。拉拔仪由油压泵、控制系统、环形液压千斤顶、位移计、显示器及锚杆综合参数测定仪等部分组成。拉拔仪通电后,通过控制系统给予一定的油压,从而带动液压千斤顶工作,油压在控制系统的处理下转换为电信号,并将其通过锚杆综合测定仪连接数据采集系统进行读取和存储。此外,液压千斤顶工作时也会带动位移计产生位移,位移计通过连接锚杆综合参数测定仪将位移数据传输至数据采集系统,从而实现荷载、位移的实时传输和测量,并生成荷载-位移曲线。

1.8 光频域反射技术原理与光纤安装

OFDR 是一种基于光纤的高精度分布式测量技术,如图 2 所示,其核心原理是当光纤外部受到温度或应变影响时会在光纤中产生瑞利散射频移,通过频域干涉技术分析散射光的频率和相位信息[21]。通过对激光频率的线性扫描,OFDR 可以实现对光纤中任意位置的高分辨率空间测量,得到光纤的损耗分布、应变变化和温度分布等信息。该技术具有高灵敏度、高空间分辨率(可达毫米级)和高动态范围的特点,广泛应用于光纤传感、通信网络监测和结构健康监测等领域[22-24]。

试验用光纤选用应变感测光纤。为了保护光纤,避免试验过程中损坏,外包一层 2 mm 的紧护套。在锚杆两侧用切割机分别对称切出长度为 0.8 m 的凹槽,以备安装光纤。此外,为了研究锚杆拉拔对围岩的影响,在围岩的正表面平行粘贴 4 根光纤。当光纤粘贴进凹槽后,采用玻璃胶将凹槽全部封住。将所有光纤端口接入 OSI-S 分布式光纤测定系统统一监测后,在试验测试前,还要采用激光笔检测光纤链路是否完整,检测光信号反射损失。若信号损失较多,则擦拭法兰接口重新连接进行测试。之后用冷凝喷雾定位光纤链路上的两个测点位置,方便后续的测试和数据分析。待调试完成后便可进行测量。

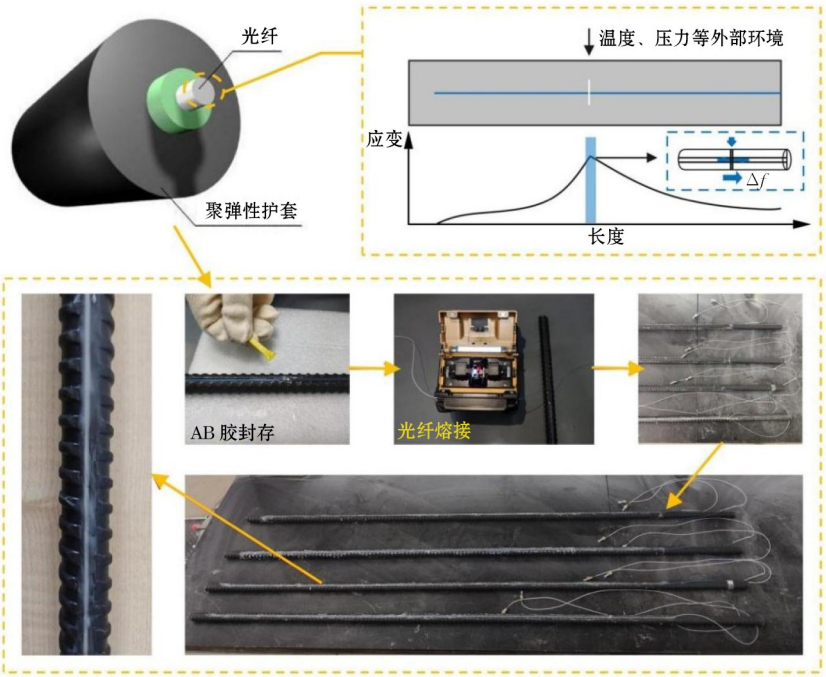


图 2 光频域反射技术原理与光纤安装

Fig.2 Principles of optical frequency domain reflectometry and fiber installation

2 试验结果及分析

2.1 流动度分析

图 3 为纳米复合注浆材料流动度随 NS 掺量的变化规律。由图 3 可以看出,向超细水泥中添加 NS 会导致浆液流动度大幅下降。这是因为 NS 具有较高的比表面积和表面活性,能有效结合大量自由水。当这些纳米粒子被掺入水泥砂浆中时,会吸附水泥砂浆中的自由水,进而增加水泥砂浆的黏稠度,降低其流动性[25]。由流动度测试结果可知,NS 在超细水泥中的掺量均需控制在适当范围内,以确保注浆材料具有良好的和易性和密实性,从而保障注浆材料的强度。

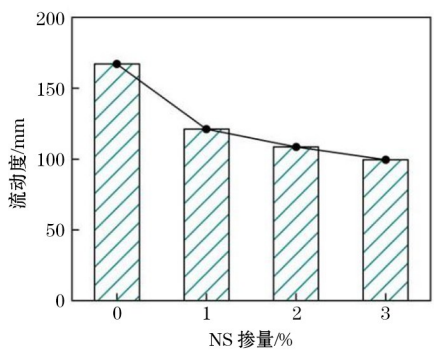


图 3 纳米复合注浆材料浆液流动度变化规律

Fig.3 Variation law of slurry fluidity of nano-composite grouting material

2.2 初凝时间分析

图 4 为纳米复合注浆材料初凝时间随 NS 掺量的变化规律。从图 4 可以看出,随着 NS 掺量的增加,材料的初凝时间逐渐减小。这是因为 NS 具有较大的比表面积和表面活性,能够加快水泥水化过程,促使 C-S-H 凝胶等水化产物更早形成,从而加快凝结[26]。然而,随着 NS 掺量的增加,材料的初凝时间下降速度逐渐变缓。这是因为过量的 NS 会吸附大量水分降低自由水含量,导致体系变黏稠,对水化反而有一定抑制作用[27]。

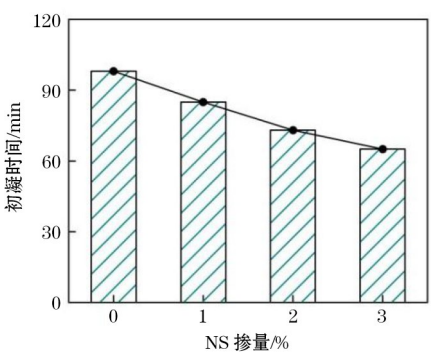


图 4 纳米复合注浆材料初凝时间变化规律

Fig.4 Variation law of initial setting time of nano-composite grouting material

2.3 结石体抗压强度分析

图 5 为纳米复合注浆材料结石体抗压强度随

NS 掺量的变化曲线。随着 NS 掺量的增加,结石体的抗压强度先增大后减小,NS 掺量为 2%时,结石体抗压强度最高。这是因为 NS 与水化过程中产生的 $Ca(OH)_2$ 反应生成更多的 C-S-H 凝胶。这些凝胶可以填充孔隙,增加基体密实性,从而增强抗压强度[28]。此外,NS 为水泥水化产物提供成核位点,促进水泥水化反应并使水泥水化更充分,早期强度提升更快。然而 NS 由于具有高比表面积和高表面能,容易在水中团聚形成絮状结构,导致分布不均产生弱界面,反而降低了抗压强度[29]。此外,NS 由于吸水性强,过量添加吸附大量自由水,等效提高了水胶比,影响水泥颗粒的水化过程,也导致了抗压强度的降低[30]。

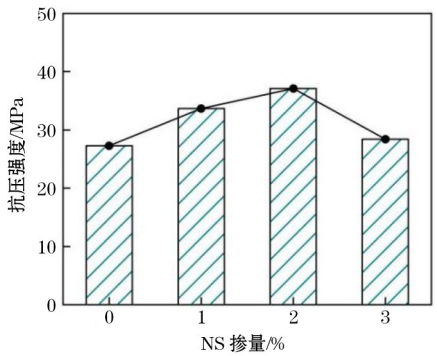


图 5 纳米复合注浆材料结石体抗压强度变化规律

Fig.5 Variation law of compressive strength of nodular body of nano-composite grouting material

2.4 结石体抗折强度分析

图 6 为纳米复合注浆材料结石体抗折强度随 NS 掺量的变化曲线。随着 NS 掺量的增加,材料结石体的抗折强度先增大后减小,NS 掺量为 2%时,结石体抗折强度最高。这是因为 NS 粒径非常小,可以填充超细水泥颗粒之间的微孔隙,提高浆体的致密性,改善微观结构,从而增强抗折强度[31]。然而当 NS 掺量过多时,抗折强度减小,这是因为 NS 的比表面积大易团聚形成聚集体,从而形成缺陷区,削弱了结构整体性[32]。

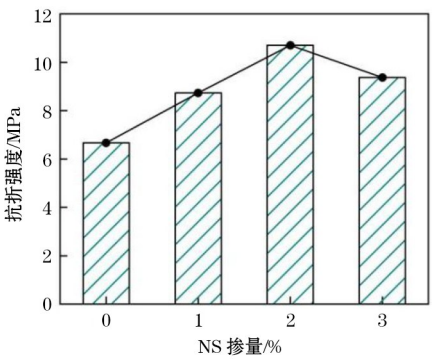
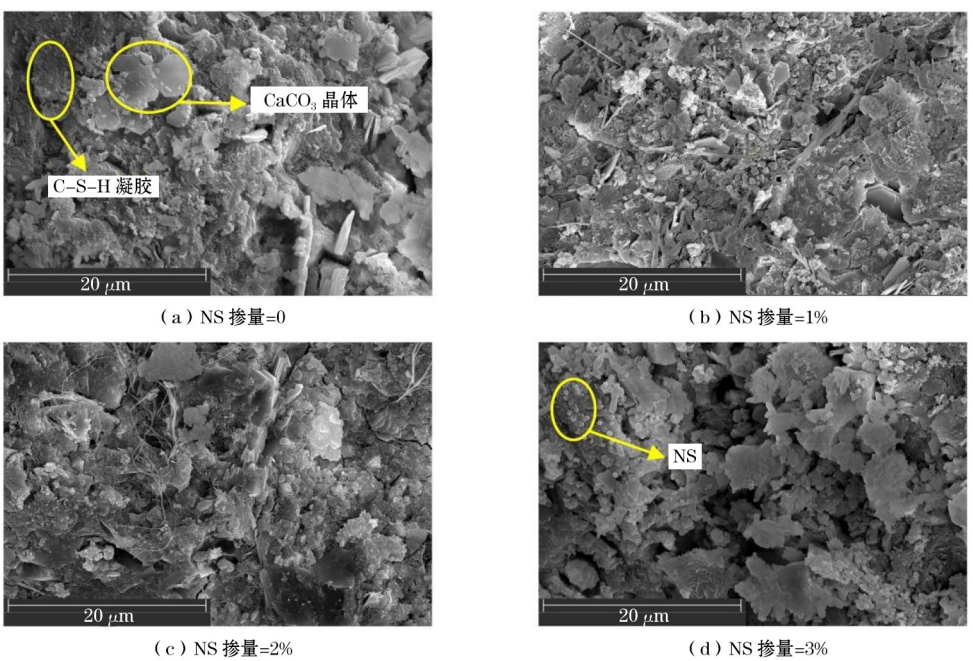


图 6 纳米复合注浆材料结石体抗折强度变化规律

Fig.6 Variation law of flexural strength of nodular body of nano-composite grouting material

2.5 微观结构分析

图 7 为不同 NS 掺量的纳米复合注浆材料结石体 SEM 扫描图像。



(a) NS 掺量=0　(b) NS 掺量=1%

(c) NS 掺量=2%　(d) NS 掺量=3%

图 7 纳米复合注浆材料结石体 SEM 扫描图像

Fig.7 SEM scanning images of nodular body of nano-composite grouting material

从图 7 可知,随着 NS 掺量的增加,C-S-H 凝胶、$CaCO_3$ 晶体等水化产物明显增加。这是因为超细水泥在水化作用时,除了生成C-S-H凝胶和 $CaCO_3$ 晶体,还生成了较多的C-H凝胶[33]。该部分与掺入的 NS 反应,生成了新的C-S-H凝胶和 $CaCO_3$ 晶体。这些生成物填充了纳米复合注浆材料结石体内部的孔隙,使得结石体结构更加致密,从而增加了结石体的力学性能。

此外,通过观察图 7(d)发现,对于 NS 掺量为 3% 的结石体试块,大部分 NS 颗粒吸附在一起,出现了团聚现象。这是因为 NS 颗粒粒径小、比表面积大、表面能高,掺入过量的 NS 颗粒易与周围的粒子发生相互吸附,从而形成大颗粒[34]。这种现象破坏了纳米复合注浆材料结石体内部结构的均匀性,形成薄弱区域,产生界面弱化效应,从而降低材料整体的力学性能。

综上所述,当 NS 掺量为 2%时,纳米复合注浆材料的流动度较好,初凝时间较短,结石体的抗压强度和抗折强度最高,因此 NS 的最佳掺量为 2%。

2.6 拉拔试验荷载-位移曲线对比分析

为了进一步研究纳米复合注浆材料的锚固应用效果,采用上文得到的 NS 最佳掺量 2%作为锚固剂制作注浆锚杆,与未掺 NS 的对照组进行对比试验。

图 8 为两组注浆锚杆拉拔试验得到的荷载-位移曲线。在拉拔初期,注浆锚杆处于弹性阶段,拉拔荷载与拉拔位移呈线性关系,弹性段的斜率即代表了注浆锚杆的初始刚度。通过观察发现,随着 NS 的掺入,注浆锚杆的初始刚度随之增加。这是因为 NS 具有较高的比表面积,可以促进水化反应,填充孔隙,提高材料的致密性。这使得锚固剂的弹性模量也随之增加,从而增强了锚固剂与锚杆接触界面的初始刚度[35]。

注浆锚杆拉拔试验荷载-位移曲线的峰值强度通常代表了锚杆的极限抗拔承载力,即锚杆与周围介质之间达到最大黏结力或锚固力时的荷载值。在实际工程中峰值荷载可作为锚杆承载力设计的参考依据。由图 8 可知,当未掺入 NS 时,注浆锚杆在拔出约 20 mm 时达到峰值荷载 150 kN 左右。当 NS 掺量达到 2%时,注浆锚杆的峰值荷载可达到 210 kN。这是因为 NS 能够显著提高锚固剂的黏结强度和抗压强度,从而导致注浆锚杆的峰值荷载升高[36]。

当未添加 NS 时,注浆锚杆的荷载-位移曲线在达到峰值后迅速下降。当添加 NS 后,注浆锚杆的荷载-位移曲线在达到峰值后并未立刻下降,而是出现了一定的位移延性,即荷载不变、位移持续增加的情况,此时位移延长约达到 20 mm。这是因为掺入适量 NS 时,锚固剂的韧性被增强,使得注浆锚杆表现出较好的延性特性,荷载-位移曲线的峰后部分更平缓[37]。

最后,通过分析残余强度阶段的荷载-位移关系,可以深入理解锚杆与岩土体之间的黏结性能、界面滑移行为及破坏模式,为进一步完善锚固理论提供依据。由图 8 可知,荷载峰值过后,曲线迅速下降至残余强度阶段,并呈波浪形波动。此外,当掺入 NS 后,残余强度增加,这是因为纳米颗粒填充了裂缝并增强了锚固剂的抗剪切能力[38]。

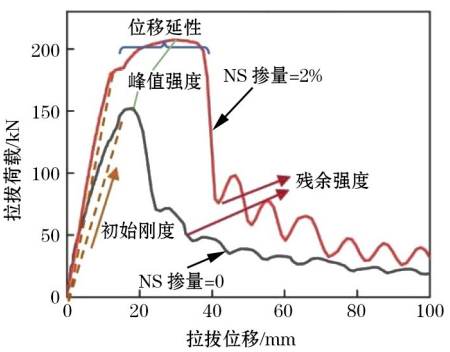


图 8 纳米复合注浆锚杆和超细水泥注浆锚杆拉拔试验荷载-位移曲线对比

Fig.8 Comparison of load-displacement curves between nano-composite grouting bolts and superfine cement grouting bolts in pullout tests

2.7 OFDR 光纤监测的注浆杆体应变分布曲线对比分析

为了满足试验设计的可比性和均匀性,同时覆盖注浆锚杆从小荷载到破坏前的大范围受力过程,选用 30 kN、60 kN、90 kN 和 120 kN 这 4 个荷载条件下的 OFDR 光纤应变监测结果分析注浆杆体的应变分布。图 9 为 30 kN、60 kN、90 kN 和 120 kN 拉拔荷载下,OFDR 光纤监测得到的注浆锚杆杆体应变分布曲线。由图 9(a)可知,纳米复合注浆锚杆锚固起始点的杆体应变为 450 με 左右,而随着锚固起始点距离的增加,应变逐渐减小至 30 με 左右,杆体的应变沿杆长呈现出明显的非均匀分布。这是因为距离锚固起始点越近越靠近加载端,拉拔力越大,界面剪切应力也越大,因此锚杆杆体的应变较大。而当远离加载端时,由于界面剪切力的传递,加载端的力逐步被吸收和分散,传递到较远位置的力逐渐减小,导致应变逐渐衰减。此外,随着拉拔荷载的增加,注浆锚杆各部分的应变都逐渐增大。当拉拔荷载为 30 kN 时,锚固起始点处杆体应变值在 450 με

至 500 με 之间,而当拉拔荷载上升至 120 kN 时,锚固起始点处的杆体应变上升至 2 000 με 至 2 200 με 之间。当拉拔荷载施加到锚杆时,荷载通过锚杆与注浆层的黏结作用传递到周围岩体。在荷载传递过程中,锚杆、注浆层和岩体之间的相互作用引起了锚杆内部的应力变化,从而导致应变变化[39]。锚固末端的应变随拉拔荷载的增加变化较小,这是因为荷载的传递不均匀,末端受到的荷载较小,并且锚杆末端与注浆体之间的摩擦力和黏结力较小,导致末端的应变响应较弱。

此外,相比于未掺入 NS 的超细水泥注浆锚杆,NS 掺量为 2%时的杆体应变分布更均匀,且整个锚固段峰值应变较低。这是因为 NS 的增强作用使注浆材料的力学性能得以提升,杆体受力后应变分布更均匀,减少了局部应变突变现象。NS 增强超细水泥后,锚固剂与锚杆的结合更好,荷载能够更高效地在界面进行传递,从而能够分散应力集中,降低杆体局部的峰值应变。而未掺入 NS 的超细水泥注浆锚杆的力学性能相对较差,应变分布不均匀,容易在受力集中区域产生较大的局部应变,且由于材料未经过增强处理,应变曲线不稳定。当荷载增加时,出现突变性应变,表现为曲线上陡峭的变化。

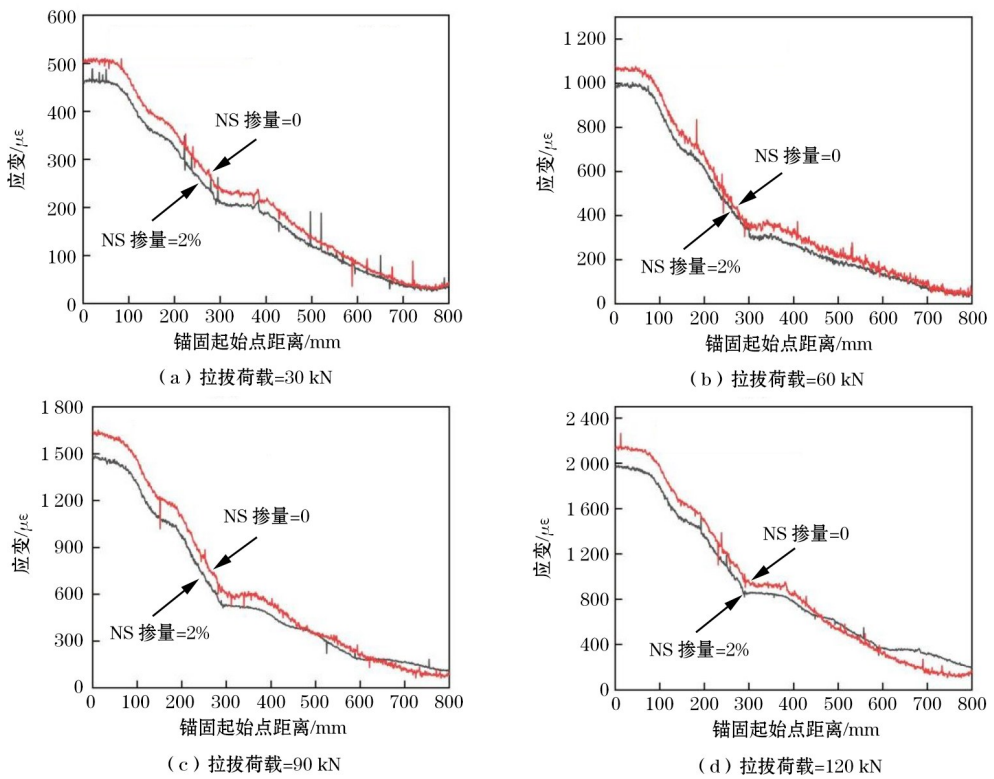


图 9 纳米复合注浆锚杆和超细水泥注浆锚杆杆体应变分布规律

Fig.9 Strain distribution law of rod body of nano-composite grouting bolts and superfine cement grouting bolts

2.8 OFDR 光纤监测准确度验证

OFDR 利用光纤传感器来测量注浆锚杆的应变,而光纤传感器本身在受到温度变化[40]、光源稳定性[41]、机械振动[42]等外部因素的影响时,可能会产生误差。对这些误差进行分析,可以揭示 OFDR 光纤实验室模型试验监测结果的准确程度,以期为 OFDR 在实际工程应用中的监测提供参考。

通过对锚杆起始点监测得到的应变值进行计算可以得到该点处的荷载值。设钢筋的拉拔应变为 $\varepsilon(z)$,则锚杆的拉拔应力 $\sigma(z)$ 为:

$$\sigma(z)=\varepsilon(z)\cdot E_c \tag{1}$$

式中:E_c 为钢筋的弹性模量,本文使用的是 PSB500 精轧螺纹钢,经检测弹性模量为 200 GPa。

注浆锚杆的荷载值 $Q(z)$ 为:

$$Q(z)=\sigma(z)\cdot A \tag{2}$$

式中,A 为锚杆的横截面积。

将公式(1)代入公式(2)中可得注浆锚杆的荷载值 $Q(z)$ 与光纤传感器监测的拉拔应变 $\varepsilon(z)$ 之间的关系:

$$Q(z)=\varepsilon(z)\cdot E_c\cdot A \tag{3}$$

对上式进行计算,得到锚杆起始点监测值与施加荷载的对比分析,如图 10 所示。无论是纳米复合

注浆锚杆还是超细水泥注浆锚杆,监测结果与 1∶1 线相距不大,二者与施加荷载的误差率计算结果见表 4。OFDR 光纤监测计算得到的荷载值与施加的荷载值之间的相对误差均小于 10%。出现误差的原因主要是钢筋刻槽后的横截面积和弹性模量减小,在荷载作用下的钢筋应力会更大,通过监测和计算获取的轴力值也相应更高。综合来看,OFDR 技术在锚杆监测中具有较高的准确度。

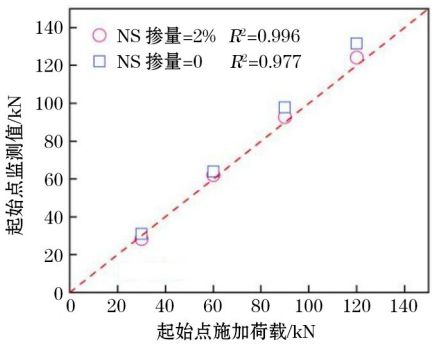


图 10 OFDR 光纤监测值与施加荷载对比

Fig.10 Comparison of OFDR fiber monitoring values and loading values

表 4 锚杆起始点 OFDR 光纤监测值与施加荷载的对比分析

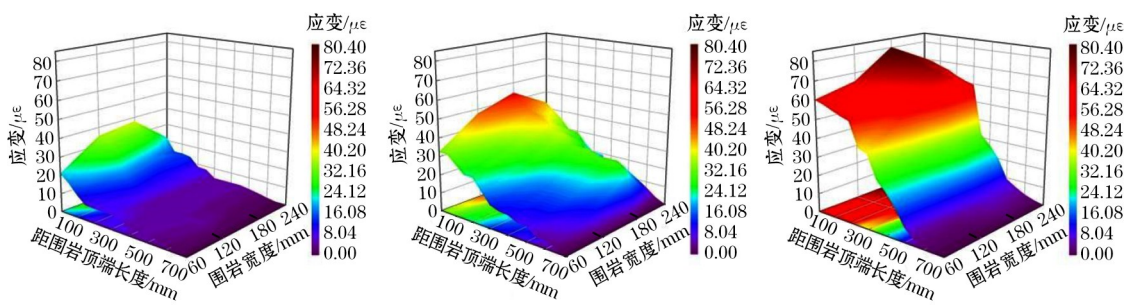
Table 4 Comparative analysis of OFDR fiber monitoring values and loading values at bolt start points

施加荷载/kN	纳米复合注浆锚杆		超细水泥注浆锚杆	
	监测值/kN	相对误差/%	监测值/kN	相对误差/%
30	28.30	−5.67	30.92	3.07
60	62.10	3.50	63.93	6.55
90	92.75	3.06	97.73	8.59
120	124.19	3.49	131.53	9.61

2.9 围岩表面应变对比分析

图 11 和图 12 为纳米复合注浆锚杆和超细水泥注浆锚杆围岩表面应变的对比。从图中可以看出,随着拉拔荷载的增大,围岩表面的应变逐渐增大。这是因为随着拉拔荷载增大,锚杆、锚固剂和围岩之间的界面逐渐从弹性阶段过渡到塑性阶段,界面上的剪应力增大,可能引起局部的剪切滑移,使锚杆周围的岩体发生相对位移[43]。这种剪切滑移效应导致围岩表面应变显著增大,尤其是在锚杆周围的区域。除此之外,围岩表面的应变分布还呈现出由中间向两端以及由顶部向下衰减的趋势,这是因为拉拔力通过锚固剂介质的黏结力和摩擦力传递给围岩[44],而这种传递并非均匀分布。通常情况下,锚固系统的力主要集中在锚杆的中部区域,两端较远处应力较小,导致应变从中间向两端逐渐减小。此外,锚杆拉拔过程中,锚杆与围岩的相互作用会导致应力在竖向上逐步扩散和传递,锚杆上方区域由于靠近加载点,围岩承受的应力最大,产生的应变也最大;而随着向下距离的增加,锚杆对围岩的作用力逐渐衰减,围岩表面的应变也随之减小。

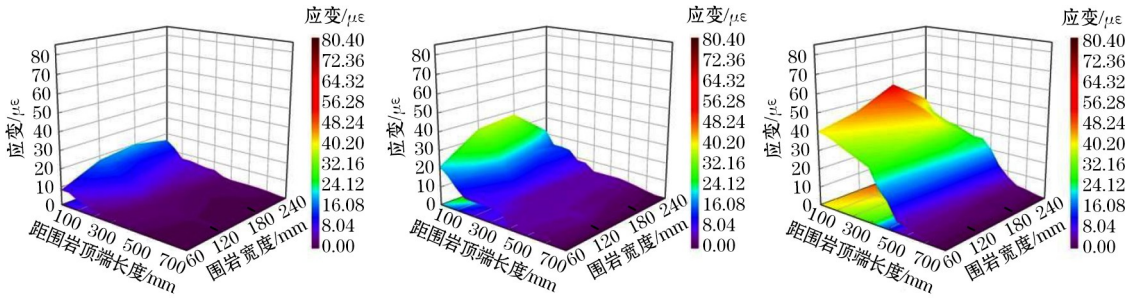
当拉拔荷载为 60 kN 时,纳米复合注浆锚杆围岩表面的峰值应变已达到 40 με,而普通超细水泥注浆锚杆围岩表面的峰值应变只有 20 με 左右;当拉拔荷载为 120 kN 时,纳米复合注浆锚杆围岩表面的峰值应变已接近 55 με,而普通超细水泥注浆锚杆围岩表面的峰值应变才达到 40 με;当拉拔荷载为 170 kN 时,纳米复合注浆锚杆围岩表面的峰值应变已达到 80 με,而普通超细水泥注浆锚杆围岩表面的峰值应变只有 55 με 左右。同等拉拔荷载下,纳米复合注浆锚杆围岩表面的应变始终大于普通超细水泥注浆锚杆。对于本研究制作的锚固模型,较高的应变值表明该范围内的围岩受到锚杆的有效牵引[45],间接说明了纳米复合注浆锚杆作用下的围岩受锚杆拉拔荷载影响的应变范围要广于普通超细水泥注浆锚杆,进一步表明,作为性能更优的锚固剂,纳米复合注浆材料可使锚杆的锚固力分布更均匀,进而使围岩表面的应变影响范围更广,拉拔试验时围岩受作用的区域也更大。



(a) 拉拔荷载=60 kN (b) 拉拔荷载=120 kN (c) 拉拔荷载=170 kN

图 11 纳米复合注浆锚杆围岩表面应变分布

Fig.11 Strain distribution on the rock surface of nano-composite grouting bolts



(a) 拉拔荷载=60 kN (b) 拉拔荷载=120 kN (c) 拉拔荷载=170 kN

图 12 超细水泥注浆锚杆围岩表面应变分布

Fig.12 Strain distribution on rock surface of superfine cement grouting bolts

3 结论

本文重点研究了 NS 对纳米复合注浆材料流动性、初凝时间、抗压抗折强度和微观结构的影响规律,并结合拉拔试验和 OFDR 光纤监测技术研究了纳米复合注浆锚杆的锚固性能,得到以下主要研究结论。

(1) 纳米复合注浆材料的流动性和初凝时间与 NS 的掺量呈负相关。其中 NS 掺量为 2%时,浆液结石体表现出最高的抗压强度和抗折强度。

(2) SEM 图像显示,NS 促进水化反应并填充水泥水化产物间的孔隙,显著提高了材料的致密性。随着 NS 掺量的增加,C-S-H 凝胶分布更均匀、结构更紧密,解释了其较优的力学性能。而当 NS 掺量为 3%时,出现了团聚现象,反而形成薄弱区域,从而降低材料整体的力学性能。因此,NS 的最佳掺量为 2%。

(3) 拉拔试验结果表明,NS 掺量为 2%时,锚杆与浆体之间的黏结力增强,极限抗拔力提高至 210 kN,锚固性能显著优于未掺入 NS 的对照组,具备良好的岩土工程应用前景。

(4) OFDR 光纤监测显示,纳米复合注浆锚杆在拉拔过程中应变分布更为均匀,局部应变突变减少,表明锚固段受力更稳定、力的传递更充分。对于围岩表面应变,掺入 2% NS 的纳米复合注浆锚杆的应变增长速度较快,表明其更早进入有效承载状态,增强了锚固效率。

参考文献(References):

[1] 王卫东,高文生,龚维明,等.基础工程技术的发展与创新[J].土木工程学报,2025,58(2):97-117.
WANG Weidong, GAO Wensheng, GONG Weiming, et al. Development and innovation of technologies in foundation engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2025, 58(2):97-117.

[2] 牛延森,黄兴久.探析岩土工程在矿山地质灾害防治方面的应用[J].科技与创新,2025(6):222-225.
NIU Yansen, HUANG Xingjiu. Exploring the application of geotechnical engineering in the prevention and control of geological disasters in mines[J]. Science and Technology & Innovation,2025(6):222-225.

[3] 李建光,刘荣毅,刘情情,等."双碳"战略下基坑和边坡工程发展进展与展望[J].岩土工程技术,2024,38(5):505-511.
LI Jianguang, LIU Rongyi, LIU Qingqing, et al. Development progress and prospects of foundation pit and slope engineering under carbon peaking and carbon neutrality policy[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2024,38(5):505-511.

[4] 庞鸿.岩土锚固技术在岩土工程边坡治理中的应用分析[J].工程技术研究,2024,9(13):75-77.
PANG Hong. Analysis on the application of geotechnical anchoring technology in slope treatment of geotechnical engineering[J]. Engineering and Technological Research, 2024,9(13):75-77.

[5] 党杰,董吉,张旭,等.水城县发耳重点区域地质灾害特征分析及防治分区[J].环保科技,2020,26(6):16-23.
DANG Jie, DONG Ji, ZHANG Xu, et al. Characteristics and prevention division of geological hazards in key area of Fa'er, Shuicheng County[J]. Environmental Protection and Technology,2020,26(6):16-23.

[6] 朱丹,李庆亮.宏阳煤矿软岩大巷返修加固技术设计及应用研究[J].煤矿现代化,2024,33(5):124-130+138.
ZHU Dan, LI Qingliang. Study on technical design and application of repairing and strengthening of soft rock main roadway in Hongyang Coal Mine [J]. Coal Mine Modernization,2024,33(5):124-130+138.

[7] 朱洪洲,杜俊池,陈祥,等.机制砂特性及其对混凝土性能影响的研究进展[J].硅酸盐通报,2024,43(11):3911-3922.
ZHU Hongzhou, DU Junchi, CHEN Xiang, et al. Research progress on characteristics of manufactured sand and its influence on concrete performance [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2024,43(11):3911-3922.

[8] 曾熙文,王艳芬,赵光明,等.聚丙烯纤维改性超细水泥复合注浆材料性能研究[J].煤炭科学技术,2024,52(7):57-67.
ZENG Xiwen, WANG Yanfen, ZHAO Guangming, et al. Study on properties of polypropylene fiber-modified ultrafine cement composite grouting materials[J]. Coal Science and Technology,2024,52(7):57-67.

[9] 王成君,汪林强,王瑞娜,等.纳米增强微胶囊复合相变材料的研究进展[J].复合材料学报,2024,41(8):3968-3986.
WANG Chengjun, WANG Linqiang, WANG Ruina, et al. Research progress of nano-enhanced microcapsule composite phase change materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2024,41(8):3968-3986.

[10] BOSCHI K, PRISCO C G, GRASSI D, et al. Nanosilica grout permeation in sand: experimental investigation and modeling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2024,150(1):04023129.

[11] ZHANG Jinpeng, LI Kesheng, LI Yang, et al. Applying novel micro-nano-siliceous grouting material improves mechanical behaviors of fractured rock masses and microscopic characteristics of slurry-rock interface: experimental and numerical simulation investigations[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(10): 8297-8321.

[12] 刘昌智,李春清,陈敦,等.低温环境下纳米二氧化硅对混凝土性能的影响[J].科学技术与工程,2025,25(9):3813-3820.
LIU Changzhi, LI Chunqing, CHEN Dun, et al. Effect of nano-silica on concrete properties under low-temperature environment[J]. Science Technology and Engineering,2025,25(9):3813-3820.

[13] HUANG Qing, ZHENG Weixin, XIAO Xueying, et al. Effects of fly ash, phosphoric acid, and nano-silica on the properties of magnesium oxychloride cement[J]. Ceramics International,2021,47(24):34341-34351.

[14] ZHAO Licai, XU Liang. Experimental investigation on mechanical response of soil reinforced by carbon nanotubes and silica dioxide nanoparticles[J]. Construction and Building Materials,2024,415:134203.

[15] HAMA S M, HAMADI E F, JAHAMI A. Structural behavior of reinforced fibrous concrete beams incorporating nano silicon dioxide powder[J]. Engineering Reports,2025,7(1):e13078.

[16] ZHAO Yiming, XIANG Zhe, ZHANG Nong, et al. Experimental study on the gelling properties of nano-silica sol and its spontaneous imbibition grouting mudstone[J]. Processes,2024,12(5):983.

[17] XIANG Zhe, ZHANG Nong, PAN Dongjiang, et al. Macroscopic and microscopic characteristics of nanosilica sol-based composite grout in sealing fractured argillaceous rock: a comparative study with silica sol and cement slurry[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 34: 898-911.

[18] GUO Qinqiang, ZHANG Junxiang, DING Pengchu, et al. Mechanical reinforcement mechanism of nano-SiO_2 in grouted consolidation bodies[J]. Applied Geophysics,2024:1-18.

[19] WANG Kai, GUO Siyang, REN Jiahui, et al. Effects of nanosilica on the properties of ultrafine cement-fly ash composite cement materials[J]. Nanomaterials, 2024, 14(24):1997.

[20] LI Shuiping, JIANG Jincheng, YU Chengxiao, et al. Effect of nano-silica on the freeze-thaw durability of cement-based grouts[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2025:1-8.

[21] CHEN Bin, YANG Jun, ZHANG Dezhi, et al. The method and experiment of detecting the strength of structural components utilizing the distributed strain of sensing optical fibers demodulated by OFDR[J]. Sensors,2024,24(16):5212.

[22] HOULT N A, WOODS J, WANG Y, et al. High-frequency dynamic distributed fiber optic strain sensing for civil infrastructure applications[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring,2024,14(2):369-382.

[23] LIU Kaijun, YIN Guolu, ZHANG Zeheng, et al. High-resolution and high-precision φ-OFDR strain sensing scheme based on adaptive phase unwrapping and wavelet packet denoising[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(2):891-897.

[24] BAO Xiaoyi, WANG Yuan. New technologies in distributed fiber sensors and their applications[J]. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists,2024:293-341.

[25] HE Zhijun, XU Hao, WANG Jintang, et al. Molecular dynamics study on the Micro-Mechanism of modified nano-silica for inhibiting shale surface hydration[J]. Fuel,2025,393:134967.

[26] 李超,李志康,李新宇,等.地聚物凝结硬化特性影响因素研究综述[J].硅酸盐通报,2025,44(2):501-514.
LI Chao, LI Zhikang, LI Xinyu, et al. Review on factors affecting setting and hardening characteristics of geopolymers[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2025,44(2):501-514.

[27] XU Jian'gen, WANG Liang, HU Hao, et al. Achieving the hydrophobic alteration by functionalized nano-silica for improving shale hydration inhibition[J]. Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects,2024,702:135167.

[28] 梁圣,崔宏志,徐丹玥.纳米 SiO_2 改性轻骨料混凝土性能[J].复合材料学报,2019,36(2):498-505.
LIANG Sheng, CUI Hongzhi, XU Danyue. Properties of nano-SiO_2 modified lightweight aggregate concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2019,36(2):498-505.

[29] BAZZI L, HESEMANN P, LAASSIRI S, et al. Alternative approaches for the synthesis of nano silica particles and their hybrid composites: synthesis, properties, and applications[J]. International Journal of Environmental Science and Technology,2023,20(10):11575-11614.

[30] EHSANI A, NILI M, SHAABANI K. Effect of nanosilica on the compressive strength development and water absorption properties of cement paste and concrete containing Fly Ash[J]. KSCE journal of civil engineering, 2017,21(5):1854-1865.

[31] 刘爽,赵立革,李雨洋,等.水泥基材料无机纳米改性的研究进展[J].功能材料,2024,55(6):6069-6078.
LIU Shuang, ZHAO Lige, LI Yuyang, et al. Research progress on inorganic nano-modification of cementitious materials[J]. Journal of Functional Materials,2024,55(6):6069-6078.

[32] ZHAN Peimin, XU Jing, WANG Juan, et al. A review of recycled aggregate concrete modified by nanosilica and graphene oxide:materials, performances and mechanism[J]. Journal of Cleaner Production,2022,375:134116.

[33] LU Bao, HUO Zhen, XU Qingyuan, et al. Characteristics of CSH under carbonation and its effects on the hydration and microstructure of cement paste[J]. Construction and Building Materials,2023,364:129952.

[34] MANYANGADZE M, CHIKURUWO N H M, CHAKRA C S, et al. Enhancing adsorption capacity of nano-adsorbents via surface modification:a review[J]. South African Journal of Chemical Engineering,2020,31(1):25-32.

[35] 臧晓雨,陈梦章,苗益祯,等.纳米二氧化硅对高流态矿渣-脱硫石膏复合碱激发材料早期强度的影响机理[J].科学技术与工程,2024,24(23):10015-10021.
ZANG Xiaoyu, CHEN Mengzhang, MIAO Yizhen, et al. Influence mchanism of nano-silica on the early-strength of high-fluidity slag and desulfurization gypsum composite alkali activated material[J]. Science Technology and Engineering,2024,24(23):10015-10021.

[36] GHAMARPOOR R, JAMSHIDI M, MOHAMMADPOUR M. Achieving outstanding mechanical/bonding performances by epoxy nanocomposite as concrete-steel rebar adhesive using silane modification of nano SiO_2[J]. Scientific Reports,2023,13(1):9157.

[37] GULLU H, YETIM M E, GULLU E B. Effect of using nano-silica on the rheological, fresh and strength characteristics of cement-based grout for grouting columns [J]. Journal of Building Engineering,2023,76:107100.

[38] DE CICCO D, ASAEE Z, TAHERI F. Use of nanoparticles for enhancing the interlaminar properties of fiber-reinforced composites and adhesively bonded joints: a review[J]. Nanomaterials,2017,7(11):360.

[39] WANG Yan, LI Changdong, CAI Zhilan, et al. Mechanical behaviors of anchorage interfaces in layered rocks with fractures under axial loads[J]. Journal of Earth Science, 2023,34(2):354-368.

[40] 王志,初凤红,吴建平.全光纤电流传感器温度补偿研究进展[J].激光与光电子学进展,2014,51(12):52-61.
WANG Zhi, CHU Fenghong, WU Jianping. Progress in all-fiber current sensor temperature compensation[J]. Laser & Optoelectronics Progress,2014,51(12):52-61.

[41] 高超,熊佳明,林志力,等.电力系统中全光纤电流传感器的研究进展[J].西安工程大学学报,2023,37(6):78-88.
GAO Chao, XIONG Jiaming, LIN Zhili, et al. Research progress of all fiber optical current sensors in power system [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University,2023,37(6):78-88.

[42] 张旭苹,丁哲文,洪瑞,等.相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J].光学学报,2021,41(1):0106004.
ZHANG Xuping, DING Zhewen, HONG Rui, et al. Fiber sensing technology phase sensitive optical time-domain refleetive distributed optical[J]. Acta Optica Sinica,2021,41(1):0106004.

[43] GRINDHEIM B, LI C C, HOIEN A H, et al. Behavior of a rock mass in uplift field tests of rock anchors[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2024,57(4):2339-2364.

[44] 尹延春,赵同彬,谭云亮,等.锚固体应力分布演化规律及其影响因素研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(5):712-716.
YIN Yanchun, ZHAO Tongbin, TAN Yunliang, et al. Research of stress distribution evolution law and influencing factors[J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2013, 30(5):712-716.

[45] LIU Xiaoming, WANG Junqi, HUANG Jie, et al. Full-scale pullout tests and analyses of ground anchors in rocks under ultimate load conditions[J]. Engineering Geology, 2017,228:1-10.