

超细水泥注浆材料研究进展

李 智

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年9月22日; 录用日期: 2026年10月13日; 发布日期: 2026年10月26日

摘 要

普通水泥浆液用于细砂层和微裂隙岩体时, 易受到颗粒架桥、渗滤堵塞、泌水和沉降等因素的限制。超细水泥通过细化颗粒改善浆液的注入能力, 但比表面积增大也会带来需水量增加、絮凝团聚和流动性损失等问题, 其性能受生产工艺、颗粒级配、水灰比及改性组分的共同影响。本文围绕2010年以来的相关研究, 梳理普通水泥向超细水泥注浆材料发展的技术背景, 重点讨论干法与湿法粉磨、颗粒细度及分散状态、水灰比对浆液和结石体性能的影响, 并分析矿物掺合料、减水剂、纳米材料、速凝剂、膨胀剂、聚合物及纤维等改性组分的作用。在此基础上, 结合砂层加固、矿山围岩注浆、水工防渗和锚固封孔等应用, 归纳超细水泥注浆材料的适用条件与发展方向。现有研究表明, 提高细度能够减轻部分颗粒阻塞, 但实际可注性仍受粗颗粒尾部、团聚及沿程渗滤影响; 水灰比应同时满足可泵性、稳定性和硬化后性能要求; 复合改性则需要协调流动保持、凝结硬化与体积稳定性。后续研究应加强实际裂隙条件下的持续注入试验、受约束体积变形和界面耐久性研究, 并通过现场监测检验室内配比的工程适用范围。

关键词

超细水泥, 注浆材料, 颗粒细度, 分散性, 水灰比, 复合改性, 工程应用

Research Progress of Ultra-Fine Cement Grouting Materials

Zhi Li

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: September 22, 2026; accepted: October 13, 2026; published: October 26, 2026

Abstract

Ordinary cement grouts used in fine sand layers and rock masses containing micro-cracks are often limited by particle bridging, filtration clogging, bleeding, and settlement. Ultra-fine cement improves

groutability through particle refinement, but its increased specific surface area also raises water demand and promotes flocculation and loss of flowability. Its performance is governed jointly by production technology, particle gradation, water-cement ratio, and modifying components. This paper reviews research published since 2010 on the development of ultra-fine cement grouting materials from ordinary cement. The effects of dry and wet grinding, particle fineness and dispersion state, and water-cement ratio on grout and hardened grout properties are discussed. The roles of mineral admixtures, superplasticizers, nanomaterials, accelerators, expansive agents, polymers, and fibers are also summarized. Engineering applicability is further examined for sand stabilization, mine surrounding rock grouting, hydraulic seepage control, and anchor-hole sealing. Existing studies indicate that increased fineness can reduce some particle-blocking effects, whereas practical groutability remains affected by the coarse-particle tail, agglomeration, and filtration along the flow path. The water-cement ratio should satisfy requirements for pumpability, stability, and hardened performance, while combined modification should balance flow retention, setting and hardening, and volume stability. Future work should focus on sustained injection tests under realistic fracture conditions, constrained-volume deformation, and interfacial durability, with field monitoring used to verify the engineering applicability of laboratory mix proportions.

Keywords

Ultra-Fine Cement, Grouting Material, Particle Fineness, Dispersion, Water-Cement Ratio, Combined Modification, Engineering Application

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水泥注浆通过向岩土体孔隙和裂隙中注入浆液,经渗透、充填、扩散后凝结硬化,达到防渗、堵水与加固的目的。普通硅酸盐水泥来源广、结石体强度较高,长期用于岩体裂隙灌浆、地基处理及矿山围岩加固。然而,普通水泥浆液属于颗粒悬浮体系,其进入被注介质的能力不仅取决于流动性,还受水泥颗粒与裂隙开度之间尺度关系的制约。当浆液遇到局部狭窄通道时,粗颗粒及颗粒团聚体容易滞留并形成滤饼,使后续浆液难以继续进入。单纯增加用水量虽可降低初始流动阻力,却不能消除这一几何限制,还可能加重泌水并降低结石体密实性[1][2]。

超细水泥是颗粒细度显著高于普通水泥的一类水泥,通常由硅酸盐水泥熟料、石膏及混合材经超细粉磨或分选制成。工程上常以细度指标界定: $D_{50} \leq 5 \mu\text{m}$ 、 $D_{\text{max}} \leq 20 \mu\text{m}$,比表面积一般 $\geq 700 \sim 800 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。通过对普通水泥或相应胶凝组分进行进一步粉磨,可降低粗颗粒含量,使水泥基浆液进入更细的孔隙与裂隙。细化也改变了浆液的物理化学条件。颗粒比表面积增大后,润湿和分散所需的水量及外加剂用量发生变化,颗粒间相互作用增强,水化过程也更易影响浆液的时变流动特性。因此,超细水泥并非普通水泥的等比例缩小,也不能仅按粉体标称细度推定现场注入能力。围绕超细水泥开展研究,需要将粉体粒径、制浆后的有效颗粒尺度以及裂隙中的颗粒迁移过程结合起来。

近年以来,相关研究由粉磨细化、流动性和强度评价,逐步扩展到多组分改性、体积稳定性、界面黏结和工程验证。本文以超细水泥及其复合注浆材料为对象,参考2010年以来的代表性文献,按生产工艺与颗粒级配、水灰比、复合改性和工程应用展开讨论。对不同研究采用的水灰比、掺量基准及试验条件分别说明,着重分析研究结果之间的联系与差异,不将局部试验所得的最佳配比视为通用配方。

2. 生产工艺与颗粒级配细度研究

2.1. 干法粉磨与湿法粉磨

超细水泥制备主要采用干法和湿法两类工艺。干法通过球磨、振动磨或气流磨等设备对水泥进行粉碎，并配合分级控制成品粒径。其优势在于可集中生产、按批次检验和以粉体形式运输储存，便于工程现场按需制浆。Pantazopoulos 等[3]的研究表明，对普通水泥进行进一步粉碎可以制备适用于注浆的微细水泥，原水泥性质与粉磨后细度共同影响材料性能。刘江峰等梳理的生产工艺也显示，不同设备的作用方式和适用条件存在差异，不能仅以粉磨时间长短评价工艺优劣。

干法粉磨的主要问题是细化后团聚加剧以及继续粉磨所需能耗增加。延长粉磨时间可以减少部分粗颗粒，但新增细颗粒可能重新聚集，最终粉体的分散状态未必与机械粉碎程度一致。工艺优化因此需要兼顾研磨介质、分级效率、物料温度及成品储存条件。对注浆用途而言，应优先控制可能引起孔口堵塞的粗颗粒尾部，同时检验粉体加水后能否充分分散，而不宜只追求较高的比表面积。

湿法粉磨在含水条件下利用胶体磨、珠磨等设备的剪切、冲击和研磨作用细化颗粒，可与现场制浆工序衔接，减少干燥粉体再润湿造成的部分团聚。其工艺限制在于水泥接触水后即开始水化，循环研磨和等待输送均占用有效施工时间；浆液固相浓度、温升及外加剂加入顺序又会影响研磨效率与流动保持。湿法的评价对象应是从制备到注入时刻的浆液，而不是刚离开设备时测得的单一粒径。

两类工艺并不存在脱离工程条件的优劣排序。干法更依赖成品粒度控制、储存防潮和现场再分散，湿法更依赖连续制浆能力及时间管理。生产工艺研究若能同时报告单位质量能耗、实际产能、粒径分布和浆液龄期，将更有利于判断某一细化程度是否具有工程价值。

2.2. 颗粒细度与级配的特征

超细水泥的细度常以比表面积、特征粒径或产品目数表示，但这些指标描述的对象并不相同。比表面积反映单位质量粉体的表面规模，D50 反映粒径分布的中位位置，D90 或 D95 则有助于识别较粗颗粒范围。不同矿物组成、颗粒形貌和分散条件下，相近的比表面积未必对应相同的粒径分布。目数更不宜直接替代激光粒度测定结果，也不宜根据产品名称推定其最大粒径[4]。

Yu 等对比 K600、K700 和 K1000 超细水泥，发现更细产品总体具有较好的稳定性和早期强度表现，但粒径分布中仍可能存在较大颗粒。这说明等级提高并不必然使粗颗粒尾部同步消失。对于细裂隙注浆，少量粗颗粒或团聚体就可能先于主体细颗粒发生架桥；对于相对宽大的孔隙，适当级配又可能有助于提高固相堆积程度。颗粒级配的目标应根据被注介质确定，不能照搬一般水泥基材料以提高堆积密度为主的设计思路。

粒度测试还应区分原始粉体、分散处理后样品与施工浆液。Draganović 等[5]比较超声与常规实验室分散设备，发现分散方式会改变超细水泥浆液的过滤通过性能。若粒度测试使用强超声处理，而现场仅采用低剪切搅拌，实验室测得的细度可能高于实际分散程度。报告分散介质、分散剂、处理时间和搅拌设备，有助于解释相同产品在不同研究中表现不同的原因。

2.3. 细度对浆液流变与硬化性能的影响

在组成和水灰比相近时，提高细度一般有利于增加颗粒与水的接触面积、促进早期水化，同时提高悬浮体系的稳定性；但细颗粒需要更多水形成润湿层，颗粒间作用增强，也容易使屈服应力和表观黏度升高。Sha 等[6]针对不同细度 CEM I 型微细水泥浆液开展流变研究，进一步表明细度是影响浆液流动性的重要变量。因此，细化后出现强度提高与流动性下降并存，并不是相互矛盾的结果。

Yu 等的试验同样显示,较高细度能够改善泌水和早期硬化表现,但部分强度试验对不同产品采用了不同水灰比范围。此类结果反映的是产品与配比的综合作用,不能将全部强度差异归因于粒径。比较不同细度材料时,宜设置同水灰比试验以观察颗粒效应,同时设置同流动度试验,以判断工程中实际需要的用水量或外加剂掺量。

细度研究还应重视凝结前的时间变化。新拌浆液具有较低流动阻力,并不保证输送后仍保持相同状态。细化带来的表面活性增加、温度变化和持续水化,均可能改变泵送阻力及有效注浆时间。对于湿磨浆液和快速硬化复合体系,取样时刻与测试历时应作为与细度同等重要的试验条件。

2.4. 颗粒级配与可注性的关系

王凯等[7]利用可视化试验比较微裂隙中不同水泥浆液的渗滤效应。在水灰比为 1.0、注浆压力为 2 MPa 的试验条件下,所研究超细水泥 I 的最小可注裂隙开度为 80 μm ,无明显渗滤对应的开度为 280 μm ;普通水泥分别为 140 μm 和 310 μm 。这些结果说明,细化能够改善狭窄裂隙中的初始进入条件,但持续输送固相所需的通道尺度仍明显较大。上述数值对应特定材料和装置,适合用于说明两类判据的区别,而非作为所有超细水泥的可注极限。

Draganović 等[8][9]分别采用短狭缝与长狭缝研究过滤过程,说明试验通道长度和颗粒迁移过程均影响可注性评价,实际裂隙还具有粗糙壁面、局部缩颈及分叉,入口处能够通过的颗粒可能在深部再次沉积。因而,颗粒级配研究应同时记录注浆压力、流量随时间的变化及出口固相浓度,使“能够进入”与“能够持续扩散”得到区分。以细度为基础、以施工分散状态和持续注入试验为校核,比仅依据粒径比选择材料更符合注浆过程。

3. 水灰比研究

3.1. 水灰比的定义与试验比较

水灰比决定浆液中水与水泥的质量关系,是连接流动性、稳定性和硬化性能的基本参数。单一水泥浆液通常以水质量与水泥质量之比表示水灰比;掺入硅灰、粉煤灰或矿渣后,部分研究采用水与全部胶凝材料质量之比,即水胶比。两者不能直接等同。外加剂为水溶液时,其引入的水量是否计入拌合水,也会影响实际固相浓度。比较文献时,应先核对组成和质量基准,再讨论水灰比差异。

这一问题在低水灰比复合体系中尤为突出。周柏坊等[10]以水泥质量为 100 份,固定加入 4 份速凝剂、8 份氧化钙膨胀剂和 0.35 份聚羧酸减水剂,研究 0.45~0.80 的水灰比。这里的水灰比基于水泥质量,而不是全部固体质量。若直接与以全部胶凝材料计量的配方比较,可能误判需水量及浆液浓度。因此,多组分研究宜同时列出各原材料质量,使水灰比及水胶比能够复核。

3.2. 水灰比对流动性与稳定性的影响

提高水灰比后,颗粒平均间距增大,颗粒间相互作用减弱,浆液通常更易流动;与此同时,单位体积内固相含量降低,沉降与泌水更容易发生。Yu 等发现,水灰比是影响不同细度超细水泥浆液流动性和稳定性的主要因素之一,较细产品对部分水灰比变化表现出更好的稳定性。提高细度可以在一定程度上减轻沉降,但其增加需水量的作用又使低水灰比配方更依赖有效分散。

减水剂改变了水灰比与流动性的对应关系。Sha 等[11]研究不同减水剂作用下微细水泥浆液的工作性及力学性能,表明外加剂种类和掺量需要与水泥性质相匹配。适当分散能够在较低用水量下获得可用的流动性;继续增加减水剂,则可能出现增效减弱或稳定性变化。因此,以清水稀释补偿流动度损失和通过分散降低流动阻力,虽然都可能改善初始施工性,对泌水及结石体孔结构的影响却并不相同。

流动性评价还应注意试验量的含义。扩展度、漏斗流出时间和旋转流变仪测得的表观黏度分别反映不同条件下的流动表现。夏小亮等[12]采用以秒计的流出时间评价硅灰改性浆液,该结果可用于同一装置内配方比较,但不应作为动力黏度与其他研究直接比较。超细水泥浆液具有时变性,比较水灰比时还需统一静置时间、预剪切程序和试验温度。

3.3. 水灰比对凝结硬化与强度的影响

水灰比增大后,水化产物形成连续结构所需的条件改变,多余水分留下的孔隙通常不利于结石体强度和抗渗性能;凝结时间也往往延长。但在低水灰比复合体系中,过少用水可能使浆液难以均匀分散和成型,局部团聚、气泡及水化不足又会削弱结石体。因此,强度与水灰比的关系需要结合实际配方判定。

周柏坊等发现,在其含速凝剂、氧化钙膨胀剂和减水剂的体系中,强度随水灰比增大先升高后降低,水灰比 0.50 时表现较优,3 d 和 28 d 抗压强度分别达到 33.70 MPa 和 50.70 MPa,28 d 抗折强度为 8.50 MPa。水灰比 0.45 并未取得最高强度,说明在该研究条件下,降低孔隙率的有利作用与分散、水化及成型条件之间存在平衡。该最优值适用于所用原材料、固定掺量和养护制度,不能直接推广到高水灰比渗透注浆配方。

温度会进一步改变这一关系。Mirza 等[13]在 4℃、10℃和 20℃下研究微细水泥浆液性能,表明温度是比较凝结与硬化表现时需要控制的条件。低温工程中,即便维持室温试验确定的水灰比,凝结过程和早期承载能力也可能发生变化。配方设计宜同时规定允许的施工温度及达到所需强度的时间,而不是只给出 28 d 抗压强度。

3.4. 水灰比的工程选取

水灰比应围绕注浆目的选择。以微裂隙渗透为主时,需要足够低的流动阻力,同时限制泌水和沿程失水;以破碎围岩加固、裂隙充填或锚固为主时,较高固相含量有利于形成连续结石体,但仍须满足泵送和充填要求。高水灰比有利于流动,并不意味着固相能够到达同样远的位置;低水灰比有利于提高结石率,也可能因过滤堵塞缩短有效扩散距离。

从现有研究看,水灰比宜作为配比优化的首要变量,但不宜作为唯一变量。可先以可注性和允许泌水率确定候选范围,再结合凝结时间、早期强度及体积变形缩小范围,最后利用代表性裂隙或砂层试验校核持续注入能力。多组分配方还需考察材料批次和现场计量波动,使室内确定的配比具有必要的施工容许范围。

4. 复合改性与外加剂研究

4.1. 矿物掺合料

粉煤灰、矿渣和硅灰是超细水泥复合改性中常见的矿物组分。它们通过改变颗粒组成、堆积状态及水化反应影响浆液和结石体性能,但不能仅按掺合料名称推定作用方向。Li 等[14]对微细水泥及水泥-矿渣浆液基本性能进行比较,说明复合胶凝体系需要同时考察工作性与硬化表现。超细注浆对粗颗粒和需水量较敏感,普通混凝土中适用的矿物掺合料,也需要先确认其细度和分散状态。

粉煤灰可能通过颗粒形貌与级配调整改善流动性,但泌水变化与其细度、掺量及减水剂配比有关。郇恒花[15]对水灰比 1.0 的改性超细水泥开展试验,报告粉煤灰掺入后浆液黏度降低,并在所用条件下改善泌水表现;樊震旺等[16]的正交试验则显示,粉煤灰掺量增加虽降低黏度,却伴随泌水率增加。两项研究采用的水泥、粉煤灰和复合组分不同,其差异提示粉煤灰不能被简单归类为固定的“稳浆剂”或“增

泌水组分”。

硅灰的细颗粒填充及后续火山灰反应有利于细化孔结构，但较高比表面积也容易增加流动阻力。夏小亮等研究的硅灰在原文中称“硅粉”。其水灰比为 1:1、减水剂用量为固体总质量的 1%时，硅灰掺量由 0 提高至 10%，漏斗流出时间由 17.75 s 增至 28.90 s，泌水率由 20%降至 3.5%，28 d 抗压强度由 15.75 MPa 增至 16.86 MPa；掺量达到 20%时，28 d 抗压强度为 17.50 MPa，但流出时间已增至 43.90 s。可见，强度增益与流动性损失并不同步，单按抗压强度确定掺量，可能得到施工阻力偏大的浆液。

同一研究中，综合浆液工作性得到的适宜硅灰掺量为 10%~15%，抗渗及强度表现较优的掺量约为 20%，酸侵蚀试验中较有利的掺量又有所不同。这些差别说明，矿物掺合料配比应依据防渗、加固或耐侵蚀等具体目标确定。掺量较高时还需关注水泥被替代后的早期反应不足，而不能仅依据后期致密化机理推断全部龄期均得到改善。

4.2. 减水剂与浆液分散

超细水泥比表面积较大，减水剂是降低低水灰比浆液流动阻力的重要手段。聚羧酸减水剂通常通过吸附和空间位阻作用改善颗粒分散，使部分絮凝结构释放出包裹水。其效果与水泥矿物组成、硫酸盐条件、产品结构及活性固含量有关。Sha 等对不同减水剂开展比较研究，为超细水泥的配比选择提供了依据。报告掺量时，应同时说明产品固含量及计量基准，避免把溶液质量分数与有效组分质量分数混为一谈。

郇恒花的研究显示，聚羧酸减水剂可以降低改性浆液黏度，但增加掺量时泌水率也会上升。这反映出分散与悬浮稳定之间的制约：颗粒絮凝被打散后，流动阻力降低，原有絮凝结构对颗粒沉降的阻滞作用也可能减弱。工程上宜优先寻找满足泵送要求的有效掺量，并通过硅灰、黏土类稳浆组分或级配调整改善稳定性，而不是不断增加减水剂追求最大扩展度。

减水剂研究还应与制浆工艺结合。同一掺量在低剪切搅拌与高剪切分散条件下，可能形成不同的团聚状态；搅拌后立即测得的高流动性，也可能随静置迅速衰减。因此，外加剂筛选应包括初始性能与流动保持，并将必要的再搅拌条件纳入现场工艺。

4.3. 纳米材料

纳米材料主要用于调节水化初期过程和结石体微结构，其效应同时受粒径、表面性质与分散状态控制。Zhang 等[17]研究微细粉煤灰、胶体纳米二氧化硅与减水剂复合体系，讨论了改性组分对流变和力学性能的共同影响。与单一组分试验相比，此类研究更接近实际配方，但也更需要区分各组分的独立作用及交互作用。

纳米二氧化硅可以提供成核表面，并通过与氢氧化钙反应参与形成水化硅酸钙凝胶。王艳芬等[18]研究超细水泥复合注浆材料，发现适量纳米 SiO_2 能够改善早期及后期力学性能，但同时存在流动度损失。这类增强作用建立在较好分散的前提下；若纳米颗粒团聚，其形成的有效尺寸可能远大于原生粒径，既降低填充效率，也可能增加过滤堵塞风险。

纳米碳酸钙与纳米二氧化硅的化学作用不同。樊震旺等在纳米碳酸钙、粉煤灰和聚羧酸减水剂复合体系中发现，纳米碳酸钙掺量变化引起黏度、泌水、凝结时间和强度的非单调变化；其中 28 d 抗压强度随掺量增加先升高后降低。其填充和成核作用可用于解释部分性能改善，但不宜套用硅质材料的火山灰反应机理。对具体水化产物的判断，应以相应物相与微观分析为依据。

现有纳米改性研究较多以抗压强度和微观形貌说明效果，工程使用还需回答增稠幅度、流动保持和材料成本是否可接受。对于需要长距离渗透的浆液，适度降低纳米组分掺量、换取更稳定的输送状态，可能比获得最高试件强度更有意义。

4.4. 速凝剂与膨胀剂

速凝剂用于缩短凝结时间、提高早期强度，尤其适用于流失风险较高或要求尽快形成承载的工况。程详等[19]在水泥 100 份、氧化钙 8 份、聚羧酸减水剂 0.35 份和水 45 份的体系中研究铝酸钠速凝剂，发现掺量为 3% 时初凝时间由未掺时的 165 min 缩短至 74 min；早期抗压及抗折性能得到改善，但 28 d 抗压强度略有下降。该结果说明，促凝和早强并不必然带来后期抗压强度同步增长。

速凝组分的适宜用量应与制浆、运输和孔内停留时间匹配。凝结过快会压缩可操作时间，并增加管路堵塞和近孔区集中固结的可能。动水条件下还应区分凝结加快与抗冲刷能力提高：前者缩短浆液处于易流失状态的时间，后者涉及浆液在水中的内聚和分散行为，需要专门的水下或动水试验评价。

膨胀剂用于补偿硬化过程中的体积收缩，改善结石体与裂隙壁面的接触。邓清怡等[20]比较氧化钙、氧化镁和硫铝酸钙类膨胀剂，在其复合胶凝体系中，氧化钙的膨胀作用较强但流动性损失也较大；硫铝酸钙型膨胀剂对流动性的影响较小；氧化镁表现出较缓慢、持续膨胀的特点。不同膨胀剂适用的时间尺度不同，其选择应结合早期补偿收缩还是较长时间保持界面接触的需求。

养护条件是膨胀改性不能忽略的因素。邓清怡等发现，标准养护下适量膨胀剂可以发挥补偿作用，而干燥及自然养护下还需要调整粉煤灰用量和水灰比。自由试件的体积增长只反映材料自身变形，实际孔隙和裂隙中的围岩约束会改变材料的应力与变形状态。膨胀改性评价宜增加受约束条件下的界面接触、开裂及渗透试验，避免仅凭自由膨胀率判断封堵效果。

4.5. 聚合物纤维及多组分复合改性

黏土类组分、聚合物和纤维主要用于改善浆液稳定性、抗裂能力与界面黏结。牛佳斌[21]将硅灰、锂基膨润土、聚乙烯醇纤维、减水剂和速凝剂引入超细水泥体系，通过多指标试验筛选配比，并进一步研究浆液扩散。Zhou 等[22]同样研究了含硅灰、膨润土、聚乙烯醇纤维及外加剂的复合体系，讨论综合性能与水化过程。两项研究的优化掺量并不完全相同，表明最佳配比受到因素范围和评价方法影响，不能将相近组分的结果直接合并。

多组分体系的性能发展也未必随龄期平稳增长。Zhou 等报告其优化材料 3~7 d 出现小幅强度下降，并观察到相应微观结构变化。这提示速凝、稳浆和纤维增强组分共同存在时，应关注水化与体积变化的协调性。仅选取某一个龄期的较高强度，容易遗漏中间阶段的性能波动。

纤维通过跨缝桥联、拔出耗能和界面黏结改善脆性，但其长度和团聚状态也决定浆液能否通过狭窄通道。程详等[23]研究耐碱玻璃纤维增强复合锚固材料，在其确定的配方下取得 14 d 抗压强度 72.9 MPa、抗折强度 13.41 MPa，并通过室内全长锚固试验获得 41.24 kN 的峰值拉拔力。这些结果支持纤维在锚固和较大空间充填中的增强作用，但不构成纤维浆液可以进入微细裂隙的证据。

复合改性的关键是根据用途协调组分作用。硅灰和纳米材料可能提高密实性，也会增加需水量；减水剂可以恢复流动性，却可能改变泌水；速凝剂缩短凝结时间，稳浆及纤维组分又会改变流动阻力。刘伟韬等[24]采用响应面法研究水灰比、硅灰和聚羧酸减水剂，为考察交互作用提供了方法。此类模型宜用于识别试验范围内的变化趋势，并通过补充试验检验推荐配方，而不宜超出原有材料和因素范围外推。

5. 工程应用研究

5.1. 砂层渗透注浆与地层加固

砂层注浆的主要任务是在不造成过度扰动的前提下，使胶凝颗粒进入孔隙并形成连续加固体。Tekin 等[25]关于不同级配砂的研究表明，可注性与砂层组成紧密相关。粒径较大的孔隙不一定构成连续通道，

局部孔喉及细颗粒含量可能决定注浆能否持续。因此,评价超细水泥在砂层中的适用性,需要同时考虑砂的级配、密实程度和渗透条件。

沙飞等[26]围绕富水砂层开展注浆材料试验与应用研究,将浆液性能、加固要求与工程工况结合起来。Pantazopoulos 等[27]则研究微细水泥注浆砂的应力-应变、强度及水力性能,说明注浆后砂体的承载表现和减渗效果需要分别评价。与净浆试件相比,注浆砂体包含颗粒骨架、浆液分布不均及界面作用,其性能更接近实际加固对象。

现有研究对砂层注浆的启示是,材料筛选不能止于“可以注入”。注入后固相的空间分布、加固体均匀性以及渗透系数变化,决定防渗和加固能否真正实现。对地表变形敏感的工程,还应同步监测注浆压力和地层变形,以区分渗透扩散与劈裂造成的注浆量增加。

5.2. 矿山巷道围岩加固

矿山破碎围岩中既存在可供渗透的细裂隙,也存在需要充填和胶结的较大破裂带。超细水泥能够改善部分裂隙的注入条件,但最终效果还取决于围岩应力、裂隙连通性和原有支护体系。赵光明等的综述将材料、设备、工艺和应用纳入同一研究范围,反映出矿用注浆不能仅以结石体强度解释围岩控制效果。

Yu 等在水帘洞煤矿开展现场注浆,选用 K700 超细水泥及 0.45 水灰比,并与锚网带、锚索和全断面喷射混凝土支护配合。该工程采用高压劈裂注浆,文中给出的初始压力不超过 6 MPa、终压为 10 MPa,监测结果显示注浆段顶底板和两帮变形均较未注浆段减小。这一案例提供了材料选择、施工参数和围岩监测相结合的现场证据;其压力条件属于特定围岩及劈裂工艺,不能作为微裂隙渗透注浆的一般推荐值。

周柏坊等的水灰比试验与程详等的铝酸钠改性试验,则分别从体积稳定、早期强度及破碎煤岩胶结方面提供材料依据。这些室内结果有助于缩小现场配方范围,但工程还需检验裂隙含水、煤岩表面污染、采动扰动及实际混合质量的影响。较高的浆体强度若未转化为连续的浆-岩胶结,仍难以充分发挥围岩加固作用。

5.3. 水工防渗与裂隙堵水

水工防渗更关注浆液留存、裂隙充填完整性和硬化后的长期水密性。郇恒花针对含微裂隙水利工程需求,比较不同细度、粉煤灰、硅灰和减水剂对浆液流变及泌水的影响,为材料选择提供了试验依据。该文的主体证据来自室内浆液性能与微观观察,并未提供完整的现场灌浆效果监测,因此其结论宜用于配方筛选,不宜表述为已证实某类坝体的长期防渗效果。

夏小亮等在硅灰改性研究中,采用 1.2 MPa 水压持续 24 h 评价结石体抗渗性能,硅灰掺量为 20% 时渗水高度由基准组的 10.2 mm 降至 4.3 mm;酸浸试验也显示适当掺量有利于减轻强度损失。Sha 等[28]进一步研究腐蚀环境下微细水泥基材料的耐久性,将评价内容扩展到较长龄期的强度及结构变化。这些研究支持致密化改性在抗渗和耐侵蚀方面的作用,但实际水工结构还存在浆-岩界面及水头变化,仅凭结石体试验难以覆盖全部渗漏路径。

对于动水裂隙,浆液在凝结前可能发生稀释、冲刷和固液分离。牛佳斌通过静水、动水条件下的裂隙扩散数值模拟,分析不同注浆条件对扩散的影响。此类模型能够辅助比较压力、流动条件与扩散形态,但其预测仍取决于流变本构、边界条件及试验校核。材料研发宜将动水留存率、冲刷损失和凝结后渗透性能与扩散过程联合评价,使模拟参数与实际材料行为保持一致。

5.4. 锚固与钻孔封孔

锚固材料需要在有限空间内充分充填,并通过与锚杆及围岩的黏结传递荷载;钻孔封孔材料则更关注体积稳定和漏气、漏水通道的封闭。两类用途都要求浆体与孔壁保持接触,但承载评价与密封评价并

不相同。赵光明等对矿用注浆应用的梳理说明,封孔材料设计需要与孔周裂隙和施工工艺共同考虑。

程详等的耐碱玻璃纤维复合体系通过室内锚固试验考察峰值拉拔力和滑移,并测试煤体界面黏结性能。相较于单纯抗压试验,这类试验能够反映界面传力与破坏过程,是锚固用途的重要验证环节。纤维增强材料用于封孔或细裂隙扩散时,还需检查通过性和分散均匀性,防止纤维集中于孔口或局部狭窄处。

膨胀改性对封孔具有直接意义,但设计目标应是补偿收缩并维持接触,而非最大化自由膨胀率。邓清怡等关于养护条件的结果表明,干燥及自然环境下的变形表现可能偏离标准养护结果。后续工程评价应在代表性孔壁约束和含水条件下测试密封性能,并跟踪服役期间的渗漏变化。就本文涉及的文献而言,锚固与封孔方向的材料试验较为丰富,而长期现场密封数据仍需补充。

6. 结论与展望

6.1. 结论

(1) 超细水泥是在普通水泥颗粒尺度限制下发展起来的注浆材料。干法与湿法粉磨均可实现颗粒细化,但成品细度、施工分散状态及浆液龄期共同决定实际性能。细度提高有利于改善部分孔隙和裂隙中的注入条件,同时也可能增加需水量与流动阻力,宜以粗颗粒尾部、持续注入能力和制备成本共同确定适宜细度。

(2) 水灰比是控制浆液流动性、稳定性和硬化性能的基本变量。提高水灰比通常降低流动阻力,却容易增加泌水和硬化孔隙;低水灰比复合体系的强度还受分散、成型及水化条件影响,可能存在试验范围内的最优值。配比比较应统一计量基准,并与材料组成、试验温度和养护条件对应。

(3) 复合改性能够分别改善分散、凝结、强度、体积稳定及抗裂性能,但各项性能之间存在制约。硅灰和纳米材料的致密化作用应与增稠效应一并评价,减水剂需要兼顾稳定性,速凝剂需要保留施工时间,膨胀剂需要适应约束和供水条件,纤维则需要满足目标通道的通过要求。

(4) 超细水泥已在砂层加固和矿山围岩注浆等方面积累应用研究,水工防渗、锚固与封孔方向也形成了相应的材料和模型试验。不同用途应分别以减渗、变形控制、界面传力或密封效果检验材料性能。净浆强度与初始流动性只能作为筛选指标,最终评价仍应落实到被注介质及服役条件。

6.2. 展望

首先,应建立便于跨研究比较的试验资料体系。原材料除报告水泥品种和细度外,还应给出粒径分布、比表面积及必要的组成信息;配方应列明水与各固体组分质量、外加剂固含量和加料顺序;浆液测试应记录温度、龄期和测试程序。对可注性试验,需明确裂隙或孔隙尺度、压力边界及持续通过的判据,为筛选适用配比提供可复核的数据。

其次,应加强粉磨分散、时变流变与渗滤过程之间的联系研究。可利用可视化裂隙试验和沿程取样,观察团聚体形成、颗粒架桥及固液分离,并结合压力-流量变化分析堵塞位置。数值模拟除拟合扩散范围外,还应检验固相分布和堵塞过程,使对注浆量的预测能够进一步反映有效加固范围。应从标准养护净浆转向受约束材料及浆-岩界面。针对膨胀补偿、纤维增强和快速硬化体系,重点研究含水变化、外部约束及持续荷载下的体积变形、界面脱黏和渗透演化。动水冲刷、化学侵蚀与应力扰动宜根据目标工程组合设置,避免仅靠单因素试验推断复杂环境下的长期可靠性。

最后,应通过现场试验检验配方的施工容许范围和长期效果。将制浆质量、压力与流量记录、取芯或压水检查以及变形和渗漏监测相衔接,有助于判断室内性能增益能否转化为工程效果。矿物掺合料和低能耗粉磨工艺的评价,也应以达到相同防渗或加固要求为前提,同时考虑材料用量、施工投入和后续维修需求,使性能优化与资源节约建立在可比较的工程基础上。

未来超细水泥注浆材料的核心矛盾是高性能、高成本与高碳排难以兼得：经济上，超细粉磨能耗和设备磨损大、产品单价高、需水量和外加剂用量大，与普通水泥浆及化学浆材竞争时性价比受限；环境上，熟料生产碳排放高、粉磨电耗大，并存在粉尘、噪声、碱性废浆废水、外加剂生态毒性及固废替代带来的重金属浸出风险。其发展方向是低碳胶凝体系(碱激发、地聚合物、硫铝酸盐、贝利特水泥、碳矿化等)、大掺量工业固废替代熟料、低能耗粉磨与颗粒级配优化、绿色低毒外加剂、智能精准注浆与废浆回收，以及全生命周期评价和绿色标准体系，最终在性能、成本与环境之间实现平衡。

参考文献

- [1] 刘江峰, 王锐, 孟庆彬, 等. 超细水泥生产工艺、性能及工程应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(5): 1519-1528.
- [2] 赵光明, 王艳芬, 艾洁, 等. 矿用水泥基注浆材料的发展及展望[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(1): 1-22.
- [3] Pantazopoulos, I.A., Markou, I.N., Christodoulou, D.N., Droudakis, A.I., Atmatzidis, D.K., Antiohos, S.K., *et al.* (2012) Development of Microfine Cement Grouts by Pulverizing Ordinary Cements. *Cement and Concrete Composites*, **34**, 593-603. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.009>
- [4] Yu, W., Zhou, M., Wan, X. and Guan, Q. (2022) Experimental Study on Physical Properties of Superfine Cement Grouting Material. *Frontiers in Materials*, **9**, Article 1056135.
- [5] Draganović, A., Karamanoukian, A., Ulriksen, P. and Larsson, S. (2020) Dispersion of Microfine Cement Grout with Ultrasound and Conventional Laboratory Dissolvers. *Construction and Building Materials*, **251**, Article 119068. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119068>
- [6] Sha, F., Kong, H., Zhang, L., Meng, Q. and Wang, Q. (2023) Rheological Properties of CEMI Type Microfine Cement Slurry with Different Fineness. *Construction and Building Materials*, **404**, Article 133253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133253>
- [7] 王凯, 王连国, 陆银龙, 等. 微裂隙中水泥浆液渗滤效应的可视化试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 990-997.
- [8] Draganović, A. and Stille, H. (2011) Filtration and Penetrability of Cement-Based Grout: Study Performed with a Short Slot. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **26**, 548-559. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.02.007>
- [9] Draganović, A. and Stille, H. (2014) Filtration of Cement-Based Grouts Measured Using a Long Slot. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **43**, 101-112. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.04.010>
- [10] 周柏坊, 孟祥瑞, 王艳芬, 等. 不同水灰比下矿用超细水泥注浆材料性能试验研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2025, 7(4): 124-139.
- [11] Sha, F., Gu, S., Diao, Y., Liu, P., Lou, D. and Hu, Y. (2022) Workability and Mechanical Properties of Superplasticized Microfine Cement Grouts. *Materials*, **15**, Article 1747. <https://doi.org/10.3390/ma15051747>
- [12] 夏小亮, 许光泉, 李青青. 硅粉改性超细水泥浆液性能及耐久性试验分析[J]. 人民黄河, 2011, 33(4): 137-138+141.
- [13] Mirza, J., Saleh, K., Langevin, M., Mirza, S., Bhutta, M.A.R. and Tahir, M.M. (2013) Properties of Microfine Cement Grouts at 4°C, 10°C and 20°C. *Construction and Building Materials*, **47**, 1145-1153. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.026>
- [14] Li, S., Sha, F., Liu, R., Zhang, Q. and Li, Z. (2017) Investigation on Fundamental Properties of Microfine Cement and Cement-Slag Grouts. *Construction and Building Materials*, **153**, 965-974. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.188>
- [15] 郇恒花. 改性超细水泥注浆材料在含微裂隙水利工程中的应用[J]. 水利技术监督, 2022(6): 192-195.
- [16] 樊震旺, 张雷, 陈朋成, 等. 纳米碳酸钙改性超细水泥注浆材料研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(5): 75-79.
- [17] Zhang, S., Qiao, W., Chen, P. and Xi, K. (2019) Rheological and Mechanical Properties of Microfine-Cement-Based Grouts Mixed with Microfine Fly Ash, Colloidal Nanosilica and Superplasticizer. *Construction and Building Materials*, **212**, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.314>
- [18] 王艳芬, 刘赫海, 程详, 等. 纳米 SiO₂ 改性超细水泥复合注浆材料水化特性与力学性能[J]. 煤炭学报, 2025, 50(S2): 968-978.
- [19] 程详, 田朝宇, 王艳芬, 等. 铝酸钠速凝剂调控无机注浆材料性能演化与加固机制[J/OL]. 化工进展: 1-17. <https://www.cnki.net/Resolution/Handler?doi=10.16085/j.issn.1000-6613.2026-0892>, 2026-09-24.
- [20] 邓清怡, 郑召, 杜义祥, 等. 膨胀剂与养护条件对超细水泥基注浆材料收缩性能的影响[J/OL]. 混凝土与水泥制

- 品: 1-8. <https://www.chndoi.org/Resolution/Handler?doi=10.19761/j.1000-4637.25040216>, 2026-09-24.
- [21] 牛佳斌. 改性超细水泥基注浆材料性能研究及浆液扩散数值模拟分析[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.
- [22] Zhou, J., Zha, L., Meng, S. and Zhang, Y. (2024) Optimization on Overall Performance of Modified Ultrafine Cementitious Grout Materials (MUCG) and Hydration Mechanism Analysis. *PLOS ONE*, **19**, e0309312. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0309312>
- [23] 程详, 田朝宇, 王艳芬, 等. 多元体系玻璃纤维增强超细水泥复合锚固材料力学性能与微观机制[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2026, 8(3): 312-327.
- [24] 刘伟韬, 吴海凤, 申建军. 基于 RSM 的超细水泥注浆材料配比及性能优化模型[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(8): 146-158.
- [25] Tekin, E. and Mollamahmutoglu, M. (2010) The Groutability of Microfine Cement (Rheocem 900) Grouts into Various Graded Sands. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **25**, 533-539.
- [26] 沙飞, 李术才, 刘人太, 等. 富水砂层高效注浆材料试验与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(7): 1420-1433.
- [27] Pantazopoulos, I.A., Markou, I.N. and Atmatzidis, D.K. (2022) Stress-Strain-Strength and Hydraulic Performance of Microfine Cement Grouted Sands. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **34**, Article ID: 04022273. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004433](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004433)
- [28] Sha, F. and Fan, G. (2021) Durability of a Novel Effective Microfine Cementitious Grouting Material in Corrosion Environments. *Construction and Building Materials*, **306**, Article 124842. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124842>