

粉煤灰基双液型注浆料性能研究

陈培新

上海隧道工程有限公司, 上海

收稿日期: 2025年7月22日; 录用日期: 2025年8月12日; 发布日期: 2025年8月26日

摘要

为提升盾构同步注浆材料的性能表现与工程适应性, 响应地下空间开发中对高性能、低污染材料体系的迫切需求, 本文围绕桃浦污水处理厂初期雨水调蓄工程的实际工况, 开展了以粉煤灰为基料, 配合不同稀释比的水玻璃构建双液注浆体系, 旨在系统探讨稀释条件对浆体性能与微观结构的影响, 为盾构同步注浆材料的优化设计提供理论依据与工程参考。实验采用比重测试、凝结时间测定、稠度试验以及无侧限抗压强度测试方法, 系统评估水玻璃稀释比变化对双液浆工作性与早期强度性能的调控效果; 结合X射线衍射(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)分析, 揭示不同水玻璃浓度对浆体反应产物的矿物组成及结石体结构致密性的影响规律。研究结果表明, 水玻璃的稀释比例对浆体性能具有显著影响, 当水玻璃与水的体积比为9:1时, 浆体不仅满足盾构施工对比重、稠度、凝结时间及早期强度的综合性能要求, 还有效控制了材料成本, 减少了水玻璃过量使用所带来的环境负荷。微观结构分析显示, 水玻璃浓度对浆体反应产物类型的影响较小, 但对结石体结构的致密性具有显著作用。本研究为构建性能优越、绿色可持续的盾构注浆材料体系提供了理论依据与技术支持。

关键词

粉煤灰, 稀释水玻璃, 同步注浆, 性能调控, 微观分析

A Study on the Properties of Fly Ash-Based Two-Component Grouting Materials

Peixin Chen

Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai

Received: Jul. 22nd, 2025; accepted: Aug. 12th, 2025; published: Aug. 26th, 2025

Abstract

To enhance the performance and engineering adaptability of shield synchronous grouting materials and to address the urgent demand for high-performance, low-pollution material systems in

文章引用: 陈培新. 粉煤灰基双液型注浆料性能研究[J]. 土木工程, 2025, 14(8): 2063-2073.

DOI: 10.12677/hjce.2025.148224

underground space development, this study, based on the actual working conditions of the Taopu Sewage Treatment Plant's preliminary rainwater storage project, developed a fly ash-based two-component grouting system incorporating water glass at various dilution ratios. The objective was to systematically investigate the influence of dilution conditions on the grout's rheological properties and microstructural characteristics, thereby providing a theoretical foundation and engineering reference for the optimized design of shield grouting materials. Through a series of experimental evaluations including bulk density measurement, setting time determination, consistency testing, and unconfined compressive strength assessment, the regulatory effect of water glass dilution on the workability and early strength of the grout was comprehensively analyzed. Furthermore, X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) were employed to reveal the influence of water glass concentration on the mineralogical composition of reaction products and the compactness of the hardened matrix. The results indicated that the dilution ratio of water glass had a significant impact on grout performance; a volume ratio of 9:1 (water glass to water) not only met the comprehensive technical requirements for shield tunneling—such as density, consistency, setting time, and early strength—but also effectively reduced material costs and minimized the environmental burden associated with excessive use of water glass. While the type of reaction products remained relatively unaffected by water glass concentration, microstructural analysis showed a pronounced influence on the compactness of the hardened structure. This study offers theoretical and technical support for the development of high-performance, environmentally sustainable grouting systems suitable for shield tunneling applications.

Keywords

Fly Ash, Diluted Water Glass, Synchronous Grouting, Performance Regulation, Microstructural Analysis

Copyright © 2025 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

本研究以上海桃浦污水处理厂初期雨水调蓄 TP1.4 标工程为背景。该工程区间隧道长度约 3210.4 m，隧道外径 4700 mm，内径 4000 mm，平面设置 R65 m、R70 m、R75 m、R80 m 四段急曲线，除此外区间正常段最小转弯半径为 R300 m，如图 1 所示。采用 1 台泥水平衡式盾构机从 DG9 井始发，到 DG2 井接收，沿途主要穿越地铁 14、15 号线、武宁路地道及梅岭北路桃浦河桥等多处重要市政设施与建筑物。

区间隧道覆土埋深 23.34 m~32.7 m，最大纵坡为+3.5%，主要涉及土层为粘土、粉质黏土、砂质粉土、粉砂，具有孔隙比高、压缩性强、强度低、触变性显著、流变性突出以及结构不均匀等不稳定土质特征。盾构在富水软土地层急曲线段隧道推进过程中纠偏量较大，对土体的扰动较大，易导致地表发生较大的沉降及管片上浮。同时，仿形刀也处于开启状态进行超挖，实际挖掘量超出理论挖掘量，进一步增加地层损失，故同步浆液填充效果直接影响到地面沉降及成型隧道的质量。

由于纯水泥灌浆料存在一定的性能缺陷，通常不直接用于盾构隧道的灌浆。目前常采用由水泥浆和硬化剂组成的双液浆体，并通过适量添加工业固废、特殊土壤材料及化学添加剂，来有效改善灌浆料的性能，从而提升盾构隧道的灌浆效果。徐建平[1]采用硫铝酸盐水泥、粉煤灰、矿渣微粉和砂为基体材料，结合聚羧酸减水剂、膨润土和三乙醇胺早强剂作为复合外加剂，开发了快硬高性能同步注浆材料。王红喜[2]提出以钢渣复合粉煤灰、矿渣或偏高岭土等高硅铝材料配制浆液，与水玻璃混合，形成新型高性能

双液注浆材料，该材料具有良好的工作性、高强度和耐久性，并已应用于武汉长江隧道施工中。安妮[3]的研究表明水泥与水玻璃的掺量对其胶凝性能具有显著影响。适当提高水泥用量，有助于增强结石体的早期与后期强度，当水泥水玻璃体积比为 1:0.75 时，可有效控制地面沉降。张世荣[4]以南宁轨道交通一号线穿越膨胀岩地层为工程背景，采用纤维复合注浆材料进行了膨胀岩地层盾构壁后注浆浆液的研究。



Figure 1. Overall plan schematic of the initial rainwater storage project at Shanghai Taopu wastewater treatment plant
图 1. 上海桃浦污水处理厂初期雨水调蓄工程总体平面示意图

基于上述工程背景，考虑到目前国内少有类似在深覆土、高水压下软土地层急曲线隧道施工案例，同时结合实际工程中对材料绿色化和简配化的要求，需尽量减少材料种类，避免使用具有潜在毒性的添加剂[5]。本研究通过选用粉煤灰(A 液)与水玻璃(B 液)制备双液浆，并对不同水玻璃稀释比例下浆液性能进行试验研究，确定经济环保且性能优良的最优配合比，以提高隧道成型质量，减少盾构施工过程中的地层扰动与环境风险。

2. 试验材料与方法

2.1. 试验材料

本工程混合双液浆分为 A、B 双液，其中 A 液由河砂、粉煤灰、石灰、膨润土、水组成，其中 A 型浆液配合由表 1 所示。B 液采用工业级水玻璃，模数为 2.3，pH 为 11.3。B 液与 A 液的体积比为 1:10，出于环保与经济性的考虑，对 B 液进行稀释，具体稀释量由表 2 所示。

Table 1. Mix proportion of single-component grout A liquid
表 1. 单液浆 A 液配合比

砂(g)	水(g)	粉煤灰(g)	膨润土(g)	石灰(g)
1888	520	480	80	128

Table 2. Volume ratio of B liquid to water
表 2. B 液、水稀释体积比

编号	B 液体积占比	稀释水体积占比
M ₁	100%	0
M ₂	90%	10%
M ₃	80%	20%
M ₄	70%	30%
M ₅	60%	40%
M ₆	50%	50%
M ₇	40%	60%
M ₈	30%	70%
M ₉	20%	80%
M ₁₀	10%	90%

2.2. 性能要求

本试验结合急曲线隧道施工环境的实际需求，设定浆体性能控制指标如下：浆体比重应大于 1800 kg/m³；A 液初始稠度控制在 9~10 cm；混合浆体的初凝时间小于 30 min；无侧限抗压强度要求在 2 h 龄期不低于 0.18 MPa，3 h 龄期不低于 0.3 MPa。上述指标作为本试验的基本性能判定依据，用于指导配比调整与性能筛选。

2.3. 比重

将 A 液与 B 液按设定比例混合均匀后，立即取适量浆液装入预先称重的 1 L 标准量筒中，并用保鲜膜封口以防水分挥发。随后置于振动台上振动 1 分钟，以消除浆液中的气泡并确保其充分堆积密实。震动完成后，再次称量整筒质量，扣除空筒质量后所得即为浆液在 1 L 体积下的质量。根据该质量值可直接计算液浆的比重，用于评估浆液体系的密实性与填充能力。

2.4. 凝结时间

参照 GB/T 1346-2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》中关于凝结时间测试的相关要求，采用维卡仪对 A、B 混合液配置所得浆体的终凝时间进行测试。通过测定终凝时间，评估双液体体系的凝结速率及其在实际工程应用中的施工可操作性，为确定其适宜的使用窗口期和现场施工作业安排提供技术依据。

2.5. 稠度及稠度损失率

参照 JGJ/T70-2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》中关于稠度试验的相关规定，分别对 A 液单独配置状态下的稠度值以及 A、B 液混合形成的双液浆体的初始稠度进行测试。对两次浆体稠度变化进行对比，以量化其稠度损失趋势，评估浆体在施工过程中的工作性能保持能力。通过该测试可为后续浆体输送性能分析与配合比优化提供依据。

2.6. 无侧限抗压强度

双液浆注入模具后，后续养护等步骤参照 JTJ051-93《公路土工试验规程》中规定的方法，分别测试

2、8、24 h 龄期双液浆凝结后的无侧限抗压强度值。

2.7. X 射线衍射

对结石体进行取样，喷涂金属导电膜后采用扫描电子显微镜(SEM, ZEISS Gemini 300)观察样品的微观形貌。

2.8. 扫描电子显微镜

从结石体进行取样，并在低温干燥条件下使样品充分干燥，以避免因水分残留影响电子显微成像效果。成像时使用金属喷镀仪在样品表面均匀喷涂一层金属导电膜，以提高样品表面的导电性并减少电荷积聚带来的成像畸变。制备完成后，使用场发射扫描电子显微镜(SEM, ZEISS Gemini 300)对样品的微观结构进行观察。

3. 结果与分析

3.1. 比重

由图 2 可见，对水玻璃进行不同比例的稀释，其比重随着稀释水的增加而降低。水玻璃与稀释水体积比从 10:0 到 8:2 的双液浆比重较高，在 2122~2133 kg/m³ 之间，表明反应较为充分，并且水玻璃密度远高于水的密度，B 液中水玻璃比例的增加会提高其密度。而在 1:9 到 3:7 的稀释浆体中比重较小，处于 1889~1920 kg/m³ 间。比重的增加表明浆体中固体物质的含量增加，通过调节水玻璃与水的比例，控制浆体的比重，可以优化浆体的凝结时间和强度，以满足不同工程的需求。液浆的密实度可以通过比重指标来判断。较高的比重通常表明材料的密度较大，这不仅有助于增强液浆的稳定性和抗分离能力，还能防止注浆过程中出现的分层现象，从而确保性能均匀。此外，高比重的液浆能够提供更大的填充力和更好的密实度，提升注浆的封闭性和承载能力。比重还直接影响液浆的流动性和渗透性，使其能够更有效地填充目标区域的空隙[6]，从而优化注浆效果。为了满足这些施工要求，通常液浆的比重应高于 1800 kg/m³ [7]。

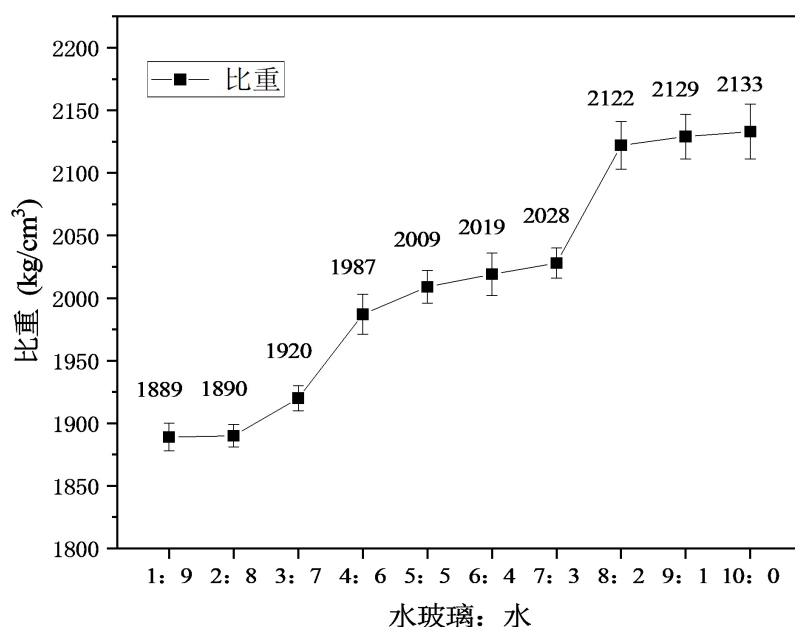


Figure 2. Bulk density of two-component grout with different sodium silicate proportions
图 2. 不同水玻璃占比双液浆比重

3.2. 凝结时间

双液浆的胶凝时间直接影响施工效率和进度，凝结过快可能导致操作时间不足，而过慢则可能引起漏浆问题，影响隧道的密封性和稳定性。如图 3 所示，凝结时间随着水玻璃比例的增加逐渐减少。从 1:9 比例的 260 分钟减少到 10:0 比例的 19 分钟。高浓度水玻璃浆体的高粘度和快速凝胶化特性使得浆体在较短时间内失去流动性并转变为固态，从而显著缩短凝结时间。而低浓度水玻璃浆体由于粘度较低，化学反应速率较慢，形成凝胶所需时间较长，导致凝结时间延长[8] [9]。同样的，宋雪飞[10]的研究表明，随着粉煤灰掺量的增加，浆液凝结时间相应延长，进一步验证了胶凝体系中激发条件和反应速率对凝结行为具有重要影响。

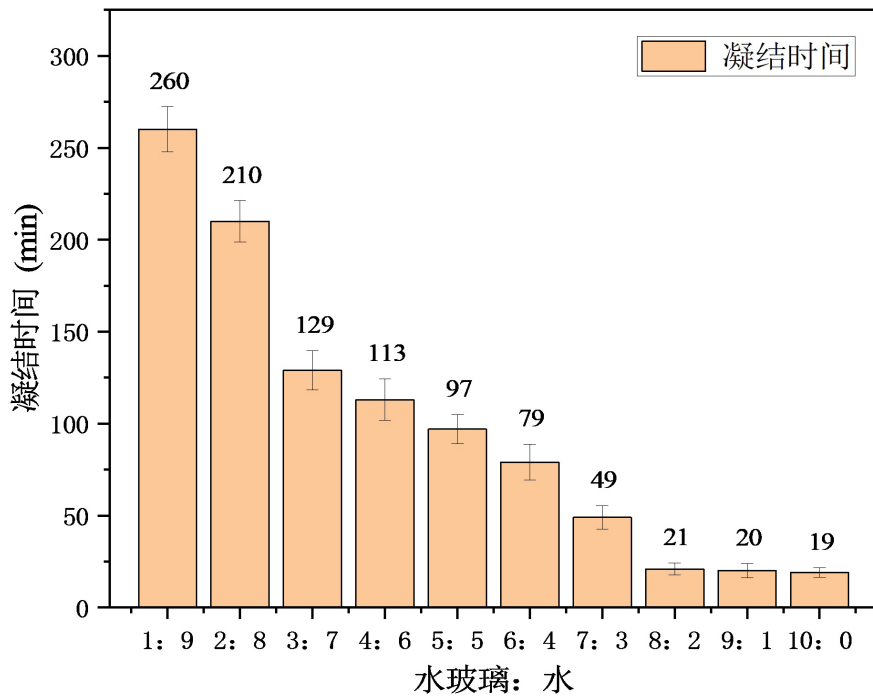


Figure 3. Setting time of two-component grout with different sodium silicate proportions
图 3. 不同水玻璃占比双液浆凝结时间

3.3. 稠度及稠度损失率

图 4 可以看出，随着水玻璃比例的增加，双液浆的稠度逐渐降低，而稠度损失率则逐渐增加。初始 A 液稠度均保持在 9 cm。在 1:9 比例下，双液浆的稠度为 7.5 cm，稠度损失率为 17%，表明在这种较低水玻璃浓度下，浆体仍然保持了较高的流动性和较低的稠度损失。然而，随着水玻璃浓度的增加，双液浆的稠度逐渐减小，直到 10:0 比例下，双液浆稠度为 3.15 cm，稠度损失率增加到 65%，浆体的流动性显著降低。高浓度的水玻璃提高了浆体的粘度，使得混合后的浆体难以流动，并且较多的硅酸钠解离出硅酸根离子与环境中的 Ca^{2+} 离子反应越充分，形成的硅酸钙(C-S-H)凝胶越多，这种凝胶能够迅速增稠浆体，进一步降低双液浆流动性，从而导致稠度降低。这种现象反映了浆体内部结构的变化，高浓度水玻璃导致更快的凝胶化和固化过程，使浆体的工作时间缩短，流动性迅速丧失[11][12]。从工程应用的角度来看，适当的稠度和稠度损失率对于施工操作和最终性能至关重要[13]。设计双液浆体时需要根据具体施工需求调整水玻璃与 A 液的比例，以达到最佳的施工效果和材料性能。

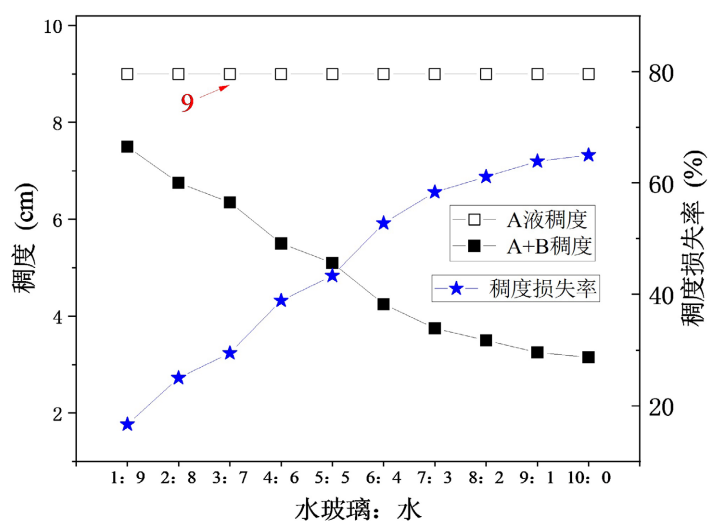


Figure 4. Consistency and consistency loss rate of two-component grout with different sodium silicate proportions

图 4. 不同水玻璃占比双液浆稠度及稠度损失率

3.4. 无侧限抗压强度

图 5 为不同水玻璃占比双液浆结石体强度。2、8、24 h 的双液浆结石体强度随着 B 液稀释比的增加逐渐下降，稀释比为 2:8 和 1:9 的情况下，由于加入较多的水，体系内无法快速反应形成硅酸钙(C-S-H)凝胶。因此，短时间内无法形成有效的初期强度[14]。根据项目要求，2 h 的结石体强度需达到 0.18 MPa，该类型双液浆中 B 液稀释比为 9:1 即可达到要求。从 8、24 h 强度来看，当稀释比小于 7:3 时强度有较大的提升，这是由于在 7:3 及更大的稀释比时，水玻璃的浓度不足以达到最佳的反应条件，导致反应生成的 C-S-H 凝胶结构不够致密，强度相对较低。而在 8:2 比例时，水玻璃浓度提高，形成的 C-S-H 凝胶网络更致密，强度显著提高[15][16]。这与豆海军[17]的研究结论一致，即当水玻璃组分占比比较低时，难以有效激发粉煤灰的活性，从而限制了结石体强度的形成。

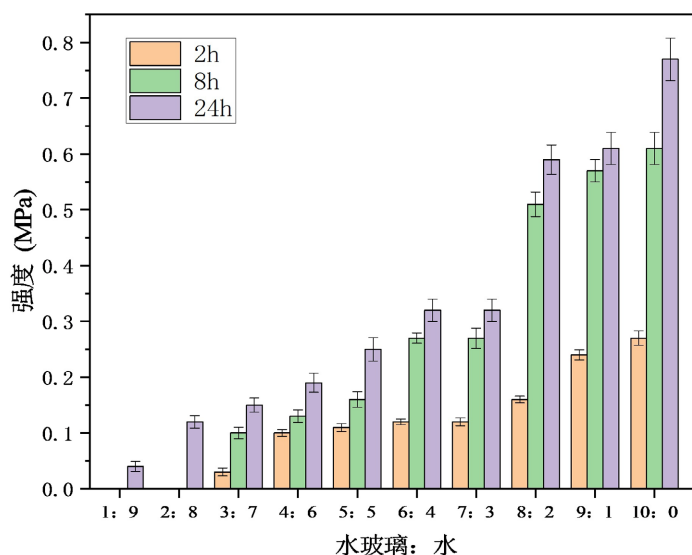


Figure 5. Compressive strength of solidified grout with different sodium silicate proportions

图 5. 不同水玻璃占比双液浆结石体强度

3.5. 结石体物相

图 6 为水玻璃稀释比为 6:4 和 9:1 的结石体 X 射线衍射图谱, 其中石英的衍射峰较为明显。值得注意的是, 稀释比为 9:1 时, 样品在 $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 区域的衍射基底略有上抬, 同时在 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 区域出现明显的弥散背景增强[17]。前者可能与体系中 N-A-S-H 类无定形凝胶产物的生成有关[18], 后者则可能源于微晶结构或胶凝相中结构无序度增加[19]。这些现象说明, 水玻璃浓度的提高在一定程度上促进了反应进行与胶凝结构的形成, 但同时也引入了更多非晶或弱结晶物相, 使体系结构更加复杂化。

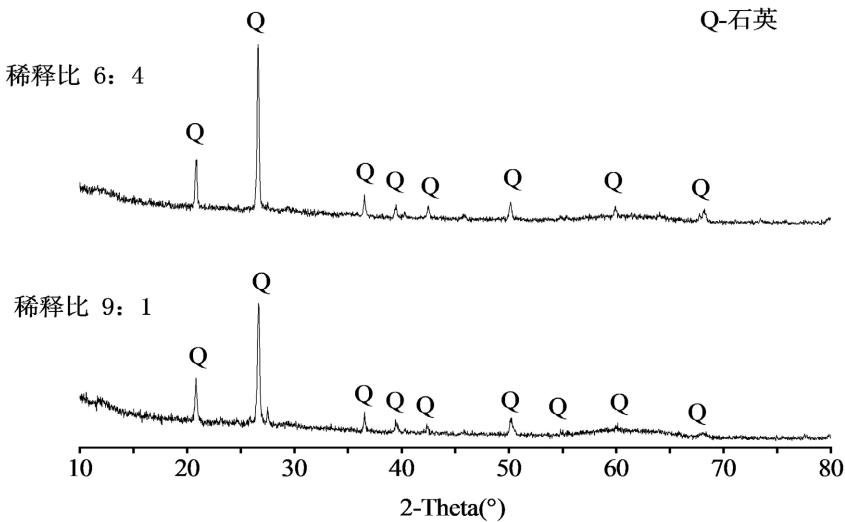


Figure 6. Phase composition of solidified grout with different sodium silicate proportions
图 6. 不同水玻璃占比双液浆结石体物相组成

3.6. 微观形貌

为了分析不同水玻璃稀释量对结石体内部结构及其强度性能的影响, 对各组样品进行了扫描电子显微镜(SEM)表征。图 7(a)为水玻璃与水比值为 6:4 时结石体内部形貌, 可以观察到材料内部存在较多的裂缝, 且整体结构较为疏松, 推测其抗压强度较低的原因与这种不均匀的微观结构有关[20]。而图 7(b)为水玻璃与水比值为 9:1 时表现出较为致密的微观结构, 且裂缝较少甚至没有明显观察到, 说明在较高水玻璃浓度条件下, 生成的凝胶相互连接紧密, 从而显著提高了结石体的抗压强度[21]。

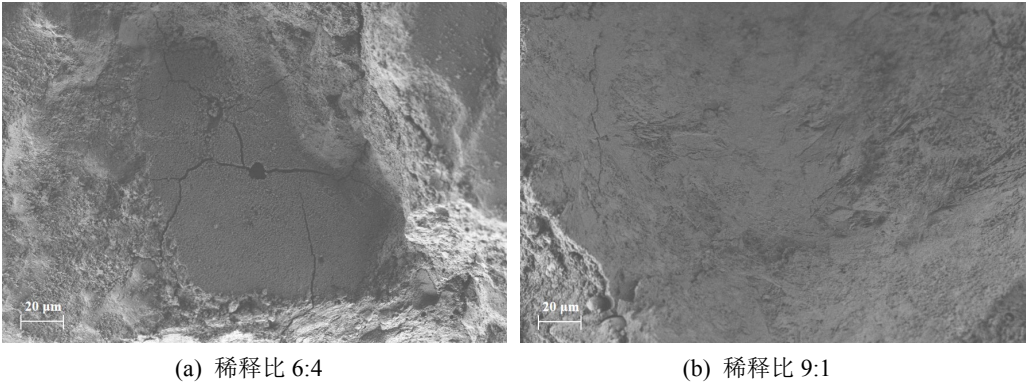


Figure 7. Internal morphology of solidified grout with different sodium silicate proportions
图 7. 不同水玻璃占比双液浆结石体内部形貌

4. 反应机理

粉煤灰俗称飞灰，是火力发电站燃煤焚烧后产生的副产物。其主要成分是 SiO_2 、 Al_2O_3 ，而 CaO 、 MgO 等含量较低。粉煤灰主要是具有高度致密的三维 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 网络结构的玻璃微珠，这种结构阻碍了水分子的渗透和扩散，并且活性成分较少，化学反应性较低，在常规环境中难以发生显著的化学反应。当采用水玻璃作为激发剂时，水玻璃水解产生 NaOH 的开始缓慢破坏硅氧结构，使得玻璃体结构解离。随着粉煤灰玻璃体表层的溶解，产生的 AlO_3^{3-} 和 SiO_3^{2-} 在碱性条件下与 Ca^{2+} 反应生成 C-S-H 和 C-A-H 凝胶[22]。随着反应的深入，生成的 C-S-H 和 C-A-H 凝胶交错共生，形成稳定的固体结构，具体反应如下：

水玻璃水解过程：



粉煤灰的主要成分在碱性条件下溶解并反应过程：



提供强度凝胶产物形成过程：



5. 成本分析

本研究采用粉煤灰、膨润土、石灰作为 A 液主材，配合水玻璃 B 液形成双液注浆体系，以期实现性能可控的同时兼顾经济性与环境友好性。相较传统以硅酸盐水泥为主的 A 液体系，本方案中粉煤灰为工业副产物，膨润土和石灰价格低廉，可显著降低材料成本。以市场均价估算，粉煤灰约为 109 元/吨，膨润土约为 300 元/吨，建筑石灰约为 275 元/吨，三者混合后 A 液单吨成本约为 162 元；而传统水泥基 A 液中，硅酸盐水泥价格约为 303 元/吨[23]。因此，本研究体系的 A 液材料成本较传统方案可降低约 50%。其次采用水玻璃稀释策略，可显著减少原浆的单位使用量，降低其在注浆体系中的总体投加比例。

在环境影响方面，每吨硅酸盐水泥生产过程中二氧化碳排放量约为 560 kg [24]，除此之外其颗粒物、二氧化硫、氮氧化物排放量约占人为源排放的 20%、5%、17%，体现出水泥工业作为典型能源密集型产业的高排放特征。而粉煤灰和石灰作为工业固废的资源化利用产物，其应用不仅有效减少了对天然胶凝材料的依赖，还避免了固废堆弃带来的环境负担。此外，水玻璃的稀释可有效减少高碱性物质的投加量，降低对土壤和地下水的碱化风险。综上所述，本研究构建的双液注浆体系在保障性能的前提下，通过低成本胶凝材料替代与水玻璃稀释策略的协同应用，实现了显著的经济优势与环境友好性，展现出良好的工程推广潜力。

6. 结论

(1) 水玻璃的稀释会降低溶液中硅酸钠的浓度，从而减少溶液中可供反应的硅酸根离子的含量。这一变化对其与钙离子之间的反应动力学具有显著影响，表现为反应速率的下降与反应时长的延长。凝胶体的生成速度减缓，固结过程延迟，可能对注浆施工的时效性及现场操作效率产生不利影响。

(2) 水玻璃溶液浓度的降低还可能影响最终固结体的微观结构及力学性能。较低浓度条件下形成的硅酸钙凝胶可能密实度不足，孔隙率增大，凝胶网络结构较为松散，从而导致固化体的力学强度下降，影响加固效果。在对强度要求较高的工程应用中，如软弱地基处理或结构缝隙注浆，稀释后的水玻璃可能难以满足稳定性与承载力的设计要求。

(3) 稀释操作亦带来一定工艺优势。稀释后的水玻璃溶液具有较低的黏度，显著提高了其在土体或微

裂隙中的渗透性和可灌注性,有利于浆液在复杂孔隙结构中的扩散与均匀分布,提升对细微裂缝及毛细孔的封堵能力。但若稀释比例控制不当,过度降低的浓度可能导致浆液在目标区域难以及时凝胶固化,出现渗透深远却未形成有效加固的情况,反而削弱了注浆效果。

(4) 在实际工程应用中,水玻璃的稀释比例需依据具体工程地质条件、目标加固范围及所需力学性能等因素综合确定。通过试验优化稀释参数,可在保障注浆有效性的前提下,兼顾施工经济性与材料利用率,避免因过度稀释带来的性能衰减与后期维护成本上升,实现加固效率与成本效益的最佳平衡。

参考文献

- [1] 徐建平, 林文书, 许可, 林建平, 王彪, 苗强, 等. 盾构隧道快硬高性能同步注浆材料研究[J]. 隧道建设, 2014, 34(2): 95-100.
- [2] 王红喜. 高性能水玻璃悬浊型双液灌浆材料研究与应用[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [3] 安妮, 赵宇, 石文广, 孙红月, 朱汉华. 水泥-水玻璃双液浆的特性试验研究及应用[J]. 铁道建筑, 2011(12): 128-130.
- [4] 张世荣, 侯凯文, 潘鑫, 苏建, 欧孝夺. 膨胀岩地区盾构壁后纤维注浆材料试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(1): 187-195.
- [5] He, S., Lai, J., Wang, L. and Wang, K. (2020) A Literature Review on Properties and Applications of Grouts for Shield Tunnel. *Construction and Building Materials*, **239**, Article ID: 117782. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117782>
- [6] 谢飞. 不同出水状态岩质隧道围岩注浆加固方法和材料选择研究[J]. 市政技术, 2021, 39(9): 83-86.
- [7] 徐晶, 范杰, 黄俊, 王先志. 盾构施工同步双液注浆材料的配合比及性能研究[J]. 混凝土, 2021(10): 151-154.
- [8] 吴啸宇. 速凝早强型双液浆性能试验及其对盾构管片变形影响研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- [9] 陈艺元. 盾构同步注浆复合水泥基-水玻璃双液浆材料特性研究及强度模拟试验[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [10] 宋雪飞. 粉煤灰改性水泥-水玻璃双液注浆性能试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(1): 143-145, 150.
- [11] 谢槟槟. 碱激发赤泥-粉煤灰二元体系地聚合物双液浆材料特性研究[D]: [硕士学位论文]. 抚州: 东华理工大学, 2022.
- [12] Zhang, Y., Wang, S., Li, L., Han, J., Zhang, B., Hou, D., et al. (2020) A Preliminary Study of the Properties of Potassium Phosphate Magnesium Cement-Based Grouts Admixed with Metakaolin, Sodium Silicate and Bentonite. *Construction and Building Materials*, **262**, Article ID: 119893. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119893>
- [13] 臧诗齐, 戴国亮, 钱晓楠. 不同注浆材料作用下后压浆桩桩-土界面力学特性分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(3): 496-503.
- [14] 李秋利, 赵光明, 王艳芬, 曾熙文, 程详, 李英明, 等. 水泥-水玻璃双液注浆材料性能与微观特性研究[J]. 煤矿安全, 2025, 56(4): 136-145.
- [15] 杨朝帅, 许学良, 刘志昊, 刘永胜, 魏嘉延, 彭冬林. 一种新型双液浆加固材料制备及铁路隧道应用效果测试研究[J]. 粘接, 2024, 51(1): 64-67.
- [16] 张书豪, 靳利安, 李宗奇, 申路, 崔圣爱. 盾构隧道用聚合物双液浆性能及水化机理研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(8): 2897-2904, 2932.
- [17] 豆海军. 复合水泥基-水玻璃双液注浆材料性能及微观特性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [18] Qu, B., Liu, T., Duan, L., Gong, C., Luo, W., He, C., et al. (2022) The Effect of Sodium Citrate on NaOH-Activated BFS Cement: Hydration, Mechanical Property, and Micro/nanostructure. *Cement and Concrete Composites*, **133**, Article ID: 104703. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104703>
- [19] Chen, W., Li, B., Wang, J. and Thom, N. (2021) Effects of Alkali Dosage and Silicate Modulus on Autogenous Shrinkage of Alkali-Activated Slag Cement Paste. *Cement and Concrete Research*, **141**, Article ID: 106322. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106322>
- [20] 陈城, 彭丽云, 张振华. 超细水泥-水玻璃双液浆的性能研究及砂土注浆效果分析[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(12):

3883-3887.

- [21] 刘溯逸. 纤维增强钢渣-矿渣地聚合物水泥基注浆材料性能研究[D]: [硕士学位论文]. 抚州: 东华理工大学, 2024.
- [22] 徐晶, 范杰, 黄俊, 王先志. 基于正交设计的隧道盾构同步注浆材料研究[C]//《施工技术》杂志社, 亚太建设科技信息研究院有限公司. 2020 年全国土木工程施工技术交流会论文集(上册). 2020: 361-363.
- [23] 刘作毅. 2025 年上半年水泥产量价格解析[J]. 中国建材, 2025(7): 102-107.
- [24] 陈春贵. 普通硅酸盐水泥和再生水泥生产过程中碳排放量对比分析[J]. 佛山陶瓷, 2023, 33(9): 91-93.