

# 镁渣地聚物复合改性聚氨酯注浆材料的制备及力学性能的研究

程世勇<sup>1</sup>, 孟奕潇<sup>2</sup>, 艾涛<sup>2</sup>

<sup>1</sup>四川成渝高速公路股份有限公司公路运营管理三分公司, 四川 成都

<sup>2</sup>长安大学材料科学与工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2026年2月2日; 录用日期: 2026年2月23日; 发布日期: 2026年3月6日

## 摘要

为实现聚氨酯注浆材料的低成本化与性能优化, 并推动镁渣、粉煤灰等工业固废的资源化利用, 本研究制备了一种镁渣地质聚合物/聚氨酯复合注浆材料。以优化后的聚氨酯体系为基础, 通过“一步法”将水玻璃激发的镁渣/粉煤灰地聚物引入其中, 系统探究了水玻璃模数与固废掺量对材料力学性能的影响。结果表明: 采用低模数水玻璃( $n \approx 1.52$ )且控制镁渣掺量为70%时, 复合材料抗压强度最高, 达3.96 MPa; 但其粘结强度随固废掺量增加而下降。机理分析表明, 水玻璃在体系中兼具激发剂与改性剂作用, 其与聚氨酯间形成的Si-O-Si化学键合与地聚物凝胶的物理填充共同构建了稳定的有机无机互穿结构, 是实现材料性能增强的关键。本研究为工业固废的高值化利用与道路修复材料的绿色升级提供了新途径。

## 关键词

镁渣, 地质聚合物, 聚氨酯, 复合注浆材料, 力学性能, 固废利用

## Preparation and Mechanical Properties Study of Magnesium Slag-Based Geopolymer Composite Modified Polyurethane Grouting Material

Shiyong Cheng<sup>1</sup>, Yixiao Meng<sup>2</sup>, Tao Ai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Highway Operation and Management Third Branch, Sichuan Chengyu Expressway Co., Ltd., Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

Received: February 2, 2026; accepted: February 23, 2026; published: March 6, 2026

文章引用: 程世勇, 孟奕潇, 艾涛. 镁渣地聚物复合改性聚氨酯注浆材料的制备及力学性能的研究[J]. 土木工程, 2026, 15(3): 27-37. DOI: 10.12677/hjce.2026.153051

## Abstract

To reduce cost and optimize performance in polyurethane (PU) grouting while advancing the resource utilization of industrial solid wastes such as magnesium slag and fly ash, this study developed a magnesium-slag-based geopolymer/PU composite grouting material. Building on an optimized PU system, a sodium-silicate-activated magnesium-slag/fly-ash geopolymer was incorporated via a one-pot route. This study systematically investigated the effects of sodium-silicate modulus and solid-waste content on composite mechanical properties. The composite achieved a maximum compressive strength of 3.96 MPa when a low-modulus sodium silicate ( $n \approx 1.52$ ) was used with 70% magnesium slag; however, bond strength decreased with increasing solid-waste content. Mechanistic analysis indicates that sodium silicate plays a dual role as an activator and a modifier. Formation of chemical Si-O-Si linkages with PU, together with the physical filling effect of geopolymer gels, yields a stable organic-inorganic interpenetrating structure that underpins the observed performance enhancement. This work provides a pathway for high-value utilization of industrial solid waste and the green upgrading of road-repair materials.

## Keywords

Magnesium Slag, Geopolymer, Polyurethane, Composite Grouting Material, Mechanical Properties, Solid-Waste Utilization

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

我国高速公路网络已发展成为世界上规模最大的公路系统,截至2024年底总里程达到19.07万公里[1]。在这一庞大基础设施网络运营过程中,路面板底脱空作为一种典型的深层病害日益凸显。该病害主要由车辆荷载的反复冲击、地基不均匀沉降以及雨水侵蚀等多因素共同作用引起,严重影响了道路结构的承载性能和使用寿命[2]。研究表明,脱空区域的存在改变了路面结构的受力模式,在车辆荷载作用下极易产生应力集中,进而引发裂缝并不断扩展[3]。非开挖注浆技术因其施工便捷、对交通影响小等独特优势,已成为处治此类病害的首选方案,而其修复效果主要取决于注浆材料的性能[4]。

聚氨酯注浆材料因其出色的快速固化性能、良好的渗透性和可控的膨胀特性而在工程实践中得到广泛应用[5]。这类材料通过专用设备将双组分聚氨酯浆液混合注入脱空区域,双组分相遇后迅速发生化学反应,体积迅速膨胀形成泡沫固体,有效实现地基加固和脱空修复[6]。然而,该类材料在实际推广过程中面临两个突出难题:一方面是主要原料(如异氰酸酯、聚醚多元醇)成本较高,导致其工程造价显著高于传统水泥基材料[7];另一方面是与基层的界面粘结性能仍有提升空间,现有材料主要依赖物理挤压作用,化学粘结力相对有限[8]。

为了降低聚氨酯注浆料的成本,水玻璃改性聚氨酯注浆料是近年来研究的重点。任柏惠[9]开发了聚氨酯/水玻璃复合注浆材料,发现该材料能实现低温固化且强度较高,其研究表明复合体系能显著降低反应温度;王维萱等[10]通过优化催化剂配比与水玻璃模数,制备出抗压强度达80.02 MPa的复合材料,证实水玻璃模数是影响材料性能的关键参数;单长兵等[11]采用酸化处理水玻璃对聚氨酯进行改性,显著提升了固结体的耐水性和力学性能,研究显示酸化处理可去除钠离子,保证固结体的耐久性。Yu等[12]为

降低 WG/PU 体系的反应温度并保持其力学性能, 引入了导热填料  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 研究发现  $\text{Al}_2\text{O}_3$  主要分布于聚氨酯连续相中, 通过形成导热通道快速导出反应热, 使材料最高反应温度显著降低 12.7%, 同时抗压强度提升 27.3%, 有效解决了传统改性方法难以兼顾低反应温度与高机械强度的难题。Chao 等[13]系统研究了 PU/WG 材料在 20℃~80℃高温环境下的性能, 发现水玻璃的引入通过与异氰酸酯的复杂反应形成了热稳定性高的有机-无机杂化结构, 使材料在 80℃下仍能保持 10%以上的峰值应变和良好的岩体界面粘结性能(粘结类型为“合并型”), 显著优于传统水泥基注浆材料。Huang 等[14]深入研究了原料温度对 PU/WG 性能的影响, 发现高温会加速异氰酸酯与水的反应, 破坏与水玻璃吸热反应间的平衡, 导致材料微观结构疏松、强度下降; 并通过调节水玻璃与聚氨酯组分的质量比, 实现了对反应平衡和最终力学性能的调控, 为高温环境下的配方优化提供了指导。Zhang 等人[15]探讨了水玻璃与纳米层状双氢氧化物(LDH)及粉煤灰(FA)的协同改性效果。研究表明, 引入 2.5%的 LDH 与 FA 后, 水玻璃改性聚氨酯复合材料的最大反应温度降低了 26.7℃, 总热释放量从 177.45 J/g 降至 108.37 J/g (降幅 38.9%), 同时有效闭孔率的提升增强了材料的抗压强度与阻燃性能。这证明了水玻璃在构建多功能复合体系中的核心作用。Huang 等人[16]重点考察了实际工程环境中的原料温度对硅酸盐改性聚氨酯(PU/WG)性能的影响规律。研究指出, 随着原料温度从 24℃升高至 60℃, 材料的峰值强度从 41.65 MPa 急剧下降至 14.51 MPa。然而, 通过将组分质量比从 80%优化至 60%, 可在 50℃环境下将强度维持在 38.04 MPa 的高水平。Zhang 等人[17]创新性地将聚氨酯/水玻璃复合材料应用于硫酸盐渍土的加固, 揭示了水玻璃在形成强化结构中的关键作用。研究发现, 当 PU/WG 掺量从 5%提升至 25%时, 固化土体的无侧限抗压强度从 0.78 MPa 显著增长至 10.6 MPa, 增幅超过 12 倍。微观结构(SEM)与声发射监测表明, 水玻璃不仅作为粘结剂填充孔隙, 更通过与聚氨酯反应生成三维有机-无机凝胶网络, 从而极大地改善了土体的力学性能与变形能力。Yu 等人[18]通过系统的对比实验揭示了硅酸钠改性聚氨酯(SS/PU)与纯聚氨酯(PU)在静动态力学性能上的根本差异。研究表明, SS/PU 材料表现出更高的早期强度(6 小时强度达 36.9 MPa)和刚性, 这源于水玻璃的引入形成了更刚性的有机-无机复合连续相; 而 PU 则展现出更高的长期强度(36 小时强度达 48.9 MPa)和动态冲击韧性。曾志鹏等[19]对聚氨酯/水玻璃注浆材料固化过程中的微观结构和力学性能进行了系统研究, 发现该注浆材料的固化具有明显的阶段性, 在固化的前 7 d, 其抗压强度、断裂韧度和弯曲强度快速提升; Yang 等[20]通过简单的室温固化工艺成功制备出具有三维互穿网络结构的聚氨酯/水玻璃注浆材料, 研究发现该材料在 50%压缩状态下抗压强度达 13.4 MPa, 伸长率高达 60%; Hong 等[21]利用硅酸钠对聚氨酯注浆材料进行改性, 发现当硅酸钠添加量为 25 wt%时, 材料的抗拉强度达 19.3 MPa, 粘结强度 4.1 MPa, 抗压强度 47.2 MPa。

使用工业废渣改性聚氨酯注浆料是另一个降低注浆料成本和提高其性能的途径[22]。杨绍斌等[23]采用滑石粉和玄武岩纤维对聚氨酯进行复合改性, 当滑石粉用量为 3%、纤维用量为 7%、纤维长度为 5 mm 时, 材料压缩、冲击和拉伸强度达到最佳值; 刘洋等人[24]将表面改性煤矸石粉引入聚氨酯体系, 研究发现当 MCG 含量为 30%时, 复合材料的极限氧指数为 23.5%, 最高反应温度从 138.3℃下降到 116.8℃, 抗压强度为 51.8 MPa; Zhang 等[25]利用粉煤灰作为惰性填料制备聚合物复合注浆材料, 发现掺入粉煤灰可以显著提高聚合物浆料的热稳定性和耐水性。

镁渣是用皮江法制备金属镁过程中产生的废渣, 中国镁渣的累计库存已超过 6000 万吨, 并且还在不断增加, 因此其利用具有迫切性[26][27]。将镁渣与水玻璃混合制备地聚合物是一种利用镁渣资源的方法[28]。镁渣富含活性  $\text{SiO}_2$  和  $\text{CaO}$ , 而水玻璃可以作为碱性激活剂, 促进镁渣形成地聚合物[29][30]。镁渣含有  $\text{MgO}$  和  $\text{CaO}$  等矿物, 这些矿物会因水化反应而使渣表现出一定的膨胀特性[31]。在本文中, 以预先优化的聚氨酯(PU)体系为基础, 重点探讨了水玻璃模量和固体废料含量如何影响 PU 注浆料的性能, 并阐明其复合增强机制, 旨在将高价值固体废料利用与改善注浆性能相结合。一方面, 镁渣水化的膨胀性

可以用来补偿聚氨酯注浆材料的养护收缩；另一方面，由水玻璃与镁渣形成的地质聚合物可以改善聚氨酯注浆材料的性能。同时，加入粉煤灰是提高地质聚合物活性和流动性的有效方法。本研究工作不仅解决了聚氨酯注浆成本高的问题，还为大宗工业废料的资源化利用开辟了一条新的途径。

## 2. 实验部分

### 2.1. 实验原料

多亚甲基多苯基多异氰酸酯(PM-200) (万华化学集团股份有限公司)，聚醚多元醇(PPG2000) (广州润宏化工有限公司)聚醚多元醇(303) (济宁宏明化学试剂有限公司)，水玻璃(桐乡恒立化工股份有限公司)，镁渣(120目)，粉煤灰(II级)，硅烷偶联剂 KH560 (东莞康锦新材料科技有限公司)，泡沫稳定剂 8805 (济宁华凯树脂有限公司)，催化剂 DBTDL (上海阿拉丁生化科技股份有限公司)。

### 2.2. 实验仪器

CMT5105 电子万能试验机(新三思)、PosiTest AT-A 自动拉拔仪(Defelsko)、ALPHA-2 傅里叶红外光谱仪(Bruker)、DM750P 偏光显微镜(Leica)、OS20-Pro 机械搅拌器(大龙兴创)和DHG 系列干燥箱(上海一恒)。

### 2.3. 样品制备

#### 2.3.1. 镁渣地质聚合物

将镁渣与粉煤灰按设定质量比(10:0~7:3)混合，加入不同硅钠比(1:0.7~1:2)的水玻璃激发液(水灰比 0.5)，搅拌 2 min 后注入 40 mm 立方模具，室温养护 24 h 后测试。

#### 2.3.2. 复合注浆料的制备

采用一步法：将 PPG2000、水玻璃(50%~175%)、KH560 (1%)、8805 (6%)、DBTDL (0.4%)和水(1%)混合为 A 组分；与 B 组分 PM-200 (180%~280%)高速搅拌 10 s 后注入模具，40℃养护 24 h。在上述 A 组分中加入镁渣/粉煤灰(9:1)地质聚合物浆，搅拌 2 min 后按相同工艺与 B 组分反应成型。

### 2.4. 性能测试与表征

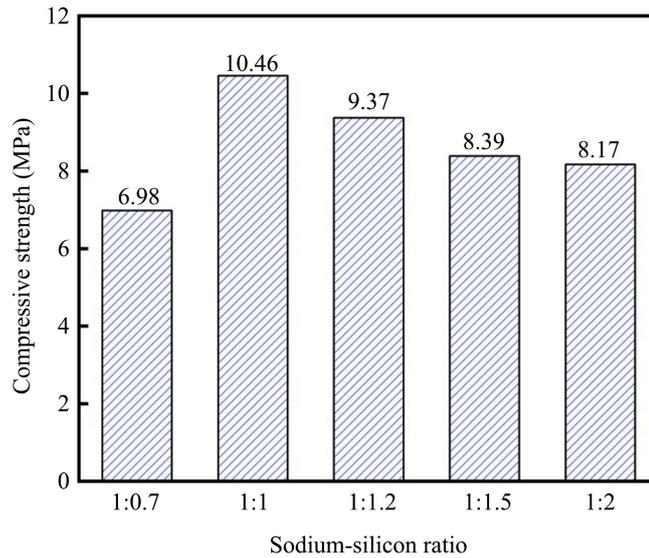
注浆料试件的抗压强度按照 GB/T 8813-2020 标准进行测试。抗压试样为直径 50 mm、高度 50 mm 的圆柱体，加载速率为 5 mm/min。粘结强度按照 ASTM D4541 标准测试，用 20 mm 拉拔锭子，在 1 mm/min 的拉拔速率下进行。注浆料的红外光谱采用 ALPHA-2 傅里叶变换红外(FTIR)进行测试；注浆料的内部孔隙形貌通过 DM750P 偏光显微镜进行观察，并使用 Image J 软件进行量化分析。使用 ZEISS ULTRA 55 Gemini 场发射扫描电子显微镜对注浆料试件的断裂形貌进行观察。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 镁渣地质聚合物的力学性能

#### 3.1.1. 水玻璃硅钠比对镁渣地聚物力学性能影响

通过调节水玻璃激发液的硅钠比，系统研究了碱性环境对镁渣地聚物抗压强度的影响规律。如图 1 所示，随着硅钠比的降低(即碱性增强)，地聚物的抗压强度呈现先增后减的趋势。当硅钠比为 1:1 时，抗压强度达到峰值 10.46 MPa。这一现象可归因于碱性环境对地聚物反应过程的双重影响：适中的碱浓度(硅钠比 1:1)能够有效促进镁渣中活性硅铝组分的溶解和缩聚反应，形成稳定的三维网络结构；而过高的碱性(硅钠比 1:0.7)会导致反应速率过快，凝胶结构发展不完善，而过低的碱性(硅钠比 1:2)则无法充分激发原料活性。

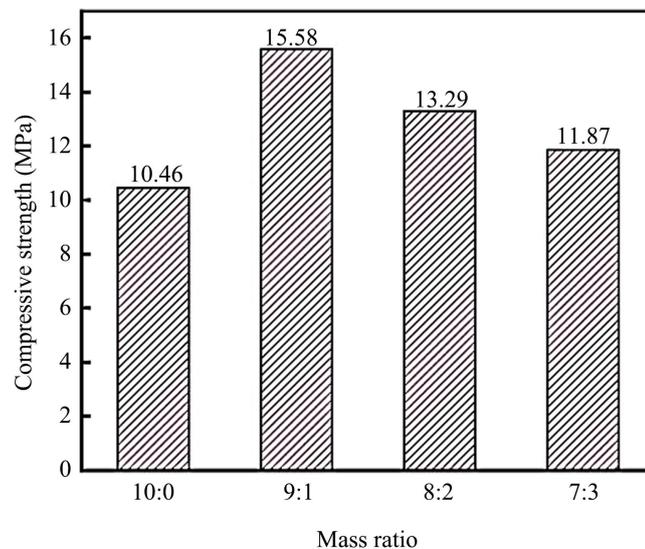


**Figure 1.** Effect of different sodium-to-silicon ratios on the compressive strength of magnesium slag geopolymers

**图 1.** 不同硅钠比对镁渣地聚物抗压强度的影响

### 3.1.2. 粉煤灰掺量对水玻璃激发镁渣地聚物力学性能影响

在确定最佳硅钠比的基础上,进一步研究了粉煤灰掺量对地聚物性能的增强作用。如图 2 所示,可以看到掺入粉煤灰可显著提升地聚物整体力学性能,但随着掺量增多,地聚物的抗压强度逐渐减小。在镁渣、粉煤灰质量比为 9:1 时地聚物的强度最佳,为 15.58 MPa。一定程度上,在碱性环境中,镁渣水解产生  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,促进粉煤灰发生水化生成高强度 C-A-H 和 C-A-S-H 凝胶。粉煤灰消耗体系中的  $\text{Ca}^{2+}$ 后又进一步加速镁渣的水解,两项反应相互循环作用,使体系内形成多种三维凝胶结构,浆体结构致密性变强,从而强度得到提升。但随着粉煤灰含量增多,镁渣含量相对减小,体系中 CaO 含量减小,  $\text{Ca}^{2+}$ 浓度不足可能抑制了 C-S-H、C-A-H、C-A-S-H 等凝胶的形成,此时水玻璃中的 Na 占主导反应,推动粉煤灰水化形成的高强度 C-A-S-H 凝胶向低强度的 N-A-S-H 凝胶转变,从而使得地聚物的强度有所降低。



**Figure 2.** Effect of different fly ash content on the compressive strength of magnesium slag geopolymer

**图 2.** 不同粉煤灰掺量对镁渣地聚物抗压强度的影响

## 3.2. 镁渣地聚物/聚氨酯复合改性注浆材料的力学性能及机理研究

### 3.2.1. 复合改性注浆材料力学性能探究

#### (一) 水玻璃模数对复合改性注浆材料抗压强度的影响

图 3 为掺入镁渣粉煤灰后改性注浆材料抗压强度的变化。由图中可知，掺入镁渣、粉煤灰后，不同模数水玻璃改性体系的抗压强度差异显著。其中，2.6 模数体系强度降至 2.10 MPa，1.21、1.52 模数体系则分别升至 2.29 MPa、2.99 MPa。2.6 模数体系强度下降的原因在于其形成的 Si-O 网络结构致密，镁渣、粉煤灰颗粒难以均匀分散，与聚氨酯基体界面结合力弱，且体系碱性不足，无法充分激发固废胶凝活性，反而破坏原有完整结构，导致整体强度降低。低模数(1.21、1.52)体系强度上升，是因低模数水玻璃体系更疏松、流动性好，利于固废均匀分散；且碱性较强，可促使镁渣中  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  水化生成 C-S-H 凝胶，粉煤灰通过火山灰效应生成 C-A-H 凝胶，二者还可能与碱液、镁渣水化产物二次反应生成 C-A-S-H、N-A-S-H 凝胶，显著提升浆体致密性与强度而 1.21 模数体系强度低于 1.52 模数，是因其与聚氨酯相容性较差，且过高 pH 易导致硅铝酸盐凝胶聚沉，阻碍地聚物三维网络形成，削弱结构支撑能力。

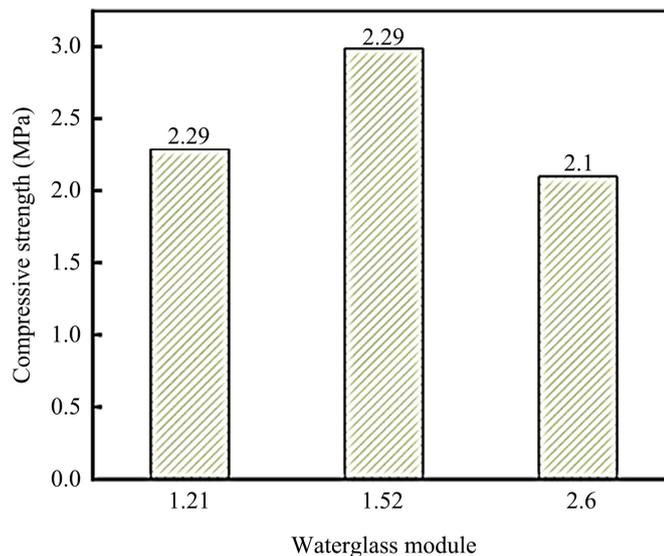


Figure 3. Effect of incorporating magnesia slag fly ash on the compressive strength of modified grouting materials

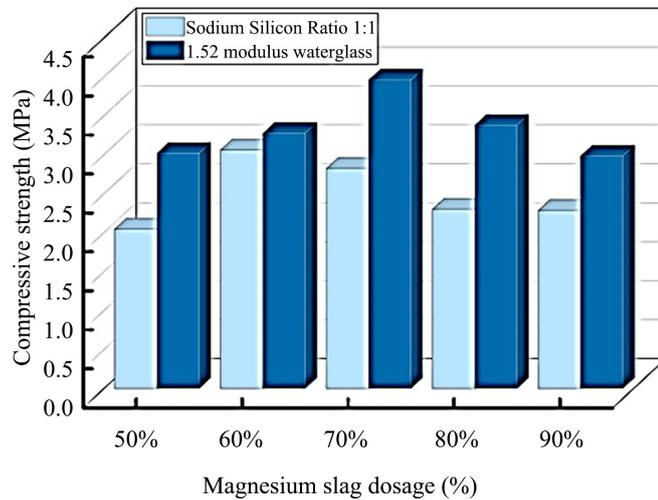
图 3. 掺入镁渣粉煤灰对改性注浆材料抗压强度的影响

#### (二) 镁渣/粉煤灰掺量对复合改性注浆材料抗压强度的影响

针对高模数水玻璃体系在掺入镁渣与粉煤灰后存在稳定性不足的问题，本研究选用自配硅钠比 1:1 ( $n \approx 1.21$ )及模数 1.52 的水玻璃进行后续实验。固定镁渣与粉煤灰质量比为 9:1，系统考察镁渣掺量(50%~90%)对复合体系抗压强度的作用规律。

不同模数下掺入不同质量镁渣/粉煤灰对改性注浆材料抗压强度的影响如图 4 所示，两种体系强度均随镁渣掺量增加呈先增后减趋势。硅钠比 1:1 体系在掺量为 60%时强度达 3.06 MPa，而模数 1.52 体系在掺量为 70%时强度最高，达 3.96 MPa，均显著高于未掺加固废的对照组，说明镁渣与粉煤灰的引入有效提升了材料力学性能。

强度变化机制可归纳为：适量固废颗粒可填充聚氨酯基体孔隙，提高密实度；其中活性  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  在碱性环境中发生火山灰反应，生成胶凝产物，增强界面粘结。然而过量掺入会导致颗粒团聚，破坏基体连续性，同时稀释有效组分，引发结构缺陷，造成强度下降。

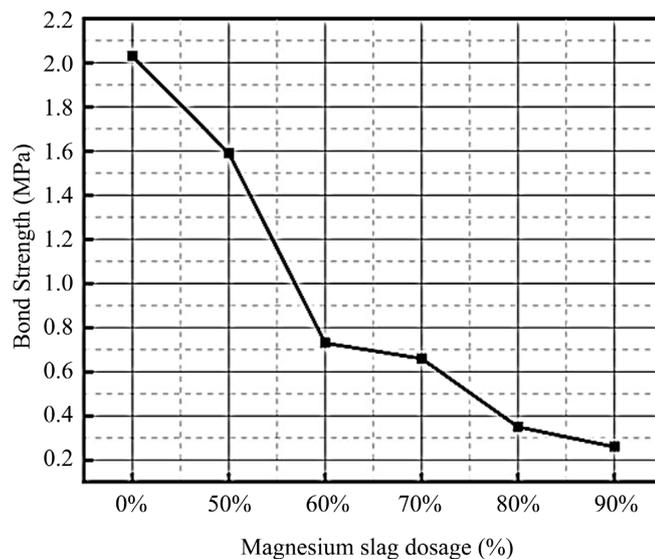


**Figure 4.** Effect of incorporating different amounts of magnesium slag/fly ash on the compressive strength of modified grouting materials under different moduli

**图 4.** 不同模数下掺入不同质量镁渣/粉煤灰对改性注浆材料抗压强度的影响

### (三) 镁渣/粉煤灰掺量对复合改性注浆材料粘结强度的影响

图 5 为不同粉煤灰/镁渣掺量对复合改性注浆材料粘结强度的影响。可以看到随着镁渣和粉煤灰的掺入量越大，材料的粘结强度一直在减小。这可能是因为随着镁渣和粉煤灰掺量的增加，大量颗粒分布在粘结界面，阻碍聚氨酯分子链的扩散和渗透，使得材料无法充分粘结，容易产生应力集中，在受力过程中率先发生破坏，进而导致整个粘结结构的失效。

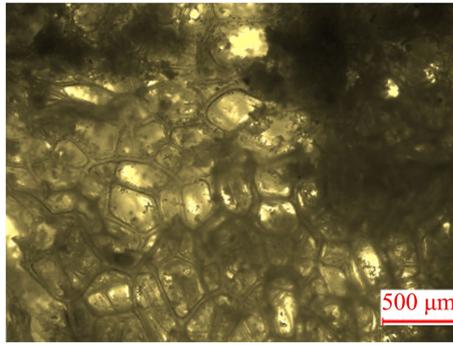


**Figure 5.** Effect of incorporating different mass of magnesium slag/fly ash on the bonding strength of modified grouting materials under low modulus

**图 5.** 低模数下掺入不同质量镁渣/粉煤灰对改性注浆材料粘结强度的影响

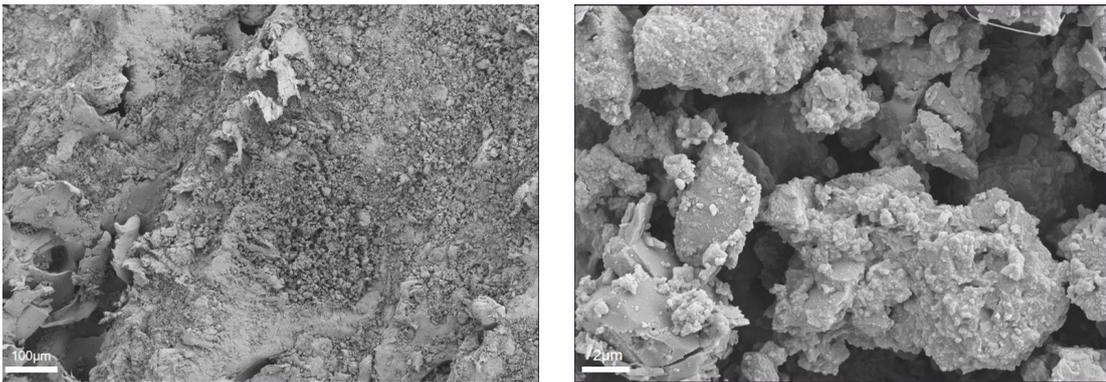
### (四) 注浆材料显微分析

图 6 为复合注浆材料在偏光显微镜下观察到的泡孔结构图。可以看到粉煤灰镁渣均匀地分散在泡孔结构中，未出现明显的聚集现象，泡孔结构相对均匀。



**Figure 6.** Pore structure of composite modified grouting material under polarized light microscope (4×)  
**图 6.** 偏光显微镜下复合改性注浆材料的泡孔结构(4×)

为了表征镁渣地质聚合物对聚氨酯注浆材料的改性效果,对复合注浆材料试件的断裂形貌进行了扫描电子显微镜分析,分析结果见下图 7。



**Figure 7.** Scanning electron microscope images of fracture morphology of composite grouting material specimens  
**图 7.** 复合注浆材料试件断裂形貌的扫描电子显微镜照片

从图 7 中可以看出,无机的镁渣地质聚合物与有机的聚氨酯结合紧密,无机相与有机相分散均匀。局部放大图可以看到,无机物紧紧包裹有机的聚氨酯,无机相与有机相间优良的界面结合表明镁渣地质聚合物对聚氨酯注浆材料的改性效果良好。

### 3.2.2. 复合改性注浆材料反应机理分析

镁渣地聚物/聚氨酯复合改性注浆材料中水玻璃、镁渣/粉煤灰、聚氨酯三者相互作用机理分析见图 8。水玻璃水解使体系呈碱性,碱性环境一方面促进地质聚合物形成,一方面促进有机相内部反应。有机相中异氰酸酯与羟基发生加成聚合反应,形成氨基甲酸酯键,构建起聚氨酯的分子链结构,反应过程释放热量。这些热量为水玻璃体系的水解以及水玻璃激发镁渣/粉煤灰的水化反应提供了额外的能量,加速了这两个反应的进程。一定程度上不仅降低了注浆材料的反应热,还使得整体的反应更加协同。水玻璃体系水解形成的硅醇具有较高的活性,与异氰酸酯发生反应,生成稳定的 Si-O 键或进一步缩聚形成 Si-O-Si 网络结构,这些化学键增强了有机相和无机相之间的结合力,使得结构更稳定。而水玻璃激发镁渣地聚物形成的 C-S-H、C-A-H、C-A-S-H 或 N-A-S-H 凝胶具有一定的粘性和可塑性,附着在聚氨酯基体表面,一定程度上增强了材料的整体力学性能。综合掺量分析,粉煤灰的掺量相对较低,推测本体系中的地聚物凝胶主要以 C-S-H 或 C-A-S-H 为主。此外,镁渣/粉煤灰作为无机填料,均匀分布在聚氨酯基体上,能够填补聚氨酯泡沫结构中的较大空洞,减少内部缺陷。

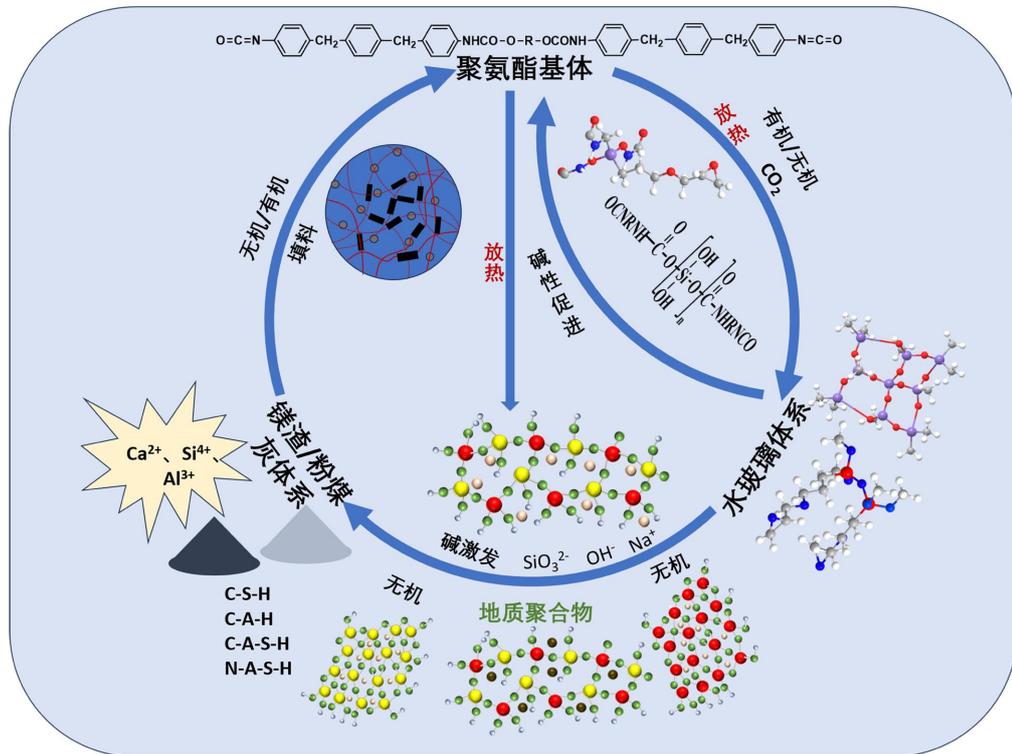


Figure 8. Internal mechanism diagram of composite modified grouting material  
图 8. 复合改性注浆材料内部作用机理图

#### 4. 结论

基于对镁渣地聚物/聚氨酯复合注浆材料的系统研究，得出以下主要结论：

- 1) 通过系统优化确立了复合注浆材料的最佳制备参数。在地聚物体系中，水玻璃硅钠比 1:1、粉煤灰掺量 10% (镁渣与粉煤灰质量比 9:1) 时力学性能最优。
- 2) 复合注浆材料的抗压强度随固废掺量增加呈先增后减趋势。低模数水玻璃 ( $n \approx 1.52$ ) 更有利于复合体系性能提升，在镁渣掺量 70% 时抗压强度达到峰值 3.96 MPa，较基础体系提升 28.6%。然而，粘结强度随固废掺量增加持续下降，归因于刚性颗粒在界面处引发的应力集中效应。
- 3) 复合注浆材料的增强机制包含水玻璃的双重功能(激发剂与改性剂)、地聚物凝胶的物理填充效应、以及有机-无机相界面化学键合，三者协同构建了稳定的互穿网络结构。
- 4) 本研究成功实现了工业固废资源化与材料性能提升的协同目标。通过优化水玻璃模数与固废掺量，构建了具有良好力学性能和稳定结构的复合注浆材料，为高速公路板底脱空修复提供了一种低成本、高性能的新型材料解决方案，兼具显著的环境效益与工程应用价值。

#### 致 谢

感谢四川蜀道集团公司提供资金支持。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国交通部. 2024 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. 2025-06-12. <https://www.mot.gov.cn/fenxigongbao/hangyegongbao/>, 2026-01-10.
- [2] 胡跃进. 高聚物注浆技术处治混凝土路面脱空问题的研究[J]. 四川建材, 2025, 51(2): 200-202.

- [3] 石明生. 高聚物注浆材料特性与堤坝定向劈裂注浆机理研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [4] 郭炎朝. 非开挖注浆加固技术在道路养护中的应用及发展前景[J]. 建筑与装饰, 2023(7): 16-18.
- [5] 牟善友. 双组分型聚氨酯胶结料的研发及性能评价[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2018.
- [6] 王叶铭. 道路聚氨酯注浆材料的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- [7] Li, X., Li, J., Wang, J., *et al.* (2021) Recent Applications and Developments of Polyurethane Materials in Pavement Engineering. *Construction and Building Materials*, **304**, Article 124639. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124639>
- [8] 马东东. 改性聚氨酯注浆加固材料的制备及其性能研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [9] 任柏惠. 矿用聚氨酯/水玻璃复合注浆材料影响因素及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2022.
- [10] 王维萱, 刘洋, 贾兰, 等. 矿用聚氨酯/水玻璃堵水复合材料的制备及研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52(z1): 132-136+142.
- [11] 单长兵, 刘元雪. 水玻璃改性聚氨酯注浆料的性能研究[J]. 建筑科学, 2011, 27(9): 48-51.
- [12] Yu, X. (2023) Preparation and Structure Analysis of Aluminum Oxide/Water Glass/Polyurethane Composite Grouting Material for Mining. *Journal of Building Engineering*, **76**, Article 107170. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.107170>
- [13] Yuan, C., Huang, Q.H., Liu, J.F., *et al.* (2025) Mechanical Behavior of Silicate-Modified Polyurethane/Waterglass Grout in Fractured Rock Interface Reinforcement at Elevated Temperatures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **165**, Article 106879. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106879>
- [14] Huang, Q., Yuan, C., Li, S., *et al.* (2024) Influence of Raw Material Temperature on the Properties of Silicate-Modified Polyurethane Grouting Materials. *Case Studies in Construction Materials*, **21**, e03479. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03479>
- [15] Zhang, S., Feng, R., Zhang, J., *et al.* (2025) Nano-Layered Double Hydroxides as Efficient Endothermic, Strengthening, and Flame-Retardant Agents for Fly Ash/Polyurethane Composite Materials. *Composites Communications*, **53**, Article 102168. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2024.102168>
- [16] 郭小雄, 黄钦颢, 彭昉, 袁超, 李树忱. 环境温度对硅酸盐改性聚氨酯注浆材料力学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2025, 44(2): 774-784
- [17] Zhang, T., Cao, D., Guo, C., *et al.* (2025) Mechanical Properties and Reinforcement Mechanism Study of Sulfate Saline Soil Solidified by Polyurethane and Water Glass. *Case Studies in Construction Materials*, **22**, e04328. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04328>
- [18] Yu, X., Wang, Y. and Sun, G. (2024) Comparative Analysis of Mechanical Properties and Fracture Characteristics Between Sodium Silicate Modified Polyurethane and Polyurethane Materials. *Construction and Building Materials*, **444**, Article 137917. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137917>
- [19] 曾志鹏, 宋小艳, 孙勇, 等. 聚氨酯/水玻璃注浆材料固化过程中的微观结构和力学性能[J]. 材料研究学报, 2022, 36(11): 855-861.
- [20] Yang, Z., Zhang, X., Liu, X., *et al.* (2017) Flexible and Stretchable Polyurethane/Waterglass Grouting Material. *Construction and Building Materials*, **138**, 240-246. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.113>
- [21] Hong, X., Dong, W., Yang, S., *et al.* (2015) Study on Structure and Performance of Reactive Silicate Reinforced Polyurethane Composite. *Polymer Engineering and Science*, **55**, 2322-2327. <https://doi.org/10.1002/pen.24119>
- [22] 姜瑜, 郭飞, 孔恒, 等. 注浆材料的现状与发展策略[J]. 化工新型材料, 2022, 50(1): 282-286.
- [23] 杨绍斌, 郑扬, 陈芳芳. 滑石粉/玄武岩纤维复合改性矿业工程用聚氨酯注浆材料[J]. 化工新型材料, 2011, 39(4): 124-127.
- [24] 刘洋, 李旭, 王维萱, 等. 煤矸石粉/聚氨酯复合注浆材料的制备与性能研究[J]. 化工新型材料, 2025, 53(4): 251-255+265.
- [25] Zhang, X., Wang, E., Ma, S., *et al.* (2024) Study on Grouting Performance Optimization of Polymer Composite Materials Applied to Water Plugging and Reinforcement in Mines. *Materials*, **17**, Article 4245. <https://doi.org/10.3390/ma17174245>
- [26] Fang, Z., Gao, Y., He, W., *et al.* (2024) Carbonation Curing of Magnesium-Coal Slag Solid Waste Backfill Material: Study on Properties of Flow, Mechanics and Carbon Sequestration. *Case Studies in Construction Materials*, **20**, e03204. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03204>
- [27] Wang, X.B., Yan, X. and Li, X.Y. (2020) Environmental Risks for Application of Magnesium Slag to Soils in China. *Journal of Integrative Agriculture*, **19**, 1671-1679. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62835-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62835-2)
- [28] 李宪军, 张树, 王芳芳. 镁渣废弃物再利用的研究综述[J]. 混凝土, 2011(8): 97-100+124.

- 
- [29] 肖力光, 雒锋, 王淑娟, 等. 镁渣胶凝材料强度影响因素的研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(5): 680-686.
- [30] 孙伟吉, 刘浪, 徐龙华, 等. 改性镁渣基矿用复合胶凝材料的水化性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(10): 4057-4070.
- [31] 崔自治, 倪晓, 孟秀莉. 镁渣膨胀性机理试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2006(6): 8-11.