第 7 卷◆第 10 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2737-4580(P) / 2737-4599(O)

粉煤灰–矿渣基地聚物注浆材料在江苏公路病害修复中的应用研究

王梁洲　董入龙　李星　雷骞
连云港丰达公路工程养护有限公司
DOI:10.32629/jpm.v7i10.9067

[摘　要] 江苏省干线公路服役年限长、重载交通占比高，路面基层裂缝、唧浆、脱空及沉陷等病害频发，注浆是处置这类病害的主要技术手段。传统水泥基注浆材料在可灌性、早期强度、体积稳定性与碳排放等方面存在短板。粉煤灰–矿渣基地聚物注浆材料以工业固废为硅铝源，经碱激发可快速水化硬化，具有早强、流动好、界面粘结强、低碳等特点，可作为水泥基注浆材料的替代方案。本文以连云港 S242 省道路基路面注浆为例，结合正交试验与文献数据，对比早强型地聚物注浆材料与普通硅酸盐水泥注浆材料的性能差异，并给出注浆前后路面检测指标的对比。结果表明：早强型地聚物注浆材料初凝 25～53 min，6 h 抗压强度达 8～15 MPa，1 d 可达 26 MPa 以上，28 d 达 40.6～70.4 MPa，开放交通时间明显短于水泥基注浆；S242 注浆修复后路面弯沉、破损率、平整度及基层回弹模量等指标均显著改善。推广应用还需控制干缩、解决耐久性并完善技术规范。
[关键词] 地聚物注浆材料；粉煤灰；矿渣；早强；连云港 S242；病害修复

Application Study of Fly Ash – Slag–Based Polymer Grouting Materials in the Repair of Highway Structural Defects in Jiangsu

Wang Liangzhou　Dong Rulong　Li Xing　Lei Qian
Lianyungang Fengda Highway Engineering Maintenance Co., Ltd.

[Abstract] The trunk roads in Jiangsu Province have a long service life and a high proportion of heavy–load traffic; consequently, pavement distresses such as base layer cracks, efflorescence, voiding, and settlement occur frequently, and grouting serves as the primary technical means for addressing these issues. Traditional cement–based grouting materials exhibit shortcomings in terms of pourability, early strength, volumetric stability, and carbon emissions. Fly ash–slag–based geopolymer grouting materials utilize industrial solid waste as a source of silicon and aluminum; through alkali activation, they can undergo rapid hydration and hardening, offering characteristics such as early strength, good workability, strong interfacial bonding, and low carbon emissions, making them a viable alternative to cement–based grouting materials. Taking the grouting of the pavement base on the Lianyungang S242 provincial road as a case study, this paper employs orthogonal tests and literature data to compare the performance differences between early–strength geopolymer grouting materials and conventional Portland cement grouting materials, and provides a comparison of pavement inspection indicators before and after grouting. The results indicate that early–strength geopolymer grouting materials reach initial setting within 25 – 53 min, achieve a compressive strength of 8 – 15 MPa at 6 h, exceed 26 MPa at 1 d, and reach 40.6 – 70.4 MPa at 28 d; their open traffic duration is significantly shorter than that of cement–based

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

grouting. Following grouting and repair on the S242 road, indicators such as pavement deflection, damage rate, smoothness, and base layer modulus of resilience have all improved significantly. For wider application, it is necessary to control drying shrinkage, address durability issues, and refine technical specifications.

[Key words] geopolymer grouting material; fly ash; slag; early strength; Lianyungang S242; structural defect repair

1 引言

注浆加固是利用压力将浆液注入路基、基层或结构裂隙，使浆料固化后与介质结成整体，达到补强与堵漏目的，在道路养护中应用广泛。目前工程中多以普通硅酸盐水泥或硫铝酸盐水泥配制注浆料，前者水化慢、早期强度不足、遇细小裂隙可灌性差，后者碱储备低、抗碳化能力弱且脆性偏大，都难以同时兼顾流动性、强度和体积稳定性，施工时常暴露可灌性差、早强不足或干缩开裂等缺陷。同时，水泥熟料生产耗能高、排碳量大，是重要的工业碳排放来源，与国家“双碳”战略要求存在差距。以粉煤灰、矿渣等硅铝质固废为前体、经强碱激发成胶的地聚物注浆材料，具有固化快、强度发展早、界面粘结好、流动性优、生产过程低碳等优点，成为替代水泥基注浆材料的研究热点[1]。本文以连云港 S242 省道为工程背景，分析该类材料的组成与作用机理，用表格对比早强型地聚物注浆与水泥注浆的性能，并给出路面注浆修复前后检测数据，为同类工程应用提供参考。

2 连云港 S242 路基路面病害现状与注浆修复需求

S242 省道是连云港市主要通道，沿线货运车辆占比大、交通量增长快，路面承受的重载荷载明显高于一般干线，通车后路面状况下降较快。结合连云港市国省道养护工作，242 省道沿线需对路面、路基开展日常巡查养护，并对破损路段实施维修加固。2026 年，连云港市对 S242（K71+449～K91+387）段实施预防性养护。该路段病害以横向裂缝、唧浆、车辙和局部沉陷为主，部分区段基层出现脱空、松散，直接削弱路面结构承载能力。此类病害若仅做面层处理，治标不治本、容易复发，采用“微创”注浆对基层与路基补强，可避免大范围开挖，在较少影响交通的前提下恢复结构整体性，因而对注浆材料的可灌性、早强性与粘结性能提出了较高要求。

3 粉煤灰–矿渣基地聚物注浆材料的组成与作用机理

矿渣-粉煤灰地聚物注浆材料以磨细高炉矿渣与粉煤灰为硅铝源前体，以碱激发剂为激发体系，掺入适量拌合水后拌制成浆[1]。矿渣富钙、活性高，是早期强度的主要贡献者；粉煤灰颗粒圆滑，起滚珠润滑与填充作用，可改善浆液流动性并适度延缓凝结，两者按一定比例复配以平衡工作性、强度与体积稳定性。主要化学成分见表 1。在强碱激发下，矿渣与粉煤灰表面铝硅酸盐网络解聚，溶出的 Si、Al 与 Ca、Na 等离子重新聚合，生成水化硅酸钙（C-S-H）、水化硅铝酸钙（C-A-S-H）及水化硅铝酸钠（N-A-S-H）等凝胶，逐步形成致密网络，使材料具备凝结快、早期强度发展迅速、与既有基体界面粘结牢固等特征[1]。

表 1　矿渣与粉煤灰主要化学成分（质量分数/%）

成分	SiO2	Al2O3	CaO	MgO	Fe2O3	SO3
矿渣	34.50	17.70	34.00	6.01	1.03	1.64
粉煤灰	43.00	23.00	5.60	0.95	2.50	0.80

注：数据引自文献[1]。

4 关键性能及对比分析

4.1 配合比与性能影响因素

正交试验极差分析显示[1]，水胶比对流动度影响最显著，水胶比由 0.3 升至 0.6 时平均流动度提高约 95.8%；碱当量是凝结时间与干缩率的主要控制因素，碱当量由 2%增至 8%时，初凝、终凝时间分别缩短约 95.7%和 96.1%，28 d 干缩率则增大近 592.8%；粉煤灰掺量对抗压、抗折强度影响最大，掺量过高会使强度明显回落。各指标的主影响因素见表 2。兼顾工作性、体积稳定性与力学性能，推荐综合最优配合比为水胶比 0.6、碱激发剂模数 1.6、碱当量 6%、粉煤灰掺量 0.4，对应浆液流动度约 282 mm、初凝 53 min、终凝 107 min、28 d 抗压强度 40.6 MPa、28 d 干缩率 1.270%[1]。面向快速开放交通的需求，可通过适当提高碱当量与激发剂模数形成早强型配方，使凝结时间进一步缩短、早期强度更快增长。

表 2　正交试验极差分析下各性能指标的主影响因素

性能指标	主影响因素（按影响程度排序）
流动度	水胶比 ＞ 碱当量 ＞ 碱激发剂模数 ＞ 粉煤灰掺量
初凝/终凝时间	碱当量 ＞ 水胶比 ＞ 碱激发剂模数 ＞ 粉煤灰掺量
干缩率	碱当量 ＞ 碱激发剂模数 ＞ 水胶比 ＞ 粉煤灰掺量
抗压强度	粉煤灰掺量 ＞ 水胶比 ＞ 碱当量 ＞ 碱激发剂模数
抗折强度	粉煤灰掺量 ＞ 碱激发剂模数 ＞ 水胶比 ＞ 碱当量

注：据文献[1]整理。

4.2 早强型地聚物注浆材料与水泥基注浆材料的性能对比

为量化工程优势，表 3 给出早强型地聚物注浆材料与普通硅酸盐水泥注浆材料的主要性能对比。早期强度方面，早强型地聚物 6 h 抗压强度即达 8～15 MPa，1 d 抗压强度超过 26 MPa，28 d 达到 40.6～70.4 MPa，与水泥净浆 28 d（约 46.3 MPa）相当或更高[4,5]。凝结时间方面，地聚物初凝 25～53 min、终凝 50～107 min，水泥则分别约 155 min、235 min，地聚物可

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

文章类型：论文| 刊号（ISSN）：2737-4580(P) / 2737-4599(O)

显著缩短等待固化与开放交通的时间[5]。流动度方面，地聚物在最优配合比下约 18.1s，泵送性好，可不掺减水剂即满足灌注要求[1,4]。体积稳定性方面，地聚物干缩和自生收缩高于水泥，需掺膨胀剂、纤维或采用内养护控制[4]。环保性方面，地聚物消纳粉煤灰、矿渣固废，生产碳排放远低于水泥[1]。

表 3　早强型地聚物注浆材料与普通硅酸盐水泥注浆材料主要性能对比

性能指标	早强型地聚物注浆材料	普通硅酸盐水泥注浆材料
6 h 抗压强度/MPa	8～15	未硬化，无强度
1 d 抗压强度/MPa	26 以上	低，需龄期发展
28 d 抗压强度/MPa	40.6～70.4	46.3（净浆）
初凝时间/min	25～53	155
终凝时间/min	50～107	235
流动度/s	18.1	随水灰比调节，可灌性受限
28 d 干缩率/%	0.030	0.045
自生收缩/%	0.020	0.028
碳排放	显著降低（消纳固废）	高

注：地聚物数据引自文献[1,4]，水泥数据引自文献[5]。

5 连云港 S242 路基路面注浆工程应用

5.1 注浆方案与施工要点

针对 S242 段路基脱空、基层松散与路面唧浆沉陷，采用早强型地聚物注浆对基层与路基进行补强。施工前通过弯沉检测与探地雷达探查确定脱空区带与注浆孔位，布孔后采用专用注浆机具将浆液压入，浆液在强碱激发下快速凝结，形成与基层、路基密贴的加固体。利用早强型地聚物初终凝时间短的特点，注浆完成并经短时养护即可开放交通，明显压缩交通管制时间。同时应注意控制浆液碱当量与激发剂模数，避免凝结过快影响泵送与压注，并配套膨胀剂或纤维抑制收缩。

5.2 注浆修复前后路面检测数据对比

注浆补强后，路面结构承载能力与表面状况得到改善。表 4 汇总了 S242 段代表性测点注浆前后路面检测指标对比，可见代表弯沉、破损率、平整度及基层回弹模量等指标均有明显好转，唧浆与松散点基本消除，说明地聚物注浆对脱空与沉陷病害的处治有效。

表 4　连云港 S242 路基路面注浆修复前后路面检测指标对比

检测指标	修复前	修复后
代表弯沉（0.01 mm）	46	18
路面破损率 DR/%	6.8	1.2
平整度标准差 σ（mm）	2.4	1.5
唧浆、松散点（处/km）	8	0
基层回弹模量/MPa	620	850

注：表中数据为 S242 段代表性测点检测结果（代表值）。

6 应用前景与存在问题

粉煤灰-矿渣基地聚物注浆材料契合干线公路“绿色养护、快速处治”的方向，尤其适合 S242 这类重载、需快速开放交通的路段。但仍存在问题：一是地聚物收缩大于水泥基材料，需控制掺配膨胀剂、纤维，更宜用于失水受限的路基、基层加固；二是相关技术规范与质量验收标准尚未健全，评价体系有待完善。此外，高碱环境下材料的长期耐久性与碱溶出仍需持续验证。

7 结论

（1）粉煤灰-矿渣基地聚物注浆材料以工业固废为硅铝源，经碱激发生成 C-S-H、C-A-S-H、N-A-S-H 凝胶，具备早强、流动好、界面粘结强、低碳等特点，可作为水泥基注浆材料的替代方案。

（2）水胶比主导流动度、碱当量主导凝结时间与干缩率、粉煤灰掺量主导强度；综合最优配合比为水胶比 0.6、碱激发剂模数 1.6、碱当量 6%、粉煤灰掺量 0.4。

（3）早强型地聚物注浆 6 h 抗压强度达 8～15 MPa、1 d 超过 26 MPa、28 d 达 40.6～70.4 MPa，初凝 25～53 min，开放交通时间显著短于水泥注浆。

（4）连云港 S242 段应用表明，早强型地聚物注浆可有效处治路基脱空与路面沉陷，注浆后路面弯沉、破损率、平整度与基层回弹模量明显改善，推广应用需完善技术规范并加强碱激发剂长期耐久性研究。

[参考文献]

[1]刘梅芳, 刘建正, 胡力群, 等. 矿渣-粉煤灰地聚物注浆材料配合比优化研究[J]. 硅酸盐通报, 2026, 45(2): 695-711.

[2]高速公路沥青路面养护现状与决策分析[J]. 交通世界（公路与养护）, 2026.

[3]江苏省交通运输厅. 连云港市公路部门积极提升普通国省道路况水平[EB/OL]. (2024-05-13). https://jtyst.jiangsu.gov.cn/art/2024/5/13/art_42014_11242579.html.

[4]硅模数（Silicate Modulus, Ms）与碱含量对用于巷道修复的粉煤灰－粒化高炉矿渣（GGBS）地质聚合物灌浆材料性能的影响[EB/OL]. (2026-06-09). https://m.ebiotrade.com/newsf/2026-6/20260609175823917.htm.

[5]DOU B, et al. Case study: In situ experimental investigation on overburden consolidation grouting for columnar jointed basalt dam foundation[J]. Geofluids, 2020: 1865326.

[6]江苏省人民政府国有资产监督管理委员会. 苏州市：吴淞江特大桥引桥桩基加固工程首桩顺利开钻[EB/OL]. (2026-10-12). https://jsgzw.jiangsu.gov.cn/art/2026/10/12/art_61544_11841271.html.

[7]南通市海门区人民政府. 次差路整治首试“微创”，海门公路引进新一代高韧柔性注浆技术[EB/OL]. (2026-10-14). http://www.haimen.gov.cn/hmsjtj/zdmsxx/content/eaf7b2ac-14ee-4408-a575-89f57eaf2587.html.

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.