

地聚物稳定碎石基层路用性能研究

张永超

华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年4月23日; 录用日期: 2025年5月15日; 发布日期: 2025年5月28日

摘要

本文通过与水泥稳定碎石做比较, 研究地聚物稳定碎石在道路基层上的性能表现, 两组试验胶凝剂含量均为5%。从原材料出发, 发现地聚物有着绿色环保的优点。通过击实试验, 得出地聚物稳定碎石比水泥稳定碎石的最大干密度更高, 说明前者的密实性更好。通过单轴抗压试验、劈裂试验、冻融循环试验以及干缩试验来综合考量地聚物稳定碎石的路面性能。结果表明: 地聚物稳定碎石的抗压强度和劈裂强度均略低于同掺量下的水泥稳定碎石。根据冻融循环试验结果, 进行破坏机理分析, 得到地聚物稳定碎石的破坏是由于自身刚性不足而引起的脆性断裂。本文末尾对地聚物稳定碎石和水泥稳定碎石28 d抗压强度的破坏试件进行微观试验, 利用SEM-EDS技术分析了两种材料的微观形貌与元素组成, 利用XRD技术分析了地聚物的元素组成和晶格结构, 并总结出地聚物材料的强度形成机理。最终得出: 地聚物稳定碎石满足规范中对道路基层材料的要求, 有望代替水泥成为新型绿色半刚性基层材料。

关键词

道路工程, 地聚物, 力学性能, 耐久性, 微观分析

Research on Road Performance of Geopolymer-Stabilized Crushed Stone Base Course

Yongchao Zhang

School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Apr. 23rd, 2025; accepted: May 15th, 2025; published: May 28th, 2025

Abstract

This paper studies the performance of geopolymer-stabilized crushed stone in road base by comparing it with cement-stabilized crushed stone, with the content of both binders being 5%. Starting

from raw materials, it is found that geopolymer has the advantage of being environmentally friendly. Through compaction tests, it is concluded that the maximum dry density of geopolymer-stabilized crushed stone is higher than that of cement-stabilized crushed stone, indicating that the former has better compactness. The pavement performance of geopolymer-stabilized crushed stone is comprehensively evaluated through uniaxial compression tests, splitting tests, freeze-thaw cycle tests and dry shrinkage tests. The results show that the compressive strength and splitting strength of geopolymer-stabilized crushed stone are slightly lower than those of cement-stabilized crushed stone with the same dosage. Based on the results of the freeze-thaw cycle test, the failure mechanism is analyzed, and it is found that the failure of geopolymer-stabilized crushed stone is caused by brittle fracture due to insufficient rigidity. At the end of the paper, microscopic tests are conducted on the damaged specimens of geopolymer-stabilized crushed stone and cement-stabilized crushed stone with 28-day compressive strength. The microstructure and elemental composition of the two materials are analyzed by SEM-EDS technology, and the elemental composition and lattice structure of geopolymer are analyzed by XRD technology. The strength formation mechanism of geopolymer materials is summarized. Finally, it is concluded that geopolymer-stabilized crushed stone meets the requirements of the specifications for road base materials and is expected to replace cement as a new type of green semi-rigid base material.

Keywords

Road Engineering, Geopolymer, Mechanical Properties, Durability, Microanalysis

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

地聚物是由高岭土、矿渣、粉煤灰等含硅铝质的工业废渣或尾矿，搭配碱性激发剂，在常温或一定养护条件下，经过“溶解－单体重构－缩聚”的反应凝结硬化过程而生成的一种类似陶瓷的新型无机聚合物材料[1]。由于其不涉及高温或高能耗过程，生产过程中的碳排放量也相对较少，仅为传统材料的 20% 左右。因此，地聚物是一种低碳环保的建筑材料，符合“双碳”战略和“绿色建材”的理念，有助于推动绿色循环经济的发展。

半刚性基层因其出色的力学特性和稳定性，已经成为当前道路基层的主导结构。采用合适的施工方法和高质量的半刚性基层材料能显著增强道路的承载能力和使用寿命[2]。早在 1978 年，法国人 Davidovits 提出了地聚合物的概念，它是一种由 AlO_4 和 SiO_4 四面体结构单元组成三维立体网状结构的无机聚合物，化学式为 $\text{Mn}\{-(\text{SiO}_2)_z\text{AlO}_2\}_n \cdot \text{WH}_2\text{O}$ ，无定形到半晶态的非金属材料[3]。其机械性能和耐久性良好，适合作为新型半刚性基层无机结合料。常等[4]使用粉煤灰作为原材料制备出具有优异性能的地聚物，发现 NaOH 溶液的浓度对地聚物的反应速度产生显著影响，地聚物表现出早期强度和高强度的特性。贾等[5]研究液固比和矿渣含量如何显著地影响粉煤灰基地聚物材料的凝结过程时间，随着浆料的液固比上升，这些变量也会相应地增长，加入矿渣可以有效地减少凝结所需的时间。Duxson 等[6]指出，粉煤灰质量对地聚物的形成起着关键作用，其微观结构最佳描述为凝胶结合的灰分复合材料。微观结构分析显示，粉煤灰试样中未反应的相包括结晶杂质、无法溶解于碱性介质的玻璃相，以及由于质量传递受阻而无法反应的潜在可溶相。

目前，国内外对地聚物的研究集中于混凝土材料上，在道路工程中的研究较少，本文研究了由常见

固废制成的地聚物作为胶凝剂，将碎石稳定成具有较高强度和耐久性的基层材料。采用地聚物稳定碎石建造的道路基层刚性更强，在使用过程中产生的形变更小，进而道路的耐久性与稳定性得到提升，理论上能够代替水泥稳定碎石。

2. 试验方案

2.1. 试验材料

2.1.1. 矿物原材料

试验中地聚物以粉煤灰与矿渣(1:1)作为地聚物原料，该原料取自于新乡市原阳县某建筑工地。本试验所使用的矿渣为 S95 级，呈灰白色粉末状，密度为 2.84 g/cm³，比表面积为 363 m²/kg；本试验所使用的粉煤灰为Ⅱ级，呈灰黑色粉末状，密度为 2.33 g/cm³，比表面积为 347 m²/kg。通过 XRF 检测原料的主要化学成分，矿渣中硅铝质的成分约占 49%，粉煤灰中硅铝质的成分约占 62%，如表 1 所示。其他矿物原材料统一采用普通建筑用碎石、自来水。

Table 1. Main chemical composition of slag and fly ash
表 1. 矿渣和粉煤灰的主要化学成分

化学成分含量(%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
矿渣	38.75	33.57	15.62	1.08	1.74	1.12	1.07
粉煤灰	27.09	45.21	16.96	3.97	2.08	1.62	1.81

对照组胶凝剂采用河南省同力水泥有限公司生产的 P.O42.5 水泥(普通硅酸盐水泥)，其余矿物原料均与试验组相同。

2.1.2. 碱性激发剂

在地聚物制备过程中，选择合适的碱激发剂是至关重要的。碱激发剂能促使硅铝质原料中的硅酸盐和铝酸盐发生溶解和重组，形成地聚物三维网状结构。常用碱激发剂有氢氧化钠(NaOH)、氢氧化钾(KOH)、水玻璃(Na₂SiO₃)等[7]。

NaOH 和 KOH 的碱性较强，虽可有效地激发硅铝质原料中的活性组分，但成本相对较高，且对环境的腐蚀性较强；水玻璃作为一种相对温和的碱激发剂，其激发效果虽不如 NaOH 和 KOH 强烈，但成本较低，且对环境较为友好。因此，本文选用水玻璃作为碱性激发剂进行使用，可在保证激发效果的同时，降低对环境的腐蚀性。本试验采用天津市众联化学试剂有限公司生产的液体硅酸钠(水玻璃)，该试剂水玻璃模数为 3.1，密度为 1.360 g/cm³。该试剂主要成分见表 2。

Table 2. Main ingredient of Na₂SiO₃
表 2. Na₂SiO₃主要成分

参数	技术要求	检验结果
水不溶物	≤0.50	0.31
密度(20℃)	1.368~1.394	1.380
二氧化硅(SiO ₂)	≥26.0	26.9
氧化钠(Na ₂ O)	≥8.2	8.5
模数	2.8~3.1	3.01

2.2. 配合比设计

2.2.1. 地聚物配合比设计

依照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》GB/T 17671-2021 [8]的标准要求, 本次试验以矿渣和粉煤灰为粉体材料, 质量比为 1:1, 水玻璃模数确定为 1.3。试验中的水胶比固定为 0.5 (碱激发剂算入水质量), 碱激发剂的掺量设定为 30%。试验中各材料具体用量如下: 矿渣 225 g、粉煤灰 225 g、标准砂 1350 g、水玻璃 68 g、水 157 g。制备相应的地聚物胶砂, 并对其养护 3 d、7 d 和 28 d 后的胶砂试件进行抗折强度和抗压强度测试。

以同样方法可以设计出对照组的水泥胶砂配合比, 各材料具体用量如下: 水泥 518 g、标准砂 1350 g、水 157 g, 对这些试件养护 3 d、7 d 和 28 d 后进行抗折强度和抗压强度测试。

2.2.2. 水玻璃模数调配

水玻璃模数为氧化钠和氧化硅的摩尔数之比, 为优化地聚物的性能, 需调整水玻璃的模数, 实现更好的使用效果[9]。水玻璃模数为 3.01, 其中氧化钠(Na_2O)含量为 7.8%, 氧化硅(SiO_2)含量为 25.9%, 可通过添加氢氧化钠来降低水玻璃模数, 本次试验需将水玻璃模数降低至 1.3。

降低水玻璃的模数是为了调整碱激发剂的物化性质, 使其与粉体材料更好地发生反应, 这样做可以带来以下四个好处:

- 1) 改善溶解性: 模数低的水玻璃更易溶于水, 在含水率较低的地聚物混合料中反应更加充分;
- 2) 调整粘度: 水玻璃的粘度随着模数的升高而增大, 降低模数可降低其粘度, 使得混合料在拌合过程中更顺畅;
- 3) 增强粘结能力: 模数低的水玻璃, 其晶体组分较多, 粘结能力较差, 通过降低模数, 可以增加胶体组分, 从而提高水玻璃的粘结能力;
- 4) 调整化学反应活性: 水玻璃模数的高低会影响其与其它物质的化学反应活性。降低模数可以调整水玻璃的反应活性, 使其更好地适应特定的化学反应条件。

每 100 g 水玻璃中 SiO_2 及 Na_2O 物质的量计算公式如式(1-1)和式(1-2):

$$n(\text{Na}_2\text{O}) = \frac{m(\text{Na}_2\text{O})}{M(\text{Na}_2\text{O})} = \frac{7.8}{62} = 0.126 \text{ mol} \quad (1-1)$$

$$n(\text{SiO}_2) = \frac{m(\text{SiO}_2)}{M(\text{SiO}_2)} = \frac{25.9}{60} = 0.432 \text{ mol} \quad (1-2)$$

若保持 SiO_2 含量不变, 当水玻璃模数 $M_s = 1.3$ 时; Na_2O 物质的量应为: $0.432/1.3 = 0.336 \text{ mol}$; 故需要加入的 Na_2O 的物质的量为: $0.336 - 0.126 = 0.21 \text{ g}$; 假设需加入的 NaOH 的量为 x , 根据化学方程式: $2\text{NaOH} = \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$, 则配置 100 g 水玻璃且模数 $M_s = 1.3$ 需要加入 NaOH 的量为: $0.21 \times 2 \times 40 = 16.8 \text{ g}$ 。

2.2.3. 地聚物稳定碎石配合比设计

Table 3. Recommended gradation range of cement stabilized graded crushed stone gravel
表 3. 水泥稳定级配碎石或砾石的推荐级配范围

筛孔尺寸(mm)	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配上限(%)	100	86	79	72	62	45	31	22	15	10	7	5
级配下限(%)	-	82	73	65	53	35	22	13	8	5	3	2
级配中值(%)	100	84	76	69	58	40	27	17	11	7	5	3

本文研究地聚物代替水泥作为胶凝材料应用于无机结合料稳定碎石类材料，因此按《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》JTG 3441-2024 [10]中的水泥稳定级配碎石或砾石的推荐级配范围进行级配设计，并按照级配中值配置基层材料，如表 3 和图 1 所示。

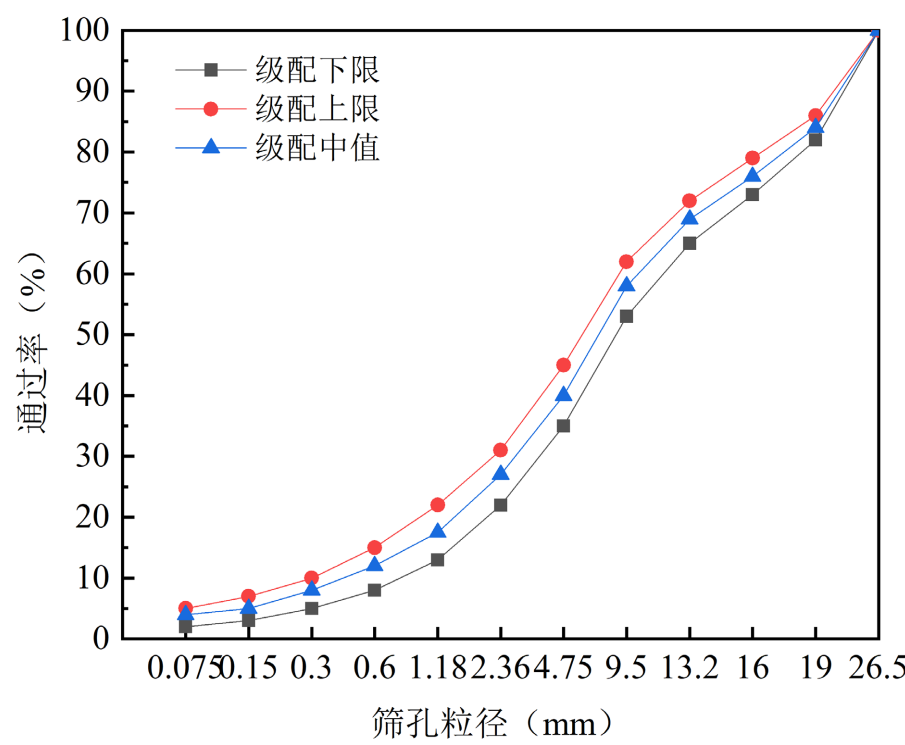


Figure 1. Grain-size distribution curve
图 1. 级配曲线

为遵循的单一变量原则，水泥稳定碎石配合比设计中碎石同样采用规范要求的级配中值进行配比。

2.3. 试样制备

2.3.1. 地聚物胶砂试件

地聚物胶砂试件的制备方法如下：

- 1) 按照试验方案，将冷却的 NaOH 溶液与 Na₂SiO₃ 溶液混合，搅拌 3 min，于室温下静置冷却 20 min；
- 2) 将水与冷却后的碱溶液倒入拌锅后充分搅拌 1 min，根据配置比例称取相应质量的矿渣和粉煤灰，混合均匀后加到拌锅内，先慢速搅拌 2 min 再快速搅拌 2 min；
- 3) 分两次将地聚物胶凝材料倒入 40 mm × 40 mm × 160 mm 的模具中，将胶凝材料表面刮平后，之后放在水泥胶砂振实台上震动 1 min，振实完成后，放入养护箱中，胶凝材料自然硬化以后脱模，之后泡在水中，继续养护至要求龄期时进行强度试验。

水泥胶砂试件的制备方法更为简单，这里不再赘述。制备试件数量和养护龄期须与地聚物胶砂试件一一对应。

2.3.2. 地聚物稳定碎石试件

根据地聚物稳定碎石的配合比设计数值，取总量为 5000 g 的各级配碎石，具体用量见表 4。地聚物

掺量为 5%，具体用量为 250 g。同样的，对照组水泥稳定碎石的配比采用同比例、质量的碎石和水泥，依据相同方法制成对应的试件。

Table 4. The specific amount of graded gravel
表 4. 各级配碎石具体用量

筛孔尺寸(mm)	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
分计筛余(%)	0	16	8	7	11	18	13	10	6	4	2	2
实际用量(g)	0	800	400	350	550	900	650	500	300	200	100	100

根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》JTG 3441-2024 的方法制备各试验所需的对应试件。

2.4. 击实试验

击实试验是评估道路基层材料的主要方法，是道路压实度检测的必要前提。根据规范《土工试验方法标准》GB/T 50123-2019 [11]要求，本试验采用丙法重型击实试验。设计 4%、5%、6%、7%、8%五组含水率，按照设计配合比拌合充足的地聚物稳定碎石(约 5000 g)，分三层装入电动击实仪的大型击实筒中，每层用大型击实锤击 94 次。重复击实步骤做五组试验，试验结果见表 5。

Table 5. Compaction results of the experimental group and the control group
表 5. 试验组与对照组击实结果

击实组	试验组 1	试验组 2	试验组 3	试验组 4	试验组 5	对照组 1	对照组 2	对照组 3	对照组 4	对照组 5
含水率(%)	3.9	4.8	5.9	7.0	7.8	4.0	5.1	6.1	7.0	8.0
干密度(g/cm ³)	2.51	2.56	2.59	2.57	2.54	2.44	2.48	2.51	2.49	2.46

由表 1~5 可以看出，5%地聚物稳定碎石的最优含水率为 5.9%，最大干密度为 2.59 g/cm³。5%水泥稳定碎石的最优含水率为 6.1%，最大干密度为 2.51 g/cm³。在相同的胶凝材料剂量和同级配条件下，地聚物稳定碎石材料的最佳含水量略低于水泥稳定碎石材料，而其最大干密度则超过水泥稳定碎石材料。由于地聚物的反应机制与水泥的水化过程有所不同，因此所制备的无机结合材料在稳定碎石材料的性能上也存在差异。水泥稳定碎石材料是通过水泥的水化作用与细集料结合而成的胶结料，它以粗集料作为基础，形成一个完整的结构，从而具备一定的强度；在地聚物的化学反应中，硅铝质更容易参与地聚物的反应，能够增强胶凝材料与集料之间的粘结力，进一步促进结合的紧密程度，因此最大干密度也得到提升，与水泥水化反应所需的水量相比，地聚物反应所需的水量较少，因此所需的最佳含水量相对较低。

3. 试验结果与分析

3.1. 无侧限抗压强度试验

地聚物稳定碎石作为一种新型绿色的半刚性基层材料，抗压强度直接关系到路面结构的承载能力和使用寿命。由于道路基层一般仅考虑来自上方的荷载，因此本文只研究其无侧限抗压强度是否满足规范要求。本文分别设计了 7 d、28 d、90 d 无侧限抗压强度试验，并设置水泥稳定碎石对照组，分别对比不同龄期下两种基层材料的力学性能。在进行强度测试时，需要将试样取出，并用湿毛巾擦去试样表面的自由水，以保证测试时试件表面干净，使用万能试验机来测试试件的无侧限抗压强度，见图 2。



Figure 2. Unconfined compressive strength test
图 2. 无侧限抗压强度试验

测试试验组和对照组的所有试件，记录所有试验值并取平均，计算其变异系数汇总于表 6。

Table 6. Unconfined compressive strength of 7 d, 28 d and 90 d age
表 6. 7 d、28 d、90 d 龄期无侧限抗压强度

基层材料类别	7 d 抗压强度 (MPa)	7 d 抗压变异系数 (%)	28 d 抗压强度 (MPa)	28 d 变异系数 (%)	90 d 抗压强度 (MPa)	90 d 变异系数 (%)
地聚物稳定碎石	4.07	12.1	4.74	11.3	5.01	7.6
水泥稳定碎石	4.18	11.6	4.88	11.2	5.16	7.9

由表中数据可以看出，地聚物稳定碎石的无侧限抗压强度略小于同掺量下水泥稳定碎石。依据《公路路面基层施工技术细则》JTG/T F20-2015，对于二级及以下公路的中、轻交通条件，基层在 7 d 龄期时的无侧限抗压强度应介于 2.0 至 4.0 MPa，且变异系数不得超过 15%，可见地聚物稳定碎石完全满足规范要求。地聚物在碱激发材料的作用下，Si、Al 等单体从地聚物材料中解体、析出，分布不均匀，通过与脱羟基作用，与碱金属离子发生反应，重新形成硅酸盐与硅铝酸盐，最终缩聚形成三维网络状聚硅铝酸盐凝胶，并逐渐凝结硬化；而且在地聚物硬化的过程中，会出现明显的体积收缩，这极易导致微裂纹的产生，这些微裂纹又成为侵蚀离子进入混合物内部的通道，从而降低基层材料强度。

3.2. 间接抗拉(劈裂)试验

使用游标卡尺测量制成的劈裂试件三个不同位置的直径和高度的值，并取这些测量值的平均值作为试样的直径和高度，精确度可达到 0.1 mm。在进行劈裂试验时，将预制的试件横放于万能试验机两条压条之间，确保试件与上下压条接触线垂直对准升降台，万能试验机以 1 mm/min 的速度加载，并记录试件破裂时的压力，如图 3。

通过劈裂试验得到不同基层材料 90 d 的劈裂强度值，其中，地聚物稳定碎石的劈裂强度值为 0.71 MPa，变异系数为 7.3；水泥稳定碎石的劈裂强度值为 0.77 MPa，变异系数为 6.9。由以上数据可知，采用地聚物替代传统水泥作为胶凝材料后，对基层材料的劈裂强度影响较小，显示出相对较小的下降幅度，仍符合规范要求。这是因为水泥砂浆试样表面完整，颗粒之间大小均匀，其内部元素分布均匀，这种均

匀的分散性有助于水泥与集料之间的充分胶结，从而提高混合物的强度。相比之下，地聚物的不规则表面形态导致部分水化产物与试样表面脱离，降低了其粘结性，而在碱性环境中激发的硅和铝单体解体、析出和逐渐硬化，造成体积收缩和微裂纹的形成，因此降低了基层材料的劈裂强度。



Figure 3. Splitting strength test
图 3. 劈裂强度试验

3.3. 冻融循环试验

在经历冻融循环后，对试件进行抗压试验，期间控制压力机的加载速率为 1 mm/min。无机结合料的抗冻性能是通过计算冻融残留抗压强度比(即抗冻系数，其计算公式为抗冻系数 = RDC/RC)来评估的。表 7 是经过 28 d 龄期的试件在冻融循环后的试验结果。

Table 7. 28 d age freeze-thaw compressive strength
表 7. 28 d 龄期冻融抗压强度

基层材料	未冻融强度(MPa)	冻融后强度(MPa)	抗冻系数(%)	强度损失率(%)
地聚物稳定碎石	4.73	4.07	86.05	15.27
水泥稳定碎石	4.91	4.28	86.25	13.75

进一步分析可知，地聚物与水泥相比有更为紧凑的微观构造，这使得水分子难以渗透到地聚物胶凝材料的内部；从另一个角度看，地聚合反应中的水胶含量相对较低，这导致胶凝材料中的自由水减少，形成更为紧凑的微毛细孔。因此，水分很难渗透到这些微毛细孔中。同时由于地聚物胶凝材料内部存在大量的封闭气孔，这增强其抗冻特性，使得其抗冻性能优于水泥胶凝材料。

3.4. 干缩性能分析

在试验进行至第 30 d 时，需记录第 60 d、第 90 d、第 120 d、第 150 d 和第 180 d 的数据。每次记录数据时，测定试件的含水率。试验结束后，试件被置于烘箱中烘干至恒重，并进行称重。具体干缩试验数据见表 8。

Table 8. Drying shrinkage test results
表 8. 干缩试验结果

水泥稳定碎石					地聚物稳定碎石				
龄期(d)	失水率(%)	干缩量(mm)	干缩应变 (10^{-6})	干缩系数 (10^{-6})	龄期(d)	失水率(%)	干缩量(mm)	干缩应变 (10^{-6})	干缩系数 (10^{-6})
1	0.94	0.025	62.5	66.49	1	0.76	0.018	45.0	59.21
2	1.15	0.043	107.5	93.48	2	0.97	0.033	82.5	85.05
3	1.41	0.072	180.0	127.66	3	1.22	0.058	145.0	118.85
4	1.63	0.096	240.0	147.24	4	1.43	0.08	200.0	139.86
5	1.83	0.112	280.0	153.01	5	1.64	0.093	232.5	141.77
6	2.07	0.121	302.5	146.14	6	1.88	0.104	260.0	138.30
7	2.2	0.135	337.0	153.41	7	1.98	0.114	283.5	143.94
9	2.35	0.153	382.5	162.77	9	2.13	0.132	330.0	154.93
11	2.41	0.166	415.0	172.20	11	2.19	0.147	367.5	167.81
13	2.45	0.178	445.0	181.63	13	2.23	0.157	392.5	176.01
15	2.56	0.187	467.5	182.62	15	2.34	0.167	417.5	178.42
17	2.7	0.191	477.5	176.85	17	2.48	0.17	425.0	171.37
19	2.75	0.202	505.0	183.64	19	2.54	0.178	445.0	175.20
21	2.86	0.207	517.5	180.94	21	2.66	0.182	455.0	171.05
23	2.96	0.215	537.5	181.59	23	2.76	0.189	472.5	171.20
25	3.09	0.225	562.5	182.04	25	2.89	0.199	497.5	172.15
27	3.24	0.237	592.5	182.87	27	3.06	0.204	510.0	166.67
29	3.32	0.241	602.5	181.48	29	3.14	0.208	520.0	165.61
60	3.38	0.255	637.5	188.61	60	3.19	0.222	555.0	173.98
90	3.63	0.268	670.0	184.57	90	3.44	0.235	587.5	170.78
120	3.85	0.282	705.0	183.12	120	3.66	0.249	622.5	170.08
150	4.11	0.305	762.5	185.52	150	3.91	0.27	675.0	172.63
180	4.28	0.334	835.0	195.09	180	4.08	0.291	727.5	178.31

地聚物稳定碎石和水泥稳定碎石，其干缩应变均随龄期增加而增大，但增长速率在初期较大，后期逐渐减缓并趋于稳定。在 7 d 的养护龄期下，地聚物稳定碎石的干缩应变为 283.5×10^{-6} ，而水泥稳定碎石的干缩应变为 337.0×10^{-6} ，地聚物稳定碎石的干缩应变较水泥稳定碎石低 15.9%；至 90 d 龄期时，地聚物稳定碎石的干缩应变为 587.5×10^{-6} ，水泥稳定碎石的干缩应变为 670.0×10^{-6} ，地聚物稳定碎石的干缩应变仍较水泥稳定碎石低 12.3%。该差异源于地聚物在早期具有快速强度发展能力，作为胶凝材料，提供了较强的粘结力，促进骨料间的紧密结合；当内部骨料因水分损失产生收缩应力时，这种粘结力有助于抵抗收缩应力引起的变形，从而有效减少干燥收缩。

3.5. 微观分析

研究材料的性能通常需要结合宏观和微观两个层面进行分析，其中微观分析能够揭示材料宏观性能

的本质。因此,本章将对地聚物稳定碎石基层材料进行深入的微观层次分析,旨在揭示地聚物的强度形成机理。

3.5.1. 微观形貌

扫描电子显微镜(SEM)与能谱分析仪(EDS)在多个研究领域和跨学科研究中扮演着关键角色,是不可替代的科研工具[12]。随着科技的进步和检测技术的提高,集成能谱分析功能的扫描电子显微镜(SEM-EDS)在材料科学中的作用日益重要。如图4所示,其中(a)是地聚物试样放大2000倍的SEM图,(b)是水泥试样放大2000倍的SEM图。

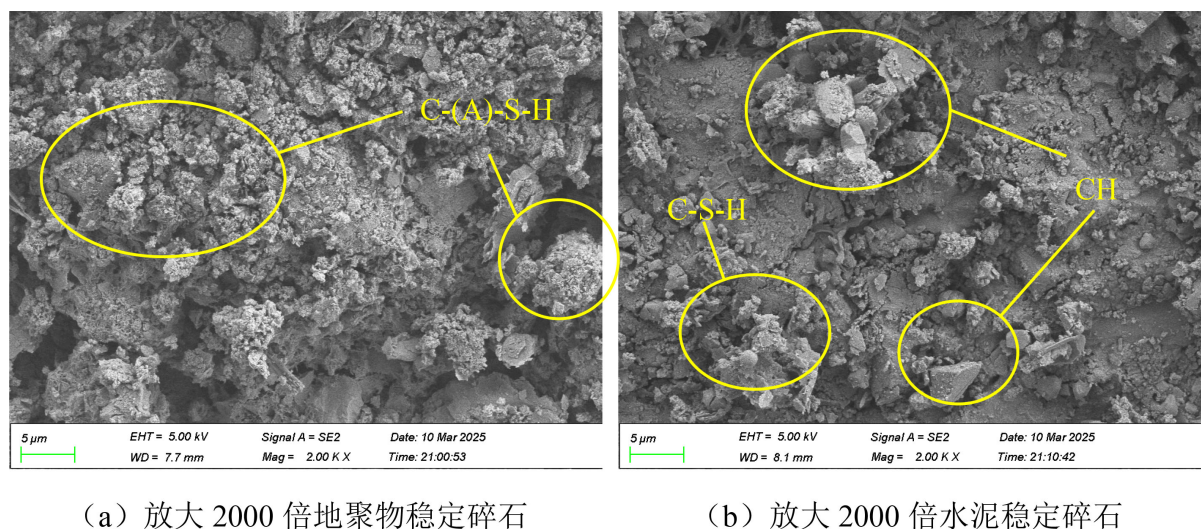


Figure 4. Microscopic morphology of geopolymer-stabilized crushed stone and cement-stabilized crushed stone
图 4. 地聚物稳定碎石与水泥稳定碎石微观形貌

由图4(a)可知,在碱激发作用下,硅铝组分和钙质组分发生地聚合反应,生成较多蜂窝状的胶凝物质,包括水化硅酸钙(C-S-H)和水化硅(铝)酸钙(C-(A)-S-H)。随着反应时间的增加,生成量逐渐增加,凝胶会填充混合料颗粒间隙和颗粒表面,提高地聚物混合料的密实度和力学性能。但地聚物的表面呈现出明显的凹凸特性,表明其微观结构存在不规则性和非均匀性。

相比之下,由图4(b)可知,水泥在水化过程中持续生成呈层状或片状的氢氧化钙(CH)和呈蜂窝状或层状的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶晶体,不同结构和形状的水化产物会影响水泥试样的各项性能指标。水泥试样表面较为完整,颗粒大小均匀分布,这反映了水泥试样在硬化过程中形成的相对均匀的微观结构,这种颗粒的均匀分布有助于提供稳定的力学性能和良好的耐久性。

3.5.2. XRD 分析

在物质衍射分析中,X射线被不同原子散射并在特定方向上相互干涉,形成明显的衍射峰。这些衍射峰的分布密度和高度与晶体结构密切相关,能够分析出材料的元素组成和晶格结构。利用Jade和Origin将数据导出,地聚物试样的XRD图谱见图5。

如图5(a)使用Jade对试验数据进行翻译,将峰值点对应的物质标记在XRD图谱上,由图5(b)可知,钢纤维地聚物稳定碎石的生成产物中含有大量的碳酸钙,以及二氧化硅晶体。解聚-缩聚反应先在碱性环境中溶解出生成硅酸根离子和铝酸根离子,接着发生缩聚反应生成硅铝酸盐和二氧化硅晶体,使地聚物凝胶逐渐硬化,形成一种高强度的聚合物。这些变化说明解聚-缩聚反应生成地聚物凝胶,在骨料表

面形成了均匀且致密的涂层，有效防止了水分和有害物质的渗透，降低了材料的渗透性和渗透率，提高了材料的耐化学侵蚀性能。

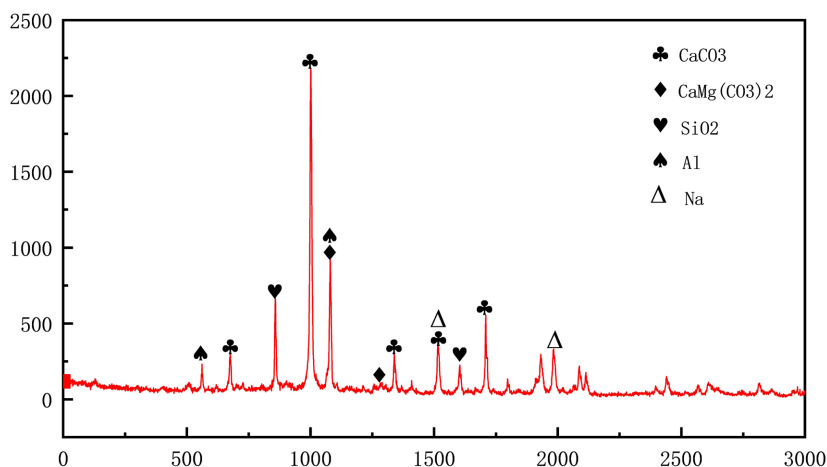


Figure 5. XRD patterns of geopolimer specimens

图 5. 地聚物试样的 XRD 图谱

4. 结论

1) 从环保方面考虑，地聚物稳定碎石比水泥稳定碎石更绿色，原料上它回收利用固体废弃物，在制备过程中大大减少了碳排放，不仅解决我国当前建筑垃圾堆放过多的难题，还推动了绿色循环经济的发展。

2) 地聚物在制备过程中相较于水泥更加繁杂，制备工艺也不如水泥成熟，这是其在道路基层应用中受限制的关键。

3) 地聚物稳定碎石的力学性能优良，各龄期无侧限抗压强度与同掺 5% 的水泥稳定碎石(P.O42.5)表现相近，完全满足道路规范中的要求。但地聚物硬化的过程中，会因为碱激发析出不均匀胶结物而引起体积收缩，从而导致微裂隙的产生，建议掺加纤维来修复或填充微裂隙。

4) 地聚物稳定碎石的耐久性较好，其在冻融循环试验中表现略逊于水泥稳定碎石，这是因为地聚物有更为紧凑的微观构造，水分子难以渗透到地聚物胶凝材料的内部。地聚物稳定碎石的干缩性能要优于水泥稳定碎石，说明其早期强度高，粘结力强，使骨料之间连接更加紧密，从而能更好地抵抗收缩应力。

5) 地聚物经过碱激发剂催化后，其微观结构存在不规则性和非均匀性，一定程度上降低了粘结性。这种较弱的粘结性可能导致地聚物试样在受力时容易发生破坏，并对其力学性能产生不良影响。解聚-缩聚反应在骨料表面形成了均匀且致密的涂层，有效防止了水分的渗透，能够提高材料的耐久性。

综上所述，地聚物稳定碎石是一种既结实耐用，又环保经济的新型基层材料。在与同掺量水泥稳定碎石的对比试验中，其性能表现优良，其力学性能和耐久性均满足相关规范要求，地聚物具有替代水泥作为新型道路基层无机结合料的潜力。

参考文献

- [1] 刘路路, 范凤英, 郭鑫鑫. 关于地质聚合物的综述[J]. 四川水泥, 2019(4): 311.
- [2] 郭烽. 永久性路面半刚性基层疲劳特性分析与研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- [3] Buruberrri, L.H., Tobaldi, D.M., Caetano, A., Seabra, M.P. and Labrincha, J.A. (2019) Evaluation of Reactive Si and Al Amounts in Various Geopolymer Precursors by a Simple Method. *Journal of Building Engineering*, 22, 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.11.017>

-
- [4] 常利. Na-粉煤灰基地质聚合物胶凝材料的制备及性能研究[D]. [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
 - [5] 贾屹海, 韩敏芳, 孟宪嫔, 等. 粉煤灰地质聚合物凝结时间的研究[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(5): 893-899.
 - [6] Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A. and van Deventer, J.S.J. (2006) Geopolymer Technology: The Current State of the Art. *Journal of Materials Science*, **42**, 2917-2933.
<https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
 - [7] 蒋明岫, 李飞, 周理安, 等. 碳酸钠、氢氧化钠与水玻璃复合激发对地质聚合物胶凝材料性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(3): 929-937.
 - [8] 国家市场监督管理总局. GB/T 17671-2021 水泥胶砂强度检验方法(ISO 法) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
 - [9] 丁兆洋, 苏群, 李明泽, 等. 水玻璃模数对地质聚合物再生混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(1): 61-70.
 - [10] 交通运输部. JTG/T 3441-2024 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2024.
 - [11] 住房和城乡建设部. GB/T 50123-2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
 - [12] 林永会, 徐东强, 赵献辉. 碱渣激发矿渣胶凝材料力学性能与微观结构试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(9): 2876-2881, 2889.