

# 宁夏地区沙质土公路工程特性及固化技术应用研究综述

任启欣

宁夏理工学院, 宁夏石嘴山, 中国

**【摘要】**宁夏回族自治区位于我国西北内陆, 属温带大陆性气候, 生态环境本底脆弱, 土地沙化问题突出。区内沙质土资源分布广泛, 主要集中分布于平罗县东部、中卫市北部腾格里沙漠边缘、灵武市白芨滩及瓷窑堡、盐池县高沙窝—苏步井—哈巴湖周边、红寺堡周边以及黄河冲积平原的芦苇湖一带。该类土壤具有结构松散、黏聚力低、抗剪强度差及水稳定性不良等显著工程缺陷, 难以直接用于公路等基础设施的结构层。同时, 部分地区传统筑路材料如天然砂砾、水泥等供应短缺, 加之远距离运输成本高昂, 严重制约了当地交通建设与发展。因此, 将储量丰富的沙质土通过固化技术转化为合格的工程材料, 已成为推动宁夏及类似地区实现绿色、可持续发展的重要课题。本文系统综述了宁夏沙质土的分布与工程特性, 重点探讨适用于沙质土改良的固化剂种类及其作用机理, 并梳理相关固化技术与工程应用现状。文章指出, 目前针对湿陷性黄土的固化技术已取得显著进展并形成地方标准, 然而针对本地沙质土的系统性固化研究及其在公开学术期刊上的案例报道仍较为缺乏, 今后应加强面向区域特点的本土化、定制化固化材料与技术研究。

**【关键词】**宁夏; 沙质土; 固化剂; 固化技术; 资源化利用

**【基金项目】**宁夏自然科学基金资助项目(编号: 2023AAC03382)

## 1. 引言

宁夏作为“塞上江南”, 得益于黄河灌溉, 但也深受土地沙化困扰。广布的沙质土因其不良的工程特性, 一直是制约工程建设的难题。这些沙质土颗粒组成单一, 以细砂和粉砂为主, 结构松散、几乎无黏聚力, 抗剪强度低, 水稳定性差<sup>[1]</sup>。在车辆动荷载及自然降水、地下水影响下, 直接使用这类土体进行路基填筑或结构层施工, 极易导致路基承载力不足、发生不均匀沉降, 引发翻浆、弹簧现象, 边坡溜坍、滑塌风险增大, 进而引起路面开裂和线形不平整, 最终威胁行车安全并缩短道路服役寿命<sup>[2]</sup>。宁夏地处西北内陆, 传统筑路材料如天然砂砾、水泥和石灰等在局部区域日益短缺。材料开采成本不断上升, 加上长距离运输导致费用高昂, 显著提高了公路工程建设成本, 延长了工期。与此同时, 大量沙质土资源却未能得到有效利用, 造成资源闲置与工程成本增加并存的局面。

因此, 将储量丰富, 就地可取的沙质土通过技术手段转化为合格筑路材料, 已成为宁夏及西北干旱-半干旱地区公路工程建设中亟待解决的关键课题。其核心在于通过掺入专用固化剂, 对沙质土进行物理改良与化学加固: 一方面改善其颗粒级配与压实性能,

提高密实性; 另一方面利用固化剂与土体之间的化学反应生成胶结物质, 有效增强土体的黏聚强度、抗剪性能和整体稳定性。成功应用沙质土固化技术具有重要的经济、环保和社会意义: 一方面可缓解材料供需矛盾, 降低建设成本, 推动区域交通基础设施发展; 另一方面减少对传统砂石资源的依赖, 保护自然环境, 符合绿色、可持续的建设理念。此外, 该技术也为我国沙漠及边缘地区公路工程建设提供了有益的技术储备和工程示范。

## 2. 沙质土固化剂的主要种类与作用机理

土壤固化剂是指掺入土体中, 通过物理化学反应显著改善土体工程性能的外加剂。针对沙质土的特性, 固化剂的发展经历了从传统单一材料到现代复合环保材料的演进。

### 2.1 传统无机固化剂

此类固化剂以水泥、石灰、粉煤灰等为代表, 是目前应用最广泛的基础材料。其固化机理主要是通过水化反应生成水化硅酸钙(C-S-H)、水化铝酸钙等凝胶物质, 包裹并胶结沙粒, 形成稳定的团粒结构, 从而提高土体的强度和耐久性。例如, 在处理类似不良土时, 水泥基固化剂添加量达到10%以上并经过充分养护后, 可显著提升固化土的承载力。然而, 传统无机固化剂用于沙质土时, 常因沙土活性低、缺乏黏土矿物而导致水化

反应不充分,存在用量大、脆性高、易开裂等缺点<sup>[3]</sup>。

## 2.2 新型高分子及复合土壤固化剂

为克服传统材料的不足,新型固化剂不断涌现。一类是合成高分子聚合物固化剂,通过其长分子链在沙粒间架桥、吸附,形成空间网状结构,将松散沙粒固结为整体<sup>[4]</sup>。另一类是以工业废料(如矿渣、钢渣)为主要成分的复合固化剂,其通过碱性激发产生胶凝性,同时发挥微集料填充效应,在提升强度的同时兼具环保与经济性<sup>[5]</sup>。例如,在湿陷性黄土固化中,研发出的新型复合固化材料相较于传统水泥成本更低、水稳定性更好。这些材料的发展趋势是高效、经济、绿色、低碳的多元化复合。

## 2.3 离子型固化剂与生物固化剂

离子型固化剂通过离子交换改变沙粒表面双电层结构,降低颗粒间的排斥力,促进其凝聚<sup>[6]</sup>。生物固化剂则利用微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)或生物聚合物(如黄原胶)的胶结作用来固化沙土<sup>[7]</sup>,是一种极具潜力的环境友好型技术,但目前多处于研究阶段,大规模工程应用尚不成熟。

## 3. 沙质土主要固化技术与施工工艺

固化剂效能的充分发挥依赖于与之匹配的施工技术。目前主流的固化技术可分为原位固化与厂拌固化两大类,其选择需根据工程要求、土体条件和固化剂特性决定。

### 3.1 原位固化技术

原位固化指在土体原始位置进行搅拌和固化,主要适用于地基处理、路基改良等场景。

**路拌法:**这是目前宁夏在黄土固化中应用较成熟的方法。施工时,将固化剂按照设计比例均匀撒布在摊平的土体表面,然后使用路拌机进行多次拌和,使固化剂与土体均匀混合,最后进行碾压成型和养生。该工艺设备简单、施工灵活,适用于大面积路基处理。

**深层搅拌法:**该技术通过专用机械的钻头将固化剂浆液与原土体进行强制搅拌,形成均匀的加固体。对于处理深层沙土液化或提高深层路基承载力尤为有效,能形成高强度整体,显著提升土体强度和路基承载力。

### 3.2 厂拌固化与流态固化回填

**厂拌法:**将土料和固化剂在集中拌合站进行精确计量和充分拌合,再运输至现场摊铺碾压。此法混合均匀度高,质量易于控制,

适用于对强度要求高、土源集中的工程。

**流态固化回填技术:**这是一种新兴技术,将沙土、固化剂、水等按比例混合,搅拌均匀具有高流动性的浆体,然后通过管道泵送至需要回填的狭小空间或基坑内,自流平并固化成型。该技术适用于传统碾压机械无法进入的作业面,是未来实现智能化、精细化施工的重要方向。

## 4. 固化技术在宁夏地区的应用实践与研究现状

宁夏在利用本地资源进行工程建设的探索方面取得了实质性进展,特别是在黄土固化领域已走在国内前列,这为沙质土固化提供了宝贵的经验借鉴和现实基础。

### 4.1 黄土固化技术的成功示范与标准化

针对宁夏中南部湿陷性黄土分布广、筑路材料短缺的问题,当地开展了系统性的技术攻关。研究团队经过上万次试验,研发出一套完整的黄土固化技术,其核心是根据道路不同结构功能需求,通过工业废料研制出固化成型快、抗压强度高、耐水能力强的新型黄土复合固化材料。2021年以来,该技术在彭阳县等地成功应用于农村公路建设,通过路拌法施工,将黄土固化为板体“石头”,使路基性能达到设计要求。经济测算显示,采用该技术每公里可节约成本15万—20万元,施工周期缩短20%—25%,并能大量替代砂石料和水泥,实现显著的碳减排。基于成功的工程实践,宁夏已制定并发布了农村公路固化土应用技术地方标准,标志着该项技术已趋于成熟并进入规范化推广阶段。

### 4.2 沙质土固化研究现状

尽管宁夏在黄土固化方面成果斐然,形成了从材料、工艺到标准的完整体系,但针对本地特征沙质土的系统性固化研究,在公开发表的学术期刊文献中仍较为鲜见,存在明显的知识缺口。现有的成功案例多集中于黄土,而沙质土在颗粒组成、矿物成分、界面活性等方面与黄土存在本质差异,直接套用黄土固化技术可能难以取得最优效果。当前,国内外的砂土固化研究多集中在沿海吹填砂、尾矿砂或泛指的沙漠砂,专门针对宁夏特定地理、气候条件下沙质土(如腾格里沙漠边缘沙、黄河冲积沙等)的固化机理、耐久性及长期性能的深入研究成果尚未形成广泛报道。例如,中国农业大学水利与土木工程学院设立的“URP”项目中虽有“砂土固化研究”方向,但其研究区域和具体对象是否

涵盖宁夏沙质土，尚不明确。这正凸显了本领域未来研究的紧迫性和重要价值。

## 5. 结论与展望

宁夏地区丰富的沙质土资源与严峻的工程建设材料短缺之间的矛盾，使得沙质土固化技术成为区域发展的关键需求。本文分析表明，沙质土的不良工程特性可通过添加适宜的固化剂并采用合理的施工工艺得以有效改良。固化剂正朝着多元复合、绿色低碳的方向发展，而施工工艺也从简单的路拌向深层搅拌、流态固化等精细化方向发展。宁夏在湿陷性黄土固化领域已成功实现了技术突破、工程应用与标准制定，为同类技术的研发提供了从科研到产业的完整范式。然而，针对本地沙质土的固化研究仍处于相对滞后的状态，是未来需要重点攻克的领域。展望未来，宁夏沙质土固化研究与应用应关注以下方向：

### 1. 开展本土化基础研究

亟需系统开展针对宁夏不同区域（如腾格里沙漠边缘、黄河冲积平原）沙质土的物理化学性质分析，探究其与各类固化剂的作用机理，为定制化固化材料设计提供理论依据。

### 2. 研发专用复合固化材料

借鉴黄土固化的成功经验，结合工业固废资源化利用，研发适用于本地沙质土的高效、耐候、低成本专用复合固化剂。

### 3. 加强长期性能与环境效应评估

在干旱、大温差、强紫外线的特殊环境下，固化土体的长期强度衰减规律、抗冻融循环能力及对周边生态环境的潜在影响，需要进行持续的现场观测与评估。

### 4. 推动技术集成与智能化发展

探索将固化技术与就地固化设备、智能拌和控制、大数据配比设计平台相结合，提升施工质量与效率，并尝试在生态护坡、场地平整等更多工程场景中应用。

总之，将宁夏广泛的沙质土“变废为宝”，不仅是一项技术挑战，更是推动区域交通建设绿色低碳转型、保障生态安全的战略举措。填补当前沙质土固化研究的空白，将是实现这一目标的重要一步。

## 参考文献

- [1]张媛媛.沙质土盐碱地水稻水肥气热盐调控节水控盐增产提质技术试验研究[D].宁夏大学,2023.
- [2]代诗宇.沙土路基边坡力学稳定性改善及其效应[J].科学技术创新,2022,(24):93-96.
- [3]刘俊芳,张天然,刘霖,等.矿渣复合物固化/稳定化铅污染沙土特性[J].科学技术与工程,2024,24(28):12287-12295.
- [4]张宾宾,郭建斌,蒋坤云,等.新型土壤改良剂 Arkadolith 对沙质土壤主要物理性质的影响[J].水土保持研究,2011,18(05):59-62.
- [5]陈锐,陈海,包卫星,等.地聚合物固化含黏风积沙土-水特征曲线[J].交通运输工程学报,2023,23(04):128-141.
- [6]白国良,赵旭.碱激发煤基固废胶凝材料固化矿井水盐离子机理与实验研究[J].矿业安全与环保,2025,52(06):88-96.DOI:10.19835/j.issn.1008-4495.20250758.
- [7]冯佃芝.生物聚合物固化疏浚底泥力学特性及机理研究[D].辽宁工程技术大学,2024.