DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260613

旧水泥混凝土面板注浆改进技术的应用研究

周　杰,韦正鹏
(甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司,甘肃 兰州 730030)

摘　要: 针对旧水泥混凝土面板板底脱空病害处治中存在水泥砂浆成本高、流动性能不足、干缩开裂诱发二次脱空等弊端,依托甘肃本地粉煤灰、钢渣微粉、矿渣粉等大宗工业固废,经碱激发与复合胶凝设计,研发高流动、微膨胀、早强型地聚物注浆材料。工程注浆结果显示,材料可密实充填板底脱空区,有效恢复路面板承载力,消除错台、板块晃动病害,优化行车工况。该材料实现固废资源化处置,相较传统水泥注浆料吨成本降低 20%~30%,兼顾固废利用与公路养护降本增效,工程推广潜力突出。

关键词: 旧水泥混凝土面板;板底脱空;固废资源化;病害处治;降本增效
中图分类号:　　**文献标志码:**　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0334-05

Study on Application of Improved Grouting Technology for Old Cement Concrete Panels

ZHOU Jie, WEI Zhengpeng
(Gansu Province Transportation Planning and Survey Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract: To address the drawbacks of high cement mortar costs, insufficient fluidity, and secondary voiding induced by drying shrinkage cracking in the treatment of the voiding disease at the bottom of the old cement concrete slab, relying on bulk industrial solid wastes such as fly ash, steel slag micro-powder and slag powder in Gansu Province, the high-flow, micro-expansion and early-strength geopolymer grouting materials are developed through alkaline activation and composite cementitious design. The engineering grouting results demonstrate that the material can densely fill the voiding area at the bottom of the slab, effectively restore the load-bearing capacity of the pavement slab, eliminate the diseases of misalignment and slab shaking, and optimize the driving conditions. This material realizes the resource disposal of solid waste, reducing the cost per ton by 20% to 30% compared with traditional cement grouting materials, which takes into account both the utilization of solid waste and the cost reduction and efficiency improvement of highway maintenance, and has outstanding potential for engineering promotion.

Keywords: old cement concrete slab; slab bottom voiding; resource utilization of solid waste; defect treatment; cost reduction and efficiency improvement

0　引　言

早期水泥混凝土路面因结构承载力优异、整体稳定性可靠等技术优势,被大量应用于国内干线公路与城市市政道路工程建设。随着服役年限增加,多数旧混凝土路面出现裂缝、断板、错台、板底脱空等病害,路面使用性能大幅下降。在存量路网提质升级、绿色低碳发展的大背景下,在保障工程质量的同时实现旧建材资源化利用,是道路养护改造领域亟待解决的问题。

本文立足兰州市旧水泥混凝土路面养护改造痛点,贴合甘肃西北寒旱气候区域特征,针对当前农村水泥路面病害识别不精准、强度评价体系缺失、补强材料性能不足、再生改造工艺不完善、资源利用率低等核心问题,开展农村水泥路破碎板集料化再生提质改造技术系统研究,旨在构建一套适配农村公路工况的水泥混凝土路面板块强度无损评价体系,精准定位路面缺陷与待补强点位。研发以工业固废为主要原料、适配低温干旱环境的高性能无机填充砂浆材料,确定最优材料配比与配制方案;梳理标准化的注浆补强施工工艺与质量控制流程,形成完整的局部板块快速补强技术体系。通过实体试验段验证技术可行性与实用性,最终实现破损水泥板块 100% 再生利用,有效降低农村公路养护改造成本,解决路面病害复发难题,为西北寒旱地区农村水泥路面提

收稿日期:2026-06-02
作者简介:周杰(1987—),男,博士,高级工程师,从事道路智慧养护研究工作。

质改造提供标准化技术支撑。

本研究紧扣农村公路水泥路面提质改造核心难题，结合甘肃地域气候与路况特征，聚焦精准检测、材料研发、工艺优化、质量验证四大核心方向，开展系统性试验与工程应用研究。遵循“理论调研→病害检测→室内试验→工艺研发→工程验证→总结推广”的系统化技术路线，分四个阶段有序推进全部研究工作。研究技术路线如图 1 所示。

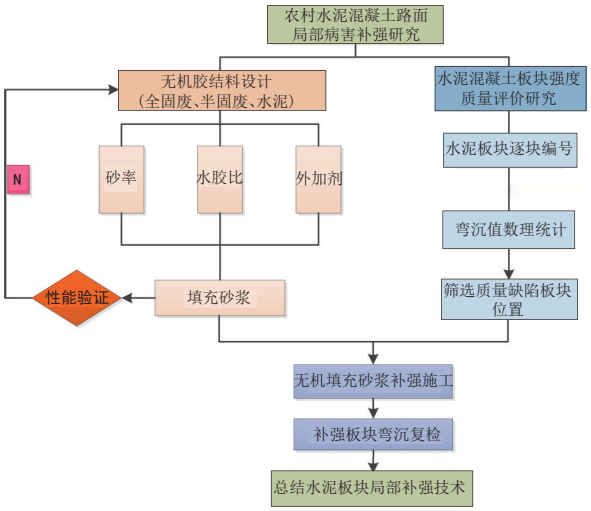


图 1　研究技术路线

1　工程概况

本试验段位于兰州市安宁区某段水泥混凝土路面，道路试验段长度 2.5 km，2009 年修建，近 17 年内无养护历史，沿线路况较为复杂。该段为双向通行道路，最小路基宽 6.5 m（3.0 m×2+0.25 m×2）。试验段路段水泥混凝土路面服役约 20 年，主要供工厂职工车辆与石料运输车辆通行，社会车辆通行较少。路面结构为 22 cm 厚水泥混凝土面板，基层为水泥稳定碎石。病害处置类型包括板底脱空、错台及裂缝（见图 2）。经弯沉检测，判定存在多处脱空板块。



（a）　（b）

图 2　旧水泥混凝土路面现状

2　旧水泥路面技术状况调研与检测评价

2.1　农村公路水泥混凝土路面板块强度评价体系研究

依托落锤式弯沉仪等无损检测设备，建立适配农村公路的全板块多点位检测方案，对改造路段所有水泥混凝土板块逐板检测，每个板块固定检测 4 个板角、1 个板中共 5 个点位，对检测点位统一编号记录。采用均值、代表值、极差等数理统计方法对弯沉检测数据进行系统分析，筛选异常数据与超标数据，精准定位存在板底脱空、强度不足、结构破损的缺陷板块，划定待补强点位。结合西北寒旱地区路况特征，总结农村水泥路面破碎后弯沉指标阈值，构建标准化、可量化的路面板块强度评价依据，为农村水泥路面破碎化改造设计与精准补强提供数据支撑与技术标准。

2.2　基于路面损坏状况的评价方法

《公路水泥混凝土路面养护技术规范》（JTJ 073.1—2001）中规定：采用路面破损状况指数 PCI 和断板率 DBL 两项指标评定路面破损状况，其中路面破损状况分为 5 个等级，各个等级的路面状况指数和断板率的评定标准如表 1 所示。

表 1　路面破损状况等级评定标准

评定等级	优	良	中	次	差
路面状况指数 PCI	≥85	84 ~ 70	69 ~ 55	54 ~ 40	＜40
断板率 DBL/%	≤1	2 ~ 5	6 ~ 10	11 ~ 20	＞20

2.3　基于路面结构承载能力的评价方法

遵照《公路路基路面现场测试规程》（JTG 3450—2019），可采用落锤式弯沉仪或贝克曼梁弯沉仪检测水泥混凝土路面板底脱空状况，实测数据作为路面养护及病害处置的技术依据。

实际工程应用中，弯沉检测和雷达检测往往是相互配合使用的。先通过弯沉检测快速筛选出弯沉异常板块，再对这些板块进行雷达精细探测，确认脱空的具体范围和严重程度，进而制定针对性的注浆补强方案。对于农村公路而言，可优先采用弯沉法进行初筛，对疑似脱空板块再辅以雷达检测进行验证。

3　固废原材料活化技术研究

3.1　典型工业固废物化分析

对地聚物注浆料研发过程的原材料水泥、矿渣粉、钢渣粉、粉煤灰等进行基本物理化学性能检测，主要包括密度、比表面积、活性、化学组成、矿物组成等。检测结果如下：

（1）钢渣粉的密度最大，一般在 3.1 ~ 3.3 g/cm^{3}之间；水泥次之；石膏和二级粉煤灰的密度较小，在 2.3 g/cm^{3}左右。

（2）酒钢钢渣粉的比表面积最大，为 8 255 cm^2/g。

脱硫石膏的比表面积最小，为 916 cm^2/g。

（3）固废粉体的活性大小依次为水泥＞S105 矿粉＞95 矿粉＞粉煤灰＞钢渣粉＞凝灰岩石粉＞脱硫石膏。

（4）粉煤灰主要由 CaO、SiO_2、Fe_2O_3、Al_2O_3 组成，而脱硫石膏主要由 CaO、SO_3 组成，矿粉主要由 CaO、SiO_2、Al_2O_3 组成。从活性元素分布角度分析，其工业固废活性的主要元素氧化物为 CaO、SiO_2、Fe_2O_3、Al_2O_3。

（5）XRD 图谱如图 3 至图 6 所示。

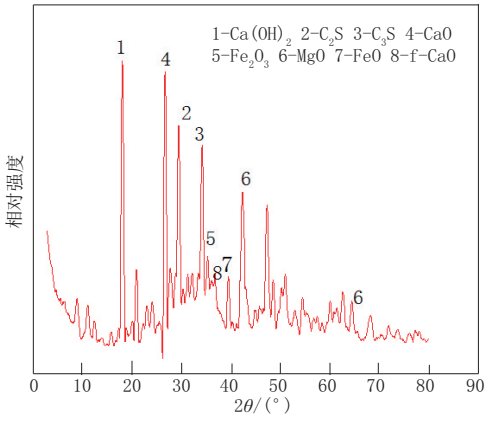


图 3　钢渣粉 XRD 图谱

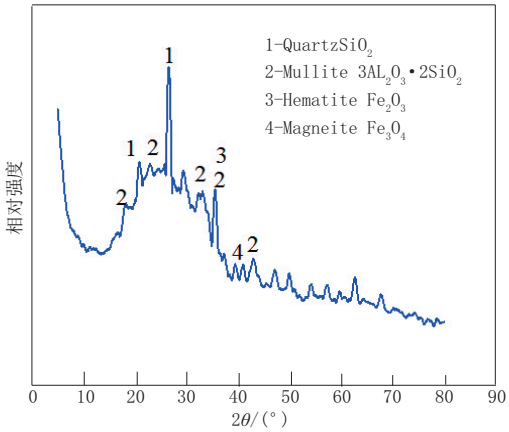


图 4　粉煤灰 XRD 图谱

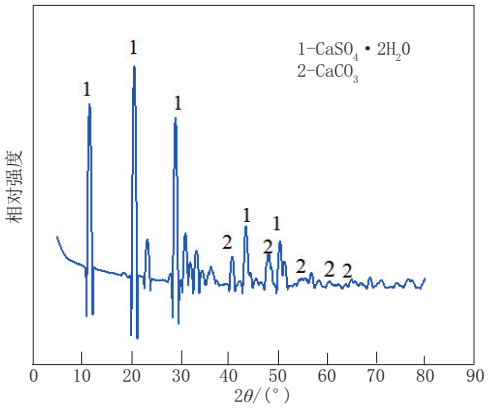


图 5　脱硫石膏 XRD 图谱

通过 XRD 图谱，可以知道钢渣粉的物相矿物主要由硅酸盐矿物（硅酸三钙、硅酸二钙）、钙镁硅酸盐矿物（钙镁橄榄石、钙镁蔷薇辉石）、铁铝酸盐矿物（铁酸二钙）、游离氧化钙（f-CaO）与 RO 固溶体组成；RO 相是 FeO、MgO、MnO 相互固溶生成的复合金属氧化物物相；而粉煤灰的主要矿物为 SiO_2 和 Al_2O_3，次要矿物为 $CaSO_4$、$CaCO_3$ 和 CaO 等，同时含有一定的玻璃相，具有潜在的水化活性。电石渣（见图 6）的主要矿物为 $Ca(OH)_2$，化学组成中 CaO 的含量达到了 91.66%，含有少量的碳酸钙；电石渣的纯度较高。脱硫石膏的主要矿物为 $CaSO_4·2H_2O$。

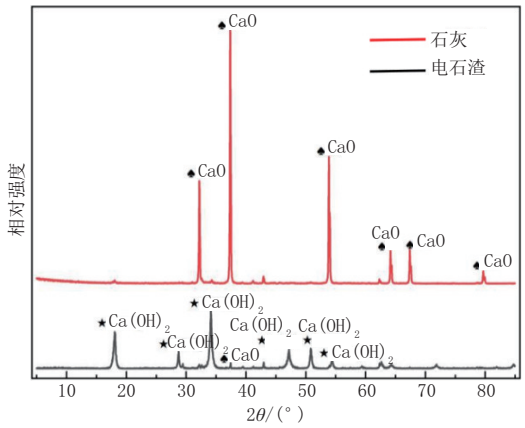


图 6　电石渣 XRD 图谱

（6）原材料粒度分析。采用 Shimadzu SALD-2300 型激光粒度测试仪对原材料矿粉和粉煤灰进行粒径分布分析，结果如图 7、图 8 所示。矿粉的中位粒径为 5.40 μm，平均粒径为 4.91 μm，众位粒径为 19.02 μm，标准偏差为 0.49。粉煤灰的中位粒径为 13.74 μm，平均粒径为 12.89 μm；众数粒径为 19.02 μm，标准偏差为 0.59，粉煤灰的粒径分布较为均匀。

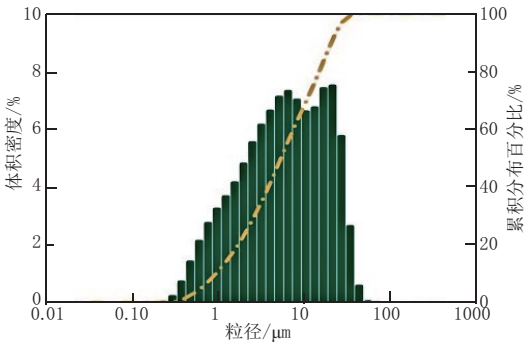


图 7　矿粉粒径分布

3.2　典型工业固废预处理

矿渣粉的活性与粒径尺寸有着显然的关系，随着矿渣粉材料的比表面积增大，晶格将发生缺陷、畸变和无定形化。同时，颗粒的粒径变小，表面的自由能增加，就增加了活性。本文研究了在不同球磨时间下矿渣粉特性的变化。

（1）粉磨细度测试。随着粉磨时间从 10 min 提

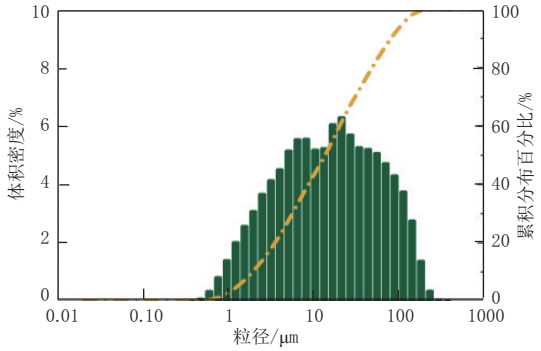


图 8　粉煤灰粒径分布

升到 60 min，矿渣粉的比表面积从 350 m^2/kg 增加到 600 m^2/kg，表明矿渣粉的粒径变得更细，且在 60 min 的球磨过程中，团聚现象不明显，没有影响到矿渣粉的细度。

（2）化学成分测试。粉磨时间对矿渣粉中难磨 Fe_2O_3 的含量不能有效得到改善。

（3）粉磨活性指数测试。随着球磨时间延长，7、28 d 活性逐渐增长，当球磨 10、30、60min，7 d 活性比原矿渣粉分别增长了 13.3%、32.4%、40.9%。但只有球磨 30、60 min 的矿渣粉活性指数 A7 大于 70。当养护至 28 d 龄期时，仍然只有球磨 30、60 min 的矿渣粉活性指数复合 H28 大于 95。

（4）矿物组成分析。矿粉中的活性 SiO_2、Al_2O_3 与 OH^-、SO_4^{2-} 等离子反应生成 C-S-H、C-A-S-H 凝胶。所以，随着球磨时间的延长，矿渣粉的活性逐渐增大。

（5）TGA-DTG 分析。体系中的 C-S-H 凝胶和钙矾石数量随球磨时间的延长逐渐增加，表明矿渣粉球磨时间越长，水化产物含量越多，并且保证了矿渣粉的强度增长越快。

（6）FT-IR 分析。与 TGA-DTG 谱的分析结果一致，表明随着球磨时间的延长，矿渣粉的活性越高，生成的水化产物 C-(A)-S-H 凝胶和 N-A-S-H 凝胶也越多。

4　地聚物注浆材料反应机理分析

4.1　XRD 图谱分析

对不同养护龄期下地聚物注浆料进行 XRD 物相测试与图谱解析，测试图谱如图 9 所示。

由图 9 示 XRD 结果可知，水化龄期 1 d 试样无钙矾石特征衍射峰；伴随养护龄期增长，钙矾石对应衍射峰峰强逐步提升，反映钙矾石生成速率较快，产物生成量随水化进程持续累积。水化初期，C_2S、C_3S、游离 CaO 等熟料矿物发生溶出解离，向液相释放大

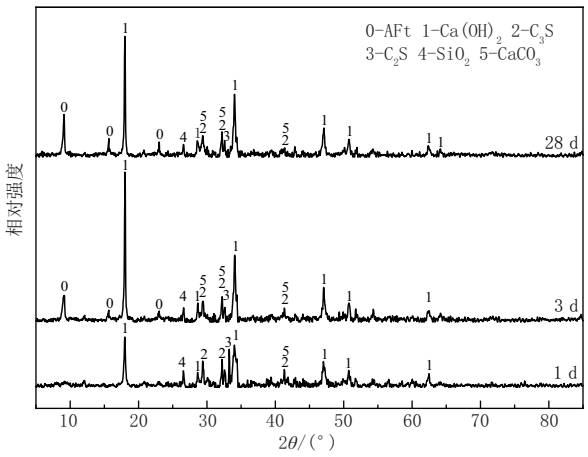


图 9　不同龄期 XRD 图谱分析

量 Ca^{2+}、OH^- 与微量 Al^{3+}、Si^{4+} 离子。随水化反应持续推进，体系液相 Ca^{2+} 浓度不断升高，离子与 OH^- 组合满足氢氧化钙溶度积条件，促使 $Ca(OH)_2$ 结晶析出且固相含量逐步提高。体系内活性 SiO_2、Al_2O_3 继而与 $Ca(OH)_2$ 发生火山灰水化反应，消耗体系中的氢氧化钙，致使其物相含量呈下降趋势。

4.2　热重图谱分析

由热分析曲线（见图 10）可见，试样在近 100℃区间出现吸热特征峰，该吸热效应源于体系内 C-S-H 凝胶、钙矾石结合结晶水受热脱除与物相分解。随养护龄期递增，试样吸热量与吸热反应速率同步提升，其中 28 d 龄期试样热失重幅度最高，1 d 龄期试样失重最低；约 450℃处观测到氢氧化钙特征吸热峰，对应热失重呈现先升后降的变化规律，该结论与前述 XRD 物相分析结果相互印证。综合分析表明，C-S-H 凝胶与钙矾石等水化产物的生成量随养护龄期延长持续富集，反映地聚物注浆料水化反应不断深化，水化产物持续累积是材料力学性能稳步发展的内在诱因。

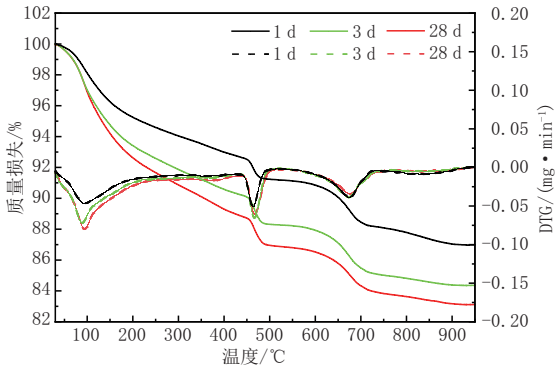


图 10　不同龄期热重图谱分析

5　地聚物注浆处治效果

5.1　施工参数

采用地聚物注浆材料进行钻孔注浆，材料施工

水灰比为35%，注浆泵送压力为0.8 MPa，钻取深度为25 cm（等同于混凝土板厚）。施工完成后需保证裂缝及层间部位填充饱满、密实。

5.2　施工工艺

地聚物注浆修复施工工艺流程如图11所示。

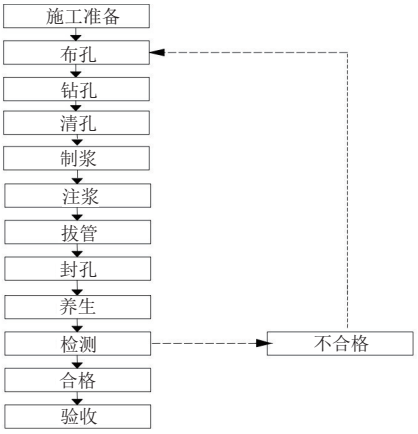


图11　地聚物注浆修复施工工艺流程

5.2　处治效果检测

（1）宏观观测。原有路面存在的错台现象以及行车时产生的晃动感已完全消失。

（2）采用探地雷达法开展无损探测（见图12、图13），对所有补强点位及全路段板块开展复检工作，对比分析补强前后路面承载强度、结构整体性的变化情况，量化评价砂浆补强效果与路面提质成效。依托雷达图谱检测数据进行病害量化分析，该试验段落经注浆修补后，在解决板底脱空及承载力不足等病害方面成效显著，具有明显的改善作用。



图12　探地雷达检测

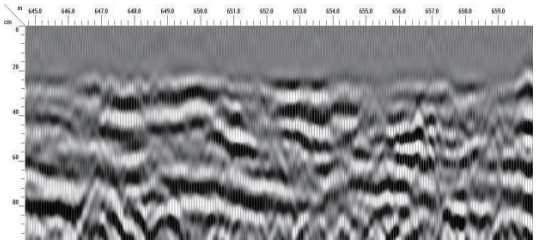


图13　反射波成像

6　结　论

本研究成功以地聚物注浆材料在农村公路水泥混凝土路面养护修复工程得到应用。该材料具有高流动性、早强高强、微膨胀及零泌水等核心性能，优于传统水泥基注浆材料。微观分析显示，该注浆材料的水化产物主要为C-S-H凝胶与钙矾石，且随着龄期不断生成。这确保了材料的强度发展与体积稳定性。

参考文献：

[1] 谢伟民．农村公路病害成因分析及预防性养护技术应用研究[J]．交通世界，2022（15）：112-114.
[2] 张富强．地聚物注浆材料性能研究[D]．西安：长安大学，2021.
[3] 于宗鑫．地聚物注浆技术在高速公路养护工程中的应用[J]．公路交通科技，2022，39（4）：156-160.
[4] 陈成桂．甘肃省陇东黄土地区农村公路病害分析及防治措施[J]．公路交通科技（应用技术版），2021，17（6）：213-215.
[5] 陈旭伟．微裂均质化再生处治技术在旧水泥混凝土路面改造中的应用[J]．城市道桥与防洪，2022（7）：223-225.
[6] 李光富．农村公路路基病害及防治措施[J]．交通世界，2021（28）：106-107.
[7] 卢小燕．农村公路常见病害成因与养护措施研究[J]．工程技术研究，2022，7（10）：156-158.
[8] Paoletti S, et al. Recycling of a Concrete Pavement after over 80 Years in Service[J]. Materials, 2020, 13(11): 2467.
[9] Mokoena M M. Incorporation of Recycled Concrete Aggregates as Road Pavement Material in South Africa[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 396: 136289.
[10] Kim J H, et al. Experimental Case Study of Recycled Aggregate Concrete Pavement Construction[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2025, 26(3): 456-468.
[11] Yang X, et al. Behavioral Analysis of Rigid Pavements Utilizing Recycled Base Layers[J]. Sustainability, 2023, 15 (3): 2145.
[12] Jones D R, et al. Recycled Materials and Byproducts in Highway Applications[R]. FHWA, 2013.
[13] Smith J W. Concrete Recycling: A Sustainable Solution for Road Infrastructure[J]. Construction and Building Materials, 2025, 382: 130987.
[14] 钟训．绿色低碳技术在“四好农村路”养护中的应用探讨[J]．交通建设与管理，2023（2）：89-91.
[15] 赵剑益．农村公路水泥混凝土路面病害及养护措施研究[J]．四川建材，2022，48（3）：156-157.
[16] 刘先锋．农村公路水泥混凝土路面病害原因分析及防治技术研究[J]．交通世界，2021（34）：118-119.
[17] 王燕霞．农村公路水泥混凝土路面裂缝病害分析与对策[J]．公路交通科技（应用技术版），2022，18（3）：201-203.
[18] 王燕霞．农村公路水泥混凝土路面裂缝病害分析与对策[J]．工程技术研究，2022，7（8）：145-147.
[19] 雷静瑶．水泥混凝土路面病害成因分析及针对性修复措施研究[J]．四川建材，2023，49（1）：159-160.