

非开挖注浆技术在机场道面维修中的对策研究

班越¹ 王一² 周颖东³

1. 重庆城市职业学院 2. 中煤科工重庆设计研究院有限公司

3. 重庆荣成建设工程质量检测有限公司

摘要 随着民航业的快速发展,机场道面的使用频率也越来越高,导致机场道面的破损率也大大增加,使得机场的维修次数也越发频繁。如何在保障机场道面正常维修前提下,又不会影响飞机的正常起降,非开挖注浆技术提供了一种解决思路。通过分析机场道面病害的特点及成因,结合非开挖注浆技术在机场道面维修中的机理分析,探讨了非开挖注浆技术处治机场道面病害的技术优势。根据非开挖注浆技术工程实例应用,利用重锤式弯沉仪(HWD)和探地雷达(GPR)对注浆前后机场道面段弯沉值和路面承载能力进行检测,用于分析和评价注浆效果。结果表面,非开挖注浆技术能够快速、高效的解决边起降边施工状态下机场道面唧泥、板底脱空、沉陷、错台等病害,对机场道面病害的快速处治有良好的效果。

关键词 非开挖注浆;道面维修;弯沉值;承载能力

DOI <https://doi.org/10.6938/iie.070102> **文章编号** 2664-5327.2025.0701.13-21

收文记录 收文:2024年10月27日;修改:2024年11月28日;发表:2025年1月31日。

引用本文 班越,王一等.非开挖注浆技术在机场道面维修中的对策研究[J].产教融合研究,2025,7(1):13-21. <https://doi.org/10.6938/iie.070102>.

产教融合研究 ISSN 2664-5327 (print), ISSN 2664-5335 (online), 第7卷第1期,2025年2月出版, <https://iie.hk>, <https://cpcl.hk>, 电子信箱: wtocom@gmail.com, kyjysz@163.com。

Research on Countermeasures of Non excavation Grouting Technology in Airport Pavement Maintenance

Yue BAN¹, Yi WANG², Yingdong ZHOU³

1.Chongqing City Vocational College, Chongqing 402160; 2. Middling Coal Science and Technology Chongqing Design and Research Institute Co.Ltd., Chongqing 400000; 3. Chongqing Rongcheng Construction Engineering Quality Inspection Co.Ltd., Chongqing 401120

Abstract With the rapid development of the civil aviation industry, the frequency of airport runway use has significantly increased, leading to higher rates of runway damage and more frequent maintenance. Ensuring proper maintenance of airport runways without disrupting aircraft takeoffs

and landings is a critical challenge. Non-excavation grouting technology offers a viable solution. By analyzing the characteristics and causes of airport pavement issues, this paper explores the technical advantages of non-excavation grouting technology in addressing these problems, based on its mechanism in airport pavement maintenance. Through engineering applications, heavy hammer deflectometer (HWD) and ground-penetrating radar (GPR) were used to measure the deflection values and pavement bearing capacity before and after grouting. This analysis evaluates the effectiveness of the grouting process. Results show that non-excavation grouting technology can effectively and efficiently address issues such as mud pumping, slab bottom detachment, subsidence, and misalignment of airport pavement during takeoff, landing, and construction. It proves to be highly effective in the rapid repair of airport pavement diseases.

Keywords non excavation grouting; Road surface maintenance; Deflection value; carrying capacity

Cite This Article Yue BAN, Yi WANG, et al. (2025). Research on Countermeasures of Non excavation Grouting Technology in Airport Pavement Maintenance. *Integration of Industry and Education*, 7(1):13-21. <https://doi.org/10.6938/iee.070102>

© 2025 The Author(s) 产教融合研究 *Integration of Industry and Education*, ISSN 2664-5327 (print), ISSN 2664-5335 (online), Volume 7, Issue 1, published on 31 January 2025, by Creative Publishing Co., Limited, <https://iee.hk>, <https://cpcl.cc>, E-mail: wtocom@gmail.com, kycbshk@gmail.com.

引言

机场道面是飞机起降的重要基础设施，其质量状况直接关系到飞行安全。在长期的使用过程中，机场道面会因飞机荷载、气候变化、地基沉降等多种因素的影响而出现唧泥、板底脱空、沉陷、错台等损坏现象。传统的机场道面维修方法，如开挖换板等，虽然技术成熟，但存在施工周期长、对机场正常运营干扰大、维修成本高等问题。非开挖注浆技术的出现为机场道面维修提供了一种新的解决方案，它能够在不破坏道面原有结构的基础上，对道面下的基层和底基层进行加固和修复，有效提高道面的承载能力和使用性能。

一、非开挖注浆技术原理

非开挖注浆技术是通过向机场道面下的土体或基层中注入特定的浆液，利用浆液的填充、渗透、挤密和胶结等作用，改善土体或基层的物理力学性质，提高其强度、刚度和稳定性。浆液在压力作用下，能够渗透到土体或基层的孔隙、裂隙中，填充其中的空洞，使松散的颗粒胶结在一起，形成一个整体的加固层。同时，浆液的注入还可以对土体或基层产生一定的挤密作用，减小其孔隙率，提高其密实度。

常用的注浆浆液有水泥浆液、水泥-水玻璃浆液、高聚物浆液等。水泥浆液具有材料来源广泛、成本低、强度高优点，适用于对强度要求较高的土体或基层加固；水泥-水玻璃浆液具有凝结时间可调、可灌性好等特点，能够在较短时间内形成强度，适用于抢险加固工程；高聚物浆液则具有粘度低、可灌性强、对细微裂隙和孔隙的渗透效果好，高聚物混合发生化学反应，体积

迅速膨胀并形成泡沫状固体，从而达到填充脱空和加固地基的目的。

二、非开挖注浆技术施工工艺流程

1. 道面检测与评估

在进行非开挖注浆施工前，首先需要对机场道面的损坏情况进行全面检测和评估。采用探地雷达、重锤式弯沉仪等设备对道面的结构层厚度、基层强度、脱空情况等进行检测，确定需要注浆加固的区域和范围，并根据检测结果制定详细的注浆施工方案。

2. 注浆孔布置

根据道面检测结果和施工方案，在道面上合理布置注浆孔。注浆孔的间距一般根据道面损坏程度、基层性质和浆液扩散半径等因素确定，通常在 1-5m 之间。注浆孔的直径一般为 10-30mm，深度应穿透道面基层，到达需要加固的土层或基层底部。

3. 钻孔

采用专用的钻孔设备在道面上进行钻孔作业。钻孔过程中应严格控制钻孔的垂直度和深度，避免钻孔偏斜或过深对道面结构造成破坏。钻孔完成后，应及时清理孔内的碎屑和灰尘，确保注浆通道畅通。

4. 浆液配制

按照设计要求的浆液配比，在施工现场配制注浆浆液。配制过程中应严格控制各种原材料的用量和搅拌时间，确保浆液的均匀性和稳定性。对于水泥浆液，应先将水泥和水按照一定比例加入搅拌机中搅拌均匀，然后根据需要加入适量的外加剂，如早强剂、减水剂等，以改善浆液的性能。

5. 注浆施工

将配制好的浆液通过注浆泵注入注浆孔中。注浆过程中应控制注浆压力和注浆速度，一般注浆压力控制在 0.5-2.0MPa 之间，注浆速度根据浆液的扩散情况和道面的承受能力进行调整。当注浆孔周围出现冒浆现象或注浆压力达到设计终压且稳定一定时间后，停止注浆，并及时封堵注浆孔。

6. 开放交通

对于高聚物注浆一般不需要养护，为防止雨水侵蚀，破坏机场道面，并保持整体形象，使用密封胶把注浆孔封住。使用密封胶时需对其加热，并且温度控制在 210°C 以下。灌注密封胶时要使密封胶略低于机场道面，如果高出机场道面，使用工具将其整平；使用铁刷对注浆孔及污染进行处理，清扫施工垃圾，清扫环境后，施工作业区内车辆要有序地快速撤离施工作业区并且开放交通。

高聚物注浆技术施工流程如下：交通控制 → 注浆路段定位 → 标记注浆孔位置 → 注浆前检测 → 钻孔 → 安装注射帽 → 注浆 → 注浆后检测 → 封孔 → 清扫环境 → 开放交通。

三、非开挖注浆技术质量控制要点

1. 原材料质量控制

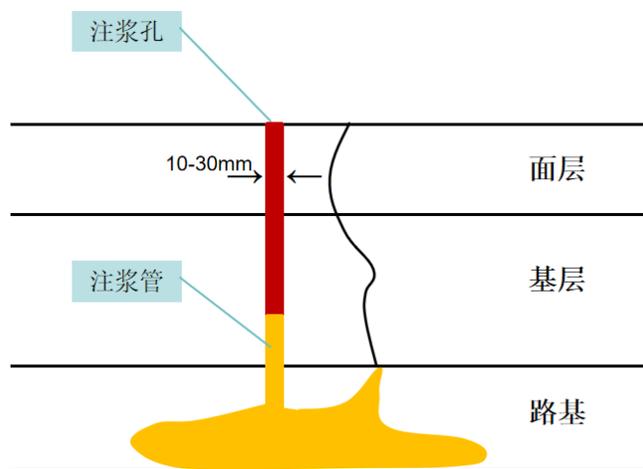


图1 注浆结构示意图

确保注浆浆液所用的水泥、水玻璃、化学药剂等原材料质量符合设计要求。对原材料进行严格的进场检验，检查其质量证明文件、物理化学性能指标等，严禁使用不合格的原材料。

2. 注浆参数控制

严格控制注浆压力、注浆速度、浆液配比等注浆参数。注浆压力过高可能导致道面隆起或破坏，过低则无法保证浆液的有效扩散和加固效果；注浆速度过快可能引起浆液流失或不均匀扩散，过慢则会延长施工周期。在施工过程中，应根据道面的实际情况和浆液的扩散情况实时调整注浆参数，确保注浆质量。

3. 注浆过程监控

在注浆过程中，应采用压力传感器、流量计等设备对注浆压力、注浆量等进行实时监控。及时记录注浆数据，分析注浆过程中的异常情况，如注浆压力突然升高或降低、注浆量过大或过小等，并采取相应的处理措施。同时，应观察道面的变化情况，如是否出现隆起、裂缝等现象，一旦发现问题应立即停止注浆并进行处理。

4. 注浆效果检测

注浆施工完成后，应采用多种检测方法对注浆效果进行检测。如采用探地雷达检测浆液的扩散情况和加固范围，采用重锤式弯沉仪检测道面的承载能力是否得到提高，通过钻孔取芯观察浆液在土体或基层中的填充和胶结情况等。根据检测结果评估注浆效果，如发现注浆效果未达到设计要求，应及时进行补注或采取其他补救措施。

四、非开挖注浆技术在机场道面维修中存在的问题与对策

1. 浆液扩散不均匀问题

在注浆过程中，由于道面基层的不均匀性和复杂性，可能会出现浆液扩散不均匀的情况，导致部分区域加固效果不佳。

对策：在施工前进行详细的道面检测和地质勘察，了解基层的结构和性质，合理调整注浆孔的间距和深度，优化注浆参数，采用分段注浆、间歇注浆等方法，提高浆液的扩散均匀性。同时，在浆液中添加适量的分散剂或增稠剂，改善浆液的流变性能，促进其均匀扩散。

2. 道面隆起或开裂问题

注浆压力控制不当或浆液注入量过多时，可能会引起道面隆起或开裂，影响道面的平整度和使用性能。

对策：严格按照设计要求控制注浆压力和注浆量，在注浆过程中密切观察道面的变化情况，设置预警值，一旦道面隆起或开裂达到预警值，立即停止注浆并调整注浆参数。采用低压慢注、分层注浆等工艺，减少浆液对道面的抬升作用。对于已经出现隆起或开裂的道面，应及时进行修复处理，如采用切割、打磨等方法恢复道面的平整度。

3. 对机场运营影响问题

虽然非开挖注浆技术相对传统开挖维修方法对机场运营影响较小，但在施工过程中仍可能会对机场的正常航班起降、滑行等造成一定的干扰。

对策：合理安排施工时间，尽量选择在机场航班流量较小的时段进行施工，如夜间或凌晨。加强与机场管理部门和航空公司的沟通协调，提前制定施工计划和航班调整方案，确保施工过程中机场运营的安全和顺畅。同时，采用高效、快速的施工设备和工艺，缩短施工周期，减少对机场运营的影响时间。

五、工程案例

以重庆永川区某机场为例，该机场经过多年的使用，道面出现了大面积的脱空和局部沉降等问题。特别是在跑道的着陆区和滑行道的交叉区域，病害较为严重。传统的开挖维修方式不仅会对机场运营造成巨大影响，而且成本高昂、工期较长，下面通过非开挖注浆技术进行维修。



图 2 道面现状

1. 检测评估阶段

首先采用探地雷达对道面结构进行全面扫描。探地雷达能够清晰地显示出道面各结构层的厚度以及是否存在脱空区域。通过检测发现，道面基层在部分区域存在明显的脱空，脱空层厚度

在 5-15 厘米不等。同时，利用重锤式弯沉仪对道面的承载能力进行评估，确定了需要重点加固的区域。重锤式弯沉仪（HWD）通过计算机控制下的液压系统提升并下落一重锤，对机场道面施加脉冲荷载。荷载的大小通过改变锤重和提升高度可在相当大的范围内调整，并通过刚性圆盘作用到机场道面上。机场道面的变形由若干个传感器测定。

由于 HWD 测速快（每测点约 40 秒），精度高（分辨率为 1 微米），并较好地模拟了行车荷载的动力作用，目前被认为是较为理想的无损检测设备。特别是 HWD 能够准确测定多点弯沉，从而为机场道面结构反分析提供了基础。

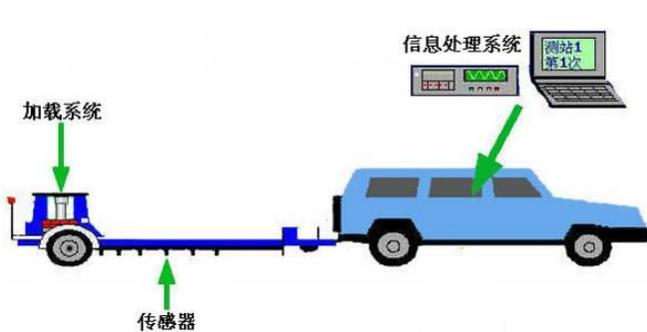


图3 重锤式弯沉仪（HWD）系统构成

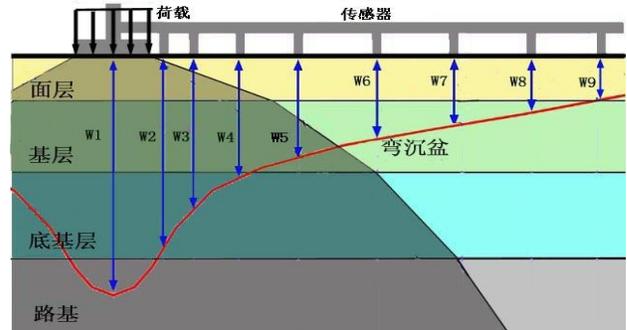


图4 重锤式弯沉仪（HWD）工作原理

2. 注浆孔布置与钻孔阶段

根据检测结果，按照梅花形布置注浆孔，注浆孔间距为 1.5-2 米。钻孔直径为 30 毫米，深度根据基层厚度和脱空情况确定，最深达到 60 厘米。在钻孔过程中，使用高精度的钻孔设备，严格控制钻孔的垂直度，误差控制在 1% 以内，以确保浆液能够顺利注入目标区域。

3. 浆液配制与注浆阶段

考虑到机场道面对于强度和耐久性以及快速开放交通的要求，选用高分子聚合物进行注浆。这种浆液的初凝时间可以通过调整水和高聚物的比例来控制，在现场配制时，根据环境温度和施工进度要求，将初凝时间控制在 3-5 分钟。注浆压力控制在 1.0-1.5MPa 之间，注浆速度根据浆液的扩散情况进行动态调整。当观察到注浆孔周围出现少量冒浆时，适当降低注浆速度，继续注浆直到注浆压力稳定在终压值并保持 3-5 分钟后停止注浆。利用 HWD 或 GPR 对注浆路段进行检测，根据检测结果对注浆不足点进行补注（见图 5）。

4. 应用效果

经过非开挖注浆维修后，通过探地雷达再次检测发现，脱空区域得到了有效的填充，浆液在基层中的扩散范围符合设计要求。弯沉值检测表明，道面的承载能力得到了显著提高，平均弯沉值降低了 40% 左右，基本均分布在 200-300um。道面承载能力 ISM 值由 1867kN/mm 提高到了 2189kN/mm，提高比例达到了为 10%。道面脱空系数在注浆前全部大于 2、注浆后降低到了 1.5、基本消除了道面脱空状况。通过一段时间的使用，积泥情况得到有效了有效改善。在后续的机场运营中，经过维修的道面区域未出现明显的病害复发情况，保障了机场的正常运营。（见图 6、图 7）。



图5 注浆后道面

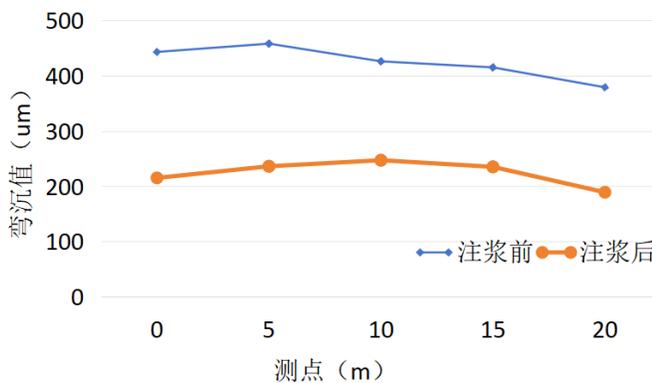


图6 注浆前后弯沉对比图

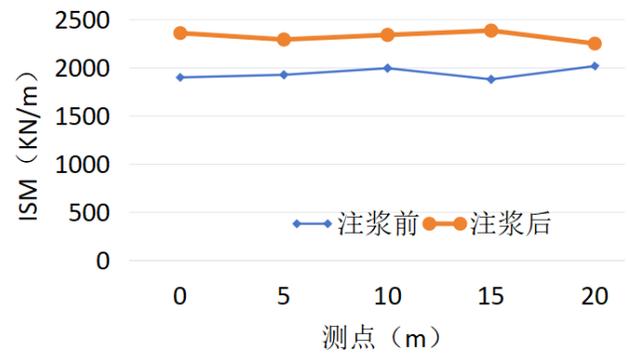


图7 注浆前后ISM对比图

六、结论与展望

非开挖注浆技术作为一种高效的机场道面维修方法，在解决机场道面唧泥、板底脱空、沉陷、错台等病害方面具有显著优势。

通过本文的研究与工程实例分析，可以得出以下结论：非开挖注浆技术能够在不破坏道面原有结构的前提下快速修复病害，提高道面的承载能力和整体稳定性；通过合理设计注浆施工方案，选用适宜的注浆材料和参数控制方法，可以有效解决浆液扩散不均、道面隆起等技术难题，显著提升维修效果；非开挖注浆技术相比传统的开挖维修方法，具有施工周期短、成本低、对机场运营影响小等优势，特别适用于机场这种对施工时间和精度要求较高的场景。

尽管非开挖注浆技术已经取得了显著成效，但其在应用过程中仍然存在一些亟需解决的问题，同时也有广阔的研究和改进空间。以下是对未来技术发展的几点展望：

1. 新型注浆材料的研发与应用。现有的注浆材料虽然能够满足大部分维修需求，但在耐久性、环保性和适应性等方面仍有改进空间。未来的研究可以关注以下方向：开发更加绿色环保的注浆材料，减少施工对环境的影响。提高材料的抗冻融性能和长期稳定性，以适应不同地区和气候条件的需求。研发智能自适应材料，使其在注浆过程中能够根据基层条件自动调节性能。

2. 智能化施工与监测技术。随着传感器技术、人工智能和大数据技术的发展,非开挖注浆技术的智能化施工与实时监测将成为趋势。利用传感器网络和物联网技术,实现施工过程的实时监测和参数调整。应用人工智能算法分析道面病害特征,优化注浆方案,提高施工效率和精度。开发智能注浆设备,实现自动化施工,减少人工干预,提升施工质量。

3. 长期性能监测与评估。非开挖注浆技术的效果往往需要通过长期的使用来检验,因此,加强道面加固后的性能监测与评估是未来研究的重要方向。开展长期跟踪监测,收集道面在不同荷载和气候条件下的性能数据。研究浆液与基层材料的长期相互作用机理,为优化材料配方和施工工艺提供理论依据。开发新的评估指标和检测方法,更全面地反映注浆加固后的道面性能。

4. 国际技术合作与标准化建设。机场道面维修是一个全球性的技术课题,各国在非开挖注浆技术方面积累了丰富的经验。未来,可以加强国际合作,借鉴先进技术和标准,提升我国非开挖注浆技术的国际竞争力。加强与国际相关组织和科研机构的合作,开展联合研究项目。推动技术标准化建设,制定统一的注浆技术规范和质量评估标准,规范行业发展。

5. 应用推广与市场前景。非开挖注浆技术的成功应用为机场道面维修提供了一种高效可行的解决方案,其潜在的市场价值和推广空间也非常广阔。通过政策支持和宣传推广,加速非开挖注浆技术在全国机场的应用。探索其在其他交通基础设施(如高速公路、城市道路)中的应用潜力,拓宽技术适用范围。结合工程实例开展技术培训和经验分享,提高施工企业的技术水平和执行能力。

总之,非开挖注浆技术在机场道面维修中的应用是一个不断发展的领域。通过持续的技术创新和经验总结,结合智能化和绿色化的发展方向,该技术将为我国乃至全球机场道面维修提供更加优质、高效的服务,助力民航业的可持续发展。

[责任编辑:黄欣 邮箱 wtocom@gmail.com]

基金项目 1. 重庆市教委科学技术研究计划项目(KJQN202303908); 2. 重庆市永川区科技局自然科学基金计划资助项目(2023yc-jckx20083); 3. 重庆城市职业学院科研项目(XJKJ202202006)。

作者简介 班越,男,1993年1月出生,安徽省六安市霍邱县人,重庆城市职业学院航空学院老师,研究方向为交通运输工程。通讯地址:重庆市永川区兴龙大道1099号,邮政编码:402160, Email: 1261214069@qq.com, <https://orcid.org/0009-0007-3772-8520>。

参考文献

- [1] 秦鹏飞. 高聚物注浆技术及其应用研究[J]. 郑州: 河南科技学院学报, 2024:05.
- [2] 周帅. 机场水泥混凝土道面维修技术研究[J]. 山西, 太原: 城市建筑空间, 2023:09.
- [3] 胡辉, 张桂深, 杨扬. 浅谈机场道面混凝土质量缺陷的施工工艺控制[J]. 建筑与预算, 2021:09.
- [4] 刘海滨. 机场水泥混凝土道面常见通病及施工措施[J]. 设备管理与维修, 2020:12.
- [5] 吕锡平, 张荣利, 李善强. 高聚物注浆技术在复合式路面改扩建工程病害处治中的应用[J]. 广东公路交通, 2020:02-0018.
- [6] 范金鹏. 浅析机场刚性跑道道面病害成因及维修方案[J]. 工程技术, 2019(5):055.
- [7] 苏昌建. 浅谈高聚物注浆在机场场道工程中的应用[J]. 河南建材, 2019:02-184.
- [8] 张鑫. 机场水泥混凝土道面大面积破损处置方案分析[J]. 建筑工程技术与设计, 2018:03.

- [9] 凌道盛, 张凡, 赵云等. 飞机荷载作用下非均匀道基动力响应分析 [J]. 土木工程学报, 2017, 50(02):97-109.
- [10] 张献民, 董倩, 吕耀志. 飞机主起落架构型对道面力学响应的影响 [J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(04):675-681.
- [11] 吕耀志, 董倩, 胡春飞等. 跑道动荷载与国际平整度指数关系研究 [J]. 中外公路, 2013, 33(03):74-77.
- [12] 林小平, 凌建明, 蒋作舟. 多轮荷载作用下跑道加铺层的力学响应分析 [J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(01):17-21.
- [13] 乐建新. 机场水泥混凝土道面开裂机理理论研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.