

文章编号:1671-1637(2026)08-0088-14

面向飞机重载的机场聚氨酯混凝土道面加铺及其适用性

徐 凌¹, 赵咨泮², 刘诗福³, 王书易¹, 肖飞鹏³, 赖元文^{*1}

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116; 2. 明尼苏达大学 土木环境与工程学院,
明尼苏达 明尼阿波利斯 55414; 3. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘 要:为有效延缓机场沥青加铺道面的轮辙和修补水泥道面的表面损害,开展了基于聚氨酯混凝土的机场道面加铺技术及其适用性研究。通过不同养生温度下的力学性能测试,评估了不同时序下的热固特性与不停航施工潜力;基于CT扫描定量分析了聚氨酯混凝土复合试件的孔隙分布特征;联合光纤光栅传感器布设,开展了基于MLS66的70万次全尺寸加速加载试验;通过车辙曲线采集、表面与层间性能测试,分析了聚氨酯混凝土道面车辙变形产生机理与层间破坏模式。研究表明:提升养生温度显著加快了聚氨酯胶结料固化速率与混凝土强度形成效率;聚氨酯混凝土具备小体积、高密度的孔隙特征及更优的孔隙球度与紧密度;经70万次轮碾后,聚氨酯胶结料刚性骨架与弹性胶结体系呈现独特的“W”形车辙变形,其高弹性与高交联密度使荷载侧向传递并触发回弹效应;相比纵向应变,其横向应变对车轮载荷更敏感,左右轮车辙直接影响面积分别达963 mm²和771 mm²;其抗滑性能与宏观纹理保留良好,界面黏结强度优于水泥混凝土自身抗剪强度。基于全尺寸加速加载试验的聚氨酯混凝土道面车辙形成机理与动态力学响应特征分析,可为机场道面加铺与不停航施工提供技术支撑。

关键词:机场工程;聚氨酯混凝土;加速加载试验;机场道面运维;道面修补;机场道面加铺

中图分类号:U8 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.238

Polyurethane concrete overlay and its applicability for airport pavement under heavy aircraft loading

XU Ling¹, ZHAO Zi-feng², LIU Shi-fu³, WANG Shu-yi¹, XIAO Fei-peng³, LAI Yuan-wen^{*1}

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, Fujian, China; 2. Department of Civil, Environmental, and Geo-engineering, University of Minnesota, Minneapolis 55414, Minnesota, USA; 3. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To effectively delay rutting in asphalt overlays of airport pavement and surface damage in repaired cement pavement, a study was carried out on airport pavement overlay technology based on polyurethane concrete and its applicability. Mechanical property tests at different curing temperatures were conducted to evaluate thermosetting characteristics and the potential for construction without

出版历程:2025-12-07收稿,2026-01-27修回,2026-03-23录用

基金项目:国家自然科学基金项目(51861145402)

作者简介:徐 凌(1997-),男,浙江金华人,副教授,工学博士,E-mail:lxu@fzu.edu.cn。

*通信作者:赖元文(1981-),男,福建龙岩人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:laiyuanwen@fzu.edu.cn。

引用格式:徐 凌,赵咨泮,刘诗福,等.面向飞机重载的机场聚氨酯混凝土道面加铺及其适用性[J].交通运输工程学报,2026,26(8):88-101.

Citation: XU Ling, ZHAO Zi-feng, LIU Shi-fu, et al. Polyurethane concrete overlay and its applicability for airport pavement under heavy aircraft loading[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(8): 88-101.

suspending flight operations at different time stages. The pore distribution characteristics of polyurethane concrete composite specimens were quantitatively analyzed based on CT scanning. A 700 000-cycle full-scale accelerated loading test based on MLS66 was conducted in combination with fiber Bragg grating sensor deployment. Through rutting curve acquisition and surface and interlayer performance tests, the formation mechanism of rutting deformation and the interlayer failure mode of polyurethane concrete pavement were analyzed. Research results indicate that increasing the curing temperature significantly accelerates the curing rate of polyurethane binder and the formation efficiency of concrete strength. Polyurethane concrete has small-volume, high-density pore characteristics and better pore sphericity and compactness. After 700 000 wheel rolling cycles, the rigid skeleton and elastic binder system of polyurethane binder present unique W-shaped rutting deformation, and its high elasticity and high crosslinking density cause lateral load transfer and trigger a rebound effect. Compared with longitudinal strain, its transverse strain is more sensitive to wheel load, and the directly affected areas of the left and right wheel ruts reach 963 mm^2 and 771 mm^2 , respectively. Its skid resistance and macrotexture are well retained, and its interfacial bonding strength is higher than the shear strength of cement concrete itself. Analysis of the rutting formation mechanism and dynamic mechanical response characteristics of polyurethane concrete pavement based on full-scale accelerated loading tests can provide technical support for airport pavement overlay and construction without suspending flight operations.

Keywords: airport engineering; polyurethane concrete; accelerated loading test; airport pavement operation and maintenance; pavement repair; airport pavement overlay

Publication history: Received 2025-12-07; Received in revised form 2026-01-27; Accepted 2026-03-23

Funding: National Natural Science Foundation of China (51861145402)

* **Corresponding author:** LAI Yuan-wen, professor, PhD, E-mail: laiyuanwen@fzu.edu.cn.

0 引言

机场道面的性能优劣直接影响飞机起降安全与机场运营效率^[1]。随着航空业蓬勃发展,机场面临飞机载荷等级、起降频次与飞行量的大幅提升,在重复重载作用下,机场道面性能会随服役时间逐步衰减^[2]。叠加外界环境侵蚀^[3-4],机场水泥混凝土道面不可避免地会出现裂缝、麻面、坑槽等表层病害^[5]。此类病害若未及时修复,不仅会导致道面平整度与抗滑性能衰减^[6],还可能加剧飞机轮胎磨损,引发起落架冲击损伤,直接威胁飞行安全。当前机场水泥混凝土道面修补技术存在技术局限:水泥基修补材料需长达数天的养生周期,必然导致航班起降受限,与机场不停航施工需求冲突;沥青混凝土加铺虽可以缩短工期,但在飞机重载与温度应力耦合作用下,易产生车辙、推移等二次病害,难以保障长期效果^[7]。因此,开发兼具快凝早强、耐久性强、与机场重载适配的新型修补材料,已成为机场道面运维领域的迫切需求^[8-9]。

聚氨酯混凝土(Polyurethane Concrete, PUC)

以其工程性能优势,为机场道面修补提供了新路径^[10],近年来在功能性路面领域的研究与应用逐步深入^[11]。研究表明,聚氨酯混凝土已应用于多孔聚氨酯混凝土^[12]、开级配抗滑表层、自应力除冰混合料和多孔弹性路面等场景中。Chen等^[13]制备的AC-13型聚氨酯混凝土因导热性与比热容优势,在寒区道面除冰防冻中表现出优良的工程性能,同时其凭借高弹性与大空隙特性,较开级配抗滑磨耗层可有效降低振动噪声8 dB。Cong等^[14]证实相同级配下多孔聚氨酯混凝土的疲劳寿命与马歇尔稳定性显著高于多孔沥青混合料。Lu等^[15]试验表明,聚氨酯黏结透水混合料抗拉/抗压强度提升显著,肯塔堡损失值降低40%,且在循环载荷下表现出低永久变形、高弹性模量的优异蠕变特性。新型多孔聚氨酯路面通过掺加废轮胎橡胶颗粒,空隙率可达40%,进一步强化了路面的弹性与抗裂性能^[16]。Xu等^[17]通过X射线扫描试验,揭示骨料形状与级配对聚氨酯混凝土的孔隙抗堵塞性能起决定性作用。但现有研究存在一定局限,绝大多数研究聚焦公路场景^[18-19],未针对机场重载特性开展针对性研究。

因此,本文以机场重载水泥混凝土道面表层快速修补为核心目标,系统开展聚氨酯混凝土性能优化与应用研究,结合机场不停航施工特点建立“固化速率-力学性能”关联模型,开展材料强度与养生温度的匹配;通过CT扫描表征内部孔隙分布等微观特征,揭示内部结构参数对宏观力学性能的影响规律;采用全尺寸加速加载试验模拟机场重载循环工况,阐明聚氨酯混凝土加铺层车辙形成机理与力学响应特征,为机场道面加铺层病害防控和机场不停航施工提供技术支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 聚氨酯胶结料

本研究采用的聚氨酯包含由多元醇组成的柔性软链段和由异氰酸酯与扩链剂交替连接形成的刚性硬链段,多元醇采用聚醚丙二醇(Polypropylene Glycol, PPG),异氰酸酯组分采用4,4'-二苯基甲烷二异氰酸酯(Methylenediphenyl Diisocyanates, MDI),扩链剂采用1,4-丁二醇(Butanediol, BDO)。表1为采用的聚氨酯胶结料固化后的基本性能。

表1 聚氨酯胶结料固化后的基本性能

Table 1 Basic performance of cured polyurethane binder

试验项目	性能参数	试验规范
拉伸强度(25℃)/MPa	≥15	《塑料 拉伸性能的测定 第1部分:总则》(GB/T 1040.1—2025)
断裂伸长率(25℃)/%	≥30	
热固性(300℃)	不熔化	《道路与桥梁铺装用环氧沥青材料通用技术条件》(GB/T 30598—2014)
吸水率/%	≤0.3	《塑料 吸水性的测定》(GB/T 1034—2008)

1.1.2 集料

本研究采用的粗集料公称粒径为4.75~9.50 mm,性能见表2。试验方法与性能参数分别依据中国《公路工程集料试验规程》(JTG 3432—2024)与《公路钢桥面聚酯型聚氨酯混凝土铺装技术指南》(T/CHTS 10033—2021)确定。试验所用的天然砾石由某机场改扩建工程的集料供应商供应,其颗粒级配、表观密度、压碎值等指标均满足机场道面集料要求,表面与聚氨酯胶结料的高黏结性能结合良好。细集料的公称粒径为0~4.75 mm,选用天然河砂材料,材料性能见表3。各类集料采用水洗、风干后用塑料袋密封包装,保持洁净、干燥、无杂质。

表2 聚氨酯混凝土粗集料性能

Table 2 Properties of coarse aggregate for polyurethane concrete

试验项目	性能要求	试验方法
表观相对密度/(g·cm ⁻³)	≥2.4	T0304
吸水率/%	≤2.0	T0304
含水率/%	≤0.3	T0305
坚固性/%	≤12	T0340
压碎值/%	≤20	T0316
泥土杂物含量(冲洗法)/%	≤1.0	T0310
针片状颗粒含量/%	≤5.0	T0312
洛杉矶磨耗/%	≤26.0	T0317
磨光值PSV	≥42	T0321

表3 聚氨酯混凝土细集料性能

Table 3 Properties of fine aggregate for polyurethane concrete

试验项目	性能要求	试验方法
表观相对密度/(g·cm ⁻³)	≥2.4	T0304
吸水率/%	≤2.0	T0304
含水率/%	≤0.3	T0305
坚固性(大于0.3部分)/%	≤12	T0340

1.1.3 配合比设计

鉴于聚氨酯混凝土机场路面加铺技术仍处于探索阶段^[20-21],依据中国《公路钢桥面聚酯型聚氨酯混凝土铺装技术指南》(T/CHTS 10033—2021),采用PUM-10推荐级配进行配合比设计(表4)。以混凝土抗压强度为控制指标确定最佳胶石比,以集料质量的16%作为聚氨酯胶结料的添加量。

表4 聚氨酯混凝土推荐级配

Table 4 Recommended gradation of polyurethane concrete

筛孔孔径/mm	通过率/%	推荐范围/%
13.200	100.0	100
9.500	100.0	95~100
4.750	74.2	60~88
2.360	50.3	41~72
0.600	31.6	15~50
0.300	13.3	6~22
0.150	6.6	3~10
0.075	3.2	0~6

1.2 试验方法

1.2.1 聚氨酯胶结料拉伸试验

以5 mm·min⁻¹的速率匀速拉伸试样直至试样发生断裂,测试温度为25℃,记录屈服时的载荷。拉伸强度取3个平行试件的算术平均值作为最终结果,其计算式为

$$\sigma_t = \frac{p}{bd} \tag{1}$$

式中:σ_t为拉伸强度,t为拉伸时间;p为最大载荷;b

为试样宽度; d 为试样厚度。

1.2.2 聚氨酯混凝土抗压试验

采用万能试验机系统,测试温度为 25°C ,记录无侧限约束下的轴向抗压强度,取3个平行试件的算术平均值作为最终结果。

1.2.3 CT扫描

采用德国YXLON公司的Precision II型X射线CT扫描系统,对聚氨酯混凝土复合试件进行扫描重构。扫描过程试验参数设置为管电压205 kV、管电流35 mA、垂直扫描间隔0.09 mm、水平扫描间隔

0.002 mm,分辨率为 $2\,048\text{像素}\times 2\,048\text{像素}$ 。

1.2.4 传感器布设与施工方案

图1(a)为加速加载试验场的道面结构示意图,试验场宽度为200 cm、长度为280 cm,以40 cm厚水泥混凝土表层铣刨后的基面作为基础,其上加铺3 cm聚氨酯混凝土面层。研究布设4个嵌入式光纤光栅应变传感器,所有传感器均置于水泥混凝土面层顶部,其布设位置如图1(b)、(c)所示。传感器布设位置经多次校核,确保精准采集荷载作用区域的应变。

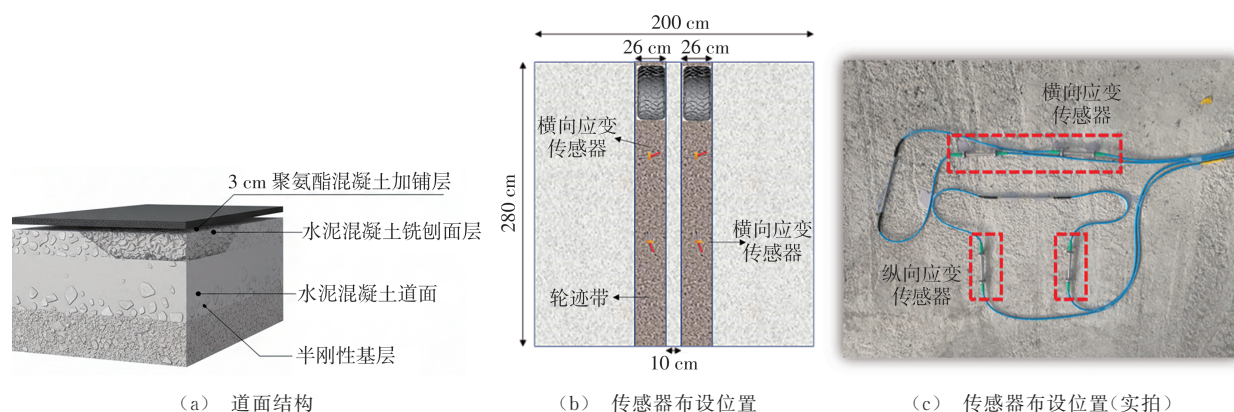


图1 道面结构与传感器布设

Fig. 1 Pavement structure and sensor layout

图2展示了试验场的完整施工程序,核心流程依次为路面铣刨、基面处理、传感器布设、面层铺筑及压实等环节。为解决施工过程中可能出现的气泡生成及体积膨胀问题,骨料在使用前先经加热处理以去除内部水分,随后冷却至 30°C 备用。混合料搅拌遵循先骨料与异氰酸酯组分预混,扩链剂与多元醇预混,后

加入多元醇组分搅拌的顺序,避免扩链剂与异氰酸酯提前反应。基面处理后对4个传感器进行精准标记与定位,将聚氨酯混凝土预先摊铺于传感器表面及底部间隙,防止传感器在后续施工中发生位移。传感器固定完成后,快速进行表层聚氨酯混凝土的摊铺,采用振动压实机进行压实处理以保障面层密实度。

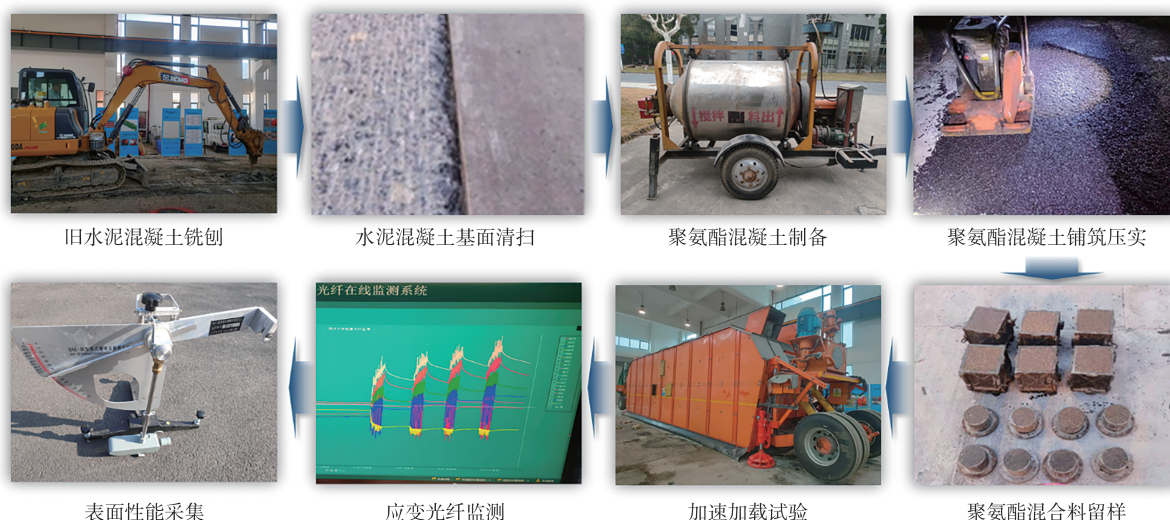


图2 施工与试验流程

Fig. 2 Construction and experimental flow

1.2.5 全尺寸加速加载试验

本研究中使用的加速加载试验机型号为MLS66,如图2所示。MLS66使用双轮进行加载,每小时运行5 000次^[22],每日运行10 h。轮胎压力设置为1.4 MPa以模拟飞机重型荷载,轮载为65 kN。轮胎压力波动范围为 $[-0.05, 0.05]$ MPa,加载过程稳定,在14个加载循环内共模拟加载了70万次飞机轮碾。

1.2.6 表面性能与层间性能采集

在不同加载循环次数后,使用长度为2 m的MLS轮廓仪Driver-P2003测量路面的变形,并以1 cm的间隔收集变形,采集聚氨酯混凝土加铺道面的车辙变形曲线,轮廓仪精度为0.001 mm,经计量校准合格,轮廓仪试验台的固定牢固,无滑移现象。根据中国《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019),采用摆式仪和铺砂法分别测量聚氨酯混凝土道面轮碾作用区域的摆值和构造深度。使用路面钻芯机钻取轮碾下方的聚氨酯混凝土复合试件,采用万能试验机在25℃下开展聚氨酯混凝土复合试件的层间剪切强度试验,加载速率设置为 $5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,分析其层间破坏模式。

2 聚氨酯混凝土材料性能分析

2.1 拉伸强度与压缩强度

车辙变形主要由荷载作用下的压缩变形与侧向挤压变形主导,因此重点分析抗压强度等与压缩变形相关的力学指标。考虑到聚氨酯胶结料的热固性特性,固化温度会显著影响聚氨酯混凝土的强度^[23]。因此,研究了不同温度(10℃、20℃、30℃、40℃、50℃)下和不同养生时间(3、6、12、18、24、36、48、60、72、84、96 h)下聚氨酯胶结料与混凝土的强度发展规律。不同养生温度下的聚氨酯胶结料试件拉伸强度试验结果如图3(a)所示。随着温度的升高,聚氨酯胶结料形成初始强度(75%最终强度)的固化时间从10℃的24 h缩短到50℃的3 h,聚氨酯胶结料形成最终强度的固化时间从10℃的96 h缩短到50℃的不到18 h。这表明,提高养生温度显著加快了聚氨酯胶结料的固化速率。

聚氨酯混凝土固化温度从10℃提高到50℃,不同固化时间下的抗压强度测量结果如图3(b)所示。固化温度的提高对聚氨酯混凝土的强度形成也有显著促进作用,在50℃下,仅用12 h就达到了最大强度的75%。因此,建议适当提高聚氨酯混凝土的养生温度来加快聚氨酯混凝土加铺的强度形成速率,例如采用“现场热风养护+保温覆盖”的

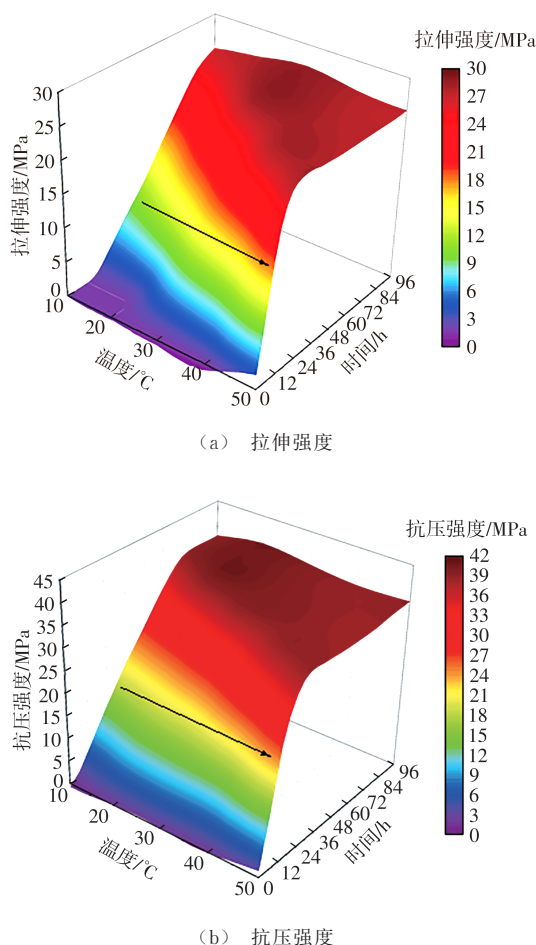


图3 聚氨酯试件力学试验结果

Fig. 3 Mechanical test results of polyurethane specimens

方式,通过移动式热风发生器向加铺层表面输送热风,同时覆盖保温罩,使养生温度控制在40℃~50℃,养护时间可根据温度调整,以满足不停航施工的要求。

总结来说,聚氨酯混凝土固化过程中呈现的热固性特征会显著影响其应用效果,这与热拌沥青混凝土技术存在本质差异。具体而言,二异氰酸酯两端的异氰酸酯基(-NCO)与聚丙二醇两端的羟基(-OH)发生亲核加成反应,生成含末端-NCO的预聚体,产物分子链中引入氨基甲酸酯键(-NH-CO-O-)。这是聚醚多元醇的羟基氧(亲核中心)进攻二异氰酸酯的羰基碳(亲电中心)形成的氨基甲酸酯键。预聚体末端的-NCO与扩链剂丁二醇($\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$)的-OH发生亲核加成,进一步延长分子链,提升硬段(二异氰酸酯+丁二醇)比例^[24]。聚氨酯混凝土快凝早强的特点,能够在短时间内达到较高的强度,满足机场道面快速修复的要求。

2.2 基于CT扫描的孔隙分布

为捕捉聚氨酯混凝土与水泥混凝土复合试件的内部结构细节,根据聚氨酯混凝土加铺复合芯样的X射线CT断层扫描图像,使用VG Studio Max 3.3进行噪声滤波和图像质量增强,对加铺层结构进行了三维重

构(图4)。从图4可以直观地看出,下层水泥混凝土呈现出集料嵌挤的骨架结构,而上层的聚氨酯混凝土呈现出集料悬浮的骨架结构,聚氨酯胶结料完全裹覆了集料。初步推断,聚氨酯混凝土的机械强度主要由骨料和聚氨酯胶结料之间的粘附力和内聚力提供。

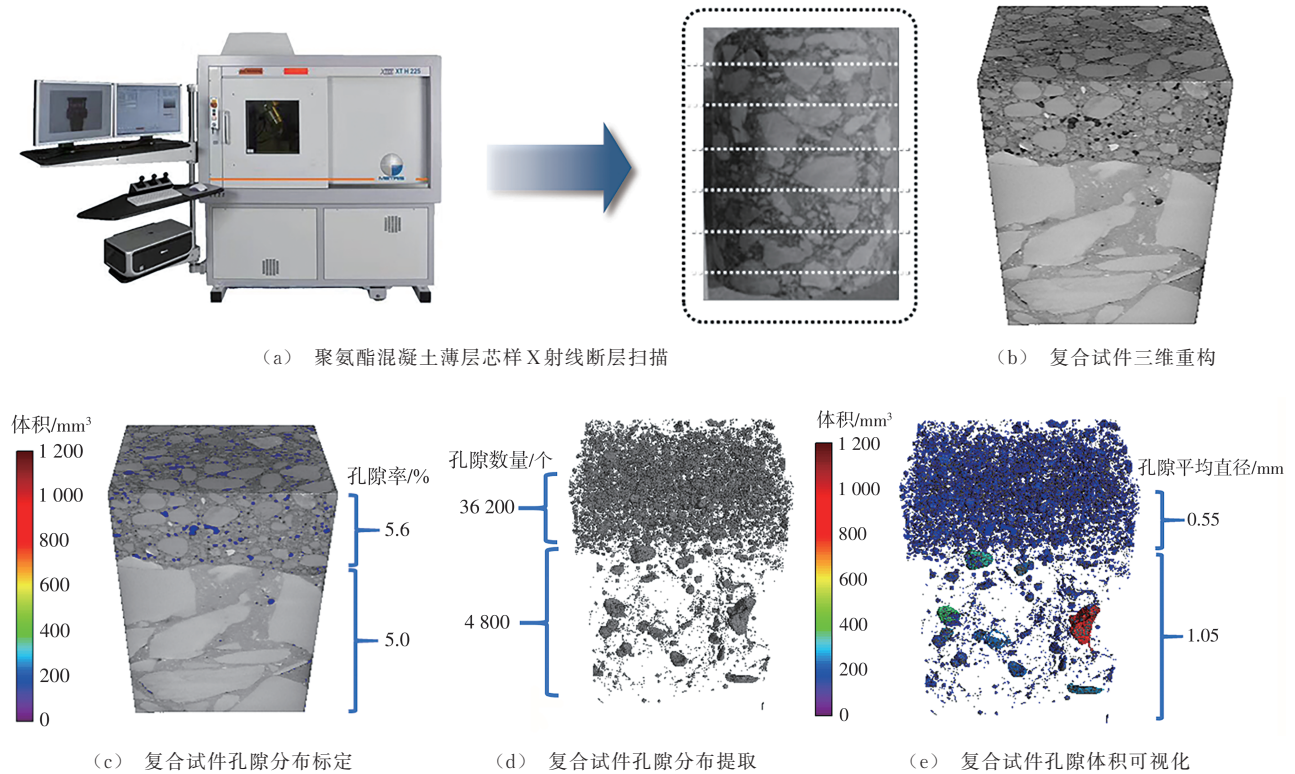


图4 聚氨酯混凝土加铺复合芯样的CT断层扫描与孔隙分布

Fig. 4 CT scans and pore distribution of composite samples with polyurethane concrete overlay

扫描完成后,对扫描获得的CT图像进行降噪、阈值分割,区分孔隙区域与固相区域(聚氨酯混凝土基体),采用VG Studio Max 3.3专业图像处理软件针对内部空隙特征进行识别和提取,并根据孔隙体积的大小相应地使用不同颜色进行标记。通过统计断层扫描图像的体素信息,进一步分析聚氨酯混凝土薄层加铺复合试件的孔隙特征参数,包括孔隙体积、孔隙数量、直径分布、球度和紧密度。统计三维体数据中孔隙体素的数量 N_{pv} 和总体素数量 N_{tv} ,计算方式为孔隙率 $P=N_{pv}/N_{tv}$ 。聚氨酯混凝土加铺复合芯样的孔隙分布特征统计如图5所示,上层聚氨酯混凝土的孔隙率约为5.6%,略高于下层水泥混凝土5.0%的孔隙率。然而,上层聚氨酯混凝土的孔隙直径平均值约为0.55 mm,远小于下层水泥混凝土1.05 mm的孔隙直径平均值。同时上层聚氨酯混凝土的孔隙数量超过了36 200个,而下层水泥混凝土的孔隙数量仅为4 800个左右。根据

统计结果可以知道,相比于水泥混凝土较大的孔隙体积和较少的孔隙数量,聚氨酯混凝土存在小体积、高密度的孔隙特征。此外,对分离后的复合试件分别进行聚氨酯混凝土和水泥混凝土的孔隙球度、紧密度的定量计算,聚氨酯混凝土的孔隙球度平均值为0.629,水泥混凝土为0.617;孔隙紧密度平均值为0.291,水泥混凝土为0.267,可以观察到聚氨酯混凝土比水泥混凝土呈现出更高的孔隙球度和紧密度。

综上所述,聚氨酯混凝土整体呈现出更为均匀的孔隙分布,更小的孔隙体积与更高的孔隙球度和紧密度,几乎没有联通孔隙,这是由于聚氨酯混凝土内部的微小孔隙主要是拌和成型过程中带入的微小球形气泡。而水泥混凝土内部的孔隙主要是水泥胶凝材料水化反应过程中产生的,这会导致水泥混凝土内部存在较为明显的界面过渡区,因此呈现出较大的孔隙体积和不规则的孔隙形状^[25]。

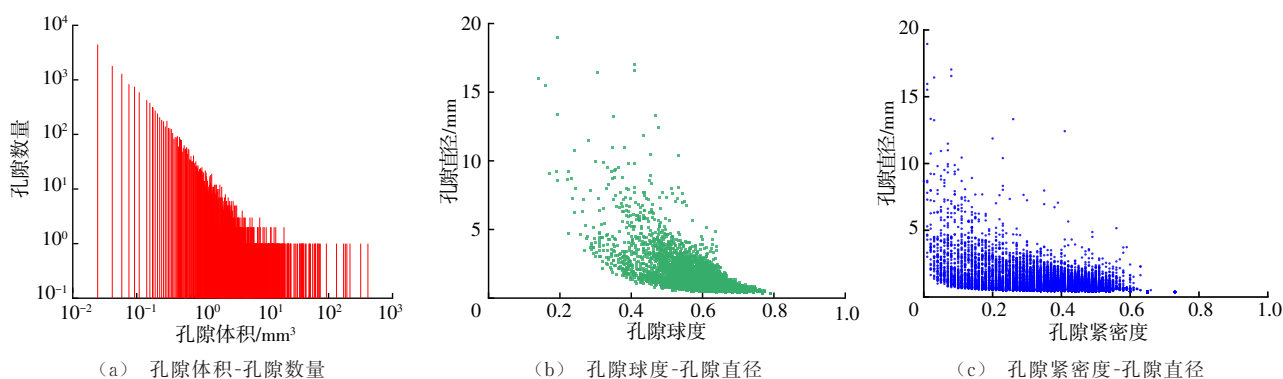


图5 聚氨酯混凝土加铺复合芯样的孔隙分布特征统计

Fig. 5 Characteristics statistical of pore distribution in composite samples with polyurethane concrete overlay

3 基于加速加载的跑道加铺适用性分析

3.1 基于加速加载试验的车辙变形特征

大型民航客机主轮单轮额定轮载常为 120~150 kN,主轮胎宽度多为 400~650 mm。由于受加速加载设备的客观机械限制,MLS66 试验机的轮载为 65 kN,在 1.4 MPa 胎压下,MLS66 试验机轮胎的压印宽度为 260 mm,通过控制轮胎压力与实际飞机胎压一致,并采用全尺寸道面试件,来模拟飞机轮载对机场道面的作用机理。相比机轮,车轮窄轮胎的

剪应力集中效应使试验测得的损伤速率略高于实际工况,不会低估路面结构的服役性能,试验结果偏于安全评估。本文中车辙是指道面在反复轮载作用下的累积永久变形,与公路车辙的定义一致,但研究对象是机场道面加铺层。

3.1.1 车辙变形曲线

不同的碾压次数后,聚氨酯混凝土加铺层横截面的车辙变形曲线如图 6 所示。可以直观地看出,与沥青混合料常见的凹陷型车辙不同^[26],聚氨酯混凝土呈现出“W”形车辙变形,车轮轮迹带中间有明显的隆起变形,而车轮轮迹带两侧为轻微的车辙凹陷。

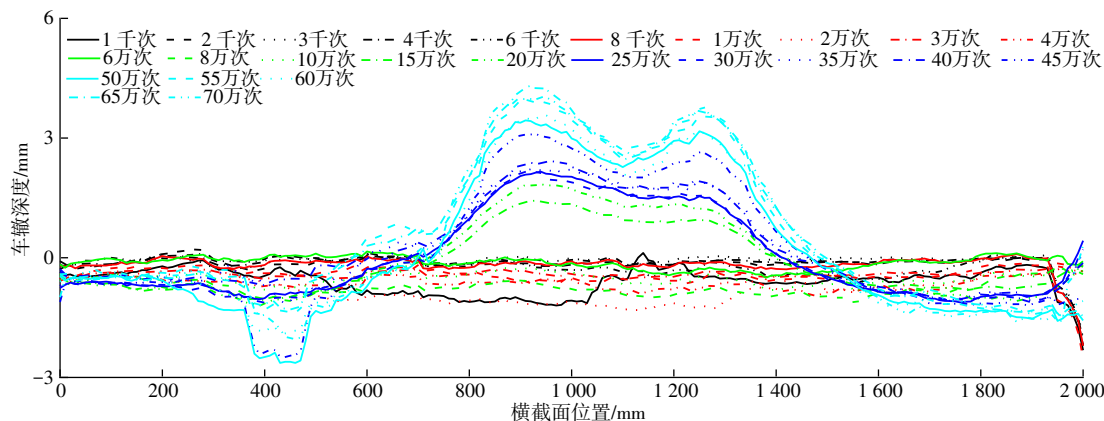


图6 聚氨酯混凝土横截面的车辙变形曲线

Fig. 6 Curves of rutting deformation of polyurethane concrete cross section

具体来说,轮载碾压的初期,聚氨酯混凝土路面的车辙变形以凹陷型为主。这是由于聚氨酯混凝土加铺层难以完全压实,初期的车轮轴向荷载有助于聚氨酯混凝土结构的致密化^[27]。以左轮迹带左侧处的车辙变形曲线为例,10万次轮碾后的车辙凹陷深度已稳定在 1.30 mm,最终 70 万次轮碾后的车辙凹陷深度为 2.03 mm;右轮迹带右侧处 70 万次轮碾后的车辙凹陷深度也稳定在 1.60 mm。与轮迹带两侧的车辙变形趋势不同,轮载中间的车辙变形先经历

了凹陷变形,再经历了隆起变形。随着累计轮碾次数的增加,轮迹带处车辙凹陷的深度逐渐维持稳定后,两轮中间的车辙变形逐渐从凹陷向隆起转变,直到 15 万次的车轮碾压后,聚氨酯混凝土的车辙变形曲线首次出现了驼峰。最终 70 万次轮碾后的车辙隆起高度为 4.31 mm(左轮)和 3.72 mm(右轮),聚氨酯混凝土的车辙变形呈现出以隆起的驼峰为主导的曲线特征。

聚氨酯混凝土在经历初期的荷载致密化后,由

于聚氨酯胶结料交联密度与弹性模量较高^[28],且与骨料形成“刚性骨架+弹性胶结”体系,轮碾下方的聚氨酯混凝土受挤压但不易发生塑性压缩,而是通过弹性变形将荷载向侧向传递。随着荷载传递,聚氨酯胶结料的高弹性与高交联密度特性被激活,聚氨酯胶结料发生弹性变形并产生侧向推力,同时带动刚性骨架产生轻微的侧向扩张。荷载消失后,聚氨酯胶结料的弹性回弹效应显著,在侧向推力与回弹应力的共同作用下,荷载直接作用区域周边的材料向中心回弹,导致中心区域逐渐出现轻微隆起。

3.1.2 车辙区影响面积

为进一步分析聚氨酯混凝土车辙变形特征,将车辙变形范围定义为3个区域,即内端影响区域、直接影响区域和外端影响区域,如图7所示。以右轮为例,内端影响区域被定义为中线与车轮内边缘之间的区域,宽度为5 cm;直接影响区域是指与车轮直接接触的区域,宽度为26 cm;外端影响区域被定义为车轮外边缘与聚氨酯混凝土路面边缘的区域,宽度为69 cm。

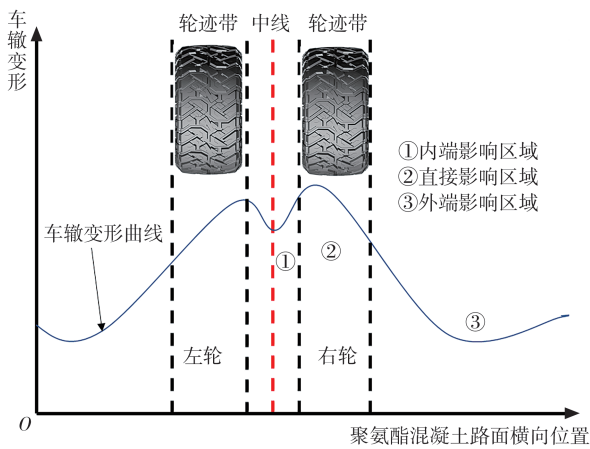


图7 车辙变形的3个区域示意

Fig. 7 Three area schematic of rutting deformation

根据3个车辙影响区的定义,将车辙变形曲线上每个区域对应的面积规定为车辙内端影响面积 S_i 、车辙直接影响面积 S_d 和车辙外端影响面积 S_o 。以右轮为例,车辙影响面积计算如下

$$S_i = \int_{1000}^{1050} R(x) dx \quad (2)$$

$$S_d = \int_{1050}^{1310} R(x) dx \quad (3)$$

$$S_o = \int_{1310}^{2000} R(x) dx \quad (4)$$

式中: x 为车辙变形区域的宽度; $R(x)$ 为车辙变形曲线的函数。

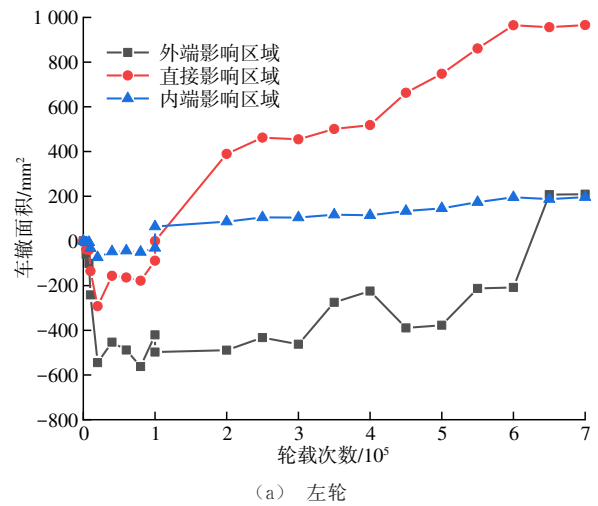
相应地,左轮的车辙影响面积为

$$S_i = \int_{950}^{1000} R(x) dx \quad (5)$$

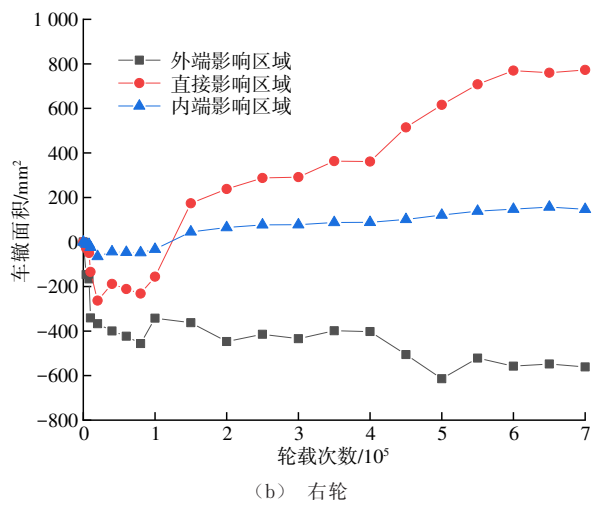
$$S_d = \int_{690}^{950} R(x) dx \quad (6)$$

$$S_o = \int_0^{690} R(x) dx \quad (7)$$

可以发现,聚氨酯混凝土路面的右轮车辙直接影响面积在15万次轮碾次数加载之前为负值,代表车辙直接影响区域发生的是凹陷变形;随着车轮荷载从20万次增加至40万次,车辙直接影响面积转变为正值并逐渐增加,代表车辙直接影响区域逐渐发生隆起变形;随后,当车轮荷载次数达到45万次,车辙直接影响面积迅速增大,并最终在70万次轮碾后达到771 mm²。对于左轮,车辙直接影响面积同样呈现出类似的变化趋势,最终在70万次轮碾后达到963 mm²。聚氨酯混凝土的车辙外端、内端影响面积如图8所示。



(a) 左轮

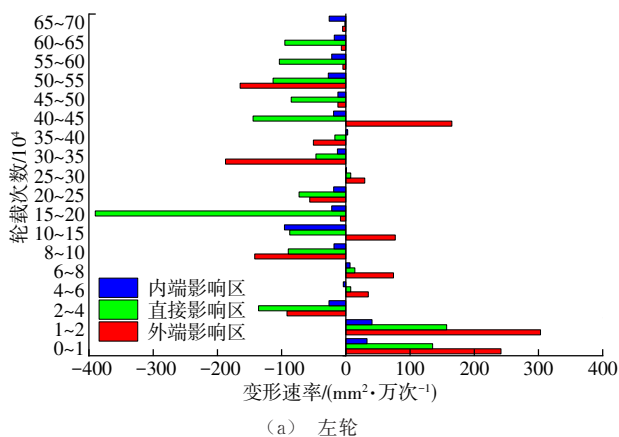


(b) 右轮

图8 聚氨酯混凝土车辙影响面积变化趋势

Fig. 8 Changes trend in the affected area of rutting on polyurethane concrete

左右车轮的车辙内端影响面积与车辙直接影响面积的变化趋势相似,在15万次轮碾次数后从负值变为正值,并随着轮碾次数的增加而逐渐增加,最终在70万次轮碾后分别达到 194 mm^2 (左轮)和 145 mm^2 (右轮)。左右车轮的车辙外端影响面积则呈现出整体波动变化的趋势,左轮的车辙外端影响面积在8万次达到最大负值,随后由于聚氨酯材料的回弹恢复效应,车辙外端影响面积逐渐减小,最终在70万次轮碾后达到 206 mm^2 ;而右轮的车辙外端影响面积最终在70万次轮碾后达到 -556 mm^2 。这是由于聚氨酯混凝土车辙直接影响区逐渐隆起的变形导致两轮下方存在一定的平整度差异,进而导致的左右两轮受力荷载和变形的差异。



3.1.3 车辙区变形率

进一步计算了车辙区的变形率(图9)。对于车辙直接影响区域的变形率在15万~20万次轮载作用后呈现最大值,左右两轮分别达到了 $-382 \text{ mm}^2 \cdot \text{万次}^{-1}$ 和 $-321 \text{ mm}^2 \cdot \text{万次}^{-1}$,表明聚氨酯混凝土路面的抗车辙性能在累计20万次的轮载作用后可能会发生较大变化。类似的,车辙内端影响区域的变形率在15万次的轮载作用后达到峰值,左右两轮分别达到了 $-104 \text{ mm}^2 \cdot \text{万次}^{-1}$ 和 $-79 \text{ mm}^2 \cdot \text{万次}^{-1}$,推断此时聚氨酯混凝土达到压实致密状态,随后压实致密与聚氨酯材料回弹特性耦合而逐渐产生隆起变形。而车辙外端影响区域的变形率则呈现出反复的波动变化,这是由于两轮下方隆起的平整度差异导致的。

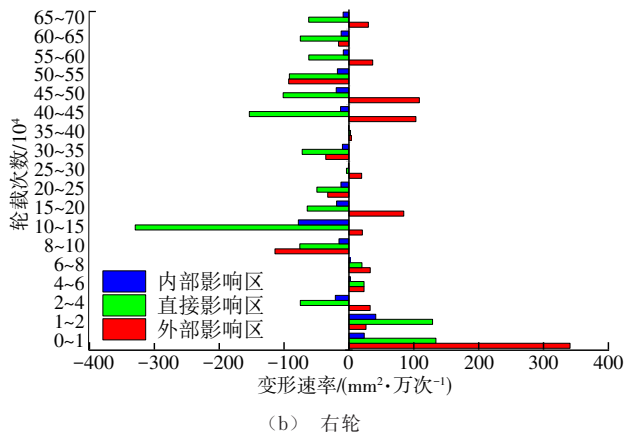


图9 聚氨酯混凝土车辙区变形率

Fig. 9 Rutting deformation rate of polyurethane concrete

3.2 基于加速加载试验的应变特征

3.2.1 总体应变演化

图10显示了总体应变与采集次数之间的关系。可以看出:传感器1代表左侧车轮下方的横向应变,在0~5万次的采集次数(采集间隔为每5s采集1次)中表现出明显的横向拉应变,这是由于轮碾初期的压实致密导致底部聚氨酯混凝土受拉变形;而在5万次的采集次数(对应10万次的轮碾次数)后表现出明显的横向拉应变向横向压应变转变,且横向拉应变波峰峰值有所下降(2.55×10^{-4} 降至 2.10×10^{-4}),这是由于聚氨酯混凝土的“刚性骨架-弹性胶结”复合体系的受力与应力传递特性。

在车轮荷载作用下,聚氨酯混凝土承受压缩应力,因此层底应变计发生受拉变形,对应拉应变;同时,由于聚氨酯胶结料的高弹性,在荷载卸荷后,聚氨酯混凝土的压缩应变逐渐回弹,弹性胶结料因侧向推力作用,荷载直接作用区域周边的材料向中心

回弹,层底应变计发生受压变形,对应压应变,示意如图11所示。10万~15万次的轮碾次数过程中,传感器1受到最大的压应变约为 9.7×10^{-5} ,随后逐渐减小至 4.0×10^{-6} 。此外,可以看出聚氨酯混凝土的变形曲线以弹性变形为主,5万次的轮碾加载次数后累积变形迅速恢复至初始水平,仅有少量的残余变形。在60万次轮碾加载后,传感器1的拉应变峰值超过 3.0×10^{-4} ,而残余拉应变仅为 7.3×10^{-5} 。

传感器2代表左侧车轮下方的纵向应变,可以看出,由于传感器的布置方向与车轮的方向相同,纵向拉应变随着轮碾次数的累积而逐渐增加,拉应变波峰峰值从 1.48×10^{-4} 减小至 4.7×10^{-5} 。此外,每个加载循环内的纵向应变幅值略小于横向应变幅值,这表明聚氨酯混凝土加铺层轮碾下方的横向应变比纵向应变对车轮载荷更加敏感。

传感器3、4分别代表右侧车轮下方的横向应变与纵向应变,其与累计轮碾作用次数关系如图12所示,其变化趋势与传感器1、2保持一致。不同的是,

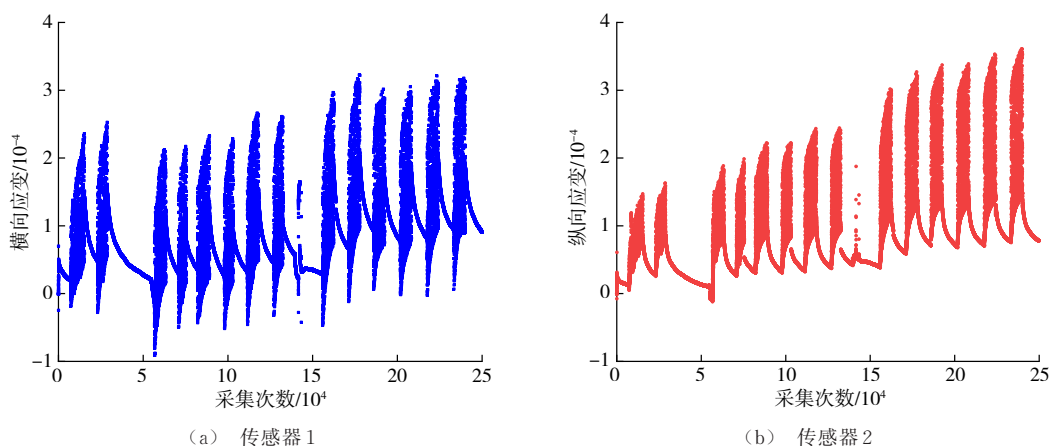


图10 左侧车轮总体应变与采集次数关系

Fig. 10 Relationship between overall strain of left wheel and number of measurement

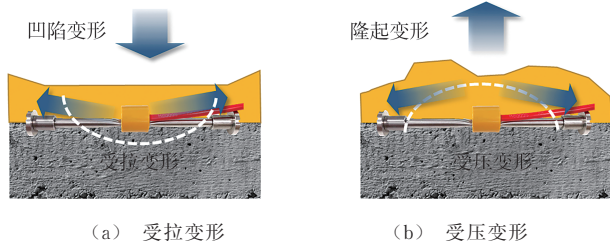


图11 传感器受力变形

Fig. 11 Sensor force deformation

传感器3、4即右侧车轮下方的应变循环范围($-5.0 \times 10^{-5} \sim 1.8 \times 10^{-4}$)要小于传感器1即左侧车轮下方的应变循环范围($-1.0 \times 10^{-4} \sim 3.6 \times 10^{-4}$)。从车辙变形曲线中可以推断,这是由于左侧车辙隆起高度高于右侧车辙隆起高度而产生的道面平整度差,使得轮碾荷载分布不均匀,左侧车轮下方道面承载了比右侧车轮下方道面更高的荷载,因此导致更大的应变循环数值。

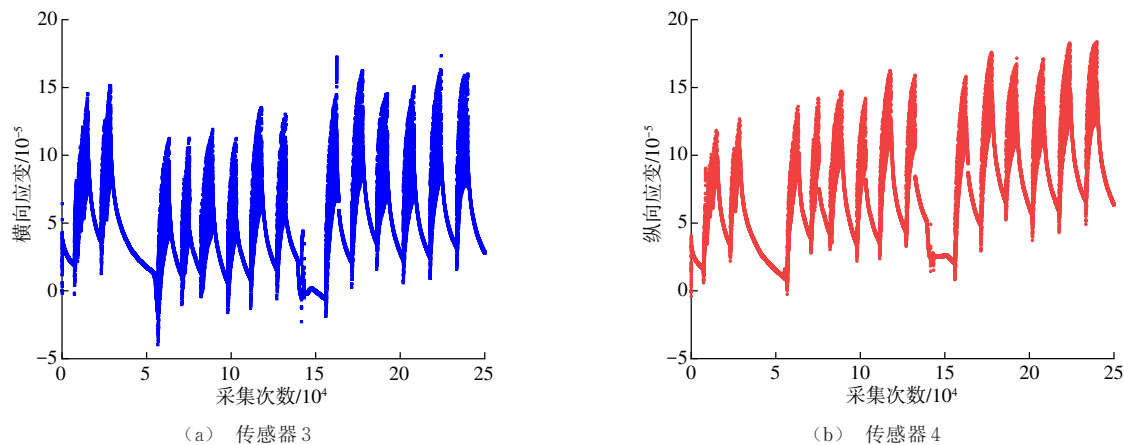


图12 右侧车轮总体应变与采集次数关系

Fig. 12 Relationship between overall strain of right wheel and number of measurement

3.2.2 最大应变演化

采集了每个轮载循环中的最大应变,如图13所示。当拉伸应变和压缩应变都出现在一个轮载循环中时,选择绝对值较高的一个作为最大应变。复核试验数据可以发现,单次循环中拉应变普遍大于压应变,且拉应变易导致道面开裂。

对于横向最大应变,传感器1和传感器3表现出一致的变化趋势,在第1个5万次轮碾循环中急速累积了

横向应变,随后随着轮碾循环逐渐增大。当循环荷载到达40万次时,最大应变的增加速率迅速提高,推测此时聚氨酯混凝土内部出现部分横向微裂纹,增大了横向应变的累积速度。此外,可以观察到左侧传感器1的横向最大应变在10万次轮碾循环后,整体上均大于右侧传感器3的横向最大应变,这是由于10万次后隆起变形导致的平整度差异,左侧道面承受了更大的荷载。

对于纵向最大应变,在轮碾循环初期(10万次)

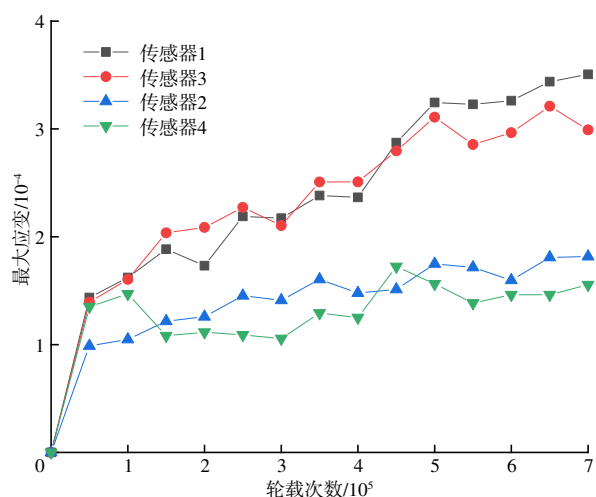


图 13 轮载循环中的最大应变

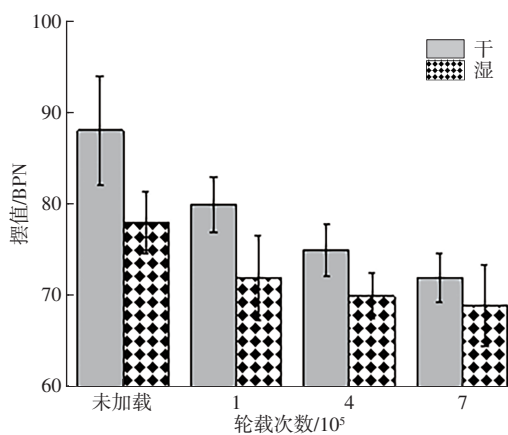
Fig. 13 Maximum strain in the loading cycle

展现出与横向最大应变一致的快速累积特点。随后左轮传感器 2 采集到的纵向最大应变缓慢增长且显著低于横向最大应变,这是由于初期轮碾循环的压实阶段结束,聚氨酯混凝土的纵向受力敏感性低于横向受力,呈现出均匀增长的特点。右轮传感器 4 采集到的纵向最大应变则在 10 万次轮碾循环后有

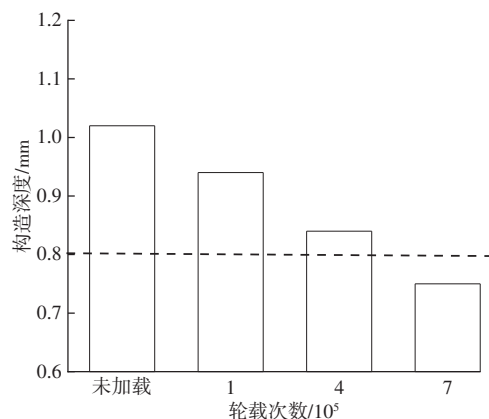
所减小并在 15 万~30 万次的轮碾循环中保持相对恒定的 1.0×10^{-4} ,这是由于轮辙驼峰的出现使得左右轮下方路面的存在平整度差异,而右侧受力荷载与聚氨酯混凝土的回弹效应相对平衡。直到 40 万次轮碾循环后,右轮下方聚氨酯混凝土的纵向最大应变进一步增长并重复上述现象。总体来说,与左轮纵向最大应变持续缓慢增长的趋势不同,右轮纵向最大应变呈现出阶梯状上升的特点。

3.3 基于加速加载的表面性能评估

摆值测试与构造深度测试如图 14 所示。干燥条件下聚氨酯混凝土在 70 万次荷载作用后摆值维持在 72 BPN 左右,相较于初始状态(88 BPN)降幅约 18%,其表现出优异的抗滑稳定性。这一现象源于聚氨酯材料的高弹性与骨料界面的强黏结性,70 万次荷载作用下未出现骨料脱落或表面粉化,有效保留了抗滑所需的微观纹理。潮湿条件下,聚氨酯混凝土在 70 万次荷载作用后摆值为 69 BPN,较初始状态(78 BPN)下降 11.5%,仍满足中国《民用机场飞行区技术标准》(MH5001—2021)中潮湿状态下抗滑临界值(≥ 55 BPN)要求。



(a) 道面摆值变化



(b) 构造深度变化

图 14 不同轮载次数下道面摆值、构造深度变化

Fig. 14 Variation of BPN value and construction depth with different loading cycles

70 万次轮碾荷载循环后,构造深度值为 0.75 mm,初始构造深度为 1.02 mm,衰减率约 26.5%,宏观纹理结构保持相对完整,优势在于基体的高弹性可缓冲荷载冲击,避免骨料嵌挤松动或散失。总结来说,70 万次轮碾荷载引发的聚氨酯混凝土道面性能衰减以“疲劳型轻度磨损”为主,未出现结构性破坏(如裂缝、坑槽)。该结果验证了聚氨酯混凝土加铺道面在飞机轮载循环下的长期服役能力,其抗滑性能的湿度稳定性与构造深度的较低衰减率,使其在机场道面中具有应用潜力。

3.4 基于加速加载的层间剪切强度

不同轮载作用次数后的层间剪切试验结果如图 15 所示。由图 15(a)可知:70 万次轮碾荷载循环后,层间剪切试验测得剪切强度为 3.40 MPa,较初始状态(4.29 MPa)降幅为 21%;剪切位移为 11.61 mm,较初始值(11.83 mm)无明显变化。这一演变源于循环荷载引发的累积损伤,轮碾荷载通过聚氨酯加铺层传递至下方水泥混凝土,产生周期性剪切应力与拉压应力,导致水泥混凝土内部微裂缝萌生、扩展,进而降低其整体抗剪承载力,同时裂缝发展使剪切过程

中应力重分布,表现为破坏位移无明显差异。因此,耦合剪切强度与剪切位移的作用,对剪切破坏曲线下方面积进行积分计算得到剪切破坏功。由于聚氨酯混凝土复合试件的层间破坏模式为脆性断裂,因

此面积积分取值选取峰值剪切强度下方的范围,避免后续滑移位移的影响,如图15(b)所示。70万次荷载后,剪切试验计算的剪切破坏功为127.5J,较初始状态(167.1J)下降23.7%。

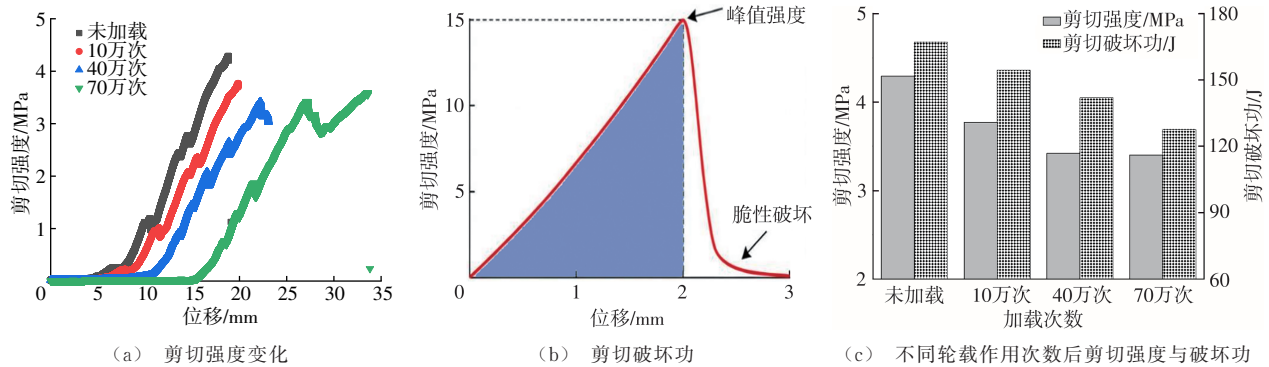


图15 不同轮载作用次数后的层间剪切试验结果

Fig. 15 Interlayer shear testing results after different numbers of loading cycles

层间剪切试验的测试部位为聚氨酯混凝土加铺层与铣刨后原有水泥混凝土道面的界面。对试件剪切破坏面形貌进行采集,如图16所示。所有试件的剪切破坏面均贯穿水泥混凝土(距界面5~15 mm),未出现界面剥离或聚氨酯加铺层自身断裂。这一现象证明聚氨酯混凝土的界面黏结强度大于水泥凝

土本身的剪切强度,荷载作用下的薄弱环节为水泥混凝土基体,而非加铺层的结合面。这是由于聚氨酯混凝土的高弹性的特点,使加铺层在荷载作用下产生弹性变形,缓冲了瞬时冲击荷载,但长期循环荷载仍通过界面传递至水泥混凝土基层,且界面应力分布均匀(无应力集中现象),避免了界面黏结的局部破坏^[29]。

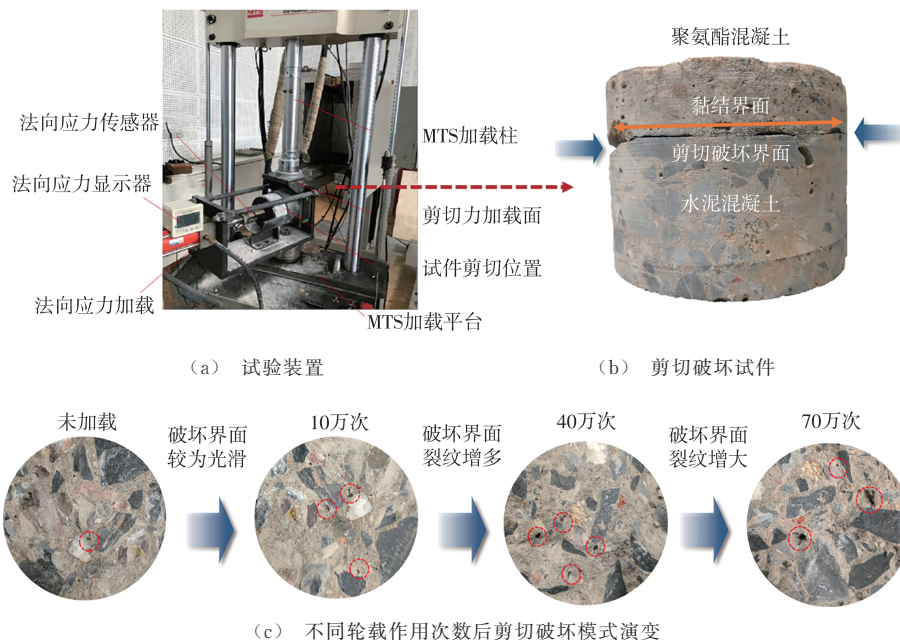


图16 层间剪切破坏模式识别

Fig. 16 Interlayer shear failure mode identification

4 结 语

(1)养生温度提升显著加快了聚氨酯胶结料固化速率与混凝土强度形成效率,具备机场道面不停航施工的应用潜力。聚氨酯混凝土小体积、高密度

的孔隙特征及更优的孔隙球度与紧密度,使其呈现均匀孔隙分布。

(2)聚氨酯混凝土呈现“W”形车辙变形特征,70万次轮碾后轮迹带两侧凹陷深度最大为2.03 mm,而两轮中间隆起高度达4.31 mm。得益于其刚性骨

架与弹性胶结体系,聚氨酯胶结料的高弹性与高交联密度使荷载侧向传递并触发回弹效应,从而区别于沥青混合料的“凹陷型”车辙。

(3)聚氨酯混凝土路面左右轮车辙直接影响面积在70万次轮碾后分别达963 mm²和771 mm²,右侧轮下应变循环范围小于左侧,此差异源于车辙隆起高度导致平整度与荷载分布不均,且横向应变对轮碾荷载更敏感。

(4)干燥与潮湿条件下,聚氨酯混凝土经70万次荷载循环作用后摆值分别维持在72 BPN和69 BPN,同期构造深度从1.02 mm降至0.75 mm,抗滑性能与宏观纹理保留良好。聚氨酯混凝土加铺体系层间剪切强度与破坏功较初始值降幅分别为21%和23.7%,聚氨酯混凝土界面黏结强度大于水泥混凝土自身抗剪强度。

(5)本文评估了聚氨酯混凝土的机场道面加铺技术实现表层快速修补的适用性,基于加速加载试验的车辙形成机理与动态力学响应可为机场工程与道面病害防治提供技术支持。为更精准匹配机场道面需求,应进一步开展抗折强度测试、抗冻性试验、模拟飞机轮胎的有限元分析等研究。

参 考 文 献:

References:

- [1] 凌建明,王增逸,刘诗福,等.飞机滑跑激振和着陆冲击的动载预估模型[J].交通运输工程学报,2026,26(8):1-19.
LING Jian-ming, WANG Zeng-yi, LIU Shi-fu, et al. Dynamic load predictive model for aircraft taxiing excitation and landing impact[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(8): 1-19.
- [2] SUN J Y, OH E, CHAI G, et al. Comparison between ACN-PCN and ACR-PCR for rigid airport pavement with case study[J]. Road Materials and Pavement Design, 2025, 26(3): 720-732.
- [3] WANG X, DONG Q, SHI B, et al. Evaluation of void beneath the airport pavement slab corner based on the strain monitoring[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2024, 25(1): 2328123.
- [4] CHENG H L, PENG T Y, ZHANG Y M, et al. Automated evaluation of snow and ice conditions on airport pavement: A study based on image recognition and point cloud reconstruction[J]. Measurement, 2025, 242: 116200.
- [5] 蔡爵威,赵鸿铎,钱鑫,等.采用实测数据实时修正的机场跑道水膜厚度面域分布预估方法[J].交通运输工程学报,2023,23(1):105-114.
CAI Jue-wei, ZHAO Hong-duo, QIAN Xin, et al. Estimation method for area distribution of water film thickness on airport runway modified by measured data in real time[J].

Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(1): 105-114.

- [6] 钱劲松,岑业波,刘东亮,等.机场跑道全波段不平整测试方法[J].交通运输工程学报,2021,21(5):84-93.
QIAN Jin-song, CEN Ye-bo, LIU Dong-liang, et al. Measurement method of all-wave airport runway roughness[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(5): 84-93.
- [7] 宗启迪.机场道面聚氨酯基薄层罩面组成设计与性能研究[D].上海:同济大学,2021:67.
ZONG Qi-di. Study on composition design and properties of polyurethane-based thin layer overlay for airport pavement[D]. Shanghai: Tongji University, 2021: 67.
- [8] 洪斌,陆国阳,高峻凌,等.路用聚氨酯胶结料的抗紫外老化性能[J].中国公路学报,2020,33(10):240-253.
HONG Bin, LU Guo-yang, GAO Jun-ling, et al. Anti-ultraviolet aging performance of polyurethane binders used in roads[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 240-253.
- [9] 侯德瑞.聚氨酯混合料路面荷载响应行为研究[D].济南:山东建筑大学,2024:76.
HOU De-rui. Study on load response behavior of polyurethane mixture pavement[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2024: 76.
- [10] 黄恒武.基于聚脲的抗轮辙型机场道面材料优选与应用研究[D].西安:长安大学,2024:82.
HUANG Heng-wu. Optimisation and application of rutting-resistant airport pavement materials based on polyurea[D]. Xi'an: Chang'an University, 2024: 82.
- [11] LI X R, LI J, WANG J Y, et al. Recent applications and developments of polyurethane materials in pavement engineering[J]. Construction and Building Materials, 2021, 304: 124639.
- [12] 李添帅,陆国阳,王大为,等.高性能聚氨酯透水混合料关键性能研究[J].中国公路学报,2019,32(4):158-169.
LI Tian-shuai, LU Guo-yang, WANG Da-wei, et al. Key properties of high-performance polyurethane bounded pervious mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4): 158-169.
- [13] CHEN J, MA X, WANG H, et al. Experimental study on anti-icing and deicing performance of polyurethane concrete as road surface layer[J]. Construction and Building Materials, 2018, 161: 598-605.
- [14] CONG L, YANG F, GUO G H, et al. The use of polyurethane for asphalt pavement engineering applications: A state-of-the-art review[J]. Construction and Building Materials, 2019, 225: 1012-1025.
- [15] LU G Y, RENKEN L, LI T S, et al. Experimental study on the polyurethane-bound pervious mixtures in the application of permeable pavements[J]. Construction and Building Materials, 2019, 202: 838-850.
- [16] GAO J F, WANG H N, CHEN J K, et al. Laboratory

- evaluation on comprehensive performance of polyurethane rubber particle mixture[J]. Construction and Building Materials, 2019, 224: 29-39.
- [17] XU L, WANG J Y, XIAO X, et al. Performance investigation and internal-structure analysis of polyurethane bonded mixture on highway steel bridge[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35(11): 04023397.
- [18] 孙 敏,郑木莲,毕玉峰,等. 聚氨酯改性沥青改性机理和性能[J]. 交通运输工程学报,2019,19(2):49-58.
SUN Min, ZHENG Mu-lian, BI Yu-feng, et al. Modification mechanism and performance of polyurethane modified asphalt [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(2): 49-58.
- [19] XU S F, LIU H Z, GUO Q Y, et al. Evaluation on moisture susceptibility of stone mastic polyurethane concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2024, 36(3): 04023599.
- [20] 吴宇轩. 寒区钢桥面聚氨酯混凝土铺装结构界面特性及参数优化研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2025:62.
WU Yu-xuan. Study on interface characteristics and parameter optimization of polyurethane concrete pavement structure on steel bridge deck in cold area[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2025: 62.
- [21] JIANG Z Q, TANG C H, YANG J, et al. A lab study to develop polyurethane concrete for bridge deck pavement[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23(5): 1404-1412.
- [22] LING J M, WEI F L, CHEN H, et al. Accelerated pavement testing for rutting evaluation of hot-mix asphalt overlay under high tire pressure[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2020, 146(2): 04020009.
- [23] 孙 敏,黄照亮,孙延超,等. 温度对聚氨酯混合料力学特性的影响及本构关系[J]. 长安大学学报(自然科学版),2025, 45(4):13-28.
- SUN Min, HUANG Zhao-liang, SUN Yan-chao, et al. Influence of temperature on mechanical properties and constitutive relationship for polyurethane mixtures[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2025, 45(4): 13-28.
- [24] MENG X D, WEN W B, FENG F, et al. Mechanical properties and damage characteristics of modified polyurethane concrete under uniaxial and cyclic compression[J]. Construction and Building Materials, 2025, 458: 139633.
- [25] HONG B, WANG J L, ZHANG B, et al. Study on the water stability of polyurethane concrete from perspective of polyurethane-aggregate interface[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(9): 04022237.
- [26] ZHAO Z F, XU L, GUAN X, et al. Rutting and strain characteristics of rubberized asphalt pavement based on accelerated pavement tester[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 376: 134219.
- [27] 徐世法,张业兴,郭昱涛,等. 基于贯入阻力测试系统的聚氨酯混凝土压实时机确定方法[J]. 中国公路学报,2021,34(7): 226-235.
XU Shi-fa, ZHANG Ye-xing, GUO Yu-tao, et al. Determination of polyurethane concrete compaction timing based on penetration resistance test system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(7): 226-235.
- [28] 张洪生,张 倩,王善坤,等. 密实型聚氨酯混合料蠕变特性研究[J]. 公路工程,2025,50(1):186-196.
ZHANG Qi-sheng, ZHANG Qian, WANG Shan-kun, et al. Research on creep characteristics of dense polyurethane mixture [J]. Highway Engineering, 2025, 50(1): 186-196.
- [29] UMMIN O, LI Y, LI K, et al. Influence of surface roughness and interfacial agent on the interface bonding characteristics of polyurethane concrete and cement concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 91: 109596.