

文章编号:1671-1637(2026)08-0020-13

基于足尺加速加载试验与有限元模型的机场沥青刻槽道面寿命分析

王 强, 卢尚泽, 张润峰*, 高艺霞, 花莺菡

(中国民航大学 交通科学与工程学院, 天津 300300)

摘 要:相较于水泥混凝土道面, 沥青道面刻槽在中国机场应用尚不广泛, 且缺乏系统的检测评估技术与寿命演化规律研究。针对上述问题, 本文依托足尺加速加载试验, 开展沥青道面矩形刻槽与梯形刻槽的变形对比研究。采用高精度数据采集系统与扫描叠加算法, 有效消除激光扫描盲区, 获得了连续可靠的刻槽形态演变数据; 基于试验数据分析, 建立了考虑沥青材料黏塑性本构关系的数值模型, 提出了刻槽形态随加载次数增加的稳态衰减斜率方程。研究结果表明: 在相同荷载条件下, 梯形刻槽道面的使用寿命约比矩形刻槽长 25%, 表现出显著的抗变形优势; 在初始加载阶段, 刻槽产生的初始变形约为总变形量的 1/3, 表明早期结构承载对刻槽形态衰减具有重要影响; 结合机场道面结构设计软件计算的结构寿命结果, 对比刻槽变形数据表明, 沥青刻槽寿命显著低于道面结构寿命, 刻槽性能成为限制道面服役性能的重要因素; 建议在施工阶段适当增加刻槽深度盈余量, 并加强刻槽修复与养护技术研究, 以延长沥青道面刻槽使用寿命。本研究通过揭示典型刻槽形式的力学响应与寿命差异, 为沥青道面刻槽结构优化设计、施工控制及养护决策提供了理论依据和工程参考。

关键词: 机场道面; 沥青道面; 足尺加速加载试验; 道面寿命; 刻槽道面; 有限元

中图分类号: U416.217 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.240

Service life analysis of airport grooved asphalt pavements based on full-scale accelerated loading tests and finite element modeling

WANG Qiang, LU Shang-ze, ZHANG Run-feng*, GAO Yi-xia, HUA Ying-han

(College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Compared with cement concrete pavements, asphalt pavement grooving has not been widely applied for airports in China. There is limited systematic research on inspection and evaluation methods as well as the long-term evolution law of service life. To address these issues, a comparative investigation was conducted on the deformation characteristics between rectangular and trapezoidal grooves in asphalt pavements based on full-scale accelerated loading tests. During testing, a high-precision data acquisition system combined with a scanning superposition algorithm was employed to effectively eliminate laser scanning blind zones, enabling continuous

出版历程: 2025-12-30 收稿, 2026-02-25 修回, 2026-03-20 录用

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2600500)

作者简介: 王 强(1962-), 男, 北京人, 教授, 博士生导师, 工学博士, E-mail: wang@cauc.edu.cn。

* 通信作者: 张润峰(1979-), 男, 河北宁晋人, 讲师, 工学博士, E-mail: rfzhang@cauc.edu.cn。

引用格式: 王 强, 卢尚泽, 张润峰, 等. 基于足尺加速加载试验与有限元模型的机场沥青刻槽道面寿命分析[J]. 交通运输工程学报, 2026, 26(8): 20-32.

Citation: WANG Qiang, LU Shang-ze, ZHANG Run-feng, et al. Service life analysis of airport grooved asphalt pavements based on full-scale accelerated loading tests and finite element modeling[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(8): 20-32.

and reliable data on groove morphology evolution. Based on the experimental data analysis, a numerical model was developed, incorporating the viscoplastic constitutive relation of asphalt materials. A steady-state degradation equation of groove morphology with increasing load repetitions was proposed. Research results show that, under identical loading conditions, the service life of trapezoidal grooves is approximately 25% longer than that of rectangular grooves, demonstrating a significant advantage in deformation resistance. Additionally, during the initial loading stage, the initial groove deformation accounts for approximately one-third of the total deformation, highlighting the critical influence of early structural load-bearing on groove performance degradation. Furthermore, structural life predictions were obtained from airport pavement design software. By comparing with groove deformation data, it is found that the service life of asphalt grooves is significantly shorter than the structural life of the pavement. Therefore, groove performance becomes a key factor limiting overall pavement service performance. Accordingly, it is recommended to provide an appropriate additional groove depth allowance during construction and to enhance research on groove rehabilitation and maintenance technologies in order to extend the service life of asphalt pavement grooving. In this study, the mechanical response and service life differences between typical groove forms are revealed, providing a theoretical basis and engineering reference for the optimized design, construction control, and maintenance decision-making of asphalt pavement grooving.

Keywords: airport pavement; asphalt pavement; full-scale accelerated loading test; service life; grooved pavement; finite element

Publication history: Received 2025-12-30; Received in revised form 2026-02-25; Accepted 2026-03-20

Funding: National Key R&D Program of China (2021YFB2600500)

* **Corresponding author:** ZHANG Run-feng, lecturer, PhD, E-mail: rfzhang@cauc.edu.cn.

0 引 言

机场沥青路面作为航空运输基础设施的核心组成部分,其表面性能直接影响飞机起降的安全性和运营效率^[1]。特别是在湿滑条件下,路面摩擦因数的降低往往导致飞机水漂现象,增加跑道偏离的风险^[2]。相较于其他飞行阶段,飞机着陆时发生水漂事故的风险尤为突出。当高速滚动的轮胎遭遇积水或湿滑道面时,水膜可能完全侵入轮胎与跑道接触区,导致轮胎丧失与路面的直接接触,摩擦力急剧下降。这一现象会显著减少轮胎与道面间的接触力和接触面积,致使飞机方向控制能力、制动效能和抗侧滑稳定性下降,进而引发滑行姿态失控。严重情况下,极易造成飞机冲出跑道事故,对航空安全构成重大威胁。根据国际航空运输协会的统计数据,2020~2024年间,全球商用航空事故中,跑道偏离事故占比为20%~25%,2024年国际航空运输协会安全报告显示,北美商用航空全事故率为每百万航班段1.20起事故,其中跑道偏离事件平均每年发生15~20起,远高于其他事故类型^[3]。为应对这一挑战,

路面刻槽技术已成为国际上广泛采用的工程措施。刻槽因其施工便捷、成本效益高、能有效恢复或提升路面宏观纹理、具有一定降噪效果等优点,成为保障雨天飞机高速滑跑安全最为经济有效的技术手段之一。

刻槽工艺是指在面层表面利用施工机械切割出具有规则的纹理以达到提高抗滑性能、降低水漂风险的作用。刻槽工艺优于其他抗滑措施主要表现在以下几个方面:成本远低于加铺层;可高效经济地提高道面的抗滑能力;施工工艺简单操作方便;可恢复旧面层的抗滑性能^[4]。然而,刻槽在使用过程中面临多种退化形式,如槽深减少、边缘破损、橡胶沉积和槽闭合,这些问题直接制约刻槽的使用寿命,并可能引发路面维护成本的急剧上升^[5]。为有效应对水漂风险,美国联邦航空管理局(FAA)在1975~1983年间进行了一系列具有里程碑意义的足尺试验,系统研究了飞机在开槽沥青跑道和刚性跑道上的制动性能与水滑行为^[6-7]。这些关键研究证实了在跑道表面切割或形成横向刻槽是一种经过验证且高效的技术方案。其核心机理在于高速滚动的轮胎下方产

生的动水压力能够驱使积水通过刻槽网络迅速横向排出,可以有效减少或消除水膜在接触区的积聚,从而显著降低跑道的潜在水滑风险^[8]。沥青路面刻槽起源于 20 世纪中叶的航空工程实践,早期的试验研究证实,横向刻槽可有效改善湿路面下的飞机制动性能^[9]。

基于上述试验成果和持续研究,FAA 制定了关于跑道刻槽构造的强制性规范标准,明确规定了新建跑道完工时及服役期间的刻槽几何参数要求^[10-11]。FAA 的矩形刻槽尺寸为 1/4 英寸(6.35 mm)×1/4 英寸(6.35 mm),中心间距为 1.5 英寸(38.1 mm),横向铺设且垂直于跑道中心线。这种标准化构造旨在优化排水效率并降低飞机的水滑风险。随着道面切割技术的不断进步,业界持续探索改进型沟槽设计以提升性能或降低成本。Patterson^[12]提出了一种新型梯形刻槽设计方案,旨在与标准矩形刻槽进行对比评估,该梯形刻槽的顶部开口宽度为 1/2 英寸(12.7 mm),底部宽度为 1/4 英寸(6.35 mm),中心间距为 2.25 英寸(57.15 mm)。FAA 的相关研究指出,相较于矩形刻槽,梯形设计可能具有提升排水效率、便于清理槽内累积橡胶、增强边缘结构稳定性或降低施工难度等潜在优势,但其综合性能仍需通过严谨的研究予以验证。

中国机场道面设计规范根据降雨量的环境条件对刻槽的标准进行了规定,规范要求对处于一类环境的道面,槽的形状可采用上宽 6 mm、下宽 5 mm、深 6 mm 的梯形刻槽,相邻槽中线间距为 38 mm。处于 2、3、4 类环境的道面,槽的形状可采用上宽 12.5 mm、下宽 6 mm、深 6 mm 的梯形刻槽,相邻刻槽中线间距为 50 mm,刻槽示意图 1。尽管刻槽技术在国际上已较为成熟,但沥青道面刻槽在中国机场的应用并不广泛,其主要原因包括:沥青材料的黏塑性特性导致刻槽在反复荷载下易发生快速变形和闭合,相比刚性道面,沥青道面刻槽的耐久性较低,易受温度变化和轮载影响而加速退化;此外,中国相关规范虽已制定,但施工工艺标准化程度不高,检测评价方法尚不完善,导致维护成本较高且效果不确定;同时,缺乏针对沥青道面的长期足尺试验数据和预测模型,也进一步限制了其推广应用。

与刚性道面相比,沥青道面刻槽在施工工艺、检测方法和纹理评估等方面存在显著差异,其技术难点主要体现在以下方面:施工工艺上,刚性道面通常采用浇筑成型后切割,材料刚度高,刻槽边缘稳定不易变形,而沥青道面需在柔性材料上切割,易因高温

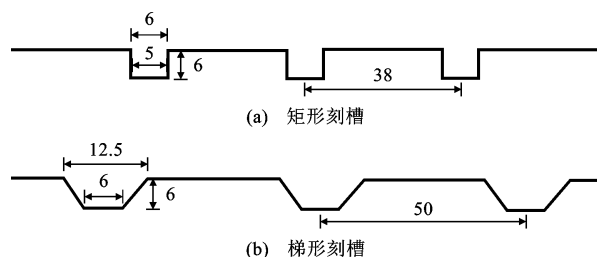


图 1 矩形槽与梯形槽几何尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Geometric dimensions of rectangular and trapezoidal grooves (unit: mm)

或荷载导致边缘塌陷和闭合,施工需严格控制温度和压实度以避免初始缺陷;检测方法上,刚性道面可依赖激光扫描和图像识别评估几何参数稳定性,而沥青道面检测需额外考虑黏塑性变形引起的动态变化,常见激光扫描存在盲区问题,需要高精度重叠算法来弥补;纹理评估上,刚性道面纹理退化主要为橡胶沉积和边缘破损,而沥青道面纹理易因材料流动导致槽深快速减少,评估需整合排水效率和摩擦性能的动态模型,难点在于量化黏塑性累积变形对宏观纹理的影响,以及建立可靠的寿命预测机制。

此外,刻槽使用寿命与道面结构寿命密切相关,但前者往往显著短于后者。道面结构寿命主要基于整体承载能力和累积损伤因子计算,考虑材料模量、厚度及交通荷载等因素,而刻槽寿命则聚焦于局部几何参数的退化,受轮载应力集中和材料黏塑性影响更大。刻槽退化会加速道面摩擦性能下降,间接影响结构稳定性,但结构寿命通常以整体破坏为标准,因此刻槽需更频繁维护,以避免其提前失效而诱发结构问题。

近年来国内外学者对沥青道面刻槽技术进行了广泛研究,涵盖施工工艺、退化机制、检测方法、预测模型和寿命分析等方面。早期研究主要聚焦于刻槽的几何参数优化和初始性能评估,例如 Lee 等^[13]通过激光位移传感器开发自动测量仪器,验证了刻槽深度、宽度和间距对抗滑性能的影响,证明标准刻槽可显著降低水漂风险。之后,研究转向退化机理和维护策略,White 等^[14]分析了刻槽闭合、边缘断裂和橡胶填充等损伤模式,强调早期维护的重要性。在道面数据采集和信号处理方面,Wang 等^[15]提出了新的桥式滤波方法。近 5 年来,随着数值模拟和智能检测技术的进步,Pasindu^[16]采用有限元方法模拟刻槽退化对摩擦性能的影响,发现深度变异可导致制动距离增加 20%。Jiang 等^[17]开发解析模型,量化轮胎橡胶-刻槽互锁对摩擦因数的贡献,评估梯形刻槽与 FAA 标准刻槽的等效性。Miah

等^[18]利用基因表达式编程(GEP)模型预测跑道刻槽闭合,准确率达 85%。Jamieson 等^[19]对澳大利亚柔性机场道面进行标准化规范,包括刻槽维护标准。Qiao 等^[20]研究了气候因素对柔性道面服役性能和使用寿命的影响,指出温度等环境条件的变化会影响道面结构的长期性能。White^[21]综述了机场沥青表面技术现状,指出刻槽闭合是主要失效模式。

中国针对道面刻槽问题的研究同样活跃。张德津等^[22]基于三维激光扫描提出机场道面刻槽检测算法,实现精度达 95%的几何参数识别。彭少龙等^[23]通过高程坐标模拟水流方向,优化高速公路沥青路面刻槽排水设计,降低水膜厚度 2.53 mm。甘宏^[24]应用三维激光成像技术检测路面刻槽和坑槽,验证了实时监测的可行性。叶珍^[25]基于 ABAQUS 模拟刻槽尺寸与路面磨损的相关性,揭示宽深比对耐久性的影响。范慧^[26]探讨了机场沥青混凝土刻槽道面的耐久性和安全性。陈逸涵^[27]基于三维激光扫描快速测定沥青路面构造深度,集成刻槽退化评估。Liu 等^[28]提出基于跑道抗滑阻力的飞机着陆关键操作参数确定方法,为刻槽道面安全评估提供新思路。宋波^[29]分析了既有沥青道面结构评价与延寿设计方法,强调刻槽退化对整体抗滑性能的影响。此外,2025 年一项研究进展综述了沥青道面退化评价和预测方法,强调科学维护决策的基础^[30]。这些文献从试验、模拟和检测等多角度揭示了刻槽性能。

本文的研究基于上述国内外研究成果,构建了沥青刻槽道面的试验平台,测试并采集足尺飞机载荷作用下,矩形刻槽和梯形刻槽的变形数据,并据此进行了有限元模拟。对沥青刻槽道面使用寿命进行了分析,旨在为机场道面设计、维护和管理提供理论支撑。对矩形刻槽与梯形刻槽的变形规律进行模拟对比分析,比较其性能差异,并采用机场道面设计软件 FAARFIELD 预测道面结构寿命,将沥青刻槽道面寿命与整体结构设计寿命进行比较评估。

1 刻槽道面足尺加载试验

目前,国际上推荐使用梯形刻槽道面,为比较梯形刻槽道面与标准矩形刻槽道面的性能差异,在沥青道面区域布置了矩形与梯形 2 种刻槽形式,并对两种刻槽道面进行了足尺加载试验。刻槽道面根据结构变化分为刻槽区 1~3,这 3 个刻槽区域如图 2 所示,每个区域内分别刻制了 1.5 m 长度的矩形刻槽和 1.5 m 长度的梯形刻槽。3 个区域的沥青面层

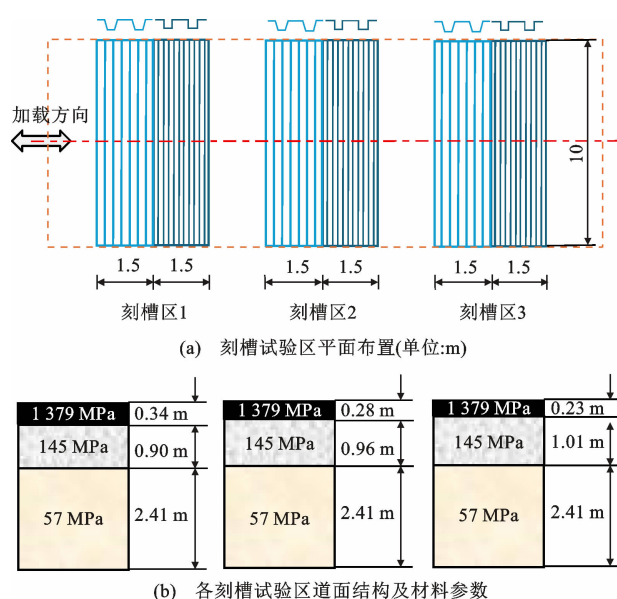


图 2 刻槽区域示意

Fig. 2 Schematic of the grooved area

和基层的厚度有所不同,各区域对应各层材料的性质保持一致,这些参数的选择主要是为了研究不同结构层柔性道面的承载性能。在沥青道面测试段结构施工完成以后,分别在上述 3 个区域的沥青面层进行了刻槽加工。

沥青道面的足尺加速加载试验,采用重载往复滚动式加载设备,加载轮组为三轴六轮,滚动加载速度 $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,单轮载荷为 245 kN,胎压为 1.76 MPa,总共历时 12 个月,在上述 3 个刻槽区域共计进行了约 3 万次滚动加载,并定期对刻槽表面的变形进行了测试记录,滚动轮加载参数见表 1。

表 1 加载测试载荷参数

Table 1 Parameters of the applied loads in the loading test

轮胎参数	取值
轮胎接地压力/MPa	1.76
单轮荷载/kN	245
加载轮数量	6(三轴双轮)
横向轮隙宽度/cm	106.5
纵向轮隙长度/cm	91.7

2 刻槽形状数据采集识别

本试验采用高精度三维激光线性扫描传感器来检测道面刻槽形状参数,虽然理论上三维激光线性扫描可以得到道面三维立体特征,但对于固定扫描角度,沿着跑道单向移动中的激光扫描器,面对不规则的道面刻槽形貌,不可避免地存在扫描盲区。由于所选激光传感器采样频率可达 10 kHz,为消除光学扫描区域的扫描盲区,本试验将传感器线性扫描

方向转动 90° 以形成对采集对象的多次重叠扫描,随着激光扫描器沿跑道方向单向移动,可以有效地消除激光扫描存在的光线遮挡问题,如图 3 所示。

为表述这种重叠扫描技术计算,假设线性激光

束沿 x 轴方向进行扫描,扫描的横向分辨率为 x_i ,激光传感器设备沿 y 轴方向,即垂直于刻槽方向匀速移动,移动产生的纵向分辨率为 y_j ,则传感器不做旋转前的正常采集样本的坐标为



图 3 激光传感器扫描示意

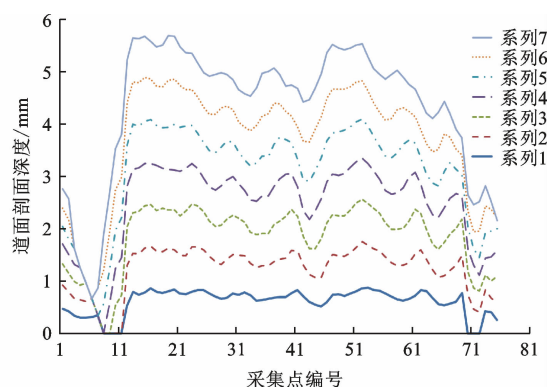
Fig. 3 Schematic of laser sensor scanning

$$\begin{cases} x_i = i\Delta x & i=1,2,\dots,m \\ y_j = j\Delta y & j=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (1)$$

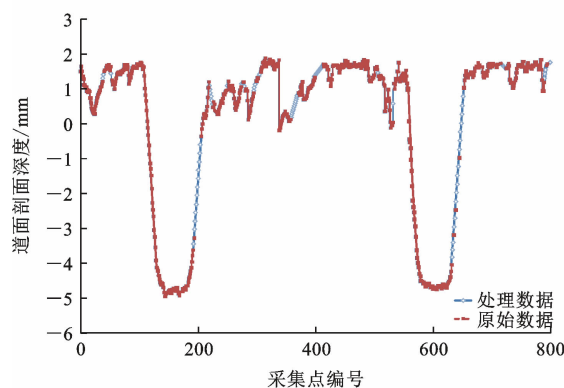
式中: Δx 和 Δy 分别为横向采样间距和纵向采样间距; m 和 n 分别为横向最大采样点数和纵向采样点数范围。

当传感器设备做 90° 旋转后, y 方向坐标点 y_j 前后会附加一系列间距为 Δx 的沿 y 轴方向的采集值,即设备旋转前,原 x 方向的采集样本值,作为 y 坐标点样本值的补充,以弥补潜在的扫描盲区。通过激光传感器设备旋转获得了一系列具有相位偏移的轮廓曲线,其扫描数据如图 4(a) 所示。经过系列数据移动处理后,将遗失的扫描点进行补充,得到修复后的道面刻槽区的数据如图 4(b) 所示,其中红色是单次扫描的原始数据,蓝色是对遮挡区经过系列扫描后得以修复的数据。

针对道面刻槽的几何形状指标,民航相关施工规范给出了槽深、槽宽和槽间距的具体要求,由于实际刻槽形状会随着载荷作用和磨损时间而发生变化,槽的深度 $p(x)$ 一般会逐渐变浅,为了有效评价槽的形状变化,需要对刻槽评价指标进行规定,定义槽深 P 取槽边两侧最高点 Q_1 和 Q_2 连线与槽底的最大距离^[31]。由于槽的宽度变化比较复杂,在槽内不同部位宽度数值不同,考虑道面刻槽的目的是为了有效排除道面积水,刻槽横截面积的大小可以反映刻槽的排水效果,所以,为了评价刻槽的宽度,通过积分取得刻槽截面积 A 来计算刻槽宽 W ,公式如下



(a) 传感器旋转后系列扫描数据



(b) 经过叠加处理后的刻槽数据

图 4 刻槽扫描数据叠加处理过程及结果

Fig. 4 Superposition processing procedure and results of groove scanning data

$$A = \int_{Q_2}^{Q_1} p(x) dx \quad (2)$$

$$W = \frac{A}{P} \quad (3)$$

3 刻槽道面疲劳损伤

沥青道面的足尺加载试验会造成道面刻槽形状的改变,变化程度随着加载次数的增加呈现非线性增长趋势。测试发现在加载初期,刻槽形状变化明显,随后变化率趋于稳定。测试区道面的测试周期

取决于加载设备运行维护和道面刻槽形变情况,在近一年的加载全过程中共进行了 12 次刻槽变形测试,包含加载前的 0 次测试,加载 660 次后的初始测试和之后各时间段的间断性测试,以及加载次数达到 30 000 次时的最终测试。所记录的刻槽深度和横截面积变化数据如表 2、3 所示。

表 2 加载测试的刻槽深度
Table 2 Groove depths in the loading test

参数		刻槽区 1 深度/mm		刻槽区 2 深度/mm		刻槽区 3 深度/mm	
		梯形槽	矩形槽	梯形槽	矩形槽	梯形槽	矩形槽
加载次数	0	3.904 0	6.504 9	4.450 1	5.628 6	6.477 0	5.567 7
	660	3.487 4	6.024 9	4.051 3	5.146 0	6.019 8	5.214 6
	30 000	3.327 4	5.034 3	3.779 5	4.097 0	5.458 5	4.213 9
初始变形占比/%		71.99	32.60	59.49	31.65	45.06	26.18

表 3 加载测试的刻槽横截面积
Table 3 Cross-sectional areas of grooves in the loading test

参数		刻槽区 1 横截面积/mm ²		刻槽区 2 横截面积/mm ²		刻槽区 3 横截面积/mm ²	
		梯形槽	矩形槽	梯形槽	矩形槽	梯形槽	矩形槽
加载次数	0	33.161 2	41.870 9	39.354 8	37.612 8	64.451 5	35.741 9
	660	29.354 8	36.064 4	35.290 3	32.322 5	57.548 3	31.935 4
	30 000	26.967 7	29.483 8	31.677 4	23.870 9	47.935 4	24.064 4
初始变形占比/%		61.29	46.93	52.81	38.32	41.89	32.56

从表 2、3 可以看出,不同刻槽区域在初始槽深及横截面积方面存在一定差异,主要源于施工误差及不同结构层厚度对表面压实状态的影响。总体来看,各区域初始槽深偏差控制在合理施工误差范围内,未出现系统性偏差。分别对 3 个刻槽区进行了数值模拟,并与实测数据进行了对比,本文选择几何尺寸相对稳定、结构参数明确的刻槽区 3 进行对比分析。

测试数据表明,虽然初始变形时的加载次数 660 仅占总加载次数 30 000 的 2%,但矩形刻槽变化量约占总变形量的 1/3,梯形刻槽变化量甚至可占总变形量的一半左右,而且沥青层越厚,初始变形越大。所以,对于沥青刻槽道面,初始几百次加载产生的刻槽变形是一个值得关注的问题,有待进一步的研究。

加载 660 次以后,刻槽深度和刻槽横截面积变化趋于稳定,这个近 3 万次加载的变形过程占测试刻槽寿命长度的 98%,是本文刻槽道面寿命计算的主要关注部分。图 5 给出矩形槽和梯形槽在各刻槽区的具体变化数值。由于刻槽过程存在施工误差,造成初始刻槽尺寸不一致,比如梯形槽在刻槽区 3 的初始尺寸大于其他 2 个刻槽区的对应尺寸,因此,

也对矩形槽和梯形槽的变化进行了平均值计算和拟合方程计算,如图 6 所示。

4 刻槽道面数值模拟

刻槽道面数值模拟采用 ABAQUS 软件建立刻槽与轮载作用的有限元模型,沥青道面材料采取常规黏塑性本构关系,以模拟不同刻槽截面在反复飞机荷载作用下的竖向位移变化。由于本试验各测试区初始刻槽尺寸不一致,仅选取刻槽区 3 的结构尺寸和实测刻槽响应进行对比。选择刻槽区 3 作为代表区域,主要基于以下考虑:刻槽区 3 刻槽初始尺寸与规范设计值最为接近;该区域结构层厚度及材料参数明确,施工质量稳定;刻槽区 3 的变形趋势具有代表性,未出现异常波动。在此基础上,进行刻槽道面寿命预测,为降低湿滑条件下的飞机水滑风险、提升机场道面运行安全提供依据。

为准确描述机场沥青混合料在循环荷载作用下的永久变形行为,本文采用基于 Perzyna 过应力理论的黏塑性本构模型对沥青面层材料进行模拟。Perzyna 于 1966 年提出该理论,将材料的塑性流动视为对应力超过屈服面的时间相关过程,可有效描述材料在高温和重复荷载条件下的黏塑性累积变形

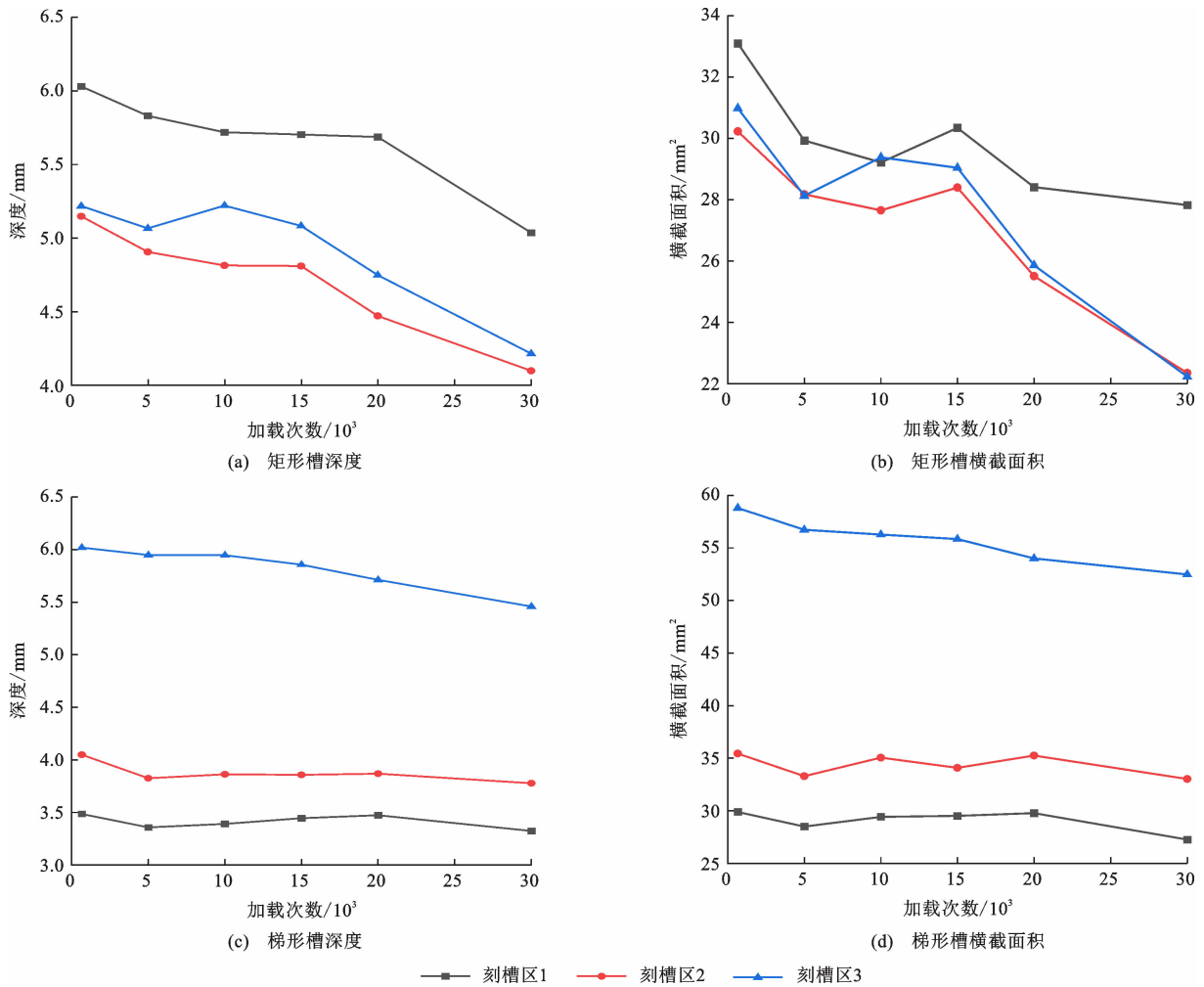


图 5 不同刻槽形式几何参数随加载次数的变化

Fig. 5 Variations in geometric parameters of different groove shapes with load repetitions

行为。该模型已广泛应用于沥青路面永久变形与车辙演化分析中。在小变形条件下,总应变可分解为弹性应变与黏塑性应变两部分。材料总应变分解公式及黏塑性应变率表达式分别为

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ije} + \epsilon_{ijvp} \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon}_{ijvp} = \gamma \left\langle \frac{f(\sigma)}{\sigma_0} \right\rangle \frac{n_s \partial g(\sigma)}{\partial \sigma_{ij}} \quad (5)$$

式中: ϵ_{ije} 为弹性应变; ϵ_{ijvp} 为黏塑性应变; ϵ_{ij} 为材料总应变; $\dot{\epsilon}_{ijvp}$ 为黏塑性应变率张量分量; γ 为黏塑性流动参数; $f(\sigma)$ 为屈服函数; σ_0 为参考应力; n_s 为应力指数; $\langle \cdot \rangle$ 为Macaulay括号; $g(\sigma)$ 为塑性势函数; σ_{ij} 为应力张量中的分量。

如前所述,试验段初期加载在 660 次以内出现了显著的竖向位移变化。其可能存在的原因有:①试验段沥青混合料初始压实度不足,空隙率偏高,早期荷载引起骨架重排与二次压实,导致沥青快速的永久变形;②试验结构位于不同道面结构的过渡带,早期加载产生就位效应与基层的初始整固,使路

表产生附加沉降;③试验季节温度较高,结合料更易流动,放大了初期的黏塑性流变变形。此后,随着混合料空隙率下降、结构刚度提升,变形速率趋于稳定并进入准线性累积阶段。本文仅对比稳态 660~30 000 次加载区间内的模拟与实测数据。试验结果表明,刻槽在前期加载阶段存在显著初始变形,该阶段变形主要与混合料二次压实效应有关,属于材料结构初始调整过程。本文所采用的黏塑性模型基于均匀连续变形假设,未考虑初始空隙率变化及结构压实演化过程,因此未能准确反映初始阶段的突变特征。需要指出的是,本文建立的寿命预测模型主要适用于稳态累积变形阶段,对初始快速变形阶段的预测有待进一步的研究。

沥青刻槽道面的三维有限元模型的矩形沥青道面的整体几何尺寸为 63.5 mm×38.1 mm×100 mm,其中刻槽的尺寸为 6.35 mm×6.35 mm×100 mm。梯形沥青道面的整体几何尺寸为 63.5 mm×57.1 mm×100 mm,梯形刻槽的上槽宽为 12.7

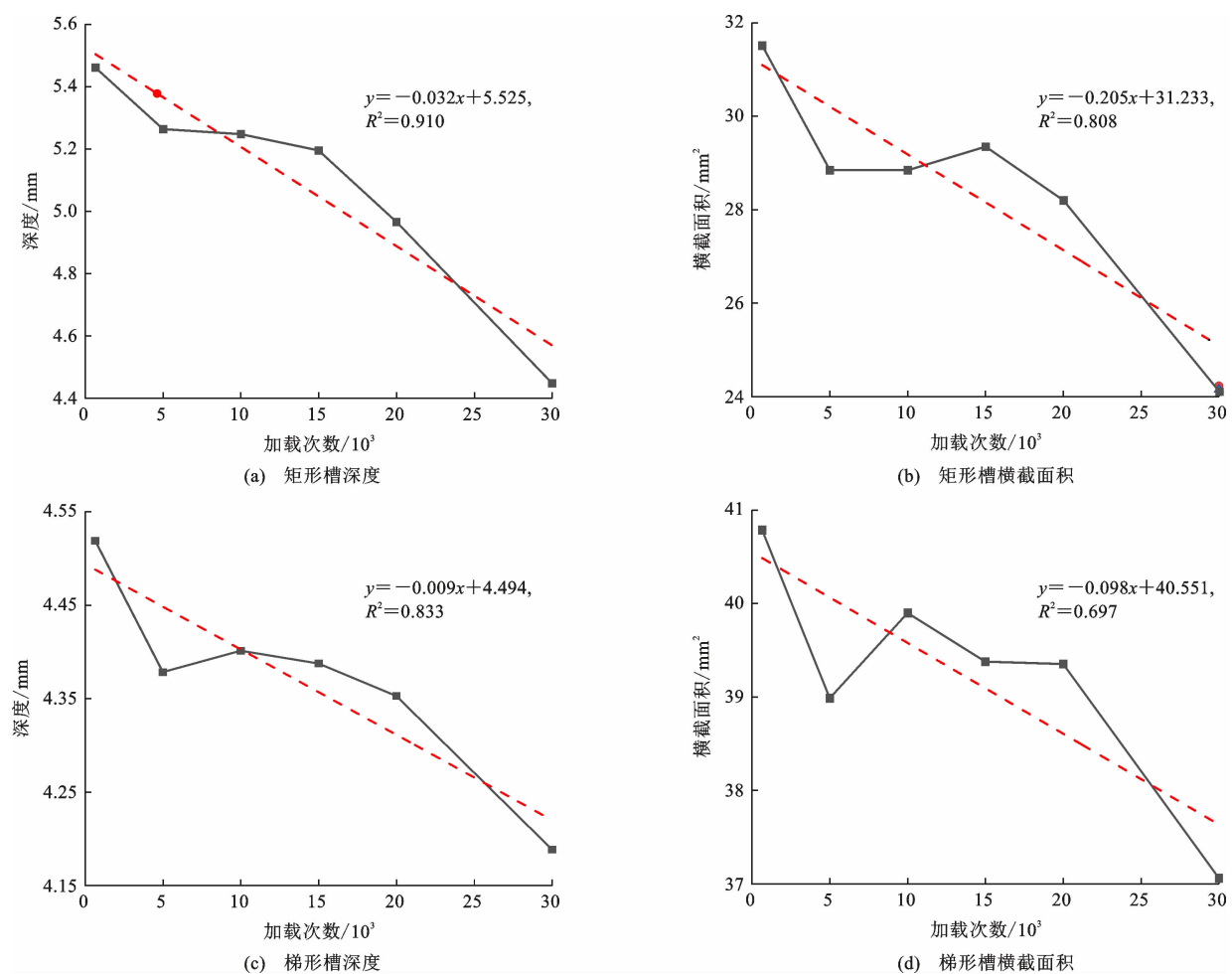


图 6 不同刻槽形式平均几何参数随加载次数的变化及拟合结果

Fig. 6 Variations and fitting results of the mean geometric parameters of different groove shapes with load repetitions

mm,下槽宽为 6.35 mm,高度为 6.35 mm,长度设置为 100 mm。在设置边界条件时,侧边界约束水平方向,底边约束水平和竖直方向。本文模型的单元类型采用 C3D8R 八结点线性六面体单元,减缩积分,沙漏控制^[32]。本文有限元模型基于小变形假设,未考虑温度梯度的影响。边界条件设置为侧边界施加水平约束,底边界采用全约束。由于所选刻槽测试数据为在道面中心相对平缓区域进行,所以本文刻槽模型未考虑土基层作用。模拟结果主要适用于稳态荷载条件下的响应分析,工程实际应用中仍需结合现场监测数据进行修正与验证。模型网格划分如图 7 所示。

模型主要关注沥青层承受载荷的形变。为准确表征机场道面沥青混合料在不同次数循环荷载下的变形行为,本文采用黏塑性本构关系描述矩形与梯形刻槽的变形特性,该模型可有效模拟 2 种刻槽的深度随加载次数变化的特性。相关参数如表 4、5。其中,沥青面层的模型参数参照相关文献数据,并针

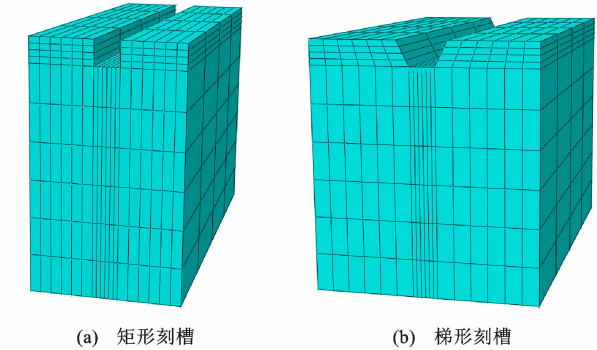


图 7 矩形刻槽和梯形刻槽的有限元网格

Fig. 7 Finite element meshes of rectangular and trapezoidal grooves

表 4 沥青面层模型参数

Table 4 Parameters of the asphalt surface layer model

材料	回弹模量 /MPa	泊松比	蠕变系数	应力指数	时间指数
AC-25	400	0.35	4.0×10^{-8}	0.776	-0.571

对本试验条件进行了适当调整^[33-34]。

有限元分析模拟了轮载对道面的加载过程,轮

表 5 屈服应力-塑性应变关系

Table 5 Relationship between yield stress and plastic strain

应力/MPa	0.026	0.116	0.200	0.300	0.350
应变/ 10^{-3}	0	2.065	3.478	4.891	5.761
应力/MPa	0.400	0.452	0.504	0.544	0.564
应变/ 10^{-3}	7.065	10.000	14.891	20.000	24.783

载参数为轮载压强 1.76 MPa,该压强沿竖直方向直接施加在机场道面上,方向为竖直向下。分别对矩形刻槽模型与梯形刻槽模型设置了分析步。刻槽模型的分析步类型为静力分析,设置最大增量步数为 35 000 次,矩形刻槽模型分析步步长为 0.034 s,总时间为 1 190 s。梯形刻槽模型分析步步长为 0.051 s,总时间为 1 786 s。在模型中部的竖直截面,矩形刻槽模型与梯形刻槽模型的变形和应力分布分别如图 8、9 所示。有限元坐标设置使得 x 轴与刻槽横向一致, y 轴为竖直方向。输出的应力分量 S_{11} 为 x 方向法向应力, S_{22} 为 y 方向法向应力。显示 2 种刻槽模型的应力分布形式不同,矩形刻槽在荷载作用下,应力主要集中在槽底部的直角附近,其中槽底中央承受最大竖向应力,横向应力在角部达到了峰值。而梯形刻槽两侧具有倾斜侧壁,载荷通过倾斜面向两侧扩散,应力不再集中在底部直角处,而是分布在侧壁和底部接触区域。两者的应力数值存在较大的差别。矩形刻槽应力明显大于梯形刻槽应力,其中最大水平应力差值为 10%,最大竖向应力差值达到 25%,这也解释了矩形刻槽的损伤程度大于梯形刻槽的试验结果。

在模型计算结果中,分别提取矩形与梯形刻槽的竖向位移,在 660、5 000、10 000、15 000、20 000、和 30 000 次加载下进行数据拟合处理。为验证有限元模型的可靠性,对模拟结果与足尺加载试验的稳态变形斜率进行比较。矩形刻槽的模拟斜率为 $-0.036\ 8$,试验值为 $-0.038\ 2$,相对误差为 3.66%;梯形刻槽的模拟斜率为 $-0.029\ 0$,试验值为 $-0.027\ 8$,相对误差为 4.32%。整体误差小于 5%,表明模型能准确捕捉沥青面层的黏塑性变形行为,进一步增强了模拟结果的可信度,如图 10 所示。

模拟分析结果表明,有限元模型变形规律即拟合直线的斜率非常接近实测数据拟合直线的斜率值,虽然矩形刻槽的初始点位移有所不同,接近 1 mm,如前所述,这种初始变形原因比较复杂,有待进一步研究。有限元模型在不考虑初始阶段变形情况下,与试验数据基本一致的拟合方程的斜率值可以反映疲劳加载的刻槽深度的稳定变化,实现对沥

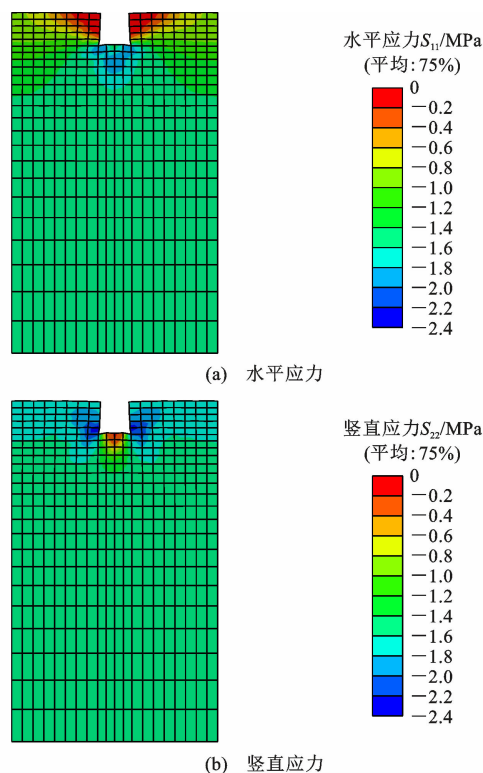


图 8 矩形刻槽的变形和应力分布

Fig. 8 Deformation and stress distribution of rectangular grooves

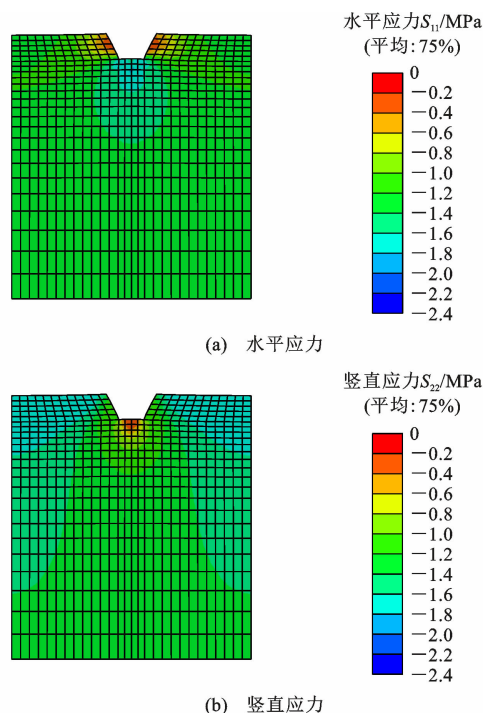


图 9 梯形刻槽的变形和应力分布

Fig. 9 Deformation and stress distribution of trapezoidal grooves
青刻槽道面刻槽寿命的预测分析^[35-36]。

5 矩形槽和梯形槽的寿命比较

中国民航的相关刻槽施工规范对刻槽深度和宽

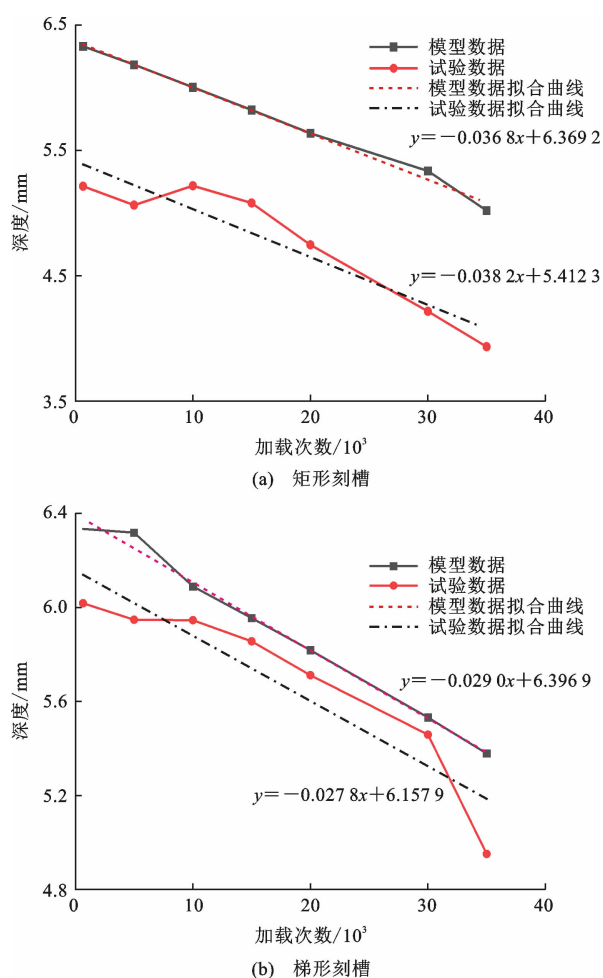


图 10 有限元刻槽模型的拟合结果

Fig. 10 Fitting results of the finite element groove model

度及其允许偏差有明确规定,美国联邦航空管理局对刻槽设计指标也有类似规定,具体数值见表 6。

表 6 国内外对刻槽尺寸的规定

Table 6 Regulations on groove dimensions at home and abroad

mm

检测指标	技术指标及最大允许偏差	
	中国民用航空管理局 规范要求	美国联邦航空管理局 规范要求
槽深	5 或 8	6 ± 1.6
槽宽	5 或 8	6 ± 1.6

通过有限元模拟对比分析 2 种刻槽形式的损伤情况,在 35 000 次加载后,矩形刻槽的道面深度变形量为 1.33 mm,梯形刻槽的深度变形量为 0.97 mm。依据中国规范判断,在该加载水平下,矩形刻槽的沥青道面结构已达到破坏状态,而梯形刻槽虽未完全失效,但已接近极限。按照美国联邦航空管理局规范进行评价,则矩形刻槽的道面结构处于临近失效状态,而梯形刻槽距离失效仍有一定余量。

对比 2 种刻槽形式的破坏情况试验数据,发现在加载计入稳定变形阶段后,即从 660 次到 30 000 次加载的寿命周期内,矩形刻槽深度的变化随加载千次数的损伤斜率为 0.038,而梯形槽为 0.028,说明梯形槽寿命周期高于矩形槽大约 25%。所以,无论是模型分析还是试验测试数据,梯形槽的使用寿命均优于矩形槽,寿命提升约 25%。从工程角度看,梯形槽通过减小底角应力集中、改善载荷扩散路径,有助于延缓几何闭合过程。该结果为优化机场沥青道面刻槽设计提供了试验依据,也为现行刻槽尺寸规范的结构合理性评价提供了参考。对于交通量较大、温度较高或重载比例较高的机场,道面刻槽形式的合理选择对于延长服役周期、降低维护频率具有重要意义。

上述寿命分析基于稳态变形阶段的线性外推结果,未计入初始压实阶段的突变变形。因此,预测寿命代表刻槽进入稳定服役阶段后的剩余使用寿命。

6 刻槽寿命与沥青道面的寿命比较

为了比较刻槽自身寿命与沥青道面的结构设计寿命,本文选用美国联邦航空管理局正在使用的机场道面设计软件 FAARFIELD 进行分析。该软件具有机场道面结构与道面使用寿命预测的功能,其寿命预测机制基于交通荷载、材料层的弹性模量与厚度等输入。结构性寿命通常定义为道面承受交通荷载至结构性失效标准之前所能服役时间或交通量。FAARFIELD 在预测中使用累积损伤因子 (Cumulative Damage Factor, CDF),若 CDF 达到 1.0,则视为结构寿命耗尽。尽管预测结果受到材料实际性能、环境因素、施工质量以及交通量估算等不确定性影响,但 FAARFIELD 提供的结构性寿命预测基于大量实际结构的飞机重载试验数据,比传统经验法更贴近道面实际性能,是国际上机场道面分析设计与维修策略的常用工具。

在 FAARFIELD 软件中进行道面结构参数设置,各层的参数与实际测试结构相一致,在表 7 列出^[37]。由于 FAARFIELD 在结构模型中采用材料弹性假设,其所计算的应力值与本文使用 ABAQUS 构建的黏塑性模型模拟出的沥青层应力状态存在差异。因此,FAARFIELD 中的材料参数设定与本文在黏塑性模型中使用的材料参数并不完全相同。

为建立与室内试验加载条件相匹配的航空道面计算模型,采用 FAARFIELD 软件对试验结构进行荷载响应分析。根据试验中采用的三轴六轮加载形

表 7 道面各结构层材料参数

Table 7 Material parameters of pavement structural layers

结构层	材料编号	回弹模量/MPa	泊松比
沥青面层	P-401	1 379	0.30
粒料基层	P-154	145	0.35
土基	SUBGRADE	57	0.40

式,选取 B777-300 型飞机作为设计荷载机型,其主起落架形式为三轴六轮,与试验加载轮组具有较好的对应性。

在道面结构参数设置方面,采用沥青混凝土面层—粒料基层结构形式。道面结构自上而下分别由沥青混凝土面层、未破碎粒料基层和土基组成。其中,沥青混凝土面层厚度设置为 203 mm,弹性模量为 1 378.95 MPa;粒料基层厚度设置为 1 000 mm,弹性模量为 144.86 MPa;土基弹性模量设置为 56.88 MPa,对应加州承载比为 5.5。

飞机荷载参数方面,B777-300 型飞机总滑行重量设置为 300 280 kg,轮胎压力设置为 1 482 kPa,年起飞架次设置为 35 000 架次,设计使用年限按照 FAARFIELD 标准取 20 年。通过输入飞机型号、飞机重量、轮胎压力、运行架次以及道面结构参数,建立与试验加载条件相对应的航空荷载计算模型,为后续道面结构变形及应力响应分析提供基础。

在飞机起飞交通量为年 35 000 架次情况下,FAARFIELD 软件中计算的沥青道面结构寿命为 1.5 年。而从有限元模型对道面刻槽变形的计算分析和实际刻槽道面的检测数据看,沥青道面刻槽寿命在一年 35 000 次加载时,矩形刻槽的沥青道面结构已达到破坏状态,而梯形刻槽虽未完全失效,但已接近极限。因此,沥青道面刻槽寿命低于沥青道面的结构寿命。这就需要进一步考虑相应的刻槽修复与养护技术,并且改进沥青道面材料性能,以提高刻槽区域变形稳定性和耐久性。

7 结 语

(1)通过技术和算法创新,即构建高精度采集系统和系列扫描叠加算法,消除了常见的激光器扫描数据盲区影响,取得了可靠的试验数据。

(2)通过对 2 种刻槽形式,即矩形刻槽和梯形刻槽的数据分析,建立了符合沥青道面材料黏塑性本构关系的数值模型,所建数值模型和试验数据基本一致。

(3)对比 2 种刻槽形式的稳态衰减斜率方程,结果表明梯形槽的使用寿命较矩形槽提高约 25%。

有限元模型分析表明梯形槽在减小应力集中和提高结构稳定性方面的优势,为机场刻槽形式优化提供了试验与理论支撑。

(4)发现沥青道面刻槽区域在其寿命周期仅占 2%的几百次初始加载阶段,矩形刻槽和梯形刻槽分别产生刻槽寿命周期内总变形量约 1/3 到 1/2 的初始变形。

(5)运用机场道面设计软件计算了沥青道面的结构寿命,通过与刻槽寿命对比,发现沥青刻槽道面自身寿命低于沥青道面的结构寿命。

(6)针对上述发现,有必要改进沥青道面刻槽效果,提高道面的刻槽寿命。一方面在沥青道面刻槽工程施工时,预留一定余量的刻槽深度,即适当增加施工时的刻槽深度值,以补偿加载时产生的初始变形,延长刻槽寿命。另一方面,进一步开展定量研究,结合初始加载的位移突变,深入研究其与道面结构和材料性能的关系,通过更多的加载试验和数值模拟分析,细化不同沥青混凝土级配类型的刻槽设计参数。

(7)鉴于梯形刻槽在寿命稳定性方面表现出的优势,在满足施工精度与成本可控条件下,建议在重载频繁或高温地区机场优先考虑梯形刻槽设计。未来可结合不同气候区与运行等级机场的实测数据,进一步评估其在更广泛工程条件下的适用性与推广潜力。

(8)本研究主要基于稳态竖向循环荷载条件,分析刻槽几何形状随加载次数的衰减规律,尚未考虑飞机着陆冲击荷载、制动阶段轮胎水平剪应力及橡胶沉积堵塞等多因素耦合作用对刻槽服役性能的影响。未来研究可考虑动载和剪切载荷分析及橡胶沉积演化机理,建立更加完整的刻槽退化多物理场耦合模型。

参 考 文 献 :

References :

- [1] MIDTFJORD A D, DE BIN R, HUSEBY A B. A decision support system for safer airplane landings: Predicting runway conditions using XGBoost and explainable AI[J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 198: 103556.
- [2] FWA T F. Pavement skid resistance properties for safe aircraft operations[J]. Journal of Road Engineering, 2024, 4(4): 361-385.
- [3] International Air Transport Association. IATA annual safety report 2024[R]. Geneva: IATA, 2025: 1-45.
- [4] 代 思,杨孝思,谭祺琦. 刻槽沥青路面抗滑性能分析[J]. 科学技术创新,2021(31):114-116.

- DAI Si, YANG Xiao-si, TAN Qi-qi. Analysis of skid resistance of grooved asphalt pavement[J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(31): 114-116.
- [5] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Impact of airport rubber removal techniques on runways[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2009: 1-119.
- [6] AGRAWAL S K, DAIUTUTOLO H. The braking performance of an aircraft tire on grooved Portland cement concrete surfaces[R]. Washington DC: FAA, 1981: 1-16.
- [7] AGRAWAL S K. Braking of an aircraft tire on grooved and porous asphaltic concrete[R]. Washington DC: FAA, 1983: 1-56.
- [8] 李林泉. 雨雪天气下机场飞行区道面易损性研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2024: 36.
- LI Lin-quan. Study on pavement vulnerability of airport flight area under rainy and snowy weather [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2024: 36.
- [9] PASINDU H R, FWA T F. Improving wet-weather runway performance using trapezoidal grooving design [J]. Transportation in Developing Economies, 2015, 1(1): 1-10.
- [10] DAIUTOLO H. Runway grooving and skid resistance[C]//SRAI. IX ALACPA Seminar of Airport Pavements. Panama City: SRAI, 2012: 1-63.
- [11] Federal Aviation Administration. Measurement, construction and maintenance of skid resistant airport pavement surfaces [R]. Washington DC: FAA, 1997: 1-45.
- [12] PATTERSON JR J W. Evaluation of trapezoidal-shaped runway grooves[R]. Washington DC: FAA, 2012: 1-9.
- [13] LEE M H, CHOU C P, LI K H. Automatic measurement of runway grooving construction for pavement skid evaluation [J]. Automation in Construction, 2009, 18(6): 856-863.
- [14] WHITE G, RODWAY B. Distress and maintenance of grooved runway surfaces[J]. Airfield Engineering and Maintenance Summit, 2014, 29: 25-28.
- [15] WANG Q, DAVIS J. Airport pavement groove identification and analysis at NAPTF[J]. Advanced Materials Research, 2013, 723: 1003-1010.
- [16] PASINDU H R. Analytical evaluation of impact of groove deterioration on runway frictional performance [J]. Transportation Research Procedia, 2020, 48: 3814-3823.
- [17] JIANG B Y, WANG H. An analytical solution for friction coefficients of grooved pavements considering tire rubber-groove interaction[J]. Tribology International, 2023, 190: 109052.
- [18] MIAH M T, OH E, CHAI G, et al. Runway groove closure prediction modelling by gene expression programming (GEP) [J]. Road Materials and Pavement Design, 2023, 24(12): 2929-2958.
- [19] JAMIESON S, WHITE G. Standardised specifications for flexible airport pavements[C]//Australian Flexible Pavement Association. Proceedings of the 19th AfPA International Flexible Pavements Conference. Brisbane: Australian Flexible Pavement Association, 2023: 1-11.
- [20] QIAO Y, FLINTSCH G, DAWSON A, et al. Examining effects of climatic factors on flexible pavement performance and service life[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013 (2349): 100-107.
- [21] WHITE G. State of the art: Asphalt for airport pavement surfacing[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2018, 11(1): 77-98.
- [22] 张德津, 王 毅, 章 洋, 等. 基于三维断面数据的机场道面刻槽检测方法[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2020, 39(2): 195-204.
- ZHANG De-jin, WANG Yi, ZHANG Yang, et al. Airport runway grooves detection using 3D laser profiling technology [J]. Journal of South-central Minzu University (Natural Science Edition), 2020, 39(2): 195-204.
- [23] 彭少龙, 李 博, 汤铭锋, 等. 高速公路沥青路面刻纹处治积水研究[J]. 四川水泥, 2025(11): 239-241, 244.
- PENG Shao-long, LI Bo, TANG Ming-feng, et al. Study on treatment of stagnant water by engraving on asphalt pavement of expressway [J]. Sichuan Cement, 2025 (11): 239-241, 244.
- [24] 甘 宏. 三维激光成像技术在路面刻槽及坑槽检测的应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2019: 55.
- GAN Hong. Automatic measurement of pavement groove and pothole based on 3D laser imaging technology[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019: 55.
- [25] 叶 珍. 基于 ABAQUS 的刻槽尺寸与路面磨损的相关性研究与应用[D]. 福州: 福建农林大学, 2018: 24.
- YE Zhen. The correlation between groove sizes and pavement wear based on ABAQUS [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018: 24.
- [26] 范 慧. 机场沥青混凝土刻槽道面耐久性 & 安全性研究[D]. 西安: 长安大学, 2009: 82.
- FAN Hui. Study on durability and safety of groove in airport asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009: 82.
- [27] 陈逸涵. 基于三维激光扫描的沥青路面构造深度快速测定技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2023: 99.
- CHEN Yi-han. Study on fast measurement technology of asphalt pavement texture depth using 3D laser scanning [D]. Nanjing: Southeast University, 2023: 99.
- [28] LIU Y Y, WANG R Y, WAN T T. A method determining critical operating parameters for landing aircraft based on runway pavement skid resistance[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2024, 25: 2346286.
- [29] 宋 波. 既有沥青路面结构评价与延寿设计方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2019: 154.
- SONG Bo. Structure evaluation and life-extensional design method of existing asphalt pavement [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019: 154.

- [30] ZHANG R, HU P K, ZHONG Y H, et al. Research progress on evaluation and prediction of degradation in service performance for asphalt pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2025, 12(4): 1011-1039.
- [31] WANG Q, HAYHOE G F. Development and implementation of a beam-bridging filter for use in airport groove identification [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013(2369): 95-103.
- [32] 姚 通. 基于 ABAQUS 的张承高速公路沥青路面永久变形影响因素分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019: 35.
- YAO Tong. Analysis of factors affecting permanent deformation of asphalt pavement of Zhangcheng Expressway based on ABAQUS[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019: 35.
- [33] 刘少鹏. 沥青路面振动压实数据分析方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2022: 36.
- LIU Shao-peng. Research on data analysis method of vibration compaction of asphalt pavement [D]. Nanjing: Southeast University, 2022: 36.
- [34] 李 森. 泰安市城市主干道交叉口车辙病害分析与防治[D]. 西安: 西安工业大学, 2023: 20.
- LI Miao. Analysis and prevention of rutting disease at intersections of urban trunk roads in Taian City[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023: 20.
- [35] 陈帅坤. 往复荷载下沥青机场道面受力状态分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022: 15.
- CHEN Shuai-kun. Stressing state analysis of asphalt airport pavements under cyclic loads[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022: 15.
- [36] 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.
- [37] 杨明桦. 基于提高寿命的机场沥青道面结构设计研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2021: 48-52.
- YANG Ming-hua. Research on structural design of airport asphalt pavement based on improving service life [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2021: 48-52.