

文章编号:1671-1637(2026)08-0147-12

界面处治技术对机场薄层罩面层间剪切性能影响分析

赵海东^{1,2}, 田雨^{*1,2}, 王俊哲^{1,2}, 杜浩³, 周梦然^{1,2}, 韩宗儒⁴, 凌建明^{1,2}

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学民航飞行区设施耐久与运行安全重点实验室, 上海 201804; 3. 上海同科交通科技有限公司, 上海 200082;
4. 首都机场集团有限公司北京大兴国际机场, 北京 102601)

摘要:为定量分析5种典型界面处治技术(凿毛、刻槽、SBR界面剂、SBR界面剂+凿毛、SBR界面剂+刻槽)对机场水泥混凝土薄层罩面层间剪切性能的影响,基于室内剪切试验标定不同处治技术的层间本构参数,构建了考虑层间黏结-滑移-摩擦行为的飞机-道面三维动力有限元模型;基于该模型,提出了以层间滑移作为损伤界限的黏结强度储备系数和容许滑移系数,用于定量分析单次飞机动载作用下的层间剪切力学行为。结果表明:层间剪切临界荷位主要由主起落架轮迹控制,在各参数组合下稳定集中于轮迹入板/出板的板边区域;在高罩面层模量与强动载效应等不利工况下,无处治与仅采用单独处治(刻槽、凿毛、SBR界面剂)的罩面层间会在单次飞机动载作用下进入软化损伤阶段,而采用复合处治的罩面层间仍处于内聚力黏结阶段,表明复合处治技术通过增强层间黏结强度与有效控制层间滑移,提升了罩面层间的抗剪损伤能力。建议机场薄层罩面优先采用SBR界面剂与凿毛/刻槽相结合的复合处治技术,并将板边轮迹区作为日常巡检与风险管控的重点部位。

关键词:机场工程;水泥混凝土薄层罩面;飞机动力仿真;界面处治技术;层间接触模型

中图分类号:U415.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.322

Analysis on effect of interface treatment technology on interlayer shear performance of airport thin overlays

ZHAO Hai-dong^{1,2}, TIAN Yu^{*1,2}, WANG Jun-zhe^{1,2}, DU Hao³, ZHOU Meng-ran^{1,2},
HAN Zong-ru⁴, LING Jian-ming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Key Laboratory of Infrastructure Durability and Operation Safety in Airfield of CAAC, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shanghai Tongke Transportation Technology Co., Ltd., Shanghai 200082, China; 4. Beijing Daxing International Airport, Capital Airports Holdings Co., Ltd., Beijing 102601, China)

Abstract: To quantitatively analyze effect of five typical interface treatment technologies (chipping, grooving, SBR interface agent, SBR interface agent + chipping, and SBR interface agent + grooving) on interlayer shear performance of airport thin cement concrete overlays, interlayer

出版历程:2025-12-31 收稿,2026-03-11 修回,2026-05-27 录用

基金项目:国家自然科学基金重点项目(U2433209);国家自然科学基金项目(52572379);国家重点研发计划(2024YFB2606000)

作者简介:赵海东(1997-),男,河北衡水人,工学博士研究生,E-mail:2310858@tongji.edu.cn。

*通信作者:田雨(1985-),男,河北望都人,长聘教授,博士生导师,工学博士,E-mail:dr.yutian@tongji.edu.cn。

引用格式:赵海东,田雨,王俊哲,等.界面处治技术对机场薄层罩面层间剪切性能影响分析[J].交通运输工程学报,2026,26(8):147-158.

Citation: ZHAO Hai-dong, TIAN Yu, WANG Jun-zhe, et al. Analysis on effect of interface treatment technology on interlayer shear performance of airport thin overlays[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(8): 147-158.

constitutive parameters of different treatment technologies were calibrated based on laboratory shear tests, and a three-dimensional dynamic finite element model of aircraft-pavement considering interlayer bond-slip-friction behavior was constructed. Based on this model, a bond strength reserve coefficient and allowable slip coefficient taking interlayer slip as damage limit were proposed to quantitatively analyze interlayer shear mechanical behavior under single aircraft dynamic load. Results indicate that critical loading position of interlayer shear is mainly controlled by main landing gear wheel path and stably concentrates in slab edge region of wheel path entering/exiting slab under various parameter combinations; under adverse conditions such as high overlay modulus and strong dynamic load effect, interlayer of overlays without treatment and with only single treatment (grooving, chipping, and SBR interface agent) enters softening damage stage under single aircraft dynamic load, while interlayer of overlays with composite treatment still stays in cohesive bonding stage, indicating that composite treatment technology improves shear damage resistance capacity of interlayer of overlays by enhancing interlayer bond strength and effectively controlling interlayer slip. It is suggested that composite treatment technology combining SBR interface agent with chipping/grooving is preferentially adopted for airport thin cement concrete overlays, and wheel path region at slab edge is taken as key part for daily inspection and risk control.

Keywords: airport engineering; thin cement concrete overlay; aircraft dynamic simulation; interface treatment technology; interlayer contact model

Publication history: Received 2025-12-31; Received in revised form 2026-03-11; Accepted 2026-05-27

Funding: Key Project of National Natural Science Foundation of China (U2433209); National Natural Science Foundation of China (52572379); National Key R&D Program of China (2024YFB2606000)

* **Corresponding author:** TIAN Yu, professor, PhD, E-mail: dr.yutian@tongji.edu.cn.

0 引 言

刚性道面因其优异的耐久性和承载能力,已成为中国机场跑道的主要结构形式,占比约87%^[1]。然而,在长期极重飞机动载与环境因素的作用下,刚性道面易出现起皮、掉粒、摩擦性能退化等表面功能性病害^[2]。此类功能性病害不仅直接影响道面的使用性能,而且增加外来物入侵的风险,进而危害飞机的起降安全^[3]。根据国际航空运输协会(International Air Transport Association, IATA)2023年的ADX报告^[4]统计,2012~2021年由于跑道使用性能不足所诱发的机场安全事件占事故总数的39%,其中刚性道面的功能性病害是主要诱因。在此背景下,水泥混凝土薄层罩面因其施工期较短、对运行干扰小且能恢复一定的结构承载能力,已成为跑道功能性修复的常用技术手段。然而其使用寿命较为有限,核心原因在于薄层罩面与旧道面之间易出现黏结失效^[5]。这是由于薄层结构厚度较小(通常为4~8 cm)且自重轻,层间法向约束能力较弱。导致在飞机动态冲击荷载与滑跑制动力的作用下,罩面层间会承

受较大的剪切力,促进微裂纹的萌生与扩展,进而诱发脱黏、剥离等病害^[6-7]。因此,薄层罩面的服役可靠性取决于层间抗剪性能能否满足飞机实际动载工况需求。

为提升罩面层间的抗剪性能,美国联邦航空局(FAA)^[8]与中国《民用机场沥青道面设计规范》(MH/T 5010—2017)均建议在铺设罩面前对旧道面进行界面处治。现有研究主要通过室内试验,研发新型界面剂材料或优化物理技术(如凿毛/刻槽)参数,以提升罩面层间的黏结性能。Das^[9]、Xu等^[10]、杨才千等^[11]、Dridi等^[12]、汪鹏等^[13]研究了水泥砂浆界面剂、聚合物改性水泥砂浆界面剂、环氧树脂对新旧混凝土层间剪切强度的影响,发现聚合物改性界面剂的脱水成膜作用能够有效填充层间的微裂纹与空隙,进而提升层间的抗剪强度与耐久性。郝玉军等^[14]、Okumura等^[15]、Daneshvar等^[16]、Luo等^[17]证实了采用凿毛、刻槽等物理处治方式能提升层间的抗剪强度,并通过理论计算得出凿毛的最佳深度为9 mm,槽间间距为55 mm。相关研究^[18]还发现,相较于仅采用界面剂或物理处治,采用复合处治技

术通常能够获得更好的抗剪性能。在此基础上,国内外学者进一步研究了界面处治技术对层间损伤演化规律与破坏模式的影响。Mokhtari等^[19]结合材料断裂力学与斜向剪切试验,提出新旧混凝土的层间结合力主要由内聚力和摩擦力共同提供,界面损伤的破坏模式通常表现为从刚度退化到延性损伤的过渡。Danešvar等^[16]、冯硕^[20]、陈子璇等^[21]的研究进一步指出,界面剂主要通过增强界面的化学黏附和分子结合来提高内聚力,使得界面在初期加载阶段表现出更高的黏结强度。而对于物理处治技术处理的界面,在界面发生脱黏后依然能够提供一定的摩擦力,延缓脆性破坏的发生。因此,水泥混凝土薄层罩面层间抗剪性能提升及其损伤机理已有较充分的研究。

尽管上述研究为处治技术的选择与优化提供了材料尺度上的参考,但层间黏结状态与飞机荷载水平对罩面层间应力-滑移响应特征有显著影响^[22]。因此,仍需在结构尺度上分析飞机动载作用下薄层罩面层的层间剪切力学行为,从而为界面处治技术的适用性提供依据。Zhao等^[23]假定罩面层间完全黏结,探究了飞机动载作用下罩面层间的响应规律。Kim等^[24]引入库仑摩擦接触模型表征层间的部分黏结状态,发现飞机动载引发的反弯效应是层间应力集中的关键机制。然而,现有的结构尺度研究大多集中于理想界面状态下的应力场分析,普遍采用简化界面刚度或完全黏结假设,难以准确描述不同处治技术下,罩面层间在大型飞机动载作用下的刚度退化与失效演化模式^[25],从而导致缺乏层间处治方案的选型与实际飞机动载工况相对应的定量力学判据。

基于此,本文构建了考虑飞机-道面相互作用的三维动力有限元模型,并引入能够描述罩面层间黏结-滑移-摩擦损伤全过程的界面本构关系。通过系统分析飞机动载效应、界面处治技术和罩面层模量对层间剪切性能的影响,结合室内剪切试验与有限元仿真结果的对比,提出了以层间滑移为损伤判据的黏结强度储备系数和容许滑移系数,用于定量评价不同界面处治技术下罩面层间的剪切承载能力,并分析了各类处治方案在不同跑道区域的适用性。该研究为机场跑道薄层罩面界面处治方案的科学优化及其服役安全性评估提供了技术支持。

1 薄层罩面-旧刚性道面层间接触表征与参数获取

在短时飞机动载作用下,罩面层间实际处于压

剪受荷状态,其层间抗剪能力主要来源于层间的黏结作用、机械嵌挤作用以及黏结破坏后由法向压力产生的摩擦作用。为合理表征罩面层间在压剪受力条件下的传力与失效行为,本文采用黏结-滑移-摩擦层间本构模型描述层间力学行为,并通过斜剪试验获取不同层间处治技术下的模型参数。随后,将该模型引入飞机-道面有限元仿真模型,以分析不同飞机运行工况下罩面层间的剪切性能。

1.1 黏结-滑移-摩擦本构模型

薄层罩面与旧道面间的界面力学行为,是由初期化学/物理黏结向后期机械摩擦演化的过程。根据耦合内聚力-摩擦理论^[15-16],演化过程可概括为初始弹性黏结、损伤演化、残余摩擦3个阶段。

(1)初始弹性黏结阶段:在加载初期,层间近似于完全黏结状态,抗剪强度由界面处的微观化学黏结作用和宏观机械嵌挤作用共同决定。在该阶段,层间剪切应力随相对滑移的增加而近似线性增长。

(2)损伤演化阶段:当剪切力超过损伤起始阈值后,界面因微裂纹的萌生与扩展开始进入损伤演化期。此时,化学黏结作用逐步减弱,宏观机械嵌挤作用通过提供延性支撑延缓了界面的脆性剥离,导致层间剪切承载能力随滑移发展而衰减。

(3)残余摩擦阶段:当滑移量超过特征阈值且内聚黏结力完全丧失后,界面发生彻底脱黏。考虑到损伤演化过程中摩擦力的同步介入,此时层间受力行为转由库仑摩擦力主导。界面的抗剪能力由层间的摩擦因数与瞬态法向压力共同决定,表现为稳定的残余抗力。

基于上述层间损伤演化过程,本研究采用分段函数对罩面层间本构进行表征。其中 $0 \leq \delta \leq \delta_s$ 为初始弹性黏结段, $\delta_s < \delta \leq \delta_i$ 为损伤演化段, $\delta > \delta_i$ 为残余摩擦段,计算如下

$$\tau(\delta) = \begin{cases} K_s \delta & 0 \leq \delta \leq \delta_s \\ \tau_s \left(1 - \frac{\delta - \delta_s}{\delta_i - \delta_s} \right) + \left(\frac{\delta - \delta_s}{\delta_i - \delta_s} \right) \mu \sigma_n & \delta_s < \delta \leq \delta_i \\ \mu \sigma_n & \delta > \delta_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\tau(\cdot)$ 为层间剪切应力; δ 为层间剪切滑移; K_s 为层间初始剪切刚度,表征初始弹性黏结阶段层间抵抗变形的能力; τ_s 为损伤起始阈值(峰值黏结强度); δ_s 为 τ_s 对应的滑移定义为临界滑移; δ_i 为内聚力完全退化并转入残余摩擦承载的特征滑移; μ 为残余摩擦因数; σ_n 为层间法向应力。

1.2 基于斜剪试验的模型参数获取

在实际工程中,中国机场薄层罩面常用的界面处治技术包含涂刷界面剂、刻槽/凿毛及其复合技术(MH 5006—2015, MH/T 5010—2017),分别通过化学作用与机械嵌挤作用提升层间的黏结性能。为此,本研究重点探究涂刷界面剂、凿毛、刻槽、界面剂+凿毛、界面剂+刻槽共5种界面处治技术对罩面层间剪切性能的影响,并设置一组层间无处理情况作为对照组。在室内试验中,所采用的界面剂配合比、刻槽与凿毛参数见表1。其中,刻槽参数与凿毛参数参考了相关研究成果的推荐取值范围^[26];界面剂选用丁二烯-苯乙烯(SBR)改性水泥石英砂浆(下文简称SBR界面剂),该材料已被证实能够提供优异的层间黏结强度,且具备良好的施工和易性^[16,25-26]。

表1 界面处治技术的参数

Table 1 Interface treatment parameters

SBR改性水泥石英砂浆界面剂	水胶比为0.25,砂灰比为1.3, SBR掺量(质量分数,下同)为9%
刻槽	槽中线间距为25 mm,宽度为7 mm,深度为4 mm
凿毛	铺砂深度2.6 mm
无处治	

考虑到飞机动载下,罩面层间实际为压剪受荷模式,为此本文采用45°斜向剪切试验获取本构模型的参数(GB/T 50081—2019),如图1所示,该试验能够通过法向分力模拟轮载对界面的挤压效应^[27]。旧混凝土模拟件采用标准养护90 d的C50硅酸盐水泥混凝土。为确保界面处治基准的一致性,将标准试块对半切割,以切割面作为黏结面进行界面处治。处治完成后,将C60小粒径硅酸盐水泥混凝土(模拟薄层罩面材料)浇筑至旧混凝土基材上,成型为100 mm×100 mm×100 mm的复合试件,新旧混凝土层厚度均为50 mm。考虑到本文研究目标侧重于单次飞机动载下的瞬态响应分析及不同界面处治技术抗剪性能的横向对比,复合试件统一在标准养护条件下养护至28 d性能相对稳定期后开展斜剪试验,以削弱龄期差异和环境因素的干扰。每种处治技术制备3个平行试件以确保数据的准确性。

试验过程中实时记录荷载 P 与加载端位移,通过几何投影换算获得层间剪切应力-滑移关系。如图2所示,模型参数采用以下规则计算。

(1) K_s :为排除加载初期试件压紧过程的非线性干扰,选取 $0.2\tau_s \sim 0.6\tau_s$ 的割线斜率作为初始剪切

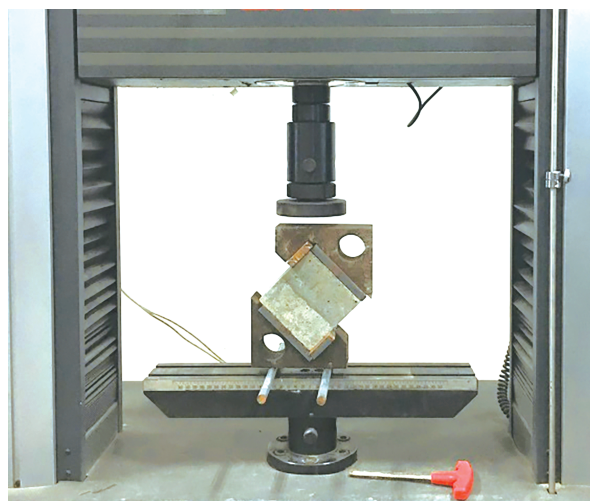


图1 层间剪切试验

Fig. 1 Interfacial shear test

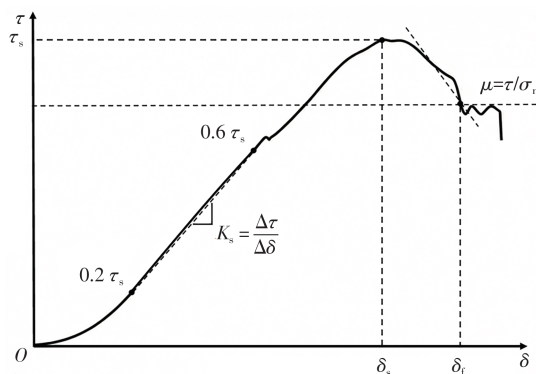


图2 加载曲线

Fig. 2 Loading curve

刚度。

(2) τ_s :取曲线首个峰值剪切应力,反映界面初期黏结强度的上限,对应滑移为 δ_s 。

(3) μ :取峰后残余稳定阶段 τ/σ_n 的平均值。该参数反映了界面经历初始损伤及表面形貌磨损演化后的稳态摩擦特征,从而定量表征不同处治技术下界面脱黏后的延性破坏特征。鉴于本研究聚焦于飞机单次脉冲型动载引起的道面瞬态动力响应,摩擦因数在进入残余阶段后的进一步衰变较小,故采用定值摩擦近似处理以平衡物理合理性与后续数值分析的可收敛性^[28-30]。

(4) δ_i :通过对软化段线性拟合,取拟合直线与残余应力平台线的交点对应的滑移量作为内聚力完全退化的特征滑移值。

表2汇总了界面剪切试验的参数提取结果。由表2可以看出,涂刷SBR界面剂显著提升了界面的初始刚度,而物理处治(凿毛/刻槽)则大幅提升了峰值强度。其中,复合处治的提升效果最为显著,较对照组提升了154%。这组实测参数完整涵

表 2 层间本构模型参数
Table 2 Constitutive model parameters for interlayer

工况	层间处治技术	$K_s/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-3})$	δ_s/mm	μ	τ_s/MPa
A1	无处理	2.98	0.30	0.41	1.62
A2	刻槽	4.57	0.42	0.65	2.74
A3	凿毛	4.39	0.44	0.70	3.34
A4	SBR 界面剂	5.12	0.53	0.54	2.56
A5	SBR 界面剂+刻槽	5.70	0.56	0.68	4.04
A6	SBR 界面剂+凿毛	6.05	0.61	0.74	4.12

盖了界面从损伤起始、形貌磨损到残余摩擦的演化历程,为后续有限元模型中接触属性的定义提供了物理依据。

2 飞机-跑道三维动力仿真模型构建

2.1 道面结构参数选取

依托 ABAQUS 仿真平台,建立了基于 Winkler 地基的全尺寸机场刚性道面模型(图 3)。该道面结构由 32 块道面板组成,覆盖了飞机主起落架在单次滑跑过程中主起落架的轮迹区域。为兼顾计算效率与解析精度,对 A2 分析板进行了网格加密处理,并统一采用 C3D8R 单元进行建模。利用 Solid 单元构建了实体基层与传力杆,模拟结构与地基在飞机动态荷载作用下的相互作用,并实现相邻道面板间的荷载传递。

道面的几何与结构参数选取参照中国西南某民用机场设计图纸及行业规范(MH/T 5110—2015)(表 3)。考虑到在实际加铺工程中,水泥混凝土罩面层通常采用强度等级不低于既有道面的高性能水泥混凝土,其弹性模量往往高于旧道面(MH 5006—2025)。同时,相关研究表明,水泥混凝土罩面层的弹性模量大多处于约 35~45 GPa 区间^[31]。因此,本研究选取了 44、42、40 GPa 三个弹性模量梯度进行分析。

表 3 道面结构参数
Table 3 Pavement structure parameters

结构层	厚度/ cm	弹性模量/GPa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
水泥混凝土罩面层	5	44.0	0.15	2 500
		42.0	0.15	2 450
		40.0	0.15	2 400
旧混凝土道面	29	38.0	0.15	2 500
水泥稳定碎石基层	20	1.5	0.25	2 000
水泥稳定碎石基层	18	1.5	0.25	2 000
地基			0.40	1 800

注:地基反应模量取为 $40 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

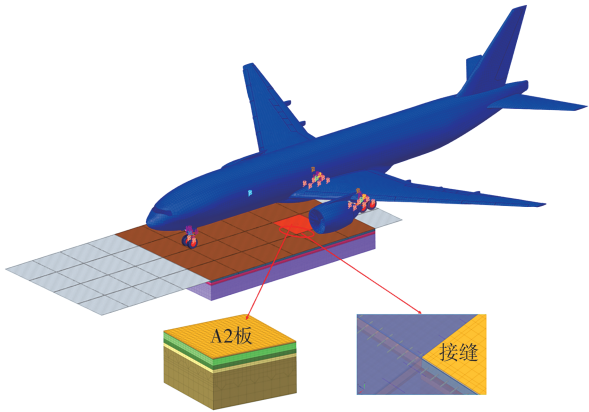


图 3 全尺寸飞机-跑道三维仿真模型
Fig. 3 Full-scale aircraft-runway 3D simulation model

2.2 飞机动力特性仿真

本研究参考的民用机场跑道等级为 4C,主要服务于 B737-800 与 A320 等窄体机型。参照机场的机型统计数据,选取 B737-800 作为代表机型,主起落架采用单轴双轮结构。基于波音公司 2023 年版技术手册,在 ABAQUS 中构建了 B737-800 飞机的全尺寸动力学模型,用于模拟其在起飞、着陆及滑行过程中对道面产生的动态冲击作用。B737-800 模型的主要参数如表 4 所示。

表 4 波音 737-800 模型参数
Table 4 Boeing 737-800 model parameters

机型	B737-800
最大起飞质量/kg	79 000
最大着陆质量/kg	66 380
主起落架载荷分布系数	0.95
主起落架间距/m	5.72
主起落架数量	2
主起落架轴距/m	0.86
主起落架构型	单轴双轮
主起落架胎压/MPa	1.47

为降低建模复杂度与计算成本,飞机机身部分除起落架及轮胎外,简化为三维刚体处理。起落架采用多体动力学建模方法,由梁单元、质量单元及连接器单元组成,以准确反映其在运动过程中的支撑、缓冲与荷载传递特性。连接器单元用于模拟液压减震系统的缓冲与动态响应过程,并依据飞机手册提供的质量分布系数,在连接器顶部设置集中质量点,以准确体现起落架的质量分布,确保在不同工况下荷载能够有效传递至轮胎。

轮胎部分采用固-液腔耦合模型建模,轮胎中心赋予旋转自由度,可实现滑移、滚动与转向等运动,充气压力设定为 1.47 MPa。飞机轮胎与道面之间设置刚性法向接触与 Mohr-Coulomb 剪切接触,以

模拟动态荷载作用下道面的变形特性。道面摩擦因数设定为 0.4,以表征道面抗滑性能良好。

2.3 飞机运动方式模拟

飞机在滑跑与着陆等工况下的加减速行为具有显著的动载效应,其产生的水平剪切作用是诱发罩面层间剪切损伤的关键动力因素。为此,本研究通过 ABAQUS/Explicit 模拟了飞机滑跑与降落 2 种典型工况,并通过动力分析实现飞机姿态的控制。依据波音飞机手册的相关数据^[32],选取了 2 种工况下标准飞机运动参数的极值进行分析,具体参数见表 5。

表 5 飞机运动参数

Table 5 Aircraft motion parameters

运动状态	水平初始速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	水平加速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	下沉速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	俯角/($^{\circ}$)
滑跑	70	0.0	0.00	0
		2.5	0.00	0
		3.0	0.00	0
着陆	242	0.0	1.32	2

在滑跑模拟过程中假设飞机无横向偏移,主起落架最外侧的轮胎将沿 A2 板的板边进行滑跑。B737-800 的质量选用表 4 中所列的最大起飞质量。在着陆过程中,主起落架的接地点和运动路径与滑跑阶段保持一致。此外,考虑到飞机接地后 2 s 内可视为匀速滑行状态^[33-35],因此在模拟中,控制轮胎首先在 A2 板的边缘接地,随后以 $70\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 匀速驶过目标板。

2.4 层间接触仿真实现

为准确模拟罩面层间剪切行为,本研究在飞机-道面有限元模型中采用面-面接触定义界面属性,将水泥混凝土薄层罩面与旧道面板分别设定为主、从面。层间法向被定义为硬接触准则,以确保动力响应过程中层间不发生受压穿透,并准确传递瞬态压应力。切向行为依据本文第 1 节建立的黏结-滑移-摩擦模型,并参考表 2 中不同处治技术下的模型参数进行定义。在数值实现过程中,层间切向响应由内聚力接触与摩擦接触耦合形成。

(1)在初始弹性黏结阶段,利用剪切刚度与峰值强度定义界面的线性弹性牵引-分离关系。

(2)当层间剪应力达到阈值后,通过标量损伤变量表征界面的损伤演化过程,并以特征滑移作为内聚力完全退化的判定准则,从而避免界面刚度骤降对数值稳定性的影响。

(3)待内聚力完全退化后,层间切向传力机制自

动转由库仑摩擦准则主导。考虑到损伤演化过程中摩擦力的同步介入,利用残余摩擦因数实现脱黏后的稳定残余抗力传递。

层间模型参数作为同一层间处治状态下的固有参数保持不变,后续将通过改变罩面层结构参数及飞机运行参数,获取层间剪切应力与滑移的时空响应特征,为后续分析提供基础。

2.5 模型可靠性验证

利用中国某西部机场智能跑道响应感知系统与飞机定位系统获取的实测数据,对数值仿真模型的整体可靠性进行了验证。如图 4 所示,该跑道内双层嵌入了动态应变计与加速度计,埋设深度分别为距板顶与板底 15 cm,能够实时捕捉飞机滑跑时道面板的振动加速度与动态应变时程。

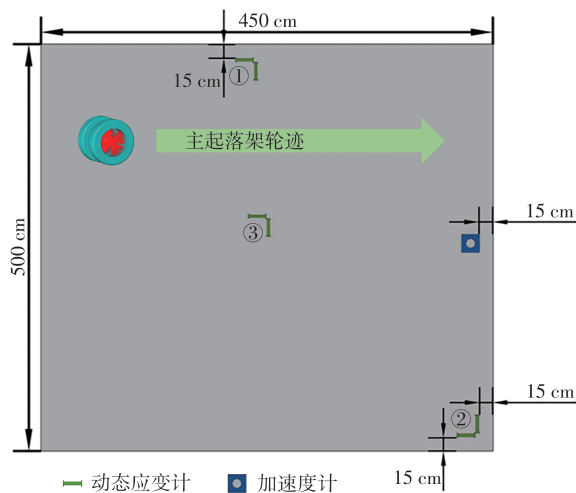


图 4 动态应变计与加速度计布设

Fig. 4 Layout of dynamic strain sensors and accelerometers

由于实测跑道现场并未进行罩面加铺,本节验证的核心目的是标定道面板、基层、地基参数选取的可靠性。在验证环节中,将模型中的水泥混凝土罩面层与旧道面板量均设定为 38 GPa,层间定义为完全黏结(共节点),使其在力学响应上等效为单层刚性道面板。本研究选取了 20 组 B737-800 滑跑工况下的飞机运动参数与飞机质量作为模型输入,在仿真模型的 A2 板处设置与实际传感器布设一致的点位提取数据。其中,振动加速度峰值用以验证仿真模型对飞机滑跑动力冲击效应的捕捉能力;动态应变峰值则用以评价飞机作用下结构响应计算的准确性。

通过对比分析实测数据与有限元计算结果之间的差异,并对应变残差进行正态性检验,以综合评估模型可靠性。表 6 表明,各测点的平均误差和最大误差一般控制在 5%~15%,说明该模型整体计算结果具有较好精度。图 5 的残差正态性检验结果显示,除

表 6 实测数据与有限元计算结果的误差对比

Table 6 Errors between measured values and finite element values

峰值	平均误差/%	最大误差/%	R^2
板中动态应变	10.2	13.8	0.95
板角动态应变	11.3	14.7	0.92
板边动态应变	5.8	9.2	0.94
板边竖向加速度	8.1	11.3	0.97

板角位置外,其余测点残差均与正态分布具有较好拟合,而板角位置受双向边界约束和应力集中效应的叠加影响,其受力状态较为复杂,对接缝传力刚度局部差异等不确定因素的敏感性更高。此类由结构边界复杂性引起的误差往往带有一定的系统性分量^[33-34],导致该处残差分布呈现一定偏态。然而,尽管板角的应变峰值残差的正态分布拟合度较差,其决定系数 R^2 仍达 0.92(表 6),表明模型依然能够较为准确地捕捉板角应变随荷载变化的演化规律及幅值水平。

综合上述结果,可认为该动力仿真框架能够较为准确地还原飞机动载下道面结构的整体动力学行为。由于位移型有限元中剪切力由位移场间接计算得到,加速度与应变响应的一致性进一步验证了模型位移场及变形计算的准确性,从而保证剪切力计算结果的可靠性,为后续开展层间剪切性能分析提供了可靠的平台。

3 不同界面处治技术下的层间剪切性能分析

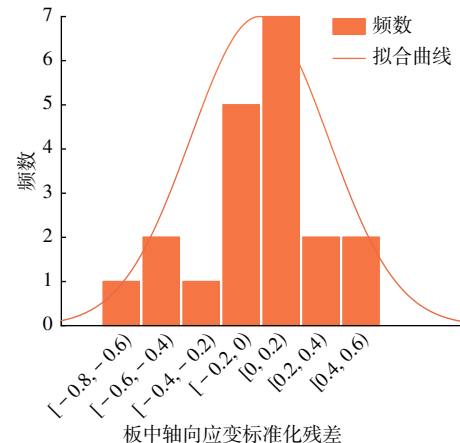
3.1 工况组合设计与分析方法

为分析不同界面处治技术下的超薄水泥混凝土罩面层与旧刚性道面板层间剪切性能,利用数值仿真模型模拟不同的界面处治技术,且均考虑了不同的罩面层模量、飞机轮迹和运动状态,共 72 组工况,具体参数取值详见表 1、3、5。

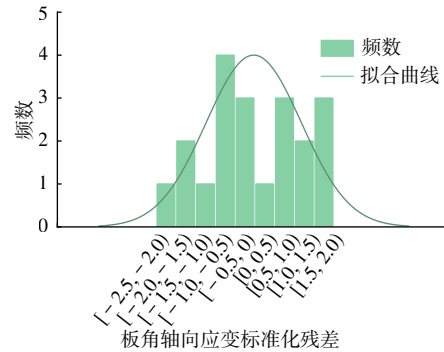
依据第 1 节建立的罩面层间黏结-滑移-摩擦本构关系,当层间剪切响应跨越峰值强度对应的临界滑移后,界面将从线性弹性黏结阶段进入损伤演化阶段。此时,层间内聚力开始衰减,微裂纹的萌生与扩展将导致界面完整性受损,在环境因素与长期飞机动载的耦合作用下,极易诱发局部脱黏甚至大面积剥离失效。因此,为分析单次飞机动载作用下罩面层间是否会产生不可逆损伤,本研究以层间是否进入损伤演化阶段作为判定依据,定义剪切强度储备系数 τ_{safety} 与容许滑移储备系数 δ_{safety} 分别为

$$\tau_{\text{safety}} = 1 - \tau_{\text{max}}/\tau_s \quad (2)$$

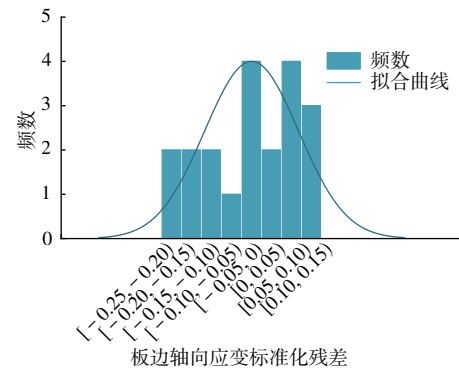
$$\delta_{\text{safety}} = 1 - \delta_{\text{max}}/\delta_s \quad (3)$$



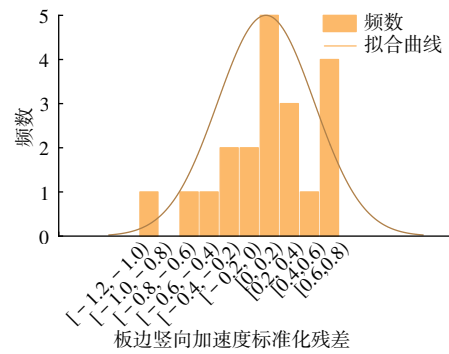
(a) 板中轴向应变残差



(b) 板角轴向应变残差



(c) 板边轴向应变残差



(d) 板边竖向加速度残差

图 5 模型残差正态分布检验结果

Fig. 5 Model residual normal distribution test results

式中: $\tau_{\max}$ 和 $\delta_{\max}$ 分别为通过数值仿真获取的层间临界荷位处的极限剪切应力与最大滑移值。

其中,剪切强度储备系数用于评估界面是否进入损伤演化阶段,表征罩面层间临界荷位处的瞬态剪切响应相对于界面损伤起始阈值的逼近程度,该值大于0时,表明层间剪切应力尚未到达损伤起始点,界面在强度意义上仍具备安全储备。容许滑移系数旨在量化损伤发展程度,从而判定单次飞机动载下层间变形是否已跨越损伤临界点。当 δ_{safety} 值不小于0时,表明层间滑移未超过极限剪切强度对应的特征滑移,界面仍处于弹性黏结控制阶段;当该值小于0时,表明层间滑移已进入损伤演化区,界面已出现损伤且界面黏结性能已开始退化。

3.2 层间剪切临界荷位

为分析不同参数组合下层间剪切响应的空间分布规律,提取并统计了全部工况下层间的极限剪切应力与最大滑移的位置,作为层间剪切临界荷位。统计结果如图6所示,可以看出,层间极限剪切应力与最大滑移均集中于主起落架轮迹的入板与出板处,与飞机运动参数、罩面层模量及界面处治技术无关。

其原因在于层间剪切应力由轮载向下传递,因此仅在轮迹作用区内才会形成显著的剪切作用。当飞机滑跑经过接缝时,旧道面能够通过接缝处的传力杆将荷载部分传递至邻板,进而有效约束板边的变形;而水泥混凝土罩面层由于厚度较薄且接缝处缺乏等效的传力构造,其板边变形更为明显。这种构造差异导致在几何边界(板边)处易出现层间变形不协调,进

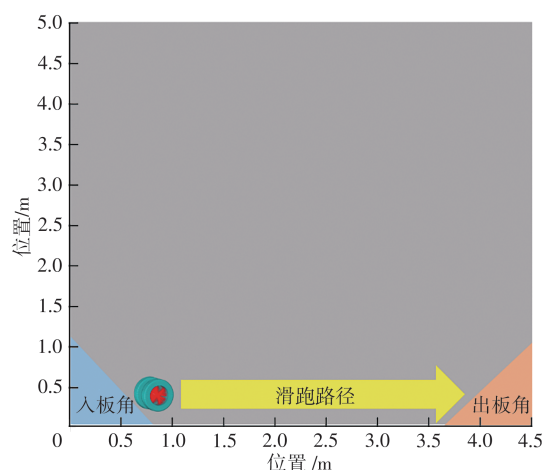


图6 层间剪切临界荷位

Fig. 6 Interlayer shear critical load position

而诱发板边处产生极限剪切应力与最大滑移。

3.3 层间剪切临界荷位的剪切响应

基于第3.2节确定的临界荷位,本节通过提取不同参数组合下的极限剪切应力与最大滑移,分析界面处治技术、飞机运动参数及罩面层模量对层间剪切响应的影响规律。

表7展示了飞机匀速滑跑状态、不同层间处治技术下的响应极值。可以发现,层间极限剪切应力由大到小依次为:SBR界面剂+凿毛、SBR界面剂+刻槽、凿毛、刻槽、SBR界面剂、无处理,而最大滑移量则呈现相反趋势。这是由于界面处治对罩面层的剪切刚度提升效果不同,在飞机荷载作用下,高刚度界面能够有效抑制层间的相对滑移,但此时界面需要承载并传递更高水平的剪切应力。

表7 匀速滑跑状态

Table 7 Constant speed taxiing condition

界面处治技术工况	不同水泥混凝土罩面层弹性模量(GPa)下的 层间极限剪切应力/MPa			不同水泥混凝土罩面层弹性模量(GPa)下 层间临界荷位处的最大滑移值/mm		
	44	42	40	44	42	40
无处理(A1)	1.090	1.056	0.988	0.215	0.206	0.194
刻槽(A2)	1.148	1.121	1.044	0.226	0.215	0.201
凿毛(A3)	1.152	1.129	1.069	0.231	0.216	0.203
SBR界面剂(A4)	1.101	1.088	1.034	0.204	0.192	0.179
SBR界面剂+刻槽(A5)	1.196	1.131	1.083	0.225	0.210	0.202
SBR界面剂+凿毛(A6)	1.211	1.170	1.117	0.230	0.215	0.205

表8与表9分别展示了飞机在匀加速滑跑状态及降落状态下,不同层间处治技术对应的响应极值。可以发现:各处治技术表现出的剪切响应规律与表7基本一致,进一步佐证了前述论证;此外,随飞机动载效应的增强,临界荷位处的层间极限剪切应力与最大滑移量均呈现同步增长趋势。其中,降落工况下的响应数值显著高于匀速与匀加速状态。

这是因为降落时产生的瞬态法向冲击载荷及额外的水平冲击力,从而诱发了较大的层间剪切响应。

进一步对比表7~9中不同罩面层模量水平可知,罩面层模量的增大将抬升临界荷位处的层间剪切响应。这是由于模量提高使罩面层整体刚度增大,层间变形协调约束增强,轮载作用下的剪切传力更集中地由层间界面承担,导致极限剪切应力与滑

表 8 匀加速滑跑状态(加速度 $a=3\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)

Table 8 Constant acceleration taxiing condition (acceleration $a=3\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)

界面处治技术工况	不同水泥混凝土罩面层弹性模量(GPa)下的 层间极限剪切应力/MPa			不同水泥混凝土罩面层弹性模量(GPa)下 层间临界荷位处的最大滑移值/mm		
	44	42	40	44	42	40
无处理(A1)	1.479	1.408	1.348	0.265	0.253	0.242
刻槽(A2)	1.532	1.460	1.414	0.303	0.288	0.276
凿毛(A3)	1.543	1.516	1.436	0.308	0.293	0.281
SBR 界面剂(A4)	1.513	1.426	1.372	0.257	0.241	0.231
SBR 界面剂+刻槽(A5)	1.600	1.543	1.467	0.324	0.307	0.295
SBR 界面剂+凿毛(A6)	1.652	1.549	1.520	0.342	0.323	0.309

表 9 降落状态

Table 9 Landing condition

界面处治技术工况	不同水泥混凝土罩面层弹性模量(GPa)下的 层间极限剪切应力/MPa			不同水泥混凝土罩面层弹性模量(GPa)下 层间临界荷位处的最大滑移值/mm		
	44	42	40	44	42	40
无处理(A1)	1.620	1.612	1.603	0.436	0.414	0.391
刻槽(A2)	2.680	2.565	2.450	0.407	0.394	0.379
凿毛(A3)	2.702	2.589	2.472	0.388	0.376	0.360
SBR 界面剂(A4)	2.560	2.529	2.414	0.563	0.536	0.508
SBR 界面剂+刻槽(A5)	2.808	2.691	2.578	0.447	0.430	0.414
SBR 界面剂+凿毛(A6)	2.835	2.719	2.608	0.462	0.445	0.428

移量均呈上升趋势。

3.4 层间剪切行为评价与机制分析

为探究飞机运动参数、罩面层模量和层间处治技术对罩面层层间安全储备的影响,提取第 3.1 节中所分析工况下临界荷位的极限剪切应力与层间最大滑移量,与斜向剪切试验获取的剪切强度峰值和临界软化滑移值进行对比,计算出每种工况下的安全储备系数(图 7)。

对比不同飞机运动参数下的安全储备系数[图 7(a)、(b)]可知,随飞机动载效应增强,各处治技术下的安全储备系数均呈持续下降趋势。这表明,动载效应的增强使界面更容易触及及其极限黏结强度,从而增加了界面进入损伤演化阶段的风险。在相同运动参数下,复合处治技术(SBR 界面剂+凿毛/刻槽)的安全储备显著高于单一处治与无处治工况。

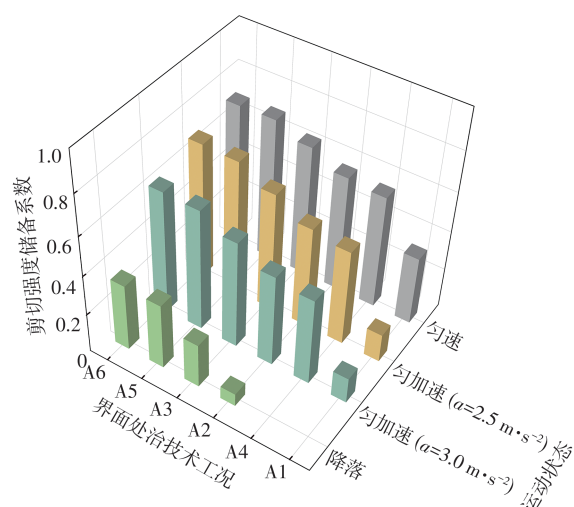
这是由于相较于仅采用界面剂或物理处治的单一工艺,复合处治技术通过化学黏结与机械嵌锁的协同作用,显著提升了罩面层间的抗剪承载能力。SBR 界面剂通过水化作用及聚合物脱水成膜作用,填充了罩面层间的孔隙和微裂纹,形成致密的界面过渡区,增强了化学黏结力,在提高界面初始剪切强度与刚度的同时,有效抑制微裂纹的萌生与扩展。物理处治技术(凿毛/刻槽)不仅通过提高界面粗糙度增强了层间的宏观机械嵌锁强度,还通过增加层间有效接触面积,为界面剂的水化作用提供了更多

潜在化学键合位点。上述协同机制显著提高了罩面层间的极限抗剪强度和软化起始阈值,使界面在飞机动载作用下主要受控于初始弹性黏结阶段,其中聚合物网络和化学键提供主导内聚抗力,微观化学黏结与宏观机械嵌锁共同限制界面滑移,延缓了损伤演化。因此,采用 SBR 界面剂+刻槽/凿毛的复合处治技术在单次飞机动载下的层间软化损伤风险最低。

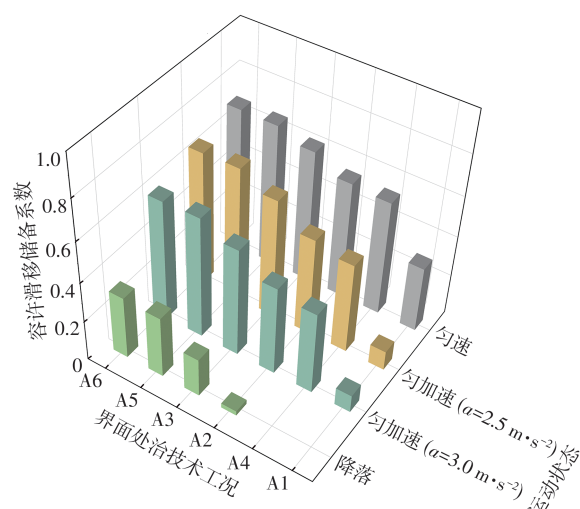
由图 7(a)~(f)可知,安全储备系数随罩面层模量的增加而逐渐降低。值得注意的是,在罩面层模量为 44 GPa 的降落或加速滑跑工况下,无处治与单一处治界面的安全储备系数均已趋近或小于 0,界面趋于或已进入损伤演化阶段。这表明在强动载和刚度差的共同影响下,单一处治虽能在一定程度上改善层间黏结性能,但受限于仅依赖化学黏结或机械嵌锁的单一作用机制,其极限抗剪强度与变形冗余度均明显低于复合处治界面,因此在强动载与刚度差共同作用下更易提前进入软化滑移阶段,界面黏结性能已发生明显退化,极易在后续环境与荷载因素的耦合下出现病害。

4 结 语

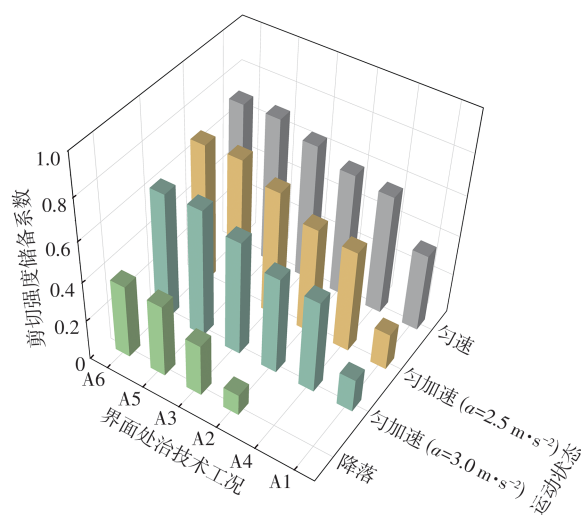
(1)在本文考虑的罩面层模量、飞机轮迹与运动状态及界面处治技术组合下,层间剪切临界荷位主要由主起落架轮迹控制,并稳定集中于轮迹入板/出



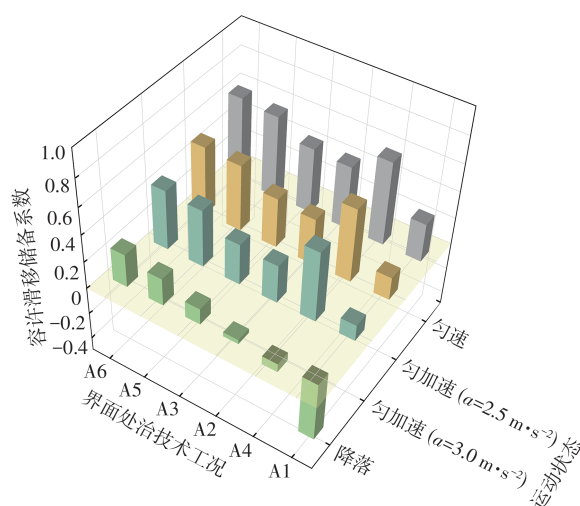
(a) 罩面层弹性模量为 44 GPa 的剪切强度储备系数



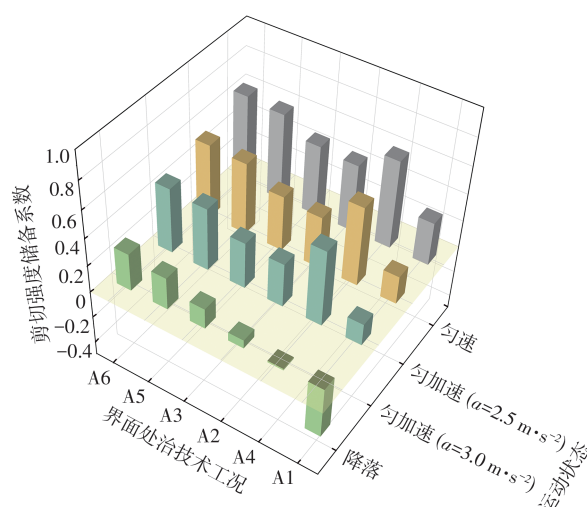
(b) 罩面层弹性模量为 44 GPa 的容许滑移储备系数



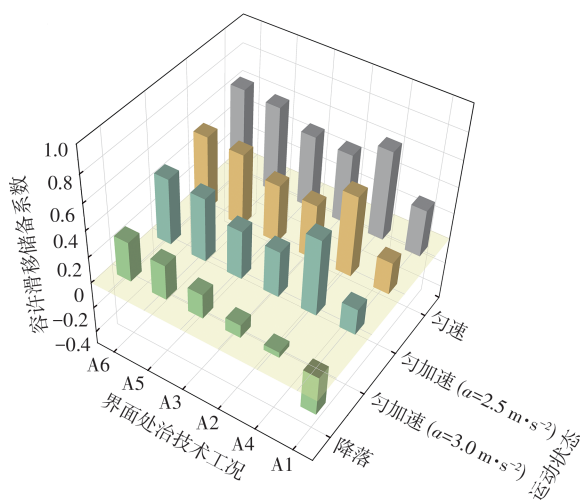
(c) 罩面层弹性模量为 42 GPa 的剪切强度储备系数



(d) 罩面层弹性模量为 42 GPa 的容许滑移储备系数



(e) 罩面层弹性模量为 40 GPa 的剪切强度储备系数



(f) 罩面层弹性模量为 40 GPa 的容许滑移储备系数

图 7 层间安全储备系数计算结果

Fig. 7 Calculation results of interlayer safety margin factors

板的板边区域。这表明板边轮迹区是薄层加铺结构的受力薄弱点,应将其列为机场道面层间处治质量控制(如刻槽均匀度、界面剂喷涂厚度)的核心重点,以及后期运营维护巡检的高频风险监测区。

(2)飞机动载效应的增强与罩面层模量的提升会显著增大层间的剪切应力与相对滑移。在不同层间处治技术下,临界荷位处的层间极限剪切应力按以下顺序递减:SBR界面剂+凿毛、SBR界面剂+刻槽、凿毛、刻槽、SBR界面剂、无处理;而层间相对滑移的排序总体上与之完全相反。这表明复合处治技术通过化学黏结与机械锚固的共同作用,有效增强了层间的变形约束能力,提升了新旧层间的传荷能力。

(3)本文建立了层间剪切强度储备和容许滑移储备系数,以定量分析不同界面处治技术下薄层罩面的软化损伤风险。结果表明,在高模量罩面与降落/加速滑跑等不利工况下,未处治或单一处治界面极易跨越临界储备界限进入损伤演化阶段,而复合处治界面则展现出较高的安全冗余。

(4)综合考虑不同界面处治技术下层间的安全储备及工程适用性,建议在跑道接地带等强飞机冲击荷载作用区域同时采用界面剂+物理处治技术(凿毛/刻槽);而在滑行道等低动载区域可仅采用物理处治技术(凿毛/刻槽)。

(5)本文主要基于单次飞机动载下的动力响应及强度储备开展研究,尚未考虑层间黏结性能在长期重复荷载下的疲劳衰减规律及环境因素的耦合影响。后续应结合加铺工程长期监测数据及高低温循环、水侵与反复荷载作用下的层间斜剪/疲劳试验,构建随环境与累积损伤演化的层间本构参数体系,以进一步完善薄层罩面的全寿命维护与养护决策方法。

参考文献:

References:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2021年民航行业发展统计公报[R]. 北京:中国民用航空局, 2022: 8-9.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. 2021 statistical bulletin on the development of civil aviation industry [R]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2022: 8-9.
- [2] DE MOURA I R, DOS SANTOS SILVA F J, COSTA L H G, et al. Airport pavement evaluation systems for maintenance strategies development: A systematic literature review [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2021, 14(6): 676-687.
- [3] 凌建明,李沛霖,刘诗福,等. 机场智慧跑道的内涵拓展与功能系统[J]. 土木工程学报, 2024, 57(8): 119-128.
LING Jian-ming, LI Pei-lin, LIU Shi-fu, et al. Connotation expansion and function system of airport smart runway [J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(8): 119-128.
- [4] International Air Transport Association. IATA annual safety report 2023, Recommendations for accident prevention [R]. Montreal: IATA, 2023: 49-50.
- [5] WANG J Q, LI Q, SONG G W, et al. Investigation on the comprehensive durability and interface properties of coloured ultra-thin pavement overlay [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01341.
- [6] GILLANI S AALI, TOUMI A, TURATSINZE A. Effect of surface preparation of substrate on bond tensile strength of thin bonded cement-based overlays [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2020, 13(2): 197-204.
- [7] LI L H, YANG R. Fatigue life analysis of composite pavement with multiple overlays [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 2018, 12(3): 7-15.
- [8] Federal Aviation Administration. AC 150/5320-6G Airport pavement design and evaluation [R]. Washington DC: FAA, 2021: 96-102.
- [9] DAS R. Field investigation and performance evaluation of interface bonding between pavement layers [D]. Baton Rouge: Louisiana State University, 2017: 22-31.
- [10] XU J Y, MA B, LIU F S, et al. Study of the bonding performance and application of an epoxy resin pavement sealant [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35(7): 04023183.
- [11] 杨才千,徐利敏,曾领雄,等. 纳米SiO₂改性界面剂对混凝土黏结性能的影响[J]. 混凝土, 2024(5): 37-42, 47.
YANG Cai-qian, XU Li-min, ZENG Ling-xiong, et al. Effect of nano-SiO₂ modified interfacial agent on the bonding performance of concrete [J]. Concrete, 2024(5): 37-42, 47.
- [12] DRIDI M, HACHEMI S, BELKADI A A. Influence of styrene-butadiene rubber and pretreated hemp fibers on the properties of cement-based repair mortars [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2023, 27(1): 538-557.
- [13] 汪鹏,梁鸿骏,万睿. 界面剂对混凝土-ECC界面粘结性能影响机理研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2026, 59(1): 48-57.
WANG Peng, LIANG Hong-jun, WAN Rui. Study on mechanism of interface agent on bonding performance of concrete-ECC interface [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2026, 59(1): 48-57.
- [14] 郝玉军,韩文龙,彭涛,等. 被动围压下ECC-NC界面粘结性能与韧性评价[J/OL]. 交通运输工程学报, 2025-12-15. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.103>.
HAO Yu-jun, HAN Wen-long, PENG Tao, et al. Bond performance and toughness evaluation of ECC-NC interface under passive confining pressure [J/OL]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025-12-15. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.103>.
- [15] OKUMURA U, 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.
- [16] DANESHVAR D, BEHNOOD A, ROBISSON A. Interfacial bond in concrete-to-concrete composites: A review

- [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 359: 129195.
- [17] LUO Q R, WANG W, WANG B J, et al. Numerical study on interface optimization of new-to-old concrete with the slant grooves [J]. *Structures*, 2021, 34: 381-399.
- [18] 董海东, 麻旭荣, 裘秋波, 等. 基于斜剪试验的超薄罩面层间黏结性能研究[J]. *公路*, 2022, 67(4): 94-97.
DONG Hai-dong, MA Xu-rong, QIU Qiu-bo, et al. Study on interlayer bonding performance of ultra-thin overlay based on oblique shear test [J]. *Highway*, 2022, 67(4): 94-97.
- [19] MOKHTARI S, HASSAN M. Performance of bond between old and new concrete layers: The effective factors, durability and measurement tests: A review [J]. *Infrastructures*, 2024, 9(10): 171.
- [20] 冯 硕. UHPC-NSC 界面协同服役性能与机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023: 73-77.
FENG Shuo. Study on synergistic service performance and mechanism of UHPC-NSC [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023: 73-77.
- [21] 陈子璇, 肖建庄, 丁 陶. 混凝土-混凝土层间界面的性能及在组合混凝土结构中的应用评述[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(7): 964-974.
CHEN Zi-xuan, XIAO Jian-zhuang, DING Tao. Review on behavior of concrete-concrete interface and its application in composite concrete structures [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2021, 49(7): 964-974.
- [22] JIA X Y, HU W, ZHU D. Investigation of interlayer shear failure of concrete bridge deck asphalt overlay utilizing shear strength envelopes [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 123: 105278.
- [23] ZHAO H D, TIAN Y, REN L, et al. Improvements to the bonding condition of ultra-thin concrete overlays for airport rigid pavements [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2024, 25: 2427855.
- [24] KIM H, BUTTLAR W G, CHOU K F. Mesh-independent fracture modeling for overlay pavement system under heavy aircraft gear loadings [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2010, 136(4): 370-378.
- [25] BAYRAKTOVA K, EBERHARDSTEINER L, PEYER M J, et al. Towards a better consideration of the interface bonding conditions in the design of bonded concrete overlays [J]. *Materials and Structures*, 2023, 56(2): 30.
- [26] ZHANG Z Y, PANG K, XU L H, et al. The bond properties between UHPC and stone under different interface treatment methods [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 365: 130092.
- [27] LIU Q H, MA J D, QIAO P Z, et al. Mesoscale modeling of new-to-old concrete interface under combined shear and compressive loads [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2024, 307: 110331.
- [28] SHI X J, LU X Q, HE T, et al. Predictions of friction and flash temperature in marine gears based on a 3D line contact mixed lubrication model considering measured surface roughness [J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(5): 1570-1583.
- [29] 李 聪, 毛庆超, 胡文旭, 等. 栓黏混合连接钢-UHPC 组合板界面抗剪试验[J]. *交通运输工程学报*, 2025, 25(5): 278-296.
LI Cong, MAO Qing-chao, HU Wen-xu, et al. Shear test on interface of steel-UHPC composite slab with hybrid connection of headed stud and adhesive [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2025, 25(5): 278-296.
- [30] 侯帅龙, 叶华文, 宋雯钰, 等. 考虑界面滑移和阻尼效应的简支钢-混组合梁自振特性的三角级数解[J/OL]. *交通运输工程学报*, 2026-04-07. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.262>.
Hou shuai-long, YE Hua-wen, SONG Wen-yu, et al. Triangular series solution for free vibration characteristics of simply supported steel-concrete composite beams considering interface slip and damping effects [J/OL]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2026-04-07. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.262>.
- [31] CUNLIFFE C, MEHTA Y A, CLEARY D, et al. Impact of dynamic loading on backcalculated stiffness of rigid airfield pavements [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2016, 17(6): 489-502.
- [32] Boeing Commercial Airplanes. Boeing 737 airplane flight manual [R]. Seattle: Boeing, 2023: 72-93.
- [33] 岑业波. 飞机荷载和湿化作用下道基变形特征及预估[D]. 上海: 同济大学, 2024: 122-130.
CEN Ye-bo. Deformation characteristics and prediction of pavement subgrade under aircraft load and wetting effect [D]. Shanghai: Tongji University, 2024: 122-130.
- [34] 刘诗福. 飞机滑跑随机振动动力学响应及跑道平整度评价[D]. 上海: 同济大学, 2015: 140-148.
LIU Shi-fu. Dynamic response of aircraft random vibration during taxiing and runway roughness evaluation [D]. Shanghai: Tongji University, 2015: 140-148.
- [35] 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.