

文章编号:1671-1637(2026)08-0046-15

高频强冲击荷载下机场道面结构损伤演化与 应力缓释机制

胡哲^{1,2}, 赵晓康^{*1,2}, 王子诺^{1,2}, 张久鹏^{1,2}, 王少博³, 裴建中¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学民航机场智慧建造与运维重点实验室,
陕西 西安 710064; 3. 西安咸阳国际机场股份有限公司, 陕西 西安 712000)

摘要:针对飞机起降对机场刚性道面造成的累积损伤问题,提出增设水泥沥青(CA)砂浆应力缓释层,以提升其抗冲击性能。以B737-800机型为例,基于ABAQUS建立机场刚性道面三维有限元模型,结合混凝土塑性损伤理论,采用Vexternaldb和Vdload子程序实现随机冲击荷载工况的模拟,系统分析了道面板抗弯拉强度与厚度、缓释层厚度、飞机垂直下沉速度及作用位置等因素对道面损伤的影响规律,揭示了重复冲击下道面的损伤演化规律及缓释层的减损机制。研究表明:重复冲击作用下,道面损伤以受拉为主,受压损伤影响较小,提高混凝土抗弯拉强度与板厚可在一定程度上延缓初期损伤,但难以有效抵抗重复冲击引起的损伤累积;设置CA砂浆应力缓释层后,早期损伤发展显著减缓,黏性耗散能降低90%以上;硬着陆工况下,缓释层厚度由2 cm增至6 cm时,塑性耗散能可降低95%,但1~2 cm过薄的缓释层易先于道面板发生受拉破坏,综合建议缓释层厚度取3~4 cm为宜,该推荐值基于当前模型参数及界面理想黏结条件下所得;飞机垂直下沉速度对能量耗散影响显著,增设缓释层后,道面板刚度退化程度与速率显著降低。缓释层在抑制损伤累积、降低能量耗散及延缓刚度退化方面具有良好效果,可为高抗冲击性能机场道面结构设计提供理论依据与技术参考。

关键词:机场工程;刚性道面;有限元模拟;应力缓释层;重复冲击荷载;损伤演化

中图分类号:V351.11 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.402

Damage evolution and stress-relief mechanism for airport pavement structures under high-frequency impact load

HU Zhe^{1,2}, ZHAO Xiao-kang^{*1,2}, WANG Zi-nuo^{1,2}, ZHANG Jiu-peng^{1,2},
WANG Shao-bo³, PEI Jian-zhong¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Construction and Maintenance of CAAC, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Xi'an Xianyang International Airport Co., Ltd., Xi'an 712000, Shaanxi, China)

Abstract: To address the cumulative damage of rigid airport pavements induced by aircraft takeoff and landing, this study proposes the incorporation of a cement asphalt (CA) mortar stress-relief layer to

出版历程:2025-12-31 收稿,2026-04-26 修回,2026-06-04 录用

基金项目:国家自然科学基金民航联合基金项目(U2333216);中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102215207);西安咸阳国际机场创新项目(CWAG-XY-2025-FW-0001);长安大学优秀博士学位论文培育资助项目(300116216601)

作者简介:胡哲(1999-),男,广东广州人,工学博士研究生,E-mail:huzhe@chd.edu.cn。

*通信作者:赵晓康(1987-),男,河南濮阳人,副教授,工学博士,E-mail:zhaoxk@chd.edu.cn。

引用格式:胡哲,赵晓康,王子诺,等.高频强冲击荷载下机场道面结构损伤演化与应力缓释机制[J].交通运输工程学报,2026,26(8):46-60.

Citation: HU Zhe, ZHAO Xiao-kang, WANG Zi-nuo, et al. Damage evolution and stress-relief mechanism for airport pavement structures under high-frequency impact load[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(8): 46-60.

enhance its impact resistance. Taking the B737-800 aircraft as an example, a three-dimensional finite element model of rigid airport pavement was established in ABAQUS. Combined with the concrete damage plasticity (CDP) model, random impact loading conditions were implemented using the Vexternaldb and Vdload subroutines. The effects of slab flexural strength and thickness, stress-relief layer thickness, aircraft vertical sinking velocity, and loading position on pavement damage were systematically analyzed. The damage evolution characteristics under repeated impacts, as well as the mitigation mechanism of the stress-relief layer were revealed. The results indicate that pavement damage is dominated by tensile failure under repeated impacts, while compressive damage is negligible. Increasing the flexural strength and slab thickness can delay initial damage to some extent, but is insufficient to effectively suppress damage accumulation induced by repeated impacts. The incorporation of CA mortar stress-relief layer can significantly mitigate early-stage damage progression, reducing viscous dissipation energy by more than 90%. Under hard landing conditions, increasing the thickness of the stress-relief layer from 2 cm to 6 cm reduces plastic dissipation energy by 95%. However, an excessively thin layer (1-2 cm) tends to undergo tensile failure prior to the slab. A thickness of 3-4 cm is recommended for the stress-relief layer based on comprehensive evaluation. This recommendation is derived under the current model parameters and ideal interfacial bonding conditions. The aircraft vertical sinking velocity has a significant influence on energy dissipation, while the inclusion of the stress-relief layer markedly reduces both the degree and rate of stiffness degradation of the pavement. The stress-relief layer is effective in suppressing damage accumulation, reducing energy dissipation, and delaying stiffness degradation, providing a theoretical basis and technical reference for the structural design of airport pavements with high impact resistance.

Keywords: airport engineering; rigid pavement; finite element simulation; stress-relief layer; repeated impact load; damage evolution

Publication history: Received 2025-12-31; Received in revised form 2026-04-26; Accepted 2026-06-04

Funding: Joint Fund of Civil Aviation Research of National Natural Science Foundation of China (U2333216); Fundamental Research Funds for the Central Universities (300102215207); Xi'an Xianyang International Airport Innovation Project (CWAG-XY-2025-FW-0001); Excellent Doctoral Dissertation Cultivation Funding Project of Chang'an University (300116216601)

* **Corresponding author:** ZHAO Xiao-kang, associate professor, PhD, E-mail: zhaoxk@chd.edu.cn.

0 引言

民航运输在全球经济与社会发展中占据重要地位,也是现代综合交通体系的枢纽,机场跑道作为关键基础设施,其结构性能直接关系到航空运行的安全与效率^[1-2]。目前,中国机场跑道以水泥混凝土刚性道面为主,此类道面虽强度高、承载力强,但在航空运输量增长与飞机重型化背景下,起降带承受的荷载强度与频次已远超早期设计基准^[3-4]。在持续高强着陆冲击与高频滑行动载耦合作用下,道面常未达设计寿命即出现劣化,表现为混凝土板断裂、接缝损坏、表层剥落等病害,既增加养护成本,也带来了安全隐患^[5-6]。起落架多轮荷载会在结构内产生

复杂应力叠加与干涉效应,驱动裂纹由萌生到扩展并持续累积疲劳损伤^[-7-8]。因此,亟需在重复荷载条件下精确表征损伤演化规律,建立荷载-结构响应-材料退化的定量关系,并据此优化结构设计以延缓损伤、提升耐久性与运行安全。

为应对飞机动态荷载引发的道面损伤问题,国内外学者从材料改良、结构优化及维护技术等多维度提出相应措施,并借助数值模拟深入剖析其力学机理^[9]。在材料增强方面,合成材料如抗裂土工格栅与土工网可在一定程度上改善整体性能,但受限于层间剪切强度不足^[10]。Mu等^[11]采取配筋混凝土提高道面混凝土的强度和截面模量,但效果亦未达预期。此外,颜祥程等^[12]借助ANSYS调整层间摩擦因

数评估纤维栅格对加铺层的增强效果,发现摩擦因数的变化对旧水泥混凝土板底拉应力、层间剪应力和加铺层弯沉的降低作用有限。作为常用加固与延寿手段,加铺沥青层已在机场道面维护中得到广泛应用^[13]。然而,当混凝土板接缝传荷不足时,加铺层下接缝区域易产生较大竖向位移,且沥青加铺层在长期重载与温度循环作用下仍可能出现开裂与车辙问题^[14]。Lu等^[15]采用沥青同步碎石封层或沥青复合封层作为隔离层,试验结果表明该隔离层能够降低层间约束、提升基层抗冲刷能力。但是有限元分析发现该隔离层会使混凝土板的拉应力略有升高^[16]。

水泥沥青(Cement Asphalt, CA)砂浆由乳化沥青、添加剂、水泥、水及细集料组成,具有优异的流动性与黏结性能,并兼具良好的强度与抗冲击性能,在高铁无砟轨道中常作为阻尼缓冲层以承担减震、传力与支承功能^[17]。尽管其在机场道面中应用有限, Hu等^[18]将其设置于刚性道面面层和基层之间作为应力缓释层,结果显示该砂浆可有效缓解局部应力集中,改善层间应力传递,并降低道面板弯沉和翘曲变形。此外,将CA砂浆作为缓释层引入路面结构,可优化水泥混凝土路面的受力与变形协调性,显著降低面层与基层的压应力、面层底部的拉应力及竖向位移^[19]。考虑到机场道面是一个复杂的多层结构,针对飞机冲击荷载作用对其动力响应与损伤演化的影响问题,数值仿真模拟是一种高效可行的技术途径^[20-21]。凌建明等^[22]基于ADAMS/Aircraft建立了涵盖7种机型的整机仿真模型,构建了跑道动载系数预估方法,研究表明飞机着陆时冲击动载系数的峰值随下沉速度的增大而显著上升,在接近限制下沉速度工况下,最大冲击动载超过了着陆滑跑最大动载。游庆龙等^[23]建立复合式道面结构模型,探究了3种多轴起落架作用下各层的力学响应,结果表明多轮轴之间叠加效应明显,力学响应呈现多

应力峰值模式。此外,蒲娜^[24]利用ABAQUS与混凝土塑性损伤(Concrete Damaged Plasticity, CDP)模型,通过时程响应和损伤演化角度,阐明了刚性道面抗冲击性能的衰退特征。然而,针对飞机重复冲击荷载作用下,在机场刚性道面面层和基层之间设置应力缓释层以减缓结构损伤的研究较少。

本研究旨在将CA砂浆材料引入机场刚性道面设计,针对飞机重复冲击工况,定量评估应力缓释层对道面损伤演化的减损效应。首先,基于ABAQUS建立机场道面有限元模型,采用CDP模型分析不同抗弯拉强度与厚度的道面板损伤的演化特性。进一步分析不同厚度缓释层对机场道面结构拉/压损伤、标准刚度退化以及耗散能的影响,并据此提出缓释层设计建议。随后,比较不同飞机垂直下沉速度与作用点位对各损伤指标的敏感性。最后,引入随机冲击荷载工况,揭示道面结构损伤演化趋势及能量耗散特征。研究成果可为抗冲击型机场道面设计提供技术参考,提升道面服役性能并延长其使用寿命。

1 机场刚性道面结构有限元模型建立

1.1 三维有限元模型建立

本研究构建的有限元模型包括9块水泥混凝土板面层,CA砂浆应力缓释层、基层、垫层及土基,道面结构横向和纵向尺寸均为15 m。模型未考虑自重及温度的影响,各结构层示意如图1所示。参考既有文献^[18,25],各层材料基本属性参数见表1。

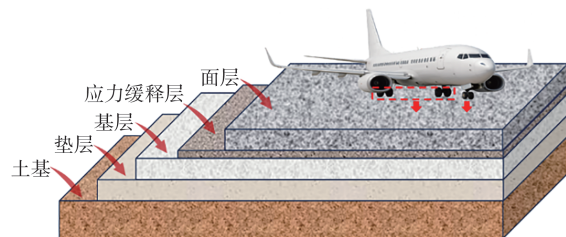


图1 刚性道面结构示意图

Fig. 1 Illustration of rigid pavement structure

表1 机场道面结构材料的基本参数

Table 1 Basic parameters of airport pavement structural materials

材料	结构层	厚度/cm	弹性模量/MPa	泊松比	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
水泥混凝土	面层	28/32/36/40	32 000/33 500/34 500/35 500	0.15	2 400
CA砂浆	应力缓释层	1/2/3/4/5/6	10 000	0.20	1 950
水泥稳定碎石	基层	30	1 500	0.25	2 300
天然砂砾	垫层	30	300	0.30	2 300
压实土	土基	1 000	70	0.40	1 920
钢材	传力杆和拉杆		210 000	0.30	7 850

为了模拟接缝处的荷载传递,ABAQUS中可在板间设置弹簧单元,并通过赋予其剪切刚度来表征

接缝传荷能力。然而,该方法依赖于经验刚度参数的选取,本研究选择与实际结构更为接近的梁单元

内置方法对接缝处进行模拟,未对接缝传荷效率进行参数化区分。具体而言,为增强相邻道面板之间的传荷性能,在板间接缝处及板厚中部设置传力杆与拉杆。相邻道面板之间设有 8 mm 接缝,其中传力杆和拉杆分别布置于横缝和纵缝,并简化为梁单元,其两端嵌入道面板内部,具体尺寸参数见表 2。

表 2 传力杆和拉杆间距及尺寸

Table 2 Spacing and dimensions of dowel bars and tie bars

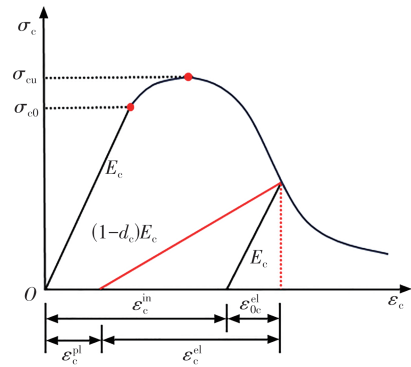
接缝设计	长度/ mm	数量	间距/ mm	直径/ mm	外侧杆到板边 距离/mm
传力杆	500	15	330	35	190
拉杆	900	9	550	16	300

面层与基层之间采用惩罚函数摩擦模型,法向采用“硬接触”,切向摩擦因数设为 0.6^[26],而其他界面设为完全连续状态。当设置 CA 砂浆应力缓释层时,各结构层之间采用 Tie 约束连接。此外,边界条件设置为:模型前后边界约束 Y 方向位移,左右边界约束 X 方向位移,土基底部采用固定端约束;同时,分别限制传力杆与拉杆绕 Y 轴和 X 轴的转动自由度,以提高模型计算的稳定性。为兼顾计算精度与效率,模型采用 C3D8R 单元进行网格划分,道面板和缓释层的网格尺寸划分为 0.1 m×0.1 m,基层和垫层为 0.3 m×0.3 m,土基为 0.8 m×0.8 m。考虑到缓释层厚度较小,为保证其应力传递与变形协调性,本研究在缓释层厚度方向划分两层单元,以降低单层网格对计算结果的影响。

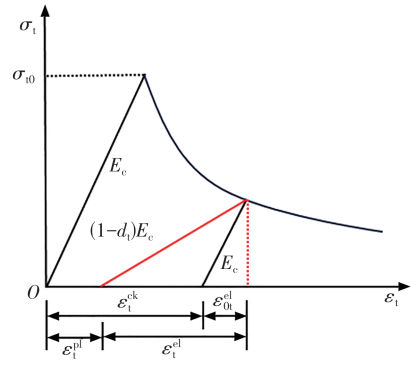
塑性损伤力学用于描述材料在加载过程中塑性变形与损伤演化的耦合行为,适用于混凝土等脆性材料。ABAQUS 中的 CDP 模型以拉压等效塑性应变及损伤变量表征刚度退化与永久性损伤,可较为准确地模拟混凝土的开裂与压碎行为。本研究根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中的本构关系,得到压缩和拉伸状态下混凝土应力-应变曲线如图 2 所示。需要说明的是,本研究在 CDP 模型中未引入动力强度提高因子,即不考虑动力增强(应变率)效应对混凝土受压/受拉损伤因子的影响。图 2 中: E_c 为弹性模量; d_c 和 d_t 分别为受压和受拉损伤因子; ϵ_c^{pl} 和 ϵ_t^{pl} 分别为压缩和拉伸塑性应变; ϵ_c^{in} 和 ϵ_t^{ck} 分别为压缩非弹性应变和拉伸开裂应变; ϵ_c^{el} 和 ϵ_t^{el} 分别为未损伤的压缩和拉伸弹性应变; ϵ_c^{el} 和 ϵ_t^{el} 分别为考虑损伤后的压缩和拉伸弹性应变。压应力 σ_c 和拉应力 σ_t 的计算式为

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_c (\epsilon_c - \epsilon_c^{pl}) \quad (1)$$

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_c (\epsilon_t - \epsilon_t^{pl}) \quad (2)$$



(a) 压缩



(b) 拉伸

图 2 压缩和拉伸状态下混凝土应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of concrete under compression and tension

基于 Sidoroff 能量等价原理,将规范应力-应变曲线转换为 ABAQUS CDP 所需的输入格式,并计算出压缩非弹性应变、开裂应变以及塑性损伤系数等关键参数。此外,CDP 模型中道面板的相关参数如表 3 所示,其中 K_c 为偏应力平面形状参数,双轴压缩屈服应力 f_{b0} 与单轴抗压缩屈服应力 f_{c0} 的比值为偏平面形状控制参数。压缩非弹性应变和开裂应变计算式为

$$\epsilon_c^{in} = \epsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (3)$$

$$\epsilon_t^{ck} = \epsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_c} \quad (4)$$

表 3 道面板 CDP 模型参数

Table 3 Parameters of the slab in the CDP model

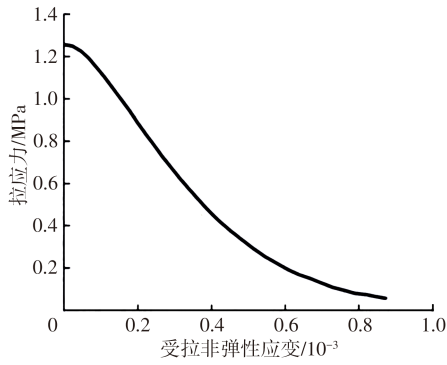
参数	膨胀角/(°)	K_c	f_{b0}/f_{c0}	黏性系数 μ	流动势偏移值
取值	30	0.667	1.16	0.005	0.1

由图 2 可见,应力-应变曲线可分为 3 个阶段:①弹性段,应力与应变成线性关系,卸载后基本恢复;②屈服段,曲线出现转折并偏离线性,产生不可恢复的塑性应变、微裂纹和局部损伤;③损伤破坏段,当损伤持续累积,材料刚度与承载力逐步衰减直至破坏。受压损伤因子 d_c 和受拉损伤因子 d_t 用于描述此退化过程,其计算式如下

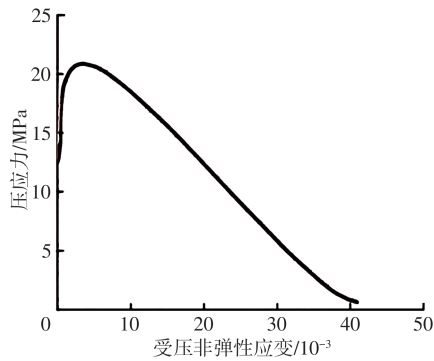
$$d_c = 1 - \sqrt{\sigma_c / (E_c \epsilon_c)} \quad (5)$$

$$d_t = 1 - \sqrt{\sigma_t / (E_c \epsilon_t)} \quad (6)$$

根据中国《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH/T 5004—2025),道面设计以抗弯拉强度作为强度控制指标,本文选取 4.5、5.0、5.5 和 6.0 MPa 作为参数变量。CDP 模型材料参数需以混凝土轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 和轴心抗压强度标准值 f_{ck} 为输入,因此依据中国《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)中的经验关系式,将抗弯拉强度换算成立方体抗压强度标准值,并结合规范《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)进一步转换为 f_{tk} 和 f_{ck} ,据此确定 CDP 模型的本构参数。CA 砂浆材料同样属于准脆性材料,采用 CDP 模型描述其损伤演化行为也具有合理性。蔡小培等^[27]基于 CDP 模型建立了考虑损伤效应的 CA 砂浆本构模型,其应力-应变关系可表示为式(7),试验表明黏性项 $\xi \varpi$ (ξ 为 CA 砂浆黏性系数, ϖ 为应变率)对总应力影响不足 2%,因此可忽略不计。本研究参考高铁无砟轨道工程中已有的 CA 砂浆力学试验结果,提取其拉/压应力-非弹性应变曲线以及受拉/受压损伤因子数值(图 3、4),作为 CDP 模型参数的输入依据^[28-29]。



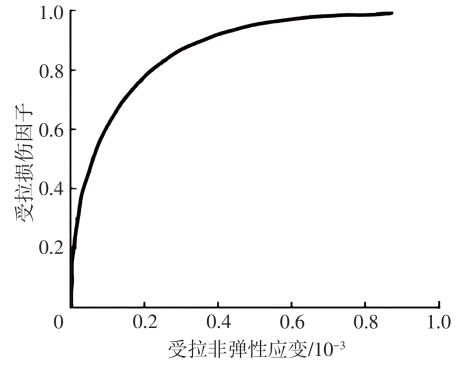
(a) 拉应力-非弹性应变曲线



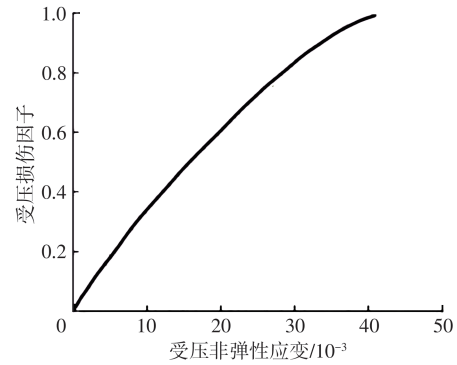
(b) 压应力-非弹性应变曲线

图 3 CA 砂浆应力-非弹性应变曲线^[28]

Fig. 3 Stress-nonlinear strain curve for CA mortar^[28]



(a) 受拉损伤因子



(b) 受压损伤因子

图 4 CA 砂浆损伤因子^[28]

Fig. 4 CA mortar damage factor^[28]

应力-应变关系为

$$\sigma = E\epsilon(1 - d) + \xi \varpi \quad (7)$$

式中: σ 为应力; E 为 CA 砂浆弹性模量; ϵ 为应变。

1.2 飞机荷载和作用点

本研究选取国内外应用较为广泛的 B737-800 机型,对机场道面在重复冲击荷载作用下的损伤演化进行分析。将轮胎与道面之间的椭圆形接触区域简化为矩形均布荷载,荷载参数见表 4。飞机着陆过程中的冲击动载可采用动载系数(Dynamic Load Coefficient, DLC)进行表征,该方法已被用于飞机着陆动载预测研究^[22]。DLC 定义为飞机着陆冲击动载峰值与最大着陆重量之比,选取上述研究中 B737-800 机型在仰角 3° 条件下的最大动载系数作为冲击荷载计算参数,并结合《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH/T 5004—2025)中给出的最大着陆重量,确定其着陆冲击动载峰值 F_N 。根据 Modarres 等^[30]研究,着陆阶段瞬态冲击荷载可近似表示为半正弦函数形式。通过式(8)~(10)将该冲击动载峰值转化为瞬态冲击荷载,并在 ABAQUS 中通过幅值曲线形式实现冲击荷载随时间变化的加载过程。根据计算,单次冲击作用持续时间为 0.04 s,考虑到单次冲击结束后

道面结构的动力响应并不会瞬时消失,为反映重复冲击荷载的时程特征,同时兼顾计算效率,在数值模拟中取相邻2次冲击之间的时间间隔为0.16 s,从而形

成单个加载周期为0.20 s的重复冲击序列。需要说明的是,该时间参数用于描述冲击荷载序列的加载节奏,并不对应实际工程中飞机起降间隔。

表4 B737-800机型荷载参数

Table 4 Load parameters of B737-800

最大着陆荷载/kN	荷载分配系数	主起落架单轮荷载/kN	胎压/MPa	单轮接触面积/m ²	轮印长度/m	轮印宽度/m
663.80	0.95	157.65	1.47	0.107	0.395	0.272

$$P_0 = \frac{F_N}{A_c} \quad (8)$$

$$p(t) = p_0 \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right) \quad 0 \leq t \leq T \quad (9)$$

$$T = \frac{12a_c}{V_h} \quad (10)$$

式中: P_0 为冲击压力; A_c 为轮胎接触面积; $p(t)$ 为瞬态冲击压力; T 为荷载作用周期; V_h 为飞机的着陆水平速度; a_c 为轮胎的当量圆半径。

在飞机着陆过程中,垂直下沉速度通常为0.31~0.91 m·s⁻¹,当超过1.32 m·s⁻¹时一般视为硬着陆。中美民航飞行标准均规定飞机着陆时的最大允许下沉速度为3.05 m·s⁻¹[31]。因此,本研究分别选取1.0 m·s⁻¹和3.0 m·s⁻¹作为正常着陆与硬着陆工况,并进一步分析不同垂直下沉速度(0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m·s⁻¹)对道面结构损伤演化的影响。此外,将起落架轮胎的冲击作用点布置于4个位置:板中、纵缝中部、横缝中部和板角(图5),以评估不同作用位置及应力缓释层设置条件下道面结构损伤的差异,进而识别出潜在的薄弱部位。

上述设置采用固定作用点的重复冲击,旨在对比不同结构参数与荷载形式对损伤演化的影响。鉴于工程实际中轮迹分布受起落架布置、飞行员操作以及气象条件等因素影响,轮迹横向偏移采用正态分布函数进行描述。在此基础上,进一步在9块道面板区域施加随机位置的冲击荷载,验证应力缓释层的减损效果。B737-800起落架为单轴双轮类型,其轮迹分布为2个概率密度函数 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 叠加,具体如下

$$F(x) = f_1(x) + f_2(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[\exp\left(-\frac{[x - (T_w - S_t)/2]^2}{2\sigma^2}\right) + \exp\left(-\frac{[x - (T_w + S_t)/2]^2}{2\sigma^2}\right) \right] \quad (11)$$

式中: σ 为标准差; T_w 为主起落架间距,取5.72 m; S_t 为两轮横向间距,取0.86 m。

轮迹横向分布标准差取0.775,轮迹曲线如

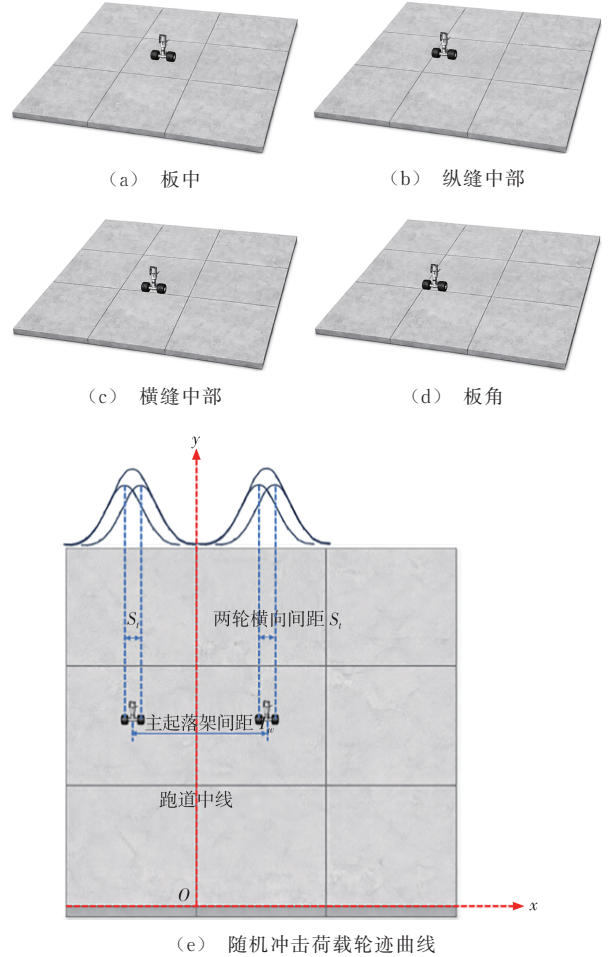


图5 荷载作用点位示意

Fig. 5 Schematic of load points

图5(e)所示。同时,轮迹纵向坐标服从均匀分布,取值范围为15 m(3块道面板宽度),本研究在随机冲击荷载仿真中仅考虑单个起落架的作用。为保证随机冲击荷载生成过程的可重复性,在随机坐标生成过程中采用随机种子控制随机数序列。具体而言,在Python程序中通过设置固定随机种子以初始化随机数生成器,使得在相同计算条件下随机冲击位置能够被重复生成。在此基础上,通过选取不同随机种子生成6组随机样本,以反映随机工况的不确定性。

1.3 模型验证

为了验证所建立的机场道面刚性结构模型的正确性,采用解析法计算道面板在B737-800荷载作用

下的最大拉应力,并将其与有限元模型计算结果进行对比^[32]。选择双轮荷载作用在纵缝中心区域作为分析节点,其最大拉应力计算如下

$$\sigma_p = (5.2059 - 2.0984t_{dx}) \left(\frac{E'_c}{E_t} \right)^{0.0715} \cdot (K_{rd}r)^{1.7114} qh^{-1.3692} \quad (12)$$

$$K_{rd} = 1 + 0.1236 \left(\frac{E'_c}{E_t} \right)^{-0.0235} h^{0.2664} \cdot S_t^{-1.1291} r^{-0.0454} \quad (13)$$

式中: t_{dx} 为纵缝传荷系数; E'_c 为水泥混凝土弹性模量; E_t 为基层顶面当量回弹模量; K_{rd} 为双轮起落架荷载折减系数; r 为荷载圆半径; q 为胎压; h 为面层板厚度; S_t 为两轮横向间距。

结果表明,仿真计算出的最大拉应力为2.215 MPa,与解析法计算出的最大拉应力2.278 MPa非常接近,两者差值在3%以内,说明所建立的机场道面结构有限元模型可用于模拟。

2 重复冲击荷载作用下道面结构损伤演化规律分析

2.1 道面结构参数影响

2.1.1 混凝土抗弯拉强度和道面板厚度

本文考虑2种飞机着陆下沉速度工况:正常着陆($1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和硬着陆($3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。在重复冲击荷载作用下,对不同抗弯拉强度和厚度的水泥混凝土道面板进行分析,并选取飞机荷载作用区域对应道面板底部的最大受拉/受压损伤因子作为评价指标,其变化规律如图6所示。正常着陆工况下,5次和20次循环冲击分别记为V1-C5和V1-C20;硬着陆工况下,1次和5次循环冲击分别记为V3-C1和V3-C5。损伤因子在0~0.98内表示材料处于损伤发展阶段;随着损伤演化推进,当 $d > 0.98$ 时,可认为混凝土刚度及其承载能力已趋近于0。结果表明,在正常着陆工况下,冲击荷载对道面板底部受拉损伤的影响更为显著。经过5次冲击作用后,各工况下的受拉损伤因子均超过0.04,而受压损伤基本可以忽略。在V3-C5硬着陆工况下,经历5次冲击作用后,道面板底的受拉损伤因子均超过0.98,而受压损伤程度相对较小,其受压损伤因子均未超过0.015。该结果表明,多次重复冲击作用下,板底区域的拉应力已超过混凝土的抗拉强度,材料进入塑性阶段并逐渐产生裂纹。随着受拉损伤的持续累积,结构承载能力逐渐退化并最终趋于破坏。

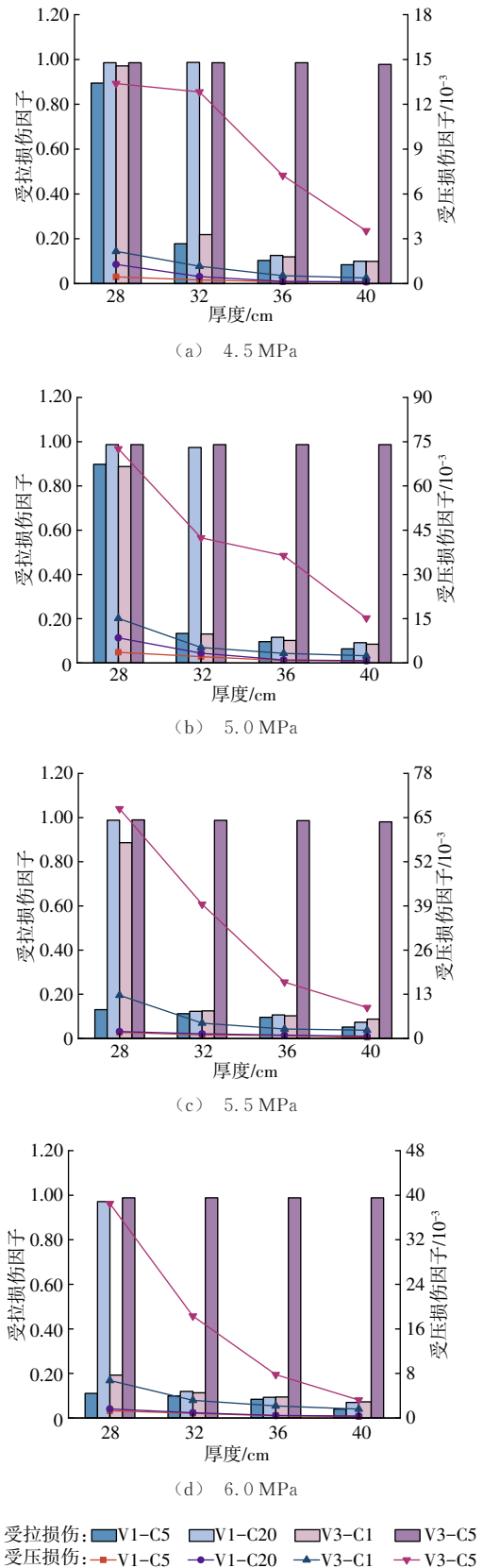


图6 重复冲击荷载作用下不同抗弯拉强度和厚度道面板受拉/受压损伤因子变化规律

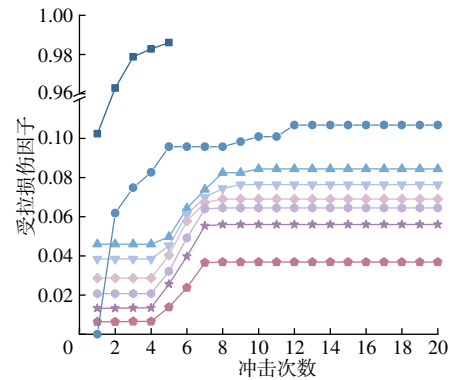
Fig. 6 Variation of tensile/compressive damage factors in slabs of different flexural strengths and thicknesses under repeated impact load

相比之下,由于混凝土抗压强度显著高于抗拉强度(约为其8~12倍),因此受压损伤并不显著。值得注意的是,在单次硬着陆V3-C1工况下,当混凝土弯拉强度为4.5~5.5 MPa且道面板厚度为28 cm时,受拉损伤因子均已超过0.8,表明结构在初始高强度冲击作用下已进入明显损伤阶段。随着冲击次数增加,损伤不断累积,在多次冲击作用后(V3-C5)最终达到破坏状态($d > 0.98$)。尽管提高混凝土弯拉强度或增加板厚能够在一定程度上缓解初期的受拉损伤,但随着硬着陆冲击次数的增加,在定点、等幅的多次瞬态冲击荷载作用下,道面板局部区域将持续承受重复高强度冲击,应力集中不断叠加使其迅速进入损伤软化阶段,裂缝逐渐萌生并扩展,结构刚度显著退化。因此,该类加载方式更倾向于反映高强度冲击作用下的极端损伤演化过程。与实际机场运行中飞机着陆荷载及轮迹空间分布特征相比,该定点冲击加载方式更易导致局部损伤的快速累积。仅通过增加板厚或提高材料弹性模量(结构刚度)来提升结构抗冲击性能,其改善效果仍然较为有限。

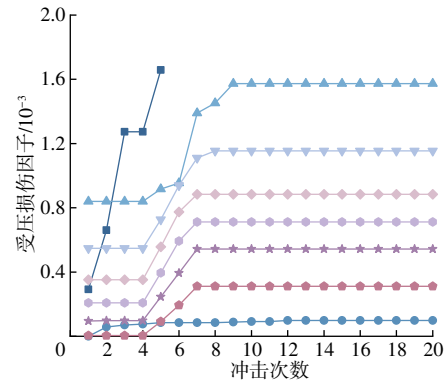
2.1.2 应力缓释层厚度

选取弯拉强度5.5 MPa、板厚36 cm的组合作为传统刚性道面板,正常着陆与硬着陆工况分别记为V1-0和V3-0。在此基础上设置不同厚度(1~6 cm)的应力缓释层,在硬着陆工况下分别用V3-1、V3-2、V3-3、V3-4、V3-5、V3-6表示,正常着陆下的命名方式同理。选取道面板底部最先出现损伤的单元,绘制其受拉/受压损伤因子时程曲线,如图7所示。图7(a)结果表明:整体上受拉损伤因子均呈阶梯式增长;在每次冲击荷载结束后,受拉损伤因子稳定在一定水平且不可恢复,表现为不可逆的累积演化过程。在正常着陆工况下,设置CA砂浆应力缓释层后,道面板底部未出现明显受拉损伤,因此该工况下其受拉损伤因子未在图中显示。与上述结果相比,传统刚性道面板在固定位置经历5次硬着陆高强度冲击作用下受拉损伤因子可达0.98。而在设置缓释层后,前10个循环周期内板底受拉损伤极为微弱,其受拉损伤因子均低于0.09,甚至低于V1-0工况;即使在经历20次循环冲击后,道面板仍未出现明显的受拉损伤。这表明增设应力缓释层能够有效延缓材料由弹性段向软化段的转变,使受拉损伤发展过程更加平缓。

图7(b)结果表明,与受拉损伤规律类似,受压损伤因子同样随冲击荷载呈阶梯式累积增长,并在载



(a) 受拉损伤



(b) 受压损伤

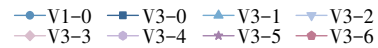


图7 道面板损伤因子时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of damage factor in slabs

荷卸除后保持稳定,无明显回弹现象。设置应力缓释层后,道面板的受压损伤程度有所降低,并随着缓释层厚度增加逐渐呈减缓趋势。经历10次冲击作用后,各工况下的受压损伤因子均大于V1-0工况,但均不超过0.0016。总体而言,仿真结果表明,应力缓释层在控制道面早期开裂及延缓损伤累积方面具有显著效果。

缓释层受拉损伤因子时程曲线如图8所示。结果表明,在硬着陆工况下,当缓释层厚度为1~2 cm(较薄)时,在道面板受拉损伤因子达到0.98之前,缓释层已率先发生受拉破坏。这主要是由于缓释层厚度过薄,其对应力的吸收与分散能力有限,在高应变率冲击作用下层内应力水平较高,从而加速了损伤的累积与演化。在此情况下,该缓释层类似于“软弱夹层”,使道面板与基层之间的相互作用由原有的摩擦接触状态转变为近似约束状态。然而,在道面板底部受拉损伤尚未明显发展的阶段,该层已因剪切破坏、拉裂或界面剥离而失去承载与传荷能力,表现为早于道面板发生严重损伤,该现象在V1-1工况

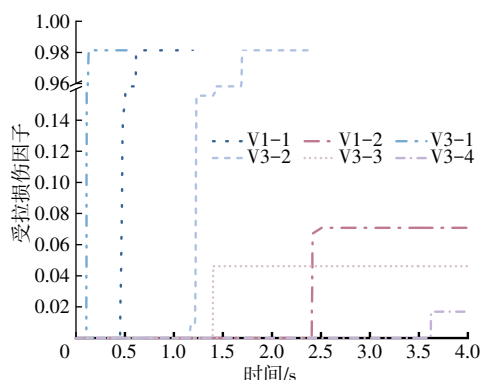


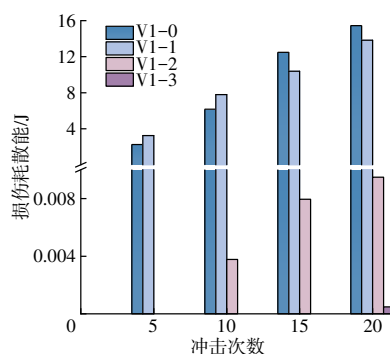
图8 CA砂浆应力缓释层受拉损伤因子时程曲线

Fig. 8 Time-history curves of tensile damage factor in CA mortar stress-relief layer

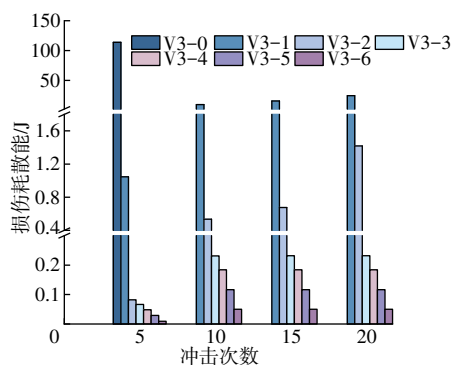
下亦可观察到。硬着陆工况下缓释层的受拉损伤首先出现在与道面板板角底部接触的位置;而当缓释层厚度增加至3 cm时,受拉损伤主要集中于机轮荷载作用区域的中部。结合图7(a)的分析结果可知,当缓释层厚度为3 cm与4 cm时,对应道面板的受拉损伤因子较为接近,而当厚度增至4 cm以上时,其降低幅度已不明显,并维持在较低水平。综合结构性能与工程经济性考虑,建议缓释层厚度取3~4 cm。

上文对损伤因子的分析均基于最先出现严重损伤的单元进行评价。为进一步表征道面结构的整体损伤演化特征,本文选取3种随时间累积的能量耗散指标进行分析,分别为损伤耗散能、塑性耗散能和黏性耗散能。其中,损伤耗散能表征材料在损伤演化过程中(如拉裂与压碎)产生的不可恢复能量耗散,在冲击荷载作用下主要来源于裂纹的萌生与扩展;塑性耗散能反映不可恢复塑性变形所消耗的能量,可用于量化重复冲击作用下的塑性累积及其导致的结构承载能力退化;黏性耗散能则反映结构体系在冲击作用下的耗散响应特征,主要来源于数值计算中引入的黏性项,包括CDP黏性正则化参数,可用于评估缓释层对体系耗散能力的调节作用,但不直接等同于材料真实黏弹性耗能。不同应力缓释层厚度条件下,道面结构各种能量耗散指标的变化规律分别如图9~11所示。

由图9可以看出,在硬着陆工况下,传统刚性道面V3-0的损伤耗散能达到113.918 J。相比之下,设置应力缓释层后,结构的损伤耗散能整体呈下降趋势。然而,在V3-1和V3-2工况下,随着冲击次数的增加,损伤耗散能仍出现较快增长,这主要是由于缓释层在道面板发生明显开裂之前已出现严重的受拉破坏。当缓释层厚度增加至3 cm及以上时,损伤耗散能够维持在相对较低的水平。此外,在正常



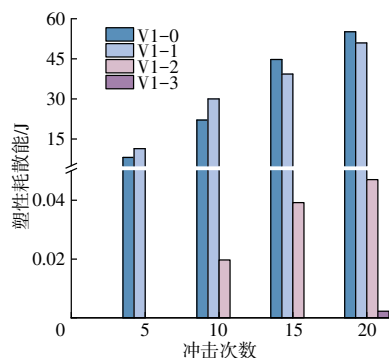
(a) 正常着陆



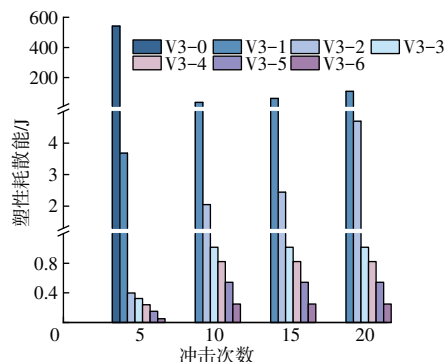
(b) 硬着陆

图9 损伤耗散能变化规律

Fig. 9 Variation patterns of damage dissipation energy



(a) 正常着陆



(b) 硬着陆

图10 塑性耗散能变化规律

Fig. 10 Variation patterns of plastic dissipation energy

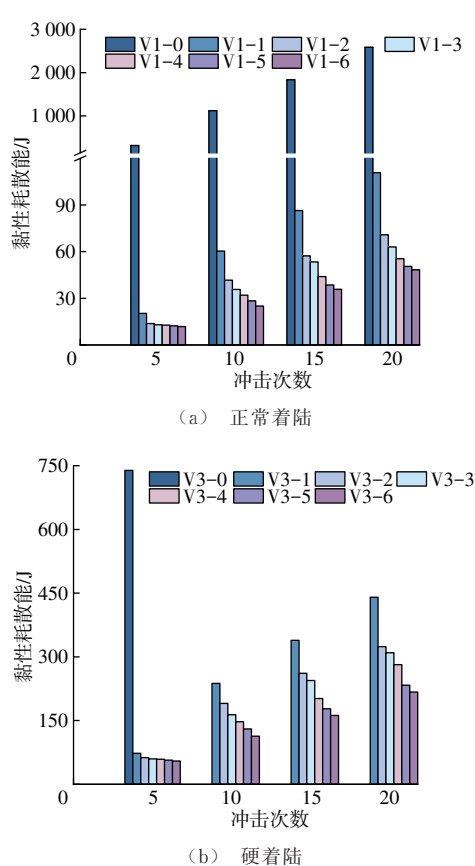


图11 黏性耗散能变化趋势

Fig. 11 Variation trend of viscous dissipation energy

着陆工况下,V1-1工况在循环冲击初期的损伤耗散能反而高于V1-0工况,这同样证实了当缓释层较薄时,CA砂浆层可能成为结构中的薄弱环节。尽管缓释层能够在一定程度上缓解道面板底部受拉损伤,但其自身过早破坏仍可能诱发整体结构失效。

图10结果表明,塑性耗散能随时间的变化趋势与损伤耗散能基本一致,说明两者受同一循环应力驱动并协同演化,能量随时间的增长步调相同。同时,输入的冲击能量主要通过塑性变形与损伤演化机制进行耗散,其中塑性应变的持续累积在CDP模型中通过基于非弹性应变的损伤演化关系进一步促进刚度退化与裂纹扩展。在硬着陆工况下,经历20次冲击后,当缓释层厚度分别为3、4、5、6 cm时,其塑性耗散能相较2 cm厚度分别降低78.34%、82.47%、88.42%和94.67%。结果表明:随着缓释层厚度的增加,结构的塑性耗散能累积受到明显抑制;但当厚度超过3 cm后,其降低幅度趋于减缓。

图11结果表明,在经历5个冲击周期后,设置缓释层可使黏性耗散能降低90%以上,表明结构体系在冲击作用下的整体耗散响应显著降低,反映了缓释层在调节能量耗散方面的有效作用。在持续重复

冲击荷载作用下,不同厚度缓释层工况的黏性耗散能差异整体较小。结合图8的分析结果可知,当缓释层厚度为3~4 cm时,能够较为有效地缓解道面结构的不可逆损伤,并显著降低各耗散能的累积水平,从而提升结构稳定性。基于上述分析,后续选取4 cm厚度的缓释层作为研究工况。

在CDP模型中,标准刚度退化(Scalar Stiffness Degradation, SDEG)用于表征由失效机制相关损伤引起的材料整体刚度退化程度。选取SDEG最大值对应的单元作为监测点,硬着陆工况下时程曲线如图12所示。与受拉/受压损伤因子的演化规律不同,SDEG时程曲线呈现明显的周期性起伏特征:在每个冲击周期内,当冲击荷载达到峰值时,SDEG值同步达到最大值,且数值与受拉损伤因子接近。这表明结构整体刚度退化主要由拉裂损伤主导,而受压损伤的贡献相对较小。随着冲击荷载的卸除,SDEG值迅速下降并稳定在一定区间。在硬着陆工况下,随着重复冲击次数的增加及受拉损伤的不断累积,该稳定区域呈现出缓慢上升的趋势。

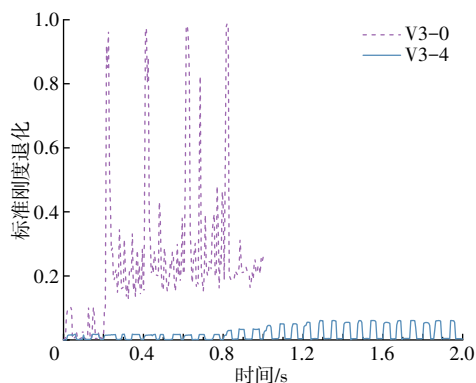


图12 硬着陆工况下道面板SDEG值时程曲线

Fig. 12 Time-history curves of SDEG in slabs under hard landing condition

本研究采用绑定模拟结构各层之间的连接,假设界面位移连续,适用于分析界面黏结良好条件下缓释层的减损效果。然而,在实际高强度冲击工况下,层间可能发生剪切剥离或分层失效。若将层间完全位移连续状态替换为允许剪切滑移的接触界面,仿真结果中道面板更早出现受拉损伤开裂,缓释层的减损效果将更加依赖界面摩擦能力,其首次破坏位置也由与道面板接触的板角区域改变为板中位置,且各类耗散能均显著增加。因此,当前结果代表理想黏结状态下的减损效果。

2.2 飞机荷载形式影响

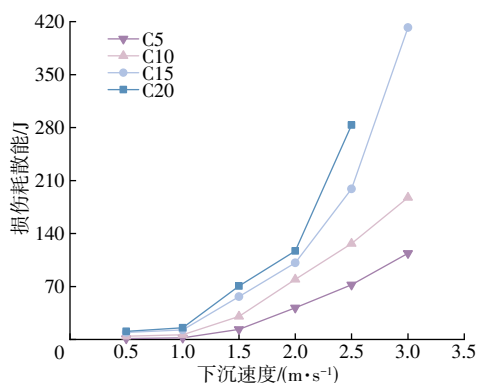
2.2.1 垂直下沉速度

不同垂直下沉速度($0.5 \sim 3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)条件下,

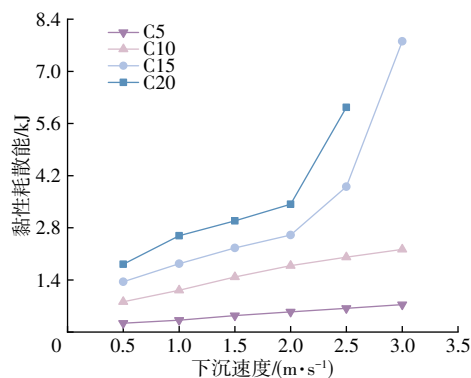
冲击荷载对传统刚性道面整体损伤耗散能与黏性耗散能的影响规律如图 13 所示。结果表明:下沉速度对损伤耗散能影响显著,在较低下沉速度条件下,耗散能的增长幅度较小;当超过 $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 后,损伤耗散能呈快速增长趋势。经历 15 次冲击循环后, $3.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 工况下的损伤耗散能与黏性耗散能分别为 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 工况的 7.29 倍和 3.46 倍,主要原因在于飞机着陆冲击力与下沉速度呈正相关,而冲击能量近似与速度平方成正比。特别是在硬着陆条件下会诱发更大的板底拉应力,从而加速塑性损伤的发展。在反复高强度冲击下,以黏性耗散能为例,当下沉速度为 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,在 5、10、15 和 20 次循环冲击后,其数值分别为 639.31、2 010.62、3 902.01、6 033.65 J,经历 10 次冲击后出现明显增长。相比之下,图 14 结果表明设置应力缓释层后黏性耗散能显著降低,且在经历 5 次冲击后其数值未随高强度冲击次数的增加而出现快速上升趋势,说明缓释层能够有效抑制部分冲击能量的累积,有助于延缓结构损伤的演化。

2.2.2 荷载作用点位

图 15 为不同荷载作用点位对设置缓释层后道



(a) 损伤耗散能



(b) 黏性耗散能

图 13 不同下沉速度传统刚性道面结构能量耗散变化规律

Fig. 13 Variation patterns of energy dissipation in rigid pavement structures under different sinking velocity

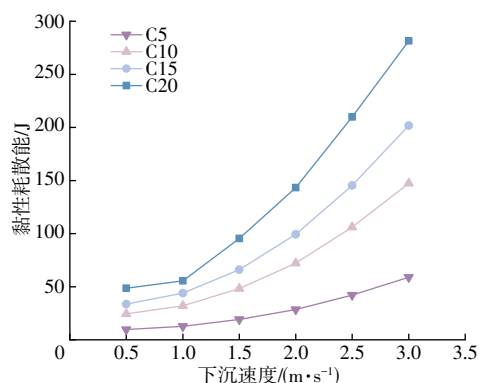
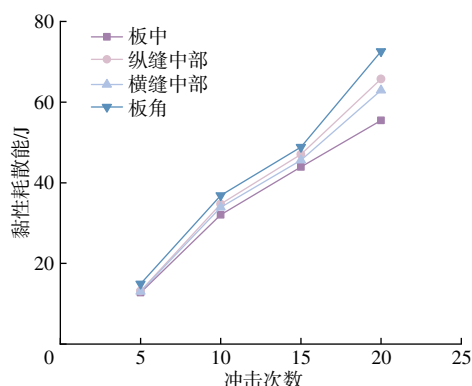
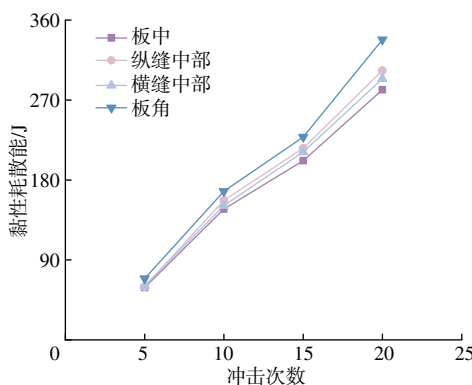


图 14 不同下沉速度增设缓释层道面结构黏性耗散能变化规律

Fig. 14 Variation patterns of viscous dissipation energy in pavement structures with stress-relief layer under different sinking velocity



(a) 正常着陆



(b) 硬着陆

图 15 不同荷载作用点位对道面结构黏性耗散能的影响规律

Fig. 15 Influence of different load points on viscous dissipation energy in pavement structure

面结构黏性耗散能的影响规律。由图 15 可见:无论在正常着陆还是硬着陆工况下,板角位置的黏性耗散能均最大,其次为纵缝中部、横缝中部,板中位置最小。冲击荷载会放大结构的边界效应,板中区域受力路径较为连续,应力能够相对均匀地向周围扩散;横缝与荷载主传递方向近似垂直,使荷载主要在横缝两侧传递;而纵缝的等效受力宽度更小、边缘约束较弱,从而导致弯矩与拉应力更高。已有研

究表明,当机轮荷载作用于纵缝边缘时,其板底拉应力高于横缝边缘,该结果亦印证了这一点^[33]。在硬着陆工况下,经历20次冲击后,当荷载作用于板角时,其黏性耗散能相较于板中、横缝中部和纵缝中部分别提高20.10%、15.01%和11.53%。这是由于板角位置的转动约束最弱,更易产生应力集中,在冲击荷载作用下板底弯矩与拉应力较高,因此更容易发生受拉损伤,相同重复冲击次数下,裂纹更早起裂并扩展。

3 随机冲击荷载作用下道面结构损伤演化分析

为体现实际运行中飞机轮迹分布的随机性对道面结构损伤演化的影响,本文在给定冲击工况与结构参数的条件下,引入随机冲击位置样本开展数值分析。具体而言,首先确定起落架轮迹几何中心位置;随后编写Python程序生成随机坐标,其中横向位置服从正态分布,纵向位置服从均匀分布,并与时程荷载相匹配,输出为外部数据文件;进一步结合Vexternaldb和Vdload子程序实现荷载施加,其中Vexternaldb在分析初始化阶段读取外部数据文件并写入common块,Vdload在每个增量中依据当前时间与坐标计算并施加相应的冲击荷载。在参数设置方面,选取弯拉强度5.5 MPa、板厚36 cm的组合作为传统刚性道面板,冲击工况分为正常着陆(V1-0)和硬着陆(V3-0),冲击次数为15~30次;在此基础上设置4 cm的缓释层,并重点分析硬着陆V3-4工况,冲击次数为25~50次。采用相同随机样本对不同道面结构进行计算,以保证对比分析的一致性。

3.1 损伤演化趋势

选取一组代表性的随机冲击位置样本并对损伤最严重的中间3块道面板进行分析,其在硬着陆随机冲击荷载作用下道面板底部SDEG演化云图见图16、17。图16结果表明,经历15次冲击后,板底出现沿航向扩展的刚度退化带,同时在垂直于航向方向亦存在一定程度的扩散,局部区域出现轻微刚度退化。进入第21个冲击周期后,刚度退化带逐渐扩展,板内出现多处团块状刚度退化,其中多个板角及板边处SDEG值已超过0.98。至第24个冲击周期,刚度退化显著加剧,横缝、纵缝与板角区域材料刚度基本丧失。第27次冲击结束后,板内形成大面积损伤,表明其结构强度与抗冲击能力已基本失效。为了更直观地体现应力缓释层的减损效果,图17中云图的色标上限取SDEG值为0.08,SDEG值大于

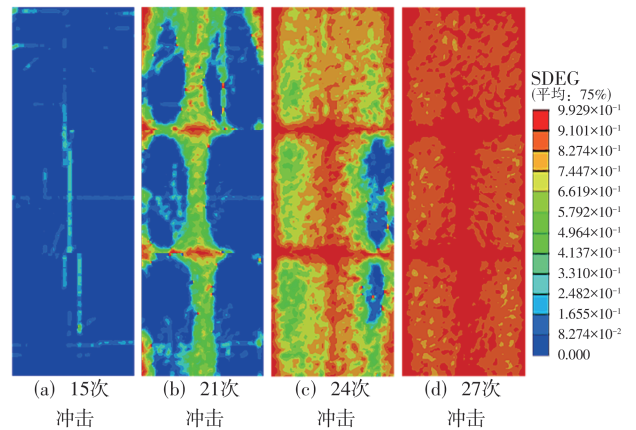


图16 硬着陆随机冲击荷载作用下传统刚性道面板底部SDEG演化云图

Fig. 16 Contour maps of SDEG at the tradition rigid slabs bottom under random impact load during hard landing

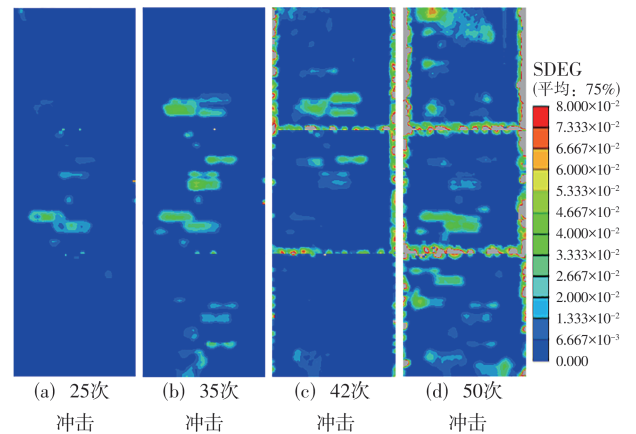


图17 硬着陆随机冲击荷载作用下设置缓释层的刚性道面板底部SDEG演化云图

Fig. 17 Contour maps of SDEG at the rigid slabs bottom with stress-relief layer under random impact load during hard landing

0.08的区域以灰色标识。结果表明经历25次冲击后板底刚度退化主要集中于机轮荷载作用过的区域,表明增设缓释层可有效减轻底部损伤。至第50次冲击结束后,SDEG值大于0.08的区域主要集中在板角、横缝和纵缝,其他区域受冲击影响较小,未出现显著刚度退化,说明缓释层能够有效抑制微裂纹的产生与扩展,使道面板整体损伤水平较低,抗冲击性能得到提升。同时,云图结果表明道面板底部刚度退化最严重的位置主要集中在板角、横缝与纵缝,其中板角区域更早出现大面积损伤,这与2.2.2节的结论一致。需要指出的是,本文采用的CDP模型未考虑应变率效应,即未引入动力强度提高因子,因此在高频冲击作用下,混凝土的动力增强效应未被体现,导致受拉/受压损伤因子略偏大,进而使SDEG结果整体偏于保守。

3.2 能量耗散

随机冲击荷载作用下不同道面结构的能量耗散变化规律如图 18 所示。由图 18(a)、(c)可见,随着冲击荷载次数的增加,传统刚性道面的损伤耗散能与黏性耗散能累积近似线性增长,其中硬着陆工况下至第 21 个冲击周期后耗散能增幅加快,这与图 16 云图中道面板刚度退化加快的现象相对应。图 18(b)结果表明,设置缓释层后在硬着陆工况下,耗散能仍低于正常着陆工况下的传统刚性道面,这表明缓释层能有效抑制道面板发生的不可逆损伤演化并显著降低能量耗散,从而提升结构的抗疲劳性与耐久性,表现出良好的减损效果。为评估随机冲击

荷载作用下结果的离散性,图 18 展示了不同耗散能的平均值及其对应的标准差,进一步通过变异系数对离散程度进行量化评价。结果表明,不同工况下能量耗散值的变异系数存在一定差异,其中 V3-0 和 V3-4 工况下的变异系数为 8%~25%;相比之下,正常着陆工况 V1-0 的变异系数降低至 5%~13%,说明硬着陆条件下随机冲击位置及作用路径的差异对结构能量耗散的影响更加显著,离散程度有所增加。尽管不同样本间的数值结果存在一定波动,其离散性主要来源于随机冲击位置的空间分布特征,而非数值计算过程的不稳定性。同时,各样本随机冲击次数的变化趋势基本一致,未改变整体演化规律。

4 结 语

(1)道面损伤以拉裂破坏主导,在硬着陆工况下经历 5 次冲击后,传统刚性道面板的受拉损伤因子达 0.98,而受压损伤因子小于 0.015。提高混凝土抗弯拉强度和增加板厚仅能缓解初期损伤,但难以抑制固定位置重复冲击引起的损伤劣化。受拉/受压损伤因子呈阶跃式累积特征,而 SDEG 则表现为周期性“峰值-回落”变化。

(2)设置 CA 砂浆应力缓释层可显著削弱高强度冲击效应并降低耗散能。在正常着陆工况下,道面板未出现明显受拉损伤,黏性耗散能降低超过 90%;在硬着陆工况下,当缓释层厚度由 2 cm 增至 3~6 cm 时,塑性耗散能可降低 78%~95%。当缓释层过薄时,可能先于道面板发生破坏,因此推荐缓释层厚度取 3~4 cm。

(3)下沉速度的增加会显著加剧道面结构的能量耗散,而设置缓释层能够有效降低耗散能并抑制其在高强度冲击荷载下的快速累积。在硬着陆工况下经历 20 次冲击后,荷载作用于板角位置时的黏性耗散能最大,分别较板中、横缝中部和纵缝中部提高 20.10%、15.01% 和 11.53%。

(4)随机冲击荷载下,传统刚性道面板底部刚度退化首先沿航向和横向扩展,板角及接缝区域最易发生早期损伤。设置应力缓释层后整体刚度退化幅度与速率降低,可有效减缓耗散能累积,提升道面结构的抗冲击性能。

(5)本文模型验证主要针对结构应力响应,损伤演化与能量耗散的结论仍依赖于数值模拟及本构参数,但其变化趋势具有参考价值。后续将补充不同应变率下的材料参数,以修正动力增强效应,完善层间接触模型,并开展缓释层摊铺平整度控制研究,以

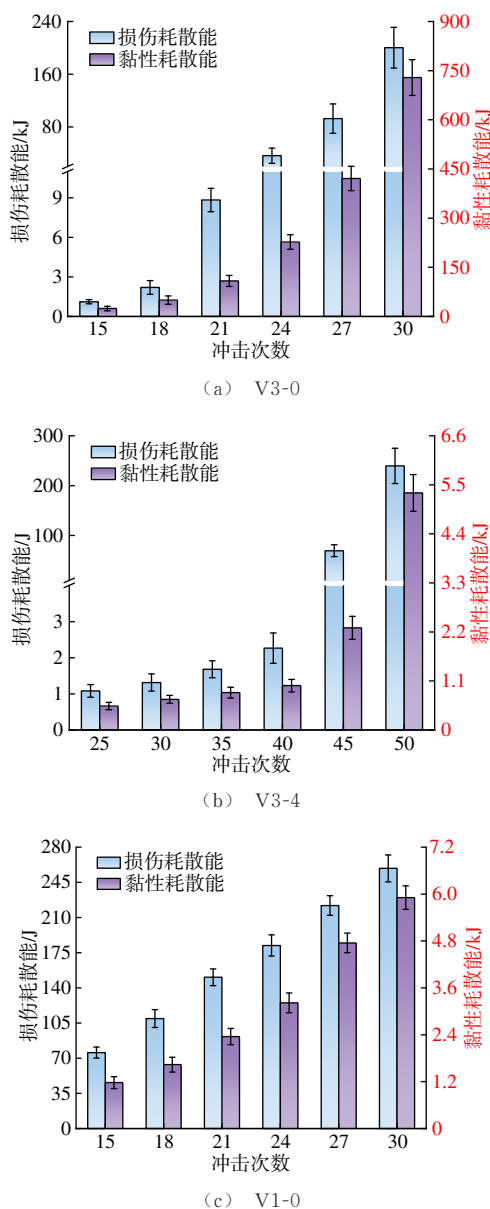


图 18 随机冲击荷载作用下不同道面结构能量耗散的变化规律
Fig. 18 Variation patterns of energy dissipation in different pavement structures under random impact load

提升模拟精度和工程适用性。

参考文献:

References:

- [1] 刘诗福,赵鸿铎,郝航程,等. 机场智慧飞行区愿景与架构[J]. 同济大学学报(自然科学版),2025,53(1):75-82.
LIU Shi-fu, ZHAO Hong-duo, HAO Hang-cheng, et al. Vision and framework of smart airfield of airport [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2025, 53(1): 75-82.
- [2] ALABI B N T, SAEED T U, AMEKUDZI-KENNEDY A, et al. Evaluation criteria to support cleaner construction and repair of airport runways: A review of the state of practice and recommendations for future practice [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 312: 127776.
- [3] QIAN J S, CEN Y B, LING J M, et al. Dynamic stress in the ground of rigid pavement subjected to moving aircraft loads at various speeds[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2023, 24(2): 2273327.
- [4] MOHAMMED I, ZHOU Z F, AI C F. Evaluating the impact of temperature variations and subgrade reactions under traffic-load on airport concrete pavement performance[J]. Structures, 2024, 70: 107704.
- [5] 赵晓康,牛振兴,张久鹏,等. 基于YOLOv5-s的机场道面异物目标检测[J]. 东南大学学报(自然科学版),2024,54(5): 1239-1250.
ZHAO Xiao-kang, NIU Zhen-xing, ZHANG Jiu-peng, et al. Foreign object debris detection on airport pavement based on YOLOv5-s [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2024, 54(5): 1239-1250.
- [6] 陈奇奇,龙小勇,蔡良才,等. 水泥混凝土道面预防性养护判定标准体系[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2021, 22(2):99-106.
CHEN Qi-qi, LONG Xiao-yong, CAI Liang-cai, et al. A judgment standard system for preventive maintenance of cement concrete pavement[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(2): 99-106.
- [7] LIU S F, LING J M, TIAN Y, et al. Evaluation of aircraft random vibration under roughness excitation during taxiing [J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2024, 15: 65-80.
- [8] SKAFF R S, HAJJE Y, SIDDHARTHAN R V, et al. Shear failure investigation of unbound pavement layers under accelerated heavy aircraft loading: Case study [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2023, 24(2): 2273326.
- [9] KOWALEWSKA A, BLACHA K, WESOŁOWSKI M, et al. Analysis of physico-chemical properties of geogrids used for the reinforcement of natural airfield pavements[J]. Aviation and Security Issues, 2023, 4(2): 375-388.
- [10] CORREIA N S, SOUZA T R, SILVA M P S, et al. Investigations on interlayer shear strength characteristics of geosynthetic-reinforced asphalt overlay sections at Salvador International Airport[J]. Road Materials and Pavement Design, 2023, 24(6): 1542-1558.
- [11] MU Y F, XIA H T, YAN Y, et al. Fracture behavior of basalt fiber-reinforced airport pavement concrete at different strain rates [J]. Materials, 2022, 15(20): 7379.
- [12] 颜祥程,翁兴中,张颖,等. 纤维格栅增强机场双层道面荷载应力分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012,36(5):954-957.
YAN Xiang-cheng, WENG Xing-zhong, ZHANG Ying, et al. Load stress of double-layer airport pavement with fiber grid reinforcement[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2012, 36(5): 954-957.
- [13] RAHMAN T, DAWSON A, THOM N, et al. Determining the allowable opening-to-traffic asphalt temperature for airport pavements[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23(7): 2351-2369.
- [14] YANG R C, ZHAN C, SUN L, et al. Modelling the reflective cracking features of asphalt overlay for airport runway under temperature and airplane load coupling factors[J]. Construction and Building Materials, 2024, 451: 138774.
- [15] LU H, ZHAO C, YUAN J, et al. Study on the properties and benefits of a composite separator layer in airport cement concrete pavement [J]. Buildings, 2022, 12(12): 2190.
- [16] 赵策. 机场水泥道面沥青隔离层结构效应[D]. 上海:同济大学,2018:89.
ZHAO Ce. Structural effect of asphalt-based isolation layer on airport cement pavement [D]. Shanghai: Tongji University, 2018: 89.
- [17] 高义,李好新,马聪,等. 板式无砟轨道充填层快修换填CA砂浆的制备与早强机理[J]. 交通运输工程学报,2025, 25(2):311-321.
GAO Yi, LI Hao-xin, MA Cong, et al. Preparation and early-strength mechanism of CA mortar for rapid repair and replacement of slab ballastless track filling layer [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(2): 311-321.
- [18] HU Z, SU H R, ZHANG J P, et al. Dynamic response analysis and optimization design of airport cement pavements based on cement emulsified asphalt mortar stress-relief layer [J]. Construction and Building Materials, 2025, 490: 142513.
- [19] 赵艳玲. 设CA砂浆功能层的水泥混凝土路面结构分析[D]. 重庆:重庆交通大学,2017:73.
ZHAO Yan-ling. Analysis of cement concrete pavement structure with CA mortar function layer [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017: 73.
- [20] RICCIO F M V, DE S BASTOS F, ALMEIDA M S S, et al. Numerical analysis of a monitored piled-supported embankment of an airport runway [J]. Transportation Geotechnics, 2024, 44: 101157.
- [21] ALI S, FAWZIA S, THAMBIRATNAM D, et al. Performance of protective concrete runway pavement under aircraft impact loading [J]. Structure and Infrastructure

- Engineering, 2020, 16(12): 1698-1710.
- [22] 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.
- [23] 游庆龙,李京洲,罗志刚,等. 飞机轮载作用下机场复合式道面结构力学分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2020,41(1):111-117.
- YOU Qing-long, LI Jing-zhou, LUO Zhi-gang, et al. Mechanical analysis of airport composite pavement structure under aircraft wheel load [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2020, 41(1): 111-117.
- [24] 蒲娜. 机场刚性道面抗冲击性能及衰变规律仿真研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2023:11.
- PU Na. Simulation study on impact resistance and decay law of airport rigid pavement [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023: 11.
- [25] WANG X, DONG Q, ZHAO X K, et al. Prediction of remaining service life of cement concrete pavement in airfield runway [J]. Road Materials and Pavement Design, 2024, 25(1): 150-167.
- [26] LIU C J, CHONG X L, WANG L F, et al. Numerical analysis on the mechanical properties of the concrete precast pavement of runways under the wheel load [J]. Applied Sciences, 2022, 12(19): 9826.
- [27] 蔡小培,钟阳龙,阮庆伍,等. 混凝土塑性损伤模型在无砟轨道非线性分析中的应用[J]. 铁道学报,2019,41(5):109-118.
- CAI Xiao-pei, ZHONG Yang-long, RUAN Qing-wu, et al. Application of concrete damaged plasticity model to nonlinear analysis of ballastless track [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(5): 109-118.
- [28] 张高峰. 温度作用下CRTS II型板式无砟轨道CA砂浆层界面性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2023:88.
- ZHANG Gao-feng. Study on interface performance of CA mortar layer of CRTS II slab ballastless track under the thermal loading [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023: 88.
- [29] 傅强,谢友均,郑克仁,等. CRTS II型水泥乳化沥青砂浆力学性能的应变率效应及模型[J]. 硅酸盐学报,2014,42(8): 989-995.
- FU Qiang, XIE You-jun, ZHENG Ke-ren, et al. Strain rate effect and modeling of mechanical properties of CRTS II type cement and asphalt mortar [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(8): 989-995.
- [30] MODARRES A, SHABANI H. Investigating the effect of aircraft impact loading on the longitudinal top-down crack propagation parameters in asphalt runway pavement using fracture mechanics [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 150: 28-46.
- [31] 朱立国. 基于大型飞机虚拟样机的刚性道面动力行为模拟与表达[D]. 上海:同济大学,2017:57.
- ZHU Li-guo. Simulation and expression of dynamic behavior of rigid pavement based on virtual prototype of large aircrafts [D]. Shanghai: Tongji University, 2017: 57.
- [32] 郑飞,翁兴中. 飞机荷载下水泥混凝土道面板应力计算方法[J]. 交通运输工程学报,2010,10(4):8-15.
- ZHENG Fei, WENG Xing-zhong. Calculating methods of stress for cement concrete pavement slab under plane loads [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(4): 8-15.
- [33] 徐浩. 环境-荷载耦合下机场刚性道面抗冲击/磨损性能演变规律研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2025:91.
- XU Hao. Research on the evolution mechanisms of impact and wear resistance in airport rigid pavement under coupled environmental-load conditions [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2025: 91.