

文章编号:1671-1637(2026)08-0033-13

基于近场动力学的飞机着陆冲击下机场刚性道面损伤萌生分析

刘诗福^{*1,2}, 赵家福^{1,2}, 侯天新^{1,2}, 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)

摘要:针对飞机着陆冲击引发的机场刚性道面损伤萌生问题,基于近场动力学(PD)理论,构建了可模拟混凝土板裂纹自发起裂与扩展的机场刚性道面PD模型;结合键型近场动力学与Hertz接触理论能量等效思想,建立轮胎-道面局部冲击接触模型,表征了轮胎与道面之间的非线性接触作用;通过Kalthoff-Winkler动态断裂试验和L形混凝土板断裂模型对所建模型进行了验证。研究表明:模拟得到的裂纹起裂角度(67.4°)及断裂路径与经典试验结果较为一致,验证了模型在动态断裂和混凝土准脆性断裂问题中的适用性;基于该模型,进一步分析了不同垂向下沉速度和板厚条件下机场刚性道面的损伤萌生规律,在较低垂向下沉速度($0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)下,冲击效应主要局限于接触区附近,随着速度提高,板底拉伸集中显著增强,高伸长率区域逐渐扩展并形成潜在微裂纹成核带,当垂向下沉速度增至 $1.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,键断裂比例最高可达9.6%;增加板厚可提高道面板抗弯刚度,降低板底高伸长率键比例,从而削弱冲击作用下的板底拉伸集中;PD模型能够较好反映冲击作用下板底裂纹由中心向多方向扩展的趋势;单次冲击虽未形成贯通裂缝,但较高垂向速度下板底已出现潜在微损伤区,可能在重复冲击疲劳荷载作用下进一步演化为宏观裂纹。本文模型无需预设裂缝路径,可为机场道面接地区损伤识别、风险预警及预防性养护决策提供参考。

关键词:机场工程;损伤萌生;近场动力学;裂纹扩展;冲击荷载;刚性道面

中图分类号:U416.2 文献标志码:A DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.327

Peridynamics-based analysis of damage initiation in airport rigid pavement under aircraft landing impact

LIU Shi-fu^{*1,2}, ZHAO Jia-fu^{1,2}, HOU Tian-xin^{1,2}, LING Jian-ming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the 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)

Abstract: In view of the damage initiation in airport rigid pavement induced by aircraft landing impact, a peridynamics (PD) model of airport rigid pavement that can simulate the spontaneous initiation and propagation of cracks in concrete slabs was developed based on the PD theory. By

出版历程:2025-12-20收稿,2026-04-25修回,2026-05-27录用

基金项目:国家自然科学基金项目(52572380,52402430);上海市自然科学基金项目(23ZR1466300)

* 作者简介:刘诗福(1993-),男,江西吉安人,副教授,博士生导师,工学博士,E-mail:sfliu@tongji.edu.cn。

引用格式:刘诗福,赵家福,侯天新,等.基于近场动力学的飞机着陆冲击下机场刚性道面损伤萌生分析[J].交通运输工程学报,2026,26(8):33-45.

Citation: LIU Shi-fu, ZHAO Jia-fu, HOU Tian-xin, et al. Peridynamics-based analysis of damage initiation in airport rigid pavement under aircraft landing impact[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(8): 33-45.

combining bond-based peridynamics with the energy equivalence thought of Hertz contact theory, a local tire-pavement impact contact model was established to characterize the nonlinear contact effect between the tire and the pavement. The developed model was validated through the Kalthoff-Winkler dynamic fracture test and the fracture model of an L-shaped concrete slab. Research results indicate that the simulated crack initiation angle (67.4°) and the fracture path are relatively consistent with classical experimental results, which verifies the applicability of the model to dynamic fracture and quasi-brittle fracture problems of concrete. Based on the model, the damage initiation laws of airport rigid pavement under different vertical sink velocities and slab thicknesses are further analyzed. At a relatively low vertical sink velocity ($0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), the impact effect is mainly confined to the vicinity of the contact region; as the velocity increases, the tensile concentration at the slab bottom is significantly enhanced, and the high-stretch regions gradually expand and form potential microcrack nucleation zones; when the vertical sink velocity increases to $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the maximum bond breakage ratio reaches 9.6%. Increasing the slab thickness can improve the flexural stiffness of the pavement slab and reduce the proportion of high-stretch bonds at the slab bottom, thereby weakening the tensile concentration at the slab bottom under the impact effect. The PD model can effectively reflect the tendency of bottom cracks to propagate from the center to multiple directions under the impact effect. Although a single impact does not form a through crack, potential micro-damage zones have appeared at the slab bottom under a higher vertical velocity, which may further evolve into macroscopic cracks under repeated impact fatigue loads. The developed model does not require a preset crack path, and can provide references for damage identification, risk warning, and preventive maintenance decision-making in the touchdown zone of airport pavement.

Keywords: airport engineering; damage initiation; peridynamics; crack propagation; impact load; rigid pavement

Publication history: Received 2025-12-20; Received in revised form 2026-04-25; Accepted 2026-05-27

Funding: National Natural Science Foundation of China (52572380, 52402430); Natural Science Foundation of Shanghai (23ZR1466300)

* **Corresponding author:** LIU Shi-fu, associate professor, PhD, E-mail: sfliu@tongji.edu.cn.

0 引 言

机场跑道是飞机起降最重要的区域,其结构状况直接影响飞机地面运行安全与效率。随着航空运输业快速发展,飞机重量增大,航班密度提升,飞机着陆冲击荷载长期作用下道面结构易产生开裂损伤,跑道的维护与检测需求日益突出。基于静力学理论的传统模型难以准确揭示道面在冲击荷载下的实际工作状况及损伤机理,因此亟需建立能够反映真实动态响应特征的动力学模型,准确高效地模拟裂纹萌生、扩展过程,以有效揭示道面结构性能损伤演化规律,提升机场道面设计水平与维护能力。

在机场工程领域,损伤预测研究大多依据 Miner 定律,分析飞机荷载作用下刚性道面累计损伤的空间分布和发展趋势,进行道面损伤和服役寿命预

测^[1-2]。目前的机场水泥混凝土道面设计规范也是采用该方法计算飞机静态荷载下的道面面层最大疲劳累计损伤因子。该方法仅通过线性叠加荷载作用次数进行疲劳损伤的间接表征,无法直接模拟飞机冲击荷载下的裂缝扩展,缺乏混凝土板在动态加载下的受力状态和破坏情况描述^[3-4]。部分学者采用有限元分析^[5](Finite Element Analysis, FEA)进行了道面裂缝模拟。然而,传统 FEA 在分析跑道结构动态损伤过程中存在以下固有缺陷:①通过重划分网格实现裂纹扩展,计算成本高昂且难以处理复杂裂纹扩展模式;②跑道应力应变场存在不连续性,网格细化无法保证几何与材料不连续区精度;③必须预设初始裂纹。为克服这些缺陷,发展了内聚力单元模型(Cohesive Zone Model, CZM)和扩展有限元法(Extended Finite Element Method, XFEM),但

CZM需预知裂纹路径,在复杂分析中实用性受限且结果受网格类型影响,其内聚力模型中的强度参数敏感性也引入额外不确定性。XFEM虽消除了此类不确定性,仍需外部准则指导裂纹扩展,同样无法处理多复杂裂纹模式。为克服上述难题,Silling^[6]于2000年提出近场动力学(Peridynamics, PD)理论,基于非局部积分形式建立结构响应模型,通过物质点之间的长程作用关系,规避了偏微分方程在不连续断裂模拟中产生的奇异性问题。Agwai等^[7]的研究表明,3种方法获得的裂纹扩展速度量级相当,但PD模拟的断裂路径与试验结果吻合度显著优于CZM与XFEM。后续相关研究进一步将PD方法拓展至裂纹成核、多材料及准脆性材料断裂模拟^[7-9],逐步完善了PD理论体系的适用性与通用性。中国方面,黄丹等^[10-11]最早系统引入PD理论,并对其数学框架和力学机理进行了综述和推广。在交通基础设施方向,马晓川等^[12]采用键型PD模型预测铁路钢轨在荷载作用下的裂纹萌生特征,初步展示了PD方法在交通基础设施服役安全评估中的潜力。PD方法在轨道等领域已有相关应用,但飞机着陆过程中显著的冲击作用以及复杂的机轮-道面刚柔接触显著区别于列车-轨道等模型,有待开展进一步研究。

机场运行对道面结构性能要求极高,但针对飞机着陆冲击作用下机场道面损伤萌生与演化规律的研究相对较少。为此,本文系统地将键型近场动力学引入飞机主起落架落地冲击问题,构建无需预设裂缝路径的三维刚性道面损伤萌生分析模型;结合基于微梁键与Hertz理论能量等效的PD接触模型,准确表征轮胎-道面之间的非线性冲击接触荷载;并引入混凝土应变率效应与潜在损伤可视化阈值,实现板底潜在裂纹路径的揭示与定量识别。

1 近场动力学模型基本理论

机场道面在承受飞机着陆冲击荷载时,混凝土材料可能在极短时间内出现非线性响应及多尺度裂纹萌生,传统连续介质理论因依赖微分方程表达应力连续性,难以有效模拟裂纹起始与传播过程。PD方法是一种非局部理论方法,能够避免应力奇异性与裂纹路径预设问题,为模拟道面在冲击荷载作用下的损伤演化提供了理论基础与数值手段。

PD方法将材料视为由物质点构成的集合,每个物质点与其作用域内所有其他物质点均存在相互作用(图1),通过积分型运动方程而非微分形式建立材料响应关系,从而具备处理裂纹起始与扩展等不连续

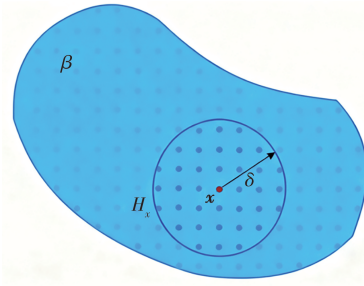


图1 近场动力学邻域

Fig. 1 Peridynamics horizon

问题的能力。这些物质点之间的相互作用通过微势能控制,其非局部作用范围由近场半径 δ 定义。当 δ 趋近于0时,PD理论可退化为经典连续介质力学。

在近场动力学中, δ 反映了混凝土物质点间的近场动力学邻域半径, x 为物质点坐标, H_x 为邻域范围, β 为结构区域。键型近场动力学建立在物质点之间成对相互作用的假设上,即两点之间的作用力大小相等、方向相反。该假设简化了力的计算形式,使得PD方法在实际结构仿真中的实现更为高效。物质点在 t 时刻的运动方程为

$$\rho(x)\ddot{u}(x,t) = \int_I f(u' - u, x' - x, t) dH + b(x, t) \quad (1)$$

式中: $\rho(\cdot)$ 为物质点密度; H 为物质点体积; u 为位移矢量; f 为键力; b 为外力矢量; x' 、 u' 分别为近场作用域内物质点的坐标及位移; I 为近场空间积分区域范围。

在键型近场动力学中的键力可表示为

$$f = cs \frac{y' - y}{|y' - y|} \quad (2)$$

$$c(\xi_{(k)(j)}, \delta) = \frac{72E}{\pi\delta^4} \left[1 - \left(\frac{\xi_{(k)(j)}}{\delta} \right)^2 \right]^2 \quad (3)$$

$$s = \frac{|y' - y| - |x' - x|}{|x' - x|} \quad (4)$$

$$\xi_{(k)(j)} = |x_{(j)} - x_{(k)}|$$

式中: c 为键常数; y 和 y' 分别为位移前后点位置坐标; s 为伸长率; E 为弹性模量; $\xi_{(k)(j)}$ 为物质点 k 与 j 之间的距离。

式(4)反映了物质点间相对变形并决定点对键力的计算,是冲击区内损伤识别的重要基础量。

2 跑道结构以及冲击荷载建模

在飞机着陆过程中,主起落架承担了绝大多数的冲击载荷,道面结构需在极短时间内承受集中冲击力并完成能量吸收与扩散。为了建立可用于数值

模拟的结构模型,本文在跑道结构与冲击荷载建模方面作如下处理。

2.1 道面结构近场动力学建模

在机场水泥混凝土道面下,地基承担着支撑与传递荷载的重要作用。本文采用 Pasternak 地基模型,考虑土体之间剪切力传递,能够简洁地描述道面板与地基之间的相互作用关系。便于结合 PD 方法进行离散计算。地基反力项 $q(x, t)$ 如下

$$q(x, t) = k w(x, t) - \nabla^2 G w(x, t) \quad (5)$$

式中: ∇^2 为调和算子; $w(\cdot)$ 为板的弯沉; k 为地基反力系数; G 为剪切层参数。

本文取 $k = 80 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $G = 60 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$, 相关参数参考飞机-道面耦合动力分析文献^[13-14]并结合本文研究对象选取。

更新后的近场动力学方程为

$$\rho(x) \ddot{u}(x, t) = \int f(u' - u, x' - x, t) dH + b(x, t) + q(x, t) \quad (6)$$

参照现行机场道面设计规范,本文取道面厚度为 35 cm; 考虑近场动力学三维离散的计算代价,为研究接触区附近局部冲击响应与损伤萌生,建立 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的局部计算域,并采用四边自由边界条件。

本研究采用显式积分方法对上述控制方程离散,便于捕捉高速冲击引发的道面响应细节。物质点 k 的速度和位移在每个时间步更新如下

$$\dot{u}_k^{n+1} = \ddot{u}_k^n \Delta t + \dot{u}_k^n \quad (7)$$

$$u_k^{n+1} = \dot{u}_k^{n+1} \Delta t + u_k^n \quad (8)$$

式中: Δt 为时间步长; n 为第 n 个时间积分步长。

为补偿边界处近场作用域不完整带来的积分精度损失,引入体积修正因子 v_c 如下

$$v_c = \begin{cases} 0 & \xi_{(k)(j)} > \delta \\ \frac{\delta + r - \xi_{(k)(j)}}{2r} & \delta - r < \xi_{(k)(j)} \leq \delta \\ 1 & \xi_{(k)(j)} \leq \delta - r \end{cases} \quad (9)$$

式中: $r = \Delta/2$ 为到近场作用域表面的距离, Δ 为划分的物质点间距。

2.2 跑道结构损伤定义

PD 方法中,材料损伤通过物质点之间的键断裂来描述。当相邻物质点之间的伸长率超过临界值 s_t 时,该键即被认为断裂,对应的作用力则不可逆地消

失。这种机制可用于刻画机场道面在高频冲击作用下的微裂纹起始过程。将物质点坐标 x 处与近场作用域内物质点坐标 x' 之间的键断裂数量归一化处理,可定义损伤变量 φ 为

$$\varphi(x, t) = 1 - \frac{\int_I \mu(x' - x, t) dV}{\int_I dV} \quad (10)$$

$$\mu = \begin{cases} 0 & s \geq s_c \\ 1 & s < s_c \end{cases} \quad (11)$$

式中: s_c 为临界伸长率。

φ 取值范围为 $[0, 1]$, 当 $\varphi = 0$ 表示该物质点与其近场作用域内所有物质点间的作用键完好,而 $\varphi = 1$ 则表示作用键全部断裂; μ 为标量函数,表示物质点对的键破坏情况。

临界拉伸伸长率 s_t 通常与材料的临界断裂能 G_c 和弹性模量 E 相关,可由下式估算

$$s_t = \sqrt{\frac{5G_c}{6E\delta}} \quad (12)$$

Mu 等^[15]针对机场道面普通混凝土开展缺口梁三点弯曲试验,给出断裂能 $G_c = 232.14 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。本文取混凝土弹性模量 $E = 30 \text{ GPa}$ 、近场半径 $\delta = 0.03015 \text{ m}$, 根据式 (12) 计算得到基准临界拉伸伸长率 $s_t = 4.62 \times 10^{-4}$ 。相关参数列于表 1。为了反映混凝土材料在动态荷载下的力学行为考虑混凝土应变率效应,Zhang 等^[16]通过改进标量函数 $\mu(t, \xi)$ 使得力密度矢量 $f(\eta, \xi)$ 能够根据不同的荷载条件进行动态调整,以准确表征材料受力与动态破坏机制间的联系,其中, ξ 为物质点对的初始相对位置。该模型将 $\mu(t, \xi)$ 改进为由 1 到 0 的连续变化,使 $f(\eta, \xi)$ 能够体现在拉伸与压缩条件下不同的力学特性,如式 (13) 所示

$$\mu(t, \xi) = \begin{cases} 1 & s_{0cd} \leq s \leq s_{0td}, \forall t > 0 \\ \mu_{\min} & s_{0cd} \leq s \leq s_{0td}, \mu_{\min} < 1 \\ \min \left\{ \mu_{\min}, \frac{s_{ucd} - s}{s_{utd} - s_{0td}} \right\} & s_{0td} < s < s_{utd} \\ \min \left\{ \mu_{\min}, \frac{s_{ucd} - s}{s_{ucd} - s_{0cd}} \right\} & s_{ucd} < s < s_{0cd} \\ 0 & s \geq s_{utd} \text{ 或 } s \leq s_{ucd} \end{cases} \quad (13)$$

式中: s_{0td} 和 s_{0cd} 分别为动态荷载作用下混凝土键的拉伸和压缩临界伸长率; s_{utd} 和 s_{ucd} 分别为动态荷载作用

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

道面板厚度/m	弹性模量/GPa	板的离散间距/m	时间步长/ 10^{-7} s	邻域半径/m	临界压缩伸长率	临界拉伸伸长率
0.35	30	0.01	1.412	0.03015	-2.0×10^{-3}	4.62×10^{-4}

下混凝土键的拉伸和压缩极限伸长率。

根据混凝土单轴抗拉强度(或单轴抗压强度)与应变率关系, s_{0td} 和 s_{0cd} 可表示为

$$s_{0td} = \begin{cases} \max\{1, 0.26\lg(\dot{s}) + 2.06\} f_t / \\ \max\left\{1, \left[\dot{s}/(1 \times 10^{-6})\right]^{0.026}\right\} E & \dot{s} \leq \frac{1}{s} \\ \left[2\lg(\dot{s}) + 2.06\right] f_t / \\ \left[\dot{s}/(1 \times 10^{-6})\right]^{0.026} E & \frac{1}{s} < \dot{s} \leq \frac{2}{s} \\ \left[1.4433\lg(\dot{s}) + 2.2276\right] f_t / \\ \left[\dot{s}/(1 \times 10^{-6})\right]^{0.026} E & \dot{s} > \frac{2}{s} \end{cases} \quad (14)$$

$$s_{0cd} = \begin{cases} -\max\{1, 0.0419\lg(\dot{s}) + 1.2165\} f_c / \\ \max\left\{1, \left[\dot{s}/(3 \times 10^{-5})\right]^{0.026}\right\} E & \dot{s} \leq \frac{30}{s} \\ -[0.8988\lg^2(\dot{s}) - 2.8255\lg(\dot{s}) + \\ 3.4907f_c / \left[\dot{s}/(3 \times 10^{-5})\right]^{0.026} E & \dot{s} > \frac{30}{s} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\dot{s}$ 为键的变形速率; f_t 和 f_c 分别为混凝土的单轴抗拉和抗压强度。

2.3 飞机冲击荷载建模

飞机着陆瞬间,轮胎与道面之间存在剧烈的非线性冲击作用,且两者材料模量差异巨大。为克服传统接触模型中接触刚度取值的人为性及容易引发的高频数值震荡,本文采用了Shen等^[17]提出的改进近场动力学接触算法。该算法基于微梁键理论,通过将近场动力学接触力与经典Hertz接触理论进行能量等效,建立了具备明确物理意义的接触微模量,飞机轮胎与道面结构离散为物质点体系。当轮胎物质点 x_i 进入道面物质点 x_j 的接触邻域,两者之间形成排斥性接触键。基于改进的接触力理论,接触力 $f_{co}(\cdot)$ 密度定义如下

$$f_{co}(x_i, x_j) = \lambda c_s \bar{s} \frac{\eta + \xi}{|\eta + \xi|} \quad (16)$$

式中: λ 为形状控制函数; η 为物质点对的相对位移; $\bar{s}$ 为接触键的压缩伸长率,反映了局部接触变形程度; c_s 为接触微模量,是控制接触力计算精度的核心参数。

随后基于Hertz理论进行刚度等效与参数确定。鉴于轮胎与道面的弹性模量存在显著差异,为确保接触力传递的物理真实性,本文首先依据Hertz接触理论确定等效接触刚度 E_c

$$E_c = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (17)$$

式中: E_1 、 E_2 与 ν_1 、 ν_2 分别为轮胎与道面的弹性模量及泊松比。

进而,通过令PD接触域内的积分力与Hertz理论解相等。 c_s 的计算如下

$$c_s = \frac{2E_c}{\pi h \delta_c^3} \quad (18)$$

式中: δ_c 为接触邻域半径; h 为网格尺寸。

该接触模型通过Hertz理论确定等效接触刚度,并进一步得到具有物理意义的接触微模量,因此避免了传统罚函数接触方法中接触刚度和接触阻尼依赖人为调节的问题。当轮胎物质点进入道面物质点的接触邻域时,压缩型接触键产生排斥作用,从而抑制物质点间的非物理穿透。在满足时间步稳定条件的前提下,该方法能够获得较为平滑的接触力时程响应,为后续道面微裂纹萌生分析提供稳定的荷载输入。在垂向下沉速度为 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的工况下,未采用Hertz能量等效处理时,接触力时程曲线峰值超过常规着陆荷载的3倍,如图2所示,难以合理表征真实飞机着陆冲击荷载。

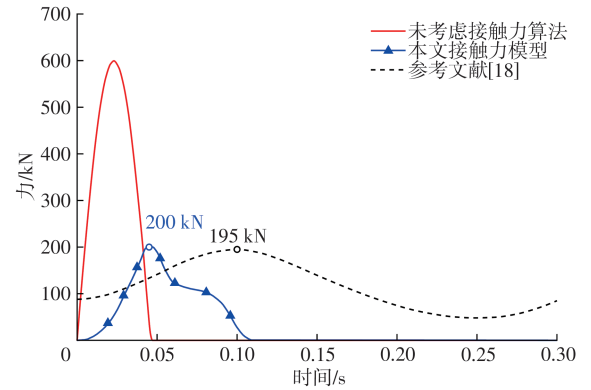


图2 接触力时程曲线

Fig. 2 Time history of contact force

相比之下,本文PD-Hertz能量等效接触算法得到的接触力峰值约为200 kN,与文献[18]给出的195 kN接近,相对误差为2.56%,表明本文接触算法在局部冲击荷载幅值表征方面具有一定合理性。需要说明的是,文献[18]模拟的是完整飞机着陆过程,包含机身运动、起落架缓冲、轮胎压缩、气动力变化及道面平整度等多自由度耦合效应;而本文模型主要面向轮胎-道面局部接触冲击过程,重点用于分析局部接触荷载作用下的道面损伤萌生。因此,两者在峰值出现时刻和接触力时程细节上存在差异是可以理解的。本文仅将文献结果作为接触力峰值数量级的参考,而不将其作为接触力时程相位完全一致的验证依据。

本文基于 MATLAB 自主编写了键型近场动力学数值计算程序,过程如图 3 所示。

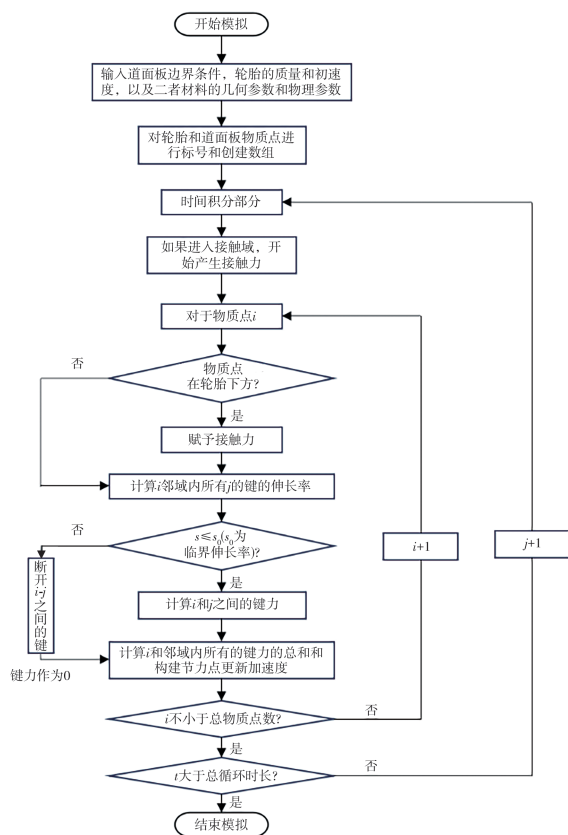


图 3 计算流程

Fig. 3 Computational procedure flow

3 模型验证与道面损伤萌生分析

3.1 冲击试验验证

为验证本文所采用近场动力学模型在处理结构冲击断裂问题中的精度与适用性,本文引入经典的 Kalthoff-Winkler 试验模型进行数值模拟,如图 4 所示。该试验常用于研究高速冲击下材料裂纹的起裂角度及扩展特征。

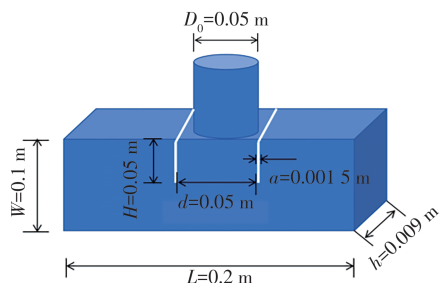


图 4 Kalthoff-Winkler 试验模型

Fig. 4 Model of Kalthoff-Winkler experiment

Kalthoff-Winkler 试验是金属动态断裂问题。试验中,冲击物直径 $D_0=0.05$ m,高度 $H=0.05$ m,初始冲击速度为 $v_0=32$ m·s⁻¹。受冲击钢板长度 $L=$

0.2 m,宽度 $W=0.1$ m,厚度 $h=0.009$ m,弹性模量 $E=191$ GPa,泊松比 $\nu=0.25$,密度为 $8\,000$ kg·m⁻³。钢板中对称分布 2 条裂缝,其宽度 $a=0.001\,5$ m,长度 $h_0=0.05$ m,裂缝间距 $d=0.05$ m。钢板不受位移约束,且初始处于静止状态,在圆柱体的冲击下发生动态断裂破坏。

利用本文开发的 PD 数值框架对上述冲击过程进行了模拟,图 5、6 分别展示了裂纹起裂与扩展过程的损伤云图。结果显示,在冲击后约 $28.2\,\mu\text{s}$ 时,裂纹开始在裂尖附近萌生,并以 67.4° 的角度扩展,该角度与文献[19]、[20]中试验记录的 68° 几乎一致;起裂时间亦接近所给出的 $29\,\mu\text{s}$ 。

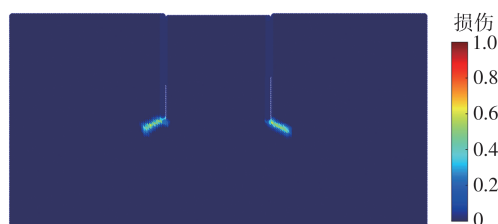


图 5 Kalthoff-Winkler 试验中起裂结果($t=28.2\,\mu\text{s}$)

Fig. 5 Crack initiation result in Kalthoff-Winkler experiment ($t=28.2\,\mu\text{s}$)

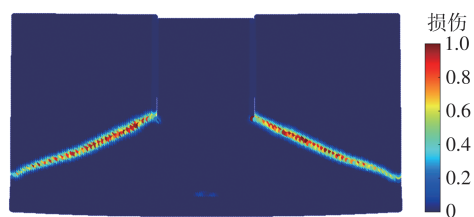


图 6 Kalthoff-Winkler 裂纹扩展最终效果

Fig. 6 Final crack propagation effect of Kalthoff-Winkler experiment

本算例虽来源于金属材料冲击试验,但其裂纹萌生角度与起裂时间均与试验吻合良好,可支持后续机场道面冲击损伤分析研究近场动力学模型在处理高速冲击诱导断裂问题中的可靠性与精度。这一验证结果表明,本文开发的程序具备较高的模拟精度与稳定性,可为将该模型推广应用于机场道面工程中、模拟飞机主起落架落地冲击引起的混凝土道面损伤演化过程提供理论依据与方法支撑。

3.2 混凝土模型验证

为验证 PD 模型对于混凝土类准脆性材料的适用性,本文选取了经典的 L 形混凝土板断裂模型进行分析。该模型为受竖向位移荷载作用下的 L 形混凝土试块,几何尺寸如图 7 所示^[21]。弹性模量为 25.85 GPa,密度为 $2\,500$ kg·m⁻³,抗拉强度为 2.7 MPa。试样被均匀离散,物质点间距 $\Delta x=0.005$ m,近场域尺寸 $\delta=3\Delta x$,位移荷载 $F(u)$ 终值为 0.5 mm,位移增量为 1.25×10^{-7} mm。

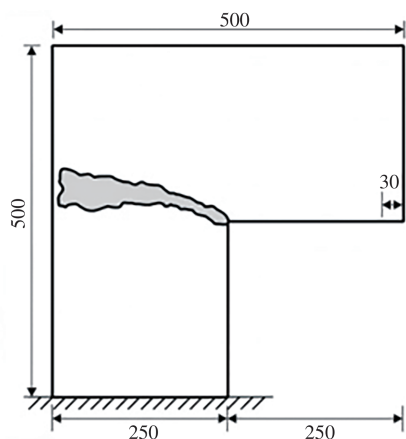


图7 几何尺寸(单位:mm)

Fig. 7 Physical dimension (unit: mm)

采用本文模型模拟了竖向均匀位移荷载作用下的断裂形态发展规律,断裂从L形混凝土试样的内角开始斜向上延伸至左边界,如图8所示。计算得到的混凝土板断裂情况与试验^[21]断裂带(图7阴影区)有较好的一致性,相较于相场模型(图9^[22])更好地反映了裂纹扩散的角度。

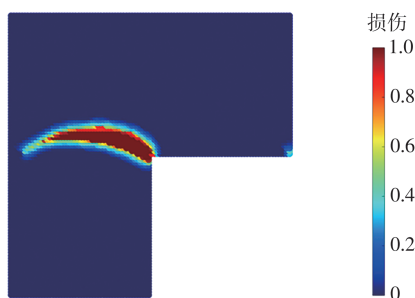


图8 本文模型

Fig. 8 Present model

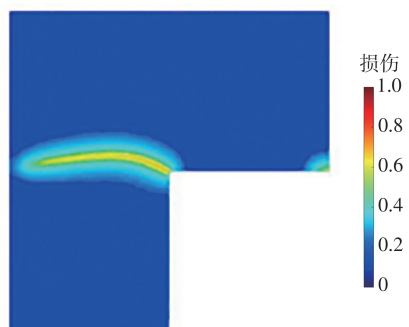


图9 相场模型

Fig. 9 Phase field model

此外,本文进一步计算了L形混凝土板加载过程中的反力位移曲线(图10),并与文献[21]试验荷载-位移包络范围及文献[22]相场模型结果进行对比,如图10所示。可以看出,本文PD模型在峰值荷载、曲线整体形态及峰后软化趋势方面均落在或接近试验包络范围,说明该模型能够较好描述混凝土

类准脆性材料在拉伸断裂过程中的力学响应。上述破坏规律的一致性表明本文所建立的PD模型对于混凝土材料断裂预测具有较好的准确性,可用于开展后续研究。

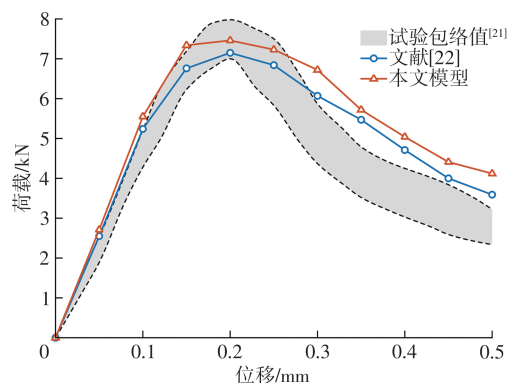


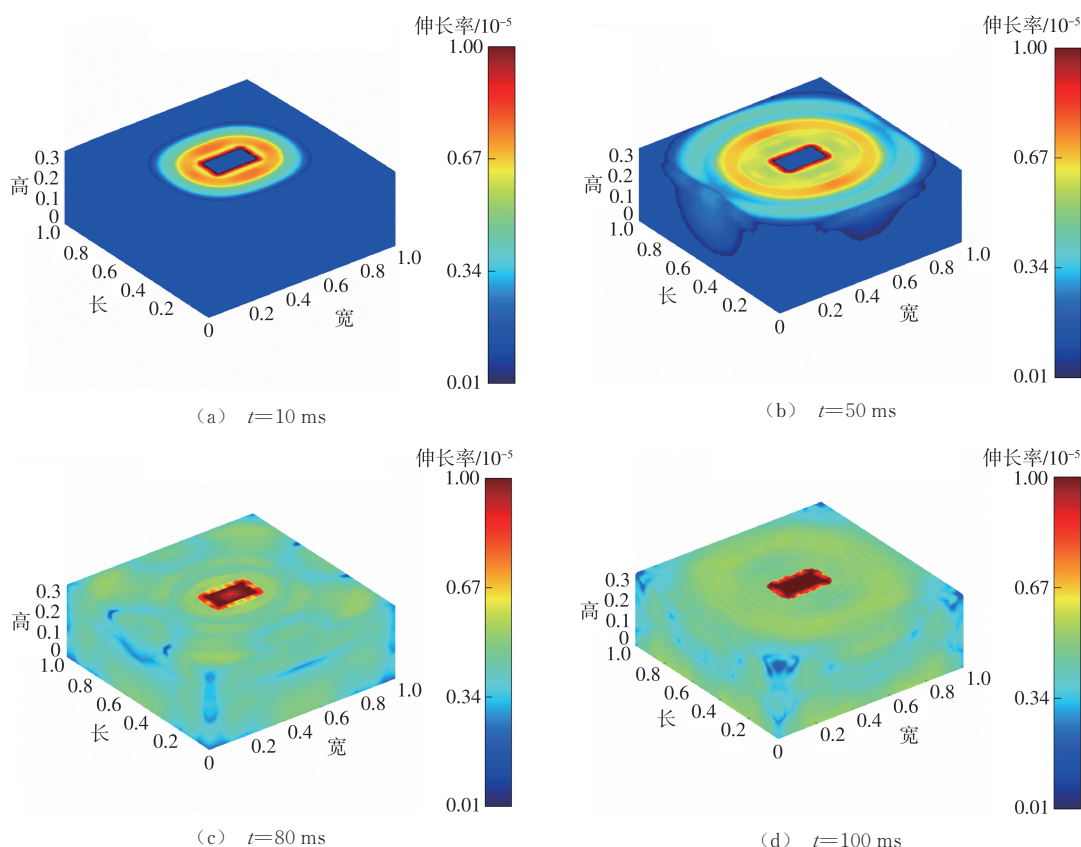
图10 荷载-位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curves

3.3 道面损伤萌生分析

为评估不同垂向下沉速度的飞机荷载对道面的冲击影响,本文开展了基于近场动力学的数值模拟。相关研究给出了速度范围^[23],民航飞机在着陆过程中的典型下沉速度范围为 $0.31 \sim 0.91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。飞行员失误、不利的天气条件和飞机机械故障等因素都可能导致粗略着陆。一般来说,超过 $1.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的下沉速度被归类为粗略着陆。因此,本文选取 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为正常工况下的机轮垂向下沉速度,并选取 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为偏高垂向下沉速度工况,以分析冲击强度变化对道面损伤萌生的影响。考虑近场动力学三维大尺度离散的计算代价,并结合本文关注接触区附近初始损伤萌生的研究目标,采用 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.35 \text{ m}$ 的局部缩尺道面板开展分析,以平衡计算开销与分析精度。同时,本文关注的是机轮接触区附近的早期局部冲击响应与损伤萌生,高伸长率与键断裂主要集中于接触区及板底邻域,尚未扩展至模型边界,因此该局部计算域能够满足本文分析目标。本文系统记录了不同工况下键伸长率的损伤演化过程并展开对比分析。模拟的物理参数设置如表1所示。

在较低速度($0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)情形下(图11),起落架与道面首次接触瞬间,冲击区域周围出现明显的局部伸长率集中,物质点键的伸长率大多未超过混凝土临界伸长率 s_c 。随着时间推进,冲击波带呈现环形向四周扩散却并不剧烈,多数键依然处于完好状态,表明此时单次冲击产生的键损伤在微观尺度上范围较小且尚未扩展。

图 11 垂向下沉速度为 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的伸长率分布Fig. 11 Stretch distribution when the vertical sink velocity is $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

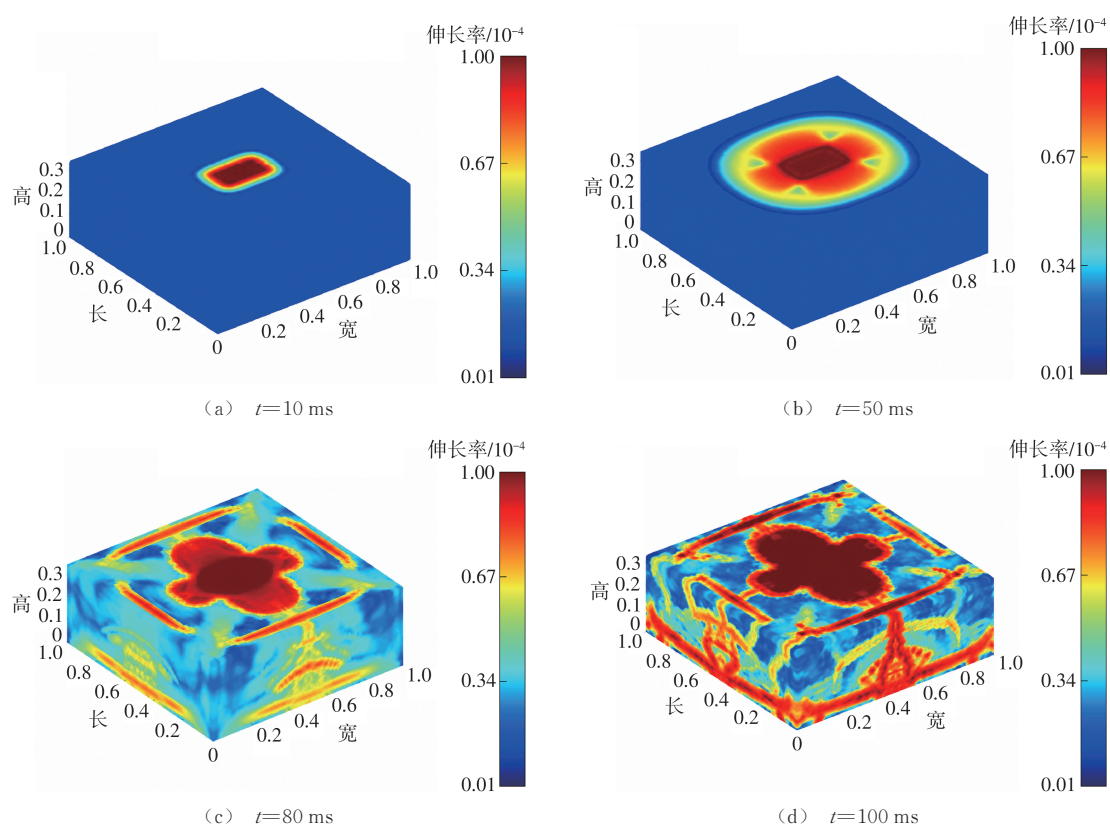
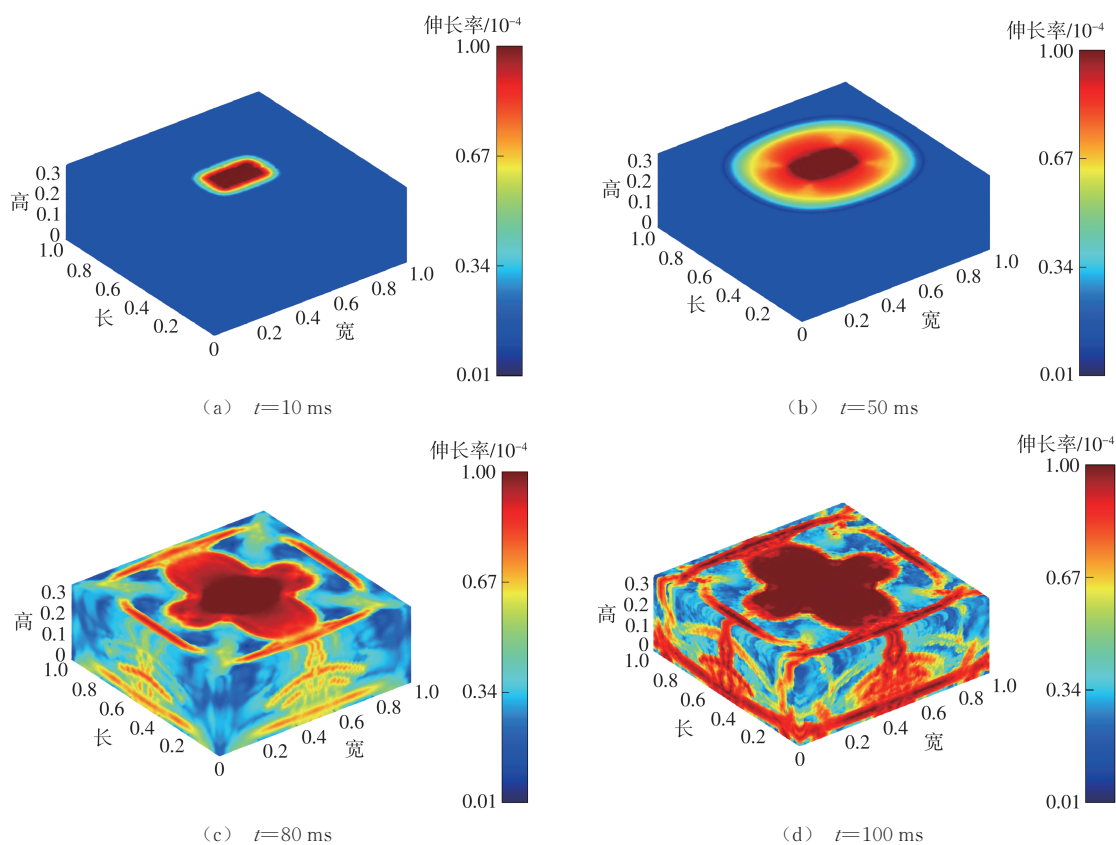
当垂向下沉速度提高至 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 12) 后, 面层与板底的应变分布均有所增强。PD 计算显示, 部分物质点键在该区域接近或超过临界伸长率, 暗示潜在的裂纹成核迹象。观察顶部与底部区域的伸长率分布, 还可见到若干向心或环状的高应变带, 这意味着道面在冲击荷载下的影响范围和程度都在增大。

当下沉速度继续增至 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 13), 道面内部的动力响应明显增强, 面层与底层间高伸长率路径快速贯通, 板底局部区域键断裂现象更为突出, 揭示出显著的微裂纹萌生趋势。该现象与工程实践相吻合: 实际机场运行中, 频繁且高强度的落地冲击通常最先导致板底区出现裂纹, 随后经循环荷载作用向上发展或扩散, 此外下沉速度也会严重影响跑道表面状况, 这也与文献[24]利用有限元仿真结果一致。综合图 11~13 可见, 不同垂向下沉速度下道面损伤萌生位置并非随机分布, 而主要集中于接触区下方及板底邻域。该现象表明, 飞机着陆冲击作用下的早期损伤并不完全由表面局部压缩控制, 而与道面板的瞬态弯曲响应密切相关。轮胎接触荷载首先在接触区附近形成较强局部压缩效应; 与此同时, 板体在冲击作

用下发生弯曲变形, 使板底区域出现更明显的拉伸响应。随着垂向下沉速度增大, 模型中高伸长率区域由接触区附近逐步向板底扩展, 并表现出更强的空间汇聚特征, 这说明板底拉伸控制作用随冲击强度增加而增强。换言之, 较高速度工况下的损伤加剧, 不仅表现为损伤量增加, 更表现为损伤控制部位由表层局部压缩区逐步向板底拉伸敏感区转移。该结果与刚性板在局部冲击荷载下接触压缩导致的弯曲拉伸耦合响应的基本力学规律是一致的。

3.4 垂向下沉速度与板厚对高危伸长率比例的影响

图 14 从全局统计角度给出了不同垂向下沉速度下道面板键伸长率的分布特征。结果表明, 随着垂向下沉速度由 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 提高至 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 板内高伸长率键所占比例明显增加, 伸长率超过临界值并发生断裂的键占比由 0.73% 增大至 9.60% 。在 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 工况下, 高伸长率键主要集中于较低伸长率区间, 超过临界值的键数量较少; 而当速度增至 1.0 、 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 分布曲线向高伸长率区间扩展, 高值区频率明显上升, 说明更多物质点键进入接近临界或超过临界的变形状态。从力学响应角度看,

图 12 垂向下沉速度为 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的伸长率分布Fig. 12 Stretch distribution when the vertical sink velocity is $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 图 13 垂向下沉速度为 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的伸长率分布Fig. 13 Stretch distribution when the vertical sink velocity is $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

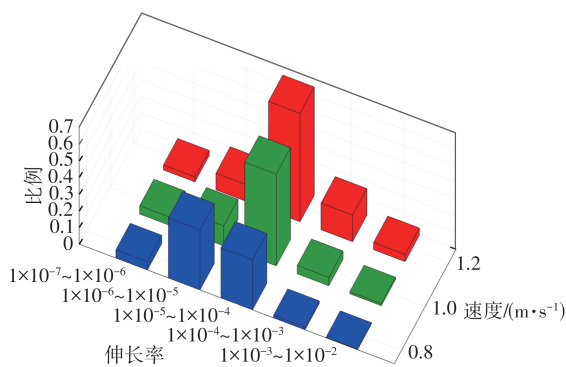


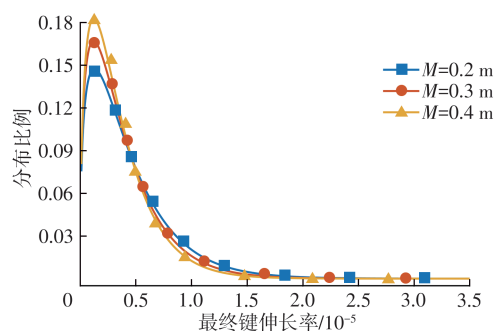
图 14 不同垂向下沉速度下键伸长率频率分布

Fig. 14 Frequency distribution of bond stretch under different vertical sink velocities

垂向下沉速度提高意味着轮胎在更短时间内向道面输入更强的瞬态冲击作用,从而使接触区附近的局部压缩响应和板体弯曲响应同时增强。对于刚性混凝土道面板而言,局部冲击并不只表现为表层压缩,还会通过板的弯曲作用在板底形成更强的拉伸变形。因此,随着下沉速度增加,板底及其邻域中处于高拉伸变形水平的键数量明显增多,这也是图 14 中高伸长率区间频率持续上升的主要原因。换言之,速度提高带来的不仅是局部响应幅值的增大,更体现为潜在微损伤区域由局部集中向更大范围扩展。

在保持飞机垂向接触速度 $v=0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,图 15 给出了不同板厚条件下混凝土板底最终键伸长率的分布。可以看出,随着板厚 M 由 0.2 m 增加至 0.4 m,分布曲线在高伸长率区的右尾逐渐收

缩,高伸长率键比例降低,说明板厚增加后,板底拉伸集中有所减弱。其主要原因是,板厚增大会提高道面板的抗弯刚度^[25],在相同冲击荷载作用下,板体弯曲变形减小,板底拉伸变形水平随之降低,因此进入高伸长率区间的键数量减少。结合图 14、15 可知,垂向下沉速度主要反映冲击输入强度的变化,而板厚主要反映结构抗弯能力的变化。前者会影响高伸长率区的扩展范围和断裂键比例,后者则通过减小板底弯曲拉伸变形,降低高伸长率键的集中程度。总体来看,在较高垂向下沉速度或较小板厚条件下,板底更容易出现高伸长率集中区;虽然单次冲击尚未形成贯通裂缝,但这些区域可能在后续重复冲击荷载作用下进一步发展为损伤累积区^[26]。

图 15 速度为 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时不同厚度板底伸长率分布Fig. 15 Stretch distribution at slab bottom under different slab thicknesses at $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

为增强数值结果的工程解释性,本文进一步基于 PD 计算得到的键断裂比例,对道面冲击损伤风险进行初步分级,结果见表 2。

表 2 道面冲击损伤初步风险分级

Table 2 Preliminary risk classification of pavement impact damage

风险等级	断裂比例	损伤状态解释	风险解释及建议
1级:基本安全	$<1\%$	局部轻微损伤,高危伸长率区域较少且不连续	对应本文低速工况损伤水平,可按常规巡检处理
2级:重点监测	$1\% \sim 5\%$	高伸长率区域开始扩大,存在微裂纹成核风险	建议关注接地区局部损伤演化,必要时加强检测
3级:预防性养护	$5\% \sim 10\%$	板底高危伸长率区域明显发展,存在疲劳扩展风险	建议开展重点检测,必要时考虑预防性养护
4级:高风险	$>10\%$	微损伤显著累积,可能向宏观裂纹进一步演化	建议作为高风险预警区域,开展重点检测,并结合现场检测结果进行处治决策

需要说明的是,表 2 中的键断裂比例阈值主要基于本文 PD 计算结果及不同工况下损伤演化特征提出,用于对冲击作用下道面早期损伤风险进行相对分级和工程解释。由于键断裂比例属于近场动力学框架下的细观损伤指标,尚不能直接等同于现行机场道面养护规范中的可视病害等级或处治阈值。

因此,该分级可作为接地区损伤预警和后续重点检测的参考,仍需结合现场无损检测、重复冲击疲劳试验及实测病害资料进一步校准。

3.5 板底潜在失效路径分析

为了在宏观尚未出现可见损伤的情况下,识别道面板内部相对薄弱区域及潜在裂纹扩展路径,本

文对冲击作用后板底区域的高伸长率键进行高亮显示,以揭示复杂应力场中的潜在损伤区域。图16给出了本文PD模型得到的板底潜在损伤路径。可以看出,高伸长率区域并非仅集中于冲击中心附近,而是由中心向多个方向呈放射状扩展,说明冲击荷载作用下板底区域已经形成具有方向性的潜在裂纹扩展通道。

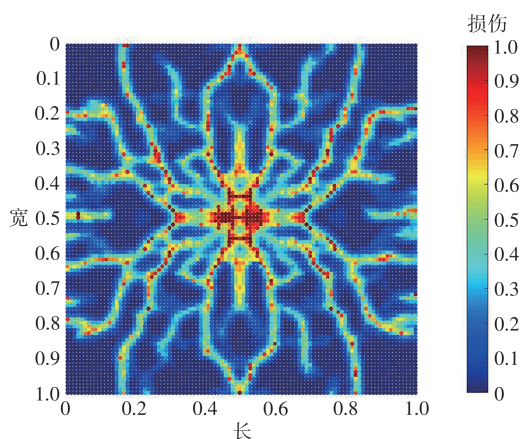


图16 板底潜在损伤路径PD结果

Fig. 16 PD result of potential damage paths at slab bottom

图17为文献[27]中落锤冲击试验得到的板底损伤形态,可以观察到试验裂纹同样表现出由冲击中心向外扩展的多方向分布特征。相比之下,图18所示^[27]FEA结果主要呈现中心集中式块状损伤区,虽然能够反映冲击中心附近的损伤集中现象,但对裂纹分叉、放射状扩展以及多方向细长裂纹路径的刻画相对不足。由图16~18的对比可见,PD结果在板底潜在损伤路径的空间形态上与试验结果更为接近,能够更清晰地反映冲击作用下板底裂纹由中心向外扩展的趋势。

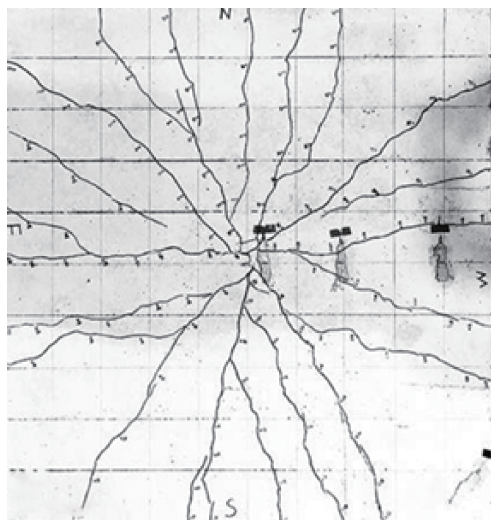


图17 板底冲击试验结果

Fig. 17 Impact test result at slab bottom

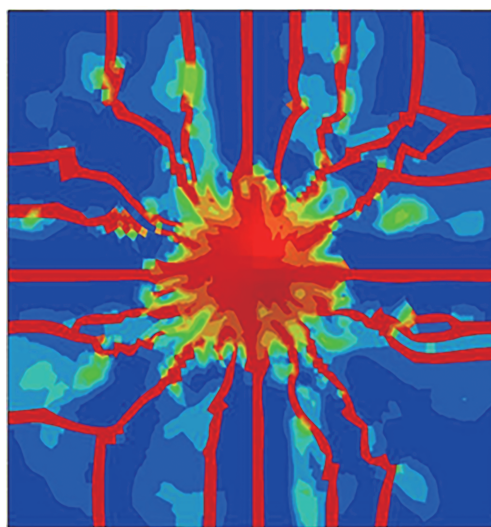


图18 板底损伤FEA效果

Fig. 18 FEA effect of damage at slab bottom

为进一步定量比较PD、FEA与试验结果的板底损伤形态,本文以冲击中心为极点,对图16~18中的板底损伤区域进行方向统计。具体而言,首先对试验裂纹区、FEA损伤区和PD高伸长率路径进行二值化处理,然后按照极角方向划分为若干角度区间,统计各方向区间内损伤数量或高危路径长度所占比。该指标可用于表征板底损伤路径是否具有多方向放射状扩展特征,从而为PD、FEA与试验结果之间的形态对比提供定量依据。

图19给出了PD、FEA与试验结果中板底损伤路径的方向比例分布。可以看出,试验结果在多个方向区间内均存在较高比例,尤其在约 55° 、 105° 、 145° 和 155° 附近出现相对明显的峰值,说明冲击作用下板底裂纹并非沿单一方向扩展,而是具有多方向放射状分布特征。PD结果整体呈现较连续的多峰分布,在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 、 $125^\circ \sim 150^\circ$ 等方向区间内与试验结果具有较好一致性,能够反映板底潜在裂纹路径的方向性扩展趋势。相比之下,FEA结果在部分方向上出现较尖锐的局部峰值,例如约 25° 、 55° 、 85° 、 125° 和 145° 附近,但相邻方向区间的比例波动较大,表现出较强的局部集中性。这说明FEA结果虽然能够反映一定的损伤方向性,但其方向分布受中心集中式损伤区影响较明显,对试验中连续放射状裂纹网络的刻画相对不足。结合图16~19可知,PD模型不仅能够揭示板底高伸长率区域的空间形态,还能够在方向比例分布上较好反映试验裂纹的多方向扩展特征,因此更适合用于识别机场刚性道面冲击作用下的潜在裂纹扩展通道。

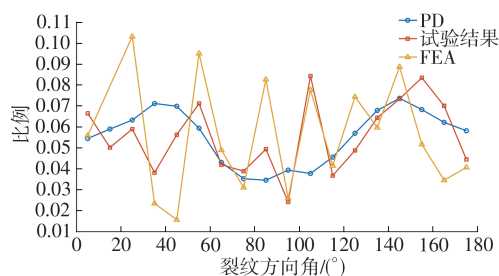


图 19 板底损伤路径方向比例分布

Fig. 19 Directional proportion distribution of damage paths at slab bottom

4 结 语

(1)PD 方法可有效模拟冲击诱发的裂纹萌生过程。Kalthoff-Winkler 冲击试验和 L 形混凝土板模型试验,表明本文建立的模型在裂纹起裂时间与扩展方向方面与试验结果高度吻合,展示出较好的断裂预测能力,该模型无需预先设置裂缝路径,能够自发模拟裂缝萌生与扩展过程,可为跑道损伤识别与预警研究提供参考。

(2)基于 PD-Hertz 接触模型,本文较好捕捉了垂向下沉速度由 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 提高至 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时板底键断裂比例由 0.73% 增至 9.60% 的非线性增长特征,表明垂向下沉速度是控制道面早期冲击损伤水平的重要外部荷载参数。板厚参数分析进一步表明,增加板厚可提高道面板抗弯刚度,降低板底高伸长率键比例,从而削弱冲击作用下的板底拉伸集中。

(3)单次冲击虽未产生贯通裂缝,但高速度下已孕育明显的微裂纹成核与局部损伤累积风险。若道面长期处于类似或更高冲击载荷下,疲劳裂纹容易在这些微损伤区内加速发展,危及道面整体服役安全,在航空交通量日益增加的背景下,这将为冲击区形成高风险损伤带及裂缝加速扩展提供条件。

(4)未来将进一步考虑机场道面材料与结构在长期重复荷载作用下的疲劳演化过程,结合随机骨料模型与实测冲击试验,对 PD 模型参数和真实物理状态开展进一步研究。

参 考 文 献:

References:

- [1] TIAN Y, XIANG P, LIU S F, et al. Improving airport runway rigid pavement design using influence surfaces[J]. Construction and Building Materials, 2021, 284: 122702.
- [2] LIU S F, ZHU L G, LING J M, et al. A novel analytical approach for the spatial distribution of accumulated damage on the airport runway considering dynamic fatigue[J]. Engineering Failure Analysis, 2026, 183: 110222.
- [3] REZAEI-TARAHOMI A, KAYA O, CEYLAN H, et al.

Sensitivity quantification of airport concrete pavement stress responses associated with top-down and bottom-up cracking[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2017, 10(5): 410-420.

- [4] MATHI K K, NALLASIVAM K. Dynamic and fatigue life prediction analysis of airfield runway rigid pavement using finite element method[J]. Computational Engineering and Physical Modeling, 2022, 5(1): 1-23.
- [5] DONG Z J, WANG T X, MA X Y, et al. Structural performance evaluation of airport asphalt pavement based on field data measurement and finite element simulation[J]. Measurement, 2023, 210: 112553.
- [6] SILLING S A. Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2000, 48(1): 175-209.
- [7] AGWAI A, GUVEN I, MADENCI E. Predicting crack propagation with peridynamics: A comparative study[J]. International Journal of Fracture, 2011, 171(1): 65-78.
- [8] SILLING S A, WECKNER O, ASKARI E, et al. Crack nucleation in a peridynamic solid[J]. International Journal of Fracture, 2010, 162: 219-227.
- [9] WECKNER O, ABEYARATNE R. The effect of long-range forces on the dynamics of a bar[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005, 53: 705-728.
- [10] 黄 丹, 章 青, 乔丕忠, 等. 近场动力学方法及其应用[J]. 力学进展, 2010, 40(4): 448-459.
- [11] HUANG Dan, ZHANG Qing, QIAO Pi-zhong, et al. A review on peridynamics (pd) method and its applications[J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(4): 448-459.
- [12] 沈 峰, 章 青, 黄 丹, 等. 冲击荷载作用下混凝土结构破坏过程的近场动力学模拟[J]. 工程力学, 2012, 29(增1): 12-15.
- [13] SHEN Feng, ZHANG Qing, HUANG Dan, et al. Peridynamics modeling of failure process of concrete structure subjected to impact loading[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(S1): 12-15.
- [14] 马晓川, 刘林芽, 冯青松, 等. 铁路钢轨裂纹萌生的键型近场动力学预测模型[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(3): 228-237.
- [15] MA Xiao-chuan, LIU Lin-ya, FENG Qing-song, et al. Prediction model of rail crack initiation using bond-based peridynamics theory[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(3): 228-237.
- [16] LI S, GUO J. Modeling and dynamic analysis of an aircraft-pavement coupled system[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2023, 11(7): 3507-3519.
- [17] 岑业波. 随机激励飞机荷载作用下的道基附加应力分布特征[D]. 上海: 同济大学, 2020: 10.
- [18] CEN Ye-bo. Distribution characteristics of additional stress in the runway subgrade induced by aircraft load under stochastic excitation[D]. Shanghai: Tongji University, 2020: 10.
- [19] 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.
- [20] ZHANG X X, DING J G, ZHANG Y. A rate-dependent

- peridynamic model of reinforced concrete subjected to explosive loading[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 292: 109666.
- [17] SHEN G Z, WANG T Z, ZHENG G J, et al. Peridynamic contact models for fracture analysis based on the micro-beam bond[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2024, 166: 105829.
- [18] 孟宪锋, 罗 萌, 江 辉, 等. 飞机着陆数值仿真及机场道面动载特性研究[J]. *振动与冲击*, 2024, 43(1): 308-318.
MENG Xian-feng, LUO Meng, JIANG Hui, et al. Numerical simulation of aircraft landing and dynamic load characteristics of airport pavement[J]. *Journal of Vibration on Shock*, 2024, 43(1): 308-318.
- [19] KALTHOFF J F. Modes of dynamic shear failure in solids [J]. *International Journal of Fracture*, 2000, 101(1/2): 1-31.
- [20] KALTHOFF J F, Burgel A. Influence of loading rate on shear fracture toughness for failure mode transition[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30(8/9): 957-971.
- [21] WINKLER B J. Ultimate load investigations of unreinforced and reinforced concrete structures on the basis of an objective material law for concrete[D]. Innsbruck: University of Innsbruck, 2001: 15.
- [22] FANG J G, WU C Q, RABCZUK T, et al. Phase field fracture in elasto-plastic solids: A length-scale insensitive model for quasi-brittle materials. [J]. *Computational Mechanics*, 2020, 66(4): 931-961.
- [23] LIU S F, ZHU L G, TIAN Y, et al. Airport runway rigid pavement dynamic response under multi-state ground operations of different aircraft using virtual prototypes[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2025, 26(1): 2571737.
- [24] 林钦栋, 冯 春, 唐德泓, 等. 冲击载荷作用下路面结构的沉降及破坏特征[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(11): 109-122.
LIN Qin-dong, FENG Chun, TANG De-hong, et al. The settlement and damage characteristics of pavement structure under impulse load[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(11): 109-122.
- [25] 李 盛, 张海涛, 孙 煜, 等. 在役水泥路面劣化行为与延寿技术综述[J]. *交通运输工程学报*, 2024, 24(3): 25-47.
LI Sheng, ZHANG Hai-tao, SUN Yu, et al. Review on deterioration behavior and life extension technologies of cement pavement in service[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2024, 24(3): 25-47.
- [26] 杨建军, 黄 旺, 吕松涛, 等. 沥青路面强度理论与结构失效特征[J]. *交通运输工程学报*, 2024, 24(5): 131-143.
YANG Jian-jun, HUANG Wang, LYU Song-tao, et al. Strength theories and structure-failure characteristics of asphalt pavements[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2024, 24(5): 131-143.
- [27] 袁继峰. 冲击作用下机场再生混凝土道面板的动力响应研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023: 20.
YUAN Ji-feng. Study on dynamic response of airport recycled concrete pavement panel under impact [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023: 20.