

文章编号:1671-1637(2026)08-0217-14

雪浆污染下机轮与刻槽道面相互作用

蔡靖^{*1,2}, 赵飞¹, 黄钰岱¹, 李建平¹, 陈红燕¹, 孙得馨³

(1. 中国民航大学 交通科学与工程学院, 天津 300300; 2. 民航机场智能建造与工业化工程技术研究中心, 天津 300456; 3. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384)

摘要:为提高飞机在冰雪污染道面的运行安全,基于光滑粒子流算法(SPH)构建了机轮-雪浆污染刻槽道面有限元模型;利用NASA全比例雪浆滑行试验数据及ESDU理论公式验证了模型的可靠性,模拟了空客A320机型在不同滑行速度、雪浆厚度及轮胎磨损程度下的运行状态,对比分析了矩形、梯形、V形3种道面刻槽对轮胎受力及溅雪特性的影响。分析结果表明:梯形刻槽对道面污染物的疏导能力最优,其对轮胎提供的道面支撑力较矩形和V形刻槽最高分别提升8.36%和10.92%,位移阻力最大分别降低12.30%和19.00%;道面刻槽深度显著影响飞机临界危险速度,随着刻槽深度从6 mm减小至0,临界危险速度由 $73 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降低至 $69 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;轮胎溅雪量由大到小呈现V形刻槽、矩形刻槽、梯形刻槽的显著差异,梯形刻槽对轮胎溅雪的抑制作用更优,其在发动机进气道危险区域的溅雪量较V形刻槽减少约23%;轮胎沟槽深度显著影响抗滑性能,当沟槽深度磨损至3 mm(磨损率70%)时,滚动摩擦力较新轮胎下降30%以上,且溅雪量增加33.19%,需及时更换轮胎。研究成果可为机场道面抗滑设计及轮胎维护提供理论依据。

关键词:机场工程;刻槽道面;SPH算法;轮胎-道面相互作用;雪浆污染;临界危险速度

中图分类号:U416.4 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.190

Interaction between aircraft tire and grooved pavement under snow slurry pollution

CAI Jing^{*1,2}, ZHAO Fei¹, HUANG Yu-dai¹, LI Jian-ping¹, CHEN Hong-yan¹, SUN De-xin³

(1. School of Traffic Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Civil Aviation Airport Intelligent Construction and Industrialization Engineering Technology Research Center, Tianjin 300456, China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: To enhance aircraft operational safety on grooved pavements with snow pollution, a finite element model for aircraft tire-grooved pavement with snow slurry pollution was established based on the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method. The reliability of the model was validated using NASA full-scale snow slurry taxiing test data and ESDU theoretical formulas. The operation status of the Airbus A320 aircraft at different taxiing speeds, snow slurry thicknesses, and tire wear degrees was simulated. The influences of rectangular, trapezoidal, and V-shaped pavement grooves on tire forces and snow splashing characteristics were compared and analyzed. According to the analysis results, trapezoidal grooves have the best drainage capacity for pavement pollutants. Compared with

出版历程:2025-11-15收稿,2026-01-02修回,2026-01-23录用

基金项目:国家自然科学基金项目(52472369);天津科技创新引导专项基金(25YDTPJC00370);天津市交通运输科技面上项目(2025-70)

* 作者简介:蔡靖(1975-),女,河北唐山人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:caijing75@163.com。

引用格式:蔡靖,赵飞,黄钰岱,等.雪浆污染下机轮与刻槽道面相互作用[J].交通运输工程学报,2026,26(8):217-230.

Citation: CAI Jing, ZHAO Fei, HUANG Yu-dai, et al. Interaction between aircraft tire and grooved pavement under snow slurry pollution [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(8): 217-230.

rectangular and V-shaped grooves, the pavement support force provided by trapezoidal grooves increases by up to 8.36% and 10.92%, respectively, with the displacement resistance lower by up to 12.30% and 19.00%. The depth of pavement grooves significantly affects the critical dangerous speed of the aircraft. As the groove depth reduces from 6 mm to 0 mm, the critical dangerous speed decreases from 73 to 69 m·s⁻¹. The snow splash quantity by tires exhibits significant differences from large to small, with V-shaped grooves, rectangular grooves, and trapezoidal grooves showing distinct patterns, and trapezoidal grooves have a better suppression effect on tire snow splashing. The snow splash quantity in the dangerous area of the engine intake port drops by about 23% compared with V-shaped grooves. Tire groove depth significantly affects skid-resistant performance. When the groove depth wears to 3 mm (wear rate of 70%), the rolling friction force decreases by more than 30% compared with new tires. The snow splash quantity increases by 33.19%, necessitating the timely replacement of the tire. These findings provide a theoretical basis for airport pavement skid-resistant design and tire maintenance.

Keywords: airport engineering; grooved pavement; SPH algorithm; tire-pavement interaction; snow slurry pollution; critical dangerous speed

Publication history: Received 2025-11-15; Received in revised form 2026-01-02; Accepted 2026-01-23

Funding: National Natural Science Foundation of China (52472369); Tianjin Science and Technology Innovation Guidance Special Fund(25YDTPJC00370); Tianjin Transportation Science and Technology General Project(2025-70)

* **Corresponding author:** CAI Jing, professor, PhD, E-mail: caijing75@163.com.

0 引 言

近些年,受极端天气影响,冬季降雪较为频繁,机场跑道被冰雪覆盖时,雪浆作为雪水混合物会导致轮胎受到的道面摩擦力急剧减小,道面刻槽疏导污染物的作用被削弱^[1],飞机制动系数显著降低^[2]。如何保障飞机在极端寒潮环境下的运行安全,已成为机场运营需重点关注的问题。因此,深入探究雪浆污染条件下机轮与道面的相互作用机理及其主要影响因素,并确定相关因素的安全阈值,对保障飞机运行安全至关重要。

雪浆污染对轮胎的作用影响,国内外学者在基础理论模型构建及影响因素分析等方面已取得显著成果^[3-4]。Hays等^[5]提出的积雪路面轮胎牵引力广义数学模型,重点分析了轮胎胎面特征与雪的物理性质对牵引力的影响机制。Nesbitt等^[6]通过理论与试验结合,基于轮胎胎面几何特性构建了积雪路面牵引力预测方程,重点考察了沟槽宽度、横向角度及花纹密度等参数对牵引力的影响规律。Choi等^[7]针对积雪碾压复杂变形问题,提出有限元法与有限体积法的耦合数值方法,通过动态模拟轮胎变形和积雪流动,量化积雪硬度、花纹深度及胎面形状对轮胎受力的影响。Seta等^[8]利用显式有

限元法和有限体积法构建了轮胎与积雪相互作用的三维预测模型,重点分析花纹滚动轮胎与积雪的动态接触特性。王亚伟^[9]建立轮胎-积雪有限元模型,模拟不同滚动状态下接地与抗滑性能,揭示了温度、气压等因素的影响规律。孟恩杰^[10]基于冰雪路面安全驾驶机理,构建车速数学模型并通过CarSim仿真验证,揭示了典型冰雪路面安全车速的形成规律。

上述研究多聚焦于汽车轮胎在冰雪污染路面下的相互作用特性,尚未针对机场条件下机轮-道面相互作用展开研究,而汽车轮胎与飞机轮胎在受力与使用环境上存在较大差异。

在飞机与污染道面的相互作用方面, Van Es^[11]首次构建了干雪环境下整机运行阻力预测模型,重点揭示了雪的物理性质及自身构造对轮胎滚动阻力的影响特性,但干雪环境与实际机场环境不符,下雪后因机场运行要求必须进行除雪作业,机械和人员扰动必然会产生雪水混合物,也就是雪浆。王丙元等^[12]基于理论与数值分析,建立考虑冰雪融化状态、测量速度及垂直载荷的摩擦因数测试模型,但未考虑实际道面条件对摩擦因数的影响。Klein-Paste等^[13]结合仿真与试验揭示了波音737在湿雪道面的制动性能最差(摩擦因数最小),并提出湿雪因易压实且填充跑道纹

理的特性导致飞机滑行阻力增大。2012年,Klein-Paste等^[2]基于挪威机场着陆数据,探讨了跑道污染类型、覆盖度等与飞机制动系数的相关性,发现污染类型和覆盖度对制动性能有显著影响,但存在个体差异,其后构建了决策支持模型(IRIS跑道模型),用于预测冰雪污染跑道表面状况^[14]。李琪^[15]构建了基于光滑粒子流(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)算法的轮胎-雪浆污染道面有限元模型,分析了飞机速度、雪浆密度及雪浆厚度等因素对轮胎与雪浆污染道面相互作用的影响,但未涉及道面、轮胎等具体物理机制对该相互作用的影响。

综上所述,当前针对雪浆对轮胎的相互作用研究多基于汽车轮胎,针对飞机轮胎在机场道面的相互作用研究多限于水条件,且雪浆条件下机轮-道面相互作用的研究未对刻槽道面实际情况进行限定,飞机轮胎的磨损程度对打滑也有较大影响。鉴于此,本文系统量化了矩形、梯形、V形3种刻槽道面的支撑力、位移阻力及溅雪抑制性能差异,明确了轮胎磨损程度与临界危险速度的定量关联,同时优化了雪浆模型的边界设置。

1 轮胎行驶力学分析

1.1 雪浆粒子受力分析

机轮在雪浆污染道面上行驶时,根据轮胎与道面的接触过程,接触区域可分为完全接触区域、部分接触区域、完全脱离区域^[16-17],如图1所示。轮胎加速前进时,受雪浆污染物向上的抬升作用,区域②、③开始扩大,并逐渐侵占区域①,轮胎与道面的接触面积逐渐减小,直至为0。此时,雪浆反作用力的竖向分力与轮胎轴载相等,轮胎发生“滑雪”现象。

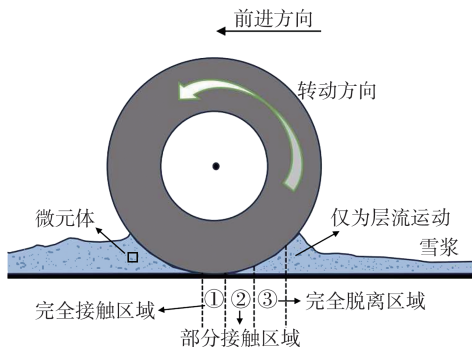


图1 机轮与雪浆污染道面接触过程

Fig. 1 Contact process between aircraft tire and snow slurry polluted pavement

区域③中,轮胎仅与雪浆接触,接触类型为弹性流体动力润滑型摩擦接触^[16]。因此,可将轮胎在雪浆污染道面的运动过程等效为雪浆以速度 v 冲击静

止轮胎的过程,取轮胎与道面之间的雪浆微元体进行受力分析,如图2所示,其中: x 正向为雪浆前进方向; z 正向为雪浆厚度方向; p 为雪浆在 x 方向产生的压强; τ_x 为微元体所受的剪应力。

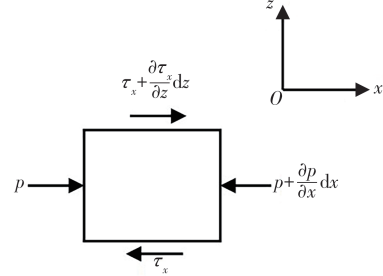


图2 雪浆微元体受力情况

Fig. 2 Stress situation of snow slurry micro-element

假设雪浆为牛顿流体,仅做层流运动,忽略体积力与横向滑移,界面无相对滑动,温度恒定^[18]。结合牛顿内摩擦定律与流体连续性方程,对微元体在 x 方向的受力平衡进行化简分析可得

$$\frac{\partial \tau_x}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

代入牛顿黏性定律 $\tau_x = \eta \partial v_x / \partial z$,可得压强与速度梯度的关系式,对 z 积分可得雪浆水平方向的流速 v_x 为

$$v_x = \frac{\partial p}{2\eta \partial x} z^2 + \frac{C_1 z}{\eta} + C_2 \quad (2)$$

式中: η 为流体的动力黏度; C_1 、 C_2 为常数,可根据假设的边界条件求得。

雪浆在水平方向的体积流量 q_x 为

$$q_x = \int_{h_1}^{h_2} v_x dz \quad (3)$$

在 x 方向上,轮胎与雪浆接触处的速度为 V_1 ,道面与雪浆接触处的速度为 V_2 ,根据质量公式 $m = \rho q$,可得雪浆在水平方向的质量流量 m_x 为

$$m_x = -\frac{\rho h^3 \partial p}{12\eta \partial x} + \frac{\rho h (V_1 + V_2)}{2} \quad (4)$$

式中: h 为雪浆厚度; ρ 为雪浆密度。

根据假设条件对流体连续性方程进行积分变换,可得积分后的连续性方程为

$$\frac{\partial m_x}{\partial x} + \frac{\partial (\rho h)}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

将式(4)代入式(5),由于滑雪现象发生的时间很短,且雪浆层的压强 p 仅在 x 方向发生变化,忽略时效应变,可得等温条件下的 Reynolds 方程

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\rho h^3 \partial p}{12\eta \partial x} \right) = 12 \frac{d(\rho V h)}{dx} \quad (6)$$

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

进一步简化为

$$\frac{dp}{dx} = \frac{12\eta V}{h^2} \quad (7)$$

上述微元体受力分析明确了雪浆流动的基本规律,包括雪浆厚度、雪浆黏度、轮胎速度对流体压力分布产生的不同影响,为后续的建立模型、仿真分析提供了理论依据。但基于连续介质假设,难以模拟雪浆在轮胎沟槽、道面刻槽疏导作用下的大变形及飞溅的动态过程。这些复杂行为直接影响轮胎受力与“滑雪”风险,需通过有限元仿真精准刻画。

1.2 SPH方程的构造及推导

SPH光滑粒子流算法是一种无网格化的拉格朗日流体力学方法,它将流体计算域离散为一组携带物理力学属性的粒子^[19]。粒子间的影响随作用半径的增大逐渐减小,引入光滑核函数 $W(\mathbf{r}-\mathbf{r}', l)$,其大小取决于粒子间的距离 $|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|$ 和光滑长度 l ,光滑长度 l 与光滑因子 κ 共同确定光滑核函数的影响区域,如图3所示。

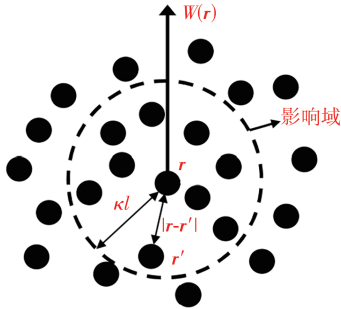


图3 SPH算法的光滑核函数

Fig. 3 Smooth kernel function of SPH algorithm

对于连续的光滑场函数 $f(\mathbf{r})$,在定义域 Ω 上,其任意位置 $\mathbf{r}$ 处的空间积分函数可表示为

$$\nabla f(\mathbf{r}) = - \int_{\Omega} f(\mathbf{r}') \nabla W(\mathbf{r}-\mathbf{r}', l) d\mathbf{r}' \quad (8)$$

采用粒子近似对积分表达式进行离散,并用光滑核函数对邻近粒子的函数值进行加权累加。用粒子的体积 ΔV_j 代替无穷小体积微元 $d\mathbf{r}'$,粒子 j 的质量为 $m_j = \Delta V_j \rho_j$,令 $\nabla_j W(\mathbf{r}-\mathbf{r}_j, l) = \nabla_j W_{ij} = -\nabla_i W_{ij}$,粒子 i 处的场函数空间导数的粒子近似为

$$\nabla f(\mathbf{r}_i) = \sum_{j=1}^N f(\mathbf{r}_j) \nabla_i W_{ij} \frac{m_j}{\rho_j} \quad (9)$$

式中: m_j 为粒子 j 的质量; ρ_j 为粒子 j 的密度。

根据 Navier-Stokes 方程控制流体运动可得

$$\frac{d\rho_i}{dt} + \rho_i \frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial \mathbf{x}_i} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{g}_i - \frac{1}{\rho_i} \nabla P + \frac{1}{\rho_i} \nabla \tau \quad (11)$$

式中: $\mathbf{v}_i$ 为粒子 i 的速度向量; $\mathbf{x}_i$ 为粒子 i 的位置向量; $\mathbf{g}_i$ 为粒子 i 的重力向量; P 为流体压强; τ 为剪切应力。

令连续方程中的 $\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial \mathbf{x}_i} = \nabla \mathbf{v}$,可得 SPH 算法中流

体动力学公式的连续性方程和动量方程为

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \mathbf{v}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (12)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{g}_i - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{P_j}{\rho_j^2} + \frac{P_i}{\rho_i^2} \right) \nabla_i W_{ij} + \frac{\nabla \tau}{\rho_i} \quad (13)$$

式中: ρ_i 为粒子 i 的密度; P_i 和 P_j 分别为作用在粒子 i 和 j 上的流体压强; $\mathbf{v}_{ij}$ 为粒子 i 与 j 的相对速度。

利用 SPH 算法求解式(12)、(13),可将连续流体离散为携带质量、速度、密度等物理量的粒子集合,得到粒子速度 $\mathbf{v}_i$ 和粒子压强 P_i 及一定范围的粒子密度 ρ_i 。根据牛顿第二定律,对时间 t 积分可得到不同速度下的轮胎与道面接触范围内的压强分布,在接触面积范围内积分可得到雪浆对轮胎的作用力;对于雪浆飞溅,通过统计危险区域内的粒子数量可得到飞溅质量。

2 轮胎-雪浆污染刻槽道面有限元模型

基于有限元平台,应用 SPH 算法构建轮胎-雪浆污染刻槽道面有限元模型,以模拟轮胎向前匀速滚动并驶过雪浆污染刻槽道面的过程,且进行动态显式求解分析(ABAQUS/EXPLICIT)^[15]。模型主要由带沟槽子午线轮胎模型、刻槽道面模型、雪浆模型3部分组成。

2.1 轮胎模型

选取空客 A320 为代表机型,主起落架轮胎型号为 46×17R20,忽略轮胎行驶过程中的热量传递及轮胎内帘线和内胎面等复杂的内部结构,轮胎为超弹性橡胶材料(Mooney-Rivlin 超弹性本构模型)与轮毂的钢材材料构成^[15],其主要参数如表1所示^[20]。

采用扫掠的网格划分方式,沿轮胎径向与环向进行划分。为使轮胎能以稳定状态沿直线滚动前进,对轮胎高度方向与左右两侧施加位移约束;对轮胎内部设置 1 140 kPa 的胎压并在轴心处施加与轮胎轴载等效的竖向位移以模拟轮胎负载状态,最后在轮胎轴心处施加线速度及相应的角速度,实现轮胎滚动状态。飞机初始单轮轴载为 153 kN,考虑升力作用,不同速度下机轮轴载 G_L 的计算公式为^[15]

表 1 A320 轮胎主要参数

Table 1 Main parameters of A320 tire

参数		数值
轮胎结构参数	直径/cm	116.8
	内径/cm	50.8
	胎面宽度/cm	43.2
	沟槽个数	4
	沟槽宽度/mm	10
	沟槽深度/mm	9
	中心沟槽间距/mm	84
	两侧沟槽间距/mm	62
橡胶材料参数	橡胶正定常数	9.9×10^6
	橡胶正定常数	8.8×10^6
	橡胶不可压缩常数	1.0×10^{-7}
轮毂钢材料参数	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 800
	弹性模量/MPa	2.0×10^4
	泊松比	0.3

$$G_L = \frac{Q(J - C\rho_a v^2 S/2)}{n_c n_w} \quad (14)$$

式中: Q 为飞机主起落架分配系数,取 0.95; C 为升力系数,取 0.59; ρ_a 为空气密度,取 $1.293 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; v 为机轮速度; S 为机翼面积,取 122.4 m^2 ; J 为飞机自身重力,取 $6.45 \times 10^5 \text{ N}$; n_c 为主起落架个数,取 2; n_w 为起落架轮胎个数,取 2。

2.2 刻槽道面模型

道面模型长度为 6 m、宽度为 3 m,为节约计算成本,仅在道面局部区域设置刻槽,刻槽区域长度为 4 m,宽度为 3 m,刻槽道面模型及不同刻槽横断面如图 4 所示。刻槽道面材料为水泥混凝土,在材料属性中设置其密度为 $2\,500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,弹性模量为 35 GPa,泊松比为 0.15。

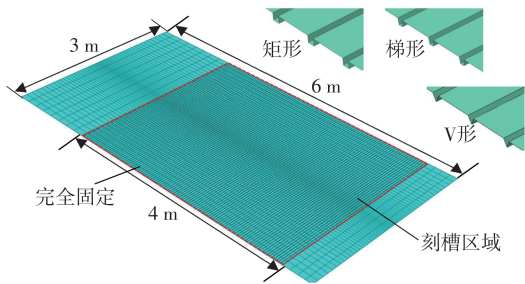


图 4 刻槽道面模型

Fig. 4 Grooved pavement model

本文研究的机轮“滑雪”问题仅涉及跑道面层表面纹理,不涉及跑道结构力学性能,因此将跑道表面简化为刚性壳体,刻槽道面模型采用的网格单元为 S4R(四节点曲面薄壳道面模型)。分别建立了矩形刻槽、梯形刻槽与 V 形刻槽进行对比分析。参考中国民航局发布的《民用机场水泥混凝土面层施工技

术规范》(MH 5006—2015)及相关文献^[21],刻槽参数如表 2 所示。

表 2 刻槽道面参数

Table 2 Parameters of grooved pavements mm

刻槽类型	槽宽	槽深	相邻槽中心间距
矩形	6	6	32
梯形	上宽 6、下宽 4	6	
V 形	上宽 6	6	

网格划分时,由于轮胎沿直线滚动前进,仅与刻槽道面宽度方向的中心区域接触,为提高计算速度,对道面模型在宽度方向进行双精度的局部加密,加密方向由两端指向中间,在宽度方向上形成中间密、两端疏的网格划分效果。在边界约束中,需对刻槽道面模型设置“完全固定”的约束条件,以保证刻槽道面与轮胎在模拟过程中的稳定接触。

2.3 雪浆模型

雪浆模型主要通过 SPH 光滑粒子流方法实现,按常规有限元法定义网格单元(C3D8R),运算开始后根据网格单元和粒子一一对应的原则,将预设网格单元转化为相应数量的粒子单元(PC3D)。但由于 SPH 方法具有将常规单元转化为粒子的特点,它无法在分析开始前针对雪浆区域的表面或边界设置约束。文献[15]在污染物模型的底部与四周设置了约束雪浆污染物运动的壳单元边界。但经多次试算发现,当雪浆污染物按厚度划分为多层网格时,轮胎驶过污染区域仍会出现粒子穿过道面的“泄出”现象。为提高计算精度,使雪浆模型在高度方向的网格层数可根据雪浆厚度调节,同时确保雪浆粒子与轮胎稳定接触且不“泄出”,本文在雪浆模型四周向内 0.01 m 划分部件,以四周向内划分的方式建立无限元边界,模拟无反射边界,如图 5 所示。该边界要求雪浆部件整体以扫掠方式划分网格,雪浆向四周内部划分的边界区域扫掠方向均指向外,且边界宽度方向仅能划分一层网格。该边界区域的网格单元类型需先选择为 EXPLICIT 单元库中的温度-位移耦合单元(C3DBT),模型整体设置完毕后,在模型的 INP 文件中将该单元替换为无限单元(CIN3D8)。

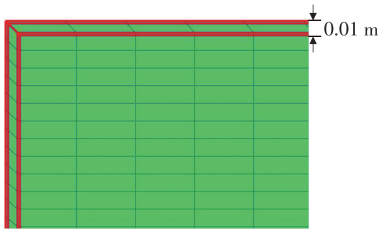


图 5 雪浆内部无限元边界区域

Fig. 5 Infinite element boundary area inside snow slurry

为实现该边界对雪浆 SPH 粒子单元的约束作用,将边界外侧约束条件设置为“铰接”。由于该无限元边界仅分布在雪浆四周,对雪浆底部无约束作用,为防止雪浆粒子在轮胎驶过污染道面时穿越道面板逸出,将道面板作为雪浆模型的底部边界。

雪浆污染物模型建立后,根据第 1.2 节所述 SPH 粒子离散原理,将雪浆模型中的网格单元(C3D8R)转换为 SPH 粒子(PC3D)。转化过程如图 6 所示,雪浆模型如图 7 所示。

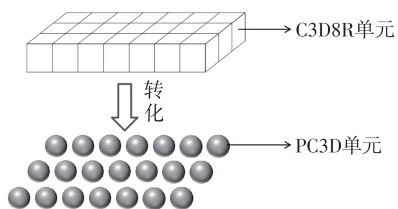


图 6 雪浆污染物 SPH 粒子转化

Fig. 6 SPH particle transformation of snow slurry pollutants

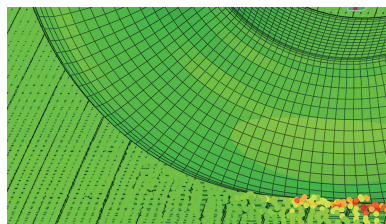


图 7 雪浆粒子模型

Fig. 7 Snow slurry particle model

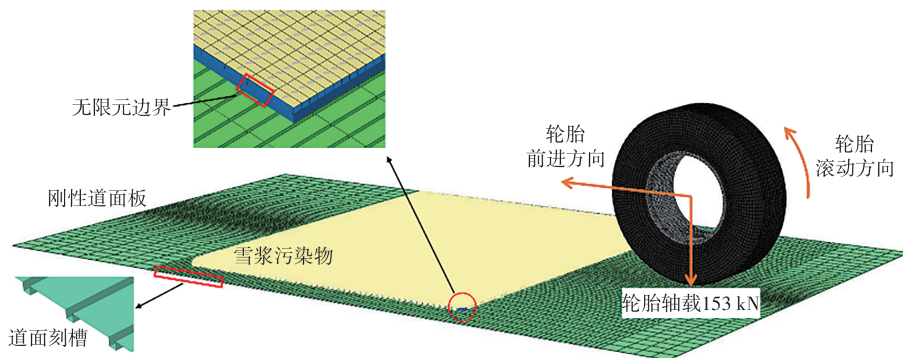


图 8 轮胎-雪浆污染刻槽道面有限元模型

Fig. 8 Finite element model of tire-grooved pavement with snow slurry pollution

对轮胎施加相应的竖向位移,使其压至道面上,与道面板的接触类型为面面接触,道面为完全固定状态,道面板与雪浆模型设置为通用接触。至此,对雪浆模型内侧区域底部在高度方向的运动与模型内部侧面在平面的运动设置约束,实现雪浆粒子与轮胎的稳定接触。

数据传递流程:轮胎在胎压、升力作用下向前滚动的过程中,对道面产生一个压力,道面对轮胎产生一个支撑力,同时轮胎与粒子相互作用,使粒子产生运动速度和压强,从而得到道面支撑力。具体求解

雪浆模型的长度、宽度均设置为 2.5 m。由文献[15]可知,雪浆的最大允许起降厚度约为 26 mm,故将雪浆污染物模型的厚度范围设置为 5~26 mm。

雪浆材料的属性设置分为 2 部分,对于雪浆模型内部转化为 SPH 粒子的区域,其材料参数如表 3 所示。对于无限元边界的雪浆模型区域,仅设置密度、弹性模量与泊松比。边界密度与雪浆内侧区域一致,边界弹性模量设置为 0.5 GPa,由于雪浆为冰水混合物,水的泊松比为 0.5,冰的泊松比为 0.3^[22],因此雪浆的泊松比近似取为 0.4。

表 3 雪浆模型内部区域材料参数

Table 3 Material parameters in the inner area of snow slurry model

参数	取值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	720
声波在流体中的传播速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1 400
雪浆黏度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	0.212 5~0.247 0
粒子运动线性拟合斜率常数	0
格鲁奈森参数	0

将搭建完成的轮胎模型、刻槽道面模型、雪浆模型按图 8 所示位置进行装配,其中轮胎模型位置沿前进方向设置在距雪浆污染物模型的 1 m 处,雪浆污染物模型放置在道面刻槽区域的中心位置。

过程见第 1.2 节中 SPH 方程。

图 9(a)~(c)为不同时刻轮胎驶过刻槽道面时雪浆与轮胎相互作用的横向位移特征,可见轮胎驶过雪浆污染区域后,雪浆在轮胎作用下均向模型两侧排开,在模型底部形成以轮胎为中心、沿行驶来向呈放射状的“波及区”,且轮胎沟槽的排雪作用明显。相较于传统欧拉方法,SPH 无网格算法无需划分固定网格,可有效避免雪浆在刻槽道面疏导、轮胎沟槽排雪过程中因大变形产生的网格畸变问题,能更精准地捕捉雪浆飞溅、流体-轮胎-道面耦合作用的动

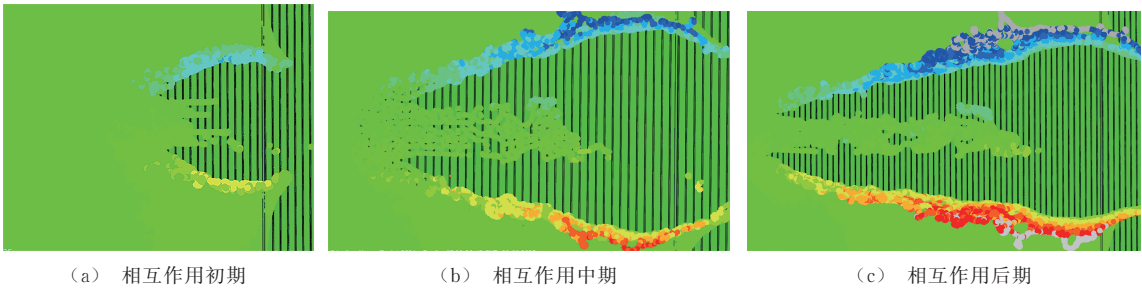


图 9 雪浆横向位移分布特征

Fig. 9 Lateral displacement distribution characteristics of snow slurry

态过程,为该类复杂多物理场相互作用模拟提供了更高效的技术路径。

3 模型合理性验证

3.1 轮胎轴心竖向位移验证

模拟轮胎在平整道面上充气加压、施加单轮轴载至轴心位移稳定的过程。在0~0.06 s对轮胎内部均匀增加压强到1 140 kPa,完成轮胎充气加压。稳定后,轮胎轴心竖直向上的位移为0.028 m。此后保持压强不变,轮胎在0.06~0.20 s内保持稳定状态。在0.2~0.3 s对轮胎轴心施加线性增长的竖直向下的轴载至153 kN。在0.3~0.4 s继续对轮胎施加该大小的轴载,使轴心竖向位移逐渐趋于稳定,其竖直向下的位移为0.022+0.028=0.050 m,如图10所示。

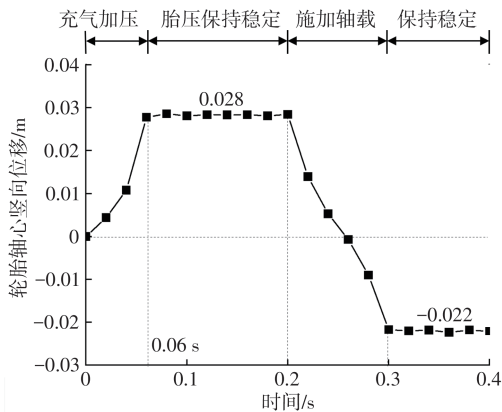


图 10 轮胎轴心竖向位移

Fig. 10 Vertical displacement of tire axis

根据Komandi^[23]提出的轮胎竖向变形量经验公式可得

$$\delta = \frac{1.5G^{0.85}}{b^{0.7}D^{0.43}P_t^{0.6}}(15 \times 10^{-3}b + 0.42) \quad (15)$$

式中: δ 为轮胎轴心的竖向变形量; G 为轮胎轴载; b 为轮胎宽度; D 为轮胎外径; P_t 为轮胎胎压。

将本文的轮胎参数代入式(9),轮胎轴心的竖向变

形量为0.055 m,与0.05 m的相对误差仅为9.1%,因此模型具有合理性。

考虑到现场工况试验难以获取,本文采用文献对比方式进行验证,主要适用于雪浆厚度5~26 mm、轮胎速度40~60 m·s⁻¹的情形,未来可进一步结合实测数据增强模型适用性^[15]。

3.2 雪浆污染物模型尺寸合理性验证

设置雪浆密度为720 kg·m⁻³、厚度为12 mm,轮胎速度分别为40、50、60 m·s⁻¹时,对比分析刻槽道面与光滑道面的道面支撑力、位移阻力的变化情况,并将上述工况的轮胎接地面积平均值列入表4中。

表 4 各速度下矩形刻槽道面与光滑道面轮胎接地面积对比

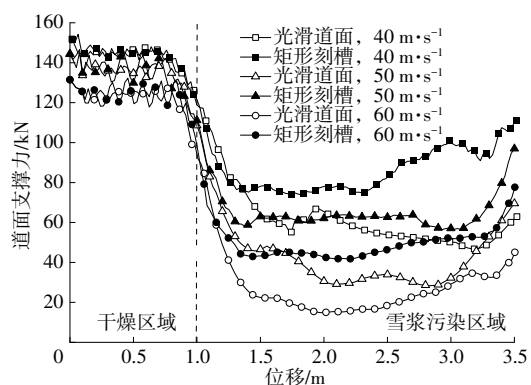
Table 4 Comparison of tire contact areas between rectangular grooved pavement and smooth pavement at different speeds

轮胎速度/ (m·s ⁻¹)	道面刻槽类型	轮胎接地面积/m ²	较刻槽道面降低率/%
40	矩形刻槽	0.096 6	23.8
	光滑道面	0.073 6	
50	矩形刻槽	0.088 4	30.3
	光滑道面	0.061 6	
60	矩形刻槽	0.077 5	35.2
	光滑道面	0.050 2	

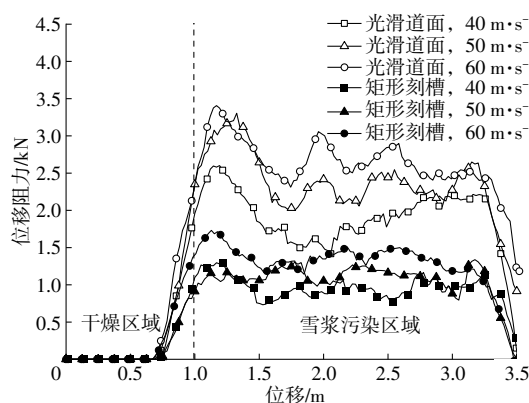
轮胎速度为40~60 m·s⁻¹时,轮胎接地面积降低率均大于20%。可见刻槽道面模型有效疏导了雪浆污染物。因此本文的刻槽道面模型符合实际。

由图11可知,轮胎所受道面支撑力与位移阻力均在雪浆模型长度2.5 m范围内达到稳定阶段。模型长度具有合理性。

将本文建立的无限元边界刻槽模型与文献[15]中的壳单元固定边界无刻槽模型进行对比,分析轮胎以50 m·s⁻¹的速度驶过雪浆污染道面时2类模型的雪浆横向位移特征。由图12可知,在均能保证雪浆粒子与轮胎稳定接触的同时,2类模型的雪浆飞溅变形主要区域一致,雪浆横向位移特征相似,但也能明显看出无限元边界模型因为有刻槽的影响,溅雪粒子在高度、宽度方向有明显



(a) 道面支撑力随位移变化情况



(b) 位移阻力随位移变化情况

图 11 不同速度下轮胎在光滑、刻槽道面上的受力

Fig. 11 Force on tire at different speeds on smooth and grooved pavements

减少。因此认为雪浆污染物模型的宽度尺寸合理。

3.3 轮胎-刻槽道面相互作用验证

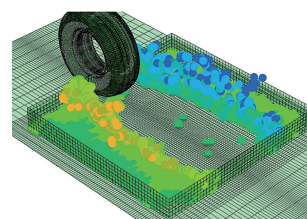
以轮胎所受道面支撑力小于单轮轴载的 10% 及轮胎所受位移阻力最大值对应的轮胎速度为临界危险速度^[17],与 1961 年美国联邦航空管理局与美国国家航空航天局联合进行的大型喷气客机的全比例雪浆滑行试验成果^[24]进行对比。同时考虑到雪浆密度的不同,引入 ESDU(英国工程科学数据组织)发布的轮胎在流体污染物下的临界危险速度公式^[15]

$$\nu_p = 9 \sqrt{P/\sigma} \quad (16)$$

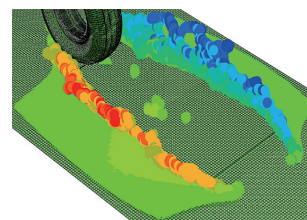
式中: ν_p 为轮胎的临界危险速度; σ 为雪浆密度与水密度之比。

将不同雪浆厚度下飞机临界危险速度的模拟值分别与 NASA 试验结果和式(16)的计算结果进行对比,如表 5 所示。

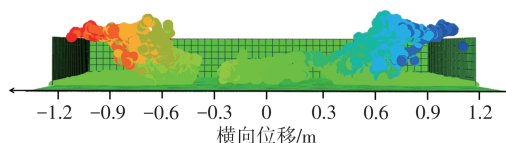
由表 5 可知,与 NASA 试验结果的误差仅为 3.1%~5.3%,与 ESDU 理论值的误差为 1.5%~



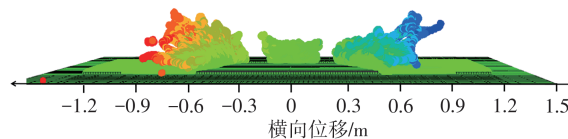
(a) 壳单元固定边界雪浆横向位移特征(无刻槽)



(b) 无限元边界雪浆横向位移特征(有刻槽)



(c) 模型的雪浆横向位移



(d) 模型中无限元边界雪浆横向位移

图 12 不同边界雪浆横向位移特征对比

Fig. 12 Comparison of lateral displacement characteristics of snow slurry with different boundaries

表 5 飞机临界危险速度对比情况

Table 5 Comparison of critical dangerous speed of aircraft

雪浆厚度/mm	临界危险速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	模拟值	NASA 试验结果	ESDU 理论值
12	73	69.5	70.1
16	69	66.9	
20	67	64.3	
24	65	61.7	

7.2%,因此本文有限元模型具有一定可靠性。模拟值略大于 NASA 实测值,其造成的主要原因为模型中道面刻槽的存在疏导了表面流体污染物,提高了飞机临界危险速度。

运用轮胎-雪浆污染刻槽道面有限元模型计算不同雪浆黏度条件下,轮胎所受摩擦力与竖向合力,获得轮胎与道面接触的摩擦因数。取平均值作为摩擦因数代表值,与实测摩擦因数对比,结果见表 6,可知,最大误差为 2.45%,且道面摩擦因数仿

表 6 雪浆污染刻槽跑道表面摩擦因数仿真结果与实测结果对比

Table 6 Comparison between simulation results and measured results of friction coefficient of grooved pavement with snow slurry pollution

条件		温度/℃	—1	—3	—5
		雪浆黏度/(Pa·s)	0.212 5	0.228 0	0.244 7
不同雪浆厚度(mm) 下的摩擦因数结果	3	仿真结果	0.633	0.650	0.668
		实测结果	0.628	0.636	0.652
		误差/%	0.80	2.20	2.45
	6	仿真结果	0.621	0.639	0.657
		实测结果	0.612	0.629	0.648
		误差/%	1.47	1.59	1.39
	12	仿真结果	0.614	0.620	0.632
		实测结果	0.605	0.613	0.635
		误差/%	1.49	1.14	0.47
	18	仿真结果	0.534	0.557	0.581
		实测结果	0.539	0.570	0.573
		误差/%	0.93	2.28	1.40

真结果随雪浆黏度、厚度的变化趋势与实测试验结果一致,进一步说明了本文所建轮胎-雪浆刻槽道面有限元模型的可靠性。

4 轮胎-雪浆污染刻槽道面相互作用

4.1 道面刻槽的影响

在雪浆黏度为 0.212 5 Pa·s、密度为 720 kg·m⁻³

的条件下,令带沟槽轮胎以 50 m·s⁻¹ 的速度驶过厚度分别为 12、16、20、24 mm 的雪浆,分析轮胎在雪浆污染刻槽道面上的受力情况。取达到稳定状态时轮胎所受道面支撑力、位移阻力的代表值,计算轮胎在矩形、V 形刻槽道面受力较在梯形刻槽道面受力的变化率,列入表 7 中,表 7 中降低率与增长率均为矩形、V 形刻槽道面较梯形的变化率。

表 7 各刻槽类型下轮胎所受道面支撑力、位移阻力代表值及变化率

Table 7 Representative values and rate of change for pavement support force and displacement resistance of tire under different groove types

雪浆厚度/mm	梯形刻槽		矩形刻槽				V 形刻槽			
	道面支撑力	位移阻力代	道面支撑力		位移阻力		道面支撑力		位移阻力	
	代表值/kN	表值/kN	代表值/kN	降低率/%	代表值/kN	增长率/%	代表值/kN	降低率/%	代表值/kN	增长率/%
12	64.13	1.05	61.55	4.02	1.14	8.57	61.29	4.43	1.25	19.05
16	56.87	3.09	55.73	2.00	3.47	12.30	53.24	6.38	3.90	26.21
20	49.65	3.41	47.95	3.42	3.70	8.50	47.65	4.03	4.19	22.87
24	46.42	4.11	42.54	8.36	4.25	3.41	41.35	10.92	4.94	20.19

各雪浆厚度条件下,矩形刻槽道面支撑力较梯形刻槽道面降低了 2.00%~8.36%,而 V 形刻槽道面支撑力较梯形刻槽则降低了 4.03%~10.92%;矩形刻槽道面轮胎所受位移阻力则较梯形刻槽道面增加了 3.41%~12.30%,V 形刻槽轮胎所受位移阻力较梯形刻槽道面均增加了 19% 以上。可见 V 形刻槽较其他 2 类刻槽,对道面污染物的疏导能力较低,轮胎与道面的接触受雪浆阻隔更多,轮胎受雪浆污染物的抬升作用更大。

以梯形刻槽为例,设置道面刻槽深度分别为 0 (光滑道面)、2、4、6 mm 的 4 种工况,提取轮胎以不同速度驶过雪浆污染道面时趋于平稳状态的道面支撑力与位移阻力代表值。

由图 13、14 可知,同一雪浆厚度(图 13、14 均为 12 mm)、不同轮胎速度下,轮胎所受道面支撑力随着刻槽深度的减小而逐渐降低,所受位移阻力随着刻槽深度的减小而逐渐增加。将不同道面刻槽深度

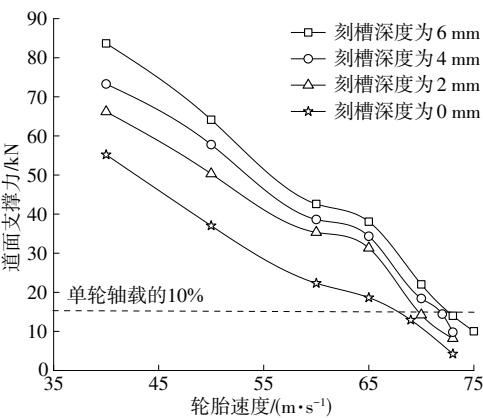


图 13 各道面刻槽深度下支撑力与速度关系曲线

Fig. 13 Relationship curves between support force and speed under different pavement groove depths

下的轮胎位移阻力最大值对应速度与道面支撑力低于单轮轴载的 10% 的临界速度范围进行对比,可得雪浆厚度为 12 mm 时各工况下轮胎的临界危险速度,如表 8 所示,道面刻槽深度越大,位移阻力达到

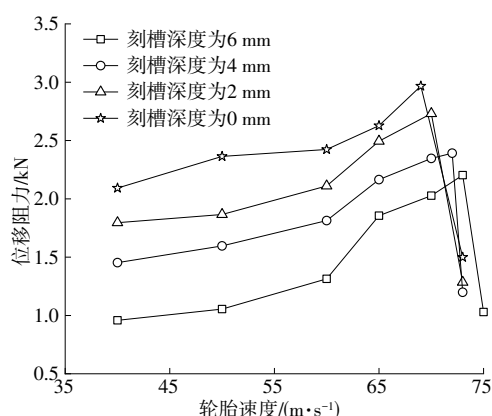


图 14 各道面刻槽深度下位移阻力与速度关系曲线

Fig. 14 Relationship curves between displacement resistance and speed under different pavement groove depths

表 8 不同道面刻槽深度对应轮胎临界危险速度

Table 8 Critical dangerous speed of tire corresponds to grooved depth of different pavements

道面刻槽深度/mm	轮胎临界危险速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
6	73
4	72
2	70
0	69

最大值所对应的轮胎速度越大,因此轮胎临界危险速度也越大。

4.2 轮胎沟槽磨损程度的影响

梯形刻槽道面下,设置轮胎沟槽深度在 10、7、5、3、0 mm(磨损率分别为 0、30%、50%、70%、100%)的条件下,飞机以 $40\sim 60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度经过雪浆黏度为 $0.2125\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、厚度为 12 mm 的雪浆污染刻槽道面。绘制轮胎滚动摩擦力随位移变化曲线,如图 15 所示。

由图 15 可知,轮胎沟槽深度越大,即沟槽磨损程度越小,轮胎所受滚动摩擦力越大,说明此时轮胎在雪浆污染道面上的抗滑性能越好。

将各速度下轮胎滚动摩擦力平稳段曲线的平均值作为代表值列入表 9 中,计算各轮胎沟槽深度下滚动摩擦力较沟槽深度为 10 mm 时的下降率。

由表 9 可知,同一速度下,轮胎所受滚动摩擦力

表 9 不同沟槽深度下轮胎所受滚动摩擦力及下降率

Table 9 Rolling friction force and drop rate of tires under different groove depths

速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	沟槽深度为 10 mm 时轮胎滚动摩擦力/kN	沟槽深度为 7 mm		沟槽深度为 5 mm		沟槽深度为 3 mm		沟槽深度为 0 mm	
		轮胎滚动摩擦力/kN	下降率/%	轮胎滚动摩擦力/kN	下降率/%	轮胎滚动摩擦力/kN	下降率/%	轮胎滚动摩擦力/kN	下降率/%
40	55.86	52.51	6.00	48.10	13.90	39.16	29.89	31.22	44.10
50	45.77	38.66	18.39	35.25	17.57	30.24	29.29	21.83	48.96
60	32.46	27.09	16.65	26.48	18.43	21.38	34.15	14.07	56.67

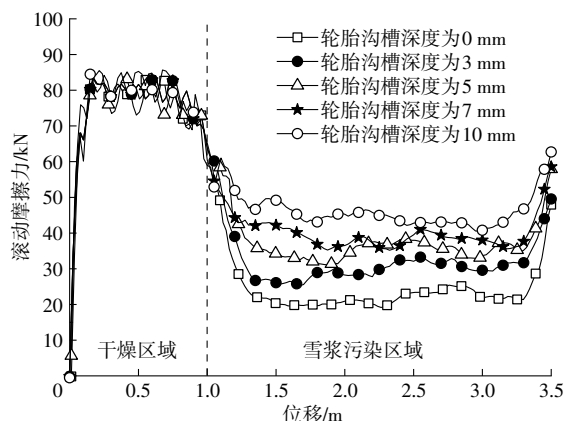


图 15 各轮胎沟槽深度下轮胎所受滚动摩擦力

Fig. 15 Rolling frictions of tire under various tire groove depths

代表值的下降率随轮胎沟槽深度的减小而逐渐增加。当轮胎沟槽深度为 3 mm 时,轮胎沟槽磨损率为 70%,轮胎速度为 $60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时滚动摩擦力已下降 30% 以上,飞机的运行安全受到极大威胁,轮胎需要进行更换。

图 16、17 为同样工况下,轮胎以不同速度经过雪浆污染梯形刻槽道面的道面支撑力、位移阻力代表值,可知同一雪浆厚度(12 mm)下,轮胎沟槽深度越大,轮胎所受道面支撑力越大,支撑力达到单轮轴载的 10% 对应的速度也越高。轮胎沟槽深度为 0~10 mm 时,道面支撑力低于单轮轴载的 10% 的速度范围为 $66\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。

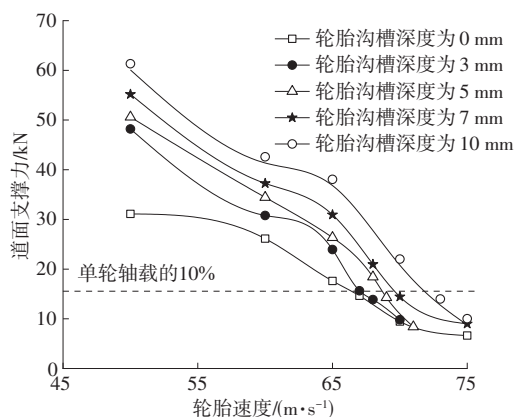


图 16 各轮胎沟槽深度下支撑力与速度关系曲线

Fig. 16 Relationship curves between support force and speed under various tire groove depths

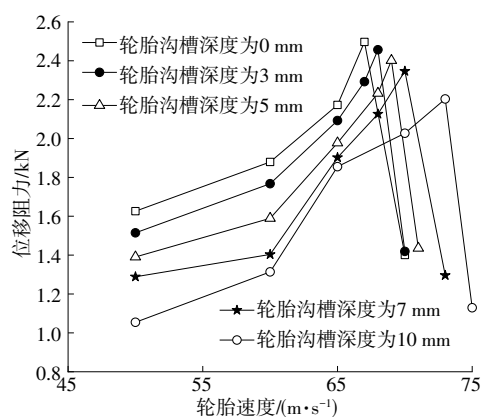


图17 各轮胎沟槽深度下位移阻力与速度关系曲线

Fig. 17 Relationship curves between displacement resistance and speed under various tire groove depths

以道面支撑力低于单轮轴载的10%与位移阻力最大值对应轮胎速度作为临界危险速度,汇总雪浆厚度为12 mm时,不同轮胎沟槽深度下的临界危险速度如表10所示。

表10 不同轮胎沟槽深度对应临界危险速度

Table 10 Different tire groove depths correspond to critical danger speed

轮胎沟槽深度/mm	轮胎临界危险速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
0	67
3	68
5	69
7	70
10	73

由表10可知,同一雪浆厚度、不同轮胎沟槽深度下,轮胎所受位移阻力随着沟槽深度的减小而逐渐增加,且轮胎沟槽深度越大,位移阻力达到最大值所对应的轮胎速度越大,因此轮胎临界危险速度也越大,沟槽深度为10 mm时与0时的临界危险速度相差了 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

4.3 轮胎在雪浆污染刻槽道面上的溅雪量分析

以空客A320配备的CFM56型涡扇发动机为研究对象,发动机风扇直径为1.73 m,起飞功率下的进气道危险区域包括进气道前半半径约为5 m的半圆区域与进气道向后延伸的1.5 m区域,如图18所示。

同时,A320飞机发动机进气道与起落架前轮轴心在沿跑道宽度方向上距离为5.79 m,沿跑道长度方向距离为6.40 m,高度方向上距离为0.68 m^[25],如图19所示。由于本文雪浆污染物模型在跑道长度方向发生溅雪的区域已经完全处于发动机进气道的危险区域内。因此,仅需确认跑道宽度方向与高度方向上与进气道危险区域的重合范围,便可确定雪浆模型溅雪粒子的统计范围。由此可知,进气道危险区域溅雪粒子

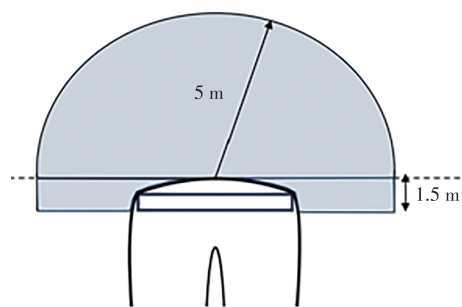


图18 发动机进气道危险区域

Fig. 18 Dangerous area of engine intake port

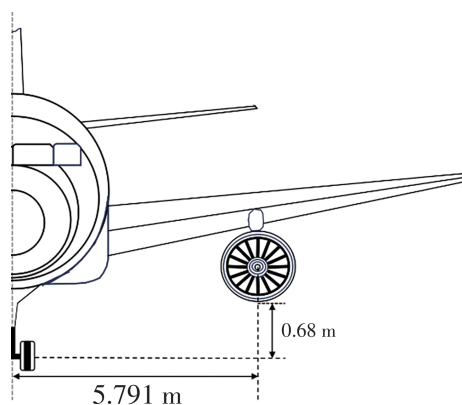


图19 发动机与前轮相对位置

Fig. 19 Position of engine relative to the front tires

的统计范围为:在跑道宽度方向距前轮轴心0.79~10.79 m,在高度方向0~6.55 m的空间区域。

从雪浆厚度、道面刻槽、轮胎沟槽、轮胎速度4个方面,对轮胎在进气道危险区域的溅雪量变化情况进行分析。为提取统计溅雪粒子数量,首先从有限元软件中提取轮胎驶出雪浆污染道面区域时各雪浆粒子的位移数据,再根据进气道危险区域溅雪粒子统计范围对位移数据进行筛选,统计危险区域内的雪浆粒子数量。为将溅雪粒子数量转换为溅雪质量,参照文献[25]中单位时间内吸入发动机内污染物质量进行计算

$$\frac{N_i}{N_s} = \frac{M}{\rho v h b} \quad (17)$$

式中: N_i 为某时刻可能吸入发动机内粒子数; N_s 为该时刻流场内粒子总数; M 为单位时间内可能吸入发动机的雪浆质量。

4.3.1 不同雪浆厚度下轮胎的溅雪量

图20为雪浆厚度分别为12、16、20、24 mm,雪浆黏度为 $0.2125 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时,轮胎在矩形刻槽道面上以 $25\sim 60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度驶过时各工况下进气道危险区域内溅雪量随雪浆厚度的变化情况。发动机进气道危险区域内的溅雪量随雪浆厚度增加而呈现先增大后减小的变化趋势,且不同轮胎速度下,溅雪量均在雪浆厚度为16 mm时达到最大。

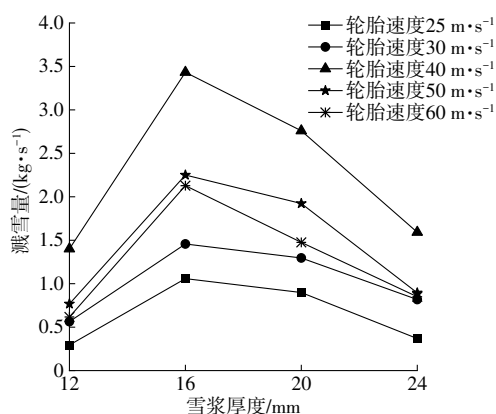


图20 不同速度下轮胎溅雪量随雪浆厚度变化曲线

Fig. 20 Variation curves of snow splash quantity of tire with thickness of snow slurry under different speeds

4.3.2 不同道面刻槽类型下轮胎的溅雪量

分别比较了道面刻槽不同类型和深度2种工况在不同雪浆厚度下发动机进气道危险区域内的溅雪量的变化情况。由图21可知,轮胎速度为 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,梯形刻槽溅雪量最小,矩形刻槽次之,V形刻槽溅雪量最大,其中V形刻槽的溅雪量约为 $3.75\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,而梯形刻槽的溅雪量约为 $2.9\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,较V形刻槽溅雪量减少23%,可见梯形刻槽对轮胎溅雪的抑制作用更加优越。由图22可知:随着道面刻槽深度的增加,道面对雪浆的疏导能力逐渐提升,轮胎溅雪量逐渐减少;2 mm刻槽与6 mm刻槽道面相比,溅雪量增长率均在10%~30%,可见6 mm道面刻槽对轮胎溅雪的抑制作用更佳。同时在雪浆厚度为16 mm时,道面溅雪量均达到最大值。当雪浆厚度超过16 mm,其吸收冲击的能量增强,对流体飞溅有抑制作用^[26],溅雪量逐渐减少。

4.3.3 不同轮胎沟槽磨损程度下轮胎的溅雪量

以不同轮胎沟槽深度对应轮胎沟槽磨损程度,

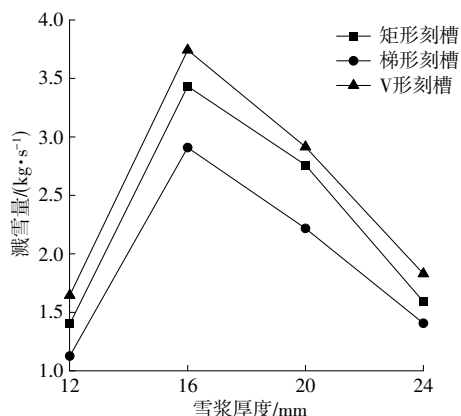


图21 不同道面刻槽类型下溅雪量随雪浆厚度变化曲线

Fig. 21 Variation curves of snow splash quantity with thickness of snow slurry under different groove types

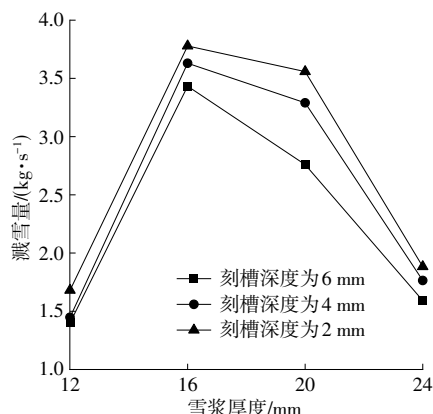


图22 不同矩形刻槽深度下溅雪量随雪浆厚度变化曲线

Fig. 22 Variation curves of snow splash quantity with thickness of snow slurry at different rectangular groove depths

图23比较了同一雪浆厚度(12 mm)下不同轮胎速度的溅雪量随轮胎沟槽深度增加的变化情况。分析可知,不同轮胎速度的溅雪量均随沟槽深度增加而逐渐减小。

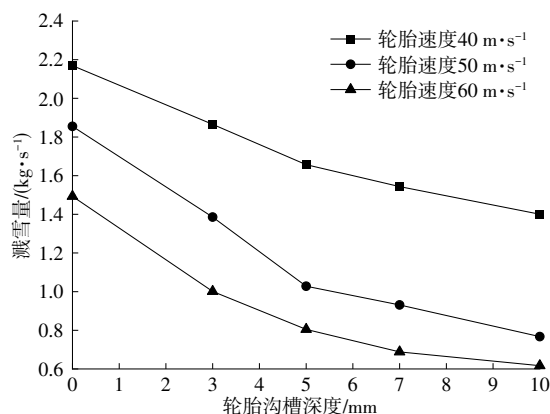


图23 不同轮胎沟槽深度下的溅雪量

Fig. 23 Snow splash quantity at different tire groove depths

以新轮胎即沟槽深度为10 mm为标准,当磨损程度为70%(轮胎沟槽深度为3 mm)时,溅雪量增加了33.19%。当轮胎速度为 $50\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上且磨损程度为100%(轮胎沟槽深度为0)时,轮胎溅雪增长率达到140%以上,溅雪量已增加1倍以上,轮胎性能损失极大,此时亟需更换轮胎。由此说明,轮胎沟槽深度对于抑制轮胎溅雪具有显著作用。

4.3.4 不同轮胎速度下轮胎的溅雪量

由图24可知,雪浆厚度不同,随着速度增加轮胎溅雪量先增大后减小,且在轮胎速度为 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时产生的溅雪量最大。对于同一雪浆厚度,当轮胎速度较小(即小于 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)时,轮胎给予雪浆粒子的动能也较少,无法使大部分雪浆进入进气道危险区域,因此在危险区域的溅雪量较少。当轮胎速度逐渐增大,飞溅的雪浆粒子动能增加,分

布更加广泛,更多的雪浆粒子进入了进气道危险区域。随着轮胎速度大于 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 轮胎给予雪浆粒子的动能足以使部分雪浆直接掠过进气道危险区域。此外,当速度逐渐趋近轮胎临界危险速度,雪浆给予轮胎的抬升作用愈加明显,轮胎与道面的接触面积减小,不再能完全排开胎面底部的污染物,因此危险区域内的轮胎溅雪量均出现缓慢下降的现象。

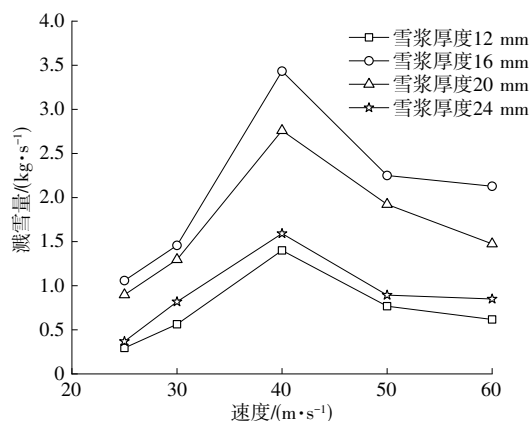


图24 轮胎溅雪量随速度变化情况曲线

Fig. 24 Variation curves of snow splash quantity of tire with speed

5 结 语

(1)雪浆污染会显著增加飞机滑行风险,而刻槽道面可有效提升其抗污染能力。综合比较表明,梯形刻槽道面在雪浆环境下的性能最优,表现为更高的道面支撑力、更低的位移阻力以及对发动机进气道危险区域的溅雪量更少。建议易受雪浆影响的机场采用梯形刻槽道面来提高飞机运行安全。

(2)道面刻槽深度每磨损2 mm,轮胎位移阻力增加0.5 kN,同时溅雪风险上升。当轮胎沟槽深度磨损至3 mm时,其对溅雪的抑制效果显著减弱,应视为轮胎更换的临界阈值。

(3)建议机场定期检查并维护道面和轮胎,并结合磨损程度评估安全阈值,帮助飞行员更好的判断进近速度,提高飞机滑行安全。

(4)本研究为雪浆污染道面刻槽设计与轮胎防滑策略提供了理论依据,但在模型参数泛化、温度耦合效应等方面仍有待深入,未来可进一步拓展研究维度,包括温度变化引发的雪浆黏度动态波动对轮胎-道面相互作用的影响、不同机型轮胎结构参数差异带来的性能适配性分析,以及考虑实际飞机制动过程中刹车系统对机轮滑移率的控制问题等,为机场设施韧性提升提供更全面的技术支撑。

参考文献:

References:

- [1] NORHEIM A, SINHA N K, YAGER T J. Effects of the structure and properties of ice and snow on the friction of aircraft tyres on movement area surfaces[J]. Tribology International, 2001, 34(9): 617-623.
- [2] KLEIN-PASTE A, HUSEBY A B, ANDERSON J D, et al. Braking performance of commercial airplanes during operation on winter contaminated runways[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 79/80: 29-37.
- [3] CAI J, DU N Z, ZHOU N, et al. Numerical study of the tire hydroplaning behavior of aircraft on grooved concrete pavement[J]. PLoS One, 2023, 18(11): e0292701.
- [4] 蔡靖,张恒,李岳,等. 道面摩擦不平衡对飞机着陆滑行参数影响[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(5): 12-24.
CAI Jing, ZHANG Heng, LI Yue, et al. Influence of unbalanced pavement friction on landing taxiing parameters of aircraft[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(5): 12-24.
- [5] HAYS D F, BROWNE A L. The physics of tire traction: Theory and experiment[M]. Boston: Springer, 1974: 99-139.
- [6] NESBITT T R, BARRON D J. Prediction of driving traction performance on snow[J]. SAE Technical Paper, 800836.
- [7] CHOI J H, CHO J R, WOO J S, et al. Numerical investigation of snow traction characteristics of 3-D patterned tire[J]. Journal of Terramechanics, 2012, 49(2): 81-93.
- [8] SETA E, KAMEGAWA T, NAKAJIMA Y. Prediction of snow/tire interaction using explicit FEM and FVM[J]. Tire Science and Technology, 2003, 31(3): 173-188.
- [9] 王亚伟. 高海拔公路隧道洞口段积雪路面轮胎抗滑性能数值模拟研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2019: 46.
WANG Ya-wei. Numerical simulation of anti-sliding of tire on snowy road in tunnel section of high-cold region[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019: 46.
- [10] 孟恩杰. 典型冰雪路面安全驾驶车速机理分析与数学建模[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2020: 62.
MENG En-jie. Mechanism analysis and mathematical model of safe driving speed on typical ice-snow road[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2020: 62.
- [11] VAN ES G W H. Method for predicting the rolling resistance of aircraft tires in dry snow[J]. Journal of Aircraft, 1999, 36(5): 762-768.
- [12] 王丙元, 马玉玲, 于之靖, 等. 冰雪条件下机场跑道摩擦系数建模与仿真研究[J]. 中国民航大学学报, 2010, 28(2): 32-34.
WANG Bing-yuan, MA Yu-ling, YU Zhi-jing, et al. Modeling and simulation on friction coefficient of airport runway with snow and ice surface[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2010, 28(2): 32-34.
- [13] KLEIN-PASTE A, SINHA N K. Comparison between rubber-ice and sand-ice friction and the effect of loose snow contamination[J]. Tribology International, 2010, 43(5/6):

- 1145-1150.
- [14] KLEIN-PASTE A, BUGGE H J, HUSEBY A B. A decision support model to assess the braking performance on snow and ice contaminated runways[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 117: 43-51.
- [15] 李 琪. 雪污染条件下轮胎与道面相互作用研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2022: 26.
- LI Qi. Research of tire-pavement interaction in snow contaminated conditions[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2022: 26.
- [16] 王永繁. 机场道面积水区域飞机行驶力学特性研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2015: 13.
- WANG Yong-fan. Mechanics study on the water areas of airport pavement in conditions of aircraft taxiing[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2015: 13.
- [17] 宗一鸣. 湿滑道面条件下轮胎力学行为与飞机着陆安全问题研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2017: 20.
- ZONG Yi-ming. Study on the mechanical properties of aircraft tire and safety problem in landing on wet-pavement [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017: 20.
- [18] 张海泉. 沥青路面潮湿与积水条件下典型车辆制动行为研究[D]. 南京: 东南大学, 2016: 23.
- ZHANG Hai-quan. Study on braking behavior of typical vehicle under moist or water asphalt pavement condition[D]. Nanjing: Southeast University, 2016: 23.
- [19] 蔡 靖, 黄钰岱, 李 琪, 等. 飞机轮胎-湿滑道面相互作用SPH算法仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(1): 53-62.
- CAI Jing, HUANG Yu-dai, LI Qi, et al. Simulation and analysis of SPH algorithm for interaction of aircraft tire-wet pavement[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(1): 53-62.
- [20] 李 岳, 宗辉杭, 蔡 靖, 等. 飞机轮组滑水行为与道面积水附加阻力[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(5): 1099-1107.
- LI Yue, ZONG Hui-hang, CAI Jing, et al. Hydroplaning behavior of aircraft wheel group and additional resistance due to accumulated water on pavement [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(5): 1099-1107.
- [21] 范 慧. 机场沥青混凝土刻槽道面耐久性及安全性研究[D]. 西安: 长安大学, 2009: 65.
- FAN Hui. Study on durability and safety of groove in airport asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009: 65.
- [22] 王延林, 郭 麒, 孙珊珊, 等. 冰与斜面结构作用过程的离散元模拟与分析[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(9): 1168-1175.
- WANG Yan-lin, GUO Qi, SUN Shan-shan, et al. Discrete element simulation and analysis of ice-inclined structure interaction[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(9): 1168-1175.
- [23] KOMANDI G. Determination of adhesive parameters characterizing the interaction of pneumatic tires and concrete pavement from pull-slip curves[J]. Journal of Terramechanics, 1975, 12(3/4): 109-117.
- [24] HORNE W B, JOYNER U T, LELAND T J W. Studies of the retardation force developed on an aircraft tire rolling in slush or water [R]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 1960: 552.
- [25] 刘 畅. 飞机轮胎溅水仿真分析方法与应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017: 40.
- LIU Chang. Simulation analysis method of water spray of aircraft tyre[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017: 40.
- [26] VANDER WAL R L, BERGER G M, MOZES S D. Droplets splashing upon films of the same fluid of various depths [J]. Experiments in Fluids, 2006, 40(1): 33-52.