

文章编号: 1674-8190(2023)05-152-10

基于 SPH 方法的飞机轮胎滑水仿真分析计算

肖刘炜^{1,2}, 刘斌³, 徐绯², 冯威², 宋金辉¹, 祁旭亮¹, 毛聪聪¹

(1. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

(2. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(3. 西北工业大学 第 365 研究所, 西安 710065)

摘要: 轮胎滑水会导致轮胎与地面之间的摩擦力急剧减小, 增加飞机起降距离, 进而影响飞行安全, 因而需要开展关于飞机轮胎滑水的研究。针对飞机轮胎滑水问题, 采用 FEM 方法建立简化轮胎模型并通过实验进行模型验证, 采用 SPH 方法建立积水模型, 进而建立轮胎—积水—道面相互作用的轮胎滑水模型, 分析不同影响因素和不同台面构型对轮胎滑水的影响。结果表明: 水深越大, 轮胎越容易发生滑水, 但水深大于 6 mm 之后, 水深对轮胎滑水的影响较小; 轮胎速度、胎压、轮载越大, 越容易发生滑水; 沟槽宽度增加, 轮胎滑水速度提高, 但稳定性会降低; 轮胎磨损越严重, 越容易发生滑水; 沟槽数量越多, 临界滑水速度越大。

关键词: 飞机轮胎; SPH 方法; 轮胎滑水; 流固耦合; 轮胎沟槽

中图分类号: V214

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.05.19

Simulation analysis and calculation of aircraft tire hydroplaning based on SPH method

XIAO Liuwei^{1,2}, LIU Bin³, XU Fei², FENG Wei², SONG Jinhui¹, QI Xuliang¹, MAO Congcong¹

(1. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

(2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(3. The 365th Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aircraft tire hydroplaning can cause a sharp decrease in friction between it and the ground, increasing the takeoff and landing distance of the aircraft, and thus affecting flight safety. Therefore, it is necessary to carry out research on airplane tire hydroplaning. Aiming at the tire hydroplaning problem of aircraft tires, a simplified tire model was established by FEM method and verified by experiments. A water model was established by SPH method, and finally a tire hydroplaning model with the interaction of tire, water and pavement was established. The influence of different influencing factors and different tire configurations on tire hydroplaning was analyzed. The results show that, the greater the water depth, the more likely occur the tire hydroplaning, but after the water depth is greater than 6 mm, the water depth on the tire hydroplaning effect is small; The greater the tire speed, tire pressure and wheel load, the more likely the tire hydroplaning; With the increase of groove width, the tire hydroplaning speed increases, but the stability decreases. The more severe the tire abrasion, the more likely it is to tire hydroplaning; The greater the number of grooves, the greater the critical water skiing speed.

Key words: aircraft tire; SPH method; tire hydroplaning; fluid solid coupling; tire groove

收稿日期: 2023-06-19; 修回日期: 2023-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(11972309)

通信作者: 刘斌, liubin@nwpu.edu.cn

引用格式: 肖刘炜, 刘斌, 徐绯, 等. 基于 SPH 方法的飞机轮胎滑水仿真分析计算[J]. 航空工程进展, 2023, 14(5): 152-161.

XIAO Liuwei, LIU Bin, XU Fei, et al. Simulation analysis and calculation of aircraft tire hydroplaning based on SPH method[J].

Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(5): 152-161. (in Chinese)

0 引言

轮胎滑水的相关研究始于汽车轮胎领域^[1-2],但随着航空领域的发展以及飞机冲出/偏出跑道事故频发^[3-4],飞机轮胎滑水问题逐渐被重视。飞机轮胎发生滑水之后,轮胎与地面之间的摩擦力急剧减小,飞机操控难度增加,容易引发飞机安全事故。

根据对航空安全网(Aviation Safety Network,简称ASN)上自1919年以来所有记录的飞行事故进行统计筛查,发现共有298起明确记载与湿跑道或污染跑道有关的飞行事故,其中有276起事故,飞机最终冲出或偏出跑道,且失事飞机中,超过半数飞机无法修复,更是有33起事故被记录有人员伤亡,累计死亡人数高达650人。

典型的污染跑道事故有:1958年2月6日,Air-speed AS. 57 Ambassad-or2型运输机在德国慕尼黑黑机场起飞时,由于跑道积雪导致飞机冲出跑道,造成23人死亡^[5]。2007年7月17号,一架A320-233飞机于雨后天在巴西圣保罗孔戈尼亚斯机场着陆时偏出跑道,撞上附近的大楼和加油站并引起火灾,造成199人遇难^[6]。2016年4月6号,Nextjet航空公司的一架BAe ATP客机在瑞典威廉敏娜机场着陆,由于跑道覆盖有5 mm厚的雪水,导致飞机偏出跑道且右襟翼损坏^[7]。

1963年,NASA进行了大量飞机轮胎滑水试验,并提出轮胎临界滑水速度公式,简称NASA公式^[8]。之后,国内外诸多研究者对飞机轮胎滑水问题开展了大量研究。T. J. Yager^[9]通过轮胎滑水试验,建立了轮胎临界滑水速度与路面横向纹理、花纹构成之间的关系;G. W. H. Van^[10]建立了临界滑水速度理论模型,并对各种型号的飞机轮胎进行了临界滑水速度的预测;G. P. Ong等^[11]、P. O. Chim等^[12]研究了飞机制动系数与轮胎胎纹类型、胎压之间的关系;S. K. Srirangam等^[13]在ABAQUS软件中计算得到了轮胎完全锁死相比于轮胎自然滚动更容易发生滑水的结论;H. C. Jung等^[14]研究发现不同的花纹构型对轮胎滑水具有不同程度的影响;Y. M. Ding等^[15]研究发现载重轮胎或轮胎充气压力会正向增加滑水速度;E. L. Sayegh等^[16]运用Murnhanhan状态方程和SPH方法建模并讨论了影响轮胎滑水速度的因素。国内,蔡靖等^[17]发现当轮胎磨损率达到使轮胎沟槽深度小于当前道面的水膜厚度时,轮胎临界滑水速度会大幅下降;张丽霞等^[18]分析了轮胎气压、负

载等因素对临界滑水速度的一般规律;杨洋等^[19]通过光学扫描捕捉并重构了具有SMA-13道面纹理特征的道面子模型,基于真实道面分析了机轮滑水性能;李岳等^[20]以道面积水附加阻力作为轮胎滑水的判据,并指出轮胎滑水后,附加阻力将迅速降低。

目前,大多数针对轮胎滑水的仿真分析,主要采用水流冲击轮胎表面的模型,以水流的冲击速度表示轮胎的滚动速度,尽管此类模型具有计算量小、易于分析的特点,但未考虑轮胎滚动的影响,且轮胎运动未进入数值稳定状态,其模型计算可能与实际滚动滑水状态有差别。因此,本文采用SPH-FEM耦合的方法,运用LS-DYNA计算软件模拟轮胎滚动平衡和轮胎入水滑水的过程,并逐一讨论各影响因素对轮胎滑水的影响。

1 轮胎滑水现象

当飞机跑道被积水污染,飞机轮胎经过积水时如图1(a)所示,将积水隐藏后如图1(b)所示,此时轮胎与地面之间可分为3部分,分别为水膜区域、过渡区域和直接接触区域^[21]。当飞机轮胎冲击到积水时,处于轮胎下方的积水来不及被排开,而积水产生的动水压会将轮胎前端抬离地面。随着飞机轮胎速度增大,水膜区域逐渐增大,而直接接触区域逐渐减小。当飞机轮胎具有一个足够大的速度时,直接接触区域将减小为0,轮胎与地面之间只有水膜区域,既轮胎与地面完全脱离,飞机轮胎发生完全滑水,并且此时的速度为飞机临界滑水速度。

NASA提出的经典临界滑水速度计算公式(简称NASA公式)^[22]如下:

$$V = 6.35\sqrt{P} \quad (1)$$

式中: P 为轮胎充气气压; V 为临界滑水速度。

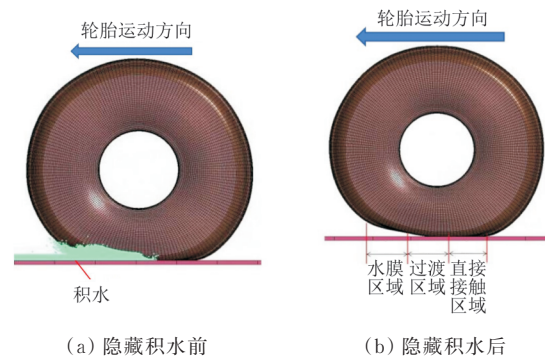


图1 滑水时轮胎与地面接触区域

Fig. 1 Tire contact area during water skiing

2 模型建立及检验

2.1 简化轮胎模型建立

现今客机基本采用三点式起落架布局,飞机前轮在飞机地面滑跑过程中起控制转向和支撑作用,一旦飞机前轮发生滑水,前轮将无法为飞机提供控制转向的功能,这将增大飞行员对飞机的操控难度,增加飞机冲出/偏出跑道的风险。本文根据某客机前轮构型建立轮胎有限元模型。根据轮胎构型切面图建立轮胎切面二维网格模型,并绕轮轴旋转一周得到三维轮胎网格元模型,如图 2 所示。轮胎直径为 586 mm,宽 189 mm。真实轮胎有些带有翻边结构,如图 2(a)所示,但翻边结构不影响轮胎滑水,因此本文在建立轮胎模型时,不考虑翻边结构。

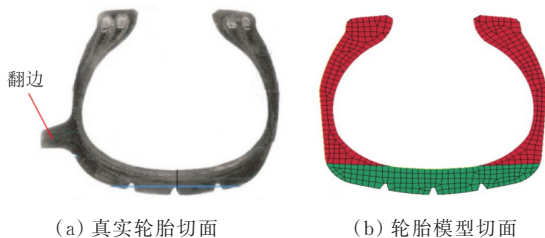


图 2 轮胎细节模型
Fig. 2 Tire detail model

真实的航空轮胎结构复杂,由覆盖层、钢丝束层、胎体帘子布层等组成,如图 3 所示。获取轮胎各组成部分的材料参数较为困难,因此本文将轮胎内部结构简化为内胎、胎面、胎侧和轮毂 4 部分组成。其中内胎为轮胎内侧的一层壳单元,采用弹性材料,用于加载胎压,模拟轮胎胎压;胎面和胎侧为实体单元,采用超弹性材料 Mooney-Rivlin^[23],构成轮胎外形,模拟轮胎的受载变形;轮毂为刚体并采用壳单元,用于加载轮载和转动速度。

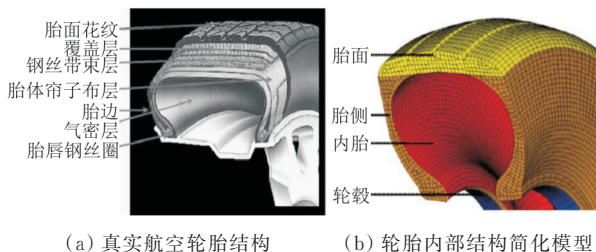


图 3 轮胎模型简化
Fig. 3 Tire model simplification

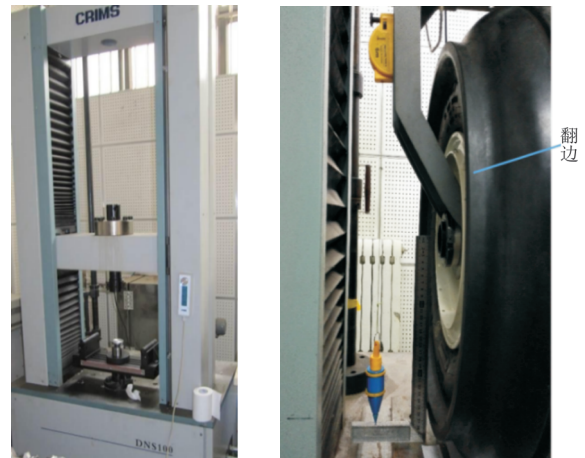
轮胎模型的材料参数如表 1 所示。

表 1 轮胎模型的材料参数
Table 1 Material parameters of tire models

轮胎部位	密度(ρ) / ($\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$)	ν	弹性材料参数		弹性模量 (E)/MPa
			A	B	
胎面	0.001 165	0.49	3	2	
胎侧	0.001 165	0.49	2.5	2	
内胎	0.001 165	0.49			30

2.2 轮胎模型检验

为检验轮胎模型的正确性,将真实轮胎开展轮胎静力加载试验,获取轮胎的载荷一位移曲线和轮胎压痕。静力试验使用的试验机为 DNS100 (100 kN) 电子万能试验机,如图 4 所示。试验机与轮胎的轮毂相连,加载 22 kN 的向下载荷,加载的载荷直接作用于轮毂上,并带动轮胎向下运动并发生弹性变形。



(a) DNS 系列电子万能试验机 (b) 试验轮胎及辅助测量装置

图 4 静力试验设备及试验件
Fig. 4 Static test equipment and test parts

对简化的轮胎模型进行静载计算,基于轮胎静力加载试验,建立轮胎检验模型,如图 5 所示,并在轮毂上加加载向下载荷,同样提取模型计算得到的载荷一位移曲线和轮胎压痕,并将二者的结果进行对比验证。轮胎的载荷一位移曲线和轮胎压痕的比对结果如图 6~图 7 所示,可以看出:结果与真实轮胎吻合良好。



图 5 轮胎检验模型
Fig. 5 Tire inspection model

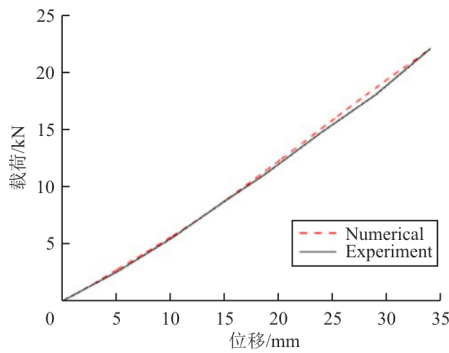
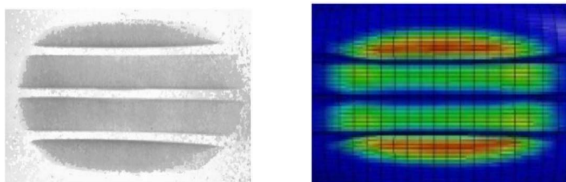


图 6 轮胎载荷—位移曲线试验与数值结果对比
Fig. 6 Comparison of tire load-displacement curve test and numerical results



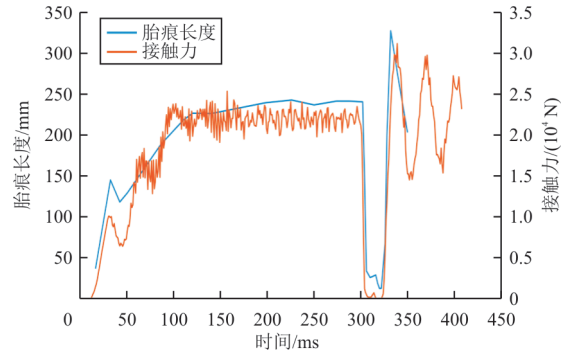
(a) 试验结果 (b) 数值模拟结果

图 7 轮胎压痕试验结果与数值模拟结果对比
Fig. 7 Comparison of tire indentation test results and numerical simulation results

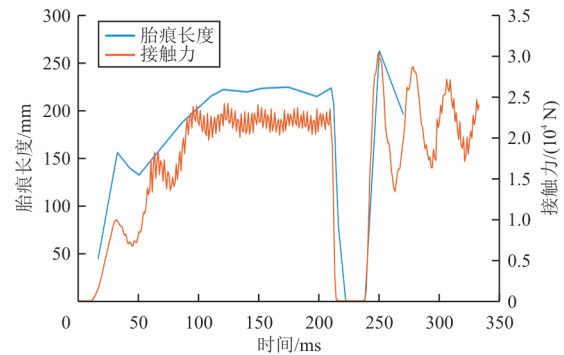
2.3 轮胎滑水验证

轮胎滑水速度是分析轮胎滑水性能的重要参数。在轮胎入水过程中,轮胎的胎痕长度也会因为轮胎滑水而减小,轮胎速度为 95 kn(48.87 m/s)和 120 kn(61.73 m/s)时,胎痕长度变化情况如图 8 所示,可以看出:胎痕长度的变化趋势与接触力曲线的变化趋势基本一致,在轮胎加载轮载和提高速度过程中,胎痕逐渐增大并趋于稳定,当轮胎入水后,胎痕长度也将迅速减小,并在轮胎出水后回升,当轮胎完全滑水时,轮胎胎痕长度也减小为 0。从图 8(a)可以看出:当胎痕长度减小到原来的 5%

左右时,接触力将非常接近于 0,因此,轮胎胎痕长度减小也可以作为轮胎滑水的判断依据。



(a) 轮胎速度 95 kn



(b) 轮胎速度 120 kn

图 8 胎痕长度变化

Fig. 8 The length of the tire marks changes

根据模型试验并结合参考文献[19]中的相关资料发现,胎痕长度或轮胎竖向接触力减小 95% 时,轮胎发生滑水,且当胎痕长度减小 95% 时,轮胎竖向接触力均至少减小 97%,故将轮胎与地面竖向接触力减小 97% 作为轮胎滑水的判断标准。轮胎与地面接触力越小,轮胎胎痕长度越小,轮胎越容易发生滑水;接触力越大,胎痕长度越长,轮胎越不容易发生滑水。

基于以上轮胎滑水的判断标准,分别建立额外两种不同尺寸的轮胎,开展轮胎滑水速度验证,其计算结果如表 2 所示。

表 2 其他工况轮胎滑水计算
Table 2 Other conditions tire water skiing calculation

轮胎类型	长/mm	宽/mm	胎压/MPa	滑水速度/kn	理论值/kn	误差/%
轮胎 A	586	189	0.62	46.30	43.93	5.10
轮胎 B	1 016	504	0.89	56.59	52.63	7.50
轮胎 C	762	223.5	1.38	66.87	64.28	4.03

从表 2 可以看出:采用本文的滑水标准计算得到的轮胎滑水速度与理论滑水速度吻合较好。

3 积水模型建立

3.1 积水模型参数确定

材料模型在 LS-DYNA 中采用 SPH(光滑粒子流体动力学)方法建模,积水模型通过 NULL 材料(MAT009)结合 GRUNISEN 状态方程模拟水的属性,具体参数如表 3 所示。

表 3 积水材料参数
Table 3 Water material parameter

状态方程及材料模型	参数	数值
GRUNISEN 状态方程	C	1 480
	S_1	2.16
	S_2	-1.985
	S_3	0.226 8
	γ_0	0.5
	a	0.67
NULL 材料 (MAT009)	$Mu/[\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}]$	7.638×10^{-3}
	$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 000

3.2 无关性检验

在 SPH 模型计算中,粒子间距和光滑长度对计算结果和计算时长影响十分显著,为达到最优计算状态,需要对粒子间距和光滑长度进行收敛性检验,检验标准为轮胎涉水时与地面之间的最小竖向接触力,根据检验结果粒子间距小于 2 mm,光滑长度小于 1.5 时,计算结果收敛,因此在后续模型计算中,粒子间距采用 2 mm,粒子光滑长度采用 LS-DYNA 的默认值 1.2。

4 轮胎滑水计算

4.1 轮胎滑水模型及滑水判断标准

在采用 SPH 方法进行计算时,粒子数量会影响计算时长,在能够得到明显的轮胎滑水现象的前提下,通过模型试算确定轮胎的速度范围,再根据轮胎直径和宽度尺寸,确定水域范围的大小为长 1 100 mm,宽 250 mm,水深采用该客机溅水试验的真实水深 20 mm。由于轮胎在加载外载时处于非平衡状态,在轮胎外载加载完成且入水之前,还需要留出一段距离用于轮胎自平衡。当轮胎胎面上一个节点的运动轨迹与轮胎在对应速度下的

滚动周期一致,说明轮胎已达到平衡,如图 9 所示,最终建立的轮胎滑水模型如图 10 所示。

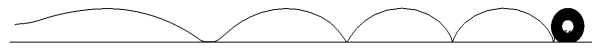


图 9 轮胎胎面节点运动轨迹
Fig. 9 The trajectory of the tread rubber points

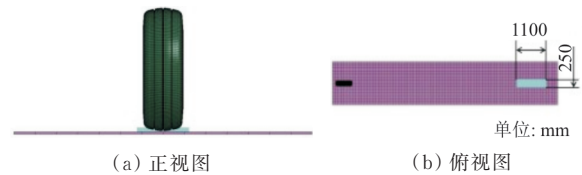


图 10 轮胎滑水模型
Fig. 10 Tire water skiing model

轮胎滚动前进过程中,轮胎与地面之间的接触力曲线如图 11 所示,可以看出: $T_1=328$ ms 时轮胎与积水接触,此时竖向接触力迅速减小; $T_2=337$ ms 时轮胎发生滑水,由于此时轮胎与地面之间无接触,轮胎与地面的竖向接触力将减小为 0; $T_3=350$ ms 时轮胎离开积水区域,接触力回升。计算得到轮胎滑水过程如图 12 所示。

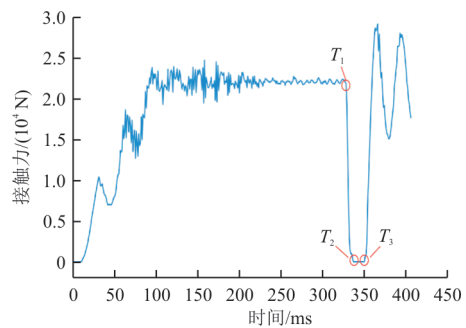


图 11 接触力曲线
Fig. 11 Contact force curve

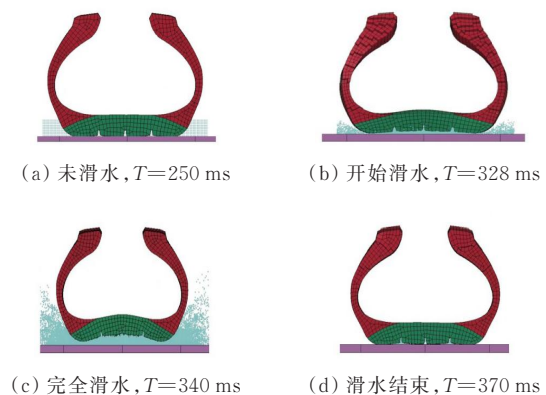


图 12 轮胎滑水状态
Fig. 12 Tire water skiing condition

4.2 水深、速度、胎压、轮载对滑水速度影响

1) 水深影响

水深是影响轮胎滑水的主要因素之一^[24],建立水深为 2、4、6、8、10、12、14 和 20 mm 的 8 种不同积水深度的轮胎滑水模型。

不同水深工况下轮胎与地面竖向接触力曲线如图 13 所示,可以看出:当水深较浅时,轮胎经过积水会直接将积水排开,此时积水产生的动压非常小,轮胎与地面之间接触力较大,轮胎速度越小,接触力越大,且越接近于轮载;随着积水深度逐渐增加,积水产生的动压逐渐增加,轮胎与地面之间的接触力逐渐减小,当水深达到 12 mm 时,轮胎速度为 100 kn(51.44 m/s)的轮胎发生滑水,而轮胎速度为 90 kn(46.3 m/s)和 80 kn(41.15 m/s)的轮胎均未发生滑水,而水深为 20 mm 时,只有轮胎速度为 80 kn(41.15 m/s)的轮胎未发生滑水;当水深小于 6 mm 时,水深增加,轮胎与地面之间的接触力减小迅速,当水深超过 6 mm 后,随着水深增加,轮胎与地面之间的接触力减小缓慢;此外,在水深相同时,无论轮胎是否发生滑水,均有轮胎速度越大,接触力越小。

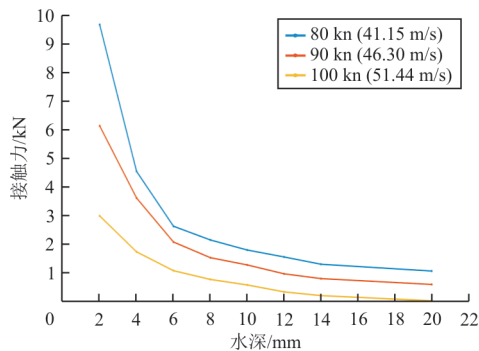


图 13 接触力随水深变化曲线

Fig. 13 Contact force curve with water depth

基于上述分析,认为当轮胎速度相同时,水深越深,轮胎越容易发生打滑,且当水深超过 6 mm 后,水深的变化对轮胎打滑的影响较小。

2) 速度影响

速度是飞机起降的重要参数,飞机处于着陆阶段时,滑跑速度范围大致在 16 kn(8.33 m/s)到 145 kn(75.00 m/s)之间。接触力随速度变化曲线如图 14 所示,可以看出:当轮胎速度从 85 kn(43.72 m/s)增加至 100 kn(51.44 m/s)时,轮胎与地面接触力随速度的增加接近线性减小,说明当

水深一定时,轮胎速度越大越容易发生滑水;当速度增加至 90 kn(46.3 m/s)时,接触力减小至 571 N,轮胎发生滑水,轮胎滑水速度为 90 kn(46.3 m/s);当轮胎速度增加至 100 kn(51.44 m/s)时,轮胎与地面接触力为 0,说明此时轮胎发生完全滑水现象,轮胎完全滑水速度为 100 kn(51.44 m/s)。

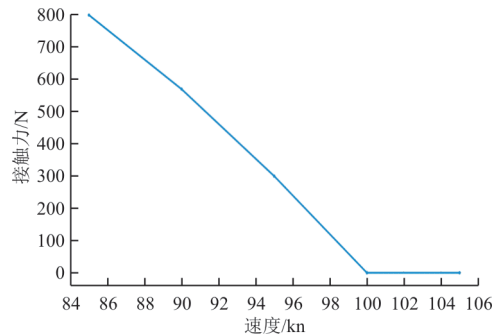


图 14 接触力随速度变化曲线

Fig. 14 Contact force curve with velocity

3) 胎压影响

采用 NASA 滑水公式计算滑水速度时,胎压是唯一被考虑的变量,且根据 NASA 公式,当轮胎的胎压越大时,轮胎滑水速度越大。本文建立胎压为 0.21、0.34、0.41、0.48、0.62、0.76 和 0.89 MPa 的 7 种不同胎压模型。轮胎经过积水模型时的接触力变化,如图 15 所示,可以看出:当胎压在 0.21 到 0.48 MPa 之间时,轮胎在速度为 80 kn(41.15 m/s)时就已经发生滑水,胎压为 0.62 MPa 时,轮胎速度 90 kn(46.3 m/s)时发生滑水,胎压 0.76 MPa 时,速度为 100 kn(51.44 m/s)时才发生滑水;在任一胎压工况下,接触力均随速度的增加而减小,而在速度相同时,接触力均随胎压的增加而增大,说明滑水速度是随胎压增大而增大的,这也与 NASA 的滑水公式得到的结论一致。

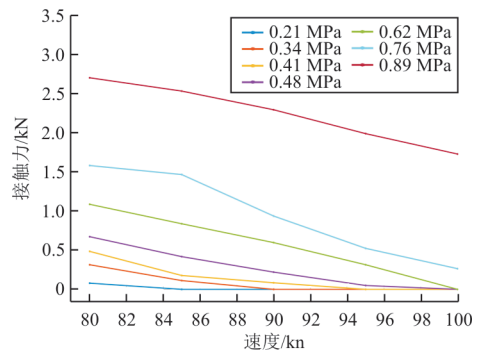


图 15 接触力随胎压变化曲线

Fig. 15 Contact force varies with tire pressure

4) 轮载影响

建立轮载为 10、15、20、22 和 30 kN 的 5 个模型,胎压选用 0.62 MPa,轮胎经过积水模型时的接触力变化如图 16 所示,可以看出:轮载为 10 kN 的模型在速度为 80 kn(41.15 m/s)时发生了轮胎滑水现象,轮载为 15、20、22 kN 的轮胎均在速度为 90 kn(46.3 m/s)时发生了滑水,轮载为 30 kN 的模型的滑水速度为 95 kn(48.87 m/s)。因此,随着轮载的逐渐增大,滑水速度逐渐增大。

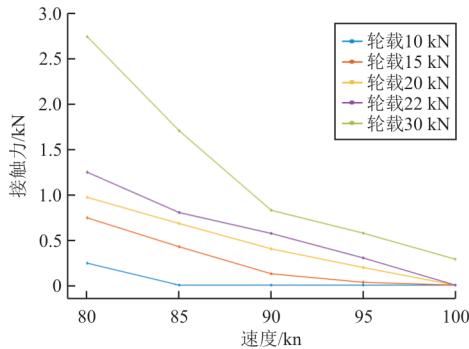


图 16 接触力随轮载变化曲线
Fig. 16 Contact force variation curve with wheel load

4.3 胎面构型对滑水速度的影响

沟槽能在轮胎经过积水时,让部分积水通过沟槽往轮胎运动方向的反方向排出,减小积水产生的水动压并避免轮胎滑水现象。沟槽宽度和深度对轮胎滑水现象的影响规律研究较少。因此,将通过建立不同沟槽构型的轮胎滑水模型,分析轮胎经过积水时的滑水性能。

1) 沟槽宽度

本文建立不同沟槽宽度的模型,沟槽的具体宽度如表 4 所示,不同沟槽宽度的轮胎模型如图 17 所示。

表 4 沟槽宽度
Table 4 Groove width

模型编号	沟槽宽度/mm	修改倍率
KA	3.606	0.5
KB	7.212	1.0
KC	10.818	1.5
KD	14.424	2.0
KE	21.636	3.0
KF	28.848	4.0



图 17 不同沟槽宽度轮胎构型
Fig. 17 Different groove width of tire configuration

不同沟槽宽度轮胎接触力曲线如图 18 所示,可以看出:当轮胎速度增加的过程中,对于各模型接触力均呈现下降趋势,这与前文中的结论一致,并且模型 KA 和模型 KB 在速度 90 kn(46.3 m/s)时发生滑水,模型 KC 和模型 KD 在速度 95 kn(48.87 m/s)时发生滑水,模型 KE 和模型 KF 需要速度达到 100 kn(51.44 m/s)才发生滑水。当轮胎速度相同时,轮胎沟槽宽度越大,接触力越大,轮胎越难发生滑水现象。

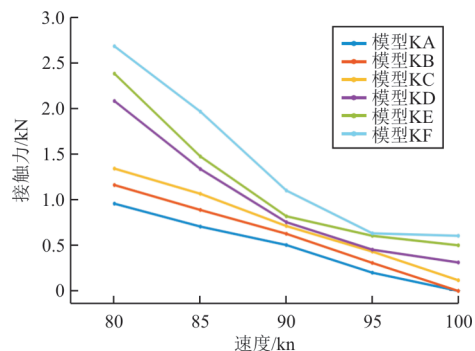


图 18 不同沟槽宽度轮胎接触力曲线
Fig. 18 Tire contact force curve with different groove width

对于 KE 和 KF 模型,由于轮胎沟槽宽度越大,轮胎与地面的接触面积越小,胎面应力分布越集中,导致轮胎稳定性下降,轮胎在竖直方向抖动严重,接触力曲线如图 19 所示。因此,在保证轮胎稳定的前提下,模型 KC 和 KD 具有较好的抗滑水

能力。

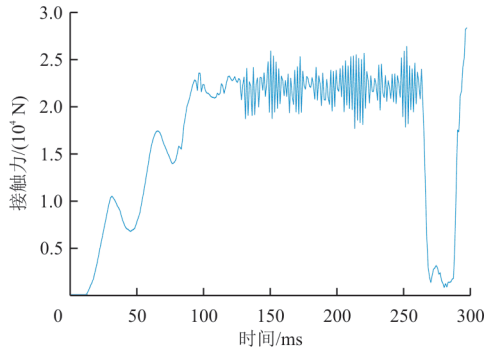


图 19 KD 模型接触力曲线

Fig. 19 Contact force curve of KD model

2) 沟槽深度

轮胎沟槽的另一特征为沟槽深度,仿照不同沟槽宽度模型的建模方法,建立 5 种不同沟槽深度模型,沟槽的具体深度如表 5 所示,不同沟槽深度的轮胎模型如图 20 所示。

表 5 沟槽深度
Table 5 Groove depth

模型编号	沟槽深度/mm	修改倍率
SA	0	0
SB	3.575	0.50
SC	4.648	0.65
SD	5.721	0.80
SE	7.151	1.00



图 20 不同沟槽深度轮胎构型

Fig. 20 Different groove depth of tire configuration

各模型的接触力随速度变化曲线如图 21 所示,可以看出:模型 SA 的滑水速度为 80 kn(41.15 m/s),模型 SB 的滑水速度为 85 kn

(43.73 m/s),而模型 SE 的滑水速度为 90 kn(46.3 m/s),因此轮胎沟槽的深度越大,轮胎滑水越大。

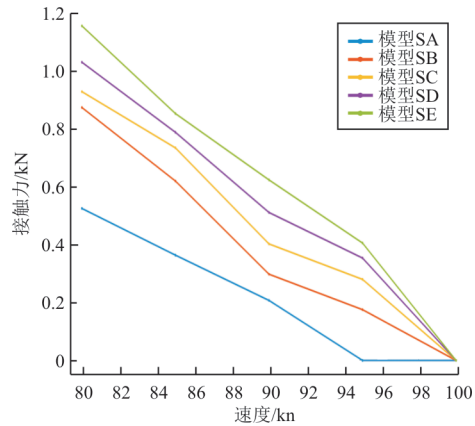


图 21 接触力—速度曲线

Fig. 21 Contact force-velocity curve

轮胎沟槽深度还可用于描述轮胎胎面的磨损情况,轮胎磨损的越厉害,沟槽深度则越小。从图 21 还可以看出:沟槽深度从 7.151 mm 减小至 0 的过程中,轮胎与地面之间的接触力不断减小,轮胎越容易发生滑水,即轮胎磨损的越厉害,轮胎越容易发生打滑。

3) 沟槽数理

航空飞机所使用的轮胎没有横向沟槽,只有纵向沟槽^[25],且不同机型的轮胎沟槽条数不同。建立 6 种胎面沟槽数量不同的轮胎模型,如图 22 所示,用于讨论沟槽数量对滑水性能的影响。不同沟槽数量滑水模型中的载荷、水深等参数均与之前的模型一致,计算结果如图 23 所示。



图 22 不同沟槽条数轮胎构型

Fig. 22 Different groove number of tire configuration

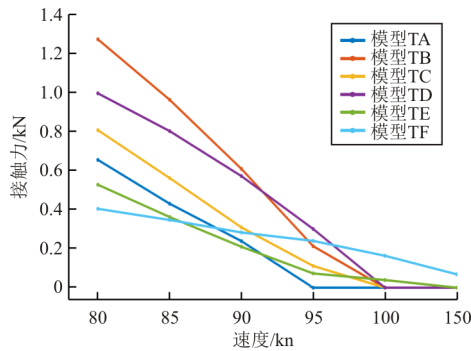


图 23 不同沟槽数轮胎接触力曲线

Fig. 23 Tire contact force curve with different groove number

从图 23 可以看出:在速度相同的情况下,接触力并非随着沟槽数量的增加而单调增加,沟槽数多的轮胎在具有较小的接触力时,轮胎的胎痕长度依旧较大,且不同轮胎之间,接触力随速度变化的速率也区别较大。该现象推测是由于不同构型的轮胎,在受载变形后,沟槽与地面之间空隙的面积(如图 24 所示)不同而导致的。

但从图 23 也可以看出:模型 TA 在速度 95 kn (48.87 m/s) 时发生完全滑水,模型 TB、TC 和 TD 在速度 100 kn (51.44 m/s) 时完全滑水,模型 TE 在速度 105 kn (54.01 m/s) 时发生完全滑水,而模型 TF 在速度为 105 kn (54.01 m/s) 时,依旧未发生完全滑水。该结果说明,随着轮胎沟槽数的增加,轮胎临界滑水速度越大,增加沟槽数能够对轮胎滑水起到改善作用。

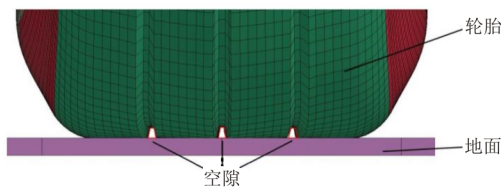


图 24 沟槽与地面之间的空隙

Fig. 24 The gap between the trench and the ground

5 结 论

1) 水深越大,轮胎越容易发生滑水,但水深大于 6 mm 之后,水深对轮胎滑水的影响非常小。

2) 轮胎速度越大,越容易发生滑水,且本文所使用的轮胎,滑水速度在 90 kn (46.3 m/s) 左右。

3) 轮胎的胎压、轮载越大,轮胎越不容易发生滑水。

4) 沟槽宽度越宽,轮胎滑水速度越大,沟槽宽

度从 3.6 增加至 28.8 mm,轮胎滑水速度从 46.30 提高至 51.44 m/s,但轮胎的稳定性会降低。

5) 轮胎沟槽深度从 0 增加至 7.151 mm,滑水速度从 41.55 增加至 46.3 m/s,且轮胎磨损的越厉害,轮胎越容易发生打滑。

6) 沟槽数量越多,轮胎完全滑水速度越大。沟槽数量为 0 时,临界滑水速度为 48.87 m/s,沟槽数量为 5 时,轮胎速度为 54.01 m/s 时依旧未发生完全滑水。

参 考 文 献

- [1] 王国林,陈海荣. 子午线轮胎滑水仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(8): 1719-1722.
WANG Guolin, CHEN Hairong. Simulation analysis of hydroplaning characteristics of radial tire[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(8): 1719-1722. (in Chinese)
- [2] 季天剑,高玉峰,陈荣生. 轿车动力滑水分析[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(5): 57-60.
JI Tianjian, GAO Yufeng, CHEN Rongsheng. Dynamic hydroplaning analysis of car tire [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(5): 57-60. (in Chinese)
- [3] 霍志勤. 基于历史数据的中国民航跑道安全管理关键问题研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
HUO Zhiqin. Key issue research on runway safety management of China civil aviation based on historical data [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [4] 李亚南. 航空轮胎溅水问题分析及翻边挡水作用研究[D]. 西安:西北工业大学, 2016.
LI Yanan. Research of water spray generated by aircraft tire and effects of the chine[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016. (in Chinese)
- [5] 倪明. 大型客机污染跑道起降性能适航审定方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2019.
NI Ming. Research on airworthiness certification method for aircraft takeoff and landing performance on contaminated runways [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [6] 李小燕. 近十年全球商用喷气机冲出跑道事故统计分析[J]. 中国民用航空, 2009(9): 37-39.
LI Xiaoyan. Statistical analysis of global runway excursion accidents of commercial jets in the last decade[J]. China Civil Aviation, 2009(9): 37-39. (in Chinese)
- [7] 曹旭辉. 运输类民机污染跑道起降性能算法研究[D]. 广汉:中国民用航空飞行学院, 2019.
CAO Xuhui. Study of takeoff and landing performance algorithm on contaminated runway for civil aircraft [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2019. (in Chinese)

- Chinese)
- [8] HORNE W B, DREHER R C. Phenomena of pneumatic tire hydroplaning: NASA TND-2056 [R]. Washington, D. C.: NASA, 1963.
- [9] YAGER T J. Comparative braking performance of various aircraft on grooved and ungrooved pavements at the landing research runway, NASA Wallops Station [C]// Pavement Grooving and Traction Studies. Hampton, VA, USA: NASA, 1969: 35-65.
- [10] VAN G W H. Hydroplaning of modern aircraft tires: NLF-TP-2001-242 [R]. USA: National Aerospace Laboratory, 1999.
- [11] ONG G P, FWA T F. Transverse pavement grooving against hydroplaning and simulation model [J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132(6): 441-448.
- [12] CHIM P O, FWA T F. Prediction of wet-pavement skid resistance and hydroplaning potential [J]. Transportation Research Record, 2007, 25(1): 160-171.
- [13] SRIRANGAM S K, ANUPAM K, SCARPAS T, et al. Study of hydroplaning risk on rolling and sliding passenger car [J]. Social and Behavioral Sciences, 2012, 53: 1020-1028.
- [14] JUNG H C, MI D J, JEONG K M, et al. Verification of tire hydroplaning phenomenon using coupled FSI simulation by CFD and FEM [J]. Open Journal of Applied Sciences, 2020, 10(7): 417-431.
- [15] DING Y M, WANG H. Computational investigation of hydroplaning risk of wide-base truck tires on roadway [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018(14): 1-12.
- [16] SAYEGH E L, ZEINA B, GINDY E L, et al. Modeling of tire-wet surface interaction using finite element analysis and smoothed-particle hydrodynamics techniques [C]// 2018 SAE World Congress Experience. USA: SAE, 2018: 12-18.
- [17] 蔡靖, 许净. 沟槽磨损对飞机轮胎滑水影响仿真分析 [J]. 中国民航大学学报, 2020, 38(2): 38-43.
CAI Jing, XU Zheng. Simulation analysis on influence of groove abrasion on aircraft hydroplaning [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2020, 38(2): 38-43. (in Chinese)
- [18] 张丽霞, 郑超艺, 杨朝会, 等. 湿滑路面汽车轮胎滑水性能影响因素仿真 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(30): 12589-12595.
ZHANG Lixia, ZHENG Chaoyi, YANG Chaohui, et al. Simulation on factors affecting hydroplaning performance of vehicle tire on wet pavement [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(30): 12589-12595. (in Chinese)
- [19] 杨洋, 朱兴一, 赵鸿铎. 基于真实道面模型的机轮滑水行为影响因素 [J]. 航空学报, 2022, 43(1): 221-231.
YANG Yang, ZHU Xingyi, ZHAO Hongduo. Aircraft tire hydroplaning behavior based on real texture of surface runway model [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(1): 221-231. (in Chinese)
- [20] 李岳, 胡宇祺, 蔡靖, 等. 湿滑道面飞机着陆滑水风险量化分 [J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(6): 1138-1144.
LI Yue, HU Yuqi, CAI Jing, et al. Quantification analysis of hydroplaning risks of aircraft landing on wet pavement [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(6): 1138-1144. (in Chinese)
- [21] 吴琦, 杨军. 基于FLUENT软件轮胎滑水现象模拟研究 [J]. 交通信息与安全, 2014, 32(2): 104-109.
WU Qi, YANG Jun. Simulation of hydroplaning phenomenon based on the FLUENT software [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2014, 32(2): 104-109. (in Chinese)
- [22] HORNE W B, JOYNER U T. Pneumatic tire hydroplaning and some effects on vehicle performance [C]// SAE Technical Paper Series. Hampton: Langley Research Center, NASA, 1965: 11-15.
- [23] FWA T F, ANUPAM K, ONG G P. Relative effectiveness of grooves in tire and pavement for reducing vehicle hydroplaning risk [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2155: 73-81.
- [24] 张彦鹏, 田国红, 韩忠浩, 等. 轮胎滑水的影响因素研究 [J]. 汽车实用技术, 2019(17): 275-276.
ZHANG Yanpeng, TIAN Guohong, HAN Zhonghao, et al. Study on the factors affecting the water skiing of tires [J]. Automobile Applied Technology, 2019(17): 275-276. (in Chinese)
- [25] 李岳, 蔡靖, 宗一鸣. 湿滑道面飞机轮胎临界滑水速度数值仿真 [J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(5): 90-101.
LI Yue, CAI Jing, ZONG Yiming. Numerical simulation of critical hydroplaning speed of aircraft tire under wet pavement condition [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(5): 90-101. (in Chinese)

作者简介:

- 肖刘炜(1997—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空工程。
- 刘斌(1970—),男,博士,研究员。主要研究方向:飞行器设计。
- 徐缙(1970—),女,博士,教授。主要研究方向:流固耦合,复合材料失效分析。
- 冯威(1991—),男,博士,副教授。主要研究方向:复合材料力学。
- 宋金辉(1989—),男,硕士。主要研究方向:航空宇航制造工程。
- 祁旭亮(1995—),男,学士。主要研究方向:飞行器制造工程。
- 毛聪聪(1996—),男,学士。主要研究方向:飞行器制造工程。

(编辑:马文静)