

轻合金车轮冲击仿真研究进展

陶士柯¹, 张广冬¹, 鲁建军², 周羊羊², 周临震¹

(1. 盐城工学院 机械工程学院, 江苏, 盐城 224051;
2. 保定市立中车轮制造有限公司 河北省高强韧轻量化车轮技术创新中心, 河北, 保定 071000)

摘要: 轻合金车轮有助于实现车辆的轻量化, 提高燃油经济性, 提升车辆的动力性能、制动性能以及悬架系统的响应速度。借助于轻合金车轮冲击仿真, 工程师可以更全面地了解轻合金车轮在各种路况下的性能, 并进行相应的设计优化以提高其安全性和耐久性。根据车轮受到冲击载荷方向不同, 系统介绍了国内外车轮13°和90°冲击仿真研究现状。从仿真效率、精度和收敛性角度, 阐述了轮胎模型、胎压模型和接触属性对车轮90°冲击仿真的影响。介绍了自动化仿真与深度学习技术在车轮冲击仿真研究中的应用, 二者的结合有助于实现冲击仿真的标准化、规范化、自动化和智能化。

关键词: 车轮; 冲击; 轮胎; 自动化仿真; 深度学习

中图分类号: U463.85 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2024.06.02

Research Progress on Impact Simulation of Lightweight Alloy Wheels

TAO Shike¹, ZHANG Guangdong¹, LU Jianjun², ZHOU Yangyang², ZHOU Linzhen¹

(1. School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, Jiangsu, China;
2. Hebei High Strength and Toughness Lightweight Wheel Technology Innovation Center, Baoding Lizhong Wheel Manufacturing Co., Ltd., Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract: Lightweight alloy wheels reduce vehicle weight, enhance fuel efficiency, and improve power performance, braking efficiency, and suspension system responsiveness. Through simulated impact testing of lightweight alloy wheels, engineers can gain a more comprehensive understanding of their performance under various road conditions, and conduct corresponding design optimizations to enhance safety and durability. This paper systematically reviews the current state of research on 13-degree and 90-degree impact simulations of wheels, both domestically and internationally. From the perspectives of simulation efficiency, accuracy, and convergence, it discusses the influence of tire models, tire pressure models, and contact properties on the 90-degree impact simulations. The paper also introduces the application of automated simulation and deep learning technologies in wheel impact simulation research. The combination of these technologies help achieve standardization, normalization, automation, and intelligence in impact simulations.

Keywords: wheel; impact; tire; automation simulation; deep-learning

收稿日期: 2024-03-06 改稿日期: 2024-04-06 网络首发日期: 2024-07-31

基金项目: 保定市科技计划项目(2394G003)

参考文献引用格式:

陶士柯, 张广冬, 鲁建军, 等. 轻合金车轮冲击仿真研究进展[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(6): 934-946.

TAO Shike, ZHANG Guangdong, LU Jianjun, et al. Research Progress on Impact Simulation of Lightweight Alloy Wheels[J].

Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(6): 934-946. (in Chinese)



车轮作为汽车的关键零部件和重要外观件，其性能直接影响行车的安全性、经济性和舒适性^[1]。在节能减排和新能源汽车快速发展的背景下，轻量化设计成为汽车车轮领域的研究热点之一。车轮轻量化有利于降低材料成本，实现节能减排，缓解新能源汽车的里程焦虑。车轮轻量化的主要途径包括：

- 1) 轻质铝合金材料的广泛应用^[2]；
- 2) 新型轻量化材料的研发和应用，如玻璃纤维^[3]、镁合金^[4]、碳纤维^[5]，制造成本较高^[6-7]；
- 3) 轻合金组装式车轮，如镁铝合金组装式车轮^[8]、多连接方式（如铆接、胶接）轻合金组装式车轮^[9]；
- 4) 基于仿生学的车轮结构设计^[10]。

车轮轻量化给车轮设计带来全新的挑战，需要在满足动态弯曲疲劳、动态径向疲劳、冲击性能等安全性能要求的前提下实现车轮减重目标。其中，良好的冲击性能尤为重要，保证车轮具有足够的结构强度，能承受来自不同道路条件下的冲击力。车轮冲击试验用于评估轻合金车轮的冲击性能，属于破坏性试验。如果车轮未通过冲击试验，则需要反复优化车轮设计直至满足冲击性能要求，从而导致开发周期长、成本高。

目前研发人员广泛采用计算机仿真来代替传统的性能试验，结合优化设计方法来寻求最佳的车轮轻量化设计方案。该方法能在产品开发阶段同步评估车轮的安全性能，快速优化车轮的结构设计，有利于缩短车轮产品的开发周期和降低开发成本。

本文介绍了车轮13°和90°冲击仿真研究现状，阐述了自动化仿真和深度学习在车轮冲击仿真中的应用，最后展望了冲击仿真的发展趋势。

1 车轮13°冲击

1.1 试验简介

根据国家标准 GB/T 15704—2012《道路车辆轻合金车轮冲击试验方法》^[11]，车轮13°冲击试验主要用于评定全部或部分用轻合金制造的车轮轴向（横向）撞击路缘的性能，如图1所示。

试验时，将车轮安装到试验机上，使冲击载荷施加到车轮轮缘，车轮的轴线应与铅直方向成13°

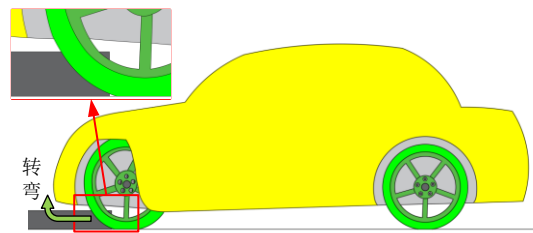


图1 车轮轴向撞击路缘

$\pm 1^\circ$ 角，轮缘最高点正对冲锤，如图2所示。试验结束后，如果出现以下任一情况，则认为车轮冲击试验失效：

- 1) 可见裂纹穿透车轮中心部分的截面；
- 2) 车轮中心部分与轮辋分离；
- 3) 在1 min内，轮胎气压全部泄漏。

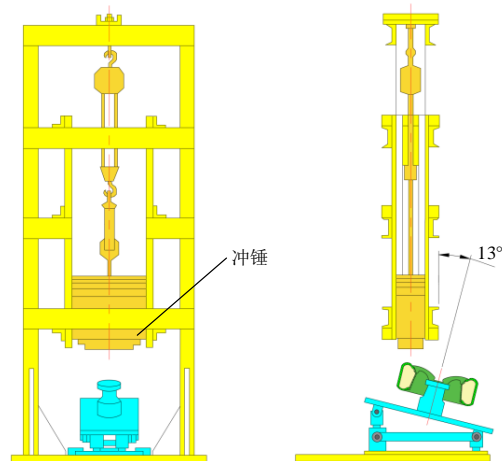


图2 车轮13°冲击试验示意图

车轮13°冲击试验包括2种典型工况，即冲锤正对轮辐冲击和冲锤正对气门孔窗口冲击。当冲锤正对轮辐冲击时，轮辐强度不足时会由于瞬时冲击产生开裂现象；当冲锤正对气门孔窗口冲击时，由于气门孔的存在导致气门孔窗口部位强度不足，车轮在较高的冲击能量下易出现外耳缘脱落或轮辐开裂等现象。

车轮13°冲击最常见的失效形式为轮辐开裂和外耳缘脱落，如图3所示。通过优化轮辐（如根部厚度、顶部圆角等）或增加轮辋厚度可改善车轮冲击性能^[8]，通过优化应力集中区域的圆角^[12]能有效改善车轮的局部力学性能。

1.2 13°冲击仿真研究现状

车轮13°冲击仿真是典型的动力学问题，通常

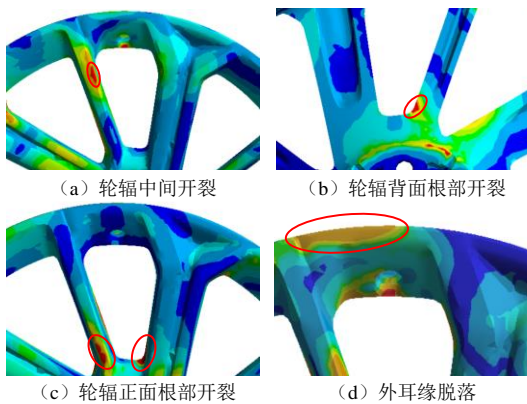


图3 部分车轮失效情形

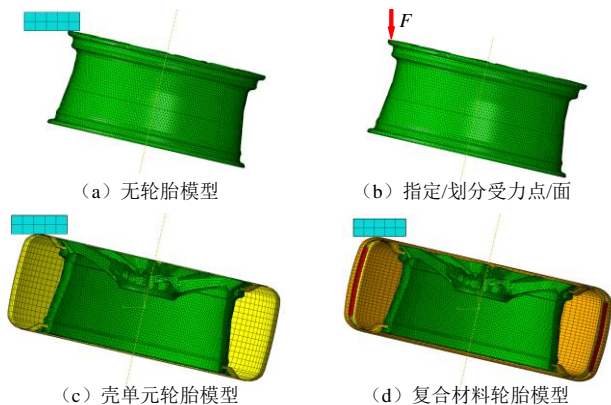


图4 车轮 13°冲击有限元模型

采用动力学显式求解器来求解。根据是否包含轮胎, 车轮 13°冲击有限元模型分为有轮胎和无轮胎 2 类, 如图 4 所示。由于轮胎模型具有较强的非线性, 包含轮胎的有限元模型通常需要耗费较多的计算资源。

无轮胎模型(图 4a)从总冲击能量中排除了轮胎吸收的能量^[13], 从而可以忽略轮胎模型的影响。无轮胎模型降低了模型的复杂性, 提高显式动力学分析效率约 60%, 但存在结果精度不足的问题^[14]。

为进一步提高不含轮胎的车轮 13°冲击有限元模型的计算效率, 可以采用静力学法(指定受力点^[15]或划分受力面^[16], 如图 4b 所示)、显式动力学的质量缩放^[17]方法、隐式动力学法^[18]。指定受力点或划分受力面的方法将冲击动力学问题转化为静力学问题, 显著提高了计算效率, 但与实际工况存在较大差异, 且划分受力面的方法依赖于工程师对经验常数的取值。采用质量缩放方法可以显著提高显式动力学分析过程中的稳定时间增量, 进而缩短总的计算时间, 然而未考虑质量缩放引起的

系统质量增加对结构响应的影响。隐式动力学法可以显著提高计算效率, 但当模型变形量较大时, 存在计算收敛性的问题。

考虑到轮胎的空心结构, 可以采用壳单元、各向同性线弹性材料建立轮胎模型, 如图 4c 所示。CHANG 等^[19]建立了包含壳单元轮胎的车轮 13°冲击有限元模型, 采用总塑性功来研究车轮的失效问题, 结果表明, 基于总塑性功的损伤模型可以作为判定准则来有效地预测铝合金车轮的断裂失效。试验表明, 在较高的冲击能量下, 轮辐更容易断裂, 在仿真中考虑车轮的损伤更符合实际的冲击情况。

为使冲击模型更符合实际, MOHAMMED 等^[20]建立了包含复合材料轮胎的车轮 13°冲击有限元模型, 如图 4d 所示, 轮胎模型包括胎面、胎侧、气密层、带束层、胎体帘线、钢丝圈等。复合材料轮胎模型充分考虑了轮胎对冲击过程的影响, 但由于轮胎模型复杂度高, 因此仿真效率较低, 收敛性较差。

OTARAWANNA 等^[21]对车轮 13°冲击的带轮胎和不带轮胎的 2 种仿真模型进行了研究。结果表明, 在进行带轮胎的分析时, 车轮关键部位的应力比不带轮胎分析时低 5 MPa。车轮关键部位的应力通常约为 70 MPa^[15], 5 MPa 的应力差异相对较小, 几乎可以忽略不计, 从而可以认为不带轮胎的 13°冲击仿真没有损失较多的仿真精度。

基于有限元法的车轮 13°冲击仿真能有效评估车轮的冲击性能, 得到了国内外学者的广泛关注^[22]。13°冲击仿真重点关注车轮的力学响应, 如应力、应变等, 在车轮未失效的条件下, 通常利用应变片测量对应部位的应变来验证仿真结果^[23]。研究人员采用忽略轮胎模型、采用线弹性材料与壳单元建立轮胎模型等方法来建立车轮 13°冲击有限元模型, 以减少轮胎的非线性对仿真效率及收敛性的影响。由于车轮 13°冲击可以不带轮胎进行分析而不损失过多的计算精度, 同时有助于提高仿真效率, 因此不带轮胎的车轮 13°冲击仿真模型被普遍采用。

目前车轮 13°冲击仿真已经广泛应用于车轮研发。静力学分析的计算效率较高, 计算资源需求较

少,收敛速度快,主要应用于设计环节;动力学分析的精度较高,收敛速度慢,主要应用于验证环节。

2 车轮90°冲击

根据行业标准QC/T 991—2015《乘用车轻合金车轮90°冲击试验方法》^[24],车轮90°冲击试验用于评定车轮受到垂直于轴线方向的冲击载荷时,车轮的强度和安全性能,主要模拟车轮冲击路面凸起物或凹坑而导致的车轮失效的情形。

由于现实中路面状况复杂多变,经常出现以下路况:路面存在石块、凹坑或设置不合理的减速带等,如图5所示(前轮冲击凹坑,后轮冲击减速带)。当汽车以一定的速度通过上述路面时,车轮受到瞬时冲击而极易失效,存在行车安全隐患,因此,有必要进行90°冲击试验来评估车轮的冲击性能。车轮90°冲击试验共有2种方法,可选其一进行试验。

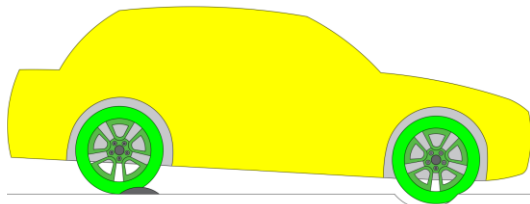


图5 车轮冲击路面凹坑与减速带

2.1 试验简介

2.1.1 方法 I

车轮90°冲击试验方法I,如图6所示。该试验方法也被称为车轮径向冲击试验^[25]。试验时,将车轮和轮胎总成安装到试验机上,保证车轮在试验机上的固定装置在尺寸上应与车辆上使用的固定装置相当;调整车轮轴向位置,使轮胎断面中心线对准锤头中心线,然后锁定轴向调整机构;调整车轮圆周方向的位置,使冲击部位处在锤头正下方。

该试验方法涉及冲击能量的选择问题,冲击能量通过下式计算:

$$E = K \times F_r \quad (1)$$

式中: E 为冲击能量,单位J; K 为系数,单位J/kg,通常有 $K_1=1.15$ 和 $K_2=4.3$ 两种取值; F_r 为车轮或车辆制造厂规定的车轮最大静载荷,单位kg。

根据计算出的能量,查表、选择并调整冲锤质

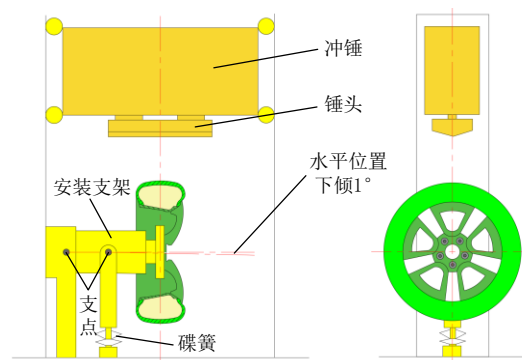


图6 车轮90°冲击试验方法I示意图

量,计算冲锤下落高度。

车轮经过冲击后,应满足以下2个要求:

- 1) $E_1=1.15 \times F_r$ 时,车轮没有出现裂纹,内轮缘变形量应小于或等于2.5 mm;
- 2) $E_2=4.3 \times F_r$ 时,轮缘被冲击部位允许有裂纹或开裂,在轮辋槽处沿圆周方向最大允许25%范围的开裂。

E_1 主要用于研究车轮的刚度, E_2 主要用于研究车轮的开裂^[26]。

2.1.2 方法 II

车轮90°冲击试验方法II,如图7所示。试验时,将车轮和轮胎总成安装到试验机上,使车轮在试验机上的固定装置在尺寸上应与车辆上使用的固定装置相当;调整车轮轴向位置,使轮胎断面中心线对准锤头冲击面边缘;调整车轮圆周方向的位置,使冲击部位处在冲锤正下方。

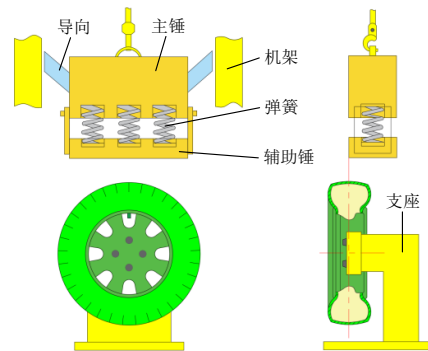


图7 车轮90°冲击试验方法II示意图

与方法I选择冲击能量的方法不同,该方法涉及冲锤下落高度的选择问题,冲锤下落高度通过式(2)计算。

$$H = K \times F_r \quad (2)$$

式中: H 为冲锤下落高度; F_r 为车轮或车辆制造厂

规定的车轮最大静载荷, 单位 kg; K 为系数, 单位 mm/kg, 通常有 $K_1=0.05$ 和 $K_2=0.28$ 两种取值。

车轮经过冲击后, 应满足以下 2 个要求:

1) $H_1=0.05 \times F_r$ 时, 车轮没有出现裂纹, 内轮缘变形量应小于或等于 2.5 mm;

2) $H_2=0.28 \times F_r$ 时, 轮缘被冲击部位允许有裂纹或开裂, 在轮辋槽处沿圆周方向最大允许 25% 范围的开裂。

2.1.3 冲击方位和变形特点

根据车辆制造厂要求, 车轮 90° 冲击试验的冲击方位通常为 0° 方位 (气门孔窗口) 与 180° 方位, 如图 8 所示。0° 方位是最常见的冲击方位, 也是车轮结构最薄弱的方位。此外, 根据车辆制造厂的要求, 还会冲击 180° 方位 (通常正对轮辐), 以最大限度地降低行车风险。车轮 90° 冲击试验的失效部位通常为内轮缘或气门孔附近的轮辋槽。内轮缘缺少轮辐的支撑, 强度较低, 在较大的冲击载荷下易发生显著的变形, 如图 9 所示。气门孔附近的轮辋槽材料缺失, 强度相对较低, 较大的冲击载荷易导致轮辋槽开裂。开裂从气门孔附近开始, 随后在轮辋上沿周向扩展, 如图 10 所示。在设计时, 可通过改善冷却工艺^[27]、加大轮辋槽底夹角或增加轮辋壁厚^[28]的方式来提高车轮结构强度, 通过优化轮辐尺寸与截面形状以实现轻量化设计^[29]。

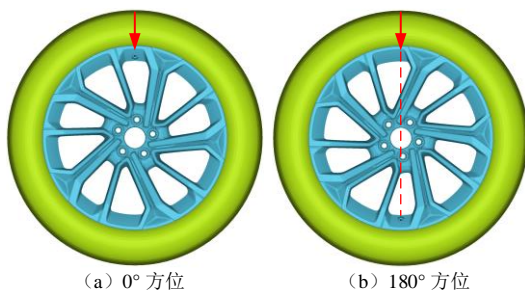


图 8 冲击方位

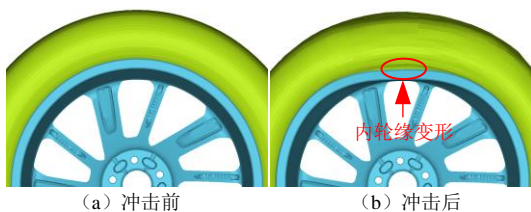


图 9 内轮缘变形



图 10 轮辋槽开裂

2.2 90° 冲击仿真研究现状

近年来, 随着垂直于轴线方向的冲击载荷对车轮影响的认识逐步深入, 90° 冲击仿真的研究也得到了国内外学者的广泛关注。车轮 90° 冲击仿真研究主要集中在: 轮胎模型、胎压模型和接触属性。与 13° 冲击相比, 车轮和轮胎在 90° 冲击试验过程中发生更大的变形, 如图 11 所示。轮胎剧烈的变形导致胎压产生较大的波动, 影响冲击过程中轮胎的刚度^[30], 从而影响载荷的传递; 接触属性影响各部件之间的接触状态, 如试验结束后胎圈是否与内轮缘分离, 如图 12 所示。90° 冲击仿真的有限元模型主要包括: 冲锤、轮胎和车轮。在冲击仿真中, 冲锤的刚度远远大于其他部件, 因此通常假设冲锤为具有一定质量和速度的刚体。冲锤的刚体建模方式^[31]包括: 解析刚体、离散刚体和施加刚体约束的变形体^[32]。在冲击过程中, 车轮发生弹性和塑性变形, 因此, 车轮材料通常设置为弹塑性材料^[33]。轮胎模型结构复杂, 材料组成多样, 根据研究的需要, 对轮胎模型进行了不同的简化处理。

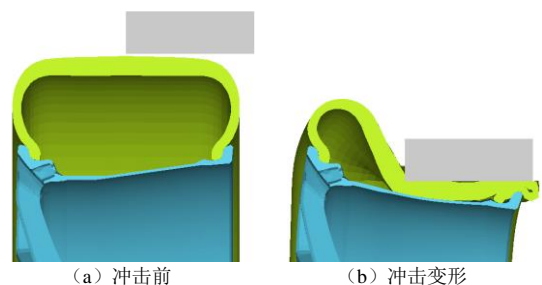


图 11 车轮和轮胎变形

2.2.1 轮胎模型

车轮 90° 冲击仿真的关注点与 13° 冲击相同, 都为车轮的力学响应。但是在 90° 冲击仿真中, 轮胎

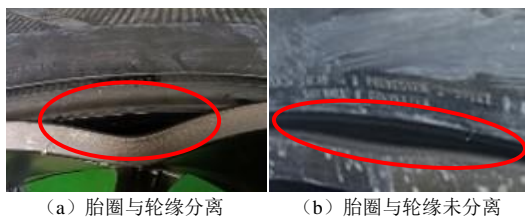


图12 胎圈与内轮缘的接触状态

模型也是研究人员重点关注的对象。车轮13°冲击位置为胎侧与外轮缘，冲击载荷由二者共同承担，而90°冲击试验中冲锤仅冲击轮胎，冲击载荷全部由轮胎传递至轮辋，轮胎模型的准确性影响载荷传递效率，从而影响仿真结果。轮胎在冲击时发生大变形，表现出极强的非线性，导致仿真效率低，收敛性差，特别是在轮胎侧壁完全折叠的高冲击能量的情况下^[34]，如图13所示。

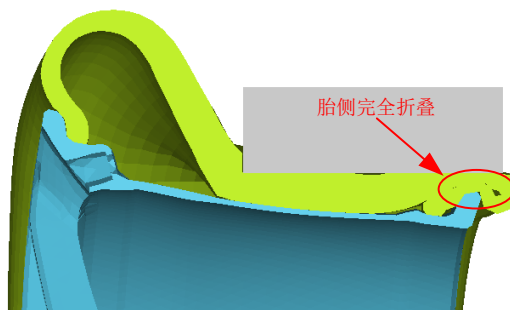
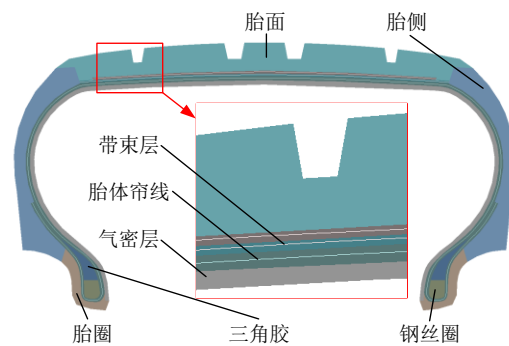


图13 胎侧完全折叠

车轮90°冲击仿真中，轮胎建模的难点在于轮胎结构、材料组成的复杂性和材料的非线性^[35]。轮胎具有非常复杂的结构，以子午线轮胎为例，如图14所示，主要由橡胶及橡胶-帘线复合材料构成，内含钢丝圈、带束层、胎体帘线等，且带束层设计参数复杂多变^[36]。此外，轮胎材料组成复杂^[37]，主要成分包括橡胶、炭黑、硫化剂、补强化合物等^[38]。轮胎橡胶是典型的超弹性材料，在受力后发生大变形，具有极强的几何非线性^[39-40]。

由于轮胎结构和材料组成的复杂性，目前普遍采用简化轮胎模型进行冲击仿真。简化轮胎模型考虑了轮胎的主要结构，如钢丝圈、帘线等，忽略气密层、三角胶等次要结构。

李世德^[25]将轮胎模型简化为单一的橡胶与钢丝圈，采用两参数Mooney-Rivlin模型来模拟轮胎橡胶的材料属性。该方法将轮胎简化为橡胶与钢丝

图14 轮胎结构示意图(横截面)^[41]

圈2个部分，如图15所示，橡胶采用各向同性超弹性材料建模，钢丝圈采用各向同性线弹性材料建模，忽略了轮胎中具有各向异性属性的帘线材料。由于不考虑帘线的补强作用，因此需依靠仿真经验调整Mooney-Rivlin材料参数，对仿真工程师的经验要求较高。ZHU Maotao等^[42]通过试验测定轮胎径向刚度，根据轮胎刚度计算轮胎的材料参数，简化了轮胎模型。

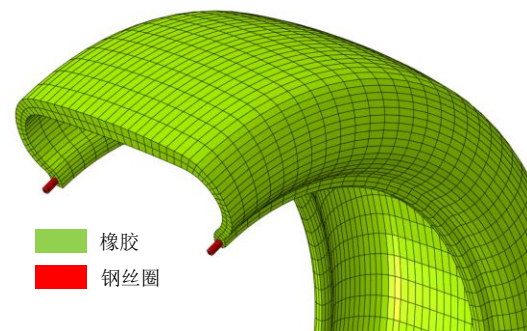


图15 简化轮胎模型

SATOSHI等^[43]建立了基于Neo-Hookean超弹性材料的轮胎模型，将全部橡胶材料简化为单一的橡胶实体，并在图15的基础上增加帘线（包括带束层与胎体帘线），如图16所示。在帘线内建立与轮胎轴线成一定角度的加强纤维，考虑了帘线各向异性对轮胎模型的影响。简化轮胎模型基于轮胎的实际结构与研究问题的需要，注重提高仿真效率，实用性较高。

为了获得更精确的冲击仿真结果，研究人员考虑轮胎内部结构，提出了复合材料轮胎模型^[44]来评估车轮冲击性能，如图17所示。图17在图16的基础上增加了胎面胶、三角胶等结构，比简化轮胎模型更接近轮胎的实际结构，通常计算精度更高，

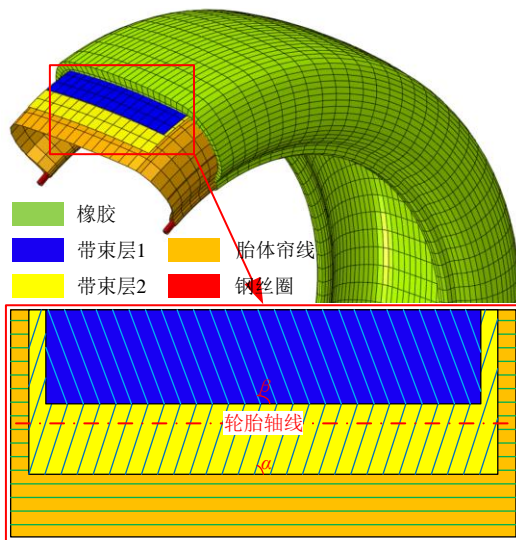


图 16 简化轮胎模型 (考虑帘线)

但模型复杂度高, 仿真效率较低, 收敛性较差。

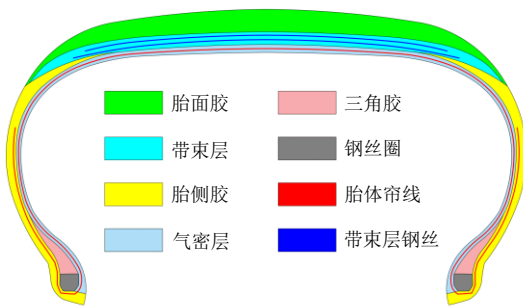


图 17 复合材料轮胎模型 (横截面) [42]

此外, 为兼顾计算效率与精度, PREVIATI 等 [18, 34] 通过试验与仿真的方式简化了轮胎模型。通过测量轮胎外形, 建立了具有真实几何轮廓的轮胎模型; 通过对标轮胎的径向刚度、频率响应, 调整轮胎模型的材料参数; 考虑到车轮和轮胎总成的对称结构, 使用“对称约束”建立车轮 90° 冲击有限元模型。该方法通过试验与仿真的方式确保了轮胎的准确性, 兼顾了仿真效率与精度, 为简化轮胎模型提供了参考方法, 但“对称约束”的方式不适用于车轮和轮胎总成结构非对称的情形。

现有研究表明: 采用简化轮胎模型和复合材料轮胎模型的车轮冲击仿真都能预测车轮的失效 [45]。简化轮胎模型的计算效率较高, 计算资源需求较少; 复合材料轮胎模型的分析精度较高, 但仿真效率较低, 收敛性存在不足。

2.2.2 胎压模型

车轮 90° 冲击试验中的轮胎充气压力为车辆制

造厂规定值。由于气体的可压缩性, 在 90° 冲击试验过程中, 冲锤冲击轮胎, 轮胎与轮辋组成的空腔容积会发生变化, 进而引起胎压的变化, 传递的载荷也随之变化。胎压模型直接影响着载荷的传递, 是冲击仿真的重要内容之一。

现有的研究将胎压设置为恒定的压力载荷并施加于轮胎与轮辋组成的空腔内表面, 在冲击过程中, 压力的大小保持不变, 且力的方向始终垂直于空腔内表面, 如图 18 所示。该方法无需考虑冲击试验过程中的胎压变化, 降低了模型的复杂性, 但与实际试验时胎压的变化情况不符。

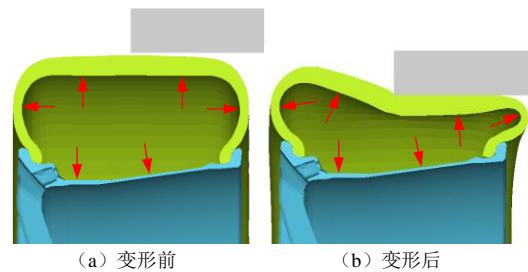


图 18 恒定胎压示意图

尹冀 [46] 在轮胎和轮辋之间定义封闭气囊, 模拟车轮冲击过程中的胎压变化关系。该方法采用实体建模的方式建立气囊模型, 为模拟胎压变化关系提供了参考方法。王登峰等 [8] 在车轮冲击仿真中采用 LS-DYNA 的 Airbag 技术, 冲击结束后, 发现胎压降低, 但未给出胎压降低的具体数值。喻义远 [47] 在摩托车车轮冲击仿真中考虑了胎压变化, 结果表明, 在一个冲击仿真过程中, 胎压增加了 9.2%。与恒定胎压相比, 非恒定胎压更符合实际的冲击情况, 但也增加了有限元模型的复杂性。胎压模型类似于流体与腔道的相互作用模型, 有研究人员基于流体腔 [48] 的方法模拟了此相互作用过程。随着仿真技术的发展, 90° 冲击仿真中的胎压随空腔容积的变化关系将被更真实地模拟, 从而有助于提升仿真精度。

2.2.3 接触属性

在车轮 90° 冲击仿真中, 不仅冲锤与轮胎、胎圈与轮缘、气密层与轮辋会发生接触, 而且轮胎内表面也会发生接触 (自接触), 如图 19 所示。

车轮 90° 冲击仿真中的接触属性主要为摩擦接触, 目前通常采用一个恒定的摩擦因数或绑定约

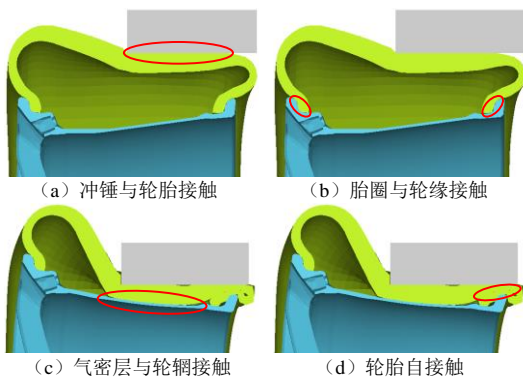


图19 接触关系

束。PREVIATI等^[34]将摩擦因数统一设置为0.5, GAO Qian等^[44]将胎圈与轮缘之间的相互关系设置为绑定约束。在冲击仿真领域,接触对仿真结果的影响的报道相对较少,而在非车轮冲击领域,众多学者对胎圈-轮缘之间的接触属性及其对仿真结果的影响进行了研究^[49-51]。

接触属性影响胎圈与轮缘的接触状态,通常采用摩擦接触,而摩擦因数与滑移率有关^[47],变化情况比较复杂,目前多采用恒定的摩擦因数。接触属性对车轮90°冲击仿真结果的影响仍待进一步研究。

2.3 车轮90°与13°冲击仿真研究侧重点对比

车轮90°冲击仿真的关注点与13°冲击相同,均为车轮的力学响应。车轮13°冲击试验中,冲击位置为胎侧与外轮缘,轮胎冲击变形小,胎压变化小,极少出现胎圈与轮缘分离现象。在13°冲击仿真中,可以忽略或量化轮胎吸能系数,从而建立无轮胎的13°冲击仿真模型,计算效率高,计算精度损失较少。

车轮90°冲击试验中,冲击位置为轮胎上侧,冲锤与车轮不直接接触,冲击时轮胎发生大变形,胎压波动较大,在冲击载荷的作用下胎圈与轮缘容易发生分离。在90°冲击仿真中,轮胎模型的准确性直接影响载荷的传递,因此,必须考虑轮胎非线性模型、胎压变化、车轮和轮胎接触属性对冲击仿真的影响。

3 新技术在车轮冲击仿真中的应用

3.1 自动化仿真技术在车轮冲击仿真中的应用

车轮冲击仿真通常遵循标准化、规范化的分析

流程。借助仿真软件提供的接口,通过二次开发将分析流程固化,从而实现自动化仿真并出具报告。

2007年,中信戴卡股份有限公司已开始研发车轮仿真流程自动化系统^[52],使不具备有限元分析基础的设计师通过简单的操作,即可进行车轮冲击仿真。2008年,王晨至^[53]开发出具有人机交互界面的铝合金车轮冲击试验自动化仿真程序,用户只需导入输入文件和车轮几何模型,即可自动进行有限元分析。2023年,童哲铭等^[54]提出车轮-轮胎一体化冲击动力学仿真方法,用户只要连接云服务平台,然后上传或在线导入车轮模型和仿真参数,即可按步骤进行仿真计算,大大降低了仿真难度。自动化仿真技术的应用减少了大量重复性的前后处理工作,实现了冲击仿真的自动化,极大地提高产品的开发效率。

3.2 深度学习技术在预测车轮冲击性能中的应用

车轮新产品的开发往往需要反复迭代优化才能获得最佳的设计^[55],自动化仿真技术虽然极大地提升了仿真效率,但是仍需要较高的计算成本。随着人工智能技术的发展,研究者将深度学习方法应用于车轮产品开发,通过深度学习模型实时预测产品性能,以提高产品开发效率,从而进一步缩短产品开发周期。

2019年,OH等^[56]提出一种基于深度学习的2D车轮生成设计方法。2021年,YOO等^[57]将2D车轮生成方法扩展到3D车轮设计。2023年,SHIN等^[58]提出三维13°车轮冲击深度学习模型,整个研究过程分成4个阶段,如图20所示。深度学习方式使用车轮的2D图像数据、3D体素数据和冲击载荷作为输入,以预测应力分布,输出最大应力的大小及其坐标 (x, y, z) 。输入数据通过3D卷积变分自编码器(cVAE)和2D卷积自编码器(cAE)被压缩进入一个潜在空间。使用全连接层来预测车轮冲击性能,输出最大应力及其坐标,并使用解码器来预测应力分布。

深度学习模型采用多模态自编码器架构,使用各种类型的数据作为输入和输出,以提高预测的准

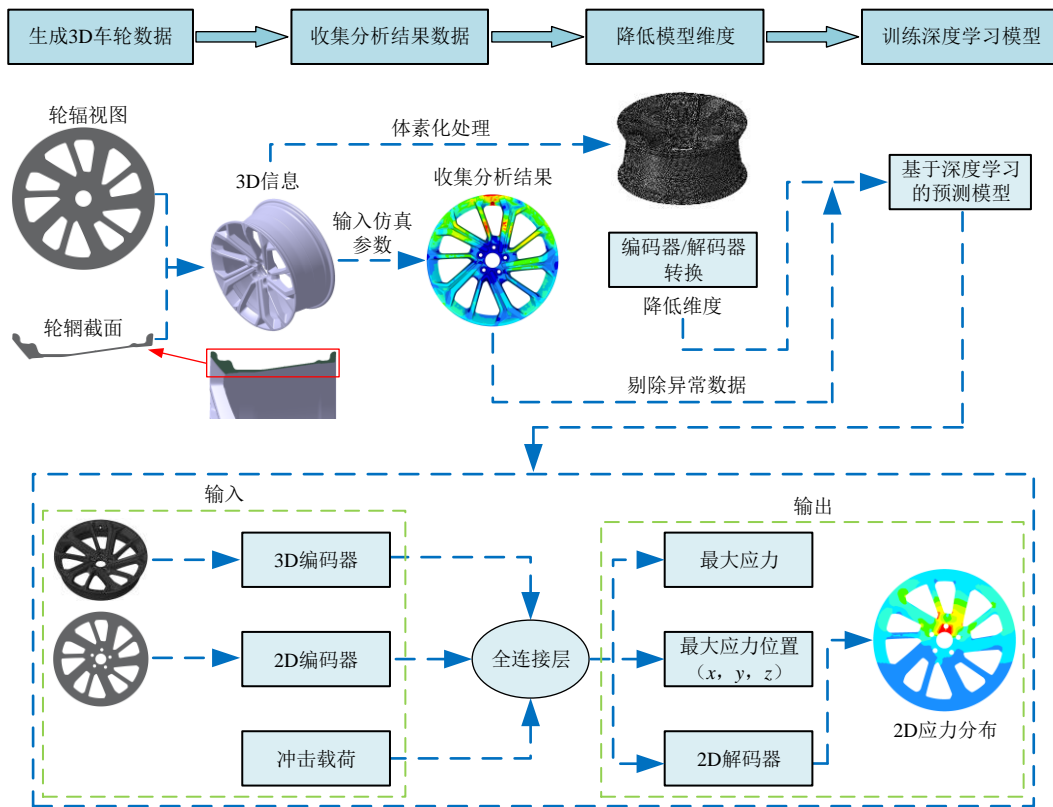


图 20 深度学习方法流程

确性，并通过实际生活中使用的车轮进行迁移学习，验证了模型的预测性能。在实际预测时，由于轮辋中心面至内轮缘部位的轮辋下半部分应力较低，因此，将轮辋上半部分（包括轮辐）的体素数据、二维图像数据、冲击载荷作为输入（忽略轮辋下半部分），从而缩小数据集的规模，并提高训练效率。

研究表明^[58]，采用深度学习预测车轮的冲击性能仅需 1 ms，分析效率远超现有的有限元方法，有利于进一步缩短车轮产品的开发周期。然而，深度学习目前依然存在问题，如训练集样本数量不够、最大应力值的预测精度仍有待提高。随着深度学习技术和自动化仿真技术的进步，通过相关企业长期的数据积累和模型训练，车轮冲击仿真将朝着智能化方向发展，推动车轮行业的技术进步。

4 总结与展望

轻合金车轮冲击仿真主要用于评估轻合金车轮在不同路况和使用条件下所受到的冲击力和应力分

布。根据车轮受到非垂直或垂直于轴向的冲击载荷，分为 13° 和 90° 冲击仿真。随着计算机技术和人工智能的发展，冲击仿真逐步向标准化、规范化、自动化和智能化方向发展。

1) 轻合金车轮冲击仿真对于改善车辆性能、提高安全性和延长零部件寿命都具有重要意义，可以帮助设计师更好地理解 and 优化轮毂和轮辋的设计。13° 冲击仿真技术趋于成熟，90° 冲击仿真仍在持续发展。在 90° 冲击仿真中，轮胎模型、胎压模型和接触属性对仿真效率、精度和准确性有很大的影响，对优化仿真方法具有重要意义，也驱动着冲击仿真技术不断发展。

2) 当前，自动化仿真和深度学习技术已被逐渐应用于车轮冲击仿真和实时预测车轮冲击性能，二者具有广阔的市场应用前景。自动化仿真技术有助于实现车轮冲击仿真的规范化、标准化和自动化，同时可以为深度学习技术提供数据集；深度学习技术通过大量数据的训练，有助于实现冲击仿真以及车轮设计的智能化。

参考文献 (References)

- [1] HIRANO A. Study on Wheel Stiffness Considering Balance Between Driving Stability and Weight [J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2015, 8(1): 205-212.
- [2] MILLER W S, ZHUANG L, BOTTEMA J, et al. Recent Development in Aluminium Alloy for the Automotive Industry [J]. Materials Science and Engineering, 2000, 280(1): 37-49.
- [3] CHAI Weihao, LIU Xiandong, SHAN Yingchun, et al. Research on Simulation of the Bending Fatigue Test of Automotive Wheel Made of Long Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Considering Anisotropic Property [J]. Advances in Engineering Software, 2018, 116: 1-8.
- [4] WANG Dengfeng, XU Wenchao. Fatigue Failure Analysis and Multi-Objective Optimization for the Hybrid (Bolted/Bonded) Connection of Magnesium-Aluminium Alloy Assembled Wheel [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 112: 1-17.
- [5] WANG Dengfeng, XU Wenchao, WANG Yong, et al. Design and Optimization of Tapered Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Rim for Carbon/Aluminum Assembled Wheel [J]. Polymer Composites, 2020, 42(1): 253-270.
- [6] 杨一鸣. 2021 镁业持续走绿色发展之路 [N]. 中国有色金属报, 2022-1-1(7).
YANG YiMing. 2021 Magnesium Industry Continues to Pursue a Green Development Path [N]. Journal of China Nonferrous Metal, 2022-1-1(7). (in Chinese)
- [7] 张坤, 张丹, 邹瑞睿, 等. CFRP 在汽车轻量化中的应用研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(10): 154-158, 163.
ZHANG Kun, ZHANG Dan, ZOU Ruirui, et al. Application Research Progress of CFRP in Automobile Lightweight [J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(10): 154-158, 163. (in Chinese)
- [8] 王登峰, 张帅, 汪勇, 等. 基于疲劳和 13° 冲击性能的组装式车轮优化设计 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(1): 44-56.
WANG Dengfeng, ZHANG Shuai, WANG Yong, et al. Optimization Design of Assembled Wheel Based on Performance of Fatigue and 13° Impact [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(1): 44-56. (in Chinese)
- [9] XU Wenchao, WANG Dengfeng. Influence Study of Connecting Methods on the 90° Impact Performance of Magnesium/Aluminium Assembled Wheel [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2023, 124: 1-13.
- [10] 王朝华. 铝合金轮毂结构轻量化设计关键技术研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- WANG Chaohua. Research on Key Technology of Lightweight Design for Aluminum Alloy Wheel Hub [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 道路车辆轻合金车轮冲击试验方法: GB/T 15704—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the P. R. C. Road Vehicles-Light Alloy Wheels-Impact Test Procedure: GB/T 15704—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. (in Chinese)
- [12] 韦洲, 张晓光, 马振哲. 基于有限元的旋压铝合金轮毂 13° 冲击分析 [J]. 铸造技术, 2018, 39(11): 2608-2610.
WEI Zhou, ZHANG Xiaoguang, MA Zhenzhe. Spinning of Aluminum Alloy Wheel Hub 13° Impact Based on the Finite Element Analysis [J]. Foundry Technology, 2018, 39(11): 2608-2610. (in Chinese)
- [13] SHANG R, ALTENHOF W, LI N, et al. Wheel Impact Performance with Consideration of Material Inhomogeneity and A Simplified Approach for Modeling [J]. International Journal of Crashworthiness, 2005, 10(2): 137-150.
- [14] WAN Xiaofei, LIU Xiandong, SHAN Yingchun, et al. Numerical and Experimental Investigation on the Effect of Tire on the 13° Impact Test of Automotive Wheel [J]. Advances in Engineering Software, 2019, 133: 20-27.
- [15] 闫胜咎, 童水光, 钟翠霞, 等. 基于 FEA 的车轮结构形状优化设计 [J]. 机械设计, 2009, 26(1): 53-55.
YAN Shengzan, TONG Shuiguang, ZHONG Cuixia, et al. Optimization Design of Wheel Structure Shape Based on FEA [J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(1): 53-55. (in Chinese)
- [16] 刘银峰. 基于有限元分析的铝合金轮毂结构优化设计 [J]. 企业科技与发展, 2016(7): 59-63.
LIU Yinfeng. Optimization Design of Aluminum Alloy Wheel Hub Structure Based on Finite Element Analysis [J]. Enterprise Technology and Development, 2016(7): 59-63. (in Chinese)
- [17] 郑玉卿, 刘建峰. 基于 Abaqus 显式算法的铸铝车轮碰撞模拟 [J]. 汽车工程, 2011, 33(2): 152-155, 161.
ZHENG Yuqing, LIU Jianfeng. Impact Simulation of Casting Aluminum Wheel Using Abaqus/Explicit [J]. Automotive Engineering, 2011, 33(2): 152-155, 161. (in Chinese)
- [18] BALLO F, PREVIATI G, MASTINU G. Impact Tests of Wheels of Road Vehicles: A Comprehensive Method for

- Numerical Simulation[J].International Journal of Impact Engineering, 2020, 146: 1-16.
- [19] CHANG C L, YANG S H. Simulation of Wheel Impact Test Using Finite Element Method[J].Engineering Failure Analysis, 2009, 16(5): 1711-1719.
- [20] MOHAMMED B K, VINOTHKUMAR S, SABARINATHAN S, et al. Simulation and Test Correlation of Wheel Impact Test[C]//SAE Technical Papers, 2011-28-0129, 2011.
- [21] OTARAWANNA S, UTTAMUNG P, MALATIP A. Finite Element Simulation and Experimental Validation of the Cracking Phenomenon in Aluminium Alloy Wheels During the Impact Test[J].AIP Conference Proceedings, 2018, 2030(1): 020303.1-202303.7.
- [22] SURESH B K, RAMANAIAH N, RAMAMURTY R P. Passenger Cars Wheel Performance Test Simulation for Service Life Evaluation: A Review[J].Journal of Failure Analysis and Prevention, 2022, 22(4): 1370-1392.
- [23] CHANG C L, YANG S H. Finite Element Simulation of Wheel Impact Test[J].Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2008, 28(2): 167-170.
- [24] 中华人民共和国工业和信息化部. 乘用车轻合金车轮 90°冲击试验方法: QC/T 991—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Passenger Cars—Light Alloy Wheels—90° Impact Test Procedure: QC/T 991—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [25] 李世德. 铝合金车轮径向冲击试验及有限元分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- LI Shide. Radial Impact Test and Finite Element Analysis of Aluminum Alloy Wheel [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015. (in Chinese)
- [26] WANG Dengfeng, ZHANG Shuai, XU Wenchao. Multi-Objective Optimization Design of Wheel Based on the Performance of 13° and 90° Impact Tests[J].International Journal of Crashworthiness, 2019, 24(3): 336-361.
- [27] 周洪海. 铝合金车轮扁平胎径向冲击实验失效分析及改善研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- ZHOU Honghai. Failure Analysis on Radial Impact Fatigue Test and Process Studies of Aluminum Wheels [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016. (in Chinese)
- [28] 赵丽红, 毕涛. 低压铸造铝合金车轮轮辋断裂分析及结构优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(1): 119-121.
- ZHAO Lihong, BI Tao. Fracture Analysis and Structure Optimization of Low Pressure Casting Aluminum Rim [J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2022, 42(1): 119-121. (in Chinese)
- [29] 童水光, 赵航, 徐稷旺. 采用代理模型的汽车铝合金轮毂优化设计[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(6): 234-240.
- TONG Shuiguang, ZHAO Hang, XU Jiwang. Optimization Method of Automobile Aluminum Alloy Wheel Hub Based on Surrogate Model[J]. Machine Design and Research, 2021, 37(6): 234-240. (in Chinese)
- [30] 熊威, 唐俊琦, 余家皓, 等. 铝合金车轮 90°冲击台架试验仿真方法研究[J]. 汽车零部件, 2019(10): 41-44.
- XIONG Wei, TANG Junqi, YU Jiahao, et al. Research on Aluminum Alloy Wheels' 90° Impact Bench Test Simulation [J]. Automobile Parts, 2019(10): 41-44. (in Chinese)
- [31] 江丙云, 孔祥宏, 罗元元. ABAQUS 工程实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2020: 289-290.
- JIANG Bingyun, KONG Xianghong, LUO Yuanyuan. Detailed Explanation of ABAQUS Engineering Example [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2020: 289-290. (in Chinese)
- [32] 敦勃文, 张响, 韩沧, 等. 铝合金轮毂冲击试验瞬态有限元分析[J]. 制造技术与机床, 2018(2): 17-20.
- DUN Bowen, ZHANG Xiang, HAN Cang, et al. Study on the Impact Test of Aluminum Alloy Wheel Based on Transient Finite Element Analysis[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2018(2): 17-20. (in Chinese)
- [33] 王利梅, 李建, 孙惠学. 铝合金车轮虚拟冲击台架试验研究[J]. 汽车零部件, 2017(7): 19-21.
- WANG Limei, LI Jian, SUN Huixue. Study on the Virtual Impact Bench Test of Aluminum Alloy Wheels [J]. Automobile Parts, 2017(7): 19-21. (in Chinese)
- [34] PREVIATI G, BALLO F, GOBBI M, et al. Radial Impact Test of Aluminium Wheels—Numerical Simulation and Experimental Validation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 126: 117-134.
- [35] RAFEI M, GHOREISHY M H R, NADERI G, et al. Computer Simulation of Tire Rolling Resistance Using Finite Element Method: Effect of Linear and Nonlinear Viscoelastic Models[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(11): 2746-2760.
- [36] 郭磊磊, 胡德斌, 崔志博, 等. 低滚动阻力轿车子午线轮胎带束层设计优化[J]. 轮胎工业, 2022, 42(12): 711-714.
- GUO Leilei, HU Debin, CUI Zhibo, et al. Optimization of Belt Design for Low Rolling Resistance Passenger Car Radial Tire[J]. Tire Industry, 2022, 42(12): 711-714. (in

- Chinese)
- [37] 杨恒潇.天然橡胶本构模型与轮胎成型仿真研究[D]. 郑州:郑州大学,2021.
YANG Hengxiao. Research on Natural Rubber Constitutive Model and Tire Forming Simulation [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021. (in Chinese)
- [38] 仇星文.轮胎橡胶材料疲劳损伤机理研究及其数值模拟[D].青岛:青岛科技大学,2023.
QIU Xingwen. Study on Fatigue Damage Mechanism of Tire Rubber Material and Its Numerical Simulation [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [39] 李宝华,胡金华,李昌海,等.铝合金车轮冲击试验的动态显示有限元分析[C]//2009中国汽车工程学会年会论文集.北京:机械工业出版社,2009:4.
LI Baohua, HU Jinhua, LI Changhai, et al. Dynamic Display Finite Element Analysis of Aluminum Alloy Wheel Impact Test [C]//Proceedings of the 2009 Annual Meeting of the Chinese Society of Automotive Engineers. Beijing: China Machine Press, 2009:4. (in Chinese)
- [40] 冷德新,王慎平,张永锋,等.半钢子午线轮胎的计算模态仿真研究[J].轮胎工业,2023,43(3):184-187.
LENG Dexin, WANG Shenping, ZHANG Yongfeng, et al. Study on Computational Modal Simulation of Steel-Belted Radial Tire [J]. Tire Industry, 2023, 43(3): 184-187. (in Chinese)
- [41] ANSYS. Tire Simulation V2022.1 [Z/OL]. [2024-03-06]. <https://catalog.ansys.com/product/6216493f5c619680e618d433/tire-simulation>.
- [42] ZHU Maotao, HAN Bing. Analysis of Impact Test of Aluminum Disc Wheels Based on FEM [C]//SAE Technical Papers, 2007-01-3648, 2017.
- [43] SATOSHI I, YASUKI S, NORIMASA N. Application of Impact Analysis for Aluminum Wheel with Inflated Tire [Z/OL]. [2024-03-06]. <https://docplayer.net/28227061-Application-of-impact-analysis-for-aluminum-wheel-with-inflated-tire.html>.
- [44] GAO Qian, SHAN Yingchun, WAN Xiaofeng, et al. 90-Degree Impact Bench Test and Simulation Analysis of Automotive Steel Wheel [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 105: 143-155.
- [45] ZAPATA A, GONZÁLEZ E, PERTUZ A. Damage Model for the Impact Test of an Automotive Aluminum Wheel [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1126: 1-7.
- [46] 尹冀.汽车钢制车轮的冲击性能仿真与轻量化研究[D].上海:上海交通大学,2013.
YIN Ji. Research on Simulation of Impact Characteristics and Lightweight Design of Steel Wheel [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [47] 喻义远.摩托车车轮冲击性能仿真[D].重庆:重庆大学,2019.
YU Yiyuan. Research on Simulation of Impact Characteristics of Motorcycle Wheel [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [48] 叶云凌,甘进,郑中毅,等.基于流体腔方法的海上充气膜结构抗弯承载性能研究[J].中国造船,2023,64(3):13-22.
YE Yunling, GAN Jin, ZHENG Zhongyi, et al. Investigation on Bending Behavior of Inflated Membrane Structure Based on Fluid Cavity Method [J]. Shipbuilding of China, 2023, 64(3): 13-22. (in Chinese)
- [49] 王泽鹏,马连湘,何燕.胎圈与轮辋接触对斜交轮胎有限元分析的影响[J].青岛科技大学学报(自然科学版),2008,29(2):154-159.
WANG Zepeng, MA Lianxiang, HE Yan. Impact of Bead-Rim Contact on the Finite Element Analysis Results of Bias Tire [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, 29(2): 154-159. (in Chinese)
- [50] 马心坦,蔡琼阳,李磊.考虑胎圈与轮辋接触的子午线轮胎模态分析[J].中国农机化学报,2016,37(5):176-179.
MA Xintan, CAI Qiongyang, LI Lei. Modal Analysis of Radial Tire with Bead-Rim Contact [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(5): 176-179. (in Chinese)
- [51] WAN Xiaofei, SHAN Yingchun, LIU Xiandong, et al. Tire-Rim Interface Pressure of A Commercial Vehicle Wheel Under Radial Loads: Theory and Experiment [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(11): 115008.1-115008.9.
- [52] 胡金华.铝合金车轮冲击强度试验工程仿真研究[C]//中国力学学会产学研工作委员会,陕西省国防科技工业信息化协会,中国数字仿真联盟,中国计算机学会高性能计算专业委员会.第十五届中国CAE工程分析技术年会论文集,2019:3.
HU Jinhua. Engineering Simulation Study on Impact Strength Test of Aluminum Alloy Wheels [C]// Industry-University-Research Work Committee of the Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, Shaanxi Provincial Association of National Defense Technology and Industry Informatization, China Digital Simulation Alliance, High Performance Computing Professional Com-

- mittee of the Chinese Computer Society.Proceedings of the 15th China CAE Engineering Analysis Technology Annual Conference, 2019:3.(in Chinese)
- [53] 王晨至.基于 ANSYS 的汽车轮毂性能试验专用分析程序开发[D].南京:南京理工大学,2008.
WANG Chenzhi. Development of an Analysis Program Specially for Automotive Wheel Hub Performance Test Based on ANSYS [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.(in Chinese)
- [54] 童哲铭,李猛强,童水光.一种轮毂-轮胎一体化车轮冲击动力学仿真方法:CN116384258A[P].2023-07-04.
TONG Zheming, LI Mengqiang, TONG Shuiguang. A Dynamic Simulation Method for Integrated Wheel Impact of Wheel Hub-Tire: CN116384258 [P]. 2023-07-04.(in Chinese)
- [55] SHIN S, SHIN D, KANG N.Topology Optimization via Machine Learning and Deep Learning: A Review[J].Journal of Computational Design and Engineering, 2023, 10(4): 1736-1766.
- [56] OH S, JUNG Y, KIM S, et al.Deep Generative Design: Integration of Topology Optimization and Generative Models[J].Journal of Mechanical Design, 2019, 141(11): 111405.1-111405.13.
- [57] YOO S, LEE S, KIM S, et al.Integrating Deep Learning into CAD/CAE System: Generative Design and Evaluation of 3D Conceptual Wheel [J].Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 64(4): 2725-2747.
- [58] SHIN S, JIN A H, YOO S, et al.Wheel Impact Test by Deep Learning: Prediction of Location and Magnitude of Maximum Stress [J].Structural and Multidisciplinary Optimization, 2023, 66(1): 1-20.

作者简介



陶士柯 (1995-), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机辅助工程。

Tel: 17826237257

E-mail: 284565307@qq.com

通信作者



张广冬 (1983-), 男, 江苏盐城人, 副教授, 主要研究方向为数字化设计和计算机辅助工程。

Tel: 13951558783

E-mail: gdzhang@ycit.edu.cn