

基于流体动力学的轮胎磨损颗粒物捕集通道位置研究

董家楠, 黄海波*, 常向东, 张 涛, 焦润楠

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 轮胎磨损颗粒物是车辆非尾气排放颗粒物的重要组成部分, 对大气悬浮颗粒物的影响日益增大, 对其进行捕集可减少对生态环境的潜在威胁. 基于喷射法和 R-R 颗粒物粒径分布, 建立了轮胎磨损颗粒物-轮胎-车辆流体动力学多相流模型, 采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟了汽车在不同行驶速度下轮胎与覆盖件之间的最大风压分布区域, 继而研究了 15 种磨损颗粒物捕集方案通道出入口位置与捕集率的关系. 结果表明: 轮胎磨损微小颗粒物在后轮处比在前轮处与壁面碰撞的数量多; 捕集率随捕集装置入口高度的增大而减小, 随出口与轮罩边缘距离的增大而增大; 出入口的动压压差越大, 捕集率越高; 当车速为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 入口位置 $H=297 \text{ mm}$, 出口位置 $L=600 \text{ mm}$ 时, 捕集率最高, 达到 56.32%; 入口位置 $H=297 \text{ mm}$ 时颗粒物捕集率均超过 40%, 出口位置 $L=600 \text{ mm}$ 时颗粒物捕集率均超过 35%.

关键词: 轮胎磨损颗粒物; 捕集率; 捕集通道; 入口

中图分类号: U461.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2020) 04-0049-06

随着燃烧颗粒物排放标准的日趋严格, 车辆非尾气排放颗粒物在大气悬浮颗粒物中所占比重日益增大. 轮胎磨损颗粒物是车辆非尾气排放颗粒物的重要组成部分^[1-2], 有研究表明轮胎磨损颗粒物约占汽车颗粒物总排放量的 5%~30%^[3]. 德国每年因汽车轮胎磨损所产生的 PM_{10} 达 5.6~9.8 万 t ^[4]. 医学研究表明^[5-9], 轮胎磨损颗粒物会引发哮喘、细胞癌变和 DNA 受损, 是人类健康的巨大隐患.

目前国内外学者主要采用解析法、数值模拟和实验方法研究颗粒物(煤粉、扬尘和汽车尾气等)的扬散特性、化学成分等. 文献[10-11]运用解析法研究了煤粉颗粒物在受各种力情况下的运动轨迹, 得到了速度和温度梯度对煤粉颗粒运动轨迹的影响规律. 文献[12]采用实验和数值模拟方法研究了车辆在行驶过程中扬尘颗粒物的运动特性, 发现轮胎胎面形状和汽车行驶速度对磨损颗粒物的散射特性有重要影响. 文献[13]运用数值模拟方法研究了汽车尾气中气溶胶分布的形成情况, 发现硫

含量、半挥发性有机污染物、碳烟颗粒的质量和初始粒径对气溶胶形成影响显著. 文献[14]研究了轮胎磨损颗粒物的形貌特征、组成成分以及产生机理, 发现车速和负载对颗粒物形成有重要影响. 为研究颗粒物的空间扬散特性, 文献[15]分析了轮胎滚动速度对颗粒物与覆盖件碰撞位置的关系. 文献[16]获得了不同车速下颗粒物扩散的横向与纵向高度范围. 然而, 有关轮胎磨损颗粒物捕集的研究尚未见报道.

本文基于多相流理论, 采用喷射法和 R-R 粒径分布模拟轮胎磨损颗粒物的剥离, 建立了轮胎磨损颗粒物-轮胎-车辆流体动力学模型, 并验证了模型的正确性. 同时, 模拟了轮胎滚动过程中磨损颗粒物的运动轨迹, 分析了不同车速下轮胎与覆盖件间的最大风压区域分布, 并据此设计了捕集通道方案, 计算了 15 种捕集通道位置的捕集率, 获得了最佳捕集方案. 研究结果可为轮胎磨损颗粒物捕集方案的设计提供参考.

收稿日期: 2019-09-02.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51975300).

第一作者: 董家楠(1992-), 男, 江苏南通人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 滚动体摩擦磨损. E-mail: 1364345314@qq.com

*通信作者: 黄海波(1978-), 男, 山东临沂人, 博士/教授, 主要研究方向: 滚动体摩擦磨损. E-mail: huanghaibo@nbu.edu.cn

1 轮胎磨损颗粒物-轮胎-车辆流体动力学模型

1.1 流体动力学模型

由于涉及流场和颗粒物,对轮胎磨损颗粒的研究属于多相流问题.本研究将流体看作连续介质,采用 Euler 法进行计算;将颗粒物看成离散相,采用 Lagrangian 法进行计算^[17].假设磨损颗粒为粒径不同的小球体,不考虑颗粒间的相互作用.轮胎磨损颗粒物在流场中主要受到重力、气流曳力和 Saffman 升力的作用,由于会受到湍流脉动的影响而产生无规则运动,因此选择随机湍流轨道模型来模拟流场和磨损颗粒物的多相运动.颗粒物在笛卡尔坐标系下的平衡力方程为:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_D(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \mathbf{F}_x, \\ \mathbf{F}_D = \frac{18\mathbf{u}}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24}, \\ Re = \frac{\rho d_p |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}|}{\mu} \end{cases}$$

式中: $\mathbf{F}_D(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p)$ 是流体曳力; $\mathbf{u}$ 是流体相速度; $\mathbf{u}_p$ 是颗粒物速度; g_x 是流体动力黏度,为 1.7894×10^{-5} ($\text{N} \cdot \text{s}) \cdot \text{m}^{-2}$; ρ_p 是颗粒物密度,为 $945 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ 是流体相密度,为 $1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; d_p 是颗粒物直径; Re 是雷诺数; C_D 是流体曳力修正系数; $\mathbf{F}_x$ 是颗粒物所受的其他外力.

轮胎磨损颗粒物采用喷射方法模拟,质量流率为 $10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,颗粒粒径符合 Rosin-Rammler 分布,粒径范围为 $0.1 \sim 280 \mu\text{m}$ ^[16,18].喷射口位置如图 1 所示,喷射速率为轮胎滚动的外胎面圆周切向速度,方向沿轮胎外表面切向.

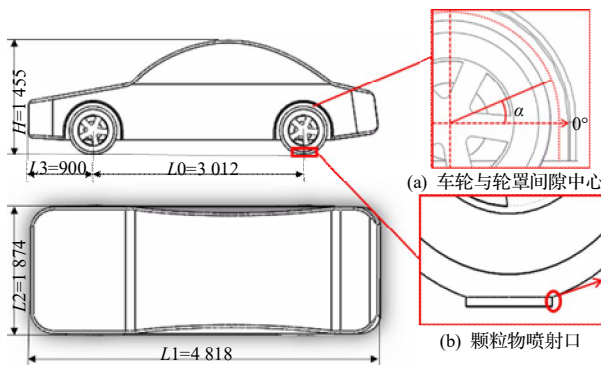


图1 汽车简化模型与颗粒物喷射口示意图(单位 mm)

以某车辆及其标配的 215/55 R16 型号轮胎为

研究对象,建立轮胎磨损颗粒物-轮胎-车辆流体动力学模型,简化去除车门把手、雨刮器和后视镜等零部件.车轮设置为旋转壁面,有效模拟轮胎滚动的流体动力学特性.计算域为长方体,可以使来流均匀化并使尾流充分展开,采用对称约束,取一半车身计算以提高运算效率.解算选择 Realizable $k-\varepsilon$ 模型,该模型优点是可以充分考虑旋转对湍流流动的影响,较好地模拟旋转剪切流动、含射流的自由流动及边界层流动^[19]. Realizable $k-\varepsilon$ 模型的数学方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_b, \\ C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \end{cases}$$

式中: ρ 是流体相密度; $\mathbf{u}_j$ 是脉动速度; $\mathbf{u}_t$ 是湍流速度; k 是湍流动能; ε 是耗散率; G_k 表示由于平均速度梯度而产生的湍流动能; G_b 是由浮力产生的湍流动能; Y_M 是可压缩湍流脉动膨胀所产生的波动; 常数 $C_2=1.92$, $C_{1\varepsilon}=1.44$; σ_k 和 σ_ε 分别是 k 和 ε 的湍流 Prandtl 数,为 1.0 与 1.3; S 为系数.

该模型采用四面体网格,对车身及轮胎附近进行了加密处理,网格大小为 5 cm,网格数量为 968 467 个,具体设置和边界条件参阅文献[16].

1.2 试验验证

车轮与覆盖件之间的气流流动特性对轮胎磨损颗粒物的运动轨迹有非常重要的影响.通过物理实验,采集轮盖间隙中面的风压与风速变化,并与数值模拟计算结果进行对比,验证轮胎磨损颗粒物-轮胎-车辆流体动力学模型的准确性.

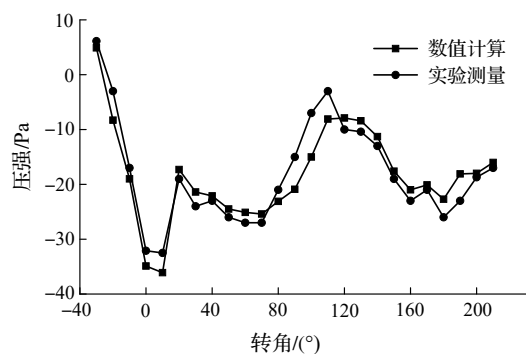
图2是车轮路面模拟试验装置,鼓风机和风速计用来产生和控制与轮胎滚动速度对应的流场.在轮胎与覆盖件间隙中间设置测点(图1中虚线所在面),轮心角 α 从 -30° 开始到 210° 结束,每过 10° 设置一个监控点,共设测点 25 个.

运行实验装置,稳定 20 min 后进行实验.轮胎

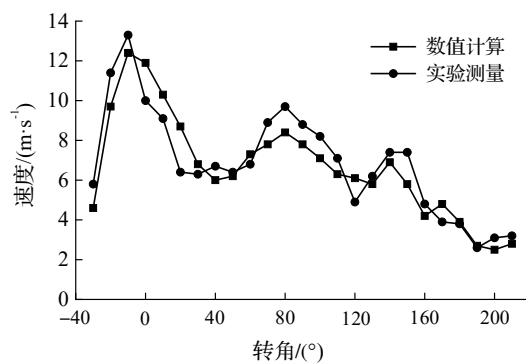
负载 3 000 N, 速度 $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 使用风速计测量风压与风速. 图 3 为实验和模拟计算获得的气流压强与速度, 从图 3 可发现, 数值模拟值和试验值基本吻合, 验证了所建立数值模拟模型的正确性.



图2 车轮路面模拟试验装置



(a) 气流压强



(b) 气流速度

图3 车轮与轮罩间的气流压强和速度分布

2 仿真结果分析

2.1 磨损颗粒物散射特性

轮胎磨损颗粒物在车速 $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时的运动轨

迹如图 4 所示. 从图 4 可看出, 磨损颗粒物从接地面后方射出后, 磨损大颗粒在流场作用下大部分经车轮底部向后和经覆盖件阻挡后向侧后方飘散, 磨损小颗粒则主要经覆盖件阻挡后向侧后方扬散和随轮胎滚动和覆盖件形状进入轮盖间隙. 同时可看出, 前轮产生的一部分磨损颗粒物在后轮处混合进入覆盖件与轮胎间隙, 因此后轮-轮盖间隙比前轮集聚了更多的微小磨损颗粒物.

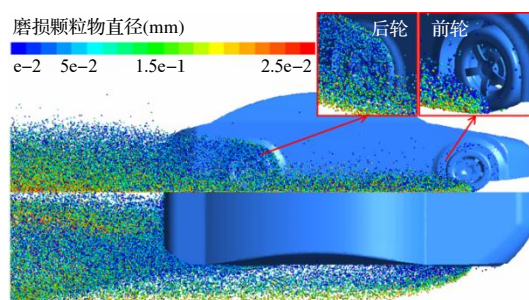


图4 某时刻轮胎磨损颗粒物的运动轨迹

2.2 风压特性分析

由于轮胎磨损颗粒物微小, 其轨迹很大程度上会受到轮胎-轮罩附近气流的影响, 并随气流扬散, 因此可以根据气流流场判断轮胎磨损颗粒物的运动轨迹. 同时, 风速和风压较大的流域会携带较多的磨损颗粒物, 因此可以通过分析轮胎-轮罩附近的风速和风压走向来推断气流携带轮胎磨损颗粒物的轨迹和能力.

采用 30 、 60 、 90 、 $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 4 组不同车速进行数值模拟, 将获得的覆盖件壁面风压较大的区域作为开口的备选位置. 图 5 为不同车速下车轮中心平面处轮胎-覆盖件间隙的风压云图(单位 Pa).

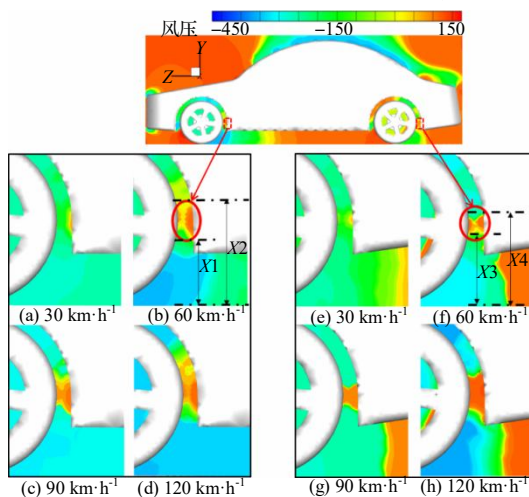


图5 不同车速下轮胎侧向中心面处的风压示意图

从图 5 可发现, 在不同速度下前、后轮胎正后方轮罩处均存在风压较大的区域, 且位置相对集中, 轮心角 α 对应的轮罩区域均在 $[-10^\circ, 20^\circ]$ 之间. 将风压较大区域下、上边界到地面的距离分别设为 $X1$ 、 $X3$ 和 $X2$ 、 $X4$.

图 6 为 $X1$ 、 $X2$ 、 $X3$ 、 $X4$ 值的变化. 从图 6 可看出, 下、上边界随车速增大呈现非线性变化, 下边界逐渐减小, 上边界逐渐增大, 风压集中区域范围随车速增大而增大, 前、后轮风压范围高差分别在 $40 \sim 227 \text{ mm}$ 与 $27 \sim 210 \text{ mm}$ 之间, 对应车速 $30 \sim 120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. 前、后轮风压集中区域范围在 $226 \sim 492 \text{ mm}$ (图 6 中虚线所示).

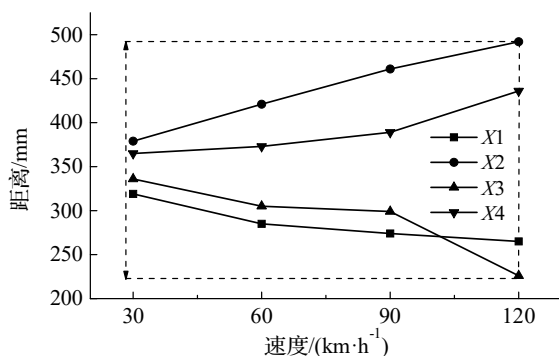


图 6 $X1$ 、 $X2$ 、 $X3$ 、 $X4$ 值的变化

2.3 轮胎磨损颗粒物捕集通道位置和捕集率

如前所述, 可以通过分析轮胎-轮罩附近的风速和风压走向来推断气流携带轮胎磨损颗粒物的轨迹和能力, 因此可以据此设计捕集方案. 具体捕集思路为: 设定捕集通道, 将磨损颗粒物引入通道进行捕集. 根据轮胎-轮罩结构, 将覆盖件壁面风压最大的区域作为捕集通道的入口, 在车辆底部设置捕集通道出口, 将轮胎磨损颗粒物引入捕集通道. 根据风压最大区域范围和高度, 设计捕集装置的通道出入口(图 7).

矩形捕集通道高 100 mm , 宽 200 mm , 中心距离地面高度为 H . 入口设置在轮胎正后方对应的覆盖件上, 捕集装置通道出口位于车身底部, 与车身底部呈 45° 夹角. 设磨损颗粒物进入通道后即完全捕集. 又设 H 为 297 、 338 、 375 、 407 、 436 mm , 对应轮心角 α 为 -5° 、 0° 、 5° 、 10° 、 15° , 出口位置距离覆盖件边缘 L 分别取 400 、 500 、 600 mm . 为了获得轮胎磨损颗粒物捕集率, 对 15 种通道方案分别进行轮胎磨损颗粒物捕集的数值模拟. 汽车

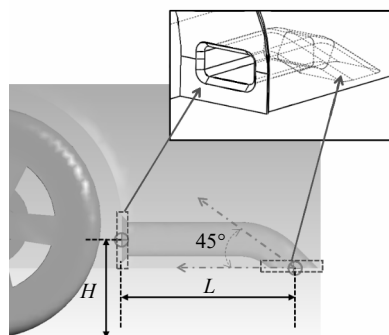


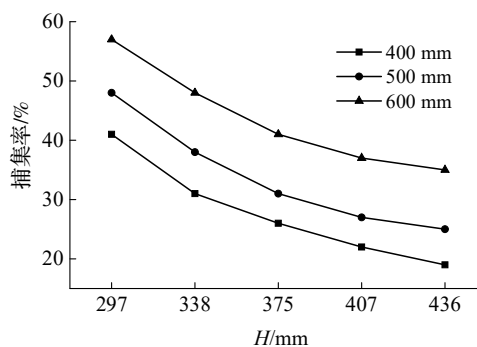
图 7 捕集装置通道出入口示意图

行驶速度为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 负载 3000 N . 以轮胎磨损颗粒物在流场区域内的平均浓度为指标, 通过 CFD-POST 软件计算每个网格点的颗粒物质量, 综合所有网格得到整个流场区域的颗粒物质量, 然后除以流场体积, 得到流场区域内的平均浓度. 捕集率的计算公式为:

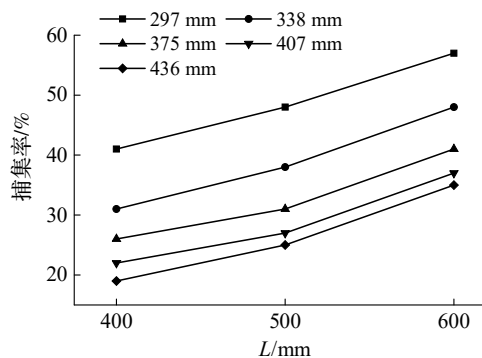
$$\eta = (w - w_i) / w \times 100\%,$$

式中: η 是轮胎磨损颗粒物捕集率; w 是未安装捕集装置时流场中轮胎磨损颗粒物平均浓度; w_i 是流场中轮胎磨损颗粒物的平均浓度.

15 种方案的捕集率如图 8 所示.



(a) 入口中心点高度



(b) 出口距离

图 8 15 种方案的捕集率

从图 8(a)可知, 当出口位置固定时, 随着 H 增大, 捕集率呈下降趋势, 说明捕集率随入口位置的升高而减小, 在 H 为 297 mm 时, 捕集率达到最大. 从图 8(b)可知, 当入口位置固定时, 随着 L 增大, 捕集率逐渐升高, 说明捕集率随出口位置的远离而增大, 在 L 为 600 mm 时捕集率达到最大值. 当 $H=436$ mm, $L=400$ mm 时, 捕集率最低, 为 19.45%. 当捕集装置出入口位置分别在 $H=297$ mm 和 $L=600$ mm 时, 颗粒物捕集率最高, 达到 56.32%, 其中入口位置 $H=297$ mm 时颗粒物捕集率均超过 40%, 出口位置 $L=600$ mm 时颗粒物捕集率均超过 35%.

2.4 前后轮处捕集通道出入口的压差

图 9 为 15 种方案前、后轮处捕集通道出入口的压差值. 从图 9 可看出, 前、后轮处捕集通道出入口的压差值随 H 增大呈非线性减小, 说明压差随入口位置的升高而减小, 当 H 为 297 mm 时, 前、后轮处通道出入口的压差达到最大, 分别为 33.80 Pa 和 18.94 Pa. 当入口位置固定时, 前、后轮处的压差值大小顺序为: $L=600$ mm, $L=500$ mm, $L=400$ mm. 结合捕集率可说明通道出入口压差与通

道的颗粒物捕集率呈正相关关系, 即压差越大, 进入通道的磨损颗粒物就越大, 捕集率越高.

3 结论

(1) 轮胎磨损颗粒物会进入轮胎与轮罩间隙并与轮罩壁面发生碰撞, 微小轮胎磨损颗粒物在后轮处比在前轮处与壁面碰撞的数量更多.

(2) 轮胎-覆盖件间的风压区域相对集中, 在 40~120 km·h⁻¹ 车速下, 覆盖件风压集中区域的风压范围的高差在 40~227 mm 之间, 风压集中区域范围在 226~492 mm, 这为设计捕集装置入口位置提供了参考依据.

(3) 捕集率随捕集装置入口高度的增大而减小, 随出口与轮罩边缘距离的增大而增大. 出入口压差越大, 捕集率越高. 当车速为 60 km·h⁻¹ 时, 入口位置 $H=297$ mm, 出口位置 $L=600$ mm 时, 捕集率最高, 达到 56.32%. 入口位置 $H=297$ mm 时颗粒物捕集率均超过 40%, 出口位置 $L=600$ mm 时颗粒物捕集率均超过 35%.

参考文献:

- [1] Yu L D, Wang G F, Zhang R J, et al. Characterization and source apportionment of PM_{2.5} in an urban environment in Beijing[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2013, 13(2):574-583.
- [2] Thorpe A, Harrison R M. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review [J]. Science of the Total Environment, 2008, 400(1/2/3): 270-282.
- [3] Harrison R M, Jones A M, Gietl J, et al. Estimation of the contributions of brake dust, tire wear, and resuspension to nonexhaust traffic particles derived from atmospheric measurements[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(12):6523-6529.
- [4] Wulff A, Pischinger R. Determination of emission factors for tire wear particles up to 10 microns by tunnel measurements[C]//Proceedings of 8th International Symposium Transport and Air Pollution Including Cost 319 Final Conference, 1999:265-272.
- [5] Wik A, Dave G. Occurrence and effects of tire wear particles in the environment — A critical review and an initial risk assessment[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(1):1-11.
- [6] Newman S E, Panter K L, Roll M J, et al. Growth and

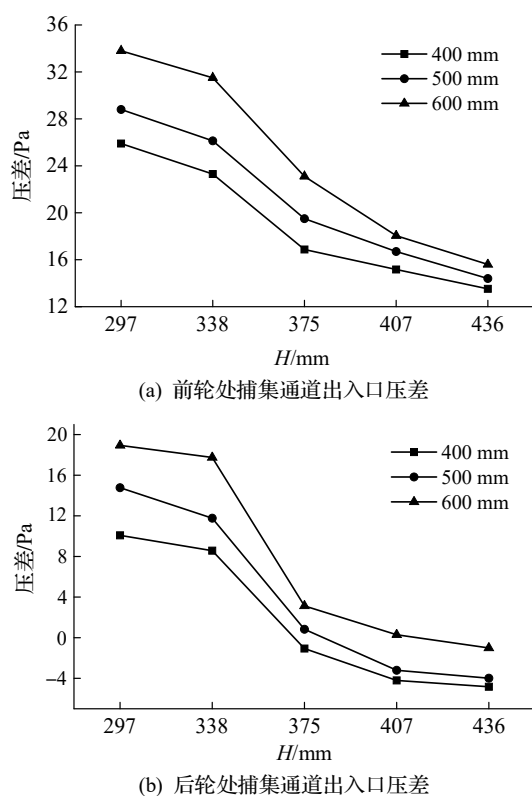


图9 前、后轮处捕集通道出入口压差

- nutrition of geraniums grown in media developed from waste tire components[J]. HortScience, 1997, 32(4):674-676.
- [7] Gualtieri M, Mantecca P, Cetta F, et al. Organic compounds in tire particle induce reactive oxygen species and heat-shock proteins in the human alveolar cell line A549[J]. Environment International, 2008, 34(4):437-442.
- [8] Gualtieri M, Andrioletti M, Mantecca P, et al. Impact of tire debris on *in vitro* and *in vivo* systems[J]. Particle and Fibre Toxicology, 2005, 2(1):1-14.
- [9] Gualtieri M, Andrioletti M, Vismara C, et al. Toxicity of tire debris leachates[J]. Environment International, 2005, 31(5):723-730.
- [10] 岑可法, 樊建人. 煤粉颗粒在气流中的受力分析及其运动轨迹的研究[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1987, 21(6):1-11.
- [11] 薛志亮. 水平槽道冷态气固两相湍流边界层中颗粒分布及颗粒尾流特性的实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [12] Gérardin F, Gentric C, Midoux N. Particle dispersion in the near-wake of an isolated rotating wheel: Experimental and CFD study[J]. Journal of Aerosol Science, 2014, 76: 56-71.
- [13] Albriet B, Sartelet K N, Lacour S, et al. Modelling aerosol number distributions from a vehicle exhaust with an aerosol CFD model[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(8):1126-1137.
- [14] 刘金朋, 黄海波, 李淑欣, 等. 轮胎磨损颗粒物形貌及产生机理的实验研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(5): 587-593.
- [15] 轩闪闪, 黄海波, 刘金朋, 等. 基于解析方法的轮胎磨损颗粒物运动轨迹分析[J]. 中国机械工程, 2017, 28(8): 1002-1007.
- [16] 卢轩, 黄海波, 张涛, 等. 汽车轮胎磨损颗粒物扩散特性的数值模拟研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2019, 32(1):44-51.
- [17] 唐家鹏. ANSYS FLUENT 16.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- [18] Marisa L K, Julie M P, Britt L M, et al. Physical and chemical characterization of tire-related particles: Comparison of particles generated using different methodologies[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(3):652-659.
- [19] 杨志刚, 沙潇, 贾青. 车轮宽度对轿车风阻的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(11):1682-1732.

The positioning of the capture tunnel for tire wear particles based on fluid dynamics

DONG Jianan, HUANG Haibo*, CHANG Xiangdong, ZHANG Tao, JIAO Runnan
(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Tire wear particles are the non-exhaust emission of vehicles, which have great potential threat to the ecological environment. In this paper tire wear particle-wheel-vehicle model was built based on both injection method and the R-R model for particles distribution. The maximum position of wind distribution between the tire and wheel covers was investigated utilizing reliable $k-\varepsilon$ turbulence model. 15 kinds of capture cases for entrance and exit positions and their capture ratios were explored. The results show that the qualities of fine tire wear particles entering the gap between the rear wheels and tire covers are greater than that near the front wheels. The capture ratio increases with the lower entrance position and higher distance from the exit to the entrance. The capture ratio reaches maximum to 56.32% when the entrance position is at $H=297$ mm and exit position is at $L=600$ mm. The capture ratio is beyond 40% and 35% when the entrance position is at $H=297$ mm and exit position is at $L=600$ mm, respectively.

Key words: tire wear particle; capture ratio; capture tunnel; entrance

(责任编辑 史小丽)