

汽车轮胎磨损颗粒物扩散特性的数值模拟研究

卢 轩, 黄海波*, 张 涛, 董家楠

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为了解汽车轮胎磨损颗粒物的扩散特性, 采用离散相模型方法, 考虑离散相和流体相的双向耦合作用, 利用 Rosin-Rammler 粒径分布模型, 模拟了不同工况下汽车行驶过程中轮胎磨损颗粒物的运动轨迹. 结果表明: 汽车尾部旋转涡流对颗粒物扩散横向距离有较大影响, 对扩散高度影响不大. 当距离汽车前轮中心竖直平面后方一定时, 颗粒物扩散高度与车速基本呈线性关系. 在距离汽车前轮中心竖直平面后方 5 m 时, 地面处不同位置颗粒物质量浓度变化呈双峰分布, 而在距离为 10 m 时呈单峰分布, 与气流在截面形成不同尺度的漩涡有关. 车速相同时, 粒径越大, 颗粒物沉积越显著. 随着车速的增大, $0.1\sim 10\ \mu\text{m}$ 的颗粒物在地面处质量浓度不断降低; $10\sim 200\ \mu\text{m}$ 的颗粒物在地面处质量浓度先增大后减小, 并在车速为 $60\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时达到最大值.

关键词: 轮胎磨损颗粒物; 运动轨迹; 扩散特性; 数值模拟

中图分类号: U501

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 01-0044-08

随着城市化进程的加快和居民机动化出行需求的激增, 全国汽车保有量迅猛增长, 汽车造成的污染问题日趋严重. 汽车是公认的大气中总悬浮颗粒物(Total Suspended Particulate, TSP)的主要来源之一, 包括汽车尾气排放和非尾气管排放两部分, 其中后者包括轮胎磨损、制动磨损、路面磨损和扬尘等^[1-2]. 近年来汽车尾气排放控制技术得到了快速发展, 排放标准也得到了大力完善, 随着《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第 6 阶段)》^[3]的出台以及实施, 汽车排放标准将更加严格, 该标准分 6a 和 6b 两个阶段实施, 6a 阶段的轻型汽车颗粒物排放限值为 $0.0045\ \text{g}\cdot\text{km}^{-1}$, 6b 阶段为 $0.003\ \text{g}\cdot\text{km}^{-1}$.

轮胎胎面和路面之间的摩擦接触导致轮胎磨损并剥落, 产生橡胶颗粒、炭黑及氧化锌颗粒等磨损颗粒物, 这些颗粒物尺寸在 $0\sim 350\ \mu\text{m}$ 之间, 其中空气动力学直径大于 $10\ \mu\text{m}$ 的颗粒物在重力作用下最终沉积在道路上, 而小于 $10\ \mu\text{m}$ 的颗粒物将扩散到大气中^[4-5]. 每条乘用车轮胎在使用期间由于车辆运行而产生的进入大气中的轮胎颗粒物质量约为

$1.4\sim 1.9\ \text{kg}$, 则每条轮胎磨耗速率为 $0.028\sim 0.038\ \text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ^[6], 已超过中国第 6 阶段轻型汽车颗粒物排放限值. Wulff 的研究显示德国轮胎磨损的 PM_{10} 年排放量为 5.6~9.8 万吨, 柴油车尾气的 PM_{10} 年排放为 7.6 万吨, 表明轮胎磨损排放量与汽车尾气排放量相当, 需要引起高度重视^[7]. 随着新能源汽车产业的快速发展, 零尾气排放的绿色环保型车辆在未来有可能取代传统发动机车辆, 这样轮胎磨损颗粒物排放将成为车辆的主要污染排放源之一.

越来越多的流行病学研究表明, 人类早死于心肺疾病与长期呼吸微细颗粒物存在显著的正相关^[8]. 道路车辆轮胎磨损颗粒物对大气颗粒物污染有较大贡献率, 道路周围的空气中轮胎颗粒物质量浓度为 $0.4\sim 11\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[9]. Fauser^[10]估计, 对于一个处于城市中心空气中的人来说, 其呼吸系统中超细轮胎颗粒的沉积为 $1.09\ \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$.

目前主要采用数值解析和数值模拟等方法研究球形煤粉^[11-12]、粉尘^[13-14]在气流场中的受力及运动轨迹; 采用实验研究和数值模拟等方法研究地面扬尘^[15-16]、机动车尾气污染物^[17-18]等的运动扩散

收稿日期: 2018-03-01.

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

基金项目: 国家自然科学基金(51205213); 浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划(2016R405070).

第一作者: 卢轩(1990-), 男, 湖北荆州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 轮胎摩擦磨损. E-mail: 1141800408@qq.com

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

特性. 对轮胎磨损颗粒物的研究主要集中在颗粒物的形貌、尺寸分布等物化性质^[2,5], 颗粒物的排放特征^[19]及颗粒物对生态环境和人类健康影响等方面, 在轮胎磨损颗粒物的扩散特性方面的研究相对较少. 鉴于颗粒物扩散特性研究对生态环境的重要意义, 本文基于气固两相流理论, 采用离散相模型对汽车行驶过程中轮胎磨损颗粒物的运动轨迹进行数值模拟, 分析不同车速下颗粒物的扩散横向距离和高度, 以及不同车速和粒径下地面处颗粒物质量浓度分布情况.

1 数值计算理论

1.1 湍流模型

通常状态下, 汽车在开阔空间行驶, 属于低马赫数的交通工具, 汽车周围流场考虑为不可压缩流体. 由于其外形复杂, 车身周围易引起气流分离, 汽车外流场属于黏性、不可压缩流, 具有典型的三维分离流动特性, 所以按湍流处理^[20]. Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型考虑了旋转和曲率对流动的影响, 能有效模拟旋转剪切流、含有射流的自由流及边界层流动等, 因此采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型.

1.2 离散相动力学模型

研究汽车外流场中的轮胎磨损颗粒, 属于多相流问题. 对颗粒相做如下假设: (1)所有颗粒相均为球形颗粒; (2)颗粒相在空气中所占体积浓度比很低, 视为离散相, 不考虑颗粒之间的相互作用. 因此采用离散相模型对颗粒物的扩散进行追踪, 用 Euler 方法描述空气流场, 用 Lagrange 方法对离散颗粒物的运动轨迹进行追踪^[21]. 颗粒的作用力平衡方程在笛卡尔坐标系下的表达式为:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u_f - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} + F_i, \quad (1)$$

式中: u_p 和 u_f 分别为颗粒和空气的速度; g 为重力加速度; ρ_p 和 ρ_f 分别为颗粒和空气的密度. $F_D(u_f - u_p)$ 为颗粒的单位质量曳力, 其中:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_p}{24}, \quad (2)$$

式中: μ 为空气动力黏度系数; d_p 为颗粒直径; C_D 为颗粒曳力系数, 可采用表达式:

$$C_D = a_1 + a_2 / Re_p + a_3 / Re_p. \quad (3)$$

对于球形颗粒, 在一定的雷诺数范围内, a_1 ,

a_2, a_3 为常数. Re_p 为颗粒相对雷诺数, 表达式为:

$$Re_p = \rho_f d_p |u_p - u_f| / \mu. \quad (4)$$

F_i 为颗粒所受的其他力项, 在车身近壁面, 主要是流场速度梯度引起的 Saffman 升力, 表达式为:

$$F_s = \frac{2Kv^{1/2}\rho_f d_{ij}}{\rho_d d_p (d_{lk} d_{kl})^{1/4}} (u_f - u_p), \quad (5)$$

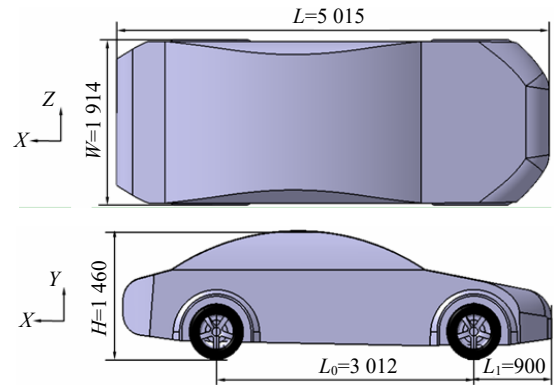
式中: K 为常数, 取 2.594; $v^{1/2}$ 为空气运动黏度系数; d_{ij}, d_{lk}, d_{kl} 为流体变形速率张量.

本文主要考虑颗粒在流场中受到的重力、气流曳力和 Saffman 升力对其扩散运动的影响. 处于流场中的颗粒, 一方面沿一定的轨道运动, 另一方面由于流体湍流脉动的影响, 颗粒还将围绕平均轨道进行扩散, 因此采用随机轨道模型来模拟湍流脉动对颗粒扩散运动的影响.

2 计算物理模型

2.1 几何模型的建立

以某汽车车身和 205/55/R16 型号轮胎模型为研究对象, 在不影响计算精度的情况下, 对三维模型进行简化, 忽略门把手、雨刮器和后视镜等附件, 并对底盘作平整化处理. 由于汽车外流场关于车身纵向对称面对称分布, 为节省计算资源, 实际计算模型取整车的一半, 图 1 所示为简化汽车模型.



L: 车长; W: 车宽; H: 车高; L_0 : 轴距; L_1 : 车头与前轮中心的距离.

图 1 简化汽车模型(mm)

2.2 计算域及网格划分

为使来流均匀以及尾流充分发展, 数值仿真时采用的计算域为长方体, 大小设置如下: 计算域入口到汽车前部为 3 倍车长, 计算域出口到汽车尾部为 6 倍车长, 计算域侧面到汽车一侧为 3 倍车宽, 计算域顶面到地面为 5 倍车高, 如图 2 所示.

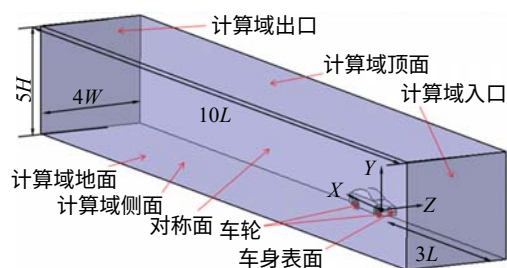


图2 计算域示意图

对汽车外流场仿真计算时需对计算域进行数值离散。采用四面体和三棱柱的混合网格形式对计算区域进行网格划分,为满足壁面函数的要求,在车身表面拉伸出与其平行的三棱柱网格来模拟附面层,同时在计算敏感区域(轮胎、车身近壁面流动区域、车尾区域)使用密度盒对网格进行加密处理,以达到局部网格细化来提高计算精度的目的。

2.3 轮胎磨损颗粒物粒径的确定

汽车行驶过程中因轮胎磨损产生的颗粒物是由不同粒径颗粒组成的颗粒群,为接近实际情况,假设粒径尺寸符合 Rosin-Rammler 分布,由文献[5]中实验数据得到轮胎磨损颗粒物粒径分布见表1。在 Rosin-Rammler 分布中假定颗粒直径 d_p 与大于 d_p 的那部分颗粒占整个颗粒群的质量分数 Y_d 之间存在指数关系,其表达式为:

$$\ln Y_d = -(d_p / \bar{d}_p)^n, \quad (6)$$

式中: n 为分布指数; $\bar{d}_p$ 为平均粒径。

表1 轮胎磨损颗粒物粒径分布

颗粒直径尺寸范围/ μm	质量分数/%	Y_d /%
>0~10	5	95
>10~40	10	85
>40~80	25	60
>80~120	28	32
>120~160	15	17
>160~200	10	7
>200~240	5	2
>240~280	2	0

拟合表1中数据得到如图3所示的曲线,在图中过 $Y_d = e^{-1} \approx 0.368$ 作一条水平线,与曲线相交点的横坐标值为平均粒径 $\bar{d}_p$,则其估计值为 $113 \mu\text{m}$ 。由下式得分布指数为 4.22:

$$n = \frac{\ln(-\ln Y_d)}{\ln(d / \bar{d}_p)} \quad (7)$$

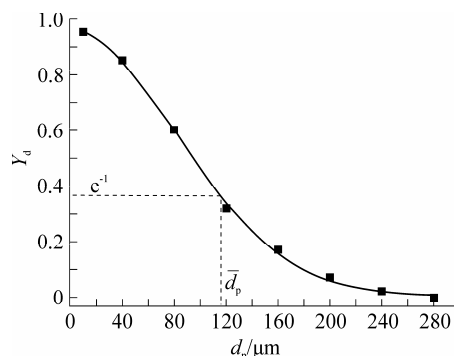


图3 轮胎磨损颗粒物质量累积率尺寸分布

2.4 边界条件的设置

本文对汽车轮胎磨损颗粒物的扩散特性分析时,选取4个具有代表性的汽车行驶速度作为考察对象,分别为 30, 60, 90 和 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。不同车速下雷诺数与湍流强度的计算值见表2。

表2 不同车速下雷诺数与湍流强度

车速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	雷诺数	湍流强度/%
30	4 644 127.65	2.35
60	9 288 255.30	2.15
90	13 932 383.00	2.05
120	18 576 510.60	1.97

根据轮胎磨损颗粒物的来源与产生机理,数值模拟时主要设置前轮和后轮颗粒相喷射口,喷射口位置为轮胎与地面接地印迹后方,如图4所示。前后轮颗粒相喷射口质量流率均设置为 $10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,由文献[5]得颗粒物材料密度为 $945 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

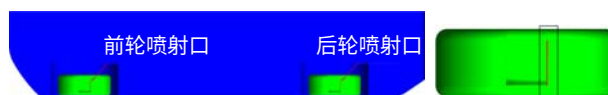


图4 颗粒相喷射口设置

(1)连续相边界条件:计算域入口采用速度入口边界条件,速度大小为汽车行驶速度;计算域出口采用压力出口边界条件,出口压力 $p = 0$ (相对于大气压);考虑到地面效应,设置计算域地面移动速度与计算域入口速度一致;车身表面采用无滑移壁面边界;车轮采用旋转壁面边界条件,旋转角速度 $\omega = u_c / r$,其中 u_c 为车速, r 为轮胎半径;其余壁面均采用对称边界条件。

(2)计算域入口与出口采用逃逸“escape”边界条件,颗粒在此逃离计算域且停止计算颗粒轨迹;其余壁面均采用反弹“reflect”边界条件,颗粒在此处反弹而发生动量变化。

3 模拟结果及分析

3.1 轮胎磨损颗粒物的沿程扩散域分析

为分析颗粒物的沿程扩散域, 对汽车行驶过程中不同粒径颗粒物(将颗粒相喷射口设置为表 1 中的颗粒群)的运动进行模拟, 得到颗粒物运动轨迹, 分别在距汽车前轮中心竖直平面后方一定位置统计颗粒物的扩散横向距离和高度, 即颗粒物到车身纵向对称面和地面的距离, 如图 5 所示. 以汽车前轮中心竖直平面为基准面 $X=0$, 每间距 1 m 截取一个测量平面, 在计算域内共截取 35 个平面.

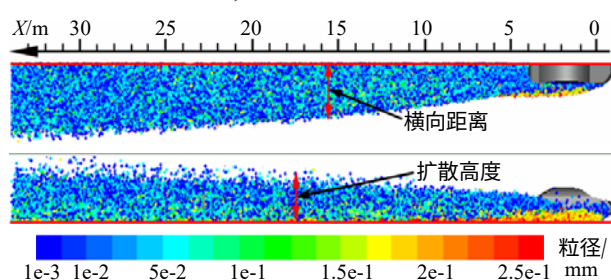
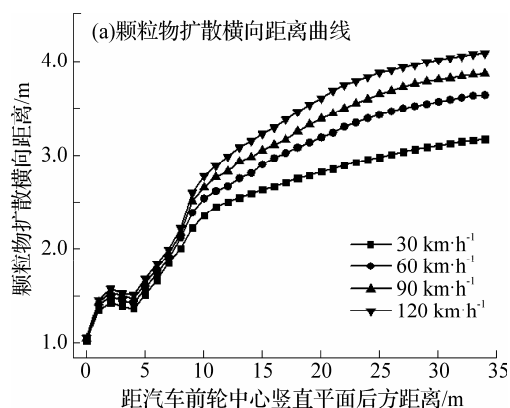


图 5 颗粒物扩散运动轨迹

3.1.1 车速对颗粒物沿程扩散横向距离的影响

图 6 为颗粒物扩散横向距离变化曲线以及汽车尾部三维流线图. 从图中可以看出, 不同车速下颗粒物沿程扩散横向距离的变化趋势相同. 汽车以一定速度行驶, 颗粒物从前轮颗粒相喷射口射出, 在轮腔内外压差与强剪切速度的作用下, 在



(b) 汽车尾部三维流线图

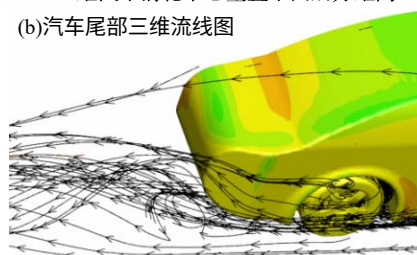


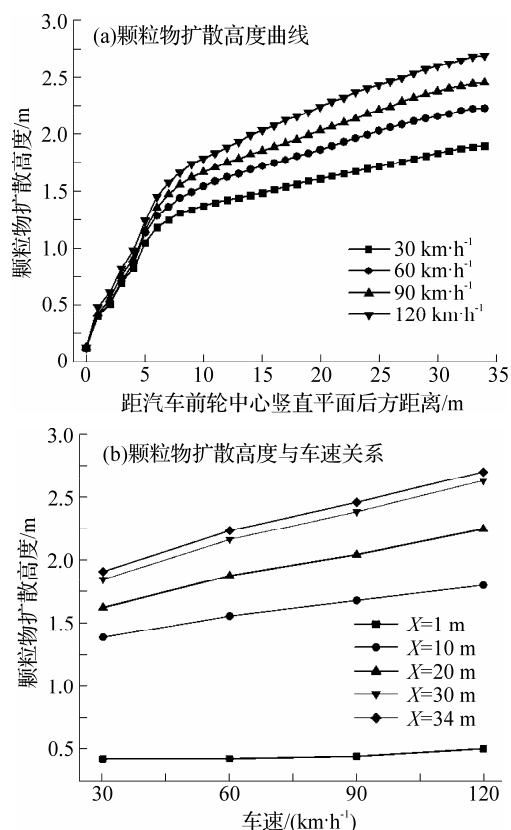
图 6 颗粒物扩散横向距离变化及汽车尾部三维流线图

$X=0$ 与 $X=3$ m 之间, 扩散横向距离不断增大. 在 $X=3$ m 与 $X=5$ m 之间, 由于来自汽车顶部与流经车身侧面和底盘的气流在汽车尾部汇合, 形成高强度旋转涡流的影响, 扩散横向距离有所减小. 在 $X=5$ m 与 $X=34$ m 之间, 扩散横向距离随沿程距离增大而增大, 最后趋于平缓.

汽车周围空气的流动是造成颗粒扬起、运移的原因, 在气相流场湍流作用的影响下, 随着车速的增大, 空气流速越大, 则颗粒受到的气流曳力和 Saffman 升力也越大, 从而颗粒受到的横向与竖向作用力越大, 颗粒物扩散横向距离也越大.

3.1.2 车速对颗粒物沿程扩散高度的影响

图 7(a)为不同车速下颗粒物沿程扩散高度变化曲线, 从图中可以看出, 汽车以一定速度行驶, 颗粒物扩散高度随沿程距离的增大而增大, 且在 $X=0$ 与 $X=5$ m 之间增大趋势较快, 之后逐渐减慢. 将图 7(a)和 7(b)进行对比可以看出在距离汽车前轮中心竖直平面后方一定时, 颗粒物扩散高度与车速基本呈线性关系. 随着沿程距离的增大, 扩散高度随车速变化的速率加快.



(b) 颗粒物扩散高度与车速关系

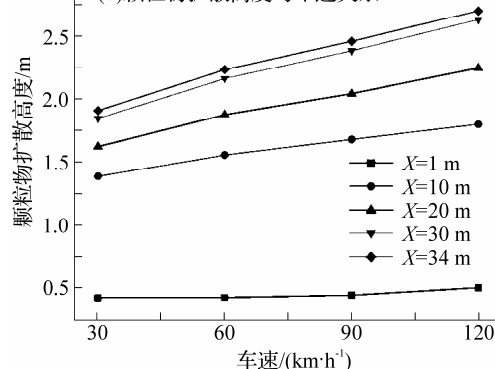


图 7 不同车速下颗粒物沿程扩散高度变化曲线

3.2 粒径对颗粒物质量浓度分布的影响

为分析粒径对颗粒物质量浓度分布的影响,模拟车速在 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 颗粒粒径分别为以下 4 个范围, 即 $0.1 \sim 10$, $10 \sim 50$, $50 \sim 100$ 和 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 时, 颗粒物在流场中的运动情况. 图 8 为不同粒径颗粒物在地面处颗粒物质量浓度分布云图, 从图中可以看出, 由于汽车尾部形成的高强度旋转涡流的影响, 携带在气流中的颗粒易在汽车尾部正后方大量聚集, 使得该区域颗粒物质量浓度较大. 随着离汽车尾部后方距离的增加, 颗粒运动速度减缓, 扩散作用减弱, 质量浓度缓慢下降趋于稳定. 地面处汽车尾部颗粒物质量浓度随粒径的增大不断增大, 说明车速相同时, 粒径越大, 颗粒物沉积越显著.

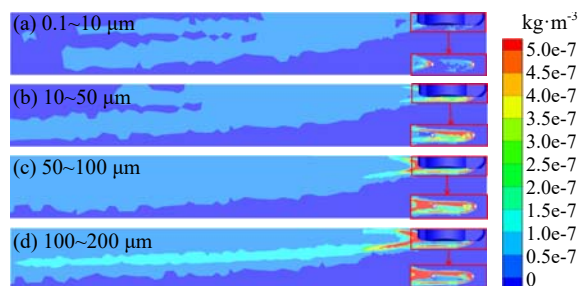


图 8 不同粒径下地面处颗粒物质量浓度分布云图

图 9 为距汽车前轮中心竖直平面后方为 5 m 和

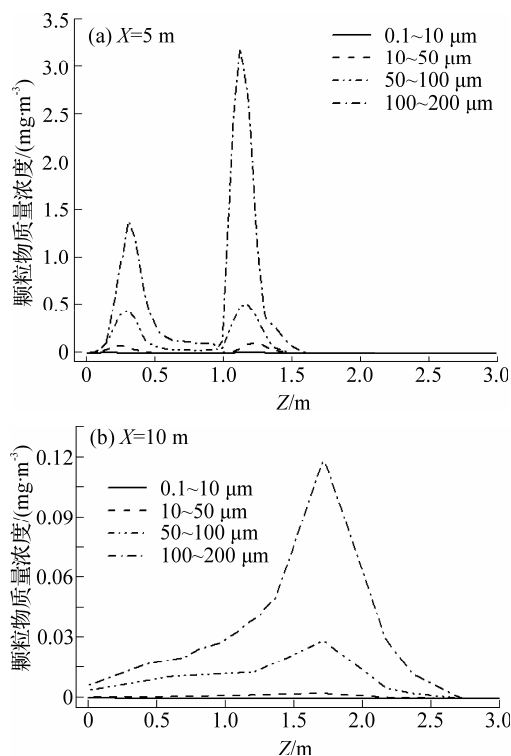


图 9 不同粒径颗粒在地面处质量浓度分布曲线

10 m 时, 不同粒径颗粒在地面处质量浓度分布曲线, 横轴 Z 表示距车身纵向对称面的距离, 纵轴表示不同位置颗粒物的质量浓度值. 从图中可以看出, 在颗粒物最大扩散横向距离范围内, 在 $X=5 \text{ m}$ 和 10 m 处均表现为随着粒径增大, 地面处颗粒物质量浓度升高. 在 $X=5 \text{ m}$ 时不同位置颗粒物质量浓度总体表现为先增大后减小, 再增大再减小的变化趋势, $X=10 \text{ m}$ 表现为先增大后减小的变化趋势.

从图 10 可以看出, 气流在 $X=5 \text{ m}$ 截面上形成两个马蹄涡, 其中左涡顺时针转动, 尺度较小, 右涡逆时针转动, 尺度较大. 在 $X=10 \text{ m}$ 截面上两个马蹄涡汇合成一个更大尺度的拖曳涡. 漩涡在流动发展过程中, 易造成颗粒物在地面沉积, 从而在 $X=5 \text{ m}$ 地面处不同位置颗粒物质量浓度变化呈双峰分布, 在 $X=10 \text{ m}$ 时呈单峰分布.

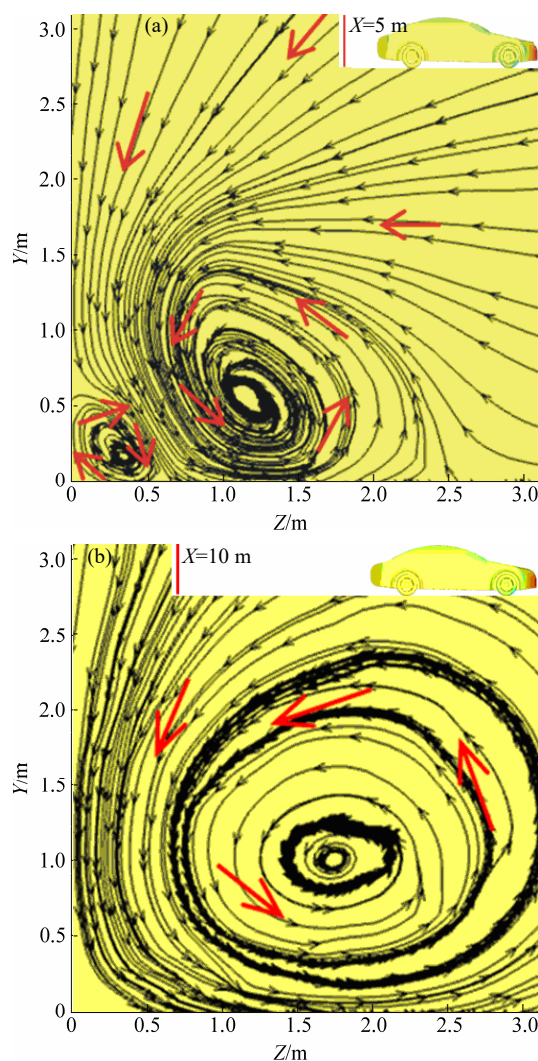


图 10 不同截面气流流线图

这是由于在车速相同时, 小粒径颗粒($0.1\sim 10\ \mu\text{m}$)所受重力作用较小, 在运动过程中受流场湍流脉动影响显著, 湍流跟随性较好, 在空气中呈悬浮状态, 并在来流的带动下, 向计算域出口滑移, 不易在地面沉积, 从而地面处颗粒物质量浓度较小. 大粒径颗粒($10\sim 200\ \mu\text{m}$)所受重力作用较突出, 随着粒径的增大, 颗粒湍流跟随性降低, 颗粒惯性作用增强, 获得初始动能后, 在运动过程中易沉降, 使得地面处颗粒物质量浓度较大.

3.3 车速对颗粒物质量浓度分布的影响

作为携带颗粒物的载体介质, 车速对颗粒物的扩散运动有着不可忽视的作用, 车速的变化将影响颗粒物在流场中的运动特性. 为分析车速对颗粒物质量浓度分布的影响, 模拟车速分别为 30 , 60 , 90 和 $120\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, 颗粒相喷射口处粒径分别为 $0.1\sim 10$, $10\sim 50$, $50\sim 100$ 和 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ 时, 颗粒物在流场中的运动情况. 图 11 是在轮胎喷射口处颗粒粒径为 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ 时, 不同车速下地面处颗粒物质量浓度分布云图. 从图中可以看出, 由于大粒径颗粒($100\sim 200\ \mu\text{m}$)所受重力作用突出, 颗粒惯性大, 在车速为 $30\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 颗粒被吹拂起来数量较少, 颗粒物质量浓度较低. 车速为 $60\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 地面处汽车尾部颗粒物质量浓度最大, 当车速大于 $60\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 颗粒物质量浓度不断减小.

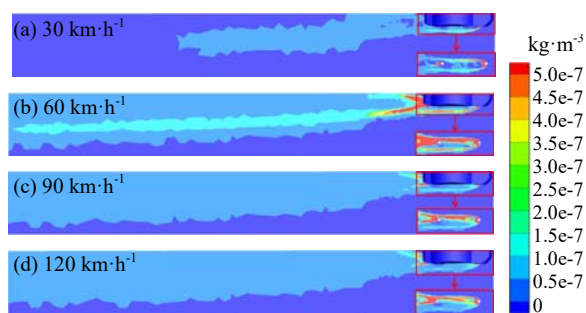


图 11 不同车速下地面处颗粒物质量浓度分布云图

图 12 为不同粒径范围颗粒在不同车速下, 距汽车前轮中心竖直平面后方为 $5.0\ \text{m}$ 时地面处颗粒物质量浓度分布曲线, 横纵轴意义与图 9 相同. 从图 12(a)可以看出, 当粒径为可吸入颗粒粒径范围($0.1\sim 10\ \mu\text{m}$)时, 车速越大, 地面处颗粒物质量浓度越低. 这是由于小粒径颗粒($0.1\sim 10\ \mu\text{m}$)的湍流跟随性较好, 车速越大, 流场中空气流速增加, 即携带颗粒物的载体介质速度增加, 由于颗粒物在流

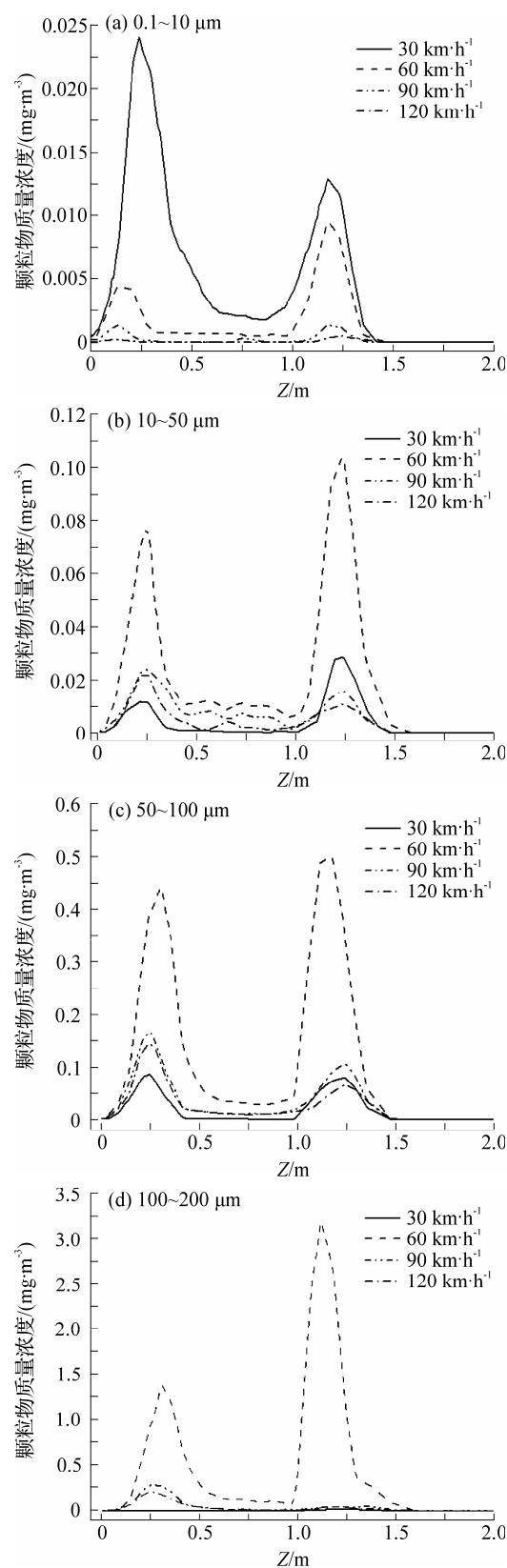


图 12 不同车速下 $X=5\ \text{m}$ 地面处颗粒质量浓度分布
场中受到空气流体对其的曳力作用, 作用于颗粒

的气流曳力增加,颗粒物的扩散能力增强,在同一位置颗粒的停留时间减少,使得该位置处的颗粒物质量浓度减小。

从图 12(b)、(c)和(d)可以看出,当粒径分别为 10~50, 50~100 和 100~200 μm 时,与车速为 60 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 相比,在车速为 30 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,颗粒物质量浓度较低,在车速为 60, 90 和 120 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,随着车速的增大,颗粒物质量浓度不断减小。这是由于在车速为 30 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,大粒径颗粒(10~200 μm)在汽车行驶过程中产生的剪切气流与诱导气流的作用下,不能完全被吹拂起来,说明诱导气流提供给颗粒向上的力不足以克服自身的重力,使得颗粒物扩散能力减弱。随着车速的增大,气流的携带能力增强,颗粒物的扩散能力增大,在相同位置处颗粒物质量浓度降低。

4 结论

(1)汽车尾部旋转涡流对颗粒物扩散横向距离有较大影响,对扩散高度影响不大。在距离汽车前轮中心竖直平面后方一定时,颗粒物扩散高度与车速基本呈线性关系。

(2)在距离前轮中心竖直平面后方 5 m 地面处不同位置颗粒物质量浓度变化呈双峰分布,而在距离为 10 m 时呈单峰分布,与气流在截面形成不同尺度的漩涡有关。漩涡在流动发展过程中,易造成颗粒物在地面沉积。车速相同时,粒径越大,颗粒物沉积越显著。

(3)随着车速的增大,0.1~10 μm 的颗粒物在地面处颗粒物质量浓度不断降低;10~200 μm 的颗粒物在地面处颗粒物质量浓度先增大后减小,并在车速为 60 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ (研究范围包括 30, 60, 90, 120 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)时达到最大值。

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, 400:270-282.
- [3] GB 18352.6-2016. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第 6 阶段)[S].
- [4] 刘力, 张立群, 杨裕生. 轮胎磨损对环境和资源的影响不容忽视[J]. *中国橡胶*, 2014, 7:16-17.
- [5] Kreider M L, Panko J M, McAtee B L, 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.
- [6] Transmitted by the expert from the Russian Federation. Particulate matter emissions by tyres[EB/OL]. [2017-11-27]. <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2013/wp29grpe/GRPE-65-20e.pdf>.
- [7] Pischinger R, Rauterberg-Wulff A. Determination of emission factors for tire wear particles up to 10 microns by tunnel measurements[C]. *Proceedings of the 8th International Symposium Transport and Air Pollution Including Cost 319 Final Conference*, 1999:265-272.
- [8] 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, 157:1-11.
- [9] Finley B L, Ownby D R, Hays S M. Airborne tire particles in the environment: A possible asthma risk from latex proteins?[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2003, 9(6):1505-1518.
- [10] Fauser P. Particulate air pollution with emphasis on traffic generated aerosols[D]. Roskilde: Technical University of Denmark, 1999.
- [11] 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.
- [12] 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, 2015.
- [13] 黄优, 桂祥友, 梦絮屹, 等. 筛分车间内粉尘颗粒在气流中的受力分析及其运动轨迹的研究[J]. *煤炭工程*, 2008(8):88-90.
- [14] 李锋, 撒占友, 王勇, 等. 基于 Fluent 的扁平硐室采场粉尘浓度分布及运移规律研究[J]. *矿业研究与开发*, 2010, 30(5):77-80.
- [15] Gerardin 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.
- [16] 罗昔联, 顾兆林. 基于 DPM 模型的街谷内颗粒物扩散特性研究[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2007, 24(5):

- 578-583.
- [17] 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.
- [18] Zhao Y, Zhao J N. Numerical assessment of particle dispersion and exposure risk in an underground parking lot[J]. Energy and Buildings, 2016, 133:96-103.
- [19] 樊守彬. 车辆非尾气管颗粒物排放特征研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(5):124-127.
- [20] 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):1682-1686.
- [21] 唐家鹏. ANSYS FLUENT 16.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.

Numerical simulation on diffusion characteristics of car tire wear particles

LU Xuan, HUANG Hai-bo^{*}, ZHANG Tao, DONG Jia-nan

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to understand the diffusion characteristics of car tire wear particles, a discrete phase model method was used. The two-way coupling of discrete and fluid phase was considered. Rosin-Rammler distribution was utilized to describe the particle size distribution. The trajectories of tire wear particles when driving under different working conditions were simulated. The results indicate that the rotating vortex at the rear of the vehicle has a great influence on the transverse distance of particle diffusion, but has little effect on the diffusion height. When the distance from the center vertical plane of the front wheel is constant, the dispersion height has a linear relationship with the car speed. At the distance of 5 m behind the center vertical plane of the front wheel, the particle concentration at different positions on the ground shows a bimodal distribution, while it is a unimodal distribution at the distance of 10 m, which is related to the formation of vortices at different sections. At the same speed, particle deposition is more significant with the larger particle size. When the particle size is 0.1-10 μm , the particle concentration on the ground decreases with the increase of the car speed. When the particle size is 10-200 μm , the particle concentration increases first and then decreases with the increase of the car speed, and reaches the maximum at 60 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Key words: tire wear particles; trajectories; diffusion characteristics; Numerical simulation

(责任编辑 韩 超)