

基于边界层和复势理论的轮胎磨损颗粒物运动轨迹研究

张 涛, 黄海波*, 董家楠

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 轮胎磨损颗粒物对生态环境和生物体健康都有非常严重的负面影响, 辨识其发散路径并进行捕集已成为当前环境保护的重要课题之一. 本文在极坐标下使用边界层和复势理论建立了轮胎磨损颗粒物的二维散射模型, 计算了颗粒物的散射路径并进行了实验验证, 进一步通过正交试验得到了各种因素对磨损颗粒物覆盖件碰撞高度的影响程度. 结果表明: 磨损颗粒物碰撞高度在很大程度上取决于其在边界层内的运动时间, 粒径为 $2.5\sim 5\mu\text{m}$ 的轮胎磨损颗粒物的散射高度受车速变化影响不大. 粒径 $5\sim 15\mu\text{m}$ 的轮胎磨损颗粒物与覆盖件发生碰撞的高度随着车速的提高先增大后减小, 转折车速随颗粒物粒径的增大而减小. 影响磨损颗粒物与覆盖件碰撞高度的因素主次顺序是: 车速、车轮半径、接地印迹半长度、胎面与覆盖件的距离.

关键词: 轮胎磨损颗粒物; 边界层; 复势; 运动轨迹

中图分类号: U501

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 05-0046-06

轮胎磨损后会释放出磨损颗粒物, 这些颗粒从轮胎接地面脱出, 包含橡胶粒子、橡胶沥青凝聚物及钙、硫等有毒金属微粒, 对生态环境和生物体健康会产生严重的负面影响^[1-2].

对于磨损颗粒物的研究, Dall'Osto 等^[3]发现轮胎与路面相互作用产生的颗粒包含轮胎橡胶和路面材料, 单独测量轮胎橡胶组分可能会低估轮胎磨损对空气中颗粒物浓度的影响. Lee 等^[4]研究发现沥青路面磨损高于混凝土路面, 因此摩擦产生的 PM10 浓度和颗粒数相对较高. 刘金朋等^[5]发现轮胎磨损颗粒物的产生形式主要为片状剥落和卷曲磨损共存, 卷曲磨损会导致更多的磨损颗粒物剥离. Kwak 等^[6]发现轮胎磨损超细颗粒可能源自轮胎颗粒中的含硫材料或抗氧化剂. 除此之外, 研究人员也开始初步关注轮胎磨损颗粒物的运动轨迹, 轩闪闪等^[7]使用简化模型计算了磨损颗粒物的散射过程, 使用自然坐标首次模拟了轮胎磨损颗粒物的散射轨迹, 但在推导边界层气流场速度分布、汽车前进气流场绕过轮胎后的速度损失等方面存在一定的缺陷. 另外, 杨兴森等^[8]、黄优等^[9]和孙

露^[10]也使用数值方法建立了煤粉及砂粒等颗粒物在风场作用下的飞扬模型, 研究颗粒物飞行轨迹的影响因素. 但总的来说, 国内外对颗粒物特别是轮胎磨损散射路径的研究还处于起步阶段, 还需进一步深入探讨和研究.

本文在文献[7]的基础上建立了改进的轮胎磨损颗粒物散射轨迹模型, 使用极坐标推导边界层方程, 基于移动平板模型计算边界层流场速度分布, 使用复势理论建立了理想情况下的绕流模型获得外流场速度分布. 通过实验对模型进行了验证, 分析了各种因素对散射轨迹的影响. 鉴于轮胎磨损颗粒物的危害性, 如何及时地抑制磨损颗粒物的挥散而减少轮胎磨损造成的次生污染将会有重要的实际意义, 本文将对获取和捕集轮胎磨损颗粒物提供可供借鉴的理论基础.

1 流场速度分布

根据边界层理论^[11], 轮胎磨损颗粒物在从接地面脱出, 会经历边界层和外流区两个阶段. 在边界层内流场具有很大的法向梯度, 需要考虑流体

收稿日期: 2018-08-16.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journallg.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: 张涛(1995-), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 轮胎摩擦磨损. E-mail: 527584790@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

黏性; 在外流区可以忽略流体黏性, 视为理想流体区. 下面将推导边界层和外流场的速度分布.

1.1 边界层内气流场速度分布

建立如图1所示极坐标系, 轮胎几何中心为坐标原点 O , 边界层内任一点 A 可用坐标 (r, θ) 表示.

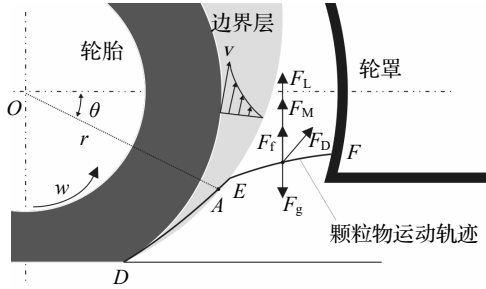


图1 轮胎磨损颗粒物二维散射模型

由于轮胎转动过程中周围空气压强变化较小, 因此空气可视为不可压缩流体^[11], 黏性不可压缩流体的斯托克斯方程组在极坐标系下可表示为

$$\begin{aligned} \frac{Du_r}{Dt} - \frac{u_\theta^2}{r} &= f_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right), \\ \frac{Du_\theta}{Dt} + \frac{u_r u_\theta}{r} &= f_\theta - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \nu \left(\nabla^2 u_\theta - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right), \\ \frac{1}{r} \frac{\partial(r u_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}$; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$; ρ 、 ν 、 p 分别为空气密度、运动黏度系数和压强; u_r 和 u_θ 分别为流场速度在 r 和 θ 方向的分量; f_r 和 f_θ 分别为质量力在 r 和 θ 方向的分量.

当物体曲率半径比边界层厚度 δ 大很多时, 曲面边界层方程与平板边界层方程相同^[12], 相关学者对其进行了应用, 计算结果和实验结果较为吻合^[13-14]. 由于轮胎曲率半径远大于边界层厚度(相差两个数量级), 因此可近似地把轮胎表面当作平板进行处理, 则斯托克斯方程组可简化为^[15]

$$\frac{\partial u_\theta}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2}. \quad (2)$$

使用波尔豪森相似性解法^[11], 将公式(2)简化为只有一个自变量的方程,

$$\frac{u_\theta}{v} = f(\eta) = a_0 + a_1 \eta + a_2 \eta^2 + a_3 \eta^3, \quad (3)$$

式中, $\eta = (r - R) / \delta$ 为无量纲变量, 其中 R 和 δ 分别为轮胎半径和边界层厚度; v 为轮胎表面线速度; a_0 、 a_1 、 a_2 和 a_3 为待求解的系数.

利用边界条件 $u_\theta(R, \theta) = v$, $u_\theta(R + \delta, \theta) = 0$, $\frac{\partial}{\partial r} u_\theta(R + \delta, \theta) = 0$ 以及 $\frac{\partial^2}{\partial r} u_\theta(R, \theta) = 0$, 结合层流边界层积分法, 可以求得边界层厚度^[16]

$$\delta = 3.64 \sqrt{\frac{\nu l}{v}}, \quad (4)$$

式中, $l = R(\pi/2 + \theta - \arcsin(a/R))$, 其中 a 为接地印迹半长度.

将公式(4)代入公式(3)后可求得

$$u_\theta = v(1 - 0.53((r - R)\sqrt{\nu/(vl)}) + 0.18((r - R)\sqrt{\nu/(vl)})^3). \quad (5)$$

1.2 外流区气流场的速度分布

在笛卡尔坐标系下, 对于边界层外部无黏性不可压缩流体的平面无旋运动可以归结为求流场的速度复势 $W(z)$ ^[17], 其中 $z = x + iy$, 则轮胎表面外流区速度可表示为

$$\begin{aligned} v_x &= \operatorname{Re} \left\{ \frac{dW(z)}{dz} \right\}, \\ v_y &= -\operatorname{Im} \left\{ \frac{dW(z)}{dz} \right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

通过奇点分步法^[17]将轮胎的自转运动和平移运动等效为3个平面简单复势均匀直线流 $W_1(z)$ 、偶极子 $W_2(z)$ 和点涡 $W_3(z)$ 的线性叠加, 如图2所示, 得 $W_e(z)$

$$W_e(z) = W_1(z) + W_2(z) + W_3(z), \quad (7)$$

$$\text{式中, } W_1(z) = vz, \quad W_2 = \frac{M_1}{2\pi} \frac{1}{z}, \quad W_3 = \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln z,$$

其中 M_1 为偶极矩, $M_1 = 2\pi v R^2$, Γ 为轮胎表面速度环量, $\Gamma = \oint_l v dl = 2\pi R v$.

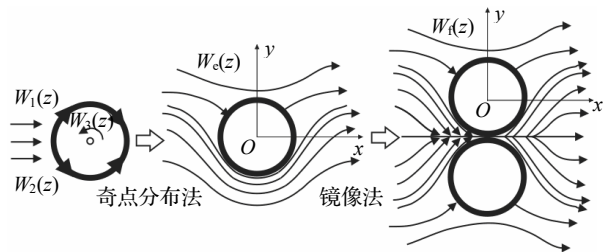


图2 奇点分布法及镜像法示意图

应用镜像法^[18]考虑地面对流场的影响, 对

$W_e(z)$ 进行求解后得到最终的流场速度复势为

$$W_f(z) = v\bar{z} + v\left(\frac{R^2}{z} + \frac{R^2}{z + 2Ri}\right) + \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln\left(\frac{z}{z + 2Ri}\right). \quad (8)$$

将公式(8)代入公式(6)可得外流场在 x, y 方向上的速度.

2 磨损颗粒物运动模型

轮胎磨损颗粒物在边界层和外流场两个区域运动时均会受到拽引力 F_D 、萨夫曼剪切提升力 F_L 、马格努斯旋转提升力 F_M 、以及重力 F_g 和浮力 F_f 的作用, 如图 1 所示. 现以轮胎为参考系, 忽略磨损颗粒物之间的碰撞, 建立单一磨损颗粒物在 x, y 方向的动力学方程

$$\begin{aligned} M \frac{d\bar{v}_x}{dt} &= M \frac{d^2\bar{x}}{dt^2} = F_{Dx}, \\ M \frac{d\bar{v}_y}{dt} &= M \frac{d^2\bar{y}}{dt^2} = F_L + F_M + F_{Dy} + F_f - F_g, \end{aligned} \quad (9)$$

式中, M 为磨损颗粒物的质量, 下标 x, y 分别表示颗粒物参量在水平和竖直方向上的分量. 颗粒物运动的初始条件设定为: $x(0)=a, y(0)=-\sqrt{R^2-a^2}, v_x(0)=v\cos\theta, v_y(0)=v\sin\theta$. F_D, F_L, F_M, F_g 和 F_f 的计算及相关参数可参考文献[7].

3 磨损颗粒物散射轨迹

图 3 为粒径分别是 5, 10 和 15 μm 的磨损颗粒物在不同车速下的运动轨迹. 从图中可以看出, 在边界层中运动时间越长, 颗粒物与覆盖件碰撞的高度越高, 而那些较早离开边界层的颗粒物碰撞高度相对较低. 也就是说, 磨损颗粒物碰撞高度在很大程度上取决于在边界层内的运动时间, 即颗粒物在边界层中沿着轮胎表面运动的时间越长, 最后能达到的最大散射高度也就越高. 由于粒径较小的颗粒物易受流场的携带作用, 在边界层中运动的时间相对较长, 故在同一种行驶工况下, 磨损颗粒物碰撞高度随着颗粒物粒径的减小而增大.

图 4 为不同粒径下颗粒物散射高度与车速的关系. 可以发现, 对于一定车速范围内的同一粒径颗粒物, 颗粒物碰撞高度并没有随车速的提高而持续提高, 而是先增大后减小. 我们认为: 当车速小于特定车速时, 随着车速增大, 边界层内流体速

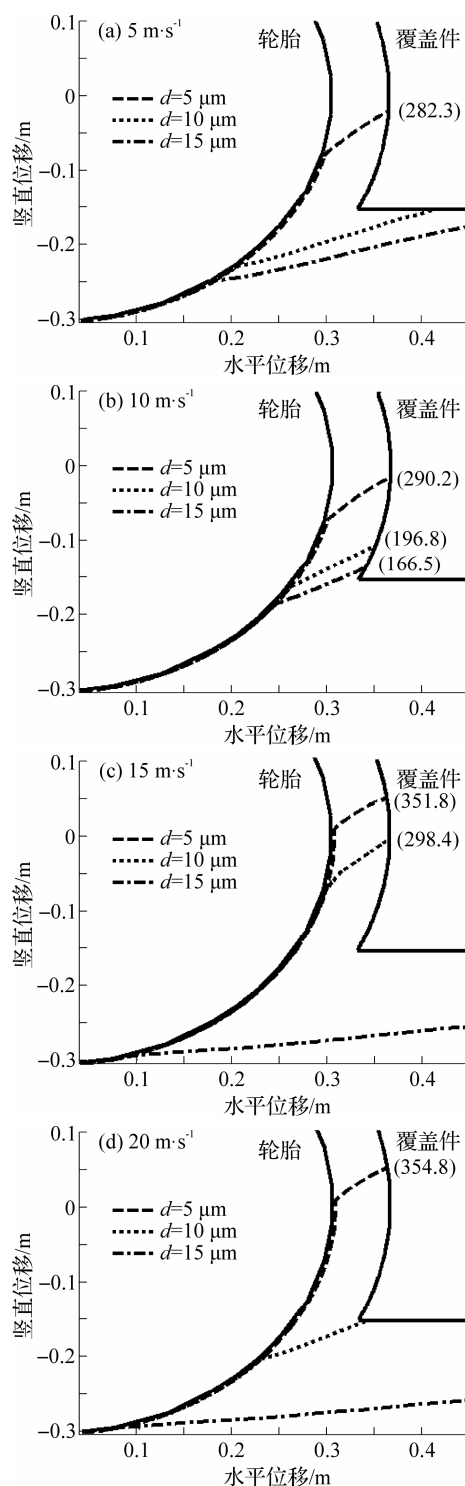


图 3 颗粒物粒径及运动轨迹与行驶速度的关系

度也越大, 携带颗粒物能力也越强; 但当车速大于特定车速后, 即颗粒物水平初速度达到特定值后, 就会很快克服边界层的携带作用而离开边界层, 碰撞高度也会随之下降. 从图 4 中还可以看出, 微小颗粒(2.5 与 5 μm)与粒径较大的颗粒(50 μm)的碰

撞高度范围受车速的影响不大, 粒径大小处于两者之间的颗粒物散射高度变化范围相对较大. 由于覆盖件最低处距离地面的高度为 150 mm, 所以小粒径($\leq 15 \mu\text{m}$)颗粒物都有与覆盖件发生碰撞的机会, 而大粒径颗粒物基本不会与覆盖件发生碰撞. 从图 4 还可以看出覆盖件距离地面 150~360 mm 的区域是微小颗粒物散射聚集区域, 这为磨损颗粒物收集装置的设计提供了一种可行的思路.

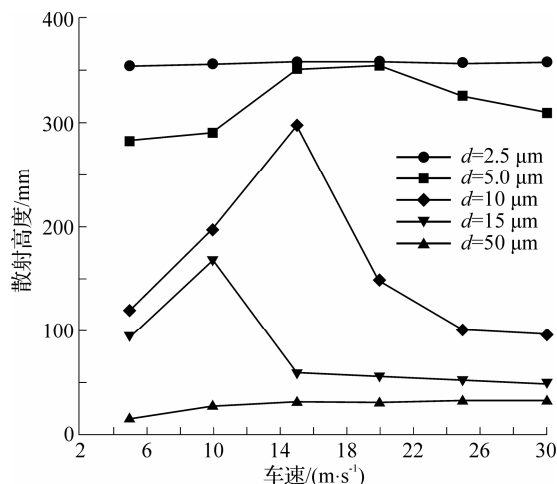


图4 不同粒径颗粒物碰撞高度与车速的关系

将因车速提高而使颗粒物碰撞高度降低的临界车速定义为转折车速, 图5为转折车速与磨损颗粒物粒径的关系. 从图5可以看出, 在一定粒径大小范围内, 转折车速随轮胎磨损颗粒物粒径的增大而逐渐减小. 也就是说磨损颗粒物粒径越大, 初始动能就会越大, 相同的条件下边界层对颗粒物的提升作用就会越弱, 这样在较低车速下便会克服边界层携带作用而离开边界层. 因此转折车速在一定程度上可以反映边界层携带作用对磨损颗粒物运动轨迹的影响程度.

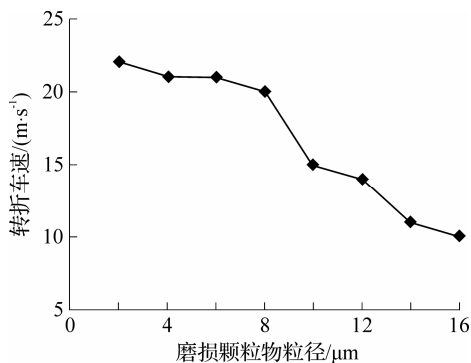


图5 转折车速与轮胎磨损颗粒物粒径的关系

4 实验设计

4.1 实验装置及内容

通过如图6所示的轮胎综合试验台^[19]进行磨损颗粒物与覆盖件的碰撞实验, 转鼓与轮胎直径比例大于4:1, 可模拟轮胎在路面的真实接触情况. 选定车辆在城乡道路上较有代表性的速度10和15 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为测试车速. 通过调整轮胎垂向载荷的大小来控制轮胎接地印迹长度, 使用风速计监测风速大小, 同时使用黏附膜黏附轮胎滚动过程中甩出的磨损颗粒物. 实验进行1 h后使用光学显微镜(VH-Z100UR)观察黏附膜上的磨损颗粒物, 统计不同粒径的磨损颗粒物在各个区域的分布情况.

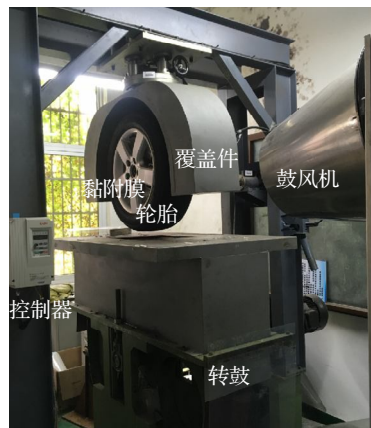


图6 轮胎综合测试装置

4.2 实验结果分析

相同工况下重复3次实验. 实验结束后, 在黏附膜上观察轮胎磨损颗粒物的聚集情况, 发现磨损颗粒物与覆盖件碰撞位置的高度主要集中在150~360 mm处.

选取距离实验台高度150, 200, 250和300 mm的4个位置使用显微镜分别统计粒径为10 μm 的磨损颗粒物的数量百分比并取均值, 如图7所示.

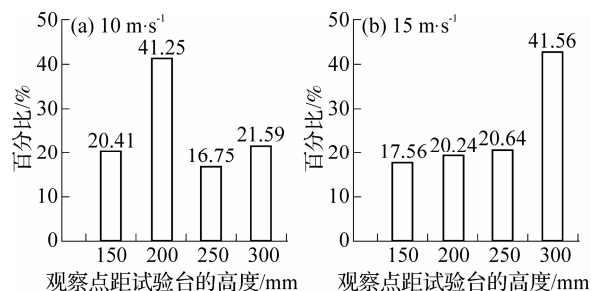


图7 不同车速下10 μm 的磨损颗粒物占比

由图可知 $10\text{ }\mu\text{m}$ 磨损颗粒在观察点距离试验台高度分别为 200 和 300 mm 处的数量占直径 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的磨损颗粒总数的百分比最大, 分别为 41.25% 和 41.56%, 与图 3(b)、(c) 的计算结果吻合较好, 说明模型计算结果较为精确。

5 正交试验参数分析

正交试验是有效研究多因素多水平的试验设计方法, 因此采用正交试验法^[20]考察一些主要因素对粒径 $10\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒物的影响程度。正交试验表中选取汽车行驶速度 v 、轮胎半径 r (轮胎的型号为 205/55/R15, 205/55/R16, 205/55/R17)、胎面与覆盖件的距离 L 和轮胎接地印迹半长度 a 作为试验指标。选用 $L_9(3^4)$ 正交表得到 9 种试验方案, 计算得到判断因素主次的主次极差 R , 见表 1。各因素对碰撞高度 h 的影响随着极差的增大而增大, 最大极差值所对应的因素也就是最主要因素。从表 1 中可以看出, 车速与轮胎半径对颗粒物碰撞高度的影响相对较大, 极差均为胎面到覆盖件距离和接地印记半长度的 2 倍以上。对粒径 $10\text{ }\mu\text{m}$ 轮胎磨损颗粒物的碰撞高度, 各类因素影响次序为: 车速、车轮半径、接地印迹半长度以及胎面与覆盖件的距离。

表 1 粒径为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒物正交试验结果

试验号	因素				结果
	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	r/mm	L/mm	a/mm	h/mm
1	10	307.5	60	40	196.8
2	10	316.0	90	50	190.1
3	10	321.5	120	60	174.6
4	15	307.5	90	60	288.1
5	15	316.0	120	40	203.9
6	15	321.5	60	50	247.6
7	20	307.5	120	50	215.7
8	20	316.0	60	60	85.0
9	20	321.5	90	40	153.7
T_1	561.5	700.6	529.4	554.4	—
T_2	739.6	479.0	631.9	653.4	—
T_3	454.4	575.9	594.2	547.7	—
R	285.2	221.6	102.5	105.7	—

6 结论

本文建立了轮胎磨损颗粒物的二维散射模型,

计算了颗粒物的散射路径, 通过现场实验得到了车速为 10, $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时轮胎磨损颗粒物与覆盖件碰撞的位置粒度的分布, 并将此结果与计算结果进行对比, 发现具有较好的一致性, 验证了解析模型的正确性, 得到如下结论:

(1) 磨损颗粒物碰撞高度在很大程度上取决于在边界层内的运动时间, 即颗粒物在边界层中沿着轮胎表面运动的时间越长, 最后能达到的最大散射高度也就越高。粒径 $5\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 的轮胎磨损颗粒物与覆盖件发生碰撞的高度随着车速的提高先增大后减小。转折车速随颗粒物粒径增大而减小。

(2) 磨损颗粒物与覆盖件发生碰撞的高度主要集中在 $150\sim 360\text{ mm}$, 粒径 $2.5\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 的轮胎磨损颗粒物的散射高度受车速变化影响不大, 这为磨损颗粒物收集装置的设计提供了一种可行的思路。

(3) 影响磨损颗粒物与覆盖件碰撞高度的因素的主次顺序是: 车速、车轮半径、接地印迹半长度、胎面与覆盖件的距离。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Camatini M, Crosta G F, Dolukhanyan T, et al. Microcharacterization and identification of tire debris in heterogeneous laboratory and environmental specimens [J]. Materials Characterization, 2001, 46(4):271-283.
- [3] Dall'Osto M, Beddows D C S, Gietl J K, et al. Characteristics of tyre dust in polluted air: Studies by single particle mass spectrometry (ATOFMS)[J]. Atmospheric Environment, 2014, 94:224-230.
- [4] Lee S, Kwak J, Kim H, et al. Properties of roadway particles from interaction between the tire and road pavement[J]. International Journal of Automotive Technology, 2013, 14(1):163-173.
- [5] 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.
- [6] Kwak J, Lee S, Lee S. On-road and laboratory investigations on non-exhaust ultrafine particles from the interaction between the tire and road pavement under braking conditions[J]. Atmospheric Environment, 2014, 97:195-205.
- [7] 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.
- [8] 杨兴森, 孙旭光, 王家新. 煤粉颗粒在一次风中的运动研究[J]. 山东电力技术, 2000(4):9-11.
- [9] 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.
- [10] 孙露. 沙粒在风扇中的飞行轨迹模拟与研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [11] 王惠民. 流体力学基础[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [12] 郭永怀. 边界层理论讲义[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008.
- [13] 何川, 辛明道. 圆柱面上再附边界层流动的级数分析[J]. 工程热物理学报, 1999, 20(3):337-341.
- [14] 孙奉仲, 史月涛, 平亚明, 等. 粘性流体绕流圆管的边界层厚度的局部相似性解法[J]. 水动力学研究与进展, 2001, 16(3):330-333.
- [15] 宁宇, 刘天庆. 移动与固定壁面上流体边界层发展的差异[J]. 化工高等教育, 2014, 31(2):76-78; 71.
- [16] Bird R B, Stewart W E, Light-Foot E N. 传递现象[M]. 戴干策, 戎顺熙, 石炎福, 译. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [17] 周光炯, 严宗毅, 许世雄, 等. 流体力学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [18] 侯义元. 简单域的平面无旋流场求复势函数[J]. 现代电力, 1987(2):81-85.
- [19] 黄海波, 刘金朋. 一种模拟轮胎磨损颗粒物真实散射行为的实验装置: CN105241676A[P]. 2016-01-13.
- [20] 邱铁兵. 试验设计与数据处理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008.

Trajectory of tire wear particles based on boundary layer and complex potential theory

ZHANG Tao, HUANG Haibo^{*}, DONG Jia'nan

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

Abstract: Tire wear particles have serious impact on the ecological environment and human health and how to capture and deal with the particulates has become an important issue to protect the environment. In this paper, the boundary layer and the complex potential theory are used to establish the two-dimensional scattering model of tire wear particles in polar coordinates. The scattering path of the particles is calculated and verified by experiments. Furthermore, the influence of various factors on the collision height between the wear particles and wheel cover is obtained through orthogonal test. The results show that the collision height between the wear particles and the wheel cover is largely determined by the time in the boundary layer. The scattering height of the tire wear particles with diameter from 2.5 to 5 μm is not greatly affected by the vehicle speed variation. The height of collisions of the tire wear particles with diameter from 5 to 15 μm increases first and then decreases with the increasing of the vehicle speed, and the turning speed of the vehicle decreases as the particle size increases. Finally, the order of the factors influencing the collision height between the wear particles and the wheel cover is obtained through orthogonal test as: the vehicle speed, the wheel radius, the half-length of the contact length and the distance between the tread and the cover.

Key words: tire wear particle; boundary layer; complex potential; movement trajectory

(责任编辑 韩 超)