

环卫车龙卷风型吸嘴内流场分析及其不同补气量条件下性能影响研究

张 斌^{1,2}

1. 西北工业大学深圳研究院 广东深圳 518057

2. 佛山博壹芯创公司 广东佛山 528313

摘 要: 吸嘴作为环卫车的核心部件,对环卫车清扫能力有重要影响,如何提升吸嘴的吸拾性能是提升环卫车清扫能力的关键组成部分,本文根据龙卷风的强旋卷吸输运特性,采用 realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型对吸嘴内流场进行数值分析,研究吸嘴在不同补气量工况下,吸嘴内部的流动规律以及对吸嘴性能的影响。分析结果表明,随着吸嘴补气量的增加,会在吸嘴内部形成强旋卷吸流场,能在吸管中心区域形成高负压流道;在吸嘴底面流场,从外侧至吸管下方区域形成不断加速的高速区,有助于垃圾颗粒的加速运动,有利于垃圾颗粒的输运,表明应用龙卷风效应能有效提升吸嘴吸拾能力,为高性能吸嘴设计提供了参考。

关键词: 环卫车;吸嘴;龙卷风效应;不同补气量;内流特性

引言

环卫车是城市道路机械化清洁的必备环卫装备,随着国家城镇化的不断发展,环卫车的作业也外延到市郊区域,相比于城区道路,市郊道路灰尘、砂石等垃圾多,对环卫车清扫能力提出更高的要求;并且随着节能环保和设备降噪的需求,常规的单纯增加环卫车风机吸力的技术路径已不能满足现实的需求。因此,对环卫车整个气力系统全链路进行系统分析就显得尤为必要,其中垃圾箱为满足装载量的要求,存在诸多结构设计约束,而吸嘴作为环卫车气力系统的核心部件,因其结构相比车体较小,设计自由度大,不同形式的吸嘴,对环卫车的清扫性能影响差异大,基于此,进行高性能吸嘴的技术研究是提升环卫车清扫能力的重要路径。

针对吸嘴的研究,主要集中在其外形结构对吸嘴性能的影响,以及吸嘴内部垃圾颗粒流动规律的多相流研究等方面。覃先云^[1]等进行了补气孔对吸嘴性能影响的研究,得出从补气孔进入的高速气流可以明显加强吸嘴内腔靠近路面处气流强度和吸管底部上升气流强度,表明采用吸嘴补气来改善吸嘴性能是可行的。黄帅帅^[2]等分析了洗扫车内腔高度对吸嘴能力的影响,表明通过降低吸嘴内腔可提升吸嘴吸力。欧阳联格^[3]等研究了吸嘴前挡板倾角、吸管倾角等对吸嘴性能的影响。鲁耀中^[4]等采用颗粒两相流数值模拟方法,分析吸嘴内流特性及吸嘴优化设计结构。高俊旭

^[5]详细研究了垃圾颗粒在吸嘴内流场的运动规律。关雄杰^[6]对高速公路垃圾清扫车进行了仿真研究,表明环卫车对作业速度的需求也在进一步提升,吸嘴的设计也是其重要一环。这些研究都表明,对吸嘴结构进行合理设计,能有效提升吸嘴性能。

本文基于龙卷风效应的启发,即在龙卷风的强旋气流作用下,在龙卷风中心区域形成负压,并呈漏斗状向地面延伸,涡核区域靠近地面越小,在地面处形成的旋转气流能将地面物体卷起卷到空中,具有很强的运输携带能力,这些特性,刚好与吸嘴的作用原理吻合,即都是将地面垃圾卷吸提升到高位处,表明采用龙卷风技术是可行的。此外,对龙卷风的这一特性,吴强运^[7]等通过对纯吸式与卷吸式在流场特征差异分析,得出卷吸式吸嘴的近地面气流速度在吸尘口覆盖区域外降低较慢的特性,能够实现大范围吸尘,表明气流场具有的卷吸特性对垃圾吸拾是有益处的。刘晓静^[8]等将龙卷风特性应用于吸嘴,表明强吸尘效果的类龙卷风流场可以达到高效清扫的效果。文献^[9]中也对龙卷风效应的吸嘴进行了研究,表明其能高效提升吸嘴的吸拾能力,但只进行了定进气量下吸嘴的性能特性研究。以上研究都表明进行龙卷风效应的吸嘴性能的深入研究,对提升环卫车清扫能力是非常具有前景的技术方向,因此,本文在既有研究的基础上,进行不同补气量对吸嘴性能的影响研究。

1 吸嘴结构介绍

吸嘴是环卫车气力系统的核心部件,其通过外接的风机,在吸嘴内部产生真空,将路面上的垃圾吸拾,并通过吸管进入垃圾箱中,实现道路垃圾的清洁作业。为能在吸嘴内部形成具有强旋特性的气流场,在常规吸嘴的基础上,在吸嘴的前后、左右方向上分别设置了1个进气口,4个进气口大小相等;如图1所示,龙卷风吸嘴主要由吸嘴体、吸管、进气口等结构组成。

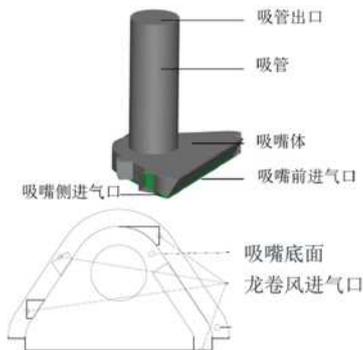


图1 龙卷风吸嘴结构示意图

2 数值计算

2.1 网格划分

根据吸嘴的结构分析,进行必要结构简化,只保留吸嘴内腔和吸管。由于吸嘴内部流场流动变化剧烈,气流从吸嘴底部的狭窄进气口进入吸嘴内腔后,又近乎垂直向上运动,为了适应吸嘴内流场不同区域流动变化特性,在吸嘴底部狭窄进气口处,增加前置进气域,并在吸嘴底部与地面区域设置为近地域,实现该区域的网格细分,并和吸嘴内腔,吸管等部分组成前置进气域、近地域、吸嘴体域、吸管域等几个区域^[10];并对这些区域内部交接处等结构变化大的局部区域进行网格加密处理,最终的网格划分示意图如图2所示。

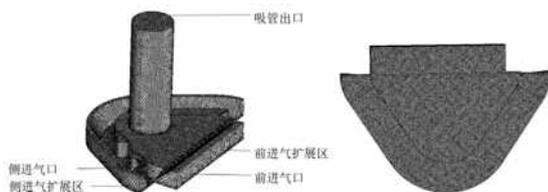


图2 网格划分示意图(左:整体网格;右:地面加密网格)

2.2 控制方程

环卫车清扫作业时,通常情况下采用低速匀速作业,吸嘴内部流场是定常流动;吸嘴内流场存在急剧变向流动,同时叠加龙卷风的强旋特性,吸嘴内流场是典型的强旋流

动,因此采用流场曲率效应,对强旋流动流场适应性更好的realizable k- ϵ 湍流模型进行数值分析,数值计算方程主要如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

湍流 k 方程、 ϵ 方程:

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \epsilon \left(C_{1\epsilon} G_k - C_{2\epsilon} \rho \epsilon \right) \quad (4)$$

$$G_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

方程(1)-(4)中各变量分别为, k -湍动能, ϵ -湍流耗散率, G_k -湍流的产生项,其具体表达式如式(5)所示;其他参数为模型常数,取值分别为 $C_{1\epsilon}=1.42$, $C_{2\epsilon}=1.68$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$ 。

2.3 边界条件

根据吸嘴结构设计的限制,并能在吸嘴内部形成稳定的龙卷风流场需求,对4个进气口,采用强制补气的方式,确保这4个进气口能保证充分进气。吸嘴的内部及吸管内壁采用无滑移边界条件;吸嘴作业时,其底部与地面有一定间隙,本文设置吸嘴底部距地面高度10mm^[11],将吸嘴前端、左右两侧的进气口设置为压力进口,压力为环境大气压,设置为0Pa;吸管出口设置为速度进口,速度设置为-55m/s,负数表示气流由内向外流动。从4个龙卷风进气口的进气量占吸嘴总进气量的流量比,即补气流量比,采用 η 表示;本文探究不同龙卷风补气流量比工况下吸嘴内流特性的变化规律,选取如表1所示补气流量比进行分析研究。

表1 不同补气流量比工况参数表

龙卷风补气流量比 η	5%	10%	15%	20%
吸管流速 (m/s)	55	55	55	55
龙卷风进气口流速 (m/s)	21.2	42.4	63.6	84.9

2.4 数值计算方法

吸嘴内流场属于定常流动，湍流方程采用压力-速度耦合 SIMPLE 算法进行数值求解，对动量方程、湍动能、耗散率的数值计算采用二阶迎风格式^[11]。

3 结果分析

通过对不同补气流量比 (η) 工况进行分析，研究吸嘴内流场在什么条件下可以产生有利于垃圾收拾的龙卷强旋流场。

如图 3 所示为吸嘴中截面压力云图，图示所示为左上图 $\eta=5$ ，右上图 $\eta=10$ ，左下图 $\eta=15$ ，右下图 $\eta=20$ 四种工况，对于 4 视图布局图，文中均按此约定。从图中可以看出，随着补气量的不断增加，逐渐在吸管内形成高负压通道，并由吸管上部延伸到吸嘴下部，在吸嘴底面区域形成强负压区，在 $\eta=15$ 工况下，负压通道已比较明显，根据图示，可以看出龙卷流场形成的演进过程。

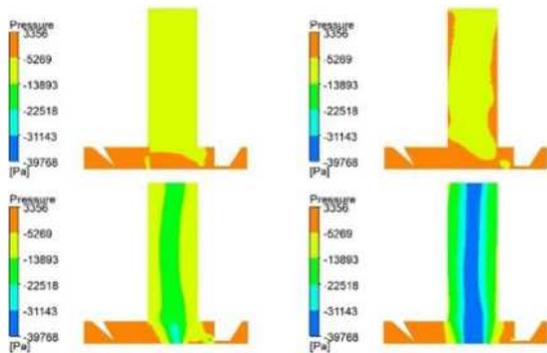


图 3 吸嘴中截面压力云图

如图 4 所示为吸嘴底面压力云图，该区域刚好是吸嘴底面垃圾进入吸嘴内腔的必经通道，对该区域的压力和速度变化规律分析，能得出龙卷风流场对垃圾收拾性能的影响规律。进一步，结合图 3、图 4 可知，随着补气量的增加，逐渐在吸嘴底部形成涡旋气流，从吸嘴侧进气口、前进气口逐渐加速、旋转、汇聚到吸管接近正下方区域，在补气量 $\eta=15$ 工况下，形成明显的负压涡核区，在补气量 $\eta=20$ 工况下，吸管接近正下方区域（此处由于本吸嘴结构内部区域不是完全左右对称结构，所以导致负压涡核区中心偏离吸管中心，但通过结构调整，完全可以实现负压涡核中心和吸管中心重合），涡核区负压相比补气量只有 $\eta=5$ 时，显著增强。由于垃圾从吸嘴前进气口进入，并逐渐呈三角状向吸管中心收拢，在吸管正中心底部，是底面垃圾堆积集中的区域，由于此处垃圾堆积集中，且都需通过吸管吸入环卫车垃圾箱

中，因此对于常规结构的吸嘴，由于没有在吸嘴内部形成强旋气流（参考 $\eta=5$ ，即补气量只占吸管总流量 5% 工况下，接近于吸管气流由吸嘴侧进气口和前进气口进入的工况），在垃圾由底面向上提升到吸管中的这一段，由于需要克服垃圾颗粒重力，因此，此区域气流需要有更大的负压产生压差形成升力，来提升颗粒进入吸管中，对于常规单独依靠增加环卫车风力吸力来提升吸嘴内腔负压，不仅增加环卫车能耗，还没有做到有的放矢，即没有将负压作用域集中在垃圾集中的区域；而通过龙卷风效应，即可以在垃圾集中区域形成高负压，实现与吸嘴作业需求的高度适配。

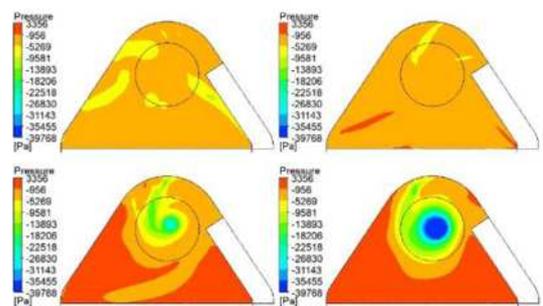


图 4 吸嘴底面压力云图

如图 5 所示为吸嘴底面速度云图，从图中可以看出，随着补气量的不断增加，吸嘴前进气口、侧进气口靠近吸嘴前端区域的气流速度越来越小，这是由于吸管出口流量不变，但补气量增加，从吸嘴前进气口和侧进气口的气流自然减少，符合实际物理规律。并且，随着补气量增加，在吸嘴内腔不断形成涡旋气流的过程中，越靠近吸管区域，气流速度越大，气流场速度增强，也能增加垃圾颗粒动能，实现垃圾颗粒加速滚动，利于垃圾的提升变向运动。在吸管中心处，形成一个比较小的低速区，这与龙卷效应的规律也是一致的。

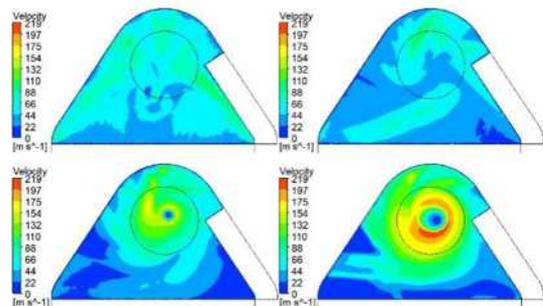


图 5 吸嘴底面速度云图

根据以上分析，可知龙卷效应能有助于垃圾收拾，正常情况下，龙卷效应越强，吸嘴对地面垃圾的收拾能力越强，但是，产生更强的龙卷强旋流场，需要增加补气量，这必然

导致环卫车能耗增加,此外,由于吸嘴外形尺寸相对较小,随着补气量增加,在龙卷风进气口处会产生高速气流,可能会直接喷吹到对侧,引起吸嘴内腔底部局部气流外溢,产生吸嘴扬尘,也是不符合环卫车整体需求,根据以上分析可知,补气量理论上存在相对合理的区间。

在环卫车作用过程中,不能有吸嘴扬尘的产生,因此,对吸嘴前进气口、侧进气口,以及影响垃圾颗粒运动的吸嘴底面(即吸嘴内腔在吸嘴底平面的投影面,垃圾颗粒都需通过该平面进入吸嘴内腔)速度和压力变化进行更详细分析。

如图6所示,随着补气量的增加,吸嘴前进气口、侧进气口气流速度不断降低,并在补气流量比约16%后速度却逐渐增加;吸嘴底面速度也是先逐步降低后再逐渐增加,而且速度拐点也不一致;产生以上现象的原因,主要是随着补气量的增加,吸嘴前进气口、侧进气口的速度,在吸管出口流量不变的情况下,必然减少,但为什么会出现速度又逐渐增大呢,有待进一步分析。同理,随着补气量的增加,由吸嘴底面进入吸嘴内腔的气流自然减少,但是由于吸嘴龙卷风进气口的下部与吸嘴底面相重合的,此处气流紊流流动变化大,气流在此区域上下湍动,且随着补气量增加,龙卷风进气口的速度也增加,湍动加剧,由侧进气口进入的气流也增加了吸嘴底面的速度,结合图5可知,由于吸嘴底面的速度是平均速度,在吸管下方区域的高速区带动吸嘴底面气流从周向朝吸管中心加速,使得吸嘴底面平均速度随着补气量的增加后就逐渐增加。

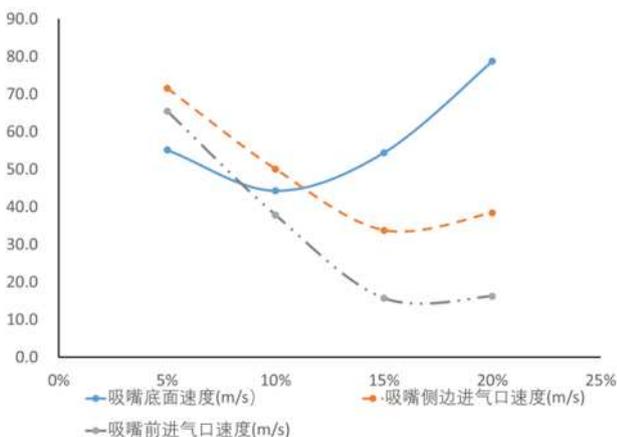


图6 吸嘴前进气口-侧进气口-吸嘴底面平均速度曲线图

如图7所示,随着补气量的增加,吸嘴前进气口、侧进气口的负压逐渐减小,这主要是由于吸嘴内腔负压在龙卷风效应作用下,不断向吸管下方区域靠近,并且随着龙卷风

进气口的速度不断增加,也会抑制吸嘴前进气口、侧进气口气流进入吸嘴内腔,甚至导致这些区域产生回流,这也和图6中吸嘴前进气口、侧进气口为什么随着补气量的增加,在过临界点后其气流速度也增加的现象吻合,即从龙卷风进气口进入吸嘴内腔的高速气流在吸嘴内腔流场的相互作用挤压下,在补气量 $\eta=20\%$ 工况附近区域,从吸嘴前进气口、侧进气口处的局部气流外溢出吸嘴,这容易引起吸嘴外溢扬尘。吸嘴底面的负压,随着补气量的增加而逐渐减小,随后又不断增大,这主要是由于吸嘴底面是吸嘴内腔与地面强耦合的区域,补气量不大的工况下,吸嘴内腔还没形成强旋涡流时,在吸嘴底面区域流场存在前进气口、侧进气口的进气与龙卷风进气口的进气相互影响削弱,使得吸嘴底面负压减小,而当形成强旋气流场后,强旋气流使得吸管下方区域产生高负压区,并逐渐扩展,最后使得吸嘴底面的负压又逐渐增加。

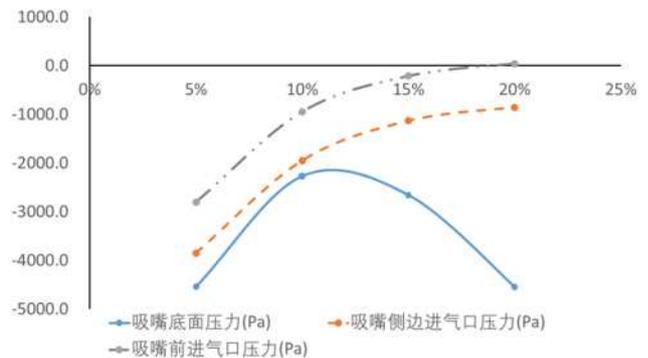


图7 吸嘴前进气口-侧进气口-吸嘴底面平均压力曲线图

为验证前述提到的随着补气量的增加,吸嘴前进气口、侧进气口存在回流的情况,对吸嘴底面进行矢量图分析,从图8可以清晰看出,当补气量达到20%工况时,在吸嘴的右下区域存在明显的回流。

通过以上的分析可知,应用龙卷风效应,能有效提升吸嘴吸拾能力,但需要相对合理的补气量才能在吸嘴内部形成强旋气流,且补气量不能过大,否则会导致吸嘴进气口气流回流,外溢扬尘,以上分析也表明,吸嘴内腔的流场流动复杂,相对合理的龙卷风流场有待进一步研究。

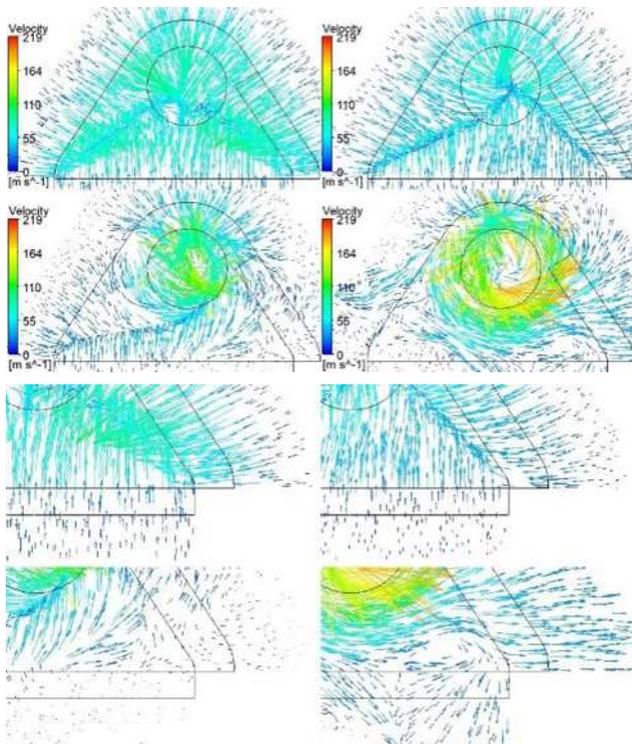


图 8 吸嘴底面矢量图

4 结论

对在不同补气流量比工况下，如何在吸嘴内部形成强旋涡流的变化规律，以及对吸嘴吸拾性能的影响进行了研究，有以下结论：

(1) 随着吸嘴补气量的不断增加，会在吸嘴内部形成强旋卷吸流场，在吸管中心区域形成高负压流道，有利于垃圾颗粒的输运。

(2) 随着补气量的增加，会对吸嘴底面流场进行加速，并在吸管下方区域形成高速区，有助于垃圾颗粒的加速运动，实现垃圾颗粒最终被提升进吸管中。

(3) 随着补气量的增加，吸嘴前进气、侧进口、吸嘴底面的流速先减小后又逐渐增大。吸嘴前进气口、侧进气口的负压是逐渐降低，而吸嘴底面的负压是先减小后又逐渐增大，最终引起吸嘴回流，气流外溢，导致吸嘴扬尘，表明吸嘴补气量存在一个合理区域，不是越大越好。

(4) 应用龙卷风卷吸运输特性，能有效提升吸嘴吸拾

性能，为吸嘴设计提供了一定参考。

参考文献：

[1] 覃先云, 肖庆麟, 伍乾坤, 等. 补气孔对扫路车吸嘴吸尘性能的影响 [J]. 计算机辅助工程, 2015, 24(6):12-17.

[2] 黄帅帅, 张沛, 姜卫生, 等. 基于 Fluent 的洗扫车吸嘴流场分析与改进 [J]. 机电产品开发与创新, 2020, 33(5):84-86.

[3] 欧阳联格, 肖强, 周文俊, 等. 基于气固两相流的电动扫路机吸嘴结构参数设计 [J]. 现代制造工程, 2020(6):115-123.

[4] 鲁耀中, 张斌, 陈阵. 清扫车吸嘴流场仿真分析及优化设计 [J]. 建设机械设计与管理, 2023(6):75-78.

[5] 高俊旭. 吸扫车吸嘴卷吸尘粒流动数值模拟及模糊灰色关联分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.

[6] 关雄杰. 高速公路垃圾清扫车工作装置设计与仿真研究 [D]. 长安大学, 2021.

[7] 吴强运, 章易程, 许彬, 等. 纯吸吸尘与卷吸吸尘仿真对比分析 [J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(4):302-306.

[8] 刘晓静, 章易程, 刘凡, 等. 龙卷风原理的吸尘装置结构设计及流场仿真分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(3):9:106-114.

[9] 张斌, 李亮. 清扫车龙卷风新式气力吸尘装置内流仿真与特征分析 [J]. 建设机械技术与管理, 2025, 38(3):17-20.

[10] 张建国, 李亮, 张斌, 等. 扫路车专用吸嘴数值模拟与内流特性分析 [J]. 建设机械技术与管理, 2018(9):62-66.

[11] 郗元, 成凯, Li Guangxian, 等. 扫路车反吹式吸嘴运行参数的 CFD 分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2016, 47(4):1144-1150.

作者简介: 张斌 (1983—), 男, 江西鄱阳人, 博士, 教授, 正高级工程师; 研究方向: 工程流体系统的机理研究、数值仿真、测试分析与优化设计。

基金项目: 广东省珠江人才计划杰出人才项目 (项目编号: 2021JC02Z140)。