

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.05.018

基于密实核理论的装载机水平 铲装阻力研究*

蒋 恒¹, 谌炎辉¹, 向上升^{2*}

(1. 广西科技大学 机械与汽车工程学院, 广西 柳州 545006;

2. 广西柳工机械股份有限公司, 广西 柳州 545007)

摘要:在装载机的铲装作业过程中,密实核的产生会引起水平铲装阻力过大,从而导致其铲装性能的下降、能耗升高。针对这一问题,对密实核阶段的装载机水平铲装阻力进行了研究。首先,运用密实核理论分析了水平铲装阶段的阻力变化情况,再通过装载机的自动铲装试验,获取了铲斗所受的水平阻力,并以此为依据对密实核的存在进行了验证;然后,根据试验数据对避免密实核形成的方法进行了研究,在铲斗插入料堆深度范围相同的情况下,对有无密实核阶段的油耗进行了对比;最后,采用试验的方式,对滑移面理论模型和 EDEM 仿真的准确性进行了验证。研究表明,控制铲斗插入深度小于 202 mm,可以避免密实核;在相同的铲装深度范围内,密实核阶段比无密实核阶段的铲装单位油耗要高出 1.9~3.34 倍;滑移面理论模型和 EDEM 仿真的误差不超过 7%,均可以较为准确地计算出水平铲装阻力。

关键词:装卸机械;装载机;水平铲装阻力;密实核理论;铲装作业;EDEM 仿真;能耗

中图分类号:TH243

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)05-0694-06

Horizontal shovel resistance of loader based on dense core theory

JIANG Heng¹, CHEN Yan-hui¹, XIANG Shang-sheng²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China; 2. Guangxi Liugong Machinery Co., Ltd., Liuzhou 545007, China)

Abstract: In the loading process of loader, the generation of dense core would caused excessive resistance of horizontal loading, resulted in the decline of loading performance and increased of energy consumption. Aiming at this problem, the horizontal shovel resistance in dense core stage was studied. Firstly, the resistance variation of horizontal shoveling stage was analyzed by using the theory of compact core, then the horizontal resistance of the bucket was obtained through the automatic shovel loading test of the loader, and the existence of dense core was verified. Then, the method of avoiding dense kernel was studied according to the experimental data, and the fuel consumption was compared in the stage with or without dense core when the depth range of the bucket was the same. Finally, the accuracy of the theoretical model and EDEM simulation was verified by experiments. The results show that controlling the insertion depth of the bucket is less than 202 mm can avoid compacting core. Within the same range of shoveling depth, the fuel consumption per unit in the compaction-core stage is 1.9~3.34 times higher than that in the non-compaction-core stage. The error of the slip surface theoretical model and EDEM simulation is less than 7%, both of which can accurately calculate the horizontal shovel resistance.

Key words: loading and unloading machinery; loader; horizontal shovel resistance; dense core theory; loading process; EDEM simulation; energy consumption

收稿日期:2021-10-22

基金项目:广西自然科学基金资助项目(2015GXNSFAA139271)

作者简介:蒋恒(1997-),男,重庆人,硕士研究生,主要从事装载机铲装作业过程优化方面的研究。E-mail:1511636171@qq.com

通信联系人:向上升,男,硕士,高级工程师。E-mail:xiangss@liugong.com

0 引言

在采煤、建筑、桥梁建设等领域,都要用到装载机的自动化铲装。因此,装载机的工作性能受到了人们广泛关注,如插入阻力大小^[1]、作业能耗^[2]以及作业的安全性^[3]等。其中,铲装阻力会受到作业轨迹^[4]、插入深度、操作水平^[5]等因素影响,导致铲装阻力增加,影响装载机自动化铲装的工作效率^[6]。

许多国内外学者已经对此进行了深入的研究,并取得了丰硕的成果。YUAN Zheng-wen 等人^[7]提出了一种轮式装载机作业时其铲斗所受外载荷的测试方法,并通过实验验证了该方法的准确性,解决了装载机铲斗所受外载荷难以测试的难题;但该方法只适用于铲斗所承载荷为静载荷的情况下,无法测出装载机在实际铲装过程中铲斗受到的实时阻力。OSUMI H 等人^[8]研究了装载机铲装过程中各个阶段的铲斗受力,对作用在装载机铲斗上的力进行了建模,并对铲斗模型进行了实验验证;由于该研究仅仅建立了微型铲斗铲装的实验模型,对其研究结论需要进一步通过实际的装载机铲装实验来验证。BI Qiu-shi 等人^[9]构建了一种用于机器人挖掘轨迹规划的遗传算法,以提高挖掘机器人的自动化程度,减少其作业阻力,优化其挖掘时间,并通过试验验证了算法的有效性;但由于在挖掘机器人的测试试验中,挖掘机器人挖掘的物料太过单一,导致该算法缺乏普遍适用性,该算法还需要进行优化。TAKAHASHI H 等人^[10]根据装载机铲装过程中料堆的变化情况,建立了装载机铲斗受力模型,并基于该受力模型求得了作用在铲斗上的阻力;但是该受力模型中没有考虑铲斗两侧边缘对物料的切削力,使得该受力模型缺乏可信度。

目前,学者们对装载机铲装阻力的研究已经取得了一些成果,但是仍有许多问题尚未解决。

当装载机铲斗插入料堆的深度加大时,虽然其铲装效率会提高,但是此时铲斗的受力变得很复杂^[11],不仅铲斗受到物料的挤压增强,还受到物料自身的块度对其产生的影响,导致铲斗齿与物料接触的前方区域会形成密实核,使得铲斗受到的阻力急剧增加,严重影响正常的铲装。同时,装载机铲装过程中,密实核的形成和发育消耗的能量巨大,还会产生大量的粉尘,不利于装载机节能,还污染环境。

针对上述问题,笔者将碎石作为铲装对象,通过装载机自动铲装试验获得铲装数据,以此分析铲装过程中,铲斗所受水平阻力与密实核的关系。

1 密实核及其物料分析

1.1 密实核原理

在铲斗与碎石开始接触时,碎石首先会产生局部的弹性变形^[12];随着铲斗向前推进,接触点会产生较大的集中应力,当集中应力达到极限值,与铲斗齿接触的碎石在局部范围内会被压成粉末,最后粉末会被压成体积处于压缩状态的密实核。

铲斗齿破石流程如图1所示。

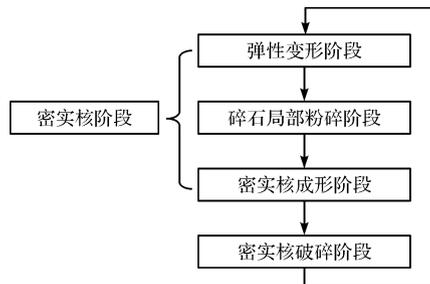


图1 铲斗齿破石流程图

由图1可以看出:在铲斗铲装物料的过程中,铲斗齿与物料从开始接触到密实核破碎主要分为4个阶段,且4个阶段会循环下去,其中的前3个阶段总称为密实核阶段。

在铲斗的水平铲装阶段,当铲斗插入料堆一定深度,会因为物料之间的挤压、物料的块度以及滑移面的影响,在铲斗齿前方形成密实核,使铲斗所受水平阻力增大。

水平铲装阻力随铲斗插入深度变化的曲线如图2所示^[13]。

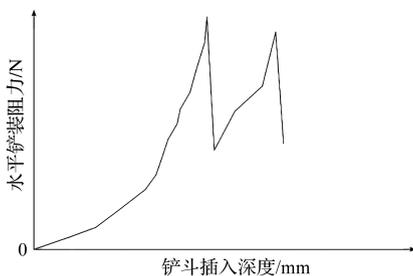


图2 水平铲装阻力随铲斗插入深度变化曲线

由图2可以看出:当密实核产生时,铲斗水平阻力在极短的时间内达到峰值;当密实核被挤压破坏时,铲斗水平阻力又在很短的时间内达到较低点;然后铲斗继续铲装,阻力又快速上升,产生新的密实核。

1.2 物料特性试验

由于轨迹规划和水平阻力计算时需要碎石的特性参数,笔者对碎石做了空隙率试验和无底圆筒试验,获得了这些参数。

碎石空隙率和密度如表 1 所示。

表 1 碎石空隙率及密度

试验次数	空隙率/(%)	碎石密度/(kg·m ⁻³)
1	41.2	2 703
2	46.8	2 792
3	36.5	2 644
4	36.5	2 644
5	36.5	2 644
6	43.6	2 697
7	36.5	2 644
8	41.2	2 703
平均值	39.9	2 684

由表 1 可以看出:碎石的空隙率平均值为 39.9%, 密度平均值为 2 684 kg/m³。

无底圆筒试验所需要的无底圆筒长度为 1 m, 直径为 400 mm, 无底圆筒内放入高度为 70 cm 的碎石, 匀速提升圆筒, 碎石落下形成料堆, 如此对碎石进行 8 次无底圆筒试验, 然后对要铲装的料堆进行 8 次安息角测量。

安息角角度如表 2 所示。

表 2 安息角角度

试验次数	试验安息角/(°)	料堆安息角/(°)
1	37.20	35.50
2	35.85	36.25
3	36.10	34.10
4	36.00	35.10
5	36.85	36.05
6	36.15	36.45
7	35.85	35.05
8	36.30	34.25
平均值	36.29	35.34

由表 2 可以看出:试验安息角的平均值为 36.29°, 铲装料堆安息角的平均值为 35.34°。由于铲装料堆安息角仅仅比试验安息角小 0.95°, 可以忽略不计。

2 铲斗水平铲装阻力分析

笔者首先分析铲斗的受力情况, 再通过滑移面理论模型推导出计算铲斗所受水平阻力大小的公式, 最后通过试验得出铲斗所受的真实水平阻力, 以验证本次试验铲装过程中是否产生密实核。

2.1 铲斗受力分析

此处笔者将装载机在水平阶段的铲装过程做简单化处理, 即铲斗所受总的阻力可以被分解为物料作用在铲斗各个部位的力。

铲斗受力分析如图 3 所示。

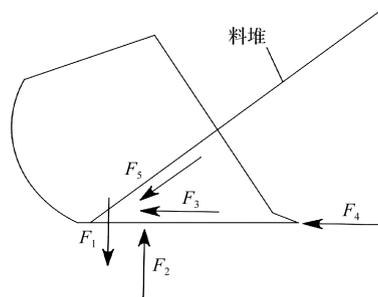


图 3 铲斗受力分析

F_1 —铲斗内物料对铲斗施加的重力; F_2 —铲斗下方物料对其施加的反作用力; F_3 —物料与铲斗接触产生的摩擦力; F_4 —物料作用在铲斗齿和铲斗边缘的插入阻力; F_5 —物料滑移对铲斗产生的力

由图 3 可以看出:铲斗所受的阻力主要可以分解为 5 个分量。由于在水平铲装阶段铲斗没有转动和提升, 因此在水平铲装阶段铲斗主要受 F_3 和 F_4 两个力。

接下来, 笔者根据滑移面理论模型得出计算铲斗所受水平阻力大小的公式。

滑移面理论模型如图 4 所示。

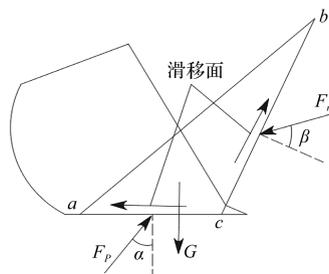


图 4 滑移面理论模型

ab —料堆表面; bc —滑移面; ac —料堆底部; F_p —库伦被动土压力; F_r —料堆对铲斗的反作用力; G —铲斗内物料重量; α —物料与铲斗之间的静摩擦角; β —物料颗粒间的静摩擦角

把图 4 中的两个滑移面和料堆表面组成的三角形 (abc) 区域看做刚性滑动楔体, 通过楔体的平衡状态和重力 G 、库伦被动土压力 F_p 、反作用力 F_r 三力平衡关系, 求得铲斗所受水平阻力, 即^[14]:

$$f = 2F_p \sin\alpha + K_0 \gamma H S g \cos\kappa \quad (1)$$

式中: f —铲斗所受水平阻力, N; F_p —库伦被动土压力, N; α —物料与铲斗之间的静摩擦角, °; γ —物料的单位重量, N/m³; H —铲斗齿上面的物料深度, m; S —铲斗齿上方物料的横截面积, m²; κ —水平方向和铲斗运动方向的夹角, °; g —重力加速度, m/s²; K_0 —材料插入阻力影响系数。

在一般情况下, 密实核的长度很难实测出来, 但可以通过公式估算出密实核的长度。

在水平铲装阶段铲斗形成的密实核长度估算值为^[15]:

$$l_1 = 1.2xd_aK_fK_3 / (0.7 + 0.23d_a) \quad (2)$$

式中: x —铲斗插入深度, m; d_a —物料的平均直径, mm; K_f —铲斗形状系数; K_3 —铲斗底与地面倾角的影响系数。

2.2 铲装过程产生的密实核

由于密实核主要在装载机水平铲装阶段产生,且铲装对象碎石的块度、粒径满足密实核产生的条件,密实核阶段铲装阻力的变化情况也可由图2获知,接下来笔者运用密实核理论,分析水平铲装阶段的铲装状况,并通过试验获取装载机自动铲装过程中铲斗所实时水平铲装阻力,以此来对密实核是否存在进行验证。

本次自动铲装测试试验采用的轮式装载机型号为856H,碎石的直径为20 mm ~ 60 mm。

首先,笔者将规划好的轨迹和参数导入到上位机软件,并下载到控制中心;然后系统根据导入的参数控制装载机,进行自动铲装;最后由传感器将铲装数据传到数据采集仪,再将其导入电脑中,完成数据的采集。

实时水平铲装阻力随时间变化曲线如图5所示。

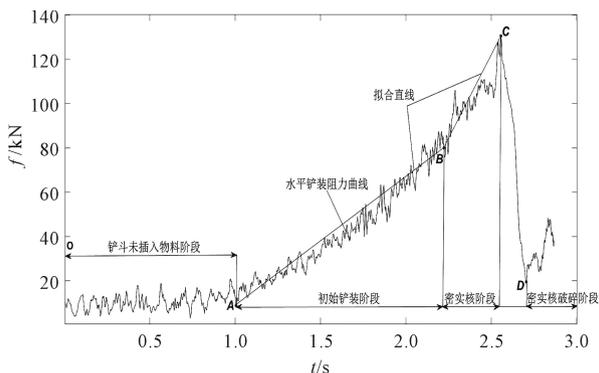


图5 实时水平铲装阻力随时间变化曲线

AB—初始铲装阶段;BC—密实核阶段;CD—密实核破碎阶段;A—铲斗开始插入物料;B—密实核开始产生;C—密实核开始破碎(最大阻力点);D—密实核破碎结束

由图5可以看出:水平铲装阻力在A点以一定斜率线性上升到B点,但在BC段水平铲装阻力的上升斜率突然变大,以极快速度到达峰值点C,然后又突然在很短时间内降至最低点D,其变化趋势和图2中的趋势一致。由此可以验证出在本次铲装试验中密实核在水平铲装阶段存在。

在铲装过程中,为了避免密实核的产生,减小铲斗的水平铲装阻力,铲斗插入深度应该在B点之前。

3 试验及结果分析

在本次试验中,装载机的铲装轨迹采用平行轨迹。平行铲装轨迹如图6所示。

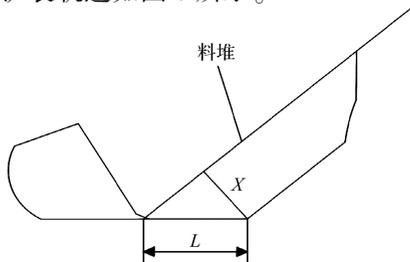


图6 平行铲装轨迹

X —铲斗的铲装轨迹到料堆表面的垂直距离; L —铲斗插入物料的深度

本次试验采用不同的 X 值(400 mm、425 mm、450 mm、475 mm、500 mm、525 mm、550 mm、575 mm、600 mm)进行装载机自动铲装物料。

3.1 减阻方法

减阻是节约能耗的重要手段,其中避免密实核的形成是减阻的主要策略之一。为了解决密实核引起铲装阻力过大问题,笔者接下来将采用所得的试验数据,来分析该如何控制铲斗插入深度,以避免密实核的形成。

在不同的 X 值下,密实核阶段的最大铲装阻力如图7所示。

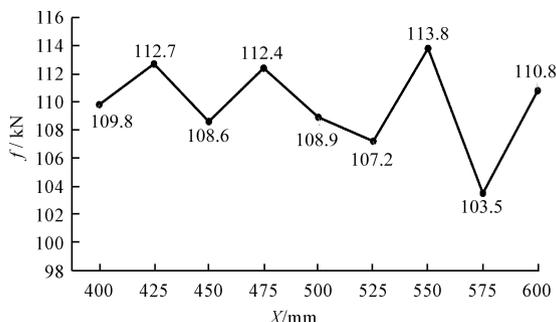


图7 密实核阶段的最大铲装阻力

由图7可以看出:密实核阶段的最大阻力没有随着 X 的增加而增加,而是在103.5 kN ~ 113.8 kN 范围之间波动。

在不同的 X 值下,密实核产生时铲斗的插入深度如图8所示。

由图8可以看出:当密实核产生时,铲斗的插入深度也没随 X 的增加而增加,只是在202 mm ~ 394 mm 之间波动。

结合图(7,8)可以发现:密实核只会随着铲斗插入到料堆的固定深度范围后才开始产生,也就是在202 mm ~ 394 mm 之间才开始产生,且密实核最大阻

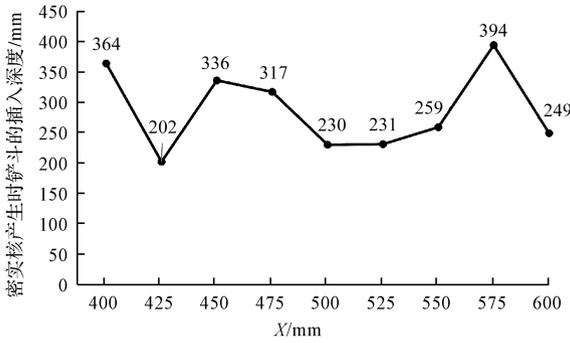


图 8 密实核产生时铲斗的插入深度

力之间最大也只相差 10.3 kN。

结合以上信息可得出:当铲斗的插入深度如果小于 202 mm,就可以避免密实核的形成,且水平铲装阻力会减小,能耗也会降低;铲斗的插入深度如果大于 394 mm,就会产生密实核,导致其水平阻力增大,装载机能耗增加。

3.2 油耗分析

密实核阶段的最大铲装阻力比正常铲装的阻力要大很多,密实核的存在肯定也会导致铲装油耗增加。

接下来,笔者设计传感器记录下了整个铲装阶段的油耗数据,以此分析密实核阶段油耗的具体情况。

在铲斗插入料堆深度范围相同的情况下,有密实核与无密实核的铲装单位时间油耗对比,如图 9 所示。

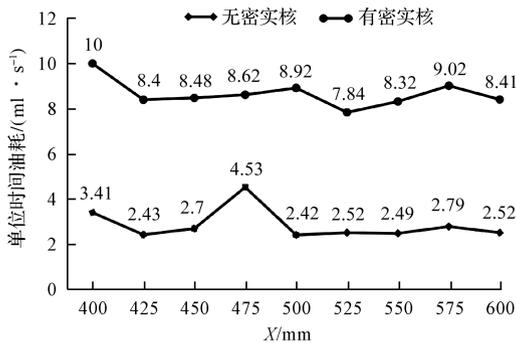


图 9 单位油耗对比

由图 9 可以看出:有密实核的铲装单位时间油耗要比无密实核的铲装单位时间油耗高出 1.9 ~ 3.34 倍。所以在节约能耗的前提下,铲装过程中避免密实核必不可少。

3.3 仿真与模型验证

由于 EDEM 软件可以比较真实地对装载机铲装物料的作业过程进行仿真,还可以计算出铲斗在铲装过程中的水平阻力^[16],此处笔者运用 EDEM 仿真软件对装载机的作业过程进行仿真测试。

仿真过程如图 10 所示。

在仿真之前,笔者先建立 3 500 × 3 500 × 2 000 (长 × 宽 × 高,单位 mm)的料仓,然后在料仓里面生成料堆,

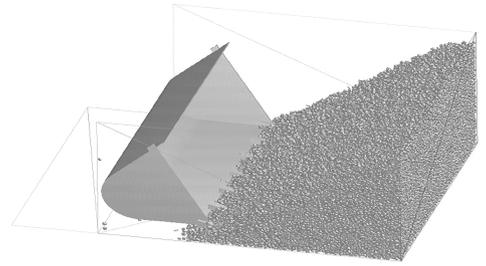


图 10 仿真过程

导入铲斗模型,设置相关参数(料堆安息角为 36.35°,铲斗插入料堆速度 0.6 m/s),然后再进行仿真试验。

材料特性参数如表 3 所示。

表 3 材料特性参数

材料	密度/(kg · m ⁻³)	剪切模量/pa	泊松比
碎石	2 684	5e + 07	0.2
铲斗	7 800	7e + 10	0.3

接触参数如表 4 所示。

表 4 接触参数

接触类型	恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
碎石-碎石	0.5	0.9	0.15
碎石-铲斗	0.5	0.4	0.05

接下来,笔者把相关参数代入到式(1)中,计算出铲斗的理论阻力值,再将 EDEM 仿真阻力值数据导出;然后将理论阻力值和 EDEM 仿真阻力值与实际铲装得到的阻力值进行比较,以验证滑移面理论模型和 EDEM 仿真的准确性。

由于密实核产生位置在料堆特定位置范围产生,且密实核的最大阻力 f_{max} 相差不大,此处笔者只用一组试验数据进行比较。

铲斗阻力的理论值、仿真值与试验值的比较如表 5 所示。

表 5 理论值、仿真值与试验值的比较

	试验值 /kN	理论值 /kN	仿真值 /kN	理论误差 E/%	仿真误差 N/%
f_{max}	109.8	114.4	116.8	4.2	6.4

由表 5 可以看出:滑移面理论模型和 EDEM 仿真的误差不超过 7%,说明滑移面理论模型和 EDEM 仿真可以用来计算装载机的水平铲装阻力。

4 结束语

为了解决密实核引起装载机水平铲装阻力过大的问题,首先,笔者分析了密实核阶段水平铲装阻力的变化情况,再设计了装载机铲装试验,获取了水平铲装阻力变化情况,验证了密实核的存在;然后,根据试验数据找到了避免密实核的方法,并做了有无密实核阶段

的油耗分析;最后,通过试验数据验证了可以求出铲斗所受水平铲装阻力大小的滑移面理论模型和 EDEM 仿真模型的准确性。

研究结果表明:

(1)密实核产生的位置在固定的铲装深度范围内,且铲斗插入深度只要小于 202 mm,就可以避免密实核的形成;

(2)在相同的铲装深度范围内,通过对有无密实核阶段的铲装单位时间油耗对比发现,有密实核的阶段要比无密实核的阶段的单位油耗高出 1.9 ~ 3.34 倍;

(3)通过试验验证了滑移面理论模型和 EDEM 仿真的准确性较高,均可适用于装载机铲斗所受水平阻力的计算。

综上所述,笔者对密实核和水平铲装阻力这方面的研究取得了初步的成果。

在后续的研究中,笔者将会研究避免密实核产生的其他方法,以及对装载机铲装作业过程的优化做进一步的研究。

参考文献 (References):

- [1] 曾庆强,秦四成,赵腾云,等. 装载机铲斗铲掘过程受力分析[J]. 工程机械,2011,42(1):18-21,101-102.
- [2] STAVROPOULOU M, XIROUDAKIS G, EXADAKTYLOS G. Analytical model for estimation of digging forces and specific energy of cable shovel[J]. *Coupled Systems Mechanics*,2013,2(1):23-51.
- [3] OSUMI H, UEHARA T, OKADA N, et al. Efficient scooping of rocks by autonomous controlled wheel loader[J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*,2012,24(6):924-932.
- [4] 龚捷,崔玉鑫. 装载机铲掘作业的轨迹规划[J]. 机械工程学报,2009,45(7):29-34.
- [5] WANG Xiao-bang, WEI Sun, LI Er-yang, et al. Energy-

minimum optimization of the intelligent excavating process for large cable shovel through trajectory planning[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*,2018,58(5):2219-2237.

- [6] 于向军,槐元辉,李学飞,等. 基于克里金和粒子群算法的装载机铲掘轨迹规划[J]. 吉林大学学报:工学版,2020,50(2):437-444.
- [7] YUAN Zheng-wen, MA Hong-feng, XU Lei. Research on testing method of the wheel loader bucket force[J]. *Advances in Engineering Research*,2018(150):298-302.
- [8] OSUMI H, UEHARA T, SARTA S. Estimation of reaction force from rock piles in scooping operation by wheel loaders[J]. *Energies*,2010(5):693-698.
- [9] BI Qiu-shi, WANG Guo-qiang, WANG Yong-peng, et al. Digging trajectory optimization for cable shovel robotic excavation based on a multi-objective genetic algorithm[J]. *Energies*,2020,13(12):1-20.
- [10] TAKAHASHI H, HASEGAWA M, NAKANO E. Analysis on the resistive forces acting on the bucket of a Load-Haul-Dump machine and a wheel loader in the scooping task[J]. *Advanced Robotics*,1998,13(2):97-114.
- [11] 孙伟,张旭,赵奎山. 基于密实核理论的单滚刀多阶段受力预测模型[J]. 机械设计与制造,2015(6):9-12.
- [12] 杨小林,唐国强,谢冰. 平端压头静力侵入岩石的数值研究[J]. 河南科技大学学报:自然科学版,2012,33(6):45-50,7.
- [13] 王启广,李炳文. 采掘机械与支护设备[M]. 2版. 徐州:中国矿业大学出版社,2016.
- [14] MENG Yu, FANG Hua-zhen, LIANG Guo-dong, et al. Bucket trajectory optimization under the automatic scooping of LHD[J]. *Energies*,2019,12(20):1-18.
- [15] 吴运新,张舒原,黄运生,等. 智能装载机减阻插入铲取控制策略[J]. 建筑机械,2003(10):55-57,60.
- [16] 李玉凤,李冰,姬国强. 装载机铲斗作业过程仿真分析[J]. 装备制造技术,2018(7):153-156.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

蒋恒,谏炎辉,向上升. 基于密实核理论的装载机水平铲装阻力研究[J]. 机电工程,2022,39(5):694-699.

JIANG Heng, CHEN Yan-hui, XIANG Shang-sheng. Horizontal shovel resistance of loader based on dense core theory[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022,39(5):694-699.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>