

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.02.010

挖掘机铲斗与松散岩石挖掘阻力研究*

李 洪¹, 李 光², 宁晓斌^{3*}

(1. 太原重工股份有限公司 矿山设备分公司, 山西 太原 030023; 2. 太原重工股份有限公司
技术中心, 山西 太原 030023; 3. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对大型液压挖掘机铲斗与松散岩石之间非线性挖掘阻力计算与无法直接测量的问题,以及非线性挖掘阻力大小与松散岩石形状、尺寸之间的关系问题,对实际松散岩石的尺寸分布和形状分布进行了研究。利用筛分法对松散岩石颗粒的尺寸分布进行了测量,利用随机法对松散岩石的形状分布进行了测量,建立了与实际吻合的松散岩石的离散元模型;对挖掘机工作装置机械结构与松散岩石耦合作用力相互传递进行了研究,提出了挖掘机工作装置多体动力学模型与松散岩石离散元模型的耦合方法,对工作装置的斗杆油缸压力和铲斗油缸压力与实际测量进行了对比分析。研究表明,挖掘机工作装置多体动力学模型与松散岩石离散元耦合模型能够计算挖掘机铲斗的挖掘阻力,松散岩石大块岩石和片状岩石的比例增加,铲斗挖掘阻力增大。

关键词:挖掘机铲斗;松散岩石;挖掘阻力

中图分类号:TH243+.1;TU621

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)02-0163-05

Research of digging force between excavator bucket and loose rocks

LI Hong¹, LI Guang², NING Xiao-bin³

(1. Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd., Mining Equipments Subco, Taiyuan 030023, China; 2. Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd., Technology Center, Taiyuan 030023, China; 3. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the calculation of nonlinear digging force produced by interaction of excavator bucket and loose rock, as well as the relation between the digging force and the size and shape distribution of loose rock, the size distribution of loose rock was measured by screening method. The shape distribution of loose rock was measured by random approach. The discrete element model (DEM) of loose rock was established. The transfer of coupling forces between the excavator mechanical mechanism and loose rock was investigated, and a coupling method of multibody dynamics model of excavator attachment and discrete element model of loose rock was proposed. Stick cylinder pressure and bucket cylinder pressure of the excavator attachment were measured by method of coupling mechanical mechanisms and loose rock, and were validated by experimental test. The results indicate that the established coupling model can be applied to calculate digging force, and the size distribution and the shape distribution of loose rock have an influence on the digging force of a hydraulic excavator, and increasing in proportion of chunks of rock and flake rock will increase the digging force.

Key words: excavator bucket; loose rocks; digging force

收稿日期:2018-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375452);山西省煤基重点科技攻关项目(MJ2014-01)

作者简介:李洪(1980-),男,安徽阜阳人,高级工程师,主要从事大型矿山装备方面的研究。E-mail:snowwolf80@126.com

通信联系人:宁晓斌,男,副教授,硕士生导师。E-mail:nxb@zjut.edu.cn

0 引 言

针对沙土、松散岩石作业的机械装备,当机械装置与沙土作用时,将沙土假设为连续体,得到机械装置与沙土的非线性力学模型,在分析计算机械装置与沙土的作用力中得到广泛的应用^[1];当机械装置与松散岩石作用时,松散岩石颗粒体为非连续体,具有强非线性响应、自组织行为等基本特性,岩石颗粒的动力响应,源于细观结构的破坏与重构、岩石颗粒的弹性能与动能间的转化,松散岩石颗粒与挖掘机械等作用力模型,需要采用离散颗粒动力学方法建模^[2]。

以松散岩石为作业对象的挖掘机械,需要分析挖掘机械与物料颗粒之间的非线性作用力,提供机械结构受力分析,为确定机械产品结构参数、运行工作参数提供参考^[3]。颗粒动力学离散元方法是研究颗粒材料行为的有效方法,可以有效地对颗粒的受力、运动和位移等宏观力学行为进行数值模拟,通过改变颗粒的材料属性及细观构型等影响因素,探索诸如挖掘铲斗与颗粒宏观动力学行为之间的联系^[4]。离散元法研究物料挖掘等装备,给相关挖掘机械产品研发、工艺设计提供了具有参考价值的成果^[5],例如通过考查颗粒物料在挖掘机铲斗挖掘过程中的运动规律,可以有效分析影响挖掘效率的因素^[6-7];拉铲铲斗铲装干燥颗粒效率离散元分析结果与实验结果是一致的,通过离散元方法改变铲斗结构达到改善拉铲效率目的^[8];将松散矿石等效成半径不同的球体^[9],或岩石颗粒形状分为4个、尺寸分为5个且随机分布^[10],或岩石颗粒尺寸正态分布^[11],建立松散岩石离散元模型,分析大型机械挖掘机挖掘阻力。挖掘机械与岩石颗粒研究的目的是设计合理的挖掘轨迹,研究不同挖掘轨迹铲斗的填充率和填充时间,降低铲斗挖掘阻力。挖掘机械铲斗的结构和材料、铲斗运动轨迹和速度^[12],金属矿山松散岩石颗粒的材料与尺寸分布、形状分布^[13],均影响铲斗与松散岩石非线性耦合作用力。

在分析金属矿山松散岩石块度尺寸分布、形状分布的基础上,本文将研究超大型挖掘机铲斗与松散岩石之间的作用力,为超大型挖掘机结构设计提供参考。

1 松散岩石离散元模型与铲斗挖掘阻力

1.1 松散岩石离散元模型

本文以太原重工开发的 WYD260 超大型液压挖掘机(整机重 260 t,铲斗容量 15 m³)为研究对象,分析

松散岩石对挖掘机铲斗的挖掘阻力。WYD260 是国内首台在矿山投入生产的超大型液压挖掘机,比同等铲斗容量进口液压挖掘机重量超出 15%。

为了后续产品能提高性能,以及研发 390 t、600 t 超大型液压挖掘机,笔者采用 INV-306U 智能数据采集分析系统,对 WYD260 液压挖掘机进行相关参数的现场数据采集。

按照现场测试实验,本研究记录工作装置挖掘循环油缸压力、油泵流量、电机电流等数据。现场测试挖掘机工作装置作业循环时间为 22 s ~ 24 s,其中铲斗挖掘时间为 6 s ~ 9 s。

液压挖掘机铲斗可简单分解为斗尖、斗身二部分。松散岩石颗粒体系具有强非线性响应特性,岩石颗粒的宏观力学,与岩石颗粒外形尺寸、形状等细观构成密切相关。松散岩石颗粒在外载荷和重力作用下,颗粒间发生接触,形成力链,相互交叉构成网络,非均匀地贯穿于岩石物质内。岩石颗粒中的强力链数目较少,支撑颗粒体系的大部分外载荷和重力;弱力链数目巨大,几乎均匀分布在岩石颗粒体系内,与强力链链接,参与强力链断裂后的重构。

矿山松散岩石爆堆表面块度尺寸分布,可利用人工级配岩石模拟爆堆的试验研究结果,转换成爆堆块度尺寸分布。

本文对某矿山人工级配岩石爆堆第一次取样,多次筛分实验,获得松散岩石颗粒直径尺寸平均值分布,松散岩石颗粒尺寸分布如表 1 所示。

表 1 松散岩石颗粒尺寸分布

| 矿石块度尺寸/mm | 所占质量百分比/(%) |
|-----------|-------------|
| 1 ~ 10 | 4 |
| 10 ~ 200 | 71 |
| 200 ~ 400 | 21 |
| 400 ~ 600 | 3.5 |
| > 600 | 0.5 |

松散岩石形状破碎具有几何形状的相似性,岩石爆破破碎成有限个形状相似的块体,其中的一部分在荷载作用下各自破裂与原块体形状相似的次一级块体,该过程的每一次产生形状相似更小的块体,矿山岩体的各种断裂几何形状具有统计自相似性,松散岩石的几何形状基本是相似的,可以用小粒级有限的几何形状组合替代全粒级组合^[14]。

本研究随机取样 5 种形状岩石并测量岩石形状,岩石颗粒形状常用颗粒形状系数表示,颗粒形状系数等于岩石实际体积与岩石颗粒最大尺寸为直径的球体体积比值。在该次筛分实验的岩石中,岩石颗粒形状系数分别为 0.279 0、0.389 1、0.427 6、0.433 0、0.657 5。

松散岩石离散元模型的自然安息角、岩石在机械装置作用下的运动特性,是判断松散岩石离散元模型的方法^[15]。

本研究建立松散岩石离散元模型,首先验证岩石模型自然安息角,根据松散岩石尺寸分布、形状分布,采用 EDEM 建立松散岩石模型,岩石形状通过球体颗粒布尔计算近似表达,将松散岩石颗粒生成在足够空间的立方体内,撤掉一个立方体侧面,松散岩石颗粒在重力作用下自然塌落稳定。

松散岩石的状态如图 1 所示。

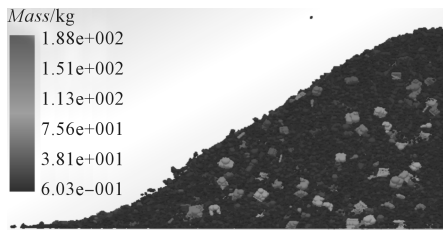


图1 矿堆岩石自然安息角

在计算机屏幕上截图,测量图 1 松散岩石的自然安息角约为 40° ,与矿山松散岩石自然安息角一致。

1.2 铲斗挖掘阻力

本研究采用 ADAMS 建立挖掘机工作装置机构多体动力学模型,开发与松散岩石 EDEM 耦合模型,实现工作装置多体动力学与松散岩石颗粒动力学相互耦合。

液压挖掘机典型斗杆挖掘作业工况,是保持动臂静止,斗杆油缸推动铲斗插入松散岩石一定深度,然后铲斗油缸伸长配合斗杆油缸共同完成铲装岩石过程。根据运动部件是否与岩石颗粒直接接触的原则,笔者选择工作装置与松散岩石单向耦合或双向耦合。经过多次计算,笔者在 9 s 完成工作装置与松散岩石耦合仿真分析(HP840 双 CPU 工作站,48 G 内存,计算一次时间约 320 h)。

本研究在 EDEM 后处理软件中导出铲斗挖掘阻力,并将挖掘阻力按铲斗的组成成分成铲斗斗尖挖掘阻力和铲斗斗身(包括斗低、斗侧等)挖掘阻力两部分。

挖掘阻力如图 2 所示。

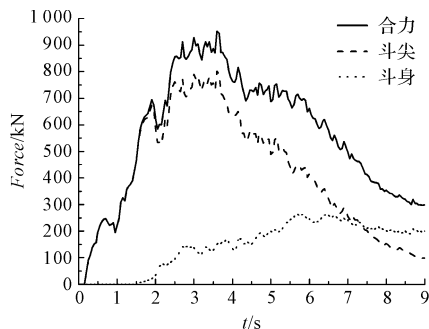


图2 液压挖掘机铲斗挖掘阻力

图 2 中,合力为铲斗挖掘阻力,斗尖曲线为铲斗斗尖挖掘阻力,斗身曲线为铲斗斗身挖掘阻力。铲斗挖掘作业过程中,斗杆挖掘工况前半段,挖掘阻力主要来自岩石与斗尖接触力,此时斗身内装有少量岩石颗粒,斗身阻力很小,随着铲斗插入矿堆深度的加深,斗身内的岩石颗粒不断增多,岩石重力、岩石颗粒与斗身摩擦阻力持续增大。斗杆挖掘工况后半段,铲斗逐渐脱离矿堆,斗尖切削矿堆的阻力减小,挖掘阻力主要来自斗身承受的矿石重力。

铲斗斗尖的插入破坏岩石颗粒之间的强力链,岩石作用在斗尖上,是形成挖掘阻力的主要因素,斗身与岩石的作用力基本等于进入铲斗的岩石重力,斗身与岩石的摩擦力相对较小,可以忽略不计。

挖掘机实际作业过程中,斗杆挖掘工况需 6 s ~ 9 s 内完成,保证在额定的时间完成一个挖掘作业循环。挖掘机斗杆挖掘工况,9 s 完成挖掘作业实测数据较多,选取 9 s 完成斗杆挖掘的实测数据。铲斗挖掘阻力无法直接测量,为此本研究通过对比工作装置油缸压力,验证离散元仿真所得铲斗挖掘阻力。

斗杆油缸压力压力仿真与实验对比如图 3 所示。

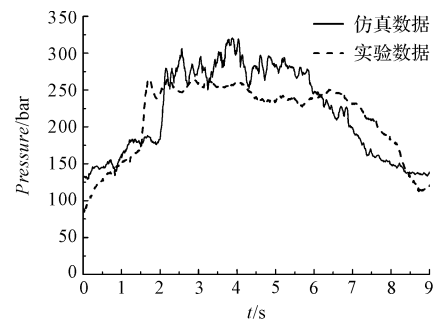


图3 铲斗油缸压力对比

铲斗油缸压力仿真与实验对比如图 4 所示。

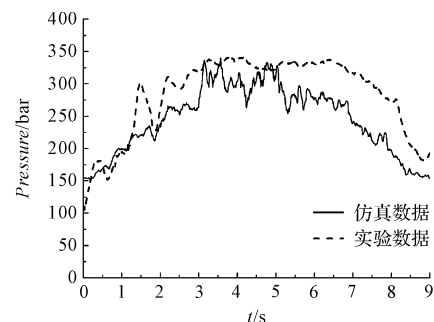


图4 斗杆油缸压力对比

在挖掘机工作装置作业过程中,铲斗油缸压力实验数据、斗杆油缸压力实验数据,均呈现较强的非线性。铲斗油缸调节铲斗姿态,斗杆油缸是铲斗插入岩石的主动件,铲斗油缸压力实测值小于模拟值,斗杆油

缸压力实测值大于模拟值,实测值与模拟分析基本吻合。

结果表明:挖掘机工作装置与松散岩石耦合模型基本反映了实际铲斗挖掘阻力,为液压挖掘机铲斗挖掘阻力提供了动载荷计算方法。

2 挖掘机铲斗挖掘阻力分析

2.1 挖掘阻力与岩石颗粒块度尺寸的关系

金属矿山松散岩石颗粒尺寸分布,随爆破设计变化改变。在矿山不同爆破工作面,第二次取样岩石,筛分实验后岩石块度尺寸分布如表 2 所示。

表 2 再次取样松散岩石颗粒尺寸分布

| 矿石块度尺寸/mm | 所占质量百分比/(%) |
|-----------|-------------|
| <200 | 40 |
| 200-400 | 35 |
| 400-600 | 17 |
| 600-800 | 5 |
| >800 | 9 |

根据表 2 松散岩石颗粒尺寸分布情况,本研究在 5 种岩石颗粒形状等其他参数不变的基础上,建立岩石模型,并进行 WYD260 斗杆挖掘工况仿真,同样 9 s 完成斗杆挖掘,达到同样的铲斗装载量。

挖掘阻力对比如图 5 所示。

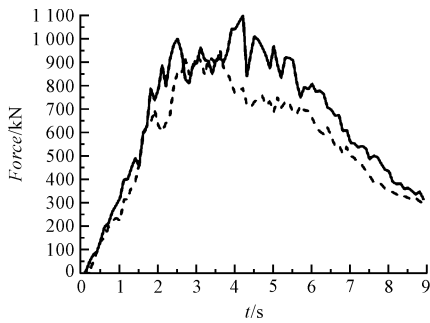


图 5 不同岩石颗粒分布对挖掘阻力影响的对比

虚线 - 岩石第一次取样铲斗挖掘阻力,其中最大挖掘阻力为 941 kN;实线 - 岩石第二次取样铲斗掘阻力,其中最大挖掘力为 1 108 kN

图 5 中最大挖掘阻力差距约为 15%。

铲斗插入松散岩石初始阶段,岩石颗粒尺寸对力链破坏与重构影响较小,随着铲斗插入深度增加,大块岩石力链破坏与重构呈现强非线性,岩石与铲斗的作用力增加,铲斗挖掘阻力变大。

构成岩石颗粒强力链主要由大块颗粒岩石组成,岩石大颗粒数量增加,强力链数量减少,强力链破坏与重构呈现强非线性。岩石的颗粒块度尺寸分布,是明显影响挖掘阻力的因素。

松散岩石颗粒尺寸分布,对挖掘阻力影响显著,需要按照大块岩石比例最高的情况,构建岩石离散元模型,分析挖掘机铲斗作用力。

2.2 岩石颗粒形状对挖掘阻力的影响

本研究在第一次筛分实验松散岩石中,第 3 次取样 6 种岩石颗粒,增大片状岩石比例,并测量岩石形状,岩石颗粒形状系数分别为 $r = 0.2139$ 、 0.2798 、 0.2590 、 0.3891 、 0.5324 、 0.6053 ,建立松散岩石模型 EDEM 模型,松散岩石自然安息角为 39° ,进行 WYD260 挖掘机斗杆挖掘作业。

挖掘阻力如图 6 所示。

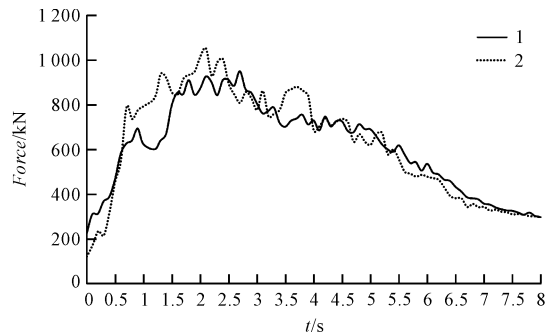


图 6 岩石颗粒形状对挖掘阻力的影响

实线曲线 1 - 岩石第一次取样铲斗挖掘阻力;虚线曲线 2 - 挖掘阻力

图 6 中,比较铲斗挖掘阻力,改变岩石形状颗粒系数,铲斗最大挖掘阻力发生变化。松散颗粒形状也是影响颗粒力链的主要因素之一,圆润颗粒增多,则强力链数量增加,强力链破坏与重构变化稳定;片状岩石颗粒增多,强力链数量减少,强力链破坏与重构变化剧烈。

松散岩石形状分布,对挖掘机铲斗挖掘阻力有显著影响,需要根据岩石形状分布,取足够数量片状颗粒建立离散元模型,作为液压挖掘机铲斗挖掘阻力计算参考依据。

3 结束语

在分析金属矿山松散岩石块度尺寸分布、形状分布的基础上,本文研究了超大型挖掘机铲斗与松散岩石之间的作用力,结论如下:

(1)通过分析金属矿山松散岩石颗粒尺寸分布、形状分布,建立挖掘机工作装置多体动力学与矿山松散岩石离散颗粒动力学耦合模型,能够有效分析挖掘机铲斗与松散岩石非线性挖掘阻力,计算超大型挖掘机铲斗挖掘阻力;

(2)影响挖掘机铲斗与松散岩石非线性耦合作用

力的因素,不仅包括铲斗材料、松散岩石材料特性,而且包括岩石颗粒的块度尺寸分布、形状分布;在金属矿山超大型矿用挖掘机设计中,需要考虑爆破后岩石颗粒的块度尺寸分布、形状分布,计算铲斗挖掘阻力,可为工作装置等关键结构件设计提供参考依据。

参考文献(References):

- [1] TORDESILLAS A, SHI J, TSHAIKIWSKY T. Stress-dilatancy and force chain evolution[J]. **International journal for numerical and analytical methods in geomechanics**, 2011,35(2):264-292.
- [2] 王光谦,孙其诚. 颗粒物质及其多尺度结构统计规律[J]. **工程力学**,2009,26(2):1-7.
- [3] BLOUIN S, HEMAMI A, LIPSETT M. Review of resistive force models for earthmoving processes[J]. **Journal of aerospace engineering**, 2001(14):102-131.
- [4] CLEARY P W. DEM simulation of industrial particle flows: case studies of dragline excavators, mixing in tumblers and centrifugal mills[J]. **Powder Technology**, 2000,109(1-3):83-104.
- [5] CLEARY P W. Industrial particle flow modelling using discrete element method [J]. **Engineering Computations**, 2009,26(6):698-743.
- [6] 胡 励. 机械产品设计中的颗粒离散元仿真技术及实现[D]. 武汉:武汉大学动力与机械学院,2013.
- [7] CLEARY P W. DEM simulation of industrial particle flows; case studies of dragline excavators, mixing in tumblers and centrifugal mills [J]. **Powder Technology**, 2000,109(1-3):83-104.
- [8] CLEARY P W. Large scale industrial DEM modelling [J]. **Engineering Computations**, 2004,21(2-4):169-204.
- [9] KYLE J, COSTELLO M. Comparison of measured and simulated motion of a scaled dragline excavation system [J]. **Mathematical and computer modelling**, 2006,44(9):816-833.
- [10] 林贵瑜,李爱峰,肖 斌,等. 机械式单斗挖掘机挖掘阻力模拟[J]. **矿山机械**,2014,42(4):39-43.
- [11] 侯亚娟,王国强,王吉生,等. WK-75 型矿用挖掘机铲斗性能仿真与结构优化[J]. **矿山机械**,2014,42(7):42-46.
- [12] OWEN P J, CLEARY P W. Prediction of screw conveyor performance using the discrete element method (DEM) [J]. **Powder Technology**, 2009,193(3):274-288.
- [13] BERNOLD L E. Experimental studies on mechanics of lunar excavation [J]. **Journal of aerospace engineering**, 1991,4(1):9-22.
- [14] 王祥厚,李程远,李发文. 爆破岩石破碎的分形演化[J]. **贵州工业大学学报:自然科学版**,2003,32(5):61-65.
- [15] BARRIOS G K P, DE CARVALHO R M, KWAVE A, et al. Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling [J]. **Powder technology**, 2013(248):84-93.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

李 洪,李 光,宁晓斌,等. 挖掘机铲斗与松散岩石挖掘阻力研究[J]. **机电工程**,2019,36(2):163-167.

LI Hong, LI Guang, NING Xiao-bin, et al. Research of digging force between excavator bucket and loose rocks[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2019,36(2):163-167.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn