

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201806054



# 立轴冲击破碎机锤头磨损形式的确定

吕宁, 房怀英, 杨建红, 陶寅

(华侨大学 机电装备过程监测及系统优化福建省高校重点实验室, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为研究立轴冲击破碎机锤头的磨损形式,在现有锤头磨损计算模型的基础上,结合赫兹接触理论和断裂力学,提出一种新的优化计算模型.通过离散单元法仿真分析锤头受力特性和颗粒运动特性,并与实验后的锤头表面微观形貌进行对比.实验结果表明:优化模型具有合理性,模拟仿真手段正确,具有可行性;并确定了冲击磨损是造成锤头磨损的主要形式.

**关键词:** 立轴冲击破; 锤头; 磨损; 离散单元法

**中图分类号:** TP 391.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2019)03-0305-07

## Determination of Hammer Wear Type of Vertical Shaft Impact Crusher

LÜ Ning, FANG Huaiying, YANG Jianhong, TAO Yin

(Key Laboratory of Process Monitoring and System Optimization for Mechanical and Electrical Equipment, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** To determine the hammer wear type of vertical shaft impact crusher, a new optimization model was proposed based on the existing hammer wear calculation models, together with Hertz contact theory and fracture mechanics. The discrete element method was used to analyze the force characteristics of the hammer and the particle motion characteristics, and the simulated morphology of hammer surface was compared with that after used. The results indicate that the impact wear was the hammer wear type of vertical shaft impact crusher. The research also indicates that the optimization model is reasonable and the simulation method is feasible and correct.

**Keywords:** vertical shaft impact crusher; hammer; wear; discrete element method

随着我国基础建设的发展,天然砂资源日益减少,导致市场对机制砂的需求越来越多.目前,普遍采用立轴冲击式破碎机作为主要制砂设备<sup>[1]</sup>,该设备也已广泛应用于人工制砂行业中<sup>[2]</sup>.立轴冲击式破碎机的主要结构包括转子、破碎腔、主轴、变频电机及控制系统等<sup>[3]</sup>.立轴冲击式破碎机在工作过程中,锤头磨损严重,更换次数频繁,严重影响制砂效率和成品砂质量. Murata 等<sup>[4]</sup>通过假设磨损率与岩石撞击抛料锤时损失的能量比例关系,分析冲击式破碎机抛料锤的磨损程度,研究发现,磨损严重部位在抛料锤的尖端. Marshall 等<sup>[5]</sup>通过选择不同的人料特性和磨损件材料,分析磨损件的磨损量的变化规律及磨损过程,优化破碎机的磨损性能. Cleary 等<sup>[6]</sup>对冲击式破碎机进行离散元仿真,分析破碎机生产过程中

**收稿日期:** 2017-03-29

**通信作者:** 房怀英(1978-),女,副教授,博士,主要从事高端机制砂装备的研究. E-mail:happen@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 福建省自然科学基金资助项目(2017J01108);福建省产学研合作重大项目(2016H6013);福建省泉州市科技计划资助项目(2018C100R);华侨大学科研启动费资助项目(17BS305);华侨大学研究生科研创新基金资助项目(17013080024)

的颗粒流动和物料破碎情况,得到破碎机的磨损分布. 文献[7-8]通过不同的结构设计以减少破碎机磨损件的磨损,延长其使用寿命. 吕龙飞等<sup>[9]</sup>将 Archrad 粘着磨损模型与 Rabinowicz 磨粒磨损模型相结合,采用 EDEM 软件模拟立轴冲击式破碎机转子磨损过程,分别得到分料锥、上、下耐磨板和抛料头的磨损特性. Yang 等<sup>[10]</sup>将立轴冲击式破碎机转子锤头的耐磨合金块分成 22 块,并单独标记,利用 EDEM 软件模拟仿真,研究转子转速、入料量和颗粒粒度对锤头载荷分布的影响. 刘敏芳<sup>[11]</sup>在研究立轴冲击式破碎机时,对其中的物料进行颗粒速度的理论推导,并对磨损的主要原因进行分析. 本文通过采用离散单元法与实验相结合的方法,确定转子锤头在制砂过程中所受的磨损类型.

1 锤头磨损实验

1.1 实验平台构建

立轴冲击式破碎机的实验平台主要由料仓、给料装置、破碎腔、转子、动力驱动系统及机架辅助装置等组成,其实验装置整体结构,如图 1 所示. 其中,转子是试验机的核心部分,其结构示意图,如图 2 所示. 实验过程如下:1) 通过给料装置,一定粒径的物料进入转子,经分料锥随机分散到转子流道板上;2) 在离心力的作用下,物料经流道板加速后,从流道板外边缘抛出;3) 抛出的物料颗粒冲击安装在转子边缘的锤头,经锤头的撞击加速,撞击破碎腔周围已经形成的物料衬层,从而发生破碎.

1.2 实验材料及方法

实验所采用的物料为石灰石颗粒,物料的总入料量为  $5.89\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ . 其中:小于  $2.36\text{ mm}$  的粒径占比为  $16.76\%$ ;在  $2.36\sim4.75\text{ mm}$  之间的粒径占比为  $76.41\%$ ;在  $4.75\sim9.50\text{ mm}$  之间的粒径占比为  $6.83\%$ . 实验时,将转子转速设置为  $1\,718.87\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,此时,转子外缘线速度为  $45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 锤头的材料为碳化钨合金,通过实验得到的磨损锤头,如图 3 所示.

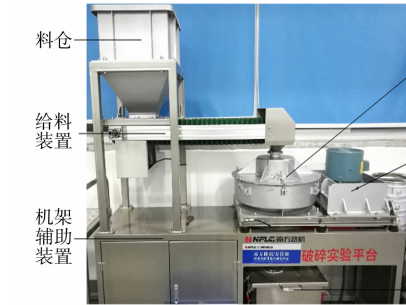


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental device

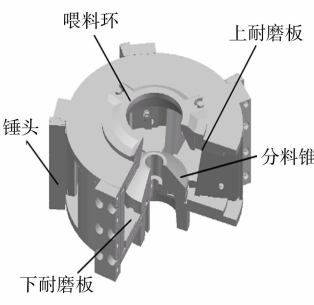


图 2 转子示意图

Fig. 2 Rotor schematic

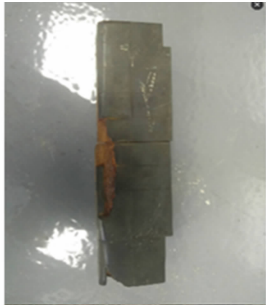


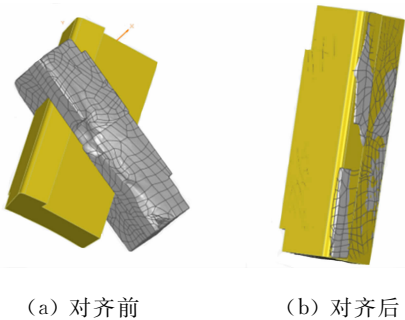
图 3 磨损锤头

Fig. 3 Worn hammer

1.3 锤头磨损值测量

为研究锤头磨损量变化,采用三维软件对比锤头磨损前、后的数学模型,并计算磨损值. 首先,对三维扫描仪进行标定;然后,使用先临三维扫描仪扫描已磨损的锤头;最后,选择不同的方向对被扫描件进行多次成像,再合成所有的扫描数据,从而完成对锤头的扫描. 扫描过程中,由于样件在测量时随意摆放,导致锤头磨损前、后的数学模型不在同一个坐标系中,无法直接对比. 因此,在对比前需要把扫描模型和数学模型进行对齐. 选择最佳拟合对齐方法<sup>[12]</sup>对点云数据和数学模型进行对齐操作. 对齐前、后的模型,如图 4 所示.

利用软件处理后的对齐模型,如图 5 所示. 图 5 中:在未磨损区域中,锤头磨损前的表面比锤头磨损后的表面凸出,说明该区域是磨损量较大的位置. 为进一步研究该区域内磨损变化趋势,提取锤头表面该区域的磨损量. 为便于对比锤头磨损测量值与仿真数据,将磨损云图离散化,如图 6 所示. 图 6 中: $X, Y$  分别为锤头较大表面的长和宽,并将  $X$  划分成 13 列,将  $Y$  划分成 38 行,形成一个矩形网格.



(a) 对齐前

(b) 对齐后

图 4 最佳拟合对齐

Fig. 4 Best-fit alignment

利用软件提取图 6 中每个网格的磨损值,得到锤头磨损部位的离散化数据,其三维图,如图 7 所示。图 7 中: $u$  为磨损值。

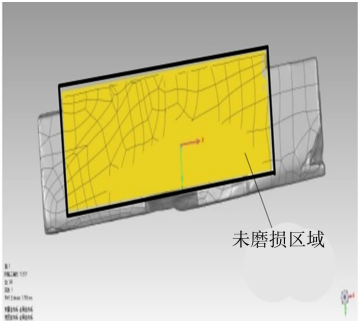


图 5 磨损关键区域  
Fig. 5 Wear critical area

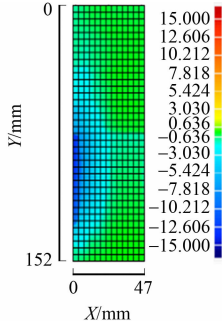


图 6 云图离散化  
Fig. 6 Cloud atlas discretization

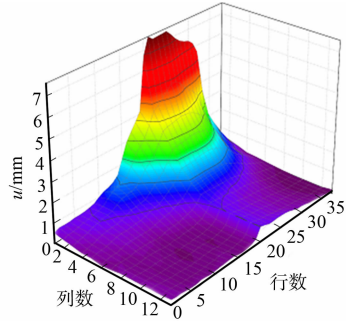


图 7 锤头磨损值  
Fig. 7 Wear value of hammer

## 2 破碎机锤头磨损仿真

### 2.1 锤头磨损计算模型

由于现有冲击磨损的计算方法没有同时考虑颗粒撞击锤头时所产生的法向作用和切向作用,因此,文中在赫兹接触理论和断裂力学的基础上,针对脆性材料碳化钨硬质合金,建立一个适用于锤头磨损的计算方法。锤头表面焊有耐磨的碳化钨合金块(脆性材料),由于脆性材料一般具有不均匀的微观结构,使得碳化钨合金磨损主要表现为脆性断裂。Sheldon 等<sup>[13]</sup>证明了脆性材料在去除过程中,除了会脆性断裂,还会对塑性变形有一定影响。

磨损模型构建的基础是假设撞击材料表面的颗粒呈球形,并且颗粒与材料表面的法向接触是基于赫兹接触理论计算<sup>[14]</sup>。球形颗粒和材料表面很小的接触面积会导致两者在接触处产生很大的局部应力。颗粒与材料的接触模型,如图 8 所示。图 8 中: $P$  为接触载荷; $h$  为压痕深度。

球形颗粒接触的截面示意图,如图 9 所示。图 9 中: $R$  为圆球半径; $r$  为水平截面圆半径; $\beta$  为接触弧所对半角。根据赫兹接触理论,可得  $r = \sqrt{2Rh}$ 。

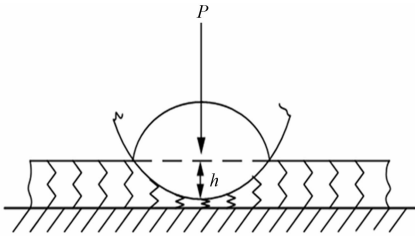


图 8 赫兹接触模型  
Fig. 8 Hertz contact model

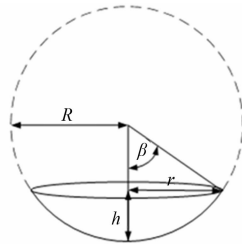


图 9 颗粒示意图  
Fig. 9 Particle schematic

质量为  $m$  的颗粒以速度  $v$  冲击物体表面,产生接触载荷  $P$ ,形成压痕的载荷  $P$  与靶材表面的硬度有关,即  $P(h) = HA(h)$ ,  $A(h) = \pi r^2$ 。其中: $A(h)$  为颗粒压入靶材部分的水平截面的表面积,是一个与压痕深度  $h$  有关的函数; $H$  为靶材的硬度。由此可得颗粒在材料表面产生的最大压痕深度  $h_{\max}$  为

$$h_{\max} = P / (2\pi R^2 H). \tag{1}$$

假设颗粒作用在材料表面的法向动能  $E_n$  全部被用于材料表面的断裂和变形,从而形成靶材表面的压痕深度  $h$ <sup>[15]</sup>,即

$$E_n = \frac{1}{2} m v_n^2, \quad E_n = W_{\text{ind}} = \int_0^{h_{\max}} P(h) dh. \tag{2}$$

式(2)中: $v_n$  为颗粒冲击物体表面时的法向速度; $W_{\text{ind}}$  为物体表面产生压痕所做的功。

联立式(1),(2),得到载荷  $P$  和颗粒法向动能  $E_n$  之间的关系,即  $P = \sqrt{4\pi H E_n R}$ 。

颗粒在冲击物体表面时的运动,如图 10 所示。图 10 中: $\theta$  为冲击角; $L$  为切向位移长度。颗粒在冲击

物体表面时,颗粒对锤头不仅有法向作用,还有切向作用.文献[16-17]在研究颗粒对材料的冲击磨损时,也考虑了颗粒对锤头的切向作用.对具有一定切向速度的颗粒冲击材料表面时,形成的切向位移长度 $L=v_t t$ .其中: $v_t$ 为颗粒冲击物体表面时,颗粒与材料表面之间的相对切向速度; $t$ 为颗粒撞击材料表面的接触时间.

颗粒压入材料的横截面为

$$S=\beta R^2-r(R-h).$$

(3)

颗粒冲击靶材造成材料的体积损失 $V$ 为

$$V=SL.$$

(4)

2.2 锤头磨损仿真

对实验所采用的转子进行模型结构简化,并导入离散元分析软件 EDEM 中,如图 11 所示.为提高计算效率,选择球形颗粒替代待破碎的石灰石物料.

2.3 离散元仿真设置

1) 材料的物理属性.颗粒的材料为石灰石,剪切模量为 $2.09\times10^8$  Pa,密度为 $2\,640\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,泊松比为 0.25.转子的材料为钢,泊松比为 0.30,剪切模量为 $7.00\times10^{10}$  Pa,密度为 $7\,800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .2) 颗粒与颗粒、颗粒与几何体的相互作用.石灰石颗粒之间的恢复系数为 0.207,静摩擦系数为 0.77,滚动摩擦系数为 0.10;石灰石颗粒与钢之间的恢复系数为 0.557,静摩擦系数为 0.77,滚动摩擦系数为 0.07<sup>[18]</sup>.设置重力加速度为 $9.81\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ .颗粒和颗粒之间,颗粒和几何体之间的接触模型均设定为 Hertz-Mindlin(no slip)模型.

设定物料颗粒的入料量、粒径及其所占比例与实验一致,设置与实验一致的转子转速.为模拟物料流进入转子的情况<sup>[19]</sup>,将颗粒工厂设定为与转子同轴心半径为 70 mm,高为 320 mm 的圆柱体,颗粒在颗粒工厂内部随机生成,仿真时间为 10 s.

利用 EDEM 软件处理提取颗粒与锤头撞击时,颗粒的质量、颗粒的半径、颗粒与锤头之间的相对速度、颗粒与锤头的接触时间等信息,并结合理论推导计算得到仿真结果,如图 12 所示.

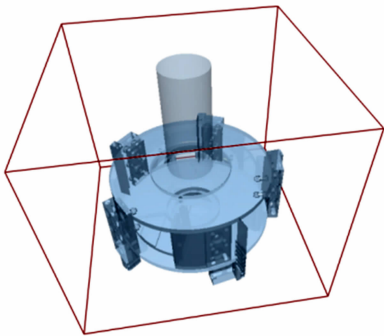


图 11 转子离散元模型

Fig. 11 Rotor discrete element model

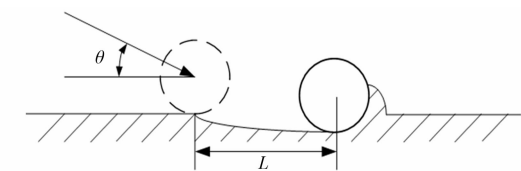


图 10 颗粒运动示意图

Fig. 10 Schematic diagram of particle movement

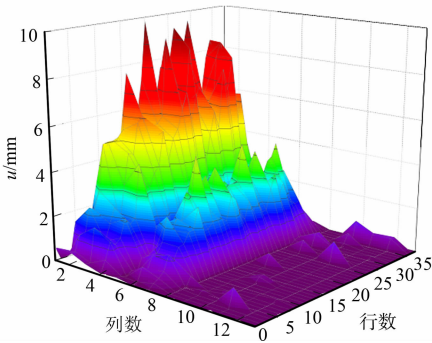


图 12 离散元仿真结果

Fig. 12 Discrete element simulation results

由图 12 可知:第 2 列的磨损值最大,第 2~13 列的磨损值呈下降趋势,但第 6 列有所上升;第 8~13 列的磨损值几乎为 0,这是由于仿真时,未引入破碎腔,缺少从破碎腔反弹回来的颗粒对锤头的冲击.因此,在后续研究中,选择第 1~7 列的磨损数据进行分析.

3 仿真与实验结果对比

为验证仿真结果的正确性,将锤头磨损量的仿真与实验结果进行对比分析.在锤头上选择第 1~7 列所有网格的相对磨损程度,取每个网格上的磨损值与总磨损值的比值,作出实验值与模拟值对比图,如图 13 所示.图 13 中: $s$  为相对磨损程度.

由图 13 可知:第 1 列的磨损仿真值与实验值的结果相差很大,实验中,锤头的中部区域磨损严重,



但仿真相对比较平缓,这是因为仿真时没有引入破碎腔,缺少从破碎腔反弹撞击锤头所引起的磨损,这也进一步说明,锤头第 1 列的磨损主要是由破碎腔反弹的颗粒撞击形成的;第 2~7 列仿真与实验所得的相对磨损程度的变化趋势几乎一致,均是中间磨损严重而两端磨损量较小。

综上所述,通过将锤头磨损量的仿真与实验结果进行对比,可证明离散元模拟仿真的正确性。

### 4 锤头磨损形式确定

#### 4.1 锤头受力分析

利用 EDEM 软件的后处理功能,提取转子运行过程中锤头表面所受法向和切向上的碰撞力。总碰撞力( $F_t$ )随时间( $t$ )的变化,如图 14 所示。

由图 14 可知:在 0~4.2 s 时,锤头所受撞击力几乎为 0,这是由于进入转子的物料颗粒先在转子内形成物料层,而被抛出转子的颗粒很少,当转子内形成稳定的物料层后,被抛出转子的颗粒量达到相对稳定状态;在 5.5 s 时,仿真系统达到稳定,此时,转子连续不断地抛出颗粒撞击锤头。

由图 14 还可知:锤头受力的任意时刻,法向总碰撞力总是大于切向总碰撞力。这说明锤头主要受到颗粒的法向冲击。

利用 EDEM 软件导出颗粒每次冲击锤头的法向相对速度和切向相对速度,两者的反正切值为冲击角。颗粒撞击锤头的冲击角及其颗粒数占比的分布,如图 15 所示。图 15 中: $\zeta$  为各区间个数占比; $v$  为速度; $\alpha$  为角度区间。由图 15 可知:颗粒撞击锤头的冲击角主要集中在  $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$  之间,其颗粒数占比达到 78%。因此,可以得出锤头主要是受到颗粒的法向冲击。

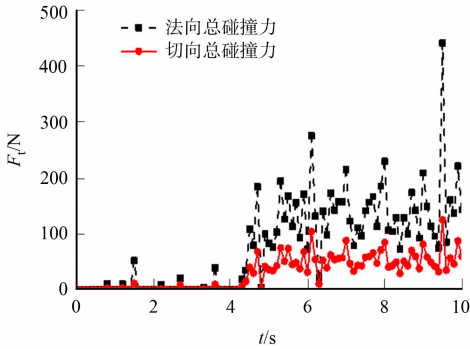


图 14 锤头表面受力

Fig. 14 Stress on surface of hammer

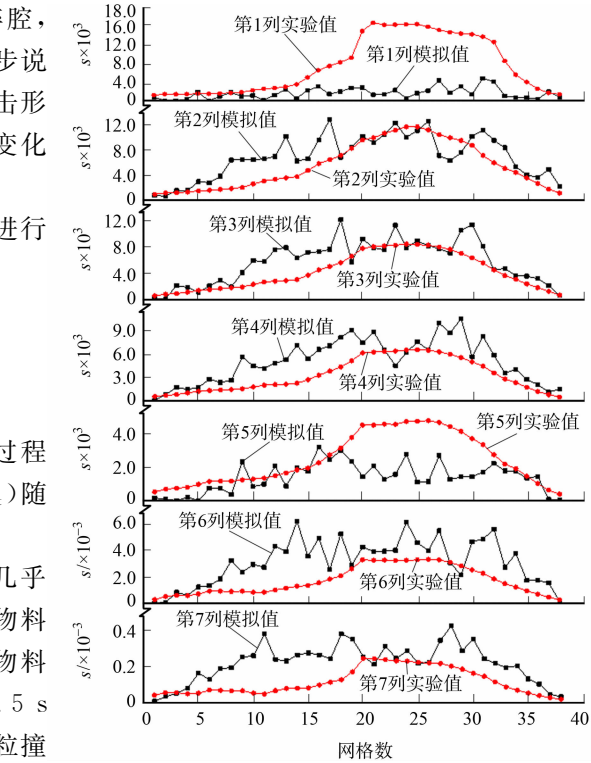


图 13 锤头磨损量的仿真与实验结果对比

Fig. 13 Comparison of simulation and experiment results of hammer wear

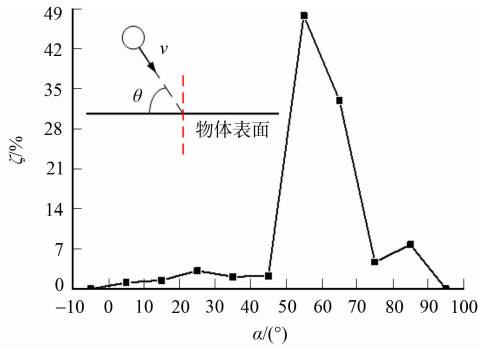


图 15 颗粒撞击锤头的冲击角与颗粒数占比

Fig. 15 Impact angle and proportion of number of particles

#### 4.2 颗粒的接触力及与锤头的相对运动分析

为了更好地判定颗粒对锤头磨损的作用形式,随机选取一个颗粒,追踪该颗粒在破碎制砂过程中,所受接触力( $F$ )及与锤头的相对运动速度( $v_r$ )随时间( $t$ )的变化情况,如图 16,17 所示。

由图 16 可知:在颗粒与锤头撞击的过程中,在 5.005 240 s 时,该颗粒与锤头接触,切向接触力和法向接触力同时增大;在 5.005 252 s 时,颗粒与锤头间的切向接触力和法向接触力同时达到最大值;在 5.005 272 s 时,颗粒与锤头不再接触,两者分离。颗粒与锤头接触时间约为 32  $\mu$ s。在颗粒与锤头撞击的整个过程中,法向接触力大于切向接触力,说明颗粒对锤头的作用主要是瞬时的法向冲击。

由图 17 可知:颗粒与锤头接触后,切向相对速度只是略有下降;法向相对速度先减小,在 5.005 252

s 时,达到最小值,此时,也是接触力最大的时刻;之后,法向相对速度增加,而切向相对速度只有少量减小.故颗粒在撞击锤头的过程中,受到锤头的阻力,主要消耗颗粒的法向动能,而切向动能在整个过程中,只有少许降低.这个现象进一步说明颗粒对锤头的作用主要是法向的冲击作用.

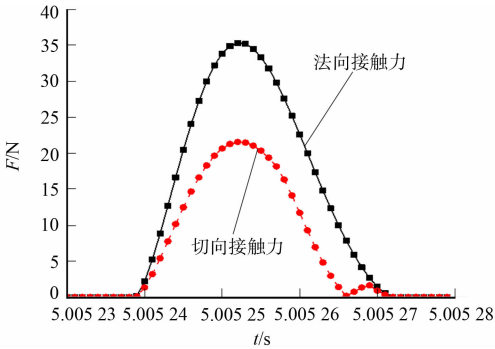


图 16 颗粒与锤头的接触力

Fig. 16 Contact force between particle and hammer

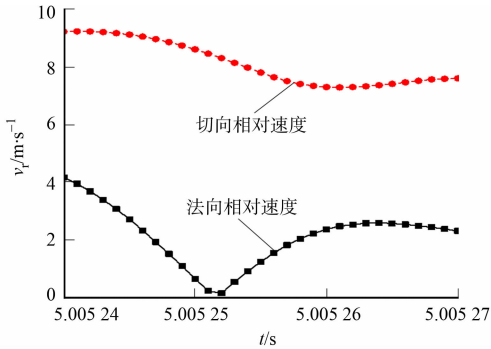
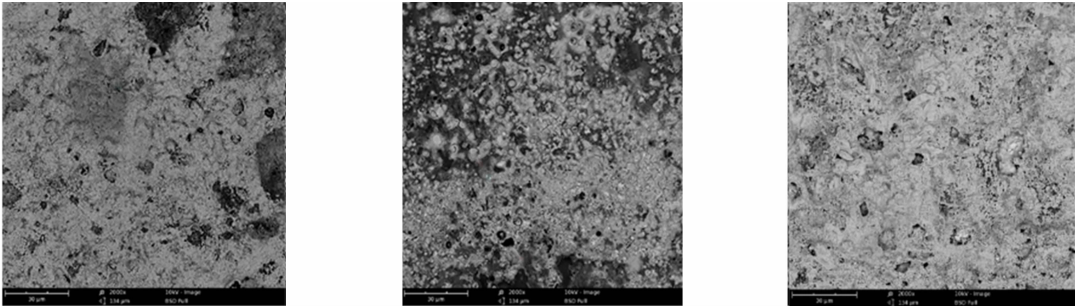


图 17 颗粒与锤头间的相对速度

Fig. 17 Relative velocity between particle and hammer

### 4.3 锤头磨损表面扫描电镜分析

选择已磨损的锤头(图 3),在磨损的锤头上选择一块碳化钨合金作为观测对象.首先,利用超声波清洗机将样品表面的油污、污渍去除.然后,放入烘干机烘干,完成样品制备.使用内置能谱仪台式扫描电镜,得到锤头磨损表面的扫描电镜图像,如图 18 所示.



(a) 样品点 1

(b) 样品点 2

(c) 样品点 3

图 18 扫描电镜结果

Fig. 18 Scanning electron microscope results

由图 18 可知:样品点 1,2,3 中均可观察到大量的凹坑,这是由于锤头表面受颗粒不断撞击而产生裂纹,随着冲击的进行,裂纹扩展,材料脱落形成凹坑,这就是典型的脆性材料冲击磨损造成的表面形貌.凹坑中的粒子主要为残存的碳化钨颗粒,由于其硬度高、耐磨性好、抵抗冲击的能力强,因此,可以承受颗粒的冲击和切削.当颗粒以一定角度冲击材料,产生所谓的“阴影效应”,使得处在碳化钨颗粒“阴影”中的其他材料承受颗粒冲击和切削的几率降低,程度减轻,从而降低材料的磨损.

由图 18(c)可知:图中有比较明显的划痕状的沟壑,其现象是由颗粒对材料切向作用造成的.从扫描电镜结果得到的锤头磨损失效现象符合碳化钨合金冲击磨损,这在文献[20-22]的实验中均有体现.

冲击磨损是颗粒对材料表面的反复冲击而使材料表面产生渐进的损耗.冲蚀磨损和撞击磨损是冲击磨损的两大类.撞击磨损指的是颗粒对一个固体表面的反复不断地冲击,在实际情况中,撞击与滑动是紧密联系的,接触表面相互接近时,存在撞击的法向和切向分量.撞击磨损是一种由粘着磨损、磨粒磨损、表面疲劳等多种磨损机理的综合作用的复杂磨损情况.

综上所述,结合电镜结果和 EDEM 软件对锤头的受力分析、颗粒和锤头撞击时间段内的接触力分析、相对速度分析及冲击磨损的作用机理分析,可判定锤头的磨损形式为冲击磨损.

## 5 结束语

采用离散单元法对立轴冲击式破碎机的锤头磨损形式进行全面的研究.通过将锤头磨损表面进行

离散,获取磨损表面信息,除第1列的磨损仿真值与实验值的结果相差很大,第2~7列仿真值与实验值的变化趋势几乎一致.针对第1列的现象差异,其原因是仿真时,没有引入破碎腔,缺少从破碎腔反弹撞击锤头所引起的磨损,同样,也进一步说明锤头第1列的磨损主要是由破碎腔反弹的颗粒撞击形成的.通过仿真数据与实验结果的对比,证明了离散元模拟仿真手段的可行性与正确性;通过从锤头的受力特性,颗粒与锤头间的作用力及相对速度等多角度分析整个磨损过程,并结合磨损锤头的表面微观形貌,最终确定锤头的磨损类型为冲击磨损.

## 参考文献:

- [1] 高强,张建华.破碎理论及破碎机的研究现状与展望[J].机械设计,2009,26(10):72-75. DOI:10.13841/j.cnki.jx-sj.2009.10.002.
- [2] 郑鸣皋.略谈制砂设备的开发[J].矿山机械,2004(1):18-22.
- [3] DALLIMORE R,FENSOME G,KJAERRAN K. Vertical shaft impact crusher: US,US8042756[P].2011-10-25.
- [4] MURATA H,CHIJI M,HINO N,*et al.* Analysis of wear in impact crushers[J].Resources Processing,1991,38(1):9-15. DOI:10.4144/rpsj1986.38.9.
- [5] MARSHALL A,PARRY T,WILSON J. Operational wear in the impeller of a vertical shaft impact breaker[J].Wear,1993,162/163/164:1022-1024. DOI:10.1016/0043-1648(93)90115-3.
- [6] CLEARY P,SINNOTT M. Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM: Part 2: Impact crushers[J].Minerals Engineering,2015,74:163-177. DOI:10.1016/j.mineng.2014.11.017.
- [7] 吴明清. Sandvik RP 系列立轴冲击式破碎机的性能和应用[J].矿山机械,2008(13):71-73.
- [8] 李本仁.国外立轴冲击式破碎机发展概况[J].矿山机械,2004(1):13-14.
- [9] 吕龙飞,侯志强,廖昊.基于离散元法的立轴破转子磨损机制研究[J].中国矿业,2016,25(增刊2):312-316. DOI:10.3969/j.issn.1004-4051.2016.z2.073.
- [10] YANG Jianhong,FANG Huaiying,LUO Man. Load and wear experiments on the impact hammer of a vertical shaft impact crusher[J].2015,103(1):012041. DOI:10.1088/1757-899X/103/1/012041.
- [11] 刘敏芳.立轴冲击式破碎机破碎及磨损仿真研究[D].济南:济南大学,2008.
- [12] 邹付群,成思源,李苏洋,等.基于 Geomagic Qualify 软件的冲压件回弹检测[J].机械设计与研究,2010,26(2):79-81. DOI:10.13952/j.cnki.jofmdr.2010.02.002.
- [13] SHELDON G,FINNIE I. On the ductile behavior of nominally brittle materials during erosive cutting[J].Journal of Engineering for Industry,1966,88(4):387-392. DOI:10.1115/1.3672666.
- [14] JOHNSON K. Contact mechanics[J].Journal of Tribology,1985,108(4):96-119. DOI:10.1017/CBO9781139171731.
- [15] GREWAL H,SINGH H,AGRAWAL A. A phenomenological model for slurry erosion prediction of thermal spray coatings[J].Tribology Letters,2014,56(1):119-132. DOI:10.1007/s11249-014-0391-3.
- [16] FINNIE I. Some observations on the erosion of ductile metals[J].Wear,1972,19(1):81-90. DOI:10.1016/0043-1648(72)90444-9.
- [17] POWELL M,WEERASEKARA N,COLE S,*et al.* DEM modelling of liner evolution and its influence on grinding rate in ball mills[J].Minerals Engineering,2011,24(3/4):341-351. DOI:10.1016/j.mineng.2010.12.012.
- [18] 邢大伟,房怀英,杨建红,等.立轴冲击破碎机转子出料特性仿真实验[J].华侨大学学报(自然科学版),2015,36(5):500-505. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.05.0500.
- [19] 路文典.立轴冲击式破碎机制砂规律与效果改进研究[J].云南水力发电,2007,23(6):90-93. DOI:10.3969/j.issn.1006-3951.2007.06.023.
- [20] ANTONOV M,PIRSO J,VALLIKIVI A,*et al.* The effect of fine erodent retained on the surface during erosion of metals, ceramics, plastic, rubber and hardmetal[J].Wear,2016,354/355:53-68.
- [21] ALLEN C,SHEEN M,WILLIAMS J,*et al.* The wear of ultrafine WC-Co hard metals[J].Wear,2001,250(1-12):604-610. DOI:10.1016/S0043-1648(01)00667-6.
- [22] 龚宝龙.煤液化高温调节阀流动磨损预测及校核研究[D].杭州:浙江理工大学,2014.