

基于连续-非连续单元法的三维脆性 颗粒冲击破碎特性分析

刘新明^{1,2}, 冯春^{*1,2}, 林钦栋³

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049;
3. 西安近代化学研究所, 西安 710065)

摘要:通过在连续-非连续单元法(CDEM)中引入考虑应变率效应的断裂能本构以及能量统计算法,实现了球体冲击破碎过程中损伤破裂程度及能量演化的定量分析。计算结果表明,冲击破碎过程分为接触蓄能阶段、损伤破碎阶段和碎块飞散阶段。首先,颗粒的部分动能转化为单元弹性变形能,随后这部分变形能和动能迅速转化为摩擦消耗、阻尼消耗及弹簧断裂能,破碎基本完全后碎块继续飞散。不同冲击速度下,颗粒分别出现了反弹、开裂、破碎和粉碎的现象。随冲击速度的增加,D50的变化速率逐渐放缓,破碎块度逐渐趋于稳定;破裂度、损伤度以及平均损伤因子的变化速率先增加后放缓,颗粒破坏以拉伸破坏为主。以上结论可为脆性材料冲击破碎工艺的优化设计提供依据。

关键词:连续-非连续单元法;颗粒冲击破碎;破碎块度;数值模拟;断裂能

中图分类号: O346.1⁺¹; O242.1

文献标志码: A

1 引言

冲击载荷下脆性颗粒的破碎特性一直都是破碎领域中重点关注的研究内容。颗粒破碎的主要演化阶段为微裂纹萌生、扩展、贯通直至形成宏观裂缝,整个过程历时极短且速度极快,常规监测手段难以对其损伤破碎演化过程进行精准描述。因此数值模拟已经成为解决冲击破碎和材料断裂等复杂问题的有效手段,其中离散元法(DEM)和有限离散元耦合法(FDEM和CDEM等)是模拟脆性材料破碎的两种主要数值算法。

离散元法是Cundall^[1]提出的非连续变形数值方法。该方法适用于描述颗粒的非连续变形问题,在众多学科和工程领域有着极为广泛的应用^[2]。Cil等^[3]采用离散元法验证了土基颗粒整体压碎的宏观能量与单个颗粒受拉断裂的宏观能量之间的标度律的有效性。Xu等^[4]使用BPM模型将载荷施加在黏结为颗粒簇的单元上,分析了颗粒破碎时的力学特性。文献[5-7]基于离散元法进行了球形颗粒撞击靶体及两球形颗粒撞击破碎的相关数值分析,探讨了撞击速度和接触面积的大小对破碎行为

的影响。脆性岩石材料在静载与动载的作用下强度特征差异很大,是一种典型的应变率敏感材料,因此研究冲击载荷下脆性颗粒的破碎特性及动态响应对尚在发展的动态强度理论是十分有意义的。

由于离散元法难以对颗粒本身细观力学特性进行精确的描述,因此在进行细观数值模拟时很难定量体现颗粒材料的宏细观力学属性。因此有限离散元耦合的相关数值方法应运而生。文献[8-10]发展了FDEM方法。Guo等^[11]基于FDEM方法建立了准脆性材料的三维裂纹扩展模型,并进行了网格无关性分析和裂纹扩展正确性的算例验证。Ma等^[12-15]利用FDEM方法和计算机断层扫描技术对不规则颗粒的冲击破碎和压碎进行了模拟,分析了颗粒形状对破碎效果的影响及在冲击荷载下的破碎临界特性和碎片分形特性。李世海等^[16]建立并发展了CDEM方法。王杰等^[17]基于CDEM方法对岩石单轴压缩破坏的过程进行模拟,描述了裂纹在拉伸和压剪等不同应力状态下的扩展问题,同时极大地提升了计算效率。冯春等^[18]基于CDEM方法实现了外加载荷下岩体损伤破裂过程的模拟,探讨了数值试样的应变率效应。Lin等^[19]基于CDEM方法提出了黏聚性断裂模型,解释了裂纹萌生和扩展过程的能量耗散现象。由于CDEM方法能够很好地模拟脆性材料在动载作用下的连续变形、裂缝扩展及破碎后运动碰撞,并且

收稿日期: 2022-02-18; 修改稿收到日期: 2022-04-15.

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1505504)

资助项目.

作者简介: 冯春^{*}(1982-),男,硕士,高级工程师
(E-mail: fengchun@imech.ac.cn).

对破碎过程中的能量转化有着良好的量化描述方法,因此十分适用于研究冲击载荷下脆性颗粒的破裂破碎问题。

本文以典型脆性材料岩石颗粒为例,采用连续-非连续单元法(CDEM),以描述脆性颗粒损伤、断裂和破碎的关系,从而详细讨论破碎状态与冲击速度的关系及破碎过程中的能量演化规律。

2 脆性颗粒本构模型及能量统计算法

2.1 脆性颗粒断裂能本构模型

采用连续-非连续单元法研究三维球体脆性岩石颗粒在不同冲击速度下的破坏特性。连续-非连续单元法是通过拉格朗日能量系统建立严格的控制方程,利用动态松弛法显式迭代求解,从而实现连续-非连续的统一描述,通过块体边界及块体内部的断裂来分析材料渐进破坏,可模拟材料从连续变形到断裂直至运动的全过程。如图1所示,CDEM的数值模型由块体及界面两部分构成。

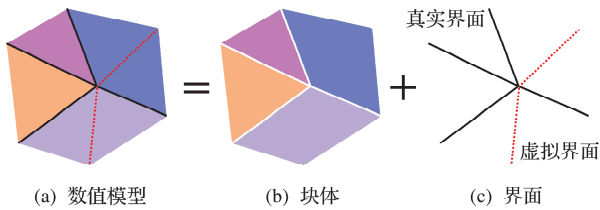


图1 CDEM的数值模型构成

Fig. 1 Composition of numerical model in CDEM

CDEM对于动力问题的解答包含两个步骤,即在每一步中分别对有限元和离散元进行求解,系统的整体受力情况通过不平衡率来表述,全部计算均使用了基于增量方式的显式欧拉前差法,控制式是质点运动方程。

CDEM中单元的本构方程为

$$\begin{cases} \Delta\sigma_{ij} = 2G\Delta\epsilon_{ij} + \left(K - \frac{2}{3}G\right)\Delta\theta\delta_{ij} \\ \sigma_{ij}(t_1) = \Delta\sigma_{ij} + \sigma_{ij}(t_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中 σ_{ij} 为应力张量, $\Delta\sigma_{ij}$ 为应力张量增量, $\Delta\epsilon_{ij}$ 为应变张量增量, $\Delta\theta$ 为体应变增量, K 为体积模量, G 为剪切模量, δ_{ij} 为 Kronecker 记号, t_0 为当前时步, t_1 为下一时步。

采用增量法计算虚拟界面上下一时步的法向及切向试探接触力,

$$\begin{cases} F_n(t_1) = F_n(t_0) - k_n \times A_c \times \Delta du_n \\ F_s(t_1) = F_s(t_0) - k_s \times A_c \times \Delta du_s \end{cases} \quad (2)$$

式中 F_n 和 F_s 为法向和切向接触力, K_n 和 K_s 为单面面积上法向和切向接触刚度(单位: Pa/m), A_c

为虚拟界面的面积, Δdu_n 和 Δdu_s 为法向和切向相对位移增量。

采用式(3)进行拉伸破坏的判断、法向接触力及抗拉强度的修正,为

$$\begin{cases} \text{if } -F_n(t_1) \geq \sigma_t(t_0)A_c \\ \text{then } F_n(t_1) = -\sigma_t(t_0)A_c \\ \sigma_t(t_1) = -(\sigma_{t0})^2 \times \Delta u_n / (2G_{ft}) + \sigma_{t0} \end{cases} \quad (3)$$

式中 σ_{t0} , $\sigma_t(t_0)$ 和 $\sigma_t(t_1)$ 为初始时刻、本时刻及下一时刻虚拟界面上的抗拉强度, Δu_n 为当前时刻虚拟界面上的法向相对位移, G_{ft} 为拉伸断裂能(单位: Pa·m)。

采用式(4)进行剪切破坏的判断、切向接触力及粘聚力的修正,

$$\begin{cases} \text{if } F_s(t_1) \geq F_n(t_1) \times \tan \phi + c(t_0)A_c \\ \text{then } F_s(t_1) = F_n(t_1) \times \tan \phi + c(t_0)A_c \\ c(t_1) = -(c_0)^2 \times \Delta u_s / (2G_{fs}) + c_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 ϕ 为虚拟界面的内摩擦角, c_0 , $c(t_0)$ 和 $c(t_1)$ 为初始时刻、本时刻及下一时刻虚拟界面上的粘聚力, Δu_s 为当前时刻虚拟界面上的切向相对位移, G_{fs} 为剪切断裂能(单位: Pa·m)。

当考虑应变率的影响时,初始粘聚力及初始抗拉强度与应变率之间的函数关系为

$$\begin{cases} c = c_0(1 + \dot{\gamma})^{e1} \\ \sigma_t = \sigma_{t0}(1 + \dot{\epsilon})^{e2} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\dot{\gamma}$ 和 $\dot{\epsilon}$ 为虚拟界面上的剪切应变率及拉伸应变率, $e1$ 和 $e2$ 为应变率影响指数,一般可取 $e1 = e2 = 1/3$ 。

2.2 颗粒脆性破坏能量统计算法

为了准确研究脆性颗粒渐进破坏过程中模型的能量演化规律,使用相关能量统计方法^[20]。如图2所示,主要统计以下6种能量,即块体在外部荷载作用下的变形能和动能,界面两侧的块体发生相对运动时,界面上数值弹簧的拉伸变形能和剪切变形能,以及单元相互作用过程中的摩擦耗能和阻尼耗能。

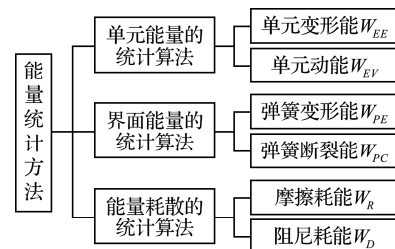


图2 能量统计方法

Fig. 2 Energy statistics method

单元变形能 W_{EE} 为

$$W_{EE} = \sum_{k=1}^{N_E} v_k (\omega_{ee} + \omega_{ep}) \quad (6)$$

式中 N_E 为模型中单元的总个数, ω_{ee} 为单元的弹性变形能密度, ω_{ep} 为塑性变形能密度, v_k 为单元的体积。

单元动能 W_{EV} 为

$$W_{EV} = \sum_{k=1}^{N_E} \frac{1}{2} m_k (v_{ex}^2 + v_{ey}^2 + v_{ez}^2) \quad (7)$$

式中 v_{ex} , v_{ey} 和 v_{ez} 为单元体心的速度在全局坐标系 X, Y 和 Z 方向的分量, m_k 为单元的质量。

界面处弹簧变形能 W_{PE} 为

$$\omega_{pe} = \omega_{pet} + \omega_{pes}, W_{PE} = \sum_{k=1}^{N_p} \omega_{pe} \quad (8,9)$$

式中 ω_{pet} 为拉伸变形能, ω_{pes} 为剪切变形能, ω_{pe} 为单个弹簧的变形能, N_p 为模型中弹簧的总数量。

弹簧的断裂能分为拉伸断裂能和剪切断裂能, 首先根据每个弹簧的破坏类型求出单个弹簧的断裂能 ω_{pc} (式(10)); 随后, 遍历所有发生破断的弹簧, 求出所有破断弹簧的断裂能累积值 W_{PC} (式(11))。弹簧断裂能 W_{PC} 为

$$\omega_{pc} = \begin{cases} \omega_{pt} + \omega_{ps} \\ \omega_{ps} \end{cases}, W_{PC} = \sum_{k=1}^{N_{PC}} \omega_{pc} \quad (10,11)$$

式中 ω_{pc} 为单个弹簧的断裂能, 如果发生拉伸破坏, ω_{pc} 等于拉伸断裂能 ω_{pt} 与剪切断裂能 ω_{ps} 之和, 如果发生剪切破坏, ω_{pc} 等于剪切断裂能 ω_{ps} , N_{PC} 为已发生破断的弹簧数量。

t 时刻到 $t + \Delta t$ 时刻界面两侧单元的相对摩擦位移 ΔU_i (即 ΔU_x 和 ΔU_y) 的表达式为

$$\Delta U_i = \begin{cases} 0 & (G_{t-\Delta t} \text{ 未破坏且 } G_t \text{ 未破坏}) \\ \left(U_i^t - \frac{F_{pi}^t}{k_s} \right) - \left(U_i^{t-\Delta t} - \frac{F_{pi}^{t-\Delta t}}{k_s} \right) & (G_{t-\Delta t} \text{ 未破坏且 } G_t \text{ 破坏}) \\ \left(U_i^t - \frac{F_{pi}^t}{k_s} \right) - \left(U_i^{t-\Delta t} - \frac{F_{pi}^{t-\Delta t}}{k_s} \right) & (G_{t-\Delta t} \text{ 破坏且 } G_t \text{ 破坏}) \\ 0 & (G_{t-\Delta t} \text{ 破坏且 } G_t \text{ 未破坏}) \end{cases} \quad (12)$$

式中 $U_i^{t-\Delta t}$ 和 U_i^t 分别为 $t - \Delta t$ 时刻和 t 时刻弹簧伸长量在 X 和 Y 方向的分量, $F_{pi}^{t-\Delta t}$ 和 F_{pi}^t 分别为 $t - \Delta t$ 时刻和 t 时刻弹簧切向力在 X 和 Y 方向的分量, $G_{t-\Delta t}$ 和 G_t 为弹簧在 $t - \Delta t$ 时刻和 t 时刻的状态。式中 4 个表达式分别代表从 t 时刻至 $t + \Delta t$ 时刻, 弹簧破坏状态的 4 种情况。

根据上述分析, 摩擦耗能 W_R 的计算公式为

$$\omega_r = F_{px} \Delta U_x + F_{py} \Delta U_y, W_R = \sum_{k=1}^{N_p} \omega_r \quad (13,14)$$

阻尼耗能 W_R 的统计算法为

$$W_D = \sum_{k=1}^{N_o} (|c_d F_{ox} \Delta U_{ox}| + |c_d F_{oy} \Delta U_{oy}| + |c_d F_{oz} \Delta U_{oz}|) \quad (15)$$

式中 N_o 为模型中节点的数量, F_{ox} , F_{oy} 和 F_{oz} 为节点的合力在全局坐标系 X, Y 和 Z 方向的分量, ΔU_{ox} , ΔU_{oy} 和 ΔU_{oz} 为 t 时刻至 $t + \Delta t$ 时刻节点的位移增量在全局坐标系 X, Y 和 Z 方向的分量。

2.3 颗粒破碎程度的评价指标

颗粒的破坏发生在单元的虚拟界面间。虚拟界面的主要作用是为显式裂纹的扩展提供潜在的通道, 即裂纹可沿着任意一个虚拟界面进行扩展。为定量描述颗粒冲击破碎后的破坏程度与破裂状态, 引入破裂度 D_f 、损伤度 D_d 及平均损伤因子 F_A 。

破裂度 D_f 是指已破裂单元的虚拟界面面积除以可破裂的虚拟界面总面积, 可表示为

$$D_f = S_b / S_T \quad (16)$$

式中 D_f 为破裂度, S_b 为已破裂单元的虚拟界面面积, S_T 为可破裂的虚拟界面总面积。

损伤度 D_d 是指对已破裂单元的虚拟界面面积乘以对应虚拟界面上的损伤因子进行累计求和, 再除以可破裂的虚拟界面总面积。其表达式如下,

$$D_d = \sum S_b \cdot F_d / S_T \quad (17)$$

式中 D_d 为损伤度, S_b 为已破裂单元的虚拟界面面积, F_d 为对应虚拟界面上的损伤因子, S_T 为可破裂的虚拟界面总面积。

颗粒破碎后会生成若干块体, 平均损伤因子 F_A 用于表征新生成块体的平均损伤程度。其计算流程为先求出各个新块体的损伤度, 再计算所有新块体损伤度的平均值, 可表示为

$$F_{Ai} = \sum S_{bi} \cdot F_{di} / S_{Ti}, F_A = \sum_{i=1}^N F_{Ai} / N \quad (18,19)$$

式中 F_{Ai} 为新生成的第 i 个块体的平均损伤因子, S_{bi} 为新生成的第 i 个块体的破裂面积, S_{Ti} 为新生成的第 i 个块体的界面总面积, F_A 为平均损伤因子, N 为新生成块体的总数。

在 CDEM 计算方法中, 平均损伤因子 F_A 分为平均拉伸损伤因子 F_{AT} 与平均剪切损伤因子 F_{AC} 单独进行计算, 可表示为

$$F_{AT} = 1 - \sigma_t / \sigma_{t(0)}, F_{AC} = 1 - C / C_{(0)} \quad (20,21)$$

式中 F_{AT} 为平均拉伸损伤因子, σ_t 为当前时刻的拉伸应力, $\sigma_{t(0)}$ 为界面的抗拉强度, F_{AC} 为平均剪

切损伤因子, C 为当前时刻的内聚力, C_0 为界面的内聚力。

3 脆性颗粒数值模型与计算参数

3.1 脆性颗粒数值模型

如图3所示,建立三维球体脆性岩石颗粒模型的数值模型和网格模型。该颗粒模型的直径为10 mm,采用四面体单元,共划分了79901个网格。表1为颗粒试样的物理力学性质。该数值模型为典型的脆性岩石颗粒性质。本文分别对颗粒模型进行了冲击速度为25 m/s, 50 m/s, 75 m/s, 100 m/s, 125 m/s 和 150 m/s 的冲击模拟,对颗粒冲击刚性面发生破碎后的破碎块度、损伤程度和能量演化规律程度进行了研究分析。破碎块度是指颗粒在冲击刚性面发生破碎后新生成的独立块体的特征尺寸,可用于量化描述冲击破碎后的破碎效果,如累计粒度分布百分数D50。

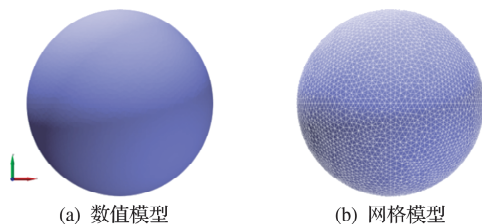


图3 三维脆性岩石颗粒试样的数值及网格模型

Fig. 3 Numerical and mesh models of 3D brittle rock particle samples

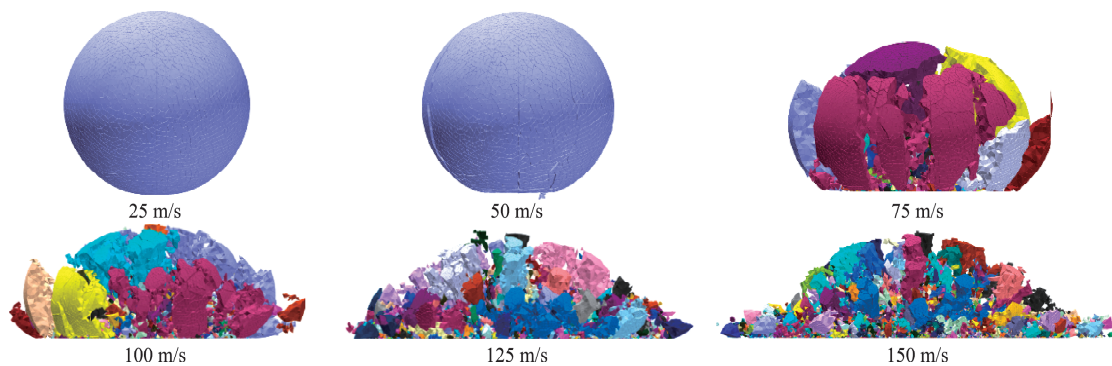


图4 破碎形态(不同色彩表示破碎后形成不同的块体)

Fig. 4 Fracture morphology (different colors represent different blocks after crushing)

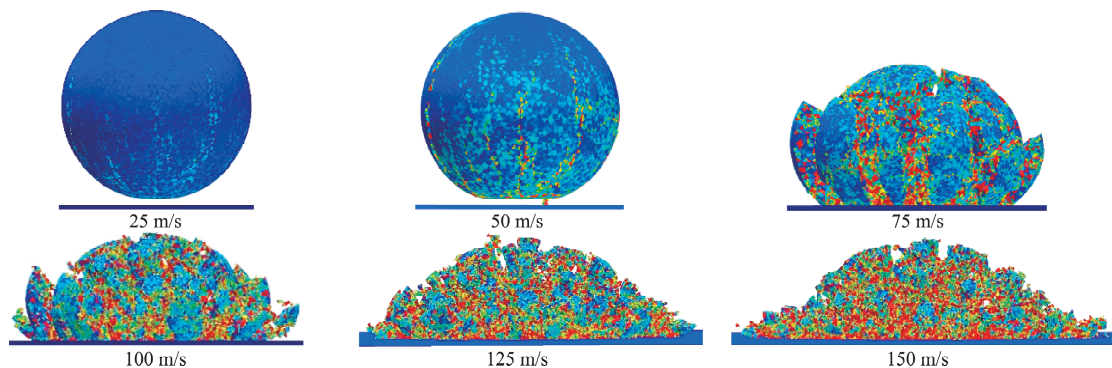


图5 损伤状态(蓝色对应损伤因子为0,红色对应损伤因子为1)

Fig. 5 Damage state (blue corresponding damage factor is 0, red corresponding damage factor is 1)

表1 三维脆性岩石颗粒试样数值模型的物理力学性质

Tab. 1 Physical and mechanical properties of 3D brittle particle sample numerical model

密度 /kg·m ⁻³	弹性模量 /GPa	泊松比	粘聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa
3200	60	0.25	36	12
内摩擦角 /(°)	剪胀角 /(°)	拉伸断裂能 /Pa·m	剪切断裂能 /Pa·m	
40	10	100	500	

3.2 脆性颗粒冲击破碎结果

在本次数值模拟实验中,共设置6种冲击速度,分别模拟25 m/s, 50 m/s, 75 m/s, 100 m/s, 120 m/s 和 150 m/s 速度下三维颗粒的冲击破碎情况,共计算150.67 μ s,并记录了全过程的数值模拟数据,颗粒的破碎形态及损伤状态分别如图4和图5所示,其中,联合损伤因子为0的单元界面为蓝色,联合损伤因子为1的单元界面为红色。结果表明,在相同的冲击持续时间下,当冲击速度小于等于50 m/s时,三维脆性颗粒均发生了碰撞反弹和局部开裂,并没有明显破碎;当冲击速度大于等于75 m/s时,随着冲击速度的增加,颗粒的破碎程度和损伤情况迅速增加,颗粒由局部开裂、破碎逐渐变为粉碎;当冲击速度达到150 m/s时,矿石分解成大量的小块。

4 破碎结果与统计分析

4.1 破碎程度及损伤情况统计分析

为了表征脆性颗粒的破碎程度,分别绘制不同冲击速度下三维颗粒的特征尺寸与通过率的分级曲线以及颗粒粒径 D50 曲线,如图 6 和图 7 所示。当冲击速度小于等于 75 m/s 时,颗粒发生了碰撞反弹与开裂,并没有形成完全贯通的裂纹,破碎并不完全;当冲击速度大于等于 100 m/s 时,D50 由 3.19 mm 变化为 0.84 mm。可以看出随着冲击速度的增加,颗粒破碎越充分,且颗粒粒径 D50 的变化速率逐渐放缓,即随着冲击速度的增加,破碎程度的变化逐渐趋于稳定。

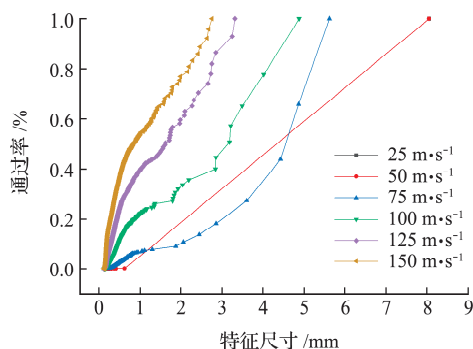


图 6 特征尺寸与通过率的分级曲线

Fig. 6 Classification curve of characteristic size and passing ratio

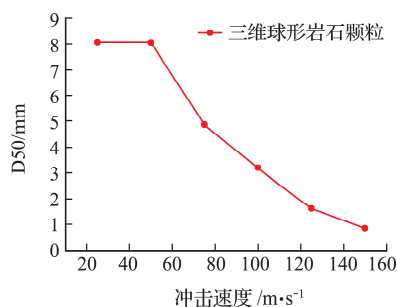


图 7 冲击速度与 D50 级配曲线

Fig. 7 Impact velocity and D50 gradation curve

为了表征脆性颗粒的损伤情况,分别对不同冲击速度下脆性颗粒材料的破裂度、损伤度及平均损伤因子的变化进行了统计,如图 8~图 11 所示。

图 8 与图 9 表明,随着冲击速度的增加,颗粒材料的破裂度和损伤度在不断增加,其损伤破裂随时间演化的过程可大致分为两个阶段,第一阶段是 $0 \mu\text{s} \sim 20 \mu\text{s}$,在此阶段,破裂度和损伤度急剧增加;第二阶段是 $20 \mu\text{s} \sim 150 \mu\text{s}$,在此阶段,破裂度和损伤度的增加速率逐渐变缓并趋于平稳。

图 10 与图 11 表明,当冲击速度从 25 m/s 增加

到 150 m/s 时,破裂度从 0.01% 增加到 48.04%,损伤度从 3.18% 增加到 61.19%;平均拉伸损伤因子由 0.02 变化至 0.59,平均剪切损伤因子由 0.01 变化至 0.55。在冲击速度变化范围内,破裂度、损伤度以及平均损伤因子的演化趋势呈一致性变化,随着冲击速度的增加,变化速率先增加后放缓。颗粒的破裂度均大于损伤度(图 10),平均拉伸损伤因子均大于平均剪切损伤因子(图 11)。

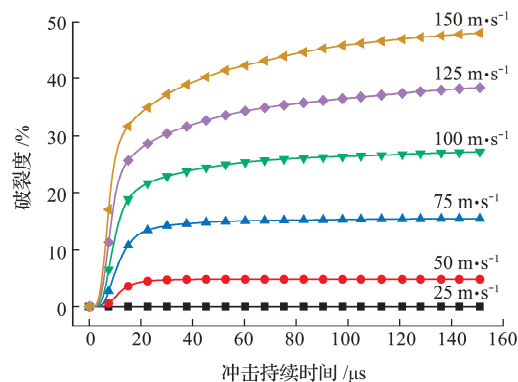


图 8 冲击持续时间与破裂度曲线

Fig. 8 Impact duration and fracture curve

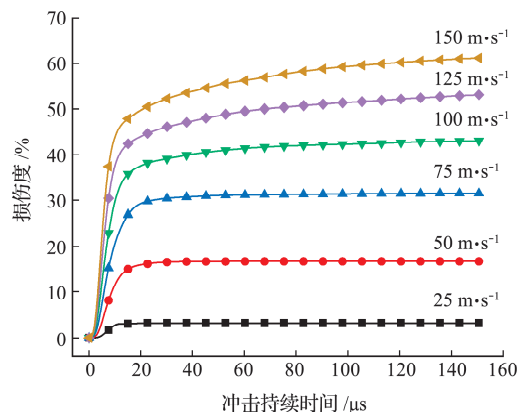


图 9 冲击持续时间与损伤度曲线

Fig. 9 Impact duration and damage curve

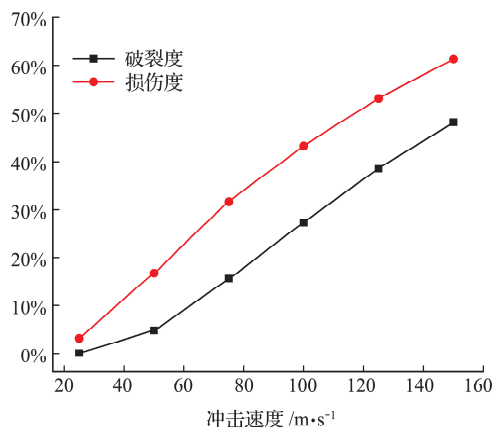


图 10 不同冲击速度破裂损伤度曲线

Fig. 10 Fracture and damage degree curves at different impact velocities

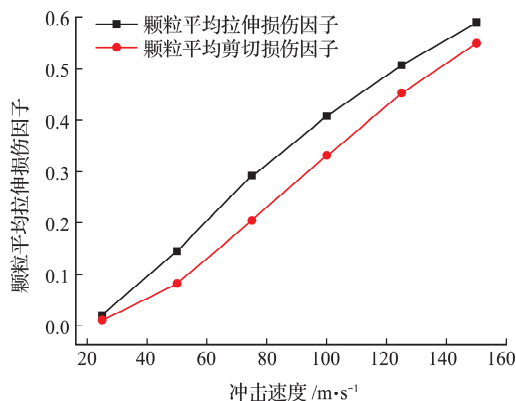


图 11 不同冲击速度平均损伤因子曲线
Fig. 11 Average damage factor curves of different impact velocities

4.2 颗粒破碎的能量演化规律分析

为了表征脆性颗粒的能量变化特征,统计了颗粒内部的单元变形能、单元动能、弹簧变形能、弹簧断裂能、摩擦耗能和阻尼耗能,并绘制了如图 12 所示的不同冲击速度下颗粒能量归一化时程曲线。

根据结果可以发现,整个颗粒冲击破碎过程大

致分为接触蓄能阶段($0 \mu\text{s} \sim 5 \mu\text{s}$)、损伤破碎阶段($5 \mu\text{s} \sim 20 \mu\text{s}$)和碎块飞散阶段($20 \mu\text{s}$ 后)三个阶段。当冲击速度为 25 m/s 时,颗粒动能较小,仅发生了碰撞接触,紧接着发生了反弹开裂,并没有形成完全贯通的裂纹,基本没有发生破碎,故此冲击速度下颗粒内部的能量主要为动能和单元弹性能的转化以及阻尼能量的耗散;当冲击速度大于等于 50 m/s 时,在碰撞接触阶段,颗粒的部分动能迅速转化为单元的变形能,随后在破碎阶段,单元变形能和单元动能主要转化为摩擦消耗、阻尼消耗以及弹簧断裂能,而弹簧的弹性变形能基本没有发生变化。随冲击速度的增加,摩擦耗能、弹簧断裂能以及阻尼耗能逐渐增加,而单元的弹性变形能基本不变。冲击过程持续到第 $150 \mu\text{s}$,当冲击速度大于等于 50 m/s 时,颗粒内部的摩擦耗能最高,随着冲击速度的逐渐增加,阻尼耗能逐渐超过界面弹簧的断裂能,单元残余动能次之,界面弹簧弹性能和单元弹性变形能基本为 0。

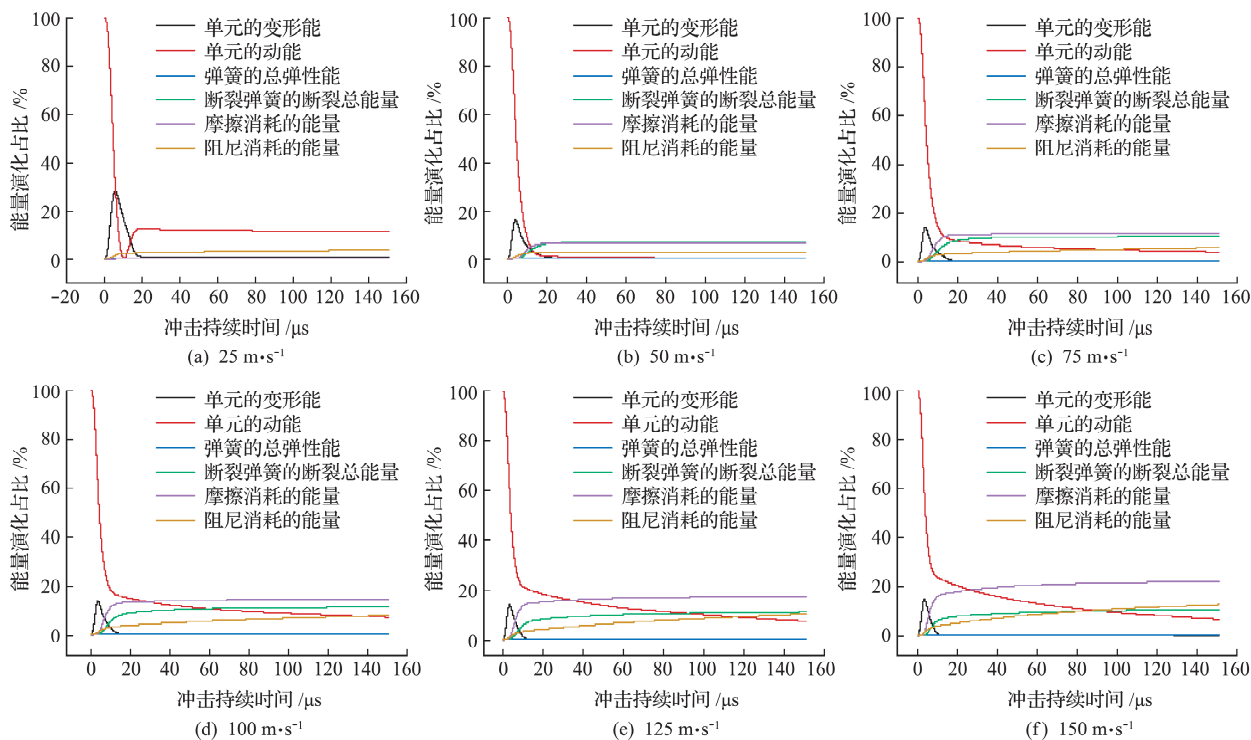


图 12 不同冲击速度下颗粒能量归一化时程曲线
Fig. 12 Normalized time history curves of particle energy at different impact velocities

5 结 论

基于连续-非连续单元法(CDEM),对不同冲击速度下球体颗粒的断裂和破碎过程进行了模拟,并对破碎过程的能量演化特征和破碎后的块度分布进行了分析,结论如下。

(1) 破碎损伤情况。不同的冲击速度下,脆性颗粒出现了反弹、开裂、破碎和粉碎等现象。随冲击速度的增加,D50 的变化速率逐渐放缓,颗粒的 D50 由 3.19 mm 变化为 0.84 mm ,破碎块度逐渐趋于稳定。随冲击速度的增加,破裂度、损伤度以及平均损伤因子的变化速率先增加后放缓,脆性颗

粒的破裂度从 0.01% 增加至 48.04%, 损伤度从 3.18% 增加至 61.19%, 平均拉伸损伤因子由 0.02 变化至 0.59, 平均剪切损伤因子由 0.01 变化至 0.55。颗粒的破裂度均大于损伤度, 颗粒破坏以拉伸破坏为主。

(2) 能量演化情况。脆性颗粒的冲击破碎大致分为接触蓄能($0\ \mu\text{s} \sim 5\ \mu\text{s}$)、损伤破碎($5\ \mu\text{s} \sim 20\ \mu\text{s}$)和碎块飞散($20\ \mu\text{s}$ 后)三个阶段。破碎过程中, 随冲击速度的增加, 用于颗粒破碎的摩擦耗能、弹簧断裂能以及阻尼耗能逐渐增加, 其中颗粒的摩擦耗能最高; 随着冲击速度的逐渐增加, 阻尼耗能逐渐超过界面弹簧的断裂能。

参考文献(References):

- [1] Cundall P. A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems [J]. *Proc Int Symp on Rock Fracture*, 1971, **1** (ii-b): 8-11.
- [2] 徐 琨, 周 伟, 马 刚, 等. 基于离散元法的颗粒破碎模拟研究进展[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(5): 880-889. (XU Kun, ZHOU Wei, MA Gang, et al. Review of particle breakage simulation based on DEM [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(5): 880-889. (in Chinese))
- [3] Cil M B, Buscarnera G. DEM assessment of scaling laws capturing the grain size dependence of yielding in granular soils[J]. *Granular Matter*, 2016, **18**(3): 1-15.
- [4] Xu M, Hong J T, Song E X. DEM study on the effect of particle breakage on the macro-and micro-behavior of rockfill sheared along different stress paths[J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, **89**: 113-127.
- [5] Deng X L, Sun S W. Numerical investigation of impact breakage mechanisms of two spherical particles [J]. *Powder Technology*, 2020, **364**: 954-962.
- [6] Zheng K H, Du C L, Li J P, et al. Numerical simulation of the impact-breakage behavior of non-spherical agglomerates[J]. *Powder Technology*, 2015, **286**: 582-591.
- [7] 黄令军, 刘雪东, 苏世卿. 基于离散单元法球形颗粒碰撞破碎行为的数值模拟[J]. *中国粉体技术*, 2014, **20**(3): 60-63. (HUANG Ling-jun, LIU Xue-dong, SU Shi-qing. Numerical simulation on breaking behavior of spheroidal particles impact based on discrete element method[J]. *China Powder Science and Technology*, 2014, **20**(3): 60-63. (in Chinese))
- [8] Munjiza A, Bangash T, John N W M, et al. The combined finite-discrete element method for structural failure and collapse[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2004, **71**(4-6): 469-483.
- [9] 马 刚, 周创兵, 常晓林, 等. 岩石破坏全过程的连续-离散耦合分析方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, **30**(12): 2444-2455. (MA Gang, ZHOU Chuang-bing, CHANG Xiao-lin, et al. Continuous-discontinuous coupling analysis for whole failure process of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, **30**(12): 2444-2455. (in Chinese))
- [10] 王永亮, 鞠 杨, 陈佳亮, 等. 自适应有限元-离散元算法、ELFEN 软件及页岩体积压裂应用[J]. *工程力学*, 2018, **35**(9): 17-25, 36. (WANG Yong-liang, JU Yang, CHEN Jia-liang, et al. Adaptive finite element-discrete element algorithm, software elfen and application in stimulated reservoir volume of shale[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, **35**(9): 17-25, 36. (in Chinese))
- [11] Guo L W, Xiang J S, Latham J P, et al. A numerical investigation of mesh sensitivity for a new three-dimensional fracture model within the combined finite-discrete element method[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2016, **151**: 70-91.
- [12] Ma G, Zhou W, Chang X L, et al. A hybrid approach for modeling of breakable granular materials using combined finite-discrete element method[J]. *Granular Matter*, 2016, **18**(1): 1-17.
- [13] Ma G, Zhou W, Regueiro R A, et al. Modeling the fragmentation of rock grains using computed tomography and combined FDEM [J]. *Powder Technology*, 2017, **308**: 388-397.
- [14] Ma G, Zhou W, Zhang Y D, et al. Fractal behavior and shape characteristics of fragments produced by the impact of quasi-brittle spheres [J]. *Powder Technology*, 2018, **325**: 498-509.
- [15] Ma G, Zhang Y D, Zhou W, et al. The effect of different fracture mechanisms on impact fragmentation of brittle heterogeneous solid[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, **113**: 132-143.
- [16] 李世海, 冯 春, 周 东. 滑坡研究中的力学方法[M]. 北京: 科学出版社, 2018. (LI Shi-hai, FENG Chun, ZHOU Dong. *Mechanical Methods in Landslide Research* [M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese))
- [17] 王 杰, 李世海, 张青波. 基于单元破裂的岩石裂纹扩展模拟方法[J]. *力学学报*, 2015, **47**(1): 105-118. (WANG Jie, LI Shi-hai, ZHANG Qing-bo. Simulation of crack propagation of rock based on splitting elements[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, **47**(1): 105-118. (in Chinese))
- [18] 冯 春, 张俊红, 张群磊, 等. 冲击载荷下赤铁矿动态抗压强度及破碎特性[J]. *郑州大学学报(理学版)*,

- 2019, **51**(1): 107-112. (FENG Chun, ZHANG Jun-hong, ZHANG Qun-lei, et al. Hematite's dynamic compressive strength and crushing features under impact load [J]. *Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition)*, 2019, **51**(1): 107-112. (in Chinese))
- [19] Lin Q D, Li S H, Feng C, et al. Cohesive fracture model of rocks based on multi-scale model and lenard-jones potential [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, **246**: 107627.
- [20] 林钦栋. 脆性材料渐进破坏的破裂加剧效应及能量耗散模型[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021. (LIN Qin-dong. Progressive Damage Induced Damage-Agravation Effect and an Energy Dissipation Model of Brittle Materials[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese))

Analysis of 3D brittle particle impact crushing characteristics based on CDEM

LIU Xin-ming^{1,2}, FENG Chun^{*1,2}, LIN Qin-dong³

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: By introducing the fracture energy mechanism considering the strain rate effect and the statistical energy algorithm into the continuum-discontinuum element method (CDEM), the quantitative analysis of the damage and fracture degree and energy evolution in the process of spherical impact crushing is realized. The results show that the impact crushing process is divided into contact energy storage stage, damage fracture stage and fragmentation stage. First of all, part of the kinetic energy of the particles is transformed into the elastic deformation energy of the element, and then this part of the deformation energy and kinetic energy is rapidly transformed into friction-induced energy dissipation consumption, damping dissipation and spring fracture energy. After the crushing is nearly complete, the fragments continue to disperse. At different impact velocities, the particles rebound, crack, break and smash. With the increase of impact velocity, the change ratio of D50 gradually slows down and the fragmentation gradually becomes stable. Secondly, the change ratio of fracture degree, damage degree and average damage factor increase and then slow down. The particle damage is mainly through tensile failure. The above conclusions can provide a basis for the optimization design of impact crushing process of brittle materials.

Key words: the continuum-discontinuum element method; particle impact crushing; fragmentation size; numerical simulation; fracture energy

引用本文/Cite this paper:

刘新明, 冯 春, 林钦栋. 基于连续-非连续单元法的三维脆性颗粒冲击破碎特性分析[J]. 计算力学学报, 2022, **39**(3): 299-306.

LIU Xin-ming, FENG Chun, LIN Qin-dong. Analysis of 3D brittle particle impact crushing characteristics based on CDEM[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, **39**(3): 299-306.