

# 三种离散单元建模方法仿真脆性材料切削的比较研究

叶 勇<sup>1,2</sup> 徐西鹏<sup>1</sup>

1. 华侨大学石材加工研究福建省重点实验室, 泉州, 362021

2. 重庆电子工程职业学院, 重庆, 401331

**摘要:** 在传统离散单元法和刚性单元重叠(ORC)方法的基础上, 提出了一种新的构建不规则颗粒形状的方法——改进 ORC 方法。用三种方法分别对  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷进行了离散元建模和切削模拟分析, 从加工后的材料表面质量、刀具前端切屑分布状态及主切削力大小三方面讨论了三种方法之间的关系, 分析了改进 ORC 方法的先进性。在此基础上, 对细晶类花岗石和粗晶类花岗石进行了不同参数下的弯曲和切削模拟实验, 计算了弯曲强度和主切削力大小并进行了试验验证。试验结果与模拟结果表明: 样本为均匀性较好的非连续性材料时, 适宜用传统离散单元法进行建模; 样本为细晶类花岗石时, 适宜用传统离散单元法和改进 ORC 方法进行建模; 样本为粗晶类花岗石时, 只适合用改进 ORC 方法或 ORC 方法进行建模。

**关键词:** 花岗石; 离散单元法(DEM); 颗粒形状; 切削力; 改进 ORC 方法

中图分类号: TG580.1 文章编号: 1004-132X(2010)23-2830-06

## Comparison of Three Methods for DEM Modeling of Brittle Materials Cutting Processes

Ye Yong<sup>1,2</sup> Xu Xipeng<sup>1</sup>

1. Fujian Province Key Research Lab for Stone Machining,

Huaqiao University, Quanzhou, Fujian, 362021

2. Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing, 401331

**Abstract:** A new method (improved ORC method) of constructing irregular particle shape was proposed based on traditional discrete element method and ORC method. Discrete element model of silicon nitride was modeled and cutting simulations was conducted by using above three methods. The relationships among the three methods were discussed from surface quality, distribution state of chips, values of the main cutting force. The advancements of improved ORC method were analyzed. A series of bending and cutting simulations of grain-refining granite and coarse-grained granite were carried out and verified under different parameters, and the values of the bending strength and the horizontal cutting force were calculated. The experimental and simulation results show that the traditional discrete element method is suitable for the modeling of homogeneous and discontinuous materials, the traditional element method and improved ORC method are suitable for the modeling of fine grain granite, whereas the modeling coarse grain granite has to be finished by the improved ORC and ORC methods.

**Key words:** granite; discrete element method (DEM); particle shape; cutting force; improved overlapping rigid cluster(ORC) method

## 0 引言

目前, 离散单元法(discrete element method, DEM)在机械加工方面, 特别是在计算分析离散性物质(如岩石、陶瓷等)加工过程中的切削力和裂纹扩展情况研究方面的应用越来越广泛<sup>[1-2]</sup>。谭援强等<sup>[3-4]</sup>用 DEM 分析了单晶硅和陶瓷加工时的裂纹情况; Onate 等<sup>[5]</sup>用 DEM 分析了砂岩切削的动态行为; Lei<sup>[6]</sup>用 DEM 对  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷进行

了切削研究, 探讨了切削过程中不同切削条件下的切削力。以上研究对象大都近似为均质材料, 因此大部分研究都是基于传统离散单元法(颗粒为圆盘形或球形)展开的。花岗石是一种典型的非均质、非连续离散材料, 其构成颗粒形状大小各异, 这些颗粒代表的不同造岩矿物均有风格迥异的变形特点, 其变形机制最终决定整个花岗石的失效特点, 因此研究该类材料需更多考虑其内部颗粒之间的关系。

一些学者在不同领域研究了新的不规则形状

收稿日期: 2010-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50825505)

颗粒模型。Matuttis 等<sup>[7]</sup>提出用多边形模拟颗粒形状, Jense<sup>[8]</sup>提出一种构造棱角颗粒的技术。Ashmawy 等<sup>[9]</sup>提出采用刚性单元重合/重叠 (overlapping rigid cluster, ORC) 方法来模拟不规则颗粒形状的技术, 该方法虽然理论上能模拟出任意不规则形状的颗粒, 但不能保证惯性矩和质心位置与实际颗粒一致。这种质量属性上的差异对模拟静态问题影响很小, 但在处理动态问题上会有较大的误差。

本文在 ORC 方法基础上提出了一种改进 ORC 方法来构造不规则颗粒。分别采用改进 ORC 方法、传统离散单元法、ORC 方法对 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷材料进行离散元切削模拟计算, 并与文献[6]进行了对比分析, 验证了改进 ORC 方法的先进性。在此基础上将研究结果运用于同属脆性材料的花岗石切削加工中, 分析了三种方法在花岗石材料加工中的适用情况, 为其他岩石类脆性材料的离散元数值模拟研究提供了参考。

### 1 改进 ORC 方法

上述离散单元方法都只能从形状上对工件材料建模进行优化, 区别仅在于 ORC 方法能模拟出更多的不规则形状的颗粒。花岗石在切削过程中, 由于刀具的切削及材料本身属性等原因, 会产生颗粒内部崩碎和穿晶现象, 所以花岗石并不都是以单一颗粒的形式脱离出去, 因此对其进行动态切削离散元建模时必须考虑这一重要因素。

#### 1.1 不规则颗粒形状的构造过程

用改进 ORC 方法生成不规则颗粒时, 首先由数字显微镜获得实际颗粒的二维轮廓线, 然后将其离散为间隔相等的 XY 坐标系, 计算出颗粒的面积、质量、质心及质量惯性矩。

构造不规则颗粒的过程中应满足如下协调方程:

$$\sum_{i=1}^N m_i = m_p \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^N m_i x_i &= 0 \\ \sum_{i=1}^N m_i y_i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N I_{z_i} = I_{z_p} \quad (3)$$

$$A_r = (1 - \frac{A_{unc}}{A_p}) \quad (4)$$

式中,  $N$  为组成团聚体“clump”的圆盘单元个数;  $m_i$  为第  $i$  个圆盘单元的质量;  $m_p$  为实际颗粒的质量;  $x_i$ 、 $y_i$  分别为  $X$ 、 $Y$  方向第  $i$  个圆盘单元的坐标与实际颗粒坐标的距离;  $I_{z_i}$  为第  $i$  个圆盘单元的质量惯性矩;  $I_{z_p}$  为实际颗粒的质

量惯性矩;  $A_r$  为填充面积率, 当  $A_r$  达到或超过设定值(本文取 95%) 时程序结束;  $A_p$  为不规则颗粒的总面积;  $A_{unc}$  为未填充的面积。

将一定范围内的圆盘单元按照最小剩余面积法(式(4))填充到颗粒轮廓线内部(图1)。设置组成“clump”的圆盘颗粒之间的强度连接值, 当强度连接值超过规定的许用值时, 颗粒发生不同形式的穿晶和崩碎现象, 如图1所示。

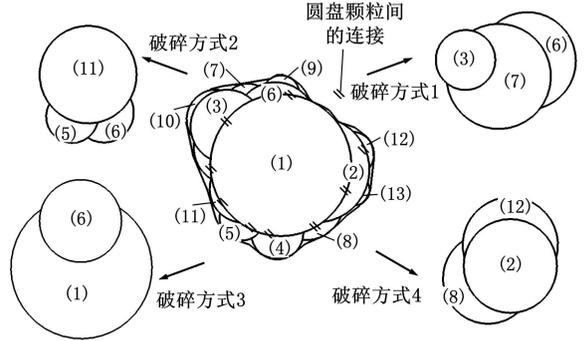


图1 改进 ORC 方法形成“clump”的破碎形式示意图

图2所示为 ORC 方法和改进 ORC 方法构造的同一颗粒, 表1所示为两种方法构造的该颗粒属性值比较。从表1看出, 改进 ORC 方法不仅在外形上匹配了实际颗粒形状, 而且保证了质心坐标和质量惯性矩完全和实际颗粒一致。

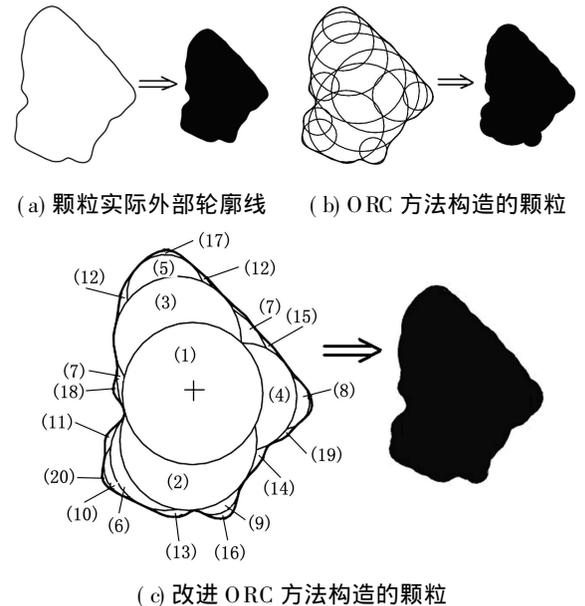


图2 不同方法构造的同一颗粒轮廓示意图

表1 ORC 方法和改进 ORC 方法构造颗粒的属性比较

属性	实际颗粒	ORC 方法	改进 ORC 方法
面积 (mm <sup>2</sup> )	2246.63	2246.63	2246.63
X 坐标的偏差 (mm)	0	0.15	0
Y 坐标的偏差 (mm)	0	0.59	0
质量惯性矩 (g · mm <sup>2</sup> )	7.57 × 10 <sup>5</sup>	5.62 × 10 <sup>4</sup>	7.57 × 10 <sup>5</sup>

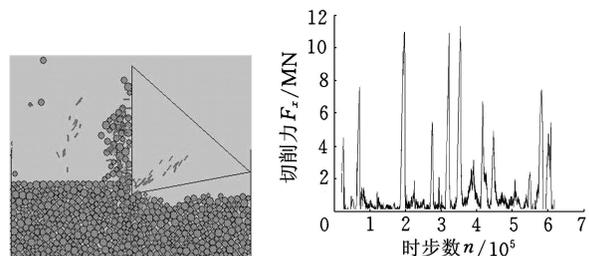
#### 1.2 改进 ORC 方法的先进性分析

切削参数如下: 切削深度  $a_p$  为 1mm、2mm; 切

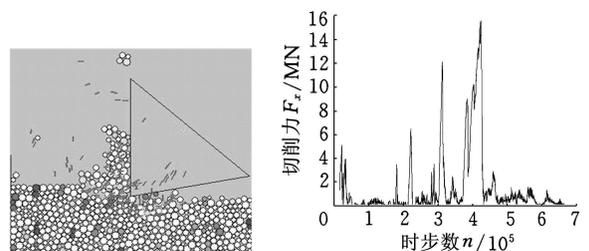
削速度  $v$  为  $1\text{m/s}$ 、 $2\text{m/s}$ ；切削长度  $L = 10\text{mm}$ 。用三种方法对同一  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷材料进行切削仿真实验。考虑到离散单元方法在计算切削变形、切削温度、刀具磨损方面的局限性，只对三种方法产生的主切削力计算结果进行定性分析。每种切削条件下的模拟均重复 5 次，取 5 次计算切削力的平均值作为最终结果。

样本尺寸为  $20\text{mm} \times 10\text{mm}$ ，三种方法模拟时颗粒数分别为 989、989、1576。因为 ORC 方法得到的新颗粒的运动和变形特征与合并一系列圆盘颗粒方法得到的新颗粒相同，所以采用 ORC 方法时颗粒可近似用不存在重叠的且经过合并的颗粒来替代。考虑一般性，本文改进 ORC 方法的样本颗粒形状的识别采用程序自动识别，并设置组成“clump”的颗粒数最大值等于 9。三种方法生成的颗粒体样本中的颗粒连接模型均采用平行接触连接模型。

鉴于篇幅，只列出  $a_p = 1\text{mm}$ 、 $v = 1\text{m/s}$  时三种方法模拟切削  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷的过程和相应主切削力（水平方向切削力）的变化趋势，如图 3 ~ 图 5 所示。由于构成  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的颗粒材料相对较为均质且近似为均匀分布，所以不规则形状的颗粒数较少。图 4a 中白色颗粒以外的颗粒表示用 ORC 方法构造的新颗粒，用来代表形状不规则、面积较大及分布不均匀的颗粒。



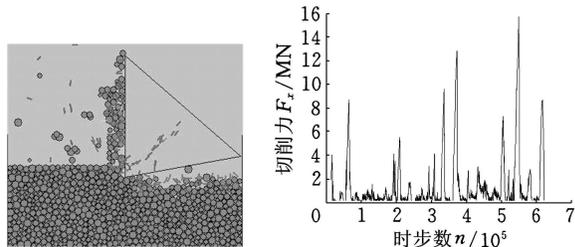
(a) 切削过程 (b) 主切削力变化趋势  
图 3 传统离散单元法切削  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷过程及主切削力变化趋势



(a) 切削过程 (b) 主切削力变化趋势

4 ORC 方法切削  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷过程及主切削力变化趋势

从加工表面质量看，切削改进 ORC 方法生成的样本时表面残留裂纹数目多于其他两种方法生成的样本。这是因为：①圆盘形颗粒体内部全



(a) 切削过程 (b) 主切削力变化趋势  
图 5 改进 ORC 方法切削  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷过程及主切削力变化趋势

部由单个颗粒构成，在切削力作用下较容易脱离自由表面，从而形成相对光滑的加工表面，这种现象更符合陶瓷、砂岩等均匀性较好的非连续性材料的切削加工。②ORC 方法构造的颗粒体中虽然包含不规则形状的颗粒，但在切削过程中颗粒内部之间不会脱离，仍以整体的形式脱离样本。这种颗粒形状上的改变只是对切削力影响较大，符合模拟存在少量空隙、有一定均匀性的非连续细晶类花岗石材料的切削加工。③切削改进 ORC 方法构造的样本时，刀具不可避免地会碰到较大颗粒，当切削力超过预先设定的“clump”内部颗粒连接值时，大颗粒就会崩碎成小颗粒，产生新的内部裂纹；反之，材料便会以较大颗粒体或单颗粒的形式脱离样本，从而造成加工表面的不平整性，这更符合粗晶类花岗石这类脆性材料的加工特征。

刀具前端的切屑表明：①切削圆形颗粒体时，切屑都以单颗粒的形式直接脱离样本，同时由于没有设置类似“clump”内部的颗粒连接力，切屑较缓和地脱离样本（图 3a）；②ORC 方法构造的颗粒只是形状上更接近实际颗粒轮廓线，所以其脱离形式与速度与前者基本一致（图 4a）；③切削改进 ORC 方法构造的样本时，刀具前端的切屑相对较多且成进射状脱离样本（图 5a），这主要是因为当刀具碰到较大“clump”时，由于切削力会超过部分内部颗粒之间的连接强度，从“clump”脱离出来的单颗颗粒会因为连接键的突然断裂而以较大的速度飞溅出去。

颗粒形状及特征对切削力的影响最为明显。从切削三组不同样本的切削力变化趋势图及切削力对比情况（表 2）可知：

(1) 切削圆形样本时，主切削力的峰值和均值均最小，因为圆形颗粒相对其他两种构造颗粒比较小，且颗粒之间更容易发生滚动；切削 ORC 方法构造的样本时，主切削力最大，因为其颗粒形状最大最复杂，也最不易发生滚动，同时单个不规则形状颗粒内部不会发生破碎；切削改进 ORC 方

表 2 三种方法切削 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷时的主切削力对比

切削深度 $a_p$ (mm)	切削速度 $v$ (m/s)	主切削力(kN)					
		ORC 方法		改进 ORC 方法		传统离散元方法	
		峰值	均值	峰值	均值	峰值	均值
1	1	15.9	9.2	15.6	8.5	11.4	7.5
	2	12	7.3	11.8	6.6	10.2	6.2
2	1	22.7	14.3	19.6	12.7	16.4	10.7
	2	19.6	12.2	16.4	9.4	15.5	8.2

法构造的样本时主切削力居中, 因为颗粒体虽然也比较大和复杂, 但颗粒体内部产生的崩碎现象削弱了切削力。

(2) ORC 方法和改进 ORC 方法构造的样本的主切削力虽然相对较大, 但是当  $a_p$  较小时, 两种方法产生的主切削力相差很小, 特别是当切削速度较大时这种差别就更小, 如  $a_p = 1\text{mm}$ 、 $v = 2\text{m/s}$  时, 切削力的峰值和平均值只相差 0.16kN 和 0.69kN; 当  $a_p$  较大时, 两种方法构造样本的主切削力之间的差值也随之增大, 如  $a_p = 2\text{mm}$ 、 $v$  分别为 1m/s、2m/s 时, 主切削力的峰值差值分别为 3.06kN、3.14kN。这是因为  $a_p$  越大, 刀具会碰到更多的不规则形状颗粒, 且  $a_p$  的增大也增加了颗粒脱离样本的难度。

(3) 切削改进 ORC 方法构造的样本时, 主切削力峰值和均值的增长幅度都大于切削圆盘形颗粒集体时的相应值, 如  $a_p = 1\text{mm}$ 、 $v$  分别为 1m/s、2m/s 时, 前者主切削力的峰值和均值的增长幅度分别为 3.74kN、1.84kN, 而后者则分别为 1.14kN、1.37kN;  $a_p = 2\text{mm}$ 、 $v$  分别为 1m/s、2m/s 时, 前者的主切削力峰值和均值的增长幅度分别为 3.16kN、3.29kN, 而后者则分别为 0.93kN、2.43kN。这主要是由于样本内部“clump”的大小和形状随机分布, 当刀具切削到较大颗粒时, 切削力突然增大, 同时以不同参数切削样本时, “clump”内部颗粒间的破碎方式也会不同。而圆盘颗粒样本中颗粒间的连接值固定, 所以切削力变化幅度很小。另外, 颗粒形状的不规则程度也是影响最终切削力大小的一个重要因素。

## 2 三种方法用于花岗岩切削过程仿真的适用性比较

在采用改进 ORC 方法对 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷进行离散元模拟的基础上, 下面以细晶类花岗岩 G603 和粗晶类花岗岩 G657 为例, 分别用三种方法首先对其进行离散元建模、三点弯曲模拟实验, 然后进行切削加工仿真分析, 并记录实验过程中的弯曲强度和主切削力, 从而说明和验证其适用性。

## 2.1 弯曲模拟实验比较

按照石材实验标准<sup>[10]</sup>的要求制作了两种规格的 G603 和 G657 实验制品各 10 件, 尺寸分别为 170mm×15mm×10mm 和 350mm×30mm×20mm。实验在 WD-30KE 门式精密型电子万能实验机上进行, 其最大实验力为 30kN, 测力示值误差和变形示值误差均为 ±0.5%。三种方法得到的两种花岗岩抗弯强度数值如表 3 所示。

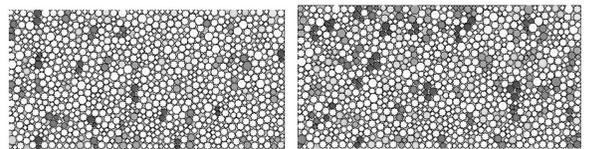
表 3 花岗岩抗弯强度

花岗岩种类	抗弯强度(MPa)			
	ORC 方法	改进 ORC 方法	实验值	手册值
G603	14.76	15.01	14.46	15.80
G657	12.12	14.20	12.98	13.26

从表 3 可以看出, 用 ORC 方法构造的样本所测出的力学性能值相对改进 ORC 方法更接近实验值。这主要是因为三点抗弯实验属于准静态实验, 无法表现出改进 ORC 方法所构造的不规则形状颗粒的动态性能, 相反, 由于增加了样本中包含的基本圆盘形颗粒数, 使得其弯曲失效时所对应的强度值增大。而 ORC 方法构造的颗粒在材料的静态性能方面已经基本接近实际颗粒, 所以得到的力学性能属性值反而更符合实际情况。

## 2.2 切削模拟实验比较

进行切削仿真分析时, 三种方法生成的样本的尺寸和颗粒个数与前述 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷相同, G603 为细晶类材料, 采用和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷相同的 ORC 模型, 只是改变了颗粒间的连接强度。切削加工参数如下: 切削深度  $a_p$  为 1mm、2mm、3mm、4mm; 切削速度  $v$  为 1m/s、2m/s、3m/s。两种材料的 ORC 模型如图 6 所示。不同参数下的主切削力(水平方向)如图 7、图 8 所示。



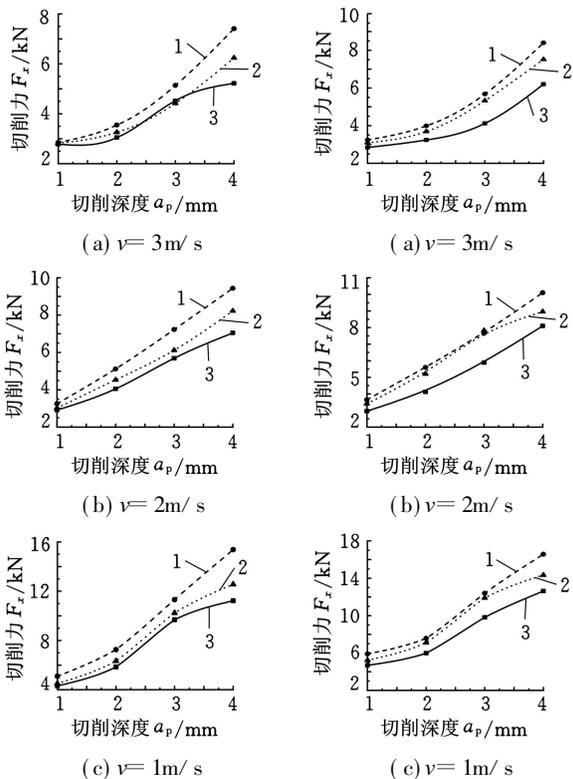
(a) G603

(b) G657

图 6 ORC 方法生成的花岗岩样本

从图 7、图 8 可以看出, 无论是 G603 还是 G657, 切削 ORC 方法构造的样本的主切削力都最大, 而切削圆形颗粒样本的切削力最小。在同一速度下, 随着  $a_p$  增大, 三种方法产生的切削力之间的差值也越大; 当  $a_p$  最小且  $v$  最大时, 切削 G603 和 G657 的切削力数值基本吻合, 这与颗粒的构造情况吻合。

切削 G603 时, 切削改进 ORC 方法构造的样



1. ORC 方法生成样本  
2. 改进 ORC 方法生成样本  
3. 圆形颗粒样本

图 7 模拟切削三种方法构造的 G603 花岗石样本的水平方向切削力

图 8 模拟切削三种方法构造的 G657 花岗石样本的水平方向切削力

本和圆盘形颗粒样本时的主切削力大小在不同参数下都基本接近;在同一切深时,切削速度越大,则切削力之间的差值越小,符合切削细晶类材料的特征。

切削 G657 时,切削 ORC 方法和改进 ORC 方法构造的样本的主切削力大小在不同参数下基本接近(除个别数据点外),且都明显大于切削圆盘形颗粒样本时的主切削力。这主要是因为 ORC 方法和改进 ORC 方法所构造的颗粒均较大且形状不规则,与粗晶类花岗石 G657 的构成相似,所以切削时相应切削力也会增大。在同一切深时,切削速度越大,切削力之间的差值也越小。

### 3 试验验证

为了再从细观尺度上进一步验证上述三种离散元建模方法之间的区别及其适用性,先对 G603 和 G657 分别进行微米级的切削模拟,相应的离散元模型样本尺寸为  $1\text{mm} \times 0.8\text{mm}$ ,其中颗粒尺寸和样本尺寸的比例与前面仿真模拟部分的比例相同,切削圆形颗粒样本过程如图 9 所示。再进行微米级的切削试验,样本尺寸为  $70\text{mm} \times 60\text{mm} \times 20\text{mm}$ 。试验通过自制夹具在三井精密平

面磨床 MSG-250HMD 上进行<sup>[11]</sup>,由于磨削时会在工件表面产生一系列间断短小的划痕,故在每个划痕过程中颗粒可视为做切削运动。采用动态测力仪 Kistler 9257BA 监测切削过程中的垂直和水平方向切削力。切削力的输出连接到 DEWETRON 动态信号采集系统,检测系统量程选为  $-0.3 \sim 0.3\text{V}$ ,采样频率为  $10\text{kHz}$ ,试验精度范围控制在  $\pm 5\mu\text{m}$  以内。

试验中主轴转速采用  $600\text{r/min}$ 、 $1300\text{r/min}$ 、 $1900\text{r/min}$  三挡,切深  $a_p$  分别为  $20\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$  和  $50\mu\text{m}$ 。用粒度为 30/40 且刀具前角为  $-10^\circ$  的钎焊金刚石颗粒作为切削刀具,其 SEM 照片见图 10。

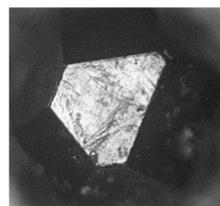
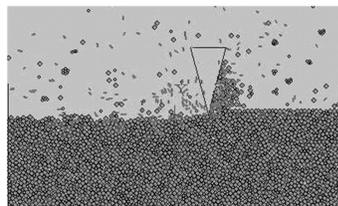
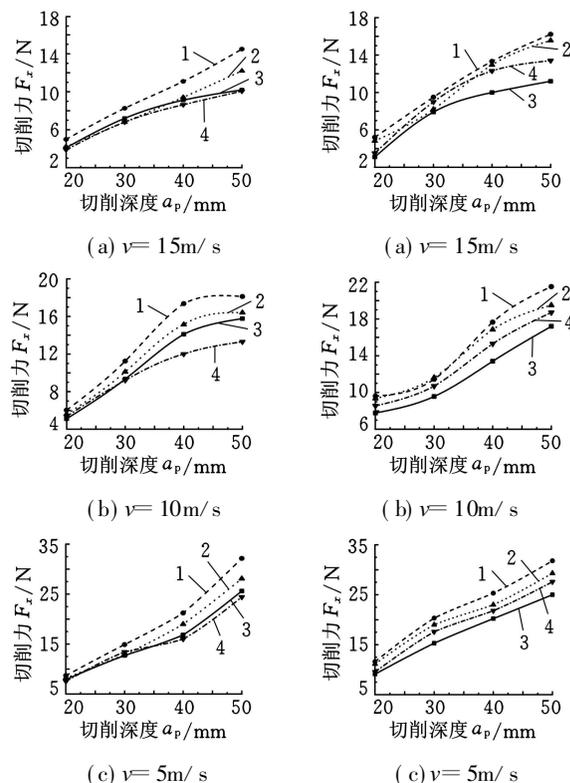


图 9 离散元样本切削过程图

图 10 钎焊金刚石颗粒 SEM 照片

从图 11、图 12 所示切削 G603 和 G657 时的水平方向切削力在不同切削参数下的变化趋势可



1. ORC 方法生成样本  
2. 改进 ORC 方法生成样本  
3. 圆形颗粒样本 4. 试验值

图 11 切削 G603 时水平方向切削力比较

1. ORC 方法生成样本  
2. 改进 ORC 方法生成样本  
3. 圆形颗粒样本 4. 试验值

图 12 切削 G657 时水平方向切削力比较

以看出, 切削 G603 时, 三种样本产生的水平方向切削力都大于试验值, 同时随着切削速度的加大, 切削圆形和改进 ORC 方法生成的样本的切削力差别逐渐减小, 且接近试验值; 切削 G657 时, 圆形颗粒样本产生的切削力最小, 同时随着切削速度的增大, 切削 ORC 和改进 ORC 方法产生的样本的切削力基本接近, 特别当切削速度较大时, 两者数值基本相等。切削力变化趋势与前面模拟仿真的情况相同, 从而验证了三种方法在加工脆性材料中的具体适用场合。

至于各种样本所产生切削力与试验值之间差别的原因, 主要是装夹夹具时引入的平行度位置公差、材料表面的平面度形状公差、样本的真实构成等一系列因素<sup>[11]</sup>。

因此, 模拟细晶类花岗石时, 采用传统离散单元法或改进 ORC 方法更为合理, 切深较小, 切削速度较大时, 三种方法均可以采用; 模拟粗晶类花岗石时, 适合采用改进 ORC 方法或 ORC 方法, 但切深较大时, 采用改进 ORC 方法更为合理。

#### 4 结论

(1) 提出了一种改进 ORC 方法, 该方法不仅能构造各种不规则形状颗粒, 而且通过设置颗粒体内部的键连接值, 可体现加工过程中样本内部分离的情况。

(2) 进行单轴压缩、抗弯等准静态实验时, 由于无需体现颗粒的动态性能和行为, 故可用 ORC 方法对其进行离散元模拟分析。

(3) 样本为陶瓷、砂岩等均匀性较好的非连续性材料时, 可用传统的圆形颗粒离散元方法对其进行建模和加工仿真分析; 样本为细晶类的花岗石材料时, 因为其内部大小和形状不同且分布不均匀的颗粒所占比例很小, 故可以用改进 ORC 方法或传统圆形离散元方法进行建模和分析, 切深较小且切削速度较大时, 三种方法均适用; 当样本为粗晶类的花岗石材料时, 其内部有大量不规则形状和大小不同的颗粒, 同时孔隙率也较大, 因此只适合采用改进 ORC 方法或 ORC 方法进行分析计算, 但切深较大时, 采用改进 ORC 方法更为合理。

#### 参考文献:

[ 1 ] Cundall P A. A Computer Model for Simulation Progressive Large Scale Movements of Blocky Rock Mechanics[ C ]// proceedings of Symposium of the

International Society of Rock Mechanics. Nancy, France: ISRM, 1971: 8-12.

[ 2 ] 王泳嘉, 邢纪波. 离散元法及其在岩土力学中的应用[ M ]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1991.

[ 3 ] 谭援强, 杨冬民, 李才, 等. 单晶硅加工裂纹的离散元仿真研究[ J ]. 中国机械工程, 2008, 19(21): 2545-2548.

[ 4 ] Tan Yuanqiang, Yang Dongmin, Shen Yong. Study of Polycrystalline Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Machining Cracks Using Discrete Element Method[ J ]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(9): 975-982.

[ 5 ] Onate E, Rojek J. Combination of Discrete Element and Finite Element Methods for Dynamic Analysis of Geomechanics Problems[ J ]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2004, 193: 3087-3128.

[ 6 ] Lei Shuting. Distinct Element Modeling of Laser Assisted Machining of Silicon Nitride Ceramics[ J ]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2003, 112: 211-215.

[ 7 ] Matuttis H G. Discrete Element Simulations of Dense Packings and Heaps Made of Spherical and Non-spherical Particles[ J ]. Powder Technology, 2000, 109(1): 278-292.

[ 8 ] Jensen R. DEM Simulation of Granular Media-structure Interface: Effect of Surface Roughness and Particle Shape[ J ]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1999, 23: 31-547.

[ 9 ] Ashmawy A. Evaluating the Influence of Particle Shape on Liquefaction Behavior Using Discrete Element Method[ C ]// Proceedings of the Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference ( ISOPE 2003 ). Honolulu, Hawaii, 2003: 25-30.

[ 10 ] GB/T9966-2001 天然饰面石材实验方法[ S ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

[ 11 ] 叶勇, 徐西鹏. 单颗金刚石磨削花岗石中力的离散元分析及试验验证[ J ]. 摩擦学学报, 2009, 29(3): 215-219.

(编辑 苏卫国)

作者简介: 叶 勇, 男, 1977 年生. 华侨大学石材加工研究福建省重点实验室博士研究生, 重庆电子工程职业学院机电工程系讲师. 主要研究方向为脆性材料的加工仿真. 徐西鹏, 男, 1965 年生. 华侨大学石材加工研究福建省重点实验室教授、博士生导师。