

单颗金刚石磨削花岗石中力的离散单元分析及试验验证

叶 勇,徐西鹏

(华侨大学 石材加工重点实验室,福建 泉州 362021)

摘 要:对花岗石进行了单颗粒金刚石磨削试验.通过测量磨削力对单颗金刚石磨粒所承受的平均法向力和切向力进行了研究,讨论了主轴转速和单颗磨粒最大切削厚度与磨削力的关系.利用离散单元方法 (DEM)构造了 2 种不同的花岗石数字模型,在此基础上对单颗磨粒磨削进行了模拟分析,分析结果与试验结果基本吻合.

关键词:花岗石;单颗磨粒磨削;磨削力;离散单元法 (DEM)

中图分类号: TG580.1

文献标识码: A

文章编号: 1004 - 0595 (2009) 03 - 0215 - 06

花岗石等脆性材料属于典型的离散性材料,在锯切等动载荷作用下经历的是一个从连续到不连续直至破坏的过程,因而用有限元法对其进行模拟并不合适.离散单元法 (Discrete Element Method 简称 DEM)是 20 世纪 70 年代发展起来的一种分析节理岩石的数值计算方法,其基本思想最初由 Cundall^[1]提出,在分析具有离散性质的物质方面表现出了极大的优越性,这非常符合离散物质本身的性质^[2].如 Onate E 等^[3]用 DEM 分析了砂岩切削的动态行为; Yu Bo^[4]用 DEM 分析了采煤过程中连续采煤机刀头切削煤块时的机理; Shuting Lei 等人^[5]对氮化硅陶瓷进行了 DEM 切削研究,探讨了切削过程中不同切削条件下的切削力;方韬等^[6]对混凝土结构破坏过程进行了 DEM 模拟.但以上文献中大部分研究对象都近似是均质的,而且在数值模拟中都是基于理想几何形状 (圆形或球形)的颗粒体来计算的,与物质真实的咬合特征不同.而花岗石属于典型的非均质非连续对象,研究该类材料需更多考虑其内部颗粒形状及颗粒之间的连接关系.

为了更深入理解锯切过程中花岗石的去除机理,就非常有必要知道单颗金刚石颗粒在锯切过程中所承受的载荷大小.相关文献^[7-8]对锯切花岗石过程中的单颗磨粒磨削力进行了较为系统的研究,但主要是通过分析锯片承受的载荷用数值方法来推

算单颗金刚石颗粒所受力,所以计算的磨削力不能真实反映单颗金刚石的受力情况.同时加工花岗石过程中虽然力数据对分析整个加工过程和加工参量的选取很重要,但不可能都通过做试验来获取,所以离散单元法 (DEM)模拟分析有可能成为一种好的分析手段.本文作者对 2 种花岗石进行了单颗磨粒磨削试验,并在其他学者研究的基础上^[9]提出一种改进的重叠/重叠刚性“cluster”单元 (Overlapping rigid cluster,简称 ORC)技术来构造不规则的颗粒形状以保证与实际颗粒形状的吻合性,利用离散单元方法建立了磨削过程的动态模型,分析了不同磨削参数下的单颗磨粒的切削力,并与试验结果进行了对比.

1 离散单元数值分析

1.1 离散单元样本分析参数

用颗粒流程序作为仿真工具进行计算. DEM 分析单颗磨粒磨削花岗石时,首先需要不断调试颗粒体的各种细观参数来构造和花岗石材料物理性能相符的颗粒体样本.具体方法为通过单轴压缩模拟试验和三点抗弯模拟试验分别得到其抗压强度 σ_c 和抗弯强度 σ_f ,当 σ_c 和 σ_f 等于实际材料的数值时,此时的各种模拟细观参数即为所求,本次离散元分析的样本基本细观参数和材料属性参数值如表 1 所

收稿日期: 2008 - 09 - 09; 修回日期: 2008 - 12 - 15; 联系人: 叶勇, e - mail: yeyong@hqu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50675073).

作者简介: 徐西鹏 (1965 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事金刚石、CBN 与硬脆材料加工、料加工技术及其理论研究.

表 1 颗粒样本基本参数

Table 1 Basic parameter of particle specimen for simulation

Material	Density / (kg · m ⁻³)	Gross areal porosity <i>n</i>	Friction coefficient <i>f</i>	Particle normal stiffness <i>k_n</i>	Ball stiffness ratio <i>k_n/k_s</i>	Ball - ball contact modulus <i>E_c/Pa</i>	Parallel- bond modulus <i>E_c/Pa</i>	Compressive strength <i>c</i> /MPa	Bending strength <i>f</i> /MPa
G603 granite	2610	0.17	0.34	1 × 10 ⁸	1	1 × 10 ¹²	1 × 10 ¹²	162.2	14.76
G657 granite	2630	0.22	0.45	1.5 × 10 ⁸	1	1 × 10 ¹²	1 × 10 ¹²	182.6	12.12

示. 离散单元法中颗粒之间的本构关系是通过接触力学模型来模拟的, 主要有接触刚度模型、滑移模型和平行键连接模型三种. 其中平行键连接模型可以想象为一组有恒定法向刚度与切向刚度的弹簧均匀分布于接触平面内, 接触的相对运动在平行连接处产生力和力矩, 作用于相互连接的颗粒上, 产生的力和力矩与连接材料的最大法向、切向强度有关. 考虑到花岗岩在加工时的特性, 本文选择平行键连接模型来模拟颗粒间的本构关系.

要得到合理的颗粒体样本模型, 还要选用符合实际材料的颗粒形状. 基于 DEM 的颗粒程序里的单元是圆形颗粒, 而自然界中岩石内部的组成颗粒形状各异, 并不是完全的圆形形状, Ashmawy 等^[9]提出了一种利用 ORC 来精确模拟不规则颗粒的形状的技术. 尽管 ORC 方法能确保生成的不规则形状颗粒的质量与其面积成正比, 但不能保证其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, 但如果要精确地处理动态问题, 则实际颗粒和仿真模型的质量属性必须严格一致. 为了更真实地模拟岩石颗粒, 本文在 ORC 技术基础上进行相应的改进从而使得两者之间的质量、质心位置坐标、质量惯性矩都相同, 如式 (1) ~ (3) 所示, 同时设置组成团聚体 “clump” 的圆盘颗粒之间的强度连接值, 当它们之间的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, 从而能更精确地体现出与实际相符的情况, 新构建的颗粒如图 1 所示.

$$\sum_{i=1}^N m_i = m_p \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^N m_i x_i = 0; \quad \sum_{i=1}^N m_i y_i = 0 \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^N I_{zi} = I_{zp} \tag{3}$$

上式中, *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* 为 *X* 方向第 *i* 个圆盘单元的坐标与实际颗粒坐标的距离, *y_i* 为 *Y* 方向第 *i* 个圆盘单元的坐标

与实际颗粒坐标的距离; *I_{zi}* 为第 *i* 个圆盘单元的质量惯性矩, *I_{zp}* 为实际颗粒的质量惯性矩.



Fig 1 Simulated particles (left) and Actual particles (right) based on theory of ORC

图 1 实际颗粒和基于 ORC 原理的模拟颗粒

1.3 离散元计算结果及分析

构造好符合实际材料属性的颗粒体样本后对其进行单颗磨粒磨削试验, 并设置动态阻尼系数 *damp* 为 0.45. 图 2 为一个在磨削速度 *V_s* 为 5 m/s, 磨削深

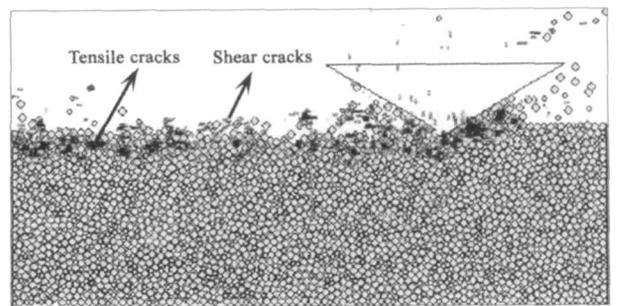


Fig 2 Grinding G603 with single diamond grain by discrete element method

图 2 单颗磨粒磨削 G603 的离散元模拟

度 *h_{max}* 为 20 μm 条件下的单颗磨粒磨削 G603 的离散元模拟动态过程 (删除了试件上去除的颗粒和颗粒群), 样本尺寸为 1.0 mm × 0.8 mm, 含有 5406 个颗粒. 其中单颗磨粒用刚度极大且不变形的 “墙” 来代替, 两侧 “墙” 的夹角为 120°, 与图 2 所示一致. 随着颗粒的向前移动, 越来越多的单个颗粒或几个仍连接在一起的颗粒组成的颗粒群从试件上被移除, 并堆积在单颗磨粒前方, 同时裂纹数目也逐渐增多

(深色短线条表示). 不难发现,在磨削过程中,裂纹沿颗粒与颗粒接触处不断扩展,形成曲折的裂纹路径;部分裂纹在颗粒的磨削挤压作用下向上和向前扩展,并露出表面,导致了表面材料的去除,从而形成划痕. 同时磨削后花岗石表面出现了不同程度的细微凹坑,这主要是颗粒形状分布以及颗粒键连接键强度值不同所导致的,该过程与文献 [10]中提出的单颗粒金刚石切削岩石模型基本相同,说明模型构造合理.

图 3所示为模拟磨削 G603过程中单颗磨粒所承受的单位长度上的法向和切向力随时步的变化趋势图,图中磨削力的变化趋势符合切削脆性材料时切削力的特征^[5]. 从图中可以看出单位长度上的法向力和切向力呈波峰 - 波谷趋势变化,波峰处代表

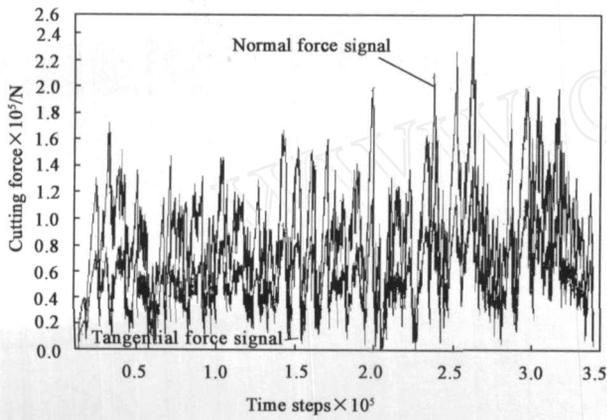


Fig 3 Variation of grinding force in grinding G603 with single diamond grain

图 3 单颗磨粒磨削 G603的磨削力变化过程

单颗磨粒正处于切削状态,波谷则表示由于切削过程中产生的裂纹使得磨削力急剧下降. 而造成磨削力大小的波动的原因一方面是因为花岗石内部颗粒形状组成复杂,当金刚石颗粒碰到较大且形状不规则度较高的花岗石颗粒时力的峰值就会较大,反之则较小;另外一方面是因为磨削深度 h_{max} 非常小,所以磨削时历经的颗粒数目就会较少,从而导致磨削力有一定的随机性,同时在 G603离散单元样本中颗粒间设置了大小不同的键连接值来模拟真实花岗石,所以当金刚石颗粒磨削到键连接值加大的颗粒时磨削力自然也会增大. 法向力 f_n 和切向力 f_t 可由强度计算公式得到,如(4)式所示:

$$f_{t,n} = f_{t,n} \times l_n \tag{4}$$

上式中, $f_{t,n}$ 为单位长度上的切向/法向力(三维离散元里则为单位面积上的切向/法向力),计算

时取峰值的平均值, l_n 为单颗磨粒在切向/法向上的作用长度, $l_n = h_{max} \times \tan 60^\circ$; $l_t = h_{max}$. 由式(4)可求得在 V_s 为 5 m/s, h_{max} 为 20 μm 条件下的单颗磨粒磨削 G603的法向力和切向力分别为 7.49 N和 2.72 N.

2 试验研究

试验在三井精密平面磨床 MSG - 250HMD上进行,采用动态测力仪(Kistler 9257BA)监测磨削过程中的垂直力和水平力,由于单颗磨粒磨削深度和所受平均载荷都很小,所以本文将测得的垂直力和水平力视为相应的法向力 f_n 和切向力 f_t ,同时取信号峰值的平均值作为最终磨削力值. 磨削力的输出连接到 DEWETRON动态信号采集系统,检测系统量程选 - 0.3 ~ 0.3 V,采样频率为 10 kHz

所用花岗石为细晶 G603和粗晶 G657,尺寸均为 70 mm x 60 mm x 20mm,铝盘基体外径为 150 mm (加上压头长度),厚度为 10 mm. 试验前对两种材料都进行双面抛光,试验时通过移动工作台得到一系列有间隔的划痕,速度约为 1 cm/s 为了更好地控制单颗磨粒磨削时的切入角且能和离散单元方法进行对比分析,本文采用型号为 RC - 3的洛氏天然金刚石压头对花岗石进行磨削(锥角为 120 $^\circ$),试验方案和试验装置如图 4所示.

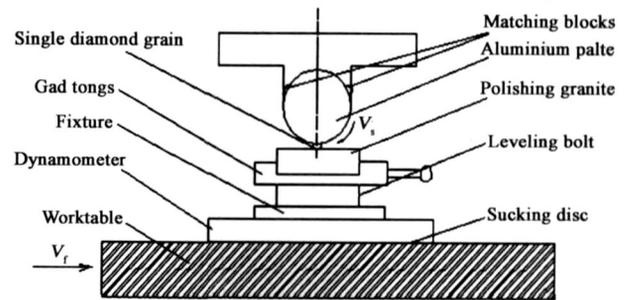


Fig 4 Schematic diagram of single diamond grain grinding tester

图 4 单颗粒磨削试验装置简图

金刚石压头通过过盈配合直接打入铝制基体的小孔内,同时添加对称配重块消除动平衡. 由于花岗石自身构造特点很难保证磨抛后的高平面度以及和机床工作台之间的高平行度,所以试验中通过千分表以及调节夹具上的调平螺栓来调整夹具中上下支撑钢板的相对位置,从而调整磨粒磨削深度,调整后锁紧,本次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、1 300、1 900与 2 500 r/m in

4档,依次用 h_{max} 为 20、30、40和 50 μm 4种切削深度进行磨削试验.

图 5为压头上单颗磨粒磨削前后的 SEM 照片.从图 5可知,磨粒在整个试验过程中都处于完好状态,从而排除了因金刚石磨粒磨损等因素对其所承受载荷的影响,保持了与 DEM 中设定的高刚性“墙”情况一致.

3 结果分析

图 6为不同主轴转速 v_s 下磨削 G603和 G657时,单颗磨粒承受的平均法向力 f_n 、切向力 f_t 的模拟值和试验值随磨粒最大切削深度 h_{max} 变化的情况.从图 6可以看出, f_n 和 f_t 的模拟值和试验值都随着切削厚度 h_{max} 增加而增大,且磨粒承受的平均法向

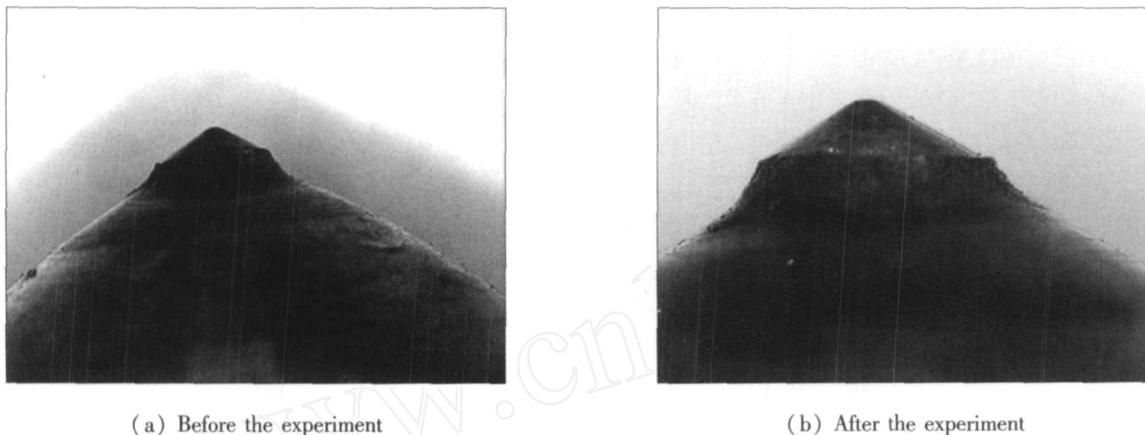


Fig. 5 SEM micrographs of single grain on diamond indenter

图 5 金刚石压头单颗磨粒磨削前后的 SEM 照片

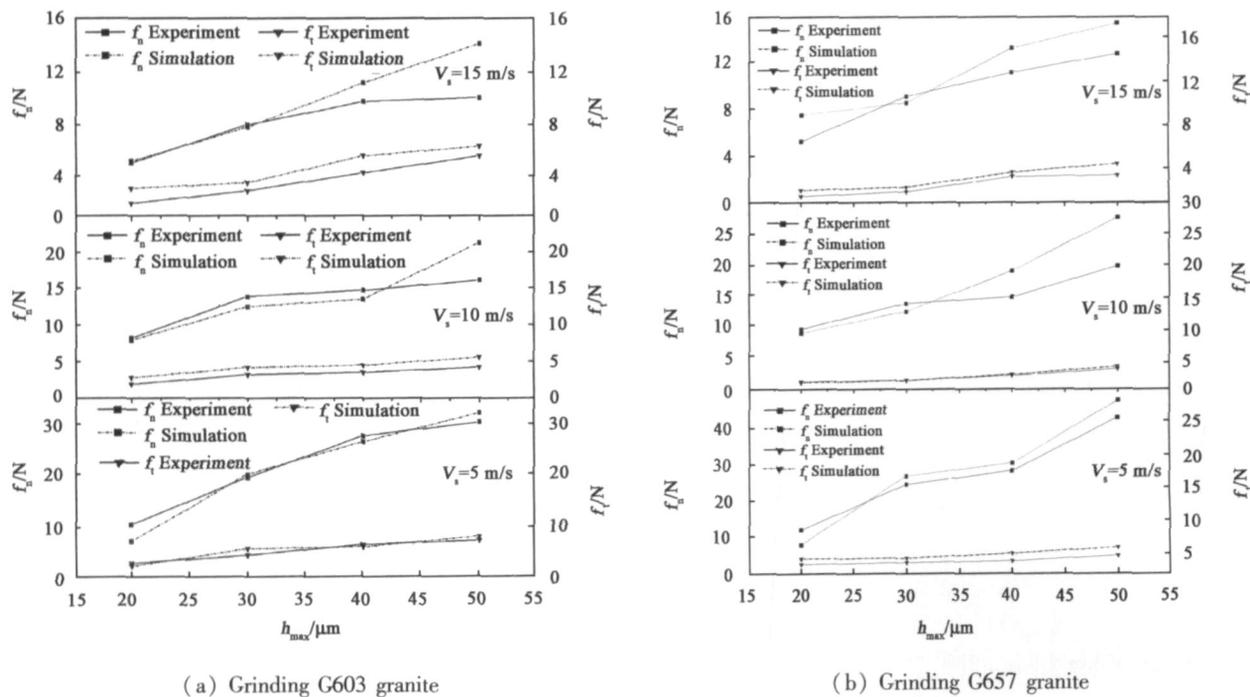


Fig. 6 Average load of a single diamond grain versus h_{max}

图 6 单颗磨粒承受的平均载荷随 h_{max} 的变化情况

力 f_n 要大于平均切向力 f_t ,这主要是因为单颗磨粒磨削花岗岩时,磨粒主要受到法向载荷作用,模拟值和试验值都很好验证了这一点,总体上两者吻合较好.

从图 6中还可以看出,当切深较小时,磨削力的模拟值和试验值吻合程度较高,如当 h_{max} 在 20 μm , v_s 为 5 m/s 的情况下,磨削 G603和 G657时 f_n 的相对

误差分别为 3.4%和 4.9%。而当切深较大时,模拟值基本上都大于相应的试验值,这主要是因为试验时由于夹具装夹会引起平行度位置公差,因此 h_{max} 只是名义值,而离散元方法由于是数值模拟,此时 h_{max} 是实际值,随着 h_{max} 和 V_s 的增大,这种误差对磨削力的影响就越明显。同时用离散元构造的样本不可能与实际花岗石材料性能完全一致,包括样本的构成、物理属性等都存在差异,这也是出现误差的原因。

在磨削花岗石过程中,磨粒虽然在不断磨削花岗石,但同时也对颗粒两侧的材料产生耕犁作用,而本文中模拟分析时采用的是二维离散单元方法,颗粒被看作是在平面内作单一切削运动,所以当磨削深度较大时也会引起磨削力的部分误差。

锯切花岗石过程中单颗磨粒承受的平均载荷随磨削速度 V_s 的变化情况也是分析锯切过程的一个重要因素,鉴于篇幅,本文只讨论磨削 G603时磨粒承受的平均载荷随磨削速度 V_s 的变化情况,如图 7 所示。

从图 7可以看出在固定 h_{max} 的情况下,单颗磨粒承受平均法向力 f_n 和切向力 f_t 的模拟值和试验

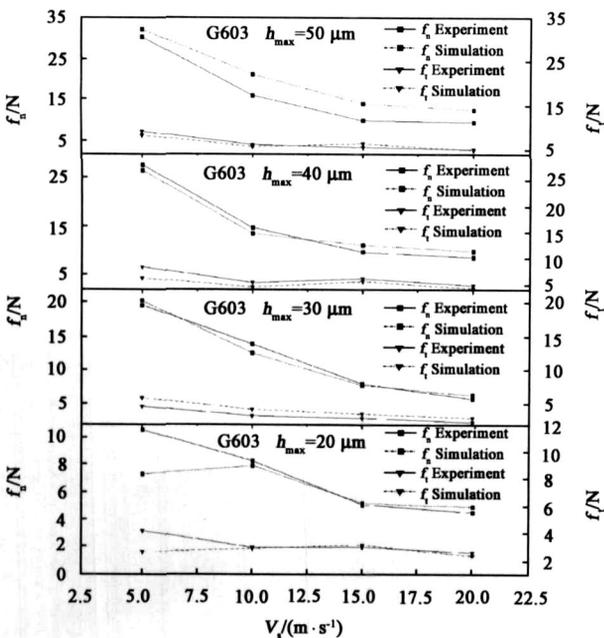


Fig 7 Average load of a single diamond grain versus V_s

图 7 单颗磨粒承受的平均载荷随 V_s 的变化情况

值都随主轴转速 V_s 的增大而减小,相同的 V_s 下, h_{max} 比较大时磨粒所受的载荷相对也要大一些。

不同 h_{max} 的情况下 f_n 的相对误差要大于 f_t 的相对误差,这是因为磨粒磨削时主要受到法向载荷作

用,试验时所用花岗石经过抛光后表面颗粒有较好的平面度,而离散元模拟时表层颗粒却存在着由于颗粒形状不同所引起的平面度形状公差(可从图 2 中未加工的颗粒体样本表面看出),当 V_s 越小 h_{max} 越大时,模拟值和试验值的误差越大。

由于离散单元方法不能构造出与实际花岗石完全相同的数字模型,同时试验时由于夹具装夹会引入形位公差,所以磨削力数据会存在相应的偏差,但仿真分析说明可以用 DEM 来获取金刚石颗粒磨削花岗石的相关数据,为更为全面地了解花岗石锯切加工过程的材料去除机理提供了技术支持。

4 结论

a 在固定主轴转速(单颗磨粒线速度)下,单颗磨粒承受的平均法向力 f_n 和切向力 f_t 都随最大切削厚度 h_{max} 的增大而增大。但是单颗磨粒承受的载荷跟 h_{max} 并没有很好的单调关系,相同的 h_{max} 下,主轴转速比较大的情况下磨粒所受的载荷相对要小一些。

b 在固定 h_{max} 的情况下,单颗磨粒承受的平均法向力 f_n 和切向力 f_t 都随主轴转速 V_s 的增大而减小,相同的 V_s 下, h_{max} 比较大的情况下磨粒所受的载荷相对也要大一些。

c 通过编制的颗粒流子程序模拟了 DEM 里的非规则形状颗粒,对其进行了单颗磨粒磨削的离散元模拟计算,其计算值与试验值有相似的变化特征,吻合程度较好,从而验证了表面离散元数值计算方法的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] Cundall P A. A computer model for simulation progressive large scale movements of blocky rock mechanics[A]. Proceedings of Symposium of the International Society of Rock Mechanics[C]. 1971, (1): 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] 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): 3 087 - 3 128
- [4] Yu Ba. Numerical Simulation of Continous Miner Rock Cutting Process[D]. West Virginia University, 2005.
- [5] Shuting Lei. Distinct element modeling of laser assisted machining of silicon nitride ceramics[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2003, (112): 211 - 215.
- [6] 方韬,龚顺风,金伟良. 混凝土结构破坏过程的离散单元法

- 模拟 [J]. 浙江大学学报, 2008, 38 (7): 921 - 925.
- Fang T, Gong S F, Jin W L. Failure process simulation of concrete structures by discrete element method [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 38 (7): 921 - 925.
- [7] 李远, 黄辉, 朱火明, 徐西鹏. 花岗岩锯切过程中的锯切力特征 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2002, (2): 48 - 51.
- Li Y, Huang H, Zhu H M, Xu X P. Characteristics of the cutting forces when sawing granite [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2002, (2): 48 - 51.
- [8] Li Yuan, Yu Y Q, Xu X P. Measurement and analysis of cutting forces in circular sawing of granite [J]. Key Engineering Materials, 2001, 202 - 203: 293 - 298.
- [9] Ashmawy. Evaluating the influence of particle shape on liquefaction behavior using discrete element method [J]. Proceedings of the Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE 2003) Honolulu, Hawaii, May, 2003.
- [10] Meding M. A Description of the Processes in the Cutting of Rock and of Its Fracture - Mechanics Behaviour with Particular Regard to the Analysis of Acoustic Emission [D]. TU Hamburg - Harburg, 1993.

Discrete Element Analysis and Experimental Validation of Forces in Grinding of Granite with Single Diamond Grain

YE Yong, XU Xi - peng

(Province Key Lab of Stone Machining, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Grinding test was carried out to study the grinding of granite with single diamond grain. Forces were measured to investigate the mean normal and tangential forces acted on the diamond grain. The relationship between the forces and either spindle speed or the maximum thickness of the undeformed chip produced by a diamond grain was discussed. The digital models for two kinds of different granite were constructed by discrete element method. Based on the models, analysis was carried out to simulate the grinding process with the single diamond grain. The analytical results were found to be comparable to the experiment results.

Key words: granite, grinding with single grain, grinding force, discrete element method (DEM)

Author: XU Xi - peng, male, born in 1965, Ph. D., Professor, e - mail: xp Xu@hqu.edu.cn