

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201703002



# 金刚石结块磨粒排布层间距实验

张大将, 黄国钦

(华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 分析现有磨粒层间距估算方法, 采用洛氏金刚石压头对中等硬度花岗岩 G603 直线等深度划擦. 通过测量相同划擦深度、不同划擦间距下划擦过程的划擦力, 观察划擦后划痕的形貌, 综合分析划擦过程材料去除与划擦力和划痕间距的关系, 并优选磨粒排布层间距. 实验结果表明: 磨粒层间距  $L$  存在一临界值间距  $L_s$ . 当  $L \leq L_s$  时, 划擦力随着  $L$  的增大而增大, 磨粒间工件材料可通过干涉式整体体积破碎去除; 当  $L > L_s$  时, 磨削力趋于稳定, 不随  $L$  增大而变化, 磨粒协同干涉作用消失, 磨粒间工件材料无法成片去除.

**关键词:** 金刚石; 划擦; 体积破损; 划擦力; 层间距

**中图分类号:** TG 580.6; TG 74

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2017)03-0288-06

## Investigation on Interlayer Spacing of Grain Layers of Diamond Segments

ZHANG Dajiang, HUANG Guoqin

(Institution of Manufacture Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In this paper, based on the review of the existing methods for estimating abrasive layers interval spacing, Rockwell diamond indenters were used to scratch a medium-hardness granite G603 with equal scratch depth. During scratching, cutting force on workpiece was monitored. After scratching test, the surface of workpiece was observed. The relationship between the material removal mechanisms and scratch force was discussed in regards with different interlayer spacing. The results show that there is a critical spacing  $L_s$ . When the interlayer spacing  $L$  is less than or equal to  $L_s$ , the scratch force increases with the increase of  $L$ , and the material adjacent grains is entirely removed by volume-fractured due to the interference of inter-grains; however, when  $L$  is larger than  $L_s$ , the scratch force remained constant and the interference of inter-grains disappeared. As a result, the material can only be removed individually by each grain.

**Keywords:** diamond; scratch; material removal mechanism; scratch force; interlayer spacing

众多研究表明, 与常规金刚石工具相比, 有序排布的金刚石工具加工效率更高、使用寿命更长、能耗更低. 因此, 磨粒有序排布技术是改善金刚石工具性能的有效途径<sup>[1]</sup>. 虽然磨粒有序排布在技术已经实现, 但磨粒排布参数优化仍存在不少问题, 有很多学者已经开展了大量的相关研究<sup>[2-11]</sup>. 从已有研究可知, 目前业界对磨粒多层有序排布的层间距估算主要采用岩石破碎理论, 即运用单个压模压入时破碎坑大的漏斗状顶角或单个压模压入时岩石破碎坑直径与压模直径的比例关系确定破碎坑直径, 并结合相邻两个压头压入时岩石破碎机理确定磨粒间的层间距<sup>[5-6]</sup>. 虽然这些估算方法取得一定的效果, 但

**收稿日期:** 2016-12-12

**通信作者:** 黄国钦(1981-), 男, 副教授, 博士, 主要从事硬脆性材料高效精密加工技术、超硬材料工具制备及应用的研究. E-mail: smarthgq@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51575198, 51105148, 51235004); 福建省自然科学基金工业引导重点资助项目(2017H0023)

都是基于垂直载荷作用理论进行推算. 事实上, 磨粒加工过程是垂直载荷和水平载荷同时作用<sup>[12]</sup>, 仅凭垂直载荷作用估算必然存在差异, 现有估算结果缺少实验验证. 本文通过单颗金刚石磨粒划擦实验, 调整划擦间距构造不同的磨粒干涉间距, 以期通过实验研究多层有序排布的层间距, 并与现有的估算理论计算的结果进行比较.

# 1 实验过程与结果

## 1.1 实验系统

单颗金刚石划擦实验原理, 如图 1 所示. 调整金刚石压头划擦工件的深度  $a_p$  后, 由工作台驱动工件运动并与金刚石压头发生等深度划擦运动. 划擦速度  $V_w = 0.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 切削深度  $a_p = 30 \text{ } \mu\text{m}$  不变, 改变不同的划擦间距  $L$ , 监测划擦力并观察划痕形貌. 对每个划擦间距  $L$  都进行了 7 次划擦, 其顺序如图 2 所示. 图 2 中: 第 1~4 条划痕为常规划痕; 第 5~7 条划痕为干涉划痕.

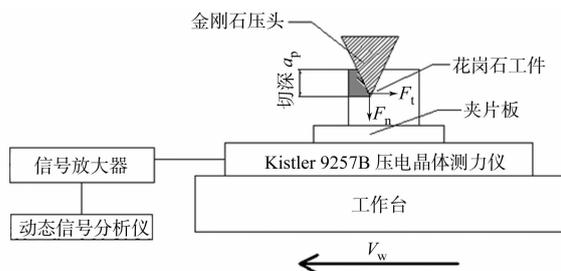


图 1 单颗金刚石划擦实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of single diamond scratch test

实验中, 所用划擦间距  $L$  从  $200 \text{ } \mu\text{m}$  开始, 并以  $50 \text{ } \mu\text{m}$  递增至  $700 \text{ } \mu\text{m}$ . 实验所用花岗石为中等硬度, 牌号 G603; 所用压头为人造洛氏金刚石压头(图 3), 顶锥角为  $120^\circ$ , 刀尖圆弧半径为  $0.2 \text{ mm}$ . 划擦过程采用 Kistler 9257B 型测力仪监测工件上所受的划擦力, 并通过 DEWESoft X2 采集和分析, 力信号采集频率为  $10 \text{ kHz}$ , 并利用 LSM 700 型激光共聚焦显微镜观察划擦后工件表面的划痕形貌.

## 1.2 实验结果

1.2.1 划擦力 由于天然石材为典型非均质材料, 划擦过程监测到力存在明显的波动, 如图 4 所示. 图 4 中:  $F_t$  为切向力;  $F_n$  为法向力;  $t$  为时间. 为了便于分析, 提出一种采用单位长度平均力  $\bar{F}$  进行量化, 其计算式为

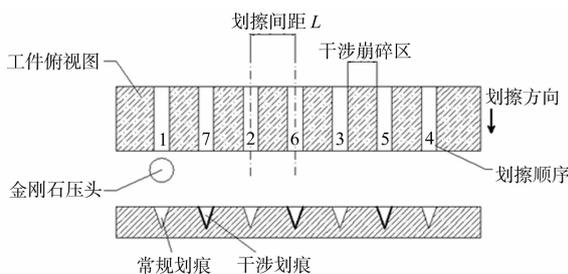
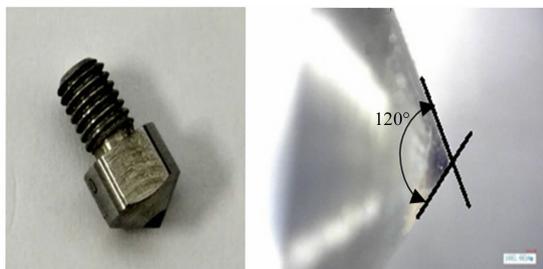


图 2 划擦顺序示意图

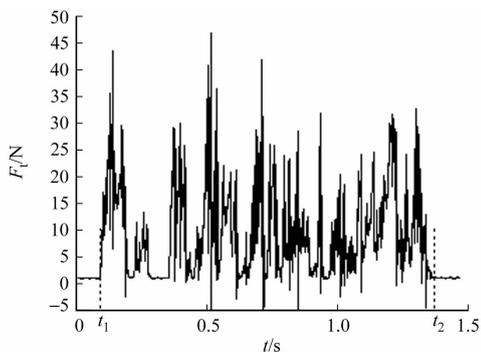
Fig. 2 Illustration of scratching sequence



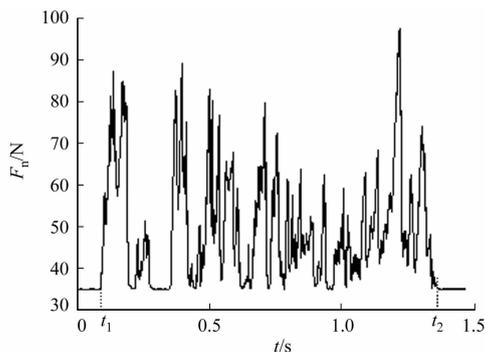
(a) 压头 (b) 顶锥角

图 3 人造洛氏金刚石压头

Fig. 3 Rockwell diamond indenter



(a) 切向力



(b) 法向力

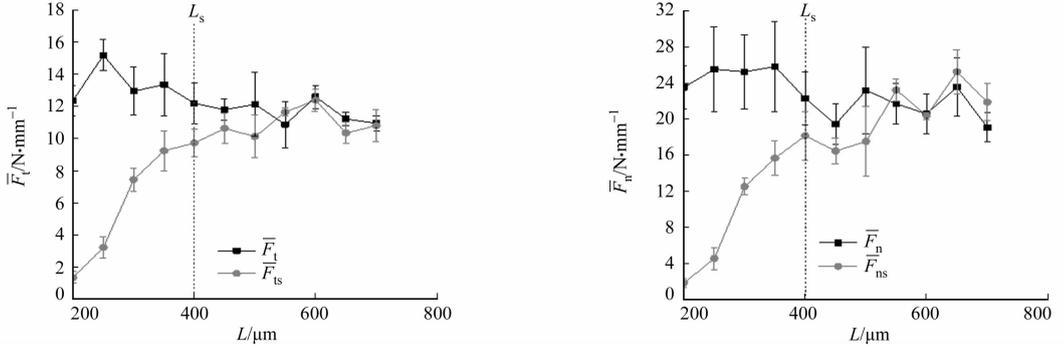
图 4 实际划擦力信号

Fig. 4 Actual scratch force signals

$$\bar{F} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} F(x) dt}{[(t_1 - t_2) \cdot s]} \quad (1)$$

式(1)中: $F(x)$ 为测力仪所测力信号; $t_1, t_2$ 分别对应划擦时力信号的起始、终止时间; $s$ 为划擦距离。

根据式(1)对第1~4条常规划痕的切向力和法向力的力信号进行计算,得到单位长度的平均切向力( $\bar{F}_t$ )和平均法向力( $\bar{F}_n$ ),对第5~7条干涉划痕的切向力和法向力的力信号进行计算,得到单位长度的平均干涉切向力( $\bar{F}_{t,s}$ )和平均干涉法向力( $\bar{F}_{n,s}$ ),如图5所示。



(a) 单位长度平均切向力

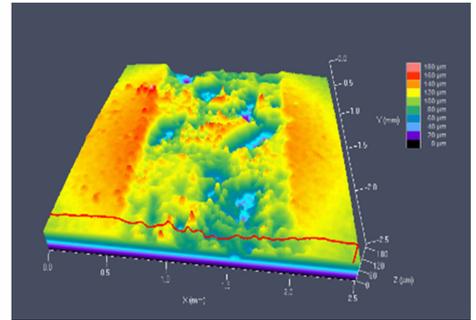
(b) 单位长度平均法向力

图5 单位长度平均力与划擦间距的关系

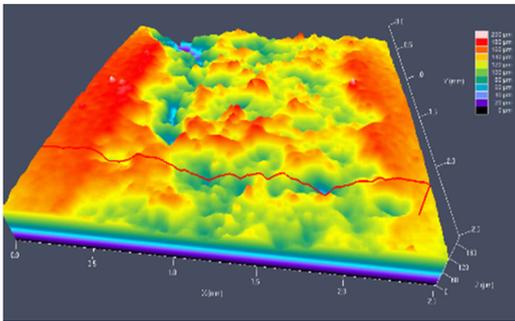
Fig. 5 Relationship between average force per unit length and distance between scratches

由图5可知:单位长度的平均切向力 $\bar{F}_t$ 和平均法向力 $\bar{F}_n$ 随着间距 $L$ 的增加波动较小,可以认为基本一致;而单位长度的平均干涉切向力 $\bar{F}_{t,s}$ 和平均干涉法向力 $\bar{F}_{n,s}$ 随着 $L$ 的增加逐渐增大并趋于稳定。

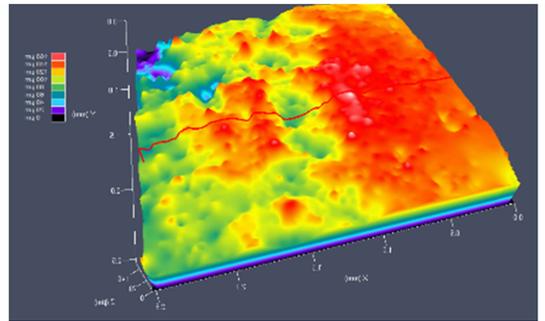
1.2.2 划擦后工件表面三维形貌 利用激光共聚焦显微镜系统观察划擦后试样的表面形貌,如图6所示。由图6可知:当划擦间距 $L$ 等于200,250,300  $\mu\text{m}$ 时,划擦交叉带完全崩碎,材料去除彻底;当 $L$ 等于350,400  $\mu\text{m}$ 时,划擦交叉带崩碎程度较大,但是并没有完全崩碎,仍有极少量岩脊存在;当 $L$ 大



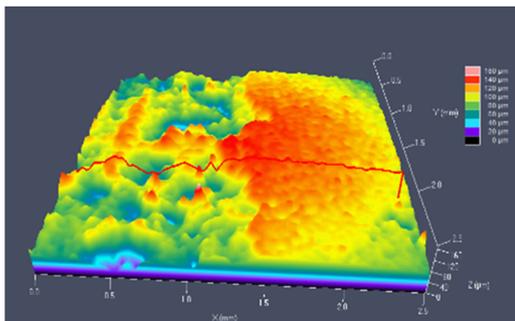
(a)  $L = 200 \mu\text{m}$



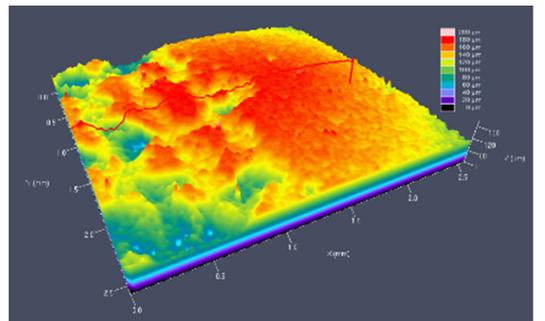
(b)  $L = 250 \mu\text{m}$



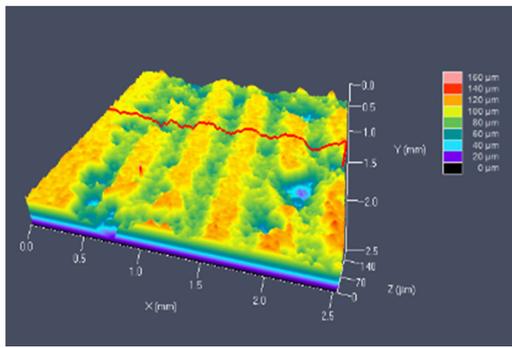
(c)  $L = 300 \mu\text{m}$



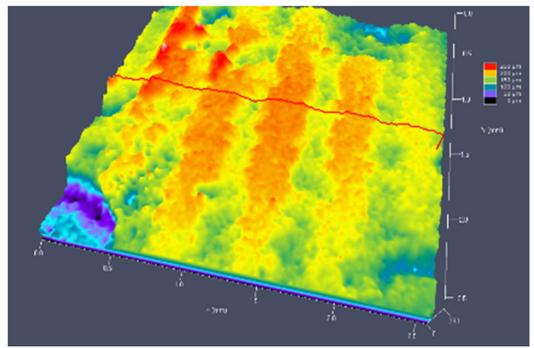
(d)  $L = 350 \mu\text{m}$



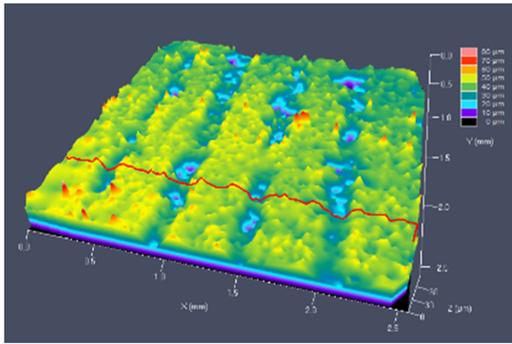
(e)  $L = 400 \mu\text{m}$



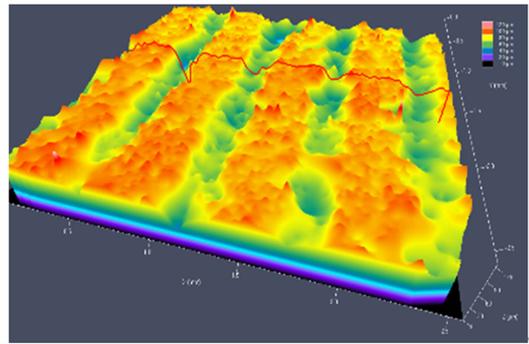
(f)  $L = 450 \mu\text{m}$



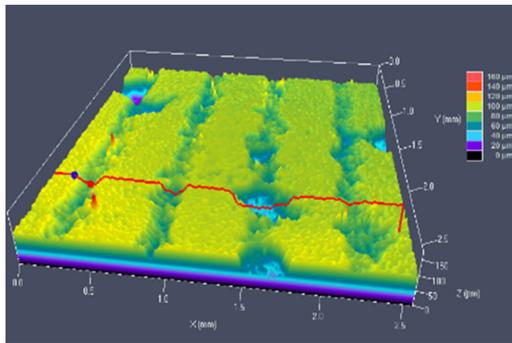
(g)  $L = 500 \mu\text{m}$



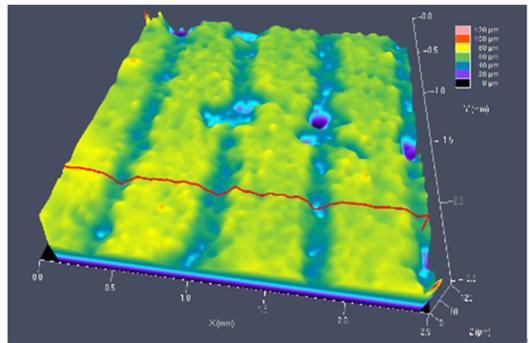
(h)  $L = 550 \mu\text{m}$



(i)  $L = 600 \mu\text{m}$



(j)  $L = 650 \mu\text{m}$



(k)  $L = 700 \mu\text{m}$

图 6 划擦后工件表面三维形貌图

Fig. 6 Scratches workpiece surface three-dimensional topography

于或等于  $450 \mu\text{m}$  时,划擦交叉带崩碎程度减小直至没有崩碎,岩脊大量存在于工件表面.

## 2 分析与讨论

两向载荷同时作用下的岩石破碎机理<sup>[12]</sup>与单向载荷作用下的岩石破碎机理存在很大差异. 金刚石划擦临界间距示意图,如图 7 所示. 由于水平载荷的存在,使岩石内部的合力方向沿水平载荷方向指向岩石内部,而裂纹从未划擦区域工件表面沿合力方向向工件内部呈扇形方向扩展(图 7(d)). 划擦过程中,磨粒对花岗石工件破碎作用遵循两向载荷同时作用下的岩石破碎机理,划擦过程中当磨粒划擦间距减小到一定距离  $L_s$  时,磨粒间底部裂纹发育充分并扩展至磨粒间交叉带的整个区域,致使交叉带处于临界崩碎状态(图 7(a)). 当磨粒划擦的间距  $L$  继续减小时,相邻两颗磨粒间划擦区域的裂纹将发生组合式生长并迅速扩展,致使磨粒间材料成干涉破碎形式去除(图 7(b)),并且裂纹的迅速扩展导致磨粒在划擦过程中的磨削力减小(图 5). 这说明磨粒划擦间距  $L$  存在临界横向间距  $L_s$ . 当  $L \leq L_s$  时,磨粒间材料通过干涉式体积破碎(图 7(b)). 当  $L > L_s$  时,磨粒间材料干涉去除消失,磨粒间材料无法成片去除(图 7(c)). 划擦力随着  $L$  的增大而增大,当  $L < L_s$  时,裂纹的组合式扩展使干涉划痕的磨削力小于常规划痕的磨削力;但当  $L > L_s$  时,磨粒间的裂纹无法以组合形式扩展,磨削力处于稳定状态.

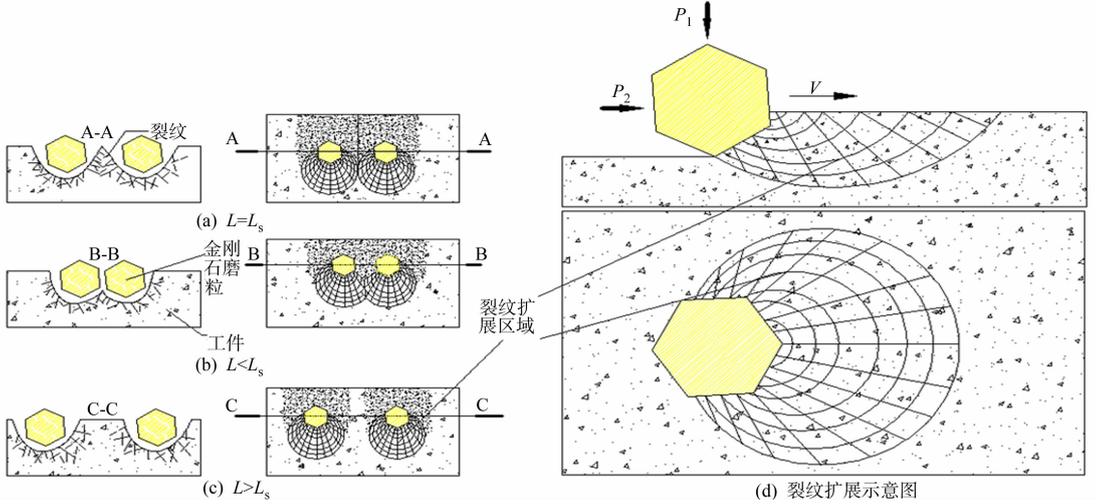


图7 金刚石划擦临界间距示意图

Fig. 7 Schematic diagram of scratch clearance of diamond

对于切向力而言,当划擦间距  $L < 400 \mu\text{m}$  时,干涉划擦的平均磨削力明显小于无干涉划擦的平均磨削力;当划擦间距  $L > 400 \mu\text{m}$  时,干涉划擦的平均磨削力与无干涉划擦的平均磨削力差别很小(图 5(a)). 对于法向力而言,当划擦间距  $L < 400 \mu\text{m}$  时,干涉平均磨削力明显比无干涉平均磨削力小;当划擦间距  $L > 400 \mu\text{m}$  时,平均磨削力与干涉平均磨削力的差距不明显(图 5(b)).

结合划擦的力信号分析结果和干涉划擦表面形貌情况,得出如下结论:在划擦速度为  $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,切深为  $30 \mu\text{m}$  的划擦参数下,干涉划擦去除材料的间距临界  $L_s$  在  $350 \sim 400 \mu\text{m}$  之间,去除材料的合理间距  $L_1$  在  $250 \sim 350 \mu\text{m}$  之间,即  $L_1 \in [250, 350]$ .

目前,主要采用的两种层间距估算方法如下.

**方法 1**<sup>[6]</sup> 金刚石单颗干涉划擦实验中金刚石磨粒划擦运动为匀速直线运动. 单颗金刚石磨粒划擦示意图,如图 8 所示. 图 8 中:AB 为单颗磨粒划擦的切宽,表示为  $D_1$ ;  $a_p$  为单颗磨粒划擦的切深;角 AOB 为漏斗坑顶角. 由奥斯特洛乌什柯(Острогоушко)对各种岩石的侵入漏斗坑顶角的测量数据可知,花岗石的侵入漏斗坑顶角( $2\theta$ )为  $116^\circ \sim 124^\circ$ . 为了使  $L_1$  与文献[6]的计算结果进行对比,取  $2\theta$  最大值为  $120^\circ$ ,并根据压头切深可以计算单颗磨粒划痕理论切宽  $D_1$  为

$$D_1 = 2a_p \tan \theta. \quad (2)$$

假设两个金刚石压头的作用效果完全相同,相邻两个载荷作用时,岩石破碎机理中合理的磨粒间距公式为

$$(D_1 + D_2)/3 < D_{L_1} < (D_1 + D_2)/2. \quad (3)$$

结合式(2),(3),计算出相邻两颗金刚石磨粒的合理间距区间  $D_{L_1}$  为

$$D_{L_1} \in [69.3, 103.9]. \quad (4)$$

**方法 2**<sup>[5]</sup> 利用球体压模压入时的岩石破碎机理.  $D/d = 2.8 \sim 3.1$ <sup>[13]</sup> ( $D$  为岩石破碎坑直径,  $d$  为球型金刚石压头直径),结合相邻两个载荷作用时岩石破碎机理式(3),计算相邻两个金刚石磨粒间的合理间距,则必须计算出半球压模半径  $d$ ,令  $\theta = 60^\circ$ ,代入式(2)中,可以近似计算出半球压模半径  $d$  为

$$d = 2a_p \tan 60^\circ. \quad (5)$$

假设相邻两个切削具的作用效果完全相同,为了使  $L_1$  与文献[5]的计算结果进行对比,这里取  $D/d = 2.9$ ,结合式(3),(5),计算出相邻两颗金刚石磨粒的合理间距  $D_{L_2}$  为

$$D_{L_2} \in [200.92, 301.38]. \quad (6)$$

对于层间距估算这一问题,实验的结果  $L_1$  和两种理论计算结果  $D_{L_1}$ ,  $D_{L_2}$  分别为

$$L_1 \in [250, 350], \quad D_{L_1} \in [69.3, 103.9], \quad D_{L_2} \in [200.92, 301.38].$$

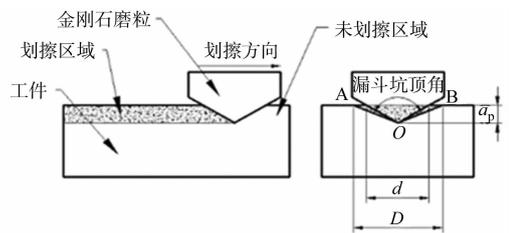


图8 单颗磨粒直线划擦示意图

Fig. 8 Schematic diagram of single grain linear scratching

从计算结果中可以发现:由理论计算得出的两个结果  $D_{L_1}$  与  $D_{L_2}$  差别较大,而第二种理论计算出的间距  $D_{L_2}$  与本次划擦实验的结果  $L_1$  比较接近.图9可以直观的反应这一情况.

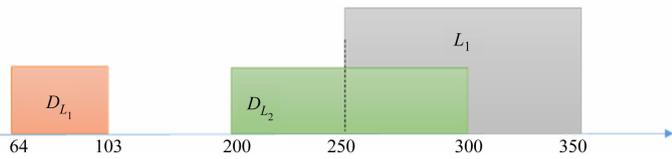


图9 金刚石磨粒间距的区间分布

Fig. 9 Interval distribution of diamond grits

### 3 结论

1) 当切深为  $30 \mu\text{m}$ ,划擦速度为  $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时,单颗金刚石直线干涉划擦花岗石的合理间距在  $250 \sim 350 \mu\text{m}$  之间.这与结合球体压模压入时,岩石破碎机理与相邻两个载荷作用的岩石破碎机理计算出的干涉划擦合理间距区间存在重叠.

2) 磨粒划擦的间距存在临界间距  $L_s$ ,当划擦间距  $L \leq L_s$  时,磨粒间工件材料可实现整体性积破碎;当  $L > L_s$  时,两磨粒协同作用消失,磨粒间工件材料无法成片去除.

3) 当  $L \leq L_s$  时,划擦力随着  $L$  的增大而增大;当  $L > L_s$  时,磨削力处于稳定状态.

### 参考文献:

- [1] 姜荣超,金刚石均布并有序排列是改善金刚石工具性能的有效途径[J]. 石材,2006,10(14):28-37.
- [2] KOSHY P, LWASAKI A, ELBESTAWI M. Surface generation with engineered diamond wheel: Insights from simulation[J]. Annals of the CIPR, 2003, 52(1): 271-274.
- [3] 胡焕校,刘静. 岩粉对金刚石锯片胎体磨损的影响及其浓度计算[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(1): 170-173.
- [4] 张绍和,叶宏煜,杨仙. 有序排布金刚石锯片中排列参数的设计[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2008, 164(2): 29-32.
- [5] 章文姣,段隆臣,叶宏煜,等. 孕镶金刚石钻头中有序排列参数的确定[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 179(30): 21-25.
- [6] 段端志. 磨粒有序排布金刚石锯片的研制及其加工性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012: 29-32.
- [7] 田霖. 基于磨粒有序排布砂轮的磨削基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013: 48-62.
- [8] YIN Shaohui, CHEN Fengjun, YU Jianwu, et al. A novel orderly arrangement method controlled by magnetic field for diamond abrasives of grinding wheel[J]. Advanced Materials Research, 2012, 497: 6-9.
- [9] 张美琴,高振,吴海融,等. 花岗石锯切过程声发射信号特征的实验[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 615-619.
- [10] BUTLER-SMITH P, AXINTE D, DAINE M, et al. Mechanisms of surface response to overlapped abrasive grits of controlled shapes and positions: An analysis of ductile and brittle materials[J]. CIPR Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(1): 321-324.
- [11] TRANSCHEL R, LEINENBACH C, WEGENER K. Cutting and ploughing forces for small clearance angles of hexa-octahedron shaped diamond grains[J]. CIPR Annal-Manufacturing Technology, 2014, 63(1): 325-328.
- [12] 屠厚泽,高森. 岩石破碎学[M]. 北京:地质出版社, 1990: 79-82.
- [13] 徐晓荷,余静. 岩石破碎学[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1984: 78-230.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:崔长彩)