

基于单颗磨粒划擦蓝宝石的磨屑形态仿真

程蔚, 方从富

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 采用有限元(FE)耦合光滑粒子流体动力学(SPH)方法, 基于单颗磨粒划擦蓝宝石三维仿真模型模拟磨屑成形与形态变化。结果表明: 磨屑是由材料体积压力减小而形成, 存在堆积、团簇、飞溅、分层 4 种形态, 磨屑飞溅角度在 $7.4^{\circ} \sim 34.3^{\circ}$ 之间变化; 磨粒速度的增大使材料出现小崩碎、大崩碎和片状去除的形式, 导致磨屑飞溅数量随磨粒速度呈波动变化, 而与磨粒切深呈线性增大; 磨屑飞溅体积随磨粒切深增大而急剧增大, 随磨粒速度增大而急剧减小。该研究为后续优化磨削加工参数以及进一步探讨蓝宝石的材料去除机理提供参考。

关键词: 有限元; SPH; 蓝宝石; 磨屑形态; 单磨粒加工

中图分类号: TG58

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)03-0301-06

Grinding chip morphology simulation based on single abrasive scratching sapphire

CHENG Wei, FANG Congfu

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on the FE coupled SPH algorithm, a three-dimensional simulation model of a single abrasive grinding sapphire was established to simulate the formation and morphological changes of grinding chips. Simulation results show that the formation of chips is caused by the decrease of material bulk pressure. There are four forms of chips, i.e., accumulation, cluster, splash and stratification, and the splash angle of chips varies from 7.4° to 34.3° . With the increase of abrasive velocity, the material will appear in the form of small broken pits, large broken pits and flake removal, which leads to the amount of abrasive splash fluctuates with abrasive velocity, and increases linearly with the abrasive cutting depth. The splash volume increases sharply with the increase of abrasive cutting depth, but decreases sharply with the increase of abrasive velocity. This study provides reference for further optimization of grinding parameters and further development of material removal mechanism of sapphire.

Keywords: finite element; SPH; sapphire; chip morphology; single abrasive processing

蓝宝石因优异的机械、光学特性被广泛应用于半导体、光学衬底等领域。在其磨削加工中, 裂纹的产生常使材料以脆性断裂方式形成磨屑被去除, 当磨削深度较小时, 材料以塑性变形方式被去除, 形成的磨屑形态也不同^[1-2]。因此, 研究磨削蓝宝石的磨屑形态变化尤为必要。现有研究中, Lin 等^[3]在蓝宝石脆性划擦阶段发现粉末状磨屑。倪嘉铭等^[4]在磨削后的碳化硅表面, 发现 20 m/s 时的磨屑呈椭球形且尺寸较大, 而在 80 m/s 时磨屑呈细长形且尺寸小。尽管上述学者

对磨屑形态展开分析但由于试验过程的不可逆性, 磨屑形态的瞬时变化仍然很难观测。建模仿真技术作为一种科学研究手段, 也被学者用来模拟硬脆材料的磨屑成形变化。段念^[5]通过磨粒切削玻璃模型模拟磨屑形态变化, 发现磨屑在塑性阶段出现颗粒状堆积, 在脆性阶段的磨屑则呈粉末状。Mir 等^[6]通过仿真单颗磨粒划擦单晶硅得出, 脆性加工阶段的磨屑以断续块状形式存在。

不同的磨屑形态变化反映出具体材料去除方式, 但对于蓝宝石在不同划擦参数下磨屑形态的

收稿日期: 2023-03-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52275426)

第一作者简介: 程蔚(1997—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 研究方向: 磨粒加工仿真。

通信作者: 方从富(1980—), 男, 安徽池州人, 教授, 博士, 研究方向: 高效精密加工、超硬工具设计与制备技术。

变化仍鲜有报道。本文采用 FE 耦合 SPH 方法, 基于单颗磨粒划擦蓝宝石三维仿真模型来模拟磨屑形态变化, 以期对磨削加工参数的优化和蓝宝石材料的去除机理提供参考。

1 FE 耦合 SPH 方法原理

光滑粒子流体动力学 (smoothed particle hydrodynamics, SPH) 作为最早被提出的一种无网格仿真方法, 被广泛应用于弹药爆破、高速碰撞等材料的瞬态响应数值模拟领域, 尤其对于微纳尺度下的材料大变形问题, 如材料侵蚀、刀具磨屑成形、裂纹扩展等, 仍能够取得优良的应用效果^[7]。

SPH 方法通过核函数 W 逼近支持域 Ω 内任意函数 $f(x)$ 的方式, 使用具有一系列场变量, 如动量、能量、速度等的离散质点来描述系统的物理状态并记录系统运动^[8]。函数 $f(x)$ 的积分近似表达为

$$\prod_{\Omega}^h f(x) = \int_{\Omega} f(x') W(x - x', h) dx' \quad (1)$$

式中, h 为粒子光滑长度, μm ; x 表示粒子位移, μm 。

通过加权求和方式将三维核函数 W 转化为二维函数表达, 求得粒子 i 的变量数据如下

$$\prod^h f(x_i) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W(r_{ij}, h) \quad (2)$$

$$r_{ij} = |x_i - x_j| \quad (3)$$

式中, i 和 j 表示粒子编号, m_j 表示 j 粒子的质量, μg ; ρ_j 表示 j 粒子的密度, 10^{-9} kg/m^3 ; r_{ij} 为粒子间距, μm ; N 为粒子总数, 个。

相比 SPH 方法, FE 方法无需额外在求解域外布置网格, 因此计算效率更高, 但针对磨屑形成等大变形问题, FE 方法的求解精度和计算效率较差。文中结合两种仿真方法优势, 基于 FE 耦合 SPH 方法建立仿真模型。

2 仿真模型建立与验证

2.1 仿真模型

单颗磨粒划擦蓝宝石的三维模型如图 1 所示, 磨粒设高度 H 为 $0.8 \mu\text{m}$ 、半径 R 为 $5.0 \mu\text{m}$ 的球体, 采用三维 SOLID 164 实体单元建立并用 $0.4 \mu\text{m}$ 单元网格划分成规则六面体; 工件设大小 $20 \times 20 \times 5 \mu\text{m}^3$, 粒子总数为 250 000 个。仿真中采用基于罚函数的自动点面接触算法以保证磨粒面

网格与 SPH 粒子的耦合接触。同时, 磨粒保留加工方向自由度, 其他空间自由度保持约束, SPH 工件底部全约束固定, 工件四周 SPH 粒子通过虚粒子对称约束。

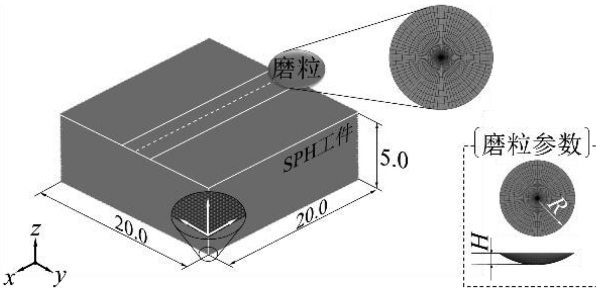


图 1 单颗磨粒划擦蓝宝石三维模型 (单位: μm)
Fig.1 3D model of a single abrasive scratching sapphire (unit: μm)

2.2 材料本构

选用 JH-2 模型模拟蓝宝石本构, 得到的蓝宝石 JH-2 本构参数如下^[9]: 蓝宝石密度 R_0 为 $3\,980 \text{ kg/m}^3$, 剪切模量 G 为 145 GPa , A 、 B 、 C 、 M 、 N 为材料的强度系数, 依次取值为 0.96 、 0.35 、 0 、 0.60 、 0.60 , 最大抗拉强度 T 为 0.40 GPa , 弹性极限 HEL 为 6.75 GPa , 弹性极限处的压力 P_{HEL} 为 3.51 GPa , 归一化断裂强度 $SFMAX$ 为 0.80 , 参考应变率 $\dot{\epsilon}$ 取 1.0 , 弹性能的损失分数 $BETA$ 为 1.00 , 损伤系数 D_1 、 D_2 依次为 0.005 、 0.95 , 体积模量 K_1 为 240 GPa , 强度系数和弹性系数 K_2 、 K_3 均为 0 , 失效准则 FS 取正值 0.20 。

实际加工中磨粒为金刚石材质的, 假设加工中不发生变形, 采用 RIGID 刚体本构模拟, 金刚石密度为 $3\,560 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 $1\,000 \text{ GPa}$, 泊松比设为 0.20 。

2.3 试验验证

仿真模型通过纳米划擦试验验证, 使用 Nano Indenter G200 纳米划痕仪, 试验样品为 $10 \times 10 \times 0.43 \text{ mm}^3$ 的蓝宝石抛光片。采用恒定载荷方式加载, 加载力分别为 15 、 20 、 25 mN , 每组试验重复 3 次以保证结果的准确性。压头选用倒角半径 $5.0 \mu\text{m}$ 的 90° 圆锥体金刚石, 并设置速度为 $5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 与仿真验证参数一致。

试验与仿真的横向力对比结果如图 2 所示。由图 2 可见, 仿真与试验的横向力变化趋势基本相同, 且数值相差在 5% 以内, 以上结果验证了仿真模型的准确性。

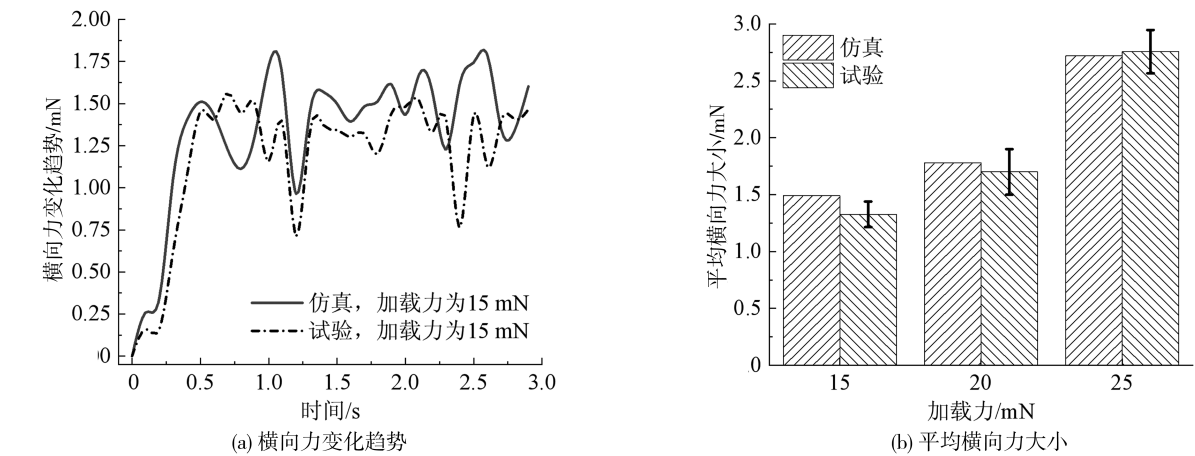


图 2 仿真与试验结果对比

Fig.2 Comparison of simulation and experiment results

2.4 仿真参数

基于上述仿真模型,在 25、50、75、100、125、150 nm 共 6 种磨粒切深参数和 0.5、1.0、1.5、2.0、40、80、120、160、175、180、185、190 m/s 共 12 种更广泛磨粒速度参数下模拟磨削加工过程。

3 结果与讨论

3.1 磨屑飞溅形态

固定磨粒速度为 1.0 m/s,在不同磨粒切深下的磨屑飞溅形态如图 3 所示。观察工件表面发现,当磨粒切深很小时(25 nm),SPH 粒子脱离原来位置,附着团簇于划痕两侧形成磨屑。此时磨屑飞溅少,飞溅距离近,如图 3(a)所示。随着磨粒切深的增大,磨粒切入更多材料,SPH 粒子吸收能量后不断脱离工件表面而形成大量磨屑,磨屑以一定的夹角向磨粒后方大量抛掷并飞溅开来,远离工件表面的上层飞溅磨屑很快发生能量损失,因体积压力降为 0 而呈现黑色,磨屑飞溅加剧,如图 3(b)~(f)所示。

速度对于磨屑形态的影响更为直观。固定磨粒切深为 100 nm,分析不同速度下的磨屑形态变化。根据金刚石磨削中有关(超)高速加工范围定义^[10],图 4 分别给出 0.5~40 m/s、80~160 m/s 和 175~190 m/s 中 12 种不同磨粒速度下的磨屑飞溅形态云图。观察图 4(a)发现,磨屑更多向磨粒后方飞溅抛掷;随速度逐渐增大,磨粒动能增大导致输入工件的能量增加,继续形成众多数量的黑色磨屑向后方抛掷,如图 4(b)~(g)所示,而当速度>160 m/s 时,磨屑形态发生显著变化,从图 4

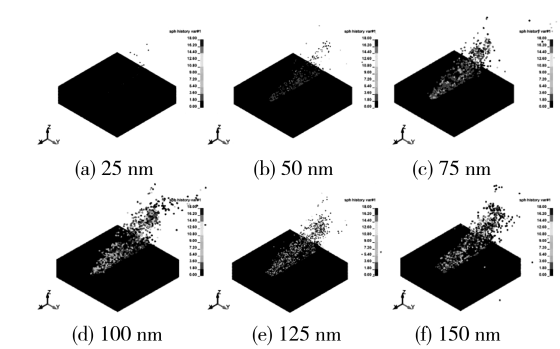


图 3 不同磨粒切深下的磨屑飞溅形态云图

Fig.3 Cloud pattern of splashes at different abrasive cutting depths

(h)~(l)中观察到明显的白色磨屑分层,磨屑飞溅有序,末端磨屑呈斜向下抛掷态。

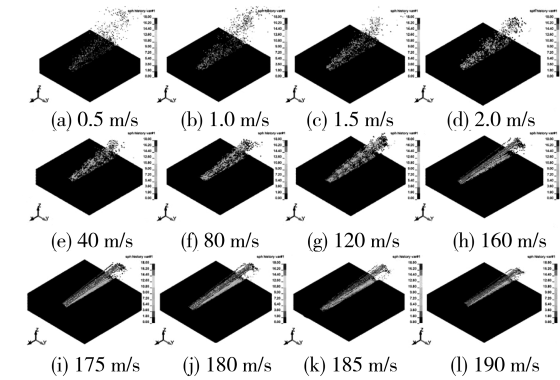


图 4 不同磨粒速度下的磨屑飞溅形态云图

Fig.4 Cloud pattern of chips splashing at different abrasive speeds

固定磨粒速度为 1.0 m/s,提取出不同磨粒切深下的磨屑飞溅角度和分层等形态特征如图 5 所示。观察发现极小切深(25 nm)时,磨屑

以团簇为主,磨屑飞溅少如图 5(f) 所示。这是因为 25 nm 磨粒切深下,工件处于弹塑性加工阶段,不会发生脆性断裂。在 50 nm 磨粒切深下时,磨粒后方飞溅的磨屑开始出现分层,飞溅角度为 19.2°和 34.3°如图 5(e) 所示。但切深的继续增大并不会使磨屑继续分层,磨屑飞溅角度稳定在 19.7°,这是由于磨粒切深增大引起的能量增量被磨屑更多的带走,因此磨屑飞溅趋于无序且数量更多。

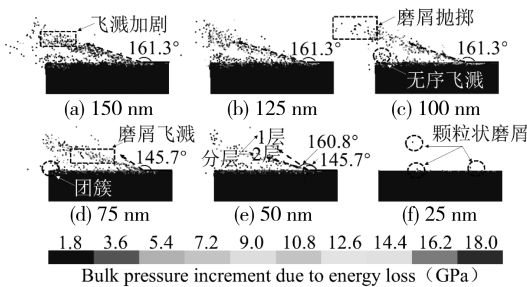


图 5 不同磨粒切深下的磨屑飞溅形态特征
Fig.5 Splashes' morphological characteristics at different abrasive cutting depths

图 6 显示了磨粒切深为 100 nm 时的不同磨粒速度下磨屑飞溅的形态特征。0.5~40 m/s 速度下磨屑以 19.2°~22.8°抛掷角度向磨粒后方无序飞溅如图 6(i)~(h) 所示;在 80~160 m/s 速度范围内,磨屑随速度的增大开始有序分层,飞溅方向趋于一致,尤其在 120 m/s 速度下,极高速使工件材料被迅速切除并以条状团簇形式向磨粒后方飞溅如图 6(f) 所示,此时磨屑尚未形成明显分层,随速度增大到 160 m/s 时,材料在微秒级便被去除,材料去除完整,磨屑有序分层,工件末端磨屑因体积压力释放呈黑色并被斜向下方抛掷如图 6(e) 所示。而在 175~190 m/s 的超高速下,磨屑以更小的抛掷角度 7.4°向后方飞溅,磨屑出现 2 层有序分层,末端磨屑斜向下呈 126.8°~133.5°抛掷。

3.2 磨屑飞溅数量

定量统计不同磨粒切深和速度下的磨屑飞溅数量以表示磨屑飞溅的剧烈程度。图 7 为磨屑飞溅数量随加工参数的变化关系。磨屑飞溅数量与磨粒切深呈线性变化,在 150 nm 切深下磨屑飞溅数量最多为 2 571 个,磨屑飞溅也最剧烈如图 7(a) 所示;而磨粒速度对磨屑飞溅数量的影响规律则与上述不同:0.5 m/s 时的磨屑飞

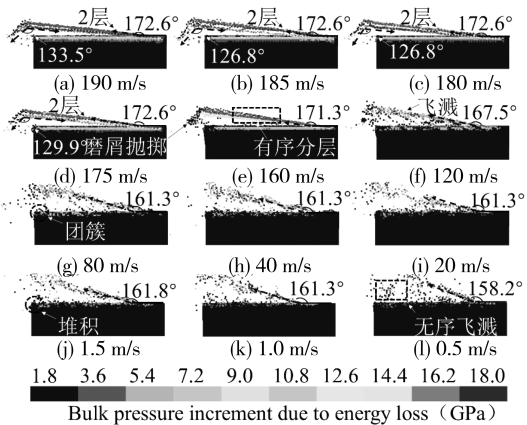


图 6 不同磨粒速度下的磨屑飞溅形态特征
Fig.6 Splashes' morphological characteristics at different abrasive speeds

溅数量达 1 676 个,处于低速范围内最大值,这说明在脆性加工阶段(100 nm 切深),低速不利于获得完整的加工表面,材料崩碎严重,磨屑因此飞溅剧烈;在 40~160 m/s 速度时,磨屑飞溅数量最多,在 80 m/s 时达到最多为 1 825 个,磨屑飞溅的剧烈程度最大;而在 175~190 m/s 超高速范围内,磨屑飞溅数量急剧降低,均低于 1 300 个。

根据磨屑加工中材料的比去除率定义^[11],磨粒切深 a_p 与进给速度 v_f 的乘积表示材料的比去除率 Q_w 。

$$Q_w = a_p \cdot v_f \tag{4}$$

由式(4),当固定 v_f 时, a_p 的增大会使去除的材料随之增多,则引起的磨屑飞溅数量增大,这与图 7(a) 中结果一致;当固定磨粒切深 a_p 时,进给速度 v_f 的增大同样使去除的材料变多,材料去除量还受到材料本身断裂特性的影响,因此磨屑飞溅数量并非一直随磨粒速度的增加而变多。根据图 7(b) 中结果,在 0.5~40 m/s 速度时,磨屑飞溅数量以 0.5 m/s 时最大,这是因为此时材料以小崩碎的形式被去除,磨屑尺寸更小因此飞溅数量最多,速度的继续增大使材料从小崩碎向大崩碎去除转变,因此形成的磨屑尺寸大,磨屑飞溅数量降低;但在 80~160 m/s 范围内,磨粒速度的增大使材料内部应变率急剧升高,被去除的磨屑吸收更大的能量后被粉碎成更小的磨屑尺寸被去除,因此磨屑飞溅数量增大;在 175~190 m/s 的超高速下,材料瞬间便被磨粒去除,工件能量甚至还未完成向材料内部的扩散,其表面材料就已经脱

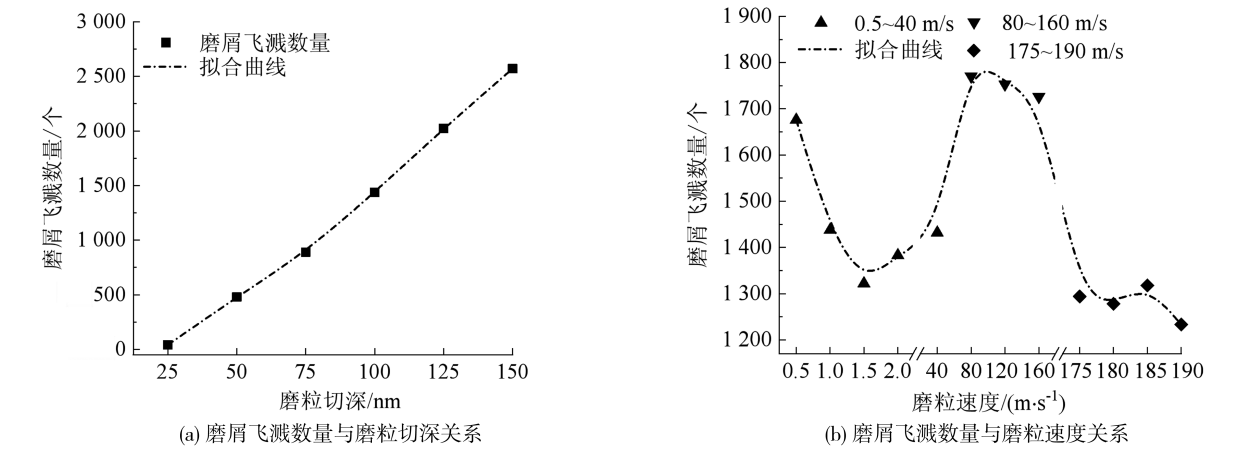


图7 磨屑飞溅数量随加工参数变化关系

Fig.7 Relationship between the number of chip splashes and processing parameters

离出来,形成整片的磨屑,如图6(a)~(d)所示。尤其在190 m/s超高速下,由于材料的趋肤效应^[12],更多能量被磨屑带走,磨屑形成有序分层。此时,材料去除方式已经发生明显的变化,因此磨屑飞溅数量急剧降低。

3.3 磨屑飞溅体积

在仿真中,通过统计磨屑沿 x 、 y 、 z 轴飞溅的最大距离 a 、 b 、 c 值,以 box 立方体形式输出磨屑飞溅占据空间,即磨屑飞溅的体积值($abc\ \mu\text{m}^3$)。通过分析磨屑飞溅体积随加工参数的变化可进一步表征磨屑的形态变化规律。

图8为1.0 m/s磨粒速度下,不同磨粒切深的磨屑飞溅体积三维图,图中白色立方体表示磨屑飞溅所处的三维空间大小。观察到25 nm切深下,磨屑飞溅体积只沿工件边缘纵向延伸,但随切深的增大,磨屑飞溅距离增大,其飞溅体积亦出现纵向和横向延伸。

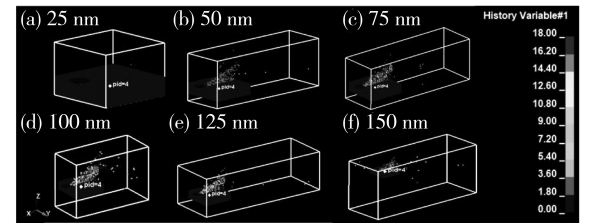


图8 不同磨粒切深下的磨屑飞溅体积

Fig.8 Splash volume of chips at different abrasive cutting depths

固定磨粒切深为100 nm,不同磨粒速度下的磨屑飞溅体积如图9所示。观察出 box 立方体体积各有不同:0.5~40 m/s时,磨屑沿 x 向飞溅的

数量最多,但在0.5 m/s速度下,磨屑同时存在 x 、 y 、 z 3个方向的磨屑飞溅,因此磨屑飞溅体积最大;80~160 m/s时,磨屑主要沿 x 、 z 方向飞溅,磨屑并未过多沿 y 向飞溅,导致磨屑飞溅体积相比减小;在175~190 m/s时,磨屑几乎只沿 x 向飞溅, z 向只存在少许磨屑的飞溅,因此磨屑飞溅体积最小。

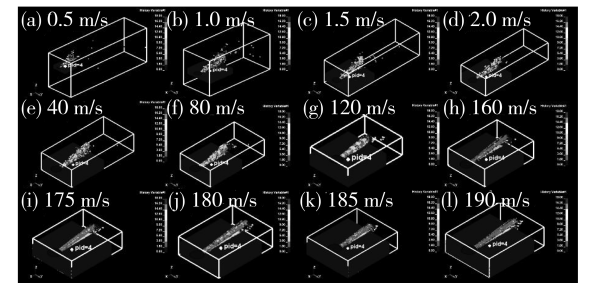


图9 不同磨粒速度下的磨屑飞溅体积

Fig.9 Splash volume of chips at different abrasive speeds

图10定量给出磨屑飞溅体积随加工参数的变化关系。图10(a)中发现磨屑飞溅体积随磨粒切深的增大而急剧增大,同时从拟合曲线看出,磨粒切深增大会加剧磨屑飞溅体积的增幅,最大磨屑飞溅体积在150 nm切深下获得为 $3.98 \times 10^5\ \mu\text{m}^3$;而磨屑飞溅体积随磨粒速度增大而急剧减小,最大磨屑飞溅体积出现在0.5 m/s时,为 $2.97 \times 10^5\ \mu\text{m}^3$,如图10(b)所示,此时材料以脆性去除为主,磨屑飞溅程度最为剧烈,而最小磨屑飞溅体积在190 m/s下获得,仅 $0.35 \times 10^4\ \mu\text{m}^3$,此时工件表面崩碎少,材料得以被完整去除。

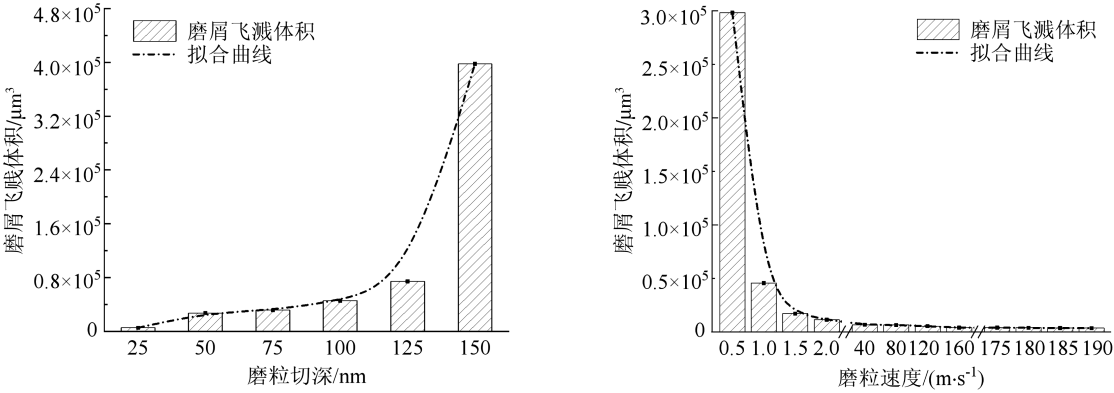


图 10 磨屑飞溅体积随加工参数变化关系

Fig.10 Relationship between splashing volume of chips and processing parameters

4 结论

1) 能量损失导致体积压力减小是磨屑形成的原因,磨屑存在堆积、团簇、飞溅、分层 4 种形态。磨粒速度的增大使磨屑飞溅形态转变为分层,磨粒飞溅角度在 $7.4^{\circ} \sim 34.3^{\circ}$ 之间,在 50 nm 磨粒切深下出现最大磨屑飞溅角度 34.3° ,而当速度大于 160 m/s 时,磨粒飞溅角度最小,为 7.4° 。

2) 磨屑飞溅数量随磨粒切深增大而线性增大;脆性加工阶段,磨粒速度的增加会使材料呈现小崩碎、大崩碎、片状去除的形式,导致磨屑飞溅数量与磨粒速度呈波动变化。

3) 磨屑飞溅体积随磨粒切深增大而急剧增大,随磨粒速度的增加而急剧减小。在 150 nm 磨粒切深下磨屑飞溅体积最大,为 $3.98 \times 10^5 \mu\text{m}^3$;磨屑飞溅体积最小在 190 m/s 时获得,仅 $0.35 \times 10^4 \mu\text{m}^3$ 。

参考文献:

[1] NOVOSELOV A. Growth of large sapphire crystals: lessons learned[J]. Journal of Crystal Growth, 2022, 578: 126431.

[2] ZHANG Y F, ZHU S L, ZHAO Y Y, et al. A material point method based investigation on crack classification and transformation induced by grit geometry during scratching silicon carbide[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2022, 177: 103884.

[3] LIN J M, JIANG F, WEN Q L, et al. Deformation anisotropy of nano-scratching on C-plane of sapphire: a molecular dynamics study and experiment[J]. Applied Surface Science, 2021, 546: 149091.

[4] 倪嘉铭. 碳化硅高速磨削表面完整性研究[J]. 机械设计与制造, 2019(11): 167-169, 173.

[5] 段念, 王文珊, 于怡青, 等. 基于 FEM 与 SPH 耦合算法的单颗磨粒切削玻璃的动态过程仿真[J]. 中国机械工程, 2013, 24(20): 2716-2721.

[6] MIR A, LUO X C, CHENG K, et al. Investigation of influence of tool rake angle in single point diamond turning of silicon [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(5): 2343-2355.

[7] TRAN T T. Study of the SPH Method for Simulation in LSDYNA[J]. International Journal of Science and Research, 2018, 7(8): 271-274.

[8] 焦培刚. 光滑粒子流体动力学方法及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2021.

[9] ZHANG B, GUO X T, LIU Y, et al. Study of glass laminate configurations on ballistic resistance of novel lightweight sapphire transparent laminated structures[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2021, 4(4): 397-404.

[10] 袁巨龙, 邓朝晖, 熊万里, 等. 高效磨削技术与装备进展及展望[J]. 航空制造技术, 2010, 53(5): 66-70.

[11] 李远, 黄辉, 于怡青, 等. 切磨过程中花岗石材料去除机理研究[J]. 矿物学报, 2001, 21(3): 401-405.

[12] ZHANG B, YIN J F. The ‘skin effect’ of subsurface damage distribution in materials subjected to high-speed machining [J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2019, 1(1): 012007.

(责任编辑: 陈雯)