

## 磨粒几何排列对 Inconel 718 磨抛的有限元仿真研究

杨 阳<sup>1</sup>, 王大中<sup>2</sup>

- 上海工程技术大学 航空运输学院, 上海 201600
- 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201600

**摘要:**目的 为了提高砂带磨抛镍基合金 Inconel 718 的表面精度, 避免砂带上磨屑堆积等问题, 针对砂带表面磨粒的顶端结构以及排列方式进行了分析, 通过三维动力学仿真方法, 研究磨抛过程中磨削力和磨屑的变化情况。方法 开展三种尖端类型磨粒和排列间距、倾角对 Inconel 718 的磨削机理研究, 先分析尖端为点型、线型、面型的磨粒磨削过程, 对比不同尖端类型磨粒的切屑形态与磨削力的大小, 根据挑选出的点型尖端磨粒建立正四面体磨粒, 利用该类型磨粒建立有序与无序的金刚石多磨粒模型, 通过有限元软件分析磨粒水平和竖直方向上的间隙大小以及磨粒排布线倾角变化对磨削力和工件表面质量的影响。结果 发现点型尖端磨粒产生的切屑呈碎屑状, 更容易在多磨粒间排出, 不易堵塞砂带, 且在磨削过程中所受的磨削力更小; 分析发现有序排列的磨粒类型具有很大的优势, 能够提高工件表面精度, 在工件表面产生大小均匀的沟槽, 同时降低砂带受到的磨抛力小; 发现磨削力大小会随着排布线倾角的增加呈现先增大后减小趋势。通过与实验对比, 发现磨屑的形状会随着水平方向间隙的增大而变化, 呈现出由块状至带状到细长条状的变化规律, 细长条状的磨屑更易从间隙中排出, 从而达到降低磨抛力的效果。结论 采用点型尖端磨粒和合适的磨粒排布规律能够有效提高磨抛后的工件表面精度和促进磨屑的排出, 为砂带的制造生产提供新的思路。

**关键词:**磨粒排列; 金刚石; 有限元; Inconel 718

**中图分类号:** TG74.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0004.004

### Finite Element Simulation Study of the Geometric Arrangement of Abrasive Grains on the Grinding of Inconel 718

YANG Yang<sup>1</sup>, WANG Dazhong<sup>2</sup>

- School of Air Transport, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China
- School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China

**Abstract: Objective** To improve the surface precision of nickel-based alloy Inconel 718 during belt grinding and polishing, and to avoid issues such as abrasive grains accumulation on the belt, an analysis was conducted on the top structure and arrangement of abrasive grains on the belt surface. Through three-dimensional dynamic simulation, the variations in grinding force and abrasive debris during the grinding and polishing process were studied. **Methods** Three types of abrasive grain tip shapes and arrangement spacings, as well as inclinations, were investigated for their grinding mechanisms on Inconel 718. Initially, the grinding processes of point, line, and surface-shaped abrasive grains were analyzed, comparing the chip morphology and grinding force of different types of abrasive grains. Based on the selected point-type abrasive grain, a regular tetrahedral abrasive grain was established, and both ordered and disordered diamond

**收稿日期:** 2023-04-11 **修回日期:** 2023-05-14 **文章编号:** 1672-058X(2024)04-0026-10

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(5217052158).

**作者简介:** 杨阳(1997—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 从事精密磨抛加工技术研究。

**通讯作者:** 王大中(1966—), 男, 吉林人, 教授, 从事复合材料智能制造与健康监测、刀具优化设计与开发研究。Email: wdzh168@126.com

**引用格式:** 杨阳, 王大中. 磨粒几何排列对 Inconel 718 磨抛的有限元仿真研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2024, 41(4): 26—35.

YANG Yang, WANG Dazhong. Finite element simulation study of the geometric arrangement of abrasive grains on the grinding of Inconel 718[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(4): 26—35.

multi-grain models were developed using this type of abrasive grain. Finite element software was used to analyze the effects of gap sizes in both horizontal and vertical directions and changes in abrasive grain arrangement line inclinations on grinding force and workpiece surface quality. **Results** The results showed that the chip produced by point-type abrasive grains was fragmented, making it easier to discharge between multiple abrasive grains and less likely to clog the belt, while experiencing lower grinding forces during the grinding process. It was found that ordered arrangement of abrasive grains had significant advantages, improving workpiece surface precision, creating uniformly sized grooves on the workpiece surface, and reducing the force exerted on the belt. It was also observed that the magnitude of grinding force increased and then decreased with the increase in arrangement line inclination. Through comparison with experiments, it was found that the shape of abrasive debris changes from block-like to strip-like to elongated strip-like as the horizontal gap increases. Elongated strip-like debris is more easily discharged from the gap, thus achieving the effect of reducing polishing force. **Conclusion** The use of point-type abrasive grains and appropriate abrasive grain arrangement patterns can effectively improve surface precision after grinding and polishing and promote the discharge of abrasive debris, providing new insights for the manufacturing and production of abrasive belts.

**Keywords:** abrasive grain arrangement; diamond; finite element; Inconel 718

## 1 引言

镍基合金 Inconel 718 具有较高的耐磨损性能、抗潜变性、抗疲劳性<sup>[1]</sup>,但另一方面,它具有较差的导热性能和高加工硬化性,特别是对于磨抛这种比能大的加工<sup>[2]</sup>,传统砂带在磨抛过程中,会经常出现磨粒与磨屑相互粘连的问题,还会出现砂带变形和材料表面烧伤等问题。为了提高磨抛 Inconel 718 的表面精度,降低磨抛过程中砂带对材料造成的损伤,可以通过改变砂带的表面结构达到此目的。

砂带作为一种由黏合剂粘连着磨粒将其固定在基体上的特殊磨具,每个磨粒都可以看作是拥有不同形状的微小刀具,改变磨粒的几何形状以及排列顺序会对磨削力和磨屑形状产生较大影响,能够有效减少磨屑的黏附和磨抛过程中的烧伤问题<sup>[3]</sup>。故国内外学者针对磨粒的形状以及排列顺序作了以下研究:王西彬等<sup>[4]</sup>发现类似于正四面体、正方体、正八面体等拥有规则形状和尺寸的立方体磨粒切削性能较好,在选择砂轮时应该首先考虑磨粒形状尺寸,其次再考虑砂轮磨粒的浓度,故在分析磨粒排列顺序时也应该首先考虑磨粒形状的影响;Pal 等<sup>[5]</sup>发现 CBN 颗粒均匀排列的钎焊砂轮在磨削轴承钢时,磨削力较小且稳定,没有磨粒脱落的现象,但没有分析排列顺序对造成磨削力降低的具体因素;Yu 等<sup>[6]</sup>发现叶序花纹排列的仿生砂轮,流体仿真中得出磨粒的均匀度表现效果好,然而并未对磨抛过程进行仿真研究,缺乏实验研究;Aurich 等<sup>[7]</sup>通过动力学研究设计了一款有序排布的砂轮结构,发现其适用于高性能磨削,磨削过程中磨削力相较于传统砂轮更低,但由于电镀制造工艺的缺陷而无法继续实验;张钰奇<sup>[8]</sup>发现采用无序和有序的金金刚石砂轮分别对光学玻璃进行磨抛实验后,有序排布的金

石砂轮所受的法向和切向磨削力更小,但损伤仿真只采用了二维的单磨粒模型,并未考虑排列顺序的影响;李瑞昊等<sup>[9]</sup>发现在花岗岩磨削过程中,采用磨粒有序排列的砂轮无论是在顺磨还是在逆磨过程中,所受的磨削力均小于乱序排列的金金刚石砂轮,但只对比了乱序与有序排列间的区别,并未分析磨粒的排列参数对磨削力大小的影响。

上述研究主要针对砂轮上磨粒的排列问题,缺乏从微观角度上对磨抛过程的理论分析,故在砂带的磨粒排列顺序上的理论研究依然缺乏,因此本文将从磨粒的尖端类型出发,通过建立磨粒的三维模型来仿真砂带上磨粒的排列顺序对镍基合金 Inconel 718 的磨抛过程,为砂带的生产加工提供新的思路。

## 2 磨粒几何排列模型设计

砂带表面分布着颗粒大小均匀的磨粒,对这些磨粒的位置进行规律排布可以使得砂带的磨削性能得到提高,磨粒间的空隙可以保证热量的散出和磨削液的进入,而且磨粒规律的排布还能够提升砂带的使用寿命,提升环保和经济效益。

传统砂带上的磨粒排列无序,磨粒间距大小不一,磨粒轨迹混乱,若磨粒呈竖直或横向依次排开则很容易造成轨迹的重叠,降低磨削效率,影响磨屑的排除。由图 1 所示,假定当磨粒的水平间距  $\Delta x$  和竖直间距  $\Delta y$  一定时,若修改磨粒的倾斜角度  $\alpha$ ,则可以预想到磨粒密度会随着  $\alpha$  值的增大而减少,进而导致磨粒的容屑空间增大、更有利于热量的排出,反之,当  $\alpha$  值减小时,单位面积磨粒数量增加,可以增加材料的去除率。所以,磨粒的排列顺序具有研究价值,其中在模型的建立过程中必须要考虑磨粒形状的影响,受到砂带表面磨粒形状的启发将对磨粒的尖端类型进行讨论。

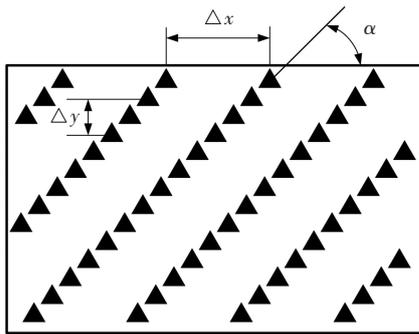
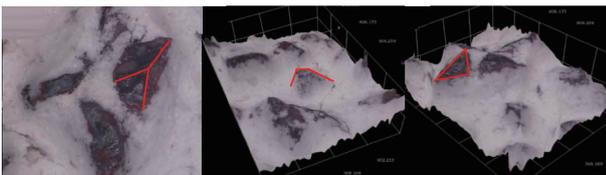


图 1 磨粒呈一定角度和间距的有序排列示意图

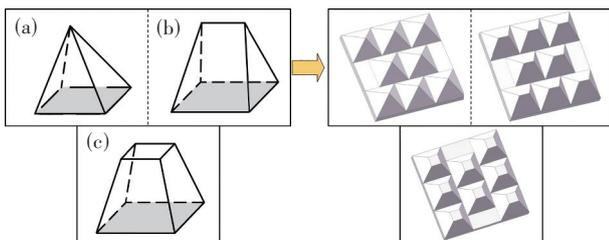
Fig. 1 Schematic diagram of the orderly arrangement of abrasive grains at a certain angle and spacing

砂轮表面的三维形貌,如图 2 所示。磨粒的尖端基本都朝外,切削刃能够很好地暴露出,故根据砂带表面磨粒形貌,建立三种不同尖端类型的磨粒,分别为点型(图 3(a))、线型(图 3(b))和面型(图 3(c)),磨粒的切削刃数量均为 4 条,底面均为  $5 \times 5 \mu\text{m}$  的正方形区域,线型尖端的直线长度为  $2.5 \mu\text{m}$ ,面型尖端为  $2.5 \times 2.5 \mu\text{m}$  的正方形区域,磨粒高度相同均为  $2.5 \mu\text{m}$ 。



(a) 点型尖端磨粒 (b) 线型尖端磨粒 (c) 面型尖端磨粒  
图 2 砂带表面磨粒三维形貌图磨粒<sup>[10]</sup>

Fig. 2 Three-dimensional morphology of abrasive grains on the surface of abrasive belt<sup>[10]</sup>



(a) 点型尖端 (b) 线型尖端 (c) 面型尖端

图 3 三种不同尖端类型的磨粒模型

Fig. 3 Three different tip types of abrasive grain models

### 3 磨粒几何排列有限元分析

#### 3.1 磨抛材料去除模型

磨削加工是一个复杂且多变的过程,需要各种形状不一的磨粒参与磨削,同时还要考虑各种因素对磨削过程的影响,如磨削温度、材料表面完整性、切削参数、橡胶轮的变形等。为了方便建立理论模型,往往采取对单颗磨粒进行研究,如图 4 所示为单颗磨粒的磨抛过程理论模型图,其中弹簧部分简化为磨抛系统中的柔性变形,底端的磨粒围绕着定点  $O$  进行旋转,磨抛过程大概由 3 个阶段构成,分别为滑擦、耕犁、切屑形成阶段<sup>[11]</sup>。

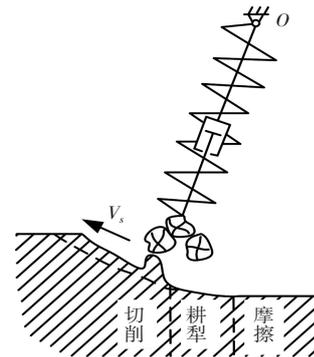


图 4 磨削过程示意图

Fig. 4 Diagram of grinding process

第 1 阶段:滑擦阶段。此时磨粒第一次与材料发生碰触,工件处于弹性变形的阶段,随着时间的推移,变形程度加大,法、切向力和摩擦力的大小逐步增加。这个阶段的特点是磨粒不参与切削,没有磨屑的产生,磨粒与工件表面只有摩擦行为<sup>[12]</sup>。

第 2 阶段:耕犁阶段。相较于上一阶段,摩擦行为加剧,磨粒与材料之间产生大量的热,由于温度升高,镍基合金屈服应力下降,当金属材料受到的磨抛力超过其屈服应力时,发生塑性变形,变形后的金属受挤压向磨粒的前刀面和两边发生位移,造成材料隆起,这个过程被称为耕犁<sup>[13]</sup>。该过程材料只有弹性、塑性变形,没有磨屑的生成。

第 3 阶段:切屑形成阶段。当材料受力加剧,塑性变形程度加大,磨粒前刀面和两侧的材料堆积程度越来越多,材料被破坏通过磨屑的形式被去除,磨削力进一步加大到达顶峰后逐渐趋向于平稳<sup>[14]</sup>。

在考虑进给速率的情况下,磨粒在一次磨削过程中与材料的接触轨迹并非标准的圆弧形状,而是由多端圆弧叠加组成,图 5 为单颗磨粒的单磨削周期内与材料的接触弧长的原理示意图。

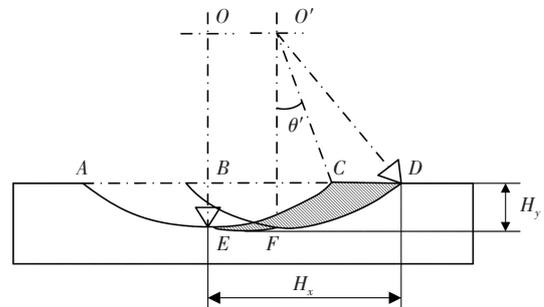


图 5 单颗磨粒的单磨削周期内与材料的接触弧长示意图<sup>[15]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of the arc length of contact with the material in a single grinding cycle of a single abrasive grain<sup>[15]</sup>

图 5 展示的为单颗磨粒从切入到切出材料的一段轨迹, $O$  和  $O'$  分别为切入和切出材料时砂轮接触轮的中心轴位置,圆弧  $AEC$  和圆弧  $BFD$  分别表示不考虑进给运动下,两个不同位置磨粒的运动轨迹。对这两个

位置的运动轨迹进行重合,圆弧段  $EFD$  即为考虑进给速度下磨粒的运动轨迹。以  $E$  点为坐标原点建立直角坐标系, $H_x$  和  $H_y$  分别表示轨迹  $EFD$  在  $x$  方向和  $y$  方向上的分量,则圆弧段  $EFD$  的长度为两分量之和, $\theta$  表示磨粒从切入到切出材料过程中所转过的角度,其中  $H_x$  的长度为进给运动所走过的长度  $OO'$  和忽略进给运动下磨粒的运动轨迹  $FD$  沿  $x$  方向上的分量之和, $EFD$  在  $x$  方向上和  $y$  方向上的分量  $H_x$  和  $H_y$  的值由式(1)、式(2)得出:

$$H_x = R\sin\theta + \frac{\theta R v_w}{60\,000 v_s} \quad (1)$$

$$H_y = R(1 - \cos\theta) \quad (2)$$

则圆弧  $EFD$  段的长度  $L$  为  $x, y$  的分量之和,可以表示为

$$L = R \int \sqrt{1 + \left(\frac{R v_w}{60\,000 v_s}\right)^2 + \frac{2 R v_w}{60\,000 v_s}} d\theta = R \left(1 + \frac{R v_w}{60\,000 v_s}\right) \theta \quad (3)$$

$$\theta = \sqrt{1 - \cos^2\theta} = \sqrt{\frac{2\alpha_p}{R} - \left(\frac{\alpha_p}{R}\right)^2} \approx \sqrt{\frac{2\alpha_p}{R}} \quad (4)$$

其中,  $\frac{\alpha_p}{R}$  的值趋向于 0,这里忽略不计,将式(4)代入式(3)可得出式(5):

$$L = \sqrt{2\alpha_p R} \left(1 + \frac{R v_w}{60\,000 v_s}\right) \quad (5)$$

若不考虑砂带进给速度,可得弧长  $L = \sqrt{2\alpha_p R}$ ,砂轮接触轮的大小一般为 300~500 mm,当磨削深度为 1~10  $\mu\text{m}$  时,单磨粒对应的磨削弧长为 774~3 162  $\mu\text{m}$ ,故在设定仿真模型时,若工件的长度为 0~50  $\mu\text{m}$ ,则可以假定工件材料表面为平面。

### 3.2 磨粒有限元建模

由于不同形状多磨粒磨削的实验现象在现实中难以观察,并且很难对磨削过程中的力进行测量,故采用 Abaqus 仿真模拟软件构建多磨粒磨削的有限元模型。如图 6 所示,模型中 Inconel 718 为工件,为 30  $\mu\text{m} \times 30 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)的长方体,金刚石作为磨粒的材料,磨抛深度为  $\alpha_p = 1 \mu\text{m}$ ,磨抛速度  $v_s = 10 \text{ m/s}$ 。采用三维正交切削构建模型,其中 Inconel 718 与金刚石的材料参数如表 1 所示。

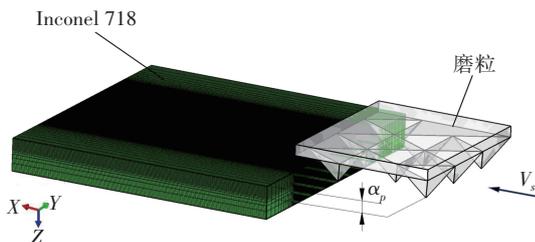


图 6 金刚石磨粒磨削 Inconel 718 模型

Fig. 6 Diamond grains grinding Inconel 718 model

表 1 金刚石与 Inconel 718 的材料参数<sup>[16-17]</sup>

Table 1 Material parameters of diamond and Inconel 718<sup>[16-17]</sup>

参 数	金 刚 石	Inconel 718
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	3 520	8 240
线膨胀系数 $\alpha/\text{K}$	$1.26 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-5}$
弹性模量 $E/\text{Gpa}$	1 050	210
泊松比 $\gamma$	0.10	0.3
比热容 $C/[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	420	435

磨削过程温度高,容易发生应变硬化、热软化等行,为了准确构造出磨削过程中 Inconel 718 的塑性变形,选择采用 Johnson-Cook 模型来表示材料的流动应力本构模型,其中流动应力  $\bar{\sigma}$  如式(6)表示<sup>[18]</sup>:

$$\bar{\sigma} = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0}\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{\text{melt}} - T_0}\right)^m\right) \quad (6)$$

其中, $A, B$  和  $C$  分别表示室温下材料的初始屈服应力、硬化模量和应变率强化系数,单位都为 Mpa, $m$  和  $n$  又分别代表热软化指数和应变硬化指数, $m = A/T, n = B/T, \varepsilon, \dot{\varepsilon}$  和  $\varepsilon_0$  分别表示塑性应变、有效应变率和参考应变率, $T_0$  和  $T_{\text{melt}}$  则分别表示室温和熔化温度。J-C 本构模型的主要参数如表 2 所示。

表 2 Inconel 718 的 J-C 本构模型主要参数<sup>[18]</sup>

Table 2 Main parameters of the J-C intrinsic model of Inconel 718<sup>[18]</sup>

$A/(\text{Mpa})$	$B/(\text{Mpa})$	$C$	$n$	$m$
1 241	622	0.013 4	0.652 2	1.3

为了使仿真后磨屑的形状更加真实,故采用 J-C 损伤模型和流动应力的结合,J-C 破坏损伤模型作为一种基于等效塑性应变的损伤分离准则,适用于高应变率变形场合,当等效塑性应变大于临界塑性应变时,材料发生损伤。经验的断裂等效应变  $\bar{\varepsilon}_f^{\text{pl}}$  表达式如式(7)所示<sup>[19]</sup>:

$$\bar{\varepsilon}_f^{\text{pl}} = \left(d_1 + d_2 \exp\left(d_3 \frac{p}{q}\right)\right) \left(1 + d_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0}\right) \left(1 + d_5 \frac{T - T_0}{T_{\text{melt}} - T_0}\right) \quad (7)$$

其中  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5$  表示材料常数,分别表示为初始失效应变、指数系数、三轴性常数、应变率常数, $p$  代表法向应力的平均值, $q$  表示 Mises 等效应力, $\dot{\varepsilon}$  和  $\varepsilon_0$  已在前面定义。其中 Inconel 718 对应的 J-C 损伤模型的参数如表 3 所示。

表 3 Inconel 718 的 J-C 损伤模型的主要参数<sup>[20]</sup>

Table 3 Main parameters of the J-C damage model of Inconel 718<sup>[20]</sup>

$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$
-0.239	0.456	0.3	0.07	2.5

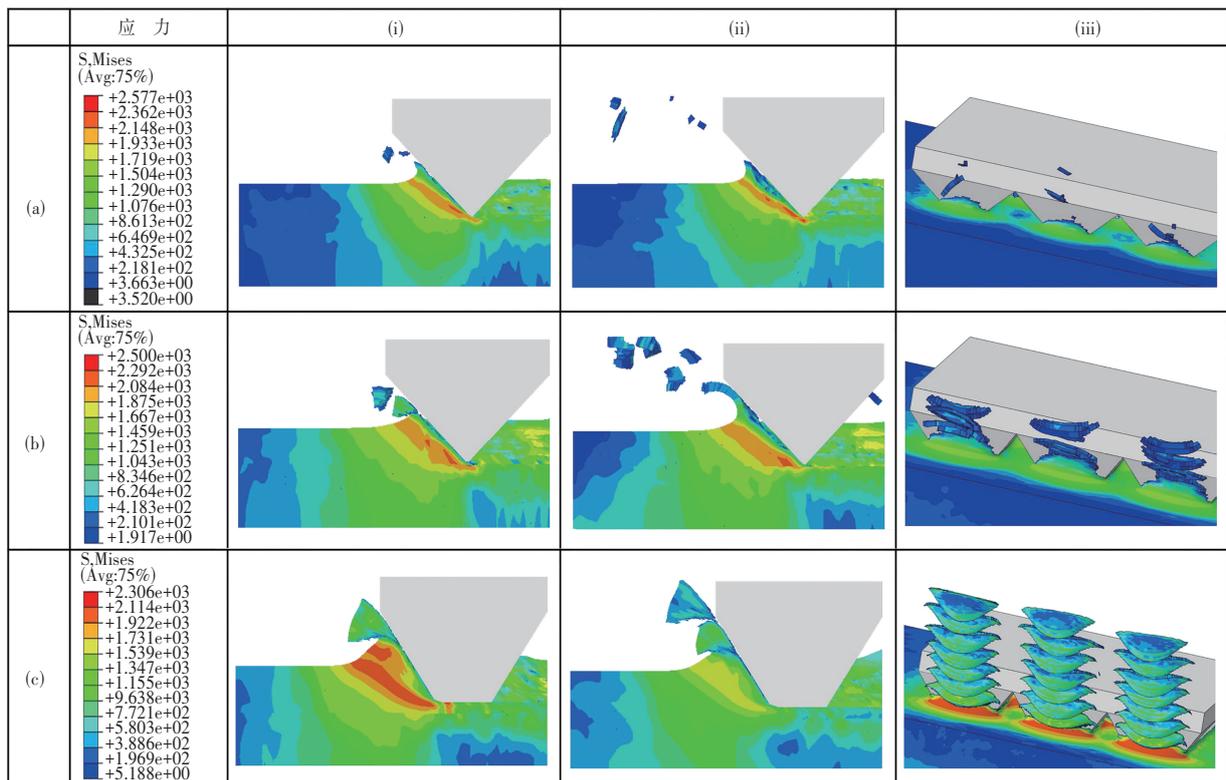
损伤参数  $\omega$  是确定切屑发生分离的重要依据,公式(8)如下表示,当  $\omega$  的值等于 1 时,材料发生损伤,其中  $\Delta\bar{\varepsilon}^{pl}$  代表等效塑性应变的增量。

$$\omega = \sum \left( \frac{\Delta\bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_f^{pl}} \right) \quad (8)$$

#### 4 磨粒尖端类型有限元分析

由于磨屑的形成过程包括滑擦、耕犁与切削 3 个阶段,由于滑擦过程仅仅包括塑性变形,没有磨屑的产生,所以接下来主要研究耕犁和切削阶段。如图 7 所示,分别展现了 3 个不同时间段的磨屑的形貌图,(i)、(ii) 两个阶段用平行于磨粒运动方向的截面图(xz 平面)展示,主要描述了磨屑的形成变化过程,(iii) 阶段为磨削过程三维整体形貌图,由于磨屑时间靠后,主要用来展示磨屑的基本形貌。点型尖端磨粒图 7(a) 在磨屑过程(i)中,工件材料在磨粒前刀面的挤压下,发生塑性变形进而逐渐堆积在磨粒的前刀面

上,随着堆积过程的加剧,靠近顶端的堆积物被破坏形成切屑,从阶段(ii)可以看出随着磨削过程的进行,前刀面上的堆积材料高度基本保持不变,剪切区应力分布呈细长条状,由阶段(iii)可以看出堆积材料主要通过点状或条状磨屑的形式飞出。线型尖端磨粒图 7(b) 在磨屑过程(i)随着堆积的进行,磨屑呈现分散的细长条状飞出,随着堆积的加剧,剪切区应力分布面积更大,从阶段(ii)、(iii)可以看出磨屑呈现出连续的带状长条,切屑更容易堆积进而影响待加工表面;面型尖端磨粒图 7(c) 在磨削过程(i)中沿剪切方向出现了两个明显的剪切变形区域,由于绝热剪切的作用,变形带上材料会出现热软化现象,其剪切应力明显小于工件材料的其他区域,随着时间的推移从阶段(ii)可以看到,剪切带区域材料在剪切力的作用下被拉长,当超过材料的损伤演变标准时便会发生断裂,剪切带周围的材料发生塑性变形向上移动,故最终磨屑呈现出锯齿形状。



注 1: 点型尖端(a)、线性尖端(b)和面型尖端(c)对应分析步时间  $t = 6.0 \times 10^{-7} \text{s}$  (i) 时、 $t = 1.4 \times 10^{-6} \text{s}$  (ii) 和  $t = 2.0 \times 10^{-6} \text{s}$  (iii) 时的应力分布图和磨屑形貌图

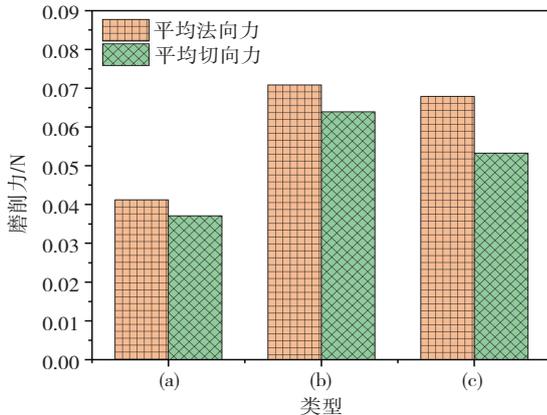
图 7 三种尖端类型磨粒磨削过程中应力分布及磨屑的类型对比

Fig. 7 Comparison of stress distribution and chip types during grinding of three tip types of abrasive grains

对比三种磨粒发现,点型尖端磨粒单个磨屑体积最小,不容易堆积在前刀面上,加工效果最好,线型尖端磨粒由于具有更大的去除材料体积,应力带面积更大,切屑更容易堆积形成带状长条形切屑,面型尖端磨粒与材料接触面积最大,材料隆起程度高,切屑呈断裂

的锯齿状切屑,切屑体积最大,容易堵塞砂轮,变相降低磨粒的出刃高度。根据图 8 可以看出,点型尖端磨粒的主切削力和进给力最小,磨削力大约为线型尖端和面型尖端的 60%,故综合对比可得出点型尖端的磨粒切屑体积最小,磨削力最小,更容易排屑,故接下来

的内容以点型尖端磨粒为基础进行研究。



注 2: (a)点型尖端; (b)线型尖端; (c)面型尖端

图 8 三种尖端类型磨粒磨削过程中平均磨削力的大小对比  
Fig. 8 Comparison of the magnitude of the average grinding force during the grinding of three tip types of abrasive grains

### 5 磨粒排列有限元分析

为了定量分析磨粒排布顺序对磨削效果的影响,定义了 3 组变量:水平间距  $\Delta x$ 、竖直间距  $\Delta y$  和磨粒的倾斜角度  $\alpha$ ,详细参数如表 4 所示。

表 4 磨粒的排列参数

Table 4 Arrangement parameters of abrasive grains

排列参数	水平间距 $\Delta x/\mu\text{m}$	竖直间距 $\Delta y/\mu\text{m}$	倾斜角度 $\alpha/(\text{°})$
数值	12.5、14.3、16.7、20、25	8、10、12、14、16	30°、45°、60°、75°、90°

如图 9 所示,建立磨粒有序排列和无序排列的三

维模型。根据第三章的分析可知点型尖端磨粒在磨削过程中具有较大优势,故本节依旧采用 11 颗底部边长为  $5\ \mu\text{m}$ ,高度为  $2.5\ \mu\text{m}$  的正四面体点型尖端磨粒进行分析,由于磨粒的数量固定为 11 颗,故水平间距  $\Delta x$  与竖直间距  $\Delta y$  为一一对应的关系。

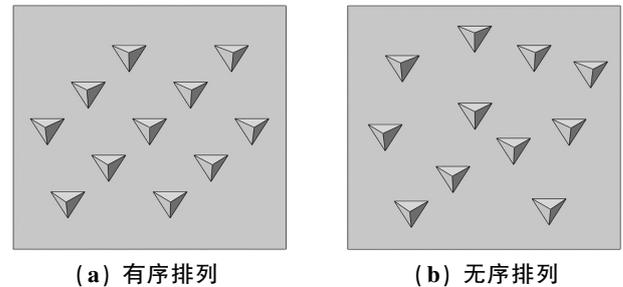


图 9 磨粒和三维模型示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the 3D model of ordered and disordered arrangement of abrasive grains

#### 5.1 磨粒参数化建模有限元分析

分别对有序排列和无序排列的磨粒进行有限元仿真,其中有序排列的磨粒间参数为水平间距  $\Delta x$ ,竖直间距  $\Delta y$ ,倾斜角度  $\alpha$ ,定义磨削速度  $v_s = 10\ \text{m/s}$ ,磨削深度  $\alpha = 45^\circ$ ,如图 10 和图 11 分别为磨粒有序与无序排列在不同阶段的应力形貌图,其中材料表面的沟槽用红色细线做了勾勒,可以看到磨粒有序排列时 Inconel 718 的表面 Mises 应力要小于磨粒的无序排列时的应力,且磨粒有序排列时材料表面的沟槽排布均匀有序,工件表面的表面粗糙度要小于无序排列时的值,无序排列时材料表面沟槽间距离大小不一,有多处的材料未参与磨削,磨削效率低下。

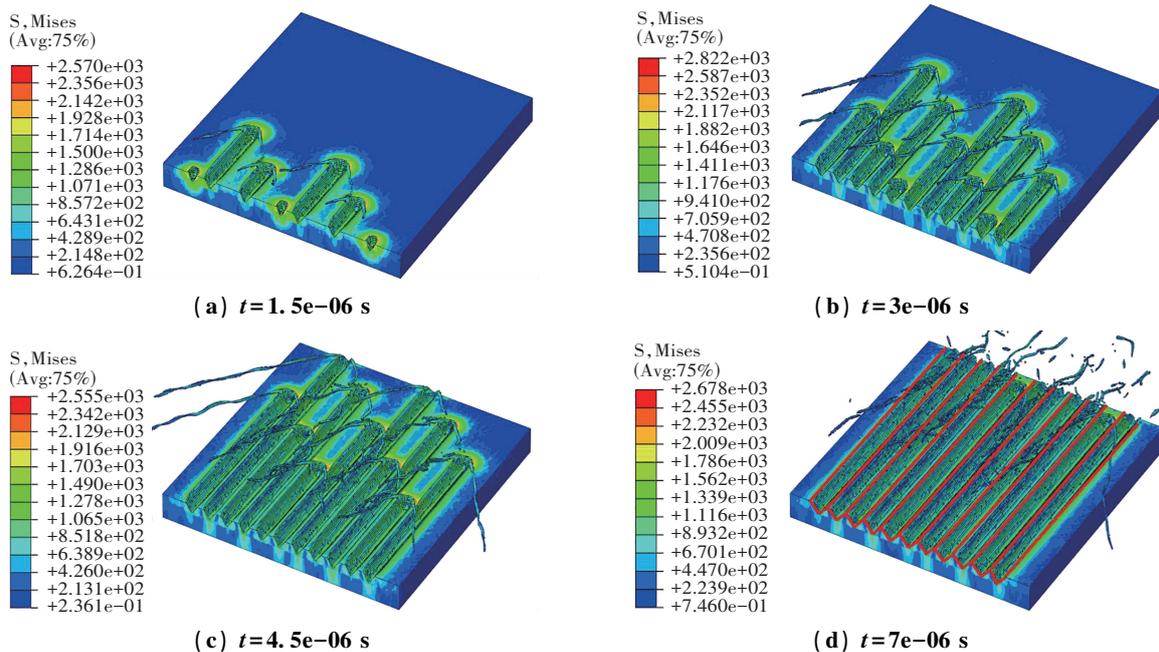


图 10 磨粒有序排列在不同阶段的应力形貌图

Fig. 10 Stress morphology of the orderly arrangement of abrasive grains at different stages

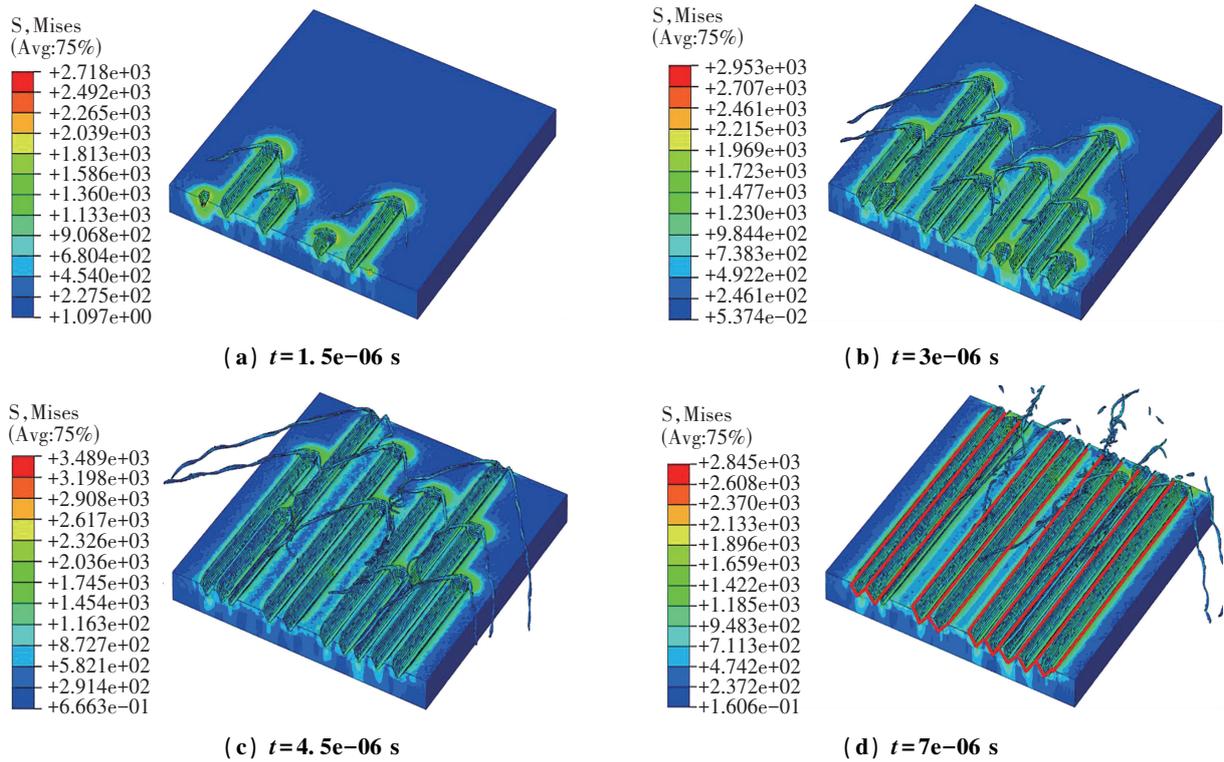


图 11 磨粒无序排列在不同阶段的应力形貌图

Fig. 11 Stress morphology of disordered arrangement of abrasive grains at different stages

图 12 为不同磨削速度下磨粒有序排列和无序排列磨粒所受的磨削力大小对比,随着磨削速度的增加,磨粒所受的平均磨削力呈减小的趋势,有序排列时所受的平均磨削力要明显小于无序排列的平均力,磨粒无序排列时容易造成磨屑的堵塞,所以当磨削深度、磨削速度等参数一定时,磨粒的有序排列更有利于 Inconel 718 的加工。

图 13(a) 表示当磨粒间水平间距  $\Delta x = 25 \mu\text{m}$ 、竖间距  $\Delta y = 8 \mu\text{m}$  时不同磨粒排列线倾角  $\alpha$  下的法、切向力大小,可以看出法向和切向磨削力随着磨粒排列线倾角  $\alpha$  的增大而先降低后增加,且  $\alpha$  为  $45^\circ$  时,磨粒所受的法、切向力为最小值,法向力  $F_n$  与切向力  $F_t$  变化趋势相同,可以得出  $\alpha = 45^\circ$  相对于  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $90^\circ$  时磨粒间的空隙能容纳更多的磨屑,有利于磨屑及时有效的排出,不易造成磨屑的拥堵堆积,降低砂带所受的磨抛力大小。

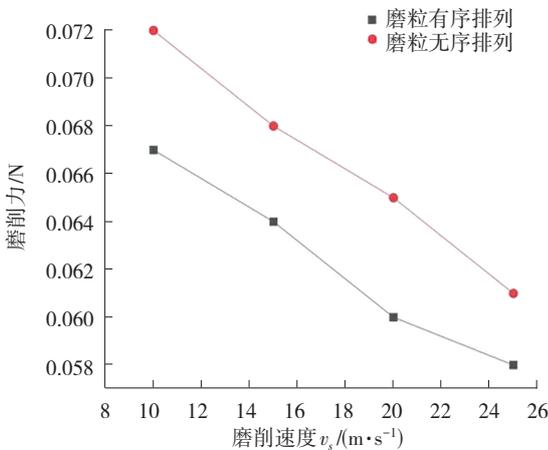


图 12 不同磨削速度下磨粒有序排列和无序排列的磨削力大小对比

Fig. 12 Comparison of the magnitude of grinding force between the orderly and disorderly arrangement of abrasive grains at different grinding speeds

图 13(b) 表示当排布线倾角为  $45^\circ$  时,磨粒间不同的水平间距  $\Delta x$  和竖间距  $\Delta y$  下磨削过程中磨粒受到的法向力和切向力之间的大小对比,可以看出法向力  $F_n$  和切向力  $F_t$  均随着竖间距  $\Delta y$  的增加先逐渐变大后略微减小,竖间距  $\Delta y = 8 \mu\text{m}$ 、水平间距  $\Delta x = 25 \mu\text{m}$  时磨粒所受到的磨削力最小,此时磨粒间的水平间距最大,可见  $\Delta x = 25 \mu\text{m}$  时,磨粒间的水平间隙最大,由图 10 看到随着磨削过程的进行,磨屑从运动方向的两边即从水平间距  $\Delta x$  的方向沿周围排出,故水平方向的间隙  $\Delta x$  越大越有利于磨屑的排出,防止由于磨屑在磨粒之间堆积无法排除导致工件材料表面被堆积物划伤,从而导致材料的表面质量降低,磨削过程中磨粒所受到磨削力增加。

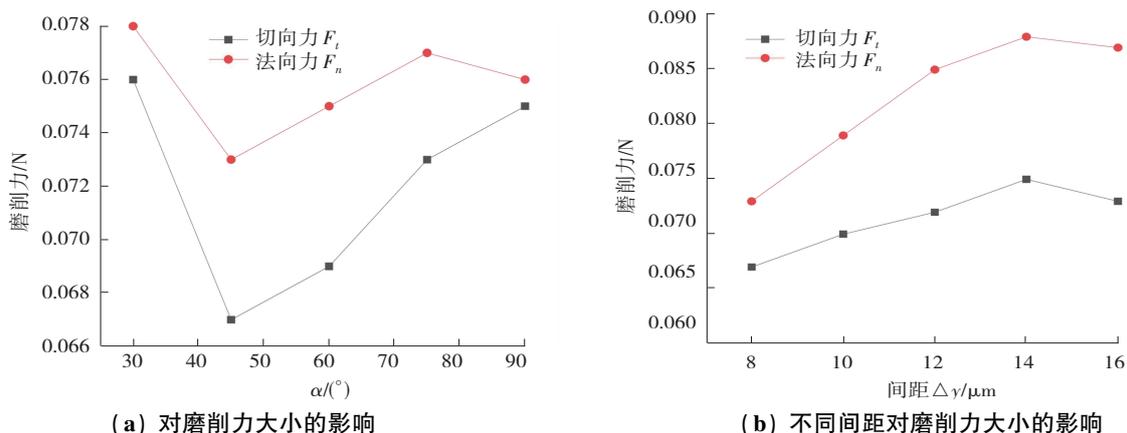


图 13 磨粒排列线倾角  $\alpha$  和不同间距  $\Delta y$  对磨削力大小的影响

Fig. 13 Effect of the inclination angle of the grain alignment  $\alpha$  and the different spacing  $\Delta y$  on the magnitude of the grinding force

经过上述有限元的仿真分析可以得出,当其他的磨削参数固定不变时,当磨粒间的竖直间距  $\Delta y = 8 \mu m$ 、水平间距  $\Delta x = 25 \mu m$ 、磨粒排列线倾角  $\alpha = 45^\circ$  时,磨粒所受到的法向力  $F_n$  和切向力  $F_t$  最小,磨粒的排屑能力最强。

### 5.2 磨屑形态研究

当磨粒的密度一定时,随着磨抛方向上的间隙  $X$  不断增大,相应的间隙  $Z$  不断变小,如图 14(b<sub>1</sub>-b<sub>4</sub>) 为 4 组对应不同磨粒间隙下的钎焊砂轮磨抛后磨屑的

SEM 图像。从工件材料表面的光学形貌图可以看出:沿竖直方向即磨粒的运动方向上有着明显的磨抛后产生的沟槽,沟槽的宽度随着  $X$  方向上的间隙增大而不断变细,根据对应磨屑的 SEM 图像看出,磨屑的形状随着  $X$  方向上间隙的增大,磨屑形状由块状向带状转变,磨屑的宽度逐渐变细、长度逐渐变长,恰好对应着沟槽的宽度大小。由此得出工件的表面粗糙度随着钎焊砂轮的磨粒在  $X$  方向上间隙的增大而逐渐减小。

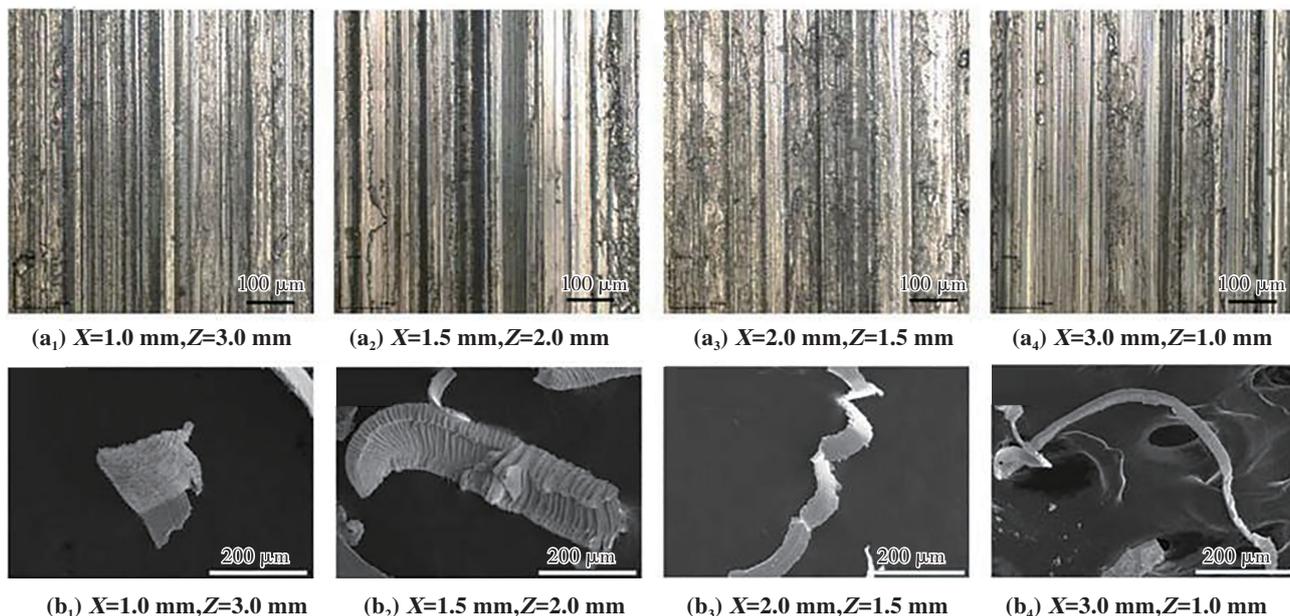


图 14 工件材料表面的光学形貌图 (a<sub>1</sub>-a<sub>4</sub>) ;磨屑的 SEM 图像 (b<sub>1</sub>-b<sub>4</sub>) [21]

Fig. 14 Optical morphology (a<sub>1</sub>-a<sub>4</sub>) of workpiece material surface and SEM images of abrasive debris (b<sub>1</sub>-b<sub>4</sub>) [21]

图 15 为对应的四种不同水平间隙  $\Delta x$  下磨屑的仿真图,根据图 13(b) 看出随着水平间隙  $\Delta x$  的不断增大即竖直间隙  $\Delta y$  不断减小,磨粒所受到的法向力与切向力不断减小,磨屑的形状也由块状逐渐向细长条状转变,金刚石砂带磨粒磨抛镍基合金的仿真结果在一定程度上与钎焊砂轮磨抛的实验结果相似。

磨屑的长度变化可以利用 Malkin 模型解释,如式

(9) 所示 [22]:

$$l = \left( 1 + \frac{v_w}{v_s} \right) (a_p d)^{1/2} + \frac{Lv_w}{2v_s} \quad (9)$$

其中,  $l$  表示磨粒的磨抛长度,  $a_p$  为磨削深度,  $d$  为砂轮的直径,  $L$  表示砂轮外径圆周上磨粒之间的平均距离,即  $L$  可以表示为磨粒沿磨削方向上的磨粒间隙  $\Delta x$ ,故当增大  $\Delta x$  的值时,单颗磨粒的磨抛长度  $\Delta x$  增加,即在

砂轮转动一周时参与磨抛的磨粒数减少,单颗磨粒与工件材料在磨抛过程中接触的距离增加,故磨屑的长度也相应地变长。

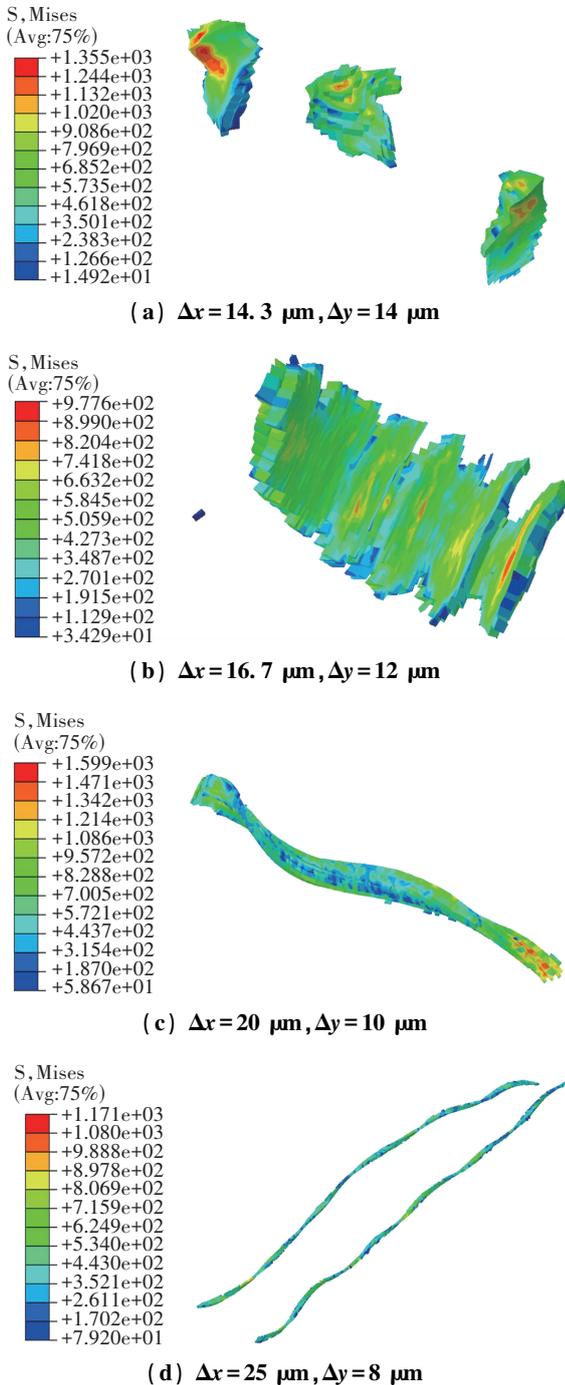


图 15 不同间隙下的磨屑形状

Fig. 15 Shape of abrasive debris at different clearances

磨屑宽度的减小与磨粒轨迹的相互重叠有关。磨粒密度不变时,当磨抛方向上磨粒的间隙  $\Delta x$  增加时,对应着垂直于磨抛方向上的磨粒间隙  $\Delta y$  减小,该方向上参与磨抛的磨粒数量增加,磨粒之间的材料堆积高度会随着相邻磨粒之间沟槽的重叠而逐渐降低,进而会产生细长的磨屑,该现象如图 14(a<sub>1</sub>-a<sub>4</sub>) 可以清晰观

察出。故可以在一定范围内通过改变砂带沿磨抛方向上磨粒的间距  $\Delta x$  来减小磨屑的宽度,另一方面也能帮助磨屑从间隙内排出,降低磨屑的堆积程度;其次随着磨抛过程中所受到的法向力与切向力减小,能够降低磨粒的磨损的程度,提高砂带的使用寿命。

## 6 结论

通过仿真研究了磨粒的排列顺序机理,得出了多磨粒排列的最佳间距大小和倾斜线角度,分析了磨屑形状变化的规律以及产生相关现象的原因。得出了以下几点结论:

(1) 仿真了点型、线型、面型尖端的磨粒磨削 Inconel 718 合金的过程,通过磨削力大小、磨屑形状方面确定了点型尖端磨粒在磨削效果上的优越性,其中点型尖端磨粒的磨屑呈碎屑状易于去除,所受磨削力更小。

(2) 磨粒的有序排列可以降低磨削力大小,提高材料表面精度,有助于磨屑的排出,当磨粒的排列线倾角  $45^\circ$  时排屑能力最强,增加水平方向的间隙也能降低磨削力的大小,避免磨屑堆积对材料表面的损伤。

(3) 磨屑的形状会随着磨抛方向上磨粒的间隙的增加而不断变化,磨屑会经过由块状到带状至细长条形状的一个变化过程,磨粒和材料之间接触弧长决定磨屑长度大小,接触弧长越长,磨屑的长度越长;磨屑宽度的变化主要是由于垂直于磨抛运动方向上磨粒轨迹间相互叠加有关,叠加程度越高,磨屑的宽度越细。

## 参考文献(References):

- [1] CHAI H, HUANG Y, ZHAO Y, et al. Experimental research on the abrasive belt grinding titanium alloy blade of aviation engine[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 565: 64—69.
- [2] DE SOUZA RUZZI R, DE PAIVA R L, DA SILVA L R R, et al. Comprehensive study on Inconel 718 surface topography after grinding[J]. *Tribology International*, 2021, 158: 1—10.
- [3] 陈珍珍, 徐九华, 丁文锋, 等. 磨粒有序多孔立方氮化硼砂轮高效磨削高温合金烧伤研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2014, 34(3): 10—15.  
CHEN Zhen-zhen, XU Jiu-hua, DING Wen-feng, et al. Grinding burn in high-efficiency grinding superalloy using porous CBN wheel with multilayer defined grain pattern[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2014, 34(3): 10—15.
- [4] 王西彬, 任敬心. 金刚石磨粒几何形状及砂轮浓度对砂轮磨削特性影响的研究[J]. *磨料磨具与磨削*, 1994, 14(5): 5—9.  
WANG Xi-bin, Ren Jing-xin. Effect on the grinding performances of diamond wheel by the geometry and the

- concentration of diamond grits in the wheel[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 1994, 14(5): 5—9.
- [5] PAL B, CHATTOPADHYAY A K, CHATTOPADHYAY A B. Performance study of brazed type cBN grinding wheel on hardened bearing steel and high speed steel[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13(5): 649—654.
- [6] YU H, LYU Y, WANG J, et al. A biomimetic engineered grinding wheel inspired by phyllotaxis theory[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 251: 267—281.
- [7] AURICH J C, HERZENSTIEL P, SUDERMANN H, et al. High-performance dry grinding using a grinding wheel with a defined grain pattern[J]. *CIRP Annals*, 2008, 57(1): 357—362.
- [8] 张钰奇. 磨粒有序排布金刚石砂轮研制及其性能分析[D]. 焦作: 河南理工大学, 2020.  
ZHANG Yu-qi. Development and performance analysis of orderly arranged abrasive diamond wheels[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2020.
- [9] 李瑞昊, 石广慧, 黄辉. 磨粒有序排布曲面砂轮设计及磨削性能实验研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2021, 41(4): 58—63.  
LI Rui-hao, SHI Guang-hui, HUANG Hui. Experimental research on design and performance of curved grinding wheels with orderly arrangement of abrasive grains[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2021, 41(4): 58—63.
- [10] 张晓芳. 超声辅助砂带磨削铝合金仿真与实验研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2016.  
ZHANG Xiao-fang. Simulation and experimental study on ultrasonic-assisted belt grinding of aluminum alloy[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2016.
- [11] 蓝善超. 基于单颗粒磨削的电镀 CBN 砂轮磨削窄深槽的特性分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.  
LAN Shan-chao. Characteristic analysis of grinding narrow-and-deep slop with electroplated CBN grinding wheel based on single abrasive grain grinding[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [12] 王懋林. 超高速磨削材料去除机理的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.  
WANG Mao-lin. Study on material removal mechanism of ultra-high-speed grinding[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [13] 余剑武, 肖清, 罗红, 等. 单颗 CBN 磨粒磨削 20CrMo 的微观成屑过程研究[J]. *材料导报*, 2017, 31(10): 146—150.  
YU Jian-wu, XIAO Qing, LUO Hong, et al. Research on micro chip formation process of 20CrMo by single CBN grain grinding[J]. *Materials Review*, 2017, 31(10): 146—150.
- [14] 苏国胜. 高速切削锯齿形切屑形成过程与形成机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.  
SUGuo-sheng. Evolution and mechanisms of saw-tooth chip formation in high-speed machining[D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [15] 刘伟. 基于单颗磨粒切削的氮化硅陶瓷精密磨削仿真与实验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.  
LIU Wei. Simulation and experiment study of the precision grinding of silicon nitride ceramic based on single grain cutting[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [16] 梁巧云, 单坤, 李兆瑞, 等. 航发钛合金叶片金刚石砂带磨削的磨粒磨损研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2020, 40(4): 59—64.  
LIANG Qiao-yun, SHAN Kun, LI Zhao-rui, et al. Investigation of grain wear in diamond abrasive belt grinding titanium alloy blade for aeroengine[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2020, 40(4): 59—64.
- [17] 李建明, 王相宇, 乔阳, 等. 液氮冷却低温切削镍基合金 Inconel 718 的试验与仿真[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(18): 61—72.  
LI Jian-ming, WANG Xiang-yu, QIAO Yang, et al. Experiment and simulation research on cryogenic cutting of Inconel 718[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(18): 61—72.
- [18] JAFARIAN F, IMAZ CIARAN M, UMBRELLO D, et al. Finite element simulation of machining Inconel 718 alloy including microstructure changes[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, 88: 110—121.
- [19] LIU C, DING W, YU T, et al. Materials removal mechanism in high-speed grinding of particulate reinforced titanium matrix composites[J]. *Precision Engineering*, 2018, 51: 68—77.
- [20] LONG Y, GUO C S, RANGANATH S, et al. Multi-phase FE model for machining Inconel 718[C]//Proceedings of ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2011: 263—269.
- [21] ZHANG F L, LI M C, WANG J, et al. Effect of arraying parameters on dry grinding performance of patterned monolayer brazed CBN wheel[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107(5): 2081—2089.
- [22] KALISZER H. Grinding technology. theory and applications of machining with abrasives[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1991, 31(3): 435—436.

责任编辑:陈芳