

# 镍基单晶高温合金磨削表面质量及亚表面 微观组织试验

蔡 明, 巩亚东, 屈硕硕, 杨玉莹

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 采用正交试验的方法,研究了镍基单晶高温合金 DD5 表面质量影响因素和亚表面微观组织. 进行 DD5 平面槽磨削正交试验,得到砂轮线速度、磨削深度和进给速度对表面质量的影响规律,优选出最优工艺参数组合,并对磨削亚表面微观组织和磨屑形貌进行观察. 结果表明:砂轮线速度对磨削表面粗糙度  $R_a$  影响最大;随着砂轮线速度的增大,表面粗糙度  $R_a$  不断减小;随着磨削深度和进给速度的增大,表面粗糙度  $R_a$  不断增大. 选出的镍基单晶高温合金 DD5 平面磨削试验参数范围内的最优工艺参数组合:砂轮线速度为 30 m/s,磨削深度为 20  $\mu\text{m}$ ,进给速度为 0.2 m/min. 磨削亚表面出现了塑性变形层和加工硬化层. 磨屑主要呈现出一节一节的锯齿状特征.

**关 键 词:** 镍基单晶高温合金 DD5;磨削;表面质量;正交试验;亚表面;磨屑

中图分类号: TH 161

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2019)03-0386-06

## Experiment of Grinding Surface Quality and Subsurface Microstructure for Nickel-Based Single Crystal Superalloy

CAI Ming, GONG Ya-dong, QU Shuo-shuo, YANG Yu-ying

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: GONG Ya-dong, E-mail: gongyd@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The orthogonal experiments were conducted to carry out the research of surface quality influential factors for nickel-based single crystal superalloy DD5 and subsurface microstructure in grinding. The orthogonal experiment of DD5 plane slot grinding was conducted. The influence of grinding wheel linear speed, grinding depth and feed rate on grinding surface quality was concluded, and the optimized parameters combination was also selected. The grinding subsurface microstructure and debris morphology were observed then. The results show that: the grinding wheel linear speed has the greatest influence on the grinding surface roughness  $R_a$ ; with the increase of grinding wheel linear speed, the grinding surface roughness  $R_a$  decreases; with the increase of grinding depth and feed rate, the grinding surface roughness  $R_a$  increases. The optimized parameters combination of nickel-based single crystal superalloy DD5 within the experimental parameters in plane grinding is as the following: grinding wheel linear speed is 30m/s, grinding depth is 20  $\mu\text{m}$  and feed rate is 0.2 m/min. The plastic deformation layer and the machined hardening layer appear on the grinding subsurface. The grinding debris mainly presents the serrated features.

**Key words:** nickel-based single crystal superalloy DD5; grinding; surface quality; orthogonal experiment; subsurface; grinding debris

磨削加工被公认为是能够产生最好的表面质量和最小的尺寸误差的主要机械加工方法之一,

一般作为机械加工的最后一道工序,用于生成零件的最终工作表面.单晶材料结晶取向一致,因此其位错较少,杂质原子等微观缺陷也相对较少,机械性能较好,与其他晶体材料相比具有良好的拉伸、剪切强度和延展性<sup>[1]</sup>.本文所研究的 DD5 材料是一种镍基单晶高温合金,其是航空发动机和燃气轮机叶片的重要材料,整个材料只有一个晶粒,消除了易产生裂纹源的晶界,使得其高温力学性能得到明显提高.鉴于磨削加工能够获得良好的表面质量,将其应用到单晶材料的加工工艺上,是解决现有单晶零件机械加工方法产生相对较差表面质量的有效途径之一.

国内外的研究机构和学者对镍基高温合金的磨削加工工艺开展了一些研究,但对镍基单晶高温合金宏观尺度的磨削加工工艺研究还鲜有报道.周云光等<sup>[2]</sup>对镍基高温合金 K445 微磨削表面质量进行试验研究,通过极差分析法得到影响其表面质量的主次因素,并总结出进给速度、磨削深度、主轴转速及微磨棒悬伸量对其表面质量的影响规律,优化出镍基高温合金 K445 微磨削的理想工艺参数组合.黄新春等<sup>[3]</sup>对镍基高温合金 GH4169 进行磨削表面完整性研究,得到磨削参数对表面粗糙度、表面形貌、表面显微硬度及表面残余应力等表面特征的影响规律.Zhou 等<sup>[4]</sup>对镍基单晶高温合金 DD98 微尺度磨削表面质量及亚表面再结晶进行试验研究.Gong 等<sup>[5]</sup>对镍基单晶高温合金微磨削力及亚表面微观组织结构进行试验研究.Aspinwall 等<sup>[6]</sup>采用电镀 CBN 砂轮对镍基高温合金进行磨削试验,成功获得了表面粗糙度  $R_a$  为 750 nm 的加工表面.Yao 等<sup>[7]</sup>对比了陶瓷结合剂的  $Al_2O_3$  砂轮和 CBN 砂轮对镍基高温合金 Inconel718 磨削加工工艺过程的影响.Zhao 等<sup>[8]</sup>采用单层电镀 CBN 砂轮对定向凝固高温合金 DZ125 进行成型磨削工艺研究,并获得了较高精度的成形轮廓.Jin 等<sup>[9]</sup>通过试验研究了切削速度对镍基高温合金 FGH95 表面完整性的影响.Chen 等<sup>[10]</sup>采用 CBN 砂轮对镍基高温合金 Inconel718 进行高效磨削温度试验研究.

针对镍基单晶高温合金在航空航天和国防等领域越来越广泛的应用前景,对镍基单晶高温合金 DD5 磨削表面质量及亚表面微观组织进行试验研究.首先对镍基单晶高温合金 DD5 磨削去除过程进行分析,并利用正交试验的方法对 DD5 进行磨削加工,分析砂轮线速度、磨削深度、进给速度对其表面质量的影响规律,优选出合理的磨削工艺方案;然后对磨削后的亚表面微观组织和磨

屑形貌进行观察和分析;最后得出研究结论.

# 1 DD5 磨削去除过程

镍基单晶高温合金 DD5 磨削加工过程中,砂轮中的磨粒在工件表面上的切削加工过程可分为三个阶段(见图 1),分别为引起弹性变形的滑擦阶段、引起塑性变形的耕犁阶段和形成切屑的切削阶段.滑擦阶段中,磨粒与工件表面接触而未切入工件,仅在工件表面产生摩擦作用并产生弹性变形,工件表层产生热应力.耕犁阶段中,随着磨粒切入量逐渐增大,磨粒逐渐切入工件,使得磨粒切入部分的材料向两旁隆起,工件表面形成刻痕并产生塑性变形,磨粒与工件间挤压摩擦作用加剧,磨削热显著增加.切削阶段中,磨粒已经切入工件一定深度,被切工件处也已经达到一定温度,该部分材料就会沿着剪切面产生滑移而形成切屑,并在工件表层产生热应力和变形应力.

滑擦、耕犁和切削是磨削加工中磨削区的三种微观交互作用.滑擦和耕犁是以摩擦为主的微观交互作用,而切削的加工机理与普通车削、铣削等加工方法相似.滑擦的本质是工件表面改性过程,耕犁的本质是材料位移过程,切削的本质是材料去除过程.

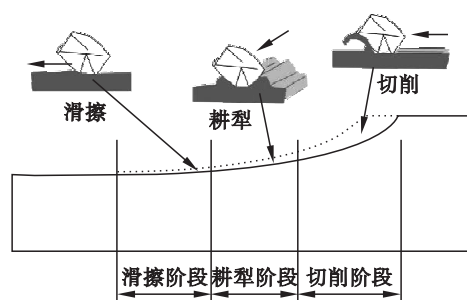


图 1 DD5 磨削去除过程  
Fig. 1 Grinding removal process of DD5

# 2 DD5 磨削表面质量正交试验

## 2.1 试验条件

试验的加工设备采用 2M9120 多用磨床,如图 2a 所示;试验的检测设备采用 VHX-1000E 超景深显微镜、Micromasure 三维轮廓仪、LEXT OLS4100 共聚焦显微镜以及 Ultra Plus 场发射扫描电镜,分别如图 2b~图 2e 所示;试验的砂轮采用直径为 180 mm 的 CBN 砂轮,其粒度为 180#,砂轮宽度为 5 mm,砂轮厚度为 5 mm,结合剂为树脂,体积分数为 100%;试验的材料采用在航空航

天和国防等领域应用广泛的镍基单晶高温合金 DD5,其沿(001)晶面中的 $\langle 110 \rangle$ 晶向生长,其金相组织如图 2f 所示。

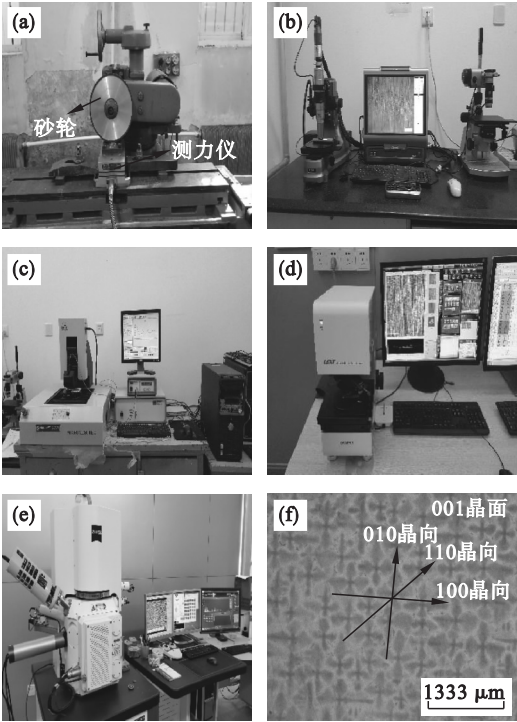


图 2 试验条件

Fig. 2 Experimental conditions

(a)—2M9120 多用磨床; (b)—VHX - 1000E 超景深显微镜; (c)—Micromesure 三维轮廓仪; (d)—LEXT OLS4100 共聚焦显微镜; (e)—Ultra Plus 场发射扫描电镜; (f)—DD5 金相组织。

2.2 试验方案

试验采用三因素四水平  $L_{16}(4^3)$  正交平面槽磨削的方法,分别探究砂轮线速度  $v_s$ 、磨削深度  $a_p$  和进给速度  $v_f$  对镍基单晶高温合金 DD5 磨削表面质量以及亚表面微观组织的影响. 正交试验设计方案如表 1 所示。

2.3 试验结果及分析

根据已选定的砂轮线速度、磨削深度和进给速度三个因素及其四个水平对镍基单晶高温合金 DD5 进行正交平面槽磨削试验. 通过 LEXT OLS4100 共聚焦显微镜对每组试验中工件的表面粗糙度  $R_a$  测量 5 次并取平均值,结果如表 1 所示;通过 VHX - 1000E 超景深显微镜观察其磨削加工后的表面形貌;通过 Micromesure 三维轮廓仪获得其磨削加工后的表面三维轮廓. DD5 平面磨削正交试验结果如表 2 所示,正交试验的极差图和方差图见图 3。

其中  $K_{ij}$  为各水平对应的表面粗糙度  $R_a$  之和,  $R$  为正交试验的极差,  $V$  为正交试验的方差。

表 1 镍基单晶高温合金 DD5 平面磨削正交试验方案设计

Table 1 Scheme of orthogonal plane grinding experiment of nickel-based single crystal superalloy DD5

试验 编号	$v_s$ $m \cdot s^{-1}$	$a_p$ $\mu m$	$v_f$ $m \cdot min^{-1}$	表面粗糙度 $R_a$ $\mu m$
1	15	20	0.2	1.05
2	20	40	0.2	0.94
3	25	60	0.2	0.86
4	30	80	0.2	0.80
5	20	20	0.4	1.00
6	15	40	0.4	1.10
7	30	60	0.4	0.88
8	25	80	0.4	0.90
9	25	20	0.6	0.87
10	30	40	0.6	0.78
11	15	60	0.6	1.06
12	20	80	0.6	1.18
13	30	20	0.8	0.85
14	25	40	0.8	0.97
15	20	60	0.8	1.04
16	15	80	0.8	1.25

表 2 正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal experiment

试验结果	$v_s$	$a_p$	$v_f$
$K_{1j}$	4.46	3.77	3.65
$K_{2j}$	4.16	3.79	3.88
$K_{3j}$	3.60	3.84	3.89
$K_{4j}$	3.31	4.13	4.11
$R$	1.15	0.36	0.46
$V$	0.068 2	0.007 0	0.008 8

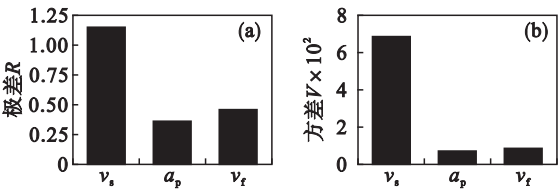


图 3 正交试验极差图和方差图

Fig. 3 Range and variance diagram of the orthogonal experiment

(a)—极差图; (b)—方差图。

从图 3 中可以看出,砂轮线速度的极差和方差最大,进给速度其次,磨削深度最小,因此,镍基单晶高温合金 DD5 磨削加工过程中,各工艺参数对磨削表面粗糙度  $R_a$  影响的主次顺序为:砂轮线速度 > 进给速度 > 磨削深度. 故合理选择砂轮线速度对有效控制磨削加工镍基单晶高温合金



DD5 的表面质量十分重要。

根据正交试验结果,分别绘制砂轮线速度、磨削深度和进给速度三个因素对其表面粗糙度  $R_a$  的影响规律曲线,分别如图 4a ~ 图 4c 所示,并分析表面粗糙度  $R_a$  变化的原因。

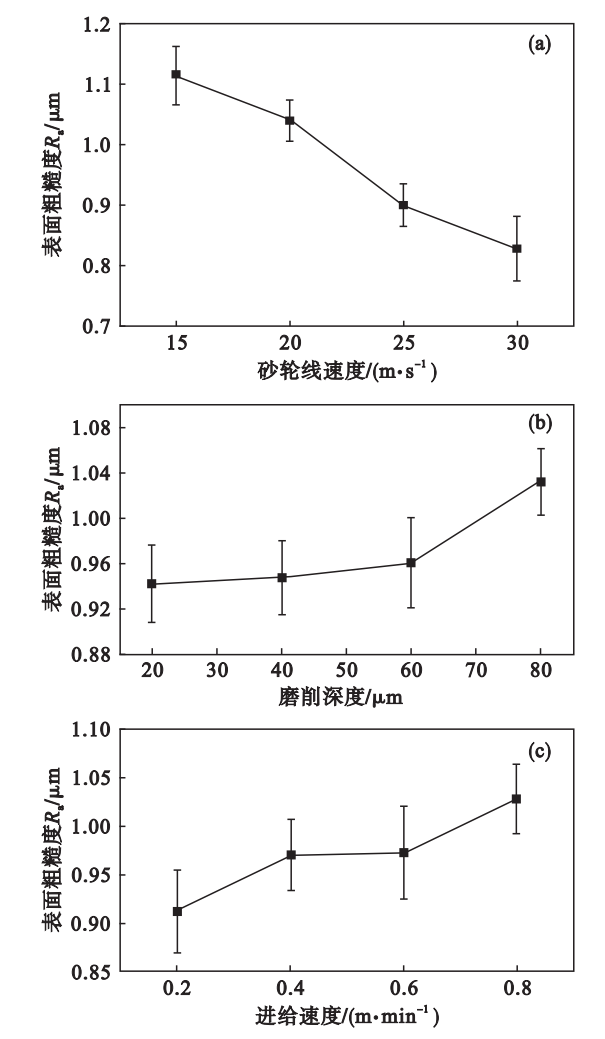


图4 各因素对磨削表面质量的影响  
Fig. 4 Influence of each factor on grinding surface quality

(a) —砂轮线速度; (b) —磨削深度; (c) —进给速度。

从图 4a 中可以看出,随着砂轮线速度的增大,表面粗糙度  $R_a$  不断减小. 分析其原因:随着砂轮线速度的不断提高,单位时间内参与磨削过程的磨粒数增加,使得单颗磨粒未变形切屑厚度减少,工件表面的塑性变形作用减弱,此时的塑性变形传播速度小于砂轮线速度,工件材料还未变形就被磨粒去除,磨屑瞬间被磨粒切离磨削加工区域,绝大部分磨削热被切屑带走,磨削力大大减小,表面粗糙度  $R_a$  减小. 在实际磨削加工中,可适当提高砂轮线速度,这样可以获得更好的表面质量. 镍基单晶高温合金 DD5 不同砂轮线速度下的磨削表面形貌以及表面三维轮廓如图 5 所示. 从

图 5 中可以看出,当砂轮线速度较小时,磨削后的表面质量较差,磨削表面凹凸不平,当砂轮线速度增大时,磨削后的表面质量有所改善,磨削纹路相对清晰。

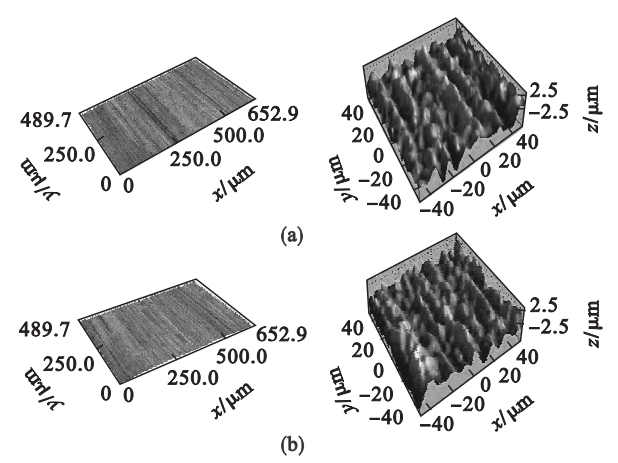


图5 DD5 不同砂轮线速度下的磨削表面形貌  
Fig. 5 Surface morphology of nickel-based single crystal superalloy DD5 with different grinding wheel linear speed  
(a) —砂轮线速度为 15 m/s; (b) —砂轮线速度为 30 m/s.

由图 4b 可知,随着磨削深度的增大,表面粗糙度  $R_a$  不断增大. 分析其原因:随着磨削深度的不断增大,单颗磨粒未变形切屑厚度增大,工件表面的塑性变形作用增强,磨削力增大且磨削温度升高,导致砂轮排屑困难,当磨削深度较大时,磨削表面出现一定的磨削烧伤,使得磨削表面质量较差。

从图 4c 可知,随着进给速度的增大,表面粗糙度  $R_a$  不断增大. 分析其原因:随着进给速度的不断增大,磨削效率不断提高,但磨削力也会显著增大,导致砂轮排屑困难,随着磨屑的堆积,磨屑黏附在砂轮的磨粒上,造成砂轮堵塞,影响磨削加工材料的去除,磨削表面质量变差。

## 2.4 试验工艺参数的优选

根据镍基单晶高温合金 DD5 砂轮线速度、磨削深度和进给速度的表面质量正交试验,选出镍基单晶高温合金 DD5 平面磨削试验参数范围内的最优工艺参数组合:砂轮线速度为 30 m/s,磨削深度为 20  $\mu\text{m}$ ,进给速度为 0.2 m/min. 经试验验证,此时的磨削表面粗糙度  $R_a$  平均值最小为 0.74  $\mu\text{m}$ ,即磨削表面质量最好。

## 3 DD5 磨削亚表面微观组织

### 3.1 研究方法

采用 GF 慢走丝电火花线切割机床将加工好

的试验工件切割成宽度为 1 mm 的亚表面试样,在镶样机上进行镶样后,对亚表面试样进行打磨和抛光,最后对亚表面试样进行腐蚀处理. 腐蚀液成分为  $V_{\text{甘油}}:V_{\text{氢氟酸}}:V_{\text{硝酸}}=4:2:1$ ,腐蚀时间为 32 s. 采用 LEXT OLS4100 共聚焦显微镜、VHX-1000E 超景深显微镜和 Ultra Plus 场发射扫描电镜对处理后的亚表面试样进行观察.

3.2 研究结果

通过 LEXT OLS4100 共聚焦显微镜和 VHX-1000E 超景深显微镜观察的 DD5 磨削后的亚表面微观组织如图 6 所示,放大倍数分别为 200 倍和 500 倍. 从图 6a 中可以看出,镍基单晶高温合金 DD5 材料(001)晶面的磨削亚表面具有典型的枝晶筏排组织结构且排列规则,DD5 的高温蠕变导致枝晶筏排组织和白色  $r/r'$  共晶相的形成. 镍基单晶高温合金由基体  $r$  相和沉淀相  $r'$  相组成, $r'$  相均匀地镶嵌在基体  $r$  相中,其体积分数约为 70%. 从图 6b 中可以看出,亚表面枝晶间析出白色  $r/r'$  共晶相,经分析该共晶相为 Ni-Al 相.

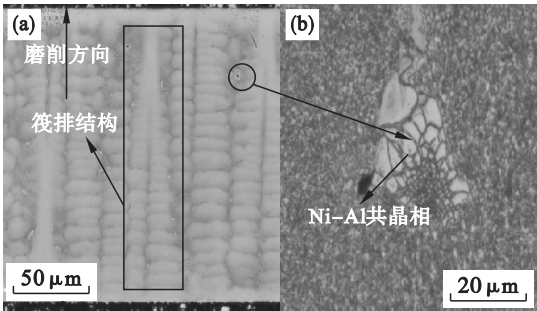


图 6 磨削亚表面微观组织  
Fig. 6 Grinding subsurface microstructure  
(a)—放大 200 倍; (b)—放大 500 倍.

为了进一步研究镍基单晶高温合金 DD5 磨削亚表面的性质,采用 Ultra Plus 场发射扫描电镜对其亚表面进行观察. 当砂轮线速度为 30 m/s,磨削深度为 20 μm,进给速度为 0.2 m/min 时,从图 7 中可以看出,磨削亚表面出现了约 2 μm 的塑性变形层,在该塑性变形层中的  $r$  相和  $r'$  相发生较严重的扭曲,且沉淀相  $r'$  相均匀地镶嵌在基体  $r$  相中. 在磨削表面和塑性变形层之间出现了约 0.5 μm 的加工硬化层.

在镍基单晶高温合金 DD5 中,不同晶面和晶向的原子排布不均匀,在切应力的作用下,晶体的一部分相对于另一部分沿着一定的晶面和晶向产生相对位移,此时产生滑移. 当磨削产生的应力超过材料自身的弹性极限时,层片之间产生相对位

移,不断累积下来就形成了宏观的塑性变形. 当其受力过大而产生塑性变形时,就会导致层与层之间产生位错,一般位错会沿着密排面和密排方向产生. 普通多晶材料的磨削加工是被加工材料沿着晶体中的晶界进行滑移,而镍基单晶高温合金 DD5 的磨削加工则是被加工材料沿着其所产生的位错进行滑移,两者在加工机理上有着本质的区别.

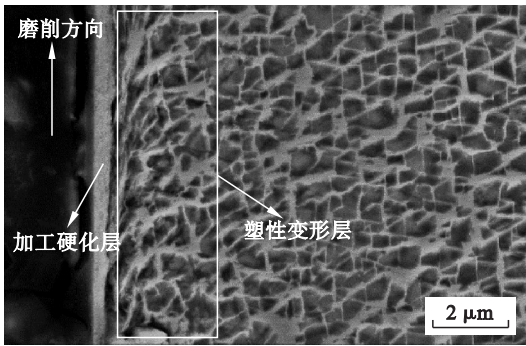


图 7 场发射扫描电镜下磨削亚表面微观组织  
Fig. 7 Grinding subsurface microstructure under scanning electron microscope

随着金属材料塑性变形程度的增加,金属材料的强度和硬度提高,但塑性和韧性降低,此时金属材料产生加工硬化现象. 其产生的原因是:金属在塑性变形时,晶粒发生滑移,出现位错的缠结,使晶粒拉长、破碎和纤维化,金属内部产生了残余应力等. 镍基单晶高温合金 DD5 的磨削加工过程中产生了一定的加工硬化现象,但金属材料的加工硬化现象会为其进一步加工带来困难,因此在实际生产过程中应合理调整加工工艺来适当减少加工硬化现象.

4 DD5 磨削加工中磨屑形貌

在 2M9120 多用磨床的工作台上安装磨屑收集盒,用以对磨削加工产生的磨屑进行收集,并在 Ultra Plus 场发射扫描电镜下观察其形貌,放大倍数分别为 500 倍和 1 050 倍,如图 8 所示.

磨屑与磨粒的接触表面光滑平整,磨屑的另一表面为自由表面,与磨屑接触表面相比,自由表面具有不连续的特点,表现出一节一节的锯齿状特征. 这表明在磨削过程中,金属材料由于受到高速运动的磨粒作用而发生剧烈的剪切滑移变形,而剪切滑移变形主要集中在节与节之间很窄的区域,节块内部的塑性变形则很小. 在锯齿状磨屑形成过程中,剪切带在主剪切区内形成后便开始扩展,它在被磨屑流带出主剪切区前演化到一个特

定的程度. 正是由于剪切带的演化, 磨屑自由表面上的剪切前缘面才变得明显起来, 这也使得磨屑在宏观上呈现出锯齿状的表面形貌特征.

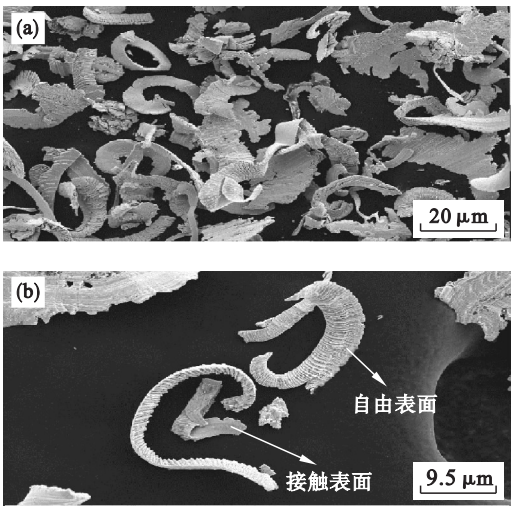


图 8 场发射扫描电镜下磨屑形貌  
Fig. 8 Grinding debris morphology under scanning electron microscope  
(a)—放大 500 倍; (b)—放大 1 050 倍.

## 5 结 论

- 1) 通过镍基单晶高温合金 DD5 平面槽磨削正交试验, 得到了砂轮线速度、磨削深度和进给速度三个因素对磨削表面质量的影响规律. 结果表明, 砂轮线速度对磨削表面粗糙度  $R_a$  影响最大, 随着砂轮线速度的增大, 表面粗糙度  $R_a$  不断减小; 随着磨削深度的增大, 表面粗糙度  $R_a$  不断增大; 随着进给速度的增大, 表面粗糙度  $R_a$  不断增大.
- 2) 通过上述正交试验, 选出的镍基单晶高温合金 DD5 平面磨削试验参数范围内的最优工艺参数组合: 砂轮线速度为 30 m/s, 磨削深度为 20  $\mu\text{m}$ , 进给速度为 0.2 m/min. 经试验验证, 此时磨削表面粗糙度  $R_a$  最小, 即磨削表面质量最好.
- 3) 对 DD5 磨削后的亚表面进行观察, 结果表明, 磨削亚表面出现了塑性变形层和加工硬化层, 且塑性变形层中的  $r$  相和  $r'$  相发生了较严重的扭曲.

- 4) 对 DD5 磨削加工过程中产生的磨屑进行观察. 结果表明, 其主要呈现出一节一节的锯齿状特征.

## 参考文献:

[1] 蔡明, 巩亚东, 于宁, 等. 单晶 DD98 微尺度铣削表面质量试验研究[J]. 中国机械工程, 2017, 28(11): 1261 – 1265.  
(Cai Ming, Gong Ya-dong, Yu Ning, et al. Experimental study on surface quality of single crystal DD98 in micro-milling processes[J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28(11): 1261 – 1265.)

[2] 周云光, 巩亚东, 温雪龙, 等. 高温合金 K445 微磨削表面质量实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(2): 218 – 221.  
(Zhou Yun-guang, Gong Ya-dong, Wen Xue-long, et al. Experimental study on surface quality in micro-grinding of superalloy K445 [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2016, 37(2): 218 – 221.)

[3] 黄新春, 张定华, 姚倡锋, 等. 镍基高温合金 GH4169 磨削参数对表面完整性影响[J]. 航空动力学报, 2013, 28(3): 621 – 628.  
(Huang Xin-chun, Zhang Ding-hua, Yao Chang-feng, et al. Effects of grinding parameters on surface integrity of GH4169 nickel-based superalloy [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(3): 621 – 628.)

[4] Zhou Y G, Gong Y D, Cai M, et al. Study on surface quality and subsurface recrystallization of nickel-based single-crystal superalloy in micro-grinding [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(6): 1749 – 1768.

[5] Gong Y D, Zhou Y G, Wen X L, et al. Experimental study on micro-grinding force and subsurface microstructure of nickel-based single crystal superalloy in micro grinding [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(7): 3397 – 3410.

[6] Aspinwall D K, Soo S L, Curtis D T, et al. Profiled superabrasive grinding wheels for the machining of a nickel based superalloy [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2007, 56(1): 335 – 338.

[7] Yao C F, Jin Q C, Huang X C, et al. Research on surface integrity of grinding Inconel718 [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 65(7): 1019 – 1030.

[8] Zhao Z C, Fu Y C, Xu J H, et al. An investigation on high-efficiency profile grinding of directional solidified nickel-based superalloys DZ125 with electroplated CBN wheel [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(1): 1 – 11.

[9] Jin D, Liu Z Q, Yi W, et al. Influence of cutting speed on surface integrity for powder metallurgy nickel-based superalloy FGH95 [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 56(6): 553 – 559.

[10] Chen Z Z, Xu J H, Ding W F, et al. Grinding temperature during high-efficiency grinding Inconel 718 using porous CBN wheel with multilayer defined grain distribution [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 77(1): 165 – 172.