

单晶镍基高温合金 DD98 微铣削表面质量试验

高 奇^{1,2}, 巩亚东¹, 周云光¹, 温雪龙¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁工业大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 锦州 121001)

摘 要: 为研究单晶高温合金的微铣削表面质量,使用 M. A. FORD 双刃端铣刀,刀刃直径为 0.8 mm,试验材料为单晶高温合金 DD98,完成正交试验研究. 通过极差分析找出主轴转速、进给速度、铣削深度对微铣削表面质量影响的主次因素,即主轴转速的影响最大,铣削深度其次,进给速度最小;采用统计学知识,获得切削工艺参数的优化组合,使表面粗糙度最小,即主轴转速为 $n = 3.6 \text{ kr/min}$,铣削深度为 $a_p = 5 \text{ }\mu\text{m}$,进给速度为 $v = 100 \text{ }\mu\text{m/s}$,对此优化方案重复试验,表面粗糙度值为 951 nm. 并对其切削机理和影响表面质量及形貌的原因进行深入的分析,对单晶高温合金的微加工理论的机理揭示具有一定的指导意义.

关 键 词: 微铣削;单晶;镍基高温合金;表面粗糙度;DD98

中图分类号: TH 161 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)03-0385-05

Experiment on Surface Quality in Micro-milling of Single Crystal Ni-Based Superalloy DD98

GAO Qi^{1,2}, GONG Ya-dong¹, ZHOU Yun-guang¹, WEN Xue-long¹

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

2. School of Mechanical Engineering & Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China.

Corresponding author: GAO Qi, E-mail: qqonline@163.com)

Abstract: To study the micro-milling surface quality of single crystal superalloy, orthogonal experiment was implemented for micro-milling of single crystal Ni-based superalloy DD98 by using the M. A. FORD two-edged micro-milling tool with 0.8 mm diameter. The primary and secondary impacting factors on the micro-milling surface quality, such as spindle speed, feed rate and milling depth were analyzed by range analysis. The results show that the influence of spindle speed is the greatest, the milling depth is the secondary, while the feed rate is the smallest. Using statistical theory, the ideal cutting process parameters was optimized and obtained, i. e., 3.6 kr/min speed spindle, 5 μm milling depth and 100 $\mu\text{m/s}$ feed rate. The surface roughness is minimum under the above combination condition. The experiments were repeatedly done with the optimized scheme to get a surface roughness (R_a) of 951 nm. The cutting mechanism, the reasons of affecting surface quality and morphology were further analyzed. The experiment result may provide some reference for micro-milling mechanism of single crystal superalloy.

Key words: micro-milling; single crystal; Ni-based superalloy; surface roughness; DD98

DD98 是我国自主研发成功的 Ni - Cr - Co - Mo - W - Al - Ta 系新型无 Re、耐高温、低成本单晶镍基高温合金^[1],单晶材料消除了垂直主应力轴的横向晶界,力学分散性能最小,其抗氧化性能、热疲劳性能和蠕变性能等较为优越,满足苛刻条件下的大载荷、高温、应力复杂的工况,

广泛应用于微涡轮叶片、微航空发动机热端关键零部件的制备,属于典型的不易切削材料,力学性能主要表现在:塑性变形大、切削温度高、刀具易磨损、加工硬化严重等.

微铣削是指用微型铣刀对微小零部件进行精密铣削的加工技术,微型铣刀直径通常小于

1 mm^[2]. 通过大量的试验证明:微铣削在切削条件、系统的刚度、切削用量等方面与传统铣削原理差异较大. 只有通过合适的铣削方式、切削参数和工艺条件,零部件的表面质量及精度才会得以保证^[3]. 国内外学者对单晶材料的研究主要集中在脆性材料硅的微磨削、软材料单晶铜、单晶铝的微铣削等^[4-5]. Sato 等^[6]在对单晶铝合金进行微切削的试验研究中提出了由切削刃刃圆半径产生的尺度效应,为提升切削质量,应力求实现塑性材料去除;Lucca 等^[7-8]在微切削小切深的试验中发现工件受尺度效应影响明显,揭示了犁耕和划擦的产生机理. 微铣削过程中,去除特征较小,与产生毛刺尺寸接近, Damazo 等^[9]和 Schaller 等^[10]在多种金属材料的微切削试验中提出微毛刺模型,并提出了如何抑制和降低微毛刺的方法. 对于单晶高温合金的微铣削在国内尚未见报道. 试验加工系统中的振动、系统刚度等相关因素,同样影响表面质量. 本文针对单晶镍基高温合金 DD98 的微铣削进行正交试验,通过统计学方法,采用不同的切削参数完成铣槽试验,优化微铣削加工工艺方案,探讨单晶材料的微铣削机理,重点研究切削用量对表面质量、形貌的影响,获得较好的零件加工质量.

1 试验条件

1.1 试验设备

微铣削加工机床为巨蟹精密加工精雕机,定位精度 0.006 mm,重复定位精度 0.005 mm,对刀精度 0.002 mm,主轴转速为 3 000 ~ 60 000 r/min,如图 1a 所示;微测量三维轮廓仪利用扫描白光干涉法对已加工工件的表面粗糙度进行测量,并生成该工件的三维轮廓形貌图,如图 1b 所示;采用 DH-5920N 动态信号测试分析仪实现三个方向力及振动的采集和检测;表面质量形貌采用日本基恩士公司设计制造的 VHX-1000E 超景深显微镜观察,如图 1c 所示.

1.2 试验材料

试验采用 M. A. FORD 双刃端铣刀,刀刃直径为 0.8 mm,其螺旋角为 30°,前角 7.5°,后角 4.5°,切削刃圆弧半径为 1.02 μm,如图 1d 所示.

切削刃圆弧半径测量采用图 2 所示超景深显微镜动态观察,将微铣刀放置在显微镜工作平台上方,多次调试位置,通过显微镜标尺测定其圆弧半径为 1.02 μm. 由于采用手工摆放,在测量精度上会有 ±0.03 μm 的误差,如图 2 所示.

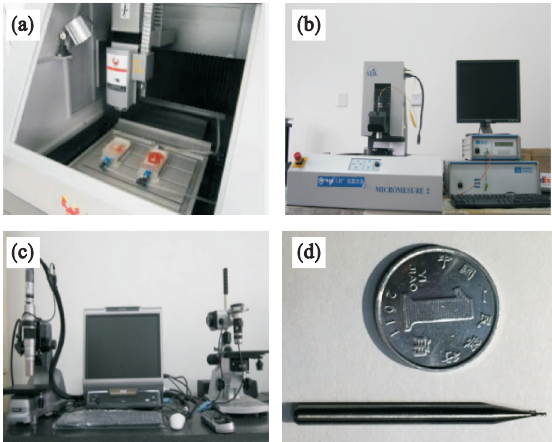


图 1 试验条件

Fig. 1 Experiment conditions

(a) — 巨蟹精雕机; (b) — 三维轮廓仪;
(c) — 超景深显微镜; (d) — 微铣刀.

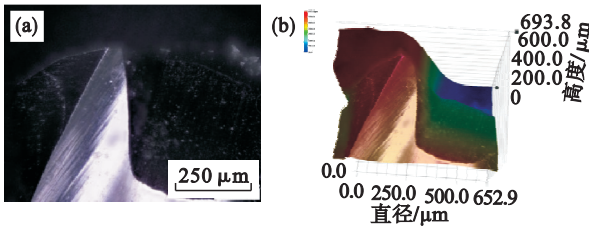


图 2 切削刃圆弧半径测量

Fig. 2 Cutting edge arc radius measurement

(a) — 切削刃显微镜成像; (b) — 切削刃显微镜测定.

DD98 的微观二相结构由金属 Ni 基体和析出的中间相 Ni₃Al 组成,均匀分布在基体相中间,其金相组织中只有一个晶粒而没有晶界. 如图 3 所示,由于单晶材料极其昂贵,为提高利用率,通过线切割棒材,沿[001]晶向切割成长条状,去除硬化层,便于试验槽铣削加工.

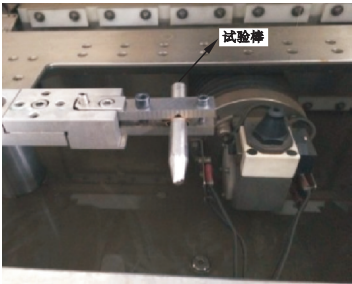


图 3 WEDM 试验棒料

Fig. 3 WEDM experiment bar

2 试验结果与讨论

2.1 微铣削试验数据

试验设计为三因素五水平正交试验,三因素即对表面质量产生影响的切削参数:主轴转速、铣

削深度、进给速度,如表 1 所示.受极小的微铣刀刀圆半径带来的尺寸效应影响,要实现单晶材料的高速、高效的精密加工,需通过提高主轴转速来提升切削速度,主轴转速参数选定为(单位:kr/min): $n_1 = 1.2, n_2 = 2.4, n_3 = 3.6, n_4 = 4.2, n_5 = 4.8$;由于刀具刃径刚度较小,在大铣削深度的情况下,产生的切削热带来主要影响,加速刀具的磨损及刀尖的钝化,致使加工质量剧烈下降,无法满足试验要求,为提升刀具寿命,保证切削质量,应该选择较小的切削深度,铣削深度参数选定为(单位: μm): $a_{p1} = 5, a_{p2} = 8, a_{p3} = 10, a_{p4} = 12, a_{p5} = 15$;同样原因,为考察最小切削厚度对表面质量的影响,进给速度的选择需要在满足能够观测出由耕犁到塑性去除的范围内选取,进给速度参数选定为(单位: $\mu\text{m}/\text{s}$): $v_1 = 20, v_2 = 40, v_3 = 60, v_4 = 80, v_5 = 100$.依据正交试验设定 25 组槽铣削参数,采用图 1c 设备观测微槽表面质量及形貌,测定沟槽底面的表面粗糙度 R_a 如表 1 所示.

表 1 单晶 DD98 试验数据
Table 1 Experimental data of the single crystal DD98

| 试验 编号 | n | a_p | v | R_a |
|----------|-------|----------|-------|---------------|
| | | | | μm |
| 1 | n_1 | a_{p1} | v_1 | 1.09 |
| 2 | n_1 | a_{p2} | v_2 | 1.07 |
| 3 | n_1 | a_{p3} | v_3 | 1.15 |
| 4 | n_1 | a_{p4} | v_4 | 1.12 |
| 5 | n_1 | a_{p5} | v_5 | 1.24 |
| 6 | n_2 | a_{p1} | v_2 | 1.26 |
| 7 | n_2 | a_{p2} | v_3 | 1.35 |
| 8 | n_2 | a_{p3} | v_4 | 1.21 |
| 9 | n_2 | a_{p4} | v_5 | 1.19 |
| 10 | n_2 | a_{p5} | v_1 | 1.24 |
| 11 | n_3 | a_{p1} | v_3 | 1.01 |
| 12 | n_3 | a_{p2} | v_4 | 1.08 |
| 13 | n_3 | a_{p3} | v_5 | 1.14 |
| 14 | n_3 | a_{p4} | v_1 | 1.15 |
| 15 | n_3 | a_{p5} | v_2 | 1.08 |
| 16 | n_4 | a_{p1} | v_4 | 1.12 |
| 17 | n_4 | a_{p2} | v_5 | 0.988 |
| 18 | n_4 | a_{p3} | v_1 | 1.09 |
| 19 | n_4 | a_{p4} | v_2 | 1.21 |
| 20 | n_4 | a_{p5} | v_3 | 1.16 |
| 21 | n_5 | a_{p1} | v_5 | 1.05 |
| 22 | n_5 | a_{p2} | v_1 | 1.35 |
| 23 | n_5 | a_{p3} | v_2 | 1.28 |
| 24 | n_5 | a_{p4} | v_3 | 1.16 |
| 25 | n_5 | a_{p5} | v_4 | 1.34 |

2.2 极差及方差分析

对表 1 中正交试验测得的粗糙度数据进行统

计学分析与处理,结果如表 2 所示.其中:
 K_{ij} 为某一切削因素在同一水平下 R_a 之和;
 R 为切削因素在同一水平下 R_a 极差;
 V 为切削因素在同一水平下 R_a 方差.

表 2 单晶 DD98 表面粗糙度试验分析结果
Table 2 Experimental analysis results of the single crystal DD98 surface roughness

| 变量 | n | a_p | v |
|------------|------------------|------------------|------------------|
| K_{1j} | 5.670 (1.134) | 5.530 (1.106) | 5.920 (1.184) |
| K_{2j} | 6.250 (1.250) | 5.838 (1.168) | 5.900 (1.180) |
| K_{3j} | 5.460 (1.092) | 5.870 (1.174) | 5.830 (1.166) |
| K_{4j} | 5.568 (1.114) | 5.830 (1.166) | 5.870 (1.174) |
| K_{5j} | 6.180 (1.236) | 6.060 (1.212) | 5.608 (1.122) |
| K_{1j}^2 | 32.150 | 30.581 | 35.046 |
| K_{2j}^2 | 39.063 | 34.082 | 34.810 |
| K_{3j}^2 | 29.812 | 34.457 | 33.989 |
| K_{4j}^2 | 31.003 | 33.989 | 34.457 |
| K_{5j}^2 | 38.192 | 36.724 | 31.450 |
| R | 0.790 | 0.530 | 0.312 |
| T | | 29.128 | |
| CT | | 33.938 | |
| SS | 0.106 0 | 0.028 6 | 0.012 4 |
| V | 0.026 5 | 0.007 2 | 0.003 1 |

依据表 2 试验分析结果,绘制单晶 DD98 表面粗糙度在三切削因素下的极差方差图,如图 4 所示.从图中可以看出, $R_n > R_{a_p} > R_v$,因此可以得出:在本次正交试验中,主轴转速 n 对单晶 DD98 材料微铣削加工表面粗糙度 R_a 影响最大,次之为铣削深度 a_p ,进给速度 v 影响最小.在此三因素五水平试验中,优化获得的切削工艺组合为: $n = 3.6 \text{ kr/min}, a_p = 5 \mu\text{m}, v = 100 \mu\text{m/s}$,为提高试验准确率,进行重复试验,获得最优粗糙度 $R_a = 951 \text{ nm}$.

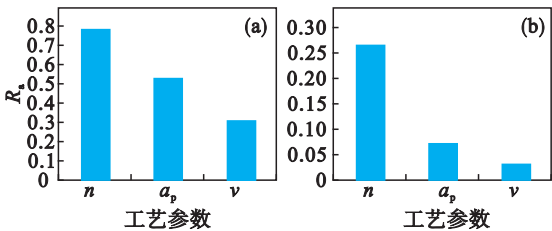


图 4 工艺参数对表面粗糙度影响的极差图和方差图
Fig. 4 Range and variance diagram of the influence of processing parameters on surface roughness

(a) — 极差图; (b) — 方差图.

2.3 切削因素对表面质量影响

为进一步探究切削因素对单晶 DD98 微铣削

沟槽表面质量影响,依据表 2 数据,建立三切削因素 n, a_p, v 对表面质量的影响机理图,如图 5 所示.

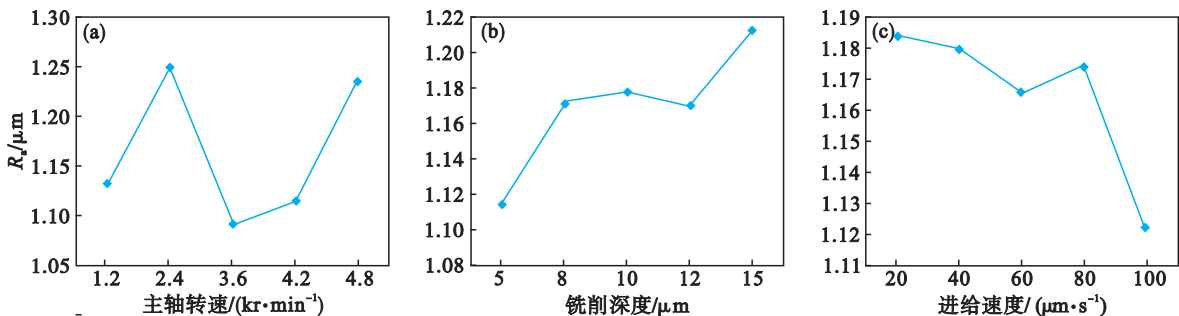


图 5 切削因素对 R_a 影响
Fig. 5 Influence of processing parameters on surface roughness
(a)— n 对 R_a 的影响; (b)— a_p 对 R_a 的影响; (c)— v 对 R_a 的影响.

从图 5 可以看出,主轴转速低于 2.4 kr/min 时,粗糙度呈增大趋势,然后不断降低,高于 3.6 kr/min 时,粗糙度呈稳定增大趋势;铣削深度小于 10 μm ,表面粗糙度显著增大,然后小幅减小,当大于 12 μm 后呈增大趋势;进给速度低于 60 $\mu\text{m}/\text{s}$ 时,粗糙度逐渐降低,然后小幅度增大,当大于 80 $\mu\text{m}/\text{s}$ 后,粗糙度降低趋势较大. 由于单晶 DD98 镍基高温合金属于难加工材料,其硬度较大,当主轴转速较低时,切削温度也较低,材料以脆性的方式被去除;同时,加工过程也受到最小切削厚度和积屑瘤的影响,使得其表面质量较差. 随着加工过程的进行,主轴转速不断增大,刀具进入正常切削状态且积屑瘤逐渐消失,其表面质量又会变好;但随着主轴转速的进一步提高,切削温度也升高,材料的去除方式由脆性转变为塑性,使其加工表面不平整;同时,较高的主轴转速也会使机床主轴产生严重的振动,使得其表面质量又会变差.

单晶 DD98 铣削深度的变化趋势与主轴转速类似,同样受到最小切削厚度、积屑瘤和机床主轴振动的影响. 但进给速度的变化趋势与之不同,由于单晶 DD98 的硬度较大,当进给速度较小时,由于最小切削厚度的影响,刀具很难产生完整的切屑,即材料很难被完全去除,使得加工表面不平整,表面质量较差;当进给速度逐渐增大时,每齿进给量完全摆脱最小切削厚度的束缚,材料实现完全去除,使得工件的表面质量大有改善.

2.4 微铣削表面形貌分析

以单晶 DD98 相同铣削深度为例,不同主轴转速和进给速度下的表面形貌如图 6 所示,图中单晶 DD98 的铣削深度为 10 μm . 试验中采用的直径为 0.8 mm 的微铣刀切削刃有一定的磨损,主要表现为刀尖磨损和粘结颗粒剥落. 由于单

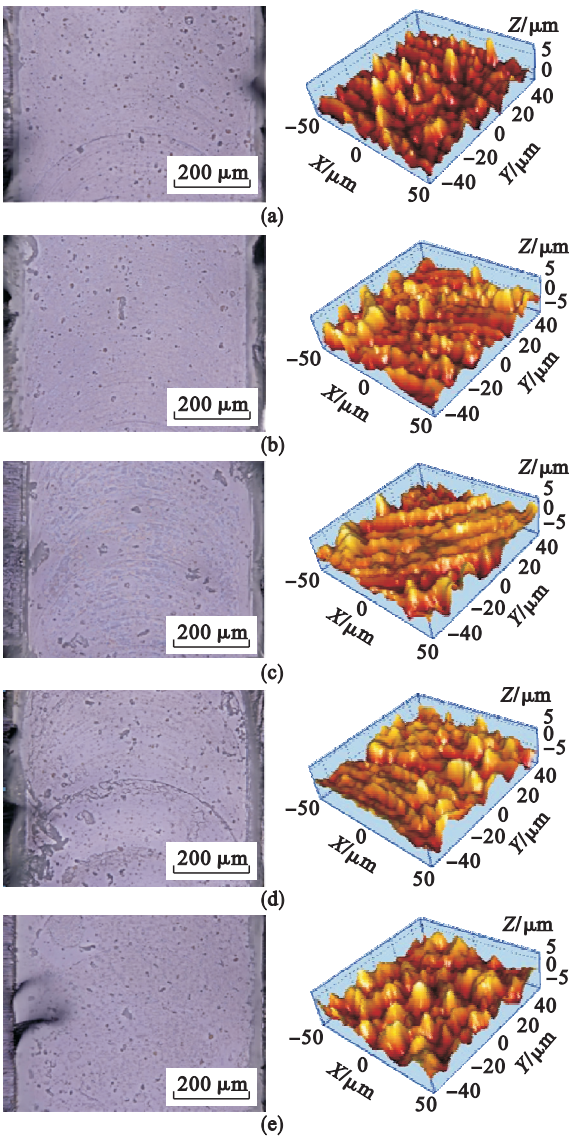


图 6 单晶 DD98 正交试验表面形貌
Fig. 6 Surface morphology of the single crystal DD98 for orthogonal experiment

(a)— $a_p = 10 \mu\text{m}$, $n = 1.2 \text{ kr/min}$, $v = 60 \mu\text{m/s}$; (b)— $a_p = 10 \mu\text{m}$, $n = 2.4 \text{ kr/min}$, $v = 80 \mu\text{m/s}$; (c)— $a_p = 10 \mu\text{m}$, $n = 3.6 \text{ kr/min}$, $v = 100 \mu\text{m/s}$; (d)— $a_p = 10 \mu\text{m}$, $n = 4.2 \text{ kr/min}$, $v = 20 \mu\text{m/s}$; (e)— $a_p = 10 \mu\text{m}$, $n = 4.8 \text{ kr/min}$, $v = 20 \mu\text{m/s}$.

晶 DD98 硬度较高, 粘结磨损产生大量热应力, 影响表面质量, 为降低刀具磨损对表面质量影响, 在每 5 组试验前更换新刀具, 以保证切削刃口半径一致。

图 6 左侧为微铣削沟槽的表面形貌, 黑色边缘为毛刺, 右侧为表面形貌对应的粗糙度云图。可以看出, 当铣削深度均为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 时, 单晶 DD98 的表面形貌随着切削参数的不同而不同, 当主轴转速由 1.2 kr/min 增到 4.2 kr/min 时, 随着主轴振动毛刺对其表面形貌影响较大; 同时, 加工过程中产生的表面微观缺陷也相对较多。当进给速度为 $20\text{ }\mu\text{m/s}$ 时, 毛刺的产生受到尺度效应的影响, 以犁耕和划擦为主; 当逐渐增大至 $100\text{ }\mu\text{m/s}$ 时, 从剪切变形和犁耕变形共存到塑性去除, 毛刺尺寸逐渐减小。为了控制毛刺的尺寸, 进给量应大于最小切削深度, 并且不宜过大, 当铣削参数为主轴转速 $n = 3.6\text{ kr/min}$, 铣削深度 $a_p = 10\text{ }\mu\text{m}$, 进给速度 $v = 100\text{ }\mu\text{m/s}$ 时, 表面质量及形貌最佳。

3 结 论

1) 对单晶材料 DD98 的微铣削正交试验研究表明: 主轴转速对加工表面质量影响最大、铣削深度次之、进给速度最小; 主轴转速为 3.6 kr/min , 铣削深度为 $5\text{ }\mu\text{m}$, 进给速度为 $100\text{ }\mu\text{m/s}$, 为优化获得的切削工艺参数方案, 此时表面质量最好, 粗糙度为 951 nm 。

2) 加工高温合金微小特征时, 材料的表面硬化层对切削质量影响显著, 去除材料时产生弹性回复, 容易引起微铣刀具的切削振动, 致使主轴转速对表面粗糙度的影响显著。

3) 当铣削深度为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 时, 主轴转速为 3.6 kr/min , 进给速度为 $100\text{ }\mu\text{m/s}$ 时, 镍基单晶高温合金 DD98 表面质量及形貌为最佳。

参考文献:

[1] 王震, 李金国, 金涛. 熔体过热处理对 DD98 镍基单晶高温合金持久性能的影响 [J]. 金属热处理, 2012, 37 (4): 48 - 51.
(Wang Zhen, Li Jin-guo, Jin Tao. Influence of melt over-

heating treatment on stress rupture properties of DD98 Ni-based single crystal superalloy [J]. *Heat treatment of Metals*, 2012, 37 (4): 48 - 51.)

[2] 高奇, 蔡明. 高速微尺度铣削单晶铝表面粗糙度试验研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016, 9 (9): 13 - 16.
(Gao Qi, Cai Ming. Experimental study on surface roughness in high speed micro milling of single crystal aluminum [J]. *Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique*, 2016, 9 (9): 13 - 16.)

[3] 高奇, 巩亚东, 周云光. 单晶 Ni3Al 基高温合金微铣削表面粗糙度试验研究 [J]. 中国机械工程, 2016, 27 (6): 801 - 804.
(Gao Qi, Gong Ya-dong, Zhou Yun-guang. Experimental study on surface quality in micro-milling of single crystal Ni3Al-based superalloy [J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27 (6): 801 - 804.)

[4] 陈明君, 陈妮, 何宁, 等. 微铣削加工机理研究新进展 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (5): 161 - 172.
(Chen Ming-jun, Chen Ni, He Ning, et al. The research progress of micromilling in machining mechanism [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50 (5): 161 - 172.)

[5] 高奇, 巩亚东, 蔡明, 等. 单晶硅微铣削塑性去除表面质量实验研究 [J]. 制造技术与机床, 2016 (6): 135 - 138.
(Gao Qi, Gong Ya-dong, Cai Ming, et al. Experimental study on surface quality in micro-milling of single crystal Si plastic removal [J]. *Manufacturing Technology and Machine Tool*, 2016 (6): 135 - 138.)

[6] Sato M, Yamazaki T, Shimizu Y, et al. A study on the microcutting of aluminum single crystals [J]. *JSME International Journal Series III*, 1991, 34 (4): 540 - 545.

[7] Lucca D A, Seo Y W. Effect of tool edge geometry on energy dissipation in ultra-precision machining [J]. *CIRP Annals*, 1993, 42 (1): 83 - 86.

[8] Lucca D A, Seo Y W. Aspects of surface generation in orthogonal ultra-precision machining [J]. *CIRP Annals*, 1994, 43 (1): 43 - 46.

[9] Damazo B N, Davies M A, Dutterer B S, et al. A summary of micro-milling studies [C] // First International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology. Bremen, 1999: 322 - 324.

[10] Schaller T, Bohn L, Mayer J, et al. Microstructure grooves with a width of less than $50\text{ }\mu\text{m}$ cut with ground hard metal micro end mills [J]. *Precision Engineering*, 1999 (23): 229 - 235.