

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.04.018

单晶镍基高温合金微铣削力试验

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: 以单晶镍基高温合金 DD98 为研究对象,从单晶高温合金微观组织分析材料去除机理,得出 DD98 滑移面为密排面 $\{111\}$,滑移向为密排方向 $\langle 110 \rangle$,克服阻力最小,最易滑移.采用双刃微铣刀对单晶镍基高温合金 DD98 进行正交试验,通过极差分析比较获得切削参数对微铣削力的影响程度.结果表明,主轴转速的影响最大,进给速度其次,铣削深度最小.通过优化获得理想的切削参数为:主轴转速 36 000 r/min,铣削深度 5 μm ,进给速度 20 $\mu\text{m/s}$,此时微铣削力最小.并对其原因进行深入分析,为单晶高温合金的微加工理论的机理揭示提供理论参考和试验依据.

关 键 词: 微铣削力;单晶高温合金;DD98;微观组织;正交试验

中图分类号: TH 161 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)04-0542-05

Micro-milling Forces Test for Single Crystal Nickel-Based Superalloy

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: Taking the single crystal nickel-based superalloy DD98 as research object, the material removal mechanism of single crystal superalloy was analyzed from its microstructure. The glide plane of DD98 is its close-packed plane $\{111\}$, while the glide direction is its close-packed direction $\langle 110 \rangle$ with minimum resistance force and easy slip. The orthogonal experiment was implemented for micro-milling single crystal nickel-based superalloy DD98 by using two-edged micro-milling tool. The effect of cutting parameters on the micro-milling forces was obtained through range analysis. The result showed that the influence of spindle speed is the greatest, the feed rate is the secondary, and the milling depth is the smallest affecting factor. The ideal cutting parameters were obtained using minimum micro-milling forces, i. e., with the spindle speed of 36 000 r/min, milling depth of 5 μm and the feed rate of 20 $\mu\text{m/s}$. The reasons affecting on micro-milling forces were deeply analyzed, and the test results may provide certain theory reference and test basis for understanding the micro-milling mechanism of single crystal superalloy.

Key words: micro-milling force; single crystal superalloy; DD98; microstructure; orthogonal experiment

随着科学技术的快速发展,微小型零部件在机电系统、光学电子、生物科技等领域得到广泛应用,单晶镍基高温合金 DD98 在微涡轮叶片、微发动机领域有着较好的应用和科研价值.微加工技术得到不断的发展和提升,微铣削是一种机械加工的材料去除方法,通常是指采用小于 1 mm 直径的刀具对微小零件进行铣削加工,具有较高的加工效率及较好的加工灵活性,是加工高精密微小零件的一种新型工艺技术^[1-2].国内外许多学者对高温合金进行了微铣削工艺和性能的相关研究,文献[3-5]通过切削试验,考虑微刀具圆弧半径及刀具磨损的影响,分析了铣削力影响因

素及规律,建立了高温合金的铣削力预测模型;文献[6-7]等在微铣削硬质合金材料时加入振动辅助,相比传统加工,有利于提高表面粗糙度和降低刀具磨损,提高刀具寿命.文献[8-9]基于切削试验研究了切削用量对切削力的影响规律,大都是针对多晶材料切削研究,对于单晶高温合金的微铣削加工鲜见报道.单晶镍基高温合金显微硬度大、导热性差、易加工硬化,属于典型的难加工材料^[10].由于单晶零件制备工艺复杂、价格昂贵,对其进行工艺性能研究尤为重要,有必要通过理论和试验分析切削工艺参数对铣削力的影响,揭示单晶高温合金的微铣削材料去除机理.

1 单晶镍基高温合金微铣削去除机理

与多晶铣削机理不同,单晶材料消除了整个晶界,为单个晶粒,表现为各向异性.文献[11]从几何与运动学角度出发,建立了晶体的塑性变形数学模型.文献[12]证明了晶体的塑性变形与金相结构的关系,建立了单晶体的本构关系及运动学方程.通用的理论模型较少考虑具体的形变过程,对于反映的塑性变形机理不够准确.单晶试验表明,单晶材料的塑性变形实质为位错的滑移,当滑移面上的切应力分量达到一定值后,晶体中就会产生层片滑移^[13],这种层片间滑动累积到一定程度时,在宏观上即表现为材料的塑性去除.产生塑性去除位错所克服的外界阻力,称为派-纳(P-N)力:

$$\tau_{P-N} = \frac{2G}{1-\nu} \exp \left[-\frac{2\pi d}{(1-\nu)b} \right]. \quad (1)$$

式中: d 为相邻滑移面间的距离; b 为原子在滑移方向上的距离; ν 为材料的泊松比; $\frac{d}{1-\nu}$ 为位错宽度.当 d 值越大, b 值越小,滑移面的面间距越大,位错强度越小,派-纳力越小,越容易滑移.由于晶体中原子沿密排面间距最大,沿密排方向原子间距最短,此时派-纳力最小,因而容易沿着这些面发生滑移.单晶镍基高温合金 DD98 为面心立方结构,密排面为 $\{111\}$,密排方向为 $\langle 110 \rangle$,具有大的位错宽度,故其派-纳力小,屈服应力低,对比其他结构塑性表现最好.当大量位错沿着同一滑移面移到晶体表面,克服派-纳阻力,就形成了显微滑移带,发生塑性变形.

2 微铣削试验

2.1 试验条件

本试验在微铣床平台巨蟹精雕机上进行,如

图 1 所示.数控系统为 FANUC 系统,NSK 气动主轴,其转速为 3 000 ~ 60 000 r/min;采用 DH-5920N 动态信号测试分析仪捕捉信号,最小分辨率为 0.01 Hz,幅值精度 1%,采用 SDC 通用测力仪进行力的采集^[14].

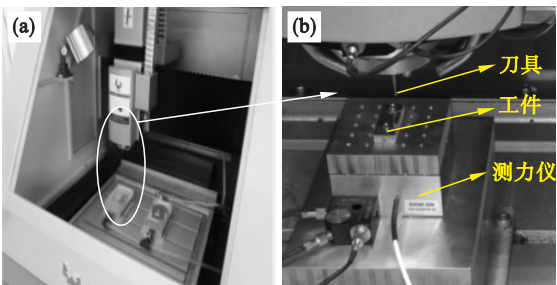


图 1 微铣床与微铣削试验
Fig. 1 Micro-milling machine and micro-milling test
(a)—微铣床;(b)—微铣削试验.

试验采用微刀具为 M. A. FORD 硬质合金端铣刀,其规格为 0.8 mm × 2.4 mm × 38 mm,切削刃圆弧半径为 $(1.02 \pm 0.03) \mu\text{m}$,采用 VHX-1000E 超景深显微镜动态多次测量,如图 2 所示.

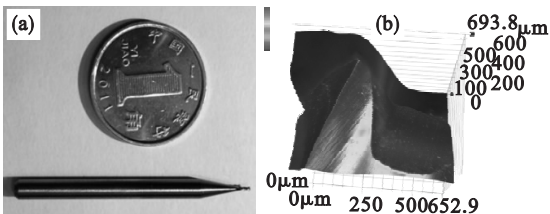


图 2 微铣刀
Fig. 2 Micro-milling tool
(a)—微铣刀;(b)—微铣刀刃径测量.

试验材料采用真空感应熔炼的 DD98 单晶镍基高温合金,图 3 为本试验槽铣削试验后,通过显微镜观察到的金相图. DD98 的微观二相结构由金属 Ni 基体(γ 相)和析出的中间相 Ni_3Al (γ' 相)组成. γ' 相均匀分布在基体 γ 相中间,其金相组织中只有一个晶粒而没有晶界,也就不存在高温晶界弱化和纵向晶界开裂等问题,具备更好的力学性能.将样件经过研磨抛光装夹于微铣床工作台上,铣削前通过磨削找平,为精确获得试验数据做准备.

2.2 试验方案设计

依据正交试验法,设计为三因素五水平,即 $L_{25}(5^3)$. 主要考虑切削工艺参数对微铣削力的影响. 三因素:主轴转速 $n(\text{r/min})$ 、进给速度 $v(\mu\text{m/s})$ 和轴向铣削深度 $a_p(\mu\text{m})$,如表 1 所示. 由于较小切削刃直径的微铣刀要提高铣削线速度必需提高主轴转速,主轴转速在限制内均布选择;进给速

度的选择可通过主轴转速及每齿进给量和铣刀有效铣削齿数计算获得,需重点考虑每齿进给量对最小切削厚度及刀具刃圆半径的影响;考虑切削的高速度、微铣刀的小刚度及加工材料的高强度,铣削深度的选择力求较小,避免大切深产生热应力加速刀具的磨损.

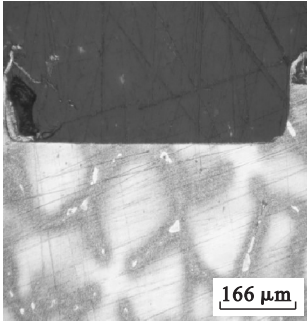


图 3 DD98 金相
Fig. 3 DD98 metallography

表 1 因素水平表
Table 1 Factors and levels table

因素	水平				
	1	2	3	4	5
$n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	12 000	24 000	36 000	42 000	48 000
$v/(\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	20	40	60	80	100
$a_p/\mu\text{m}$	5	8	10	12	15

3 试验结果分析

试验过程中,为减少刀具磨损,每组参数铣削槽长度为 3 mm,每 5 组试验更换一次刀具,采用风冷干式铣削,三个坐标方向铣削力选取峰值平均值作为试验测量结果,并合成总的铣削力 F 置于正交试验结果表中,计算数据的极差 R 和方差 V 如表 2 所示.

切削参数对应单晶 DD98 微铣削力的极差图和方差图如图 4 所示. 可知,主轴转速的极差最大,进给速度的其次,而铣削深度的最小,因此在

单晶 DD98 微铣削力正交试验中,主轴转速和进给速度对其微铣削加工过程中的铣削力影响最大,而铣削深度对其影响较小. 当主轴转速为 36 000 r/min,铣削深度为 5 μm ,进给速度为 20 $\mu\text{m}/\text{s}$ 时铣削力最小. 所以合理选择工艺参数对有效控制微铣削力十分重要.

表 2 单晶 DD98 的微铣削力试验结果
Table 2 Experimental results of micro-milling force of single crystal DD98

项目	$n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$a_p/\mu\text{m}$	$v/(\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
K_{1j}	4. 567(0. 913)	4. 504(0. 901)	4. 232(0. 846)
K_{2j}	4. 924(0. 985)	5. 070(1. 014)	4. 801(0. 960)
K_{3j}	4. 302(0. 860)	4. 647(0. 929)	5. 315(1. 063)
K_{4j}	5. 023(1. 005)	5. 204(1. 041)	4. 906(0. 981)
K_{5j}	6. 005(1. 201)	5. 396(1. 079)	5. 567(1. 113)
K_{1j}^2	20. 857	20. 286	17. 910
K_{2j}^2	24. 246	25. 705	23. 050
K_{3j}^2	18. 507	21. 595	28. 249
K_{4j}^2	25. 231	27. 082	24. 069
K_{5j}^2	36. 060	29. 117	30. 991
R	1. 703	0. 892	1. 335
T	24. 821	—	—
CT	24. 643	—	—
SS	0. 337 2	0. 114 0	0. 210 8
V	0. 084 3	0. 028 5	0. 052 7

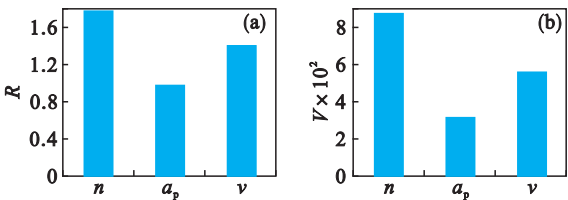


图 4 切削参数对铣削力影响的极差图和方差图
Fig. 4 Range and variance diagrams for influence of cutting parameters on milling force
(a) —极差图; (b) —方差图.

为探究切削参数对镍基单晶高温合金 DD98 铣削力的影响机理,依据表 2 括号中计算的数据,绘制三因素对铣削力影响情况折线图,如图 5 所示.

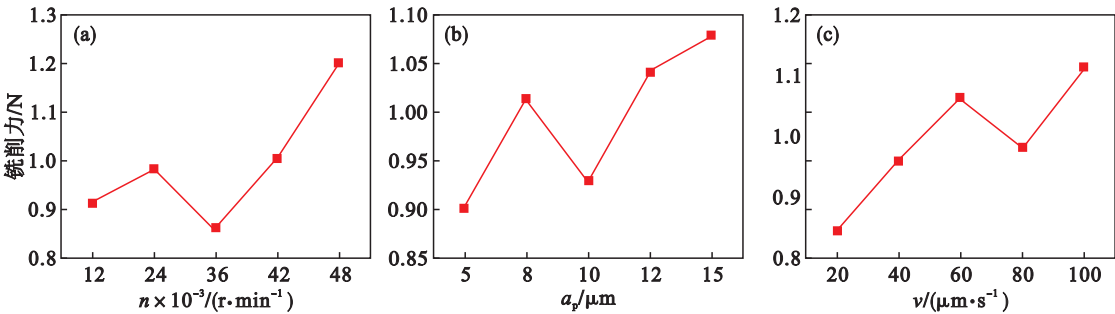


图 5 铣削过程三因素对铣削力的影响
Fig. 5 Effect of three factors on milling force

由图 5a 可知,随着主轴转速的增大,铣削力先增大后减小再增大,转折点为 24 000 r/min 和 36 000 r/min. 刚开始低转速切削温度较低,瞬态切削为划擦与挤压形式,以脆性断裂的方式从基体去除. 铣削力不断增加,主轴转速达到 24 000 ~ 36 000 r/min 时,温度升高,塑性加大,由脆性断裂向塑性去除转变,以后随着转速的提高,温度不断升高导致主轴转速带来的颤振,使切屑与刀具前后刀面及已加工表面摩擦力增大,材料抵消弹塑性变形的抗力增加,剪切屈服强度下降,铣削力增大.

由图 5b 可知,随着铣削深度的增大,铣削力先增大后减小再增大,转折点为 8 μm 和 10 μm . 开始时切削面积较小,切削面积由进给量及铣削深度决定,此时,铣削力较小,铣削深度不断增加,切削阻力增大,铣削力增加,但波动区间非常小. 在后段中,切削均匀性提升,材料去除过程稳定,微铣削力增加缓慢.

由图 5c 可知,随着进给速度的增大,铣削力先增大后减小再增大,转折点为 60 $\mu\text{m/s}$ 和 80 $\mu\text{m/s}$. 受刀具切削刃半径与最小切削厚度的影响,每齿进给量与进给速度关系可表示为

$$v = f_t \cdot n \cdot z. \quad (2)$$

式中: v 为进给速度 (mm/s); f_t 为每齿进给量 (mm); n 为主轴转速 (r/min); z 为刀具齿数. 由文献[15]知最小切削厚度与切削刃圆弧半径之比为 0.13 ~ 0.3, 所以 DD98 最小切削厚度为 0.133 μm 以上. 当进给速度为 60 $\mu\text{m/s}$, 主轴转速为 24 000 r/min 时, $f_t = 0.15 \mu\text{m}$, 满足每齿进给量 f_t 大于最小切除厚度的条件. 加工开始到进给速度为 60 $\mu\text{m/s}$ 时,微铣削力缓慢增加,产生较少塑性去除,划擦和挤压为主要去除方式,当挤压与划擦累积切屑到一定厚度时,产生弹塑性变形,会有少量回复现象产生. 进给速度为 60 ~ 80 $\mu\text{m/s}$ 时,铣削厚度大于最小切削厚度,进入塑性去除阶段,切削稳定,随着 f_t 的继续增加,克服摩擦阻力增大,热量传递较慢,铣削力再呈增大趋势. 为了获得好的铣削质量和提升刀具寿命,需避开最小切除厚度,满足每齿进给量 f_t 大于最小切削厚度,方可产生塑性切削,有利于获得较小的铣削力和较好的铣削质量.

4 结 论

1) 随着切削参数的增大,微铣削单晶镍基高温合金时微铣削力呈“先增大—再减小—再增大”规律.

2) 进给速度为 60 $\mu\text{m/s}$ 时,每齿进给量为 0.15 μm ,大于 DD98 最小切削厚度,满足产生塑性去除条件.

3) 通过微铣削单晶材料 DD98 正交试验,得出对微铣削力的影响因素依次为:主轴转速、进给速度、铣削深度. 通过正交试验获得微铣削力最小的优化工艺方案,即转速为 36 000 r/min,铣削深度为 5 μm ,进给速度为 20 $\mu\text{m/s}$.

参考文献:

- [1] 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 micro milling in machining mechanism [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50 (5): 161-172.)
- [2] 史振宇. 基于最小切除厚度的微切削加工机理研究[D]. 济南:山东大学,2011.
(Shi Zhen-yu. Study on micro cutting mechanism based on minimum uncut chip thickness [D]. Jinan: Shandong University, 2011.)
- [3] Estrems M, Sanchez H T, Kurfess T, et al. Influence of size effect and radial run-outs on the end milling of a nickel-based superalloy [J]. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, 2011, 39 (6): 268-276.
- [4] Fang N, Pai P S, Mosquea S. Effect of tool edge wear on the cutting forces and vibrations in high-speed finish machining of Inconel 718 [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 52(1):65-67.
- [5] Kuo C P, Ling C C. The prediction of cutting force in milling Inconel 718 [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 27(7):655-660.
- [6] Cheng K, Huo D. Micro cutting: fundamentals and applications[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2013: 145-172.
- [7] Ding H, Ibrahim R, Cheng K, et al. Experimental study on machinability improvement of hardened tool steel using two dimensional vibration-assisted micro-end-milling [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50(12):1115-1118.
- [8] 王园伟. Inconel 718 高速铣削工艺参数优化[D]. 济南:山东大学,2011.
(Wang Yuan-wei. Optimization of process parameters in high-speed milling Inconel 718 [D]. Jinan: Shandong University, 2011.)
- [9] 季德生,黄雪红. 高速车削 Inconel 718 切削力的试验研究[J]. 工具技术,2012,46(2):23-25.
(Ji De-sheng, Huang Xue-hong. Experimental study on cutting force in high-speed turning of inconel 718[J]. *Tool Engineering*, 2012, 46(2):23-25.)
- [10] Henderson A J, Bunget C, Kurfess T R. Cutting force modeling when milling nickel-base superalloys [C]// Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference. Corvallis, 2011: 193-202.
- [11] Hill R, Rice J R. Constitutive analysis of elastic-plastic crystal at arbitrary strain [J]. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, 1972, 20(6):401-415.