DOI: 10.3901/JME.2021.09.264

基于 MQL 的超声椭圆振动微切削 Inconel718 的机理研究*

王大中¹ 吴淑晶² 林靖朋³ 郭国强⁴ 王 鹏⁵

(1. 上海工程技术大学航空运输学院 上海 201620;

2. 上海工程技术大学化学化工学院 上海 201620;

3. 中冶宝钢技术服务有限公司 上海 201999;

4. 上海航天精密机械研究所 上海 201600;

5. 上海工业自动化仪表研究院 上海 200233)

摘要: 研究不同切削条件下的超声椭圆振动(Ultrasonic elliptical vibration, UEV)对 Inconel718 微切削性能的影响规律, 讨论微量润滑(Minimum quantity lubrication, MQL)和 UEV 切削对加工性能的影响机理。针对微量润滑切削时的不同喷嘴角度, 提出一种新的换热模型, 利用软件对 Inconel718 微切削的切削力、切削温度进行了仿真研究, 并通过试验对不同喷嘴角度下的切削温度的进行了对比, 探讨不同喷嘴角度对 UEV 切削条件下加工性能的影响。研究表明, 与常规切削相比, UEV 切削可降低切削力、切削温度, 超声椭圆振动微量润滑切(UEV+MQL)效果明显, 喷嘴角度为 0° 条件下超声振动微切削 Inconel718 的切削温度降低效果最为明显。

关键词: 超声椭圆振动(UEV); 微量润滑(MQL); 微切削; 喷嘴角度

中图分类号: TP273

Research on Ultrasonic Elliptical Vibration Micro-cutting Inconel718 Based on Minimum Quantity Lubrication

WANG Dazhong¹ WU Shujing² LIN Jingpeng³ GUO Guoqiang⁴ WANG Peng⁵

(1. School of Air Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620;

3. MCC Baosteel Technology Services Co., Ltd., Shanghai 201999;

4. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600;

5. Shanghai Institute of Process Automation & Instrumentation, Shanghai 200233)

Abstract: The performance of Inconel718 steel when ultrasonic elliptical vibration (UEV) micro-cutting with different cutting conditions is investigated. The purpose of this study is to investigate the influence of minimum quantity lubrication (MQL) and UEV cutting on machining performance compared with conventional turning (CT). And a new heat transfer mode is proposed for different nozzle angles. The cutting force and cutting temperature of Inconel718 micro-cutting are simulated by software, and the cutting temperature under different nozzle angles is compared through experiments. The effects of different nozzle angles on the machining performance are compared under UEV cutting condition. The cutting force, Mises stress, temperature, and the tool stress are explored. It is found that UEV cutting has lower cutting force, stress, and temperature compared with CT, UEV and MQL coupling turning(UEV+MQL)has better performance and the cutting temperature of ultrasonic elliptical vibration (UEV) micro-cutting Inconel718 is significantly reduced when the nozzle angle is 0° .

Key words: ultrasonic elliptical vibration(UEV); minimum quantity lubrication(MQL); micro cutting; nozzle angle

* 国家科技重大专项(2018ZX04011001)和上海市科委(20030501100)资助项目。
20200510 收到初稿, 20201115 收到修改稿

0 前言

Inconel718 沉淀硬化型镍铬铁合金具有良好的抗疲劳、抗氧化、耐腐蚀性以及高熔点等性能。在切削加工时, Inconel718 加工硬化严重、切削力和切削温度高、刀具磨损严重, 被认为是最难加工的金属材料之一^[1-4]。为解决 Inconel718 的加工难题, 研究人员曾进行过广泛深入研究, 如文献[5]提出了使用外部 MQL 润滑和 CO₂ 作为内部冷却剂的低温冷却技术来加工 Inconel718, 可以延长刀具使用寿命, 揭示了其在特定加工条件下的切削机理。文献[6]为探究冷却润滑条件对难加工材料镍基高温合金 Inconel718 切削加工质量影响规律, 基于 Advantedge 有限元软件, 采用三种不同的冷却润滑方式, 对 Inconel718 材料进行干式切削、浇注式切削、低温冷风微量润滑切削仿真, 对比分析不同冷却及润滑条件对切削力、切削温度、切屑形态、残余应力变化的影响规律。表明低温冷风微量润滑切削难加工材料是一种极具前途的加工方式。文献[7]提出一种超声椭圆振动铣削工艺, 采用刀尖在平面内按椭圆轨迹运动的超声频间歇性切削方法, 可有效改善表面质量, 也可突破常规超声振动加工对临界速度的限制。结果表明, 超声振动加工工艺较普通加工方式在已加工表面质量等方面有稳定提升, 粗糙度降幅可达 10%~40%。文献[8]研究超声椭圆振动铣削中振幅对加工表面质量的影响, 对不同振幅条件下的超声椭圆振动铣削过程中的切削力、工件表面质量、残余应力以及表面显微硬度进行研究, 结果显示, 超声椭圆振动径向切削力随振幅的增大呈减小趋势。

现代制造业对切削技术的发展提出了更高的要求^[9-11], 微切削工艺能够满足加工效率、加工精度和表面质量的要求, 同时兼具经济和绿色环保等方面的优点。绿色切削包括干切削、低温切削、高速切削、超精密加工及硬切削等^[12-14]。绿色切削和可持续发展已成为新时期机械制造业的主要发展趋势之一, 如何最大限度地减少切削液污染, 并且确保加工质量成为国内外机械制造业亟待解决的问题。目前, 金属切削领域的冷却和润滑方法有很多, 如液氮冷却、低温冷却、空气冷却、喷雾冷却、微量润滑(MQL)和低温微量润滑等^[15-16]。MQL 以微量喷雾代替普通切削液, 可以实现向绿色切削方式转变。对此, 文献[17]使用三种硬质合金涂层刀具, 选择在干切削和 MQL 条件下, 以 TC4 合金为切削加工对象, 研究刀具磨损形态及失效形式, 探讨刀具磨损失效机理。结果显示, 干切削加工时, 刀具表面

涂层对刀具寿命影响速度不显著, 表面涂层可以减缓刀具磨损, 提高刀具寿命。为研究 MQL 安置方式对车削加工性能的影响, 文献[18]采用干式、切削液外置式及切削液内置式 MQL 进行切削试验研究。研究结果显示外置式及内置式 MQL 润滑方式均可减小切削力, 均可抑制切削颤振, 内置式在抑制颤振方面比外置式效果更好, 但在改善切削力方面尚未发现有明显差异。

MQL 是在切削过程中改善切削摩擦学特性, 从而实现刀具耐磨、减磨, 是切削润滑的主流发展方向。MQL 喷嘴结构及角度是影响切削油雾化及切削效果的主要因素之一, 这方面的研究尚需进一步加强。有鉴于此, 本文首先在超声椭圆振动加工的基础上加入了微量润滑和低温微量润滑, 分析了不同加工条件下的切削性能。开展不同喷嘴角度建模研究, 理论与试验结果吻合, 研究成果具有重要的理论价值, 对生产实际也有一定的指导意义。

1 超声椭圆振动切削原理

1.1 材料模型

本文采用自适应网格划分法开展建模, 自适应网格划分可以提高工件表面质量判断的准确性, 节省运算时间。材料本构模型描述流动应力与应变、应变速率和温度之间的函数关系。本文选择文献[19-20]的材料模型, 通过应变、应变速率和温度的关系来描述材料的等效流动应力(σ)为

$$\sigma(\varepsilon^p, \dot{\varepsilon}, T) = g(\varepsilon^p) \times \Gamma(\dot{\varepsilon}) \times \Theta(T) \quad (1)$$

式中, $\sigma(\varepsilon^p, \dot{\varepsilon}, T)$ 为工件材料的流动应力; $g(\varepsilon^p)$ 为应变强化函数; $\Gamma(\dot{\varepsilon})$ 为应变率效应函数; $\Theta(T)$ 为热软化函数。

1.2 超声椭圆振动切削原理

椭圆超声振动切削的刀尖轨迹如图 1 所示。在这个过程中以图 1a~1d 为一个椭圆振动切削周期。

图 1 超声椭圆振动切削原理图

切削参数设定: 切削速度为 30 m/min, 进给量为 0.1 mm/r, 背吃刀量为 0.003 mm。刀具的振动频率是 40 kHz, x 方向的振幅为 8 μm , y 方向的振幅为 7 μm 。椭圆振动的初始角度分别是 x 方向 -180° , y 方向 90° 。润滑冷却液消耗量为 50 mL/h。MQL 切削时润滑油温度为 20 $^\circ\text{C}$, CMQL 切削时润滑油温度为 -30°C 。图 4 中的 θ 是前刀面和喷嘴中心线

的夹角, 本文选择三个夹角角度进行研究, 分别为喷嘴中心线与加工表面垂直(11°), 喷嘴中心线与前刀面平行(0°)以及两者之间平均角度(5.5°)。试验结果与仿真结果的误差低于 10% [26-27], 证明仿真分析的可靠性(图 5)。

图4 润滑喷淋原理图

(a) 进给量为0.1 mm

(b) 切削速度为10 m/min

图5 试验结果与仿真结果的对比

4 结果分析

4.1 切削力分析

四种切削条件下切削力的变化规律如图 6 所示。刀具在切削方向上的最大振动速度大于刀具进给速度, 刀具与切屑分离, 后刀面与工件分离。由于切削作用, 当刀具与工件分离时, 切削力和进给力减小; 当刀具进入切削过程时, 切削力和进给力

增大。常规切削时, 切削力约为 12 N, 进给力为 6 N, 如图 6a 所示。当振动频率从 0 到 40 kHz 时, 切削力和进给力分别降低 61.5%和 73.9%; UEV+MQL 条件下切削力和进给力分别降低了 67.6%和 79.4%; UEV+CMQL 条件下切削力和进给力分别降低了 62.7%和 75.3%。低温微量润滑条件下的切削力大于微量润滑, 金属加工中加工区域会热软化, 使切削力降低, 低温微量润滑由于温度很低, 减小了加工区域工件的热软化, 使得工件硬度上升切削力增大。

(a) 常规切削

(b) 超声椭圆振动切削

(c) 超声椭圆振动微量润滑耦合切削

(d) 超声椭圆振动低温微量润滑耦合切削

图6 不同切削条件下切削力对比

4.2 切削温度分析

切削开始尚未达到稳定状态时, 依据能量守

恒的原则, 切削初始时超声振动的能量会提高刀具和切削区域的温度。四种切削条件下的温度排序为 $T_{UEV} > T_{CT} > T_{UEV+MQL} > T_{UEV+CMQL}$ 。切削进入稳定状态时, 切削温度对比情况如图 7 所示。常规切削时的温度稳定在 440 °C 左右。与常规切削相比, UEV 的温度降低约 10.8%, UEV+MQL 的温度降低约 15.7%, UEV+CMQL 的温度降低约 19.8%。

刀具与工件分离时, 切削液喷淋压力区域如图 8 所示。当喷嘴夹角为 0° 时, 喷雾更容易进入加工中心区域; 喷嘴夹角为 5.5° 和 11° 时, 切削液喷雾更多的分布在切屑和已加工表面。图 9 表示不同切削条件下切削温度的分布规律, 其中图 9a 表明喷嘴角度越大, 刀具变形区和刀尖温度越大,

温度分布范围越大; 图 9b 显示在常规 MQL 切削时喷嘴的角度对切削变形区的温度影响不大, 温度及分布范围的变化亦不明显。

图 7 四种加工条件下的温度对比

图 8 切削液压力区域

图 9 切削温度分布规律

当 $\theta=0^\circ$ 时切削温度最低，传热量最大。不同喷嘴角度的切削温度的公式可以表达为

$$T_\theta = \left(2 - 0.0785 \times \left(\frac{2\theta}{360^\circ} \right)^{-0.0587} \right) T_{\min} \quad (7)$$

式中， $0^\circ < \theta < 90^\circ + \gamma$ ， γ 为刀具前角； T_θ 为夹角为 θ 的温度； $T_{\min}$ 为最小切削温度。

三种喷嘴角度一个周期内温度曲线如图 10 所示。喷嘴角度 0° 时切削温度比喷嘴角度为 5.5° 时低 3.95%，喷嘴角度 0° 时切削温度比喷嘴角度为 11° 时低 6.3%。该结果与式(7)的计算结果相符合。

图 10 三种喷嘴角度的温度

4.3 切削应力分析

不同条件下切削应力分布如图 11 所示。

图 11 不同切削方式的应力分布图

图 11a 中, 常规切削应力主要分布在刀尖和剪切面区域, 切屑变化导致应力无法释放。在 UEV 切削加工中(图 11b)刀具与工件分离时, 工件上应力分布大幅度减小。随着喷雾温度的降低, 应力和应力集中范围也随之减小。当刀具开始切削时, 刀具上的应力分布主要集中在前刀面和后刀面, 刀尖区域的切削应力较小。刀尖的应力的范围随着切削雾滴温度的降低而减小, 有利于保护刀具, 提高刀具的使用寿命。

不同喷嘴角度条件下, 刀具应力如图 12 所示。刀具应力的周期曲线拟合后发现, 喷嘴角度为 0° 时的刀具应力比喷嘴角度为 5.5° 时低 4.3%, 比喷嘴角度为 11° 时低 7.6%。选择较小的喷嘴角度可以降低刀具应力, 提高刀具使用寿命。

图 12 三种喷嘴角度的刀具应力曲线图

5 结论

(1) 提出了一种不同喷嘴角度的传热模型。仿真结果与方程计算结果相吻合, 验证了模型的正确性, 对实践具有指导意义。

(2) 在 Inconel 718 微切削过程中, 与 CT 相比, UEV 的温度降低 10.8%, 切削力和进给力分别降低 61.5%和 73.9%; UEV+MQL 的切削温度降低 15.7%, 切削力和进给力分别降低 67.6%和 79.4%; UEV+CMQL 的切削温度降低 19.8%, 切削力和进给力分别降低 62.7%和 75.3%。优化切削条件有助于提高切削性能。

(3) 在超声椭圆振动切削中, 当喷嘴角度 θ 从 11° 到 0° 变化时, 切削变形区和刀具的温度降低, 最高温度的分布范围减少, 刀具应力也随喷嘴角度的减小而降低, 从而提高了加工性能和刀具耐用度, 喷嘴角度的改变对常规切削影响较小。

参 考 文 献

- [1] 李峰, 李学崑, 融亦鸣. 强化感应加热辅助磨削 Inconel718 的残余应力主动调控[J]. 机械工程学报, 2018, 54(3): 216-226.
LI Feng, LI Xuekun, RONG Yiming. Active control of the residual stress in Inconel718 grinding assisted by the strengthen induction heating[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(3): 216-226.
- [2] ZHANG J, ZHANG Q L, ZHUANG Y F, et al. Microstructures and cyclic hot corrosion behavior of laser deposited Inconel718 alloy under different heat treatment conditions[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 135: 106659.
- [3] 孔德瑞. Inconel 718 材料切削研究[J]. 金属加工(冷加工), 2020, 71(1): 58-60.
KONG Derui. Study on Inconel718 material cutting[J]. Metal Processing (Cold working), 2020, 71(1): 58-60.
- [4] 范依航, 王涛, 郝兆朋, 等. 基于多尺度仿真的 Inconel718 切削过程研究[J]. 制造技术与机床, 2017(9): 114-117.
FAN Yihang, WANG Tao, HAO Zhaopeng, et al. Research of cutting process based on multiscale simulation in machining Inconel718[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2017(9): 114-117.
- [5] PEREIRA Q, CELAYA A, URBICAÍN G, et al. CO₂ cryogenic milling of Inconel718: cutting forces and tool wear[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(4): 8459-8468.
- [6] 王哲, 沈雪红. 镍基高温合金 Inconel718 在不同冷却润滑条件下的切削仿真研究[J]. 工具技术, 2019, 53(10): 83-86.
WANG Zhe, SHEN Xuehong. Cutting simulation of nickel-based superalloy Inconel718 under different cooling and lubrication conditions[J]. Tool Technology, 2019, 53(10): 83-86.
- [7] 高泽, 张德远, 李哲, 等. 高速超声椭圆振动铣削腹板表面质量研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(7): 249-256.
GAO Ze, ZHANG Deyuan, LI Zhe, et al. Research on surface quality of titanium alloy webs via high-speed ultrasonic elliptical vibration milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(7): 249-256.
- [8] 刘佳佳, 姜兴刚, 高泽, 等. 高速旋转超声椭圆振动侧铣削振幅对钛合金表面完整性影响的研究[J]. 机械工

- 程学报, 2019, 55(11): 215-223.
- LIU Jiajia, JIANG Xinggang, GAO Ze, et al. Investigation of the effect of vibration amplitude on the surface integrity in high-speed rotary ultrasonic elliptical machining for side milling of Ti-6Al-4V[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(11): 215-223.
- [9] KHALIQ W, ZHANG C, JAMIL M, et al. Tool wear, surface quality, and residual stresses analysis of micro-machined additive manufactured Ti-6Al-4V under dry and MQL conditions[J]. Tribology International, 2020, 151: 106408.
- [10] YANG M, LI C H, ZHANG Y B, et al. Maximum undeformed equivalent chip thickness for ductile-brittle transition of zirconia ceramics under different lubrication conditions[J]. Int. J. Mach. Tools. Manuf., 2017, 122(11): 55-65.
- [11] YOU Changtang, ZHAO Guolong, CHU Xuyang, et al. Design, preparation and cutting performance of bionic cutting tools based on head microstructures of dung beetle[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58: 129-135.
- [12] LIU C F, ZHU L D, NI C B. Chatter detection in milling process based on VMD and energy entropy[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 105: 169-182.
- [13] DING Y, ZHU L D. Investigation on chatter stability of thin-walled parts considering its flexibility based on finite element analysis[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9): 3173-3187.
- [14] ZHU L D, LIU B G, CHEN H Y. Research on chatter stability in milling and parameter optimization based on process damping[J]. Journal of Vibration and Control, 2018, 24(12): 2642-2655.
- [15] 段春争, 车明帆, 孙伟, 等. 不同冷却润滑方式对切削 SiCP/Al 复合材料刀具磨损的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(5): 1244-1253.
- DUAN Chunzheng, CHE Mingfan, SUN Wei, et al. Influence of different cooling and lubrication methods on tool wear in machining SiCp/Al composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(5): 1244-1253.
- [16] AN Qinglong, CAI Chongyan, ZOU Fan, et al. Tool wear and machined surface characteristics in side milling Ti6Al4V under dry and supercritical CO₂ with MQL conditions[J]. Tribology International, 2020, 151: 106511.
- [17] 励政伟, 陈杰, 安庆龙. 基于微量润滑的钛合金高速切削涂层刀具磨损机理[J]. 航空制造技术, 2018, 61(6): 70-77.
- LI Zhengwei, CHEN Jie, AN Qinglong. Tool wear mechanism of titanium alloy high-speed cutting coating based on trace lubrication[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2018, 61(6): 70-77.
- [18] 吕涛, 黄水泉, 胡晓冬, 等. 静电微量润滑气雾特性及其切削加工性能研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(1): 129-138.
- LÜ Tao, HUANG Shuiquan, HU Xiaodong, et al. Study on aerosol characteristics of electrostatic minimum quantity lubrication and its turning performance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(1): 129-138.
- [19] THIRD WAVE AAVANTEDGE, AavantEdge FEM 7.1 User's Manual, Minneapolis, USA.
- [20] NI Chenbing, ZHU Lida. Investigation on machining characteristics of TC4 alloy by simultaneous application of ultrasonic vibration assisted milling (UVAM) and economical-environmental MQL technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 278: 116518.
- [21] MOON C, THUILLIER S, LEE J, et al. Mechanical properties of solution heat treated Al-Zn-Mg-Cu(7075) alloy under different cooling conditions: Analysis with full field measurement and finite element modeling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 856: 158180.
- [22] CHEN H. Effect of flash evaporation and spray droplet characteristic on heat transfer enhancement of spray cooling[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [23] STROTOS G, GAVAISES M, THEODORAKAKOS A, et al. Numerical investigation of the cooling effectiveness of a droplet impinging on a heated surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(19-20): 4728-4742.
- [24] STROTOS G, ALEKSIS G, GAVAISES M, et al. Non-dimensionalities parameters for predicting the cooling effectiveness of droplets impinging on moderate temperature solid surfaces[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(5): 698-711.
- [25] 林靖朋, 王大中. 超声椭圆振动和微量润滑耦合切削 Inconel718 的性能研究[J]. 智能计算机与应用, 2020, 10(3): 186-188.

- LIN Jingpeng , WANG Dazhong. Study on the performance of coupling Inconel718 with ultrasonic elliptical vibration and micro—lubrication[J]. Intelligent Computer and Applications, 2020, 10(3): 186-188.
- [26] NATH C, RAHMAN M. Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting[J]. Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(9): 965-974.
- [27] LU D, WANG Q, WU Y, et al. Fundamental turning characteristics of Inconel718 by applying ultrasonic elliptical vibration on the base plane[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2015, 30(8): 1010-1017.

作者简介: 王大中, 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为复合材料智能制造、先进刀具设计、切削振动主动控制。
E-mail: wdzh168@126.com

吴淑晶(通信作者), 女, 1968 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为金属切削理论、切削主动控制、复合材料切削加工。
E-mail: wushujing168@126.com