

超声车削Monel K500高温合金残余应力模拟分析

韩学杰, 许闻卓, 吕青青, 杨立权*, 丁贺阳

平顶山学院河南省超声技术应用工程研究中心, 河南 平顶山

收稿日期: 2025年1月8日; 录用日期: 2025年2月1日; 发布日期: 2025年2月8日

摘要

加工工件中的残余应力对工件的疲劳寿命及其尺寸和几何精度都具有重要影响。超声波辅助车削降低了切削区域的温度, 并降低了由于刀具和工件的不连续接触而产生的平均加工力。因此, 超声振动辅助加工技术被引入到镍基合金切削加工过程中。文章通过单因素试验和正交试验探讨了不同切削深度、切削速度和进给量等对Monel K500高温合金残余应力的影响, 并且使用专业有限元分析软件AdvantEdge对Monel K500高温合金进行超声车削二维模拟仿真。研究结果表明: 各个因素在影响残余应力的数值上略有差异, 其中进给量、振动频率影响最大。同时也通过试验得出了各个参数的最佳组合: B₄D₂A₃C₄E₄。研究结果为进一步优化镍基高温合金超声车削提供了参考依据。

关键词

表面残余应力, 超声车削, 镍基高温合金

Simulation Analysis of Residual Stress of Monel K500 Superalloy by Ultrasonic Turning

Xuejie Han, Wenzhuo Xu, Qingqing Lyu, Liquan Yang*, Heyang Ding

Henan Province Engineering Research Center of Ultrasonic Technology Application, Pingdingshan University, Pingdingshan Henan

Received: Jan. 8th, 2025; accepted: Feb. 1st, 2025; published: Feb. 8th, 2025

Abstract

The residual stress in the machined workpiece has a significant influence on the fatigue life of the

*通讯作者。

文章引用: 韩学杰, 许闻卓, 吕青青, 杨立权, 丁贺阳. 超声车削 Monel K500 高温合金残余应力模拟分析[J]. 机械工程技术, 2025, 14(1): 1-10. DOI: 10.12677/met.2025.141001

workpiece and its dimension and geometric accuracy. Ultrasonic-assisted turning reduces the temperature in the cutting zone and the average processing force due to the discontinuous contact between the tool and the workpiece. Therefore, ultrasonic vibration-assisted machining technology was introduced into the cutting process of nickel-based alloys. In this paper, the effects of different cutting depths, cutting speeds, and feed rates on the residual stress of the Monel K500 superalloy are discussed through single-factor experiments and orthogonal experiments. The two dimensional simulation of the ultrasonic turning of the Monel K500 superalloy is carried out using the professional finite element analysis software AdvantEdge. The results show that all factors have some influence on the residual stress, and the feed and vibration frequency have the greatest influence. At the same time, the best combination of individual parameters was determined through experiments: B₄D₂A₃C₄E₄. The research results provide a further reference for optimizing the ultrasonic turning of nickel-based superalloy.

Keywords

Surface Residual Stress, Ultrasonic Turning, Nickel-Based Superalloy

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

超声车削作为一种新兴的高效、超精密加工技术，在高温合金的加工领域中具有广阔的应用前景。高温合金性能优良，在航空、化工、军工等领域应用广泛[1]，加工需求量大，尤其是对表面质量和残余应力的要求更是严苛。在高温合金的制备和加工过程中，残余应力问题一直是制约高温合金性能提高的重要因素之一。超声车削[2]结合了机械切削[3]和超声振动两种特殊的物理现象，通过振动能消散大部分的热量[4]，则在加工时温度就会大大地降低，减小了残余应力，使加工时的效率和质量有所提高。

随着有限元仿真技术[5]在近年来不断成熟，现在比较常用的软件有 Abaqus/Explicit、Deform、AdvantEdge、Ansys/LS-DYNA 和 Marc 等[6]，它们能够精确地分析相关数据，为优化切削过程提供参考。在切削过程中，切削变形区域内的材料会经历晶粒细化[7]、塑性变形、相变和位错积累等微观结构演变，这些演变可以改变工件的物理和机械性能，并对零件的使用寿命产生负面影响。

本文旨在通过有限元仿真分析[8]，详细探讨超声车削加工中切削速度、振幅等参数对残余应力的影响。利用 AdvantEdge 有限元软件建立了二维有限元模型，研究如何通过调整车削参数来减小工件残余应力。

2. 材料与方法

2.1. 材料

Monel K500 是一种镍铜合金，镍铜合金一般指镍含量大于 50%，镍和铜总含量大于 90% 的合金，这类合金在美国被称为 Monel 合金。此类合金被广泛应用于建筑、航天、海洋和石化等行业[9]，具有良好的抗腐蚀性[10]、极佳的耐还原性介质和相对较高的硬度[11]。

2.2. 方法

PowerLaw 本构模型[12]是最全面考虑加工性能模型之一。同时在切削过程中 PowerLaw 本构模型

能够准确预测产生的应力、温度和变形等关键参数。在建立 Monel K500 时, AdvantEdge 采用了 Power Law 本构模型, 以便更好地描述该材料在不同的加工条件下的流动应力。模型的基本表达式为[13]:

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

式中: $g(\varepsilon^p)$ 为加工硬化函数; $\Gamma(\varepsilon)$ 为应力速度效应函数; $\Theta(T)$ 为热软化函数; $\sigma(\varepsilon^p, \varepsilon, T)$ 为材料流动应力。

Power-law 的应变率表达式为:

$$\left(1 + \frac{\bar{\varepsilon}^p}{\bar{\varepsilon}_0^p}\right) = \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_f(\varepsilon^p)}\right) \quad (2)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为有效应力; ε^p 为累积塑性应变; $\bar{\varepsilon}_0^p$ 为参考塑性应变率; σ_f 为流变应力; $\bar{\varepsilon}^p$ 为塑性应变率。

Power-law 中流变应力表达式为:

$$\sigma_f = \sigma_0 \Theta(T) \left(1 + \frac{\varepsilon^p}{\varepsilon_0^p}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

式中: σ_0 为温度为 T_0 时的初始屈服应力; $\Theta(T)$ 为热软化函数; ε_0^p 为参考塑性变形; n 为硬化指数。

超声振动车削是一种高级切削加工技术, 在高效加工、表面质量和精度方面表现出色。根据相关文献[14], 确定了切削速度、进给量、振幅、振动频率及刃钝角半径这 5 个影响残余应力较大的因素。通过对这些因素进行单因素试验确定对 5 个因素选取 4 种不同的水平条件来得出这些单一因素对残余应力的影响。

通过正交试验对以上单因素的切削速度、进给量、振幅、振动频率、刀具刃钝角半径这五个因素和四个水平条件进行正交分析, 每个参数因素水平如表 1 所示。

Table 1. Table of factor levels

表 1. 因素水平表

试验因素					
水平条件	切削速度 A (m/min)	进给量 B (mm/r)	振幅 C (μm)	振动频率 D (kHz)	刃钝角半径 E (mm)
1	60	0.13	1.0	24	0.02
2	70	0.15	1.5	26	0.03
3	80	0.17	2.0	28	0.04
4	90	0.19	2.5	30	0.05

通过表 1 我们选择 $L_{16}(4^5)$ 的 4 水平 5 因素的表, 一共需要做 16 组仿真试验, 正交试验方案如表 2 所示。

Table 2. Orthogonal test programme

表 2. 正交试验方案

组号	切削速度 A (m/min)	进给量 B (mm/r)	振幅 C (μm)	振动频率 D (kHz)	刃钝角半径 E (mm)
1	60	0.13	1.0	24	0.02
2	60	0.15	1.5	26	0.03
3	60	0.17	2.0	28	0.04

续表

4	60	0.19	2.5	30	0.05
5	70	0.13	1.5	28	0.05
6	70	0.15	1.0	30	0.04
7	70	0.17	2.5	24	0.03
8	70	0.19	2.0	26	0.02
9	80	0.13	2.0	30	0.03
10	80	0.15	2.5	28	0.02
11	80	0.17	1.0	26	0.05
12	80	0.19	1.5	24	0.04
13	90	0.13	2.5	26	0.04
14	90	0.15	2.0	24	0.05
15	90	0.17	1.5	30	0.02
16	90	0.19	1.0	28	0.03

3. 试验结果与讨论

3.1. 切削速度对残余应力的影响

在加工时，较大的切削速度可以加快加工进程，但同时也会产生较大的热量与切削力，破坏材料的内部结构，从而改变其物理特性。通过保证其他参数不变，只改变切削速度来验证切削速度对残余应力的影响。变量切削速度依次设置为: 60 m/min、70 m/min、80 m/min、90 m/min。其关系如图 1 所示。

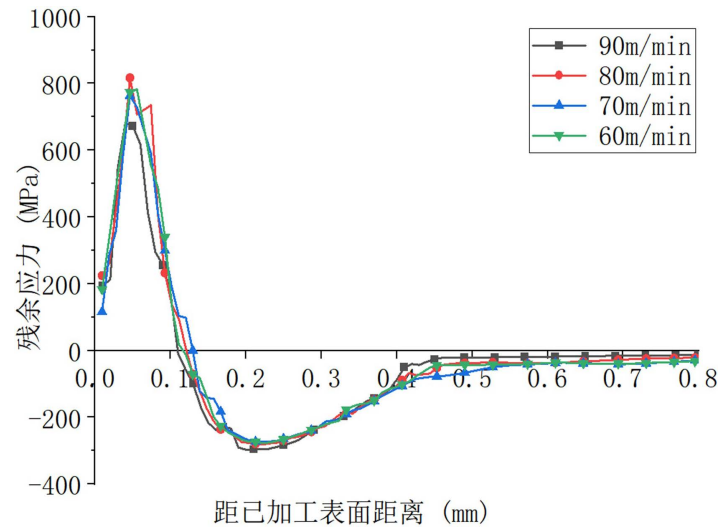


Figure 1. Different cutting speeds and surface residual stress distribution
图 1. 不同切削速度与表面残余应力分布

由图 1 可知，在工件表面 0~0.13 mm 范围内时，随着加工深度的递增，工件表层的残余拉应力表现出先上升后下降的整体趋势。当加工深度自 0.13 mm 增大到 0.45 mm 时，残余压应力则随深度增加呈现出先增大后减小的总体变化趋势。究其原因随着加工过程中温度升高引起了表层体积增大，使残

余压应力开始升高。但产生的过多热量会引起材料的变形,从而使残余压应力变小。直至加工深度达到约 0.45 mm 时,残余应力逐渐趋近于零值。此外,不同的切削速度条件下,所对应的最大拉应力与最大压应力的具体数值存在轻微差异,且随着加工深度的增加,会增大切削力与温度对工件表面质量的影响。

3.2. 进给量对残余应力的影响

进给量为工件每旋转一周时,刀具切削刃相对于工件在进给方向上所移动的距离,是一个关键的工艺参数,其大小对切削过程中的切削力、工件内部的残余应力分布以及切削温度等物理量均会产生显著影响。通过保证其他参数不变,只改变进给量来验证进给量对残余应力的影响。变量进给量依次设置为:0.13 mm/r、0.15 mm/r、0.17 mm/r、0.19 mm/r。其关系如图 2 所示。

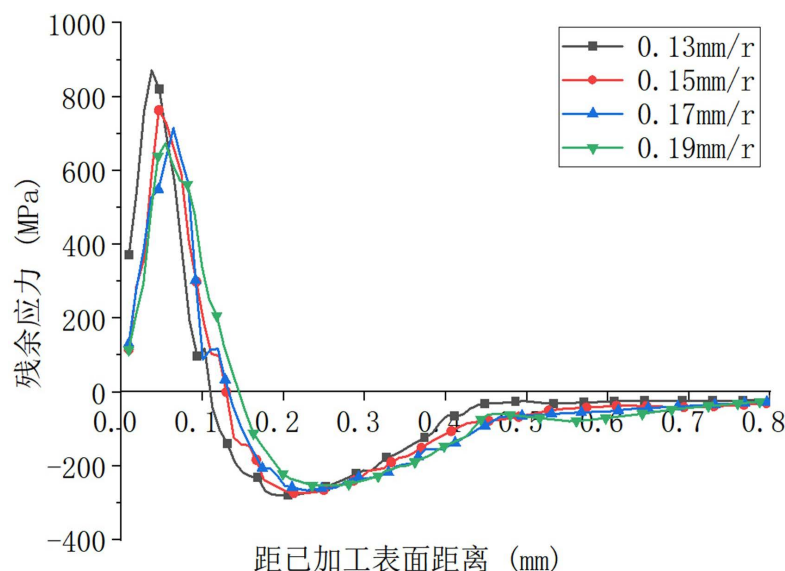


Figure 2. Residual stress distribution on surface with different feeds
图 2. 不同进给量与表面残余应力分布

由图 2 可知,在工件表层 0~0.14 mm 的深度范围内,随着加工深度递增,工件表层的残余拉应力呈现出先增后减的总体趋势。当加工深度进一步从 0.14 mm 扩展至 0.45 mm 时,残余应力的性质由拉应力转变为压应力,并且这种残余压应力随着深度的增加,也呈现出一个先增大后减小的整体变化趋势。直至加工深度达到 0.45 mm 左右时,残余应力逐渐趋近于零值。此外,图中所示的不同进给量条件下的残余应力曲线随着加工深度的变化而表现出较大的波动性,其分布状态相对较为分散,当进给量为 0.13 mm/r 时得到最大拉应力与最大压应力。随着车削进给量的增大,被去除的材料量随之增加,导致加工过程中刀具与工件之间相互作用产生的切削力显著增大和局部温度升高,应力集中,进而使软化效应增强,残余应力减小。

3.3. 振幅对残余应力的影响

振幅是指振动的物理量在波动中可能达到的最大值,直接反映了振动的范围和强度,在振动加工过程中,振幅的变化会显著影响材料内部的应力分布和演变,是超声车削加工中较为重要的一个关键因素。通过保证其他参数不变,只改变振幅来验证振幅对残余应力的影响,变量振幅依次设置为:1.0 μm 、1.5 μm 、2.0 μm 、2.5 μm 。其关系如图 3 所示。

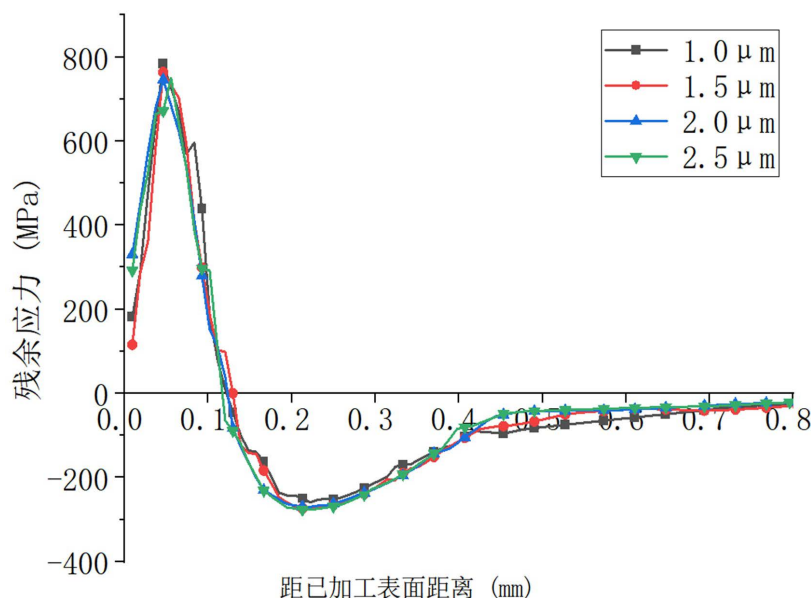


Figure 3. Residual stress distribution on surface with different amplitudes
图 3. 不同振幅与表面残余应力分布

由图 3 可知, 在工件表层深度介于 0~0.13 mm 范围内时, 随着加工深度的递增, 工件表层的残余拉应力呈现出先上升后下降的总体趋势。而当加工深度从 0.13 mm 增大至 0.42 mm 时, 残余应力转变为压应力, 并且该压应力随着深度的增加同样呈现出先增大后减小的变化趋势。直至加工深度达到 0.42 mm 左右时, 残余应力曲线逐渐平缓趋近于零。此外, 在振幅为 $1.0\ \mu\text{m}$ 时, 工件表层得到最大拉应力值; 而当振幅增大至 $2.5\ \mu\text{m}$ 时, 则获得最大压应力值。这是由于当振幅较小时, 加工过程中产生的热量无法及时散出, 使局部温度迅速上升, 残余应力也随之增大。随着振幅的进一步增大, 冲击作用下的切屑开始逐渐剥落, 这一变化有效地减小了切削力, 进而平衡了加工过程中的温度分布, 减少局部残余应力的产生, 使工件表层的残余应力迅速下降。

3.4. 振动频率对残余应力的影响

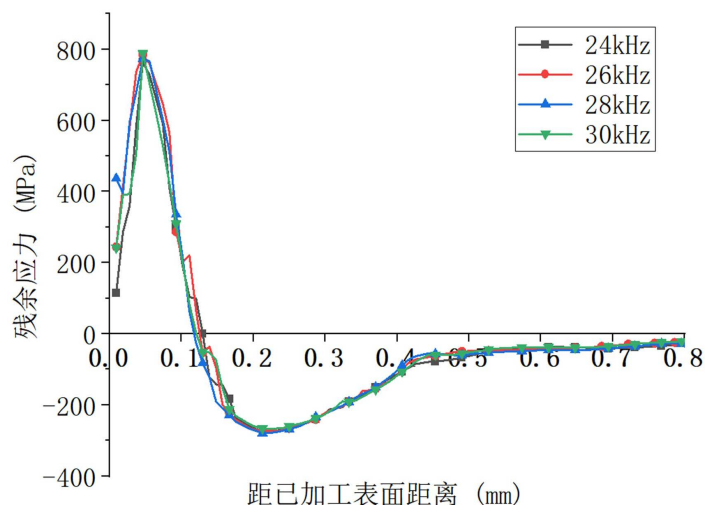


Figure 4. Residual stress distribution on the surface with different vibration frequencies
图 4. 不同振动频率与表面残余应力分布

保持其他参数不变, 只改变振动频率来验证振动频率对残余应力的影响, 变量振动频率依次设置为 24 kHz、26 kHz、28 kHz、30 kHz。模拟试验结果如图 4 所示, 在距表面 0~0.14 mm 范围内时, 工件表层的残余拉应力随加工深度的增加, 整体先上升后下降。当加工深度从 0.14 mm 增大到 0.42 mm 时, 残余压应力随深度增大整体上呈现先增大后减小的变化趋势。直到加工距离达到 0.42 mm 左右时, 残余应力逐渐趋于零。当振动频率为 30 kHz、26 kHz 时得到最大拉应力, 当振动频率为 28 kHz 时得到最大压应力, 总体上各个参数的最大拉应力与最大压应力分布比较集中, 曲线间间隙较小。起先切屑掉落较慢, 随着振动频率越来越大, 工件残余应力会逐渐上升。但由于高频振动能够更好地抑制切屑的形成, 减小工件材料的热影响区域与切削力, 从而降低残余应力。

3.5. 刀具刃钝角半径对残余应力的影响

在加工中, 刀具的刃钝角半径, 会影响工件表面的质量, 以及刀具的磨损。通过保证其他参数不变, 只改变刃钝角半径来验证刃钝角半径对残余应力的影响, 变量刃钝角半径依次设置为: 0.02 mm、0.03 mm、0.04 mm、0.05 mm。其关系如图 5 所示。

由图 5 可知, 在距表面 0~0.15 mm 范围内时, 随着加工深度的递增, 工件表层的残余拉应力呈现出一种先上升后下降的整体趋势。当加工深度从 0.15 mm 增大到 0.45 mm 时, 残余应力的性质转变为压应力, 并且该残余压应力随深度的增加整体上先增大后减小。直至加工深度达到 0.45 mm 左右时, 残余压应力逐渐趋于零。此外, 当刀具刃钝角半径为 0.02 mm 时, 可获得最大残余拉应力; 而当刀具刃钝角半径增大至 0.04 mm 时, 则得到最大的残余压应力。在 0.15~0.45 mm 范围内, 刃钝角半径为 0.04 mm 时上下波动幅度较大。并且切削刃钝角半径对切削刃的锋利程度具有显著影响, 该半径值越小, 切削刃的锋利度越高, 这通常有利于提升加工表面的质量。若半径值过小, 则可能面临无法通过刃磨工艺精确达到预定目标值, 同时, 切削刃的强度也会随之降低, 刃口处易出现热应力集中, 进而增加切削刃崩裂的风险。另一方面, 随着切削刃钝角半径的增大, 刀具的锋利度相应降低, 即变得更加钝化。在此情况下, 刀尖对工件表面的挤压作用会更为显著, 导致切削过程中产生的力也随之增大。这种增大的切削力会进一步导致加工过程中产生的残余应力水平上升。

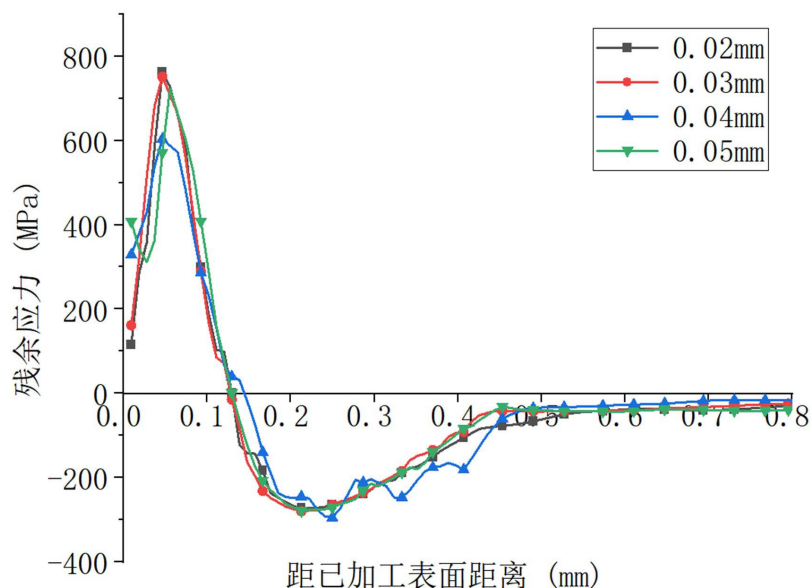


Figure 5. Residual stress distribution on the surface with different radii of cutting edge obturations
图 5. 不同刀具刃钝角半径与表面残余应力分布

3.6. 正交试验验证

通过极差分析法探究每个参数对残余应力的影响状况，结果如表 3 所示，分析表 3 得出切削加工中每个参数对工件表面最大残余应力的影响程度依次为：B (进给量) > D (振动频率) > A (切削速度) > C (振幅) > E (刃钝角半径)。通过影响程度的顺序经过分析得到的最佳组合是：B₄D₂A₃C₄E₄，相关参数是：进给量 0.19 mm/r，振动频率 26 kHz，切削速度 80 m/min，振幅 2.5 μm，刃钝角半径 0.05 mm。

Table 3. Polar analysis
表 3. 极差分析

	切削速度 A (m/min)	进给量 B (mm/r)	振幅 C (μm)	振动频率 D (kHz)	刃钝角半径 E (mm)
均值 1	623.25	682.12	629.32	640.25	627.05
均值 2	642.81	659.58	648.69	605.82	644.83
均值 3	610.34	611.46	640.21	625.10	644.76
均值 4	657.23	580.47	615.40	662.45	617.00
极差	46.88	101.65	33.29	56.63	27.83
因素主次	B > D > A > C > E				
最佳组合	B ₄ D ₂ A ₃ C ₄ E ₄				

对数据进行残余应力方差分析，具体如表 4 所示，通过采用 F 比作为评估工具，可以有效地量化并判断各个加工参数对残余应力影响程度的显著性。对表中数据进行深入分析后，我们可以得出在切削加工过程中，各参数对工件表面产生的最大残余应力影响程度的排序为：进给量、振动频率、切削速度、振幅、刃钝角半径。与极差分析结果相同。

Table 4. Analysis of variance
表 4. 方差分析

因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性
切削速度 A	5162.87	3	2.27	9.28	
进给量 B	25368.35	3	11.15	9.28	
振幅 C	2483.12	3	1.10	9.28	
振动频率 D	6880.85	3	3.02	9.28	
刃钝角半径 E	2275.85	3	1.00	9.28	
误差	2275.85	3			

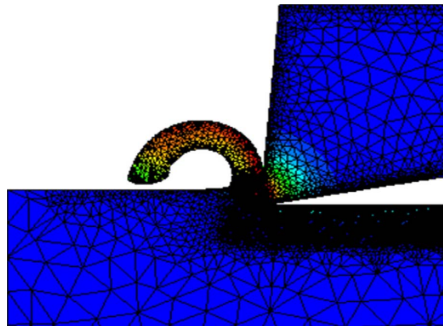


Figure 6. workpiece cutting cloud chart
图 6. 工件切削云图

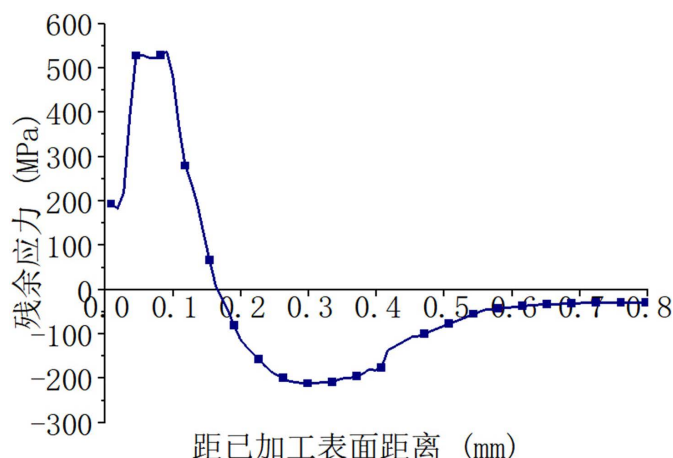


Figure 7. Optimal combination of finite element residual stresses
图 7. 最佳组合有限元残余应力

将正交试验极差分析所得到的最佳组合进行有限元仿真，具体参数为：进给量 0.19 mm/r，振动频率 26 kHz，切削速度 80 m/min，振幅 2.5 μm ，刃钝角半径 0.05 mm。最终得到的最大残余拉应力值为 536.86 MPa，图 7 是最佳组合的数据图。与其他组得到的数据进行对比，此组合的最大残余拉应力得到较好的优化，因此，此组合为最佳组合，其工件切削云图与最佳组合有限元残余应力图分别如图 6、图 7 所示。

4. 结论

通过 AdvantEdge 建立了超声振动车削的有限元模型，对有限元模型进行了车削过程中残余应力的有限元分析，通过单因素试验，控制单一因素的不同参数相互比较得出各个参数对残余应力的影响。然后通过正交试验研究了四水平五因素，并分析了相关数据，得出结论：

1) 进给量、振动频率、切削速度、振幅、刃钝角半径这 5 个参数对已加工表面残余应力的影响在整体上存在类似规律，距加工表层大约 0.15 mm 的深度内，呈现出残余拉应力占据主导地位，并且应力先增大后减小。距加工表层 0.15~0.45 mm 的深度内，呈现出残余压应力占据主导地位，并且应力先增大后减小。说明在距表面 0.45 mm 的范围内，5 个参数对表面残余应力及工件质量影响较大。

2) 5 种因素对最大残余应力的影响程度依次为：B (进给量) > D (振动频率) > A (切削速度) > C (振幅) > E (刃钝角半径)。并得到了最佳组合的相关参数 B₄D₂A₃C₄E₄，进给量 0.19 mm/r，振动频率 26 kHz，切削速度 80 m/min，振幅 2.5 μm ，刃钝角半径 0.05 mm。此最佳参数组合在距工件表面 0.09 mm 深度处产生了最大的残余拉应力，其数值约为 536.86 MPa。同样地，在距表面 0.30 毫米的深度位置，得到了最大的残余压应力，其数值大约为 211.36 MPa。

基金项目

河南省重点研发与推广专项(科技攻关) (242102111173)；平顶山学院机械重点学科基金项目(PXY-JXZDXK-202306)。

参考文献

- [1] 王梓帆, 谢云飞, 吕青青, 等. 镍基高温合金超声铣削残余应力试验研究[J]. 机械制造, 2024, 62(5): 55-59.
- [2] 吕云芳, 张云芳. 高效实用化超声车削技术[J]. 机电工程, 2004, 21(3): 51-53.
- [3] 马利杰, 王西彬. 精密、超精密切削技术发展概况[J]. 航空制造技术, 2015(16): 58-62.
- [4] 王立强. 铝合金薄壁管件二维超声振动车削温度试验研究[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2024, 44(4): 217-

220.

- [5] 程格, 乔龙阳, 王文杰, 等. 有限元仿真技术在金属切削加工中的应用进展[J]. 机械制造, 2023, 61(8): 65-67.
- [6] 张松, 李斌训, 李取浩, 等. 切削过程有限元仿真研究进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(13): 14-28.
- [7] 郑广花, 刘孟阳, 张嘉慧, 等. 7075 铝合金切削加工晶粒尺寸演化过程研究[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2024, 24(2): 57-61.
- [8] 何宁. 高速加工理论与应用[M]. 北京: 科学技术出版社, 2010.
- [9] 潘文涛, 彭文海, 方铁辉, 等. Ni-Cu 耐磨耐蚀合金涂层研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(9): 1193-1194.
- [10] 朱明伟. 国产 B10 铜镍合金海水腐蚀行为及防腐对策研究[J]. 船舶标准化工程师, 2017, 50(5): 60-62.
- [11] 朱玉亮, 郑文杰, 宋志刚, 等. 镍铜合金在我国的发展与应用[J]. 热加工工艺, 2019, 48(8): 23-24.
- [12] 艾建光, 姜峰, 言兰. TC4-DT 钛合金材料动态力学性能及其本构模型[J]. 中国机械工程, 2017, 28(5): 607-661.
- [13] 杜浩, 尹念东. 基于 AdvantEdge 的镍基合金 GH4169 车削残余应力模拟分析[J]. 湖北理工学院学报, 2014(2): 11-15.
- [14] 郭东升, 张敏良, 赵森, 等. 超声振动车削参数对切削力的影响[J]. 轻工机械, 2019, 37(5): 30-33.