激光加热辅助车削高温合金薄壁件变形仿真及试验研究



孔宪俊,刘世文,侯宁,郑耀辉,王明海

沈阳航空航天大学, 辽宁 沈阳 110000

摘 要:机匣件作为航空发动机的重要零部件,是一种典型的薄壁件,其尺寸大、壁薄以及刚性低等特点使得在加工过程中容易 发生工件变形、刀具震颤,造成加工精度不达标,以及加工表面质量差等问题。本文建立高温合金常规车削与激光加热辅助车削 模型,并通过试验验证了模型的准确性。模型最大误差为10.1%,最小误差为5.5%,平均误差为7.8%,处于可接受范围。然后建 立常规车削与激光加热辅助车削薄壁件模型,研究激光加热辅助车削对薄壁件变形的影响。研究结果表明,与常规车削相比,当 激光照射温度达到650℃以上时,激光加热辅助车削切削力分别下降了20.2%、19.8%和15.2%。激光加热辅助车削能够降低车削 薄壁件过程中的加工变形。与常规车削相比,激光加热辅助车削薄壁件时,加工变形量分别降低了15.6%、12.7%和13.3%。

关键词:激光加热辅助车削;高温合金;薄壁件

中图分类号:V261.8

文献标识码:A

镍基高温合金由于其卓越的高温强度、抗氧化、抗热腐 蚀,以及抗疲劳等综合性能,已成为航空发动机薄壁件的关 键材料[1-2]。航空发动机机匣件作为一种典型的薄壁件[3], 拥有尺寸大、壁薄以及刚性低等特点。而且由于高温合金 自身高强度的特点,加工高温合金时易产生高切削力和高 切削温度,因此,在加工高温合金薄壁件过程中容易发生工 件变形、刀具震颤,造成薄壁件加工精度不达标以及加工表 面质量差^[4]。因此,研究薄壁件加工时产生的切削力,对提 高薄壁件的加工精度和表面质量具有重大意义。卫星驰 等151针对薄壁件铣削时工件变形导致铣削力预测不准确的 问题,建立了一种考虑工件变形的铣削力预测模型,并进行 了试验验证,试验结果表明模型误差小于4.42%。王长清[6] 通过试验与仿真相结合的方法,研究了车削钛合金薄壁件 切削参数与刀具参数对切削力和残余应力的影响。方群兵 等四研究了切削参数对铣削钛铝合金薄壁件切削力和表面 粗糙度的影响,并建立了预测切削力和表面粗糙度的指数 预测模型。韩军等[8]针对铝合金薄壁件加工变形问题,利 用多岛遗传算法对铣削参数进行了优化,使加工过程中铣 削力降低了38.2%。姜增辉等阿研究了铣削参数对钛合金

DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2024.02.009

TC4薄壁件铣削力的影响,并建立了相应的经验公式。

以上研究通过优化常规切削方式参数改善了切削力对 薄壁件变形的影响,如采用较小的进给速度与切削用量,但 却降低了加工效率、提高了加工成本。因此,近年来一些学 者对非常规切削加工方式对切削力的影响进行了研究。其 中,激光加热辅助车削是一种利用激光束加热待加工材料 改善其切削性能进而进行切削加工的新型加工方法,在降 低切削力方面有出色表现。申昆明[10]进行了激光加热辅助 单晶硅超精密车削试验,试验结果发现与常规车削相比,激 光加热辅助车削主切削力降低了52.5%,进给抗力降低了 32.6%, 切深抗力降低了 62.6%。田纪文^[11]进行了 C_t/SiC 陶 瓷基复合材料激光辅助高速微车削试验,试验结果表明随 着激光功率的增加,切削力随之降低。吴雪峰等[12]发现使 用激光加热辅助铣削技术能降低切削力和刀具磨损。黎昊 宇^[13]进行了钛合金TC4激光加热辅助车削试验,试验结果 表明当激光加热温度处于310~375℃之间时,相比于常规 车削切削力,激光加热辅助车削主切削力最多降低 26.45%。孔宪俊^[14]进行了45%SiC_n/Al复合材料激光加热 辅助车削试验,试验结果表明,随着激光加热温度的升高,

收稿日期: 2023-06-02;退修日期: 2023-11-12;录用日期: 2024-01-11

基金项目: 航空科学基金(2019ZE054005);中国航发自主创新基金(ZZCX-2019-019);沈阳市科技局计划项目(RC210439)

引用格式: Kong Xianjun, Liu Shiwen, Hou Ning, et al. Simulation and experimental study on deformation of thin-walled superalloy parts in laser-assisted turning[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(02):75-80. 孔宪俊, 刘世文, 侯宁, 等. 激光加热辅助车削高 温合金薄壁件变形仿真及试验研究[J]. 航空科学技术, 2024, 35(02):75-80.



图1 常规车削仿真模型 Fig.1 Conventional turning simulation model 主切削力也随之降低。

综上所述,激光加热辅助切削技术对降低切削力有重 大影响。因此,本文通过试验与仿真相结合的方法研究了 激光加热辅助车削对切削力和高温合金 GH4169 薄壁件变 形的影响。

1 仿真模型建立

1.1 常规车削与激光加热辅助车削仿真模型

1.1.1 常规车削仿真模型

利用 ABAQUS 软件建立了高温合金 GH4169 常规车削有 限元仿真模型,如图1所示。模型使用了温度一位移耦合显式 动力求解器求解有限元模型,为提高模型的精度和计算速度, 在切削区域划分出更小的网格,其他区域划分较大的网格,模 型工件最小网格10μm,最大网格100μm。工件材料是镍基高 温合金 GH4169,仿真所用工件材料的物理参数见表1^[13-14]。

材料本构方程采用J-C本构方程,方程表达式如式(1)

	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
参数	参数值
密度/(kg/m ³)	8240
线膨胀系数/(1/℃)	1.3e-5
弹性模量/GPa	201(20°C), 192(200°C), 185(400°C), 173(600°C),
	154(800°C)
泊松比	0.3
₩空圧地容/	13.4(20°C), 14.7(100°C), 15.9(200°C), 17.8
(1/(K=******)))	(300°C), 19.3(400°C), 19.6(500°C), 21.2(600°C),
(J/(Kg•°C))	22.8(700°C), 23.6(800°C), 30.4(1000°C)
热传导系数/ (W/(m•℃))	435(20°C), 450(100°C), 481.4(200°C), 493.9
	(300°C), 514.8(400°C), 539(500°C), 573.4(600°C),
	615.3(700°C), 707.4(1000°C)

表1 GH4169材料性能参数 Table 1 GH4169 material property parameters

所示

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) [1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)] [1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m] \qquad (1)$$

式中, σ 为屈服极限; ε 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}$ 为等效塑性应变 率; $\dot{\epsilon}_0$ 为初始应变率;A为材料的初始屈服应力;B为硬化系 数;C为应变率系数;m为温度软化指数;n为加工硬化指 数;T为变形温度;T为室温(20°C); T_m 为材料熔点。

材料损伤演化采用J-C损伤准则,其表达式如式(2)所示,损伤参数见表3。

$$\bar{\varepsilon}_{f}^{pl} = \left[d_{1} + d_{2} \exp\left(d_{3}\frac{p}{q}\right)\right] \left[1 + d_{4} \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_{0}}\right)\right] \left[1 + d_{5}\left(\frac{T - T_{r}}{T_{m} - T_{r}}\right)\right]$$
(2)

式中, $\overline{\varepsilon}_{l}^{p}$ 为等效破坏应变;p为压应力;q为Mises应力; $\overline{\varepsilon}^{p}$ 为等效破坏应变率; $d_{i} \sim d_{i}$ 为失效参数。

GH4169的 J-C本构方程参数和损伤参数见表 2 和表3^[15-16]。

表2 GH4169的J-C本构方程参数

Table 2 The J-C constitutive equation parameters for GH4169

A/MPa	<i>B</i> /MPa	С	п	m
963	937	0.022	0.333	1.3

表3 GH4169的J-C损伤参数

Table 3 The J–C damage parameters of the GH4169

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
0.239	0.456	0.3	0.07	2.5

1.1.2 激光照射模型

利用高斯型表面热源进行激光照射仿真。高斯分布的 热流密度由式(3)所示^[8]

$$q_{(x,y)} = \frac{2Pn}{\pi R_{\rm a}^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{R_{\rm a}^2}\right)$$
(3)

式中,q是(x,y)处的热流密度;r是到激光辐射中心的径向 距离;R_a是激光的半径;P是激光功率;n为GH4169的激光 吸收率。

通过ABAQUS子程序VDFLUX及其Fortran语言可实 现对激光光斑半径、激光光斑移动速度、激光功率与激光吸 收率等参数设定。其中,激光光斑直径为0.1mm,激光光斑 移动速度与切削参数相关(即激光光斑始终处于刀具前方, 二者相对位置固定),激光照射温度达到650℃以上。 1.1.3 激光加热辅助车削模型

利用ABAQUS及其子程序VDFLUX,将1.1.1节与1.1.2 节中常规车削模型与激光照射模型结合起来,建立了激光加 热辅助车削模型。如图2所示(图中NT11表示节点温度)。



1.2 薄壁件常规与激光加热辅助车削模型

由于车削过程中薄壁件发生的变形无法直接测量,因此需要借助有限元仿真模型将车削过程中薄壁件变形量提取出来,用以分析薄壁件的变形情况。利用1.1节中的车削模型建立了薄壁件仿真模型,如图3所示。薄壁件高度为5mm,外径16mm,壁厚1mm。



2 车削试验

试验采用的激光加热辅助车削试验系统由沈阳机床 CAK4085nj机床、IPG2000W激光发生器、六轴机械臂、FLIR 红外测温仪和Kistler测力仪组成,如图4所示。试验材料为 GH4169棒料,长40mm,直径30mm。试验刀具为厦门金鹭 特种合金有限公司可转位刀具DCMT11T304-MM。

首先进行常规车削试验,切削参数见表4。最后进行激 光加热辅助车削试验,激光加热辅助车削过程中,利用激光 将待加工区域温度加热至650°C以上,如图5所示。试验过 程中分别采用FLIR红外测温仪与Kistler测力仪测量工件



图4 激光加热辅助车削系统 Fig.4 Laser-assisted turning system

表4 车削试验参数 Table 4 Turning test parameters

试验组数	切削速度/(m/min)	进给量/(mm/r)	切削深度/mm
1	60	0.1	0.1
2	50	0.1	0.1
3	40	0.1	0.1

温度与三向切削力 F_x (径向力)、 F_v (轴向力)和 F_z (周向力)。

3 结果与讨论

3.1 仿真结果验证分析

通过公式 $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$,计算出切削合力F。图 6为试验切削力与仿真切削力原始信号。由于切削合力存 在波动,为更直观地比较切削大小,计算了切削力平均值。 图7、图8分别为激光加热辅助车削与常规车削切削力试验 值与仿真值,其最大误差为10.1%,最小误差为5.5%,平均 误差为7.8%。由于试验过程中机床与刀具存在变形、震 颤,信号收集过程中存在信号漂移,仿真模型存在网格畸变 导致切削力突变等问题,导致试验值与仿真值存在误差,但 误差处于可接受范围,因此认为仿真模型是准确的。

3.2 车削试验切削力分析

图9为常规车削与激光加热辅助车削切削力对比图, 由图7可知,在激光加热辅助作用下,切削力有明显下降, 这一点现象与以往的研究相符合。而且,随着切削速度的 升高,切削力的下降程度也随之降低,分别下降了20.2%、 19.8%和15.2%。这是因为当照射表面温度相同时,随着切 削速度的升高,刀具运动至激光光斑位置时间减少,激光热 量主要聚集在工件表面,还未完全传导至工件内部切削层, 导致激光加热效果减弱引起的。激光加热导致切削力下降 的原因有:(1)待加工区域材料温度升高导致其拉伸和屈服





强度降低变软;(2)激光加热使前道工序产生的加工硬化降低;(3)激光加热通过固溶、退火处理降低了材料的硬度。

3.3 薄壁件变形分析

通过薄壁件有限元仿真模型,测量了激光加热辅助车 削和常规车削时内壁直径的变形量来研究薄壁件加工过程 中的变形。图10为常规车削和激光加热辅助车削薄壁件



conventional and laser-assisted turning

变形量的对比图,与常规车削相比,激光加热辅助车削薄壁 件变形量分别降低了15.6%、12.7%和13.3%。薄壁件车削 过程中受力如同简支梁,其径向变形主要受切削力作用。 薄壁件变形量会随着切削力的变化而变化。本文3.2节证 明了激光加热辅助车削能有效降低切削力,图10中激光加 热辅助车削薄壁件的变形量与常规车削相比也出现了不同 程度的降低。然而,薄壁件变形量降低幅度小于切削力下 降幅度,造成这种现象的主要原因是激光加热辅助车削过 程中切削区域温度较高,导致薄壁件弹性降低。正是由于 切削力的降低和弹性降低二者相互竞争,导致了切削力与 薄壁件变形量降低程度的不统一。

4 结论

通过ABAQUS软件建立高温合金GH4169常规车削与激 光加热辅助车削仿真模型,并进行了试验验证,模型最大误差 为10.1%,最小误差为5.5%,平均误差为7.8%,处于可接受 范围。

与常规车削相比,当激光照射温度达到650℃以上时,激



光加热辅助车削切削力可以下降15%以上。当切削速度为40m/min时,激光加热辅助车削切削力下降了20.2%,随着切削速度的增加,激光加热效果减弱,切削降低程度也随之下降,在50m/min和60m/min时,切削力分别下降19.8%和15.2%。

通过ABAQUS软件建立高温合金GH4169常规车削与激光加热辅助车削薄壁件仿真模型激光加热辅助车削能够降低车削薄壁件过程中的加工变形。与常规车削相比,激光加热辅助车削薄壁件时,其加工变形量分别降低了15.6%、12.7%、13.3%。

参考文献

[1] 吴明阳,张亚利,程耀楠,等.高压冷却下PCBN刀具切削高 温合金表面残余应力分析及变质层成形机理[J].机械工程学 报,2022,58(1):231-243.

Wu Mingyang, Zhang Yali, Cheng Yaonan, et al. Analysis of surface residual stress and formation mechanism of metamorphic layer in pcbn tool cutting superalloy under highpressure cooling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(1): 231-243. (in Chinese)

- [2] 万宏远,刘壮壮,韩泉泉,等.激光增材制造高温合金抗开裂 行为研究进展[J].航空科学技术,2022,33(9):26-42.
 Wan Hongyuan, Liu Zhuangzhuang, Han Quanquan, et al. Laser additive manufacturing of cracking-resistant superalloys[J]. Aeronautical Science & Technology,2022,33(9):26-42. (in Chinese)
- [3] 鲁龙坤,庄茁,柳占立.裂纹尖端张开角在飞机金属薄壁结构 中的应用[J].航空科学技术,2020,31(4):21-29.

Lu Longkun, Zhuang Zhuo, Liu Zhanli. CTOA applications in metallic thin-walled structures of airplane[J]. Aeronautical

Science & Technology, 2020, 31(4):21-29. (in Chinese)

 [4] 王志学,刘献礼,李茂月,等.考虑力致变形影响的薄壁件铣 削多点接触稳定性预测[J/OL].机械工程学报.(2022-08-08).
 http://kns. cnki. net/kcms/detail/11.2187. TH. 20220527.1854.
 109.html.

Wang Zhixue, Liu Xianli, Li Maoyue, et al. Multi-point contact stability prediction considering force-induced deformation effect in milling thin-walled parts[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering. (2022-08-08). http://kns. cnki. net/kcms/detail/11. 2187.TH.20220527.1854.109.html.(in Chinese)

- [5] 卫星驰,赵嫚,杨青平,等.考虑工件变形的五轴侧铣薄壁件 铣削力建模[J].机械工程学报,2022,58(7):317-324.
 Wei xingchi, Zhao man, Yang qingping, et al. Milling force modeling of thin-walled parts with 5-axis flank milling considering workpiece deformation[J]. Journal of mechanical engineering,2022,58(7):317-324. (in Chinese)
- [6] 王长清,张毅飞,郑勇,等.钛合金薄壁件切削力与残余应力 研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2022,36(3):95-104.
 Wang Changqing, Zhang Yifei, Zheng Yong, et al. Study on cutting force and residual stress of titanium alloy thin wall part [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(3): 95-104. (in Chinese)
- [7] 方群兵,马耀,汪振华,等.TiAl 合金薄壁件铣削加工切削力 与表面粗糙度研究[J].工具技术,2022,56(1):20-24.
 Fang Qunbing, Ma Yao, Wang Zhenhua, et al. research on cutting force and surface roughness of milling thin wall TiAl alloy parts[J]. Tool Engineering, 2022, 56(1): 20-24. (in Chinese)
- [8] 韩军,曹龙凯,徐睿,等.基于多岛遗传算法的环形薄壁铝合 金零件铣削参数优化[J].机电工程,2022,39(1):100-106.
 Han Jun, Cao Longkai, Xu Rui, et al. Optimization of milling parameters of annular thin-walled aluminum alloy parts based on multi-island genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical& Electrical Engineering, 2022, 39(1): 100-106. (in Chinese)
- [9] 姜增辉,陈荣葛,王书利,等.切削用量对TC4薄壁件铣削力的影响[J].装备制造技术,2021(3):1-3+6.
 Jiang Zenghui, Chen Rongge, Wang Shuli, et al. The cutting parameters influence on cutting force in milling the TC4 thinwalled part[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2021, (3): 1-3+6. (in Chinese)
- [10] 申昆明. 激光加热辅助单晶硅超精密车削试验研究[D]. 厦

门:厦门理工学院,2021.

Shen Kunming. Experimental study on ultra-precision cutting of monocrystalline silicon assisted by laser heating[D]. Xiameng: Xiameng University of Technology, 2021. (in Chinese)

[11] 田纪文. CMC-SiC 激光辅助高速微切削温度场分析与试验 研究[D].长春:长春理工大学,2021.

Tian Jiwen. Temperature field analysis and experimental research of CMC-SiC laser-assisted high-speed micromachining [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)

- [12] 吴雪峰,赵博文,冯高诚.激光加热辅助铣削高温合金 GH4698试验研究[J].工具技术,2016,50(4):12-16.
 Wu Xuefeng, Zhao Bowen, Feng Gaocheng. Experimental study on laser-assisted milling of super-alloy GH4698[J]. Tool Engineering, 2016, 50(4): 12-16. (in Chinese)
- [13] 黎昊宇. 钛合金 TC4 激光加热辅助车削工艺参数优化研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2018.

Li Haoyu. Study on the optimization of turning process parame-

ters for laser assisted turning of Ti6A14V[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

- [14] 孔宪俊. 45%SiCp/Al复合材料激光加热辅助车削性能研究
 [D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
 Kong Xianjun. The turning properties study of laser assisted turning of 45%Sicp/Al composites[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [15] 王相宇. 高温合金 GH4169 的切削加工性评价方法和本构模型研究[D]. 济南:山东大学,2016.
 Wang Xiangyu. Study on cutting performance evaluation and constitutive model of superalloy GH4169[D]. Ji'nan: Shandong University, 2016. (in Chinese)
- [16] 任小平. 高温合金 GH4169 车削加工表面完整性及抗疲劳加工工艺研究[D]. 济南:山东大学,2019.
 Ren Xiaoping. Study of turned surface integrity and antifatigue turn processing technology for GH4169 super alloy[D].
 Ji'nan: Shandong University, 2019. (in Chinese)

Simulation and Experimental Study on Deformation of Thin-walled Superalloy Parts in Laser-assisted Turning

Kong Xianjun, Liu Shiwen, Hou Ning, Zheng Yaohui, Wang Minghai Shenyang Aerospace University, Shenyang 110000, China

Abstract: As an important part of aero-engine, casing is a typical thin-walled part. Its large size, thin wall and low rigidity make it prone to workpiece deformation and tool chatter in the machining process, resulting in substandard machining accuracy and poor surface quality. In this paper, models of conventional turning and laser-assisted turning of superalloys were established by the software ABAQUS, and the accuracies of the models were verified by tests. The maximum error of the models is 10.1%, the minimum error is 5.5% and the average error is 7.8%, which is within an acceptable range. Then, models of conventional turning and laser-assisted turning of thin-walled parts were developed to study the effect of laser-assisted turning on the deformation of thin-walled parts. The results of the study show that compared with conventional turning, the cutting forces of laser-assisted turning deformation of thin-walled parts can be reduced in laser-assisted turning. Compared with conventional turning, the machining deformation of thin-walled parts can be reduced in laser-assisted turning. Compared with conventional turning, the machining deformation of thin-walled parts in laser-assisted turning is reduced by 13.5%, 11.2% and 10.4% respectively.

Key Words: laser-assisted turning; superalloy; thin wall parts

Received: 2023-06-02; Revised: 2023-11-12; Accepted: 2024-01-11

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(2019ZE054005); Air China Development Independent Innovation Fund (ZZCX-2019-019); Shenyang Young and middle-aged Talents Project (RC210439)