

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-09

## 新型 GH4198 高温合金车削加工性研究

靳淇超<sup>1</sup>, 张锦淇<sup>1</sup>, 谭海兵<sup>2</sup>, 李福林<sup>3</sup>, 付锐<sup>3</sup>, 郭磊<sup>1</sup>

(1. 长安大学 工程机械学院, 西安 710064)

(2. 中国航发四川燃气涡轮研究材料工艺室, 成都 610500)

(3. 北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081)

**摘要:** 新型 GH4198 镍基高温合金为高性能航空发动机热端部件的关键材料, 其车削加工性对表面质量和服役性能具有重要影响。基于单因素方法开展车削实验并研究车削参数对车削力、车削温度和表面粗糙度的影响规律。结果表明: 在实验参数范围内, 车削力与车削温度都随车削参数的增大而不断增大, 对车削力影响最大的因素为车削深度, 最大车削力达 685.2 N; 对车削温度影响最大的因素为车削速度, 最大车削温度达 484.8 °C; 进给速度对表面粗糙度影响最大, 最小表面粗糙度达 0.346  $\mu\text{m}$ 。因此, 在粗加工时可选取车削速度  $v=130$  m/min, 进给速度  $f=0.14$  mm/r, 车削深度  $a_p=0.8$  mm 以达到高效去除材料的目的, 在精加工时可选取车削速度  $v=90$  m/min, 进给速度  $f=0.06$  mm/r, 车削深度  $a_p=0.3$  mm 以达到提高表面质量的目的, 为新型材料 GH4198 加工提供理论基础。

**关键词:** GH4198 合金; 车削参数; 车削力; 车削温度; 表面粗糙度

**中图分类号:** V263; TG519.1

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

## Research on turning machinability of a new GH4198 superalloy

JIN Qichao<sup>1</sup>, ZHANG Jinqi<sup>1</sup>, TAN Haibing<sup>2</sup>, LI Fulin<sup>3</sup>, FU Rui<sup>3</sup>, GUO Lei<sup>1</sup>

(1. School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

(2. Department of Material Technology, Sichuan Gas Turbine Establishment Aero Engine Corporation of China, Chengdu 610500, China)

(3. Gaona Aero Material Co., Ltd., Beijing 100081, China)

**Abstract:** The new GH4198 nickel based superalloy is a key material for high-performance aviation engine hot end components, and its turning workability has a significant impact on surface quality and service performance. Conduct turning experiments based on single factor method and study the influence of turning parameters on turning force, turning temperature, and surface roughness. The experimental results show that within the range of experimental parameters, both turning force and turning temperature increase continuously with the increase of turning parameters. Among them, the factor that has the greatest impact on turning force is turning depth, with a maximum turning force of 685.2 N; The factor that has the greatest impact on turning temperature is turning speed, with a maximum turning temperature of 484.8 °C; The feed rate has the greatest impact on surface roughness, with a minimum surface roughness of 0.346  $\mu\text{m}$ . Therefore, during rough machining, a turning speed of  $v=130$  m/min, a feed rate of  $f=0.14$  mm/r, and a turning depth of  $a_p=0.8$  mm can be selected to achieve efficient material removal. During precision machining, a turning speed of  $v=90$  m/min, a feed rate of  $f=0.06$  mm/r, and a turning depth of  $a_p=0.3$  mm can be selected to improve surface quality, providing a theoretical basis for the processing of the new material GH4198.

**Key words:** GH4198 alloy; turning parameters; turning force; turning temperature; surface roughness

收稿日期: 2024-03-06; 修回日期: 2024-06-11

基金项目: 陕西省自然科学基金青年项目(2021JQ-284)

通信作者: 郭磊(1986-), 男, 博士, 副教授。E-mail: lguo@chd.edu.cn

引用格式: 靳淇超, 张锦淇, 谭海兵, 等. 新型 GH4198 高温合金车削加工性研究[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-9.

JIN Qichao, ZHANG Jinqi, TAN Haibing, et al. Research on turning machinability of a new GH4198 superalloy[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-9. (in Chinese)

## 0 引言

GH4198 合金是我国近年来研制的新型铸/锻涡轮盘合金,该合金为镍基沉淀强化型变形高温合金,其主要化学成分可参照美国粉末涡轮盘合金 Rene104(ME3)<sup>[1]</sup>。它的合金化程度高,具有优异的力学性能、耐腐蚀性能和抗高温氧化性能<sup>[2]</sup>,是高性能航空航天发动机盘件、环形件及其他热端部件的关键材料,该类零件通常采用车削加工成型。新材料在新一代装备过程中需伴随新的工艺<sup>[3]</sup>,高温合金作为典型的难加工材料,切削力大、切削温度高、加工表面质量难以控制。因此,探究新型 GH4198 车削加工性对提升发动机盘件、环件加工质量具有重要意义。

在高温合金切削过程中,切削力与切削温度的大小会直接影响刀具的使用寿命以及工件的表面质量,工件的加工表面质量包含表面粗糙度、残余应力等<sup>[4-5]</sup>,而切削参数的选择又对切削力、切削温度以及表面质量具有显著影响。因此,研究切削参数对 GH4198 合金加工性的影响具有重要意义。由于该高温合金切削加工难度较大,且主要应用于航空航天发动机盘件、环形件等热端部件,故本实验采用车削加工的方式进行探究。

对高温合金切削加工性能研究,国内外研究人员从切削力、切削温度、表面粗糙度、刀具磨损等方面做了相关研究。邱坤等<sup>[6]</sup>进行了镍基铸造高温合金 K24 车削实验,结果表明,在切削过程中,由于切削速度增大,刀具磨损加剧,导致实际切削深度减小,切削力也随之减小,切削温度也相对降低;Thakur 等<sup>[7]</sup>使用碳化钨刀片加工 Inconel 718 的实验中推荐加工条件在低切削深度下选择中等切削速度和中等进给速度,以解决 Inconel 718 的可切削性问题;黄志阳<sup>[8]</sup>设计并进行了 Inconel 718 车削实验,分析认为,随着切削参数的增大,沿着切削速度方向、进给方向、切削深度方向的力都有不同程度的增大,其中沿切削深度方向切削力变化最大;吴明阳等<sup>[9]</sup>使用 PCBN 刀具进行了 GH4169 车削实验,结果表明,当切削速度逐渐增大,切削力略有降低,当切削深度和进给量逐渐增大时,切削力增大趋势较为显著,当刀具后刀面磨损逐渐变大,切削力也有变大趋势;王哲等<sup>[10]</sup>对 Inconel 718 镍基高温合金基于田口法设计了正交切

削仿真实验,结果表明,切削温度随切削参数变化关系呈正相关,其中切削速度对切削温度影响最大;王明海等<sup>[11]</sup>应用 Abaqus 有限元分析软件,对 GH4169 合金车削过程中温度场与应力场进行分析,结果表明,当切削速度和切削深度逐渐增大,切削力也逐渐增大,且切削深度对切削力的影响更显著,而进给量对切削力的影响不明显;Sgj 等<sup>[12]</sup>利用 ANSYS 有限元软件对 Inconel 718 进行车削仿真,结果表明,切削深度对切削力的影响最大,其次为切削速度,对刀尖温度而言,切削速度和进给量的影响大于切削深度;Bushlya 等<sup>[13]</sup>用未涂层和涂层 PCBN 刀具进行高温合金切削性能研究,研究发现涂层的保护功能能够提高刀具寿命达 20%;Ezilarasan 等<sup>[14]</sup>通过使用  $Al_2O_3/SiC_w$  刀具车削加工 Nimonic C-263 实验中发现,车削速度在 125~250 m/min 时,车削力随车削速度的增大而逐渐减小,当进给量和车削深度增大时,车削力也增大;Narutaki 等<sup>[15]</sup>通过  $Si_3N_4$  刀具车削加工 Inconel 718 试验中利用热电偶测试了刀具与切屑界面的温度,实验结果表明,当切削速度不断增大,切削温度也随之不断增大;龙重旺等<sup>[16]</sup>通过对比实验,发现 TiAlN 涂层硬质合金刀具获得的加工表面质量优于  $Al_2O_3$  复合涂层刀具;金洁茹等<sup>[17]</sup>通过车削 GH4169 高温合金实验发现表面粗糙度随切削速度的增大而减小;孔宪俊等<sup>[18]</sup>进行了正交车削 GH4169 合金实验,结果表明,影响表面粗糙度的主次因素依次为进给量、切削速度和切削深度。综上所述,国内外对高温合金加工性能方面进行了大量研究,在理论和实验方面获得了不同的成果,但在新材料的加工性能方面研究成果相对较少。对此,本文选择车削力,车削温度,表面粗糙度三个方面进行新型铸/锻 GH4198 高温合金车削加工性能研究。

由于 GH4198 合金为新型高温合金材料,其合金性能较传统高温合金更高,导致其加工难度更大,目前缺乏相关加工性能方面的研究成果。因此,本文采用单因素变量法,使用涂层硬质合金刀片开展 GH4198 合金外圆车削实验,测试车削力、车削温度和表面粗糙度,分析车削参数对 GH4198 合金加工性能的影响规律,为 GH4198 车削加工提供重要的参考。

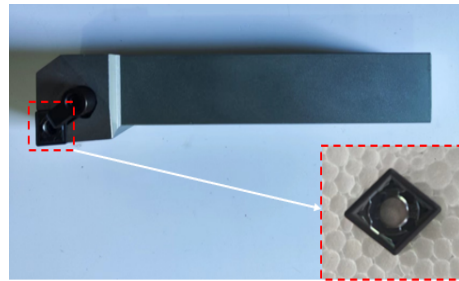
## 1 车削实验

### 1.1 实验材料

GH4198 合金为变形高温合金,制备工艺采用真空感应+电渣重熔连续定向凝固双联工艺制备铸锭,铸锭依次经过 1 120 °C、1 160 °C 两个升温台阶以及 1195 °C/12 h 的步骤进行均匀化热处理,再经过锻造工艺加工成型<sup>[1]</sup>。试件直径尺寸为  $\Phi 50$  mm,长度为 140 mm;针对高温合金显微强化硬度高,高温强度高特点,为延长刀具使用寿命,提高加工表面质量,在实际加工中刀具材料常选用耐磨性较好的 AlTiN 涂层硬质合金刀具,其主要参数为 80°菱形,刀具后角为 0°,刀尖半径为 0.8 mm,如图 1 所示。GH4198 在第二代涡轮盘 GH4096 合金基础上添加了 Ta 元素,增加了  $\gamma'$  的稳定性,其  $\gamma'$  相体积分占合金的 53% 左右,其主要化学成分如表 1 所示。相较于高温合金 GH4169,新材料 GH4198 的屈服强度以及抗拉强度分别提高了大约 3.6% 和 28%,如表 2 所示;该合金可在 700 ~ 800 °C 范围内长期使用,短时最高使用温度可达 850 °C,这在满足轻量化的同时提高了材料性能。然而,在切削过程中,GH4198 在高温状态下仍具有较高的强度,导致切削力大,容易加速刀具磨损,降低刀具使用寿命。除此之外,由于切削热的作用使得高温合金变形区产生晶粒细化现象,导致工件表面产生加工硬化,加剧了刀具的磨损,给切削加工带来了很大难度。同时,刀具的加速磨损也会造成表面质量难以控制等问题。



(a) GH4198 合金棒料



(b) 车削刀片及刀杆

图 1 实验材料及刀具

Fig. 1 Experimental materials and tools

表 1 镍基 GH4198 合金化学成分

Table 1 Chemical composition of nickel based GH4198 (% , mass fraction)<sup>[1]</sup>

参数	数值	参数	数值
Cr	13.0	Nb	1.0
Co	20.5	Ta	2.5
W	2.3	C	0.05
Mo	3.8	B	0.015
Ti	3.8	Zr	0.05
Al	3.4		

表 2 GH4198 与 GH4169 的室温力学性能<sup>[20]</sup>

Table 2 Room temperature mechanical capability of GH4198 and GH4169

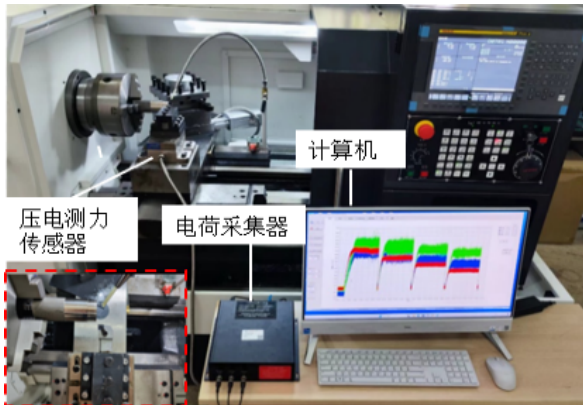
材料	屈服强度 $\sigma_s$ /MPa	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	延伸率 $\delta$ /%	弹性模量 $E$ /GPa	热导率 $\lambda$ /(W·m·k)	密度 $\rho$ /(kg·m <sup>3</sup> )	泊松比 $\nu$
GH4198	1 150	1 650	20.0	229	23.2	8 300	0.28
GH4169	1 110	1 290	23.3	206	11.2	8 470	0.30

### 1.2 实验条件及方案

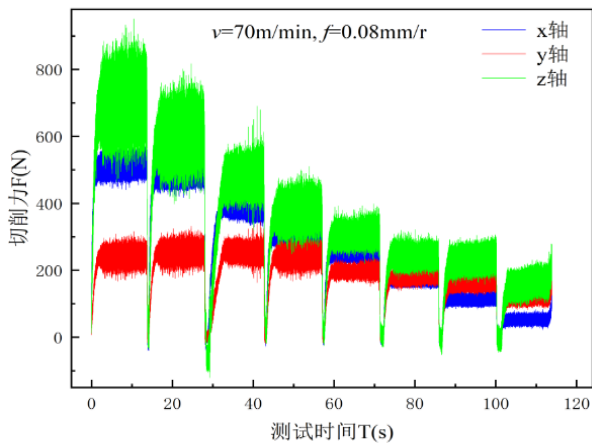
实验采用 SK66Q 数控车床,切削方式为外圆连续车削。采用 YDCL-Ⅲ 89B 型号的三向压电测力系统采集车削力,将采集的车削力信号通过 Matlab 软件进行滤波处理;采用 FOTRIC 346+红

外测温仪采集车削温度,将采集的温度数据通过 AnalyzIR 软件进行处理。为保证实验结果的可靠性,在同一工艺参数下重复三次实验并采集车削稳阶段的车削力数据和车削温度数据后取平均值作为最终测量结果;采用 Mahr XT20 粗糙度测试仪测量表面粗糙度,为了减少误差,对同一参数加

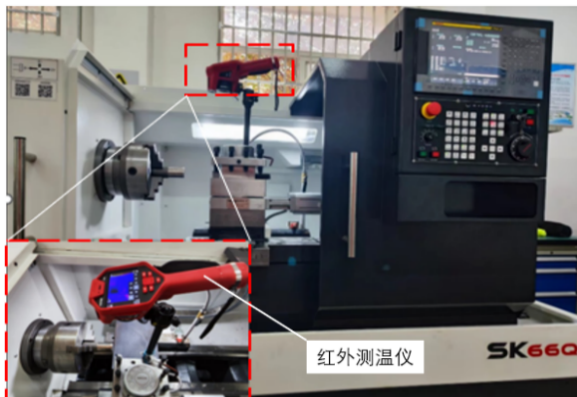
工区域,沿周向选取3个点进行测量,在测量过程中,探针与被测区域进给方向保持垂直,按试件轴向进行取样,仪器的取样长度为0.8 mm,评定长度为5.6 mm。每个点的粗糙度值测量5次取平均值,再将3个点的表面粗糙度平均值作为每组参数的表面粗糙度测量结果。实验过程如图3所示。



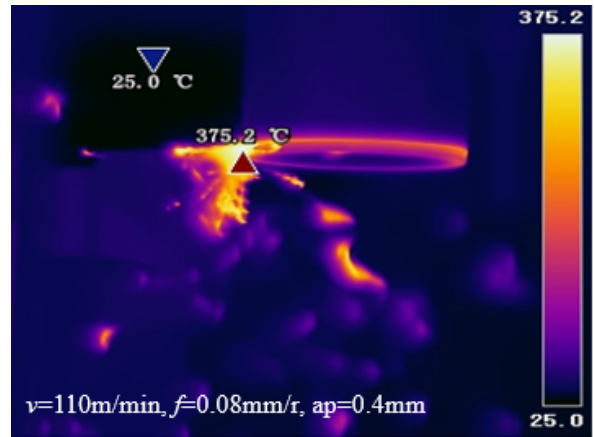
(a) 车削力测试



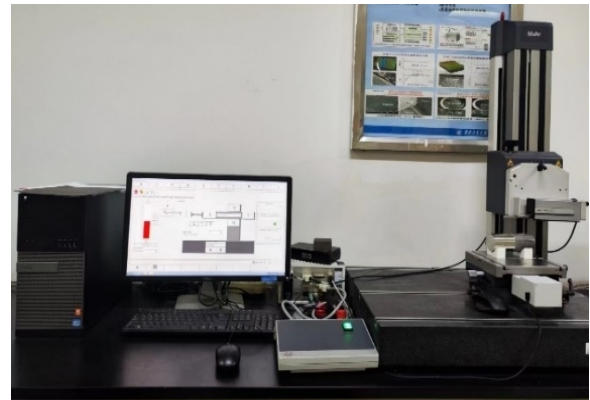
(b) 车削力测试信号



(c) 车削温度测试



(d) 车削温度红外成像



(e) 粗糙度测试仪

图3 实验测试系统

Fig. 3 Experimental testing system

在车削过程中,车削参数的变化会使车削力、车削温度以及表面粗糙度随之变化。采用单因素实验法,研究车削参数(车削速度 $v$ 、进给速度 $f$ 、车削深度 $a_p$ )对GH4198外圆车削的车削力、车削温度以及表面粗糙度的影响变化规律,实验工艺参数如表3所示。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 车削参数对车削力的影响

车削力的大小直接影响切削热的多少并进一步影响刀具的磨损、加工表面质量及加工零件精度。车削力过大是造成刀具磨损、崩刃的主要原因,进而造成对工件表面粗糙度的二次影响。车削力主要来源于切屑与刀具前刀面间的摩擦力,垂直于前刀面的挤压作用力以及刀具后刀面和材料加工表面相互之间的作用力,该作用力是与已

加工表面平行的摩擦力以及与已加工表面垂直的挤压作用力的合力。此外,为了方便切削力的研究分析,通常将切削力的合力  $F$  分解为三维空间坐标中的轴向力  $F_x$ 、径向力  $F_y$  和主切削力  $F_z$ 。合力  $F$  的大小与三个分力的关系为

表 3 GH4198 合金车削实验参数  
Table 3 Experimental parameters for turning GH4198 alloy

试验编号	车削速度 $v$ / (m·min)	进给速度 $f$ / (mm·r)	车削深度 $a_p$ /mm
1	10		
2	30		
3	50		
4	70		
5	90	0.08	
6	110		
7	130		
8	150		
<hr/>			
9		0.02	0.4
10		0.04	
11		0.06	
12		0.08	
13		0.10	
14		0.12	
15		0.14	
16		0.16	
17	70		0.1
18			0.2
19			0.3
20			0.4
21		0.08	0.5
22			0.6
23			0.7
24			0.8

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

以 Oxley's 解析加工预测理论为基础,对主变形区切削力进行分析,主变形区切削合力  $R$  计算公式<sup>[21]</sup>为

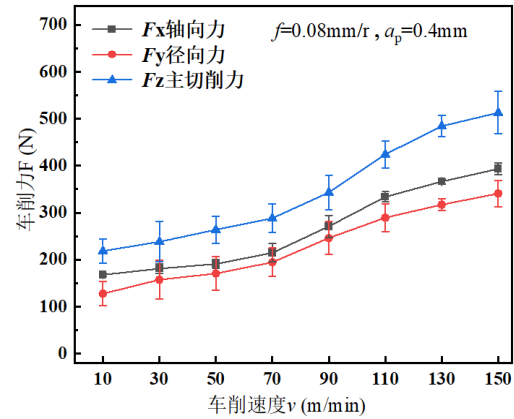
$$F_s = \frac{K_s t_1 t_2}{\sin\varphi} \quad (2)$$

$$R = \frac{F_s}{\cos\theta} \quad (3)$$

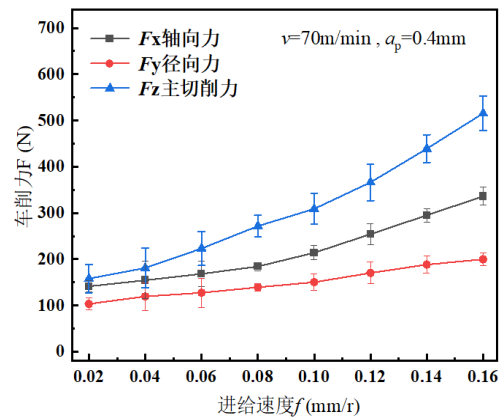
式中: $K_s$ 为剪切面处的剪切流动应力,与车削速度呈正比,可由 Von Mises 屈服准则求得; $t_1$ 为切削厚度,相当于车削进给量  $f$ ; $t_2$ 为切削宽度,相当于车

削中的切削深度  $a_p$ ; $\varphi$ 为剪切角; $\theta$ 为主变形区切削合力  $R$ 与剪切面之间的夹角。

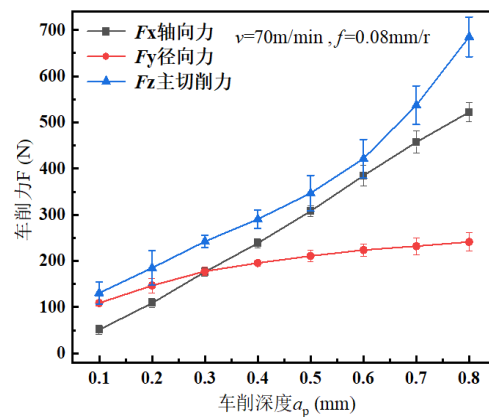
由式(2)可知,车削力的大小变化与车削参数息息相关,车削参数对车削力的影响变化如图 4 所示。



(a) 车削速度对车削力的影响



(b) 进给速度对车削力的影响



(c) 车削深度对车削力的影响

图 4 车削参数对车削力的影响

Fig. 4 Effect of Turning Parameters on Turning Force

从图4(a)可以看出:随着车削速度的增大各向车削力也逐渐增大,主切削力 $F_z$ 在三向分力中最大,车削力增幅为294.46 N。轴向力 $F_x$ 与径向力 $F_y$ 相较于主切削力 $F_z$ 变化规律基本一致。车削速度在10~110 m/min时,各向切削力增长趋势较快,这是由于车削速度增大,材料去除率增大,材料塑性变形较大,导致材料加工硬化,从而引起车削力的快速增加。车削速度在110~150 m/min时,车削力增长趋势变缓慢,这是因为车削速度增大,车削温度不断升高,材料表面硬度有所降低,导致车削力增幅降低。从图4(b)可以看出:随着进给速度的不断增加,各向车削力也不断增大。主切削力 $F_z$ 在三向分力中最大且增幅较快,增幅为357.49 N。这是由于进给速度不断增大,高温合金的切削面积也不断增大,刀具和工件之间的变形力和摩擦力也变大,从而导致车削力也不断增大。从图中可以看出,轴向力 $F_x$ 的变化规律与主切削力 $F_z$ 基本保持一致,径向力 $F_y$ 随着进给量的增大增幅趋于平缓,可以得到进给速度对轴向力 $F_x$ 的影响大于对径向力 $F_y$ 的影响。从图4(c)可以看出:随着车削深度的增大,主切削力 $F_z$ 呈快速增长趋势且在三向分力中依然保持最大,增幅达到554.72 N。这是由于车削深度不断增大,高温合金切削厚度也不断增大,切削面积随之增大,造成车削力快速增大。综上,车削深度的增大也使得轴向力 $F_x$ 和径向力 $F_y$ 逐渐增大, $F_y$ 增大趋势变缓且切削深度对径向力 $F_y$ 影响不明显。根据以上分析可知,车削参数对车削力有明显影响。其中,车削深度对车削力的影响最大,其次为进给速度和车削速度。

## 2.2 车削参数对车削温度的影响

在切削过程中,切削温度变化会造成积屑瘤的产生或消失,直接影响到工件的加工精度和表面质量<sup>[19]</sup>。在切削加工过程中会产生大量热量,其热量会经过切屑、刀具、工件内部以及空气等介质传出。而切屑在热量的传递过程中占主要部分,其余热量由工件、刀具以及空气等介质传出,而通过空气等介质传递的热量在总热量传递过程中只占据很少一部分。因此,在切削过程中,热量平衡公式可表示为

$$Q = Q_c + Q_f + Q_w + Q_m \quad (4)$$

式中: $Q$ 为总的热量; $Q_c$ 为切屑传递的热量; $Q_f$ 为刀具传递的热量; $Q_w$ 为工件内部传递的热量; $Q_m$ 为空气等介质传递的热量。

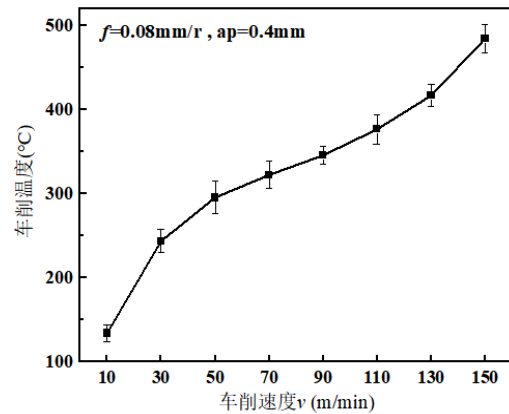
在对金属切削温度变化问题进行探究时,一般以刀具与切屑接触区的平均温度作为加工时的切削温度。刀—屑接触区的平均温度 $T_{int}$ 计算公式<sup>[21]</sup>为

$$T_{int} = T_0 + \Delta T_{xy} + \xi \Delta T_M \quad (5)$$

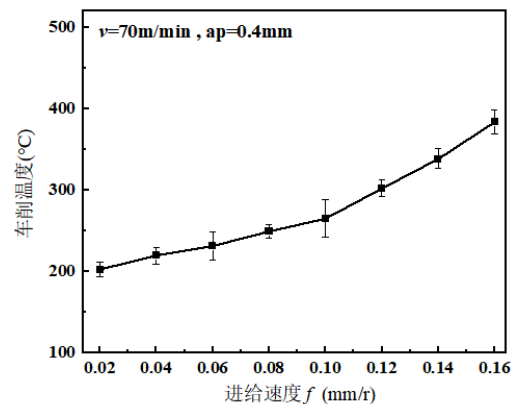
$$\Delta T_{xy} = \frac{(1 - \psi) F_s \cos \alpha}{\rho \omega t_1 t_2 \cos(\varphi - \alpha)} \quad (6)$$

式中: $T_0$ 为室温; $\Delta T_{xy}$ 为切屑形成的塑性变形区的温升; $\xi$ 为刀—屑接触区平均温升与最大温升的比值, $0 \leq \xi \leq 1$ ; $\Delta T_M$ 为刀—屑接触区的最大温升,可由布思莱德公式得出; $\psi$ 为塑性功转化为工件温升的比例, $0 \leq \psi \leq 1$ ,可由布思莱德经验公式求得; $\rho$ 为材料密度; $\omega$ 为材料比热容; $\alpha$ 为刀具前角。

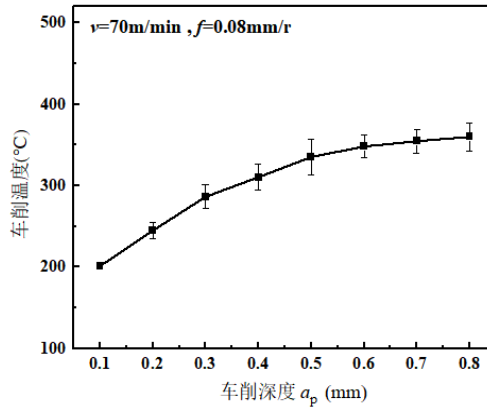
由上式可知,车削温度与车削力、车削参数相关联,车削参数对车削温度的影响变化如图5所示。



(a) 车削速度对车削温度的影响



(b) 进给速度对车削温度的影响



(c) 车削深度对车削温度的影响

图5 车削参数对车削温度的影响

Fig. 5 Effect of turning parameters on turning temperature

在车削温度的测量过程中,车削方式采用干切削,由于切屑的堆积,造成仪器测量的车削温度略低于实际车削温度。从图5(a)可以看出:车削速度增大,车削温度呈增大趋势,当车削速度从10 m/min增加到150 m/min,车削温度达到484.8 °C,实验参数变化范围内温度上升幅值为350.5 °C。这是由于车削速度的上升使得车削过程中的摩擦加剧,而且材料单位时间的去除率上升,从而产生更多的切削热导致车削温度的升高。从图5(b)可以看出:进给速度逐渐增大,车削温度也不断增大,进给速度从0.02 mm/r增加到0.16 mm/r,车削温度达到383.4 °C,取值变化中温度上升幅值为181 °C。这是由于进给速度的增大,材料去除率也增大,导致车削温度也不断上升。从图5(c)可以看出:随着车削深度增大,车削温度也呈现增大趋势,车削深度从0.1 mm增加到0.8 mm,车削温度达到359.9 °C,取值变化中温度上升幅值为158.5 °C。这是由于材料车削深度增加,导致工件与刀具间切削力与摩擦力增大,转变为切削热的功也增大。但同时车削深度增大导致切屑截面积增大,切屑承载的热量增加,带走更多的切削热。从而在车削深度达到0.5 mm后,继续增大车削深度,车削温度增大趋势变缓。根据上述分析可知,车削参数对车削温度影响明显,车削温度与车削力一样随车削参数保持增大趋势。其中,车削速度对车削温度的影响最大,其次为进给速度和车削深度。

### 2.3 车削参数对表面粗糙度的影响

表面粗糙度是判定零件表面完整性的一项重要指标,对零件的使用寿命和可靠性有重要影响,表面粗糙度的大小直接关系到高温合金零部件表面加工质量的优劣。在进行外圆车削时,工件材料表面的残留面积高度与进给速度密切相关,其残留面积的多少以及高度大小都会直接影响表面粗糙度的大小。在不考虑圆弧半径影响的情况下,残留面积高度为

$$H = \frac{f}{\cot k_r + \cot k'_r} \quad (7)$$

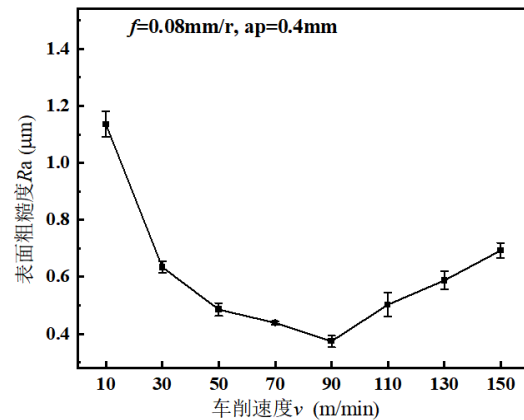
式中: $f$ 为进给量; $k_r$ 为主偏角; $k'_r$ 为副偏角。

当车削深度较小,表面粗糙度值则受刀尖圆弧半径的影响变大,该情况下残留面积的高度为

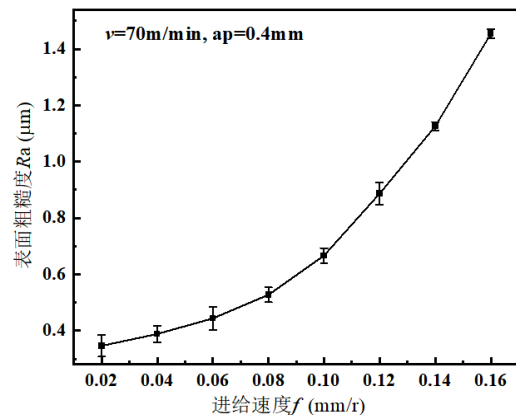
$$H = \frac{1000f^2}{8r} \quad (8)$$

式中: $r$ 为刀尖圆弧半径。

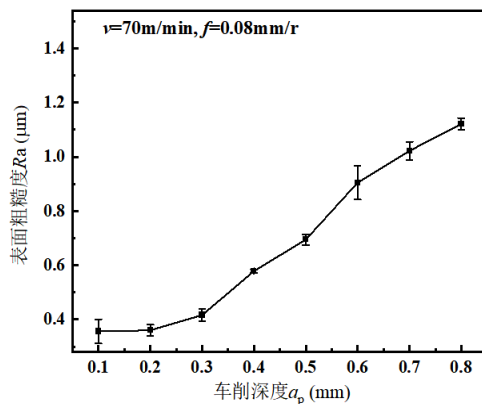
车削参数对表面粗糙度的影响规律如图6所示。



(a) 车削速度对表面粗糙度的影响



(b) 进给速度对表面粗糙度的影响



(c) 车削深度对表面粗糙度的影响

图6 车削参数对表面粗糙度的影响

Fig. 6 Effect of turning parameters on surface roughness

从图6(a)可以看出:当车削速度不断增大,表面粗糙度先减小后增大。车削速度在10~90 m/min的区间范围内,表面粗糙度呈明显减小趋势;当车削速度达到90 m/min时,表面粗糙度达到0.374  $\mu\text{m}$ ,为实验参数范围内的最小值。这是因为表面粗糙度与切屑的形成存在密切关系。在车削过程中,随着刀具的移动,其前刀面与工件表面产生挤压和摩擦作用,使工件表面材料发生剪切滑移。这使得刀具切削部分的切削力增大,极易在切削过程中产生积屑瘤代替刀具进行切削,因而导致表面粗糙度变大。当车削速度继续增大,车削温度也不断增大,积屑瘤会发生软化,切屑与前刀面摩擦系数减小,车削过程平稳,表面粗糙度随之降低。当继续增大车削速度,较高的车削速度使得切屑不易排出,造成工件加工表面刮伤,同时,由于刀具磨损加快,导致工件车削表面残留高度增大,表面粗糙度升高。从图6(b)可以看出:进给速度从0.02 mm/r增大到0.16 mm/r,表面粗糙度从0.346  $\mu\text{m}$ 增大到1.454  $\mu\text{m}$ ,表面粗糙度随进给速度呈正相关增长。这是因为进给速度不断增大,车削过程中切削厚度增大,导致切屑不易排出。同时,由于切削厚度的增加,车削力也随之增大,切屑产生剧烈变形,故表面粗糙度也不断增大。从图6(c)可以看出:车削深度逐渐增大,表面粗糙度也逐渐增大,表面粗糙度从0.356  $\mu\text{m}$ 增大到1.121  $\mu\text{m}$ 。这是因为车削深度增大,车削力随之增大,导致切屑变形逐渐剧烈。同时,伴随着高温合金切削面积的增大,切屑厚度也增大,对已加工表面容易造成刮伤,导致表面粗糙度也增大。根据上述分析可知,车削参数对表面粗糙度

影响明显。进给速度对表面粗糙度的影响最大,其次为车削深度和车削速度。实验结果符合精车加工要求,在精车加工过程中应选择尽量小的进给速度与车削深度、适当提高车削速度进行加工,以保证工件材料的加工质量。

### 3 结论

1) 车削力随车削参数的增大而增大,其中车削深度对车削力的影响最大。在参数变化范围内,主切削力由130.48 N增大到685.2 N。

2) 车削温度随车削参数的增大而增大,其中车削速度对车削温度影响最大。在参数变化范围内,车削温度由134.3  $^{\circ}\text{C}$ 增大到484.8  $^{\circ}\text{C}$ 。

3) 当车削速度不断增大,表面粗糙度先减小后增大;当进给速度和车削深度不断增大,表面粗糙度也逐渐增大,且对表面粗糙度的影响最大的为进给速度。在车削参数范围内,表面粗糙度由0.346  $\mu\text{m}$ 增大到1.454  $\mu\text{m}$ 。

4) 在粗加工时可选车削速度  $v=130$  m/min,进给速度  $f=0.14$  mm/r,车削深度  $a_p=0.8$  mm以达到高效去除材料目的;在精加工时可选取车削速度  $v=90$  m/min,进给速度  $f=0.06$  mm/r,车削深度  $a_p=0.3$  mm以达到提高表面质量目的,可将表面粗糙度控制在0.5  $\mu\text{m}$ 以内。

### 参考文献

- [1] 李福林,谭海兵,孟令超,等. 新型铸&锻GH4198合金组织特征及偏析行为[J]. 稀有金属, 2020, 44(8): 807-815. LI Fulin, TAN Haibing, MENG Lingchao, et al. Microstructural characteristics and segregation behavior of a newly developed cast & wrought superalloy GH4198[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44(8): 807-815. (in Chinese)
- [2] 田伟,钟燕,刘砚飞,等. 新型铸&锻GH4096合金篦齿盘研制与考核[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(4): 1325-1333. TIAN Wei, ZHONG Yan, LIU Yanfei, et al. Development and Testing of Novel Casted & Wrought GH4096 Al-alloy Labyrinth Disk[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(4): 1325-1333. (in Chinese)
- [3] 姜涛,刘新灵,陶春虎,等. 中国航空工业失效分析的现状与展望[C]// 2015年全国失效分析学术会议论文集. 2015: 10-19. JIANG Tao, LIU Xinlin, TAO Chunhu, et al. Actuality and expectation of failure analysis in aviation industries of China[C]// Proceedings of the 2015 National Conference on Failure Analysis. 2015: 10-19. (in Chinese)
- [4] 胡越,张晟玮,蒋睿嵩,等. 国产7050铝合金薄壁承力框车削残余应力变形控制研究[J/OL]. 航空工程进展. http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1479.V.20231229.



- 0901.002.html.
- HU Yue, ZHANG Shengwei, JIANG Ruisong, et al. Research on residual stress and deformation control of domestic 7050 aluminum alloy thin-wall bearing frame turning [J/OL]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1479.V.20231229.0901.002.html>. (in Chinese)
- [5] 马秀伟, 胡越, 姚雯莉, 等. 国产 7050 铝合金薄壁承压框车削变形预测研究[J/OL]. *航空工程进展*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1479.V.20231229.0901.002.html>. MA Xiuwei, HU Yue, YAO Wenli, et al. Research on prediction of turning deformation of domestic 7050 aluminum alloy thin-wall bearing frame[J/OL]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1479.V.20231229.0901.002.html>. (in Chinese)
- [6] 邱坤, 王新永, 庞思勤. 镍基铸造高温合金 K24 的切削温度实验研究[J]. *功能材料*, 2012, 43(6): 692-695. QIU Kun, WANG Xinyong, PANG Siqing. Cast nickel-base superalloy K24 study of cutting temperature[J]. *Journal of Functional Materials*, 2012, 43(6): 692-695. (in Chinese)
- [7] THAKUR D G, RAMAMOORTHY B, VIJAYARAGHAVAN L. Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning [J]. *Materials & Design*, 2009, 30(5): 1718-1725.
- [8] 黄志阳. 镍基高温合金 Inconel 718 高效切削表面完整性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018. HUANG Zhiyang. Surface integrity of nickel-based superalloy inconel 718 in high-efficiently cutting process[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [9] 吴明阳, 赵旭, 计伟, 等. PCBN 刀具切削高温合金锯齿形切屑形成机理[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(3): 179-186. WU Mingyang, ZHAO Xu, JI Wei, et al. Generation mechanism of saw-tooth chip in turning of GH4169 with PCBN tool[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(3): 179-186. (in Chinese)
- [10] 王哲, 李磊, 沈雪红. Inconel 718 镍基高温合金车削切削力和切削温度分析[J]. *工具技术*, 2019, 53(11): 51-54. WANG Zhe, LI Lei, SHEN Xuehong. Analysis of Cutting Force and Cutting Temperature of Nickel-based Superalloy Inconel 718 Based on Grey Relational Analysis[J]. *Tool Engineering*, 2019, 53(11): 51-54. (in Chinese)
- [11] 王明海, 王江涛, 郑耀辉, 等. GH4169 三维车削力与温度有限元仿真[J]. *现代制造工程*, 2016 (8): 106-111. WANG Minghai, WANG Jiangtao, ZHENG Yaohui, et al. The finite element simulation of GH4169 three-dimension turning cutting force and temperature[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2016 (8): 106-111. (in Chinese)
- [12] SGJ A, VNG A, VNK A, et al. Analyzing the effect of cutting parameters on forces and tool-tip temperature in turning of nickel-based superalloy using FE simulation[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 49(5): 1833-1843.
- [13] BUSHLYA V, ZHOU J, STÅHL J E. Effect of cutting conditions on machinability of superalloy Inconel 718 during high speed turning with coated and uncoated PCBN tools [J]. *Procedia Cirp*, 2012, 3(none): 370-375.
- [14] EZILARASAN C, VELAYUDHAM A. An experimental analysis and measurement of process performances in machining of nimonic C-263 super alloy[J]. *Measurement*, 2013, 46(1): 185-199.
- [15] NARUTAKI N, YAMANE Y, HAYASHI K, et al. High-speed machining of Inconel 718 with ceramic tools[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1993, 42(1): 103-106.
- [16] 龙重旺, 陈领, 郭智兴, 等. TiAlN 涂层与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层刀具高温合金切削性能研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2020 (9): 154-157. LONG Chongwang, CHEN Ling, GUO Zhixing, et al. Research on super alloy machinability between TiAlN series coating tools and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coating tools[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2020 (9): 154-157. (in Chinese)
- [17] 金洁茹, 张显程, 涂善东, 等. 车削速度对 GH4169 加工表面完整性的影响[J]. *中国表面工程*, 2015, 28(3): 108-113. JIN Jieru, ZHANG Xiancheng, TU Shantung, et al. Effects of cutting speed on Machining surface integrity of GH4169 [J]. *China Surface Engineering*, 2015, 28(3): 108-113. (in Chinese)
- [18] 孔宪俊, 胡光, 赵明, 等. 车削高温合金 GH4169 表面粗糙度及残余应力优化分析[J]. *机床与液压*, 2022, 50(20): 32-37. KONG Xianjun, HU Guang, ZHAO Ming. Optimization Analysis of Surface Roughness and Residual Stress of Turning Superalloy GH4169 [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2022, 50(20): 32-37. (in Chinese)
- [19] 张帅奇, 杨忠学, 张长春, 等. DD5 镍基单晶高温合金缓进磨削力和温度实验研究[J]. *航空工程进展*, 2021, 12(04): 80-89. ZHANG Shuaiqi, YANG Zhongxue, ZHANG Changchun, et al. Experimental Research on Grinding Forces and Temperature of DD5 Nickel-based Single Crystal Super-alloy by Creep-feed Grinding. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2021, 12(04): 80-89. (in Chinese)
- [20] 韩彬. GH4169 高温合金切削加工技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017. HAN Bin. Research on super alloy gh4169 cutting technology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [21] 王运, 张昌明, 张昱. 基于 Oxley's 理论的 300M 钢正交切削加工变量的预测[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(6): 2269-2278. WANG Yun, ZHANG Changming, ZHANG Yu. Prediction of Orthogonal Cutting Variables of 300M Steel Based on Oxley's Theory [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(6): 2269-2278. (in Chinese)

(编辑: 马文静)