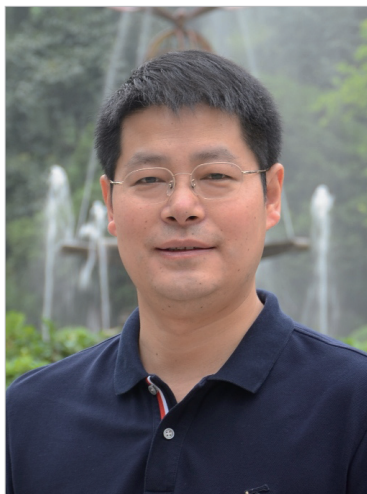


GH4169 高温合金车削加工技术

Turning Technology of GH4169 Superalloy

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 刘维伟 朱立坚 姚倡锋 黄新春



刘维伟

西北工业大学副教授,工学博士。研究方向为计算机辅助技术、难加工材料切削、航空发动机复杂零部件研制。主持或参与 30 余项航空航天预研及型号攻关工作课题,发表文章 30 余篇,申请国家技术专利 9 项。

GH4169 等同于美国牌号 Inconel718,是以体心四方 γ' 和面心立方 γ 相沉淀强化的镍基高温合金。它在低温到 700℃以下具有很高的屈服强度、拉伸强度和持久强度;在 650~760℃具有良好的塑性,并具有优良的高温强度、热稳定性及抗热疲劳性,广泛用于制造喷气发动机的涡

本文采用正交试验方法,使用涂层硬质合金刀片进行了 GH4169 高温合金的外圆车削试验,对加工后的表面粗糙度和表面形貌进行了研究,建立了表面粗糙度的预测模型,分析了表面粗糙度对切削参数的绝对和相对灵敏度,获得了切削参数优选区间,为 GH4169 高温合金零件的车削加工参数优化提供了试验依据。

轮盘、涡轮轴、轴颈、封严环和叶片等高温部件,并在宇航、核能、石油工业中也得到了极为广泛的应用^[1-2]。由于 GH4169 中含有许多高熔点合金元素及其碳化物、氮化物,在一定温度范围内能保持相当高的强度和硬度,而且导热率很低,使得 GH4169 切削加工性较差,具体表现为切削力大、切削温度高、刀具磨损剧烈和排屑困难^[3-5]。

国内外学者对 GH4169 的切削进行了多方面的研究。Arunachalam 等^[6-7]研究了 CBN、陶瓷和涂层硬质合金刀具车削 Inconel718 产生的残余应力和表面粗糙度,结果表明,陶瓷刀具产生残余拉应力比 CBN 刀具产生的大,CBN 刀具产生的残余应力和表面粗糙度对切削速度和切削深度更敏感,采用冷却液可以产生残

余压应力或者较低的残余拉应力,同时干切削产生残余拉应力。Pawade 等^[8-9]研究了加工参数和刀刃几何对表面完整性的影响,结果表明,采用较高切削速度、较低进给率和适当的切深,加上刃磨的切削刃在已加工表面可以获得残余压应力,硬化深度为 30 μm ,变化范围为 370~490HV,此时基体硬度为 220~361HV,加工影响区深度达到 200 μm ,硬化程度受刀刃几何和切深影响大。Ezugwu 等^[10]研究了陶瓷刀具车削 Inconel718 时不同冷却压力对切削力和表面完整性的影响,结果表明,15MPa 的冷却压力可以抑制沟槽磨损因此延长刀具寿命,切削力随冷却压力的增加而降低,生成的粗糙度都很低,微观组织结果表明,存在塑性变形,硬化深度达到 0.15mm。黄奇等^[11]研究了

车削 GH33A 的表面完整性,结果表明,车削后表面粗糙度和残余拉应力较大,而且加工硬化严重,采用较小的进给量和切削深度,使粗糙度、残余应力和加工硬化减小,适当提高切削速度有利于降低表面粗糙度和残余应力。田荣鑫等^[12]针对高速铣削表面粗糙度的工艺控制,提出了基于表面粗糙度经验模型的工艺参数灵敏度和相对灵敏度概念,给出了工艺参数稳定域和非稳定域的划分原则,结合正交试验获得的不同切削工艺参数对表面粗糙度的影响曲线,提出了工艺参数区间的优选办法。

本文采用正交试验方法,使用涂层硬质合金刀片进行了 GH4169 高温合金的外圆车削试验,对加工后的表面粗糙度和表面形貌进行了研究,建立了表面粗糙度的预测模型,分析了表面粗糙度对切削参数的绝对和相对灵敏度,获得了切削参数优选区间,为 GH4169 高温合金零件的车削加工参数优化提供了试验依据。

GH4169 外圆车削试验

1 试验条件

试件材料为 GH4169 高温合金,采用圆棒试件,直径 30mm,长 50mm。试验机床为 CK7525 数控车床,最大主轴转速为 3000r/min,冷却方式采用乳化液冷却。刀具选用 SANDVIK 公司生产的 PVD-TiAlN 涂层硬质合金刀片。车削试验现场如图 1 所示。

表面粗糙度采用 TR240 表面粗

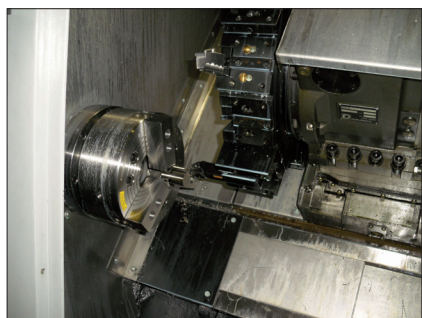


图1 车削试验现场

糙度测试仪进行测量,在已加工表面上共测量 5 个点,然后求平均值。表面形貌采用 VECO 三维形貌测试仪进行测量。

2 试验方案

采用 3 因素 3 水平正交试验的方法进行 GH4169 高温合金的外圆车削试验。每一个试件进行切削试验之前,都采用同样的切削参数去除 0.5mm 的厚度,以消除不均匀的表面,保证试件的一致性。试验方案及表面粗糙度测试结果如表 1 所示。

表1 正交试验方案及表面粗糙度测试结果

a_p /mm	f /(mm·r ⁻¹)	v /(m·min ⁻¹)	R_a /μm
0.2	0.10	65	0.802
0.2	0.15	80	0.754
0.2	0.20	95	1.137
0.3	0.10	80	0.406
0.3	0.15	95	0.772
0.3	0.20	65	1.880
0.4	0.10	95	0.661
0.4	0.15	65	0.761
0.4	0.20	80	1.677

试验结果与讨论

1 表面粗糙度经验公式的建立

在机床特征和刀具特征确定的前提下,基于正交试验方法获得的表面粗糙度的经验模型一般采用如下形式^[13]:

$$R_a = C a_p^{a_1} f^{a_2} v^{a_3}, \quad (1)$$

其中, C 为取决于被加工材料和切削条件的系数, a_1, a_2, a_3 分别为指数。

根据表 1 表面粗糙度的测试结果,采用多元线性回归法进行拟合,最终得到表面粗糙度的经验公式为:

$$R_a = 10^{2.271} a_p^{0.083} f^{1.303} v^{-0.623}. \quad (2)$$

运用极差分析法可以确定表面粗糙度影响因素的主次关系,极差统计如表 2 所示。极差最大的列,对应因素对表面粗糙度的影响最大,即进给量是影响高温合金车削加工中表

面粗糙度的最主要因素,其次是切削速度,切削深度的影响最小。

表2 表面粗糙度的极差统计

因素	切削速度 / (m·min ⁻¹)	进给量 / (mm·r ⁻¹)	切削深度 / mm
水平 1	1.148	0.623	0.898
水平 2	0.946	0.762	1.019
水平 3	0.857	1.565	1.033
极差	0.291	0.942	0.135

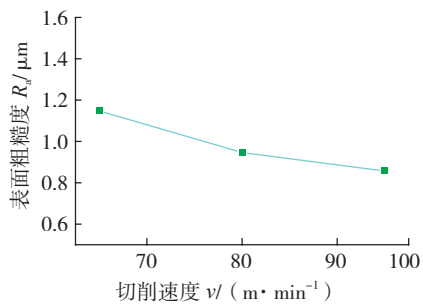
2 切削参数对表面粗糙度的影响规律

根据表 2 做出各切削参数对表面粗糙度的直观分析图(图 2)。由此可以分析切削参数对表面粗糙度的影响规律。

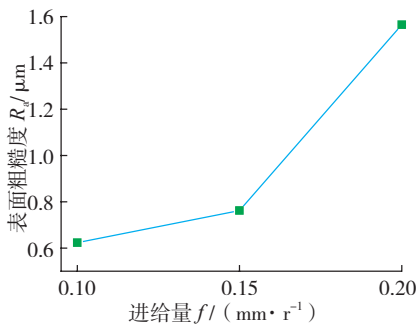
如图 2 (a)所示,随着切削速度增加,表面粗糙度减小。切削速度的变化会引起切屑形成过程的变化,而表面粗糙度在很大程度上与切屑形成过程,尤其是与积屑瘤现象密切相关。随着切屑的形成,刀具前面切削的压力增加,由于内外摩擦力的作用,切屑下层出现速度梯度,上下层金属出现相对移动,同时产生大量的热,在刀具前面形成一个“停滞区”,为形成积屑瘤创造了条件。产生的刀瘤会使加工表面粗糙度恶化。随着切削速度增大,切削区温度提高,使金属韧性增加,形成“停滞区”的条件就变坏,在切削热的高温作用下,金属边层软化,使摩擦系数降低,刀瘤软化并且有很大的塑性,以至于流过的切屑将它与“停滞区”的一部分金属分子带走,于是刀瘤变小了,表面粗糙度进一步降低。

如图 2 (b)所示,随着进给量增加,表面粗糙度急剧增加。这是因为随着进给量增加,切削厚度增加,表面金属塑性变形的体积增加,大量变形的金属从副刀刃方向排出,表面粗糙度因而迅速上升。

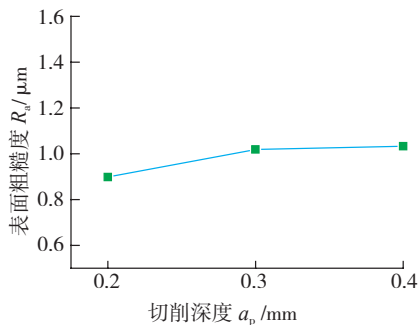
如图 2 (c)所示,随着切削深度增加,表面粗糙度变化很小,从 0.898 μm 增加到 1.033 μm。一般来说,切削深度对加工表面粗糙度的影



(a) 切削速度对表面粗糙度的影响



(b) 进给量对表面粗糙度的影响



(c) 切削深度对表面粗糙度的影响

图2 切削参数对表面粗糙度的影响

响不大。切削深度对加工表面质量的影响主要是由其切削力的影响而引起的,增大切削深度会使切削力随之增大,这样使切屑与前刀面的挤压更严重,反应更强烈,会使切屑很容易粘结在刀具的前刀面上,形成积屑瘤。另外,切削深度较大也会引起较大加工表面变形及较大的振动等,因此随着切削深度的增大,加工表面粗糙度将随之增大。

3 切削参数灵敏度分析

根据文献[12]中相对灵敏度的计算方法,计算得到切削速度、进给量和切削深度的相对灵敏度分别为-0.623、1.303和0.083。分析可知,表面粗糙度对进给量的变化最为敏

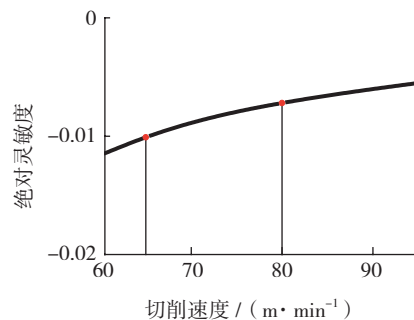
感,对切削速度的变化敏感次之,对切削深度的变化不敏感。

根据文献[12]中绝对灵敏度的计算方法,获得各切削参数的绝对灵敏度公式如式(3)所示。

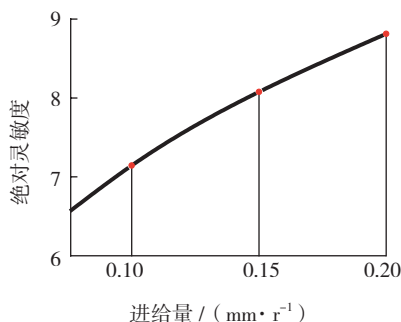
$$\begin{cases} S_{Ra}^v = -8.883v^{-1.623} \\ S_{Ra}^f = 14.352f^{0.303} \\ S_{Ra}^{a_p} = 0.085a_p^{-0.917} \end{cases} \quad (3)$$

图3为根据式(3)绘制的表面粗糙度对各切削参数的绝对灵敏度曲线。

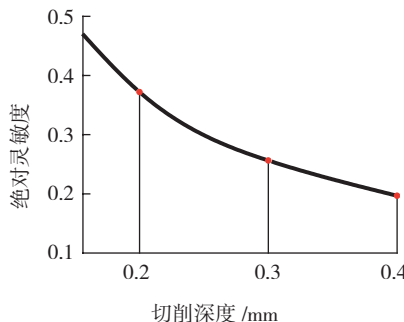
如图3(a)所示,随着切削速度的增加,表面粗糙度对切削速度的绝对灵敏度值减小。在切削速度[80m/min,95m/min]区间的绝对灵敏度值



(a) 表面粗糙度对切削速度



(b) 表面粗糙度对进给量



(c) 表面粗糙度对切削深度

图3 表面粗糙度对工艺参数绝对灵敏度

小于[65m/min,80m/min]区间,即切削速度在[80m/min,95m/min]区间时,表面粗糙度的变化相对平缓,切削速度在[65m/min,80m/min]区间时,表面粗糙度的变化相对陡峭。

如图3(b)所示,随着进给量的增加,表面粗糙度对进给量的绝对灵敏度值增大。在进给量[0.1mm/r,0.15mm/r]区间的绝对灵敏度值小于[0.15mm/r,0.2mm/r]区间,即进给量在[0.1mm/r,0.15mm/r]区间时,表面粗糙度的变化相对平缓,进给量在[0.15mm/r,0.2mm/r]区间时,表面粗糙度的变化相对陡峭。

如图3(c)所示,随着切削深度的增加,表面粗糙度对切削深度的绝对灵敏度值减小。在切削深度[0.3mm,0.4mm]区间的绝对灵敏度值小于[0.2mm,0.3mm]区间,即切削深度在[0.3mm,0.4mm]时,表面粗糙度的变化相对平缓,切削深度在[0.2mm,0.3mm]区间时,表面粗糙度的变化相对陡峭。

4 切削参数优选

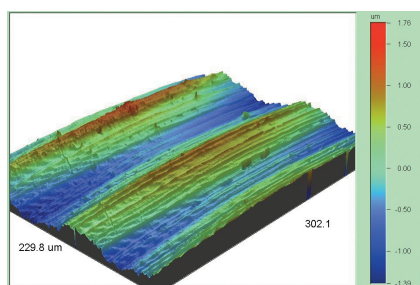
根据相对灵敏度,以及绝对灵敏度和表面粗糙度随切削参数的变化规律综合优选。优选的参数区间首先保证表面粗糙度越小越好,其次绝对灵敏度尽量变化平缓。由于表面粗糙度对进给量的变化最敏感,所以进给量要重点优选。随着进给量的增加,表面粗糙度增加,绝对灵敏度也增加,所以进给量优选低的区间[0.1mm/r,0.15mm/r],这个区间可以保证表面粗糙度在0.76μm以内,并且变化比较平缓。表面粗糙度对切削速度的变化较敏感,随着切削速度的增加,表面粗糙度减小,绝对灵敏度也减小,所以切削速度优选高的区间[80m/min,95m/min],这个区间可以保证表面粗糙度在0.95μm以内,并且变化比较平缓。而表面粗糙度对切削深度的变化不敏感,切削深度对表面粗糙度的影响也比较小,原则上试验参数范围内都可以选择。具体可

根据加工工序来选择,粗加工时可以选较大切深,而精加工时取较小值以提高加工精度,降低表面粗糙度。

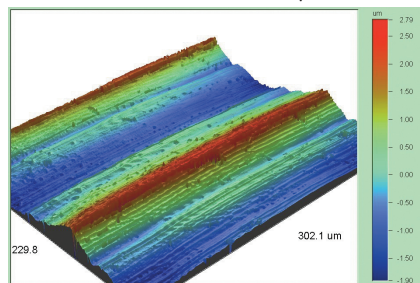
5 表面形貌分析

高温合金车削加工的三维表面形貌如图4所示,车削后工件表面产生波浪状的表面纹理,它是车刀与工件相对移动后最终形成的表面形貌,清晰地反映了车刀切削刃的运动轨迹。图4(a)所示的已加工表面,表面粗糙度为 $0.406\mu\text{m}$,最大波峰高度为 $1.76\mu\text{m}$,最大波谷深度为 $1.39\mu\text{m}$;图4(b)所示的已加工表面,表面粗糙度为 $0.772\mu\text{m}$,最大波峰高度为 $2.79\mu\text{m}$,最大波谷深度为 $1.90\mu\text{m}$,从中可以看出,进给量从 0.1mm/r 增加到 0.15mm/r ,已加工表面的最大波峰高度和最大波谷深度均显著增大,表面粗糙度显著恶化,所以在车削加工中进给量的变化对表面粗糙度有至关重要的影响。

工件表面完全是由刀具切削刃直接切出来的,复制了刀具切削刃形状,刀具进给运动的轨迹清晰可见,每条均匀间隔突起的棱脊在进给方向的位移量等于每转进给量。工件表面上分布有沿切削运动方向的细小沟槽,这种沟槽一方面



(a) 表面粗糙度 $0.406\mu\text{m}$



(b) 表面粗糙度 $0.772\mu\text{m}$

图4 工件三维表面形貌

是刀具表面上硬质点对工件加工表面的犁耕,另一方面是刀具磨损表面上粗糙沟槽在工件加工表面上的复制。从图中可以看出,棱脊不是一条线,而是变成很多磨损沟槽组成的犁垄带,不仅影响加工表面粗糙度,还反作用于刀具表面,使之产生附加沟槽,加剧刀具磨损。在每一转进给量范围内,靠近刀尖部位的工件表面较为光滑平整,越靠近副后刀面和副切削刃尾部刀具与工件分离处,工件加工表面越粗糙,说明刀具磨损带内磨损状态分布不均匀。刀尖部位紧压工件过渡表面,接触稳定,磨损过程稳定,加工痕迹较平整;副后刀面上,由于副后刀面和切屑锯齿状边缘的影响,离刀尖越远,刀具与工件压紧程度越差,加剧了刀具副后刀面的磨损^[14]。

结束语

通过对GH4169高温合金车削表面粗糙度及表面形貌的研究,得出如下结论。

(1) 进给量是影响高温合金车削加工中表面粗糙度的最主要因素,其次是切削速度和切削深度。

(2) 表面粗糙度随切削速度的增加而减小,随进给量和切削深度的增加而增大。

(3) 表面粗糙度对进给量的变化最为敏感,对切削速度的变化敏感次之,对切削深度的变化不敏感。

(4) 切削速度优选 $80\sim 95\text{m/min}$ 的范围,进给量优选 $0.1\sim 0.15\text{mm/r}$ 的范围,可以保障表面粗糙度在 $0.95\mu\text{m}$ 以内^[14]。

参考文献

- [1] Ezugwu E O, Bonney J, Yamane Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003 (134): 233-253.
- [2] 《中国航空材料手册》编辑委员会编. 中国航空材料手册. 北京: 中国标准出版社, 2001.

[3] Rahman M, Seah W K H, Teo T T. The Machinability of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 63: 199-204.

[4] Dudzinski D, Devillez A, Moufki A, et al. A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, 44: 439-456.

[5] Ezugwu E O, Wang Z M, Machado A R. The machinability of nickel-based alloys: a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 86: 1-16.

[6] Arunachalam R M, Mannan M A, Spowage A C. Residual stress and surface roughness when facing age hardened Inconel 718 with CBN and ceramic cutting tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004 (44): 879-887.

[7] Arunachalam R M, Mannan M A, Spowage A C. Surface integrity when machining age hardened Inconel 718 with coated carbide cutting tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004(44): 1481-1491.

[8] Pawade R S, Joshi S S, Brahmanekar P K, et al. An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007(192-193): 139-146.

[9] Pawade R S, Joshi S S, Brahmanekar P K. Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned Inconel 718. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008(48): 15-28.

[10] Ezugwu E O, Bonney J, Fadare D A, et al. Machining of nickel-base, Inconel 718, alloy with ceramic tools under finishing conditions with various coolant supply pressures. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005(162-163): 609-614.

[11] 黄奇,任敬心. 车削与磨削GH33A高温合金表面完整性研究. *航空工艺技术*, 1991(3): 24-27.

[12] 田荣鑫,姚倡锋,黄新春,等. 面向加工表面粗糙度的钛合金高速铣削工艺参数区间敏感性分析及优选. *航空学报*, 2010, 31(12): 2464-2470.

[13] 王素玉,赵军,艾兴,等. 高速切削表面粗糙度理论研究综述. *机械工程师*, 2004(10): 3-6.

[14] 杜随更,吕超,任军学,等. 钛合金高速铣削表面形貌及表层组织研究. *航空学报*, 2008, 29(6): 1710-1715.

(责编 三丰)