

车削速度对 GH4169 加工表面完整性的影响 *

金洁茹¹, 张显程¹, 涂善东¹, 叶友俊²

(1. 华东理工大学 机械与动力工程学院, 上海 200237; 2. 江苏省特种设备安全监督检验研究院, 南京 200000)

摘 要: 加工表面完整性对材料的服役性能有着重要的作用。使用陶瓷刀具, 对高温合金 GH4169 进行车削加工, 分析不同车削速度对表面完整性各特征参量的影响, 采用光学显微镜、扫描电子显微镜、显微硬度仪和 XRD 等仪器对表面微观结构、显微硬度和残余应力进行观测。结果表明: 表面粗糙度随切削速度的增大而减小; 加工表层存在滑移, 且有明显的加工硬化现象, 表层显微硬度随着车削速度的增大呈现增大趋势; 轴向表面残余应力均为拉应力, 且随着车削速度的增大拉应力先增大后减小, 原因在于当速度增大至一定程度时, 热量短时间内无法传递到工件内部, 导致热效应的作用效果减弱。

关键词: 表面完整性; 车削加工; 残余应力; 显微硬度

中图分类号: V261.21; TG174.4

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)03-0108-06

Effects of Cutting Speed on Machining Surface Integrity of GH4169

JIN Jie-ru¹, ZHANG Xian-cheng¹, TU Shan-tung¹, YE You-jun²

(1. Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237; 2. Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province, Nanjing 200000)

Abstract: Surface integrity is an important factor that can impact the service performance of the material. In this paper, the turning of GH4169 was conducted with the ceramic cutting tool at different cutting speeds in detail. The effect of cutting speed on the surface integrity was investigated in detail. The optical microscope, scanning electron microscope, hardness tester and X-ray diffraction (XRD) were used to observe the microstructure near the surface and measure the microhardness and the residual stress. The results show that the surface roughness decreases with the cutting speed increase. Slipping and obvious work hardening exist near the machined surface. The microhardness at the machined surface increases with the cutting speed increase. The tensile residual stress generates at the machined surface increases in the axial direction, reaches a local maximum, and then decreases with the cutting speed increase. This phenomenon is due to the fact that the time for the thermal transmission through the machined surface decreases when the cutting speed increases to some degree.

Keywords: surface integrity; turning; residual stress; microhardness

0 引 言

高温镍基合金 GH4169 (美国牌号 Inconel 718) 有着高硬度、强抗氧化性及良好的高温力学稳定性等显著特征, 因此被广泛应用于航空发动机涡轮盘、叶片、轴、隔环等关键高温部件^[1]。但

是, 低热导率、高强度和较大的粘性使其在加工过程中易产生较高的加工温度和较大的切削力, 引起加工硬化和材料表面缺陷, 最终显著降低产品的使用寿命。由于国外对于该类材料关键部件的工艺参数采取保密措施, 使得国内制造业对于这

收稿日期: 2015-01-18; **修回日期:** 2015-04-24; **基金项目:** * 上海市科委基础重点项目 (12JC1403200)

通讯作者: 张显程 (1979—), 男 (汉), 副教授, 博士; **研究方向:** 结构完整性; **Tel:** (021) 6455 3149; **E-mail:** xc Zhang@ecust.edu.cn

网络出版日期: 2015-05-06 13:30; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150506.1330.002.html>

引文格式: 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 J R, Zhang X C, Tu Shan-tung, et al. Effects of cutting speed on machining surface integrity of GH4169 [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(3): 108-113.

方面的数据仍然相当匮乏,因此,有关 GH4169 的加工工艺参数的研究仍亟待进一步充实完善。

表面完整性是指零件由加工所形成的表面特征和表层特性^[2],主要包括加工后引入的残余应力、表面粗糙度、加工硬化等。表面完整性对工件及材料的使用寿命产生着重要的影响^[3-5]。在承受交变载荷作用时,增大材料的表面粗糙度,易在加工表面波谷处造成应力集中,诱发疲劳裂纹产生,造成工件的断裂失效。表面残余压应力能延缓疲劳裂纹的扩展,而残余拉应力会起到相反的作用。同时,如果材料受到严重的加工硬化,材料的疲劳性能也会降低。综上所述,针对材料表面完整性方面的研究具有重要的意义和价值。

目前国内外学者对 GH4169 的切削加工进行了多方面的研究,Sharman^[6]等研究了切削速度对残余应力的影响,发现随着切削速度的增加材料表面残余应力在减小。Pawade^[7]等通过实验发现,随着车削速度的提高,加工硬化层深度在随之减小,表层残余应力呈现先增大后减小的趋势。Outeiro^[8]等研究表明,未涂层刀具容易在表面产生较大的残余拉应力。刘维伟^[9-10]等实验发现经过涂层硬质合金刀具加工后的材料,表面粗糙度随着切削速度的增加而减小,随着进给和切削深度的增加而增大,且表面粗糙度对进给量的变化最为敏感,减小进给量降低车削速度可明显减小车削加工的残余应力。然而,以往大部分的研究都只是对表面完整性中的个别表面特性进行研究,且有些研究结果存在差异。文中选用陶瓷刀片,通过改变车削加工速度,对表面完整性中的表面粗糙度、表层微观结构、表层显微硬度、残余应力进行全面的研究,分析了车削速度对表面完整性的影响规律,以期为 GH4169 车削加工参数优化及表面完整性控制研究提供相关的试验数据基础。

1 材料及方法

1.1 材料

工件材料为 GH4169,其化学成分如表 1 所示。圆棒试样 4 个,尺寸为 $\Phi 20\text{ mm}\times 55\text{ mm}$ 。材料加工前进行热处理:1 050 ℃保温 1 h 的固溶处理,随之空冷,之后在 720 ℃下保温 8 h 炉冷至 620 ℃保温 8 h 后再空冷。

表 1 GH4169 的化学成分

Table 1 Chemical composition of the GH4169

(w/%)

Element	Ni	Cr	Fe	Nb
Content	50.97	19.56	18.49	5.35
Element	Mo	Ti	C	Al
Content	2.61	1.25	1.23	0.54

1.2 试验方案

采用单因素试验方法,选用陶瓷刀片对 GH4169 高温合金进行外圆车削,试验机床为 CK6140H 型数控机床,最大主轴转速 3 000 r/min,不选用冷却液。试验加工参数如表 2 所示,进给量 f 、切深 a_p 均保持不变,车削速度在 25 ~ 125 m/min 范围内进行变化。车削加工示意图如图 1 所示,主轴旋转速度为车削速度 v ,刀具前进方向为进给方向,切削长度为 30 mm,每组试验完成后都更换新的刀片进行下一组试验,以便排除刀具磨损这一影响因素。

表 2 试验选用加工参数

Table 2 Cutting parameters used in the experiment

Parameters	Values
Cutting speed, $v / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	25, 50, 75, 125
Feed, $f / (\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	0.2
Depth of cut, a_p / mm	0.5

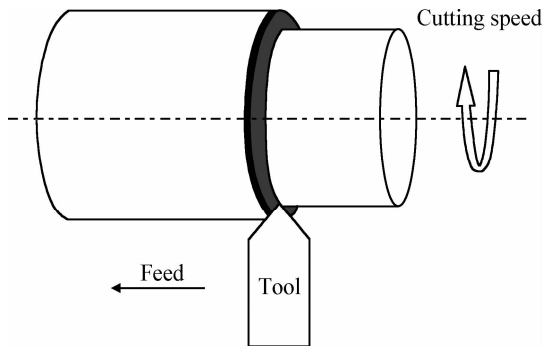


图 1 车削加工示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the turning

1.3 表征

将加工后的试样利用线切割取出长为 10 mm 的一段圆棒,经过超声清洗后先采用 IFMG4g E-lectronics 三维形貌仪(Alicona 公司)沿进给方向

进行表面粗糙度测量。再对剩余部分通过线切割方式沿进给方向取出一小块试样,如图 2 所示。通过树脂冷镶,打磨、抛光、腐蚀之后利用光学显微镜和扫描电子显微镜对加工截面上的微观结构进行观察,并在 HXD-1000TMC/LCD 显微硬度仪上沿深度方向(如图 2)进行显微硬度的测量,测量过程使用 0.98 N 的试验力,保载时间为 15 s,表征方式为维氏硬度。最后,对取出的 10 mm 圆棒试样沿轴向进行残余应力的测量,测量过程中使用 Proto XRD 残余应力测试仪,采用 $\sin^2\psi$ 方法。选用的靶材为 Mn K α ,布拉格角 2θ 为 151.88° ,所选晶面为 (311) 晶面。采用电解抛光法对试样进行腐蚀,在不引发附加残余应力的条件下,缓慢减小试样直径,沿深度方向逐层测定残余应力的分布规律。

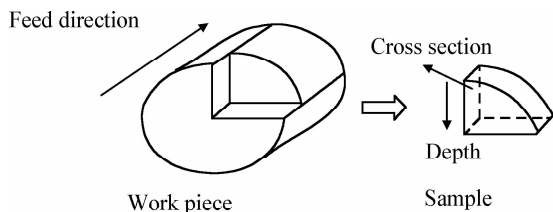


图 2 切割试样的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the cutting samples

2 结果与讨论

2.1 表面粗糙度

图 3 为表面粗糙度随车削速度的变化规律。由图可知,随着车削速度的增加,表面粗糙度呈现明显的下降趋势,当车削速度达到 125 m/min 时,表面粗糙度达到最小为 $1.059 \mu\text{m}$ 。表面粗糙度很大程度上与切屑的形成过程有关,随着切屑的形成,刀具前端切削压力增大,上下层金属相对移动,容易在刀具前端产生积屑瘤,从而增大了表面粗糙度。但随着切削速度的增加,切削区温度升高,积屑瘤发生软化并且具有很大的塑性,同时切屑底层也发生软化,切屑与前刀面摩擦因数减小,导致切削力降低,切削过程平稳,以上两方面因素都使得表面粗糙度有所降低。Nalbant^[11]、Sadat^[12] 等人通过研究证明了随着车削速度的增加,切削力随之减小。曹成铭等^[13] 在研究高速切削 Inconel 718 时也发现随着速度的增加表面粗糙度在减小。

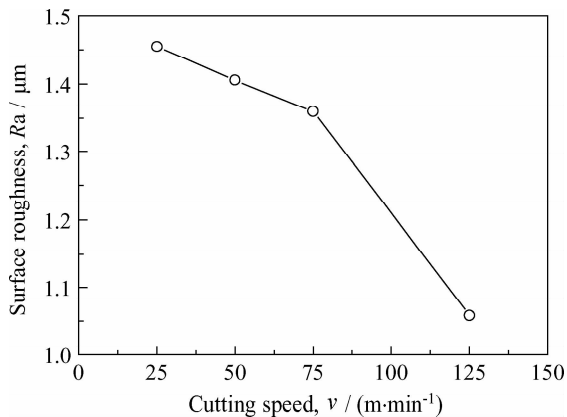


图 3 不同车削速度下的表面粗糙度

Fig. 3 Surface roughness at different cutting speeds

2.2 表层微观结构

图 4 为光学显微镜和扫描电子显微镜下观察得到的车削加工表面显微组织。在较低速度 ($v=50 \text{ m/min}$) 下,表面显微组织未发生较大变化,也没有产生明显的滑移线。从图 4(c) 及其放大区域图 4(d) 可以看出,当 $v=75 \text{ m/min}$ 时,加工表层已出现明显的滑移线。当 $v=125 \text{ m/min}$ (图 4(b)) 时,表面也存在这种现象,而且表面晶粒存在明显的拉长。但速度由 75 m/min 增大至 125 m/min 的过程中,塑性变形层的深度并没有明显变化。本质上,切削过程是工件材料在切削力的作用下产生从弹性变形到塑性变形(滑移、孪生、晶界滑动、扩散性蠕变)直至断裂(切屑与工件分离)的过程^[14]。在加工过程中刀具与工件之间的接触会在材料表面产生塑性流动^[6]。加工过程中切削力随着速度的提高不断减小,所以速度增大表面塑性变形层并没有增加;但是又由于热效应的影响,当切削速度较高时产生的热量较多,对材料表面起到了一定的“软化”作用,所以速度相对较高时加工表面会出现晶粒拉长的现象。

2.3 显微硬度

图 5 为不同车削速度下材料显微硬度沿深度方向的变化规律。可以看出,所有试样在加工表层和次表层存在明显的加工硬化现象,且表面硬度最大,沿深度方向硬度不断减小,约 $150 \mu\text{m}$ 处显微硬度趋于一个稳定的波动范围,当 $v=50 \text{ m/min}$ 时,表层显微硬度达 $484 \text{ HV}_{0.1}$,随着车削速度的增加表层显微硬度呈现增大的趋势,当 $v=75 \text{ m/min}$ 和 125 m/min 时,表层显微硬度值

相近。

加工硬化现象与表层、次表层的塑性变形程度有着紧密的联系,当速度较低时,表层塑性变形程度不大,当速度增加时,随着表面塑性变形

程度的增加,加工硬化现象也明显增强,速度 $v=75\text{ m/min}$ 和 $v=125\text{ m/min}$ 两种参数下表面显微硬度变化不大,这种现象与在此速度下表面塑性变形层深度的变化趋势相一致。

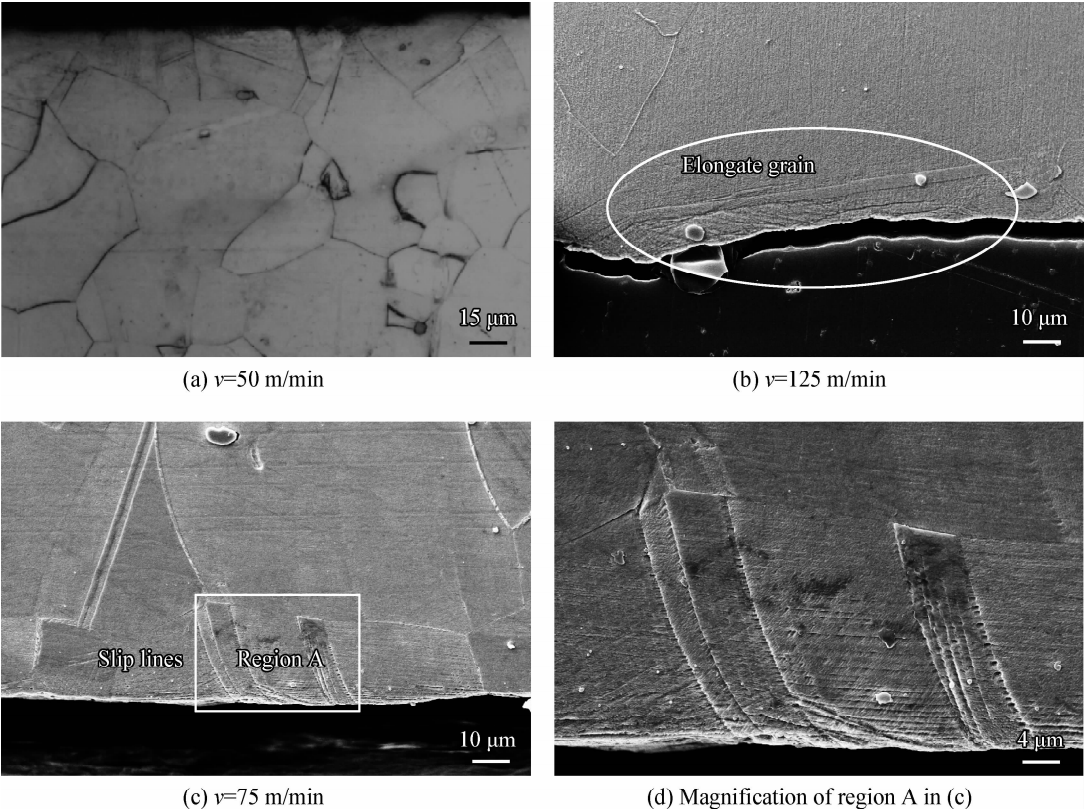


图 4 不同车削速度下的表层微观组织

Fig. 4 Microstructure on the surface at different cutting speeds

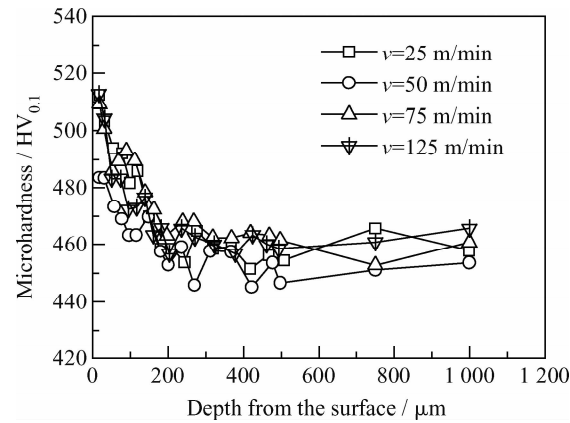


图 5 不同车削速度下沿深度方向的显微硬度

Fig. 5 Microhardness with depth at different cutting speeds

2.4 残余应力

残余应力也是由于不均匀的塑性变形导致,机械加工过程中的机械效应和热效应都会导致

残余应力的产生。车削加工时,由于产生大量的切削热,使得加工表层受热膨胀,冷却后形成残余拉应力,而机械效应会产生相反的结果,残余应力的最终状态是这两种竞争机制相互作用的结果^[6]。

图 6 为不同车削速度下表面残余应力的分布情况。由图 6 可知,表面残余应力均为拉应力,随着速度的增加拉应力呈现先增大后减小的趋势。这种结果表明热效应在热机械耦合效应中起到了主导作用,其变化规律与表面热量的传播有很直接的联系。当 v 在 $25\sim75\text{ m/min}$ 区间变化时,表面残余拉应力由 306.3 MPa 增加至 356.2 MPa ;但当速度增加到 125 m/min 时,表层残余拉应力反而减小为 286.7 MPa ,其原因如图 7 所示。热量在加工过程中的传播路径可分为 3 个部分:一部分随切屑流失;另一部分传播到加工材料内部;最后一部分被刀具带走^[13]。如

图 7(a)所示,在较低速度下大部分热量传播至工件,并且随着速度的增大,产生的热量也随之增加,使得表面的残余拉应力逐渐增大。但与此同时,金属去除率也在逐渐增加。如图 7(b)所示,当速度增加到一定程度时,由于热量传播时间变短,以及材料较低的热传导率,导致大量的热来不及传播到工件中,大部分的热量被切屑带走,表面热效应减弱,从而残余拉应力会有所减小。此外就机械效应这一影响因素而言,在速度增大的过程中,切削力随之减小^[11-12],由此表面产生的残余压应力不断减小,最终在热力耦合作用下表面最终呈现为残余拉应力,且残余拉应力值先增大后减小。

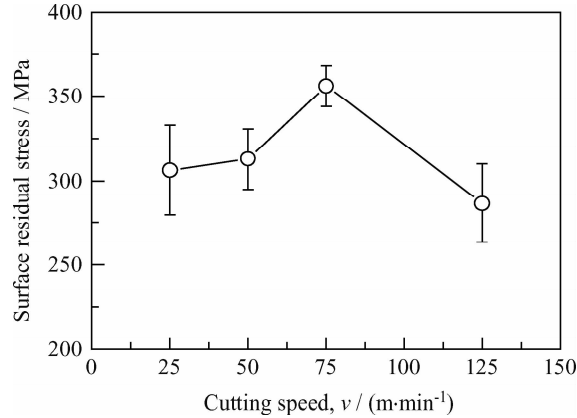


图 6 表面残余应力随车削速度的变化规律
Fig. 6 Changing law of the surface residual stress at different cutting speeds

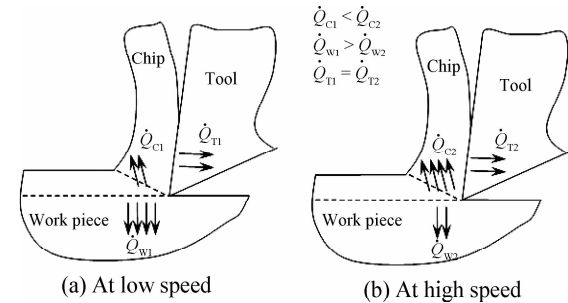


图 7 不同切削速度下表面热量的传播^[13]
Fig. 7 Heat propagation during machining at different cutting speeds^[13]

图 8 为不同车削速度下轴向残余应力沿深度方向的分布规律:整体上呈现“钩形”,表面表现为残余拉应力,并且沿深度方向残余拉应力先减小,在距离表面 5~10 μm 处残余拉应力开始转变为压应力,随后压应力先增大后减小直至趋

近于零。造成这种现象的原因在于已加工表面表层温度相对次表层温度高,所以切削过后表层和次表层冷却至室温时表层收缩多、里层收缩少,表层收缩受到次表层限制,因而表层表现为拉应力,次表层就表现为压应力。最大残余压应力在 30~50 μm 处,随着速度的增加最大残余压应力离表面的距离越近,残余应力的梯度也越大,约 200 μm 处残余应力逐渐消失。而且不难发现,内部残余压应力的最大值随着速度的增加呈现减小的趋势,这也与随着速度的增加切削力减小有关^[11-12]。

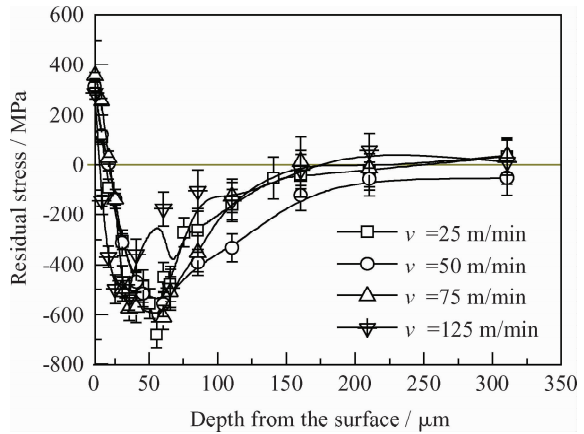


图 8 不同切削速度下的残余应力
Fig. 8 Residual stresses at different cutting speeds

3 结 论

- (1) 随着车削速度的增加表面粗糙度呈现下降趋势,当 $v=125$ m/min 时,表面粗糙度达到最小为 1.059 μm 。
- (2) 当 $v=75, 125$ m/min 时,加工表面存在滑移和晶粒拉长的现象,并且在所有加工参数下,加工表层均存在明显的加工硬化现象,影响层达 200 μm 。
- (3) 表面残余拉应力随着车削速度的增加先增大后减小,当 $v=75$ m/min 时,表面残余拉应力最大为 356.2 MPa。而内部压应力随着速度的增加呈现减小的趋势。在距离加工表面 5~10 μm 处残余拉应力开始转变为压应力,最大残余压应力在 30~50 μm 处,随着速度的增加最大残余压应力离表面的距离也越近,残余应力的梯度也越大,约 200 μm 处残余应力逐渐消失。从残余应力结果和表面粗糙度的趋势来看选择较大一点的加工速度能获得较好的表面完整性。

参考文献

- [1] 董建新. Inconel 718 高温合金的发展 [J]. 兵器材料科学与工程, 1996, 19(2): 46-50.
Dong J X. The development of the high temperature alloy Inconel 718 [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1996, 19(2): 46-50 (in Chinese).
- [2] 美国可切削性数据中心. 机械加工切削数据手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
Cutting data center of America. Manual of mechanical cutting data [M]. Beijing: China Machine Press, 1989 (in Chinese).
- [3] 王欣, 滕伯秋, 曾惠元, 等. 表面完整性对 C250 型超高强度钢高周疲劳性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(2): 69-74.
Wang X, Teng B Q, Zeng H Y, et al. Effect of surface integrity on the high-cycle fatigue of C250 super-strength steel [J]. China Surface Engineering, 2014, 27(2): 69-74 (in Chinese).
- [4] 陈雷, 吕泉, 马艳玲, 等. 表面完整性对航空发动机零件疲劳寿命的影响分析 [J]. 航空精密制造技术, 2012, 48(5): 47-50.
Chen L, Lv Q, Ma Y L, et al. Effect of the surface integrity on the fatigue life of aero-engine parts [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2012, 48(5): 47-50 (in Chinese).
- [5] 张定铨. 残余应力对金属疲劳强度的影响 [J]. 理化检验-物理分册, 2002, 38(6): 231-235.
Zhang D Q. Effect of residual stress on the metal fatigue strength [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A Physical Testing, 2002, 38(6): 231-235 (in Chinese).
- [6] Sharman A R C, Hughes J I, Ridgway K. An analysis of the residual stresses generated in Inconel 718TM when turning [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 173(3): 359-367.
- [7] 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 [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(1): 15-28.
- [8] Outeiro J C, Pina J C, M'Saoubi R. Analysis of residual stresses induced by dry turning of difficult-to-machine materials [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 77-80.
- [9] 刘维伟, 朱立坚, 姚倡锋, 等. GH4169 高温合金车削加工技术 [J]. 航空制造技术, 2012(14): 48-51.
Liu W W, Zhu L J, Yao C F, et al. Turning processing technology of GH4169 [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(14): 48-51 (in Chinese).
- [10] 刘维伟, 李晓燕, 万旭生, 等. GH4169 高速车削参数对加工表面完整性影响研究 [J]. 机械科学与技术, 2013, 32(8): 1093-7.
Liu W W, Li X Y, Wan X S, et al. Effect of high cutting parameters on surface integrity of GH4169 [J]. Mechanical Science and Technology, 2013, 32(8): 1093-7 (in Chinese).
- [11] Nalbant M, Altin A, Gökçaya H. The effect of cutting speed and cutting tool geometry on machinability properties of nickel-base Inconel 718 super alloys [J]. Materials & Design, 2007, 28(4): 1334-8.
- [12] Sadat A B, Reddy M Y, Wang B P. Plastic deformation analysis in machining of Inconel 718 nickel base superalloy using both experimental and numerical methods [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1991, 33(10): 829-842.
- [13] 曹成铭, 刘战强, 杨奇彪. 切削速度对 Inconel 718 加工表面完整性的影响 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 223-227.
Cao C M, Liu Z Q, Yang Q B. Effect of cutting speed on the surface integrity of Inconel 718 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 223-227 (in Chinese).
- [14] 杨红科, 宋海潮. 金属切削过程中晶体塑性变形的有限元分析 [J]. 工具技术, 2010, 44(9): 44-46.
Yang H K, Song H C. Finite element analysis of crystal plastic deformation during cutting process [J]. Tool Engineering, 2010, 44(9): 44-46 (in Chinese).

(责任编辑: 常青)