

切削速度对 Inconel 718 加工表面完整性的影响*

曹成铭 刘战强 杨奇彪

(山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061)

【摘要】 随着机械加工对于更快的材料去除率和更好的表面完整性的需求, 高速切削高强度镍基高温合金 Inconel 718 的应用是必然的发展趋势。通过赛阿龙(Sialon)陶瓷刀具高速铣削 Inconel 718 试验, 研究切削速度对 Inconel 718 加工表面完整性的影响规律。结果表明, 随着切削速度的提高加工表面完整性越来越好, 在试验条件范围内, 当切削速度达到 1 400 m/min 时, 获得的表面完整性最好。

关键词: 镍基高温合金 高速铣削 表面完整性

中图分类号: TG506.1; TF125.2⁺12 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)01-0223-05

Effects of Cutting Speed on Surface Integrity of Inconel 718

Cao Chengming Liu Zhanqiang Yang Qibiao

(Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacturing, Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract

As one kind of high strength and thermal resistant nickel-based alloys, Inconel 718 has been used extensively in aerospace industries. To satisfy the instant requirements of higher material removal rate and good surface integrity from engineering practice, high speed machining of Inconel 718 is an inevitable trend. The influences of cutting speed on surface integrity were investigated through the experimental study with high-speed milling Inconel 718 using Sialon ceramic tool. The results showed that higher cutting speed could exploit to give excellent surface integrity. The best surface integrity was obtained in the investigation at the highest cutting speed of 1 400 m/min in the applied cutting speed range.

Key words Nickel-base heat resisting alloy, High speed milling, Surface integrity

引言

Inconel 718(GH4169)作为镍基高温合金中的一种, 具有良好的机械力学性能和化学稳定性, 如较高的抗氧化性、抗腐蚀性, 即使在很高的温度下, 仍旧可以保持其良好的机械性能。但是由于 Inconel 718 在加工过程中具有低热导率、加工硬化现象明显、刀具磨损严重等问题, 使其很难加工, 因此, Inconel 718 也被定义为难加工材料^[1-3]。

目前, 就加工刀具材料来说, 硬质合金刀具、

PCBN、金刚石刀具和陶瓷刀具都可以用来加工镍基高温合金, 尤其是硬质合金刀具被广泛的用来加工 Inconel 718。多年来, 随着刀具涂层技术的发展, 涂层刀具加工镍基高温合金的速度可达到 100 ~ 200 m/min^[4]。但是随着生产上对于更快的材料去除率和更好的加工表面完整性的需求, 涂层硬质合金刀具不适合高速加工的缺点就被暴露。PCBN 刀具、金刚石刀具由于其价格较昂贵, 不适合在工厂中广泛使用, 而陶瓷刀具由于其价格较便宜, 具有较高的热硬度, 其加工速度会比涂层硬质合金刀具更高,

收稿日期: 2010-01-11 修回日期: 2010-01-29

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009CB724401)、国家自然科学基金资助项目(50828501)、国家科技重大专项(2009ZX04014-043)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAF32B01)和山东省自然科学基金杰出青年基金资助项目(JQ200918)

作者简介: 曹成铭, 硕士生, 主要从事高速切削表面完整性研究, E-mail: cao_chengming@126.com

通讯作者: 刘战强, 教授, 博士生导师, 主要从事高速/高效加工、微细切削加工研究, E-mail: melius@sdu.edu.cn

比 PCBN 和金刚石刀具实际应用也更广泛。所以,用陶瓷刀具进行高速加工对于提高生产率是一种很好的选择^[5]。

已有研究人员对陶瓷刀具切削加工镍基高温合金进行了研究^[6-9]。

大量试验研究均表明:高速切削镍基高温合金获得的加工表面,具有表面粗糙度低、硬化层深度小、残余应力小等特点^[10-12]。因此,高速加工是提高镍基高温合金加工效率、改善加工表面质量、延长镍基高温合金构件疲劳寿命的理想加工方法。而且对于航空发动机等 Inconel 718 构件的大型平面加工而言,立铣由于其加工效率较低,应该更加重视端铣的研究。综上分析,本文采用端铣加工方式,用 Sialon 陶瓷刀具铣削加工 Inconel 718,以期为以后

的理论和应用研究提供必要的试验依据。

1 试验条件

1.1 刀具

采用肯纳公司生产的盘型铣刀,刀盘为 80A08RF84SN12B,刀片为 SNGN120412E,方形,刀具材质为 KY2100(SiAlON 陶瓷),KY2100 抗机械冲击性和耐磨性较好,可用于高温合金加工。试验时安装单个刀片。

1.2 工件

工件材料为 Inconel 718,试件为 105 mm × 70 mm × 30 mm 的块料。其成分、物理机械性能分别如表 1、表 2 所示。

表 1 Inconel 718 的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of Inconel 718

Tab. 1 Chemical composition of Inconel 718											%
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Co	Ti	Fe	Al	
0.04	0.08	0.08	<0.015	0.002	18.37	53.37	0.23	0.98	17.8	0.50	

表 2 Inconel 718 的物理机械性能

Tab. 2 Physical and mechanical properties of Inconel 718

屈服应力 σ_s /MPa	拉伸应力 σ_b /MPa	弹性模量 E /GPa	热传导率 κ /W·(m·K) ⁻¹	密度 ρ /kg·m ⁻³	基体显微硬度/HV
1 110	1 310	206	11.2	8 470	264.72

1.3 试验设备与仪器

工件在 DECKEL MAHO 公司生产的 DMU 70V 数控加工中心上进行加工,如图 1 所示。已加工表面粗糙度在 MC020-2205 型表面粗糙度仪上进行测量,三维表面形貌利用美国 Wyko 公司的 NT9300 型光学轮廓仪进行测量。表面显微硬度在 MH-6 型显微硬度计上测量。表面残余应力测量在 Stresstech 公司生产的 X 射线应力分析仪 XSTRESS 3000 型上进行,测试方法为固定 ψ 法及回摆法,采用 Ni 粉校准,测试时使用的靶材为 Cr Ka 靶, θ 为 130°,倾角为 $\pm 45^\circ$ 。

1.4 试验方案

采用单因素试验,试验中进给量 f 、轴向切深

a_p 、铣削宽度 a_w 保持不变,分别为 0.05 mm/z、0.5 mm、15 mm。切削速度从 800 m/min 到 1 400 m/min 进行变化,如表 3 所示。铣刀盘上每次只安装一个刀片,每组试验完成后更换新刀片,干切削,顺铣。图 2 为加工后的工件。

表 3 试验铣削参数

Tab. 3 Experimental milling parameters

参数	数值
切削速度 v /m·min ⁻¹	800、900、1000、1200、1300、1400
轴向切深 a_p /mm	0.5
铣削宽度 a_w /mm	15
每齿进给量 f /mm·z ⁻¹	0.05

2 试验结果与分析

2.1 表面粗糙度和表面形貌

从图 3 可以看出在切削速度的变化范围内,表面粗糙度 R_a 随着切削速度的增大而减小,并且当切削速度达到 1 400 m/min 时,表面粗糙度值达到最小。这是由于切削过程中的切削力与传递给工件的热量综合作用影响着工件的表面粗糙度。随着切削速度的增加,切削功率增大,单位时间产生的热量相



图 1 加工工件与机床

Fig. 1 Workpiece and the machine

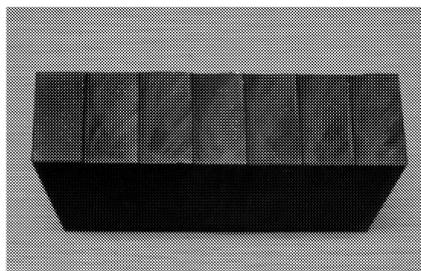


图 2 加工后的工件

Fig. 2 Workpiece after processing

应增多,因而切削温度升高,使得切屑底层软化,形成薄薄的微熔层,切屑与前刀面的摩擦系数减小,同时切屑变形时间缩短,也使得切屑变形系数减小,从而使切削力降低,图 4 为切削力随切削速度的变化趋势图。从图中可以看出,3 个方向的切削力随切削速度的提高,都有下降的趋势,而且每组切削速度条件下, $F_z > F_x > F_y$ 。另外,在高速切削时,主要的切屑将由切屑导出,为了保证每齿进给量相同,随着转速的上升必须相应增加进给速度,从而使热源运动速度加快,向工件传热的的时间减少,传递给加工表面的热量不断减少。综上所述,在高速切削过程中,随着切削速度的增加,传递给工件的热量不断减少,切削力逐渐降低,切削过程平稳,从而使加工表面粗糙度也随之降低^[13]。Arunachalam R M^[9]等在较低切削速度 ($v = 225 \text{ m/min}$) 下切削 Inconel 718,也发现随着速度增加,表面粗糙度会有降低的趋势。

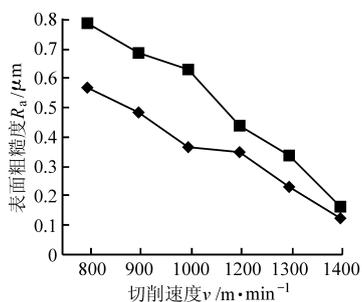


图 3 切削速度对表面粗糙度的影响

Fig. 3 Effect of cutting speed on surface roughness

从图 3 可以看出,进给方向上的表面粗糙度小于垂直于进给方向上的表面粗糙度。这是由于本试验的切削宽度为 15 mm,铣刀盘直径为 80 mm,故铣削后获得的表面位于刀盘一侧(未过铣刀中心)。从图 5 可测得进给方向(X 方向)与切削速度方向(v 方向)的夹角约为 30° ,小于垂直于进给方向(Y 方向)与切削速度方向(v 方向)的夹角。沿着切削速度方向上的表面纹理较规则、平滑,故所测的表面粗糙度最小,因此,在相同取样长度上进行表面粗糙度测量时,进给方向由于与切削速度方向夹角较小,相比垂直于进给方向来说,所测长度上的表面较规则、

光滑,故所测的表面粗糙度也较小。

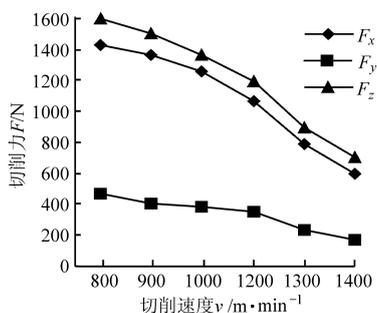


图 4 切削速度对切削力的影响

Fig. 4 Effect of cutting speed on cutting force

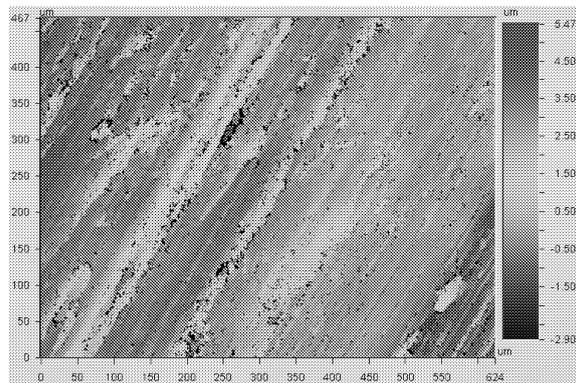
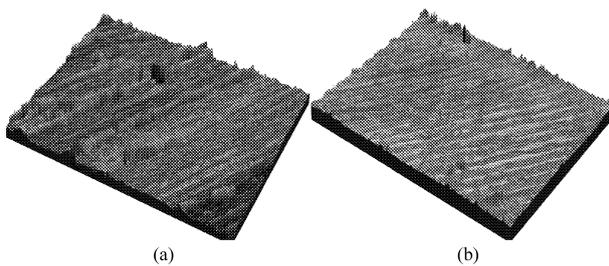


图 5 加工表面二维形貌图

Fig. 5 Machined surface 2-D topography

图 6 给出了切削速度在 800、1 400 m/min 下的三维表面形貌图。从图 6 可看出,当 $v = 800 \text{ m/min}$ 时,表面起伏较大,说明加工表面较粗糙,而当 $v = 1 400 \text{ m/min}$ 时,表面较平整光滑,加工表面粗糙度较小。



(a) (b)

图 6 已加工表面三维形貌图

Fig. 6 Machined surface 3-D topography

(a) $v = 800 \text{ m/min}$ (b) $v = 1 400 \text{ m/min}$

2.2 残余应力

图 7 比较了切削速度对沿进给和垂直于进给的两个方向的残余应力影响规律,从图中可以看出,切削速度对 Inconel 718 面铣时产生的残余应力有较大影响。当切削速度在 800 m/min 到 1 400 m/min 之间变化时,表面残余应力都为拉应力,并且两个方向的应力随着切削速度的增加有递减的趋势。众所周知,切削加工表面的残余应力的形成是复杂的,受到切削区不均匀热-力耦合场的直接影响,机械应力

引起的残余应力是压应力,而热应力引起的是残余拉应力。Inconel 718 具有低热导率,因此在最低切削速度 800 m/min 时,材料去除率最低并且切屑带走的热量也最少,使大量的热传递到工件表面,但是随着切削速度的增加,切屑带走的热量越来越多,传递给工件的热量不断减少,热应力作用效果越来越小,但依旧起主要作用,表面残余拉应力越来越小,从而当切削速度达到 1 400 m/min 时,残余拉应力值达到最小,这样更有利于提高工件的疲劳寿命。相同的结论也被 Arunachalam R M^[9] 等证实,他们用 CBN 和陶瓷刀具加工 Inconel 718,研究加工后的表面残余应力和表面粗糙度,结果表明陶瓷刀具的低热导率会导致更高的表面残余拉应力。

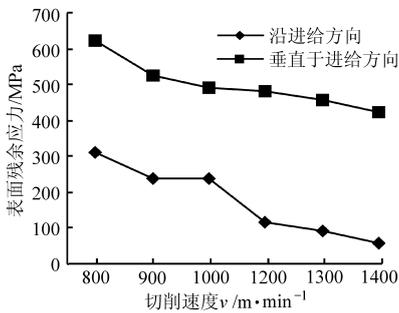


图7 切削速度对表面残余应力的影响

Fig. 7 Effect of cutting speed on surface residual stress

另外,从图7中也可以看出,在任一切削速度条件下,进给方向上的残余拉应力总是小于垂直于进给方向上的残余拉应力。这是由于在切削过程中,进给方向的切削力 F_x 总是小于垂直于进给方向的切削力 F_y ,见图4。因此,在同样热应力作用下,进给方向上的切削力产生的残余压应力要比垂直于进给方向上的残余压应力大。但是在切削过程中,残余应力是机械应力和热应力共同作用的结果,而且热应力起主要作用,因此,综合作用之后,进给方向上的残余拉应力要小于垂直于进给方向上的残余拉应力。

2.3 显微硬度

在低速切削条件下,镍基高温合金的加工硬化较严重^[9]。通过图8可以看出,在高速切削条件下,已加工表面显微硬度随切削速度变化的规律。在 $v = 800 \text{ m/min}$ 时,表面显微硬度达到 414.94 HV,随着切削速度的增加,表面显微硬度逐渐减小,当速度达到 $v = 1 400 \text{ m/min}$ 时,表面显微硬度达到 356.56 HV。

表层加工硬化程度可表示为

$$N_H = \frac{HV}{HV_0} \times 100\%$$

式中 HV ——测量参数的显微硬度

HV_0 ——基体显微硬度

本试验中 $HV_0 = 264.72 \text{ HV}$ 。

由上式得出在不同切削速度下的表面加工硬化程度,如表4所示。从表4中可以看出切削速度从 800 m/min 到 1 400 m/min 进行变化时,加工硬化程度在 160% 到 130% 之间进行相应的波动,这与文献[7]中提到的在常规切削速下加工 Inconel 718 时,加工表面显微硬度随着切削速度的增加而增高不一致。这是因为在高速的情况下,加工表面软化,使得产生的切屑更容易被剥离表面,从而带走更多的热量,表层金属硬化程度反而降低,这就减小了表层加工硬化程度^[14]。文献[9]通过车削 Inconel 718 试验也得出在高速情况下,表面加工显微硬度会降低,加工硬化程度会减小的结论。所以,高速切削能在一定程度上有效减小表面加工硬化程度。

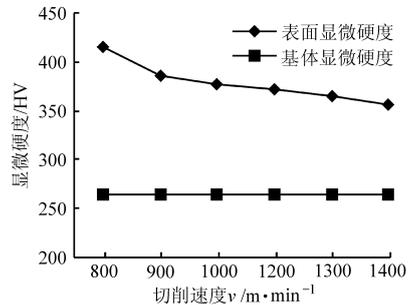


图8 切削速度对表面和基体显微硬度的影响

Fig. 8 Effect of cutting speed on surface microhardness

表4 不同速度下的表面加工硬化程度

Tab. 4 Surface microhardness under various cutting speeds

$v / \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	800	900	1000	1200	1300	1400
$N_H / \%$	156.7	145.9	142.4	140.2	138	134.7

2.4 表面损伤

通过 MH-6 分别放大 100、400 倍来分析切削速度对已加工表面损伤的情况。在较低速度 800 m/min 时发现存在有存在于加工表面上的金属脆片(图9、图10中较黑的部分),这是因为加工是在干切削条件下进行的,已加工表面在切削加工过程中持续保持高温,从而使产生的切屑微粒粘附在工件表面上。但是在切削速度为 1 400 m/min 时的表面纹理较 800 m/min 时的要好(图9、图10),这是因为在高速切削时,切削热主要由切屑带走,工件和刀具的温升都较小,这在很大程度上降低了在铣削过程中力和热对工件表面的作用。相同的现象在较低的速度($v = 125, 300, 475 \text{ m/min}$)下也存在^[12]。

3 结论

(1) 高速铣削 Inconel 718 后的加工表面粗糙度 R_a 随切削速度的增加而减小。

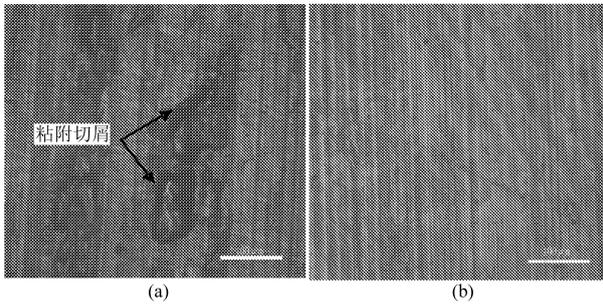


图9 已加工表面的光学显微照片(×100)

Fig.9 Optical microscope picture of machined surface(×100)

(a) $v = 800$ m/min (b) $v = 1400$ m/min

(2)加工后的表面残余应力都是拉应力,残余应力数值随切削速度的增加而减小,并且进给方向上的残余拉应力总是小于垂直于进给方向上的残余拉应力。

(3)表面加工硬化程度较严重,随着切削速度增加,加工硬化程度有减小的趋势,说明高速切削对表面加工硬化有一定的缓解作用。

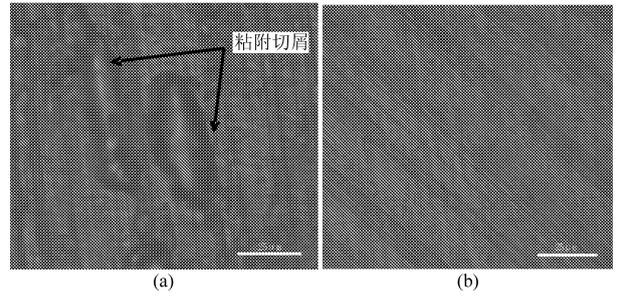


图10 已加工表面的光学显微照片(×400)

Fig.10 Optical microscope picture of machined surface (×400)

(a) $v = 800$ m/min (b) $v = 1400$ m/min

(4)通过对加工后的表面进行显微拍照,可以看出,在较低的切削速度下,表面质量较差,上面粘附有残留切屑、金属颗粒,从另一角度验证了在较低的切削速度下,加工表面较差,随着切削速度的增加,加工表面越来越好。因此,在试验参数范围内,切削速度越高,加工表面完整性越好。

参 考 文 献

- 1 Rahman M, Seah W K H, Teo T T. The machinability of Inconel 718 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 63(7):199~204.
- 2 Ezugwu E Q, Bonney J, Yamane Y. An overview of the machinability of aero engine alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135(5):233~253.
- 3 Dudzinski D, Devillez A, Moufki A, et al. A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(4):439~456.
- 4 Liao Y S, Lin H M, Wang J H. Behaviors of end milling Inconel 718 superalloy by cemented carbide tools [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201(1~3):460~465.
- 5 艾兴. 高速切削加工技术[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- 6 Li L, He N, Wang Z G. High speed cutting of Inconel 718 with coated carbide and ceramic inserts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1~3):127~130.
- 7 Nalbant M, Altin A, Gokkaya H. The effect of cutting speed and cutting tool geometry on machinability properties of nickel-base Inconel 718 superalloys [J]. Materials & Design, 2007, 28(4):1334~1338.
- 8 Altin A, Nalbant M, Taskesen A. The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining Inconel 718 with ceramic tools [J]. Materials&Design, 2007, 28(9):2518~2522.
- 9 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[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(9):879~887.
- 10 Coelho R T, Silva L R, Braghini A, et al. Some effects of cutting edge preparation and geometric modifications when turning Inconel 718 at high cutting speeds[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 148(1):147~153.
- 11 Sharman A R C, Hughes J J, Ridgway K. Workpiece surface integrity and tool life issues when turning Inconel 718 nickel based superalloy [J]. Machining Science and Technology, 2004, 8(3):399~414.
- 12 Pawade R S, Joshi Suhas 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.
- 13 杜随更,吕超,任君学,等. 钛合金 TC4 高速铣削表面形貌及表层组织研究[J]. 航空学报,2008, 29(6):1710~1717.
- Du Suigeng, Lü Chao, Ren Junxue, et al. Study on surface morphology and microstructure of titanium alloy TC4 under high-speed milling [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 29(6):1710~1717. (in Chinese)
- 14 Ezugwu E Q, Wang Z W, Okeke C I. Tool life and surface integrity when machining Inconel 718 with PVD and CVD coated tools [J]. Tribology Transactions, 1999, 42(2):353~360.