

# TiAlN 涂层刀具高速铣削 GH4169 刀具耐用度研究

## Research on TiAlN-Coated-Carbide Tool Life in High-Speed Milling GH4169

西 安 航 空 学 院 李 锋 刘建强 赵慧凯  
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 李晓燕

**[摘要]** 针对难加工镍基高温合金材料 GH4169 实际切削过程中的加工效率低下、刀具磨损严重、加工表面质量差等问题,本文采用正交试验法,使用新型 PVD-TiAlN 涂层硬质合金刀具进行高温合金 GH4169 的高速铣削试验。研究了 TiAlN 涂层刀具高速铣削 GH4169 过程中的刀具耐用度和由于刀具磨损引起的试件表面粗糙度的变化规律;建立了高温合金 GH4169 的刀具寿命经验公式和刀具磨损与试件表面粗糙度之间的变化规律曲线。结果表明:高温合金 GH4169 高速铣削过程中,切削速度对刀具寿命的影响非常明显,进给量及切削深度的影响较小;TiAlN 涂层硬质合金刀片的耐用度随着切削速度的增大而减小;试件的表面粗糙度值随着刀具的磨损总体上呈现增加的趋势。

**关键词:** GH4169 高速铣削 刀具寿命 表面粗糙度

**[ABSTRACT]** In order to solve the problems that it is the low removal rate, serious tool wear, and the poor surface machined quality of difficult-to-machine nickel base superalloys GH4169. In this paper, the orthogonal experimental method is used to the tests of high speed milling GH4169 with a new developed PVD-TiAlN coated carbide tool. This article mainly studies the tool life and the change rules of surface roughness which caused by tool wear on the condition of the high speed milling GH4169. The empirical formula of the tool life is acquired by using multiple linear regression method, meanwhile, tool wear and surface roughness function curve is pulled out. The research results indicate that cutting speed have highly obvious influence on tool life, followed by feed rate and cutting depth; the TiAlN-coated-carbide tool life decreaseds with the increase of milling speed; the surface roughness of specimen increases overall with the increase of tool wear.

**Keywords:** GH4169 High speed milling Tool life Surface roughness

GH4169 是一种时效硬化的镍基高温合金,具有良好的抗疲劳、抗辐射、抗氧化、耐腐蚀性能,广泛应用于

航空航天制造领域,是火箭发动机和航空喷气发动机中的关键材料。但由于 GH4169 在一定温度范围内能够保持相当高的强度和韧性,而且导热率很低,加上大量金属间化合物的作用,使其成为最难加工的材料之一。切削过程中的切削力大、切削温度高、刀具磨损严重、塑性变形大、加工表面质量和精度不易保证<sup>[1]</sup>。

高速切削不仅可以减少切削时间,大幅度提高生产效率,而且有利于提高加工精度和表面质量,还可加工高硬度的难加工材料<sup>[2-3]</sup>。因此,在航空航天制造领域,高温合金 GH4169 的高速切削具有重要的研究意义和应用价值。德国的 H.Schulz<sup>[4]</sup> 教授于 1992 年提出了不同材料高速切削的速度范围,对于镍基合金的高速切削,切削速度应大于 50m/min。

国内外学者对镍基高温合金 GH4169 的高速切削进行了多方面的研究。安卡拉大学的 Nalbant 等<sup>[5]</sup> 研究了陶瓷刀高速车削 Inconel718 过程中,切削速度和刀具几何参数对切削力的影响规律; A. Altin 等<sup>[6]</sup> 利用不同形状陶瓷刀具对 Inconel718 进行了切削试验,研究了切削过程中刀具的磨损形态,分析了不同切削速度下刀具的磨损情况。N.Fang 等<sup>[7]</sup> 对比研究了两种常用的航空材料 Ti-6Al-4V 和 GH4169 高速铣削时的切削力。韩荣第等<sup>[8]</sup> 分别在干切、乳化液和水蒸汽条件下采用硬质合金刀具 YG6 对 GH4169 进行了刀具磨损试验,研究了刀具磨损形貌及磨损机制,并给出了刀具后刀面磨损曲线。但是这些研究都没有对高速切削条件下加工参数对刀具寿命的影响规律以及由于刀具磨损引起的试件表面粗糙度的变化规律进行研究。

本文采用正交试验方法,使用 SANDVIK 公司新型的 PVD-TiAlN 涂层硬质合金刀具高速铣削高温合金 GH4169,建立了刀具寿命的经验公式,分析了切削参数对刀具寿命的影响规律,研究了刀具磨损引起的试件表面粗糙度的变化趋势,可为高温合金类零件的精加工高速铣削参数优化、铣削表面质量控制、降低生产成本、提高加工效率提供依据。

## 1 高温合金 GH4169 高速铣削试验

### 1.1 试验条件

试验机床选用乔福 VMC850 立式数控铣床, 机床最大功率 22kW, 主轴最高转速 8000r/min; 试验材料为高温合金 GH4169, 长方体试件, 几何尺寸为: 100mm × 35mm × 40mm; 铣削方式为端面顺铣, 加 Blasor 冷却液; 刀具选用 SANDVIK 公司的 Coromill 300 铣刀, 产品型号为: R300-052C5-12M, 刀体直径  $\phi$  52mm, 4 刃镶片式立铣刀。刀片选用 SANDVIK Coromill 300, TiALN 涂层硬质合金铣刀片, 刀片直径  $\phi$  12mm, 牌号为 R300-1240E-MM, 如图 1 所示; 刀片磨损采用光学显微镜进行观测, 精度 0.01mm; 表面粗糙度使用北京时代公司的 TR240 表面粗糙度仪测量。



图1 试验刀具  
Fig.1 Experiment tool

## 1.2 试验方案

采用 3 因素 3 水平正交试验的方法进行高温合金 GH4169 高速铣削试验。正交试验选取的因素、相应水平值和刀具寿命的测量结果如表 1 所示。

表1 正交试验方案及刀具寿命测试结果

序号	切深 $a_p$ /mm	切削速度 $v_c / (m \cdot \min^{-1})$	每齿进给量 $f_z / (mm \cdot z^{-1})$	刀具寿命 $T/\min$
1	0.1	70	0.02	168.62
2	0.1	90	0.04	50.23
3	0.1	110	0.06	34.19
4	0.3	70	0.04	65.91
5	0.3	90	0.06	25.50
6	0.3	110	0.02	30.07
7	0.5	70	0.06	40.17
8	0.5	90	0.02	54.62
9	0.5	110	0.04	20.60

试验中选用切削宽度  $a_e=20\text{mm}$ , 试验初期每组参数每走 5 刀测 1 次刀具磨损量及试件的表面粗糙度值, 并记录刀具的切削时间。当磨损接近失效标准时减少走刀次数进行测量, 直至磨损达到刀具失效标准, 累计的切削时间即为刀具的寿命。

刀具的失效判断准则是进行研究的一个重要指标, 在试验中刀具失效的确定基于以下一个或几个标准的综合: 后刀面最大磨损量  $V_B=0.6\text{mm}$ ; 工件材料表面粗糙度  $R_a$  达到  $1.6\mu\text{m}$ ; 后刀面出现较大范围的破损、崩刃或剥落。试验现场如图 2 所示, 试件表面粗糙度随刀具磨损的测试结果见表 2。



图2 试验现场  
Fig.2 Experiment scene

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 刀具寿命经验公式的建立

指数型经验公式是目前比较常见的刀具寿命经验公式形式。本文主要研究影响刀具寿命  $T$  的切削深度, 切削速度和进给速度。因此, 在机床特征和刀具几何参

表2 试件表面粗糙度随刀具磨损的测试结果

序号	$a_p/mm$	$v_c/(m \cdot min^{-1})$	$f_z/mm$	$V_B/mm$	$R_a/\mu m$
1	0.1	70	0.02	0.12, 0.24, 0.38, 0.53, 0.60	0.152, 0.218, 0.274, 0.269, 0.267
2	0.1	90	0.04	0.11, 0.19, 0.27, 0.55, 0.63	0.183, 0.206, 0.319, 0.380, 0.318
3	0.1	110	0.06	0.22, 0.27, 0.37, 0.44, 0.60	0.215, 0.308, 0.420, 0.453, 0.487
4	0.3	70	0.04	0.19, 0.26, 0.37, 0.51, 0.61	0.241, 0.225, 0.314, 0.272, 0.262
5	0.3	90	0.06	0.16, 0.22, 0.35, 0.44, 0.61	0.187, 0.304, 0.315, 0.324, 0.352
6	0.3	110	0.02	0.12, 0.30, 0.37, 0.52, 0.60	0.145, 0.227, 0.193, 0.191, 0.195
7	0.5	70	0.06	0.16, 0.21, 0.30, 0.38, 0.60	0.219, 0.363, 0.283, 0.34, 0.418
8	0.5	90	0.02	0.13, 0.23, 0.40, 0.56, 0.60	0.127, 0.225, 0.203, 0.229, 0.240
9	0.5	110	0.04	0.14, 0.19, 0.40, 0.56, 0.60	0.219, 0.251, 0.209, 0.233, 0.257

数确定的前提下,应用多元线性回归分析的方法建立刀具寿命与切削用量之间的回归方程为:

$$T = C \cdot a_p^{a_1} \cdot f_z^{a_2} \cdot v_c^{a_3} \quad (1)$$

式中,  $C$  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,式(1)两边分别取对数得:

$$\lg T = \lg C + a_1 \lg a_p + a_2 \lg f_z + a_3 \lg v_c \quad (2)$$

令  $Y = \lg T, a_0 = \lg C, X_1 = \lg a_p, X_2 = \lg f_z, X_3 = \lg v_c$ , 则式(2)可转化为:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 \quad (3)$$

应用多元线性回归法进行拟合,对式(3)进行回归分析,求得回归系数,本文利用 MATLAB 软件,得到的回归方程为:

$$Y = 4.8821 - 0.4078 X_1 - 0.6324 X_2 - 2.2568 X_3 \quad (4)$$

再反求式(2)中各个系数,对应的指数关系式为:

$$T = 10^{4.8821} a_p^{-0.4078} f_z^{-0.6324} v_c^{-2.2568} \quad (5)$$

为了检验模型对样本观测值的拟合程度,需要检验回归方程的拟合优度,对回归方程采用  $F$  值检验法进行显著性检验,  $F$  值检验法规定: 试验因素数为  $m$ , 次数为  $n$ , 给定显著性水平为 0.05, 若  $F < F_{0.05}(m, n-m-1)$ , 则称  $Y$  与  $X_i$  间没有明显的线性关系, 回归方程不可信; 若  $F_{0.05}(m, n-m-1) < F < F_{0.01}(m, n-m-1)$ , 则称  $Y$  与  $X_i$  间

有显著的线性关系; 若  $F > F_{0.01}(m, n-m-1)$ , 则称  $Y$  与  $X_i$  间有十分显著的线性关系。本文  $m=3, n=9$ , 查  $F$  分布表得  $F_{0.05}(3, 5)=5.41, F_{0.01}(3, 5)=12.1$ 。由表 3 可知,  $Y$  的  $F$  值大于  $F_{0.01}(3, 5)$ , 回归方程十分显著, 与实际情况拟合较好。

表3 回归方程方差分析表

差异源	平方和	自由度	均方	$F$ 值	显著性
回归	0.563	3	0.186	35.584	十分显著
残差	0.026	5	0.005		
总和	0.589	8			

## 2.2 切削参数对刀具寿命的影响规律

从刀具寿命经验公式(5)的指数可以看出, 切削速度  $V_c$  及进给量  $f_z$  对刀具寿命的影响非常显著, 切削深度的影响最小, 所以文章中主要分析了切削速度和进给量对刀具寿命的影响规律。

### 2.2.1 切削速度对刀具寿命的影响规律

根据刀具寿命经验公式拟合出刀具寿命与切削速度的关系曲线如图 3。从图中可以发现, TiAlN 涂层硬质合金刀片的使用寿命随着切削速度的增大而减小。以  $a_p=0.3mm, f_z=0.04mm/z$  为例, 当切削速度在较低范围(小于 70m/min)内增大时, 刀具寿命减小的速度非常快, 随着速度的进一步增加, 刀具寿命减小的速度放缓, 直到速度增加到 100m/min/z 以后, 切削速度对刀具耐用度的影响较小。这主要是因为切削速度主要影响切削区的温度, 当切削速度较高的情况下, 切削区温度高, 粘结磨损加剧, 涂层很容易被磨损、剥落, 甚至破损, 扩散加剧, 使刀具容易被磨损, 或形成缺陷导致破损。另外在较高的切削温度下, 刀具粘结磨损严重, 也会影响刀具的使用寿命。

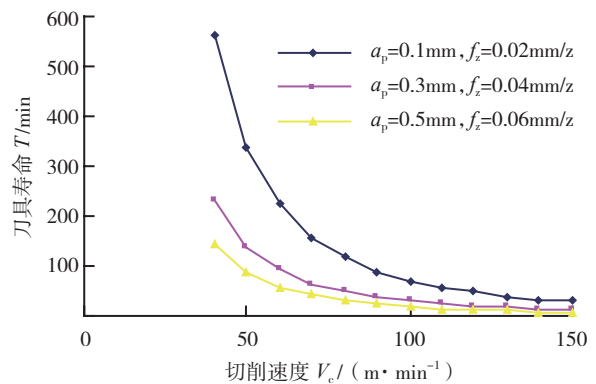


图3 切削速度对刀具寿命的影响

Fig.3 Effects of cutting speed on the tool life

另外, 比较图 3 中的曲线还可以看出, 切削深度大、

进给速度大,刀具寿命就小,这两个切削参数与刀具寿命成负相关。

### 2.2.2 进给量对刀具寿命的影响规律

从图4可以发现,刀具寿命随着每齿进给量的增加而减小,以 $a_p=0.3\text{mm}$ , $V_c=90\text{mm/min}$ 为例,当每齿进给量 $f_z<0.02\text{mm/z}$ 时,刀具寿命减小的速度非常快,随着进给量的进一步增加,刀具寿命减小的速度放缓,直到 $f_z\geq 0.04\text{mm/z}$ 以后,进给量对刀具耐用度的影响较小。这主要是因为每齿进给量影响未变形切屑层的厚度,顺铣条件下,增大每齿进给量,在刀具切入工件瞬间,增大 $f_z$ 会使刀具受到较大冲击力,从而严重影响刀具的使用寿命。

另外,比较图4中的曲线也能看出,刀具寿命与切削深度、切削速度都成负相关。

### 2.3 刀具磨损对试件表面粗糙度的影响

高温合金高速铣削过程中刀具极易磨损,当刀具磨损后必然对切削过程产生影响,如切削力增大,切削温度上升等。随着刀具的磨损引起的切削环境变化必然导致切屑形貌和加工表面质量的变化<sup>[9-10]</sup>。后刀面的磨损会引起刀具后角和后刀面的变化,进而影响加工的表面质量。图5是高温合金GH4169高速铣削过程中,刀

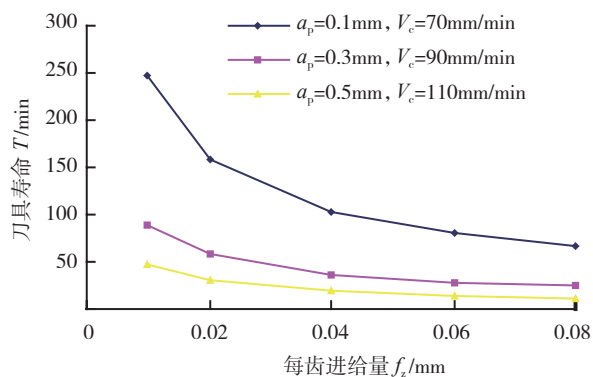


图4 进给量对刀具寿命的影响

Fig.4 Effects of feed rate on the tool life

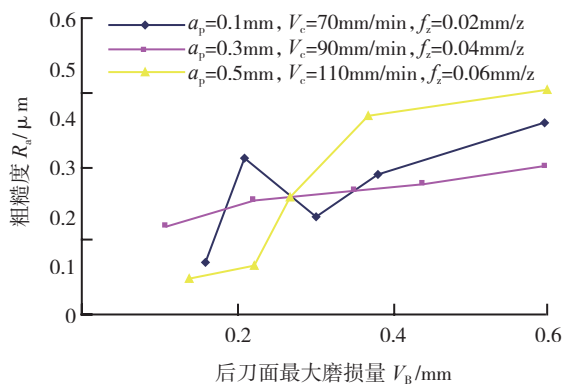


图5 刀片磨损对表面粗糙度的影响

Fig.5 Effects of tool wear on the surface roughness

具后刀面的磨损与加工表面粗糙度的变化规律曲线。

可以发现粗糙度值随着刀具的磨损总体上都是增加的,在切削初期粗糙度随着切削的进行迅速增加,而当刀具磨损到一定程度后,粗糙度出现明显的降低,然后又逐渐增加,产生这种现象的原因为当刀具逐渐磨损后,刀具进入稳定切削阶段,刀具的前后刀面出现较为稳定的切削状况,从而使表面粗糙度出现降低,而随着刀具的进一步磨损刀具切削环境进一步恶化导致粗糙度的增加。

## 3 结论

(1) 高温合金GH4169的精加工高速铣削,刀具寿命随铣削速度、每齿进给量、铣削速度的增加而减小。

(2) 高温合金GH4169的精加工高速铣削,切削速度对刀具寿命的影响十分显著,其次是进给量,切削深度的影响最小。

(3) 刀具经过磨损后,工件表面粗糙度随着刀具的磨损总体上呈现增加的趋势,切削初期粗糙度迅速增加,当刀具磨损到一定程度后,粗糙度出现明显的降低,然后又逐渐增加。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 艾兴. 高速切削加工技术. 北京: 国防工业出版社, 2003: 9-67.
- [3] Liu W W, Zhu L J, Shan C W, et al. Effect of cutting parameters on the cutting force in the end milling of GH4169 superalloy. *The International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment*, 2010(6): 3756-3759.
- [4] Schulz H, Moriwaki T. High-speed machining. *Annals of the CIRP*, 1992, 41(2): 637-643.
- [5] Nalbant M, Altin A, Hasan, et al. The effect of cutting speed and cutting tool geometry on machinability properties of Inconel 718. *Materials and Design*, 2007(28): 1334-1338.
- [6] Altin A, Nalbant M, Taskesen A. The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining Inconel 718 with ceramic tools. *Materials and Design*, 2007(28): 2518-2522.
- [7] Fang N, Wu Q. A comparative study of the cutting forces in high speed machining of Ti-6Al-4V and Inconel 718 with a round cutting edge tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009(209): 4385-4389.
- [8] 韩荣第,王辉,刘俊岩,等. 绿色切削Ni基高温合金GH4169刀具磨损研究. *润滑与密封*, 2008, 33(8): 12-15.
- [9] 刘维伟,李锋,姚倡锋,等. GH4169高速铣削参数对表面粗糙度影响研究. *航空制造技术*, 2012(12): 79-83.
- [10] 王素玉. 高速铣削加工表面质量的研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.

(责编 深蓝)