

TiAlN 涂层硬质合金刀具大进给铣削 高温合金的加工性能评价

姚倡锋¹, 陈广超¹, 黄 亲², 杨国旺²

(1. 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, 陕西 西安 710072;

2. 湖南通用航空发动机有限公司, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 大进给铣削是一种高效加工方法, 在提高难加工材料的加工效率方面具有显著优势。采用可转位的 TiAlN 涂层硬质合金刀具对 GH4169 进行了大进给铣削试验, 研究了切削速度、每齿进给量以及刀具磨损对切削力的影响规律, 并通过对后刀面磨损区域微观形貌和能谱分析, 研究了刀具磨损机理。结果表明: 每齿进给量对切削力的影响最显著, 刀具磨损对轴向切削分力的影响非常显著, 在刀片磨钝过程中, 轴向切削分力由 854 N 增大至 1 863 N; 切削速度对刀具寿命的影响最显著, 切削速度增大至 110 m/min 时, 刀具寿命仅有 2 min; 通过刀具后刀面磨损区域的能谱分析, 在切削刃附近发现大量 Ni、Fe、Cr 等 GH4169 材料元素, 刀具的主要磨损形式为黏结磨损和由热裂纹引起的材料剥落及崩刃。

关键词: 大进给铣削; GH4169; 切削力; 刀具磨损

DOI: 10.15938/j.jhust.2018.03.021

中图分类号: V261.2+3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2018)03-0122-06

Machinability Research on TiAlN Coated Carbide Tool High-Feed Milling Superalloy

YAO Chang-feng¹, CHEN Guang-chao¹, HUANG Qin², YANG Guo-wang²

(1. The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education,

Northwestern Poly-technical University, Xi'an 710072, China;

2. AVIC Hunan General Aviation Engine Co., Ltd, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: High-feed milling roughing process is a new method which has significant advantages in terms of improving efficiency in the processing difficult materials. In this paper, the experiment of TiAlN Coated Carbide indexable Tool high-feed milling GH4169 were carried out. The influence of the cutting speed and the feed per tooth, and the amount of tool wear on cutting forces are researched. Through microstructure and spectroscopy of the flank wear area to study the mechanism of tool wear. The flank wear condition are detected to analysis the mechanisms of tool wear. The results show that the effect of feed per tooth on the cutting forces is significant, and tool wear has great impact on the axial cutting force component. The axial cutting force increased from 854 N to 1 863 N in the process of the blunt; The impact on the life of tool more significant is the cutting speed, When the cutting speed is increased to 110 m/min, the tool life is just 2 min; Through spectroscopy worn area nearby the

收稿日期: 2016-07-20

基金项目: 国家科技重大专项(2014ZX04012013)。

作者简介: 陈广超(1989—), 男, 硕士研究生;

黄 亲(1984—), 男, 工程师。

通信作者: 姚倡锋(1975—), 男, 博士, 教授, E-mail: chfyao@nwpu.edu.cn.

cutting edge, a lot of Ni, Fe, Cr and other elements which belong to GH4169 materials were found, so adhesive and flaking and chipping of cutting edge caused by thermal cracking are the main form of tool wear.

Keywords: high-feed milling; GH4169; cutting force; tool wear

0 引言

GH4169 因为其强度高,塑性与韧性好,抗高温、抗氧化和抗热腐蚀性能优良,能在高温、高频应力应变及腐蚀性环境下长期稳定工作^[1-2],已经成为航天、航空、能源等行业关键零部件不可或缺的重要结构材料。GH4169 是一种典型的难加工材料,加工过程中存在切削力大、切削温度高^[3-4]、加工硬化严重、刀具磨损剧烈寿命低等特点^[5-6],目前的生产过程中加工效率很低。

国内外学者针对 GH4169 的高效切削进行了大量研究。文 [7] 等采用三种不同的涂层刀具切削 Inconel718, TiAlN 涂层刀具的切削效果要好于 TiCN 和 TiN 涂层。Kim^[8] 在低温冷风条件下采用 TiAlN 涂层硬质合金刀具高速切削镍基高温合金,有效地提高切削速度和切削效率。Z. Y. Wang^[9] 用液氮冷却切削 GH4169,速度可达 200 ~ 700 m/min,极大地提高了切削效率。文 [10] 用 Si₃N₄ 陶瓷刀具和 Al₂O₃/SiC 陶瓷刀具进行了高速切削 Inconel718 的研究,指出沟槽磨损和月牙洼是主要磨损形态,基于试验得出最佳切削速度为 250 m/min。文 [11] 研究了采用 Si₃N₄ 陶瓷、Al₂O₃ 陶瓷、Al₂O₃ + TiC 陶瓷刀具切削 Inconel718 时,在 $v_c = 100 \sim 300$ m/min 内, Al₂O₃ + TiC 陶瓷刀具的后刀面磨损较小,且加工过程较稳定,较耐高温。文 [12] 进行了硬质合金立铣刀高效插铣 GH4169 工艺研究。美国 ATI Stellram 公司的方向东^[13] 等人对大进给刀具的铣削原理进行详细的阐述,并传统铣削进行了试验对比,大进给铣削的材料去除率是传统铣削的 2 ~ 14 倍左右。文 [14] 利用山特维克的 R210 大进给刀具对 TC4 分别进行了粗、精加工铣削试验,粗、精加工的金属去除率分别可达到 110 和 30 cm³/min。南京航空航天大学杨吟飞^[15] 等研究了液氮和常规大进给切削 TC4 中的切削力和切削温度变化规律,发现每齿进给量和切削深度的影响最为显著,切削力和温度都随之有显著的增大趋势。文 [16] 对大进给铣削工艺进行了系列的基础研究。文 [17, 18] 对大进给铣削 TC21 钛合金的刀具磨损进行了宏观和微观分析,发

现刀具磨损的不均匀性和前后刀面上钛合金粘附物。陈冲^[19] 等在液氮冷却下进行了大进给铣削 TC4 的试验研究,结果表明液氮冷却比乳化液更有效地降低切削力和温度,比采用低温冷风冷却能更有效地延长刀具寿命。

目前,为提高加工效率,大进给铣削钛合金的研究已经很多,但针对大进给铣削高温合金的研究还较少。本文以镍基高温合金 GH4169 为研究对象,采用 TiAlN 涂层的硬质合金刀具进行大进给铣削性能试验研究,为镍基高温合金航空构件的高效加工提供试验数据支撑。

1 试验方案

1.1 工件和刀具材料

试验材料为镍基高温合金 GH4169,其主要化学成分及室温下的力学性能见表 1 和表 2,块状工件尺寸为 150 mm × 100 mm × 100 mm。

试验刀具是湖南株洲钻石刀具公司的大进给铣刀,刀柄型号为 XMR01-025-G25-SD0902,直径为 25 mm,2 个可转位刀片对称装配在刀柄上,刀片型号为 SDMT09T312-DMD,刀片基体材质为硬质合金,带有 3 μm 厚的 TiAlN 涂层。

表 1 GH4169 主要化学成分含量 %

元素	Ni	Cr	Mo	Al	C	Mn	Nb
成分	52.82	19.0	3.0	0.8	0.08	0.35	5.0

表 2 GH4169 力学性能(20℃)

抗拉强度 / MPa	屈服强度 / MPa	弹性模量 / GPa	伸长率 / %	收缩率 / %
1489	1319	205	20	46

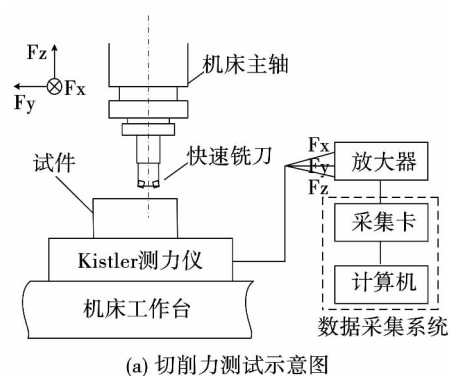
1.2 试验及测量方案

试验在 VMC-850 型三坐标立式数控机床上进行,机床主轴转速为 0 ~ 8 000 r/min,功率为 25 kW,最大进给速度为 5 000 mm/min。加工方式为顺铣,采用乳化液冷却。试验采用单因素方案,如表 3 所示,其中固定了轴向切削深度($a_p = 0.3$ mm)和径向切宽($a_e = 12.5$ mm)两个参数。

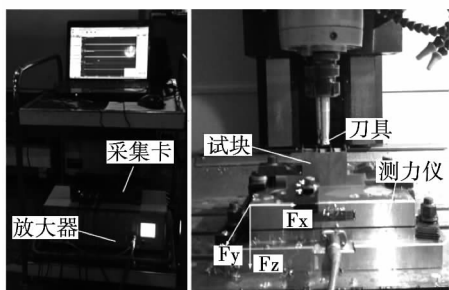
表3 试验方案及结果($a_p = 0.3 \text{ mm}$, $a_e = 12.5 \text{ mm}$)

NO.	切削速度/ (m/min)	每齿进给量/ (mm/z)	进给速度/ (mm/min)	切削力/ N	刀具寿命/ min
1#	47.1	—	600	1307	24.75
2#	78.5	0.5	1000	1365	9.45
3#	110.0	—	1400	1380	2
4#	—	0.3	600	796	15.75
5#	78.5	0.5	1000	1372	9.5
6#	—	0.7	1400	1728	4.82

试验过程中采用 Kistler9255B 三向动态压电式测力仪对不同铣削参数过程中的铣削力进行测试,如图1所示,试件装夹在的测力平台上,铣削时切削力的信号通过 Kistler5080A 电荷放大器进行放大,最终由 DEWESoft SIRIUS 数据采集卡对铣削力进行记录和存储,其中, F_x 为进给方向分力, F_y 为径向切宽方向分力, F_z 为轴向切深方向分力,切削力为三个切削分力的合力。为了获得连续稳定的铣削力信号,只对切削中间阶段的铣削力信号进行记录。



(a) 切削力测试示意图



(b) 切削力测试现场

图1 切削力测试示意图和现场

在铣削加工过程中,对切削力进行实时测量,加工一段时间,采用 Alicona 全自动刀具测量仪观察大进给铣刀后刀面宏观磨损形貌,并对后刀面平均磨损带宽度进行测量,以后刀面平均磨损带宽度达到 0.3 mm 作为刀具磨钝标准。采用 JEOL JSM-6360LV 型扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线能谱仪

(EDS) 对刀具磨损区域的微观磨损形貌和局部化学成分进行能谱分析。

2 实验结果及讨论

2.1 大进给铣削参数对切削力的影响

图2为 $v_c = 78.5 \text{ m/min}$ 、 $f_z = 0.5 \text{ mm/z}$ 时, TiAlN 涂层硬质合金大进给铣刀旋转一周即一个切削周期内的切削力信号波形图,不同的铣削参数下采集的铣削力信号波形图基本一致,大进给铣削是断续切削过程,刀具每转一周,两个切削刃会先后切削工件材料,根据被切削材料的厚度变化,形成了铣削力信号波形图。其中,轴向切深方向分力 F_z 的波幅较小,但其波峰值 F_{zmax} 最大,约为 929 N ,这与大进给铣刀小的主偏角结构相关; F_x 和 F_y 波幅较大,并且由于主轴的转动导致 F_x 和 F_y 出现正负两个方向的波动,其波峰值 F_{xmax} 和 F_{ymax} 分别为 -603 N 和 -792 N 。

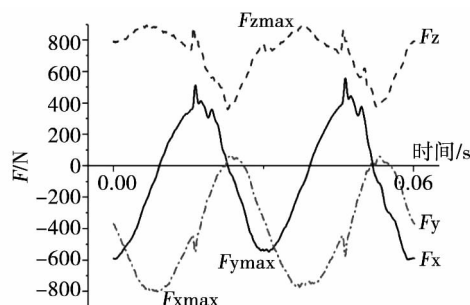


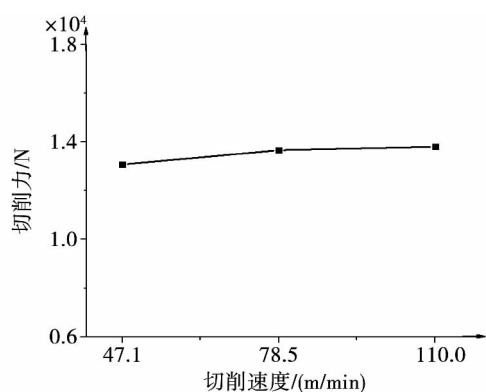
图2 一个切削周期内的切削力信号图

图3为切削速度和每齿进给量对大进给铣削 GH4169 切削力的影响规律图,由图可见,相比于切削速度,每齿进给量对切削力的影响更为显著,切削速度从 47.1 m/min 增大到 110.0 m/min 时,切削力只增大了 70 N 左右;而每齿进给量从 0.3 mm 增大到 0.7 mm ,切削力由 796 N 增大到 1728 N ,对于大进给铣削加工,每齿进给量与切屑厚度正相关,随着每齿进给量的增加,切屑厚度变大,因此切削力急剧增大。

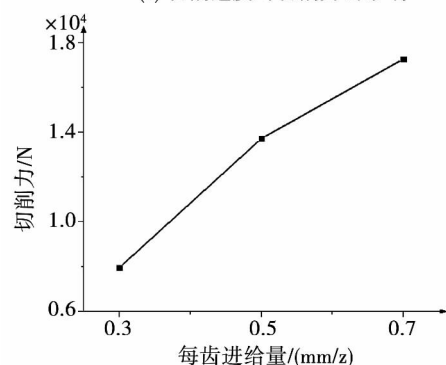
2.2 刀具寿命与刀具磨损规律

图4为不同切削参数下大进给铣削 GH4169 的刀具寿命对比图。可以看出刀具寿命随着切削速度和每齿进给量的增加而急剧降低。切削速度增大至 110.0 m/min 时,刀具寿命由 47.1 m/min 时的 24.75 min 急剧降低到 2 min ,切削速度的增加切削力变化不大,而大的切削速度导致切削温度过高,致

使刀具发生剧烈磨损而快速失效;由图4还可见,随着每齿进给量的增加,刀具寿命从15.75 min降为4.82 min,每齿进给量的增加使切削力大幅增加,同时切削温度升高,在热力耦合作用下导致了刀具的剧烈磨损。



(a) 切削速度对切削力的影响



(b) 每齿进给量对切削力的影响

图3 切削速度和每齿进给量对切削力的影响

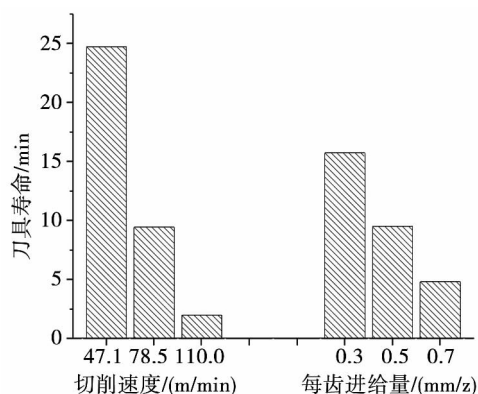


图4 切削速度和每齿进给量对刀具寿命的影响

图5为 $v_c = 78.5$ m/min、 $f_z = 0.5$ mm/z时,大进给铣削GH4169的刀具磨损曲线与切削力变化曲线。刀具磨损过程可分为三个各阶段:初始磨损、平稳磨损和剧烈磨损。图6为三个磨损阶段的刀具磨损形貌图,当铣削时长小于1.2 min时,为初始磨损阶段,后刀面磨损量迅速增加,其刀具磨损速率为

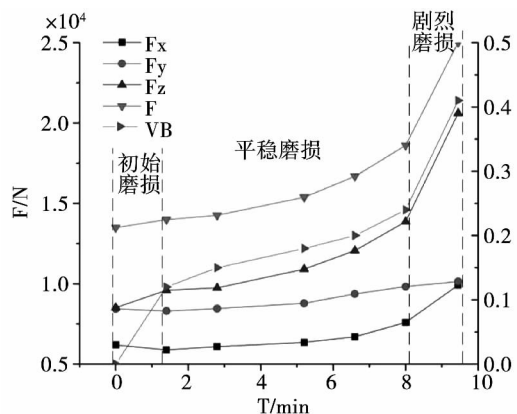
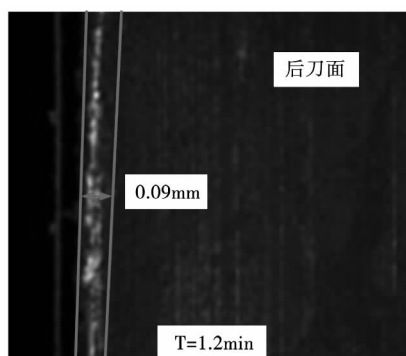
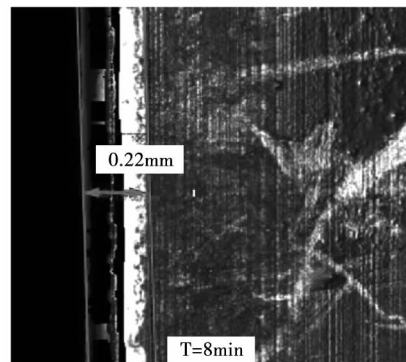


图5 刀具磨损曲线及切削力变化曲线

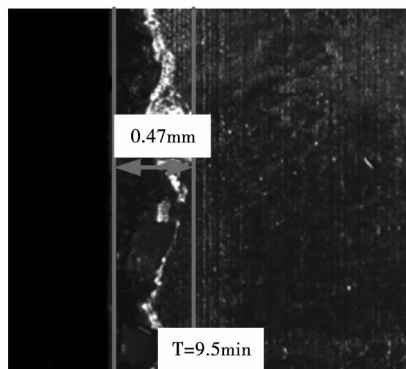
($v_c = 78.5$ m/min、 $f_z = 0.5$ mm/z)



(a) 初始磨损阶段



(b) 平稳磨损阶段



(c) 急剧磨损阶段

图6 不同阶段刀具磨损形貌

0.075 mm/min,但切削力的变化很小;随着铣削时长的进一步增长,即正常磨损阶段,后刀面磨损量的增加相对平缓,其磨损速率仅为0.02 mm/min,轴向切削分力 F_z 有明显的增大趋势,而 F_x 和 F_y 的变化不明显;当铣削时长超过8 min后,刀具急剧磨损,其磨损速率为0.17 mm/min,相比平稳阶段增加了约8倍, F_z 亦随刀具磨损量的增大而急剧增加,而 F_x 和 F_y 的增大相对缓慢。总体而言,刀具磨损对轴向切削分力的影响最为显著,刀具磨钝过程中,轴向切削分力由854 N增大至1 863 N。另外,在测量过程中发现刀具后刀面的磨损量并不均匀,磨损最严重处一般发生在最大切深 a_{pmax} 附近,此处切削量最大,最易发生磨损而导致刀具的失效,为刀具的薄弱部位。

2.3 刀具磨损机理

图7为扫描电子显微镜(SEM) X300倍下大进给铣刀后刀面磨损后的微观形貌,从图中可以看出刀具后刀面上有层状物的分布,切削刃刃口部位发生严重的破损或崩刃;临近切削刃的后刀面上出现灰白相间的物质,为了判别其化学成分,采用X射线能谱仪(EDS)对刀具磨损区域的1#和2#位置进行化学成分能谱分析,检测结果如图8所示。

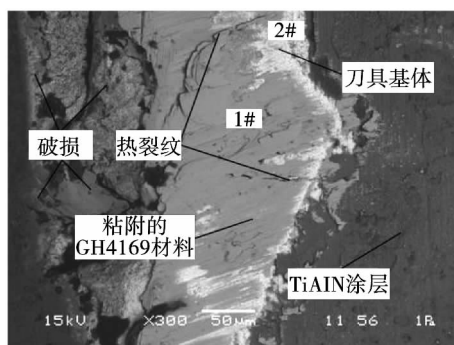


图7 后刀面磨损后的微观形貌

对比图8(a)和8(b)可以看出,刀具后刀面1#区域处成分比较复杂,既有硬质合金基体的主要材料W和涂层材料Al、Ti和N等元素;也有大量的Ni、Fe化合物和Cr等元素,这些元素均为GH4169材料的主要元素成分,Ni、Fe化合物是铣削过程中高温引起的刀具-工件之间化学反应生成的。2#区域处,主要是硬质合金刀具基体材料的主要成分为W。这说明加工过程中刀具后刀面发生了严重的黏结磨损。在高温和高压条件下,刀具和工件实际接触面上产生了明显的塑性变形而发生“冷焊”现象,两接触表面的黏结点因相对运动,晶粒或晶粒群受剪切或受拉而被撕裂带走造成黏结磨损。随着切削

时间的增加,黏结层的厚度和面积不断增加,当达到一定程度时,黏结层出现开裂和脱落现象,一部分黏结材料随着切屑带走,使得黏结层材料与刀具之间产生剪切,一部分刀具材料被撕裂下来随着切屑带走,造成刀具刃口的破损^[20]。

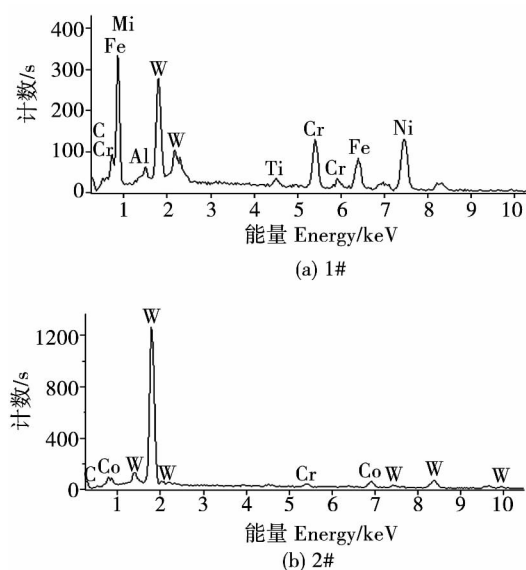


图8 磨损区域的能谱分析

从图7中可发现在刀具后刀面磨损区域存在许多细小的微裂纹,这些微裂纹是在切削加工中机械应力和热应力相互耦合冲击作用以及刀具表面的塑性变形作用下产生的热裂纹。大进给铣削是断续切削,在刀具-切削接触区有比较严重的热应力疲劳,在这种热应力疲劳和切削的冲击下,刀具表面产生热裂纹并不断扩展,当裂纹扩展到一定程度就会使刀具表层发生片状剥落,如此反复就会导致刀具失效,可见热裂纹也是切削刃崩刃或破损的一种主要因素。

3 结 论

通过可转位的TiAlN涂层硬质合金刀具大进给铣削GH4169进行了切削力和刀具磨损试验,分析了切削参数和刀具磨损量对切削力的影响规律以及刀具的磨损机理,得到以下结论:

1) 大进给铣削的轴向切削分力大于其它方向的切削分力,切削力对切削速度的变化不敏感,随每齿进给量的增大会显著增大;刀具磨损对轴向切削分力的影响非常显著,在刀片磨钝过程中,轴向切削分力由854 N增大至1 863 N。

2) 刀具寿命随主轴转速和每齿进给量的增加

而明显降低,切削速度对刀具寿命的影响最为显著,切削速度增大至 110 m/min 时,刀具寿命仅有 2 min。

3) TiAlN 涂层硬质合金大进给铣刀铣削 GH4169 时,后刀面附近发现大量 Ni、Fe 化合物、Cr 等 GH4169 材料元素,因此刀具的主要磨损形式为黏结磨损,同时还伴有热裂纹引起的材料剥落和切削刃的崩刃。

参考文献:

- [1] 航空制造工程手册总编委. 航空制造工程手册—金属材料切削加工[M]. 北京: 航空工业出版社, 1999.
- [2] 吴明阳, 王博, 程耀楠, 等. 高温合金材料特性及加工技术进展[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2015(06): 24–31.
- [3] ACKERMANN H, TENEVA-KOSSEVA G, LUCKA K. Oxidation Behaviour of Selected Wrought Ni-base High Temperature Alloys when Used as Flame Tube Material in Modern Blue Flame Oil Burners[J]. Corrosion Science, 2007, 10(49): 3866–3879.
- [4] M R, H S W K, T T T. The Machinability of Inconel 718[J]. 1997, 63(7): 199–204.
- [5] 郑敏利, 范依航. 高速切削典型难加工材料刀具摩擦与磨损机理研究现状[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011(6): 22–30.
- [6] 刘利, 程耀楠, 韩禹, 等. 高强度钢加工硬质合金刀片粘结破损与刀-屑元素扩散实验研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2015(5): 46–50.
- [7] JINDAL P, SANTHANAM A, SCHLEINKOFER U, et al. Performance of PVD TiN, TiCN, and TiAlN Coated Cemented Carbide Tools in Turning[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 1999, 1(17): 163–170.
- [8] KIM S W, LEE D W, KANG M C, et al. Evaluation of Machinability by Cutting Environments in High-speed Milling of Difficult-to-cut Materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111(1–3): 256–260.
- [9] 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.
- [10] ALTIN A, NALBANT M, TASKESAN 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.
- [11] 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.
- [12] 林谦, 任军学, 李祥宇, 等. 高温合金 GH4169 高效插铣工艺试验研究[J]. 工具技术, 2014, (4): 57–61.
- [13] 方向东, 左旭辉, 王子豪, 等. 大进给铣削[J]. 航空制造技术, 2012, (3): 104–105.
- [14] 楚王伟, 牟文平, 龚清洪, 等. 钛合金飞机结构件高效铣削技术研究[J]. 工具技术, 2008, 42(8): 43–46.
- [15] 杨吟飞, 赵威, 李亮, 等. Ti6Al4V 钛合金大进给铣削切削力与切削温度的试验研究[J]. 航空精密制造技术, 2014, (4): 34–37.
- [16] 徐杰. 钛合金大进给铣削工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [17] 李亮. 钛合金的高速粗加工——大进给铣削技术[J]. 航空制造技术, 2014(12): 32–35.
- [18] 史琦, 李亮, 何宁, 等. 大进给铣削 TC21 钛合金的刀具磨损试验研究[J]. 航空制造技术, 2015, (3): 51–53.
- [19] 陈冲, 赵威, 何宁, 等. 液氮冷却下大进给铣削 TC4 钛合金的试验研究[J]. 工具技术, 2014, 48(8): 13–17.
- [20] 李锋, 刘维伟, 余斌高, 等. TiAlN 涂层刀具高速铣削 GH4169 刀具磨损形貌及机理分析[J]. 航空精密制造技术, 2016(1): 34–38.

(编辑: 关 毅)