

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.10.017

高速磨削 Inconel718 单颗 PCBN 磨粒磨损研究*

程 强, 梁国星*, 郝建宇, 张 宇

(太原理工大学 机械与运载工程学院 山西 太原 030024)

摘要:针对高速磨削 Inconel718 PCBN 磨粒磨损问题,对单颗磨粒高速磨削实验过程的磨削力、工件材料堆积率及磨粒磨损等方面进行了研究。利用 MV-40 数控加工中心,对 Inconel718 进行了单颗磨粒高速磨削试验;使用测力仪测量了磨削过程磨削力,采用三维形貌仪和超景深显微镜对磨痕和磨粒磨损进行了观察,分析了材料堆积率和磨粒磨损变化规律;从磨削力比、磨痕横截面以及材料堆积率 3 个方面,分析了高速磨削过程中的磨粒磨损情况。研究结果表明:磨粒初期磨损阶段,尖端出现微破裂、材料粘附以及裂纹;稳定磨损阶段,裂纹沿切削刃扩展直到形成新的切削刃;磨粒初期磨损钝化会增大磨削力比和材料堆积率,磨粒磨损后期形成新切削刃则会降低磨削力比和材料堆积率;磨削深度的增大会加剧磨粒磨损,磨粒力比拐点出现更早。

关键词:Inconel718;磨削力;堆积率;磨粒磨损

中图分类号:TH117;TG58

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)10-1225-06

Wear study of single PCBN abrasive in high speed grinding Inconel718

CHENG Qiang, LIANG Guo-xing, HAO Jian-yu, ZHANG Yu

(School of mechanical and vehicle engineering, Taiyuan University, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Aiming at studying the wear mechanism of a single PCBN abrasive grain at high-speed grinding of Inconel718, the grinding force, the material pile-up ratio and the wear of the abrasive grains during the high-speed grinding experiment were studied. The MV-40 CNC machining center was employed in the process of High-speed grinding Inconel718 with single abrasive grain. The grinding force was measured by a dynamometer, the grinding crack and abrasive wear were observed with a 3D profilometer and super depth-of field microscope, and the material pile-up ratio and abrasive grain wear change law were analyzed. The wear of abrasive grain was analyzed from the angle of grinding force ratio, cross section of grinding cracks and pile-up ratio. The results indicate that during the initial wear stage, the tip of the abrasive grain appeared macro-fracture, material adhesion and crack, and during the stable wear stage, the crack expanded along the cutting edge until new cutting edges were formed. The grinding force ratio (F_n/F_t) and pile-up ratio will be increased by the passivation of the abrasive grain at the initial wear stage, while the grinding force ratio (F_n/F_t) and pile-up ratio will be decreased by the formation of new cutting edges at the stable wear stage. The increase of grinding depth will aggravate the wear of abrasive grain, and the grinding force ratio (F_n/F_t) will appear earlier than the inflection point.

Key words: Inconel718; grinding force; pile-up ratio; abrasive wear

0 引 言

由于具有较高的热强度、热稳定性以及良好的耐腐蚀性能,高温镍基合金在航空发动机、燃烧室、燃气

轮机等领域被广泛应用^[1-3]。高温镍基合金和钛合金一样,在磨削加工时磨削区磨削比能较大^[4]、温度较高,会造成材料的软化以及砂轮表面磨屑的粘附,属于难加工材料^[5]。

收稿日期:2020-01-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575375);山西省自然科学基金资助项目(201801D21174)

作者简介:程强(1994-),男,河南开封人,硕士研究生,主要从事先进制造技术方面的研究。E-mail:1959027280@qq.com

通信联系人:梁国星,男,教授,硕士生导师。E-mail:lianguoxing@tyut.edu.cn

磨削加工^[6]在精密加工领域有着重要的地位,其原理是利用工件与砂轮磨粒的相互作用以去除材料^[7]。磨削过程参与磨粒数量较多,形状、尺寸分布随机,为研究材料去除机理带来了一定的困难^[8]。

单颗磨粒磨削方法被广泛应用于研究材料去除机理。余剑武等^[9]利用单颗磨粒磨削实验,研究磨削速度对工件材料去除的影响,研究发现,提高磨削速度有利于提高材料去除成屑阶段,降低磨痕两侧堆积率。沈平华等^[10]对 GH4169 进行了单颗金刚石高速磨削实验,研究发现,磨削力随切削速度的增大而减小,高速有利于高温镍基合金磨削加工。WANG 等人^[11]通过有限元对单颗 CBN 磨粒高速磨削 Inconel718 高温镍基合金条件下的磨损演化进行了研究,结果表明在切削刃附近出现微裂纹,并由微裂纹扩展形成宏观断

裂,拉应力是造成 CBN 颗粒磨损的主要因素。RAO 等人^[12]分别用 PCBN 和 CBN 进行单颗磨粒磨削实验研究,发现采用 PCBN 磨粒获得的磨痕粗糙度值更高,PCBN 磨粒比 CBN 磨粒磨痕更容易发生锐化,PCBN 磨粒去除材料能力更强。

Inconel718 镍基合金^[13]具有良好的性能而被广泛地应用,但其难加工性限制了它的发展。为此,笔者将镍基高温合金 Inconel 718 作为对象,采用形状规则的 PCBN 颗粒进行单颗磨粒试验研究。

1 磨削试验

试验选用 Inconel718 作为样件材料样件,试验前进行打磨抛光处理,粗糙度为 $0.4\ \mu\text{m}$,初始硬度为 34 HRC。

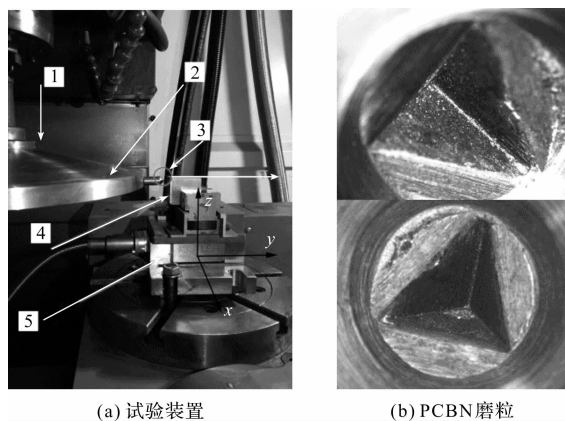
Inconel718 合金化学成分如表 1 所示。

表 1 Inconel718 合金化学成分(质量分数/%)

Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	Al	Si	Mn	Co	Fe
50~55	17.0~21.0	2.8~3.3	4.75~5.50	0.65~1.15	0.20~0.80	0.35	0.35	1.0	其余

笔者采用 MV-40 数控立式加工中心对 Inconel718 进行单颗磨粒高速磨削试验;将 PCBN 磨粒通过钎焊的方式固定在直径为 400 mm 的砂轮盘上。

试验装置及单颗 PCBN 磨粒如图所示。



(a) 试验装置

(b) PCBN 磨粒

图 1 试验装置单颗 PCBN 磨粒

1 - 进给方向;2 - 单颗 PCBN 磨粒砂轮盘;3 - PCBN 磨粒;4 - 试验样件;5 - 测力仪

图 1 中,试验样件通过试验专用夹具连接在 Kistler9119AA2 型测力仪上;用无水乙醇清洗磨削后的样件及 PCBN 磨粒,清除表面附着污物,用超景深显微镜观察记录磨粒磨损情况,使用 SM-1000 三维光学轮廓仪观察样件材料堆积率以及磨痕三维形貌。

磨削试验参数如表 2 所示。

表 2 磨削试验参数

参数/单位	值
磨削速度 $V_s/(m \cdot s^{-1})$	65
磨削深度 $a_p/\mu\text{m}$	15、20、25
进给速度 $V_w/(m \cdot min^{-1})$	0.2

2 结果与分析

2.1 单颗磨粒磨削 Inconel718 磨削力

不同磨削深度下,磨削力随切削次数变化的对比曲线如图 2 所示。

由图 2 可以看到,前期法向力和切向力随切削次数的增加逐渐增大,这是由于磨粒尖端和切削刃被磨平钝化,磨粒对材料切削作用减弱,切削过程由切削转为磨粒前端对材料的挤压,材料在磨粒前端堆积以及沿磨粒侧面流动摩擦作用增强;随着磨削次数的进一步增加,磨削力出现上下波动,这是由于磨粒钝化后导致磨削力增大,磨削力的增大会加剧磨粒尖端破碎形成的微观钝化和锐化循环;当切削次数继续增加时,磨削力有明显下降,可以解释为磨粒微破碎沿切削刃附近扩展形成了新的切削刃;不同磨削深度条件下,磨削力变化趋势大致相同,磨削深度越大磨削力中期波动拐点和后期下降拐点出现越早。

磨削力比 F_n/F_t 与被磨材料物理和机械性能和磨粒磨损情况有关。不同磨削深度条件下,磨削力比随切削次数变化的对比曲线,如图 3 所示。

图 3 中,磨削力比 F_n/F_t 随切削次数的增加而波动,在切削次数达到 13 次时降到最低 1.17,之后随着切削次数的增加波动增长,当切削次数达到 43 次时磨削力比 F_n/F_t 达到了最大 1.72,随后开始下降;当磨削深度为 $15\ \mu\text{m}$ 时,磨削力比前期波动拐点和最大点出现晚于 $20\ \mu\text{m}$;磨削深度为 $25\ \mu\text{m}$ 时,磨削力比前期波动拐点和最大点出现早于 $20\ \mu\text{m}$;磨削力

比 F_n/F_t 的下降可以解释为磨粒锐度提高,PCBN 材料固有的自锐特性会在磨削过程中发生破碎,形成新的切削刃。

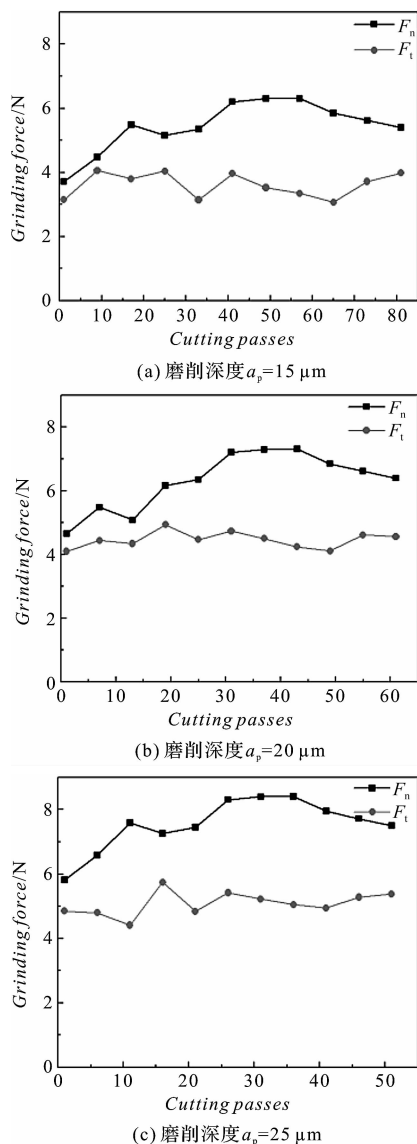


图2 磨削力随切削次数变化曲线

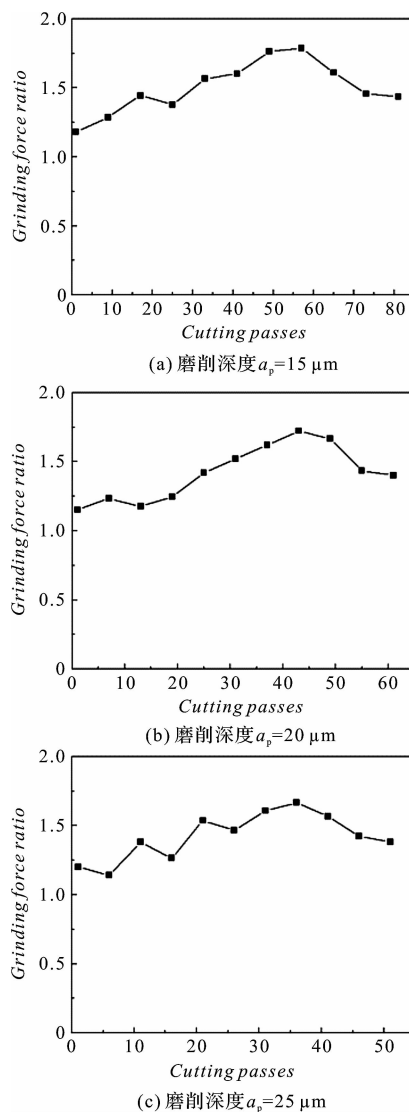


图3 磨削力比随切削次数的变化

2.2 磨粒磨损

不同次数后,磨粒磨削高温镍基合金的超景深图片如图4所示。

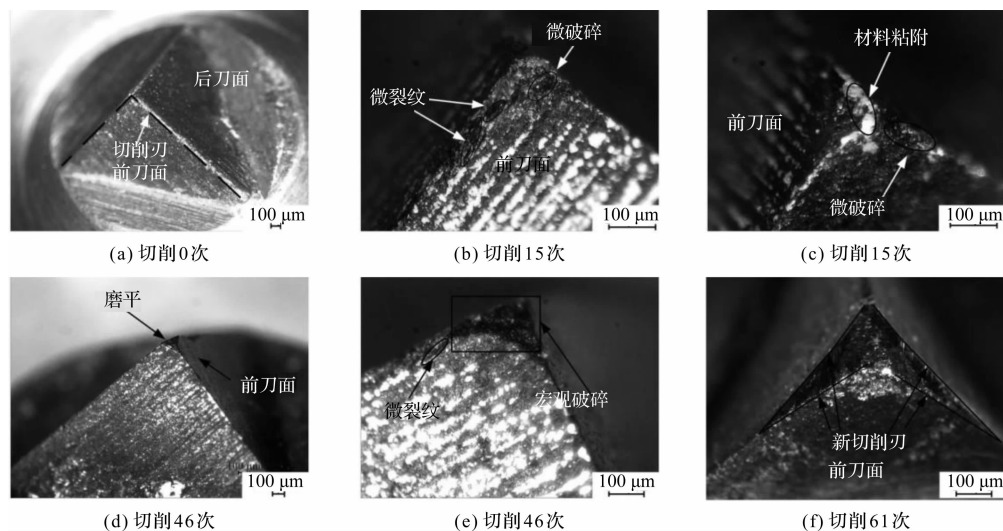


图4 PCBN 磨粒不同磨削次数后表面形貌图

图 4 中,磨粒未切削材料时磨粒表面磨粒尖端完整,切削刃锋利;经过 15 次切削后,磨粒尖端前部和后刀面有微破碎剥落,尖端有磨屑粘附,切削刃附近有裂纹出现;当切削次数达到 46 次后,磨粒尖端附近裂纹扩展导致破碎增大,表现为磨粒尖端被磨平,磨粒尖端磨平变钝导致磨粒受到工件材料挤压作用增强,受磨粒与工件接触应力和切削温度影响,磨粒表面裂纹沿切削刃扩展;当切削次数达到 61 次时,磨粒切削刃附近微裂纹的扩展直接导致宏观破碎并形成新的切削刃。

由此可见,磨粒磨损主要发生在磨粒尖端及切削刃附近。磨粒磨损可以分为两个阶段:(1)初期磨损,

主要为磨粒尖端上部及后刀面发生微破碎,切削刃附近有微裂纹出现,并在磨粒尖端有磨屑粘附,磨屑粘附导致了磨粒出现摩擦磨损,磨粒表面裂纹的扩展会进一步扩大,磨粒尖端破碎面积表现为尖端磨平;(2)稳定磨损,磨粒尖端出现磨平磨损后与工件接触面积增大,前端受到接触压力增大,磨粒表面裂纹沿切削刃扩张形成宏观破碎出现新的切削刃。

2.3 横截面轮廓

通过 SM-1000 扫描单颗粒磨削磨痕,可以获得磨痕三维形貌信息,如图 5 所示。

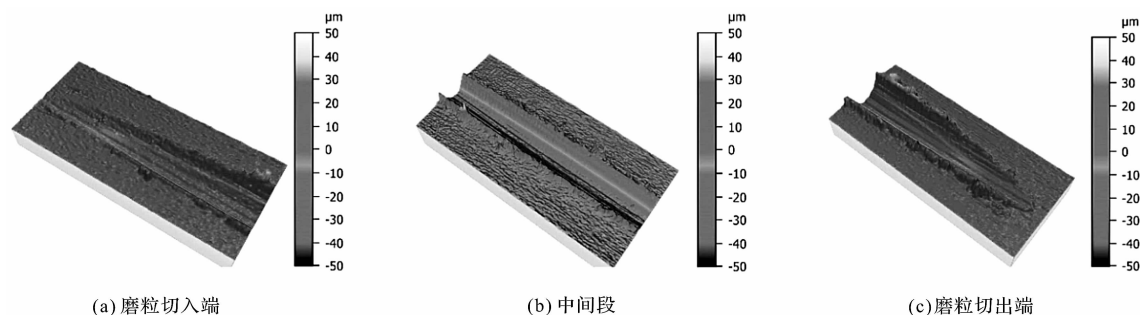


图 5 磨痕三维形貌图

该试验采用磨粒为棱锥型,划痕呈梭形轮廓,由于划擦轨迹是圆弧状,磨痕深度和宽度先增大后减小,磨粒切入端和切出端划痕深度小于划痕中部。

图 5 中,磨粒与材料刚开始接触为滑擦阶段,材料发生轻微塑性变形;材料堆积在磨粒前端未形成磨屑;随着磨粒的切入,进入犁耕阶段,在磨痕两边开始出现材料堆积;在磨痕切出端由于磨粒前端对材料挤压作用增强,材料堆积达到了最大。

磨痕横截面变化图如图 6 所示。

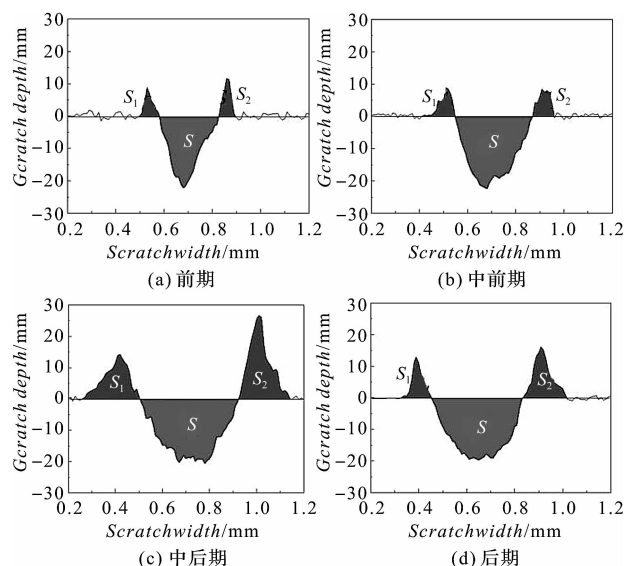


图 6 磨痕横截面变化图

通过分析磨痕三维形貌图,可以获得磨痕横截面堆积面积和磨痕沟槽信息,磨痕沟槽轮廓反应了磨粒轮廓变化。

图 6 中给出了磨痕横截面轮廓信息,磨粒未磨损时磨粒尖端完整切削刃锋利,磨痕沟槽形状呈头部较尖的 v 字形形态;随着磨削次数的增加,磨痕横截面轮廓底部出现不规则变化,这是由于磨粒尖端受到材料挤压出现破碎;随着磨削次数继续增加,磨粒磨损加剧,表现为磨痕底部扁平,这是由于磨粒尖部微破裂增大,磨粒表现为尖端磨平磨损;随着磨削次数进一步增加,磨痕横截面两边与底部连接处向弧状转变,且磨痕两边堆积面积减小,这是由于磨粒切削刃发生断裂磨粒,磨粒尖端磨平消失,磨粒重新锐化。

磨痕横截面轮廓信息反映出的磨粒形貌变化与上节试验测得的磨粒形貌变化基本一致。

ÖPÖZ^[13]介绍了材料堆积率,可以定义为总堆积面积与划痕横截面面积之比,可以用于量化材料去除率^[14],即:

$$R_s = (S_1 + S_2) / S \quad (1)$$

式中: R_s —堆积率; S —磨痕沟槽横截面面积; S_1, S_2 —磨痕两边堆积面积。

在磨削速度 $v_s = 65 \text{ m/s}$ 、磨削深度 $a_p = 20 \text{ } \mu\text{m}$ 条件下,磨痕堆积率沿磨削方向的变化如图 7 所示。

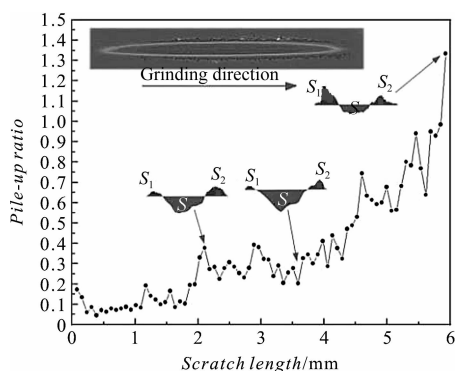


图7 磨痕堆积率

由图7可知:在磨粒与工件刚接触时,磨粒与工件主要是弹性滑擦作用,工件材料堆积在磨粒前端面,并向两侧流动,因此,磨粒在切入阶段材料堆积率逐渐上升达到37%。随着磨粒继续切入,磨粒前端材料堆积达到临界值,工件材料开始以切屑形式被去除,磨痕两边材料堆积出现减小趋势。在磨粒与工件最后接触阶段,材料堆积率迅速增大,这是由于材料受到磨粒剧烈挤压作用,材料开始向磨痕两侧流动形成大量材料堆积达到了133%。

在磨削速度 $v_s = 65 \text{ m/s}$ 、切削深度 $a_p = 20 \text{ }\mu\text{m}$ 时,磨粒经过不同划擦次数后,工件材料堆积率变化规律如图8所示。

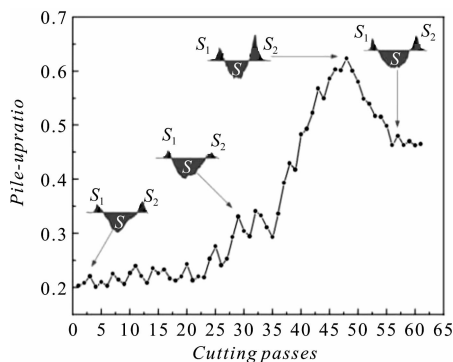


图8 堆积率随切削次数变化

由图8可以看出:

磨粒未出现磨损时工件材料堆积率为22%,此时磨粒切削刃锋利,材料大多以切屑的形式被去除;随着划擦次数的增加,磨粒出现磨损变钝导致材料堆积率逐渐升高达到60%;当划擦继续增加达到46次时,可以看到材料堆积率开始下降;划擦次数为61次时,材料堆积率最低达到45%左右,这是由于磨粒磨损变钝磨粒前端受到接触压力增大,磨粒表面微裂纹继续扩展形成宏观破碎出现新的切削刃,从而进一步降低了材料堆积率。

3 结束语

(1)单颗PCBN磨粒高速磨削Inconel718磨削力比 F_n/F_t 在磨削过程中先增加后减小,磨削力比 F_n/F_t 的增加与磨粒发生磨损钝化有关,磨粒破碎发生锐化可以在一定程度降低磨削力比 F_n/F_t ;磨削深度增加,磨削力比拐点提前;

(2)磨粒磨损分为两个阶段,第一阶段表现为磨粒尖端发生材料粘附和破碎导致磨粒尖部被磨平,切削刃附近出现微裂纹;第二阶段PCBN磨粒切削刃附近微裂纹扩展形成宏观破碎出现新的切削刃;

(3)磨削加工过程中,材料堆积率随磨削次数的增加上下波动大致呈上升趋势,前期材料堆积率由20%逐渐增加到62%,随后下降达到46%。

参考文献 (References):

- [1] 徐 艳,李俊成. 高温合金涡轮叶盘机树型槽的铣削试验研究[J]. 汽轮机技术, 2002, 44(6): 380.
- [2] 任敬心,康仁科,史兴宽. 难加工材料的磨削[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [3] EZUGWU E O. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005; 45(12): 1353-67.
- [4] YAO C F, JIN Q C, HUANG X C, et al. Research on surface integrity of grinding Inconel 718 [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, (6)5: 1019-1030.
- [5] ZHU Y J, DING W F, YU T Y, et al. Investigation on stress distribution and wear behavior of brazed polycrystalline cubic boron nitride super abrasive grains: Numerical simulation and experimental study [J]. *Wear*, 2017, 376-377 (B): 1234-1244.
- [6] 程 泽,单颗磨粒高速磨削镍基高温合金机理研究[D]. 南京:南京航空航天大学机电学院, 2011.
- [7] 宋 涛,赵恒华,磨削加工技术的现状[J]. 制造技术与机床, 2011(11): 60-63.
- [8] 李伯民,赵 波. 现代磨削技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [9] 余剑武,肖 清,罗 红,等. 单颗CBN磨粒磨削20CrMo的微观成屑过程研究[J]. 材料导报, 2017, 31(10): 146-150.
- [10] 沈平华,傅玉灿,田 霖. GH4169 高温合金的单颗磨粒高速磨削试验[J]. 机械工程材料, 2013, 37(8): 23-26, 94.
- [11] WANG J W, YU T Y, DING W F, et al. Wear evolution

- and stress distribution of single CBN superabrasive grain in high-speed grinding [J]. **Precision Engineering**, 2018 (54):70-80.
- [12] RAO Z W, DING W F, ZHU Y J, et al. Understanding the self-sharpening characteristics of polycrystalline cubic boron nitride super-abrasive in high-speed grinding of Inconel718[J]. **Ceramics International**, 2019, 45 (10): 13324-13333.
- [13] 高利和, 里 杨, 高 博, 等. 镍基合金换热器的焊接要点[J]. 压力容器, 2015, 32(5):75-79.
- [14] ÖPÖZ T T, CHEN X. Experimental Investigation of Material Removal Mechanism in Single Grit Grinding[J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2012, 6(3):32-40.

[编辑:冯黎雅]

本文引用格式:

程 强, 梁国星, 郝建宇, 等. 高速磨削 Inconel718 单颗 PCBN 磨粒磨损研究[J]. 机电工程, 2020, 37(10):1225-1230.

CHENG Qiang, LIANG Guo-xing, HAO Jian-yu, et al. Wear study of single PCBN abrasive in high speed grinding Inconel718[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020, 37(10):1225-1230.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1219 页)

参考文献 (References):

- [1] 冯慧娟, 苗 青, 樊胜秋, 等. 工业机器人机械结构模块化设计[J]. 机械工程与自动化, 2019, 213(2):105-106, 109.
- [2] 王 涛, 李 阳, 王 宁, 等. 模块化可重构坐标机器人设计[J]. 机械设计与制造, 2018(8):126-128, 132.
- [3] 苏华勇, 李海艳. 机械臂系统的动力学建模与分析[J]. 机电工程技术, 2020(7):120-122.
- [4] WU W, GUAN Y, YANG Y, et al. Multi-objective configuration optimization of assembly-level reconfigurable modular robots[C]. *IEEE International Conference on Information & Automation*. Piscataway: IEEE, 2017.
- [5] LEVIN M, DEGANI A. A conceptual framework and optimization for a task-based modular harvesting manipulator[J]. **Computers and Electronics in Agriculture**, 2019, 166 (11):1-11.
- [6] CHEN I M, YANG G. Configuration independent kinematics for modular robots[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Michigan: IEEE, 1996.
- [7] 刘明尧, 谈大龙, 李 斌. 可重构模块化机器人现状和发展[J]. 机器人, 2001, 23(3):275-279.
- [8] 吴文强, 管贻生, 朱海飞, 等. 面向任务的可重构模块化机器人构型设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(3): 93-98.
- [9] 于天彪, 乔 木, 李 明. 基于遗传算法的医药码垛机器人结构参数优化研究[J]. 机电工程, 2016, 33(11):1289-1294.
- [10] CHEN I M, YANG G. An evolutionary algorithm for the reduction of DOFs in Modular Reconfigurable Robots[J]. **Proceeding of the ASME Dynamic System and Control Division**, 1998(64):759-766.
- [11] 潘新安, 王洪光, 姜 勇, 等. 一种模块化可重构机器人系统的研制[J]. 智能系统学报, 2013(4):10-16.
- [12] CHOI J, PARK D, SHIN H, et al. A new approach to generate the DH parameters of modular robots[C]. *2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE)*, Piscataway: IEEE, 2017.
- [13] GIUSTI A, ALTHOFF M. Automatic Centralized Controller Design for Modular and Reconfigurable Robot Manipulators[C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems*. Vancouver: IEEE, 2015.
- [14] 林蔚韡, 姚立纲, 东 辉. 一种可重构模块化机器人的设计与运动学分析[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(2): 150-154.
- [15] 李秋苹, 章 军, 崔 军. 一种欠驱动柔性机械手的抓取力研究[J]. 轻工机械, 2018, 36(3):21-24.
- [16] 计时鸣, 黄希欢. 工业机器人技术的发展与应用综述[J]. 机电工程, 2015, 32(1):1-13.

[编辑:冯黎雅]