

难加工材料精密孔高效珩磨技术研究进展*

杨长勇^{1,2},高绍武¹,徐九华¹,傅玉灿¹,杨能阁³,闫文³,周晓卫³

(1. 南京航空航天大学机电学院,南京 210016;

2. 先进数控技术江苏省高校重点建设实验室,南京 211167;

3. 中航工业西安航空发动机(集团)有限公司,西安 710021)

[摘要] 珩磨技术凭借加工精度高、材料去除率大的优势,广泛应用于精密孔加工。航空发动机广泛采用高温合金、钛合金、不锈钢等航空难加工材料,其难加工性降低了珩磨加工的材料去除及误差修正能力,限制了珩磨工艺在航空发动机精密孔加工中的进一步应用。为突破难加工材料珩磨工艺瓶颈,对难加工材料珩磨工艺特性进行分析,并以高效精密珩磨工艺及工具为切入点,归纳了航空难加工材料精密孔高效珩磨技术现状,并对其发展趋势进行了预测。

关键词: 难加工材料;精密孔;珩磨;高速;高效

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.09.026



杨长勇

南京航空航天大学副教授、工学博士,主要从事难加工材料高效精密磨削技术与应用研究,主持国家自然科学基金、江苏省自然科学基金等项目,发表论文 20 余篇。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51305200); 江苏省自然科学基金项目(BK20130805); 江苏省科技支撑项目(BE2013122); 先进数控技术江苏省高校重点建设实验室开放基金项目(KXJ201502)。

航空发动机被誉为“工业皇冠上的明珠”,其设计、材料与制造技术对于航空工业的发展起着至关重要的作用,是一个国家科技水平、军事实力和综合国力的重要标志之一^[1]。随着科技的迅猛发展,以及航空工业水平的不断提高,对航空发动机的性能也提出了更高的要求,如高推重比、高可靠性、超高速、长航时等。其中,航空发动机关键零部件的设计与制造精度又是实现航空发动机高性能的前提。

精密孔结构广泛存在于航空发动机中,如燃油喷嘴、轴承、齿轮及盘类零件等,其加工精度及表面完整性对零件的性能及疲劳寿命具有重要的影响。该类零件由于长期工作于高温、高压环境中,对高温性能以及耐腐蚀性能有较高的要求;同时,为提高航空发动机的推重比,广泛采用了高温合金、钛合金以及不锈钢等具

有高比强度的难加工材料。这些难加工材料在拥有优异力学性能的同时,又给其磨削加工带来一些问题,如磨削力大、磨削温度高、砂轮磨损严重等,降低了加工精度及已加工表面的完整性^[2-3]。因此,实现难加工材料精密孔的高效精密加工,是实现先进航空发动机精密零部件孔制造的重要途径。

难加工材料珩磨技术存在的主要问题

珩磨是一种面接触磨削工艺——油石表面磨粒在径向压力的作用下压入内孔表面,并作相对运动,从而去除干涉部分材料。20 世纪初,珩磨技术应汽车工业的需求而产生,用于汽缸孔表面的光整加工。早期的珩磨工艺受机床进给刚度及油石切削能力的限制,材料去除率低,仅能作为一种光整加工工艺改善

已加工表面的质量。随着机床及油石制造水平的提高,珩磨工艺能力也不断提升,材料去除率发生根本性变化,充分发挥出其面接触磨削的效率优势。目前,珩磨工艺已不仅仅局限于光整加工工艺,在获得较高的表面质量的同时,可极大地提高内孔的尺寸、形状精度,故作为一种高效精密孔加工方法,已广泛应用于航空、航天、液压、汽车等行业中^[4]。

然而,对于高温合金、钛合金以及不锈钢等典型难加工材料,其难加工性在珩磨加工中仍然存在。如难加工材料加工硬化趋势严重,珩磨加工力大,油石磨损剧烈;同时,油石与磨屑发生严重黏附,堵塞油石,进一步降低了油石的切削能力;另外,其材料去除率远低于常规材料的珩磨加工,降低了珩磨工艺对底孔的尺寸及形状误差的纠正能力^[5-6]。如何提高难加工材料珩磨加工中的材料去除效率,是目前难加工材料孔珩磨加工中面临的主要问题。

难加工材料高效精密珩磨技术研究现状

1 高效精密珩磨工艺技术研究

高效精密珩磨工艺是指在保证珩磨加工精度的前提下,极大地提高珩磨加工的材料去除率,进而提高珩磨加工效率,实现“以珩代磨”,提高加工质量,降低生产成本。现有的高效精密珩磨工艺主要包括两类:一类是通过改进机床及工具的制造水平,将珩磨允许工艺参数提升一个数量级,进而实现材料去除率质的提升,如高速珩磨及强力珩磨;另一类是将传统珩磨工艺与其他的高效加工工艺相融合,优势互补,产生的新型复合高效精密珩磨工艺,如电解珩磨、超声珩磨以及单冲程珩磨。

(1) 高速珩磨。

高速珩磨是通过珩磨头的高速旋转,从而获得较高珩磨加工线速度的一种珩磨加工工艺。珩磨头是将

油石安装在油石座上所构成的工具,油石自身尺寸的误差及其装配误差共同决定了珩磨头的误差,故珩磨头的几何中心线与回转中心线的偏心误差 e 是不可避免的(图1)。珩磨加工中,工具与工件相对浮动,工具在工件内孔的导向下进入工件,从而保证工具的几何中心线与内孔的几何中心线重合。工具转动的同时,带动工件一同围绕回转中心线做圆周摆动,故工具对工件施加了向心力,向心力的数值与偏心误差及转速的平方成正比。在珩磨工具高转速情况下,向心力数值迅速增大,削弱了珩磨工艺过程的稳定性及可控性,降低了珩磨加工精度。目前传统珩磨加工主轴转速一般不超过2000r/min。

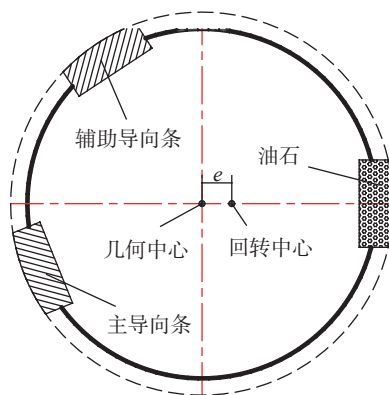


图1 珩磨工具横截面
Fig.1 Cross-section of honing tools

随着珩磨工具制造水平的提高,特别是电镀单层超硬磨料珩磨工具的出现,极大地改善了珩磨工具的偏心,珩磨工艺所允许的转速也获得了大幅提高。目前,KADIA公司生产的高速珩磨机床主轴转速可达8000r/min,DEGEN公司生产的高速珩磨机主轴转速可达到12000r/min。主轴转速的提高带来珩磨线速度的提高,在低速磨削区域,提高磨削速度可大幅降低磨削力,减少油石磨损^[7]。Vrac等研究表明,珩磨线速度是影响珩磨材料去除率最显著的因素^[8]。高速珩磨使材料去除率显著提高,有效解

决了难加工材料珩磨加工中材料去除率低的问题,提高了珩磨加工的效率及对内孔尺寸、形状精度的修正能力。

(2) 强力珩磨。

20世纪70年代末,国内外开始发展强力珩磨,也称为重切削珩磨。强力珩磨是用切削性能较强的油石和较高的珩磨压力,在刚性较好的珩磨机上进行大余量或高效率的珩磨加工。De Beer公司的Juchem采用金刚石油石进行珩磨试验,结果表明金属的材料去除率与油石的切削压力基本成正比关系^[9]。先进强力珩磨机进给压力可达6MPa,而普通珩磨工作压力一般仅为0.5MPa,故强力珩磨材料去除率高,珩磨余量可增加到4mm^[10]。由于强力珩磨的高材料去除率,使其能取代半精镗以及磨削等中间工序,简化了工艺流程。

强力珩磨的上述特性,可有效克服难加工材料珩磨加工中材料去除能力差的问题。陕西科技大学王宁侠对钛合金和沉淀硬化不锈钢精密孔进行强力珩磨加工试验,试验结果表明强力珩磨可有效去除材料,并修正内孔的几何形状误差,是解决该类难加工材料精密孔加工的有效工艺途径^[11]。

(3) 电解珩磨。

电解珩磨是将电解加工与机械珩磨加工相结合的一种复合加工方法。电解珩磨中,工件作为阳极,材料主要以电化学溶解的形式去除,同时油石对工件表面钝化层进行刮擦,珩磨头的往复及旋转运动对电解液起到搅拌作用,故电解珩磨加工材料去除率高于电解加工,可达传统珩磨加工的8倍,同时已加工表面粗糙度可达0.04~0.005 μm 。珩磨头往复运动过程中,与内孔表面的接触面积时刻变化,引起电场强度的变化,导致工件表面各点材料去除不均匀,降低了内孔的尺寸及形状精度。对此,大连理工大学郭东明等采用微型计算

机对电解珩磨过程中工件表面扫描的电解电场强度进行实时控制,从而调控各点的金属去除速度,同时实现高几何精度与高表面质量的加工,使得电解珩磨加工成为一种可去除大余量的高效精密内孔加工工艺,而不仅仅局限于一种表面光整加工工艺^[12-13]。

印度理工学院的 Rao 等研究了电解珩磨工艺参数对材料去除率及表面粗糙度的影响,为电解珩磨在生产中的应用积累了重要的数据,并对 TC4 孔进行了电解珩磨试验,已加工表面粗糙度降低了 80%,且随着加工时间的增加,材料去除率及材料力学性能没有明显降低^[14-15]。

(4) 超声珩磨。

超声珩磨是在传统的珩磨加工中附加轴向超声振动所形成的一种新型复合加工方法。20 世纪 70 年代初,日本宇都宫大学的隈部淳一郎教授率先研究超声加工技术,随后超声加工技术几乎被应用于所有传统加工中,包括珩磨加工。80 年代末,我国亦成功研制出卧式超声珩磨装置,对钛合金、铝合金等材料进行了超声珩磨试验。上海交通大学赵波等对超声珩磨工艺系统的“局部共振”特性进行了研究,为超声珩磨工艺系统的设计提供了理论指导^[16]。南京航空航天大学祝锡晶等设计并制作出立式超声珩磨装置,并进行超声珩磨试验,在相同珩磨加工参数下,超声珩磨的材料去除率是普通珩磨的 2.5 倍,且表面粗糙度更好,油石堵塞较少^[17]。正是由于超声珩磨具有珩磨力小、油石不易堵塞、加工效率高、加工质量好等诸多优点,故可有效解决难加工材料,尤其是强韧性难加工材料珩磨加工中存在的相应问题。

在此基础上,河南理工大学郜吉才等将在线电解修锐(ELID)方法引入超声珩磨中,发展出机-声-电 3 种能量复合的新型加工工艺^[18]。在

线电解修锐-超声珩磨工艺提高了珩磨过程中油石的锋利保持性,在相同的珩磨工艺参数下,其加工精度较传统珩磨提高了 9 倍,较超声珩磨提高了 1 倍,在难加工材料高效精密珩磨加工中展示出极大的潜力。

(5) 单冲程珩磨。

单冲程珩磨又称为整体式珩磨或较珩,是采用整体式电镀超硬磨料工具,在刀具旋转的同时,一次性走刀通过工件内孔,切除一定余量的材料加工方法(图 2)。其加工形式与平面磨削相似,可看作环形弧区磨削。由于刀具无需胀开,刚性好,不存在难加工材料传统珩磨中珩磨力大、工具进给系统退让变形、材料去除率低的问题。同时,单冲程珩磨加工的尺寸一致性高,形状精度可达 $0.5\mu\text{m}$,适用于难加工材料内孔的高效、高一一致性加工。

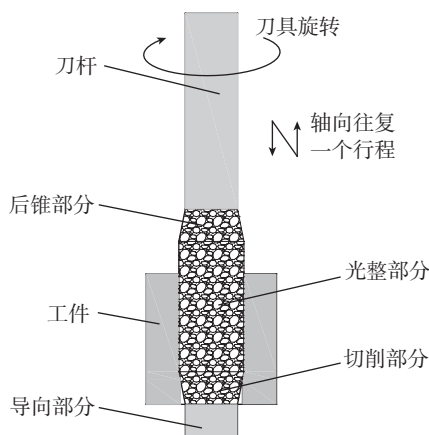


图2 单冲程珩磨示意图
Fig.2 Schematic diagram of single-stroke honing

20 世纪 70 年代,美国 Diagrit 金刚石工具公司率先提出单冲程珩磨工艺,并成功研制出电镀金刚石较刀,用于液压阀体孔的精密加工。随着超硬磨料的发展,单冲程珩磨工艺在内孔精密加工领域展示出巨大的潜力,到 80 年代末期已广泛应用于工业生产中^[19]。目前,国内的珩磨机床生产厂家已经意识到这种工艺的优势及前景,积极研发相关珩磨工

具及工艺,并取得了显著成果。

虽然单冲程珩磨工艺的应用已日趋成熟,但与之相匹配的理论研究起步较晚,仍有待进一步探索。英国考文垂大学的 Arunachalam 设计正交试验,对单冲程珩磨的工艺特性进行了系统的研究,为后续的研究工作积累了重要的数据^[20]。

2 高效精密珩磨工具技术研究

难加工材料珩磨加工中,材料加工硬化严重,珩磨力大,油石磨损剧烈。油石磨损后便不具备加工能力,需进行修锐。油石修锐对工人的技术水平要求较高,且耗费工时,严重降低了珩磨加工效率,增加了加工成本。故对于难加工材料珩磨加工而言,提高珩磨工具自锐性及耐用度对提高珩磨加工效率有着重要的作用。

(1) 混合普通磨料油石。

混合磨料油石是指将不同种类磨料按一定比例混合而制成的油石。在混合磨料油石中,不同种类的磨粒在特定的比例下,可以优势互补,提高油石的珩磨加工性能。珩磨油石中所采用的普通磨料包括氧化物系和碳化物系两大类。氧化物系磨料(如单晶刚玉)自锐性较好,但油石磨损较快;碳化物系磨料(如绿碳化硅)切削能力强,但油石自锐性差。西安石油大学彭海等采用 70% 绿碳化硅和 30% 单晶刚玉磨料混合油石,对 TC4 进行珩磨试验,珩磨效率高,油石粘附较少,磨粒不易破碎,具有良好的磨削效果^[21]。

(2) 立方氮化硼油石。

1957 年,美国的 Wentorf 采用静压触媒法,首次合成出立方氮化硼。由于其优异的硬度、耐磨性和耐腐蚀性,作为超硬磨料,广泛应用于磨削加工中。同时,立方氮化硼对铁族元素具有较强的化学惰性,特别适合于镍基高温合金、钛合金、不锈钢等难加工材料的高效磨削加工。20 世纪 70 年代,国外开始采用金属结合剂立方氮化硼油石进行珩磨加工;

到 80 年代中期,立方氮化硼油石在珩磨加工中的比例已达到 29.4%,仅次于金刚石油石;90 年代初期,随着“以珩代研”工艺在我国的推广,立方氮化硼油石也开始推广应用,推动了我国精密内孔加工工艺的发展。

(3) 单层电镀珩磨工具。

近年来,国外先进的珩磨机床厂商,如 KADIA、DEGEN、SUNNEN 等均提出采用电镀工艺,制备单层超硬磨料珩磨工具(图 3)。单层电镀珩磨工具精度高,尤其适用于高速珩磨加工。相较于传统珩磨工具,电镀珩磨工具接触面积更大,材料去除率更高,同时磨粒出露高度大,更为锋利,珩磨力更小,在难加工材料的高效精密珩磨加工中具有较大应用潜力。

(4) 有序排布钎焊珩磨工具。

钎焊 CBN 珩磨工具利用高温钎焊过程的冶金作用,引起 CBN 磨粒、钎料及工具基体之间发生化学反应,从根本上提高了珩磨工具对磨粒的把持强度,同时可依据加工条件优化磨粒排布,实现磨粒负荷均匀,避免了大负荷珩磨加工中磨粒的非正常脱落,增加工具的耐用度,在难加工材料的高速高效珩磨加工中优势尤为显著。苏黎世联邦理工大学的 Burkhard 等采用有序排布钎焊 CBN 珩磨工具(图 4)对 16MnCr5 钢进行珩磨加工,在加工质量相同的情况下,钎焊珩磨工具的加工效率为电镀

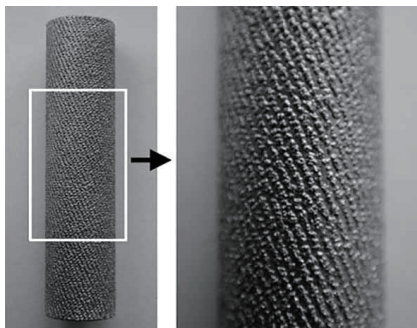


图4 钎焊CBN珩磨工具
Fig.4 Brazing CBN honing tools

珩磨工具的 3 倍,同时刀具耐用度为电镀珩磨工具的 10 倍以上^[22]。

难加工材料高效精密珩磨 技术发展趋势

高效率、高精度是机械加工永恒的追求,珩磨加工同样如此。通过以上对难加工材料高效精密珩磨技术研究现状的总结,不难看出目前难加工材料高效精密珩磨技术的发展趋势已呈现出如下几个重要特征:更高的珩磨加工速度、更大的珩磨加工压力以及多种能量的复合。

针对上述新型珩磨工艺,需要与之配套的新型珩磨设备及珩磨工具,辅之以合适的珩磨工艺参数,方能取得高效精密珩磨加工的效果。尽管航空难加工材料孔的高效精密珩磨技术研究已取得巨大进展,珩磨技术在航空发动机精密孔制造中展示出巨大的应用前景,但与之相匹配的机床、工具、工艺仍处于滞后水平,尤其是工艺数据的积累,远未达到实际应用的要求。这就需要相关的机床厂家、高校以及生产应用单位开展交流与合作,共同推进高效珩磨技术在难加工材料孔精密加工中的应用。

结束语

目前,我国正大力发展航空工业,尤其是航空发动机产业,这是我国航空发动

机行业,特别是航空发动机制造业的一个重大机遇。难加工材料的高效精密珩磨技术必将成为航空发动机高效精密制造技术中的重要一环,推动航空发动机研制及生产水平的进步,极大促进我国先进航空发动机行业的发展。

参考文献

- [1] 黄维,黄春峰,王永明,等. 先进航空发动机关键制造技术研究[J]. 国防制造技术, 2009(3): 42-48.
HUANG Wei, HUANG Chunfeng, WANG Yongming, et al. Key manufacturing technology research of advanced aero-engine[J]. Defense Manufacturing Technology, 2009(3): 42-48.
- [2] 邓朝晖,万林林,张荣辉. 难加工材料高效精密磨削技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2008(24): 3018-3023.
DENG Zhaohui, WAN Linlin, ZHANG Ronghui. Research progresses of high efficiency and precision grinding for hard to machine materials[J]. China Mechanical Engineering, 2008(24): 3018-3023.
- [3] 任敬心,康仁科,王西彬. 难加工材料磨削技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011:17-31.
REN Jingxin, KANG Renke, WANG Xibin. Grinding technology of difficult-to-machine materials[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011:17-31.
- [4] SCHMITT C, BÄHRE D. An approach to the calculation of process forces during the precision honing of small bores[J]. Procedia CIRP, 2013, 7: 282-287.
- [5] 彭海,袁方. 难加工材料的珩磨加工技术研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010(2): 21-24.
PENG Hai, YUAN Fang. Research of honing technology for difficult-to-machine materials[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2010(2): 21-24.
- [6] 黄大顺,杨长勇,傅玉灿,等. 镍基高温合金珩磨材料去除率研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(5): 726-731.
HUANG Dashun, YANG Changyong, FU Yucan, et al. Study on material removal rate of nickel-based superalloy during honing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 46(5): 726-731.
- [7] BRINKSMIEER E, SCHNEIDER C. Grinding at very low speeds[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1997, 46(1): 223-



(a) 电镀小孔珩磨工具 (b) 电镀单冲程珩磨工具
图3 KADIA公司生产的电镀珩磨工具
Fig.3 Electroplating honing tools of KADIA company

226.

[8] VRAC D S, SIDJANIN L P, KOVAC P P, et al. The influence of honing process parameters on surface quality, productivity, cutting angle and coefficients of friction[J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2012, 64(2): 77-83.

[9] JUCHEM H O. Honing with diamond and CBN abrasives[J]. *Industrial Diamond Review*, 1984,44(503):209-218.

[10] 陈海玲. 强力珩磨工艺的试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.

CHEN Hailing. Experimental study on heavy honing process[D]. Jinan: Shandong University, 2006.

[11] 王宁侠. 强力珩磨技术在难加工材料精密深孔加工中的应用[J]. *机械设计与制造*, 2007(4): 114-116.

WANG Ningxia. Application of strong precision grinding technique in precision deep hole processing of hardly processing material[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2007(4): 114-116.

[12] 郭东明, 卫国强, 贾振元. 可控电解珩磨加工机理及其电解液的加工特性[J]. *大连理工大学学报*, 1993(4): 425-432.

GUO Dongming, WEI Guoqiang, JIA Zhenyuan. Field controlling electro-chemical honing (FCECH) machining mechanism and machining property of electrolyte[J]. *Journal of*

Dalian University of Technology, 1993(4): 425-432.

[13] 郭东明, 贾振元, 赵福令, 等. 可控电解珩磨准稳态加工去除规律模型参数的确定[J]. *大连理工大学学报*, 1999(5): 653-657.

GUO Dongming, JIA Zhenyuan, ZHAO Fuling, et al. Mathematical models of quasi-stable machining removal in field controlling electro-chemical honing[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 1999(5): 653-657.

[14] RAO P S, JAIN P K, DWIVEDI D K. Precision finishing of external cylindrical surfaces of EN8 steel by electro chemical honing (ECH) process using OFAT technique[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2015, 2(4-5): 3220-3229.

[15] RAO P S, JAIN P K, DWIVEDI D K. Electro chemical honing (ECH) of external cylindrical surfaces of titanium alloys[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 100: 936-945.

[16] ZHU X S, XU K W, ZHAO B, et al. Experimental and theoretical research on "local resonance" in an ultrasonic honing system[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 129(1-3): 207-211.

[17] 祝锡晶. 功率超声振动珩磨技术的基础与应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

ZHU Xijing. Foundation research and application technology of the power-ultrasonic-vibration honing[D]. Nanjing: Nanjing University

of Aeronautics and Astronautics, 2007.

[18] 邹吉才. 在线电解修锐-超声珩磨系统多场耦合机理[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(13): 196-201.

KUAI Jicai. Coupling mechanisms of electrolytic in process dressing-ultrasonic honing system by multiphysics code[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(13): 196-201.

[19] 廉洁. 珩磨技术的发展[J]. *现代车用动力*, 2004(2): 53.

LIAN Jie. Development of honing technology[J]. *Modern Vehicle Power*, 2004(2): 53.

[20] ARUNACHALAM S, GUNASEKARAN A, O'SULLIVAN J M. Analysing the process behaviour of abrasive reaming using an experimental approach[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1999, 39(8): 1311-1325.

[21] 彭海, 张敏, 刘庆功. 混合磨料珩磨油石的磨削性能研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2006(4): 50-54.

PENG Hai, ZHANG Min, LIU Qinggong. Study on grinding performance of mixed-abrasive grits honing stones[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2006(4): 50-54.

[22] BURKHARD G, REHSTEINER F, SCHUMACHER B. High efficiency abrasive tool for honing[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2002, 51(1): 271-274.

Progress on High Efficiency Honing Technology of Precision Hole in Difficult-to-Cut Material

YANG Changyong^{1,2}, GAO Shaowu¹, XU Jiuhua¹, FU Yucan¹, YANG Nengge³, YAN Wen³, ZHOU Xiaowei³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Key Laboratory of Advanced Numerical Control Technology of Jiangsu Province, Nanjing 211167, China;

3. AVIC Xi'an Aero-Engine (Group) Ltd., Xi'an 710021, China)

[ABSTRACT] Honing technology is widely used in precision hole processing as a result of its high machining accuracy and material removal rate. However, conventional honing hasn't fully contributed its advantages in honing difficult-to-cut materials, such as superalloy, titanium alloy, stainless steel, which are widely used in aeroengines. To break through the bottlenecks in honing technology of difficult-to-cut materials, firstly, an analysis of process behavior of honing difficult-to-cut materials is made; secondly, the research of high efficiency and precision honing difficult-to-cut materials is summarized from aspects of honing process and tools; finally, the tendency of high efficiency and precision honing difficult-to-cut materials is predicted.

Keywords: Difficult-to-cut material; Precision hole; Honing; High speed; High efficiency

(责编 谷雨)