GH4169材料磨削后数控抛光表面完整性试验研究*

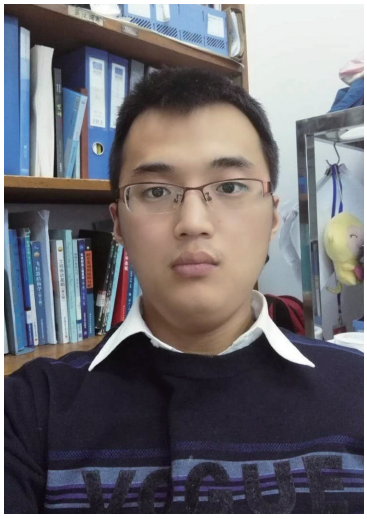
高世民，全　芳，陈志同

（北京航空航天大学机械工程及自动化学院，北京 100191）

[摘要] 针对航空发动机叶片材料GH4169高温合金，采用CBN砂轮磨削后进行羊毛毡轮数控抛光。首先，研究了抛光预压量对抛光轮寿命和工件表面粗糙度的影响，找到了抛光轮寿命的评价方法和优化的预压量；然后，研究了抛光深度对磨削后GH4169表面完整性的影响。结果表明：表面粗糙度R_a随抛光深度的增加先减小后稳定，表面显微硬度HV随抛光深度的增加呈显著下降趋势，进给方向表面残余正应力随深度增加先升高后下降，而垂直进给方向表面残余正应力先基本不变后下降。最终试验优选出了深度参数为2μm，预压量0.5~1.0mm。采用羊毛毡轮对GH4169磨削表面进行抛光，既能达到较小的表面粗糙度值（R_a=0.3μm），又可以有效维持CBN砂轮磨削形成的两个方向较大的表面残余应力。

关键词：GH4169；CBN磨削；数控抛光；表面完整性

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.23/24.052



高世民

北京航空航天大学硕士研究生，研究方向为难加工材料表面完整性、叶片类薄壁件加工变形。

GH4169高温合金广泛应用于航空、航天高温部件中，如航空发动机压气机叶片[1]，其在–253~700℃温度范围内具有良好的综合性能，抗疲劳、抗腐蚀、抗氧化性能高[2]。对叶片的加工精度与表面完整性要求都极高。表面完整性被认为与零件的使用性能，尤其是与疲劳寿命密切相关[3]。磨削可实现微量去除，加工精度高，能够获得较好的表面质量。叶片磨削后抛光是有效提高表面完整性的方法[4]。

目前高温合金的抛光主要由手工完成，抛光过程较为复杂[5-6]，一致性差、效率低、工作环境恶劣[7]。数控抛光可以有效地规避此类缺点[8]。数控抛光工具羊毛毡轮采用天然羊毛纤维压制而成，纤细柔软的羊毛纤维极少损伤加工表面，因此能够得到较好的表面质量。

抛光的主要作用是去掉上道工序留下的加工纹路，减小或消除加工变质层。在实际的羊毛毡轮抛光中，针对叶片材料GH4169，抛光深度的选择对表面完整性影响较大。因此，研究羊毛毡轮数控抛光工艺对GH4169高温合金表面完整性的影响很有意义。本文以羊毛毡轮数控抛光中表面完整性为目标，研究抛光层数优化问题，以期为高温合金数控抛光和表面完整性研究提供试验数据与理论分析。

GH4169磨削抛光试验

1　试验材料

试验所用材料为锻造的镍基变形高温合金GH4169，采用标准热处理制度：965℃、1h，空冷+720℃、8h，以50℃/h炉冷至620℃、8h，空冷。试块大小为60mm×40mm×60mm，其基本力学性能如表1所示。

2　试验设备

* 基金项目：国家重大科技专项（2013ZX04001051）。

磨削试验采用五轴立式磨床；采用 CBN200# ϕ16mm 砂轮，轴向圆弧半径为 1.5mm；磨削液采用 Blaser 高速磨削油。磨削工序为粗磨＋半精磨＋半精磨＋精磨，4 道工序走刀路径皆为单向顺磨，进给速度 v_f=400mm/min，v_c=30.16m/s，二者方向相同，4 道工序切深、切宽各不同。此磨削工艺采用以表面完整性为目标优化后的参数。磨削完成之后，试件表面显微照片如图 1 所示。

抛光试验采用三轴立式高速磨床；采用 ϕ25mm 羊毛毡轮，如图 2 所示；冷却方式为气冷；采用 W1 金刚石研磨膏；经过表面粗糙度优选，抛光工艺参数为 v_f=300mm/min，n=20000r/min，w=0.25mm。抛光路径示意如图 3。

3 表面完整性试验过程

首先进行羊毛毡轮的抛光磨损试验。由于羊毛毡轮采用天然羊毛制成，故在抛光过程中耐磨性较差，较易磨损。表面质量与预压量密切相关[9]，试验研究了不同预压量对表面粗糙度的影响，并探讨了抛光面积对羊毛毡轮磨损的影响。其中，磨损量是羊毛毡轮初始半径与磨损后半径之差。

其次，试件磨削完成后，进行不同深度的抛光，测量其表面粗糙度、表面显微硬度、表面残余应力。

表面粗糙度测量使用 Taylor Hobson 轮廓仪，表面粗糙度值为垂直于进给方向。其中，取样长度为 0.8mm，评定长度为 4mm，测量值为轮廓算术平均偏差 R_a，以下称为表面粗糙度 R_a。

表面显微硬度的测量采用 HV-1000 维氏显微硬度测量仪。其中，试验力选择 0.2kg（1.961N），载荷保持时间 10s，测量值为维氏硬度（HV0.2）。

表面残余应力采用加拿大 Proto 公司的 iXRD 型 X 射线衍射应力仪测试，试件测点位置如图 4 所示，每个测点分别检测进给方向（X 方向）和垂直进给方向（Y 方向）的残余应力。

表1 GH4169室温基本力学性能

温度/℃	弹性模量 E/GPa	屈服强度 $\sigma_{p0.2}$/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	硬度 HBS
25	205	1220	1440	346

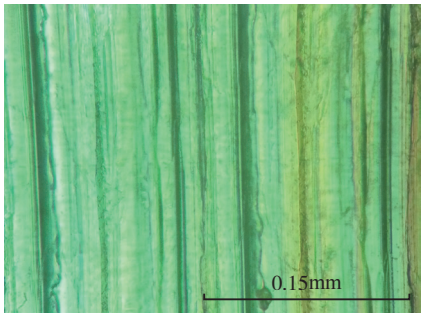


图1 CBN砂轮精磨表面显微照片

Fig.1 Micrograph of CBN finish-grinding surface

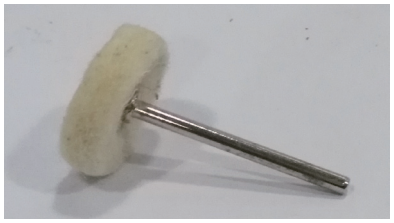


图2 羊毛毡抛光轮

Fig.2 Wool felt wheel

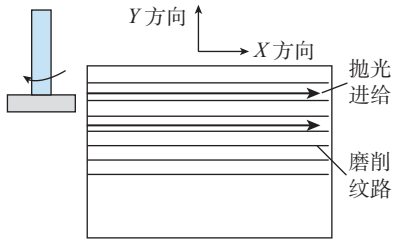


图3 抛光路径示意图

Fig.3 Schematic diagram of polishing path

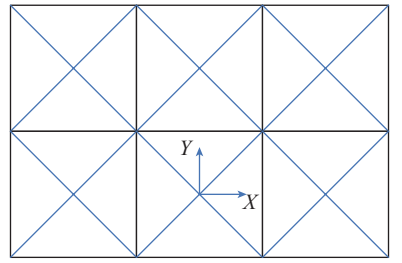


图4 XRD测点示位置

Fig.4 Position of XRD measure point

表面完整性试验及结果分析

1 羊毛毡轮磨损试验

首先，其他参数保持给定值，选取预压量 a_p 分别为 0.25mm、0.5mm、1mm、1.5mm、2mm、2.5mm 进行试件区域的抛光，测量表面粗糙度与羊毛毡轮磨损量，如图 5 所示。从中可以看出：

（1）磨损量与预压量几乎呈线性关系。这是因为羊毛毡轮抛光时，首先很快被修整，然后利用伸展的羊毛纤维进行抛光。

（2）预压量的增大使得表面粗糙度降低，羊毛毡轮的磨损量也不断加大。预压量在 0.5~1.0mm 比较合适，既能很好地降低表面粗糙度，又能使羊毛毡轮的磨损较小。

然后，其他参数保持给定值，选取预压量 a_p=1.5mm 研究抛光面积的变化对表面粗糙度和羊毛毡轮磨损量的影响，如图 6 所示。抛光面积增加，由于羊毛毡轮的磨损加剧，羊毛毡轮降低粗糙度的能力越来越低，在

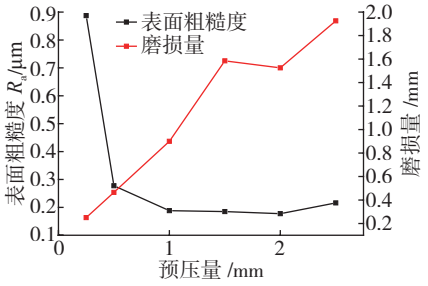


图5 预压量对R_a及毡轮磨损的影响

Fig.5 Effects of pre-compression on R_a and the wear of wheel

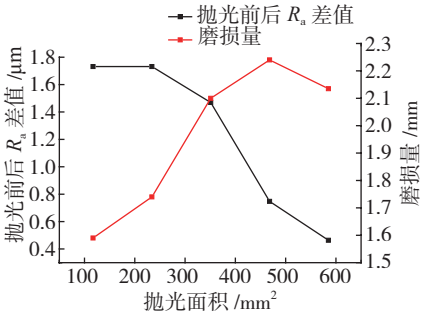


图6 抛光面积对R_a影响及毡轮磨损情况

Fig.6 Effects of polishing aera on R_a and the wear of wheel

抛光面积达到 400mm^2 左右成为拐点。

从以上试验得到，在实际应用中，使用预压量 a_p=0.5~1.0mm，且在抛光面积达到一定值（如 400mm^2）时，需要调整预压量或者更换新的羊毛毡轮。

GH4169 材料质地较硬，其硬度如表 1，不同层数抛光后表面显微照片如图 7 所示，可以看到随着抛光层数的增加，磨削纹路逐渐被抛掉。

针对不同的抛光深度，分别测量其表面完整性的 3 项指标：表面粗糙度 R_a、表面显微硬度 HV0.2、表面残余应力 σ。

2 抛光深度对表面粗糙度的影响

表面粗糙度 R_a 随抛光深度的变化规律如图 8 所示，可以看出：

（1）磨削之后 R_a 值达 1μm，抛光之后表面粗糙度值显著降低。

（2）随着抛光深度增加，R_a 值不断下降，在抛光 3 层，即抛光深度 2μm 之后，R_a 值达到 0.3μm。

（3）抛光深度达到一定值后，粗糙度稳定。此时，磨削纹路已被抛光去掉，虽然羊毛柔软，但进行抛光时也会在表面留下抛光痕迹，会影响表面粗糙度。

从上述试验结果表明，抛光深度为 2μm 时，能够有效地去除磨削后的纹路。

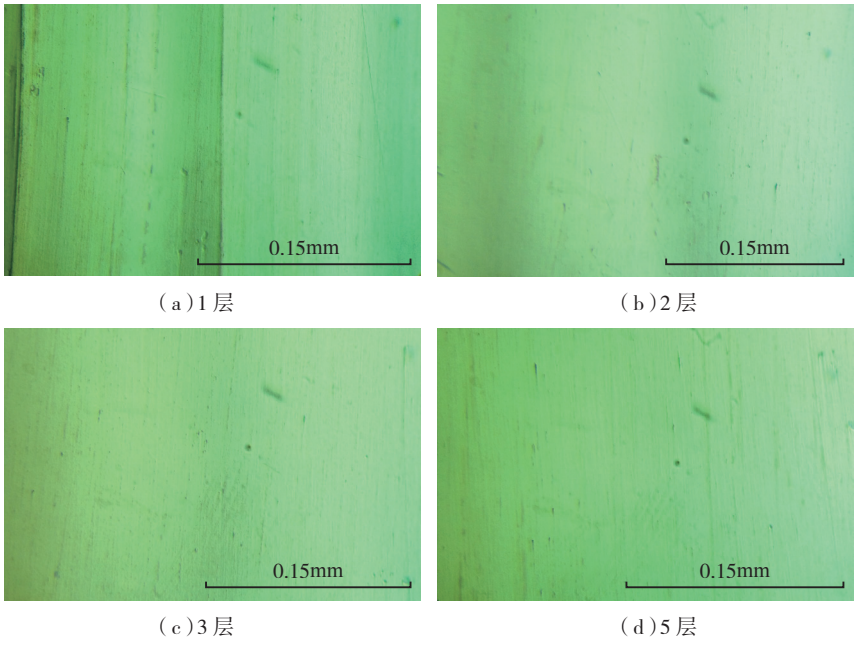
3 抛光深度对表面显微硬度的影响

材料基体的硬度 HV365，磨削后抛光深度对表面显微硬度的影响如图 9 所示。

（1）经过 CBN 砂轮磨削，未进行抛光，此时材料表面显微硬度比材料基体硬度高 HV135。

（2）表面显微硬度随深度的增加而下降。因为抛光深度增加，表面硬化层被逐渐去除。考虑到硬化层可能有益于材料疲劳寿命的提高，故抛光深度要有一定限制。

从以上试验结果可以得到，抛光之前采取的 CBN 磨削工艺能够使表面硬化显著，而羊毛毡轮抛光工艺会将表面硬化层削弱。



（a）1 层　（b）2 层　（c）3 层　（d）5 层

图7　不同层数抛光显微照片

Fig.7　Micrographs of different polishing surfaces

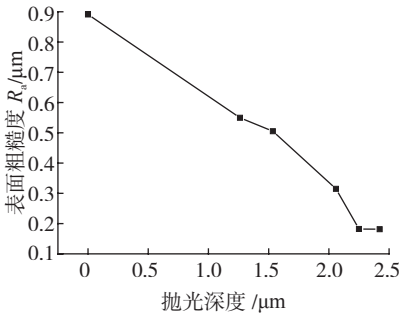


图8　抛光深度对磨削表面粗糙度的影响

Fig.8　Effects of polishing depth on R_a

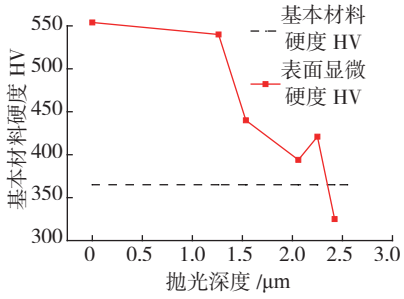


图9　抛光深度对磨削表面显微硬度的影响

Fig.9　Depth of polishing on micro-hardness

4 抛光深度对表面残余应力的影响

测试结果发现，两个方向上的切应力绝对值均在 20MPa 以内，平均值在 10MPa 左右，故可以认为两个正应力方向，即 X 方向和 Y 方向为主应力方向。

表面残余应力随抛光层数变化曲线如图 10 所示。其中，抛光前 X 方向表面残余应力为 –852.5MPa；抛光前 Y 方向表面残余应力为 –951.7MPa。

可以看出，羊毛毡轮抛光对 GH4169 砂轮磨削表面残余应力的影响有以下特点：

（1）在给定的参数磨削后两个主方向的表面残余应力皆为压应力，经羊毛毡轮抛光后依然为残余压应力。表面残余压应力利于试件疲劳寿命的提高。

（2）在给定的抛光参数下，X 方向的残余压应力随着抛光深度的增加先增加后减小，增加幅度为 40MPa，并在抛光 2μm 后达到极大值；Y 方向残余应力在抛光 2μm 以内变化不大，之后显著降低。

（3）在抛光过程中，CBN 砂轮磨削后表面残余压应力较大的表面，两个方向的表面残余压应力的最大值都超过了抛光前的残余应力值。

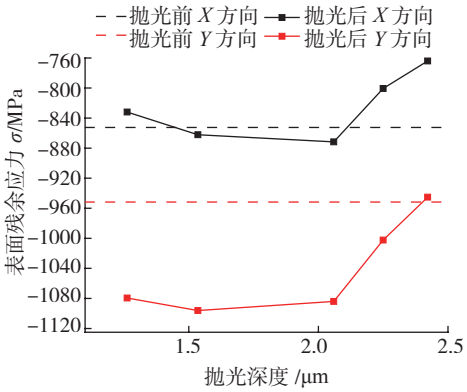


图10 抛光深度对磨削表面残余应力的影响

Fig.10 Effects of polishing depth on residual stress

以上试验结果表明，CBN 砂轮磨削后表面形成较大残余压应力，而抛光深度在一定范围内对此残余压应力影响有限。

综合考虑以上 3 组表面完整性试验，可以得出，CBN 砂轮磨削能够形成表面显微硬度较高、表面残余压应力较大的表面，而之后的羊毛毡轮数控抛光能够有效地降低表面粗糙度。同时，以表面完整性为目标抛光层数为参数优化，较大的抛光深度，虽然能够将表面粗糙度 R_a 值降低但容易将表面的残余压应力以及表面硬化层削弱，这将不利于试件的疲劳寿命[10]；较小的抛光深度又不能够降低 R_a 值。

经过综合优选，抛光深度 2μm，在工程应用中以抛光 3 层来实现，既能达到较小的表面粗糙度值（R_a=0.3μm），也不至于显著去除磨削表面硬化层（HV389.36）的情况下，并且有效维持 CBN 砂轮磨削形成的两个方向的表面残余应力（约为 800MPa 与 1000MPa）。

结论

经过试验与分析，可以得到以下结论：

（1）通过羊毛毡轮磨损试验，选择合适的抛光预压量（a_p=0.5~1.0 mm）可以使得磨损较小，能够进行较长时间的作业。

（2）羊毛毡轮数控抛光可以有效改善试件的表面质量。随着抛光深度增加，表面粗糙度显著下降后趋于稳定，表面显微硬度下降，进给方向残余应力先升高后下降，而垂直进给方向先基本不变后下降。

（3）对羊毛毡轮数控抛光磨削 GH4169，经过试验优选出抛光深度 2μm，能有达到表面粗糙度 R_a 为 0.3μm，表面显微硬度 HV389.36，表面残余应力 X 方向 -871.6MPa，Y 方向 -1084.0MPa。

羊毛毡轮抛光磨削后，GH4169 能够达到一定的表面完整性，表面完整性对零件的使用性能，如疲劳寿命等的影响仍有待研究。

参 考 文 献

[1] 《中国航空材料手册》编辑委员会 . 中国航空材料手册（第 2 版）[M]. 北京：中国标准出版社，2002:323.

China Aeronautical Materials Handbook Editorial Committee. China aeronautical materials handbook (2nd edition)[M]. Beijing: Standards Press of China, 2002:323.

[2] 王聪梅 . 航空发动机典型零件机械加工 [M]. 北京：航空工业出版社，2014:207.

WANG Congmei. Machining of typical aero-engine parts[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014:207.

[3] DAVIM J P. Surface integrity in machining[M]. New York: Springer, 2009:215.

[4] MENG F J, LI X, CHEN Z T, et al. Study on the cantilever grinding process of aero-engine blade[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014,228(11):1393-1400.

[5] 李小彪，史耀耀，段继豪 . 叶片数控砂带抛光关键技术研究 [J]. 制造业自动化，2011(19):113-115.

LI Xiaobiao, SHI Yaoyao, DUAN Jihao. Research on key technology for NC belt polishing of blade[J]. Manufacturing Automation, 2011(19):113-115.

[6] 吴海龙 . 航空发动机精锻叶片数控砂带磨削工艺基础研究 [D]. 重庆：重庆大学，2012.

WU Hailong. Basic research on CNC abrasive belt grinding process of aero-engine precision forged blade[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.

[7] 段继豪，史耀耀，张军锋，等 . 航空发动机叶片柔性抛光技术 [J]. 航空学报，2012,33(3):573-578.

DUAN Jihao, SHI Yaoyao, ZHANG Junfeng, et al. Flexible polishing technology for blade of aviation engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012,33(3):573-578.

[8] 陈宇飞，崔伟，李勋，等 . 高温合金和钛合金材料的橡胶轮数控抛光试验 [J]. 航空制造技术，2015(S2):146-149.

CHEN Yufei, CUI Wei, LI Xun, et al. Experiment of rubber wheel CNC polishing for superalloy and titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(S2):146-149.

[9] YI A Y, HEZLOP M, POL T. A computer controlled optical pin polishing machine[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004,146(2):156-162.

[10] 曾泉人，刘更，刘岚 . 机械加工零件表面完整性表征模型研究 [J]. 中国机械工程，2010(24):2995-2999.

ZENG Quanren, LIU Geng, LIU Lan. Quantitative description model of surface integrity for machined parts[J]. China Mechanical Engineering, 2010(24):2995-2999.

Research on Surface Integrity for GH4169 of CNC Polishing After Grinding

GAO Shimin, QUAN Fang, CHEN Zhitong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] For the blade material GH4169, the process of CNC polishing after CBN wheel grinding was conducted. Firstly, the influence of the pre-compression parameter on life of wool wheel and the roughness were studied. The influ-

ences of polishing depth on the surface topographic characters of surface integrity including surface roughness, surface micro-hardness, and surface residual stress, were studied to optimize the polishing depth. With the increasing of the polishing depth, the roughness R_a drops firstly and then gets stable, and the surface micro-hardness decreases. The normal residual stress in the feed direction shows a trend from rise to decline, while in the vertical feed direction, it stays unchanged basically and then decreases. The polishing depth after optimized is 2μm, and pre-compression parameter is about from 0.5mm to 1.0mm. It has a small roughness of 0.3μm, a macro-hardness of HV389.36 and the high compressive stresses after CBN grinding, which are -871.6MPa and -1084.0MPa for two principal stress directions.

Keywords: GH4169; CBN grinding; Polishing; Surface integrity （责编 李丹）

（上接第 51 页）

281.

[3] 杨永春，田拓，刘坤宁 . Sandwich 等效理论在铝蜂窝复合夹层板中的应用与分析 [J]. 科学技术与工程，2012,12(10):2282–2285.

YANG Yongchun, TIAN Tuo, LIU Kunning. Application and analysis of sandwich equivalent theory for aluminum honeycomb sandwich plates[J]. Science Technology and Engineering, 2012,12(10):2282–2285.

[4] 陈萍，陈宁 . 蜂窝夹层结构板的改制技术 [J]. 航天制造技术，2012,6(3):47–51.

CHEN Ping, CHEN Ning. Retreading technique of honeycomb sandwich structure panel[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2012,6(3):47–51.

[5] 李莺歌，宫顼，黎昱 . 蜂窝夹层结构埋件拉脱力的影响因素 [J]. 宇航材料工艺，2011,41(3):38–41.

LI Yingge, GONG Xu, LI Yu. Studies on factors influencing honeycombstructure insert pullout strength[J]. Aerospace Materials & Technology, 2011,41(3):38–41.

[6] 吴福忠，连晋毅 . 航空蜂窝芯零件数控加工工艺 [J]. 航空制造技术，2007(7):92–95.

WU Fuzhong, LIAN Jinyi. NC Machining process of honeycomb core part for aerospace[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007(7):92–95.

[7] 张菊霞，田卫 . 浅谈蜂窝芯零件的数控加工 [J]. 航空制造技术，2010(6):87–89.

ZHANG Juxia, TIAN Wei. Brief analysis on digital manufacturing of honeycomb core parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(6):87–89.

[8] 佘敏娟，龚斌，贾保国 . 纸蜂窝数控加工技术研究 [J]. 装备制造，2011,11(1):44–46.

SHE Minjuan, GONG Bin, JIA Baoguo. Research of paper honeycomb NC machining[J]. Equipment Manufacture, 2011,11(1):44–46.

[9] 王文理，陈树巍，康永锋 . 新型复杂航空结构件数控加工技术 [J]. 航空制造技术，2012(9):34–37.

WANG Wenli, CHEN Shuwei, KANG Yongfeng. NC machining technology of new type important aircraft structure part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(9):34–37.

[10] 候小林，祝益军 . 蜂窝结构件的数控加工 [J]. 航空制造技术，2009(S):60–63.

HOU Xiaolin, ZHU Yijun. NC machining of honeycomb structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(S):60–63.

CNC Machining Process of Titanium Alloy Honeycomb for Aviation Component

WANG Peng[1,2], LUO Rui[1,2]

(1. Beijing NC Machining Processing and Equipment Technology Key Laboratory of Aero Complex Structure Parts, Beijing 100024, China;
2. AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] In this paper, CNC machining process for titanium alloy honeycomb core is studied. It raises the questions of clamping and holding the titanium alloy honeycomb, losing pieces, chamfering edge, controlling the precision of profile, part detection, etc. The filling method, recommended cutting parameters and tool types are given by the research on the holding fillings, cutting parameters and cutting tools for these questions. Then, on principle of good processing efficiency and quality, the CNC machining cutting method for titanium alloy honeycomb core is introduced. To remove the allowances effectively, the cavity milling method is used for rough cutting of titanium honeycomb core; to assure the machining quality, the zigzag milling method is used for semi-finish cutting and finish cutting of titanium honeycomb core. Finally, the processing results of some honeycomb core test pieces are detected. The statistical data shows that the machining error of titanium honeycomb core is within 0.2mm, which means that with the advantages in high processing efficiency and good surface quality, the process method mentioned in this paper is workable.

Keywords: Titanium alloy; Honeycomb core; Holding filling; Precision of profile; CNC machining （责编 李丹）