

文章编号:1674-8190(2022)05-163-08

复杂异型零件小直径螺纹优质高效加工 工艺研究与应用

陈宝来¹,王军¹,王梓懿²,张昌菊¹,王战玺³

(1.中国航发贵州红林航空动力控制科技有限公司工艺研究所,贵阳550009)

(2.中国人民解放军93147部队某代表室,贵阳550009)

(3.西北工业大学机电学院,西安710072)

摘要:复杂异型壳体类零件广泛应用于航空发动机控制附件,此类零件表面分布有大量小直径螺纹孔,螺纹孔加工是影响整个壳体生产加工效率和精度的核心工序。该类零件现有的加工工艺存在一致性差、加工效率低、专用夹具多、铣螺纹时易出现正锥现象等缺点。针对上述问题,提出并设计专用螺纹铣刀对小直径螺纹孔进行加工,通过宏程序编程解决刀具刃部缩短带来的编程问题,采用刃部长度为1~3个螺距的专用螺纹铣刀,同种刀具即可实现相同螺距不同规格的螺纹孔加工。通过对两个批次的零件进行实际加工验证,结果表明:工艺优化方案可使小直径螺纹孔加工质量及加工效率得到显著提升。

关键词:壳体类零件;小直径螺纹;攻丝;螺纹铣刀;宏程序

中图分类号:V263;TG62

DOI:10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.05.18

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research and Application of High Quality and High Efficiency Machining Technology for Shell Small Aperture Thread

CHEN Baolai¹, WANG Jun¹, WANG Ziyi², ZHANG Changju¹, WANG Zhanxi³

(1. Process Research Institute, China Aeroengine Guizhou Honglin Aero Power Control
Technology Co., Ltd., Guiyang 550009, China)

(2. A Representative Office, 93147 Unit of the PLA, Guiyang 550009, China)

(3. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Shell parts with complex and strange shapes are widely used in the control accessories of aero-engines, and there are many small-diameter threaded holes on the surface of such parts. Threaded hole processing is the core process of processing such parts, which can affect the processing efficiency and accuracy of the entire shell production. This processing technology has disadvantages such as poor consistency, low processing efficiency, many special fixtures, and the phenomenon of positive taper easily occurs during processing. In view of these problems, it is proposed in this paper to design a special thread milling cutter to process threaded holes, and solves the problem caused by the shortening of the cutting edge of the tool by means of a macro program. The length of the cutting edge of the tool is between one pitch and three pitches. The same tool can process threaded holes with the same pitch and different specifications. Finally, through two batches of parts machining, the actual machining of the milling cutter is verified. The experimental results show that the optimized solution can significantly improve the machining quality and efficiency of small-diameter threaded holes.

Key words: shell parts; small aperture thread; tapping; thread milling cutter; macro program

收稿日期:2022-04-13; 修回日期:2022-05-30

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2021GY-302)

通信作者:王军,77171773@qq.com

引用格式:陈宝来,王军,王梓懿,等.复杂异型零件小直径螺纹优质高效加工工艺研究与应用[J].航空工程进展,2022,13(5):163-170.
CHEN Baolai, WANG Jun, WANG Ziyi, et al. Research and application of high quality and high efficiency machining technology
for shell small aperture thread[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(5): 163-170. (in Chinese)

0 引言

复杂异型壳体类零件是航空发动机控制附件的关键零部件,它在控制附件中起支承和功能集成的作用,影响整个机器的装配精度、使用性能、寿命以及工作精度。该类零件通常形状各异,表面分布有大量小直径螺纹孔,导致加工量大,工艺较为复杂,且对加工质量要求较高。而复杂异型壳体类零件表面的螺纹孔加工工序一般处于整个产品加工工序的末端,如果螺纹孔加工出现质量问题,就会导致产品质量不合格甚至报废^[1],因此小直径螺纹孔的加工质量对于整个零件的生产至关重要。

针对钛合金这类难加工材料壳体类零件上小直径螺纹孔的加工,由于该材料的切削性能差^[2],螺纹孔分布在结构复杂的壳体类零件上,加之螺纹孔加工精度、质量和加工效率要求高等原因,难加工材料小直径螺纹孔的加工还存在诸多难点。目前,壳体小直径螺纹孔一般采用螺纹铣刀铣螺纹或丝锥手工加工。螺纹孔铣削是利用螺纹铣刀进行螺旋插补铣削而形成螺纹^[3],加工小直径螺纹时一般采用刚性攻丝的方法^[4],但是由于螺纹铣刀切削刃过长,在同样切削力作用下易发生让刀,从而导致螺纹不合格,甚至发生刀具折断;而丝锥攻丝无法加工出有一定深度的螺纹^[5],对于小直径螺纹攻丝刀具消耗量大且易折断在基体内。为解决这一问题,应对现有螺纹铣刀进行改进,优化工艺流程。

国内外已对铝合金、钛合金、高温合金等材料的螺纹孔切削工艺开展了许多研究。张兆飞等^[6]针对小直径螺纹孔的铣削过程中刀柄和铣齿部分的尺寸过小、铣刀刚性不足等问题,研制锥形新型内螺纹铣刀,并通过实验验证其可行性,但是锥形铣刀很难应用于常见的竖直型螺纹孔加工;G. Fromentin 等^[7]针对铣削螺纹孔时发生的超差现象,提出一种迭代修正方法消除过切现象,提高了铣削螺纹孔的精度;K. Shirase 等^[8]证明了在均匀的螺距铣刀上使用可变螺距,可以将表面误差降低多达 20%;吴东^[9]针对钛合金小直径螺纹的加工,通过对比试验分析得到钛合金攻丝后,其小径和中径都会收缩,加工余量越大则收缩量越大,因此在工艺改进后可通过将螺纹底孔的直径适当扩大来降低螺纹孔加工后的收缩量;A. C. Araujo

等^[10]为了探究螺纹铣削工艺,对螺纹铣削参数进行分析,以此来优化铣削刀具,并通过测量切削力和扭矩,分析了铣削参数与铣削力之间的具体关系;张勇等^[11]通过优化螺纹底孔尺寸、设计专用丝锥、优化工艺步骤等手段,形成了独有的钛合金小直径盲孔攻丝技术;A. C. Araujo 等^[12]通过分析螺纹孔铣削加工仿真过程,建立了铣削螺纹孔的切削力模型,进行试验后对其结果进行分析,得到铣削螺纹孔过程中切削力和刀具几何形状之间的具体关系。上述研究虽然对难加工材料小直径螺纹孔的加工改进有促进改善的作用,但是还存在加工过程耗时过大,无法在保证产品加工精度的同时提高产能。

本文为解决这一难点,设计加工刃部长度为 1~3 个螺距的专用螺纹铣刀,同时为解决由刀具刃部缩短产生的加工编程问题,提出采用宏程序编程来实现小直径螺纹的数控加工,并在试切合格后,分别对两批零件加工不同螺纹,通过实验结果对比分析,验证该加工工艺改进的有效性和可靠性,以期实现加工工艺的降本增效。

1 小直径螺纹孔加工工艺及难点

壳体类零件为起连接作用,表面设计了各种不同功能、不同规格的小直径螺纹,包含:普通螺纹 M2~M6,过盈螺纹 AG4~AG10,丝套螺纹 ST3~ST10,如图 1 所示。目前小直径螺纹孔加工工艺主要分为铣刀铣螺纹和丝锥攻螺纹。

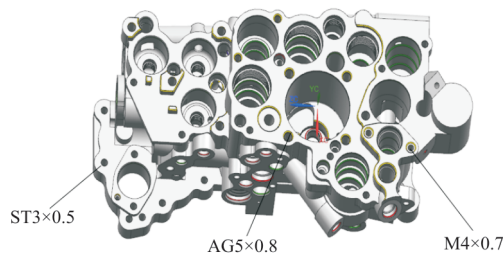


图 1 壳体表面小直径螺纹

Fig. 1 Small bore thread on shell surface

数控铣削加工螺纹孔时不受螺纹结构和螺旋向的限制^[13],通常,铣螺纹的铣刀其切削刃比螺纹的长度要稍长一些,铣削时铣刀在内孔中走出一圈螺旋线即可。对于小直径螺纹,由于螺纹铣刀长径比过大(大于 5),螺纹切削刃过长,在同样切削力的作用下容易让刀^[14],造成加工的螺纹中

径呈正锥状或公差做大导致螺纹不合格,甚至断刀。

攻丝分为机器攻丝和手工攻丝,机器攻丝借助钻床或铣床等设备,手工攻丝只需要一般夹具。丝锥切削时切屑易咬住丝锥,尤其在加工盲孔过程中排屑不畅的问题等都可能造成螺纹撕裂,并且对于钛合金、高温合金等难加工材料,经常会出现丝锥折断或换刀频繁的情况。加工小直径螺纹时,丝锥过细,加工过程中磨损严重,甚至发生断丝,使其折断在零件基体内,降低加工效率。实践证明,采用机用丝锥加工螺纹盲孔底部时,机用丝锥停下来进行反转回退时,很容易出现丝锥折断的现象。此外,在对难加工材料小直径螺纹进行加工时,由于刀具磨损较快,且加工过程中很难对刀具的磨损量进行预测,仅通过铣削来加工难加工材料的螺纹很容易出现超差现象,加工出的螺纹孔非小即大。同时由于螺纹在重复加工时,非常容易出现“烂牙”现象,因此无法对其采用先粗铣再精铣加工的加工工艺。

基于上述原因,目前主要采用手工攻丝手段加工小直径螺纹。铝合金壳体小直径螺纹孔加工流程:在数控加工中心钻中心孔、钻螺纹底孔和倒角,再由人工用丝锥完成攻丝攻螺纹。钛合金、高温合金壳体小直径螺纹孔加工流程:钻中心孔、钻螺纹底孔、倒角、铣螺纹在数控加工中心由一道工序不同工步完成,铣螺纹留精加工余量 $0.01\sim 0.02\text{ mm}$,攻螺纹单独设置工序采用手工攻丝完成。但是采用手工攻丝仍存在如下问题:一是质量不稳定,主要表现在工件的表面一致性较差,在放大镜观察下即可看到攻丝后的孔存在毛刺;二是加工效率低,采用手攻攻丝平均 3 min 完成1个螺纹孔加工;三是工装多,不同规格、不同功能的螺纹需要不同的专用丝锥、专用工装(攻丝导板、攻丝底座、攻丝导套、夹持杆)等,通用性较差。

2 面向数控加工的工艺改进方案

2.1 技术方案

为了尽可能消除攻丝缺陷,同时考虑钛合金、高温合金难加工属性,优化工艺流程,加工方案还需从铣螺纹着手,在加工小直径螺纹时,必须减小加工时的径向力对加工刀具的影响。相应工艺流程调整为:钻中心孔、钻螺纹底孔、倒角、铣螺纹安

排在一道工序,可保证第一个螺纹一定不会很大。由于整体螺纹铣刀在加工时受力较大,会造成零件尺寸出现正锥现象,故现有整体螺纹铣刀需进行改进。为了减小加工时产生的径向力,需设计加工刃部为 $1\sim 3$ 个螺距的专用螺纹铣刀,其外径一般比大径小 $1\sim 4\text{ mm}$ 左右,视加工螺纹孔的直径而定。为了保证刃具的加工强度,刀具材料最好选择整体硬质合金。对于不同螺距的零件需定制不同的刃具,但相同螺距的各类零件,均可用同一把刀具进行加工。该款螺纹铣刀设计与制造难度不大,可以直接采购,但该刀具刃部的缩短给加工编程带来了挑战。为了解决编程问题,通过加工中心,利用数控机床的三轴联动功能,采用宏程序编程来实现小直径螺纹的数控加工。

2.2 加工设备及工艺参数

(1) 要求机床在三个轴向(x - y - z)上进行螺旋插补铣的能力,其中 x 轴和 y 轴决定螺纹直径, z 轴控制螺距。根据要求选择成都普瑞斯三轴立式加工中心:PL1000,FANUC系统,主轴转速 $40\sim 8\ 000\text{ rpm}$,主轴孔锥度BT40,切削进给速度(x 、 y 、 z): $2\sim 20\ 000\text{ mm/min}$,刀库容量24把, x 、 y 、 z 定位精度 0.008 mm ,重复定位精度 0.004 mm 。

(2) 螺纹铣刀的耐用度是普通丝锥的十多倍甚至数十倍,特点是不受螺纹结构和旋向的限制。由于整体螺纹铣刀在加工时受力较大,需选择加工刃部仅为 $1\sim 3$ 个螺距的螺纹铣刀以减小加工径向力,同时为保证加工强度,刀具材料选取整体硬质合金。选择的刀具如图2所示。



图2 刀具
Fig.2 Tool

2.3 铣削用量的选择

螺纹铣刀的切削用量包括进给率 V_f 、铣削速度 V_c 和背吃刀量 a_p 。其中,螺纹铣刀与传统立铣

刀的铣削速度和背吃刀量相同。但是其必须降低螺纹铣刀的进给率 V_f 。在内圆切削应用中,刀具外围移动速度 V_m 会比刀具中心线的移动速度快,如图 3 所示。

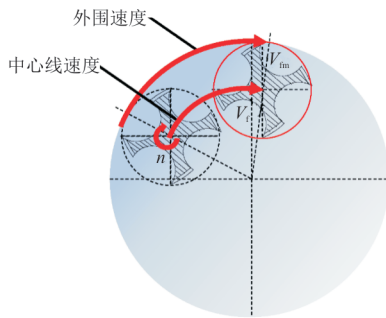


图 3 铣削螺纹示意图

Fig. 3 Schematic diagram of thread milling

在大多数数控铣床或加工中心上,进给率指刀具中心点向前切削的速度,因此进给率过高会导致刀具振动、崩刀、降低使用寿命。

(1) 进给率 (V_f) 选择如式(1)所示。

$$V_f = V_m \left(\frac{D_{Th} - D_c}{D_{Th}} \right) \quad (1)$$

式中: D_{Th} 为螺纹直径; D_c 为铣刀直径。

(2) 主轴转速 n 如式(2)所示。

$$n = \frac{V_f \times 1000}{\pi \times D_c} \quad (2)$$

首先根据螺纹直径、螺距及零件材料查切削手册参数推荐表,选择每齿进给量 f_z ;再根据螺纹直径、螺距及每齿进给量 f_z 查切削手册参数推荐表,选择切削速度 V_m ;最后根据零件材料实际状态修正选用的切削速度,通过式(1)~式(2)可得主轴转速及进给速度。本文加工参数推荐如表 1 所示。

表 1 加工参数推荐表

Table 1 Recommended processing parameters

螺纹规格	刀具规格/ (mm×mm)	零件 材料	转速/rpm	进给/ (mm·min ⁻¹)
M3/ST3	3×0.5	铸铝	3 000	30
M4/AG4/ST4	4×0.7	铸铝	3 500	40
M5/AG5/ST5	5×0.8	铸铝	4 000	50

2.4 编程要求

在铣削螺纹孔编程前,需考虑刀具的切削直径,在每个标准刀具上都会标记有“RPRG”-刀具圆角半径编程值,由此获得最佳螺纹质量所需要

的圆角半径修正值。通常在编程时,将“RPRG”值作为偏移量即可使加工的螺纹在合理的误差范围内,在后序加工时根据标记的要求值可轻松调整程序。本文使用定制铣刀,其上没有标记“RPRG”值,因此在编程时无法使用标准程序模块,本文提出通过数控宏指令来解决这一问题。

该螺纹孔加工的编程是比较复杂的,但是可以提取螺纹尺寸要素使其变得简单些,主要包括以下数据:螺距、螺纹公称直径、螺纹铣刀的刀具半径、螺纹长度等^[15]。编程的原理:通过数控宏程序中的圆弧指令和在轴向增量编程的方法,将螺纹线分解为两种运动方式——圆弧运动和垂直于圆弧所构成的平面方向的直线运动,在 xy 平面刀具旋转一周 360° , z 值同时移动螺距的距离,如此循环,直至加工出要求的螺纹深度,使刀具轨迹形成一个螺旋线。

经过反复试验,得到小直径螺纹宏程序编制方法,走刀路线是从底部向上走刀进行加工,如图 4 所示,避免切削过程切屑对刀具的影响。

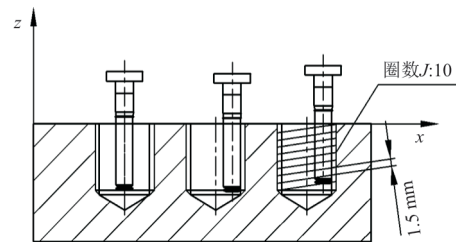


图 4 走刀路线示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cutting route

(1) 程序运行方式

以加工中心 FANUC 系统为例,程序运行方式使用 G65/G66 调用方式,主程序调用宏程序加工内孔,调用指令为:G65P8307X-Y-Z-R-E-K-J-D-F-V。

循环过程为:主轴先以 G0 快速移动到指定的 x 值、 y 值位置;再以 G0 快速移动到安全高度 R 值处;刀具以 3 倍 F 值速度移动至螺纹深度位置;刀具按螺距 K 值以一个或多个 (J 值) 螺旋运动向上铣削螺纹孔;完成 J 值圈数后,刀具以直线退出方式至圆心位置;刀具快速退刀至循环前主轴 z 值,循环结束。

(2) 螺纹孔铣削宏程序模块

螺纹孔铣削宏程序模块如图 5 所示。

```

O8307
(G65P-X-Y-Z-R-E- J-K-D-F-V-)
IF[#24EQ#0]THEN#24=#5001
IF[#25EQ#0]THEN#25=#5002
IF[#26EQ#0]GOTO100
IF[#18EQ#0]THEN#18=#5003
IF[#7EQ#0]GOTO100
IF[#6EQ#0]GOTO100
IF[#5EQ#0]THEN#5=1
IF[#8EQ#0]GOTO100
IF[#22EQ1]GOTO3
#119=#[118]
#125=#9*3
#129=#8/2
#130=#129-#119
#136=#130-[#6/2]
IF[#136LE0]GOTO200
G90G40G0X#24Y#25
END1
G90G1X#24Y#25
G0Z#105
G#101G#102F#103
GOTO999
N100
#3000=1(CH ICUN WEI SHU RU)
.....
    
```

图 5 螺纹孔铣削宏程序模块
Fig. 5 Macro program module of milling threaded holes

(3) 铣螺纹程序

以加工 M3×0.5 为例,程序如图 6 所示。

```

T5M6(D2.5)
G10G90L2P1Z-455.9
#13005=1.2
S4000M3
G54G0X0Y0D5
M8
G0Z100
G1Z20F6000
#609=50(F)
G65P8307X0Y0Z-5R2E3J10K0.5D5F#609
G1Z20F6000
G0Z100
.....
    
```

图 6 螺纹孔铣削程序模块
Fig. 6 Program module of milling threaded holes

3 应用实例

3.1 加工质量

加工获得很好的表面光洁度和螺纹精度相当困难,其中一批次为航空发动机附件壳体上的 M4 螺纹孔,零件号为 XXX-630-02,另一批次为航空发动机某附件零件上的 M3 螺纹孔,零件号为 XXX-0000-602。标准为 GJB 119.1,其加工要求如图 7 所示。

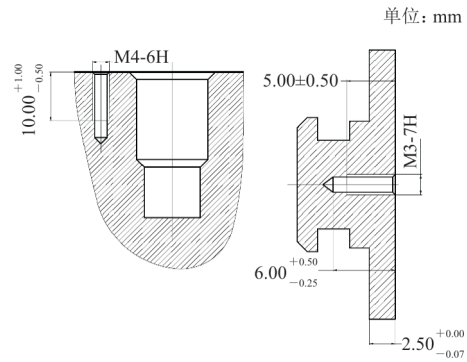
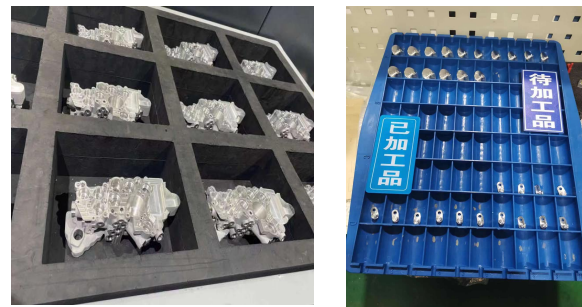


图 7 实验加工要求
Fig. 7 Requirements for experimental processing

经过样件试切合格后,开展产品实物分批次验证工作,如图 8 所示。



(a) 零件号:XXX-630-02 (b) 零件号:XXX-0000-602

图 8 螺纹孔铣削加工案例
Fig. 8 Milling threaded holes cases

加工结果如表 2 所示。

表 2 加工结果
Table 2 Processing results

部门	零件号	工序号	批次	数量/件	合格率/%	备注
机加	xxx-630-02	55	Z11A Z12A	34	100	M4 (3处)
燃机	xxx-0000-602	10,15,20	TR2A	230	100	M3

螺纹表面质量对比如图 9 所示。

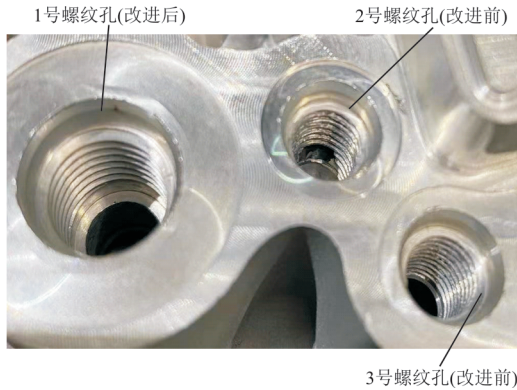
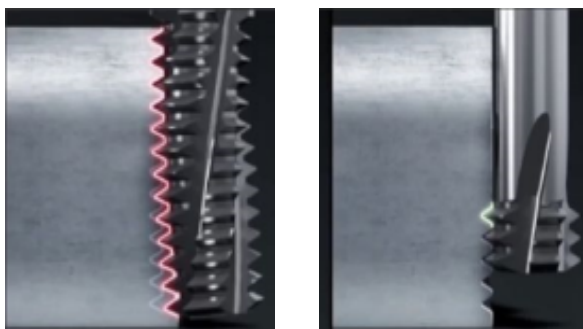


图 9 螺纹表面质量对比

Fig. 9 Quality comparison of thread surface

工艺改进前丝锥攻丝时的切削速度低,切屑易折断,因此螺纹孔的表面光洁度和精度较低,从图 9 的 2、3 号螺纹孔可以看出:工艺改进前螺纹上有断裂、坑点、裂缝,整体的光洁度很差。在工艺改进后,由于加工时的切削速度高、切削力小,故切削表面具有较高的光洁度。同时加工中产生的切屑非常细小,在被冷却液冲出工件时不会划伤工件表面,如图 9 的 1 号螺纹孔所示,工艺改进后的螺纹光洁度非常好。

由于特制刀具的刃部长度较短,其在加工过程中只有一排齿在进行切削,使其让刀量非常小,螺纹的圆柱度得到很好的保证,消除了传统铣螺纹在铣削螺纹孔时出现的正锥现象,如图 10 所示。



(a) 传统铣刀加工螺纹

(b) 特制铣刀加工螺纹

图 10 传统刀具与改进刀具加工对比图

Fig. 10 Machining comparison of traditional tools and improved tools

3.2 加工效益

数控铣削螺纹孔加工时间计算公式:

$$T_c = \frac{L_m}{V_f} = \frac{\pi \times d \times n}{V_f} \quad (3)$$

$$d = 2 \times (d_{\text{大径}} - d_{\text{小径}}) \quad (4)$$

$$n = \frac{H_{\text{螺纹深度}}}{h_{\text{螺距}}} \quad (5)$$

式中: T_c 为加工时间; L_m 为加工长度; V_f 为进给速度; d 为移动直径; n 为螺纹圈数。

将式(4)~式(5)代入式(3)分别计算两批次零件的铣削螺纹孔加工时间:

(1) XXX-630-02 三个螺纹单螺距铣刀切削时间计算如下。

M4 × 7:

$$T_1 = 50 \times \frac{(4 - 3.2) \times 2 \times 7 \times 3.14}{0.7} = 1 \text{ min}$$

M4 × 11:

$$T_1 = 50 \times \frac{(4 - 3.2) \times 2 \times 11 \times 3.14}{0.7} = 1.5 \text{ min}$$

则三个螺纹切削时间: $T_1 + 2 \times T_2 = 4 \text{ min}$, 计算结果与实际加工时间吻合。

(2) XXX-0000-602 一个螺纹单螺距铣刀切削时间计算如下。

M3 深 5:

$$T_1 = 50 \times \frac{(4 - 3.2) \times 2 \times 5 \times 3.14}{0.7} = 0.75 \text{ min}$$

手工攻丝实作时间与单螺距铣刀铣削螺纹孔时间对比如表 3 所示。

表 3 加工时间对比表

Table 3 Comparison table of processing time

零件号	工序	手工工时/min	数控铣削切削时间/min	备注
XXX-630-02	455	9	4	3个M4螺纹
XXX-0000-602	10	3	0.75	1个M3螺纹

XXX-630-02 三个螺纹孔加工效率提升:

$$\left(1 - \frac{4}{9}\right) \times 100\% \approx 56\%, \text{ XXX-0000-602 一个螺}$$

$$\text{纹孔加工效率提升: } \left(1 - \frac{0.75}{3}\right) \times 100\% = 75\%.$$

经过对实物加工验证,用带有宏程序的螺纹铣所加工的零件,铣削的螺纹牙型起始端距离可由程序精确控制,表面一致性好,无任何废品,首件通止检测后,后面的零件加工质量稳定,合格率可达到 100%。单个螺纹孔加工时间由原来的 3 分

钟/个降为0.75分钟/个,螺纹与底孔在同一工序加工减少了手工攻丝的工序,准备时间可大幅缩短,而且数控铣削螺纹孔比手工快,经实际验证带有宏程序的螺纹铣的加工效率提高50%以上。由于一把刀可以实现相同螺距不同规格的各种螺纹孔加工,所需刀具数量减少2/3,每年可以节省大量的刀具费用。手工攻丝需要大量专用丝锥的同时,还需要大量的专用夹具(如攻丝导板、攻丝底座、攻丝导套、夹持杆等),而螺纹孔铣削不需要上述专用夹具,刀具费用对比如表4所示,可以看出:原有工艺所需费用合计为4 258元,改进工艺所需费用共计1 200元。

表4 刀具费用对比
Table 4 Comparison table of tool cost

螺 纹	原有工艺						改进工艺	
	费用单价/元						数量/ 把	螺纹铣刀 数量/ 把
	丝锥	导板	导套	底座	夹持杆	单价/元		
AG	390	624	70	220	150	1	1 200	1
ST	338	624	70	220	150	1		
M	338	624	70	220	150	1		

其中,导板、导套、底座以及加持杆为一次性费用,丝锥和螺纹铣刀需要根据磨损量进行更换。综合计算工艺改进后,加工过程的成本可节约50%以上。

此外,通过改变螺纹孔加工方式改变了传统的壳体加工工艺,工序设计时该类螺纹不用单独设置工序,减少了整个零件加工过程中的工序数;同时,减少加工工序可大幅减少多余工序的准备工时。

4 结 论

(1) 应用三轴数控加工壳体小直径螺纹的方法后,小直径螺纹孔的加工质量及效率得到明显提升,经济效益显著。

(2) 设计的专用螺纹铣刀减小了加工时径向力对刀具的影响,同时消除了加工零件时出现的正锥现象。

(3) 成功开发出小直径螺纹的数控加工宏程序,解决了专用螺纹铣刀刃部缩短给加工编程带来的挑战,为难加工材料小直径螺纹孔找到了有

效的加工方案。

参 考 文 献

- [1] 韦煜萍,李成华,吴奉明,等. 螺纹铣削加工工艺及数控程序自动生成技术研究[J]. 航空精密制造技术, 2020, 56(1): 44-47.
WEI Yuping, LI Chenghua, WU Fengming, et al. Research on thread milling technology and automatic generation technology of NC program[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2020, 56(1): 44-47. (in Chinese)
- [2] 许丽华. 航空领域钛合金内螺纹用丝锥的设计[J]. 航空制造技术, 2010(15): 47-49.
XU Lihua. Design of tap for titanium alloy internal thread in aviation field[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2010(15): 47-49. (in Chinese)
- [3] 鲁淑叶. 基于“西门子”系统螺纹铣削的参数化编程[J]. 精密制造与自动化, 2018(1): 56-58.
LU Shuye. Parametric programming of thread milling based on "Siemens" system[J]. Precision Manufacturing and Automation, 2018(1): 56-58. (in Chinese)
- [4] 王小虎. 基于FANUC系统的螺纹铣削循环功能开发[J]. 航空精密制造技术, 2015, 51(4): 42-45.
WANG Xiaohu. Development of thread milling cycle function based on FANUC system [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2015, 51(4): 42-45. (in Chinese)
- [5] 邓集松. 螺纹铣削工艺与编程研究[J]. 机械制造, 2022, 60(1): 59-61.
DENG Jisong. Research on thread milling technology and programming[J]. Machinery Manufacturing, 2022, 60(1): 59-61. (in Chinese)
- [6] 张兆飞,王靖,张世贵. 新型小直径内螺纹铣刀加工试验研究[J]. 内江科技, 2021, 42(4): 16, 52.
ZHANG Zhaofei, WANG Jing, ZHANG Shigui. Experimental research on machining of new small diameter internal thread milling tool[J]. Neijiang Science and Technology, 2021, 42(4): 16, 52. (in Chinese)
- [7] FROMENTIN G, POULACHON G. Modeling of interferences during thread milling operation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(1/4): 1-15.
- [8] SHIRASE K, ALTINTAS Y. Cutting force and dimensional surface error generation in peripheral milling with variable pitch helical end mills [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, 36(5): 567-584.
- [9] 吴东. 钛合金小直径螺纹攻丝研究[J]. 机械制造, 2018, 56(2): 54-56.
WU Dong. Research on small diameter thread tapping of titanium alloy[J]. Machinery Manufacturing, 2018, 56(2): 54-56. (in Chinese)
- [10] ARAUJO A C, FROMENTIN G, POULACHON G. Analytical and experimental investigations on thread milling forces in titanium alloy [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 67: 28-34.

- [11] 张勇, 颜德. 钛合金材料小直径螺纹盲孔攻丝技术[J]. 国防制造技术, 2011(1): 26-29.
ZHANG Yong, YAN De. Tapping technology of small diameter thread blind hole in titanium alloy materials[J]. National Defense Manufacturing Technology, 2011(1): 26-29. (in Chinese)
- [12] ARAUJO A C, FROMENTIN G. Modeling thread milling forces in mini-hole in dental metallic materials[J]. Procedia CIRP, 2017, 58: 623-628.
- [13] 陈思涛, 汪小东, 温良, 等. 螺纹铣削的数控加工工艺应用研究[J]. 航空精密制造技术, 2019, 55(1): 55-58.
CHENG Sitao, WANG Xiaodong, WEN Liang, et al. Research on the application of NC machining technology in thread milling[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2019, 55(1): 55-58. (in Chinese)
- [14] 李岩, 王广辉, 李静. 应用成套丝锥加工转轴接杆孔螺纹的工艺研究[J]. 机械制造, 2017, 55(6): 76-78.
LI Yan, WANG Guanghui, LI Jing. Study on the process of machining the thread of the connecting rod hole of the rotating shaft with a complete set of taps[J]. Machinery Manufacturing, 2017, 55(6): 76-78. (in Chinese)
- [15] 黄新燕, 曹春平. 机床数控技术及编程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015: 265.
HUANG Xinyan, CAO Chunping. Machine tool numerical control technology and programming[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 2015: 265. (in Chinese)

作者简介:

陈宝来(1987-), 男, 学士, 工程师。主要研究方向: 机械设计制造及其自动化, 高精度数控加工技术。

王 军(1980-), 男, 学士, 高级工程师。主要研究方向: 机械设计制造及其自动化, 壳体数字化加工技术。

王梓懿(1987-), 男, 学士, 工程师。主要研究方向: 航空发动机制造技术。

张昌菊(1977-), 女, 学士, 高级工程师。主要研究方向: 工业设计, 结构件加工技术。

王战玺(1983-), 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 数控装备, 智能制造技术。

(编辑: 马文静)

(上接第 130 页)

- [J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2018, 32(5): 627-632.
ZHANG Meng, ZHANG Jian, TANG Wenxian, et al. Experimental and theoretical investigation on buckling of spherical shells[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 32(5): 627-632. (in Chinese)
- [10] 李富根, 聂国华. S型功能梯度扁球壳非线性屈曲的渐近分析[J]. 力学季刊, 2018, 39(3): 494-504.
LI Fugen, NIE Guohua. Asymptotic buckling analysis of S-FGM shallow spherical shells[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2018, 39(3): 494-504. (in Chinese)
- [11] 郭英男, 孙秦, 毋玲. 航空连接结构的参数化有限元分析系统设计与开发[J]. 航空工程进展, 2010, 1(1): 80-84.
GUO Yingnan, SUN Qin, WU Ling. Parametric finite element system development for the joint structures on aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2010, 1(1): 80-84. (in Chinese)
- [12] 蒋华兵, 詹梅, 杨合. 基于ABAQUS的数控弯管专用前处理模块开发[J]. 航空工程进展, 2010, 1(2): 184-189.
JIANG Huabing, ZHAN Mei, YANG He. Development of pre-process module of NC tube bending based on ABAQUS software using python[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2010, 1(2): 184-189. (in Chinese)
- [13] 年春波, 王小平, 代文猛, 等. 基于ABAQUS二次开发变角度层合板屈曲特性分析[J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(4): 17-22.
NIAN Chunbo, WANG Xiaoping, DAI Wenmeng, et al. Analysis of buckling properties of variable angle laminated plates based on secondary development of ABAQUS[J]. Aerospace Materials & Technology, 2019, 49(4): 17-22. (in Chinese)
- [14] JIN Bocheng, LI Xiaochen, MIER R, et al. Parametric modeling, higher order FEA and experimental investigation of hat-stiffened composite panels[J]. Composite Structures, 2015, 128(C): 207-220.
- [15] TANG Jiapeng, XI Ping, ZHANG Baoyuan, et al. A finite element parametric modeling technique of aircraft wing structures[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(5): 1202-1210.

作者简介:

彭宇辰(1997-), 男, 硕士研究生。主要研究方向: ABAQUS二次开发及复合材料结构强度与屈曲分析。

陈秀华(1977-), 男, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 复合材料的设计、分析与试验验证技术, 高温、超高温材料的分析与试验验证技术, 飞机、航空发动机结构强度计算, 设计优化理论, CAE仿真软件的开发等。

吴亚东(1980-), 男, 博士, 副研究员。主要研究方向: 叶轮机械非定常流动, 航空发动机试验测试, 气动噪声降噪优化等。

(编辑: 丛艳娟)