

钛合金深盲孔加工

邹峰

湖北三江航天红林探控有限公司 湖北孝感 432009

摘要：分析了钛合金的加工难点和容易产生的问题，并以典型零件数控车加工为例，通过工艺难点分析，设计出合理的工艺过程和加工工艺方案，选择合适的刀具，优化夹具、加工程序和切削参数，采用合适的测量方式、冷却方式和排屑方式，解决了钛合金深盲孔内腔加工时存在的易产生积屑瘤和振纹、表面粗糙度差、尺寸公差不易保证、冷却困难、刀具磨损快及易折断等加工难题，并为类似零件车削加工提供了可借鉴的经验。

关键词：钛合金材料；深盲孔加工；刀具；切削参数

1 序言

钛合金具有比强度高、抗腐蚀性好及热强度高特点，因此被大量应用于航空、航天、医疗、化工及石油管道等零件加工中。钛合金为难切削材料，具有切削效率低、刀具磨损快、排屑困难以及表面质量差等加工难点，成为制约钛合金类零件加工效率和产品质量的关键。通过对典型钛合金零件加工工艺的研究，有效解决了钛合金深盲孔内腔类零件车削质量难以保证的技术难题。

2 钛合金的加工难点和容易产生的问题

钛合金（TC4）的物理、力学性能（见表1）决定了其加工时存在以下技术难题。

1) 钛合金的弹性模量低，在切削力作用下使零件已加工表面容易产生回弹，从而使刀具切削时产生振动，后刀面磨损加剧，直接影响零件的尺寸精度和表面粗糙度。

2) 钛合金热导率和比热容都非常低，造成切削钛合金时，切屑与刀具前刀面接触长度短，使切削热大量（约75%）集中在切削刃附近的小面积内，不易散发，导致这一区域切削温度过高，加快了刀具的磨损；同时，钛又是化学亲和力极强的元素，容易在加工表面形成加工硬化层，使刀具磨损加快。

3) 钛合金切削时容易与刀具发生粘结，切削温度高易产生积屑瘤，直接影响零件尺寸及表面粗糙度，甚至可能会引起刀具折断。

表1 钛合金（TC4）物理、力学性能

密度/ (g/cm ³)	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	蠕变极限/ MPa	断后伸长率 (%)	硬度/ HBW	比热容/ [J/ (kg·K)]	热导率/ [W/ (m·K)]
4.43	10	900~1180	830~1030	8~15	320	520	7.5

3 钛合金典型零件分析

3.1 零件介绍

零件的整体三维模型如图1所示，零件尺寸如图2所示。该零件为钛合金深盲孔复杂内腔零件，内腔主要由螺纹、台阶孔、内锥面、内钩槽和圆角

组成。零件材料为TC4（ $\alpha + \beta$ ）型钛合金，内孔内锥面表面粗糙度值 $Ra=0.8\mu m$ ，内孔18.5mm圆柱度为0.01mm，外圆38mm与内孔16mm的前端锥面关于内孔18.5mm的同轴度为0.02mm，端面 $\phi 38mm$ 和M26×1.5mm螺纹退刀槽端面关于内孔18.5mm的垂

直度为0.02mm。

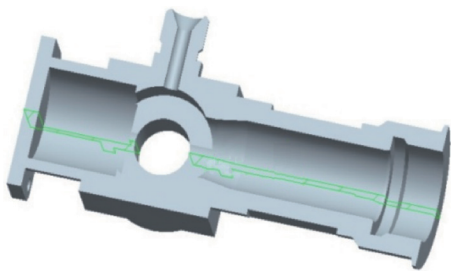


图1 零件整体三维模型

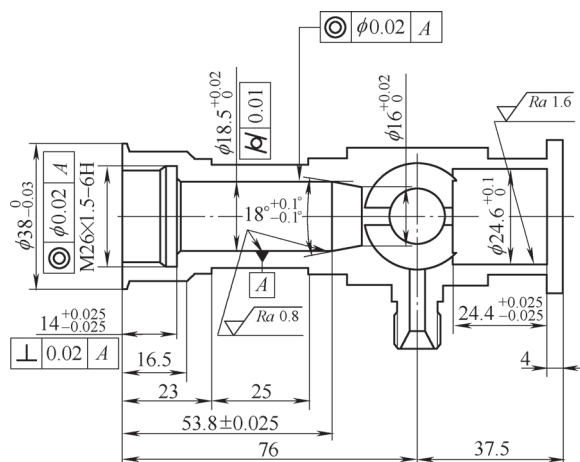


图2 零件尺寸

3.2 加工难点分析

根据零件的尺寸要求加工 $\phi 16\text{mm}$ 和 $\phi 18.5\text{mm}$ 内孔锥面、 $\phi 24.6\text{mm} \times 24.4\text{mm}$ 的内槽以及外部形状是该零件的加工难点。由于 $\phi 16\text{mm}$ 内孔深度为90mm，长径比为5.6:1，所以加工该零件时，刀杆悬伸过长，容易产生振动。另外，材料弹性较大、排屑困难、表面质量和尺寸公差均难以保证，且冷却非常困难，切削时刀具容易磨损、崩刀。同时，因内孔底部钩槽 $\phi 16\text{mm}$ 内孔与钩槽直径相差8.6mm，所以无适合的标准刀具，只能设计特殊刀具进行加工，且加工时因切削余量过多，需采用分步加工。这些加工难点的存在使得加工过程中刀具的选择、加工工艺路线、装夹方式、非标刀具的设计及冷却方式的选择等都成为该零件能否加工合格的关键。

4 加工工艺过程设计

通过对零件结构及加工难点的分析，制定出以下加工工艺方案。

1) 对毛坯零件进行粗加工时，留1mm的加工余量。

2) 精车零件最大的外圆作为后序工序的装夹基准。

3) 镗制软自定心卡盘，保证同轴度 $< \phi 0.02\text{mm}$ ，对零件进行粗钻孔，用 $\phi 15\text{mm}$ 、 $\phi 17.5\text{mm}$ 和 $\phi 23\text{mm}$ 的钻头加工，并使用 $\phi 14.9\text{mm}$ 平底钻头保证内孔总深度为110.7mm。

4) 粗车外圆，使用多功能切槽刀，留0.2mm余量，平端面，粗车内孔，留余量0.2mm。

5) 使用自制内钩槽刀对 $\phi 26\text{mm} \times 24\text{mm}$ 钩槽进行粗加工，留0.2mm余量。

6) 精车外圆、内孔、端面以及 $M26 \times 1.5\text{mm}$ 螺纹，这样可以保证 $\phi 18\text{mm}$ 的内孔与螺纹退刀槽端及零件端面垂直度 $< 0.02\text{mm}$ ， $\phi 18\text{mm}$ 内孔与锥面 $\phi 38\text{mm}$ 外圆的同轴度 $< \phi 0.02\text{mm}$ 。但加工内孔时，如果使用卡管装夹应注意：若装夹全硬质合金刀杆，则必须清理干净辅助夹具的内孔，防止因有多余物影响刀杆的夹持效果；另外，因为全硬质合金刀杆脆性大，所以装夹时用力一定要适度，否则容易造成刀杆折断。

7) 使用自制内钩槽刀、自制仿形刀和自制镗孔刀3把刀接力的方式，加工 $\phi 26\text{mm} \times 24.4\text{mm}$ 内槽，并保证槽根部 $R2\text{mm}$ 的要求，完成内腔加工。

5 加工工艺方案设计

5.1 刀具及几何参数的选择

根据钛合金热导率差、比热容高、易产生积屑瘤、弹性模量低以及回弹性大的加工难点，为避免被加工零件产生振纹、表面粗糙度差、尺寸公差无法保证，选择加工刀具时应尽量选择切削力小、耐磨性好的刀具。最终选择的刀杆及刀片见表2，刀具几何参数详见表3。

5.2 专用刀具的设计

(1) 内钩槽刀 内钩槽刀刀体为M42材质的高速钢（见图3），韧性、耐磨性均优于W18Cr4V的高速钢，且刀具刃口锋利。由于刀具悬长为110mm，钩槽深度为8.6mm，孔径为16mm，导致刀柄直径只能为10mm，刃部宽度只能为3mm，如果刃部过宽，就会造成刀具切削力过大，出现折断现象。同时钩槽时必须采用台阶式方法加工，

表2 刀杆及刀片

加工部位	刀杆名称	刀片名称	刀具特点
外圆	MCLNR2020142	CNMG120404FF KC5010 (粗加工)	全钢制刀杆，刚性好且为负前角刀具，前角为 -5° ，可承受较大切削力；刀片为硬质合金基体，前角为 20° ，物理涂层（PVD）为TiAlN，适合硬化材料、低速、断续切削和高进给率加工
	SCLCR2020K09	CCMT09T302 CP200 (精加工)	全钢制刀杆，刚性好且为正前角刀具，前角为 11° ；刀片为硬质合金基体，前角为 18° ，物理涂层（PVD）为TiAlN+TiN，适合用于钛合金超细颗粒材质的精加工
	LF123H25-200BM (多功能切刀)	N123H2-400-0001CF 4125	全钢制刀杆，刚性好；刀片为硬质合金基体，前角为 7° ，物理涂层（PVD）为TiAlN，适合于低速进给，切削轻快，切屑控制得非常好，防止切削刃上积屑瘤的产生，同时侧边上的Wiper（修光刃）的结构设计，耐磨性好，可加工出非常好的表面质量
内孔	A12N-SCLCR09	CCMT09T302-F1 CP200 (粗镗孔)	全钢制刀杆，在悬伸长度超过刀杆直径6倍时，刀杆刚性明显不足，刀杆为 $\phi 12\text{mm}$ 圆锥结构，带有内冷孔，能有效地使刀尖和零件得到充分冷却，降低切削零件时产生的高温，减缓刀具的磨损，适用于粗镗孔；刀片为硬质合金基体，前角为 18° ，物理涂层（PVD）为TiAlN，刀片锋利，断屑槽容易断屑，且耐磨性好，适合加工钛合金材料
	E12QSCLPR06	CPGT060202-HP KC5010 (精镗孔)	全硬质合金刀杆，前角 15° ，带内冷却孔，在悬伸长度为刀杆直径7~8倍时，具有良好的刚性，适用于精镗孔；刀片为硬质合金基体，前角 15° ，刀片物理涂层（PVD）为TiAlN，抗变形性能强，切削刃锋利，耐磨性好，适合于精镗孔
	内钩槽刀 (自制刀具)	高速钢棒	选择适合钛合金加工的M42材质，适合于低速加工，切削刃锋利，切削力小
	内仿形刀 (自制刀具)	DCMT070202-F1 CP200	全钢制刀杆，刚性好，且刀杆为正前角；刀片为硬质合金基体，前角为 18° ，物理涂层（PVD）为TiAlN+TiN，适合于小切削深度、高进给量加工，韧性好、耐磨性好，切削刃锋利
	内螺纹车刀 SNR0013L11	11R 1.5ISO CP500	全钢制刀杆，刚性好；刀片为硬质合金基体，前角为 10° ，物理涂层（PVD）为TiAlN+TiN，适合于小切削深度、高进给量加工，韧性好、耐磨性好，切削刃锋利
	螺纹退刀槽刀 SNR0013L9	9NR2.15FG CP500	全钢制刀杆，刚性好，刀片为硬质合金基体，前角为 10° ，物理涂层（PVD）为TiAlN+TiN，适合于小切削深度、高进给量加工，韧性好、耐磨性好，切削刃锋利

表3 刀具几何参数

刀具名称	刀尖半径R/mm	主偏角/ ($^{\circ}$)	前角/ ($^{\circ}$)	后角/ ($^{\circ}$)	刀片材质
外圆粗车刀	0.4	95	20	0	KC5010（物理涂层）
外圆精车刀	0.2	95	18	7	CP200（物理涂层）
内孔粗车刀	0.2	95	18	7	CP200（物理涂层）
内孔精车刀	0.2	95	15	11	KC5010（物理涂层）
多功能切刀	0.1	0	11	7	CF 4125（物理涂层）
M24×1.5mm内孔镗刀	0.2	95	18	7	CP200（物理涂层）
内孔钩槽刀	0.5	90	20	18	M42（物理涂层）
内仿形刀	0.2	95	18	7	CP200（物理涂层）
螺纹退刀槽刀	0	0	10	5	CP500（物理涂层）
螺纹车刀	0.1	0	10	0	CP500（物理涂层）

即每次进刀比上一次进刀多进0.5mm，注意保留 $\phi 24.6\text{mm} \times 24.4\text{mm}$ 槽底部R2mm的余量，精加工出12mm长的内槽形状。再利用数控车床进刀准确的特点，利用自制仿形刀加工出 $\phi 24.6\text{mm} \times 24.4\text{mm}$ 槽后半部分和R2mm圆角。

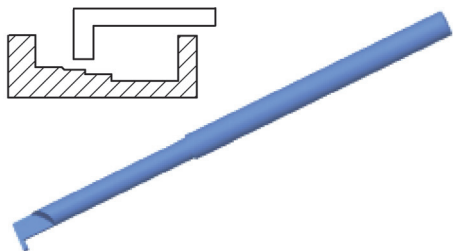


图3 内钩槽刀

(2) 自制内仿形刀 标准外购内仿形刀直径方向的最大切削深度为6.5mm，工件深度为8.6mm，无法满足加工需要。同时，由于刀具悬伸量为110mm，因加工需要，刀柄直径只能为10mm，长径比为11:1，因此加工时必须采用小切削深度、大进给方式进行。综上，需自制内仿形刀杆（见图4），采用进口外购刀片加工钛合金零件，既能保证产品的表面质量和尺寸精度，也可以提高刀片寿命和稳定性。使用内仿形刀加工时采取分层切削，后一次比前一次进刀少进给0.1mm，这样做能有效防止因切屑和积屑瘤的产生而出现刀尖崩碎的情况。



图4 自制内仿形刀杆

(3) 外切槽刀 使用外切槽刀（见图5）加工外形，看似简单，但要想保证零件尺寸精度必须要注意，横向走刀切削时，刀具切削刃与工件轴线之间会有一个副偏角，这个副偏角的大小主要与进给量、切削深度、刀杆头部悬伸长度、刀片的宽度、零件转速和工件材质这6种因素有密切关系。因此，在精加工零件时必须考虑直径补偿因素，当外切槽刀沿径向切槽至工件最终直径后，再沿轴向横向走刀，刀片会出现一个副偏角，径向切槽处工件直径 D_1 与横向车削处工件直径 D_2 两者会出现一个调试差

Δ （见图6），其中 $\Delta/2 = (D_1 - D_2)/2$ ，必须对外切槽刀进行补偿。

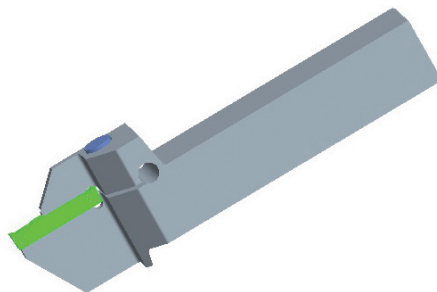


图5 外切槽刀

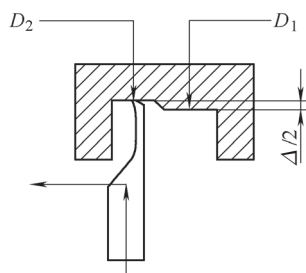


图6 调试差

根据计算得出补偿值，按以下加工可避免工件表面出现台阶情况。

- 1) 切槽至最终直径。
- 2) 回退刀具，其距离为 $\Delta/2$ 。
- 3) 进行首件横向精车前，切记一定要在工件上进行试切削，以确定最终加工尺寸。

5.3 工件的装夹

工件加工时使用刀具较多，零件需要多次重复装夹，且钛合金材料加工时切削力大，为保证零件的同轴度、垂直度和圆柱度，本零件加工使用钢制未淬火软自定心卡盘，它有两个优点：一是可以增加夹持力；二是可以精确定位，重复使用。对于加工装夹所使用的软自定心卡盘有以下要求。

- 1) 低碳钢材料制造软自定心卡盘，具有强度高，可装夹高硬度钢件、钛合金以及高温合金等难加工材料的零件，可用于断续切削等优点。
- 2) 在软自定心卡盘内部夹一个圆柱形垫块，可有效消除软自定心卡盘装夹工件时因受力大小不一造成的传动间隙，提高其装夹精度。
- 3) 内卡软自定心卡盘的外径要略大于工件内径，一般为超出工件内径0.02~0.05mm，这样可以保证卡爪与工件紧密结合，保证夹持的稳定性。

5.4 切削参数

根据零件材料、尺寸精度、表面粗糙度的要求，表面粗糙度计算公式见式（1），以式（1）的计算值为基础，结合刀具手册上推荐的切削参数值，确定了刀具的切削参数见表4。

$$Ra = \frac{f^2 \times 50}{r_e} \quad (1)$$

式中， Ra 为表面粗糙度值（ μm ）； f 为进给量（ mm/r ）； r_e 为刀尖圆弧半径（ mm ）。

5.5 测量内孔

内孔尺寸及公差为 $\phi 18.5^{+0.02}_0 \text{ mm}$ ，表面粗糙度值 $Ra=0.8\mu\text{m}$ ，如采用内径百分表和内径三爪千分尺测量，由于人为测量误差较大，并有可能划伤内孔表面，因此，应采用测量精度为 0.001mm ，以氮气为气源的气动测量仪进行无接触测量，这样既能保证测量精度，也防止划伤内孔表面。

5.6 冷却方式

采用水溶剂极压切削液，对刀杆进行内冷却和

表4 刀具切削参数

刀具名称	刀杆名称	刀片名称	刀片材质	转速/（r/min）	进给量/（mm/r）	切削深度/mm
外圆粗车刀	MCLNR2020142	CNMG120404FF	KC5010	400	0.15	1.5
外圆精车刀	SCLCR2020K09	CCMT09T302	CP200	600	0.10	0.1
多功能切刀	LF123H25-200BM	N123H2C400-0001- CF	4125	500	0.05	0.9
内孔粗车刀	A12N-SCLCR09	CCMT09T302-F1	CP200	800	0.08	0.5
内孔精车刀	E12QSCLPR06	CPGT060202-HP	KC5010	600	0.06	0.05
M24×1.5mm内孔镗刀	A16Q-SCLCR09	CCMT09T302-F1	CP200	800	0.08	1.0
内孔钩槽刀	内钩槽刀	M42高速钢棒	M42	400	0.03	8.0
内仿形刀	内仿形刀	DCMT070202-F1	CP200	300	0.15	0.5
螺纹退刀槽刀	SNR0013L11	11R 1.5ISO	CP500	300	0.02	1.5
螺纹车刀	SNR0013L9	9NR2.15FG	CP500	300	1.50	1.7

对刀座进行外冷却相结合的方式。切削液要有较高的压力和足够的流量，外冷时应使切削液对准刀尖部位，使加工部位得到快速充分冷却，以减小切削热对工件造成的变形影响；内冷时要精确地对准切削刃与工件的接触区间。因此，选择刀具时尽量选择带内冷却孔的刀具，冷却液能直接到达刀具的刀尖部分，使刀具得到充分的冷却。

5.7 排屑问题

由于该零件内孔长径比大，钛合金材料塑性较好，所以切屑容易缠绕在刀杆上，如不及时清理，容易造成内孔表面划伤，甚至损坏刀尖。因此，镗孔时，在半精车、精车的每一个循环完成后应设置暂停，及时清理切屑。

6 数控加工程序设计

数控程序设计流程如图7所示，由工艺路线及程序设计流程编制数控程序。

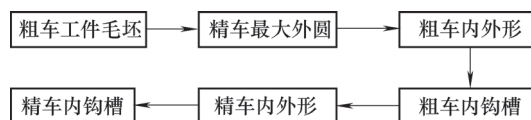


图7 数控程序设计流程

7 结束语

通过工艺创新，把刀具材料、涂层、几何角度、工件的装夹方式、冷却液的使用以及切削用量等要素结合起来合理选用，总结出一套加工钛合金的切削参数。自制3把刀具接力加工，加工后的零件尺寸精度完全符合设计要求，产品一次交验合格率由原来的70%提高到99%。此工艺方法有效解决了钛合金深盲孔内腔加工中易产生积屑瘤和振纹、表面粗糙度差及尺寸公差不易保证等一系列技术难题。

参考文献：

- [1] 陆剑中，孙家宁．金属切削原理与刀具[M]．北京：机械工业出版社，2011.

MW 20210408