

TB6钛合金精密加工工艺

■ 中国船舶工业集团公司第六三五四研究所 (江西九江 332000) 关福州 刘 智

摘要：为了实现轴向铰轴颈零件的精密加工，从TB6钛合金材料特性、加工工艺方法、刀具的选择以及切削液等方面进行了深入地研究，并通过工艺试验，确定了合理的制造方法。为今后开展其他钛合金切削加工的研究提供了参考。



TB6钛合金不仅是制造飞机、导弹和火箭等航天器的重要结构材料，而且在惯性导航领域中也逐步开始使用。但由于该材料价格昂贵、难加工以及加工费用高，制约了它的应用。目前我们所承接的导航部件，军方为了提升其强度和寿命，决定淘汰传统的结构钢30CrNi4MoA，使用TB6钛合金材料，这就意味着原来的加工工艺要推倒重来，重新研究TB6钛合金的加工工艺方法。我们对TB6钛合金材料的性能、加工工艺方法及刀具选用等进行了探索和研究，通过各种试验，积累了许多TB6钛合金加工的经验，特别是切削加工用量及刀具的选择，在加工研制过程中

得到了验证。本文重点对TB6钛合金精密加工和刀具选用方面的工艺创新作一次全面的阐述，也为今后进一步开展其他钛合金切削加工的研究提供参考与借鉴。

1. 零件结构特点

TB6钛合金轴向铰轴颈零件如附图所示，其外型复杂，技术要求高，加工难度大。



轴向铰轴颈零件三维图

2. TB6钛合金材料特性分析

钛合金是一种强度高而密度小、机械性能好且韧性和抗蚀性能也很好的不锈钢材料。

TB6不锈钢材料加工工艺性差，切削加工困难，特别是在热加工中，非常容易吸收氢、氧、氮和碳等杂质。其加工工艺性主要表现在：

(1) 摩擦系数大。该材料导热系数低，刀尖切削温度高，切削时产生的切削热都集中在刀尖上，使刀尖温度很高，易使刀尖很快熔化或粘结磨损而变钝。

(2) 弹性模量小。切削时易产生弹性变形和振动，不仅影响零件的尺寸精度和表面质量，而且还影响刀具的使用寿命。

(3) 钛合金化学亲和力较强，极易与其他金属亲和结合，在加工中切屑与刀具的粘结现象严重，使刀具的粘结和扩散磨损加大。

3. 精加工工艺试验

(1) 工艺方法。考虑到该钛合金零件的加工余量比较大，有的部位很薄，只有2~3mm，主要配合表面的尺寸精度、形位

公差要求高，在零件的加工工艺方法及工艺流程安排时，按粗加工→半精加工→精加工的顺序分阶段安排加工，同时在每个工序阶段安排热处理工艺，消除加工应力，稳定加工尺寸。这种工艺方法特点主要是通过分阶段的反复加工，减少表面残余应力，防止变形，最后达到设计图样的要求。其主要的加工方法有铣削、车削、磨削、钻削、铰削以及攻螺纹等。

(2) 铣削加工及刀具试验方案。钛合金轴向铰轴颈零件加工中，有大量的铣削余量，为了做好铣削加工，我们做了一些试验，特别是在刀具和切削液的选择方面：①刀具材质选择了高硬度、高抗弯强度、韧性和耐磨性好且散热性好的高速W6Mo5Cr4V2Al、W2Mo9Cr4VCo5 (M42) 和硬质合金YG8、K30、Y330。②铣削时采用水溶性油质切削液来降低刀具和工件的温度，以延长刀具的使用寿命。

为了提高铣削加工效率，在加工中心机床上进行了高效铣削试验，结果效率提升了2~3倍，

零件表面质量也得到较大的提高。表1、表2所示分别为通过试验总结的切削用量和刀具参数。

(3) 孔的精车加工及刀具试验方案。钛合金轴向铰轴颈零件加工中，由于热处理后的表面氧化皮给工艺加工增加了较大困难，为此在加工前用酸洗方法去掉表面薄层氧化皮，然后通过加大走刀量，降低切削速度来车削剩余的氧化皮。在刀具材质的选择、切削用量和切削液的选择方面：①刀具材质选用YG类硬质合金材料。②刀具的几何参数选择前角 $\gamma_0=4^\circ\sim8^\circ$ ，后角 $\alpha_0=12^\circ\sim18^\circ$ ，主偏角 $\varphi=45^\circ\sim75^\circ$ ，刃倾角 $\lambda=0^\circ$ ，刀尖圆弧半径 $=0.5\sim1.5\text{mm}$ 。③切削用量按主轴转速 $n\geq 230\text{r/min}$ ，进给量 $f\geq 0.10\sim0.15\text{mm/r}$ 。在同样刀具和切削参数的情况下，选择不同切削液进行切削试验，检查表面粗糙度情况；选定切削液后，使用乳化液冷却，提高了刀具寿命。固定切削参数，选择不同刀具材料进行切削试验，检查表面粗糙度和尺寸控制情况，确定刀具牌号为YG6X、YG10HT；切削液和刀具固定后，选择不同切削

参数，对尺寸控制能力进行研究和目标表面粗糙度实现能力进行验证。

(4) 内螺纹加工试验方案。由于内螺纹不便在放大镜下观察，也不便进行尺寸精确测量，选择外螺纹进行替代试车观察表面粗糙度，选好参数后进行内螺纹试车验证，并用粗糙度仪检测验证；选择内螺纹车削加工工艺参数试验，验证上述试验确定的切削液工艺要素和刀具材料要素的适应性，螺纹车削的切削接触刃长，功率需求大，切削参数要进行单独的试验验证。

(5) 孔的磨削加工试验方案。磨削加工阶段，由于TB6钛合金的特质，导致了钛合金磨削非常困难，磨削时砂轮磨损严重，轻易会变钝，同时易在表面产生拉应力及烧伤现象。为此在磨削过程中，通过使用切削液和润滑油，使零件充分冷却，保证了精磨质量。磨削砂轮的材料选用绿碳化硅(TL)、黑碳化硅(TH)两种磨料，选择软砂轮R3、ZR1和ZR2，粒度为46、60。磨削用量的选择如表3所示。

(6) 铰削加工试验方案。

表1 铣削用量

刀具材料	立铣刀直径/mm	切削速度 $v/(m\cdot\text{min}^{-1})$	进给量 $f/(mm\cdot\text{min}^{-1})$	切削深度 a_p/mm	切削宽度 a_c/mm	切削刃总长度/mm	使用机床
K30	≤ 25	40~70	200~300	0.3~0.8	1.5~5.0	30~40	加工中心
K30	> 25	40~120	300~400	0.3~0.8	2.5~8.0	30~60	加工中心

表2 铣削刀具参数

刀具	前角 $\gamma_0(^{\circ})$	后角 $\alpha_0(^{\circ})$	螺旋角 $\beta(^{\circ})$	刀尖 $(^{\circ})$	齿背	备注	使用机床
立铣刀	粗	0~4	12~15	30~45	按需	R形	加工中心
	精	4~8	15~20	30~45	按需	R形	加工中心
三面刃铣刀	3~10	12~15	—	按需	—	—	—

表3 磨削用量

磨削方法		砂轮速度 v / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	工作台速度 v_1 / ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	工件速度 v_2 / ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	磨削深度 a_p /mm	横向进给量 f_a / (mm/st)	纵向进给量 f_b / ($\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$) (砂轮宽度为 B)
平面磨	粗	15~18	10~20	—	0.025~0.035	0.5~4.0	—
	精	15~18	6~12	—	0.010 (最大)	0.5~4.0	—
外圆磨	粗	15~18	—	15~30	0.025~0.035	—	1/5B
	精	15~18	—	15~30	0.010 (最大)	—	1/10B

钛合金的钻削加工也比较困难，常在加工过程中出现烧刀和断钻现象，其主要原因是钻头刃磨不良、排屑不及时、冷却不佳以及工艺系统刚性差等。铰孔是最后一道精加工工序，采用钻孔→扩孔（粗铰）→精铰的加工工艺方法。在刀具和切削液的选择方面：①刀具材料选用M42高速钢或硬质合金K30；刀具的几何参数选择前角 $\gamma_0=3^\circ\sim7^\circ$ ，后角 $\alpha_0=12^\circ\sim18^\circ$ ，主偏角 $\varphi=5^\circ\sim18^\circ$ 。校准部分刃带宽度 $b=0.05\sim0.15\text{mm}$ ，过宽会轻易同钛合金加工表面粘结，过窄会轻易在铰削时产生振动。铰刀齿数为 $z=4$ （铰刀直径为12mm）。②铰削时应不断地注入冷却润滑液以获得较好的表面质量，同时应勤排屑，及时清除铰刀刃上的切屑末，铰削时要匀速地进退刀。

通过上述几个步骤的试验分析，得出TB6钛合金的各种加工工艺特点，以此为基础，形成TB6钛合金切削工艺方法，并将关键技术点总结出来，拟定了TB6轴向铰轴颈加工的工艺方案。

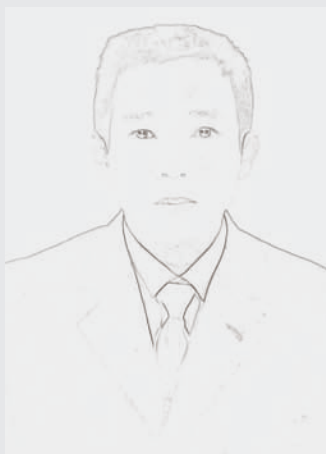
4. 结语

按照我们确定的加工工艺方案进行产品批量加工，达到了轴向铰轴颈的各项精度技术指标，经检测后一次性合格。验证了我们对加工技术难点分析的正确性，说明这种TB6钛合金切削工艺方法是可行的，也积累了经验，开拓了思路。随着科技的高速发展，材料的不断更新，我们

需要对新型的惯性导航材料的切削机理、刀具磨损、切削液的选择等状况进行进一步的研究，也需要对切削过程不断进行优化。可以预计，超硬刀具和硬质合金刀具的发展也将在航空、惯性导航等的加工领域中占有很大的席位，必将为制造业的发展起到积极的推动作用。**MW**

（收稿日期：20150822）

专家点评



该文以TB6钛合金导航部件的精密加工为例，按照粗加工→半精加工→精加工的顺序分阶段安排加工，同时在每个工序阶段安排热处理工艺，消除加工应力，稳定加工尺寸。这种通过分阶段的反复加工来防止工件变形的工艺方法，在复杂零件的铣削中非常实用。作者针对钛合金材料的切削加工试验也很有说服力，为类似零件的加工积累了经验。