

# 起落架大型承力构件钛合金 TC18 高效粗加工铣削技术

## TC18 High-Efficiency Roughing Milling Technology of Large Titanium Bearing Structure of Landing Gear

中航飞机股份有限公司长沙起落架分公司 刘新文 何多政 黄国华

**[摘要]** 在简要分析了钛合金 TC18 材料可加工性差、加工效率低下的基础上,结合飞机起落架大型承力构件的加工特点,对钛合金 TC18 高效粗加工技术进行了深入研究。通过对粗加工中铣削方式的探究——如何根据机床刚性合理采用强力铣削、大进给铣削的加工方式,大型锻件在编程时的注意事项,以及合理的刀具应用等,实现了 TC18 大型承力构件的高效铣削粗加工,达到了高的金属去除率。

**关键词:** 钛合金 TC18 起落架 强力铣削 大进给铣削 刀具应用

**[ABSTRACT]** Based on the brief analysis of TC18 titanium alloy which has poor workability and low processing efficiency, and combined with machining characteristics of large titanium bearing structure of aircraft landing gear, high-efficiency roughing technology of TC18 titanium alloy is deeply studied. Through the research on milling mode during roughing, such as how to reasonably use powerful milling and high-feed milling in accordance with machine tool rigidity, precautions during programming of large forgings and reasonable tool application, high-efficiency milling roughing of TC18 large bearing structure is realized and high metal removal rate is achieved.

**Keywords:** Titanium TC18 Landing gear Powerful milling High-feed milling Tool application

钛合金材料以其高强度、耐高温、抗腐蚀、轻质等良好的综合物理性能,广泛应用于航空、航天、石油、造船等工业领域,而大型钛合金模锻件在飞机起落架承力结构件上的应用比重也日益加大。起落架大型承力构件结构通常比较复杂,精度要求较高,并且在加工过程中具有较大的材料去除量(通常起落架承力结构件材料去除量高达 80%)。这些特性使得此类零件加工效率低,加工质量难以保证,成为了飞机研制和批量生产的瓶颈。

本文在简要分析 TC18 自身特性及飞机大型锻件加

工效率低的基础上,结合飞机主要承力结构件的特点,对 TC18 起落架大型承力构件高效粗加工技术进行了深入探讨。

### 1 TC18 难加工性分析

TC18 钛合金名义成分为 Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe,是一种高强、高韧钛合金。在退火状态下具有很高的强度(1080MPa),强化热处理后强度可达到 1300MPa,并且淬透性极佳,截面淬透厚度可达 250mm,由于截面厚度不受淬透性限制,特别适合制造飞机大型承力构件,这也是 TC18 钛合金最突出的优点,但与此同时也决定了它的难加工性以及低的金属去除率。假如 45 号钢的可加工性能为 1,则 TC18 的可加工性能仅为 15%~25%。从材料特性上来看,TC18 有以下几点<sup>[1]</sup>:(1)导热率低;(2)钛元素化学活泼性高,易与氢、氧、氮发生化学反应,形成硬化层;(3)易与刀具材料发生化学反应,造成刀具材料扩散,加速刀具磨损;(4)塑性低、硬度高,切屑与前刀面接触面积小,刀尖切削应力大,刀尖和切削刃极易磨损,通常切削速度为 30m/min 左右;(5)弹性模量小、屈强比大,加工过程中易出现较大回弹,增加后刀面与工件间的摩擦,加剧后刀面磨损。

虽然同为钛合金,但飞机主要承力结构件与其他行



图1 零件局部毛坯

Fig.1 Local blank of parts

业钛合金零件不同。主要体现在：零件体积较大，装配尺寸较多，形状复杂，以致于加工部位形式多样，编程信息量大；毛坯通常为模锻件，锻件表面有硬度很高的硬化层（HRC>55），厚度为0.1~0.15mm。图1所示零件氧化层总面积达到6m<sup>2</sup>，加工余量极其不均，同时金属去除量很大。如某一承力结构件为连杆类零件，材料为TC18M，毛坯重量在680kg左右，成品仅130kg左右，材料去除率达80%左右。

## 2 高效粗加工技术研究

在粗加工过程中，根据零件的加工特征来选择不同形式的刀具，通常主要有两种铣削方式：一种方式为大切深、低进给、低转速的切削，也称强力铣削方式<sup>[2]</sup>；另一种方式是小切深、大进给、转速相对强力铣削较高的切削，也称快进给铣削方式。

### 2.1 合理选择装夹方式和刀具

通常都以加工高强度合金钢300M为主，线速度一般都在200m/min以上。但当采用强力切削并以30m/min的线速度加工TC18时，主轴刚性不足的机床会出现刀具振动，大的切削力易导致工件窜动，有造成零件超差的可能性，严重了会导致刀具和零件的报废。

在分析了各种隐患、机床条件和强力切削方式又受到限制的情况下改变切削方式，从刀具上寻求突破。

在实际加工中，最大切屑厚度 $H_{ex}$ 是实现高生产效率和稳定的铣削最重要的参数，但 $H_{ex}$ 值太低会产生薄切屑，在已加工表面容易产生加工硬化，而且生产效率低； $H_{ex}$ 数值过高又会使切削刃过载，从而导致刀具破裂，机床闷车的现象。但 $H_{ex}$ 值的大小却受到刀具主偏角 $K_r$ 和刀具的每齿进给 $f_z$ 的影响。 $K_r$ 表示刀具的主偏角，当 $f_z$ 值恒定时，刀具所产生的 $H_{ex}$ 值是不一样的， $H_{ex}=f_z \cdot \sin K_r$ 。 $f_z$ 的大小直接决定了工作台进给 $V_f$ 的大小（ $F=n \cdot Z_n \cdot f_z$ ，转数 $n$ 、刀具有效齿数 $Z_n$ 、每齿进给 $f_z$ ），金属去除率 $Q$ 很大程度上又由工作台进给 $V_f$ 决定（ $Q=a_p \cdot a_e \cdot V_f$ ，切深 $a_p$ 、切宽 $a_e$ 、工作台进给 $V_f$ ）。

表1中，如最大切屑厚度 $H_{ex}$ 为0.1mm，当刀具主偏角 $K_r$ 为45°时， $f_z=1.4 \times 0.1=0.14\text{mm}$ ；对于90°直切削刃刀片来说，当主偏角为90°时， $f_z$ 等于最大切削厚度

表1 直切削刃刀具主偏角与每齿进给的关系

主偏角 $K_r/$ (°)	修正系数	$f_z/\text{mm}$		
		$H_{ex}=0.1$	$H_{ex}=0.15\text{mm}$	$H_{ex}=0.2$
90	1.0	0.10	0.15	0.20
75	1.0	0.10	0.16	0.21
65	1.1	0.11	0.17	0.22
45	1.4	0.14	0.21	0.28
10	5.8	0.58	0.86	1.15

$H_{ex}$ ，即为0.1mm。所以刀具主偏角 $K_r$ 较小时，每齿进给 $f_z$ 越大。

与直切削刃刀片解决方案相比，圆刀片具有强度更高的刀片形状和更长的切削长度。表2以Coromill300P-L为例，在相同的切深 $a_p$ 和最大切屑厚度 $H_{ex}$ 下，随着圆刀片直径 $i_c$ 的增加，每齿进给量 $f_z$ 也会随之增大。对比表1，选择同样的切深1mm下，每齿进给最大是主偏角为10°的刀具。

表2 圆刀片直径大小与每齿进给的关系 mm

$i_c$	$H_{ex}$			不同切深下每齿进给量 $f_z$							
	最小	起始	最大	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
8	0.10	0.15	0.2	0.31	0.23	0.19	0.17				
10	0.10	0.20	0.25	0.46	0.33	0.28	0.25	0.23			
12	0.10	0.20	0.25	0.50	0.36	0.30	0.27	0.25	0.23		
6	0.10	0.20	0.25	0.57	0.41	0.34	0.3	0.28	0.26	0.24	0.23

选择刀具时，在考虑 $H_{ex}$ 和主偏角的同时，还要考虑主偏角对于切削力的影响。主偏角越小，轴向力越大，径向力越小；反之，轴向力越小，径向力越大。所以10°主偏角的刀具进给方向所受切削力最小，加上每齿进给相对于其他主偏角刀具较大，这样可以保持高的工作台进给，从而实现较大的金属去除率。由于快进给刀具轴向力，所以必须增加零件和工作台之间的支撑，保证工况的稳定。

### 2.2 合理的编程和刀具应用

为了验证2.1节的理论分析，选择某零件中一个型腔，在新进的意大利龙门铣床上测试加工效率。如图2所示，型腔最终要求深度为100mm，长度为1200mm，宽度为185mm，毛坯分为上下两部分，上半部分深度为40mm，经过锻造，腔的上表面和腔壁、腔底余量不均且有氧化层；下半部分深度为60mm，实心腔，虽无氧化层但金属去除体积高达13320cm<sup>3</sup>（1200mm×185mm×60mm）。了解型腔特征后，要想实现高效粗加工必须解决好3个问题。

(1)最大限度优化数控程序。模锻毛坯余量不均，编程建立数模时如果不能建立比较准确的毛坯，那么产

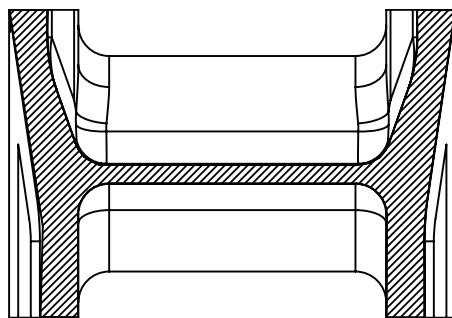


图2 型腔剖视图

Fig.2 Sectional view of cavity

生的刀具轨迹是不能用于零件加工的。第1种情况,当毛坯数模比实际毛坯的尺寸大时,产生的加工轨迹就会有很多空刀轨,加工效率低下;第2种情况,当毛坯数模比实际毛料的尺寸小时,产生的加工轨迹就是灾难性的,这是因为编程软件生成的刀具轨迹中,快速移动的指令都是G00,刀具以这样的进给直接切入毛坯表面,刀具会直接损坏。解决好上述问题,不但能减少编程人员重复繁琐的工作量,还能提高产品质量和加工效率,编程也就变得格外简单<sup>[1]</sup>。

(2) 刀片材质的正确选择。模锻件表面的氧化层硬度在HRC55以上,加之TC18在加工中产生的切削温度比钢件、不锈钢大,这对刀片的材质要求很高。加工TC18还要求刀具前角较大,刃口锋利,但是锋利的刃口强度差,而产品表面的氧化层加大了刃口崩刃的可能。如何让刀片刃口既保持锋利又不失强度,这对刀片刃口处理是极大的考验。加工TC18的刀片材质要求既要有高硬度的基体,又要有极高的刃口强度。TiAlN涂层的PVD刀片较好地解决了这个问题,PVD相比CVD(气象沉淀),涂层厚度小,与硬质合金基体粘结程度高,在切削中不容易剥落,既能提高刀片的刃口强度又不会影响刃口的锋利,同时可以有效阻隔切削时刀尖所受的高温,并能防止刀片与被加工材料的亲和。国际、国内都有这样的刀具产品,某些品牌在钛合金加工领域具备广泛的知名度,选定出几款能满足加工要求的刀具,并且在铣削方法上也做了研究。

铣刀切削刃每次切入都会受到冲击载荷。为了达到满意的铣削效果,必须考虑在切入和切出时切削刃和材料保持正确的接触形式。采用顺铣,在周边顺铣中,切削厚度从切削开始就逐渐降低,并在切削末端逐渐接近零。这可防止切削刃在吃刀前磨损或擦伤表面。较大的切屑厚度较为有利,且切削力有拉动工件进入刀具的趋势,从而保持切削刃铣削。

(3) 优化切削参数,保证金属去除率 $Q$ 最大。无论

改变切深 $a_p$ ,还是改变切宽 $a_e$ ,或者是增大工作台进给 $V_f$ 值,都能达到高的金属去除率,如何通过对这3个参数的对比、调整而使金属去除率最大化,是此次测试的目的。

结合型腔宽度选择了3种不同直径的刀具来变换 $a_e$ ,结合型腔深度选择了3种不同切深的刀具来变换 $a_p$ ,结合涂层硬质合金刀具材质所具备的切削速度来控制线速度,通过刀片形状和槽型来改变 $f_z$ 大小,从而改变工作台进给 $F$ 值。表3显示了测试结果。

单从涂层硬质合金刀片来看,瓦尔特的WSM35和山特维克可乐满的GC1040材质更为出色,连续切削时间较长。对比 $\phi 63R8$ 和 $\phi 80R8$ 两种规格的刀具得出, $\phi 80R8$ 有更高的金属去除率,说明增大切宽可以提高金属去除率。对比 $\phi 63$ 玉米铣刀和 $\phi 80R8$ 两种规格的刀具得出, $\phi 63$ 玉米铣刀的金属去除率更高,说明改变切深也能有效提高金属去除率。而采用 $\phi 63$ 大进给铣刀,金属去除率大幅度提高,尤其是山特维克可乐满的 $\phi 63$ 大进给铣刀在有效保证连续切削时间的情况下,金属去除率相对达到了峰值。 $10^\circ$ 主偏角的山特维克可乐满大进给刀具通过减小刀具主偏角,以小切深方式进行加工,从而保证了每齿进给量较大( $\phi 63, 5$ 齿、 $f_z$ 为 $0.56\text{mm}$ ),最大切屑厚度 $H_{ex}$ 值最佳,同时获得较小的切削力,使得工作台进给 $V_f$ 值相对于玉米铣刀和圆刀片铣刀呈2~3倍提升。

有些进给刀具虽然金属去除率也很高,但在减小主偏角后失去了螺旋下刀的能力,当加工完上半部分已锻造腔后,需要制落刀孔才能继续加工下半部分实心腔,这样便会增加一个工步,多一次换刀,多一段程序运行,降低了生产效率。山特维克可乐满R210并不存在这个问题,可以直接螺旋下刀加工实心腔。

零件型腔拐角处比较多,在切削力突变的情况下,刀具容易产生振动,刀具磨损严重,崩刃现象时有发生,易铣伤零件且加工效率较低。此时圆刀片由于接触面

表3 粗加工刀具应用

刀具商	刀具规格	刀片材质	槽型	金属去除率 / $\text{cm}^3$	连续切削时间 /h
美国肯纳	$\phi 80R8$	KC522M		866	1.8
	$\phi 63$ (大进给铣刀)	KC522M		1860	1.8
德国瓦尔特	$\phi 80R8$	WSM35		835	2.1
	$\phi 63R8$	WSM35	D57	576	2.6
	$\phi 63$ (玉米铣刀)	WSM35		1200	3.2
瑞典山特维克可乐满	$\phi 63$ (大进给铣刀)	GC1040	E-MM	2250	2.0
	$\phi 63R8$	GC1030	E-MM	512	1.6
	$\phi 63$ (690系列玉米铣刀)	GC1040	E-MM	1500	2.9
国产株洲钻石	$\phi 63$ (大进给铣刀)	YBG212	DM	1620	1.0
	$\phi 63R8$	YBG302	DM	453	1.2

积较大,故振动尤为明显。而快进给铣刀无论在深腔中位置如何,切削截面(切屑量)均保持恒定,经过拐角处较圆刀片平稳很多,在拐角处增大刀具编程的圆角值,并且根据圆角值的大小来衰减进给值,这样便大大减小了最大切屑厚度。并且快进给铣刀还有一个优势,它能加工出接近轮廓的侧壁,拐角处残留更小,为后续的精加工留下了较为均匀的余量,解决了粗加工完根部残留过大的问题。

### 2.3 加工过程中刀具的冷却

冷却条件的好坏是能否高效加工钛合金 TC18 材料的一大关键因素,在这里需要指出的是,由于机床冷却液流量和压力充足,在整个型腔中充满了冷却液,加工时型腔就如一个蓄满水的水池,所以在整个加工过程中刀具始终处于冷却液当中,冷却条件极佳。

## 3 高效粗加工成果

通过从以上对机床和刀具的合理应用,加工方式以及工艺编程的合理选择,最终在起落架承力结构件粗加工的过程中,将两个同类零件分别放在一台新进的刚性较好的意大利龙门上和一台原有的龙门铣床(低刚性)上,采用了两种相应工艺方法进行了加工效率对比,通过对一个完整零件的加工,做出了对 3 个问题的判断:(1)低刚性机床采用大进给铣削做粗加工会不会出现机床功率不足,闷车的现象;(2)大进给铣削方式与圆刀片结合玉米铣刀的强力铣削方式中哪种加工方式效率更高;(3)在型腔之外的工位上大进给铣削方式还能否保持高的金属去除率,从而达到最终所有机床都能采用大进给铣削来达到此类零件生产高效目的,在此通过表 4~6,来展示大进给铣削刀具高效粗加工的优异表现。

## 4 结束语

高强、高韧的钛合金 TC18 具有优良的性能,应用前景广泛,是未来大型飞机起落架承力构件的理想材料,通过合理选用机床、夹具、切削方法和刀具应用可以实现对它的高效加工。

随着科技的进步,硬件条件的提升,以后还可以采用更先进的加工方法来加工钛合金 TC18 模锻件,如特种加工(电火花加工)、超高速加工技术(通过超高硬度刀具材料、超高线速度)以及绿色加工技术(干切削加工和绿色冷却技术)等。

表4 零件的材料去除量 kg

零件名称	毛坯重量	产品重量	材料去除量
零件 1	685	130	555
零件 2	580	98	482
零件 3	500	97	403

表5 效率提升表 kg

零件名称	主切削刀具刀片使用数量		加工时间		低刚性机床比 新进机床提高 加工效率 1%
	新进机床	低刚性机床	新进机床	低刚性机床	
零件 1	90 片 + 16 片 圆刀片 + 玉米 铣刀片	120 片 大进给刀片	49(天) 49 × 16=784h	18(天) 18 × 16=288h	63
零件 2	66 片 + 16 片 圆刀片 + 玉米 铣刀片	100 片 大进给刀片	41(天) 41 × 16=656h	14(天) 14 × 16=224h	65
零件 3	76 片 + 16 片 圆刀片 + 玉米 铣刀片	94 片 大进给刀片	43(天) 43 × 16=688h	17(天) 17 × 16=272h	60

表6 R210  $\phi$  63Rx大进给铣刀的材料去除量 kg

零件名称	毛坯重量	产品重量	材料去除量
零件 1	685	130	500 (90%)
零件 2	580	98	313 (65%)
零件 3	500	97	302 (75%)

## 参考文献

- [1] 许文祥,李明衡. 钛合金的切削加工性及其改善方法. 汽车科技,2004(4):30-32.
- [2] 李友生,邓建新,石磊. 高速切削加工钛合金的刀具材料. 制造技术与机床,2007(8):24-27.
- [3] 王俊. 快进切削技术在钛合金粗加工的中应用. 科技信息,2010(29):106-108.

(责编 深蓝)

(上接第 95 页)

通过利用 ANSYS 有限元分析软件,分析两个方向力的大小与变形量的关系,把理论分析作为依据与实际加工相联系,选择合适的对顶力和磨削力,并综合零件转速、砂轮线速度、磨削速度及进给量多方面因素,选择合理的磨削参数,确定加工程序。可以把此次试验理论及分析流程作为依据,并对其他难加工种类零件进行延伸扩展,提高加工效率和加工质量。

## 参考文献

- [1] 刘鸿文. 材料力学(上册). 北京:人民教育出版社,1980:184-185.
- [2] 刘鸿文. 材料力学(下册). 北京:人民教育出版社,1980:166-167.
- [3] 孟少农. 机械加工工艺手册. 北京:机械工业出版社,1992.
- [4] 李伯民,赵波. 现代磨削技术. 北京:机械工业出版社,2003:29-38.

(责编 深蓝)