

飞机钛合金典型零件制造

李 鑫 华 编 译

62.3

1

样
本
书

国防工业出版社

飞机钛合金典型零件制造

美国波音公司钛合金零件制造技术，特选五万字，特
选五万字

第一分册 李鑫华 编译

国防工业出版社

1981年4月第1版

内 容 简 介

本书介绍飞机生产中加工整体壁板、梁类零件、接头零件、螺纹连接件、起落架作动筒等钛合金典型零件所采用的工艺和设备。

本书叙述的内容以机械加工为主，也简单地介绍了一些其它工艺方法，如化学铣切、超声加工、扩散连接等。

本书根据国内出版的期刊以及国外一些有关资料编写而成。

本书可供航空科研人员、工厂技术人员和高等院校有关专业的师生参考

飞机钛合金典型零件制造

李鑫华 编译

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张2⁵/₁₆ 47千字

1981年4月第一版 1981年4月第一次印刷 印数：0,001—1,120册

统一书号：15034·2173 定价：0.26元

前 言

本书的主要内容是介绍现代飞机上的钛合金典型零件及其加工方法，对某一类零件来说，只对其主要机械加工工序作详细叙述，但通过全书，把其机械加工的所有方式都进行了叙述，这样既突出每一类零件的重点，也避免了章节之间内容的重复，对加工钛合金零件的车、铣、刨、磨等主要机械加工工序的机床、刀具、切削用量、切削条件等作了系统地叙述，因此，各章的内容既各有重点又互有联系。

此外，在叙述工艺过程时，把材料与结构这两个因素紧密地结合在一起。

由于编者的水平有限，一定有不少的缺点和错误，欢迎读者批评指正。

目 录

第一章 钛合金的特性及其加工问题	1
一、钛合金的性能	1
二、钛合金的加工特性	1
三、钛合金加工的实际问题	2
四、其它问题	3
第二章 钛合金飞机壁板的加工	4
一、飞机壁板的铣切加工	4
二、机翼壁板的刨削加工	19
三、格形壁板的数控铣切	20
四、格形壁板的电化学加工	22
五、电化学方法和数控铣切方法的比较	24
第三章 飞机骨架梁的铣切加工	27
第四章 接头类零件的加工	32
第五章 阀类零件的机械加工	40
第六章 飞机起落架作动筒的机械加工	44
第七章 螺纹连接件的制造工艺	55
第八章 其它	61
一、化学铣切	61
二、超声加工	62
三、扩散连接	64

第一章 钛合金的特性及其加工问题

一、钛合金的性能

钛是地球上蕴藏量最丰富的金属之一。钛合金可以很满意地用来制造低于 500°C 温度条件下工作的零件。与其它结构材料相比，钛合金的主要优点是机械性能和抗腐蚀性能好而比重小。

钛合金特性之一是抗氧化能力低，能与大气中的氧起作用，这种作用并随温度的提高而增强。在出现氧化皮的同时，氧还向钛中扩散以致形成硬度很高的脆性层，其厚度随时间的增加而增加，这就使钛合金的塑性降低，在锻压后形成的这种比原来材料硬度高得多的氧化皮，也增加了切削加工的困难。

此外，它还能与大气中或其它介质中的氢起作用而形成氢脆层，这种氢脆层会严重影响零件的使用性能。

二、钛合金的加工特性

钛合金加工的主要问题是刀具的耐用度低，这是由钛合金特有的性质所决定的。

钛合金的导热性非常差，比钢小 $1/3 \sim 1/6$ 。又由于切屑严重卷曲而造成的刀尖压力高，其结果是产生高的刀尖温度，如不在特殊的切削条件下进行切削，刀具就会迅速磨损。钛合金虽然存在着与其它普通结构材料显然不同的加工

特性，但在加工方法上仍类似于和它等强度的 30CrMnSiA 低合金钢。

钛合金塑性小，因而显著地影响其切削时的变形，如果用切屑的纵向收缩来表示切屑的范性形变，则钛合金切屑的纵向收缩系数，可能等于或小于 1。这意味着切屑与刀具在狭窄的接触面上发生接触。钛合金机械加工的切削用量对切屑的变形有影响，其中切削速度和进给量的影响最大。切屑的收缩系数随进给量或切削深度的增加而减小，并且进给量对切屑收缩系数的影响比切削深度对其影响要大。同时由于钛合金有很高的强度极限，当接触面积上的温度较高时，刀具磨损很快，因此多半采用硬质合金刀具来加工。

另外，各种气体杂质对钛合金的切削加工性有很大的影响，其中最活泼的是氢和氧，即切削加工性随钛合金中气体含量的增加而恶化。加工钛合金时，由于钛的化学活泼性高，易和所有与它接触的金属化合，因此刀刃的磨损很快。加之，在钛合金中常含有氧化物、氮化物和碳化物等杂质，这些杂质有磨料的性质，也能加速刀具的磨损。尽管如此，加工钛合金虽比不锈钢难，但比耐热合金还容易些。

三、钛合金加工的实际问题

从加工钛合金的切削力和所需功率来看，具备能加工同等硬度钢的机床就能加工钛合金，但铣床应装有间隙消除机构，以便顺铣。

由于加工钛合金时，容易产生高的切削温度，这就要求操作人员特别小心，以免刀具过热而引起软化、磨损和迅速变钝。控制方法主要有两种：一是采用合适的刀具材料，二

是采用有效的切削液。

(1) 刀具材料 应尽量采用硬质合金刀具，因为这种刀具的抗高温性能远比任何高速钢刀具好。然而，在因机床刚性不够而不能高速切削时，应采用高速钢刀具。经验表明，采用含钴高速钢刀具的效果优于普通高速钢刀具。

(2) 切削液 若用高速钢刀具切削钛合金时，推荐采用合成水溶性油喷雾冷却，若用硬质合金刀具切削钛合金时，推荐采用氯化切削油喷雾冷却，但零件加工后必须立即清洗。

四、其它问题

(1) 加工钛合金时，刀具磨损是影响工件硬化深度和硬化程度最严重的因素。

(2) 切削用量各要素中，对钛合金表面光洁度影响最大的是进给量。而切削速度则几乎没有影响。

(3) 加工钛合金时尽量不采用干切，因为干切会使加工表面层产生残余应力，引起应力腐蚀和降低零件的疲劳寿命。

第二章 钛合金飞机壁板的加工

一、飞机壁板的铣削加工

钛合金飞机壁板的铣削是目前加工飞机壁板最常用的方法。

在钛合金的铣削中，从刀具寿命和表面光洁度两个方面证明了顺铣比逆铣优越。这两种铣削方法的区别如图 2-1 所

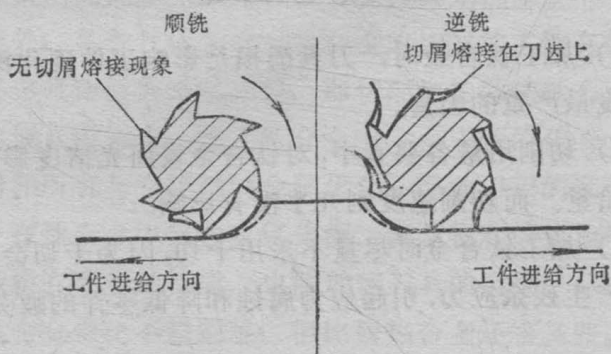


图2-1 顺铣与逆铣

示。由图的右方可以看出切屑熔结在刀齿上，这是逆铣时经常发生的，这种现象和加工钛合金时产生的高温有关。当每个刀齿再次切入工件时，熔结在刀齿上的切屑折断，结果使刀具迅速磨损，致降低了表面光洁度。图的左方使用的是顺铣方法，从中可以看出，由于切屑是由厚变薄，切屑熔结现象很少出现。实践证明采用顺铣时的刀具寿命比逆铣方法至少可提高一倍，所以在加工时应尽量采用顺铣。

在实体毛坯上用立铣刀开槽时（图 2-2），最好是采用含钴高速钢立铣刀。刀具刃磨后带有 $5^{\circ} \sim 7^{\circ}$ 的后角和0.51~1.02 毫米宽的主刃带。

切削速度和切屑载荷均应低于通常铣凹槽和铣型面时所用的参数。推荐使用的切削速度为15米/分，切屑载荷为0.05~0.08毫米/齿，切削深度可以达到刀具直径的三分之一。

开槽用的起始孔，可采用加工钢件时的同样方法，用带中心刃的立铣刀

或钻头加工出。在上述工作条件下，刀具寿命估计至少可达

到30分钟。如果因为某种原因必须使用普通高速钢立铣刀时，切削速度应降低到10.5米/分。

推荐铣凹槽（图 2-3）用的参数是切削速度21~27米/分，切屑载荷0.1~0.13毫米/齿。此时应用含钴高速钢立铣刀，其

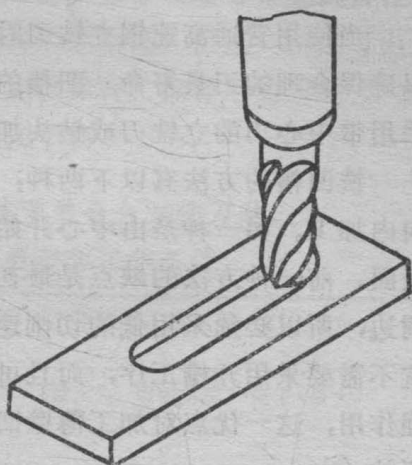


图2-2 开槽

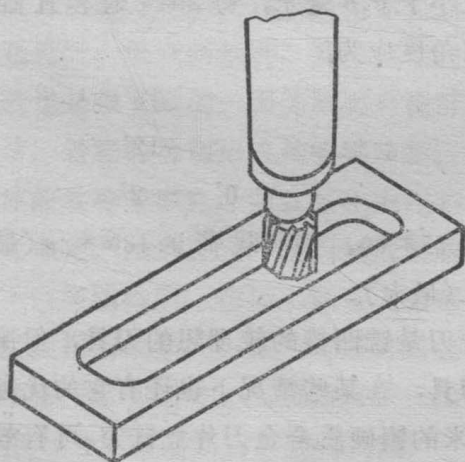


图2-3 铣凹槽

主后角为 $5^{\circ} \sim 7^{\circ}$ ，主刃带宽 0.51~1.02 毫米。切削深度与切削宽度两者之间的关系应按加工同等强度钢的情况。并应尽可能地采用顺铣。

当使用普通高速钢立铣刀时，切削速度应降低到 15 米/分，以确保合理的刀具寿命。凹槽的起始孔可采用普通方法，即采用带中心刃的立铣刀或钻头加工出。

铣凹槽的方法有以下两种：一种是先铣周边，然后逐渐向内加工。另一种是由中心开始向外加工，最后加工周边的表面。前一种方法的缺点是最初以一种开槽工序加工凹槽的周边，所以必须采用低的切削速度和切屑载荷。后一种方法就不需要采用开槽工序，而且可利用凹槽内未切削材料的补强作用，这一优点对加工薄壁凹槽来说，往往是十分重要的。

不受圆角半径或刀具直径限制的外型面铣削，应尽可能用镶硬质合金刀片的立铣刀。因为用这种刀具可得到高的金属去除率。刀具直径不应小于 6.5 毫米，每 25.4 毫米直径须有 6 个齿，刀具的几何角度应为：

螺旋角	15°
主后角	12°
径向前角	$0^{\circ} \sim -2^{\circ}$

其工作条件是：切削速度 75 米/分，切屑载荷 0.43 毫米/齿（最大），切削深度 2.5 毫米（最大）。

虽然含钴高速钢立铣刀是铣凹槽的较理想的刀具，但镶片的和整体的硬质合金刀具，在某些情况下也还有它的优越性。例如直径最小 32 毫米的镶硬质合金刀片立铣刀，可有效地用于粗铣深度大于 25.4 毫米的凹槽，特别是加工长而宽

的凹槽。这种刀具设计成每 25.4 毫米直径带有 4 个齿。其工作条件是：切削速度 45 米/分、切屑载荷 0.25 毫米/齿（最大）、切削深度 7.6 毫米（最大）。整体硬质合金立铣刀很适用于精铣凹槽。虽然这种刀具的成本高，但这一缺点可由刀具寿命长和进给率高等优点加以弥补。推荐用的刀具类型，刀具几何角度和工作条件均列于表 2-1 内。

表 2-1 使用整体硬质合金立铣刀时，
推荐的刀具类型和工作条件

刀 具	直径在 19 毫米以上，带 4 个排屑槽，主后角 12° ，硬质合金牌号为 YG6
切削方式	顺铣，切削深度 1.3 毫米（最大），切削宽度 39 毫米（最大）
切削速度	39 米/分
切屑载荷	0.18 毫米/齿

加工钛合金壁板的前提首先是机床必须有大的刚度。为此，机床的螺母要锁紧，上下导轨要配合适当，机床工作台送进时，无任何松动，并采用消除间隙的装置。另外，切削液也是很重要的。因为需要有良好的散热性能，以免切屑熔结，最好的冷却形式是喷雾冷却。雾化切削液比浇注式切削液的致冷效率高，而且雾化力可将切屑从刀具与工件的接触区带走，减少可能产生的切屑熔结。

实践表明，在加工钛合金壁板时，硬质合金刀具并不比高速钢的效果好，因为所用的转速和进给率必须很低，特别是在间歇切削时，硬而脆的碳化钨容易震裂。采用含钴 5% 和 12% 的高速钢刀具较为优越。

对高速钢刀具，采用三次回火处理，不仅使刀具硬度达

到 HRC42，并且消除了所有的残余应力。刀具的几何角度对获得长的刀具寿命是很重要的。采用大的螺旋角（角度达 45° ，而普通的只是 30° ）(图 2-4) 的四槽高速钢立铣刀，使

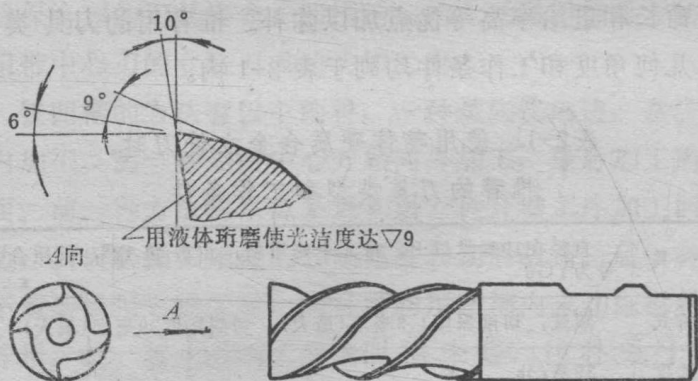


图2-4 带 45° 螺旋角的四槽高速钢立铣刀

刀具具有较高的剪切能力，这对切削硬金属是不可缺少的。由于采用了大螺旋角，能以均匀的剪切作用进行切削，且形成的紧紧卷曲的切屑很容易离开刀具，工件的表面光洁度可达到 $\nabla 8$ ，这种刀具寿命比普通高速钢刀具高三倍。这种刀具的刀齿角度也不同于普通刀具，其后角较小，可增大刀齿强度。例如直径为 76 毫米的立铣刀，其主后角是 6° ，副后角是 9° 。而这种直径刀具的标准后角通常分别为 9° （主后角）和 12° （副后角）。直径大于 76 毫米的立铣刀，则带有 4° 的主后角和 7° 的副后角，在一切情况下，后角均随着刀具直径的增大而减小，并且主后角与副后角相差 3° 。

提高刀具的表面光洁度，这与减小后角同样重要。对普通刀具每处的光洁度只是研磨至 $\nabla 6 \sim \nabla 7$ ，而对加工钛合金

的刀具则须用液体珩磨或气体喷磨，使刀具最高光洁度达到 $\nabla 9$ ，刀具后面经过刃磨后要求达到 $\nabla 8$ ，并且在刀刃上要制出一个半径最大为0.25毫米的圆角。这种极高光洁度和稍圆的刀刃，有助于切屑的排除，同时可提高刀尖强度。

加工钛合金壁板时，还应对切削用量进行严格的控制，特别是在切削过程中，要使每个刀齿的受载均匀，并且在加工时，大多数情况下，切屑载荷都不应低于0.08毫米/齿，因轻微切削易使刀具卷刃而缩短寿命。例如用双槽高速钢立铣刀加工淬火时效的TC4钛合金壁板时，采用了0.15毫米/齿的切屑载荷。

尽管如此，刀具的寿命仍然是不够理想，因此出现了对热态毛坯铣切加工的研究，这首先是以锻造和挤压壁板试件开始的。现有的钛合金锻造毛坯，在它们的表面上预先就有氧化物、氮化物与碳化物层，深度达5~10毫米，加工前需在重型铣床上铣去。

铣切钛合金时的刀具磨损特征，实质上与刀具材料的脆性有关。哪种影响对刀具的磨损过程与磨损形式起主导作用，这要由加工的具体情况来决定，其中包括被加工材料的性质和切削用量。

实践证明，在以 $V = 10 \sim 15$ 米/分， $S_z = 0.07 \sim 0.1$ 毫米/齿加工钛合金壁板时，刀具的磨损特征基本上是刀具的机械磨损与刀齿的脆性崩刃，附着现象（切屑粘结、钎接）表现得较微弱。提高切削速度会导致与刀刃的前面与后面磨损过程的加剧（引起前角的增加与表面压力提高至超过刀具材料的强度极限）与刀刃的崩落。

在铣切硬皮时，磨损过程显得特别强烈，并且在切削用

量相同的情况下，刀具寿命比加工基体材料时低6~8倍，最大磨损发生在刀刃与硬皮相接触的地方。

在 $V=20\sim 30$ 米/分， $S_z=0.8\sim 1.2$ 毫米/齿的情况下，铣切强度较低而塑性较好的合金（TA3、TC2等）壁板时，由于被加工材料的塑性变形增加，与刀具实际接触面积的增加，刀具温度的提高，被接触材料化学活性的增加，都能使刀具磨损。除机械磨损外，还加上附着现象，在刀具上出现粘迹和切屑钎接。

一般说来，加工钛合金锻造毛坯表面，生产率都是很低的，然而采用加热状态的锻造毛坯来降低对接触面作用力能够提高刀具寿命。

最初的试验是在有加热毛坯装置的立式铣床上进行的，用镶有硬质合金YG8刀片的立铣刀来加工钛合金TA3、TC2、TA6、TC6与TC8的飞机壁板试样，用热电偶测量切削温度，用测力计、张线式传感仪和示波器来测量切削力，切屑收缩率用重力法来测定或用分析法来确定。

根据所获得的切屑显微薄片决定连续性系数 $C = \frac{a_2}{a_1}$ 、

加宽系数 $K_b = \frac{b_1}{b}$ 与加厚系数 $K_a = \frac{a_1}{a}$ ，这里 b 与 a 分别是变形前的切屑宽度和厚度， b_1 是变形后的切屑宽度， a_1 与 a_2 都是变形后的切屑厚度。图2-5表示为用镶有硬质合金YG8刀片，几何角度 $\gamma=0^\circ$ ， $\varphi=45^\circ$ 、 $\alpha=12^\circ$ 的立铣刀，以切削宽度 $b=3$ 毫米端面铣切TC6时，纵向收缩率 K 与切屑滑移角 β 和切削速度 V （ $S_z=0.31$ 毫米/齿）与切屑载荷 S_z （ $V=80$ 米/分）的关系。在用显微镜观察时，滑移角 β 是按切屑外形来确定，图2-6表示获得的结果。

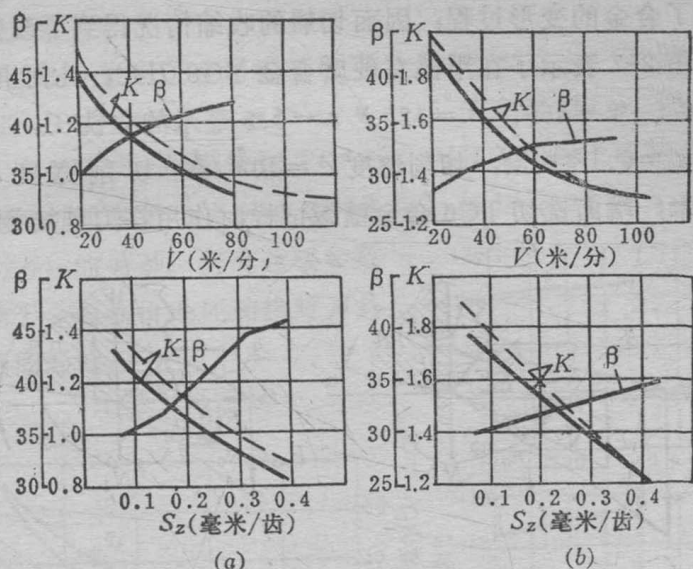


图2-5 端面铣切TC6时, K (虚线表示计算关系) 与 β 和 V 与 S_z 的关系
(a) 毛坯不加热; (b) 毛坯加热至500°C。

在一般情况下 (即不加热毛坯时) 加工钛合金壁板, 会出现不利的切屑收缩率, 因为产生合金变形过程差 ($K_a = 1.3 \sim 1.5$) 和降低切屑连续性 ($C = 0.3 \sim 0.5$), 这两个因素与钛合金具有低的连续性有直接关系。毛坯的加热提高了合金的塑性, 在此情况下, $K_a > 2$ 、 $C = 0.8$, 而纵向收缩率增加至 $K = 1.9$ 。由此可见, 钛合金的低塑性决定了切屑的性质, 所以毛坯不加热, 切削时必然会出现不利的收缩。毛坯一加热, 切屑的连续性系数就上升,

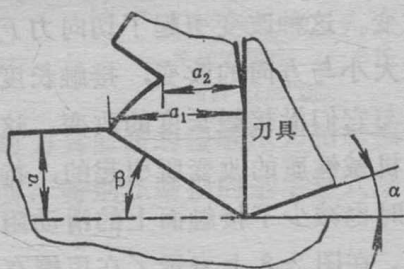


图2-6 铣切TC6时切屑形成图

改善了合金的变形过程，因而切屑的收缩情况得到了改善。

图 2-7 表示了在用镶有硬质合金 YG8 刀片，几何角度 $\gamma = 0^\circ$ 、 $\varphi = 45^\circ$ 、 $\alpha = 12^\circ$ 、 $r = 0.5$ 毫米的立铣刀，以进给量 $s_0 = 0.1$ 毫米/转，切削速度 $V = 40$ 米/分，切削宽度 $b = 3$ 毫米，端面铣切 TC6 合金壁板试样时作用在刀具接触面

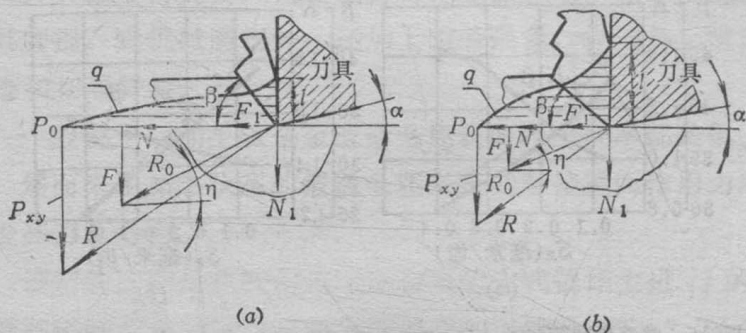


图 2-7 切削 TC6 时，作用在刀具上的力系及作用在刀具前面法向压力 q 图

(a) 毛坯不加热；(b) 毛坯加热至 500°C 。

上的力系。很明显，毛坯的加热带来了接触面上某些作用的改变。这种改变引起了切向力 F 与法向力 N 的减少，合力 R 的大小与方向的改变，接触长度 l 的增加，法向压力 q 的大小与它们沿接触长度的改变。这些变化首先是由于毛坯的物理机械性质的改变所引起的，特别是降低了塑性变形抗力，同时也减少了接触面上的滑动阻力。

在图 2-8 上表示了在用镶有硬质合金 YG8 刀片，几何角度 $\gamma = 0^\circ$ 、 $\varphi = 45^\circ$ 、 $\varphi_1 = 15^\circ$ 、 $\alpha = 12^\circ$ 立铣刀，切屑载荷 $S_z = 0.3$ 毫米/齿、切削宽度 $b = 3$ 毫米，端面铣切 TC6 时的单位摩擦力 $q_f = \frac{F}{bl}$ ，在前面上的摩擦系数 μ 和切削速度