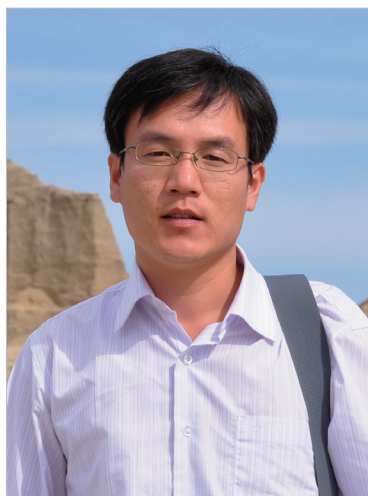


# 钛合金材料的切削加工及 专用刀具开发

## Cutting Technology for Titanium Alloy and Development of Special Cutting Tool

上海交通大学 安庆龙 牛秋林 明伟伟 陈 明



安庆龙

工学博士,上海交通大学机械与动力工程学院讲师,主要从事难加工材料高效精密加工方面的研究工作。

本文主要针对多种典型钛合金的车削、铣削和钛合金剥皮与平头等 3 种加工方式从高速切削加工中切削刀具、材料切削性能评价、切削加工机理、建模仿真及工艺优化等方面进行阐述。

性和高温条件下亦能保持高强度等,因此,航空工业的不断发展对钛合金的切削加工提出了更多的要求,如提高切削速度、增加材料去除率等<sup>[1-2]</sup>。但是,由于钛合金具有高温化学活性大、导热系数小、弹性模量低、与其他金属摩擦系数大等特性,即使在较低的切削速度下切削加工钛合金也会出现切削温度高、刀具磨损严重、刀具寿命低以及加工表面质量差等现象,因此其也成为一种典型的难加工材料。如何提高钛合金的切削加工效率一直是航空航天以及其他制造行业中迫切需要解决的难题。在制造技术飞速发展的今天,钛合金加工技术已经成为衡量一个国家工业水平的重要指标。因此评价新型钛合金的切削加工性能,优化钛合金加工工艺是新型钛合金开发并推向市场的重要环节。

近些年来,以高效率、高精度和高表面加工质量为基本特征的高速加工技术已成为主要的先进制造技术之一,广泛应用于航空、航天、汽车等工业领域<sup>[3]</sup>。与此同时,人们对高速切削技术进行了大量的研究,主要集中在切削刀具、材料切削性能、高速切削机理以及切削过程仿真等方面。因此,利用现有技术手段和试验条件,从材料性能、切削刀具、切削机理、切削过程监控、加工方法等方面针对钛合金材料的切削加工展开深入研究,以达到高质高效切削的目的成为目前钛合金机械加工行业迫切需要解决的具有重大意义的一个课题。

本文结合目前的一些研究成果,基于钛及钛合金生产过程中存在的一些难题,对在切削加工钛合金中遇到的一些重要问题进行了探讨,以期

随着工业技术的迅速发展,钛工业也得到了迅速的发展,不仅成为现代航空航天工业中不可缺少的结构材料,还在造船、化工、冶金、医疗等方面获得了广泛的应用。从 20 世纪 50 年代开始,钛合金在航空航天领域中得到了迅速的发展,成为当代飞机和发动机的主要结构材料之一,其应用水平是衡量武器装备先进程度,影响武器装备战技性能的一个重要方面。由于钛合金具有许多优异的性能,如高的比强度、强的耐腐蚀

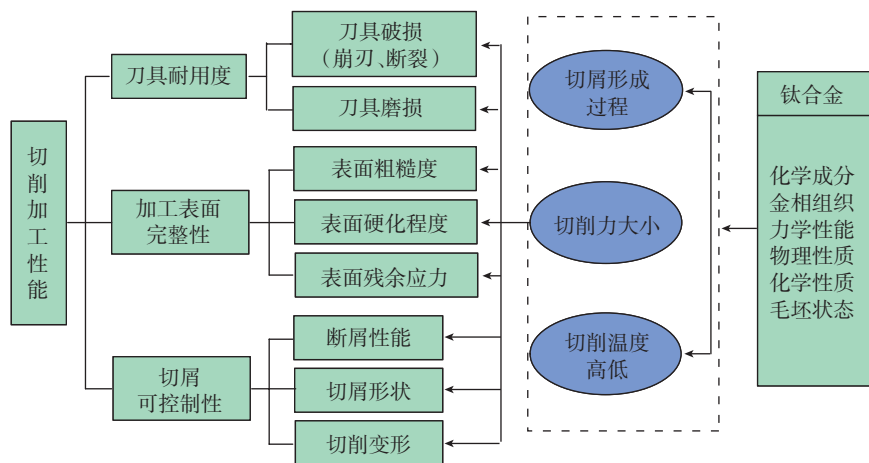


图1 钛合金切削加工性能及其影响因素

对改进和完善钛合金的切削工艺提出指导性意见。本文主要针对多种典型钛合金的车削、铣削和钛合金剥皮与平头等3种加工方式从高速切削加工中切削刀具、材料切削性能评价、切削加工机理、建模仿真及工艺优化等方面进行阐述。

### 钛合金车削性能评价

为了适应钛合金市场的需求,国内各厂商不断加强钛与钛合金材料的基础研究,对其生产工艺进行不断改进,提高国产钛合金的质量和性能。钛合金切削加工的特点主要有:变形系数小;切削温度高;单位面积上的切削力大;冷硬现象严重;刀具易磨损等<sup>[4-5]</sup>。

作者所在的课题组对硬车削条件下不同化学成分(表1)和显微组织结构的 $\alpha + \beta$ 型钛合金的切削性能进行了全面评测和研究,分析了钛合金切削加工机理,研究了不同钛合金材料的切削性能差异,并优化了切

削加工参数<sup>[6]</sup>。图1为钛合金切削加工性能与各种影响因素之间的相互关系。通过具体分析钛合金车削加工表面粗糙度与外圆车削用量(车削深度、车削速度、进给量)、刀具材料、刀具几何参数(切削角度、刀面形式、刀刃形式)、刀具磨损、车削振动、车削毛刺、切屑成型等因素之间的关系,研究了车削加工钛合金表面形貌、表面层组织结构、表面层加工硬化程度、表面残余应力等表面完整性变化规律,对钛合金棒材车削加工提高表面光洁度的工艺路线给出了指导性意见。

虽然TC4、TC6、TC11 3种均为 $\alpha + \beta$ 钛合金,但是3者的显微组织和力学性能却不尽相同。其中,TC6的强度最高。切削试验结果表明,TC6的切削系数 $K_f$ 、 $K_n$ 比TC4和TC11的更大。因此,切除单位体积的TC6材料所消耗的能量会更多。TC6切削时,刀具寿命仅为18min,比TC4(>25min)和TC11(20min)

都要短。研究还表明,加工这3种材料时,刀具的磨损形式主要表现为后刀面粘接磨损和前刀面月牙洼磨损。同时,切削加工表面残余应力的大小与切削参数密切相关,会随切削速度的增加而减小。

研究结果表明,TC6的切削加工性相对于TC11和TC4来说更差一些,其切削力最大,切屑变形和刀具磨损均比较严重。进给量是影响表面粗糙度的决定性因素,而切削速度对锯齿化程度影响很大,对齿距影响不大,相反,切削深度对齿距的影响很大,对锯齿化程度影响很小。根据不同的加工环境选择合适的工艺可以获得良好的加工质量,高效的加工效率和较低的生产成本。对于粗加工,可采用如下切削参数:切削速度40~70m/min;进给量0.10~0.15mm/r;而对于精加工,推荐切削参数范围如下:切削速度80~100m/min,进给量0.05~0.1mm/r。

### 钛合金铣削性能评价

在金属切削加工中,铣削是最常用的加工方式之一。一般来说,加工钛合金常用高速钢刀具和硬质合金刀具。近年来,细晶粒(1~0.5 $\mu\text{m}$ )和超细晶粒(小于0.5 $\mu\text{m}$ )硬质合金材料及整体硬质合金刀具的开发,使硬质合金的抗弯强度大大的提高,可替代高速钢用于制造小规模钻头、立铣刀、丝锥等量大、面广的通用刀具,其切削速度和刀具寿命远超过高速钢。整体硬质合金刀具的使用可使原来采用高速钢大部分应用领域的切削效率显著提高。为提高硬质合金的韧性,通常采取增加Co含量的方法,由此引起的硬度降低现在可通过细化晶粒得到补偿,并可使硬质合金的抗弯强度提高到4.3GPa,已达到并超过了普通高速钢的抗弯强度。细晶粒硬质合金的另一优点是刀具刃口锋利,尤其适合于高速切削粘而韧

表1 钛合金化学成分及Al、Mo元素的当量值

钛合金	化学成分质量分数 1%							元素当量值 1%	
	Al	Cr	Mo	Fe	V	Zr	Si	Al	Mo
TC4	6	-	-	-	4	-	-	7	2.5
TC6	6	1.5	2.5	0.5	-	-	0.3	7	8.5
TC11	6.5	-	3.5	-	-	1.5	0.3	7.8	3.5

当量计算公式:  $Al(\%) = Al + Sn/3 + Zr/6 + 10(O+N)$ ,  $Mo(\%) = Mo + 2/3V + Nb/3 + 3(Fe+Cr)$

的材料。

对于钛合金的切削加工,当切削速度达到 100m/min 以上,即进入高速切削范围<sup>[7]</sup>。目前国外铣削加工钛合金的先进水平在 100~200m/min 范围内。同时,由于钛合金材料本身具有多项特性,因此对于不同类型的钛合金,其铣削加工规律也不尽相同。本课题组针对 5 种类型的钛合金材料: TC6、TC11、TC17、TC18 和 TA19,通过面铣、侧铣和槽铣试验,从锯齿形切屑形态形成、毛刺形成<sup>[8]</sup>、切削力、切削温度、切削稳定性、切削刀具磨损机理<sup>[9-10]</sup>和表面完整性<sup>[11]</sup>等角度全面分析了材料的铣削加工性,从而考察钛合金材料在铣削中的高速切削加工机理,并优化铣削加工参数,完成了这 5 种材料的铣削加工性能对比。

一系列的试验研究表明适合各种钛合金的切削速度分别为: TC6<110m/min, TC11<110m/min, TC17<80m/min, TC18<50m/min, TA19<110m/min。图 2 给出了在切削速度为 80m/min 时 5 种不同钛合金的典型切屑的对比情况。进一步分析表明,所选用的 5 种钛合金材料的切削加工性有明显的差别: TC18 的切削加工性最差, TC17 其次,其后依次为 TC11, TC6 和 TA19。在同一切削参数、刀具磨钝标准 VB 为 0.3mm 的情况下,3 种硬质合金刀片的使用寿命对比结果为: PVD (TiN+TiAlN) 涂层刀片 > CVD (TiN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiCN) 涂层刀片 > 超细晶粒无涂层刀片。同时, PVD 涂层刀具是 3 种刀具中切削力最小的。因此, PVD 刀具更适合切削钛合金。

## 钛锭剥皮和平头专用刀具的开发

铸钛工业随着航空铸造技术发展的需求应运而生,尤其是钛铸件民用市场的发展,促进了铸钛工业的迅速发展与提高。同时随着工业的发

展,对一些大型棒料的特殊钢材(如钛合金高温合金及工模具钢)的需求量陡增,同时对其坯料的要求也越来越高。

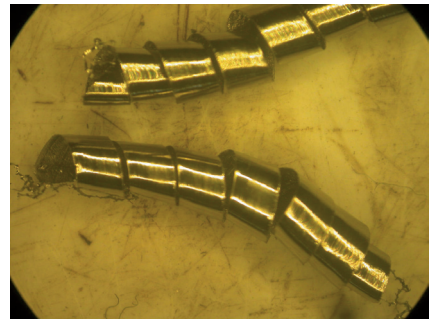
目前,对于钛锭的熔炼,国内外一般采用真空自耗炉 2 次或 3 次的工艺重熔钛锭。这种工艺对一次锭进行表面清理,去除电极两端的飞边,电极的联结焊接以及二次锭的剥皮、锻造、切块、去头等工序。因此刚熔炼好的钛锭,其棒材毛坯形状精度差和表面层材料组织不均。

目前,钛合金棒料剥皮常常采用硬质合金刀具。但是,硬质合金刀具因毛坯表面材质不均、氧化皮严重及棒料直线度差等原因,容易造成钛合金熔炼中一次锭、二次锭平头和剥皮过程中因刀具磨损破损而引入钨污染,导致材料组织不均和夹杂物应力集中等问题,使钛合金棒料存在着许多硬缺陷,从而大大降低钛合金的性能,甚至造成废品。

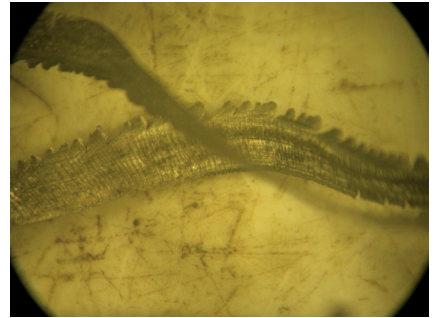
因此,在钛合金棒料剥皮过程中,剥皮专用刀具必须具备高强度、高表面硬度、高温力学性能好等特点,以便获得良好的抗冲击性能和耐磨性能。

通过刀具材料、刀具刃口强化和刃口精化、刀具几何角度优化匹配、排屑断屑性能、刀具切削余量分配和刀具装夹方式等多个方面,对剥皮专用刀具进行设计与制作,以满足钛合金熔炼中一次锭、二次锭平头和外圆剥皮中对刀具的高要求。对此,本课题组专门设计研制了一种双刀片刀具,如图 3 所示。

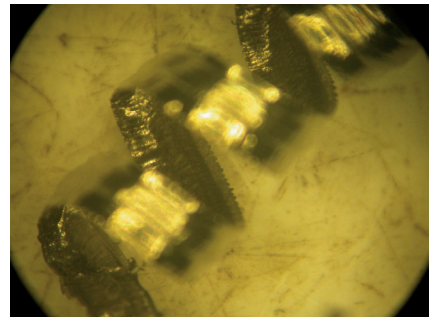
双刀片同时车削加工的基本思想是将原来单个车刀的车削量分割为两个车刀同时车削,从而可以在传统加工方法中一个加工时间段内完成两次车削,基本可以成倍地缩短加工时间,并且提高刀具使用寿命。同时,由于 2 个刀头的互相牵制,单向作用的外力互相作用,使得弹性系统放出的能量与能量储放之间的差值



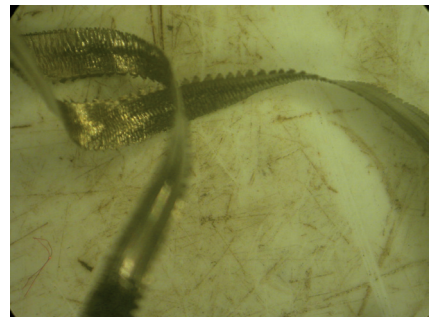
(a) TC6



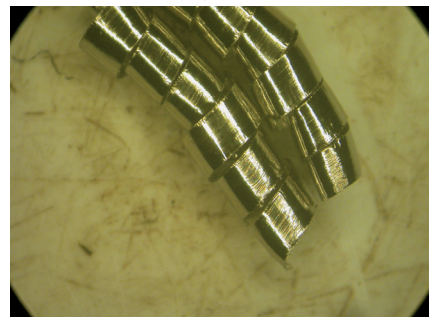
(b) TC11



(c) TC17



(d) TC18



(e) TC19

图2 5种钛合金典型的切屑形态(面铣, V=80m/min)

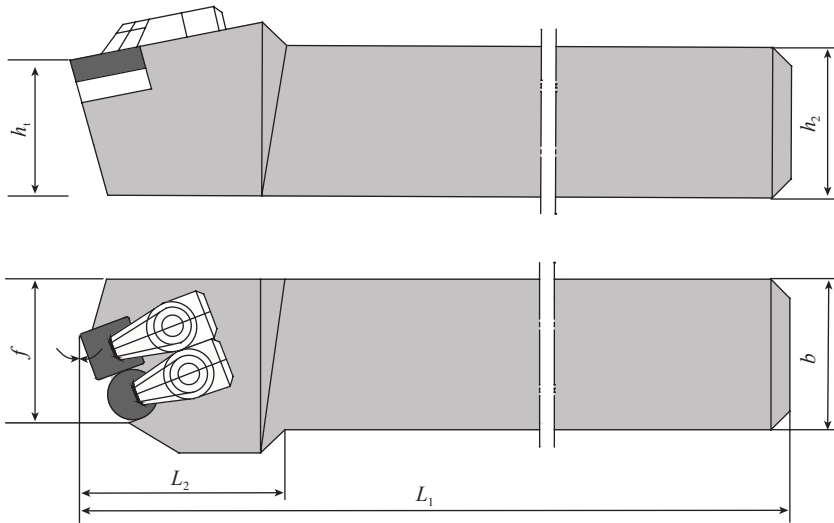


图3 双刀片车刀

减小,从而有效地避免切削中的颤振现象,由于钛合金剥皮属于重载车削,因此,双刀片可以选用高强度的圆形刀片和正方形刀片。考虑到圆形刀片切削刃最为坚固,可靠性也最高,所以先由圆形刀片切入,把方形刀片安装在第二个位置,完成剩下加工余量。两把刀片互相作用,能够最大限度地发挥刀具的作用。因此对于单次切深很大的剥皮工序,采用双刀装夹应该很有利。前面圆形刀片具有较高的强度和耐冲击性能,满足大余量切削要求,后面的方形刀片完成余下的材料去除,不会受到较大的冲击,对获得较好的表面粗糙度有利。双刀具用途主要用来完成钛合金棒料外圆高速车削。

### 切削过程建模与仿真

采用有限元方法研究切削加工有2个关键性问题,分别是热力耦合的非线性材料本构模型和切削仿真建模问题。材料本构关系反映了材料物质本性的变化,是任何有限元建模仿真过程的关键环节和成败的关键因素。对于切削和高速过程经常达到的大应变(5~8)、高应变率(104~105/s)和高温升(>1400℃)情况,切削仿真研究人员通常使用的材料本构关系为Johnson-Cook模型:

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^p)^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

切削仿真建模的问题主要包括刀-屑接触的相关问题、切削热的产生问题以及切屑成形的相关问题。刀-屑接触问题主要是刀具和工件接触的判断以及速度、加速度值的运算等,切削热的产生主要是塑性变形生热的计算、刀-屑摩擦作用生热的计算以及热量的传递和变化等,而切屑成形问题主要为自适应网格划分问题。

有限元建模和分析是研究切削过程的重要方法。文献[12]采用有限元方法对材料本构模型和有限元建模对锯齿形切屑形成过程的影响进行了研究。文中采用J-C模型讨论了高速切削TC4钛合金过程中产生的切削力、切削温度、应力应变、切屑变形等,模拟了锯齿形切屑的绝热剪切带,并通过分析绝热剪切带的塑性等效应变的变化可以解释锯齿形切屑的形成。

文献[13]利用有限元方法,研究了TC4钛合金车削时4种不同涂层刀具产生的切削力和刀具磨损情况。为了研究TC4钛合金车削中的切屑

形成、切削力、切削温度和刀具磨损,建立了三维有限元模型,利用该有限元模型对切屑成形和温度场进行了分析。

### 参考文献

- [1] Boyer R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Materials Science and Engineering*, 1996, 213 (A): 103.
- [2] Ezugwu E O, Bonney J, Yamane Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 134(2): 233.
- [3] Haber R E, Jiménez J E, Peres C R, et al. An investigation of tool-wear monitoring in a high-speed machining process. *Sensors and Actuators A*, 2004, 116(3): 539.
- [4] Ezugwu E O, Wang Z M. Titanium alloys and their machinability—a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997(68): 262.
- [5] 莱因斯 C, 皮特尔斯 M. 钛与钛合金. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [6] Ming W W, Chen M, Rong B, et al. Machinability evaluation of the finish hard turning  $\alpha + \beta$  titanium alloys. *Key Engineering Materials*, 2010, 431-432: 551.
- [7] Schulz H, Moriwaki T. High speed machining. *Ann. CIRP*, 1992, 41(2): 637.
- [8] Luo M, Liu G, Chen M. Mechanism of burr formation in slot milling Al-alloy. *International Journal of Materials & Product Technology*, 2008, 31(1): 63.
- [9] 马玉平, 向道辉, 陈明, 等. 微小孔加工试验及刀具磨损机理. *南京航空航天大学学报*, 2005, 37: 8-11.
- [10] 杨贵军, 杨跃军, 陈明, 等. 新型TiCN涂层钻头的磨损机理. *上海交通大学学报*, 2005, 39(11): 1741.
- [11] Zhang X H, An Q L, Chen M. Residual stress prediction by adaptive neuro-fuzzy system in milling aluminum alloy. *Key Engineering Materials*, 2009, 392-394: 504.
- [12] Özel T, Sima M. Finite element simulation of high speed machining Ti-6Al-4V Alloy using modified material models. *Transactions of NAMRI/SME*, 2010, 38: 49.
- [13] Özel T, Sima M, Srivastava A K, et al. Investigations on the effects of multi-layered coated inserts in machining Ti-6Al-4V alloy with experiments and finite element simulations. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2010, 59: 77.

(责编 小城)