

钛合金钻削加工及其新发展*

毕秀国 卜繁岭 康健

大连工业大学

摘要:从钛合金自身的切削加工性能出发,系统介绍了钛合金的切削加工基本原则。阐述了传统钛合金在钻削加工中常出现的几点问题:钻头材料、钻头几何参数分析和冷却介质的选择。根据钛合金的导热率低、弹性模量低、硬度较低和化学活性强等特点合理地调整钻头材料的选择,对原有钻头几何参数进行优化,正确选取冷却介质。并介绍了当前钛合金切削加工技术的新发展。

关键词:钛合金, 钻削加工, 钻头参数, 新发展

Titanium Alloy Drilling and New Development

Bi Xiuguo Bu Fanling Kang jian

Abstract: From the titanium alloy cutting performance, the basic principles of titanium alloy cutting is introduced. And expounded several problems about the traditional titanium alloys drilling: bit materials, bit's geometric parameters of choice and the choice of cutting medium. Selecting suitable bit materials and cutting medium, optimizing the original bit geometric parameters according to the low thermal conductivity, low modulus of elasticity, hardness and lower chemical activity of titanium alloys. At last it made an exposition of the new development of current titanium alloy cutting technology.

Keywords: titanium alloy, driller, parameters of bit, new development

1 引言

1791 年英国人 William Gregor 第一次发现了钛元素,但是由于纯金属钛很难制备,直到 1932 年卢森堡化学家 Wilhelm Justin Kroll 才用 $TiCl_4$ 和 Ca 制取出大量的钛。直至今日,该方法仍然是应用最广泛的工艺,被称为“Kroll 工艺”。第二次世界大战后钛基合金很快发展成为航空发动机的关键材料。今天,航空航天工业仍然是钛及钛合金的主要应用领域,在其他领域如建筑、化工、医药、能源、海洋和近海、体育休闲以及交通运输等行业也得到了越来越广泛的应用^[1]。

纯钛和大多数钛合金一样都结晶成近似理想状态下的密排六方结构的 α -Ti;高温下为体心立方结构的 β -Ti。表 1 列出了高纯多晶 α -Ti 的部分重要物理性能。

与纯钛相类似,根据钛合金的晶格结构,通常将钛合金分为 α 型、 $\alpha + \beta$ 型和 β 型合金三大类。在数量众多的钛合金之中,美国的 Illinois 技术研究所 20 世纪 50 年代初开发的 Ti-6Al-4V 合金的应用最为广泛,占使用总量的 50% 以上。按相分它属于 $\alpha + \beta$ 型钛合金,是在 α 型钛合金(由 α 相稳定化元素 Al 的作用而产生)中加入少量的 β 稳定化元素(V)得到的。其力学性能如表 2 所示。

2 钛合金的分类及性能

工业纯钛在 882℃ 发生同素异构转变,常温下

3 钛合金的切削加工性^[3]

钛合金是一种典型的难加工材料,其比强度高、

表 1^[1] 高纯多晶 α -Ti (> 99.9%) 的物理性能 (25℃)

热膨胀系数 / $10^{-6}K^{-1}$	导热率 / $[W/(m \cdot K)]$	比热容 / $[J/(kg \cdot K)]$	电阻 / $10^{-9}\Omega m$	硬度 Hv	弹性模量 /GPa	剪切模量 /GPa	泊松比	β 转变温度 /℃
8.36	14.99	523	564.9	100	115	44	0.33	882

表 2 Ti-6Al-4V 钛合金的力学性能

化学成分 /% (质量)	密度 / $g \cdot cm^{-3}$	硬度/HV	杨氏模量 /GPa	屈服强度 /MPa	拉伸强度 /MPa	伸长率 /%	断裂韧性 / $MPa \cdot m^{1/2}$
Ti-6Al-4V	4.43	300~400	110~150	800~1100	900~1200	13~16	33~110

*国家自然科学基金重点项目(项目编号:50534030)
收稿日期:2008 年 5 月

导热性差、加工硬化严重;由于其化学活性大,在一定温度下与周围介质容易发生化学反应,产生脆而硬的外皮,加工时塑性和冲击韧性剧烈下降,刀具磨损和破损严重、耐用度低,加工精度和表面质量难以保证,加工效率很低。

钛合金的诸多性能中导热系数、弹性模量、加工硬化、化学活性及合金类型和显微组织等起到了主要作用,所以钛合金的切削加工存在着以下一些限制:

(1)钛合金的导热率低,约为铁的 $1/3$,阻碍了机加工过程中所产生热量的散发,且其比热低,使得切削区温升过快,在 600°C 以上时表面形成氧化硬层从而加速刀具的磨损;

(2)钛合金的弹性模量低,使已加工表面容易产生极大的回弹,特别是薄壁零件的加工回弹更为严重,易引起后刀面与已加工表面产生强烈摩擦,从而磨损刀具和崩刃。而且在回弹力的作用下会引起零件在机加工过程中偏离刀具。

(3)钛合金的硬度较低、化学活性很强,导致钛与刀具之间的产生咬合。且高温下钛极易与氧、氢、氮发生作用,使其硬度增加,塑性下降,在加热和锻造过程中形成的富氧层的机械加工困难。

所以,要成功地切削加工钛合金零件应遵循以下通用准则:

(1)工件尽可能短,并安装在夹具中以免出现振动;

(2)适当增大后角,减小前角以增大切屑与前刀面的接触长度,减小工件与后刀面的摩擦。定时刃磨刀具保持刀具的锋利,防止刀具出现磨钝后的迅速破坏;

(3)采用刚性的加工设备和夹具;

(4)切削过程采用水溶性油以及气相亚硝酸型防锈液充分、及时冷却,不仅可以迅速散热,而且能预防由于钛粉、切屑或碎片而引发的火灾;

(5)采用低的切削速度和高的进给量;切削过程中不能停止进刀,因为此时刀具与工件产生摩擦将促进刀具的污染和粘接,加速刀具的磨损;

(6)机加工前应采用喷砂处理或在含 2% 硝酸的溶液中酸洗去除硬的表面氧化皮;

不同的加工方式因其的切削特点和条件不同,在切削加工过程中必然会有不同的侧重点,所以以上通用准则也只是加工过程中的普通原则。

4 钛合金的切削加工

(1)钛合金的车削加工

钛合金的机加工工艺中,由于车削加工的切削环境容易控制所以易获得较好的表面粗糙度,加工硬化相对不严重,但切削温度高,刀具磨损快。在粗加工时,需要刀具刚性好,刀具前角、后角小。在精加工时,为得到良好的表面完整性和尺寸精度,要求刀具锋利,所以前角、后角、螺旋角要偏大些,并要求刀刃不带有倒棱或负倒棱最小。

由于钛的化学活性大,易产生表面变质污染层,导致表层硬度和脆性上升,易使刀具产生缺口、崩刃、剥落等现象,因此增加刃磨次数、延长停机时间和机床调整时间,降低生产率;另外,钛的粘刀现象严重,易产生积屑瘤,将引起工件尺寸变化,影响过盈配合的装配质量,严重时会导致零件报废。

(2)钛合金的钻削加工

相对于车削过程,钻削过程是在半封闭状态下完成的,其摩擦大、切削温度高、排屑难、钻头刚度低,它的钻削比车削更困难。所以,钻削加工钛合金时应重点考虑:钻头材料、钻头几何参数、钻削用量及冷却液等,避免在加工过程中极易出现的烧刀、崩刃、加工硬化、磨损过快等问题。

在钻削钛合金时容易生成大而薄的卷曲切屑,同时钻削热量大,容易使切屑过分堆积或粘附在钻削刃上,这是造成钻削钛合金困难的主要原因。因此,钻孔要采用短而锋利的钻头和低速强制进给,支撑支架要紧固,并要给以重复充分冷却,尤其是深孔钻削。

此外钻削过程中钻头在孔内应保持钻削状态而不允许在钻孔内空转,并应保持低而恒速的钻削速度。钻通孔要仔细,当快要钻通时,为了清理钻头和钻孔,及去除钻屑,最好退回钻头,最终破孔时采用强制进给,这样可以获得质量较高的孔。因此,钛合金钻削加工主要从以下几个方面考虑:

(1)钻头材料

根据钛合金加工特性,要求钻头材料必须具有以下特点:

(a)足够的硬度。钻头的硬度必须大于钛合金的硬度。

(b)足够的强度和韧性。由于钻头在加工钛合金时承受很大的扭转力和轴向力,因此,必须有足够的强度和韧性。

(c)足够的耐磨性。由于钛合金韧性好,要求切削时刀刃要足够锋利,因此刀具材料必须有足够的抵抗磨损能力,这样才能减少加工硬化。

(d)刀具材料与钛合金亲合能力要差。由于钛

合金化学活性高,因此要求刀具材料和钛合金亲合能力要差,以免形成扩散而造成粘刀、断钻等现象。

因此,加工钛合金的钻头既要有较高的硬度又要有很好的韧性、耐磨性,而且刀具材料与钛合金亲和能力要差。

(2) 钻头几何参数分析

钛合金的加工特性决定了传统的标准麻花钻头钻削加工钛合金时存在许多问题,主要从以下几个方面进行改进:

(a) 钻头顶角小,切削刃长,切下的切屑宽,因而钻头扭矩大,轴向抗力也大。同时,切屑卷曲成螺旋状程度大,切屑所占的空间也大,排屑不顺畅,影响冷却。

钻头顶角决定切屑宽度和钻头前角的大小。当钻头直径和进给量一定时,增大顶角,则切屑变窄,单位切屑刃上的负荷减轻。同时,钻头外圆处的刀尖角减小,减小了刀尖角的磨损速度,同时有利于散热,耐用度也得到提高。顶角对前角有很大影响,相应增大顶角有利于改善钻心处的切削条件。顶角影响切屑流出的方向。顶角较大,切屑卷曲成螺旋的程度减小,且比较平直,容易排除,即提高了排屑性能。通过分析试验,加工钛合金时,采取增大钻头顶角的方法,一般顶角的取值范围是 $135^\circ \sim 140^\circ$ 时钻削效果较好。

(b) 钻头钻心厚度小。由于钻削加工钛合金时钻头承受很大扭矩和轴向抗力。钻心厚度小,则钻头强度低,特别是小直径钻头,钻头易发生折断,需增大钻心厚度以提高钻头强度。所以要适当增加钻心厚度。钻心厚度一般为

$$K = (0.45 \sim 0.32) D$$

式中, K 为钻心厚度, D 为钻头直径。

(c) 钻头螺旋角小。螺旋角直接影响主切削刃的前角。螺旋角越大,则刀口越锋利,切削越轻快,否则会造成严重的加工硬化现象使得刀刃很快磨损。由麻花钻的外形特点可知切削刃上各点螺旋角是变化的。越靠近外圆处螺旋角越大,前角也越大,切削刃越锋利,切削性能越好。而靠近钻心处螺旋角最小,切削性能最差,可以将此处磨成球圆弧状,以改善切削条件。

随螺旋角增加,切削刃强度减弱,磨损快,甚至会发生切削刃烧毁等现象。因此合理选择螺旋角,以适合钛合金钻削加工成为关键问题。

(d) 钻头外缘处后角小,影响钻心处切削刃的前角。钻头切削刃各点上的后角也是不等的,愈接近

中心,其后角愈大。因此,钻头后角的标注和要求,都以钻头外缘处为准,增大钻头外缘处后角,可以使切削刃锋利,改善切削性能,特别是对钻心处的钻削加工有明显改善。因此,适当的改进钻头几何参数,以适合钛合金钻削加工十分重要。

(e) 选取适当的进给量。在钛合金的钻削过程中,应采用较低的切削速度,以免切削温度过高;进给量应适中,进给量过大易引起刀刃烧伤。根据实践经验,通常取进给量为 $f = 0.05 \text{ mm/r} \sim 0.15 \text{ mm/r}$,切削速度 $v = 10 \sim 30 \text{ m/min}$ 。

(3) 选用有效的冷却系统和合适的冷却液。

钻削加工钛合金时最好不用含氯的冷却液,以避免产生有毒物质和引起材料的氢脆。钻削浅孔时,可用电解切削液,其成分是:葵二酸 $7 \sim 10\%$,三乙醇胺 $7 \sim 10\%$,甘油 $7 \sim 10\%$,硼酸 $7 \sim 10\%$,亚硝酸钠 $3 \sim 5\%$,剩余为水。

钻削深孔时,尽可能不选水基切削液,在高温下切削刃上形成气泡,易产生积屑瘤,最好用 N32 机械油加煤油,配比是 $3:1.5$,也可用硫化切削液。

5 钛合金钻削的新发展

对于钛合金的加工除了传统的切削方式,近年来还陆续发展起来了一系列的新加工方法和加工工艺,这些新工艺、新方法不仅仅应用于车削、铣削,同样也大量应用于钻削加工,具体如下:

(1) 低温切削:用液氮 (-180°C) 或低温液体 (-76°C) 作为切削冷却液,将加工环境控制在低温条件下进行切削加工,可以有效地防止由于切削温度过高引起的刀具过度磨损等后果。

(2) 真空切削:在真空中加工钛合金可杜绝空气中的杂质与钛发生反应。降低刀具寿命。

(3) 惰性气体保护切削:在被加工表面创造惰性气体环境,有效隔绝空气中的杂质,与真空切削相比工艺性更好,实现更容易。

(4) 静电冷干式切削:是通过静电场装置将压缩空气离子化,由于在还原时需要急剧的吸收热量。将这样一种方法用到钛合金的切削中,将电离的空气离子经由喷嘴送至切削区,并在切削区获取足够的热量,同时使得切削区的温度迅速下降。静电冷却干式切削不仅有效降低切削区温度,更重要的是能在刀具与切屑和刀具与工件接触面上形成起润滑作用的氧化薄膜,增加刀具的使用寿命。静电冷却装置组成:电源装置、静电场装置、压力空气装置、电

颗粒增强金属基复合材料加工表面质量的研究

董小磊 高国富 马星辉

河南理工大学

摘要:颗粒增强金属基复合材料拥有比强度高、比模量高、膨胀系数低、耐磨性良好等良好的物理性能,但是由于其特殊的组织结构,导致其加工性能较差。本文从其加工表面质量方面综述了国内外颗粒增强金属基复合材料加工技术的进展情况,从传统加工和特种加工两个方面分析了几种加工颗粒增强金属基复合材料常用的加工方法,并指出当前存在的问题和不足。

关键词:颗粒, 金属基复合材料, 表面质量

Study for Machining Surface Quality of Particle Reinforced Metal Matrix Composites

Dong Xiaolei Gao Guofu Ma Xinghui

Abstract: Particle reinforced metal matrix composites (PRMMCs) possess excellent mechanical properties such as low density and very light weight with high strength, hardness and stiffness and good high wear and corrosion resistances, but its machining property is rather bad because of its specific structure. In this paper, the developing situations of machining quality for machining technology of PRMMCs are reviewed, and some machining processes for PRMMCs are analyzed from conventional machining processes and non-conventional machining processes. Also, the existing questions and deficiency are indicated.

Keywords: particles, metal matrix composites, machining surface quality

1 引言

PRMMCs 具有比强度高、比模量高、膨胀系数低、耐磨性良好等优异的综合性能,在航空、航天、汽车、微电子等工业领域具有广阔的应用前景^[1-3],近年来对 PRMMCs 的研究与应用的范围和程度也日益增大。但由于 PRMMCs 的特殊组织结构,导致其加工成为一个难题。迄今,车、钻、铣等多种传统加工

方法和电火花加工、特种焊接、激光、超声等特种加工方法都已被尝试用于 PRMMCs 零件加工^[4,5]。本文主要从加工表面质量方面对几种常用的加工 PRMMCs 的方法进行了分析综述。PRMMCs 的表面质量主要包括表面粗糙度、表面残余应力、表面金相组织变化及表面裂纹等方面。这些虽然只是产生在表面层中的问题,却在很大程度上影响着机械零件的精度、耐磨性、尺寸稳定性、配合性质的保持、抗腐蚀性和抗疲劳强度等。因此对已加工表面质量进行研究具有重要意义,本文就目前常用的加工方法对

收稿日期:2008年5月

离空气的输送系统、各部分的连接件、夹具安装框架、喷嘴等。

(5)超声波振动钻削加工^[4]。强化是指钛合金在切削过程中用刀刃在工件上用小振幅超声波振动激励进行切削的。超声波振动切削可以:减少变形区的大小和切削力;消除刀瘤;改变刀具工作面上摩擦特性;并且由于超声波振动阻尼的有效性,提高了切削过程的动态稳定性;由于超声波的毛细效应,改善了工作区冷却润滑液的进入条件,但超声波引起的交变载荷却降低了刀具的寿命。

此外,还有激光切削、电解切削(电化学切削)^[5]、电磁切削、加热切削、磨料液喷射切削、特殊热处理降低硬度切削等一系列的新加工方法。随着新加工手段和新加工工艺的发展,钛合金的加工方式不断改进,必将促进钛合金在社会各领域的广泛

发展。

参考文献

- 1 莱茵斯等编,陈振华等译.钛与钛合金.北京:化学工业出版社,2005
- 2 太原市金属切削刀具协会.金属切削实用刀具技术.北京:机械工业出版社
- 3 蔡在亘.金属切削原理.上海:同济大学出版社
- 4 司尧华等.超声波强化技术在难以加工材料中的应用.北京:机电产品开发与创新,2004
- 5 张美丽等.钛合金 TC4 电解加工表面质量的试验研究.电加工与模具,2007

第一作者:毕秀国,硕士,讲师,大连工业大学信息科学与工程学院,116034 大连市

First Author: Bi Xiuguo, Master, Instructor, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034