

航天钛合金专用立铣刀的优化设计

孟漪

上海工具厂有限公司

摘要: 钛合金材料属于难加工材料,其整体结构件在航天领域中应用广泛。在加工过程中,刀具的寿命和切削效率是影响钛合金加工的关键因素。通过对航天钛合金材料的切削性能研究,从刀具材料、刀具几何结构与刀具表面涂层等方面对航天钛合金专用立铣刀进行了优化设计。

关键词: 钛合金材料;几何结构;涂层

中图分类号: TG714;TH162

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2020.07.010

Design of End Millings Special Purpose for Aerospace Titanium Alloy

Meng Yi

Abstract: Titanium alloy is difficult-to-machining material, its monolithic components are widely used in aerospace area. The life span and the efficiency during the cutting process are the key elements in the titanium alloy machining. By studying of aerospace titanium alloy performance, the optimization design of end milling cutter for aerospace titanium alloy is given from the tool material option, the tool geometric structure and the tool coating three parts.

Keywords: titanium alloy material; geometric structure; coating

1 引言

钛合金是一种典型的难加工材料,加工时切削温度高,有一定的加工硬化,刀具磨损较快^[1,2]。在实际生产加工中,钛合金切削加工存在的主要问题是切削效率低。铣削加工是航天钛合金的主要切削方式之一,与车削、钻削等连续切削的加工方式相比,铣削加工为断续切削,铣削刀具的刀刃更易发生粘结现象,从而导致加工时刃口的粘屑被碰掉并带走刀具材料,形成刀具的微崩刃,破坏刀具的强度和寿命^[3-6]。

设计合适的刀具满足钛合金材料铣削加工特性是铣削刀具加工的关键。本文针对 TC4 钛合金材料加工特性,围绕航天钛合金专用立铣刀的材料、结构和表面涂层进行研究,设计能满足航天钛合金加工要求的专用立铣刀。

2 刀具材料

刀具的切削性能很大程度上取决于刀具材料。通常在刀具设计中,应根据具体的刀具品种并结合具体的加工对象选择合适的切削刀具材料。刀具材料应具备的基本性能主要有:硬度与强度高,材料的韧性好,同时材料又具有较强的耐磨性和耐热性。此外在材料实际使用时,还需考虑到材料的工艺性与经济性。

在航天领域中,航天用钛合金毛坯经过冲压、锻造、热轧等方法加工后,表面会形成一层不均匀且硬而脆的外皮,当刀具在切削时切到这层外皮时极易造成崩刃现象。目前,各航天企业生产现场的钛合金整体结构件的材料多采用 TC4 牌号,这类钛合金强度高,硬度大,摩擦系数大,导热系数低。由于加工钛合金的设备功率大,刀具应具有较高的强度和硬度。因此,根据生产现场的铣削加工方式与被加工钛合金材料的加工特性综合考虑,加工刀具(立铣刀)材料选用整体硬质合金。

整体硬质合金刀具是目前钛合金加工领域中应用最为广泛的一种刀具,由于其性价比高、材料导热性好、且材料具有较高的硬度和红硬性,因此目前国内许多钛合金材料加工都选用整体硬质合金刀具^[7,8]。

通常,硬质合金棒料按晶粒度的大小可分为普通硬质合金棒料、细晶粒硬质合金棒料和超细晶粒硬质合金棒料。其中细晶粒(0.5~1 μm)和超细晶粒(小于0.5 μm)硬质合金棒料,在制成刀具后,可使刀具的抗弯强度大幅度提高。在铣削加工钛合金材料时,刀具切削速度较高,硬质合金材料在切削时的切削速度以及刀具的寿命远超高速钢材料。此外,细晶粒的硬质合金棒料通常比较适合制造刃口较锋利的刀具,尤其适合加工钛合金材料这种需要高速切削且粘性与韧性较大的材料,航天钛合金零部件的加工工况符合该特性。因此,细晶粒硬质合金

材料被认为是加工钛合金比较理想的刀具材料。此次航天钛合金专用立铣刀的材料选用细晶粒硬质合金棒料,如图1所示,立铣刀选用晶粒度为 $0.6 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 的细晶粒硬质合金棒料。

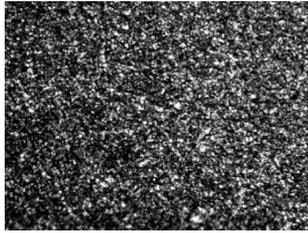


图1 细晶粒硬质合金棒料晶粒度

3 刀具几何结构

刀具几何结构设计包括刀具的基本外形尺寸以及基本截形设计,刀具的基本截形设计主要包括刀具的前角、后角、螺旋角等参数。刀具的几何结构参数关系着切屑本身、切屑与刀具、工件已加工表面与刀具三者之间的变形和相互作用,对刀具的切削性能和切削效果起非常重要的作用。根据TC4钛合金材料的切削特性,正确选择航天钛合金专用立铣刀的几何结构参数是合理设计刀具的关键,本文主要从刀具几何结构中的前角、后角和螺旋角等方面对航天钛合金专用立铣刀的几何结构进行优化设计。

3.1 前角设计

刀具前角是前刀面与基面间的夹角,如图2所示,立铣刀的前角为 γ 。刀具前角有正前角和负前角之分,而前角的大小决定着刀具在切削时的切削刃锋利程度。通常情况下,正前角可以减小切屑被切下时的弹性变形和切屑流出时与前刀面的摩擦阻力,从而可以有效减小刀具在切削时的切削负载,使刀具切削轻快且产生热量较小^[9]。但是,增大前角又会造成刀齿前刀面偏心变大,使刀齿槽底部分强度降低,在切削时容易产生崩刀;因此,如果刀具的前角过大,刀具的强度反而会降低,影响刀具使用寿命。负前角主要用在硬材料的加工中,前刀面在切削时主要为刮削,且切削量较小。

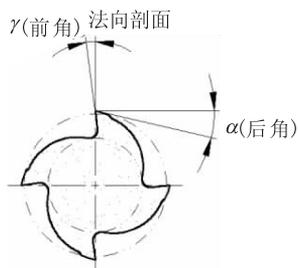


图2 整体硬质合金立铣刀的前角和后角

根据上述分析,在刀具设计时,需选择合适的前角,以保证切削刃锋利和具有足够的强度。由于钛合金材料的强度较大,因此主要考虑刀具切削刃的强度。当刀具前角选择过大时,由于被加工材料强度大,可能会使刀具出现崩刃现象,影响刀具整体寿命;但当刀具前角选择过小时,且在加工高硬度材料时,会使刀具切削阻力变大,影响刀具切削,甚至会使刀具产生无法切削的现象。因此,综合考虑上述因素,针对钛合金铣削加工,钛合金专用立铣刀可以选择正前角,正前角参考范围为 $10^\circ \sim 15^\circ$ 。

3.2 后角设计

后角是刀具后刀面与切削平面的夹角,如图2所示,此次设计的航天钛合金专用立铣刀的后角为 α 。通常,立铣刀在切削时,其后角的大小将影响刀具后刀面与被加工件表面的摩擦,从而进一步影响加工表面质量和后刀面磨损量。如图3所示, Δh 为弹性恢复层的厚度,随着后角 α 的增大,后刀面与工件接触长度 CD 逐渐变小。

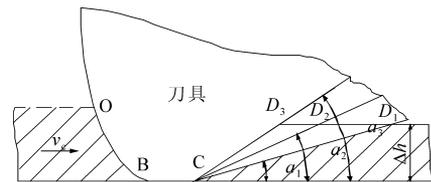


图3 后角大小与后刀面接触长度的关系

在钛合金材料加工时,后角过小会导致刀具与工件接触面积增加,增大切削阻力。考虑到钛合金材料强度较大,容易引起刀具崩刃,虽然较大的后角可使切削轻快,但如果后角选取过大,又会导致立铣刀切削刃的整体强度下降,影响刀具的耐用度。加工时,钛合金材料会出现温度过高现象,材料容易产生加工硬化,导致刀具磨损加快。因此,综合考虑钛合金材料的加工特性,针对钛合金铣削加工,钛合金专用整体硬质合金立铣刀后角 α 建议选择 10° 左右。

3.3 螺旋角设计

螺旋角 β 是指在切削平面内测量的主切削刃与基面间的夹角。如图4所示,当螺旋角 $\beta = 0^\circ$ 时,视为直角切削;如图5所示,当螺旋角 $\beta \neq 0^\circ$ 时,视为斜角切削。可见,直角切削中切削刃垂直于主运动方向,而斜角切削中切削刃不垂直于主运动方向^[10]。

立铣刀通常为螺旋槽设计,与传统直槽刀具相比,螺旋槽立铣刀在切削时是斜角切削,其刀齿在切削时逐点切入工件。与直槽刀具的直角切削相比,可以有效减小刀齿在切削时的切削力以及与被加工件的接触面积,从而提高刀具在整个切削过程中的

平稳性。但是,加大螺旋角会导致刀具前角增大,如上文所述,增大前角容易减小刀齿强度。螺旋角过大或过小都会降低刀具寿命,因此加工钛合金用立铣刀一般采用 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 的螺旋角。

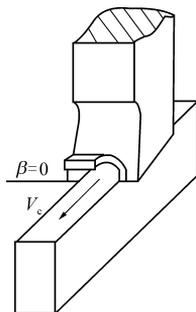


图4 直角切削

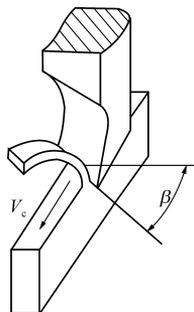


图5 斜角切削

4 刀具涂层

刀具表面涂层技术主要通过化学或物理气相沉积的方法在刀具表面获得几微米到十几微米厚的硬质膜。因其具有硬度高、润滑性好、高温性能优异等特点,而使切削刀具获得优良的综合机械性能,切削用量大幅提高,加工表面质量高,可实现高速、高效、高精加工^[11]。

根据航天钛合金材料的加工特性,基于航天钛合金专用立铣刀的精密程度,采用物理气相沉积涂层 PVD 涂层工艺技术,使用 AlCrN(氮铬铝)涂层,涂层厚度为 $2\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ 。对 AlCrN(氮铬铝)涂层做相关的物理性能与力学性能的研究分析,在研究中涂层的力学性能测试采用 Fischerscope 1000 微力学探针,金相分析采用 Rigaku D/MAX 2550 VB/PC 型旋转靶 X 射线衍射仪(XRD),采用 Cu 靶,厚度和微结构分析采用 JSM - 6460 型扫描电子显微镜(SEM),从涂层截面对断口进行分析。

图6为 AlCrN 涂层的微力学探针卸载硬度曲线。可见,最大压入载荷为40mN时,涂层卸载硬度曲线无下降,仍处于高硬度平台区。涂层的硬度为35.0GPa,弹性模量为356.2GPa。图7的XRD分析,结果表明,AlCrN 涂层为 NaCl 型的面心立方结构,主要以(200)和(111)择优取向生长。图8为 AlCrN 涂层截面断口的 SEM 形貌。由图可见,涂层以柱状晶形式生长,厚度为 $2.0\mu\text{m}$ 。

AlCrN 涂层材料中的 Al 元素可增加刀体表面的硬度,Cr 元素可增加材料表面的抗氧化性,并且能抗高温氧化。钛合金材料硬度较高且导热性差,在加工中容易使刀具与材料表面出现温度过高的现象。针对钛合金材料的加工特性,对刀具增加表面

处理,采用 AlCrN 涂层,涂层元素中的 Al 元素与 Cr 元素能增加刀具表面硬度与提高刀具表面的高温抗氧化性。通过上述研究分析可知,AlCrN 涂层适合于钛合金加工。

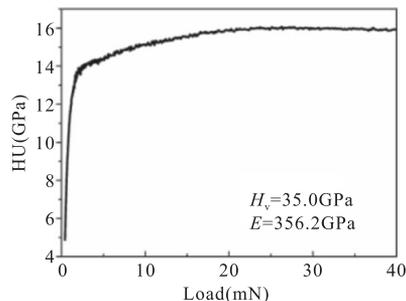


图6 AlCrN 涂层的微力学探针卸载硬度曲线

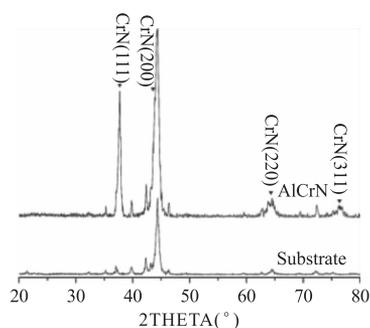


图7 AlCrN 涂层的 XRD 分析

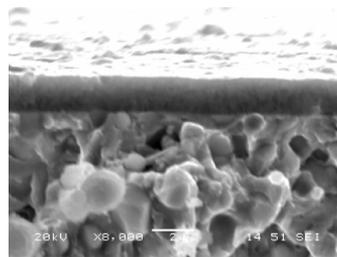


图8 AlCrN 涂层截面断口的 SEM 形貌

5 结语

(1) 航天钛合金专用立铣刀材料选用细晶粒硬质合金棒料,可满足钛合金加工需求。

(2) 航天钛合金专用立铣刀的几何结构参数应按航天钛合金材料的加工特性选取,立铣刀的前角 γ 建议选取正前角,参考范围为 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$,立铣刀后角 α 建议选取 10° 左右,立铣刀螺旋角 β 参考范围为 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 。

(3) 航天钛合金专用立铣刀表面涂层选用 AlCrN 涂层,能增加刀具表面硬度与高温抗氧化性。

参考文献

[1] 刘艳琳. 钛合金零件加工工艺方法分析[J]. 山东工业技术, 2016(5): 6.

锥度螺旋面加工用盘形刀具的轮廓解析法

胡贤金, 邱易, 杨冰

成都工具研究所有限公司

摘要: 刀具设计曲面与加工工件的锥度螺旋面接触线为一条空间几何曲线, 由此建立了刀具设计廓形的数学模型, 提出了锥度螺旋面加工刀具的廓形设计原理, 并给出了刀具设计的计算公式。

关键词: 锥度螺旋面; 刀具廓形; 解析计算

中图分类号: TG71; TH161+.12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2020.07.011

Disc Shaped Cutters Profile Analytical Method for Machining Taper Spiral Surface

Hu Xianjin, Qiu Yi, Yang Bing

Abstract: According to the principle of solid geometry, the contact line between the design surface of the tool and the taper spiral surface of the processed workpiece is a spatial geometric curve, thus a mathematical model of the tool design profile is established, and the principle of the tool contour design for machining the taper spiral surface is proposed. The calculation formula of the tool design for taper spiral surface machining is given.

Keywords: taper spiral surface; tool profile; analytical calculation

1 引言

锥度螺旋面广泛应用于刀具设计中, 如锥度螺旋立铣刀、锥度蜗轮滚刀和锥度螺旋铰刀等都与锥度螺旋面密切相关。使用传统的作图法设计误差偏大, 不能满足设计精度要求, 而采用计算机辅助设计的方法可大幅提高刀具轮廓精度。

在加工锥度螺旋面过程中, 刀具轴线与工件轴线形成一个夹角, 刀具相对于工件作锥度螺旋方向运动的同时, 刀具回转直径按一定速率增大, 最终完成整个锥度螺旋面的加工。

如图1所示, 由刀具设计的截形通过回转加工得到工件锥度螺旋面, 工件和刀具沿与空间曲线相切的方向作相对运动, 两者无瞬心包络形成一条三维接触线, 将其绕刀具轴线旋转一周, 即可形成所需的刀具三维设计模型。

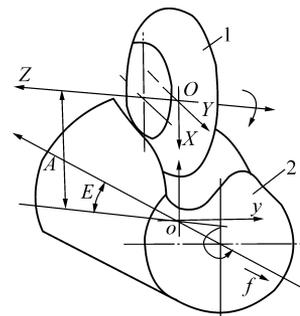


图1 盘形刀具加工锥度螺旋面

基金项目: 高档数控机床与基础制造装备科技重大专项(2019ZX04007-001)复杂数控刀具创新能力平台建设
收稿日期: 2020年4月

- [2] 陈五一, 袁跃峰. 钛合金切削加工技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2010(15): 26-30.
- [3] 华南工学院, 甘肃工业大学. 金属切削原理及刀具设计[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [4] 袁哲俊, 刘华明. 刀具设计手册[K]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [5] 耿国盛. 钛合金高速铣削技术的基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [6] 韩荣第, 于启勋. 难加工材料切削加工[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [7] 杨发展, 艾兴, 赵军, 等. 细晶粒硬质合金刀具铣削钛合金损坏机理的研究[J]. 工具技术, 2008, 42(4): 12-14.
- [8] 程剑兵. 钨钴类超细硬质合金刀具及其切削性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [9] 张洪洲. 钛铈切削加工专用刀具的开发及应用. 上海: 上海交通大学硕士论文, 2010.
- [10] 顾立晨, 孟漪, 马哲斌, 等. 航空钛合金加工专用高速钢设计[J]. 工具技术, 2019, 53(9): 67-70.
- [11] 陈云. 镍铬合金耐蚀油套管专用螺纹刀具关键技术的研究. 上海: 上海交通大学博士论文, 2017.
- 作者: 孟漪, 高级工程师, 上海工具厂有限公司, 200093 上海市
Author: Meng Yi, Senior Engineer, Shanghai Tool Works Co., Ltd., Shanghai 200093, China