

# 钛合金切削加工技术研究

王勇 戚保凯 高帅 刘全  
北京航天爱锐科技有限责任公司 北京 100076

**摘要:** 在航天、航空领域,钛合金用于制造飞机结构件和发动机部件,可大幅减轻飞行器重量、提高燃烧效率;在医疗领域,其良好生物相容性适用于人体植入物。在化工领域也被广泛应用于制造反应容器和管道系统。本文深入研究钛合金切削加工技术,分析材料特性对加工影响,探讨切削机理,阐述刀具选择设计、工艺参数优化、冷却润滑和表面完整性控制等技术要点,旨在提高钛合金切削加工效率与质量,推动其在高端制造业更广泛地应用。

**关键词:** 钛合金;切削加工技术;工艺参数优化;表面完整性

## 引言

钛合金凭借低密度、高比强度、良好耐腐蚀性和生物相容性等卓越性能,在高端制造业中占据重要地位,钛合金切削加工技术的研究与发展对高端制造业发展升级意义重大。然而,钛合金切削加工面临诸多挑战,如导热性差导致切削热积聚、化学活性高易与刀具反应、弹性模量低使工件易变形等,致使刀具磨损严重、加工精度和表面质量难以保证。深入研究钛合金切削加工技术,对提高钛合金加工效率、降低成本、拓展应用范围具有重要意义。

## 1 钛合金特点

### 1.1 钛合金的材料特性

钛合金具有独特物理、化学和力学特性。物理特性方面,密度约为 $4.5\text{g/cm}^3$ ,仅为铁的60%左右,熔点高达 $1668^\circ\text{C}$ ,热导率低,约为铁的1/5至1/7。化学特性上,钛合金在高温下化学活性极高,易与空气中氧、氮、氢等元素发生反应,形成硬脆化合物,影响材料性能。力学特性表现为高强度和硬度,抗拉强度可达 $800\sim 1200\text{MPa}$ ,同时弹性模量相对较低,约为钢的一半。此外,钛合金还具有良好的耐腐蚀性能,尤其在海水和氯化物环境中表现出色。此外,其耐高温性能优异,能在高达 $500^\circ\text{C}$ 的环境下保持机械性能稳定。钛合金的这些特性使其成为制造飞机、火箭发动机部件以及深海探测设备的理想材料。

### 1.2 钛合金切削加工特点

钛合金的材料特性一方面影响了其使用范围,另一方面又对其生产中的切削加工有着显著的影响。首先,由于钛合金的导热性较差,切削过程中产生的热

量难以快速散发出去,导致热量在切削区域集中,从而使切削温度急剧升高,甚至可以达到 $1000^\circ\text{C}$ 以上。这种高温环境会加速刀具的磨损,从而降低刀具的使用寿命。其次,钛合金材料的化学活性较高,在高温高压的切削条件下,刀具与工件材料之间容易发生化学反应,这种反应会加剧刀具的粘结磨损和扩散磨损,进一步影响刀具的性能<sup>[1]</sup>。最后,材料的弹性模量较低,这意味着在切削力的作用下,工件容易产生变形,从而影响加工的精度。这种变形在薄壁件和细长轴的加工中表现得尤为明显,给钛合金的精密加工带来了挑战。因此,在切削加工过程中必须予以充分考虑,以确保加工质量和刀具的使用寿命。

## 2 钛合金切削加工机理

### 2.1 切屑形成机制

钛合金在切削过程中,刀具与材料之间的摩擦力较大,容易产生高温。这导致切屑在形成过程中会经历塑性变形和断裂两个阶段,从而形成不规则的切屑。在较低切削速度和进给量下,易形成连续切屑,但钛合金的高应变硬化特性使切屑变形困难,切削力增大。随着切削速度提高和进给量增加,切屑形态转变为锯齿状。这是因为钛合金在高温下发生绝热剪切行为,材料局部快速软化和剪切变形,形成周期性剪切带,导致切屑呈锯齿状。锯齿状切屑的形成使切削过程不稳定,产生较大振动和冲击,进一步影响加工表面质量和刀具寿命。为了有效控制切屑,通常需要采用特殊的切削参数和刀具设计,并及时排出切削时产生的热量,以实现高效、精确的加工。

### 2.2 切削力和切削温度

切削力源于工件材料的弹塑性变形抗力和刀具与工件间的摩擦力。钛合金高强度和低弹性模量使其切削力较大,约为普通钢材的1.5~1.2倍。切削力随切削参数

**通讯作者:** 白亚群,1990年10月,硕士,工程师。研究方向机械制造,工艺技术,数控加工技术。

变化,切削深度增加时,切削力近似线性增大;进给量增大时,切削力也显著增加;切削速度对切削力影响较复杂,在中低速范围内,切削速度增加,切削力略有减小,高速时切削力可能增大。

切削温度主要由切削层金属变形功和刀具与工件、切屑间摩擦功转化而来。钛合金导热性差,切削热难以扩散,集中于切削刃附近,使切削温度迅速升高。切削温度随切削速度提高呈指数增长,进给量和切削深度增加也会使切削温度上升<sup>[2]</sup>。切削温度过高加速刀具磨损,降低工件材料力学性能,影响加工精度和表面质量。

### 2.3 刀具磨损机理

刀具磨损是钛合金切削加工中的关键问题。主要磨损机理包括磨粒磨损、粘结磨损、扩散磨损和氧化磨损。磨粒磨损是由于钛合金材料中存在一些硬质点,以及在切削过程中产生的硬颗粒切屑,这些硬颗粒在高温高压的切削条件下,会对刀具的表面产生剧烈的刮擦作用,从而导致磨粒磨损的发生。其次,粘结磨损则是在高温高压的切削环境下,钛合金材料与刀具材料之间发生粘结现象,当粘结点在切削过程中被撕裂时,会带走一部分刀具材料,从而导致粘结磨损。再者,扩散磨损是在切削温度升高的情况下,刀具材料和工件材料中的元素相互扩散,这种扩散作用会改变刀具表面的化学成分和组织结构,进而导致扩散磨损的发生。最后,氧化磨损是在高温条件下,刀具表面与空气中的氧发生氧化反应,形成一层氧化膜,当这层氧化膜在切削过程中脱落时,就会导致氧化磨损。这些磨损机理在实际的切削过程中往往是相互作用、相互影响的,它们共同加速了刀具的失效过程,最终导致钛合金加工成本的增加。因此,了解和掌握这些磨损机理,对于提高钛合金切削加工的效率 and 降低成本具有重要的意义。

## 3 钛合金切削加工关键技术

### 3.1 钛合金切削刀具的选择与设计

钛合金材料强度高、硬度大且化学活性高,在切削时对刀具产生强大抗力,高温下还易与刀具发生化学反应,加快刀具磨损与腐蚀,降低其使用寿命。刀具选择与设计首先要关注刀具材料的评估与选择。硬质合金刀具硬度和耐磨性好,适用于钛合金粗加工和半精加工,但韧性低,高速切削易崩刃;高速钢刀具韧性强、可加工性好,常用于低速精加工,不过耐热性差,切削温度升高时其硬度和强度下降,限制切削速度,影响加工效率;陶瓷刀具高硬度、高耐磨性且化学稳定性好,适合高速切削钛合金,但脆性大,对切削条件和机床刚性要求高,否则易破损;立方氮化硼刀具硬度和耐热性、化

学稳定性都极为优异,是钛合金精密切削和高速切削理想选择,却因成本高、刃磨困难限制了大规模应用。

刀具的几何参数对钛合金切削加工过程同样影响显著。刀具前角影响切削力、温度和刀具强度,适当增大前角可降低切削力,但过大则削弱刀具强度;后角主要减少刀具与工件摩擦,过小会加剧磨损,过大影响刀具强度和散热;刃倾角影响切屑流向和刀具切入切出平稳性,合理选择可改善加工表面质量;刀尖圆弧半径影响刀具强度和切削力分布,增大它可提高刀具强度,但可能增大切削力和表面粗糙度,针对钛合金切削特点需综合考虑这些因素,平衡切削力、刀具寿命和加工表面质量。最后是注意刀具涂层技术的应用,涂层技术通过涂层在刀具表面形成薄膜,减少刀具磨损,以应对钛合金切削加工对刀具的严苛要求。常见涂层材料如TiN涂层硬度高、耐磨性好,能降低刀具与工件摩擦系数;TiC涂层高硬度和良好耐磨性可提高抗月牙洼磨损能力;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>涂层化学稳定性高、抗氧化性强,适用于高温切削;金刚石涂层硬度极高、摩擦系数低,在钛合金精加工中表现出色。

### 3.2 钛合金切削工艺参数优化

切削工艺参数对钛合金加工的效率、质量、刀具寿命和生产成本均有重大影响。工艺参数直接影响表面粗糙度、加工硬化程度和残余应力等表面质量指标以及尺寸精度,不当参数会致工件表面缺陷和尺寸偏差,优化参数可使切削更平稳、控制变形和余量以提高质量。切削工艺参数决定切削力和温度大小,同时优化参数将有效延长刀具寿命,降低刀具成本,加快生产周期,提高生产能力。

切削速度对钛合金切削加工的影响颇为复杂。低速切削时,刀具会遭受严重磨损,加工表面质量低劣;随着切削速度的提升,切削温度升高,刀具磨损加剧,不过在特定速度区间内,能得到较好的加工表面质量,然而过高的切削速度会引发刀具急剧磨损,甚至导致刀具失效。进给量方面,其增大时,切削力与切削功率随之增加,使得加工表面粗糙度增大,刀具磨损也加快。而切削深度增加会显著增大切削力,这不仅对刀具强度和机床刚性提出更高要求,同时还会对加工表面质量和加工效率产生影响。在此基础上,为达成钛合金切削工艺参数的优化,可借助遗传算法、粒子群优化算法等先进手段。具体而言,以加工效率、加工质量和刀具寿命作为优化目标来构建目标函数。同时,全面考量切削力、切削温度、刀具磨损等约束条件,从而建立起完善的优化模型。通过这些优化算法对切削速度、进给量和切削

深度等参数展开寻优，以此确定最佳参数组合。例如在运用粒子群优化算法时，将切削参数视作粒子位置向量，把加工性能指标当作适应度函数，经迭代计算来寻找最优解。如此优化后的工艺参数，能够显著提高钛合金切削加工的综合性能，进而降低生产成本，为钛合金加工切削技术的发展提供有力支持。

### 3.3 钛合金切削冷却润滑技术

钛合金导热性差，切削时刀具热量难散发，高温会加速刀具磨损，冷却润滑技术能有效带走热量，降低刀具温度，减少磨损，提高其耐用性，同时可防止因温度过高降低材料强度，导致的工件变形，保证加工精度<sup>[1]</sup>。其次，切削产生的摩擦会增加切削力、耗能并降低效率，还会使工件表面产生缺陷，冷却润滑液形成的润滑膜可减小摩擦系数，降低切削力，使切削更顺畅。再者，钛合金高温下易与刀具粘结产生积屑瘤和粘刀现象，影响切削稳定性和工件表面质量，冷却润滑技术可降低温度、减少粘结，抑制积屑瘤和粘刀。此外，冷却润滑技术能通过减少刀具磨损延长其寿命，降低刀具更换频率和成本。最后，冷却润滑技术可降低切削温度，减少因高温和摩擦引发火灾等安全事故的风险，提高加工安全性。

传统切削液在钛合金切削中广泛应用，其主要作用是冷却和润滑。通过吸收和带走切削热，降低切削温度，减少刀具磨损；在刀具与工件、切屑间形成润滑膜，减小摩擦系数。然而，传统切削液存在诸多问题。大量使用切削液增加生产成本，且切削液处理不当会造成环境污染。此外，在钛合金切削中，切削液可能渗入工件材料表面，引发微裂纹等缺陷，影响工件表面质量和性能<sup>[4]</sup>。微量润滑（MQL）技术是一种新型冷却润滑方式，将微量润滑液以雾状形式喷射到切削区域，具有冷却和润滑效果，可减少切削液用量，降低成本，减轻环境污染。低温冷却技术，如液氮冷却和液态二氧化碳冷却，利用低温介质降低切削温度，提高刀具寿命和加工表面质量，但设备成本较高，对操作要求严格。高压冷却技术通过高压喷射切削液，增强冷却效果，有效冲走切屑，适用于钛合金深孔加工等场合。这些新型冷却润滑技术为钛合金切削加工提供了更多选择，但在实际应

用中仍需进一步优化和完善。

### 3.4 钛合金切削加工表面完整性控制

良好表面完整性对钛合金零件性能至关重要。加工表面完整性涵盖表面粗糙度、表面形貌、残余应力、微观组织变化等多个方面。表面粗糙度影响零件摩擦磨损性能、密封性能和疲劳强度；残余应力状态影响零件尺寸稳定性和抗疲劳性能，残余拉应力可能降低零件疲劳寿命，残余压应力则有助于提高疲劳强度；微观组织变化可能改变零件力学性能和耐腐蚀性能。

切削参数是影响钛合金切削加工表面完整性的重要因素。具体而言，较低切削速度和进给量有助于降低表面粗糙度，适当选择切削深度可控制残余应力大小和分布。同时，锋利刀具可获得较好表面质量，合适刀尖圆弧半径和刃倾角可减小表面粗糙度和残余应力。此外，冷却润滑方式影响切削温度和刀具磨损，进而影响表面完整性，合理选择冷却润滑技术可改善表面质量。通过优化切削加工工艺，可有效控制钛合金加工表面完整性，提高零件使用性能。

### 结语

钛合金切削加工技术的研究与发展对高端制造业意义重大。通过深入了解钛合金材料特性，剖析切削加工机理，通过优化刀具选择设计、工艺参数、冷却润滑和表面完整性控制等方面，可有效提高钛合金切削加工性能。尽管目前仍面临诸多挑战，但随着新型刀具材料、先进加工工艺和智能化控制技术的应用，钛合金切削加工将实现更高效率、更高质量和更环保的目标。

### 参考文献

- [1]王正东,蔡霞,杨嵩.钛合金冷切削加工实践研究[J].四川冶金,2023,45(05):60-63.
- [2]盛鑫.钛合金切削性能及工艺参数多目标优化研究[D].导师:侯力;王少江.四川大学,2022.
- [3]周知进,王宗正,林家祥,等.钛合金切削加工研究现状及发展趋势[J].工具技术,2022,56(10):3-11.
- [4]孙敏.钛合金材料及其加工刀具参数选择[J].内蒙古科技与经济,2022,(17):110-111+153.