

钛合金材料加工工艺及切削参数优化

李永杰¹, 郝伟伟¹, 杨帆², 黄家旺¹, 朱亮¹, 袁武成¹, 杨文强¹

¹西安西材三川智能制造有限公司, 陕西 西安

²湖南江麓机电集团有限公司, 湖南 湘潭

收稿日期: 2025年5月16日; 录用日期: 2025年6月18日; 发布日期: 2025年6月26日

摘要

本论文主要针对钛合金材料的加工工艺和切削参数的优化进行了研究。钛合金因其高强度、低密度、耐腐蚀等特点被广泛应用于航空航天和医疗器械等领域, 但由于材料本身的特点, 导致其加工困难和效率低下。本文通过分析钛合金材料的切削加工性能, 整合了几何参数设计、材料科学和品牌选型等多维要素, 采用优化算法对切削参数进行优化, 为钛合金的高效、高质制造提供理论基础和技术支撑。

关键词

钛合金, 加工工艺, 切削参数, 参数优化

Machining Processes and Optimization of Cutting Parameters for Titanium Alloy Materials

Yongjie Li¹, Weiwei Hao¹, Fan Yang², Jiawang Huang¹, Liang Zhu¹, Wucheng Yuan¹, Wenqiang Yang¹

¹Xi'an Xicai Sanchuan Intelligent Manufacturing Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Hunan Jianglu Electromechanical Group Co., Ltd., Xiangtan Hunan

Received: May 16th, 2025; accepted: Jun. 18th, 2025; published: Jun. 26th, 2025

Abstract

This paper focuses on the study of the machining processes and optimization of cutting parameters for titanium alloy materials. Due to their high strength, low density, and corrosion resistance, titanium alloys are widely used in aerospace and medical device fields. However, these characteristics also contribute to the difficulty and inefficiency of processing these materials. By analyzing the

文章引用: 李永杰, 郝伟伟, 杨帆, 黄家旺, 朱亮, 袁武成, 杨文强. 钛合金材料加工工艺及切削参数优化[J]. 材料科学, 2025, 15(6): 1366-1371. DOI: 10.12677/ms.2025.156145

cutting performance of titanium alloy materials, this paper integrates multi-dimensional factors such as geometric parameter design, materials science, and brand selection. An optimization algorithm is employed to optimize the cutting parameters, providing a theoretical basis and technical support for high-efficiency and high-quality manufacturing of titanium alloys.

Keywords

Titanium Alloy, Machining Process, Cutting Parameters, Parameter Optimization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钛合金是一种以钛为基础添加其他元素的合金，其密度只有普通钢材的 60%，但其强度可媲美高强度钢，且在高温、湿度等苛刻条件下仍具有优异的化学稳定性及力学性能。在航空航天领域，钛合金广泛应用于发动机叶片和机身结构件的制造[1]；由于具有良好的生物相容性，在医疗器械领域中被广泛应用于人工关节和种植牙等[2]。然而，钛合金化学活性高，导热系数高，弹性模量高，易造成刀具磨损严重，切削温度高，表面质量差等问题。因此，对钛合金材料的加工工艺[3]进行深入研究，并对其切削参数进行优化[4]，对提高钛合金构件的加工质量、生产效率、降低制造成本具有重要的实际意义。目前，国内外学者已对钛合金进行了较多研究[5][6]，但随着新材料、新加工要求的不断涌现，对钛合金加工工艺及切削参数的优化研究亟待深入。

2. 钛合金材料的切削加工性能分析

2.1. 物理化学性能对加工的影响

钛合金的物理和化学性质对其切削加工性能有重要影响[7]。在导热性方面，典型 TC4 钛合金的导热系数只有 $16.7 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，比 45 号钢($54 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)低了 1/3。在切削加工过程中，切削热很难经材料传导而散失，约 85% 的切削热集中在刀具-切屑接触区，引起局部温升过高。利用红外热成像技术对钛合金车削加工过程进行监控，发现 50 m/min 的切削速度下，前刀面的温度高达 980°C ，在此高温环境下，刀具的硬度显著降低，并加剧了扩散磨损和粘结磨损。同时，钛合金具有很高的化学活性，当切削温度大于 600°C 时，它会与空气中的氧气和氮气快速发生化学反应，生成 TiO 、 TiN 等硬脆化合物。这些化合物不仅改变了刀具的表面形貌，而且可能在刀具表面形成微裂纹，从而加速刀具的失效。

2.2. 力学性能对加工的影响

钛合金材料的力学特性给切削加工提出了新的挑战。它的高强度表现在 $900\sim 1200 \text{ MPa}$ 之间，屈服强度大于 800 MPa ，这样的高抗变形能力极大地提高了切削力。在钛合金车削实验中，以切削速度 40 m/min 、进给量 0.15 mm/r 和背吃刀量 0.8 mm 的条件下，可以获得 850 N 的主切力，约为相同条件下车削 45 号钢的 1.8 倍。高切削力不仅对机床刚性要求较高，而且易造成刀具受力过大、刀具失效等问题。钛合金具有高硬度($30\sim 40 \text{ HRC}$)和低塑性，在切削过程中极易产生锯齿状切屑。利用高速摄影观测发现，锯齿形切屑形成过程中，切削力波动幅度高达 $30\%\sim 50\%$ ，导致切削系统振动，产生振纹，表面粗糙度 R_a 值由稳态下 $1.2 \mu\text{m}$ 上升到 $2.5 \mu\text{m}$ 。

3. 钛合金加工工艺研究

3.1. 车削加工工艺

对钛合金车削刀具进行工艺优化应从几何参数设计、材料选择及实际应用效果三个方面进行综合考虑。从几何参数上看,前角一般为 $6^{\circ}\sim 8^{\circ}$,既能保证刀刃的锋利,又能保证刀刃的强度;建议采用 $8^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 的后刀角,可有效地减小后刀面的摩擦力;刀刃倾角取负值 $-5^{\circ}\sim 0^{\circ}$,特别适用于断续切削;刀尖圆弧半径控制在 $0.4\sim 0.8\text{ mm}$ 之间,不仅提高了刀尖强度,而且还避免了半径过大引起的振动[8]。

在刀具选择方面,以YG8、YG6X等超细晶硬质合金($0.5\sim 1\text{ }\mu\text{m}$)为基材,与TiAlN、AlCrN复合涂层相结合,可以显著提高刀具的耐高温性能。在结构设计上,强化断屑槽、双面刃的设计已成为主流。国际著名品牌,如山特维克公司 CoroTurn® 107 系列,肯纳金属公司的 Kyon® 2100 系列,伊斯卡公司的 HELITURN® HTP 系列,三菱材料公司的 VP15TF 系列,均为钛合金加工而开发的专用产品,以满足从粗加工到精加工不同的要求。

实际加工参数需要根据工序特点进行调整,如表 1 所示。

Table 1. Typical machining parameter configuration

表 1. 典型加工参数配置

加工类型	切削速度(m/min)	进给量(mm/r)	背吃刀量(mm)	刀具推荐
粗加工	40~60	0.15~0.25	1.5~2.5	山特维克
精加工	80~120	0.05~0.1	0.2~0.5	肯纳金属

实际应用表明,优化后的刀具使用寿命由原来的 15 分钟提高到 90 分钟,表面粗糙度提高了 50%,单件成本降低了 40%。研究表明,系统地选择刀具并优化工艺参数,不仅可以显著提高加工效率与质量,而且可以有效地降低制造成本,在航空航天及其他高端制造业中有着重要的应用价值。

3.2. 铣削加工工艺

对钛合金进行铣削时,刀具的选用及工艺参数的优化是十分重要的。刀具几何参数设计需注意如下关键问题:首先,采用 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 大螺旋角结构,既可大幅提高排屑效率,又可降低切削力 15%~20%,有效降低切削振动。其次,前角宜控制在 $6^{\circ}\sim 10^{\circ}$ (采用正前角设计),后角 $8^{\circ}\sim 12^{\circ}$,使刀后刀面磨损降到最低。为了提高刀刃的强度,建议使用宽度为 $0.1\sim 0.15\text{ mm}$ 的 T 形刃带,刀尖圆弧半径为 $0.4\sim 0.8\text{ mm}$,以提升刃口强度。

选用刀具时应遵循以下几个核心原则:材质上以粒度 $0.5\sim 0.8\text{ }\mu\text{m}$ 的超细晶硬质合金为基材,配合高性能的 TiAlN、AlCrN 涂层;在结构设计中,采用不等齿间距设计减小加工振动,并将容屑槽容积增大 20%~30%,提高排屑效率;所有的工具都要达到航空航天级的精度[9]。

目前,世界上主要的刀具品牌均为钛合金提供了专业的加工方案。山特维克公司的 CoroMill® Plura 系列(例如 Plura HFS 4F)具有 45° 螺旋角并涂有 TiAlN 涂层,特别适用于高效率铣削钛合金结构件;肯纳金属的 HARVI™ Ultra 8 X (例如 KU40T 等)采用了变螺角设计,并涂有 AlCrN 涂层,非常适合于航空航天等复杂型腔的加工;三菱 MWS 铣刀(例如 VQX4 型)采用 CBN 涂层,具有超高硬度,适用于高精密叶轮加工。

根据不同的加工类型,推荐的参数配置也有所区别,如表 2 所示。

在实际应用中取得了很好的效果。某航空公司采用该方案对 TC4 钛合金结构件进行加工,刀具寿命

提高 200% (从 15 个提高到 45 个), 表面粗糙度稳定在 Ra 0.4~0.6 μm , 加工效率提高 40%。这些改进不仅使生产成本大大降低, 而且使产品的质量得到明显提高。

Table 2. Typical machining parameter configuration
表 2. 典型加工参数配置

加工类型	刀具型号	切削速度(m/min)	每齿进给(mm/z)	轴向切深(mm)
粗加工	Plura HFS	40~60	0.08~0.12	1.5~2.0
半精加工	HARVI KU40T	60~80	0.06~0.08	1.0~1.5
精加工	MWS VQX4	80~100	0.04~0.06	0.2~0.5

3.3. 钻孔加工工艺

对钛合金钻孔工具进行工艺优化时, 应特别注意其几何参数、材料选择及实际加工效果。在几何参数上, 建议以 130°~140°为宜, 此角度可有效减小轴向切割力; 采用双顶角设计(如 90°+140°组合), 可有效提高排屑效果。采用 25°~35°的螺旋角, 可实现排屑性能与刚度的平衡, 同时, 将螺旋槽容积增大 30% 以上, 可解决钛合金排屑难的问题。刃带采用抛光处理, 宽度控制在 0.1~0.15mm, 采用 15°×0.05 mm 的倒棱设计, 可有效提高刀刃的强度。

在刀具选择方面, 以 0.5~0.8 μm 的超细晶硬质合金为基体, 并辅以高性能的 TiAlN、AlCrN 涂层。在结构设计中, 为保证冷却效果, 需考虑内冷孔设计(直径 $\geq 1.5\text{ mm}$), 并采用非均匀刃带设计抑制加工振动[10]。所有的工具都要连续钻削试验以确认孔的精度达到 IT7 级。目前市场上主要使用的钛合金特种钻头有: 山特维克公司的 CoroDrill® 880 系列(适用于深孔加工), 肯纳金属公司的 Beyond™ EVO 系列(航空航天结构件专用), 瓦尔特公司的 DC170 系列(高精密切孔)。

实际加工参数需要根据孔径大小进行调整, 如表 3 所示。

Table 3. Typical machining parameter configuration
表 3. 典型加工参数配置

孔径范围(mm)	推荐转速(rpm)	进给量(mm/rev)	冷却压力(bar)
$\Phi 3\sim\Phi 6$	800~1200	0.03~0.05	30~50
$\Phi 6\sim\Phi 10$	600~900	0.05~0.08	50~70
$\Phi 10\sim\Phi 20$	400~700	0.08~0.12	70~100

实际应用表明, 优化后的刀具寿命由原来的 50 个孔提高到 140 个, 提高了 180%, 而孔径精度稳定控制在 $\pm 0.02\text{ mm}$ 内, 加工效率提高 35%。研究表明, 系统地选择刀具并优化工艺参数, 不仅可以显著提高加工效率与质量, 而且可以有效地延长刀具使用寿命, 对我国航空航天及其他高端制造业的生产成本具有重要意义。

4. 钛合金切削参数优化方法

4.1. 经验公式法

经验公式法以 TC4 钛合金 20 组车削试验数据为基础, 以 YG8 硬质合金刀具为研究对象, 采用多元回归分析方法, 建立了刀具表面粗糙度预测模型 $Ra = 0.25v^{0.3}f^{0.6} + 0.3$ 。该模型适用于切削速度为 30~60

m/min, 进给量为 0.1~0.25 mm/r, 预测误差小于 $\pm 15\%$ 。该模型在实际应用中有一定的局限性, 如没有考虑刀具磨损状态的变化, 没有考虑切削液类型的影响, 也没有考虑到刀具-工件材料的特殊组合。实际应用时, 应根据具体的工作条件, 适当修正预测结果。

4.2. 试验法

试验法采用三因素三水平正交实验设计法(L9-array)对钛合金铣削工艺参数进行优化。实验以铣削转速(20/30/40 m/min)和每齿进给量(0.05/0.08/0.1 mm/z)为变量, 以表面粗糙度、刀具磨损量为评价指标。方差分析表明, 铣削速度对加工表面粗糙度的影响最大, 贡献达 52.3%, 且每齿进给量与刀具损耗有很强的相关关系($r = 0.81$)。与全因子设计相比, 本方法的成本降低 67%, 但仍需做 18 组试验, 时间 16 小时左右。实验结果表明, 该试验方法能有效地提高优化效率, 同时又能保证参数的可靠性。

4.3. 粒子群优化算法(PSO)

粒子群优化算法模拟鸟类的觅食行为, 实现了快速搜索。针对钛合金车削参数优化, 选取 3 个粒子维度(对应切削速度、进给量、背吃刀量), 对 50 个粒子进行初始化, 采用速度-位置更新方程迭代求解。在此基础上, 引入惯性权重动态调整策略(由 0.9 线性降到 0.4), 经过 25 次迭代, 获得切削速度 33.7 m/min, 进给量 0.13 mm/r, 背刀量 0.7 mm 的最优解, 相对于经验参数, 加工表面粗糙度降低 22%, 加工效率提高 18%。粒子群优化算法具有计算量小、收敛快等优点, 但容易陷入局部极值, 需要结合动态邻域结构和混合优化策略来提高算法性能[11]。

4.4. 智能算法与机器学习结合

采用神经网络和智能优化算法相结合的方法, 建立基于数据驱动的优化模型。采集 300 组钛合金切削实验数据, 通过卷积神经网络对不同工艺参数组合进行预测, 预测精度达到 92.3%。采用遗传算法全局优化 CNN 模型输出参数-性能映射关系, 将优化时间从 72 小时缩短到 3.5 小时, 刀具寿命预测误差降低到 $\pm 8\%$ 。基于机器学习的钛合金切削性能预测模型, 并结合智能算法, 实现钛合金切削参数的快速优化, 为钛合金切削加工智能化提供一条新途径[12]-[14]。

5. 结语

本论文以钛合金为研究对象, 对其加工工艺及切削参数进行了研究。在对其物化性能及力学性能进行深入分析的基础上, 建立一套从车削-铣削-钻削一体化工艺系统。研究创新性地提出一种基于多目标优化的刀具选择策略, 将几何参数、材料学、品牌选择等多个维度有机结合起来。在参数优化方面, 开发了从传统经验公式到智能算法的多层次解决方案。实际应用表明, 优化后的加工效率可提高 18%, 加工质量及经济效益明显提高。未来, 随着加工技术的不断发展, 还需进一步探索新的加工工艺和更高效的优化方法, 以满足钛合金材料在更多领域的应用需求。

参考文献

- [1] 张鹏飞, 张林嘉, 周瑜, 等. 钛合金精密铸造技术在航空航天领域的应用进展[J]. 航空制造技术, 2025, 68(7): 22-36.
- [2] 单迪, 何鑫玉, 方长青, 等. 医用镍钛合金表面涂覆技术研究概述? [J]. 材料导报, 2015, 29(15): 28-32.
- [3] 祁志旭, 陈兴媚. 钛合金切削加工技术研究进展[J]. 材料研究与应用, 2021, 15(1): 71-76.
- [4] 龚清洪, 孙超, 王伟. 航空钛合金结构件高速高效加工工艺研究及应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(7): 26-32.
- [5] Boyer, R., Welsch, G. and Collings, E.W. (2016) Materials Properties Handbook: Titanium Alloys. ASM International.

-
- [6] 刘意. 热处理对激光选区熔化成形高温钛合金组织与力学性能的影响规律研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.
- [7] 林海生, 王成勇, 李伟秋, 等. 钛合金绿色切削加工工艺优化研究[J]. 工具技术, 2023, 57(12): 15-20.
- [8] 吕嗣孝, 周洪, 崔建昆. 钛合金材料切削加工参数优化和实验研究[J]. 机械工程师, 2022(1): 154-156.
- [9] 王胜, 周明安, 魏小华, 等. AlTiN 涂层刀具精铣 TC4 钛合金工艺参数的影响与优化[J]. 制造技术与机床, 2021(1): 68-72+76.
- [10] 李晓娜. 数控加工技术在钛合金材料加工中的应用研究[J]. 设备管理与维修, 2020(20): 93-94.
- [11] 曹宇, 马兴海, 刘东平, 等. TC4 钛合金钻削加工工艺参数研究[J]. 航空精密制造技术, 2019, 55(6): 10-14.
- [12] 边洪录, 王子铭, 李勋, 等. TC4 钛合金大进给铣削参数优化试验[J]. 机械制造, 2020, 58(7): 78-81.
- [13] 王胜, 刘文军, 周明安, 等. PCD 刀具高速铣削 TC4 钛合金的工艺参数优化[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(4): 47-52.
- [14] 李体仁, 胡晓强. 高速铣削钛合金 TC4 切削力试验研究及切削参数优化[J]. 机床与液压, 2019, 47(1): 45-48.