



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2507366

引用格式:周向葵,王强,吴深,等.钛合金铣削过程中切削参数应用及优化综述[J].科学技术与工程,2026,26(27):11543-11553.

Zhou Xiangkui, Wang Qiang, Wu Shen, et al. Review of application and optimization of cutting parameters in titanium alloy milling[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(27): 11543-11553.

矿冶工程

钛合金铣削过程中切削参数应用及优化综述

周向葵¹, 王强¹, 吴深¹, 李鑫¹, 王凯²

(1. 郑州轻工业大学河南省机械装备智能制造重点实验室, 郑州 450002;

2. 东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110819)

摘 要 钛合金凭借优异的比强度、耐腐蚀性与高温性能,在航空航天等领域得到了广泛应用。但受低热导率、高化学活性以及加工硬化等特性的影响,钛合金铣削加工始终面临切削力大、刀具易磨损、加工质量不稳定等诸多难题。因此,合理设置切削参数是提升钛合金铣削加工质量与加工效率的关键。梳理了切削参数在钛合金铣削加工中的应用现状,分析了主要切削参数对切削力、切削温度及刀具磨损等响应特性的影响规律,总结了当前常用的参数优化方法与实验设计方案,并进一步针对薄壁件加工、高速铣削,以及超声振动、激光外场辅助铣削等工艺场景下的参数调整展开分析,结果为钛合金铣削过程中切削参数的选择与优化提供参考与借鉴。

关键词 钛合金; 铣削; 切削参数; 参数优化

中图分类号 TG506 TG54; 文献标志码 A

Review of Application and Optimization of Cutting Parameters in Titanium Alloy Milling

ZHOU Xiang-kui¹, WANG Qiang¹, WU Shen¹, LI Xin¹, WANG Kai²

(1. Henan Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Mechanical Equipment, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

[Abstract] Titanium alloys have been extensively employed in aerospace and other fields due to their excellent specific strength, corrosion resistance, and superior high-temperature performance. However, milling is faced with large cutting forces, easy tool wear, and unstable machining quality, because of low thermal conductivity, high chemical reactivity, and work hardening. Proper selection and optimization of cutting parameters are regarded as crucial for improving machining quality and efficiency. The current application status of cutting parameters in titanium alloy milling was introduced. The influences of major cutting parameters on cutting force, temperature, and tool wear were analyzed. Commonly used parameter optimization methods and experimental designs were summarized. Parameter adjustments under thin-walled machining, high-speed milling, ultrasonic vibration-assisted milling, and laser-assisted milling were further analyzed. Reference and guidance are provided for the selection and optimization of cutting parameters in titanium alloy milling.

[Keywords] titanium alloy; milling; cutting parameters; parameter optimization

钛合金因其优异的综合力学性能、低密度、耐腐蚀、抗疲劳以及显著的耐高温性能等,被广泛应用于航空航天、国防和医疗等领域,是典型的结构功能一体化材料^[1]。然而,其低热导率、高化学活性、弹性模量低及显著的加工硬化效应,在加工过程中容易引发刀具磨损严重、切削力剧烈波动、表面质量难以控制等问题,被广泛认为是一种典型的难加工材料^[2-4]。

为了解决上述问题,研究者在切削参数的选择与优化方面进行了研究,尝试通过参数匹配提升加工稳定性和刀具寿命,优化加工表面完整性,进而实现高质量、高效率的钛合金铣削过程。Jia 等^[5]针

收稿日期: 2025-10-21 修订日期: 2026-03-06

基金项目: 河南省自然科学基金(252300421437, 252300421576); 河南省高等学校重点科研项目(25A430026); 河南省科技攻关计划(232102230042, 242102230069)

第一作者: 周向葵(1986—),男,汉族,河南平顶山人,博士,副教授。研究方向:高硬耐磨合金材料。E-mail:2016051@zzuli.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

对航空航天薄壁钛合金结构件铣削,通过构建三维稳定叶瓣图实现对转速与切深等参数的匹配选择,从而抑制振动并提升加工稳定性。孙庆贞等^[6]针对医用级 Ti-6Al-4V ELI 钛合金铣削,通过响应面法构建切削参数与表面粗糙度的预测模型,得到以最小表面粗糙度为目标的切削参数组合。目前,中国在钛合金铣削参数的研究与优化方面形成了“试验-仿真-建模-优化”的研究体系,并在航空航天、医疗等领域取得了一定的应用进展。但整体上仍以离线优化、经验参考为主,在切削参数的智能化自适应调控、高精度预测等方面仍有不足^[7-9]。

近年来,随着实验手段和数值仿真技术的发展,基于有限元模拟的切削过程分析逐渐成为研究热点,可在无需大量试验的情况下揭示切削力、温度分布及应变场的演变规律。同时,统计建模、机器学习和智能优化算法的引入,为建立切削参数与加工响应之间的预测模型提供了可能,显著提升了优化效率和预测精度^[10]。此外,对于薄壁件、高速铣削及外场辅助等复杂工况下的加工,传统基于经验的参数设定方式已难以满足加工稳定性与质量要求,需要根据不同的工况做出相应的调整。

围绕钛合金铣削过程中的切削参数应用,探讨不同切削参数对加工响应特性的作用机理,总结当前主流的参数优化方法,并进一步分析面向复杂工况下参数的选择与应用研究进展,以期对钛合金铣削工艺参数优化提供参考与借鉴。

1 切削参数对加工响应特性的影响

切削参数在钛合金铣削过程中起着重要作用,不仅影响加工过程的稳定性,还直接关系最终的加工质量。目前,中外学者主要围绕切削力、切削温度以及刀具磨损等方面展开研究,揭示不同参数组合对加工行为的影响规律。

1.1 切削力

切削力是切削过程中重要物理量之一,在切削变形过程中产生的切削力直接影响切削热的产生,进一步影响刀具的磨损程度及表面加工质量^[11]。在钛合金铣削过程中,切削力作为评估加工稳定性和刀具负载的重要指标,受到多种切削参数的显著影响。韩变枝等^[12]采用多因素正交试验分析切削参数对切削力的影响,并基于最小二乘法 and 回归分析建立了三向铣削力模型。研究表明轴向切深对切削力的影响最为显著,每齿进给量次之。王荣华等^[13]也证实了这一规律,随着切削深度和每齿进给量的增加,切削力也随之增大。这是因为随着轴向切深的增大,切削层截面积扩大,材料去

除率提高的同时,变形抗力也随之增大,从而导致切削力明显上升;而每齿进给量的增加会导致瞬时切削厚度增大,切削抗力增强,同时加剧刀具与工件接触区的挤压、回弹及摩擦作用,使切削力进一步上升^[14]。

李体仁等^[15]通过单因素试验研究了切削参数对铣削 Ti-6Al-4V 钛合金切削力的影响,结果表明随着铣削宽度的增加,切削力整体呈现上升趋势,其中铣削方向分力 F_x 表现出先增大后减小再增大的复杂变化。此外,当切削速度低于 94 m/min 时,切削力变化不大;超过 94 m/min 时,切削力随切削速度增加而减小。与此不同,Hou 等^[16]在高速铣削试验中发现,当切削速度 $v_c < 125.6$ m/min 时,切削力基本保持稳定;而当 $v_c > 125.6$ m/min 时,切削力显著增加。这一现象可用应变硬化和热软化之间的关系进行解释,当应变硬化与热软化保持平衡时,切削力保持稳定;而当应变硬化占主导地位时,需要更高的切削力来克服阻力^[17]。Mou 等^[18]的研究则进一步指出,在高速铣削 Ti-6Al-4V 钛合金时,切削速度对切削力的影响并不显著。这是由于当切削速度超过某一临界值后,切削区域温度升高导致材料软化,从而降低切削阻力;而在低于该临界速度时,温度不足以软化材料,切削力变化不大。

由上述研究可知,不同切削参数对钛合金切削力的影响机理和变化规律存在一定差异。为系统比较各参数的作用特征,主要切削参数的影响方向及相关文献结论的总结如表 1 所示。

表 1 不同切削参数对钛合金切削力的影响规律对比
Table 1 The comparative analysis of the effects of different cutting parameters on the cutting force of titanium alloys

切削参数	主要影响机制	影响趋势	参考文献
轴向切深 (a_p)	改变切削层截面积,增大材料变形抗力	显著增加	[12-14]
每齿进给量 (f_z)	增大瞬时切厚,加剧刀具与工件接触区挤压与摩擦	明显增加	[12-14]
铣削宽度 (a_e)	扩大切削接触区域,增加铣削分力	增加	[15]
铣削速度 (v_c)	改变应变硬化与热软化平衡关系	增加或降低(与速度区间有关)	[15-18]

1.2 切削温度

切削温度是钛合金加工中的关键因素。钛合金热导率低,切削过程中产生的热量难以及时扩散,容易在切削区域积聚,导致温度升高,从而加剧刀具磨损,引发表面缺陷,降低加工质量,并可能引起材料热软化,增加加工不稳定性。

调节工艺参数是控制钛合金切削温度的有效手段,众多学者通过不同实验规划分析了工艺参数对切削温度变化的影响规律^[19]。文献[17,20]表明,切削温度随进给量的增加而增大。吕偿等^[21]研究显示,在切削速度不变的情况下,随着进给量的升高,切削温度平均增加约 6.08%。这是因为较大的进给量导致切屑横截面积扩大,增强了刀具与切削区域之间的摩擦,进而加剧剪切热的生成,导致温度上升^[20]。杨吟飞等^[22]的研究发现,在每齿进给量 $f_z \leq 0.8 \text{ mm/z}$ 范围内,切削温度随着进给量的增加显著上升;而当 $f_z > 0.8 \text{ mm/z}$ 时,温度升高趋于平缓。对于切削深度,李光平等^[23]研究发现切削温度随着切削深度的增加而升高,但影响相对较小。在其试验条件和参数范围内,随着切削深度的增大,材料去除量也随之增加,更多的切削热量随切屑而被排出。相比之下,Saharkhiz 等^[24]指出切削深度的影响最为显著,这种差异可能与试验条件及工艺参数的变化有关。

对于切削速度,多数研究表明,切削速度是影响钛合金切削温度的主要因素。赵仲林等^[25]基于仿真数据建立了有关切削温度的二阶响应曲面模型,分析结果表明切削速度对切削温度的影响最大。Samsudeensadham 等^[26]发现当 v_c 从 100 m/min 增加至 140 m/min 时,温度从约 214 °C 升高至 413 °C。这主要是因为较高切削速度下,刀具与工件间的摩擦发热及材料的塑性变形速率迅速增加,导致刀-屑接触区产生更高的热量;同时,由于钛合金导热性能较差,热量难以及时扩散,从而使切削温度迅速升高^[27]。总体来看,切削参数对于钛合金铣削过程中切削温度的影响由大到小依次为切削速度、进给量及切削深度^[19,21,23,28]。切削温度随切削速度和进给量的增加而增大,如图 1 所示^[28]。

1.3 刀具磨损

刀具磨损是钛合金切削过程中的关键问题之一,直接影响加工表面质量、尺寸精度及刀具寿命。根据行业调查,大型制造企业在刀具方面的年消耗高达近亿元人民币,而其中大部分损耗正是由于刀具磨损所致^[29]。这一现象凸显了在提高加工效率的同时,有效控制刀具磨损、延长其使用寿命的重要性。尤其是在粗加工与半精加工阶段,切削过程中热-机械载荷剧烈,刀具磨损问题尤为突出,而切削参数的选取则对磨损过程产生显著影响^[29-30]。

众多学者针对钛合金切削过程中刀具磨损行为展开了系统研究。Liu 等^[31]在 Ti-6Al-4V 钛合金干式摆线铣削中,研究了切削参数对刀具磨损的影响规律。结果表明,后刀面磨损随切削速度的升高

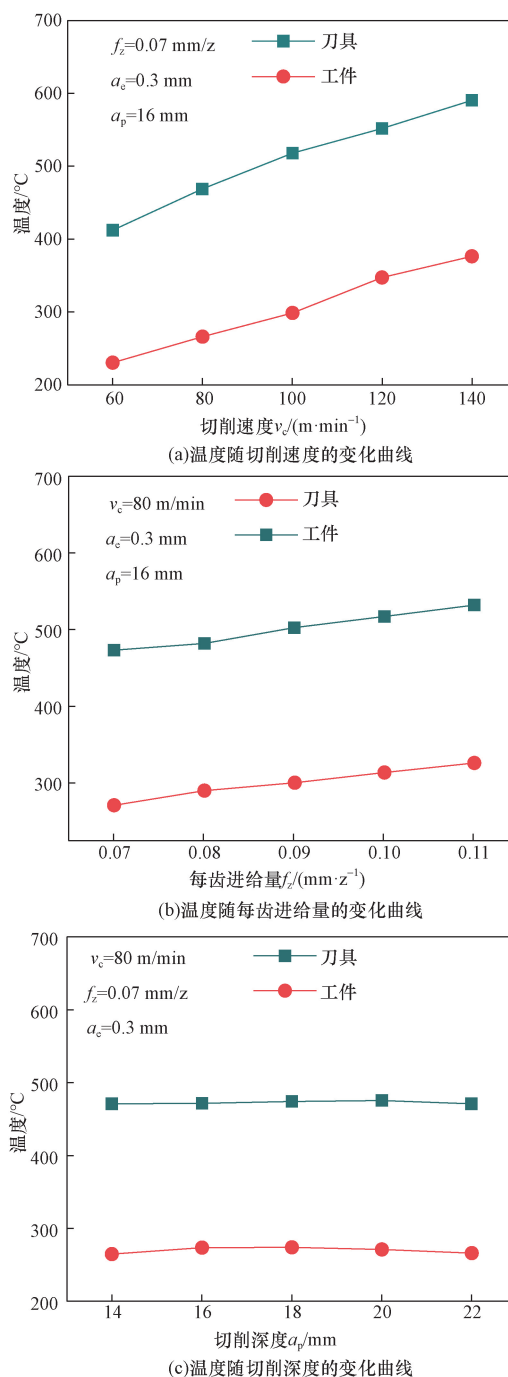


图 1 切削参数对切削温度的影响^[28]

Fig. 1 The influence of cutting parameters on cutting temperature^[28]

而整体增大,并在相同切削速度下随径向切宽的增大而加剧;当切削速度较高时刀具更容易出现缺口磨损等失效形式。姚远^[32]对多晶金刚石 (polycrystalline diamond, PCD) 与 TiAlN 涂层硬质合金刀具在高速铣削 Ti-6Al-4V 钛合金时的磨损行为进行了对比,发现 PCD 刀具因其较低的摩擦系数,在进给量低于 0.09 mm/z、切削速度不超过 190 m/min 时具有更长的寿命和更稳定的磨损表现。Wang 等^[33]则

针对 Ti-6Al-4V 钛合金的高速铣削过程,研究了无结合剂立方氮化硼(binderless cubic boron nitride, BCBN)和传统立方氮化硼(cubic boron nitride, CBN)刀具的磨损特性及其与切削参数之间的关系,如图2所示。结果表明,BCBN 刀具在切削速度 v_c

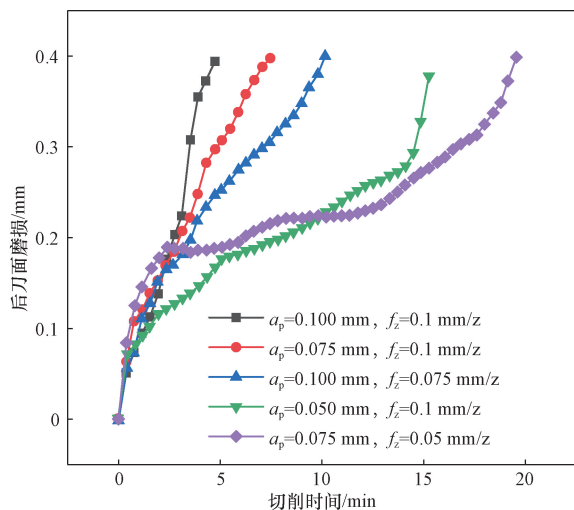


图2 切削时间与切削速度 350 m/min 的平均侧面磨损^[33]

Fig. 2 Average flank with cutting time and cutting speed 350 m/min^[33]

为 350 m/min、进给量 f_z 为 0.05 mm/z、切削深度 a_p 为 0.075 mm 的条件下仍能保持 20 min 寿命,显著优于传统的 CBN 刀具,但随着进给量和切削深度的增加,切削热与力的同步增强导致材料在刀具表面的黏结现象和刀具磨损加剧。

对于不同速度区间,马书娟等^[34]研究发现,切削速度与刀具磨损程度成正比。Matuszak 等^[35]的研究进一步验证了这一规律,当切削速度为 70 m/min 时刀具磨损最平稳,寿命最长,随着速度的增加,磨损逐渐加剧;当切削速度为 250 m/min 时磨损迅速达到失效界限,边界剥落和崩损频发。Li 等^[36]则进一步扩大研究范围,采用 (Ti, Al) N-TiN 涂层硬质合金刀具对 Ti-6Al-4V 合金在切削速度为 100 ~ 3 000 m/min 范围内的高速铣削过程进行了系统分析。研究指出,在中低速区 (100 ~ 250 m/min) 内,刀具磨损相对温和,以轻微后刀面磨损为主;而当速度超过 1 000 m/min 时,磨损急剧加剧,并出现粘结、氧化和涂层剥落等复合失效特征。尤其是在超高速区 (2 000 ~ 3 000 m/min),刀具表面出现熔融切屑粘附、涂层大面积剥离及剧烈磨损,失效模式由常规磨损演化为由热-机械耦合作用引发的断裂破坏,如图3所示^[36]。

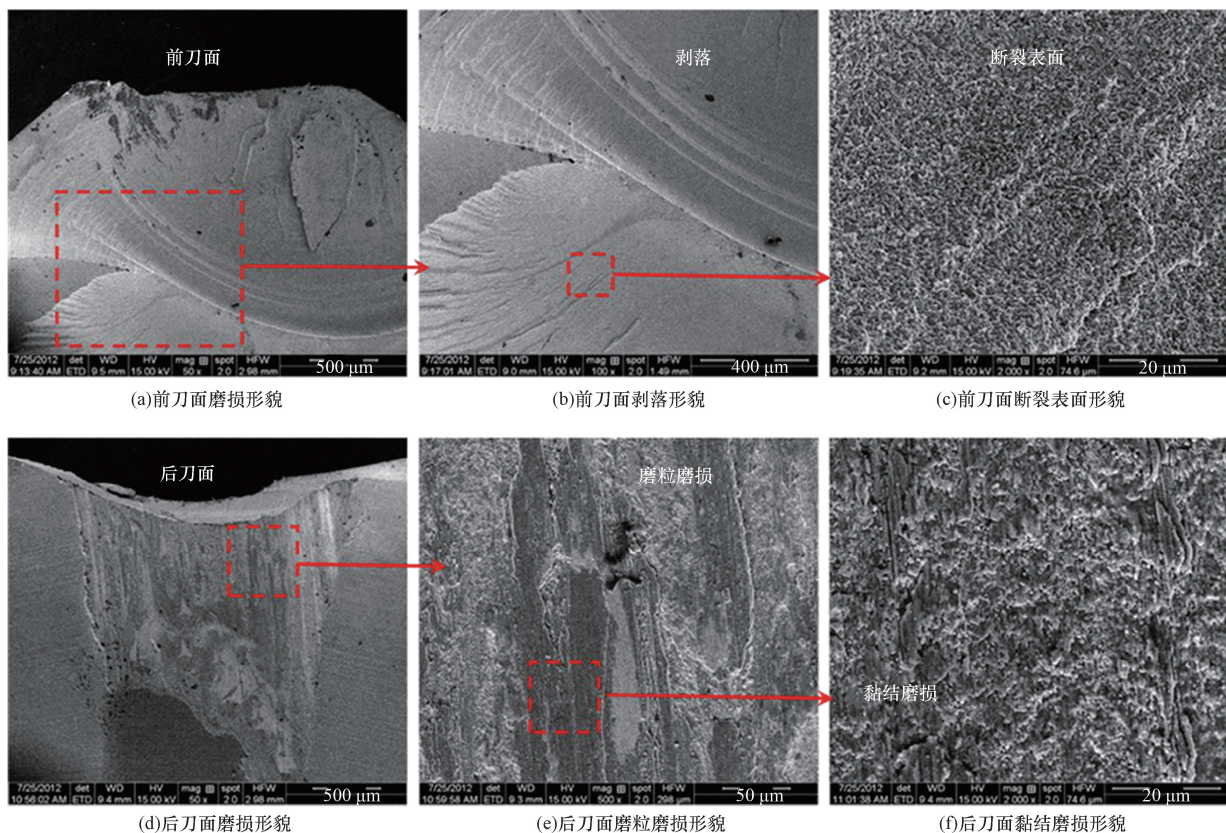


图3 涂层硬质合金刀具在切削速度为 3 000 m/min 的 Ti-6Al-4V 铣削中的失效形貌的 SEM 图像^[36]

Fig. 3 SEM images of the failure morphologies for coated carbide tool in face milling of titanium alloy Ti-6Al-4V at a cutting speed of 3 000 m/min^[36]

2 切削参数的优化方法

在铣削过程中,铣削参数的优化可以在很大程度上改善切削性能、降低能耗与加工成本^[37]。参数的优化也一直是机械加工领域研究的重点,研究者们为此经过长期的探索,形成了多种各具特色的方法。

2.1 切削参数的传统优化方法

传统的切削参数优化方法以实验设计为基础,通过可控实验建立切削参数与加工响应的定量关系,其理论基础是概率论和数理统计。因其简便性和成熟性,长期以来在切削参数优化研究中发挥着重要作用。常用的有单因素实验法、正交实验法、响应曲面法(response surface methodology, RSM)等。

单因素实验是一种传统且直观的方法,每次仅改变一个参数,考察其对加工响应的影响,适用于初步规律探究与参数敏感性分析。该方法操作简便,分析结果直观。Yang 等^[38]通过单因素实验研究了切削速度和每齿进给量对球头铣刀铣削钛合金时温度变化规律的影响,为后续建立热模型和仿真分析提供了实验依据。但在存在多因素交互作用时,其局限性较为明显,无法系统揭示参数间的协同关系。

正交实验设计则被广泛应用于多因素水平的参数优化研究中。该方法通过正交表对实验方案进行均匀、合理的安排,在有限的实验次数下获得最优的实验方案^[39]。通过极差分析或方差分析,可以有效识别影响加工质量的主次因素。许多关于钛合金切削力、温度和刀具磨损优化的研究均采用该方法^[40-41],尤其适用于前期参数筛选与实验构建。

相比之下,RSM 则更加侧重于参数间的定量建模与最优组合的精细求解^[42]。该方法通常基于二次多项式回归模型,能够拟合多个因素对响应变量的非线性影响,并通过方差分析评估模型的显著性。在机械加工领域,响应曲面法普遍被应用于分析切削参数与材料加工特性之间的关系^[43]。

2.2 切削参数的智能优化算法

随着科技发展,智能优化算法在钛合金切削参数优化中得到广泛应用。常用方法包括遗传算法(genetic algorithm, GA)、粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)等。GA 算法是通过模拟自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法,具备处理非线性、非凸优化问题的能力。将问题的求解模拟成生物进化过程,并遵循大自然的优胜劣汰原则,对群体进行反复复制、交叉和变异等操作,不断更新群体,以求解获得满足适应度函数要求的解^[44]。

PSO 算法同样是一种基于群体搜索的随机优化

方法。相较于遗传算法,粒子群算法在实现上更加简单,参数设置较少,收敛速度较快,尤其在约束复杂、目标函数较难建模的工程优化问题中表现出更强的适应性和搜索效率^[45],其流程如图 4 所示。

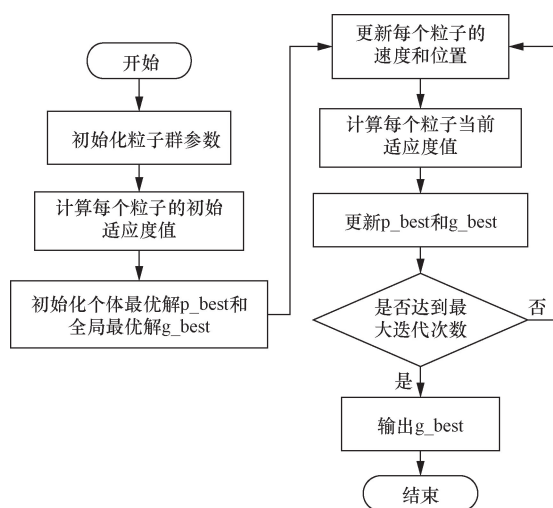


图4 粒子群算法流程图

Fig. 4 Particle swarm optimization algorithm flowchart

尽管上述算法在参数优化中都具有良好效果,但由于实际铣削过程中往往涉及多个相互制约的性能指标,传统算法在多目标环境下仍存在一定局限性。为此,研究者在传统优化算法的基础上进行改进或与其他方法相结合,发展出适用于多目标优化的智能算法,并进一步形成了面向复杂工况的多目标参数优化策略。Shao 等^[46]采用改进的粒子群优化算法对 Ti6Al4V 钛合金铣削过程中的材料去除率、噪声、振动及切削力进行多目标优化,得到在约束条件下兼顾最大材料去除率与最小噪声、振动和切削力的最优切削参数组合。郭建桦等^[47]则将 Pareto 前沿和模拟退火算法相结合,实现了切削力与材料去除率的多目标协调优化。Zhai 等^[48]将有限元仿真和粒子群优化算法相结合,建立了切削力线性回归经验模型并进一步构建了比切削能预测模型,为钛合金低能耗加工参数优化提供了理论依据。此外,一些研究还尝试将机器学习方法与智能优化算法结合,以构建数据驱动的多目标优化框架。Xi 等^[49]基于实验数据建立径向基函数神经网络代理模型,并结合多目标粒子群算法对 Ti-6Al-4V 铣削过程的能效和刀具磨损进行多目标优化,获得了在约束条件下兼顾低能耗、高效率与磨损风险较低的切削参数组合。Wang 等^[50]以 Ti-6Al-4V 微铣削为对象,结合有限元仿真与单因素试验,构建基于最优拉丁超立方采样的反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)的预测模型,并采

用第二代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)与基于熵权的逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS),对切削力、毛刺宽度、表面粗糙度进行多目标优化,获得兼顾加工效率和表面质量的切削参数组合。

综合来看,这些研究表明,智能优化算法正逐步向多目标协同与数据驱动化方向发展,这一趋势为复杂工况下钛合金切削参数的高效优化提供了新的解决思路。

3 面向复杂工况的参数选择

尽管现有的优化方法能够在单一或理想化的条件下实现较优的切削参数组合,但其结果往往难以直接应用于实际生产中^[51]。在实际的钛合金铣削过程中往往涉及多种复杂工况,如薄壁结构加工、高速切削及外场辅助等,这些条件下的热-力耦合效应、振动特征及材料去除机理均与常规条件存在明显差异。因此,为提高优化结果在实际工况下的适用性和稳定性,需进一步研究复杂工况下的参数选择并根据不同的工况做出相应的调整。

3.1 薄壁件铣削中的参数选择

钛合金薄壁件因其轻质高强的特性在航空结构中应用广泛。然而,薄壁结构刚度低,在铣削过程中易产生颤振、弹性变形等问题,严重影响加工质量与精度。因此,优化切削参数以降低加工变形,提高加工稳定性成为研究重点。

文献[52-53]表明,在引起薄壁件加工变形的因素中,切削力是最重要的因素之一。文献[54-55]指出在薄壁件铣削过程中,径向切深对切削力的影响最为显著,其次为每齿进给量,而轴向切深与铣削速度的影响相对较小。随着径向切深的增大,切削力迅速上升,进而导致结构应力与变形加剧。Tan等^[56]的研究进一步验证了径向切深的影响最为显著。但轴向切深、每齿进给量等因素的影响存在一定差异性,具体作用效果需结合工况条件进一步

分析。

切削热也是引起薄壁结构加工变形的重要因素,在铣削过程中,温度场会随着刀具的运动而发生变化,如图5所示^[57]。钛合金导热性差,铣削热量易在局部积聚,导致切削区域温度升高,进而引发材料热软化与刚度降低。薄壁结构在高温下更难抵抗切削力与热应力,从而加剧变形发生。为此,Liu等^[57]在分析薄壁铣削温度场分布时发现,主轴转速对温度有显著影响,提高转速可降低热积聚,从而抑制热变形。在此基础上,岳彩旭等^[58]基于热-力耦合有限元仿真与多目标遗传算法优化的研究表明,在较高铣削速度、较小切削深度与进给量的组合条件下,能够有效降低切削力与切削区域温度,从而有助于抑制加工过程中工件的变形。

通过以上分析可知,在钛合金薄壁件铣削中,为降低切削力与热变形、提高加工稳定性,应优先选择较高的主轴转速与切削速度,以减少热积聚;同时采用较小的径向与轴向切削深度,并合理控制每齿进给量,以避免因切削力过大引起的结构变形。这些经验规律既是参数选择的参考依据,也为建立参数优化模型、定义约束条件提供了基础。

3.2 高速铣削下的参数选择

高速铣削作为提升钛合金加工效率的重要手段,近年来得到了广泛应用。然而,此类加工方式通常伴随较高的热负荷与剧烈的刀具磨损,使得切削参数的合理选取成为影响加工性能的关键因素。在高速铣削条件下,铣削力随着轴向切削深度、每齿进给量及径向切削深度的增加而显著升高^[12,59]。而切削温度主要受切削速度、径向切削深度和每齿进给量的影响,三者均与温度呈正相关关系;在较大径向切削深度条件下,切削速度对温度的影响更为敏感^[60]。当切削速度超过一定值时,切削区域热量迅速积聚,会导致加工件表面局部软化,从而在一定程度上降低切削力;但温度过高也会加剧刀具磨损,缩短其使用寿命,影响加工稳定性^[61-62]。

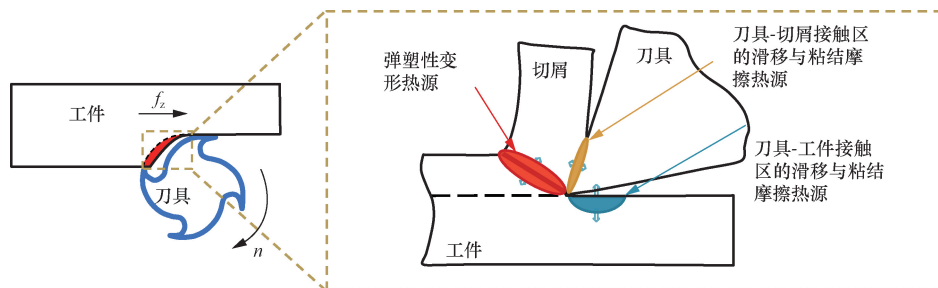


图5 切削热的产生与传导图^[57]

Fig. 5 Generation and conduction diagram of cutting heat^[57]

除切削力与温度外,表面粗糙度同样是衡量加工质量的重要指标,其变化亦受到切削参数的显著影响。王慧等^[63]研究发现表面粗糙度随着切削深度和切削宽度的增加而增大,而随着主轴转速和每齿进给量的增加而降低。这是因为主轴转速的提高可增加刀具与工件的接触频率,从而促进热量扩散,减小切削区域的塑性变形;而每齿进给量的增加,使刀具单位时间内切削长度增大、材料去除量增加,切削热量降低,使得表面粗糙度下降。

通过以上分析,在钛合金高速铣削过程中选择铣削用量时,从降低切削力保证加工质量的角度出发,在刀具寿命允许的条件下,应采用较高的主轴转速与切削速度以及较小的轴向切削深度,并合理控制每齿进给量和铣削宽度。此外,可将切削力和温度等因素作为约束条件,结合多目标参数优化方法,实现加工效率、刀具寿命与表面质量之间的协调优化。

3.3 外场辅助下的参数选择

近年来,随着加工辅助技术的发展,超声振动、激光等外场被广泛应用于钛合金铣削过程,以改善加工性能。由于外场作用改变了材料去除机理和切削热传导机制,传统参数设定策略也需做出相应调整。

在超声振动辅助铣削中,为提高超声振动辅助的优势,铣削参数的选择应与振动频率和振幅相匹配。文献^[64]表明,随着切削速度的提高,刀具与工件之间的接触时间比例增加,从而削弱超声振动在减小切削力方面的作用;而进给速度的增加在一定范围内有助于增强超声振动对铣削力的抑制能力,但当进给速度进一步增大时,该效果会逐渐减弱^[65]。当切削速度从30 m/min增加到120 m/min,切削力的降低幅度从16.42%降低至4.21%^[66]。铣削深度的选择不能太大,过大不仅会导致切削力的线性增长,还会降低超声振动的辅助优势^[67]。

激光辅助铣削 Ti-6Al-4V 的关键在于激光预热所产生的热软化效应,可有效降低切削力并改善表面质量。然而,其切削效果依赖于铣削参数的选择,并需避免工件温度过高而发生相变^[68]。文献^[69-70]表明,随着切削速度的增加,激光束与工件的相互作用时间相应缩短,热软化效果减弱;但速度过低,会使工件表面温度过高,从而引起表面熔化和相变硬化,使切削力减弱效果降低,如图6所示^[69]。随着切削深度的增加,激光辅助对切削力的减弱效果逐渐下降。为在较大切削深度下实现理想的软化效果,需相应提高激光功率。文献^[69]表明,在激光功率处于350~1 000 W范围内时,切削深度对切削力的影响最为显著,如图7所示。此外,

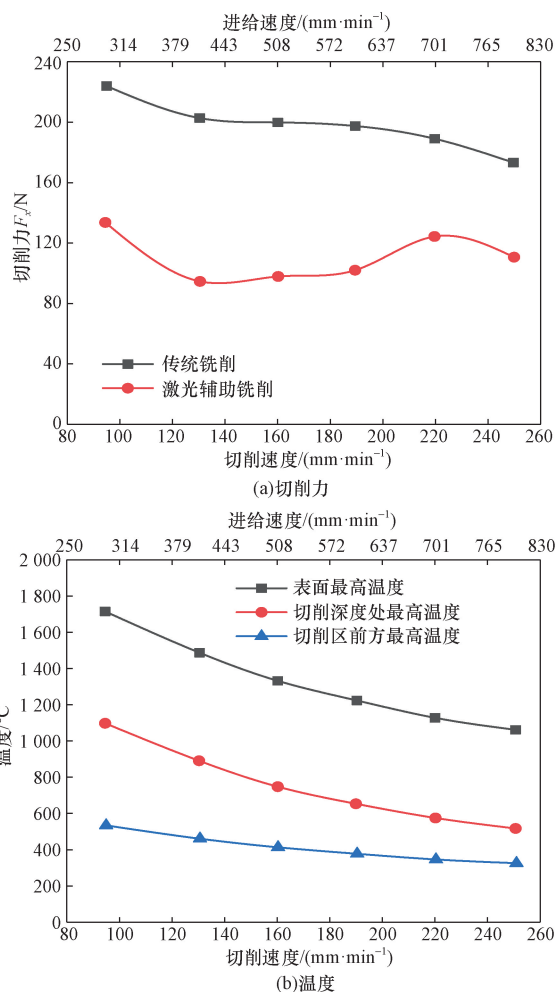


图6 切削速度对轴向切削深度为1.0 mm时切削力及激光功率为1 000 W时激光辅助铣削过程中温度变化的影响^[69]

Fig. 6 Effect of cutting speed on feed force at axial depth of cut of 1.0 mm and temperature change during laser-assisted milling; incident laser power was 1 000 W for laser-assisted milling^[69]

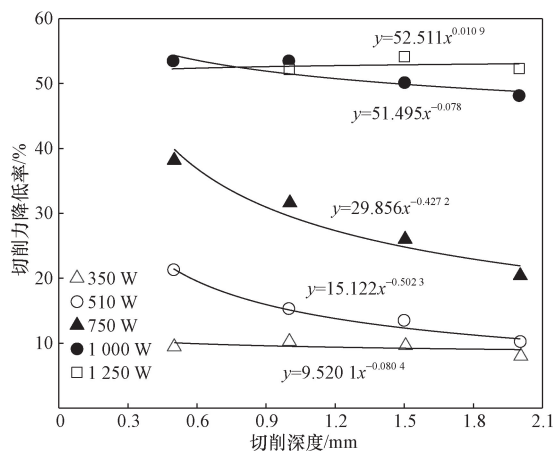


图7 切削深度在不同激光功率下对切削力的影响^[69]

Fig. 7 Effect of laser power and axial depth of cut on the reduction in feed force^[69]

为避免材料微观结构发生不可逆变化,同时确保切削区域充分软化,切削深度范围内的温度应控制在 $450 \sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ [68]。

由以上分析可知,在超声振动辅助铣削加工中,应选择适中的切削速度和进给率,以维持良好的刀具工件间歇接触状态、保障减力效果,同时切削深度不宜过大;在激光辅助铣削加工中,应避免切削速度过高,保证激光对工件有足够的预热时间,当切削深度较大时,需要相应提高激光功率,并将加工区域的温度控制在最佳加热温度范围内。外场辅助加工中的切削参数,必须根据不同辅助方式的特性进行调整,才能充分发挥外场辅助加工的效果。

4 结论与展望

综述了钛合金铣削参数对加工响应特性的影响规律、参数优化的主要方法及其在复杂工况下的应用研究进展。研究表明,对切削参数进行合理调控,可有效降低切削力与切削温度、改善加工表面质量并延缓刀具磨损;结合实验设计与智能优化算法的多目标优化方法,在提升钛合金铣削加工性能方面具有显著优势。针对薄壁件加工、高速铣削以及外场辅助加工等典型复杂工况,已有研究者开展了大量工作,为提升钛合金在复杂应用场景下的可加工性提供了坚实的理论支撑。尽管相关研究已取得积极进展,但针对钛合金切削参数的优化研究仍存在一些不足。

(1)目前,切削参数与加工响应之间的非线性耦合机理尚不清晰,多数研究仍依赖经验模型或统计分析方法,难以准确反映材料变形、热-力相互作用及切屑形成等复杂过程。一方面,切削过程是材料塑性变形、摩擦生热与热-力耦合等多物理场、多动态过程交织的复杂系统,参数与响应之间存在明显的非线性映射关系;同时,难加工钛合金在高温、高应变率条件下呈现出复杂的动态力学行为,针对其本构关系的建模仍面临较大挑战。另一方面,多个切削参数之间存在显著的交互作用,不同加工响应之间也相互耦合,导致参数效应难以被有效解耦与定量表征。

(2)现有参数优化方法在模型泛化性、收敛稳定性等方面仍存在不足。现有优化模型多基于特定工况、有限材料样本或仿真数据构建,数据集的工况覆盖范围窄、维度单一,当加工材料、刀具状态等工况条件发生变化时,模型的预测精度与优化效果会出现明显衰减;同时,部分智能算法或传统统计优化方法在多参数、多约束优化问题中易出现局部收敛、收敛速度偏慢或优化结果波动较大的问

题,难以稳定获得高质量的优化结果。此外,现有方法多为离线静态优化,缺乏在线学习与动态反馈机制,难以及时感知加工过程扰动并据此自适应调整优化策略,导致优化参数与实际加工状态脱节,进一步影响了模型的可靠性与工程可用性。

综上所述,现有研究在切削机理表征、优化模型泛化与在线闭环调控等方面仍存在明显不足。随着多物理场仿真、人工智能和数字孪生等技术的深度融合,钛合金切削参数优化将朝着高精度、自适应与智能化方向发展,为高端装备制造中钛合金的高效高质加工提供关键技术支撑。因此,未来研究可从以下方向展开。

(1)深化多物理场耦合机理研究:建立考虑热-力等多场耦合的高精度铣削仿真模型,引入更适用的材料本构与损伤演化模型,结合机理模型与数据驱动方法系统揭示切削参数对切削力、切削温度及刀具磨损的影响规律,为参数优化提供扎实的理论支撑。

(2)发展自适应动态优化技术:融合多源传感信息与强化学习等智能算法,构建具备实时感知与动态反馈能力的优化框架,实现加工过程中切削参数的自适应调整,提升优化策略对复杂工况的鲁棒性。同时,拓展多目标优化在薄壁件加工、高速铣削等典型场景的应用,并结合数字孪生实现优化方案的快速预验证。

(3)推动研究成果的工程化应用:构建面向工业应用的钛合金铣削参数优化知识库与决策支持系统,整合不同工况下的参数响应数据,为实际生产提供快速可靠的参数推荐;并在航空航天等典型领域开展工艺验证,评估优化方案的经济性与可行性,加速研究成果的工程化落地。

参考文献

- [1] 孙杰, 国凯, 杨斌. 钛合金航空结构件加工刀具与工艺技术研究现状[J]. 航空制造技术, 2021, 64: 74-86.
Sun Jie, Guo Kai, Yang Bin. Review on cutting tool and processing technology for titanium alloy aviation components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64: 74-86.
- [2] Hourmand M, Sarhan A A D, Sayuti M, et al. A comprehensive review on machining of titanium alloys[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(8): 1-37.
- [3] 姜增辉, 董济超, 孔繁雅, 等. 钛合金铣削加工技术研究现状及发展[J]. 新技术新工艺, 2021(9): 54-58.
Jiang Zenghui, Dong Jichao, Kong Fanya. Research status and development tendency of titanium alloy milling technology[J]. New Technology & New Process, 2021(9): 54-58.
- [4] 靳淇超, 李军, 汪亮亮, 等. 铣削工艺参数对 Ti65 高温钛合金加工表面完整性的影响[J]. 机械工程材料, 2025, 49: 43-47, 65.
Jin Qichao, Li Jun, Wang Liangliang, et al. Effect of milling

- process parameters on machined surface integrity of Ti65 high temperature titanium alloy[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2025, 49: 43-47, 65.
- [5] Jia J, Chen L, Song W, et al. Three-dimensional stability lobe construction for face milling of thin-wall components with position-dependent dynamics and process damping[J]. *Machines*, 2025, 13(6): 524.
- [6] 孙庆贞, 魏学涛, 张涛, 等. 运用响应面法的 Ti-6Al-4V ELI 钛合金铣削表面粗糙度预测模型[J]. *机械科学与技术*, 2024, 43: 643-649.
- Sun Qingzhen, Wei Xuetao, Zhang Tao. Prediction model for surface roughness in milling of Ti-6Al-4V ELI titanium alloy using response surface methodology[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2024, 43: 643-649.
- [7] 孙弋, 高宏力, 宋虹亮, 等. 考虑刀具状态的工艺参数在线优化技术研究[J]. *西南交通大学学报*, 2025, 61: 1-9.
- Sun Yi, Gao Hongli, Song Hongliang. Study on tool condition-integrated online optimization of process parameters[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2025, 61: 1-9.
- [8] 吴宝海, 张阳, 郑志阳, 等. 数控加工进给速度参数优化研究现状与展望[J]. *航空学报*, 2022, 43: 86-105.
- Wu Baohai, Zhang Yang, Zheng Zhiyang. Review and prospects of feedrate optimization in CNC machining[J]. *Acta Astronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43: 86-105.
- [9] 孙备, 张玲玲, 李峰, 等. 面向磨损检测的切削表面粗糙度评估及 AGRNN 预测[J]. *制造技术与机床*, 2023(9): 74-79.
- Sun Bei, Zhang Lingling, Li Feng. Roughness evaluation and AGRNN prediction of cutting surface for wear detection[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2023(9): 74-79.
- [10] 孙茜. 数据驱动的航空航天典型零部件工艺参数优化系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- Sun Han. Research on data-driven optimization system of process parameters for typical aerospace parts [D] Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [11] 王奔, 刘国家, 张棋, 等. 铣削参数对 SiCp/Al 复合材料切削力及表面质量的影响[J]. *工具技术*, 2025, 59: 30-36.
- Wang Ben, Liu Guojia, Zhang Qi, et al. Effect of milling parameters on cutting forces and surface quality of SiCp / Al composites[J]. *Tool Engineering*, 2025, 59: 30-36.
- [12] 韩变枝, 陈明, 王栋. 钛合金高速铣削的切削力实验研究与建模[J]. *机床与液压*, 2018, 46: 104-108.
- Han Bianzhi, Chen Ming, Wang Dong. Research and modeling of cutting force on the high speed milling titanium alloy[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2018, 46: 104-108.
- [13] 王荣华, 汪振华. TC4 钛合金铣削力及表面粗糙度分析[J]. *工具技术*, 2021, 55: 30-33.
- Wang Ronghua, Wang Zhenhua. Analysis of milling force and surface roughness of TC4 titanium alloy [J]. *Tool Engineering*, 2021, 55: 30-33.
- [14] Zhu L, Zhang K, Liu B, et al. Experimental investigation on cutting force and hole quality in milling of Ti-6Al-4V[J]. *Micromachines*, 2026, 17(1): 19.
- [15] 李体仁, 王金玉, 马超超. 方肩铣刀高速铣削 TC4 钛合金试验研究及参数优化[J]. *机床与液压*, 2020, 48: 40-44.
- Li Tiren, Wang Xinyu, Ma Chaochao. Experimental study and parameter optimization of high speed milling of TC4 titanium alloy with carbide shoulder milling cutter[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2020, 48: 40-44.
- [16] Hou J, Zhou W, Duan H, et al. Influence of cutting speed on cutting force, flank temperature, and tool wear in end milling of Ti-6Al-4V alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70(9-12): 1835-1845.
- [17] Yan J, Suhaimi M A, Sharif S, et al. Enhancing tool life and surface quality in high-speed milling of Ti6Al4V: a comparative study of flood and minimum quantity lubrication cooling strategies[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, 141(5): 3089-3110.
- [18] Mou H, Xue W, Wu L, et al. Experimental study and modeling of cutting force in high-speed milling of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. *Journal of Mechanics*, 2025, 41: 55-63.
- [19] 沈雪红, 张定华, 姚倡锋, 等. 钛合金切削加工表面完整性形成机制研究进展[J]. *航空材料学报*, 2021, 41: 1-16.
- Shen Xuehong, Zhang Dinghua, Yao Changfeng, et al. Research progress on formation mechanism of surface integrity in titanium alloy machining[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2021, 41: 1-16.
- [20] Özlü B, Ulaş H B, Kara F. Investigation of the effects of cutting tool coatings and machining conditions on cutting force, specific energy consumption, surface roughness, cutting temperature, and tool wear in the milling of Ti6Al4V alloy[J]. *Lubricants*, 2025, 13(8): 363.
- [21] 吕偿, 徐盛学. TC4 钛合金铣削温度场仿真与数值分析[J]. *航空精密制造技术*, 2024, 60: 5-9.
- Lü Chang, Xu Shengxue. Simulation and numerical analysis of cutting temperature field of TC4 titanium alloy[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2024, 60: 5-9.
- [22] 杨吟飞, 赵威, 李亮, 等. Ti6Al4V 钛合金大进给铣削切削力与切削温度的试验研究[J]. *航空精密制造技术*, 2014, 50: 34-37.
- Yang Yinfei, Zhao Wei, Li Liang, et al. Experimental study on cutting force and cutting temperature in high feed milling of Ti6Al4V alloy[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2014, 50: 34-37.
- [23] 李光平, 辛红敏, 姬相斌, 等. TC4 钛合金盘铣开槽铣削温度研究[J]. *工具技术*, 2021, 55: 30-38.
- Li Guangping, Xin Hongmin, Ji Xiangbin. Milling temperature of grooving TC4 titanium alloy by disc milling[J]. *Tool Engineering*, 2021, 55: 30-38.
- [24] Saharkhiz E, Osgouie S K G, Emami M, et al. Temperature and tool wear effects on the milling process of Ti6Al4V titanium alloy[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2025, 239(12): 4537-4554.
- [25] 赵仲林, 安立宝, 张好强, 等. TC4 钛合金铣削轴向力及铣削温度分析与预测[J]. *工具技术*, 2022, 56: 24-30.
- Zhao Zhonglin, An Libao, Zhang Haoqiang. Analysis and prediction of axial force and temperature in milling titanium alloy TC4 [J]. *Tool Engineering*, 2022, 56: 24-30.
- [26] Samsudeensadham S, Krishnaraj V, Thilak R K, et al. Investigations on the machining characteristics of Ti-6Al-4V alloy during high-speed end milling process[J]. *International Journal of Manufacturing Research*, 2023, 18(2): 125-143.
- [27] 胡锦渊, 金成哲, 王俊杰, 等. 激光增材制造 TC4 钛合金铣削

- 温度的研究[J]. 工具技术, 2025, 59: 60-64.
- Hu Jinyuan, Jin Chengzhe, Wang Junjie, et al. Study on milling temperature of laser additive manufacturing TC4 titanium alloy [J]. Tool Engineering, 2025, 59: 60-64.
- [28] Sun Y, Sun J, Li J, et al. An experimental investigation of the influence of cutting parameters on cutting temperature in milling Ti6Al4V by applying semi-artificial thermocouple[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(5): 765-773.
- [29] 臧家冉. 钛合金切削过程刀具磨损研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2024.
- Zang Jiaran. Study on tool wear in titanium alloy cutting process [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2024.
- [30] 杨晓勇. 钛合金铣削刀具磨损及表面完整性研究 [D] 天津: 天津大学, 2013.
- Yang Xiaoyong. Tool wear and surface integrity of titanium alloy milling [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [31] Liu D, Zhang Y, Luo M, et al. Investigation of tool wear and chip morphology in dry trochoidal milling of titanium alloy Ti-6Al-4V [J]. Materials, 2019, 12(12): 1937.
- [32] 姚远. 切削参数对高速切削钛合金刀具磨损的影响[J]. 机械设计与制造, 2018(9): 213-216.
- Yao Yuan. Effect of cutting parameters on wear of high speed cutting titanium alloy [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(9): 213-216.
- [33] Wang Z G, Rahman M, Wong Y S. Tool wear characteristics of binderless CBN tools used in high-speed milling of titanium alloys [J]. Wear, 2004, 258(5): 752-758.
- [34] 马书娟, 赵明月, 郑耀辉, 等. TC4 钛合金车削刀具磨损数值分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2018, 37: 829-833.
- Ma Shujuan, Zhao Mingyue, Zheng Yaohui, et al. Numerical analysis on wear of TC4 titanium alloy turning tools[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2018, 37: 829-833.
- [35] Matuszak J, Zaleski K, Zyśko A. Investigation of the impact of high-speed machining in the milling process of titanium alloy on tool wear, surface layer properties, and fatigue life of the machined object[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2023, 16(15): 5361.
- [36] Li A, Zhao J, Hou G. Effect of cutting speed on chip formation and wear mechanisms of coated carbide tools when ultra-high-speed face milling titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(7): 266-274.
- [37] 李薇, 郑光明, 丁峰, 等. 清洁可持续切削及工艺参数多目标优化研究进展[J]. 制造技术与机床, 2024(9): 79-85.
- Li Wei, Zheng Guangming, Ding Feng, et al. Research progress on clean sustainable cutting and multi-objective optimization of process parameters [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2024(9): 79-85.
- [38] Yang S, He C, Zheng M, et al. Temperature field of tool engaged cutting zone for milling of titanium alloy with ball-end milling[J]. Micromachines, 2018, 9(12): 672.
- [39] 魏效玲, 王晓鹏, 崔岳. 基于正交试验的钛合金 TC4 切削参数的优化设计[J]. 煤矿机械, 2020, 41: 120-122.
- Wei Xiaoling, Wang Xiaopeng, Cui Yue. Optimization design of cutting parameters of titanium alloy TC4 based on orthogonal test [J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41: 120-122.
- [40] Lü Q, Chai Y, Yang L, et al. Experimental study on cutting force and surface integrity of TC4 titanium alloy with longitudinal ultrasonic-assisted milling[J]. Coatings, 2023, 13(10): 1725.
- [41] Wang J, Kong B, Li A, et al. Experimental study on cutting force in two-step milling of profile walled surface of titanium alloy[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2024, 38(10): 5661-5673.
- [42] Daniyan I A, Tlhabadira I, Phokobye S N, et al. Modelling and optimization of the cutting forces during ti6al4v milling process using the response surface methodology and dynamometer[J]. MM Science Journal, 2019, 128: 3353-3363.
- [43] 周文昌, 曹泽平, 李小兵, 等. 基于响应曲面法的 TC32 钛合金高速铣削加工表面粗糙度研究及参数优化[J]. 工具技术, 2022, 56: 43-47.
- Zhou Wenchang, Cao Zeping, Li Xiaobing, et al. Research on surface roughness and parameter optimization of TC32 titanium alloy high speed milling process based on response surface method [J]. Tool Engineering, 2022, 56: 43-47.
- [44] 鲍骏, 白海清, 任礼, 等. TC4 钛合金铣削性能分析及多目标参数优化 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36): 15400-15410.
- Bao Jun, Bai Haiqing, Ren Li, et al. Analysis of milling performance of TC4 titanium alloy and optimization of multi-objective parameters [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(36): 15400-15410.
- [45] 刘士博, 程志江, 吴动波, 等. 基于 PSO 的 TC4 钛合金铣削参数优化研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(10): 155-159.
- Liu Shibao, Cheng Zhijiang, Wu Dongbo, et al. Optimization of milling parameters of TC4 titanium alloy based on PSO[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023(10): 155-159.
- [46] Shao M, Li S, Hu Y, et al. Study on parameter optimization of noise-vibration-force-metal removal rate in TC4 titanium alloy milling[J]. Journal of Vibration and Control, 2023, 29(23/24): 5698-5712.
- [47] 郭建辉, 任星星. 基于高速切削的钛合金铣削力分析及切削参数优化[J]. 辽宁科技学院学报, 2024, 26: 28-33.
- Guo Jianhui, Ren Xingxing. Analysis and optimization of titanium alloy cutting parameters based on high-speed milling[J]. Journal of Liaoning Institute of Science and Technology, 2024, 26: 28-33.
- [48] Zhai C, Zhu L, Qin S, et al. Analysis on specific cutting energy prediction model based on cutting force prediction model built by particle swarm optimization: a case study of milling machining [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 140(11): 6553-6573.
- [49] Xi L, Li L, Li L, et al. Parameter optimization of titanium alloy considering energy efficiency and tool wear based on RBFNN-MOPSO algorithm in milling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 122: 97-111.
- [50] Wang J, Cheng X, Han Y, et al. Optimization for high-efficiency micromilling of titanium alloy based on an improved neural network and genetic algorithm[J]. Machining Science and Technology, 2026, 30(1): 100-124.

- [51] Zhang X, Pan T, Ma A, et al. High efficiency orientated milling parameter optimization with tool wear monitoring in roughing operation [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 165: 108394.
- [52] Li W, Ren J, Shi K, et al. A method for monitoring machining errors of complex thin-walled parts based on the fusion of physical information and CNN[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2025, 81: 208-221.
- [53] Li W, Wang L, Yu G. Force-induced deformation prediction and flexible error compensation strategy in flank milling of thin-walled parts[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 297: 117258.
- [54] Tang J, Deng C, Chen X, et al. Analysis and optimization of milling deformations of TC4 alloy thin-walled parts based on finite element simulations[J]. *Machines*, 2023, 11(6): 628.
- [55] 李同, 汤爱君, 赵彦华, 等. 切削参数对弯曲薄壁件变形规律的有限元仿真[J]. *制造业自动化*, 2020, 42: 47-50.
Li Tong, Tang Aijun, Zhao Yanhua, et al. Finite element simulation of cutting parameters on deformation law of curved thin-walled parts[J]. *Manufacturing Automation*, 2020, 42: 47-50.
- [56] Tan Z, Wang Y, Xu K. Stress deformation simulation for optimizing milling thin-walled Ti-6Al-4 V titanium alloy parts[J]. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2023, 18(1): 265-273.
- [57] Liu J, Liu C, Tong H, et al. Optimization of process parameters for minimizing the temperature field of high-speed milling of titanium alloy thin-walled parts[J]. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2025, 19(4): 2415-2430.
- [58] 岳彩旭, 胡德生, 刘献礼, 等. 基于有限元仿真的钛合金薄壁件铣削参数优化[J]. *工具技术*, 2021, 55: 53-60.
Yue Caixu, Hu Desheng, Liu Xianli, et al. Milling parameters optimization of titanium alloy thin-walled parts based on finite element simulation[J]. *Tool Engineering*, 2021, 55: 53-60.
- [59] Guo X, Li M, Dong Z, et al. Smooth particle hydrodynamics modeling of cutting force in milling process of TC4[J]. *Advances in Manufacturing*, 2019, 7(4): 364-373.
- [60] 何朕, 李国和, 孙勇, 等. 钛合金高速切削加工试验研究进展[J]. *工具技术*, 2021, 55: 11-23.
He Zhen, Li Guohe, Sun Yong, et al. Development of experimental study on high-speed cutting of titanium alloys[J]. *Tool Engineering*, 2021, 55: 11-23.
- [61] Gutzeit K, Bulun G, Stelzer G, et al. Sub-zero milling of Ti-6Al-4V—impact of the cutting parameters on the resulting forces, tool wear, and surface quality[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 126(7): 3367-3381.
- [62] Rauf A, Khan M A, Jaffery S H I, et al. Effects of machining parameters, ultrasonic vibrations and cooling conditions on cutting forces and tool wear in meso scale ultrasonic vibrations assisted end-milling (UVAEM) of Ti-6Al-4V under dry, flooded, MQL and cryogenic environments- a statistical analysis[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 30: 8287-8303.
- [63] 王慧, 李南奇, 赵国超, 等. 基于航空铸造钛合金 Ti-6Al-4V 高速铣削参数的表面质量及切削效率优化[J]. *表面技术*, 2022, 51: 331-337, 346.
Wang Hui, Li Nanqi, Zhao Guochao, et al. Optimization of surface quality and cutting efficiency for high-speed milling parameters of titanium alloy Ti-6Al-4V for aviation casting[J]. *Surface Technology*, 2022, 51: 331-337, 346.
- [64] Li Z, Zhu L, Yang Z, et al. Investigation of tool-workpiece contact rate and milling force in elliptical ultrasonic vibration-assisted milling[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 118(1): 585-601.
- [65] Geng D, Sun Z, Liu Y, et al. Unravelling the influence of vibration on material removal and microstructure evolution in ultrasonic transversal vibration-assisted helical milling of Ti-6Al-4V holes [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, 326: 118320.
- [66] Han G, Ye Z, Xu J, et al. Investigation on cutting forces and tool wear in high-speed milling of Ti-6Al-4V assisted by longitudinal torsional ultrasonic vibrations[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 129(1): 783-799.
- [67] Lü Q, Yang S, Yang L, et al. Optimization milling force and surface roughness of Ti-6Al-4V based on ultrasonic-assisted milling (UAM): an Experimental Study[J]. *Micromachines*, 2023, 14(9): 1699.
- [68] Wiedenmann R, Liebl S, Zaeh M F. Influencing factors and workpiece's microstructure in laser-assisted milling of titanium[J]. *Physics Procedia*, 2012, 39: 265-276.
- [69] Sun S, Brandt M, Barnes J E, et al. Experimental investigation of cutting forces and tool wear during laser-assisted milling of Ti-6Al-4V alloy[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2011, 225(9): 1512-1527.
- [70] Kalantari O, Fallah M M, Jafarian F, et al. Surface integrity in laser-assisted machining of Ti6Al4V[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020, 235(20): 5009-5016.