

影响钛合金机械加工因素的分析与研究

马钰斐

中国船舶集团有限公司第七一三研究所 河南 郑州 450000

摘要: 本文详细探讨了材料特性、刀具因素、加工工艺参数及加工环境对钛合金机械加工的影响。钛合金导热性差、化学活性高、弹性模量小,导致加工过程中刀具磨损快、工件易变形。刀具材料、几何参数及磨损情况直接影响加工质量和效率,加工工艺参数如切削速度、进给量、切削深度及切削液的选择也至关重要。同时机床刚性、夹具设计、环境温度湿度及人为因素同样不可忽视。优化这些因素,对提高钛合金机械加工质量和效率具有重要意义。

关键词: 钛合金; 机械加工; 因素分析; 研究

引言

钛合金以其优异的性能广泛应用于航空、航天和医疗等领域。然而,其机械加工难度大,对加工质量和效率要求高。本文针对这一问题,系统分析了影响钛合金机械加工的关键因素,包括材料特性、刀具因素、加工工艺参数和加工环境等,旨在为提高钛合金机械加工质量和效率提供理论依据和实践指导。

1 材料特性对钛合金机械加工的影响

1.1 导热性差

材料特性对钛合金机械加工影响显著,导热性差是重要因素,钛合金导热系数低,仅为钢的1/5-1/7,铝的1/14-1/16。在机械加工时,切削热难以快速传导散出,大量热量积聚在切削区域,致使切削温度快速攀升。过高的切削温度会带来诸多不利影响,一方面会加速刀具磨损,降低刀具使用寿命。刀具在高温环境下,易出现扩散磨损、氧化磨损等情况,使得刀具刃口快速变钝,影响切削效果。另一方面,会引起工件热变形,对加工精度和表面质量产生负面影响。在高速切削钛合金过程中,切削区域温度可能超过1000℃,刀具在这种恶劣高温条件下工作,性能会急剧下降,进而影响整个钛合金机械加工的质量和效率。

1.2 化学活性高

在高温条件下,钛合金化学活性显著提升,能与空气中的氧、氮、氢等元素产生强烈化学反应。切削过程中,切削区域温度升高,钛合金会和刀具材料发生反应,形成黏结物。这些黏结物附着在刀具表面,会加剧刀具磨损,使刀具切削性能下降,缩短刀具使用寿命。此外,化学反应还会在工件表面形成氧化层。氧化层的存在会影响工件表面质量,导致表面粗糙度增加,还可能影响后续加工工序,如涂层处理、焊接等,降低产品整体质量。并且,钛合金会与刀具中的碳元素反应生成

碳化钛,碳化钛的生成会使刀具表面出现剥落和崩刃现象,严重影响刀具的正常使用,进而影响钛合金机械加工的效率和质量。

1.3 弹性模量小

钛合金弹性模量约为钢的一半,在加工过程中极易产生弹性变形,当切削力作用于钛合金工件时,工件会发生弹性恢复。这种弹性恢复会使刀具与工件之间的接触长度产生变化,破坏切削过程的稳定性。切削过程不稳定会导致切削力波动,进而影响加工表面质量,使表面粗糙度增大,还可能引发切削振动,降低刀具寿命。弹性变形还会引发工件尺寸精度误差和形状误差,由于钛合金弹性回复的存在,实际加工尺寸与理论尺寸之间会出现偏差,影响工件的尺寸精度。在形状方面,弹性变形可能导致工件出现弯曲、扭曲等形状误差。特别是在加工薄壁件和细长轴时,这种影响更为突出^[1]。薄壁件和细长轴本身刚性较差,在切削力作用下更容易发生弹性变形,加工后难以保证其形状和尺寸精度,增加了加工难度和废品率。

2 刀具因素对钛合金机械加工的影响

2.1 刀具材料

常用刀具材料涵盖高速钢、硬质合金、陶瓷和立方氮化硼等。高速钢刀具在硬度、耐磨性和耐热性方面表现欠佳,加工钛合金时刀具磨损迅速,通常仅适用于低速切削以及小批量生产场景,难以满足高效、大规模加工需求。硬质合金刀具凭借较高硬度和耐磨性,成为加工钛合金的主流选择。钨钴类硬质合金(YG类)因具备良好韧性和抗黏结性,在加工钛合金时优势明显,能有效减少刀具与钛合金之间的黏结现象,降低刀具磨损,提高加工质量。陶瓷刀具硬度高、耐磨性好且耐高温,不过韧性较差,易出现崩刃情况,更适合用于钛合金的精加工和半精加工,能在保证加工精度的同时,发

挥其耐磨优势。立方氮化硼刀具硬度、耐磨性极高，热稳定性良好，可用于高速切削钛合金，能有效提高加工效率。然而，其价格高昂，在一定程度上限制了广泛应用，一般在对加工效率和精度要求极高且成本允许的情况下才会选用。

2.2 刀具几何参数

刀具几何参数涵盖前角、后角、主偏角、副偏角和刃倾角等，对钛合金切削过程和加工质量影响显著。合理选取这些参数，能降低切削力、切削温度和刀具磨损，提升加工表面质量。前角大小对刀具强度和切屑变形有直接影响。加工钛合金时，前角不宜过大，通常取 5° - 15° ，若前角过大，刀具强度会降低，切屑变形也会过大，不利于切削过程的稳定进行，还可能加速刀具磨损。后角适当增大可减少刀具后刀面与工件间的摩擦。一般取 8° - 15° ，合适的后角能降低摩擦产生的热量，减轻刀具磨损，提高刀具使用寿命，同时也有助于改善加工表面质量。主偏角和副偏角的选择需结合工件形状和加工要求，合理选择这两个角度，可有效减小切削力和振动，振动过大会影响加工精度和表面质量，通过优化主偏角和副偏角，能提高加工过程的稳定性。

2.3 刀具磨损

刀具磨损对钛合金机械加工质量和效率影响重大，是关键影响因素之一，刀具磨损主要有前刀面磨损、后刀面磨损和边界磨损三种表现形式。前刀面磨损会使切屑流出受阻，切屑与前刀面摩擦加剧，进而增加切削力和切削温度。切削力增大易引发切削振动，影响加工稳定性；切削温度升高则会加速刀具磨损，形成恶性循环。后刀面磨损会使刀具后刀面与工件表面摩擦增大，导致加工表面粗糙度增加，降低表面质量，还可能影响工件的尺寸精度。边界磨损会削弱刀具刃口强度，使刀具在切削过程中容易发生崩刃，一旦崩刃，刀具将无法正常切削，需及时更换，增加生产成本。刀具磨损的原因包括机械磨损、黏结磨损、扩散磨损和氧化磨损等，为减少刀具磨损，需从多方面采取措施^[2]。合理选择刀具材料，确保其具备足够的硬度、耐磨性和耐热性；优化刀具几何参数，如前角、后角等，以降低切削力和摩擦；优化加工工艺参数，如切削速度、进给量等；同时采用合适的冷却润滑方式，降低切削温度，减少刀具与工件、切屑之间的摩擦，从而延长刀具使用寿命，提高加工质量和效率。

3 加工工艺参数对钛合金机械加工的影响

3.1 切削速度

切削速度与刀具磨损、加工表面质量、切削力及积

屑瘤生成等密切相关，当切削速度过高时，切削区域温度会快速上升。高温会使刀具材料性能下降，加剧刀具磨损，缩短刀具的使用寿命，同时还会导致加工表面质量变差，出现表面粗糙度增大、烧伤等问题。而当切削速度过低时，切削力会明显增大。较大的切削力会使刀具与工件、切屑之间的摩擦加剧，刀具容易产生积屑瘤。积屑瘤会改变刀具的实际前角和切削厚度，影响切削过程的稳定性，进而降低加工精度和表面质量。在实际加工中，切削速度的选择需综合考虑多方面因素，包括刀具材料、工件材料和加工要求等。不同刀具材料所能承受的切削速度范围不同。对于硬质合金刀具，其具有较好的综合性能，加工钛合金时切削速度一般取 $20\sim 80\text{m/min}$ 。陶瓷刀具硬度高、耐磨性好、耐高温，能承受更高的切削速度，在加工钛合金时切削速度可适当提高到 $80\sim 150\text{m/min}$ ，但需注意其韧性较差的问题，避免因切削速度过高引发刀具崩刃。

3.2 进给量

进给量是钛合金机械加工中需重点关注的工艺参数，它对切削力和加工表面质量有着直接影响，若进给量选取过大，切削过程中刀具与工件的接触面积和作用力增大，切削力会显著增加。较大的切削力不仅会加速刀具磨损，缩短刀具使用的寿命，还会使加工表面粗糙度增大，降低质量，影响工件的使用性能和外观。反之，若进给量过小，虽然能在一定程度上减小切削力，但会导致单位时间内材料去除量减少，生产效率大幅降低，增加加工成本。因此，在选择进给量时，需要全面考虑刀具强度、工件材料特性以及加工精度要求等因素。对于钛合金加工而言，经过实践和理论分析，一般将进给量控制在 $0.05\sim 0.3\text{mm/r}$ 的范围内，这样可以在保证加工质量和刀具使用寿命的同时，兼顾一定的生产效率。

3.3 切削深度

当切削深度设置过大时，切削过程中刀具所承受的载荷急剧增加，切削力显著增大。过大的切削力会使刀具承受较大应力，容易导致刀具产生弯曲变形，影响切削精度，甚至引发崩刃现象，损坏刀具，增加加工的成本。若切削深度过小，刀具与工件的接触面积减小，切屑形成困难，切削热不易散发，刀具的散热条件变差，切削温度会随之升高。高温会加速刀具材料的磨损和软化，降低刀具性能，缩短使用寿命，所以在确定切削深度时，要充分考虑工件的刚性以及加工要求。对于钛合金加工，经过长期实践和理论总结，一般将切削深度控制在 $0.5\sim 5\text{mm}$ 的范围内，如此能在保证加工质量、刀具使用寿命和加工效率之间取得较好的平衡。

3.4 切削液

切削液在钛合金机械加工中起着冷却、润滑、清洗和防锈等作用,合理选用切削液对加工过程和结果影响显著,能有效降低切削温度,减少刀具和工件、切屑之间的摩擦,进而降低刀具磨损,提高加工表面质量。鉴于钛合金化学活性高,在加工时易与切削液中的某些成分发生化学反应,所以应选择与钛合金相容性好的切削液。常用切削液类型包括乳化液、极压切削油和合成切削液等。乳化液冷却性能突出,能快速带走切削区域产生的大量热量,适用于切削量大、发热严重的粗加工阶段,可有效防止工件和刀具因过热而损坏。极压切削油润滑性能优异,能在刀具与工件表面形成一层润滑膜,减少摩擦和黏结,适用于对加工精度和表面质量要求较高的精加工^[3]。合成切削液兼具良好的冷却和润滑性能,且使用寿命长,能满足高速切削时的冷却和润滑需求,保证加工过程的稳定性和加工质量。

4 加工环境对钛合金机械加工的影响

4.1 机床刚性

机床刚性对钛合金机械加工稳定性和质量影响关键。钛合金加工切削力大,若机床刚性不足,切削时易产生振动。振动会破坏切削过程的平稳性,使刀具与工件间产生冲击,加剧刀具的磨损,缩短使用寿命,同时振动还会在加工表面留下振纹,导致表面粗糙度增大,降低加工表面质量。所以加工钛合金时,要选择刚性好的机床,这类机床能承受较大切削力,减少振动产生,还要合理调整机床参数,如主轴转速、进给速度等,使机床处于最佳工作状态,提高加工过程稳定性,确保加工精度和表面质量满足要求。

4.2 夹具设计

夹具设计和制造精度影响工件装夹稳定性和加工精度。加工钛合金工件时,需设计合理夹具。夹具要能准确定位工件,保证工件在加工过程中位置固定,不发生松动和变形。夹紧力大小要适中,夹紧力过小,工件可能因切削力作用而移动,影响加工精度;夹紧力过大,会使工件产生弹性变形,导致加工后尺寸和形状出现偏差,同时夹具材料要具备良好耐磨性和耐腐蚀性,以承受加工过程中的摩擦和腐蚀,延长夹具使用寿命,降低生产成本,保障钛合金加工的稳定性和质量。

4.3 加工环境温度和湿度

加工环境温度和湿度影响钛合金机械加工。温度过高,刀具和工件热膨胀系数增大,加工时尺寸会发生变化,导致加工尺寸精度误差。温度变化还可能影响刀具材料性能,降低刀具硬度,加速刀具磨损。湿度过大,刀具和工件表面易吸附水分,引起锈蚀,影响刀具切削性能和工件表面质量,所以在加工钛合金时,要控制环境温度和湿度,一般将温度控制在20-25℃,相对湿度控制在40%~60%,为加工创造稳定环境,保证加工精度和质量^[4]。

4.4 人为因素

操作人员技能水平和责任心影响钛合金机械加工质量和效率。操作人员要熟悉钛合金加工特性和工艺要求,掌握正确操作方法和刀具调整技巧。钛合金加工难度大,不同刀具和工艺参数对加工结果影响明显,操作人员需根据实际情况合理选择和调整,同时操作人员要严格按操作规程操作,加强对加工过程监控和检查。在加工过程中,要密切关注刀具磨损、工件变形等情况,及时发现并解决问题,如调整切削参数、更换刀具等,确保加工过程顺利进行,提高加工质量及效率。

结语

综上所述,钛合金机械加工是一个复杂而精细的过程,受多种因素影响。通过深入分析这些因素,我们可以更加全面地了解钛合金加工的特性,为优化加工工艺提供理论依据。未来,随着科技的进步和加工技术的不断创新,我们有理由相信,钛合金机械加工的质量和效率将得到进一步提升,为钛合金在更多领域的广泛应用奠定坚实基础。同时,也期待更多学者和专家投身于此领域的研究,共同推动钛合金机械加工技术的不断进步。

参考文献

- [1]谭金刚,何斌,万轩瑞,等.钛合金表面沟槽结构纳秒激光加工实验研究[J].激光技术,2024,48(5):684-690.
- [2]王鑫,刘建慧,焦锋.基于尺寸效应的钛合金二维超声辅助精密切削特性研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2025,44(1):117-123.
- [3]那春雨,姜增辉,刘玮,等.钻削参数对钻削TC4小孔切削力的影响[J].制造技术与机床,2025(6):67-72.
- [4]吴高生,周瑞红,杨叶,等.钛合金铣孔加工切削力建模和粗糙度试验研究[J].机械工程与自动化,2025,54(2):48-51.