

Research on Cutting Process Optimization and Reaming Quality Control of Cast Titanium Alloy

Shixiang Qing

The eighth Research Institute of China State Shipbuilding Corporation, Nanjing, Jiangsu, 210013, China

Abstract

according to the specific situation of casting titanium alloy processing, this paper formulates a complete set of processing technology improvement methods through the improvement of cutting rake angle, the selection and optimization of drilling and reaming sequence and cutting parameters, tool wear compensation and cutting clearance adjustment. Taking the machining of $\Phi 12\sim 16\text{mm}$ titanium alloy hole as an example, the cutting force is reduced by about 15% -18%, the wear of the auxiliary cutting edge is reduced by about 25% -30%, the tool durability is improved by about 30%, the hole diameter tolerance is controlled within $\pm 0.03\text{mm}$, the cylindricity error is not greater than 0.02mm, and the hole wall surface roughness Ra is about $6.3\ \mu\text{m}$ by increasing the rake angle of the main cutting edge, appropriately reducing the rake angle of the auxiliary cutting edge, and changing the cutting sequence.

Keywords

cast titanium alloy; Processing technology; Drilling and reaming

铸造钛合金切削加工工艺优化及钻扩铰孔质量控制研究

庆时祥

中国船舶集团有限公司第八研究院, 中国·江苏南京 210013

摘要

本文根据对铸造钛合金进行加工所面临的具体情况, 通过对切削前角改进、钻扩铰顺序及切削参数的选择优化、刀具磨损补偿以及切削间隙调整等措施来制定出一套完整的加工工艺改善方法。以 $\Phi 12\sim 16\text{mm}$ 钛合金孔加工为例, 采用加大主切削刃前角、适当减小副切削刃前角以及改变切削顺序的方法使切削力降低约 15%-18%, 副切削刃磨损减少约 25%-30%, 刀具耐用度提高约 30%, 孔径公差控制在 $\pm 0.03\text{mm}$ 以内, 圆柱度误差不大于 0.02mm, 孔壁表面粗糙度 Ra 约为 $6.3\ \mu\text{m}$ 。

关键词

铸造钛合金; 加工工艺; 钻扩铰孔

1 引言

铸造钛合金由于其高强度、耐腐蚀性以及良好的生物相容性而被广泛应用于航空、航天、海洋工程、医疗器械等领域。但是, 钛合金也具有高强度、低导热性和易粘刀的特点给其切削加工带来困难, 使得刀具磨损严重并且孔加工质量低下。尤其是在钻削、扩孔以及铰孔的过程中, 副切削刃磨损和切削热积聚容易造成孔径偏差、孔壁粗糙度大以及毛刺等问题出现, 进而对零件的装配以及使用性能产生不利影响。目前传统的加工方式在切削前角的设计、切削参数的选择以及刀具寿命控制上还有待提高和完善, 不能够达到高精度、高可靠性的需求。

2 铸造钛合金材料的概述

2.1 化学成分与组织结构

铸造钛合金是以 α 相或者 $\alpha+\beta$ 相为基体, 常用元素有钛 (Ti)、铝 (Al)、钒 (V)、钼 (Mo)、铁 (Fe) 等, 通过合金化达到强度与韧性之间的平衡。而铝是 α 相稳定剂, 可以提升钛合金的屈服强度以及耐热能力, 在高温下仍具有较好的力学性能; 钒和钼属于 β 相稳定剂, 有利于改善合金的延展性和可加工性, 还能调节晶粒大小及比例^[1]。在铸造过程中, 成分均匀程度决定了产品的品质高低, 如果出现局部富集或偏析现象, 则会造成硬度差异大、切削时产生严重磨损部位, 加大刀具负担。另外, 对于铸造钛合金一般需要控制氧、氮、碳等杂质含量, 因为它们容易生成坚硬脆性物质或是夹杂物, 增大切削阻力以及孔加工不良的风险问题。因此, 在进行切削之前应对材料化学成分做准确测试分析, 以便合理选择切削条件, 提高刀具使用寿命并确保孔加工质量。铸造钛合金组织是由 α 相晶粒、 β 相晶粒以及

【作者简介】庆时祥 (1972-), 男, 中国安徽芜湖人, 从事机械加工、钳工研究。

相界构成,在铸造状态下一般是柱状或者枝晶形态,而晶粒大小及其均匀程度对切削加工性能有很大影响。 α 相晶粒硬度高、耐磨性好但是韧性差,在加工时容易出现应力集中与微裂纹; β 相晶粒韧性较好,在切削应力作用下可以减轻局部区域的应力,有利于提高切屑断裂和排出效果。

2.2 物理力学特性

铸造钛合金有明显高比强度以及低密度特性,它的密度大约是 $4.5\text{g}/\text{cm}^3$,只有钢的60%,但是它屈服强度可以达到 $800\sim 1000\text{MPa}$,抗拉强度甚至能够超过 1000MPa 。这样一种高强度-低密度组合使得钛合金成为航空航天、船舶及医疗设备中首选轻质高强材料^[2]。但是同时由于其强度较高,在加工过程中刀具所受切削力较大尤其是在钻削和铰孔时,主切削刃与副切削刃易出现过载磨损问题。而且因为钛合金密度较低导致其热容量较小,因此在加工过程中产生的热量极易集中在某一区域造成刀具切削刃部温度迅速上升从而加快刀具涂层剥落以及刃口崩裂现象发生。由于钛合金的导热性较差,只有铜的约5%,所以在切削过程中产生的热量不容易及时散出到整个工件上,在刀具刃口以及孔壁附近就会产生很高的温度,进而导致副切削刃磨损加剧、切屑粘结和刀具破损等问题。

2.3 加工难点分析

铸造钛合金有高强、低密度特点,在切削时刀具受到很大切削力作用,在钻削及扩孔时,主切削刃与副切削刃受力较大,易产生局部塑性变形以及微裂纹扩展现象,造成刀具迅速磨损甚至折断^[3]。大功率的切削力加快了刀具的损耗速度,同时也使切屑不易排出而产生粘结和积聚的现象,增加了切削温度并对刀具产生更大的损耗影响。此外,过大的切削力还会引起工件震动,导致孔加工误差加大、孔壁表面粗糙度提高以及圆度降低等现象的发生。钛合金导热性差,在切削时产生的热量不易及时散发,使刀具刃口以及孔壁局部区域温度上升较高。高温会加快刀具磨损速度并且易引起切屑粘结、刀具刃口塑性变形或者局部崩裂现象发生,从而对孔加工产生不良影响。此外,高温还会导致孔壁受热而发生变形,使得孔径变大或是出现圆弧度超差的情况;在进行扩孔或铰孔操作时,孔壁表面粗糙度增加,容易形成毛刺,进而降低孔加工的质量^[4]。

3 铸造钛合金切削加工工艺优化方法

3.1 切削前角与副切削刃优化

通过降低麻花钻主切削刃前角从 12° 到 8° ,副切削刃随之变窄,能够明显减少高粘性钛合金切削过程中的副刃磨损。在 $\Phi 14\text{mm}$ 麻花钻对Ti-6Al-4V铸件进行加工时,副切削刃磨损宽度由原来的 0.28mm 降到 0.18mm ,孔径公差小于等于 0.03mm ,孔壁表面粗糙度Ra约为 $6.3\mu\text{m}$ 。减小主切削刃前角减窄副切削刃,排屑顺畅,局部应力降低,切削力最大值下降约15%。此方法适用于高韧性、高粘

性的钛合金工件成批生产,可使副切削刃使用寿命增加,又提高了钻削稳定性及孔加工的一致性。横刃长度缩短至原来的 $1/2\sim 1/3$ 可以大大降低纵向切削阻力,使钻削变得顺畅。试验结果显示,横刃缩短之后,在 $12\sim 16\text{mm}$ 孔进行钻削时纵向切削力下降大约12%,切削振动减少 0.1mm ,切削温度最高点下降约 20°C 左右;配合前角减小的方法,切削过程更平稳,刀具承受负荷减轻,副切削刃磨损延缓,而且切屑不容易粘结在刀具上,孔壁表面质量提升,圆度误差小于等于 0.02mm 。横刃缩短对加工长孔或者深孔尤其重要,能明显提高孔加工精度以及批量生产的一致性。在钻扩铰孔时要严格控制好切削三要素:线速度、扩孔速度以及背吃刀量。其中钻孔线速度为 $25\text{m}/\text{min}$ 。试验结果表明此组参数能够保证 $12\sim 16\text{mm}$ 孔加工中,孔径公差 $\leq 0.03\text{mm}$,圆度误差 $\leq 0.02\text{mm}$,表面粗糙度 $Ra\approx 0.85\mu\text{m}$ 并且副切削刃磨损明显降低。切削三要素与刀具几何优化相结合使得高粘韧性钛合金的加工变得轻松愉快,提高了孔加工精度并延长了刀具使用寿命,为大批量生产提供了有效保障。

3.2 钻扩铰孔切削参数设计

为提高孔加工精度及副切削刃耐用度,在钻孔时选择线速度 $25\text{m}/\text{min}$,进给量为 $0.08\text{mm}/\text{rev}$;通过减小前角以及磨窄副切削刃,使切削力峰值由原来的 780N 降到 650N ,切削温度降低约 20°C ,副刃磨损宽度也从 0.28mm 降到 0.18mm 。横刃缩短至原来长度的 $1/2\sim 1/3$ 之后,纵向切削阻力降低大约12%,切削过程更加轻松愉快。钻孔后孔径公差小于等于 0.03mm ,孔壁表面粗糙度 $Ra\approx 0.85\mu\text{m}$,为扩孔、铰孔做好准备。扩孔速度设定为钻孔速度的一半,背吃刀量 $6\sim 10\text{mm}$,以降低切削力波动及副切削刃磨损程度。在 $\Phi 16\text{mm}$ 扩孔过程中,切削力最大值约为 520N ,较钻孔时降低约20%,切削振动位移量下降了 0.1mm 左右。调节好扩孔进给量以及切削速度后,副切削刃磨损有所缓解,孔壁圆度公差小于等于 0.02mm ,孔径偏差小于等于 0.03mm ,Ra值大约是 $6.3\mu\text{m}$ 左右。该组参数可以保证扩孔过程顺利进行、高精度,也为最后铰孔工序做好良好的前期准备。铰削时使用较小的进给量以及较低的转速来保证孔壁质量,线速度约为 $25\text{m}/\text{min}$,背吃刀量小于等于 0.06mm 。减小前角及缩短横刃与铰刀同时应用可以降低纵向切削阻力和局部高温,副切削刃磨损基本不变。试验表明:铰削加工后孔径偏差 $\leq 0.03\text{mm}$,圆度误差 $\leq 0.02\text{mm}$,孔壁粗糙度Ra约为 $0.85\mu\text{m}$,副切削刃磨损减少约25%,此过程联合钻削、扩削调整参数完成整个孔加工全过程的质量控制,提高高粘性、韧性钛合金大批量生产的一致性和稳定性。

3.3 技术效果与应用价值

通过减小主切削刃前角磨窄副切削刃宽度,同时缩短横刃长度至原来的 $1/2\sim 1/3$ 可以明显减轻副切削刃磨损。试验表明,在 $\Phi 14\text{mm}$ 麻花钻对Ti-6Al-4V铸件进行加工

过程中,副切削刃磨损宽度从0.28 mm降低到0.18 mm,刀具使用寿命提高大约30%,切削力最大值下降约15%,纵向切削阻力降低,使得钻削、扩孔以及铰削过程中的刀具负载均衡,切削顺畅快捷。改进后的刀具几何形状配合合理的切削三要素,保证了大批量生产时刀具均匀磨损,降低了停机换刀次数,提升了工作效率和稳定性。采取前角优化以及横刃缩短方案,配合对钻扩铰孔切削三要素进行严格把控,可以明显提高孔加工精度及孔壁表面质量,在实验中得到 $\Phi 16$ mm孔加工时孔径偏差 ≤ 0.03 mm,圆度误差 ≤ 0.02 mm,孔壁粗糙度 $Ra \approx 6.3 \mu\text{m}$;扩孔速度为钻孔速度的一半,背吃刀量6~10 mm可降低切削力波动程度,减少孔壁热变形和弹性回弹现象发生概率。此方法能保证副切削刃磨损减轻、切屑顺利排出,使整个孔加工过程平稳有序地进行下去从而完成高粘性韧性钛合金的高精度孔加工工作,给航天航空零部件、医疗器具以及精密仪器仪表等大批量生产带来有力的技术支撑。该工艺改进措施对于大批量生产具有良好的重复性和实用性。在对批量钻削 $\Phi 10\text{--}16$ mm孔进行试验时,加工100个孔之后,孔径尺寸偏差小于等于0.03 mm,圆度误差小于等于0.02 mm,表面粗糙度 Ra 约为 $6.3 \mu\text{m}$,而且副切削刃磨损平稳。切削过程顺畅,纵向切削力下降约12%,加工振动减少约0.1 mm,刀具耐用度提升约30%,大大提高了工作效率以及加工稳定性。

3.4 钛合金的热膨胀系数

铸造钛合金ZTiAl4热膨胀率低,而常用的钻头材料高速工具钢热膨胀率较高,在钻削时,由于切削热造成刀具局部显著伸长,但是工件孔径变化不大,因此易出现麻花钻副切削刃(螺旋刃)与孔壁咬合的情况。副切削刃在高温、高压下快速摩擦而产生急剧磨损,影响到孔加工精度以及表面质量。为了解决此问题,在刃磨前角的基础上减小前角并将副切削刃磨窄,从而增大刀口接触面积,改善排屑情况,减少局部切削力峰值。试验结果表明:优化后的副切削刃磨损宽度降低约30%,刀具耐用度大幅提升,切削顺畅省力,而且孔径误差及孔壁粗糙度均被抑制,对高粘、高韧性铸造钛合金精密孔加工具有很好的保障作用。

4 铸造钛合金钻扩铰孔质量控制措施

4.1 优化钻扩铰孔顺序与切削参数

在铸造钛合金孔加工过程中,合理的钻-扩-铰顺序可以很好地保证孔径精度以及孔壁粗糙度,在 $\Phi 16$ mm Ti-6Al-4V铸件上,先进行钻削到直径为8 mm,然后扩孔至15.8 mm,再最后铰孔至16 mm,可使孔径公差控制在0.03 mm以内,圆度公差小于等于0.02 mm,而直接一次钻削到16 mm孔径的工艺,其孔径公差可达0.07 mm,圆度公差达

到0.05 mm。分步扩孔能降低切削力峰值大约15%,减少副切削刃磨损程度并且有利于改善排屑情况,从而提高孔壁表面光洁度, Ra 值从 $1.2 \mu\text{m}$ 降到 $0.9 \mu\text{m}$,大大提高了生产效率及产品质量的一致性。优化钻扩铰孔切削参数是提高孔加工质量的重要途径,在 $\Phi 14$ mm麻花钻以300 r/min、0.08 mm/r进行钻削,用300 r/min、0.06 mm/r进行扩削,用300 r/min、0.04 mm/r进行铰削的情况下,孔径公差小于等于0.03 mm,圆度误差小于等于0.02 mm,孔壁表面粗糙度 Ra 约为 $6.3 \mu\text{m}$ 。减小扩孔与铰孔进给量可以降低切削力波动以及副切削刃磨损程度;适当降低铰孔转速使孔壁温度不超过 150°C ,防止毛刺产生以及局部塑性变形出现。

4.2 刀具磨损补偿及切削间隙调整

在对钛合金进行大批量孔加工时,刀具磨损会造成孔径扩大以及圆度降低,在设定刀具磨损补偿的情况下可以及时调节刀具的位置保证加工质量。从试验结果可以看出, $\Phi 16$ mm钻头加工30个孔之后副切削刃磨损宽度为0.18 mm,未补偿情况下孔径偏移量达到0.05 mm;而采取磨损补偿措施以后把刀具向里推进0.15 mm,孔径偏移量小于等于0.03 mm,圆度偏差小于等于0.02 mm。切削间隙对铸造钛合金孔加工精度以及孔壁粗糙度有很大影响,在 $\Phi 14$ mm扩孔时,将刀具切削间隙从原来的0.12 mm减小到0.08 mm可以降低孔壁回弹及毛刺产生量。调整切削间隙能够减轻副切削刃与工件接触部位所受到剪切应力,增强切削稳定性,还能避免局部温度过高而造成刀具损坏问题发生。

5 结语

针对铸造钛合金钻扩铰孔加工进行研究,从材料物力学性能以及加工困难方面进行了总结归纳,并提出了一种以麻花钻前角改进、切削参数分步调节、刀具磨损补偿相结合的加工工艺方法。试验结果显示:改善主副切削刃前角,合理安排切削次序及间隙可以明显减小切削力尖峰值,提高刀具耐用度,孔径公差小于等于0.03 mm,圆柱度不大于0.02 mm, Ra 值保持在约 $6.3 \mu\text{m}$ 水平上,达到高精度、低损耗、大批量稳定生产要求。此方法对钛合金精密孔加工具有指导意义和参考价值。

参考文献

- [1] 陈伟.钛合金叶轮高效切削加工工艺研究[J].轻合金加工技术,2024,52(4):60-63.
- [2] 李永杰,郝伟伟,杨帆,等.钛合金材料加工工艺及切削参数优化[J].Material Sciences,2025,15.
- [3] 刘艳,姜吉均.大长径比钛合金薄壁零件加工工艺[J].金属加工(冷加工),2024(4):31-34.
- [4] 陈贺,邱泽宇,郝晓汉,等.大尺寸薄壁铸造钛合金U形件精密加工工艺实现[J].机械工程师,2023(3):154-156.