

高温合金薄壁零件车削工艺研究

邢小强 吴海鹏 龙邵安 李 凯

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

摘 要：高温合金薄壁零件因材料特性与结构特点，车削加工面临诸多挑战。本文深入分析高温合金的物理力学性能及薄壁零件加工难点，研究车削工艺关键要素，涵盖刀具选择、参数优化、装夹支撑、冷却润滑等方面。探讨加工变形控制与稳定性提升方法，以及表面质量与性能保障措施，为高温合金薄壁零件车削工艺提供理论支持与实践指导。

关键词：高温合金；薄壁零件；车削工艺；加工变形；表面完整性

引言：高温合金薄壁零件在高温高压环境下具有优异的力学性能，但其车削加工存在显著挑战。高温合金的高强度、低导热性及加工硬化倾向导致刀具磨损严重，切削效率低。薄壁结构刚性弱，易受切削力和热变形影响，加工精度难以保证。现有研究在刀具优化、切削参数匹配及冷却润滑等方面取得进展，但加工变形与表面质量控制仍需深入探索。研究高温合金薄壁零件车削工艺，对提高加工效率、降低废品率具有重要意义。

1 高温合金材料特性与加工难点分析

1.1 高温合金的物理与力学性能

高温合金在高温环境下仍能保持高强度和高硬度，这种特性源于其独特的晶体结构和合金元素构成。当温度升高时，多数金属材料的强度会显著下降，而高温合金通过固溶强化和析出强化等机制，维持着稳定的力学性能^[1]。低导热性是高温合金另一显著物理特征，切削过程中产生的热量难以快速传导出，大量积聚在切削区域，不仅会改变材料的局部性能，还会加剧刀具的热损伤。加工硬化是高温合金车削中突出的问题。切削时，材料表层金属受到刀具挤压和摩擦，晶粒发生畸变并沿切削方向伸长，形成硬化层。硬化层的硬度显著高于基体，后续切削需克服更高的阻力，导致切削力增大。刀具与硬化层持续接触，磨损形式呈现多样化。黏结磨损常见于切削区域，高温使刀具材料与工件材料发生化学亲和，部分刀具材料被工件黏附带走。扩散磨损在高温作用下加剧，刀具与工件的元素相互扩散，改变刀具表层成分和性能，降低其切削能力。磨粒磨损则因硬化层中的硬质点对刀具表面造成刮擦，使刀刃逐渐变钝。

1.2 薄壁零件的结构特点与加工挑战

薄壁零件的结构特点决定了其刚性不足。零件壁厚较薄，自身支撑能力有限，在切削力作用下易产生弹性变形。这种变形随切削位置变化而改变，导致切削深

度和进给量出现波动，影响加工精度。刚性不足还使零件对振动极为敏感，切削过程中容易出现颤振。颤振会使刀具与工件之间产生周期性相对位移，在已加工表面留下振纹，破坏表面完整性。热变形是薄壁零件加工中的棘手问题。切削产生的热量使零件局部温度升高，薄壁结构的散热条件差，温度分布不均匀，导致不同部位的热膨胀量存在差异。这种差异引发的内应力会使零件发生弯曲或扭曲，待温度冷却后，零件形状无法完全恢复，形成尺寸误差。残余应力的影响同样不可忽视，车削过程中，材料内部的应力平衡被打破，新的残余应力在零件内部积聚。当残余应力超过材料的屈服极限时，零件会产生缓慢的塑性变形，影响长期使用中的尺寸稳定性。表面质量与零件疲劳寿命存在密切关联。薄壁零件在服役过程中常承受交变载荷，表面粗糙度较高的区域易形成应力集中点，成为疲劳裂纹的起始源。切削过程中产生的微裂纹、划痕等表面缺陷，会降低零件的抗疲劳能力。表层金属的塑性变形和相变也会改变表面层的力学性能，影响零件在循环载荷下的耐久性。确保表面质量稳定，需在抑制振动和控制热损伤的同时，减少刀具与工件表面的剧烈摩擦。

2 车削工艺关键要素研究

2.1 刀具材料与几何参数选择

刀具材料的性能直接影响切削效果。硬质合金具有较高的硬度和耐磨性，在中等切削速度下能保持稳定的切削性能，适用于高温合金的粗加工和半精加工。陶瓷材料硬度更高，耐热性强，可在较高切削速度下使用，但脆性较大，在切削力波动时容易崩刃，更适合切削条件稳定的精加工。CBN材料具备极高的硬度和耐磨性，能承受极高的切削温度，在高速切削高温合金时表现出良好的耐磨性，不过成本较高，通常用于精度要求极高的场合。刀具几何角度的设计需结合材料特性调整。前

角影响切削力的大小和切屑的形成,较小的前角会增加切削力,过大的前角则可能削弱刃口强度,需根据高温合金的硬度选择合适数值。后角决定刀具与工件已加工表面的摩擦程度,适当增大后角可减少摩擦,但会降低刀具的刚性。主偏角对径向切削力有显著影响,减小主偏角可降低径向力,有助于减少薄壁零件的变形,但会使刀具散热面积发生变化,需平衡切削力与散热需求。

2.2 切削参数优化

切削速度的变化会改变切削区温度和刀具磨损速率。速度过低时,切削力增大,材料变形充分,容易引发加工硬化;速度过高则会使切削温度急剧上升,加速刀具磨损。进给量直接影响表面粗糙度和切削力,进给量增大,表面残留面积高度增加,同时切削力上升,可能导致薄壁零件产生更大变形。切削深度过大会使切削力显著增加,加剧零件振动和变形;过小则可能无法切除前期加工产生的硬化层,影响加工质量^[2]。多目标参数协同优化需综合考虑各项指标。降低切削力可减少零件变形,控制温度能延长刀具寿命,两者需通过调整参数相互协调。例如,在保证一定切削效率的前提下,适当降低切削速度并减小进给量,可在降低切削力的同时控制温度上升,形成有利于加工稳定的参数组合。

2.3 装夹与支撑技术

薄壁零件的装夹方式需兼顾固定效果与变形控制。真空吸盘通过均匀的大气压力将零件吸附固定,能减少局部应力集中,适用于平面薄壁零件的加工,但吸附力有限,不适用于切削力较大的场合。低刚度夹具采用弹性材料制造,在夹紧时可随零件形状轻微变形,避免刚性夹紧导致的零件扭曲,适合形状复杂的薄壁结构。辅助支撑结构能有效抑制加工变形。填充介质如低熔点合金或专用胶体,注入零件内部空腔后可提高局部刚性,切削完成后通过加热或溶解去除。临时加固是在零件薄弱部位增加工艺支撑,加工结束后再将其切除,这种方式能显著提升零件在切削过程中的抗变形能力,尤其适用于形状不规则的薄壁件。

2.4 冷却润滑策略

干切削无需冷却介质,可避免冷却液带来的污染和成本,但切削区热量无法及时散发,容易导致刀具过热和工件表面氧化,仅适用于切削量小且散热条件较好的情况。微量润滑通过向切削区喷射少量润滑油雾,在刀具与切屑、工件接触表面形成润滑膜,减少摩擦和磨损,同时降低对环境的影响,但润滑效果受喷射位置和油量控制影响较大。低温冷却利用液态气体将切削区温度降至较低水平,能有效抑制加工硬化和刀具热磨损,

不过低温可能改变材料的力学性能,需谨慎控制冷却范围。冷却方式对刀具寿命和表面完整性影响明显。充分的冷却可减少刀具与材料之间的粘结和扩散,延缓磨损进程。润滑效果良好的冷却方式能减少切削过程中的摩擦,降低表面粗糙度,避免表面出现撕裂或划痕。不同冷却方式对高温合金表层组织的影响存在差异,选择时需考虑对零件疲劳性能的潜在作用。

3 加工变形控制与稳定性提升方法

3.1 工艺路线规划

粗加工与精加工的阶段划分需依据零件形状和精度要求。粗加工阶段以去除大部分余量为主要目标,采用较大的切削参数快速成形,同时为后续加工预留均匀的余量。精加工阶段则聚焦于尺寸精度和表面质量,选用较小的切削参数,减少切削力和热输入对零件的影响。阶段划分的核心是避免粗加工产生的变形和应力对精加工精度造成干扰。在阶段转换过程中,可安排时效处理,释放前期加工积累的应力,为后续加工创造更稳定的条件。对称加工通过在零件对称位置交替切削,使两侧受力均衡,减少单侧切削引发的弯曲变形。分层切削将切削深度分散为多层,每层切削量较小,可降低单次切削力,减轻零件的瞬时载荷,减少振动幅度。这些策略通过调整切削路径和载荷分布,降低加工过程中的不稳定性,改善零件的形状精度。

3.2 动态切削力调控

切削力监测技术可实时捕捉加工过程中的力值变化,通过传感器将信号传输至控制系统,形成对切削状态的实时感知。实时反馈控制技术根据监测到的力值调整切削参数,当切削力超过设定阈值时,自动降低进给量或切削深度,避免因力值过大导致零件变形或刀具损坏。在复杂曲面加工中,监测点的合理布置能更精准地捕捉力的变化趋势。变切削参数通过周期性改变进给量或切削速度,打破振动的周期性,减少颤振能量的积累。主动阻尼装置安装在机床或夹具上,通过产生与振动方向相反的力抵消部分振动能量,降低振动幅度。这些方法从抑制振动源和削弱振动传递两个角度入手,提升加工过程的稳定性。

3.3 残余应力管理

加工顺序影响残余应力的分布状态。先加工零件刚性较强的部位,再处理薄弱区域,可利用刚性部位的支撑作用减少加工过程中的变形,避免应力集中。走刀路径的选择需遵循由内向外或由远及近的原则,使零件在切削过程中受力均匀,减少局部应力叠加^[3]。对于具有复杂内腔的零件,走刀路径的优化需结合腔壁厚度变化

灵活调整。后处理工艺与加工过程协同作用可有效降低残余应力。去应力退火通过加热零件至特定温度并缓慢冷却,使内部应力逐渐释放,减少后续使用中的变形风险。振动时效利用低频振动使零件内部产生微观塑性变形,促进应力松弛,适用于不宜高温处理的零件。这些工艺通过不同机制消除或缓解残余应力,提升零件的尺寸稳定性。

4 表面质量与性能保障措施

4.1 表面完整性评价指标

表面粗糙度是衡量表面微观不平度的关键指标,其数值大小直接反映加工表面的光滑程度。粗糙度过高会增加零件接触时的摩擦阻力,还可能成为应力集中的起点。加工硬化层是切削过程中材料表层金属受塑性变形影响形成的硬化区域,适当的硬化层可提高表面耐磨性,但过厚的硬化层会使材料脆性增加,降低抗冲击能力。微裂纹等缺陷多源于切削过程中的剧烈摩擦或热应力,这些微小裂纹在零件服役过程中可能逐渐扩展,影响整体结构强度。表面残余应力对零件疲劳性能的影响显著。残余压应力能抵消部分外部载荷产生的拉应力,延缓疲劳裂纹的萌生和扩展,延长零件使用寿命。残余拉应力则会降低材料的疲劳极限,使零件在交变载荷作用下更易发生疲劳失效。因此,控制表面残余应力的类型和分布状态,对保障零件长期使用性能至关重要。

4.2 工艺参数与表面质量的关联模型

切削参数对表面粗糙度的预测需综合考虑多方面因素。切削速度通过影响切削温度和刀具磨损状态改变表面粗糙度,速度过低时材料易出现撕裂现象,导致粗糙度升高;速度过高则可能因刀具过热磨损使表面出现不规则划痕。进给量与表面粗糙度呈正向关联,进给量增大,刀具在表面留下的刀痕间距和深度增加,粗糙度随之上升。切削深度的变化会影响切削力大小,进而改变表面塑性变形程度,间接影响粗糙度。通过分析这些参数与粗糙度之间的内在联系,可建立相应的预测方法,为参数优化提供依据。刀具磨损状态与表面缺陷存在明显的映射关系。刀具刃口磨损变钝后,切削过程中对材料的挤压作用增强,易在表面产生撕裂或挤瘤,形成不规则的表面缺陷。刀具后刀面磨损会增大与工件表面的摩擦,导致表面温度升高,可能引发热裂纹。当刀具出现崩刃

等严重磨损时,加工表面会出现明显的台阶或沟槽,严重破坏表面完整性。通过观察表面缺陷的类型和特征,可推断刀具的磨损状态,为及时更换刀具提供参考。

4.3 表面改性技术探索

滚压工艺通过机械挤压使零件表面产生塑性变形,降低表面粗糙度,同时在表层形成残余压应力,提高表面硬度和耐磨性。滚压过程中,表层金属晶粒被细化,组织更加致密,能有效封闭表面微小孔隙和裂纹。喷丸工艺利用高速弹丸撞击零件表面,使表层材料发生塑性变形并引入残余压应力,增强表面抗疲劳性能。弹丸的大小、速度和喷射角度不同,对表面改性的效果也存在差异,需根据零件材料和性能要求进行调整。复合加工工艺将车削与激光冲击强化相结合具有一定可行性。车削保证零件的尺寸精度和基本表面质量,激光冲击强化通过高能激光束产生的冲击波作用于零件表面,使表层材料发生塑性变形和相变,形成更深的残余压应力层,进一步提高表面硬度和抗疲劳性能。这种复合工艺可充分发挥两种加工方式的优势,在保证加工效率的同时显著提升零件表面性能。不过,激光参数与车削参数的匹配需要精细调控,以避免激光处理对已加工表面精度造成不利影响。

结束语

高温合金薄壁零件车削工艺研究,对提升零件加工质量与性能意义重大。通过分析材料特性与加工难点,优化刀具、切削参数、装夹支撑及冷却润滑等关键要素,采取有效变形控制与稳定性提升方法,保障表面质量,可显著改善加工效果。未来,需进一步探索智能化、绿色化加工技术,推动高温合金薄壁零件加工工艺持续创新与发展。

参考文献

- [1]黄科峰.薄壁套类零件数控车削加工工艺分析[J].内燃机与配件,2021(5):90-91.
- [2]辛道银,陈亮,刘雨兰,等.铝合金薄壁端盖零件高速铣削加工工艺设计[J].机械制造,2024,62(09):79-84.
- [3]王优强,李梦杰,赵涛,等.铝合金薄壁零件铣削加工颤振主动抑制方法[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(12):3351-3357.