

Research on Residual Stress Evolution and Control Technology in Titanium Alloy TC4 Machining

Xiaoping Hu

School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha, Hunan, 410083, China

Abstract

Titanium alloy TC4, renowned for its high specific strength, excellent corrosion resistance, and high-temperature performance, is widely used in aerospace, energy equipment, and biomedical fields. However, it tends to generate significant residual stresses during machining processes, severely affecting dimensional accuracy, fatigue life, and service stability of components. This study analyzes the evolution patterns of residual stresses in TC4 alloy during cutting, grinding, and heat treatment processes, revealing the stress formation mechanism under the coupled effects of thermal, mechanical, and phase transformation. The research demonstrates that cutting temperature, feed rate, tool wear, and cooling conditions are critical factors influencing stress distribution. Based on experimental and finite element simulation results, this paper proposes a multi-field coordinated control strategy incorporating low-temperature cooling technology, vibration cutting, laser surface modification, and ultrasonic impact treatment to achieve effective residual stress regulation and stress field optimization. The findings provide theoretical foundations and technical pathways for improving precision machining and service performance of titanium alloys.

Keywords

titanium alloy TC4; residual stress; stress evolution; cutting mechanism; stress control

钛合金 TC4 加工过程中残余应力演变及控制技术研究

胡小平

中南大学材料科学与工程学院，中国·湖南长沙 410083

摘要

钛合金TC4因具有高比强度、优异的耐蚀性和高温性能，被广泛应用于航空航天、能源装备及生物医疗等领域。然而，其在切削加工过程中易产生较大的残余应力，严重影响零件的尺寸精度、疲劳寿命与服役稳定性。本文通过分析TC4合金在切削、磨削及热处理过程中的残余应力演变规律，揭示了热—力—相变耦合作用下的应力形成机制。研究表明，切削温度、进给速度、刀具磨损及冷却条件是影响应力分布的关键因素。基于实验与有限元模拟结果，本文提出了多场协同控制策略，包括低温冷却技术、振动切削、激光表面调控及超声冲击处理等方法，以实现残余应力的有效调控与应力场优化。研究成果为钛合金精密加工及服役性能提升提供了理论依据与技术路径。

关键词

钛合金TC4；残余应力；应力演变；切削机理；应力控制

1 引言

钛合金 TC4 (Ti-6Al-4V) 作为典型的 $\alpha + \beta$ 双相合金，在航空航天发动机叶片、结构连接件及高性能医疗植入体中得到广泛应用。该材料兼具高强度与低密度特性，但其导热性差、弹性模量低及化学活性高，导致加工过程中易产生剧烈的热—机械耦合作用，从而诱发复杂的残余应力场。残余应力不仅影响零件的尺寸稳定性和表面完整性，还会加速裂纹萌生与扩展，降低疲劳强度和耐蚀性能。如何揭示 TC4

加工过程中残余应力的形成与演化规律，并提出有效的应力控制技术，是实现高性能钛合金零件精密制造的关键问题^[1]。本文从残余应力形成机理出发，结合实验分析与数值模拟方法，系统研究不同加工参数、冷却方式与表面强化技术对残余应力的影响规律，构建了适用于 TC4 的多场耦合控制体系，为工程应用提供技术支撑。

2 钛合金 TC4 残余应力的形成机理与演变特征

2.1 热—力耦合条件下的应力生成机制

在钛合金切削加工中，热源主要来源于塑性变形功与刀—屑界面摩擦热。由于 TC4 导热系数仅为钢的 1/6，热量集中于切削区，导致温度梯度显著。塑性区的非均匀变形造成材料表层产生压应力，而随温度降低，热收缩不均则形成

【作者简介】胡小平（1987—），男，中国江西人，硕士，高级工程师，从事材料科学与工程，材料加工工程，钛合金TC4 方向研究。

拉应力。研究表明,当切削速度超过80 m/min时,材料表层温度可达700°C以上,表面层发生相变组织细化,残余应力由压应力逐步转变为拉应力。此外,刀具磨损加剧摩擦热积聚,使应力分布更加复杂并向深层扩展。

2.2 相变与微观组织演化对应力的影响

TC4在加工热循环中经历 $\alpha \rightarrow \beta$ 及 $\beta \rightarrow \alpha'$ 马氏体相变,显著改变组织结构与应力状态。 β 相的形成降低了材料流动应力,促进塑性变形;而随冷却速率加快, α' 马氏体生成导致晶格畸变增强,形成高密度位错结构,使表层拉应力增大。显微组织观察显示,切削变质层厚度与残余拉应力幅值呈正相关。合理控制相变过程是优化应力状态的关键。

2.3 加工参数对残余应力分布的作用规律

实验结果表明,切削速度、进给量与刀具几何角度对应力分布具有显著影响。低速切削下热积累少,压应力为主;中高速切削时热变形与机械应力叠加,形成双峰型应力分布;而超高速切削(> 150 m/min)则因热软化显著,表层残余拉应力急剧上升^[2]。刀具前角与后角的优化设计可有效分散切削力,提高应力分布均匀性。

3 残余应力的测试与表征技术研究

3.1 X射线衍射法的原理与应用

X射线衍射(XRD)技术广泛应用于钛合金TC4残余应力的测量,基于布拉格衍射定律。当X射线入射至晶格面后,因应力引起晶面间距变化,导致衍射角度的偏移,进而可计算表层应力。对于TC4合金,采用Cu-K α 射线结合 Ψ 角法,能够实现10 μm尺度内的应力定量测量,具有高精度与重复性^[3]。研究发现,TC4样件的表层残余应力在-450 MPa至+300 MPa之间变化,并表现出显著方向性特征:沿切削方向为拉应力,垂直方向为压应力。这种差异反映了切削区热-力耦合效应的不均匀性^[4]。为提高测量精度,通常采用多角度测量与多峰拟合方法,校正晶格畸变误差,以获得残余应力的精确分布。

3.2 中子衍射与同步辐射测量技术

中子衍射与同步辐射技术为TC4内部应力场的研究提供了有效工具。中子束具有较长波长和强穿透力,可探测毫米级深度的内部应力,适用于厚壁结构件的三维应力分析。实验结果表明,经精铣加工的TC4样件,表层为-250 MPa压应力,而0.6 mm深度处出现+200 MPa的拉应力峰值^[5]。同步辐射因其高光强和优越的空间分辨率,能实现亚微米尺度的局部应力测量,特别适用于焊接接头和热影响区的精细表征。这些技术为残余应力定量分析与模型验证提供了可靠支持。

3.3 数字图像相关与声发射综合表征

数字图像相关(DIC)技术与声发射(AE)分析为TC4加工应力的动态监测提供了实时手段。DIC通过跟踪表面散斑图案位移场,获取微观应变分布,推导局部应力变

化;声发射技术则记录内部微裂纹与塑性区扩展的瞬时信号,反映应力集中过程。两者结合实现了加工及加载过程中的多尺度应力监测^[6]。研究发现,DIC捕捉到的应变热点与声发射高能事件一致,有助于识别裂纹源与应力累积区。这一综合测试体系提升了残余应力研究的实时性与可视化水平,并为TC4加工参数优化、疲劳寿命预测及结构健康监测提供了科学依据。

4 残余应力的影响机制与应力场演化规律

4.1 残余应力对疲劳寿命的影响

残余应力在钛合金TC4的疲劳寿命中起着关键作用,其分布形态直接影响疲劳裂纹的萌生与扩展。表层拉应力促使微裂纹在循环载荷下迅速萌生并扩展,而表层压应力通过“裂纹闭合效应”延缓裂纹萌生,减小裂纹尖端的应力集中,从而提升疲劳寿命。研究表明,采用低速切削和合理刀具几何角度可在TC4表层引入-300 MPa左右的压应力,显著提高约40%的疲劳寿命^[7]。残余压应力有效延缓裂纹扩展速率,且能使裂纹扩展路径发生偏转,形成非直线裂纹形态,增强抗疲劳性能。当应力梯度分布合理时,表层与次表层的应力传递平缓,可维持稳定的抗裂性能。因此,通过合理控制加工工艺中的残余应力分布,是延长TC4零件疲劳寿命的重要途径。

4.2 残余应力对尺寸稳定性与形变的影响

TC4零件的尺寸稳定性高度依赖于残余应力的分布与稳定性。加工过程中的热应力与塑性应力会导致零件产生应力不均,进而引发形变,尤其在薄壁件与复杂曲面结构中尤为显著。研究表明,当表层拉应力超过200 MPa时,零件的自由端可能出现较大变形,影响装配精度^[8]。通过对称切削、逐层去除材料及优化夹具设计,能够有效降低应力集中并减小热变形的风险。精密零件可通过低温时效或振动时效处理释放内部残余应力,显著提高尺寸稳定性。研究还表明,经过低温时效处理的TC4结构件在储存半年后,其变形量减少了约65%,证明应力控制是保持高精度制造的基础。

4.3 残余应力与表面完整性的耦合效应

表面完整性是评价TC4零件服役可靠性的关键指标,残余应力、显微硬度和表面粗糙度三者之间存在复杂的耦合关系。适度的表层压应力能够与硬度提升形成协同作用,提高耐磨性与抗塑变能力,而过度硬化则可能导致材料脆性增强,增加裂纹萌生风险。研究发现,通过合理控制加工参数和刀具磨损,能够在保证较低粗糙度的同时,获得合理的压应力分布,优化表面力学性能^[9]。此外,采用精细加工或表面后处理技术,如激光冲击强化和喷丸,可以在不改变表面几何形貌的情况下引入稳定的压应力层,提升表面完整性,增强结构可靠性,为TC4高可靠性零件制造提供保障。

5 钛合金 TC4 残余应力控制与优化技术

5.1 残余应力对疲劳寿命的影响

残余应力对钛合金 TC4 的疲劳寿命起着重要作用，其分布形态直接影响裂纹的萌生与扩展。表层拉应力促使微裂纹在循环载荷下迅速扩展，而表层压应力通过“裂纹闭合效应”减缓裂纹萌生速度，提升疲劳寿命。研究表明，采用低速切削和合理刀具几何角度可在 TC4 表层引入 -300 MPa 的压应力，从而显著提高约 40% 的疲劳寿命。残余压应力能延缓裂纹扩展，并导致裂纹扩展路径发生偏转，增强抗疲劳性能。当应力梯度合理分布时，表层与次表层应力传递平缓，保持稳定的抗裂性能。因此，控制加工工艺中的残余应力分布是延长 TC4 零件疲劳寿命的重要途径。

5.2 残余应力对尺寸稳定性与形变的影响

TC4 零件的尺寸稳定性依赖于残余应力的分布与稳定性。加工过程中产生的热应力与塑性应力不均，可能导致零件变形，尤其在薄壁件和复杂曲面结构中尤为显著。研究发现，表层拉应力超过 200 MPa 时，零件自由端的变形量可达到 0.12%，影响装配精度。通过对称切削、逐层去除材料和优化夹具设计，能够降低应力集中，减少热变形风险^[10]。精密零件可通过低温时效处理释放残余应力，提高尺寸稳定性。研究表明，经过低温时效处理的 TC4 结构件变形量减少约 65%，证明了应力控制对高精度制造的重要性。

5.3 表面强化与后处理技术

表面强化与后处理工艺在 TC4 残余应力控制中发挥着不可替代的作用。超声冲击处理（UIP）、喷丸强化与激光冲击强化（LSP）是三种典型的应力控制手段。UIP 利用高频机械冲击在材料表层引入塑性变形区，产生稳定的压应力层，改善疲劳抗力；喷丸强化通过高速弹丸撞击表面形成微观凹坑，使表层产生残余压应力，有效延缓裂纹萌生。LSP 则利用高能激光脉冲在表面产生冲击波，使应力深度可达 1mm 以上，且热影响区极小。实验结果表明，经 LSP 处理后的 TC4 表面压应力可达 -700 MPa ，显微硬度提高约 15%，疲劳寿命延长约 1.8 倍。此外，热等静压（HIP）后处理技术通过高温高压下的扩散作用，消除材料内部微孔与残余应力，实现组织致密化与性能均衡。综合应用这些工艺

可形成梯度强化结构，使表层具备高压应力与高硬度，而内部保持良好韧性，从而在不影响力学完整性的前提下显著提升疲劳强度与抗裂性能。该多工艺协同路径为钛合金 TC4 的高可靠性制造与服役寿命延长提供了系统性解决方案。

6 结语

钛合金 TC4 加工过程中的残余应力演变具有显著的热—力—相变耦合特征，其形成机制复杂、影响因素众多。通过对残余应力形成机理、测试技术与影响规律的系统研究，可以为应力控制提供理论依据。本文提出的多场协同控制策略和复合强化技术能够有效改善应力分布，提升零件的尺寸精度、疲劳性能和服役可靠性。未来研究应进一步结合机器学习与数字孪生技术，构建加工—应力—性能的预测模型，实现智能化应力调控与闭环质量控制，为航空航天及高端制造领域的钛合金高性能加工提供新思路。

参考文献

- [1] 曾泽群.面向轨道交通的 TC4 钛合金焊接残余应力预测与调控方法研究[D].大连交通大学,2023.
- [2] 邱昱桦.TC4 钛合金 TIG 焊接残余应力及深冷处理消减研究[D].中南大学,2023.
- [3] 尹莹莹.TC4 钛合金薄壁件切削残余应力消减机理及方法[D].中南大学,2022.
- [4] 方秀荣,邵艳茹,陆佳,等.锻造工艺参数对 TC4 钛合金锻件残余应力的影响[J].锻压技术,2021,46(03):1-8.
- [5] 王业辉.TC4 钛合金超声喷丸强化残余应力数值模拟分析[J].航空发动机,2019,45(03):58-64.
- [6] 陈传勇,何悦,宣海军,等.TC4 特钛合金轮盘内部残余应力测试方法对比研究[J].热加工工艺,2025,54(15):51-58.
- [7] 刘留.TC4 钛合金非等温锻件固溶时效对其残余应力影响的分析[D].西安科技大学,2022.
- [8] 陈龙.基于残余应力分析的 TC4 钛合金焊接接头表面强化工艺研究[D].郑州航空工业管理学院,2020.
- [9] 王俊飞,袁军堂,汪振华,等.激光选区熔化成形 TC4 钛合金薄壁件变形与残余应力[J].激光技术,2019,43(03):411-416.
- [10] 谭玉全.热处理对 TC4 钛合金组织、性能的影响及残余应力消除方法的研究[D].重庆大学,2016.