

离心式滚磨光整加工钛合金的数值模拟分析

张晓东, 李秀红, 李文辉, 杨胜强

(太原理工大学 机械工程学院, 太原 030024)

摘要: **目的** 研究离心式滚磨光整加工对钛合金表层残余应力场的影响。**方法** 利用有限元分析软件 ABAQUS 建立了加工过程中磨块碰撞 TC4 钛合金材料的三维有限元模型, 对碰撞过程中的能量变化、材料应变及不同光整参数对工件表面残余应力场分布规律的影响进行分析, 对比碳化硅磨块与氧化铝的加工效果。**结果** 磨块参数对残余压应力峰值影响显著, 但对其出现的位置影响不大。与碳化硅磨块相比, 氧化铝磨块更适合于加工钛合金。**结论** 有限元模拟可以探讨磨块碰撞作用下钛合金材料残余应力场的分布规律, 优化滚磨光整加工钛合金的工艺参数。碰撞模拟证明, 氧化铝磨块更适用于钛合金材料的滚磨光整加工。

关键词: 滚磨光整加工; 有限元模拟; 残余压应力

中图分类号: TG175 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2014)05-0011-05

Numerical Simulation Analysis of the Centrifugal Roll Finishing of Titanium Alloy

ZHANG Xiao-dong, LI Xiu-hong, LI Wen-hui, YANG Sheng-qiang

(School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the residual stress field on titanium alloy after centrifugal roll finishing. **Methods** By using finite analysis software ABAQUS, a 3D finite element model was built for the collision between centrifugal grinding block and TC4 titanium alloy materials. The system energy conversion, material strain and regularity of residual stress field were analyzed with different finishing parameters, and the processing effects were compared between SiC grinding block and Al_2O_3 grinding block. **Results** The simulation results showed that the parameters of grinding block had significant effects on the peak value of the compressive residual stress, but had no effect on its occurrence location. Compared with SiC grinding block, the Al_2O_3 grinding block was more suitable for processing titanium alloy. **Conclusion** Finite element simulation could be used to investigate the distribution rule of the Ti alloy material residual stress field, and to guide the optimization of the technological parameters of titanium alloy processing. The crash simulation verified that Al_2O_3 grinding block was more suitable for centrifugal roll finishing of Ti alloy material.

KEY WORDS: centrifugal barrel finishing; finite element simulation; compressive residual stress

表面滚磨光整加工技术是指磨块在盛有零件和加工介质的滚筒中以复杂的运动方式对零件表面进

收稿日期: 2014-05-08; 修订日期: 2014-08-18

Received: 2014-05-08; Revised: 2014-08-18

基金项目: 国家自然科学基金主任基金(51345010); 高等学校博士学科点专项科研基金课题(20131402110002)

Fund: Supported by the Director Foundation of National Nature Science Foundation (51345010) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(20131402110002)

作者简介: 张晓东(1989—), 男, 河南人, 硕士, 主要研究方向为精密表面光整加工技术。

Biography: ZHANG Xiao-dong(1989—), Male, from Henan, Master, Research focus: finishing technology of the precision surface.

行碰撞、滚压及微量磨削^[1],去除加工毛刺,降低零件的表面粗糙度,改善表面层的力学性能,达到改善零件使用性能和提高零件寿命的目的^[2]。在滚磨光整加工的过程中,大量的磨块连续对零件表面进行碰撞,使零件表面产生塑性变形,实现加工硬化,可以提高零件表面的硬度,更重要的是可使零件表层一定深度范围内形成残余压应力层^[3],从而减缓疲劳裂纹的萌生和扩展,提高零件的疲劳寿命^[4-7]。

钛合金具有熔点高、密度小、耐生物侵蚀等优点,被广泛应用于机械工业、航空航天、生物医疗等高技术领域,但由于自身耐磨性差,抗疲劳性能不高,制约了进一步的开发和应用^[8-9]。对滚磨光整加工技术的研究,单纯采用实验显然不太经济,基于有限元方法的残余应力场数值模拟^[10-12],能够节省大量的时间和费用,更快地得到较优的结果,为进一步研究滚磨光整加工提高钛合金抗疲劳性能的机理提供基础。

笔者使用离心式滚磨光整加工技术对钛合金进行表面光整强化,并使用有限元方法对颗粒碰撞作用下 TC4 钛合金材料的残余应力场进行模拟与分析。

1 有限元模型的建立

碰撞属于高度非线性问题,大量的研究表明,ABAQUS/Explicit 模块使用的动态显示接触对算法非常适用于处理动态接触——碰撞问题^[13],应用 ABAQUS/Explicit 研究滚磨光整加工中磨块对工件的碰撞具有可行性。使用 Johnson-Cook 模型作为材料的本构模型,该模型能够较好地描述材料屈服强度受应变率、温度软化及加工硬化效应的影响。模型中所用材料的基本力学性能见表 1。

表 1 材料的基本力学性能

Tab.1 The basic mechanical properties of material

材料	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E / GPa	μ
Al ₂ O ₃	3965	300	0.2

在实际加工过程中有成千上万颗磨块对工件进行反复撞击,直接模拟该过程难度较大,因此建立单颗磨块碰撞工件的模型来分析不同参数下工件表面残余应力场的分布规律。工件的几何尺寸为 16 mm×16 mm×10 mm,磨块直径分别为 4,5,6 mm。为缩短仿真时间,设定磨块距工件表面的初始距离为 0。

设定工件的边界条件为位移/旋转,约束工件底

面的所有自由度。在滚磨光整加工过程中,由于工件表面产生的残余应力主要来自于磨块方向的撞击,在 ABAQUS/Explicit 中将磨块在 x, y 方向上的速度约束为 0,并在 z 方向上对磨块定义初始速度。相对于工件材料,磨块的强度、硬度都很高,为提高计算效率,将磨块约束为刚体。

根据磨块对工件碰撞加工的原理,定义接触类型为面-面接触,并约束磨块的表面为主面。在磨块碰撞工件的过程中,允许两接触面产生相对滑动,选择 ABAQUS 里默认的有限滑移公式^[14]。碰撞过程为两接触面间的瞬态接触,由于接触面之间的摩擦对模型的响应影响不大,同时为了减小模型的收敛难度,忽略接触面之间的摩擦。

设置目标物体单元类型为线性减缩积分单元 C3D8R,确保当网格出现较大的变形时,分析精度不会受到太大的影响。为了提高计算精度,将其划分为六面体网格。磨块表面为球面,设置其单元类型为更适用于求解接触问题的线性四面体单元 C3D4。网格划分后的模型如图 1 所示。

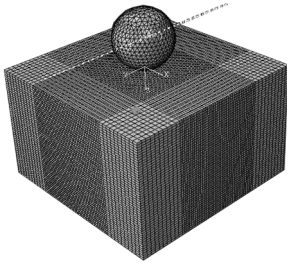


图 1 有限元仿真模型

Fig.1 Finite element model for simulation

2 有限元结果分析

2.1 碰撞过程中的能量分析

采用直径为 5 mm 的球体磨块,以 12 m/s 的速度对工件进行碰撞,图 2 为碰撞过程中系统动能、内能和塑性耗散能随时间的变化曲线。可以看出,在碰撞过程中,系统的大部分动能都转换为内能,仅有很小一部分以其他形式散发出去。

2.2 应力波作用下的材料应变

由图 2 可知,4.8×10⁻⁵ s 之前为磨块与工件碰撞接触,在冲击载荷作用下,接触表面产生强大的应力波。图 3 为碰撞接触力的变化,可以看出工件受到的最大应力为 1063 MPa,大于工件材料室温下的屈服

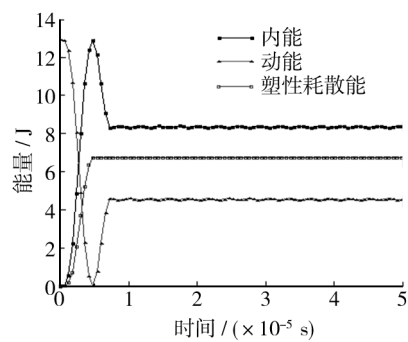


图 2 碰撞过程中的能量分析

Fig. 2 Energy analysis in the process of collision

强度 830 MPa,说明材料可以得到塑性强化。从图 2 可知, $4.8\times10^{-5}\sim7.2\times10^{-5}$ s 是磨块的反弹阶段,也是应力波的卸载阶段,当应力波卸载结束后,工件表面产生不可恢复永久变形。因此,当下次加载时,即使应力达到工件材料的屈服应力,材料也不屈服,只有应力大于上次载荷卸载前的最大应力时,材料才再次产生屈服,即在工件表面产生了加工硬化。

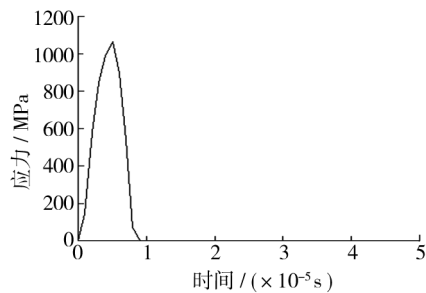


图 3 接触力的变化曲线

Fig. 3 The change curve of contact force

根据 Mises 屈服准则,当材料点应力状态达到屈服强度时,材料即开始屈服,产生塑性应变。图 4 为不同时刻工件表面沿深度方向上的等效塑性应变。

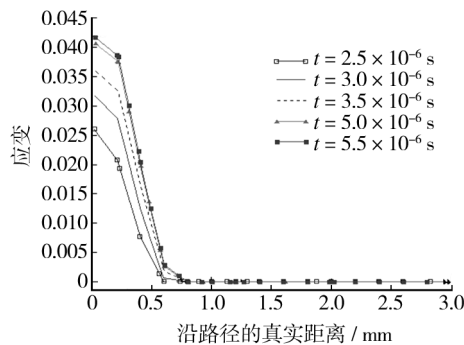


图 4 不同时刻沿表面深度方向的等效塑性应变

Fig. 4 Distributions of equivalent plastic strain along the depth of surface at different time

碰撞发生后,工件表层首先产生塑性变形,然后应力波开始向材料内部传播,传播过程中由于应力波的衰减,距材料表面越深的位置产生的应变越小。系统稳定时,工件上产生的塑性应变层的深度为 0.79 mm;在塑性应变区,材料的应变程度随着深度的增加而逐渐减小;在工件最表层产生的应变最大,其值为 0.0418。

2.3 磨块速度对残余应力场的影响

实际光整加工过程中,受加工工艺的影响,对磨块速度会产生限制。通过建立有限元模型,可以模拟任意速度下磨块碰撞工件后形成的残余应力场。

模型中设置磨块直径为 5 mm,不同碰撞速度下工件表层的残余应力场分布如图 5 所示,磨块的速度分别为 9,12,15 m/s。可以看出,碰撞结束后,工件表层形成了残余压应力场,随着深度的增加,残余压应力先增大后减小,当到达一定深度时,工件表现为受拉的状态。

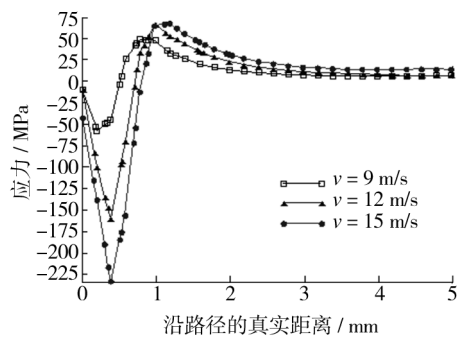


图 5 磨块速度对残余应力场的影响

Fig. 5 Effects of the grinding block velocity on residual stress field

分析可知,磨块速度对残余应力的大小和深度具有显著的影响,随着磨块速度的增加,残余压应力呈抛物线状变化,其峰值和深度随着磨块速度的增大有明显的改变。当磨块速度由 9 m/s 增至 15 m/s 时,工件表面最大残余压应力绝对值由 57 MPa 增大到 232 MPa,提高了 307%;残余压应力的深度由 0.51 mm 增大到 0.84 mm,提高了 64.7%。磨块速度对工件表层残余压应力峰值出现的位置影响不大,在磨块速度由 9 m/s 增至 15 m/s 的过程中,最大残余压应力的位置始终为 0.38 mm 左右。

2.4 磨块直径对残余应力场的影响

磨块直径对加工后工件表面的冲击变形具有显著影响^[15]。直径太小,加工效率会比较低;直径过大,易造成工件表面碰伤,仿真中采用光整加工常用

的 3 种磨块直径(4,5,6 mm)。在磨块速度为 15 m/s,其他参数保持不变的情况下,改变磨块直径的大小,得到的残余应力场分布如图 6 所示。可以看出:增大磨块直径,残余压应力的峰值和深度均有明显的变化。当磨块直径由 4 mm 增大到 6 mm 时,残余压应力峰值的绝对值由 96.35 MPa 增大到 292.37 MPa,增大了 204%;残余压应力层的深度由 0.56 mm 增大到 1.00 mm,提高了 78%。同时可以看出,在工件亚表层,残余拉应力峰值出现的位置由 0.97 mm 增至 1.36 mm,沿深度方向有了明显的转移,这对提高材料的抗疲劳性能是十分有益的。

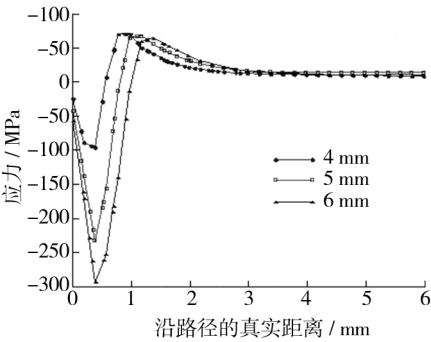


图 6 磨块直径对残余应力场的影响

Fig. 6 Effects of grinding block diameter on the residual stress field

2.5 碰撞次数对残余应力场的影响

为了更深入地研究多颗磨块对工件的强化效果,在有限元模型中对单颗磨块多次撞击工件表面的过程进行了数值模拟。数值模拟的结果如图 7 所示。

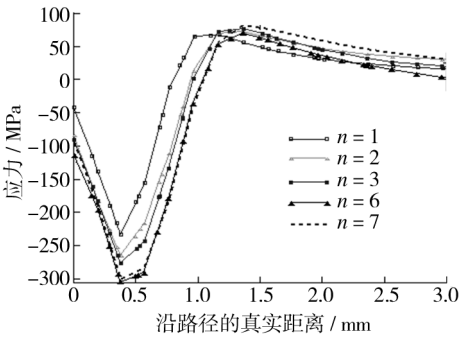


图 7 碰撞次数对残余应力场的影响

Fig. 7 Effects of collision frequency on the residual stress field

从图 7 中可以看出,随着碰撞次数的增多,残余压应力的深度呈缓慢增深的趋势。从第二次碰撞之后,工件近表层 0~0.25 mm 区域内的残余压应力已基本趋于稳定,0.25 mm 深度以下的残余压应力则随着碰撞次数的增多明显提高。同时可以看出,磨块在

第 6 次和第 7 次碰撞之后,工件上残余应力的分布已十分接近,说明 6 次撞击后,由于应变硬化,工件的塑性变形达到饱和,残余应力场趋于稳定。

2.6 不同种类磨块对残余应力场的影响

对滚磨光整加工中常用的两种磨块(氧化铝和碳化硅)进行了对比,表 2 给出了模型中所用到的一些基本参数,计算结果如图 8 和图 9 所示。

表 2 磨块参数
Tab. 2 Grinding block parameters

磨块种类	磨块直径/mm	磨块速度/(m·s ⁻¹)
氧化铝	5	15
碳化硅	5	15

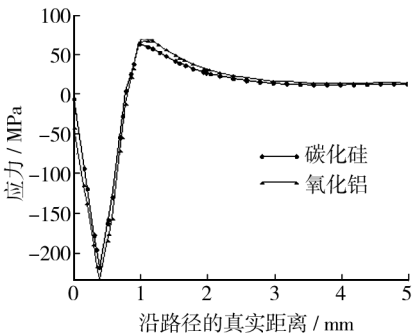


图 8 1 次碰撞结果的比较

Fig. 8 The Comparison of one collision results

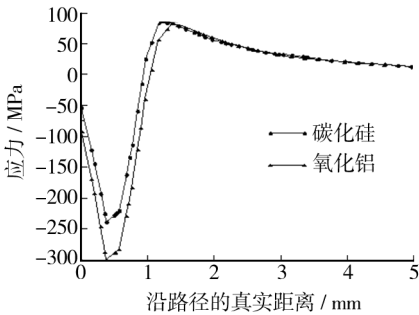


图 9 7 次碰撞结果的比较

Fig. 9 The comparison of 7 collision results

从图 8、图 9 中可以看出,与碳化硅磨块相比,不管是单次碰撞还是多次碰撞,氧化铝磨块在工件表层产生的残余压应力的深度更深,数值更大,在多次碰撞后,二者之间的差距更为明显。这是由于氧化铝磨块密度明显大于碳化硅磨块,在相同速度下,氧化铝磨块动能较大,在工件表面产生的接触力更大,使工件表层产生更剧烈的弹塑性变形,引起材料晶格产生

更大的畸变,从而产生更大的残余压应力。

3 结论

1) 有限元分析可以探讨磨块碰撞作用下钛合金材料残余应力场的分布规律,优化滚磨光整加工钛合金工艺参数。

2) 增大磨块速度和直径,可以提高工件表层残余压应力的深度。此外增大磨块直径,还可以使工件亚表层的残余拉应力转移到更深的位置。

3) 增大碰撞次数,对位于工件表层 0.25 mm 以下深度的残余压应力值影响显著。同时随着碰撞次数的增多,残余压应力的深度也逐渐增加。

4) 多次碰撞后,氧化铝磨块在工件上产生的残余压应力较大,更适于钛合金材料的滚磨光整加工。

参考文献

- [1] 杨胜强. 离心式滚磨光整加工技术及适用工艺选择[J]. 磨床与磨削,1997(3):62—64.
YANG Sheng-qiang. The Process Technology and the Suitable Process Choice of Centrifugal Barrel Finishing[J]. Grinding Machine and Grinding,1997(3):62—64.
- [2] 杨胜强,李文辉,陈红玲,等. 表面光整加工理论与新技术[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
YANG Sheng-qiang, LI Wen-hui, CHEN Hong-ling, et al. The New Processing Theory and New Technology of Surface Finishing[M]. Beijing: National Defence Industry Press,2011.
- [3] 张银喜,郭燕莹. 离心式滚磨加工机理与试验的分析[J]. 山西农业大学学报,1994,14(3):320—322.
ZHANG Yin-xi, GUO Yan-ying. The Processing Mechanism and Experimental Analysis of Centrifugal Barrel Finishing[J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 1994, 14(3):320—322.
- [4] MIAO H, ZUO D W, WANG M, et al. Numerical Calculation and Experimental Research on Residual Stress in Precipitation-hardening Layer of NAK80 Steel for Shot Peening[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(3):439—445.
- [5] 田峰,杨辉. AM50 镁合金孔挤压强化对其疲劳性能的影响[J]. 表面技术,2014,43(1):55—58.
TIAN Feng, YANG Hui. Effects of Hole-expansion on Fatigue Property of AM50 Magnesium Alloy[J]. Surface Technology, 2014, 43(1):55—58.
- [6] 周传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.
- ZHOU Chuan-yao. Fatigue and Fracture[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Engineering Press, 2002.
- [7] 高玉魁. 孔挤压强化对 23Co14Ni12Cr3MoE 钢疲劳性能的影响[J]. 金属热处理,2007,32(11):34—36.
GAO Yu-kui. Influence of Cold Hole Expansion on Fatigue Property of 23Co14Ni12Cr3MoE Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32(11):34—36.
- [8] 温爱玲. 表面纳米化对钛及其合金疲劳性能的影响[D]. 大连:大连交通大学,2011.
WEN Ai-ling. The Effect of Surface Nano on the Properties of Titanium and Its Alloy Fatigue[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2011.
- [9] NALLA R K, CAMPBELL J P. Mixed-mode, High-cycle Fatigue-crack Growth Thresholds in Ti-6Al-4V: Role of Small Cracks[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24:1047—1062.
- [10] 杨定富,韩树,袁伟. 基体预热温度对热障涂层热残余应力影响的研究[J]. 表面技术,2004,33(2):22—28.
YANG Ding-fu, HAN Shu, YUAN Wei. Study on the Influences of the Substrate Preheating Temperature on the Thermal Residual Stress of the Thermal Barrier Coating[J]. Surface Technology, 2004, 33(2):22—28.
- [11] 杨欢,张建辉. 人工心瓣含硅热解炭涂层残余应力分析[J]. 表面技术,2014,43(1):7—10.
YANG Huan, ZHANG Jian-hui. Analysis of Residual Stress of Silicon-alloyed Pyrocarbon Coatings for Artificial Heart Valves[J]. Surface Technology, 2014, 43(1):7—10.
- [12] 陈志斌,刘晓初. 轴承套圈强化研磨表面残余应力试验研究[J]. 研究与开发,2013,42(12):76—78.
CHEN Zhi-bin, LIU Xiao-chu. Experiment Study of Residual Stress under Bearing Ring Surface Based on Strengthening and Polishing Processing[J]. Research and Development, 2013, 42(12):76—78.
- [13] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
SHI Yi-ping, ZHOU Yu-rong. The Finite Element Analysis Example Explanation of ABAQUS[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006.
- [14] 赵腾伦. ABAQUS 6.6 在机械工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
ZHAO Teng-lun. The Application of ABAQUS 6.6 in Mechanical Engineering[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2005.
- [15] 卫俊峰. 基于 L 系统分形造型的光整加工磨具运动的模拟研究[D]. 太原:太原理工大学,2003.
WEI Jun-feng. The Simulative Research on the Movement of the Finishing Grinder Based on the L-system of Fractal Mould[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2003.