

超声喷丸与传统喷丸对 TC4 钛合金残余应力影响的仿真分析

刘 辉¹, 蔡 晋², 孟庆勋², 朱继宏¹

(1. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072; 2. 沈阳航空航天大学 航空宇航学院, 沈阳 110136)

摘要: 为了预测喷丸 TC4 钛合金试件的残余压应力层深度及值的分布和冲击面凹坑的直径、深度特征曲线及表面形貌的变化, 采用 ABAQUS/Explicit 软件建立 2 个 3D 模型。通过超声喷丸与传统喷丸 2 种工艺过程数值仿真对比了表面残余应力场差异, 分析了 TC4 钛合金弹丸直径、速度和冲击次数等喷丸参数对残余应力分布的影响。结果表明: 当动能相同时, 2 种强化过程表面所产生的残余压应力是可比较的, 超声喷丸模型亚表层残余应力深度为 0.16 mm, 约为传统喷丸模型深度的 2 倍; 传统喷丸产生的残余压应力最大值约 -800 MPa, 约为超声喷丸的 1.6 倍。与传统喷丸相比, 超声喷丸具有较低的表面粗糙度以及较深的残余压应力层。残余压应力层深度与弹丸直径呈正相关, 但过大的弹丸尺寸会引起薄壁件另一侧残余拉应力区域的增大。

关键词: 超声喷丸; 传统喷丸; 残余压应力; 有限元仿真; 粗糙度; 航空发动机

中图分类号: V260.5

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.02.016

Simulation Analysis of Influence of Ultrasonic and Conventional Shot Peening on Residual Stress of TC4 Titanium Alloy

LIU Hui¹, CAI Jin², MENG Qing-xun², ZHU Ji-hong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: In order to predict the distribution of the depth and value of the compressive residual stress layer of shot peening TC4 titanium alloy specimen and the change of diameter, depth characteristic curve and surface morphology of impact surface pit, two 3D models were established by Abaqus/Explicit software. The difference of surface residual stress field was compared by numerical simulation of ultrasonic shot peening and conventional shot peening. The influence of shot peening parameters such as diameter, velocity and times of impact on residual stress distribution of TC4 titanium alloy projectile was analyzed. The results show that when the kinetic energy is the same, the compressive residual stress on the surface of the two reinforcing processes can be compared, and the residual stress depth of the subsurface of the ultrasonic peening model is 0.16 mm, which is about 2 times the depth of the conventional peening model. The maximum compressive residual stress of conventional shot peening is about -800 MPa, about 1.6 times that of ultrasonic shot peening. Compared with conventional shot peening, ultrasonic shot peening has lower surface roughness and deeper compressive residual stress layer. The depth of the compressive residual stress layer is proportional to the diameter of the projectile, but the size of the projectile can cause the increase of the residual tensile stress area on the other side of the thin wall.

Key words: ultrasonic shot peening; conventional shot peening; compressive residual stress; finite element simulation; roughness; aeroengine

收稿日期: 2019-10-02 **基金项目:** 国家重点研发计划(2017YFB1102800)、中国航发产学研合作项目(HFZL2019CXY024-1)、辽宁省高等学校(境)外培养项目(2018LNGXGJWPY-YB008)资助

作者简介: 刘辉(1976), 男, 博士, 研究方向为表面完整性和航空发动机健康管理; E-mail: huilxy@sina.com。

引用格式: 刘辉, 蔡晋, 孟庆勋, 等. 超声喷丸与传统喷丸对 TC4 钛合金残余应力影响的仿真分析[J]. 航空发动机, 2020, 46(2): 87-92. LIU Hui, CAI Jin, MENG Qingxun, et al. Simulation analysis of influence of ultrasonic and conventional shot peening on residual stress of TC4 titanium alloy [J]. Aeroengine, 2020, 46(2): 87-92.

0 引言

喷丸强化是通过改善构件表面应力状态,抑制表面裂纹萌生,从而实现高周疲劳性能显著提高的表面冷加工工艺^[1]。传统喷丸(Conventional Shot Peening, CSP)包括气动式喷丸、抛丸等,弹丸重复冲击会在亚表层产生有益的加工硬化和残余压应力(Compressive Residual Stress, CRS),控制其工艺过程的目的是避免由于高速度和过度处理时间导致过度喷丸,从而产生有害的表面缺陷(重叠、鳞片等)。超声喷丸强化(Ultrasonic Shot Peening, USP)是将超声波能量转化为振动激励的机械能,弹丸受到振动激励,在特定设计的工装腔室中产生随机和重复的撞击。2种喷丸工艺弹丸冲击方式的差异对零件表面特性和机械性能有显著影响,对2种喷丸工艺表面强化的模拟分析及参数差异化定量描述方法有一定的研究价值。

由于控制方式不同, CSP与USP会产生不同的CRS场。Foss等^[2]的研究表明如果引入的CRS层足够深,在高周微动疲劳下可阻碍裂纹萌生与扩展。这与美国Wright Patterson空军基地和Lambda研究中心研究结果相同^[3]; NASA格伦研究中心的研究同样表明,引入并控制表面强化后产生的CRS层是提高疲劳寿命的关键^[4]。Fathallah等^[5]针对喷丸模型的恢复系数进行讨论分析,结合试验方法探讨了喷丸参数以及由此过程引起的CRS; Al-Obaid^[6]早在1990年进行基于3维等参单元研究,提出1种动态分布有限元方法,得到残余应力分布并建立喷丸的理论模型; Meguid等^[7-8]提出1/4对称喷丸模型用来计算等效应力、等效塑性应变和弹性应变,提出喷丸强化的全面非线性动态弹塑性有限元分析,并关注数值收敛和CRS影响区的有效性; Frija等^[9]采用3维有限元模型预测CRS场及由喷丸强化引起的初始效应; Kim等^[10]基于3维有限元喷丸模型,运用区域平均的思想获得喷丸强化CRS场的现实分布; Nougier-Lehon等^[11]采用离散元方法模拟USP强化,发现应力影响区平均深度与冲击速度之间有强相关性; Chaise等^[12]给出1个USP模型计算冲击后的残余应力; Rousseau T^[13]研究了USP过程中弹丸数量增加会扩大CRS在构件中的影响区; Dai和Shaw^[14]建模描述了USP强化过程表面纳米化和硬化过程之间的差异; 王业辉等^[15]通过仿真分析了USP强化工艺参数对CRS场分布特征的影响; 蔡晋等^[16]构建了冲击能量对钛合金表面塑性形变

的USP仿真模型,验证了能量输入与冲击力大小的关系。上述研究给出了USP对构件CRS场、加工硬化场、等效应变场的影响,然而目前缺少关于CSP与USP对构件性能表征影响的研究成果。

本文采用有限元方法来模拟比较CSP和USP过程,以达到预测由2种强化方式引起的CRS层深和表面几何形貌变化。

1 相同覆盖率和相同动能的仿真模型

通过采用有限元方法模拟比较CSP和USP过程,预测2种喷丸工艺过程引起的CRS典型特征及表面形貌的变化: CRS值及层深、强化面的凹坑直径及深度。在2种喷丸工艺过程数值仿真的冲击动能和覆盖率相同的前提下,比较表面残余应力场差异,分析喷丸参数(弹丸直径、速度和冲击次数)对残余应力分布的影响。

1.1 模型参数设置

为了预测USP和CSP的表面状态,采用ABAQUS/Explicit软件建立2个3D模型。在2种模型中,目标研究试块尺寸均为1 mm × 1 mm × 1 mm。为了防止USP模型中目标试块出现应力集中现象,影响应力分析结果准确性,在USP与CSP大尺寸试块模型(15 mm × 10 mm × 1.5 mm)表面中心位置划分小尺寸试块(1 mm × 1 mm × 1 mm),试块通过减缩积分单元(C3D8R)进行6面体网格划分。为了提高有限元解决方案的精确度,目标试块采用网格单元尺寸(0.05 mm × 0.05 mm × 0.05 mm)。弹丸材料为轴承钢,试件材料为TC4钛合金。边界条件设定: 试样底面施加完全固定约束,在试样表面和弹丸之间设置面-面接触。采用动态接触算法来模拟弹丸与试件的相互作用。

为了准确比较CSP和USP过程,本文针对该模型采用2个标准: (1)相同的喷丸覆盖率; (2)相同的动能。

1.2 相同覆盖率 T 的设定

在喷丸处理中,表面覆盖率是1个重要变量,对CRS有重要影响,一般定义为在给定喷丸时间内受冲击表面积的百分比。采用python语言根据以下约束条件生成弹丸的随机序列和位置。为了产生具有特定数量冲击的 T , 2个相邻弹丸中心之间的距离为

$$e = 10 \times a \times \sqrt{\frac{\pi}{T}} \quad (1)$$

根据 Fathallah R 的研究^[17],弹丸压痕的半径为

$$a = \frac{D}{2} \left(\frac{5\pi\rho k(1-e_r)v^2}{2E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

式中: ρ 为弹丸密度; v 为冲击速度; D 为弹丸直径; E 为等效刚度模量; e_r 为恢复系数; k 为效率系数。

因此,由弹丸引起的压痕面积为 $2\pi a^2$ 。

1.3 相同动能 E_k 的设置

采用相同 E_k 的目的在于使 CSP 和 USP 2 个过程具有相同的表面条件,传统喷丸弹丸的动能为

$$E_{k,CSP} = \frac{\pi}{2} \rho D^3 v^2 N \quad (3)$$

式中: N 为弹丸数量。

从式中可见, E_k 也取决于所使用弹丸材料的密度。

如上所述,USP 模拟采用初始最大冲击速度 v_{inmax} ,因此,参照相同的式(3),为 USP 带来的总动能为

$$E_{k,USP} = \frac{\pi}{2} \rho D^3 v_{inmax}^2 N \quad (4)$$

2 种表面强化的差异为弹丸的直径(CSP 为 0.25 ~ 1 mm,USP 为 1 ~ 8 mm)及速度(CSP 为 20 ~ 150 m/s,USP 为 3 ~ 20 m/s)^[18-19]。

因此,为了接近实际情况并假设具有相同的动能,USP 弹丸的大小应假定为 CSP 的 10 倍,而速度要低 10 倍。参考式(2),比较 2 种强化方式的压痕半径可以得出,在 CSP 模型中需要 5 次冲击才能达到由 USP 中的 1 次冲击所产生的强化效果。经过对 USP 模型工艺参数的控制,将中心小试块区域冲击的弹丸数设置为 5,CSP 模型中弹丸数设定为 50,以实现表面覆盖率为 150%,USP 弹丸速度为 4 m/s,弹丸直径为 4 mm,CSP 弹丸速度为 40 m/s,弹丸直径为 0.4 mm,2 种模型具体工艺参数见表 1。USP 模型如图 1 所示。

表 1 USP 与 CSP 模型工艺参数

喷丸方式	弹丸数量	弹丸直径/mm	弹丸速度/(m/s)
USP	5	4	4
CSP	50	0.4	40

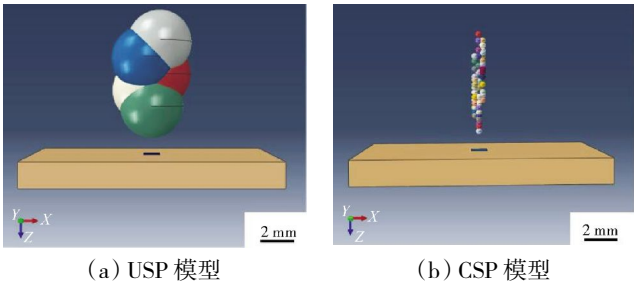


图 1 USP 与 CSP 模型

2 超声喷丸与传统喷丸结果分析

输出 2 个模型的位移如图 2 所示。从图中可见,2 个试件表面已经完全变形。

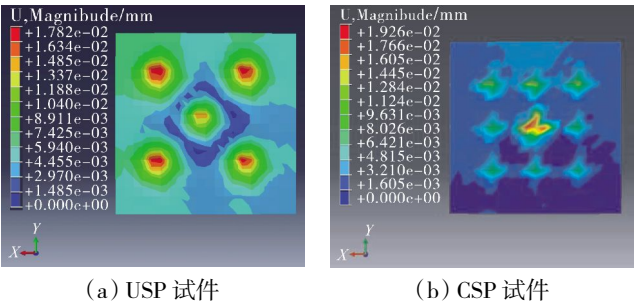


图 2 USP 与 CSP 试件表面位移

分析 2 种强化方式试件沿 y 轴正方向距中心 0.25 mm 凹坑截面区域残余应力场(如图 3(c)、(d)所示),图 3(a)、(b)中剖面残余应力显示出 USP 模型亚表层残余应力深度较深,约 0.16 mm,约为 CSP 模型残余压应力层深度的 2 倍,比较残余应力曲线(如图 4(c)所示),CSP 产生的残余压应力最大值约 -800 MPa,约为 USP 的 1.6 倍,对应研究位置如图 4(a)和图 4(b)所示。

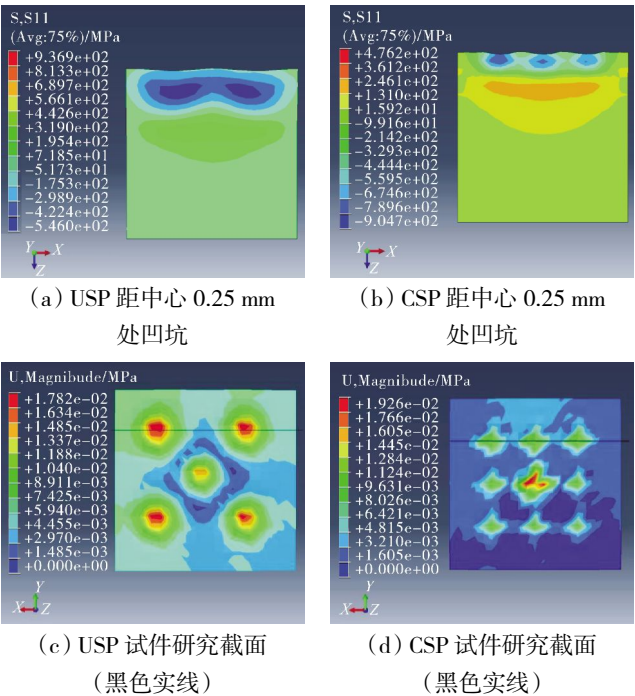


图 3 USP 与 CSP 距中心沿 y 轴正方向 0.25 mm 处凹坑残余应力

USP 与 CSP 模型中心凹坑 CRS 分布如图 5 所示。USP 仅试块中心冲击后的 CRS 分布如图 5(a)所示,USP 中心受到周围弹丸冲击影响后的 CRS 分布

如图 5(b) 所示, 中心区域第 1 次受冲击时亚表层 CRS 层较深, 在两侧弹丸冲击之后形成了图 5(b) 中的 CRS 分布, CRS 深度以及影响区减小, 表层凹坑附近出现明显的拉应力, 使中心 CRS 区域产生应力松弛, 这是由于两侧弹丸冲击造成的。CSP 中心受到周围弹丸冲击影响后的 CRS 分布如图 5(c) 所示, 与图 5(b) 相比, USP 在亚表面形成的 CRS 影响区更大。

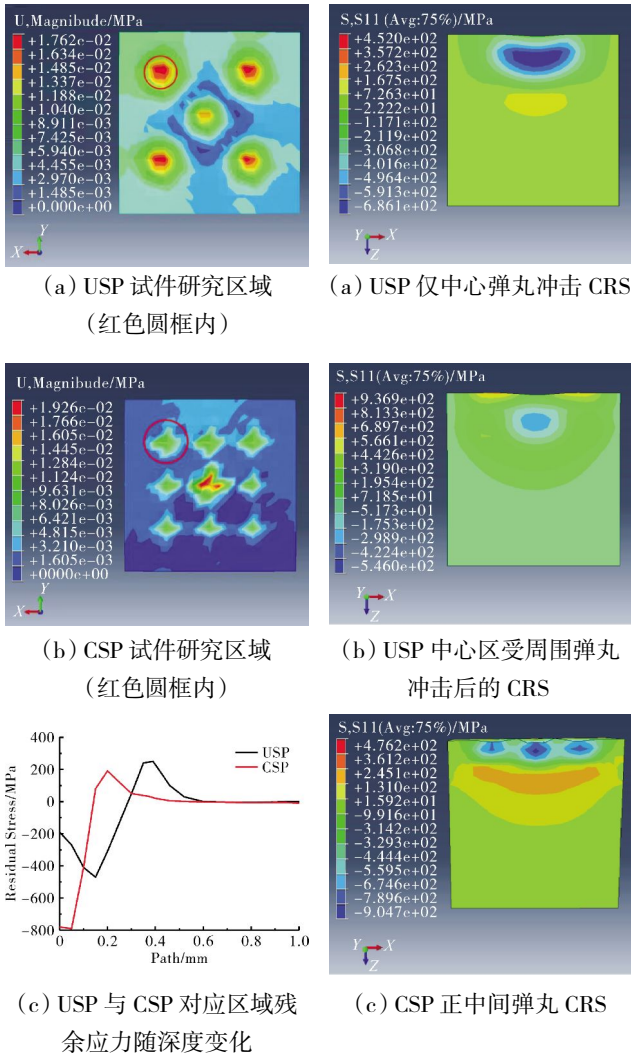


图 4 CSP 与 USP 边部凹坑残余应力随路径变化

CSP 与 USP 试块中心区域残余应力随深度变化如图 6 所示。USP initial 为超声喷丸中心弹丸冲击后其他弹丸冲击前中心凹坑区域的 CRS 随深度的变化曲线, USP 与 CSP 曲线表示其他弹丸冲击后的中心凹坑区域 CRS 随深度的变化, 结果显示, USP 中心区域初始时 (USP initial) CRS 层深大于所有弹丸冲击后结果, 中心凹坑在周围弹丸冲击下, CRS 层深发生松弛而

减小, 而 CRS 最大值始终小于 CSP 过程, 在 CRS 层深度方面则始终大于 CSP 过程。

对比 USP 和 CSP 中心凹坑位移, 如图 7 所示。

从图中可见, 提取表面位移数据, 在 USP 模型中, 凹坑中心区域向下变形 0.0116 mm, 边部凸起 0.0048 mm。在 CSP 模型中凹坑中心向下变形 0.015 mm, 边部向上凸起 0.009 mm, 产生的距离差值大于 USP, 且形成的峰间距离小于 USP, 因此 CSP 形成的表面粗糙度大于 USP 过程, 更容易造成表面应力集中。

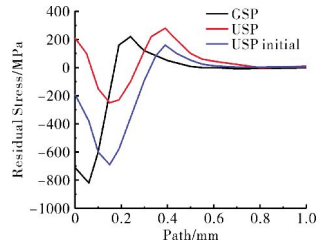


图 6 CSP 与 USP 中间弹坑残余应力随路径变化

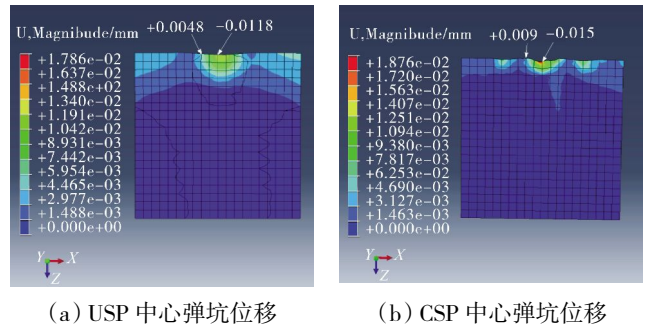


图 7 CSP 与 USP 中间弹坑位移

3 工艺参数对 USP 模型残余应力的影响

对比分析 2 种喷丸方式, USP 可以产生更深的 CRS 层, 表面粗糙度低于 CSP 的, 对 USP 过程中各参数影响的研究显得尤为重要, 本文针对弹丸尺寸和弹丸速度 2 方面对工艺参数的影响进行分析。

3.1 弹丸直径对 USP 模型残余应力的影响

采用直径为 3、4、5 和 6 mm 弹丸, 分析不同尺寸的弹丸对 TC4 钛合金残余应力产生的影响。不同直径弹丸冲击后中心区域凹坑受周围冲击影响的 CRS 随深度变化如图 8(a) 所示; 在各种尺寸弹丸情况下, 其他弹丸冲击前 (仅中心区域受冲击情况下), 中心凹坑区域 CRS 随距表层距离的变化如图 8(b) 所示。

从图 8(a) 中可见, 随着弹丸直径的增大, CRS 最大值减小, 中心凹坑区域受周围弹坑影响越大, 弹丸直径为 6 mm 时, 在该区域所有弹丸冲击表面之后, 中心凹坑区域几乎只呈现拉应力, 此时由于弹丸直径过大, 会在表面以及亚表面形成较大的拉应力, 类似产生过喷丸行为, 引起剧烈的塑性变形。从图 8(b) 中

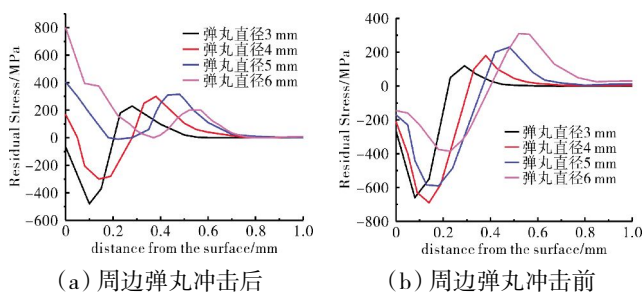


图8 不同直径弹丸模型中残余应力随路径变化

可见,随着弹丸直径的增大,CRS 最大值向材料更深处延伸,且 CRS 层更深。

3.2 弹丸速度对 USP 模型残余应力的影响

不同弹丸速度下的残余应力特征曲线如图 9 所示。基于直径为 3 mm 弹丸 USP 模型,控制 USP 模型工艺参数,使平均弹丸速度分别为 4、8 和 16 m/s 进行研究,随着冲击速度的增大,CRS 层深增加,最

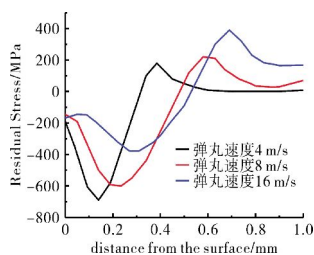


图9 不同弹丸速度下的残余应力特征

大值减小,在更深处下表面随弹丸速度增大,拉应力最大值和影响区都增大,与改变弹丸直径产生的效果相近。

4 结论

本文通过仿真研究 USP 和 CSP 主要工艺参数差异,比如弹丸冲击速度和直径等,在假定冲击覆盖率与冲击动能相近的前提下,进行超声喷丸与传统喷丸对 TC4 钛合金表面冲击的残余压应力仿真研究,得出以下结论:

(1)当动能相同时,2 种强化过程表面所产生的 CRS 是可比较的。其中 USP 产生更深的 CRS 层,而 CSP 过程产生的 CRS 最大值明显增大。

(2)应用计算结果作为解析方程的输入值,该模型给出预测表面粗糙度的方法。数值上认为,与 CSP 相比,USP 的主要优点是较低的冲击速度和表面粗糙度。

(3)对 USP 过程中弹丸尺寸和冲击速度的研究表明:随着弹丸直径的增大,CRS 最大值向材料更深处延伸,且 CRS 层深度增加,而在弹丸直径一定时改变弹丸冲击速度,与改变尺寸产生的结果较为类似。需要注意的是,针对压气机叶片这类薄壁件,一侧的压应力会引起另一侧残余拉应力增大,设计给出的

喷丸强度值要综合考虑压应力影响层深度与零件厚度的关系。

本文主要针对 2 种强化工艺的残余应力场进行数值评估,下一步研究将以应力场检测为主,进行 2 种强化工艺表面应力场验证。

参考文献:

- [1] Liu K K, Hill M R. The effects of laser peening and shot peening on fretting fatigue in Ti-6Al-4V coupons [J]. Tribology International, 2009, 42(9): 1250-1262.
- [2] Foss B J, Gray S, Hardy M C, et al. Analysis of shot-peening and residual stress relaxation in the nickel-based superalloy RR1000 [J]. Acta Materialia, 2013, 61(7): 2548-2559.
- [3] Golden P J, Hutson A, Sundaram V, et al. Effect of surface treatments on fretting fatigue of Ti-6Al-4V [J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(7): 1302-1310.
- [4] Gerald A. Shot peening for Ti-6Al-4V alloy compressor blades [R]. NASA Technical Paper 2711, 1987: 1-7.
- [5] Fathallah R, Inglebert G, Castex L. Determination of shot peening coefficient of restitution [J]. Surface Engineering, 2003, 19(2): 109-113.
- [6] Al-Obeid Y F. Three-dimensional dynamic finite element analysis for shot-peening mechanics [J]. Computers & Structures, 1990, 36(4): 681-689.
- [7] Meguid S A, Shagal G, Stranart J C, et al. Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot peening induced residual stresses [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1999, 31(3): 179-191.
- [8] Meguid S A, Shagal G, Stranart J C. 3D FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model [J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(2): 119-134.
- [9] Frija M, Hassine T, Fathallah R, et al. FEM modelling of shot peening process: prediction of the compressive residual stresses, the plastic deformations and the surface integrity [J]. Materials Science and Engineering, 2006, 426(1-2): 173-180.
- [10] Kim T, Lee H, Jung S, et al. A 3D FE model with plastic shot for evaluation of equi-biaxial peening residual stress due to multi-impacts [J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(13): 3125-3136.
- [11] Nougier L C, Zarwel M, Diviani C, et al. Surface impact analysis in shot peening process [J]. Wear, 2013, 302(1-2): 1058-1063.
- [12] Chaise T, Li J, Nelias D, et al. Modeling of multiple impacts for the prediction of distortions and residual stresses induced by ultrasonic shot peening (USP) [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(10): 2080-2090.
- [13] Rousseau T, Hoc T, Gilles P, et al. Effect of bead quantity in ultrasonic shot peening: surface analysis and numerical simulations [J]. Journal Materials Processing Technology, 2015, 225: 413-420.
- [14] Dai K, Shaw L. Comparison between shot peening and surface

nanocrystallization and hardening processes[J]. Materials Science and Engineering:A,2007,463(1-2):46-53.

[15] 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(3):58-64.

WANG Yehui. Numerical simulation analysis of residual stress in ultrasonic shot peening of TC4 titanium alloy[J]. Aeroengine,2019,45(3):58-64.(in Chinese)

[16] 蔡晋, 刘建邦. 能量输入对 TC4 钛合金超声喷丸力学影响的仿真研究[J]. 表面技术,2019,48(9): 140-149.

CAI Jin,LIU Jianbang. Simulation study on the effect of energy input on ultrasonic shot peening mechanics properties of TC4 titanium alloy [J]. Surface Technology,2019,48(9):140-149.(in Chinese)

[17] Fathallah R. Mode' lisation du Proce' de' de grenaillage;incidence des billes et taux de recouvrement[D]. Paris:ENSAM,1994.

[18] Rousseau T,Hoc T,Gilles P,et al. Effect of bead quantity in ultrasonic shot peening:surface analysis and numerical simulations [J]. Journal of Materials Processing Technology,2015,225:413-420.

[19] Astarace A H,Miresmaeili R,Bagherifard S,et al. Incorporating the principles of shot peening for a better understanding of Surface Mechanical Attrition Treatment(SMAT)by simulations and experiments [J]. Materials & Design,2017,116:365-373.

(编辑:刘 亮)