

AISI-304 奥氏体不锈钢喷丸残余应力的有限元模拟

陈光忠¹, 何志坚¹, 杨岳²

(1.湖南信息职业技术学院, 长沙 410200; 2.中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 目的 针对喷丸有限元模拟中多数模型的弹丸数量较少, 不能准确反映喷丸过程中弹丸位置的随机性及喷丸覆盖率对残余应力场影响的问题, 对喷丸过程的有限元模拟技术进行优化。方法 基于大型有限元分析软件 ABAQUS, 使用 python 编程语言对弹丸在三维空间中的分布进行随机化处理, 建立了随机多弹丸喷丸 AISI-304 奥氏体不锈钢的有限元模型。在喷丸覆盖率大于 100% 的条件下, 模拟分析了喷丸工艺中弹丸的数量、尺寸和弹丸的速度对残余应力场的影响, 结合试验对有限元模型的合理性进行了验证。结果 增加弹丸数量可提高残余压应力层的厚度和残余压应力的最大值, 当弹丸数量为 90 颗时, 残余压应力场接近饱和; 增加弹丸速度, 靶材残余压应力的峰值、表面应力值及残余压应力场的深度值增大, 残余压应力峰值出现的位置基本不变; 增大弹丸的直径, 靶材残余压应力峰值、峰值的位置、表面应力值及残余压应力场的深度值均明显增大。结论 喷丸残余应力的试验测量结果和有限元模拟结果吻合, 模型合理。

关键词: AISI-304; 有限元; 随机多弹丸喷丸; 残余应力; 覆盖率; 工艺参数

中图分类号: TG178 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)12-0124-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.12.020

Finite Element Simulation of Residual Stress of Shot Peening on AISI-304 Austenitic Stainless Steel

CHEN Guang-zhong¹, HE Zhi-jian¹, YANG Yue²

(1.Hunan College of Information, Changsha 410200, China; 2.School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize the finite element simulation technology of shot peening technology since limited shots are used by most models in finite element simulation of shot peening, randomness of shot position and the effects of shot peening coverage to residual stress field are not accurately reflected. By virtue of a large-scale finite element analysis software ABAQUS, python programming language was used to randomize the distribution of shots in three-dimensional space and finite element model of random multi-shot shot peening was established. Provided that coverage rate of shot peening exceeds 100%, effects of shot quantity, size and velocity of shot peening technology on residual stress field were analyzed and simulated, and

收稿日期: 2016-05-07; 修订日期: 2016-11-07

Received: 2016-05-07; Revised: 2016-11-07

基金项目: 湖南省科技厅研究课题 (2013FJ3019); 湖南省教育厅研究课题 (14C0825)

Fund: Supported by the Department of Science & Technology of Hunan Province(2013FJ3019) and the Department of Education of Hunan Province(14C0825)

作者简介: 陈光忠 (1968—), 男, 副教授, 主要从事零件表面强化技术及表面完整性研究。

Biography: CHEN Guang-zhong(1968—), Male, Associate professor, Research focus: parts surface strengthening technology and surface integrity.

the rationality of the finite element model was verified by experiment. Thickness of compressive residual stress layer and the maximum residual stress could be increased by adding shots. The residual stress field was nearly saturated when there were 90 shots. As the shot velocity increased, the peak value of residual stress on target, surface stress value and the depth of residual stress field increased and the site where residual stress peak was present kept unchanged. As the shot diameter increased, peak value of residual stress on target, surface stress value and the depth of residual stress field increased significantly. The measurement results of shot peening residual stress test are consistent with that of finite element simulation and the finite element model is reasonable.

KEY WORDS: AISI-304; finite element; random multi-shot peening; residual stress; coverage rate; technological parameters

喷丸强化技术主要用于提高金属零部件的疲劳寿命。喷丸强化工艺能够在工件表面引入一定深度的残余压应力场,残余压应力可以抵消工件受载时的部分拉应力,降低疲劳裂纹的扩展速率,使材料的疲劳性能得到改善^[1-4]。喷丸强化工艺具有工艺简单、强化效果显著、适用面广等特点,现被广泛应用于航空、军工、汽车等领域中重要零部件的抗疲劳强化中,如螺旋桨、航空发动机叶片、涡轮盘、齿轮、曲轴等。

在喷丸强化过程中,成千上万颗弹丸对工件表面进行高速冲击,引起工件表层发生强烈塑性变形,由于喷丸影响因素较多,且作用过程复杂,至今未有喷丸工艺参数与加工性能之间的定量联系。目前喷丸工艺参数的选取主要依赖于试验或经验,这对喷丸工艺的发展具有一定的制约。为揭示喷丸工艺的强化机理,近年来国内外研究人员借助于有限元方法对喷丸工艺进行了大量研究^[5-9]。在现有的喷丸有限元模拟中,有限元模型多属微观建模,弹丸数量通常少于 20 个,喷丸覆盖率低,与实际喷丸过程相差较大。闫五柱等^[10]建立了单颗粒撞击 40Cr 钢靶材的三维有限元模型;党建毅等^[11]建立了单颗玻璃丸冲击 0Cr18Ni9 不锈钢靶材的有限元模型;Meguid S A 等^[12]建立了单弹丸和双弹丸冲击合金靶材的有限元模型;张洪伟等^[13]采用 LS-DYNA 软件建立了 1、4、6、8、9 及 13 颗弹丸喷丸强化的有限元模型;李欣等^[14]通过计算单弹丸冲击作用下的弹痕直径,建立了弹丸在特定的规则分布条件下顺序冲击 40Cr 钢的有限元模型,虽满足喷丸满覆盖率的计算要求,然而未能准确体现实际喷丸中弹丸在空间分布的随机性。

为体现喷丸有限元模拟中弹丸分布的随机性及覆盖率对残余应力场的影响,文中基于大型有限元分析软件 ABAQUS,使用 python 编程语言对弹

丸在三维空间中的分布进行随机化处理,建立了随机多弹丸喷丸的有限元模型。工件为 AISI-304 奥氏体不锈钢。通过有限元模拟,研究喷丸工艺参数对残余应力分布的影响。

1 有限元模型的建立

1.1 几何模型的建立与模型网格的划分

使用 ABAQUS 中 python 编程语言建立了随机多弹丸的喷丸模型,见图 1。靶材的几何尺寸为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。弹丸在空间的分布由随机函数确定,由于在真实喷丸过程中,不可能存在 2 颗弹丸同时碰撞到靶材的同一位置,故约束任意 2 颗弹丸的质心距离大于等于弹丸的直径。在网格划分上,弹丸的网格采用线性四面体单元,靶材的网格采用八节点减缩积分六面体单元。由于减缩积分单元不可避免地存在沙漏问题,因此对靶材主要产生形变部位的网格单元进行细化以减小沙漏的影响。由于弹丸的形变可以忽略,在仿真中约束弹丸为刚体,弹丸速度方向垂直于靶材表面,对靶材的底面进行固定约束。定义弹丸与靶材之间为面面接触,

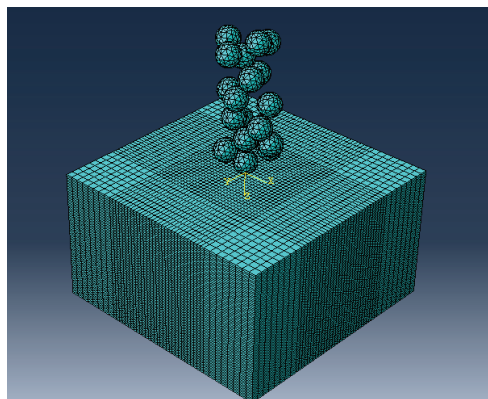


图 1 随机弹丸喷丸有限元模型

Fig.1 Finite element model of random shot peening

接触算法采用罚函数法,弹丸与靶材间的摩擦因数为 0.2^[15]。

对靶材沿厚度方向上的网格单元进行细化。喷丸结束后,提取出靶材表层沿厚度方向上各个位置的节点应力并求取平均值,作为靶材不同深度的残余压应力值。

1.2 材料的本构模型

弹丸材料为铸钢。工件材料为 AISI-304 奥氏体不锈钢,该材料的主要力学性能参数:密度 $\rho=7.8 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E=210 \text{ GPa}$, 屈服强度 540 MPa , 泊松比 $\mu=0.3$ 。Johnson-cook 模型是高应变率条件下理想的刚塑性强化模型,适于描述材料在大应变率下的应力应变关系,由于在喷丸过程中工件表面发生强烈塑性变形,且应变率较高,因而根据 Johnson-cook 模型,将材料的动态屈服应力表示为:

$$\sigma = (A + B\bar{\epsilon}^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\epsilon}_0})[1 - (\frac{T - T_r}{T_m - T_r})^m] \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 C 、 m 、 n 为通过试验得到的材料的本构参数^[16], 其中, $A=310$, $B=1000$, $C=0.07$, $m=1$, $n=0.65$; $T_m=1673 \text{ K}$; $T_r=293 \text{ K}$; $\bar{\epsilon}^p$ 为材料的等效塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为材料的参考塑性应变率; T , T_r , T_m 是与温度相关的参数,由于喷丸一般在常温下进行,仿真中未考虑该参数。

1.3 弹丸数量的确定

实际喷丸过程中,大量弹丸高速连续地对工件表面进行碰撞,使工件表面各个位置均得到强化。在喷丸有限元仿真中,增加弹丸数量有利于提高喷丸覆盖率,使模拟更接近于实际喷丸过程,但计算求解时间也会增加。仿真中首先选取弹丸直径为 0.2 mm , 采用 python 程序计算了不同弹丸数量下的喷丸覆盖率。计算结果表明,当弹丸数量为 50 颗时,喷丸覆盖率接近 100%。

为得到理想的残余应力场,同时使计算时间不致于过长,比较了弹丸数量对喷丸残余应力场的影响。取弹丸数量 N 大于 50, 弹丸直径为 0.6 mm , 弹丸速度为 120 m/s , 采用不同数量的弹丸对 AISI-304 奥氏体不锈钢进行了喷丸模拟。采用 Origin 软件绘制得到残余应力沿深度方向的分布见图 2。从图 2 可以看出,喷丸处理后,材料表层

残余应力为压应力,沿深度方向上残余应力先增大后减小。随弹丸数量的增加,残余压应力的峰值、残余压应力层的厚度值增大效果比较显著,而残余压应力峰值的深度变化较小;当弹丸数量 N 大于 80 后,残余压应力变化已经很小,此时靶材表层残余应力场接近饱和。为获得理想的残余压应力场,同时节省计算求解时间,为此在后续分析中设定弹丸数量 N 为 90。

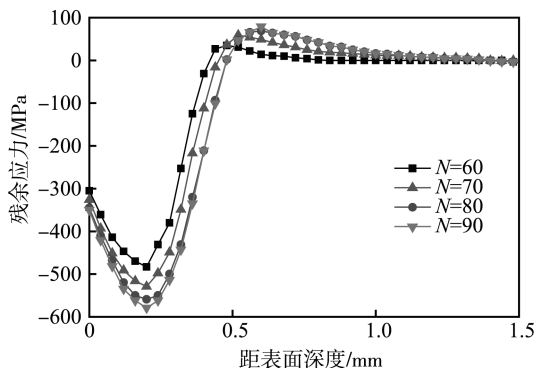


图 2 弹丸数量对残余应力的影响

Fig.2 The influence of projectile number on residual stress

2 喷丸工艺参数对残余应力分布的影响

2.1 弹丸速度

采用直径为 0.4 mm 的铸铁弹丸, 分别以 80, 100, 120 m/s 的速度对 AISI-304 不锈钢进行了喷丸模拟, 模拟结果见图 3。从图 3 可以看出, 靶材表层残余压应力随层深的增加呈先增大后减小的过渡变化。增大弹丸速度, 残余压应力峰值增大效果明显; 靶材表面残余压应力值、残余压应力层的厚度值随弹丸速度的增大而略有增加。当弹丸速度为 120 m/s 时, 表面残余压应力值达到最大值为 -343 MPa 。

在靶材表面以下深度为 0.19 mm 时, 残余压应

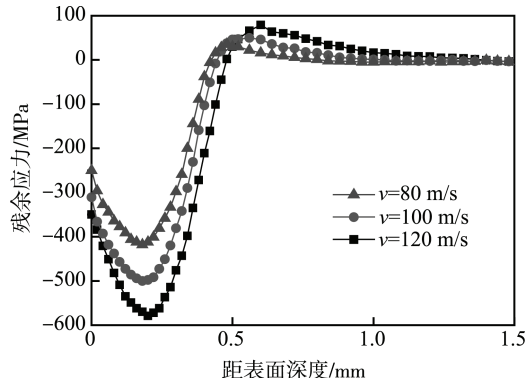


图 3 弹丸速度对残余应力的影响

Fig.3 The influence of projectile speed on residual stress

力达到最大值。随着弹丸速度 v 的增大, 残余压应力的最大值逐渐增大, 当弹丸速度 v 为 120 m/s 时, 残余压应力的最大值为 -572 MPa。随弹丸速度的增加, 残余压应力最大值的位置基本不变。

2.2 弹丸直径

在弹丸速度 v 为 120 m/s 的条件下, 比较了弹丸直径对 AISI-304 不锈钢喷丸残余应力的影响。在弹丸直径 D 分别为 0.2, 0.4, 0.6 mm 时, 喷丸后靶材表层残余应力沿层深的变化见图 4。从图 4 可以看出, 残余压应力层的厚度值随弹丸直径的增大而增大。随着弹丸直径的增大, 靶材表面残余压应力值和残余压应力的峰值逐渐增大, 同时残余压应力峰值的深度值变化明显。当弹丸直径 D 为 0.6 mm 时, 表面残余压应力最大值为 -426 MPa。残余压应力最大值为 -659 MPa, 其深度值为 0.29 mm。

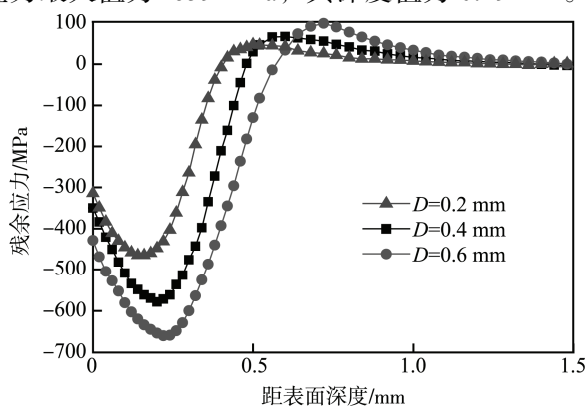


图 4 弹丸直径对残余应力的影响

Fig.4 The influence of projectile diameter on residual stress

3 试验验证

采用直径为 0.6 mm 的铸钢丸, 在弹丸速度 v 为 100 m/s 的条件下采用气动式数控喷丸设备对 AISI-304 不锈钢进行了喷丸试验。采用电化学腐蚀法对喷丸后的试样进行了剥层, 采用 X-350A 型 X 射线应力仪对喷丸后试样表层的残余应力进行测试。管电压为 22 kV, 管电流 6 mA, 采用铬靶特征辐射。残余应力的测试采用侧倾法, 侧倾角依次选取 0°, 15°, 25° 和 45°。

残余应力在试样表层分布的试验测量结果和仿真模拟结果见图 5。从图 5 可以看出, 残余应力的仿真结果和试验测量结果相近, 二者具有相同的分布趋势。在试样表层附近, 残余应力仿真值、残

余压应力场的深度值略低于试验测量结果。残余应力的试验结果和模拟结果吻合, 有限元模型合理。

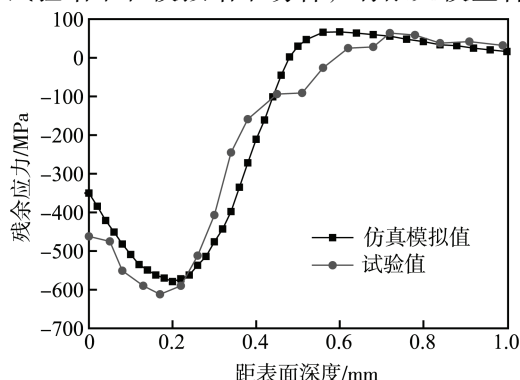


图 5 试验与仿真结果的对比

Fig.5 The contrast of residual stress between test results and simulation results

4 结论

采用 ABAQUS 软件建立了随机多弹丸喷丸的有限元模型, 模拟了弹丸数量及喷丸主要工艺参数对 AISI-304 奥氏体不锈钢残余应力的影响, 并将有限元模拟结果和试验结果进行对比, 得出以下结论。

1) 在弹丸最小直径为 0.2 mm, 弹丸数量为 50 颗时, 喷丸覆盖率接近 100%。随着弹丸数量的增加, 残余压应力的峰值及压应力场的深度增加明显, 残余压应力峰值的深度基本不变; 当弹丸数量为 90 颗时, 靶材表层残余压应力场接近饱和。

2) 提高弹丸速度, 残余压应力峰值、表面最大值及残余压应力场的深度值明显增大, 但残余压应力峰值的深度基本不变; 增加弹丸直径, 表面最大值、残余压应力场的深度值、残余压应力峰值及峰值的深度均明显增大。

3) 喷丸 AISI-304 奥氏体不锈钢残余应力的有限元模拟结果和试验测量结果吻合, 模型合理。

参考文献

- [1] OGURI K. Fatigue Life Enhancement of Aluminum Alloy for Aircraft by Fine Particle Shot Peening (FPSP)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(8): 1395—1399.
- [2] 何柏林, 邓海鹏. 表面完整性研究现状及发展趋势[J]. 表面技术, 2015, 44(9): 140—152.
HE Bo-lin, DENG Hai-peng. Research Status and Development of Surface Integrity[J]. Surface Technology, 2015,

- 44(9): 140—152.
- [3] 何少杰, 杨文玉, 郭步鹏, 等. 机加工表面残余应力及其疲劳寿命评价的研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(6): 120—132.
- HE Shao-jie, YANG Wen-yu, GUO Bu-peng, et al. Research Progress on Evaluation of Surface Residual Stress and Fatigue Life of Machined Products[J]. Surface Technology, 2015, 44(6): 120—132.
- [4] 高玉魁. 表面强化对 A-100 钢带孔构件疲劳性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(5): 160—164.
- GAO Yu-kui. Influence of Local Surface Strengthening on Fatigue Properties of Components with Holes of an A-100 Steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(5): 160—164.
- [5] 凌翔, 彭微微, 倪红芳. 喷丸三维残余应力场的有限元模拟[J]. 机械工程学报, 2006, 42(8): 1583—1588.
- LING Xiang, PENG Wei-wei, NI Hong-fang. Simulation of 3D Residual Stress Field of Shot Peening by Dynamic Finite Element Analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(8): 1583—1588.
- [6] LIU Jin-xiang, YUAN Huang, LIAO Ri-dong. Prediction of Fatigue Crack Growth and Residual Stress Relaxations in Shot-peened Material[J]. Materials Science and Engineering, 2010, 527: 5962—5968.
- [7] LIU W C, DONG J, Zhang P, et al. Improvement of Fatigue Properties by Shot Peening for Mg-10Gd-3Y Alloys under different Conditions[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(18): 5935—5944.
- [8] MIAO H Y, DEMERS D, LAROSE S. Experimental Study of Shot Peening and Stress Peen Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210: 2089—2102.
- [9] 陈光忠, 何志坚, 杨岳. 喷丸强化 AZ91D 镁合金残余应力场的数值模拟及实验研究[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 134—138.
- CHEN Guang-zhong, HE Zhi-jian, YANG Yue. Numerical Simulation and Experimental Study of Residual Stress Field of AZ91D Magnesium Alloy by Shot Peening[J]. Surface Technology, 2016, 45(2): 134—138.
- [10] 闫五柱, 刘军, 温世锋. 喷丸过程中的能量转化及残余应力分布研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(6): 139—142.
- YAN Wu-zhu, LIU Jun, WEN Shi-feng. Energy Conversion and Residual Stress Distribution in Shot Peening Process[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(6): 139—142.
- [11] 党建毅, 董星, 杨威. 喷丸强化残余应力的数值模拟[J]. 矿山机械, 2013, 41(5): 130—134.
- DANG Jian-yi, DONG Xing, YANG Wei. Numerical Simulation of Residual Stress Field Induced by Shot Peening [J]. Mining and Processing Equipment, 2013, 41(5): 130—134.
- [12] MEGUID S A, SHAGAL G, STRANART J C, et al. Three-dimensional Dynamic Finite Element Analysis of Shot Peening Induced Residual Stress[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1999, 31(3): 179—191.
- [13] 张洪伟, 张以都, 吴琼. 喷丸强化残余应力场三维数值分析[J]. 航空动力学报, 2010, 25(3): 603—609.
- ZHANG Hong-wei, ZHANG Yi-du, WU qiong. Three-dimensional Numerical Analysis of Residual Stress Field for Shot Peening[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(3): 603—609.
- [14] 李欣, 张晓晶, 汪海. 基于 Abaqus 的喷丸满覆盖率实现及残余应力场预测[J]. 机电一体化, 2014(4): 66—71.
- LI Xin, ZHANG Xiao-jing, WANG Hai. Full-coverage Shot-peening Models to Predict the Residual Stress Field Based on Abaqus[J]. Mechatronics, 2014(4): 66—71.
- [15] KIM T, LEE J H, LEE H, et al. An Area-average Approach to Peening Residual Stress under Multi-impacts using a Three-dimensional Symmetry-cell Finite Element Model with Plastic Shots[J]. Materials and Design, 2010, 31: 50—59.
- [16] LEE S, BARTHELA F, HUTCHINSON J W, et al. Dynamic Failure of Metallic Pyramidal Truss Core Materials Experiments and Modeling[J]. International Journal of Plasticity, 2006, 22: 2118—2145.