铝合金喷丸应力-变形的仿真分析与实验

陈家伟[1]，廖凯[1]，车兴飞[1]，钟利萍[1]，龚海[2]

（1.中南林业科技大学，长沙 410004；2.中南大学，长沙 410083）

摘 要：目的 揭示喷丸处理对 7075-T651 铝合金材料表面应力场和形貌改变的作用机制。**方法** 首先利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件分别建立单颗弹丸和多颗弹丸撞击铝合金靶材的有限元模型，并在符合实验外场边界条件的前提下，获得材料表面 200 μm 深度的内应力分布和不同撞击次数后的表面变形情况。然后通过实验所测结果修正模型丸粒撞击参数，包括网格划分密度、丸粒撞击次数、接触速度等，并结合仿真计算结果阐述喷丸表面应力分布和变形强化层的形成机理。**结果** 计算与实验结果对比表明，喷丸仿真模型的计算结果与实验吻合较好。一方面，表面逐层应力分布规律与喷丸实际接近，表面应力最大偏差小于 25 MPa，这说明模型中设置的喷丸强度正确。另一方面，6 次弹丸撞击造成的强化层变形率小于 6%，并逐步趋于稳定，这与实验中采用多次喷丸表面覆盖导致的材料硬化现象一致，从而间接说明靶材模型单元与参数设置的准确性。**结论** 分析认为，喷丸建模方法能够快速准确地计算出材料表面应力-变形状况，为揭示喷丸工艺对材料表面的强化规律发挥积极作用。

关键词：喷丸强化；有限元模型；表面应力；强化层；铝合金

中图分类号：TG113.25 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2018)11-0041-07

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.11.006

Simulation Analysis and Experiment of Surface Stress-Deformation on Al-based Alloy by Shot Peening

CHEN Jia-wei[1], LIAO Kai[1], CHE Xing-fei[1], ZHONG Li-ping[1], GONG Hai[2]

(1.Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;
2.Central South University, Changsha 410083, China)

ABSTRACT: The work aims to discover the mechanism of shot peening (SP) to change the surface field and surface morphology of 7075-T651 Al-based alloy. Firstly, the finite element models (FEM) of SP involving single projectile and projectiles were set by ANSYS/LS-DYNA respectively to calculate the 200 μm deep stress distribution on materials surface and the surface deformation via different peening times based on the boundary condition of experiment. Then the collision parameters in the model were corrected by experimental results, including meshing density, number of peening times by shot and contact speed, etc. Finally, the calculation of FEM dedicated the surface stress distribution and mechanism of strengthened layer on surface by SP treatment. Through the contrast, the calculation and experimental results of SP simulation model matched with each other.

收稿日期：2018-08-13；**修订日期：**2018-09-17

Received：2018-08-13；**Revised：**2018-09-17

基金项目：国家自然科学基金（51475483）；湖南省重点研发计划项目（2018NK2065）；湖南省高校科技创新团队支持计划项目（2014207）

Fund：Supported by the National Natural Science Foundation of China (51475483), the Key Research and Development Program of Hunan Province (2018NK2065), the Science and Technology Innovation Team Support Program of Hunan Province (2014207)

作者简介：陈家伟（1994—），男，硕士研究生，主要研究方向为铝合金薄壁件表面处理。

Biography：CHEN Jia-wei (1994—), Male, Master, Research focus: surface treatment of aluminum alloy thin wall parts.

通讯作者：廖凯（1977—），男，博士，教授，主要研究方向为铝合金薄壁件变形调控。邮箱：liaokai102@csuft.edu.cn

Corresponding author：LIAO Kai (1977—), Male, Doctor, Professor, Research focus: deformation control of thin-walled aluminum alloy parts. E-mail: liaokai102@csuft.edu.cn

The stress profile from surface to subsurface via FEM agreed with experimented data. The maximum deviation of surface stress was less than 25 MPa, which indicated that the shot peening strength in the model was correct. Furthermore, the deformation ratio of strengthened layer by 6 times of projectile impacts was less than 6% and gradually tended to be stable. This phenomenon was consistent with the hardening situation of the material via the multiple surface coverage in the SP experiment, which indicated the accuracy of the target model and parameters in FEM indirectly. Through the analysis, the FEM of SP can calculate the stress-deformation on materials surface quickly and correctly and play a positive role in exploring the influence rules of SP technology on the characteristics of materials surface.

KEY WORDS: shot peening; FEM; surface stress; strengthened layer; Al-based alloy

7075-T651 铝合金经过固溶和预拉伸处理，结构紧密，耐腐蚀效果强，目前广泛应用于航空机械[1]。7075 铝合金在加工成薄壁框架件的过程中，由于铣削、装夹等加工过程产生的残余应力，构件尺寸会发生改变[2-7]，且构件内部残余应力会极大影响构件的疲劳强度，减少使用寿命[8-10]。喷丸强化处理是提高零件疲劳强度和延长寿命的有效方法之一，得到广泛的应用[11-13]。喷丸工艺参数对喷丸强化质量有很大影响[14-16]，为探究其作用规律，有必要掌握喷丸工艺参数的调节方式。

在实验室，即使进行大量喷丸实验，也难以取得理想的效果，因此常采用仿真与实验相结合的方法来进行研究。在国内，王利平等[17-18]在 SPH/FEM 耦合建模仿真时，发现达到一定的喷丸时间后，继续增加喷丸时间，材料表面残余应力变化幅度小于 10%，达到饱和状态。在研究过程中，其重点在仿真建模，而对实验验证方面的研究较少。张洪伟等[19-20]建立喷丸强化三维有限元模型，探究单次和多次冲击下材料内部的残余应力场分布、塑性应变分布的特点和不同覆盖率对残余应力场的影响，但研究主要以仿真的方法讨论撞击次数对残余应力的影响，未采用实验与仿真相互佐证。路会龙等[21]通过单丸粒模型分析丸粒的速度对残余压应力分布的影响，得出丸粒的参数一定时，存在一个最优喷丸速度；但只针对弹丸速度影响靶材残余应力的分布情况展开了研究，对其他工艺参数的影响情况讨论不多。国际上，Lechun Xie 等[22]将数值分析结合实验验证，研究了钛基复合材料在喷丸后的残余应力分布情况。S. M. Hassani-Gangaraj 等[23-25]通过实验评估和仿真，从微观组织的角度研究了高强度低合金钢喷丸处理后的残余应力分布情况。A. H. Mahmoudi 等[26]通过实验与仿真相结合的方法研究了初始残余应力对喷丸强化残余应力分布的影响，认为喷丸强化过程可以消除初始应力场的影响，但未对加工应力和装夹应力等造成的影响进行深入研究。依据已经取得的研究成果，普遍认为覆盖次数对喷丸强化效果的影响不大，而喷丸压力、弹丸大小和入射角度各自存在一个最优值，但取各个工艺参数的最优值，喷丸强化效果也并非最佳。

本文通过 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立喷丸三维模型，采用四分之一喷丸强化模型进行计算，对撞击区域网格进行细分，以节省时间，并准确模拟弹丸撞击金属表面产生的应力与变形。同时，对 7075 铝合金靶材进行喷丸实验，结合逐层化学腐蚀、XRD 应力测试、SEM 电镜扫描方法得到表面层深应力分布和表面特征，并将实验结果与仿真结果进行对比分析，最后验证和完善仿真模型的准确性。

1 数值分析模型

1.1 喷丸强化原理

喷丸强化即高速运动的弹丸流喷射材料表面并使材料表层发生塑性变形的过程，该过程中弹丸反复打击材料表面，最终使材料表层附近形成具有一定深度的塑性变形层，即强化层，喷丸强化引入适当塑性变形层，以冷作硬化形式改善材料疲劳性能和抗应力腐蚀性能。

图 1 所示为喷丸强化示意图。在弹丸撞击下，接触表面处材料被挤压变形，金属向弹坑四周塑变。因此，弹丸接触层呈现压应力，这一层就是材料被压实变形最剧烈的强化层。相对地，强化层以下，材料内部表现为拉应力。可见，材料从撞击表面到内部依次为：塑性层—弹塑性变形层—变形层。

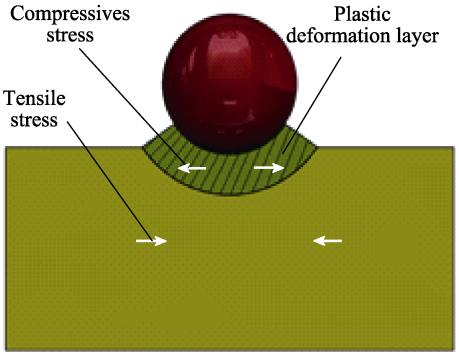


图 1 喷丸强化示意图

Fig.1 Schematic diagram of shot peening strengthening

1.2 多丸有限元模型建立

由于撞击接触模型具有对称性，建模时取四分之

一模型，提高计算效率。将模型进行切分并网格细化，撞击区域网格大小 0.05 mm，非撞击区域网格大小为 0.1 mm，均采用映射网格划分。由于喷丸速度不便直接测量，利用 Dr. KIemenz（Klemenz, 2009）推导的半经验公式估算喷丸速度：

$$v=\frac{16.35\times p}{1.53\times m+p}+\frac{29.50\times p}{0.598\times d+p}+4.83\times p \tag{1}$$

其中 p、m、d 分别代表喷射压力（bar）、喷丸流量（kg/min）、弹丸大小（mm）。为了得到喷丸流量，用电子秤称量 2 kg 的弹丸（d=0.5 mm），把弹丸放入喷丸机磨料贮存器内，将喷丸机打开，喷射压力调整到 0.3 MPa，待气压稳定后，开始喷丸，并且同步计时。喷射出的弹丸用收集盒收集，以免再次进入喷射循环，引起误差。5 次重复性实验测算：喷射 2 kg 弹丸用时为 3′17″~4′26″，带入计算弹丸流速在 54.2~55.1 m/min。

单元类型选用适合实体模型的 solid164 单元，对弹丸施加沿 Z 轴负方向 55 mm/s 的初速度载荷，喷射角度为 90°，弹丸距靶材 100 mm。靶材采用映射网格划分并进行网格细化，撞击后的应力由计算机根据网格的应变计算得出。由于弹丸不是主要讨论对象，弹丸采用自由网格划分。碰撞过程中，接触分析往往很复杂，需贴合实际接触情况，采用显式自动算法和面对面接触类型。图 2 所示为多丸撞击有限元模型。

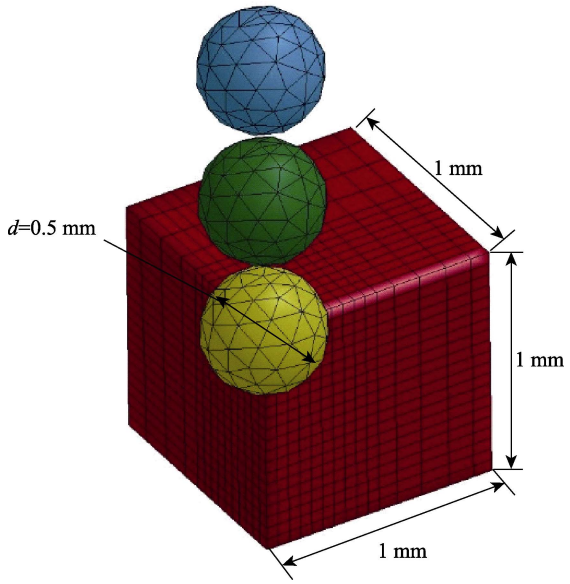


图 2　多丸撞击有限元模型
Fig.2 FEM of multiple shot impacts

1.3　边界条件

喷丸处理时，弹丸强度要高于靶材强度。因此，选弹丸为钢丸，其直径为 0.5 mm。由于弹丸是刚体，选用 ANSYS/LS-DYNA 材料库中的 Rigid 本构关系模型，并限制弹丸模型 XY 平面的位移及全转动，避免弹丸在运动过程中偏移出靶材范围。为模拟无限大实体模型，在模型两个外侧面施加非反射边界条件，则应力波在该边界处不会被反射而重新进入模型，影响实验结果的准确性。同时，两个内侧面施加对称边界条件，即切分模型的对称面处，便于在后处理中进行对称操作。为贴近实际喷丸情况，让靶材受到弹丸良好的冲击，在靶材的底部施加全约束。图 3 为模型边界条件的设置状况。

铝合金材料具有弹塑性，且根据实验测量，得到喷丸处理撞击后铝合金靶材所产生的变形在微米级，所以选用 ANSYS/LS-DYNA 材料库中的经典双线性随动强化模型。此模型适合各向同性材料的小应变问题，使用双线性来表示应力应变曲线，因此有两个斜率，即弹性斜率和塑性斜率，这可以很好反应出铝合金材料特性。表 1 为铝合金材料力学属性。

表 1　材料力学属性
Tab.1 Mechanical properties of materials

	λ	ρ/(g·cm^{-3})	E/GPa	σ_s/MPa	G/MPa
Projectile	0.31	7.85	206	/	/
Target	0.33	2.81	71	510	1027

如图 3 所示，应力集中处为弹丸撞击点，细化后网格尺寸为 50 μm，从云图中可以看出撞击处应力的横向、纵向影响范围大概在 300 μm，而在 0~50 μm 范围内，内应力值明显大于其他位置，即强化层。撞击中心略微凹陷，而撞击边缘处相较于周围区域凸起，这是典型的撞击塑性变形。

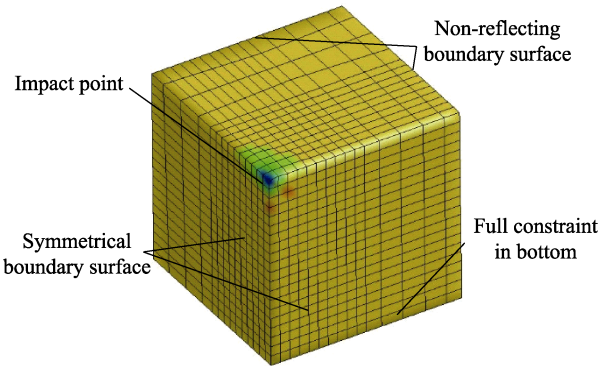


图 3　多丸撞击模型边界条件
Fig.3 Boundary conditions in FEM

1.4　仿真结果

仿真结果采用 ANSYS 求解器求解，建立多个模型，在后处理中查看其能量-时间曲线，整体能量趋于稳定时即可[27]（如图 4 所示）。从图 4 可以看出，总能量和动能在 0.005 s 后即趋于稳定，为了不影响计算结果和精度，故将求解时间定为 0.02 s。输出控制将输出步长设为 100，后处理文件输出格式设为 LS-DYNA，在 LS-PREPOST 中运行 d3plot 文件查看计算结果。

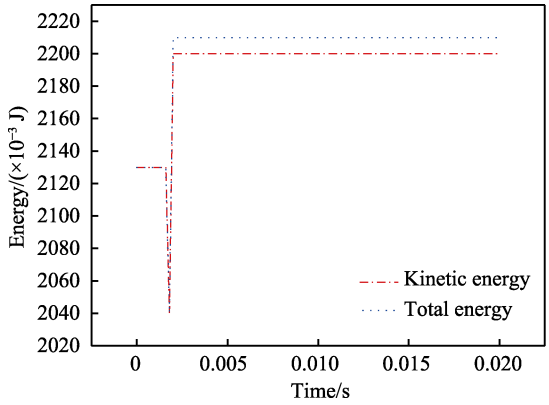


图 4　能量-时间曲线
Fig.4 Energy-time curve

从等效应力云图（图 5）中可见，越靠近撞击点处，应力等值线越密集，颜色也越深，说明撞击点中心处最容易变形，应力也最集中。

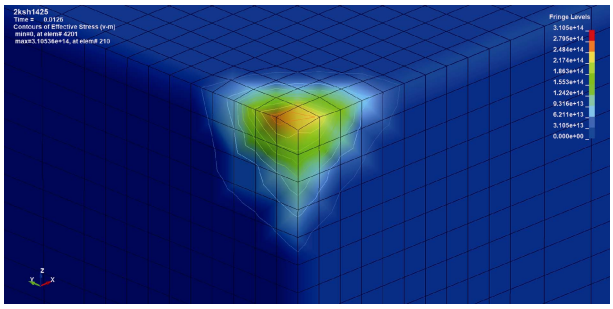


图 5　等效应力云图
Fig.5 Von-Mises stress

图 6 显示了撞击点处沿坐标轴方向的应力分布曲线。由表及里、由中心及四周，范围在 120~200 μm 内，应力变化剧烈；且随距离增加，应力趋于一致，即接近初始应力。这个范围近似反应了强化区的深度。

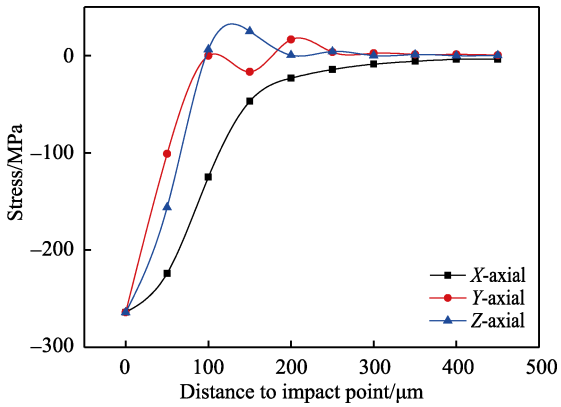


图 6　弹坑区域应力分布图
Fig.6 Stress distribution in crater

如图 7，撞击点变形程度随撞击次数增加而略有增大。第一次撞击后变形效果最显著，单丸撞击和双丸撞击所产生的变形增幅达到了 30%，后续增幅逐渐减小，五丸撞击和六丸撞击产生的变形增幅仅为 6%。说明在不改变喷丸工艺参数的情况下，材料的塑性变形将会有一个饱和值，不会随着撞击次数的增加而无限增大。

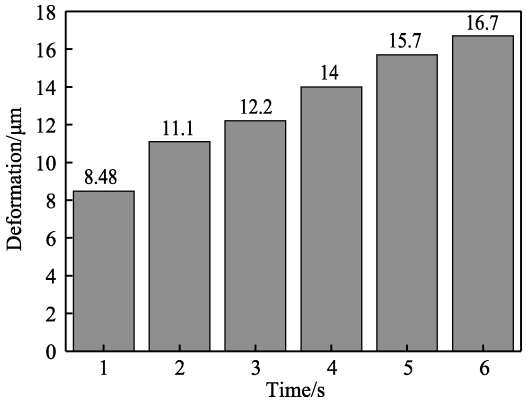


图 7　弹丸撞击次数-变形
Fig.7 Deformation along with different impact times

由弹丸撞击可知，弹着点正中心材料被挤压，而四周材料被塑性拉延变形，并出现类似毛边的凸起。从图 8 弹坑应力等值线图可以看出，弹丸撞击点处的压应力最大，以撞击点为中心，四周的压应力趋近于零，但是在弹丸撞击边缘呈现出拉应力。图示现象说明两点：一是撞击中心与边缘应力状态完全不同，撞击区四周容易出现应力集中现象；二是撞击带来了弹坑处塑性变形，造成表面不平整。分析认为，实际喷丸撞击时肯定是多丸撞击情形，单丸撞击只是理想状况，减小材料表面应力集中和平整变形表面需要在多丸喷覆下才能实现。因此，实践中喷丸强化要求 100% 表面全覆盖。

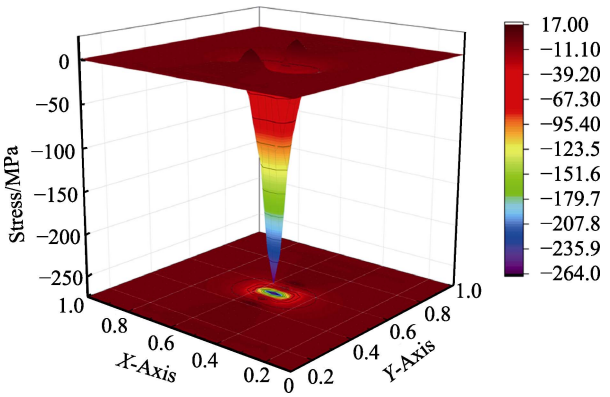


图 8　弹坑应力云图
Fig.8 Stress contour of crater

2　实验与分析

2.1　实验设计

靶材为 7075-T651 铝合金，经过固溶处理和预拉伸，尺寸 500 mm×108 mm×5 mm。实验设备为 ST-1960 喷砂机，喷口直径 5 mm。该机采用吸入式喷砂，即

利用空气压缩机形成的压缩气体在喷枪内高速流动，形成负压，将储存器内的丸粒吸入到喷枪内，高速喷射到靶材上面。在喷丸压力 0.3 MPa、弹丸直径 0.5 mm、喷丸距离 100 mm 的条件下。对靶材进行喷丸强化处理，在靶材的受喷面涂抹上一层红色粉末，待粉末基本消失，视为 100%完整覆盖一次。如图 9 所示，覆盖后铝合金表面由银白色变为灰色。

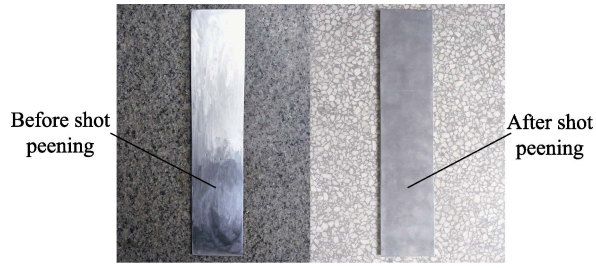


图 9　喷丸前后实验试样
Fig.9 Experimetal spmple before and after SP

2.2　应力测试

使用 Proto iXRD 组合式应力仪测试喷丸后材料表面应力，XRD 靶材为 Co_K-Alpha，参数为 20 kV/4 mA。XRD 测试值范围反映的是一个微小区域应力值，而仿真模型反映的也是一个微小区域的受力情况，所以两者反映的物理区域近似相同，具有可对比性，实验如图 10 所示。为了测量表面处沿深度方向的应力值，使用质量分数为 5%的 NaOH 溶液分别腐蚀出 20、40、60、80、100、120 μm 深的应力采集点，可得到步长为 20 μm 的层深应力分布，如表 2 所示。

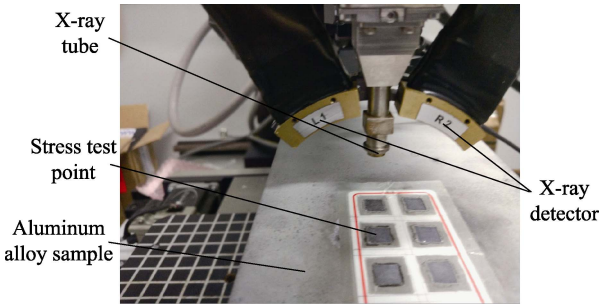


图 10　XRD 应力测试
Fig.10 Stress measurement by XRD

表 2　喷丸后表面深度应力
Tab.2 Depth stress on surface after SP

Depth/μm	Stress/MPa	Depth/μm	Stress/MPa
−249±12.1	Surface	−90±11.5	80
−237±7.7	20	−62±7.6	100
−187±11.6	40	−22±8.2	120
−137±8.8	60		

2.3　仿真与实验对比

如图 11，仿真计算了弹坑多次丸粒撞击后沿深度方向的表面应力分布。可见喷丸强化的影响深度约 200 μm。不同次数撞击后，材料表面应力相近，不同数量弹丸撞击后随深度方向的残余应力分布大致相同，曲线趋势相似，说明撞击次数增加对喷丸强化的效果影响不显著。应力分布说明喷丸强化后，材料内部拉、压应力相平衡，压应力分布浅而强度高，拉应力分布广而强度小。材料表层分布着一层高强度的压应力，在材料表面产生压缩变形，使表面形成形变硬化层。

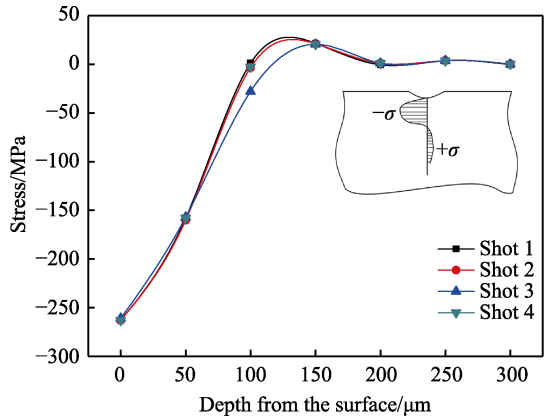


图 11　沿深度方向的表面应力
Fig.11 Surface stress profile along depth

将仿真时一个弹击部位与 XRD 测试微区部位相比，如图 12 所示。仿真模型的应力值与实验测得的应力值基本吻合，曲线的变化趋势相近。最大偏差值在 25 MPa 左右。模型表面应力为−261 MPa，随深度的增加，压应力逐渐减小，大约在 120 μm 处残余应力值近乎零，120~200 μm 深度残余应力值为正，往后应力曲线收敛在零值附近。这一应力分布规律符合材料力学中材料内部拉、压应力相平衡的理论。

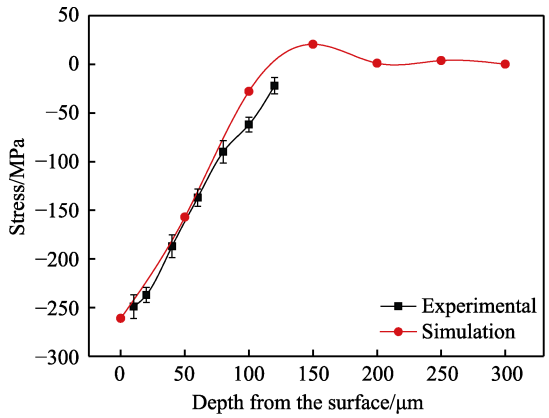


图 12　仿真与实验应力分布对比
Fig.12 Comparison of stress between simulation and experiment

表面的塑性变形会带来表面硬化，因此，用显微硬度可以间接说明变形程度。图 13 为 100%~400%喷丸表面覆盖率下靶材表面弹坑处硬度增幅曲线。可以看出，随覆盖次数的增加，材料硬度增加，但增幅率下降，100%覆盖时硬度增幅约 13%，300%覆盖时增

幅 6%，400%覆盖时增幅小于 4%，这也说明材料变形率下降。同时，由喷丸表面 SEM 电镜扫描（200×，近似一个弹坑范围）与弹坑三维变形图可见，上述的分析结果具有一致性。这也说明多丸撞击仿真中，撞击次数具有有限性特点。

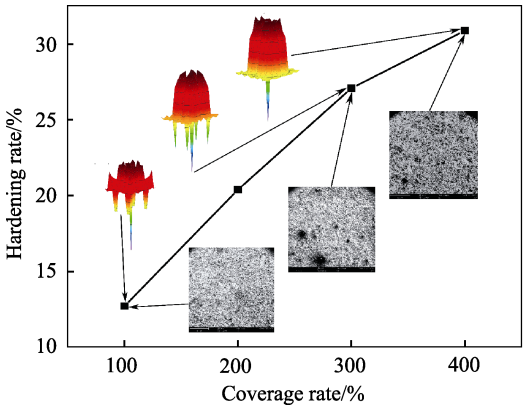


图 13　硬化率-覆盖率曲线

Fig.13 Hardening rate-surface coverage curve

2.4　误差分析

仿真与实验存在偏差。一是，由于材料表面实际组织状况与仿真状况差异很大，其性状的不均匀性导致了仿真计算存在差异。二是，喷砂压力直接影响弹丸的速度，喷砂机的压力由气泵供给，而气泵的输出压力并非恒定不变的，随着喷丸过程的进行，喷丸压力在 0.25~0.3 MPa 之间变化。三是，试样初始应力状况在低水平下难以评价，例如试样为预拉伸板材，实际内应力水平很低（小于 20 MPa，难于测量），而仿真模拟中预拉伸板材的初始应力则几乎为零。因此，仿真与实验偏差不超过 20 MPa 范围时，取仿真模型初始状态为零应力。综合上述因素，在合理情况下，仿真与实验计算偏差不大，分布曲线趋同，研究结果证明了这一点。

2.5　可重复性实验

为了验证模型的可重复性，对另外 3 块铝合金靶材进行不同工艺参数的喷丸强化处理，并测试其表面应力，结果见表 3。将实验数值和仿真数值进行对比发现，最大偏差为 18 MPa，说明本模型有较好的可重复性。

表 3　实验与仿真模型的残余应力值对比

Tab.3　Comparison of residual stress values between experimental and simulation models

Sample	Distance to target /mm	Pressure /MPa	Projectile size /mm	Experimental stress /MPa	Simulation stress /MPa
1	50	0.3	0.4	–189	–174
2	100	0.4	0.4	–214	–218
3	150	0.3	0.5	–251	–269

3　结论

1）通过单丸和多丸颗粒撞击，模拟喷丸仿真，并将丸粒撞击的坑域与 XRD 微区应力分布、弹坑 SEM 形貌作对比实验分析，为仿真建模边界条件、物理参数、力学分析提供数据参考。

2）喷丸实验后，运用逐层 XRD 应力测试，获得了表层应力分布，实验与仿真结果吻合较好，最大偏差小于 25 MPa。两者力学行为的一致性说明了仿真建模的有效性。同时，仿真分析认为多丸撞击模拟计算结果与多次表面喷丸覆盖实验结果很接近，这验证了弹坑在应力和形变饱和后，单纯增加弹丸撞击次数的计算效率不高。例如，在一定条件下，6 次撞击后其弹坑变形增幅仅为 6%。

3）为了检验仿真模型的正确性，通过 3 组重复性实验对比了模型计算结果。数据显示，两者表面应力偏差最大 18 MPa，最小 4 MPa。上述结果验证了建模过程的准确性，说明借助实验外场条件完善建模参数，可以快速准确地计算喷丸后材料表面应力变形分布，描述材料表面应力和塑性变形的规律和机制。

参考文献：

[1] 刘兵, 彭超群, 王日初, 等. 大飞机用铝合金的研究现状及展望[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(9): 1705-1715.
LIU Bing, PENG Chao-qun, WANG Ri-chu, et al. Recent development and prospects for giant plane aluminum alloys[J]. Chinese journal of nonferrous metals, 2010, 20(9): 1705-1715.

[2] 常艳艳, 孙涛, 李增强. 硬铝合金超精密车削残余应力的仿真及试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(7): 41-46.
CHANG Yan-yan, SUN Tao, LI Zeng-qiang. Simulation and experiments of residual stress on ultra-precision turning of hard aluminum alloy[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(7): 41-46.

[3] HUANG Xiao-ming, SUN Jie, LI Jian-feng. Effect of initial residual stress and machining-induced residual stress on the deformation of aluminium alloy plate[J]. Journal of mechanical engineering, 2015, 61(2): 131-137.

[4] YANG Y, LI M, LI K R. Comparison and analysis of main effect elements of machining distortion for aluminum alloy and titanium alloy aircraft monolithic component[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2014, 70(9-12): 1803-1811.

[5] CHEN J. Study on machining distortion of residual stress release[J]. Advanced materials research, 2012, 426: 143-146.

[6] 廖凯, 张萧笛, 车兴飞, 等. 铝合金薄壁件加工变形的力学模型构建与分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(5): 166-172.
LIAO Kai, ZHANG Xiao-di, CHE Xing-fei, et al. Construction and analysis of mechanic model of deformation for Al alloy thin-walled component[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(5): 166 -172.

[7] 唐志涛. 航空铝合金残余应力及切削加工变形研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
TANG Zhi-tao. Residual stress and deformation of aerospace aluminum alloy in machining[D]. Jinan: Shandong University, 2008.

[8] 谭靓, 姚倡锋, 张定华. 7055 铝合金高速加工表面完整性对疲劳寿命的影响[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(6): 872-876.
TAN Liang, YAO Chang-feng, ZHANG Ding-hua. Influence of surface integrity on the fatigue life for high-speed milling of 7055 aluminum alloy[J]. Mechanical science and technology, 2015, 34(6): 872-876.

[9] 李占明, 王红美, 孙晓峰, 等. 高速微粒轰击对微弧氧化铝合金疲劳性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(7): 2179-2184.
LI Zhan-ming, WANG Hong-mei, SUN Xiao-feng, et al. Effect of high-speed particles bombarding pre-treatment on the fatigue properties of micro-arc oxidation aluminum alloy[J]. Rare metal materials and engineering, 2018, 47(7): 2179-2184.

[10] 臧志刚, 王建明, 郑林彬. 2024 铝合金喷丸试件疲劳寿命试验及仿真研究[J]. 材料保护, 2018, 51(5): 69-73.
ZANG Zhi-gang, WANG Jian-ming, ZHENG Lin-bin. Fatigue life experiment and simulation study on 2024 aluminum alloy specimen with shot peening[J]. Material protection, 2018, 51(5): 69-73.

[11] 邓红华, 夏琴香, 程秀全, 等. 喷丸对预腐蚀后铝合金疲劳性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 118-123.
DENG Hong-hua, XIA Qin-xiang, CHENG Xiu-quan, et al. Effect on anti-corrosion fatigue property of aluminum alloy after shot peening[J]. Surface technology, 2016, 45(1): 118-123.

[12] 陈国清, 田唐永, 张新华, 等. Ti-6Al-4V 钛合金陶瓷湿喷丸表面强化微观组织与疲劳性能[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(1): 122-127.
CHEN Guo-qing, TIAN Tang-yong, ZHANG Xin-hua, et al. Microstructure and fatigue properties of Ti-6Al-4V titanium alloy treated by wet shot peening of ceramic beads[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2013, 23(1): 122-127.

[13] MOLINARI A, SANTULIANA E, CRISTOFOLINI I, et al. Surface modifications induced by shot peening and their effect on the plane bending fatigue strength of a Cr-Mo steel produced by powder metallurgy[J]. Materials science & engineering A, 2011, 528(6): 2904-2911.

[14] PUROHIT R, VERMA C S, RANA R S, et al. Optimization of process parameters of shot peening using ABQUS[J]. Materials today proceedings, 2017, 4(2): 2119-2128.

[15] SEDDIK R, BAHLOUL A, ATIG A, et al. A simple methodology to optimize shot-peening process parameters using finite element simulations[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2016, 90(5-8): 1-17.

[16] BADREDDINE J, ROUHAUD E, MICOULAUT M, et al. Simulation of shot dynamics for ultrasonic shot peening: effects of process parameters[J]. International Journal of mechanical sciences, 2014, 82(5): 179-190.

[17] 王利平, 王建明, 裴信超, 等. 喷丸残余应力场 SPH/FEM 耦合建模与仿真[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(6): 108-112.
WANG Li-ping, WANG Jian-ming, PEI Xin-chao, et al. Numerical simulating for residual compressive stress of shot-peening based on SPH coupled FEM[J]. Journal of Zhengzhou University (engineering science), 2014, 35(6): 108-112.

[18] 刘飞宏, 王建明, 余丰, 等. 基于 SPH 耦合有限元法的喷丸残余应力场数值模拟[J]. 山东大学学报(工学版), 2010, 40(6): 67-71
LIU Fei-hong, WANG Jian-ming, YU Feng, et al. Numerical simulation for compressive residual stress of shot peening based on SPH coupled FEM[J]. Journal of Shandong University (engineering science), 2010, 40(6): 67-71.

[19] 张洪伟, 陈家庆, 张以都. 基于多丸粒模型的喷丸表面强化过程数值模拟[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(6): 118-125.
ZHANG Hong-wei, CHEN Jia-qing, ZHANG Yi-du. Numerical simulation of shot-peening process based on multiple shot model[J]. Journal of plasticity engineering, 2012, 19(6): 118-125.

[20] 卢国鑫, 宋颖刚, 王仁智, 等. 300M 钢喷丸强化残余应力场的数值模拟[J]. 中国表面工程, 2013, 26(4): 72-76.
LU Guo-xin, SONG Ying-gang, WANG Ren-zhi, et al. Numerical simulation of 300M steel residual stress field caused by shot peening[J]. China surface engineering, 2013, 26(4): 72-76.

[21] 路会龙, 姚平喜, 刘海英. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的受控喷丸工艺过程仿真[J]. 机械设计与制造, 2009(2): 214-216.
LU Hui-long, YAO Ping-xi, LIU Hai-ying. Simulation of controlled shot peening process based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Mechanical design and manufacturing, 2009(2): 214-216.

[22] XIE Le-chun, WANG Cheng-xi, WANG Li-qiang, et al. Numerical analysis and experimental validation on residual stress distribution of titanium matrix composite after shot peening treatment[J]. Mechanics of materials, 2016, 99: 2-8.

[23] HASSANI-GANGARAJ S M, CHO K S, VOIGT H J L, et al. Experimental assessment and simulation of surface nanocrystallization by severe shot peening[J]. Acta materialia, 2015, 97: 105-115.

[24] POURALI S, KIANIRASHID A R, BABAKHANI A. Surface nanocrystallization and gradient microstructural evolutions in the surface layers of 321 stainless steel alloy treated via severe shot peening[J]. Vacuum, 2017, 144: 152-159.

[25] QANDIL A, ZAID A I O. Effect of shot peening and grain refinement on the fatigue life and strength of commercially pure Al and two of its alloys: Al-2024-T3 and Al-7075-T6[J]. 2016, 146(1): 012-028.

[26] MAHMOUDI A H, GHASEMI A, FARRAHI G H, et al. A comprehensive experimental and numerical study on redistribution of residual stresses by shot peening[J]. Materials & design, 2016, 90: 478-487.

[27] 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.