不同入射角弹丸强化残余应力场的数值模拟

周志近，单以才

（南京信息职业技术学院，南京 210023）

摘 要：目的 通过建立有限元模型模拟研究弹丸入射角度对残余应力场和强化效果的影响。**方法** 采用 ABAQUS 软件建立了单粒弹丸强化靶体的三维对称模型，对单个弹丸喷丸强化进行了数值模拟，模拟了 50、75、100 m/s 三种不同速度下，弹丸垂直入射作用在靶体上所产生的残余压应力场，以及 30°、60°和 90°三种不同入射角度下靶体上产生的残余应力场。**结果** 不同速度下弹丸垂直入射作用在靶体上所产生的残余压应力场的模拟结果显示，随着弹丸速度的增加，靶材次表层的最大残余压应力以及压应力层深度增加。不同入射角度下靶体上产生的残余应力场深度和大小变化不相同，入射角为 90°（垂直入射）时，所产生的残余压应力最大，入射角为 60°时次之，入射角为 30°时最小。**结论** 模拟结果与实验结果的残余压应力最大值和曲线的变化趋势基本一致，吻合程度较高，说明所建的有限元模型可靠。在相同速度下，随着入射角度不断变大，所产生的最大残余压应力也不断增加，在垂直入射时达到最大值。

关键词：弹丸强化；入射角；残余应力；数值模拟

中图分类号：TU317+.3 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2017)10-0213-05

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.10.031

Numerical Simulation of Residual Stress Field Induced by Shot Peening at Different Incidence Angle

ZHOU Zhi-jin, SHAN Yi-cai

(Nanjing College of Information Technology, Nanjing 210023, China)

ABSTRACT: The work aims to study influence of incidence angle of shot on residual stress field and strengthening effect by establishing finite element model. Three-dimensional symmetric model of single-shot peening was established by using ABAQUS software. Numerical simulation was performed to peening of single shot. Both residual compressive stress field on target body generated by vertical incidence of shot at 50 m/s, 75 m/s and 100 m/s, and that on target body at three different incidence angles of 30°, 60° and 90° were simulated. The maximum residual compressive stress and depth of compressive stress layer of secondary surface of the target increased as the shot velocity increased. Depth and magnitude of the residual stress field generated at different incidence angles on the target body changed differently. The residual compressive stress was the maximum at the incidence angle was 90° (vertical incidence); higher at the incidence angle of 60°; and the minimum at the incidence angle of 30°. Variation trend of the maximum residual compressive stress and curve obtained from simulation results and experimental results are consistent, and degree of coincidence is high, indicating that the finite element model is reliable. At the iden-

收稿日期：2017-03-28；修订日期：2017-05-22

Received：2017-03-28；**Revised**：2017-05-22

基金项目：江苏省产学研前瞻联合研究项目（BY2016013-01）；江苏省青蓝工程项目（2016-05）

Fund：Supported by Project of Jiangsu Province Prospective Joint Research Project (BY2016013-01), Jiangsu Province Qinglan Project (2016-05)

作者简介：周志近（1978—），男，硕士，讲师，主要研究方向为机械设计制造。

Biography：ZHOU Zhi-jin(1978—), Male, Master, Lecturership, Research focus: mechanical design and manufacturing.

tical speed, the maximum residual compressive stress increases gradually and reaches the maximum during vertical incidence as the incidence angle increases.

KEY WORDS: shot-peening; incidence angle; residual stress; numerical simulation

弹丸强化是一种利用大量弹丸喷射到工件表面，在工件表面产生一定深度的残余压应力层和表面加工硬化，有利于抑制疲劳裂纹的萌生和减缓疲劳裂纹的扩展，使零件表层的机械性能得到改善，使材料的抗磨损性、耐腐蚀性和抗疲劳等性能得到显著提高，从而提高工件的疲劳寿命的冷加工方法[1-4]。经过弹丸强化后，能够改变零件由表面起裂导致发生宏观脆性断裂的断裂抗力，对裂纹的萌生起到了抑制作用，减缓了裂纹的扩展，使零件的疲劳寿命得到显著提高。弹丸强化工艺具有操作简便、成本低廉、效率高等特点，广泛应用在航空航天、汽车工业、海洋装备、工程机械、建筑设备等对可靠性要求较高以及疲劳破坏比较频繁的领域[5-8]。

近年来，国内外大量学者对弹丸强化性能进行了大量研究。张洪伟等人[9]采用 LS-DYNA 软件建立了 7075 航空铝合金喷丸强化的有限元模型，研究了不同喷丸工艺参数对喷丸残余应力场的影响，并将数值模拟研究的结果与相关文献实验结果相对比，最后得到了单次喷丸和多次喷丸情况下模型的残余应力场以及塑性应变分布规律。凌祥等人[10]通过 ABAQUS 建立了喷丸的三维有限元模型，模拟了玻璃丸和钢丸两种弹丸所产生的残余应力场，并分析了线性减缩积分单元的沙漏参数、材料的应变硬化率、喷丸覆盖率以及初始残余拉应力等因素，对 304 不锈钢靶材残余应力分布的影响。李雁淮[11]采用有限元法建立了单弹丸和多弹丸喷丸强化模型，模拟了奥氏体不锈钢的喷丸强化过程，对不同模型下弹丸覆盖率进行了研究，发现：单弹丸模型中，弹丸的冲击次数对材料残余应力幅值的影响较小，对材料塑性应变的影响较大；多弹丸模型中，弹丸覆盖率对残余应力幅值的影响较大。陈光忠[12]建立了喷丸强化 AZ91D 镁合金的有限元模型，从残余压应力层的厚度、残余压应力的峰值及其深度等方面，探讨了喷丸不同工艺参数对 AZ91D 镁合金表面残余应力场的影响。国外相关学者采用了二维轴对称模型、三维模型等对单丸粒和多丸粒的喷丸过程进行了比较全面的研究，并取得了显著成果[13-16]。但这些数值模拟过程大都从喷丸的工艺参数出发，弹丸的入射角度对其强化效果的影响还有待进一步深入研究。

本文应用 ABAQUS 软件对单个弹丸喷丸强化进行了数值模拟，将所模拟的结果与文献[17]的结果进行对比，以验证本文所建模型的可靠性。在此模型的基础上，分别模拟弹丸不同的入射角度对产生残余应力场的影响，分析弹丸入射角度对材料喷丸强化的影响规律，为实际应用提供一定的参考。

1 数值模拟模型

1.1 模型的建立

本文在 ABAQUS 软件中建立了单粒弹丸和靶体的三维模型，对单粒弹丸的喷丸强化过程进行有限元分析。靶体尺寸为 $7R\times5R\times4R$ 的 1/4 对称模型，所选弹丸半径为 0.5 mm。在网格划分中，为了求解更加准确，对弹丸和靶体材料选用不同类型的网格进行划分，弹丸作为刚体处理，采用 4 节点线性四面体单元（C3D4），靶材选用减缩积分单元（C3D8R）。在弹丸撞击区域将网格细化，以提高计算精度；在远离撞击区域，网格可适当减少。三维有限元模型如图 1 所示。

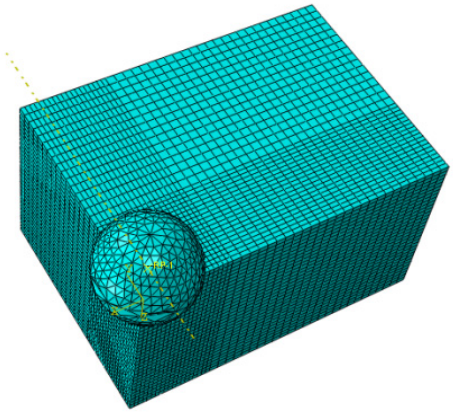


图 1 三维有限元模型

Fig.1 Three-dimensional FE model

1.2 边界条件和材料属性

定义边界条件和接触条件，在实际喷丸作业过程中，靶件一般固定在夹具上。所以在边界条件的定义中，限制靶件各个方向上的移动，对称面采用对称约束。同时限制弹丸的转动，并将弹丸约束为刚体。弹丸和靶件采用库伦接触，摩擦系数为 0.25。靶体的材料参数如表 1 所示。

表 1　靶材的材料力学性能参数[17]

Tab.1 Mechanical properties parameters of target material[17]

ρ/(kg·m^{-3})	E/GPa	ν	σ_0/MPa	H/MPa
7800	200	0.3	600	800

2　模拟结果及分析

2.1　弹丸速度对残余应力场的影响

弹丸强化参数的设置不当，会使试样表面的粗糙度增加，在试样表面引入微裂纹，有损试样的疲劳性能。因此，弹丸强化参数的设置对弹丸强化效果至关重要。弹丸速度可以根据不同的靶材和需求进行控制，不同速度的弹丸撞击试样表面，在试样表面产生的残余应力场也不相同。通过有限元模型，能够模拟不同速度的弹丸撞击试样靶材所产生的残余应力场的变化规律。采用文献[17]中所建立的模型参数，模拟不同速度（50、75、100 m/s）的弹丸撞击靶材的情况，模拟结果如图 2 所示。可以看出，随着弹丸速度的增加，试样次表层的最大残余压应力以及压应力层深度随之增加，三种喷丸速度下，所产生的残余应力最大值都出现在试样次表层 0.25 mm 附近。

图 3 为文献[17]中 Meguid 等人所得出的结果。通过比较图 2 和图 3，可以看出三种速度下，所得出

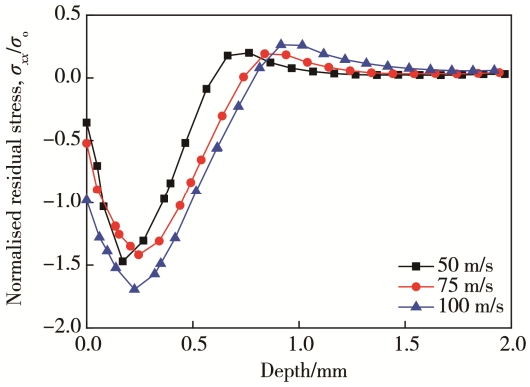


图 2　弹丸冲击靶材的残余应力场模拟

Fig.2 Residual stress field simulation of shot impact on target material

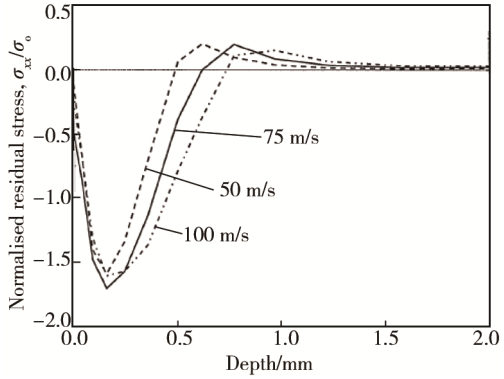


图 3　Meguid 的残余应力场模拟[17]

Fig.3 Simulation of residual stress field by Meguid[17]

的残余应力变化曲线基本一致，残余应力最大值相当，且残余应力最大值都出现在试样的次表层。本文所模拟的结果与文献的结果基本吻合，验证了本文所建的有限元模型的正确性。

2.2　弹丸入射角对残余应力场的影响

本文在上述模型的基础上，模拟了弹丸的不同入射角所产生的靶材残余应力场。图 4—6 分别为 30°、60°和 90°三种入射角下所产生的残余应力场，都在喷丸速度为 100 m/s 的情况下进行模拟。从图 4—6 可以看出，弹丸的入射角度对靶体的残余应力场有较大影响，不同的入射角度在靶体上产生的残余压应力层的深度和大小也不相同。图 7 为三种不同入射角下沿深度方向上残余应力的分布情况，残余应力沿深度的变化趋势基本一致，入射角为 90°（垂直入射）时，所产生的残余压应力最大，入射角为 60°时次之，入射角为 30°时最小。当入射角为 90°时，弹丸与靶体垂



图 4　入射角为 30°的靶体残余应力云图

Fig.4 Contour of residual stress on target at incidence angle of 30°

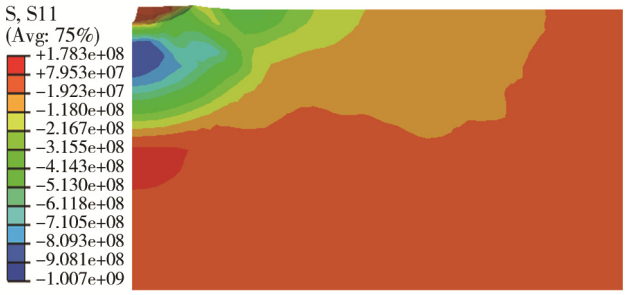


图 5　入射角为 60°的靶体残余应力云图

Fig.5 Contour of residual stress on target at incidence angle of 60°

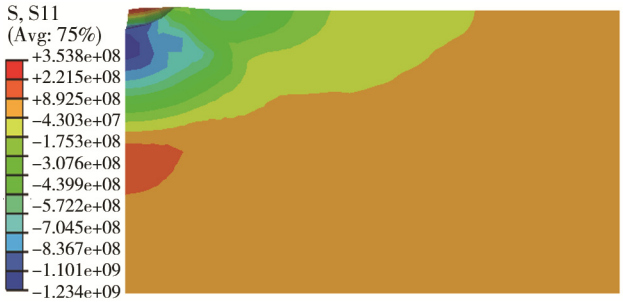


图 6　入射角为 90°的靶体残余应力云图

Fig.6 Contour of residual stress on target at incidence angle of 90°

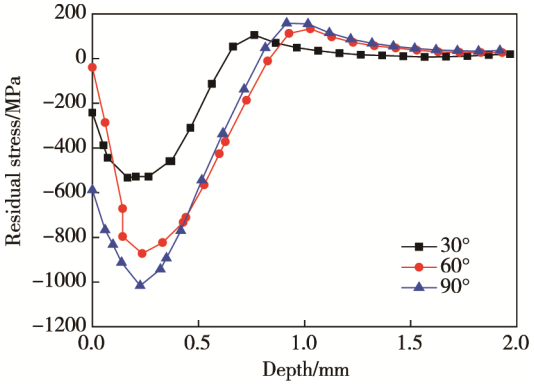


图 7　不同入射角下沿深度方向的残余应力分布

Fig.7 Distribution of residual stress at different incidence angles in depth direction

直，喷丸过程中，弹丸的能量全都用于与靶体的相互作用；当入射角小于 90°时，属于斜碰撞过程，会有部分能量未用于与靶体的相互作用。

图 8—10 为三种入射角下靶体表面所产生的 Mises 应力云图，可以看出，不同入射角在靶体表面产生的残余应力呈对称分布，且随着入射角度不断增加，残余应力的分布范围不断增大。从图 8—10 还可以看出，入射角为 30°和 60°时，在靶体表面所产生的最大 Mises 应力分布在入射角度的前进方向，也就是如图所示弹坑的右侧；当入射角度为 90°时，最大 Mises 应力分布较均匀，并分布在弹坑周围。图 11 为不同入射角表面残余应力分布，三种不同入射角下喷丸产生的横向残余应力的变化趋势基本一致，随着入射角的减小，所产生的应力分布整体向右侧偏移。

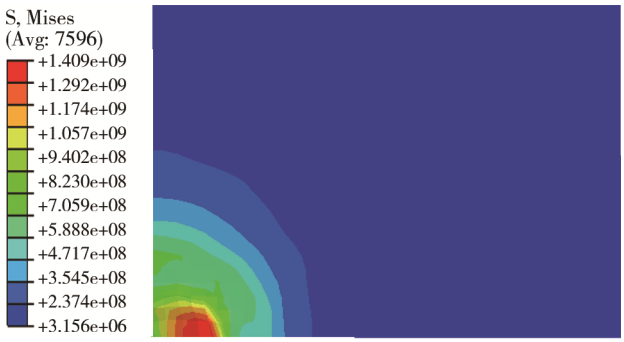


图 8　入射角为 30°的靶体表面残余应力云图

Fig.8 Contour of residual stress on target surface at incidence angle of 30°

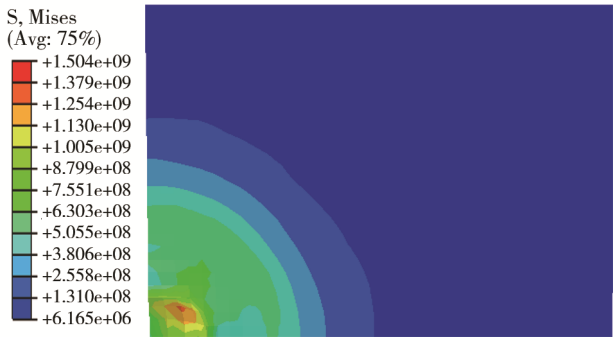


图 9　入射角为 60°的靶体表面残余应力云图

Fig.9 Contour of residual stress on target surface at incidence angle of 60°

图 12 为不同入射角下等效塑性应变分布图。可以看出，入射角为 30°时，等效塑性应变值为 0.31；入射角为 60°时，等效塑性应变值为 0.53；入射角为 90°时，等效塑性应变值为 0.59。等效塑性应变值随入射角度的增加而增加，但随着入射角的增加，等效塑性应变值的增加幅度明显变小。



图 10　入射角为 90°的靶体表面残余应力云图

Fig.10 Contour of residual stress on target surface at incidence angle of 90°

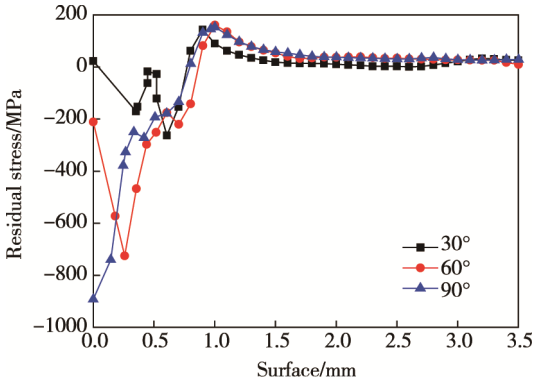


图 11　不同入射角下表面残余应力分布

Fig.11 Distribution of surface residual stress at different incidence angles

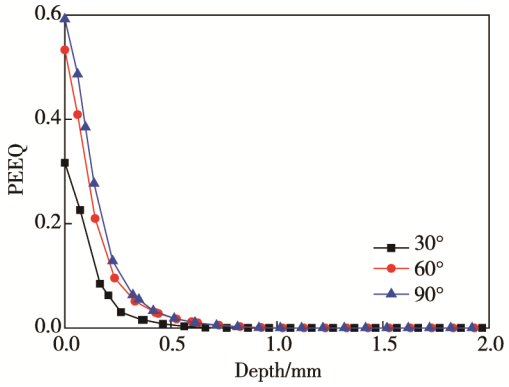


图 12　不同入射角下等效塑性应变分布图

Fig.12 Equivalent plastic strain distribution diagram at different incidence angles

3　结论

三种不同入射角下喷丸产生的残余应力沿深度的变化趋势基本一致，入射角为 90°（垂直入射）时，所产生的残余压应力最大，入射角为 60°时次之，入射角为 30°时最小，实际喷丸过程应该尽量控制弹丸垂直入射靶体。喷丸产生的横向残余应力随着入射角的减小，整体向右侧偏移。入射角为 30°和 60°时，在靶体表面所产生的最大 Mises 应力分布在弹坑右侧；当垂直入射时，最大 Mises 应力分布在弹坑周围。

参考文献：

[1] 王仁智. 金属材料的喷丸强化原理及其强化机理综述[J]. 中国表面工程, 2012, 25(6): 1-9.
WANG Ren-zhi. Overview on the Shot Peening Principle and Its Strengthening Mechanisms for Metallic Materials[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(6): 1-9.

[2] 张洪伟, 张以都, 吴琼. 喷丸强化过程及冲击效应的数值模拟[J]. 金属学报, 2010, 146(1): 111-117.
ZHANG Hong-wei, ZHANG Yi-du, WU Qiong. Numerical Simulations of Shot-peening Process and Impact Effect[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 146(1): 111-117.

[3] 党建毅, 董星, 杨威. 喷丸强化残余应力场的数值模拟[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 & Processing Equipment, 2013, 41(5): 130-134.

[4] 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.

[5] 李鹏, 刘道新, 关艳英, 等. 喷丸强化对新型 7055-T7751 铝合金疲劳性能的影响[J]. 机械工程材料, 2015, 39(1): 86-93.
LI Peng, LIU Dao-xin, GUAN Yan-ying. Effects of Shot Peening on Fatigue Property of New Aluminum Alloy 7055-T7751[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(1): 86-93.

[6] 程秀全, 夏琴香, 陈志超, 等. 飞机腐蚀损伤构件喷丸强化后的表面残余应力场[J]. 表面技术, 2016, 45(5): 51-55.
CHENG Xiu-quan, XIA Qin-xiang, CHEN Zhi-chao, et al. Surface Residual Stress Field by Shot Peening on Corroded Aircraft Structural Part[J]. Surface Technology, 2016, 45(5): 51-55.

[7] 张彩珍, 杨健, 魏磊, 等. 航空发动机钛合金叶片喷丸强化残余应力研究[J]. 表面技术, 2016, 45(4): 208-212.
ZHANG Cai-zhen, YANG Jian, WEI Lei, et al. Shot-peened Residual Stress of Aeroengine Titanium Alloy Blades[J]. Surface Technology, 2016, 45(4): 208 -212.

[8] 汝继刚, 李超, 王亮, 等. 喷丸强化对 7Al2 铝合金微观组织和疲劳性能的影响[J]. 航空材料学报, 2013, 33(6): 51-56.
RU Ji-gang, LI Chao, WANG Liang, et al. Effect of Shot Peening on Microstructure and Fatigue Life of 7Al2 Aluminum[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(6): 51-56.

[9] 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.

[10] 凌祥, 彭薇薇, 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): 182-189.
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): 182-189.

[11] 李雁淮, 王飞, 吕坚, 等. 单丸粒喷丸模型和多丸粒喷丸模型的有限元模拟[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(3): 348-352.
LI Yan-huai, WANG Fei, LYU Jian, et al. Finite Element Analysis for Shot-peening Models of Single Shot Impact and Multiple Impingement[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(3): 348-352.

[12] 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(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(2): 134-138.

[13] MIAO H Y, LAROSE S, PERRON C, et al. On the Potential Applications of a 3D Random Finite Element Model for the Simulation of Shot Peening[J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40(10): 1023-1038.

[14] BARAGETTI S. Three-dimension Finite Element Procedures for Shot-peening Residual Stress Field Prediction[J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2001, 14: 51-63.

[15] MAJZOOBI G H, AZIZI R, ALAVI NIA A. A Three-dimensional Simulation of Shot Peening Process Using Multiple Shot Impacts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164-165: 1226-1234.

[16] BHUVARAGHAN B, SRINIVASAN S M, MAFFEO B, et al. Shot Peening Simulation Using Discrete and Finite Element Methods[J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41(12): 1266-1276.

[17] 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: 179-191.