

# 基于 SPH 结合 FEM 的喷丸残余应力数值模拟 \*

王利平, 王建明, 赵莉莉, 吕鹤婷, 刘兴睿

(山东大学 机械工程学院, 济南 250061)

**摘 要:** 针对以往有限元模型中弹丸数量较少且为规则阵列排布的缺陷, 采用光滑粒子流体动力学法 (Smoothed particle hydrodynamics, SPH) 与有限元法 (Finite element method, FEM) 相结合的方法, 对喷丸过程进行数值模拟; 使用 MATLAB 对弹丸空间位置坐标进行随机化处理, 形成了大量丸粒冲击工件表面的随机喷丸仿真模型。通过分析确定了喷丸饱和时间, 研究了喷射角度、弹丸流量对残余应力场的影响。结果表明: 在喷丸参数一定的条件下, 存在相应的饱和喷丸时间; 研究喷丸参数对残余应力的影响时, 应在喷丸达到饱和时间之后提取残余应力值; 喷射角度增大, 残余压应力增大; 开始时弹丸流量增大, 残余压应力会有所增大, 但当其达到饱和值后, 残余压应力不再变化。

**关键词:** 喷丸强化; 光滑粒子; 流体动力学法; 有限元法; 残余应力场

**中图分类号:** TG668

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-9289(2015)05-0071-06

## Numerical Simulations for Residual Stress Field of Shot-peening Based on SPH Coupled with FEM

WANG Li-ping, WANG Jian-ming, ZHAO Li-li, LV He-ting, LIU Xing-rui

(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061)

**Abstract:** In previous numerical models, the number of shots is inadequate and its distributions is in a regular array. To overcome there defects, the smoothed particle hydrodynamics (SPH) and finite element method (FEM) were coupled to simulate the shot-peening process. By MATLAB programming to deal with the shots space coordinates, a random shot-peening model with many shots impacting the component surface was built. The shot-peening saturation time, the influence of impact angle and mass flow on the residual stress field were analyzed. The results show that in the given condition, the corresponding saturated shot peening time exists. The residual stress value should be extracted after reaching the shot peening saturated time in the effect of shot peening parameters on the residual stress research. With the increase of the impact angle and mass flow, the residual pressure stress is improved. However, the residual stress field remains unchanged when the mass flow reaches a certain extent.

**Keywords:** shot-peening; smoothed particle; smoothed particle hydrodynamics (SPH); finite element method (FEM); residual stress field

## 0 引 言

喷丸强化工艺主要用来提高金属工件的疲劳寿命<sup>[1-4]</sup>。它利用球形硬化铸钢弹丸、钢丝切丸、玻璃弹丸或陶瓷弹丸以较高速度(20~100 m/s)撞击

工件表面,使工件表层材料发生塑性变形,次表层材料发生弹性变形,因弹性变形部分要恢复其初始状态,对表层的塑性变形区将形成压缩作用,这将在工件表层产生残余压应力。该表层残

**收稿日期:** 2015-03-02; **修回日期:** 2015-06-28; **基金项目:** \* 国家自然科学基金(51375267)

**通讯作者:** 王建明(1962-), 男(汉), 教授, 博士; **研究方向:** 喷丸强化技术、计算力学、多体动力学; **Tel:** (0531) 8839 2261; **E-mail:** wangjianming@sdu.edu.cn

**网络出版日期:** 2015-09-09 15:31; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150909.1531.028.html>

**引文格式:** 王利平, 王建明, 赵莉莉, 等. 基于 SPH 结合 FEM 的喷丸残余应力数值模拟 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(5): 71-76.  
Wang L P, Wang J M, Zhao L L, et al. Numerical simulations for residual stress field of shot-peening based on SPH coupled with FEM [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(5): 71-76.

余压应力场能有效抑制循环载荷作用下的疲劳失效<sup>[5-6]</sup>。现被广泛应用于航空、汽车和发电设备中重要零部件的抗疲劳强化处理,如涡轮叶片、螺旋桨、旋翼主轴、弹簧、曲轴等。现有有限元仿真研究中多属微观建模,即仿真模型中弹丸数量有限,通常少于20个,与实际喷丸强化过程存在明显差距。Meguid S A等<sup>[7]</sup>建立了单丸和双丸铸钢弹丸冲击合金靶材的模型。张洪伟等<sup>[8]</sup>针对航空常用材料7075铝合金通过显式动力分析软件LS-DYNA,分别建立1、4、6、8、9及13弹丸的单丸和多丸粒喷丸强化有限元模型。闫五柱等<sup>[9]</sup>采用ABAQUS建立喷丸表面强化过程的单丸粒三维有限元模型。Gangaraj S M H等<sup>[10]</sup>分别建立了显式有限元模型和隐式有限元模型,显式模型为四弹丸多丸粒对称胞元模型,而隐式模型为二维模型,其又于2014年重新仿真了Meguid & Kim模型和Majzoubi模型,先通过单弹丸冲击工件表面获得弹坑尺寸,后又建立了多丸粒冲击靶材模型。党建毅等<sup>[11]</sup>采用ABAQUS建立了单玻璃弹丸冲击0Cr18Ni9奥氏体不锈钢靶材的有限元模型。

为克服上述模型中弹丸数量较少的缺陷,采用SPH结合FEM的方法建立了包含大量弹丸撞击工件表面的随机喷丸仿真模型。工件选用AISI-304不锈钢,使用FEM建模;弹丸选用铸铁丸,使用SPH粒子建模。通过分析确定了喷丸饱和时间,研究了喷射角度、弹丸流量对残余应力场的影响。

## 1 数值仿真模型

### 1.1 工件材料模型

选用AISI-304不锈钢,材料力学性能参数:密度 $\rho=7.8\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量 $E=2.1\times 10^{11}\text{ Pa}$ ,泊松比 $\gamma=0.3$ 。考虑到工件表面的塑性应变及温度对应力的影响,选用LS-DYNA材料库中的JOHNSON\_COOK粘塑性本构方程模拟目标靶材。屈服应力 $\sigma_y$ 与等效塑性应变 $\bar{\epsilon}^p$ 关系如式(1)所示。

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^{\bar{p}})(1 + C\ln\frac{\bar{\epsilon}^{\bar{p}}}{\bar{\epsilon}_0})(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中A、B、C、n、m是通过试验得到的常数,取值参考文献[12],具体见表1。 $\bar{\epsilon}^{\bar{p}}$ 表示等效塑性应变, $\bar{\epsilon}_0$ 表示准静态阈值率,等于 $1\text{ s}^{-1}$ 。

对比温度 $T^*$ 可以表示为:

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (2)$$

式中, $T$ 为任意时刻的瞬时温度, $T_m$ 为溶解温度, $T_r$ 为参考温度,取 $292\text{ K}$ 。考虑工件的应变率效应。

表1 工件模型的参数

Table 1 Parameters of the component model

Parameters	A/MPa	B/MPa	C	n	m
Values	96	1 127	0.067	0.5	1

### 1.2 弹丸流材料模型

弹丸材料选用铸铁弹丸,直径为 $0.5\text{ mm}$ ,密度 $\rho=5.6\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量 $E=2.0\times 10^{11}\text{ Pa}$ ,泊松比 $\gamma=0.3$ 。

而弹丸流采用关键字MAT\_NULL材料来模拟,由于弹丸中含有空气,故其状态方程应考虑空气作用<sup>[13]</sup>。

模型中弹丸流压力 $P$ 与密度 $\rho$ 的关系式(特殊形式的Gruneisen状态方程)经推导可转化为:

$$P = \begin{cases} C_s^2(\rho - \rho_0) & \rho > \rho_0 \\ 0 & \rho \leq \rho_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $C_s$ 为铸铁弹丸的声速,即粒子速度为零时的波速,取 $5.2\text{ km/s}$ 。 $\rho_0$ 为弹丸与气体的初始混合密度。

弹丸流状态方程也可使用EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL状态方程模拟,将表示压力的公式(3)转化为多项式形式:

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5 + C_6\mu^2)E \quad (4)$$

式中, $C_0\sim C_6$ 为 $0\sim 6$ 阶多项式系数; $\mu$ 为弹丸流材料密度变化率,可表示为 $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ ,将其代入公式(4)可得弹丸流线性多项式状态方程为:

$$P = C_s^2\rho_0\mu \quad (5)$$

### 1.3 弹丸随机分布

考虑弹丸流中丸粒分布是随机的,建立圆柱型弹丸流束,由公式(6)对其中丸粒的空间位置坐标进行随机分布处理,将其坐标数据输入到 $k$ 文件

中,形成大量弹丸撞击靶材的随机分布模型。

$$(x_i, y_i, z_i) = [rand(1)h\beta + x_i, rand(1)h\beta + y_i, rand(1)h\beta + z_i] \quad (6)$$

式中,  $i$  为第  $i$  个 SPH 粒子;  $rand(1)$  为  $0 \sim 1$  之间的随机数;  $h$  为粒子规则排列时的弹丸间距;  $\beta$  为随机分布系数,可在  $0 \sim 1$  间取值以控制随机程度;  $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$  为粒子规则排列时的空间位置坐标值。

### 1.4 SPH 结合 FEM 数值仿真模型

利用 LS-DYNA 建立仿真模型如图 1 所示, A 为工件模型,为节省计算机资源,尺寸取  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ ,在工件 A 的 4 个侧面定义非反射边界约束以避免应力波在边界面上形成反射波,底面采用全约束。对靶材进行网格划分时选用 Lagrange 网格,单元类型选用 8 节点实体单元 solid164,共划分 32 000 个单元。B 为随机弹丸流模型,使用 SPH 粒子单元建模,共划分 784 个 SPH 粒子单元。工件和弹丸间的相互作用通过接触算法实现,利用关键字“CONTACT\_AUTOMATIC\_NODES\_TO\_SURFACE”定义该接触,将工件的 FEM 单元节点定义为主节点,SPH 粒子定义为从节点。

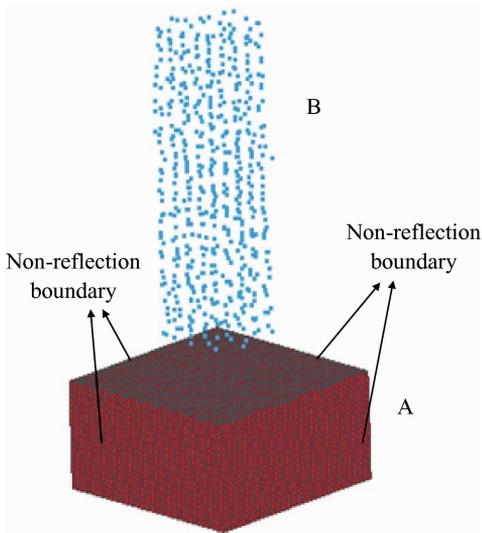


图 1 SPH-FEM 仿真模型

Fig. 1 Simulation model of the SPH coupled with FEM

## 2 模型验证

为验证上述使用 SPH 结合 FEM 所建喷丸仿真模型的正确性,根据文献[12]提供的试验条件建模并进行仿真分析,试验中工件采用 AISI-

304 不锈钢,尺寸为  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,弹丸采用铸铁丸,覆盖率为 120%,速度为  $45 \text{ m/s}$ ,得到图 2 所示残余应力随深度变化曲线图,其中曲线 1 是试验结果,表面残余压应力为  $-321.11 \text{ MPa}$ ,最大残余压应力为  $-681.16 \text{ MPa}$ ;曲线 2 为 SPH 结合 FEM 模型的仿真结果,表面残余压应力为  $-420.01 \text{ MPa}$ ,最大残余压应力为  $-649.99 \text{ MPa}$ ;曲线 3 为文献[12]中使用 FEM 建立多丸粒模型的仿真结果,表面残余压应力为  $-928.625 \text{ MPa}$ ,最大残余压应力为  $-950.52 \text{ MPa}$ 。

比较三者的数值结果及曲线变化趋势均可看出,采用文中模型得到的仿真结果较传统多丸粒模型的仿真结果与试验结果的符合程度更高,故可认为文中所建立的喷丸模型较传统的多丸粒模型更接近实际喷丸过程,利用该 SPH 结合 FEM 的喷丸仿真模型开展喷丸强化相关影响因素的仿真研究,有望得到更丰富的研究结果。

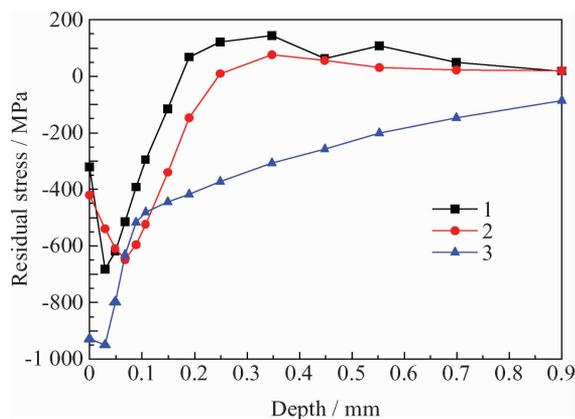


图 2 SPH-FEM 模型验证

Fig. 2 Validation of the SPH-FEM model

## 3 数值模拟分析

图 3 为  $50 \text{ m/s}$  不同时刻的喷丸效果图。初始时刻弹丸与工件表面有一定的距离,相当于喷嘴至工件表面间的喷射距离;随后弹丸与工件表面发生碰撞,并发生反弹。因在碰撞过程中,工件表面材料发生弹塑性变形,因弹性变形区域要恢复到其初始状态,而塑性变形区域不能恢复,导致工件表层产生残余压应力。

图 4 为  $t = 107.989 \mu\text{s}$  时刻工件中截面应力分布云图,图中深色应力值均为正,代表拉应力;灰色为拉压应力过渡区;其它颜色对应的应力值均为负,表示压应力,其中最大压应力值为

-656.2 MPa, 压应力层厚度约 0.3 mm。经喷丸强化处理, 在受喷工件表层产生了残余压应力, 在工件的内部产生了与压应力相平衡的拉应力。

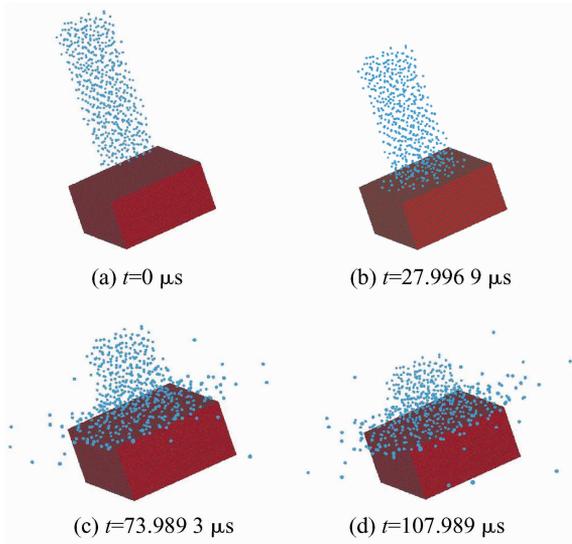


图3 不同时刻的喷丸效果

Fig. 3 Shot-peening effects under different times

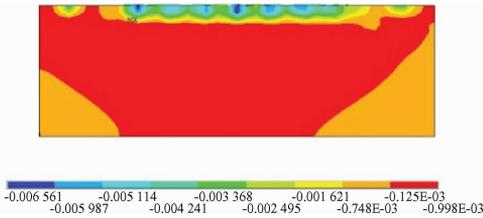


图4  $t=107.989 \mu\text{s}$  截面应力分布云图

Fig. 4 Distribution contour of the section stress at 107.989  $\mu\text{s}$

### 3.1 饱和喷丸时间对残余应力的影响

所使用的模型为大量弹丸撞击工件的随机模型, 故可研究喷丸时间对残余应力场的影响, 进而确定饱和喷丸时间。图 5 为弹丸以 50 m/s 的速度冲击工件时, 对应时刻为 59.993、89.991、103.989 和 119.99  $\mu\text{s}$  时工件表层所形成的残余应力场沿深度的分布。开始时的残余压应力值较小, 随着喷丸时间的增加, 残余压应力值有所增大。从 89.991  $\mu\text{s}$  到 103.989  $\mu\text{s}$ , 表面残余压应力与最大残余压应力增长的幅度分别为 11.11% 和 9.07%。而从 103.989  $\mu\text{s}$  到 119.99  $\mu\text{s}$ , 残余压应力场虽有所变化, 但表面残余压应力与最大残余压应力的数值变化幅度均不到 3%, 且深度基本不变。故可将 103.989  $\mu\text{s}$  作为对应 50 m/s 时的稳定喷丸

时间, 即饱和喷丸时间。从图 5 可以直观看出达到喷丸饱和时间之后, 表面残余压应力、最大残余压应力、最大残余压应力值深度、残余压应力层深度基本不变。因此在研究喷丸工艺参数对残余应力场的影响时, 应在喷丸达到饱和时间之后提取残余应力值。

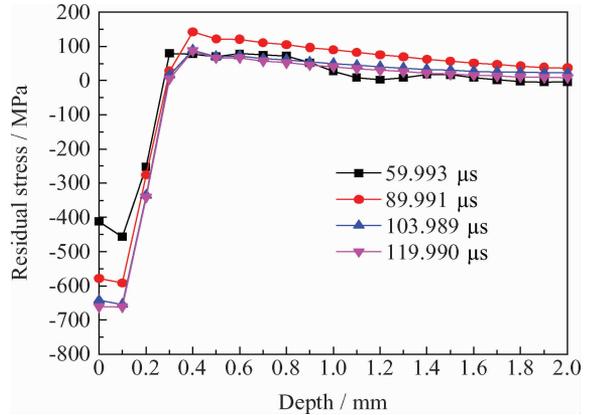


图5 喷丸时间对残余应力的影响

Fig. 5 Effects of the shot-peening time on residual stress

### 3.2 喷射角度对残余应力的影响

弹丸喷射角度  $\alpha$  指弹丸流冲击方向与工件表面之间的夹角。下面研究弹丸在 50 m/s 的速度下 3 种喷射角度对残余应力场分布的影响。在仿真过程中通过改变喷射角度  $\alpha$  得到相应残余应力沿工件表面深度变化的关系如图 6 所示。随着喷射角度  $\alpha$  的增加, 表面残余压应力值和最大残余压应力值均增加, 且残余压应力层深度也增加。喷射角度从  $60^\circ$  经  $75^\circ$  到  $90^\circ$  的过程中, 表面残余压应力值从 214.57 MPa 增加到了 442.45 MPa; 最大残余压应力值从 218.14 MPa 增加到 654.42 MPa;

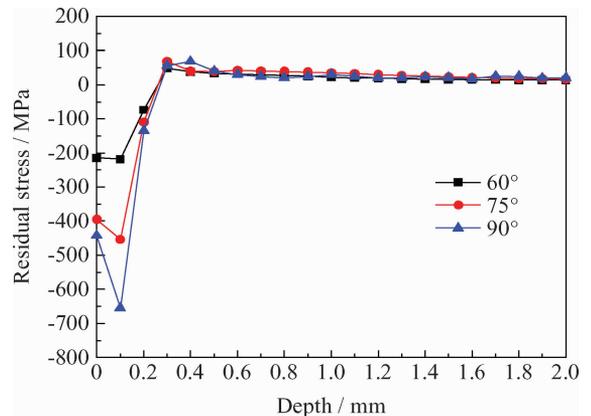


图6 喷射角度对残余应力的影响

Fig. 6 Effects of the impact angles on residual stress

残余压应力层深度从 0.25 mm 增加到 0.27 mm, 即最大残余压应力值深度变化较小。

从能量转换角度加以分析, 经喷丸在工件表面产生的残余应力主要取决于弹丸动能转化为靶材塑性变形能的程度。在弹丸以 90° 垂直撞击靶材表面时, 弹丸动能全部用于与靶材的相互作用; 而弹丸以一定角度(非 90°) 撞击工件表面时, 则有部分动能未用于与靶材的相互作用。故在实际喷丸过程中应尽量使弹丸流垂直撞击靶材表面以使弹丸动能得到充分利用。

### 3.3 弹丸流量对残余应力的影响

在所建立的弹丸流模型中, 弹丸为球形, 其空间位置是随机分布的。弹丸流量  $r_m$  可由单位时间内喷嘴射出的平均弹丸数决定。即设在已知时间段  $T_1$  内由喷嘴射出的弹丸数量为  $N$ , 则

$$r_m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho N / T_1 \quad (7)$$

式中,  $r$  为球形弹丸的半径, mm,  $\rho$  为弹丸的密度, kg/m<sup>3</sup>。

通过改变弹丸流量得到图 7 所示的残余应力图。当  $r_m = 100$  kg/min 时, 表面残余压应力与最大残余压应力分别为 -442.45 MPa 和 -654.42 MPa, 残余压应力层深度约为 0.26 mm, 最大残余压应力深度约在 0.1 mm 处。当弹丸流量增大到 145 kg/min 时, 残余应力有所增大, 表面残余应力增大到 -584.55 MPa, 最大残余压应力增大至 -688.98 MPa, 残余压应力层深度增大至 0.34 mm。当弹丸流量从 145 kg/min 继续增加到 270 kg/min 时, 两者的残余应力随深度变化曲线基本重合, 变化幅度不超过 5%, 且表面残余压应力值略有

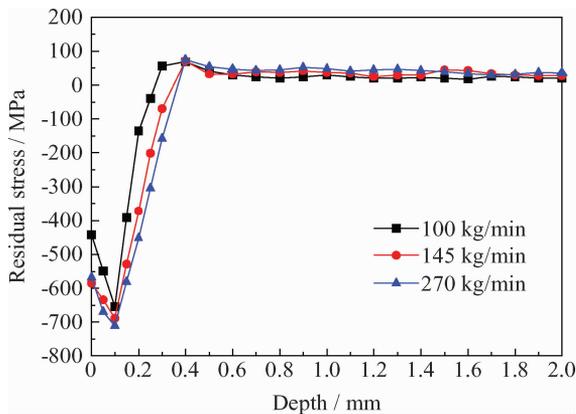


图 7 弹丸流量对残余应力的影响

Fig. 7 Effects of the mass flow rates on residual stress

减小, 故可认为弹丸流量也存在饱和值, 并非越大越好。

## 4 结 论

采用 SPH 结合 FEM 的方法, 建立了由大量随机分布丸粒所组成的圆柱型弹丸束冲击工件的喷丸仿真模型, 该仿真模型较传统的多丸粒模型更符合实际喷丸强化过程。通过仿真分析, 得到以下结论:

(1) 在喷丸参数一定的条件下, 存在相应的饱和喷丸时间。当喷丸时间超过该饱和喷丸时间时, 评价喷丸效果的 4 个参数(表面残余压应力、最大残余压应力、最大残余压应力值深度、残余压应力层深度)基本不变。在研究喷丸参数对残余应力的影响时, 应在喷丸达到饱和时间之后提取残余应力值。

(2) 弹丸流垂直撞击工件表面时, 能得到较好的喷丸效果。当弹丸以一定的角度斜着冲击工件表面时, 由于弹丸的部分动能没有通过与靶材的相互作用实现变形能的转化, 使所得到的残余压应力值降低。

(3) 开始时随着弹丸流量的增大, 所得的残余应力值会有所增大, 但弹丸流量也存在饱和状态。即当弹丸流量达到饱和状态后, 继续增大弹丸流量, 其残余应力场变化不大, 而此时消耗的资源将增加。故在实际喷丸过程中, 弹丸流量并非越大越好。

## 参考文献

- [1] Meguid S A. Effect of partial coverage upon the fatigue fracture behavior of peened components [J]. Fatigue Fracture Engineering Materials Structure, 1991, 14(5): 515-530.
- [2] 栾伟玲, 涂善东. 喷丸表面改性技术的研究进展 [J]. 中国机械工程, 2005, 16(15): 1405-9.  
Luan W L, Tu S D. Recent trends on surface modification technology of shot peening [J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(15): 1405-9 (in Chinese).
- [3] Gao Y K, Li X B, Yang Q X, et al. Influence of surface integrity on fatigue strength of 40CrNi2Si2MoVA steel [J]. Materials Letters, 2007, 61(2): 466-469.
- [4] Bagherifard S, Ghelichi R, Guagliano M. A numerical model of severe shot peening (SSP) to predict the generation of a nanostructured surface layer of material [J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(24): 4081-90.
- [5] Zupanc U, Grum J. Effect of pitting corrosion on fatigue performance of shot-peened aluminium alloy 7075-T651

- [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(9): 1197-202.
- [6] H-Gangaraj S M, Alvandi-Tabrizi Y, Farrahi G H, et al. Finite element analysis of shot-peening effect on fretting fatigue parameters [J]. Tribology International, 2010, 44(11): 1583-8.
- [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] 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 H W, Zhang Y D, Wu Q. Three-dimensional numerical analysis of residual stress field for shot-peening [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(3): 603-609 (in Chinese).
- [9] 闫五柱, 刘军, 温世峰. 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 W Z, Liu J, Wen S F. Energy conversion and residual stress distribution in shot peening process [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(6): 139-142 (in Chinese).
- [10] Gangaraj S M H, Guagliano M, Farrahi G H. An approach to relate shot peening finite element simulation to the actual coverage [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 243: 39-45.
- [11] 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 J Y, Dong X, Yang W. Numerical simulation of residual stress field induced by shot peening [J]. Mining and Processing Equipment, 2013, 41(5): 130-134 (in Chinese).
- [12] 李雁准, 王飞, 吕坚, 等. 单丸粒喷丸模型和多丸粒喷丸模型和有限元模拟 [J]. 西安交通大学, 2007, 42(3): 349-352.  
Li Y H, Wang F, Lv J, et al. Finite element analysis for shot-peening models of single shot impact and multiple impingement [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 42(3): 349-352 (in Chinese).
- [13] 王建明, 宫文军, 高娜. 基于 ALE 法的磨料水射流加工数值模拟 [J]. 山东大学学报(工学版), 2010, 40(1): 49-52.  
Wang J M, Gong W J, Gao N. Numerical simulation for the abrasive water jet machining based on the ALE algorithm [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2010, 40(1): 49-52 (in Chinese).

(责任编辑: 黄艳斐)

• 学术动态 •

第十三次全国机械维修学术会议将于北京召开

为交流近年来我国在机械维修与再制造领域的先进技术和成果, 搭建企业和科研单位的交流平台, 促进装备维修与再制造技术的发展, 第十三次全国机械维修学术会议将于 2015 年 11 月 3-5 日在北京召开。会议由中国工程机械学会维修工程分会, 中国设备管理协会工程机械维修委员会和装备再制造技术国防科技重点实验室主办, 主题为: 提升高端装备维修和再制造技术水平, 适应新时期基础设施建设大发展需求。

会议将邀请国内机械维修和再制造领域的知名院士、专家、学者参加并做特邀报告。欢迎高校、科研院所以及从事工程机械整机和零部件生产、维修、再制造的企业代表积极参加。

会议联系人: 魏璐 185 1169 7963; 李洋 136 7111 3856; 联系电话: (010) 5123 824; 邮箱: dilong1118@vip.126.com

(宋巍 供稿)