

金属表面喷丸的有限元模拟

张正, 周迅, 李洪涛, 刁浩峰, 陈大为

(浙江理工大学浙江省机电产品可靠性技术研究重点实验室, 杭州 310018)

摘要: 探讨喷丸之后金属表面的残余应力场的分布情况。基于有限元平台,建立喷丸工艺模拟的弹丸—靶材模型,讨论了边界条件、接触条件的设置以及在计算中需优先控制的参数并进行模拟。结果表明,该模型可以有效地对喷丸过程进行模拟,其结果与传统的理论方法具有一致性而数据更为丰富。两者结果均表明,通过增大冲击速度和弹丸尺寸以及选择密度较大的弹丸材料可以有效地改善喷丸效果。

关键词: 喷丸; 残余应力场; 有限元法; 金属表面加工

中图分类号: TH14; TH16 **文献标志码:** A

0 引言

作为一种冷加工工艺,喷丸可以有效地改善金属构件的表面完整性、提高疲劳性能^[1-2],其应用非常广泛。可长期以来,因为涉及的参数过多,用实验法研究喷丸的工艺极为耗时耗力,随着计算机技术和有限元技术的发展,使用有限元模拟的方法来研究喷丸过程中的材料变形、残余应力的形成过程成为可能^[3]。

目前,国内学者对喷丸的数值模拟关注度不是很高,相关的文献报道较少,国外相关研究则相对活跃。20世纪80年代前,该领域研究的主要困难在于对高应变率下的弹性以及非弹性现象缺乏足够的认识,很难对冲击时靶材的反应做出合理的解释。Al-Hassani等^[1-4]的研究打破了僵局,他们用物理方法描述了冲击过程,将之前看似难以捉摸的问题简化,并且首次利用解析法分析了喷丸残余应力场,得出了单丸单次冲击时残余应力分布公式。以此为基础,这一研究进入活跃期,新的文献不断出现。Meguid等^[5-7]开始将FEM(finite element method,有限元方法)用于喷丸研究,开创了有限元法研究喷丸的先河。1998年,Andrew等^[8]采用热载荷的方

法模拟了喷丸成形过程。Al-Obaid等^[9]首次使用了等参数单元的概念,使靶件的离散化更为简单。2008年,洪滔等^[10]将统计法引入喷丸的有限元研究。2010年,Bhuvraghan等^[11]利用DEM(discrete element method,离散元法)与FEM联合从而更加准确地计算出了喷丸残余应力场分布。2011年,Gariepy A等^[12]采用有限元法定量地分析了喷丸残余应力场,基于有限元模拟的喷丸研究趋向深化。

本文首先基于Al-Hassani公式应用Matlab来计算塑性区深度和最大残余应力,然后基于ABAQUS建立喷丸工艺模拟的弹丸—靶材模型,讨论边界条件、接触条件的设置以及在计算中需要优先控制的参数,并将两种计算方法的计算结果进行对比,最后利用该有限元模型研究不同喷丸工艺的效果。

1 Al-Hassani公式简介

Al-Hassani^[1,4]在前人研究的基础上得出了两个极为重要的公式:

塑性区深度公式

$$\frac{h_p}{R} = 2.57 \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\rho V^2}{P} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

收稿日期: 2012-11-19

基金项目: 浙江省重点科技创新团队基金(2010R5000)

作者简介: 张正(1987—),男,湖南宁乡人,硕士研究生,主要从事基于有限元的喷丸抗疲劳机理研究。

通信作者: 周迅,电子邮箱: zhouxun78@gmail.com

式中: h_p —塑性区深度, ρ —弹丸密度, V —冲击速度, \bar{p} —平均压力 ($\bar{p}=3Y$, Y 为材料屈服强度), R —弹丸半径。公式(1)表述了塑性层厚度与弹丸密度、尺寸、冲击速度以及靶件材料之间的关系。

残余应力分布公式

$$\sigma_R(z) = \sigma_{\text{bending}} + \sigma_{\text{axial}} + \sigma_s \quad (2)$$

σ_s 被称之为“stress source(应力源)”, 它平衡了冲击时产生的弯曲应力 σ_{bending} 和拉伸应力 σ_{axial} , 公式(2)主要适用于薄的靶件。对于厚的靶件, 弯曲和拉伸现象相对不明显, $\sigma_R \approx \sigma_s$ 。

公式(2)经进一步计算之后得出残余应力分布公式为:

$$\sigma_R(z) = \frac{E}{1-\nu} \epsilon_m \left\{ \frac{12\lambda}{\pi h} (1-\alpha) \left(\frac{h}{2} - z \right) c_1 + \frac{2\lambda}{\pi} (1-\alpha) c_2 - \cos \pi \left[\frac{z - \alpha h_p}{2(1-\alpha)h_p} \right] L(h_p) \right\} \quad (3)$$

$$\text{式中: } \lambda = \frac{h_p}{h} \quad (4)$$

$$c_1 = c_2 - 2\lambda + \frac{4\lambda}{\pi} (1-\alpha) \cos \frac{\pi\alpha}{2(1-\alpha)} \quad (5)$$

$$c_2 = 1 + \sin \frac{\pi\alpha}{2(1-\alpha)} \quad (6)$$

$$\epsilon_m = \frac{2}{3\lambda L^2} \frac{\pi h \delta}{(1-\alpha)c_1} \quad (7)$$

当 $0 \leq z \leq h_p$ 时 $L(h_p) = 1$, 当 $z > h_p$ 时 $L(h_p) = 0$;

其中, ϵ_m —最大应变, h —靶件厚度, L —靶件宽度, $\alpha - h_p$ 在最大残余应力值时的分量, 当 $\frac{d\sigma_R}{dz} = 0$ 时取得最大残余应力值 σ_{max} 。

利用公式(1)和(3)可以很方便计算出喷丸残余应力场的塑性区深度以及残余应力分布曲线。

2 喷丸工艺的有限元模拟

2.1 喷丸有限元模型建立

喷丸过程中, 靶件的变形是在与弹丸的接触状态下进行的, 弹丸通过该接触表面把力和速度的作用施加到靶件上, 使之产生塑性变形。这种作用状态随着变形的进行而在不断变化, 因此它对模拟分析有着极其重要的影响。靶件在接触表面受到弹丸的力和速度的约束作用, 即切向摩擦应力和法向冲击速度约束, 所以接触表面是混合边界条件表面。接触的复杂性使喷丸的有限元模拟成为一个高度非线性问题。而 ABAQUS 的非线性模拟可广泛地适应各种工程案例。因此, 选取它对喷丸进行有限元建模与计算。

2.1.1 模型确定

喷丸的过程非常复杂, 直接模拟几乎不可能。将冲击过程看作为多个球体反复冲击规则靶材的过程, 因此简化了建模过程。靶件模型的准确性决定了计算成本和计算结果的精准性, 为此笔者尝试了多种模型, 最终找到了一个较为合适的“魔方型”模型, 如图1所示。图中弹丸半径为 0.5 mm, 靶件为 $3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的长方体的对称模型。靶件选用的是减缩积分单元 (C3D8R), 求解更加精准, 但减缩积分单元只在单元中心有一个积分点, 存在沙漏问题。为避免沙漏问题, 细划了弹丸与靶体接触端面的网格以及引入少量的人工“沙漏刚度”以限制沙漏模式的扩展。

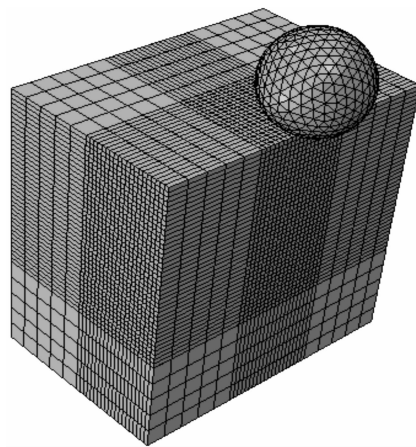


图1 喷丸的有限元模型

2.1.2 材料的力学性能

靶材用的是 Q235, 弹丸选用材料为钢和玻璃两种, 其力学性能如表1所示。

表1 材料的基本力学性能

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ GPa
Q235	7 860	212	0.3	0.235
钢	7 800	210	0.3	1.69
玻璃	2 500	7.8	0.3	1.06

2.1.3 边界条件和接触条件

在实际喷丸作业中, 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。

2.2 需优先控制的参数

采用有限元法与实验法、理论法所不同的是, 需要用不同网格和单元类型去进行收敛性验证, 从而确保计算结果不受网格质量和单元类型的影响, 如果采用的是减缩性单元, 则需要控制沙漏参数。喷丸是一个动态过程, 采用 ABAQUS/Explicit 模块, 所以接触

时间也需优先控制,以免对后续研究产生影响。

2.2.1 沙漏参数

选择冲击速度 $V=150\text{ m/s}$, 冲击时间 $=40\text{ }\mu\text{s}$, 弹丸半径为 0.5 mm 的钢丸, 沙漏参数选择了 0 (即没有设定沙漏参数)、1、2、3 四组, 有限元计算结果如图 2。

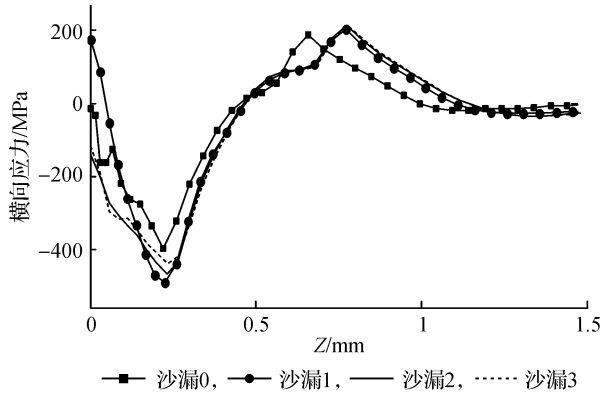


图2 沙漏参数对横向残余应力分布的影响

由图 2 可以看出, 沙漏参数的选择对喷丸的残余应力分布有较大影响。沙漏参数为 0 时与沙漏参数为 1、2、3 时相比, 最大残余应力和 h_p 要小很多。在靶件表面至深度方向 0.3 mm 的范围内, 随沙漏参数的增大, 表面残余应力不断增大, 最大残余应力减小, 而在 0.3 mm 深度范围以后不同沙漏参数计算得到的应力分布基本相同。参考理论计算结果, 接下来的有限元计算中沙漏参数选择 3。

2.2.2 接触时间

冲击速度 $V=150\text{ m/s}$, 沙漏参数 $=3$, 弹丸半径为 0.5 mm 的钢丸, 接触时间选择了 $10\text{ }\mu\text{s}$ 、 $40\text{ }\mu\text{s}$ 、 $100\text{ }\mu\text{s}$ 、 $400\text{ }\mu\text{s}$ 四组, 有限元计算结果如图 3。喷丸是一个瞬间过程, 冲击速度大, 弹丸与靶件接触时间很短, 理论上, 单次冲击时接触时间的选择对结果影响不大, 图 3 的结论与此相吻合。为方便计算, 接下来的有限元计算中接触时间选择 $40\text{ }\mu\text{s}$ 。

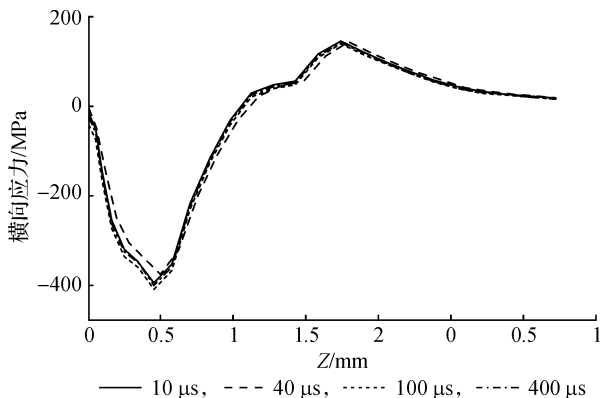


图3 接触时间对横向残余应力分布的影响

3 计算结果分析

采用最大残余应力、塑性层的厚度以及表面残余应力等来衡量喷丸参数是否精确和合理, 这些参数包括弹丸类型和尺寸、喷射角度以及覆盖率等。通过对这些参数有效控制和规范, 使残余应力分布与理论更加吻合。

3.1 塑性区深度与最大残余应力计算结果

利用 Matlab 编制计算程序, 共得出如表 2 五组数据, 并与有限元的计算结果进行对比。表 2 中, 第 1、2、3 组: 不变量为 $\rho=7800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $R=0.5\text{ mm}$, 变量分别为 $V=110\text{ m/s}$ 、 130 m/s 、 150 m/s ; 第 4 组: 不变量为 $R=0.5\text{ mm}$, $V=150\text{ m/s}$, 变量为 $\rho=2500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; 第 5 组: 不变量为 $\rho=7800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $V=150\text{ m/s}$, 变量为 $R=0.25\text{ mm}$ 。横向对比分析表 2 数据, 可以得到 Al-Hassani 理论方法与有限元方法计算得到的值基本具有一致性。纵向对比第 1、2、3 组数据得出, 随着冲击速度增大, 塑性区深度和最大残余应力值增大; 对比第 3、4 组数据得出, 选择密度较大的弹丸可使塑性区深度以及最大残余应力值增大; 对比第 4、5 组数据得出, 随着弹丸半径增大, 塑性区深度增大。

表2 塑性区深度和最大残余应力的计算结果

组别	h_p/mm		σ_{\max}/MPa	
	计算值	FEM 值	计算值	FEM 值
1	0.702	0.709	346	368
2	0.764	0.767	424	412
3	0.820	0.777	432	439
4	0.617	0.546	407	403
5	0.410	0.415	259	267

3.2 可比参数

用“可比参数”来定义理论法和有限元法均涉及的参数, 包括弹丸类型和尺寸、喷射角度以及覆盖率等。本文只选择了弹丸类型和尺寸以及冲击速度三个参数。洪滔等^[10]认为垂直喷射是最有效的, 以不同角度喷射只是损耗了动能, 基于此, 本文只选择垂直喷射, 没有考虑其他喷射角度。本文主要研究单次冲击, 没有考虑覆盖率。

3.2.1 冲击速度

选择沙漏参数 3, 接触时间 $40\text{ }\mu\text{s}$, 弹丸半径 0.5 mm 的钢丸, 冲击速度选择 110 m/s 、 130 m/s 、 150 m/s 三组, 有限元计算结果如图 4。由图 4 可以看出, 不同冲击速度计算得到的应力分布曲线形状非常相似, 随着冲击速度增大, 曲线向右下方向平移, 反映的物理结果是塑性区深度和最大残余应力的增大。

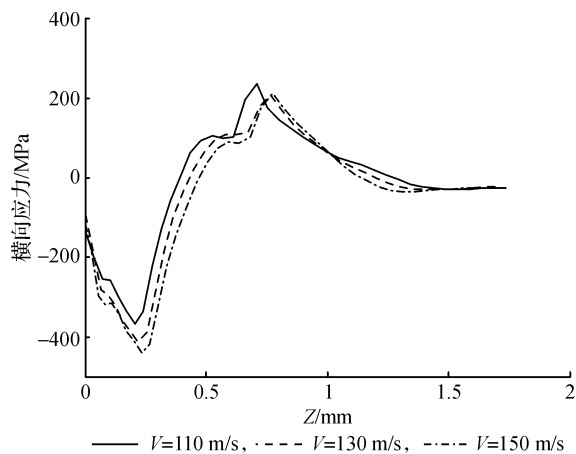


图4 冲击速度对横向残余应力分布的影响

3.2.2 弹丸材料

选择沙漏参数 3, 接触时间 $40 \mu\text{s}$, 冲击速度 150 m/s , 选用弹丸半径为 0.5 mm 的钢丸和玻璃丸。弹材为钢时的应力云图如图 5, 弹材为玻璃时的应力云图如图 6, 它们的应力分布有限元计算结果如图 7。与图 5 所示钢丸冲击相比, 图 6 所示的玻璃丸冲击所形成的“碗型”塑性区域较小, 即 h_p 较小, 图 7 也反映了这一结论。同时由图 7 可知, 在同样条件下, 选择密度较大的钢丸材料可增加最大残余应力值以及残余应力层厚度。

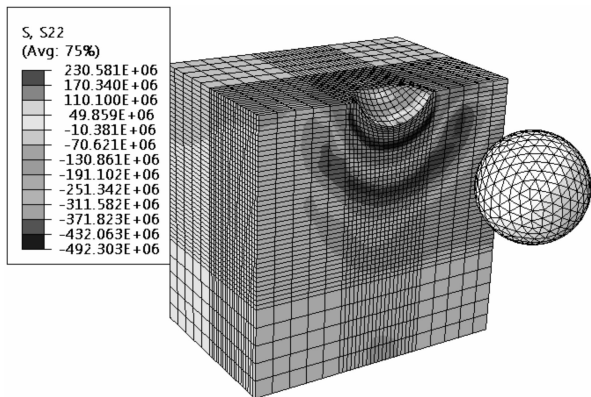


图5 钢丸冲击靶件时的横向残余应力云图

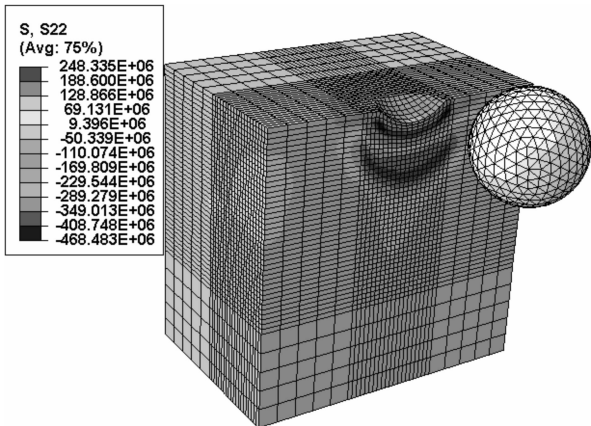


图6 玻璃丸冲击靶件时的横向残余应力云图

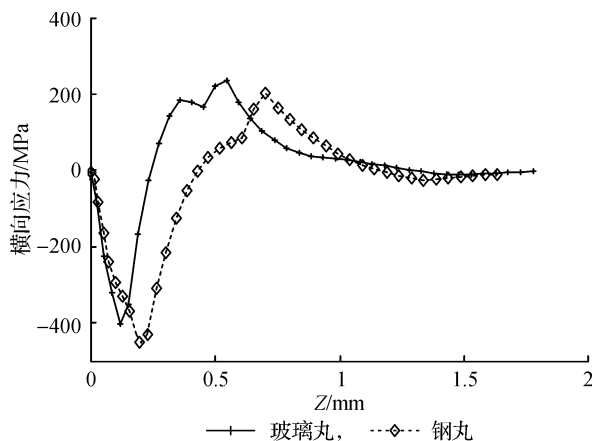


图7 靶件受不同材料弹丸冲击后的横向残余应力分布

3.2.3 弹丸半径

选择沙漏参数 3, 接触时间 $= 40 \mu\text{s}$, 冲击速度 150 m/s , 钢丸半径选择了 0.25 、 0.5 mm 两组, 有限元计算结果如图 8。由图 8 可以看出, 以不同尺寸弹丸计算得到的应力分布曲线形态各异, 增大弹丸尺寸可有效地增大塑性区深度和最大残余压应力值。

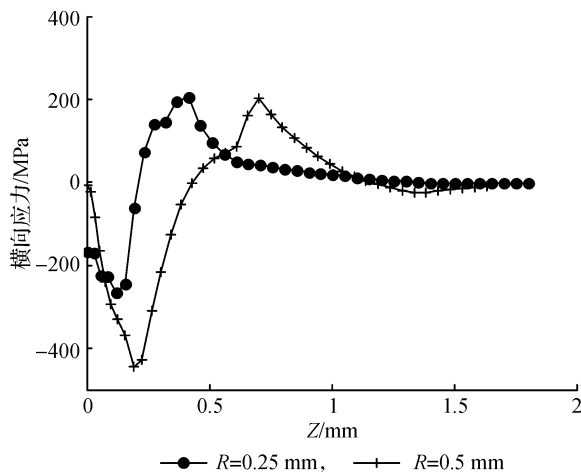


图8 靶件受不同半径弹丸冲击后的横向残余应力分布

3.2.4 理论计算结果与有限元计算结果对比

基于 Al-Hassani 公式计算应力分布曲线时, 引入了较多理想化的前提条件, 导致计算结果与有限元计算结果存在较大出入。由图 9 可以得出, 半径为 0.5 mm 的钢丸冲击靶件时, 不同冲击速度计算得到的应力分布曲线形状非常相似, 随着冲击速度增大, 曲线向右下方向平移, 反映的物理结果是塑性区深度和最大残余应力的增大; 钢丸以速度为 150 m/s 冲击靶件时, 增大弹丸半径可有效增大塑性区深度; 冲击速度为 150 m/s , 弹丸半径为 0.5 mm 时, 增大弹丸密度可以有效增加最大残余应力值以及残余应力层厚度。

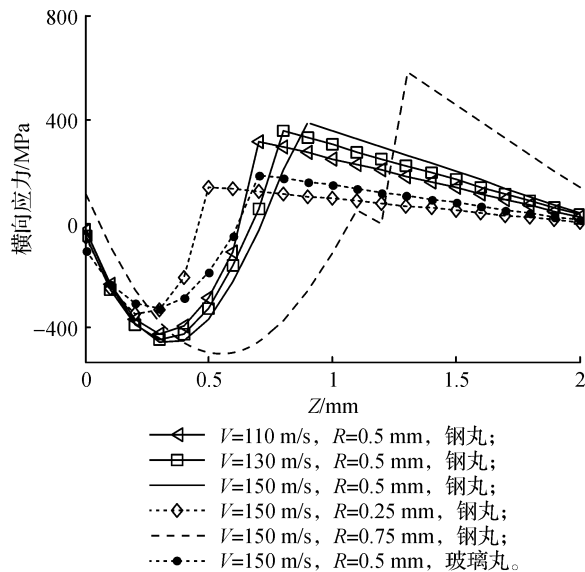


图9 不同参数对横向残余应力分布的影响

本文选定的三个可比参数:冲击速度、弹丸材料和弹丸半径,分别计算了它们的有限元结果和理论计算结果,综合对比图4、图7、图8和图9可得出结论:残余应力场的有限元法计算结果与 Al-Hassani 理论法的计算结果具有很好的一致性。

4 结 论

通过最大残余应力值、表面残余应力值以及塑性区厚度等指标来衡量沙漏参数、冲击时间、冲击速度、弹材等对喷丸效果的影响,得出了以下结论:

a) 喷丸有限元法的计算结果与 Al-Hassani 理论法的计算结果具有一致性;

b) 通过对参数的有效控制才能准确地模拟喷丸过程,在传统试验方法中无需涉及的单元类型、网格密度以及冲击时间等参数应优先选定,以免对后续研究产生影响;

c) 通过合理设置冲击速度,合理选择弹丸材料以及尺寸等方法,可大幅提升喷丸的效果。

参考文献:

- [1] Al-Hassani S T S. Mechanical aspects of residual stress development in shot peening[C]//International Scientific Committee for Shot Peening: the First International Conference on Shot Peening. Paris, 1981: 583-602.
- [2] Meguid S A. Effect of partial coverage upon the fatigue fracture behaviour of peened components[J]. Fatigue Fracture Eng Mater Structures, 1991, 14(5): 515-530.
- [3] Zeng Yuansong. Finite element simulation of shot peen forming[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Shot Peening (ICSP-8). Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2002: 554-560.
- [4] Al-Hassani S T S. An engineering approach to shot peening mechanics instrumentation and control of impact finishing processes[C]// International Scientific Committee for Shot Peening: the 2nd International Conference on Shot Peening. Chicago, 1984: 275-282.
- [5] Meguid S A, Klair M S. An examination of the relevance of coindentation studies to incomplete coverage in shot peening using the finite element method[J]. Journal of Mechanics of Working Technology, 1985, 11: 87-104.
- [6] Meguid S A, Shagal G, Stranart J C, et al. Three-dimension dynamic finite element analysis of shot peening induced residual stress[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1999, 31: 179-191.
- [7] 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: 119-134.
- [8] Andrew L, Alan P. Finite element analysis of shot peening[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80-81: 304-308.
- [9] Al-Obaid F Y. Three-dimensional dynamic finite element analysis for shot-peening mechanics[J]. Computers & Structures, 1999, 36(4): 681-689.
- [10] Hong T, Ooi J Y, Shaw B. A numerical simulation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses[J]. Engineering Failure Analysis, 2008, 8(15): 1097-1110.
- [11] Bhuvaraghan B, Srinivasan S, Maffeo B, et al. Shot peening simulation using discrete and finite element methods[J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41: 1266-1276.
- [12] Garipey A, Larose S, Perron C. Shot peening and peen forming finite element modelling-towards a quantitative method[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48: 2859-2877.

Finite Element Simulation of Metal Surface Shot Blasting

ZHANG Zheng, ZHOU Xun, LI Hong-tao, DIAO Hao-feng, CHEN Da-wei

(Zhejiang Key Laboratory of Reliable Technology Research of Mechanical and Electrical Products,
Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To obtain the distribution of residual stress field of metal surface after shot blasting, this paper establishes a pill-target model of shot blasting process simulation based on finite element platform and discusses and simulates the setting of boundary conditions and contact conditions and parameters to be controlled preferentially in calculation. The result shows that this model can effectively simulate the process of shot blasting and its result is consistent with the traditional theoretical method, but it has richer data. Both results show that the increase of impact velocity and pill size and the selection of pill material with a higher density can effectively improve the effect of shot blasting.

Key words: shot blasting; residual stress field; finite element method; metal surface treatment

(责任编辑: 张祖尧)

(上接第 311 页)

Study on Characteristics of Luminescence of $\text{Gd}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$ Thin Film Prepared with Electrochemical Deposition Method

ZENG Hong-chun, YANG Jing-jing, ZHANG Chen-chun, ZHANG Xue, SHI Rui-rui

(Materials Engineering Center, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This study prepares $\text{Gd}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$ fluorescent thin film with electrochemical deposition method; explores thin film with the optimal luminescence effect by adjusting the doping concentration of Eu^{3+} ion; and analyzes the phase composition and surface topography of this material with XRD, SEM, PL spectrum and EDS test. The result shows that thin film prepared with electrochemical deposition method has a good effect and cubic crystal structure and doping ion Eu^{3+} is uniformly distributed in the thin film; fluorescent thin film prepared has a good luminescent intensity. When the volume ratio of $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ is 10 : 1, the luminescent intensity is maximum; however, when the doping concentration of Eu^{3+} ion is too high, fluorescence quenching occurs. Fluorescent thin film with a good characteristic of luminescence can be prepared with electrochemical deposition method.

Key words: $\text{Gd}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$ thin film; rare earth doping; electrochemical deposition; characteristics of luminescence

(责任编辑: 张祖尧)