

文章编号: 1000-8055(2010)03-0603-07

喷丸强化残余应力场三维数值分析

张洪伟^{1,2}, 张以都^{1,2}, 吴 琼^{1,2}

- (1. 北京航空航天大学 虚拟现实技术与系统国家重点实验室, 北京 100191;
2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 建立了喷丸强化三维有限元模型, 实现了喷丸强化处理残余应力场的数值模拟. 根据显式动力分析各种能量变化过程, 确定了显式分析求解时间选择方法; 研究了喷丸速度、弹丸直径、入射角度及摩擦力等因素对喷丸残余应力场影响的一般规律, 并与现有相关文献试验结论进行对比; 分析了单次和多次冲击下材料内部的残余应力场分布及塑性应变分布特点; 建立了不同数目的多丸粒喷丸强化三维有限元模型, 研究了不同覆盖率对残余应力场分布的影响规律.

关 键 词: 喷丸强化; 有限元方法; 数值分析; 残余应力

中图分类号: TG156

文献标识码: A

Three-dimensional numerical analysis of residual stress field for shot-peening

ZHANG Hong-wei^{1,2}, ZHANG Yi-du^{1,2}, WU Qiong^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: This investigation is devoted to the modeling and simulation of the residual stress field resulting from the shot-peening process, in which the finite element method was employed. The history of energy change during explicit dynamic analysis was discussed and the solving time for explicit analysis was analyzed by shock wave theory. For the single shot impact model, the study examined the effect of shot velocity, shot size, incident angle and interfacial friction, while comparison was made with the published experimental results. Furthermore, the effect of repeated impacts on the residual stress field and equivalent plastic strain was studied. The influence of peening coverage on the residual stresses field was investigated using a realistic multiple impingement model.

Key words: shot-peening; finite element method; numerical analysis; residual stress

喷丸强化是无数个高强度弹丸高速撞击工件表面, 使工件表面产生残余压应力场, 从而有效阻止疲劳裂纹的萌生和扩展, 显著提高工件疲劳寿命^[1], 具有实施方便、效果显著、适应面广、消耗低等特点, 广泛应用于航空、军工、汽车领域.

研究喷丸残余应力场的分布规律, 了解喷丸工艺参数对喷丸强化效果的影响, 深刻理解喷丸强化机理是非常重要的. 由于喷丸强化是一个复杂的动态碰撞接触过程, 涉及到多种非线性的耦合, 影响因素众多, 目前喷丸工艺参数的选择只能

收稿日期: 2009-02-24; **修订日期:** 2009-06-04

基金项目: 虚拟现实技术与系统国家重点实验室资助

作者简介: 张洪伟(1978 -), 男, 山东济南人, 博士后, 主要从事数值模拟及机械系统动力学研究.

依靠试验或经验,而实验研究具有很大的局限性,严重制约了喷丸强化技术的发展。

数值模拟技术为研究喷丸强化过程提供了强有力的手段,可以减少费用,缩短相关问题的研发周期。国外学者 Al-Hassani 等^[2]首先使用解析法分析了残余应力场,但使用的材料模型较简单;Meguid 等^[3-4]利用有限元法进行了残余应力场的研究,使用隐式求解分析,提出了喷丸的准静态模型;Schiffner 等^[5]建立了二维轴对称喷丸模型和双丸粒有限元模型;Baragetti 等^[6]用三维模型模拟了喷丸过程,但仅限于单丸粒;Meguid 等^[7]、Majzoubi 等^[8]研究了多丸粒喷丸过程三维有限元模拟。国内目前关于喷丸过程数值仿真的文献还较少。凌祥等^[9]对弹丸垂直撞击工件过程进行了三维有限元模拟;李雁淮等^[10]研究了喷丸覆盖率对残余应力场的影响。

目前国内外关于喷丸强化过程的数值模拟试验材料主要为钢材,许多文献仍然集中在如何建立准确的有限元模型上。针对航空用铝合金材料的喷丸强化过程研究的相关文献较少,喷丸工艺参数对残余应力场的影响规律还不清楚,局部区域受到反复冲击后,材料内部残余应力场变化规律缺少研究,喷丸覆盖率对强化后的残余应力场分布规律的影响研究也相对较少。

本文针对航空常用材料 7075 铝合金通过显式动力分析软件 LS-DYNA,进行了喷丸强化过程数值模拟;研究了喷丸速度、弹丸直径、入射角度及摩擦力对喷丸残余应力场的影响;分析了单次和多次冲击下材料内部的残余应力场分布及塑性应变分布规律;研究了不同覆盖率对残余应力场分布的影响。

1 数值分析模型

1.1 喷丸强化残余应力场

喷丸强化使工件表层产生不均匀的弹、塑性变形,其结果除在表面留下凹穴外,主要是形成表层残余压应力场,以提高疲劳寿命。

要直接完全模拟上述物理过程是不可能的,但喷丸强化是许多单个弹丸冲击靶体的过程,是众多弹丸冲击作用的累积,单个弹丸冲击靶体的过程模拟是喷丸强化模拟的基础。

喷丸强化过程这种高度瞬态冲击动力学接触问题的求解,需采用显式动力有限元算法,以获得最终形成的残余应力场^[8]。影响残余应力场的因

素很多,包括弹丸速度、弹丸大小、入射角度及覆盖率等,单丸粒模型可用于模拟丸粒作用区域的残余应力场及塑性应变的变化,并进行参数化研究,揭示各工艺参数与残余应力场分布之间的关系。

1.2 单丸粒有限元模型建立

由于弹丸及试件材料的对称性,取 1/4 模型进行分析计算。在对称面上施加对称边界条件。数值仿真需要的模型为半无限大三维实体模型。为模拟半无限大三维实体,需要在此模型的侧面及底面施加无反射边界条件,防止应力波在边界处发生反射。

模型尺寸根据文献[4]选择为 $7R \times 5R \times 4R$ 。其中 R 为弹丸的半径。分析单元选择 8 节点缩减积分显式实体单元 Solid164。在喷丸碰撞三个坐标方向选择 $2R$ 长度区域,将网格细化,单元尺寸为 0.05 mm 。其他远离喷丸撞击区域,网格适当较粗,单元尺寸为 0.3 mm 。模型全部单元为 39 816 个。有限元模型、边界条件如图 1 所示。

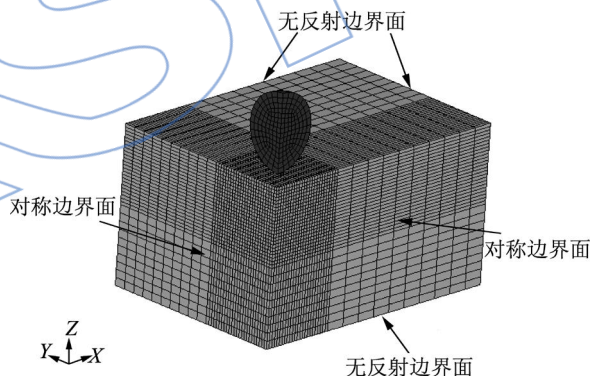


图1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

1.3 试样材料模型

分析所用试件材料为航空铝合金板 7075,假设工件为弹塑性材料,选择双线性强化本构模型描述材料特性,力学性能参数为:弹性模量 71 GPa ,密度 2600 kg/m^3 ,泊松比 0.3 ,屈服应力 450 MPa ,硬化模量 250 MPa 。

在实际喷丸强化过程中,通常采用刚性弹丸,强度、硬度都要高于目标板材,不会发生较大的变形,可选用刚性体来模拟弹丸,提高计算效率。

2 单丸粒喷丸强化分析

2.1 显式动力分析结果

喷丸高速撞击产生的瞬间应力波,使材料质

点发生运动,引起材料变形,可由材料质点的动能及内能体现。喷丸高速撞击做功传递给材料的总能量主要转化为动能、内能及显式算法中因控制缩减积分实体单元的沙漏模式形成的沙漏能。

仿真分析过程中,各种能量的时间历程变化曲线如图 2 所示。弹丸与试验件初始有一定距离,直到 $2.7\mu\text{s}$ 开始撞击,此时,模型能量出现变化,动能随碰撞接触的发生而不断减少,在 $4.6\mu\text{s}$ 达到最小并开始反弹,随着反弹速度的增加,动能逐渐增加。而内能变化趋势与动能相反,沙漏能随着分析过程逐渐增加。在弹丸撞击过程中,总能量首先迅速上升到峰值,然后由于沙漏控制能而逐渐下降。由于模型的底面为无反射边界条件,因此,传播到模型底部的应力波将会发生完全透射,从而也会引起模型总能量的降低。在大约 $6.5\mu\text{s}$ 后,材料的总能量与内能基本保持稳定,材料中应力波的作用十分微弱,其动态应力状态已经基本保持稳定,因而可作为本文动态分析的求解时间。

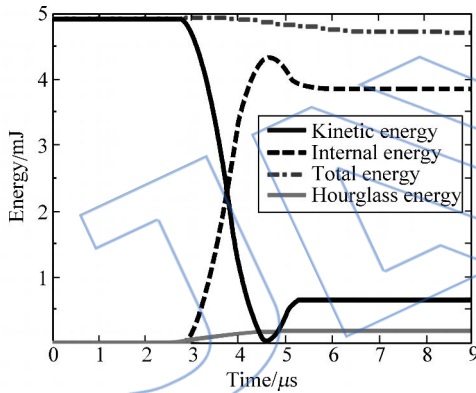


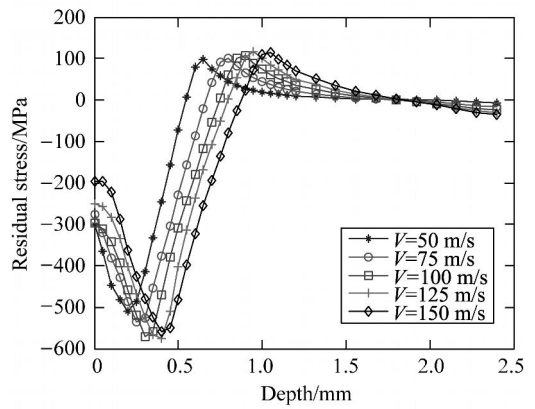
图 2 分析过程中材料能量动态变化历程

Fig. 2 History of energies during explicit analysis

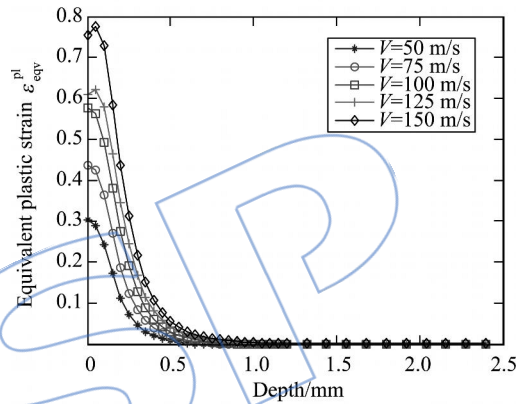
2.2 弹丸速度的影响

考虑弹丸不同速度对喷丸强化残余应力场的影响。假定弹丸直径 1.2 mm , 模拟不同速度 $50, 75\text{ m/s}$ 和 100 m/s 的情况下撞击试验件后, 横向 (x 方向) 残余应力及等效塑性应变分布如图 3 所示。

喷丸速度的提高, 可明显提高残余压应力值, 且残余压应力层深度增加。从图 3 可以看出, 喷丸速度有个临界值, 并非速度越高, 压应力最大值就越大。喷丸速度对表层残余应力值影响较小。当喷丸速度超过 100 m/s 后, 改变喷丸速度残余压应力最大值几乎没有变化, 甚至小于低速度时的压应力值。而且表层的残余应力值也会减少, 影响喷丸



(a) 不同速度下沿深度方向残余应力分布



(b) 不同速度下沿深度方向等效塑性应变分布

图 3 喷丸速度对残余应力和等效塑性应变的影响

Fig. 3 Effect of impact velocity on residual stress versus depth and equivalent plastic strain versus depth, along the centre line of the shot

效果。所以在实际喷丸过程中, 应该控制喷丸速度, 这与文献[11]中的试验分析结论相吻合。塑性应变随着喷丸速度的提高而增加, 喷丸速度提高了一倍, 塑性应变提高了 83% 。对比图 3(a) 与图 3(b) 可看到, 塑性应变区域深度与残余压、拉应力转换位置几乎重合。

2.3 弹丸直径的影响

考虑弹丸大小对喷丸强化残余应力场的影响。假定喷丸速度 75 m/s , 改变弹丸直径大小分别为 $0.8, 1.0, 1.2\text{ mm}$ 。图 4 为不同弹丸大小横向残余应力沿深度方向分布。

由图 4 可见, 弹丸直径增大, 残余压应力层增加, 残余压应力最大值会相应增大。但同时可以发现, 并非弹丸直径越大, 压应力值就越大, 这与文献[11]中的试验结论相吻合。如图 4 中所示, 在弹丸直径 1.2 mm 时, 相比直径 1.0 mm 与 0.8 mm 时, 表层残余压应力减小, 影响了喷丸效果。

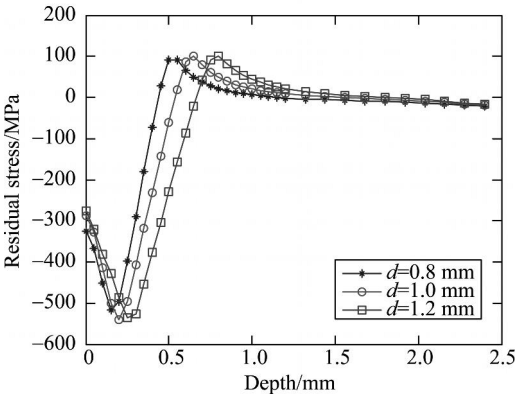


图 4 不同弹丸直径沿深度方向残余应力分布
Fig. 4 Effect of impact radius on residual stress versus depth , along the centre line of the shot

2. 4 入射角度的影响

弹丸直径为 1. 2 mm ,速度为 75 m/ s 情况下 ,考虑不同入射角 (指弹丸速度与水平方向的夹角) 对喷丸强化残余应力场的影响. 图 5 为不同入射角度 30 °,45 °,60 °,75 °和 90 °的情况下,喷丸后沿深度方向残余应力分布情况.

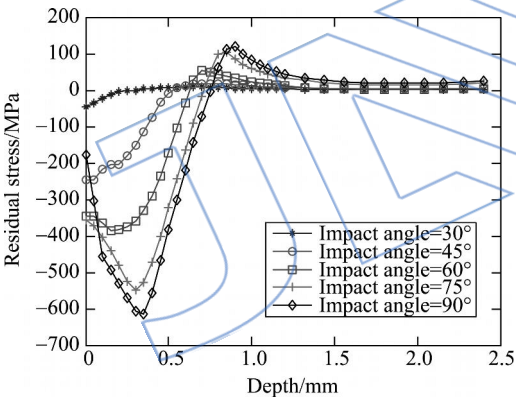


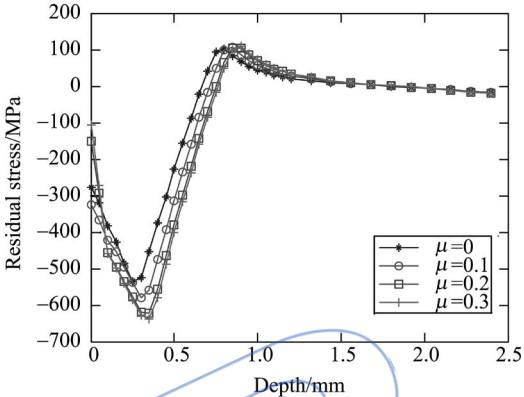
图 5 不同入射角度沿深度方向残余应力分布
Fig. 5 Effect of incident angle on residual stress versus depth , along the centre line of the shot

结果表明,喷射角度会影响到残余应力场的分布和幅值. 随着喷射角度的增加,残余压应力层增加,压应力幅值也相应增加.

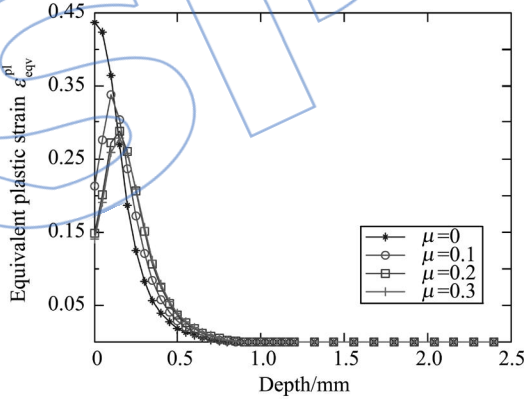
从能量角度来说,表层残余压应力分布很大程度上取决于弹丸能量向靶材塑性变形的转换程度,垂直碰撞过程所有的弹丸能量都用于与靶体相互作用,而斜碰撞过程,会有部分能量未用于与靶体相互作用. 实际喷丸过程中为了得到最佳的喷丸效果,尽量使弹丸喷射角与受喷表面呈垂直碰撞.

2. 5 摩擦系数的影响

弹丸直径为 1. 2 mm ,速度为 75 m/ s 情况下 ,为考察弹丸与靶体之间的摩擦作用,改变库仑摩擦系数 μ ,残余应力和等效塑性应变的影响如图 6 所示. 图 6(a) 是不同摩擦系数下,沿深度方向残余应力 σ_{xx} 分布规律曲线.



(a) 不同摩擦系数下沿深度方向残余应力分布



(b) 等效塑性应变沿深度方向分布

图 6 摩擦系数对残余应力和等效塑性应变的影响

Fig. 6 Effect of friction on residual stress versus depth and equivalent plastic strain versus depth , along the centre line of the shot

结果表明,摩擦力对于残余应力的数值及分布影响主要集中在弹丸作用局部区域. 随着摩擦系数的增加,表层的残余应力数值减小. 而且当摩擦系数大于 0. 2 时,残余应力数值及分布都不再有明显变化.

从图 6(b) 中等效塑性应变分布来看,随着摩擦作用的增强,表层的塑性应变逐渐减小,塑性应变峰值向层深方向移动. 弹丸与靶体的接触作用,存在较大的接触力,在接触区域会形成较大的剪切作用力以克服摩擦力,剪切力导致表面较高的流动应力值,因此,减小了表层塑性应变. 而在亚表层深度,有较大的塑性变形发生.

3 单丸粒多次重复冲击

实际喷丸过程中,大量丸粒冲击下的局部区域几乎处处受到丸粒的冲击.利用单个弹丸反复冲击同一位置,研究残余应力场及塑性应变分布规律.

单个弹丸反复冲击同一位置得到的沿深度方向的残余应力分布如图 7 所示.图 7 结果表明,在单个弹丸不同冲击次数下,残余应力沿深度方向分布规律相似.随着冲击次数的增加,喷丸强化特征明显,残余压应力的最大值增加到 600 MPa,且向层深方向移动.残余压应力层影响深度增加,从 0.6 mm 增加到 1.1 mm.随着喷丸次数的增加,横向残余应力数值及分布变化逐渐缓慢,冲击次数对残余应力幅值影响较小.

从图 8 可以看出,随着喷丸次数的增加,等效

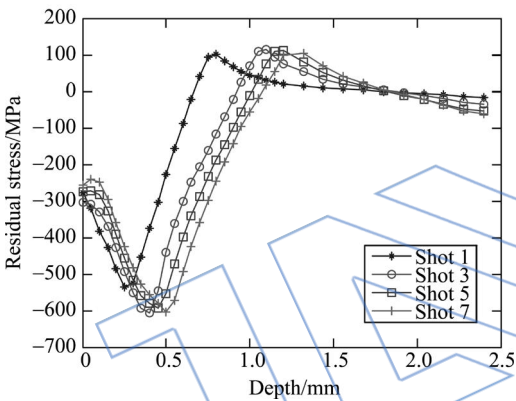


图 7 多次冲击沿深度方向的残余应力分布
Fig. 7 Residual stress versus depth, along the centre line of the shot after multiple shot impacts

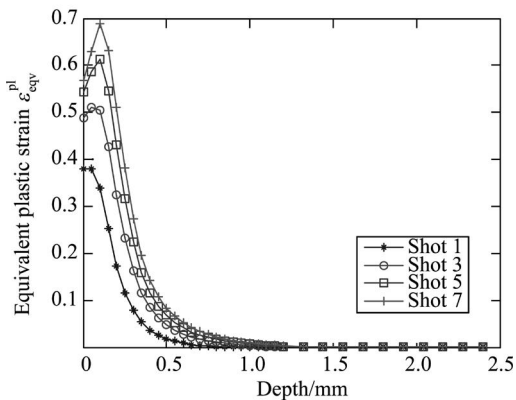


图 8 多次冲击沿深度方向等效塑性应变分布
Fig. 8 Equivalent plastic strain versus depth, along the centre line of the shot after multiple shot impacts

塑性应变最大值增加,但塑性应变增加量变小,最大应变值向层深方向移动.所以,喷丸次数的增加,有利于提高材料屈服强度.

4 多丸粒喷丸强化

为研究弹丸数量及喷丸覆盖率对于喷丸残余应力场的影响,进行多丸粒喷丸强化仿真分析.弹丸半径为 $R = 0.6\text{ mm}$,假定两弹丸中心间距 $C = 2R$.为简化模型,靶体取对称边界条件的胞元模型 $2R \times 2R \times 8R$.材料特性同前述.喷丸速度选为 75 m/s ,摩擦系数选为 0.2 .

弹丸数目越多,表示覆盖率越高.分别建立 4, 6, 8, 9 及 13 弹丸的多丸粒喷丸强化有限元模型.图 9 为 4 弹丸、13 弹丸多丸粒有限元模型.对于 4 弹丸模型,4 个弹丸同时撞击目标体.对于 6, 8, 9, 13 弹丸有限元模型,将其按规律放置若干排.如 13 弹丸模型,将丸粒分别放置 5 排,依据一定时间间隔依次撞击板材.时间间隔计算通过 H/V , H 为弹丸与板材的距离, V 为弹丸的撞击速度.

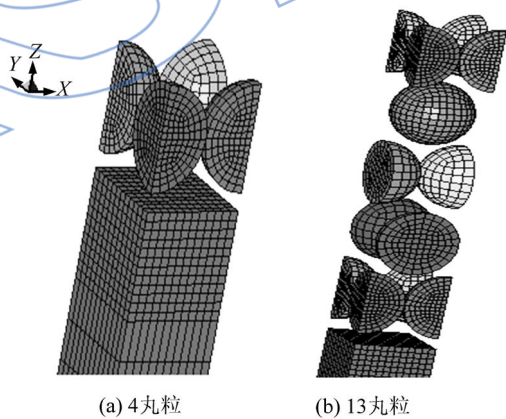


图 9 多丸粒有限元模型
Fig. 9 Multiple shot impacts finite element models

选择胞元模型上代表性的关键位置,研究多丸粒喷丸残余应力场分布规律,均指沿胞元模型深度方向一组节点,如图 10 俯视方向所示:①胞元模型角点 A 处;②胞元模型横向边线(沿图 10 中 X 向)中点 B 处,该处是第二排弹丸最先撞击位置;③胞元模型纵向边线(沿图 10 中 Y 向)中点 C 处,该处是第三排弹丸最先撞击位置;④胞元模型中心位置 D 处,该处是第四排弹丸最先撞击位置.

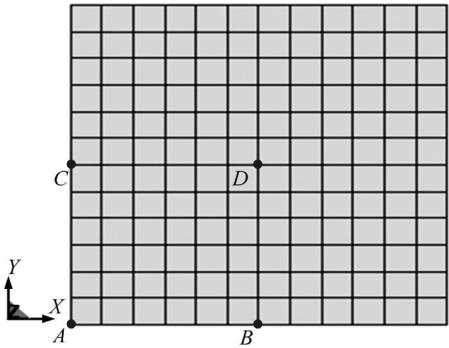


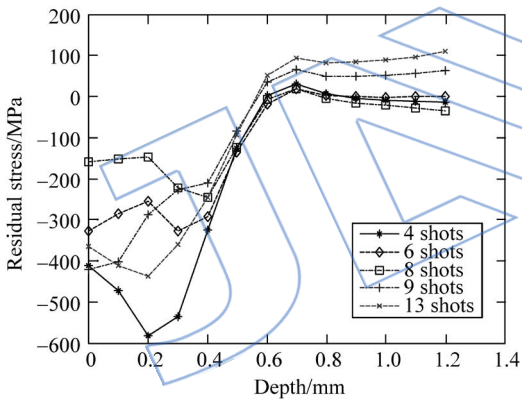
图 10 胞元模型上关键位置(俯视方向)
Fig. 10 Key points on the symmetry cell

从图 11 不同位置的残余应力分布曲线可以看出,4 弹丸模型在不同位置产生的残余应力曲线分布最为不均匀,差别较大.随弹丸数目增加,残余应力分布趋向均匀,各个位置的残余应力分布曲线逐渐接近.而 13 弹丸有限元模型在不同位置得到的残余应力曲线分布较为均匀,即 13 弹丸有限元模型可获得较均匀的应力场分布.

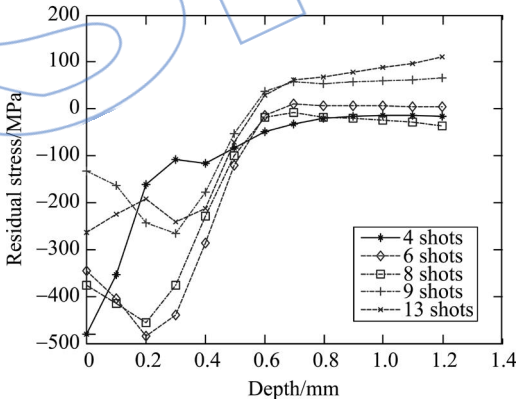
图 11 结果表明,残余压应力最大值并不是随着弹丸数目的增加而增加,而是与弹丸作用区域及覆盖率有关.如图 11(a)所示,在胞元模型角点处 4 弹丸模型产生的残余压应力值最大,这是由于角点位置是 4 丸粒直接冲击区域.

图 12 为 4 弹丸、13 弹丸模型冲击后的残余应力场分布云图.可以发现,13 弹丸最终形成的残余应力场相比 4 弹丸模型,分布状态更加均匀.4 弹丸模型压应力场主要集中在弹丸作用的有限区域(4 个冲击角点附件区域),而 13 弹丸模型由于覆盖率的提高,各处均受到丸粒的作用,沿层深方向形成一定均匀的残余应力场.

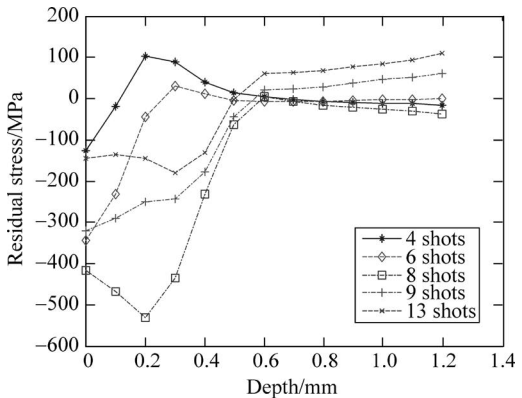
从图 12 可以看出,残余压应力最大值从 630 MPa 减小为 466 MPa,这说明不同丸粒的冲击区域是相互影响的,后续丸粒的冲击使得最初的残余应力场得到部分松弛和释放,所以应力值有所减小,也表明残余压应力最大值与覆盖率及弹丸数目没有必然相关性.



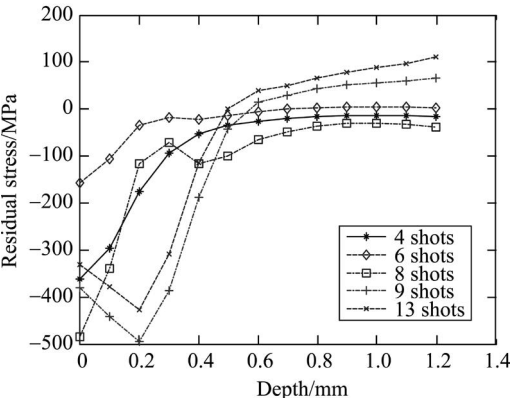
(a) 胞元模型角点A沿深度方向残余应力分布



(b) 胞元模型横向B沿深度方向残余应力分布



(c) 胞元模型纵向C沿深度方向残余应力分布



(d) 胞元模型中心D沿深度方向残余应力分布

图 11 不同喷丸强化模型各个关键点的残余应力分布

Fig. 11 Residual stress profiles at different key points on the target plate for five different shot models

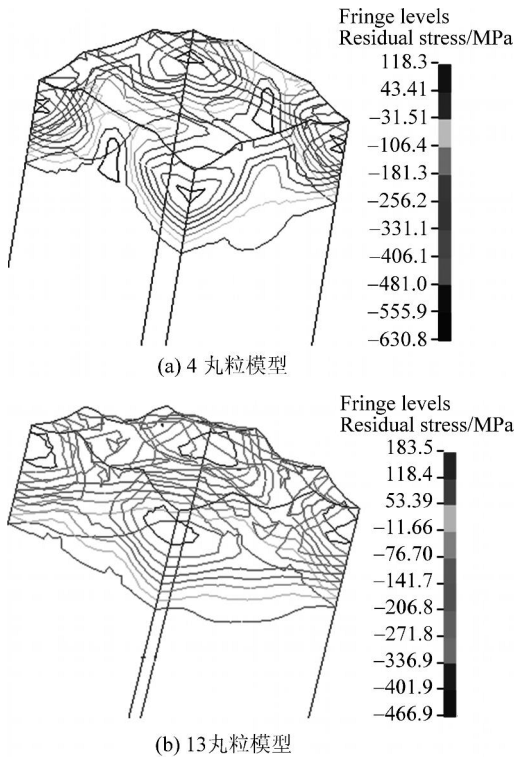


图12 多丸粒模型的残余应力场

Fig. 12 Contours of residual stress field for two different shot models

5 小 结

1) 在喷丸强化过程模拟中,根据显式动力分析过程中各种能量变化曲线,选择动能及内能趋于稳定时间作为显式分析求解时间。

2) 弹丸速度、弹丸大小、入射角度及摩擦力都会影响到最终喷丸残余应力场。喷丸速度对残余应力场分布影响显著,速度提高,可明显提高残余压应力值,且残余压应力层深度增加。但弹丸速度并非越大越好,达到一定临界速度,喷丸强化效果反而减弱。弹丸大小也并非越大越好,实际喷丸过程应该控制弹丸速度及弹丸大小。

3) 摩擦系数会对喷丸效果有一定影响,当摩擦系数大于0.2时,摩擦作用不再明显。但摩擦系数的确定有一定困难。

4) 单丸粒模型反复冲击同一位置,喷丸强化特征明显,残余压应力影响深度增加。随着喷丸次数增加,有利于提高材料的屈服强度。但残余应力幅值受冲击次数影响较小。

5) 多丸粒喷丸有限元分析结果表明,喷丸覆盖率会增加会显著改变残余应力场,并使残余应力

场分布更加均匀。但残余压应力最大值与喷丸覆盖率没有必然相关性。

参考文献:

- [1] 梁伟玲,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): 1405-1409.
LUAN Weiling, TU Shandong. Recent trends on surface modification technology of shot peening[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(15): 1405-1409. (in Chinese)
- [2] Al-Hassani S T S. Mechanical aspects of residual stress development in shot peening[C]// Proceedings of the First International Conference on Shot Peening. Paris, France: Pergamon Press Ltd., 1981: 583-602.
- [3] Meguid S A, Klair M S. An examination of the relevance of co-indentation studies to incomplete coverage in shot peening using the finite element method[J]. Journal of Mechanics of Working Technology, 1985, 11: 87-104.
- [4] 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.
- [5] Schiffner K, Helling C D G. Simulation of residual stresses by shot peening[J]. Computers and Structures, 1999, 72: 329-340.
- [6] 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.
- [7] Meguid S A, Shagal G, Stranart J C. 3D FE analysis of peening of sensitive materials using multiple impingement model[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27: 119-134.
- [8] Majzoubi 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.
- [9] 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 Weiwei, NI Hongfang. 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. (in Chinese)
- [10] 李雁淮, 王飞, 吕坚, 等. 单丸粒有限元模型和多丸粒模型的有限元模拟[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(3): 348-352.
LI Yanhuai, WANG Fei, LÜ 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. (in Chinese)
- [11] 孔献辉. 喷丸强化工艺在汽轮机隔板制造中的应用[J]. 机械设计与制造, 2000, (2): 68-69.