

文章编号:1671-6833(2014)06-0108-05

喷丸残余应力场 SPH/FEM 耦合建模与仿真

王利平, 王建明, 裴信超, 赵莉莉

(山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250061)

摘 要: 针对有限元模型难以模拟大量弹丸群集撞击的喷丸过程, 使用光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)耦合有限元法(Finite Element Method, FEM)模拟喷丸强化过程. 工件采用 FEM 建模, 弹丸流采用 SPH 建模, 通过接触算法实现 SPH 和 FEM 的耦合以模拟弹丸对工件的强化作用. 采用随机算法建立了包含丸粒和空气两类 SPH 粒子形成的弹丸流模型, 推导了两者的状态方程. 研究了弹丸速度、喷丸时间等对喷丸残余应力的影响及工件表面各典型位置处的残余应力分布. 结果表明:最大残余压应力值及深度随喷丸速度的增加而增加;达到一定喷丸时间后,继续增加作用时间,则残余应力变化甚微,其变化幅度小于 10%,达到喷丸饱和状态;处于撞击中心处的残余应力值最大.

关键词: 喷丸残余应力;光滑粒子流体动力学;耦合有限元法;气体状态方程;丸粒状态方程

中图分类号: O242.21;TG668

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.026

0 引言

喷丸强化是一种能提高工件表面疲劳寿命的工艺.它通过大量弹丸介质以 20 ~ 100 m/s 的速度反复撞击工件表面,在工件表面形成均匀残余压应力层.该残余压应力层可抵消工件表面的拉应力,从而有效阻止裂纹的萌生和扩展,显著提高工件疲劳寿命^[1-2],被广泛应用于航空、军工、汽车等领域.因实验方法耗时耗力,且所用的阿尔门试片不能精确反应残余压应力的大小和分布.随着计算机技术和有限元技术的发展,已出现许多基于有限元法研究喷丸残余应力的数值模型. Mori K 等^[3](1992)通过建立 2D 单丸粒对称模型,对塑性变形工件进行了仿真. S. A. Meguid 等^[4-5](1999)通过建立 3D 单丸粒动力学模型,研究了弹丸和靶材尺寸对塑性应变及残余应力的影响. S. A. Meguid 等^[5]和 G. R. Majzoubi 等^[6]利用 3D 多丸粒对称模型对喷丸强化过程进行了系统的分析. 凌祥等^[7](2006)建立了模拟喷丸残余应力场的三维有限元模型. 路会龙等^[8](2009)分别建立单、多丸撞击模型,指出弹丸撞击速度存在最优值. 张洪伟等^[9](2010)利用 LS-DYNA 有限元软件分别建立单、多丸对称胞元 3D 模型,利用

单丸模型研究弹丸速度、直径、入射角、摩擦系数和重复撞击次数对残余应力及塑性应变的影响;通过分别取 4,6,8,9,13 个弹丸建立对称胞元模型,分析不同覆盖率对残余应力场的影响.上述有限元模型仅涉及单丸或数量有限的多丸,属微观模型,与采用大量弹丸反复撞击工件表面的实际喷丸过程存在明显差异.

笔者采用 SPH 耦合 FEM 方法针对高强度铝合金 A12024-T3 通过显式动力分析软件 LS-DYNA,进行了大量弹丸反复撞击工件表面的喷丸强化过程数值模拟;基于两类不同材料属性的 SPH 粒子模拟弹丸流,研究了弹丸速度、喷丸时间等对喷丸残余应力的影响以及工件表面各典型位置处残余应力的分布规律.

1 数值模型的建立

1.1 两类 SPH 粒子均匀混合模型

笔者采用两种 SPH 粒子分别表示空气和离散弹丸.其中,空气对应的 SPH 粒子采用常规气体状态方程,弹丸对应的 SPH 粒子采用离散固体的状态方程.两类粒子间的相互作用通过形函数的特殊定义实现,即在表示粒子形函数的相邻粒子支持域中可包含两类不同性质的 SPH 粒子.

收稿日期:2014-06-26;修订日期:2013-09-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375267)

通讯作者:王建明(1962-),男,山东济南人,山东大学教授,主要从事计算力学、多体动力学、喷丸强化技术方面研究, E-mail: wangjianming@sdu.edu.cn.

在 SPH 法中,问题域的离散是由有限个具有质量并且占有一定空间的粒子组成.粒子的质量可表示为

$$m_i = \Delta V_i \rho_i.$$
 (1)

式中: ΔV_i 为粒子 i 占有的体积; ρ_i 为粒子 i ($i = 1, 2, \cdots, N$) 的密度, N 为粒子支持域内的粒子数量.

根据弹丸尺寸及弹丸流中弹丸与空气的体积比,分别确定 SPH 粒子大小和空气粒子与弹丸粒子的数量.为使两类 SPH 粒子均匀混合,使用随机函数产生随机数,通过 MATLAB 编程实现不同属性的两类 SPH 粒子在弹丸流空间范围内随机均匀分布.将得到的两类 SPH 粒子随机分布单元信息写入 LS-DYNA 支持的 K 文件中.图 1 所示为两类 SPH 粒子均匀分布模型,其中左侧粒子代表弹丸,右侧粒子代表空气.

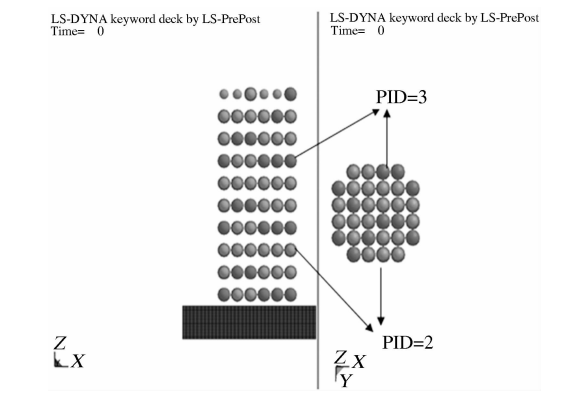


图 1 两类 SPH 粒子混合模型

Fig.1 Hybrid model for two types of SPH particles

1.2 气体状态方程

在 LS-DYNA 中,采用 MAT_Null 材料建立空气 SPH 粒子,使用状态方程 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 表示压力与密度变化间的关系. EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 为线性多项式形式的状态方程,可表示为

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4\mu^4 + C_5\mu^5 + C_6\mu^6)E.$$
 (2)

式中: $\mu = \rho/\rho_0 - 1$,表示当前密度与参考密度间的比值, ρ_0 为初始参考密度,在材料模式 MAT_Null 中定义; $C_0 \sim C_6$ 为各项系数,对于气体状态方程取

$$C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0;$$
 (3)

$$C_4 = C_5 = \frac{C_p}{C_v} - 1.$$
 (4)

式中: C_p 为定压比热; C_v 为定容比热.

上述状态方程相关参数使用 AUTODYNA-

Version6.1 材料库中的参数,如表 1 所示.

表 1 气体材料和状态方程相关参数

Tab.1 Relative parameters of the air material and state equation

密度 $\rho_0/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	多项式 系数 C_4	多项式 系数 C_5	单位体积初始内能 $E/(10^7 \text{N} \cdot \text{cm})$
0.00129	0.4	0.4	2.5×10^{-6}

1.3 丸粒状态方程

丸粒 SPH 粒子使用 MAT_Null 模拟,考虑弹丸流具有离散介质的特性,根据文献[10]推导弹丸 SPH 粒子的状态方程,其为特殊形式的 Gruneisen 方程:

$$P = \begin{cases} C_s^2(\rho - \rho_0), & \rho > \rho_0; \\ 0, & \rho < \rho_0. \end{cases}$$
 (5)

式中: C_s 为声音在弹丸材料中的传播速度,对于钢丸其值为 5.2 km/s ; ρ_0 为弹丸材料初始密度.

设 $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$,则当 $\rho > \rho_0$ 时,式(5)可表示为

$$P = C_s^2 \rho_0 \mu.$$
 (6)

故弹丸 SPH 粒子也可以使用线性多项式形式的状态方程 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL,此时有

$$C_0 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 0;$$
 (7)

$$C_1 = C_s^2 \rho_0.$$
 (8)

弹丸材料和状态方程参数如下:密度 $\rho_0 = 7.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;多项式系数 $C_1 = 2.096$.

1.4 工件材料本构方程

工件材料为 A12024-T3,力学性能参数如下:弹性模量 $E = 71.3 \text{ GPa}$;密度 $\rho_0 = 2.78 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;泊松比 $\gamma = 0.3$.

由于撞击过程速度较高且高应变率,需要考虑温度对应力流动的影响.工件材料采用 Johnson-Cook 黏塑性本构方程模拟,屈服应力 σ_y 与等效塑性应变的关系式为

$$\sigma_y = (A + B \bar{\epsilon}^{pn}) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}).$$
 (9)

式中: A, B, C, n, m 是通过实验获得与应变、应变率、温度相关的常数. Dabboussi 等人提出的相关参数使得仿真结果与实验结果具有较高的一致性^[11],见表 2; $\bar{\epsilon}^p$ 为等效塑性应变; $\bar{\epsilon}^* = \frac{\bar{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0}$, $\dot{\epsilon}_0$ 等于 1 s^{-1} .

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}.$$
 (10)

式中: T 为任一时刻的瞬时温度; T_m 为溶解温度, T_r 为参考温度取 292 K .

表 2 Johnson-Cook 相关参数

Tab. 2 Relative parameters of Johnson-Cook

A/MPa	B/MPa	C	n	m
335	85	0.012	0.11	1

1.5 SPH 耦合 FEM 的喷丸模型

采用 LS-DYNA 软件建立喷丸模型如图 1 所示. 其中弹丸流使用两类 SPH 粒子建模, 共包含 320 个 SPH 粒子; 工件使用有限元建模, 为减少计算时间, 工件尺寸取 6 mm×6 mm×4 mm, 由于工件中部区域与弹丸发生接触, 故对其网格进行细化, 由 53 760 个 solid 单元组成. 工件底面采用固定位移边界, 4 个侧面采用非反射边界以避免应力波在其边界发生反射.

通过定义接触算法耦合 FEM 与 SPH 模型. 在 LS-DYNA 中通过关键字 Contact_Automatic_Nodes_to_Surface 定义有限单元模型上表面与 SPH 粒子间的接触关系, 其中将 FEM 单元节点定义为主节点, SPH 粒子定义为从节点. SPH 耦合 FEM 的过程如图 2 所示.

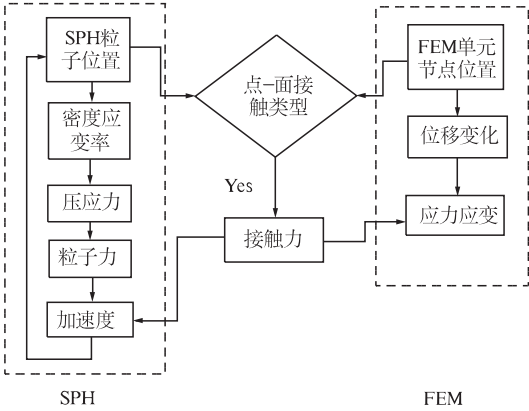


图 2 SPH 耦合 FEM 的过程

Fig. 2 The process of SPH coupled FEM

2 仿真结果分析值模型

图 3 为大量弹丸以速度 50 m/s 撞击工件时不同时刻的撞击效果图. 基于此模型可模拟大量弹丸撞击工件的喷丸过程.

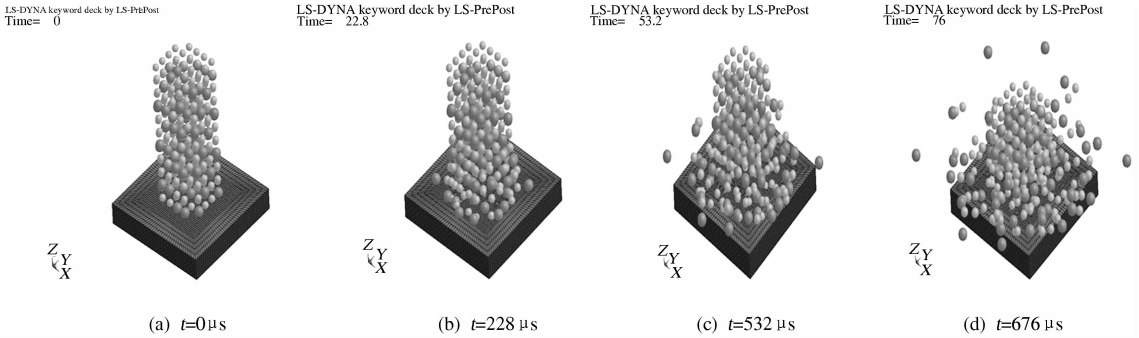


图 3 大量弹丸撞击工件效果图

Fig. 3 The process of shots impacting the target

2.1 弹丸速度对残余应力的影响

由于本文仿真模型中, 弹丸流由大量随机分布的丸粒组成, 可通过弹坑附近的残余压应力研究大量丸粒撞击下的喷丸结果. 图 4 给出弹丸速度分别为 25, 50, 75 和 100 m/s 的大量弹丸经过 120 μs 撞击后, 弹坑底部残余应力分布图. 对应上述 4 种弹丸速度, 其最大残余应力分别为 -632.2, -692.71, -729.0, -738.9 MPa, 发生在距离弹坑表面 0.18~0.24 mm 的次表层. 最大残余压应力值和其深度均随速度的增加而增加. 因此在实际生产中, 应根据最大残余压应力及应力层深度要求合理选择喷丸速度.

2.2 喷丸时间对残余应力的影响

基于本文含大量丸粒的宏观喷丸模型, 可研究残余应力场随喷丸时间的变化. 随着喷丸时间

的增加, 撞击工件表面的弹丸数量、工件表面的有效受喷面积及覆盖率均随之增加. 图 5 所示为速度为 50 m/s 的弹丸分别经过 26.6, 79.8, 102.6, 120 μs 时间后, 弹坑底部残余应力分布图. 图示弹坑处受多个不同粒子撞击, 其中 26.6 μs 对应弹丸首次撞击后的残余应力结果, 而 79.8 μs 则对应弹丸多次撞击同一位置后的残余应力结果. 两者对应的最大残余压应力值分别为 -658.86 MPa 和 -692.17 MPa, 其最大残余压应力值有所提高. 撞击时间继续增加至 102.6 μs 和 120 μs 时, 其对应的残余应力变化甚微, 最大变化幅度小于 10%, 即喷丸残余应力存在饱和状态.

2.3 不同位置点的残余应力分布

图 6 所示为一典型四弹坑分布图. C、E、G、I 分别为 4 个弹坑的中心, B、D、H、F 分别为 4 个弹

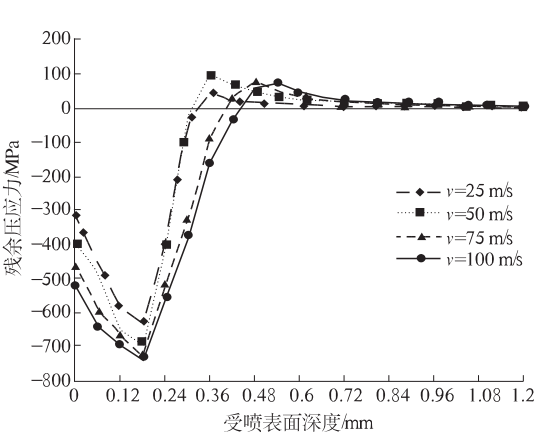


图 4 喷丸速度对残余应力的影响

Fig. 4 Effect of impact velocity on residual stress

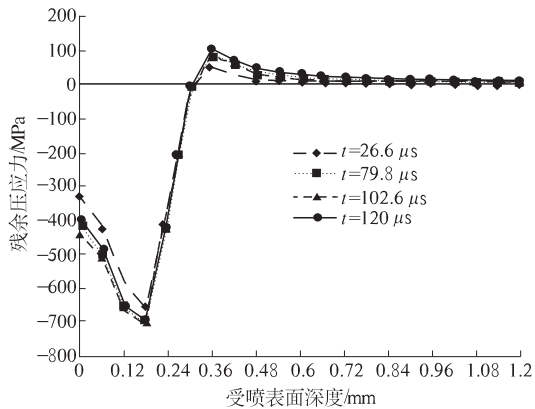


图 5 喷丸时间对残余应力的影响

Fig. 5 Effect of impact time on residual stress

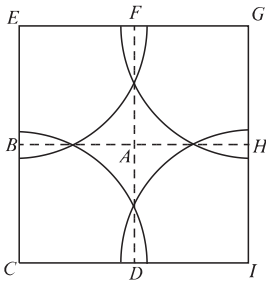


图 6 典型弹坑位置点

Fig. 6 Typical positions of craters

坑两两重叠区域, A 点未受到撞击. $ABCD$ 区域可视为一典型区域. 图 7 分别表示 A 、 B 、 C 、 D 4 个位置点的残余应力分布情况. C 点为粒子撞击中心点, 其最大残余压应力为 -653.45 MPa, 发生在深度为 $0.20 \sim 0.22$ mm 的次表层; B 点和 D 点位于两弹坑重叠处, 该处的最大残余压应力值为 -343.56 MPa, 位于深度为 $0.12 \sim 0.18$ mm 的次表层; A 点的最大残余压应力值为 -450 MPa, 发生在表面处.

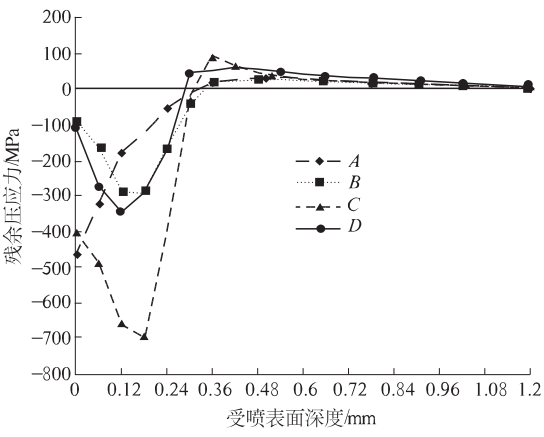


图 7 不同位置残余应力分布

Fig. 7 Distribution of the residual stress vs. depth at different positions

3 结论

针对有限元法难以模拟大量弹丸群集撞击的喷丸过程, 采用 SPH 耦合 FEM 法进行了喷丸过程数值建模与分析. 仿真结果如下:

- (1) 最大残余压应力值及所在次表层深度均随弹丸速度的增加而增加. 故应根据最大残余压应力及应力层的深度要求合理选择喷丸速度.
- (2) 开始时, 随着喷丸时间的增加, 最大残余应力值增大; 达到一定时间后, 继续增加喷丸时间, 残余应力变化甚微, 最大残余压应力的变化幅度小于 10%, 达到喷丸饱和状态.
- (3) 弹坑中心点处最大残余压应力值较高且位于次表层; 两坑交汇处的最大残余压应力值较中心点低且其次表层深度较浅; 未受撞击点处的最大残余压应力发生在表面上.

参考文献:

[1] KAZUYUKI O. Fatigue life enhancement of aluminum alloy for aircraft by Fine Particle Shot Peening(FPSP) [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(8):1395-1399.

[2] 高玉魁. 喷丸强化对 23CO14Ni12Cr3MoE 钢疲劳性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2007, 28(6): 75-77.

[3] MORI K, OSAKADA K, MATSUOKA N. Finite element analysis of peening process with plastically deforming shot[J]. Mater Process Technol, 1994, 45(1-4): 607-612.

[4] MEGUID S A, SHAGAL G, STRANART J C. Finite element modelling of shot-peening residual stresses [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 92/93:401-404.

- [5] 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.
- [6] MAJZOBI G H, AZIZI R, NIA A A. A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005: 164/165:1226–1234.
- [7] 凌翔,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.
- [8] 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.
- [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.
- [10] GRUJICIC M, PANDURANGAN B, QIAO R, et al. Parameterization of the porous-material model for sand with different levels of water saturation [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2008, 28(1): 20–35.
- [11] DABBOUSSI W, NEMES J A. Modeling of ductile fracture using the dynamic punch test [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2005, 47(8): 1282–1299.

Numerical Simulating for Residual Compressive Stress of Shot-peening Based on SPH Coupled FEM

WANG Li-ping, WANG Jian-ming, PEI Xin-chao, ZHAO Li-li

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

Abstract: Because FEM (finite element method) cannot simulate a mass of shots impinging the target, the SPH(smoothed particle hydrodynamics) coupled FEM modeling and simulating for shot peening is presented, in which the shots are modeled by two types of SPH particles and the target is modeled by FEM and the two parts interact through a contact algorithm. Combining with the random algorithm, the random model for shot flow is established and the state equations for shot flow are deduced. The relationships between residual compressive stress and peening velocity, peening time, and the residual compressive stress at typical positions are analyzed. The results show that higher velocity can cause deeper residual compressive stress under target's subsurface. After a certain period of shot-peening, the residual compressive has hardly changed, of which the maximum residual compressive stress changes by less than 10%. The residual stress at the center of impingement reaches the maximum.

Key words: residual stress of shot-peening; SPH; FEM; state equation for air; state equation for shots