DOI: 10.3901/JME.2020.04.224

前混合水射流多弹丸喷丸模型及 残余应力场的数值模拟*

董 星¹ 刘雨庆¹ 段 雄²

(1. 黑龙江科技大学机械工程学院 哈尔滨 150022;
2. 中国矿业大学电气与动力工程学院 徐州 221116)

摘要: 针对前混合水射流的液固湍动特性与喷丸过程多重非线性耦合作用行为, 提供一种射流喷丸强化残余应力场的有限元分析法。采用液固两相流动理论与计算流体动力学方法分析喷嘴内流特性, 建立射流多弹丸喷丸模型; 基于弹丸速度冲击载荷加载制度, 利用多线性各向同性强化弹塑性模型, 应用动态接触对称罚函数法, 运用 ABAQUS 软件模拟不同弹丸数量作用下射流喷丸在 45 钢材料表层产生的残余应力场, 获得残余应力场的分布规律及残余应力沿深度的变化规律; 得出射流喷嘴内流呈均质流流型, 不同弹丸数量射流喷丸在材料表层产生的径向残余应力沿深度的变化规律相同, 但在材料表面产生的径向残余压应力值受喷丸模型影响较大, 对弹丸分三层排列、相邻弹丸之间径向和周向中心距离均为弹丸半径的多弹丸喷丸模型, 数值模拟获得的表面径向残余压应力值与射流喷丸试验数据基本吻合。

关键词: 前混合水射流; 喷丸强化; 喷丸模型; 残余应力场; 数值模拟

中图分类号: TP668

Numerical Simulation of Multi-shot Shot Peening Models and Residual Stress Field of Premixed Water Jet

DONG Xing¹ LIU Yuqing¹ DUAN Xiong²

(1. School of Mechanical Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022;
2. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116)

Abstract: In view of the liquid-solid turbulence behavior of premixed water jet and multiple nonlinear coupling behavior in shot peening process, an analysis method of finite element for jet peening strengthening residual stress field is provided in this article. The liquid-solid two-phase flow theory and computational fluid dynamics method are used to analyze the internal flow characteristics of the nozzle, and the jet shot peening model of multiple projectiles is established. Based on projectile speed impact load loading system, an elastic-plastic model with multilinear isotropic hardening and dynamic contact symmetric penalty function method are adopted, and the finite element software ABAQUS is used to simulate the residual stress fields produced on the surface layer of 45 steel by jet peening under different number of projectiles, thereby the distribution law of residual stress field and the variation law of residual stress along depth are revealed. It is found that the internal flow of the jet nozzle presents a homogeneous flow pattern. The variation law of the radial residual stress along the depth produced by different number of projectiles jet peening on the surface layer of the material is the same. But the radial residual pressure stress value on the surface of the material is greatly affected by the shot peening model, for the multiple projectile shot peening model, whose projectiles are arranged in 3 layers, the radial and circumferential center distance between adjacent projectiles are all the radius of the projectile, the surface radial residual pressure stress value calculated by numerical simulation is proximate to the test data of jet shot peening.

Key words: premixed water jet; peening strengthening; shot peening model; residual stress field; numerical simulation

* 黑龙江省自然科学基金资助项目(E2016060)。20190420 收到初稿,
20191221 收到修改稿

0 前言

喷丸强化是一种金属表面强化技术,是提高金属零构件疲劳抗力的有效途径之一,目前广泛应用于航空航天、汽车、兵器、模具、工程机械等众多工业领域^[1-3]。

前混合水射流喷丸强化是从前混合磨料水射流切割技术衍生出来的一种湿法喷丸强化新工艺,它以高压水为载体,以弹丸粒子为强化介质,通过供丸装置将弹丸与高压水预先混合成液固两相流体,再经过进一步混合加速后由喷嘴高速喷射到金属零构件表面上,通过弹丸的高速冲击加载作用,使零构件表层材料在再结晶温度下产生塑性形变,呈现理想的组织结构和残余应力分布,从而有效抑制零构件疲劳裂纹的萌生和扩展,达到提高金属零构件疲劳抗力的目的^[1]。它与传统的喷丸强化工艺相比具有以下优点,一是喷丸表面粗糙度值增加小,表面质量高,不易造成表面冲击裂纹,当采用微丸粒子时可以实现小尺度零构件的精细喷丸;二是喷丸强度范围宽,通过调节喷丸压力、喷丸时间等工艺参数控制射流冲击载荷,实现全强度喷丸;三是喷丸无热影响区,可以有效抑制喷丸热量的产生,控制喷丸温度的升高,实现冷加工塑性形变;四是方便控制,喷头体积小,反作用力小,移动方便,易于实现机械手控制、靶点精准喷丸;五是绿色环保,高压水对喷丸表面起到润滑、降温、灭尘和清洗作用,抑制喷丸过程火花、粉尘产生,及时清理喷丸表面,安全卫生、绿色清洁。

前混合水射流喷丸强化与传统的喷丸强化机理相同,其主要强化机制之一是在金属零构件表层引入残余压应力场,它是提高材料室温疲劳强度的主要因素,因此,对喷丸残余应力场的研究至关重要。但是,由于喷丸强化过程是一个复杂的动态碰撞接触问题,在力学上涉及多种非线性耦合作用,理论分析工程实际中的多粒弹丸喷丸强化过程误差较大,获得准确的解析解几乎是不可能的;试验研究成本高、时间长、局限性大;数值模拟以其经济性、高效性、通用性为喷丸强化过程研究提供了强有力的工具^[4-5]。因此,国内外一些学者相继开展了喷丸强化残余应力场的数值模拟研究。

在国内,凌祥等^[6]采用三维有限元模型预测了相同喷丸强度下两种类型单粒弹丸和多粒弹丸喷射所产生的残余应力场;董星等^[7]应用有限元法模拟了不同压力作用下水射流喷丸强化在铝合金材料表层产生的残余应力场,获得了残余应力场的分布规

律;张洪伟等^[4]采用三维有限元模型研究了单粒和多粒弹丸喷丸强化过程及弹丸搭接率对残余应力场的影响;李源等^[2]建立了一种弹丸在空间位置随机分布的弹丸束喷丸模型,并研究了喷丸工艺参数与残余应力间的分布规律;王明涛等^[8]针对飞机机翼壁板常用铝合金材料,研究了大尺寸单粒和多粒弹丸喷丸过程弹丸直径和喷丸覆盖率对残余应力的影响。强斌等^[9]采用多粒弹丸模型数值模拟了弹丸对Q345钢的喷丸过程,分析了冲击速度、冲击次数和弹丸直径对喷丸残余应力的影响。杨诗婷等^[10]采用有限元方法对单个弹丸垂直撞击316L不锈钢表面引起的应变场和残余应力场进行了数值模拟,获得了弹丸不同撞击速度下产生的径向残余应力沿深度的分布规律。

国际上,HONG等^[11]采用三维有限元模型研究了单粒和多粒弹丸喷丸强化过程,并利用三维离散元模型研究了喷丸工艺参数对喷丸强化过程的影响,提出了综合运用有限元法和离散元法研究喷丸强化过程更符合工程实际。KIM等^[5]利用对称单元的三维有限元模型预测多粒弹丸冲击产生的残余应力,指出多粒弹丸喷丸需要较大的喷丸区域来反映其真实性。SADASIVAM等^[12]基于三维准静态非线性有限元模型模拟了单粒球形弹丸冲击具有弹性预应力的Ti6Al4V钛合金产生的残余应力场,数值模拟获得的靶材近表面残余压应力计算结果与采用后混合磨料水射流(试验磨料粒子与模拟弹丸尺寸相等)试验数据相对误差为12%。KUMAR等^[13]基于喷丸工艺中粒子冲击作用在靶材表层产生残余应力的影响与粒子冲蚀磨损过程相似的思想,在磨料水射流加工中采用三维有限元模型分别模拟了单个球形磨料粒子冲击不锈钢和多个球形磨料粒子冲击钛合金的过程。GALLITELLI等^[14]在对喷丸强化力学状态、简单几何结构模型喷丸强化过程模拟等研究的基础上,以齿轮为例提出了一种适用于部分复杂几何结构零件喷丸强化残余应力场计算的有限元模拟方法。AHMADI等^[15]基于单粒弹丸冲击的三维有限元模型研究了材料强化模型和喷丸工艺参数对喷丸残余压应力的影响,指出材料的动态强化模型比各向同性强化模型具有更好的适配度。KAZUKI等^[16]提出了一种基于显式有限元法预测喷丸残余应力分布规律的动态分析方法,应用于多道焊接接头残余应力分析获得的数据与XRD测得的结果较好吻合。

综上所述,目前国内外一些学者虽然开展了一些喷丸残余应力场数值模拟研究,并取得了相应研究成果,但是尚未见到有关基于前混合水射流喷丸

强化装置的射流喷丸强化多粒弹丸喷丸模型残余应力场数值模拟的研究报道。本文采用渐进式研究方法,首先从前混合水射流发生的源头,射流喷丸强化装置的关键元件喷嘴入手,研究喷嘴内流场,确定喷嘴内流型;其次根据喷嘴内流型建立射流多粒弹丸喷丸的几何模型及有限元模型,并利用有限元法模拟射流喷丸过程,获得射流喷丸残余应力场;最后对射流喷丸数值模拟结果进行试验验证。探索一种前混合水射流喷丸强化残余应力场数值模拟新方法,为前混合水射流喷丸强化技术的理论发展与工程应用进一步奠定技术基础。

1 射流喷嘴内流型

在两相流动理论研究范畴内,前混合水射流属于液固湍动射流。一般情况下前混合水射流系统中弹丸粒子的体积分数小于 5%,质量分数小于 10%,两者均远小于 1,可以按十分稀疏的液固两相射流处理^[17]。因此,弹丸在与高压水混合输送过程中,由于弹丸很稀少,可以忽略弹丸间直接的和间接的相互作用,只考虑弹丸受到的高速水流的曳力作用以及重力、压差力、附加质量力、Basset 力、Magnus 升力、Saffman 升力等力作用^[18],这些力中的轴向分力决定弹丸粒子的轴向运动特性和轴向速度分布,径向分力决定弹丸粒子的径向运动特性和浓度分布。

实际喷丸过程中射流喷嘴布置方式因工件喷丸位置而异,其典型的布置方式有水平布置、垂直向上布置和垂直向下布置三种。因此,弹丸粒子由贮丸罐进入高压管与高压水混合,再由高压管输送至喷嘴从喷嘴喷出的过程实质上就是丸粒的有压管路水力输送,为保证丸粒在输送过程不发生管底淤积,要求弹丸粒子在高压管和喷嘴中的输送速度大于悬浮临界速度。而丸粒在输送过程中经历的水平流、上升流和下降流这三种方式中,水平流时丸粒是最容易沉降的,处于输送的最不利状态,因此,下面首先分析水平布置喷嘴中丸粒的均质悬浮临界速度,然后利用计算流体动力学数值模拟方法求得射流喷嘴出口速度,并与均质悬浮临界速度比较,最终确定射流喷嘴内流型。

假设弹丸粒子在水平布置喷嘴中沉降时的雷诺数 Re_p 在过渡流内,因弹丸粒子的体积分数和质量分数均远小于 1,粒子在沉降过程中彼此干涉很小,可以看成是自由沉降,近似选择阿连自由沉降末速公式(适用范围 $Re_p=2\sim 300$)^[19],则弹丸粒子自由沉降末速

$$v_t = d_p^3 \sqrt{\left(\frac{2}{15} g \frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right)^2 \frac{\rho}{\mu}} \quad (1)$$

式中, d_p 为弹丸粒子直径, g 为重力加速度, ρ_p 、 ρ 分别为弹丸粒子与水的密度, μ 为水的动力黏度。

研究采用的弹丸粒子为玻璃珠,弹丸直径 $d_p=0.25$ mm,密度 $\rho_p=2.5\times 10^3$ kg/m³;水的密度 $\rho=1\ 000$ kg/m³,动力黏度 $\mu=1.002\times 10^{-3}$ Pa·s。将弹丸粒子、水及重力加速度的相关数据代入式(1),计算得弹丸粒子自由沉降末速 $v_t=0.039\ 2$ m/s。

验算弹丸粒子自由沉降的雷诺数

$$Re_p = \frac{v_t d_p \rho}{\mu} = 9.78 \quad (2)$$

根据式(2)计算得到的雷诺数 Re_p 在 2~300 范围内,因此,采用式(1)计算弹丸粒子的自由沉降末速是正确的。

假设射流喷嘴中弹丸粒子与水混合形成的液固两相介质弹丸液处于均质悬浮状态,则悬浮临界速度^[20-21]

$$u_k = (1800 g d_n v_t)^{-3} \quad (3)$$

式中, d_n 为喷嘴出口直径。

研究选择工程中常用的出口带圆柱段的圆锥收敛型喷嘴,喷嘴出口直径 $d_n=2.2$ mm,由式(3)计算得均质悬浮临界速度 $u_k=1.15$ m/s。

为了验证射流喷嘴中弹丸液处于均质悬浮状态,需要求出射流喷嘴出口速度。但由于前混合水射流属于液固湍动射流,无法直接采用纯水射流喷嘴出口速度理论公式准确求解,需要利用计算流体动力学数值模拟方法求解喷嘴内流场。结合十分稀疏的液固湍动射流特点,数值模拟数学模型采用多相流动的拉格朗日离散相模型,将流体处理为连续相,在欧拉坐标中描述,通过直接求解雷诺数时均 N-S 方程得到流场;将弹丸粒子处理为离散相,在拉格朗日坐标中描述,通过计算流场中弹丸粒子的运动得到粒子的运动轨迹。计算方法采用二阶精度迎风差分格式,基于微元中心有限容积法离散连续相控制方程,并通过 SIMPLE 算法求解压力速度耦合;将离散相控制方程离散成若干个时间步,应用连续相时均速度,积分弹丸粒子运动方程得到粒子运动速度,积分弹丸粒子轨迹方程得到粒子运动轨迹。进口边界条件设置:对连续相,给定进口喷丸压力为 8 MPa;对离散相,采用单点射流源类型及惯性粒子,弹丸粒子材料为本研究采用的玻璃珠。采用 FLUENT 软件数值模拟的计算结果为:对离散相运动,在喷嘴出口截面半径上分别为 0 mm(轴线

上)、0.167 mm、0.387 mm 和 0.622 mm 处, 弹丸粒子的轴向速度 v_p 分别为 124.981 m/s、124.776 m/s、123.947 m/s 和 122.021 m/s。

将数值模拟求得的喷嘴出口弹丸粒子轴向速度 v_p 与均质悬浮临界速度 u_k 进行比较, 因为 $v_p \gg u_k$, 则射流喷嘴内流为均质流型, 喷嘴横截面上离散相弹丸粒子浓度分布近似相同, 连续相水轴向速度呈高度湍流状态的轴对称分布, 为旋转抛物面^[19]。

2 射流喷丸数值模拟基本模型及算法

前混合水射流喷丸强化是一个复杂的动态碰撞接触力学问题, 涉及到材料非线性、几何非线性和边界非线性等多重非线性的耦合作用, 其结构中的响应瞬时发生很大的变化, 是不连续的。因此, 在不影响研究结果的前提下, 为简化数值模拟分析, 结合射流实际喷丸过程提出如下基本假设。

(1) 射流喷嘴移动速度远小于射流喷嘴出口的喷丸速度, 忽略移动速度影响, 按喷嘴固定喷丸处理。

(2) 射流垂直冲击靶面, 弹丸冲击靶面的入射角为 90° 。

(3) 射流中各弹丸粒子冲击靶面的速度相等, 不存在冲击速度差。

(4) 弹丸粒子为直径相等的圆球体。对于我国标准弹丸粒度, 基本粒径的弹丸量大于 80%; 同时, 在弹丸生产和喷丸工艺中安装了选丸装置, 及时剔除了圆度差的弹丸, 能够满足要求。

(5) 靶面初始几何结构为理想光滑平面。

(6) 靶体为均质的各向同性体, 对喷丸强化采用的金属材料能够满足要求。

(7) 水的主要作用是加速弹丸, 忽略其对靶面的冲击效应。

(8) 弹丸表面和靶面之间不存在水膜, 忽略可能影响冲击性能的水膜效应。

2.1 几何模型

射流喷丸强化过程是大量弹丸连续不断地高速冲击靶体表面, 使靶体表层材料产生塑性变形的冷加工硬化过程。因此, 结合所用喷丸机的工作特点进行多粒弹丸喷丸过程数值模拟更符合工程实际^[5,22]。考虑到大量弹丸的实际喷丸过程是每一个单粒弹丸冲击作用的集合, 也是多粒弹丸喷丸过程模拟的基础, 因此, 本项研究同时进行了单粒弹丸和多粒弹丸的喷丸过程数值模拟。

研究采用前混合水射流喷丸强化装置, 根据第 1 节射流喷嘴内流流型的研究结果, 射流喷丸过程模拟分别采用单粒弹丸轴对称喷丸模型和多粒弹丸

喷丸模型, 选择的弹丸数分别为 1 粒、4 粒、5 粒、7 粒、9 粒、13 粒和 19 粒。在几何模型中, 所有弹丸均为半径 $r_p=0.125$ mm 的圆球体; 目标靶体为圆柱体, 靶体直径 $D=12r_p=1.5$ mm, 高度 $H=12r_p=1.5$ mm。对于多粒弹丸喷丸模型, 考虑到一般喷丸要求 $S \geq r_p$ (S 为泛指相邻弹丸之间中心距离), 且当 $S=r_p$ 时应力干涉最大的情况^[5], 取 $S_r=r_p$ (S_r 为特指弹丸径向相邻时, 相邻弹丸之间径向中心距离), 且将 S_θ (S_θ 为特指弹丸周向相邻时, 相邻弹丸之间周向中心距离) 作为变量进行几何模型影响分析, 则 4 粒、5 粒、7 粒、9 粒、13 粒和 19 粒多粒弹丸喷丸几何模型(俯视图)如图 1 所示。

图 1 多粒弹丸喷丸模型

由图 1 可见, 图 1a、图 1b、图 1c、图 1d 弹丸分两层排列, 图 1e、图 1f 弹丸分三层排列。在两层和三层排列方式中均有 $S_r=r_p$; 图 1a、图 1b、图 1c、图 1d 第 2 层的 S_0 依次逐渐减小, 分别为 $S_0=\sqrt{3}r_p$ 、 $S_0=\sqrt{2}r_p$ 、 $S_0=r_p$ 、 $S_0=0.765r_p$; 而图 1e、图 1f 第 2 层的 S_0 均为 $S_0=r_p$, 第 3 层的 S_0 分别为 $S_0=2r_p$ 、 $S_0=1.035r_p \approx r_p$ 。

2.2 有限元模型

研究采用有限元软件 ABAQUS 显式求解器模块 Explicit 模拟单粒、多粒弹丸冲击靶体过程。由于弹丸和靶体的形状及变形程度不同, 因此选取不同的单元类型及网格生成技术。弹丸选取 4 节点线性四面体三维实体单元 C3D4, 自由网格划分。目标靶体考虑到冲击接触区域网格会产生严重扭曲, 选取 8 节点线性六面体三维实体减缩积分单元 C3D8R, 沙漏控制, 并将靶体分割成九个区域, 边上种子设置方法, 结构化网格划分; 在弹丸直接碰撞接触区域, 沿 x 轴方向和 y 轴方向各取 0.4 mm 形成的半径为 0.4 mm 圆区域, z 轴方向取 0.3 mm 区域, 采用单元尺寸 0.02 mm 将网格细化, 提高网格密度, 以获得精确的计算结果; 喷丸非直接碰撞接触区域单元尺寸为 0.06 mm。单粒弹丸和多粒弹丸几何模型的中心位置弹丸与靶体对称轴对应。图 2 例举给出了 9 粒弹丸和 19 粒弹丸喷丸的有限元模型。

图 2 有限元模型

2.3 材料模型

射流喷丸所用玻璃珠弹丸的弹性模量为 72 GPa, 泊松比为 0.3, 材料模型采用各向同性弹性模型。靶体材料为 45 钢调质处理, 密度为 7.8×10^3

kg/m^3 , 弹性模量为 206 GPa, 泊松比为 0.3, 屈服极限为 705 MPa, 强度极限为 830 MPa; 在弹丸冲击接触区域产生明显的弹塑性变形, 因此材料模型采用多线性各向同性强化弹塑性模型, 各直线段弹性模量, 由单向拉伸试验测得的 45 钢材料的名义应力-名义应变缩颈前的数据, 转换为真实应力-真实应变数据, 然后输入到程序中各向同性强化应变率相关数据表得到相应数据。

在模型中要求弹丸相对靶体材料应具有较高的硬度, 不会发生较大的变形, 因此将弹丸定义为刚体, 以提高计算效率^[22]。

2.4 载荷及边界条件

前混合水射流喷丸过程是由高压泵产生高压水, 高压水将能量传递给弹丸, 弹丸以一定的速度从喷嘴喷出冲击靶体表面, 从而对靶体表面施加一冲击载荷。载荷的施加通过定义弹丸初始速度的方式实现, 载荷的大小通过调节高压泵喷丸压力来获得需要的冲击初始速度。根据第 1 节研究结果, 喷丸压力为 8 MPa 时, 喷嘴出口截面上, 位于射流轴线上的弹丸轴向速度为 124.981 m/s, 沿径向方向弹丸的轴向速度略有逐渐减小, 分别为 124.776 m/s、123.947 m/s 和 122.021 m/s。在本研究采用的射流喷丸强化试验装置中, 喷丸试样位于射流 10 mm 靶距位置, 虽然弹丸离开喷嘴后在外流场射流核心段仍要继续加速, 但是加速距离很短, 可以近似地认为 10 mm 靶距位置处弹丸的平均轴向速度为 125 m/s, 因此, 根据本节的基本假设(3), 定义弹丸冲击初始速度均为 125 m/s。

弹丸冲击载荷作用于靶体模型上表面, 沿 z 轴正方向, 因此对模型的下表面进行完全的自由度约束, 限制模型下表面的移动和转动, 模型上的其他节点具有 6 个方向自由度, 位移不被约束。

2.5 接触模型及算法

定义弹丸与靶面的接触类型为面-面接触, 动力学接触方法, 有限滑动, 接触性; 接触碰撞采用动态接触对称罚函数法, 应用库仑摩擦模型描述弹丸与靶面之间的相对切向运动, 取库仑摩擦因数为 0.2^[5, 13]; 在模型中加入阻尼限制数值振荡, 提高计算结果的稳定性, 取线性体黏性阻尼系数为 2, 二次体黏性阻尼系数为 1.2。计算方法采用中心差分时间显式算法, 弹丸冲击加载计算时间为 3×10^{-5} s, 选择 ABAQUS/Explicit 求解器, 结果文件输出步数为 160 步。

3 射流喷丸数值模拟结果及分析

图 3~5 分别例举给出了 1 粒、9 粒和 19 粒弹

丸喷丸作用下材料中产生的径向残余应力分布云图。由图 3a、图 4a、图 5a 可见, 弹丸冲击靶体卸载后在材料表面分别形成与 1 粒、9 粒和 19 粒弹丸模型相符的冲击凹坑形貌, 并产生径向残余压应力, 残余压应力以接触中心为圆心沿径向环形扩展; 但

对于 9 粒和 19 粒, 由于弹丸间存在着径向和周向之间的搭接间距, 造成径向残余压应力沿周向不是均匀分布。由图 3b、图 4b、图 5b 可见, 在靶体轴平面上, 形成的材料变形及产生的径向残余应力沿靶体对称轴均呈对称分布。

(a) 表面径向残余应力分布云图

(b) 轴平面径向残余应力分布云图

图 3 1 粒弹丸喷丸产生的径向残余应力分布云图

(a) 表面径向残余应力分布云图

(b) 轴平面径向残余应力分布云图

图 4 9 粒弹丸喷丸产生的径向残余应力分布云图

(a) 表面径向残余应力分布云图

(b) 轴平面径向残余应力分布云图

图 5 19 粒弹丸喷丸产生的径向残余应力分布云图

图 6 给出了 1 粒、4 粒、5 粒、7 粒、9 粒、13 粒和 19 粒弹丸喷丸作用下, 材料表层对称轴上产生的径向残余应力沿轴向变形层深度的变化曲线。由图 6 可见, 不同弹丸数喷丸时材料表层产生的径向残余应力沿深度的变化规律相同。在材料表面均产生径向残余压应力, 分别为 -330.2 MPa、-352.1 MPa、-372.1 MPa、-457.6 MPa、-498.2 MPa、-431.6 MPa 和 -418.5 MPa; 然后随着深度的增加径向残余压应力先逐渐增大, 在各自的第 I 特征深度(最大残余压应力深度)处, 径向残余压应力达到最大值; 之后随着深度的继续增加径向残余压应力逐渐减小, 在第 II 特征深度(残余压应力层深度)处, 径向残余压应力减小至 0; 随着深度的继续增加, 残余压应力转变为残余拉应力并逐渐增大, 在各自的第 III 特征深度(最大残余拉应力深度)处, 径向残余拉应力达到最大值; 随着深度的进一步增加, 径向残余拉应力逐渐减小, 最终逐渐趋近于 0。因此, 径向残余应力沿深度分为两个区域, 一是从表面起至第 II 特征深度之间的残余压应力区, 二是大于第 II 特征深度范围的残余拉应力区。

图6 表层径向残余应力沿深度的变化曲线

由图6同时可知,1粒、4粒、5粒、7粒和9粒弹丸喷丸时,表面径向残余压应力随着弹丸数的增加而逐渐增大,分别为-330.2 MPa、-352.1 MPa、-372.1 MPa、-457.6 MPa和-498.2 MPa;之后随着弹丸数增加至13粒和19粒时,表面径向残余压应力随之相应减小,分别为-431.6 MPa和-418.5 MPa。产生这一变化的原因是,每个弹丸冲击凹坑中心部位均产生径向残余压应力,但是随着距弹丸冲击中心径向距离的增加,残余压应力逐渐减小,当距离增加到一定值时,压应力将转变为拉应力。

由图1可知,当以4粒、5粒、7粒和9粒弹丸喷丸时,弹丸分两层排列,只有几何模型中心位置1粒弹丸冲击在靶体材料中心对称轴上,并在材料中心产生径向残余压应力,其余第2层弹丸都冲击在距材料中心为 r_p 的圆环上,也在材料中心产生径向残余压应力;因此,两层弹丸冲击产生的残余应力叠加后,促使在材料中心产生的径向残余压应力随着冲击弹丸数的增加而增大。当以13粒、19粒弹丸喷丸时,弹丸分三层排列,也是只有几何模型中心位置1粒弹丸冲击在靶体材料中心对称轴上,并在材料中心产生径向残余压应力,第2层的6粒弹丸冲击在距中心为 r_p 的圆环上,并均在材料中心产生径向残余压应力,第3层的弹丸冲击在距中心为 $2r_p$ 的圆环上,在材料中心产生径向残余拉应力;因此,三层弹丸冲击产生的径向残余应力叠加后,随着弹丸冲击数量的增加,造成在材料中心对称轴上产生的径向残余压应力随着弹丸冲击数量的增加反而减小。

4 试验验证

采用前混合水射流喷丸强化装置对调质处理的45钢喷丸试样进行喷丸强化试验。试验条件:

喷嘴直径为2.2 mm,喷丸压力为8 MPa,喷丸方式为直线喷射,喷丸角度为 90° ,喷丸靶距为10 mm,喷丸时间为0.4 s,喷丸用弹丸材料为玻璃珠,弹丸直径为0.25 mm,弹丸流量为1.0 kg/min,喷嘴移动速度为330 mm/min,喷嘴移动轨迹间距为2.2 mm,喷丸覆盖率为100%。喷丸试样为直径25 mm、高15 mm的圆柱试样,试样喷丸前进行电解抛光,消除前序加工工艺引起的残余应力和附加应力。

采用XSTRESS3000 X-ray Stress Analyzer测定前混合水射流喷丸试验后的试样表面残余应力,测定的试样个数为3个,这3个试样测定的表面径向残余应力结果均为表面径向残余压应力,其平均值为-407.2 MPa。将1粒、4粒、5粒、7粒、9粒、13粒和19粒弹丸喷丸强化数值模拟获得的表面径向残余压应力值,与试验测定得到的表面径向残余压应力平均值进行比较(表1)。

表1 数值模拟与试验残余应力的比较

弹丸数/粒	数值模拟残余应力	试验残余应力/MPa	相对误差 (%)
	残余应力/MPa		
1	-330.2	-407.2	-18.9
4	-352.1	-407.2	-13.5
5	-372.1	-407.2	-8.6
7	-457.6	-407.2	12.4
9	-498.2	-407.2	22.3
13	-431.6	-407.2	6.0
19	-418.5	-407.2	2.8

由表1可知,当采用单粒弹丸喷丸模型数值模拟射流喷丸过程时,模拟获得的表面径向残余压应力小于试验值,相对误差为-18.9%。当采用4粒、5粒、7粒和9粒弹丸的多粒弹丸喷丸模型,弹丸分两层排列数值模拟射流喷丸过程时,随着第2层相邻弹丸之间周向中心距离 S_0 由 $\sqrt{3}r_p$ 经 $\sqrt{2}r_p$ 、 r_p 减小到 $0.765r_p$,数值模拟获得的表面径向残余压应力逐渐增大,由4粒、5粒时的模拟结果小于试验值,增加到7粒、9粒时的模拟结果大于试验值,相对误差分别为-13.5%、-8.6%、12.4%和22.3%。当采用13粒和19粒弹丸的多粒弹丸喷丸模型,弹丸分三层排列数值模拟射流喷丸过程时,随着第3层相邻弹丸之间周向中心距离 S_0 由 $2r_p$ 减小到 r_p ,数值模拟获得的表面径向残余压应力相应减小,相对误差分别为6.0%、2.8%。因此,采用19粒弹丸的多粒弹丸喷丸模型,弹丸分三层排列,相邻弹丸之间径向和周向中心距离均为弹丸半径时,其相对误差为2.8%,表明该有限元分析方法能够很好地预测工程实际中前混合水射流喷丸强化过程。

5 结论

(1) 前混合水射流喷丸出口带圆柱段的圆锥收敛型喷嘴内流呈均质流流型,离散相弹丸粒子在喷嘴圆柱段横截面上浓度分布近似相同,连续相水轴向速度呈高度湍流状态的轴对称分布,为旋转抛物面。

(2) 射流以不同的弹丸数量喷丸在材料表面均产生较大的径向残余压应力,并且在材料表层产生的径向残余应力沿深度的变化规律相同,并分为由表面起至残余压应力深度之间的残余压应力区和位于残余压应力区深度以下的残余拉应力区两个区域。

(3) 射流弹丸数量和多粒弹丸排列方式对材料表面产生的径向残余压应力影响较大,在研究的弹丸数量范围内,多粒弹丸喷丸在材料表面产生的径向残余压应力均大于单粒弹丸喷丸产生的径向残余压应力;对19粒弹丸分三层排列、相邻弹丸之间径向和周向中心距离均为弹丸半径的多粒弹丸喷丸模型,数值模拟获得的表面径向残余压应力值与试验结果的相对误差为2.8%,表明该有限元分析方法能够很好地预测前混合水射流喷丸强化过程。

参考文献

- [1] 董星,郭睿智,段雄.前混合水射流喷丸强化表面力学特性及疲劳寿命试验[J].机械工程学报,2011,47(14): 164-170.
DONG Xing, GUO Ruizhi, DUAN Xiong. Surface mechanical characteristics and fatigue life experiments of premixed water jet peening strengthening[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(14): 164-170.
- [2] 李源,雷丽萍,曾攀.弹丸束喷丸有限元模型数值模拟及试验研究[J].机械工程学报,2011,47(22): 43-48.
LI Yuan, LEI Liping, ZENG Pan. Shot stream finite element model for shot peening numerical simulation and its experiment study[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(22): 43-48.
- [3] SRIVASTAVA M, TRIPATHI R, HLOCH S, et al. Potential of using water jet peening as a surface treatment process for welded joints[J]. Procedia Engineering, 2016, 149: 472-480.
- [4] 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,2010,46(1): 111-117.
ZHANG Hongwei, ZHANG Yidu, WU Qiong. Numerical simulations of shot-peening process and impact effect[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(1): 111-117.
- [5] KIM T, LEE H, JUNG S, et al. A 3D FE model with plastic shot for evaluation of equi-biaxial peening residual stress due to multi-impacts[J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206: 3125-3136.
- [6] 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.
- [7] 董星,张海录,段雄.水射流喷丸强化残余应力场的有限元模拟[J].机械工程学报,2010,46(18): 189-194.
DONG Xing, ZHANG Hailu, DUAN Xiong. Finite element simulation of residual stress field with water jet peening strengthening[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 189-194.
- [8] 王明涛,曾元松,尚建勤,等.基于ABAQUS的大尺寸弹丸喷丸过程数值模拟[J].塑性工程学报,2012,19(5): 109-114.
WANG Mingtao, ZENG Yuansong, SHANG Jianqin, et al. Numerical simulations of shot peening with large balls based on ABAQUS[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(5): 109-114.
- [9] 强斌,李亚东,顾颖,等.钢板喷丸处理残余应力场和表面粗糙度数值模拟[J].西南交通大学学报,2015,50(4): 691-697.
QIANG Bin, LI Yadong, GU Ying, et al. Numerical simulation of residual stress field and surface roughness for steel plate subjected to shot peening[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(4): 691-697.
- [10] 杨诗婷,邢永明,赵燕茹,等.单个弹丸撞击316L不锈钢引起的变形场[J].爆炸与冲击,2017,37(1): 126-133.
YANG Shiting, XING Yongming, ZHAO Yanru, et al. Deforming field in 316 L stainless steel by single shot peening[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(1): 126-133.
- [11] 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, 15: 1097-1110.
- [12] SADASIVAM B, AROLA D. An examination of abrasive waterjet peening with elastic pre-stress and the effects of boundary conditions[J]. Machining Science and Technology, 2012, 16: 71-95.
- [13] KUMAR N, SHUKLA M. Finite element analysis of multi-particle impact on erosion in abrasive water jet machining of titanium alloy[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2012, 236: 4600-4610.

- [14] GALLITELLI D, BOYER V, GELINEAU M, et al. Simulation of shot peening: From process parameters to residual stress fields in a structure[J]. *Comptes Rendus Mecanique*, 2016, 344: 355-374.
- [15] AHMADI M, SADEGHI B M, IRANI M, et al. Finite element simulation of shot peening of an aluminum alloy considering hardening models[J]. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2016, 57(6): 565-571.
- [16] KAZUKI I, MASAKAZU S, KOICHI A, et al. Numerical analysis of residual stress distribution on peening process[J]. *Weld World*, 2017, 61: 517-527.
- [17] 刘大有. 二相流体动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- LIU Dayou. Fluid dynamics of two-phase systems[M]. Beijing: Higher Education Press, 1993.
- [18] 张成光, 张勇, 张飞虎, 等. 磨料水射流加工去除模型研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(7): 188-196.
- ZHANG Chengguang, ZHANG Yong, ZHANG Feihu, et al. Study on removal model of abrasive waterjet machining[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(7): 188-196.
- [19] 董星, 刘春生. 磨料射流技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002.
- DONG Xing, LIU Cunsheng. Abrasive jet technology[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2002.
- [20] 管路和沟的流体阻力出版分科会编. 固液两相流[J]. *水泵技术*, 1984(4): 55-61.
- The Publishing Classified-assembly of the Fluid Resistance of Pipeline and Channel. Solid-liquid two phase flow[J]. *Pump Technology*, 1984(4): 55-61.
- [21] 陈次昌, 刘正英, 刘天宝, 等. 两相流泵的理论与设计[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1994.
- CHEN Cichang, LIU Zhengying, LIU Tianbao, et al. Theory and design of two phase flow pump[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1994.
- [22] 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: 1023-1038.

作者简介: 董星, 男, 1964 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为水射流技术及流体机械设计理论。
E-mail: dongxingwrh@163.com