

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2013.03.003

# 空化水喷丸诱导 45 钢残余应力场的数值模拟与验证<sup>\*</sup>

石加联<sup>1</sup>, 徐常亮<sup>1</sup>, 韩冰<sup>1</sup>, (日)巨东英<sup>2</sup>

(1. 辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051; 2. 日本埼玉工业大学 先端科学研究所, 日本 埼玉 369-0293)

**摘要:** 空化水喷丸工艺是利用淹没式空化射流中微小空泡在材料表面溃灭时产生的冲击波压力, 用该压力来诱导金属零部件的表面形成压缩残余应力层, 进而提高其疲劳寿命。本文依据空化水喷丸强化 45 钢的试验, 运用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立非线性无弹性模型中的双线性各向同性模型, 模拟了空化水喷丸工艺过程中冲击波压力和材料相互作用的动力学过程, 以及形成在表层的压缩残余应力场分布规律, 讨论了本构关系、网格划分、载荷大小、加载历史等关键问题。采用不同峰值载荷的冲击波压力和多冲击波连续加载的方法, 实现了对残余应力场分布的预测。利用微小部残余应力测定装置 (PSPC/MICRO) 对上述工艺条件诱导残余应力的大小进行测定, 数值模拟的结果和 X 射线衍射法测得的残余应力大小和分布吻合较好。

**关键词:** 空化; 喷丸强化; 残余应力; 数值模拟; X 射线衍射

**中图分类号:** TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2013)03-0015-06

## Experiment and Numerical Simulation of Water-jet Cavitation Peening Processing in 45 Steel

SHI Jia-lian<sup>1</sup>, XU Chang-liang<sup>1</sup>, HAN Bing<sup>1</sup>, JU Dong-ying<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, Liaoning; 2. Institute of Advanced Science, Saitama Institute of Technology, Saitama 369-0293, Japan)

**Abstract:** Water-jet cavitation peening was a new technology using impact wave pressure generated by micro bubbles collapsing near the surface of material in the submerged cavitating jets processing, which was used for inducing compressive residual stress layer in the surface of metallic materials, and its fatigue life was improved. According to the cavitating water shot peening tests on 45 steel, a bilinear isotropic model in nonlinear inelastic model was created by ANSYS/LS-DYNA finite element analysis software, the interaction between shock wave pressure and material of dynamics of the cavitating jets processing was simulated, the distribution rule of compress residual stress forming in the surface layer was obtained, and the constitutive relationship, meshing, load magnitude, load history and other key issues were discussed. The shock wave pressure under different peak loads and the method of continuous wave loading were adopted to predict the distribution of residual stress. A small residual stress measurement device (PSPC/MICRO) is used to test the residual stress induced by WCP. The results show that the numerical simulation agrees well with the experimental results of magnitude and distribution of the residual stress determined by the X-ray diffraction method.

**Key words:** cavitation; peening strengthen; residual stress; numerical simulation; X-ray diffraction

收稿日期: 2013-01-22; 修回日期: 2013-05-07; 基金项目: \* 辽宁省教育厅重点实验室项目 (LS2010085); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划 (LJQ2011025); 辽宁科技大学科研专项基金 (2012TD03)

作者简介: 石加联 (1965-), 男 (汉), 山东威海人, 教授, 硕士; 研究方向: 机械设备数值模拟与仿真分析

网络出版日期: 2013-05-17 10:36; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130517.1036.002.html>

引文格式: 石加联, 徐常亮, 韩冰, 等. 空化水喷丸诱导 45 钢残余应力场的数值模拟与验证 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(3): 15-20.

## 0 引言

空化水喷丸技术(water-jet cavitation peening, 简称 WCP, 在国际上有 cavitation shotless peening 的提法, 简称 CSP)是合理利用淹没式高速高压水射流空化后形成的大量微小空泡群, 空泡群在固体边界附近溃灭时可产生高达上 GPa 的冲击波压力, 利用该压力来强化金属材料<sup>[1-3]</sup>。目前的研究结果已经证明该技术和其他喷丸技术一样能在金属零部件的近表面形成压缩残余应力层, 进而提高零部件的疲劳寿命<sup>[4-6]</sup>。但目前针对其工艺中的空化行为及其残余应力形成机理等基础理论的研究还相对比较薄弱, 从很大程度上阻碍了该技术装置的进一步发展和完善。

2004年 Kunaporn 等人<sup>[7]</sup>首先将有限元法应用于预测水射流喷丸工艺诱导残余应力的研究, 2010年董星等<sup>[8]</sup>模拟了不同压力作用下水射流在 2A11 铝合金材料表层产生的残余应力场, 有限元计算结果和试验结果近似吻合。2009年 Han 等<sup>[9]</sup>用 Ansys 有限元软件模拟了空化水喷丸工艺诱导的压缩残余应力场分布, 但是并没有合理给出冲击压力载荷峰值, 也没有解决多个冲击波载荷连续作用后残余应力场的最终分布的求解问题。

文中按照 45 钢空化水喷丸强化的试验条件, 利用 ANSYS/LS-DYNA 分析平台, 建立合适的工艺过程中的非线性动力学有限元模型, 并考虑网格划分、载荷大小、加载历史等关键问题, 模拟该工艺诱导压缩残余应力场分布规律, 最后与用 X 射线衍射法测定的残余应力分布结果进行对比分析。

## 1 试验原理与方法

### 1.1 强化原理

如图 1 所示, 在空化水喷丸工艺中, 淹没式高速高压水射流空化后会在射流方向上形成大量的微小空泡群, 单个微小空泡在材料的表面溃灭时可产生高达数 GPa 的冲击波压力, 利用该压力可以使金属材料的近表层产生弹塑性变形, 形成压缩残余应力层来强化金属材料, 进而提高材料的疲劳强度。

### 1.2 试验方法和工艺条件

如图 1 所示, 将几何尺寸为  $80\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times$

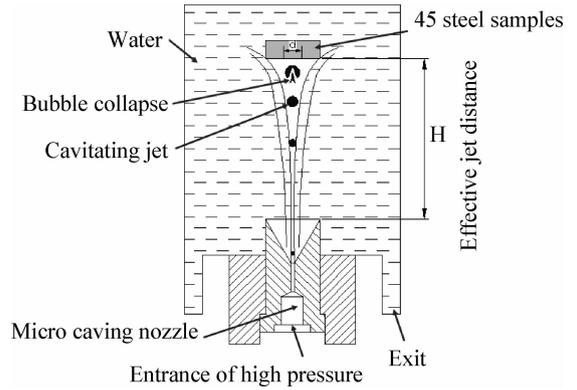


图 1 强化原理及试验方法示意图

Fig. 1 Schemes of strengthening principle and test method

5 mm 的 45 钢板固定在垂直于射流方向的专用夹具上, 选择喷嘴距离  $S = 90\text{ mm}$ , 喷丸时间  $t = 30\text{ min}$  的工艺条件对工件进行空化水喷丸强化处理。

### 1.3 残余应力测试方法

利用微小部残余应力测定装置 (PSPC/MI-CRO) 对上述工艺条件诱导残余应力的大小进行测定。具体测定条件如下: 采用传统的  $\sin^2\Psi$  方法, 管电压 40 kV, 管电流 40 mA, 采用 Cr 靶, 入射光斑 1 mm, 衍射峰为  $2\theta = 156.4^\circ$ , 测量晶面  $\alpha\text{-Fe}(211)$  面, 应力常数  $K = -299\text{ MPa}/^\circ$ 。为了获得残余应力在深度方向上的分布规律, 采用电解抛光装置 (Proto electrolytic polisher - model 8818) 对试样进行剥层腐蚀。

## 2 有限元模型的建立

### 2.1 材料本构模型

在双线性各向同性强化模型中用到的弹簧钢 45 钢的力学性能参数如表 1 所示。

表 1 45 钢的力学性能参数

Table 1 Performance parameters of 45 steel

Properties	Value
Density $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 800
Poisson's ratio $\nu$	0.28
Elastic modulus $E/\text{GPa}$	210
Dynamic yield strength $\delta_y/\text{MPa}$	650
Tangent modulus $\tau/\text{MPa}$	0

45 钢在屈服阶段内,本次模拟是小应变,将切线模量设为 0,可满足本次模拟的需要,该模型遵循一维应变弹性阶段本构关系,服从 Mises 屈服准则,当材料中的冲击波压力大于材料 Hugoniot 弹性极限(HEL)时,材料产生屈服,材料的动态屈服强度为<sup>[10]</sup>:

$$\sigma_y^{dyna} = HEL \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (1)$$

根据胡克定律,表面塑性应变为:

$$\epsilon_p = \frac{-2HEL}{3\lambda + 2\mu} \left( \frac{P}{HEL} - 1 \right) \quad (2)$$

其中, $P$ 为冲击压力, $\nu$ 是泊松比, $\mu$ 和 $\lambda$ 是拉梅常数。

## 2.2 有限元模型

如图 2 所示,参照试验中的实体模型,并考虑减少冲击波在边界上的反射影响,建立尺寸为高 40 mm、直径为 40 mm 的 1/4 圆柱体模型。在模型 X、Y 坐标方向上将冲击区的长度 10 mm 划分 40 等份,尺寸比例为 1,其余部分划分 40 等份,尺寸比例为 0.1,在 Z 方向上将冲击区域 0.5 mm 划分 30 等份,尺寸比例为 1,其余部分为 39.5 mm,划分 30 等份,尺寸比例为 0.1,模型共形成 315 000 个单元。如图 2 所示,模型的两个剖面上设置对称边界,模型的侧面与底面设置为无反射边界,让应力波在边界透射,以模拟三维半无限实体。按照建模分析的边界条件处理给模型施加边界条件。

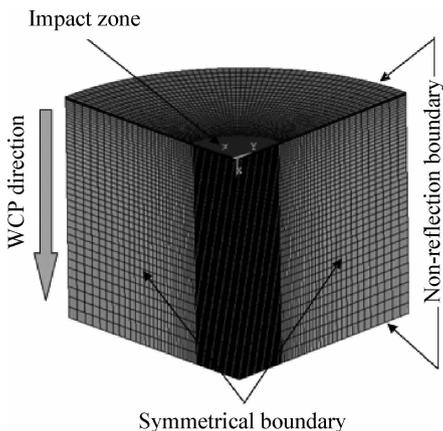


图 2 有限元模型边界条件示意图

Fig. 2 Boundary conditions schemes of finite element model

在空化水喷丸工艺中,冲击压力时程曲线如

图 3 所示。冲击波载荷的大小、加载方式以及加载时间是影响数值模拟精度的关键。日本学者远藤用钢板表面发生汽蚀斑点的有无和大小来计测磁致伸缩振动法产生的气穴现象时产生的冲击波压力,压力值高达 1.2~1.4 GPa<sup>[11]</sup>。

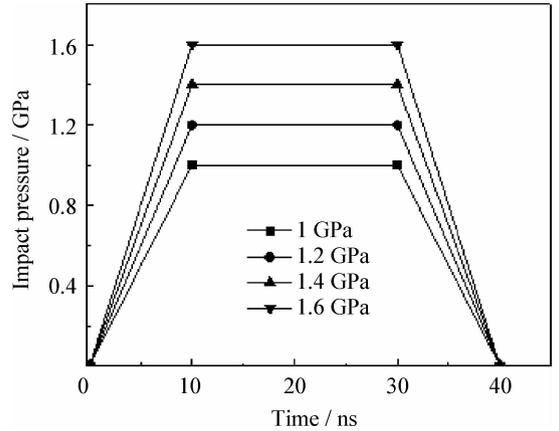


图 3 冲击压力时程曲线

Fig. 3 Impact wave pressure changes as a function of time

因此文中冲击波峰值压力选用  $P=1, 1.2, 1.4$  和  $1.6$  GPa,冲击压力作用时间取 40 ns,采用多个冲击波连续作用的加载方式,来解决峰值载荷大小及加载时间的难题,为了准确地获得材料对冲击应力波的动力响应,求解时间必须要大大长于冲击应力波的时间,可以将材料动能趋于零的时间作为求解时间,所以取单个冲击波的求解时间为  $1 \times 10^5$  ns,由于时间足够长,此时材料内动能趋于零,内能趋于恒量,因此可用此时的残余应力场来表达最后的残余应力场。

## 3 模拟结果及分析

### 3.1 动力学过程分析

在 ANSYS/LS-DYNA 的后处理器中,可以动态显示冲击应力波在模型中的动态传播过程,图 4 显示了冲击应力波在有限元模型中传播不同时刻的 Von Mises 应力云图。图 4(a)中冲击应力波正从模型表面传入模型内部正向底部传播,模型 Von Mises 等效应力为 339 MPa,此时的等效应力为瞬态等效应力,不是最大等效应力,因此此时的等效应力小于材料的屈服强度。

根据  $t=L/C_0$ , ( $L$ 为模型高度, $C_0$ 为弹性波速,这个时间值与理论计算值是一致的,其中:

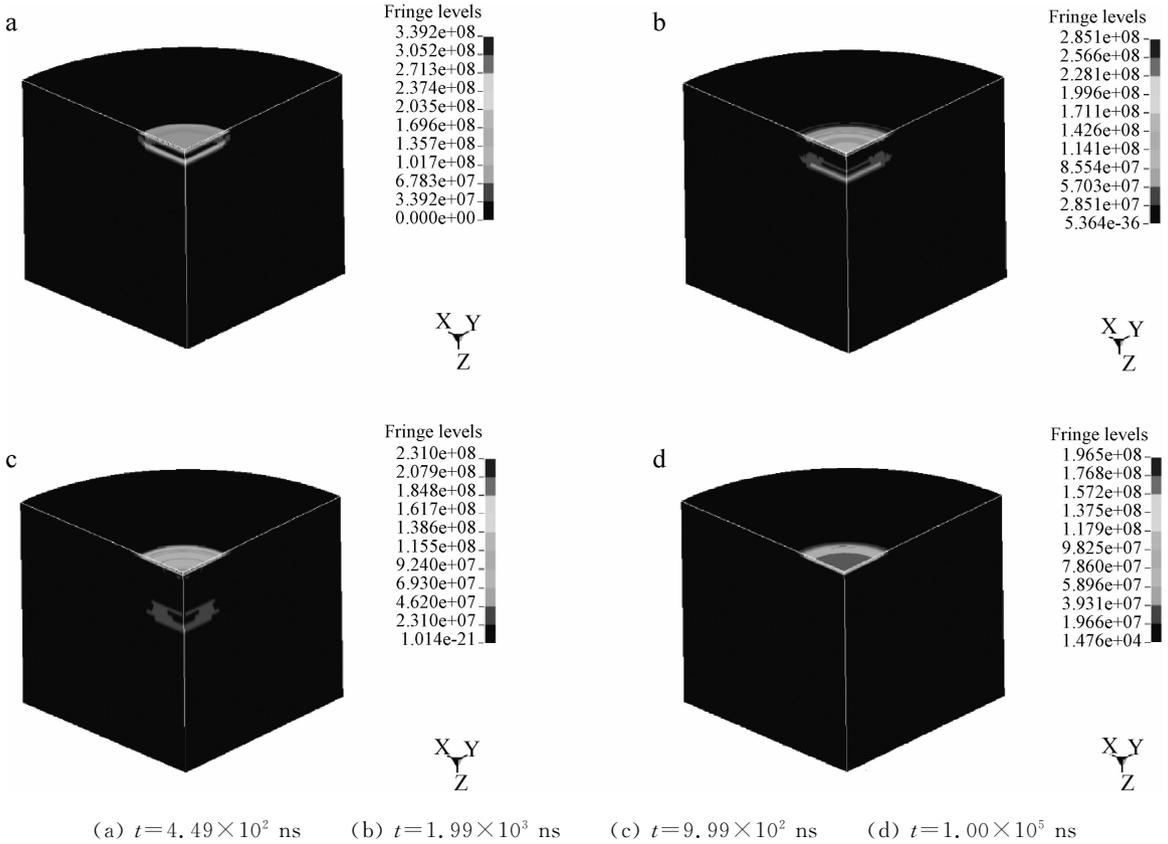


图4 应力波动态传播过程

Fig. 4 Propagation process of dynamic stress wave

$$C_0 = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)\rho}} \quad (3)$$

式中<sup>[12]</sup>, E为弹性模量,  $\rho$ 为材料密度。

图4(b)显示当时间  $t = 1500$  ns 时,模型最大 Von Mises 等效应力已下降为 285 MPa;图4(c)显示当时间  $t = 2250$  ns 时,应力波已经传播至模型的中部,能量逐渐衰减,模型最大 Von Mises 等效应力已下降为 207 MPa;在图4(d)中,材料

内部的应力波与材料不断相互作用后能量不断衰减,最终在模型表层已形成稳定的残余应力场,最大 Von Mises 等效应力达到 196 MPa。

### 3.2 最终残余应力模拟结果

图5是经过15个连续冲击波作用后形成在近表层中的残余应力分布图。

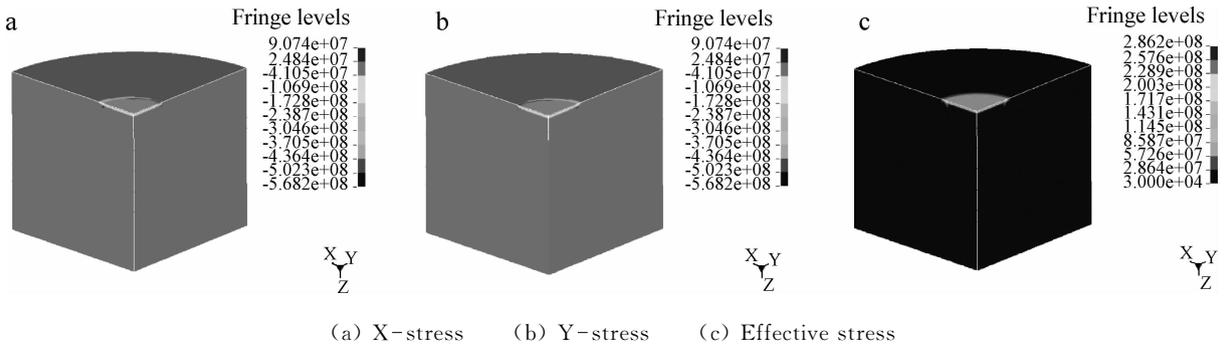


图5 最终残余应力场分布

Fig. 5 Field distribution of final residual stress

从图 5(a)和图 5(b)中可以看出,X 方向和 Y 方向上的残余应力分布呈对称分布,在数值上是一致的,这一模拟结果和残余应力的实验测定结果也是一致的。在受到 15 个连续冲击波作用后形成在近表层中的压缩残余应力达到约 -568 MPa。图 5(c)是最终等效应力分布图,可以看出等效应力达到 286 MPa。

### 3.3 不同峰值载荷对残余应力的影响

为了研究深度方向上不同节点残余应力随冲击波数目的增加的变化规律,在模型的近表层上选取 4 个典型节点,4 个典型节点在有限元模型中的位置如图 6 所示。

图 7 显示在不同峰值载荷条件下冲击方向上典型节点残余应力随冲击波作用次数增加的变化规律。由图可见,不同峰值载荷条件下,不同节点残余应力随冲击波数目的变化规律基本一致。但随着冲击波数目的增加,不同节点的残余压应力也不断地递增,表层节点的残余应力递增幅度明

显比内部节点的快。从数值上看,表面残余压应力经 15 个冲击波连续作用后,当峰值载荷  $P=1.0$  GPa,残余应力的最大值约为 -251 MPa,当峰值载荷  $P=1.6$  GPa,残余应力的最大值约为 -827 MPa,此时由于载荷峰值较大,网格划分不再适合,因此使残余应力的模拟结果偏大。

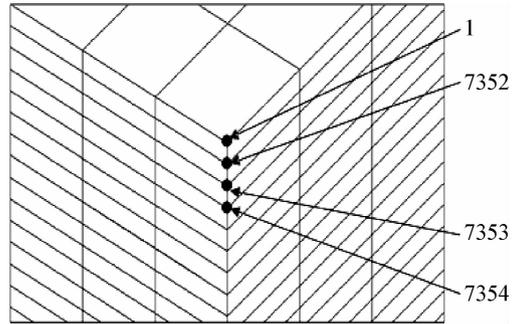
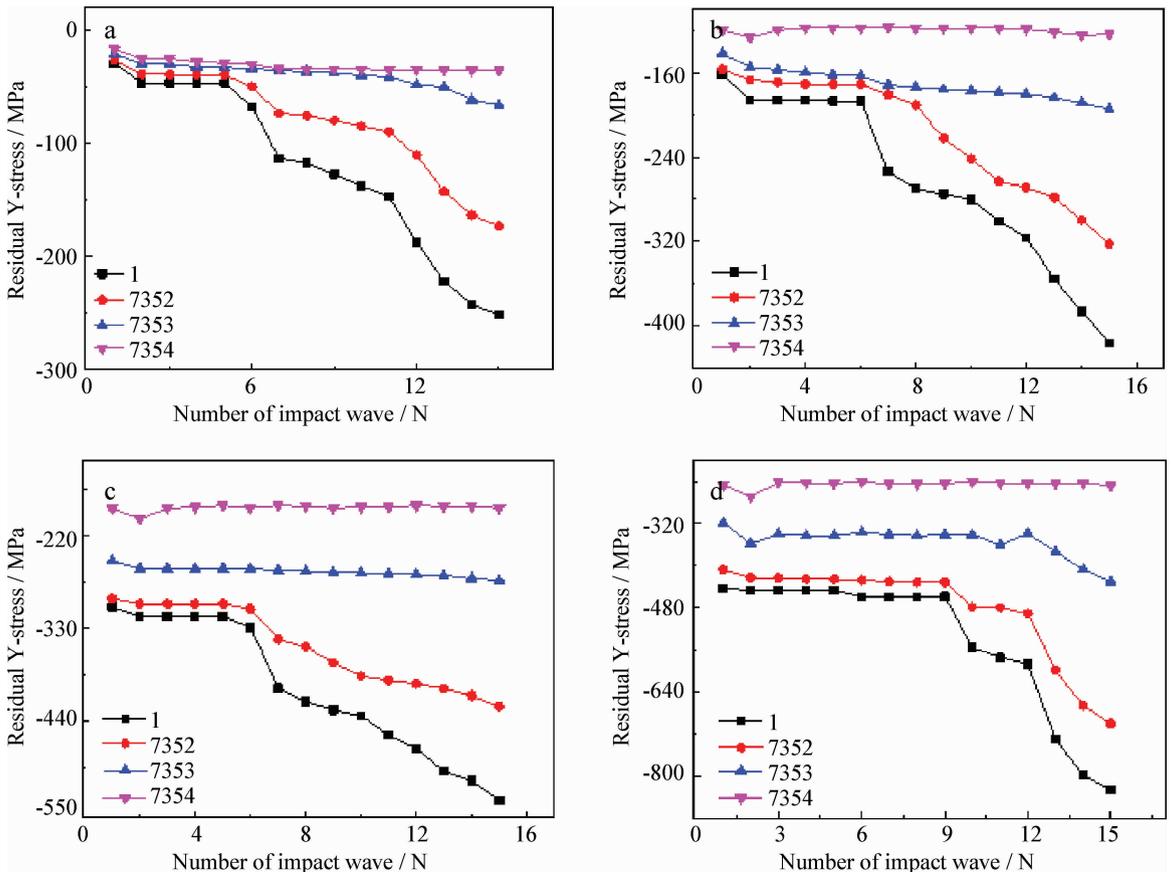


图 6 典型节点在有限元模型中的位置

Fig. 6 Typical nodes in the position of the finite element model



(a)  $P=1$  GPa (b)  $P=1.2$  GPa (c)  $P=1.4$  GPa (d)  $P=1.6$  GPa

图 7 不同节点残余应力随冲击波数目的变化

Fig. 7 Residual stress change as a function of number of impact wave at different nodes

## 4 模拟结果和实验结果的对比

图8是不同峰值载荷条件下,15个冲击波连续作用后,残余应力分布的数值模拟结果和实验测量结果的对比图。

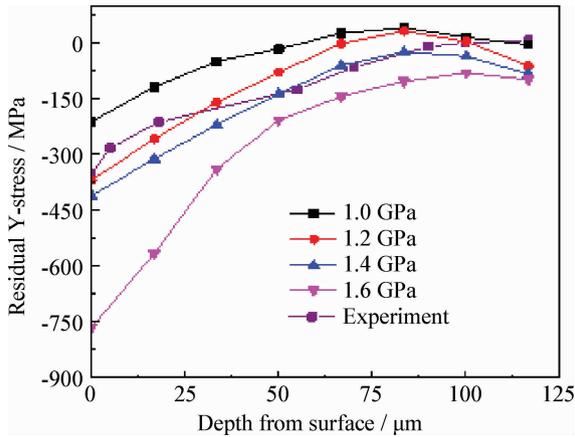


图8 残余应力模拟和实测结果的比较

Fig. 8 Comparison between simulation and test results of residual stress

由图可见,当峰值载荷  $P=1.2, 1.4$  GPa 时的模拟结果和喷丸时间  $t=30$  min 时的实测结果有很好的—致性。与实测结果相比,在模拟结果中位于近表层  $0\sim 35\ \mu\text{m}$  范围内残余应力数值偏小;在  $35\sim 100\ \mu\text{m}$  范围内,压缩残余应力的数值模拟结果比试验测定结果略大,超过  $100\ \mu\text{m}$  深度以后数值模拟结果略小。

## 5 结论

(1) 利用 ANSYS/LS-DYNA 分析平台,可以获得不同峰值载荷条件下空化水喷丸工艺在 45 钢材料表层形成残余应力场分布规律,通过冲击波的动态过程分析可知,冲击波压力和材料相互作用是比较复杂的过程。

(2) 用不同的峰值载荷条件和多冲击波连续作用的方法,有效的解决了载荷大小和加载历史的关键问题,在冲击压力一定的条件下,残余应力的大小和残余应力层的深度都随着冲击波数目的增加而增加,并且材料的强度得到了强化,特别是当载荷为  $1.6$  GPa 时,由于载荷较大,网格划分不太适应此时的载荷等原因,因此数值模拟获得的最终残余应力值偏大。

(3) 当峰值载荷  $P=1.2, 1.4$  GPa 时残余应力的模拟结果和喷丸时间  $t=30$  min 时的实测结果能较好吻合,说明运用 ANSYS/LS-DYNA 分析平台可以实现空化水喷丸工艺诱导的残余应力场分布的预测。

## 参考文献

- [1] Soyama H, Kusaka K, Saka M. Peening by the use of cavitation impacts for the improvement of fatigue strength [J]. Journal of Materials Science Letters, 2001, 20(13):1263-5.
- [2] Odhianabo D, Soyama H. Cavitation shotless peening for improvement of fatigue strength of carbonized steel [J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25 (9/10/11): 1217-22.
- [3] Ramulu M, Kunaporn S, Jenkins M, et al. Fatigue performance of high-pressure water jet peened aluminum alloy [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2002,124(1): 118-123.
- [4] Soyama H, Park J D, Saka M. Use of cavitating jet for introducing compressive residual stress [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2000,122(11):83-89.
- [5] Ramulu M, Kunaporn S, Arola D, et al. Waterjet machining and peening of metals [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2000,122(1): 90-95.
- [6] Kunaporn S, Ramulu M, Hashish M. Mathematical modeling of ultra high pressure waterjet peening [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2005, 127:186-192.
- [7] Kunaporn S, Ramulu M, Jenkins M G, et al. Residual stress induced by waterjet peening: A finite element analysis [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2004, 126 (3): 333-340.
- [8] 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(9): 189-194.
- [9] Han B, Ju D Y. Compressive residual stress induced by water cavitation peening: A finite element analysis [J]. Materials & Design, 2009, 30(8): 3325-32.
- [10] Ding K, Ye K. Three-dimensional dynamic finite element analysis of multiple laser shock peening processes [J]. Surface Engineering, 2003,19(5): 351-358.
- [11] Kato H. Basic theory and recent progress on cavitation [M]. Tokyo: Makisyoten Press, 2002.
- [12] 杨桂通. 塑性动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 426-458.

作者地址: 辽宁省鞍山市千山中路 185 号

114051

辽宁科技大学机械工程与自动化学院

Tel: (0412) 5928 271(韩冰)

E-mail: hanb75@126.com