

# 超声冲击改善高强钢焊接接头残余应力的数值模拟分析

张晓<sup>1</sup>, 邵军<sup>2</sup>, 姚润钢<sup>1</sup>, 王任甫<sup>1</sup>, 薛钢<sup>1</sup>

(1) 中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471039; 2 海军材料工程办公室, 辽宁 鞍山 114000)

**摘要:** 通过将数值模拟技术应用于超声冲击工艺的研究, 合理处理超声冲击加载方式和接触条件, 建立了超声冲击工艺有限元分析模型, 计算结果与试验结果吻合较好。研究结果表明, 10N 5CMoV 钢焊趾部位存在高达 660 MPa 的残余拉应力, 超声冲击技术能够改善其残余应力分布, 在焊趾部位形成超过 400 MPa 的残余压应力。

**关键词:** 超声冲击; 数值模拟; 高强钢; 残余应力

中图分类号: TG 407 文献标识码: A

焊接引起的残余应力对材料力学性能有重大影响, 高的残余拉应力能导致结构内部产生裂纹, 降低结构的抗拉强度和疲劳强度<sup>[1]</sup>。超声冲击方法是一种有效的提高焊接接头疲劳强度方法, 它可以改善焊趾部位几何形状, 消除焊趾部位表面缺陷和产生有益于提高疲劳强度的压缩残余应力<sup>[2~5]</sup>。认识超声冲击前后焊接接头处残余应力的变化规律是工程应用中十分关注的问题。从目前发表的文献来看, 国内尚未进行过超声冲击对高强钢焊接残余应力影响的研究, 而且以往对超声冲击改善焊接残余应力的研究均是通过实验测试进行。仅仅依赖于实验测试, 不但费时费力且受到许多条件的限制, 因此本文借助于大型工程软件, 通过三维有限元分析研究超声冲击技术对高强钢焊接接头残余应力的影响。

## 1 数值计算分析

### 1.1 计算模型

图 1 为所建立在焊接接头上进行超声冲击计算的模型。模型尺寸同实际试板一样为 300 mm × 300 mm × 26 mm, 冲击针头直径为 3 mm。冲击针头在冲击过程中基本没有变形, 将其定义为离散刚性体, 将被冲击试件定义为可变形接触体。

在实际冲击过程中针头和被冲击试板间的摩

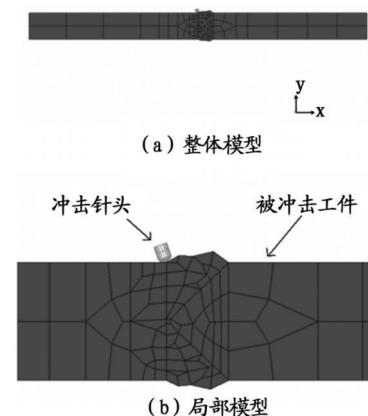


图 1 超声冲击数值计算模型

擦作用会使温度升高, 但是升温范围小、作用时间短, 因此忽略相互之间的摩擦作用。将焊接所形成的残余应力作为超声冲击计算的初始条件。

### 1.2 超声冲击加载

超声冲击的主要加载过程是通过谐振作用冲击针头以 100~120 Hz 频率冲击被处理工件<sup>[6]</sup>。

对于冲击过程加载, 根据冲击频率和振幅, 设定冲击针在一个冲击周期内运动一定的位移。根据实际试验试板所产生的塑性变形, 考虑一定的弹性回复, 确定冲击针头的位移为 0.35 mm。对于超声冲击的加载方式, 根据应力波传递理论, 弹性波和塑性波在固体中的传播速度如式(1)和(2)所示<sup>[7]</sup>:

$$C_l^e = \sqrt{\frac{(1-\gamma)E}{(1+\gamma)(1-2\gamma)}} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (1)$$

$$C_l^p = \sqrt{\frac{E}{3(1-2\gamma)}} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

$\gamma$  是泊松比,  $\rho$  是材料密度,  $E$  是弹性模量。

可知 10N 5CrMoV 钢弹性波  $C_l^e$  的速度为 5759m/s 和塑性波  $C_l^p$  的速度为 4431m/s, 它们在 26mm 厚板中的传播时间  $t$  和  $t_p$  分别为  $9.029 \times 10^{-6}$  s 和  $11.7 \times 10^{-6}$  s, 超声冲击一个冲击周期时间大约  $10^{-2}$  s, 远远大于弹性波和塑性波在试板中传递的时间。因此对超声冲击的加载采用静态加载方法。

### 1.3 接触理论

接触探测是超声冲击过程模拟需要解决的一个关键问题。描述超声冲击瞬间接触过程需要非常精确的网格划分, 本文是在完成多层多道焊数值计算的基础上进行超声冲击计算, 若网格过细会导致整个计算量极为庞大, 为此采用了一个有效的控制方案, 使接触探测距离的误差范围发生偏移, 以便在接触体外表面的接触距离误差比内表面的接触距离误差稍大。这种控制方法只需要设定一个偏移系数, 实现接触距离误差判断, 通过这种方法保证了计算精度, 又使计算费用较为合理。

## 2 试验方案和试验过程

### 2.1 试板焊接

焊接试件为具有纵向焊缝的对接焊接接头, 试板尺寸为 250 mm × 150 mm × 26 mm, 如图 2 所示, 母材为屈服强度超过 785MPa 的 10N 5CrMoV 钢。

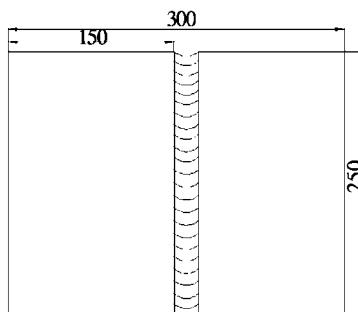


图 2 焊接试板示意图

对接接头开 K 型坡口, 钝边为 1 mm, 每面焊 6 道, 余高为 2 mm 左右。焊接工艺如表 1 所示。

表 1 气保焊试板焊接工艺参数

试板 规格	预热 温度 /℃	道间 电流 /A	电压 /V	焊速 · m min <sup>-1</sup>
26mm	100~130	200~360	26~35	22~39

### 2.2 超声冲击处理

试验所采用超声冲击设备为天津大学研制的 HJ-2 型超声冲击仪。冲击处理操作方法如下: 将超声冲击枪垂直焊缝并对准焊趾部位, 冲击针沿焊缝方向排列, 沿焊趾进行处理。在冲击过程中, 给冲击枪施加一定的压力, 防止冲击枪摆动, 以获得更好的光滑过渡外形。

### 2.3 残余应力测试

高强钢应力峰值主要分布在距焊缝很窄的范围内<sup>[8]</sup>。所以在本文的测试布点主要集中在距焊缝 40 mm 内的范围。X 射线残余应力测试各测试点距 K 型坡口直边焊趾处距离见表 2。

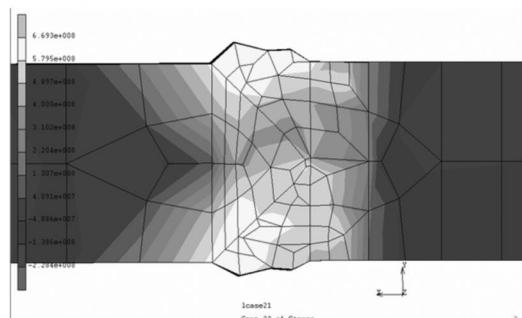
表 2 测试各点距 K 型坡口直边焊趾处距离

测试点	距焊趾距离 /mm
1	0
2	2
3	5
4	10
5	15
6	25
7	41

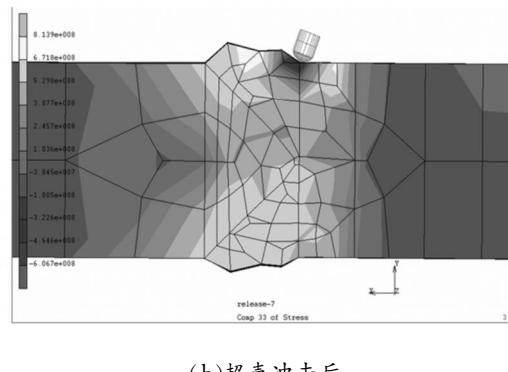
## 3 结果分析与讨论

### 3.1 超声冲击计算结果

图 3 为超声冲击前后冲击位置纵向残余应力云图对比, 可以看出超声冲击前后在冲击位置纵向残余应力发生了很大变化。焊趾位置由冲击前的拉伸残余应力变为压缩残余应力。



(a)超声冲击前



(b)超声冲击后

图 3 残余应力云图对比

图 4 为选取冲击位置沿焊缝中垂线上节点残余应力对比情况,可以看出最大纵向残余应力由 660 MPa 降低到最小 -600 MPa 降幅达到 1200 MPa; 最大横向残余应力由 550 MPa 降低到最小 -450 MPa 降幅达到 1000 MPa。

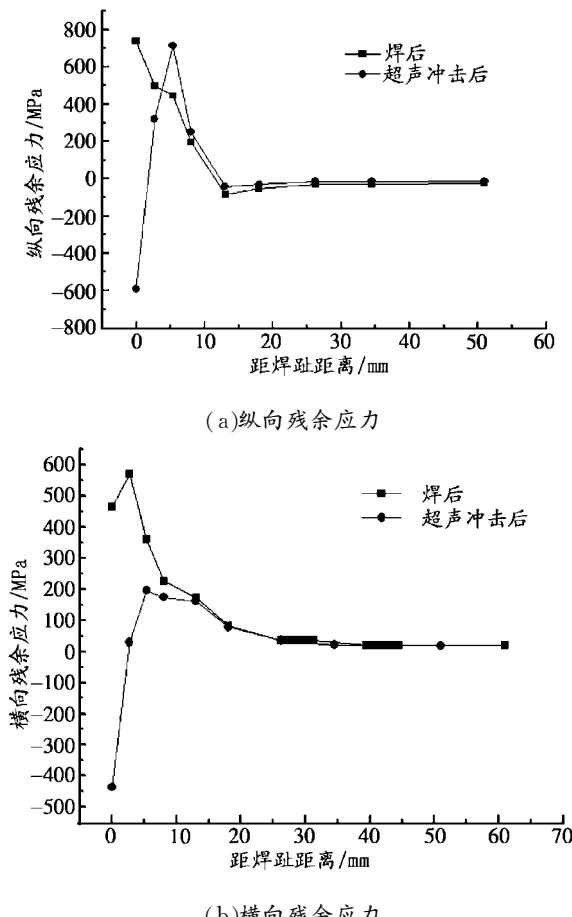


图 4 计算残余应力分布对比

### 3.2 计算结果与实测对比

图 5 所示为超声冲击数值计算结果和 X 射线衍射实测结果对比,可以看出纵向残余应力和横向残余应力实测同计算结果基本一致,特别是

横向残余应力吻合较好。但是残余应力峰值和冲击位置边缘处的纵向残余应力计算结果同实测存在一定误差。计算所获得的残余应力峰值要高于实测值大约 150 MPa。在冲击位置边缘计算所得的纵向残余应力高达 650 MPa 而实测只有 200 MPa。

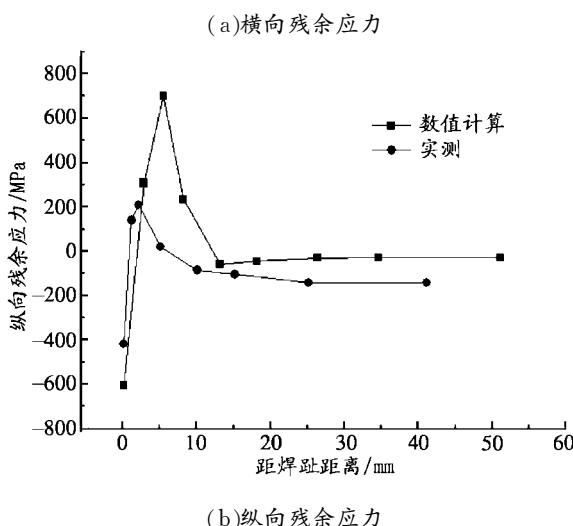
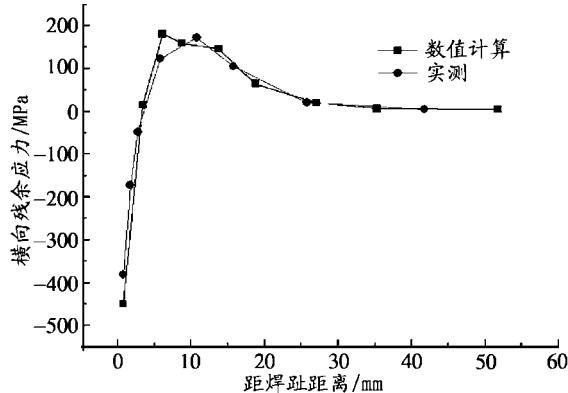


图 5 计算和实测残余应力分布对比

产生误差的原因主要是: (1) 焊趾部位组织差异较大影响 X 射线衍射法测试精度。(2) 靠近超声冲击边缘的位置塑性变形剧烈, 导致应力分布在较窄范围内变化梯度很大, 实际冲击过程中此位置很可能形成了金属屑已经脱离试样, 这一点在冲击过程中不断有金属屑释放出来可以证明。计算模型由于网格尺寸划分的原因未能体现处金属屑的脱离, 因此在所获得的应力分布中仍保留这部分高应力的节点。

### 4 结论

(1) 通过选择合理的加载方式和接触条件,  
(下转第 32 页)

# Research on Impact Properties of Several Alloy Materials by Instrumented Impact Test

CHEN Qing-lei

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China)

**Abstract** In the paper series temperature impact tests of D36, 14MnVTRe and 10CrNiCu steels are carried out on instrumented impact tester. The results show that ductile-brittle transition temperature of these steels is lower and it is more accurate to use crack propagation energy  $W_p$  as criterion for the ductile-brittle transition temperature. Fracture energy is consumed mostly on crack extension when test temperature is higher than ductile-brittle transition temperature, while it is consumed mostly on crack formation when test temperature is lower than ductile-brittle transition temperature.

**Keywords** Instrument Impact Ductile-brittle transition temperature Crack forming energy Crack propagation energy

(编辑:房威)

(上接第 6 页)

能够实现超声冲击技术的数值模拟。超声冲击的计算结果和试验结果吻合较好。

(2) 数值计算和试验结果证明超声冲击技术能够消除高强钢焊趾部位的拉伸残余应力, 并能在冲击位置形成压缩残余应力, 对于高强钢在机械结构中的应用具有重要价值。

## 参考文献:

- [1] 焦馥杰. 焊接结构分析基础 [M]. 上海: 上海科学技术文献出版社. 1991, 58~69.
- [2] Statnikov E S. Applications of operational ultrasonic impact treatment technologies in production of welded joints [J]. Welding in the World 2000, 44(3).
- [3] Cheng O, John W, Fisher Henry J et al. Residual stress modification by post-weld treatment and its beneficial effect on fatigue strength of welded structures [J]. International Journal of Fatigue 2003, 25, 1259~1269.
- [4] 王东坡. 改善焊接接头疲劳强度超声冲击方法的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2000.
- [5] Huo L X, Wang D P, Zhang Y F, et al. Investigation on improving fatigue properties of welded joints by ultrasonic impact treatment method [J]. Welding in the world 2001, 45(3), 12~16.
- [6] Sugata Roy. Experimental and analytical evaluation of enhancement in fatigue resistance of welded details subjected to post-weld ultrasonic impact treatment [D]. University of Lehigh, 2006.
- [7] Hu Yongxiang, Yao zhenqiang, Hu Jun. 3-D FEM Simulation of laser shock Processing [J]. Surface & Coating Technology 2006(201), 1426~1435.
- [8] Koichi Masubuchi. Analysis of Welded Structures [M]. Pergamon press[M]. 1 ed 1980.

## FEM Analysis of Residual Stress Induced by Ultrasonic Impact Treatment in Welded Joints of High Strength Steel

ZHANG Xiao SHAO Jun YAO Run-gang WANG Ren-fu XUE Gang

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China)

**Abstract** Finite element numerical simulation was applied in the research of ultrasonic impact treatment with selection of proper loadcase class and contact condition, a model of ultrasonic impact treatment was established. The calculation results are in agreement with the experiment results. The results show that tensile residual stresses in the welds of 10N5CrMoV steel ( $R_{p0.2} \geq 785 \text{ MPa}$ ) is 660 MPa, ultrasonic impact treatment has significant effects on the residual stress and introduces compressive residual stress in the welded joints.

**Keywords** Ultrasonic impact treatment Finite element High strength steel Residual stress

(编辑:房威)