

超声滚压加工对 X80 管线钢焊接残余应力的影响

王炳英, 詹发福, 李慧玲, 高志伟

(中国石油大学(华东) 机电工程学院, 青岛 266580)

摘 要: 建立超声表面滚压加工(ultrasonic surface rolling process, USRP)的三维有限元模型,开发了模拟焊接的移动双椭球热源子程序,利用有限元软件 ABAQUS 模拟了 X80 管线钢焊缝不同方向的焊接残余应力,在此基础上叠加 USRP 的超声振动与静载荷的综合作用,模拟了表面塑性变形、应力和应变,耦合后分析了 USRP 前后残余应力的变化规律。结果表明,经过 USRP 处理,X80 管线钢表面焊缝区由三向残余拉应力变为三向残余压应力,随着 USRP 次数的增加,残余压应力数值不断增大,残余应力 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 变化规律基本相同。

关键词: 超声表面滚压加工; 有限元模拟; 残余应力

中图分类号: TG 441.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)12-0087-04

0 序 言

目前降低残余应力的方法主要包括焊后热处理、力学形变法和温差形变法^[1-3]。然而焊后热处理对一些大型构件较难实现、成本高,而且容易改变材料的性能;力学形变法和温差形变法通过协调母材与焊缝变形降低残余应力,改变构件尺寸,有一定的局限性。

超声滚压加工(USRP)技术是一种利用喷丸冲击能与静载滚压相结合的加工方式^[4-6],能够细化材料表面晶粒至纳米量级,提高材料表面硬度和疲劳强度。国内外针对各类表面纳米化方法进行了大量研究,Bagherifard 等人^[7]研究发现 39NiCrMo3 喷丸加工后疲劳强度提高,但是高动能喷丸会使表面粗糙度增加;Kim 等人^[8]研究了喷丸处理的中碳钢耐疲劳性能,发现喷丸加工后中碳钢疲劳寿命得到改善、疲劳极限提高;Wang 等人^[9]研究发现 USRP 加工后 40Cr 表层获得纳米层、表面产生残余应力。

目前对于 USRP 的研究主要通过试验来完成,而采用数值模拟方法进行研究的报道相对较少,且关于 USRP 改善焊接接头的焊后残余应力的研究尚未见报道。文中通过开发模拟焊接的移动双椭球热源子程序,利用有限元软件 ABAQUS 模拟焊缝的 USRP 过程,得到超声滚压加工前后残余应力的变化规律,分析了加工次数对超声滚压残余应力场分布的影响规律。

1 有限元模型

1.1 温度场模拟

由于焊接方法为焊条电弧焊,采用由两个前后 1/4 椭球组成的标准 Goldak 双椭球热源可以较为准确的模拟焊条电弧焊热源模型,数学表达式如下^[10],即

模型前半部分椭球的体热流密度分布为

$$q_{it}(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_i Q}{abc_i \pi \sqrt{\pi}} e^{-3\Gamma(x-vt)^2 Y c_i^2} e^{-3y^2/a^2} e^{-3z^2/b^2} \quad (1)$$

模型后半部分椭球的体热流密度分布为

$$q_{ii}(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_i Q}{abc_i \pi \sqrt{\pi}} e^{-3\Gamma(x-vt)^2 Y c_i^2} e^{-3y^2/a^2} e^{-3z^2/b^2} \quad (2)$$

式中: a, b, c_i, c_f 为热源形状参数; Q 为热输入功率; v 为焊接速度; f_i, f_r 为模型前后椭球的能量分配系数。通过 FORTRAN 语言编写热源子程序 DFLUX,在 ABAQUS 中调用该子程序进行计算。

1.2 几何模型的建立及网格划分

USRP 处理过程中通过工作头将静压力和超声冲击振动传递到旋转的机械零部件表面,其工艺参数主要包括:机床主轴转速、工作头进给量、静压力和振动频率等^[9]。利用现有的计算机技术直接模拟 20 kHz 超声频率的机械振动显然难以实现。由于对工件表面施加静载和超声频率的冲击后材料表层发生强烈塑性变形,且不同静载对应不同的塑性变形量,因此文中通过给定工作头一定的位移载荷,对

USRP 的冲击过程进行模拟。

有限元三维模型尺寸: X80 管线钢长宽高为 240 mm × 240 mm × 14.6 mm, 焊缝为“V”形坡口, 坡口 40°, 根部间隙 1.5 mm. 采用双层焊接并利用生死单元法形成焊缝金属. 为了更好的得到焊缝表面残余应力分布, 模型网格局部进行加密, 网格划分模式如图 1 所示, 共有 83 582 个节点和 76 650 个单元. 温度场采用 DC3D8 (8 节点线性传热四面体) 单元, 应力场计算采用 C3D8 (8 节点线性实体) 单元. 热分析和力分析采用相同的模型结构和节点数.

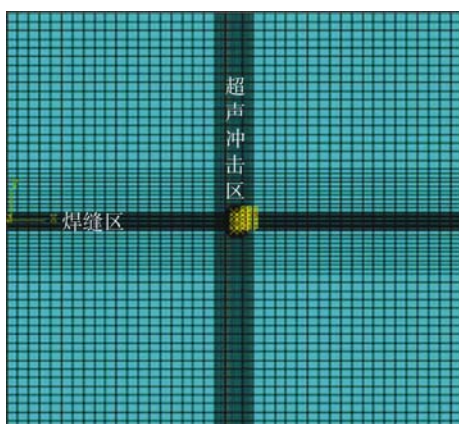


图 1 网格划分示意图

Fig. 1 Schematic drawing of mesh generation

USRP 工作头模型为刚性体. USRP 加工模拟如图 2, 因为相关数据的缺乏, 为减少计算时间简化工作头集合 1 下压 0.1 mm, 然后工作头集合 2 下压 0.1 mm.

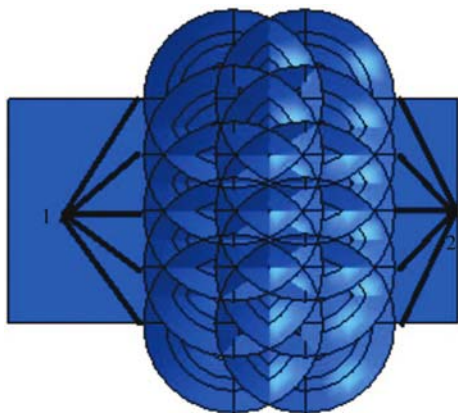


图 2 USRP 加工模拟示意图

Fig. 2 Schematic diagram of USRP

1.3 模型参数

使用有限元分析软件 ABAQUS 采用顺序耦合热应力分析技术. 首先, 热传导分析得到焊接温度

场; 在应力分析中, 温度场作为外部载荷产生热应变; 最后, 进行 USRP 加工的数值模拟. 焊接工艺参数如表 1.

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Welding process parameter

	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(cm \cdot min^{-1})$
根焊	90	20	6
填充、盖面焊	230	18.5	18

在焊接过程中, 构件与周围环境通过对流和辐射进行热交换. 根据牛顿定律^[11], 对流热交换与气体接触的构件的表面其热流密度同温度之差成比例. 根据描述牛顿冷却方程为

$$q_c = a_c (T - T_0) \quad (3)$$

式中: $(T - T_0)$ 为气体接触的构件表面温差; a_c 为对流系数, 在模拟中取 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. 构件与环境之间的热辐射热交换用斯蒂芬-波尔兹曼定律^[7]描述, 它们之间的净热量传递为

$$q = \varepsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (4)$$

式中: q 为热流率; ε 为辐射发射率, 这里取 0.85; σ 为 Stefan-Boltzman 常数, 取值 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$.

初始温度取 20°C , 在残余应力分析和 USRP 加工分析中, 约束 X80 管线钢底部 4 个端点所有自由度, 限制焊件的刚性移动. 焊接是非线性瞬态热传导需要考虑材料的非线性, 受温度变化的 X80 管线钢材料热物理性能见表 2^[12].

表 2 X80 管线钢热物理性能

Table 2 Thermophysical properties of X80 pipeline

温度 $T/^\circ\text{C}$	比热 $C/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	杨氏模量 E/kPa	屈服 强度 R_{el}/MPa	热导率 $\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	热膨胀 系数 $\alpha/10^{-5} \text{K}^{-1}$
20	423	7.81	210	641	54.42	1.10
100	473	7.79	207	623	54.01	1.15
200	536	7.77	204	597	52.75	1.22
400	662	7.72	187.5	550	47.71	1.35
800	914	7.61	118.6	100	27.55	1.48
1 200	1 160	7.50	39.5	15	40.00	1.34

2 USRP 模拟结果与分析

2.1 残余应力分布情况

沿 x , y 和 z 轴方向的残余应力分别为 σ_x , σ_y 和 σ_z , 图 3 中曲线 0 表示管线钢焊后残余应力 σ_y 分布, 曲线 1 ~ 8 表示经过 1 到 8 次 USRP 处理后表面残余应力 σ_y 分布. 未进行 USRP 加工的焊缝产生了较高的残余拉应力, 但在焊缝中心区残余拉应力急

剧减小. 焊缝残余应力呈阶段变化: 经过 1, 2, 3 次 USRP 加工后焊缝残余应力分布基本相同, 焊缝两侧仍然为残余拉应力, 拉应力从最高处 345 MPa 减小到 43 MPa, 焊缝中心产生残余压应力, 压应力平均 -50 MPa; 经过 4~7 次 USRP 加工后焊缝残余应力分布基本相同, 焊缝所有区域全部产生残余压应力, 压应力在 -130 MPa 以下, 压应力数值最低达到 -174 MPa; 经过第 8 次 USRP 加工焊缝区域残余压应力继续增大, 压应力在 -210 MPa 以下, 最小值达到 -290 MPa. 随着加工次数的增加, 焊缝区域的残余压应力增大.

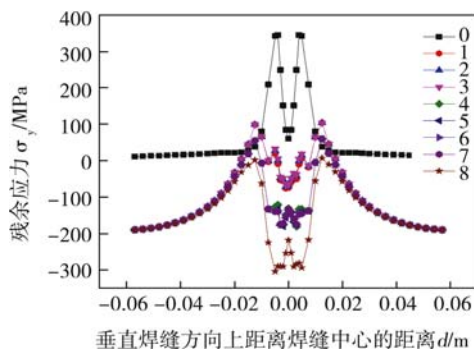


图 3 USRP 前后焊缝表面残余应力 σ_y 分布

Fig. 3 Residual stress distribution (σ_y) before and after USRP

图 4 为焊缝滚压加工前后残余应力 σ_x 的分布曲线, 随着 USRP 加工遍数的增加, 焊缝区纵向残余应力明显降低, 最低达到 -92 MPa. 图 5 为焊缝滚压加工前后残余应力 σ_z 分布曲线, 加工前残余应力 σ_z 呈双峰分布, 加工遍数对 σ_z 的影响规律与 σ_x , σ_y 两类残余应力相同, 分为 3 个阶段, 加工遍数 8 遍时, 应力达到最低, 其数值由 660 MPa 最低降至 -300 MPa. 经 USRP 加工处理后焊缝表面的 3 向残余应力得到明显降低, 在焊缝区产生了 3 轴压缩应力.

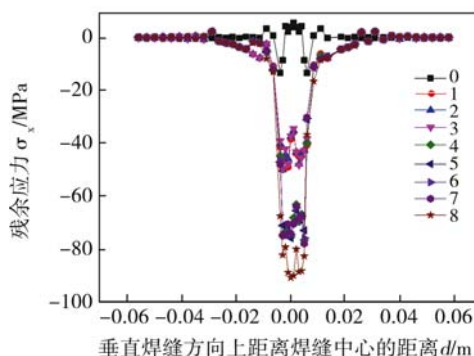


图 4 USRP 前后焊缝表面残余应力 σ_x 分布

Fig. 4 Residual stress distribution (σ_x) before and after USRP

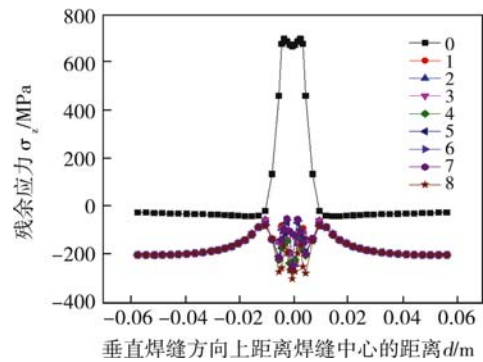


图 5 USRP 前后焊缝表面残余应力 σ_z 分布

Fig. 5 Residual stress distribution (σ_z) before and after USRP

2.2 等效塑性应变分布情况

图 6 为焊缝表面在 USRP 前后的等效塑性应变分布. 曲线 0 表示未进行 USRP 加工管线钢等效塑性应变分布, 曲线 1~8 表示经过 1 到 8 次 USRP 加工处理后等效塑性应变分布. 可以看出, 经 USRP 加工处理后的焊缝区表面等效塑性应变增大. 与残余应力 σ_x 变化规律相同, 分为 3 个阶段: 经过 1~3 次 USRP 加工焊缝区域等效塑性应变分布基本相同, 最大值为 0.133; 经过 4~7 次 USRP 加工焊缝区域等效塑性应变分布基本相同, 最大值为 0.173; 经过 8 次 USRP 加工焊缝区域等效塑性应变值最高值为 0.249. 说明管线钢表层组织发生塑性变形.

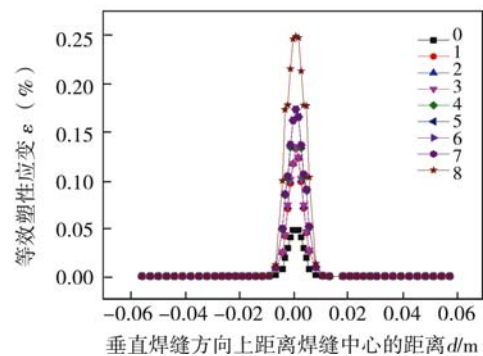


图 6 USRP 前后焊缝表面等效塑性应变分布

Fig. 6 Residual stress distribution on surface of weld before and after USRP

3 结 论

(1) 经 USRP 加工处理后焊缝表面的残余应力得到明显降低, 在焊缝区产生了 3 轴压缩应力.

(2) 经过 1, 2, 3 次 USRP 加工后, 焊缝两侧仍然为残余拉应力, 焊缝中心产生残余压应力, 压应力平均 50 MPa; 经过 4~8 次 USRP 加工后焊缝所有区

域全部产生残余压应力。

(3) 残余应力 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分布规律基本相同, 都分 3 个阶段: 经过 1~3 次 USRP 加工焊缝区域残余应力分布基本相同; 经过 4~7 次 USRP 加工焊缝区域残余应力基本相同; 8 次 USRP 加工焊缝区域残余应力又分为 1 个阶段。

(4) 经 USRP 加工处理后的焊缝区表面等效塑性应变增大, 与残余应力 σ_x 变化规律相同, 分为 3 个阶段: 经过 1~3 次 USRP 加工焊缝区域等效塑性应变分布基本相同; 经过 4~7 次 USRP 加工焊缝区域等效塑性应变分布基本相同; 经过 8 次 USRP 加工焊缝区域等效塑性应变值最高值为 0.249。

参考文献:

- [1] 方洪渊, 董俊慧, 王文先, 等. 焊接结构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [2] 徐连勇, 荆洪阳, 周春亮, 等. 焊后热处理对 P92 钢管道焊接残余应力场的影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(3): 13-16.
Xu Lianyong, Jing Hongyang, Zhou Chunliang, *et al.* Influence of heat treatment on residual stress of P92 steel pipe girth weld [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(3): 13-16.
- [3] Yu Liu, Lijun Wang, Dongpo Wang. Finite element modeling of ultrasonic surface rolling process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(12): 2106-2113.
- [4] 赵晓辉, 王东坡, 王惜宝, 等. 承载超声波提高 TC4 钛合金焊接接头的疲劳性能[J]. 焊接学报, 2010, 31(11): 57-60.
Zhao Xiaohui, Wang Dongpo, Wang Xibao, *et al.* Improvement of fatigue performance of TC4 Ti-alloy welded joints by loading ultrasonic peening [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(11): 57-60.
- [5] 贾翠玲, 陈芙蓉. 超声冲击处理对 7A52 铝合金焊接应力影响的数值模拟[J]. 焊接学报, 2015, 36(4): 30-34.
Jia Cuiling, Chen Furong. Numerical simulation of influence of ultrasonic impact treatment on welding stress of 7A52 aluminum alloy joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(4): 30-34.
- [6] 饶德林, 陈立功, 倪纯珍, 等. 超声冲击对焊接结构残余应力的影响[J]. 焊接学报, 2005, 26(4): 48-50, 64.
Rao Delin, Chen Ligong, Ni Chunzhen, *et al.* Effect of ultrasonic impact treatment on residual stress of welded structure [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(4): 48-50, 64.
- [7] Bagherifard S, Pariente I F, Ghelichi R, *et al.* Fatigue properties of nanocrystallized surfaces obtained by high energy shot peening [J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1): 1683-1690.
- [8] Kim J C, Cheong S K, Noguchi H. Residual stress relaxation and low-and high-cycle fatigue behavior of shot-peened medium-carbon steel [J]. International Journal of Fatigue, 2013, 56(11): 114-122.
- [9] Wang Ting, Wang Dongpo, Liu Gang, *et al.* Investigations on the nanocrystallization of 40Cr using ultrasonic surface rolling processing [J]. Applied Surface Science, 2008, 255(5): 1824-1829.
- [10] Sattari-Far I, Farahani M R. Effect of the weld groove shape and pass number on residual stresses in butt-welded pipes [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2009, 86(11): 723-731.
- [11] 拉达伊 D. 焊接热效应温度场. 残余应力变形[M]. 熊第京, 郑朝云, 史耀武, 译. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [12] Yan Chunyan, Liu Cuiying, Yan Bo. 3D modeling of the hydrogen distribution in X80 pipeline steel welded joints [J]. Computational Materials Science. 2014(83): 158-163.

作者简介: 王炳英, 女, 1972 年出生, 博士, 教授. 主要从事焊接结构的环境敏感断裂、腐蚀与防护方面的研究. Email: tdwby2004@126.com