DOI: 10.3901/JME.2019.18.028

多次切割轮廓法测试局部补焊厚板 内部残余应力分布*

严 益¹ 晏嘉陵^{2,3} 刘明星^{2,3} 李 丹^{2,3} 刘 川¹ 褚巧玲⁴

(1. 江苏科技大学材料科学与工程学院 镇江 212003;

2. 中国大唐集团科学技术研究院有限公司华东电力试验研究院 合肥 230088;

3. 大唐锅炉压力容器检验中心有限公司 合肥 230088;

4. 西安理工大学材料科学与工程学院 西安 710048)

摘要: 局部修补焊缝的应力分布呈现三维特征, 需要进行内部应力测试才能全面反映局部补焊对焊接残余应力的影响。采用多次切割轮廓法测试 50 mm 厚局部补焊试板的内部应力分布, 获得原始焊缝位置的纵向应力、补焊位置的纵向应力以及原始焊缝中心位置的横向应力分布; 分析补焊焊接对纵向焊接应力的影响; 研究了试板中截面位置横向切割后造成的应力释放程度。结果表明, 多次切割轮廓法可获得试样不同位置的横向和纵向应力分布全貌; 局部补焊造成补焊焊缝内的纵向应力幅值增加, 峰值应力相对原始焊缝增加 30%; 由于局部补焊焊缝的热处理作用, 其上部区域的纵向应力降低, 峰值应力相对原始焊缝降低幅度达到 60%; 垂直焊缝方向平行切割测试两位置的纵向应力时, 两切割面的距离大于 2 倍厚度, 第一次切割对第二次切割面上的应力状态影响较小。多次切割轮廓法为研究厚板内部应力局部补焊前后的变化提供了经济高效的测试手段。

关键词: 局部补焊; 内部应力; 轮廓法; 应力释放程度; 应力叠加

中图分类号: TG404

Measurement on the Internal Stress Distribution in a Thick Specimen with a Partial Repair Weld Using Multiple-cut Contour Method

YAN Yi¹ YAN Jialing^{2,3} LIU Minxing^{2,3} LI Dan^{2,3} LIU Chuan¹ CHU Qiaoling⁴

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology,
Zhenjiang 212003;

2. China Datang Corporation Science and Technology Research Institute Co., Ltd.,
East China Electric Power Test & Research Institute, Hefei 230088;

3. Datang Boiler and Pressure Vessel Inspection Center Co., Ltd., Hefei 230088;

4. College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: Residual stress distributions in partial repair welds exhibit 3-D characteristics. It is necessary to perform measurement on internal stresses to investigate the effects of partial repair on welding residual stresses. The internal stress distributions in a 50 mm -thick specimen with a partial repair weld are measured by the contour method with multiple cuts, and the longitudinal and transverse stress distributions in the initial weld, the longitudinal stress distribution in the repair weld are obtained. The effect of the partial repair weld on the welding longitudinal stress distribution is studied. The extent of stress release induced by the transverse cut at the middle-length location is also investigated. Investigated results show that the full maps of the welding longitudinal and transverse stress distributions can be obtained by the multiple-cut contour method; the peak longitudinal stress within the repair weld increases by 30% as compared with that in the initial weld; due to the heat effect exerted by the multipass welding of the repair weld, the peak longitudinal stress in the region above the partial repair weld decreases by 60% in relation to the peak stress in the initial weld; the

* 国家重点研发计划(2018YFC0310400)、国家自然科学基金(51575251)和
江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX18_2319)资助项目。20181112
收到初稿, 20190613 收到修改稿

extent of stress release caused by the transverse cut changes with the location from the cut edge, the stress within the region with a distance from the cut edge over twice times the thickness is almost unaffected by the cut. The multiple-cut contour method provides an economical and efficient method to investigate the variation of internal stress distribution in a thick welded plate before and after partial repair.

Key words: partial repair weld; internal stress; contour method; extent of stress release; stress superposition

0 前言

多道焊接是大厚度结构制造的重要方式。大厚度结构对焊缝的拘束度大, 焊缝及附近材料经历反复多次的热循环, 造成焊接应力幅值高且分布复杂。焊接残余应力对结构的疲劳性能、服役安全性和服役寿命影响显著^[1-3]。焊后焊缝出现缺陷或者结构服役过程中出现缺陷的补救方法是挖掉缺陷部分的材料进行修补焊。修补焊接会显著影响焊接残余应力的分布和大小变化。如朱援祥等^[4]研究表明: 修复同一位置, 随着修复次数的曾加, 焊接残余应力值逐渐增加且应力宽度也明显变大; DONG 等^[5-6]研究发现修补焊会增加横向残余应力幅值, 修补长度越短横向应力增加越大。

DONG 等^[5]和 SONG 等^[7]的研究表明, 修补焊缝的应力呈现三维特征, 且修补焊缝几何形状相关。因此能测试内部应力分布的方法如中子衍射法、深孔法等常用于研究修补焊道的内部应力分布^[8-9]。但深孔法仅能测试有限位置点沿厚度应力变化, 中子衍射法测试受试样尺寸、晶粒尺寸限制, 且价格昂贵^[10]。轮廓法是一种可以获得内部二维应力分布全貌的新颖应力测试方法^[11-12]。该方法将试样沿需测试应力的位置切割成两半, 由于应力释放, 切割面产生变形, 测试出切割面的变形并作为有限元计算的边界条件, 将试样压回到切割前的无变形情况, 所获得的切割面上应力即为切割前的原始应力^[11]。该方法对晶粒大小不敏感, 且所用设备为工业生产常用设备, 经济高效^[10]。轮廓法内部应力测试结果与中子衍射法测试结果基本一致^[13-14]。该方法已经用于测试各种焊接方法形成的应力^[15-18], 且基于叠加原理和其他测试方法, 轮廓法可以测试多个方向的内部应力分布全貌^[19-20]。轮廓法为研究修补焊内部应力分布提供了经济高效的手段。

本文采用轮廓法测试经局部修补的厚板焊接试样内部残余应力分布, 得到试板原始焊缝位置、修补焊位置和初始焊缝中心位置的应力分布, 分析局部修补焊对厚焊接接头残余应力的影响, 分析厚板试样经横向切割后焊接应力的释放程度。

1 试验过程

1.1 焊接试验

将两块 200 mm×200 mm×50 mm 的 Q345 钢板采用二氧化碳气保焊方式对接焊接在一起。坡口形式为 X 型坡口, 总共焊道数为 22 道。上部坡口焊接 6 道后, 进行碳刨清根处理, 然后填满下部坡口, 再翻面填充上部坡口。焊接完成后, 将焊缝边缘位置局部区域采用碳刨方式清除并用角磨机打磨, 形成 180 mm 长、27 mm 宽和 27 mm 深的凹坑, 然后对该凹坑进行补焊, 补焊道数为 14 道。试样尺寸和坡口形式如图 1 所示, 补焊焊缝凹坑照片、补焊焊道顺序如图 2 所示, 原始焊缝形貌及补焊焊缝形貌如图 3 所示。

图 1 试样尺寸及坡口形式

图 2 补焊凹坑尺寸及补焊焊道顺序

图 3 焊缝形貌

Q345 母材的屈服强度为 392 MPa, 所用药芯焊丝的牌号为 CHT711HR, 填充金属材料的屈服强度为 543 MPa。

1.2 轮廓法应力测试

轮廓法应力测试分为三个步骤^[11-12]: ① 切割。采用慢走丝线切割方法将试样切割开; ② 测试切割面的变形轮廓, 并进行数据平均和光滑拟合; ③ 有限元法应力构造。以切割后试样尺寸建立有限元模型, 将光滑拟合后的切割面变形轮廓作为有限元模型的边界条件, 通过弹性分析获得切割面上垂直方向的应力分布, 该应力即为切割前的原始应力。通过多次切割并结合叠加原理, 可以获得多个切割面上的应力分布^[21]。

本文研究的试样包含部分补焊区域, 为了研究补焊区域和原始焊道区域的应力分布不同, 采用三次切割方式获得三个平面上的应力分布。三次切割面的位置示意图如图 4 所示。

图 4 三次切割位置示意图

第一次切割位置为试样中截面位置, 可以获得该位置的纵向应力。第二次切割为补焊区域中间位置, 与第一次切割位置的距离为 100 mm, 可获得补焊位置的纵向应力分布。第三次切割面为焊缝中心位置, 可以获得垂直该面的应力分布, 即焊缝中心位置的横向应力。

本文采用沙迪克慢走丝线切割机 Sodick ALN400QS 完成三次切割, 所用切割丝为直径 0.25 mm 的铜丝, 切割速度为 0.12 mm/s。切割后的变形轮廓采用海格斯基 Hexagon Global Performance 三坐标测试仪测量(测试照片见图 5), 焊缝区的测试间距为 1 mm, 远离焊缝区域测试间距为 2 mm。测试的变形轮廓经平均、光滑拟合和插值处理后, 作为有限元的边界条件经弹性计算获得切割面上的应力分布。

图 5 切割面轮廓测试

2 多次切割的应力叠加

试样经第一次切割后, 其应力重新分布(部分应力释放), 以第二次切割后的变形轮廓弹性分析得到的纵向应力仅仅为第二次切割面上的剩余应力, 需要将第一次切割释放造成的释放应力与剩余应力进行叠加才能获得第二次切割位置的原始应力。

通过叠加获得第二次切割面(补焊位置)上的应力示意图如图 6 所示。

图 6 中, A 是原始试样, B 为试样切割后部分应力释放后的一半试样; C 为将切割面上的变形轮廓作为边界条件计算应力的分析步; 根据轮廓法原理, A 中切割面 P_1 上的纵向应力(x 向应力)即为 C 中 P_1 面上的纵向应力。D 为第二次切割后应力释放的 1/4 部分试样; E 是用第二切割后的变形轮廓分析应力的计算步, E 获得的纵向应力即为第一次切割后 P_2 面的剩余纵向应力。B 中切割面 P_2 面上的应力可以通过 E 和 D 叠加获得, D 中切割面 P_2 上的应力已经全部释放, C 中 P_2 位置的应力是第一次切割后 P_2 面的释放纵向应力。因此, 将 C 和 E 进

图 6 第二次切割面上的应力构造示意图

行叠加, 就可获得 A 上第二次切割面 P_2 面的原始纵向应力(x 方向应力), 即

$$\sigma_x^{(A)}(P_1) = \sigma_x^{(C)}(P_1) \quad (1)$$

$$\sigma_x^{(A)}(P_2) = \sigma_x^{(C)}(P_2) + \sigma_x^{(E)}(P_2) \quad (2)$$

同样, 第三次切割面 P_3 上的原始横向应力(y 向应力)也可以通过叠加原理获得, 如图 7 所示。其表达式为

$$\sigma_y^{(A)}(P_3) = \sigma_y^{(C)}(P_3) + \sigma_y^{(F)}(P_3) \quad (3)$$

图 7 第三次切割面上的横向应力构造示意图

3 结果和分析

3.1 切割面变形轮廓和应力构造

第一次和第二次切割时, 采用两侧先加工导向孔(图 5)的方法进行^[18]。切割面的变形轮廓数据测试时, 考虑到线切割切入和切出造成的误差, 舍弃距切割端部 40 mm 区域的数据(包含导向孔区域), 因此有效轮廓数据长度为 320 mm。由于焊接应力集中在焊缝及其邻近区域, 远离焊缝区域的应力较小, 切割后应力释放造成的变形在远离焊缝区域较小, 故轮廓测试时, 选择远离焊缝区域作为测试基准点。第三次切割后也舍弃距端面 5 mm 区域的数据(有效数据长度 190 mm)。将两切割面的测试变形数据进行平均并光滑拟合后的形貌如图 8 所示。图 8a 中看

(a) 第一次切割面

(b) 第二次切割面 (补焊位置)

(c) 第三次切割面

图 8 光滑拟合后的切割面变形轮廓

出, 第一次切割面上焊缝区域呈现凹陷变形, 变形量峰值达到 -0.17 mm , 远离焊缝区域变形较小呈现凸出变形, 峰值达 0.01 mm ; 图 8b 中, 第二次切割面上焊缝区域的凹陷变形量峰值达到 -0.19 mm (补焊区域), 且沿厚度分布不均匀, 补焊区域的变形量大于原始焊缝区域变形量, 远离焊缝区域的变形量小; 由图 8c 看出, 第三次切割后, 焊缝中心位置的横向变形较小 (第一次切割后剩余的横向应力释放造成的变形), 沿厚度上下表层的变形量大, 中间区域的变形量小。

根据有效测试数据尺寸通过 ANSYS 软件建立有限元模型 (三次切割的模型尺寸分别为 $320\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, $320\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 和 $190\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 50\text{ mm}$), 切割面上有限元网格划分为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 。将光滑拟合后的切割面轮廓数据按照 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 间距插值, 然后作为位移边界条件逐节点施加到有限元模型中, 并在远离切割面的两节点上施加附加位移约束以防止模型刚性移动, 进行弹性计算, 获得切割面上的应力分布。所用材料的弹性模量为 200 GPa , 泊松比为 0.3 。

3.2 各切割面位置的应力及局部补焊的影响

基于轮廓法和叠加原理获得的三个位置应力分布如图 9 所示。

图 9 测试的各切割面上的应力分布

GEORGE 等^[8]针对环焊缝修补焊应力进行研究, 认为距修补焊端部距离大于 25 mm 的区域其环向应力不受修补焊影响。本文的两次切割位置的距离为 100 mm , 修补焊端部与第一次切割面的距离为 20 mm , 且修补焊端部的补焊深度浅, 热输入小, 故对第一次切割面位置的应力影响小, 可以认为第一次切割面位置的应力为原始焊态应力。因此通过两个位置的应力可分析修补焊对原始应力的影响。图 9a 为第一次切割面上的原始纵向应力分布, 图中看出, 焊缝区域为拉伸应力, 远离焊缝区域出现压缩应力以平衡焊缝区域的拉伸应力; 焊缝区域表层纵向应力大于内部纵向应力, 上部区域的峰值拉伸应力为 440 MPa , 出现在距上表面约 8 mm 深度位置, 下部区域的峰值应力为 410 MPa , 出现在距下表面约 5 mm 深度。图 9b 为补焊位置的纵向应力分布, 图中看出, 补焊焊缝区域呈现拉伸应力, 远离焊缝区域为压缩应力, 其分布趋势与原始焊缝的纵向应力分布趋势一致。补焊焊缝的峰值拉伸应力约为 530 MPa , 出现在距下表面 9 mm 位置, 该应力峰值接近焊缝材料的室温屈服强度 (543 MPa); 补焊焊缝区域的拉应力明显高于原始焊缝相同位置的纵向应力, 而补焊焊缝上部区域的纵向应力明显小于原始焊缝相同位置的纵向应力, 这是由于补焊的热处理造成上部区域应力减小。图 9b 结果说明局部补焊造成增加补焊区域的纵向应力增加, 而补焊焊缝

上部区域的纵向应力降低。图 9c 为焊缝中心位置的横向应力, 上下表层区域的横向应力为拉伸应力, 内部区域为压缩应力。

选择第一次切割面和第二次切割面上焊缝中心位置线(L_1 线和 L_2 线), 画出沿该两条线的纵向应力分布如图 10 所示。

图 10 补焊和原始焊缝中心位置的沿厚度纵向应力变化

图 10 中看出, 补焊深度范围内(距下表面 0~30 mm 范围)的峰值纵向应力(约 530 MPa, a' 点)明显大于原始焊缝的峰值纵向应力(410 MPa, a 点), 因此补焊造成的纵向应力峰值增加 120 MPa(约 30%); 补焊焊缝上部区域(距上表面 0~20 mm 范围)的原始峰值纵向应力(440 MPa, b 点)明显大于补焊焊缝相同位置的应力(180 MPa, b' 点), 因此补焊焊道的多次热循环作用造成其上部分区域的应力峰值点的应力缩减达到 260 MPa(相对原始焊缝应力降低达到约 60%)。

3.3 第一次切割造成的应力释放程度

第一次切割后, 造成应力释放和重分布, 影响到第二次及第三次切割面上的应力分布。图 6 和图 7 中, C 为将第一次切割后释放应力造成的变形轮廓作为边界条件分析应力步(弹性有限元计算), 因此 C 的应力状态是第一次切割后的释放应力, 可以通过 C 分析第一次切割后造成的应力释放程度。将切割面上的变形轮廓作为有限元边界条件获得的应力即可获得切割面上的原始纵向应力(全部释放应力)和其余位置部分释放的横向和纵向应力。选择焊缝中心位置平面(图 7 中 C 分析步的 P_3 面), 画出该面上因为第一次切割造成的释放应力如图 11 所示。

图 11 中, $x=0$ 位置即为切割面位置, 该位置的横向和纵向应力最大, 说明切割后该位置的释放应力最大(纵向应力全部释放); 远离切割面的位置, 释放应力迅速减小, 且释放应力沿厚度趋于均匀分

图 11 第一次切割造成的焊缝中心位置截面上的应力释放

布。选择 P_3 面上中等厚度位置线(图 11 中 L_3 线), 画出沿该线的释放横向和纵向应力分布见图 12。由图 12 看出, 距切割面距离大于 25 mm 的区域($0.5t$, t 为试样厚度)其横向应力释放较少(释放应力小于 50 MPa); 距切割面距离大于 100 mm($2t$)区域的释放纵向应力小于 50 MPa, 距离大于 150 mm($3t$)的纵向应力几乎不受试样切割影响。因此, 对于 50 mm 厚的试样, 可以认为试样经横向切割后(垂直焊缝方面切割), 与切割面距离大于 $2t$ 位置的区域其应力状态受切割影响较小; 与切割面距离大于 $3t$ 位置的区域其应力状态基本不受切割影响。因此, 基于多次平行切割轮廓法测试应力时, 与第一次切割面距离为 $3t$ 位置的应力测试可不考虑应力叠加。

图 12 第一次切割面造成的释放应力沿 L_3 线分布

4 结论

(1) 将试样多次切割, 结合轮廓法和应力叠加方法, 可以获得试样不同位置的横向和纵向应力分布全貌。

(2) 切割造成试样应力释放和重分布, 距切割面不同位置横纵应力的释放程度不同。对于本文研究的 50 mm 厚焊接试样, 两次横向平行切割位置的距离大于 3 倍厚度时, 第二次切割面上的纵向应力测试可不考虑第一次切割造成的应力释放(不用叠加释放应力)。

(3) 补焊造成补焊焊缝内的纵向应力幅值显著增加, 峰值应力接近材料的屈服强度, 相对原始焊缝峰值纵向应力增加 30%; 由于补焊焊缝的热处理作用, 其上部区域的纵向应力降低, 相对原始焊缝峰值纵向应力其降低幅度达到 60%。

参 考 文 献

- [1] WITHERS P J. Residual stress and its role in failure[J]. Reports on Progress in Physics, 2007, 70(12): 2211-2264.
- [2] 王东坡, 霍立兴, 张玉凤, 等. 焊接残余应力对超声波冲击处理焊接接头疲劳性能的影响[J]. 机械工程学报, 2004, 40(5): 150-154.
WANG Dongpo, HUO Lixing, ZHANG Yufeng, et al. Effect of welding residual stress on fatigue performance of the welded joints treated by ultrasonic peening[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(5): 150-154.
- [3] 余陈, 陈静, 陈怀宁. TC4 钛合金磁控窄间隙 TIG 焊试板热处理前后三维应力[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 61-66.
YU Chen, CHEN Jing, CHEN Huaining, et al. Triaxial stresses in tc4 ti-alloy weldments by magnetically controlled narrow gap tig welding before and after PWHT[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(6): 61-66.
- [4] 朱援祥, 张小飞, 杨兵, 等. 基于有限元的多次补焊焊接残余应力的数值模拟[J]. 焊接学报, 2002, 23(1): 65-68.
ZHU Yuanxiang, ZHANG Xiaofei, YANG Bing, et al. The numeric simulation of weld residual stress of several weld-repaired based on Finite element[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(1): 65-68.
- [5] DONG P, ZHANG J, BOUCHARD P J. Effects of repair weld length on residual stress distribution[J]. Journal of Pressure Vessels Technology, 2002, 124(1): 74-80.
- [6] DONG P, HONG J K, BOUCHARD P J. Analysis of residual stresses at weld repairs[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2005, 82(4): 258-269.
- [7] SONG S, DONG P. Residual stresses at weld repairs and effects of repair geometry[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2017, 22(4): 265-277.
- [8] GEORGE D, SMITH D J. Through thickness measurement of residual stresses in a stainless steel cylinder containing shallow and deep weld repairs[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2005, 82(4): 279-287.
- [9] BOUCHARD P J, GEORGE D, SANTISTEBAN J R, et al. Measurement of the residual stresses in a stainless steel pipe girth weld containing long and short repairs[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2005, 82(4): 299-310.
- [10] MURANSKY O, HOSSEINZADEH F, HAMELIN C J, et al. Investigating optimal cutting configurations for the contour method of weld residual stress measurement[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2018, 164: 55-67.
- [11] PRIME M B. Cross-sectional mapping of residual stresses by measuring the surface contour after a cut[J]. Journal of Engineering Materials & Technology, 2001, 123: 162-168.
- [12] 刘川, 庄栋. 基于轮廓法测试焊接件内部残余应力[J]. 机械工程学报, 2012, 48(8): 54-59.
LIU Chuan, ZHUANG Dong. Internal welding residual stress measurement based on contour method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(8): 54-59.
- [13] FRANKEL P, PREUSS M, STEUWER A, et al. Comparison of residual stresses in Ti-6Al-4V and Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo linear friction welds[J]. Materials Science and Technology, 2009, 25(5): 640-650.
- [14] BRAGA D F O, COULES H E, PIRLING T, et al. Assessment of residual stress of welded structural steel plates with or without post weld rolling using the contour method and neutron diffraction[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(12): 2323-2328.
- [15] ZHANG Y, GANGULY S, EDWARDS L, et al. Cross-sectional mapping of residual stresses in a VPPA weld using the contour method[J]. Materialia, 2004, 52(17): 5225-5232.
- [16] LIU C, ZHU H Y, DONG C L. Internal residual stress measurement on inertia friction welding of nickel-based superalloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(5): 408-415.
- [17] SUN T Z, ROY M J, STRONG D, et al. Comparison of residual stress distributions in conventional and stationary shoulder high-strength aluminum alloy friction stir welds[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 242: 92-10.
- [18] SMITH M, LEVESQUE J B, BICHLER L, et al. Residual

- stress analysis in linear friction welded in-service Inconel 718 superalloy via neutron diffraction and contour method approaches[J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 691: 168-179.
- [19] OLSON M D, HILL M R. A new mechanical method for biaxial residual stress mapping[J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(6): 1139-1150.
- [20] HOSSEINZADEH F, BOUCHARD P J. Mapping multiple components of the residual stress tensor in a large P91 steel pipe girth weld using a single contour cut[J]. Experimental Mechanics, 2013, 53(2): 171-181.
- [21] PAGLIARO P, PRIME M B, ROBINSON J S, et al. Measuring inaccessible residual stresses using multiple methods and superposition[J]. Experimental Mechanics, 2011, 51(7): 1123-1134.
-
- 作者简介: 严益, 男, 1993 年出生。主要研究方向为焊接应力测试和评价。
E-mail: yiyang_lengduo@126.com
刘川(通信作者), 男, 1973 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为焊接应力变形测试分析和控制, 焊接结构安全性评价。
E-mail: chuanliu@just.edu.cn