基于轮廓法与固有应变理论焊接纵向残余应力的三维重构

董志波^{*}, 周守振, 武继胜, 方洪渊

哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001

^{*} E-mail: dongzhib@hit.edu.cn

收稿日期: 2020-03-02; 接受日期: 2020-03-31; 网络版发表日期: 2020-05-18

国家自然科学基金(批准号: 51875131)资助项目

摘要 将轮廓法与固有应变理论相结合, 利用试件焊缝横向切割面应力释放产生的轮廓变化, 通过切割面轮廓起伏数据计算构件的固有应变, 再利用固有应变模拟获得焊接构件内部纵向残余应力的三维分布. 将所得结果与数值模拟、小孔法所得结果进行对比验证, 证明了轮廓法与固有应变相结合方法的可靠性, 对于焊接构件残余应力的三维分布实验测量具有重要应用前景.

关键词 残余应力, 轮廓法, 固有应变, 三维分布

1 引言

焊接残余应力是决定焊接构件可靠性的重要因素, 直接关系着构件的使用性能、疲劳寿命等, 往往带来稳定性下降、服役寿命减少等不利影响^[1~3], 因此准确测量残余应力具有重大意义. 常见的残余应力测试方法很多, 可分为机械释放和无损测量两类^[4], 但目前采用实验手段获得焊接构件三维应力的方法非常少, 本文基于轮廓法提出了一种结合固有应变的新方法.

轮廓法是一种针对构件内部残余应力破坏性的测试方法, 由Prime和Gonzales^[5]提出, 测试简单, 成本低, 不受试件微观结构的限制, 因此轮廓法已经渐渐成为研究厚板内部应力的热点^[6]. 国内已经有不少学者对轮廓法的理论和应用展开了研究, 刘晓龙等人^[7]利用

轮廓法研究了7050T型锻件淬火和冷压残余应力沿厚度的分布, 并将所得结果与中子衍射法测量结果进行对比, 二者显示出很好的一致性. 谢国贞等人^[8]重点研究了轮廓法测量过程中的轮廓值数据处理, 用包络处理、左右轮廓平均、Gauss混合模型拟合以及节点插值处理等方式修正轮廓法边界条件, 得到了相对更准确的T形构件淬火残余应力场. 刘川等人^[9]利用轮廓法测量了TC₁₇钛合金的线性摩擦焊(LFW)焊接接头内部残余应力, 结果表明残余应力集中于焊缝中心线区域, 并在中心线处达到应力峰值. 闫锦辉等人^[10]采用轮廓法进行两次相互垂直的切割, 分别得到两切割面的法向残余应力, 在切割面的交线位置获得了纵向与横向两个方向的残余应力变化情况. 轮廓法虽然可以测量构件内部的残余应力, 但主要用于切割面的二维残余

引用格式: 董志波, 周守振, 武继胜, 等. 基于轮廓法与固有应变理论焊接纵向残余应力的三维重构. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 957–963
Dong Z B, Zhou S Z, Wu J S, et al. Reconstructing a 3D map of longitudinal residual stress by combining the inherent strain theory and contour method (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 957–963, doi: [10.1360/SST-2020-0070](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0070)

应力分布重构, 无法反映构件整体残余应力的三维分布, 这使得轮廓法的应用受到很大限制.

针对构件内部残余应力的三维测量一直是国内外学者们不懈研究的热点. 陈琨等人^[11]针对压缩变形工艺下的构件提出了比容差法, 根据应力状态与试件体积变化的关系, 对材料内部的三维残余应力进行了准确、定量的测量分析. 中子衍射法是目前相对成熟、可信度较高的三维残余应力测试方法, 可直接用于实验件内部的应力分布测量. 但中子衍射法对设备要求高, 价格昂贵, 且操作复杂不具有便携性, 一般只能在具有核反应堆的实验室进行^[12,13]. 因此, 本文针对便捷的轮廓法进行了更深入的研究, 提出了一种将固有应变理论与轮廓法相结合的新方法, 实现了焊接纵向残余应力三维分布重构.

2 切割面轮廓实验测量

采用长247 mm、宽147 mm、厚9 mm的Q235钢板作为试验件, 如图1所示. 焊接方法采用TIG交流焊, 焊接工艺参数: 电流150 A, 电压16.5 V, 交流100 Hz, 占空比75%, 焊接速度2 mm/s.

选用加工精度较高的慢走丝切割方法进行试件切割, 采用0.25 mm铜丝, 0.5 mm/min的切割速度, 对试件进行了一次连续切割, 得到切面光滑无明显刀痕的理想切面.

采用CV-3200S4型三丰轮廓仪对切面轮廓进行采集, 测量精度可以达到 $\pm 0.5 \mu\text{m}$. 在两侧切面上分别由上至下取6条线, 如图2所示, 将两切割面的对应数据进

图1 试验件示意图
Figure 1 Schematic diagram of the specimen.

图2 切割面数据采集线
Figure 2 Lines of cut planes data acquisition.

行求和平均, 避免切割过程并不完全沿预定直线, 导致有微小的偏转与弯曲而产生误差, 同时排除切面存在的微小切应力造成的轮廓值误差. 最终将轮廓数据拟合为光滑曲线, 得到轮廓曲线如图3所示.

3 三维纵向残余应力重构

3.1 残余应力的三维重构原理

固有应变是焊件中产生应力与变形的根本原因, 其大小和分布直接决定了焊件最终的残余应力和变形^[14]. 固有应变在焊接过程中体现为塑性应变、热应变和相变应变三者之和, 对于焊接Q235钢这类低碳钢, 相变通常发生在弹性丧失温度以上, 可以忽略相变应变对残余应力的影响. 完全冷却后, 加热产生的热应变被抵消为零, 故固有应变完全等于残留在焊缝中的压缩塑性变形^[15].

在轮廓法测试中, 切割面的轮廓变形是由残余应力引起的弹性变形, 由文献^[16]可知, 弹性变形并不会引起固有应变的改变, 而构件的固有应变又决定了残余应力, 因此可以通过切割面的轮廓变形反向求解固有应变, 进而得到构件内部整体的残余应力分布.

在实际工程中, 为了简化计算, 忽略长度方向上的

图3 (网络版彩图)切割面轮廓变化数据
Figure 3 (Color online) Fluctuation data of the cut planes.

固有应变的变化, 将单元体中的固有应变简化为 x 的函数, 并分为三类: x 方向的固有应变、 y 方向的固有应变及固有切应变, 建立相关方程如下:

$$\varepsilon_x^* = f_1(x), \quad \varepsilon_y^* = f_2(x), \quad \tau_{xy}^* = f_3(x), \quad (1)$$

式中, ε_x^* 为 x 方向的固有应变; ε_y^* 为 y 方向的固有应变; τ_{xy}^* 为固有切应变。

当固有应变满足协调方程式(2)时, 不会引起残余应力^[17].

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y}. \quad (2)$$

因此, 对于工程中连续加工的平板构件, 只有 y 方向的固有应变会引起残余应力. 为了近似表达出固有应变的函数, 采取插值构造的方法来逼近该函数, 如式(3)所示.

$$\varepsilon_y^*(x) = \sum_{l=1}^n A_l P_l(x), \quad (3)$$

式中, $\varepsilon_y^*(x)$ 为未知的固有应变函数; A_l 为系列未知系数; $P_l(x)$ 为已知多项式组.

每一个固有应变多项式可以得到一个应力分布结果, 在有限元中可计算得到对应的切割面轮廓变化值, 将多项式线性组合后使应力分布接近实际应力分布时, 轮廓变化叠加之后将与实际的轮廓变化相等, 如式(4)所示.

$$\tilde{u}(x) = \sum_{l=1}^n A_l C_{kl}, \quad (4)$$

式中: $\tilde{u}(x)$ 为实际切割面轮廓; C_{kl} 为施加已知的函数固有应变得到的轮廓, 其中, C_{kl} 满足关系式:

$$C_{kl} = u(x_k) \Big|_{\varepsilon_y^* = P_l(x)}. \quad (5)$$

根据轮廓点数据建立相关等式, 构成超定线性方程组, 通过最小二乘法求得近似解, 将固有应变函数转化为对应的温度函数, 以温度边界条件的形式施加到有限元模型中, 通过热膨胀的方式造成构件中应力产生, 此即所求残余应力的分布.

3.2 纵向残余应力的三维重构

对固有应变函数进行插值构造时, 采用切比雪夫多项式进行线性叠加, 保证插值函数最大限度地降低龙格现象, 实现最佳一致逼近. 式(3)中的每一阶多项

式由两项切比雪夫多项式相乘得到, 如式(6)所示. 由于 x 方向残余应力变化更为剧烈和复杂, 取 i 值为1~8, j 值为1~4.

$$P(x, z) = P_i'(x)P_j'(z), \quad (6)$$

式中, i, j 表示切比雪夫多项式阶数.

根据实际尺寸建立平板的有限元模型, 通过温度变化将每一阶的固有应变施加到有限元模型中, 基于上述重构原理, 将各阶多项式叠加得到固有应变函数, 构造的函数图像如图4所示.

将构造的固有应变函数转化为温度函数施加到有限元模型中, 获得焊件纵向残余应力的三维分布图, 如图5所示.

4 结果与讨论

为验证方法的可靠性, 本文分别采用轮廓法(反变形)、数值模拟法和小孔法对焊件进行了残余应力模拟与测量, 将测量结果与上述残余应力的三维重构结果对比并进行分析.

4.1 轮廓法测量切割面残余应力

由于不涉及热处理过程, 故对构件的有限元模型

图4 (网络版彩图)插值构造的固有应变函数图

Figure 4 (Color online) The image of inherent strain function by interpolation method.

图5 (网络版彩图)重构的纵向残余应力三维分布

Figure 5 (Color online) 3D map of reconstructed longitudinal residual stress.

定义弹性模量(212 GPa)以及泊松比(0.3), 进行应力与变形的弹性求解。将图2所示的轮廓数据取负值(反向)施加到对应的节点, 根据轮廓法测量原理^[18]可知, 施加反变形后所得截面的应力结果即为切面(S1截面)纵向残余应力二维分布, 如图6所示。

4.2 数值模拟计算残余应力

根据相关文献^[19]的Q235钢物理性能数据确定模型材料参数, 依据实际焊接工艺, 采用双椭球热源模型进行焊接过程模拟, 获得试件焊后残余应力分布, 其中的纵向残余应力三维分布如图7所示。

4.3 小孔法测量表面残余应力

在焊件切割前使用小孔法对S1和S2截面的表面分别进行应力测量, 并沿着交线连续取点, 测量过程严格参照国家标准SL 499-2010《钻孔应变法测量残余应力的标准测试方法》中规定的步骤与操作要求执行, 最终得到48个点的残余应力值并用于应力测量结果对比研究。

4.4 测量结果对比分析

抽取各方法中S1和S2截面的应力测量数据, 进行

图6 (网络版彩图)切面的纵向残余应力分布

Figure 6 (Color online) Distribution of longitudinal residual stress of the cut planes.

图7 (网络版彩图)纵向残余应力的三维分布

Figure 7 (Color online) 3D map of longitudinal residual stress.

对比, 如图8和9所示。

由图中数据对比可得, 采用的4种残余应力测量方法所得结果在应力变化趋势上是一致的, 拉应力峰值均出现在焊缝附近区域, 并且整体应力分布呈现对称结构。

对比图8和9数据可以发现, 与内部应力数据相比, 在近表面区域轮廓法所得结果与固有应变和轮廓法结合方法相差更明显, 这是由于近表面区域所受约束较小, 在切割过程中容易产生不规则的轮廓, 并且在构件转运过程中边缘轮廓易受磨损, 使得边缘位置的轮廓变形产生较大误差所导致的。此外, 与数值模拟法相比, 轮廓法、固有应变理论与轮廓法的结合方法所得结果更接近于小孔法数据。如图8(b)所示, 小孔法所测结果的压应力峰值约为115 MPa, 固有应变与轮廓法结合所得结果的压应力峰值约为125 MPa, 二者相差8%, 远小于小孔法与数值模拟所得结果差值。对比内部残余应力测试结果, 由图9可得, 固有应变与轮廓法结合所得结果几乎与轮廓法所得结果一致, 拉应力峰值相差约3%, 同样小于数值模拟法所得结果与轮廓法所得结果差值。说明固有应变理论结合轮廓法可以对连续加工构件进行较准确的纵向残余应力的三维重构。

5 结论

(1) 结合固有应变理论与轮廓法, 针对有较长连续焊缝的连续加工构件, 提出了一种测量三维残余应力的新方法: 测量出切割面轮廓起伏数据, 推导出构件

图 8 (网络版彩图)表面残余应力测试结果对比. (a) S1截面上表面结果对比; (b) S2截面上表面结果对比

Figure 8 (Color online) Comparison of surface residual stresses. (a) Comparison of upper surface results of S1 section; (b) comparison of upper surface results of S2 section.

图 9 (网络版彩图)内部残余应力测试结果对比. (a) S1截面3号线结果对比; (b) S1截面4号线结果对比

Figure 9 (Color online) Comparison of internal residual stresses. (a) Comparison of line 3 results of S1 section; (b) comparison of line 4 results of S1 section.

固有应变的分布, 从而得到构件纵向残余应力的三维分布, 为获得更准确的结果, 可以对试件起弧端、收弧端和稳定区切割三个面进行计算。

(2) 对比有限元数值模拟、轮廓法、小孔法、固有应变与轮廓法的结合方法4种残余应力测量方法的结果, 证明了固有应变与轮廓法结合方法的可靠性。与

数值模拟法相比, 新方法的表面残余应力测量结果更接近于小孔法, 其压应力峰值与小孔法相差约为8%, 内部残余应力结果更接近于轮廓法, 其拉应力峰值与轮廓法相差约3%, 说明固有应变理论结合轮廓法可以对连续加工构件进行较准确的纵向残余应力的三维重构。

参考文献

- Wang N, Luo L, Liu Y, et al. Research progress on stress measurement technology for metal components (in Chinese). Chin J Sci Instrum, 2017, 38: 2508–2517 [王楠, 罗岚, 刘勇, 等. 金属构件残余应力测量技术进展. 仪器仪表学报, 2017, 38: 2508–2517]
- Qin Q B, Wu S C, Hu Y N, et al. Fatigue strength and residual life assessment of high-speed railway vehicle used S38C hollow axles (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 840–850 [秦庆斌, 吴圣川, 胡雅楠, 等. 高速动车组S38C车轴疲劳强度及剩余寿命评价. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 840–850]
- Lu Y H, Zhang D W, Zhao Z T, et al. Influence of welding residual stress on fatigue strength for EMU aluminum alloy carbody (in Chinese). J Traffic Transport Eng, 2019, 19: 94–103 [卢耀辉, 张德文, 赵智堂, 等. 焊接残余应力对动车组铝合金车体疲劳强度的影响. 交通运输工程学报, 2019, 19: 94–103]
- Zhang T H, Wang Y, Fang X F, et al. Research status and development of residual stress detection and elimination methods (in Chinese). J

- Netshape Form Eng, 2017, 9: 122–127 [张铁浩, 王洋, 方喜凤, 等. 残余应力检测与消除方法的研究现状及发展. 精密成形工程, 2017, 9: 122–127]
- 5 Prime M, Gonzales A. The Contour Method: Simple 2-D Mapping of Residual Stresses. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2000. 617–624
- 6 Yan Y, Liu C, Wang C J, et al. Surface stress correction of the thick welded plate measured by contour method using eigenstrain method (in Chinese). Trans China Weld Inst, 2019, 40: 82–86, 164–165 [严益, 刘川, 王春景, 等. 基于本征应变法修正厚板轮廓法应力测试误差. 焊接学报, 2019, 40: 82–86, 164–165]
- 7 Liu X L, Robert C W, Gong H, et al. Neutron diffraction and contour method of residual stress in quenching and cold pressing of 7050T forgings (in Chinese). Ann Report China Inst Atom Energ, 2017. 96 [刘晓龙, Robert C W, 龚海, 等. 7050T型锻件淬火和冷压残余应力的中子衍射和轮廓法研究. 中国原子能科学研究院年报, 2017. 96]
- 8 Xie G Z, Wu Y X, Gong H, et al. Data processing in residual stress measurements using contour method (in Chinese). China Mech Eng, 2017, 28: 1778–1783 [谢国贞, 吴运新, 龚海, 等. 轮廓法测试残余应力中的数据处理. 中国机械工程, 2017, 28: 1778–1783]
- 9 Liu C, Dong C. Internal residual stress measurement on linear friction welding of titanium alloy plates with contour method. [Trans Nonferrous Met Soc China](#), 2014, 24: 1387–1392
- 10 Yan J H, Yin X Q, Niu J, et al. Three-dimensional optical contour method for testing multiple residual stress components of welding (in Chinese). J Netshape Form Eng, 2020, 12: 80–85 [闫锦辉, 殷咸青, 牛靖, 等. 三维光学轮廓法测试多个焊接残余应力分量. 精密成形工程, 2020, 12: 80–85]
- 11 Chen K, Liu K J, Wu X M, et al. A new method for measuring the three-dimensional residual stress of materials (in Chinese). J Plastic Eng, 2017, 24: 194–199 [陈锟, 刘克家, 吴新猛, 等. 材料三维残余应力测量的新方法. 塑性工程学报, 2017, 24: 194–199]
- 12 Yang J F, Cheng J P, Xie J. Residual stress test method of thick steel plate (in Chinese). Build Struct, 2016, 46: 406–409 [杨俊芬, 程锦鹏, 谢坚. 厚钢板的残余应力检测方法. 建筑结构, 2016, 46: 406–409]
- 13 Xu X Y, Lü Y T, Zhang D, et al. Measuring residual stress by neutron diffraction (in Chinese). Mater Rev, 2015, 29: 117–122 [徐小严, 吕玉廷, 张荻, 等. 中子衍射测量残余应力研究进展. 材料导报, 2015, 29: 117–122]
- 14 Dong Z B, Guo J L, Yang L S, et al. Research status of macro-micro simulation and modelling of welding process (in Chinese). J Netshape Form Eng, 2018, 10: 40–51 [董志波, 郭军礼, 杨来山, 等. 焊接过程宏微观数值模拟与仿真的研究现状. 精密成形工程, 2018, 10: 40–51]
- 15 Wang J H, Lu H, Wei L W. Prediction of welding distortions based on theory of inherent strain by FEM and its application (in Chinese). Trans China Weld Inst, 2002, 23: 36–40 [汪建华, 陆皓, 魏良武. 固有应变有限元法预测焊接变形理论及其应用. 焊接学报, 2002, 23: 36–40]
- 16 Kartal M E, Kang Y H, Korsunsky A M, et al. The influence of welding procedure and plate geometry on residual stresses in thick components. [Int J Solids Struct](#), 2016, 80: 420–429
- 17 Mura T. Micromechanics of Defects in Solids. Boston: Kluwer, 1987
- 18 Liu C, Zhuang D. Internal welding residual stress measurement based on contour method (in Chinese). [J Mech Eng](#), 2012, 48: 54–59 [刘川, 庄栋. 基于轮廓法测试焊接件内部残余应力. 机械工程学报, 2012, 48: 54–59]
- 19 Dragi S, Ivana V. Finite element analysis of residual stress in butt welding two similar plates. Sci Tech Rev, 2009, LIX: 57–60

Reconstructing a 3D map of longitudinal residual stress by combining the inherent strain theory and contour method

DONG ZhiBo, ZHOU ShouZhen, WU JiSheng & FANG HongYuan

State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

A new method for measuring three-dimensional (3D) residual stress by combining the contour method and the inherent strain theory is proposed. After measuring the fluctuation data of the cut planes caused by the release of stress, the inherent strain is obtained. The inherent strain is used to derive the 3D internal residual stresses. Comparing the results to numerical simulation and the small-hole method results proves the reliability of the method, the reliability of the contour method, and the inherent strain theory. Therefore, this new method can be widely applied to measure the 3D residual stress of materials in the future.

residual stress, contour method, inherent strain, 3D map

doi: [10.1360/SST-2020-0070](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0070)