

钛合金厚板焊接接头三维应力测试

张建欣¹, 王德全², 刘希林¹, 李 新¹, 郭洪涛¹

(1. 中国船舶重工集团公司 第七二五研究所, 洛阳 471039;

2. 洛阳理工学院, 洛阳 471023)

摘 要:通过对钛合金厚板焊缝常用的应力测试方法进行对比分析, 建立适合钛合金窄间隙焊接试板的三维应力测试方法——逐层对称剥削盲孔法, 该方法克服窄间隙对接焊缝三维应力分布区间窄小、应力变化梯度大、应力测试操作难的技术难题, 实现钛合金厚板的三维应力测试, 得出钛合金厚板焊接接头的三维残余应力分布规律。

关键词: 钛合金; 厚板; 焊接接头; 三维应力测试

中图分类号: TG404

文献标志码: A

Three dimensional stress testing of welded joint of titanium heavy plate

ZHANG Jian-xin¹, WANG De-quan², LIU Xi-lin¹, LI Xin¹, GUO Hong-tao¹

(1. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China;

2. Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: The normal method of testing stress was employed to contrast and analysis the welding joints in titanium-alloy thick plate. A new measure about testing three dimensional stress was innovated which was suitable to narrow-gap welding in titanium, that is curing blind holes layer by layer and symmetrically. The method overcomes the disadvantages about which the three dimensional stress distributed areas are strait, the variation of stress gradients is big, and the control of testing stress is difficult. Therefore, the testing of three dimensional residual stresses in titanium heavy plates is realized and the regularities of distribution of weld joints in titanium heavy plates can be gained.

Key words: titanium-alloy; heavy plate; weld joint; three dimensional stress testing

现代焊接结构向着大厚度、大型化和复杂化方向发展, 且大厚度焊接件常用于核电站、石油天然气、压力容器等重要工业场合。

焊接结构在服役过程中受各种外部介质、各种载荷以及焊接残余应力的综合作用极易产生裂纹等缺陷而导致失效。了解大厚度焊接接头残余应力分布和特征, 特别是沿厚度上的分布特征, 对于焊接结构的强度和安全设计至关重要。焊接结构断裂力学参量评估时要考虑沿厚度方向的残余应力^[1]。已有试验证明焊接残余应力的存在降低了压力容器的开裂压力和爆破压力, 并且压力容器缺陷的评价中即使采用了焊后消除残余应力方法, 也要考虑部分残余应力的作用^[2]。

此外, 在进行焊接结构疲劳分析时, 由于焊接残余应力的存在改变了循环应力的数值, 故在进行疲劳分析时也应考虑焊接残余应力的影响^[3]。

现有的残余应力测量方法有以下几点不足而不能满足大厚度焊接结构残余应力的测量要求: 1) 大多测量方法只能进行表面测量, 如小孔法、衍射法等; 2) 测量内部应力时需要将焊接结构进行大规模的破坏而费工费时, 且引入更多的误差, 如逐层剥削法等; 3) 测量结果反映的是结构上较大区域残余应力的平均值。如逐层剥削法测量值为该剥削层的平均应力值^[4], 裂纹柔度法也最适合单向变化的应力^[5-6], 切槽法或环芯法也只能是测量槽内材料去掉后所释放应力的平均

值^[7-8]。焊接应力主要分布在焊缝和热影响区的窄小区域且在该窄小区域变化剧烈,平均应力测量法不能反映其小区域变化特征。深孔法是近几年出现的比较适合大厚度焊接结构的测量方法^[9-12],能测量厚度达 100 mm 的焊接结构内部应力,其测量原理基于环芯法,加工环槽的直径达到 20 mm,测量区域很可能已经远离诸如窄间隙焊接之类的窄小焊缝区域,所以该方法主要用于具有较大焊缝宽度的焊接结构测量。对于窄间隙焊接接头,包括深孔法都不能有效反映其焊缝区域的梯度变化。因而有必要研究探索一种新的方法进行具有窄小焊缝的焊接残余应力测量。从而能反映窄小焊缝内大梯度残余应力分布特征的测量方法而言,小孔法的钻孔直径可以很小而能满足这一要求。STONE 等^[13]研究了中子衍射法、X 射线衍射法和小孔法测量电子束焊接接头残余应力的异同,结果表明由于焊缝区域的晶格常数与母材不同且变化剧烈,衍射法无法测得焊缝区域的残余应力,而小孔法可以测得焊缝区域的应力变化,并且在远离焊缝区域 3 种方法测得结果基本一致。因此,迫切需要研发新的测量方法和技术手段,以对大厚度板焊接接头的内部应力进行准确测量和分析。

1 测试方法的选择

现有的沿厚度方向上的残余应力测量方法主要有深孔法、阶梯孔法、逐层剥除法、裂纹柔度法等。这些方法除深孔法外都只适用于测量均匀分布的应力和单点测量,不适合测量小区域内变化剧烈的焊接残余应力。深孔法是最近发展起来的能测量厚达 100 mm 的构件残余应力,但其测量耗时,费用高,且是基于环芯法测量,所测量的残余应力区域较大,测量值反映较大测量区域的平均应力,不太适合窄小焊缝的应力测量。

本文作者针对尺寸为 400 mm × 500 mm × 40 mm 的 TA2 焊接件的焊接残余应力测量,采用局部逐层去除材料和盲孔法测量内部残余应力。该方法利用理论和实践均非常成熟的小孔法,结合阶梯孔法和逐层剥除法的优势,在焊接件上下表面局部区域去除一定厚度的材料,然后采用盲孔法测量去除材料后的内部残余应力。该方法能多点测量以反映焊缝区域的应力梯度变化;局部去除材料能保证去除材料部分的应力释放所引起的附加应力最小,最大限度保证了原有焊接残余应力的完整性^[14-17];该方法将材料剥除过程和应

力测量过程分离,使得敏感的应力测量过程不受剥除过程的影响,因而测量误差小,操作方便,测量效率高,适合工程应用。

2 测试过程

首先按照图 1 所示进行表面残余应力的测量,然后每次剥削长 200 mm 宽 65 mm 深 5 mm 材料,再采用盲孔法测量内部残余应力,在厚度方向共测试 8 点的残余应力。剥削顺序和剥削层位置见图 1 所示。测量线以及应力方向表示如图 2 所示。

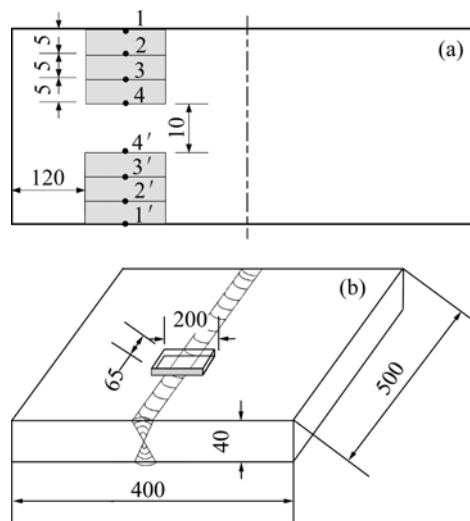


图 1 逐层对称剥削盲孔法测量 TA2 焊接件残余应力示意图

Fig.1 Sketch map of testing TA2 residual stress about curing blind holes layer by layer and symmetrically (Unit: mm): (a) S curing layer and order of testing; (b) Curing position map

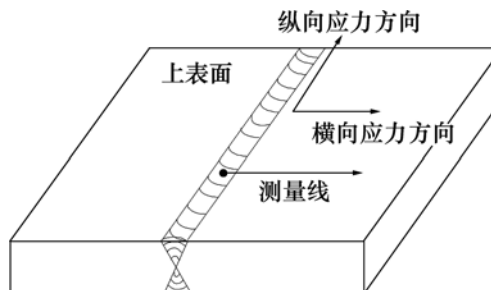


图 2 应力方向示意图

Fig.2 Sketch map of stress direction

3 测试结果与分析

表面残余应力分布如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 上表面纵向残余应力在距焊缝中心 0~5 mm 范围呈很高的拉应力, 随后随距焊缝距离的增大纵向残余应力迅速降低, 在远离焊缝 10 mm 位置后纵向残余应力保持较低应力水平; 上表面横向残余应力在焊缝中心较低, 在距焊缝 5 mm 位置为峰值拉应力, 随距焊缝中心距离增加应力迅速降低; 下

表面横向和纵向残余应力具有相似分布趋势, 在焊缝中心的应力水平较低, 然后迅速增加在距焊缝 5~10 mm 区域达到峰值, 然后在远离焊缝中心 20 mm 外应力迅速降低。

沿厚度分布的残余应力如图 4 所示。

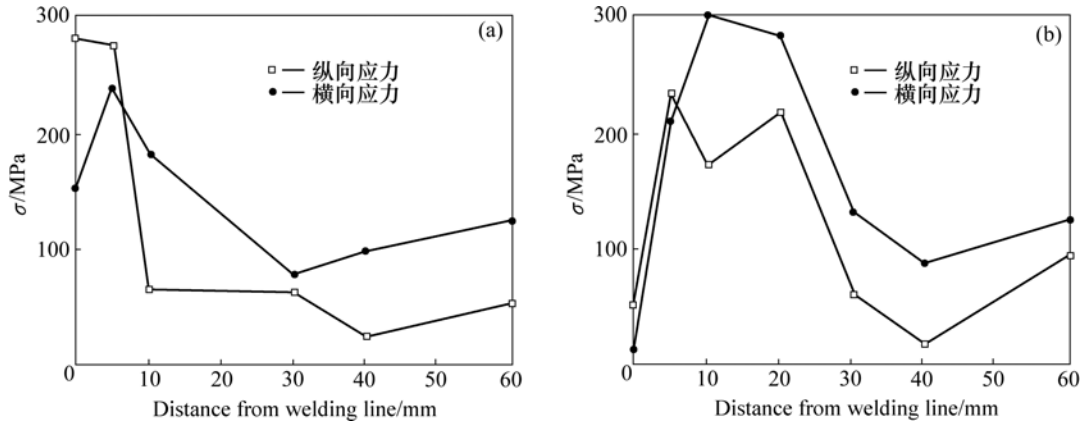


图 3 表面残余应力分布

Fig.3 Residual stress distribution at surface: (a) At upper surface; (b) At base coat

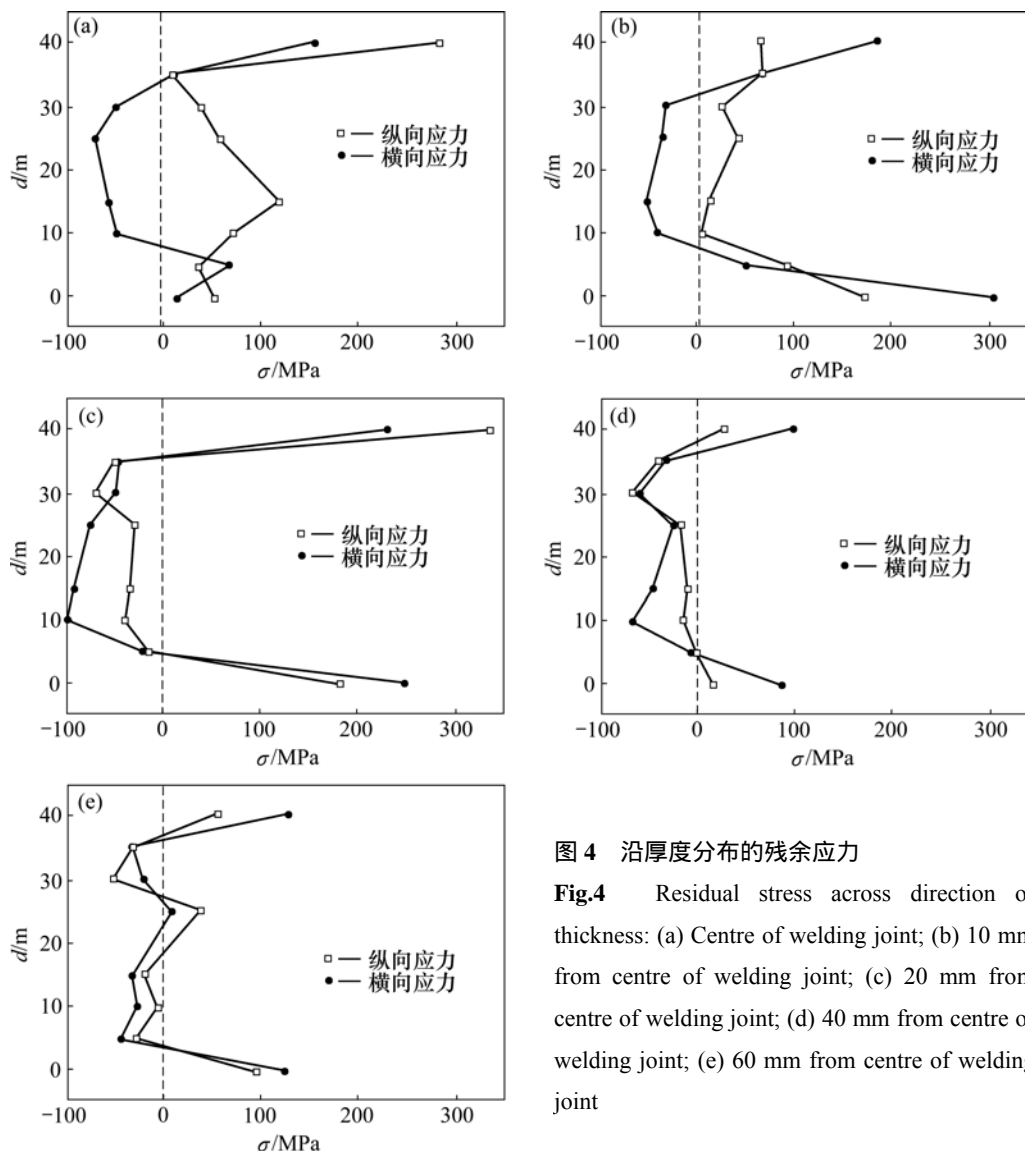


图 4 沿厚度分布的残余应力

Fig.4 Residual stress across direction of thickness: (a) Centre of welding joint; (b) 10 mm from centre of welding joint; (c) 20 mm from centre of welding joint; (d) 40 mm from centre of welding joint; (e) 60 mm from centre of welding joint

从图 4 可以看出：纵向残余应力在厚度上都为拉应力，在距焊缝中心大于 20 mm 位置处，纵向残余应力较小，在焊缝中心处内部纵向残余应力大于近表面区域残余应力；在距焊缝中心 10 mm 位置处，内部区域纵向残余应力小于近表面区域残余应力。

横向残余应力在厚度上呈现明显的拉应力—压应力—拉应力分布趋势，内部区域(距下表面 10~30 mm)的横向应力为压应力；除焊缝中心外的横向残余应力沿厚度方向都为 C 形分布；焊缝中心处下表面横向应力为较小的拉应力。

4 结论

1) 逐层对称剥离盲孔法在理论上和工艺上相对其他残余应力测量方法更成熟，本项目提出的逐层对

称剥离盲孔法发展了小孔法、逐层剥离法和阶梯孔法，能测量焊接件的大梯度残余应力；具有测量和加工互不干扰、多点测量、效率高、操作方便等特点，适合大型焊接构件残余应力测量需要。

2) 40 mm 厚 TA2 试板的表面残余应力基本上为拉应力，且在垂直焊缝的测量线上波动较大，这可能与表面的加工应力状态相关；表面横向和纵向残余应力都大于内部残余应力，在厚度上呈明显的 C 形分布特征。

3) 三维残余应力在焊缝和热影响区的应力水平高，因而该区域各试板在内部应力随厚度变化明显；远离焊缝的区域应力水平低，内部应力随厚度变化不明显。

REFERENCES

- [1] DONG P, BRUST F W. Welding residual stresses and effects on fracture in pressure vessel and piping components: A millennium review and beyond[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2000, 122(3): 329–338.
- [2] 黎延新, 陈国理, 陈柏暖. 焊接残余应力对筒形压力容器脆断的影响[J]. *石油化工设备*, 1985, 14 (8): 1–6.
LI Yan-xin, CHEN Guo-li, CHEN Bai-nuan. Residual stress affect on the brittle failure of press vessel[J]. *Petrochemical Plant*, 1985, 14(8): 1–6.
- [3] 周剑秋. 压力管道缺陷评定中焊接残余应力的处理分析[J]. *焊接*, 1998(1): 15–18.
ZHOU Jian-qiu. Residual stress analysis and treatment during defect assessment for pressurized pipe[J]. *Welding*, 1998(1): 15–18.
- [4] 郭 魂, 左敦稳, 王树宏. 铝合金预拉伸厚板内余应力分布的测量[J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(2): 33–36.
GUO Hun, ZUO Dun-wen, WANG Shu-hong. Measurement of residual stress distribution in thick pre-stretched aluminum alloy plate[J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2006, 34(2): 33–36.
- [5] PRIME M B. Residual stress measurement by successive extension of a slot: The crack compliance method[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1999, 52(2): 75–96.
- [6] 张旦闻, 刘宏昭, 刘 平. 裂纹柔度法在 7075 铝合金板带残余应力检测中的应用[J]. *材料热处理学报*, 2006, 27(2): 127–136.
ZHANG Dan-wen, LIU Hong-zhao, LIU Ping. Evaluation of residual stresses in 7075 aluminum alloy plate using crack compliance method[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2006, 27(2): 127–136.
- [7] PETRUCCI G, ZUCCARELLO B. Modification of the rectilinear groove method for the analysis of uniform residual stresses[J]. *Experiment Techniques*, 1997, 21(6): 25–29.
- [8] 周新灵, 张小伍, 李兴东. 测试大型汽轮机转子残余应力的环芯法和 X 射线法[J]. *理化检验: 物理分册*, 2008, 44(4): 196–202.
ZHOU Xin-ling, ZHANG Xiao-wu, LI Xing-dong. Ring core method and X-ray method of testing residual stress of larges steam turbine rotor[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing*, 2008, 44(4): 196–202.
- [9] SMITH D J, BOUCHARD P J, GEORGE D. Measurement and prediction of residual stresses in thick-section welds[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2000, 35(4): 287–305.
- [10] PARDOWSKA A M, PRICE J W H, FINLAYSON T R. Efficient use of available techniques to measure residual stresses in welded components[C]//*International Workshop on Thermal Forming and Welding Distortion*. Bremen, 2008: 1–12.
- [11] 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.
- [12] WIMPORY R C, MAY P S, O'DOWD N P. Measurement of residual stresses in T-plate weldment[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2003, 38(4): 349–365.
- [13] STONE H J, WITHERS P J, HOLDEN T M. Comparison of three different techniques for measuring the residual stresses in an electron beam-welded plate of Waspaloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999, 30(7): 1797–1808.
- [14] ZHANG Jin-miao, DONG Ping-sha, BRUST F W, SHACK W J, MAYFIELD M C, MCNEIL M. Modeling of weld residual stresses in core shroud structures[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2000, 195(2): 171–187.
- [15] 陆才善. 残余应力测试—小孔释放法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
LU Cai-shan. Testing on residual stress—mathar method[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1991.
- [16] 王秋成. 航空铝合金残余应力消除及评估技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
WANG Qiu-cheng. Evaluation and relief of residual stresses in aluminum alloys for aircraft structures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [17] 唐幕尧. 焊接测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
TANG Mu-yao. Text technology of weld[M]. Beijing: China Machine Press, 1988.

(编辑 杨幼平)