

厚板窄间隙多道埋弧焊温度和残余应力分布

朱政强¹ 陈立功² 徐济进² 倪纯珍²

(1. 南昌大学机电工程学院 南昌 330029;

2. 上海交通大学焊接技术研究所 上海 200030)

摘要: 通过有限元数值模拟的方法, 分析厚板窄间隙埋弧焊的温度分布, 同时给出了厚板上、下表面和厚度方向上的残余应力分布曲线。通过热电偶构成的温度测量系统测得试板特定点上的温度分布, 且在焊接完成冷却一段时间后利用盲孔法测量了试板上、下表面特定点上残余应力大小。有限元计算结果和试验测量结果吻合较好, 证明了该有限元模型的合理性, 为评价焊接接头性能提供了参考。特别是, 在厚度方向上不便测量的残余应力分布曲线可以通过有限元数值模拟的方法获得, 为实际考查厚板内部残余应力分布提供依据。对于两者结果有较大偏差的地方, 分析该偏差出现的原因。

关键词: 残余应力 温度分布 多道焊 埋弧自动焊

中图分类号: TG402 TG404

0 前言

窄间隙焊接(Narrow gap welding, NGW)技术发明于 20 世纪 60 年代, 由于它具有焊接生产率高、成本低、焊接应力与变形小、焊接线能量范围宽等其它焊接方法所无法比拟的优越性, 使之在厚板工程焊接领域愈来愈受到极大的关注, 其工业应用比例正呈上升趋势^[1]。由于绝大多数焊接方法都采用局部加热, 随后快速冷却的方法, 故不可避免存在温度梯度, 于是产生内应力和变形^[2]。焊接应力和变形不但可能引起工艺缺陷, 而且在一定条件下将影响结构的承载能力: 诸如强度, 刚度和受压稳定性等, 除此以外还会影响到结构的加工精度。多道焊接是许多单层热循环交替作用, 相邻焊层之间彼此具有热处理作用。因此其温度场和残余应力较单道焊接复杂很多。国外对厚板焊接的温度场和残余应力的分布有一些研究^[3-7], 然而部分是局限于有限元数值模拟而没有试验数据的验证, 部分是单纯通过试验方法来进行研究。

本文将采用试验和数值模拟相结合的方法来进行分析。其中温度随着时间的分布是利用自制的热电偶温度测量系统进行测量, 在焊接完成并冷却到室温后利用盲孔法测量试样上下表面的残余应力。同时通过与有限元数值模拟的结果进行比较来验证有限元模型的合理性, 为评价焊接接头性能提供参考。

1 试验方法和试验工艺

1.1 试验材料和试板设计

本次试验中使用的是 A105 阀门用钢, 焊丝为 H08MnA, 直径 2 mm, 试板尺寸为 450×200×44、450×200×52(单位: mm), 采用带衬底 U 形坡口; 两试板点焊后, 安装在试验平台上。试板尺寸和坡口形状如图 1 所示。

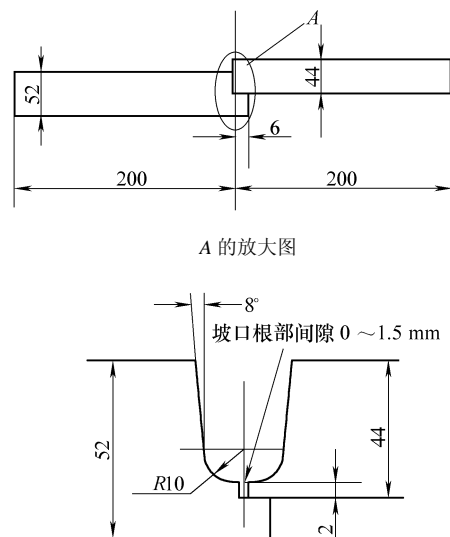


图 1 试板尺寸及坡口形状

试验中采用单电源双丝埋弧自动焊方法, 采用直流反接。下表列出了本次试验所用到的焊接参数。

表 焊接参数

堆焊层数	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	焊丝排列	伸出长度 L/mm	熔敷厚度 δ/mm	起焊温度 $\theta/^\circ C$
1	550	43	11	前后	45	2.90	37
2	600	44	11	前后	45	2.95	
3	700	45	11	前后	45	2.45	
4	700	43	10	前后	45	2.43	
5	800	43	9	前后	45	3.60	
6	850	42	9	前后	40	4.22	≈ 80
7	850	42	9	前后	40	4.40	
8	800	42	9	前后	40	4.35	
9	800	42	9	前后	40	4.20	
10~15	900	42	9	前后	40	3.60~4.20	

1.2 残余应力和温度的测试

在厚板的正反面分别进行了残余应力的测试,正面测量了 8 个点,背面测了 4 个点。测点分布见图 2 所示。

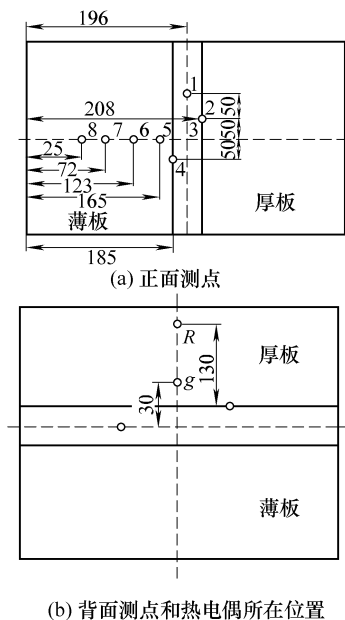


图 2 残余应力测试点和热电偶所在位置

在焊接的同时,利用自制的热电偶测温系统进行了温度的测量。图 2b 中 g 和 h 两点即为热电偶所在位置。

1.3 温度测量系统

埋弧焊过程中焊缝处的温度在 $1\ 000\ ^\circ C$ 以上,距离焊缝一定距离处的温度极限会低于 $1\ 000\ ^\circ C$,因此选用价格便宜、测量范围为 $-200\sim 1\ 300\ ^\circ C$ 的 K 型热电偶作为温度传感器能满足测量的要求。温度测量系统经过放大、滤波后,应用 SPI 总线 A/D 转换芯片 TLC2543 进行模数转换, A/D 采样率为 20KPS,通过 PRT 口与计算机接口;采用 Visual C++ 建立了配套的测试软件,实现温度数据的采集、分析与后处理。系统可以同时进 8 个点的温度连续

测量,最终获得实测的焊接温度动态分布。由于热电偶须点焊在试板上(即焊接电流、电压测量的模拟地),故温度测量系统与焊接电量测量系统无法共用一个模拟地,为了克服焊接大电流在试板上产生的共模电压干扰,在未采用隔离采样的状况下,温度测量采用地悬浮(与其他测量系统分离的独立测量系统)。图 3 是温度测量系统的硬件框图。

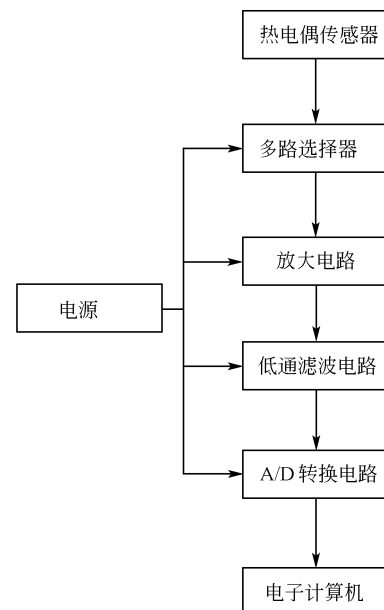


图 3 硬件系统框图

本温度测量仪通过计算机的并口对 TLC2543 芯片进行控制与数据传输,并采用 Visual C++ 建立了配套的用户软件,便于对测温仪进行参数设置。用户在主程序中设置参数后,通过调用 TLC2543 的 A/D 转换子程序获取温度场数据。

软件调用 `_inp(LPT)` 和 `_outp(LPT, DATAWORD)` 函数对计算机并口进行读写,从而控制 TLC2543 获得转换结果。需要注意的是,在 NT 环境下,内核安全模式禁止直接对端口进行操作。因此这里采用 PortTalk 作为设备驱动,实现了对底层端口的操作。

除此之外，也可在 VC++编程时，利用 NT 的 API 函数 CreateFile 和 WriteFile 来控制并口。

系统同时使用了 CD4051 八通道多路器来切换通道，将其与计算机并口相连，再根据用户的选择来控制通道的选通。另外，由于测温系统中存在着不可避免的零点漂移，将 AD590 温度传感器采集到的室温温度值与用热电偶获得的室温值相比较，通过在软件中调节零位偏移值使两者相等，从而减少了系统测量误差。

1.4 残余应力测量方法

盲孔法是在应力场测点的三向应变花上钻一个直径 $D=2.0\text{ mm}$ ，深度 $h=2.0\text{ mm}$ 的盲孔，从而该处的应力场在盲孔的干涉下发生了变化，这种场变化的原因在于：① 原有应力的局部释放。② 盲孔对应力分布的影响。③ 钻孔加工塑性应力的影响。在应变花规格及钻孔工艺确定时，以上三点规律保持一定。残余应力的计算可通过下列公式得到。

$$\varepsilon_1 = \varepsilon'_1 - \varepsilon_0 \quad \varepsilon_2 = \varepsilon'_2 - \varepsilon_0 \quad \varepsilon_3 = \varepsilon'_3 - \varepsilon_0 \quad (1)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{4B \cos \gamma} \quad (2)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} - \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{4B \cos \gamma} \quad (3)$$

$$\gamma = \cot^{-1} \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \quad (4)$$

$$\sigma_x = \frac{\varepsilon_1(B+A) + \varepsilon_3(B-A)}{4AB} \quad (5)$$

$$\sigma_y = \frac{\varepsilon_1(B-A) + \varepsilon_3(B+A)}{4AB} \quad (6)$$

式中 $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ 分别为最大、最小主应力； σ_x, σ_y 分别为贴片 $0^\circ, 90^\circ$ 方向的应力； $\varepsilon'_1, \varepsilon'_2, \varepsilon'_3$ 分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 三个方向盲孔法实测的应变； $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 三个方向除去塑性应变 ε_0 的测量值； ε_0 为塑性加工应变统计值； γ 为最大主应力与 0° 方向夹角； A, B 分别为盲孔法应变释放系数，可以通过试验的方法进行标定。

2 多道焊有限元模型

考虑到双丝埋弧焊的焊接速度大约为 10 mm/s ，可以作为高速热源处理。即热源可以假定瞬时加在焊缝线上，因此可取一单位长度的平板进行 2D 温度场和应力场分析，以节省计算时间和计算成本。图 4 为计算用有限元网络模型。计算过程中使用生死单元来模拟多道焊接。

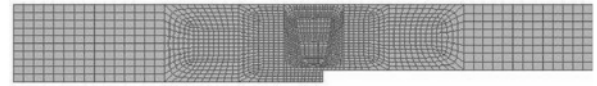
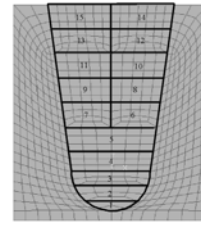
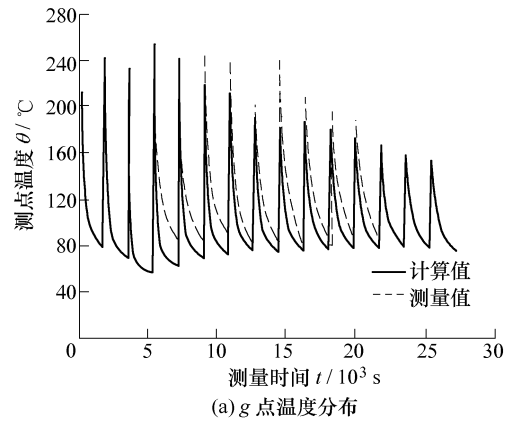


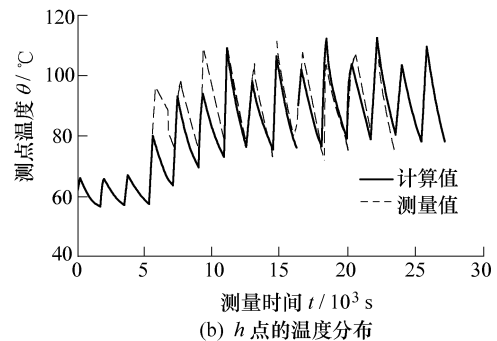
图 4 计算用有限元网格模型

3 有限元计算和试验结果

通过位于焊缝背面厚板处分别距离焊缝中心 30 mm 和 130 mm 的两个热电偶测温系统测得的温度曲线，以及通过有限元计算的温度曲线绘在图 5 中。在实际测量中由于试验仪器的故障，致使前 3 道和后 3 道的温度测量数据丢失，但是并不影响对多道焊的温度分析以及测量数据和有限元计算结果的比较。



(a) g 点温度分布



(b) h 点的温度分布

图 5 试样背面厚板处温度分布

在多道焊接中试样上各点的温度变化比单道焊接复杂了很多，其温度分布尤其是峰值温度直接影响材料的组织、硬度、机械性能和残余应力等。

由图 5 可见距离焊缝中心较远处前三道的峰值

温度不高, 主要是因为钢中导热需要一定的时间。实际计算中使用的是风冷热导率, 而实际试验中在焊接的过程中没有使用风冷, 只是在焊后迅速的施加了风冷处理, 这也就说明了实际温度峰值略高于计算温度峰值的原因。使用这些曲线, 可以得到母材上特定点在不同焊道的峰值温度。通过峰值温度可以估计可能的组织和相的转变和力学性能的变化。

图 6 为分别为厚板上下表面的横向残余应力和纵向残余应力的计算和测量结果, 图 7 为厚度方向上横向残余应力和纵向残余应力的分布曲线。由图 6 可知, 测试结果和计算结果吻合得较好, 但是

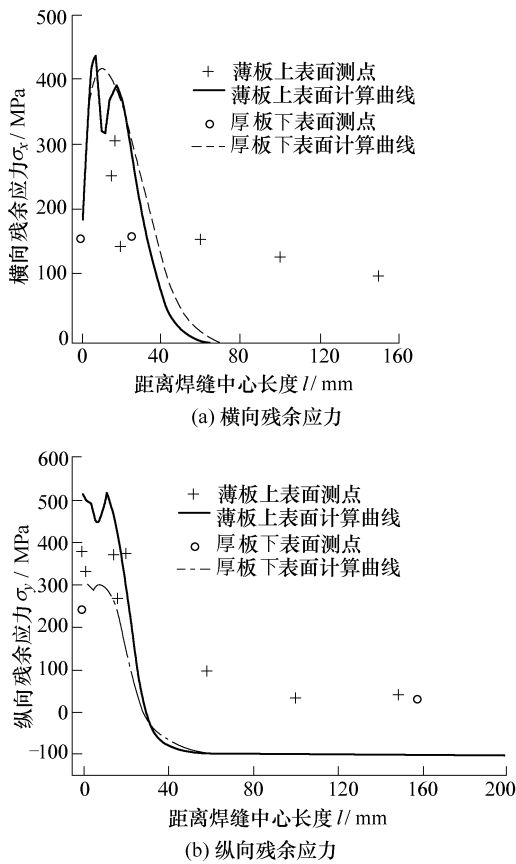


图 6 厚板上下表面的横向残余应力和纵向残余应力的计算和测量结果

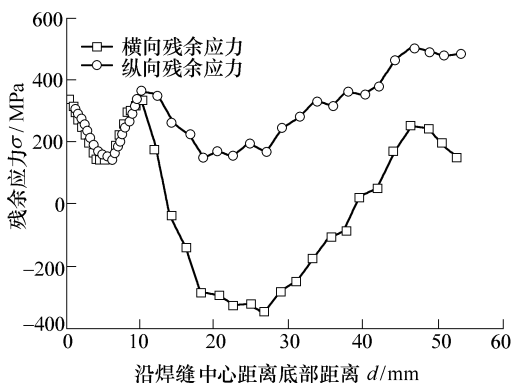


图 7 厚度方向残余应力分布曲线

在母材低应力区测试结果和计算结果存在一定偏差, 其主要原因如下。

(1) 计算的时候对焊缝形状进行了一定的规范化简化。事实上多道焊各道焊缝形状很复杂, 前道焊缝成形对后道焊接时焊枪姿态的影响; 后道焊缝成形对前道焊缝重熔影响; 更不包括层间可能的对夹渣和未焊透的打磨与补焊所引入的影响。

(2) 试板焊接前热处理消应力不彻底的残余应力对母材区实测应力的影响;

(3) 盲孔法测量值为直径 10 mm 斑点的应力平均值, 有限元计算值是按照网格划分条件下节点的应力值。所以在高应力焊缝区应力梯度变化较大的情况下, 实测应力往往低于计算应力。

(4) 其他影响因素, 如为稳定测量对试板与试验台的点焊固定等。

图 7 显示了在整个厚度方向上纵向残余应力均为拉应力, 横向残余应力在大约厚度一半处为压应力的最大值, 试样表面均为拉应力。厚度中部的横向压应力能有效的减小裂纹生成和扩展的风险, 然而表面上的拉应力会随同工作载荷一起促进裂纹的发生和发展, 所以焊后采取应力释放工艺(包括热处理、振动时效等)来减小表面的拉应力大小显得十分必要。

4 结论

(1) 试验测试结果和有限元计算结果吻合得较好, 说明该有限元计算模型能够有效地模拟厚板窄间隙埋弧自动焊的温度分布和残余应力场。

(2) 给出了试板表面特定点上的温度分布, 通过温度分布曲线为估计可能发生的组织和相的转变、机械性能的变化提供参考。

(3) 给出了厚板表面和厚度方向的残余应力分布曲线。厚度中部的横向压应力能有效的减小裂纹生成和扩展的风险, 表面上的拉应力会随同工作载荷一起促进裂纹的发生和发展, 所以焊后采取应力释放工艺(包括热处理、振动时效等)来减小表面的拉应力大小显得十分必要。

参 考 文 献

- [1] 姜焕中. 电弧焊与电渣焊[M]. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [2] 田锡唐. 焊接结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [3] BRISKSTAD B, JOSEFSON B L. A parametric study of residual stress in multi-pass butt-welded stainless steel pipes[J]. International Journal of Pressure Vessels and Pip-

- ing, 1998, 75): 11-25.
- [4] LINDGREN L E, RUNNEMALM H, NASSTROM M. Simulation of multi-pass welding of thick plate[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 44: 1 301-1 316.
- [5] MURUGAN S, SANJAI K P, KUMAR P V, et al. Temperature distribution and residual stresses due to multipass welding in type 304 stainless steel and low carbon steel weld pads[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2001, 78: 307-317.
- [6] MURUGAN S, KUMAR P V, RAJ B, et al. Temperature distribution during multipass welding of plates[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1998, 75: 891-905.
- [7] TENG T L, CHANG P H. A study of residual stresses in multi-pass girth-butt welded pipes[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1997, 74: 59-70.

TEMPERATURE DISTRIBUTION AND RESIDUAL STRESS IN MULTI-PASS NARROW GAP SUBMERGED ARC WELDING

ZHU Zhengqiang¹ CHEN Ligong² XU Jijin²
NI Chunzhen²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering,
Nanchang University, Nanchang 330029;
2. Institution of Welding, Shanghai Jiaotong
University, Shanghai 200030)

Abstract: By the methods of finite element analysis (FEA), the temperature distribution of thick plate narrow gap submerged arc welding (SAW) is analyzed. Also the residual stress distribution of upper surface, lower surface and along the thick direction is presented. The temperature distribution of specific points is measured by the temperature measurement system of thermocouple. After welding and cooling for a long time, the residual stress of the specific points of the upper and lower surface of the plate. The testing results are coincided with those of FEA which proves the rationality of this finite element model and offers reference to appraise the weld performance. In particular, the residual stress distributing curve in the thick direction which is inconvenient to measure is gained by FEA. There is large deviation between these two results in the base metal zone and the reason of this deviation is presented.

Key words: Residual stress

Temperature distribution

Multi-pass welding

Submerged arc welding

作者简介: 朱政强, 男, 1976年出生, 博士后, 副教授。主要研究方向为焊接质量控制和智能金属结构, 发表论文 20 余篇。

E-mail: zhuzhq@ncu.edu.cn