手工 MAG 焊接 Q345D 钢工字梁结构 热特性的有限元分析

郭三爱

(新疆交通职业技术学院 汽车与机电工程学院, 新疆 乌鲁木齐 831401)

摘 要:采用焊接专用有限元分析软件对 Q345D 低合金高强钢工字梁焊接结构手工 MAG 焊接过程进行数值仿 真,分析最优热输入条件下的温度场分布、熔池形态及熔池邻近区域金属升降温速率。此外,结合 Q345D 钢连续冷却组 织转变图(CCT 曲线),预测了焊缝及热影响区的微观组织组成。研究结果可为下一步预测该焊接变形和残余应力的分 布提供热学方面的理论借鉴。

关键词:Q345D钢;焊接温度场;热循环曲线;有限元分析

中图分类号:TG404

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2013)07-0183-03

Finite Element Analysis on Thermal Characteristics in Manual MAG Welded Q345D Steel with Beam Structure

GUO Sanai

(Department of Automotive Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Vocational & Technical College of Communications, Urumchi 831401, China)

Abstract: The welding process of Q345D low alloy high strength steel beam structure manual MAG welded was numerically simulated by special welding finite element analysis software. The temperature distribution, the morphology of molten pool and cooling rate of metal in adjacent the pool areas under the optimal thermal input condition were analyzed. Furthermore, based on the CCT curve of Q345D low alloy high strength steel, the microstructure of the welded joints at weld beam heat affected zone was predicted. The research results can provide thermal theory for the further prediction of welding deformation and residual stress distribution.

Key words: Q345D steel; welding temperature field; thermal cycle curve; finite element analysis

焊接工字梁具有优越的结构形式和良好的力学 性能,是现代建筑结构、桥梁结构和电站建设中日益 广泛采用的钢结构构架模式^[1]。焊接工字梁在生产 过程中焊接变形的控制是关键性的问题,因为焊接 变形不但增加了工作量和生产成本,而且影响到结 构的安装、使用和力学性能^[2]。焊接过程的局部加热 是引起焊接结构产生变形的主要原因,因此焊接过 程的热特性值得深入研究^[34]。本文以工程常用 Q345D 低合金高强钢手工 MAG 焊接工字梁结构焊 接过程为研究对象,采用数值分析方法研究焊接过 程的热特性,旨在为其后续焊接变形和残余应力的 预测和控制提供热学方面的理论基础。

1 试验材料及方法

焊接结构如图 1 所示。材料为 Q345D 低合金高 强钢板材,正火态。焊接方式为手工熔 化极气体保 护电弧焊(MAG),焊接速率约 10 mm/s,保护气体为 富氩混合保护气体(80%Ar+20%CO₂),气体流量为 15L/min。焊接时,前一道焊缝结束后间隔 10s,进行 下一道焊缝的焊接。



2 有限元模拟

有限元模型网格如图2所示。本模型主要包括

收稿日期:2012-11-21

基金项目: 江苏省无线传感系统应用工程技术开发中心校企合作项 目(2011-12)

作者简介:郭三爱(1965-),女,湖北武汉人,高级讲师,研究方向:汽车制造 及应用;电话:0991-7902636;Email:gsattkl@sina.com



图 2 有限元网格模型 Fig.2 Finite element mesh model

8 节点六面体单元和6 节点五面体单元(局部过渡区 域),共包含 104434 个节点和 134600 个单元。

采用经典 3-D 双椭球热源模型^{[9}(热源模型参数 取值见表 1) 代替实际 MAG 焊接的电弧热输入,电 弧热效率取 0.75^[8]。热源在对模型加热过程中的热 传导方程可表述为^[9]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_{\perp} \quad (t \ge 0)$$
(1)

式中:T为材料的瞬时温度 ($^{\mathbb{C}}$); λ 为材料的热导率 (W·mm⁻¹ $^{\mathbb{C}}$ -1); q_1 为热源单位时间产生的热量 (W·mm⁻³); ρ 为材料密度(g·mm⁻³);c 为材料的比热容(J·g⁻¹ $^{\mathbb{C}}$ -1)。

表 1 热源模型参数 Tab.1 Heat source model parameters

参数	q₁/(W⋅mm³)	q₁/(W⋅mm³)	$a_{\rm f}$ / mm	a _r / mm	<i>b</i> / mm	c / mm
取值	36	24	3	5	6	6

理性能属性可直接由 SYSWELD 软件自带材料数 据库获得。

3 模拟结果分析

3.1 焊接温度场的演变

图3给出了焊接过程温度场的演变云图。图3 (a)显示,在引弧后 0.5s 的时刻,熔池最高温度迅速 达到 1758.6℃,熔池金属开始熔化;图 3(b)显示,在 第一道焊缝焊接结束时(t=20s),熔池最高温度达到 2601.89 ℃;图 3(c)显示,在第一道焊缝结束后 10s 焊接第二道焊缝,第二道焊缝结束时(t=50s),熔池最 高温度仍旧为 2601.89℃,这说明就本研究用焊接 结构尺寸而言,在10s的时间间隔内,第一道焊缝焊 接热循环对第二道焊缝的温度场没有产生影响;图 3(d)显示,在第三道焊缝焊接结束时(t=80s),熔池最 高温度达到 2689.52℃,比前两道焊缝熔池最高温 度高出 87.63℃, 说明第三道焊缝受到第一道焊缝 焊接热循环的影响(焊接第一道焊缝时,第二道焊缝 区域金属材料被预热);图 3(e)显示,受第二到焊缝 焊接热循环的影响, 第四道焊缝焊接结束时(t=110 s),熔池最高温度达到 2689.58 ℃,近似等于第三道 焊缝结束时的熔池最高温度;图 3(f)显示,焊接结束 冷却 8 min 时(t=600 s),焊接结构的最高温度冷却至 112.128℃,最高温度区域位于上翼板两道焊缝中午 区域,焊接结构最低温度为 91.0737 ℃,位于腹板中 部区域,焊接结构的最高温度和最高温度差缩小,这



型表面与周围空气之 间的对流热交换遵循 Newton 冷却方程^[9],通 过热辐射散失的热量 q_r 遵循 Stefan-Boltzman 定理,辐射系数取值为 0.8^[7],Stefan-Boltzman 常量取值为 5.67×10⁸ W/(m²·k⁴)。

有限元计算时,模

需要用到的材料 属性有导热率、比热 容、密度。其中,比热 和密度是从室温到熔 点间取值,热导率是 从室温到固相线之间 取值。上述材料热物 是因为在焊接结构冷却过程中,焊缝高温区域的热 量除了通过表面以对流和辐射方式向周围空气散热 外,还通过自身的热传导向低温区域金属传递热量, 最终整个焊接结构的温差减小。

3.2 熔池形态及焊接热循环曲线分布

焊接过程的局部热输入是造成焊接结构产生变 形和残余应力的主要原因,因此有必要分析焊接过 程的热特性。

图 4 给出了焊接熔池进入准稳态时的形态和焊 缝及其邻近区域的热循环曲线。图 4(a)显示,在所选 的热源参数下,准稳态时,熔池近似为椭球状,长度 约 22 mm,宽度约 10 mm,熔池最高温度是 2539.06 ℃。图 4(b)显示,熔池升、降温速率较大;而热影响区 升降温速率较小。另外,根据软件后处理数据库显示





的热循环曲线计算数据可知,达到准稳态时,熔池和 热影响区的温度分别为 2460.33 ℃和 831.2064 ℃; 温度由 800 ℃冷却至 500 ℃的时间 (*t*₈₅) 分别为 3.5 和 4s。

3.3 热影响区组织预测

上述 185 时间是焊缝冷却时相变发生的主要阶段,对整个热影响区域焊后的组织和力学性能有着 重要影响。低合金钢的焊缝组织比较复杂,与其合金 元素、焊接方法等密切相关。通过数值模拟计算所得 的冷却时间,结合低合金钢焊缝金属连续冷却组织 转变图(CCT 曲线)可以预测热影响区的组织。

图 5 显示,准稳态时,升温速率最大区域位于熔 池前沿热源移动方向,约为 3660.11 ℃/s;而降温速 率最大区域位于熔池尾部,约为 796.444 ℃/s(负号 表示冷却)。热影响区金属升温速率范围约为



193.901 ℃/s,最大降温速率约为 301.271 ℃/s。

图 6 是 由 Jmatpro 软件数据 库 计算得到的 Q345D 钢的 CCT 曲线。结合上述 t₈₅时间及图 5 熔池 及其邻近区域金属的升降温速率,可以判断熔池及热 影响区金属冷却速率大于 100℃/s。因此,根据图 6 所 示,可以判断实际焊接焊缝和热影响区得到的金属组 织应大概为马氏体 + 贝氏体 + 珠光体组织。



4 结论

(1)本研究中,在所选的热源参数下,准稳态时, 熔池近似为椭球状,长度约 22mm,宽度约 10mm;熔 池升降温速率较大,而热影响区升降温速率较小。熔 池和热影响区对应的 t₈₅分别为 3.5 和 4s。

(2) 结合 Q345D 钢的连续冷却 CCT 曲线,预测 在最优热源参数下,其实际焊接接头焊缝及热影响 区域金属应该是马氏体+贝氏体+(下转第 188 页) 为了更好的实现组态软件的通用性,本试验的 模糊 PID 控制软件采用 VC 进行编写,因为目前大 多数组态软件支持 OLE for Process Control (简写为 OPC)接口技术并自带 OPC 服务器,这可以方便的 采用 VC 编写系统控制软件。

3 测试结果与分析

为了验证本试验设计的 SMT 回流焊炉温控制 系统的实际炉温控制效果,在广东某电子企业的 SMT 生产线上,在其它条件都相同的情况下,采用 同一台计算机分别使用传统 PID控制器和 PID 模糊 控制器进行 SMT 回流焊炉温控制,并与设定曲线 进行比较。图 3 是采用不同控制方法时回流焊炉内 整个焊接过程的工艺曲线。



temperature of SMT reflow

从生产现场的对比试验以及如图 3 所示的各种 工艺曲线,我们发现传统 PID 控制下的 SMT 回流 焊炉温工艺曲线在局部地区温度差异较大,炉温超 调现象较为明显,整个回流焊接工艺过程中,其炉温 工艺曲线与设定曲线的偏差在 -3~10℃之间,平均 温差的绝对值为 6.8℃,其温差有 6 处超过 5℃,难 以满足 SMT 回流焊的炉温控制要求;而采用 PID 模糊控制技术进行控制时,其工艺曲线有很好的跟 随性,较好的抑制了炉温的大惯性、大滞后性等,其

(上接第185页)珠光体组织。

参考文献:

- [1] 刘志刚,苏白兰,韦弦. Q345 钢板焊接性能研究[J]. 河南冶金, 2003,11(1):14-15.
- [2] 胡晓萍,屈朝霞,李自刚,等. Q345D 钢结构梁腹板对接接头 裂纹分析[J]. 理化检验,2006,42(8):416-418.
- [3] 雷卡林(Рыкалин Н Н). 焊接热过程计算[М]. 北京:中国工 业出版社,1958.
- [4] 郭彦兵,童彦刚,贺晓娜. 低合金钢薄板件 TIG 焊接温度场三

焊接工艺曲线与设定曲线的偏差在 -2~2℃之间, 温差绝对值的算术平均值为 1.7℃,平均温差小,可 以有效抑制生产过程中其他外在因素对炉温稳定性 方面的影响,确保实现高效率、高可靠性的电子产品 SMT 回流焊接,实现较高精度的系统控制要求。本试 验设计的 SMT 回流焊炉温控制系统,稳定性较好,控 制精度较高,具有较高的工程应用价值。

4 结论

(1) 基于模糊 PID 控制技术,采用增量式 PID 控制算法、二维模糊控制算法、全三角形隶属函数,可以设计出具有较高控制精度的 SMT 回流焊炉温 控制系统。

(2) 采用模糊 PID 控制技术时,SMT 回流焊炉 的焊接工艺曲线与设定曲线的偏差在 -2~2℃之 间,温差绝对值的算术平均值为 1.7℃,稳定性较 好、控制精度较高,具有较高的工程应用价值。

(3) 采用传统 PID 控制下的 SMT 回流焊炉的 焊接工艺曲线与设定曲线的偏差在 -3~10℃之间, 平均温差的绝对值为 6.8℃,难以满足 SMT 回流焊 的炉温控制要求。

参考文献:

- [1] 刘洪涛. 基于模糊控制的锚链调质炉炉温系统设计 [J]. 电 工技术,2010,(4):38-40.
- [2] 张丽萍,马立新,金珍珍. 模糊自适应 PID 炉温控制系统的设 计[J]. 热加工工艺,2012,41(14):234-236.
- [3] 唐镜军. 热处理炉温度的 PID 控制[J]. 机床电器,2010,(5): 55-56.
- [4] 张丽玲. 基于参数自调整模糊 PID 算法的弧焊过程熔透控制 研[J]. 热加工工艺,2011,40(3):123-126.
- [5] 尹懿,张晨曙,叶建雄,等. 基于 Fuzzy-PID 复合控制的焊缝自动跟踪系统的研究[J]. 热加工工艺,2010,39(13):120-123.
- [6] 张勇,甄国涌. 基于 W5300 的以太网数据传输硬件设计及优化[J]. 化工自动化及仪表,2011,38(8):989-991. II

维有限元模拟[J]. 热加工工艺,2010,39(21):158-160.

- [5] 武传松. 焊接热过程数值分析[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大 学出版社,1990.
- [6] Kiyoshima S. Quick Welder User's Manual [M]. Tokyo: User's Center of Computational Mechanics Inc., 2005. 23.
- [7] Kiyoshima S, Deng D, Ogawa K, et al. Investigations on welding residual stresses in penetration nozzles by means of 3D thermal elastic plastic FEM and experiment[J]. Comput Mater Sci, 2009, 46:987-990. III