

文章编号:0253-9993(2012)10-1771-06

装车站 H 型钢-节点板组焊温度场数值模拟及实验研究

贾 栗¹, 邹 勇¹, 邹增大¹, 赵永生²

(1. 山东大学 材料液态结构及遗传性教育部重点实验室, 山东 济南 250061; 2. 天地科技股份有限公司, 北京 100013)

摘 要:利用 ANSYS 软件的二次开发语言编写程序,对装车站中常用的 H 型钢-节点板组焊结构的焊接温度场进行了模拟,利用红外测温仪对观测点的温度进行了实时测量,研究了焊缝表面温度随时间的变化规律。结果表明,实测热循环曲线与模拟结果吻合较好,证明了此研究中采用的热源模型、参数设置和网格划分方法是可行的。

关键词:H 型钢-节点板;焊接;温度场;数值模拟

中图分类号:TD421.7;TG402 **文献标志码:**A

Temperature field simulation and experimental study for H-beam and end-plate welding of loading station

JIA Li¹, ZOU Yong¹, ZOU Zeng-da¹, ZHAO Yong-sheng²

(1. Key Laboratory for Liquid-Solid Structural Evolution and Processing of Materials (Ministry of Education), Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Tiandi Sciences and Technology Company, Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: Computer program was written using ANSYS parametric design language (APDL) to simulate welding temperature field of H-beam and end-plate assembly, which is commonly used in loading station, element birth and death technique was used to simulate weld deposition and moving heat source, and infrared thermometers were used to measure the real-time temperature of the welding seams during welding and cooling process. The changing of the weld surface temperature was studied. Results show that the real measured thermal cycle curves of weld matches well with the simulation results, indicate that the used heat source model and parameters and mesh generation are reliable in this study.

Key words: H-beam and end-plate; welding; temperature field; numerical simulation

为适应煤炭市场发展和铁路大提速的需要,煤炭储装运系统的升级改造和新建项目越来越多, H 型钢-节点板组焊结构是装车站钢框架常用的节点形式,进行节点设计优化和结构安全保障的前提是对焊接残余应力进行研究,减小安装误差和提高计量精度的前提是对焊接变形进行研究。但是,这些研究工作的基础都需要对节点域组焊温度场进行研究,在进行温度场研究的基础上进一步优化焊接工艺、改善残余应力分布、减小焊接变形和安装误差,提高装车站的建设质量。

H 型钢-节点板组焊属于 T 型接头形式。多年来,国内外学者的研究多集中于较为简单的平板对接形式,受各种因素的影响,对 T 型接头焊接温度场进行模拟的较少^[1-10]。目前,对 T 型接头的焊接温度场模拟仍存在以下问题:① 热源能量分布参数的确定缺乏系统而准确的资料;② 材料高温性能参数严重不足;③ 现有的 T 型接头三维温度场模拟大多数局限于纯模拟,经试验验证的研究项目较少,仅文献[7]采用热电偶对焊接热影响区两个测点的温度进行了测量验证,文献[9]采用热像仪对焊缝背面温度分布进行了

测量。获得经试验验证的 T 型焊接接头温度场的模拟数据,对开展应力场模拟、焊接变形预测、焊接顺序优化等领域的进一步研究具有重要的意义。

20 世纪 80 年代以后,焊接温度场的研究普遍采用三维有限元方法,但受计算方法、计算机运算能力等条件的限制,一般极少对原型整体结构进行三维有限元分析,本文有限元模型按实际试件尺寸建立,使研究结果更具有实用价值。

1 有限元模拟及试验方法

1.1 焊接温度场数值模拟的特点

焊接温度场模拟是典型的非线性瞬态热传导问题,且受多方面因素的影响,涉及热源类型、焊接电流、电弧电压、焊接速度、材料的热物理性能、焊件的几何尺寸、焊接环境因素等,与以上因素相关的参数设置会影响计算的收敛性和计算结果的准确性。本文在编写 ANSYS 有限元计算程序时,较好地解决了相关参数的设置问题,模拟结果比较理想。

1.2 有限元模型及网格划分

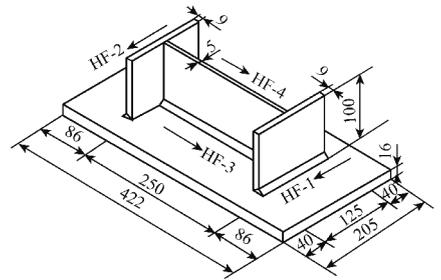
本文在建立有限元模型时,H 型钢与节点板采用 4 条焊缝连接,分别以 HF-1、HF-2、HF-3 和 HF-4 表示,数字表示焊接顺序。其中翼缘板与节点板的连接采用单面剖口对接焊缝(双层);腹板与节点板的连接采用 T 型接头双面角焊缝(单层)。有限元分析单元选择 8 节点六面体单元 SOLID70。

在焊接过程中,因焊接热源能量高度集中,温度场的分布极不均匀,在焊缝及其附近区域温度极高,离开该区域后温度急剧下降。在有限元划分网格时,焊缝及附近区域必须采用细密网格,才能达到计算精度要求,但模型全部采用细密网格划分必然导致自由度数目增大,计算量倍增,故本文在远缝区采用粗网格。网格划分后的单元总数为 18 545,节点数为 22 876。组焊结构三维几何模型如图 1(a)所示,有限元网格划分如图 1(b)所示。

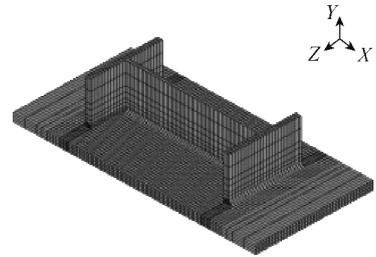
1.3 边界条件

边界条件是指物体边界上的换热条件,本文焊接温度场模拟时考虑表面换热边界条件和热流密度边界条件。

焊件表面换热边界条件主要是在焊接和随后的冷却过程中的对流和辐射换热,为简化计算,通常将对流与辐射作用同时考虑,用总表面换热系数表示。本文模拟时采用随温度变化的总换热系数,将试件所有外表面均作为散热边界。经多次试算发现,总表面换热系数的数值变化对温度场峰值温度的影响并不大,因此这种处理方法不会造成明显的模拟误差。



(a) 工字钢-端板组焊结构几何模型和截面参数



(b) 有限元网格划分

图 1 分析模型

Fig. 1 Analysis model

热流密度边界条件即热源模型的加载,本文采用生死单元技术模拟焊接热输入,以生热率的形式施加加热荷载。热源模型采用均匀体热源,焊缝金属的填充和均匀体热源的施加采用生死单元技术进行模拟。体热源的选择基于试验测定的焊缝形状和几何尺寸,热荷载有效作用段长度为一个单元的长度,热作用时间等于电弧移动一个单元所用的时间,生热率等于电弧有效功率除以所作用单元的体积,即:

$$\begin{cases} q = \frac{Q}{A_w v dt} \\ Q = \eta UI \end{cases} \quad (1)$$

式中, q 为生热率, W/mm^3 ; A_w 为焊缝的横截面积, mm^2 ; v 为焊接速度, mm/s ; dt 为每个荷载步的时间步长, s ; Q 为热源传给焊件的有效瞬时热能, W ; η 为焊接热效率; U 为电弧电压, V ; I 为焊接电流, A 。

本文模拟时,先由试验测定宏观酸蚀后的焊缝尺寸,计算三角形面积得到焊缝的横截面积 A_w 值,其中 HF-1, HF-2 的 A_w 值取整后为 $56 mm^2$, HF-3, HF-4 的 A_w 值取整后为 $18 mm^2$ 。

1.4 焊接工艺参数及材料参数

本文组焊结构采用低碳钢 Q235B,焊接方法为 CO_2 气体保护焊,焊丝选择 $\phi 1.2 mm$ 的 RE50-6 实芯焊丝,在保证良好的焊缝质量及焊接效率的条件下,现场实测的腹板焊缝焊接电流 260 A,电弧电压 30 V,焊接速度 28.8 m/h;翼缘板焊缝焊接电流 270 A,电弧电压 31 V。本文模拟所用焊接参数为以上实测数据,模拟时 4 条焊缝依次施焊。

在进行焊接温度场的非线性计算时,需要给定随

温度变化的材料参数,因试验条件的限制,金属材料在高温状态时的热物理性能参数严重匮乏,而材料的高温性能参数对焊接模拟结果影响较大,若处理不当,就会导致计算不收敛或计算结果不准确。本文温度场模拟时,材料的热物理性能参数 1 000 °C 以下数据参考文献 [11 ~ 12], 1 000 °C 以上数据参考文献 [13]。Q235B 钢的热物理性能参数与温度的关系如图 2 所示。

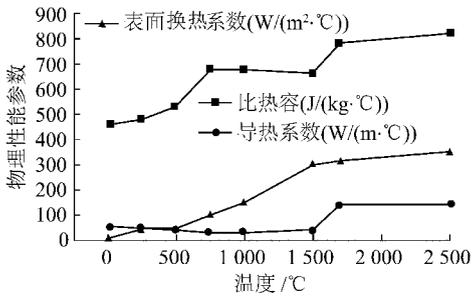


图 2 Q235B 钢的热物理性能参数与温度的关系

Fig. 2 Relationship between physical properties of Q235B grade steel and temperature

1.5 焊接热效率

焊接过程中,焊接热源所产生的热量在加热焊件的同时,一部分通过与周围环境的热交换散失,一部分随飞溅散失,因此焊接热效率 $\eta < 1$ 。鉴于 η 参数的影响因素多和实验测定复杂等原因,各文献资料中 η 的取值范围跨度较大,文献 [14] 对现有文献资料中 CO₂ 气体保护电弧焊 η 的取值进行了汇总,得到了 η 取值范围为 75% ~ 90%。本文在此范围内首先预估一个 η 值进行温度场分析,然后将焊接加热和冷却过程中的模拟结果与远红外测温仪的测量结果进行对比,根据对比的偏差调整 η 的取值,直至模拟结果与试验结果相符。经反复试算调整及试验校核, η 值取为 75% 较为合适。 η 值验证时选取 T 型接头试件,试件 FB-1 的底板尺寸为 200 mm × 198 mm × 16 mm,肋板 200 mm × 80 mm × 6 mm,焊缝形式为单面单层角焊缝;试件 YB-1 的底板尺寸为 200 mm × 175 mm × 16 mm,肋板 200 mm × 80 mm × 9 mm,焊缝形式为单面单层剖口对接焊缝,模拟结果与试验测试结果对比见表 1。

1.6 有限元分析

鉴于焊接过程和模拟过程的复杂性,本文在有限元分析过程中做了如下假设:① 忽略焊丝与母材材料的非一致性,采用相同的热物性参数;② 忽略保护气体对温度场的影响;③ 假设焊接速度、焊接电流、焊接电压、焊接热效率均为常数;④ 假设热源热流密度恒定,热源的形状和尺寸固定不变;⑤ 忽略试件与

支承件之间的热传导。模拟时初始温度值取 30 °C,相变潜热的处理采用热焓法。

表 1 T 型试件观测点的峰值温度对比

Table 1 Peak temperature comparison between test and simulation of T-joint

试件	观测点位置	模拟峰值温度/°C	实测峰值温度/°C	差值/°C
FB-1	焊缝正面	2 123.5	2 117.0	6.50
	焊缝背面	364.04	480.2	-116.16
YB-1	焊缝正面	1 863.0	2 047.0	-184.00
	焊缝背面	729.1	771.2	-42.10

有限元计算采用宝德 PT6310N-SD1 工作站,计算时采用完全牛顿-拉普森方法,针对大型结构非线性求解收敛困难的问题,本文模拟时求解器选择预条件共轭梯度迭代求解器,采用小的时间步长,采取线性搜索、自动时间步长跟踪等一系列措施,以加强计算的收敛性。本文温度场计算时的非线性收敛误差值为 0.01。

1.7 温度测量

对于焊接温度场的实验研究,以往多采用热电偶对焊接热影响区的点进行温度测量,这种接触测温方法操作比较困难,测量精确较低。本文借助远红外测温技术进行现场温度数据采集,远红外测温技术为非接触测温,对被测温度场无干扰,测温速度快、精度高,能实时采集焊缝观测点的温度。

试验选择美国 Raytek 公司的 Marathon™ MM 系列红外测温仪,对观测点温度进行精确测量。根据所测部位温度范围的不同,本文选择了 MM1MH 型高温测温仪和 MMLT 型低温测温仪组合,同时对观测点的温度进行实时测量,以实现温度数据的连贯性,并将数据同步传输到微机中保存。两台仪器组合后的测温范围为 -40 ~ 3 000 °C,目标直径为 5 mm,测试角度为 90°,与目标的距离为 350 mm (低温) 和 500 mm (高温),在本文试验条件下,钢板辐射率的取值为 $\varepsilon_{\text{solid}} = 0.8$, $\varepsilon_{\text{liquid}} = 0.35$ 。在测温过程中,由熟练焊工匀速焊接,测温时参考文献 [15] 的研究结果,将测温系统垂直于焊缝放置,以避免弧光辐射等造成的干扰。测温试验如图 3 所示。

2 模拟与试验结果分析

2.1 温度场模拟结果

图 4 为焊接有限元模拟的温度场云图。图 4(a), (b) 分别为焊接开始后 60 s 和 125 s 时的温度场云图,可以看出,随着热源的移动,温度场的分布不



图 3 测温试验

Fig. 3 Temperature measurement process

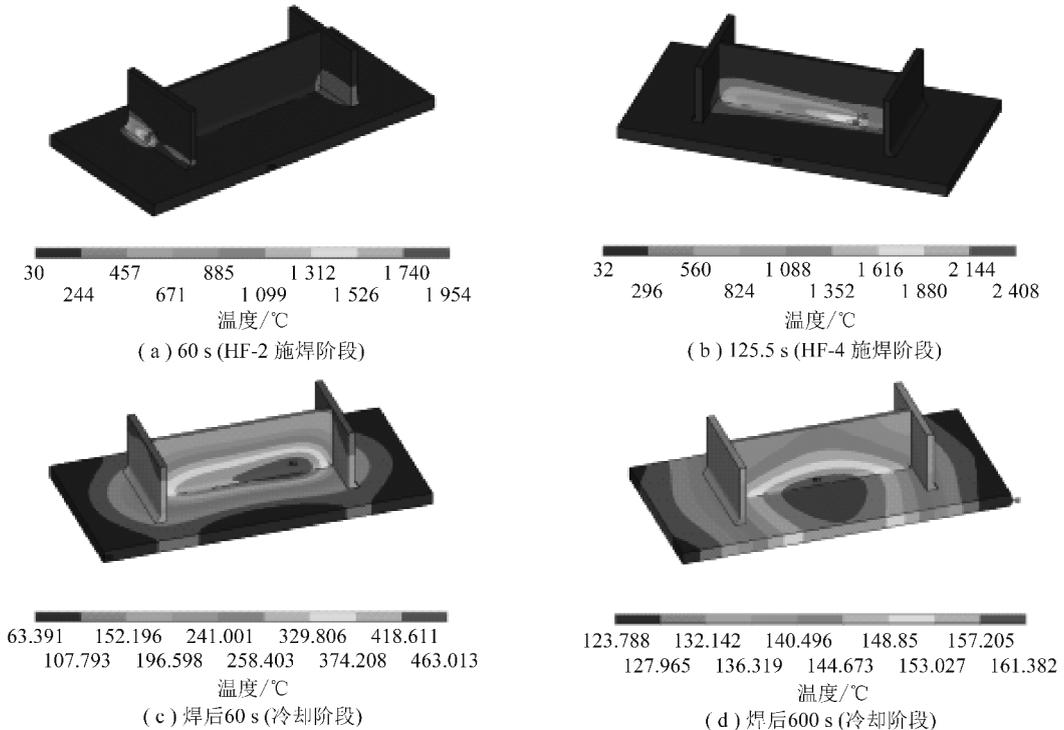


图 4 温度场云图

Fig. 4 Contours of temperature fields

时的温度场云图,可以看出,在焊后冷却 60 s 时,组焊构件中部高温区域最高温度降为 463 °C 左右,由于热传导作用,边缘低温区域的温度则升到 63 °C 左右;在焊后冷却 600 s 时,组焊构件上最高温度为 161 °C 左右,最低温度为 123.8 °C 左右,温度在整个构件上逐步趋于均匀分布。

焊接模拟温度场云图清晰地展现了焊接温度场的变化过程,理论上符合热传导的分布规律,也说明了模拟结果的合理性和有效性。

2.2 焊接热循环曲线

在焊接热源作用下,焊件上某点的温度随时间变化的过程可以用一条曲线来表示,这种曲线称为焊接热循环曲线。图 5 为焊缝观测点模拟与实测焊接热循环曲线的比较,可以看出,模拟曲线与实测曲线吻合良好,较好地反映了焊接过程中温度急剧变化的特点。在热源到达观测点时,该点温度迅速达到最高温

断发生变化,T 型接头焊缝的熔池沿焊缝表面呈椭圆形,熔池前方的温度梯度很大,而熔池后方温度梯度则较缓。从图 4(a)可看出,在时间点 60 s 时的 HF-1 焊缝温度场的分布情况和 HF-2 焊缝第 1 层焊后温度场的分布情况,从图 4(b)可以看出,在时间点 125 s 时 HF-3 焊缝背面温度场分布情况,同时也证明了 HF-3 焊缝形成的温度场提高了 HF-4 焊缝的初始焊接温度。

图 4(c),(d)分别为焊接结束后冷却 60,600 s

度 2 400 °C 左右,当热源离开观测点后,该点温度又迅速降低,但降温速度小于升温速度。

图 5(a),(b)显示, HF-1 和 HF-2 的第 2 层焊缝(第 2 个波)的峰值温度略高于第 1 层(第 1 个波),在降温阶段第 2 层的降温速度也明显低于第 1 层。这是因为第 1 层焊缝形成的温度场提高了第 2 层焊缝的初始温度,当热源到达观测点附近,观测点的温度仍高达 253 °C 左右,导致第 2 层焊缝的热循环曲线峰值温度较高,降温较缓。图 5(c),(d)显示, HF-4 的峰值温度大于 HF-3,降温速度较 HF-3 为缓,这也是由于 HF-3 施焊时对 HF-4 母材的间接预热作用造成的。从图 5 中可以看到,由于升温速度极快,且记录温度数据时的时间间隔偏大,使熔化潜热现象不明显,但在降温过程中,热循环曲线在 1 400 ~ 1 600 °C 温度区间出现了明显的平缓段,这是因为当液态金属的温度到达凝固温度时发生液-固相变释

放出热量,即凝固潜热,由于凝固潜热的释放,补偿了焊缝金属散失到周围环境的热量,使冷却过程中出现

了某时间段上温度恒定的现象,温度恒定的这段时间即为凝固时间,凝固过程结束后,温度开始继续下降。

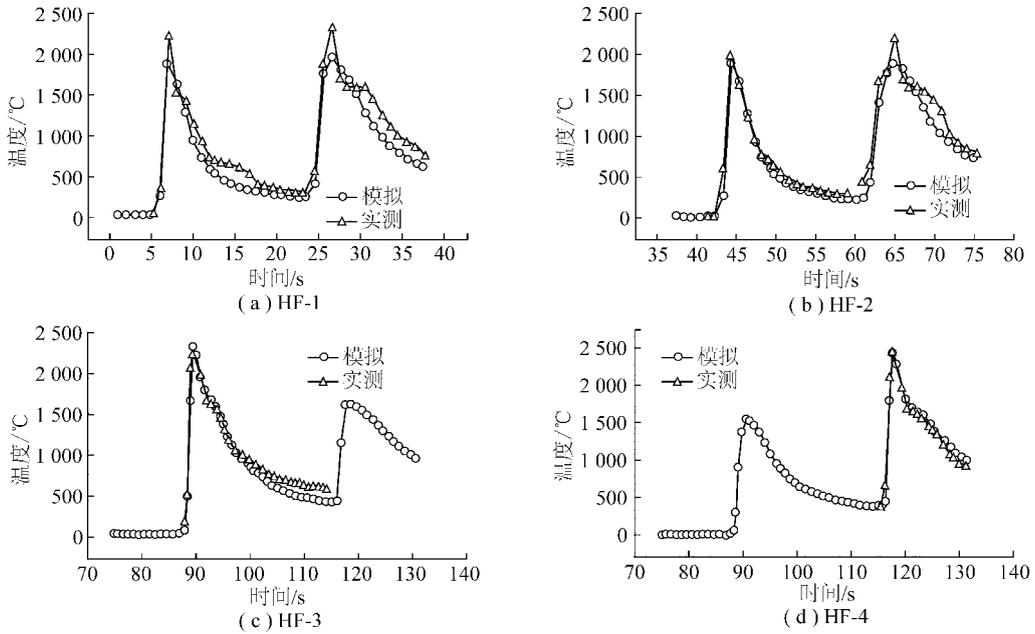


图 5 观测点热循环曲线

Fig. 5 Thermal cycle curves of the observation points

2.3 误差分析

表 2 列出了模拟峰值温度与实测峰值温度的对比,表中 L-1 表示第 1 层焊缝,L-2 表示第 2 层焊缝。从表 2 可以看出,观测点的实测温度与模拟温度存在一定误差,造成误差的主要原因有:① 在数值模拟过程中,由于高温热物理参数的测量比较困难,模拟所用的部分高温参数值与实际值存在偏差;② 焊接过程中温度变化剧烈,在很短的距离内,温度值会大幅变化,观测点在模型上与试件上位置的偏差也会导致温度的差异;③ 红外探测仪在高温及低温的校正误差。

表 2 观测点的峰值温度对比

Table 2 Peak temperature comparison between test and simulation

观测点位置	焊缝代码	模拟峰值温度/°C	实测峰值温度/°C	差值/°C	误差/%	
翼缘板	HF-1	L-1	1 890.1	2 227	-336.9	15.1
		L-2	1 977.6	2 315	-337.4	14.6
	HF-2	L-1	1 894.5	1 986	-91.5	4.6
		L-2	1 949.9	2 199	-249.1	11.3
腹板	HF-3	2 297.2	2 213	84.2	3.8	
	HF-4	2 426.8	2 441	-14.2	0.6	

料高温性能参数、热源模型及有限元网格划分模式可以很好地满足计算要求,模拟与实测结果基本一致。

3 结 论

(1) 运用 ANSYS 软件对 H 型钢-节点板组焊结构的温度场进行了数值模拟,利用红外测温仪对焊接观测点的温度进行了现场实测,数值模拟结果与试验测量结果吻合良好,证明本文有限元程序模拟的有效性、选用热源模型的适用性、各参数设置及材料高温性能参数选用的准确性。对于复杂组焊结构,本模拟过程是可行的,对于同类组焊结构焊接过程模拟的研究及工程应用提供了参考。

(2) 凝固潜热现象的出现进一步验证了模拟过程和结果符合实际情况。

(3) 研究成果为进一步研究同类组焊结构的焊接残余应力及焊接变形奠定了基础,进一步的研究成果将为提高装车站的建设质量和技术水平提供技术支持。

(4) 对于同类组焊结构焊接模拟,焊接热效率值建议取 75% 较为合适。

参考文献:

[1] Jeong S K, Cho H S. An analytical solution to predict the transient temperature distribution in fillet arc welds [J]. Welding Journal, 1997, 78(6): 223-232.
 [2] Kim C-H, Zhang W, DebRoy T. Modeling of temperature field and

以上模拟和实测的结果对比表明,本文采用的材

- solidified surface profile during gas-metal arc fillet welding[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(4): 2667-2679.
- [3] Zhang W, Kim C-H, DebRoy T. Heat and fluid flow in complex joints during gas metal arc welding—Part I: Numerical model of fillet welding[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 95(9): 5210-5219.
- [4] Zhang W, Kim C-H, DebRoy T. Heat and fluid flow in complex joints during gas metal arc welding—Part II: Application to fillet welding of mild steel[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 95(9): 5220-5229.
- [5] Kumar A, DebRoy T. Guaranteed fillet weld geometry from heat transfer model and multivariable optimization[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47: 5793-5806.
- [6] Kumar A, DebRoy T. Heat transfer and fluid flow during Gas-Metal-Arc fillet welding for various joint configurations and welding positions[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 2007, 38(3): 506-519.
- [7] Fratini L, Buffa G, Shivpuri R. Influence of material characteristics on plastomechanics of the FSW process for T-joints[J]. *Materials and Design*, 2009, 30(7): 2435-2445.
- [8] Murugan N, Narayanan R. Finite element simulation of residual stresses and their measurement by contour method [J]. *Materials and Design*, 2009, 30: 2067-2071.
- [9] Zeng Zhi, Wang Lijun, Wang Yue, et al. Numerical and experimental investigation on temperature distribution of the discontinuous welding [J]. *Computational Materials Science*, 2009, 44: 1153-1162.
- [10] Siva Shanmugam N, Buvanashakaran G, Sankaranarayanan K, et al. A transient finite element simulation of the temperature and bead profiles of T-joint laser welds [J]. *Materials and Design*, 2010, 31: 4528-4542.
- [11] 《机械工程材料性能数据手册》编委会. 机械工程材料性能数据手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [12] 张家荣, 赵廷元. 工程常用物质的热物理性质手册[M]. 北京: 新时代出版社, 1987.
- [13] 鹿安理, 史清宇, 赵海燕, 等. 厚板焊接过程温度场、应力场的三维有限元数值模拟[J]. *中国机械工程*, 2001, 12(2): 183-186. Lu Anli, Shi Qingyu, Zhao Haiyan, et al. Three-dimensional finite element simulation for welding temperature field and stress field of thick plate [J]. *China Mechanic Engineering*, 2001, 12(2): 183-186.
- [14] 郑振太. 大型厚壁结构焊接过程的数值模拟研究与应用[D]. 天津: 天津大学, 2007. Zheng Zhentai. Research and application of numerical simulation for welding process of large-scale thick-walled structure[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [15] Huang R S, Liu L M, Song G. Infrared temperature measurement and interference analysis of magnesium alloys in hybrid laser-TIG welding process[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 447: 239-243.