

基于相似理论的箱型结构焊接应力与变形的数值模拟

汤小红^{1,2}, 杨岳¹, 张闪影³

(1. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075; 2. 中南林业科技大学 机电工程学院, 长沙 410004;
3. 江铃汽车股份有限公司, 南昌 330001)

摘要: 从基于温度场的相似准则出发, 建立并推导出了均匀热源模型的相似条件, 利用该相似条件, 对平板对接焊和角接焊分别进行了温度场、位移场和应力场的数值模拟计算与对比分析。结果表明, 原模型与相似模型的温度场、位移场和应力场误差相当小, 其误差分别仅为 3.7%、4.7%、3.8%。基于均匀热源相似条件, 对箱型结构的焊接残余应力与变形进行了数值模拟, 得到了相似箱型结构焊接残余应力的变化规律和变形量随距离的变化曲线, 其变形量的数值模拟结果与实际测量结果误差仅为 9.8%, 进一步验证了均匀热源模型相似条件的正确性。

关键词: 相似理论; 应力与变形; 数值模拟; 箱型结构

中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2013)11-0022-05



汤小红

0 序 言

在预测和控制焊接结构的残余应力及变形过程中, 广泛采用数值模拟和试验相结合的方法。一般情况下, 数值模拟和试验验证均采用 1:1 的模型进行对比分析, 以此来验证数值模拟结果和试验测量结果的吻合度。然而对于大型复杂的焊接结构, 如果按照 1:1 的模型进行数值模拟和试验验证, 不但数值模拟的计算量非常庞大, 计算结果的准确性难以保证, 而且试验验证的成本和生产周期也大大增加。

相似理论已广泛应用于造船、飞机、风洞等诸多领域^[1]。相似理论在焊接方面的应用研究尚处在起步阶段。清华大学的蔡志鹏^[2]利用焊接相似准则建立了高斯热源的相似条件并验证了在该热源条件下的温度场、应力场和应变场的相似关系; 哈尔滨工业大学的姬书得等人^[3,4]在焊接相似准则条件下建立了双椭球热源的相似条件并验证了在该热源条件下的焊接残余应力与应变的对应关系。利用相似理论可以缩小大型复杂焊接结构, 极大地减少试验成本, 并缩短生产周期, 因此对于焊接相似理论的研究具有重要的意义。

1 基于温度场相似准则的建立

如果两个焊件完全满足温度场相似条件, 在焊接过程中相似模型和原模型之间应满足以下 5 个条件^[2,3]: (1) 相同材料; (2) 初始温度与环境温度相同; (3) 力的边界条件应满足所加外力大小与方向相同; (4) 位移边界条件应满足几何比例关系; (5) 原模型和相似模型(以下标 m 表示)之间的焊缝长度 l、热输入 q、焊接速度 v、表面换热系数 α 和焊接时间 t 应满足

$$\left. \begin{aligned} \frac{l_m}{l} &= \frac{q_m}{q} = \delta \\ \frac{v_m}{v} &= \frac{\alpha_m}{\alpha} = \frac{1}{\delta} \\ \frac{t_m}{t} &= \delta^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: δ 为相似模型与原模型的几何尺寸比例。

根据上述 5 个条件, 保证温度场完全相似的条件下, 基于相似原理, 再利用焊接过程中的微分方程, 从而推导出模拟件与原件的应力场及应变场的关系式为^[2,3]

$$\left. \begin{aligned} T_m &= T \\ (\sigma_{ij})_m &= \sigma_{ij} \\ (u_i)_m &= \delta u_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: T 为温度场; σ_{ij} 为应力分量; u_i 为位移分量。

2 均匀热源模型的相似条件

均匀热源模型也是一种体热源模型, 在焊缝截面上施加均匀的体热流密度, ANSYS 以生热流载荷形式加载^[5], 生热流用 H_g 表示, 即单位体积内的热输入功率, 表达式为

$$H_g = \frac{q}{Avdt} \quad (3)$$

式中: q 为热输入; A 为焊缝截面积; v 为焊接速度; dt 为每个子步时间.

由温度场的相似条件有 $q_m/q = \delta$, 对于相似模型和原模型应有

$$\frac{(H_g)_m}{(H_g)} = \frac{\frac{q_m}{A_m v_m dt_m}}{\frac{q}{Avdt}} = \frac{q_m}{q} \cdot \frac{A}{A_m} \cdot \frac{v_m}{v} \cdot \frac{dt_m}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{A_m}{A} = \left(\frac{l_m}{l} \right)^2 = \delta^2 \quad (5)$$

式中: A_m 为相似模型焊缝截面的面积, 对于矩形焊缝截面来说 A_m 为长、宽缩小后的面积, 对于弧形焊缝截面来说 A_m 为半径和弦长缩小后的面积. 令

$$dt = \frac{l}{nv} \quad (6)$$

式中: n 为原模型焊缝的子步数(沿焊缝长度的单元数量), 而

$$dt_m = \frac{l_m}{n_m v_m} \quad (7)$$

式中: n_m 为相似模型焊缝的子步数(沿焊缝长度的单元数量). 假设原模型焊缝的子步数与相似模型焊缝子步数相等, 即 $n = n_m$, 也就是每个子步的长度对应成比例. 所以有

$$\frac{l_m}{l'} = \frac{n_m}{n} = \delta \quad (8)$$

式中: l' , l' 分别为相似模型和原模型焊缝处子步长度. 将式(6)、式(7)和式(8)根据相似比例得

$$\frac{dt}{dt_m} = \frac{l}{l_m} \cdot \frac{n_m}{n} \cdot \frac{v_m}{v} = \frac{1}{\delta} \times 1 \times \frac{1}{\delta} = \frac{1}{\delta^2} \quad (9)$$

将式(5)、式(9)代入式(4)得

$$\frac{(H_g)_m}{(H_g)} = \frac{1}{\delta^2} \quad (10)$$

所以在基于相似准则的条件下, 生热率热源的相似条件为

$$\left. \begin{aligned} \frac{A_m}{A} &= \delta^2 \\ \frac{dt_m}{dt} &= \delta^2 \\ \frac{(H_g)_m}{(H_g)} &= \frac{1}{\delta^2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

从上述推导过程看出, 要保证生热率热源符合温度场、应力场和应变场的相似准则, 必须满足上述 3 个条件. 但从式(9)的推导过程可以看出, 要满足该式必须要先保证相似模型焊缝和原模型的焊缝子步数相等($n = n_m$), 即每个单元的尺寸对应成比例, 相似模型和原模型的单元数量相等. 所以相似模型在数值模拟计算时并没有减少单元计算量, 也没减少数值模拟所用的时间.

3 生热率热源相似条件的数值验证

为验证均匀热源相似条件的正确性, 利用均匀热源的相似条件对平板对接焊和角接焊分别进行数值模拟分析, 以此来验证均匀热源在焊接过程中的正确性.

3.1 对接焊和角接焊的建模求解

原模型和相似模型按 1:1.5 的比例缩小, 满足相似条件的各项参数如表 1 所示.

建立相应大小的模型, 进行网格划分; 设置边界条件为无外加载荷, 无整体刚性位移, 初始温度为

表 1 相似模型与原模型的模拟参数

Table 1 Simulation parameters of similar model and original model

| 材料 | 几何尺寸 $L \times W \times H$ (mm \times mm \times mm) | 焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$ | 对接焊热输入 q_1 / W | 角接焊热输入 q_2 / W | 表面换热系数 $\alpha / (\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ |
|------|---|--|----------------------------|----------------------------|---|
| 原模型 | Q235 | $240 \times 240 \times 12$ | 6 | 2 800 | 2 000 |
| 相似模型 | Q235 | $160 \times 160 \times 8$ | 9 | 1 867 | 1 334 |

20 °C; 求解得到相应的结果; 然后取对应位置的点, 平板对接焊和角接焊对应探测点的分布如图 1 和图 2 所示.

3.2 原模型与相似模型的焊接温度场和位移场及应力场对比分析

取原模型和相似模型对应点上的温度、位移和应

力曲线进行对比,其中位移曲线对比是以原模型作为标准,相似模型乘以对应的比例系数 $1/\delta$ 得到的曲线。另外以时间增量步为各图的横坐标,这样保证原

模型和相似模型的时间对应。取平板对接焊和角接焊上的点2-1、点2-2和点2-3,其各点的温度、位移和应力与时间之间的对比曲线分别如图3和图4所示,

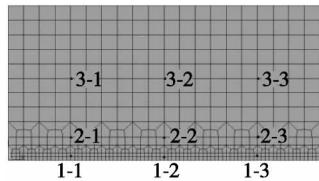


图1 平板对接—原模型与相似模型的对应探测点

Fig. 1 Corresponding probe points of original model and similar model of butt joint

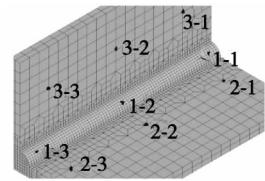


图2 角接焊—原模型与相似模型的对应探测点

Fig. 2 Corresponding probe points of original model and similar model of fillet joint

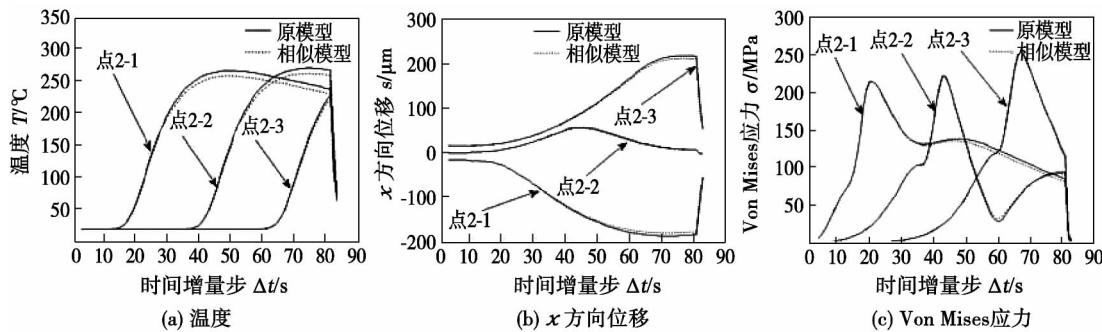


图3 平板对接焊时对应点的温度和位移及应力随时间变化曲线

Fig. 3 Relationships between temperature, displacement and stress at corresponding points and time step in butt-joint

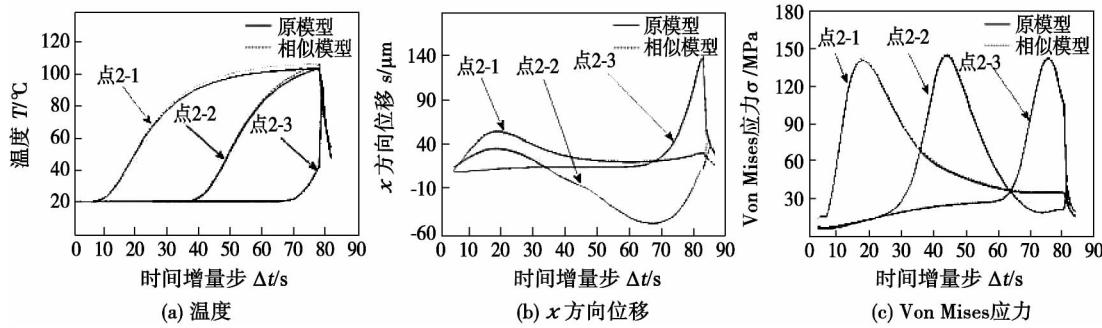


图4 角接焊时对应点的温度和位移及应力随时间变化曲线

Fig. 4 Relationships between temperature, displacement and stress at corresponding points and time step in fillet-joint

其余各处情形类似。

3.3 数值模拟对比结论

从图3和图4可以看出,原模型与相似模型在对应点的温度、位移和应力曲线吻合程度非常好,其误差相当小;其中温度对比曲线最大误差仅为3.7%,位移对比曲线最大误差仅为4.7%,等效应力对比曲线最大误差仅为3.8%。这就表明上述推导的均匀热源相似条件是存在的并且是正确的;再者,根据相似理论得到的缩小模型在特定的条件下确实能得到原模型的应力与变形数值,所以通过研

究相似模型就能得到原模型的结果,这样就大大地降低了大模型的试验成本和生产时间。

但利用均匀热源相似准则仍然存在两大问题^[6,7]:(1)针对数值模拟计算来说,仍然没有减少相似模型的计算量和计算时间,只是单一地减少了相似模型的单元尺寸,而单元的数量并没有减少。(2)对于模型试验来说,相似准则所需的条件无法同时满足。因此利用焊接相似原理只能解决相似比例范围相对较小的模型。如果要扩大相似比例可以采用激光焊接严格控制其焊接参数来实现,但实际

生产过程中不现实,仅用于试验研究.

4 均匀热源相似条件下箱型结构残余应力及变形数值模拟

要得到原箱型结构的残余应力和变形量,就可以通过其相似结构而得到;根据第1节的内容(σ_{ij})_m = σ_{ij} ; (u_i)_m / u_i = δ 通过相似模型的应力和变形数值模拟就得到了原模型的应力分布和变形量.

4.1 箱型结构模型及焊接工艺

该模型为中国南车集团株洲电力机车有限公司生产的型号为7 200 kW六轴机车变压器箱型结构.该箱型结构形式及尺寸见图5;其中影响该结构变形的焊缝主要是下盖板与立板之间的两条长焊缝;立板与底板的两条主焊缝都由3道焊完成,立板加工成单边V形坡口,其中焊接工艺参数如表2所示.

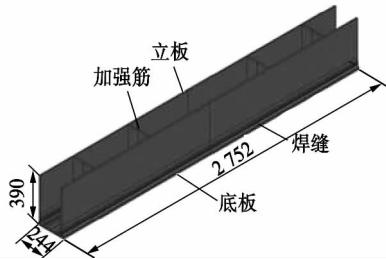


图5 箱型结构形式及尺寸(mm)

Fig. 5 Formation and dimensions of box structure

表2 焊接工艺参数
Table 2 Welding process parameters

| | 焊接电流 <i>I</i> /A | 电弧电压 <i>U</i> /V | 焊接速度 <i>v</i> /(mm·s ⁻¹) | 焊丝直径 <i>d</i> /mm |
|-----|---------------------|---------------------|--|----------------------|
| 打底层 | 160 | 20 | 4 | 1.2 |
| 中间层 | 280 | 28 | 4 | 1.2 |
| 盖面层 | 280 | 28 | 4 | 1.2 |

4.2 建立相似模型

由于整个箱型结构尺寸较大,划分的有限单元数量巨大,求解该结构的温度场和应力场时计算量非常大、耗时长.由于该箱型结构是一个完全对称的模型,根据模型的对称性,只要建立其四分之一模型就能有效地模拟该结构焊接时的应力与变形,这样不仅大大地减少了计算单元,缩减了计算时间,而且其准确性不会降低.根据焊接相似原理及均匀热源的相似条件,选择原模型与相似模型的缩小比例为1:2,建立相似分析模型.对相似分析模型进行网

格划分,选择Solid70作为温度场分析单元,Solid45作为应力场分析单元,整个相似分析模型的Solid单元数为30 273,最小单元尺寸为2 mm × 2 mm × 2 mm.

4.3 相似箱型结构残余应力的变化规律

4.3.1 沿焊缝方向残余应力随焊缝长度的变化规律

图6为箱型结构焊完后沿焊缝表面中心处的纵向、横向和垂直方向残余应力随焊缝长度的分布曲线.从图6可以看出,沿焊缝方向上的纵向残余应力是主要的残余应力,并且3个方向的残余应力都随着距离变化而波动,表明沿焊缝方向上的3个方向上的残余应力极不稳定,有应力突变点;其次纵向残余应力整体表现为拉伸应力,只在初始阶段为压缩应力,拉伸应力最大值为445.3 MPa,压缩应力为170.1 MPa;横向和垂直方向残余应力的变化规律基本一致,均出现拉伸应力和压缩应力交替现象.

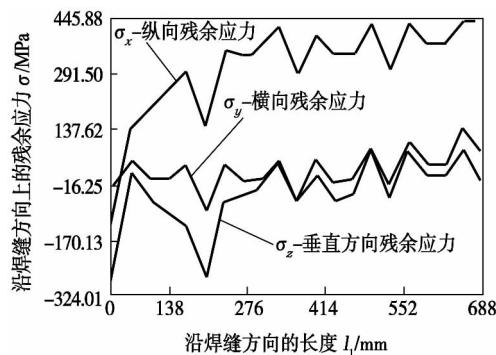


图6 沿焊缝方向上残余应力变化曲线

Fig. 6 Residual stress curve in welding direction

4.3.2 沿垂直焊缝方向残余应力随焊缝距离的变化规律

图7为沿板厚方向上的残余应力变化曲线.从图7可知,垂直焊缝方向立板上的残余应力随焊缝距离的变化,其中纵向残余应力为主要的残余应力,且纵向残余应力由开始阶段的拉伸应力迅速转变为压缩应力,然后再由压缩应力逐渐转变为拉伸应力,其中拉伸应力最大值为333.2 MPa,压缩应力为134.1 MPa;而横向和垂直方向残余应力值较小,且较平稳.

4.4 相似箱型结构变形结果分析

图8为放大20倍后相似箱型结构变形量云图,图8中的虚线框为没焊接时箱型结构的位置,虚线框和实线对比可知其结构的变形情况;图9为变形量随焊缝长度的变化曲线.从图9中可以得知,最小变形量在起焊处,最大变形量出现在焊缝结束处(即x = 688 mm),其中最大的变形量为1 098 μm.

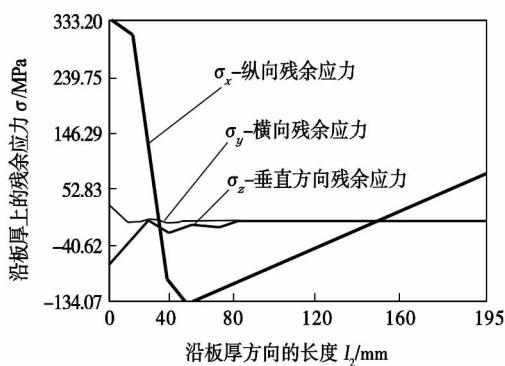


图7 沿板厚方向上的残余应力变化曲线

Fig. 7 Residual stress curve in vertical welding direction

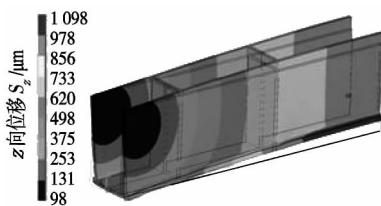


图8 相似结构变形量云图(沿焊缝长度方向)

Fig. 8 Diagram of deformation of similar structure

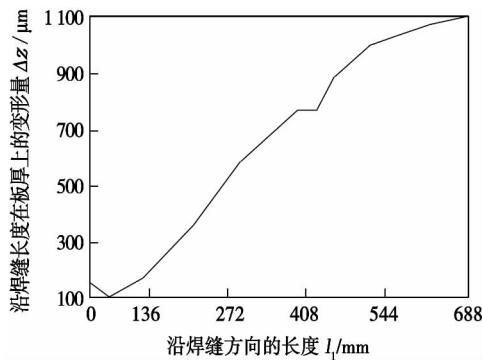


图9 相似结构变形量随焊缝长度变化曲线

Fig. 9 Deformation curve with distance of similar structure

4.5 原箱型结构变形量

从原模型的实际焊接情况和相似模型的模拟情况对比,其原模型的变形量变化规律和相似模型的模拟情况基本吻合,也是变形量随着焊缝长度逐渐增加;原模型的最大变形量也出现在整个结构的中间位置,即相似模型对应的焊缝最长位置。所以根据其相似原理和原模型位移量计算公式,可以得到原模型的最大变形量。由于相似模型的最大变形量为 $1098 \mu\text{m}$, $\delta = 1/2$,所以求得原模型的最大变形量为 $2196 \mu\text{m}$ 。实际焊接条件下该箱型结构在焊后其变形量约为 $2000 \mu\text{m}$,按照 $2000 \mu\text{m}$ 的变形量计算,模拟值和实际值之间的误差为 9.8% ,其误差小

于 10% ,说明该模拟值是有效的。

5 结 论

(1) 基于相似理论和焊接温度场相似准则推导出了均匀热源条件下的相似条件,并以比例系数为 $1:1.5$ 的原模型和相似模型对平板对接焊和角接焊分别进行了数值模拟分析,证明了均匀热源相似条件的正确性。

(2) 利用相似理论和均匀热源相似条件,对箱型结构的焊接残余应力与变形进行了数值模拟,得到了相似箱型结构焊接残余应力的变化规律和变形量随距离变化曲线。沿焊缝方向上的纵向残余应力是主要的残余应力,除在初始阶段为压缩应力外,整体表现为拉伸应力,横向和垂直方向残余应力的变化规律基本一致,均出现拉伸应力和压缩应力交替现象;垂直焊缝方向立板上的纵向残余应力由开始阶段的拉伸应力迅速转变为压缩应力,然后再由压缩应力逐渐转变为拉伸应力,而横向和垂直方向残余应力值较小且较平稳。另外相似箱型结构焊接变形量的数值模拟结果与实际测量结果误差仅为 9.8% 。

参考文献:

- [1] 徐挺. 相似理论与模型试验 [M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1982.
- [2] 蔡志鹏. 大型结构焊接变形数值模拟的研究与应用 [D]. 北京: 清华大学, 2001.
- [3] 姬书得. 水轮机转轮焊接残余应力调控措施的虚拟优化 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [4] 姬书得, 张利国, 方洪渊, 等. 局部加热冷却法对水轮机转轮焊接残余应力场的影响 [J]. 焊接学报, 2007, 28(2): 71–74.
Ji Shude, Zhang Liguo, Fang Hongyuan, et al. Influence of local heating-cooling on welding residual stress of Francis turbine runner [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(2): 71–74.
- [5] 王敏, 龙志波, 余兰. 数值模拟温度场对钛合金TIG焊接的影响 [J]. 中国焊接, 2008, 9(3): 4–9.
Wang Min, Dong Zhibo, Yu Lan. Numerical simulation of temperature fields for T-joint during TIG welding of titanium alloy [J]. China Welding, 2008, 9(3): 4–9.
- [6] 蔡志鹏, 鹿安理, 史清宇, 等. 相似理论在焊接温度场和应力场及应变场中的应用 [J]. 焊接学报, 2000, 21(3): 79–82.
Cai Zhipeng, Lu Anli, Shi Qingyu, et al. Application of similarity principles to study in welding temperature, strain and stress fields [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2000, 21(3): 79–82.

[下转第 108 页]

- The New Technology and New Process ,2005(4) : 39 - 41.
- [3] 黄 勇,樊 丁,樊清华. 铝合金 FBTIG 焊的试验研究 [J]. 焊接 2004(3) : 10 - 12.
Huang Yong ,Fan Ding , Fan Qinghua. Study on FBTIG welding for aluminium alloy [J]. Welding & Joining ,2004(3) : 10 - 12.
- [4] 张赋升,马铁军,李京龙,等. A-TIG 焊电弧的动态研究 [J]. 电焊机 ,2003 ,33(12) : 17 - 19.
Zhang Fusheng ,Ma Tiejun ,Li Jinglong ,et al. Research of A-TIG welding arc [J]. Electric Welding Machine ,2003 ,33(12) : 17 - 19.
- [5] 张瑞华. 活性焊接法及熔深增加机理的数值模拟研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学 ,2005.
- [6] 杨春利,牛尾诚夫,田中学. TIG 电弧活性化焊接现象和机理研究(2) ——活性化 TIG 焊接中的电弧现象 [J]. 焊接 ,2000 (5) : 15 - 18.
Yang Chunli ,Ushio Makotoo ,Tian Zhongxue. Phenomenon and mechanism of activated arc in TIG weldinga(2) —the arc phenom-enon in A-TIG welding [J]. Wedling & Joining ,2000(5) : 15 - 18.
- 18.
- [7] 郭德伦. 活性焊剂焊接技术的研究与应用 [C] // 中国机械工 程学会焊接学会. 航空航天焊接国际论坛论文集. 北京: 机械 工业出版社 ,2004: 262 - 270.
- [8] Tanaka M ,Ushio M. Approach to understanding of TIG welding with activating flux [J]. Transactions of Joining and Welding Re-search Institute ,2000 ,29(2) : 41 - 49.
- [9] 刘凤尧,杨春利,林三宝,等. 活性化 TIG 焊熔深增加机理的 研究 [J]. 金属学报 ,2003 ,39(6) : 661 - 665.
Liu Fengyao ,Yang Chunli ,Lin Sanbao ,et al. Research of weld penetration increase mechanism for activating TIG welding [J]. Acta Metallurgica Sinica ,2003 ,39(6) : 661 - 665.

[上接第 26 页]

- [7] 姬书得,张利国,李雅范,等. 基于相似理论的构件与模拟件 之间焊接残余应力关系的建立 [J]. 焊接学报 ,2010 ,31(6) : 61 - 64.
Ji Shude ,Zhang Liguo ,Li Yafan ,et al. Establishment of relation about welding residual stress between simulative component and

practical component on basis of similitude principles [J]. Transac-tions of the China Welding Institution ,2010 ,31(6) : 61 - 64.

- 作者简介: 汤小红,男,1968 年出生,博士研究生,教授. 主要从 事焊接工艺方面的教学与科研工作. 发表论文 30 余篇. Email: zhuzhoutxh@163. com

of welded joint.

Key words: magnetic field; formability; AZ31 magnesium alloy; A-TIG welding

Effects of HAZ on limit loads for mismatched welded joints

LING Kun, WANG Zhengdong, XUAN Fuzhen (School of Mechanical and Power Engineering , East China University of Science and Technology , Shanghai 200237 , China) . pp 17 – 21

Abstract: A tri-material model was proposed to investigate the effects of HAZ on the limit loads of mismatched welded joint. Some assumptions of materials and geometries of welded joint were given in the finite element limit analysis. The finite element analysis were carried out on the welded joint with a series of configurations of different materials properties , different widths of HAZ and different groove angles. The results show a significant influence of mismatched materials , especially the HAZ of welded joint , on the limit load ratio. The results also illustrate the changing trend of the limit load ratio with the various groove angles and widths of the HAZ of the mismatched welded joint. Numerical simulation results show that the limit load of mismatched welded joint is determined by the yield strength of HAZ. The regression equation in this paper can calculate the limit loads of mismatched welded joint.

Key words: heat affected zone (HAZ) ; mismatched welded joint; limit load function

Numerical simulation on welding stress and deformation of box structure based on similarity principles TANG Xiaohong^{1,2} , YANG Yue¹ , ZHANG Shanying³ (1. School of Traffic and Transportation Engineering , Central South University , Changsha 410075 , China; 2. School of Electrical and Mechanical Engineering , Central South University of Forestry and Technology , Changsha 410004 , China; 3. Jiangling Motors Co. , Ltd. , Nanchang 330001 , China) . pp 22 – 26 , 108

Abstract: Based on similarity criteria of the temperature field , the similar conditions in the HGEN heat source model were set up and deduced. By use of the conditions , the temperature field , displacement field and stress field of the butt welding and fillet welding were simulated and analyzed , comparatively. Numerical results show that the errors in temperature , displacement and stress field in the similarity model are quite small with those of original model , which are only 3. 7% , 4. 7% , 3. 8% . Besides , the welding residual stress and deformation of box structure were simulated , and the welding residual stress variation and deformation change curve with distance of the similar box structure was obtained. The error between the simulated deformation and experimental measurement is only 9. 8% , which furthermore certifies the correction of similar conditions of the HGEN heat source model.

Key words: similarity principles; stress and deformation; numerical simulation; box structure

Microstructure and mechanical properties of TiC/Co composite coating by laser cladding on H13 steel surface PHAM THI HONG NGA^{1,2} , ZHANG Xiaowei¹ , WANG Chuan-

qi¹ , LIU Hongxi¹ , JIANG Yehua¹ (1. College of Materials Science and Engineering , Kunming University of Science and Technology , Kunming 650093 , China; 2. College of Mechanical Engineering , University of Technical Education Ho Chi Minh City , Ho Chi Minh 720035 , Vietnam) . pp 27 – 31

Abstract: TiC/Co composite coating and Co50 alloy coating were prepared by laser cladding of on the AISI H13 hot work tool steel surface. The bonding characteristics , phase constitution , microstructure and micro-hardness distribution of the coatings were analyzed and tested by XRD , SEM and micro-hardness tester. The results indicate that Co50 alloy coating as well as TiC/Co composite coating show good metallurgical bonding with the H13 steel substrate surface. Co50 alloy coating was mainly composed of γ -Co dendrite and eutectic between γ -Co dendrites , while TiC/Co composite coating which contained TiC particles , dendrite and fine eutectic , was consisted of TiC , TiCo₃ , Cr₂Ni₃ as well as Cr-Ni-Fe-C , and so on. The average micro-hardness of cross-section of TiC/Co-based composite coating and Co50 alloy coating are 5 520 MPa and 4 990 MPa , about 2. 7 times and 2. 4 times higher than that of the H13 steel substrate.

Key words: laser cladding; AISI H13 steel; Co-based alloy; composite coating

Numerical simulation of radial friction welding temperature field of steel ZHANG Lei¹ , QIN Guoliang² , ZHANG Chunbo¹ , ZHAO Yushan¹ , ZHOU Jun¹ (1. Harbin Welding Institute , China Academy of Machinery Science and Technology , Harbin 150080 , China; 2. Institute for Materials Joining , Shandong University , Jinan 250061 , China) . pp 32 – 36

Abstract: By applying ABAQUS software , a two-dimensional axisymmetric model of radial friction welding was established based on heat transfer theory , elastic-plastic mechanics and finite element method. The radial friction welding temperature field was simulated by remeshing technology. In the secondary stage of friction welding , the dynamic balance between heat generated by friction on the friction interface and heat loss with flash and heat conduction is achieved and the interface temperature is not higher than 1 320 °C. In the third stage of friction welding , as the metal layer at high temperature being squeezed out , the temperature on the interface decreases rapidly. By analyzing the metallographic microstructure , the thermal cycle process in the joint was obtained. The simulated temperature distribution in joint accords well with the test results.

Key words: radial friction welding; temperature field; numerical simulation

FVM-CA simulation of grain growth during solidification using ‘node-based-correction’ method ZHAO Jingyi¹ , LI Zili² , WANG Guilan¹ , ZHAN Haiou³ (1. School of Materials Science and Engineering , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China; 2. School of Software Engineering , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China; 3. School of Mechanical Science and Engineering , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China) . pp 37 – 40