

焊接热源对钢结构焊接应力的影响

杨 燕

(扬州市职业大学, 江苏 扬州 225009)

摘 要: 基于 Von Mises 屈服准则和线性等向性硬化准则, 采用相关的弹塑性本构方程建立了 TIG 焊接不锈钢 316L 动态模型, 研究了不同焊接热源模型对焊接过程中温度和残余应力分布的影响规律。结果表明, 双椭球模型中的等温线更倾向于长条形, 沿焊缝方向温度梯度较小; 3D 锥形高斯热源模型的等温线相对更圆, 沿焊缝方向温度梯度更大; 两种热源模型对横向残余应力和纵向残余应力的分布规律影响不大。

关键词: SYSWELD; 热源模型; 温度场; 残余应力

中图分类号: TG44

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2014)02-0374-04

Impacts of Welding Heat Sources on Welding Stress of Steel Structure

YANG Yan

(Yangzhou Polytechnic College, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Based on the Von Mises yield criterion and the linear isotropic hardening rule, a dynamic model of TIG welding 316L stainless steel was established using the elastoplastic constitutive equations, and the effects of different welding heat source model on the distribution of temperature and residual stress in welding process were investigated. The results show that the isotherm is more inclined to long strip in the double ellipsoidal model, and the temperature gradient is small along the welding direction; the isotherm is relatively more round in 3D conical Gaussian heat source model, and the temperature gradient is larger along the welding direction; the residual stress distribution in the transverse and longitudinal direction is almost the same in two kinds of heat source models.

Key words: SYSWELD; heat source; temperature field; residual stress

惰性气体钨极保护焊(又称 TIG 焊)过程是一个温度变化、组织转变、存在应力应变和金属流动等多方面相互耦合、共同作用的复杂过程^[1]。分析焊缝金属的温度场、应力应变场、流场的相互影响作用,搞清楚焊接热物理量之间的耦合关系,建立 TIG 的三维热-力和热-流耦合模型,建立焊接几何参数和工艺参数对温度场、应力应变场、流场的影响规律,对控制焊接接头的组织性能有重要的理论意义,对提高焊接质量具有重要的实用价值^[2,3]。

1 TIG 焊接钢结构模型

1.1 热分析

TIG 焊接传热计算的控制方程为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} \quad (1)$$

式中: ρ , c_p , λ 分别为 S355 合金钢的密度、比热容和导热系数, $\dot{Q}$ 表示焊接热源。

在基本试验中所采用的热源模型为双椭球热源模型^[1](Double ellipsoid), 为研究热源模型对结果的影响, 在模拟中将热源模型改为 3D 锥形高斯热源

模型^[2,3](3D conical Gaussian)。图 1 为 3D 锥形高斯热源模型和双椭球热源模型。

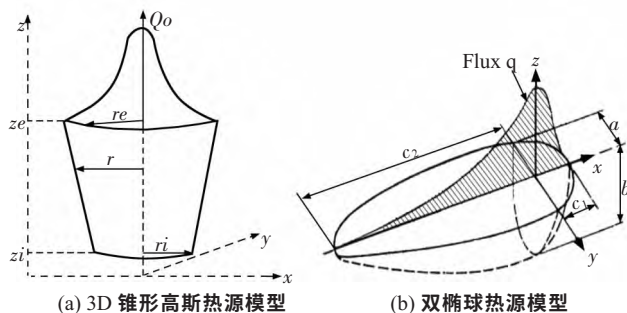


图 1 焊接热源模型

Fig.1 Welding heat source model

所用的 3D 锥形高斯热源模型的方程描述为:

$$\begin{cases} Q_R = Q_0 \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \\ r_0 = f(z) \end{cases} \quad (2)$$

其中,具体参数为: $Q_0=35.2545$, $r_e=4$, $r_i=1$, $z_e=0$, $z_i=-4$ 。输入功率与基本试验相同,均为 2000。

$$\begin{cases} q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} f_r Q_0}{c_2 ab \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\left(\frac{3x^2}{c_2^2} + \frac{3y^2}{a^2} + \frac{3z^2}{b^2}\right)\right) \\ q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} f_r Q_0}{c_1 ab \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\left(\frac{3x^2}{c_1^2} + \frac{3y^2}{a^2} + \frac{3z^2}{b^2}\right)\right) \end{cases} \quad (3)$$

收稿日期: 2013-07-03

作者简介: 杨燕(1979-), 女, 江苏泰州人, 硕士, 讲师。

电话: 13813195301, E-mail: yangy121@126.com

其中, a, b, c_1 和 c_2 的取值是相互独立的, f_f, f_r 分别表示椭球热源前后两部分的能量分数, 并且 $f_f + f_r = 2$ 。

在焊接温度场传热分析中, 散热边界条件考虑对流散热和辐射散热两种热传导方式。热循环过程中, 在熔池周围辐射热损失占主导地位, 而远离熔池的母材区域对流热损失占主导地位, 本文采用等效对流散热系数来表示这两种散热导致的热损失, 其等效对流散热系数 h 描述如下:

$$h = h_c + \frac{\varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4)}{(T - T_0)} \quad (4)$$

式中: T_0 表示初始环境温度, 常温下 $T_0 = 293 \text{ K}$; ε 表示辐射系数, 取值为 0.25; σ 表示史蒂芬-玻尔兹曼常数, 取值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ J}/(\text{m}^2 \text{K}^4 \text{s})$ 。本文中对流换热占据主导地位。

1.2 力学分析

力学分析需要用到上述热分析中的温度变化作为每时间子步的热载荷输入, 以计算瞬时焊接热应力分布及最终残余应力分布。力学分析涉及力平衡方程和本构方程。

力平衡方程: $\sigma_{ij,j} + p b_i = 0 \quad (5)$

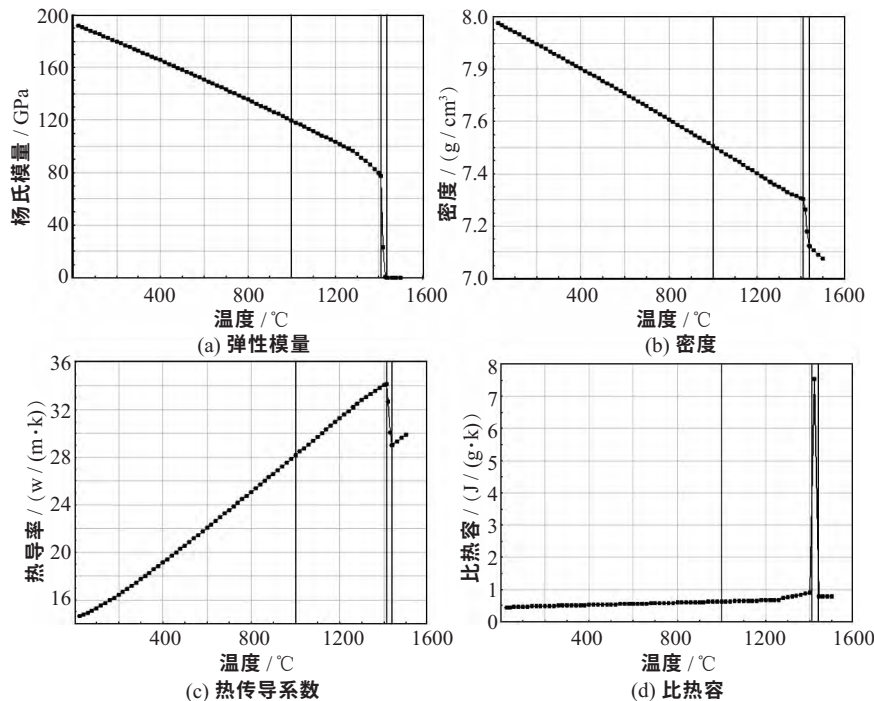


图2 利用 JMatPro 得到的 316L 不锈钢热物理性能

Fig.2 Thermal physical properties of 316 L stainless steel obtained by JMatPro software

2 计算结果及分析

2.1 热源模型对温度场的影响

保持焊接工艺参数及其余条件一致的情况下, 分别对 3D 锥形高斯热源模型和双椭球热源模型的焊接温度场云图进行计算, 结果如图 3 所示。可以看

式中: σ_{ij} 是对称分布的, 因此 $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ 。

在焊接过程中, 由于固相转变对低碳钢残余应力的分布有非常大的影响^[4], 所以本构方程中相应的应变被分解成总应变的 3 部分差分形式的应变分量:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + d\varepsilon_{ij}^{th} \quad (6)$$

根据各项同性的虎克定律计算弹性应变, 通过材料的热膨胀系数计算热应变增量。对于含有塑性应变计算来说, 根据 Von Mises 屈服准则和线性等向性硬化准则, 采用相关的弹塑性本构方程, 应力应变的增量形式关系方程表示为^[5]:

$$\{d\sigma\} = [D_d]\{d\varepsilon\} - \{c_i\}dT \quad (7)$$

1.3 材料种类

实验所用材料为 316L 不锈钢, 其化学成分见表 1。将 316L 不锈钢化学成分输入到 JMatPro 材料性能模拟软件中, 计算其随温度变化的热物理属性, 见图 2 所示。

表 1 316L 不锈钢的化学成分 $w(\%)$
Tab.1 The chemical composition of 316L stainless steel

Fe	Cr	Mn	Mo	Ni	Si	C
64.447	17.3	1.74	2.66	13.1	0.73	0.023

到, 3D 锥形高斯热源模型的温度场与双椭球模型的计算结果有较大不同。双椭球模型中的等温线更倾向于长条形, 即沿焊缝方向温度梯度较小, 而 3D 锥形高斯热源模型的等温线相对更圆, 即沿焊缝方向温度梯度更大。

为进一步分析计算结果, 可以比较在相同时刻

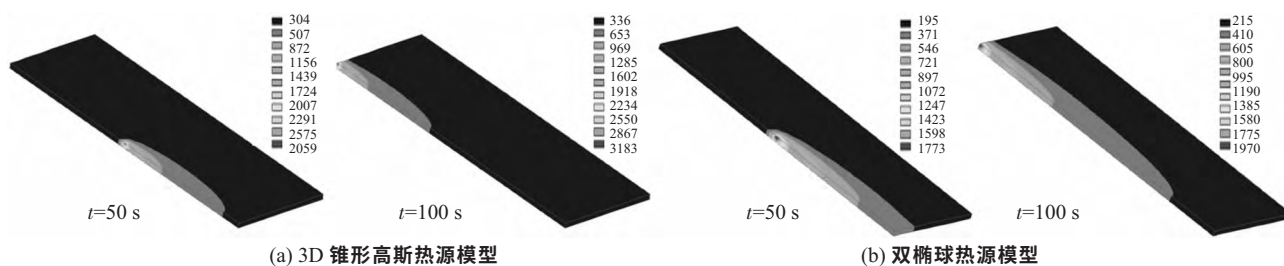


图3 两种热源模型温度云图计算结果 (°C)

Fig.3 Temperature cloud computation results by two kinds of heat source models

两个热源模型中焊缝上的温度分布,如图4所示。可以看出,两个热源模型在熔池前方的温度分布较为类似,但是在熔池处和熔池后方的温度分布有较大不同。3D 锥形高斯模型的热量集中程度高于双椭球模型,因而在熔池中心处 3D 锥形高斯模型的温度高于双椭球模型。但由于两者有效功率相等,因此在熔池后方 3D 锥形高斯模型的热量少于双椭球模型,熔池后侧的温度下降速率也大于双椭球模型,因此其温度梯度较大,等温线相对较圆。而双椭球模型熔池后侧的温度下降速率较小,因此其温度梯度较小,等温线相对更倾向于长条形。这与图3 温度场云图的对比结果一致。

2.2 热源模型对残余应力的影响

根据 SYSWELD 软件计算结果,可以得到两种焊接热源模型在工件上的焊接残余应力分布,结果如图5所示。选择的时刻为 $t=2\ 000\text{ s}$,此时温度基本均匀,可认为此时的应力场即为焊接应力场。两种热

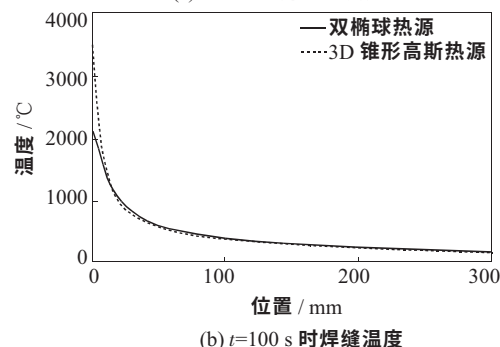
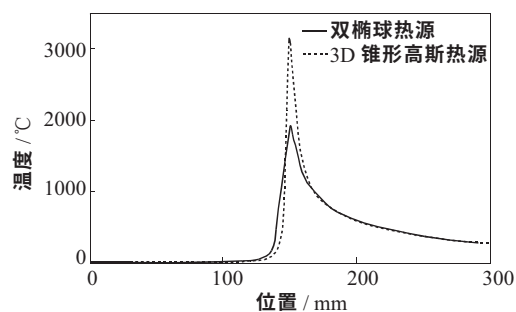


图4 两种焊接热源模型的焊缝温度分布对比

Fig.4 Weld temperature contrast of two kinds of welding heat source

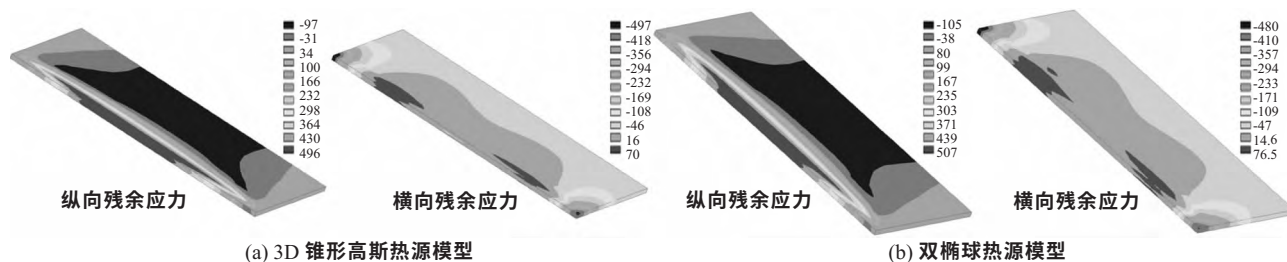


图5 两种焊接热源模型的残余应力 (MPa)

Fig.5 Weld residual stress using two different welding heat source

源模型的残余应力云图较为相似,说明热源模型对残余应力分布规律的影响并不明显。

为了进一步研究热源模型对焊接横向和纵向残余应力的影响规律,取部分截面上的残余应力分布进行对比。图6为两种热源模型计算结果中焊缝上横向残余应力的对比图,图7为不同位置横截面上纵向残余应力对比图。可以看出,两种热源模型对横向残余应力和纵向残余应力的分布规律影响不大,这与图5中残余应力云图的对比结果是统一的。

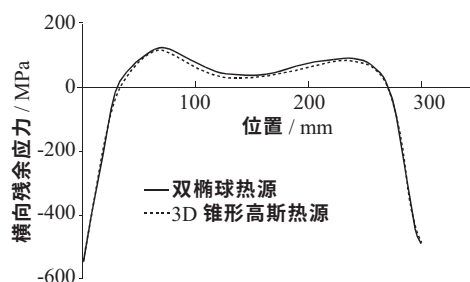


Fig.6 Transverse residual stress of the weld seam

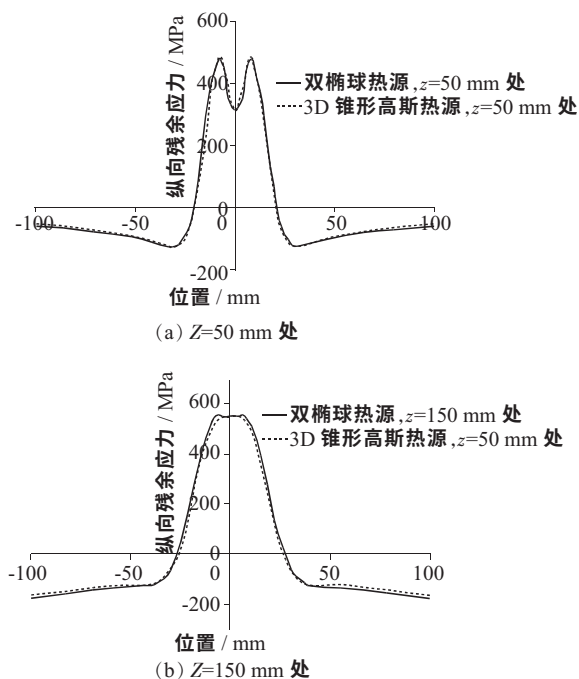


图 7 不同位置横截面上纵向残余应力对比

Fig.7 Longitudinal residual stress of the weld seam at different sectional locations

3 结论

(1) 双椭球模型中的等温线更倾向于长条形,沿焊缝方向温度梯度较小,而 3D 锥形高斯热源的等温线相对更圆,沿焊缝方向温度梯度更大。

(2) 热源模型对焊件的残余应力影响不大。

参考文献:

- [1] 王能庆,童彦刚,邓德安. 热源模型参数对焊接残余应力和变形影响的研究[J]. 热加工工艺,2011,40(23):174-146.
- [2] 汪建华. 焊接数值模拟技术及其应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,2003.
- [3] 梁晓燕,罗金华,杜汉斌,等. 基于 ANSYS 平台焊接模拟中不同热源的比较[J]. 电焊机,2003,33(1):29-32.
- [4] 潘广善,王自力,李良碧,等. 高强度焊接结构残余热应力的有限元分析[J]. 船舶工程,2011(3):78-82.
- [5] Lee C H, Chang K H. Numerical investigation of the residual stresses instrength-mismatched dissimilar steel butt welds [J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2008, 43: 55-66.
- [6] 梁晓燕,罗金华,杜汉斌,等. 基于 ANSYS 平台焊接模拟中不同热源的比较[J]. 电焊机,2003,33(1):29-32.

2014年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志,月刊,1979年创刊,中国铸造协会会刊,中文核心期刊,国内外公开发行,国内邮发代号:52-64,国外发行号:M855,中国标准刊号:ISSN 1000-8365/CN61-1134/TG。

报道范围:报道国内外铸造领域的先进科技成果、应用技术、生产管理经验和信息动态等。涉及铸造材料研究、铸造成形工艺和铸造设备,覆盖铸铁、铸钢和有色金属等铸造领域,包括砂型铸造、熔模铸造、金属型铸造、消失模铸造和压铸等特种铸造技术。

主要栏目:材料开发、材料改性、材料保护及表面工程、材料失效分析、工艺技术、今日铸造、实用成型技术、生产技术、装备技术、经验交流等。

发行对象:国内外铸造企业,科研院所,高等学校,铸造原辅材料厂商,设备、仪器厂商,铸件采购商等。

广告范围:刊登铸造原辅材料、铸造设备、熔炼设备、热处理设备、环保设备、检测仪器、以及铸件生产、科研成果转让、企业形象宣传等相关广告。

订阅方式及价格:

请从当地邮局订阅,也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年12期,每期定价18元,平寄全年216元(含邮费),挂号全年252元。

海外:每期定价18美元,全年216美元。中国台湾:每期定价18美元,全年216美元。中国香港、澳门:每期定价36 HKD,全年432 HKD。

订购地址:710048 西安市金花南路5号 西安理工大学608信箱

联系人:刘晓辉 18729237741 电话传真:029-82312140

银行汇款:户名:陕西铸造技术杂志社有限责任公司

帐号:3700 0235 0920 0091 309

开户行:中国工商银行西安市互助路支行