

316L 不锈钢板 TIG 对接焊温度场及应力场数值模拟

林 波, 周尚荣

(中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

摘要: 采用 ANSYS 针对 316L 不锈钢厚板 TIG 对接焊进行了温度场和应力场的数值模拟计算研究。建立了不锈钢厚板端面焊接数值模型, 提出了在 TIG 焊焊接过程中采用单元焊接时间 telement 来模拟焊接过程中的熔滴过渡, 并分别采用 2 s 和 3 s 的 telement 进行了模拟分析, 计算结果表明, 单元焊接时间对焊缝及 HAZ 的温度场分布具有重要影响。

关键词: 316L 不锈钢; TIG 对接焊; 单元焊接时间; 数值模拟

中图分类号: TG457.11; TG444.74 **文献标志码:** B

0 引言

316L 不锈钢采用 TIG 焊过程中, 随着焊接热源的移动, 焊缝及热影响区 (HAZ) 的温度急剧变化, 形成复杂的温度场分布。温度场的分布则反映出复杂的焊接热过程, 不仅直接通过热应变, 而且还间接通过相变和应变影响焊接残余应力和焊缝熔化、结晶、变形、应力等状况, 这些因素都影响到熔合、裂纹、组织等与焊接质量有关的指标, 故焊接温度场分布能够全面和深入地反映焊接质量^[1]。

因此, 本文针对 316L 不锈钢板 TIG 对接焊进行模拟研究, 探究焊缝及其热影响区的温度场及残余应力分布规律, 对提高工件的焊接质量具有重要意义。

1 焊接物理模型的建立

1.1 温度场控制方程

在区域 Ω 中的热传导控制方程为:

$$c_p \frac{dT}{dt} = \nabla[\lambda \nabla T] + \bar{Q}, \quad (1)$$

式中: c_p 为比热容; λ 为热导率; $\bar{Q}$ 为内热源强度; T 为温度; t 为时间。

焊接温度场控制方程的热流边界条件为:

(1) 对流换热产生的边界上热流:

$$q_c = \alpha_c (T - T_\infty), \quad (2)$$

式中: q_c 为热流率; α_c 为对流换热系数; T 为固体

表面温度; T_∞ 为环境参考温度。

(2) 辐射换热导致的边界对流:

$$q_r = \sigma_0 \varepsilon_0 (T^4 - T_\infty^4), \quad (3)$$

式中: q_r 为热流率; ε_0 和 σ_0 分别为黑度 (发射率) 和黑体辐射常数; T 为辐射面温度; T_∞ 为环境参考温度。

1.2 应力场控制方程

在该区域中力平衡方程^[2]为:

$$\sigma_{ij,j} = 0, \quad (4)$$

式中: $\sigma_{ij,j}$ 为应力分量, 已包括热应力项。

热应变可按下式描述:

$$\varepsilon_{ij}^T = \alpha_{ij} (T - T_0) \delta_{ij}, \quad (5)$$

式中: ε_{ij}^T 为热应变张量; α_{ij} 为热膨胀系数; T_0 为参考温度; δ_{ij} 为 δ 算子。

2 有限元计算模型的建立

焊接温度场分析是典型的非线性瞬态热传导问题。在焊接过程热弹塑性分析中, 考虑材料热物理性能和力学性能依赖于温度。

计算模型如图 1 所示, 材料为 316L 不锈钢。研究图 1 中 AB, CD 路径上的温度场及 BB' 路径上焊接残余应力的分布规律。假设材料为线性强化弹塑性模型, 物理性能参数见文献[2-3]。

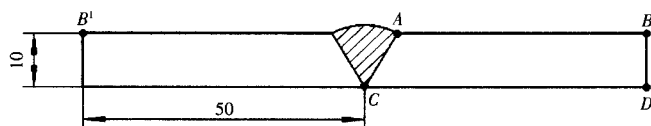


图 1 316L 不锈钢平板对接示意图

2.1 焊接热源

选用 ANSYS 中的四节点二维耦合场 PLANE13 单元。该单元同时具有温度、位移和磁场的性能,在此仅利用温度和位移 2 个场的耦合,实现焊接过程的温度和残余应力的耦合模拟分析。

本研究针对的是开坡口的奥氏体不锈钢焊缝,计算时应将热源作为焊缝单元内部生热处理,以生热率的形式施加载荷,同时考虑金属的填充作用,运用“生死”单元的方法,逐步将填充焊缝转化为“生死”单元参与计算中。利用 ANSYS 的 APDL 语言进行二次开发编写子程序,运用循环语句,实现焊接的填充过程。

2.2 边界条件的处理

焊接过程的边界条件包括温度场分析和应力应变分析。温度场计算属于瞬态热分析,在空气中焊接时,需将初始温度值设为室温。应力应变分析时,焊缝中心垂直于 x 轴的平面关于 $x=0$ 面对称,另加使焊件自由平躺地面的边界条件。

2.3 相变潜热

假定熔解潜热等于凝固潜热,取 316L 不锈钢的熔解潜热为 300 kJ/kg,固相线温度 1420 °C,液相线温度 1460 °C^[4]。

2.4 网格划分

焊接过程中温度随时间和空间都急剧变化,温度梯度很大,因此,焊缝及附近的网格划分较精细,远离焊缝的地方可以划得较粗。针对 316L 不锈钢板端面尺寸 100 mm×10 mm 建立数学模型。基于文献[5]所述 TIG 焊不锈钢时,其单道可焊厚度上限仅为 3 mm (氩气保护),选用命令 ESIZE 指定焊缝单元的

边长为 1.5 mm,母材单元边长为 2.5 mm,采用 AMESH 命令在模型面上生成网格单元,网格划分如图 2 所示。



图 2 316L 不锈钢板 TIG 焊有限元分析模型

选用 List 的 Element 命令,调出系统网格划分文件,建立的模型节点数 260,单元数 211,其中焊缝区域单元数为 46。

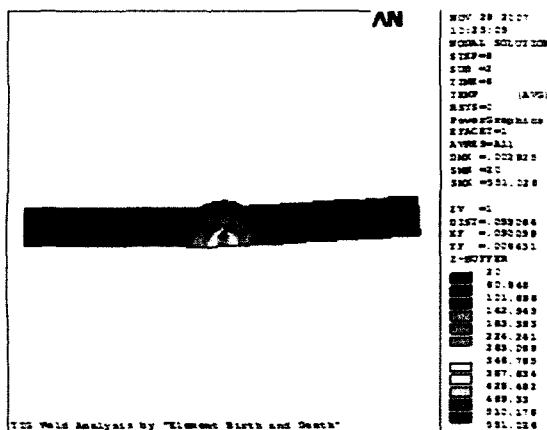
3 计算结果及分析

3.1 2 种焊缝单元焊接时间

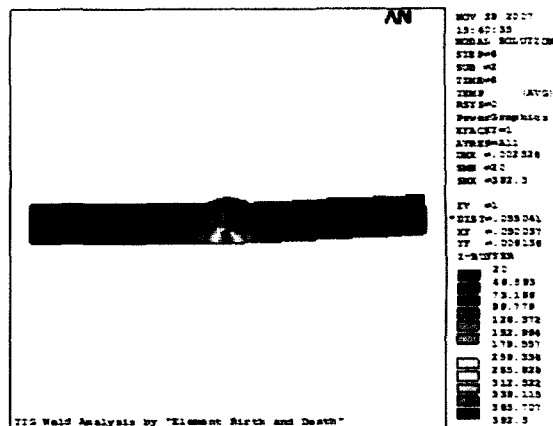
温度场的数值计算是应力应变数值计算的前提和基础,其分布对应力应变场的分布规律有着极大的影响。在焊接过程中,高温焊接熔滴的焊接时间是影响焊接质量的关键因素之一。本研究中采用单元焊接时间 (t_{element}),即模型焊缝中每个单元的焊接时间。考虑实际情况, t_{element} 分别采用 2 s 和 3 s 进行对比计算分析。

3.2 瞬态温度场模拟结果

图 3 给出了 t_{element} 分别为 2 s 和 3 s,焊接时间 t_{weld} 分别为 6, 24, 48, 78 s 的焊接温度场。图 4 为不同的 t_{element} 时间下,焊接结束时的温度场分布图形。从图 3a 和 b 可以看出, $t_{\text{weld}}=6$ s 时, $t_{\text{element}}=2$ s 的升温速度较快,最高温度达到了 551.026 °C,而 $t_{\text{element}}=3$ s 的最高温度则仅为 392.3 °C。由图 3c~h 可以看出,在 t_{weld} 为 24, 48 和 78 s 时焊缝及其热影响区域的温度场分布情况。



(a) $t_{\text{weld}}=6$ s ($t_{\text{element}}=2$ s)



(b) $t_{\text{weld}}=6$ s ($t_{\text{element}}=3$ s)

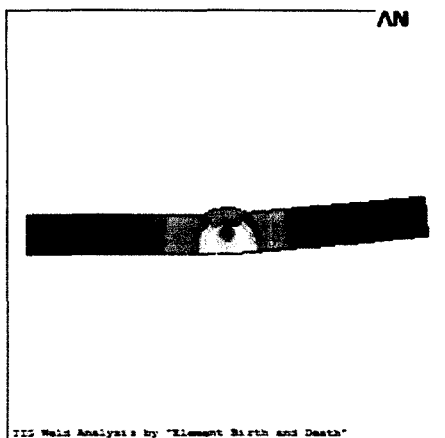
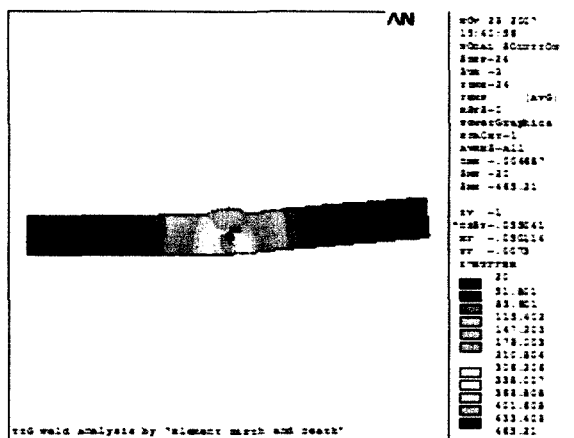
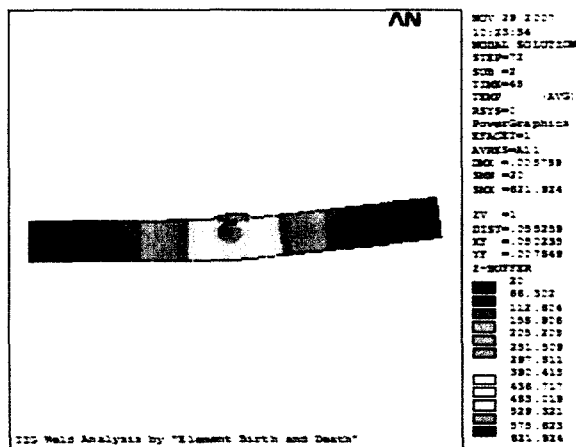
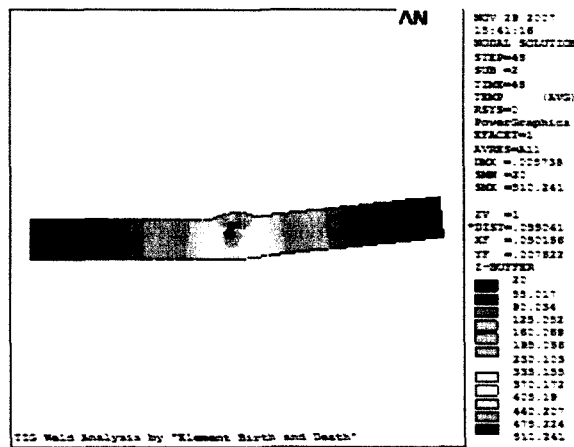
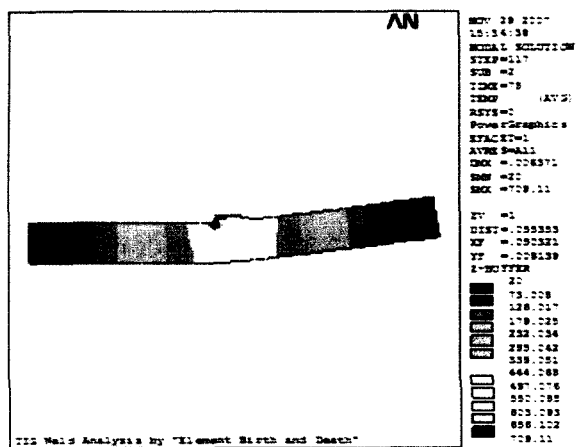
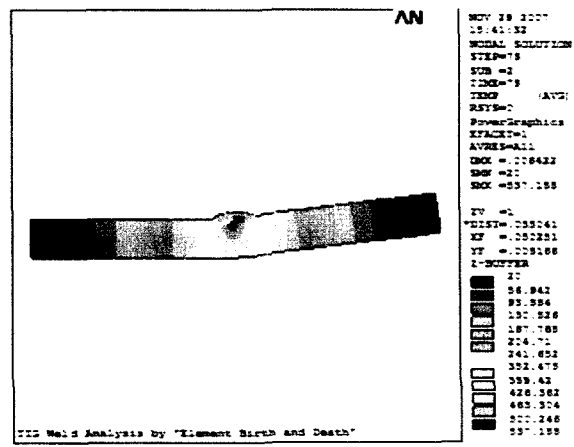
(c) $t_{\text{weld}}=24 \text{ s}$ ($t_{\text{element}}=2 \text{ s}$)(d) $t_{\text{weld}}=24 \text{ s}$ ($t_{\text{element}}=3 \text{ s}$)(e) $t_{\text{weld}}=48 \text{ s}$ ($t_{\text{element}}=2 \text{ s}$)(f) $t_{\text{weld}}=48 \text{ s}$ ($t_{\text{element}}=3 \text{ s}$)(g) $t_{\text{weld}}=78 \text{ s}$ ($t_{\text{element}}=2 \text{ s}$)(h) $t_{\text{weld}}=78 \text{ s}$ ($t_{\text{element}}=3 \text{ s}$)

图3 焊接过程温度场分布

图4a, b示出了 $t_{\text{element}}=2 \text{ s}$ 和 $t_{\text{element}}=3 \text{ s}$ 时的焊缝单元焊接时间、焊接结束时的温度场分布。图4a中最高焊接温度达 727.524°C , 远高于图4b中的 615.677°C 。

图4a显示的温度场分布更为均匀, 同时该计算结果与文献[6]中模拟计算的温度场分布较为一致。因此选用 $t_{\text{element}}=2 \text{ s}$ 的焊缝单元焊接时间, 即总焊接时间为 92 s 进行应力数值计算分析。

3.3 焊缝及HAZ区域温度和应力曲线

3.3.1 焊缝及HAZ区域温度曲线

图5示出了采用 $t_{\text{element}}=2 \text{ s}$ 的焊缝单元时间, 沿 AB , CD 路径的焊接和冷却过程中的温度变化规律。图5中曲线2表示距焊缝 5 mm 处的温度变化, 图中该曲线并不平滑, 客观地表征出了TIG焊焊接过程中近焊缝区的温度随焊接热源的移动而变化。

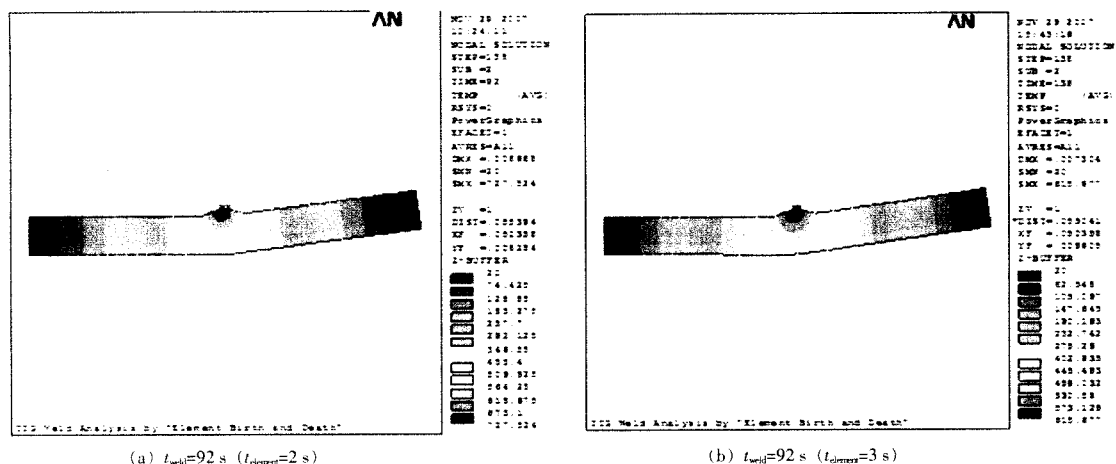


图4 焊接完成时温度场分布

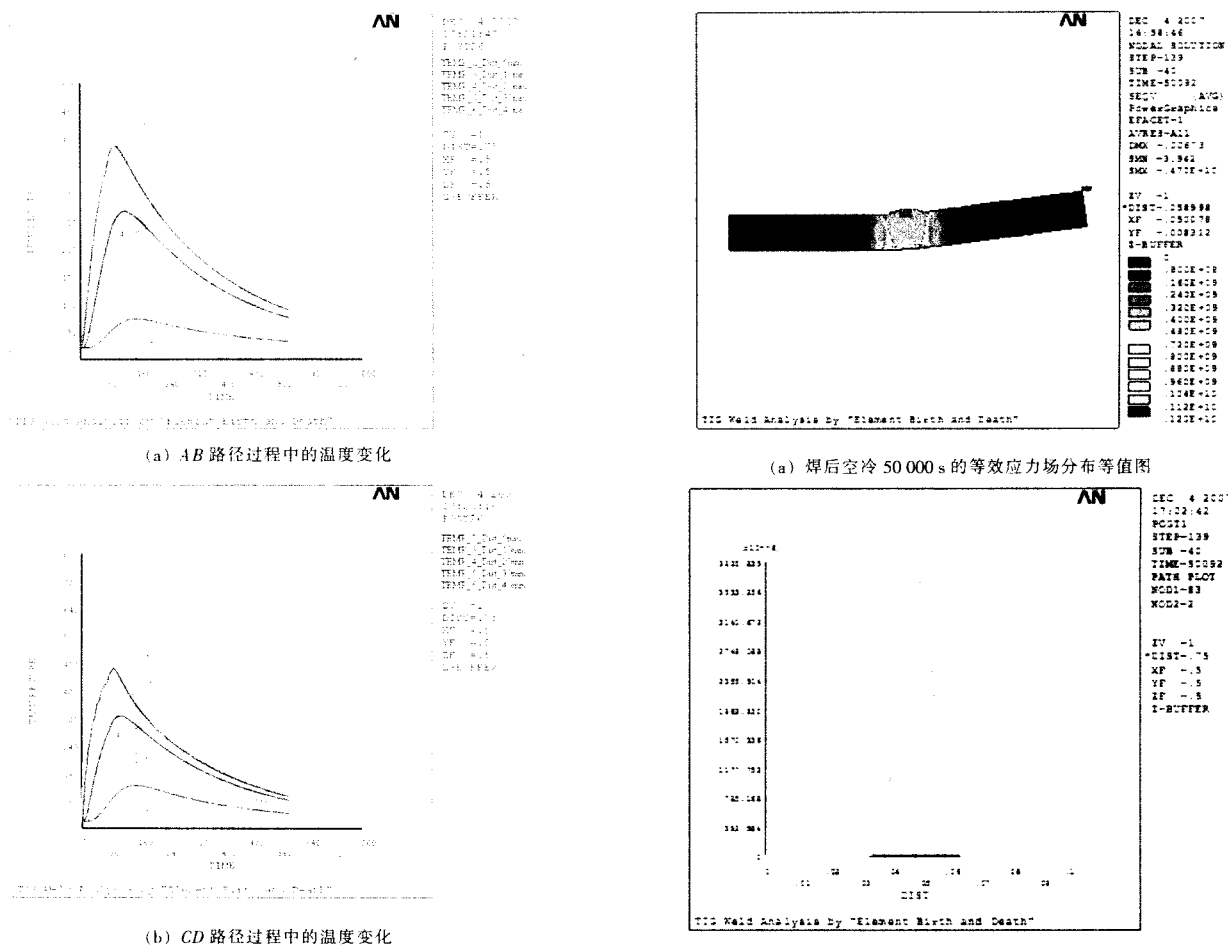


图5 距焊缝 5, 10, 20, 30, 40 mm 处的温度曲线

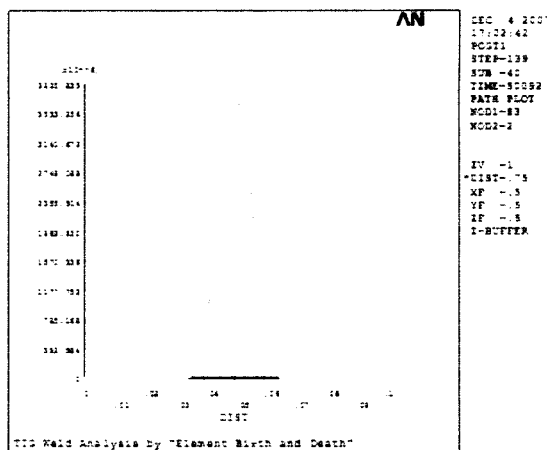


图6 焊接残余应力分布图

3.3.2 焊缝及 HAZ 区域应力分布曲线

图 6a 为焊接完成后空冷 50 000 s 后的应力分布云图。图 6b 为图 1 中 B'B 路径上的残余应力分布情况,轴上 (0, 0) 和 (0.1, 0) 分别表示对接平板的左边缘和右边缘,在中心位置 (0.05, 0) 即对接焊缝的中心处应力值达到最大值。

4 结论

- (1) 建立了 316L 不锈钢平板对接 TIG 焊端面焊接模型,利用 ANSYS 分析软件的 APDL 语言编写程序,运用循环语句,实现焊接填充过程。
- (2) 采用单元焊缝时间模拟焊接过程中熔滴的过

间歇交变磁场波形对堆焊金属组织及性能的影响

刘政军, 孙景刚

(沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110023)

摘要: 为了研究交变磁场波形参数对堆焊层金属组织及性能的影响, 对低碳钢表面进行等离子弧堆焊时外加间歇交变纵向磁场, 并利用光学金相、X射线衍射、显微硬度和湿砂橡胶轮磨损试验等方法, 系统分析了不同磁场波形参数对等离子弧堆焊试件的作用。结果表明, 适当的交变磁场波形参数能增加堆焊金属中硬质相的数量, 控制硬质相的生长方向, 提高堆焊层金属的硬度和耐磨性, 从而获得最佳的电磁搅拌效果。

关键词: 电磁搅拌; 间歇交变磁场; 波形参数; 等离子弧堆焊; 硬质相

中图分类号: TG455

文献标志码: B

近年来, 磁控焊接技术的发展表明, 在等离子弧堆焊中应用外加间歇交变磁场比直流磁场有更加明显的优势。在适当的间歇交变磁场波形参数作用下, 电磁搅拌可以更加有效地改变焊接熔池液态金属结晶过程中的传质和传热过程, 从而改变晶粒结晶方向, 细化一次组织, 减少了偏析, 提高了焊缝的力学性能^[1]。但当磁场波形参数选择不恰当时, 电磁搅拌效果变差, 降低了焊缝的质量。因此, 在外加间歇交变磁场对低碳钢表面进行等离子弧堆焊时, 磁场波形参数的确定起重要作用。

通过在低碳钢基体上堆焊 Fe5 合金粉末时, 外加间歇交变纵向磁场, 研究不同的间歇交变磁场波形参数对堆焊层金属组织及性能的影响机制。

收稿日期: 2008-09-25

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目 (20042025)

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验采用 Fe 基自熔合金粉末 (Fe5), 粉末的粒度为 60~160 μm 。

1.2 试验方法

所用外加磁场是一种有一定频率和占空比的间歇交变纵向磁场。该磁场由安装在等离子弧堆焊机导电嘴上的激磁线圈产生。线圈的骨架是用壁厚为 5 mm 的绝缘管 ($\phi 120$ mm, 高 150 mm) 和 3 mm 厚的绝缘板制成的; 线圈是用 $\phi 1.5$ mm 的漆包线绕在骨架上制成的, 线圈匝数是 430 匝, 用矽钢片作铁芯, 其厚度为 5 mm。其激磁电流为间歇交变脉冲电流, 它由专用电源供电, 其占空比、频率和幅值均可调节, 产生的磁感线方向与电弧轴线平行, 并以电弧轴线为中心

渡, 计算结果表明有效控制焊缝单元时间, 能够获得更均匀的焊缝及 HAZ 的温度场分布。

(3) 针对 316L 不锈钢板的 TIG 焊接过程进行的数值模拟计算, 分析焊缝及其 HAZ 区域的温度场及残余应力分布规律。建立了完善的数值模拟分析模型, 为后续研究工作提供理论计算依据。

参考文献:

- [1] [德] 拉达伊 D 著. 焊接热效应——温度场, 残余应力, 变形[M]. 熊第京, 郑朝云 译. 北京: 机械工业出版社, 1997.

- [2] 倪红芳, 凌 祥, 涂善东. 多道焊三维残余应力场有限元模拟[J]. 机械强度, 2004, 26(2): 218-222.
- [3] 曾正明. 实用工程材料技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [4] 蔡洪能, 唐慕尧. TIG 焊接温度场的有限元分析[J]. 机械工程学报, 1996, 32(2): 34-39.
- [5] 任雪婷, 杨德新, 李晓红, 等. 焊接规范对单组分活性剂 A-TIG 焊缝形成的影响[J]. 大连铁道学院学报, 2004, 4(25): 76-78.
- [6] 李萌盛, 王传标. 关于钨极氩弧焊热源模型适用性的探讨[J]. 热加工工艺, 2007, 36(15): 70-72.

作者简介: 林 波 (1979—), 男, 硕士, 主要从事数控技术及材料加工方面的研究。