

# 郁金香坡口焊接接头焊后TIG重熔 数值模拟

郭 豪,倪宝成,董洪达,方孝钟

(南车南京浦镇车辆有限公司,江苏 南京 210031)

**摘要:**针对高速转向架构架上新设计的郁金香坡口焊接接头,运用 ABAQUS 有限元软件对该形式接头多道焊和焊后 TIG 重熔处理进行了数值模拟,分别计算了多道 MAG 焊和焊后 TIG 重熔处理的温度场、残余应力场和应变,对比分析该接头形式 MAG 焊后和 TIG 重熔处理后在不同路径下的横向与纵向残余应力及应变分布。结果表明,TIG 重熔影响区产生的新残余应力值较多道 MAG 焊时大幅增加且以拉应力为主,TIG 重熔产生的焊接变形主要在板厚方向,计算结果对结构设计具有一定指导意义。

**关键词:**郁金香;温度场;残余应力场;焊接变形;数值模拟

**中图分类号:** TG404

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-2303(2011)01-0078-04

## Numerical Simulation of tulip type welding joint TIG remelting

GUO Hao, NI Bao-cheng, DONG Hong-da, FANG Xiao-zhong

(CSR Nanjing Puzhen Rolling Stock Co., Ltd., Nanjing 210031, China)

**Abstract:** Aim at the new design tulip type welding joint used on bogie frame, ABAQUS FEM software was used to simulate multi-pass welding and TIG remelting process about this type joint, the calculation contains temperature field, residual stress field and deformation, compared the result we found that the new residual stress value of TIG remelting zone is higher than MAG process and the value is positive, also we found that the deformation of TIG remelting mainly affected the thickness direction, the result analyzed the influence of TIG remelting made sense of the structure design.

**Key words:** tulip; temperature field; residual stress field; welding deformation; numerical simulation

## 0 前言

南车南京浦镇车辆有限公司在部分高速转向架构架上设计了郁金香坡口的角焊缝,目前已申请专利。该形式坡口空间大,适合机械手焊接,其 2 mm 的钝边也能有效防止烧穿和焊接装配时的压装变形。在构架试制前对该形式焊接接头进行了各方面的研究和工艺试验,为了研究 TIG 重熔对该坡口焊缝残余应力分布和焊接应变的影响采用了数值模拟方法。数值模拟方法可节约大量实验费用,有效缩短了机械产品的研制和试验周期,是一种高效、低成本优化工艺的预测和控制技术<sup>[1]</sup>。

收稿日期:2010-01-15

作者简介:郭 豪(1983—),男,江苏扬州人,工程师,硕士,主要从事转向架焊接构架工艺设计和焊接结构仿真、计算方面的研究工作。

## 1 数学模型的建立

### 1.1 温度场

三维瞬态温度场控制方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \bar{Q}$$

式中  $\bar{Q}$  为内热源强度;  $\rho, c, \lambda$  分别为密度、比热容、热导率。

焊接温度场控制方程的热流边界条件

$$q = -k \nabla T$$

式中  $q$  为对流、辐射以及通过非对称边界上的热流。

### 1.2 应力场<sup>[2]</sup>

在该区域中力平衡方程为

$$\sigma_{ij,j} = 0$$

式中  $\sigma_{ij}$  为应力分量,已包括热应力项。

热应变可描述为

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

式中  $\varepsilon_{ij}^T$  为热应变张量;  $\alpha_{ij}$  为热膨胀系数;  $T_0$  为参考温度;  $\delta_{ij}$  为  $\delta$  算子。

应力应变间的本构方程为

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}(d\varepsilon_{kl} - d\varepsilon_{kl}^p - d\varepsilon_{kl}^c - d\varepsilon_{kl}^T)$$

式中  $D_{ijkl}$  为弹性本构张量系数;  $d\varepsilon_{kl}$ 、 $d\varepsilon_{kl}^p$ 、 $d\varepsilon_{kl}^c$ 、 $d\varepsilon_{kl}^T$  分别为总应变、塑性应变、蠕变应变和热应变。

## 2 物理模型建立

试验用钢板母材为 P355NL1, 焊丝 G4Si1、 $\phi 1.2$ 。试板共三道填充焊缝, TIG 重熔中心位置距郁金香坡口侧焊趾 2 mm, 接头截面尺寸如图 1 所示, 长度方向 100 mm。有限元计算使用大型通用软件 ABAQUS, 温度场计算采用 DC3D8 单元, 应力场计算采用 C3D8 单元, 温度场和应力场计算采用的节点和单元个数相同, 共计 28 417 个节点和 23 373 个单元, 有限元网格划分如图 2 所示。

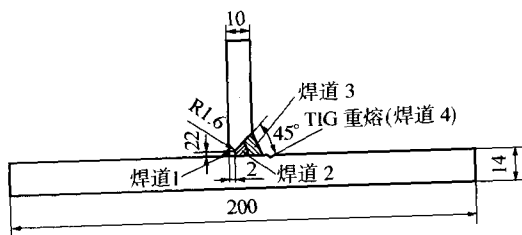


图1 接头截面尺寸

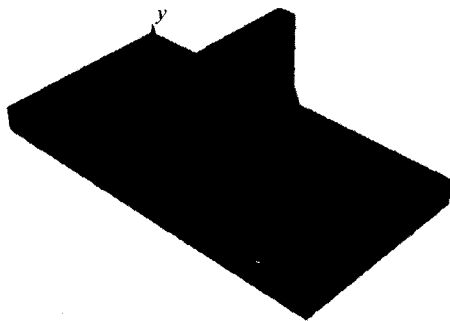


图2 郁金香坡口接头网格划分

### 2.1 材料的热物理性能

焊接过程是个局部快速加热到高温并随后冷却的过程, 随着热源的移动, 整个焊件的温度随时间和空间急剧变化, 材料热物理性能也随温度剧烈变化, P355NL1 的热物理参数如图 3 所示。

### 2.2 焊接工艺参数

郁金香坡口接头采用 MAG 多层(道)焊接, 焊接工艺参数如表 1 所示。

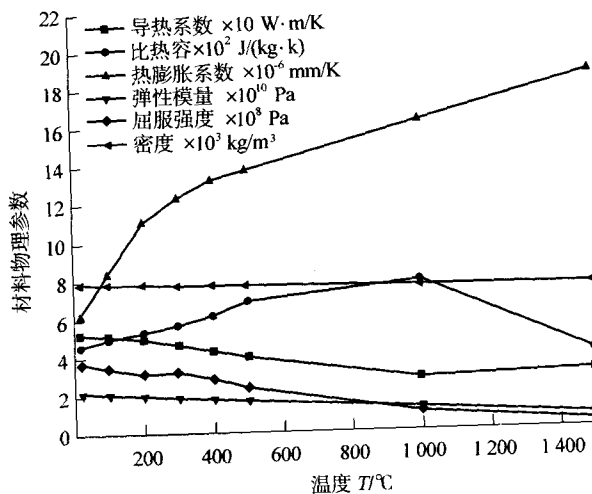


图3 材料的热物理参数

表1 焊接工艺参数

| 焊道 | 焊接方法 | 焊接电流<br>I/A | 焊接电压<br>U/V | 焊接速度<br>v/mm·s <sup>-1</sup> |
|----|------|-------------|-------------|------------------------------|
| 1  | MAG  | 260         | 27          | 4.2                          |
| 2  | MAG  | 280         | 28          | 6.5                          |
| 3  | MAG  | 290         | 30          | 6.5                          |
| 4  | TIG  | 180         | 11          | 3.2                          |

### 2.3 焊接热源

对于有坡口的填角焊缝通常假定热量均匀施加在焊缝单元上, 作内部热源处理。由于焊缝是随电弧的移动逐步填充上去的, 尚未填充的部分假定为虚单元, 在虚单元中给以极小的导热系数, 直至填充焊缝转化为实单元<sup>[3]</sup>。

TIG 焊接热源按表面移动热流处理, 采用高斯分布的热源模型

$$q(r) = q_m \exp(-3 \frac{r^2}{\bar{r}^2})$$

式中  $r$  为离开热源中心的距离;  $\bar{r}$  为电弧有效加热半径;  $q_m$  为最大比热流。

### 2.4 边界条件

采用热-应力耦合中的间接分析法, 因此需同时施加热分析和结构分析的边界条件<sup>[4]</sup>。焊件和外界同时存在对流和辐射换热, 为便于计算, 引入一个总的换热系数, 取对流换热系数为 13 W/(m<sup>2</sup>·k), 环境温度 20 °C, 应力分析时对立板与翼板定位焊处节点全约束。

## 3 温度场

温度场的数值模拟是应力场数值模拟的基础<sup>[5]</sup>,

同时温度场的分布对应力应变有极大的影响。图 4 和图 5 分别给出了第三道 MAG 焊 20.4 s 和 TIG 重熔 3.17 s 时的温度场分布,计算结果与移动正态分布热源温度场已有的理论分析趋势一致,在加热过程中,随热源移动,接头各点的温度迅速升高,经过一段时间后形成准温度场<sup>[6]</sup>。

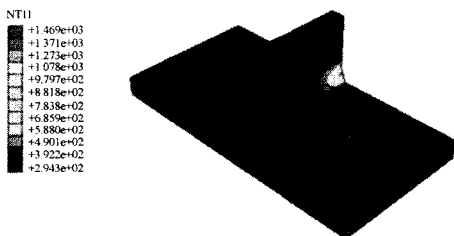


图 4 MAG 焊 20.4 s 时温度场

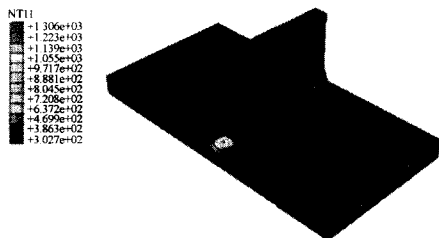


图 5 TIG 重熔 3.17 s 时温度场

## 4 应力场和应变

在模型上取两条路径对计算结果进行分析,如图 6 所示。路径 1 为横向路径,是翼板的上表中心横向方向;路径 2 为纵向路径,是郁金香坡口侧的焊趾纵向方向。

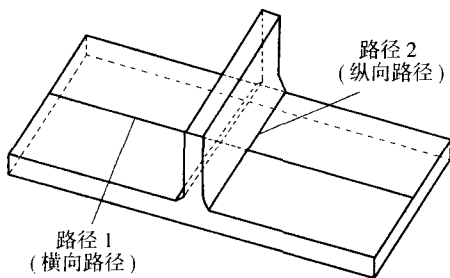


图 6 分析路径

### 4.1 MAG 焊后和 TIG 重熔后横向路径残余应力对比

试板 MAG 焊完冷却和 TIG 重熔后横向路径残余应力对比如图 7、图 8 所示。可以看出,TIG 重熔影响区为横向坐标 97~123 mm,该区域残余应力值变化较大,其他区域横向和纵向残余应力都略有降低。郁金香坡口侧焊趾横向残余应力由 101 MPa 增加为 270 MPa,纵向残余应力由 112 MPa 增加为 433 MPa。

TIG 重熔在其影响区域产生了新的应力场,新应力场与 MAG 焊后的应力场叠加而使该区域残余应力大幅增加。其他区域只是相当于短暂的热处理,因而残余应力值略有降低。

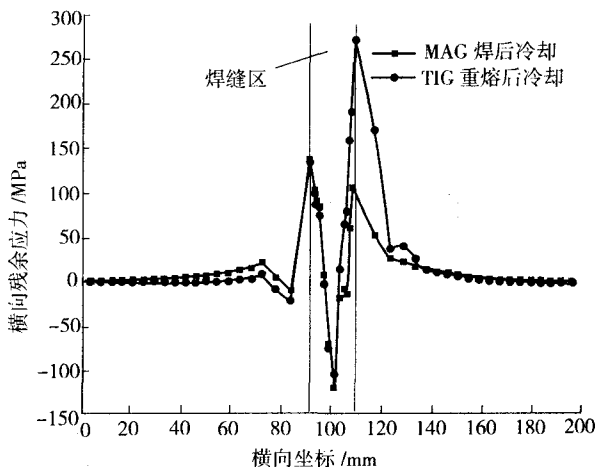


图 7 路径 1 横向残余应力对比

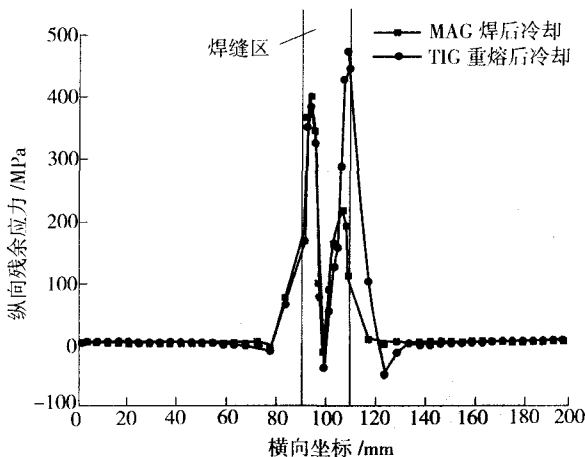


图 8 路径 1 纵向残余应力对比

### 4.2 MAG 焊后和 TIG 重熔后纵向路径残余应力对比

试板 MAG 焊后冷却和 TIG 重熔后纵向路径残余应力对比如图 9、图 10 所示。由图可知,MAG 焊后和 TIG 重熔后的焊缝起弧端残余应力为增长趋势,收弧端为下降趋势,中间焊缝变化稳定,与经典理论一致。纵向路径上所有节点的残余拉应力值 TIG 重熔后都比 MAG 焊后增大,在收弧端 TIG 重熔后的横向残余压应力由 -67 MPa 改变为 -259 MPa。

### 4.3 横向路径和纵向路径应变分布

横向路径和纵向路径焊接变形对比分布如图 11、图 12 所示。MAG 焊后路径 1 横向变形单道焊

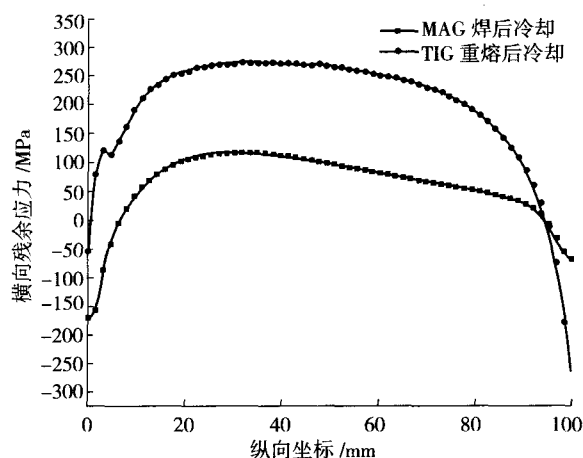


图 9 路径 2 横向残余应力对比

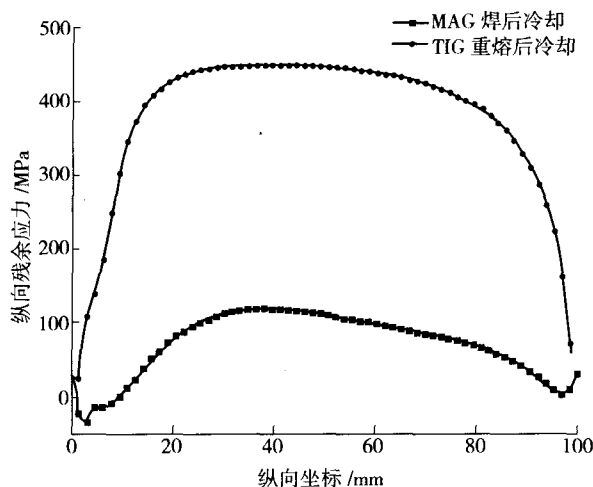


图 10 路径 2 纵向残余应力对比

缝侧为收缩变形,郁金香坡口侧为拉伸变形;路径 2 纵向变形起弧端为收缩变形,收弧端为拉伸变形。TIG 重熔对试板横向与纵向应变影响不大,高度方向变形明显,郁金香坡口侧末端从 $-0.007\text{ mm}$ 变为 $0.026\text{ mm}$ ,TIG 重熔产生的收缩力使该侧翘起<sup>[7]</sup>。

## 5 结论

(1)基于 ABAQUS 三维有限元分析有效地模拟了郁金香坡口接头多道焊和焊后 TIG 重熔处理过程,得到了其温度场、残余应力场和应变分布,对结构设计有指导意义。

(2)计算结果表明,TIG 重熔产生的新应力场与 MAG 焊后的残余应力场叠加后大幅提高了重熔影响区的残余应力。

(3)TIG 重熔产生的收缩力使郁金香坡口侧试板翘起。

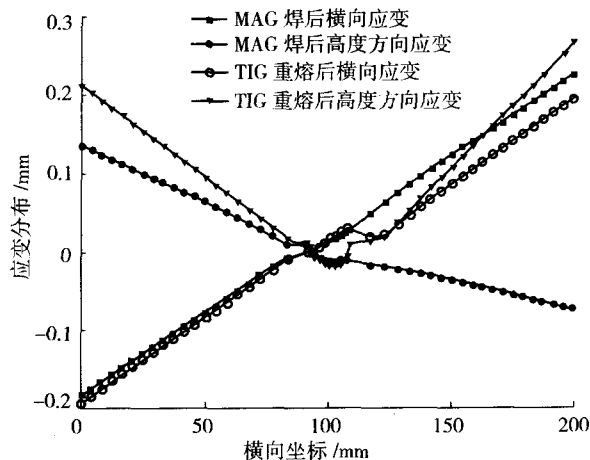


图 11 路径 1 应变对比

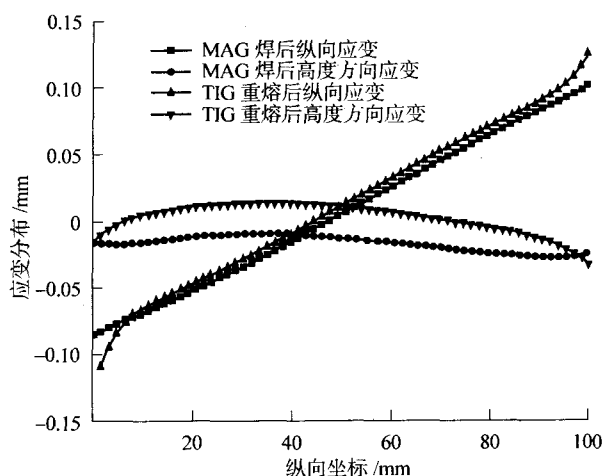


图 12 路径 2 应变对比

## 参考文献:

- [1] 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.
- [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] 罗金华,梁晓燕,王春明,等.中厚板多道焊温度场和应力场三维数值模拟[J].电焊机,2006,36(8):33.
- [4] 薛小龙,王志亮,桑芝富,等.T 形焊接接头的三维有限元模拟[J].中国机械工程,2005,16(9):812-813.
- [5] 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):183-184.
- [6] 扬 文,石永久,王元清,等.结构钢焊接残余应力三维有限元分析[J].吉林大学学报(工学版),2007,37(2):351-352.
- [7] 姚熊亮,刘庆杰,孙 谦,等.基于 ABAQUS 平台对球冠结构焊接变形的数值试验[J].焊接学报,2007,28(6):89.