

DOI : 10.3901/JME.2013.10.127

## 封头坯料拼焊成形焊接残余应力分析

罗征志<sup>1</sup> 曾 京<sup>2</sup> 方华伟<sup>3</sup>

- (1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031 ;  
2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031 ;  
3. 重庆铁马专用车有限公司技术中心 重庆 402260)

**摘要：**研究旋压封头坯料双面多道次拼焊过程残余应力分布规律。对封头材料 Q345R 进行焊接工艺和材料性能分析，然后使用 SYSWELD 软件对封头坯料多道次拼焊焊接工艺过程进行数值模拟。根据焊接模拟结果对封头坯料拼焊过程中的温度场、焊接变形和焊接残余应力分布进行分析，并给出上下表面横向残余应力和纵向残余应力以及厚度方向残余应力的分布曲线。研究表明，Q345R 封头坯料焊接之后，焊接残余应力分布较复杂，残余应力偏高，尤其焊缝区内部存在高残余应力区。高残余应力易使坯料在后续旋压过程中产生开裂缺陷。根据模拟结果制定合理的消除残余应力热处理工艺，并通过试验验证仿真结果的有效性和可靠性。该研究方法为实现大型封头焊接质量预测和控制，以及类似产品的加工工艺制定提供有效手段。

**关键词：**封头坯料 多道焊 残余应力 数值模拟

**中图分类号：**TG404

## Welding Residual Stress Analysis for Welding Forming of Heads Blank

LUO Zhengzhi<sup>1</sup> ZENG Jing<sup>2</sup> FANG Huawei<sup>3</sup>

- (1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;  
2. Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;  
3. Research Centre, Chongqing Tiema Special Vehicles Co., Ltd., Chongqing 402260)

**Abstract :** Residual stress distribution of double-sided multi-pass welding in the course of spinning heads welding is studied. The welding process and material property of Q345R material for heads blank is analyzed. And then the multi-pass welding process of the blank is simulated with SYSWELD software. According to the welding simulation, the temperature field, welding deformation and welding residual stress are analyzed. Then, distribution curves of transverse residual stress and longitudinal residual stress on the top and the bottom surface, and along the thick direction are given. It indicates that the distributions of the welding residual stress are complicated, while the residual stress values especially in the weld zone are too large after the Q345R blank welding. The high residual stress in the weld zone can cause cracks in followed spinning process. According to the simulation results, a reasonable heat-treatment process is considered and implemented to relief the residual stress. The experiments of blank welding and spinning verified that the simulation results are valid and reliable. The research method provides an effective measure for the forecast and control of the large heads multi-pass welding and the determination of the manufacturing process of similar products.

**Key words :** Blank of heads Multi-pass welding Residual stress Numerical simulation

### 0 前言

火车和汽车用罐车封头、化工用罐体等大型压力容器生产中，常用材料为 Q345R。Q345R 材料一般具有化工用板材特质外，就材料成形性能方面，其通常还具有良好的焊接性能和冲压成形性能。大

型封头由于尺寸较大，其所需坯料材料一般是由封头制造厂商进行拼装焊接得到。坯料焊接质量好坏，直接关系封头冲压成形质量及其罐车实际使用寿命和安全性。沈利民等<sup>[1]</sup>对 Q345R 材料焊接接头性能进行研究。刘华等<sup>[2-4]</sup>研究认为，过高的焊接残余应力易造成焊缝开裂，通过焊后热处理工艺能有效降低焊接残余应力，蒋文春等<sup>[4]</sup>还对合理的热处理工艺条件进行了研究。尤其是多道次焊接过程中，各道次焊缝相互影响后所呈现的变形和应力分布极

为复杂,残余应力分布规律的研究显得尤为重要,李娅娜等<sup>[5-9]</sup>使用有限元法对厚板多道次焊接残余应力进行研究。而目前封头及罐车制造企业对封头焊接质量及焊接对后续制造工序,如焊接对封头冲压工艺的影响仅靠经验进行控制,而无理论依据进行指导。因此,罐车封头产品制造,尤其是新品开发中,造成产品报废量大、开发周期长和成本过高。

本文就某铁路罐车所使用的材料厚度为 30 mm 的封头材料 Q345R 进行焊接工艺和力学性能试验研究,并使用 SYSWELD 软件对封头坯料双面多道次焊接成形过程进行数值模拟仿真。根据模拟结果,对厚板封头坯料焊接残余应力进行研究,以指导封头旋压成形工艺制定,提高生产效率,节约产品研究和制造成本。

## 1 封头坯料尺寸及焊接工艺参数

本文研究的封头坯料尺寸为直径 4 200 mm,由两块长 4 300 mm、宽 2 150 mm、厚 30 mm 的 Q345R 钢板通过多道次对接拼焊成形而得。坯料焊前加工如图 1a 所示的坡口,焊接工艺采用双面多道次焊接工序,焊接次序如图 1b 所示。

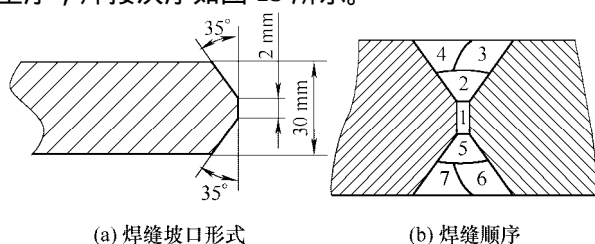


图 1 焊接坡口形式及焊接顺序

Q345R 封头焊接工艺,除第一道打底焊外,均使用焊材 H10Mn2、焊剂 HJ-431 进行埋弧焊。各道次焊接主要工艺参数如表 1 所示。

表 1 封头坯料焊接工艺参数

| 焊接<br>道次 | 焊丝直径<br>/mm | 焊接电流<br>/A | 电弧电压<br>/V | 焊接速度<br>/(cm/min) | 焊丝伸出长度<br>/mm |
|----------|-------------|------------|------------|-------------------|---------------|
| 1 打底焊    | 1.2         | 190        | 21         | —                 | —             |
| 2 道焊层    | 4           | 510        | 34         | 50                | 20            |
| 3 道焊层    | 4           | 650        | 35         | 49                | 18            |
| 4 道焊层    | 4           | 700        | 38         | 50                | 18            |
| 5 道焊层    | 4           | 700        | 37         | 48                | 20            |
| 6 道焊层    | 4           | 700        | 38         | 50                | 18            |
| 7 道焊层    | 4           | 700        | 38         | 50                | 18            |

## 2 Q345R 材料性能参数

材料 Q345R 进行化学组成分析和力学性能测试,试验得到 Q345R 材料化学组成和力学性能见表 2 和表 3 所示。测试结果表明该材料冲压成形性能良好。并对 Q345R 焊接接头进行弯曲和冲击试验,试验结果如图 2 所示,焊接接头冲击吸收功达 135

J,有较好韧性。

表 2 Q345R 材料化学组成

| 元素   | C    | S    | Si   | Mn   | P     | V       | Ti    |
|------|------|------|------|------|-------|---------|-------|
| 质量分数 | 0.19 | 0.01 | 0.32 | 1.46 | 0.017 | 0.002 4 | 0.028 |

表 3 Q345R 材料力学性能

| 材料    | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 伸长率(%) |
|-------|----------|----------|--------|
| Q345R | ≥ 345    | ≥ 550    | ≥ 28   |

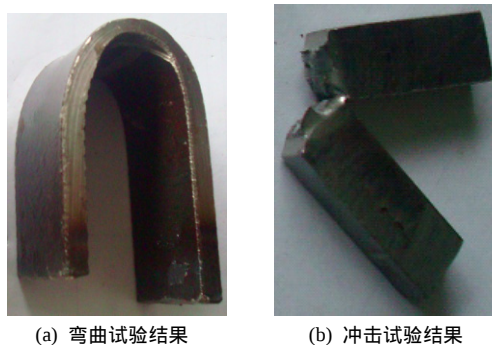


图 2 封头板料试验结果

材料 Q345R 焊接成形过程中,材料的热物理性能和力学性能参数是随着温度变化的,各项热性能参数对于有限元模拟后的焊接残余应力结果的准确性影响极大。采用材料性能计算软件 Jmatpro 4.1 进行热物理性能计算,得到主要物理性能参数弹性模量、屈服应力、热膨胀系数等与温度的对应关系如图 3 所示。

## 3 封头坯料焊接有限元模型

由于封头材料料厚达 30 mm,多道焊坯料进行网格划分时,全部离散成实体单元,为了保证计算精度和提高计算速度,单元网格构建时,采用疏密结合的网格布局,在焊缝熔池区及热影响区采用较细的网格,而在远离焊缝区采用较粗的网格。焊接有限元模型及各道次焊缝填充料网格布局如图 4 所示。

封头板料对接焊数值模拟分析,采用双椭圆型热源模型,热源效率为 0.8<sup>[10]</sup>。焊接模拟过程中,设置初始温度为 20 。并在焊缝区两侧位置,选取三个节点,分别进行 xyz、xy 和 x 方向约束,以消除焊接模拟过程中刚体位移。模拟过程采用直通焊接,焊缝区材料使用生死单元法进行填充。

## 4 封头坯料焊接模拟结果分析

根据前述焊接工艺条件和有限元模型,进行封头坯料多道次拼焊过程模拟分析。对其焊接过程中温度场、焊接变形和焊接残余应力进行分析。

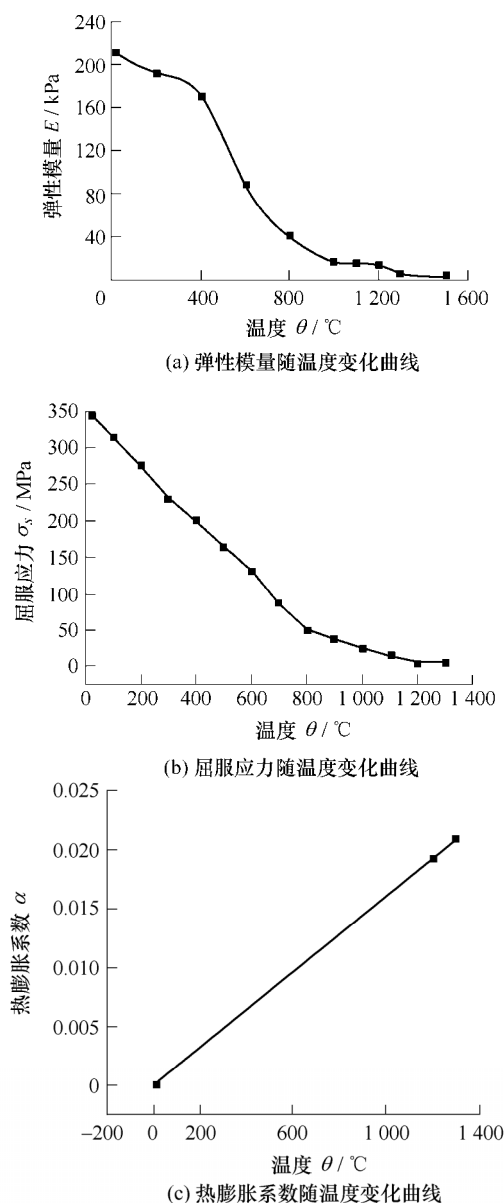


图3 Q345R 主要性能参数与温度的对应关系

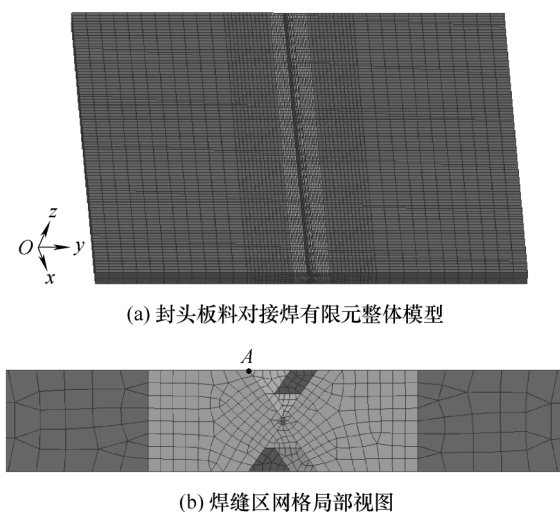


图4 封头板料多道焊有限元模型

#### 4.1 封头坯料焊接温度场分析

封头拼焊多道次焊接温度场最高温度约 1 800

。图 5 为选取图 4b 中第四道焊缝内侧熔池区边上一节点 A 绘制的温度随时间变化曲线,图 5 表明各道次焊接时对其他道次相应区域的温度变化有一定影响,但影响不大。

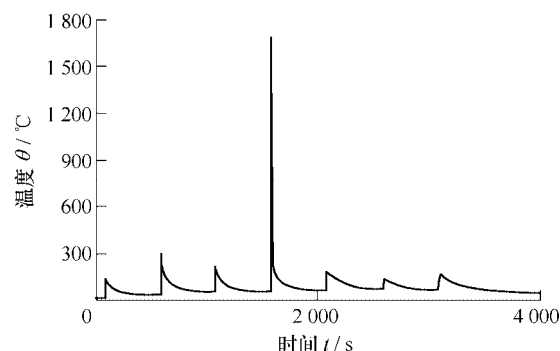


图5 温度-时间变化曲线

#### 4.2 封头坯料焊接变形分析

封头拼焊多道次焊接完毕并冷却之后,封头坯料变形如图 6 所示。由图 6 可知,封头坯料焊后最大变形量为 1.177 mm,大变形区为焊缝及其附件区域,远离焊缝区的两侧区域变形不大。

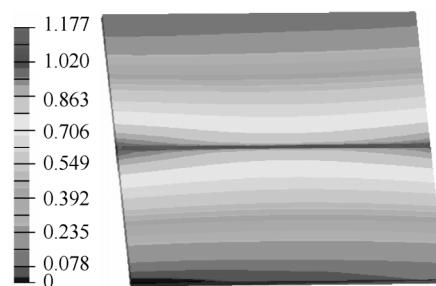


图6 封头坯料焊接变形(mm)

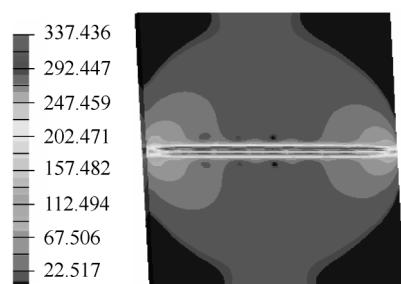
#### 4.3 封头坯料焊接残余应力分析

封头坯料多道次焊接完毕并充分冷却之后,对其焊后残余应力进行分析。重点分析焊缝区域等效残余应力、焊缝纵向、横向残余应力和厚向残余应力,如图 7~10 所示。

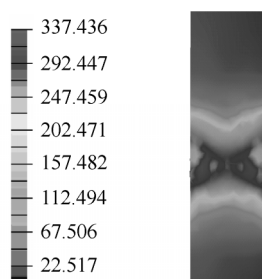
图 7a 焊后等效应力分布云图表明,封头坯料对接焊时焊缝熔池区和热影响区为高等效力区域。高应力区在焊缝区,远离焊缝区域等效应力较小。焊缝表面起止区域高应力区分布不规则,应力相对较小;而焊缝中间段应力分布较规则,高应力区集中在焊缝附近狭长区域。图 7b 焊缝截面视图可见,多道焊中,焊缝内部存在两处高应力区,焊缝表面应力相对较小。最大等效应力达 337 MPa,且位于焊缝内部。

图 8a 焊后纵向应力分布云图表明,封头坯料对接焊的熔池区及热影响区域为高纵向应力区。焊缝区域存在较大的拉伸纵向应力,在该拉伸残余应力区周围,则为压缩纵向应力分布区域,而远离焊缝

区域纵向应力较小。尤其在焊缝表面焊缝起止区域,焊缝附近存在较大的高压应力区。图8b焊缝截面视图可见,多道焊中,焊缝内部存在两处高拉伸纵向应力区,焊缝中心应力相对较小。最大纵向拉应力位于焊缝内部,最大达423 MPa。由于焊缝区域存在较高的纵向拉应力和压应力,将对封头坯料后续冲压加工带来难度,容易致使坯料自内部起产生裂纹而且不易察觉,带来罐车质量安全隐患。

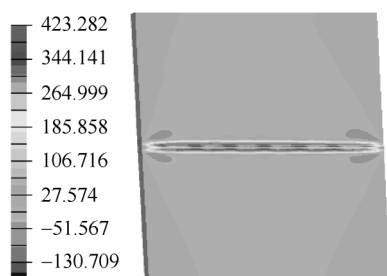


(a) 焊后等效应力整体分布图

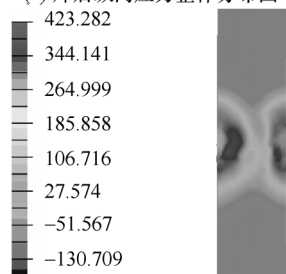


(b) 焊缝截面局部应力分布放大图

图7 焊后等效应力分布图(MPa)



(a) 焊后纵向应力整体分布图

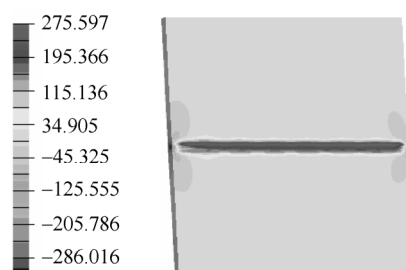


(b) 焊缝截面局部应力分布放大图

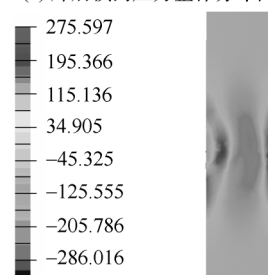
图8 焊后纵向应力分布图(MPa)

图9a焊后横向应力图表明,焊缝表面焊缝起止端附近区域存在较大的压缩横向残余应力,中间段则为规则分布的拉伸横向应力。图9b焊缝截面视图

可见,残余应力呈不规则分布,上下两侧为高拉伸横向应力区,焊缝中心区域则为高压压缩横向应力区。横向残余应力释放,将使得内、外侧焊缝起止端产生焊后变形。高拉伸横向应力将加大后续冲压加工难度,易使封头冲压时表面开裂,而焊缝内部压缩残余应力释放将加剧表面开裂趋势。

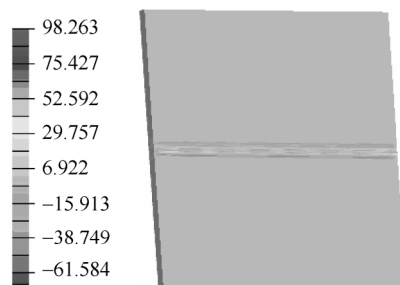


(a) 焊后横向应力整体分布图

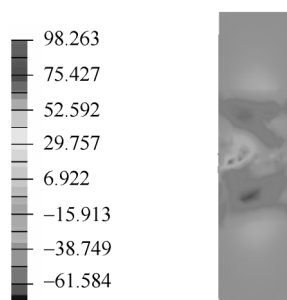


(b) 焊缝截面局部应力分布放大图

图9 焊后横向应力分布图(MPa)



(a) 焊后厚度方向应力整体分布图



(b) 焊缝截面局部应力分布放大图

图10 焊后板厚方向应力分布图(MPa)

焊后板厚方向应力云图10a可见,焊接冷却后,封头材料厚度方向残余应力较小。图10b焊缝区截面视图可见,焊缝两侧存在一定的压缩板厚方向应力,焊缝内部中心区域为板厚方向高应力区。

图 11~13 为焊缝上下表面沿焊缝某一截面选取节点获得的等效残余应力、纵向残余应力和横向残余应力分布曲线。

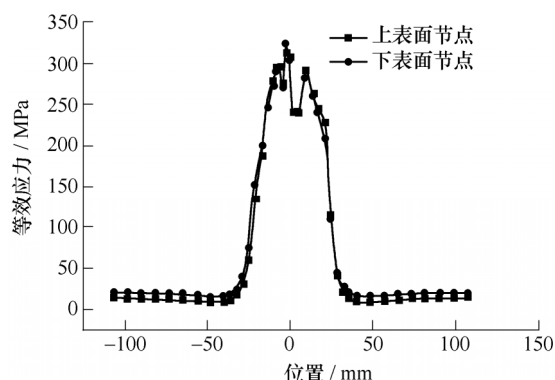


图 11 焊缝上下表面等效残余应力分布曲线

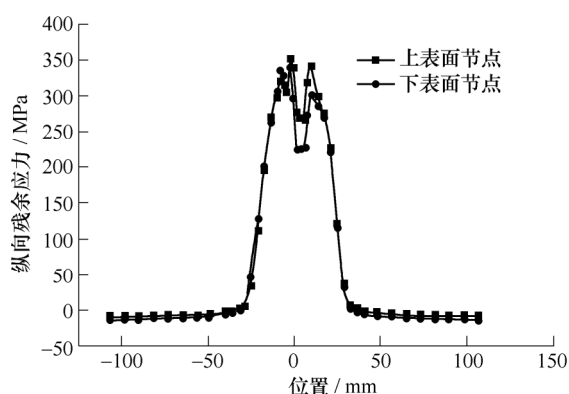


图 12 焊缝上下表面纵向残余应力分布曲线

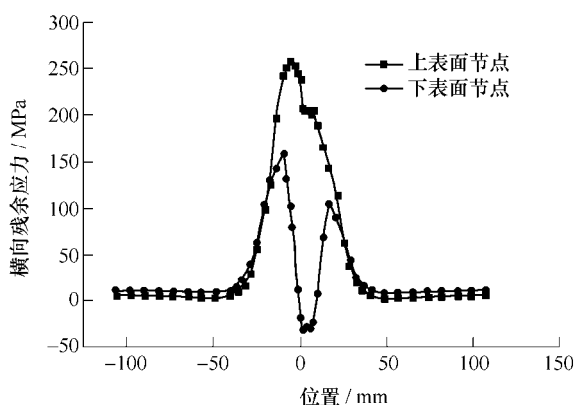


图 13 焊缝上下表面横向残余应力分布曲线

图 11 所示为焊缝焊后上、下表面等效应力分布曲线。图示曲线表明，上下焊缝表面对应位置应力分布规律基本一致，焊缝区为高应力区，而焊缝区两侧应力较小。

图 12 表明焊缝上、下表面纵向残余应力分布规律和大小基本一致，且焊缝区附近为拉伸残余应

力，而焊缝区两侧为压缩残余应力。

图 13 焊缝横截面上、下表面横向残余应力分布曲线表明，上下表面横向焊接残余应力由于两侧焊缝焊接先后影响，焊缝区分布规律差异显著，先焊的上表面为高拉应力区，而后焊的下侧焊缝应力较低，中心区甚至为较小的压缩应力区；而焊缝区两侧应力变化趋势和数值大小基本一致，靠近焊缝区处呈现拉应力，远离焊缝区为压缩应力。该应力分布形式将使后期横向残余应力释放过程中，造成焊缝及附近区域发生较明显的形状变化。

图 14 为沿焊缝中心位置自下而上选取节点获得的等效残余应力、纵向残余应力、横向残余应力和厚向应力分布曲线。

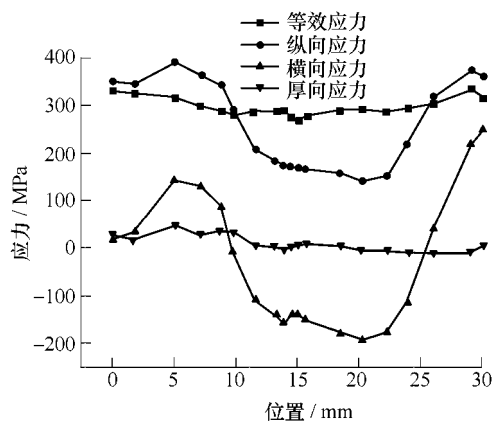


图 14 焊缝厚向节点残余应力分布曲线

图 14 表明，沿焊缝中心自下而上，等效应力和板厚方向应力变化不大，但纵向应力和横向应力变化较大。焊缝表面，纵向应力较高，中心相对较低；而中心区域则为高压压缩横向应力分布区，两侧为高拉伸横向应力区。

## 5 试验结果

封头坯料焊接模拟分析表明，封头坯料多道焊之后，残余应力偏高，残余应力将使得封头旋压成形工艺难度增大。根据前述焊接工艺，焊接得到图 15 所示坯料，机械修边加工后进行旋压试制。旋压试验中，封头外侧焊缝区产生如图 16 所示的沿焊缝方向的局部裂纹，最大开裂缝隙达 3.5 mm，深度约 10 mm；而 Q345R 母材区域外观质量良好，并无裂纹出现。裂纹产生的主要原因为焊缝区的过高残余应力。试验验证了焊接模拟分析结果的正确性。



图 15 焊后坯料实物

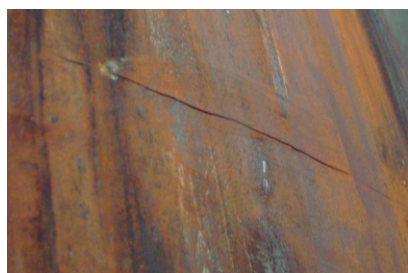


图 16 封头旋压成形裂纹

为消除焊缝区残余应力,采用退火热处理工艺(620 保温 1 h,炉冷到 400 出炉空冷)对焊后板料进行热处理。坯料热处理之后再进行旋压试验,最终得到合格的旋压封头制品如图 17 所示,产品表面无裂纹出现,整体质量良好。试验表明,Q345R 焊接板旋压成形前进行消除焊接残余应力热处理是必要的。



图 17 封头成品

## 6 结论

(1) 大型封头坯料材料 Q345R 焊接工艺和材料性能研究表明,Q345R 材料有较好的焊接性能和冲压成形性能。

(2) Q345R 封头坯料双面多道次焊接完毕后焊缝区等效残余应力、焊缝纵向和横向残余应力较高,板厚方向内部也存在较高的残余应力,这将对封头后续旋压成形产生极大影响。试验表明焊后高残余应力容易导致封头旋压开裂缺陷。

(3) 根据模拟分析结果,制定并实施封头坯料焊后去除残余应力热处理工艺,最终得到了合格的封头制品。

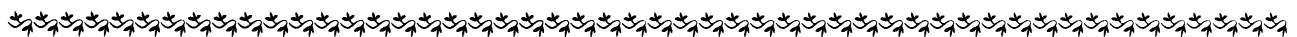
(4) 模拟计算结果和实践表明,有限元软件进

行双面多道次焊接过程模拟分析的模型是有效的;且能通过焊接有限元模拟分析,对封头实际焊接工艺过程进行成形质量预测,为焊接质量控制方案的制定提供科学依据。

## 参 考 文 献

- [1] 沈利民, 巩建鸣, 余正刚, 等. Q345R 钢焊接接头不同部位补焊残余应力的有限元分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(9): 57-60.  
SHEN Limin, GONG Jianming, YU Zhenggang, et al. Residual stress analysis of repair welding at different zone of Q345R welded joint based on finite element simulation[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(9): 57-60.
- [2] 刘华. 某压力容器封头焊缝开裂分析[J]. 材料工程, 2007(3): 43-45.  
LIU Hua. Weld cracking analysis of the pressure vessel cover[J]. Journal of Material Engineering, 2007(3): 43-45.
- [3] 黄荣杰, 杨朝瑞, 胡林, 等. 管板堆焊层开裂的成因分析及处理措施[J]. 压力容器, 2012, 29(5): 66-70.  
HUANG Rongjie, YANG Chaorui, HU Lin, et al. Analysis on crack cause and treatment measure of tube sheet surfacing layer[J]. Pressure vessel Technology, 2012, 29(5): 66-70.
- [4] 蒋文春, 王炳英, 巩建鸣. 焊接残余应力在热处理过程中的演变[J]. 焊接学报, 2011, 32(4): 45-48.  
JIANG Wenchun, WANG Bingying, GONG Jianming. Development of welding residual stress during post welding heat treatment[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(4): 45-48.
- [5] 李娅娜, 谢素明, 许鸿吉, 等. 铁路货车厚板多道焊仿真研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(6): 20-23.  
LI Yana, XIE Suming, XU Hongji, et al. Numerical simulation of multi-pass welding of coarse plate of railway wagon[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(6): 20-23.
- [6] 严仁军, 雷加静, 李鹏, 等. 特厚板多层多道焊的 Marc 有限元模拟[J]. 机械工程学报, 2011, 47(18): 37-42.  
YAN Renjun, LEI Jiajing, LI Peng, et al. Marc finite element simulation in special thick plate by multi-pass and multi-layer welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(18): 37-42.
- [7] CHANG K, LEE C, PARK K, et al. Experimental and numerical investigations on residual stresses in a

- multi-pass butt-welded high strength SM570-TMCP steel plate[J]. International Journal of Steel Structures, 2011, 11(3): 315-324.
- [8] 朱政强, 陈立功, 徐济进, 等. 厚板窄间隙多道埋弧焊温度和残余应力分布[J]. 机械工程学报, 2007, 43(2): 225-229.
- ZHU Zhengqiang, CHEN Ligong, XU Jijin, et al. Temperature distribution and residual stress in multi-pass narrow gap submerged arc welding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(2): 225-229.
- [9] 孟庆国, 方洪渊, 杨建国, 等. 多道焊温度场数值模拟及其分布规律的研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(1): 124-128.
- MENG Qingguo, FANG Hongyuan, YANG Jianguo, et al. Numerical simulation of multi-pass welding's temperature field and study of temperature distribution results[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(1): 124-128.
- [10] LUO Zhengzhi, PAN Yisu. Numerical simulation of welding for vice-frame components[J]. Advanced Materials Research, 2012, 160-162: 220-225.
- 作者简介：罗征志，男，1977 年出生，博士研究生，讲师。主要研究方向为 CAD/CAE，材料成形数值模拟。  
E-mail: zhzhluo@swjtu.edu.cn



## 第 2 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

### 高温复杂结构的混合概率故障物理建模与疲劳寿命预测

作者：朱顺鹏

毕业学校：电子科技大学

指导教师：黄洪钟

由于重大机械装备复杂结构破坏机理的复杂性、不确定性和分散性，针对其寿命预测与可靠性理论中若干亟待解决的重要问题，在复杂载荷、多环境因素以及多种失效模式下的概率寿命预测以及不确定性分析方面展开研究，利用航空发动机涡轮盘用 GH4133 合金和某型航空发动机实测转速循环数据，并辅以高强度耐热钢试验数据进行模型验证，主要内容和研究成果如下。

为完善工程中应用较广的 Miner 法则的理论缺陷和拓展其应用范围，通过考虑载荷和损伤的分散性和随机性对疲劳寿命和疲劳特性分散性的影响，将复杂载荷中小载荷的损伤与强化引入到传统 Miner 法则的理论框架下，并将载荷之间相互作用和载荷次序效应对疲劳特性的影响定量地纳入 Miner 法则，提出模糊 Miner 法则。该法则的提出为工程中“载荷是否产生损伤”的判据和“低载强化”现象的解释提供了理论支撑，更符合客观实际。

为统一表征高温复杂结构在多种失效模式下不同载荷类型造成的损伤而实现不同加载波形下的疲劳-蠕变寿命预测，基于能量准则，提出广义应变能损伤函数模型。该模型综合考虑各加载条件对其损伤和寿命的影响，具有较广的适用性。在此基础上，考虑到该模型中给定的应变能与控制裂纹形成与扩展的真实应变能的差异，提出改进型广义应变能损伤函数模型。研究结果显示，在不同温度、应变比或应力比下，改进模型的寿命预测精度较高，可满足工程实际需要。

针对高温下无荷载保持时间的低周疲劳失效，结合故障物理失效分析技术，从能量角度提出更具一般性的广义能量损伤参数。在此基础上，应用动粘性来描述损伤累积，提出一种物理意义更明确和试验依据更充分的延性耗竭模型。广义能量损伤参数和延性耗竭模型均是基于疲劳失效过程中不可逆延性耗散且材料逐渐递减的固有能量吸收能力而提出的，为实现可靠预估重大机械装备复杂构件的剩余寿命提供了有效途径。研究结果显示，相比现有模型和方法，广义能量损伤参数和延性耗竭模型在寿命预测精度和应用范围上有着显著的优势。

为解决复杂结构寿命预测中诸多因素引入的不确定性问题，应用 Bayes 推理和故障物理技术，将寿命预测模型参数、载荷历程和材料属性等参数以分布形式输入，构建由历史记录数据到材料试验、加速寿命数据的混合概率故障物理寿命预测理论框架。同时，设计并应用马尔科夫链蒙特卡洛(MCMC)仿真技术解决该框架下高维 Bayes 推理的密集计算问题。该框架的提出，实现了故障物理技术在疲劳寿命预测中的应用，并可依据不同阶段的信息和知识状态进行信息更新，既节省相关试验时间和成本，还为实现重大机械装备的安全评估和寿命周期管理做出最有利的决策和判断提供了理论依据。

基于混合概率故障物理寿命预测理论框架，系统地研究物理不确定性、统计不确定性和模型不确定性对寿命和损伤的影响，提出寿命预测中的综合不确定性分析方法：White-Box 法，有效地对重大机械装备复杂构件进行概率故障物理寿命预测。同时，拓展 Black-Box 法在疲劳寿命预测中的应用，较好地表征并评估了模型不确定性。相比 Black-Box 法，White-Box 法综合考虑模型、模型参数、材料属性和模型输入变量的不确定性对疲劳寿命的影响。研究结果表明，概率故障物理寿命预测方法较好地解释了同一类设备或复杂构件在相同使用条件下寿命也有很大的分散性问题，可用于重大机械装备复杂构件的安全评定、健康监测、结构设计和剩余寿命估算等一系列工程实际问题中。