

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.04.009

# 捞渣装置吊臂焊接结构改进

张柱银<sup>1</sup>, 张文军<sup>1</sup>, 王建军<sup>2</sup>

(1. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 株洲市远东通用机械制造有限责任公司, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 吊臂是铝电解捞渣装置的关键部件, 也是主要承力部件, 在实际工作状况下经常发生断裂。为此, 建立了基于 ANSYS Workbench 的某型号捞渣装置吊臂的有限元模型, 且进行了实际工况下的应力应变计算, 并以此为依据对吊臂进行改进设计。改进后的吊臂结构的机械性能得到了明显的提升, 其使用寿命也得到了较大的提高。

**关键词:** 吊臂; 有限元法分析; 焊接结构; 结构改进

**中图分类号:** TH24

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2013)04-0046-07

## The Improvement of Slag Device Crane Welded Structure

Zhang Zhuyin<sup>1</sup>, Zhang Wenjun<sup>1</sup>, Wang Jianjun<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Zhuzhou Far East General Machinery Manufacturing Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** The crane is the key component of the aluminum electrolytic slag device and the load-bearing part, and often breaks under actual working conditions. Established the finite element model of a slag device crane based on ANSYS Workbench Model, and calculated the stress and strain under practical conditions. On this basis the crane design was improved, and the mechanical properties of the improved structure were significantly enhanced and its service life was also greatly increased.

**Keywords:** cranes; finite element analysis; welded structure; structural improvement

## 0 引言

在电解铝行业中, 广泛采用中间下料预焙铝电解槽, 在其阳极更换作业时, 当残余阳极块被吊出后, 电解槽内仍有大量的残余阳极料块和料渣。这些残余阳极料块和料渣不但会影响新阳极的安装精度, 而且会在新阳极下形成炉底沉淀, 从而导致电解槽无法正常生产。因此, 将料块和料渣顺利捞出的意义十分重大。在很长一段时间内, 人工捞块的方法作为一种仅有的方法被广泛采用。此法不仅效

率低下, 且难以适应大规模机械化生产<sup>[1]</sup>。为了解决这一问题, 法国 ECL 公司和德国 NOELL 公司做了大量研究工作, 并在铝电解多功能机组上增加了捞渣功能, 并在实际生产中取得良好的使用效果<sup>[2]</sup>。国内的沈阳冶金机械总厂和株洲天桥起重机厂对其进行仿制, 在实际应用中取得了一定的效果。

但由于捞渣装置的吊臂焊接结构设计不合理、工艺质量控制不严等因素的影响, 再加上在实际使用中难以避免的受力不合理等诱因, 导致捞渣装置的吊臂在频繁使用中强度降低, 又因其在高空不易

收稿日期: 2013-05-18

作者简介: 张柱银(1962-), 男, 湖南常德人, 湖南工业大学教授, 主要从事机械过程装备研究, E-mail: zzy707@163.com

通信作者: 张文军(1985-), 男, 安徽滁州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为机械强度结构分析,

E-mail: 83442467@qq.com

被发现,在正常工况下,该装置的吊臂断裂现象经常发生,已严重制约其使用性能<sup>[3]</sup>。为了保证其稳定可靠地工作,有必要对吊臂进行应力应变分析,从而为改善结构的刚度和强度提供依据<sup>[4]</sup>。本文利用较为成熟的有限元分析软件 ANSYS Workbench 对株洲某厂多功能天车捞渣装置的吊臂进行结构静力学分析,得到其应力应变分布趋势、危险截面及应力集中部位,并以数据和焊接结构设计相关原则为依据对原焊接结构进行改进,从而得到性能更好、能够满足企业预期目标的新结构。

## 1 捞渣装置吊杆有限元分析

### 1.1 建立捞渣装置吊杆的几何模型

捞渣装置吊臂是箱型焊接结构,是一段由2片100 mm × 9.5 mm(称为较薄钢板)和2片105 mm × 24.5 mm(称为较厚钢板)钢板角接而成的方型中空长杆,与另一段由2片161 mm × 9.5 mm和2片121 mm × 9.5 mm钢板角接而成的方台型部件对焊而成。在AWE软件的三维建模工具 Design Modeler 中建立模型,如图1~2所示。

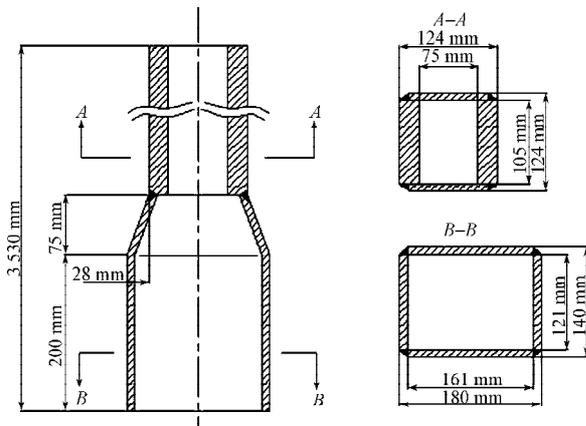


图1 捞渣装置吊杆的剖面图

Fig. 1 Sectional view of slag device boom

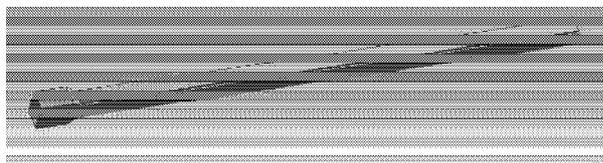


图2 捞渣装置吊杆的三维几何造型

Fig. 2 Three-dimensional geometric modeling of slag device boom

### 1.2 建立有限元模型

#### 1.2.1 建立静力学模型

线性静力学结构分析,一般用来求出结构在给定静力载荷作用下所对应的响应。通常情况下,比较关注的是结构的位移、约束反力、应力以及应变等参数。参考动力学的通用方程

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t), \quad (1)$$

式中:  $M$  表示质量矩阵;  $C$  为阻尼系数;  $K$  表示刚度系数矩阵;  $x$  表示位移矢量;  $F$  表示力矢量。

由于捞渣装置在运行过程中吊臂所受到的力基本不变,所以取其所受的最大载荷加以分析,将其看成静力学结构问题,忽略与时间相关的选型,由式(1)得到

$$Kx = F. \quad (2)$$

#### 1.2.2 定义材料属性

捞渣装置吊臂选用的材料为1Cr18Ni9Ti,属于奥氏体型不锈钢,由于含有Ti,使其具有较高的抗晶间腐蚀性能,有比较好的韧性,以及经过热处理后较好的抗磁性,焊接性能良好,其应用比较广泛,其材料相关性能如表1所示。

表1 吊臂板材(1Cr18Ni9Ti)属性表

Table 1 The crane (1Cr18Ni9Ti) attributes

抗拉强度 / MPa	屈服强度 / MPa	泊松比	弹性模量 / GPa	密度 / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
550	200	0.27	206	7 850

#### 1.2.3 网格划分方案

ANSYS Workbench 的网格划分与其他有限元分析软件的网格划分相比,更智能、更方便。本文采用尺寸控制方法和分网控制方法<sup>[5-9]</sup>。启用AWE的Model模块,尺寸控制方法选择Element Sizing选项;设置网格划分的平均单元尺寸大小为9 mm,其中相同大小或长度的体或线段应用相同的单元尺寸;分网方法控制选择Hex Dominant或者Auto Sweep if possible选项。这样得到的吊臂结构变截面部分是四面体网格,其他规则部分为六面体网格,可得到较好的计算结果。本例网格划分最终共产生250 254个节点和143 951个单元。

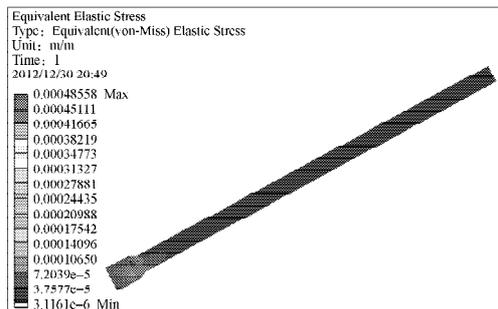
### 1.3 载荷与约束

捞渣装置吊杆上部为固焊联接,可以看成是固定不动,将其上端的6个自由度全设为0。在正常工况下,捞渣装置吊杆在竖直方向上受到来自吊杆自身的重力、残余阳极块重力以及抓斗的重力,总载荷大小约为80 kN。在AWE中的Static Structural模块中定义好对应的载荷,然后选择solve进行求解。

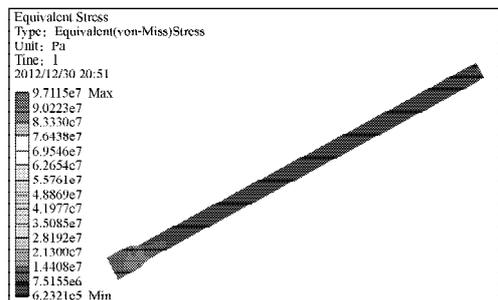
### 1.4 有限元结果的求解与分析

进入AWE下的Solution模块,对实体单元进行强度分析,并求出其在多种路径下的应力应变分布。选择Von-Mises强度理论情况下的应力应变输出,Von-Mises输出依据畸变能密度理论(即第四强度理论)。第四强度理论认为形状改变比能是引起材料流动破坏的主要原因,得出的结果更符合实际,因而

能够更真实地反映捞渣装置吊臂杆的受力情况。整个吊臂的应力应变云图的结果如图3所示。



a) 等效应变云图



b) 等效应力云图

图3 吊臂改进前的等效应力应变云图

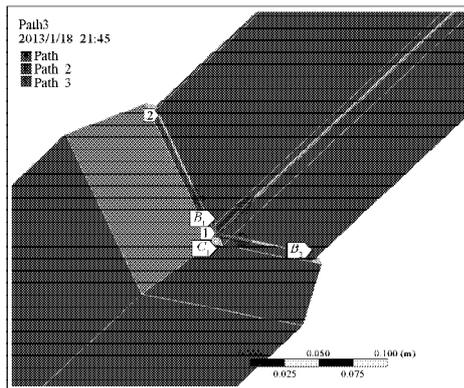
Fig. 3 The boom equivalent stress and strain contours before improvement

从图3a可以看出，吊臂的上部方钢型结构的形变量在整个吊臂结构中最小，且总体比较均匀，故其安全裕度较大，可靠性较好；吊臂的下部台状结构的形变量在整个吊臂结构中也相对较小，也是可靠性较好的部位。这上下2个焊接结构是通过对接焊接完成的，而变形量最大部位就出现在方钢型焊接件下部与台状型焊接件上部的对接焊接面（下文简称对接焊接面）附近。从图3b可以得出，吊臂的上部方钢型结构的应力在整个吊臂结构中最小，且应力分布比较均匀，在整个结构中此部分结构的可靠性最高，吊臂的下部台状型结构的应力在整个吊臂结构中也是偏小的，属于可靠性安全性较好部位，最大应力值出现在对接焊接面附近。

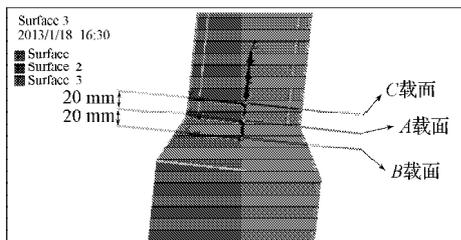
在上述对整个吊臂结构的应力应变分析中，整个吊臂结构最大应力应变值出现的位置，恰恰是吊臂的对接焊接面附近，这与吊臂在实际情况中的断裂部位吻合。通过计算某个吊臂结构在工况下的应力值，最大应力值为97.12 MPa，安全系数为 $n=2$ ，而许用应力 $[\sigma]=100$  Mpa，所以在静载荷下，原设计结构是满足安全要求的。

但是在实际应用中却达不到使用预期，在正常工作状况下，吊臂突然断裂而造成的生产事故比较突出，且断裂面往往在对接焊接面附近。针对这一原

因，从吊臂结构是焊接结构这一情况进行分析是必要的。焊缝的布置以及焊接过程中产生的如裂纹、气孔、夹渣、未焊透、咬边、烧穿和下塌等焊接缺陷以及焊接残余应力等不利因素都会对吊臂结构强度产生影响。焊接缺陷主要在工艺中加以克服，本文主要考虑焊缝布局对吊臂机构的影响。在合理设计焊缝布局之前，必须对吊臂上下部分结构的对接焊接面附近的应力应变作出详细分析。图4为应力应变分析的路径与截面。



a) 各线性路径



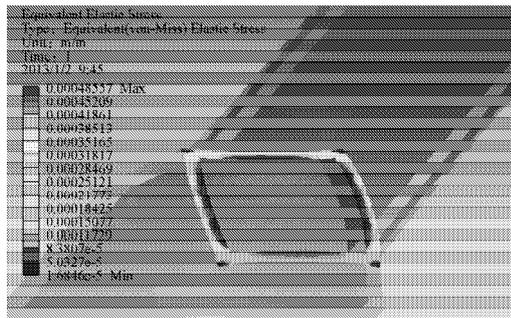
b) 各截面位置

图4 应力应变分析的路径与截面

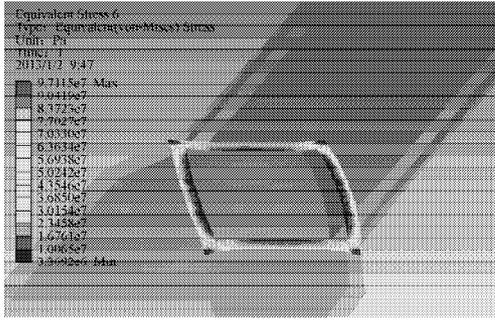
Fig. 4 The stress and strain analysis for sections and paths

如图4所示，对原有结构的应力应变在多个方向、多个路径和多个截面进行分析，计算出应力应变的分布云图与曲线，找出最大应力应变值的准确位置，为对原焊接结构改进提供数据依据，并总结出其比较直观应力应变的规律，以便于在改进中更好地运用。

首先对原焊接结构的A、B、C 3个截面应力应变情况进行计算，得到图5~7的3组计算结果，并以计算结果为依据，对3个截面的应力应变进行分析对比。

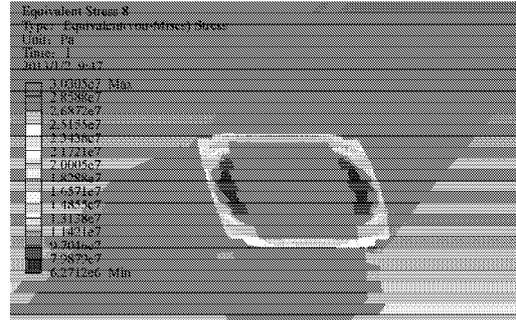


a) 应变云图



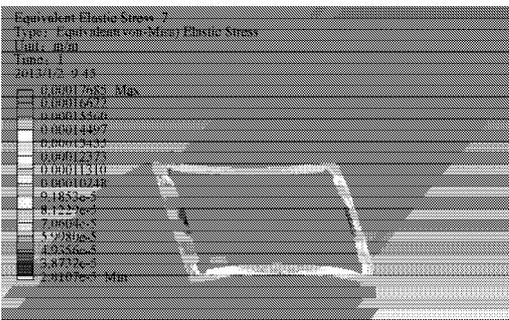
b) 应力云图

图5 对焊接面(即A截面)的应力应变云图  
Fig. 5 The stress-strain contours of the welded surface (A cross-section)

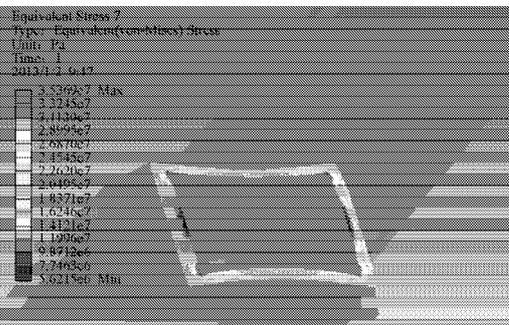


b) 应力云图

图7 对焊接面上方20 mm处截面(即C截面)应力应变云图  
Fig. 7 The cross section (C cross-section) stress-strain contours above 20 mm of welded surface



a) 应变云图

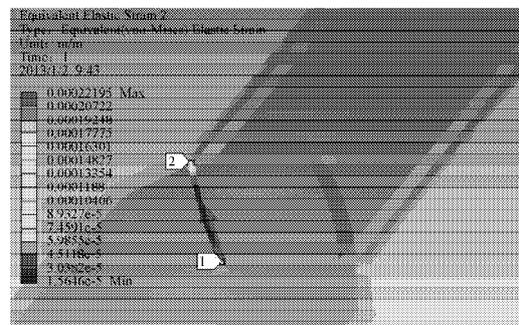


b) 应力云图

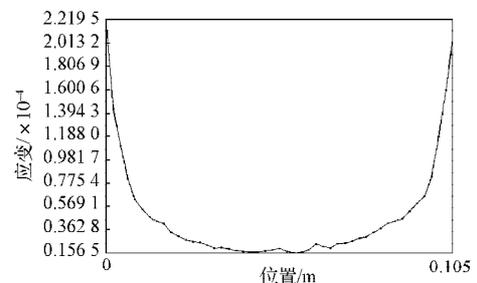
图6 对焊接面下方20 mm处截面(即B截面)应力应变云图  
Fig. 6 The cross-section (B cross-section) stress-strain contours below 20 mm of the welded surface

由图5~7这一组计算结果可以进一步证实, 吊臂焊接结构的最大应力应变截面就在对焊接面处, 从2个方面可以证实这个结论: 其一, 对比这组图片可以发现, 对焊接面处的最大应力应变比其上部与下部的截面都要大, 其值约为另2组截面应力应变值的3倍左右; 其二, 图3a的最大应变值与图5a的最大应变值几乎一致, 图3b的最大应力值与图5b最大应力值完全相等, 依据这2项指标, 再次证实了前期认定的结论是正确的。

再对原焊接结构进行多方向多路径的应力应变计算, 计算结果如图8~13所示。



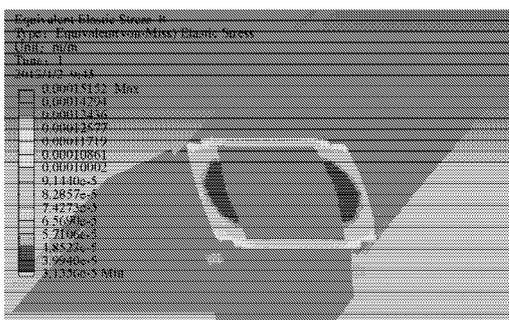
a) 应变云图



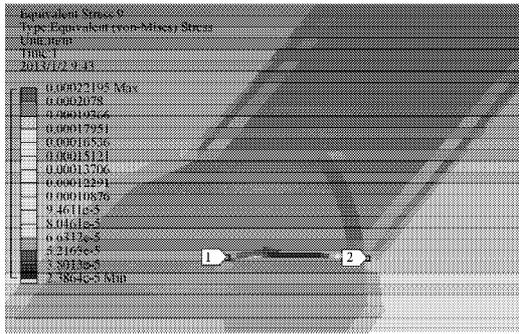
b) 应变分布

图8 较厚钢板对焊接面外侧(即1~2路径)应变云图和应变分布

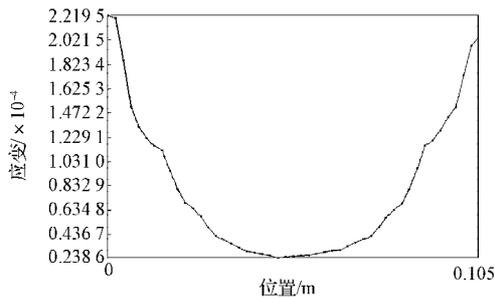
Fig. 8 The strain contours and strain distribution of outer surface of the welded thick steel plate (1 to 2 paths)



a) 应变云图



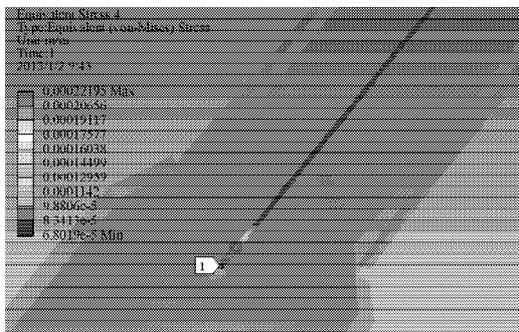
a) 应变云图



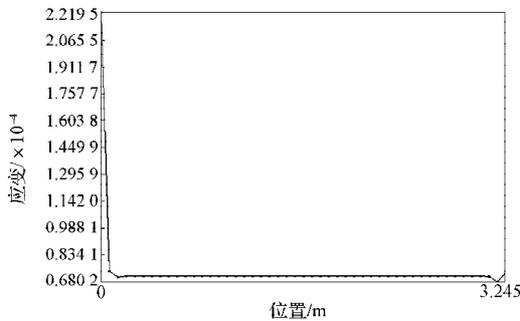
b) 应变分布

图9 较薄钢板对焊接面外侧(即  $B_1 \sim B_2$  路径) 应变云图和应变分布

Fig. 9 The strain contours and strain distribution of outer surface of the welded thin steel plate( $B_1$  to  $B_2$  paths)



a) 应变云图



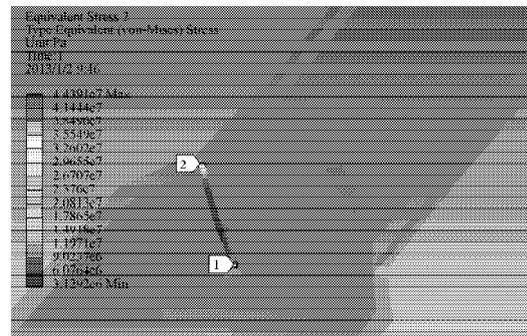
b) 应变分布

图10 上部钢板角焊接面外侧(即  $C_1 \sim C_2$  路径) 应变云图和应变分布

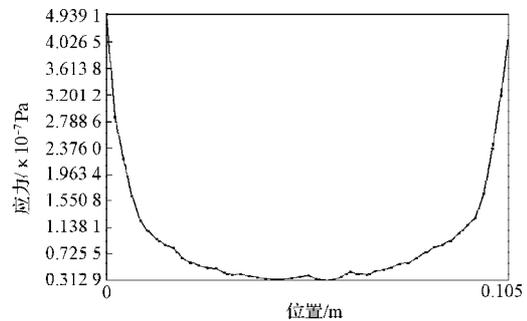
Fig. 10 The strain contours and strain distribution of outer surface of the upper plate( $C_1$  to  $C_2$  paths) fillet welded

由图8可知,吊臂较厚钢板对焊接面外侧,其应变分布为中间小两端大,且两端的应变值较为接近。由图9可知,吊臂较薄钢板对焊接面外侧,其应变分布也为中间小两端大,两端的应变值较为接近。

由图10可知,吊臂角焊接面外侧,其应变在对接截面处最大,然后随着远离对接截面而突然减到很小的值,并保持这个值不变一直到吊臂上部末端。根据图10b的数据分析:一方面,整个吊臂上部方钢型焊接结构应变较小,是整个吊臂的安全系数最高区域,不会因为此处应变过大导致吊臂的断裂;另一方面,较吊臂上部方钢型焊接结构其他截面而言,对焊接面处会产生很大的应变。



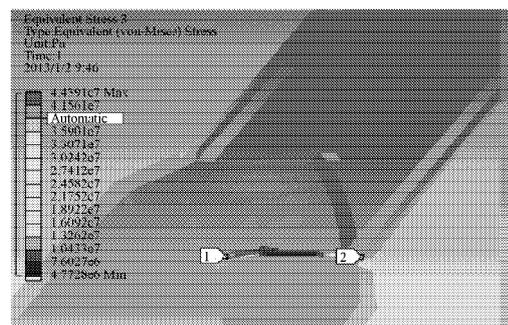
a) 应力云图



b) 应力分布

图11 较厚钢板对焊接面外侧(即 1~2 路径) 应力云图和应力分布

Fig. 11 The stress contours and stress distribution of outer surface of the welded thick steel plate (1 to 2 paths)



a) 应力云图

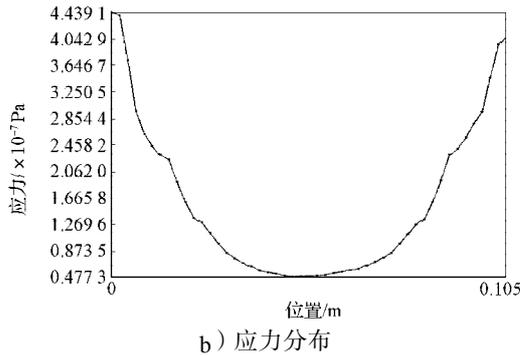
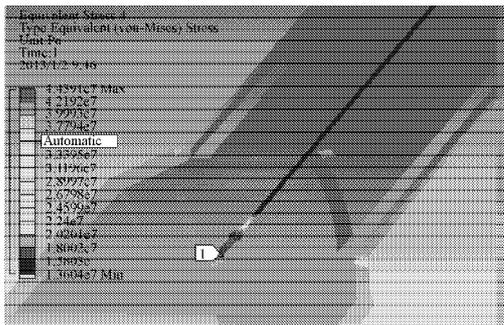


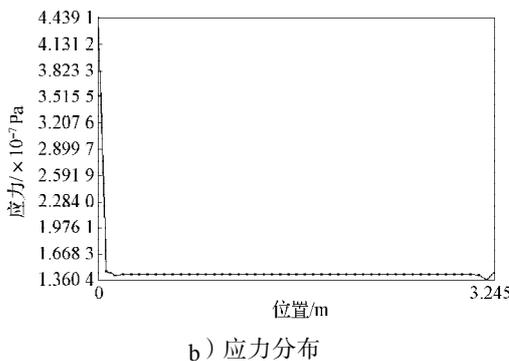
图 12 较薄钢板对焊接面外侧 (即  $B_1 \sim B_2$  路径) 应力云图和应力分布

Fig. 12 The stress contours and stress distribution of outer surface of the welded thin plate ( $B_1$  to  $B_2$  paths)

由图 11 可知, 吊臂较厚钢板对焊接面外侧, 其应力分布为中间小, 两端大, 且两端的应力值较接近。由图 12 可知, 吊臂较薄钢板对焊接面外侧, 其应力分布也为中间小, 两端大, 两端的应力值较接近。



a) 应力云图



b) 应力分布

图 13 上部钢板角焊接面外侧 (即  $C_1 \sim C_2$  路径) 应力云图和应力分布

Fig. 13 The stress contours and stress distribution of outer surface of the upper plate ( $C_1$  to  $C_2$  paths) fillet welded

由图 13 可知, 吊臂上部角焊接面外侧, 其应力在对焊接面处最大, 随着远离对焊接面而突然减到很小的值, 并保持数值不变一直到吊臂上部末端。据图 13b 的数据, 一方面, 整个吊臂上部方钢型焊接结构应力较小, 是整个吊臂的安全系数最高区域, 不会因为此处应力过大导致吊臂断裂; 另一方面, 较吊臂上部方钢型焊接结构其他截面而言, 此处会产

生很大的应力, 即应力集中效应很严重。

## 2 捞渣装置吊杆焊接结构的改进

对原有吊臂结构分析: 一方面, 在工况下发现其对焊接面处所具有的应力应变在整个吊臂结构中是最大的, 对焊接面部位 (即  $A$  截面) 是整个吊臂结构的薄弱环节。但该处的最大应力应变值尚在安全范围内; 另一方面, 由于对焊接面处是由焊接连接的, 焊接过程中难免会产生裂纹、气孔、夹渣、未焊透、咬边、烧穿和下塌等缺陷及残余应力等不利因素, 这些因素又会使得原本就是薄弱环节的对焊接面部分出现断裂的可能性增加。吊臂的最大应力应变值是在安全范围内这一结果是基于吊臂结构是一个整体结构, 而不是焊接结构的假设之下分析得出的, 所以在分析断裂原因时再考虑结构是焊接结构, 综合两种因素就可分析出断裂的真正原因。这一分析结果与实际生产中吊臂出现的断裂部位相吻合, 印证了仿真结果与分析结论的正确性。

根据上述的分析结论, 对原结构进行改进时, 着重考虑焊接因素的影响, 吊臂焊接结构对焊接面部位由多道焊缝交汇连接而成, 因此焊接所造成的影响较大, 故从焊接结构设计角度对原结构进行了改进<sup>[10-11]</sup>, 如图 14 所示。

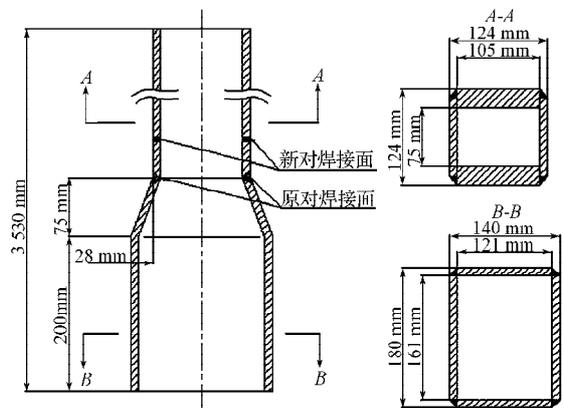


图 14 焊接结构改进二维示意图

Fig. 14 Two-dimensional schematic of the improved welded structure

图 15 为原焊接结构与改进后焊接结构三维模型对比图。如图 15a 所示, 原吊臂焊接结构上部箱 4 块钢板与下部 4 块钢板的对接截面是在同一个平面内, 根据焊接结构设计中避开应力最大处、对称布置变形小、焊缝部位要求分散等焊缝布置原则, 如图 15b 所示, 把对焊接面原本在应力应变最大处的 121 mm  $\times$  9.5 mm 的 2 片钢板与 100 mm  $\times$  9.5 mm 的 2 片钢板 (较薄钢板) 的对焊接面上移 50 mm。这样不仅使它们的对焊接面避开应力应变的最大位置, 也避免了

焊缝过于集中,使得焊缝合理分散,促使焊缝的残余应力降低,避免其相互影响,从而使得吊臂焊接结构的薄弱环节得以加强。在对改进后的捞渣装置使用情况进行调查后发现,新的吊臂焊接结构在使用中其安全系数和使用寿命得到了大幅度提高。该优化改进方案,已经申请了国家专利。

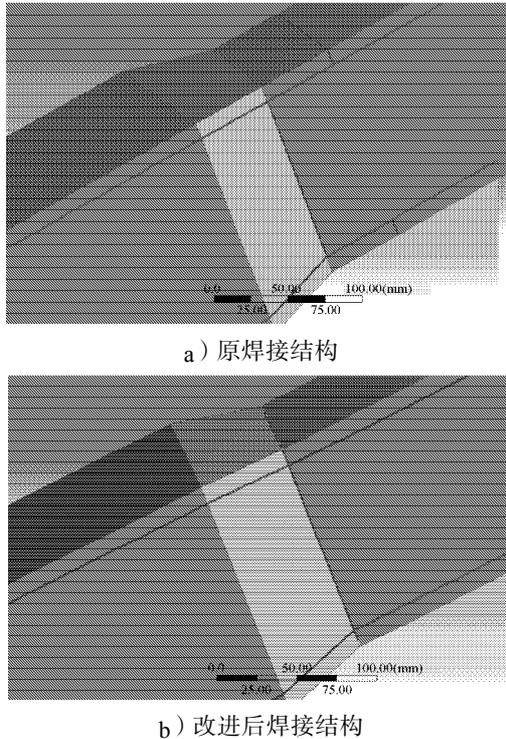


图15 原焊接结构与改进后焊接结构三维模型对比

Fig. 15 The three-dimensional model comparison of original welded structure and improved welded structure

### 3 结语

本文用ANSYS Workbench对原吊臂进行有限元分析,核算其可靠性,综合在工况下出现故障时的原吊臂的断裂位置,分析出故障是由于焊接结构的焊缝布局不合理造成的。因此,对原焊接结构的部分焊缝位置做出新的改进设计,使新的吊臂焊接结构薄弱部位所受应力应变情况得到了合理优化。

新改进中没有增加新的装置和材料,在没有增加企业成本的情况下,经过对原结构薄弱环节的改进设计,使得新吊臂结构的强度和刚度都得到保障,吊臂的总体性能提高,新的吊臂焊接结构在实际生产应用中的使用寿命明显提高,可靠性完全达到了预期目标,得到了企业方的好评。

#### 参考文献:

[1] 龚惠玲. 多功能铝电解槽阳极坑捞块装置的设计及应用

[J]. 冶金设备, 2008(2): 79-80.

Guo Huiling. Design and Application of Anode Pit's Fish Up Block Equipment for Multifunction Aluminum Cell[J]. Metallurgical Equipment, 2008(2): 79-80.

[2] 聂昌跃. 浅析引进法国 I - III 型电解天车的多功能优化配置[J]. 四川有色金属, 2004(3): 16-20.

Nie Changyue. Preliminary Analysis of Multifunctional Optimizing Arrangement of Electrolytic Crane Imported From France[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2004(3): 16-20.

[3] 柴永辉, 魏国平, 齐瑞云, 等. 国产铝电解多功能天车与进口天车的差距和改进[J]. 轻金属, 2006(10): 55-57.

Chai Yonghui, Wei Guoping, Qi Ruiyun, et al. The Gap Between the Domestically Made PTM and Imported One and Its Upgrading[J]. Light Metals, 2006(10): 55-57.

[4] 刘惟信. 机械可靠性设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 26-85.

Liu Weixin. Mechanical Reliability Design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996: 26-85.

[5] A. Zafer Senalp, Oguz Kayabasi, Hasan Kurtaran. Static-Dynamic and Fatigue Behavior of Newly Designed Stem Shapes for Hip Prosthesis Using Finite Element Analysis [J]. Materials and Design, 2007, 28(5): 1577-1583.

[6] Yang Y S, Zhang Y N, Hua F A. Three-Dimensional Finite Element Analysis of Tube Spinning[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 168(1): 68-74.

[7] 赵汝嘉. 机械结构有限元分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990: 23-53.

Zhao Rujia. Mechanical Finite Element Analysis[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1990: 23-53.

[8] 李兵, 何正嘉, 陈雪峰. ANSYS Workbench 设计与优化与仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 24-50.

Li Bing, He Zhengjia, Chen Xuefeng. ANSYS Workbench Design, Optimization and Simulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 24-50.

[9] 蒲广益. ANSYS Workbench12 基础教程与实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 36-50.

Pu Guangyi. ANSYS Workbench 12 Basic Tutorial and Detailed Examples[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010: 36-50.

[10] 有色冶金设计手册编辑委员会. 有色冶金设计手册[S]. 北京: 冶金工业出版社, 1986: 101-103.

Nonferrous Metallurgy Design Manual Editorial Board. Nonferrous Metallurgy Design Manual[S]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1986: 101-103

[11] 蔡春源. 机械零件设计手册[S]. 北京: 冶金工业出版社, 1994: 89-92.

Cai Chunyuan. Mechanical Parts Design Manual[S]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1994: 89-92.

(责任编辑: 申剑)