

基于虚拟仿真技术的推土机台车架结构优化设计

李德明, 宫涛, 王彩凤, 雷宁宁

(山推工程机械股份有限公司, 山东 济宁 272000)

摘要: 台车架是推土机行走机构履带架的骨架, 是地面支撑元件的关键部件, 主要采用焊接结构。针对某型号推土机台车架生产效率低、制造精度差等问题, 进行结构优化设计, 将原有两段式方盒结构改为三段式履带盒结构, 新结构由前导向合件、中弯板合件、后枢轴箱合件、底板、平衡梁座、耳轴、弹簧安装座等组成。基于 SYSWELD 虚拟仿真技术对优化后的结构进行建模, 对焊后变形、残余应力及 5 种典型工况下的结构强度进行仿真。结果表明, 前导向合件总体焊后变形为 12.1 mm, 残余应力为 369.73 MPa, 台车架结构在铲刀提铲、整机匀速后退、整机后退过障碍物 3 种工况时结构应力较小, 而在左刀角偏载和最大牵引力后退两种工况下应力值较大, 但未超过母材的屈服强度。同时优化后的结构重量减轻, 装配简化, 效率和安全系数均提高。最后采取物理样机验证, 工艺流程便捷, 产品可靠性得到保证及提升。

创新点: (1) 三段式履带盒结构的台车架首次在推土机新型产品中应用, 解决了原结构生产效率低、结构工艺性不足以及制造精度一致性差的问题。

(2) 虚拟仿真技术从数字研发向工艺工序深入, 并实现数据的迭代仿真, 首次真正应用在生产实际, 并成为有效指导产品结构优化及制造的典型案例。

(3) 从全流程进行分析验证研发制造过程, 为方法论引入企业生产流程提供一种全新思路。

关键词: 推土机台车架; 虚拟仿真; 结构优化; 样机验证

中图分类号: TG457, TH164 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20220310001

Structural optimization design of bulldozer frame based on virtual simulation technology

Li Deming, Gong Tao, Wang Caifeng, Lei Ningning

(Shantui Construction Machinery Co., Ltd., Jining 272000, Shandong, China)

Abstract: The platform frame is the framework of the track frame of the walking mechanism of the bulldozer and the key component of the ground support element. It mainly adopts the welded structure. Aiming at the problems of low efficiency and poor manufacturing accuracy of a certain type of bulldozer, the structural optimization design is carried out. The original two-stage square box structure is changed into three-stage crawler box structure. The new structure consists of front guide assembly, middle bending plate assembly, rear pivot box assembly, base plate, balance beam seat, trunnion, spring mounting seat, etc. The SYSWELD virtual simulation technology is used to model the optimized structure and simulate the post weld deformation, residual stress and structural strength under typical working conditions. The results show that the overall post weld deformation of the front guide assembly is 12.1 mm and the residual stress is 369.73 MPa. The structural stress of the bench frame structure is small under three working conditions: blade lifting, uniform speed retreat and obstacle retreat. The stress value is large under the two working conditions of eccentric load at the left knife angle and maximum traction retreat, but it does not exceed the yield strength of the base metal. At the same time, the optimized structure reduces the weight, simplifies the assembly and improves the safety factor. Finally, the physical prototype is adopted for verification, the process flow is convenient, and the product reliability is guaranteed and improved.

Highlights: (1) The three-stage caterpillar box frame was first applied in the new product of bulldozer, which solved the problems of low production efficiency, insufficient structure technology and poor manufacturing accuracy consistency of the original structure.
(2) Virtual simulation technology goes deep from R & D to manufacturing process, and realizes iterative simulation of data. It is the first typical case to effectively guide the optimization of product structure and manufacturing practice.
(3) This paper combines theory with practice, analyzes and verifies the R & D and manufacturing process from the whole process, and provides a new idea reference for the introduction of methodology into enterprise production process.

Key words: bulldozer platform frame; virtual simulation; structural optimization; machine verification

0 前言

工程机械作为国家工业基建的建设主力军,近年来随着一体化技术的应用,产品逐渐向智能化、遥控型、无人化方向发展,新型推土机由常规机械液力式向更高效的静液压式升级,其产品结构设计为现有工厂生产制造技术带来新的挑战。推土机台车架属于大型构件,焊缝数量多、受力复杂,容易产生应力集中和变形,利用传统结构设计方法需要大量的计算,并需要试验验证,开发周期长、成本高。

随着计算机技术和仿真算法的发展完善,采用数值模拟的方法可以预测焊接结构的温度场、应力场和焊后变形等,能够节省大量人力、物力和财力,已经成为智能化生产制造技术的关键环节之一,已有学者对地铁牵引梁、地铁底架枕梁、压滤机滤框、汽车车身等结构的焊接变形进行研究^[1-3]。也有学者采用 ANSYS 和 SYSWELD 软件的二次开发,建立适宜于 CO₂ 气体保护焊的双椭球热源模型,通过 Y 形坡口的两块钢板对接多层多道焊模型,分别采用 3 种不同“单元生死”技术对合金结构钢的 CO₂ 气体保护焊温度场分布规律进行数值模拟^[4-5];天津大学的郑振太等人^[6-7]通过红外热像仪检测了 CO₂ 气体保护焊的温度场,发现在熔池及其邻近区域温度呈圆锥型分布,并对有强制对流效果的气体保护焊温度场进行了数值模拟;双丝 MAG 焊接,基于泰勒因子计算 MAG 焊焊缝金属对结构件质量的影响,并采取有限元分析常规和低相变点 MAG 焊的焊接接头的拉伸残余应力(RS)情况^[8-9];在双椭球热源理论研究方面,有学者基于 SYSWELD 和 ANSYS 软件优化设计工具开展双椭球热源模型参数研究^[10-11],也有对网格尺寸及其作用下的温度场计算的相关研究^[12],同时也有针对双椭球热源加载算法的研究,主要是基于热源模型规则离散的加载算法和基于双椭球区域节点选择集的加载算法进行对比分析,得出影响其模型参数的因素^[13],以及低合金

高强钢双面 GTAW 和焊接熔池发展的数值模拟等方面的研究^[14-15]。上述研究方向及成果为文中的焊接顺序、焊接工艺、热源模型校核以及样机验证等方面提供了理论依据,但在工程机械领域鲜有对大型复杂构件,尤其是含有大量的高强度低合金板材、铸锻件掺杂,同时多种焊缝结构形式的工件缺少直接指导企业制造实际的应用研究。

文中结合虚拟仿真技术以及多年积累的制造经验,对某型号静液压推土机台车架进行结构优化设计,建立虚拟仿真模型,对焊后变形、残余应力和典型工况下结构强度进行仿真分析,为台车架焊接结构的优化奠定基础,并采取物理样机验证优化的结果可行性。

1 推土机台车架结构设计

台车架优化前后的结构如图 1 所示,原结构如图 1a 所示,整体为方盒结构,两段式组装。制造工艺流程为弯板合件组焊、底板方盒组对、台车一次组对、二次组对,然后台车机器人焊接、人工焊补修磨、校形。存在的问题是:①整体由多个零件组成,零件之间尺寸互相关联,只能在一个工位按顺序逐步进行,且工作时需要多次翻转工件,效率低下;②由于零件多、工序繁杂,每个零件的制造公差和加工误差积累,制造精度差;③弯板有较大制造公差,造成以其为基体进行装配焊的托轮支架、平衡梁座、耳轴安装座公差较大,难以保证图纸要求。

优化设计后的结构如图 1b 所示,整体改为履带盒结构,三段式模块化组对,生产流程简化为小合件组焊、台车总对、台车机器人焊接、人工焊补修磨、校形,与原方案相比,效率明显提高。同时将枢轴箱与主体弯板合件由原来的对接改为角接,中弯板合件内部设计 4 个筋板,与上部弯板、下部底板相焊,形成箱形结构增加强度。平衡梁座与耳轴安装座均增加连接板成箱形结构。板材型号和板厚做如下调整:将原底板由 28 mm/Q460C 改为 25 mm/Q345,将原弯板上盖板由 10 mm/Q345 改为 8 mm/Q460C,将原中板由 8 mm/Q460C 改为 6 mm/Q345,优化

后结构总重量减轻约 70 kg。

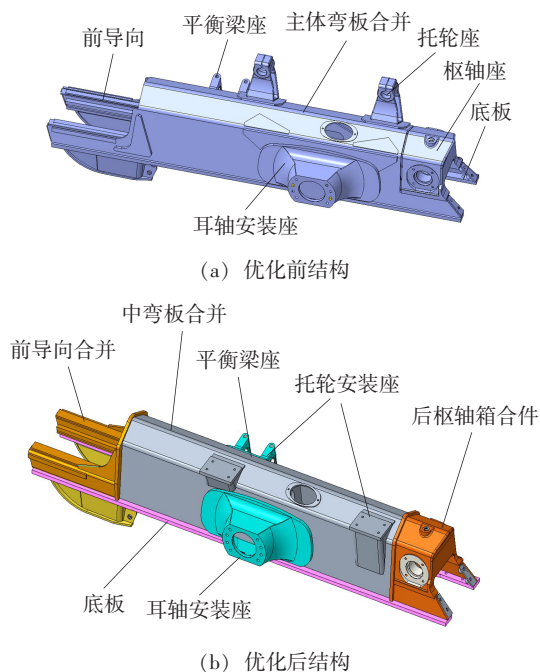


图1 台车架优化前后的结构

2 虚拟仿真分析与验证

2.1 仿真模型建立

为验证上述优化后推土机台车架焊接结构的受力和变形情况,采用 SYSWELD 仿真软件对结构进行仿真,为保证计算精度,模型采用六面体网格,通过网格划分工具 Visual - Mesh 导入三维 CAD 模型完成网格划分。台车架网格共计 280 488 个,焊缝共计 120 条,网格划分如图 2 所示。

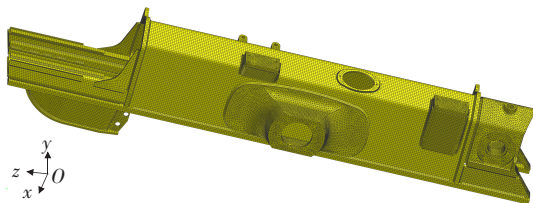


图2 台车架网格划分

整体模型网格划分完成后,打开焊接流程向导,按顺序完成仿真。将局部模型提取的应变值加载到整体模型焊缝网格上,完成映射,利用 Database 数据库设置配置好所有母材 Q345, Q460C 以及铸件 SC450 等材料,并配置 ER50-6 ϕ 1.2 mm 焊丝,添加夹具设置约束条件如图 3 所示,添加所有焊缝网格,完成焊缝激活,接触传热系数设置为 20 W/(m² · K)。零件及焊缝网格通过 unconnect edge 连接,从而大大减少网格处理时间。

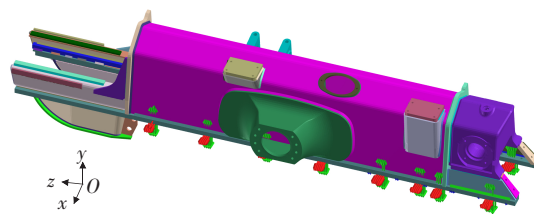


图3 夹持位置示意图

2.2 工艺参数设定

通过软件中的焊接顺序管理器设置焊接顺序、夹持顺序和释放顺序。根据变位机支撑、定位及夹持点位置进行工装夹具模型的创建和设置,并根据变位机液压夹具的夹紧力进行设定,根据工艺预设方案装焊后对工件进行刚性夹持,施焊完成后 10 min 进行加持力的释放。Q460C 为台车架主体结构材质,是在 16Mn 钢中加入 Cr, Ni, V, Ti 等合金元素的低合金高强度钢, V 和 Ti 元素的加入,使钢材强度增高,同时又能细化晶粒,减少钢材的过热倾向,具有良好的抗疲劳性能和低温韧性,根据材料化学成分及力学性能,并参照 CE (IIW) 和冷裂敏感指数 P_{cm} ,制定焊接工艺参数如表 1 所示。

现场焊接采取 Ar-CO₂ 二元混合气体保护焊,选择高斯双椭球的热源模型,根据校验热源模型(表 2 和图 4)对热源的参数/尺寸进行配置,使之与焊接工艺中的实际热源几何形状相匹配。设置完毕后,采取非线性、热学耦合求解器进行计算,并利用云图进行应力-应变的结果输出和直观显示。

表1 焊接工艺参数

焊接位置	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	气体流量 $Q/(L \cdot \min^{-1})$	焊接速度 $v/(cm \cdot \min^{-1})$	层间温度 $T/^{\circ}C$
打底焊	240 ~ 280	25 ~ 30	20	36	100 ~ 150
填充盖面	300 ~ 340	30 ~ 35	25	40	

表 2 热源模型参数设置表

双椭球热参数	前轴长 a_f/mm	后轴长 a_r/mm	宽度 b/mm	深度 d/mm	高斯参数 M	热源前端比例因子 μ
设置数值	1.86	7.2	2.87	3.65	3	0.427

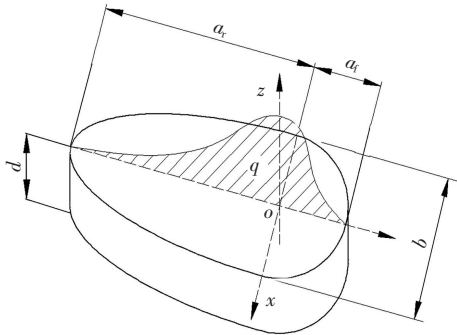
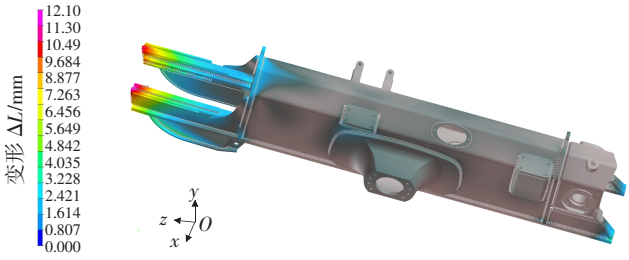


图 4 热源模型

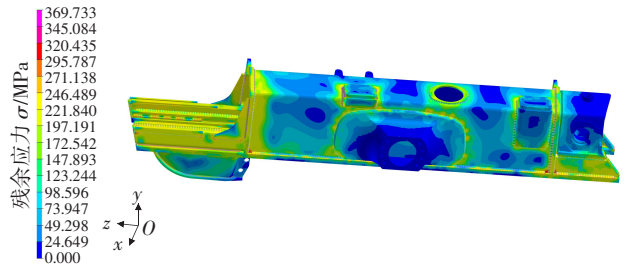
2.3 仿真结果分析

2.3.1 焊后变形及残余应力

为了验证仿真模型,达到改进焊接顺序、工装设计等工艺优化目的,对新型台车架的焊后变形情况、焊接结束后的残余应力分布进行了预测。台车架的焊后变形仿真结果如图 5 所示,可见焊后总体最大变形量为 12.1 mm,最大变形位于前导向合件处。应力-应变仿真结果如图 5b 所示,可以看到主要残余应力分布在焊缝热影响区,最大残余应力值为 369.733 MPa,低于 Q460C 的屈服强度,满足设计要求。同时对比原结构的生产实际测量情况,主体弯板合件、前导向焊接变形量均减少 2~3 mm,通过现有 HTY-12 三维频谱应力消除系统配合应力检测片进行实际检测,残余应力约为 387.45 MPa,新结构最大残余应力值较原结构低 4.5%,位置基本一致。



(a) 焊后变形



(b) 焊后残余应力

图 5 台车架焊接变形及残余应力仿真结果

2.3.2 典型工况结构强度分析

基于上述结果,进一步在结构仿真软件中模拟左刀角偏载、铲刀提铲、整机匀速后退、整机后退过障碍物和最大牵引力后退等 5 种工况下台车架的力学性能极值,分析可能的结构薄弱部位和相关力学性能,验证方案的可行性。表 3 为产品主要性能参数表,其中载荷数值仅为右倾最深位置满载推土的工况参考值。

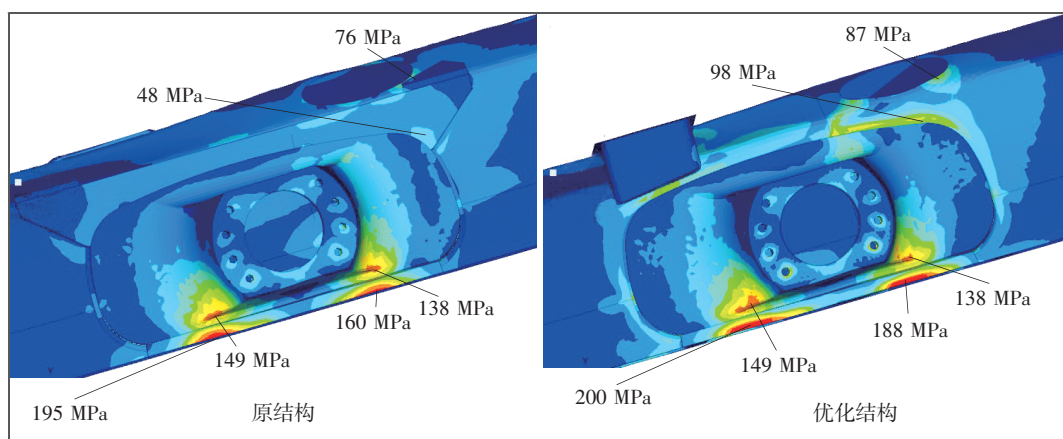
表 3 产品主要性能参数

整机质量 G/kN	滚动阻力系数 f	地面附着 系数 φ	重力加速度 $g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	动载系数 K_d	最大牵引力 P_{kp}/kN
168.2	0.07	0.9	9.8	1.5	146.17
偏载冲击载荷水平 $P_{AX}(1.1P_{kp})/\text{kN}$	油缸溢流压力 P_L/MPa	提升油缸缸筒 直径 ϕ_1/mm	提升油缸缸杆 直径 ϕ_2/mm	提升油缸溢流最大 推力 F_1/kN	提升油缸溢流最大 拉力 F_2/kN
161.8	21	75	60	109.1	43.46

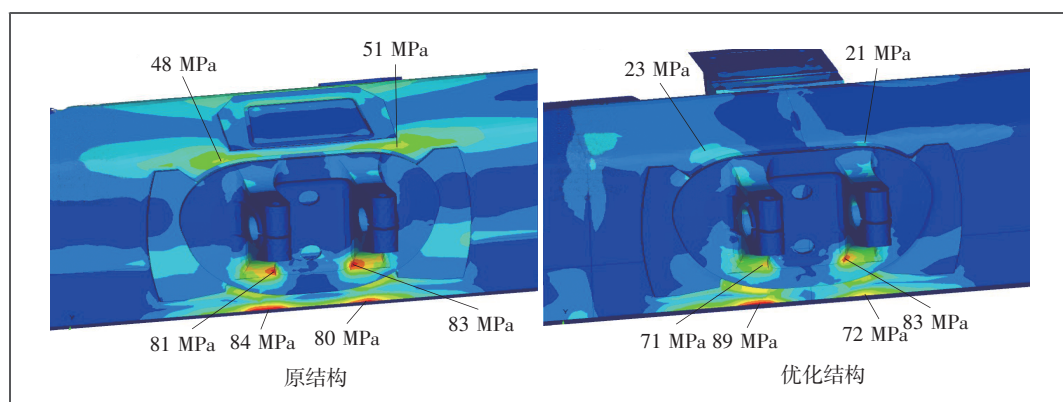
把焊后残余应力及应变变量数值载入至结构强度软件中,并对网格中的退化或不良单元网格进行删除优化处理,确保良好网格单元占比达 99.99% 以上,同时把表 3 中作用载荷转换为有效负荷载力,进行有限元分析计算,典型工况下的结构强度仿真结果分别如

图 6 所示。

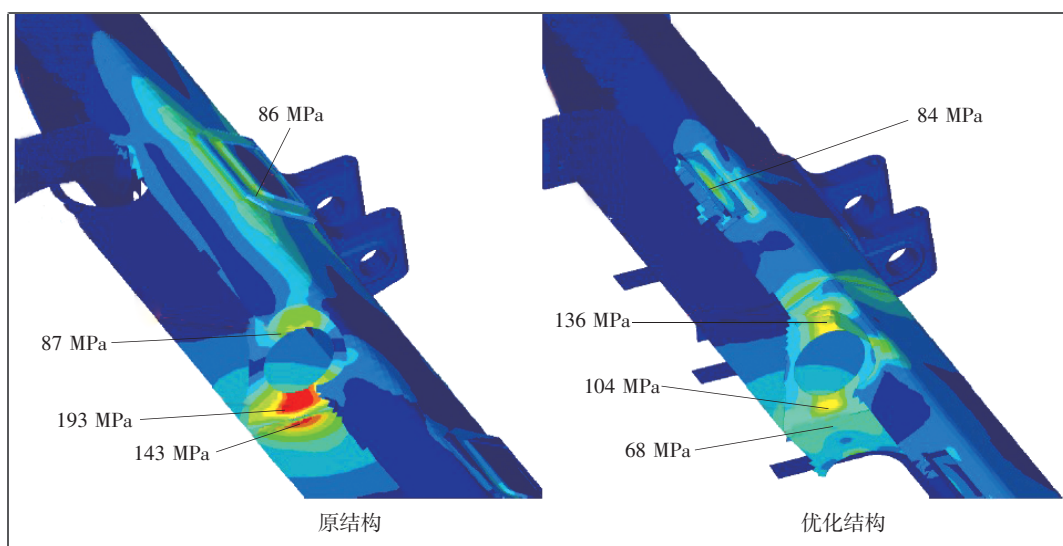
经过仿真分析,台车架结构在铲刀提铲、整机最大牵引力后退 2 种工况时结构应力较小,均不超过 100 MPa,在左刀角偏载工况下应力值较大,与实际工况符合。原结构左刀角偏载工况和最大牵引力后退工况下



(a) 左刀角偏载



(b) 铲刀提铲



(c) 最大牵引力后退

图6 典型工况下结构强度仿真结果

最大应力分别为 195 MPa 和 193 MPa, 新结构下两种工况下最大应力分别为 200 MPa 和 136 MPa, 均小于选用材料 Q460C 的屈服强度, 同时对比分析各工况可以发

现, 新结构的工况安全系数更有优势, 见表 4 所示, 仅左刀角偏载工况下, 新结构耳轴周边无加强板, 耳轴与弯板焊接处周边应力稍高于原结构。

表 4
 产品工况安全系数对比

工况	安全系数	
	原结构	优化结构
左刀角偏载	1.77	1.73
铲刀提铲	4.11	5.17
整机匀速后退	4.27	8.07
整机后退过障碍	6.16	4.86
最大牵引力后退	1.22	2.54

3
 物理样机验证

根据仿真分析结论,进行新结构 5 台物理样机生产验证。考虑批量化生产制造工艺,从试制阶段就整体考虑采取模块化组对,并融入到工厂现有台车架机器人焊接自动化生产线,改变原试制采取人工作业的传统,提高生产效率和焊接质量,减少不必要的额外投资,降低制造成本。整个工艺流程采取小合件组

焊、模块化总组对方式,通过平衡梁座焊前加工,取消焊后加工,解决加工瓶颈。由于与相关件的关键连接安装尺寸没变,采用现有工装进行组对,优化了平衡梁架定位轴。在工装上可完成枢轴箱、弯板合件、前支架合件、耳轴座、平衡梁座的组对,保证了精度;整体组对流程顺畅,部件易调整,尺寸易保证,台车加工增加托轮座划线、铣面、钻孔工序,减少托轮座孔镗铣工序,其余加工内容均相同,整体加工时间与现结构台车持平,特别说明的是优化结构的焊缝总长度由原来 26.540 m 减少为 22.106 m,实际焊接生产效率提升 5.7%,同时工件的自动焊接可达率由原来的 81.5% 提升为 82.1%。

样机制作完成,进行 500,1 000,1 500,2 000 h 4 阶段的市场验证,目前市场验证时间均超过 2 000 h,见表 5 所示,售后服务部门实时跟踪作业工况、验证数据等信息收集,整个车辆工况满足设计要求,同时较原结构在施工作业中,落土便捷性、整体可维修性方面得到很大的改善,得到客户的认可。

表 5
 样机市场验证情况

序号	主机编码	主机号	左台车号	右台车号	GPS 工作时间 t/h
1	D * * * C2LXZQB0L01	1686	L2009201	L2009203	2 379
2	D * * * C2LXZQB0L02	1687	L2009210	L2009204	2 017
3	D * * * C2LXZQB0L01	1701	L2009205	L2009209	2 246
4	D * * * C2LXZQB0L02	1628	L2009202	L2009206	2 468
5	D * * * C2LXZQB0L01	1654	L2009207	L2009208	2 135

4
 结论

(1)将某型号推土机台车架由原有两段式方盒结构改为三段式履带盒结构,新结构包括前导向合件、中弯板合件、后枢轴箱合件、底板、平衡梁座、耳轴、弹簧安装座等。

(2)利用虚拟仿真软件对推土机台车架进行建模和仿真,总体焊后变形为 12.1 mm,位于前导向合件位置,热影响区残余应力最高,达到 369.733 MPa,由于台车架结构中焊缝较多,容易出现应力集中,应进行焊后热处理消除残余应力。

(3)虚拟仿真结果显示,台车架结构在铲刀提铲、

整机匀速后退、整机后退过障碍物 3 种工况时结构应力较小,均不超过 100 MPa,在左刀角偏载和最大牵引力后退两种工况下应力值较大,但未超过母材的屈服强度,表明优化后的结构合理,重量减轻,装配简化,效率和安全系数均有所提高。

(4)通过物理样机试制,模块化生产,整个生产工序流程得到提升,新台车结构试制工时、生产效率比原结构台车提升约 5.7%。

参考文献

[1] 唐琪,陈鹏,陈静青,等. 基于 SYSWELD 的激光复合焊焊接变形数值模拟[J]. 焊接学报,2019,40(3):32

- 36.

- [2] 周三平,王恒,郑宏涛. 基于 SYSWELD 压滤机滤框焊接变形数值模拟[J]. 山东化工, 2020, 49(2): 125 - 128.
- [3] 唐琪,陈鹏,黄菁婧,等. 基于 SYSWELD 的地铁底架枕梁焊接变形的数值模拟[J]. 电焊机, 2017, 47(6): 101 - 104.
- [4] 张银霞,乔向南,王栋,等. CO₂ 气体保护焊温度场的三维数值模拟与分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(4): 41 - 45.
- [5] 黄彦彦,凌泽民,康惠. 基于 SYSWELD 软件的 CO₂ 焊温度场数值模拟及实验验证[J]. 热加工工艺, 2010(13): 146 - 148.
- [6] 郑振太,单平,罗震,等. CO₂ 气体保护焊温度场的数值模拟[J]. 天津大学学报, 2007, 40(2): 234 - 238.
- [7] Bruno Leonardy S. Lopes, Samuel F. Rodrigues, Eden S. Silva. Influence of MIG/MAG welding process on mechanical and pitting corrosion behaviors on the super-duplex stainless steel SAF 2507 welded joints[J]. Materials Sciences and Applications, 2018, 9(2): 228 - 245.
- [8] 刘鑫,陈华,饶银辉,等. 薄板 T 型接头双丝 MAG 焊接残余应力及变形有限元分析[J]. 电焊机, 2021, 51(10): 78 - 85.
- [9] Feng Zhongyuan, Di Xinjie, Wu Shipin, et al. Comparison of microstructure and residual stress between TIG and MAG welding using low transformation temperature welding filler [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 31(3): 263 - 272.
- [10] 李瑞英,赵明,吴春梅. 基于 SYSWELD 的双椭圆热源模型参数的确定[J]. 焊接学报, 2014, 35(10): 93 - 96.
- [11] 顾颖,李亚东,强斌,等. 基于 ANSYS 优化设计求解双椭圆热源模型参数[J]. 焊接学报, 2016, 37(11): 15 - 18.
- [12] 王薇,金成,史春元. 网格尺寸对双椭圆热源模型作用下焊接温度场计算的影响[J]. 机械设计与制造, 2016, 37(7): 60 - 62.
- [13] 董克权,刘超英,陈英俊. 双椭圆热源模型加载算法研究[J]. 焊接学报, 2008, 29(11): 39 - 43.
- [14] 李金阁,凌泽民,徐火青. 低合金高强钢双面 GTAW 的数值模拟研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(1): 153 - 155.
- [15] 杨雪峰, Aristeu da Silveira Neto, Américo Scotti. GTAW 焊接过程中熔池发展的数值模拟及与实验结果的比较[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2002, 34(6): 47 - 51.

第一作者: 李德明, 硕士, 高级工程师; 主要研究方向为工程机械制造技术; lityjidian@163.com。

(编辑: 郑红)

[上接第 46 页]

- position double-sided arc welding[J]. Materials Science and Technology, 2016, 260: 99 - 102.
- [12] Sridhar P, Biswas P, Mahanta P. Effect of process parameters on bead geometry, tensile and microstructural properties of double-sided butt submerged arc welding of SS 304 austenitic stainless steel[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42(10): 1 - 15.
- [13] Wang L, Zhao P, Pan J, et al. Investigation on microstructure and mechanical properties of double-sided synchronous TIP TIG arc butt welded duplex stainless steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(1): 303 - 312.
- [14] Qiang W, Wang K, Wang S, et al. Forming characteristics and mechanism of double-sided heat source synergic vertical welding on an aluminum alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 356 - 368.
- [15] Feng J, Li L, Chen Y. Morphology and crystallography of lath martensite in weld metal of high strength steel by double sided laser welding[J]. Materials Letters, 2020, 261: 127 - 129.

第一作者: 张政, 博士研究生; 主要研究方向为激光电弧复合焊接; zhangzheng716@163.com。

通信作者: 苗玉刚, 博士, 博士研究生导师; miao0701@163.com。

(编辑: 郑红)