

工艺仿真技术在工程机械结构中的应用研究

李德明, 蒋富强, 宫涛, 王彩凤

山推工程机械股份有限公司 山东济宁 272000

摘要: 随着工程机械制造业产品研发的数字化转型, 对产品所涉及关键构件的设计及制造过程中趋于更全面的工艺风险评估, 但工艺开发手段仅仅依赖传统经验模式是远远不够的。通过结合某款推土机新型车架结构优化, 创新地采取某款焊接工艺仿真工具进行提前介入分析, 有效减少物理试错概率及试错成本, 降低产品开发风险, 同时也为工艺仿真对实际问题的解决方案提供一种参考。

关键词: 工艺仿真; 焊接; 工程机械; 应用研究

1 序言

近年来, 随着电、液等相关技术和智能化技术在工程机械行业中的应用, 推土机也由原常规机械液力式向更高效的静液压推土机转变, 产品结构的差异性大也给工厂生产制造带来新的挑战。如某新型车架完全不同于常规产品的后桥箱、机架、平衡梁架等几大传统部件中铸锻件较多的组焊结构特点, 而是摒弃对环保要求过高铸锻件, 采取以低合金高强板为主的一体式组焊结构, 如图1所示。

由于公司原自动化焊接生产线相对柔性较低, 生产工艺流程只适应于原常规产品的生产, 所以无法有效满足该新产品的生产工艺要求。若根据新机型产品结构投入新的自动化焊接生产线, 一是投资额度较大, 二是新机型产品需经历市场推广阶段, 这期间常规产品在量上仍为主导, 无法替换腾出厂房空间来布局, 从而导致短期内新机型生产瓶颈的现实问题。因此, 也只能采取人工参与度较高的焊接作业方式来实现, 但作业中使用行车吊装翻转会

4) U肋内外焊熔透焊接工艺能满足U肋全熔透要求, 工艺的关键在于内焊不得焊偏, 要求内焊设备稳定性好, U肋内部焊缝一旦出现缺陷很难返修或根本无法返修, 无法保证熔透。

总之, 在上述几种成熟的焊接工艺中, 不管采用何种方法焊接, U肋机加工和组装精度均需满足技术要求。

4 结束语

合理的焊接工艺可提高正交异性桥面结构抗疲劳性能, U肋熔深控制、焊缝外观质量满足要求也是提高抗疲劳性的一种措施。通过总结研发出的以上几种U肋焊接工艺, 在实施过程中各有优缺点, 得出以下结论。

1) 采用药芯焊丝焊接, 坡口根部容易产生未

熔合。实芯焊丝船位单道焊对电弧燃烧位置要求极高, 措施控制不合理容易出现焊漏现象。

2) 双丝混合焊实芯焊丝保证了焊缝熔深, 药芯焊丝保证了外观质量。

3) U肋内外埋弧焊能够实现熔透焊接, 进一步提高了桥面板的焊接质量。

参考文献:

- [1] 张华, 舒先庆, 黄新明. 钢桥焊接中工艺参数与焊缝金属填充量的关系[J]. 焊接, 2007 (8): 50-52, 64.
- [2] 裴雪峰, 车平, 冯辉. 钢桥面板U肋角焊缝全熔透焊接工艺研究[J]. 金属加工(热加工), 2021 (3): 41-44.
- [3] 何思根. 虎门大桥钢箱梁U肋与桥面板的焊接工艺[J]. 广船科技, 1995 (4): 47-49.

MW 20210806

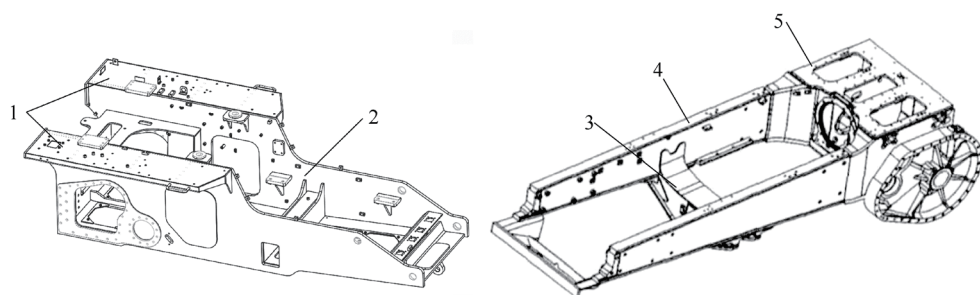


图1 车架结构

1.翼板 2.主体 3.平衡梁架 4.机架 5.后桥箱

增多,无法实现焊缝的船型焊接,翻转一次只能焊局部焊缝,焊接变形及均一性无法保证;另外,由于工件尺寸、重量较大,所以翻转作业同样存在安全隐患,且焊接效率较低。

2 结构优化思路

原生产线自动化水平高,经过三十余年的工艺积淀,制造成本优势较明显,同时由于新老产品交替,所以生产线的产能有富余,并因此工艺人员仍考虑沿用或者通过技术改进原来的生产设备,实现原设备稼动率提升,使公司运营效益最大化。然而新产品与原产品结构差异性大,直接复制工艺流程无法适用,只能从产品结构进行改进。通过多轮评审论证,把原新型车架结构更改为断开式(见图2),类似于常规机型后桥箱、机架等结构,然后沿

用原来的生产工艺流程,合件焊接加工后进行总组总焊,不再进行整体加工,同时减少对大型加工中心的依赖性,实现较大程度的降本增效。

通过拟采取的断开结构可以看出,把新型车架主体结构分成两个部分,采取双边X形对接焊缝进行连接。由于板材为32mm,故单侧采取三层四道进行施焊。此外,为更好地控制焊接变形,考虑到车架的对称结构,同时尽量减少焊接变位次数,提升作业效率,采取有序对称施焊方式,具体焊接顺序为1→9→5→6→13→14→2→3→4→10→11→12→7→8→15→16。焊接参数见表1。

表1 焊接参数

焊丝型号及规格/mm	层道	焊接电流/A	电弧电压/V	气体流量/L·min ⁻¹	焊接速度/cm·min ⁻¹	层间温度/℃
ER50-G φ 1.2	打底	270~300	28~31	20	33	100~150
	填充	300~330	30~35	25	40	
	盖面	340~350	30~35	30	35	



图2 车架断开结构及焊缝形式示意

3 主体结构材料性能

新型车架主体结构采取材料为Q460C,该材质是一种低合金高强度结构钢,在16Mn钢的基础上加入Cr、Ni、V、Ti等合金元素炼制而成,材料化学成分及力学性能见表2。V和Ti的加入,能使钢材

表2 Q460C钢板化学成分及力学性能

化学成分(质量分数,%)											力学性能		
C	Mn	Si	P	S	V	Nb	Ti	Al	Cr	Ni	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率(%)
0.2	1.0~1.7	0.55	0.035	0.035	0.02~0.20	0.015~0.06	0.02~0.20	0.015	0.7	0.7	460	550~720	17

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, 可以适应于制作高强度工程机械关键结构件, 特别是耐寒高强度结构件^[1]。

根据碳当量计算公式 $CE = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + Si/24 + (Ni+Cu)/15$, 可得出碳当量为0.58%~0.63%, 由此得出Q460C焊接时具有较好的焊接性。

4 焊接仿真过程模拟

4.1 工艺流程

根据改进后的产品新结构特点和生产实际进行分析, 研究制定并通过细化工序以及标准化工艺流程等方面进行工艺仿真。具体工艺路线为: ①后桥合件: 小件组焊→粗加工→后桥合件组对→后桥合件焊接→无损检测、矫形→机械加工。②前体合件: 小件组焊→平衡梁合件组焊→底板板组焊→前体总对→前提焊接→机械加工。③后桥合件、前体合件总对→总焊→抛丸→涂装→机械加工→翼板组焊→面漆涂装→检查待检。

4.2 工艺方案选取

结合后桥合件、前体合件的产品结构, 采取原龙门式+L形双回转变位机常规产品的机器人自动焊设备进行夹具改造实现自动焊作业, 车架主体焊接则采用双立柱提升的头尾式双回转的变位机, 实现本次改进关键焊缝的船型位置施焊, 确保焊接质量^[2]。焊接变位机结构如图3所示。

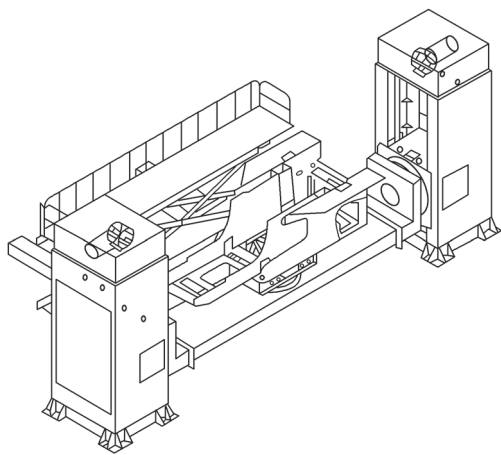


图3 焊接变位机结构

4.3 工艺流程仿真

由于原车架已经过市场验证, 结构强度没有问

题, 但评审对主体对接焊缝强度及残余应力集中问题有所顾虑, 因此本次验证方案针对断开式结构的关键焊缝进行工艺过程的仿真。采取一款专用焊接仿真软件, 首先针对三维模型中对结果没有影响的孔、面及小件进行清理, 节省后期的计算量, 提升计算效率。然后对模型进行前处理, 采取六面体、四面体进行网格划分(见图4), 同时针对焊缝区域进行网格的局部细化, 提升后期计算的精度。

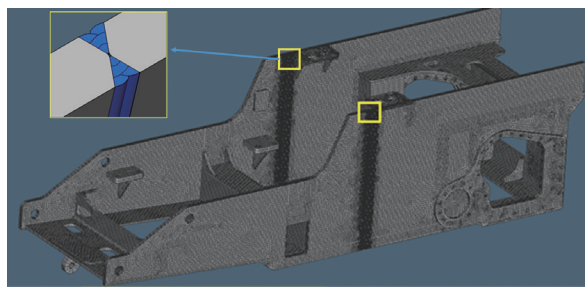


图4 车架网格划分示意

由于采取的仿真软件提供的常用金属材料均为德标、法标, 没有本例中Q460C材料的相关数据, 所以为了更好地进行模拟计算, 在软件的材料库中找到同类材料, 并参照Q460C材料对该同类材料特性值进行修正, 形成Q460C材料性能曲线(见图5), 设置包括杨氏模量、泊松比、热传导系数、热膨胀系数、比热容、应力-应变、熔点及相变潜热等各项参数, 且可以结合CCT和TTT曲线数据进行相变仿真计算, 预测结构的硬度、主要相的成分和百分比、 $t_{8/5}$ 冷却速率等。

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, 如图6所示。本例中底板设置固定装夹(绿色), 且底板孔的前后有顶紧工装(蓝色), 并根据变位机液压夹具的夹紧力进行设定。根据生产节拍, 工件焊前进行夹持, 直至焊接完成10min后进行下一件焊接为止。随后按照软件流程界面依次设置焊接电流、电弧电压、焊接速度等工艺参数及焊接路径、焊接方向、焊接顺序, 同时需要提前校验好热源模型。

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, 如图7所示。通过本例中针对某断开式车架结构的焊接过程的变形情况、焊接结束后的残余应力分布进行了预测。另外, 对于焊接变形的控制可以进一步提出改进方案, 如焊接顺序、工装设计

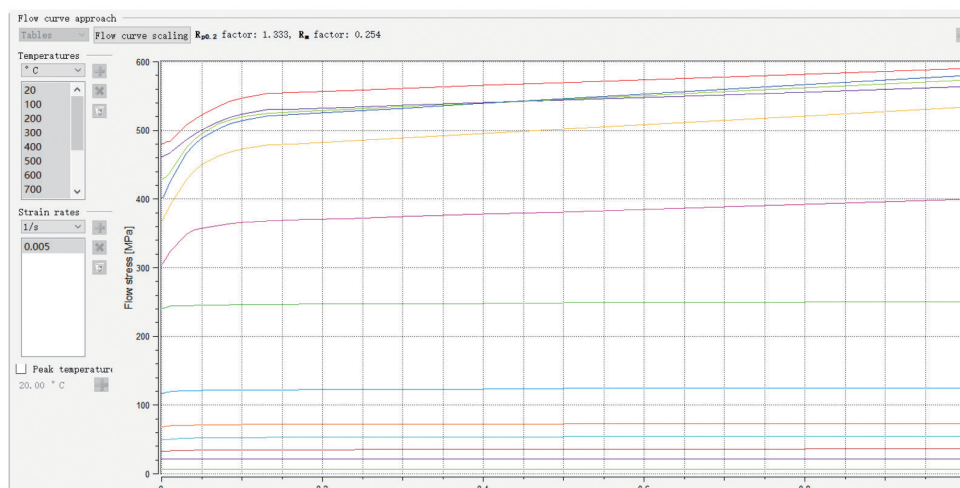


图5 材料修正曲线示意

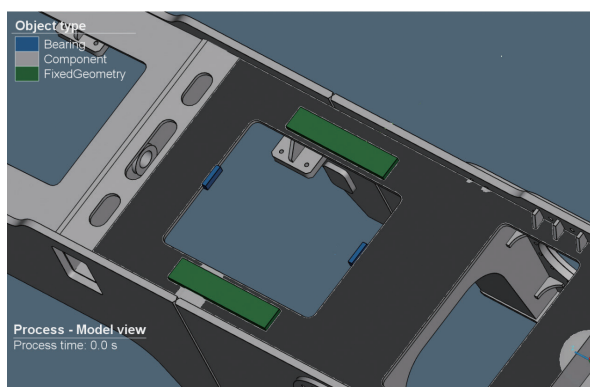
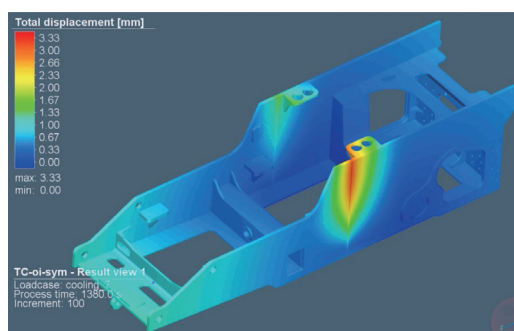
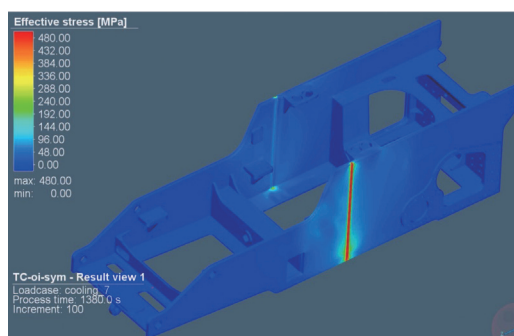


图6 夹持点位置示意



a) 应变云图



b) 应力云图

图7 应力应变结果输出

等，并可进行各方案的对比和验证，从而实现工艺优化的目的。最终经过优化后可以看到在目前的工艺下，整体变形呈现对称分布趋势，变形主要集中在焊缝附近，最大变形量为3.33mm。焊接残余应力的预测结果显示，主要的残余应力分布集中在焊缝即附近的热影响区，最大应力值为480MPa，低于材料固有性能，满足了设计要求。

4.4 结构强度分析

工序工艺仿真的目的是找到更优的方案，并应用到产品工况中，以提升产品的可靠性。因此，基于上述结果又进一步在结构仿真软件中模拟施工工况过程中车架的力学性能极值，分析可能的开裂部位和相关力学性能，与材料自身固有性能进行对比，验证方案的可行性。

如图8所示，推土机作业工况主要受力点位前机罩提升缸作用点 F_1 、 F_2 ，平衡梁作用部位中心孔 F_3 ，枢轴、终传动作用部位 F_4 、 F_5 。以链轮轴线与车体中心面的铰点为坐标原点，X轴与链轮中心轴线重合，正向指向车体左侧，Y轴正方向垂直向

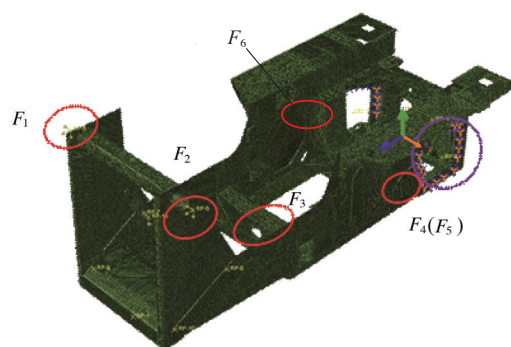


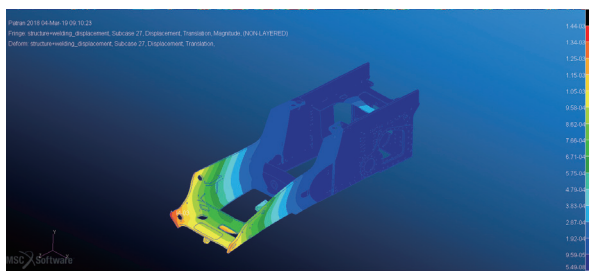
图8 工况受力作用示意

上：Z轴正向指向车体前方。输入载荷施加位置如图
中红色圆圈所示，边界条件施加位置如图中紫色圆
圈所示，参考图示坐标系，同时确定车架重心的坐
标值。表3中载荷数值仅为右倾最深位置满载推土
的工况参考值。

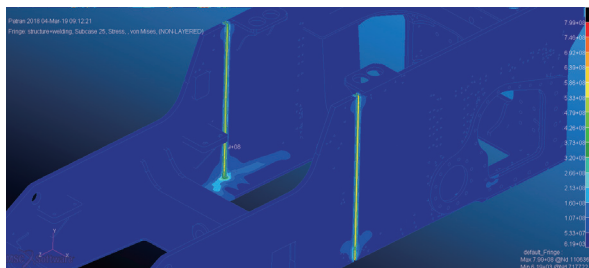
表3 各部位载荷受力

名称		载荷位置	数值大小/N		
			X	Y	Z
载荷	F_1	右提升油缸上铰点	-2120	-35400	10500
	F_2	左提升油缸上铰点	-107	-29200	14500
	F_3	平衡梁安装位置	0	314830	0
	F_4	左枢轴安装位置	-41000	-4500	165000
	F_5	右枢轴安装位置	3550	-15195	45000
	F_6	结构重力	0	-215200	0
边界条件		左右链轮安装位置	固定约束		

进一步把焊后残余应力及应变数值载入至
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
荷加载力，进行有限元分析计算。结构强度分析云
图如图9所示。



a) 车架整体应变云图



b) 焊缝部位应力云图

图9 结构强度分析云图

通过最终有限元计算优化的应力应变云图可以
看出，最大应变量为1.44mm，与原车架结构基本一
致，但应力最大值达到799MPa，高出Q460C材料的
固有性能。这表明焊缝部位应力集中较明显，主要
的残余应力分布集中在焊缝及热影响区，整体趋势
与工艺人员用经验预测相吻合，再进行物理样机改
制试验风险较大，存在设备使用过程中车架断裂风
险。因此采取谨慎处理方式，对此种断开式改进结
构予以否定，后续会采取其他工艺优选方式，在此
不再赘述。

5 结束语

随着用户对产品外观及质量可靠性的要求趋
于高标准，工程机械制造企业对产品所涉及关键件
的研发也需进行更全面的生风险评。原来对于
产品工艺方案的制定和工艺参数的优选，采用传统
的物理试错方法，存在设计和研发周期较长、成本
高、效率低等问题，同时采取固有经验只能定性的
判断，无法实现数值量化，仍需要物理试错来体
现。但近年来工艺仿真软件从通用性，如具代表性
的有Marc、Ansys、Abaqus，向细分市场的专业化
转变，如Sysweld、Simufact等，同时也从航空航
天、军工高铁等高端行业逐渐向一般制造业普及，
界面可视化，操作流程化较好。

工艺仿真软件的应用提升了工艺基础理论研
究，在实现工艺开发数字化，效果数值化的同时，
也为有效减少物理试错概率及试错成本，降低产
品开发风险，提供一种参考。

参考文献：

- [1] 李德明，张民，王彩凤，等.新型推土机机架焊缝
缺陷分析及优化[J].金属加工（热加工），2015
（8）：40-42.
- [2] 中国机械工业学会焊接学会.焊接手册 第3卷 [M].3
版.北京：机械工业出版社，2007.

MW 20210906