

大型钻探设备支承底盘焊接工艺优化研究

康红梅¹, 王继园¹, 黎杰¹, 李昌平¹, 殷国乐^{*2}

(1. 中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;

2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:大型支承底盘作为大型钻探设备的支承平台,通常由大量钢板通过焊接装配而成,焊接残余应力和残余变形会对底盘的强度和刚度产生一定的影响。本文运用有限元分析方法,选取高斯移动热源,针对大型支承底盘中具有代表性的T形焊接接头建立了有限元模型,分别采用4种不同的焊接顺序和焊接速度,分析了其对焊接应力和变形的影响,得到了优化的焊接顺序和焊接速度。在此基础上,对底盘的整体焊接方案做出优化,对比分析了优化前后的焊接应力和变形,结果表明:优化后残余应力减少了约7%,最大变形减少了约26%。研究成果可为焊接工艺的制定提供参考。

关键词:大型钻探设备;大型支承底盘;有限元分析;焊接工艺;焊接残余应力;焊接残余变形

中图分类号:P634.3 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)02-0068-10

Research on optimization of welding process for support chassis of large drilling equipment

KANG Hongmei¹, WANG Jiyuan¹, LI Jie¹, LI Changping¹, YIN Guoyue^{*2}

(1. School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

2. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: The support chassis of large drilling equipment, serving as the support platform, is commonly assembled by welding numerous steel plates together. The residual stresses and deformations caused by welding have a certain impact on the strength and stiffness of the chassis. In this study, the finite element analysis method is applied. A finite element model is established for a representative T-type welded joint in the large support chassis, using a Gaussian moving heat source. Four different welding sequences and welding speeds are adopted to analyze their effects on welding stresses and deformations. Optimized welding sequences and welding speeds are obtained. Based on this, an overall welding scheme for the chassis is optimized. A comparative analysis is conducted on the welding stresses and deformations before and after optimization. The results show that the residual stress is reduced by approximately 7% and the maximum deformation is reduced by approximately 26% after optimization. The research results can provide reference for the formulation of welding processes.

Key words: large drilling equipment; large support chassis; finite element analysis; welding process; residual welding stress; residual welding deformation

收稿日期:2023-09-25; 修回日期:2023-12-10 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.02.010

基金项目:2023教育部产学研合作协同育人项目“面向智能制造的机械类专业师资培训”(编号:231000405032415);湖北楚大智能装备有限公司“日用玻璃智能装备关键技术开发”(编号:2021076887)

第一作者:康红梅,女,汉族,1968年生,副教授,博士,长期从事机械结构设计与制造方面的研究与教学工作,湖北省武汉市鲁磨路388号,haofei98@126.com。

通信作者:殷国乐,男,汉族,1991年生,工程师,从事多工艺空气钻进技术研究及相关钻具设计研发工作,河北省廊坊市广阳区金光道77号,yguole@mail.cgs.gov.cn。

引用格式:康红梅,王继园,黎杰,等.大型钻探设备支承底盘焊接工艺优化研究[J].钻探工程,2024,51(2):68-77.

KANG Hongmei, WANG Jiyuan, LI Jie, et al. Research on optimization of welding process for support chassis of large drilling equipment[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2):68-77.

0 引言

大型支承底盘作为大型钻探设备的支承平台,起到支承、连接和固定钻探设备其他部件的作用^[1-2]。大型钻探设备的支承底盘往往有几吨甚至十几吨重,通常由大量钢板通过焊接装配而成。焊接过程必然在焊缝附近产生大量热量、很高的热应力和大的变形,冷却后会留下较大的残余应力和残余变形。因此大型支承底盘焊接后需要进行后处理,以减少残余应力和残余变形的影响。而由于其体积庞大,大多数厂家没有昂贵的大型退火处理装置,只能进行超声振动处理、局部火焰加热矫正、时效处理等,劳动强度大、需要时间长,且常常达不到要求。为了保证大型支承底盘的强度和刚度,降低生产成本和劳动强度,研究焊接工艺对其焊接质量的影响具有重要意义。传统的实验法因为成本太高,在大型焊件研究中无法普遍适用,在实际焊接前,采用数值模拟方法来研究焊接工艺对焊件质量的影响,相对更经济实用。

相关研究人员利用数值模拟方法,对不同焊接方法下焊件的应力和变形做了大量的研究,但其实验对象大多是简单的平板结构和焊接接头。也有一些学者运用通用或专用有限元软件,对大型复杂结构件进行了焊接仿真研究。李婧^[3]对大型船体货舱双层底结构进行了三维热弹塑性焊接过程模拟,得到了最大焊接变形量和位置。陈泳等^[4]对特种车体大型结构件焊接过程进行数值模拟仿真,分析了不同焊接顺序对大型结构件的焊接变形影响,选择了合理的焊接顺序。管超等^[5]对电铲底架大型焊接组件进行了焊接过程仿真,得到了不同预热温度、散热条件、坡口尺寸和热输入等条件下的焊接温度场和应力场随时间的变化规律。黄月双^[6]对大型航空结构的激光焊接温度场与应力应变场进行分析,得到了残余应力对结构变形的影响规律。对长焊缝进行了焊接顺序优化,进而对整个结构进行了焊接顺序优化。王刚^[7]对中厚板T形接头进行了不同焊脚尺寸、焊缝坡口形式及角度下的焊接数值模拟,预估了其焊接变形及残余应力情况。在此基础上,对装载机动臂进行了焊接数值模拟,预估了其焊接残余应力及变形情况。

本文运用有限元软件 ANSYS Workbench,对某大型钻探设备支承底盘的焊接过程进行热力耦合分析。以单条焊缝为基础,探究不同焊接工艺下

应力和变形的变化规律,在此基础上,对该底盘原有焊接方案进行优化。本文的研究工作可为各种焊件的焊接工艺制定提供参考。

1 方案分析

1.1 底盘结构分析

某大型钻探设备支承底盘如图1所示,由上面板(蓝色部分)、下面板(黄色部分)、中间通过纵横加劲立板(红色和绿色部分)焊接而成的刚性连接体。底盘上面板的材料为Q345A,其余各板材料均为Q235A,其力学性能参数^[8]如表1所示。总长为6300 mm,总宽为2000 mm,总高245 mm,总质量6.3 t。钻探设备机组安装在底盘上面板上表面。

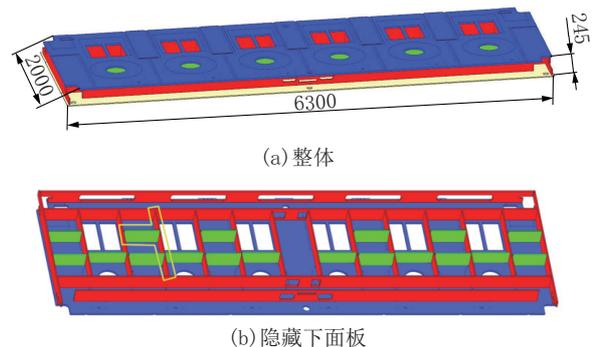


图1 底盘结构

Fig.1 Chassis components

表1 Q235A和Q345A的力学性能参数
Table 1 Mechanical property parameter of Q235A and Q345A

材料类型	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa
Q235A	235	450	0.3	7850	2.1×10 ⁵
Q345A	345	550	0.3	7850	2.1×10 ⁵

底盘上面板为一整块水平放置的钢板,因其上安装设备的功能要求局部开孔,与所有的中间纵横立板均以焊接连接,如图1(b)所示。上面板是底盘最重要的零件,因其上焊缝非常多,每条焊缝焊接后都会产生焊接应力和焊接变形,各个焊缝的综合作用,使得上面板焊接应力和焊接变形的影响因素非常复杂。上面板设计厚度30 mm,因其上需要安装钻探设备,对其上表面平面度要求较高,因此上面板在焊接完成后,需要留下一定的机加工余量。余量太大的话,钢材浪费太多,成本太高;余量太小

的话,焊接处理后再机加工,没法达到上表面平面度的要求,影响设备的后续使用。相关企业要求余量在5 mm以内,即机加工后上面板厚度 ≥ 25 mm。尽量减小焊接后上面板的残余变形和残余应力,才能同时较好地保证加工余量的范围和上面板上表面的平面度。底盘下面板为多块水平放置的钢板,仅起到连接、支撑作用,各个钢板与中间立板均以焊接连接,各个钢板上焊缝均较少。故本文仅就上面板与各个中间立板的焊接进行研究。

1.2 底盘焊接工艺优化方案分析

焊接工艺参数是影响焊接质量的关键因素,包括焊接顺序、焊接速度、焊接电压和焊接电流等。其中焊接顺序和焊接速度的改变对残余应力和变形的影响十分显著^[9-11]。选择合理的焊接顺序和焊接速度,有助于减少焊接结构的变形和残余应力,也可以为实际生产提供有效的指导^[12]。通常焊接电压和焊接电流由焊机决定,不能改变,本文研究不同焊接顺序和焊接速度对上面板应力及变形的影响。

该底盘的焊接方式为CO₂气体保护电弧焊,焊接时的电弧电压 $U=30$ V,焊接电流 $I=210$ A,焊枪移动速度 $v=5$ mm/s,绝大多数焊缝为高度5 mm的角焊缝。

底盘中间立板可以分为侧板和筋板,侧板和筋板通过焊接来连接和支撑上下面板。如图1(b)所示,红色部分为侧板,绿色部分为筋板,侧板和筋板相互垂直且呈T形布置(后续简称“T形接头”)。由图1(b)可见,虽然焊缝非常多,但焊缝形式均为垂直焊接。选用图1(b)中数量最多的侧板和筋板各一块作为模型基础(图中黄色框线部分),研究焊接工艺对T形接头应力和变形的影响,特别是对残余应力和残余变形的影响。在此基础上,研究整个上面板的焊接工艺对其整体应力和变形的影响。

2 焊接过程数值模拟前处理

2.1 热源模型的选取和加载

焊接过程的模拟需要焊接热源的支撑,正确选择焊接热源模型对于准确模拟焊接温度场和应力变形有着极其重要的作用^[13]。热源模型的种类较多,其中高斯移动热源模型广泛应用于有限元分析中,符合底盘的焊接场景,本文选择高斯移动热源模型。

高斯移动热源函数^[14]为:

$$q(x,y,z,t) = \frac{3\eta UI}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) \quad (1)$$

式中: q ——加热斑点热流密度; x,y,z ——各方向坐标值; t ——时间; η ——焊接热效率,一般电弧焊接热效率为40%~75%,选取 $\eta=0.50$; U ——焊接电压; I ——焊接电流,见本文1.2节; r ——该点到加热斑点中心的距离; R ——电弧有效加热半径,取5 mm。

假设T形接头的焊缝在XOY平面,焊接起点为坐标原点,沿着 x 轴正向焊接,则式(1)可写为:

$$q(x,y,z,t) = 10^8 \exp\left[-3 \frac{(x-0.01t)^2 + y^2}{0.005^2}\right] \quad (2)$$

由于焊接的起始时间和坐标位置均不一样,每条焊缝都需要一个高斯移动热源函数。

2.2 几何模型及网格划分

选择图1(b)黄色线框所示T形接头的侧板和筋板之间的焊接,侧板尺寸为1129 mm \times 169 mm \times 25 mm,筋板尺寸为482 mm \times 169 mm \times 16 mm(见图2),材料均为Q235A,焊枪倾斜20°,焊枪移动速度保持在5 mm/s。热源函数为式(2),两条焊缝长度均为169 mm。计算得总的焊接时长为68 s,设置冷却时间为100 s,则焊接过程总共历时168 s。

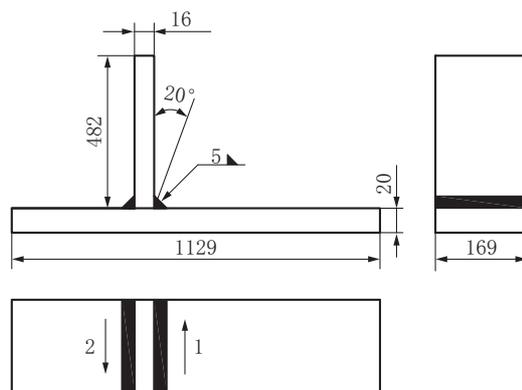


图2 T形接头几何尺寸

Fig.2 T-joint geometry

在进行焊接数值模拟时,通常着重考虑温度场、应力、变形及显微组织之间相互影响^[15],可看作热应力耦合分析,需要选择具备热分析与力分析双重属性的耦合单元,本文采用热力耦合单元SOL-1D70。

良好的网格应该在应力变化较大或重要的区

域,网格更加精细,而在不太重要的区域,适当降低网格密度^[16-17]。焊接过程中焊接熔合处和邻近区域的温度、应力变化剧烈,而远离焊缝处变化趋势较平缓。在划分网格时,对于焊缝附近的热影响区采用0.5 mm的精细网格来提高分析精度,其余部分为了节省分析时间,网格采用系统自动划分,过渡方式为Slow。网格划分结果如图3所示。

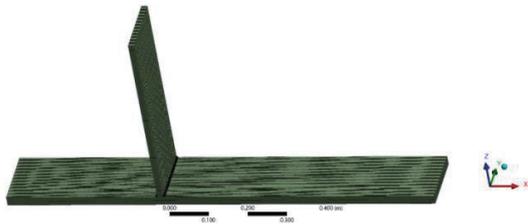


图3 T形接头网格划分结果
Fig.3 T-joint meshing result

2.3 其余前处理

生死单元技术可以模拟结构在加载过程中的局部破坏,提供关于破坏模式、强度极限和能量消耗等方面的信息^[18]。焊接过程中焊接部分是逐渐增多的,可以通过生死单元技术来精准地模拟。本文利用生死单元技术,在前处理阶段,先生成所有单元,然后根据需要某些单元“杀死”。之后在适当的载荷步中,重新激活这些单元^[14]。生死单元的个数设置成焊接过程的秒数,即在焊接过程中每秒激活一个死单元。

设置热交换系数为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,选择T形接头所有表面为对流面,设定环境温度为 22°C 。设置加热过程时间步长是1 s,每个载荷步设置4个子步;冷却时间100 s,设置为1个步长、10个子步。

3 焊接工艺对T形接头应力和变形的影响

3.1 焊接顺序对T形焊接接头应力和变形的影响

对有大量焊缝的结构,调整焊接顺序可以减小结构残余应力和焊接变形^[19-20]。本节针对T形接头设计不同的焊接顺序,利用有限元分析软件,对所设计的焊接顺序进行数值模拟,获得不同焊接顺序下T形接头的应力和变形结果,通过比较和分析,找出最优的焊接顺序。

3.1.1 焊接顺序对T形接头应力的影响

T形接头共有2条焊缝,可以分4个方案对其进行焊接,如图4所示。方案a:依次按照相同方向焊

接2条焊缝,先焊第一条,再焊第二条;方案b:改变焊接方向2条焊缝以不同方向进行焊接,先焊第一条再焊第二条;方案c:同时同向焊接2条焊缝;方案d:同时不同方向焊接2条焊缝。

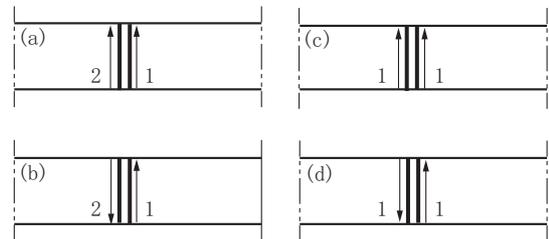


图4 4种方案焊接顺序

Fig.4 4 schemes welding sequence

4种方案焊接过程中的最高温度随时间变化曲线如图5所示。由图5可见,方案c前期温度较高,原因可能是2个移动热源同时同向加热,导致焊件升温快,最高温度为 2390°C 。方案c和方案d焊接过程只有34 s,之后进入冷却,焊件温度冷却至常温。方案a和方案b焊接过程有68 s,方案b中第一条焊缝焊接完后直接反向焊接第二条焊缝,此时温度有所升高,温度可达 2450°C ,然后慢慢趋于稳定。最后冷却至环境温度。

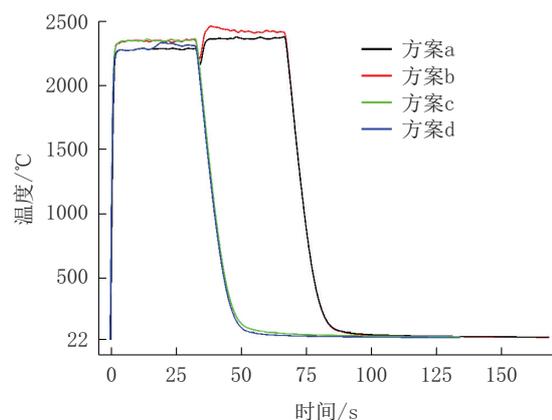


图5 不同焊接顺序最高温度随时间变化曲线

Fig.5 Maximum temperature with time for different welding sequence

4种方案焊接过程中的最大应力随时间变化曲线如图6所示,由图6得到的峰值应力和最大残余应力见表2。从图6和表2可以看出,峰值应力和最大残余应力的大小随着焊接顺序的不同而改变,合理的焊接顺序可以降低残余应力。

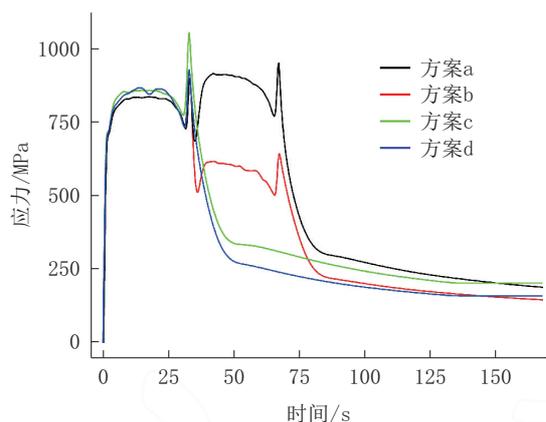


图6 不同焊接顺序最大应力随时间变化曲线

Fig.6 Maximum stress with time for different welding sequence

表2 不同焊接顺序峰值应力和最大残余应力

Table 2 Peak stress and residual stress for different welding sequence

方案	峰值应力/MPa	最大残余应力/MPa
a	1075	189
b	998	146
c	1177	204
d	1030	161

方案b和d为2条焊缝反向焊,相比于方案a和c的2条焊缝同向焊,峰值应力降低了约10%,最大残余应力降低了约20%。焊接顺序的改变并没有改变其峰值应力的位置,4种方案均位于焊缝的终点位置。焊接结束后,相比其他位置,焊件在焊缝终点位置会更快速冷却并收缩,导致产生较大的应力。4种焊接方案残余应力的分布基本一致,最大残余应力的位置均在侧板下底面靠近焊缝的地方,图7所示为方案b的残余应力云图。可见,焊接顺序的改变能够改变峰值应力和残余应力的大小,但是对峰值应力和残余应力的分布影响不大。

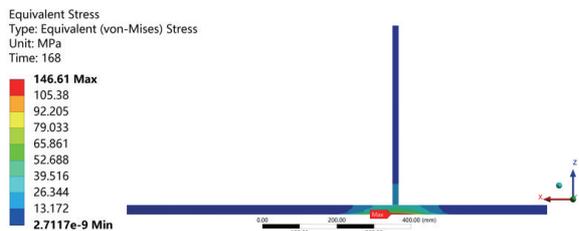


图7 方案b残余应力云图

Fig.7 Residual stress nephogram of scheme b

4种方案中的峰值应力和最大残余应力,方案b均最小,方案c均最大,方案b的最大残余应力比方案c降低了近30%,可见通过改变焊接顺序来降低残余应力很有意义。

3.1.2 焊接顺序对T形接头焊接变形的影响

图8为4种方案在焊接过程中,最大变形随时间变化曲线。由图8可见,方案a和b变形峰值同为0.477 mm,但方案a焊接第二条焊缝过程中整体变形值要比方案b大得多;方案c和d变形趋势较为相近,变形峰值分别为0.466 mm和0.392 mm,方案d的变形峰值比方案a和方案b小近18%。表明将2条焊缝同时反向焊接,可显著减小焊接过程中的变形。

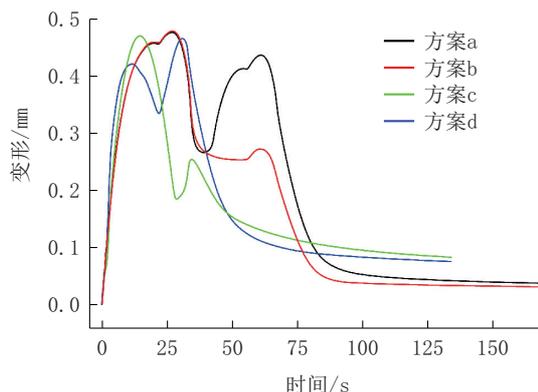


图8 不同焊接顺序最大变形随时间变化曲线

Fig.8 Maximum deformation with time for different welding sequences

由图8可见,4种方案残余变形均小于0.1 mm,而方案a和b的残余变形比方案c和d更小。

综合考虑残余应力与残余变形,4种方案中方案b为最优焊接顺序,即先焊接T形接头一条焊缝,再反向焊接另一条焊缝。

3.2 焊接速度对T形焊接接头应力和变形的影响

焊接速度的改变会对焊件的应力和变形产生重大影响。如果焊接速度过快,焊接产生的热量无法完全熔化金属材料,导致焊缝内部产生了大量的冷却应力,从而使得焊缝内部形成了较大的残余应力;如果焊接速度过慢,过多的热量会导致焊缝内部存在较大的热应力,从而导致较大的焊缝变形^[21-22]。

按照3.1节最优的焊接顺序(方案b)进行焊接,调整焊接速度进行试验。方案a~方案c的焊接速

度分别为:10、8、6和5 mm/s,4种方案冷却时间均设定为100 s。

3.2.1 焊接速度对T形接头应力的影响

4种方案焊接过程中的最高温度随时间变化曲线如图9所示。由图9可见,4种方案的曲线变化趋势基本一致,在焊接初始温度陡升,之后慢慢平稳,在第一条焊缝焊接结束、第二条焊缝焊接开始有一个温度突变,之后温度恢复平稳。方案d在整个焊接过程温度最高,原因是焊接速度慢,热源加载时间长,导致焊接过程中积聚的热量较多。

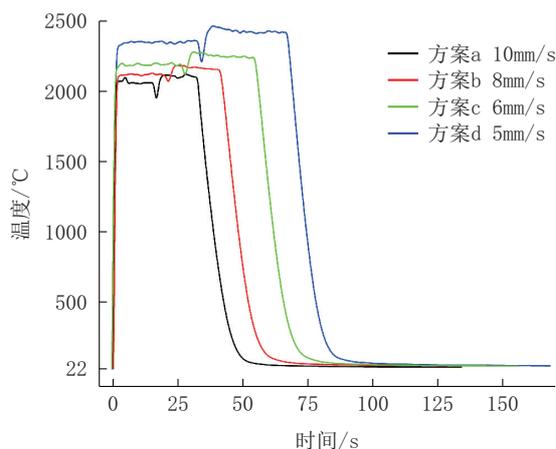


图9 不同焊接速度最高温度随时间变化曲线

Fig.9 Maximum temperature with time for different speed

4种方案焊接过程中的最大应力随时间变化曲线如图10所示,峰值应力和残余应力结果见表3。可以看出,采用不同的焊接速度可以改变焊接过程中应力和残余应力的大小。4种焊接速度峰值应力依次增加,说明峰值应力的大小与焊接速度成反比,快速焊接可以减少焊接区域内热影响范围的扩大,从而降低焊接应力。前3种方案峰值应力均位于第二条焊缝末端,只有焊接速度为5 mm/s时,峰值应力位于第一条焊缝末端,表明焊接过程中峰值应力的分布受焊接速度的影响不大。

焊接速度的大小会影响焊后残余应力的大小,其中焊接速度为8 mm/s的残余应力最小为130 MPa,比最大的残余应力小20%左右。焊接速度对残余应力的分布影响不大,4种焊接速度的残余应力最大值均位于侧板底面靠近焊缝的地方,残余应力云图与图7接近。

3.2.2 焊接速度对T形接头焊接变形的影响

不同焊接速度下的最大变形随时间变化曲线

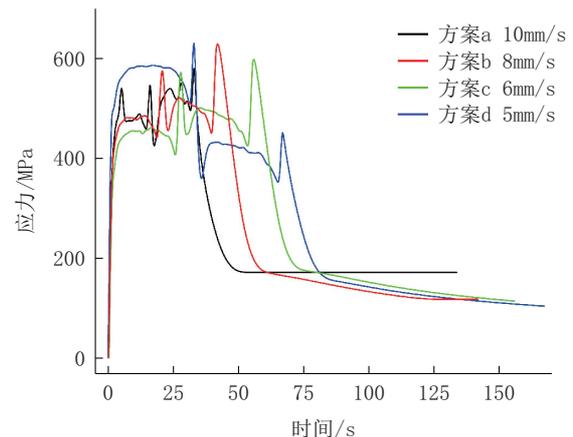


图10 不同焊接速度最大应力随时间变化循环曲线

Fig.10 Maximum stress with time for different speed

表3 不同焊接速度峰值应力和残余应力

Table 3 Peak stress and residual stress for different welding speed

方案	焊接速度/ (mm·s ⁻¹)	峰值应力/ MPa	残余应力/ MPa
a	10	643	156
b	8	807	130
c	6	909	162
d	5	998	147

如图11所示,4种焊接速度的变形峰值较接近,分别为0.468、0.457、0.490、0.477 mm,焊接速度为8 mm/s时变形峰值最小。

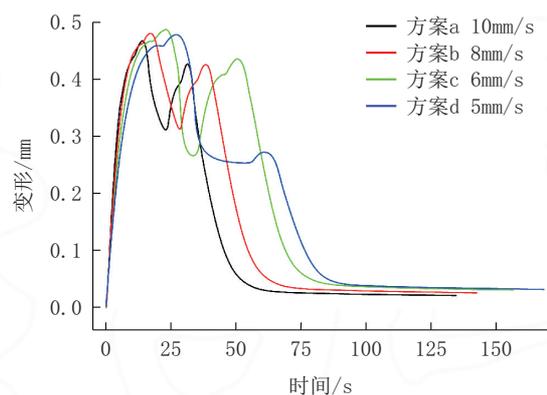


图11 不同焊接速度最大变形随时间变化曲线

Fig.11 Maximum deformation with time for different speed

在焊接过程中,金属受热膨胀,焊接后会发生变形。焊接速度越大,焊接区域的加热和冷却时间就越短,金属在短时间内经历的温度变化就越小,

从而导致焊接残余变形也就越小。然而过快的焊接速度会导致熔池形状不均匀和焊缝中夹杂物等质量问题,从而增加残余变形的产生。所以残余变形与焊接速度之间的关系较为复杂。4种方案焊接变形的分布基本一致,都是远离焊缝的地方变形大。图12为速度10 mm/s、最大变形为峰值时(0.468 mm)T形接头的变形云图。

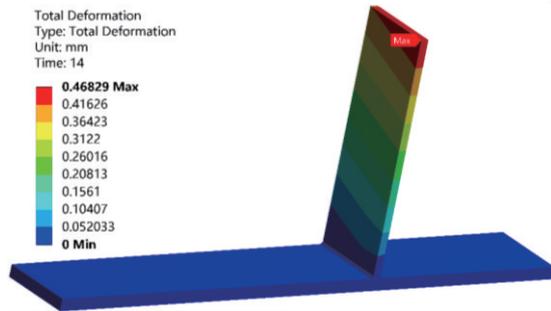


图12 方案a变形云图

Fig.12 Deformation nephogram of scheme a

综合考虑残余应力与焊接变形,4种方案中8 mm/s为最优的焊接速度。

4 底盘总体焊接工艺优化设计

根据前面对焊接顺序和焊接速度的研究,对底盘焊接工艺做出优化,并对优化前后的结果进行综

合分析,为实际生产提供指导。

4.1 底盘焊接优化方案

某企业现有的焊接方案为:在上面板上焊接各个中间立板时,先对各个钢板通过点焊装配到位。因底盘左右对称,从对称面将其分为左右2个区域,2个焊工同时从左、右两边进行焊接。焊接顺序如图13所示,图中数字表示焊接的顺序,箭头表示焊接的方向,因左右对称,该图只截取了左边的部分。焊枪移动速度保持在5 mm/s。

根据前面对T形接头焊接过程数值模拟结果,针对底盘的焊接顺序和焊接速度进行优化。上面板与各个立板的焊接都可以看做T形接头,先后反向焊接2条焊缝,将焊接速度由5 mm/s加快到8 mm/s。

针对较长的焊缝,如图13中焊缝1~6等,可以采用对称分段焊,如图14(a)所示,先焊红色部分,再焊黑色部分,对称地跳焊,最后形成一条完整焊缝,目的是减少焊接应力和变形。针对需要开坡口的焊缝,如图13中焊缝较长的焊缝,采用多层多道焊缝,一层层对称的焊接每道焊缝,如图14(b)所示,按照从①到⑥的顺序焊接。对于不太重要的较长焊缝,如图13中各个短筋板两边的焊缝等,可以选择间断交错焊以减少焊接变形,如图14(c)所示,按照从①到⑤的顺序焊接。

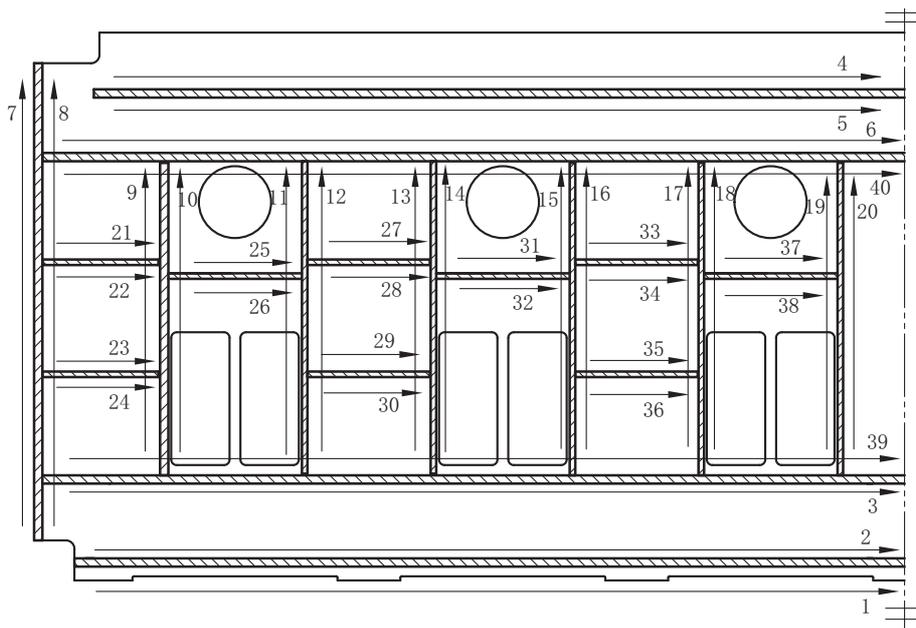


图13 底盘焊接顺序示意

Fig.13 Chassis welding sequence

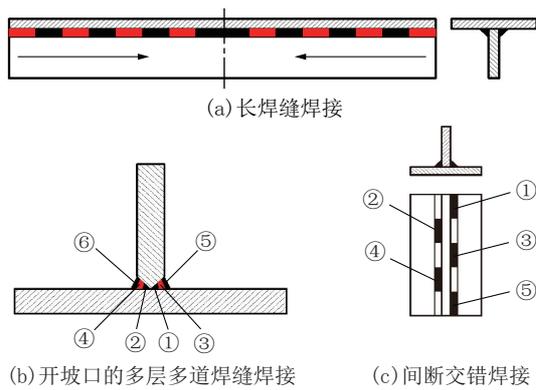


图 14 不同焊缝焊接示意

Fig.14 Different welds welding

4.2 结果分析

4.2.1 优化前后应力结果对比

假设焊接过程不停歇,2个焊工同时焊接,使用优化方案焊接上面板与所有中间立板需时间约5000 s,焊接立板之间的垂直焊缝需要约500 s,之后冷却200 s,总计时间为5700 s。而优化前的方案焊接过程总时间约9000 s。

焊接方案优化前后最高温度随时间变化曲线如图15所示,优化后的焊接最高温度稳定在2400℃左右,优化前的最高温度稳定在2500℃左右。优化后的焊接速度快,焊接时间相对较短,热量的积累相对较少,焊接温度较低。

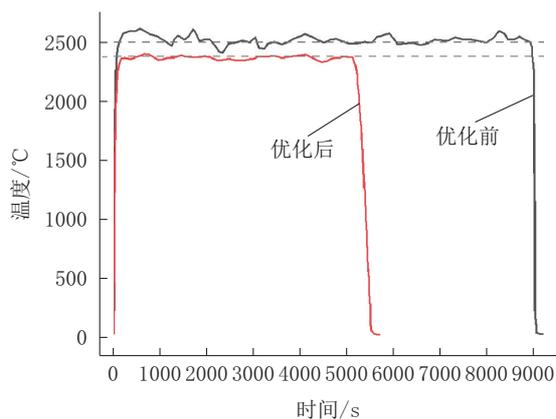


图 15 优化前后最高温度随时间变化曲线

Fig.15 Maximum temperature with time before and after optimization

焊接方案优化前后最大应力随时间变化曲线如图16所示,优化前后焊接过程中的最大应力分别在1000 MPa左右和930 MPa左右;优化前后的残余应力分别为219和204 MPa,可见焊接方案优化

后,残余应力下降了约7%。

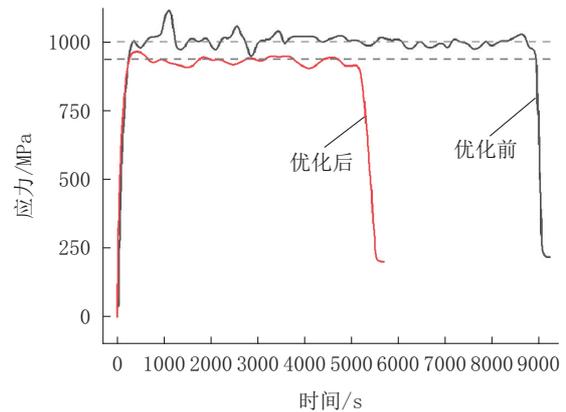


图 16 优化前后最大应力随时间变化曲线

Fig.16 Maximum stress with time before and after optimization

由图16可见,在焊接之前,整个底盘中的焊接应力值为零。当焊条移动时,焊接应力迅速增加,随着长焊缝焊接的继续,最大焊接应力快速达到极值。焊接完成后随着冷却的进行,焊缝和热影响区域的温度开始下降,焊缝和热影响区域也会随之收缩。焊缝处温度高,其收缩程度也会更加显著。周边温度较低的母材会阻碍焊缝和热影响区域的收缩,从而导致拉应力的产生。

优化前后的残余应力分布云图类似,优化后的残余应力云图如图17所示,优化前后的最大残余应力均位于上面板前方左、右角顶点处。

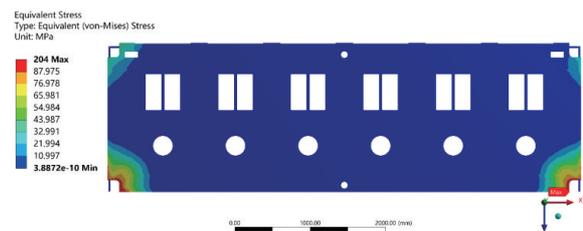


图 17 优化后残余应力云图

Fig.17 Residual stress nephogram after optimization

4.2.2 优化前后变形结果对比

图18为底盘焊接方案优化前后最大变形随时间变化曲线,优化前最大变形区间的中间值为0.42 mm,优化后最大变形区间的中间值为0.32 mm,优化前后变形峰值分别为0.460和0.343 mm。取某一时刻优化前后变形分布云图如图19所示,优化前最大变形位于一块长侧板中间部位,优化后最大变形

位于另一块长侧板端部,长焊缝附近的应力比其他部位相对较大,可见长焊缝的焊接对上面板变形有着主要影响。焊接方案优化后,最大变形降低了约26%,降低幅度较大。

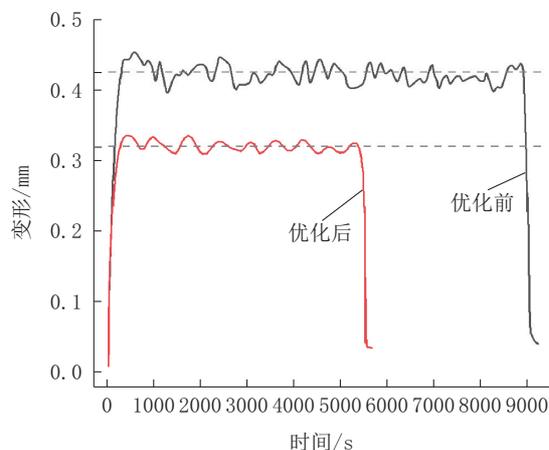
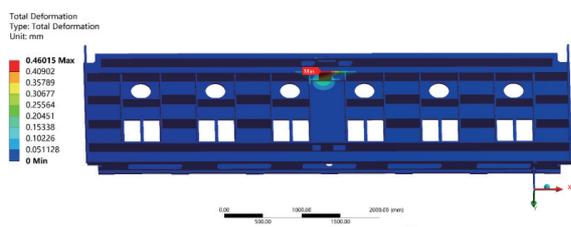
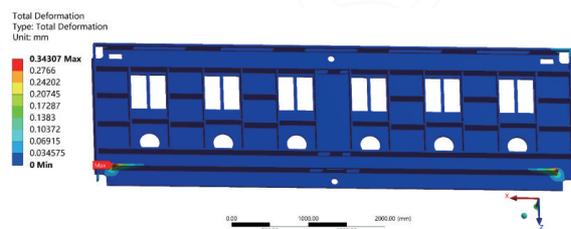


图18 优化前后最大变形随时间变化曲线

Fig.18 Maximum deformation with time before and after optimization



(a) 优化前变形分布云图



(b) 优化后变形分布云图

图19 优化前后变形云图

Fig.19 Deformation nephogram before and after optimization

5 结论

(1)焊接顺序和焊接速度会影响焊件的焊接质量。对于单条焊缝的焊接件,最优的焊接顺序为:先焊接一条焊缝,再反向焊接其另一条焊缝。焊接速度与焊件的焊接质量之间不是简单的线性关系,对于一般的焊件焊接速度可定为8 mm/s。

(2)某大型钻探设备底盘采用优化后的焊接方案,最大残余应力减少了约7%,最大焊接变形减少了约26%。这使得底盘的焊接后处理能较经济顺利达到减少残余应力和残余变形的要求,使得上面板的机加工能顺利达到切削厚度的要求。

(3)大型焊接结构件一般焊缝多,其中大多数焊接可以看做T形接头,本文的研究对大型焊接结构件焊接工艺的制定有一定的指导意义。

参考文献(References):

- [1] 薛倩冰,刘凡柏,张金昌,等.特深孔地质岩心钻探技术装备集成及示范[J].钻探工程,2023,50(2):8-16.
XUE Qianbing, LIU Fanbai, ZHANG Jinchang, et al. Integration and demonstration of geological core drilling technology and equipment for ultra-deep hole[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2):8-16.
- [2] 朱恒银,王强,刘兵,等.5000 m新型能源勘探智能钻探装备与技术研究[J].钻探工程,2022,49(1):110-119.
ZHU Hengyin, WANG Qiang, LIU Bing, et al. Research on 5000m new energy exploration intelligent drilling equipment and technology[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1):110-119.
- [3] 李婧.大型船体焊接变形仿真技术研究及其应用[D].上海:上海交通大学,2011.
LI Jing, Study of large hull welding deformation simulation technology and its application [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [4] 陈泳,冯和永,李巍,等.特种车体大型结构件焊接的三维有限元分析及工艺优化[J].新技术新工艺,2016(1):5-7.
CHEN Yong, FENG Heyong, LI Wei, et al. Special car body welding large structural three-dimensional finite element analysis and process optimization[J]. New Technology & New Process, 2016(1):5-7.
- [5] 管超,杨珏,张永明,等.基于有限元分析的大型结构件焊接热过程仿真研究[J].矿山机械,2016,44(2):86-93.
GUAN Chao, YANG Jue, ZHANG Yongming, et al. Simulation and research on thermal process of welding of large-scale structural components based on FEA [J]. Mining & Processing Equipment, 2016, 44(2):86-93.
- [6] 黄月双.大型航空结构件焊接变形分析及数值模拟[D].成都:电子科技大学,2019.
HUANG Yueshuang. Welding deformation analysis and numerical simulation of large aeronautical structural parts [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [7] 王刚.面向大型结构件的焊接残余应力及变形预估[D].柳州:广西科技大学,2022.
WANG Gang. Prediction of welding residual stress and variant for large structural parts [D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2022.
- [8] 成大先,等.机械设计手册[M].北京:化学工业出版社,2017.
CHENG Daxian, et al. Handbook of Mechanical Design [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.

- [9] 陈芙蓉,解瑞军,张可荣,等.数值计算模拟工艺参数对电子束焊接残余应力的影响[J].焊接学报,2006(2):55-58,115-116.
CHEN Furong, XIE Ruijun, ZHANG Kerong, et al. Effect of simulated welding parameter on residual stress of vacuum electron beam welding[J]. Transactions of the China welding institution, 2006(2):55-58,115-116.
- [10] Yi Pan, D.Lados. Friction stir welding in wrought and cast aluminum alloys: Weld quality evaluation and effects of processing parameters on microstructure and mechanical properties[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 48(4): 1708-1726.
- [11] 李志强.不同焊接工艺参数对焊缝组织的影响[J].焊接技术, 2019,48(12):20-23,5.
LI Zhiqiang. Effects of different welding process parameters on weld microstructure [J]. Welding Technology, 2019, 48(12): 20-23,5.
- [12] Yusuf Ozcatalbas, Ibrahim Vural H. Determination of optimum welding sequence and distortion forces in steel lattice beams [J]. Journal of Materials Processing Tech, 2008,209(1).
- [13] 洪小龙,黄本生,李天宁,等.几种常见焊接工艺热源模型的研究进展[J].材料热处理学报,2023,44(5):25-38.
HONG Xiaolong, HUANG Bensheng, LI Tianning, et al. Research progress of heat source models for several common welding processes [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023,44(5):25-38.
- [14] 张晓程,付迎,俄馨,等.焊接移动高斯热源数字化仿真和残余应力的分析[J].热处理技术与装备,2023,44(2):54-58.
ZHANG Xiaocheng, FU Ying, XinE, et al. Digital simulation of moving gaussian heat source for welding and residual stress analysis [J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2023,44(2):54-58.
- [15] 曾志,王立君.数值模拟技术在焊接中的应用[J].航空制造技术,2008(8):44-47.
ZENG Zhi, WANG Lijun. Application of numerical aeronautical manufacturing technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(8):44-47.
- [16] Zhang C, An S, Wang W, et al. A novel meshing method based on adaptive size function and moving mesh for electromagnetic finite element analysis [J]. Symmetry, 2021, 13(2): 254-254.
- [17] 仇亚萍,黄俐军,冯立飞.基于ANSYS的有限元网格划分方法[J].机械管理开发,2007(6):76-77.
QIU Yaping, HUANG Lijun, FENG Lifei. FEA meshing method based on ANSYS [J]. Mechanical Management and Development, 2007(6):76-77.
- [18] Quan Shi, Tang Jue, Chu Man-sheng. Numerical simulation of slag layer and its distribution on hot surface of copper stove based on ANSYS birth-death element technology [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, 28(5): 507-519.
- [19] 柯佳娜.基于ANSYS钢结构焊接温度场与应力场的数值模拟[D].青岛:青岛科技大学,2012.
KE Jiana. Steel welding temperature field and stress field simulation based on ANSYS [J]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2012.
- [20] 张西坤,宋秋锋,申寿长,等.进口爆破钻机配套钻塔的研制[J].钻探工程,2021,48(6):80-85.
ZHANG Xikun, SONG Qiufeng, SHEN Shouchang, et al. Development of the drilling mast for the imported blast hole drill [J]. Drilling Engineering, 2021,48(6):80-85.
- [21] 申超男,陈相飞,王江超.固定热源长度对T形接头焊接变形及残余应力精确预测的影响[J].船舶工程,2022,44(11): 132-139.
SHEN Chaonan, CHEN Xiangfei, WANG Jiangchao. Influence of length of fixed heat source on prediction accuracy of welding distortion and residual stress in T-joint [J]. Ship Engineering, 2022,44(11):132-139.
- [22] 王红英,李志军.焊接工艺参数对镁合金CO₂激光焊缝表面成形的影响[J].焊接学报,2006(2):64-68,116.
WANG Hongying, LI Zhijun. Effects of welding parameters on CO₂ laser welding of magnesium alloys [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006(2):64-68,116.

(编辑 荐华)