

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2023.11.018

堆垛机柱脚焊接接头疲劳寿命分析及优化*

徐世敏,王立华*,陈太茂,王怀宇,魏启珂

(昆明理工大学机电工程学院,云南昆明650500)

摘要:为了探究工作条件下堆垛机柱脚焊接接头的疲劳寿命问题,对堆垛机柱脚焊接接头进行了动载荷作用下的疲劳寿命分析,并对影响疲劳危险焊缝疲劳强度的相关尺寸进行了优化。首先,建立了含柱脚焊缝的堆垛机柱脚有限元模型,并使用典型受力模式下的静力学分析与焊缝处结构应力分析,确定了柱脚危险焊缝位置;然后,建立了含柱脚危险焊缝的堆垛机有限元模型,采用动力学分析得到了动载荷作用下危险焊缝的疲劳载荷谱,并采用结构应力法求解得到了动载荷作用下的危险焊缝疲劳寿命;最后,针对危险焊缝疲劳强度较低的情况,使用响应面优化法对影响柱脚环形焊缝疲劳强度的尺寸进行了优化。研究结果表明:柱脚环形焊缝为柱脚疲劳危险焊缝;在极端工况下,堆垛机危险焊缝疲劳寿命为27.14 y,可以满足堆垛机设计使用年限;优化后的危险焊缝结构应力较优化前降低了15%,危险焊缝疲劳强度得到了较大提高。

关键词:装卸机械;堆垛设备;堆垛机柱脚;机械强度;焊缝疲劳强度;结构应力法;响应面优化

中图分类号:TH246

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2023)11-1794-09

Fatigue life analysis and optimization of welded joints in stacker column-footing

XU Shimin, WANG Lihua, CHEN Taimao, WANG Huaiyu, WEI Qike

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650500, China)

Abstract: In order to investigate the fatigue life of the welded joints of the stacker foot under working conditions, the fatigue life analysis of the welded joints of the stacker foot under dynamic loading and the optimization of the relevant dimensions affecting the fatigue strength of the fatigue hazard welds were carried out. Firstly, a finite element model of a stacker foot containing a foot weld was established, and the location of the dangerous weld at the foot was determined by static analysis and structural stress analysis at the weld line under typical stress patterns. Then, a finite element model of a stacker containing a dangerous weld at the foot was established, and the fatigue load spectrum of the dangerous weld under dynamic load was obtained by kinetic analysis, and the fatigue life of the dangerous weld under dynamic load was obtained based on the structural stress method. Finally, the dimensions affecting the fatigue strength of the annular weld at the foot were optimized using the response surface optimization method for the case of low fatigue strength of the dangerous weld. The research results show that the column foot ring weld is the column foot fatigue hazard weld; under extreme working conditions, the fatigue life of the stacker hazard weld is 27.14 years, which can meet the design service life of the stacker; the optimized hazard weld structural stress is reduced by 15% compared with that before optimization, and the fatigue strength of the hazard weld is greatly improved.

Key words: handling machinery; stacking equipment; stacker column-footing; mechanical strength; weld fatigue strength; structural stress method; response surface optimization

0 引言

堆垛机是自动化立体仓库的核心设备。因此,堆垛机的整体性能、可靠性、安全性和工作效率直接影响

了整个自动化立体仓库的运行效率^[1]。

目前,对于堆垛机结构的研究主要集中在结构强度和刚度研究方面。其中,吕永锋^[2]基于力学理论建立了堆垛机多级货叉力学模型,并采用多目标优化方

收稿日期:2023-03-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52265012)

作者简介:徐世敏(1995-),男,山东青岛人,硕士研究生,主要从事机械动力学及其应用方面的研究。E-mail:xu_shim@163.com

通信联系人:王立华,男,博士,教授,博士生导师。E-mail:kmwanglihua@163.com

法,对货叉截面进行了参数优化,使优化后的货叉整体刚度提升了 14.5%。马朝鹏等人^[3]开展了对双立柱堆垛机的轻量化研究,在满足结构刚度、强度要求的情况下,使堆垛机整体质量降低了 9.83%。蒋君侠等人^[4]提出了基于 V 型滚轮接触力算法的堆垛机综合刚度求解方法,并通过对立柱和三级货叉进行结构优化,使优化后的堆垛机整体刚度提升了 23.9%。潘春荣等人^[5]对转弯过程中的堆垛机立柱挠度进行了分析,并采用仿真分析得到了增加立柱壁厚和底部横截面长度均可提高立柱整体刚度这一结论。

然而,堆垛机金属框架的连接存在大量的焊接接头,且在堆垛机长期运行过程中产生的动载荷作用下,极有可能发生疲劳破坏。现有研究中很少考虑堆垛机结构的疲劳特性,因此,有必要开展针对堆垛机焊接接头的疲劳损伤研究。

在现有的焊接接头疲劳研究中,SHIOZAKI T 等人^[6]发现,在焊接接头疲劳分析中考虑焊缝波纹的几何结构,对于提高焊接接头疲劳寿命预测的准确性至关重要。AYGÜL M 等人^[7]以正交各向异性梁为研究对象,研究发现,将结构热点应力法或有效缺口应力法用于估算复杂焊接结构的疲劳寿命,能得到较好的结果。RETTENMEIER P 等人^[8]提出了一种基于临界平面法的疲劳寿命估算方法,可用于评估起重机焊接轨道疲劳寿命。RAUTIAINEN M 等人^[9]提出了一种用于复杂十字接头焊缝根部疲劳分析的牵引力法,该方法能较好地估计焊缝局部力。GOYAL R 等人^[10]提出了一种基于粗网格模型的焊接接头疲劳分析方法,该方法在较粗糙的网格下仍具有较高的准确度。

这些方法虽然可以较为准确地对特定焊接接头进行疲劳寿命预测,但对接头类型、材料、载荷条件等因素比较敏感,因此,该方法的通用性较差。

堆垛机中焊接接头结构和受力模式较为复杂,使用名义应力法等常用方法很难准确评估其疲劳寿命。基于结构应力的焊接接头疲劳寿命计算方法^[11],能够综合考虑接头类型、材料、载荷条件等因素对焊接接头疲劳寿命的影响,目前已被广泛应用到起重运输机械焊接接头的疲劳寿命分析中^[12-15]。但研究中多采用静态加载的方式构建疲劳载荷谱,不考虑惯性载荷的影响,且普遍以等效应力作为评估危险焊缝位置的标准,不适用于堆垛机焊缝的疲劳寿命评估。

综上所述,针对堆垛机柱脚焊缝运行工况下的疲劳寿命问题,笔者首先以结构应力为疲劳强度评价标准,确定堆垛机柱脚危险焊缝所在位置;然后,采用动力学仿真分析获取柱脚危险焊缝动态疲劳载荷

谱,并基于结构应力法预测柱脚危险焊缝运行工况下的疲劳寿命;最后,使用响应面优化方法对影响危险焊缝疲劳强度的尺寸进行优化。

1 结构应力法

1.1 结构应力定义

截面内的应力分解如图 1 所示。

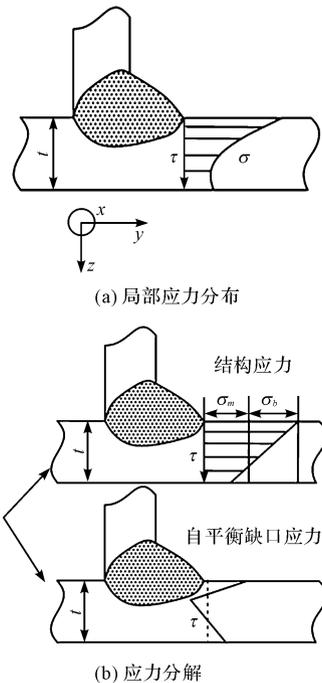


图 1 截面内的应力分解

Fig. 1 Stress decomposition within the cross-section

图 1(a)中,焊缝截面上沿厚度方向的应力分布因含有缺口应力而呈现出高度非线性。

根据文献[16],参考结构应力法理论,将图 1(a)中应力分解为图 1(b)的两个部分。其中,结构应力 σ_s 由膜应力 σ_m 和弯曲应力 σ_b 组成,只与外力有关,且与外力互相平衡,可以用结构力学的方法计算得到。另一部分为缺口应力,由于其处于自平衡状态,且对焊缝开裂的贡献较小,可以忽略不计^{[16]1447}。

结构应力计算公式如下:

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{f_y}{t} + \frac{6m_x}{t^2} \quad (1)$$

式中: f_y 为所定义焊线处单位长度上的线力; m_x 为所定义焊线处单位长度上的线矩; t 为母板厚度。

由式(1)可知:要计算结构应力,首先需要计算线力 f_y 和线矩 m_x 。在使用有限元法进行结构应力计算时,需要将有限元求解得到的节点力和节点力矩转化为线力和线矩。

根据文献[16],结合有限元法对结构应力求解进

行一般化处理,则各节点的结构应力 σ_n 可由各节点力 F_n 和各节点力矩 M_n 表示,即:

$$\sigma_n = \frac{1}{t} \mathbf{L}^{-1} \left(F_n + \frac{6}{t} M_n \right) \quad (2)$$

式中: \mathbf{L}^{-1} 为单元长度等效矩阵的逆矩阵。

至此,可实现将有限元分析结果中的节点力和节点力矩转化为结构应力。

1.2 等效结构应力和主 S-N 曲线

结构应力法通过等效结构应力,将接头类型、厚度、加载模式等对焊接接头疲劳寿命的影响进行统一计算,不需要再根据不同类型的焊接接头选择不同的 S-N 曲线,只需要一条主 S-N 曲线便可对不同焊接接头进行疲劳寿命计算。

等效结构应力 ΔS_s 的计算公式为^{[16]1447}:

$$\Delta S_s = \frac{\Delta \sigma_s}{t^{(2-m)/2m} I(r)^{1/m_s}} \quad (3)$$

式中: $\Delta \sigma_s$ 为结构应力范围; $I(r)$ 为载荷弯曲比 r 的无量纲函数; m 为裂纹扩展系数。

由式(3)可知,等效结构应力 ΔS_s 受到包括应力集中效应 $\Delta \sigma_s$ 、厚度效应 t 、描述膜应力和弯曲应力状态的 $I(r)$ 等疲劳参数的影响。

主 S-N 曲线可表示为:

$$N = (\Delta S_s / C_d)^{-1/h} \quad (4)$$

式中: N 为循环次数; h, C_d 为试验常数。

S-N 曲线参数如表 1 所示^{[17]87}。

表 1 主 S-N 曲线参数(钢材)

Table 1 Main S-N curve parameter (steel)

统计依据	C_d	h
中值	19 930.2	0.319 5
+2 σ (95%)	28 626.5	0.319 5
-2 σ (95%)	13 875.7	0.319 5
+3 σ (99%)	34 308.1	0.319 5
-3 σ (99%)	11 577.9	0.319 5

2 危险焊缝位置确定

2.1 柱脚焊缝静力学分析

堆垛机柱脚尺寸较大、结构复杂,含有大量焊接接头,若直接用于对全部焊缝进行疲劳分析,会使计算模型过大,严重降低计算效率。因此,笔者首先对其进行典型工况下的静力学分析,确定危险焊缝所在位置,然后对危险焊缝进行疲劳寿命分析。

该双立柱堆垛机高 20 m,由金属框架(左立柱、右立柱、下横梁、上横梁)、升降机构、行走机构、载货台、控制柜等组成。

其结构图如图 2 所示。

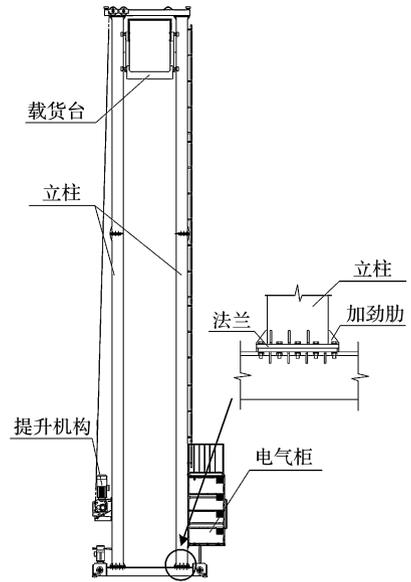


图 2 堆垛机结构图

Fig. 2 Diagram of stacker structure

该堆垛机整机质量 8 000 kg,额定起重量 1 000 kg,行走速度 160 m/min,行走加速度 0.4 m/s²;金属框架材质为 Q345B 钢,弹性模量 2.1 × 10⁵ MPa,泊松比 0.3,屈服强度 345 MPa。

堆垛机金属框架是典型的对称结构,对称位置受力也极为相似,故根据堆垛机金属框架对称性特点,笔者只选取具有代表性的右立柱外侧柱脚焊缝进行分析。

笔者使用 Workbench 建立含该位置全部焊缝的柱脚有限元模型,忽略螺栓孔等对结果影响很小的结构,使用实体单元进行离散,得到含焊缝柱脚有限元模型,如图 3 所示。

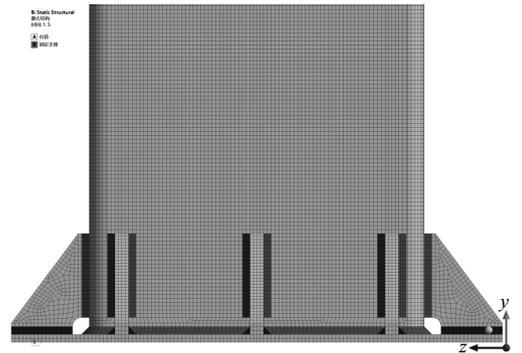


图 3 含焊缝柱脚有限元模型

Fig. 3 Finite element model of column foot with welding seam

右立柱外侧柱脚焊缝共包含 20 条加劲肋与立柱和法兰连接的角焊缝,以及 1 条立柱与法兰连接的环形角焊缝。

各焊缝的编号如图 4 所示。

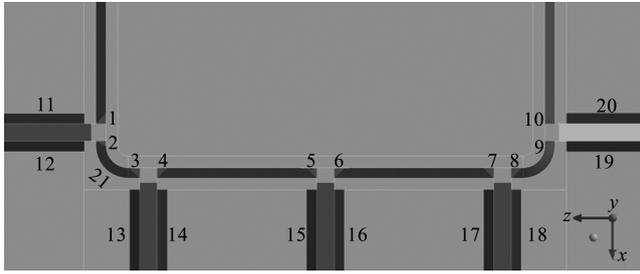


图 4 螺栓编号
Fig. 4 Bolt number

焊缝处所受载荷主要来自于立柱运行过程中摆动所产生的弯矩载荷。因此,在静力学分析中,笔者对矩形法兰底面进行固定,通过在立柱顶部施加沿 x 轴的位移,模拟立柱在运行过程中的摆动。

笔者对有限元模型进行静力学求解,提取等效应力结果,如图 5 所示。

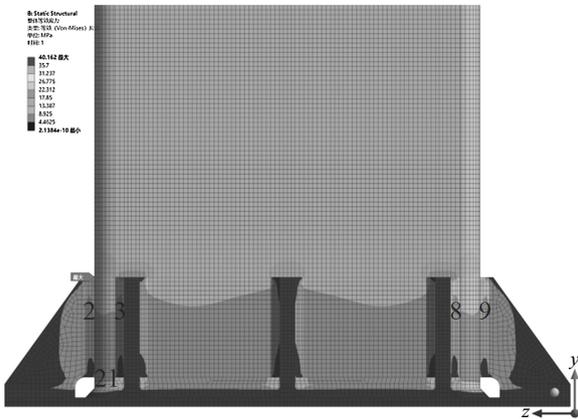


图 5 柱脚等效应力分布

Fig. 5 Equivalent force distribution at the foot of the column

由图 5 可以看出:在立柱弯矩载荷作用下,最大应力为 40.2 MPa,出现在 2 号焊缝立柱侧焊线端部;应力集中区域主要出现在 2 号、3 号、8 号、9 号焊缝及 21 号焊缝弯曲部分,即应力集中主要出现在加劲肋与立柱连接焊缝的上端面以及法兰与立柱连接焊缝的圆角处,且沿立柱 $X-Y$ 对称面呈对称分布。

由静力学应力结果可以看出:高应力区主要集中在加劲肋与立柱连接焊缝的顶部,柱脚危险焊缝位置位于 2 号焊缝立柱侧焊线处。

2.2 基于结构应力法的危险焊缝位置预测

笔者采用 Workbench 和 Fe-safe 求解各焊缝的结构应力。在 Fe-safe 中求解结构应力需要定义焊线参数。

在其有限元模型中,焊线参数的选取位置如图 6 所示。

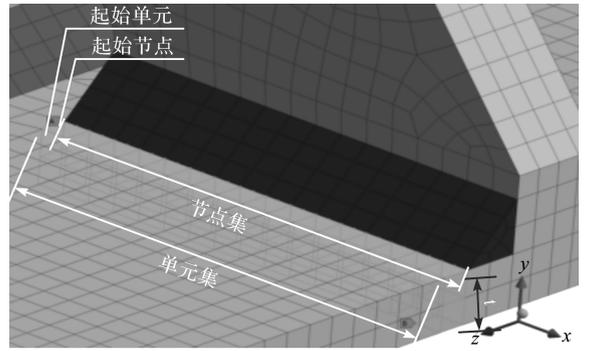


图 6 焊线定义参数示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the definition parameters of the solder line

图 6 中,每条焊缝在连接的两块结构板处各包含 1 条焊线,即每条焊缝需定义两条焊线。

笔者提取各焊线相关参数,将静力学分析结果导入 Fe-safe 中,使用提取的焊线参数定义各焊线信息,求解各焊线结构应力。

处于对称位置的 2 号和 9 号焊缝加劲肋侧焊线结构应力对比,如表 2 所示。

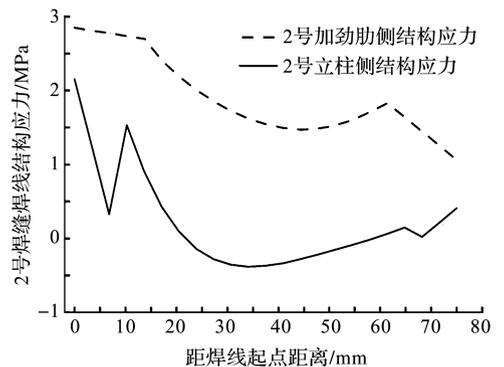
表 2 2 号和 9 号焊缝加劲肋侧焊线结构应力

Table 2 Structural stress on the side weld lines of the stiffening ribs of No. 2 and No. 9

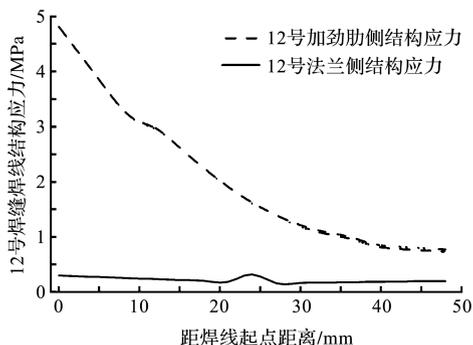
与焊线起点 距离/mm	2 号加劲肋侧焊线 结构应力/MPa	9 号加劲肋侧焊线 结构应力/MPa
0	2.85	2.85
17	2.42	2.41
41	1.49	1.49
58	1.74	1.74
75	1.06	1.06

由表 2 可以看出:2 号和 9 号焊缝相同位置焊线处的结构应力基本相同,即柱脚焊缝结构应力分布也具有对称性。

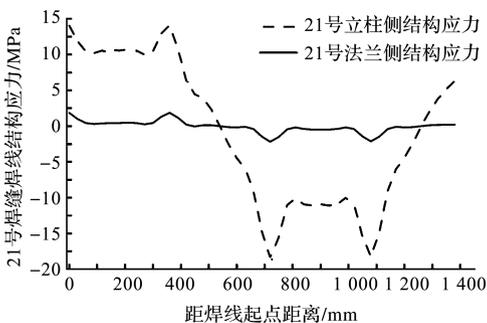
对比各焊缝焊线处结构应力,部分焊缝焊线处的结构应力如图 7 所示。



(a) 2 号焊缝焊线处结构应力



(b) 12号焊缝焊线处结构应力



(c) 21号焊缝焊线处结构应力

图 7 焊线结构应力

Fig. 7 Structural stress in the weld line

由图 7 可以看出:对于加劲肋与立柱、法兰连接焊缝,加劲肋侧焊线结构应力大于立柱或法兰侧焊线结构应力;结构应力最大值为 14.1 MPa,出现在 21 号环形焊缝立柱侧焊线弯曲部位,其结构应力约为加劲肋与立柱连接焊缝最大结构应力的 5 倍,约为加劲肋与法兰连接焊缝最大结构应力的 3 倍。结构应力预测的危险焊缝为 21 号环形焊缝。

由以上分析可以看出:等效应力与结构应力对于焊缝疲劳破坏位置的预测并不相同;等效应力预测的危险位置为 2 号焊缝立柱侧焊线端部,而结构应力预测的危险位置为 21 号焊缝立柱侧焊线弯曲部分。

焊接接头主要的疲劳破坏形式为焊缝附近沿板厚度方向上的疲劳开裂,焊缝截面沿板厚度方向上的应力是导致焊接接头疲劳破坏的主要载荷。

由结构应力构成可知:结构应力与该部分外力相平衡,所以其能更好地描述外力造成的应力集中现象,对焊缝疲劳危险位置的预测更为准确,这在现有研究中已得到证实^{[17]178-180}。

目前,针对起重运输机械焊接接头疲劳寿命的研究中,多以整体分析中等等效应力最大处作为焊缝疲劳危险位置,并依此建立含危险焊缝的疲劳分析模型。由于沿板厚度方向上的应力是疲劳裂纹扩展的主要作用力,而等效应力无法仅描述该方向上的应力,因此,这种方法受焊接接头几何结构和受力模式影响很大,

很多情况下无法正确预测危险焊缝所在位置。

在此,笔者选择以结构应力预测的危险焊缝位置为准,进行危险焊缝疲劳寿命分析。

3 基于结构应力法的焊缝疲劳分析

动态交变载荷是导致堆垛机疲劳的根本原因。为此,笔者使用动力学仿真结果作为危险焊缝的疲劳载荷谱,对危险焊缝进行疲劳寿命分析。

3.1 含危险焊缝的堆垛机动力学分析

为减少模型规模,笔者只对右立柱柱脚危险焊缝进行分析,忽略左立柱柱脚法兰等质量较小的连接细节;柱脚部位的上、下法兰使用高强螺栓进行连接。

由于螺栓连接非此处研究重点,因此笔者忽略螺栓连接细节,使用梁连接代替上、下法兰之间的连接。笔者将提升机构、控制柜、维修爬梯等结构以点质量和分布质量的形式附加到模型中;使用节点更少的壳单元对模型进行离散,并采用局部网格控制方法,对柱脚焊缝的周围结构进行网格细化。离散后的模型共包含 437 649 个单元,439 061 个节点。

笔者约束上横梁两端的沿 Z 轴的自由度和下横梁两端沿 Y、Z 轴的自由度,使其只能沿 X 轴移动,模拟堆垛机沿地轨的运动。

含危险焊缝堆垛机有限元模型如图 8 所示。

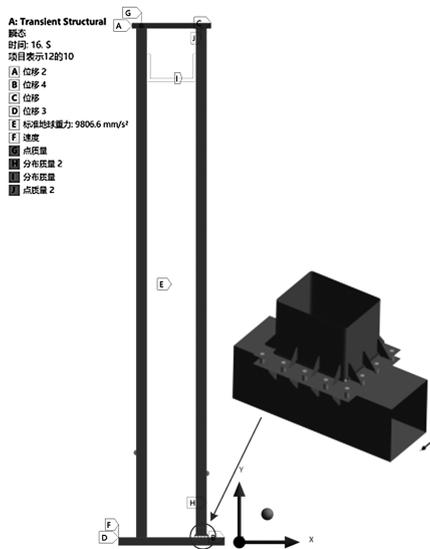


图 8 含危险焊缝堆垛机有限元模型

Fig. 8 Finite element model of stacker with hazardous welds

笔者在下立柱左端面施加速度载荷,以实现堆垛机的移动,其速度变化如图 9 所示。

笔者把载货台处于高位、堆垛机进行全程运行的极端工况作为疲劳分析工况。

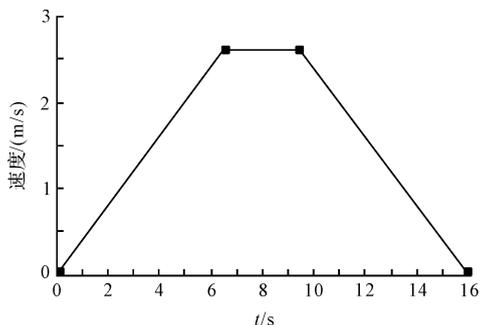


图 9 堆垛机运行速度

Fig. 9 Operation speed of stacker crane

3.2 危险焊缝疲劳寿命分析

笔者将动力学仿真结果导入 Fe-safe,将环形焊缝焊线信息添加到 Verity 焊线集中,求解焊线结构应力。

笔者提取立柱挠度与静力学分析立柱挠度相同时的环形焊缝结构应力,如图 10 所示。

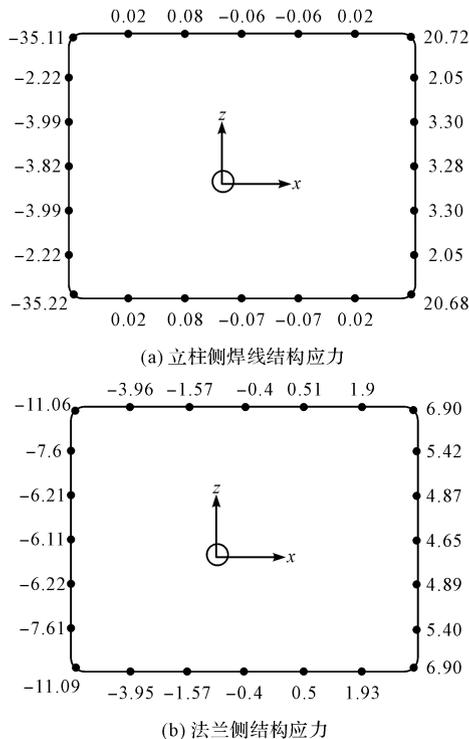


图 10 环形焊缝焊线结构应力

Fig. 10 Structural stresses in the weld line of a girth weld

由图 10 可以看出:结构应力极值出现在焊线弯曲部位,立柱侧焊线最大结构应力为 20.72 MPa,法兰侧焊线最大结构应力为 6.9 MPa;立柱侧焊线结构应力远大于法兰侧焊线结构应力,最大结构应力出现位置与静力学预测位置相同。

笔者对动力学分析的应力结果进行组合,构建动载荷作用下的焊缝疲劳载荷谱;选用中值主 S-N 曲线,基于 Miner 线性累积损伤理论,计算环形焊缝的疲劳寿命。

疲劳计算结果如表 3 所示。

表 3 疲劳危险点位置及循环次数

Table 3 Location of fatigue hazard points and number of cycles

危险点所在位置	疲劳循环次数	单元号
立柱侧焊线弯曲部位	4.95×10^6	244 823

由表 3 可以看出:疲劳危险位置为立柱侧焊线弯曲部位,其疲劳危险位置与该类型焊接接头在疲劳试验下的疲劳危险位置一致^{[17]178-180}。

根据堆垛机的工作情况,假设该堆垛机每天运行 500 次,设计使用寿命为 20 y,计算可得危险焊缝的疲劳寿命为 27.14 y,即在正常工作年限内,柱脚焊缝不会发生疲劳破坏。

3.3 结构应力法与名义应力法对比

目前,名义应力法仍是各标准中常用的焊接接头疲劳分析方法。因此,笔者使用常用的英国标准 BS7608:2014 + A1:2015 中的名义应力法,以此来求解危险焊缝疲劳寿命,并将其结果与结构应力法求解结果进行对比。

两种方法计算结果如表 4 所示。

表 4 不同分析方法结果对比

Table 4 Comparison of the results of different analysis methods

分析方法	循环次数	危险位置
名义应力法	1.28×10^6	弯曲部位
结构应力法	4.95×10^6	弯曲部位

由表 4 可以看出:名义应力估算结果与结构应力估算结果相差较大,这是因为柱脚危险焊缝结构和受力模式较为复杂;在 BS 标准中无法找到与之匹配的接头类型和受力模式,只能选用相近的类型,这也必然导致较大的估算误差^[18]。

由结构应力的主 S-N 曲线构成可知,其对接头类型和受力模式不敏感,更适用于复杂结构和受力模式的焊接接头的疲劳寿命估算。

4 基于响应面法的危险焊缝优化

由上述针对堆垛机柱脚连接部位的分析可知:焊接接头是柱脚处最容易发生应力集中和疲劳破坏的位置,因此,在提升堆垛机性能的设计中,应重点关注该部位。

接下来,笔者将使用响应面优化法对影响焊缝受力的关键尺寸进行优化,以提高焊缝的抗疲劳性能。

4.1 参数化优化模型构建

柱脚环形焊缝的疲劳强度会受焊脚尺寸、母材厚度、加劲肋高度等尺寸的影响;但增加母材厚度,如增

加立柱截面厚度,会增加堆垛机整体质量,且会改变堆垛机整体力学性能,因此,需重新对整体结构进行验证。

由上述分析结果可知:加劲肋与立柱侧焊缝所受疲劳载荷较小,疲劳寿命较高。因此,笔者以环形焊缝焊脚高 h_k 、宽 w_k 、加劲肋高度 h 这些不影响整体结构的局部尺寸为设计变量,以环形焊缝焊线处应力 σ_{max} 最小和危险焊缝质量 m_{max} 最小为目标函数,对焊缝疲劳强度进行优化。

各尺寸所在位置,即设计变量位置如图 11 所示。

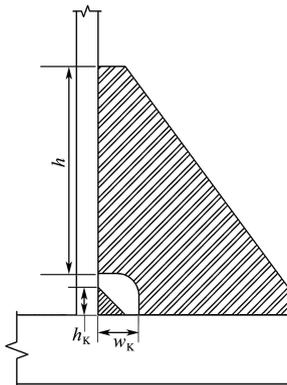


图 11 设计变量位置

Fig. 11 Location of design variables

焊缝优化的数学模型为:

$$\begin{cases} \text{Min: } \sigma_{max}, m_{max} \\ \text{s. t. } 7 \leq h_k \leq 15 \\ 7 \leq w_k \leq 15 \\ 60 \leq h \leq 95 \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ_{max} 为危险焊缝最大等效应力; m_{max} 为危险焊缝最大质量。

4.2 响应面优化

响应面优化法使用代理模型代替真实模型进行优化分析,可有效缩短分析所用时间。

笔者基于 Workbench,进行危险焊缝的响应面优化,使用上述静力学分析模型作为优化分析的有限元模型(焊缝部分仅保留底部环形焊缝),并对相关尺寸和优化目标进行参数化处理;将静力学结果导入响应面优化模块,进行响应面优化。

笔者使用最佳空间填充设计(optimal space filling design, OSFD)生成试验设计表,对生成的设计点进行求解,得到响应值,完成实验设计;将实验设计产生的样本点和响应值导入到响应面模块中,使用 Kriging 代理模型拟合得到响应曲面(响应面拟合精度会直接影响优化结果的精度)。

响应面拟合优度图如图 12 所示。

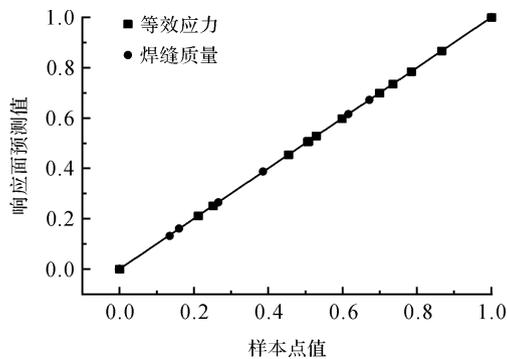


图 12 响应面拟合优度图

Fig. 12 Graph of response surface goodness-of-fit

由图 12 可以看出:该响应面具有较高的拟合精度。

由敏感度图可以直观看出各设计变量对优化目标的影响。

各设计变量与应力的敏感度图如图 13 所示。

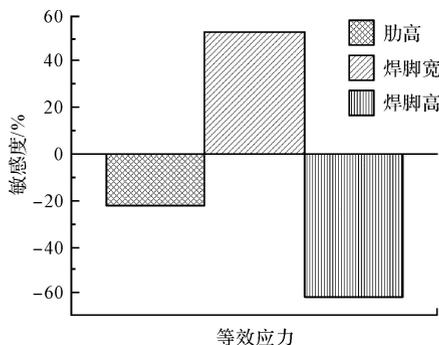


图 13 应力敏感度图

Fig. 13 Graph of stress sensitivity

由图 13 可以看出:焊脚高(敏感度 52.69%)和焊脚宽(敏感度 -62.01%)对等效应力影响最显著。其中,焊脚高、加劲肋高与等效应力值呈负相关,焊脚宽与等效应力值呈正相关,增大焊脚高和加劲肋高,或者减小焊脚宽,皆可有效降低其应力值。

完成响应面搭建后,笔者使用 Workbench 中多目标遗传算法(multi-objective genetic algorithm, MOGA),对危险焊缝应力等进行优化求解,得到 3 组候选点结果,如表 5 所示。

表 5 优化候选点结果

Table 5 Results of optimization candidate points

序号	h/mm	h_k/mm	w_k/mm	等效应力 /MPa	焊缝质量 /kg
1	88.431	13.327	7.004	13.683	0.51
2	88.073	13.464	7.011	13.641	0.51
3	86.519	13.305	7.004	13.744	0.51
圆整尺寸	88	13	7	13.829	0.5

由表 5 可以看出:3 组候选点结果差异不大。

由于减小焊缝处等效应力为优化的主要目标,故笔者选取第 2 组优化结果为优化的最优解。笔者对各参数进行圆整处理,处理后的尺寸如表 5 中的圆整尺寸组所示。

4.3 优化结果分析

笔者将优化前后的相关参数进行对比。由于结构应力对焊缝疲劳强度的描述更为准确,因此,笔者将优化前后的焊线结果导入 Verity 中求解结构应力,将结构应力也纳入对比范围中。

优化结果与原方案结果对比情况如表 6 所示。

表 6 优化结果与原方案结果对比

Table 6 Comparison of optimization results and original solution results

参数	$h/$ mm	$h_k/$ mm	$w_k/$ mm	等效应力 /MPa	焊缝质量 /MPa	结构应力 /MPa
优化前	75	7	7	18.05	0.27	13.69
优化后	88	13	7	13.83	0.5	11.7
变化率/(%)	17	86	0	-23	85	-15

由表 6 可以看出:通过适当调整焊脚尺寸和加劲肋的高度,可以将焊线处结构应力减小 15%,有效提高危险焊缝疲劳强度;虽然焊缝的质量增加了 85%,但相较于堆垛机的整体质量,加劲肋和焊缝增加的质量对整体的影响可以忽略不计。

笔者对尺寸进行优化,在不改变堆垛机整体结构的基础上,可有效提高柱脚的整体疲劳强度。该成果可为堆垛机整体性能提升提供参考。

5 结束语

笔者采用了有限元分析与结构应力相结合的方法,确定了堆垛机危险焊缝的位置;然后,使用结构应力法,求解了危险焊缝载荷作用下的疲劳寿命;最后,使用响应面优化方法,对影响焊缝疲劳寿命的相关尺寸进行了优化,提高了柱脚危险焊缝疲劳强度。

研究结论如下:

1) 堆垛机柱脚最易发生疲劳破坏的焊缝为环形焊缝,其最容易发生疲劳破坏的位置为环形焊缝立柱侧焊线弯曲部位;

2) 在极端工况下,柱脚危险焊缝的疲劳寿命可达 27.14 y。在工作年限内,环形焊缝不会发生破坏;

3) 在不影响焊接接头结构强度的基础上,适当增大焊脚高度、减小焊脚宽度可以有效提高环形焊缝疲劳强度;

4) 使用响应面法对影响焊缝疲劳强度的相关参

数进行匹配,使危险焊缝结构应力降低 15%,有效提高了危险焊缝疲劳强度。

在后续的相关工作中,笔者将进一步探讨其他因素对堆垛机焊接接头疲劳强度的影响规律,并设计相关疲劳试验,对堆垛机焊接接头进行更全面深入的优化研究。

参考文献 (References):

- [1] 朱宗伟. 双立柱重载有轨巷道堆垛机结构分析与仿真 [D]. 桂林:桂林理工大学,2021.
ZHU Zong-wei. Structural Analysis and Simulation of Dual Masts Heavy Rail Roadway Stacker Crane [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2021.
- [2] 吕永锋. 双立柱式堆垛机三级货叉刚度建模与优化 [J]. 机电工程,2023,40(1):96-103.
LV Yong-feng. Modeling and optimization of the rigidity of the triple fork of a double pillar stacker [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2023, 40(1): 96-103.
- [3] 马朝鹏,谢 晖. 双立柱堆垛机结构分析与优化 [J]. 机电工程,2022,39(8):1152-1159.
MA Zhao-peng, XIE Hui. Structural analysis and optimization of double column stacker [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(8): 1152-1159.
- [4] 蒋君侠,廖海鹏. 重载智能堆垛装备刚度建模与结构优化 [J]. 浙江大学学报:工学版,2021,55(10):1948-1959.
JIANG Jun-xia, LIAO Hai-peng. Stiffness modeling and structure optimization of heavy-duty intelligent stacking equipment [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2021, 55(10): 1948-1959.
- [5] 潘春荣,陈亚龙,张 伟. 转弯过程中堆垛机的结构仿真分析 [J]. 机械设计与制造,2021(9):129-133.
PAN Chun-rong, CHEN Ya-long, ZHANG Wei. Simulation analysis of stacker in the process of turning [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(9): 129-133.
- [6] SHIOZAKI T, YAMAGUCHI N, TAMAI Y, et al. Effect of weld toe geometry on fatigue life of lap fillet welded ultra-high strength steel joints [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 116(11): 409-420.
- [7] AYGÜL M, AI-EMRANI M, URUSHADZE S. Modelling and fatigue life assessment of orthotropic bridge deck details using FEM [J]. International Journal of Fatigue, 2012, 40(7): 129-142.
- [8] RETTENMEIER P, ROOS E, WEIHE S. Fatigue analysis of multiaxially loaded crane runway structures including welding residual stress effects [J]. International Journal of Fatigue, 2016, 82(1): 179-187.

- [9] RAUTIAINEN M, REMES H, NIEMELÄ A. A traction force approach for fatigue assessment of complex welded structures[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2021, 44(11):3056-3076.
- [10] GOYAL R, EL-ZEIN M, GLINKA G, et al. A robust stress analysis method for fatigue life prediction of welded structures[J]. *Welding in the World*, 2016, 60(2):299-314.
- [11] DONG P. A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analysis of welded joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23(10):865-876.
- [12] 岳增可. 造船龙门起重机焊接结构多轴疲劳寿命研究[D]. 大连:大连理工大学, 2021.
YUE Zeng-ke. Research on Multi-axial Fatigue Life of Welded Structure of Shipbuilding Gantry Crane[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [13] 许成斌, 王欣, 郭晓光, 等. 基于等效结构应力法的主梁疲劳寿命评估[J]. *起重运输机械*, 2020, 59(12):37-41.
XU Cheng-bin, WANG Xin, GUO Xiao-guang, et al. Fatigue live evaluation of girder based on equivalent structure stress method[J]. *Hoisting and Conveying Machinery*, 2020, 59(12):37-41.
- [14] 李志强. 基于 Verity 与子模型的桥式起重机焊缝疲劳研究[D]. 太原:太原科技大学机械工程学院, 2016.
LI Zhi-qiang. Research on Fatigue Life of Welding Seam of Bridge Crane Based on Verity and Sub Model[D].
- Taiyuan: Faculty of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, 2016.
- [15] 马岩. 基于等效结构应力法的塔式起重机焊接节点疲劳寿命研究[D]. 西安:西安建筑科技大学理学院, 2020.
MA Yan. Research on the Fatigue Life of Welded Joints-tower Crane Based on the Equivalent Structural Stress Method[D]. Xi'an: Faculty of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [16] 曹蕾蕾, 王严, 王留涛, 等. 大型焊接结构疲劳寿命评估研究综述[J]. *机械强度*, 2022, 44(6):1443-1454.
CAO Lei-lei, WANG Yan, WANG Liu-tao, et al. Review of research on fatigue life evaluation for large welded structures[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2022, 44(6):1443-1454.
- [17] 兆文忠, 李向伟, 董平沙. 焊接结构抗疲劳设计理论与方法[M]. 北京:机械工业出版社, 2017.
ZHAO Wen-zhong, LI Xiang-wei, DONG Ping-sha. Theory and Method of Anti-fatigue Design of Welded Structure[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [18] 陈秉智, 何正平, 李向伟, 等. 某构件焊缝疲劳开裂的寿命预测方法应用对比[J]. *焊接学报*, 2022, 43(5):63-68, 117.
CHEN Bing-zhi, HE Zheng-ping, LI Xiang-wei, et al. Comparison of fatigue life predicting methods used in cracked welded component[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(5):63-68, 117.

本文引用格式:

徐世敏, 王立华, 陈太茂, 等. 堆垛机柱脚焊接接头疲劳寿命分析及优化[J]. *机电工程*, 2023, 40(11):1794-1802.

XU Shimin, WANG Lihua, CHEN Taimao, et al. Fatigue life analysis and optimization of welded joints in stacker column-footing[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2023, 40(11):1794-1802.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1784 页)

- [25] SHENG Hui, HE Meng-xin, ZHAO Jia-le, et al. The ABH-based lattice structure for load bearing and vibration suppression[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 252(8):108378.
- [26] 鲍鑫, 沈浩, 陈新文, 等. R152a 在无油直线压缩机中应用的试验研究[J]. *流体机械*, 2022, 50(12):14-19, 85.
BAO Xin, SHEN Hao, CHEN Xin-wen, et al. Experimental research on the application of R152a in oil-free linear compressor[J]. *Fluid Machinery*, 2022, 50(12):14-19, 85.
- [27] RAO S S. *Vibration of Continuous Systems*[M]. John Wiley & Sons, 2019.
- [28] OVTCHINNIKOV E E, XANTHIS L S. The discrete Korn's type inequality in subspaces and iterative methods for thin elastic structures[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1998, 160(1-2):23-37.
- [29] TANG Li-ling, CHENG Li. Enhanced acoustic black hole effect in beams with a modified thickness profile and extended platform[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 391(3):116-126.
- [30] 郭凯, 程雨轩, 蒋建旭, 等. 不等直径并排塔器风致振动特性分析[J]. *压力容器*, 2022, 39(9):56-63.
GUO Kai, CHENG Yu-xuan, JIANG Jian-xu, et al. Analysis of wind-induced vibration characteristics of parallel towers with different diameters[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2022, 39(9):56-63.