

# 筋板及约束条件对双梁桥式起重机主梁挠度的影响研究

王志斌<sup>1</sup>,张阳<sup>1</sup>,周国鹏<sup>1,2</sup>,陈国胜<sup>3</sup>

(1. 湖北科技学院 工程技术研究院,湖北 咸宁 437100;

2. 湖北香城智能机电产业技术研究院,湖北 咸宁 437100;

3. 湖北特种设备检验检测研究院 咸宁分院,湖北 咸宁 437100)

**摘要:**针对双梁桥式起重机的主梁挠度有限元分析效率和精度问题,以 QD75t-31.5m-A3 双梁桥式起重机作为研究对象,基于 Ansys Workbench 软件分析主梁的筋板和约束条件对主梁最大挠度的影响,推荐主梁挠度有限元分析的主梁模型和约束条件;验证主梁的静刚性,进行主梁的挠曲线仿真分析。结果表明:主梁筋板对最大挠度分析的影响可忽略不计,选用推荐主梁模型作为挠度分析的几何模型;考虑端梁对主梁最大挠度分析的影响,选用推荐约束作为挠度分析的约束条件;主梁的静刚性符合要求,并且挠曲线最大挠度值的精度提高了 4.02%。

**关键词:**双梁桥式起重机;箱型梁;筋板;约束;挠度;有限元法

**中图分类号:**TH215 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)03-0027-04

## Study on Influence of Ribs and Constraints on Deflection of Main Girder of Double Beam Bridge Crane

WANG Zhibin<sup>1</sup>, ZHANG Yang<sup>1</sup>, ZHOU Guopeng<sup>1,2</sup>, CHEN Guosheng<sup>3</sup>

(1. Institute of Engineering and Technology, Hubei University of Science and Xianning 437100, China; 2. Fragrant City Institute of Intelligent Electromechanical Industry and Technology of Hubei Province, Xianning 437100, China; 3. Xianning Branch of Hubei Special Equipment Inspection and Testing Research Institute, Xianning 437100, China)

**Abstract:** In regard to the efficiency and precision of finite element analysis of main beam deflection of double beam bridge crane, the QD75t-31.5m-A3 double-beam bridge crane is taken as the research object to analyze the influence of the ribs and constraint methods of the main beam on the maximum deflection of the main beam by the Ansys Workbench software, and the main beam model and constraint method of the deflection finite element analysis of the main beam is recommended. The static rigidity of the main beam is verified, and the deflection curve simulation analysis of the main beam is carried out. The results show that the static rigidity of the main beam meets the requirements and the accuracy of the maximum deflection of the deflection curve is improved by 4.02% on the premises that the recommended main beam model is selected as the geometric model for deflection analysis without the consideration of the influence of the ribs of the main beam on the maximum deflection analysis, and that the recommended constraint method is chosen as the constraint mode of the deflection analysis with the consideration of the influence of the end carriage on the maximum deflection analysis of the main beam.

**Keywords:** double beam bridge crane; box beam; rib; constraint; deflection; FEM

## 0 引言

桥式起重机是横架于车间、仓库和料场上空进行物料吊运的起重设备,它是目前使用范围最广、数量最多的一种起重机械。主梁是桥式起重机吊运过程中承受载荷最核心的部件,其最大挠度值是影响静态刚性指标的主要因素之一;在载荷作用下,主梁的轴线将成为一条挠曲线,需要通过预拱工艺抵消其产生挠度。因此,针对桥式起重机的主梁挠度研究十分必要。

国内外研究人员针对桥式起重机做了大量的研究。宋恒家<sup>[1]</sup>分析了若干种常见情形的主梁跨中挠度计算公

式,研究了主梁上任意一点挠度与跨中挠度的关系,列出了计算挠度的理论公式。陈国璋<sup>[2]</sup>介绍国内外桥式起重机的静刚度控制情况,给出满足静刚度的下挠校核公式。文献[3]和文献[4]利用有限元分析软件对桥式起重机的刚度、强度方面的分析,二者分别采用了主梁和桥架作为研究对象,基于桥架的主梁挠度分析结果精度更高,但是模型处理比较复杂,需要花费更多的时间,对计算机性能也提出了较高的要求。文献[5]研究了不同筋板对起重机主梁静动态特性的影响,结果表明筋板对主梁的动态特性有不可忽略的影响。在桥式起重机的主梁挠度分析中,研究人员按照主梁实际构造建模,在模型简化方面工作较少,造成了分析效率低的问题。

**基金项目:**湖北省科技计划项目(2019BEC206);咸宁市自然科学基金项目(2020ZRKX10);湖北科技学院博士启动基金项目(BK202112)

**第一作者简介:**王志斌(1988—),男,山西晋中人,助教,硕士,研究方向为起重机械动力学。

在桥架结构中,主端梁有多种连接形式。文献[6]介绍了主端梁焊接连接和螺栓连接两种常见形式。施加约束需要考虑约束位置和约束自由度,文献[7]中主端梁之间采用螺栓连接的形式,针对主梁静挠度分析的约束条件进行了研究。在桥式起重机的主梁挠度分析中,研究人员通常直接施加简支梁约束在主梁上,忽略了端梁结构对分析精度的影响。

针对上述问题,本文将分别研究主梁模型简化及不同约束条件对于主梁挠度的影响,最终得出合理的主梁推荐模型及约束条件,为桥式起重机的预拱度设计及刚度校核提供参考。

## 1 主梁挠度的理论计算

### 1.1 基本参数

桥架是桥式起重机的基本构件,由主梁、端梁以及走台等组成。桥架沿高架轨道纵向运行,起重小车沿桥架上的导轨横向运行,提升机构沿铅锤方向升降,形成长方体的工作空间,如图1所示。

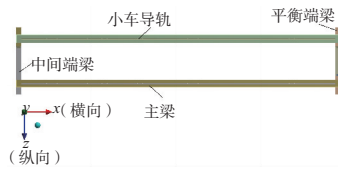


图1 双梁桥式起重机的桥架

本文研究对象为 QD75t-31.5m-A3 双梁桥式起重机,主要应用于室内环境的普通桥式起重机。其制造材料为 Q235,主要参数如表1所示。

表1 QD75t-31.5m-A3 双梁桥式起重机的主要参数

参数	数值
跨度 $S/\text{mm}$	31 500
额定主起重量 $Q_1/\text{t}$	75
额定副起重量 $Q_2/\text{t}$	20
主梁的均布载荷集度 $q/(\text{kN}/\text{mm})$	0.005 68
小车纵向车轮间距/ $\text{mm}$	4 400
小车横向车轮间距/ $\text{mm}$	3 500
主梁自质量/ $\text{t}$	18.271
小车自质量/ $\text{t}$	24
主梁截面对 $z$ 轴的惯性矩 $I_z/\text{mm}^4$	$4.33 \times 10^{10}$

该起重机主梁属于正轨箱型梁,截面形状如图2所示。图中翼缘板厚  $t_1$  为 20 mm,腹板厚度  $t_2$  为 8 mm,翼缘板宽度  $C$  为 800 mm,主梁腹板间距  $D$  为 720 mm,腹板高度  $H$  为 2000 mm。

### 1.2 理论计算

假设主梁的质量均匀分布,忽略车轮压差异,主梁主要承受均布的重力载荷和小车轮压集中载荷,将主梁的

约束简化为简支梁约束,力学模型如图3所示。图中小车处在主梁的跨中位置,  $F_1$  与  $F_2$  为载荷和小车自质量产生的轮压,  $a_1, b_1$  与  $a_2, b_2$  分别表示  $F_1$  与  $F_2$  作用点距两端点 A、B 的距离,  $q$  代表主梁均布重力载荷,  $c$  为小车的车轮间距。

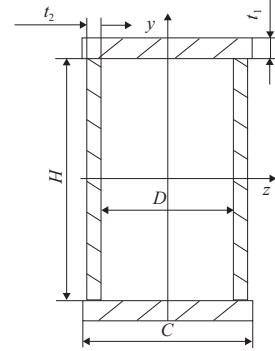


图2 QD75t-31.5m-A3 桥机主梁简化截面

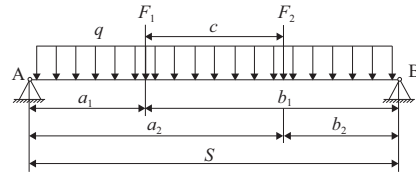


图3 主梁的简支梁模型

挠度是指杆件轴线在垂直于轴线方向的线位移<sup>[8]</sup>。主梁 AB 上任意一点的挠度  $\omega$  由  $F_1, F_2$  及  $q$  共同作用产生。在其上任取一点,设该点与 A 端点之间的距离为  $x$ ,在  $F_1, F_2$  及  $q$  单独作用下,对应该点挠度分别为  $\omega_1, \omega_2$  和  $\omega_3$ ,挠度计算公式<sup>[8]</sup>如下:

当  $0 \leq x \leq a_1$  时,  $\omega_1, \omega_2$  和  $\omega_3$  分别为:

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{F_1 b_1 x}{6EI_z S} (S^2 - x^2 - b_1^2) \\ \omega_2 = \frac{F_2 b_2 x}{6EI_z S} (S^2 - x^2 - b_2^2) \\ \omega_3 = \frac{qx}{24EI_z} (S^3 - 2Sx^2 + x^3) \end{cases} \quad (1)$$

当  $a_1 < x \leq a_2$  时,  $\omega_1, \omega_2$  和  $\omega_3$  分别为:

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{F_1 b_1}{6EI_z S} \left[ \frac{S}{b_1} (x - a_1)^3 + (S^2 - b_1^2) x - x^3 \right] \\ \omega_2 = \frac{F_2 b_2 x}{6EI_z S} (S^2 - x^2 - b_2^2) \\ \omega_3 = \frac{qx}{24EI_z} (S^3 - 2Sx^2 + x^3) \end{cases} \quad (2)$$

当  $a_2 < x \leq S$  时,  $\omega_1, \omega_2$  和  $\omega_3$  分别为:

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{F_1 b_1}{6EI_z S} \left[ \frac{S}{b_1} (x - a_1)^3 + (S^2 - b_1^2) x - x^3 \right] \\ \omega_2 = \frac{F_2 b_2}{6EI_z S} \left[ \frac{S}{b_2} (x - a_2)^3 + (S^2 - b_2^2) x - x^3 \right] \\ \omega_3 = \frac{qx}{24EI_z} (S^3 - 2Sx^2 + x^3) \end{cases} \quad (3)$$

在载荷作用的情况下,变形后梁的轴线变成平面内的一条曲线,称为挠曲线<sup>[8]</sup>。由叠加法,主梁 AB 的挠曲线方程为<sup>[8]</sup>

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 \quad (4)$$

## 2 主梁挠度的有限元分析

### 2.1 主梁挠度分析的流程

利用 Ansys Workbench 中 Static Structural 模块进行主梁挠度分析。在不影响分析结果的前提下,对主梁模型简化处理,简化几何特征以及零部件;采用 SolidWorks 软件进行三维建模,形成多实体零件。将主梁模型导入 Ansys Workbench 中,利用 DM 模块进行模型处理,形成若干个 Parts;采用 Structural Steel 材料模型;Parts 之间均采用 Bond 接触类型;采用 Solid185 实体单元进行划分,形成六面体网格;采用 Remote Displacement 模拟约束;考虑主梁自质量 Standard Earth Gravity ( $G$ ),施加小车处于跨中位置形成的轮压载荷,轮压载荷由小车自质量和起重量共同作用形成,主梁工况如表 2 所示。

表 2 主梁工况

工况序号	数值/t	说明
1	$G$	主梁自质量
2	$G+24$	主梁+小车
3	$G+24+20$	主梁+小车+副钩
4	$G+24+75$	主梁+小车+主钩

### 2.2 最大挠度的影响因素

本文主要研究主梁模型和约束对主梁最大挠度的影响,最终得出合理的主梁建模方法和约束形式。

#### 1) 主梁模型

本文研究的对象,主梁与端梁之间采用焊接连接的形式,其中主梁由上翼板、腹板、下翼板以及筋板(包括隔板、角钢等)组成;主梁模型 1 中包含筋板,主梁模型 2 中不包含筋板,如图 4 所示。依照主梁挠度分析流程,研究图 4 中两种主梁模型分别在表 2 中 4 种工况条件下的最大挠度。

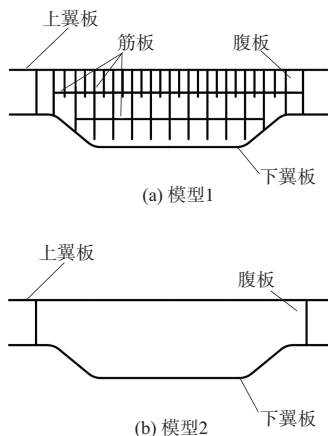


图 4 主梁模型

#### 2) 主梁约束的施加

约束是影响仿真结果的重要因素之一,不同的约束导致的差异明显。约束施加需要考虑约束的位置、约束的自由度。约束位置如图 5 所示。图 5(a)约束的位置 I 为主梁与端梁的搭接区域;图 5(b)约束的位置 II 为模拟端梁区域,用长方体块代替端梁模型;图 5(c)约束的位置 III 为端梁的车轮安装面,通过研究桥架间接考察主梁。约束的自由度如表 3 所示,约束 1 是在约束的位置 I 施加简支约束;约束 2 是在约束的位置 I 施加固支约束;约束 3 是在约束的位置 II 施加简支约束;约束 4 是在约束的位置 III 施加简支约束。依照主梁挠度分析流程,研究图 5 中主梁模型 I 分别在表 2 中 4 种工况条件下的最大挠度。

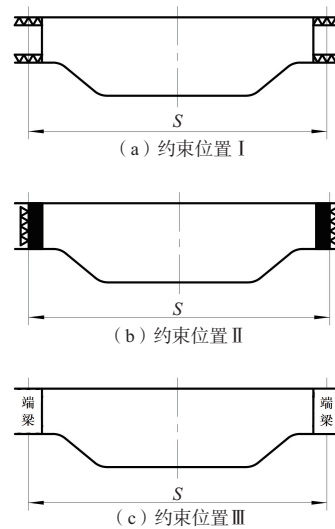


图 5 添加约束位置

表 3 主梁约束方案

约束序号	约束自由度		约束类型	约束位置	备注
	A	B			
1	$x y z R_x R_y$	$y z R_x R_y$	简支约束	I	验证
2	$x y z R_x R_y R_z$	$x y z R_x R_y R_z$	固支约束	I	验证
3	$x y z R_x R_y$	$y z R_x R_y$	简支约束	II	验证
4	$x y z R_x R_y$	$y z R_x R_y$	简支约束	III	标准

## 3 仿真结果与分析

### 3.1 主梁模型对最大挠度的影响分析

在表 2 中 4 种工况条件下,分别施加图 5、表 3 中的约束 1、约束 2、约束 3 于图 4 中两种主梁模型,将仿真结果最大挠度值绘制成多折线曲线,如图 6 所示。

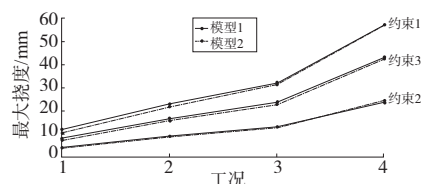


图 6 不同工况下的最大挠度曲线

约束 1、约束 3 均属于简支约束,由图 6 可知,两种约束表现出类似的变化趋势,随着载荷的变大,模型 1、模型 2 的最大挠度曲线逐渐逼近,工况 4 对应的最大挠度值点几乎重合。约束 2 属于固支约束,由图 6 可知,随着载荷的变大,模型 1、模型 2 的最大挠度曲线逐渐逼近,出现交叉现象,然后逐渐渐远。数据分析表明,额定的工况范围内,在约束 1 的条件下,模型 1、模型 2 的最大挠度值之间的最大差异为 1.4 mm,不足 3.5%;在约束 2 的条件下,模型 1、模型 2 的最大挠度值之间的最大差异为 0.8 mm,不足 2.0%;在约束 3 的条件下,模型 1、模型 2 最大挠度值之间的最大差异为 1.0 mm,不足 2.5%。因此,可以忽略筋板对主梁最大挠度分析的影响,推荐主梁模型 2 作为挠度分析的几何模型。

### 3.2 约束条件对最大挠度的影响分析

在表 2 中 4 种工况条件下,分别施加图 5、表 3 中的 4 种约束于图 4 中主梁模型 1,提取最大挠度值的仿真结果;根据式(2)计算主梁理论最大挠度值;将仿真和理论最大挠度值绘制成多折线曲线,如图 7 所示。

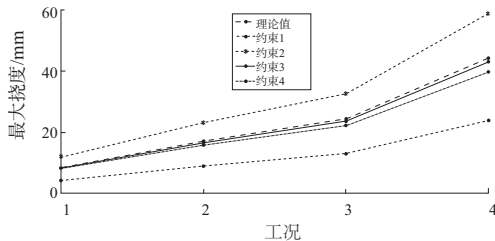


图 7 不同工况下的最大挠度曲线

约束 1 属于简支约束,没有考虑端梁。由图 7 可知,在相同工况条件下,约束 1 的最大挠度值明显大于理论值;约束 2 属于固支约束,没有考虑端梁。由图 7 可知,在相同工况条件下,约束 2 的最大挠度值明显小于理论值;约束 4 属于简支约束,考虑了端梁的结构,模型简化程度最小,最大挠度的值更加符合实际情况;约束 3 属于简支约束,考虑了模拟端梁。由图 7 可知,在相同工况条件下,约束 3 的最大挠度值介于理论值和约束 4 之间。数据分析表明:额定的工况范围内,理论值与约束 4 之间的最大差异为 4.54 mm;理论值与约束 3 之间的最大差异为 1.16 mm;约束 3 与约束 4 之间的最大差异为 3.38 mm。因此,相比于约束 1、约束 2,约束 3 的效果更理想,推荐约束 3 作为挠度分析的约束方式。

### 3.3 推荐模型及约束方式的仿真结果分析

通过研究影响主梁最大挠度的两种因素,进行挠度分析时推荐选用主梁模型 2 和约束 3。

#### 1) 静态刚性验证

起重机的静态刚性是额定起重量和小车自质量在主梁跨中所产生的垂直静挠度与起重机跨度的比<sup>[9]</sup>。在不计主梁自质量的情况下,主钩起吊额定载荷(主钩的额定起重量为 75 t,小车自质量分别为 75 t 和 24 t),并且小车位于跨中位置,主梁 y 方向的挠度仿真结果如图 8 所示,最大挠度值为 35.67 mm,满足规范中的低于主梁跨度的  $1/750 \approx$

42 mm,符合《起重机设计规范》的静刚性要求<sup>[9]</sup>。

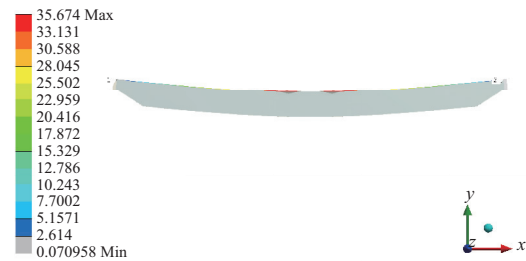


图 8 主梁 y 方向的挠度

#### 2) 主梁的挠曲线仿真分析

主梁预拱曲线与小车额定负荷的主梁下挠量曲线相等,则小车带额定负荷时的运行轨迹近似为水平线,这曲线可称为理想预拱曲线<sup>[10]</sup>。在工况 4 下,并且小车位于跨中位置,主梁轴线变成挠曲线。根据式(2)、式(4)计算主梁的挠曲线作为理论结果;按照推荐的模型和约束进行仿真分析,主梁挠曲线作为推荐结果;以桥架为研究对象,并且在约束 4 的条件下进行仿真分析,主梁挠曲线近似作为实际结果,如图 9 所示。由图 9 可知,推荐主梁挠曲线介于理论挠曲线和实际挠曲线之间。数据分析表明:理论挠曲线、推荐挠曲线以及实际挠曲线的最大挠度值分别为 44.36 mm、42.77 mm、39.70 mm;理论挠曲线的最大挠度值比实际挠曲线的最大挠度值大 11.74%,推荐挠曲线的最大挠度值比实际挠曲线的最大挠度值大 7.72%。因此,与理论挠曲线的最大挠度值相比,推荐挠曲线的最大挠度值精度提高了 4.02%。

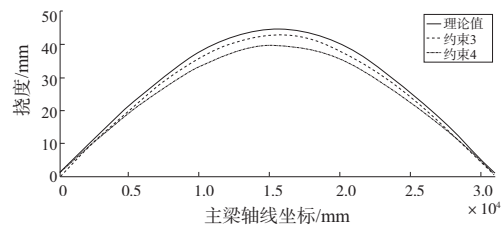


图 9 主梁的挠曲线

## 4 结语

基于 Ansys Workbench 双梁桥式起重机(QD75t-31.5m-A3)的主梁挠度分析,结果表明:

1) 在额定起重载荷条件下,可以忽略主梁筋板对最大挠度分析的影响,推荐选用主梁模型 2 作为挠度分析的几何模型;

2) 通过验证约束 1、约束 2、约束 3,端梁对主梁最大挠度分析的影响不可忽略,推荐选用约束 3 作为挠度分析的约束方式;

3) 采用推荐的模型和约束方式进行挠度分析,主梁符合《起重机设计规范》的静刚性要求;主梁挠曲线的最大挠度值比理论挠曲线最大挠度值的精度提高了 4.02%。

(下转第 43 页)

$$A = \frac{|\sigma_{i,a} - \bar{\sigma}_a|_{\max} - |\sigma_{j,b} - \bar{\sigma}_b|_{\max}}{|\sigma_{j,b} - \bar{\sigma}_b|_{\max}} \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{i,a}$ 、 $\sigma_{j,b}$  分别为时效后、时效前被测点  $i$ 、 $j$  的应力值;  $\bar{\sigma}_a$ 、 $\bar{\sigma}_b$  分别为时效后、时效前所有被测点的平均应力;  $N$  为被测点数。

焊件上部、中部、下部的横向应力匀化率分别为 37.7%、19.2%、21.3%; 焊件上部、中部、下部的纵向应力匀化率分别为 39.0%、41.8%、24.5%。综上, 通过本文设计的装夹方式进行振动时效处理对焊接接头不同区域的应力影响不尽相同, 总体而言上部的峰值应力调减和匀化效果都较为突出。这是由于振动时效过程使得焊件上部区域产生较大的动应力, 而基于振动时效机理, 一定范围内动应力越大, 构件残余应力释放量越高。实验焊件整体残余应力有了较好的消除和匀化效果, 这表明振动时效对含四边形的焊接接头的工件有较强的可行性。

## 4 结语

1) 基于机匣结构、应力分布及模态特征, 设计了等效工艺试验模型。通过对机匣和工艺试验模型的应变振型特征分析确定装夹方式, 并结合扫频结果确定激振频率 600 Hz。

2) 结合分析得到的振动时效参数和扫频的共振频率进行振动时效处理, 焊接接头峰值残余应力均有所下降, 最高应力调减率可达 30.8%; 整体应力匀化效果明显, 最高应力匀化率可达 41.8%。这表明采用该方法的振动时效处理可用于实现机匣局部复杂应力的调减和均匀化。

### 参考文献:

- [1] 柳燕, 姜华, 于正伟, 等. 薄壁超高强度钢熔敷焊接导带裂纹成因分析及预防[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(5): 79-82.
- [2] 房德馨, 姚培勤. 用振动消除金属构件残余应力的原理和应

用[J]. 大连工学院学报, 1983, 23(3): 77-80.

- [3] 宋天民, 张国福, 尹成江. 振动时效机理的研究[J]. 吉林大学自然科学学报, 1995, 33: 53-56.
- [4] YANG Y P. Understanding of vibration stress relief with computation modeling[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 18(7): 856-862.
- [5] EBRAHIMI S M, FARAHANI M, AKBARI D. The influences of the cyclic force magnitude and frequency on the effectiveness of the vibratory stress relief process on a butt welded connection[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(5/6/7/8): 2147-2158.
- [6] GAO H J, ZHANG Y D, WU Q, et al. Fatigue life of 7075-T651 aluminium alloy treated with vibratory stress relief [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 108: 62-67.
- [7] GAO H J, ZHANG Y D, WU Q, et al. Experimental investigation on the fatigue life of Ti-6Al-4V treated by vibratory stress relief[J]. Metals, 2017, 7(5): 158.
- [8] 张清东, 曾杰伟, 罗晓明, 等. 高强度钢板残余应力振动时效调减技术试验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(1): 86-92.
- [9] DJURIC D, VALLANT R, KERSCHBAUMER K, et al. Vibration stress relief treatment of welded high-strength martensitic steel[J]. Welding in the World, 2011, 55(1/2): 86-93.
- [10] 高自成, 余田, 廖凯, 等. 振动时效对结构件材料表面完整性的影响[J]. 振动·测试与诊断, 2020, 40(5): 976-981, 1027.
- [11] CHEN S G, ZHANG Y D, WU Q, et al. Residual stress relief for 2219 aluminum alloy weldments: a comparative study on three stress relief methods[J]. Metals, 2019, 9(4): 419.
- [12] 顾邦平, 胡雄, 杨振生, 等. 基于应变振型的振动时效激振频率的确定方法与实验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(11): 259-264, 280.
- [13] GB/T 25712—2010 振动时效工艺参数选择及效果评定方法[S].

收稿日期: 2021-02-23

(上接第 30 页)

### 参考文献:

- [1] 宋恒家. 桥式起重机主梁的承载挠度计算[J]. 起重运输机械, 1992(1): 15-16, 28.
- [2] 陈国璋. 桥式起重机结构静刚度的分析[J]. 起重运输机械, 1982(12): 27-31, 64.
- [3] 任德斌, 赵美涵. 吊钩桥式起重机主梁的有限元计算[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(1): 108-114.
- [4] 张楠, 陈志刚, 邱燕超, 等. 箱型梁桥架装置的有限元分析[J]. 机械设计与制造, 2019(6): 22-24.
- [5] 李荣强, 吴淑芳, 高鑫, 等. 加劲肋对起重机主梁静动态特性影响研究[J]. 机械设计与制造工程, 2020, 49(1): 12-14.

[6] 王正勇, 张国银, 张韦微. 桥式起重机主端梁连接技术研究[J]. 起重运输机械, 2015(10): 119-122.

- [7] 易朋兴, 马德扬, 聂福全, 等. 桥式起重机主梁静挠度有限元分析的约束条件[J]. 中国工程机械学报, 2018, 16(2): 101-105.
- [8] 刘鸿文. 材料力学- II [M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [9] GB/T 14405—2011 通用桥式起重机[S].
- [10] 付荣柏. 起重机主梁上拱度及预拱曲线[J]. 起重运输机械, 1990(2): 16-19, 2.

收稿日期: 2021-08-13