

转向架构架疲劳应力计算与评估

兰清群¹, 王伟²

1. 安徽交通职业技术学院, 安徽 合肥 230051; 2. 合肥市轨道交通集团有限公司运营分公司, 安徽 合肥 230000

摘要:为评估某低地板车辆焊接转向架构架的疲劳强度,采用 ANSYS 有限元仿真软件搭建转向架构架三维有限元模型,分别计算母材、打磨的焊缝边缘部位和不打磨的焊缝边缘部位的3组包络线的许用应力,与11种动载荷的组合变化应力相比较,评价构架的疲劳强度是否满足设计要求。结果表明:转向架构架母材和打磨过的焊缝边缘部位疲劳强度满足要求;在转向架构架安全裕量较小的焊缝部位必须打磨才能满足疲劳强度要求。

关键词:车辆;转向架;构架;疲劳应力

中图分类号:U270.331

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2022)01-0009-07

引用格式:兰清群,王伟. 转向架构架疲劳应力计算与评估[J]. 山东交通学院学报,2022,30(1):9-15.

LAN Qingqun, WANG Wei. Calculation and evaluation of fatigue stress of bogie frame[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2022, 30(1):9-15.

0 引言

随着轨道交通车辆的快速发展,车辆关键部件的强度成为影响运行安全的重要因素。由于车辆结构复杂且试验费用昂贵,通过仿真软件对疲劳强度预测评估成为一项重要手段^[1-3]。轻量化等强度和等刚度设计已成为轨道交通车辆转向架构架的基本要求。国内学者对转向架焊接构架的疲劳强度校核及可靠性提升进行了广泛研究^[4-6]。文献[7]研究了标准动车组转向架构架的疲劳可靠性并提出结构优化方法。文献[8-14]研究了铁道车辆转向架构架疲劳强度并提出动载荷识别方法。文献[15-19]对焊接构架疲劳强度及动态特性进行分析,提出焊接构架疲劳强度的评估方法。文献[20-21]提出了基于载荷谱提升转向架构架疲劳可靠性的方法。以往研究主要考虑模拟运营载荷和超常载荷对构架强度的影响,而未考虑局部动载荷的影响,随着列车运行速度不断提高及转向架轻量化的发展趋势,容易引起转向架构架振动频率与线路固有频率重叠,导致转向架构架受到动载荷影响而产生较大的疲劳损伤。

本文以某低地板车辆转向架构架为研究对象,依据文献[22-23]要求,采用 ANSYS 有限元仿真软件搭建仿真模型,充分考虑动应力对构架疲劳强度的影响,分别计算构架的母材、打磨的焊缝边缘部位和不打磨焊缝边缘部位的3组包络线的许用应力,与其余工况的组合变化应力比较,评价构架的疲劳强度是否满足设计要求。

1 转向架构架有限元计算模型

采用 AutoCAD 和 SolidWorks 软件进行建模和局部简化后,由 ANSYS 有限元仿真软件对转向架构架模型自动离散。根据构架的结构特点,板类结构采用 Shell 单元离散,座类结构采用 Solid 单元离散,端梁采用 Beam 单元离散,电机齿轮箱单元质点处建立 Mass 单元,模拟安装部件质量。为使模型更加精确,受

收稿日期:2021-04-12

基金项目:安徽省自然科学基金项目(KJ2019A1075);安徽省高校优秀人才支持计划项目(gxyqZD2020071)

第一作者简介:兰清群(1987—),女,江西萍乡人,副教授,工学硕士,主要研究方向为轨道交通车辆结构,E-mail:qingqun_lan@163.com。

力复杂的部位由人工干预离散。构架共离散成 140 442 个节点,74 156 个单元。转向架构架实体模型如图 1 所示,离散后有限元计算模型如图 2 所示。

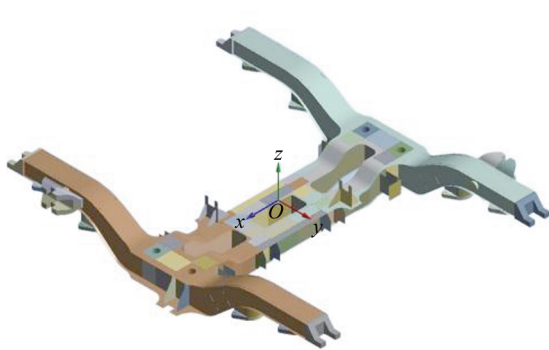


图 1 转向架构架实体模型

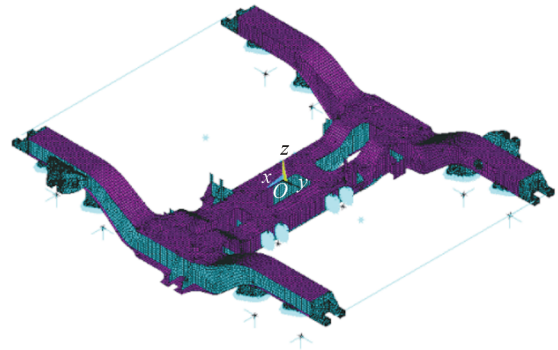


图 2 转向架构架有限元模型

构架支撑在轴箱弹簧支座上,在每个支撑面上建立弹簧边界单元,弹簧边界单元的垂向、横向和纵向刚度为一系悬挂对应的 3 个方向刚度,弹簧边界单元共计 32 个。模型坐标原点位于构架中心, x 轴方向为横向水平向右方向, y 轴方向为车辆前进方向, z 轴方向垂直向上指向横梁上盖板位置。构架垂向载荷作用在侧梁弹簧座上,横向载荷作用在侧梁腹部的横向止挡位上,斜对称载荷作用在构架最外端的轴箱弹簧座上,牵引力作用在构架侧梁的牵引拉杆座上。转向架构架主要参数如表 1 所示。

表 1 转向架构架主要参数

轨距/mm	轮对内侧距/mm	车辆最高速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	轴质量 m/t	车轮直径(新轮) D/mm	车轴材料	板材材料	铸件材料
1435	1353	100	13	840	LZ50	Q345E	B 级钢

2 载荷及强度设计条件

2.1 静载荷

静载荷是指车辆在静止状态下构架所承受的载荷,转向架构架上的静载荷^[22]

$$W = W_1 + W_2 + W_3,$$

式中: W_1 为车体重量, W_2 为车辆的装载重量, W_3 为转向架重量。

根据轴和转向架重量,可计算得到每侧弹簧座垂向静载荷为 115.03 kN,每个电机齿轮箱重量为 7.85 kN。转向架构架的静载荷条件如表 2 所示。

表 2 转向架构架的静载荷条件

工况	载荷种类	载荷作用位置	载荷/kN
1	载重量产生的垂向载荷	侧梁弹簧座	115.03
	横梁安装部件重量产生的载荷	电机齿轮箱质心处	7.85

2.2 动载荷

动载荷是指车辆在运行状态下构架所承受的载荷,分为静载荷与附加系数的乘积所表示的载荷以及安装部件的特性所决定的载荷^[22]。由于横向止挡对称布置,仅加一侧作用于横向止挡的水平方向载荷作为 1 个计算工况,有限元后处理时计算结果以所加载荷一侧为准。不同动载荷条件下的计算工况的边界约束条件略有不同,根据实际装配结构,各工况统一为轴箱 3 向弹性约束,其刚度与实际一系刚度相

同^[23]。将文献[22]中规定的驱动力作用于驱动装置座的载荷转化为电机齿轮箱质心点的扭矩,取轮轨黏着因数为 0.3,根据黏着限制,不考虑传动系扭矩损失和电机扭矩输出特性,得到转向架构架的动载荷及作用位置如表 3 所示。

表 3 转向架构架的动载荷及作用位置

工况	载荷种类	载荷作用位置及表现形式	载荷
2	载重量振动产生的垂向载荷 W_{z1}	侧梁弹簧座	$0.3W$
3	横梁安装部件振动产生的垂向载荷 W_{z2}	电机的垂向加速度	$4g$
4	驱动力作用于驱动装置座的垂向载荷 W_{z3}	电机齿轮箱质心位置的扭矩	$0.3Dmg$
5	作用于垂向减振器座的垂向载荷 W_{z4}	每个垂向减振器座	7.5 kN
6	载重量振动产生的水平方向载荷 W_{x1}	横向止档处	$0.3W$
7	安装部件振动产生的水平方向载荷 W_{x2}	电机横向加速度	$2g$
8	作用于横向减振器的水平方向载荷 W_{x3}	每个横向减振器座	7.5 kN
9	载重量振动产生的纵向载荷 W_{y1}	牵引拉杆座	$0.3W$
10	牵引力所产生的纵向载荷 W_{y2}	牵引拉杆座	$0.3mg$
11	安装部件振动产生的纵向载荷 W_{y3}	电机纵向加速度	$1.5g$
12	超高降低等引起的扭转位移载荷 W_r	转向架的对角车轮位置上,使其产生相对于水平位置的位移	12 mm

注: g 为重力加速度。

2.3 强度设计条件

国内转向架构架采用的材料为 16MnR,与日本 SMA490 材料性能相近^[24],采用文献[22]中 SMA490 材料性能数据作为评定依据,SMA490 的应力极限图如图 3 所示。图 3 中红色线条包络区域为疲劳强度的评定区域, σ_B 为抗拉强度, $\sigma_B=490\text{ MPa}$; σ_0 为屈服应力, $\sigma_0=305\text{ MPa}$; σ_{w1} 、 σ_{w2} 、 σ_{w3} 分别为母材疲劳许用应力、不打磨焊接边缘部位疲劳许用应力、打磨焊接边缘部位疲劳许用应力,取值分别为 155、70、110 MPa; σ_m 为交点应力。

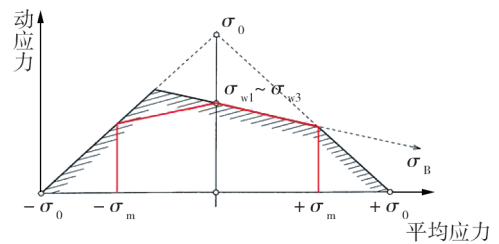


图 3 SMA490 应力极限图

3 构架强度计算结果分析

3.1 构架应力计算

平均应力是按照工况 1 的静载荷所计算出的各个应力代数和的平均值^[22-23],组合动应力 σ_{amp} 是所有动载荷应力的合成,计算公式^[25]为:

$$\sigma_{amp} = \sqrt{\sigma_{z1}^2 + \sigma_{z2}^2 + \sigma_{z3}^2 + \sigma_{z4}^2 + \sigma_{y1}^2 + \sigma_{y2}^2 + \sigma_{y3}^2 + \sigma_{x1}^2 + \sigma_{x2}^2 + \sigma_{x3}^2 + \sigma_r^2}, \quad (1)$$

式中: σ_{z1} 、 σ_{z2} 、 σ_{z3} 、 σ_{z4} 分别为载荷 W_{z1} 、 W_{z2} 、 W_{z3} 、 W_{z4} 产生的应力, σ_{y1} 、 σ_{y2} 、 σ_{y3} 分别为载荷 W_{y1} 、 W_{y2} 、 W_{y3} 产生的应力, σ_{x1} 、 σ_{x2} 、 σ_{x3} 分别为载荷 W_{x1} 、 W_{x2} 、 W_{x3} 产生的应力, σ_r 为载荷 W_r 产生的应力。

利用 ANSYS 有限元仿真软件计算构架在静载荷作用下的平均应力分布,得到母材、打磨的焊缝边缘部位和不打磨的焊缝边缘部位红色包络线内平均应力下的许用应力 σ_{per} ,如图 4 所示。根据式(1)在模型中加载得到转向架构架的应力云图如图 5 所示。由图 5 可知,最大应力出现在牵引拉杆座过渡部位。

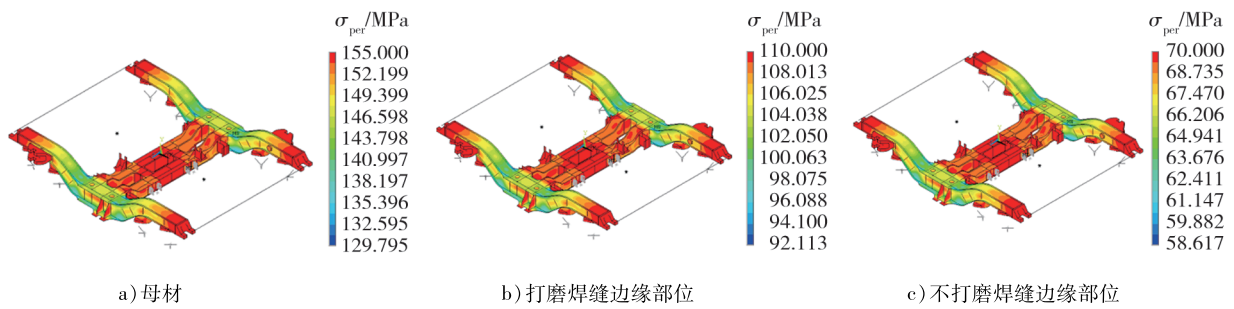


图4 转向架构架 σ_{per} 云图

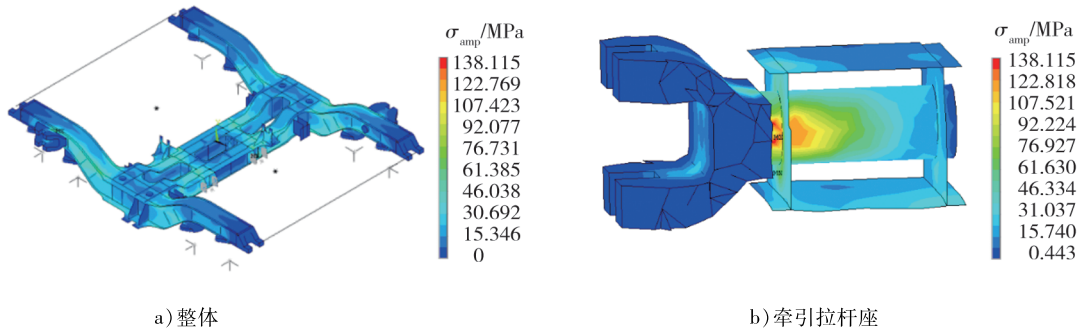


图5 转向架构架应力云图

3.2 构架疲劳强度校核

疲劳安全裕量

$$\sigma_d = \sigma_{per} - \sigma_{amp}$$

若 $\sigma_d \geq 0$, 结构疲劳强度足够; 若 $\sigma_d < 0$, 说明结构疲劳强度不足。

疲劳安全系数

$$\eta = \sigma_{per} / \sigma_{amp}$$

若 $\eta \geq 1$, 则构架疲劳强度满足要求。

3.2.1 母材强度校核

转向架构架母材的 σ_d 云图如图6所示, 构架母材的 η 云图如图7所示(图中灰色部分 $\eta > 5$)。由图6可知: 转向架构架母材的最小 σ_d 位于侧梁立板与上盖板折弯连接处, 侧梁立板与下盖板连接处和横向减振器座与电机吊座部位的 σ_d 也较小, 但都有一定的裕量。由图7可知, 所有部位 $\eta > 1$, 母材疲劳强度满足要求。

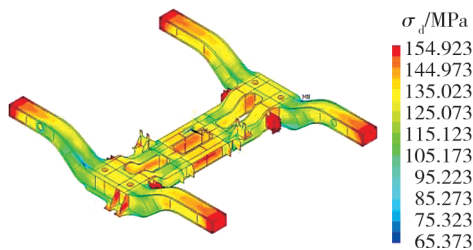


图6 转向架构架母材 σ_d 云图

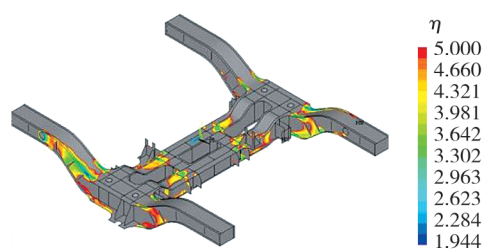


图7 转向架构架母材 η 云图

3.2.2 打磨焊缝边缘部位强度校核

转向架构架打磨焊缝边缘部位的 σ_d 云图如图8所示, 打磨焊缝边缘部位的 η 云图如图9所示(图中灰色部分 $\eta > 5$)。由图8可知, 打磨焊缝边缘部位的最小 σ_d 位于内轴箱座与侧梁下盖板连接处、侧梁下盖板与立板折弯连接处、侧梁上盖板与立板折弯连接处, 横向减振器加强立板与横梁上盖板连接处的 σ_d

也较低,但都有一定的裕量。由图9可知,打磨焊缝边缘部位 $\eta > 1$ 。转向架构架各焊缝满足规范中焊缝打磨要求时,打磨焊缝边缘部位构架疲劳强度满足要求。

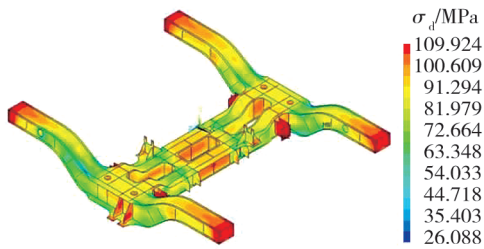


图8 打磨焊缝边缘部位 σ_d 云图

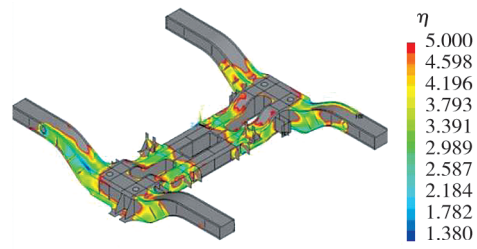


图9 打磨焊缝边缘部位 η 云图

3.2.3 不打磨焊缝边缘部位强度校核

假定转向架构架焊缝全部不打磨,得到不打磨焊缝边缘部位的 σ_d 云图如图10所示,不打磨焊缝边缘部位的 η 云图如图11所示(图中灰色部分 $\eta > 5$)。由图10、11可知,不打磨焊缝边缘部位 $\sigma_d < 0$, σ_d 较小的焊缝为构架2个侧梁盖板过渡部位、横梁横向减振器及电机吊座部位。该部位必须进行焊缝打磨以满足疲劳强度要求。

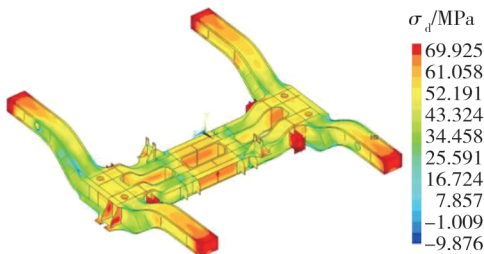


图10 不打磨焊缝边缘部位 σ_d 云图

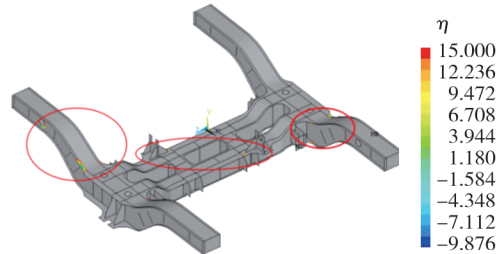


图11 不打磨焊缝边缘部位 η 云图

4 结论

ANSYS有限元仿真可作为评估低地板车辆转向架构架疲劳强度的重要手段,在考虑动应力的情况下,分别计算转向架构架母材、打磨过的焊缝边缘部位和不打磨焊缝边缘部位的3组包络线对应的许用应力幅值,与各工况的组合变化应力幅值相比较,根据疲劳安全裕量云图和疲劳安全系数云图预测转向架构架结构的薄弱部位,评价构架的疲劳强度是否满足设计要求。转向架构架母材及打磨焊缝边缘部位有一定的疲劳安全裕量,能满足疲劳强度的要求。在疲劳安全系数较低的焊缝部位应严格控制焊接质量并焊后打磨以满足疲劳强度要求。

参考文献:

- [1] 牛悦丞,李芾,李金城,等. 100%低地板有轨电车动力转向架构架强度分析[J]. 机车电传动,2019(1):92-97.
NIU Yuecheng, LI Fu, LI Jincheng, et al. Strength analysis for 100% low-floor tram motor bogie frame[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(1):92-97.
- [2] 党林媛. 高速列车车体铝合金裂纹扩展速率及疲劳寿命预测方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.
DANG Linyuan. Research on prediction method of crack growth rate and fatigue life of aluminum alloy carbody in high speed train[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2019.
- [3] 孙晖东,高晓霞,高峰,等. 地铁转向架摇枕抗疲劳设计方法研究[J]. 机车电传动,2018(1):84-87.
SUN Huidong, GAO Xiaoxia, GAO Feng, et al. Research on anti-fatigue technology for metro bogie bolster[J]. Electric Drive

- for Locomotives, 2018(1):84-87.
- [4] 张红涛,徐建喜. 八轴货运机车中间构架静强度与疲劳强度分析[J]. 中国工程机械学报,2018,16(2):183-188.
ZHANG Hongtao, XU Jianxi. Static and fatigue strength analysis of the eight-axle freight locomotive middle frame[J]. Chinese Journal of Construction machinery, 2018,16(2):183-188.
- [5] 薛海,李强,胡伟钢. 1万t重载货车车钩载荷分布特性研究[J]. 铁道学报,2017,39(9):48-52.
XUE Hai, LI Qiang, HU Weigang. Research on coupler load distribution characteristics of 10 000 t heavy haul train[J]. Journal of the China Railway Society, 2017,39(9):48-52.
- [6] 张晓鹤. CRH2 动车组动力转向架焊接构架优化[D]. 成都:西南交通大学,2013.
ZHANG Xiaohe. Optimization for powered bogie welded frame of CRH2 type motor unit [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [7] 唐薇. 标准动车组转向架构架疲劳可靠性研究与结构优化[D]. 北京:北京交通大学,2015.
TANG Wei. Fatigue reliability research and structure optimizing for bogie frame of standard EMU[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [8] 沈彩瑜. 铁道车辆转向架构架疲劳强度研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
SHEN Caiyu. Fatigue strength analysis of the welded bogie frame for railway vehicle [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [9] 高云霄,王曦,邹骅,等. 基于动应力的转向架构架载荷识别[J]. 机械工程学报,2018,54(12):58-63.
GAO Yunxiao, WANG Xi, ZOU Hua, et al. Load identification of bogie frame based on dynamic stress [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018,54(12):58-63.
- [10] 朱涛. 高速列车载荷反演技术及其运用研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
ZHU Tao. Load identification technology for high-speed train dynamic force and its application [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [11] 邹骅. 城际动车组转向架构架载荷谱研究[D]. 北京:北京交通大学, 2016.
ZOU Hua. The study on intercity EMU bogie frame load spectrum [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [12] 高云霄. 高寒动车组转向架构架载荷特性研究[D]. 北京:北京交通大学, 2017.
GAO Yunxiao. Study on load characteristics of bogie frame in alpine EMU [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [13] 周盼,张权,率志君,等. 动载荷识别时域方法的研究现状与发展趋势[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(1):6-11.
ZHOU Pan, ZHANG Quan, SHUAI Zhijun, et al. Review of research and development status of dynamic load identification in time domain [J]. Noise and Vibration Control, 2014,34(1):6-11.
- [14] 刘伯韬. 基于 ABAQUS 的两种不同城市轨道交通车辆转向架构架应力仿真分析[D]. 北京:北京化工大学,2016.
LIU Botao. Frame stress simulation analysis to two kinds of city rail vehicles based on ABAQUS [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [15] 杨宏. CRH3 型动车组焊接构架疲劳强度及动态特性分析[D]. 兰州:兰州交通大学,2018.
YANG Hong. Analysis on fatigue strength and dynamic characteristics for welded frame of CRH3 EMU [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [16] 宋向辉,王红,商跃进. 动车转向架构架强度分析[J]. 机械研究与应用,2012,25(1):1-3.
SONG Xianghui, WANG Hong, SHANG Yuejin. The strength and modal analysis on locomotive bogie frame [J]. Mechanical Research & Application, 2012,25(1):1-3.
- [17] 高伟. 基于正则化的动态载荷识别方法及应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
GAO Wei. Research on dynamic load identification method and application based on regularization [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [18] BATHIAS C, PINEAU A. 材料与结构的疲劳[M]. 吴圣川,李源,王清远,译. 北京:国防工业出版社,2016.
- [19] 程先科. CRH380A 转向架构架动应力特性分析及可靠性研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.
CHENG Xianke. Reliability research and dynamic stress characteristics analysis for CRH380A bogie frame [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [20] 王斌杰,孙守光,李强,等. 基于载荷谱提升转向架构架疲劳可靠性研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(2):23-30.
WANG Binjie, SUN Shouguang, LI Qiang, et al. Research on the improvement of speed increased passenger car bogie frame

- reliability based on load spectrum[J]. Journal of the China Railway Society, 2019,41(2):23-30.
- [21] 王斐. 地铁B型车转向架构架拓扑与尺寸优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
WANG Fei. Topology and size optimization research on metro vehicle bogie frame of type B[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [22] 日本铁路车辆工业会. 铁道车辆转向架设计通用技术条件:JIS E4207—2004[S]. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司,译.[S.1.]:日本标准协会,2004:1-10.
- [23] 日本铁路车辆工业会. 铁路车辆转向架载荷试验方法:JIS E4208—2004[S]. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司,译.[S.1.]:日本标准协会,2004:1-10.
- [24] DICTCE R. 焊接结构疲劳强度[M]. 郑朝云,张式程,译. 北京:机械工业出版社,1994.
- [25] 安琪,李芾,黄运华,等. 基于JIS标准的转向架焊接构架疲劳强度评估[J]. 机车电传动,2009(4):26-29.
AN Qi, LI Fu, HUANG Yunhua, et al. Fatigue strength assessment for bogie welded frame based on JIS standard[J]. Electric Drive for Locomotives, 2009(4):26-29.

Calculation and evaluation of fatigue stress of bogie frame

LAN Qingqun¹, WANG Wei²

1. Anhui Communications Vocational and Technical College, Hefei 230051, China;

2. Operation Branch Company, Hefei Rail Transit Group Co., Ltd., Hefei 230000, China

Abstract: To evaluate the fatigue strength of welded bogie frame for a low floor vehicle, a three-dimensional finite element model is established by ANSYS simulation software. The allowable stress value of three sets of envelope including base material, polished and non-polished weld edges are calculated respectively, which are compared with 11 kinds of the combined varying stress to evaluate whether the fatigue strength of the structure meets the design requirements. The results show that the base material of bogie frame and polished weld edges can meet the requirement of fatigue strength, but it is necessary to polish on the welding seam of bogie frame with small safety margin.

Keywords: vehicle; bogie; frame; fatigue stress

(责任编辑:杨秀红)