

重载货车车钩强度非线性有限元仿真分析

李朋¹,朱涛²,王超²,肖守訥²

(1. 神华铁路装备有限责任公司 肃宁车辆维修分公司,河北 肃宁 062350;

2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘要:为准确分析重载货车车钩的载荷-应力强度映射关系,建立重载货车 16、17 型车钩及关键零部件的有限元模型,在不同材料试验数据的基础上,采用整体装配、接触非线性以及材料非线性三者相结合的分析方法,得出车钩在不同拉伸载荷工况下的应力状态,并将钩舌数值计算应变区与实际服役状态中上、下牵引台接触部位的磨耗、压痕进行对比,验证了模型的可靠性以及强度关系的准确性,为更加准确地评估结构的服役状态提供参考。

关键词:重载货车;装配体;接触;材料非线性;有限元仿真

中图分类号:U272.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)03-0090-05

Nonlinear Finite Element Simulation Analysis of Coupler Strength of Heavy Truck

LI Peng¹, ZHU Tao², WANG Chao², XIAO Shoune²

(1. Suning Vehicle Maintenance Branch, Shenhua Railway Equipment Co., Ltd., Suning 062350, China;

2. Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To analyze accurately the load-stress intensity mapping relationship of heavy-duty truck couplers, the finite element model of heavy-duty truck 16 and 17 couplers with key components was established. Based on the test data of different materials, and by the analysis method of combining overall assembly of the structure and contact and material nonlinearities, the stress state of the coupler under different tensile load conditions was obtained, and the numerically calculated strain area of the hook tongue was compared with the wear and indentation of the contact parts of the upper and lower traction tables in the actual service state. The analysis result verifies the reliability of the model and the accuracy of the strength relationship, and provides important reference for more accurate assessment of the service state of the structure.

Keywords: heavy wagon; assembly; contact; material nonlinearity; finite element simulation

0 引言

随着我国重载铁路的快速发展,铁路货车牵引吨位、编组数量、运行速度的不断增加,车辆间纵向载荷随之增大,尤其在长大坡道条件下,车辆间冲击载荷急剧增大,恶化了车钩的服役条件^[1-3]。针对目前重载货车的服役运行条件,一方面对车钩强度服役安全性提出了更高的要求;另一方面,长大编组运行大幅度降低了车钩的服役疲劳寿命,并在一定程度上缩短了检修周期,进而增加了维修成本。为此针对目前重载铁路货车主流应用的 16、17 型车钩进一步深入分析整体结构的载荷-应力强度映射关系,为车钩结构的设计与优化,服役状态可靠性评估提供支撑。

目前我国重载货车车钩采用预防性计划检修的模式,更多地依赖于周期性定期检查,缺乏结构在既有服役状态下的状态性评估^[4]。作为车钩可靠性评估的首要条件是明确结构的载荷-应力-强度映射关系,进而建立准确的分析模型。针对重载车钩,现有文献中主要采用独立结构

建模以及线性数值分析相结合的方法。李晨曦等^[5]单独对钩体做了拉伸和压缩工况的线性分析;于兆华^[6]将钩舌和钩体分离,采用分别施加约束的方法进行强度数值分析;管艳华等^[7]单独对钩舌进行线性数值分析;苗伟明等^[8]对钩舌与钩体装配体进行了线性分析。上述强度分析模型中均将材料特性考虑为线性,部件之间的接触则是通过力和位移来限制,与实际部件之间接触非线性状态吻合度不高,伴随大载荷工况条件时,数值仿真计算结果与实际结构应力状态误差较大。

为考虑车钩接触部件之间力传递的相互影响,更加准确地建立结构的载荷-应力强度映射关系,本文采用车钩整体装配建模的方法,建立了车钩装配体非线性有限元模型,各零部件之间的相互作用通过定义接触进行传递,同时考虑材料非线性对结构强度的影响,得到车钩在装配状态下的载荷应力分布状态,并将钩舌数值计算应变区与实际服役状态中上、下牵引台接触部位的磨耗、压痕进行对比,验证了模型的可靠性以及强度关系的准确性,为更加准确地评估结构的服役状态提供重要参考。

基金项目:神华重载铁路货车状态检修成套技术研究及装备研制项目(SHGF-17-56)

第一作者简介:李朋(1985—),男,河北定州人,助理工程师,本科,研究方向为铁道车辆。

1 车钩整体装配与受力分析

由于车钩装配关系和接触关系的复杂性,通常将车钩零部件作为分离体对其边界施加载荷和位移进行独立分析,进而会导致数值仿真模型与实际接触状态误差较大,不能合理地模拟出实际结构内部载荷传递状态以及准确的载荷应力强度映射关系。采用车钩整体装配体与接触分析方法可有效解决单个部件分析而引入过度约束的问题,即将车钩所有受力部件进行建模并完成精准装配,然后对装配体接触部位间建立相应的接触模型,以更加真实地模拟车钩零部件间的接触位置及受力面积并进行自动调整,有效提高数值模型与实际服役状态的吻合程度。

车钩缓冲装置由车钩(钩体、钩舌)、钩尾框、缓冲器、前从板、转动套、钩尾销等零部件组成^[9],安装于车体底架两端的牵引梁内,各部件连接关系如图1所示。

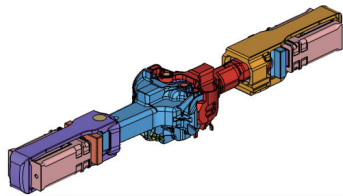


图1 车钩缓冲装置

当车钩受拉力时的传递顺序为:钩头—钩尾销—钩尾框—缓冲器—从板—从板座—牵引梁,如图2所示。当车钩受压时力的传递顺序为:钩头—钩尾圆弧面—从板—缓冲器—压溃吸能元件—安装底板—牵引梁,如图3所示。

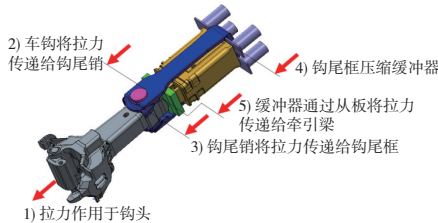


图2 拉载荷力传递关系

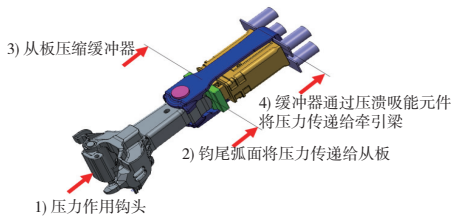


图3 压载荷力传递关系

2 材料参数和验收标准

16型、17型车钩是目前重载货车主型结构,钩体、钩舌材料为铸造E级钢,牌号25MnCrNiMoA,钩尾框为锻造E级钢,牌号ZG25MnCrNiMo^[10]。根据GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验—第1部分:室温试验方法》,在

CSS-2220电子万能试验机上测定了两种材料的各项基本力学性能,如表1所示。TB/T 456—2008《机车车辆用车钩、钩尾框》规定了16型、17型车钩系统的强度验收标准,如表2所示。

表1 E级钢的力学性能

材料	规定塑性延伸强度 $\sigma_{p0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_b/MPa	断后伸长率 $\delta/\%$	断面收缩率 $\Phi/\%$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
铸造	757	854	12	34	214 000	0.28
锻造	885	976	19	64	211 670	0.28

表2 16型、17型车钩系统静强度指标

零部件	最大永久变形/mm		最小破坏载荷/kN	最小极限载荷/kN
	1 780 kN	3 115 kN		
钩体	0.8	—	4 005	—
钩舌	—	0.8	3 430	—
钩尾框	—	0.8(3 430 kN)	—	4 005

铸造E级钢的应力应变曲线为非线性,从结构本体取样进行试验,获取车钩材料的应力应变曲线,采用多线性随动强化本构模型拟合得到结构应力应变参数曲线如图4所示。

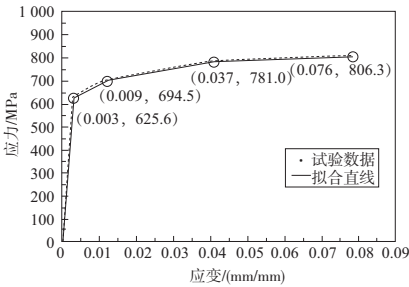


图4 铸造E级钢应力应变曲线

3 车钩装配体有限元模型

3.1 单元网格离散

基于16型、17型车钩系统装配体建立了详细的车钩有限元模型,采用高阶四面体单元离散,单元类型为SOLIDS187,单元尺寸为4 mm,总单元数为3 026 981,有限元模型如图5所示。

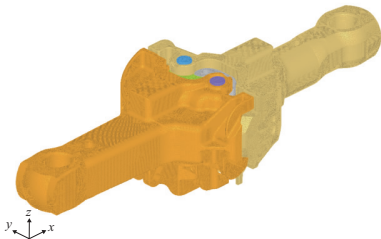


图5 16型、17型车钩有限元模型

3.2 接触定义

完整的车钩装配体接触关系主要包括:钩体牵引台-钩舌牵引台、钩舌-钩舌S面、钩舌销孔-钩舌销、钩耳孔-钩舌销接触^[9]。目标面采用 TARGE170 接触单元,接触面采用 CONTA174 单元,接触类型为标准面接触,即允许接触面分离、闭合和产生相对滑动,滑动摩擦系数取 0.3。忽略初始穿透并保留初始间隙,计算过程允许自动更新接触刚度以提高计算收敛性,接触部位关联单元如图 6 所示。

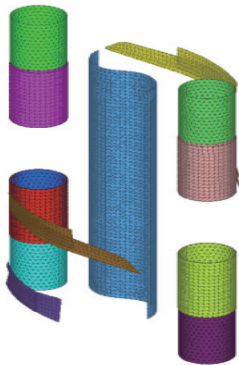


图 6 接触单元

3.3 载荷和边界条件的设定

已知车钩服役过程中主要薄弱部位为钩舌、钩体上、下牵引台部位,且主要由拉伸载荷引起疲劳裂纹失效,因此主要研究车钩受到拉伸载荷作用下的受力状态^[11-12]。其边界条件设定为:车钩一端尾销孔处约束三方向位移,另一端尾销孔处施加 600 kN、800 kN、1 000 kN、1 200 kN 的拉伸载荷,钩舌与锁铁接触部位施加横向约束,边界条件如图 7 所示。

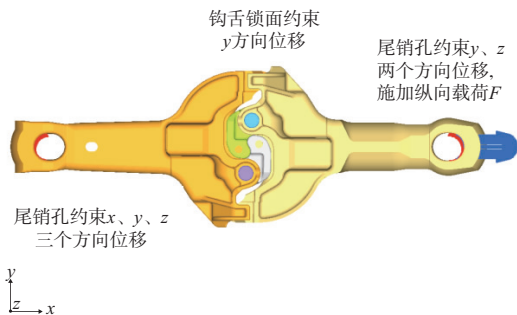


图 7 载荷边界条件

3.4 数值计算结果

基于弹塑性非线性模型计算得到四级拉伸载荷下钩舌、钩体牵引台根部最大节点平均等效应力和最大节点平均 P1 应力如表 3-表 6 所示。由于篇幅限制,仅给出了钩体和钩舌在 800 kN 载荷作用下的应力分布云图,如图 8-图 11 所示。

表 3 600 kN 拉伸载荷应力结果

部位	等效应力/MPa	P1 应力/MPa
16 型钩体上牵引台根部	537.52	612.81
16 型钩体下牵引台根部	501.08	438.59
16H 钩舌(16)上牵引台根部	594.25	647.54
16H 钩舌(16)下牵引台根部	484.29	555.89
17 型钩体上牵引台根部	576.08	606.77
17 型钩体下牵引台根部	558.84	446.31
16H 钩舌(17)上牵引台根部	573.31	649.35
16H 钩舌(17)下牵引台根部	493.87	566.27

表 4 800 kN 拉伸载荷应力结果

部位	等效应力/MPa	P1 应力/MPa
16 型钩体上牵引台根部	660.68	751.46
16 型钩体下牵引台根部	601.36	578.81
16H 钩舌(16)上牵引台根部	672.31	770.49
16H 钩舌(16)下牵引台根部	608.25	706.18
17 型钩体上牵引台根部	672.31	719.14
17 型钩体下牵引台根部	624.86	588.81
16H 钩舌(17)上牵引台根部	668.47	787.38
16H 钩舌(17)下牵引台根部	613.17	715.52

表 5 1 000 kN 拉伸载荷应力结果

部位	等效应力/MPa	P1 应力/MPa
16 型钩体上牵引台根部	715.88	827.69
16 型钩体下牵引台根部	652.69	699.15
16H 钩舌(16)上牵引台根部	714.67	841.71
16H 钩舌(16)下牵引台根部	678.87	816.70
17 型钩体上牵引台根部	710.36	765.95
17 型钩体下牵引台根部	637.06	705.73
16H 钩舌(17)上牵引台根部	715.22	862.22
16H 钩舌(17)下牵引台根部	683.45	822.23

表 6 1 200 kN 拉伸载荷应力结果

部位	等效应力/MPa	P1 应力/MPa
16 型钩体上牵引台根部	732.89	866.18
16 型钩体下牵引台根部	687.21	765.50
16H 钩舌(16)上牵引台根部	729.24	883.72
16H 钩舌(16)下牵引台根部	714.06	879.51
17 型钩体上牵引台根部	744.78	806.32
17 型钩体下牵引台根部	680.22	773.95
16H 钩舌(17)上牵引台根部	729.67	895.66
16H 钩舌(17)下牵引台根部	714.68	883.46

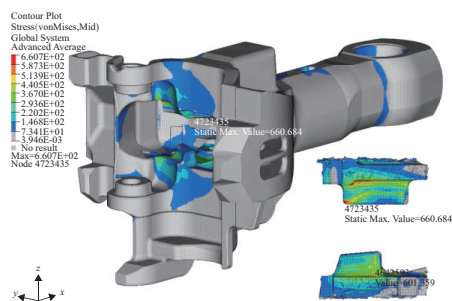


图 8 16 型钩体等效应力云图 (800 kN)

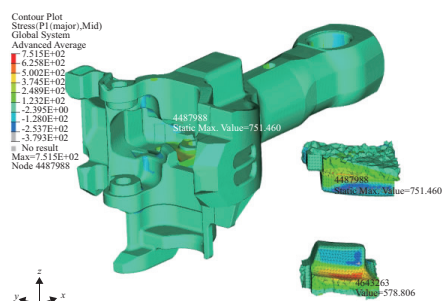


图 9 16 型钩体 P1 应力云图 (800 kN)

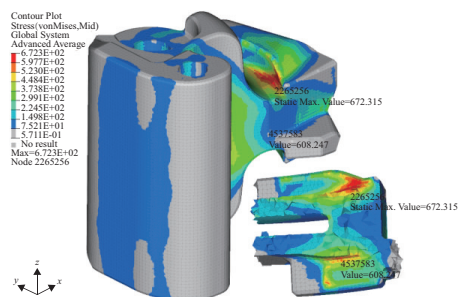


图 10 16 型钩舌等效应力云图 (800 kN)

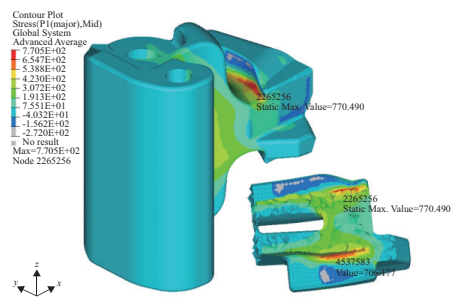


图 11 16H 钩舌 P1 应力云图 (800 kN)

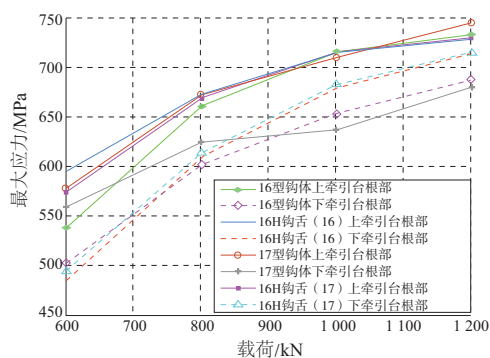


图 12 危险部位等效应力载荷映射曲线

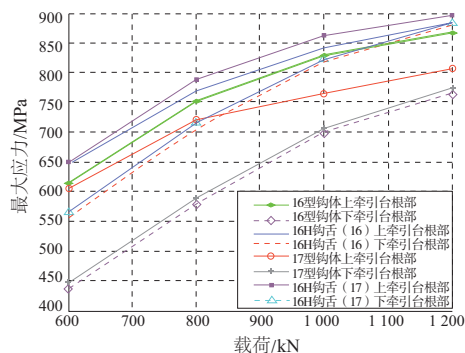
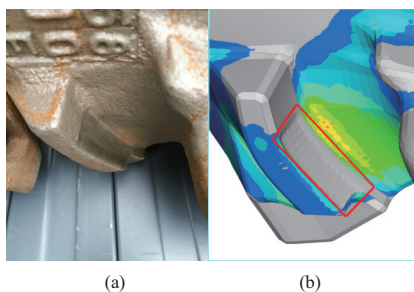
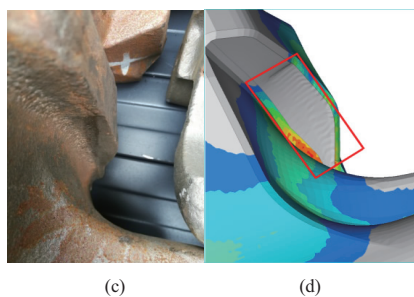


图 13 危险部位最大主应力载荷映射曲线



(a)

(b)



(c)

(d)

图 14 钩舌上、下牵引台接触区对比

将不同拉伸载荷下钩体、钩舌应力集中危险部位的最大节点平均等效应力以及平均最大主应力与边界载荷建立载荷-应力强度映射关系,如图 12、图 13 所示。

进一步将数值模拟得到的钩舌应变区与实际服役条件下钩舌受压接触磨损、压痕部位状态进行对比,二者接触区吻合度较高,表明基于整体装配、接触非线性以及材料非线性三者相结合分析方法建立的数值有限元模型与实际更为接近,接触状态对比细节如图 14 所示。

将实际服役条件下伤损钩舌的上、下牵引台部位进行荧光磁粉探伤,探伤结果如图 15 所示。钩舌上、下牵引台应力集中产生裂纹的区域与有限元数值模型计算结果吻合度较高。钩体下牵引台根部倒角大,而上牵引台根部存在结构非圆滑过渡,即应力集中区;钩体上、下牵引台承载接触面趋同,但上牵引台比下牵引台略高,根部弯矩大,导致上牵引台根部应力略大于下牵引台根部,应力分布细节如图 16 所示。

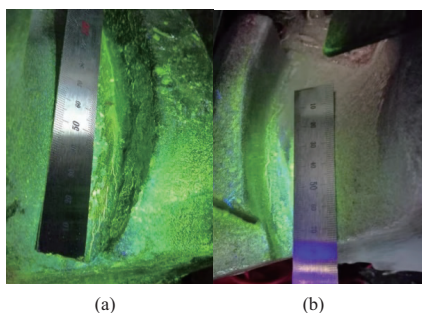


图 15 钩舌上、下牵引台裂纹探伤结果

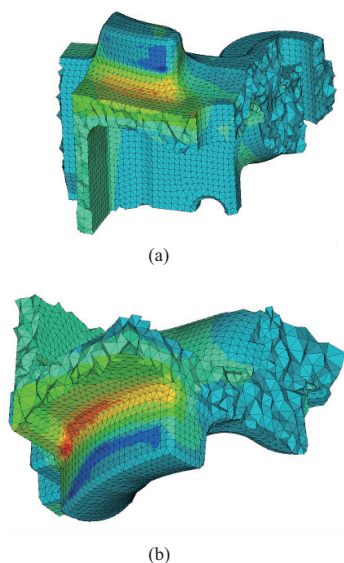


图 16 钩体上、下牵引台结构和根部应力对比

4 结语

1) 基于车钩装配体有限元分析法,通过接触单元来模拟车钩部件之间的相互作用,可以合理地解决各零部件之间的相互影响,避免过度约束。

2) 通过现场实验对钩舌上、下牵引台裂纹进行探伤,发现裂纹出现的位置与有限元计算应力较大的区域吻合,验证了模型的可靠性以及强度关系的准确性。

3) 采用接触非线性、材料非线性的车钩整体装配有限元模型,能够更加真实地反映出车钩在实际受力状况下局部接近屈服应力而产生塑性变形的服役状态。

4) 通过对钩舌和钩体牵引台结构和数值计算应力云图的分析,发现钩舌和钩体上、下牵引台根部过渡圆角较小且存在附加弯矩,导致局部应力较大,应适当增加牵引台根部的过渡圆角,提高表面质量,可有效提高服役寿命。

参考文献:

- [1] 张福田,王曦,邵文东. 铁路货车车钩的纵向载荷谱特性[J]. 北京交通大学学报,2017,41(1):68-73.
- [2] 豆辉,武福,段振枢,等. 基于 UM 的重载列车纵向冲动仿真分析[J]. 兰州交通大学学报,2020,39(1):88-94.
- [3] 金希礼,曾燕军,周坤,等. 重载机车与 102 车钩系统的相互作用关系[J]. 科学通报,2019,64(25):2617-2624.
- [4] 丛盛国,崔英俊. 我国重载铁路货车车钩检修模式探讨[J]. 铁道车辆,2020,58(6):6,32-33.
- [5] 李晨曦,商跃进,王红,等. 重载货车车钩钩体的强度校核及抗疲劳设计[J]. 机械研究与应用,2018,31(2):57-60,68.
- [6] 于兆华. 17 号车钩、钩尾框疲劳寿命及可靠性分析[D]. 北京:北京交通大学,2009.
- [7] 管艳华,田武岭,张建武,等. 大秦线重载钩舌疲劳寿命有限元模拟分析[J]. 机械设计与研究,2012,28(3):122-123.
- [8] 苗伟明,孙丽萍. 基于装配体的 13 号车钩有限元分析[J]. 大连交通大学学报,2007(4):37-41.
- [9] 杨海宾. 铁路重载货车车钩剩余寿命研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.
- [10] 张成程. 锻造、铸造 E 级钢的疲劳断裂试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2014.
- [11] 苗伟明. 13 号车钩故障分析及对策研究[D]. 大连:大连交通大学,2008.
- [12] 罗刚. 17 型车钩装配体有限元分析[J]. 装备制造技术,2015(9):25-28.

收稿日期:2020-06-16

(上接第 89 页)

参考文献:

- [1] 孙龙. 电液伺服六自由度摇摆台性能及控制策略研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2017.
- [2] MOOG Company. Moog aero test controller training course[Z]. [S.l.: s.n.], 2008.
- [3] 姚石磊. 六自由度运动平台控制系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- [4] 张玉姝. 气压伺服式六自由度运动平台控制系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [5] 王英波,黄其涛,郑书涛,等. Simulink 和 SimMechanics 环境下并联机器人动力学建模与分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2012,33(1):100-105.

- [6] 姚程. 六自由度运动平台的模糊控制策略研究[D]. 长春:中国科学院大学,2015.
- [7] 黄晓敏. 基于 Matlab 的六自由度平台研究[D]. 广州:华南理工大学,2013.
- [8] 须颖,徐福红,邵萌. Stewart 平台的 SimMechanics 仿真[J]. 沈阳建筑大学学报,2017,33(5):906-913.
- [9] 吴伟,何鹏飞. 基于 SimMechanics 抽油机运动仿真方法的研究分析[J]. 机械研究与应用,2020,33(1):50-57.
- [10] 何文清,麦云飞. 基于神经网络 PID 整定的电液位置伺服系统[J]. 软件导刊,2020,19(3):177-181.
- [11] 杨靖一,黄山云,丁祝顺,等. 基于模糊 PID 算法的六自由度并联机构控制研究[J]. 导航与控制,2017,16(5):33-39.

收稿日期:2020-06-01