

卷钢座架强度的理论计算与试验结果的对比

韩立东

(西南交通大学, 成都 611756)

摘要: **目的** 研究铁路货物装载加固座架的强度估算方法。**方法** 进行了卷钢座架的静态和冲击动强度试验, 测量了静态和冲击过程中座架危险截面的应力。同时, 依据《铁路货物装载加固规则》的有关规定, 计算了卷钢座架所受的作用力, 利用有限元方法计算了在此力作用下座架的强度, 对比了卷钢座架静态和冲击试验测量的应力和理论计算的应力。**结果** 试验值与理论计算值的误差约为 10%, 理论计算的应力值具有较高的精度。**结论** 在缺乏试验条件的场合下, 可以用理论的方法来估算座架的强度。

关键词: 铁路运输; 装载加固; 冲击试验; 纵向惯性力

中图分类号: TB485.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)07-0147-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.07.020

Comparative Study on Theoretical Calculation and Test Results of the Strength of a Reinforced Frame

HAN Li-dong

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the method for evaluating the strength of a railway cargo loading and reinforcement device (CLRD). Static and impact strength tests were carried out on a reinforced frame to measure the stress on the dangerous section of a reinforced frame during static and dynamic impact. The maximum force acting on the device was calculated according to the relevant provisions of the "Rules for Railway Cargo Loading and Reinforcement"; and the strength of the device under the force was evaluated with the finite element method. At the same time, the stress obtained by static and shock dynamic tests and the stress by theoretical calculation were compared. The error between the tested value and the theoretical calculation result was about 10%. The value obtained from theoretical calculation had high precision. In the absence of test conditions, the simulation can be used to evaluate the strength of the CLRD.

KEY WORDS: railway transportation; loading reinforcement; impact test; longitudinal inertia force

我国幅员辽阔, 经济发展迅速, 货物运输繁忙, 其中卷钢的运输量非常大。卷钢的质量和尺寸的变化都比较大, 单卷质量从 5~33 t 不等, 卷径从 $\varphi 800 \sim 2100$ mm 不等^[1-3]。铁路部门普遍采用凹型草支垫和钢丝绳加固的方式对卷钢进行加固, 这种加固方式存在的问题和安全隐患也不少, 主要表现在以下几个方面^[4-7]: 加固材料使用不当或者加固材料质量不良,

造成运输途中卷钢窜滚和车辆偏重; 阻燃措施不到位, 造成外来火源引起稻草掩挡等草质加固材料着火, 从而使稻草掩挡加固功能失效; 装载过程中不易对中, 容易造成车辆偏载; 加固费用高; 加固、拆卸时间长; 装载量达不到车辆允许的最大载重量, 普遍存在亏吨运输现象。近年来, 利用钢制座架加固卷钢的方法得到了迅速发展。钢制座架直接刚性加固到承

收稿日期: 2019-08-21

作者简介: 韩立东 (1963—), 男, 工程师, 主要研究方向为危险品包装、铁路运输等。

运车辆上,卷钢则直接加固到座架上,卷钢不需要捆绑,钢制座架可以重复使用,因此不仅容易保证运输安全,而且加固材料费用低、加固时间短、效率高^[8—11]。

在铁路货物运输过程中,车辆主要通过驼峰溜放进行编组。在编组连挂时车辆会产生冲撞,此时货物所承受的载荷最大,钢制座架在该工况下必须满足装载加固的强度要求。在设计钢制座架的时候,一般按照《铁路货物装载加固规则》^[12]的有关规定确定座架的受力,然后进行强度校核。文中探讨卷钢座架冲击试验测量的强度与理论计算强度之间的差距,为今后铁路货物装载加固座架强度估算提供参考依据^[13—16]。

1 卷钢装载加固方案和实际装载

使用 60, 61, 70 t 通用敞车,在车辆转向架上对称放置 1 个卷钢集装座架,座架底座凹型卡槽卡住敞车侧墙加强斜铁。卷钢的卷径为 $\varphi 800 \sim 2100$ mm、卷径与卷宽比不大于 2.3。当板宽 > 1400 mm 时,单卷质量 ≤ 33.735 t;当 $900 \text{ mm} \leq \text{板宽} \leq 1400$ mm 时,单卷质量 ≤ 29.15 t。

根据受力分析,座架装载板宽 900~1400 mm 的卷钢时,座架的 V 形槽单侧 4 根斜撑中仅中间 2 根斜撑受力,此时座架的应力最大。选此工况进行座架强度的理论分析和试验验证。座架实际装载见图 1,其中卷钢 1、钢卷 2、钢卷 3 的质量分别为 $Q_1=29.18$ t, $Q_2=10.22$ t, $Q_3=22.455$ t。座架单件质量 $Q_z=1.275$ t,敞车 C_{70E} 的质量 $Q_c=24$ t。卷钢 1 的板宽为 1300 mm,卷径为 1920 mm。

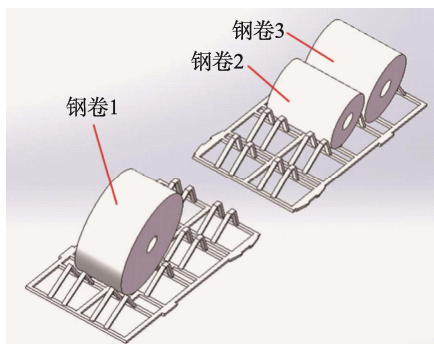


图 1 卷钢座架实际装载示意

Fig.1 Schematic diagram of cargo loadings on the reinforced frame

2 静强度分析和试验测量

2.1 作用于座架上的静态作用力

座架装载卷钢 Q_1 时的静态作用力分析见图 2,

研究卷钢和座架之间的静态作用力,可不考虑卷钢和座架之间摩擦力的影响。由图 2 可以得出:

$$N_1 = N_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} Q_1 = 202.2017 \text{ kN}$$

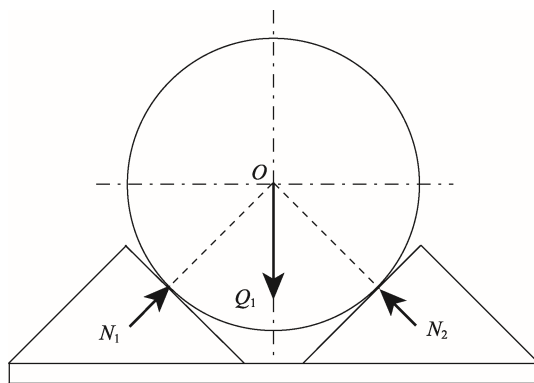


图 2 卷钢作用在座架 V 形槽的力

Fig.2 Forces acting on the V-groove of the reinforced frame

2.2 座架静强度理论分析与试验测量

应用有限元软件 Abaqus 计算座架同时受到法力 N_1 和 N_2 作用时的应力。首先,根据座架的设计尺寸,用三维实体建模软件 SolidWorks 建立座架的全尺寸实体模型,然后将实体模型输入到有限元软件 Abaqus,用 Abaqus-CAE 软件划分座架的有限元网格,见图 3,整个模型有约 100 万个节点、79 万个六面体单元组成。根据座架的材料型号,将座架各种材料的弹性模量、泊松比等数据输入到 Abaqus 模型里面,最后根据实际情况设置座架的受力和边界条件。卷钢作用在 V 形槽的力 N_1 和 N_2 就是座架的受力,在座架底面设置垂直支撑约束,在座架的底架侧梁上的卡槽和挡块处分别设置纵向和横向约束。在输入材料参数、座架受力和约束边界条件后,就可以计算座架的应力分布,计算结果见图 4。根据图 4 的应力分布,在座架应力比较大的地方都布置了应变片,见图 5。进行座架静强度试验时,相同工况的试验连续做 3 次,以 3 次试验的应力测量结果的平均值作为测量值。计算应力和测量应力的数值以及误差见表 1,可见在座架的所有测点中,测点 7 的应力最大,其值为 57.89 MPa,计算值与测量值之间的相对误差为 3.02%。由表 1 还可以看出,测点 2, 5, 6, 13, 14, 15, 18 的测量应力都比较大,其对应的计算应力也比较大。由此可见,座架有限元理论计算得出的最大应力值与试验测量的最大应力值位置对应,数值接近。需要说明的是,测点 8 的测量值和理论计算值之间的相对误差达到 21.81%,原因是该测点的测量值比较小,容易受到外部因素的干扰。

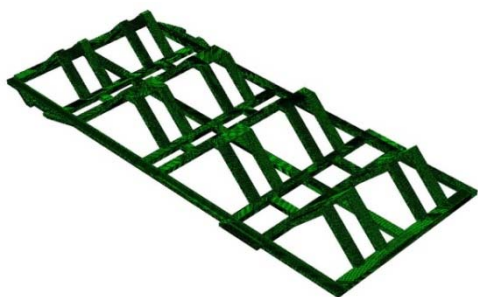


图 3 座架的有限元模型
Fig.3 Finite element model of the reinforced frame

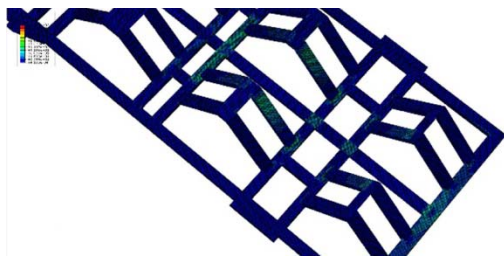


图 4 座架的静态应力分布
Fig.4 Static stress distribution of the reinforced frame

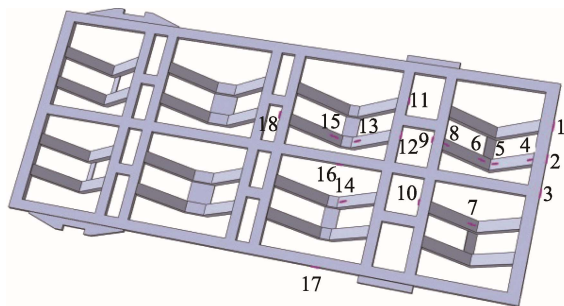


图 5 座架的应力测点布置
Fig.5 Stress measurement points of the reinforced frame

表 1 各个测点的静态应力和计算应力

Tab.1 Static stress and calculation stress of each measurement point

测点序号	测量应力/MPa	计算应力/MPa	相对误差/%
1	13.10	8.82	9.77
2	55.28	53.40	3.40
3	45.23	42.40	6.26
4	- 34.23	- 30.40	11.19
5	50.52	53.45	5.80
6	53.89	57.23	6.20
7	57.89	56.14	3.02
8	11.74	9.18	21.81
9	8.14	7.90	2.95
10	- 3.91	- 4.30	9.97
11	- 7.14	- 6.74	5.60
12	- 14.63	- 12.83	12.30
13	51.47	56.78	10.32
14	54.88	53.28	2.92
15	52.23	54.83	4.98
16	15.14	13.79	8.92
17	19.47	17.72	8.99
18	53.32	54.49	2.19

3 冲击动强度理论分析和试验测量

3.1 运输过程中作用于货物上的纵向惯性力

钢制座架正常使用时,座架底座凹型卡槽卡住敞车侧墙的加强斜铁,横向和纵向都抵紧敞车侧墙上的加强斜铁,用刚性加固方式将座架和货物加固到敞车侧墙的加固斜铁上,防止座架和货物在车辆纵向和横向方向产生移动。根据《铁路货物装载加固规则》的有关规定,运输过程中作用于货物的单位质量纵向惯性力为 t_0 , $t_0=26.69 - 0.13Q_{总}=15.1974 \text{ kN/t}$ 。其中 $Q_{总}$ 是装载后重车总质量, $Q_{总}=Q_C+2Q_Z+Q_1+Q_2+Q_3=88.405 \text{ t}$ 。作用在卷钢 Q_1 上的惯性力 $T=Q_1t_0=443.46 \text{ kN}$ 。

卷钢在冲击试验时受到的作用力见图 6,座架的 V 形槽限制了卷钢在车辆纵向的运动,但 V 形槽无法限制卷钢在垂直方向的运动,在冲击试验时卷钢有一个垂向跳起的动作,就是这个原因所致。卷钢作用在座架 V 形槽上的法向力为 N_3 , $N_3 = \frac{T}{\cos \frac{\pi}{4}} = 627.15 \text{ kN}$,这个力均匀作用于座架 V 形槽的 2 根斜撑上。

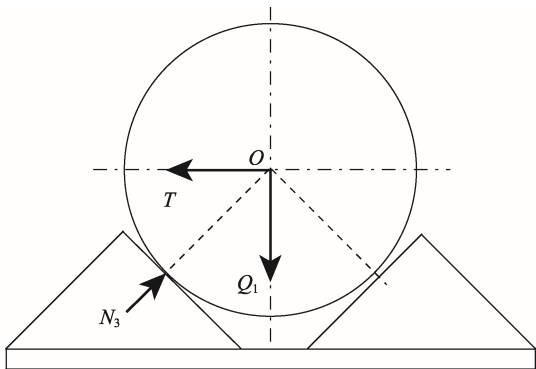


图 6 冲击时卷钢作用在座架 V 形槽的力
Fig.6 Forces acting on the V-groove of the reinforced frame in impact test

3.2 座架冲击动强度计算

车辆溜放编组冲击连挂时卷钢作用在座架 V 形槽的法向力具有冲击特性,为了简化计算,在货物装载加固计算中都把该力当作稳态力来看待。座架在冲击作用力 N_3 作用下的应力分布见图 7,测点 1—18 的动应力计算结果分别为: 80.24, 243.43, 223.58, 36.60, 278.17, 297.31, 264.14, 84.22, 114.82, 5.45, 12.33, 32.87, 21.86, 22.08, 22.93, 60.11, 83.71, 13.83 MPa,可以看出测点 2, 5, 6, 7 的应力比较大,最大值发生在测点 6 上,为 297.31 MPa。

3.3 座架冲击试验及动应力测量

选用一辆装有主型缓冲器、均衡满载货物(煤炭)的 C_{70EH} 型 70 t 敞车作为冲击车,其车体、转向架及

车钩缓冲装置的技术状态良好。选取一辆 C_{70EH} 型敞车为装载加固试验车,卷钢根据装载加固方案装载在试验车上。

总共进行了 15 次冲击试验,冲击速度为:3.4, 4.8, 6.1, 6.5, 6.9, 6.9, 7.5, 7.8, 8.3, 8.3, 8.7, 8.7, 8.9, 9.3 km/h。测点 6 的冲击应力动态变化曲线见图 8,冲击试验测量的测点 1—18 的最大动态应力分别为:83.64, 245.14, 289.99, -129.99, 398.5, 469.47, 451.80, 248.23, 68.42, -35.64, 55.62, 70.25, 41.61, -47.59, 104.03, 81.78, 83.55, 106.65, 对应的车辆冲击速度均为 9.3 km/h, 可以看到,测点 6 的动态应力最大。将测点 6 在不同冲击速度下的动态应力进行非线性回归分析,结果见图 9,

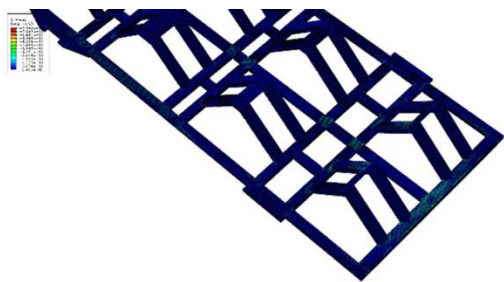


图 7 座架的动应力分布

Fig.7 Dynamic stress distribution of the reinforced frame

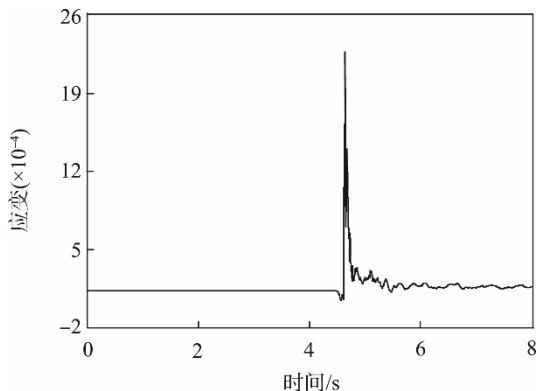


图 8 冲击应变动态变化曲线

Fig.8 Variation of dynamic strain with time in impact test

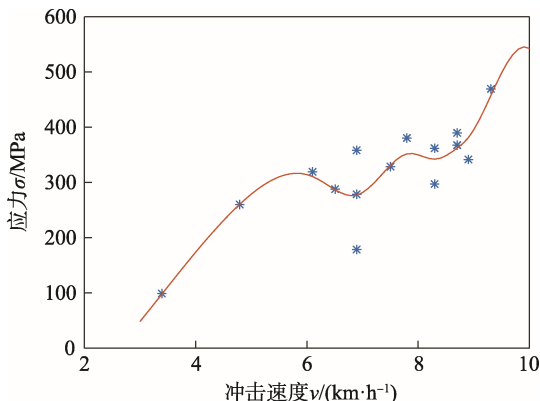


图 9 测点 6 测量值的线性回归分析

Fig.9 Linear regression analysis of the dynamic stress at measurement point 6

可以看出,当冲击速度 $v=6$ km/h 时,由线性回归得出测点 6 的冲击应力为 314.32 MPa。由于《铁路货物装载加固规则》中纵向惯性力的取值,是根据铁路列车提速后作用于货物上的惯性力试验值通过线性回归分析得出的经验数值,对应的冲击速为 $v=6$ km/h,因此这里也以回归到冲击速度 $v=6$ km/h 时的应力值进行比较。测点 6 的计算应力为 297.31 MPa,测量值和理论计算值的相对误差为 5.41%。

4 结语

对卷钢运输座架进行了静态、动态强度的有限元分析和试验测量,经过对座架强度计算结果和测量结果的对比分析,得出以下结论:座架的有限元强度分析可以获得座架在货物装载加固力作用下的应力分布,可以找到座架应力比较大的危险部位,用于确定试验时的测点位置;座架有限元计算的静态应力值与试验实测的应力值比较接近,测量的最大应力值与该点计算的应力值的相对误差大约为 10%;座架受到纵向惯性力作用下的有限元强度计算值与冲击试验测量的动态应力最大值出现位置基本一致,测量的最大应力值与该点计算的应力值的相对误差约为 5.5%;座架受《铁路货物装载加固规则》规定的惯性力作用时的理论计算应力比较接近冲击试验测量的动应力(相对误差小于 10%),因此理论计算应力可以作为座架在设计和试制阶段的强度估算依据。

参考文献:

- [1] 辛海琳,徐海涛,朱丽.三卷卷钢装载加固座架的研制[J].机械工程师,2016(3):185—186.
XIN Hai-lin, XU Hai-tao, ZHU Li. Development of a Loading and Reinforcement Device for Embarking Three Steel Coils[J]. Mechanical Engineering, 2016(3): 185—186.
- [2] 徐海涛,侯文江,辛海琳.卷钢座架在铁路平车上的应用[J].铁道货运,2015,33(4):57—60.
XU Hai-tao, HOU Wen-jiang, XIN Hai-lin. Application of a Loading and Reinforcement Device for Embarking Steel Coils in Railway Flat-car Transportations[J]. Railway Freight Transportations, 2015, 33(4): 57—60.
- [3] 岳森根.钢座架卧装卷钢运输方式的运用与建议[J].上海铁道科技,2014(1):20—21.
YUE Sen-gen. Application and Suggestion for a Loading and Reinforcement Device for Embarking Horizontal Steel Coils[J]. Shanghai Railway Technology, 2014(1): 20—21.
- [4] 厉劲松.铁路使用钢座架运输卷钢的实践与思考[J].铁道货运,2012,30(4):34—38.
LI Jin-song. Application and Suggestion for a Loading and Reinforcement Device for Embarking Steel Coils

- in Railway Transportations[J]. Railway Freight Transportations, 2012, 30(4): 34—38.
- [5] 石磊. 卷钢铁路运输安全对策分析[J]. 中国铁路, 2011(1): 72—75.
- SHI Lei. Safety Measures for Rolled Steel Transportation[J]. China Railway, 2011(1): 72—75.
- [6] 龙维洋. 卧装运输座架在攀钢冷轧原料运输中的应用[J]. 冶金管理, 2004(6): 51—52.
- LONG Wei-yang. Application of Loading and Reinforcement Device for Embarking Horizontal Steel Coils in Railway Transportations of Cold Rolling Materials in Panzhihua Iron and Steel Group Co, Ltd[J]. Metallurgy Management, 2004(6): 51—52.
- [7] 林一衡. 性能优越的钢卷运输座架[J]. 交通与运输, 1995(3): 40.
- LIN Yi-heng. Study on an Excellent Loading and Reinforcement Device for Embarking Steel Coils[J]. Traffic and Transportation, 1995(3): 40.
- [8] 马玉坤. 75 m 长钢轨采用普通平车运输方案研究[J]. 铁道运输与经济, 2016, 38(5): 84—90.
- MA Yu-kun. Transport Program of 75 m Long Rails by Ordinary Flat Car[J]. Railway Transportation and Economy, 2016, 38(5): 84—90.
- [9] 杨广全, 马玉坤. 普通平车运输 100 m 长钢轨的车辆承重仿真研究[J]. 铁道货运, 2012, 30(3): 37—42.
- YANG Guang-quan, MA Yu-kun. Simulation Study on Loads Acting on Ordinary Flat Car in Transportation of 100 m Long Rails[J]. Railway Freight Transportations, 2012, 30(3): 37—42.
- [10] 刘飞, 马玉坤, 张长青, 等. 50 m 道岔轨运输装载加固装置研究[J]. 铁道货运, 2010, 28(10): 41—44.
- LIU Fei, MA Yu-kun, ZHANG Chang-qing, et al. A Loading and Reinforcement Device for Switch Rail Transportations[J]. Railway Freight Transportations, 2010, 28(10): 41—44.
- [11] 殷涛, 丁文赢. 长钢轨普通平车运输装载加固方案试验与测试[J]. 铁道货运, 2010, 28(9): 44—47.
- YAN Tao, DING Wen-ying. Test and Measurement for Transport Program of Long Rails by Ordinary Flat Cars[J]. Railway Freight Transportations, 2010, 28(9): 44—47.
- [12] 中国铁路总公司. 铁路货物装载加固规则: 铁总运[2015]296号[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- China Railway General CO., Ltd. Rules for Railway Cargo Loading and Reinforcement: TIE ZONG YUN (2015) No.296[M]. Beijing: China Railway Press, 2015.
- [13] 杨永伟, 张静, 王清晨. 弹药包装箱铁路运输试验问题及对策[J]. 包装工程, 2019, 40(7): 246—249.
- YANG Yong-wei, ZHANG Jing, WANG Qing-chen. Problems and Countermeasures of Railway Transport Test for Ammunition Packing Boxes[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(7): 246—249.
- [14] 潘驰, 邸斌, 郭志达. 铁路货运箱式托盘的标准选择[J]. 包装工程, 2016, 37(9): 49—53.
- PAN Chi, DI Bin, GUO Zhi-da. Standard Choice for Railway Freight Box Pallet[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(9): 49—53.
- [15] 王春生. 铁路危险货物集装箱运输中的包装问题[J]. 包装工程, 2007, 28(2): 96—97.
- WANG Chun-sheng. Packaging Problems of Dangerous Goods Container in Railroad Transportation[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(2): 96—97.
- [16] 徐伟民, 曾山. 铁路运输包装动态仿真的研究[J]. 包装工程, 2004, 25(5): 149—150.
- XU Wei-min, ZENG Shan. Dynamic Simulation of Railroad Transport Package[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(5): 149—150.