

缓冲与隔振

基于 SolidWorks 和 ANSYS 的铁路卷状货物横向限位 钢制座架设计

袁舜¹, 潘帅², 卢泓坤², 田志强¹, 袁霞¹, 邹美思²

(1. 兰州交通大学 铁道部货物装载加固研究与咨询中心, 兰州 730070; 2. 九江职业技术学院,
江西 九江 332007)

摘要: **目的** 针对卷状货物在铁路运输中常发生横向位移, 危及行车安全等问题, 设计一款安全可靠、适用车型广、结构强度高、循环使用、叠装回送、适合多种规格货物并带可伸缩横向限位装置的卷状货物运输钢制座架。**方法** 首先依据《铁路货物装载加固规则》, 计算发生在卷状货物的各种力, 制定装载加固方案; 再依据《钢结构设计规范》及敞车、平集两用车内部结构, 确定钢制座架材料与规格; 然后通过 SolidWorks 对钢制座架进行三维建模, 利用 ANSYS 对模型进行有限元分析。**结果** 分析得出, 钢制座架受垂向力、纵向力, 最薄弱部分应力分别为 172.1、244.39 MPa, 位移形变量分别为 0.23、0.19 mm, 均符合规定; 横向限位装置在最不利载荷作用下, 齿块剪应力为 7.11 MPa, 横向档杆最大等效应力 28.66 MPa, 最大变形量 0.03 mm, 均符合规定。**结论** 铁路卷状货物横向限位钢制座架安全可靠, 能有效防止卷状货物横向位移, 降低装载加固成本, 对当下卷状货物运输发展有较大作用。

关键词: 铁路; 卷状货物; 横向限位钢制座架; 装载加固方案; SolidWorks; ANSYS

中图分类号: TB482.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)21-0130-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.21.017

Design of Steel Seat Frame for Railway Coiled Cargo Transportation Based on SolidWorks and ANSYS

YUAN Shun¹, PAN Shuai², LU Hong-kun², TIAN Zhi-qiang¹, YUAN Xia¹, ZOU Mei-si²

(1. Loading and Reinforcement Center of School of Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Jiujiang Vocational and Technical College, Jiangxi Jiujiang 332007, China)

ABSTRACT: The work aims to design a safe and reliable, suitable for a wide range of models, high structural strength, reusable, recyclable and stackable coiled cargo transport steel seat with retractable lateral stops, so as to solve the problems of coiled cargoes of lateral displacement in railway transportation, resulting in endanger the safety of railway transportation. First, according to the "Railway Cargo Loading and Reinforcement Rules", the various forces occurring in the coiled goods were calculated, and the loading and reinforcement plan was formulated; then, the materials and specifications of steel seat frame were determined according to the "Code for Design of Steel Structures" and the internal structure of the gondola and flat-collector. Then the three-dimensional modeling of the steel seat frame was carried out through SolidWorks, and the finite element analysis of the model was carried out by ANSYS. The result analysis showed that the

收稿日期: 2022-02-09

基金项目: 国家自然科学基金地区基金 (71761023)

作者简介: 袁舜 (1987—), 男, 工程师, 主要研究方向为铁路货物运输装备研究。

steel seat frame was subject to vertical force and longitudinal force, the stress of the weakest part was 172.1 MPa and 244.39 MPa respectively, and the displacement and deformation were 0.23 mm and 0.19 mm respectively, which were all in line with the regulations; Under the action of unfavorable load, the shear stress of the tooth block was 7.11 MPa, the maximum equivalent stress of the transverse bar was 28.66 MPa, and the maximum deformation was 0.03 mm, which were all in compliance with the regulations. The railway coiled cargo lateral limit steel seat frame is safe and reliable, and can effectively prevent the lateral displacement of the coiled cargo, reduce the cost of loading and reinforcement, and play a great role in the development of the current coiled cargo transportation.

KEY WORDS: railway; coiled cargo; lateral limit steel seat frame; loading reinforcement plan; SolidWorks; ANSYS

卷钢、铝卷运输属于铁路大宗货物运输,其特点是圆柱状易滚动、密度大易集重,加固难。铁路在卷状货物中长途运输中占有较高地位^[1-2]。目前,国内铁路运输卷状货物尚无专用车型,通常采用敞车运输,优先采用卧装方式。乌鲁木齐铁路局管内的新疆八一钢铁集团有限责任公司(简称八钢公司)通过铁路发往疆内外的卷状货物运距较长,距离最近省会城市兰州约 2 000 km。卷状货物在运输过程中存在横向位移风险,危及行车安全,见图 1。要运用铁路敞车安全高效、经济环保的运输卷状货物,就要结合敞车内部结构,设计新型钢制座架。

目前,针对卷状货物运输的研究主要集中在钢制座架强度估算、疲劳寿命计算、主体结构优化等方面。韩立东^[3]提出了研究铁路货物装载加固座架的强度估算方法,计算了货物纵向惯性力,进行了卷钢座架静态和冲击动强度试验。刘晓华^[4]通过中铁联合物流股份有限公司 RUL-CI 型卷钢座架,研究了强度有限元分析和检测试验,后对底架架构进行优化。高俊平^[5]选择铁路 A 型卷钢座架为研究对象,比较不同工况下的钢座架强度有限元数据和试验数据,后改进了敞车补强座与阻挡臂接触方式、增设了纵向缓冲装置。方哲^[6]以攀钢集团铁路 TX-C-I 型卷钢座架为研究对象,计算疲劳破坏条件下钢座架的疲劳寿命,后从消除焊缝应力集中、补强薄弱处和母材表面强化处理等方面对钢座架进行改进。

文中在既有技术经验基础上,根据(GB 50017—2017)《钢结构设计规范》^[7]、(TB/T 3550.2—2019)《机车车辆强度设计及试验鉴定规范车体第 2 部分:货车车体》^[8]和铁路敞车、平集两用车内部结构,设计一款安全可靠、适用车型广、结构强度高、循环使用、叠装回送、适合多种规格货物并带可伸缩横向限位装置的卷状货物运输钢制座架(以下简称卷状货物横向限位钢制座架)。按照铁总运[2015]296 号《铁路货物装载加固规则》^[9],计算发生在卷状货物上的各种力,制定经济合理的装载加固方案。采用 SolidWorks 和 ANSYS,对钢制座架进行三维建模和有限元分析,现实意义重大。

1 铁路卷状货物横向限位钢制座架设计方法

1.1 设计原则

卷状货物圆柱状易滚动、密度大易集重,加固难。运输中,线路变化以及车辆运动等,会引起车辆横向运动状态变化^[10],危机行车安全,见图 1。



图 1 铁路卷状货物横向位移事故现场
Fig.1 Accident scene of lateral displacement of railway coiled cargo

卷状货物不能发生纵向滚动、横向窜动等情况,应遵循以下原则。

1) 安全。卷状货物卧装于 V 形驼峰支架凹槽内,防止货物纵向滚动。钢制座架带可伸缩横向限位装置,防止货物横向窜动。

2) 无缝叠放,降低回送成本。钢制座架 V 形驼峰支架、V 形横挡支撑杆连接件的设计,可实现无缝叠放回送,降低回送成本。

3) 适用车型广。敞车、平集两用车均可使用,

不挑车型。

4) 结构简单,轻量化。在保障货物安全运输条件下,减少用材,降低重量。

5) 强度高,可重复循环使用,绿色环保。

1.2 钢制座架结构设计

卷状货物横向限位钢制座架三维立体仿真见图 2,装载卷状货物工况见图 3。钢制座架主要由 3 部分组成,即底架结构、驼峰支架、横向限位装置。

1.3 各结构设计

1.3.1 底架结构设计

底架结构主要包括横梁、纵梁、中梁、侧梁、角件、C 形加固钩、加固环、棘轮紧固器、卡板、定位卡槽等。

1.3.2 驼峰支架结构设计

驼峰支架结构主要包括 V 形驼峰支架、辅助支架、加强筋、橡胶垫等。支架两侧均用工业强力胶粘黏 12 mm 厚的多层夹线耐磨橡胶垫作为缓冲材料。

1.3.3 横挡限位装置结构设计

横挡限位装置主要包括横向档杆、齿条、齿块、T 型螺杆等。横向档杆两侧的矩形横挡牙齿卡在齿条内,防止横挡横向移动。此外,通过 T 型螺杆将横挡固定在横挡支撑杆上。铁路卷状货物横向限位钢制座架自重约 600 kg/架,径宽比小于 2.5,外形尺寸为 2 800 mm×2 200 mm×500 mm,承载货物最大重量不超过 32.5 t,适用卷径 1 100~2 150 mm,适用板宽为 900~2 300 mm。外形尺寸公差标准参考 GB/T 19804—2005《焊接结构的一般公差尺寸和形位公差》^[11]。

1.4 钢制座架使用材料性能

铁路卷状货物横向限位钢制座架主承载结构采用 Q550NQR1 耐候钢。耐候即耐大气腐蚀,耐候钢是介于普通钢和不锈钢间的低合金钢系列,具有优质钢强韧、塑延、成型、焊割、磨蚀、高温、抗疲劳等特性^[12],因此,耐候钢常用于铁道、车辆、桥梁、塔架等长期暴露在外界的钢结构。

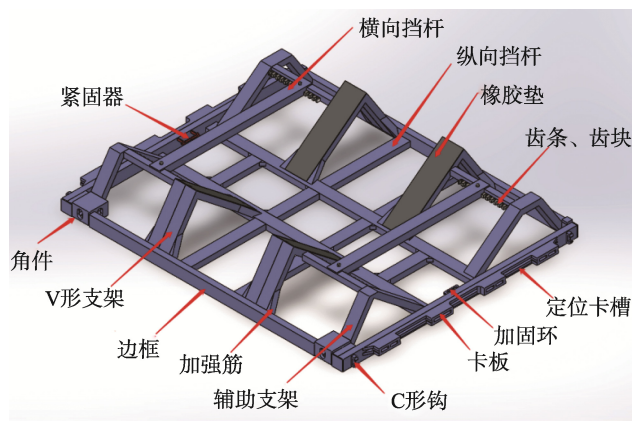


图 2 铁路卷状货物横向限位钢制座架
Fig.2 Lateral limit steel seat frame of railway coiled cargo

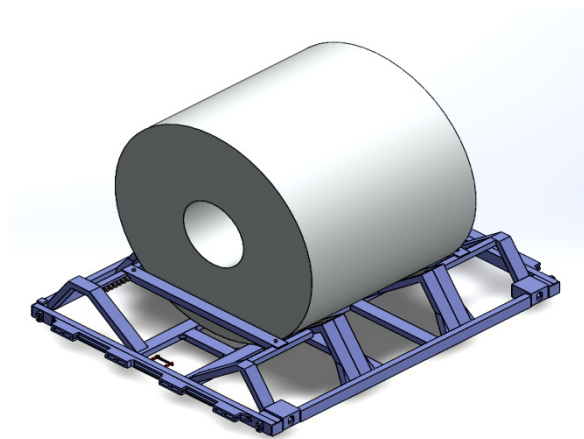


图 3 钢制座架装载卷状货物
Fig.3 Steel seat frame loading coiled cargo

铁路卷状货物横向限位钢制座架相关材料性能参数见表 1。

2 装载加固方案论证

通过 SolidWorks 对铁路 70 t 通用敞车(简称 C₇₀)进行建模,特别对 C₇₀ 的内补强座与内部强座把手,见图 4。其中, C₇₀ 主要技术参数见表 2。

表 1 铁路卷状货物横向限位钢制座架使用材料及强度性能
Tab.1 Materials and strength properties of steel seat frame for lateral limit of railway coiled cargo

材料	部件	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	泊松比
Q550NQR1	主体	206	550	600	0.3
Q345 NQR3	齿条、齿块、横向档杆	206	550	600	0.3
JIS SCW480	角件	206	275	480	0.3

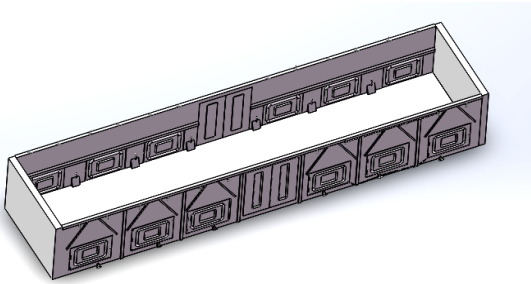


图 4 铁路 70 t 通用敞车
Fig.4 Railway 70 t general gondola car

表 2 C₇₀ 主要技术参数表
Tab.2 Main technical parameters of C₇₀

载质 量/t	自质 量/t	车体内 长/mm	车体内宽/mm		车体内 高/mm
			上侧 板处	连铁处	
70	≤23.8	13 000	2 900	2 792	2 050

2.1 卷状货物装载加固方法

根据铁总运[2015]296 号《铁路货物装载加固规则》,以敞车一车两钢制座架装 2 件为例,进行计算^[9]。使用铁路通用车型 C₇₀。加固装置为铁路卷状货物横向限位钢制座架。货物在敞车中装载加固仿真见图 5。

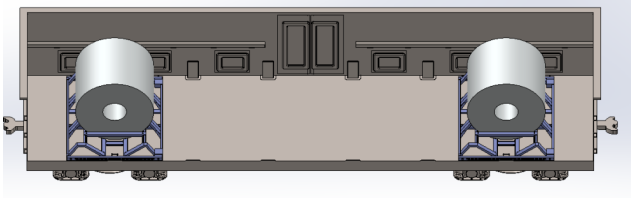


图 5 铁路 70t 通用敞车 2 件卷状货物装车工况
Fig.5 Loading condition of 2 pieces of coiled cargo in railway 70 t general gondola car

2.2 卷状货物装载加固计算

以下计算均严格按照铁总运[2015]296 号《铁路货物装载加固规则》。采用 C₇₀, 主要技术参数见表 2。每个钢制座架装载 1 件卷状货物, 刚性加固。

2.2.1 计算作用于货物上各种力的数值

1) 纵向惯性力:

$$t_0 = 26.69 - 0.13Q_{\text{总}} = 14.496 \text{ kN/t} \quad (1)$$

$$T = t_0 \times Q = 480 \text{ kN} \quad (2)$$

式中: t_0 为单位重量货物的纵向惯性力, kN/t;
 T 为纵向惯性力, kN。

2) 横向惯性力:

$$n_0 = 2.82 + 2.2 \frac{a}{l} = 3.92 \text{ kN/t} \quad (3)$$

$$N = n_0 \times Q = 127.4 \text{ kN} \quad (4)$$

式中: a 为货物重心偏离车辆横中心线的距离, mm; l 为负重车转向架中心距, mm; n_0 为单位质量货物的横向惯性力, kN/t; N 为横向惯性力, kN。

3) 垂直惯性力:

$$q_{\text{垂}} = 3.54 + 3.78 \frac{a}{l} = 5.43 \text{ kN/t} \quad (5)$$

$$Q_{\text{垂}} = q_{\text{垂}} \times Q = 176.48 \text{ kN} \quad (6)$$

式中: $q_{\text{垂}}$ 为单位质量货物的垂直惯性力, kN/t;
 $Q_{\text{垂}}$ 为垂直惯性力, kN。

4) 风力:

$$W = q \times F = 1.51 \text{ kN} \quad (7)$$

式中: W 为风力, kN; q 为侧向计算风压 kN/m²;
 F 为侧向迎风面的投影面积, m²。

5) 纵向摩擦力:

$$F_{\text{纵摩}} = 9.8\mu_1 \times Q = 97.314 \text{ kN} \quad (8)$$

式中: μ_1 为摩擦因数, 取值 0.3。

6) 横向摩擦力:

$$F_{\text{横摩}} = \mu_2 \times \left(F_1 - \frac{1}{2} \times \frac{Q_{\text{垂}}}{\cos\alpha} \right) \quad (9)$$

$$F_{\text{横摩1}} = F_{\text{横摩2}} = \frac{1}{2} \times \mu_2 \times \frac{9.8(Q - Q_{\text{垂}})}{\cos\alpha} = 45.05 \text{ kN} \quad (10)$$

式中: μ_2 为摩擦因数, 取值 0.5。

2.2.2 检查货物稳定性

1) 卷状货物水平移动稳定性。

钢制座架在纵向水平移动方面稳定性:

$$\Delta T = T - F_{\text{纵摩}} = 382.69 \text{ kN} > 0, \text{ 不稳定} \quad (11)$$

由式(11)可知, 纵向不平衡力 ΔT 为 382.69 kN, 焊缝长度不应少于:

$$\lambda_{\text{纵}} = \frac{10 \times \Delta T}{0.7 h [\tau]} = 28 \text{ cm} \leq 30 \text{ cm} \quad (12)$$

式中: h 为焊缝高度, cm; $[\tau]$ 为剪切许用应力, $[\tau] \leq (0.6 \sim 0.8)[\sigma] \text{ MPa}$, 故满足安全要求。

钢制座架在横向水平移动方面稳定性:

$$\begin{aligned} \Delta N &= 1.25(N + W) - F_{\text{横摩}} = \\ &1.25 \times 47 - 83 = 71.1 \text{ kN} > 0, \text{ 不稳定} \end{aligned} \quad (13)$$

故, 钢制座架在纵向稳定, 卷状货物在横向会发生水平移动。

2) 货物在倾覆方面的稳定性

纵向倾覆稳定性: 因卷状货物横向卧装, 存在纵向滚动风险。卷钢在 V 形驼峰槽内纵向免于滚动的条件:

$$h_{\text{掩}} \geq (0.3744 - 0.0018Q_{\text{总}})D = 442 \text{ mm} \quad (14)$$

钢制座架高度 500 mm, 因此, 符合要求。

横向倾覆稳定性: 卷状货物横向卧装, 因此, 卷状货物有横向倾覆的风险。

横向合力产生倾覆力矩: $M_{\text{倾}} = (N + W) \times R \times$

$$\cos\alpha=50.79D \text{ KN}\cdot\text{m} \quad (15)$$

$$\text{横向合力产生稳定力矩: } M_{\text{稳}}=9.8Q \times K \times 0.5=159.25K \text{ KN}\cdot\text{m} \quad (16)$$

式中: K 为钢制座架相邻支架(外边缘)间距, mm。

卷状货物免于横向倾覆条件为:

$$\eta_{\text{横}}=\frac{M_{\text{稳}}}{M_{\text{倾}}}=\frac{159.25K}{50.79D} \geq 1.25 \quad (17)$$

因此, $\frac{D}{K} \leq 2.5$ 时, 卷状货物在横向免于倾覆。

方案中, K 为 900 mm, 允许最大卷径为 2 150 mm。

按卷径取最大值时, $\frac{D}{K}=2.39 \leq 2.5$, 因此, 满足铁总运[2015]296 号《铁路货物装载加固规则》对横向倾覆性的规定。

3 基于 SolidWorks 和 Ansys 的钢制座架有限元分析

3.1 SolidWorks 和 Ansys 简介

SolidWorks 集三维建模、装配、工程制图于一体的大型软件, 拓展性好, 可与多款软件配合使用^[13-14]。ANSYS 是全球主流有限元分析软件, 但三维参数化建模环境不友好^[15]。因此, 采用 SolidWorks 对铁路卷状货物横向限位钢制座架进行三维建模, 将模型导入 ANSYS 中进行有限元分析。

3.2 有限元分析思路

在 SolidWorks 环境下, 对铁路卷状货物横向限位钢制座架装载卷状货物工况等效建模; 再通过 CAD 关联接口, 导进 Workbench 环境下; 然后网格划分, 添加载荷, 运行算例求解; 最后, 结合材料特性、GB 50017—2017《钢结构设计标准》规定的强度及位移要求, 得出结论。此外, 算例运行环境如下: ROG 台式计算机, 处理器为 Core(TM)i9@5.20GHz 12900KF, 操作系统为 Windows 10 20H2, ANSYS 2022R1 版。

3.3 铁路卷状货物横向限位钢制座架有限元分析

3.3.1 V 形驼峰支架有限元分析

V 形驼峰支架分别受到卷状货物纵向惯性力, 垂向惯性力与重力合力。其中, 纵向惯性力为 480 kN, 垂向惯性力与重力的合力 494.98 kN。进行有限元分析, 网格质量为 0.89, 划分网格节点数为 5 473 554, 单元数为 1 302 777。依次施加上述力, 垂向等效应力分析见图 6, 垂向等效位移分析见图 7; 纵向等效应力分析见图 8, 纵向等效位移分析见图 9。

由图 6 可知, 施加垂向力后, 最薄弱部分是 V 形驼峰支架支撑面与卷状货物接触处, 应力值 172.1 MPa, 小于 Q550NQR1 耐候钢屈服极限(550 MPa), 强度满足要求。由图 7 可知, 施加垂向力后, 最大位移发生在 V 形驼峰支架支撑面和齿条焊接处下方, 位移形变量为 0.23 mm, 小于 2 mm, 满足规定。

由图 8 可知, 施加纵向力后, 最薄弱部分是 V 形驼峰支架支撑面与卷状货物接触处, 应力值 244.39 MPa, 小于 Q550NQR1 耐候钢屈服极限(550 MPa), 强度满足要求。由图 9 可知, 施加垂向力后, 最大位移发生在 V 形驼峰支架支撑面和齿条焊接处下方, 位移形变量为 0.19 mm, 小于 2 mm, 满足规定。

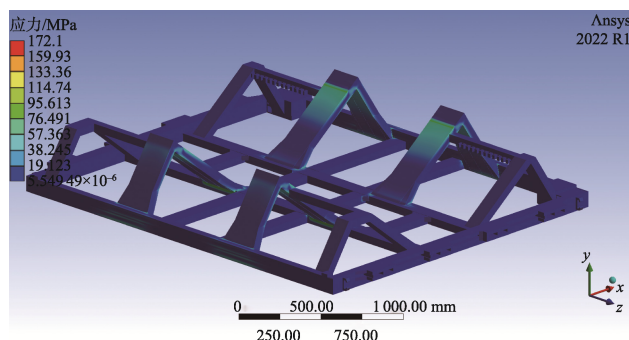


图 6 V 形驼峰支架垂向等效应力云图
Fig.6 Vertical equivalent stress contour of V-shaped hump bracket

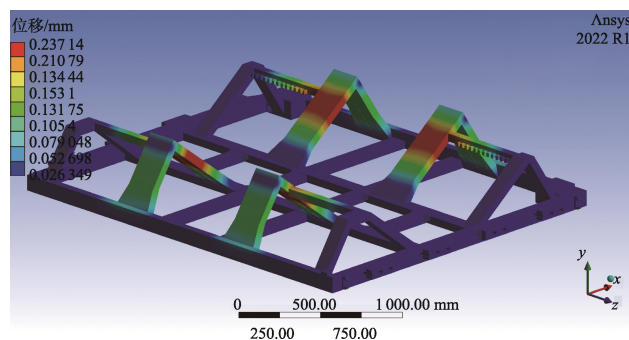


图 7 V 形驼峰支架垂向等效位移云图
Fig.7 Vertical equivalent displacement contour of V-shaped hump bracket

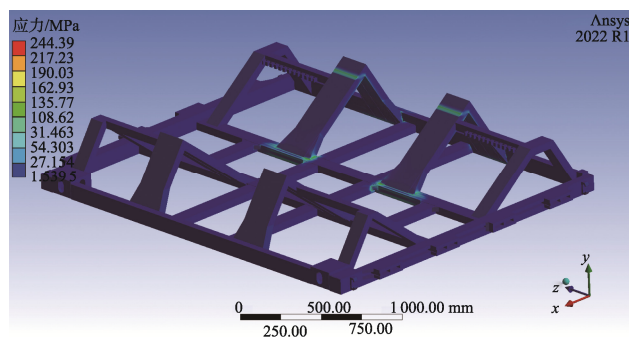


图 8 V 形驼峰支架纵向等效应力云图
Fig.8 Longitudinal equivalent stress contour of V-shaped hump bracket

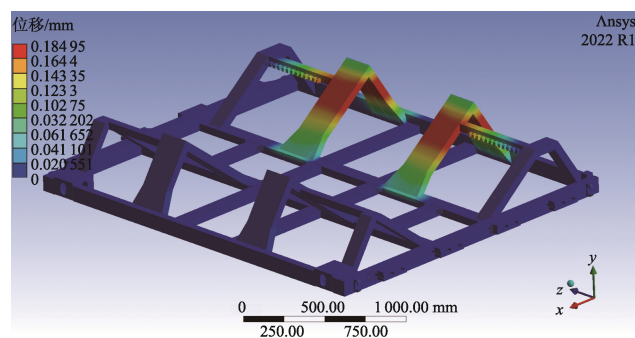


图 9 V 形驼峰支架纵向等效位移云图

Fig.9 Longitudinal equivalent displacement contour of V-shaped hump bracket

3.3.2 钢制座架横向限位装置强度校核

卷状货物在钢制座架 V 形驼峰凹槽内所受横向不平衡力 ΔN 为 71.1 kN, 通过横向限位装置的横向挡杆及齿条上的齿块抵消。钢制座架横向限位装置三维实体模型如图 10 所示。

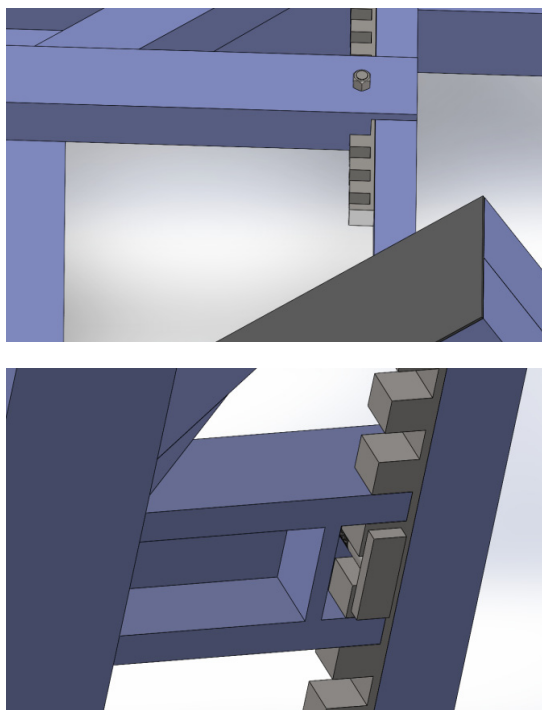


图 10 钢制座架横向限位装置

Fig.10 Lateral limit device of steel seat frame

1)校核齿块抗剪强度。每侧齿块剪切力 17.775 kN, 齿块横截面积 625 mm², 齿块剪应力 τ 为 7.11 MPa, 小于 Q345 NQR3 钢的许用剪切应力。

2)校核横向档杆的抗弯强度。横向不平衡力 ΔN 作用于长 1 270 mm 的横向档杆, 横向档杆长度方向中间断面受到工作弯曲应力 M_c 最大。

根据横向限位装置设计, 通过 ANSYS 有限元分析对横向档杆受力进行分析。在最不利载荷作用下, 横向档杆等效应力分析云图和位移云图如图 11、图

12 所示。由图 11 可知, 最大等效应力 28.66 MPa, 小于 Q345 钢的许用应力 216 MPa。由图 12 可知, 最大变形量 0.03 mm, 为弹性变形。综上, 钢制座架横向限位装置强度及刚度符合要求。

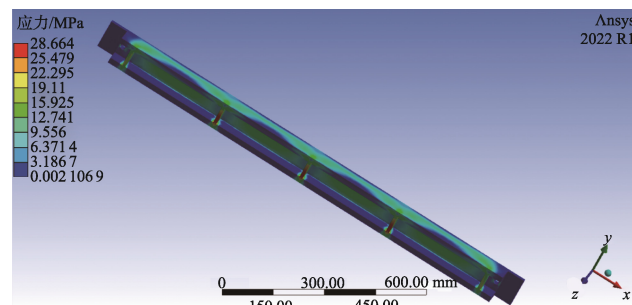


图 11 横向挡杆等效应力云图

Fig.11 Equivalent stress contour of lateral stop bar

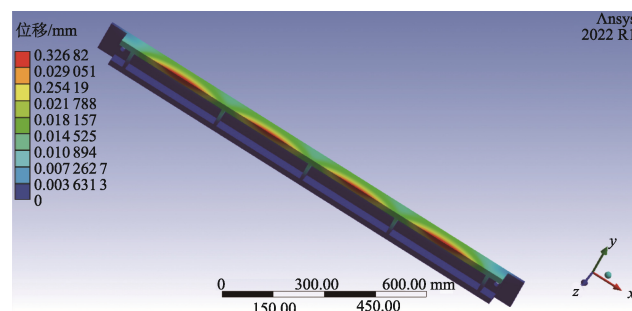


图 12 横向挡杆等效位移云图

Fig.12 Equivalent displacement contour of lateral stop bar

《铁路技术管理规程》规定, 车辆在编组站, 应限速连挂, 可实施溜放。此外, V 形驼峰支架支撑面铺满 12 mm 厚的多层夹线耐磨橡胶垫进行缓冲^[16], 因此, 运输卷状货物更加安全可靠。

4 结语

我国幅员辽阔, 铁路在以卷钢、铝卷为代表的卷状货物运输中发挥重要作用。以 C₇₀ 为代表的敞车占铁路货物运输运用车保有量 60.64 % 以上^[17]。文中在铁路卷状货物钢制座架技术基础上, 提出的铁路卷状货物横向限位钢制座架具有安全稳定、循环使用、适用车型广、无缝叠放、适合多种规格卷状货物运输等特点。通过 SolidWorks 对钢制座架不同工况三维建模, 确定最不利条件下的卷状货物装载加固方案, 计算运输过程中的各种力; 配合 ANSYS Workbench, 对钢制座架进行有限元分析。结果证明, 铁路卷状货物横向限位钢制座架可有效防止货物横向位移, 保障卷状货物运输安全, 降低装载加固成本。未来研究, 可考虑如何简化装卸作业流程, 实现“门到门”运输, 提高铁路运输市场竞争力, 促进卷状货物运量加速反流铁路。

参考文献:

- [1] 中国建筑材料联合会. 中国建筑材料工业年鉴[M]. 北京: 人民出版社, 2018: 531-535.
China Building Material Federation. Almanac of China Building Materials Industry[M]. Beijing: People's Publishing House, 2018: 531-535.
- [2] 中国铁路总公司. 中国铁道年鉴[R]. 北京: 中国铁路总公司, 2019: 233-241.
China Railway. China Railway Yearbook[R]. Beijing: China Railway Press, 2019: 233-241.
- [3] 韩立东. 卷钢座架强度的理论计算与试验结果的对比[J]. 包装工程, 2020, 41(7): 147-151.
HAN Li-dong. Comparative Study on Theoretical Calculation and Test Results of the Strength of a Reinforced Frame[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(7): 147-151.
- [4] 刘晓华. 中铁联合物流 RUL-C1 型卷钢座架强度仿真及试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015: 19-20.
LIU Xiao-hua. Strength Simulation and Experimental Study on RUL-C1 Coil Steel Pedestal of China Railway Joint Logistics[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015: 19-20.
- [5] 高俊平. 铁路卧装运输卷钢座架强度仿真分析与试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012: 43-51.
GAO Jun-ping. Simulation Analysis and Experimental Study on the Strength of Coiled Steel Pedestal in Horizontal Railway Transportation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012: 43-51.
- [6] 方哲. 攀钢集团 TX-C-I 型卷钢座架疲劳寿命研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016: 69-73.
FANG Zhe. Study on Fatigue Life of TX-C-i Coil Steel Seat Frame in Panzhihua Iron and Steel Group[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016: 69-73.
- [7] GB 50017—2017, 钢结构设计规范[S].
GB 50017-2017, Code for Design of Steel Structures[S].
- [8] TB/T 3550.2—2019, 机车车辆强度设计及试验鉴定规范 车体第 2 部分: 货车车体[S].
TB/T 3550.2-2019, Strength Design and Test Accreditation Specification for Roll Stock Car Body-Part2: Car Body of Freight Wagons[S].
- [9] 中国铁路总公司. 铁路货物装载加固型方案[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015: 160-168.
China Railway. Railway loading, reinforcement and fi-
- nalization scheme[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015: 160-168.
- [10] 吴育俭. 铁路货运技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000: 43-51.
WU Yu-jian. Railway Freight Technology[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2000: 43-51.
- [11] GB/T 19804—2005, 焊接结构的一般公差尺寸和形位公差[S].
GB/T 19804-2005, Welding-General Tolerances for Welded Constructions-Dimensions for Lengths and Angles-Shape and Position[S].
- [12] 张耀, 曹小平, 王春芬. 材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 18-24.
ZHANG Yao, CAO Xiao-ping, WANG Chun-fen. Mechanics of Materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 18-24.
- [13] 李建华, 白岩柏. 一种基于 SolidWorks 二次开发的三维交互辅助装配方法[J]. 现代制造工程, 2020(1): 83-87.
LI Jian-hua, BAI Yan-bai. Three-Dimensional Interactive Auxiliary Assembly Method Based on Secondary Development of SolidWorks[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(1): 83-87.
- [14] 范德军, 文劲松, 徐勇, 等. 基于 SolidWorks 的可视化定制研究[J]. 图学学报, 2018, 39(3): 573-578.
FAN De-jun, WEN Jin-song, XU Yong, et al. Research on Visual Customization Based on SolidWorks[J]. Journal of Graphics, 2018, 39(3): 573-578.
- [15] 田建辉. 有限元分析及 ANSYS 18.0 工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019: 4-10.
TIAN Jian-hui. Finite Element Analysis and Engineering Application of ANSYS 18.0[M]. Beijing: China Machine Press, 2019: 4-10.
- [16] 中国铁路总公司. 铁路技术管理规程 高速铁路部分[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2014: 55-71.
China Railway. Technical management regulations for railway-high-speed railway[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014: 55-71.
- [17] 中国国家集团铁路有限公司. 中国铁道年鉴 2019[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2020: 171-172.
China National Group Railway Co., Ltd. China Railway Yearbook 2019[M]. Beijing: China Railway Press, 2020: 171-172.

责任编辑: 曾钰婵