铁路 35 t 敞顶箱裸包装大板玻璃集装运输架设计及仿真分析

王建国[1]，潘帅[2,3]，袁舜[4]
（1.中国铁路兰州局集团有限公司 货运部，兰州 730020；2.九江职业技术学院，江西 九江 332007；3.北京交通大学 交通运输学院，北京 100044；4.中外运（宁夏）物流发展有限公司，银川 750021）

摘要：目的 针对铁路大板玻璃木箱包装存在受潮易变形、耐用性差、无法循环使用等问题，设计一款安全可靠、可循环使用、拆解回送、实现重去重回的铁路 35 t 敞顶箱裸包装大板玻璃集装运输架。**方法** 首先按照《钢结构设计规范》及敞顶箱内部结构，设计集装架；接着根据《铁路货物装载加固规则》，确定不利工况下的装载加固方案，计算作用在集装架上的力值；最后利用 SolidWorks 和 ANSYS 协同仿真技术，建立玻璃集装架 CAE 模型，进行动载工况有限元分析。**结果** 集装架纵向、垂向、横向限位组件最薄弱部分应力分别是 186.44、184.82、168.98 MPa，变形量分别是 1.30、0.36、0.75 mm，均符合规定。**结论** 结果表明，大板玻璃集装运输架安全可靠，可有效降低玻璃破损率，符合铁路货物安全运输需求，可为同类型铁路板状货物集装运输架设计提供有力参考。

关键词：35 t 敞顶箱；大板玻璃集装运输架；装载加固方案；ANSYS
中图分类号：TB48；U294.5 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-3563(2024)23-0305-06
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.23.033

Design and Simulation Analysis of Bare Packed Large Sheet Glass Container Transport Frame for Railway 35 t Open-Top Container

WANG Jianguo[1], *PAN Shuai*[2,3], *YUAN Shun*[4]
(1. Freight Department of China Railway Lanzhou Group Co., Ltd., Lanzhou 730020, China; 2. Jiujiang Vocational and Technical College, Jiangxi Jiujiang 332007, China; 3. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 4. Sinotrans (Ningxia) Logistics Development Co., Ltd., Yinchuan 750021, China)

ABSTRACT: In response to challenges such as deformation due to moisture susceptibility, poor durability and non-reusability associated with the wooden crates of large sheet glass for railway transport, the work aims to design a secure, reusable, disassemblable, and bi-directional bare packed large sheet glass container transport frame for railway 35 t open-top container. The container transport frame was designed in accordance with the "Steel Structure Design Code" and the internal structure of open-top containers. Subsequently, adhering to the "Railway Cargo Loading and Reinforcement Rules," adverse loading conditions were considered to determine reinforcement solutions, and the forces acting on the container transport frame were calculated. Finally, the collaborative simulation techniques of SolidWorks and ANSYS

收稿日期：2023-12-19
基金项目：国家自然科学基金（71761023）；中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划（N2020X015）；甘肃省教育厅“双一流”科研重点项目（GSSYLXM-04）

were utilized to establish a CAE model of the glass container transport frame, and a finite element analysis under dynamic loading conditions was conducted. The stress values at the weakest points of the longitudinal, vertical, and lateral restraint components of the container transport frame were determined to be 186.44, 184.82, and 168.98 MPa, respectively. The corresponding deformation values were found to be 1.30, 0.36, and 0.75 mm, all in compliance with specified standards. The results indicate that the large sheet glass container transport frame is secure and reliable, effectively reducing glass breakage rates. It aligns with safety requirements for railway cargo transportation, providing a robust reference for the design of similar container transport frames for railway sheet goods.

KEY WORDS: 35 t open-top container; large sheet glass container transport frame; loading reinforcement scheme; ANSYS

大板玻璃又称浮法原片玻璃，广泛应用在现代工业、高档建筑等领域，常见规格长 3 660 mm、高 2 440 mm、厚 3.5、4.6、5、6、8、10、12 mm[1-2]。目前，国内铁路优先以敞车、平集两用车刚性连接 20 ft 通用集装箱或 35 t 敞顶集装箱的方式，木箱立装运输[3-4]。然而，木箱存在受潮易开裂变形、耐用性差、无法循环使用等问题。因此，设计安全可靠、可循环使用、拆解回送、实现重去重回的铁路大板玻璃运输载具是一项具有重要应用价值和现实意义的研究课题。

近年来，针对玻璃运输载具设计，专家学者开展了许多研究工作。曾志海等[5]介绍了平板玻璃木箱包装的发展历史，对木箱包装从包装成本、功能、价值等角度进行分析。李琛等[6]以钢化玻璃为研究对象，设计了安全合理的松木托盘模型，利用 Pro/E 建模，ANSYS Workbench 进行静态堆码载荷分析、随机振动仿真分析。蔡丽娜等[7]对框架木箱的结构设计进行分析，设计了一款新型框架木箱，采用 ANSYS 进行了静态分析、动力分析。黄河[8]针对挡风玻璃运输破损率高等问题，从包装材料、结构方面入手，采用实木材质和 EVA 材料，设计了缓冲包装结构，对包装整体进行跌落试验和振动试验，达到预期效果。于雪斐等[9]针对平板玻璃木箱包装导致木材消耗、成本高等问题，提出用木（竹）基复合材料设计平板玻璃木箱运输的方案。上述研究均是木质运输托盘，由于无法循环使用，导致木材资源严重浪费；再者，由于木材吸湿特性，木箱在潮湿的环境下易吸收水分，造成箱体变形；此外，因木材各向异性，木箱受力不均匀或长期使用，易出现变形或开裂，导致箱内货物受损。

为解决大板玻璃木箱运输存在的诸多问题，本文在既有技术经验基础上，结合 35 t 敞顶箱内部结构和安全运输需求，率先提出一款安全可靠、循环使用、可拆解回送的铁路 35 t 敞顶箱裸包装大板玻璃集装运输架（简称集装架）；根据《铁路货物装载加固规则》（简称《加规》），制订不利工况下的大板玻璃装载加固方案；建立 CAE 模型，进行集装架动载工况有限元分析，验证大板玻璃集装架设计是否符合铁路安全运输需求。

1 铁路 35 t 敞顶箱裸包装大板玻璃集装运输架设计

1.1 整体设计

大板玻璃集装架技术参数见表 1，材料性能见表 2，整体结构见图 1。集装架主要包括 4 部分，即外框结构、横向限位组件、垂向限位组件和纵向限位组件。

表 1 大板玻璃集装架技术参数
Tab.1 Technical specifications for large sheet glass container frame

名称	外形尺寸/mm	自重/t	玻璃的长×高×厚/mm	最大承重/t
铁路 35 t 敞顶箱裸包装大板玻璃集装运输架	3 960×1 250×2 600	0.47	3 660×2 440×（3.5~12）	32

表 2 大板玻璃集装架材料性能
Tab.2 Material performance of the large sheet glass container frame

材料	部件	弹性模量/MPa	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	泊松比
Q345	集装架主体	2.06×10^5	550	600	0.3

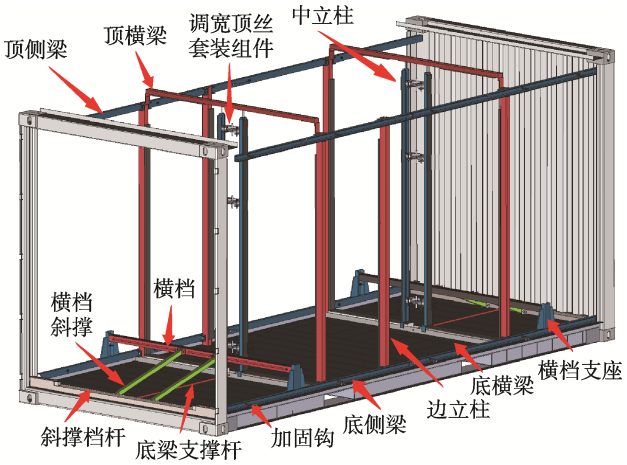

图 1 大板玻璃集装架整体结构
Fig.1 Overall structure of the large sheet glass container frame

1.2　结构设计

1.2.1　外框结构设计

外框结构主要包括底侧梁、顶测梁、加固钩、边立柱、底横梁、底梁支撑杆，见图 2。其中，底横梁是集装架承重基础，为 5 mm 厚矩形管，上表面用工业强力胶粘固厚度为 12 mm 的优质尼龙线夹层橡胶垫，直接抵触大板玻璃底端面；凹槽内嵌方木。底侧梁、顶侧梁上均匀布置加固孔，加固钩通过通孔与集装箱加固环连接固定，实现底侧梁、顶侧梁与集装箱底部、顶部刚性连接，保证集装架整体结构稳定，安装简单。底梁支撑杆两侧螺杆配合螺母，锁合斜撑档杆与相邻底横梁。边立柱内侧嵌入缓冲方木垫，与底侧梁、顶侧梁通过通孔螺栓连接，实现外框结构一体化连接。

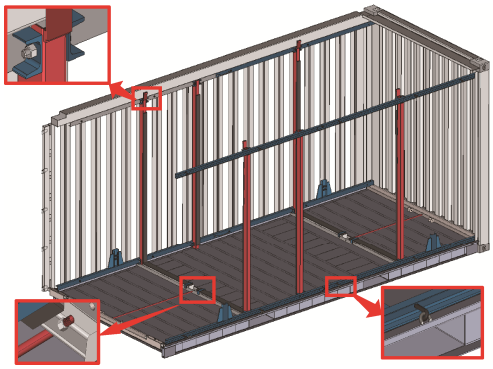

图 2　外框结构
Fig.2 Frame structure

1.2.2　纵向限位组件设计

纵向限位组件主要包括斜撑档杆、横档斜撑、横档、横档支座 4 部分，见图 3。其中，横档侧表面粘固尼龙线夹层橡胶垫，可直接抵触在大板玻璃侧端面。斜撑档杆与横档斜撑通过通孔螺栓连接，横档斜撑与横档通过通孔螺栓连接。横档与横档支座通过下沉式螺钉固定，配合横档斜撑起到加固支撑作用，可有效防止大板玻璃纵向移动。

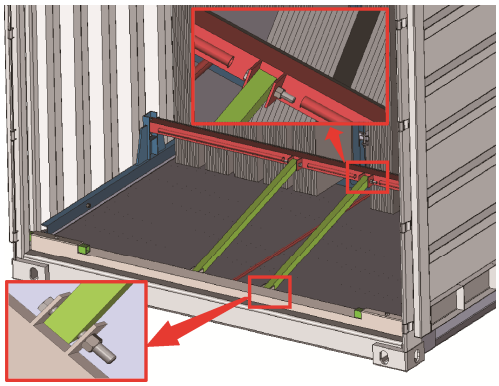

图 3　纵向限位组件
Fig.3 Longitudinal restraint component

1.2.3　垂向限位组件设计

垂向限位组件主要包括顶横梁和底横梁，见图 4。顶横梁侧表面粘固尼龙线夹层橡胶垫，直接抵触在大板玻璃顶端面。顶横梁通过卡槽插入边立柱，通过下沉式螺钉与中立柱建立刚性连接，实现顶横梁和底横梁联合抵触固定玻璃，防止玻璃垂向晃动。

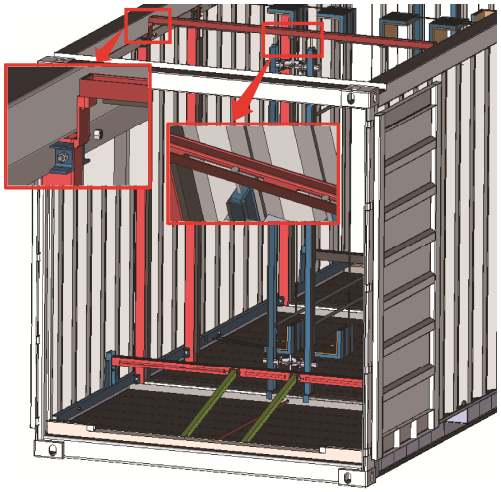

图 4　垂向限位组件
Fig.4 Vertical restraint component

1.2.4　横向限位组件设计

横向限位组件主要由中立柱、调宽顶丝套装组件 2 部分组成，见图 5。中立柱侧表面粘固尼龙线夹层橡胶垫，可直接抵触在大板玻璃表面。调宽顶丝套装组件包括顶丝防转盒、顶丝、双向螺杆、锁紧十字架、锁合螺杆，根据每组大板玻璃厚度，调节顶丝套装组件宽度，即双向螺杆带动螺杆顶丝在防转盒两端内外滑动，顶丝抵触在中立柱凹槽内部，带动中立柱移动，通过十字架锁紧，实现中立柱侧表面橡胶垫和边立柱缓冲方木垫联合抵触挤紧玻璃，防止玻璃横向位移和倾覆。

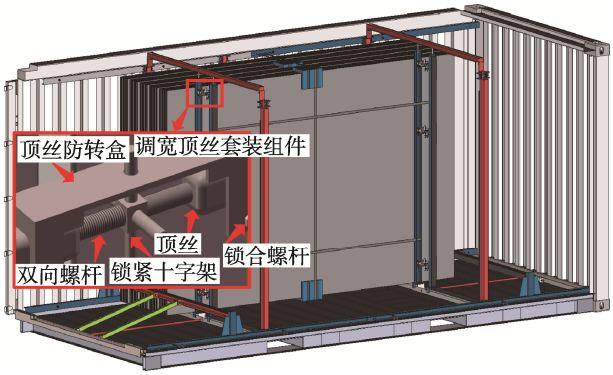

图 5　横向限位组件
Fig.5 Lateral restraint component

2　大板玻璃装载加固方案制订

2.1　玻璃装载加固方案

货物规格：裸包装玻璃长 3 660 mm、高 2 440 mm、

厚 168 mm，件重 3.18 t。使用箱型：35 t 敞顶箱。加固材料：25 mm×1 mm 钢带（或 19 mm×1 mm 塑钢带）、泡沫隔条、护角。加固装置：大板玻璃集装架。

2.1.1　装载方法

1）每箱装 1 垛，每垛立装 2 组，每组对称装 5 件，即每箱立装 10 件。

2）使货物总重心投影位于箱地板纵、横中心线的交叉点上。

3）每箱总重（含玻璃集装架自重）≤35 t。

4）全车装载质量不超过 NX_{70A} 型平车的标记装载质量。

5）全部装车完毕，货物重心投影位于 NX_{70A} 型平车车地板纵、横中心线的交点。

2.1.2　加固方法

1）安装玻璃集装架的底（顶）侧梁、底横梁，与集装箱上下两侧加固环连接固定。

2）每组装 5 件大板玻璃，沿高度方向各拉牵 1 道钢带，分别捆绑在侧梁加固环上。

3）钢带与玻璃接触处用护角隔开；玻璃之间用泡沫隔条隔开。

4）玻璃装载完毕后，安装中立柱和顶横梁，中立柱安装在顶横梁上，分上、中、下 3 处用调宽顶丝套装组件顶紧，防止玻璃横向倾覆。

5）在玻璃两侧安装横挡、斜撑挡杆、横挡斜撑及底梁支撑杆，阻止玻璃纵向移动。

6）最后，将门闩插入箱门口凹槽内。

2.1.3　其他要求

1）雨季时按要求苫盖捆绑篷布。

2）玻璃为易碎品，禁止溜放。

3）按要求关闭集装箱门，用 8 号镀锌铁线将集装箱门锁捆绑。

2.2　装载加固计算

为保证大板玻璃运输安全，根据《加规》进行装载加固计算[4,10-11]。NX_{70A} 平集两用车蘑菇头刚性连接 35 t 敞顶箱底角件，箱内集装架每侧对称装载 5 件大板玻璃，受力见表 3。

表 3　力值计算

Tab.3 Force value calculation results

纵向惯性力 T/kN	横向惯性力 N/kN	垂直惯性力 $Q_{垂}$/kN	风力 W/kN	摩擦力 $F_{纵}$/kN	摩擦力 $F_{横}$/kN
460.973	62.330	172.674	0	186.984	83.379

2.3　检查货物稳定性

1）货物倾覆的稳定性

集装架通过加固钩与集装箱刚性连接，不会发生纵向、横向倾覆。

2）货物水平移动的稳定性

纵向：

$$\Delta T=T-F_{纵摩}=273.989\ \text{kN}>0，\text{不稳定} \tag{1}$$

横向：

$$\Delta N=1.25(N+W)-F_{横摩}=-5.467\ \text{kN}<0，\text{稳定} \tag{2}$$

因此，大板玻璃会发生纵向移动，通过集装架纵向限位组件，可防止玻璃纵向移动。

3　大板玻璃集装架有限元分析

3.1　纵向限位组件

纵向限位组件有限元分析见图 6 和图 7。由图可知，不利工况下，组件可承受大板玻璃纵向冲击，安全可靠。具体而言，纵向限位组件最薄弱部分位于与冲击方向相反的横档侧表面位置中部，应力为 186.44 MPa，低于 Q345 第二工况许用应力 293 MPa（第二工况安全系数为 1.18），强度满足要求[12]；变形主要发生在与冲击方向相反的横档侧表面位置中部，变形量为 1.30 mm，<2 mm，符合规定。

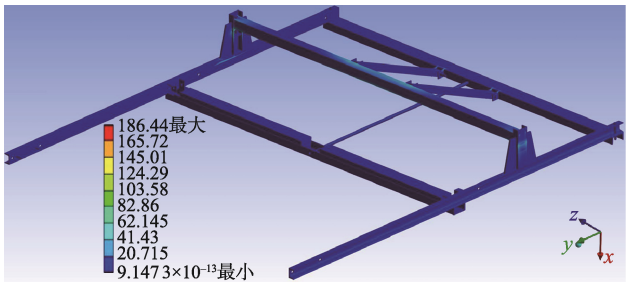

图 6　纵向限位组件应力云图

Fig.6 Stress cloud map of the longitudinal restraint component

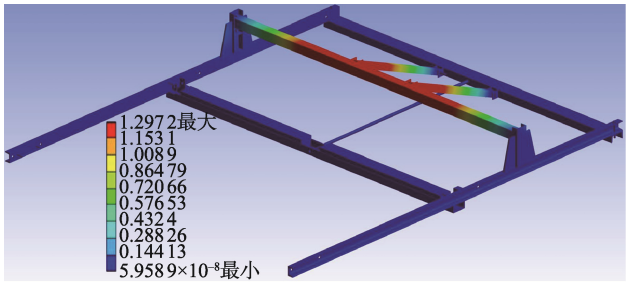

图 7　纵向限位组件位移云图

Fig.7 Displacement cloud map of the vertical restraint component

3.2　垂向限位组件

垂向限位组件有限元分析见图 8 和图 9。由图可知，不利工况下，组件可承受大板玻璃垂向冲击，安全可靠。具体来说，垂向限位组件最薄弱部分位于底横梁上表面，应力为 184.82 MPa，低于 Q345 第二工况许用应力 293 MPa（第二工况安全系数为 1.18），强度满足要求[12]；变形主要发生在底横梁与底侧梁连接处，变形量为 0.36 mm，<2 mm，符合规定。

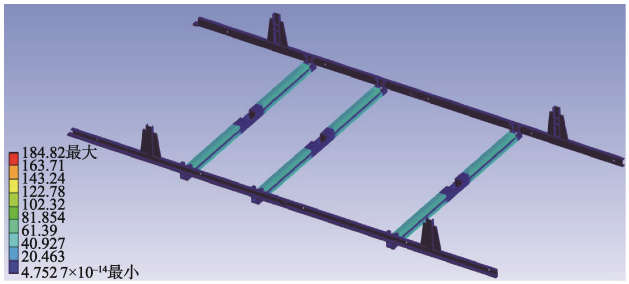

图 8　垂向限位组件应力云图
Fig.8 Stress cloud map of the vertical restraint component

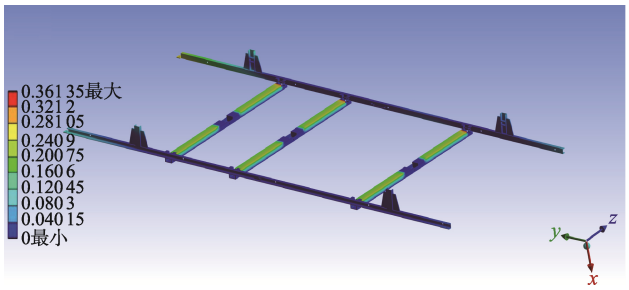

图 9　垂向限位组件位移云图
Fig.9 Displacement cloud map of the vertical restraint component

3.3　横向限位组件

横向限位组件有限元分析见图 10 和图 11。由图可知，不利工况下，组件可承受大板玻璃横向倾覆冲击，安全可靠。具体而言，横向限位组件最大应力位于调宽顶丝套装组件顶丝处，应力为 168.98 MPa，低于 Q345 第二工况许用应力 293 MPa（第二工况安全系数为 1.18），强度满足要求[12]；变形主要发生中立柱上部，变形量为 0.75 mm，<2 mm，符合规定。

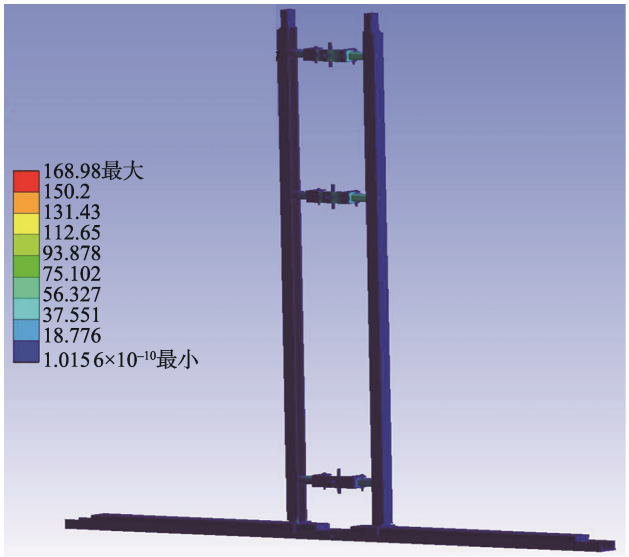

图 10　横向限位组件应力云图
Fig.10 Stress cloud map of the lateral restraint component

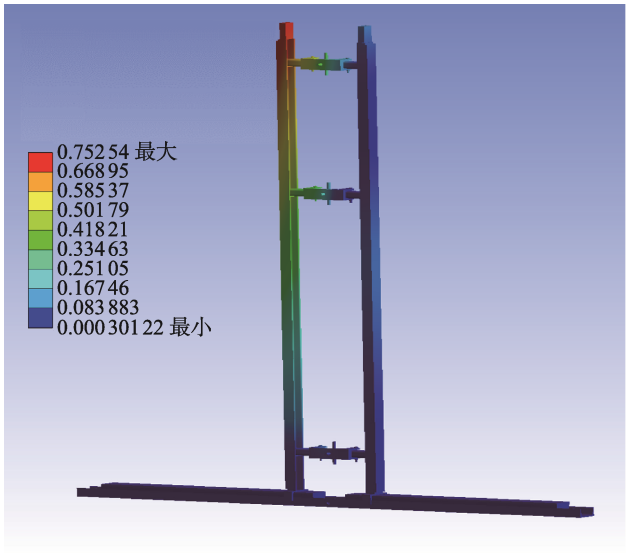

图 11　横向限位组件位移云图
Fig.11 Displacement cloud map of the lateral restraint component

此外，《铁路技术管理规程》[13]明确要求，易碎货物在运输途中，应保持限速；在编组站内，应限速连挂。因此，调车作业期间，货车连挂速度<5 km/h，即可避免因车辆制动、加速冲击，造成玻璃破损事故。

4　结语

随着大板玻璃市场需求日益旺盛，铁路在大板玻璃长途运输市场中发挥着越来越重要的作用。本文针对传统玻璃木箱包装存在的诸多问题，提出的铁路 35 t 敞顶箱裸包装大板玻璃集装运输架设计，具有安全可靠、可循环使用、拆解回送、实现重去重回等特点，符合铁路大板玻璃安全运输需求，可加快铁路车辆周转，促进公路玻璃运量返流铁路。

参考文献：

[1] 中国建筑材料联合会. 中国建筑材料工业年鉴[R]. 北京: 人民出版社, 2021: 121-125.
China Building Material Federation. Almanac of China Building Materials Industry[R]. Beijing: People's Publishing House, 2021: 121-125.

[2] 邱培军, 潘帅, 袁舜, 等. 基于 SolidWorks 的铁路敞车裸包装玻璃集装架设计[J]. 包装工程, 2021, 42(3): 143-150.
QIU P J, PAN S, YUAN S, et al. Design of Pallet for Bare Glass in Railway Wagon Based on SolidWorks[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(3): 143-150.

[3] 中国铁路总公司. 铁路货物装载加固定型方案(上册)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2021: 160-168.

China Railway. Railway Loading, Reinforcement and Finalization Scheme (Volume I)[M]. Beijing: China Railway Press, 2021: 160-168.

[4] 中国铁路总公司. 铁路货物装载加固规则[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015: 43-56.
China Railway. Railway Freight Loading Reinforcement Rules[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015: 43-56.

[5] 曾志海, 陈兰武. 浮法玻璃包装技术的分析[J]. 玻璃, 2010, 37(6): 14-19.
ZENG Z H, CHEN L W. Analysis of Package Technology for Float Glass[J]. Glass, 2010, 37(6): 14-19.

[6] 李琛, 牛美亮, 赵玉松. 钢化玻璃运输包装设计与有限元分析[J]. 包装工程, 2018, 39(15): 113-118.
LI C, NIU M L, ZHAO Y S. Transportation Package Design and Finite Element Analysis of Tempered Glass[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(15): 113-118.

[7] 蔡丽娜, 王玉龙, 徐洁, 等. 框架木箱有限元受力分析[J]. 包装工程, 2010, 31(17): 13-15.
CAI L N, WANG Y L, XU J, et al. Finite Element Analysis to Stress of Wooden Framed Box[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(17): 13-15.

[8] 黄河. 汽车挡风玻璃的缓冲包装设计[J]. 中国包装工业, 2015(16): 108-109.
HUANG H. Cushion Packaging Design of Automobile Windshield[J]. China Packaging Industry, 2015(16): 108-109.

[9] 于雪斐, 史建伟, 于文吉. 木(竹)基复合材料替代传统玻璃包装材料的探讨[J]. 中国人造板, 2010, 17(6): 1-4.
YU X F, SHI J W, YU W J. Feasibility Study of Wood/Bamboo Matrix Composites to Replace Solid Wood as Flat Glass Transporting Packaging Materials[J]. China Wood-Based Panels, 2010, 17(6): 1-4.

[10] 盖宇仙. 铁路货运组织 4 版[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
GAI Y X. Railway Freight Organization 4th ed[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.

[11] 吴育俭. 铁路货运技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000: 43-51.
WU Y J. Railway Freight Transport Technology[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2000: 43-51.

[12] 国家铁路局. 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: TB/T 3550.2—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019.
State Railway Administration. Strength Design and Test Accreditation Specification for Rolling Strock-Car Body-Part 2: Freight Car Bodies: TB/T 3550.2—2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.

[13] 中国钢铁工业协会. 冶金企业铁路技术管理规程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2018: 55-71.
China Iron and Steel Association. Regulations on Railway Technology Management in Metallurgical Enterprises[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018: 55-71.