基于 ASME RT-2—2014《重型轨道交通车辆结构设计的安全标准》的地铁车辆底架结构设计

陆冠含[1]　魏成杰[1]　夏常青[1]　李　刚[2]　段鹏飞[2]　刘伟亮[1]

（1. 中车长春轨道客车股份有限公司工程技术中心，130062，长春；
2. 中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心，130062，长春//第一作者，工程师）

摘　要　底架结构是城市轨道交通车辆车体结构设计中最重要且难度最大的部位。基于纽约资质审查项目（NYCT），从端底架吸能结构、底架边梁、底架中梁及整体结构等方面阐述了基于 ASME RT-2—2014《重型轨道交通车辆结构设计的安全标准》的地铁车辆底架结构的设计方案和设计重点。阐述了所应用的碳钢及不锈钢材料的机械性能及焊接标准，对底架钢结构进行了静强度、吸能计算及相关试验验证。结果表明，底架的强度、刚度和吸能值均满足车辆设计要求。

关键词　城市轨道交通；ASME 标准；车辆；底架结构

中图分类号　U270.32；U266

DOI：10.16037/j.1007-869x.2021.02.018

Metro Vehicle Underframe Structure Design Based on ASME RT-2—2014 Safety Standard for Structural Requirements for Heavy Rail Transit Vehicles

LU Guanhan, WEI Chengjie, XIA Changqing, LI Gang, DUAN Pengfei, LIU Weiliang

Abstract　Underframe structure is the most important and most difficult part in urban rail transit vehicle body structure design. Based on the NYCT Qualification Project, metro vehicle underframe structure design scheme and key points formulated from ASME RT-2—2014 Safety Standard for Structural Requirements for Heavy Rail Transit Vehicles are expounded from the perspectives of end underframe energy absorption structure, underframe side beam, underframe middle beam and the whole structure. The mechanical properties and weld standard of the applied carbon steel and stainless steel material are described, and static strength numerical computation, energy absorption numerical computation and relative experimental verification are carried out on underframe steel structure. Results show that the static strength value, stiffness and impact energy absorption value of underframe structure all meet the needs of vehicle design.

Key words　urban rail transit; ASME standard; vehicle; underframe structure

First-author's address　CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

随着城市轨道交通的迅速发展，市场对轨道车辆的需求量大幅增加，同时也对车辆的设计和生产技术提出了更高的要求。尤其是基于 ASME RT-2—2014《重型轨道交通车辆结构设计的安全标准》（以下简为“ASME 标准”）的地铁车辆，车体宽度大、承载能力强、安全防护等级高，对车体碰撞吸能指数和静强度指数的要求非常严格，这给我国的轨道车辆制造业设定了更高的标准。为使车体底架结构达到碰撞吸能指数和静强度指数的高标准平衡，文献[1-2]中的轨道车辆底架采用了结构吸能设计，底架边梁采用了双层结构设计，底架中梁结构采用了仿生鱼骨设计。

1　地铁车辆底架结构简述

基于 ASME 标准的地铁不锈钢车体结构主要分为侧墙结构、端墙结构（前端结构）、车顶结构和底架结构，其中，底架结构是车体结构设计中最重要且难度最大的部位。参考文献[3-6]，底架结构主要分为端底架组成（防爬器组成、吸能模块、车钩座组成、枕梁组成）、边梁组成、中梁组成、主横梁组成等，如图 1 所示。为满足基于 ASME 标准地铁车辆的要求，应重点关注车体底架整体结构及端部吸能结构的研发设计。

2　基于 ASME 标准的地铁车辆底架结构的设计思路

2.1　底架焊接标准

底架主体采用弧焊方式连接，点焊及弧焊接头设计需符合相关焊接标准：

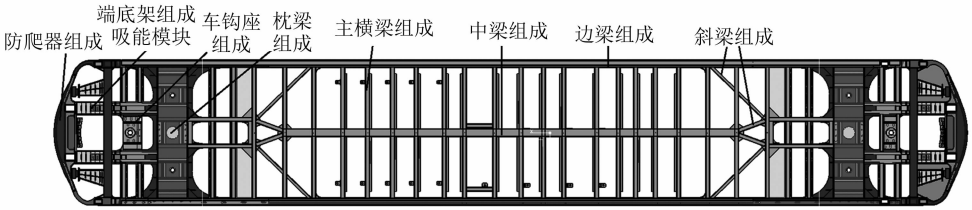


图 1　车体底架结构模型图

1）碳钢板弧焊：板厚大于 3 mm 时执行 AWS D1.1/D1.1M：2015，板厚小于 3 mm 时执行 AWS D15.1/D15.1M：2012。

2）不锈钢板弧焊：板厚大于 2 mm 时执行 AWS D1.6/D1.6M：2017，板厚小于 2 mm 时执行 AWS D15.1/D15.1M：2012。

3）点焊：应符合 AWS C1.1M/C1.1：2012 标准的要求，多层板点焊以外侧薄板为强度标准，多层板及迂回点焊符合 JIS E 4049—1990 标准。点焊焊点压痕执行 JIS Z 3140：2017 要求的“不超过单侧板厚的 10%和 0.15 的较大值”，迂回点焊及非外露面的点焊焊点压痕应不超过单侧板厚的 25%。

2.2　底架材料性能

薄板执行 GB/T 6807—2001《钢铁工件涂装前磷化处理技术条件》的要求，厚度为 5 mm 及以下的不锈钢零件使用冷轧不锈钢板生产。

底架碳钢零件材料为 ASTM A588，不锈钢零件材料为 ASTM AISI 301LN-1/4H、301LN-1/8H 以及 301LN-1/16H，符合 ASTM A666—2015 标准。具体底架材料的机械性能及应用率见表 1。

表 1　底架材料的机械性能及应用率

材料	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	应用率/%
1/16H	345	690	40	14.3
1/8H	415	760	35	4.3
1/4H	515	825	25	22.9
A588	345	485	21	58.5

3　底架结构分解设计方案

3.1　底架吸能结构设计

轨道车辆被动防护技术也称第二安全措施，它通过对系统自身抗撞击性能的研究来减小碰撞的影响，使碰撞损失降至最低，从而达到保护人民生命和财产安全的目的，使事故损失最小化，具有重大现实意义和工程实用价值。为实现被动安全防护所采用的装置为被动安全防护装置，它包括吸模块、防爬器等。被动安全防护技术最核心的目标是保护司乘人员的生命安全。在轨道交通被动防护技术领域，国际上已经形成了很多标准体系，目前主要的标准、法规体系有国际通用标准体系、欧洲标准体系及美国 ASME 标准体系等。针对美国城市轨道车辆，吸能标准执行 ASME 标准，即车体端部设置一个可控变形区，在发生碰撞时以可预测及稳定可控的方式变形，吸收碰撞所产生的能量。其变形的距离取决于元件的设计及所吸收能量的大小。同时，要求车体在发生碰撞时，应能保持结构的完整性，以保证对乘客的伤害最小化。

过去我国生产的城市轨道交通车辆没有吸能要求，与安全相关的只有防爬器及对车体静强度等要求。随着用户对城市轨道交通运营的安全性要求越来越高，出现了对车辆碰撞吸能的要求，并逐步从车钩、防爬器等单元吸能发展成车体结构吸能以及多种元素组合吸能。

车体结构吸能分为两级，一级结构为低速碰撞吸能（对吸能元件设计了两组工况，碰撞速度分别为 24 km/h 和 40 km/h），其要求具有可维护性。在一级碰撞发生过程中，除指定的吸能元件外，车体结构任何位置不得产生永久变形，且在维护过程中不得使用切割、焊接等作业，必须通过手工完成维修工作。二级结构吸能允许车体结构产生塑性变形，但要满足 ASME 标准要求。

底架吸能结构为基于 ASME 标准的车体结构设计的重中之重，根据标准需求和数值模拟中的吸能数值监测，不断修正吸能样块，得到防爬器结构后连接复合压溃箱结构的方案。该方案中，防爬器通过加宽加厚保证其强度，压溃箱逐步吸能可有效避免峰值，从而完成吸能任务。图 2 为吸能样块模型图。针对此方案分别对吸能样块进行了数值模拟及试验验证，如图 3 所示。试验的主要目的是验证计算分析的正确性及底架的制作工艺，试验对象包括吸能结构及其组成单元。由图 3 可见，数值模拟及试验验证结果相符，吸能部位能量吸收效果显著，试验与数值模拟分析结果偏差均在 10%以内。

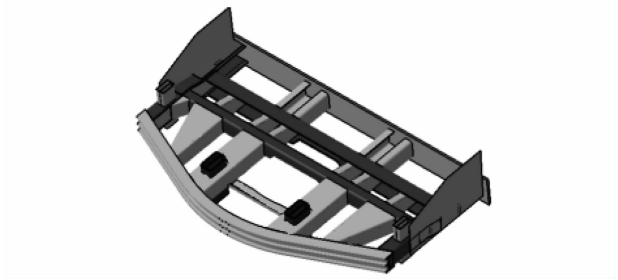
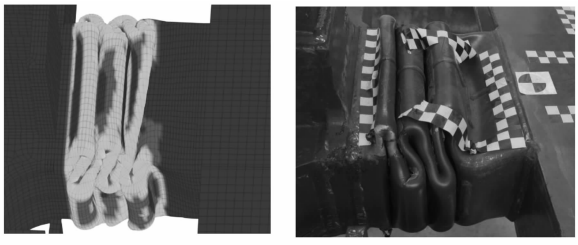


图 2　吸能样块模型图



a) 数值模拟　　b) 试验

图 3　吸能样块数值模拟及试验对比图

3.2　底架边梁结构设计

车体吸能要求与车体静强度要求相辅相成。底架是重要的力的承载部件。在底架设计中,底架边梁须具有较强的强度和刚度。在边梁设计中,采用了双层边梁设计(见图 4),即外层边梁采用帽型结构,内层边梁采用 U 型结构,通过加固边梁来加强底架承载力。双层边梁设计会在两层边梁中间形成空腔,从而有效提高强度、控制挠度。

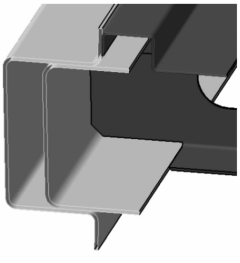


图 4　双层边梁结构模型图

3.3　底架中梁结构设计

在底架设计中,边梁承载了大部分的纵向载荷。边梁设计之初,将碰撞传导至底架的中间纵向载荷力以斜梁的形式传导至边梁。但在数值模拟计算的过程中发现,多辆编组碰撞吸能工况无法达到 ASME 标准规定的 1.2 MJ 的吸能值,因此在底架结构中增加了中梁结构,并采用仿生鱼骨造型(见图 5)来加强“鱼骨骨节”强度,同时与横梁配合连接边梁,起到对底架的支撑、加固以及传导的作用,以有效分流底架边梁在碰撞吸能工况中的能量及动态载荷。

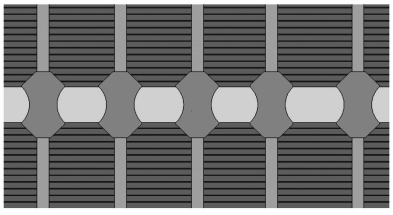


图 5　中梁鱼骨结构示意图

中梁的内部设计(见图 6)以两个开口方向相反的 W 型梁及上下盖板组成,该设计有效提高了中梁的强度、刚度及抗压能力。其设计思路类似于边梁的空腔结构,且由于内部的密封腔,使得底架结构具有优异的动载传导能力和结构性能指数。

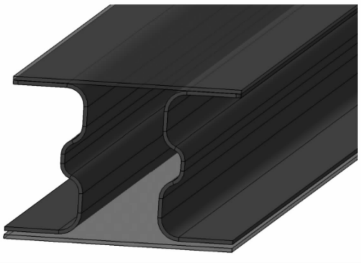


图 6　中梁内部结构截面模型图

4　底架结构整体方案

底架作为车体结构中最重要的部位,影响了整车的性能参数。因此,为保证 ASME 标准的执行,底架方案不断更新变化,更改部位涉及防爬器、吸能结构、车钩座、枕梁、中梁和边梁等结构。为保证底架钢结构的静强度、吸能、减重和弹塑性等多项指标达成,以及确保结构的使用寿命大于 30 年。据统计,2016 年初至 2017 年 6 月,底架结构不同程度的补强及其优化多达 40 余次。

对底架静强度及吸能的计算共计 56 个工况,并在中南大学进行了 6 次验证性试验。借助 ANSYS 及 HYPERWORKS 数值模拟软件进行仿真计算。计算结果表明,吸能工况中,底架总吸能值平均大于 1.2 MJ;静强度工况中,底架可承受 1 424 kN 的作用力。底架结构应力分布如图 7 所示。针对数值

图 7　底架应力分布图

模拟结果进行相关弹塑性试验,在底架试验模块中选取 10 个关键点监测其拉伸力与剪切力,拉伸力与剪切力试验各分两组,每组左侧为理论允许受力值,右侧为实测受力值。表 2 为底架结构的拉伸力与剪切力实测值。由表 2 可见,该结构的拉伸力与剪切力均满足理论要求,验证了设计的合理性。

表 2　底架结构的拉伸力与剪切力实测值　单位:N

编号	材料	许用剪切力	最大剪切力	许用拉伸力	最大拉伸力
1	301LN,1/8	4 922.00	1 956.39	1 230.50	349.47
2	301LN,1/4	8 122.00	3 589.27	2 030.50	303.76
3	301LN,1/4	1 229.50	444.2	307.38	95.98
4	301LN,1/4	1 846.00	205.22	461.50	18.57
5	301LN,1/4	2 727.50	1 344.67	681.88	554.9
6	301LN,1/4	4 922.00	937.74	1 230.50	45.3
7	301LN,1/4	1 229.50	579.4	307.38	97.65
8	301LN,1/8	2 727.50	825.6	681.88	344.88
9	301LN,1/8	4 922.00	2 110.48	1 230.50	362.76
10	301LN,1/16	8 122.00	1 985.22	2 030.50	355.02

5　结语

基于 ASME 标准的地铁车辆技术的实现具有跨时代的意义,目前仅有法国阿尔斯通公司、日本川崎公司、加拿大庞巴迪公司获得了纽约地铁资质。中车长春轨道客车股份有限公司突破了外国公司对我国形成的技术壁垒,将成为第 4 个具有纽约地铁资质的公司。基于 ASME 标准的地铁车辆技术对我国企业开拓国外市场起到了巨大的推进作用,此项技术具有广阔应用前景。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地铁设计规范:GB 50157—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.

[2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地铁车辆通用技术条件:GB/T 7928—2013[S]. 北京:中国质检出版社,2013.

[3] 杨延龙. 西安地铁一号线车体钢结构设计[J]. 科技视界,2015(5):85.

[4] 汪学岭,岳译新. 郑州地铁 1 号线车体底架设计[J]. 技术与市场,2012(4):94.

[5] 刘军,周传谊. 天津地铁 2 号线车辆车体钢结构设计[J]. 城市轨道交通研究,2014(1):51.

[6] 刘玉民,刘晓芳,陆冠含. 美标城市轨道交通车辆不锈钢车体结构研发[J]. 现代城市轨道交通,2018(6):5.

(收稿日期:2020-09-05)

(上接第 70 页)

极限断裂次数的影响很大,加载载荷由 1 100 N 增加到 1 500 N 时,样件的疲劳极限断裂次数降低 73.8%,衰减幅度较大。

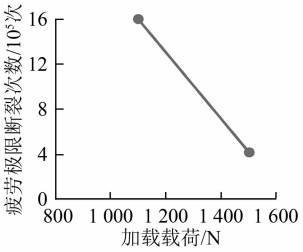


图 1　加载载荷与疲劳极限断裂次数关系图

3　结论

1) 振动频率、加载载荷、基材表面处理方式等因素均对 Aradilt 2015 胶的剪切强度有较大的影响。

2) 轨道车辆粘接接头设计时,为使粘接接头获得较长寿命,以及确保粘接的可靠性,需要针对不同的基材及其不同的表面处理方式,在车辆各种运行工况下对粘结接头进行结构受力分析与试验验证。

3) 轨道车辆粘接用环氧胶属于承载受力接头,通过研究它的使用寿命确定检修周期非常有必要。接头寿命受疲劳极限、使用环境等多种因素的制约。目前,并没有可靠的计算方法计算其使用寿命,而实验数据积累则需要较长的周期,因此后续还需对其进行更深入的研究。

参考文献

[1] 杜美娜,黄海江. 丙烯酸结构胶单搭接剪切疲劳性能的影响因素[J]. 粘接,2015(5):11.

(收稿日期:2020-09-05)