

# 100%低地板现代有轨电车轻量化研究

王剑博

(中车长春轨道客车股份有限公司磁浮研究所,130062,长春//高级工程师)

**摘要** 100%低地板现代有轨电车具有节能、环保、投资小、载客量适中、乘坐舒适性高、后期维护费用低等特点,同时面临着严峻的轻量化及减重要求。对车体结构轻量化以及车体部件和内饰部件轻量化材料的应用开展研究,介绍了相关设计结构及应用方案。

**关键词** 100%低地板现代有轨电车;车体结构;轻量化;车体材料;内饰材料

**中图分类号** U482.1

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2021.02.008

## Lightweight Research of 100% LVR Low-floor Modern Tram

WANG Jianbo

**Abstract** 100% LVR low-floor modern tram has advantages of energy-saving, environment-friendly, small investment, suitable passenger capacity, high ride comfort, low maintenance cost, but it's also faced with serious demand of weight reduction. Research of vehicle body structure lightweight, application of vehicle body components and interior lightweight materials is carried out. Related design structure and application scheme are introduced.

**Key words** 100% LVR (low-floor modern tram); vehicle body structure; lightweight; vehicle body material; interior material

**Author's address** CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

100%低地板现代有轨电车具有节能、环保、投资小、载客量适中、乘坐舒适性高、后期维护费用低等特点,较广泛应用于我国武汉、上海、成都、三亚等多个城市,在解决城市核心区换乘、市郊接驳以及景区旅游观光等方面发挥了重要作用。

为降低项目土建成本,国内既有用户对 100%低地板现代有轨电车的满载轴重要求一般为 $\leq 12.5$  t。常见的 5 模块 100%低地板现代有轨电车配置 6 轴、3 个转向架,AW3(满载)工况下车辆总质量 $\leq 75$  t。车辆编组后长度约为 34.8 m,AW3 工况下车

辆载客量约为 360 人,按 60 kg/人计算,AW0(空载)工况下车辆自重需 $\leq 53.4$  t,整车面临严峻的轻量化及减重要求。

100%低地板现代有轨电车如图 1 所示。



图 1 100%低地板现代有轨电车

通过结构优化、使用轻量化材料能够有效降低车辆自重,保证车辆满足轴重要求,同时能够有效降低车辆运行能耗,使车辆更环保。100%低地板现代有轨电车的轻量化设计包括车体的结构优化,以及车体部件轻量化材料与内饰部件材料的应用。

## 1 现代有轨电车车体结构轻量化设计

车体结构采用骨架承载式车身。车身包括底架、侧墙、车顶、端墙等 4 大部件。其中,底架受力集中,采用碳钢与不锈钢组合结构;侧墙、端墙及车顶由不锈钢弧焊、段焊或点焊而成。

通过焊接后机械加工的生产工艺保证了底架二系簧座、牵引拉杆及铰接安装座等部件的关键尺寸精度。通过使用车体总组成工装,保证了整车尺寸精度。

侧墙、车顶、端墙组成后,利用整车总组成工装与底架组成整车,焊接设备安装采用小件,从而完成车体结构生产。

车体几何模型如图 2 所示。

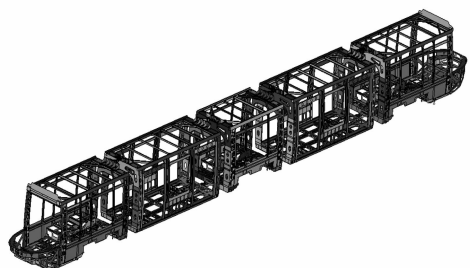


图 2 车体几何模型

车体使用的材料为高强度碳钢材料 S355、铸钢



ZG25MnNi、不 锈 钢 SUS301L-DLT/ST、不 锈 钢 X2CrNiN18-7 以及少量的 09CuPCrNi-A。车体材料特性如表 1 所示。

表 1 车体材料特性

材料牌号	屈服强度/ (N/mm <sup>2</sup> )	拉伸强度/ (N/mm <sup>2</sup> )	杨氏模量/ (N/mm <sup>2</sup> )	泊松比
S355J2+N(L≤16)	≥355	≥470	206 000	0.3
S355J2+N(16<L≤40)	≥345	≥470	206 000	0.3
ZG25MnNi	≥350	≥565	206 000	0.3
SUS301L-DLT	≥345	≥690	206 000	0.3
SUS301L-ST	≥410	≥760	206 000	0.3
X2CrNiN18-7	≥345	≥650	206 000	0.3
09CuPCrNi-A	≥345	≥480	206 000	0.3

注：L 代表板材厚度。

车体结构静强度根据 EN 12663-1:2010《铁路应用——铁道车辆车体的结构要求》<sup>[1]</sup> 进行评定。该标准规定：在所有静强度计算工况作用下，车体各部件的应力均不得大于部件所用材料的许用应力，其安全系数按 1.0 进行考虑。

车体结构疲劳强度根据 EN 12663-1:2010《铁路应用——铁道车辆车体的结构要求》进行评定。本文中车体结构疲劳分析的基本工况共 13 个，组合后疲劳计算工况共 24 个。车体结构的疲劳强度根据标准 DVS 1612:2014《铁道车辆结构中的钢焊接接头的设计和疲劳程度》<sup>[2]</sup> 进行评估。

采用 DVS1612:2014 校核车体结构的疲劳强度时，选取平行于焊缝（母材）的主应力  $\sigma_p$ 、垂直于焊缝（母材）的主应力  $\sigma_v$  及焊缝（母材）的剪应力  $\tau$  等 3 个变量，并按式（1）检验车体结构 3 个方向的应力值。

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{p,zul}} \leq 1, \quad \frac{\sigma_v}{\sigma_{v,zul}} \leq 1, \quad \frac{\tau}{\tau_{zul}} \leq 1 \quad (1)$$

式中：

- $\sigma_{p,zul}$ ——平行于焊缝的最大许用正交应力；
- $\sigma_{v,zul}$ ——垂直于焊缝的最大许用正交应力；
- $\tau_{zul}$ ——平行于焊缝的最大许用剪切应力。

建立车体结构有限元模型时，凡是对该车体整体刚度及局部强度有贡献的结构，都应予以考虑。车体结构模型的构成以四节点薄壳单元为主，三节点薄壳单元为辅，局部如枕梁、铰接装置等采用了实体单元进行模拟。

利用 Ansys 软件对车体结构的静强度进行分

析。车体静强度计算云图如图 3 所示。图 3 中，车体结构静强度的最大应力值出现在 Mc（带司机室的动车）的 3 点支撑工况中，约为 324.44 N/mm<sup>2</sup>；最大应力区域材料为 ZG25MnNi，屈服强度 ≥ 355 N/mm<sup>2</sup>；安全系数为 1.094，满足标准要求。



图 3 车体静强度计算云图

利用 FATEVAS 软件提取车体结构焊缝（母材）单元 3 个方向的主应力值并进行应力系数评估，其应力系数均小于 1，满足标准要求。

车体焊缝疲劳强度计算云图如图 4 所示。由图 4 可知，车体焊缝疲劳强度最大值出现在 F 车（悬浮车，具体指车辆编组中的第 2、4 车）2 位端车门与底架连接处，其应力系数为 0.969。

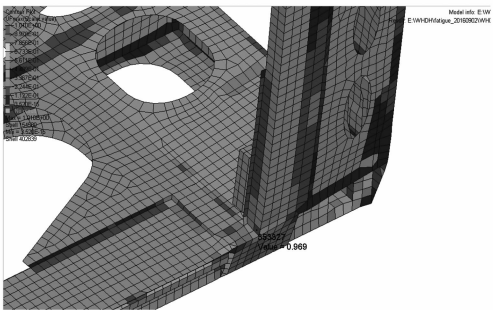


图 4 车体焊缝疲劳强度计算云图

车体母材疲劳强度计算云图如图 5 所示。由图 5 可知，车体母材疲劳强度最大值出现在 Mc 车 2 位端底架二系簧安装面处，其应力系数为 0.923。

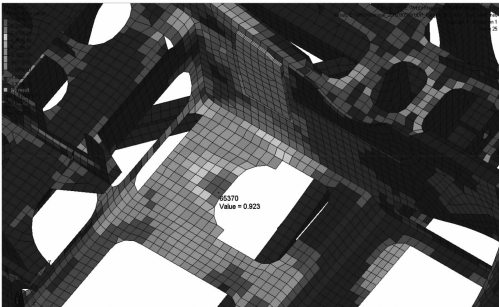


图 5 车体母材疲劳强度计算云图



## 2 车体部件轻量化材料的应用

### 2.1 车体外墙板

车体外墙板采用碳纤维复合材料,总厚度为 6 mm。其中,外墙板外层为 0.5 mm 厚碳纤维板,中间为 5 mm 厚 PVC 材料。外墙板所用材料以及胶均为优质环保材料,符合 TB/T 3139—2006《机车车辆内装材料及室内空气有害物质限量》<sup>[3]</sup>的要求。

碳纤维复合车体外墙板具有轻量化、自带涂装、隔音性好、隔热性能好等特点。车体外墙板材料特性如表 2 所示。

表 2 车体外墙板材料特性

项目	试验标准	参数值
弯曲刚度/(10 <sup>8</sup> N·mm <sup>2</sup> )	GB/T 1456—2005	≥0.4
剪切刚度/10 <sup>4</sup> N	GB/T 1456—2005	≥1.5
面板弯曲强度/MPa		≥100
面板拉伸强度/MPa		≥215
隔热系数/(W/(m <sup>2</sup> ·K))	GB/T 3399—1982	≤10
隔音量/dB	ISO-140-3—2004	≥23
巴氏硬度/HBa	GB/T 3854—2017	>30

车体外墙板采用粘接方式与车体结构固定到一起。粘接后确保整车强度满足 EN 12663-1:2010《铁道应用——轨道车身的结构要求》标准的要求。

对整车车体结构进行有限元网格划分。车体钢结构模型以四节点薄壳单元为主,粘接胶及侧墙板采用 Solid 实体单元进行模拟。整车侧墙板安装有限元模型如图 6 所示。



图 6 整车侧墙板安装有限元模型

车体外墙板粘接强度计算云图如图 7 所示。通过在设定工况下的仿真分析可知,侧墙板粘接胶最

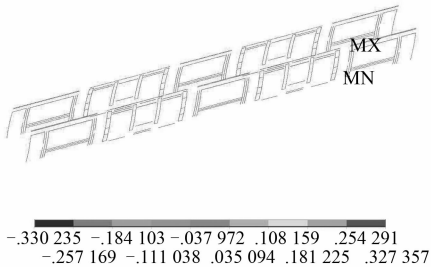


图 7 车体外墙板粘接强度计算云图

大拉伸应力为 0.33 MPa,出现在 Mc 车 2 位端车窗右上角区域;最大剪切应力为 0.333 MPa,出现在 Mc 车 2 位端车窗上方区域。

粘接用胶(以 B0stik ISR70-03 为参考)的拉伸强度约为 2.6 MPa,剪切强度约为 2.5 MPa,拉伸强度安全系数为 7.88,剪切强度安全系数为 7.51,粘接强度满足标准要求。

### 2.2 车顶复合板

车体车顶采用 PET 复合板,总厚度为 22 mm,外层为 1 mm 厚铝板,中间为 20 mm 厚 PET 发泡材料。

车顶复合顶板满足 EN 12663 标准要求。具体要求如下:

1) 静态:纵向±3 g,横向±1 g,垂向(1±c)g。c 为安装于车体上设备的垂向加速度位置修正值。其中,c 在车端为 2,c 在车辆中心为接近 0.5 的线性值。

2) 动态:纵向±0.2 g,横向±0.15 g,垂向(1±0.18)g。

3) 额外的载荷:允许 2 人站在复合板上平面,每人 75 kg,工具 25 kg,每人占用面积为 100 mm×300 mm,安全系数为 1.5。

车顶复合板粘接强度计算云图如图 8 所示。通过在设定工况下的仿真分析可知,车顶复合板粘接胶最大拉伸应力为 2.076 MPa,拉伸强度安全系数为 1.2,最大剪切应力为 1.34 MPa,剪切强度安全系数为 1.87。

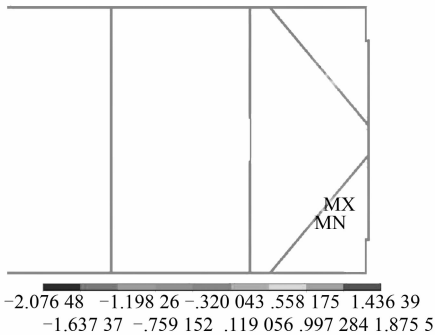


图 8 车顶复合板粘接强度计算云图

## 3 车体内饰部件轻量化材料的应用

### 3.1 客室座椅轻量化材料的应用

客室座椅骨架使用镁铝合金材料(牌号为 AZ31B),座椅面板使用玻璃钢材料。为提高镁铝合金内部骨架的防腐性能,要求座椅内部骨架整体焊接后进行钝化,并在钝化后表面喷漆处理。



横向座椅使用车体在转向架上方的方箱进行安装,纵向座椅使用车体上焊接的滑槽进行安装。

座椅安装结构示意图如图9所示。

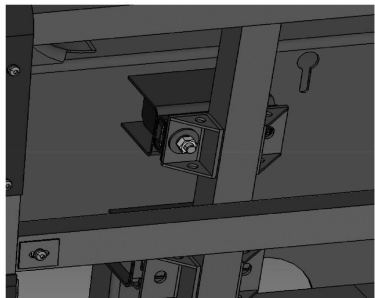


图9 座椅安装结构示意图

客室座椅及安装结构强度计算云图如图10所示。由图10可知,客室座椅结构在静强度载荷工况下,车体钢结构、钢结构安装座及座椅骨架的最大应力分别为65.2 MPa、54.4 MPa、32.8 MPa,安全系数分别为2.85、5.25、3.20,满足UIC 566—1990《客车车体及其零部件的载荷》<sup>[4]</sup>标准要求。

