

轨道交通车辆铝合金车体静强度特性分析

王青权¹ 赵鹏宇¹ 陈刚² 任悦³

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司基础研发部, 130062, 长春; 2. 中车长春轨道客车股份有限公司科技管理部, 130062, 长春; 3. 中车长春轨道客车股份有限公司工程技术部, 130062, 长春//第一作者, 教授级高级工程师)

摘要 以铝合金轨道交通车辆为研究对象, 研究车体的静强度特性, 包括: 总结铝合金材料应用于轨道交通车辆的优势与不足; 分析铝合金车体结构及主要技术参数; 建立仿真模型, 分析典型工况下的车体静强度; 通过仿真获得不同工况下车体应力分布情况; 通过试验验证车体关键部位的应力及安全系数; 分析铝合金车体静强度特性。仿真和试验结果显示, 轨道交通车辆铝合金车体整体安全系数较大, 但车门角、车窗角等区域应力集中较明显, 因此, 设计时应重点考虑轻量化及应力集中区的局部强度问题。

关键词 轨道交通车辆; 铝合金车体; 静强度分析

中图分类号 U270.1*2

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.04.011

Static Strength Characteristics of Aluminum Alloy Rail Vehicle Car-body

WANG Qingquan, ZHAO Pengyu, CHEN Gang, REN Yue

Abstract Taking the aluminum alloy rail vehicle as the research object, the static strength characteristics of the car-body are studied. The advantages and disadvantages of aluminum alloy materials applied to rail vehicle are summarized, the structure and main technical parameters of aluminum alloy car-body are analyzed. Then, by establishing a simulation model, the typical working conditions are determined to analyze the static strength of the car-body. The stress distribution of the car-body under different working conditions is obtained through simulation analysis, the stress and safety factors of the car-body key parts are verified by experiments. On this basis, the static strength characteristics of the aluminum alloy car-body are analyzed. The simulation and experiment results show that the overall safety factors of the car-body are quite high, and the stress concentrations in the corner areas of the door and window are obvious. Therefore the design should focus on the lightweight and local strength concentration zones.

Key words rail transit vehicle; aluminum alloy car-body; static strength analysis

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

随着材料科学的发展, 轨道交通车辆所使用的材料种类日益增多, 如耐候钢、不锈钢、铝合金以及复合材料等。其中碳纤维等新型复合材料正处于研发阶段, 应用尚不成熟, 未得到大规模生产。在已广泛应用于轨道交通车辆车体制造的材料中, 铝合金材料由于具有较高的屈强比、较强的冲击能吸收性、良好的加工性能以及无低温脆性等特点^[1], 因而在轨道交通车辆车体材料的应用方面具有一定的综合性优势。1952年, 英国伦敦地铁首先采用铝合金作为轨道交通车辆车体材料^[2]; 1962年, 日本采用铝合金材料制造出山阳电铁2000系车辆并投入运营^[3]。由于铝合金车体质量较小, 具有良好的经济效益, 因而在世界各国得到了快速发展。1990年, 中车长春轨道客车股份有限公司研制出了国内首辆铝合金车体轨道交通车辆。

轨道交通车辆铝合金车体主要采用5000系、6000系及7000系铝合金。铝合金车体结构可分为板梁焊接结构、大型中空挤压型材与开口型材混合焊接结构、大型中空挤压型材焊接结构等3种结构形式^[4]。因制造工艺简单, 目前铝合金车体多采用氩弧焊组焊式中空挤压型材焊接结构^[5]。

铝合金的屈服极限与密度之比(量纲归一后)约为46.3~103.7, 而耐候钢约为37.6~87.9, 不锈钢约为43.9~70.1^[6], 由此可看出铝合金在车体轻量化方面具有较大的优势(新型复合材料在轨道交通车辆车体结构上的应用尚不成熟)。然而, 铝合金的弹性模量较小会导致车体刚度降低, 因此, 为提高车体刚度和断面系数, 需加大铝合金板材厚度。通常铝合金板材厚度约为不锈钢的1.4倍, 且不小于2 mm。

本文以某型铝合金车体为例开展仿真分析和试验验证, 研究铝合金车体的特性。

1 车体结构

以中车长春轨道客车股份有限公司设计的某铝合金材料B型地铁车辆M车车体为研究对象,如图1所示。车体采用大型桁架中空型材组焊式结构,铝合金型材沿车体纵向对接,采用连续自动弧焊工艺焊接。车体主要几何尺寸如表1所示。车体牵引梁、枕梁、车钩座及门角等结构采用6082-T6铝合金材料,底架、侧墙、端墙和车顶采用6005A-T6铝合金型材。各材料的屈服极限如表2所示。

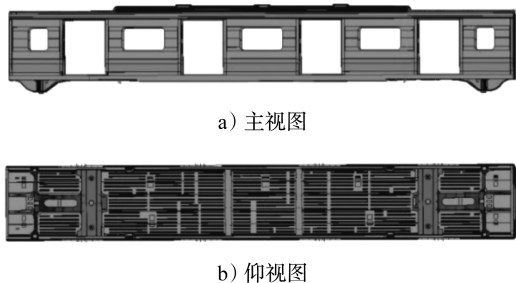


图1 B型M车的车体结构示意图

表1 B型M车的车体主要几何尺寸

| 参数 | 数值 |
|---------------|--------|
| 车体长度/mm | 19 000 |
| 车体宽度/mm | 2 800 |
| 车辆定距/mm | 12 600 |
| 车钩中心线至轨面高度/mm | 660 |

表2 铝合金车体材料屈服极限

| 材料 | 厚度/mm | 母材屈服极限/MPa | 焊缝区屈服极限/MPa |
|----------|-----------------|------------|-------------|
| 6082-T6 | 3.0 < δ ≤ 6.0 | 260 | 125 |
| | 6.0 < δ ≤ 12.5 | 255 | 125 |
| | 12.5 < δ ≤ 60.0 | 240 | 125 |
| | δ ≤ 5.0 | 225 | 115 |
| 6005A-T6 | 5.0 < δ ≤ 10.0 | 215 | 115 |
| | 10.0 < δ ≤ 25.0 | 200 | 115 |

该铝合金车体裸车质量为6 630 kg,整备状态下质量为20 767 kg,最大有效载荷为20 694 kg。对照来看,主要几何尺寸相同的不锈钢材料车体,其裸车质量约为7 520 kg,因此,使用铝合金材料可使车体质量减少约11.8%,轻量化效果较显著。

2 仿真分析

2.1 仿真模型及工况

采用ANSYS软件对铝合金车体静强度进行有限元分析,有限元模型如图2所示。建立车体有限元模型并划分网格,模型的构成以四节点薄壳单元为主,三节点薄壳单元为辅。车体有限元模型中包含1 793 523个单元,1 478 029个节点。



图2 车体有限元模型

根据EN 12663-1: 2010+A1: 2014《铁路应用—铁路车辆车体的结构要求—第1部分:机车和客车(及货车的替换法)》标准,选取竖向超员载荷工况、车钩区域640 kN拉伸载荷+竖向超员载荷工况、车钩区域800 kN压缩载荷+竖向超员载荷工况、腰带高度300 kN压缩载荷+垂向整备载荷工况、支撑点移位工况等5种典型工况进行车体静强度分析。各工况载荷及约束条件如表3所示。

2.2 仿真结果

在上述工况条件下对车体静强度进行仿真分析,得到不同工况下车体各部位的Von-Mises应力。

表3 仿真分析中各工况载荷及约束条件

| 序号 | 工况 | 载荷 | 约束条件 |
|-----|-----------------------|---------------------------|---|
| 工况1 | 竖向超员载荷 | 车体、设备及乘客的质量均布地板上 | |
| 工况2 | 车钩区域640 kN拉伸载荷+竖向超员载荷 | 竖向载荷同工况1,纵向载荷作用于车钩座处 | 空簧处约束竖向位移;枕梁与转向架连接处约束横向位移;车钩座处约束纵向位移 |
| 工况3 | 车钩区域800 kN压缩载荷+竖向超员载荷 | 同工况2 | |
| 工况4 | 腰带高度300 kN压缩载荷+竖向整备载荷 | 竖向载荷同工况1 纵向载荷作用于端墙腰带高度 | |
| 工况5 | 支撑点移位 | 竖向载荷同工况1 | 一位端一位侧架车位支撑点垂直下降10 mm; 其余3个架车位约束横向、纵向及竖向位移 |

其中,产生应力集中的部位、应力及安全系数如表4所示。安全系数较小区域位置的应力云图见图3。

表4 各工况应力集中部位仿真结果

| 工况 | 位置 | 应力/MPa | 屈服强度/ MPa | 安全系数 |
|-----|--------|--------|--------------|------|
| 工况1 | 枕梁 | 97.0 | 225 | 2.32 |
| 工况2 | 车钩座 | 118.5 | 255 | 2.15 |
| | 牵引梁 | 94.8 | 255 | 2.69 |
| 工况3 | 车钩座 | 159.0 | 255 | 1.42 |
| | 牵引梁 | 128.4 | 255 | 1.99 |
| | 车门角 | 116.4 | 225 | 1.93 |
| | 车门角 | 113.0 | 225 | 1.99 |
| 工况4 | 端墙腰带高度 | 141.9 | 225 | 1.59 |
| 工况5 | 车门角 | 121.8 | 225 | 1.85 |
| | 车门角 | 101.1 | 225 | 2.23 |

由仿真结果可知,在上述工况下所得到的铝合金车体各部位安全系数均大于1.0,车体静强度满足要求。进一步针对多种工况进行仿真分析,得到各工况下车体 Von-Mises 应力分布情况。由应力分布情况可知,车体侧墙(除门角、窗角区域外)、端墙、地板、顶板等结构的应力很小,多数工况下不超过30 MPa,安全系数较大;枕梁、底架边梁、底架端梁、底架横梁等结构的应力较小,安全系数一般不小于3.0;门角和牵引梁等结构易产生应力集中,局部应力较大,安全系数较小。

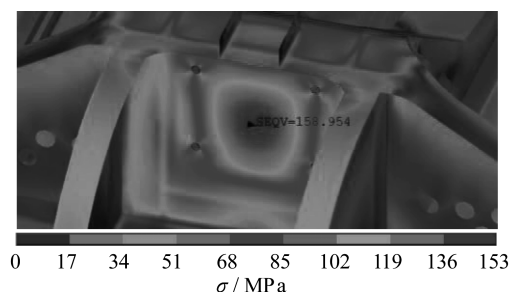
3 试验验证

3.1 试验方法及测点布置

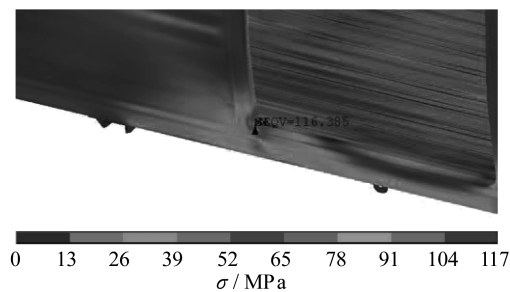
针对表3所示工况,利用铝合金车体样车进行试验研究。通过测量车体关键部位应力数值,分析车体静强度是否满足EN 12663标准的要求。

车体竖向载荷通过砝码均布加载于地板,模拟乘客及车内设备设施质量;空调载荷通过托盘及砝码均布在车顶空调安装位置;纵向载荷由液压缸通过工装施加于车体端部的车钩座或端墙腰带位置。工况1—工况4中,车体由假台车支撑在空气簧位置;工况5中,车体由千斤顶支撑于枕内抬车位。

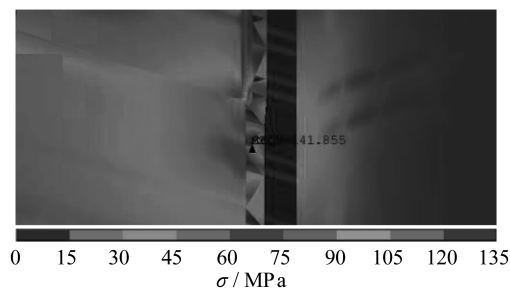
车体应力由应变片测得的应变数据计算求得。根据仿真结果并结合车体结构特点,应变片布置于侧窗角、侧门角、端门角、上边梁、牵引梁等位置。承受应力较复杂的区域,如侧墙腰带高度和侧墙上边梁高度等部位,则通过应变花测量各向应变。



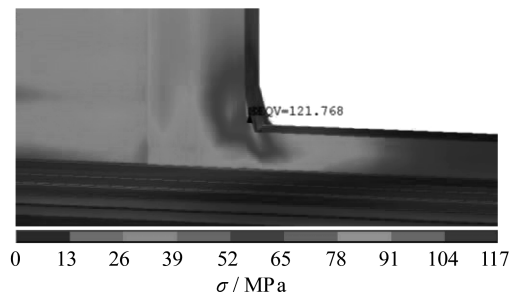
a) 工况3车钩座



b) 工况3车门角



c) 工况4端墙



d) 工况5车门角

图3 安全系数较小区域的应力云图

3.2 试验结果

在上述工况下对车体静强度进行强度试验,计算相应位置的应力值。其中,应力较大和安全系数较小位置的试验结果如表5所示。

由试验结果可知,各工况下所有测点位置应力均小于材料屈服强度,车体静强度满足要求。应力较大、安全系数较小的位置集中于车门角、车窗角以及牵引梁处;其余位置应力较小,安全系数一般不小于3.0,其中车体上边梁、侧墙、端墙等结构在各工况下承受应力均很小,安全系数大于100.0。

表5 各工况应力集中部位试验结果

| 工况 | 位置 | 应力/MPa | 屈服强度/MPa | 安全系数 |
|-----|-----|--------|----------|------|
| 工况1 | 车窗角 | 59.2 | 115 | 1.94 |
| | 车门角 | 56.1 | 115 | 2.05 |
| | 车门角 | 50.1 | 115 | 2.30 |
| 工况2 | 车门角 | 40.3 | 115 | 2.85 |
| | 车门角 | 38.8 | 115 | 2.96 |
| | 端门角 | 75.1 | 115 | 1.53 |
| 工况3 | 牵引梁 | 61.0 | 125 | 2.05 |
| | 车门角 | 54.5 | 115 | 2.11 |
| | 牵引梁 | 58.6 | 125 | 2.13 |
| 工况4 | 牵引梁 | 58.0 | 125 | 2.16 |
| | 车窗角 | 59.3 | 115 | 1.94 |
| | 车门角 | 71.6 | 115 | 1.61 |
| 工况5 | 车门角 | 66.8 | 115 | 1.72 |
| | 车门角 | 60.7 | 115 | 1.89 |

4 仿真及试验结果分析

通过仿真分析与试验验证可知,在所有工况下车体各部位静强度均满足EN 12663标准的要求。车门角、车窗角以及牵引梁区域易产生应力集中,导致应力较大、安全系数较小,但安全系数一般不小于1.50。车体其余部位安全系数较大。

仿真与试验结果趋势相同,但数值上存在一定误差。其主要原因包括:建模过程中对车体结构和载荷施加方式的简化、网格划分情况(特别是边界区域和复杂结构网格形式及尺寸的选取)、试验样车制造过程中的工艺缺陷和加工误差,以及试验工装、操作工人技术水平、试验测点选择、数据采集系统精度、试验场地温度变化等因素。以上因素都会对仿真分析和试验数据产生影响。

综合仿真与试验结果可知,铝合金车体的整体安全系数较大,其中车体侧墙、端墙、车顶、上边梁等结构安全系数很大。由于这些部件尺寸较大,占据了车体大部分质量,若仅考虑车体静强度,则可优化部件结构,适当减少材料用量,以降低车体整备质量。

车门角、车窗角区域应力集中较明显,安全系数远小于车体其他区域。其原因在于铝合金车体采用大型桁架中空型材组焊式结构,此种结构的车体型材为主要承载部件,但由于车门和车窗区域的横截面不完整,有效承载面积减小,导致截面惯性矩较小,抗弯能力减弱。通过对车体不同位置横截面惯性矩的仿真可知,相比于完整截面:车窗截面承载面积减小10.8%,惯性矩减小16.6%;车门截面

承载面积减小35.0%,惯性矩减小49.5%;车窗与空调截面承载面积减小20.0%,惯性矩减小32.0%;车门与空调截面承载面积减小54.0%,惯性矩减小54.1%^[7]。由此可见,车门、车窗及空调的尺寸对于车体抗弯能力和承载能力影响很大。与不锈钢车体的整体承载板梁结构相比,在相同的几何尺寸下,铝合金车体的车门角和车窗角更易产生应力集中现象。因此,铝合金车体设计过程中应重点考虑车门、车窗及空调结构尺寸的优化,适当增大门窗的圆角或添加补强结构,同时应尽量避免将空调安装于车门上方。

另外,铝合金车体由于采用电弧焊组焊工艺,焊接过程产生的热量较多,使得焊缝区铝合金材料的屈服强度较母材降低约50%,降低了铝合金车体焊缝区的局部强度。因此,开发新型铝合金焊接工艺,减少焊接过程对材料屈服强度的影响,成为提高铝合金车体强度的另一有效途径。

5 结语

本文以某型铝合金材料轨道交通车辆为研究对象,研究铝合金车体的静强度特性。通过仿真分析与试验验证可知:在所有工况下车体各部位静强度均满足要求;仿真与试验结果趋势相同,但数值上存在一定的误差;铝合金车体的整体安全系数较大,可通过结构优化适当减少材料用量,以降低车体整备质量;车门角、车窗角区域应力集中较明显,应在设计过程中考虑结构和尺寸优化;为提高焊缝区铝合金材料的屈服强度,可开发新型铝合金焊接工艺,以减少焊接过程对材料屈服强度的影响。

参考文献

- [1] ADAMOWSKI J, SZKOD M. Friction Stir Welding (FSW) of aluminum alloy 6005 A-T6[J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2014, 2(5): 120.
- [2] 张铁浩, 韩德成, 刘胜龙, 等. 轨道车辆铝合金车体搅拌摩擦焊的工业化应用[J]. 焊接, 2013(10): 25.
- [3] 张占领, 邱然锋, 杜宜乐, 等. 铝合金在日本轨道车辆的应用及相应焊接技术[J]. 电焊机, 2011, 41(11): 11.
- [4] 阎锋. 铁路客车车体结构轻量化研究[J]. 国外铁道车辆, 2016, 53(1): 1.
- [5] 员华, 邹鹏. 不锈钢车体与铝合金车体的现状及发展[J]. 都市快轨交通, 2008, 21(3): 89.
- [6] 马洪光, 阎锋, 邓海. 轨道客车车体结构材料选择分析[J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(4): 54.
- [7] 谢素明, 王思阳, 高阳. 高速动车组铝合金车体性能的深入研究[J]. 大连交通大学学报, 2014, 35(6): 14.

(收稿日期: 2019-08-10)