

客车车身结构精细化设计

刘永博¹, 王 微¹, 詹国臣², 张佩红¹, 陈一林¹, 胡建青¹

(1. 清华大学苏州汽车研究院(吴江), 江苏 苏州 215200; 2. 金龙联合汽车工业(苏州)有限公司, 江苏 苏州 215026)

摘 要:为减少客车车身结构设计冗余,探讨车身骨架、预埋精细化设计方法,为车身结构优化和轻量化设计提供参考。

关键词:客车; 车身结构; 精细化设计

中图分类号:U463.83⁺1

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2023)04-0035-05

Refined Design of Coach Body Structure

LIU Yongbo¹, WANG Wei¹, ZHAN Guochen², ZHANG Peihong¹, CHEN Yilin¹, HU Jianqing¹

(1. Suzhou Automotive Research Institute Tsinghua University(Wujiang), Suzhou 215200, China;

2. Higer Bus Co., Ltd., Suzhou 215026, China)

Abstract:To reduce the design redundancy of coach body structure, the authors discuss the refined design method for the body framework and embedded parts to provide a reference for body structure optimization and lightweight design.

Key words:coach; body structure; refined design

车身骨架和预埋件约占白车身比重的60%,轻量化有助于传统汽车降低耗油,纯电动汽车提高续航里程^[1]。精细化设计也是实现轻量化的一种措施,目的是深度消除冗余结构和缩小设计余量,同时不改变客车制造工艺流程。此前,不少研究聚焦轻质材料、新型成型工艺和结构拓扑优化等方向。例如基于客车底架结构的受力工况,对结构拓扑优化,提高了扭转刚度和强度,但未考虑降低材料用量^[2-3];采用大封闭环和小封闭环结合的方法提高结构安全,未分析预埋结构以及设计细节^[4-5];利用辊压型材以减少拼焊结构,不但成本较高,而且对工艺影响大^[6]。近些年,随着钢铁价格不断提高,减少原材料消耗,提高设计精细化水平,对提高材料利用率具有重要意义。

1 客车车身结构设计现状

客车车身结构设计必须要满足国家法规/标准规定的侧翻、碰撞等要求,确保车身结构强度和刚度满

足安全性能需要^[7-8]。

客车产品有多品种、小批量,产品迭代周期快、配置丰富等特点^[9-10]。由于产品开发和订单设计周期较短,在传统的设计过程中,工程人员主要凭借经验设计结构的细节,存在一定的“延续性设计”思维(即沿用前人积累的经验),缺乏量化的控制方法^[11-12]。因而始终存在结构件冗余、预埋件冗余问题,对轻量化技术发展十分不利。为了尽快完成研发任务和订单设计,车身预埋件也设计得越来越大,虽然满足了可靠性要求,但设计过于保守,导致设计冗余现象十分突出。

此外,客车车身结构安全越来越受到重视,国家标准也逐步增加安全方面的规定和要求,仅凭借经验的设计方法已无法跟上时代的步伐。

2 车身精细化设计方法

2.1 骨架结构精细化设计

骨架结构精细化设计原则:根据产品类型和配置

收稿日期:2023-01-30。

第一作者:刘永博(1991—),男,硕士;工程师;主要从事汽车轻量化、智能网联汽车技术研究工作。E-mail: yongbo_liu@foxmail.com。

确定精细化设计方案;同系列车型,统一减重方法。精细化设计方法具体措施有3种:①关键截面和位置采用高强度材料,壁厚可适当减薄;②非主要受力矩形钢管壁厚减薄或采用槽钢、角钢等小截面型材;③优化矩形钢管或型材档距布局。精细化设计之后,通过仿真分析,可快速初步判断优化后结构是否满足许用要求。

以某款12 m公路客车主销车型车身结构为例:2016年上市以来,客户反馈结构失效问题主要是底架截面,而顶盖骨架、侧围骨架结构可靠性较高。该款车顶盖骨架矩形钢管冗余,且有钢质型材选用、档距布局不合理等问题,仍有深度优化空间(如图1所示)。企业虽有相关设计规范作为指导,但仅满足安全性、可靠性,没有对骨架结构细节设计进行约束和控制。

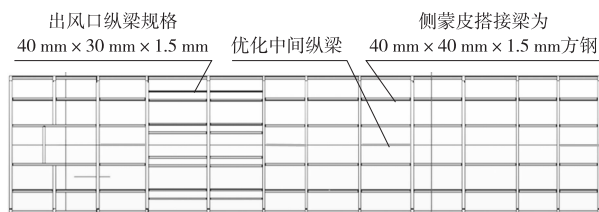


图1 精细化设计前顶盖骨架

优化前该顶盖骨架已经全部采用了700 MPa高强度材料,骨架壁厚也全部做了减薄处理,凭借传统经验设计已经很难继续深入优化。通过精细化设计确定优化方法:①优化侧顶蒙皮和中间蒙皮搭接梁,切换成40 mm×20 mm×15 mm的槽钢;②优化空调出风口、回风口处矩形钢管规格方钢,材料为普通钢;③优化中间纵梁,左右两侧纵梁档距提高到600 mm。精细化设计后的顶盖骨架如图2所示。

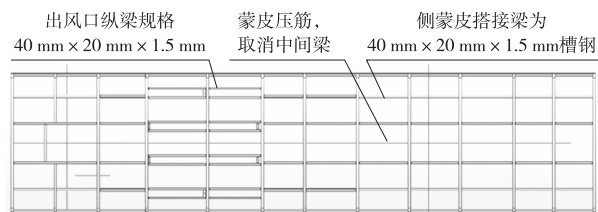


图2 精细化设计后顶盖骨架

侧围、前后围、底架的精细化设计均可参考以上设计方法。

2.2 精细化设计前后骨架结构分析

根据上述精细化设计方案,通过Hypermesh软件分析顶盖骨架结构刚度和强度变化。在自然状态工况下,分析其前三阶固有频率变化情况,固有频率的变化直接反映其更改前后刚度变化情况,表1为顶盖骨架固有频率分析结果。图3为精准设计前后顶盖骨架的前三阶振型图。从表1和图3中可以看到:精准设计前后一阶振型都为扭转变形,精准设计后其固定频率降低0.13 Hz;二阶振型都为弯曲变形,其固定频率降低了0.2 Hz;三阶振型都为扭转变形,其固定频率降低了0.38 Hz。精准设计前后的刚度损失在5%以内,振型无明显变化,满足设计要求。

表1 顶盖骨架模态分析结果

模态状态	精准设计前/Hz	精准设计后/Hz	刚度损失/%
(一阶)扭转变形	4.02	3.89	3.2
(二阶)弯曲变形	4.3	4.1	4.7
(三阶)扭转变形	8.42	8.04	4.5

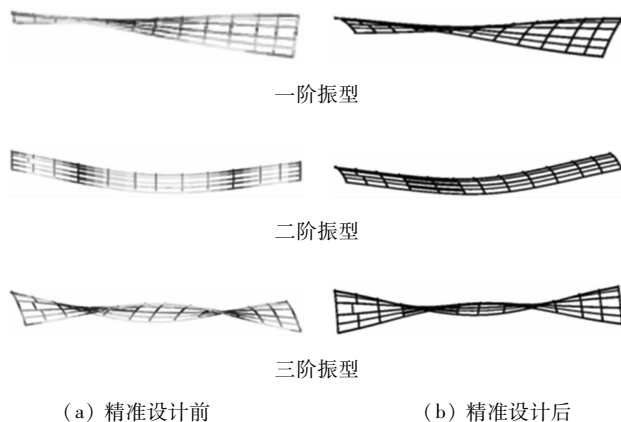


图3 顶盖骨架模态分析

顶盖空调载荷简化为质点加载,建立顶盖强度受力有限元模型,如图4和图5所示。空调质量为342 kg,约束顶盖四周6个方向自由度。为提高仿真准确度,模拟颠簸路段下的重力加速度值,一般放大5倍重力加速度 g 值,因此 $F=342\times9.8\times5=16\,758(\text{N})$ 。

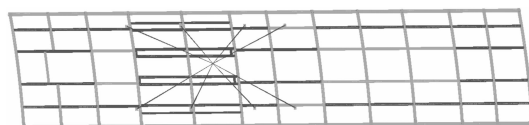
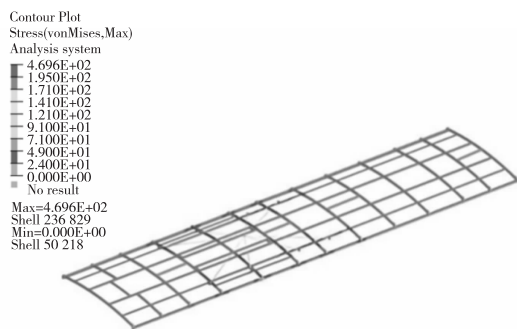
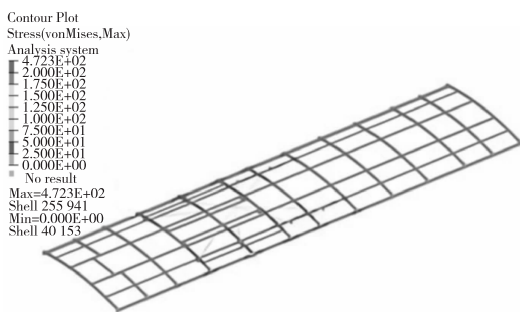


图4 顶盖骨架强度分析模型

1) 精准设计前。顶盖骨架边纵梁、顶横梁等关键位置采用屈服强度为 700 MPa 的高强钢, 壁厚为 1.5 mm; 空调固定预埋件采用屈服强度为 700 MPa 的高强钢, 壁厚为 4.0 mm。其他纵向纵梁使用屈服强度为 345 MPa 的普通钢, 壁厚为 1.5 mm。顶盖骨架总质量为 185.7 kg。如图 5(a) 所示, 精准设计前顶盖骨架最大应力为 469.6 MPa, 位于空调螺栓固定预埋位置, 此位置的固定预埋屈服强度为 700 MPa, 符合要求。顶盖骨架方钢上的最大应力为 195 MPa, 位于顶弧梁和边纵梁的连接处, 此位置的材料屈服强度也是 700 MPa, 符合要求。其他纵向纵梁的最大应力均小于 91 MPa, 低于纵梁的材料屈服强度 345 MPa, 符合要求。



(a) 精准设计前



(b) 精准设计后

图5 顶盖骨架强度分析结果

2) 精准设计后。顶盖骨架边纵梁、顶横梁等关键位置改用屈服强度为 345 MPa 的普通钢, 壁厚为 1.5 mm, 空调固定预埋件仍采用屈服强度为 700 MPa 的高强钢, 壁厚为 4.0 mm。其他位置结构按照 2.1 节中的优化方法, 侧顶蒙皮和中间蒙皮搭接梁切换成 40 mm×20 mm×1.5 mm 的槽钢, 壁厚为 1.5 mm, 材料屈服强度为 235 MPa。优化空调出风口、回风口处矩

形钢管方钢规格, 壁厚为 1.5 mm, 材料屈服强度为 235 MPa。优化中间纵梁, 左右两侧纵梁档距增加到 600 mm, 壁厚为 1.5 mm。精准设计后顶盖骨架质量为 162.1 kg, 减少了 23.6 kg, 减少的质量占顶盖骨架总质量的 12.7%。如图 5(b) 所示, 精准设计后顶盖骨架最大应力为 472.3 MPa, 位于空调螺栓固定预埋位置, 此位置的固定预埋屈服强度为 700 MPa, 符合要求。顶盖骨架方钢上的最大应力为 205.5 MPa, 出现在顶弧梁和边纵梁的连接处, 此位置的材料屈服强度是 345 MPa, 安全系数为 3.4, 符合要求。

2.3 车身预埋件精细化设计和分析

2.3.1 车身预埋件精细化设计

预埋件焊接在骨架上, 用于固定车内外零部件, 主要有预埋板、预埋角钢和预埋槽钢 3 种截面, 如图 6 所示。传统设计方法中, 为了实现固定牢靠的目标, 主要关注螺栓是否达到预紧力要求, 往往忽视了预埋在轻量化中的作用。以某款 12 m 公路客车为例, 焊接在悬架上的预埋件质量约 106 kg, 约占车身骨架质量的 8.8%。预埋件精细化设计, 对车身减重、轻量化研究都具有重要价值。

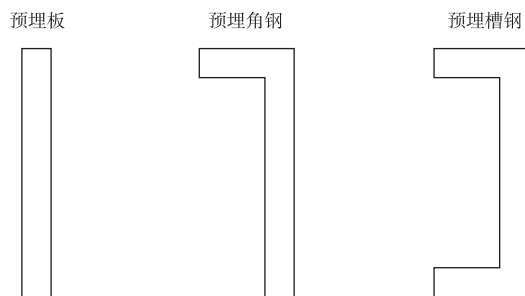


图6 3种预埋截面

安装在车内的零部件, 允许存在一定的工艺偏差。因此, 预埋件精细化设计原则如下: 满足功能、强度和刚度, 安装有误差余量。预埋件误差余量目前没有统一标准, 为了确保能够满足安装需求, 企业往往仅设定了下限, 没有规范边界上限。预埋件设计一般由工程师根据经验确定上下限, 从而导致预埋件的设计尺寸越来越大甚至可能出现失效的风险。

2.3.2 车身预埋件受力分析

以某款 12 m 公路客车右前护栏悬臂预埋件受力

分析为例。如图 7 所示,预埋件的悬臂 H 值由护栏安装的前后位置确定,宽度 L 由护栏底座宽度决定。悬臂预埋边界距离 h 根据工艺水平设定在 20~30 mm 之间,一般取整。悬臂预埋长度 H 为研究目标,分别采用 3 种悬臂结构(方板、角钢、槽钢)左侧满焊固定,厚度为 5 mm,材料为 Q345,泊松比为 0.3,弹性模量为 $2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 。材料密度为 $7.9 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$,有限元分析中,网格单元大小 2 mm,单元类型为 pshell,载荷 $F=500 \text{ N}$ (单孔估算值),方向垂直向下, m 为加载力到固定端的距离,分别等差 10 mm,加载 12 次。预埋受力分析有限元模型如图 8 所示。

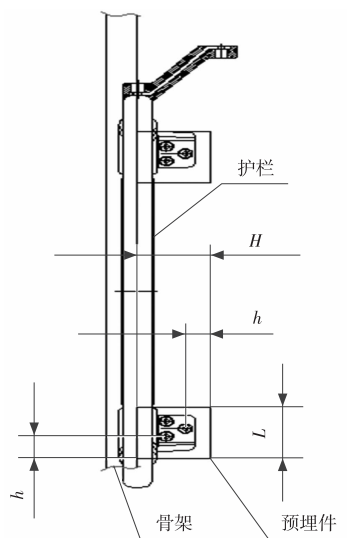


图 7 右前护栏固定在悬臂预埋件示意图

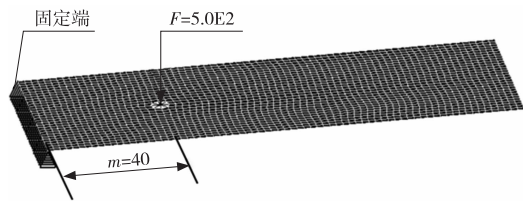


图 8 预埋受力分析有限元模型

2.3.3 车身预埋件精细化设计结果

从图 9 和图 10 中可得出以下结论:

1) 从受力角度看,当 $H \leq 100 \text{ mm}$ 时,方板、角钢和槽钢三者的最大应力都满足要求;当 $100 \text{ mm} < H \leq 120 \text{ mm}$ 时,只有角钢和槽钢的最大应力满足要求。

2) 从变形角度看,当 $H < 60 \text{ mm}$ 时,方板、角钢和槽钢三者的最大变形都满足要求;当 $60 \text{ mm} \leq H \leq 120 \text{ mm}$ 时,只有角钢和槽钢的最大变形满足要求。

结合以上结论和成本分析可知,当 $H < 60 \text{ mm}$ 时,可优先考虑方板;当 $60 \text{ mm} \leq H \leq 120 \text{ mm}$ 时,考虑槽钢或者角钢。

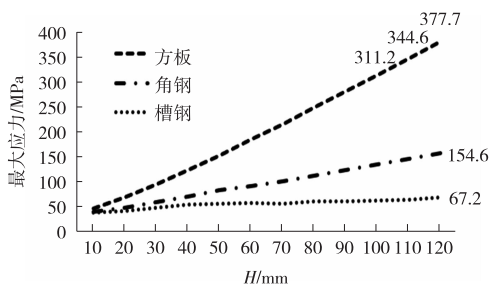


图 9 3 种型材结构应力对比

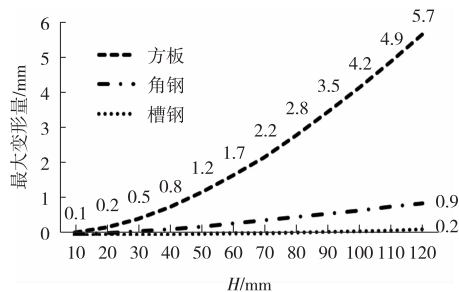


图 10 3 种型材结构变形对比

表 2 为某款 12 m 公路客车车身预埋件精细化设计前后的统计表,车身预埋件累计减重 25.5 kg,按照当时普通碳素钢 Q345 价格 6.7 元/千克估算,单车降本可达 170.9 元。

表 2 预埋件精细化设计效果

预埋件	传统/精化设计/kg	减重比/%	降本/元
前围上	15/10	33.3	33.5
后围上	8/5	37.5	20.1
左、右侧围上	6/4.5	25.0	10.1
顶盖上	66/55	16.7	73.7
地板上	11/6	45.5	33.5

3 结束语

本文分析和探讨了车身骨架结构精细化设计、车身预埋精细化设计在客车轻量化中的设计思路和方法,对结构精细化和车身预埋精细化设计做了案例分析,对常用的预埋受力做了仿真分析,总结了悬臂预埋的边界参考值,可以辅助客车车身设计人员进一步开展轻量化研究。

参考文献:

- [1] 郭韦华.轻量化技术在汽车工程中的应用[J].工程技术研究,2020,5(3):127-128.
- [2] 王文甲,吴长风,张勇,等.客车骨架局部结构的多工况拓扑优化设计[J].客车技术与研究,2018,40(1):26-29.
- [3] 姚成.客车局部结构刚度贡献度评价方法改进及应用研究[D].长春:吉林大学,2018.
- [4] 韩刚.纯电动客车车身结构设计及强度分析[J].黑龙江科学,2022,13(2):1-3.
- [5] 林凯.全承载式客车车身两种结构方案的探索与研究[D].长春:吉林大学,2007.
- [6] 酒军亮,詹国臣,王小伟,等.集成式辊压型材在客车车身结构轻量化设计中的应用探讨[J].客车技术与研究,2021,43(5):34-37.
- [7] 中华人民共和国工业和信息化部.客车结构安全要求:GB 13094—2017[S].北京:中国标准出版社,2017:5-6.
- [8] 于维东.基于侧翻安全的10米级公路客车车身设计与优化[D].长春:吉林大学,2016.
- [9] 刘承.客车生产工艺的研究与应用[J].汽车测试报告,2021(20):35-36.
- [10] 王童,杜轶群,陈轶嵩,等.基于结构轻量化的城市客车车身生命周期评价[J].汽车工程,2022,44(5):778-788.
- [11] 刘凯.客车车身六大片骨架的焊接结构及工艺探讨[J].汽车实用技术,2013(12):104-106.
- [12] 刘开春.客车车身设计[M].北京:机械工业出版社,2015:12-37.

热烈祝贺本刊新版网站正式上线运行

在招商局检测车辆技术研究院有限公司的大力支持下,经过大家的共同努力,《客车技术与研究》官网改版工作完成,并正式上线运行。

新网站版面清新,功能完善。稿件处理系统便于作者在线投稿、专家审稿,大大提高了工作效率;新增文献下载功能,为读者提供贴心服务。

欢迎使用,欢迎提出宝贵意见,以便进一步完善。

网址:<http://bus-in.cmvrr.com.cn>。