

城市轨道交通车辆轻量化车体结构材料的研究与应用

康兴东 龚晓波 赵 建

(中车青岛四方车辆研究所有限公司,266031,青岛//第一作者,工程师)

摘 要 新型轻量化车体结构材料是实现城市轨道交通车辆轻量化的重要途径。介绍了纳米组织控制铝合金、阻燃镁合金和复合材料等新型材料的研究和应用情况。指出我国应加强新型轻量化材料在城市轨道交通领域的研究与运用,推出自主产权产品,全面提升制造水平。

关键词 车辆;轻量化车体结构;复合材料车体;纳米组织控制铝合金;阻燃镁合金

中图分类号 U270.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.06.043

Research and Application of Lightweight Carbody Structural Material for Urban Rail Transit Vehicle

KANG Xingdong, GONG Xiaobo, ZHAO Jian

Abstract An important way to realize the urban rail vehicle lightweight is to use the new lightweight carbody structural material. In this paper, the research and application of new materials such as the nano-structure controlled aluminum alloy, ignition-proof magnesium alloy and composite material are described. It is pointed out that the research and application of new lightweight material to urban rail transit vehicle in China should be strengthened, in order to manufacture the products

with independent property rights and improve the manufacturing level.

Key words vehicle; lightweight carbody structure; composite carbody; nanostructure controlled aluminum alloy; ignition-proof magnesium alloy

Author's address CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 266031, Qingdao, China

城市轨道交通车辆的车体结构轻量化是城市轨道交通可持续发展的关键因素之一。轻量化车体结构不仅能提高列车行驶速度和能源利用率,还能有效减小轮轨间的磨损和冲击,提升列车的抗振性和防噪性,降低车辆寿命周期成本。新型轻量化车体结构材料的选用是实现城市轨道交通车辆轻量化的重要途径。

1 城市轨道交通车辆常用车体结构材料

城市轨道交通车辆常用的车体结构材料主要有耐候钢、低合金高强度钢、不锈钢和铝合金,如表1所示。

表1 城市轨道交通车辆常用的车体结构材料示例

城市轨道交通制式	示例项目名称	车体结构材料
地铁	伊朗伊斯法罕地铁1号线	低碳钢、耐候钢
	巴西里约1A线、香港南港岛线	不锈钢
	印度新德里—古尔冈地铁、沙特麦加地铁朝觐线	铝合金
轻轨	伊朗马沙德轻轨1号线	耐候钢、低合金高强度钢
	土耳其伊兹密尔1号线、马来西亚安邦延伸线	铝合金
单轨	重庆跨坐式单轨3号线、德国杜塞尔多夫机场单轨线	铝合金
市域快轨	南京S8线、温州S1线	铝合金
	北京有轨电车西郊线、苏州有轨电车1号线	耐候钢、低合金高强度钢
	南京河西有轨电车1号线	耐候钢、铝合金混合
现代有轨电车	上海磁浮示范线、长沙磁浮快线	铝合金
	上海轨道交通浦江线	铝合金

钢质车体一般都采用整体承载式板梁结构,但由于不锈钢材料的比强度较高,同时不锈钢材料具有超强的耐腐蚀性,无需考虑腐蚀所引起的承载截面变小、涂装等问题,且不锈钢材料的板厚可以做得很薄,所以不锈钢车体相比其他钢质车体更轻^[1-2]。

在常用的车体结构材料中,铝合金材料的密度约为钢质材料的 1/3,且比强度最大,因此铝合金车体结构最轻。不过铝合金材料的弹性模量也约为钢质材料的 1/3,在保证车体结构具有足够强度和刚度的条件下,铝合金车体通常需要采用中空挤压型材整体承载结构。此外,铝合金车体还须进行防腐、涂装等工序,这使得整备后的铝合金车体与不锈钢车体的质量相差并不大,故两者均为当前应用最广泛的轻量化车体结构材料。

2 新型轻量化车体结构材料的研究与应用

上述常用轻量化车体结构材料在面对高温、高寒、高海拔等恶劣运行环境时,难以满足车辆的更高要求。不锈钢车体具有气密性差、局部屈曲、表面划伤难处理等问题;铝合金车体存在应力腐蚀、疲劳强度低、低温脆性等缺陷,同时现有铝原料也面临日益枯竭,因此急需探寻新型、轻量化的车体结构材料和先进的制造技术,以实现城市轨道交通的可持续发展。

2.1 纳米组织控制铝合金的研究

铝合金是由基础元素铝、主加元素(硅、铜、镁、锌、锰)和辅加元素(镍、钛、铬、铁、锂)共同组合而成,其金属组织可见形态为:晶界分离形成多个晶粒,同时产生了析出物。通过铝合金纳米组织控制方法,不仅能使析出物微细化,也可使晶粒的大小微细到纳米尺寸,从而改善铝合金材料的性能,实现车体结构的轻量化。

铝合金车体结构大多选用 Al-Mg-Si 系和 Al-Zn-Mg 系铝合金。日本研究人员分别对 A6N01 和 A7N01 两种铝合金材料进行铸造处理、固溶处理、固溶处理+时效处理及添加纳米组织控制处理。对比发现,相比其他处理工艺,纳米组织控制铝合金材料的 0.2% 屈服强度及最大拉伸强度均有所增加,且比日本工业标准中的下限值提高了 1.5~1.8 倍^[3]。

此外,研究人员对一般铝合金的薄板和纳米组织铝合金材料进行了搅拌摩擦焊试验。试验发现,

一般材料的薄板在焊缝区域存在接合缺陷,而对通过纳米组织控制析出物的薄板进行焊接,其焊接区域能够消除缺陷,实现良好的接合。分析认为,这是由于纳米组织控制改善了材质的延展性。此外,本研究还进行了应力腐蚀裂纹对比试验,结果表明通过控制纳米组织能够改善材料耐腐蚀性^[3-4]。

2.2 阻燃镁合金的研究与应用

镁合金是工程应用中密度最小的结构金属材料其密度为 $1.74 \times 10^3 \sim 1.90 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,仅为铝合金的 2/3;镁合金的强度、塑性和韧性等指标与铝合金相当;镁合金具有优异的机械加工性能和铸造性能,切削阻力小,可实现高速切削加工,加工后产品的尺寸精度较高、表面粗糙度较低;镁及镁合金为密排六方晶体结构,变形时位错变形能大,吸收振动能量的能力强,减振降噪性能良好;此外,镁合金还具有优异的导热性能和电磁屏蔽性能,可用于电磁干扰要求严格的部件^[5]。

但是,镁合金存在易燃、耐腐蚀性差等缺陷。为了提高其阻燃性,可将镁合金中钙的成分增加 1%;为了易于制造和提高强度,将镁合金中锌和铝的成分分别增加 1% 和 6%,这样得到的阻燃镁合金的强度不低于铝-镁-硅系铝合金的强度。镁合金的耐腐蚀性与纯净度有密切的关系,除铍和钙等少数有益的杂质外,其它大多数杂质都会降低镁合金的耐腐蚀性能。因此,需要选用高纯度的原材料、优化熔炼工艺及镁合金熔体净化法,以提高镁合金的纯净度;并应采用高性能镁合金挤压加工、镁合金高效短流程成形等技术,有效改善镁合金的耐腐蚀性,以提高镁合金产品性能及生产效率^[4]。

法国 TGV Duplex 双层高速列车座椅的小桌面板、扶手、脚踏板等部件采用了镁合金。与原有铝合金座椅的 36 kg 质量相比,镁合金座椅的质量减少到 30 kg。据统计,该车型列车中镁合金座椅的总数量超过了 45 000 个。此外,日本新干线 N700 系列高速列车座椅骨架也已采用镁合金,包括了座椅扶手、中央支撑架、底垫、底座、扶手座、背靠等部件^[6]。

我国一些科研院校和制造商也对镁合金在轨道车辆方面的应用开展了研究。图 1 为全镁合金制成的空调通风窗,镁合金框架采用氩弧焊,并对镁合金结构部件进行化学清洗和钝化处理,装配完成后再进行喷塑(粉)处理^[7];图 2 是全镁合金制成的客车卧铺,卧铺边梁和框架采用镁合金挤压型材,

铺板为镁-铝蜂窝板^[8];此外,研究人员还提出了镁合金的轨道列车车体及其制造方法^[9]。



图1 全镁合金制成的空调通风窗

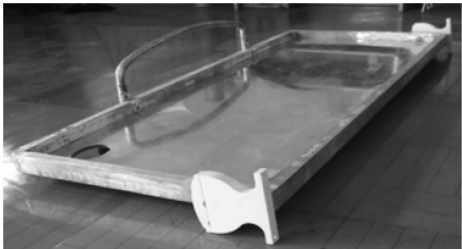


图2 全镁合金制成的客车卧铺

2.3 复合材料车体的研究与应用

复合材料是由基体材料和增强材料复合而成的新型材料,其性能优于构成该复合材料中任意单一材料的性能。复合材料车体具有如下特点:① 良好的设计性。研发人员可从选材、结构形式、成型工艺等方面全方位统筹进行结构设计。② 采用整体成型工艺。可减少零件和紧固件数量,缩短生产

周期,控制生产成本。③ 具有高阻尼特性,可提高列车的减振性和降噪性。④ 质量轻、强度高,有良好的耐腐蚀、抗疲劳、抗冲击等性能,可延长车辆的使用寿命,降低维修成本。

国外就复合材料在轨道交通车辆的应用已从内饰、设备舱等非承载部件和次承载部件,延伸到车体结构、转向架构架等主承载部件。其中,最成功的案例当属韩国 TTX 摆式列车车体。TTX 摆式列车车体采用了复合材料车体与不锈钢底架的混合设计理念,使车体结构总质量减重约 30%。如图 3 所示,车顶、侧墙和端墙均由三明治夹芯复合材料制成,其中三明治夹芯复合材料是由碳纤维环氧树脂层板及铝蜂窝夹芯通过胶粘剂 BONDEX@ 606 粘接而成。铝蜂窝夹芯的芯材厚度为 40 mm,碳纤维环氧树脂层板内、外表层的厚度分别为 1.5 mm 和 3.5 mm。同时,在应力较大的部位置入长方形的增强骨架,以提高刚度并减小开口处的应力集中。车体底架部分采用 SMA490B 不锈钢,这样不但能降低车体重心,而且便于安装设备和管道。最后,两者通过铆接、胶接及焊接的混合方式进行组装连接。TTX 摆式列车于 2007 年 5 月 22 日首次在韩国忠清北道的线路上开展运行试验,于 2009 年 7 月 8 日完成了 100 000 km 的运行试验计划,并于 2010 年正式投入商业化运营^[10]。

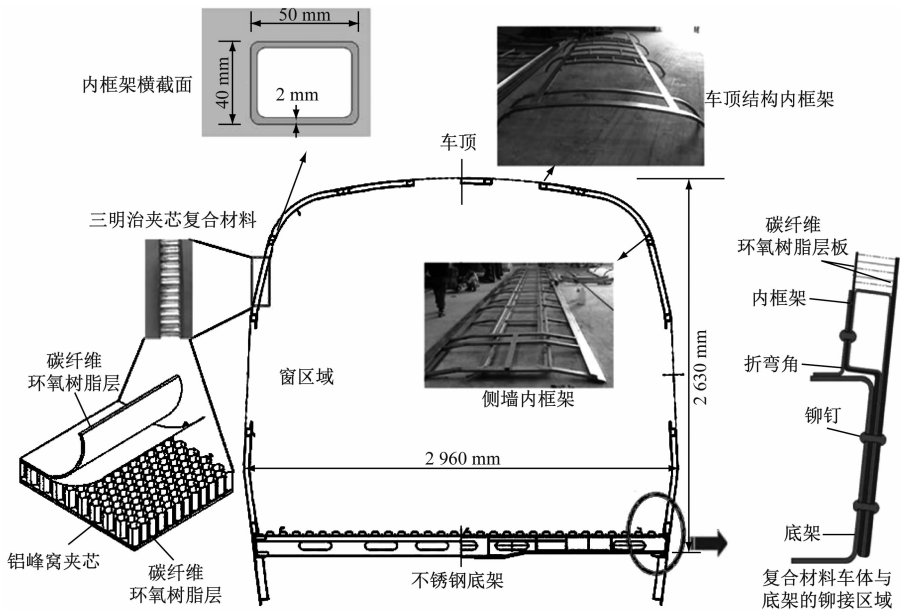


图3 韩国 TTX 摆式列车复合材料车体断面示意图

我国对复合材料在轨道交通领域应用的研究 虽起步较晚,但已完成非承载结构和次承载结构的

应用研究,目前正逐步开展主承载结构部件的研制。2015 年,中车青岛四方机车车辆股份有限公司牵头承担了“十二五”国家科技支撑计划课题“下一代地铁列车”;2018 年 9 月,在德国柏林国际轨道交通技术展上,该公司展出了全新碳纤维地铁车辆“CETROVO”(如图 4 所示);2019 年 6 月,“下一代地铁列车”完成了动态调试及 5 km 试验线型式试验(如图 5 所示);2019 年 9 月,列车在实际运营线路(广州地铁 8 号线)完成线路试验和运行示范;2019 年 12 月 17 日,“下一代地铁列车”项目顺利通过专家组验收。“下一代地铁列车”采用了先进的碳纤维技术,列车的车体、转向架构架、司机室、设备舱及设备机体等均使用碳纤维复合材料制造,首次实现碳纤维复合材料在列车主结构上的全面应用。同时,列车能够适应高温、高寒、高海拔等恶劣运营环境,性能优异。



图 4 全新碳纤维地铁车辆“CETROVO”



图 5 “下一代地铁列车”进行厂内动态调试

3 结语

从 1952 年英国第一辆铆接铝合金地铁车体到 1982 年日本第一辆焊接铝合金动车组车体,铝合金及其相关的加工生产技术得以迅猛发展,同时也给轨道交通制造业带来了巨大的综合效益。而如今城市轨道交通车辆需求的日益加剧以及传统制造资源的逐渐枯竭,使得现有车体结构材料在车体结

构轻量化、降低成本等方面遇到了发展瓶颈,无法达到更高的要求。新型轻量化材料的出现与应用,充分证明了其在质量和能源等方面可实现更多的节约,带来新兴经济效益增长点。因此,新型轻量化材料在轨道交通车辆上的运用不但满足可持续发展的需求,而且也是未来技术发展的必然趋势。

相对高速列车等干线铁路车辆,城市轨道交通车辆在运行时速、列车气密性等方面要求相对较低,因此可从城市轨道交通车辆的车体结构上率先采用新型轻量化材料。在新型材料车体结构研发过程中,必须综合考虑各项关键技术。现阶段,在新型轻量化车体材料的研发过程中应注重以下方面工作:① 深入了解新型材料的性能,开展整体承载结构设计;② 全面考虑制造工艺的优缺点,采用整体成型工艺;③ 通过试验获取结构部件的性能参数,集成云数据,进行理论分析;④ 建立“产学研用”一体化平台,推出自主知识产权的系列化产品。

新型轻量化材料在轨道车辆领域的大规模应用,必将全面提升轨道交通车辆的制造水平,实现我国轨道交通事业可持续发展。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 森久史. 改善车体用铝合金的特性[J]. 国外机车车辆工艺,2015(3):32.
- [4] 森久史. 满足轻量化的铁道车辆用轻质新材料[J]. 国外铁道车辆,2017,54(3):12.
- [5] 李瑞淳. 镁合金在现代铁道车辆上的应用探讨[J]. 铁道车辆,2010,48(9):18.
- [6] 李岩,郭建强,孙召进,等. 镁合金在轨道客车上的应用及展望[J]. 现代商贸工业,2012(1):276.
- [7] 大连交通大学. 轨道客车镁合金通风窗及其制造工艺:201010100394.X[P]. 2010-07-07.
- [8] 长春客车铺椅股份合作公司,权高峰. 轨道客车镁合金卧铺:200710127585.3[P]. 2009-01-07.
- [9] 大连交通大学,北京华盛荣镁业科技有限公司. 镁合金轨道列车车体及其制造方法:201010002323.6[P]. 2010-06-16.
- [10] 康兴东. 韩国摆式列车复合材料车体的探究及思考[J]. 国外铁道车辆,2017,54(6):12.

(收稿日期:2018-06-17)