



国内地铁铝合金车体技术发展

苏柯^{1,2}, 苏永章^{1,2}, 刘永强^{1,2}, 岳译新^{1,2}, 梁锦发³, 王宇兵²
(1. 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室, 湖南 株洲 412001;
2. 中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412001;
3. 深圳地铁建设集团有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 我国地铁铝合金车体技术历经技术引进、国产化突破、企业级自主创新、国家级协同创新4个阶段, 并已建成中国标准地铁列车技术平台, 实现了从依赖进口到自主可控的跨越。文章以中车株洲电力机车有限公司4代地铁“B型车”技术平台为例, 系统梳理了国内地铁铝合金车体技术的发展历程, 阐明其技术发展规律与驱动机制。研究表明, 技术迭代由技术创新、市场需求、成本优化、政策引导协同驱动。未来, 技术将向全生命周期模块化、绿色化和智能化深度发展, 助力我国轨道交通装备国际竞争力提升。

关键词: 地铁列车; 铝合金车体; 产品平台; 轻量化; 模块化; 城市轨道交通

中图分类号: U231; U270.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2025)02-0027-07

0 引言

全球轨道交通行业正经历深刻变革, 地铁车辆围绕轻量化、模块化、绿色化、全生命周期成本优化持续创新。作为列车关键承载结构, 铝合金车体技术水平直接决定车辆性能与运营效益。德国西门子(Siemens)Inspiro平台以轻量化为核心亮点, 通过采用铝合金骨架与纤维增强塑料(fiber reinforced plastics, FRP)的混合结构构建驾驶室外壳, 成功提升了车辆的被动碰撞安全性, 并降低了空车重量, 使其能够更好地适应高密度运营需求^[1]。法国阿尔斯通(Alstom)Metropolis平台凭借其模块化设计, 可根据不同城市的多样化需求进行定制、灵活扩展, 并且借助监控系统可实时监控关键部件状态, 有效延长了维护周期, 实现了低生命周期成本^[2]。日本日立(Hitachi)A-train平台对铝合金车体采用模块化设计与摩擦搅拌焊接(friction stir welding, FSW)技术, 实现了列车轻量化、高精度和环保性, 其高刚度中空型材的大范围应用, 不仅提升了车辆的隔音舒适性和抗冲击能力, 还增强了材料的可回收性^[3]。日本川崎重工(Kawasaki)的

efACE平台建立了“标准化+模块化”技术体系, 在实现国内车型开发周期缩短30%、制造成本降低20%的同时, 保证了质量稳定性^[4], 而且铝合金车体采用单一合金, 简化了回收流程, 通过轻量化设计与采用可回收材料实现了全生命周期资源节约。

为提升我国城市轨道交通装备的国际竞争力, 国内相关机构、企业启动了系列化中国标准地铁列车研制及其试验项目, 以“安全、便捷、绿色、智慧”为目标, 遵循“零件通用化、部件模块化、系统集成化、功能配置化、关键部件自主化、整车标准化、产品系列化、产业规模化、行业规范化、安全提升、性能提升”的顶层设计原则^[5], 成功开发了全新模块化地铁车体技术, 支撑中国标准地铁车辆平台建设。本文通过梳理国内地铁铝合金车体发展历程, 深入解析技术演进规律, 为行业技术升级提供理论与实践参考。

1 国内地铁铝合金车体技术发展历程

1.1 铝合金车体发展重要节点

地铁铝合金车体技术起源于国外。1952年, 英国伦敦地铁率先将铝合金应用于车体制造^[6]。1962年, 日

基金项目: 湖南省科技创新计划项目(2024CK1007); 中国中车重大科技项目(2024CCA163)

通信作者: 苏柯, 男, 正高级工程师, 中车资深技术专家, 主要从事轨道车辆车体结构的研究; E-mail: sukemetro@163.com

引用格式: 苏柯, 苏永章, 刘永强, 等. 国内地铁铝合金车体技术发展[J]. 机车电传动, 2025(2): 27-33. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.02.003.

Citation: SU Ke, SU Yongzhang, LIU Yongqiang, et al. Research on the technological development of aluminum alloy car bodies for metro trains in China[J]. Electric drive for locomotives, 2025(2): 27-33. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.02.003.

本山阳200系电车引入该技术,进一步推动铝合金在轨道交通领域的应用。我国铝合金地铁车体研发起步较晚,1989年,中车长春轨道客车股份有限公司(以下简称“长客股份”)借鉴日本技术模式,成功开发出国内首辆铝合金地铁车体。该车体采用板梁结构,受制于当时工艺水平,存在制造工艺复杂、表面平整度欠佳、生产成本高昂等问题,未能实现规模化应用^[7-8]。

21世纪以来,我国通过技术合作加速了铝合金车体技术引进。中车南京浦镇车辆有限公司(以下简称“浦镇公司”)与法国阿尔斯通合作,为“上海明珠线(一期)”车辆提供采用大型中空挤压铝型材为主的钢铝铆接车体^[9];中车株洲电力机车有限公司(以下简称“株机公司”)联合德国西门子,为“上海明珠线(二期)”打造国内首辆全焊接铝合金车体地铁车辆^[10];长客股份与加拿大庞巴迪合作,为广州地铁2号线供应鼓形断面的A型地铁车辆^[11]。这些合作项目有效吸收了国外先进技术,显著提升我国铝合金地铁车体制造水平,为行业自主发展奠定坚实基础。

2007年,深圳地铁1号线(续建)项目开启了国产化突破期。由株机公司开发的车辆,是国内首个自主投标、自主研发、具有自主知识产权的A型地铁车辆项目^[12],从结构设计到型材制造均实现国产化,标志着我国打破技术依赖,迈入自主创新阶段^[12]。2013年,行业进入企业级自主创新阶段,株机公司研制的长沙轨道交通1号线车辆,其轻量化与强度综合性能达到国际领先水平^[13]。相关成果形成了以“一种轻量化轨道车辆车体结构”为核心的专利池^[14],并荣获国家专利优秀奖。2019年,中国中车集团有限公司(以下简称“中国中车”)旗下的长客股份、株机公司、浦镇公司等6家整车研制企业联合开展中国标准地铁车体研制,推动行业进入国家级协同创新阶段。研究成果在广州、深圳、武汉、兰州、宁波、无锡多个城市地铁项目落地,形成了以“模块化轨道车辆车体”为核心的自主知识产权体系^[15],标志着国内地铁车辆技术进入发展新阶段。

1.2 铝合金车体发展总体趋势

过去三十余年,我国地铁铝合金车体技术实现了从依赖进口到自主可控的重大跨越。株机公司4代地铁“B型车”技术平台的发展历程具有典型示范意义,其车体断面与框架的迭代优化(如图1和图2所示),以及车体自重阶梯式下降趋势(如图3所示),直观呈现了地铁车体技术的发展趋势。其中,前3代车体以轻量化为核心目标推进结构优化:①在车顶结构中,受电弓和空调底板型材厚度逐步减薄,最终实现型材共用与结构整合;②侧墙作为外观质量要求严格的可视部件,自第2代车体起步,规模化应用FSW技术,并同步缩减型材厚度;③底架作为关键承载部件,第2代车

体仅对与侧墙连接的底架边梁进行局部优化,第3代车体则在优化边梁承载功能的同时,对地板筋板密度实施均匀化减重设计,并将FSW技术应用于地板型材的对接焊接。第4代车体在继承前3代轻量化技术的基础上,以模块化设计创新满足不同城市轨道交通的多样化需求,不仅对断面轮廓进行全新设计,而且车顶、侧墙、底架等部件结构与前3代存在显著差异:车顶取消独立的受电弓和空调安装平台,并在圆弧顶板焊接中采用FSW技术;侧墙通过板材加厚、门立柱截面尺寸优化和宽幅型材应用,实现结构强度与轻量化的协同提升。

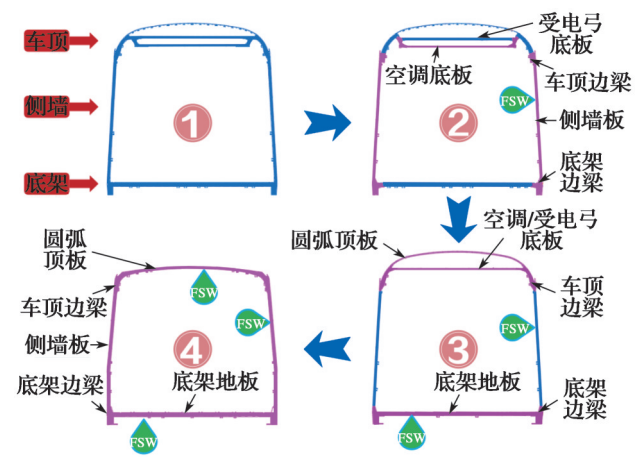


图1 4代典型地铁车体(B型车)断面示意图
Fig. 1 Cross-section diagram of the fourth-generation typical carbody (B-type) for metro trains

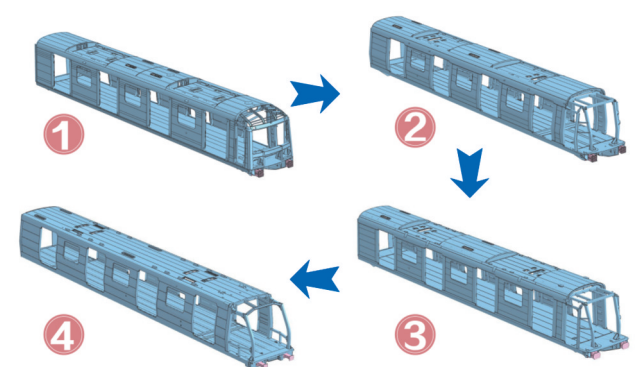


图2 4代典型地铁车体(B型车)框架结构示意图
Fig. 2 Frame structure of the fourth-generation typical carbody (B-type) for metro trains

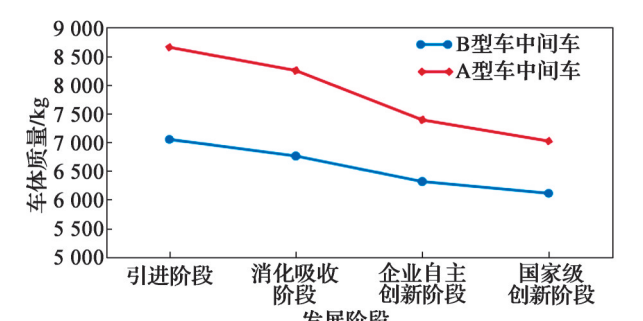


图3 不同代际地铁铝合金车体质量变化示意图

Fig. 3 Mass changes of aluminum alloy carbody across generations for metro trains

2 国内4代地铁铝合金车体技术特点

2.1 初代引进车体(技术局限与安全隐患并存)

我国初代地铁铝合金车体技术高度依赖进口, 在结构设计与工艺应用上存在显著缺陷。车顶多采用单层开口铝型材, 底架为未铺设铝蜂窝地板的单层结构, 以电弧焊作为主要连接工艺, 导致车体等强度设计欠佳, 而且变形较大。由于引进的相关技术仅适配特定车型, 难以满足国内复杂多样的市场需求, 车体结构与不同制式车型的塞拉门、内藏门、外挂门等设备的适配问题尤为突出, 极大地限制了车辆的通用性与灵活性。

在设计与材料应用层面, 受制于当时有限元仿真技术的落后, 部分以6000系铝合金为主要材料的车体存在结构或板厚冗余设计。例如, 某“A型车”采用6005A和6082材料制造的结构件挤压型材^[16], 导致车体自身质量接近9 t, 材料利用率较低, 不仅造成了材料浪费, 还增加了能耗; 还有部分车型在底架牵枕缓等关键承载部位采用7000系高强铝合金减重, 却因该材料低应力、晶间腐蚀特性, 在运行约22年后, 车钩安装座^[17]、抗侧滚扭杆底座^[18]等部位出现裂纹, 严重威胁列车运行安全, 充分暴露了初代车体在技术适配与材料选择上的不足。

2.2 第2代国产化车体(技术探索与局部优化)

第2代地铁铝合金车体研发以满足城市个性化需求为核心, 技术团队针对引进车型开展结构改造与技术优化^[19-20]。通过优化车头流线型造型、调整侧墙弧度, 并对车顶与底架边梁型材断面进行重新设计, 实现了多种模块化车门的适配安装, 有效提升了车辆的定制化水平。

在材料选择方面, 由于2000年上海地铁车辆采用7020材料制造的底架出现批量裂纹^[21], 行业暂时停用7000系铝合金, 转而推广使用国产化6000系铝合金, 从源头上保障了车体结构安全。在焊接工艺方面, 车体侧墙板开始采用更环保的FSW技术^[22]。此外, 技术人员开始探索轻量化设计方法, 对承载功能相对较弱的侧墙板、空调底板等结构进行减薄设计。以深圳地铁1号线(续建)车辆为例, 对车体结构进行局部优化, 成功实现车体减小质量超350 kg。然而, 由于采用“点状优化”模式, 底架关键承载结构仍沿用传统的悬挂座安装大型设备方式^[23], 整体结构复杂度未有效降低, 轻量化目标未完全实现, 这反映出该阶段的技术探索仍具备局限性。

2.3 第3代系统轻量化车体(结构创新与性能突破)

随着乘客对舒适性和智能化需求日益增长, 车载设备不断增加, 而既有线路轴重限制愈发严格, 车体

轻量化成为行业技术攻关的主要方向^[24]。株机公司研发的第3代铝合金车体, 在结构设计与工艺应用上实现了系统性创新突破。

在设备安装方面, 摒弃传统车下悬挂座安装方式(如图4所示), 创新采用底架边梁托装结构(如图5所示), 减少地板型材和安装座等冗余结构, 并将节省的重量指标用于增设铝蜂窝地板, 显著提升车辆隔声性能; 在车顶结构优化方面, 将空调平台由“下沉式”改为“平顶式”^[13], 并与受电弓平台一体化设计, 同时车顶圆弧顶结构采用双层中空闭口型材替代单层开口型材。这些创新设计使“A型车”减重幅度超过10%, “B型车”自身质量接近6 t, 并且“B型车”车钩纵向抗压压缩能力提升至1 000 kN, 实现了强度与轻量化的双重提升。

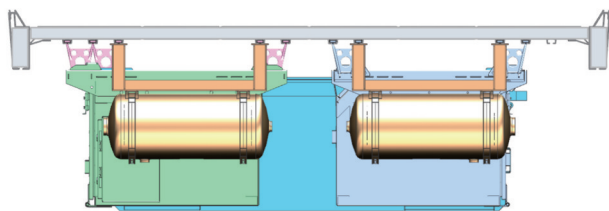


图4 车下大型设备悬挂座安装方式示意图

Fig. 4 Installation method of the suspension bracket for underfloor large equipment

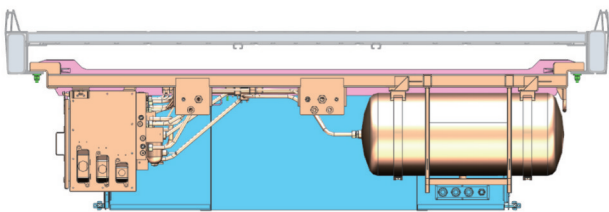


图5 车下大型设备底架边梁托装安装方式示意图

Fig. 5 Installation method of the underframe side beam support for underfloor large equipment

由于地铁“A型车”“B型车”都是基于独立技术平台开发的, 使得型材规格缺乏统一标准, 设备接口兼容性不足, 模块化互换性较差。车体型材种类繁多, 大幅增加了模具开发成本, 模块化率不足40%, 难以满足市场对快速定制化生产的迫切需求。这一问题凸显出该阶段技术创新在顶层设计层面的缺陷, 也为后续地铁车辆技术向标准化、模块化方向发展提出了改进方向。

2.4 第4代顶层融合模块化车体(标准引领与全面突破)

针对行业长期缺乏统一平台导致的研发重复、成本高企等问题, 中国标准地铁列车项目开展不同时速的“A型车”“B型车”两大平台车体的顶层设计, 构建以中国标准为主导的行业通用产品平台^[18]。典型产品平台示意图如图6所示。

新平台覆盖80~120 km/h多种速度等级, 兼容鼓形断面与梯形断面的车体。车体采用通长微圆弧顶结

构^[25]，在实现减重的同时，优化车顶设备安装空间与排水性能。通过加厚车顶、侧墙型材厚度，增强隔音降噪效果，同时大幅减少了补强件的使用，使车体零部件种类减少近 20%。侧墙板、端墙板、牵枕梁等部件采用宽幅型材，焊缝长度减少近 30%，显著降低焊接复杂度与生产成本。在模块化设计层面，依托顶层融合技术，“A 型车”“B 型车”及其不同断面车体的模块化率提升至 60% 以上，实现型材互换与设备安装接口的统一。这一创新不仅大幅降低了全生命周期成本，而且更有效解决了前代车型存在的技术瓶颈。该平台的成功应用，标志着我国地铁车辆技术从企业自主创新阶段跨越至国家级协同创新阶段，成为推动行业高质量发展的重要里程碑。

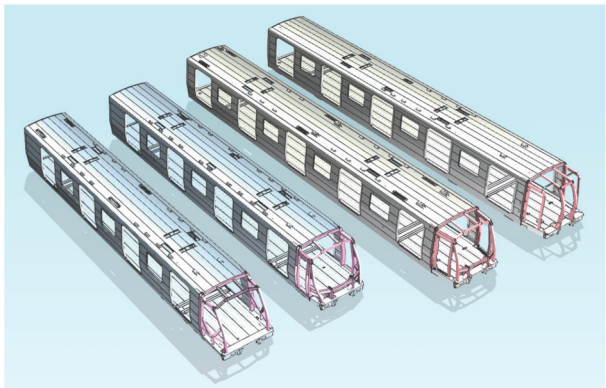


图6 系列化中国标准地铁车体典型产品示意图
Fig. 6 Schematic diagram of typical products in the serialized Chinese standard carbodies for metro trains

3 车体技术迭代升级机制分析

通过系统梳理国内4代地铁铝合金车体的结构演变与技术发展脉络可知，其技术升级是技术创新、市场需求、成本优化、政策引导协同作用的结果。四大要素相互交织、彼此赋能，共同推动我国地铁车体技术实现从引进依赖到自主创新的跨越。

3.1 技术创新(核心驱动力)

技术创新贯穿地铁车体技术迭代全过程，从结构设计到制造工艺的持续突破，成为提升车体性能与生产效率的核心引擎。

在结构设计层面，轻量化与模块化创新双线并进。早期减重聚焦局部型材减薄与筋板优化，成效有限。伴随技术进步，研发重心转向设备安装集成与整体断面优化。第3代车体通过创新设备安装方式，以底架边梁托装替代悬挂座安装，减少冗余结构；第4代车体进一步实现主结构标准化统型，除司机室骨架因造型需求个性化设计外，同一车型主结构工艺固化，不同车型间型材共用料率超 75%，并且不同司机室骨架与车体主结构的连接接头保持一致（如图 7 所示），模块化

设计水平达到新高度^[26]。

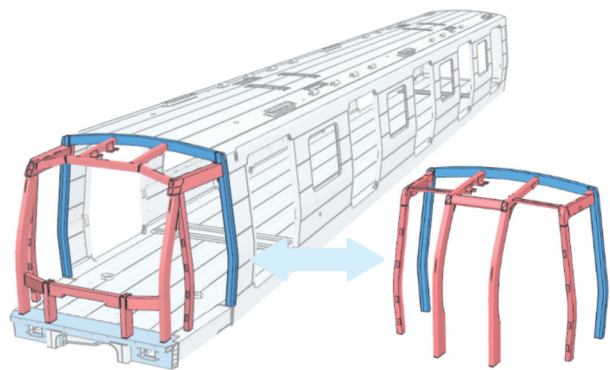


图7 不同司机室骨架与车体主结构连接示意图
Fig. 7 Schematic diagram of connections between different cab frames and the main carbody structure

在制造工艺创新方面，中空型材挤压技术发展促使宽幅型材广泛应用，第4代车体侧墙板数量由 6 块减至 4 块，端墙采用单断面直接挤压成型，大幅减少焊缝数量，提升组焊效率。FSW 技术凭借焊接变形小、质量高、焊缝美观的优势，应用范围不断拓展，为车体侧墙免油漆涂装创造条件，推动车体制造工艺向绿色高效转型。

3.2 市场需求(关键牵引力量)

城市交通领域对载客量、安全性、舒适性、节能性的多元需求，构成技术进步的重要驱动力。各需求要素需协同平衡，轻量化与模块化发展必须兼顾安全与舒适。

以车顶结构设计为例，在减重时同步优化排水方式，不同代际车体的车顶排水路径优化如图 8 所示。第 3 代车体将受电弓与空调平台一体化设计，同步取消前两代车体的车内排水通道，消除车内漏水隐患。第 4 代车体采用微圆弧顶结构，避免因焊接变形导致平顶平台积水，同时解决了空调胶条密封不良引发的客室渗水问题^[27]，还能防止列车运行时积水飞溅对受电弓等设备造成的安全威胁，这种迭代优化在保障车体轻量化的同时，显著提升了排水安全性与可靠性。

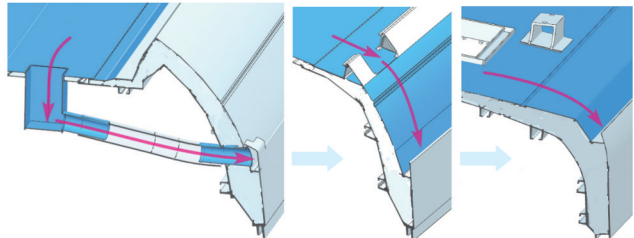


图8 4代车体的车顶排水路径优化示意图
Fig. 8 Schematic diagram of roof drainage path optimization for the four generations carbody

3.3 成本优化(重要助推因素)

成本优化贯穿铝合金车体技术升级全周期，通过

结构简化、轻量化设计与模块化提升, 实现全生命周期成本降低。

结构简化与轻量化直接降低成本。第3代车体减重策略减少了原材料采购与运营能耗; 第4代车体通过优化设计, 将零部件种类从600余种降至不足500种, 显著提升了生产效率, 降低了制造成本。模块化水平提升带来多重效益, 缩短设计研发周期, 提高设备维护效率。第4代车体顶层融合模块化设计, 减少型材开模成本, 面向工位需求的模块化设计增强了生产柔性^[27], 推动绿色低碳低成本生产模式发展。

针对业主对车体延寿与降低意外撞车后维修成本的需求, 第4代车体采用大断面型材机加工客室门角, 减少焊缝数量, 提升安全系数; 头车底架前端设置大断面横梁, 优化碰撞能量吸收结构^[28]。尽管这些措施增加了初期制造成本, 但能有效降低后期维修、改造和报废处理成本, 实现全生命周期成本的优化平衡。

3.4 政策引导(战略支撑保障)

产业政策在地铁车体技术迭代中发挥着关键引导作用, 从国产化、本质安全、绿色发展到产业协同, 全方位推动技术升级。

本质安全政策强化设计选材与验证标准。因7000系铝合金全生命周期质量可靠性问题, 自第2代车体起, 逐步被国产化6000系铝合金替代; 结构设计更注重本构安全, 第3代车体开发的底架边梁托装车下大型设备方式, 兼顾了轻量化与安全性, 在第4代车体中得到更广泛应用; 在结构验证方面, 开始重视结合线路条件评估服役性能^[29]。例如, 在第4代车体样车开发时, 针对抗侧滚扭杆安装结构等疲劳承载区域, 开展动应力测试与寿命评估^[30], 确保了新平台产品全生命周期的服役安全。

“双碳”目标为技术发展指明绿色发展方向。政策鼓励轻量化设计与降低能耗, 推动了FSW技术应用与宽幅型材推广, 减少焊接能耗与污染物排放, 践行绿色生产理念。在“交通强国”战略引导下, 新型“举国体制”整合高校、科研院所与企业资源, 借鉴高铁技术突破的成功经验^[31], 推动城市轨道交通领域协同创新。依托“十四五”制造业核心竞争力提升的政策引导, 中国中车牵头打造中国标准地铁列车平台, 研发第4代车体, 并已启动标准地铁2.0项目, 持续提升我国轨道交通装备国际竞争力。

4 结束语

系列化中国标准地铁车体的诞生, 标志着国内轨道交通装备行业迈入全新发展阶段。尽管碳纤维复合材料在轻量化方面具备一定优势^[32], 但铝合金车体凭借生产成本低、被动碰撞性能优、服役周期结构稳定

等特性, 仍是标准地铁2.0项目的重点研究对象。在政策驱动、市场需求牵引、技术创新支撑、成本优化协同的正向循环作用下, 地铁铝合金车体技术将朝着高效、智能、可持续方向发展。未来, 该领域技术发展主要聚焦三大方向:

①平台化与模块化升级。基于模块化车体产品平台 and 市场需求, 实现从面向工位需求的模块化设计深入扩展到面向产品全生命周期需求的模块化设计, 达成配置高效化研发和柔性生产协同, 灵活适应列车重联与模块化组合运营方式, 促进车体生产、维护和升级更加便捷和经济, 降低全生命周期成本, 并能够更好地适应市场多样化需求和快速变化。

②深化轻量化与绿色化进程。优化车体侧墙与门框、车顶、底架等焊缝接头结构, 进一步将FSW技术应用到车体组焊台位的3D焊接路径中, 深入研究大型构件铝合金表面处理技术, 实现车体外露面的免油漆涂装。这些举措不仅能够节省油漆和腻子材料, 实现车体的进一步轻量化, 而且能促进铝合金材料回收^[33-34], 减少环境污染, 实现绿色生产目标, 助力地铁车辆运营节能减排。

③长寿化与智能化发展。依托车载传感器采集的载荷谱数据, 构建车体结构强度与疲劳寿命优化模型, 利用物理车体与仿真模型的数据交互, 实现结构应力动态监测。结合数字孪生技术与机器学习算法, 精准预测关键部件剩余寿命并触发主动维护, 延长车体服役周期, 提升车辆可靠性, 降低运营成本与资源消耗, 创造更大的经济与社会效益。

参考文献:

- [1] GOTT-KARLBAUER S. Inspiro: the new metro platform [EB/OL]. [2025-03-01]. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:1e751c35-c9f8-4b82-8f08-feb9adf3027c/presentation-uitp2011-inspiro-gott-karlbauer-e.pdf>.
- [2] ALSTOM. Metro metropolis: continuously improved to serve cities[EB/OL]. [2025-03-01]. https://www.alstom.com/sites/alstom.com/files/2021/09/17/Alstom_Product_Sheet_Metropolis_EN.pdf.
- [3] OHBA H, UEDA C, AGATSUMA K. Innovative vehicle: the "A-train"[J/OL]. Hitachi review, 2001, 50(4): 130-133 [2025-03-01]. https://www.hitachi.com/ICSFiles/afieldfile/2004/06/08/r2001_04_102.pdf.
- [4] 加藤英一, 神戸勝啓, 岡山千裕, 等. 標準型車両「efACE」の展開[J]. 川崎重工技報, 2016, 177(5): 10-13.
- [5] 唐飞龙, 赖森华, 于青松. 系列化中国标准地铁列车综述[J]. 电力机车与城轨车辆, 2021, 44(5): 1-8.
TANG Feilong, LAI Senhua, YU Qingsong. Overview of serialized China standard metro train[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2021, 44(5): 1-8.
- [6] 海邦君. 铝合金车体设计研究[J]. 铁道车辆, 2003, 41(10):

- 26-28.
HAI Bangjun. Design and research on the design of aluminum alloy vehicle body[J]. Rolling stock, 2003, 41(10): 26-28.
- [7] 王炎金, 丁国华, 王俊玖. 铝合金车体制造技术在中国的发展现状和展望[J]. 焊接, 2004(10): 5-7.
WANG Yanjin, DING Guohua, WANG Junjiu. Status quo and prospect of manufacture technology about aluminium alloy bodywork[J]. Welding & joining, 2004(10): 5-7.
- [8] 宫元绅. DK19型地铁客车铝合金车体介绍[J]. 铁道车辆, 1992, 30(9): 23-27.
GONG Yuanshen. Introduction to the aluminum alloy vehicle body of DK19 type metro car[J]. Rolling stock, 1992, 30(9): 23-27.
- [9] 王曰凡. 上海明珠线一期工程车辆技术特点[J]. 机车电传动, 2003(1): 38-41.
WANG Yuefan. Technical characteristics of metro vehicles for first stage of project on Shanghai Jewel Line[J]. Electric drive for locomotives, 2003(1): 38-41.
- [10] 刘强. 株洲电力机车厂为上海明珠线提供地铁车辆[J]. 电力机车技术, 2002, 25(3): 56.
LIU Qiang. Zhuzhou electric locomotive works provides metro vehicles for Shanghai Jewel Line[J]. Electric locomotive technology, 2002, 25(3): 56.
- [11] 大洋网. 广州地铁2号线首列国产车在长春下线[J]. 城市轨道交通研究, 2003, 6(6): 16.
DAYOO. The first domestic-made vehicle of Guangzhou Metro Line 2 rolls off the production line in Changchun[J]. Urban mass transit, 2003, 6(6): 16.
- [12] 岳译新, 耿竹. 深圳地铁1号线(续建)车体结构[J]. 机车电传动, 2009(6): 48-51.
YUE Yixin, GENG Zhu. Car body structure for Shenzhen Metro Line 1 extension project vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2009(6): 48-51.
- [13] 苏柯, 刘厚林, 刘永强, 等. 长沙市轨道交通1号线车辆车体结构轻量化设计[J]. 电力机车与城轨车辆, 2015, 38(2): 29-32.
SU Ke, LIU Houlin, LIU Yongqiang, et al. Lightweight design of car body structure for Changsha Rail Transit Line 1 vehicle[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2015, 38(2): 29-32.
- [14] 苏柯, 刘永强, 岳译新, 等. 一种轻量化轨道车辆车体结构: CN201410619825.1[P]. (2014-11-05)[2025-03-01].
SU Ke, LIU Yongqiang, YUE Yixin, et al. A lightweight rail vehicle body structure: CN201410619825.1[P]. (2014-11-05)[2025-03-01].
- [15] 柳晓峰, 金希红, 苏柯, 等. 模块化轨道车辆车体: CN202010046853.4[P]. (2020-01-16)[2025-03-01].
LIU Xiaofeng, JIN Xihong, SU Ke, et al. Modular rail vehicle car body: CN202010046853.4[P]. (2020-01-16)[2025-03-01].
- [16] 杨斌, 宁新军. 上海地铁1号线增能扩编(6改8)项目列车[J]. 机车电传动, 2009(4): 44-48.
YANG Bin, NING Xinjun. Metro vehicle for Shanghai Line 1 expansion (6 to 8)[J]. Electric drive for locomotives, 2009(4): 44-48.
- [17] 王生华. 上海轨道交通1号线列车车体裂纹原因分析及解决措施[J]. 铁道车辆, 2018, 56(3): 41-43.
WANG Shenghua. Analysis of the causes of cracks in the car body of trains on Shanghai rail transit line 1 and solutions[J]. Rolling stock, 2018, 56(3): 41-43.
- [18] 俞之益. 上海轨道交通01A02型列车拖车抗侧滚扭杆底座区域延寿改造[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(增刊1): 51-54.
YU Zhiyi. Service life extension modification of anti-roll bar mounting seat area of Shanghai rail transit 01A02-type train trailer car[J]. Urban mass transit, 2023, 26(Suppl 1): 51-54.
- [19] 苏永章. 上海地铁1号线102号车C1车体侧墙结构设计[J]. 机车电传动, 2008(6): 51-54.
SU Yongzhang. Sidewall structure design of C1 car body of Shanghai Metro No.1 Line 102# vehicle[J]. Electric drive for locomotives, 2008(6): 51-54.
- [20] 刘永强. 地铁车辆铝合金车体型材筋板设计[J]. 电力机车与城轨车辆, 2008, 31(3): 26-28.
LIU Yongqiang. Design of aluminum alloy profile web on metro vehicle car body[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2008, 31(3): 26-28.
- [21] 王荣, 鄢国强, 李光福, 等. 7020铝合金列车车钩梁开裂原因与机理[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2008, 28(4): 240-245.
WANG Rong, YAN Guoqiang, LI Guangfu, et al. Failure analysis of cracking of coupler beam of aluminum alloy 7020[J]. Journal of Chinese society for corrosion and protection, 2008, 28(4): 240-245.
- [22] 苏柯, 岳译新, 阮思维, 等. 宁波轨道交通1号线车辆车体结构优化设计[J]. 电力机车与城轨车辆, 2013, 36(2): 26-29.
SU Ke, YUE Yixin, RUAN Siwei, et al. Optimal design of car body structure for Ningbo Rail Transit Line 1 vehicle[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2013, 36(2): 26-29.
- [23] 雷张文, 李科, 黄慧建. 宁波轨道交通车辆底架设备悬挂方案分析与比较[J]. 机车电传动, 2019(2): 128-132.
LEI Zhangwen, LI Ke, HUANG Huijian. Analysis and comparison for under frame equipment suspension scheme of Ningbo rail transit vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2019(2): 128-132.
- [24] 朱鹏飞. 北京地铁车辆轻量化设计研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2013.
ZHU Pengfei. Research on the design of Beijing subway vehicle lightweight[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013.

- [25] 苏柯, 金希红, 刘永强, 等. 地铁列车车体技术研究[J]. 机电传动, 2022(2): 82-88.
SU Ke, JIN Xihong, LIU Yongqiang, et al. Research on the car body technology[J]. Electric drive for locomotives, 2022 (2): 82-88.
- [26] 苏柯, 刘永强, 水文菲, 等. 一种轨道列车车体前端结构: CN202110705332.X[P]. (2023-01-20)[2025-03-01].
SU Ke, LIU Yongqiang, SHUI Wenfei, et al. A front-end structure of a rail train car body: CN202110705332.X [P]. (2023-01-20) [2025-03-01].
- [27] 陈勇, 周利, 曹文祥. 城轨车辆防水质量分析及改善[J]. 技术与市场, 2022, 29(1): 58-60.
CHEN Yong, ZHOU Li, CAO Wenxiang. Analysis and improvement of waterproof quality of urban rail vehicles[J]. Technology and market, 2022, 29(1): 58-60.
- [28] 王宇兵, 苏柯, 金希红, 等. 面向工位的标准地铁列车车体模块化设计[J]. 电力机车与城轨车辆, 2024, 47(5): 25-29.
WANG Yubing, SU Ke, JIN Xihong, et al. Modular design of car body for standard metro train oriented to work station [J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2024, 47 (5): 25-29.
- [29] 苏柯, 柳晓峰, 刘永强, 等. 地铁列车车体技术发展综述 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2021, 44(5): 75-80.
SU Ke, LIU Xiaofeng, LIU Yongqiang, et al. Technology development trend of metro train car body[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2021, 44(5): 75-80.
- [30] 申天亮, 左亮, 朱涛, 等. 基于全生命周期的地铁车辆铝合金车体服役寿命评估[J]. 电力机车与城轨车辆, 2023, 46 (6): 101-106.
SHEN Tianliang, ZUO Liang, ZHU Tao, et al. Service life assessment of the aluminum alloy car body of metro vehicles based on the whole life cycle[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2023, 46(6): 101-106.
- [31] 国家铁路产品质量监督检验中心. 时速120公里中国标准地铁(A型)列车检测报告: [2022]GTJ(JL)字第W0036号 [R]. 北京: 国家铁路产品质量监督检验中心, 2022.
- [32] 郑世林, 胡惜玥. 项目动员制: 一种关键核心技术攻关和自主产品迭代赶超的新型举国体制[J]. 产业经济评论, 2025(1): 5-27.
ZHENG Shilin, HU Xiyue. Project mobilization: a new type of national system for breakthrough of key core technology and iterative caught-up of independent products[J]. Review of industrial economics, 2025(1): 5-27.
- [33] ULBRICHT A. Development and technological realisation of an innovative lightweight rail vehicle in composite design [J]. ZEVrail, 2019, 143(6/7): 220-227.
- [34] 伊東隼, 横山晃治, 藤井忠. 東海道新幹線 N700S におけるアルミニウム合金の水平リサイクルに関する取組み [J]. 日本機械学会論文集, 2024, 90 (929): 23-00211. DOI: 10.1299/transjsme.23-00211.

Research on the technological development of aluminum alloy carbodies for metro trains in China

SU Ke^{1,2}, SU Yongzhang^{1,2}, LIU Yongqiang^{1,2}, YUE Yixin^{1,2}, LIANG Jinfa³, WANG Yubing²

(1. The State Key Laboratory of Heavy Duty AC Drive Electric Locomotive Systems Integration, Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

3. Shenzhen Metro Construction Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: Aluminum alloy carbody technology for metro trains in China has developed through four stages: technology introduction, localization breakthrough, enterprise-level independent innovation, and national-level collaborative innovation. With the establishment of the Chinese standard metro train technology platform, China has achieved a leap forward from dependence on imports to the independent development of autonomous and controllable products. This paper presents a systematic review of China's development journey in aluminum alloy carbody technology for metro trains, using the technology platform for the fourth-generation B-type cars developed by CRRC ZELC as a case study. It clarifies the technological evolution patterns and driving mechanisms throughout this process. The study shows that technological iterations have been synergistically driven by technological innovations, market demands, cost optimization, and policy guidance. Looking ahead, the technology in this field is anticipated to undergo in-depth development towards modularization, sustainability, and intelligence throughout the full life cycle of products, thereby enhancing China's international competitiveness in the rail transit equipment sector.

Keywords: metro train; aluminum alloy carbody; product platform; lightweight; modularization; urban rail transit