

轨道交通车辆新材料应用前景分析

刘路路

中车工业研究院（青岛）有限公司，山东 青岛 266041

DOI: 10.61369/SSSD.2025120045

摘要：随着社会经济与科学技术的不断发展，交通运输体系也开启了“现代化”的发展快车道。而轨道交通作为其中重要一环，承担着大规模客货运输、缓解城市拥堵、推动绿色低碳出行的关键职能。当前，轨道交通车辆新材料的创新应用也愈发广泛。本文在探讨轨道交通车辆新材料分类及特性的同时，就新材料在轨道交通车辆各系统的具体应用与发展趋势进行了分析，仅供相关人士参考。

关键词：轨道交通车辆；新材料；具体应用；发展趋势

Analysis of Application Prospects of New Materials in Rail Transit Vehicles

Liu Lulu

CRRC Industrial Research Institute (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266041

Abstract : With the continuous development of the social economy and science and technology, the transportation system has entered a fast track of "modernization." As an important part of this system, rail transit undertakes the key functions of large-scale passenger and cargo transportation, alleviating urban congestion, and promoting green and low-carbon travel. At present, the innovative application of new materials in rail transit vehicles is becoming increasingly widespread. This paper discusses the classification and characteristics of new materials for rail transit vehicles, and analyzes their specific applications and development trends in various systems of rail transit vehicles, providing a reference for relevant professionals.

Keywords : rail transit vehicles; new materials; specific applications; development trends

在新时期，我国轨道交通运营里程不断突破新高，这也对车辆的性能提出了更高的要求。从技术角度来看，轨道交通重载化和高速化发展对于车辆材料的强度以及耐疲劳性提出了更高的要求；从市场角度来看，乘客对乘车体验要求的提高，也推动着轨道交通车辆向着环保节能方向不断转变；从科技发展角度来看，各种新技术的创新迭代也在无时无刻地推动着轨道交通车辆新材料应用与发展^[1]。

一、轨道交通车辆新材料分类及特性分析

(一) 轻量化材料

该类材料有着绿色环保、抗疲劳寿命能力强等特点。例如，碳纤维复合材料(CFRP)比强度为钢材7~9倍，抗疲劳寿命是铝合金3倍以上^[2]。在复兴号CR400BF型动车组的头罩部件中，CFRP材料的应用使部件减重达40%，同时抗冲击性能提升25%。此外，铝合金密度1.8g/cm³，其有着非常卓越的减震性，但是耐腐蚀性能不太理想，所以其常被应用在车辆内饰支架等部件上。

(二) 高强度耐磨材料

这类材料最突出的特点就是具备较强的耐磨性与安全性，以高强度钢为例，其屈服强度≥690MPa，同时它的耐腐蚀性能够超越普碳钢6~8倍的水平。由于其较强的耐磨性能，所以常常被应用在转向架侧梁以及车底架设计之中^[3]。此外，还有耐磨合金、陶瓷基复合材料等等，它们都有着非常优异的耐磨性，能够延长车

辆相关部件的使用寿命。如广州地铁9号线的制动盘采用陶瓷基复合材料，磨耗速率较传统铸铁制动盘降低60%。

(三) 环保节能材料

在“绿色环保”理念下，轨道交通车辆轻量化材料应用也愈发广泛。比较常见的有生物基材料、节能绝缘材料等，它们可回收率高，产生的污染和所用的能耗较低。例如，生物基材料在车辆中应用之后可回收率能够达到80%以上；杭州地铁3号线车辆的高压电缆采用节能绝缘材料，电气损耗较传统材料降低18%^[4]。

表1 新旧材料性能对比

材料类型	密度 (g/cm ²)	抗拉 强度 (MPa)	减重效果 (vs 普碳 钢)	成本 (元 / kg)	使用 寿命 (年)	适用部 件
普碳钢	7.85	345	-	8~10	8~10	传统车 底架、 支架

铝合金 (6005A)	2.7	310	65%– 70%	25–30	12–15	车体框架、内饰支架
高强度钢 (Q690)	7.85	690	–	18–22	15–18	转向架侧梁、车底架
碳纤维复合材料	1.7	3500	75%– 80%	280– 320	20–25	头罩、车顶盖板、制动梁
陶瓷基复合材料	3.2	800	40%– 45%	180– 200	18–22	制动盘、耐高温部件

二、新材料在轨道交通车辆各系统的具体应用

(一) 车体系统

对于轨道交通车辆而言，通常其车体以铝合金材料为主，中车CR450动车组用6005A-T6型材，减重40%，同时可以有效降低能源消耗。CFRP材料则主要应用于头罩、车顶盖板等位置，以此来让车辆进一步减重，同时保证其具备良好的抗冲击和减噪性能^[5]。

(二) 转向架系统

在转向架系统中，铝合金材料应用比较广泛，其能够让车辆减重20%左右。CFRP制动梁重9.5kg（比钢轻62%），疲劳寿命超100万次^[6]。此外，陶瓷基制动盘试点于时速350公里动车组，制动距离缩小了5%~8%。

(三) 电气系统

电气系统依赖新材料提升可靠性与节能性。绝缘支架用环氧树脂通常被应用到牵引变流器之中，可以使变流器体积缩小15%、重量减轻12%，同时降低能耗10%~15%。此外，高压电缆绝缘层采用聚酰亚胺-氟塑料复合结构，耐电压等级达27.5kV，耐候性强，在-40°C至80°C环境下可正常运行，且弯曲半径小，便于车辆布线^[7]。

(四) 内饰与辅助系统

内饰系统注重环保与舒适度，所以，镁合金/铝合金等材料应用比较广泛，他们可以让车辆减重30%~40%。此外，内饰板用可降解聚丙烯，免喷涂减污染，进一步提高乘客舒适度和体验度。车辆地板则可以用橡胶-玻璃纤维复合结构，以此来有效隔绝轮轨噪声。

三、轨道交通车辆新材料应用发展趋势

(一) 材料高性能化与多功能化

1. 高性能化：关键指标持续突破，适配极端工况需求

随着科学技术的不断发展，轨道交通系统也在不断向着高性能方向转型与突破。在此背景下，新材料的性能边界也在不断被

打破。以轻量化材料为例，铝合金材料也在不断创新和改革，其强度性能也在不断提升。目前应用比较广泛的6005A-T6型号铝合金的抗拉强度大概在300MPa左右，而中车研究所研发的7075系铝合金抗拉强度能够达到700MPa左右，这也让我们看到铝合金未来在车体承重方面的应用^[8]。此外，在碳纤维复合材料方面，其聚集性也将得到不断优化，如日本研发的T1400级碳纤维，能够更好地适应超高和超低温度，其衰减率也从以往的15%降到了5%。而高强度耐磨材料方面，耐磨合金等材料也在保证高强度性能的同时，逐步向着低耐磨方向发展，鞍钢研发的ER9NiCrMoV轮轨钢，硬度达HB320~350，轮径磨耗速率从0.2mm/万公里降至0.12mm/万公里，这也大幅提升了它们的使用寿命。

2. 多功能化：“一材多能”降低系统复杂度

传统的轨道交通车辆材料大多是“功能单一”的，这也直接影响了车辆的安全性与实用性。在新时期，相关材料也在向着“多功能化”方向不断发展。例如，在车体材料方面，中车青岛四方机车车辆股份有限公司研发的“碳纤维-玄武岩纤维”混杂复合材料，不但保留了以往该类材料高强度性能，而且也基于玄武岩纤维的应用，提高了其导热性，进一步提高了车辆热量散发效率。又如，在内饰方面，巴斯夫推出的“生物基PP-石墨烯”复合内饰板作为一种基于石墨烯的新型生物材料，不但有着较强的低VOC特性，而且也有着较强的防静电功能，所以，在应用这类材料之后，车辆也不需要再像之前那样涂抹防静电层了，车辆的舒适度以及乘客的体验感也随之得到提升。

(二) 材料绿色化与可持续发展

1. 绿色原材料：可再生资源替代率持续提升

在新时期，绿色环保已经成为各个领域发展的重要主题，轨道交通车辆材料应用方面也不例外。目前，生物基、可回收原材料得到了广泛应用，如杜邦研发的玉米基聚酰胺(PA)，其主要以玉米淀粉为原材料，可以很好地代替以往轨道交通车辆运用的石油基PA，且新材料的碳排放量也比以往材料降低了45%。此外，再生材料也得到了广泛应用和发展^[9]。例如，中国铝业研发的“再生铝-稀土”合金，能够有效提升材料的抗拉强度并且可以有效减少材料生产中铝的消耗。

2. 闭环回收体系：从“线性消耗”到“循环利用”

目前，可持续发展已经成为社会经济发展的重要原则。在此背景下，轨道交通车辆材料应用也在向着可持续化方向不断发展。例如，铝合金材料的不断发展也推动了其回收系统的建立，中车青岛四方就基于铝合金车辆材料搭建了相应的回收系统，通过把生产废料等进行重新回收然后进行重新熔炼生成再生铝，其可以直接应用到轨道交通车辆生产之中，同时其纯度达到了99.8%。其次，碳纤维复合材料也在逐渐向着“循环利用”方向发展，英国某公司研发的“化学解聚”技术能够通过超临界流体分解树脂，这也大大提高了该类材料的回收率，促进了材料的循环利用，让环境保护、可持续化发展等目标能够更好地落地生根^[10]。

(三) 材料智能化与智能化应用

1. 智能材料研发：赋予材料“感知-响应-决策”能力

面对数智化时代来临的大背景，轨道交通车辆材料也在向着智能化方向不断发展。新技术、新手段的出现，更是赋予了材料“感知－响应－决策”能力。例如，形状记忆合金（SMA），能够在低温情况下自动收缩，让车辆更好地保持内部温度；压电复合材料能够智能化地将车辆震动所产生的能量转化为电能；“碳纤维－光纤”复合材料能够对车辆的温度、压力等情况进行实时监测，同时提前预警疲劳裂纹（裂纹长度 $>0.2\text{mm}$ 时触发警报），这也极大程度地提高了车辆使用的安全性与使用寿命。

2. 智能化应用：材料－数据－运维深度融合

如今，在数智化时代，大数据、人工智能等技术的发展也为轨道交通车辆材料开辟了新的通道。以车辆检测方面为例，高铁碳纤维车体采用“分布式传感网络”，通过嵌入多个光纤传感器来实现对全车温度、车体应力分布等数据的实时监测。同时，其能够适应300km/h运行速度环境，可以让相关人员更好地监测车辆的整体性能与异常情况。地铁转向架的陶瓷基制动盘则集成“无线测温传感器”，通过蓝牙5.0传输数据，测温范围-40°C至1200°C，精度 $\pm 2\text{°C}$ ，深圳地铁应用后，制动盘过热故障响应时间从10分钟缩短至1分钟，未再发生因过热导致的停车事故。此外，在新时期预测性维护体系也愈发成熟，通过机器算法下的数字平台可以对车辆零件、材料的使用寿命进行精准监测，这也能够有效提高车辆维护效率、安全性能与使用寿命。

（四）材料应用集成化与产业化

1. 集成化：从“单一部件”到“系统－整车”方案

在新时期，轨道交通车辆新材料的应用也逐渐从单一化向着整体化方向转变。例如，中车株洲电力机车推出“轻量化集成转向架”其运用了铝合金架构以及陶瓷基制动盘等多种材料，能够以多材料组合的方式来降低整体部件重量，进一步提高使用过程中的车辆稳定性。又如，中车青岛四方研发的“绿色智能动车组”就对智能传感材料、再生铝等进行了集中整合，其不但能够

有效降低整体材料应用重量，而且也有着较高的低能耗、安全化与智能化性能。

2. 产业化：技术成熟度提升，成本快速下降

随着社会经济与科技的不断发展，轨道交通车辆材料生产技术也在不断成熟，以往生产成本较高的材料也在现代科技的赋能下变得更具性价比。例如，以往生产成本较高的碳纤维复合材料，在近些年随着行业规模化发展以及科技的不断更新迭代，其生产工艺不断提高，且成本也在不断下降。就国内方面来看，T700级碳纤维价格从十年前的800元/kg已经降低到了如今的280元/kg，这也体现了相关材料技术成熟度提升以及生产成本的快速下降。

3. 产业链配套：从“依赖进口”到“自主可控”

当前，我国新材料产业也在不断发展，尤其是在科技创新的推动下，该领域也开启了自主创新之路。同时，可以看到国內在新材料方面的生产工艺已经接近世界顶尖水准。以中科院化学所研发的氰酸酯树脂为例，其有着较强的耐热性，同时力学性能也和该领域的顶尖产品不相上下（美国 Hexcel 同类产品）。这种趋势也体现了新材料领域从以往“依赖进口”到现在“自主可控”的转变。此外，该领域也在逐渐向着产业集群方向不断发展，以青岛“轨道交通新材料产业园”为例，其中聚集了中国铝业等多家企业，目前已经形成了“原材料+加工+应用生产+回收”的一整套产业链，新型铝合金、碳纤维复合材料目前已经在国內得到广泛应用并且出口至15个国家，这也为我国轨道交通新材料的创新发展奠定坚实基础。

综上，随着社会经济与科学技术的不断发展，轨道交通车辆材料行业也在不断进行着创新与变革。在此背景下，各种新材料、新技术得到了广泛应用。面对未来，我们也要不断创新探索，不断研发和应用各种新材料、新技术，以此，为轨道交通高质量发展注入强劲动力。

参考文献

- [1] 王正, 钱嘉伟, 王振东, 等. 城市轨道交通车辆轻量化地板材料隔声性能测试研究 [J]. 现代城市轨道交通, 2024, (07):35-39.
- [2] 荣幸, 于全蕾, 刁朔, 等. 轨道交通车辆内装材料中挥发性有机化合物测试方法的研究 [J]. 高速铁路新材料, 2024, 3(03):20-23.
- [3] 赵英男. 轨道交通车辆用碳纤维复合材料的性能研究 [J]. 中国新技术新产品, 2024, (02):57-59.
- [4] 周津扬, 李明. 城市轨道交通车辆轻量化材料及应用 [J]. 铁道车辆, 2023, 61(03):109-113.
- [5] 吴铁辉, 徐文治, 吴静申, 等. 碳纤维复合材料在轨道交通车辆转向架上的应用 [J]. 合成纤维, 2023, 52(06):78-81.
- [6] 孙华, 史耀君, 周华彬, 等. 碳纤维复合材料在轨道交通车辆上的应用与发展趋势 [J]. 轨道交通材料, 2023, 2(02):29-32.
- [7] 汤娟. 多轴向经编织物 (NCF) 拉挤技术及其在轨道交通车辆上的应用研究 [D]. 江苏大学, 2022.
- [8] 马守仓. 试析轨道交通车辆车体结构材料轻量化产业发展及展望 [J]. 内燃机与配件, 2019, (24):174-175.
- [9] 张丽娇. 轨道交通车辆车体结构材料轻量化产业发展及展望 [J]. 新材料产业, 2019, (08):21-25.
- [10] 谢玄晖. 城市轨道交通车辆造型设计的演进历程研究 [J]. 设计, 2018, (10):121-123.