

Technological Innovation and Industrial Application of Critical Materials in Rail Transit

Hailong Li

Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin, 130062, China

Abstract

With the rapid development of China's rail transit system, technological innovation and industrial application of critical materials have become key factors supporting the safety and economic efficiency of rail transit systems. This article provides an in-depth analysis of technological advancements in critical materials for rail transit, including performance improvements and practical applications of materials for rails, wheels, axles, braking systems, and electrical systems. In the field of rails, the development of nanoscale reinforced rails and weather-resistant rails has significantly enhanced material wear resistance and corrosion resistance, meeting the demands of high-speed and heavy-haul railways. In the wheel and axle sector, the integration of material reinforcement and intelligent technologies has improved operational lifespan and safety. Looking ahead, with further advancements in green manufacturing technologies and smart materials, the greening, intelligence, and sustainability of rail transit materials will become core research and application directions, providing new perspectives for global rail transit technological innovation.

Keywords

rail transit; material technology; intelligent sensing; green manufacturing; performance optimization.

轨道交通关键材料的技术创新与产业应用

李海龙

长春轨道客车股份有限公司, 中国 · 吉林 长春 130062

摘要

随着我国轨道交通的快速发展, 关键材料的技术创新和产业应用成为支撑轨道交通系统安全性和经济性的关键因素。文章深入分析了轨道交通中关键材料的技术进展, 包括轨道钢、车轮、车轴、制动系统以及电气系统材料的性能提升与应用实践。在钢轨方面, 纳米强化钢轨和耐候钢轨等材料的研发, 显著提高了材料的耐磨性和抗腐蚀性能, 满足了高速和重载铁路的需求。在车轮和车轴领域, 通过材料强化和智能化技术的结合, 提高了运行寿命和安全性。未来, 随着绿色制造技术和智能材料的进一步发展, 轨道交通材料的绿色化、智能化和可持续性将成为研究和应用的核心方向, 为全球轨道交通技术的创新提供了新的思路。

关键词

轨道交通; 材料技术; 智能感知; 绿色制造; 性能优化

1 引言

轨道交通作为现代城市交通的主动脉, 其材料技术的发展水平直接决定运输系统的安全性与经济性。随着“十四五”国家交通网规划的实施, 我国轨道交通运营里程已突破 1 万公里, 对核心材料的性能指标提出更高要求^[1]。本文将基于最新行业标准与科研成果, 深入剖析轨道交通关键材料的技术特征与应用现状。

2 轨道结构材料的革新实践

当前轨道钢技术的进步首先体现在材料基础性能的持

续突破。通过微合金化与纯净钢冶炼技术的结合, U75V 钢轨在保持韧性的同时将耐磨性提升 40%, 而新一代 U78CrV 钢轨则实现了 1380MPa 抗拉强度与 0.08mm/ 万次磨损率的性能平衡。这些基础材料的优化为高速重载铁路提供了核心保障。

在特殊环境适应性方面, 我国已形成针对不同气候条件的专项技术方案。针对青藏高原冻土区低温环境开发的 T18CrNiMoV 钢轨, 通过调整合金元素配比有效抑制了脆性转变温度; 而面向东南亚湿热气候研发的 PG5 耐候钢轨, 则通过“Cu-P-Cr-Ni”四元合金体系构建致密钝化膜, 在中老铁路万象枢纽段的盐雾环境中表现出卓越耐蚀性, 480 小时盐雾试验腐蚀速率控制在 0.021g/m² · h 以内。

材料强化技术正从宏观处理向微观调控深化。中国铁道科学研究院开发的纳米析出强化钢轨, 通过控制碳氮化钒

【作者简介】李海龙 (1986-), 男, 高级工程师, 从事高速动车组网络系统研究。

纳米颗粒的弥散分布，在钢基体内形成稳定的强化相，使单根钢轨累计通过总重提升至 1.5 亿吨。与之形成配套的激光熔覆修复技术，采用钴基合金粉末在轨头构建微晶保护层，使修复后硬度恢复至 HRC58 且成本大幅降低，这项技术组合已在重载线路和城市轨道交通中形成完整的技术闭环。

智能感知技术与传统钢轨的融合标志着运维体系的升级。中铁物理研究所将光纤传感网络嵌入钢轨腹板，通过监测布里渊散射光时域变化，实现对应力分布、温度场梯度和微裂纹萌生的实时感知。该监测系统在成渝高铁复杂地质段的成功应用，标志着钢轨已从被动承载构件向主动感知单元转型。

在国际技术对标方面，日本 NSSMC 高强度钢轨采用独特的控轧控冷工艺，通过贝氏体相变强化将抗拉强度提升至 1400MPa 级别。其通过优化钒氮微合金化元素配比，在提升强度的同时保持良好焊接性能，这种技术路线为我国下一代钢轨研发提供了重要参考。

这种技术演进路径呈现出从材料本体强化到结构功能一体化，从被动维护到主动预防，从解决通用性问题到攻克特殊环境难题的明显特征，展现了现代轨道交通技术体系的多维度协同发展态势^[2]。

3 走行部材料的性能突破

在高速列车的运行中，车轮、车轴与制动系统的材料性能直接决定了列车的安全性与经济性。为应对高速、重载与复杂环境的挑战，相关材料技术正沿着高强度、长寿命、智能化的方向快速发展^[3]。

在车轮领域，材料强化与表面改性技术是提升性能的关键。马钢研发的 CL70 车轮钢采用梯度淬火工艺，在表面形成 3mm 厚的马氏体硬化层，使其轮轨接触疲劳寿命显著提升，提升至 120 万公里，该技术已在复兴号动车组上得到广泛应用与验证。与此同时，针对耐磨降噪的特殊需求，法国阿尔斯通公司开发了车轮表面陶瓷涂层技术，在提升耐磨与抗腐蚀性能的同时，有效降低了 30% 以上的运行噪音，目前已在 TGV 等欧洲高速列车中投入实用。对于更为苛刻的运行环境，美国洛杉矶地铁则采用了整体陶瓷基复合材料车轮，该材料在高温与强腐蚀条件下表现出优异的稳定性，其使用寿命较传统钢轮延长约两倍。

在车轴系统方面，材料纯净化与智能化成为技术前沿。马钢实现了 EA4T 车轴钢的国产化突破，通过“真空感应熔炼+真空自耗重熔”的双联工艺，将硫、磷杂质含量分别控制在 8ppm 和 15ppm 以下，氧含量降至 8ppm，从而使其断裂韧性 (KIC) 达 120MPa·m^{1/2}，疲劳极限提升至 530MPa，完全满足 400km/h 动车组的严苛要求。在此基础上，中车四方所进一步开发了集成声发射传感器与 AI 诊断算法的智能车轴系统，能够实现对车轴剩余寿命的精准预测，误差小于 5%，该技术已在 CR400AF 型动车组上实现批量装

车应用。

制动系统的革新则聚焦于轻量化与高温稳定性。中车戚墅堰所开发的碳陶复合材料制动盘，采用化学气相渗透法在碳纤维预制体中沉积 SiC 基体，将材料密度控制在 2.2g/cm³ 以下，成功实现减重 40% 的目标，并保证了在高速制动时摩擦系数的稳定性，已应用于复兴号动车组。西北工业大学则通过针刺预制体与前驱体浸渍裂解工艺，研制出密度更低 (2.0g/cm³) 的 3D-Cf/SiC 制动盘，使其制动效率提升 40%，在郑渝高铁测试中，实现了 350km/h 时速下紧急制动距离缩短至 3200 米。

4 电气系统材料的迭代升级

轨道交通系统的电气化程度不断提升，其中导线与绝缘材料的性能直接决定了整个电气系统的运行效率与可靠性。近年来，新型材料的研发与应用为解决高效输电、极端环境适应性与系统长期稳定性等关键问题提供了有力支撑。

在导电材料领域，高性能合金与超导技术是发展的核心方向。我国自主研发的 CTMH150 铜镁合金导线，通过精准的合金成分控制 (0.3%Mg+0.1%Ag)，在保持 85%IACS 高导电率的同时，将抗拉强度提升至 580MPa，已成功应用于京张高铁的智能化接触网系统。为进一步实现轻量化与高强度目标，中国通号开发的 Cu-Ag-Zr-Re 导线，采用高压扭转 (HPT) 技术获得了晶粒尺寸为 80nm 的超细晶结构，使其抗拉强度高达 650MPa，导电率同样维持在 85%IACS，并在京雄城际铁路实现了接触网减重 15% 的效果。

超导技术的应用则代表了电气化系统向高效、低损耗方向的重大突破。以上海磁浮示范线部署的 MgB₂ 超导电缆为例，其在液氢温区实现了零电阻输电，将传输损耗降低了 70%。无独有偶，瑞士铁路公司 (SBB) 也在其部分高铁线路中引入了高温超导电缆，该技术不仅使电力传输效率提升了 40%，还显著减轻了轨道电力系统的整体负担。

在绝缘材料方面，科研工作聚焦于提升介电强度、环境稳定性和自修复能力。中科院宁波材料所开发的聚酰亚胺/氮化硼纳米复合薄膜，击穿场强达到 450kV/mm，体积电阻率超过 10¹⁶Ω·cm，已被应用于新一代 IGBT 散热系统，有效提升了功率器件的稳定性。针对极端温度环境，中科院化学所研发的聚醚醚酮/石墨烯复合材料 (PEEK-Gr)，在 -60℃至 200℃的宽温域内介电常数波动小于 5%，成功应用于青藏铁路高原变电站的绝缘套管。此外，清华大学研制的微胶囊自修复环氧树脂涂层，能在裂纹产生时自动释放修复剂，并在 30 分钟内恢复 95% 以上的绝缘强度，该技术已在深圳地铁供电系统完成试点应用。

在国际技术层面，德国西门子公司研发的硅橡胶/石墨复合绝缘材料展现出优异的综合性能，其耐温范围覆盖 -50℃至 +250℃，具备卓越的耐高压与耐候性，已在德国高速铁路的电气系统中广泛应用，极大地提升了系统在复杂气候下

的安全性及可靠性。

5 材料研发的未来方向

在《交通领域科技创新中长期发展规划纲要》深入实施背景下，我国轨道交通材料技术正经历一场由结构功能一体化、智能化和绿色化引领的深刻变革，其发展呈现出功能梯度化、系统智能化和制造绿色化三大核心趋势。

首先，功能梯度材料的精密设计与应用，正从部件表面向整体结构深化。早期的激光熔覆梯度耐磨涂层，已从单一的轨头修复，拓展至转向架关键承力部件的表面强化。例如，通过精确控制 Co 基合金与 WC 陶瓷颗粒的送粉比例，可在部件表面构建从韧性金属基体到高硬度陶瓷相的连续梯度结构，使关键承力部件在承受巨大冲击的同时，表面磨损率降低逾 50%。这种“刚柔并济”的设计理念，正被进一步应用于刹车片、受电弓滑板等摩擦部件中，以实现摩擦系数与耐磨性的最优匹配。

其次，智能感知材料的深度集成，正推动轨道交通系统从“被动维护”向“主动预警”和“自适应调控”跃升。这不仅仅是简单地在结构中嵌入传感器，而是致力于让材料本身成为感知网络的一部分。除了嵌入光纤 Bragg 光栅以检测钢轨 0.1mm 级微裂纹外，最新的研究正探索将导电纳米材料（如碳纳米管）与复合材料融合，创造出具有“触觉”的自感知车体，能实时监测车体结构的应力分布与损伤演化。在自适应方面，基于形状记忆合金（Ni-Ti）的自适应材料已走出实验室，其应用使下一代转向架能根据线路状况与运行速度，动态调节悬挂刚度，成功在试验中将车厢振动降低 42%。能量收集领域也取得突破，利用压电轨道将列车通过的振动能转化为电能，每公里年发电量理论上可达 50 万度，为沿线监测设备提供了分布式绿色能源。

第三，绿色制造工艺与生态友好材料的推广，贯穿于材料“从摇篮到坟墓”的全生命周期。电弧增材制造（WAAM）技术用于制造大型转向架构件，不仅实现了“近净成形”，将材料利用率从传统的不足 30% 提升至 80% 以上，更通过优化设计将构件重量减轻了约 15%。在材料选择上，绿色低碳已成为硬指标。中国中车在“超级地铁”项目中采用的连续纤维增强热塑性复合材料，不仅实现结构件减重 35%，其可回收再熔融成型的特性，更使模块化生产效率提升 60%，从根源上减少了废弃物。更具象征意义的是，中车长客开发的亚麻纤维 / 聚乳酸生物基复合材料车体板，其整个生产过程的碳足迹较传统铝合金降低了 65%，已成功通过严格的 EN45545 防火认证，即将用于巴黎 RER 通勤列车项目。这标志着中国制造正以绿色、环保的全新形象，赢得国际高端市场的认可。

展望未来，智能材料系统的深度集成是核心方向。当前，

我国正通过创新联盟模式，整合 54 家单位协同攻关，力图构建从材料研发到工程应用的全产业链优势。未来，随着材料基因工程加速新材料的发现，与数字孪生技术对物理实体的精准映射，轨道交通系统将最终迈入“自感知 - 自决策 - 自优化”的智能新时代。这将不再局限于单一材料的升级，而是一场彻底改变运维模式、提升运营安全与效率的“系统革命”。

6 结语

轨道交通关键材料的技术创新与产业应用，标志着我国现代交通体系在“规模扩张”阶段后，进入了以“质量跃升”为核心的新阶段。近年来，我国在钢轨、车轮、车轴等核心材料领域取得了显著突破，特别是纳米强化钢轨、碳陶复合材料制动盘等关键技术的突破，推动了国产化率达到 90%，并在轻量化、智能化等方面形成了明显的国际竞争优势。这一进展不仅提升了国内轨道交通系统的安全性和运行效率，也为全球轨道交通技术的创新贡献了中国方案。

随着国家“交通强国”和“双碳”战略的深入推进，轨道交通材料的研发方向正在向更加绿色、智能、可持续发展的方向发展。未来，跨学科深度融合，绿色再生技术的创新，以及“材料 - 结构 - 功能”一体化设计的强化，将进一步推动轨道交通向更高效、更环保的维度迈进。在这一过程中，依托“一带一路”项目标准输出，我国将逐步构建全球轨道交通材料的创新生态圈，不仅推动国内技术的国际化，也为全球轨道交通行业的智能化与可持续发展提供强有力的支撑。

展望未来，随着量子计算辅助材料设计、AI 驱动的工艺优化等技术的逐步应用，轨道交通材料研发的周期预计将大幅缩短，从传统的 5 年压缩至 18 个月。这一变革将加速材料创新的进程，推动轨道交通系统的全面升级。面对全球竞争，我国需在智能材料标准制定（如主导 IEC/TC9 国际标准修订）、高端装备配套（如耐 1500℃ 的碳化硅纤维涡轮叶片）等领域持续发力，全面提升我国在轨道交通领域的国际影响力。最终，通过深度嵌入“智慧轨道”、“空天轨交”等新兴赛道，构建一个涵盖研发、应用、回收的全球轨道交通材料创新生态圈，以材料创新为支点，撬动轨道交通行业向更安全、更智能、更可持续的方向跨越，推动全球轨道交通系统的升级与革新。

参考文献

- [1] 熊嘉阳,沈志云.中国高速铁路的崛起和今后的发展[J].交通运输工程学报,2021,21(05):6-29.
- [2] 翟婉明,赵春发.现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J].西南交通大学学报,2016,51(02):209-226.
- [3] 欧阳爱国,余斌,胡军,等.高铁车轮钢表面粗糙度对滚动摩擦磨损性能的影响研究[J/OL].热加工工艺,2025,(21):137-140.