

碳纤维复合材料在轨道车辆承力部件中的应用

刘茂 周洲 刘奇奇 陈淑珍 李玉顺

株洲时代新材料科技股份有限公司 湖南株洲 412007

摘要：碳纤维复合材料在轨道车辆承力部件中的应用带来了显著的性能提升和经济效益。随着材料科学和工程技术的发展，预计在未来的轨道交通系统中，这种材料将得到更广泛的应用。随着材料技术的进步，将会有更多轨道车辆采用碳纤维复合材料，特别是在新型列车（如磁悬浮列车和超高速列车）设计中，其应用将会更加普遍。碳纤维复合材料的发展与智能材料技术结合，将有助于提升轨道车辆的整体性能和智能化水平。本文结合碳纤维复合材料在轨道车辆承力部件中的应用进行分析，以供参考。

关键词：轨道交通；复合材料；碳纤维；轻量化

一、碳纤维复合材料在轨道车辆承力部件中的应用优势

（一）高强度与轻量化

碳纤维复合材料的强度比许多传统材料（如钢和铝）高出数倍，这使得承力部件在承受重载时能有效防止变形和破坏。碳纤维的密度较低，这意味着在设计相同强度的结构时，可以显著减轻整体重量。这对提高轨道车辆的能效和速度具有重要意义。碳纤维复合材料在多次循环加载下表现出良好的疲劳耐受性，相较于金属材料，能够承受更长时间的运行而不发生疲劳损伤，这对于轨道车辆在长时间运行中的安全性和可靠性至关重要。碳纤维复合材料对多种化学物质和环境因素（如湿气、盐雾和紫外线）的抵抗能力强，因此在潮湿和腐蚀性环境中表现优异。这能够有效延长承力部件的使用寿命，减少维护成本。

（二）设计灵活性

碳纤维复合材料可以通过改变纤维的排列方向、数量和树脂的类型来优化设计，满足特定的力学性能需求。这种设计的灵活性使得工程师可以根据实际的使用要求来设计复杂的几何形状和负载路径。碳纤维复合材料具有良好的减振性能，可以有效降低车辆运行过程中的振动和噪音，提高乘坐舒适性和安全性。这在轨道交通系统中是一个重要的性能指标。

（三）降低能耗与运营成本

碳纤维复合材料在高温下仍能保持稳定的物理性质，相比于金属材料在高温下容易发生强度下降的情况，碳纤维复合材料更为可靠，适合多种气候和工作条件。由于碳纤维复合材料的轻量化特性，轨道车辆的自重降低

可以减少能耗，从而降低运营成本。同时，较少的维护需求和较长的使用寿命也有助于整体经济性。

二、碳纤维复合材料在轨道车辆承力部件中的现有应用情况

（一）车体结构

碳纤维复合材料具有优越的强度和重量比，使得使用这种材料制造的车体能够在保持结构强度的前提下显著降低重量。轻量化的车体结构可以减少列车在运行过程中的能量消耗，尤其是在加速和制动过程中，有助于提升整体能效，降低运营成本。碳纤维复合材料的成型能力强，可以制造出复杂形状的车体部件。这种灵活性使得设计师能够在车体设计中融入更多创新元素，提升列车的美观性和空气动力学性能。碳纤维复合材料的高刚性使得车体在遭受外力时不易变形，提供更好的结构支持。这种刚性确保了车辆在高速运行或遭遇突发情况时的稳定性和安全性。该材料的耐疲劳性意味着车体在长期使用中不会出现明显的结构损伤，有助于延长列车的使用寿命。碳纤维复合材料对环境的抵抗力强，能够有效抵御湿气、化学腐蚀等，有助于维护车体的完整性和美观。在高端列车中，碳纤维复合材料被用于车体前端的防撞结构，能够有效吸收和分散冲击力，降低碰撞时对乘客的伤害风险。强韧的防撞结构不仅增强了列车的安全性能，还为乘客提供了更高的保护，满足现代列车对安全性的严格要求。由于碳纤维复合材料的抗冲击能力，防撞结构在碰撞后较少出现严重损坏，降低了维修频率和成本。许多国家的高铁（如中国的复兴号、法国的TGV）已开始采用碳纤维复合材料作为车体材料，以提升列车的性能。在城市地铁中，使用碳纤维复合材

料的车厢结构能够有效应对城市轨道交通的高强度使用需求，同时提升乘客的乘坐体验。随着生产工艺的改进和材料科学的进步，碳纤维复合材料的成本有望降低，应用范围将进一步扩大。未来，结合智能传感技术的碳纤维复合材料将可能实现实时监测和智能管理，提升列车的安全性和可靠性。

（二）轨道车辆转向架

碳纤维复合材料的轻量化特性，使得转向架构件的设计可以更低，从而降低整个车辆的重心，有助于提升车辆的稳定性，尤其在高速运行和转弯时，能够有效减少侧倾现象。重心的降低改善了车辆在复杂行驶条件下的操控性，使得司机在驾驶时更容易控制列车。碳纤维复合材料的高强度和刚性为转向架提供了良好的结构支持，能够承受复杂的动态载荷。这种强度有助于保持车辆在行驶中的稳定性，尤其是在高速运行时。在受到外部冲击或行驶过程中，碳纤维复合材料能够有效抵御弯曲和扭转，确保车辆保持良好的形态和性能。碳纤维复合材料的特性使其能够有效吸收和缓解来自轨道的不平整和车辆自身运行产生的振动，提升乘客的舒适性。相比传统材料，碳纤维复合材料在使用时能更好地隔绝噪音，进一步改善乘坐体验。

碳纤维复合材料作为弹簧的制造材料，可以有效地吸收振动能量，减少对车体和乘客的影响，这种特性特别适用于高频振动的环境。通过弹簧的有效工作，车辆在行驶过程中能够保持更为平稳的状态，从而提升整体行车安全性和舒适性。碳纤维复合材料对环境因素（如湿气、盐分、化学物质等）具有较强的耐受性，能够保证弹簧在各种气候条件下长时间使用而不失效。由于其耐用性，采用碳纤维复合材料的弹簧减少了维护和更换的频率，从而降低了长期使用成本。许多现代高速列车和地铁系统已经开始采用碳纤维复合材料作为转向架构件和弹簧，以提升整体性能和乘坐体验。在城市轻轨系统中，碳纤维复合材料也逐渐被应用于转向架设计中，帮助提升乘客的舒适度。随着材料科学的不断发展，未来可能会有更多性能优越的复合材料出现，进一步提高车辆的安全性和舒适性。结合智能传感技术的碳纤维复合材料弹簧将可能实现更智能的振动管理，提升车辆的运行效率和乘坐体验。

（三）轨道车辆车轮

碳纤维复合材料的轻质特性使得地铁车轮的整体重量大幅减少，车轮重量的减轻会导致地铁列车在加速和制动时所需的动力减少，从而降低能源消耗。较轻的车

轮可以减少对轨道的压强，降低轨道的磨损程度，延长轨道使用寿命。碳纤维复合材料的高强度和耐磨性使得车轮在运行过程中更加稳定，能够应对高强度的工作负荷，减少车轮的裂纹和破损，延长使用寿命，确保地铁运营的安全性：碳纤维复合材料在长期运转下仍能保持较高的强度，减少车轮疲劳断裂的风险。地铁车轮在制动时会产生大量热量，碳纤维复合材料能够承受较高的温度，避免车轮因高温而变形或损坏。碳纤维复合材料的良好摩擦特性使得车轮和轨道之间的摩擦性能优越，能够提供更高效的制动效果。这对提高地铁的制动性能、缩短制动距离有积极作用，从而提高地铁的安全性。地铁车轮在运行过程中会产生一定的噪音和震动，这不仅影响乘客体验，还可能对城市环境造成污染。碳纤维复合材料由于其优异的减震性能，有助于减少车轮与轨道接触时产生的噪音和振动，从而提升乘车的舒适性，并减少对周围环境的影响。

高速列车的车轮需要承受巨大的重力和速度，碳纤维车轮由于其轻质和高强度特性，能够有效降低列车自重，提高能效，减少能耗，同时提供更好的操控性能和安全性。在城市轨道交通中，碳纤维车轮可以降低车体的总重，减少轨道的磨损和噪音，为乘客提供更舒适的乘坐体验。碳纤维车轮的重量比钢铁车轮轻得多，降低了车辆的整体质量，进而减少了能耗和提高了速度。碳纤维材料具有极高的强度与刚性，能够在高速运行下保持稳定，减少车轮变形。碳纤维不易受到化学腐蚀，适合在多种环境条件下使用，延长了车轮的使用寿命。由于碳纤维的特性，车轮能有效吸收振动，减少乘客的舒适度影响，同时降低轨道的磨损。碳纤维车轮在运行时产生的噪音较低，有助于改善城市环境中的噪音污染。

三、碳纤维复合材料在轨道车辆承力部件中的应用未来趋势

（一）更广泛的应用领域

未来，碳纤维复合材料将更多地应用于新型轨道交通系统，如磁悬浮列车和超高速列车。磁悬浮列车由于采用电磁悬浮技术，要求列车本身尽可能轻便，以降低能耗并提升加速能力。碳纤维复合材料的高强度和轻量化特性使其成为理想的车体材料。磁悬浮列车的运行速度极高，因此对结构的稳定性和抗疲劳性能要求也相应提高。碳纤维复合材料的刚性和耐用性能够满足这些严苛的条件。超高速列车需要在高速运行中减少空气阻力，碳纤维复合材料的设计灵活性能够实现更流线型的车体形状，从而提高空气动力学性能。高速度意味着更高的

碰撞风险，碳纤维复合材料在冲击时的能量吸收能力可以提高乘客的安全性。在地铁和轻轨车厢中，碳纤维复合材料的振动吸收特性可以有效减轻乘客在行驶过程中的不适感，提高整体乘坐体验。车厢内部的设计也可以使用碳纤维复合材料，创造出更宽敞、现代的空间，提高乘客的舒适性和满意度。通过在各关键部件中广泛应用碳纤维复合材料，整个车辆的能效会显著提高。轻量化设计将减少动力消耗，降低运营成本。随着碳纤维复合材料生产技术的进步，材料成本将逐渐降低，使其在轨道交通行业的应用更加普及。

（二）先进制造技术的应用

随着3D打印、自动化纤维铺放技术和数字化制造的进步，碳纤维复合材料的生产效率将显著提高。这将降低生产成本，并使得复杂结构的制造变得更加可行。结合物联网和人工智能技术，未来的碳纤维复合材料生产将更加智能化，实现实时监控和优化，提高生产质量。未来的碳纤维复合材料将与其他材料（如陶瓷、金属和其他高性能纤维）进行复合，以进一步提升强度、韧性和耐高温等性能，满足轨道车辆的高要求。研究人员正致力于开发具有自修复能力的碳纤维复合材料，以提高车辆在使用过程中的安全性和可靠性。

（三）环境友好与可持续发展

随着可持续发展意识的增强，未来将有更多以可再生资源为基础的碳纤维复合材料出现，以减少环境影响。在碳纤维复合材料的使用和回收方面，将更加注重资源的循环利用，以降低生产和使用过程中的碳足迹。未来的碳纤维复合材料可能与传感器集成，实现对材料状态和结构健康的实时监测。这将有助于提前发现潜在问题，提高轨道车辆的安全性和可靠性。结合大数据分析和预测维护，轨道车辆的维护将更加高效，减少停机时间，降低运营成本。除了降低生产成本，碳纤维复合材料的耐用性和较低的维护需求也将带来长期的经济效益。虽然初期投资较高，但从长远看，因减少的能耗和维护成本，整体运营成本将显著降低。碳纤维复合材料在使用过程中能显著提高轨道交通系统的能效，有助于减少温室气体排放。此外，未来的研发将着重于碳纤维的回收与再利用技术，提升材料的可持续性。

（四）多功能集成

碳纤维复合材料的强度比钢材高出几倍，而密度却仅为其四分之一。这种特性使得碳纤维材料在需要高强

度但又需减轻重量的轨道交通部件中非常受欢迎，如车体结构、车轮等。碳纤维复合材料可以设计成具备电磁屏蔽特性，降低电磁干扰。在轨道交通系统中，电气设备和通信系统对电磁干扰的敏感性要求材料具备良好的屏蔽性能，以保障信号的稳定和安全。碳纤维复合材料能够在高温和低温环境下保持其物理性能，并可以通过设计实现优异的热导性能。这使其在刹车系统和电池管理系统中表现出色，帮助提高能效和安全性。随着先进制造技术（如3D打印、自动化纤维铺设等）的发展，碳纤维复合材料的生产效率和质量将显著提高。这些技术能够实现更复杂的几何形状和更高的性能标准，推动其在轨道交通的应用。随着市场需求的增加，碳纤维复合材料的生产规模将逐渐扩大。这将导致生产成本的降低，从而使得其在轨道交通系统中的应用更加经济可行。通过建立高效的碳纤维材料供应链，企业可以降低采购成本，确保材料的可靠供应。这不仅有助于提升生产效率，还能增强企业在市场中的竞争力。

总结

碳纤维复合材料在轨道车辆承力部件中的应用正处于快速发展阶段，已经在多个关键部件中得到广泛应用。未来，随着技术的进步和材料成本的降低，预计其应用范围将进一步扩大，带来更高的性能和经济效益。碳纤维复合材料在轨道车辆承力部件中的应用趋势将更加广泛、技术更加先进、性能更加优异、环保更加友好。随着对轨道交通安全性、舒适性和经济性的要求不断提高，碳纤维复合材料将在这一领域发挥越来越重要的作用。

参考文献

- [1] 吴凡, 姚召定, 李宙利, 尹利, 罗乐, 王刚, 屈发家. 轨道交通车辆用高阻燃碳纤维复合材料环境适应性研究[J]. 纤维复合材料, 2023(04)
- [2] 吴铁辉, 徐文治, 吴静中, 李月, 秦德才. 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(06)
- [3] 王昕敏. 轨道交通车辆转向架零部件应用碳纤维复合材料替代金属材料研究[J]. 合成材料老化与应用, 2022(04)
- [4] 基于新型复合材料应用的德国轨道车辆车体结构轻量化设计[J]. 现代城市轨道交通, 2022(07)