

重卡车身结构轻量化设计与高强度钢/铝合金应用对比

张煜轩 张 宁 李庆歌

陕西重型汽车有限公司 陕西西安 710200

摘要: 本文系统阐述了重卡车身轻量化的核心设计理念与方法,并重点聚焦于当前主流的两轻量化材料——高强度钢与铝合金,从材料特性、成形工艺、连接技术、成本效益、生命周期环境影响及实际应用案例等多个维度进行深入对比分析。研究表明,高强度钢凭借其优异的综合力学性能和成熟的制造体系,在现阶段仍是重卡车身轻量化的主力选择;而铝合金则以其卓越的减重潜力和耐腐蚀性,在特定高端或对续航有极致要求的应用场景中展现出独特优势。未来,多材料混合设计将是重卡车身轻量化的必然趋势,需在材料选择、结构优化与先进制造技术之间寻求最佳平衡点。

关键词: 重型卡车; 车身结构; 轻量化设计; 高强度钢; 铝合金; 材料对比

引言

重型卡车是陆路大宗货物运输主力,但庞大体量带来高能耗、高排放和高运营成本等挑战。研究显示,重卡整车质量每减轻10%,燃油消耗可降低6%~8%。轻量化可提高有效载荷,为运输企业创效,也是电动重卡延长续航、降低成本的关键。车身结构是重卡轻量化核心环节,相较于底盘和动力总成,其轻量化潜力大、设计空间灵活。传统重卡车身多采用普通低碳钢,密度大、强度低,制约轻量化水平提升,开发新型轻质高强材料成行业共识。高强度钢和铝合金因优势突出,成为重卡车身轻量化领域应用最广的两类材料。本文将系统梳理重卡车身轻量化设计理念与方法,对比研究这两种关键材料,为制造商材料选型和结构设计提供参考。

一、重卡车身轻量化设计的核心理念与方法

重卡车身的轻量化并非简单地“减薄”或“挖孔”,而是一个融合了材料科学、结构力学、制造工艺和系统工程的复杂过程。其核心目标是在确保车身满足所有功能要求(如安全性、刚度、耐久性、NVH性能等)的前提下,实现质量的最小化。主要的设计理念与方法包括:

(一) 材料替代

这是最直接的轻量化手段,即用密度更低、比强度(强度/密度)或比刚度(弹性模量/密度)更高的材料替代传统材料。高强度钢和铝合金正是这一理念的典型代表。通过选用更高强度级别的钢材,可以在保证同等承载能力下显著减薄钢板厚度;而铝合金的密度仅为钢

的1/3左右,即使其绝对强度低于某些高强度钢,其减重效果依然十分显著。

(二) 结构优化

在给定材料和边界条件下,通过优化结构布局来提升材料利用效率。拓扑优化可在设计域内寻找最优的材料分布,去除对整体刚度和强度贡献不大的区域,形成仿生或有机形态的轻量化结构;形貌优化则针对薄板结构,通过优化加强筋、凹坑等微小几何特征的布局和形状,以最小的质量代价获得最大的刚度提升;尺寸优化则是对构件的截面尺寸(如厚度、宽度、高度)进行精细调整,实现局部强化或弱化。

(三) 先进成形与连接技术

新材料的应用往往伴随着新工艺的挑战。例如,超高强度钢的冷冲压成形难度大,需要热成形(Hot Stamping)技术;铝合金的焊接性差,需要采用自冲铆接(SPR)、流钻螺钉(FDS)、胶接(Adhesive Bonding)等机械连接或混合连接技术^[1]。这些先进工艺是实现复杂轻量化结构可靠制造的基础。

(四) 模块化与集成化设计

通过将多个零部件集成为一个模块,不仅可以减少零件数量和装配工序,还能通过整体结构设计提升刚度和强度,间接实现轻量化。例如,将驾驶室的A柱、顶盖横梁、门槛梁等通过激光拼焊或液压成形技术集成为一体式封闭断面结构。

二、高强度钢在重卡车身中的应用

高强度钢是指屈服强度在210MPa以上,抗拉强度在

270MPa以上的钢材。在汽车工业中，通常将抗拉强度在500MPa以上的称为先进高强度钢（AHSS）。其在重卡车身中的应用主要体现在以下几个方面：

（一）材料特性

屈服强度达普通低碳钢2~4倍甚至更高，弹性模量（~210GPa）远超铝合金（~70GPa），能保障车身精度与稳定性，强度与刚度高；热成形钢（如22MnB5，抗拉强度超1500MPa）吸能佳，是构建车身碰撞安全骨架（如A/B柱等）的理想之选，碰撞安全性好；钢铁产业链成熟，设备通用，工程师熟悉性能工艺，供应链与制造体系完备；且回收率高，闭环回收体系完善，可回收性佳。不过，它也有短板：钢密度约 $7.8\text{g}/\text{cm}^3$ ，阻碍轻量化；强度提升致钢材塑性降低，冷冲压成形难、回弹难控，对模具和工艺精度要求苛刻，成形性与回弹问题突出；本征耐蚀性逊于铝合金，虽可镀锌改善，但长期防腐成本高，耐腐蚀性相对差。

（二）在重卡车身中的典型应用

在重卡驾驶室中，高强度钢被广泛应用于关键承力和安全部件。例如，A柱、B柱、门槛梁、前围板、地板横梁等通常采用590MPa、780MPa甚至更高强度级别的双相钢（DP钢）或马氏体钢（MS钢）。对于货厢，侧板、底板和立柱也开始采用500~800MPa级别的高强钢，通过减薄板厚（如从2.0mm减至1.5mm）来实现减重。

三、铝合金在重卡车身中的应用

铝合金以其低密度、良好的耐腐蚀性和较高的比强度，成为轻量化的另一重要选择。在重卡领域，主要应用的是5xxx系列（Al-Mg系，不可热处理强化）和6xxx系列（Al-Mg-Si系，可热处理强化）合金。

（一）材料特性

轻量化潜力卓越，密度约 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ ，仅为钢的1/3，同等刚度下铝制结构件质量可减轻30%~50%；耐腐蚀性优异，表面氧化膜使其在大气环境抗腐蚀强，降低后期维护成本，适用于恶劣工况；能量吸收能力良好，压溃变形时能稳定吸能，满足碰撞安全要求；外观美观，表面光洁易着色，可作外覆盖件提升质感。但也有不足：绝对刚度低，弹性模量为钢的1/3，达相同刚度构件截面尺寸常需更大，抵消部分减重优势且影响空间布置；连接工艺复杂，氧化膜阻碍电弧焊，需依赖成本高的机械或胶接技术，增加制造难度与成本；原材料成本高，单位质量成本显著高于钢材；疲劳性能敏感，对缺口和应力集中更易响应，设计需注重细节。

（二）在重卡车身中的典型应用

铝合金在重卡上的应用始于挂车（半挂车）货厢，如今已扩展至牵引车驾驶室。全铝挂车是目前最成功的商业化案例，其厢体（侧板、前板、后门、底板、顶板）几乎全部由铝合金制成，相比传统钢制挂车可减重3~4吨，经济效益极为显著。在驾驶室方面，部分高端重卡品牌（如斯堪尼亚、奔驰Actros）已推出全铝或部分铝制驾驶室，主要应用于顶盖、侧围外板、发动机罩等非主要承力或次承力部件。

四、高强度钢与铝合金的综合对比分析

（一）减重效果与结构性能对比

在减重效果方面，铝合金凭借其极低的密度，在单纯材料替换的场景下展现出压倒性优势。一个全铝驾驶室相比全钢结构可减重300至400公斤，这种量级的质量削减对整车性能提升意义重大。然而，结构性能的评价不能仅看质量，还需兼顾刚度与强度。在同等质量条件下，经过合理设计的铝结构刚度通常优于钢结构；但在同等几何尺寸下，钢结构的刚度远胜于铝结构^[2]。因此，轻量化设计实践中，铝制构件往往需要通过增大截面惯性矩（例如采用封闭断面、增设加强筋）来弥补刚度不足，这在一定程度上限制了其减重潜力的完全释放。在安全性方面，高强度钢，特别是热成形钢，在抵抗侵入和维持乘员舱完整性方面具有天然优势，是安全核心区的首选；而铝合金则通过精心设计的能量吸收路径和压溃机制，在正面与侧面碰撞中也能提供可靠的保护，两者在满足法规要求上殊途同归。

（二）制造工艺与成本对比

制造工艺的成熟度与成本是决定材料能否大规模应用的关键。高强度钢，尤其是先进高强度钢，虽然对冲压设备吨位和模具耐磨性提出了更高要求，但其工艺链与现有汽车制造体系高度兼容，主要依赖成熟的电阻点焊技术，生产节拍快、自动化程度高、单件成本低。相比之下，铝合金的制造挑战主要集中在连接环节。其表面致密的氧化膜阻碍了传统电弧焊的熔合，且焊接热影响区易发生软化，导致接头强度下降。因此，必须采用自冲铆接（SPR）、流钻螺钉（FDS）或结构胶接等先进连接技术，这些工艺不仅设备投资大、工艺窗口窄，而且生产节拍相对较慢，显著推高了单车制造成本。尽管铝合金原材料单价远高于钢材，但其带来的燃油节省和增加载货收益可在高利用率场景下部分甚至完全抵消初始成本溢价^[3]。生命周期成本（LCC）分析表明，对于年

行驶里程超过15万公里的长途物流车辆，全铝挂车的投资回报周期通常在2至3年，经济性显著；但对于驾驶室而言，由于减重带来的直接经济效益相对有限，其成本回收期更长，更多体现为品牌溢价或技术前瞻性。

（三）耐久性与维护成本

在长达十余年的服役周期中，车身的耐久性与维护成本对用户至关重要。钢制车身虽可通过镀锌、喷涂等手段提升防腐能力，但在刮擦、磕碰后易暴露基材，引发锈蚀，需定期检查与维护。而铝合金凭借其优异的本征耐腐蚀性，几乎无需额外防腐处理，在潮湿、盐雾等恶劣环境下仍能保持良好状态，大幅降低了用户的后期维护负担，并有助于提升二手车的残值率。这一优势在沿海地区或冬季频繁使用融雪剂的北方市场尤为突出。

（四）生命周期环境影响（LCA）

从全生命周期视角审视，材料的环境足迹需涵盖“摇篮到坟墓”的全过程。铝合金的生产，特别是电解铝环节，能耗极高，碳排放强度远大于钢铁冶炼。然而，在车辆使用阶段，其轻量化带来的燃油消耗减少可大幅降低二氧化碳排放。多项生命周期评估（LCA）研究表明，一辆全铝挂车在其数十万公里的运营生涯中所节省的燃油，足以抵消其生产阶段多出的碳排放，并产生显著的净环境效益。因此，对于高利用率、长寿命的商用车辆，铝合金的总体环境表现通常是积极的，符合“双碳”战略下的可持续发展方向。

五、实际应用案例与发展趋势

（一）应用案例

在中国市场，主流重卡制造商如一汽解放、东风商用车和中国重汽的新一代车型普遍采用了590MPa及以上级别的高强度钢来构建驾驶室骨架，在确保碰撞安全等级（如ECER29）的前提下，实现了驾驶室整备质量降低10%至15%的轻量化目标。而在铝合金应用方面，北美市场已形成成熟的全铝挂车产业生态，国内则以广东坚美、忠旺集团等铝加工龙头企业为代表，成功为顺丰、京东等物流巨头批量供应全铝厢式货车和冷藏车，充分验证了其在高强度、高频率运营场景下的商业可行性与技术可靠性。欧洲高端重卡品牌则持续引领技术创新，率先将铝合金应用于驾驶室主体结构，展示了未来轻量化的发展方向。

（二）发展趋势

未来重卡车身的轻量化将呈现以下趋势：（1）多材料混合车身（Multi-material Body-in-White）：单一材料难以满足所有性能和成本要求。未来的车身将是“合适的材料用在合适的位置”。例如，乘员舱核心区使用超高强度热成形钢以保障安全，外覆盖件和非核心区使用铝合金以减重，底盘框架则可能采用高强度或复合材料^[4]。（2）先进制造技术的深度融合：激光焊接、热成形、液压成形、3D打印等技术将与新材料结合，制造出更复杂、更高效的轻量化结构。（3）数字化驱动的设计与验证：基于CAE仿真和数字孪生技术，可以在虚拟环境中完成从概念设计、性能验证到工艺规划的全过程，极大缩短开发周期，降低试错成本。（4）可持续性成为核心考量：除了减重和成本，材料的可回收性、生产过程的碳足迹将成为选材决策的关键因素。

结语

重卡车身轻量化是复杂的系统工程。高强度钢凭借优异强度、刚度、成熟工艺和成本优势，仍是安全关键结构件的首选；铝合金则以显著减重效果、耐腐蚀性和环保优势，在挂车货厢广泛应用，并逐步拓展至驾驶室等部件。二者非替代关系，而是互补共存。未来轻量化应摒弃“唯材料论”，转向基于性能、成本与可持续性的多材料混合设计。这需主机厂、材料商、零部件企业及科研机构协同攻关，突破多材料连接、异种材料防腐、一体化成型等关键技术，推动重卡向高效、绿色、智能方向发展。

参考文献

- [1] 涂坚, 单长洲, 王香廷. 某重卡白车身轻量化设计研究[J]. 汽车实用技术, 2016, (08): 55-57.
- [2] 李祥龙. 重卡自卸车货厢轻量化设计研究[D]. 山东大学, 2021.
- [3] 陈文博, 牛润泽, 潘星, 等. 铝合金在汽车轻量化中的应用及重卡轻量化实例[J]. 汽车实用技术, 2020, 45(16): 49-51.
- [4] 方玉金. 某型重卡自卸车货厢仿真分析及轻量化研究[J]. 机械研究与应用, 2024, 37(02): 129-134+139.