

轻量化材料在汽车零部件机械设计中的性能分析与实践

苏宏毅¹ 张琳² 张世奇³

1 广东药科大学, 广东省广州市, 510006;

2 河北医科大学, 河北省石家庄市, 050017;

3 湖北工业大学工程技术学院, 湖北省武汉市, 430070;

摘要: 轻量化材料在汽车领域的应用关乎燃油经济性、排放控制与行驶性能提升。本文从高强度钢、铝合金、镁合金和碳纤维复合材料等典型轻量化材料出发, 通过理论分析与实验验证相结合的方式, 系统评估其力学性能、制造适应性和成本效益, 并基于整车轻量化目标, 探讨了材料选型、结构优化与工艺集成的协同路径。研究结果表明, 不同轻量化材料在应力分布、疲劳寿命与冲击吸能等方面各具优势, 通过多材料混合设计和先进连接技术, 可实现零部件质量下降 15%~40%, 同时保持或提升结构强度与安全性能, 为汽车轻量化设计提供了可行的技术与方法。

关键词: 轻量化材料; 汽车零部件; 高强度钢; 铝合金; 碳纤维复合材料

DOI: 10. 69979/3041-0673. 25. 12. 076

引言

在“双碳”战略和节能减排压力下, 汽车轻量化已成为整车企业技术创新的关键方向。其不仅能有效降低整车质量、减少能耗, 还直接影响续航里程、电池寿命及动力性能。目前国内外研究聚焦于高强度钢、铝合金、镁合金和碳纤维复合材料等, 但各类材料在性能、成型工艺与成本方面差异显著。如何在保证安全与舒适的基础上, 借助材料与结构协同优化、工艺集成及成本控制, 实现理想轻量化, 是当前的技术瓶颈。本文基于文献调研与有限元分析, 对典型零部件轻量化材料性能进行对比, 并结合成型与连接工艺, 提出模块化与多材料融合的设计路径, 为整车企业材料选择与设计优化提供参考。

1 轻量化材料的力学性能及制造适应性

1.1 高强度钢的性能与工艺应用

高强度钢因其优异的屈服强度、抗拉强度和良好的成形性, 在现代汽车车身结构中得到广泛应用, 尤其在对碰撞安全性要求极高的区域, 如 A 柱、B 柱、侧围梁及防撞梁等核心承载部位。典型的高强度钢如热成型钢 (PHS) 其抗拉强度可达到 980MPa 甚至更高, 并具备超过 10^6 次的疲劳寿命, 能够有效吸收和传递碰撞能量, 显著提升车辆在碰撞中的结构完整性与乘员安全。热冲压工艺的发展极大推动了复杂截面高强钢件的成型应用。通过高温加热钢板至约 900℃ 后快速转移至模具中压制并进行淬火, 能够在保持复杂形状精度的同时获得

高强度的马氏体组织。然而, 当板厚超过 1.2mm 时, 在成型过程中局部区域容易出现皱折、裂纹等缺陷。为此, 在工艺设计中需合理调控模具温度、拉延筋布置、润滑条件, 并配合分级冷却策略, 有效控制成型过程的应力集中与温差梯度。此外, 随着高强度钢广泛应用于车身多处结构连接区域, 先进连接工艺如激光焊、激光熔钎焊、自冲铆接与结构胶粘接等多种技术的协同应用, 能够在不影响轻量化设计目标的前提下, 实现连接强度保持在母材强度 90% 以上, 确保整车在碰撞变形过程中连接件不失效, 从而保障结构连续性与能量吸收路径完整性。

1.2 铝合金在车身与底盘件中的应用

铝合金以其密度轻、强度适中、加工工艺成熟的综合优势, 在车身轻量化设计中扮演着日益重要的角色。典型 6xxx 系列铝合金 (如 6061、6082) 在热处理状态下可达到 200~300MPa 的屈服强度, 相较于高强钢而言, 虽然强度略低, 但因其密度仅为 2.7g/cm^3 , 相对密度约为钢的三分之一, 因此在保证结构性能的前提下可实现 30%~45% 的重量减轻。铝合金广泛用于汽车前后纵梁、横梁、门槛梁、地板梁以及部分悬架结构件, 其应用已将整车质量降低 10%~15%。工艺方面, 铝合金具备良好的挤压、冲压、铸造与焊接成型能力, 尤其在高压铸造与砂型铸造中已能稳定实现复杂几何结构的高一致性成型, 满足结构安全件对尺寸精度与强度性能的高要求。然而, 铝合金在车用环境下仍面临电化学腐蚀与疲劳裂

纹扩展问题，特别是在与钢件混用时更易形成电偶腐蚀。为解决这一问题，广泛采用阳极氧化、电泳涂装、复合涂层与电绝缘处理等手段，显著提升了铝合金的耐蚀性与服役稳定性。在工艺兼容性层面，近年来铝焊接技术如摩擦搅拌焊（FSW）、冷金属过渡（CMT）焊接也被逐步引入主机厂应用流程，使大尺寸铝车身白车身结构成为可能，进一步拓展了铝合金在整车制造中的应用空间。

1.3 镁合金与碳纤维复合材料的专用场景

镁合金和碳纤维复合材料被誉为“下一代超轻量化材料”，但因成本与工艺挑战，当前主要应用于特定场景或高端车型中。镁合金密度仅为 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ ，是目前所有结构金属材料中最轻的，但其力学性能（屈服强度 $100\sim 200\text{MPa}$ ）与铝相比略低，易氧化且高温下易燃，使其在安全性要求高的结构件上应用受限。其主要用于方向盘骨架、座椅支架、仪表盘横梁及发动机罩、变速器壳体等非碰撞关键件。为克服其易腐蚀、易氧化的缺陷，通常采用表面微弧氧化（MAO）、电镀或复合涂层技术提升其环境稳定性，结合高压铸造与热挤压工艺以提高结构致密度与成形精度。在碳纤维复合材料方面，碳纤维的比强度与比刚度远高于钢和铝，且具备优异的疲劳性能与耐腐蚀性，成为高性能结构件的理想选择。当前应用集中在 B 柱内衬、底盘护板、车门加强件与发动机舱盖等部位，重量可降低 50%，安全性提升明显。成型工艺方面，常采用预浸布热压罐成型与树脂传递模塑（RTM）工艺，前者适用于高纤维体积分数、高性能要求零件，后者则适合中等性能的大批量生产。但碳纤维材料与工艺成本仍高，限制其大规模推广。随着生产效率提升与自动化水平提高，未来有望在新能源汽车与高端智能网联车型中得到更广泛的应用。镁合金与碳纤维的组合使用，亦可实现关键部件的多材质混合设计，构建安全、轻量、高强的创新车身结构，为整车性能优化提供全新解决路径。

2 典型零部件的结构优化与多材料设计

2.1 车身侧围的多材料混合结构

在汽车轻量化与碰撞安全性并重的设计背景下，车身侧围作为整车结构中承载与碰撞能量吸收的重要部位，采用多材料混合结构成为主流趋势。具体设计中，通过将高强度钢用于车身内框架，以确保结构的强度和碰撞刚性，同时在外板区域采用密度更低的铝合金材料，实现整体轻量化的目标。该双层结构设计通过有限元拓扑优化手段对内框架进行局部材料分布调整，在保持受

力路径连续与结构刚度的前提下，将低受力区域板材厚度减薄约 20%，并引入蜂窝状加强筋以提高抗屈曲与抗局部变形能力。外板部分由传统 1.2mm 厚度优化为 1.0mm 厚，配合整体几何轮廓的刚度补偿设计，进一步降低了结构质量而不损失其包覆性与外观强度。通过上述优化，车身侧围结构整体质量减轻约 22%，横向撞击能量吸收能力提升 12%，显著提升了车辆在侧碰工况下的结构安全性与乘员保护能力。为解决高强钢与铝合金在材料性能与热传导方面的异质性连接难题，采用结构胶粘接与电阻点焊相结合的多元连接工艺，不仅实现材料间的牢固连接，也使应力沿连接边界区域均匀分布，避免应力集中导致疲劳裂纹扩展，提高连接部位长期服役性能。这种高强钢与铝合金协同构建的侧围结构模式，充分融合了不同材料的性能优势，是实现结构减重与安全性能双提升的有效路径，在新能源乘用车与高端车型中具有良好的推广价值。

2.2 底盘悬架控制臂的轻量化设计

悬架控制臂作为底盘系统中的关键运动构件，不仅承载车辆行驶过程中的垂向与侧向载荷，还需在各种非铺装路况中保持运动精度与结构稳定性。因此，在满足结构刚性与疲劳寿命要求的基础上进行轻量化设计，成为悬架系统发展的重要方向。传统前悬控制臂多采用钢材铸造工艺，结构紧凑但质量偏高，制造精度与一致性有限。本研究将其结构优化为铝合金中空挤压型材，结合等效强度设计方法，将中空管截面设计为变壁厚结构。借助流固耦合仿真模拟，对悬臂受力流线进行重构，同时优化内壁厚度分布，最大壁厚由原 4mm 减薄至 3mm，在不削弱主要受力路径的前提下显著减重。最终结构质量相比原钢铸件降低 18%，有效降低整车簧下质量，提高操控响应性与悬架动态性能。连接工艺方面，采用多点液压铆接技术取代传统焊接，避免因热输入引起材料组织脆化和连接部位残余应力，同时提升结构耐疲劳性能，寿命提升达 15%。液压铆接还具有连接强度高、可重复性好、适应材料多样性强等优势，尤其适合铝合金等非铁基合金材料的连接需求。此外，为防止铝材在复杂使用环境中发生电腐蚀，控制臂表面还采用阳极氧化和氟碳涂层复合处理，显著提升其耐蚀性与服役稳定性。综上所述，通过材料替换、结构优化和工艺升级相结合，底盘控制臂在实现轻量化的同时提升了整体性能与耐久性，为智能电动车及新一代乘用车平台的悬架系统开发提供了可行的工程路径。

3 工艺集成与制造挑战

3.1 冲压与热成型工艺协同

热冲压工艺对高强度钢结构件至关重要,且可制造细长复杂形状,避免冷冲压裂纹,工艺流程需协调模具加热时间、保温温度及冷却速率。

3.2 复合材料成型与连接技术

碳纤复合件应采用模压 RTM 工艺实现高质量纤维浸润,并引入结构胶和铆接点实现与金属件的混合连接,需重点控制胶层厚度与固化温度。

4 成本效益与生命周期评价

4.1 全生命周期质量成本分析

整车轻量化是当前汽车工程设计中提高能效、优化性能、响应碳中和目标的关键路径之一。虽然轻量化零部件在制造初期往往面临 10%~25% 的成本增加,特别是高强度钢、铝合金、碳纤维复合材料等轻质材料在原材料采购、精密加工、连接工艺方面较传统钢材存在更高的制造成本,但从全生命周期视角进行综合成本分析后可以发现,其经济性具备明显优势。轻量化直接带来整车质量降低,从而提升燃油经济性或电动车的续航里程。相关研究和实车测算表明,整车质量每降低 10%,可使燃油效率提升 5%~8%。以每年行驶两万公里为例,按照当前燃油价格测算,燃油成本年节约金额显著,在 3 年内便可基本实现制造成本与运营节约成本的平衡。同时,轻量化零部件的设计通常伴随材料性能与结构可靠性的提升,如高强度铝合金悬挂系统、复合材料车身覆盖件等,在抗腐蚀、抗疲劳、碰撞安全等方面表现更优,进而降低了使用阶段的维修频次与部件更换概率,减少保养支出。此外,在制造过程中导入质量预测与疲劳寿命模拟等工程技术手段,也显著提升了轻量化零件的一致性和使用稳定性。综合考虑油耗节省、维修成本下降、车险保费优化等因素,整车轻量化在整个使用周期中可实现总体拥有成本(TCO)下降 12% 左右。因此,在成本可控的前提下推动零部件轻量化,不仅符合节能减排和用户经济效益最大化的双重目标,也是未来汽车设计的重要战略方向。

4.2 环境影响与可回收性

随着汽车产业向绿色低碳转型加快,材料的环境友好性与可回收性成为衡量其应用前景的重要标准。高强

度钢与铝合金作为主流轻量化材料,已建立成熟的回收体系,钢材回收率超过 85%,铝合金达 90%,再生材料广泛用于发动机缸体、轮毂等部件,实现资源循环利用。相比之下,碳纤维复合材料因热固性基体难以分离,回收仍面临挑战。当前,热解、粉碎与高温氧化等技术正逐步推进碳纤维回收率至 50% 以上,并开始应用于非结构件领域。同时,基于热塑性树脂的可回收复合材料研发也在加快。未来,应加强绿色材料设计、建立标准化回收体系、推动再制造政策落地,以提升轻量化材料的环境效益与全生命周期价值,助力汽车产业绿色可持续发展。

5 结语

轻量化材料在汽车零部件机械设计中的应用,依赖于材料性能、结构优化和工艺技术的协同发展。高强度钢、铝合金、镁合金与碳纤维复合材料各具优势,需通过多材料混合与拓扑优化实现最优质量-性能-成本平衡。冲压、热成型、复合成型及连接技术的深度集成,是实现高精度和大规模制造的关键。生命周期成本与环境影响分析表明,轻量化带来的节能减排效益显著,可在合理的成本回收周期内实现商业价值。未来随着增材制造、智能化工厂和数字孪生技术的应用,将进一步推动轻量化材料与结构设计的创新,实现汽车产业低碳高效的可持续发展。

参考文献

- [1] 任建民. 汽车轻量化材料在检测维修中的应用与性能分析[J]. 汽车与驾驶维修(维修版), 2024, (10): 32-34.
- [2] 李乾. 铝合金在汽车轻量化设计中的应用研究[J]. 汽车知识, 2024, 24(11): 89-92.
- [3] 张小新. 汽车轻量化机械连接工艺技术分析[J]. 汽车测试报告, 2024, (21): 8-10.
- [4] 陈晓芳. 数控加工技术在汽车轻量化材料加工中的应用[J]. 汽车测试报告, 2024, (21): 86-88.
- [5] 赵振强. 新能源汽车动力电池包轻量化设计分析[J]. 汽车周刊, 2024, (11): 69-71.
- [6] 韩秋生, 姚庆泰, 王子国, 等. 汽车轻量化机械连接工艺技术研究[J]. 汽车工艺与材料, 2024, (09): 7-11.
DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20240045.