机械设计轻量化技术研究

崔博文 赵岩风 朱建新

河北科技学院 河北唐山 063000

DOI: 10.12238/ems.v7i5.13185

[摘要] 在全球制造业低碳转型与高端装备性能升级的双重驱动下,机械设计轻量化技术已从单一的减重手段发展为融合材料创新、结构优化、工艺升级与可靠性保障的系统性工程。本文构建以材料优选、结构创型、工艺适配、可靠性评估为核心的轻量化技术体系,结合新能源汽车、航空航天、轨道交通等领域的工程实践,深入探讨轻量化设计中性能、成本、可靠性的协同优化策略。研究表明,通过多学科融合与数字化技术应用,可在保证机械性能的前提下实现 20%-40% 的重量优化,为高端装备制造业的绿色化、高效化发展提供理论支撑与实施范式。

[关键词] 机械设计;轻量化;材料

1 引言

随着“双碳”目标的深化推进与《中国制造 2025》战略的实施,机械产品的轻量化设计已成为提升装备性能、降低能源消耗的核心路径。轻量化技术通过合理选择材料、优化结构设计、创新制造工艺,在降低装备重量的同时,能够有效提升能源利用效率、改善动态响应性能、减少材料消耗,广泛应用于汽车、航空航天、轨道交通、工程机械等高端装备领域。然而,当前轻量化设计面临材料性能与成本的矛盾、结构复杂度与制造可行性的冲突,以及多失效模式耦合下的可靠性评估难题。本文基于工程实践与前沿理论,系统梳理轻量化技术的核心体系,探索其在实际应用中的关键问题与解决路径,为行业发展提供参考。

2 轻量化材料应用

2.1 先进金属材料

(1) 铝合金。作为应用最广泛的轻质金属材料,6000 系列(如 6061-T6)兼具良好的强度(抗拉强度 310MPa)与耐腐蚀性,适用于汽车车身框架、高速列车车体;7000 系列(如 7075-T6)通过时效强化可将抗拉强度提升至 500MPa 以上,多用于航空航天承力部件(如飞机翼肋)。某新能源汽车电池托盘采用 6061-T6 铝合金挤压成型,较钢制托盘减重 35%,同时满足 10g 振动载荷下的抗疲劳要求。

(2) 镁合金。密度仅为 1.74g/cm³,是最轻的商用金属结构材料。Mg-Gd-Y 稀土镁合金在 300℃ 高温下抗拉强度可达 180MPa,解决了传统镁合金耐温性不足的问题,被应用于汽车变速器壳体、航空航天仪器支架,较铝合金部件减重 20%-30%。

(3) 高强度钢。第三代先进高强度钢(AHSS)通过相变诱导塑性(TRIP)技术,在保持 20% 以上延伸率的同时实现抗拉强度超 1500MPa,成为汽车碰撞吸能结构的核心材料。例如,某车型热成型钢 B 柱厚度仅 1.2mm,即可满足 25kN 的侧向碰撞载荷,较传统钢材减重 40%。

2.2 非金属材料

(1) 碳纤维增强复合材料(CFRP)。具有密度低(1.6-2.0g/cm³)、比强度高(超过钢铁 10 倍)的优势,广泛应用于航空航天主承力结构(如波音 787 机身复合材料占比 50%)。通过纳米晶界面改性技术,可将层间剪切强度提升 35%,有效解决层间失效问题。

(2) 长纤维增强塑料(LFRT)。密度 1.1-1.3g/cm³,成本仅为 CFRP 的 1/5,适用于汽车仪表盘支架、空调压缩机壳体等非承力部件。某车型 LFRT 发动机罩较铝合金罩减重

25%,且具有良好的隔音与隔热性能。

3 轻量化结构设计理论与方法

3.1 基于力学分析的结构优化技术

结构优化的核心是通过材料分布的合理化,实现“载荷路径最短、材料利用最高”。

3.1.1 拓扑优化

借助有限元分析工具,以结构刚度最大、重量最小为目标,自动求解材料最优分布。某商用车车架通过拓扑优化,去除非承载区域冗余材料,重量减轻 22%,弯曲刚度提升 18%,一阶模态频率从 55Hz 提高至 72Hz,有效避开路面激励共振区间。该技术已从早期的概念设计阶段发展到直接指导模具开发,缩短产品研发周期 30% 以上。

3.1.2 仿生设计

模仿自然界高效承载结构开发轻量化构型。

(1) 蜂窝夹层结构:借鉴蜜蜂蜂巢的六边形胞元设计,上下蒙皮承受面内载荷,蜂窝芯层抵抗剪切与弯曲,密度仅 0.1-0.3g/cm³,比刚度可达 100GPa·cm³/g 以上,广泛应用于飞机机翼、卫星承力筒,较实心结构减重 60%-70%。

(2) 仿生骨骼结构:参考鸟类中空骨骼设计,在机械臂、无人机机架中采用空心管状结构,结合变截面设计,在减轻重量的同时提升抗扭刚度。某工业机械臂通过仿生设计减重 15%,负载-自重比从 3:1 提升至 4:1。

3.1.3 多学科协同优化

建立包含静力学、动力学、热力学的耦合仿真模型,解决传统单学科优化的局限性。某新能源汽车电池包通过多学科优化(MDO),在减轻 28% 重量的同时,将振动疲劳寿命提升 30%,并通过热流仿真确保电芯温差控制在 5℃ 以内,满足快充工况下的热安全要求。该方法通过 Isight 平台集成 ABAQUS、ANSYS 等工具,实现设计参数的自动迭代,优化效率较人工试错提升 5 倍以上。

3.2 功能集成化结构设计

将多种功能集成于单一结构,减少部件数量与连接冗余:

(1) 承载-散热一体化设计:在汽车电机壳体中设计内置冷却流道,利用结构本体实现散热,较传统“壳体+散热器”组合减重 15%,同时散热效率提升 20%。流道结构通过 CFD 仿真优化,确保冷却液流速均匀,避免局部过热。

(2) 结构-传感一体化设计:在碳纤维层合板中嵌入光纤布拉格光栅(FBG)传感器,实时监测结构应力分布,实现“承载+健康监测”功能集成。该技术已应用于航空航天关键部件,可提前 200 小时预警疲劳裂纹,提升维护效率

40%。

4. 轻量化制造工艺创新与精度控制

4.1 先进成型工艺

4.1.1 增材制造 (3D 打印)

选择性激光熔化 (SLM) 技术突破传统加工限制, 可直接制造钛合金、铝合金复杂镂空结构, 材料利用率从 30% 提升至 90% 以上。通用电气 LEAP 发动机燃油喷嘴通过 3D 打印将 20 个部件集成为 1 个, 重量减轻 25%, 加工周期从 4 个月缩短至 2 周。此外, 电子束熔化 (EBM) 技术适用于大尺寸钛合金构件制造, 打印速率可达 $100\text{cm}^3/\text{h}$, 已应用于航空航天框架结构。

4.1.2 半固态成型

铝合金半固态压铸 (SSDC) 技术通过控制浆料固相率 (40%-60%), 实现薄壁件 (壁厚 1.2mm) 的精密成型, 表面粗糙度可达 $Ra1.6\mu\text{m}$, 无需后续机加工。某汽车仪表盘支架采用该工艺制造, 较传统压铸减重 12%, 尺寸精度控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内, 满足高精度装配要求。

4.2 轻量化连接技术

4.2.1 搅拌摩擦焊 (FSW)

作为固相连接技术, FSW 避免了熔焊热裂纹问题, 铝合金接头疲劳强度可达母材的 85%, 且无需填充材料, 较传统铆接减重 15%-20%。高铁车体侧墙采用 FSW 技术连接铝合金型材, 焊缝长度可达 10 米以上, 焊接变形量控制在 $0.1\text{mm}/\text{m}$ 以内, 保障高速运行时的气密性与安全性。

4.2.2 激光焊接 (LW)

利用高能量密度激光束实现精密焊接, 焊缝宽度仅 $0.2\text{--}0.5\text{mm}$, 适用于碳纤维复合材料与金属的异种材料连接。某新能源汽车电池包壳体采用激光焊接, 单条焊缝耗时仅 0.3 秒, 接头拉伸强度可达 45MPa, 较胶接工艺效率提升 10 倍, 可靠性提升 20%。

4.3 精度控制与质量检测

结构光三维扫描: 对铝合金薄壁件进行全场变形测量, 精度可达 $\pm 0.05\text{mm}$, 实时反馈成型误差, 指导模具修正。某汽车覆盖件模具通过该技术将尺寸合格率从 85% 提升至 99.2%。

超声相控阵检测: 针对复合材料层合板, 可检测出直径 $\geq 2\text{mm}$ 的分层缺陷, 检测速度达 $100\text{mm}/\text{s}$, 较传统超声检测效率提升 3 倍, 保障航空结构件的制造质量。

5. 工程应用案例分析

5.1 新能源汽车轻量化工程实践

5.1.1 全铝车身架构

某高端纯电车型采用 “6 系铝合金框架 + 7 系铝合金防撞梁” 方案, 通过拓扑优化与热成型技术, 使车身重量较钢制车身减轻 38% (从 320kg 降至 198kg), 扭转刚度提升 40% ($25000\text{N}\cdot\text{m}/^\circ$ 升至 $35000\text{N}\cdot\text{m}/^\circ$)。配合碳纤维复合材料电池包壳体 (减重 45%), 整车能耗降低 15% (从 $16\text{kWh}/100\text{km}$ 降至 $13.6\text{kWh}/100\text{km}$), 续航里程提升 20% (从 500km 增至 600km)。车身连接采用 FSW 与激光焊接组合工艺, 焊点数量减少 20%, 连接强度提升 15%。

5.1.2 一体化压铸底盘

特斯拉 Model Y 后底板采用 6000T 压铸机一体成型铝合金部件, 将 70 余个零件整合为 2 个, 重量减轻 30%, 制造周期缩短 40%。该工艺通过优化浇口位置与冷却系统, 解决了大尺寸铸件的缩孔与变形问题, 开创了汽车轻量化制造

的全新范式, 推动行业向 “少部件、高集成” 方向发展。

5.2 航空航天领域轻量化创新

5.2.1 碳纤维复合材料机身

空客 A350 XWB 机身复合材料占比达 70%, 较同级别铝合金飞机减重 15 吨, 燃油效率提升 25%。其复合材料层合板采用 “Z-pin” 增强技术, 将层间剪切强度提升 20%, 有效应对高空复杂载荷环境。机身结构通过渐进损伤分析 (PDA), 在保证抗冲击性能的前提下减薄材料厚度, 关键连接部位采用钛合金紧固件 (较钢件轻 40%), 实现了结构效率的最大化。

5.2.2 钛合金增材制造部件

GE 航空 LEAP 发动机钛合金燃油喷嘴通过 SLM 技术制造, 实现传统工艺无法完成的复杂流道结构, 在减轻 25% 重量的同时, 将燃油雾化效率提升 15%, 减少碳排放 5%。该部件通过 1000 小时高温 (1200°C)、高压 (30MPa) 测试, 证明增材制造技术在航空发动机关键部件中的应用可行性。

5.3 轨道交通轻量化实践

CRH380 高铁转向架采用 “空心车轴 + 铝合金构架” 方案, 较传统钢制转向架减重 25%, 轮轨载荷降低 12%, 配合空气动力学优化, 使列车运行阻力减少 18%, 时速 350km 时能耗较前代车型降低 30%。转向架悬挂系统采用刚柔耦合设计, 通过优化橡胶节点形状, 将垂向振动加速度幅值降低 22%, 提升乘客舒适性与系统可靠性。

结语

机械设计轻量化技术是高端装备性能提升与低碳转型的核心引擎, 其本质是通过材料、结构、工艺与可靠性的深度协同, 实现 “重量 - 性能 - 成本” 的多目标优化。本文构建的技术体系揭示了轻量化设计的工程逻辑与实施路径, 通过典型案例验证了其在减重、增效、提质方面的显著价值。未来, 需持续攻克材料成本、智能化设计、可靠性评估等关键技术, 推动轻量化技术从单一技术应用向全产业链协同创新发展, 为 “双碳” 目标下的制造业转型升级提供强大支撑。随着数字化技术与绿色制造理念的深度融合, 轻量化技术将在更广泛的领域释放潜力, 成为全球工业可持续发展的关键驱动力。

[参考文献]

- [1] 邱富林. 轻量化材料在汽车机械设计中的应用与挑战 [J]. 汽车维修技师, 2025, (04): 120-121.
 - [2] 燕通, 贾蕾, 宋洋. 工程机械设计中轻量化技术的应用研究 [J]. 现代盐化工, 2025, 52 (01): 43-45.
 - [3] 刘涛. 基于先进机械设计的轻量化汽车车身结构研究与优化 [J]. 汽车维修技师, 2025, (02): 115-116.
 - [4] 郝山. 绿色环保机械设计的理念与实践 [J]. 机械管理开发, 2024, 39 (12): 239-241.
 - [5] 叶霜, 唐萌, 陈斌, 等. 面向增材制造技术的机械臂轻量化设计与工艺仿真 [J]. 南方农机, 2024, 55(24): 36-39.
 - [6] 雷江涛, 赵书尚, 李东林, 等. 驾驶机器人机械腿轻量化设计与动力学分析 [J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45 (09): 206-213.
 - [7] 刘祥, 林波, 曾建梅, 等. 汽车设计与制造的轻量化研究 [J]. 玩具世界, 2024, (08): 144-146.
- 作者简介: 崔博文 (2000.12-), 男, 汉族, 辽宁抚顺人, 本科在读, 主要从事车辆工程和机械设计。