

机械设计中的材料选择和应用分析

李 宁，焦海婷，臧 鑫

(山东远卓石油技术有限公司，山东 东营 257000)

摘 要 机械设计中的材料选择与应用是保障产品性能、成本与可持续性的关键环节。材料选择需综合考虑力学性能、工艺适配性及环境效益三大核心维度，通过构建多目标决策模型实现科学选型。在金属材料中，高强度钢与钛合金在承载结构领域占据主流，其强化机制与热处理工艺显著影响服役寿命；在非金属材料方面，碳纤维复合材料凭借比强度优势推动汽车、航空航天领域轻量化革命；功能陶瓷的特殊电磁性能则拓展了其在传感器领域的应用边界。现代材料选择方法正呈现智能化趋势，机器学习算法可基于海量数据库预测材料性能，结合有限元仿真实现“设计—材料—工艺”的并行优化。本文对机械设计中的材料选择和应用进行分析，以期为相关人员提供借鉴。

关键词 机械设计；材料选择；金属材料；非金属材料

中图分类号 TH122；TH140

文献标志码 A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.19.021

0 引言

材料作为机械系统的物质基础，其选择与应用水平直接决定着装备的性能边界与价值维度。从青铜时代的工具革命到现代碳纤维复合材料的轻量化突破，材料科学的每一次跃迁都深刻重塑着机械设计的技术版图。在智能制造时代，材料选择已突破传统经验范式，演变为多学科知识驱动的系统工程。面对极端工况挑战与可持续发展需求，材料选择呈现出矛盾平衡的技术特征。航空航天领域要求材料同时满足高温强度、抗疲劳性能与轻量化指标；生物医疗领域则需兼顾力学相容性与生物活性。本文将从材料选择的理论框架出发，系统分析金属、非金属及复合材料的特性与应用规律，探讨智能决策模型在材料选择中的实现路径，并通过典型行业案例揭示技术发展趋势。研究旨在构建“性能需求—材料基因—应用工艺”的全链条设计方法，为高端装备创新提供理论支撑与实践指导^[1]。

1 材料性能指标体系与材料选择基本原则

1.1 材料性能指标体系

材料性能指标体系是材料选择与应用的核心评价框架，涵盖力学性能、物理性能、化学性能及工艺性能四大维度。在力学性能方面，强度指标（屈服强度、抗拉强度）决定材料在载荷作用下的失效极限，韧性参数（冲击功、断裂韧性）反映抗裂纹扩展能力，硬度值（布氏、洛氏硬度）则关联耐磨性与成型性能。物理性能包含密度（影响轻量化设计）、热导率（热管理关键参数）、电导率（电磁器件设计基础）及热

膨胀系数（热应力分析核心参数）。化学性能着重耐腐蚀性（介质环境适配性）、抗氧化性（高温服役寿命）及化学稳定性（反应容器材料选择）。工艺性能涉及铸造流动性、焊接性、切削加工性及成型工艺窗口，直接影响制造可行性及成本。例如：高强度钢虽具优异力学性能，但其焊接敏感性需在结构设计时通过工艺优化补偿；而铝合金虽密度低，但热膨胀系数较大，在精密仪器设计中需进行热变形补偿设计。现代材料研发进一步拓展性能边界，如纳米晶材料通过晶界强化突破强度—塑性矛盾，形状记忆合金利用相变特性实现智能驱动功能^[2]。

1.2 材料选择基本原则

材料选择需遵循四大基本原则以确保设计方案的科学性与经济性。功能适配性原则要求材料性能与工况需求精确匹配，如航空发动机构件需选用高温合金以承受 1 500 ℃ 以上工作环境，而深海装备材料则需具备优异的抗蠕变性能以抵御高压环境。工艺可行性原则强调材料加工特性与现有制造能力的兼容性，如复杂曲面零件优先选择超塑性成型合金，大批量生产场景则倾向选择成型周期短的压铸铝合金。经济性原则需平衡材料成本、加工成本及使用周期成本，如碳纤维复合材料虽然初期成本高，但其轻量化带来的能耗降低和寿命提升在汽车、航空航天领域展现出显著的全生命周期成本优势。可持续发展原则要求考虑材料的环境影响，如生物基材料替代传统石油基塑料，镁锂合金作为最轻金属结构材料减少运输能耗，均体现绿色设计理念。实际选择过程中需建立多目标决策

模型，如通过层次分析法（AHP）量化各原则权重，结合有限元仿真进行多方案对比。例如：某医疗器械案例显示，采用钛合金替代不锈钢虽材料成本增加 3 倍，但生物相容性提升使二次手术率降低 80%，最终实现综合成本节约^[3]。

2 金属材料的特性与应用

2.1 碳钢与合金钢

碳钢与合金钢作为传统工程材料的基石，其特性与应用覆盖机械设计的广泛领域。碳钢以铁碳合金为基础，通过调控含碳量（0.02% ~ 2.11%）和热处理工艺实现性能多样化：低碳钢（C < 0.25%）凭借优异的焊接性和塑性，成为冲压件、焊接结构件的首选；中碳钢（C=0.25% ~ 0.6%）经调质处理后强度可达 800 MPa，适用于齿轮、轴类零件；高碳钢（C > 0.6%）则具有卓越的硬度和耐磨性，广泛用于刀具、弹簧制造。合金钢通过添加 Cr、Ni、Mo 等元素显著提升性能：低合金高强钢（如 Q690）在保持焊接性的同时强度提高 30% ~ 50%，是压力容器、工程机械的核心材料；不锈钢（如 316 L）的耐腐蚀特性使其在化工设备、海洋平台领域不可替代；高温合金（如 Inconel 718）能在 800 °C 以上保持组织稳定，成为航空发动机涡轮叶片的关键材料^[4]。

2.2 铝合金与钛合金

铝合金与钛合金凭借其轻量化优势，在航空航天、交通运输领域引发材料革命。铝合金密度仅为钢的 1/3，其中形变铝合金（如 6061、7075）通过固溶时效处理达到高强度（> 500 MPa），铸造铝合金（如 A356）则具有良好的流动性和压铸成型性。钛合金的密度（4.5 g/cm³）虽高于铝，但其比强度超越多数金属，且具备优异的耐腐蚀性和生物相容性。 $\alpha + \beta$ 型钛合金（如 TC4）综合性能优异，广泛应用于航空紧固件、骨科植入物； β 型钛合金（如 Ti-10-2-3）则通过添加钒、铁等元素提高冷加工性能，适用于冷成形复杂零件。此外，铝合金与钛合金的加工技术也在不断进步，例如：铝合金的精密铸造、锻造以及钛合金的粉末冶金、增材制造等技术，都极大地拓展了这两种材料的应用范围。在航空航天领域，铝合金与钛合金的轻量化特性使得飞行器能够携带更多的有效载荷，同时降低燃油消耗，提高飞行效率。在交通运输领域，这两种材料的应用有助于提升车辆的燃油经济性，减少尾气排放，推动绿色出行的发展。随着材料科学与加工技术的不断进步，铝合金与钛合金的应用前景将更加广阔。

2.3 特殊性能金属

特殊性能金属在高端装备领域展现出独特价值。形状记忆合金（如 NiTi）通过热弹性马氏体相变实现

形状记忆效应和超弹性，在航空航天领域用于自适应结构，生物医疗领域用于血管支架；铌钛合金的超导特性（临界温度 9.3 K）使其在 MRI 设备、粒子加速器中作为核心材料。高熵合金突破传统合金设计理念，由五种及以上元素按等摩尔比组成，具有优异的力学性能和抗辐照性能，在核能装备领域展现出应用潜力。此外，这些特殊性能金属的研发与应用还推动了材料科学的进步。科研人员通过深入研究其微观结构与性能之间的关系，不断优化合金成分与制备工艺，以满足更为严格的应用需求。例如：在形状记忆合金领域，通过调整 NiTi 合金的成分比例与热处理制度，实现了对相变温度与形状记忆特性的精确调控。同时，高熵合金的抗辐照性能研究也为核能装备的安全运行提供了重要保障，使得这些特殊性能金属在高端装备领域的应用前景更加广阔。

3 非金属材料创新应用

3.1 聚合物材料

聚合物材料以其优异的可加工性、耐腐蚀性和功能可设计性，在机械设计中展现出广阔的应用前景。通用塑料（如聚丙烯、ABS）通过注塑成型技术实现复杂结构件的大批量生产，广泛应用于家电外壳、玩具制造等领域。工程塑料（如聚碳酸酯、聚酰胺）则具有更高的强度（> 100 MPa）和耐温性（> 150 °C），在汽车仪表盘、齿轮等部件中替代金属材料。高性能聚合物（如聚醚醚酮 PEEK）的连续使用温度可达 260 °C，在航空发动机轴承、半导体晶圆传输臂等高端装备中展现独特优势。

功能化改性技术进一步拓展其应用边界。纳米粒子填充技术（如纳米二氧化硅改性环氧树脂）将复合材料热导率提升 300%，有效解决 LED 散热问题；导电聚合物（如聚苯胺）通过掺杂控制电导率，在柔性传感器、电磁屏蔽材料中实现应用突破。某医疗器械案例采用 3D 打印聚乳酸（PLA）材料制备可降解骨钉，避免二次手术取出。此外，自修复聚合物（如微胶囊化修复剂）模仿生物组织修复机制，在涂层材料领域展现出延长服役寿命的潜力。

3.2 陶瓷材料

陶瓷材料凭借高硬度（> 9 Mohs）、耐高温（> 1 600 °C）、耐腐蚀等特性，在极端工况下展现独特价值。结构陶瓷（如氧化铝、氮化硅）用于制造陶瓷轴承、密封环，其寿命较金属件提高 5 ~ 10 倍；功能陶瓷（如压电陶瓷、热释电陶瓷）则实现机械能与电能的相互转换，在超声换能器、红外探测器中不可或缺。现代陶瓷制备技术突破传统烧结工艺限制，凝胶注模

成型技术可制备复杂形状陶瓷件，表面金属化技术解决陶瓷与金属的连接问题。此外，陶瓷材料在医疗领域也展现出广阔的应用前景，如生物陶瓷（如羟基磷灰石）具有良好的生物相容性和骨结合能力，成为人工关节、种植牙等医疗器械的重要材料。随着纳米技术的发展，纳米陶瓷通过晶粒细化显著提升韧性和强度，进一步拓宽了陶瓷材料的应用领域。

3.3 新型碳材料

新型碳材料（如石墨烯、碳纳米管）的发现，为机械设计带来了革命性变革。石墨烯的单层碳原子结构赋予其优异的力学（杨氏模量 1 TPa）、电学（载流子迁移率 $2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ）和热学（热导率 5 000 W/m·K）性能。石墨烯增强复合材料在航空航天领域展现出轻量化潜力，某卫星支架案例采用石墨烯 / 铝基复合材料，比刚度提升 40%。碳纳米管（CNT）则具有极高的长径比（ $> 1\,000$ ）和导电性，在导电涂层、场发射阴极材料中展现出良好的应用前景。此外，石墨烯的二维结构使其在柔性电子器件领域具有独特优势，如可弯曲显示屏、电子皮肤等。碳纳米管作为一维纳米材料，在储能领域也展现出应用潜力，如作为锂离子电池的导电添加剂，可显著提升电池的能量密度和循环稳定性。

4 材料选择决策模型

4.1 传统选择方法

传统材料选择方法主要依赖工程经验和试验验证，通过构建材料性能数据库，结合设计约束条件进行筛选。Ashby 图表法将材料性能参数（如比强度、比刚度）可视化，帮助工程师在二维坐标中直观定位最优材料。某航空案例通过绘制密度—强度图表，在 200 种铝合金中筛选出适合机翼结构的 7055-T77 合金。然而，该方法难以处理多目标优化问题，且对新型材料数据更新响应较慢^[5]。

4.2 现代智能方法

现代智能方法引入机器学习、遗传算法等技术，实现材料选择的智能化。基于神经网络的多目标优化算法可综合考虑成本、性能、环境等多维度指标，某汽车轻量化案例通过 NSGA-II 算法在 5 000 种材料组合中筛选出碳纤维增强复合材料方案，使车身减重 18% 且成本增加控制在 5% 以内。数字孪生技术则通过构建材料性能预测模型，实现设计阶段的虚拟验证。某核电案例利用 LSTM 网络预测不同辐照条件下锆合金的蠕变行为，为燃料包壳材料选型提供依据^[6]。

4.3 数字化工具应用

数字化工具通过集成材料数据库、模拟仿真平台和优化算法，构建材料选择决策支持系统。Granta MI

材料数据库收录超百万条材料性能数据，支持多参数组合查询与对比分析。Ansys Engineering Knowledge Manager 则通过仿真驱动设计，自动评估材料在特定工况下的失效风险。某消费电子案例利用该软件对比 6 种镁合金的热导率与成型性能，确定 AZ91D 为散热片最优材料。此外，区块链技术开始应用于材料溯源与供应链优化，确保选材决策的数据可信度。利用这些工具不仅提升了效率，更推动材料选择从经验驱动向数据驱动转型。

5 结束语

机械设计中材料的选择与应用是保障装备性能、成本与可靠性的核心环节。材料选择需综合考虑力学性能、工艺性、服役环境及全生命周期成本，形成“性能—工艺—成本”的多维决策模型。传统方法依赖 Ashby 图表与经验公式，而现代智能算法通过机器学习、多目标优化显著提升效率。在金属材料中，高强度钢与钛合金在航空、海洋装备领域展现出强度优势，铝合金则凭借轻量化特性成为汽车、消费电子的首选。非金属材料的应用不断涌现，如聚醚醚酮（PEEK）在半导体装备中替代金属，陶瓷基复合材料在航空发动机中突破耐温极限。新型碳材料（石墨烯、碳纳米管）更推动电子器件向柔性化、微型化发展。材料应用分析需结合具体工况。在交变载荷下，疲劳强度成为材料选择的关键指标；在腐蚀环境中，需匹配电化特性与防护涂层；热端部件则需考虑高温蠕变与氧化行为。某核电案例通过数字孪生技术预测锆合金辐照性能，使燃料包壳寿命提升 30%。未来，材料选择将向智能化、绿色化方向发展。基于区块链的材料溯源系统可确保数据可信度，生物基可降解材料将推动环保设计。随着增材制造技术的成熟，“材料—工艺—性能”的一体化设计将成为新范式，为装备制造创新提供更多可能。

参考文献:

- [1] 杨明霞, 曲志江. 机械设计中材料的选择和应用分析[J]. 冶金与材料, 2025, 45(02): 91-93.
- [2] 刘景阳. 分析机械设计中材料的选择和应用[J]. 当代化工研究, 2023(07): 191-193.
- [3] 李倩. 新合金材料的选择在机械设计中的应用分析[J]. 铸造, 2023, 72(03): 355.
- [4] 梁先盛. 机械设计中材料的选择与应用分析[J]. 中国设备工程, 2022(08): 83-84.
- [5] 孙逸飞. 机械设计中材料的选择和应用分析: 建筑工程领域[J]. 中国住宅设施, 2021(03): 81-82.
- [6] 吕建中. 机械设计中的材料的选择和应用分析[J]. 湖北农机化, 2020(04): 80.