

机械设计与制造中仿生结构的应用及力学性能创新研究

窦智

511130*****4218

摘要:为突破传统机械结构在轻量化、强韧性、耐疲劳、抗冲击等力学性能上的瓶颈,顺应高端装备极端工况服役需求,仿生结构设计成为机械设计与制造领域的核心创新方向。本文系统梳理仿生学与机械工程融合的核心机理,剖析自然界典型生物结构的力学优势与构型特征,分类阐述仿生结构在多领域的工程应用现状;重点研究仿生拓扑构型、多尺度复合、梯度分布等设计思路对机械结构力学性能的调控机制,结合先进制造技术探讨力学性能创新优化路径;分析当前仿生结构工程化应用面临的核心难题,展望多技术融合下的未来发展趋势。研究表明,仿生结构可实现机械构件强度、韧性、轻量化的协同提升,为高端机械装备性能迭代提供全新技术支撑。

关键词:机械设计;仿生结构;力学性能;轻量化

DOI: 10.69979/3060-8767.26.05.011

引言

现代机械装备正朝着高速、重载、轻量化、长寿命、极端环境服役的方向发展,传统均质机械结构受材料本征特性与构型设计局限,难以兼顾高强度、高韧性、低重量、抗冲击等多维力学性能需求,制约装备可靠性与服役效率。自然界生物经过亿万年进化,形成了适配生存环境、兼具优异力学性能与功能特性的精巧结构,如贝壳的层状叠构、骨骼的多孔梯度结构、蜂巢的正六边形蜂窝、竹子的中空纤维排布等,展现出轻量化、高比强度、高比刚度、耐疲劳、吸能缓冲等卓越力学特质,为机械结构创新设计提供了天然范本。

仿生结构设计以生物构型、材料分布、受力机制为灵感,将生物力学原理与机械工程理论相结合,重构机械构件的拓扑形态、微观组织与界面结构,打破传统机械结构性能瓶颈。近年来,随着有限元仿真、多尺度建模、增材制造等技术的突破,仿生结构从理论设计逐步走向工程落地,在机械零部件、承力构件、缓冲装置等核心部件中实现广泛应用。基于此,本文聚焦机械设计与制造领域,系统探究仿生结构的应用场景、力学性能优化机制及创新方向,为仿生机学结构的工程化推广提供理论参考与实践思路。

1 仿生结构在机械领域的工程应用

1.1 高端装备领域应用

高端装备是机械制造领域的高精尖板块,涵盖航空航天、深空探测、深海作业等场景,服役环境普遍存在高温、高压、重载、交变载荷等严苛条件,对构件轻量化、比强度、结构稳定性提出了极高要求,仿生结构凭

借天然的力学适配优势,成为该领域性能升级的核心技术方案。航空航天装备中,借鉴蜂巢规整蜂窝构型与人体骨骼多孔梯度特征,设计卫星承力支架、发动机舱体、机翼加强肋等关键构件,通过优化孔隙分布与筋板形态,可实现构件自重降低15%-20%,同时提升结构基频与抗弯刚度,满足航天发射与在轨运行的力学需求。针对航空发动机叶片、深海探测器耐压舱等核心部件,模仿贝壳层状叠构与生物梯度密度机理,采用仿生复合材料与梯度构型设计,既能增强构件抗冲击、耐疲劳、耐海水腐蚀性能,又能在保证屈服强度的前提下缩减构件壁厚,提升极端环境下的承压能力与服役寿命,打破传统均质结构在高端装备场景下的性能瓶颈,推动装备向轻量化、长寿命、高可靠性方向升级。

1.2 运载装备领域应用

运载装备主要涵盖轨道交通、民用汽车、商用重卡等领域,核心诉求是兼顾运行节能、乘坐舒适性与碰撞安全性,仿生结构凭借轻量化、高吸能、强减振的力学优势,在该领域实现规模化落地应用。针对运载装备碰撞安全痛点,借鉴生物多孔缓冲、骨骼梯度受力机理,设计仿生薄壁防撞梁、车厢吸能构件,通过优化结构曲面与内部筋板排布,改变冲击能量传递路径,轴向冲击吸能效率较传统钢结构提升30%以上,有效降低碰撞冲击力,保障驾乘人员安全。为实现节能降耗目标,模仿植物叶脉分布、蜂巢轻量化构型,优化汽车底盘加强件、车架纵梁、列车车身框架结构,在保证抗弯、抗扭刚度的前提下,实现构件自重降低18%-25%,减少整车能耗。此外,针对轨道交通长期重载、高频振动的工况,采用仿生变截面、关节柔性构型设计转向架弹簧、悬架阻尼

件,优化应力分布、缓解疲劳损伤,提升构件服役寿命与整车减振效果,适配高速列车、重载卡车的长期稳定运行需求,全面助推运载装备向轻量化、安全化、节能化升级。

1.3 精密与工程机械应用

精密机械与工程机械分属高精密度、重载工况两大应用场景,对仿生结构的性能诉求差异显著,仿生设计凭借精准适配性,在两大领域均实现针对性应用落地。精密机械以机床、机器人、精密传感器为代表,核心追求运行精度、低摩擦损耗与结构稳定性,借鉴生物关节曲面构型、软组织阻尼机理,设计机床主轴轴承、机器人关节减速器、精密传动构件,优化接触应力分布、降低摩擦系数,有效提升传动精度与定位准确度,减少长期运行的磨损量;模仿生物微纳网格与纤维排布特征,设计 MEMS 传感器弹性元件、精密夹具基体,赋予构件超弹性与抗微变形能力,大幅提升检测灵敏度与夹持稳定性,满足精密制造的高精度需求。工程机械侧重重载、耐磨、抗冲击性能,挖掘机履带、起重机支腿、液压管件等核心构件,模仿植物根系锚固、贝壳梯度层状机理优化构型,支腿接地比压与抗滑移性能显著提升,履带耐磨寿命延长;仿生梯度承压管件兼顾耐蚀性与高承载能力,适配矿山、基建等恶劣工况,缓解局部应力集中、降低疲劳失效风险,全面提升工程机械的服役可靠性与耐用性,拓宽极端工况下的作业边界。

2 仿生结构力学性能创新优化机制

2.1 拓扑与构型优化机制

拓扑与构型优化是仿生结构力学性能创新的核心手段,依托生物受力自适应的进化机理,打破传统机械结构均质化、规则化的设计局限,通过重构结构拓扑形态实现应力均匀分布,同步达成轻量化与强承载的双重目标。仿生拓扑优化摒弃传统经验设计思路,以自然界生物分形结构、非均匀筋板排布、多孔渐变构型为灵感,结合多目标力学算法,对机械构件的内部孔隙、外部轮廓、加强筋布局进行迭代优化,精准打散局部应力集中区,让载荷沿结构整体高效传递,最大限度提升材料利用率。针对薄壁承力件、多孔支架、复杂曲面构件等典型机械结构,模仿蜂巢、骨骼、植物茎秆的仿生构型,通过调控孔隙尺寸、排布密度、截面曲率与筋板倾角,可灵活调节结构的弹性模量、屈服强度与冲击吸能特性。实际工程应用中,仿生拓扑优化能实现机械构件比强度提升 20%以上、自重降低 25%以上,彻底破解传统结构“减重必降强、增重则失韧”的痛点,同时优化结构动态

响应特性,提升耐疲劳、抗变形能力,适配高端装备、运载工具等各类机械产品的高性能服役需求,为力学性能创新提供了底层设计支撑。

2.2 多尺度与梯度强化机制

多尺度与梯度强化机制是破解机械结构强度与韧性相互制约瓶颈的核心仿生路径,依托生物材料多级构型与梯度分布的进化特性,从微观到宏观重构结构受力体系,实现力学性能的协同提升。自然界生物普遍具备多尺度复合特征,仿生设计借鉴这一机理,构建微观晶须增强、介观软硬相交替、宏观拓扑适配的多级结构,利用界面裂纹偏转、纤维桥接、能量耗散等效应,阻断裂纹扩展路径,大幅提升结构断裂韧性与抗冲击性能,有效解决传统均质材料“高强即脆、高韧即弱”的痛点。梯度仿生设计则模仿骨骼、贝壳等生物的成分、硬度、孔隙率梯度渐变规律,打造外层致密高强、内层疏松吸能的非均匀结构,精准匹配机械构件表层耐磨、内部承力的非均匀受力需求,同时降低结构与基体之间的应力屏蔽效应,优化应力传递效率。通过调控梯度变化速率、多尺度界面结合状态,可灵活适配不同工况的力学诉求,既能提升构件静载强度与疲劳寿命,又能增强交变载荷、冲击载荷下的结构稳定性,让机械构件在轻量化基础上实现强韧性同步升级,进一步拓宽仿生结构在极端工况机械装备中的应用范围。

2.3 先进制造赋能机制

先进制造技术是仿生结构从理论设计落地为工程实体的关键支撑,打破了传统加工工艺无法制备复杂仿生构型的壁垒,实现力学性能的精准调控与稳定输出,为仿生机械结构的性能创新提供了硬件保障。传统切削、铸造工艺难以实现多孔、梯度、层状、互穿等复杂仿生构型的精细化加工,且易造成结构缺陷、应力分布不均,制约力学性能发挥;以增材制造为核心的先进制造工艺,依托分层成型、逐点堆积的原理,可精准复刻贝壳、骨骼、蜂巢等生物原型的多尺度构型,灵活调控结构孔隙、界面、筋板等关键参数,保证仿生结构的设计精度与成型质量。激光选区熔化、电子束熔融等金属增材技术,适配高端装备金属仿生构件制备,兼顾结构强度与成型精度;熔融沉积、复合材料 3D 打印则满足运载、精密装备轻量化仿生构件的批量制备需求。与此同时,精密成型、界面改性、熔体浸渗等配套工艺协同发力,优化仿生结构界面结合强度,消除内部缺陷,保障力学性能稳定性。先进制造与仿生设计的深度耦合,不仅解决了复杂仿生结构的加工难题,更实现了力学性能的定制化

调控,推动仿生结构从实验室样品走向工业化量产,进一步释放仿生结构在机械领域的性能升级潜力。

3 仿生结构应用瓶颈与发展趋势

3.1 工程化应用核心瓶颈

现阶段仿生结构在机械领域的规模化工程化应用,仍面临理论、制造、标准三大层面的核心瓶颈,制约其从实验室走向产业化落地。理论建模与仿真层面,生物结构的多尺度、非线性力学机理极为复杂,现有仿真模型难以完整还原微观到宏观的跨尺度受力响应,跨尺度分析效率低、精度不足,无法精准预判极端工况下仿生结构的应力分布、裂纹扩展及失效模式,导致设计方案与实际力学性能存在偏差,加大了工程调试成本。制造工艺与成本层面,多孔、梯度、层状等复杂仿生构型依赖增材制造等高端工艺,存在制备效率低、原材料成本高、批量生产难度大等问题,且仿生结构的界面结合质量、孔隙均匀性、内部缺陷难以精准把控,力学性能稳定性不足,传统制造工艺又无法适配复杂仿生构型的加工要求,进一步限制了规模化应用。标准体系层面,目前行业内缺乏统一的仿生机械结构力学性能评价准则、测试规范与质量验收标准,不同构型、材料的仿生结构性能对比无统一依据,长期服役工况下的疲劳寿命、耐腐蚀性能、可靠性测试数据匮乏,难以满足高端装备严苛的质量管控要求,成为仿生结构工程推广的重要阻碍。

3.2 未来发展核心趋势

未来机械领域仿生结构的发展,将围绕多学科融合、功能升级、工程落地三大核心方向推进,逐步破解现有瓶颈,实现从性能优化到产业落地的全面升级。智能仿生设计将成为主流趋势,依托机器学习、数字孪生与多尺度仿真技术,构建数据驱动的仿生设计平台,通过海量生物结构数据训练、多目标算法迭代,快速生成适配复杂工况的最优构型,大幅提升仿真精度与设计效率,缩短研发周期。结构-功能一体化是重要发展方向,突破单一力学性能优化局限,融合减振、导热、耐蚀、自修复等多功能特性,打造兼具高承载、多功能的仿生构件,适配高端装备、极端工况装备的集成化需求,拓宽仿生结构应用边界。低成本批量化制造技术将实现突破,研发适配仿生结构的专用增材材料、精密模压与铸造工艺,优化制备流程、降低生产成本,解决复杂仿生构型

量产难题;同时建立统一的性能评价标准与测试体系,完善工程化验证流程,推动仿生结构从实验室样品走向工业化应用。此外,针对深空、深海、高温重载等极端工况,挖掘特殊生物的结构适应机理,研发特种仿生结构,进一步提升机械装备的极端环境服役能力,助力机械制造领域高质量发展。

4 结论

仿生结构依托自然界生物进化形成的优异力学机理,为机械设计与制造提供了突破传统性能瓶颈的全新路径,在高端装备、运载工具、精密机械等领域展现出极强的应用价值。通过拓扑构型优化、多尺度复合、梯度设计三大核心机制,可实现机械构件轻量化、高强度、高韧性的协同提升,先进制造技术则为仿生结构的精准制备提供了坚实保障。尽管现阶段仿生结构在建模、制造、标准层面仍存在制约,但随着多学科交叉融合与制造技术迭代,仿生结构将逐步实现规模化工程应用,成为推动高端机械装备性能升级、助力制造业高质量发展的关键技术,未来在极端环境、多功能集成等场景的应用潜力将进一步释放。

参考文献

- [1]孙国华,李世霞.浅谈机械制造设计缺陷对工业生产的影响[J].产品可靠性报告,2025,(12):235-236.
- [2]陈挺辉,杜晖,陈良,等.机械研发过程中的数字化设计方法与制造技术优化分析[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛——绿色智造·采购革新专题.宁波市哈雷换热设备有限公司;绍兴市优帮教育信息咨询有限公司;浙江一川纺织科技有限公司;,2025:16-21.
- [3]孙瞻.机械设计制造及其自动化专业热工基础课程教学改革——以河南科技大学应用工程学院为例[J].造纸装备及材料,2025,54(12):229-231.
- [4]李洪旺.机械设计制造及其自动化中数控加工精度控制策略[C]//广西网络安全和信息化联合会.第十四届工程技术管理与数字化转型学术交流论文集(下册).青岛港湾职业技术学院;,2025:200-201.
- [5]程军飞.机械设计制造及其自动化在汽车车身结构优化中的应用[J].汽车维修技师,2025,(24):116-117.