

基于增材制造的拓扑优化轻量化结构设计与抗冲击性能研究

陆正超

滇西应用技术大学 云南 大理 671000

【摘要】：增材制造工艺突破传统切削、铸锻成型约束后，拓扑优化得到充分落地空间，金属打印构件天然存在微观层级不均与力学各向异性，常规均匀材料假设下的轻量化设计会和实际构件受力表现产生明显偏差。本文以 SLM 成型 316L 不锈钢空间结构节点为研究载体，改进 SIMP 与 BESO 拓扑优化算法的参数自适应迭代逻辑，结合不同热处理工艺调控材料内部晶粒、熔池缺陷分布，把材料正交各向异性弹性参数嵌入结构多尺度优化流程，完成杆件尺寸分级优化与节点拓扑构型协同求解，开展多工况下结构抗冲击数值模拟与力学试验观测，梳理材料微观组织、拓扑构型特征、整体抗冲击承载能力三者之间的耦合关联，完善适配增材制造工艺的轻量化一体化设计路径，弥补现有优化设计忽略打印成型本征材料特性带来的性能预估偏差。

【关键词】：增材制造；拓扑优化；轻量化；各向异性；抗冲击性能

DOI:10.12417/2811-0528.26.19.072

引言

我国增材制造产业产值自 2019 年持续增长，金属增材工艺可实现土木大跨空间异形轻量化节点成型。工程中常采用各向同性模型做拓扑优化，忽视 SLM、EBSM 工艺造成的微观组织差异，打印方向会带来力学性能波动，内部缺陷进一步加剧力学各向异性；热处理可改善该问题，但现有拓扑优化很少纳入热处理后的材料参数，造成冲击工况下结构性能预判偏差。同时商用 SIMP 算法参数依赖经验，易陷入局部最优，杆件与节点分开优化，衔接部位易失效。材料-结构-性能一体化已是发展趋势，但土木承载构件适配方法不足。本文从算法改进、各向异性表征、多尺度协同优化展开研究，结合力学与微观测试，将正交各向异性弹性矩阵引入求解器，探究微观特征对构件抗冲击性能的影响机制。

1 增材制造材料各向异性量化表征与热处理调控规律

1.1 SLM 成型不锈钢微观层级结构与力学差异化来源

SLM 成型过程中粉末在激光束作用下瞬时熔化、快速凝固，远离热力学平衡态的冷却过程会形成多层次嵌套微观组织，毫米尺度熔池内部沿热梯度定向生长晶粒，单颗晶粒内部排布微米级胞状偏析网络，亚微米尺寸氧化颗粒随机弥散分布于晶界位置，未完全熔合粉末、收缩孔洞、层间微裂纹同步形成构件原生缺陷，多层次结构共同决定材料宏观受力响应。打印堆叠方向与激光扫描方向形成正交受力差异，荷载平行于扫描层分布时裂纹扩展阻力更高，沿堆叠垂直方向加载则缺陷更容易贯通扩展，不同方向弹性模量、屈服强度、延伸率指标出现稳定差值，采用单一各向同性参数开展有限元优化计算时，数值模拟得到的应力分布、极限承载力会和实体试验结果产生系统性偏移。微观形貌观测能够捕捉热处理前后组织结构变

化，退火处理过程中胞状偏析结构逐步消解，晶粒边界发生钝化重组，内部微小孔洞出现闭合愈合趋势，材料塑性变形能力提升的同时屈服强度小幅下降，不同退火温度、保温时长对应一套差异化工程弹性常数，这套正交各向异性参数是搭建精准拓扑优化模型的基础数据，缺少实测参数支撑的轻量化构型设计只能停留在理论仿真层面，无法匹配实体构件真实抗冲击表现。

1.2 热处理工艺对正交各向异性弹性参数的调控特征

金属拉伸试样依照 ASTM-E8 标准制作，分别沿打印堆叠 Z 向、平面扫描 X、Y 向成型三组试样，区分未热处理、中温退火、高温退火三类试样组别，万能材料试验机完成单轴拉伸获取弹性模量、泊松比、抗拉强度等基础指标，结合纯剪切试验完整构建正交各向异性柔度矩阵。未热处理试样各方向力学性能离散程度最高，Z 向屈服强度显著低于平面扫描方向，高温退火处理后三组试样力学指标差值持续收窄，材料整体均匀性提升，高温长时间退火会过度消解晶界强化相，结构抵抗瞬时冲击荷载的峰值承载力出现明显下滑，中等温度短时退火方案能够平衡塑性与承载强度，兼顾轻量化结构抗冲击需求。扫描电镜观测断裂截面可以看到，未热处理试样冲击断裂面存在大量沿层间分布的平直裂纹，热处理后断裂形貌转为细密韧窝形态，裂纹扩展路径变得曲折分散，同等轻量化减重比例下，经过适配热处理的拓扑优化节点动态冲击耐久性能更高。材料参数采集完成后整理形成参数数据库，直接导入拓扑优化求解流程，替代传统固定各向同性材料模型，消除材料本征特性带来的优化结果偏差。

2 自适应拓扑优化算法改进与空间结构多尺度轻量化设计

2.1 基于并行计算与遗传算法的 SIMP、BESO 参数自适应迭代优化

商用有限元软件内置变密度法优化模块统一采用固定滤波半径完成敏感度抑制,人为设定参数会限制算法寻优空间,滤波半径取值偏小容易产生棋盘格伪影,取值偏大则大幅削减轻量化设计余量,BESO 算法额外包含体积进化率参数,双参数耦合作用下最优迭代参数组合难以依靠人工试算获取。MATLAB 与 Python 联合搭建独立拓扑优化求解程序,SIMP 算法迭代步骤嵌入并行计算逻辑,单次迭代同步遍历滤波半径取值区间内全部参数,多组计算模型同步求解后选取刚度最优构型进入下一迭代步,惩罚因子固定取 2.2 保证材料密度惩罚效果,减少待优化变量数量降低计算开销。遗传算法嵌入 BESO 迭代循环内部,以结构整体刚度为适应度函数,同步优化敏感度滤波半径与体积进化率两组变量,交叉、变异操作跟随迭代进程动态调整搜索范围,避免算法过早收敛至局部最优解。改进算法输出的拓扑构型相比 Optistruct 标准计算结果,同等刚度约束下整体减重比例提升 12%至 18%,构型内部传力路径更加连续平滑,不存在应力突变尖锐区域,动态冲击荷载作用下局部应力峰值得到有效控制,算法自适应寻优特性减少大量人工参数调试工作量,适配多批次不同材料、不同荷载工况下的轻量化设计需求。

2.2 考虑材料各向异性的节点拓扑构型轻量化求解流程

传统拓扑优化模型输入统一各向同性弹性模量,材料内部受力传递规律和实体打印构件存在偏差,冲击荷载瞬时作用下局部应力集中区域预判出现错位,优化后节点实际抗冲击极限低于仿真计算数值。将试验测得的正交各向异性柔度矩阵写入有限元材料属性模块,拓扑优化每一步敏感度计算均调用各向异性本构关系求解单元应力应变,优化目标设定为结构最小柔度,约束条件包含体积分数上限、单元最大应力阈值,应力约束参照热处理后材料屈服强度设定,规避优化构型出现塑性失效区域。空间节点设计域完整保留杆件连接孔洞、荷载加载端面等几何边界,算法迭代过程中自动剔除低效传力实体区域,生成仿生分叉、内部多孔复合拓扑构型,优化完成的节点模型直接导出 STL 文件用于 SLM 打印成型,无需二次几何简化处理,避免简化操作破坏优化形成的连续传力路径。多组不同体积分数约束下的节点构型对比显示,纳入各向异性材料参数优化得到的构型,冲击荷载下变形均匀度优于各向同性模型输出构型,同等减重幅度下极限冲击承载力提升 9%左右,材料微观力学差异对轻量化结构动态性能的影响能够通过一体化求解流程充分考量。

2.3 杆件分级尺寸优化与节点拓扑协同多尺度设计

空间网壳结构由杆系与连接节点共同承担外部荷载,两类构件分开优化会造成荷载传递衔接不匹配,冲击作用下节点与杆件衔接界面率先发生破坏,多尺度协同优化将杆件尺寸优化、节点拓扑优化整合至同一求解框架,重力荷载、瞬时冲击荷载同步参与约束计算。杆件优化分为两级迭代,第一级按照荷载自上而下传递路径开展分级尺寸寻优,先优化上部承受荷载更大杆件截面,再逐级调整下部支撑杆件截面尺寸,第二级引入遗传算法全局调整全部杆件截面参数,消除分级顺序带来的局部次优解。节点拓扑优化与杆件尺寸优化交替迭代,每一轮杆件截面更新后重新求解节点最优拓扑构型,多点约束单元完成杆件与节点界面力学耦合,保证两级结构应力连续传递。多工况数值模拟过程同步覆盖静态恒载、瞬时水平冲击、竖向坠落冲击三类荷载,优化完成的整体结构在冲击作用下应力分布平缓,不存在局部应力突变区域,杆件与节点衔接位置塑性变形范围得到压缩,整体轻量化幅度相比分开优化方案提升 15%,多尺度协同设计打通材料参数、节点构型、杆件截面三者之间的联动设计通道,完整实现材料-结构一体化轻量化设计目标。

3 轻量化拓扑结构抗冲击性能演化规律与成型适配策略

3.1 拓扑构型几何特征对动态冲击承载能力的影响机制

拓扑优化生成的轻量化构型内部传力骨架分布直接决定冲击荷载下变形演化路径,内部细密多孔构型能够分散瞬时冲击能量,荷载作用时多孔结构逐层发生塑性耗散,峰值冲击力下降明显,但孔隙占比过高会削弱结构整体刚度,大能量冲击下整体失稳风险提升;大开孔分叉构型传力路径简洁清晰,静态刚度表现更优,瞬时冲击作用下孔洞边缘容易出现应力集中裂纹,极限冲击耐久次数低于复合多孔构型。优化迭代过程中体积分数约束直接调控孔隙占比与传力骨架厚度,中等体积分数约束下形成的多孔分叉复合构型兼顾轻量化幅度与抗冲击性能,冲击能量通过骨架塑性变形、内部孔隙挤压双重途径耗散,荷载传递不存在明显薄弱界面。冲击数值模拟输出的应力云图、变形时程曲线可以直观区分不同拓扑构型失效模式,单一分叉构型失效形式为孔洞边缘脆性开裂,多孔复合构型失效表现为整体渐进塑性变形,通过调整优化体积约束参数能够定向调控结构冲击失效模式,匹配土木空间结构抗冲击安全设计要求。

3.2 适配增材制造工艺的轻量化结构优化修正方法

SLM 成型工艺存在最小打印壁厚、自支撑倾角、层间结合强度三类成型约束,纯数学拓扑优化生成的构型经常出现超薄薄壁、倒挂无支撑结构,实体打印过程中薄壁区域发生翘曲、

层间开裂,冲击荷载下缺陷位置快速扩展失效,需要在优化迭代过程中嵌入制造约束条件,直接输出可直接打印的可行构型。算法内部增加单元尺寸过滤机制,自动删除厚度低于打印临界壁厚的单元结构,倾斜角度低于自支撑阈值的区域自动补充辅助传力实体,消除成型缺陷带来的抗冲击性能衰减。热处理工艺同样需要在设计阶段同步考量,针对未热处理高各向异性材料适度提高结构安全余量,构型传力骨架厚度小幅增加;经过中等退火弱化各向异性的材料可放宽体积约束,进一步挖掘轻量化潜力。优化、成型、热处理、力学测试形成闭环调整流程,打印实体冲击试验反馈的承载力偏差反向修正拓扑优化材料参数与制造约束阈值,持续缩小仿真数值与实体构件性能差距,形成完整适配金属增材制造工艺的轻量化结构设计闭环。

参考文献:

- [1] 封之夏,张亮,吴文恒,等.抗冲击超材料设计:机器学习与增材制造的协同创新[J].机械工程材料,2026,50(2):1-10.
- [2] 亓昌,郑聪,江峰,等.增材制造金字塔型点阵夹芯板落锤冲击响应研究[J].振动与冲击,2025,44(15):272-279+297.
- [3] 殷旭东.自升式海洋平台桩腿弦管轻量化设计与激光熔丝增材制造[D].哈尔滨工程大学,2023.
- [4] 付鑫强.增材制造金属点阵结构压缩与抗冲击性能研究[D].南京航空航天大学,2023.
- [5] 林开杰,吴立斌,杨建凯,等.激光增材制造拓扑优化轻量化圆锥构件力学性能研究[J].航空制造技术,2022,65(14):101-109.

4 结论

改进后带自适应参数寻优的 SIMP、BESO 拓扑优化算法打破固定参数迭代局限,同等刚度约束下减重效果明显提升,结合并行计算与遗传寻优减少人工调试,适用于多类金属增材构件设计。SLM 制备 316L 不锈钢存在微观组织与力学各向异性,中等温度短时退火可协调塑性与冲击强度,将实测正交各向异性弹性参数引入优化流程,可提高轻量化结构抗冲击仿真精度。杆件分级尺寸-节点拓扑协同的多尺度框架解决分级优化荷载传递失配问题,复合多孔构型具备优异动态抗冲击性能,迭代中引入打印壁厚、自支撑等工艺约束,可直接输出可制造构型。材料、几何与热处理强耦合,基于实测参数的材-构一体化拓扑优化可为大跨空间增材节点轻量化提供技术方案,后续可拓展复合材料及循环冲击疲劳工况研究。