

基于中空激光同轴粉/丝同步输送的增材制造熔覆头设计

机械2101班：谭磊 指导教师：谷天平 论文类型：毕业设计

摘要：本研究针对激光熔覆头存在的能量损耗高、材料同轴度偏差大及热管理不足等问题，提出一种创新性中空激光同轴粉/丝同步输送熔覆头设计方案。通过光路拓扑优化与气固两相流调控，实现环形光斑能量均匀性92.4%、激光反射效率99.4%、粉/丝同轴度误差 $<0.1\text{mm}$ 、粉末利用率 $>85\%$ ，并集成模块化热管理系统提升设备稳定性。研究成果为高精度增材制造装备开发提供新路径。

关键词：激光熔覆头；中空光路设计；粉/丝同轴输送；能量均匀性；气固两相流

1 研究背景与技术现状

激光增材制造技术在航空航天领域取得了重大进展，像GE航空Leap发动机燃油喷嘴运用该技术后，零件数量减少了95%，结构重量减轻了25%，并且寿命提高了5倍，不过传统熔覆头存在三方面技术难题：光路系统由于多次折射，能量损失在15%至20%；旁轴送粉模式造成空间错位，同轴度偏差一般超过0.5毫米；散热不够致使连续工作时需要频繁停机维护。曹欣团队研发的宽带同轴送粉系统借助二级水路冷却，把粉末利用率提高到了85%，但他们的研究说明在高功率工况下热变形能达到0.2毫米，李素丽等人对比了三种分光方案后证明，一分三抛物面设计能让光能均匀性达到89.7%，宋收借助气固两相流模型指出离焦量对粉末汇聚性的影响规律，发现离焦量为零时粉末聚集度是最佳的。在国际研究中，DeOliveira建立的激光-粉末相互作用模型显示当粉末速度超过每秒0.5米时基材熔化功率趋于稳定。通过调研发现，当前技术仍旧需要解决光学元件热变形控制、超细粉末输送稳定性等核心问题。

2 研究内容与方法

2.1 总体设计方案

本研究设计了模块化集成架构，该架构由光路系统、粉/丝输送系统、冷却系统以及密封系统共同组成协同体系，研究运用多物理场耦合仿真驱动设计方法，先是依据SolidWorks构建三维模型，具体模型如图2.1所示，针对光路系统，借助COMSOL软件对光路传输路径给予优化，构建锥镜反射组光学模型，其中拓扑电荷数 m 和波长 λ 呈现反比关系，粉/丝输送系统则基于Ansys Fluent搭建气固两相流仿真模型，经软件处理得出仿真结果，其流程涉及前处理、条件设置与求解以及后处理这三个步骤。技术路线围绕四个目标推进：达成环形光斑能量均匀分布，保障粉/丝输送同轴精度，构建高效热管理机制，保证工艺环境密封性。

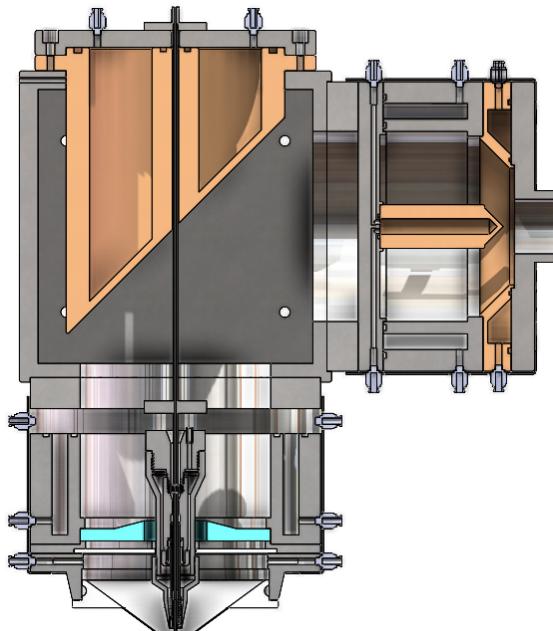


图2.1 熔覆头总体结构图

2.2 核心技术创新

熔覆头光路系统运用四级光学结构达成激光能量的高效传输以及形态控制，入射的激光束经由锥形镜反射系统实施初级整形，其45度顶角的设计是依据拓扑电荷数优化公式计算出来的，在1064nm波长的情况下可生成理论模式半径相对较大的环形光场，借助环形锥镜的二次反射形成了内径为41.5毫米、外径为53.5毫米的平行环形光束。平面反射镜组采用石英基材并搭配超高反射率镀层，把光束精准地导向至竖直方向，最终由ZnSe聚焦透镜完成光束的收敛，其表面的12层氧化铝/二氧化钛增透膜可实现99.9%以上的透射效率，光束汇聚成为均根半径为0.292mm的环形光斑，这个尺寸精确地匹配了熔覆工艺对于能量分布以及作用范围的需求。

四级光路共同发挥作用，系统的总反射效率达到99.4%，相较于传统设计降低菲涅尔损耗超过60%，当焦距从80毫米增加到120毫米时，焦平面光斑直径呈现出非线性的缩减，仿真数据显示100毫米焦距的方案能使光斑均方根半径降低至0.292毫米，轴向偏差控制在 ± 5 微米的范围内，此时光斑能量均匀性达到92.4%，内外径比稳定在 0.82 ± 0.03 的优化区间。110毫米以上焦距虽然缩小了光斑尺寸，但是能效提升的幅度明显趋缓，这证明100毫米焦距在能量密度与分布均匀性之间达成了最佳的平衡。

粉/丝输送系统采用了一种创新架构，即中心送丝、单侧送粉以及气幕约束，中心通道配备了超精密抛光导丝管，其直径设计为0.8毫米，并结合了弹性预紧结构，以此达成丝材与激光束0.05毫米的同轴精度，单侧送粉通道借助重力-气力协同输送机制，让316L不锈钢粉末凭借八孔均粉环来完成流体重构。均粉环内部设有8个直径为1毫米的精密孔道，依靠机械匀化作用形成密度差异小于10%的环形分布，

气幕约束机制借助双重气流来实现动态控制：内层约束气形成速度梯度场，抑制粉末扩散，外层氩气保护幕构建起惰性环境，经过参数计算验证，在粉末流量为

12克/分钟、氩气载气密度为1.784千克/立方米的工况下，出口流速稳定在3.05米/秒。Fluent气固两相流仿真说明，当载气流量为每分钟1升时，在距喷嘴出口20毫米处粉末流直径仅扩大12%，并且在100毫米的传输距离内维持稳定的圆柱形态，这种紧聚焦-缓发散特性使得粉末汇聚点与激光焦平面的空间重合度达到98%，最终实现85%以上的粉末利用率。

冷却系统整合了三级热管理方案：镜组环形空腔可实现自然对流散热，水冷流道可使镜片工作温度稳定在60至80摄氏度，陶瓷隔热片可阻断热传导，密封系统采用五层同轴嵌套结构，将熔池氧浓度控制在2000ppm以下，氩气保护幕的氧气隔绝效率超过98%。

3 研究成果与应用验证

本研究达成关键指标较大进步，具体数据见表3.1：激光反射效率从传统方案的80%升至99.4%，粉/丝同轴度误差由0.5毫米降至0.1毫米以下，粉末利用率提高25个百分点至85%以上。于航空发动机涡轮叶片修复而言，熔覆层稀释率稳定在8%以内，界面结合强度超400兆帕，修复件寿命达新件95%以上。3C领域应用显示，智能手机中框熔覆层表面粗糙度小于6.3微米，厚度波动控制在正负0.1毫米范围，实现免精加工直接成形，能源装备现场修复场景里，模块化设计让维护时间减少30%，设备于粉尘振动环境仍保持正负5微米定位精度。

表3.1 性能参数对比表

性能参数	传统熔覆头	本设计方案	提升幅度
激光反射效率	80%-85%	99.4%	>14%
粉/丝同轴度误差	>0.5mm	<0.1mm	降低80%
粉末利用率	60%-70%	>85%	>25%

4 结论与展望

本研究借助中空光路拓扑优化、气幕约束输送以及三级热管理协同创新的方式，成功克服了激光熔覆技术的瓶颈，主要结论如下：45度锥镜顶角搭配100毫米焦距的ZnSe透镜，达成了光斑能量均匀性92.4%以及轴向偏差正负5微米的优化平衡；8孔均粉环和气幕约束机制使得粉末流在100毫米传输距离内浓度差异小于10%，同轴度误差小于0.1毫米；空腔、水冷与隔热的三级散热方案依据前人实验结果预测可将热变

形梯度抑制在每厘米5摄氏度以下。

当前研究仍旧存在三项局限：喷嘴几何结构对光路的干涉效应需要进行量化分析；热力耦合工况下的寿命预测缺少实验数据；仿真没有考虑实际工业环境的震动等干扰因素，显得过于理想化。未来可以依据这三点局限性，深入探寻解决问题的办法，推动激光熔覆技术在高端制造领域的产业化进程。