



玻璃样品长波激光热冲击试验系统技术方案

陕西库赫曜能科技有限公司

方案版本：V1.0

2026年7月

目录

一、项目概述3

二、设计依据与技术目标3

三、总体技术方案3

四、核心系统设计4

五、两套独立光斑设计方案5

六、热流密度推导及能力分析 7

七、光斑均匀性分析9

八、控制、测量与安全设计 10

九、试验工作流程11

十、主要技术参数11

十一、方案结论12

一、项目概述

本方案面向玻璃样品热冲击试验，通过长波高能束对样品指定表面进行快速、可控和可重复的辐照加热，用于研究样品在规定热流条件下的温升响应、热应力演化及热冲击后强度变化。

根据试验要求，加热波段为 8~12 μm ，样品面目标入射热流密度约为 0.2 MW/m^2 。综合波长匹配、功率调节速度、能量密度及方形光斑整形能力，推荐采用波长 10.6 μm 、额定输出功率 4 kW 的连续波 CO_2 激光器作为长波热源，系统可设计两种方形平顶光斑：50×50 mm 和 90×90 mm，配置完整的激光热源、匀化投影光路、冷却系统、控制系统和安全联锁。

二、设计依据与技术目标

项目	设计要求
试验对象	玻璃样品热冲击试验
加热波段	长波 8~12 μm
推荐中心波长	10.6 μm
激光器额定功率	4 kW
方案一有效光斑	50×50 mm，方形平顶分布
方案二有效光斑	90×90 mm，方形平顶分布
目标入射热流密度	约 0.20 MW/m^2 （即 20 W/cm^2 ）
主要光学构成	水冷金属反射镜+镀金反射式匀化器+少量 ZnSe 保护/投影镜片

说明：本方案中的“0.2 MW/m^2 ”按样品表面的入射热流密度理解，即到达样品面的光功率除以有效光斑面积；样品实际吸收热流还与玻璃材料在 10.6 μm 处的吸收率有关。

三、总体技术方案

系统由 4 kW CO_2 激光器、光束传输与匀化投影单元、样品夹持/试验单元、热流与温度测量单元、水冷机组、控制系统及激光安全防护单元组成。激光器输出的 10.6 μm 光束经准直和水冷金属反射镜转向后，进入镀金反射式匀化器进行分束、混合与重排，再由投影光学组件将匀化后的能量成像到样品表面，形成边界清晰的方形平顶光斑。

方案一系统按照 50×50 mm 有效光斑进行完整配置，重点保证较小区域内的高热流能力和较大功率调节余量；方案二系统按照 90×90 mm 有效光斑进行完整配置，重点保证较大区域的均匀覆盖能力。两套系统分别通过激光器功率给定、快门控制和样品面热流标定，将实际工作点稳定在约 0.20 MW/m^2 。

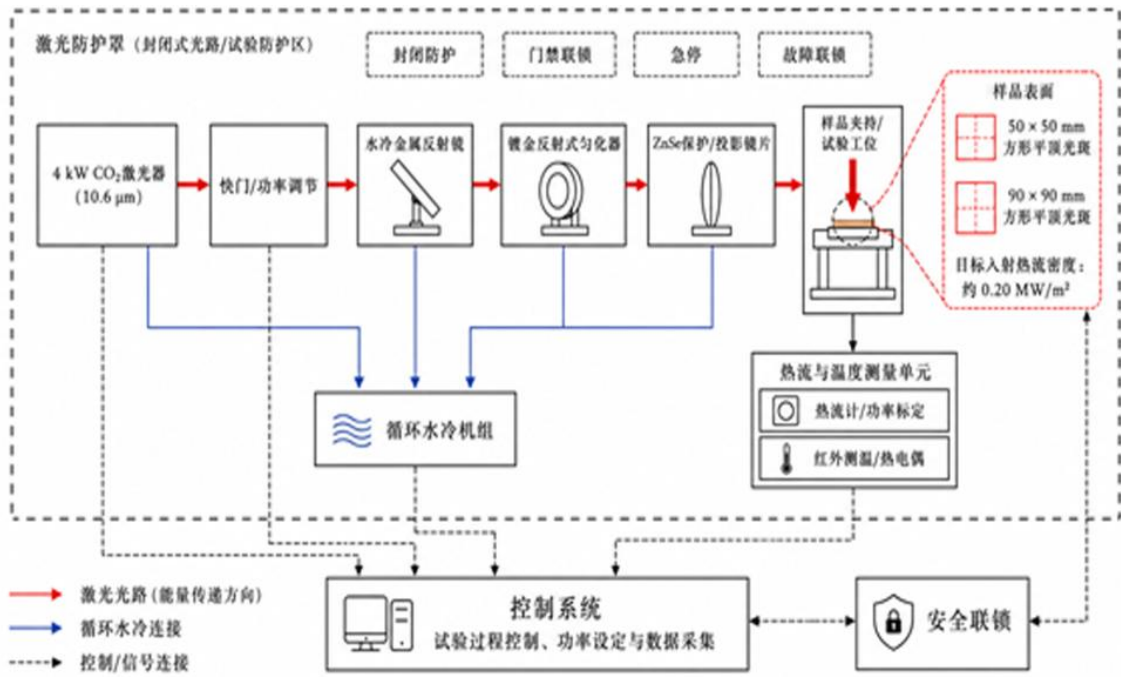


图 1 长波激光热冲击试验系统组成示意

四、核心系统设计

4.1 4000W CO₂ 激光热源

CO₂ 激光器典型输出波长为 10.6 μm，位于 8~12 μm 长波范围内。与宽谱辐射热源相比，激光热源的功率可直接调节、光束方向性好，且可通过专用匀化光学获得方形平顶能量分布，适合构建可重复的热流加载条件。

两套方案均采用额定 4 kW 激光器。额定功率并不表示试验时必须满功率运行，而是为光学传输损耗、不同玻璃吸收率以及后续热流扩展保留能力。0.20 MW/m² 工作点通过功率闭环调节获得。



图 2 4 kW 级 CO₂ 激光器产品参考图

4.2 长波光束传输与匀化投影

10.6 μm 高功率光路以反射式元件为主，减少透射材料的热负荷和热透镜效应。主要构成为：

1. 水冷金属反射镜：完成光束转向与传输；金属基底配合水冷，可承受千瓦级连续光束热负荷。
2. 镀金反射式匀化器：将原始近高斯或多模光束划分为多个子光束，经空间重排和叠加后形成方形平顶光斑；金膜在 10.6 μm 波段具有较高反射能力。
3. ZnSe 保护/投影镜片：仅在保护与最终投影位置少量使用，并采用适用于 10.6 μm 的增透膜及必要的冷却/防污染设计。
4. 可调光机结构：设置反射镜角度、匀化器位置和工作距离微调机构，用于现场校正光斑尺寸、方正度和能量均匀性。

4.3 冷却、样品与测试单元

激光器、水冷金属反射镜、匀化器安装基座及必要的光路防护部件接入循环水冷系统，并设置流量、温度和压力监测。样品夹具采用低遮挡结构，使有效光斑完整覆盖待测区域，同时预留热流计、红外测温或接触式温度测量位置。

五、两套独立光斑设计方案

5.1 方案一：50×50 mm 方形光斑系统

该方案的有效面积为 2,500 mm^2 ，单位面积功率高、热流调节余量大，适合小尺寸玻璃样品或局部高热流热冲击。由于投影范围较小，对光学口径和装调误差的敏感度相对较低，更有利于获得较高的光斑均匀性。

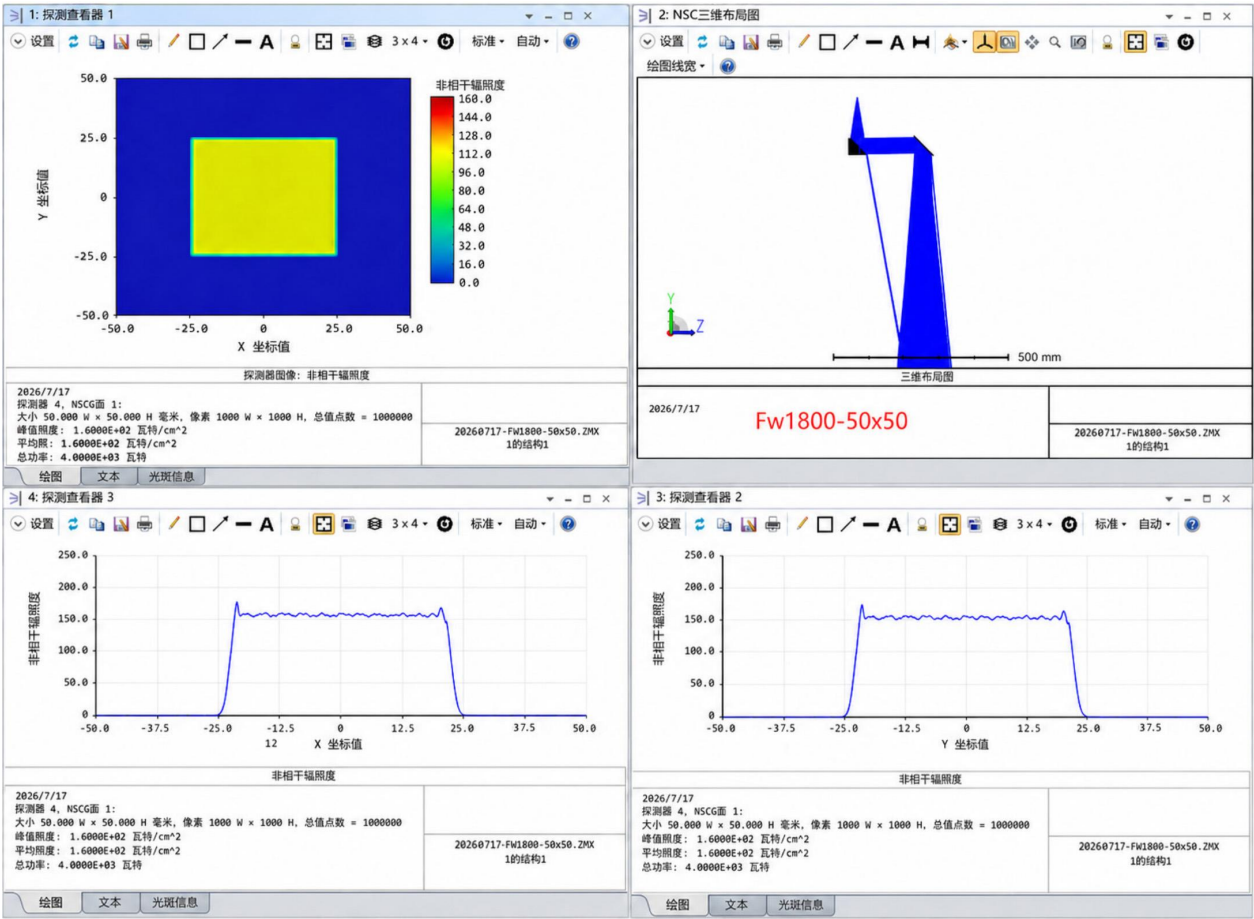


图 3 50×50 mm 方形平顶光斑光学仿真

仿真输入总功率为 4,000 W，图中给出的平均辐照度为 160 W/cm²，换算为 1.60 MW/m²，与按面积计算的理论值一致。X、Y 两个方向的截面曲线在有效区内形成明显平台，说明反射式匀化方案能够将原始光束转换为方形平顶分布。

5.2 方案二：90×90 mm 方形光斑系统

该方案的有效面积为 8,100 mm²，单次覆盖面积是方案一的 3.24 倍，适合较大样品或更大区域的均匀热冲击。大光斑对匀化器有效口径、投影距离、反射镜面形及装调同轴度提出更高要求，因此采用水冷反射式光路并配合现场能量面阵标定。

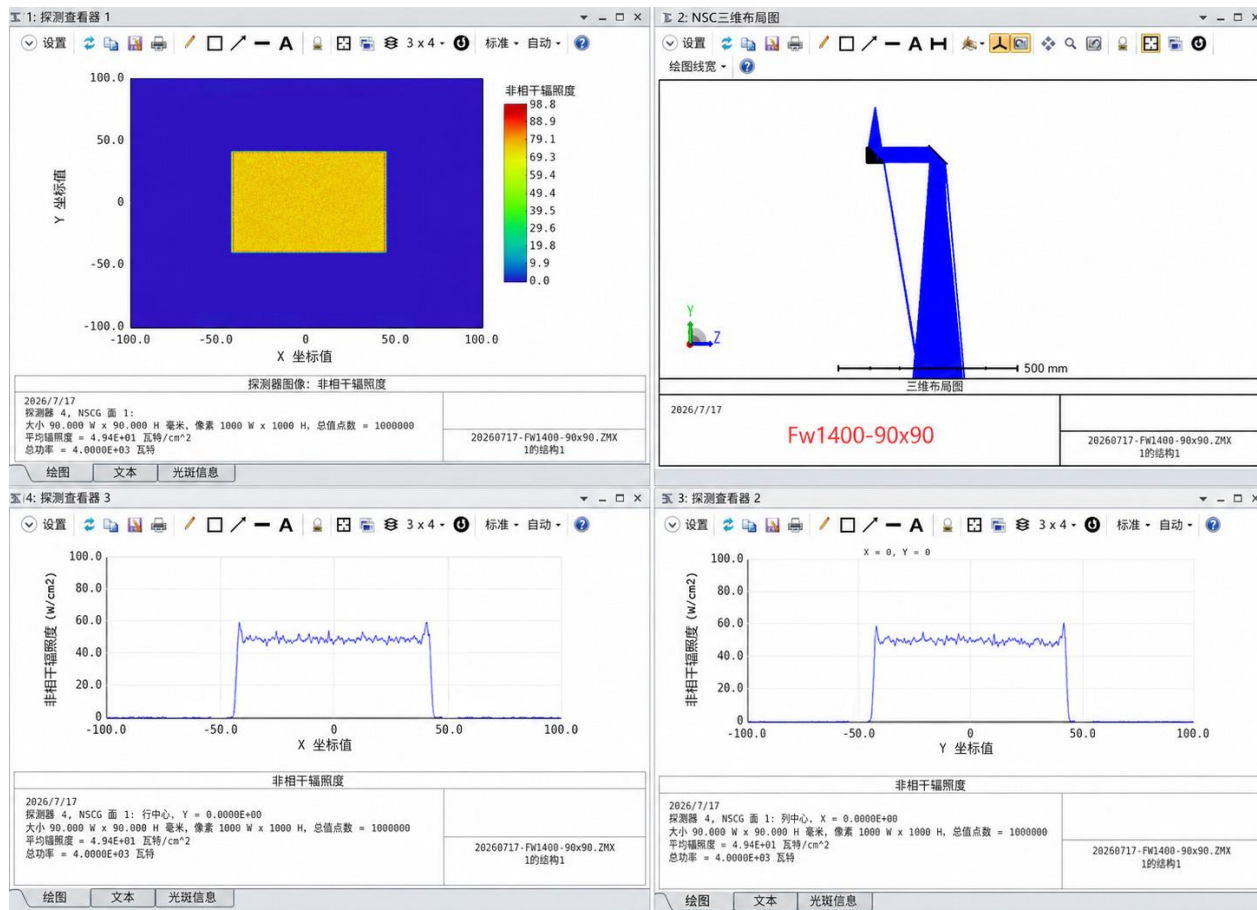


图 4 90×90 mm 方形平顶光斑光学仿真

仿真输入总功率同样为 4,000 W，平均辐照度约为 49.4 W/cm²，换算为 0.494 MW/m²。X、Y 方向截面在有效区域内均呈平顶平台，说明在 90×90 mm 尺度下仍可形成较稳定的方形均匀光场。

六、热流密度推导及能力分析

6.1 基本计算关系

样品面的平均入射热流密度由到达样品面的光功率与有效光斑面积决定：

$$q = P_s / A$$

式中， q 为样品面平均入射热流密度（W/m²）， P_s 为实际到达样品面的光功率（W）， A 为有效光斑面积（m²）。若激光器输出功率为 P_o 、从激光器出口到样品面的综合光学效率为 η ，则：

$$P_s = \eta \cdot P_o, \text{ 因而 } q = \eta \cdot P_o / A$$

考虑水冷反射镜、镀金匀化器、少量 ZnSe 镜片、装调与污染裕量，方案计算采用 $\eta = 80\% \sim 90\%$ 的工程估算范围。以两只反射镜反射率约 98%、匀化/投影单元约 90%~95%、少量 ZnSe 元件与装调余量综合计算，总效率取 80%~90% 具有合理性。最终效率通过样品面功率标定确定。

6.2 90×90 mm 光斑最大热流能力

90×90 mm 光斑面积为：

$$A_{90} = 0.09 \times 0.09 = 0.0081 \text{ m}^2$$

若不计光学损耗，4,000 W 全部到达样品面，则理论平均热流密度为：

$$q_{90,ideal} = 4000 / 0.0081 = 493,827 \text{ W/m}^2 \approx 0.494 \text{ MW/m}^2$$

考虑 80%~90% 综合光学效率，样品面功率为 3.2~3.6 kW，因此工程最大平均入射热流密度为：

$$q_{90,eng} = (3200 \sim 3600) / 0.0081 \approx 0.395 \sim 0.444 \text{ MW/m}^2$$

因此，90×90 mm 光斑在工程状态下可提供约 0.40~0.44 MW/m² 的最大平均入射热流，目标 0.20 MW/m² 位于其稳定调节范围内，约保留 2 倍能力余量。

6.3 50×50 mm 光斑最大热流能力

50×50 mm 光斑面积为：

$$A_{50} = 0.05 \times 0.05 = 0.0025 \text{ m}^2$$

不计光学损耗时，理论平均热流密度为：

$$q_{50,ideal} = 4000 / 0.0025 = 1,600,000 \text{ W/m}^2 = 1.60 \text{ MW/m}^2$$

考虑 80%~90% 综合光学效率，工程最大平均入射热流密度为：

$$q_{50,eng} = (3200 \sim 3600) / 0.0025 = 1.28 \sim 1.44 \text{ MW/m}^2$$

因此，50×50 mm 光斑可提供约 1.28~1.44 MW/m² 的工程最大平均入射热流，远高于 0.20 MW/m² 目标值，适合需要较大热流扩展能力的工况。

6.4 实现 0.20 MW/m² 时的功率设定

目标热流密度为 $q = 0.20 \text{ MW/m}^2 = 200,000 \text{ W/m}^2$ 。首先计算样品面所需光功率，再反推激光器输出设定。

对于 50×50 mm 光斑：

$$P_{s,50} = 200,000 \times 0.0025 = 500 \text{ W}$$

$$P_{o,50} = 500 / \eta \approx 0.56 \sim 0.63 \text{ kW} \quad (\eta = 90\% \sim 80\%)$$

对于 90×90 mm 光斑：

$$P_{s,90} = 200,000 \times 0.0081 = 1,620 \text{ W}$$

$$P_{o,90} = 1620 / \eta \approx 1.80 \sim 2.03 \text{ kW} \quad (\eta = 90\% \sim 80\%)$$

光斑规格	面积	4 kW 理论热流	工程最大热流	0.20 MW/m ² 所需激光输出
50×50 mm	0.0025 m ²	1.60 MW/m ²	1.28~1.44 MW/m ²	约 0.56~0.63 kW
90×90 mm	0.0081 m ²	0.494 MW/m ²	0.395~0.444 MW/m ²	约 1.80~2.03 kW

工作点说明：4 kW 是系统最大输出能力。进行 0.20 MW/m² 试验时应按上述功率范围设置，并以样品面热流计或功率面阵标定结果闭环修正，不应直接满功率照射。

6.5 入射热流与吸收热流的关系

玻璃样品实际吸收的热流密度可表示为 $q_{abs} = \alpha \cdot q_{in}$ ，其中 α 为材料表面在 10.6 μm 处的吸收率。不同材料成分、表面粗糙度、涂层与温度会使 α 发生变化。若试验指标指“到达样品面的热流”，则按 0.20 MW/m² 入射值控制；若后续要求“样品实际吸收热流”为 0.20 MW/m²，则需要结合样品吸收率提高入射设定并重新标定。

七、光斑均匀性分析

7.1 均匀光斑的形成原理

原始 CO₂ 激光光束通常不是理想平顶分布。反射式匀化器通过微分割或多通道反射结构将入射光束分解为多个子光束，并在目标平面进行空间叠加，使中心高能量向边缘重新分配。投影系统将匀化面准确成像到样品面，从而同时控制光斑尺寸、方形边界与面内能量分布。

相较于单纯离焦扩束，反射式匀化能够避免中心热流过高、边缘热流不足的问题，更适合玻璃热冲击试验所需的可重复平面热流加载。

7.2 均匀性指标与仿真判断

本方案建议按下式评价样品有效区内的光学热流均匀性：

$$U = [1 - (q_{max} - q_{min}) / (q_{max} + q_{min})] \times 100\%$$

其中 q_{max} 和 q_{min} 为有效区网格采样点的最大、最小热流密度。边缘过渡带通过投影设计布置在定义的有效区外。按照该定义，面内波动约为平均值的 $\pm 5\%$ 时，对应均匀性约 95%。

现有 50×50 mm 与 90×90 mm 初步仿真均显示：二维能量图呈方形平顶分布，X、Y 方向截面在有效区内形成连续平台，没有明显中心尖峰。由此说明两种尺寸在光学原理上均可实现大面积均匀化。结合千瓦级热负荷、装调和实际光束变化，本方案将有效区均匀

性工程设计指标确定为不低于 90%，经精细装调和能量面阵校正后以达到 95% 为优化目标。

7.3 保证大光斑均匀性的关键措施

1. 按实测激光器光束参数反向设计匀化器，而不是仅使用理想高斯光束计算。
2. 采用水冷金属反射镜和热稳定基座，降低持续工作时的镜面热变形和光斑漂移。
3. 方案二的 90×90 mm 光学系统使用足够的有效通光口径，并控制匀化器—投影镜—样品面的共轭位置。
4. 在样品平面布置二维扫描或阵列测量，分别校正 X、Y 方向中心、边缘和四角热流。
5. 设置可调反射镜架、工作距离微调和功率修正系数，使光路维护或复位后能够重复回到标定位置。
6. ZnSe 保护片设置气幕或易更换结构，避免粉尘沉积造成局部吸收、热斑和均匀性下降。

说明：光学热流均匀性与样品温度均匀性不是同一指标。样品表面温度还受吸收率分布、厚度、热导率、夹持散热及辐射散热影响；本系统首先保证入射热流场可控，再通过温度测量记录样品实际响应。

八、控制、测量与安全设计

8.1 功率与热流控制

方案一和方案二分别配置功率与试验过程控制系统，对各自激光器的输出功率、快门状态、加载时间和试验程序进行控制。两套方案分别建立“激光器输出功率—样品面实际功率—平均热流密度”标定曲线。试验时输入目标热流 0.20 MW/m^2 ，系统调用对应方案的功率设定，并由样品面标定结果进行修正。

热流加载可按试验要求设置为快速开启、恒定保持和快速关闭，也可设置阶梯或分段加载。热冲击过程中同步记录激光功率、加载时间、样品温度及其他力学测试信号。

8.2 测量配置

1. 样品面总功率标定：在样品位置使用适用于 $10.6 \mu\text{m}$ 和千瓦级功率的功率计/量热装置。
2. 面内均匀性标定：采用衰减后的二维能量测量或小口径热流探头网格扫描，形成热流分布图。

3. 样品温度测量：可配置红外测温或热电偶；红外测温通道应避免或抑制 10.6 μm 激光杂散光干扰。

8.3 安全联锁

4 kW CO₂ 激光器属于高功率 Class 4 激光设备，系统采用封闭式光路和试验防护罩，配置机械快门、门禁联锁、急停、冷却水流量/温度联锁、激光器异常联锁及状态指示。防护材料与观察方式按 10.6 μm 波段选型，避免使用普通透明玻璃作为直接激光观察窗口。

九、试验工作流程

- 1. 按照已确定方案的光斑规格，确认对应激光热源、匀化投影光路及样品工位均处于标定位置。
- 2. 启动循环水冷和控制系统，确认冷却流量、温度、门禁、急停及快门联锁状态正常。
- 3. 在样品平面安装功率计或热流测量装置，对该方案光斑的总功率、尺寸和面内均匀性进行标定。
- 4. 根据标定结果将目标热流设为 0.20 MW/m²；方案一初始功率约 0.56~0.63 kW，方案二初始功率约 1.80~2.03 kW。
- 5. 安装玻璃样品并对准有效光斑区域，确认温度测量和力学检测通道工作正常。
- 6. 关闭防护罩并启动试验程序，按规定时间加载热流，同步记录激光功率、热流、温度和试样响应。
- 7. 试验结束后关闭激光与快门，待样品和光学部件处于安全状态后取出样品，进行强度检测及热冲击前后数据对比。

十、主要技术参数

序号	参数项目	设计值/说明
1	激光类型	连续波 CO ₂ 激光器
2	输出波长	10.6 μm，位于 8~12 μm 长波范围
3	额定输出功率	4 kW，可调
4	方案一光斑规格	50×50 mm 方形平顶光斑
5	方案二光斑规格	90×90 mm 方形平顶光斑
6	目标工作热流	约 0.20 MW/m ²
7	50×50 mm 工程最大热流	约 1.28~1.44 MW/m ²
8	90×90 mm 工程最大热流	约 0.395~0.444 MW/m ²

序号	参数项目	设计值/说明
9	光学综合效率估算	80%~90%，最终以样品面标定为准
10	有效区均匀性	设计值 ≥90%，装调优化目标 ≥95%
11	主要光学元件	水冷金属反射镜、镀金反射式匀化器、少量 ZnSe 保护/投影镜片
12	功率控制方式	激光器功率调节+快门控制+样品面热流标定
13	冷却方式	激光器与高热负荷光学元件循环水冷
14	安全方式	封闭防护、门禁、急停、快门、冷却与故障联锁

十一、方案结论

采用 10.6 μm、4 kW CO₂ 激光器配合水冷金属反射镜、镀金反射式匀化器及少量 ZnSe 保护/投影镜片，可分别形成方案一 50×50 mm 和方案二 90×90 mm 方形平顶长波加热光斑。初步仿真表明，两套方案均具有清晰的方形边界和稳定的平台型截面，具备实现大面积均匀热流加载的光学基础。

在综合光学效率按 80%~90% 估算时，方案一工程最大平均入射热流约为 1.28~1.44 MW/m²，方案二约为 0.395~0.444 MW/m²，均高于 0.20 MW/m² 目标。实现目标热流时，方案一和方案二所需激光器输出分别约为 0.56~0.63 kW 和 1.80~2.03 kW，两套 4 kW 激光系统均具有充足的调节范围和能力余量。

方案建议以有效区均匀性不低于 90% 作为工程设计目标，并通过实测光束参数匹配、水冷热稳定设计、可调光机结构和样品面二维标定进一步优化至 95% 左右。由此可为玻璃样品热冲击强度试验提供波长匹配、热流可调、分布均匀且重复性良好的长波加热条件。