



玻璃样品短波辐射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、设计输入与目标指标..... 3

三、总体技术路线..... 3

四、加热模块结构设计..... 4

五、热流密度与功率配置说明..... 5

六、测控与安全保护..... 7

七、建议试验流程..... 8

八、主要技术参数..... 8

九、方案总结..... 9

一、项目概述

本系统用于玻璃样品的高热流短时热冲击试验。通过短波石英灯平面加热模组，在样品表面形成不小于 300 mm×150 mm 的均匀辐照区域，并在该区域建立 0.5 MW/m²量级的入射热流，使样品产生快速、可重复的热冲击载荷，为后续强度、损伤形貌及失效行为评价提供受控热环境。

系统以 20 根单管 3 kW 短波石英灯为辐射源，总装机功率 60 kW；采用反射定向、工作距离调节、分区调功及水冷热管理，使各灯管在样品面形成连续重叠的辐照场。供电、功率调节、水冷、测量及安全联锁统一纳入控制系统。

二、设计输入与目标指标

项目	设计参数
试验对象	玻璃样品
试验目的	在规定短波高热流作用下实施热冲击，并评价样品热冲击后的强度与损伤
加热方式	短波石英灯平面辐射加热
主要有效波段	约 1–3 μm
样品面均匀辐照面积	≥300 mm×150 mm
额定热流密度	约 0.5 MW/m ² （即 500 kW/m ² ，额定热流密度）
灯管配置	20 根×3 kW/根，单根发热长度 250 mm
总装机功率	60 kW，可调
模组排布	20 根灯管沿 300 mm 方向展开，模组排布长度约 400 mm
冷却方式	灯管端部、反射结构及模组壳体循环水冷

三、总体技术路线

系统由功率控制器、短波平面加热模组、水冷装置、保温试验腔、样品安装机构以及热流/温度测量系统及安全防护单元组成。控制系统根据设定功率或预先建立的“功率—热流密度”标定曲线输出各分区功率；热流测量用于装调、标定和定期复核，温度测量用于记录样品热响应。水冷系统持续热量，保证光学几何位置与输出重复性。

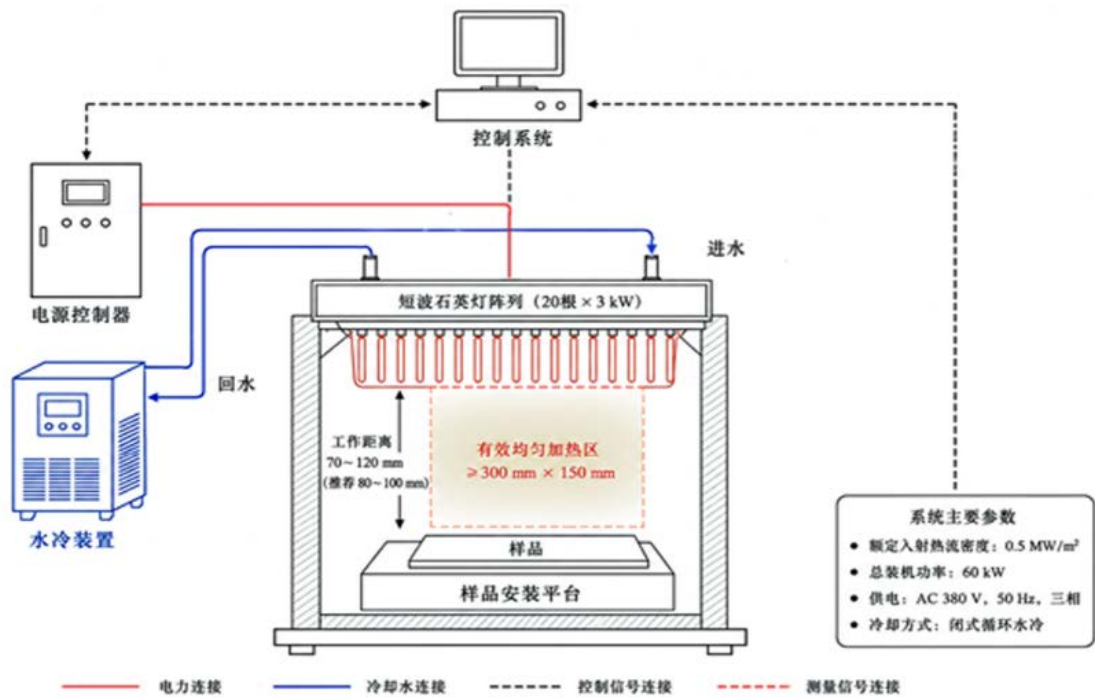


图 1 系统总体结构示意图

四、加热模块结构设计

4.1 灯管阵列与反射结构

灯管采用短波石英卤素辐射元件。根据 0.5 MW/m²目标热流、300×150 mm 有效面积及系统传递损失，加热模组按 60 kW 装机功率设计，采用 20 根、单根 3 kW 的短波石英灯管，总功率为 60 kW。20 根灯管沿 300 mm 方向依次排布，灯管轴向对应 150 mm 方向，从而形成连续密集的短波平面辐射阵列。

单根灯管有效发热长度取 250 mm，150 mm 有效加热宽度布置在灯管发热段中部，轴向两端各保留约 50 mm 辐射覆盖余量。加热模组沿 20 根灯管排布方向的外形长度按约 400 mm 设计，300×150 mm 有效区位于模组中心；配合端部及侧向反射结构，降低边缘热流衰减并减少非工作区域的能量损失。

灯管轴向余量 = (250 - 150) ÷ 2 = 50 mm/端

沿 300 mm 方向排布 20 根灯管，并在有效区两侧分别预留约 50 mm 的反射、灯座和结构安装空间，因此模组该方向的外形长度约为 300+2×50=400 mm。灯管中心距结合灯管外径、反射器结构及热流校准结果确定。

加热模组采用水冷背板与高反射腔体。反射面可选高反射铝基表面或镀金反射面，侧向设置耐高温隔热层和辐射防护罩，减少非工作方向能量损失。灯管至样品工作面距离设计为 70–120 mm 可调，推荐工作距离为 80–100 mm，用于兼顾热流强度、均匀性与样品夹具空间。

4.2 分区功率调节

20 根灯管建议划分为 4 个独立功率区，每区 5 根、额定 15 kW。各区可在 0–100% 范围内连续调节，利用边缘区与中心区的独立补偿修正热流分布。控制器配置软启动、限流和斜率设定，避免冷态灯丝冲击电流，并支持试验配方重复调用。

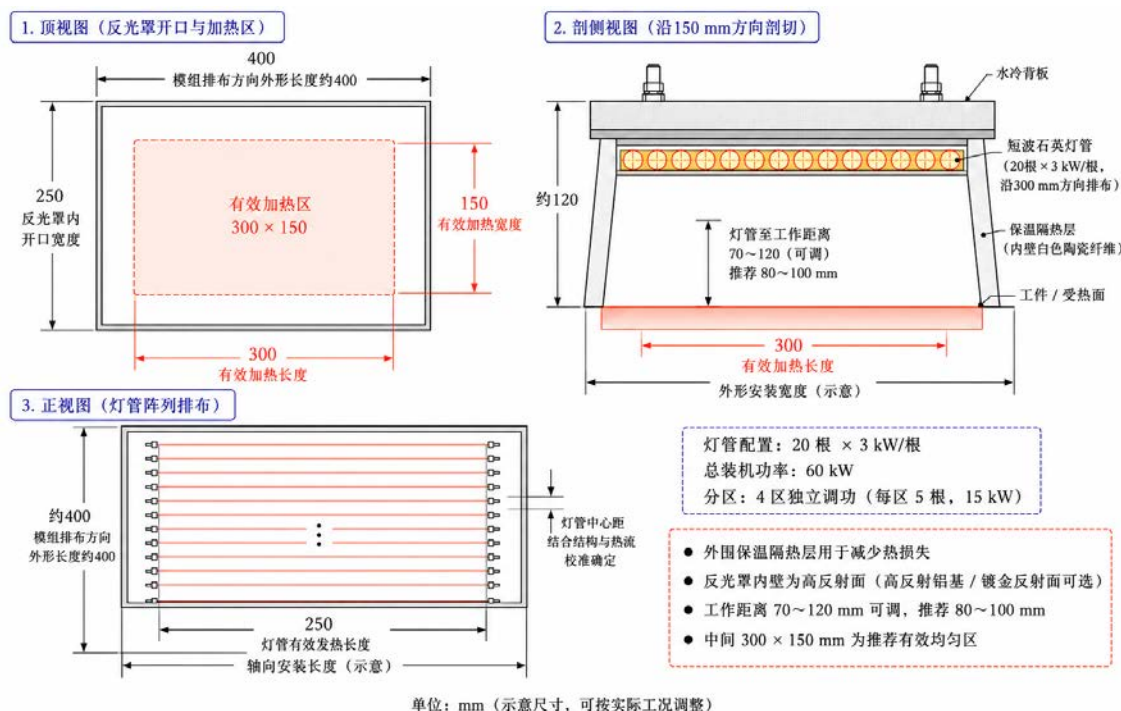


图 2 石英灯阵列反光罩结构示意图

五、热流密度与功率配置说明

5.1 样品面所需有效辐射功率

热流密度表示单位面积在单位时间内接收的热功率。客户要求的 0.5 MW/m^2 等于 500 kW/m^2 ，也可以换算为 50 W/cm^2 。300×150 mm 的有效面积为 0.045 m^2 ，即 450 cm^2 。

$$A = 0.300 \times 0.150 = 0.045 \text{ m}^2$$

因此，样品工作面需要实际接收到的净辐射功率为：

$$P_{\text{入射}} = q \times A = 0.5 \times 10^6 \times 0.045 = 22.5 \text{ kW}$$

5.2 灯管装机功率

22.5 kW 是到达样品面的功率，并不是灯管所需电功率。电能需依次经过灯管电—辐射转换、反射腔导向和空间几何耦合，其中一部分能量会被灯座、反射板、隔热层及样品周边吸收。可将总传递效率简化表示为：

$$\eta_{\text{总}} = \eta_{\text{灯管}} \times \eta_{\text{反射}} \times \eta_{\text{几何}}$$

工程估算中，短波灯管辐射效率可按 0.82–0.88、反射传递效率按 0.85–0.92、几何耦合效率按 0.60–0.68 进行估算，三者相乘后总传递效率约为 0.42–0.55。该效率用于方案功率配置，设备实际输出以样品工作平面的热流测量结果表示。

$$P_{\text{电}} = P_{\text{入射}} \div \eta_{\text{总}} = 22.5 \div (0.42 \sim 0.55) \approx 40.9 \sim 53.6 \text{ kW}$$

理论所需电功率约为 40.9–53.6 kW。进一步考虑均匀性调节、灯管衰减、安装误差及连续运行余量，总装机功率取 60 kW。按单根灯管 3 kW 计算，灯管数量为：

$$N = P_{\text{总}} \div P_{\text{单灯}} = 60 \div 3 = 20 \text{ 根}$$

20 根灯管分为 4 个功率区，每区 5 根，因此单区装机功率为 $5 \times 3 = 15 \text{ kW}$ 。四个功率区独立调节，既可使系统总功率达到 60 kW，也便于根据热流测量结果修正中心与边缘区域的功率比例。

5.3 供电容量

加热回路采用三相 AC 380 V 供电。按 60 kW 额定加热功率、功率因数 $\cos\varphi \approx 0.90$ 估算，满功率线电流为：

$$I = P \div (\sqrt{3} \times U \times \cos\varphi) = 60\,000 \div (1.732 \times 380 \times 0.90) \approx 101 \text{ A}$$

考虑 SCR 调功器、线路温升及连续运行余量，加热主回路容量建议不低于 80 kVA，主断路器建议不低于 160 A；计入水冷机组、控制柜和测量系统后，现场整机供电容量建议不低于 100 kVA。四个 15 kW 功率区在三相之间进行均衡分配。

5.4 水冷能力

灯管输入功率中未到达样品面的部分主要由反射腔、水冷背板和隔热结构带走。按装机功率的 35%–45% 估算，水冷部件需承担约 21–27 kW 热负荷。计入环境温度变化和连续运行余量后，冷水机额定制冷量建议不低于 35 kW。

$$V \approx Q \div (c \times \Delta T) = 35 \div (4.18 \times 10) \approx 0.84 \text{ kg/s} \approx 50 \text{ L/min}$$

上式按水温升 $\Delta T = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、水比热 $c = 4.18 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 计算。由此，闭式循环水冷系统设计流量取 50–60 L/min，并设置流量、进水温度和压力联锁，可满足反射腔及灯座连续运行时的散热需求。

5.5 热流与样品温度的关系

0.5 MW/m² 表示到达样品工作面的入射热流密度。玻璃实际吸收的能量与材料在 1–3 μm 波段的吸收率、样品厚度、导热率、表面状态和受热时间有关，因此热流密度并不直接对应某一个固定样品温度。系统以热流测量和分区功率配方控制辐射输入，同时通过红外测温或热电偶记录样品温度响应。

六、测控与安全保护

6.1 测量与控制

功能	设计说明
功率控制	四区 SCR 连续调功，支持分区比例、斜坡、定时与循环配方
热流测量与校准	采用水冷式热流传感器或专用测量板，在样品工作平面进行多点扫描
样品温度	预留红外测温仪、热像仪及热电偶采集接口；测温方式根据样品表面发射率确定
数据记录	记录各区功率百分比、输出电流、照射时间、热流/温度及报警状态
控制模式	手动调试、定功率、定时热冲击、循环配方；温度闭环作为可选模式

6.2 热流分布校准方法

在样品实际受热平面布置适用于高热流短波辐射的校准传感器。建议按 5 列×3 行共 15 个测点覆盖 300 mm×150 mm 区域，分别记录各测点热流密度。标定时应保持光学窗口、工作距离、水冷状态和功率配置与正式试验一致。

15 个测点完成后，先计算区域平均热流：

$$\bar{q} = (q_1 + q_2 + \dots + q_{15}) \div 15$$

再计算每个测点相对于区域平均值的偏差：

$$\delta_i = (q_i - \bar{q}) \div \bar{q} \times 100\%$$

标定记录中同时给出最大正偏差、最大负偏差以及 q_{max}/q_{min} ，并形成样品面热流分布图，用于判断有效均匀区范围。

通过调整工作距离、反射结构及 4 个功率区的输出比例，使样品面平均热流达到 0.5 MW/m²，并获得满足双方确认指标的均匀分布。建议以±10%作为均匀性设计目标，最终验收限值以技术协议为准。

6.3 安全联锁

- 1. 冷却水流量、进水温度及压力联锁：断水、低流量或超温时立即切断灯管输出。
- 2. 防护门/遮光罩联锁：防护未闭合时禁止高功率输出，减少短波辐射暴露风险。
- 3. 电气保护：配置分区断路、过流、短路、缺相、相序及接地保护。
- 4. 温度保护：反射腔、水冷板及关键电气位置设置超温报警。
- 5. 紧急停机：设置设备急停按钮，触发后切断加热输出并保持冷却循环。
- 6. 灯管诊断：监测各区电流，识别灯管开路或异常衰减，便于维护。

七、建议试验流程

- 1. 样品准备：记录材料牌号、尺寸、厚度、表面状态和初始缺陷；将样品放置于加热平台。
- 2. 系统自检：启动水冷机组，确认流量、温度、压力、电气保护及防护门联锁正常。
- 3. 热流确认：调用对应工作距离和样品平面的校准配方；必要时使用热流传感器复核中心点及边缘点。
- 4. 实施热冲击：按设定分区功率、照射时间和循环次数启动灯阵列，实时记录功率、温度及报警状态。
- 5. 冷却/循环：照射结束后按试验方法自然冷却或切换增配的气冷/水淬单元；达到循环条件后进入下一次热冲击。
- 6. 强度检测：进行试后强度测试，或在原位方案中同步采集载荷—位移—温度数据，记录裂纹与失效模式。
- 7. 结果归档：输出热流配方、样品温度历程、循环次数、强度结果及异常记录，形成可追溯试验数据。

八、主要技术参数

参数项目	初步技术指标
辐射加热方式	短波石英灯阵列平面辐射
主要辐射波段	约 1–3 μm
有效均匀加热区	≥300×150 mm
额定入射热流密度	0.5 MW/m²（样品工作面）
热流调节范围	0–100% 连续调功；稳定下限通过实际输出测量确定
热流均匀性	设计目标 ±10% 以内（有效区，15 点热流测量与分区校准）
灯管配置	20×3 kW 短波石英灯管
总装机功率	60 kW
分区数量	4 区独立调功，每区 5 根，单区 15 kW
灯管有效发热长度	250 mm；对应 150 mm 有效宽度，轴向两端各保留约 50 mm 覆盖余量
模组外形长度	沿 20 根灯管排布方向约 400 mm
工作距离	70–120 mm 可调；推荐工作距离 80–100 mm
供电条件	AC 380 V，50 Hz，三相
冷却方式	闭式循环水冷；设计流量 50–60 L/min，额定制冷量≥35 kW

参数项目	初步技术指标
控制方式	PLC+触摸屏+SCR 调功，支持手动、定时及循环配方
测量接口	热流传感器、红外测温/热像及热电偶接口
安全保护	断水、低流量、超温、过流、缺相、门禁及急停联锁

九、方案总结

采用 20 根×3 kW 短波石英灯阵列、四区独立调功、水冷反射腔和多点热流测量与校准，可在 300×150 mm 样品工作面建立 0.5 MW/m²级短波辐射热流。0.5 MW/m²作用于 0.045 m²区域，对应样品面净入射功率 22.5 kW。按总传递效率 42%–55%核算，并考虑分区调节、灯管衰减及安装余量，设计装机功率取 60 kW。

单根灯管有效发热长度为 250 mm，20 根灯管沿 300 mm 方向排布，加热模组该方向外形长度约 400 mm；灯管分为 5 个功率区，每区 4 根、单区 12 kW。系统通过 15 点热流测量建立五区功率配方，并结合样品在 1–3 μm 波段的吸收特性、热冲击循环方式和力学加载形式设置运行参数，使热流能力、均匀性与强度测试过程形成完整配合。