



团 体 标 准

T/CEATEC XXX—XXXX

半导体制造用快速热退火设备（RTP）通用
性能测试方法

General performance testing method for rapid thermal processing tool (RTP) used in
semiconductor manufacturing

（征求意见稿）

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发 布

目次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 测试的一般条件 3

 4.1 环境条件 3

 4.2 电源条件 3

 4.3 测试仪器与设备 4

 4.4 被测设备要求 4

5 试验项目及方法 4

 5.1 外观与基本功能 4

 5.2 核心温度性能测试 5

 5.3 压力调节与控制系统/气体控制系统 8

 5.4 电气安全性能测试 9

 5.5 机械与环境性能测试 10

 5.6 系统功能与安全保护测试 10

6 试验报告和文件资料 11

 6.1 试验报告 11

 6.2 文件资料 11

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

半导体制造用快速热退火设备（RTP）通用性能测试方法

1 范围

本文件规定了半导体制造用快速热退火设备（RTP）的测试的一般条件、试验项目及方法、试验报告和文件资料等内容。

本文件适用于半导体制造用快速热退火设备（单片RTP），不包括炉管式热处理设备。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 191 包装储运图示标志
GB/T 230.1 金属材料 洛氏硬度试验 第1部分：试验方法
GB/T 3163 真空技术 术语
GB/T 5226.33 机械电气安全 机械电气设备 第33部分：半导体设备技术条件
GB 5959.1 电热装置的安全 第1部分：通用要求
GB 5959.4 电热装置的安全 第4部分：对电阻加热的特殊要求
GB/T 6587 电子测量仪器通用规范
GB/T 6587.1 电子测量仪器 环境试验总纲
GB/T 6593 电子测量仪器 质量检验规则
GB/T 10066.1 电热设备的试验方法 第1部分：通用部分
GB/T 10066.4 电热设备的试验方法 第4部分：间接电阻炉
GB/T 10067.1 电热设备基本技术条件 第1部分：通用部分
GB/T 10067.4 电热装置基本技术条件 第4部分：间接电阻炉
GB/T 13298 金属显微组织检验方法
GB/T 18268.1 测量、控制和实验室用的电设备 电磁兼容性要求 第1部分：通用要求
DIN EN IEC 61000-6-2 industrial environments

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

快速热退火设备 rapid thermal processing tool; RTP

采用热辐射等快速加热与冷却方式，对半导体晶圆进行高精度退火热处理的专用设备，核心单元包括热辐射加热系统、压力调节与控制系统、气体控制系统、温度测量与控制系统、冷却系统以及安全保护系统。

3.2

温度均匀性 temperature uniformity

在工艺过程中，晶圆表面温度分布的一致性。

3.3

升温速率 heating rate

设备在规定工况下，工艺区域温度从室温升至设定工艺温度的平均变化速率，单位为℃/s。

注：瞬时升温和平均升温速率，应在到达设定温度且过冲不超过50℃的情况下测试。或根据供需双方协商确定。

3.4

极限真空度 ultimate vacuum

设备真空系统在冷态、空载、密闭工况下，所能达到的最低稳定压力值，单位为 mTorr。

3.5

工艺腔室 process chamber

晶圆进行退火的密闭空间，通常有石英窗、进气/排气口及测温窗口。

3.6

灯管阵列 lamp arrangement

设备用于加热的辐射热源，有多个卤钨灯按区域排列，灯管形态及分布模式直接影响温度的均匀性。

3.7

高温计 thermometer

非接触式测温仪器，通过测量晶圆或支撑结构在特定波长下的热辐射来实时获取温度，是设备闭环控制的核心。需明确工作波长、采样频率和校准方式。

3.8

温度校准晶圆 TC wafer

嵌有多支微型热电偶的特殊晶圆，用于建立高温计读数与晶圆温度的关系映射。

3.9

工艺配方 recipe

一组预定义的完整工艺指令集合，包含晶圆传输逻辑，升降温速率，目标温度，保温时间，气体种类及流量步骤，腔室压力，旋转速率（适用时）等关键设置、限值、报警条件等。在工艺重复性测试中，Recipe 的版本锁定是保证测试有效性的前提，任何涉及配方更改，更重新执行工艺认证。

3.10

温度的开环控制和闭环控制 temperature open loop/close loop control

开环控制是指不依赖测量温度的实时反馈，直接按预设的功率曲线输出控制信号的工作模式，常用于非关键阶段（如低速预热升温阶段）或工艺开发阶段的功率测试，不具有温度控制能力。

闭环控制是指根据高温计实时测得的温度与目标设定值比较后自动调整输出，使实时测量温度稳定在设定值的工作模式。快速热退火设备的温度闭环控制通常以高温计读数作为反馈，通过模型预测算法或者 PID 动态调节灯管功率，是实现精确温度重复性和快速升温的核心机制。

3.11

保温/均温退火工艺 soak anneal

晶圆升温至设定目标温度后，在该温度下维持一定时间（保温时间）的快速热退火工艺。保温段允许晶圆达到热稳定，使化学反应或固相反应完成，适用于氧化、硅化物形成、致密化、常规杂质激活等需要稳定温度平台的工艺。

关键表征参数：保温温度 soak temperature，保温时间 soak time（通常在 1s~300s 量级），升温速率 ramp up rate (up to 75°C/s)

3.12

尖峰退火工艺 spike anneal

一种以极高的升温速率（通常大于 150°C/s）将晶圆加热至峰值温度后，不执行保温阶段，立即以受控高速率降温的快速热处理方式。其核心目的是在激活掺杂杂质的同事最大限度抑制扩散，常用于超浅结的形成。

关键表征参数：峰值温度 Peak temperature (T_{peak})，升温速率 Ramp up rate，降温/冷却速率 Ramp down/Cooling rate，及 T-50 时间。

3.13

T-50

在尖峰退火工艺中，晶圆表面温度处于峰值温度减去 50°C ($T_{peak}-50^{\circ}\text{C}$) 以上范围的持续时间。该参数量化了尖峰退火有效高温段的热预算，直接关联杂质扩散深度，单位通常为秒 (s)。在重复性测试评价中， T_{peak} 和 T-50 应作为辅助判定项。

3.14

升温速率 ramp up rate

从规定起始温度升温至目标温度的平均速率，单位是℃/s

3.15

降温/冷却速率 ramp down rate/cooling rate

从峰值温度降温至规定终点温度的平均速率，单位是℃/s

3.16

温度过冲 temperature over shoot

升温过程中，晶圆实际温度超出目标温度的最大值。过冲过大可能会导致杂质过度扩散等问题影响产品器件性能。

注：过冲要求由供需双方根据工艺窗口协商确定，极限值不超过50℃。

3.17

工艺气体及流量 process gas/Gas flow

进入腔室的反应气体、保护气体种类及体积流量，单位是 sccm 或 slm。

3.18

原位蒸汽生成 In-Situ Steam Generation(ISSG)

在低压工艺腔体（常用工艺压力范围 6torr~15torr）里通入氢气和氧气，利用晶圆表面高温（通常在 850℃ 以上）在腔室进行氧化反应的工艺。涉及 ISSG 工艺，需规定 H₂/O₂ 流量比、腔室压力及安全互锁要求。

3.19

滑移线与翘曲 slip line and warpage

退火后因热应力在晶圆内产生的晶格缺陷或形变，这是快速热退火工艺必须控制的指标，尤其是 300mm 以上的大尺寸晶圆。

3.20

热机/预处理 pre conditioning

在正式工艺前，用非产品晶圆或者无晶圆执行特殊指定的一个或者多个完整的工艺循环/recipe，使工艺腔室和晶圆承载装置达到热稳定，清除腔室内残留物质，稳定气体氛围，这是保证首片测试重复性的关键步骤。

3.21

负载 load

负载是指被热处理样品及用于匀热样品的托盘。托盘应与样品下表面完全贴合。

4 测试的一般条件

4.1 环境条件

4.1.1 温度

测试环境温度为22℃±2℃，测试过程中环境温度波动幅度≤1℃/h，设备附近无强热源、无强制气流干扰。

4.1.2 湿度

测试环境相对湿度为45%RH±5%RH，无凝露现象。

4.1.3 大气压强

由供需双方协商确定；或参照测试现场实际大气压。

4.1.4 其他环境要求

测试环境应无强电磁干扰、无腐蚀性气体、无明显振动；被测设备应放置于平稳牢固的刚性基础上，水平度符合设备技术文件要求。

4.2 电源条件

4.2.1 电压

交流供电电压应控制在设备额定电压的 $\pm 10\%$ 范围内，优先采用额定电压480V（三相）、380V（三相）或220V（单相）或208V（三相），按设备标称额定参数设定。

4.2.2 频率

电源频率为50Hz或60Hz。

4.2.3 接地与抗干扰

供电回路应无强脉冲干扰、无谐波畸变，设备保护接地可靠，接地电阻符合GB 5959.1的要求。

4.3 测试仪器与设备

4.3.1 通用计量

所有测试用仪器仪表应经法定计量机构检定合格，且在有效期内；量程与精度应满足被测参数的测试要求，测量不确定度应不大于被测参数允许偏差的1/3。

4.3.2 温度测试设备

温度测试设备应采用适当量程的非铠装热电偶（如 K/S/R/B/C 型，按测温范围选用）；接触式测温的测温点应与负载直接接触；非接触测温的光斑焦点应位于负载上；测温结果应反映负载的实际温度而非炉膛其他位置的温度。

如果设备显示温度非实际温度时应明确标明。

4.3.3 真空测试设备

真空度测试应采用经校准的真空计，测量范围覆盖 10^{-5} Pa $\sim 10^{-5}$ Pa，精度不低于 $\pm 5\%$ 读数。

4.3.4 电气安全测试设备

电气安全测试设备应符合GB 5959.1、GB 5959.4的相关要求，耐压测试仪、绝缘电阻测试仪、泄漏电流测试仪均应在检定有效期内。

4.4 被测设备要求

4.4.1 状态

被测设备应按制造商技术文件完成安装、调试，处于完好可运行状态，配套的真空、冷却、载气、电控、安全系统工作正常。

4.4.2 预热要求

测试前应对被测设备进行充分预热，预热时间不少于120 s，或按制造商规定的预热要求执行，确保设备进入稳定工作状态。

4.4.3 工况要求

测试过程中，设备的运行参数应符合制造商技术文件的规定，不得超额定工况运行。

5 试验项目及方法

5.1 外观与基本功能

5.1.1 测试项目

应包括外观质量、操作部件功能、标识与铭牌完整性。

5.1.2 测试方法

- a) 目测检查设备外观，外壳应坚固平整，漆面无气泡、颗粒、划痕、磕伤、锈蚀，结构件无明显凸起、凹陷、变形；
- b) 手动检查开关、按钮、接插件、调节器件，应连接可靠、操作灵活、功能正常，操作指令与设备执行动作一致；
- c) 检查设备铭牌与操作标识，内容应清晰完整，至少包含产品名称、型号、制造商名称、出厂编号、额定参数、制造日期等信息，操作机构应有明确的名称与操作标记。

5.1.3 合格判定

应符合上述全部要求。

5.2 核心温度性能测试

5.2.1 最高工作温度测试

5.2.1.1 测试方法

- a) 在测试开始前应检查测温点位置在负载上；最高温度应理解为样品的最高温度，而非环境温度或腔体其他位置的温度；
- b) 设备空载，按制造商技术文件完成开机与预热，设定升温程序为额定升温速率，目标温度为设备标称最高工作温度；
- c) 启动升温程序，升至目标温度后恒温保持不少于5s，通过校准后的测温设备记录实际达到的最高稳定温度；
- d) 降温至室温后，检查设备各组件无损坏、无异常。

5.2.1.2 合格判定

实测最高稳定温度应不低于设备标称最高工作温度，测试后设备功能正常，无异味。

5.2.2 温度均匀性测试

5.2.2.1 测试方法

- a) 测量点数量应按晶圆中心、半径及边缘处均匀分布中心和最边缘必须有采样点（具体数量可与客户协商）；
- b) 设备空载，抽真空至工作真空度（非真空型设备通额定保护气氛），设定温度为设备常用工艺温度（优先选取600℃、900℃、最高工作温度的80%三个典型温度点）；
- c) 升温至设定温度后恒温保持不少于1150℃保持120s，待温度稳定后，同步记录保温时间内各测温点的温度值，采样频率不低于10Hz；
- d) 计算各测温点实测温度与设定温度的最大偏差值，以及各测温点之间的最大温差。

5.2.2.2 合格判定

有效工艺区内温度偏差应不超过 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ，或符合供需双方约定的技术要求。

5.2.3 温控精度测试

5.2.3.1 测试方法

- a) 设备空载，设定常用工艺温度点，升温至设定温度后恒温保温时间不少于5分钟（控温精度测试）；炉壁温升测试应检查：① 最高温度下炉壁/炉腔无损坏；② 无异味（焦糊味等反映水冷系统问题）。；
- b) 待温度完全稳定后，记录保温时间内控制点温度值，采样频率不低于10Hz；
- c) 计算实测温度与设定温度的最大偏差值。

5.2.3.2 合格判定

温控精度应不超过 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，或符合供需双方约定的技术要求。温度控制精度的合格判定应包含过冲指标，判断标准可参考3.16，过冲值应满足供需双方协商确定的要求。

5.2.4 升温速率测试

5.2.4.1 测试方法

- 目标温度不低于 1150℃，保温时长1min；
- 启动升温程序，记录从室温升至目标温度的总时间，计算平均升温速率；
- 同步记录升温过程中的实时温度曲线，确认无超调、无温度失控。

5.2.4.2 合格判定

平均升温速率应不低于设备标称值，通用型半导体 RTP 设备平均升温速率应 $\geq 15^{\circ}\text{C/s}$ ，高速型设备应满足标称的额定指标。

5.2.5 最大降温速率测试

5.2.5.1 测试方法

- 设备空载，升温至1150℃保持120s，启动额定降温程序；
- 记录从1150℃降至600℃的总时间，计算平均降温速率；
- 记录降温过程的温度曲线，确认无异常。

5.2.5.2 合格判定

最大降温速率应不低于设备标称值，应 $\geq 50^{\circ}\text{C/s}$ ，或符合供需双方约定的技术要求。

5.2.6 工艺重复性测试

5.2.6.1 测试方法

5.2.6.2 测试目的

工艺均匀性测试：验证在指定的目标工艺条件下，关键工艺指标的片内均匀性。

工艺重复性测试：验证在相同目标工艺条件下，连续多次运行时晶圆关键工艺结果的一致性。

5.2.6.3 测试工具与材料

- 监测晶圆：推荐离子注入监测片，如B⁺, 3keV, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, 注入轻掺杂抛光硅片，整批来自同一母批。
- 四探针方阻测试仪：经校准，采用49点或121点全晶圆固定边缘排除3mm图案（Full map, EE 3mm）。
- 椭偏仪：经校准，采用49点或121点全晶圆固定边缘排除3mm图案（Full map, EE 3mm）。

5.2.6.4 测试条件

- 设备已完成温度校准，对于重复性测试，需再温度均匀性测试完成且结果合格之后。
- 基准工艺配方：至少覆盖一个常用工艺窗口（如1100℃，60s均温氧化；950℃，20s均温退火，或1050℃尖峰退火）。
- 测试开始前执行预跑片，直至工艺稳定（如方阻值稳定在控制限内）。

5.2.6.5 测试步骤

5.2.6.5.1 连续运行不少于 25 片监测晶圆，使用同一固定 Recipe。

5.2.6.5.2 每片测量 121 点方块电阻或/和氧化层厚度，以下以阻值为例。记录 Rs_avg、标准差 σ 、Rs_max、Rs_min。

5.2.6.5.3 计算片内均匀性：

片内非均匀性 $= (\text{Rs_max} - \text{Rs_min}) / (2 \times \text{Rs_avg}) \times 100\%$ 或

片内非均匀性 $= \sigma / \text{Rs_avg} \times 100\%$

5.2.6.5.4 计算片间重复性：

片间RSD = $\sigma_{\text{wafer}} / \bar{X}_{\text{doublebar}} \times 100\%$, 其中 $\bar{X}_{\text{doublebar}}$ 为25片Rs_avg的均值, σ_{wafer} 为25片Rs_avg的标准差。

5.2.6.5.5 绘制单值-移动极差控制图, 检查有无超限或异常趋势。

5.2.6.5.6 对于spike工艺, 抽取至少5片晶圆数据, 记录峰值温度和T-50, 计算温度和T-50的重复性(采样频率不低于100Hz)。

5.2.6.6 合格判定

对于阻值测试, 片内均匀性 $\leq 1.5\%$; 片间重复性 $\leq 1\%$, 且无异常点及异常趋势。

对于膜厚测试, 片内均匀性 $\leq 1\%$; 片间重复性 $\leq 1\%$, 且无异常点及异常趋势。

对于Spike工艺, 其峰值温度波动范围应不超过 3°C , T-50波动范围不超过0.05s。

5.2.7 程序升温速率偏差测试

5.2.7.1 测试方法

a) 基于5.2.6的测试数据, 按公式(1)计算各升温速率下的速率偏差:

$$\Delta v = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\Delta T_2} \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

式中:

Δv ——程序升温速率偏差, 单位为%;

ΔT_1 ——程序升温过程中, 实际温度点与起始温度的差值, 单位为 $^{\circ}\text{C}$;

ΔT_2 ——对应时间节点, 按设定升温速率计算的理论与起始温度的差值, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

b) 取所有测试节点的最大偏差值为最终结果。

5.2.7.2 合格判定

程序升温速率偏差应 $\leq 10.0\%$ 。

5.2.8 热循环稳定性测试

5.2.8.1 测试方法

a) 设备空载, 设定完整的升降温循环程序: 室温 $\rightarrow 900^{\circ}\text{C}$ (额定升温速率) $\rightarrow$ 恒温 10min $\rightarrow 200^{\circ}\text{C}$ (额定降温速率) $\rightarrow$ 室温, 为1个完整循环;

b) 热循环测试中, 降温时间必须每次保持一致(这是测试有效性的前提), 再评估温度波动。

5.2.8.2 合格判定

每次循环过程中温度波动应 $\leq \pm 2^{\circ}\text{C}$, 测试完成后设备功能正常。

5.2.9 炉壁温升测试 (适用时)

5.2.9.1 测试方法

a) 设备空载, 升温至最高工作温度, 恒温保持至热稳定状态;

b) 采用经校准的红外测温仪或热电偶, 测试炉体外表面(炉壳、炉顶板、操作面板等)的温度, 测试点避开炉口、加热元件引出孔、热电偶引出孔边缘 75mm 范围内的区域;

c) 记录各测试点的最高表面温度, 减去测试时的环境温度, 得到表面温升。

5.2.9.2 合格判定

炉体外表面最高温度应 $\leq 50^{\circ}\text{C}$ (环境温度 25°C 下), 或符合 GB/T 10067.1 的相关规定。最高温度下炉壁/炉腔不应发生损坏, 无异味(焦糊味等)。

5.2.10 金属污染控制测试 (适用时)

5.2.10.1 晶圆表面金属污染

高温工艺下，设备部件（如腔体、石英件等）的微量金属会扩散进入晶圆，导致产品器件漏电、寿命下降等严重问题。金属污染表征通常是以晶圆表面单位面积上的金属杂质原子数表示，单位 atoms/cm²。主要关注元素包括Fe、Cu、Ni、Cr、Na、Al、K、Ca等。

5.2.10.2 测试条件

设备已完成全部工艺调试，并运行过产品类配方。

- a) 测试前按标准流程进行腔室清洁和预跑片（使用洁净挡片），以排除非稳态污染。
- b) 测试配方选取较高温度点和较长保温时间（如 1100℃，60s）的典型组合，以最大化测试效果。
- c) 在做工艺测试前，找一个洁净密闭的cassette/foup里，里面放置两片全新晶圆片，一片用来做金属污染测试，另一片保留不动作为基准片来评估测试片的污染水平。将测试片在RTP设备中运行测试配方，晶圆尽量使用传送系统，避免人为污染。晶圆出腔后，立即放入干净密闭的CASSETTE/FOUP, 送实验室做金属污染分析。

5.2.10.3 测试方法

5.2.10.3.1 VPD-ICP-MS

气相分解-电感耦合等离子体质谱。通过 HF 蒸汽在晶圆表面形成凝结液滴扫描收集表面金属，再以 ICP-MS 检测，是表面金属污染检测的标准方法，检出限可达 10⁷ atoms/cm² 量级。

5.2.10.3.2 TXRF

全反射X射线荧光光谱。非破坏性地直接测量晶圆表面局部区域的金属浓度。

5.2.10.4 合格判定

所有金属杂质含量小于5E10atoms/cm²。

5.3 压力调节与控制系统/气体控制系统

5.3.1 冷态极限真空度测试

5.3.1.1 测试方法

- a) 设备空载、冷态、室温，关闭所有真空阀门，清洁炉膛内部，确认无泄漏点；
- b) 启动主真空机组，连续运行不少于 2h，待真空度稳定后，读取经校准的真空计的稳定读数，即为冷态极限真空度。

5.3.1.2 合格判定

冷态极限真空度应不高于设备标称值，高真空型设备应 $\leq 1 \times 10^{-3}$ Pa，或符合供需双方约定的技术要求。

5.3.2 真空升压率测试

5.3.2.1 测试方法

- a) 设备空载、冷态，启动真空机组抽至极限真空度，关闭所有真空阀门，记录关闭阀门 20min 后的真空度 P₁；
- b) 静置 24h 后，记录同一位置的真空度 P₂；
- c) 按公式（2）计算升压率：

$$\Delta P = \frac{P_2 - P_1}{24} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- ΔP ——升压率，单位为 Pa/h；
 P_1 ——初始真空度，单位为 Pa；
 P_2 ——24h 后真空度，单位为 Pa。

5.3.2.2 合格判定

升压率应符合设备标称值，应 $\leq 0.5\text{Pa/h}$ ，或符合供需双方约定的技术要求。

5.3.3 抽气时间测试

5.3.3.1 测试方法

- a) 设备空载、冷态、室温，炉膛内处于大气压状态，关闭所有放气阀门；
- b) 启动主真空机组，同时开始计时，记录真空度达到设备标称工作真空度所需的时间。

5.3.3.2 合格判定

抽气时间应不超过设备标称值，或符合供需双方约定的技术要求。

5.3.4 气氛成分控制精度测试

5.3.4.1 测试方法

- a) 设备空载，设定工艺气氛的组分与流量，通入炉膛并稳定不少于120s；
- b) 采用经校准的气体分析仪，连续检测炉膛出口气氛的组分浓度，记录不少于 10 组数据，间隔不小于10ms；
- c) 计算实测浓度与设定浓度的最大偏差值。

5.3.4.2 合格判定

气氛成分控制偏差应 $\leq \pm 0.5\%$ ，或符合供需双方约定的技术要求。

5.3.5 压力控制精度测试

5.3.5.1 测试方法

- a) 设备空载，设定炉膛工作压力（优先选取 500Pa 典型值），启动压力控制系统，待压力稳定后，以1次/10ms的频率记录炉膛压力值，连续记录不少于 30 组数据；
- b) 计算实测压力与设定压力的最大偏差值。

5.3.5.2 合格判定

压力控制偏差应 $\leq \pm 5\text{Pa}$ ，或符合供需双方约定的技术要求。

5.4 电气安全性能测试

5.4.1 绝缘电阻测试

5.4.1.1 测试方法

- a) 设备处于非工作状态，电源开关置于接通位置，断开所有易受高压损坏的电子元器件；
- b) 采用额定电压 500V 的直流兆欧表，测试电源输入端与保护接地端之间的绝缘电阻，施加电压保持 1min 后读取数值。

5.4.1.2 合格判定

整机绝缘电阻应 $\geq 1\text{M}\Omega$ ，或符合GB/T 5226.33的相关规定。

5.4.2 耐电压测试

5.4.2.1 测试方法

- a) 设备处于非工作状态，电源开关置于接通位置，断开所有易受高压损坏的电子元器件；
- b) 采用耐压测试仪，在电源输入端与保护接地端之间施加交流 50Hz、有效值 1500V 的试验电压，保持 1min；
- c) 观察试验过程中是否出现击穿、闪络、飞弧现象。

5.4.2.2 合格判定

试验过程中无击穿、闪络、飞弧现象。

5.4.3 接地连续性测试

5.4.3.1 测试方法

- a) 设备处于非工作状态，采用低电阻测试仪，测试设备保护接地端子与设备各金属外壳、可触及金属部件之间的接地电阻；
- b) 每个测试点测试不少于 3 次，取平均值。

5.4.3.2 合格判定

保护接地电阻应 $\leq 0.1\ \Omega$ ，或符合GB/T 5226.33的相关规定。

5.5 机械与环境性能测试

5.5.1 噪音测试

5.5.1.1 测试方法

- a) 设备在额定工况下空载运行，测试环境背景噪音应比设备噪音低3dB (A)以上；
- b) 采用声级计，在设备四周距离设备外壳 0.5m、高度 1.2m 的位置，均匀布置不少于 4 个测试点；
- c) 记录每个测试点的 A 计权声压级，取最大值为测试结果。

5.5.1.2 合格判定

设备运行噪音应 $\leq 75\text{dB (A)}$ ，或符合供需双方约定的技术要求。

5.5.2 环境适应性测试

5.5.2.1 测试方法

- a) 温度试验、湿度试验按GB/T 6587的规定执行；
- b) 振动试验、冲击试验、运输试验应在设备完整包装状态下，分别按GB 6587.4、GB 6587.5、GB 6587.6的规定执行；
- c) 电源变化试验按GB/T 6587的规定执行。

5.5.2.2 合格判定

试验完成后，设备外观无损坏，结构无松动，各项性能指标符合本文件要求，功能正常。

5.5.3 电磁兼容性测试

5.5.3.1 测试方法

按IEC 61000系列标准的规定执行，包含静电放电抗扰度、射频电磁场辐射抗扰度、电快速瞬变脉冲群抗扰度、浪涌抗扰度等核心项目。

5.5.3.2 合格判定

测试过程中设备无故障、无死机、无数据异常，测试后性能指标符合本文件要求。

5.6 系统功能与安全保护测试

5.6.1 人机交互与通讯功能测试

5.6.1.1 测试方法

- a) 操作设备人机界面，检查各项菜单、参数设置、数据显示功能，验证中英文操作切换功能；
- b) 测试远程监控、数据传输、数据存储与导出功能，验证数据的准确性与完整性；
- c) 检查设备操作指令与执行动作的一致性，无延迟、无误动作。

5.6.1.2 合格判定

各项功能正常，指令与动作一致，数据传输准确。

5.6.2 自动报警与故障诊断功能测试

5.6.2.1 测试方法

- a) 模拟设备超温、超压、真空泄漏、气压异常、冷却水断流、电源异常等故障场景；
- b) 检查设备是否实时监测异常状态，是否自动触发报警、停机保护，是否显示故障信息与诊断提示。

5.6.2.2 合格判定

设备可准确识别故障，自动停机并报警，故障诊断信息清晰准确。

5.6.3 安全保护功能测试

5.6.3.1 测试方法

- a) 测试设备急停功能，按下急停按钮，检查设备所有运动执行元件是否立即停止动作，加热系统是否紧急切断；
- b) 测试电源断电保护，模拟电源突然中断，检查设备是否无异常动作，恢复供电后无误启动；
- c) 测试互锁保护功能，包括炉门互锁、真空阀门互锁、加热系统互锁等，验证互锁逻辑是否正确；
- d) 测试掉电、超载、超温、超压保护功能，验证保护动作是否准确可靠。

5.6.3.2 合格判定

所有安全保护功能动作准确、可靠，符合安全设计要求。

6 试验报告和文件资料

6.1 试验报告

6.1.1 报告内容要求

每项测试完成后，应出具完整、可追溯的试验报告，试验报告应至少包含以下内容：

- a) 报告编号、版本号、出具日期；
- b) 被测设备的基本信息：设备名称、型号、序列号、制造商、出厂日期、额定技术参数；
- c) 测试单位、测试地点、测试环境条件（温度、湿度、大气压、电源参数）；
- d) 测试依据的标准文件编号与名称；
- e) 测试用仪器仪表的信息：名称、型号、设备编号、检定有效期、精度等级；
- f) 测试项目、测试方法、实测原始数据、测试曲线、合格判定结果；
- g) 测试过程中的异常情况说明与处置记录；
- h) 测试人员、审核人员、批准人员的签字与日期；
- i) 测试单位的有效印章。

6.1.2 报告管理要求

试验报告应数据完整、清晰可追溯，不得随意涂改，测试结果应真实反映设备的性能状态。

6.2 文件资料

设备随附的文件资料应至少包含以下内容：

- a) 产品使用说明书，至少包含设备用途、技术参数、工作原理、安装调试方法、操作步骤、安全注意事项、维护保养要求、故障排除方法；
 - b) 产品检验合格证 / 质量证明书，至少包含制造商名称、设备型号、出厂编号、出厂日期、各项检验结果、质检部门检印；
 - c) 电气原理图、真空系统原理图、备件清单、附件清单。
-