



团体标准

T/CEATEC XXX—2025

航空涡轮叶片气膜冷却孔水导激光 加工设备技术规范

Technical specifications for water-guided laser processing equipment for air
film cooling holes on aviation turbine blades
(征求意见稿)

2025-X-XX 发布

2025-X-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 3

2 规范性引用文件 3

3 术语和定义 3

4 技术要求 4

 4.1 外观要求 4

 4.2 激光系统要求 4

 4.3 水导系统要求 4

 4.4 运动系统要求 4

 4.5 工件装夹与定位系统要求 5

 4.6 加工质量要求 5

 4.7 安全要求 5

 4.8 可靠性要求 6

5 试验方法 6

 5.1 外观检查 6

 5.2 激光系统性能试验 6

 5.3 水导系统性能试验 6

 5.4 运动系统性能试验 7

 5.5 工件装夹与定位系统性能试验 7

 5.6 加工质量试验 7

 5.7 安全性能试验 7

 5.8 可靠性试验 7

6 检验规则 7

 6.1 检验分类 8

 6.2 出厂检验 8

 6.3 型式检验 8

 6.4 检验报告 8

7 标志、包装、运输和贮存 8

 7.1 标志 8

 7.2 包装 8

 7.3 运输 8

 7.4 贮存 9

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并归口。

本文件主要起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

航空涡轮叶片气膜冷却孔水导激光加工设备技术规范

1 范围

本文件规定了航空涡轮叶片气膜冷却孔水导激光加工设备的技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存。

本文件适用于航空发动机涡轮叶片（含导向叶片）气膜冷却孔加工的水导激光加工设备。

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 2423.15 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验Ga和导则：稳态加速度

GB/T 2828.1 计数抽样检验程序 第1部分：按接收质量限（AQL）检索的逐批检验抽样计划

GB 2894 安全标志及其使用导则

GB/T 3768 声学 声压法测定噪声源声功率级和声能量级 采用反射面上方包络测量面的简易法

GB/T 4380 圆度误差的评定 两点、三点法

GB/T 5080.7 设备可靠性试验 恒定失效率假设下的失效率与平均无故障时间的验证试验方案

GB/T 5226.1 机械电气安全 机械电气设备 第1部分：通用技术条件

GB/T 7247.1 激光产品的安全 第1部分：设备分类、要求

GB/T 10320 激光设备和设施的电气安全

GB/T 13306 标牌

GB/T 13384 机电产品包装通用技术条件

GB/T 13863 激光辐射功率和功率不稳定性测试方法

GB/T 16855.1 机械安全 安全控制系统 第1部分：设计通则

GB/T 17421.1 机床检验通则 第1部分：在无负荷或准静态条件下机床的几何精度

GB/T 17421.2 机床检验通则 第2部分：数控轴线的定位精度和重复定位精度的确定

GB/T 19067.1 产品几何量技术规范（GPS） 表面结构 轮廓法 测量标准 第1部分：实物测量标准

GB/T 31839 电工电子设备机械结构 安全要求和试验

GB/T 35076 机械安全 生产设备安全通则

GB/T 40742.2 产品几何技术规范（GPS） 几何精度的检测与验证 第2部分：形状、方向、位置、跳动和轮廓度特征的检测与验证

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

水导激光加工 water-guided laser processing

以高压水束作为激光能量的传输载体，将激光能量聚焦于水束末端，实现材料高精度去除的加工方式。

3.2

气膜冷却孔 film cooling holes

在航空涡轮叶片表面加工的、用于形成冷却气膜的微小孔径孔道。

4 技术要求

4.1 外观要求

加工设备外观应无明显划痕、锈蚀、变形，油漆涂层应均匀、牢固，无流挂、脱落现象，操作面板标识清晰、准确，按钮、开关动作灵活、可靠。

4.2 激光系统要求

4.2.1 激光类型

应采用脉冲光纤激光器，激光波长范围为1060 nm~1080 nm。

4.2.2 激光功率

激光输出功率可调范围应为10W~100W，在额定功率下，连续工作2小时内的功率波动应不大于±3%。

4.2.3 脉冲参数

脉冲宽度可调范围应为10ns~100ns，脉冲频率可调范围应为1kHz~100kHz。

4.2.4 激光光斑质量

激光光束质量因子 M^2 应 ≤ 1.2 ，光斑直径可调范围为10 μm ~50 μm 。

4.3 水导系统要求

4.3.1 水流压力

水流压力可调范围应为5MPa~20MPa，连续工作1小时内的压力波动应不大于±2%。

4.3.2 水流流量

水流流量可调范围应为5mL/min~20mL/min，连续工作1小时内的流量波动应不大于±5%。

4.3.3 水质要求

应采用去离子水，水质应满足以下指标：

- a) 电阻率：不小于15M Ω ·cm（25℃时）；
- b) 颗粒物含量：粒径大于0.1 μm 的颗粒物数量应不大于10个/mL；
- c) 酸碱度（pH值）：在6.5~7.5。

4.3.4 水导喷嘴

应满足以下要求：

- a) 喷嘴材质：应采用蓝宝石材质，纯度应不低于99.9%；
- b) 喷嘴孔径：可调范围应为50 μm ~200 μm ；
- c) 喷嘴同轴度：喷嘴与激光束的同轴度误差应不大于5 μm 。

4.4 运动系统要求

4.4.1 运动轴配置

加工设备至少应配置X、Y、Z三个直线运动轴和A、B两个旋转运动轴（五轴联动）。各运动轴的行程应根据加工叶片的最大尺寸进行确定，一般应满足：

- a) X 轴行程：不小于 800mm；
- b) Y 轴行程：不小于 500mm；
- c) Z 轴行程：不小于 300mm；
- d) A 轴（绕 X 轴旋转）行程：-120° ~120° ；
- e) B 轴（绕 Y 轴旋转）行程：-90° ~90° 。

4.4.2 定位精度与重复定位精度

各运动轴的定位精度和重复定位精度应满足表1的要求。

表1 定位精度和重复定位精度

运动轴	定位精度（μm）	重复定位精度（μm）
X 轴	≤±5	≤±2
Y 轴	≤±5	≤±2
Z 轴	≤±3	≤±1.5
A 轴（角秒）	≤±10	≤±5
B 轴（角秒）	≤±10	≤±5

4.4.3 最大运动速度与加速度

应满足以下要求：

- a) 直线运动轴（X、Y、Z 轴）：最大运动速度不小于500mm/s，最大加速度不小于10m/s²；
- b) 旋转运动轴（A、B 轴）：最大旋转速度不小于60° /s，最大角加速度不小于500° /s²。

4.5 工件装夹与定位系统要求

4.5.1 装夹方式

应采用真空吸附与机械夹紧相结合的装夹方式。装夹机构应具备自适应调节功能，可适应不同形状、不同尺寸的航空涡轮叶片。

4.5.2 定位基准

以航空涡轮叶片的榫头定位面和叶根端面作为定位基准，定位基准的平面度应不大于0.01mm，粗糙度Ra应不大于0.8 μm。

4.5.3 定位精度

工件装夹与定位系统的定位精度（叶片实际定位位置与理论定位位置的偏差）应不大于±3 μm。

4.6 加工质量要求

4.6.1 孔径尺寸精度

加工后的气膜冷却孔孔径尺寸偏差应满足表2的要求。

表2 孔径尺寸偏差

孔径范围（mm）	尺寸偏差（mm）
0.1~0.3	±0.005
0.3~0.6	±0.01
0.6~1.0	±0.015

4.6.2 孔的形状精度

应满足以下要求：

- a) 孔的圆度：对于孔径≤0.5mm的孔，圆度误差应不大于0.008mm，对于孔径>0.5mm的孔，圆度误差应不大于0.012mm；
- b) 孔的圆柱度：对于孔径≤0.5mm的孔，圆柱度误差应不大于0.01mm，对于孔径>0.5mm的孔，圆柱度误差应不大于0.015mm。

4.6.3 孔的位置精度

气膜冷却孔的位置偏差（实际加工位置与设计位置的偏差）应不大于±0.02mm。

4.6.4 热影响区

加工后气膜冷却孔周围的热影响区厚度应不大于10 μm，且热影响区内不应出现裂纹、氧化等缺陷。

4.6.5 孔内壁质量

气膜冷却孔的内壁粗糙度Ra应不大于1.6 μm，内壁不应有毛刺、熔渣、划伤等缺陷。

4.7 安全要求

4.7.1 激光安全

设备激光安全应符合GB/T 7247.1的规定。

4.7.2 电气安全

设备的电气系统应符合GB 5226.1和GB/T 10320的规定。

4.7.3 机械安全

设备的机械安全应符合GB/T 16855.1、GB/T 35076的规定。

4.7.4 噪声安全

设备在正常运行时（加工状态下），噪声声压级应不大于 85dB（A）。

4.7.5 急停装置

设备应设置急停按钮，急停按钮应采用红色蘑菇头式，安装在设备操作面板和加工区域附近，急停响应时间应不超过0.1s，急停后设备所有运动部件应立即停止，激光输出应切断。

4.8 可靠性要求

4.8.1 平均无故障工作时间（MTBF）

设备的平均无故障工作时间（MTBF）应不小于5000h。

4.8.2 平均修复时间（MTTR）

设备的平均修复时间（MTTR）应不大于2h，平均修复时间反映了设备发生故障后恢复正常运行速度，较短的 MTTR 可减少设备故障对生产的影响，确保生产的连续性。

4.8.3 使用寿命

设备的设计使用寿命应不小于10年（或累计工作时间不小于30000h），在使用寿命期内，设备的主要性能指标应能满足本文件的要求，且设备的易损件应易于更换，更换周期应不小于1000h。

5 试验方法

5.1 外观检查

采用目视法检查设备外观，检查内容包括：表面涂层、划痕、锈蚀、变形，操作面板标识、按钮开关动作情况。

5.2 激光系统性能试验

5.2.1 激光波长试验

采用激光波长计测量激光波长。

5.2.2 激光功率试验

使用激光功率计测量实际输出功率，计算功率波动值。

5.2.3 脉冲参数试验

采用脉冲宽度测量仪、频率计数器分别测量实际脉冲宽度、实际脉冲频率。

5.2.4 激光光斑质量试验

采用激光光束质量分析仪，采集激光光斑图像，分析光斑的模式和直径。

5.3 水导系统性能试验

5.3.1 水流压力试验

使用精密压力表测量水导系统的压力值，计算压力波动值。

5.3.2 水流流量试验

采用液体流量计测量水流流量值，计算流量波动值。

5.3.3 水质试验

应包括：

- a) 电阻率试验：使用电阻率仪测量水质的电阻率；
- b) 颗粒物含量试验：采用颗粒计数器测量水样中粒径大于0.1 μm的颗粒物数量；
- c) pH值试验：使用pH计测量pH值。

5.3.4 水导喷嘴检测

应包括：

- a) 喷嘴材质鉴定：采用X射线荧光光谱仪检测喷嘴材质和纯度；

- b) 喷嘴孔径试验：使用工具显微镜测量喷嘴孔径的尺寸；
- c) 喷嘴同轴度试验：采用同轴度测量仪检测激光束经过喷嘴后的偏移量，计算喷嘴与激光束的同轴度误差。

5.4 运动系统性能试验

- 5.4.1 定位精度与重复定位精度试验
应按照GB/T 17421.2的规定进行。
- 5.4.2 最大运动速度与加速度试验
应按照GB/T 2423.15的规定进行。

5.5 工件装夹与定位系统性能试验

- 5.5.1 装夹试验
通过装夹不同尺寸叶片验证自适应夹持功能及负载稳定性。
- 5.5.2 定位基准试验
使用三坐标测量机检测定位基准面平面度和粗糙度仪检测Ra值。
- 5.5.3 定位精度试验
应按照GB/T 17421.1的规定进行。

5.6 加工质量试验

- 5.6.1 孔径尺寸试验
使用孔径测量仪测量实际孔径尺寸，计算实际孔径尺寸与设计孔径尺寸的偏差。
- 5.6.2 孔的形状精度试验
应按照GB/T 4380、GB/T 40742.2的规定进行。
- 5.6.3 孔的位置精度试验
应按照GB/T 19067.1的规定进行。
- 5.6.4 热影响区试验
采用扫描电子显微镜识别热影响区与基体材料的边界，测量热影响区的厚度，观察热影响区内是否存在裂纹、氧化等缺陷。
- 5.6.5 孔内壁质量试验
采用表面粗糙度测量仪测量孔内壁的粗糙度Ra值，采用光学显微镜观察孔内壁是否有毛刺、熔渣、划伤等缺陷。

5.7 安全性能试验

- 5.7.1 激光安全试验
应按照GB/T 13863的规定进行。
- 5.7.2 电气安全试验
应按照GB/T 25296的规定进行。
- 5.7.3 机械安全试验
应按照GB/T 31839的规定进行。
- 5.7.4 噪声测量
应按照GB/T 3768的规定进行。

5.8 可靠性试验

- 5.8.1 平均无故障工作时间（MTBF）试验
应按照GB/T 5080.7的规定进行。
- 5.8.2 平均修复时间（MTTR）试验
应按照GB/T 5080.7的规定进行。

6 检验规则

6.1 检验分类

本文件要求的检验分为出厂检验和型式检验两类。

6.2 出厂检验

6.2.1 每台加工设备出厂前均应进行出厂检验，检验合格并出具产品合格证后方可出厂。

6.2.2 出厂检验项目应包括外观检查。

6.2.3 出厂检验项目符合本文件要求时，判定为出厂检验合格，若有不合格项目，应进行返修，返修后重新检验，直至所有项目合格，若返修后仍有项目不合格，判定为出厂检验不合格。

6.3 型式检验

6.3.1 检验时机

出现下列情况之一时，应进行型式检验：

- a) 新产品首次研制或定型时；
- b) 产品结构、材料、关键部件（如激光器、高压水泵）发生重大变更时；
- c) 产品停产1年以上重新恢复生产时；
- d) 出厂检验结果与上次型式检验结果有较大差异时。

6.3.2 型式检验项目

应包括本文件第4章技术要求中的所有项目。

6.3.3 抽样规则

抽样规则应符合GB/T 2828.1的要求。

6.3.4 结果判定：

所有检验项目均满足本文件的技术要求时，判定为合格。任一项不符合规定时，判定为不合格。对于不合格的产品，应进行返工或报废处理，返工产品应重新进行检验。

6.4 检验报告

所有检验记录和报告应妥善存档，每次检验结束后应出具完整的检验报告，并包括下列内容：

- a) 基本信息：产品名称、产品批次编号、检验日期、检验机构和参与人员等；
- b) 检验目的与检验依据；
- c) 检验环境与检验设备清单等；
- d) 检验方法与检验过程；
- e) 检验数据：详细列出各项的检测数据；
- f) 检验结论：评估该批次产品是否合格。

7 标志、包装、运输和贮存

7.1 标志

7.1.1 加工设备机身明显位置应设置产品标牌，标牌应符合GB/T 13306的规定，标牌内容包括：产品名称、型号规格、生产厂家名称、地址、产品编号、生产日期、主要技术参数。

7.1.2 设备激光加工区域防护罩上应粘贴激光辐射警示标志，标志应符合GB 2894的规定。

7.1.3 设备包装件外表面应粘贴包装储运图示标志，标志应符合GB/T 191的规定。

7.2 包装

7.2.1 加工设备包装应符合GB/T 13384的规定。

7.2.2 设备在包装箱内应固定牢固，采用泡沫塑料、珍珠棉等缓冲材料填充设备与包装箱之间的间隙，防止设备在运输过程中窜动、碰撞。

7.2.3 随设备附带的技术文件（产品合格证、使用说明书、维修手册、备件清单、关键部件检测报告）应密封在防水文件袋中，放置在包装箱内指定位置。

7.2.4 设备易损部件应单独包装，注明“易损件”标识，并与设备主体一同放入包装箱内。

7.3 运输

7.3.1 加工设备运输应选择具有相应资质的运输单位，运输过程中应避免剧烈振动、冲击和雨淋、暴晒，严禁倒置、侧放运输。

7.3.2 运输车辆车厢内应保持清洁、干燥，无腐蚀性物质，设备包装箱在车厢内应固定牢固，堆码高度不得超过包装箱上标明的堆码极限。

7.3.3 运输过程中，运输单位应定期检查包装箱状况，若发现包装箱破损、泄漏等情况，应及时采取补救措施，并通知生产厂家。

7.4 贮存

7.4.1 加工设备应存放在干燥、通风、清洁、无腐蚀性气体、无粉尘的库房内，库房内温度应保持在 $-5^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度应不超过75%（无凝露），库房地面应平整、坚实。

7.4.2 设备在库房内贮存时，应放置在垫木上，垫木高度应不低于100mm，设备与库房墙壁、其他设备之间的距离应不小于500mm。

7.4.3 设备长期贮存（超过6个月）时，应定期进行维护保养，包括：每3个月检查一次设备外观，每6个月接通设备电源，启动各系统空载运行30min，检查各系统功能是否正常。

7.4.4 设备贮存期间，若发现设备损坏、锈蚀等情况，应及时进行维修处理，并记录维修情况。
