

团 体 标 准

T/NDIE 30102—2023

舰船燃气轮机涡轮冷却叶片热冲击试验 方法

Thermal shock test method of marine gas turbines cooled blades

2023-12-28 发布

2023-12-28 实施

中国国防工业企业协会
国家国防标准创新基地

发布

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。

本文件由中国船舶集团有限公司综合技术经济研究院提出。

本文件由中国国防工业企业协会、国家国防标准创新基地联合归口。

本文件起草单位：中国船舶集团有限公司第七〇三研究所、中国船舶集团有限公司综合技术经济研究院、国家国防标准创新基地。

本文件主要起草人：李国强、牛夕莹、徐波、刘宇、侯隆安、王靖超、马晓红、李巧平、高道清、栾贻东、张一博。

舰船燃气轮机涡轮冷却叶片热冲击试验方法

1 范围

本文件规定了舰船燃气轮机涡轮冷却叶片热冲击试验方法的试验目的、试验样品、试验环境、试验设备、试验人员、试验保障、试验异常处理、试验项目、试验原理、试验程序、试验数据处理、试验结果评定和试验报告编写等内容。

本文件适用于开展以高温燃气为介质、由 3 片及以上真实涡轮叶片组成 2 通道及以上扇形叶栅试验段的舰船燃气轮机涡轮冷却叶片热冲击试验。

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。

HB 20321 航空燃气涡轮发动机涡轮冷却叶片热冲击试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

主流空气 main air

流经整个扇形叶栅试验段通道的燃烧室进口空气。

3.2

燃气 gas

流经整个扇形叶栅试验段通道的主流气体。

3.3

冷却空气 cooling air

冷却涡轮叶片的空气。

3.4

燃气进口静压 inlet gas pressure

扇形叶栅试验段进口测量截面上的燃气静压。

3.5

燃气进口总压 inlet gas total pressure

扇形叶栅试验段口测量截面上的燃气总压。

3.6

燃气进口总温 inlet gas total temperature

扇形叶栅试验段进口测量截面上的燃气总温。

3.7

燃气出口总压 outlet gas total pressure

扇形叶栅试验段出口测量截面上的燃气总压。

3.8

燃气出口总温 outlet gas total temperature

扇形叶栅试验段出口测量截面上的燃气总压。

3.9

燃气流量 gas flow rate

流经整个扇形叶栅试验段通道的燃烧室出口气体流量。

3.10

冷却空气总温 cooling air total temperature

扇形叶栅试验段正式试验件叶片冷却空气进口测量截面上的空气总温。

3.11

冷却空气总压 cooling air total pressure

扇形叶栅试验段正式试验件叶片冷却空气进口测量截面上的空气总压。

3.12

冷却空气流量 cooling air flow rate

用于冷却扇形叶栅试验段正式试验件叶片的空气流量。

3.13

叶片表面温度 blade surface temperature

燃气涡轮叶片测量截面敷设的热电偶测量温度。

3.14

热冲击 thermal shock

涡轮叶片经受的周期性燃气温度及冷却空气或冷却水的交变负荷。

3.15

标准循环 standard cycle

热冲击试验实际采用的快速加温、高温保持、快速降温、低温保持梯形循环载荷时间历程。

3.16

循环数 cycle number

符合热冲击试验设计要求的标准循环累计次数。

3.17

初始裂纹 initial crack

热冲击条件下叶片表面最初产生的可检测热疲劳裂纹。

3.18

循环寿命 cycle life

热冲击条件下叶片表面产生初始裂纹的标准循环数。

4 符号

下列符号适用于本文件，不同位置的参数可在符号后加阿拉伯数字、字母或它们的组合进行区分。

G ——流量，单位为千克每秒（kg/s）；

G_s ——主流空气流量，单位为千克每秒（kg/s）；

G_f ——燃油流量，单位为千克每秒（kg/s）；

G_g ——燃气流量，单位为千克每秒（kg/s）；

G_c ——冷却空气流量，单位为千克每秒（kg/s）；

P ——压力，单位为帕（Pa）；

P_g^* ——燃气进口总压，单位为帕（Pa）；

$P_{c,in}^*$ ——冷却空气进口总压，单位为帕（Pa）；

$P_{c,out}^*$ ——冷却空气出口总压，单位为帕（Pa）；

$P_{g,in}^*$ ——燃气进口总压，单位为帕（Pa）；

$P_{g,out}^*$ ——燃气出口总压，单位为帕（Pa）；

T ——温度，单位为开尔文（K）；

T_g^* ——燃气总温，单位为开尔文（K）；

$T_{g,in}^*$ ——燃气进口总温，单位为开尔文（K）；

$T_{g,out}^*$ ——燃气出口总温，单位为开尔文（K）；

$T_{c,in}^*$ ——冷却空气进口总温，单位为开尔文（K）；

$T_{c,out}^*$ ——冷却空气出口总温，单位为开尔文（K）；

t ——时间，单位为秒（s）；

N ——标准循环数；

Z ——扇形叶栅通道数；

X_{AV} ——参数平均值；

X_i —— i 点参数测量值；

δ ——相对误差；

Δ ——绝对误差。

5 试验目的

舰船燃气轮机涡轮冷却叶片热冲击试验目的为验证涡轮叶片热疲劳低循环预测寿命。

6 试验原理

6.1 试验方法

涡轮冷却叶片热冲击试验方法采用一定的温度循环负荷和时间历程模拟涡轮叶片在燃气轮机工作中经历的“启动-运行-停机”温度交变负荷循环，利用主流空气系统及燃气加温系统等施加燃气温度载荷，利用冷却空气系统等施加冷气温度载荷。经历规定循环次数后进行试验件裂纹检查，把在叶片叶身位置出现初始裂纹的循环次数作为叶片的初始循环寿命，该寿命与燃气轮机运行小时数存在一定的换算关系。在循环最高温度时，叶片温度应模拟燃气轮机工作中经受的最高温度水平，在循环最低温度时，应使叶片温度接近环境温度。

6.2 标准循环

标准循环曲线如图 1 所示，标准循环曲线应满足以下要求：

- 升温、降温速率以不低于发动机在工作中最快变化状态为标准；
- 在高温保持阶段，叶片考核部位平均温度为燃气轮机涡轮叶片考核部位在实际工作中所经受的最高温度水平的平均温度；
- 在低温保持阶段，叶片考核部位平均温度应接近环境温度。一般情况下，舰船燃气轮机涡轮叶片低温保持阶段叶片考核部位平均温度不大于 500K 即可；
- 标准循环图谱一经选定不宜变更，保证试验结果可比性；
- 标准循环数根据燃气轮机实际使用情况或计算结果确定。

试验设备在达不到燃气温度指标时，可以在保证叶片最高温度水平和温度分布的情况下进行试验。

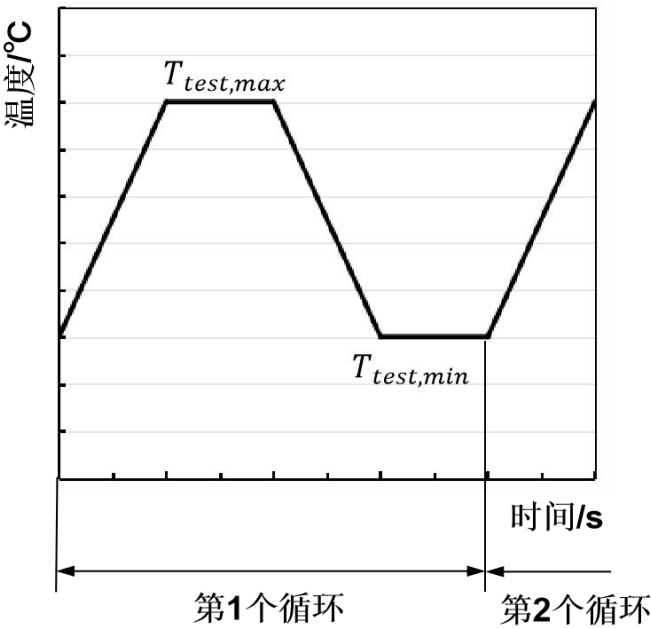


图1 热冲击循环曲线

7 试验样品

7.1 试验件

试验件为涡轮叶片，叶片应具有叶片制造厂合格证。

7.2 试验段

试验段是试验件进行试验时的必要工装夹具，应满足以下要求：

- a) 试验段包含燃烧室出口转接段、测量段、扇形叶栅试验段、排气转接段、冷气转接段、冷气测量段、排气喷水段、软化水转接段等；
- b) 扇形叶栅试验段进口气流角与叶片中截面进口气流角应一致，转子叶片使用中截面相对气流角；
- c) 冷却空气进气方式与实际发动机进气方式保持一致；
- d) 当试验段为双层冷却结构时，试验段内套采取支撑结构防止内外压差过大或热应力过大导致试验段变形泄露。

8 试验设备

8.1 试验设备组成

试验设备系统所使用的设备应是经过检验验收后的完好合格设备，试验所用仪器、仪表应经检定机构检定合格并在使用有效期内，热冲击试验设备系统组成见图 2。

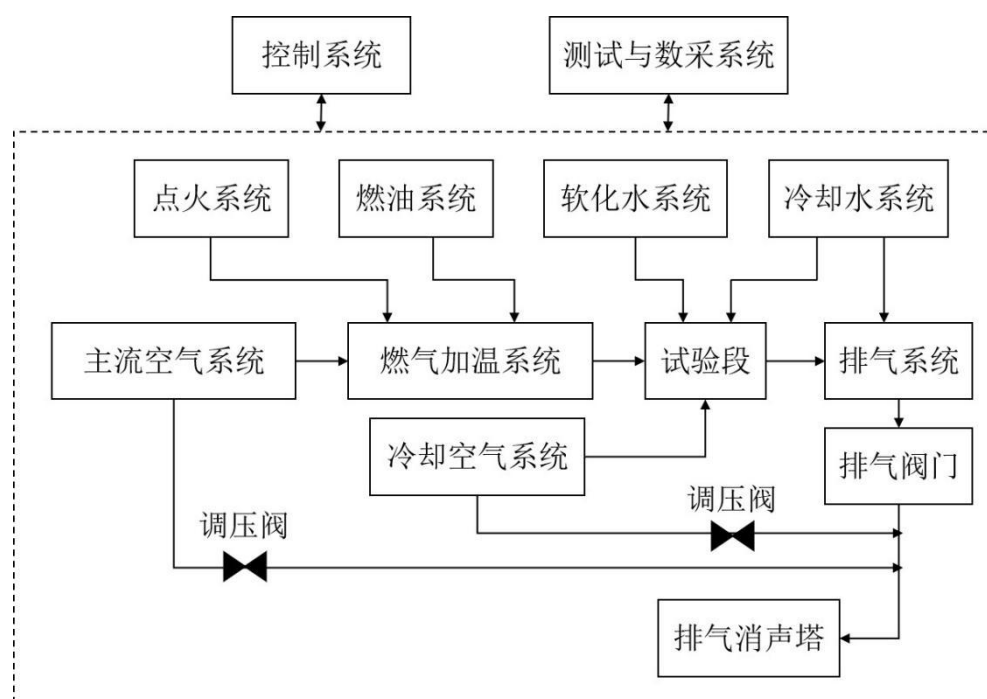


图2 热冲击试验设备系统图

8.2 主流空气进气系统

主流空气进气系统应满足以下要求：

- 主流空气进气系统由进气阀门、旁通调压阀门、流量测量装置、参数测量装置和管段等组成；
- 进气阀门、旁通调压阀门为连续可调节阀门，为试验提供设计的主流空气流量。

8.3 冷却空气进气系统

冷却空气进气系统应满足以下要求：

- 冷却空气系统由进气阀门、空气电加热器、旁通调压阀门、流量测量装置、参数测量装置和管段等组成；
- 进气阀门、旁通调压阀门为连续可调节阀门，为试验提供设计的冷却空气流量；
- 空气电加热器为试验提供设计的冷却空气温度。

8.4 燃气加温系统

燃气加温系统应满足以下要求：

- 燃气加温系统由燃烧室、参数测量装置、燃油系统、点火系统和管段等组成；
- 燃气加温系统加温主流空气，为试验提供设计的燃气温度；
- 燃油系统由开关阀、调节阀、旁通阀门、流量测量装置、参数测量装置和管段等组成，调节阀、旁通阀门为连续可调节阀门，为试验提供要求的燃油流量。

8.5 软化水系统

在燃烧室能保持最低稳定燃烧工况时，试验件壁面平均温度仍然不满足试验要求或进行加速试验的情况下可启动软化水系统。软化水系统应满足以下要求：

- 软化水系统由加压泵、过滤装置、软化装置、软化水箱、电磁阀和管段等组成；

- b) 固体杂质颗粒度不大于 $5\ \mu\text{m}$;
- c) 软化装置出水硬度不大于 $0.03\ \text{mmol/L}$ 。

8.6 冷却水系统

冷却水系统为试验段提供冷却水，冷却水系统应满足以下要求：

- a) 冷却水系统由加压泵、过滤装置、调节阀门、电磁阀和管段等组成；
- b) 调节阀门连续可调，保证被冷却位置温度在允许工作范围内。

8.7 排气系统

排气系统应满足以下要求：

- a) 排气系统由排气阀门、喷水冷却装置（可引自冷却水系统）、管段和排气消声塔等组成；
- b) 排气阀门为连续可调阀门，用于调节扇形叶栅试验段出口静压；
- c) 喷水冷却装置用于降低扇形叶栅试验段出口燃气温度；
- d) 排气管线采取隔热措施；
- e) 主流空气和冷却空气旁通连接到排气阀门后。

8.8 测试及数采系统

测试系统应满足以下要求：

- a) 测试系统由计算机、温度采集模块、压力采集模块、数据采集程序等组成；
- b) 测试系统具有可视和连续采集记录功能，采样频率不小于 $2\ \text{Hz}$ ；
- c) 用于测试燃气温度、压力的受感部满足测试系统要求及精度要求，在保证强度的前提下，受感部阻塞比不宜大于 5% ，并要求有良好的气动外形，并在使用参数范围内校准并提供校准结果；
- d) 原始数据记录中应包括试验名称、数据采集时间、所有试验参数及标准循环；
- e) 实时记录数据格式可选，试验历史数据可导出，便于数据处理。

8.9 控制系统

控制系统应满足以下要求：

- a) 控制系统包括泵控制、阀门控制、燃烧室点火控制、空气加热器控制、热冲击循环参数控制、应急控制等；
- b) 泵、阀、空气加热器等受控设备具有快速响应和反馈功能；
- c) 热冲击循环参数控制具备标准梯形循环时间历程设置功能；
- d) 应急控制应有报警监测功能；
- e) 当试验要求冷气温度随试验循环变化时，应配置冷气温度循环控制功能。

9 试验实施过程

9.1 试验流程

热冲击试验流程见图3。

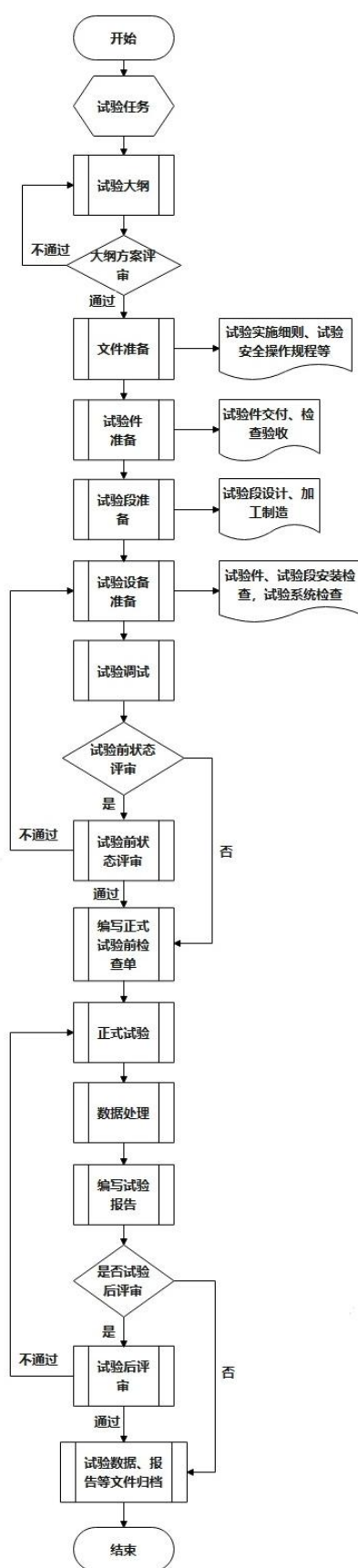


图3 试验流程

9.2 试验大纲

试验提出单位应根据研制要求，编制试验大纲。试验大纲应包括：

- a) 编制试验大纲的依据；
- b) 试验项目；
- c) 试验目的；
- d) 试验对象、试验数量；
- e) 试验设备、测试设备；
- f) 试验方法；
- g) 试验数据处理；
- h) 试验件检查要求；
- i) 试验完成形式；
- j) 试验进度；
- k) 质量保障；
- l) 保密安全。

9.3 文件准备

试验承担单位应按试验大纲要求编制试验实施细则、试验安全操作规程、试验应急预案等。

9.4 试验件准备

试验承担单位应对试验件进行如下检测，确定试验件状态。

- a) 试验件外观检查及记录；
- b) 试验件原始资料检查，包括检查单、试验件合格证或无损检查报告。

9.5 试验段准备

试验承担单位应完成试验段工装设计加工制造，在加工过程中进行关键尺寸检查，形成记录。

9.6 试验件、试验段安装检查

试验前应对试验件、试验段进行安装检查，满足以下要求：

- a) 试验件、试验段安装尺寸检查，是否满足图纸设计要求；
- b) 试验件测点连接检查，保证连接正确；
- c) 试验件、试验段安装密封检查。

9.7 试验系统检查

试验前应对各个试验台设备系统进行检查，保证管路密封良好，各个系统均满足试验要求且运转正常。

9.8 控制精度

主要参数控制精度应满足表 1 要求。

表 1 参数控制精度

参数名称	控制精度
燃气温度	±1.5%
冷气温度	±1%
叶片表面温度	±1.5%
燃气流量	±1%
冷气流量	±0.5%
燃油流量	±0.5%

9.9 试验状态调试

试验状态调试过程如下：

- a) 安装带有热电偶的调试叶片；
- b) 试验前，各岗位人员按照试验实施细则规定的检查内容进行检查，做好记录并签字；
- c) 启动冷却水系统，保证循环水流通顺畅，该步骤试验人员可以在现场检查；
- d) 启动空压机、进气系统、冷却空气系统，对进气管路和冷却空气管路进行吹扫；
- e) 试验人员调节主流空气压力及流量，使其到达满足点火状态要求；
- f) 燃烧室点火；
- g) 试验人员根据试验实施细则调节燃气、冷气参数，使叶片表面考核部位温度在最高工况和最低工况时均满足试验大纲要求，并记录满足试验大纲要求时的试验设备运行参数和各测点参数；
- h) 启动标准循环控制系统，通过重复 g) 到 h) 步骤使叶片温度变化规律满足试验大纲要求；
- i) 试验结束后，首先切断供油，使燃烧室熄火，之后按试验实施细则操作使试验停止；
- j) 对试验状态调试结果进行重复性验证，排除不确定因素。

9.10 正式试验

正式试验过程如下：

- a) 换装考核试验件；
- b) 启动试验台进行暖机；
- c) 暖机结束后启动标准循环控制系统，按照试验状态调试结果，进行正式试验，实时记录设备运行参数和各测点参数；
- d) 按照试验大纲要求在规定标准循环次数后进行试验件表面裂纹检查并记录；
- e) 按照试验大纲要求的完成试验形式完成热冲击试验。

9.11 试验保障

试验保障要求如下：

- a) 根据试验实际情况，存储足量燃油且符合燃油存储相关规定；
- b) 根据试验期间可能发生的燃料泄露、高温燃气泄露、冷却水泄露等情况制定应急预案；
- c) 根据保密相关规定落实保密相关措施；
- d) 制定安全操作规程，落实安全防护。

9.12 试验异常处理

当试验中出现异常情况时，应采取相应的处理：

- a) 试验过程中出现燃气泄露、漏油、漏水等情况，应暂停试验，排出故障后可继续试验；
- b) 试验过程中出现燃烧不稳定，为防止燃气超温烧蚀试验件，应中断试验，排出故障后可继续试

验；

- c) 试验件在拆卸检查后，发现初始裂纹，应根据试验目的判断是否终止试验。

10 试验数据处理

10.1 试验数据记录

在试验过程中，应做好监视试验参数的记录和测试系统的数集工作。试验原始数据记录应包括：

- 试验前调试结果及其原始记录；
- 正式试验过程中环境参数变化及关键参数变化手动记录；
- 正式试验过程中各参数原始数据的连续记录；
- 正式试验中的声像记录；
- 试验后叶片检查结果记录。

10.2 试验数据整理

试验数据整理要求如下：

- 通过对试验数据进行整理，验证试验状态参数和循环参数有效性，并为后续的试验评估提供数据支持；
- 实时记录的设备运行参数和各测点参数，留取其符合热冲击条件下标准循环数内的数据。

10.3 参数计算

算数平均值：

$$X_{AV} = \frac{\sum_{i=1}^j X_i}{j} \quad \dots\dots\dots (1)$$

燃气质量流量的相对误差：

$$\delta G_g = \frac{\Delta G_g}{G_g} = \sqrt{\left(\frac{1}{1+G_f/G_s}\right)^2 \left(\frac{\Delta G_s}{G_s}\right)^2 + \left(\frac{1}{1+G_s/G_f}\right)^2 \left(\frac{\Delta G_f}{G_f}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

考核试验件冷却空气流量与燃气比相对误差：

$$\delta \left(\frac{G_c}{G_g} \right) = \sqrt{\left(\frac{\Delta G_g}{G_g}\right)^2 + \left(\frac{\Delta G_c}{G_c}\right)^2} \sqrt{\left(\frac{1}{1+G_f/G_s}\right)^2 \left(\frac{\Delta G_s}{G_s}\right)^2 + \left(\frac{1}{1+G_s/G_f}\right)^2 \left(\frac{\Delta G_f}{G_f}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

燃气与冷气温比相对误差：

$$\delta \left(\frac{T_g}{T_c} \right) = \sqrt{\left(\frac{\Delta T_g}{T_g}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_c}{T_c}\right)^2} \sqrt{\left(\frac{1}{1+G_f/G_s}\right)^2 \left(\frac{\Delta G_s}{G_s}\right)^2 + \left(\frac{1}{1+G_s/G_f}\right)^2 \left(\frac{\Delta G_f}{G_f}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

膨胀比相对误差：

$$\delta \left(\frac{P_{g,in}^*}{P_{g,out}^*} \right) = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_{g,in}^*}{P_{g,in}^*}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_{g,out}^*}{P_{g,out}^*}\right)^2} \sqrt{\left(\frac{1}{1+G_f/G_s}\right)^2 \left(\frac{\Delta G_s}{G_s}\right)^2 + \left(\frac{1}{1+G_s/G_f}\right)^2 \left(\frac{\Delta G_f}{G_f}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

11 试验结果评定

11.1 试验件检查

完成试验后，对考核试验件进行检测。

11.2 检查部位

试验件主要检查部位为叶片的叶身、气膜孔、缘板及其与叶身相连处。

11.3 检查项目

检查项目一般有特征尺寸、重量的测量，表面无损检测、断口分析和金相检查等，检查结果用图表、文字描述，有检查报告的，将其作为附件写入试验报告。

11.4 试验结果及分析

检查结果一般包括以下内容：

- a) 初始裂纹标准循环数；
- b) 初始裂纹的位置、长度及深度等基本信息；
- c) 不同考核试验件试验对比结果；
- d) 完成目标循环数的叶片检查结果。

根据同类试验数据和本次叶片试验结果，评定本次试验是否达到试验目的。

12 试验报告编写

试验报告编写应包含以下内容：

- a) 试验名称；
 - b) 试验目的；
 - c) 试验件；
 - d) 试验系统；
 - e) 测试系统及测试方法；
 - f) 试验步骤与试验方法；
 - g) 试验数据处理方法；
 - h) 试验过程；
 - i) 试验结果分析与评定；
 - j) 试验误差分析；
 - k) 试验结论及建议。
-