|  |  |
| --- | --- |
| ICS  | 77.040.99  |
| CCS  | H20/29 |

|  |
| --- |
|  43 |

湖南省地方标准

DB 43/T XXXX—XXXX

热障涂层模拟服役环境动态试验验证方法

Dynamic Test Verification Method for Simulating Thermal Barrier Coating Service Environment‌‌

（本草案完成时间：2025年3月2日）

XXXX - XX - XX发布

XXXX - XX - XX实施

湖南省市场监督管理局  发布

目次

[前言 II](#_Toc187243987)

[1 范围 1](#_Toc187243988)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc187243989)

[3 术语和定义 1](#_Toc187243990)

[4 方法原理 2](#_Toc187244000)

[5 设备要求 2](#_Toc187244001)

[6 环境要求 3](#_Toc187244006)

[7 试验准备 3](#_Toc187244007)

[8 试验条件 4](#_Toc187244008)

[9 试验步骤 4](#_Toc187244009)

[10 数据处理 5](#_Toc187244010)

[11 试验记录 6](#_Toc187244014)

[12 档案管理 7](#_Toc187244014)

[13 参考文献 7](#_Toc187244014)

1. 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。

本文件由湖南省工业和信息化厅提出并归口。

本文件起草单位：湖南江冶涂层技术有限公司、湘潭大学。

本文件主要起草人：吴光辉、范伟、夏杰、朱旺、程鹏、章琳、庞忠。

热障涂层模拟服役环境动态试验验证方法

* 1. 范围

本文件规定了热障涂层模拟服役环境动态试验的设备要求、环境要求、试验准备、试验条件、试验步骤、数据处理和试验记录。

本文件所规定的试验方法适用于涡轮叶片热障涂层的检验。

* 1. 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。

ISO 21940机械振动-转子平衡（Mechanical vibration-Rotor balancing）

* 1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

* + 1.

热障涂层thermal barrier coatings

涂覆在高温合金基体表面，对基体材料起到隔热降温作用的涂层体系，一般包括耐高温陶瓷层、粘结层及高温合金基底。

〔来源：GJB 9916-2021，2.1〕

* + 1.

热冲击 thermal shock

因急剧加热或冷却，使物体在较短的时间内产生大量的热交换，温度发生剧烈的变化从而引起物体内产生热应力的现象。

〔来源：GJB 9916-2021，2.1〕

* + 1.

冲蚀 erosion

高速运动的颗粒反复碰撞热障涂层表面，造成涂层发生减薄、密实、脱落等失效的载荷形式。

〔来源：GJB 9916-2021，2.1〕

* + 1.

冲蚀磨损率 erosion rate

简称冲蚀率，冲蚀过程中涂层质量减少量与冲蚀粉末质量的比值。

〔来源：GJB 9916-2021，2.1〕

* 1. 方法原理

通过模拟航空发动机叶片高温、高转速服役环境，以航空煤油为燃料，氧气、压缩空气为助燃气体，对涂层进行抗高速旋转火焰热冲击、抗颗粒冲击等性能考核。对其失效过程进行分析，记录涂层出现剥落的时间、位置，分析不同温度冲击情况下热障涂层的失效模式与严重程度。

* 1. 设备要求
		1. 热障涂层模拟服役环境动态试验装置

热障涂层模拟服役环境动态试验装置，功能原理如图1所示，装置主要包括环境模拟燃气喷枪、试验操作平台防震系统、冷却与辅助系统、颗粒输送模块、实时监测模块、数据采集与控制系统、高速旋转转子系统。主要性能与参数应满足：

1. 燃料：航空煤油；
2. 火焰速度：喷枪出口≥1马赫；
3. 升温速率：应满足在30s~60s内使样品表面加热至1300℃，误差范围为±20℃；
4. 温度监测：采用热电偶，应实现热障涂层表面温度的检测，误差范围为±20℃；
5. 颗粒输送：冲蚀速度300 m/s~500 m/s，流量0.2 g/min~8 g/min可调；
6. 装载叶片数量：6片，可根据实际情况减少；
7. 轮盘+叶片旋转直径：300~400 mm；
8. 叶片旋转线速度：不超过400 m/s；
9. 叶片转速：指高速旋转电动机旋转带动叶片旋转，不超过20000RPM；



图1 热障涂层模拟服役环境动态试验装置示意图

* + 1. 分析天平

用于冲蚀前后涡轮叶片称重，精度为0.0001g。

* + 1. 超声波清洗器、烘干箱

可实现被测叶片的超声波清洗和烘干处理。

* + 1. 图像记录设备

图像记录设备应采用2000万像素以上高清相机。

* 1. 环境要求

试验时外部环境和操作室仪器设备环境应维持在：温度5℃~40℃，相对湿度不大于90%。

* 1. 试验准备

试验准备包括：

1. 被测叶片： 常规涡轮叶片，含榫头。涡轮叶片形状和尺寸由样品性质决定；
2. 表面清洁：利用水、酒精以及超声波清洗器对待测叶片进行清洗，后放入烘干箱干燥，随后拍照，记录待测叶片形貌与局部关键特征；
3. 热冲蚀颗粒准备：选择Al2O3颗粒，粒径在10μm~600μm范围内选择某一固定值，试验前将冲蚀颗粒放在60~80℃烘干箱干燥2小时以上备用；
4. 设备调试：按照设备说明书对设备功能、参数、安全状态进行检查和调试，确保设备可以正常运行；
5. 测温参数设置：在被测叶片冲击位置安装热电偶进行测试，通过信号数据传输得到实时温度数据。同时调节氧气、煤油流量、旋转转速来调节叶片表面温度，误差不超过±20℃。记录相关参数对应温度；
6. 校准要求：设备内控制或监测试验参数的仪器和试验设备应检定合格(校准)，并在有效期内。其最大误差不应超过测量值允差的1/3（来源：GJB 9916-2021，3.3）；
	1. 试验条件

试验条件包括：

1. 样品表面温度：最高温度可达1300℃，依服役环境或技术协议而定，无特定要求可采用1100℃，误差范围为±20℃；
2. 转速条件：依服役环境或技术协议而定，无特定要求可采用5000RPM；
3. 热冲击时间：试验为循环试验，一个循环包括升温-保温-降温三个阶段，升温，保温和降温时间由样品需求而定。不做要求时，可采用1min升高到1100℃,在1100℃保温4min，然后再5 min冷却到室温，一次热冲击循环时间为10min，循环次数依服役环境或技术协议而定；
4. 热冲蚀颗粒直径：依服役环境或技术协议而定，无特定要求可采用50μm，误差±10μm；
5. 热冲蚀颗粒流量：依服役环境或技术协议而定，无特定要求可采用5g/min；
6. 热冲蚀时间：采用阶段性试验方式，即将待测叶片在协议温度、速度、流量等条件下冲蚀5min为一个阶段，暂停冷却至室温称重、拍照分析；然后再继续下一阶段试验、称重与分析，如此递进进行，直至达到试验终止条件。间隔时间可设置为30 min，或依据技术协议确定，在涂层出现明显剥落时可缩短冲蚀时间至2min，以保证能做出冲蚀率随冲蚀时间变化的曲线为准。
	1. 试验步骤

9.1 热冲击

9.1.1待测叶片安装

将准备好的待测叶片安装在热障涂层模拟服役环境动态试验装置的涡轮盘上；

9.1.2 校准动平衡

根据转子结构特点和平衡要求，选择合适的平衡方法、试验装置和校正方法，使动平衡的精度应不小于ISO21940规定的G1标准。

9.1.3试验开始

移动喷枪至蜗壳端盖指定位置，进行热冲击试验，达到4min保温时间后移开喷枪，使样品自然冷却，达到冷却时间时完成一次热冲击试验。如此循环，整个过程中注意记录循环次数，每10次循环注意观察样品表面形貌变化，并通过相机实时拍照记录，如出现剥落，应缩短拍照间隔次数，可每5个循环拍照记录一次。

9.1.5试验终止

当待测叶片达到破坏检测阈值时终止试验。

9.1.6待测叶片后处理

对最终形貌拍照，可用扫描电镜对失效形式与机理进行分析。

9.2热冲蚀

在本文件9.1热冲击的基础上加入如下步骤：在本文件9.1.1安装之前需将待测叶片称重并记录，同时在本文件9.1.4冲击过程中需加入指定规格的冲蚀颗粒并设置冲蚀颗粒流量。在阶段试验结束后，需对待测叶片进行清洗，烘干，称重，记录，并拍照，重复以上冲蚀步骤，直到达到局部完全剥落。

* 1. 数据处理
		1. 冲蚀率计算

热冲蚀试验结束后，冲蚀率可按下式进行计算：



式中：

Rerosion——冲蚀率；

M0——待测叶片原始质量，g；

M——阶段测试后叶片质量，g；

q——冲蚀粉末流量，g/min；

t——冲蚀时间，min。

* + 1. 数据分析

以冲蚀率为纵坐标、冲蚀时间为横坐标，建立冲蚀率与时间的演变曲线，分析斜率突变位置。可采用扫描电镜等微观结构表征方法分析涂层的破坏形式、机制与关键影响因素。

* + 1. 外观观察

10.3.1热冲击

采用目视、拍照的方式对样品宏观剥落情况进行分析，记录剥落时的试验时间与条件；

10.3.2 热冲蚀

每次到达间隔时间暂停试验之后，使用相机对热障涂层的表面进行拍摄，尤其是涂层脱落或者有脱落趋势的区域，要着重拍照记录。

* + 1. 微观观察

可采用扫描电镜、能谱仪对热障涂层的微观结构及剥落特征进行观察。

* 1. 试验记录

试验报告一般包括下列内容：

1. 待测叶片参数如待测叶片种类、工艺、尺寸；
2. 试验仪器，名称、型号、功能等；
3. 试验参数，如试验温度、保温时间、冷却时间、氧气流量、旋转转速、冲蚀颗粒类型、粒径、流量等；
4. 试验数据如待测叶片剥落面积、循环次数、冲蚀率、待测叶片不同循环次数下的形貌照片；
5. 试验人、试验日期、备注。

12 档案管理

试验原始数据记录、试验过程图片资料、试验报告保存时间宜为5年。

参考文献

〔1〕GJB 9916-2021 航空发动机热障涂层试验验证方法

