

ICS 77.040

CCS H 77

YS

中华人民共和国有色金属行业标准

YS/T XXXX—202X

航空发动机封严涂层材料
可磨耗性试验方法

Test Method for Abrasion Resistance of Sealer Coatings for Aircraft
Engines
(草案)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中华人民共和国工业和信息化部 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。

本文件规定了航空发动机封严涂层材料可磨耗性能评价测试的试验设备、取样方法、试验方法和结果评定等。

本文件适用于航空发动机全部封严涂层材料可磨耗性能的试验、测定、检验和评定等。

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。

本文件由全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC243）提出并归口。

本文件负责起草单位：北矿新材科技有限公司。

本文件主要起草人：xxx、xxx、xxx、xxx、xxx、xxx、xxx、xxx、xxx

航空发动机封严涂层材料可磨耗性试验方法

1 范围

本标准规定了航空发动机封严涂层材料可磨耗性能评价测试的试验设备、取样方法、试验方法和结果评定等。

本标准适用航空发动机全部封严涂层可磨耗性能的试验、测定、检验和评定等。

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 1214.3 游标类卡尺 高度游标卡尺

GB/T 1216 外径千分尺

GB/T 26497 电子天平

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1 可磨耗性

在高温高速条件下封严涂层与叶片对磨刮削，封严涂层发生主动磨耗而不磨损叶片的能力。

3.2 叶片高度磨损比（IDR）

刮削前后叶片高度变化与总进给深度的比值。

3.3 涂层刮痕表面加权粗糙度（Rc）

根据测得的 Ra、Rz、Rmax 常规粗糙度数据，通过经验公式计算所得的、用于评价涂层磨痕表面状态的数值。

4 原理

本试验方法的原理是，通过高温超高速可磨耗试验机模拟发动机转子与封严涂层在高温高速条件下的对磨刮削工况环境，控制温度、转子叶尖线速度和转子向封严涂层进给刮削的速率等试验参数进行高温高速对磨刮削试验，对试验后封严涂层刮痕形貌、叶片高度磨损比和刮痕的加权粗糙度进行测量表征，以评价封严涂层的可磨耗性，高温高速刮削试验原理如图 1 所示。

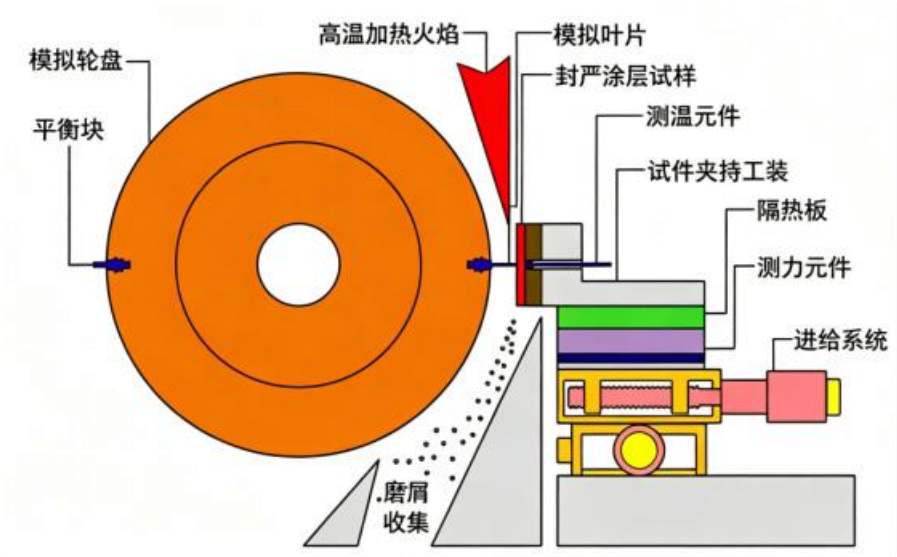


图1 高温高速刮削试验原理图

5 一般要求

5.1 试验目的

在模拟航空发动机高温高速条件下进行封严涂层可磨耗性能考核试验，针对不同的线速度、温度、进给速率、进给深度等进行刮磨试验，对试验后的叶片、涂层磨损现象进行评估，获取封严涂层可磨耗性能数据以及磨损情况，支撑封严涂层的设计与制备。

5.2 试验任务书

试验提出单位提供试验任务书，任务书的内容一般包括：

- a) 试验范围；
- b) 试验目的；
- c) 试验件；
- d) 试验内容和技术要求；
- e) 责任说明
- f) 试验进度
- g) 试验完成形式

5.3 试验大纲

承担试验的单位根据试验任务书编制试验大纲，试验大纲的内容一般包括：

- a) 试验任务来源；
- b) 试验目的；
- c) 试验件；
- d) 试验设备；
- e) 试验方法

- f) 试验技术要求
- g) 测试方案
- h) 试验数据处理原则和方法
- i) 试验完成形式
- j) 试验进度

6 试验件

6.1 涂层试样

6.1.1 基体材料

基体材料原则上应与实际零件基体材料一致，特殊情况下可选取其他材料或发动机真实外环，所选材料在测试温度下不得发生变形。

6.1.2 涂层厚度

涂层厚度原则上应与实际零件一致，若无特殊要求，推荐在2.0~2.5mm间，涂层厚度不得小于1.5mm，且厚度均匀。

6.1.3 涂层表面粗糙度

用于试验的涂层试样表面粗糙度值应小于 $3.2\mu\text{m}$ 。

6.1.4 涂层试样规格

当在高温超高速可磨耗试验机上进行试验时，所用涂层试样规格见附录A。采用其它试验设备时，试样规格应符合相关要求。

6.1.5 涂层试样清洁与存放

涂层试样表面应清洁、无污染物，可用压缩空气进行清理。清理后的样品应保存在干燥的试样袋或者盒子中待用。

6.2 模拟叶片试样

6.2.1 叶片材料

叶片材料应与实际零件保持一致，包括材料的牌号、热处理状态及加工状态等，特殊情况下可以选择其他材质的叶片材料。

6.2.2 叶尖尺寸

模拟叶片叶尖尺寸对试验结果有重要影响。应根据实际叶片叶尖的厚度选择模拟叶片叶尖的厚度，压气机叶片厚度推荐选择0.7mm，涡轮叶片厚度推荐选择2.0mm；模拟叶片叶尖高度应 $\geq 1.5\text{mm}$ ，且厚度均匀。

6.2.3 模拟叶片试样规格

在高温超高速可磨耗试验机上进行试验时，所用模拟叶片试样规格见附录B。采用其它试验设备时，试样规格应符合相关要求。

6.2.4 模拟叶片清洁与存放

模拟叶片试样表面应清洁、无污染物。将制备好的叶片试样利用丙酮溶液超声波振动清除表面污垢和油渍，清理后的样品应保存在干燥的试样袋或者盒子中待用。

6.2.5 模拟叶片安全性检测

加持在试验机上的模拟叶片试样必须要进行如下检测：①进行荧光检测；②进行超声波检测。在确保叶片试样经两次检测合格且无内部和外部缺陷损伤后，方可进行下一步操作。

6.3 平衡配重

为了保证试验机轮盘在加速及高速转动过程中的稳定安全，需要在模拟叶片对应位置装卡平衡配重。配重材料应与模拟叶片材料保持一致，平衡配重尺寸规格见附录C。

7 试验设备

7.1 高温高速可磨耗试验机

选用可在实验室中模拟出航空发动机转子叶片与封严涂层的高温高速碰磨刮削工况的高温高速可磨耗试验机，该设备用于高温高速刮削试验。该设备的控制精度要求应达到如下条件：

- a) 控温精度： $\pm 30^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 轮盘转速控制精度： $\pm 10\text{rpm}$ ；
- c) 试验台进给速率控制精度： $\pm 0.2\mu\text{m/s}$ ；
- d) 最高加热温度： 1300°C ；
- e) 最高工作线速度： 480m/s ；
- f) 试验件进给速率： $2\text{--}2000\mu\text{m/s}$ 。

7.2 立体显微镜

用于封严涂层及模拟叶片试样的观察与拍照，最大视场直径不小于 100mm 。

7.3 三维非接触式光学表面轮廓仪

用于涂层刮痕表面粗糙度的测量。

- a) 垂直分辨率： $\leq 10\text{nm}$ ；
- b) 水平光学分辨率： $\leq 400\text{nm}$ ；
- c) 扫描高度： $\geq 22\text{mm}$ ；
- d) 扫描面积： $\geq 120\text{mm} \times 30\text{mm}$ 。

7.4 电子天平

用于样品重量的测量，应满足 GB/T26497 的规定，精度为 0.001g 。

7.5 游标卡尺

用于涂层刮痕长度和叶片高度的测量，应满足 GB/T 1214.3 的规定，精度为 0.02mm 。

7.6 外径千分尺

用于涂层厚度的测量，应满足 GB/T1216 的规定，精度为 0.01mm。

8 试验项目与试验程序

8.1 试验项目

航空发动机封严涂层材料可磨耗性试验项目包括如下内容：

- a) 封严涂层可磨耗性预试验；
- b) 封严涂层可磨耗性试验。

8.2 试验程序

8.2.1 试验流程

航空发动机封严涂层材料可磨耗性试验的流程和工作内容详见图 2。

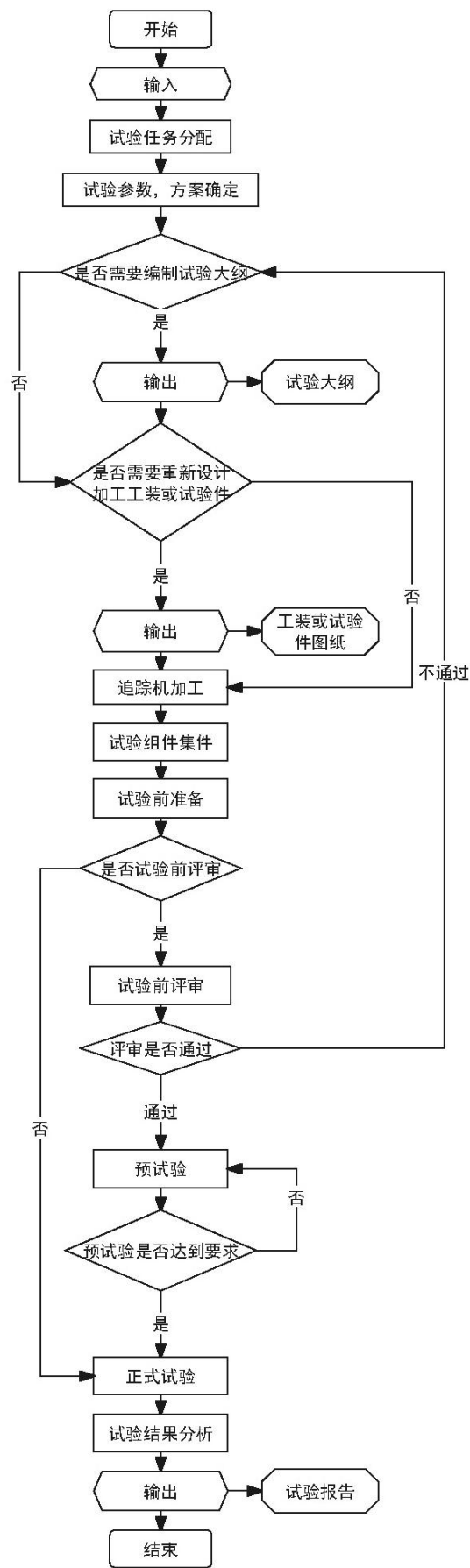


图2 航空发动机封严涂层材料可磨耗性试验的流程和工作内容

8.2.2 试验准备

8.2.2.1 文件准备

试验文件根据试验任务书编写，包括试验大纲等。所有文件按文件签署制度要求进行签署，主要包括以下内容：

- a) 试验任务书应符合 5.2 的要求；
- b) 试验大纲应符合 5.3 的要求。

8.2.2.2 试验件准备

对涂层试样、模拟叶片试样及配重进行称重，对模拟叶片叶尖的高度进行测量并记录。

8.2.2.3 动平衡准备

采用打磨等方式对模拟叶片试样的重量进行调整，使其与平衡配重的重量差 $\leq 0.2\text{g}$ ，打磨过程不得损伤叶片叶尖，对调整后的模拟叶片进行称重并记录。

8.2.2.4 设备准备

对可磨耗试验机各部位进行检查，确认试验机状态正常，检查各紧固螺丝无松动和短缺，检查管路有无泄露现象，检查各仪表传感器工作状态正常。

8.2.2.5 试验件安装准备

将涂层试样安装在夹持工装中、模拟叶片和平衡配重安装在轮盘上，叶片叶尖应与涂层表面平行，试样应安装牢固，保证进给平台上的涂层试样与轮盘之间有足够的进给空间，防止试验过程中有意外的碰撞。

8.2.3 预试验

预试验是对可磨耗试验机进行整体调试，试验机各系统调试均需正常才可进行正式试验。

在预试验时，应检查试验机转速和火焰的燃气流量是否稳定，轮盘转速、转子动平衡及温度波动范围是否满足试验大纲规定的精度要求。在运行设定好的程序时检查轮盘转速是否正常、火焰调节是否正常、温度监测是否正常，以及进给平台是否正常。在运行设定好的程序时检查进给平台进给速率和深度是否正常；在运行设定好的程序时检查防护罩、监控摄像系统、气体浓度检测装置是否全部正常工作。如果以上任一调试不到位，需要重新调试；如果调试到位，可进行下一步。

通过控制面板，对轮盘转速、叶尖线速度、火焰加热温度、进给速率和进给深度等参数进行设置，具体设置数值参考以上设备调试结果，检查程序设置是否合理。检查方法是通过预运行该程序，观察获得的温度曲线是否满足对磨刮削试验要求。如果不满足，需要重新设置程序。

8.2.4 试验

对可磨耗试验机试验系统进行预试验合格后，进入正式试验：

- 1.在控制面板程序中运行程序开始试验。
- 2.试验机启动，在轮盘达到目标转速后，火焰喷枪对试验件表面进行加热，同时红外测温仪对试验件表面刮磨区域温度进行实时监测，在温度达到设定值并稳定5-10秒后，进给平台开始按设定的速率进给与叶片进行对磨刮削，达到目标进给深度后按照试验设计停留相应时长，若无停留要求则立即后移停止对磨刮削。
- 3.进给结束后，喷枪同时后移进入冷却阶段，通过冷却气流量调节控制冷却速率，直至试样温度达到室温，冷却阶段持续15-20分钟。试验中按要求对涂层试验件外观进行录像，对温度曲线及试验参数进行记录。
4. 试验过程中，检查红外仪和热电偶测温是否正常、温度曲线是否正常、进给系统是否正常。如果不正常，需要暂停试验进行软硬件微调并重新试验。
5. 试验过程中，需要对试验对象信息（材料名称、规格、状态等）、试验信息（试验日期、试验人员、试验环境温湿度、试验参数结果等）信息进行真实记录，针对测试数据的单值需要根据相应测试方法的要求对数据进行统计处理，试验记录项目应包括上述材料背景信息、试验信息，试验记录格式须符合相关格式要求。

8.2.5 结果保存

对试验后的涂层试样和叶片试样应清晰标识，包括：涂层及叶片试样名称和编号，试验温度、线速度、进给速率和进给深度。涂层与叶片试样应独立封装，并避免原始摩擦面受到破坏。推荐使用带封头的试样袋或者盒子，长期保存时，应存放在干燥器皿中。

9 试验结果测量表征

9.1 刮痕形貌表征

采用立体显微镜对可磨耗试验后的涂层试样和叶片试样分别进行拍照。涂层试样采取俯视角度拍摄，要求视野应包含涂层整体；叶片试样采取俯视和侧视两个角度拍摄，要求视野应包含叶片叶尖整体。拍摄时要求聚焦清晰、照片像素不低于 150dpi，照片中需添加标尺，典型的照片参见附录 D。

9.2 叶片高度磨损比测算（IDR）

9.2.1 涂层刮痕深度的测算

由于刮痕表面形貌不规则，采用直接测量的方式无法获得准确的刮痕深度数据。本标准根据转子半径与刮痕长度的几何关系，通过计算得出更为准确的刮痕深度数据，刮痕深度与刮痕长度的几何关系如图 3 所示。

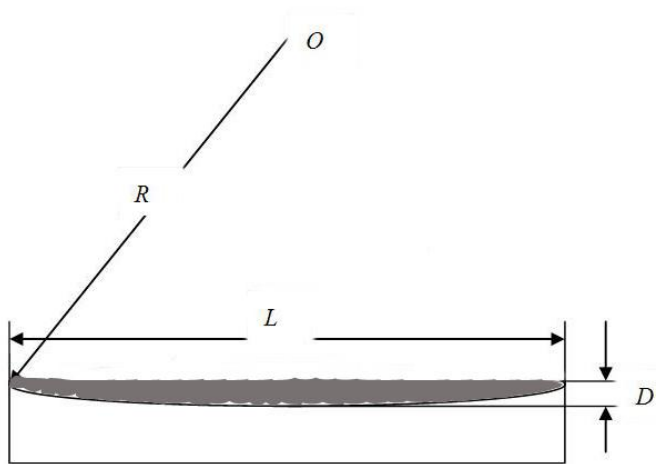


图 3

涂层刮痕深度的计算公式：

$$D = R - \sqrt{R^2 - \frac{L^2}{4}}$$

其中：

D——涂层刮痕深度计算值；

R——轮盘半径+叶片高度；

L——涂层刮痕长度。

采用游标卡尺对涂层刮痕的长度进行测量并记录。

9.2.2 IDR

本标准将刮削试验前后的叶片高度变化与总进给深度的比值定义为叶片高度磨损比（IDR），通过下式计算：

$$IDR = \begin{cases} \frac{\Delta h}{D} & (\Delta h < 0) \\ \frac{\Delta h}{D + \Delta h} & (\Delta h > 0) \end{cases}$$

Δh ——叶片高度变化值， Δh =刮削前高度-刮削后高度；

当刮削试验后，叶片高度增加（ $\Delta h < 0$ ）时，即有涂层材料向叶尖的粘附造成叶片高度增加，总进给深度=刮痕深度的计算值；

当刮削试验后，叶片高度减小（ $\Delta h > 0$ ）时，总进给深度=刮痕深度的计算值+叶片高度变化值，即总的进给深度就是叶尖磨损的深度与涂层被刮削的深度之和。

采用游标卡尺对模拟叶片高度进行测量并记录。

9.3 涂层刮痕表面加权粗糙度测算

采用三维非接触式光学表面轮廓仪对可磨耗试验后涂层试样的刮削表面粗糙度进行测量并记录，计算公式如下：

$$R_c = 9.2R_a + 1.3R_z + R_{max}$$

Rc——封严涂层刮痕表面的加权粗糙度；

Ra——从中线起的粗糙度轮廓偏差的等差中项；

Rz——由 5 个连续相等的切割长度组成横向长度所得到的，从最大峰到凹处之间高度差异的平均值；

Rmax——最大峰到凹处，且大于横向长度的高度。

10 结果评定

10.1 刮痕形貌

涂层及模拟叶片外观形貌是评价涂层可磨耗性能的重要依据之一。具有良好可磨耗性的涂层，试验后应无大面积剥落及掉块现象，刮痕轮廓规则无锯齿状边缘，无局部过热烧蚀痕迹；模拟叶片叶尖轮廓与试验前相当，无锯齿状磨损、无局部过热烧蚀痕迹、无明显涂层粘附。

10.2 叶片高度磨损比（IDR）

叶片高度磨损比 IDR 是评价涂层可磨耗性能的另一重要依据。IDR 的绝对值越小，可磨耗性能就越好。当以叶片磨损为主时，IDR 为正值，当出现涂层材料黏附叶片时，IDR 为负值。一般情况下，IDR 绝对值小于 10%可磨耗性为优，10~20%可磨耗性为良，20%~30%可磨耗性为可接受。

10.3 涂层刮痕表面加权粗糙度

涂层刮痕表面加权粗糙度与涂层可磨耗性能相关。一般情况下，刮削后涂层刮痕表面加权粗糙度值越小涂层可磨耗性能越好。

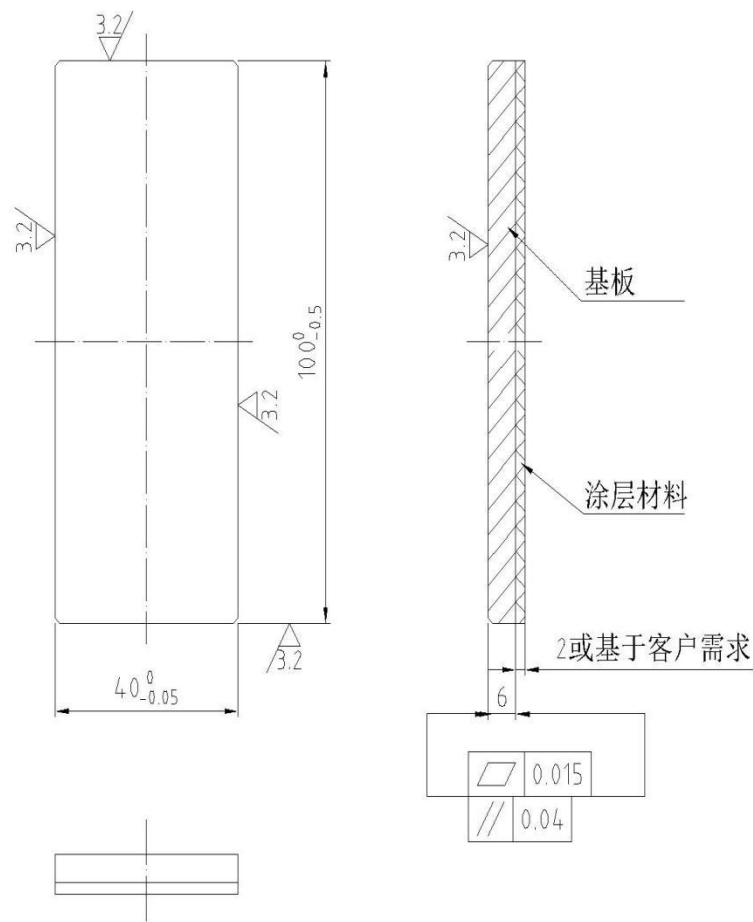
11 试验报告

在涂层可磨耗性能的试验报告中，试验条件应清晰注明，并包括以下内容：

- 本标准的编号；
- 基体材料、叶片材料和涂层材料的牌号或名称；
- 试验机型号；
- 试验条件，包括温度、进给速度、叶尖线速度、进给深度等；
- 可磨耗性能的评价结果；
- 试验日期。

附录 A
(资料性附录)
“高温超高速可磨损试验机” 涂层试样规格

未注倒角1×45°，其余 $\sqrt[12.5]{}$

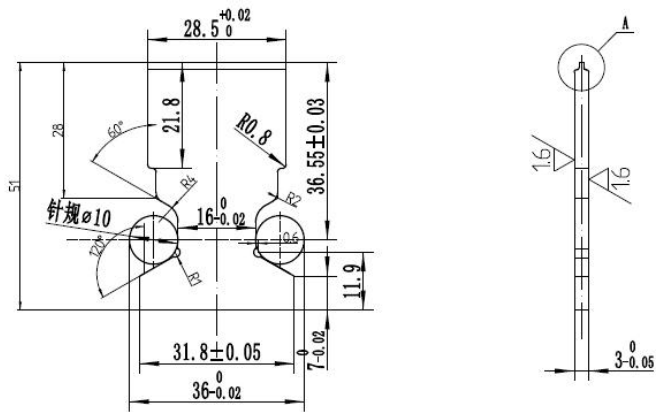


附 录 B

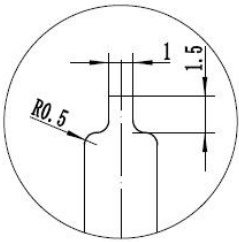
(资料性附录)

“高温超高速可磨耗试验机”模拟叶片试样规格

未注倒角0.5*45°，其余



A
5:1

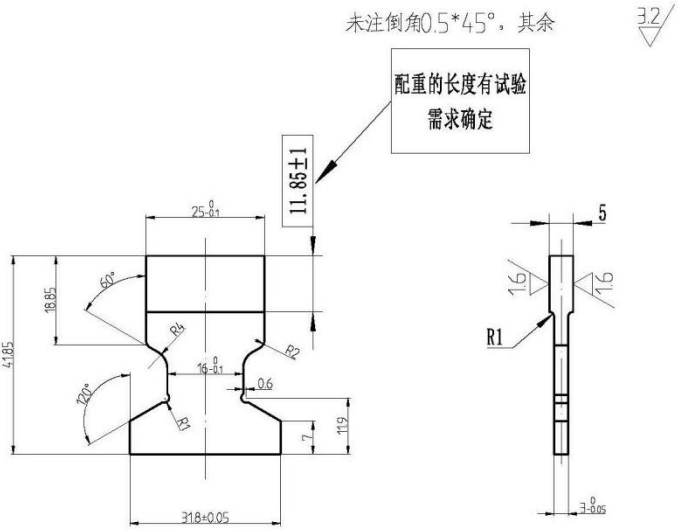


- 技术要求：
- 1. 固溶处理。
 - 2. 锐角倒钝，去净毛刺。

附录 C

(资料性附录)

“高温超高速可磨损试验机”平衡配重试样规格

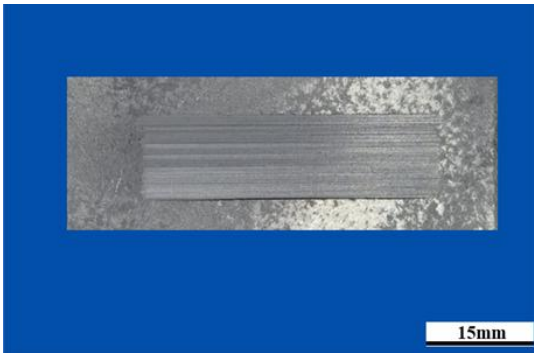


- 技术要求：
1. 固溶处理。
 2. 锐角倒钝，去净毛刺。

附 录 D

(规范性附录)

“高温超高速可磨耗试验机” 涂层试样照片



“高温超高速可磨耗试验机” 模拟叶片试样照片

