

航空发动机封严涂层材料可磨耗性评定方法

编制说明

(工作组讨论稿)

《航空发动机封严涂层材料可磨耗性评定方法》标准编制说明

一、工作简况

1.1 任务来源

根据工业和信息化部办公厅关于印发“2026 年第二批行业标准制修订和外文版项目计划的通知”（工信厅科函〔2026〕192 号）的文件精神，行业标准《航空发动机封严涂层材料可磨耗性试验方法》由全国有色金属标准化技术委员会粉末冶金分技术委员会提出并归口，项目计划编号：2026-0234T-YS，北矿新材科技有限公司牵头起草，该标准计划完成年限 2026 年。

1.2 本标准所涉及的产品简况

封严涂层用于减少转子与静子的径向间隙，对提高航空发动机效率、降低油耗、延长服役寿命具有重要意义。封严涂层在高温高速工况下的可磨耗性是封严涂层的核心服役性能之一，它是在极端工况下航空发动机中的气路密封配副的一种综合性能的集中表现。目前，对于封严涂层最重要的考核指标“可磨耗性”的评价已成为国际行业内共识。

国外对封严涂层可磨耗性能的研究从 20 世纪 60 年代就已开始，其发展先后经历了单一参量的标准研究，模拟航空发动机单一工况条件下标准研究，模拟航空发动机多参量工况复合条件下标准研究。现阶段，国外已形成一套相对科学的行业标准，并已经指导众多发动机封严涂层材料的研发。西方知名航空发动机制造公司，如罗罗、普惠、GE 等公司已经将其列为其发动机用封严涂层材料的重要考核指标，行业内知名封严涂层材料研制龙头企业瑞士 Metco 公司也在其产品手册和介绍中明确将可磨耗性这一关键指标作为该材料的最重要考核指标，并建立相关评价技术与标准。NASA 也建立了相关的评价设备并在其部分研究报告中提及封严涂层的可磨耗性及其测试标准。但由于该行业的特殊性，国外对于该材料的可磨耗性考核标准属于关键技术且不予公开，该标准对国内实施严密封锁。

国内对于航空发动机封严涂层材料可磨耗性无相关的国家或行业标准。对于封严涂层可磨耗性试验方法有多种，但评价效果和具体测试手段都不同，且停留在企业标准等层面，在封严涂层的研制开发方面带来了诸多不便。其中硬度法、划痕法、划痕硬度法、滑动磨损法、车削法、冲击刮削法、单摆冲击划痕法方法差异大，考核参量也各不相同，并且其因为无法模拟真实航空发动机工况，其评价方法的科学性较弱，国内的发动机研制设计单位对其认可度不高；模拟台架试验法最接近真空工况，但考核周期长、成本高；

高温超高速可磨耗试验法，目前已经得到国内航空发动机研制单位广泛认可，亟需形成行业

标准以规范可磨耗性能的评测，指导发动机关键涂层材料的研制和供应。该标准对推动我国航空发动机行业的快速高质量发展具有重要的意义。

1.3 主要参加单位和工作组成员及其工作

本文件起草单位有：北矿新材科技有限公司，中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司，中国航空发动机集团有限公司沈阳发动机研究所，中国燃气涡轮研究院，浙江海骆航空科技有限公司。

北矿新材科技有限公司负责调研国内外航空发动机封严涂层材料可磨耗性试验方法；组织开展封严涂层材料可磨耗性能测试，完成试验样品测试结果的采集与分析处理；承担标准文本、试验报告和编制说明的起草工作，汇总各单位意见，完成标准文本修改完善。中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司、中国航空发动机集团有限公司沈阳发动机研究所、中国燃气涡轮研究院负责结合各自产品实际服役工况，提出试验参数优化建议；提供试验试样；参与标准研讨，对标准文本提出修改意见。浙江海骆航空科技有限公司负责开展试验结果可靠性验证工作；参与标准研讨，对标准文本提出修改意见。

北矿新材科技有限公司及其前身历年来承担国家科研项目近 200 项，曾获国家科技进步奖、全国科学大会奖、国家发明奖、部级科技奖等 65 项，获国家、有色协会及北京市重点新产品奖 22 项，拥有国家发明专利 75 项。

自七十年代以来，北矿新材长期从事用于先进航空发动机等高精尖装备的特种涂层材料的研究开发及生产工作，是国内最早开展封严涂层材料和涂层研制、生产和应用推广的单位。其在航空发动机封严涂层材料可磨耗性能领域的研究十分深入，在封严涂层材料与涂层核心技术方面先后获得国家及省部级等奖项 20 余项，已负责承接了大量的试验、科研任务，对该设备的使用积累了大量的经验。先后承担了大飞机专项、LJ 专项、国资委专项等一系列科研课题。

本文件主要起草人有：

1.4 主要工作过程

北矿新材科技有限公司在接到该标准制订任务后，立即组织骨干人员成立了标准编制组，主要工作过程经历以下阶段：

(1) 2025 年 1 月-2025 年 3 月成立项目课题组，开展调研、查新工作，深入了解和掌握国内外涉及封严涂层测试相关生产和应用企业内部形成的航空发动机封严涂层材料可磨耗性试验方法。

(2) 2025 年 4 月-2025 年 8 月根据调研情况，组织起草航空发动机封严涂层材料可磨耗性试验方法行业标准初稿，并在本单位内部组织有关技术专家和质量管理人员进行讨论，并形成航空

发动机封严涂层材料可磨耗性试验方法行业标准征求意见稿。

(3) 2025 年 9 月-2025 年 12 月将航空发动机封严涂层材料可磨耗性试验方法行业标准征求意见稿发至国内各相关行业生产和使用单位，征集各单位对本标准的修改意见，并根据修改意见组织修改，形成航空发动机封严涂层材料可磨耗性试验方法行业标准预审稿。

(4) 2026 年 1 月-2026 年 3 月将航空发动机封严涂层材料可磨耗性试验方法行业标准预审稿发至国内各相关行业生产、使用单位，征集各单位对本标准的修改意见，并根据修改意见组织修改，形成航空发动机封严涂层材料可磨耗性试验方法行业标准送审稿。

(5) 2026 年 4 月-2026 年 6 月在全国有色标委会的组织下，组织国内各相关行业生产、使用单位技术专家就航空发动机封严涂层材料可磨耗性试验方法行业标准送审稿进行讨论，并根据讨论结果对标准进行修改，形成最终送审稿上报全国有色标委会秘书处。

二、标准编制原则

2.1 符合性

本文件严格按照 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》的规定进行起草。

2.2 适用性

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样品、试验设备、试验流程、试验数据处理、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。

2.3 先进性

北矿新材料科技有限公司研制的 BGRIMM-ATR 型高温超高速磨耗试验机，已负责承接了大量的试验、科研任务，对该设备的使用积累了大量的经验。先后承担了大飞机专项、两机专项、国资委专项等一系列科研课题。先后为中国航发黎明发动机厂、中国航发沈阳发动机研究所、中国航发四川燃气涡轮研究院、中国航发北京航空材料研究院、中国航天科技集团一院、西安交通大学、南京航空航天大学、湘潭大学等一系列科研院所及高校进行了可磨耗性试验及研究。以上试验均得到了用户较高的评价。并形成相关企业标准《可磨耗封严涂层可磨耗性能检测评价标准》。在封严涂层评价领域获得过有色金属行业一等奖和国防工业一等奖。本项目的完成可使得更多以往需要上机考核的材料无需经历漫长的等待期，通过可磨耗试验-性能评价-工艺优化的流程，大大节约了国产化涂层的研制时间。该项目的顺利实施，可使我国在封严涂层领域的技术水平提升到

一个新台阶，逐步缩小与国外的差距甚至达到国际领先水平。

三、确定标准主要内容的依据

本文件是首次制定，并且是在充分调研了国内外对封严涂层可磨耗性能的评价方法研究相关标准、文献的基础上，结合国内多家发动机研制单位的经验、意见完成的。

3.1 分析方法概述

本标准通过采用高温超高速可磨耗试验机，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。

3.2 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。

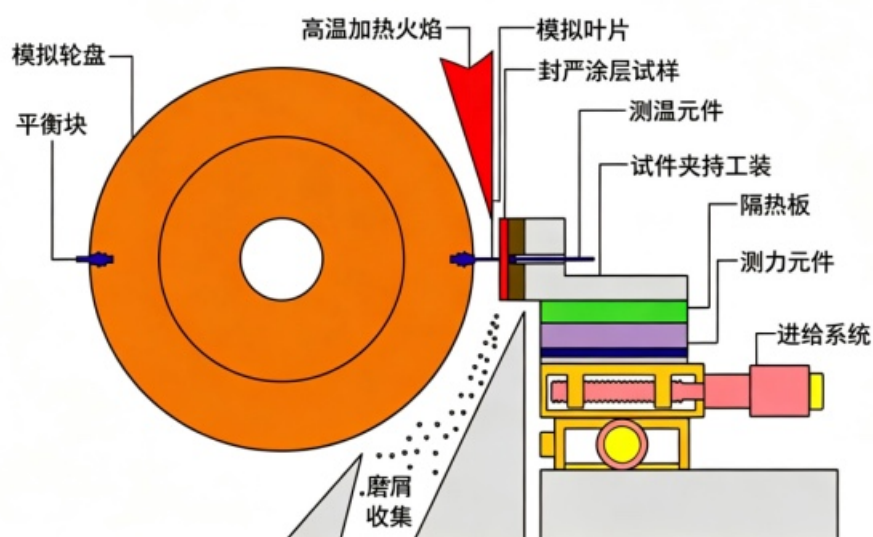


图1 高温高速刮削试验原理图

3.3 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。

3.4 试验程序

3.4.1 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。

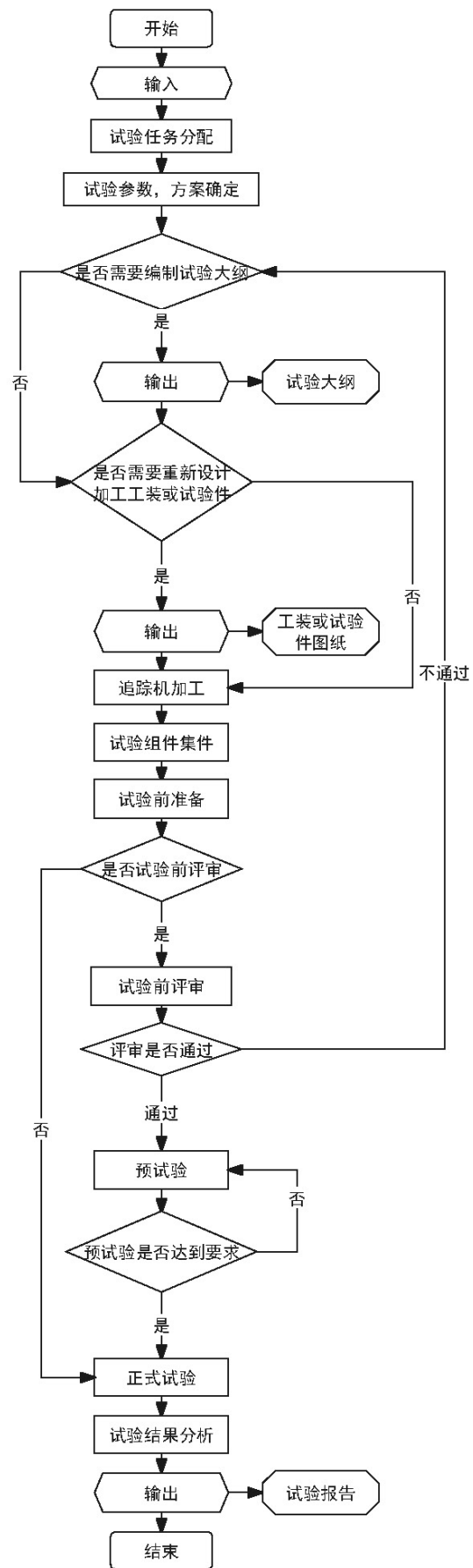


图2 航空发动机封严涂层材料可磨耗性试验的流程和工作内容

3.4.2 试验准备

3.4.2.1 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、燃气流量及助燃气体流量是否稳定，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。若以上任一环节调试不到位，则需重新调试；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。

3.4.2.2 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。

3.5 试验结果测量表征

3.5.1 刮痕形貌表征

采用立体显微镜对可磨损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。

3.5.2 叶片高度磨损比测算（IDR）

3.5.2.1 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。

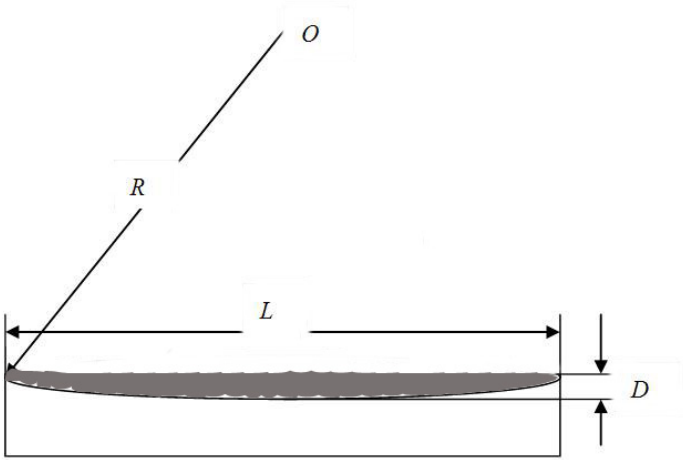


图3 刮痕深度与刮痕长度的几何关系

涂层刮痕深度的计算公式：

$$D=R-R^2-L^2$$

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。

3.5.2.2 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：

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

Δh ——叶片高度变化值， $\Delta h = \text{刮削前高度} - \text{刮削后高度}$ ；

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，总进给深度值=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。

3.5.3 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：

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

R_c ——封严涂层刮痕表面的加权粗糙度；

R_a ——从中线起的粗糙度轮廓偏差的等差中项；

R_z ——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；

$R_{\max}$ ——最大峰到凹处，且大于横向长度的高度。

3.6 结果评定

3.6.1 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。

3.6.2 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。

3.6.3 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。

3.7 分析方法水平简析及验证情况

目前我国相关研究单位对封严涂层的可磨耗性指标的评价标准与评价方法各不相同，有硬度法、划痕法、划痕硬度法、滑动磨损法、车削法、冲击刮削法、单摆冲击划痕法、模拟台架试验法、高温超高速可磨耗试验法等，各方法的有效性不同，且缺乏统一化和共识性的行业标准。这已经成为制约我国封严涂层材料及技术发展的关键问题。其中硬度法、划痕法、划痕硬度法、滑动磨损法、车削法、冲击刮削法、单摆冲击划痕法方法差异大，考核参量也各不相同，并且其因为无法模拟真实航空发动机工况，其评价方法的科学性较弱，国内的发动机研制设计单位对其认可度不高；本标准实施后，可有效提升封严涂层性能评价领域整体技术水平，通过标准化、规范化涂层性能评价与测试流程，进一步完善封严涂层理论与技术研究体系，推动涂层研制工作向科学化、精准化方向发展，弥补我国该领域的技术与体系空白。为封严涂层领域各类在研及后续科研项目提供坚实的技术支撑与方法保障，并为新型涂层、新型功能材料的研发迭代与创新应用奠定扎实技术基础、创造有利研发条件。与此同时，标准的定型和顺利实施能够推动我国封严涂层核心技术能力实现跨越式提升，推动领域技术水平迈上新台阶，对我国航空发动机产业高质量、可持续发展具有重要的工程价值与战略意义。

四、 标准水平分析

4.1 采用国际标准和国外先进标准的程度

经查，国外无类似标准化文件，因此本标准不采用其他国际或国外标准。

4.2 国际、国外同类标准水平的对比分析

本标准达到了国内先进水平，国外无相同的标准。

4.3 与现有标准及制定中标准协调配套的情况

经查，标准与现有标准及制定中的标准无重复交叉情况。

4.4 涉及国内外专利及处置情况

经查，本文件不涉及国内外专利。

五、与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

与有关的现行法律、法规和强制性国家标准没有冲突。

六、重大分歧意见的处理经过和依据

暂无重大分歧意见。

七、标准作为强制性标准或推荐性标准的建议

建议作为推荐性有色行业标准。

八、贯彻标准的要求和措施建议

标准发布后宣贯实施。

九、废止现行有关标准的建议

无。

十、其他应予说明的事项

无。

十一、预期效果

本文件充分考虑了目前国内外对封严涂层可磨耗性能的评价方法研究的现状。本文件颁布执行后,将在国内形成统一的封严涂层可磨耗性能分析测试标准,通过可磨耗试验-性能评价-工艺优化的流程,大大节约了国产化涂层的研制时间。使我国在封严涂层领域的技术水平提升到一个新台阶,逐步缩小与国外的差距甚至达到国际领先水平。

《封严涂层可磨耗性评定方法》标准编制组

二〇二六年七月