

# 涂层高温砂蚀试验方法的研究

西安航空发动机公司 陈慧敏\*

本文介绍一种涂层高温砂蚀试验方法,包括仪器、工作原理、试验步骤和结果处理。首次从理论上提出“耐高温砂蚀能力(b)”并用数理统计方法计算出b值。曾用这种方法评定了7种涂层,同时研究了压力、温度和落砂速度对b值的影响。

## Investigation of the Test Method for High Temperature Sand Corrosion-resistant Coatings

Chen Huimin

(Xian Aero-engine Company)

A test method for the high temperature sand corrosion resistant coatings has been described in this paper, and it comprises apparatus, operative principles, test procedures and results handling.

The capacity “b” of high temperature sand corrosion resistant coatings is first proposed by us in theory. The “b” can be calculated by statistical method.

We have evaluated seven kinds of coatings by this method and also studied the influence of the pressure, temperature and falling speed of sand on value “b”.

### 一、前言

随着宇航事业的发展,飞机的飞行速度不断提高,发动机在高空高速的飞行条件下受到的高温、砂粒和雨水冲刷等成为重要的破坏因素,越来越严重地影响着发动机,尤其是进气导流叶片的寿命。海军用的军舰、水上飞机,长期运转在海水、砂粒的剧烈冲刷条件下,因此,对零件、叶片上的保护层提出了更高的要求。这样,对涂层耐风砂磨蚀性能的评定,也就成为一个重要的研究课题。

我厂采用与英国罗·罗公司同样的原理并参考美国材料试验协会ASTMD658-44(70)标准的部分内容自行设计制造了一台SY-347涂层高温砂蚀试验仪。经过两年多的时间,在不同条件下对各种涂层一共作了700多次高温吹砂试验。现已初步制定了试验方法,确定了影响试验的因素,运用数理统计一元线性回归法进行了数据处理并提出了涂层在高温下耐风砂磨蚀能力(b)的概念。这就有可能从数值上对相同条件下各种涂层耐风砂磨蚀性能进行准确的比较,以便选材。

### 二、试验原理

#### 1. 仪器及工作原理

采用本厂自行设计并制造的SY-347涂层高温砂蚀试验仪。仪器外形见图1。仪器由压缩空气过滤器、

压缩空气通道、加热装置、喷嘴和温度调控等部分组成。

仪器的工作原理:当压缩空气进入试验器后,经空气过滤器过滤,并减压调节至规定的压力后进入管状空气电加热器。流动的压缩空气从常温被加热至所需温度。通过温度调控部分,确保压缩空气自动达到规定的温度值,并保持恒定。当一定重量的磨料由注入漏斗来到喷嘴时,具有相当压力的热压缩空气,以一定的速度把磨料从喷嘴喷出,吹射到转盘的涂层试片上进行高温砂蚀试验,见图2。

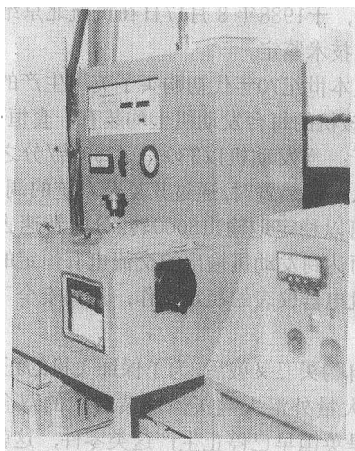


图1 涂层高温砂蚀试验仪

\*参加本职工作的还有杨吉、王爱莲同志。

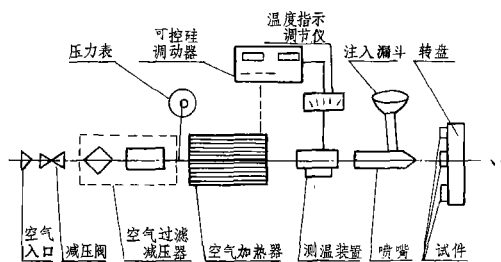


图2 仪器工作原理图

## 2. 高温砂蚀性能的测定

涂层高温砂蚀性能的评定是在一定压力的高温空气气流中，以一定的速度将规定重量的磨料吹到涂层试片上，然后称量高温砂蚀前后的试片重量并算出涂层的重量损失。

将试片进行多次连续吹砂后就可以得出磨料消耗量 (X) 与涂层重量损失 (Y) 的一系列对应值。Y 与 X 的关系，近似地符合函数  $Y=a+bX$ 。采用数理统计中最小二乘法原理进行一元线性回归计算，使 Y 对 X 的回归线为最好。当磨料的消耗量为零时，涂层的重量损失亦为零。故在本试验中函数  $Y=a+bX$  可以具体简化为  $Y=bX$ 。b 值的物理意义是：在一定条件下，消耗 1 克磨料所引起的涂层重量损失 (克)，它是一个无量纲量，我们将它定义为：“涂层的相对耐高温砂蚀能力”。在相同的吹射条件下，b 值愈小，涂层的耐砂蚀性能愈好；反之，b 值愈大，涂层的耐砂蚀性能愈差。这样，从 b 值的大小，就可以从数量上对涂层的耐高温砂蚀性能进行相对比较并能得出定量的结果。

## 三、试验步骤

### 1. 试片及其制备

(1) 试片 材料为 20 号碳钢，表面光度  $\nabla 7$ ，其余  $\nabla 4$ ，尺寸见图 3。

(2) 喷涂试片 1) 用汽油擦洗试片表面，除去油污后用 60 目石英砂进行吹砂处理。用压缩空气吹掉残存的砂粒。将不需要喷涂的部位用保护胶带保护好；用汽油、丙酮再次擦洗喷涂表面。2) 按受试涂料的要求，选择合适的粘度进行喷涂。每喷涂一遍，应在空气中放置 3~5 分钟，使表面微干，无漆流淌。应至少喷涂 4 遍，以获得均匀的表面，达到足够的厚度，供砂粒磨蚀。3) 喷涂结束后，在空气中放置 20 分钟，然后在规定温度的烘箱或高温炉中进行烘烤处理。检查涂层的干性及其它性能 (对导电涂层应检查导电

材料工程

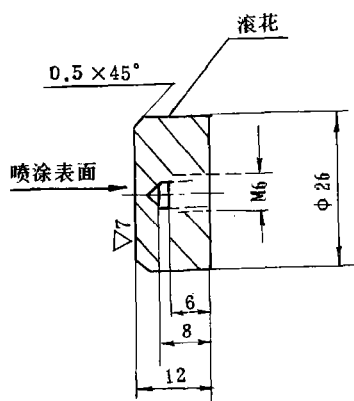


图3 高温砂蚀试验用试片

性)，将合格的试片留下备用。

### 2. 磨料及处理

本试验采用 70~80 目石英砂作为高温砂蚀试验用磨料；如果粒度不均匀应过筛。试验前，宜将其置于 100~110℃ 烘箱中烘烤，除去水分。一般烘烤 2~3 小时即可。

按选定的落砂量，一一称取规定重量的砂粒 (准确至 0.2 克) 备用。

### 3. 砂蚀试验

(1) 称重 将制备好的涂层试片放在分析天平上一一称量，准确至 0.0002 克。

(2) 标准试验条件 空气压力为  $0.4 \text{ kg/cm}^2$ ，每次吹砂用磨料重量为 30 g，落砂速度为  $6 \text{ g/s}$ ，温度为  $150^\circ\text{C}$ 。

(3) 吹射 将制备好的试片依次装在仪器转盘的每个定位螺杆上。接通压缩空气，调节压力，使压力表指示值为  $0.4 \text{ kg/cm}^2$ 。开启仪器电源，升温至  $150^\circ\text{C}$ ，保温 10 分钟。摇动转盘手柄，将试片中心对准喷嘴，把预先称过重量的磨料放入漏斗，热压缩空气将其带进喷嘴，垂直地吹射在试片中心。吹射结束后，依次将第 2 个试片中心对准喷嘴，重复上述步骤，顺序吹射转盘上的每一个试片。

(4) 再次称重 从转盘上取下试片，将残留的磨料清理干净。待冷至常温后再在分析天平上称量，记录吹射前后涂层损失量，准确至 0.0002 克。每种受试涂层至少应作 3 个试片，进行平行试验，取 3 次涂层重量损失的算术平均值。

(5) 重复上述试验过程，直至试片上涂层被穿透，露出基体金属或有足够的数据为止。

## 四、数据处理及结果

### 1. 数理统计方法

用最小二乘法原理进行一元线性回归处理, 求出涂层的相对耐高温砂蚀能力 (b值)。

在本试验中,  $Y=bX$

式中  $X$ —每次吹射所消耗的磨料 (克);

$Y$ —每次吹射后涂层的重量损失 (克);

$b$ —涂层耐高温砂蚀的能力。

进行若干次吹射后, 可得出一系列对应的 $X$ 、 $Y$ 值, 见表1。

表1 数据处理用表

n	X	Y	$X^2$	$Y^2$	XY
1	$X_1$	$Y_1^0$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
		$Y_1^I$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
		$Y_1^{II}$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
		$Y_1^{III}$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
2	$X_2$	$Y_2^0$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
		$Y_2^I$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
		$Y_2^{II}$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
		$Y_2^{III}$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
3	$X_3$	$Y_3^0$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
		$Y_3^I$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
		$Y_3^{II}$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
		$Y_3^{III}$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
4	$X_4$	$Y_4^0$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
		$Y_4^I$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
		$Y_4^{II}$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
		$Y_4^{III}$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
n	$\Sigma X$	$\Sigma Y$	$\Sigma X^2$	$\Sigma Y^2$	$\Sigma XY$

注:  $Y^0$ 、 $Y^I$ 、 $Y^{II}$ 、 $Y^{III}$ 系每次吹射时各次平行试验值。

根据最小二乘法原理求b值:

$$b = \frac{L_{xy}}{L_{xx}}$$

式中

$$L_{xy} = \Sigma XY - (\Sigma X)(\Sigma Y) / n$$

$$L_{xx} = \Sigma X^2 - (\Sigma X)^2 / n$$

$n$ —吹射次数

由b值的计算, 可以得到最好的回归方程。通过b值的大小, 可以比较涂层的耐高温砂蚀性能。b值越小, 在相同条件下涂层的耐高温砂蚀性能越好。

在数理统计中, 引进一个叫相关系数 $\gamma$ 的量,  $\gamma$ 由下式定义

$$\gamma = \frac{L_{xy}}{\sqrt{L_{xx} \cdot L_{yy}}}$$

式中

$$L_{yy} = \Sigma Y^2 - (\Sigma Y)^2 / n$$

$\gamma$ 的绝对值越接近于1,  $X$ 和 $Y$ 的线性关系越好。

### 2. 7种涂层高温砂蚀试验的数据处理结果

为了评定AC-2等7种涂层的耐高温砂蚀性能, 我们采用了相同的条件 (温度150℃, 压力0.4 kg/cm<sup>2</sup>, 落砂速度6 g/s) 和SY-347涂层高温砂蚀仪分别进行砂蚀试验。再用上述方法进行数据处理, 测得每一种涂层的“相对耐高温砂蚀能力 (b值)”。试验结果及其耐高温砂蚀能力的顺序分别列于表2和表3中。由表可知, 涂层的b值越小, 耐砂蚀性能越好, b值越大, 耐砂蚀性能越差。

表2 7种涂料的高温砂蚀试验结果

序号	涂料名称	试验次数	所测b值	备 注
1	英国PL219涂料	7	$0.47 \times 10^{-4}$	
2	国产仿PL205白色涂料	3	$3 \times 10^{-4}$	经3次吹射后涂层被吹破露底
3	国产W <sub>5</sub> 涂料	6	$2 \times 10^{-4}$	
4	AC-2聚氨酯叶片漆	8	$0.76 \times 10^{-4}$	
5	国产W <sub>3</sub> 涂料	8	$0.9 \times 10^{-4}$	
6	国产W <sub>4</sub> 涂料	8	$1.49 \times 10^{-4}$	
7	国产W <sub>6</sub> 涂料	6	$3.5 \times 10^{-4}$	

表3 7种涂料耐高温砂蚀能力的顺序

耐高温砂蚀能力的顺序	涂 层 名 称	b 值
好	1 英国PL219	$0.47 \times 10^{-4}$
	2 AC-2聚氨酯漆	$0.76 \times 10^{-4}$
	3 国产W <sub>3</sub> 涂料	$0.9 \times 10^{-4}$
	4 国产W <sub>4</sub> 涂料	$1.49 \times 10^{-4}$
	5 国产W <sub>5</sub> 涂料	$2.0 \times 10^{-4}$
	6 国产PL205白色涂料	$3.0 \times 10^{-4}$
差	7 国产W <sub>6</sub> 涂料	$3.5 \times 10^{-4}$

### 3. 在不同试验条件下试验数据的处理及结果

影响涂层高温砂蚀性能的因素很多, 鉴于仪器的局限性, 我们仅探讨温度、压力和落砂速度等因素的影响。

(1)落砂速度对涂层耐高温砂蚀性能的影响 以英国PL219涂层为例, 试验温度选用150℃, 每次吹射砂粒重量为30g, 当压力为0.2、0.4、0.7、1kg/cm<sup>2</sup>时, 测得的落砂速度分别为4、6、7、9g/s。在此4种速度下的试验结果见表4。由表4可见, 当其他条件固定不变时, 落砂速度对涂层的高温砂蚀性能有影响: 落砂速度增大, 涂层的砂蚀量增加, 耐高温砂蚀性能降低。

表 4 落砂速度对涂层耐高温砂蚀性能的影响

压力(kg/cm <sup>2</sup> )	落砂速度(g/s)	耐高温砂蚀性能(b)
0.2	4	$0.34 \times 10^{-4}$
0.4	6	$0.47 \times 10^{-4}$
0.7	7	$1.37 \times 10^{-4}$
1.0	9	$1.70 \times 10^{-4}$

(2)温度与涂层耐砂蚀性能的关系 为了探讨温度与涂层耐砂蚀性能的关系, 分别选用英国PL219涂料、PL205白色叶片漆和国产A05-9氨基漆等三个品种, 在不同温度下评定耐砂蚀性能, 结果见表5。由表5可见, 不同的涂层, 其砂蚀性能随温度的变化而改变的规律不同。如表中的英PL219涂层, 在50~250℃范围内, 其耐砂蚀性能基本上不随温度的变化而改变, 即b值在此温度范围内是一个常数。由于仪器的试验温度仅300℃, 所以未能测定更高温度下的b值。

表 5 几种涂层在不同温度下的砂蚀性能

涂 层	英PL219	英PL205	国产A05-9
耐砂蚀性	b值	b值	b值
温度(℃)			
室温	—	$1.92 \times 10^{-4}$	$1.43 \times 10^{-4}$
50	$0.47 \times 10^{-4}$	—	$1.25 \times 10^{-4}$
100	$0.50 \times 10^{-4}$	$1.77 \times 10^{-4}$	经两次吹破试片
150	$0.47 \times 10^{-4}$	—	—
200	$0.47 \times 10^{-4}$	$1.38 \times 10^{-4}$	经一次吹破试片
250	$0.46 \times 10^{-4}$	—	—

英PL205涂层的b值在200℃以下时随温度的升高略有下降趋势, 这可能与涂层固化程度的提高有关。国产A05-9的b值在50℃以下时比室温略有降低; 当温度再升高时, 由于材料本身不能承受这样的高温, 致使试片迅速被吹破而无法测定。

可见, 温度与涂层耐砂蚀性能的关系难以用一个材料工程

共同的规律来描述。不同类型的涂层对温度的敏感性是不同的, 它与涂层的组成、结构、耐温范围及其他综合性能都有关系。只能分别在不同的温度下对各种涂层进行试验, 以便得出具体的对应关系。

五、关于试验方法的讨论

迄今为止, 除了ASTMD658-44 (70) 标准中规定有常温砂蚀试验方法外, 还未见到其他的国际标准。ASTMD658-44 (70) 是用常温下磨穿一个单位涂层膜厚所需的磨料量来表示涂层的耐磨蚀性能 [1]。

该标准要求严格控制喷涂厚度, 给施工带来困难; 准确测定被磨穿部位的膜厚, 也受到仪器精度和视力误差的限制。而且该方法规定在常温下进行砂蚀试验, 不能模拟涂层实际工作的高温条件, 所以局限性较大。

我厂的方法虽然是采用与英国罗·罗公司方法相同的原理建立起来的, 但是已经作了改进。从仪器上看, 采用了管状空气电加热器, 与炉丝加热相比, 加热速度快, 功率大, 能在较高的温度下做试验, 而且便于维修 [2]。在喷砂的仪器箱内装有日光灯, 便于观察吹射情况。从试验方法上看, 英国罗·罗公司试验室对涂层进行吹砂时要反复多次地称量各次砂蚀后的试片重量并用涂层的重量损失对所用磨料——作图, 然后根据所画直线的斜率进行比较, 借以评定其耐砂蚀的能力 [3]。这样, 当涂层的耐砂蚀能力相差较大时, 可以进行定性比较, 但不能进行定量比较; 当涂层的耐砂蚀能力相近时, 画出的n条直线近似重合, 用图示法就难以比较; 当数据比较分散时, 描绘出的直线有可能产生较大的人为误差。甚至因为取舍点的不同描绘出不同的直线, 有可能得出相反的结论。

本试验提出的数理统计方法可以避免上述缺点并能准确地算出涂层的耐高温砂蚀能力 (b值), 而且可由b值的大小直接进行定量评定。检验计算的结果表明, 相关系数γ值十分接近于1, 这说明拟合出的回归线是有意义的, 试验的置信度令人满意。

此外, 本试验是选用固定的条件在SY-347仪器上对涂层进行试验的, 所得出的耐高温砂蚀能力 (b) 仅仅是一个相对值, 因而, 当谈及各种涂层的耐高温砂蚀能力时, 也只是相对比较的结果。

该方法的不足之处在于: 由于受加热管设计功率的限制, 最高温度只能达300℃, 使耐温性更高的涂层试验受到限制。

六、结 论

1. 本厂自行设计制造的SY-347涂层高温砂蚀试验仪能较好地满足各类涂层在300℃以内进行高温砂

# 复合材料无损定量测试方法及微机系统

北京航空材料研究所 刘于藩 丁建设

本文介绍了一种对复合材料内部缺陷进行定量测定的无损试验方法和微机系统。为材料的质量评定、性能测试、制订和执行缺陷标准提供了较为有效的手段。

## A NDT Quantitative Measurement and a Micro-computer System for CFRP Inspection

Liu Yufan Ding Jianshe  
(Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

This paper introduces a quantitative measurement and a micro-computer system for CFRP interior defects. It provides effective means for evaluating material quality, testing performance, establishing and implementing defect standard.

缺陷的定性定量,是无损检测领域里的重要内容之一,至今仍在研究。这一内容对复合材料的无损检测尤为重要。由于复合材料本身具有不均匀和性能数据分散的特点,而内部存在的分散或密集缺陷,目前虽有方法检验并能定性,但难以定量。特别是孔隙率和缺陷分布面积率这两个影响性能的重要指标,在国外有关缺陷验收标准规范中均有明确规定。这就要求有相应的定量测试方法和设备去实现这一标准。否则无法得出检验结果,部件无法使用。

近年来,我国在复合材料的研究和生产应用上发展很快,但在缺陷验收标准的研究和制订上仍是薄弱环节,这势必会影响复合材料在生产中的应用。要开展这一工作,同样也需要定量的测试方法和手段作技术保证。

关于孔隙率的测定,目前常用的是光学法和烧蚀法。这两种方法不仅均需破坏试样,而且测出的数据不能直接反映其它试样的质量,加之随机取样的盲目性,也不能减少性能数据的分散,试样有效利用率不高。

本工作就是为适应上述需要而研究的一种非破坏性定量测试方法和微机系统。

### 一、基本原理

80年代前后,美国和法国先后采用水浸式超声纵波衰减法测量孔隙率,后者已用于生产。近年来,国外又开展超声横波、板波、表面波等方面的研究。本工作采用的是水浸式超声纵波反射板衰减法。

众所周知,由水和复合材料两种介质组成的界面,

蚀试验的要求。用它模拟航空涂料在高空飞行中可能遇到的高温和风砂冲刷等苛刻条件,从而对涂层的耐高温砂蚀性能进行实验室评定。

2. 本试验首次提出涂层“耐高温砂蚀能力(b)”这一概念。它的物理意义是:在一定条件下,消耗一克磨料所引起的涂层重量损失。运用数理统计方法能够准确地求出b值。通过b值的大小,可以对各种涂层的耐高温(300℃以内)砂蚀性能进行定量评定。

3. 运用数理统计方法处理试验数据能避免图示法中人为的视力误差,结果较为准确可靠。由于只需要

对试片连续几次吹砂和称重就可以计算出结果,更不需要测定厚度,所以该方法简便易行,与英国罗·罗公司的方法相比,有明显的改进和提高。

### 参考资料

- [1] ASTM D658-44 (70)。
- [2] 李荣伟, SY-347试验仪空气电加热器设计小结。
- [3] 英国罗·罗公司WC“O”实验室, 各种PL205的耐腐蚀性。
- [4] 中国科学院数学研究所统计组, 常用数理统计方法。