DOI:10.27055/j.1674-5590.2026.05.008

YbDS 涂层碰摩力峰值的 Weibull 分析与超限风险评估

于建海[1a],叶毅淋[1a],丁坤英[1a],叶 军[2],李桂洋[1b]
(1. 中国民航大学 a. 天津市民用航空器适航与维修重点实验室; b. 科技创新研究院,天津 300300;
2. 北京飞机维修工程有限公司,北京 100621)

摘 要: 航空发动机极小的叶片尖隙结构导致叶片与机匣间偶发碰摩故障,为量化连续高速碰摩中周期峰值的随机性及高载荷概率,本文对4种不同结构特征的双硅酸镱(YbDS,ytterbium disilicate)环境障涂层展开高速转子碰摩试验。按转子周期分割法向力信号,提取全周波峰并修正基线,并用 Weibull 模型拟合波峰数值,计算 95% 高分位碰摩力 $F_{0.95}$ 及超限概率。结果得出:Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验 p 值为 0.837、0.764、0.782 和 0.635,均大于 0.05;$F_{0.95}$ 为 2 706.19、2 190.52、2 046.44、2 085.93 N,均比平均峰值高出16%以上;涂层 2、3、4 的 Hertz 理论碰摩力高于 $F_{0.95}$ 39.69%、48.50%、45.69%。研究表明,Weibull 模型能够准确反映周期峰值离散性和给定工程载荷限值下的超限概率,可为兼顾碰摩载荷风险与涂层性能的涂层设计提供依据。

关键词: 环境障涂层;双硅酸镱(YbDS);高速碰摩;周期峰值;Weibull 模型;超限概率
中图分类号: V231.92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2026)05-0069-09

Weibull analysis of rub-impact force peaks and exceedance risk assessment for YbDS coatings

YU Jianhai[1a], *YE Yilin*[1a], *DING Kunying*[1a], *YE Jun*[2], *LI Guiyang*[1b]
(1a. *Tianjin Key Laboratory for Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance*; 1b. *Research Institute of Science and Technology Innovation, CAUC, Tianjin* 300300, *China*; 2. *Aircraft Maintenance and Engineering Co., Ltd., Beijing* 100621, *China*)

Abstract: The extremely small blade tip clearance in aero-engines leads to occasional rub-impact faults between the blades and the casing. To quantify the randomness of cyclic peak values and the probability of high loads during continuous high-speed rub-impact, high-speed rotor rub-impact tests were carried out on four ytterbium disilicate (YbDS) environmental barrier coatings with different structural characteristics. The normal force signals were segmented by rotor cycle, and the peaks over the whole cycle were extracted with the baseline corrected. The peak values were then fitted with a Weibull model, and the 95% upper-quantile rub-impact force $F_{0.95}$ and the exceedance probability were calculated. The results show that the p values of the Kolmogorov-Smirnov (K-S) test are 0.837, 0.764, 0.782 and 0.635, all greater than 0.05. The $F_{0.95}$ values are 2 706.19, 2 190.52, 2 046.44 and 2 085.93 N, all more than 16% higher than the mean peak values. The Hertz theoretical rub-impact forces of coatings 2, 3 and 4 are 39.69%, 48.50% and 45.69% higher than their $F_{0.95}$ values. The study indicates that the Weibull model can accurately reflect the dispersion of cyclic peak values and the exceedance probability under a given engineering load limit. It can therefore provide a basis for coating design that balances rub-impact load risk and coating performance.

Key words: environmental barrier coating; ytterbium disilicate (YbDS); high-speed rub-impact; cyclic peak value; Weibull model; exceedance probability

现代航空发动机为提高推重比、降低油耗,普遍采用小叶尖间隙设计。在高温、高转速及复杂载荷下,热膨胀失配和转子振动易引发叶片与机匣的瞬态碰摩,造成叶尖磨损、涂层损伤和非线性振动[1]。

收稿日期:2026-08-20; **修回日期:**2026-09-08
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB4302400);天津市研究生科研创新项目(2025YJSKC01004)
作者简介:于建海(1990—),山东临沂人,实验师,硕士,研究方向为功能涂层制备与性能.
通信作者介绍:丁坤英(1981—),河北唐山人,教授,博士,研究方向为功能涂层制备与性能.

随着涡轮进口温度持续升高,传统镍基高温合金逐渐接近服役极限,碳化硅陶瓷基复合材料(SiC-CMCs, silicon carbide ceramic matrix composites)因低密度、高强度和优异高温稳定性成为新一代热端部件的候选材料[2-3]。但 SiC-CMCs 在高温水氧和熔融硅酸盐环境下易被腐蚀,需采用环境障涂层(EBCs,environmental barrier coatings)防护[4-6]。双硅酸镱(YbDS,ytterbium disilicate)因具有较低的热膨胀系数、良好的高温相稳定性和耐蚀性,是与 SiC-CMCs 匹配性较好的 EBCs 材料[7]。热喷涂、热循环及腐蚀服役过程会在 YbDS 涂层中形成孔隙和微裂纹,使其呈现多孔脆性特征。因此,准确表征叶片—涂层—机匣碰摩载荷及其波动,对评估涂层损伤和叶尖间隙安全性具有重要意义。

针对叶片与机匣的碰摩现象,目前的研究主要集中在接触力学、转子动力学及接触界面的材料属性等方面。Hertz 接触理论是转静子碰摩载荷计算的基础,在此基础上,研究者逐渐引入表面粗糙度及塑性变形等因素。Chen 等[8]对硬质涂层粗糙表面的弹塑性接触进行了研究;Song 等[9]在考虑了微凸体大小及相互影响的情况下,针对碰撞区域表面建立了统计学的碰撞模型;Ma 等[10]提出了一种改进的碰摩模型,将叶片的弯曲及弹性机匣的影响也加入到模型中;Kang 等[11]对叶片与机匣的碰摩位置及方式进行了探讨;Wang 等[12]提出了弹塑性粗糙表面线接触模型;Legrand 等[13]进行了叶片与机匣的三维实体碰撞分析。上述研究使碰摩研究由单纯的理想化弹性碰撞发展到了复杂的界面及非线性碰撞。近年来,涉及涂层的叶片与机匣碰摩研究进一步考虑了涂层磨损、叶片弯曲及二者间的耦合响应。Kang 等[14]建立了考虑可磨耗涂层磨损和叶片弯曲变形的碰摩模型;Ma 等[15]分析了叶片—涂层—机匣系统的磨损与振动响应。现有研究仍主要采用确定性碰摩力、磨损量或振动响应进行评价,针对同一工况下连续周期峰值的随机离散性及超限概率的研究相对不足。

目前对高速碰摩载荷的评估主要以最大法向力或单个理论值为依据,但高速碰摩具有显著的周期性和瞬时性,在工况条件不变的情况下,每个转动周期的峰值也会因局部孔隙、表面状态、接触位置等因素及系统动态响应而变化,单独的平均值或最大值不能很好地体现峰值的波动性及高负荷的发生概率。

针对随机机械响应,Weibull 模型已经在材料强度、疲劳载荷和冲击响应等方面得到了广泛应用。Weibull[16]提出了通用统计分布模型;Deng 等[17]采用 Weibull 模型表征脆性陶瓷强度的离散性,指出形状参数 m 与样本变异程度相关,尺度参数 η 可用于表征特征强度;Manuel 等[18]利用 Weibull 模型模拟风力机叶片循环载荷幅值,得到了长期载荷分布及置信区间;Zhang 等[19]采用 Weibull 模型拟合落锤冲击试验数据,并得到了不同冲击水平下的失效概率。上述研究表明,Weibull 模型适用于非负且具有离散特征的机械响应,可同时描述响应水平、离散程度及高分位值或超限概率。

基于此,本文从周期峰值概率分布的角度研究不同造孔相含量的 YbDS 涂层的高速碰摩响应。基于完整的法向力时间历程,按转子旋转周期划分信号,提取每个完整周期的主峰并进行局部基线校正;采用 Weibull 模型拟合周期峰值,以尺度参数 η 和形状参数 m 表征载荷水平与离散程度,并计算出 95% 高分位碰摩力 $F_{0.95}$、高分位碰摩力放大系数 $\gamma_{0.95}$ 及不同参考载荷下的超限概率。进一步对比概率指标、实测平均峰值及 Hertz 理论碰摩力,分析确定性载荷评价与概率载荷评价的差异,并探讨超限概率作为造孔相含量筛选指标的工程应用。

1　试验

1.1　涂层试样与高速碰摩试验

以 50 mm × 30 mm × 10 mm SiC 陶瓷片为基体,采用大气等离子喷涂(APS,atmospheric plasma spraying)制备 YbDS 环境障涂层。涂层由 Si 粘结层和 YbDS 面层组成,通过在面层粉体中加入不同含量的聚苯酯(PHB,p-hydroxybenzoate)造孔剂获得不同结构特征的涂层,PHB 含量如表 1 所示。

表 1　各涂层试样的 PHB 含量

Tab.1　PHB contents of the coating specimens

涂层编号	PHB 质量分数/%	涂层编号	PHB 质量分数 /%
1	0	3	10
2	5	4	15

YbDS 和 Si 粉末粒径均为 15~53 μm,由浙江联田新材料科技有限公司提供;PHB 粉末粒径为 15~75 μm,由中昊晨光化工研究设计有限公司提供。试样采用 Praxair 3710 大气等离子喷涂系统和 SG-100 喷枪制备,Si 粘结层厚度为 50~100 μm,YbDS 面层厚度为 300~400 μm,具体工艺参数如表 2 所示。

高速碰摩试验在中国民航大学自研高速转子碰摩试验台上进行,如图 1 所示。主轴叶盘上安装 1 片 Inconel 625 工作叶片和 5 片配重短叶片,使每转仅发生一次有效碰摩。工作叶片叶尖的接触面为 25 mm ×

表 2　等离子喷涂工艺参数

Tab.2　Plasma spraying process parameters

部位	主要成分	电压/V	电流/A	喷涂速度/(mm·s^{-1})	喷涂距离/mm	送粉率/(r·min^{-1})
粘结层	Si	42	800	300	70	2
面层	YbDS	45	810	300	80	4

2 mm,试验前经磨抛处理。试样由 Zolix PSAV100–240ZF 微进给系统沿径向送向旋转叶片,以模拟叶片与涂层周期性碰摩;法向力由 Kistler 9327C 传感器测量,并通过 DEWE–Soft X2 系统采集。高速碰摩工况如表 3 所示。碰摩试验在常温环境下进行,未对试样施加外部加热。

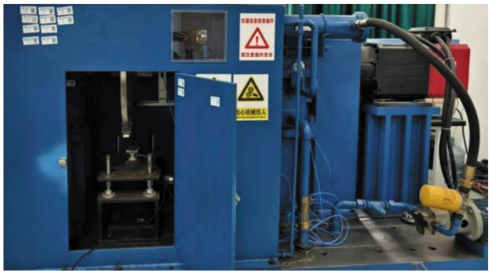


图 1　高速转子碰摩试验台

Fig.1　High–speed rotor rub–impact test rig

表 3　高速碰摩工况

Tab.3　High–speed rub–impact test conditions

叶片转速/(r·min^{-1})	叶尖线速度/(m·s^{-1})	进给速率/(mm·s^{-1})	进给深度/mm	单次侵入深度/mm
1 000	41.887 9	0.01	0.2	0.000 6

对每种涂层均记录连续法向力信号。采样间隔约 $4.882\ 8\times10^{-4}$ s,对应采样频率约 2 048 Hz,可捕捉单周期内的快速冲击响应。后续分析以时间 t 和法向力 $F(t)$为输入。

1.2　周期划分与碰摩峰值提取

试验仅设置 1 片工作叶片,因此,转子每转一周对应一次主要碰摩。理论旋转周期 T_0 由转速 n 计算,即

$$T_0=\frac{60}{n} \tag{1}$$

当 n = 1 000 r/min 时,理论周期 T_0 = 0.06 s,相邻主碰摩峰应以约 0.06 s 的间隔出现。为避免将单次碰摩后的振铃误识别为新事件,本文在 Matlab 中采用“候选峰识别—周期边界确定—周期内主峰搜索”的流程提取有效周期峰值。

采用最小峰间距和峰值突出度约束识别候选峰。最小峰间距取 0.045 s,峰值突出度阈值取 200 N,以保留各周期主冲击峰,并抑制衰减振荡的次峰。识别候选峰后,根据相邻候选峰的峰值时刻 $t_{\mathrm{p},j}$,计算实测周期,即

$$T_{\mathrm{m}}=\mathrm{median}(t_{\mathrm{p},j+1}-t_{\mathrm{p},j}) \tag{2}$$

式中,median(·)为取中位数函数。采用中位数可降低个别峰值时刻偏差对周期估计的影响。

以相邻候选峰时刻的中点作为周期边界

$$t_{\mathrm{b},j}=\frac{t_{\mathrm{p},j}+t_{\mathrm{p},j+1}}{2} \tag{3}$$

据此将法向力信号划分为周期区间 Ω_j,并在每个完整周期区间内搜索最大值,将第 j 个周期的原始碰摩力峰值定义为

$$F_{\mathrm{p},j}=\max_{t\in\Omega_j}F(t) \tag{4}$$

候选峰仅用于确定周期位置,最终峰值直接取自原始信号,从而避免识别参数改变峰值幅值。

不同涂层的信号存在一定的零点偏移,因此,需对周期峰值进行局部基线校正。以峰值时刻 $t_{\mathrm{p},j}$ 前 20 ms 到前 5 ms 区间内的法向力中位数作为局部基线 $F_{\mathrm{b},j}$,将校正后的峰值定义为

$$F^{*}_{\mathrm{p},j}=F_{\mathrm{p},j}-F_{\mathrm{b},j} \tag{5}$$

其中,采用中位数计算基线能够降低偶发噪声及局部小幅振动对基线估计的影响。后续描述性统计与 Weibull 模型概率分析均基于 $F^{*}_{\mathrm{p},j}$ 进行。

仅保留具有完整周期边界和基线区间的碰摩事件,并对自动提取结果进行图形复核,确保每个周期仅保留 1 个主峰。最终 4 种涂层均获得 16 个有效周期峰值。

1.3　Weibull 模型概率分析方法

为表征连续碰摩力峰值的随机性,采用 Weibull 模型拟合 4 种涂层的碰摩周期峰值。

设基线校正后的周期碰摩力峰值为随机变量 F,其 Weibull 模型累积分布函数为

$$G(F)=1-\exp\left[\left(\frac{F}{\eta}\right)^{m}\right]\quad F\geqslant0 \tag{6}$$

其中:尺度参数 η 越大,峰值分布整体越靠近高载荷区;形状参数 m 越大,峰值分布越集中,周期波动越小。

尺度参数 η 和形状参数 m 采用极大似然法估计。通过经验累积分布函数与 Weibull 模型拟合曲线对比评价拟合效果,并采用 Kolmogorov–Smirnov(K–S)检验作为补充依据,显著性水平 α = 0.05。

考虑到每种涂层仅包含 16 个有效周期峰值,为评估小样本条件下 Weibull 参数估计的不确定性,采用参数化 Bootstrap 方法进行 10 000 次重采样。每次从已拟合的 Weibull 模型生成与原样本量相等的数据,重新估计尺度参数 η、形状参数 m 及 95%高分位

碰摩力 $F_{0.95}$，并取 Bootstrap 分布的 2.5%和 97.5%分位数作为 95%置信区间。K–S 检验 $p > 0.05$ 仅表示在当前样本下未发现显著拟合偏差，不作为总体分布形式的充分证明。

除 Weibull 参数外，还分别计算各组峰值样本的平均值 $\overline{F}$、标准差 σ 及变异系数 C_V。C_V 定义为

$$C_V = \frac{\sigma}{\overline{F}} \tag{7}$$

式中，C_V 用于消除平均载荷水平差异的影响，便于比较各涂层峰值的相对离散程度。

定义 95%高分位碰摩力 $F_{0.95}$。令式(6)中 $G(F) = 0.95$，可得

$$F_{0.95} = \eta[-\ln(0.05)]^{\frac{1}{m}} \tag{8}$$

式中，$F_{0.95}$ 表示表 3 所示工况下 95%的单周期碰摩力峰值不超过该值。

进一步定义 95% 高分位碰摩力放大系数为

$$\gamma_{0.95} = \frac{F_{0.95}}{\overline{F}} \tag{9}$$

其中，$\gamma_{0.95}$ 越大，说明峰值离散性对 95%高分位载荷的放大作用越明显。

对给定参考载荷 F_{lim}，其超限概率由 Weibull 模型计算

$$P_{exc} = P(F > F_{lim}) = \exp[-(F_{lim}/\eta)^m] \tag{10}$$

参考载荷取 1 500~3 300 N，间隔 10 N，得到“参考载荷–超限概率”曲线。F_{lim} 仅为概率比较阈值，并非叶片断裂、涂层脱落等实际失效临界载荷，因此，P_{exc} 表示峰值超过给定参考载荷的概率，不等同于结构失效概率。在工程应用中，若由叶片强度、涂层损伤限值或转子系统设计要求给定工程载荷限值，并规定允许超限概率，则可将 P_{exc} 不高于该允许值作为候选 PHB 质量分数的风险筛选条件。

为比较概率结果与确定性预测，采用相同试验条件下的 Hertz 理论碰摩力作为参考。与本试验接触形式相对应的 Hertz 理论碰摩力[20]可表示为

$$F_{n\max} = \frac{E^*}{2a\sqrt{\delta}} \cdot \delta^{\frac{3}{2}} \cdot A = \frac{aE^*}{2R} \cdot S \cdot L \tag{11}$$

式中：A 为叶尖的接触面积，如图 2 所示，其值为叶尖切向接触厚度 S 与轴向接触宽度 L 的乘积；a 为碰摩副接触半宽；δ 为单次侵入深度；R 为转子半径；E^* 为碰摩副的等效弹性模量，其表达式为

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2} \tag{12}$$

E_1、E_2 分别为转子与静子的弹性模量；v_1、v_2 分别为转子与静子的泊松比，两者泊松比均取 0.3。

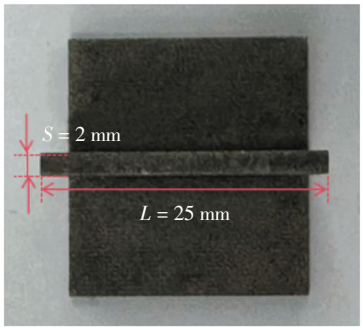


图 2　叶尖接触面积示意图

Fig.2　Schematic diagram of the blade tip contact area

将 Hertz 理论碰摩力与实测平均峰值及 Weibull 分布的 $F_{0.95}$ 分位值进行对比，分析确定性载荷与概率高分位载荷的差异。

2　结果与讨论

2.1　涂层结构特征与性能分析

4 种涂层的性能与结构特征参数如表 4 所示。随着 PHB 含量增加，涂层孔隙率 φ 和表面粗糙度升高，弹性模量降低，该趋势与等离子喷涂层的结构演变规律一致[21]。PHB 在喷涂后形成孔隙，随其含量增加，涂层有效承载截面积和连续载荷传递路径减少，使等效接触刚度降低；在相同切入条件下，较低的接触刚度对应较小的法向力峰值。与此同时，孔隙率 φ 和表面粗糙度升高会增强局部接触位置、实际接触面积及应力传递路径的非均匀性，从而增加周期碰摩响应的波动。因而，PHB 含量主要通过“孔隙结构—有效刚度—接触载荷”路径影响峰值水平，并通过表面与孔隙结构的非均匀性影响峰值离散程度。

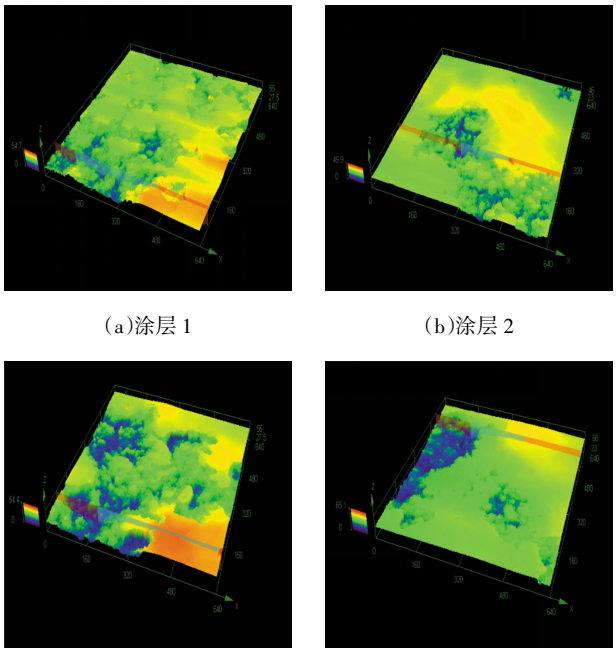
表 4　4 种涂层的性能与结构特征

Tab.4　Performance and structural characteristics of the four coatings

涂层编号	孔隙率 φ/%	粗糙度/μm	弹性模量 E/GPa
1	5.87	2.23	168
2	8.55	2.57	162
3	11.64	2.84	160
4	13.91	3.10	160

图 3 给出了 4 种涂层碰摩后磨痕的三维形貌。在 4 种涂层试样上均可观察到沿叶片运动方向形成的条带状磨痕及不同程度的局部凹陷，表明高速碰摩过程中叶尖对涂层产生了明显的切削和犁削作用，并伴随局部材料去除。随着 PHB 含量增加，磨痕表面的空间起伏和局部凹陷形态发生明显变化，说明孔隙结构

不仅改变涂层整体接触刚度,也影响碰摩过程中的实际接触状态和局部材料去除。由于三维形貌主要反映宏观磨痕轮廓,本文据此将主要磨损特征归纳为犁削、局部材料去除及不均匀磨损。



(a)涂层 1　(b)涂层 2

(c)涂层 3　(d)涂层 4

图 3　4 种涂层碰摩后磨痕的三维形貌

Fig.3　Three-dimensional morphologies of the wear scars on the four coatings after rub-impact

Inconel 625 合金叶片弹性模量取 207.5 GPa[22]。将表 5 所列参数代入式(11),得到 4 种涂层的 Hertz 理论碰摩力,结果如表 5 所示。

表 5　4 种涂层的 Hertz 理论碰摩力

Tab.5　Hertz theoretical rub-impact forces of the four coatings

涂层编号	R/mm	δ/mm	a/mm	A/mm^2	E^*/GPa	$F_{n\max}$/N
1	400	0.000 6	0.49	50	102.02	3 123
2	400	0.000 6	0.49	50	99.97	3 060
3	400	0.000 6	0.49	50	99.27	3 039
4	400	0.000 6	0.49	50	99.27	3 039

2.2　周期碰摩力峰值提取及其统计特征

按上述方法对 4 组法向碰摩力信号进行周期划分和峰值提取,并扣除局部基线。剔除首尾不完整周期后,4 种涂层均获得 16 个有效周期峰值。

图 4 显示,4 组法向碰摩力信号均呈稳定的周期性冲击特征,相邻主峰间隔基本一致。提取的碰摩力峰值均对应各周期主冲击,未将碰摩后的衰减振荡误识别为新事件,表明该方法可有效提取周期峰值。

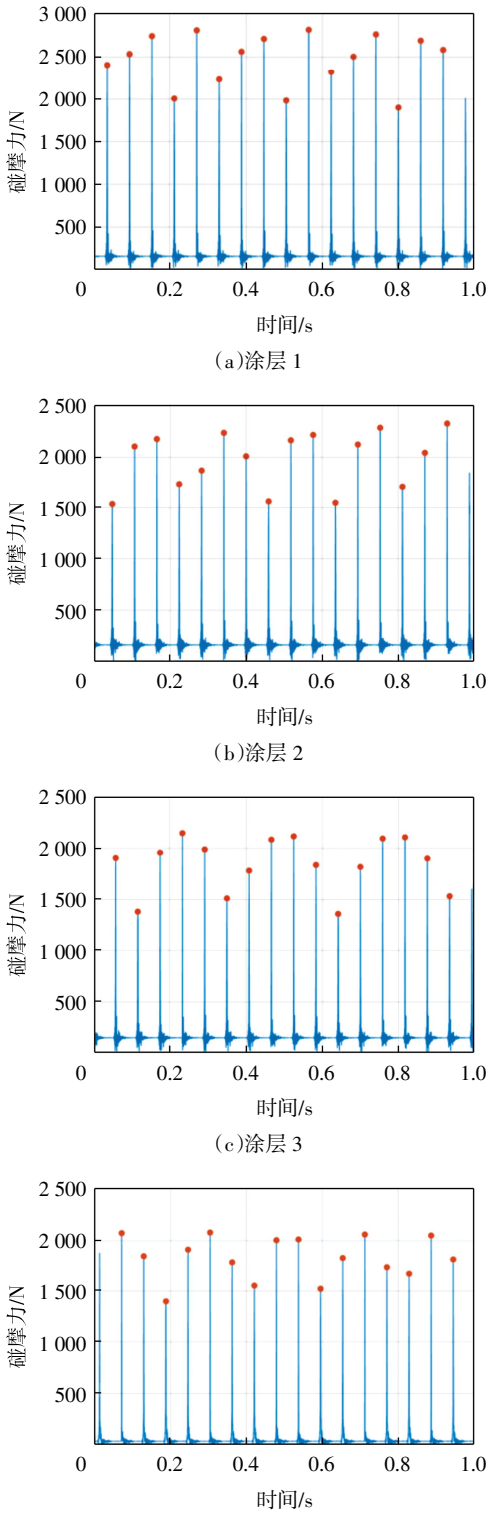


图 4　4 种涂层周期划分与碰摩力峰值提取结果

Fig.4　Cycle segmentation and rub-impact force peak extraction results for the four coatings

表 6 给出了基线校正后的碰摩力峰值统计结果。涂层 1 的平均峰值最高,为 2 309.58 N;涂层 2 ~ 4 分别为 1 812.87、1 695.52、1 795.77 N,较涂层 1 分别降

低 21.51%、26.59%、22.25%，说明涂层结构变化显著改变了周期碰摩载荷水平。

表 6　4 种涂层周期碰摩力峰值统计量及 Weibull 模型拟合参数

Tab.6　Statistics of cyclic rub–impact force peaks and Weibull model fitting parameters for the four coatings

涂层编号	峰值统计量		Weibull 拟合参数					
	$\overline{F}$/N	σ/N	C_V	η/N	m	p	$F_{0.95}$/N	$\gamma_{0.95}$
1	2 309.58	304.29	0.131 8	2 433.36	10.325	0.837	2 706.19	1.171 7
2	1 812.87	279.33	0.154 1	1 926.50	8.543	0.764	2 190.52	1.208 3
3	1 695.52	266.36	0.157 1	1 801.74	8.616	0.782	2 046.44	1.207 0
4	1 795.77	214.76	0.119 6	1 885.44	10.857	0.635	2 085.93	1.161 6

结合表 6 可看出：4 种涂层的碰摩力峰值的标准差 σ 分别为 304.29、279.33、266.36、214.76 N；考虑平均载荷差异后，涂层 1 ~ 4 的变异系数 C_V 依次为 0.131 8、0.154 1、0.157 1、0.119 6；涂层 2 和涂层 3 的峰值更分散，涂层 4 的周期波动最小。

峰值载荷水平与随机离散性并不同步。平均峰值反映整体承载水平，变异系数反映周期响应的稳定性；较低的平均峰值并不一定对应较小的波动。因此，仅以平均值评价碰摩性能不足以描述高载荷事件特征。

2.3　周期碰摩力峰值的 Weibull 模型分布特征

采用 Weibull 模型拟合 4 种涂层的 16 个有效周期峰值，经验累积分布与拟合曲线如图 5 所示，其中，Empirical CDF 和 Weibull CDF 分别表示经验累积分布函数和 Weibull 累积分布函数。

图 5 中，4 组 Weibull 模型拟合曲线与经验累积分布吻合良好，未见明显系统偏差。K–S 检验 p 值分别为 0.837、0.764、0.782、0.635，均大于 0.050，因此，在当前样本条件下不能拒绝 Weibull 分布假设。

表 7 中参数化 Bootstrap 结果进一步表明，各涂层尺度参数 η 与 95% 分位碰摩力 $F_{0.95}$ 的 95% 置信区间均具有有限宽度，说明小样本会带来可见的参数估计不确定性。因此，本文主要讨论当前涂层试样和短时周期内的相对变化，不该将结果外推为全寿命周期的失效概率。

尺度参数 η 反映整体载荷水平。涂层 1~4 的尺度参数 η 分别为 2 433.36、1 926.50、1 801.74、1 885.44 N，相较涂层 1，后三者分别降低 20.83%、25.96%、22.52%。其变化趋势与实测平均峰值的变化趋势一致，说明尺度参数 η 可有效表征总体碰摩载荷水平。

形状参数 m 反映峰值集中程度。涂层 1~4 的形状参数 m 分别为 10.325、8.543、8.616、10.857。m 越大，表示峰值分布越集中，因此，涂层 4 的周期响应最稳定，涂层 1 和涂层 2 相对分散。

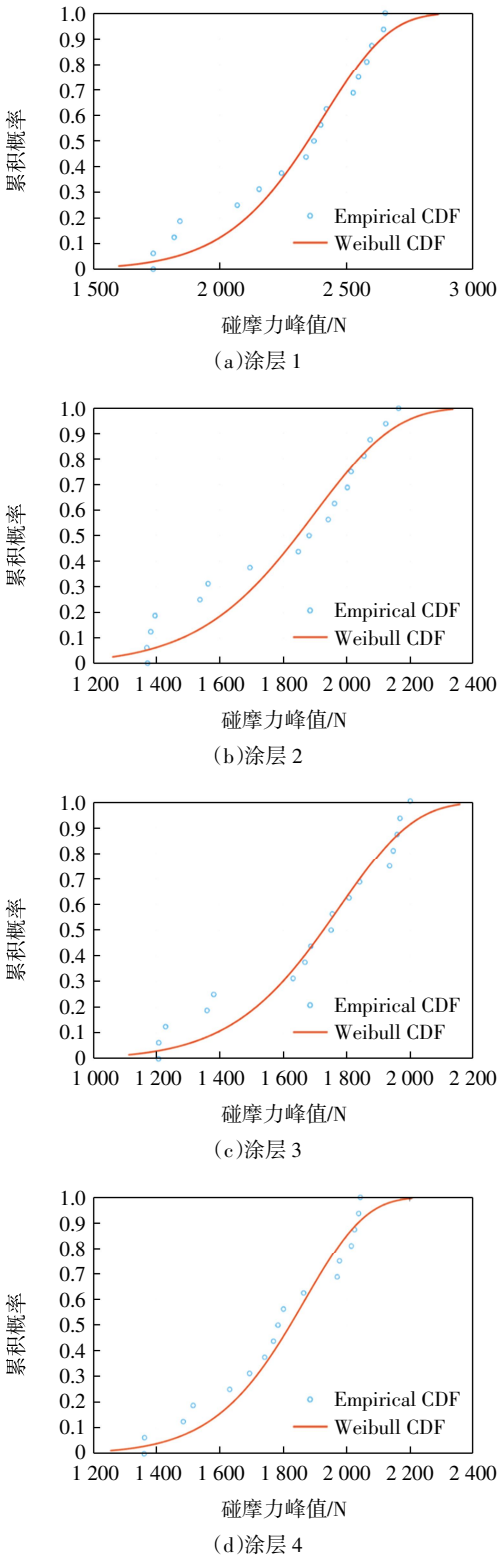


图 5　4 种涂层周期碰摩力峰值的经验累积分布与 Weibull 模型拟合曲线

Fig.5　Empirical cumulative distributions and Weibull model fitting curves of the cyclic rub–impact force peaks for the four coatings

表 7　Weibull 参数及 95% 高分位碰摩力的 Bootstrap 置信区间

Tab.7　Bootstrap confidence intervals of the Weibull parameters and 95% upper-quantile rub-impact forces

单位：N

涂层编号	η	η 的 95% 置信区间	$F_{0.95}$ 的 95% 置信区间
1	2 433.36	2 299.64~2 542.61	2 535.41~2 830.90
2	1 926.50	1 803.13~2 034.97	2 024.33~2 316.85
3	1 801.74	1 685.21~1 899.90	1 894.07~2 158.02
4	1 885.44	1 788.55~1 967.66	1 959.84~2 176.89

形状参数 m 与变异系数 C_V 的结果一致：涂层 4 具有最大的形状参数 m 和最小的变异系数 C_V，而涂层 2 和涂层 3 具有较小的形状参数 m 和较大的变异系数 C_V，说明形状参数 m 能够表征周期峰值的相对离散程度。

总体上，不同涂层的主要差异体现在峰值分布的位置，即碰摩载荷水平明显不同；峰值离散性则未随涂层孔隙率出现单调变化，表明结构状态对周期波动的影响更为复杂。

2.4　95%高分位碰摩力与超限概率

基于 Weibull 模型计算 4 种涂层的 95% 高分位碰摩力 $F_{0.95}$。该值表示在表 3 所示工况和 Weibull 模型下约 95% 的单周期峰值不超过该载荷。图 6 比较了平均峰值、尺度参数 η、$F_{0.95}$ 及 Hertz 理论碰摩力。涂层 1~4 的 $F_{0.95}$ 分别为 2 706.19、2 190.52、2 046.44、2 085.93 N，与平均峰值和尺度参数 η 的趋势一致；相较涂层 1，涂层 2~4 的 $F_{0.95}$ 分别降低 19.06%、24.38%、22.92%。

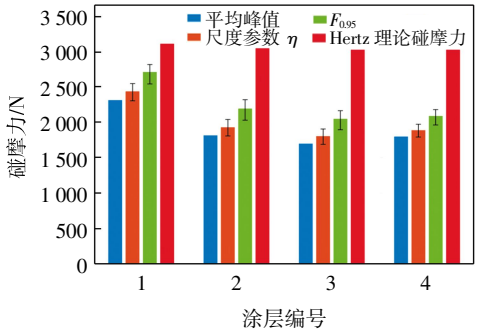


图 6　4 种涂层碰摩力峰值、Weibull 尺度参数、95%高分位碰摩力及 Hertz 理论值对比（误差棒为 95%参数化 Bootstrap 置信区间）

Fig.6　Comparison of rub-impact force peaks, Weibull scale parameters, 95% upper-quantile rub-impact forces and Hertz theoretical values for the four coatings (error bars indicate the 95% parametric Bootstrap confidence intervals)

4 种涂层的高分位碰摩力放大系数 $\gamma_{0.95}$ 分别为 1.172、1.208、1.207、1.162，即 $F_{0.95}$ 较平均峰值高 16.2%~20.8%。因此，仅采用平均碰摩力可能低估高峰值载荷。涂层 2 和涂层 3 的高分位碰摩力放大系数 $\gamma_{0.95}$ 较大，与其较高的变异系数 C_V 和较低的形状参数 m 一致，表明峰值越分散，高分位载荷所需的概率裕量越大。

Hertz 理论碰摩力分别为 3 123、3 060、3 039、3 039 N，较对应的 $F_{0.95}$ 分别高 15.40%、39.69%、48.50%、45.69%。其中，涂层 1 的差异较小，涂层 2~4 的差异显著增大。

Hertz 确定性结果总体比较保守，理想弹性连续体假设无法及时响应实际峰值位置的变化，导致对一些涂层试样的碰摩载荷预测出现较大的高估；同时，单一 Hertz 理论碰摩力无法给出不同载荷水平的出现概率。

图 7 为根据 Weibull 模型计算的不同参考载荷下的峰值超限概率。4 种涂层的超限概率均随参考载荷的增加而下降，但曲线位置和衰减速率不同。相较之下，涂层 1 的曲线更多位于高载荷区，产生较大峰值的概率最高，而涂层 2~4 曲线整体位于低载荷区，这与其较小的尺度参数 η 相吻合。当参考载荷取 2 000 N 时，涂层 1~4 的超限概率分别为 87.63%、25.23%、8.56%、15.00%；当参考载荷提高至 2 200 N 时，分别降至 70.25%、4.47%、0.37%、0.48%。即在相同参考载荷下，不同涂层的超限概率差异显著。

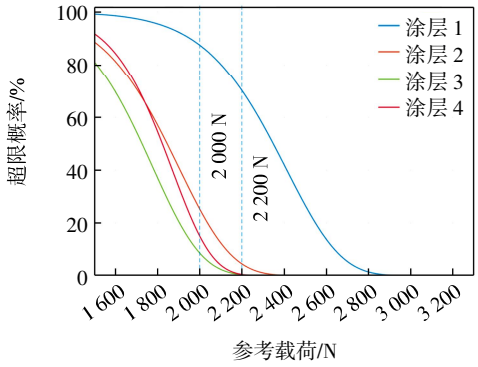


图 7　4 种涂层碰摩力峰值随参考载荷变化的超限概率曲线及示例参考阈值

Fig.7　Exceedance probability curves of rub-impact force peaks versus reference load for the four coatings, with illustrative reference thresholds

结合图 3 的磨痕形貌可以进一步解释不同涂层的超限风险差异。涂层 1 具有较完整的连续承载表面和较高的接触刚度，其峰值分布整体位于高载荷区，因此，在参考载荷 2 000 N 和 2 200 N 下仍分别具有 87.63% 和 70.25% 的较高超限概率。涂层 2 和涂层 3 因孔隙增加及局部材料去除，有效承载能力被削弱，尺度参数 η 明显降低，超限概率曲线整体向低载荷侧移动，但其磨痕空间非均匀性较明显，对应较低的形状参数 m，说明峰值仍具有较强的随机波动。涂层 4 的局部磨损区域较集中，主要承载区域相对稳定，其较大的形状参数 m 使高载荷尾部处的概率衰减更快，因此，尽管尺度参数 η 略高于涂层 3，在参考载荷

2 200 N 下的超限概率仍仅为 0.48%。由此可见,超限概率同时受到整体承载水平和碰摩稳定性的影响:磨痕形貌所反映的整体材料去除程度主要影响尺度参数 η,而磨损空间的均匀性及接触状态的稳定性则主要影响形状参数 m,两者共同决定高载荷区的超限风险。

需要指出的是,图 7 中的载荷仅为概率分析的参考阈值,并非材料或结构的实际失效临界载荷。因此,本文的超限概率表示周期峰值超过给定载荷的概率,不能直接等同于结构失效概率。在实际工程应用中,$F_{\lim}$ 应由叶片允许载荷、涂层损伤限值或转子系统设计准则确定,允许超限概率 P_{allow} 则由相应安全或可靠性要求给定。为说明该方法,图 7 中选取了参考载荷2 000 N 和 2 200 N 作为示例参考阈值。若仅以参考载荷 2 200 N 和 P_{allow} = 5%为示例,则涂层 2~4 的超限概率分别为 4.47%、0.37%和 0.48%,均满足该示例风险约束,而涂层 1 的超限概率为 70.25%,不满足该约束。上述数值仅用于说明风险筛选方法,不作为本文确定的实际失效判据。

综上,Weibull 模型可同时表征周期峰值的载荷水平、离散程度、95%高分位载荷及超限概率。相较平均峰值和单一 Hertz 理论值,基于该模型的超限概率不仅能够描述高载荷事件发生的可能性,还可在给定工程载荷限值和允许风险水平后转化为涂层设计的风险筛选指标。

3　结语

本文基于完整的连续周期碰摩过程提取 4 种 YbDS 涂层的周期碰摩力峰值,并采用 Weibull 模型来表征其随机特征。本文结论适用于本试验所采用的 APS 制备的 YbDS/Si/SiC 涂层体系及常温高速碰摩工况:转速 1 000 r/min、叶尖线速度 41.887 9 m/s、进给速度 0.01 mm/s、进给深度 0.2 mm、单次侵入深度约 0.000 6 mm;每种涂层的分析基于 16 个有效周期峰值,结果主要反映短时周期随机性。主要结论如下。

(1)4 种涂层的周期峰值均表现出随机离散性,K-S 检验 p 值为 0.635 ~ 0.837,Weibull 模型可较好地描述其概率特征。尺度参数 η 为1 801.74 ~ 2 433.36 N,与平均峰值的变化趋势一致;形状参数 m 为 8.543 ~ 10.857, 与变异系数 C_V 相互对应但并非单调变化,表明涂层结构对载荷水平的影响强于对离散性的影响。

(2)4 种涂层的 95%高分位碰摩力 F_{095} 为2 046.44 ~ 2 706.19 N,高分位碰摩力放大系数 $\gamma_{0.95}$ 为 1.162~1.208,即 95%高分位碰摩力 $F_{0.95}$ 为平均峰值的 1.162~1.208 倍。因此,仅采用平均峰值可能低估低概率高载荷事件的载荷水平,95%高分位碰摩力 $F_{0.95}$ 可为碰摩载荷评价提供概率裕量。

(3)Hertz 理论碰摩力均高于 Weibull 95%高分位碰摩力 $F_{0.95}$,其中,涂层 2~4 高 39.69%~48.50%,表明传统 Hertz 模型在多孔涂层碰摩力预测中存在显著偏大的情况。超限概率可给出不同参考载荷对应的峰值发生概率,将单一确定性载荷扩展为连续概率描述。在工程上,在给定实际载荷限值和允许超限概率后,可据此调控陶瓷基涂层造孔相的掺杂量,为涂层成分设计与碰摩风险控制提供量化依据。

参考文献:

[1] 胡延青, 申秀丽. 航空发动机叶尖径向间隙研究进展综述[J]. 航空发动机, 2014, 40(1): 60-67.

[2] Padture N P. Advanced structural ceramics in aerospace propulsion[J]. Nature Materials, 2016, 15(8): 804-809.

[3] Steibel J. Ceramic matrix composites taking flight at GE Aviation[J]. American Ceramic Society Bulletin, 2019, 98(3): 30-33.

[4] Tao Shunyan, Yang Jiasheng, Shao Fang, et al. Thermal spray coatings for aircraft CMC hot-end components: opportunities and challenges[J]. Journal of Inorganic Materials, 2024, 39(10): 1077-1083.

[5] Tejero-Martin D, Bennett C, Hussain T. A review on environmental barrier coatings: history, current state of the art and future developments [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, 41(3): 1747-1768.

[6] Stokes J L, Presby M J, Hoffman L C, et al. Effects of molten silicate reactivity on high temperature erosion behavior of plasma sprayed Yb2Si2O7-based EBCs[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 494: 131078.

[7] 丁坤英, 刘子剑, 王梦潇, 等. 水氧腐蚀对 Yb2Si2O7 涂层裂纹扩展的影响[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(9): 2981-2994.

[8] Chen Z, Etsion I. The elastic-plastic contact behavior of rough surfaces with hard coatings[J]. Tribology International, 2019, 134: 435-442.

[9] Song H, Vakis A I, Liu X, et al. Statistical model of rough surface contact accounting for size-dependent plasticity and asperity interaction[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2017, 106: 1-14.

[10] Ma Hui, Tai Xingyu, Han Qingkai, et al. A revised model for rubbing between rotating blade and elastic casing[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 337: 301-320.

[11] Kang Yanhong, Cao Shuqian, Hou Yuanhang, et al. Dynamics research on the rubbing process and rubbing forms of rotor-blade-casing systems [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2022, 147: 104242.

[12] Wang S H, Yuan W K, Liang X M, et al. An improved line contact model for elastic-plastic rough surfaces[J]. Acta Mechanica, 2025, 236(1): 343-355.

[13] Legrand M, Batailly A, Magnain B, et al. Full three-dimensional investigation of structural contact interactions in turbomachines[J]. Journal of

Sound and Vibration, 2012, 331(11): 2578–2601.

[14] Kang Yanhong, Cao Shuqian, Gao Tian, et al. Development and validation of a rotating blade–casing rubbing model by considering the blade deformation and abradable coating[J]. Journal of Sound and Vibration, 2023, 563: 117853.

[15] Ma Hui, Guan Hong, Qu Lin, et al. Blade–coating–casing rubbing induced vibration responses and wear characteristics[J]. Tribology International, 2024, 194: 109571.

[16] Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability[J]. Journal of Applied Mechanics, 1951, 18(3): 293–297.

[17] Deng Bin, Jiang Danyu. Determination of the Weibull parameters from the mean value and the coefficient of variation of the measured strength for brittle ceramics[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2017, 6(2): 149–156.

[18] Manuel L, Veers P S, Winterstein S R. Parametric models for estimating wind turbine fatigue loads for design[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2001, 123(4): 346–355.

[19] Zhang Maoyu, Li Bo, Zheng Zezhong, et al. Experimental study on impact performance of basalt–polypropylene fiber reinforced high–performance concrete[J]. Materials, 2024, 17(13): 3253.

[20] 丁坤英, 裴祥忠, 刘子剑, 等. 基于赫兹接触模型的发动机封严涂层碰磨力计算与优化[J]. 表面技术, 2024, 53(5): 184–193.

[21] Park G, Yang H, Lee M, et al. Effect of coating density on plasma etch resistance and material loss of Y_2O_3 coatings[J]. Applied Surface Science, 2025, 712: 164246.

[22] 卫泽兵. 激光熔覆 Inconel 625 工艺及其组织性能研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2023.

(责任编辑:孟　欣)

(上接第 57 页)

例库等知识成果,为审定人员提供数据参考和决策支撑,为相似型号的适航审定工作提供经验参考,指导型号审定工作的合理规划和开展,实现数据价值的最大化释放。

参考文献:

[1] AP–21–11R2—2026 航空器型号合格审定程序[S].

[2] 殷时军, 孙建红, 王大蕴. 适航审定“三性”理念与模型分析[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2022, 54(5): 843–850.

[3] 张睿琳, 裴沛, 胡涛, 等. 水陆两栖飞机投汲水灭火系统适航审定基础探究[J]. 航空标准化与质量, 2021(4): 26–30.

[4] 蔡喁. 适航审定智能化若干关键技术研究[D]. 上海: 复旦大学, 2020.

[5] 朱玉屏, 李煜, 顾新. 基于审查任务模型的机载系统和设备的适航审查技术研究[J]. 航空电子技术, 2022, 53(2): 60–67.

[6] 申岳, 邵俊, 蔡喁. 适航审查活动规则管理方法和系统: CN2020–11220723.4[P]. 2021–01–15.

[7] 朱玉屏, 顾新, 孙辉鹏. 基于 C–PRO 模型的数字化适航审定研究及应用[J]. 中国民航大学学报, 2022, 40(6): 53–59.

[8] 张艳红. 民用飞机型号取证过程中条款关闭管理平台的应用[J]. 装备制造技术, 2014(8): 164–166.

[9] 张艳红. 民机型号取证任务管理信息化建设探讨[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(4): 78–81.

[10] 张娟. 民用飞机数字化适航管理平台技术研究[J]. 航空科学技术, 2017, 28(3): 74–78.

[11] 张粉婷. 浅析构建数字化适航审定平台的必要性[J]. 科技视界, 2022, 12(29): 71–73.

(责任编辑:刘雅婷)