

# 基于层次分析法-熵权组合法的航天器材料应用验证 综合评价研究

牛 虎 刘泊天 高 鸿 李 岩 邢 焰

(中国航天宇航元器件工程中心, 北京 100094)

**文 摘** 为解决航天领域优选材料的难题,针对航天器用材料服役环境特点及材料自身性质,分别从材料性能、工艺、服役环境和安全四个方面构建了航天器材料应用验证评价的技术指标,通过层次分析法(AHP)和熵权法建立航天器材料应用验证量化评分模型,并以两批次航天器用涂覆材料为例,通过AHP-熵权组合赋权,将主观和客观方法相结合,确定了涂覆材料的综合权重,最后利用模糊综合评价的方法对两批次航天器涂覆材料的性能进行了评分比较,实现了材料综合性能的量化打分。

**关键词** 航天器,材料,应用验证,AHP-熵权组合法

中图分类号:V45

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2023.02.004

## Research on Comprehensive Evaluation of Spacecraft Materials Application Validation Based on Analytic Hierarchy Process-Entropy Weight Combined Method

NIU Hu LIU Botian GAO Hong LI Yan XING Yan

(China Aerospace Components Engineering Center, Beijing 100094)

**Abstract** In order to solve the problem of selecting spacecraft materials, according to the working environment characteristics and properties of spacecraft materials, an index system for the applicability evaluation of spacecraft materials is established from the four aspects: functional stability, process applicability, environmental adaptability and service safety. The comprehensive evaluation model of spacecraft materials application validation is established through analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method. Two batches of coating materials for spacecraft are taken as examples, the comprehensive weight is determined by combining the subjective and objective methods through AHP-entropy weight combined method. Finally, the properties of two batches of spacecraft coating materials is scored and compared by using the fuzzy comprehensive evaluation method.

**Key words** Spacecraft, Materials, Application validation, AHP-entropy weight combined method

### 0 引言

航天器材料选用技术作为航天器各单机、部组件、元器件的设计基础<sup>[1-3]</sup>,关系到航天器的质量与可靠性、航天器验证成本与进度<sup>[4-6]</sup>,也关系到资源与环境的平

衡发展。因此,航天器材料的选择在近些年航天技术的发展中尤为重要。航天器材料选用技术的核心不仅在于对材料关键性能先进性的评估,更需要以工程应用可靠性和寿命为核心,通过对材料所经历的服役环

收稿日期:2022-09-25

第一作者简介:牛虎,1992年出生,博士,主要从事航天材料保证与可靠性评价工作。E-mail:455615961@qq.com

通信作者:高鸿,1980年出生,博士,研究员,主要从事航天材料开发应用与可靠性评价工作。E-mail: gh\_cast@sina.com

境下性能稳定性、工艺适用性、组件兼配性等综合数据进行评估,遴选出在特定应用背景下更为适合的材料。

当前,面对航天技术快速发展、新材料技术日新月异,新技术新材料更迭换代、交叉互用的模式已打破传统航天器研制以材料继承性选用为主的常态。航天器器件或零件等生产制备过程中,可选材料种类多、规格杂、性能广,且一些性能有时又相互制约,传统的通过材料手册进行数据筛选识别的选用模式已经不能满足当前复杂航天研制任务要求。正因如此,材料综合评价系统的全面构建,推动材料新技术在重大工程任务高可靠应用的转化,已成为近些年国内材料选用领域中的研究热点。

GANESAN等<sup>[7]</sup>对AA6082基复合材料的制备工艺进行了研究,通过熵权法获得了制备该材料的最佳工艺参数。QIAN等<sup>[8]</sup>在微机电系统设计的早期阶段通过AHP-熵权法等综合评价方法对器件所用的硅材料进行了比较分析,快速准确地筛选出了综合性能最优的硅材料。王鹏博等<sup>[9]</sup>基于改进的熵权法分析了钢纤维体积参量和塑钢纤维体积参量对混凝土抗折强度和抗压强度的影响,实现了混凝土性能的综合改善。汪建飞等<sup>[10]</sup>利用模糊集合理论,建立了金属材料远程模糊查询及选材系统,通过模糊综合评判,可快速选择出最合适的金属牌号。

本文基于对材料、信息及管理多学科交叉的技术基础,对航天器材料综合评价技术指标的建立、评价指标权重的确定以及评价方法的选择进行系统研究,示范性地开展航天器材料综合评价,拟为航天器材料应用验证综合评价提供实践指导,进一步完善我国航天器材料“选、评、用”技术一体化发展理论基础。

### 1 材料性能评价技术指标的构建

评价技术指标的主要作用是较为全面地反映材料从制备到应用中的关键特征属性,以获得客观、准确的评价结果。航天器材料指标体系需在充分考虑材料的功能性能、工艺适用性、环境适应性和服役安全性基础上,通过层次分析法进行构建<sup>[11]</sup>,即通过对材料全面的分析,选择出若干个可综合材料整体性能的特征并结合应用需求设定指标体系及其判据,形成层次清晰,关键特性鲜明评价矩阵。

根据上述分析,获得航天器材料指标体系框架如图1所示。所述指标体系应重点关注材料的使用性能,因为这是保证分系统或单机产品正常工作的关键,综合评价时应以材料使用性为核心进行评价指标设置。

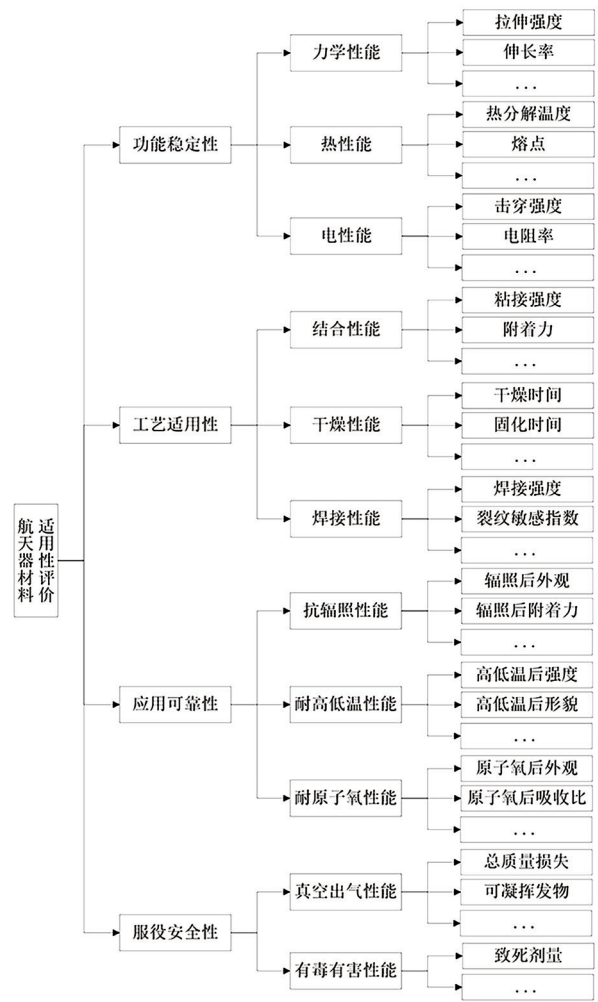


图1 航天器材料评价指标体系框架

Fig. 1 Evaluation index system framework of spacecraft materials

## 2 材料性能评价指标权重的确定

指标权重是为了将各评价指标的重要性进行初步量化,是最终量化打分的前提条件,本研究工作主要通过主观、客观两种方法进行权重的计算。

### 2.1 层次分析法(AHP法)

AHP法是一种常用的主观赋权法,该方法将定性分析和定量分析相结合,将复杂系统中各指标进行层次化,形成多层次分析结构,然后将各层次各指标进行分析比较,按照相对重要程度进行赋值。该方法具有准确性好、容易实施等特点<sup>[12-13]</sup>,近些年在金融、基建及军工等领域均取得了较为广泛的应用。AHP法进行赋权的主要步骤如下。

#### 2.1.1 构建目标与指标的层次关系

先将总目标分解为影响其的若干个指标,然后将指标继续分解成各个子指标,直至分解出最下级指标。中间层是用来判断下一层对上一层的影响标准,最下层指标直接体现材料某一性能,典型的指标层级关系如图2所示。

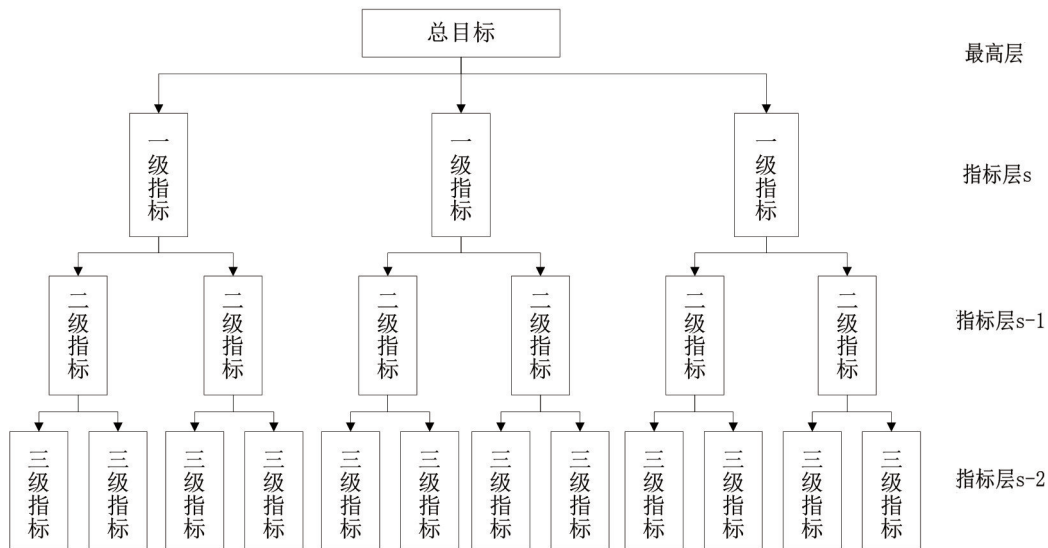


图2 层次结构示意图

Fig. 2 Hierarchy Diagram

### 2.1.2 确定各元素之间的重要关系

把图2层次结构中每一层的各元素的相对重要性进行两两比较,采用1-9标度法<sup>[14]</sup>将结果量化,获得该层元素的判断矩阵  $C=(c_{ij})_{n \times n}$ ,  $c_{ij}$  的取值如表1所示。

表1 元素赋值及说明

Tab. 1 Element assignment and description

元素赋值	说明
1	元素A和B重要性相同
3	元素A重要性稍微比B强
5	元素A重要性明显比B强
7	元素A重要性与B相比特别强
9	元素A重要性与B相比极端强
2,4,6,8	上述相邻比较的中间值
倒数	若元素A与元素B相比取值为 $c_{ij}$ , 则元素B与元素A相比取值为 $1/c_{ij}$

### 2.1.3 元素相对权重的确定

AHP法中元素的相对权重一般通过和法、幂法或方根法计算。本文利用方根法计算元素的相对权重。

$$b_i = \prod_{j=1}^n c_{ij} \quad (1)$$

$$\bar{a}_i^k = \sqrt[n]{b_i} \quad (2)$$

$$a_i^k = \frac{\bar{a}_i^k}{\sum_{i=1}^n \bar{a}_i^k} \quad (3)$$

式中,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

### 2.1.4 一致性检验

为了消除判定过程中由于人为的因素对结果造成不一致的结论,需要对结果进行一致性检验,只有当一致性  $CR < 0.1$ ,才具有满意的一致性。 $CR$ 通过公式(4)

进行计算。

$$CR = CI/RI \quad (4)$$

式中,  $CI = (\lambda_{\max} - n)/(n-1)$ ,  $\lambda_{\max}$  为特征根最大值,  $n$  为判断矩阵阶数,  $RI$  为随机一致性值,具体值见表2。

表2 随机一致性值

Tab. 2 Random consistency value

$n$	$RI$	$n$	$RI$	$n$	$RI$	$n$	$RI$
1	0	3	0.58	5	1.12	7	1.32
2	0	4	0.90	6	1.24	8	1.41
						9	1.45
						10	1.49

### 2.1.5 权重计算

根据上述步骤,可计算总目标下所有元素的相对权重,根据公式(5)便可计算出所有指标的权重。

$$\beta_i = a^1 \times a^2 \times a^3 \times \dots \times a^s \quad (5)$$

式中,  $i = 1, 2, \dots, m$ , 表示指标总数。

### 2.2 熵权法

熵在管理学中可用来在多指标性综合评价中计算评价指标的客观权重<sup>[15]</sup>。熵可测量数字信息学中的杂乱程度<sup>[16]</sup>。熵权法就是通过各指标包含信息量的大小确定指标权重,是一种常用的客观赋权法,在一定程度上可减少主观因素对评价过程的干扰。熵权法计算过程如下:设有  $m$  个评价对象,每一对象有  $n$  个指标,则可组成  $m \times n$  的初始信息矩阵  $X^*$ , 其中  $x_{ij}^*$  为第  $i$  个评价项目的第  $j$  个指标的数值。

$$X^* = \begin{bmatrix} x_{11}^* & x_{12}^* & \dots & x_{1j}^* & \dots & x_{1n}^* \\ x_{21}^* & x_{22}^* & \dots & x_{2j}^* & \dots & x_{2n}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i1}^* & x_{i2}^* & \dots & x_{ij}^* & \dots & x_{in}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1}^* & x_{m2}^* & \dots & x_{mj}^* & \dots & x_{mn}^* \end{bmatrix}$$

式中,  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。

通过密度法公式(6)将矩阵进行标准化, 得到标准矩阵  $X$ 。

$$x_{ij} = x_{ij}^* / \sum_{k=1}^m x_{kj}^* \quad (6)$$

$$X^* \xrightarrow{\text{标准化}} X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

根据公式(7)计算第  $j$  个指标的熵值, 根据公式(8)计算第  $j$  个指标的差异系数, 根据公式(9)计算第  $j$  个指标的权重。

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n x_{ij} \cdot \ln x_{ij} \quad (7)$$

$$h_j = 1 - e_j \quad (8)$$

$$\beta_j = h_j / \sum_{j=1}^n h_j \quad (9)$$

式中,  $k = (\ln m)^{-1}, 0 \leq e_j \leq 1; j = 1, 2, \dots, n$ 。

### 2.3 组合赋权法确定权重

通过将AHP和熵权法得到的权重向量进行点乘并归一化, 便可得到组合赋权后的综合权重向量, 用公式(10)表示。

$$\beta = \frac{\beta_1 \times \beta_2}{\sum_i \beta_{1i} \times \beta_{2i}} \quad (10)$$

式中,  $\beta_1$  代表权重<sub>AHP</sub>,  $\beta_2$  代表权重<sub>熵权</sub>,  $\beta$  代表权重<sub>综合</sub>,  $\beta_{1i}$  和  $\beta_{2i}$  各代表  $\beta_1$  和  $\beta_2$  中的各个元素。

### 3 基于组合赋权的模糊综合评价

模糊综合评价法可对不同材料性能的评价更为全面和科学, 得到的结果更为准确。该方法实现了材料性能由定性向定量评价的转变, 为优选材料提供了更为客观的依据<sup>[17]</sup>。模糊综合评价法流程图如图3所示。

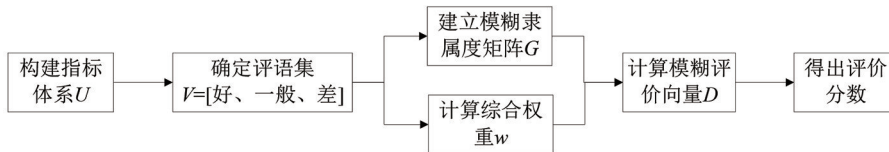


图3 模糊综合评价法流程图

Fig. 3 Flow chart of fuzzy comprehensive evaluation method

其中, 评语集中的好、一般、差在进行具体评价时需设置相应的分数区间, 例如 80~100 为好, 50~80 为一般, 低于 50 为差。模糊评价向量  $D = \text{模糊隶属矩阵 } G \times \text{综合权重 } w$ 。

综上所述可知, AHP-熵权组合法进行航天器材料应用验证综合评价时的主要步骤为: 首先通过AHP法确定主观权重, 包括层次关系的建立、判断矩阵的建立、一致性检验和权重计算。然后根据熵权法确定客观权

重, 组合赋权确定综合权重, 包括信息矩阵和标准矩阵的建立, 熵、差异系数和权重的计算。最后进行模糊综合评价, 包括最终评价指标集的确定、评语集和隶属函数的确定、综合评价分数的计算。通过上述步骤便可实现不同材料综合性能的量化评分, 为优选航天器材料提供科学、客观的数据支撑。

### 4 航天器用涂覆材料应用验证评价实例分析

#### 4.1 APH法确定主权重

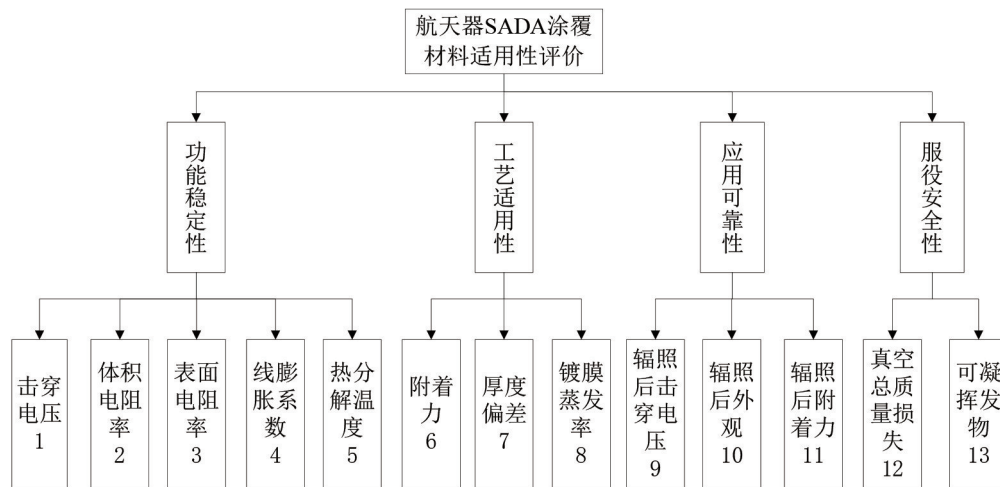


图4 航天器涂覆材料指标

Fig. 4 Indexes of spacecraft coating material

以航天器太阳能阵列组件(Solar Array Drive Assembly, SADA)中功率电刷用涂覆材料为验证对象,通过使用AHP法分析涂覆材料评价指标的主观权重。

#### 4.1.1 建立层次关系

综合考虑涂覆材料在SADA组件中的功能作用和空间环境中服役时应具备的性能要求,结合图1中航天器材料适用性评价指标体系并参照图2中的层级结构,选择5种指标作为功能稳定性评价指标,各选3种指标作为工艺适用性和应用可靠性评价指标,选择2种指标作为服役安全性评价指标,层次结构如图4所示。

#### 4.1.2 构建判断矩阵

从涂覆材料的功能角度出发,击穿电压是其主要的选择标准,其次是体积电阻率、表面电阻率。此外,线胀系数和热分解温度也是较为关键的性能。从工艺角度出发,附着力、厚度偏差以及镀膜蒸发率依次设为重要的工艺性指标。从空间应用的角度出发,辐照后击穿电压、外观和附着力依次为关键性指标。从服役安全的角度出发,真空总质量损失和可凝挥发物为安全性指标。

结合前文分析可获得功能稳定性指标评价体系判断矩阵 $C_1$ ,工艺适用性指标评价体系判断矩阵 $C_2$ ,应用可靠性指标评价体系判断矩阵 $C_3$ 和服役安全性指标评价体系判断矩阵 $C_4$ 。

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 & 4 & 5 \\ 1/3 & 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1/3 & 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1/4 & 1/2 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

在SADA涂覆材料适用性总目标下,可得到功能稳定性、工艺适用性、应用可靠性和服役安全性四个上级指标的判断矩阵 $C_5$ 。

$$C_5 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1 & 1/3 & 1 \\ 1 & 3 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

$X =$

$$\begin{bmatrix} 0.5455 & 0.5010 & 0.5014 & 0.5 & 0.4995 & 0.5744 & 0.5 & 0.5606 & 0.5 & 0.4953 & 0.5493 & 0.4952 & 0.5 \\ 0.4545 & 0.4990 & 0.4986 & 0.5 & 0.5005 & 0.4256 & 0.5 & 0.4394 & 0.5 & 0.5047 & 0.4507 & 0.5048 & 0.5 \end{bmatrix}$$

利用公式(1)~(3)进行计算,可求出功能稳定性下5个指标的相对权重: $a_1^1=(0.4566, 0.1856, 0.1856, 0.1066, 0.0657)$ 。工艺适用性下3个指标的相对权重: $a_2^1=(0.5397, 0.2970, 0.1634)$ 。应用可靠性下3个指标的相对权重: $a_3^1=(0.5397, 0.2970, 0.1634)$ 。服役安全性下2个指标的相对权重: $a_4^1=(0.5, 0.5)$ 。

同理,计算得出在航天器涂覆材料适用性评价总目标下功能稳定性、工艺适用性、应用可靠性和服役安全性4个指标的相对权重: $a^2=(a_1^2, a_2^2, a_3^2, a_4^2)=(0.3751, 0.1250, 0.3751, 0.1250)$ 。

#### 4.1.3 一致性检验

通过计算,可得矩阵 $C_1$ 最大特征根 $\lambda_{\max}=5.0558$ , $CI=(5.0558-5)/(5-1)=0.0140$ ,由表2可知 $RI=1.12$ ,故 $CR=0.0140/1.12=0.0124<0.1$ ,通过一致性检验,表明所构建矩阵合理。

同理,矩阵 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 和 $C_5$ 也都通过一致性检验。

#### 4.1.4 指标权重计算

计算出各指标的相对权重之后,根据公式(5)即可计算出所有13个指标的权重:

$$w = (a_1^1 \times a_1^2, a_2^1 \times a_2^2, a_3^1 \times a_3^2, a_4^1 \times a_4^2) = (0.17126, 0.06962, 0.06962, 0.03999, 0.02464, 0.06746, 0.03713, 0.02042, 0.02042, 0.11141, 0.06128, 0.0625, 0.0625)$$

#### 4.2 熵权法确定客观权重

涂覆材料作为SADA组件中绝缘防护材料,在满足厚度要求的前提下,其绝缘性、热分解温度越高越好,线胀系数越低越好。从工艺角度分析,厚度偏差越小越好,镀膜蒸发率越高越好,附着力等级越低越好。同理,辐照之后涂覆材料绝缘性越高越好,附着力等级越低越好。在轨服役时,其污染物应该尽可能少,因此总质量损失和可凝挥发物都是越低越好。

基于上述分析,将击穿电压(BV)、体积电阻率( $\rho_v$ )、表面电阻率( $\rho_s$ )、热分解温度( $T_d$ )、镀膜蒸发率(E)、外观(A)作为正指标,厚度偏差(t)、线膨胀系数( $\alpha$ )、附着力等级(D)、总质量损失(TML)和可凝挥发物(CVCM)作为逆指标,两个批次涂覆材料的13个评价指标性能数据如表3所示。表中,将外观指标定量化处理:完好性能数据为1,轻微起皮、轻微起泡、轻微开裂性能数据为0.5,严重起皮、严重起泡、严重开裂性能数据为0。体积电阻率和表面电阻率取其倒数。

将表3中逆指标正向化(取其倒数)后利用公式(2)可求出指标的标准化矩阵 $X$ 。

表3 两批次涂覆材料性能数据  
Tab. 3 Performance data of two batches of coating materials

批次	BV/kV	$\rho_v/\Omega\cdot\text{cm}$	$\rho_s/\Omega\cdot\text{cm}$	$T_d/^\circ\text{C}$	E/%	辐照-BV/kV	辐照-A/kV	t/%	D/级	$\alpha/10^{-6}\text{K}^{-1}$	TML/%	CVCM/%	辐照-D/级
1	5.45	15.18	12.93	453	99.3	4.94	0.5	2.9	1	48.5	0.288	0.053	2
2	4.54	15.12	12.86	453	99.5	3.66	0.5	3.7	1	47.6	0.351	0.052	2

表4 涂覆材料评价指标熵、差异系数和权重  
Tab. 4 Evaluation index entropy, difference coefficient and weight of coating materials

参数	BV/kV	$\rho_v/\Omega\cdot\text{cm}$	$\rho_s/\Omega\cdot\text{cm}$	$T_d/^\circ\text{C}$	E/%	辐照-BV/kV	辐照-A/kV	t/%	D/级	$\alpha/10^{-6}\text{K}^{-1}$	TML/%	CVCM/%	辐照-D/级
$e_j$	0.994 0	1	1	1	1	0.984 0	1	0.989 4	1	0.999 9	0.993 0	0.999 9	1
$h_j$	0.006 0	0	0	0	0	0.016	0	0.010 6	0	0.000 01	0.007	0.000 01	0
$\beta_j$	0.150 8	0	0	0	0	0.402 0	0	0.266 3	0	0.002 5	0.175 9	0.002 5	0

由公式(7)~(9)对13种指标的熵、差异系数和权重进行计算,结果如表4所示。从表4中可知,体积电阻率、表面电阻率、热分解温度、镀膜蒸发率、辐照后外观、附着力等级以及辐照后附着力等指标其客观权重为0,这是因为两批次材料该性能指标数据标准化后非常接近或相等,由公式(10)可知,在通过组合赋权进行综合评价时,这类指标权重将都为0,当权重为0的指标同时又满足应用要求时,这类指标可不再参与计算。

### 4.3 组合赋权确定综合权重

根据4.1和4.2中权重结果,并利用公式(10)可计算获得评价指标的综合权重,如表5所示。

表5 涂覆材料评价指标权重  
Tab. 5 Weight of coating material evaluation index

权重	BV/kV	辐照-BV/kV	t/%	$\alpha/10^{-6}\text{K}^{-1}$	TML/%	CVCM/%
$\beta_{\text{AHP}}$	0.171 3	0.020 4	0.037 1	0.040 0	0.062 5	0.062 5
$\beta_{\text{熵}}$	0.150 8	0.402 0	0.266 3	0.002 5	0.175 9	0.002 5
$\beta$	0.468 1	0.148 8	0.179 2	0.001 8	0.199 3	0.002 8

### 4.4 基于组合赋权的模糊综合评价

#### 4.4.1 评价指标集的确定

根据4.3节分析可知,在两种材料都满足应用要求的前提下,可确定最终评价指标集  $F=\{\text{击穿电压 } BV, \text{辐照后击穿电压、厚度偏差 } t, \text{线胀系数 } \alpha, \text{总质量损失 } TML \text{ 和可凝挥发物 } CVCM\}$ 。

#### 4.4.2 建立评语集

由章节3可知,模糊评语集及相应的评分集是模糊综合评价的基础,本文将航天器材料适用性程度划分为3级,即模糊评语集  $V=\{\text{好、一般、差}\}$ ,相应的评分集  $V^*=\{90, 70, 50\}$ 。

#### 4.4.3 确定隶属函数

隶属函数用来计算某指标在相应评语集中的隶属程度,是提高材料应用验证综合评价准确性的重要步骤<sup>[18]</sup>。两种材料工程应用指标要求、最终参与评价指标及相应性能数据如表6所示。

表6 两批次涂覆材料性能及指标要求

Tab. 6 Performance and index requirements of two batches of coating materials

涂覆材料	BV/kV	辐照-BV/kV	t/%	$\alpha/10^{-6}\text{K}^{-1}$	TML/%	CVCM/%
批次1	5.45	4.94	2.9	48.5	0.288	0.053
批次2	4.54	3.66	3.7	47.6	0.351	0.052
应用要求 $x_0$	$\geq 1$	$\geq 1$	$\leq 7.4$	$\leq 80$	$\leq 1$	$\leq 1$

设某指标取值为  $x$ ,当该指标为正向指标时,最低指标要求  $x_0$ ,理想指标为  $x_2=4x_0$ ,中间等分点为  $x_1=2.5x_0$ ;当该指标为逆向指标时,最高指标要求为  $x_0$ ,理想指标为  $x_2=1/4x_0$ ,中间等分点为  $x_1=0.625x_0$ 。因此,可建立如下隶属函数。

#### (1) 指标属于{好}的隶属函数

$$\mu_A = \begin{cases} 1 & x \geq x_2 \\ \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} & x_1 < x < x_2 \text{ (正指标)} \\ 0 & x \leq x_1 \end{cases}$$

$$\mu_A = \begin{cases} 1 & x \leq x_2 \\ \frac{x_1 - x}{x_1 - x_2} & x_2 < x < x_1 \text{ (逆指标)} \\ 0 & x \geq x_1 \end{cases}$$

#### (2) 指标属于{一般}的隶属函数

$$\mu_A = \begin{cases} 0 & x \leq x_0 \text{ or } x \geq x_2 \\ \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} & x_0 < x \leq x_1 \text{ (正指标)} \\ \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} & x_1 < x < x_2 \end{cases}$$

$$\mu_A = \begin{cases} 0 & x \leq x_2 \text{ or } x \geq x_0 \\ \frac{x - x_2}{x_1 - x_2} & x_2 < x \leq x_1 \text{ (逆指标)} \\ \frac{x_0 - x}{x_0 - x_1} & x_1 < x < x_0 \end{cases}$$

#### (3) 指标属于{差}的隶属函数

$$\mu_A = \begin{cases} 1 & x \leq x_0 \\ \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0} & x_0 < x < x_1 \text{ (正指标)} \\ 0 & x \geq x_1 \end{cases}$$

$$\mu_A = \begin{cases} 1 & x \geq x_0 \\ \frac{x - x_1}{x_0 - x_1} & x_1 < x < x_0 \text{ (逆指标)} \\ 0 & x \leq x_1 \end{cases}$$

根据上述公式,涂覆材料批次1和批次2的指标评价矩阵分别为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0.6216 & 0.3784 & 0 \\ 0.0500 & 0.9500 & 0 \\ 0.8987 & 0.1013 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0.7733 & 0.2267 & 0 \\ 0.3333 & 0.6667 & 0 \\ 0.0800 & 0.9200 & 0 \\ 0.7307 & 0.2693 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

#### 4.4.4 综合评价

由章节3中综合评价向量  $D = \text{综合权重} \times \text{评价矩阵}$  可知,两批次涂覆材料的模糊综合评价向量:

$$D_1 = \beta \times R_1 = (0.4681, 0.1488, 0.1792, 0.0018, 0.1993, 0.0028) \times R_1 = (0.9103, 0.0897, 0);$$

$$D_2 = \beta \times R_2 = (0.4681, 0.1488, 0.1792, 0.0018, 0.1993, 0.0028) \times R_2 = (0.7915, 0.2085, 0).$$

两批次涂覆材料最终评价价值如表7所示。评价结果表明,两批次涂覆材料综合评价分数均高于80分,评价表现为“好”,在航天器的应用验证中,批次1涂覆材料性能更优。

表7 两批次涂覆材料适用性综合评价向量及评价分数

Tab. 7 Comprehensive evaluation vector and score of applicability of two batches of coating materials

涂覆材料	模糊评价向量	评价分数
批次1	(0.9103, 0.0897, 0)	88.21
批次2	(0.7915, 0.2085, 0)	85.84

## 5 结论

“综合评价”是航天器材料应用验证技术整体性、系统性的数字化体现,它是利用常用数据模型和计算方法将航天器材料“多参数”指标体系进行“适用度”的归一化过程。本文示范性地论述了航天器材料在特定应用背景下,从指标体系分解研究到综合集成递进,从主观、客观分析到主客观结合的评价,实现了材料应用验证综合评价整体性的研究以及科学性的量化。

文章以航天器用绝缘涂覆材料为例,首次利用层次分析法和熵权法对涂覆材料性能指标的权重进行了计算。然后通过组合赋权,确定了涂覆材料的综合权重,最后利用模糊综合评价的方法对两批次

航天器涂覆材料的适用性进行量化的比较,实现了航天器材料的量化评分。评价流程清晰,方法科学、客观,结果与实际应用效果相吻合,既可为航天器材料性能的综合评价提供较大的参考价值,同时能为其他领域中优选材料的难题提供一种新的解决思路。

## 参考文献

[1] 吴开林. 航天器基本特点与设计要求概述(二)——航天器设计的约束条件[J]. 航天标准化, 2002(2): 42-44.

WU K L. Overview of basic characteristics and design requirements of spacecraft ( II )—constraints for spacecraft design [J]. Aerospace Standardization, 2002(2): 42-44.

[2] 冯伟泉. 航天器材料空间环境适应性评价与认定准则研究[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(2): 139-143.

FENG W Q. Evaluation and validation of space environmental applicability of spacecraft materials [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(2): 139-143.

[3] 王蓓. 航天电子元器件可靠性设计与分析[J]. 电子元器件与信息技术, 2020, 4(1): 13-14, 17.

WANG B. Reliability design and analysis of aerospace electronic components [J]. Electronic Component and Information Technology, 2020, 4(1): 13-14, 17.

[4] 高鸿, 牛虎, 王向轲, 等. 航天器用材料大数据服务体系构建构想[J]. 中国材料进展, 2022, 41(11): 930-937.

GAO H, NIU H, Wang X K, et al. Conceive of big data service system construction for spacecraft materials [J]. Rare Metals Letters, 2022, 41(11): 930-937.

[5] 胡继东, 左小彪, 冯志海. 航天器热防护材料的发展概述[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(3): 88-92.

HU, J D, ZUO X B, Feng Z H. Development of thermal protection materials for space vehicle [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2011, 32(3): 88-92.

[6] 虞晓芬, 傅玳. 多指标综合评价方法综述[J]. 统计与决策, 2004(11): 119-121.

YU X F, FU D. A review of multi-indicator comprehensive evaluation methods [J]. Statistics and Decision, 2004(11): 119-121.

[7] GANESAN K P, DHILIP J D J, SIVALINGAM V, et al. Machinability analysis and optimisation of EDM in AA6082/3 wt% BN/1 wt% MoS<sub>2</sub> hybrid composites using entropy method weights integrated with complex proportional assessment (COPRAS) method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 123(11-12): 4051-4064.

[8] QIAN J, ZHAO Y P. Materials selection in mechanical design for microsensors and microactuators [J]. Materials & Design, 2002, 23(7): 619-625.

[9] 王鹏博, 尹冠生, 冯俊杰, 等. 基于NSGA-II与熵权TOPSIS法的混杂纤维再生混凝土配合比多目标优化[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(12): 4189-4201.

WANG P B, YIN G S, FENG J J, et al. Multi-objective optimization of mix ratio of hybrid fiber recycled concrete based

on NSGA-II and entropy weight TOPSIS method[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(12): 4189-4201.

[10] 汪建飞, 殷国富, 宁芊, 等. 金属材料模糊查询及选材数据库系统[J]. 机械, 2005, 32(3): 26-28.

WANG J F, YIN G F, QIAN N, et al. Metal material selection system based on fuzzy theory[J]. Machinery, 2005, 32(3): 26-28.

[11] 张天云, 陈奎, 徐晓玲, 等. 工程材料评价指标体系的构建方法[J]. 机械工程材料, 2016(9): 6-9.

ZHANG T Y, CHEN K, XU X L. Construction methods of evaluation index system for engineering materials[J]. Mechanical Engineering Materials, 2016(9): 6-9.

[12] MB A, MB B. A combined goal programming-AHP approach to maintenance selection problem-science direct [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91(7): 839-848.

[13] BAFAIL O A, ABDULAAL R M. New approach for selecting a suitable recycling collection program for recovered paper and pulp recyclables using AHP-TOPSIS techniques [J]. Waste Management & Research, 2021, 39(11): 1406-1413.

[14] 张留欢, 王君, 冯建畅, 等. 基于AHP的航天科技创新课题制实施影响因素分析[J]. 项目管理技术, 2021, 19(6): 124-127.

ZHANG L H, WANG J, FENG J C. Analysis of influencing factors in the implementation of aerospace science and technology innovation project system based on AHP [J]. Project

Management Technology, 2021, 19(6): 124-127.

[15] 张发明, 刘志平. 组合评价方法研究综述[J]. 系统工程学报, 2017, 32(4): 557-569.

ZHANG F M, LIU Z P. Combined evaluation methods: a literature review [J]. Journal of Systems Engineering, 2017, 32(4): 557-569.

[16] 章穗, 张梅, 迟国泰. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究[J]. 管理学报, 2010, 7(1): 34-42.

ZHANG S, ZHANG M, CHI G T. The science and technology evaluation model based on entropy weight and empirical research[J]. Chinese Journal of Management, 2010, 7(1): 34-42.

[17] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. 水利学报, 2004(3): 65-70.

JIN J L, WEI Y M, DING J. Fuzzy comprehensive evaluation model based on improved analytic hierarchy process [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(3): 65-70.

[18] 温震江, 高谦, 王永定, 等. 基于模糊综合评判的复合胶凝材料开发及料浆配比优化[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(3): 698-707.

WEN Z J, GAO Q, WANG Y D, et al. Development of composite cementitious material and optimization of slurry proportion based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(3): 698-707.