

# 基于氧气相容性评估的工程定量选材方法

关月明\*, 马明远

航空工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

**摘要:** 氧气系统具有不可避免的火灾危害, 因此材料选用对于氧气系统安全性设计至关重要。氧气相容性评估已成为材料适用性判断的重要手段, 在航空航天氧气系统设计中日益受到重视。为了降低氧气系统火灾风险、提高选材效率, 建立了工程适用的、操作性强的定量选材方法。结合材料在富氧环境中的燃烧试验数据和氧气相容性评估方法, 归纳出工程定量选材的计算方法, 并给出具体实施步骤。对比某型飞机氧气瓶充氧接嘴弹簧选材的计算和试验结果, 验证了选材方法的有效性, 可为氧气系统安全性设计提供参考。

**关键词:** 氧气相容性; 定量选材方法; 飞机氧气系统; 安全性; 层次分析法

中图分类号: V25 文献标识码: A DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2018.08.041

飞机氧气系统的主要功能是在飞行过程中为机上人员提供呼吸用氧, 以防止高空低气压引起的人体高空缺氧。氧气作为系统的工作介质, 虽然化学性质稳定, 但其助燃性对于飞机安全具有一定的危险性。在国内外航空领域, 高压氧气系统已发生了多起火灾、燃爆事故<sup>[1,2]</sup>。导致飞机高压氧气系统着火的原因是多方面的, 在实际工程应用中, 很难对氧气系统起火的故障进行复现。因此科学合理选材成为氧气系统的设计重点。

目前针对高压富氧环境下的材料选用问题, 国内外学者已经进行了大量的试验和理论研究。以美国国家航空航天局 (NASA) 和美国材料与试验协会 (ASTM) 为首的研究机构, 早在 20 世纪 70 年代就开展了高压气氧、液氧系统材料选用的研究, 进行了大量金属和非金属材料在富氧环境下的燃烧试验, 积累了试验数据, 并制定了相关的行业标准<sup>[3-5]</sup>。基于各种试验数据和评价方法, NASA 建立了一套氧气相容性评估方法, 可以用于评估氧气系统使用的材料和部件的火灾风险<sup>[6]</sup>。国内学者在高压富氧环境下的材料选用及燃烧特性研究方面, 也做了一定工作。赵汗青等<sup>[7]</sup>对金属颗粒与金属表面的碰撞机理进行理论分析和建模, 以衡量氧自生增压输送管路的安全性。王戈<sup>[8]</sup>研究了聚合物及其复合材料与液氧的相容性问题。

然而, 已有的选材研究大多是对已知燃烧现象的仿真

及复现, 或是给出一种定性分析方法。在传统的经验选材和行业选材方法已不能满足飞机氧气系统火灾安全性设计要求的条件下, 定性分析选材方法很难用于氧气系统的工程应用。本文将氧气相容性评估方法为基础, 利用现有的各项燃烧试验数据, 结合工程定量选材方法, 提出飞机氧气系统材料选用的评价方法, 并给出具体实施步骤。该方法能够同时对多个候选材料的多种影响因素按重要度进行综合评价并排序, 旨在实现氧气系统定量选材, 并为安全性评估提供分析工具。

## 1 氧气相容性评估方法

### 1.1 评估方法及流程

材料与氧气的相容性定义为“在特定的压力和温度下, 材料与氧及潜在着火源在一定危险系数范围内共存的能力”, 按照该定义, 氧气系统中使用的材料除了考虑材料的力学性能, 还要考虑氧气系统工作环境中可能存在的着火源以及材料在富氧环境中的燃烧特性。氧气相容性评估程序如下<sup>[6]</sup>: (1) 确定最坏工作条件; (2) 评估在使用条件下被氧气浸润材料的易燃性; (3) 评估着火机理的存在和概率; (4) 评估传火路径, 这是火灾破坏系统的潜在条件; (5) 确定反应效应, 即火灾可能造成的生命、任务和系统功能的损失; (6) 记录评估结果。

收稿日期: 2018-05-04; 退修日期: 2018-05-23; 录用日期: 2018-07-05

\* 通信作者: Tel.: 029-86832740 E-mail: gym4825@163.com

引用格式: Guan Yueming, Ma Mingyuan. Methods of quantitative materials selection in engineering based on oxygen compatibility assessment[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (08): 41-47. 关月明, 马明远. 基于氧气相容性评估的工程定量选材方法[J]. 航空科学技术, 2018, 29 (08): 41-47.

## 1.2 着火机理及概率

氧气相容性评估过程中,对存在易燃材料的部件,需评估表 1 所示常见的着火机理,以确定它是否存在于部件中,以及是否会引起点火;并对每个着火机理进行分析,确定其发生概率等级,见表 2。

表 1 着火机理  
Table 1 Ignition mechanism

序号	着火机理	序号	着火机理
1	摩擦着火	6	机械应力
2	绝热压缩	7	静电放电
3	机械撞击	8	电弧
4	微粒冲击	9	化学反应
5	共振	—	—

表 2 着火机理概率等级  
Table 2 Ignition mechanism probability rating

等级	定义
0	几乎不可能
1	可能性极小
2	不太可能
3	可能
4	极有可能

## 1.3 反应效应

反应效果评估将有助于确定部件是否可以安全使用。评估等级分为 A (可忽略的,没有生命和设备损失), B (微弱的,设备损坏,但没有生命损失), C (严重的,测试数据丢失和设备损坏,但没有生命损失) 和 D (灾难性的,设备和生命损失)。当部件在特定应用下材料着火的反应效应评估等级为 A 或 B,则该部件的材料可以使用,但是需要进行防护设计;如果等级为 C 或 D,则应避免使用该材料。

## 2 氧气系统选材方法

### 2.1 选材方法概述

氧气系统传统的选材方法是根据行业内多年的经验积累,从已知可用的几种材料中选择适用的材料,满足系统性能及安全要求,是一种定性分析方法。新兴的氧气相容性评估过程选材,考虑了着火机理和可靠的试验数据,将定性分析与定量分析结合,一次只能对一种材料在氧气环境下的适用性进行确定。

随着飞机氧气系统使用环境日益复杂以及新材料的应用,氧气系统选材时的影响因素增多,这就要求定量分析与定性分析的有机结合,在多目标的情况下,根据既定目的,利

用统一的评价模型,对比各种候选方案,权衡各方案的利弊得失,选择出总体最优、现实可行的方案。因此,本文提出了一种以系统工程为指导思想的选材方法,基于将氧气相容性评估方法融入选材流程,同时利用燃烧试验数据库的相关数据,以及工程定量计算方法建立评价模型,对材料进行综合评价,以实现在多种适用的候选材料中,针对多个影响因素,选出一种最优方案。具体实施流程如图 1 所示。

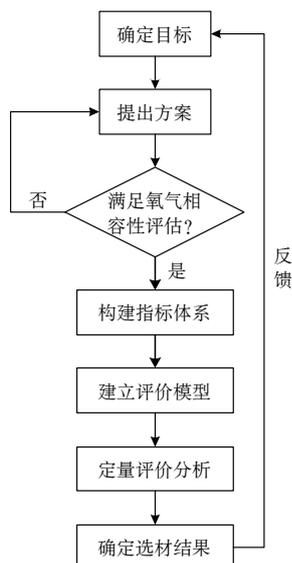


图 1 氧气系统选材流程

Fig.1 Material selection process of oxygen system

### 2.2 确定评价目标

对于飞机氧气系统特定零部件的选材,总体目标是满足使用需求,包括性能、寿命、可靠性、安全性、工艺性等多个分层目标。

这些分层目标通常包含多个指标来衡量,因此需要进一步分解成更具体的子目标,直至可以用一个或几个评价指标来衡量。

### 2.3 提出候选方案

根据选材目标,结合多年行业内氧气系统设计经验的积累,从氧气系统常用材料中(包括金属材料和非金属材料)提出候选材料方案,并对各方案进行简要说明,特别是该材料曾经应用的场合;对于尚未在氧气系统中使用的新材料,则应说明其在其他系统中的应用情况,便于设计人员掌握。

### 2.4 执行氧气相容性评估

在分析一个实际的氧气应用之前,必须量化最坏工作条件,主要包括最高工作温度、最高工作压力、最高氧浓度等,这些均能加剧材料的易燃性和着火危险。根据量化的最坏工作条件,应遵照以下原则对候选材料进行筛选<sup>[4]</sup>: (1) 材料

的自然温度必须大于最高工作温度(含绝热压缩),并且有至少 100℃的安全阈值,优选自然温度大于等于 400℃的材料,避免使用自然温度小于等于 160℃的材料;(2) 材料抗促进燃烧的最低压力必须大于最高工作压力;(3) 由于氧气系统最高氧浓度为 100%,因此优选氧指数大于 55 的非金属材料,避免使用氧指数小于 20 的非金属材料;(4) 优选燃烧热小于等于 10.5MJ/kg 的材料,避免使用燃烧热大于等于 41.9MJ/kg 的材料;(5) 优选由 1100mm 的落下高度的重复试验中抵抗冲击引起着火的材料,避免使用 152mm 或更低的高度易着火的材料。

同时,对该应用的着火机理及概率,和通过筛选材料的反应效应进行分析,为后续建立定量评价模型做准备。

### 2.5 构建指标体系

评价指标体系是根据评价目标的层次、特点来设置的。基于氧气相容性的飞机氧气系统设计,重点关注燃爆安全问题,要求选用的材料在工作条件下不能着火,因此安全性指标是氧气系统选材的关键指标。

本文根据氧气相容性评估方法,将安全性目标分解为“易燃性”和“燃烧传播性”子目标。其中,材料易燃性是材料在既定应用的最坏工作条件下抵抗着火的能力,涉及工作条件下的潜在着火机理的评估;燃烧传播性是材料在系统或部件中被点燃后,产生火焰的扩散能力和燃烧的破坏能力。再依据着火机理及反应效应,将子目标进一步分解,直至可用便于处理的一个或几个评价指标来衡量这些子目标为止。结合材料选用考虑的总目标及子目标,仅以材料评价的性能和安全性指标为例,得到氧气系统选材的指标层次结构图,如图 2 所示。

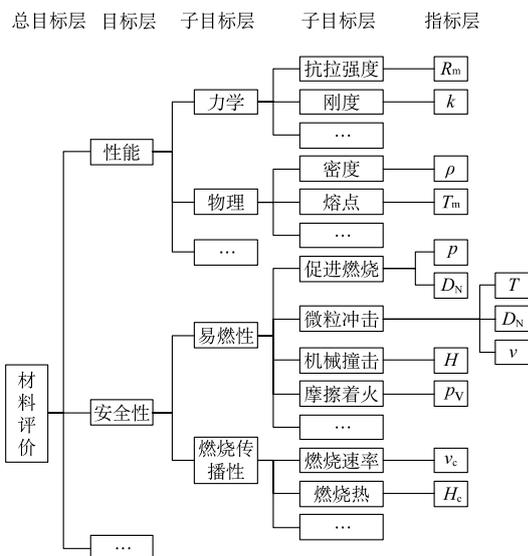


图 2 氧气系统材料指标层次结构图

Fig.2 Hierarchy structure map of materials in oxygen system

其中,材料安全性的评价指标是基于材料的着火和燃烧特性试验数据,以及与氧气有关的故障研究。目前为止,没有任何一个材料试验适用于所有的材料,以确定材料在富氧环境中的燃烧并给出相对评级。因此,将大量金属和非金属材料在富氧环境下的燃烧试验数据与氧气相容性评估结合,各种着火机理作为材料易燃性的评价指标,材料的燃烧特性,如氧指数、自然温度和燃烧热等作为燃烧传播性的评价指标。选取合适的燃烧试验数据作为材料评价指标的性能数值。常用评价指标与燃烧试验参数的对应关系见表 3。

表 3 常用评价指标与燃烧试验参数

Table 3 Common evaluation indexes and combustion parameters

序号	评价指标	燃烧试验参数
1	促进燃烧	不燃烧的最低压力值 $p$
2	微粒冲击	开始燃烧的最低温度 $T$
3	机械撞击	着火的最低下落高度 $H$
4	摩擦着火	压强与线速度乘积 $Pv$
5	燃烧速率	燃烧速率 $v_c$
6	燃烧热	燃烧热 $H_c$
7	氧指数	燃烧的最低氧浓度 IO
8	自然温度	自然温度 AIT

需要注意的是,材料在富氧环境中的燃烧是一个十分复杂的反应过程,各材料的燃烧特性随环境、特征尺寸等的变化而变化,且变化趋势不一致;并且针对特定应用,评价指标对应的燃烧试验参数可能有一个或多个。因此,在选择评价指标时需要对材料使用工况进行分析,在统一的燃烧试验条件下得到的试验参数中选取适用的参数作为评价指标。

### 2.6 建立评价模型

#### 2.6.1 评价模型概述

工程定量选材是利用模型和相关数据,将候选对象在评价目标下的各项指标的特征进行综合处理,得到最优方案的过程。因此,本文使用关联矩阵法<sup>[9]</sup>进行定量计算,该方法用矩阵形式反映各指标的权重、候选材料的评估值,然后计算各材料评估值的加权和  $W_i$ ,再通过比较  $W_i$ ,综合评价价值  $W_i$  最大的材料即为最优材料。该方法可操作性强,结果科学客观,其关键是确定计算模型的评价指标和权重。

#### 2.6.2 指标选择及预处理

根据 2.5 节,在构建氧气系统定量选材的指标体系时,经分析可得选材的评价指标和指标值。这些评价指标具有不同的物理量纲,无法直接用于定量计算,因此需要对指标进行定量化和范化处理。以图 2 中的安全性指标值为例, $p$ ,

$D_N, T, H, pv, IO$  和  $AIT$  是正指标,即数值越大越好; $v, v_c$  和  $H_c$  是逆指标,即数值越小越好。

$n$  个候选材料,每个候选材料有  $m$  个指标时,可得初始信息矩阵,其中  $x'_{ij}$  为第  $i$  个候选材料的第  $j$  个指标的数值。对于逆指标,使用式 (1) 将其转换成正指标,得到数据矩阵  $X^* = (x_{ij}^*)_{n \times m}$ 。

$$x_{ij}^* = \frac{1}{x'_{ij}} \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad (1)$$

使用式 (2) 对矩阵  $X^*$  进行无量纲化,得到标准化矩阵:

$$x_{ij} = \frac{x_{ij}^*}{\sum_{k=1}^m x_{kj}^*} \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad (2)$$

### 2.6.3 指标权重确定

进行定量分析时,部分指标有明确的数据可以作为指标权重,如着火机理的发生概率,而大部分指标难以建立数学模型进行定量分析,因此这类指标的权重使用层次分析法 (AHP) [10] 确定。AHP 的基本思路是确定指标之间的相对重要度,计算步骤如下 [11]:

#### (1) 构建判断矩阵

将图 2 中的目标、子目标和指标统称为因素。根据层次结构,对于从属某上一层的各个因素,对两两因素之间的相对重要性进行比较得到的评价。设有  $n$  个因素从属于第  $k$  层第  $l$  个因素,则这  $n$  个因素通过两两比较构成判断矩阵  $C=(c_{ij})_{n \times n}$ 。  $c_{ij}$  的取值及含义见表 4。

表 4  $c_{ij}$  的取值及含义

Table 4 The meaning and value of  $c_{ij}$

$c_{ij}$ 的取值	含义
1	两个指标同样重要
3	两个指标相比,前者比后者稍微重要
5	两个指标相比,前者比后者明显重要
7	两个指标相比,前者比后者特别重要
9	两个指标相比,前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	上述相比较的中间值
倒数	若指标 $i$ 与指标 $j$ 的重要性之比为 $c_{ij}$ , 则指标 $j$ 与指标 $i$ 的重要性之比为 $c_{ji}=1/c_{ij}$

#### (2) 计算判断矩阵 $C$ 的特征矢量

可得到  $n$  个因素的相对权重  $\alpha_i^k=(\alpha_1^k, \alpha_2^k, \dots, \alpha_n^k)$ 。

#### (3) 使用式 (3) 对判断矩阵进行一致性检查

当一致性比率  $CR < 0.1$  时,判断矩阵的构建是合理的,否则需要对判断矩阵中的元素进行适当调整,直至  $CR < 0.1$  为止。

$$\begin{cases} CR = \frac{CI}{RI} \\ CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $CI$  为判断矩阵的一致性指标;  $\lambda_{\max}$  为特征根最大值;  $n$  为判断矩阵的阶数;  $RI$  为判断矩阵的平均随机一致性指标,具体值参见表 5。

表 5 平均随机一致性指标

Table 5 Average random coincidence indicator

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

#### (4) 计算指标权重

设指标层有  $m$  个指标,根据上述步骤可计算出总目标下所有因素的相对权重,由式 (4) 得到这  $m$  个指标的权重:

$$\omega_j = \alpha^1 \times \alpha^2 \times \dots \times \alpha^s \quad (j=1,2,\dots,m) \quad (4)$$

式中:  $\alpha^1$  为第  $j$  个指标对于从属某子目标层 1 的相对权重,  $\alpha^2$  为第  $j$  个指标对于从属某子目标层 2 的相对权重,依次类推。

### 2.7 定量评价分析

设计算得到各指标的权重分别为  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ , 由式 (5) 计算各候选材料评估值的加权和  $W_i$ , 以此为评价的根据,  $W_i$  值越高,材料越优。

$$W_i = \sum_{j=1}^m \omega_j x_{ij} \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad (5)$$

### 2.8 确定选材结果

通常地,  $W_i$  值最高的材料可确定为选材结果,当多个候选材料中  $W_i$  值排序在前且十分接近时,可以通过绘制指标的雷达图,结合选材目标,特别是重点关注目标,对优选材料的指标值再次评估,确定最终选材结果。

## 3 选材示例

### 3.1 选材背景

某型飞机在地面充氧时起火,事故原因确定为氧气瓶充氧接嘴内部阀门静电积累产生拉弧,点燃弹簧,进而引起剧烈燃烧。事故发生后对充氧接嘴内部弹簧材料进行更改,使用本文提出方法对弹簧进行定量选材。候选材料有故障件材料碳素钢以及氧气系统中常用材料(铍青铜、锡青铜和蒙乃尔合金 (Monel 400))。在此选材过程中,为了简化计

算,不考虑候选材料的力学性能、工艺性、经济性等指标,只针对材料的安全性指标进行评估。

### 3.2 执行氧气相容性评估

充氧接嘴由壳体、阀门、弹簧及过滤块等组成。充氧时,高压氧气通过管路、前端过滤块进入组合件内腔阀门前端,当氧源压力升高时,克服弹簧力将阀门打开,再经后端过滤块,进入氧气瓶。充氧结束后,阀门在氧气瓶压力和弹簧力作用下关闭,并保持气密。

地面充氧时,充氧接嘴中弹簧的工作条件为:最高工作压力为 25MPa,最高氧浓度为 100%,充氧时阀门快速打开局部纯氧绝热压缩可获得极大温升,高速气流摩擦容易在非金属阀门端头积累电荷,充氧接嘴前端过滤块可滤除气流中绝大部分微粒。分析最坏工作条件,得到弹簧的潜在着火机理及概率,见表 6。一旦弹簧着火,即会点燃氧气瓶内的高压气氧,有燃爆风险,反应效应评估为 D 级,因此要求所选材料在最坏工作条件下不能发生着火。

表 6 弹簧的着火机理及概率

Table 6 Ignition mechanism and probability of spring

着火机理	概率	原因分析
微粒冲击	1	前端设置过滤块,微粒较少
静电电弧	3	气流摩擦非金属阀门易积累电荷
促进燃烧	1	前端设置过滤块,微粒较少
绝热压缩	2	充氧时阀门快速打开,纯氧从 20℃、一个标准大气绝热压缩到 25MPa 时获得的理论最高温度为 1162℃

由于碳素钢在纯氧环境下的燃烧压力阈值为 0.7MPa,低于弹簧工作环境压力值,不能使用,将之从候选材料中剔除。

### 3.3 确定评价指标及权重

弹簧候选材料的根据着火机理及反应效应评估,建立弹簧材料安全性指标的评价层次结构图,如图 3 所示。

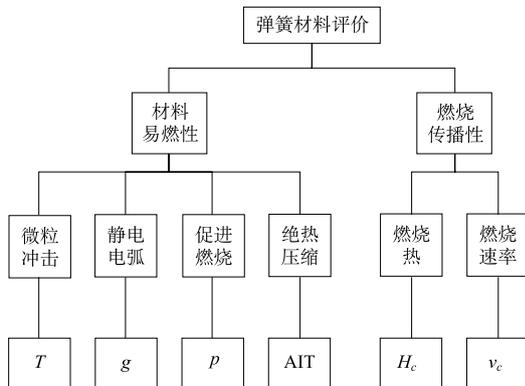


图 3 弹簧材料层次结构图

Fig.3 Hierarchy structure map of spring materials

其中弹簧的易燃性指标包括材料开始燃烧的最低温度  $T$  (微粒撞击试验)、电导率  $g$ 、不发生燃烧的最低压力  $p$  (促进燃烧试验) 和自燃温度 AIT; 弹簧的传播性评估指标包括燃烧热  $H_c$  和燃烧速率  $V_c$ 。由于三种候选材料均为铜合金,在试验中不传播燃烧,则燃烧速率指标  $v_c$  剔除; 铜合金在氧气环境中很难发生自燃,使用熔点  $T_m$  代替自燃温度 AIT。

查阅 ASTM、美国消防协会 (NFPA)、NASA 等机构的燃烧试验数,以及相关物性参数,数据为区间值时使用中位值计算。由此得到弹簧材料的评价指标,见表 7。

表 7 弹簧材料评价指标

Table 7 Evaluating indicators of spring materials

材料	$T/^\circ\text{C}$	$g/\% \text{IACS}$	$p/\text{MPa}$	$T_m/^\circ\text{C}$	$H_c/(\text{kJ/g})$
锡青铜	307	19.8	48.3	963	2.74
铍青铜	357	25.5	68.9	906	3.64
蒙乃尔	357	4	68.9	1345	3.60

由表 7 可得初始信息矩阵,见式 (6):

$$X' = \begin{bmatrix} 307 & 19.8 & 48.3 & 963 & 2.74 \\ 357 & 25.5 & 68.9 & 906 & 3.64 \\ 357 & 4 & 68.9 & 1345 & 3.60 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式 (6) 中除了燃烧热为逆指标,其余均为正指标,根据式 (1)、式 (2) 得到标准化矩阵,见式 (7):

$$X = \begin{bmatrix} 0.300 & 0.402 & 0.260 & 0.300 & 0.398 \\ 0.350 & 0.517 & 0.370 & 0.282 & 0.299 \\ 0.350 & 0.081 & 0.370 & 0.418 & 0.303 \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据表 6 中着火机理发生概率,可以确定易燃性的 4 个指标权重分别为  $\alpha_1^1=(0.143, 0.286, 0.14, 0.428)$ 。燃烧传播性指标只有燃烧热,则权重指标  $\alpha_2^1=1$ 。

弹簧材料评价总目标层下,材料易燃性和燃烧传播性的两个目标层的判断矩阵见式 (8):

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据 2.3.2 节方法,计算得到材料易燃性和燃烧传播性的相对权重为  $\alpha^2=(0.667, 0.333)$ 。由此得到材料评价指标的相对权重为  $\omega=(0.095, 0.192, 0.095, 0.285, 0.333)$ 。

### 3.4 定量评价分析

由式 (5)、式 (7) 和权重  $\omega$  计算各候选材料的分值  $W_i$ ,依此作为评价依据,得到各候选材料的排序,具体数值见表 8。

表 8 定量评价结果  
Table 8 Quantitative evaluation results

材料	$W_i$	排序
锡青铜	0.350	1
铍青铜	0.347	2
蒙乃尔	0.304	3

### 3.5 确定选材结果

由表 8 可知,锡青铜评分值最高,铍青铜与锡青铜的评分十分接近,均是弹簧的优选材料。绘制指标雷达图进一步分析材料性能,如图 4 所示。

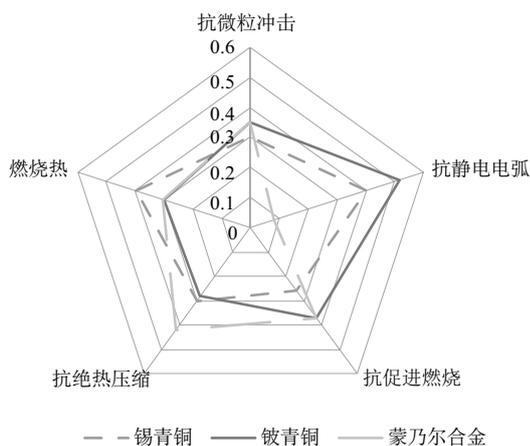


图 4 评价指标雷达图

Fig.4 Radar chart of the evaluating indicators

由图 4 可知,锡青铜在 5 个评价指标中,除了“燃烧热”和“抗绝热压缩”指标外其余三个指标均劣于铍青铜。由于这三种铜合金在氧气环境中均不燃烧,且考虑燃烧事故的故障原因为静电积累,因此铍青铜在充氧接嘴弹簧材料应用中为最适用材料。某型飞机氧气瓶地面充氧发生燃烧事故后,通过大量试验验证,优化了充氧接嘴的内部机构,同时更改弹簧材料:由碳素钢改为铍青铜。材料选用试验验证结果与本文分析结果一致。

## 4 结论

通过研究,可以得出以下结论:

(1) 本文提出的基于氧气相容性评估的工程定量选材方法,能够同时对多个材料的多种影响因素按重要度进行综合评价并排序。

(2) 与氧气系统传统选材方法相比,本文利用工程材料综合评价的先进思路,结合氧气系统安全性设计的特点,建立的氧气系统选材流程,步骤清晰、操作性强,提高了系统设计效率。

(3) 利用公开的材料燃烧数据计算,方法快速、直观、准确,选材结果与试验验证结果一致,可为氧气系统选材、安全性评估供参考依据,具有一定的实用价值。 **AST**

### 参考文献

- [1] 李勇, 谢孜楠. 飞机氧气系统引发着火案例的调查研究 [J]. 航空安全, 2010, 112 (4): 68-70.  
Li Yong, Xie Zinan. Research the cases of aircraft oxygen system result in fire[J]. Safety of Aviation, 2010, 112 (4) : 68-70. (in Chinese)
- [2] 封文春, 董鹏涛, 杨静. 飞机充氧过程燃爆机理分析 [J]. 航空科学技术, 2014, 25 (12): 44-48.  
Feng Wenchun, Dong Pengtao, Yang Jing. Combustion mechanism analysis of the aircraft recharging oxygen process[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25 (12): 44-48. (in Chinese)
- [3] ASTM. ASTM G94-05 Standard guide for evaluating metals for oxygen service[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.
- [4] ASTM. ASTM G63-99 Standard guide for evaluating nonmetallic materials for oxygen service[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2007.
- [5] ASTM. ASTM G128/G128M-15 Standard guide for control of hazards and risks in oxygen enriched systems[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.
- [6] Beeson H D, Smith S R, Stewart W F. Safe use of oxygen and oxygen systems: handbook for design, operation, and maintenance[M]. 2nd Edition. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2007.
- [7] 赵汗青, 张颖轩, 彭泳卿, 等. 氧自生增压系统中的金属材料安全性分析 [J]. 测控技术, 2012, 31: 316-321.  
Zhao Hanqing, Zhang Yingxuan, Peng Yongqing, et al. Safety analysis of material in oxygen autogenous pressurization system[J]. Measurement & Control Technology, 2013, 31: 316-321. (in Chinese)
- [8] 王戈. 与液氧相容性聚合物及其复合材料研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2005: 8-17.  
Wang Ge. Study of liquid oxygen compatible polymer matrixes and composites[D]. Changsha: National University of Defense, 2005: 8-17. (in Chinese)
- [9] 周德群. 系统工程概论 [M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2010.  
Zhou Dequn. Introduction to system engineering [M]. 2nd Edition.

- tion. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [10] 薛居征. 基于层次分析法的群决策方法及应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- Xue Juzheng. Research on methods and applications of group decision making based on analytic hierarchy process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [11] 张天云. 工程材料综合评价系统研究与实现 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008: 37-38.

Zhang Tianyun. The research and implementation of evaluation system for engineering materials[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2008: 37-38. (in Chinese)

#### 作者简介

关月明 (1985- ) 女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞机氧气系统设计。

Tel: 029-86832740 E-mail: gym4825@163.com

## Methods of Quantitative Materials Selection in Engineering Based on Oxygen Compatibility Assessment

Guan Yueming\*, Ma Mingyuan

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

**Abstract:** The oxygen system has an inevitable fire hazard, so the selection of materials is very important for the safety design of oxygen system. As an important means to judge the applicability of materials, oxygen compatibility assessment has been paid great attention in the design of aeronautics and astronautics oxygen system. In order to reduce the risk of fire in oxygen system and improve the efficiency of material selection, a suitable and operational quantitative material selection method was established. Combined with combustion test data of materials in oxygen-enriched atmospheres and oxygen compatibility assessment method, the calculation method of engineering quantitative material selection was summarized, and specific implementation steps were given. Comparing the calculation and experimental results of the material selection for the spring in an oxygen charging nozzle for a certain airplane, the validity of the material selection method was verified, and it can provide reference for the safety design of the oxygen system.

**Key Words:** oxygen compatibility; quantitative material selection method; aircraft oxygen system; safety; AHP

Received: 2018-05-04; Revised: 2018-05-23; Accepted: 2018-07-05

\*Corresponding author. Tel.: 029-86832740 E-mail: gym4825@163.com