

基于层次分析法的吸热碳氢燃料评估指标体系设计

陈雪娇^{1,2}, 王晓宇^{1,2}, 安高军³, 徐曦萌³, 蒋榕培^{1,2}

(1. 北京航天试验技术研究所, 北京 100074; 2. 航天绿色推进剂研究与应用北京市重点实验室, 北京 100074; 3. 中国人民解放军军事科学院 系统工程研究院, 北京 100071)

摘要: 为综合评价吸热碳氢燃料的整体性能, 对吸热碳氢燃料研制、生产、使用、测试、贮存等各个环节的指标进行了有序整合, 构建了吸热碳氢燃料评估指标体系。通过对吸热碳氢燃料的性能指标进行梳理和分类, 根据层次分析法思想建立三级递阶层次结构模型, 采用主观赋值法和一致性检验方法构建和筛选符合运算逻辑的判断矩阵, 通过求解判断矩阵得到各指标权重值, 对各指标的重要度进行了排序, 并形成了评估指标体系的应用方法。研究结果将吸热碳氢燃料在各个环节中涉及的百余项评价指标“点”汇聚整合成为一套完整的评估体系“面”, 为吸热碳氢燃料整体性能的评价提供了有效的方法, 初步实现了吸热碳氢燃料综合性能定性评估到半定量评估的跨越, 对新型吸热碳氢燃料的评价和发展具有重要应用价值。

关键词: 吸热碳氢燃料; 评估指标体系; 层次分析法; 判断矩阵; 权重值

中图分类号: V511

文献标志码: A

文章编号: 1672-9374(2024)05-0044-09

Design of an evaluation index system for endothermic hydrocarbon fuel based on analytic hierarchy process

CHEN Xuejiao^{1,2}, WANG Xiaoyu^{1,2}, AN Gaojun³, XU Ximeng³, JIANG Rongpei^{1,2}

(1. Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China;

2. Beijing Key Laboratory of Research and Application for
Aerospace Green Propellants, Beijing 100074, China;

3. Systems Engineering Institute, Academy of Military Sciences, Beijing 100071, China)

Abstract: To comprehensively assess the overall performance of endothermic hydrocarbon fuels, the indicators of various aspects including development, production, utilization, testing, and storage of endothermic hydrocarbon fuels were systematically integrated, and an evaluation index system for endothermic hydrocarbon fuels was constructed. By categorizing and organizing the performance indicators of endothermic hydrocarbon fuels, a three-tier hierarchical structure model was established using the Analytic Hierarchy Process (AHP). Expert scoring and consistency testing methods were employed to

收稿日期: 2023-09-14 修回日期: 2023-12-03

基金项目: 国家重点研发计划

作者简介: 陈雪娇(1993—), 女, 博士, 高级工程师, 研究领域为液体推进剂研发。

引用格式: 陈雪娇, 王晓宇, 安高军, 等. 基于层次分析法的吸热碳氢燃料评估指标体系设计[J]. 火箭推进, 2024, 50(5): 44-52.

CHEN X J, WANG X Y, AN G J, et al. Design of an evaluation index system for endothermic hydrocarbon fuel based on analytic hierarchy process[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(5): 44-52.

create and refine judgment matrix that adhere to logical calculations. The weight values of each indicator were determined by solving the judgment matrix, and the importance of each indicator was ranked. More than one hundred evaluation indicators involved in various stages of endothermic hydrocarbon fuels are integrated into a comprehensive evaluation system, which fills the gap from qualitative assessment to semi-quantitative assessment of the comprehensive performance for endothermic hydrocarbon fuels. This study is valuable for the evaluation and development of novel endothermic hydrocarbon fuels.

Keywords: endothermic hydrocarbon fuel; evaluation index system; analytic hierarchy process; judgment matrix; weight value

0 引言

吸热碳氢燃料经过数十年的发展,评估方法可分类为基本理化性能评价方法和使用性能评价方法。基本理化性能评价方法主要由各种成熟燃料的标准规范构成,如《3 号喷气燃料》^[1]、《高闪点喷气燃料规范》^[2]、“Turbine fuel, low volatility, JP-7”^[3]等,主要内容是采用成熟的测试方法规定燃料的基本理化性能,应用于油品生产、使用、贮存等各个环节,以直观地判断燃料是否合格。在吸热碳氢燃料的使用性能方面,虽然目前大部分性能还未形成测试规范,但是业内已经形成了一套固定的评价流程,针对具体的应用场景,有相对确切的广泛受到认可的评价条件和评价基准,保障了使用性能评估方法的科学性和准确性。

然而由于吸热碳氢燃料分子结构的特点,导致燃料某些性能变好的同时必然导致某几种性能变差,一些指标是互相矛盾的,比如密度增大的燃料黏度通常会更高、杂质元素含量少的燃料润滑性会变差等,因此不存在一种“十全十美”的吸热碳氢燃料,这种优劣共存的特性使新型吸热碳氢燃料综合性能的评价变得较为困难。现有的评价方法针对的是某种产品是否合格或者某项指标是否满足工程应用需求,明显难以满足从多角度多维度对吸热碳氢燃料进行综合评估的需求。因此,亟需将吸热碳氢燃料在设计、生产、研制、使用、贮存等过程中涉及的多项评价指标“点”汇聚整合成为一套完整的评估体系“面”,形成一套综合的吸热碳氢燃料评估体系。

调研发现国内关于吸热碳氢燃料评估体系的研究尚属空白,国外也未见相关文献资料。而建筑、武器装备、防空体系等领域的评估体系已经有

几十年的研究历史,尤其是建筑领域,早在 21 世纪初期英国、德国^[4-5]、日本^[6]等国家就已经颁布了绿色建筑评估体系标准。国内从 2015 年起也陆续颁布了关于绿色建筑的评估体系标准/手册/准则,并且已经大范围推广至实际工程应用中。此外,随着复杂研究系统综合性能评价的需求愈发迫切,武器装备^[7-10]、安全科学^[11]、环境科学^[12-13]等领域也陆续开展了评估体系的探索,构建了多套面向不同应用场景的评估体系。

通过对不同领域的评估体系构建方法进行分析,发现都遵循一套固定的构建流程:构建分级评估指标体系模型→指标权重系数计算→构建认证分析方法。构建过程中最为核心的是权重系数计算。权重表示该项指标在评估体系中的重要程度。权重赋值方法包括主观赋值法和客观赋值法两类。主观赋值法能充分运用评估专家的知识 and 经验,不容易出现实际重要程度与权重相悖的情况;客观赋值法需要建立在大量样本数据的基础上,在样本量不足的情况下,易产生权重值与实际重要程度相违背的情况,且对历史数据的依赖较强,不适用于与样本性质偏差较大的体系的权重计算^[14]。通常采用层次分析法对主观赋值法获得的定性数据进行定量分析。层次分析法将复杂的多目标决策问题作为一个系统,通过定性指标模糊量化方法计算得到各层次权重,是一种应用广泛的定性与定量结合的综合性的系统分析方法^[15-17]。

本文将成熟的评估体系构建方法首次引入吸热碳氢燃料领域,采用主观赋值法+层次分析法整合吸热碳氢燃料基本理化性能评价方法、使用性能评价方法、经济性、风险性等方面的指标,完成了吸热碳氢燃料评估指标体系的构建,初步实现了吸热碳氢燃料综合性能定性评估到半定量评估的跨越。

1 吸热碳氢燃料评估指标体系建立方法

吸热碳氢燃料评估指标体系的构建流程为:确立评估指标项→初步构建评估指标分级模型→反复迭代优化评估指标分级模型→指标权重系数计算→形成评估指标体系。由于关于吸热碳氢燃料评估指标体系的数据样本量较小,且新型碳氢燃料的性能数据与历史样本存在差异,因此适宜采用主观赋值法确定权重。

为了将主观赋值法中专家的打分转化为权重数据,引入层次分析法进行计算。层次分析法不仅能够获得比较接近实际的相对重要性排序,而且可以利用一致性检验方法对专家打分结果进行逻辑性判断,剔除不符合逻辑规律的样本,保证评价结果的科学可靠。运用主观赋值法+层次分析法确定权重的步骤如下。

1.1 建立判断矩阵

判断矩阵是层次分析法的核心,一般邀请本领域内专家对同一层级的各项指标采用“1~9 标度法”^[18-19]互相比较(见表1),形成如式(1)所示的判断矩阵。

表1 层次分析法1~9 标度法

Tab.1 1~9 scale law of analytic hierarchy process

标度	含义
1	表示两个指标的重要性相等
3	表示指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 略重要
5	表示指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 明显重要
7	表示指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 强烈重要
9	表示指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻指标重要程度的折中值

$$D = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{X_1}{X_2} & \cdots & \frac{X_1}{X_n} \\ \frac{X_2}{X_1} & 1 & \cdots & \frac{X_2}{X_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{X_n}{X_1} & \frac{X_n}{X_2} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

1.2 计算权重系数

权重系数的主要计算方法包括方根法和求和法,

两种计算方法得到的权重数值虽然略有差异,但是各个指标的重要性排序完全一致。因此计算方式不影响权重计算结果,只要全套指标体系均采用一种方式计算,即可以保证各个指标的权重具有可对比性。

1.3 开展一致性检验

为避免因经验判断导致评价结果失真,需要通过一致性检验来评判所构造的判断矩阵是否符合逻辑。一致性检验采用一致性比率算法,见式(2)~式(3)。当 $C_R < 0.1$ 时,则该判断矩阵满足一致性检验;否则认为判断矩阵不符合逻辑,需调整判断矩阵或从样本中剔除^[20]。

$$C_R = C_I / R_I \quad (2)$$

$$C_I = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (3)$$

式中: C_R 为一致性比率; C_I 为一致性指标; n 为判断矩阵阶数; R_I 为随机一致性指标,与 n 的数值相关,如表2所示^[21]。

表2 不同矩阵阶数的 R_I 值

Tab.2 R_I values of different matrix order

阶数	1	2	3	4	5
R_I	0.00	0.00	0.58	0.89	1.12
阶数	6	7	8	9	10
R_I	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

2 吸热碳氢燃料评估指标体系建立结果与讨论

从吸热碳氢燃料全寿命周期的角度考虑,评估指标体系应包括研制、生产、使用、测试、贮存等环节的各项指标。综合考量吸热碳氢燃料的理化性能评价指标、使用性能评价指标和经济成本等相关指标^[22-32],通过专家调查法经过两轮迭代优化,构建了由7个一级指标(包括燃料技术指标、燃料环境适用性、燃料勤务适用性、燃料发动机子系统部件测试指标、燃料动力飞行测试指标、燃料经济性、燃料风险性)、25个二级指标、75个三级指标组成的吸热碳氢燃料指标分级模型。

根据层次分析法的思想,将吸热碳氢燃料指标分级模型中各层级的指标利用1~9 标度法进行两两比较,形成专家调研问卷,本研究共统计分析有效调研问卷33份,调研问卷中专家构成如图1所

示。高级职称(包括正高级职称和副高级职称)人员占比达 64%,从业 5 a 以上人员占比达 60%,表明参与调研的专家成员具有较为丰富的从业经验和专业知识,问卷调研结果具有代表性和科学性。

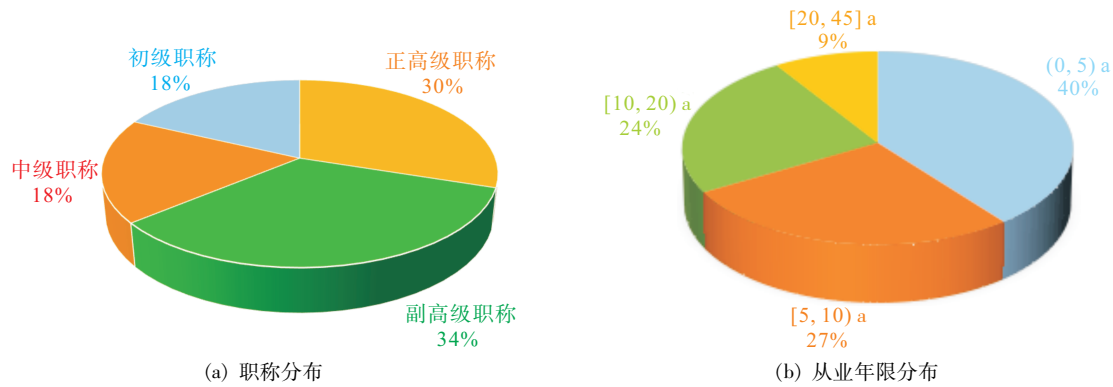


图 1 调研问卷专家构成

Fig. 1 Composition of survey questionnaire experts

以其中一份调研问卷的一级指标权重计算过程为例说明计算过程。调研问卷中专家选择的答案为燃料技术指标比燃料环境适用性更重要,重要程度为明显重要,因此判断矩阵的 X_{12} 为 5,以此类推将该调研问卷中的问答结果转换得到一级指标的 8×8 判断矩阵,如表 3 所示。分别采用方根法和求和法计算了权重,结果见表 4。结果表明两种计算方法得到的权重数值虽然略有差异,但是各个指标的重要性排序完全一致。且方根法和求和法计算得到的一致性比率分别为 0.076 和 0.081,均小于 0.1,均符合一致性检验。验证了计算方式不影响权重计算结果,本研究中采用求和法进行权重的计算。

表 3 一级指标判断矩阵示例

Tab. 3 Example of the first level indicator judgment matrix

准则层	燃料 技术指标	燃料环境 适用性	燃料勤务 适用性	燃料发动机 子系统部件测试指标	燃料动力飞行 测试指标	燃料 经济性	燃料 风险性
燃料技术指标	1	5	6	3	1/2	7	1
燃料环境适用性	1/5	1	3	1/2	1/6	1/2	1/3
燃料勤务适用性	1/6	1/3	1	1/4	1/5	3	1/4
燃料发动机子系统部件测试指标	1/3	2	4	1	1/4	5	1/2
燃料动力飞行测试指标	2	6	5	4	1	8	2
燃料经济性	1/7	2	1/3	1/5	1/8	1	1/7
燃料风险性	1	3	4	2	1/2	7	1

表 4 方根法和求和法得到的权重示例

Tab. 4 Example of the weights obtained by root and sum methods

指标项	方根法计算的权重	求和法计算的权重	重要度排序
燃料技术指标	0.233 94	0.227 45	2
燃料环境适用性	0.051 90	0.058 24	5
燃料勤务适用性	0.042 58	0.047 62	6
燃料发动机子系统部件测试指标	0.110 64	0.111 52	4
燃料动力飞行测试指标	0.334 39	0.329 19	1
燃料经济性	0.032 86	0.038 60	7
燃料风险性	0.193 69	0.187 38	3

按照上述方法对全部调研问卷的数据进行分析,将 $C_R > 0.1$ 的调研问卷视为不符合逻辑样本,从总样本中剔除。以一级指标的一致性比率分布为例,如图 2 所示,有 3 份样本的一致性比率不符合要求,对其余样本的权重值进行求解,得到一级指标权重值分布。以此类推计算得到的各级指标权重值如表 5 所示。

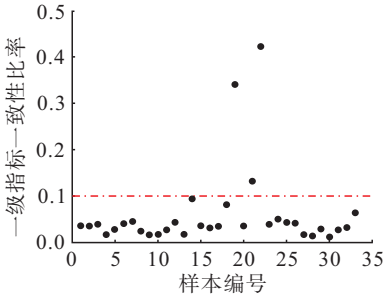


图 2 一级指标一致性比率
Fig. 2 Consistency ratio of primary indicators

表 5 吸热碳氢燃料评估指标体系
Tab. 5 Evaluation index system for endothermic hydrocarbon fuels

一级指标	权重值	二级指标	权重值	三级指标	权重值
燃料动力飞行测试指标	0.279 49	发动机试验	0.335 43	地面试验	0.171 58
				高空模拟试验	0.409 47
				持久试车	0.418 95
		飞行试验	0.664 57	飞行速度	0.301 00
				飞行高度	0.131 80
				飞行里程	0.305 63
				命中指数	0.261 57
				燃料发动机子系统部件测试指标	0.224 16
喷嘴适用性	0.276 99				
过滤器流阻特性	0.196 36				
控制系统兼容性	0.175 27				
测量系统兼容性	0.135 79				
燃烧室性能试验	0.384 96	启动性能	0.217 22		
		点熄火边界	0.181 87		
		燃烧效率	0.254 11		
		积碳	0.269 53		
		燃烧排放特性	0.077 27		
换热性能	0.388 53	换热安全性	0.633 51		
		总热沉	0.366 49		
燃料技术指标	0.154 64	化学组成	0.070 38	烃族组成	0.193 16
				萘系烃含量	0.119 07
				芳烃和烯烃含量	0.136 58
				添加剂	0.192 88
				痕量元素	0.080 33
				总酸值	0.090 09
				总硫含量	0.096 54
				硫醇硫含量	0.091 36
		颜色	0.018 69	赛波特颜色	—
		燃料计量和飞行航程	0.151 31	密度	0.328 73
				燃烧净热值	0.671 27

续表					
一级指标	权重值	二级指标	权重值	三级指标	权重值
燃料技术指标	0.154 64	燃料雾化和低温性	0.135 49	运动黏度	0.459 92
				冰点	0.413 52
				表面张力	0.126 57
		安定性	0.169 83	动态热安定性	0.763 14
				静态热安定性	0.236 86
		挥发性	0.077 60	馏程或沸点	0.269 16
				闪点	0.461 14
				饱和蒸气压	0.269 69
		热性质	0.144 22	导热系数	0.258 35
				比热容	0.409 21
				临界参数	0.332 43
		导电性	0.039 76	介电常数	0.579 80
				电导率	0.420 20
		润滑性	0.044 32	磨痕直径	—
		清洁性	0.061 84	实际胶质	0.386 32
				水反应	0.170 36
				固体颗粒污染物含量	0.314 55
				水分离指数	0.128 76
燃料环境适用性	0.113 62	贮存稳定性	0.279 84	铜片腐蚀	0.696 31
				银片腐蚀	0.303 69
		材料相容性	0.285 70	加速贮存稳定性	0.487 00
				自然贮存稳定性	0.513 00
		高温高压热物性	0.434 46	金属材料相容性	0.669 42
				非金属材料相容性	0.330 58
				密度(高温高压)	0.292 45
				黏度(高温高压)	0.215 20
燃料风险性	0.098 62	生产风险	—	比热容(高温高压)	0.294 99
				导热系数(高温高压)	0.197 36
				原料来源稳定性	0.310 16
				工艺稳定性	0.344 15
				工艺放大能力	0.345 69
燃料勤务适用性	0.095 77	安全性	0.451 92	可燃浓度/温度极限	0.405 72
				自燃点	0.255 32
				最小点火能	0.338 97
		储运系统相容性	0.305 68	混油特性	0.366 32
				油泵相容性	0.360 42
				过滤器相容性	0.273 26
		毒性	0.242 40	急性毒性	0.491 30
				生殖/遗传毒性	0.209 36
				诱变性/致癌性	0.299 34
燃料经济性	0.033 69	研制成本投入	0.596 97	研制成本利润率	0.178 98
				单位产品成本	0.276 21
				产品合格率	0.544 80
		获利能力	0.403 03	市场需求	0.724 88
				收入利润率	0.275 12

各级指标的重要程度由高到低排序如下。

2.1 一级指标

各级指标重要程度排序为:燃料动力飞行测试指标、燃料发动机子系统部件测试指标、燃料技术指标、燃料环境适用性、燃料风险性、燃料勤务适用性、燃料经济性。

2.2 二级指标

1)燃料技术指标:安定性、燃料计量和飞行航程、热性质、燃烧雾化和低温性、腐蚀性、挥发性、化学组成、清洁性、润滑性、导电性、颜色。

2)燃料环境适用性:高温高压热物性、材料相容性、贮存稳定性。

3)燃料勤务适用性:安全性、储运系统相容性、毒性。

4)燃料发动机子系统部件测试指标:换热性能、燃烧室性能试验、系统部件组件试验。

5)燃料动力飞行测试指标:飞行试验、发动机试验。

6)燃料经济性:研制成本投入、获利能力。

2.3 三级指标

1)化学组成:烃族组成、添加剂、芳烃和烯烃含量、萘系烃含量、总硫含量、硫醇硫含量、总酸值、痕量元素。

2)燃料计量和飞行航程:燃烧净热值、密度。

3)燃料雾化和低温性:运动黏度、冰点、表面张力。

4)安定性:动态热安定性、静态热安定性。

5)挥发性:闪点、饱和蒸气压、馏程或沸点。

6)热性质:比热容、临界参数、导热系数。

7)导电性:介电常数、电导率。

8)清洁性:实际胶质、固体颗粒污染物含量、水反应、水分离指数。

9)腐蚀性:铜片腐蚀、银片腐蚀。

10)贮存稳定性:自然贮存稳定性、加速贮存稳定性。

11)材料相容性:金属材料相容性、非金属材料相容性。

12)高温高压热物性:比热容(高温高压)、密度(高温高压)、黏度(高温高压)、导热系数(高温

高压)。

13)安全性:可燃浓度/温度极限、最小点火能、自燃点。

14)储运系统相容性:混油特性、油泵相容性、过滤器相容性。

15)毒性:急性毒性、诱变性/致癌性、生殖/遗传毒性。

16)系统部件组件试验:喷嘴适用性、油泵适用性、过滤器流阻特性、控制系统相容性、测量系统相容性。

17)燃烧室性能试验:积碳、燃烧效率、启动性能、点熄火边界、燃烧排放特性。

18)换热性能:换热安全性、总热沉。

19)发动机试验:持久试车、高空模拟试验、地面试验。

20)飞行试验:飞行里程、飞行速度、命中指数、飞行高度。

21)研制成本投入:产品合格率、单位产品成本、研制成本利润率。

22)获利能力:市场需求、收入利润率。

23)生产风险:工艺放大能力、工艺稳定性、原料来源稳定性。

3 吸热碳氢燃料评估指标体系应用方法

基于模糊理论的方法,将吸热碳氢燃料的评价等级划分为5级,各等级对应的量化关系如表6所示。根据量化准则,针对待评价吸热碳氢燃料的各项性能指标数据,对评估指标体系中的各三级指标进行打分,具体分值的确定需参考燃料规范要求、应用场景需求等,吸热碳氢燃料综合得分 X 的计算见式(4)~式(5)。由此即可对吸热碳氢燃料的综合性能进行评价或直观地对比新型吸热碳氢燃料与传统吸热碳氢燃料的综合性能优劣。

$$X = \sum x_i w_i \quad (4)$$

$$w_i = w_m w_n w_o \quad (5)$$

式中: x_i 为各指标评分; w_i 为各指标组合权重; w_m 为指标 i 的一级指标权重值; w_n 为指标 i 的二级指标权重值; w_o 为指标 i 的三级指标权重值。

表 6 指标量化准则

Tab. 6 Quantitative criteria for indicators

各指标定性评价	各指标量化值
性能优异	[90,100]
性能良好	[80,90)
性能基本合格	[70,80)
性能较差	[60,70)
性能不合格	(0,60)

4 结束语

针对吸热碳氢燃料综合性能评价方法缺失的问题,本研究创新性地基于层次分析法建立了吸热碳氢燃料评估指标体系,将吸热碳氢燃料在研制、生产、使用、测试、贮存等各个环节中涉及的百余项评价指标“点”汇聚整合成为一套完整的评估体系“面”,科学合理地确定了各项指标的权重值和重要程度,基于模糊理论的方法建立了指标体系的应用方法,从而可以直观地对比新型吸热碳氢燃料与传统吸热碳氢燃料的整体性能的优劣。本研究建立的吸热碳氢燃料评估体系填补了国内空白,初步实现了吸热碳氢燃料综合性能定性评估到半定量评估的跨越,对新型吸热碳氢燃料的评价和发展具有重要应用价值。

参考文献

[1] 国家市场监督管理总局. 3 号喷气燃料: GB 6537—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
State Administration for Market Regulation. No. 3 jet fuel: GB 6537—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

[2] 毕载俊, 龚灿铮, 韩复旦, 等. 高闪点喷气燃料规范: GJB 560A—97 [S]. 北京: 国家科学技术工业委员会, 1997.

[3] Turbine fuel, low volatility, JP-7: MIL-DTL-38219D [S]. [S. l.]: US Air Force, 1998.

[4] DGNB certification system: new buildings criteria set [S]. [S. l.]: DGNB, 2018.

[5] DGNB certification system-new buildings criteria set [S]. [S. l.]: DGNB, 2020.

[6] CASBEE for new construction technical manual [S]. [S. l.]: Research Committee on Comprehensive Environmental Assessment of Buildings, 2010.

[7] 蒋德珑, 曹建军. 武器装备体系评估论证模型的构建研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2014, 28(1): 47-51.
JIANG D L, CAO J J. Research on the construction of evaluation and demonstration model of weapon equipment system [J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2014, 28(1): 47-51.

[8] 徐强, 金振中, 杨继坤, 等. 基于 Fuzzy-AHP 的武器装备作战试验鉴定指标体系评估[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(7): 175-180.
XU Q, JIN Z Z, YANG J K, et al. Evaluation of index system for weapons and equipments operational test based on the Fuzzy-AHP method [J]. Fire Control & Command Control, 2021, 46(7): 175-180.

[9] 何能波, 吴红朴, 朱佳辰, 等. 基于改进灰色关联度的装备保障效能指标体系优化[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(5): 164-170.
HE N B, WU H P, ZHU J C, et al. Optimization of equipment support efficiency index system based on improved grey correlation degree [J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(5): 164-170.

[10] 寇昆湖, 刘登攀, 钱峰, 等. 基于改进层次分析法的无人机作战效能评估方法研究[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(2): 110-114.
KOU K H, LIU D P, QIAN F, et al. Research on operational effectiveness evaluation of UAV based on improved analytic hierarchy process [J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(2): 110-114.

[11] 裴楠. 一种半定量建筑火灾风险评估体系[J]. 中国公共安全(学术版), 2013(1): 24-30.
PEI N. A semi-quantitative building fire risk assessment system [J]. China Public Security (Academy Edition), 2013(1): 24-30.

[12] 毛雨晗, 金彦, 欧阳惠卿, 等. 基于层次分析法与专家打分法的机械式停车设备安全评价指标体系研究[J]. 起重运输机械, 2023(3): 20-24.
MAO Y H, JIN Y, OUYANG H Q, et al. On safety evaluation indicator system of mechanical parking equipment based on analytic hierarchy process and expert scoring method [J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2023(3): 20-24.

[13] ANSHEBO M A, MENGESHA W J, SOKIDO D L. Selection of the most appropriate sustainable buildings assessment categories and criteria for developing countries: case of Ethiopia [J]. Journal of Urban Planning and Development, 2023, 149(1): 1-17.

[14] 高源. 整合碳排放评价的中国绿色建筑评价体系研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.

- GAO Y. Studies on the China's green building assessment system integrated assessment of carbon emissions [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [15] 李建林, 李光辉, 马速良, 等. 一种基于层次分析法的氢能发电系统评估方法: CN112465270A [P]. 2021-03-09.
- [16] 魏杰. 基于层次分析法的 Y 智能楼宇评标指标体系研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- WEI J. Y Based on AHP evaluation index system of intelligent building [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [17] 李永德. 基于层次分析法的燃气轮机故障诊断方法研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
- LI Y D. Research on fault diagnosis method of gas turbine based on analytic hierarchy process [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [18] 徐坚强, 刘小勇. 基于层次分析法的建筑火灾风险评估指标体系设计 [J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2019, 41(4): 345-351.
- XU J Q, LIU X Y. Design of building fire risk assessment index system based on analytic hierarchy process [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2019, 41(4): 345-351.
- [19] 林丹. 世界一流制造企业评价体系及其应用研究: 以中国制造企业为例 [D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- LIN D. Research on the evaluation system of world class manufacturing enterprises and its application [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [20] SHEN J K, ZHU G M, ZHANG M Q, et al. Safety analysis and countermeasure of tank car transportation based on fish bone diagram and analytic hierarchy process [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 233: 032023.
- [21] 王永臻. 冀中坳陷东北部石炭-二叠系煤成气资源潜力分析及有利区预测 [D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- WANG Y Z. Carboniferous-permian coal-derived gas resource potential analysis and favorable area prediction in the northeast of Jizhong depression [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [22] 张香文, 邹吉军, 潘伦. 先进航空航天液体燃料合成及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [23] 付伟, 李明, 陶志平. 世界航空燃料规格及进展 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2011.
- [24] 张丽静, 刘东升, 于存贵, 等. 高超声速飞行器 [J]. 航空兵器, 2010, 17(2): 13-16.
- ZHANG L J, LIU D S, YU C G, et al. Hypersonic aircraft [J]. Aero Weaponry, 2010, 17(2): 13-16.
- [25] 周伟星, 贾贞健. 冲压发动机碳氢燃料技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.
- [26] 王镜淇, 王成刚, 陈雪娇, 等. RBCC 组合动力用液体推进剂研究进展 [J]. 火箭推进, 2022, 48(6): 101-112.
- WANG J Q, WANG C G, CHEN X J, et al. Research progress of liquid propellant development for RBCC engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2022, 48(6): 101-112.
- [27] 高旭锋, 代萌, 郭士刚, 等. 喷气燃料热氧化安定性测定方法及其影响因素的研究进展 [J]. 石油化工, 2022, 51(7): 857-862.
- GAO X F, DAI M, GUO S G, et al. Research progress on determination methods of thermal oxidation stability of jet fuel and its influencing factors [J]. Petrochemical Technology, 2022, 51(7): 857-862.
- [28] 段永亮, 王慧琴, 张静, 等. 煤炭间接液化生产喷气燃料的发展现状与展望 [J]. 合成材料老化与应用, 2021, 50(6): 121-124.
- DUAN Y L, WANG H Q, ZHANG J, et al. Development status and prospects of indirect coal liquefaction to produce jet fuel [J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2021, 50(6): 121-124.
- [29] 李进, 张世堂, 胡泽祥. 国内外喷气燃料润滑改进剂综述 [J]. 合成润滑材料, 2020, 47(2): 26-30.
- LI J, ZHANG S T, HU Z X. Reviews on jet fuel lubricating improvers at home and abroad [J]. Synthetic Lubricants, 2020, 47(2): 26-30.
- [30] 李琛, 左伟, 张翼鹏, 等. 军用航空发动机燃油泵低润滑性试验方法研究 [J]. 航空标准化与质量, 2021(5): 9-11.
- LI C, ZUO W, ZHANG Y P, et al. Research on low lubricity test method for military aviation engine fuel pumps [J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2021(5): 9-11.
- [31] 刘朝晖, 宋晨阳, 陈强, 等. 吸热型碳氢燃料再生冷却性能评估方法 [J]. 火箭推进, 2020, 46(2): 15-20.
- LIU Z H, SONG C Y, CHEN Q, et al. Evaluation methods on regenerative cooling performance for endothermic hydrocarbon fuel [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(2): 15-20.
- [32] 马海波, 马元, 南向谊, 等. PATR 发动机发展历程简介及参数特性分析 [J]. 火箭推进, 2023, 49(6): 100-109.
- MA H B, MA Y, NAN X Y, et al. Development history and parameter Propulsion, 2023, 49(6): 100-109.