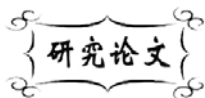


中图分类号: C934
文献标识码: A

文献编号: 1005-1198 (2020) 05-0323-08
DOI: 10.16253/j.cnki.37-1226/tq.2020.05.007



基于模糊多属性决策的高温陶瓷过滤器 保温层选材设计研究

刘雪娇, 赵世凯, 薛友祥, 程之强, 张久美、宋涛、唐钰栋、贾同军
山东工业陶瓷研究设计院有限公司, 山东 淄博 255000

摘要: 以合理化选择高温陶瓷过滤器保温层为目的, 选取适合作为高温陶瓷过滤器保温层的不同材料, 通过递阶质量屋法对材料属性和设计要求进行研究计算, 得到关于整体顾客满意度的材料属性综合权重值, 用作下一步材料选择的基础。运用模糊多属性决策计算备选材料与最优材料的贴合度, 结合关于整体顾客满意度的材料属性综合权重值, 建立最终适合陶瓷过滤器保温层的材料组合满意度排序, 以确定适合高温陶瓷过滤器保温层的最优材料, 为陶瓷膜组件的材料选择与设计提供参考。

关键词: 陶瓷过滤器; 材料选择; 递阶质量屋; 模糊多属性决策

Material Selection Design for High Temperature Ceramic Filter Insulation Layer Based on Fuzzy Multi-Attribute Decision Making

LIU Xue-Jiao, ZHAO Shi-Kai, XUE You-Xiang, CHENG Zhi-Qiang,
ZHANG Jiu-Mei, SONG Tao, TANG Yu-Dong, JIA Tong-Jun

Shandong Industrial Ceramic Research & Design Institute Co., Ltd, Zibo 255000, China

Abstract: The purpose of the present study is to realize rationalization selection of high-temperature ceramic filter heat-insulating layer. Different materials suitable for this purpose were considered. The material properties and design requirements were studied and calculated by the hierarchical quality roof method, and the comprehensive weight value of the material property with respect to the overall customer satisfaction is obtained, which is used as the basis for the next step of material selection. The bonding degree of the candidate alternative materials and the optimal one was calculated by using the fuzzy multi-attribute decision-making method. By combining the material

收稿日期: 2019-11-21

收到修改稿日期: 2020-06-12

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0310403); 2016年度泰山产业领军人才。

第一作者: 刘雪娇 (1991-), 女, 山东潍坊人, 工程师。E-mail: liuxuejiao122@163.com。

通讯作者: 赵世凯 (1984-), 男, 河南驻马店人, 高级工程师。E-mail: zhaosc1949@163.com。

property comprehensive weight value with respect to the overall customer satisfaction, the material combination satisfaction ranking was established, so as to determine the optimal material suitable for the thermal insulation layer of the high-temperature ceramic filter, and provide reference for the material selection and design of the ceramic membrane component.

Keywords: Ceramic filter; Material selection; Hierarchical quality house; Fuzzy multi-attribute decision making

陶瓷过滤器以其过滤阻力小、过滤精度高、耐酸碱、耐高温、无二次污染、使用寿命长等特点, 在热电、化工等行业的废气处理和水处理领域有广泛的应用^[1]。研究表明, 高温陶瓷过滤器良好的保温效果可以减少能耗、节约成本、提升过滤效率^[2]。高温陶瓷过滤器在过滤工作温度大于 200°C 时, 可以避免出现露点, 消除了含酸烟气的凝结引起粉尘粘附而堵塞滤料的现象, 并且可以防止过滤器的全面腐蚀。因此, 陶瓷过滤器保温层的选材设计尤为重要。

近年来, 国内外学者对保温材料的选择以及材料属性对取热功率的影响等进行了大量研究。董硕^[3]计算了不同管径和保温层厚度下蒸汽管道输送高压蒸汽的热损失和温度降, 研究了保温材料选择和保温结构对节能的影响。冉云敏等人^[4]比较分析了不同保温材料及保温深度对采出水温度和取热功率的影响, 表明保温材料导热系数和保温深度对系统取热功率有很大影响。杨盼盼等人^[5]将模糊数学综合评判法应用于蒸汽管道保温结构优化, 从保温材料本身特性及工况条件两个方面对保温结构稳定性进行了综合评价。

根据材料性能及工程设计人员经验, 可供选择的高温陶瓷过滤器保温层材料属性包括抗压强度、容重、导热系数、价格和安全性等, 设计方面的要求则包括有外观、成本、环保性、耐久性、尺寸、可加工性等多方面。本文通过材料专家系统选取聚苯板、聚氨酯、岩棉和玻璃棉 4 种备选材料进行研究。选取抗压强度、容重、导热系数、价格和安全性五个材料属性以及外观、成本、环保性、耐久性、尺寸等五个设计要求, 通过递阶质量屋和模糊多属性决策方法对材料属性和设计要求进行研究计算, 建立满足客户需求的材料组合满意度排序, 来确定适合高温陶瓷过滤器保温层的最优材料。

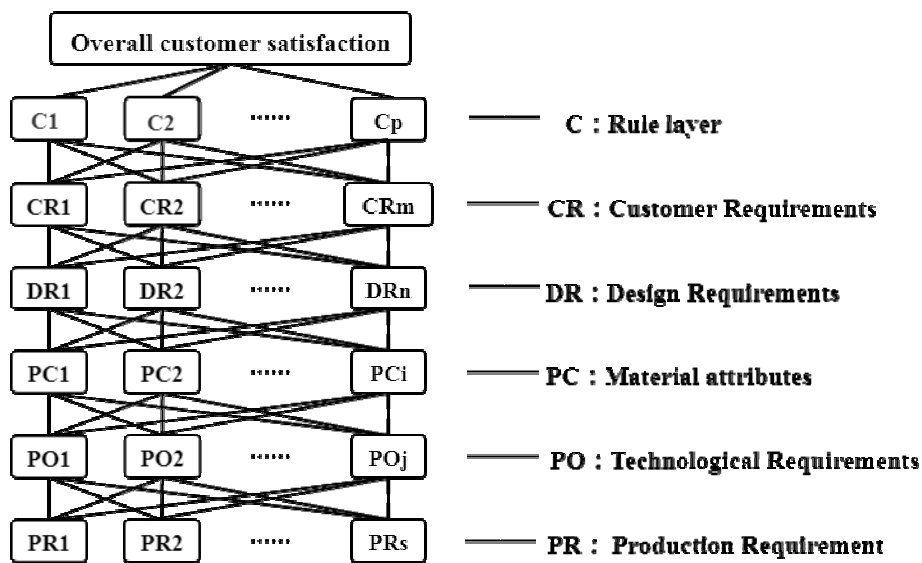


图 1 QFD 总体展开结构图
Figure 1 Illustration of QFD expanded structure

1 递阶质量屋材质属性权重分析

以整体客户满意 (Total Customer Satisfaction, TCS) 为层次结构目标。假设 i 个客户满意准则 C_1 、 C_2 、...、 C_i ，且有 m 个用户需求 CR_1 、 CR_2 、...、 CR_m ；其中 C 为准则层，在确定顾客满意的准则时，既要考虑产品本身的功能特性，又要考虑顾客的具体需求因素； CR 为顾客要求设计方案层。 m 个顾客需求关于目标的综合排序权重 A_1 、 A_2 、...、 A_m ，记为 $A = (A_1, A_2, \dots, A_m)$ ；采用某一准则下的层次分析法求出 i 个准则关于目标的权重，设为 C_1 、 C_2 、...、 C_i ，记为 $C = (C_1, C_2, \dots, C_i)$ ；然后算出 m 个顾客要求关于第 j 准则的相对权重 Q_{j1} 、 Q_{j2} 、...、 Q_{jm} ；然后会对 i 个满意准则及其顾客需求层次结构进行一致性检验，确保顾客需求排序权重过程中分析的一致性^[6]。递阶质量屋总体展开结构如图 1 所示。

表 1 Saaty 比例标度值及其语言含义
Table 1 Saaty's 9-unit scale

Values of scale	Meaning
1	Equally important
3	A little important
5	Obviously important
7	Very important
9	Extremely important
2, 4, 6, 8	The compromise between the two scale
Multiplicative inverse	$a_{ij}=1/a_{ji}$

1.1 单一准则下的材料属性相对权重

构造设计要求和材料特性的递阶层级结构，然后在每一层建立梯形矩阵，用 Saaty 标度值^{错误！未找到引用源。}进行表征，如表 1 所示，可建立判断矩阵 \mathbf{A} ：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & a_{ij} & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 a_{ij} 表示各层对应元素之间的相对重要程度。高温陶瓷过滤器保温材料设计要求有：外观、成本、环保性、耐久性、尺寸、可靠性、回收性，分别对应于 DR_1 、 DR_2 、...、 DR_7 。采用专家打分法，建立基于顾客整体满意度 (TCS) 的设计要求判断矩阵，如表 2 所示。

建立判断矩阵 \mathbf{A} 之后，可采用和法或者根法^[8]求得材料属性的相对权重 w_i 。其中，和法的计算公式为：

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad (2)$$

根法的计算公式为：

$$w_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij}\right)^{1/n}}{\sum_{k=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{kj}\right)^{1/n}} \quad (3)$$

表 2 设计要求判断矩阵
Table 2 Design requirements judgment matrix

TCS	DR_1	DR_2	DR_3	DR_4	DR_5	DR_6	DR_7
DR_1	1	1/6	1/5	1/5	1	1/7	1/5
DR_2	6	1	2	1/2	6	1/2	2
DR_3	5	1/2	1	1	5	1/2	1
DR_4	5	1/2	1	1	5	1/3	1
DR_5	1	1/6	1/5	1/5	1	1/7	1/5
DR_6	7	2	2	3	7	1	2
DR_7	5	1/2	1	1	5	1/2	1

表 3 材料设计要求权重
Table 3 Weight required for material design

Design requirements	Surface	Cost	Unpolluting	Durability	Size	Reliability	Recycling
Weight	0.032856	0.197172	0.144612	0.136979	0.032856	0.310913	0.144612

表 4 以外观为准则的材料属性判断矩阵
Table 4 Material attribute judgment matrix based on appearance

TCS	Bulk density	Compression strength	Thermal conductivity	Price	Safety	Processing difficulty	Fire proof properties
Bulk density	1	2	1/3	5	1/2	1	1/2
Compression strength	1/2	1	1/2	4	1/3	1/2	1/3
Thermal conductivity	3	2	1	8	3	4	3
Price	1/5	1/4	1/8	1	1/7	1/6	1/6
Safety	2	3	1/3	7	1	2	1
Processing difficulty	1	2	1/4	6	1/2	1	1/2
Fire proof properties	2	3	1/3	6	1	2	1

根据设计要求判断矩阵计算各个设计要求的相对权重, 采用和法计算得到各个设计要求的相对权重值 w_1 、 w_2 、...、 w_7 , 结果列于表 3。

得到各个设计要求的相对权重值后, 需要建立材料属性判断矩阵。高温陶瓷过滤器保温层材料属性包括容重、抗压强度、导热系数、价格和安全性等, 相应的判断矩阵分别对应于 PC_1 、 PC_2 、...、 PC_7 。使用 Saaty 标度值, 建立以外观为准则的材料属性判断矩阵, 如表 4 所示。

同以外观为准则的材料属性判断矩阵的建立方法一样, 分别建立以成本、环保性、耐久性、尺寸设计要求为准则的材料属性判断矩阵, 进而求得其材料属性权重。

1.2 一致性检验

采用 Saaty 经验规则, 对设计要求准则及其材料特性进行一致性检验, 以保证排序权重过程中判断和分析的一致性。当一致性比率 $CR < 0.1$ 时, 可认为递阶质量屋的展开精度是可接受的。

一致性指标 CI 由下式计算得到:

表 5 平均随机一致性指标 RI
Table 5 Average random consistency index RI

matrix order	1	2	3	4	5	6	7
RI	0.00	0.00	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

式中, λ_{\max} 为判断矩阵 \mathbf{A} 的最大特征值。

表 5 列出了 1 到 7 阶矩阵平均随机一致性指标 RI 对应的数值。运用式 (5) 计算一致性比率 CR :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

运用 Saaty 经验规则对其属性权重进行一致性检验后填入表 6。

1.3 求递阶质量屋的综合权重

设 p 个设计要求准则 DR_1 、 DR_2 、 DR_3 、...、 DR_p , 有 q 个材料特性 PC_1 、 PC_2 、 PC_3 、...、 PC_q , 采用单一准则下的层次分析法求出 p 个准则关于目标的权重 w_1 、 w_2 、...、 w_p , 记为 $w = (w_1, w_2, \dots, w_p)$; 进而依次算出 q 个材料特性关于第 p 个准则的相对权重 v_{p1} 、 v_{p2} 、...、 v_{pq} 。其中, 不受准则支配的材料特性的权重为 0。采用式 (6) 可计算综合权重 B_k :

$$B_k = \sum_{j=1}^p w_j v_{jk} \quad (6)$$

最终得到基于整体客户满意的材料属性权重列于表 7。

表 6 各材料属性对应设计要求的权重值
Table 6 Weight values of each material attribute corresponding to design requirements

Customer requirements & weight	Design requirements						
	Bulk density	Compression strength	Thermal conductivity	Price	Safety	Processing difficulty	Fire proof properties
Surface	0.1076	0.0798	0.3320	0.0248	0.1762	0.1073	0.1716
Cost	0.0587	0.0413	0.17423	0.4771	0.0957	0.0589	0.0940
Unpolluting	0.0810	0.0586	0.1935	0.0231	0.4407	0.0853	0.1179
Durability	0.0685	0.2811	0.1941	0.0224	0.1007	0.0717	0.2615
Size	0.2529	0.1298	0.1580	0.0175	0.0766	0.2170	0.1482
Reliability	0.0624	0.2987	0.1843	0.0216	0.2684	0.0674	0.0972
Recycling	0.0911	0.0710	0.2363	0.0237	0.3400	0.0994	0.1386

表 7 基于整体客户满意的材料属性权重
Table 7 Material attribute weights based on overall customer satisfaction

Material	Bulk density	Compression strength	Thermal conductivity	Price	Safety	Processing difficulty	Fire proof properties
Weight	0.0030	0.0238	0.0757	0.0106	0.0934	0.0920	0.1322

2 TOPSIS 分析法求算决策依据

模糊多属性决策是多属性决策理论中应用最广泛的方法^[7], 而 TOPSIS 分析法是解决系统工程中有限个方案多目标决策分析问题的最常用方法 错误! 未找到引用源。

TOPSIS 分析法的一般步骤为:

(1) 求判断矩阵 **Z**: 假设共有 m 个目标, 每个目标都有 n 个属性, 对其进行同趋势化和归一化处理后进行加权处理。第 i 个目标 j 个属性加权后权重为 f_{ij} , 得到加权判断矩阵 **Z** 为:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ f_{i1} & \dots & f_{ij} & \dots \\ f_{m1} & f_{m2} & \dots & f_{mn} \end{bmatrix} \tag{7}$$

(2) 求正负理想解: 依据加权判断矩阵获取评估目标的正负理想解, 其中正理想解为:

$$f_j^* = \begin{cases} \max(f_{ij}), j \in J^* \\ \min(f_{ij}), j \in J' \end{cases} \tag{8}$$

负理想解为:

$$f_j' = \begin{cases} \min(f_{ij}), j \in J^* \\ \max(f_{ij}), j \in J' \end{cases} \tag{9}$$

上面两个式子中, J^* 是效益型指标, J' 是成本型指标。

(3) 由式 (10) 和式 (11) 计算各个目标的相对贴合度:

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m (f_{ij} - f_j^*)^2} \tag{10}$$

$$S_i' = \sqrt{\sum_{j=1}^m (f_{ij} - f_j')^2} \tag{11}$$

式中, S_i^* 为目标值与正理想值的欧氏距离, S_i' 为目标值与负理想值的欧氏距离。

(4) 依照贴合度大小排序, 运用式 (12) 求算决策依据:

$$C_i = S_i' / (S_i^* + S_i') \tag{12}$$

式中 C_i 为贴合度。 C_i 值越大, 说明评选结果越优, 以此形成决策依据。

3 典型材料分析

通过材料专家系统选取聚苯板、聚氨酯、岩棉和玻璃棉等 4 种备选材料。查阅资料得到各材料属性 (精准属性) 的精确值。其中各个材料的具体价格根据某电商平台近两年的市场平均价格进行取值。4 种材料的精准属性值列于表 8。

采用专家打分, 对专家意见进行统计、处理、分析和归纳, 经过多轮意见征集、反馈、调整之后得到具有代表性的材料安全性 (模糊属性), 将材料的安全性 (模糊属性) 与材料其他属性 (精准属性) 同趋势化处理得到表 9 所列的材料属性同趋势化处理的结果。

表 9 材料的精准属性
Table 9 Precision attributes of the test materials

Material	Precision attributes					
	Bulk density / kg·cm ⁻³	Compression strength / MPa	Thermal conductivity / W·(m·K) ⁻¹	Price / Yuan·m ⁻³	Processing difficulty	Fire proof properties
Polystyrene board	32	0.60	0.041	16	3	1
Polyurethane	35	0.27	0.024	30	4	5
Rock wool	120	0.04	0.040	15	5	8
Glass wool	20	0.06	0.045	7	5	8

表 9 材料属性同趋势化处理结果
Table 9 The results of material attributes in the same trends

Material	Bulk density / kg·cm ⁻³	Compression strength / MPa	Thermal conductivity / W·(m·K) ⁻¹	Price / Yuan·m ⁻³	Processing difficulty	Fire proof properties
Polystyrene board	0.3125	0.60	24.39	0.0625	2	0.33
Polyurethane	0.0286	0.27	41.67	0.0333	2	0.25
Rock wool	0.0083	0.04	25	0.0667	2	0.2
Glass wool	0.05	0.06	22.22	0.1429	5	0.2

对材料各项属性同趋势化处理后的结果进行归一化处理得到归一化矩阵 **F**：

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 0.4731 & 0.9065 & 0.4153 & 0.3616 & 0.3288 & 0.6619 & 0.0806 \\ 0.4326 & 0.4079 & 0.7094 & 0.1929 & 0.3288 & 0.4964 & 0.4029 \\ 0.1262 & 0.0604 & 0.4256 & 0.3857 & 0.3288 & 0.3971 & 0.6447 \\ 0.7570 & 0.0906 & 0.3783 & 0.8266 & 0.8220 & 0.3971 & 0.6447 \end{pmatrix} \tag{13}$$

对材料属性的归一化矩阵 **F** 进行加权赋值，在此采用统一的权值 w_{ij} ，即：

$$w_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \tag{14}$$

进而得到材料属性的加权矩阵 **Z** ($\mathbf{Z} = \mathbf{F}w_{ij}$)：

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} 0.4731 & 0.9065 & 0.4153 & 0.3616 & 0.3288 & 0.6619 & 0.0806 \\ 0.4326 & 0.4079 & 0.7094 & 0.1929 & 0.3288 & 0.4964 & 0.4029 \\ 0.1262 & 0.0604 & 0.4256 & 0.3857 & 0.3288 & 0.3971 & 0.6447 \\ 0.7570 & 0.0906 & 0.3783 & 0.8266 & 0.8220 & 0.3971 & 0.6447 \end{pmatrix} \tag{15}$$

应用式 (8) 和式 (9) 求得正负理想解：

$$f_j^* = (0.757, 0.9665, 0.7094, 0.8266, 0.822, 0.4964, 0.6447) \tag{16}$$

$$f_j' = (0.1262, 0.0604, 0.3783, 0.1929, 0.3288, 0.3971, 0.8058) \tag{17}$$

根据式 (10) 和式 (11) 得到材料属性值与理想值之间的欧氏距离: $S_1^* = 0.972$, $S_2^* = 1.0414$, $S_3^* = 1.3046$, $S_4^* = 0.9194$, $S_1' = 0.9676$, $S_2' = 0.6618$, $S_3' = 0.598$, $S_4' = 1.167$ 。最后, 通过式 (12) 得出各个材料属性相对贴合度: $C_1 = 0.4989$, $C_2 = 0.3886$, $C_3 = 0.3143$, $C_4 = 0.5593$ 。

比较计算所得 C 值的大小可以看出 $C_4 > C_1 > C_2 > C_3$ 。聚苯板与岩棉最优解的贴合度相近且都在 0.5 左右。结合基于整体客户满意的材料属性权重值, 可以知道客户对于保温材料的导热系数以及价格是最敏感的 (导热系数和价格的综合权重值最大), 显然岩棉更加贴合整体客户满意的材料属性权重。由此得出: 虽然聚苯板与岩棉最优解的贴合度相近, 但依据基于整体客户满意的材料属性权重值, 选择岩棉作为高温陶瓷过滤器保温层最终的材料方案可以达到最好的效果。

4 结 论

本研究通过优先选择材料属性来满足整体客户需求及工程实际运用, 确保概念设计能够适应多变的市场需求, 能够提供满足用户需求的产品及服务。对于高温陶瓷过滤器的保温材料选择, 岩棉作为最终的材料方案可以达到最好的效果。

本研究中材料选择方法、用户需求、材料属性等的设定都有极大的灵活性, 所以在实际设计生产过程中, 可以根据具体的使用情况, 针对不同的产品或材料, 设定不同的用户需求准则, 根据所需材料性能设定更为精确的材料属性值, 根据现实情况调整各项参数。

该方法对陶瓷制品及其装备设计有重要参考价值, 可以为后续研发生产过程中所遇到的材质选择、参数调整等问题提供新思路。

参 考 文 献

- [1] 田维, 税安泽, 柯善军. 高温烟气过滤陶瓷的研究及应用现状[J]. 佛山陶瓷, 2016, (12): 5-8.
- [2] 刘剑刚, 李攀, 刁永发, 等. 高温烟气用复合型陶瓷材料的过滤特性研究[J]. 建筑热能通风空调, 2015, (1): 94-96.
- [3] 董硕. 高压蒸汽管道保温研究[J]. 合成纤维, 2019, (9): 52-54.
- [4] 冉运敏, 卜宪标. 保温对地热单井换热性能的影响分析[J]. 化工学报, 2019, (11): 4191-4198.
- [5] 杨盼盼, 何承霖, 王楠. 蒸汽管道保温结构稳定性模糊综合评价[J]. 辽宁化工, 2015, (5): 575-576.
- [6] 陈以增, 唐加福, 任朝辉, 等. 基于质量屋的顾客需求权重确定方法[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23 (8): 36-42.
- [7] JAISWAL RK, TTHOMAS T, GALKATE RV, et al. Watershed prioritization using Saaty's AHP based decision support for soil conservation measures [J]. Water Resources Management, 2014, 28 (2): 475-494.
- [8] 全铨. 基于模糊多属性决策和递阶质量屋的汽车轻量化材料选择方法[D]. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2015.
- [9] 张雄林, 张彩云, 胡欣月. 基于三角模糊 TOPSIS 分析法的第三方物流供应商服务绩效评估[J]. 物流技术, 2015, 34 (3): 176-179.
- [10] 姚绍文. 多属性决策的模糊理想点法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47 (24): 241-244.
- [11] 苏珂, 王硕. 产品多意象造型设计研究[J]. 机械设计, 2016, 33 (3): 115-119.