

# 基于 AHP-TOPSIS 的铝电解槽设计方案优选<sup>①</sup>

杨志强<sup>1</sup>, 柴婉秋<sup>1,2</sup>

(1. 贵阳铝镁设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081; 2. 国家铝镁电解装备工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 根据铝电解槽技术特点, 从经济、技术和安全 3 个方面, 选取 9 个评价指标构建了综合评价指标体系; 采用层次分析法 (AHP) 确定各项评价指标的权重系数, 再耦合逼近理想解排序法 (TOPSIS) 建立铝电解槽设计方案优选的综合评价模型; 最后, 运用该模型针对某 400 kt/a 的铝锭工程, 选取 4 种初选设计方案进行综合评比, 结果表明: 电流强度为 500 kA 的设计方案最优, 其次是 550 kA 和 420 kA 设计方案, 600 kA 设计方案最劣。评价结果与实际工程预期相吻合, 该方法可应用于铝电解槽设计方案的优选决策。

**关键词:** 铝电解槽; 层次分析法; 逼近理想解的排序法; 方案优选

**中图分类号:** TF111

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.0253-6099.2019.06.027

**文章编号:** 0253-6099(2019)06-0107-04

## Optimization of Aluminum Electrolytic Cell Design Based on AHP-TOPSIS

YANG Zhi-qiang<sup>1</sup>, CHAI Wan-qiu<sup>1,2</sup>

(1. Guiyang Aluminum Magnesium Design & Research Institute Co Ltd, Guiyang 550081, Guizhou, China; 2. National Engineering and Technology Research Center for Aluminum & Magnesium Electrolysis Facilities, Guiyang 550081, Guizhou, China)

**Abstract:** According to the technical characteristics of aluminum electrolytic cell, 9 evaluation indexes were selected in terms of economic, technical and safety factors to build a comprehensive evaluation index system. Analytical hierarchy process (AHP) was used to determine the weight coefficient of each evaluation index, and then the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) was coupled to establish a comprehensive evaluation model for optimization of the design of aluminum electrolytic cell. Finally, this model was applied to the evaluation of a 400 kt/a capacity aluminum ingot project, and four preliminary design schemes were selected for comprehensive evaluation. The results show that the design scheme with a current intensity of 500 kA is the best, followed by the design schemes with 550 kA, 420 kA and 600 kA, in which the 600 kA scheme is the worst. It is found that the evaluation results are consistent with the actual project expectations. It is concluded that this method can be applied to the optimization and decision in the design of aluminum electrolytic cells.

**Key words:** aluminum electrolytic cell; analytic hierarchy process (AHP); technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS); scheme optimization

近年来, 国内外铝电解槽技术过度追求大容量、甚至超大容量的设计方案, 随着铝电解槽容量的不断增大, 电流强度也逐渐增高, 过高的电流强度产生的强磁场会对槽内熔体的流动和波动产生剧烈影响, 槽内的电热状况也愈加复杂。根据国内已投产的大型铝电解槽生产现状可知, 铝电解槽容量越大, 槽型的稳定性越差、槽寿命越短、电流效率越低、能耗越高。从技术成熟度和经济技术指标上相比较, 400 kA 级槽型明显优于 500 kA 级和 600 kA 级槽型; 从生产管理上相比较,

500 kA 级和 600 kA 级槽型对生产的精细化管理要求更严, 管理难度更大。因此, 根据实际工程特点和技术现状, 合理决策出一套技术先进、生产稳定、安全可靠, 并获得良好经济技术指标的铝电解槽设计方案尤为重要。

目前, 铝电解槽设计方案的决策大多采用传统的经验法和类比法, 这些方法受决策人的专业知识、经验等主观因素影响较大, 难以综合考虑各方面因素的影响。近年来, 有些专家学者在地铁施工方案、矿山开采方案、工程设计方案、矿井安全等领域的决策中, 采用

① 收稿日期: 2019-05-26

作者简介: 杨志强 (1985-), 男, 贵州天柱人, 高级工程师, 硕士, 主要从事有色冶金工艺与装备研究。

层次分析法(AHP)耦合逼近理想解排序法(TOPSIS)进行综合评价决策,取得了较好的效果<sup>[1-6]</sup>。鉴于此,本文探索运用AHP法对影响铝电解槽设计方案的各项评价指标分类,计算其各指标权重,再结合TOPSIS法构建综合评价模型,最后确定最优的铝电解槽设计方案。

## 1 AHP法确定指标权重

AHP法是一种能将复杂模糊的问题采用定性与定量分析相结合进行多准则决策的分析方法,可根据决策目标将复杂问题条理化、层次化后,由高到低构建目标层、准则层和指标层的组合全排列的评价指标体系<sup>[7]</sup>,再按1~9标度法原理对各评价指标赋值,进而确定各指标的权重。

### 1.1 构建判断矩阵

设有评价指标 $X_1, X_2, \dots, X_n$ ,依据资料数据或专家意见,采用二元对比法对各评价指标进行两两相比较,利用它们对上层指标的相对重要度进行赋值,则判断矩阵为:

$$P_i = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $P_i(i=1, 2, \dots, n)$ 为第 $i$ 个上层指标的判断矩阵; $x_{ij}(i, j=1, 2, \dots, n)$ 为对应下层指标 $X_i$ 和指标 $X_j$ 相对于上层指标的重要度值。

### 1.2 指标权重的计算与一致性检验

由赋值原则可知,判断矩阵 $P_i$ 为正定互反矩阵,存在唯一的非零最大特征值 $\lambda_{\max}$ 。实际计算时,较难求出 $P_i$ 的精确最大特征值 $\lambda_{\max}$ 和特征单位向量 $K$ ,常采用方根法计算它们的近似值<sup>[7]</sup>。

由于判断矩阵是专家凭个人知识和经验构造而成的,难免存在一定误差,为使判断结果与实际情况更加吻合,需对判断矩阵进行一致性检验,一致性检验公式为:

$$CR = \frac{\lambda_{\max} - n}{RI(n-1)} \quad (2)$$

式中 $RI$ 为平均随机一致性指标,对于1~9阶判断矩阵, $RI$ 取值分别为0、0、0.58、0.90、1.12、1.24、1.32、1.41、1.45; $n$ 为判断矩阵的阶数; $CR$ 为判断矩阵的随机一致性比率,当 $CR < 0.1$ 时,判断矩阵一致性满足要求,否则需要对判断矩阵进行修正。

## 2 TOPSIS法的综合评价

TOPSIS法综合评价是根据各待选评价方案与正、负理想解的距离进行判定,若评价方案最靠近正理想解同时又远离负理想解为最好,反之为最差。正理想

解是一个设想最优解,其各个指标均达到最优;负理想解是设想最劣解,其各项指标均为最差<sup>[3]</sup>。

### 2.1 构建综合评价矩阵

设决策问题有 $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ 共 $m$ 个待选评价方案,每个方案有 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 共 $n$ 个衡量方案性能的评价指标,则综合评价矩阵为 $R_{m \times n}$ :

$$R_{m \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $a_{ij}(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ 为第 $i$ 个方案中第 $j$ 个评价指标赋值。

由于决策问题中不同的评价指标具有不同量纲和量纲单位,不具有可公度性,需对评价指标进行无量纲化处理<sup>[5]</sup>。同时,不同评价指标的相对重要度也存在差异,需利用权重系数进行修正。

### 2.2 计算与理想解的距离

TOPSIS法决策的关键是计算评价方案与正、负理想解之间的欧氏距离,其计算公式为<sup>[7-8]</sup>:

$$\begin{cases} S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (b_{ij} - b_j^+)^2} \\ S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (b_{ij} - b_j^-)^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $S_i^+, S_i^-(i=1, 2, \dots, m)$ 分别为评价方案与正、负理想解之间的欧氏距离; $b_j^+, b_j^-(j=1, 2, \dots, n)$ 分别为正、负理想解所对应元素值; $b_{ij}$ 为 $a_{ij}$ 经无量纲化处理和权重系数修正后所得值。

### 2.3 综合评价模型

综合评价采用评价方案与正理想解的相对接近度进行评定,相对接近度计算公式为:

$$T_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (5)$$

式中 $T_i(i=1, 2, \dots, m)$ 为评价方案与正理想解的相对接近度值。

相对接近度值 $0 \leq T_i \leq 1$ ,当待选评价方案越趋近正理想解时, $T_i$ 越趋近于1;反之, $T_i$ 越趋近于0。按照 $T_i$ 值的大小进行排序, $T_i$ 值最大的评价方案即为最优方案,反之为最劣方案。

## 3 实例应用与分析

某电解铝厂拟新建单线产能为400 kt/a的铝锭工程,铝电解槽设计方案选用要求:①建设期为1年,槽型外形美观、施工难度较低,便于流水线机械化制作;②选用国内外主流槽型结构,技术先进、安全可靠、主要技术经济指标达到国内外领先水平;③正常生产管理难度较低,便于精细化管理,运营成本较低。根据建设产能和国内铝电解槽技术现状,初步拟选电流强度

为 420 kA(方案 I)、500 kA(方案 II)、550 kA(方案 III)和 600 kA(方案 IV) 4 种铝电解槽设计方案, 各方案的主要参数见表 1。

### 3.1 构建综合评价指标体系

依据 AHP 法的基本原理和铝电解槽技术特点, 构建方案优选的综合评价指标体系, 见表 2。

表 1 拟选设计方案的主要参数

方案	电流强度 /kA	安装槽数 /台	槽间距 /m	平均电压 /V	电流效率 /%	吨铝直流电耗 /( $\text{kWh} \cdot \text{t}_{\text{Al}}^{-1}$ )	厂房长度 /m	厂房跨度 /m	工区数量 /个
方案 I	420	354	6.8	3.92	94	12 427	1 317	32+55+32	8
方案 II	500	298	6.9	3.92	94	12 427	1 142	33+55+33	8
方案 III	550	272	6.7	3.92	94	12 427	1 015	34+60+34	6
方案 IV	600	248	6.8	3.92	94	12 427	942	35+60+35	6

表 2 铝电解槽设计方案优选的综合评价指标体系

准则层指标	指标层指标	指标单位	方案 I	方案 II	方案 III	方案 IV
经济指标 ( $P_1$ )	吨铝电解车间建设投资 ( $X_1$ )	元/ $\text{t}_{\text{Al}}$	3 395	3 365	3 380	3 395
	实际正常生产电流效率 ( $X_2$ )	%	94	92.5	90	88
	吨铝电解车间占地面积 ( $X_3$ )	$\text{m}^2/\text{t}_{\text{Al}}$	0.368	0.346	0.335	0.326
技术指标 ( $P_2$ )	设计指标实现的难易程度 ( $X_4$ )	无量纲	1.00	0.98	0.955	0.94
	漏槽或停槽事故发生率 ( $X_5$ )	%	0.03	0.04	0.05	0.06
	生产管理难易程度 ( $X_6$ )	无量纲	0.95	0.93	0.91	0.89
	槽型寿命周期 ( $X_7$ )	年	8	12	15	15
安全指标 ( $P_3$ )	安全事故发生率 ( $X_8$ )	%	0.04	0.03	0.03	0.04
	电磁辐射污染影响程度 ( $X_9$ )	无量纲	0.08	0.10	0.10	0.12

### 3.2 AHP 法确定指标权重

根据 AHP 法的基本原理, 在查阅了相关文献资料和咨询设计院有关专家的基础上, 通过对各层次指标的相对重要度进行对比分析后, 构建出判断矩阵, 再利用 MATLAB 软件计算得各层次指标的权重系数, 见表 3。

表 3 各层次指标的权重系数

准则层指标		指标层指标		综合权重
代号	权重	代号	权重	
$P_1$	0.571 4	$X_1$	0.400 0	0.228 6
		$X_2$	0.400 0	0.228 6
		$X_3$	0.200 0	0.114 3
		$X_4$	0.444 4	0.127 0
$P_2$	0.285 7	$X_5$	0.222 2	0.063 5
		$X_6$	0.111 2	0.031 8
		$X_7$	0.222 2	0.063 5
		$X_8$	0.666 7	0.095 3
$P_3$	0.142 9	$X_9$	0.333 3	0.047 6

### 3.3 综合评价

根据公式(3)定义, 以表 2 中各设计方案的综合评价指数为依据构建综合评价矩阵; 因方案中部分评价指标的量纲和量纲单位均存在不一致现象, 需作无量纲化处理; 同时考虑到各评价指标之间存在重要度差异, 还需利用 AHP 法所确定的指标权重系数进行修正, 经计算后得综合评价结果见表 4。

表 4 拟选设计方案综合评价结果

拟选设计方案	正理想解距离	负理想解距离	相对接近度	综合评价排序
方案 I	0.023 0	0.025 1	0.521 5	3
方案 II	0.014 9	0.021 5	0.590 7	1
方案 III	0.019 2	0.023 5	0.550 3	2
方案 IV	0.028 5	0.018 6	0.300 0	4

由表 4 可知, 电流强度为 500 kA(方案 II)的铝电解槽设计方案的总评价最高, 即为本工程的最优设计方案, 拟选设计方案按优劣排序为: 方案 II > 方案 III > 方案 I > 方案 IV。

### 3.4 讨论及建议

由评价结果可以看出, 吨铝电解车间建设投资和实际正常生产电流效率 2 个评价指标对评价结果影响最大; 吨铝电解车间占地面积和设计指标实现的难易程度 2 个评价指标次之; 其余评价指标影响较小。

400 kA 级铝电解槽技术方案, 因其具有电场、热场和磁场稳定性高, 技术成熟、安全可靠、电流效率高、能耗低、槽寿命长等众多优点, 故得以广泛运用; 但随着电解铝产能不断增加, 铝电解槽数量也随之增加, 电解车间厂房会过长, 导致生产管理越趋困难。经 AHP-TOPSIS 法计算可知, 单线产量不大于 350 kt/a 的电解铝项目, 采用 400 kA 或 420 kA 铝电解槽技术方案更为合理。

500 kA 铝电解槽技术自 2011 年投产以来, 经过

国内各设计院在槽型结构、内衬结构、母线配置、智能化管理与控制等关键技术方面不断地优化改进,目前各项经济技术指标已趋于良好,近年来逐渐被各大型电解铝项目定为首选方案。单线产量不大于 500 kt/a 的电解铝项目,优先采用 500 kA 的铝电解槽设计方案较合理;更大产能项目可选 530 kA 或 550 kA 铝电解槽技术方案。

600 kA 铝电解槽技术由于还存在热场和磁场稳定性较差、槽寿命较短、电流效率较低、运营成本较高、生产管理难度大等不足,所以推广缓慢。考虑到技术经济性、安全性、风险性等因素,目前对于产量大于 600 kt/a 的电解铝项目,建议采用双线布置。

## 4 结 语

1) 依据 AHP 法原理和铝电解槽技术特点,从经济指标、技术指标和安全指标 3 个方面,选取 9 个主要评价指标,构建铝电解槽设计方案优选的综合评价指标体系,再运用 1~9 标度法对各评价指标赋值,从而计算出各评价指标的权重系数。

2) 以某单线产能为 400 kt/a 的铝锭工程为例,按电流强度大小拟选了 420、500、550 和 600 kA 共 4 种铝电解槽设计方案,采用 TOPSIS 法进行综合评价,结果表明:电流强度为 500 kA 的铝电解槽设计方案最优。

(上接第 106 页)

2) 通过单因素实验,得出硝酸氧化浸出分离铜镍的最佳工艺条件为:硫酸浓度 2.0 mol/L,固液比 1:5,浸出反应温度 85 ℃,浓硝酸用量 2.0 mL/100 mL,搅拌速度 500 r/min 和浸出时间 90 min。在此条件下,Cu 和 Ni 平均浸出率分别达到 94.58% 和 80.22%,而 As、Sb 和 Sn 浸出率仅为 4.52%,1.11% 和 0.15%。有效实现了从高锡高砷铜阳极泥中浸出分离铜镍,有利于各金属资源的综合回收。

## 参考文献:

- [1] 王晓阳,王文祥,方红生,等. 高砷高锡阳极泥中砷锡分离工艺研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(6):9-12.
- [2] 郭学益,许志鹏,田庆华,等. 低温碱性熔炼分离富集铜阳极泥中的有价金属[J]. 中国有色金属学报, 2015,25(8):2243-2250.
- [3] 贺山明,王晓明,徐志峰,等. 黑铜泥氢氧化钠氧压碱浸脱砷研究[J].

3) 由行业内资深专家确定主要评价指标、各指标数据源于实际工程,评价结果与工程预期相吻合,故 AHP-TOPSIS 综合评价法可应用于铝电解槽设计方案的优选决策。

## 参考文献:

- [1] 陈婷婷,宋永发. 基于 AHP-TOPSIS 的地铁车站施工方案比选[J]. 工程管理学报, 2012,26(2):33-36.
- [2] 程 健,张钦礼,薛希龙,等. 基于 AHP 和 TOPSIS 法的采场结构参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2014,34(1):1-5.
- [3] 王新民,柯愈贤,张钦礼,等. 基于 AHP-TOPSIS 的露天转地下采矿方案优选[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2012,37(6):1273-1279.
- [4] 阳雨平,谢选杰,郭 明,等. 基于 AHP 和灰色关联 TOPSIS 的残矿回采方案优选[J]. 矿冶工程, 2015,35(1):1-5.
- [5] 王智远,李国栋,王勇华. 基于 AHP-TOPSIS 的桥梁设计方案优选决策模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017,47(2):478-482.
- [6] 贾宝山,尹 彬,王翰钊,等. AHP 耦合 TOPSIS 的煤矿安全评价模型及其应用[J]. 中国安全科学学报, 2015,25(8):99-105.
- [7] 龚 剑,胡乃联,崔 翔,等. 基于 AHP-TOPSIS 评判模型的岩爆倾向性预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2014,33(7):1142-1148.
- [8] 廖炎平,刘 莉,邢 超. TOPSIS 中不同规范化方法的研究[J]. 北京理工大学学报, 2012,32(5):871-875.

引用本文:杨志强,柴婉秋. 基于 AHP-TOPSIS 的铝电解槽设计方案优选[J]. 矿冶工程, 2019,39(6):107-110.

矿冶工程, 2017,37(2):94-97.

- [4] 李彦龙,易 超,鲁兴武,等. 铅阳极泥碱性浸出铋、铊研究[J]. 矿冶工程, 2016,36(1):80-82.
- [5] 兰玮锋. 铜钴硫化物精矿氧压浸出工艺研究[J]. 矿冶工程, 2018,38(4):115-117.
- [6] 钟清慎,贺秀珍,马玉天,等. 铜阳极泥氧压酸浸预处理工艺研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2014(7):14-16.
- [7] Hait J, Jana R K, Kumar V, et al. Some studies on sulfuric acid leaching of anode slime with additives[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2002,41(25):6593-6599.
- [8] 贺山明,王瑞祥,韩海军,等. 黑铜渣氧压硫酸浸出脱铜脱砷实验研究[J]. 矿冶工程, 2018,38(1):84-87.
- [9] 刘伟锋,杨天足,刘又年,等. 脱除铜阳极泥中贱金属的预处理工艺[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013,44(4):1332-1333.

引用本文:刘小文,周兆安,毛语章,等. 从高锡高砷铜阳极泥中浸出铜镍的工艺研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(6):104-106.