

基于 AHP-Fuzzy 方法的铝酸钙企业清洁生产评价指标体系构建

秦玲¹, 安艳玲^{1*}, 吴起鑫^{1,2}, 彭宏佳¹

(1. 贵州大学 喀斯特环境与地质灾害防治重点实验室, 贵州 贵阳 550003;

2. 中国科学院 地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 铝酸钙主要用于生产铝盐产品, 其尤为突出的作用是决定水处理剂聚合氯化铝的性能优劣, 为了更好的控制铝酸钙的生产, 方便企业实施清洁生产和强化环境管理, 构建清洁生产评价指标体系是重中之重。通过对铝酸钙企业的整个生命周期进行调查分析, 结合国家清洁生产评价指标体系编制通则、其它行业清洁生产评价指标体系及专家经验, 运用层次分析法建立铝酸钙企业清洁生产评价指标体系, 确定一级、二级各项评价指标的权重; 根据国内外铝酸钙企业先进的清洁生产模式及专家的建议确定各评价指标的等级基准值; 运用模糊数学综合评价法确定综合评价的方法。同时对国内一家较先进的铝酸钙企业进行实证分析, 取得了一致的结果, 因此该评价指标体系能全面、科学、合理地反应铝酸钙企业的清洁生产水平。

关键词: 铝酸钙; 清洁生产评价; 指标体系; 层次分析法; 模糊综合评价法

中图分类号: X38

文献标识码: A

铝酸钙主要用于生产聚合氯化铝, 硫酸铝, 铝酸钠以及炼钢除渣剂, 高铝水泥材料等, 是制作高效净水剂聚合氯化铝的必备材料, 作为碱化剂或聚合度调整剂参与反应, 铝酸钙的使用直接控制了聚合氯化铝的好坏。而聚合氯化铝是冶金、石化、造纸、钢铁、纺织、印染、食品、酿造等多种行业的废水处理和自来水净化的主要材料; 是目前应用最广、销售量最大的无机混凝剂和水处理剂^[1]。面对水处理行业的极大需求, 铝酸钙被大量生产, 相应的企业也不断增多。为使企业能够清洁高效的生产铝酸钙, 必须实行清洁生产, 而推行清洁生产, 关键就是要制定和实施一套具有科学性、全面性和激励性的清洁生产评价指标体系, 去发现企业生产、管理过程中存在的各种问题并加以解决。

目前, 我国生产铝酸钙的企业有 15 余家, 总生产能力达 100 万吨左右, 其中有 3 家企业采用窑外预热法, 其余的均采用中空窑生产工艺。铝酸钙生产过程中能源资源消耗量大、烟尘粉尘排放量多、噪声污染强, 而铝酸钙企业尚未有可以参考的清洁生

产标准和评价指标体系, 企业的清洁生产只能参照产业政策等来开展, 这已严重影响到企业清洁生产水平的正确评价以及企业清洁生产方案的实施。

本文采用层次分析(AHP)法构建铝酸钙企业的清洁生产指标体系, 运用模糊综合评价(Fuzzy)法对企业清洁生产水平进行综合评价, 并运用构建的体系对某企业进行实证分析, 以期为其它铝酸钙企业开展清洁生产提供理论依据和技术指导。

1 清洁生产指标体系的构建

1.1 指标体系的选取原则

评价指标筛选应遵从:(1)从铝酸钙企业整个生命周期过程来选取符合清洁生产思路, 体现全过程污染防治的指标。(2)选取出的评价指标应易量化、易获取数据, 计算方法简便易行, 具有较强的可操作性^[2]。(3)各指标之间相互补充, 全面、系统反映企业的各个环节, 能找出企业能耗、物耗高及产生污染情况的指标^[3]。(4)定量评价指标的选取应能较全面地反映铝酸钙企业清洁生产的最终成果; 定性评价指标的采用应能较准确地考核铝

收稿日期: 2017-01-01

基金项目: 贵州省科技厅重点实验室建设项目(黔科合计 Z 字[2012]4012)

作者简介: 秦玲(1991-), 女, 在读硕士, 研究方向: 流域治理与管理, 行业清洁生产, Email: 18798012036@163.com.

* 通讯作者: 安艳玲, Email: re.yilan@gzu.edu.cn.

酸钙企业与国家、地方各项政策法规的相符性及其清洁生产水平^[4]。

评价指标等级值的设定需考虑:(1)国内外现有的技术水平和管理水平,并有一定的激励作用。(2)注重实用性和可操作性,尽量选择铝酸钙企业生产管理部门和环境管理部门日常采用的指标,以便于企业的理解、掌握及应用^[5-8]。

基于以上原则,选取确定出科学、完整、开放、可随经济社会环境等条件变化而改变的指标集合及指标基准值来客观真实反映铝酸钙企业清洁生产水平^[9]。

1.2 指标体系的构建方法

目前国内外常用的评价指标体系构建方法有层次分析法(AHP)法、熵值法、主成分分析法、德尔菲法、加权因子法、输入输出法、清洁度法和百分制法等。通过比较各种方法的适用性,发现 AHP 法将定性和定量分析相结合,具有适用、简洁、实用和系统性均佳的优点,应用较为广泛;同时参照《清洁生产评价指标体系编制通则》^[7],因此选取 AHP 法用于构建铝酸钙企业清洁生产评价指标体系。AHP 法构建清洁生产评价指标体系主要有 5 个步骤:建立层次结构模型,构造判断矩阵,层次单排序,一致性检验,层次总排序^[10-12]。

1.3 指标体系的构成

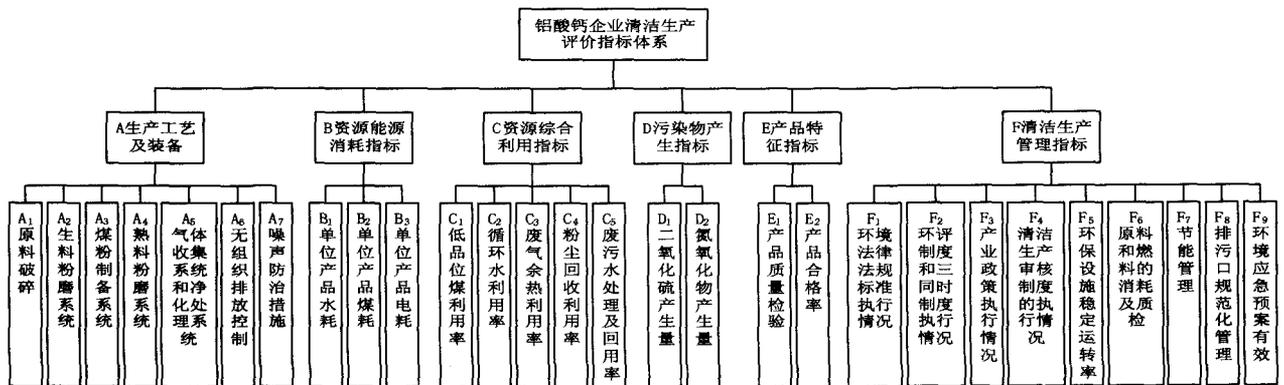


图 1 铝酸钙企业清洁生产评价指标体系

1.4 评价指标权重值的确定

铝酸钙企业清洁生产评价属于多目标决策问题,各指标的权重应能反映其对系统清洁生产的重要程度,各项指标权重是否准确直接影响整个评价指标体系的科学合理性。目前,权重的计算方法有很多种,常用的有专家咨询法、主成分分析法和层

次分析法^[17]。结合铝酸钙企业清洁生产评价指标体系的特点,本文选用层次分析法与专家咨询法相结合来确定各指标的权重^[18,19]。

铝酸钙企业清洁生产评价指标体系包括定量和定性评价两部分。根据铝酸钙企业的特点和层次分析法(AHP)的步骤建立由总到分的层次结构模型。该模型共 3 层,第一层为铝酸钙企业清洁生产发展水平,即目标层(P);第二层为铝酸钙企业清洁生产评价的主要准则,即准则层(A、B、C、D、E、F);第三层为具体描述铝酸钙企业清洁生产的各级指标(A₁、B₁、C₁、D₁、E₁、F₁),即评价指标层^[13,14]。

参照编制通则中的生产工艺及装备、资源能源消耗、资源综合利用、污染物产生、产品特征、清洁生产管理 6 类一级指标;借鉴国内外先进的铝酸钙清洁生产企业模式;结合清洁生产、环境保护、循环经济、资源综合利用、节能 5 个行业专家及铝酸钙生产先进企业技术专家的合理化建议表进行分类统计得出的结果;对铝酸钙企业现状进行全面调查、系统分析,针对企业的特点,将评价指标体系设置为两级。一级指标(准则层)为生产工艺及装备、资源能源消耗、资源综合利用、污染物产生、产品特征、清洁生产管理共 6 类指标;二级指标(指标层)为能够反映企业原材料管控、生产技术、环境管理、资源能源消耗、废物产生、产品质量等情况的 28 项指标^[15,16],指标体系见图 1。

次分析法^[17]。结合铝酸钙企业清洁生产评价指标体系的特点,本文选用层次分析法与专家咨询法相结合来确定各指标的权重^[18,19]。

筛选出专家按照 1-9 标度法对指标体系中准则层、指标层之间进行重要性比较的表格,进行统计分析,建立判断矩阵。使用层次分析法软件

Yaahp7.0 进行具体计算^[20,21]。计算出各项指标的权重值(见表 1)并进行一致性检验(见表 2),当一致性 $CR < 0.1$ 时,一般认为判断矩阵的一致性是可以接受的,当判断矩阵通过一致性检验后,则计算出的结果可以作为指标的权重值^[22],表明权重层

次总排序结果可行,权重集合较科学。由表 2 可知目标层对准则层,准则层对各相应的指标层的一致性检验结果都小于 0.1,说明本文建立的铝酸钙企业清洁生产指标体系及计算出的权重值科学合理。

表 1 指标权重值

指标	权重值										
A	0.47	B	0.17	C	0.16	D	0.13	E	0.03	F	0.04
A ₁	0.08	B ₁	0.60	C ₁	0.04	D ₁	0.50	E ₁	0.50	F ₁	0.08
A ₂	0.22	B ₂	0.30	C ₂	0.29	D ₂	0.50	E ₂	0.50	F ₂	0.12
A ₃	0.24	B ₃	0.10	C ₃	0.36					F ₃	0.07
A ₄	0.24			C ₄	0.14					F ₄	0.04
A ₅	0.11			C ₅	0.17					F ₅	0.26
A ₆	0.08									F ₆	0.20
A ₇	0.04									F ₇	0.11
										F ₈	0.08
										F ₉	0.04

表 2 一致性检验结果

准则层/指标层	λ_{max}	CR
目标层对准则层	6.5445	0.0864
A-A _i	7.1749	0.0214
B-B _i	3.0000	0
C-C _i	5.1729	0.0386
D-D _i	2.0000	0
E-E _i	2.0000	0
F-F _i	9.9884	0.0846

1.5 综合评价方法

目前常用的清洁生产评价方法主要有综合评价指数法和百分制法两种。其中综合评价指数法操作简便,而百分制法主观性较强,容易忽略指标间的影响及对整体的贡献情况^[23]。模糊数学综合评价(Fuzzy)法具有较好的定量性、客观性^[24],结果清晰、系统性强,能较好的解决模糊的、不确定性的问题^[25]。根据企业实施清洁生产需要评估各个环节的现状、识别出清洁生产的潜力^[26];同时考虑到清洁生产指标具有多属性、多层次,且多数具有随机性、模糊性,所以本文在对铝酸钙企业清洁生产水平进行评价时,选用模糊数学综合评价法。同时本文在层次分析法确定指标权重的基础上,运用模糊综合评价法进行评价,两者相辅相成,共同提高了评价的可靠性和有效性^[27]。

(1) 单因素评价

将因素集设为 X ,将评价集设为 $Y, X = \{X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n\}, X_i$ 为评价因素(评价指标), $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_j, \dots, Y_m\}, Y_j$ 为评价等级。评价等级 Y 直接决定企业的清洁生产水平,所以本文在收集国内外铝酸钙行业数据的基础上,结合清洁生产、环境保护、循环经济、资源综合利用、节能 5 个行业专家及铝酸钙生产先进技术专家的建议,综合考虑铝酸钙行业的生产现状、未来的发展趋势、铝酸钙 GB/T29341-2012 标准及其它相关行业的评价等级得出等级建议值(其中(a).定性指标生产工艺及装备和清洁生产管理各等级值主要参考国内外企业不同类型设备的使用效果,产业政策要求,设备淘汰落后目录,污染物排放标准,清洁生产促进法、清洁生产审核暂行办法、环保“三同时”、环境影响评价等环保制度的要求等;(b).定量指标资源能源消耗各等级值主要是参考过程监视和测量控制程序的规定,综合能耗计算通则;资源能源综合利用各等级值主要参考资源综合利用目录,行业协会数据,开展资源综合利用若干问题的暂行规定,产业结构调整目录;污染物产生各等级值主要参考工业大气污染物排放标准;产品特征各等级值主要参考铝酸钙 GB/T29341-2012 标准,国家产品质量法,质量管理体系要求),最终建议等级为国际清洁生产领先水平、国内清洁生产先进水平、国内清洁生产基本水平,见表 3。

表3 等级评价标准

一级指标	二级指标	国际清洁生产领先水平	国内清洁生产先进水平	国内清洁生产基本水平
A 生产工艺及装备	原料破碎	单段破碎系统	单段破碎系统	二段破碎系统
	生料粉磨系统	采用国际领先的生料粉磨系统	采用国内先进的生料粉磨系统	采用国内普通的生料粉磨系统
	煤粉制备系统	采用国际领先的煤粉制备系统	采用国内先进的煤粉制备系统	采用国内普通的煤粉制备系统
	熟料粉磨系统	采用国际领先的熟料粉磨系统	采用国内先进的熟料粉磨系统	采用国内普通的熟料粉磨系统
	气体收集系统和净化处理装置	按照 HJ434 和 GB4915,对产生大气污染物的生产工艺和装置必须设立局部或整体气体收集系统和净化处理装置,达标排放。		
	无组织排放控制	物料处理、输送、装卸、储存等逸散粉尘的设备和作业场所均应采取控制措施,采用密闭、覆盖、减少物料落差或负压操作等措施,防止粉尘逸出,或负压收集含尘气体净化处理后排放。通过合理工艺布置、厂内密闭输送、路面硬化、清扫洒水等措施减少道路交通扬尘,确保无组织排放限值符合 GB4915 要求。		
	噪声防治措施	鼓励采用低噪声设备,并对设备或生产车间采取隔声、吸声、消声、隔振等措施,降低噪声排放。宜通过合理的生产布局、建(构)筑物阻隔、绿化等方法减少对外界噪声敏感目标的影响。		
B 资源能源消耗	单位产品水耗(t/t)	≤0.03	≤0.05	≤0.075
	单位产品煤耗(t/t)	≤0.076	≤0.080	≤0.083
	单位产品电耗(Kwh/t)	≤78	≤84	≤90
C 资源能源综合利用	低品位煤利用率(%)	≥30	≥20	<20
	循环水利用率(%)	≥95	≥90	≥85
	废气余热利用率(%)	≥70	≥50	≥30
	粉尘回收利用率(%)	100	100	100
D 污染物产生	废污水处理及回用率(%)	设污水处理站,处理达标后 100%回用	设污水处理站,处理后部分达标排放	
	二氧化硫产生量(Kg/t)	≤0.15	≤0.3	≤0.6
E 产品特征	氮氧化物产生量(Kg/t)	≤0.4	≤0.5	≤0.8
	产品质量检验	参照铝酸钙 GB/T29341-2012 标准对产品的氧化铝、氧化钙、可溶氧化铝、铅、镉、铬等含量进行测定检验,需满足标准要求才能出厂		
F 清洁生产管理	产品合格率(%)	铝酸钙质量应符合 GB/T29341-2012,产品出厂合格率达到 100%。		
	环境法律法规标准执行情况	符合国家和地方有关环境法律、法规,污染物排放应达到国家或地方排放标准、总量控制和排污许可证管理要求。		
	环评制度、“三同时”制度执行情况	建设项目环评、“三同时”制度执行率达到 100%。		
	产业政策执行情况	符合国家和地方相关产业政策,不使用国家和地方明令淘汰或禁止的落后工艺和装备。		
	清洁生产审核制度的执行情况	按照《清洁生产促进法》和《清洁生产审核暂行办法》要求开展了审核。		
	环保设施稳定运转率(%)	净化处理装置与对应的生产设备同步运转率 100%,确保颗粒物等大气污染物达标排放。		
	原料、燃料消耗及质检	建立原料、燃料质检制度和原料、燃料消耗定额管理制度,安装计量装置或仪表,对能耗、物耗消耗及水耗进行严格定量考核。		
节能管理	实施低温余热发电、高压变频、能源管理中心建设等;配备专职管理人员;设置三级能源计量系统。			
排污口规范化管理	排污口设置符合《排污口规范化整治技术要求(实行)》相关要求。			
环境应急预案有效	编制系统的环境应急预案并定期开展环境应急演练。			

对 X 中全部元素分布进行单因素评价,则可获
得从 X 到 Y 的模糊关系矩阵 R ^[28]。

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix}$$

式中 $R_{m \times n}$ 为单因素评价矩阵; r_{ij} 为第 i 个评价
指标的第 j 个评价等级隶属度, $0 \leq r_{ij} \leq 1 (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ 。隶属函数是用来确定某指
标 X_i 在评语集中对 Y_j 级别的逼近程度,本文采用
半梯形分布函数来进行计算^[29,30]。

(2) 综合评价

经过单因素评价后得到矩阵 R ,用公式 $WR =$
 Q ^[31] 进行权重 W 与 R 的复合运算。(其中 $Q = (q_1,$
 $q_2, \dots, q_n)$, 为评语集上各评价等级的可能性系数
组成的向量。)为了综合考虑各因素对铝酸钙企
业清洁生产总的影响,采用加权平均法,其计算式

为 $q_j = \min[1, \sum_{i=1}^m W_i r_{ij}]$ ^[13]。(其中, W_i 为指标 i 的
权重, r_{ij} 为指标 i 对评语集中第 j 级别的隶属度。)

在得到决策集 Q 后,采用最大隶属度原则确定
评价对象的等级。铝酸钙企业清洁生产指标评价体
系中各具体指标按照国际清洁生产领先水平 85 ~
100(含 85);国内清洁生产先进水平 75 ~ 85(含 75);
国内清洁生产基本水平 60 ~ 75(含 60)。取 $V_1 =$
 $[85, 100] = 100, V_2 = [75, 85] = 80, V_3 = [60, 75]$
 $= 60$ 共三个值作为评价尺度,即评价尺度向量 V 为
(100, 80, 60),则清洁生产评价得分 N 。

$$N = Q \times V$$
^[32-34]

2 实证分析

2.1 数据收集

选取国内一家较先进的铝酸钙生产企业,该
企业是参与制定铝酸钙 GB/T29341-2012 标准的
企业。收集到的企业各指标现状值见表 4。

表 4 某铝酸钙企业清洁生产评价现状值

一级指标	二级指标	现状值	一级指标	二级指标	现状值	
A 生产 工艺及 装备	原料破碎	国内先进水平	D 污染物产生	二氧化硫产生量(Kg/t)	0.6	
	生料粉磨系统	国内先进水平			氮氧化物产生量(Kg/t)	0.5
	煤粉制备系统	国内先进水平	E 产品特征	产品质量检验	达到要求	
	熟料粉磨系统	国内先进水平			产品合格率(%)	100
	气体收集系统和净化处理装置	国内先进水平			环境法律法规标准执行情况	达到要求
B 资源 能源消 耗	无组织排放控制	国内先进水平	F 清洁生产管理	环评制度、“三同时”制度执行情况	达到要求	
	噪声防治措施	国内先进水平			产业政策执行情况	达到要求
	单位产品水耗(t/t)	0.045			清洁生产审核制度的执行情况	国际领先水平
	单位产品煤耗(t/t)	0.085			环保设施稳定运转率(%)	国内基本水平
	单位产品电耗(Kwh/t)	86			原料、燃料消耗及质检	达到要求
C 资源 能源综 合利用	低品位煤利用率(%)	10		节能管理	国内基本水平	
	循环水利用率(%)	86		排污口规范化管理	达到要求	
	废气余热利用率(%)	40		环境应急预案有效	达到要求	
	粉尘回收利用率(%)	98				
	废污水处理及回用率(%)	97				

2.2 评价结果

依据指标层各指标的权重值、现状值、标准
值,运用模糊数学综合评价法得出各指标的隶属度
(见表 5);准则层的权重和隶属度(见表 6)。

单因素模糊判断计算结果:

由综合评价方法和表 6 中的数据计算得出该
企业的综合判定向量为 $Q(0.04, 0.69, 0.27)$ 。则有
该企业的国际清洁生产领先水平隶属度为 0.04,国

内清洁生产先进水平隶属度为 0.69,国内清洁生
产基本水平为隶属度为 0.27。清洁生产评价得分 N
 $= Q \times V = 75.34$,对照评价等级基准值说明该企业达
到了国内清洁生产先进水平。

通过表 5 和表 6 中得到的隶属函数可以分析
出该企业清洁生产水平得分偏低的原因:(1)资源
综合利用水平整体较低,其中最为突出的是循环水
利用率和废气余热利用率,其次是粉尘回收利用率

表 5 单因素评价结果

一级指标	权重	二级指标	权重	企业的隶属度		
				一级	二级	三级
A	0.47	A ₁	0.08	0	1.00	0
		A ₂	0.22	0	1.00	0
		A ₃	0.24	0	1.00	0
		A ₄	0.24	0	1.00	0
		A ₅	0.11	0	1.00	0
		A ₆	0.08	0	1.00	0
		A ₇	0.04	0	1.00	0
B	0.17	B ₁	0.60	0.25	0.75	0
		B ₂	0.30	0	0	1.00
		B ₃	0.10	0	0.67	0.33
C	0.16	C ₁	0.04	0	0	1.00
		C ₂	0.29	0	0.20	0.80
		C ₃	0.36	0	0.50	0.50
		C ₄	0.14	0	0	1.00
		C ₅	0.17	0	0	1.00
D	0.13	D ₁	0.50	0	0	1.00
		D ₂	0.50	0	1.00	0
E	0.03	E ₁	0.50	0	1.00	0
		E ₂	0.50	0	1.00	0
		F ₁	0.08	1.00	0	0
		F ₂	0.12	1.00	0	0
F	0.04	F ₃	0.07	1.00	0	0
		F ₄	0.04	1.00	0	0
		F ₅	0.26	0	0	1.00
		F ₆	0.20	0	0	1.00
		F ₇	0.11	0	0	1.00
		F ₈	0.08	0	0	1.00
		F ₉	0.04	0	0	1.00

模糊综合评判方法计算结果:

表 6 综合评价结果

一级指标	权重	企业的判断向量		
		一级	二级	三级
A	0.47	0	1.00	0
B	0.17	0.15	0.52	0.33
C	0.16	0	0.24	0.76
D	0.13	0	0.50	0.50
E	0.03	0	1.00	0
F	0.04	0.31	0	0.69

和废污水处理及回用率较低。(2) 清洁生产管理水平较低,主要体现在对环保设施稳定运转率,原料、燃料消耗及质检,节能管理,排污口规范化管

理,环境应急预案有效 5 项指标的管理程度较低。针对这些问题,提出以下建议:

(1) 提高企业的资源综合利用率。加强二级计量,完善水循环的记录,以免有跑冒滴漏现象出现来提高循环水利用率;选择适用有效的排烟—供风系统,减少热损失来提高废气的余热利用率;将布袋收尘回收的一些粉尘返回到原料粉磨车间来提高粉尘回收利用率;选择适合的废水处理工艺及设备来提高废污水处理及回用率。

(2) 加强企业的清洁生产管理水平。建立环境保护办公室及环境保护档案,并落实专门的环境保护管理人员,完善环境保护管理制度;实施定期维护环保设施的制度并严格执行;完善企业水、电、煤或者天然气的二级计量设备,以免造成资源能源的浪费,并加强人员的培训,定期做清洁生产培训,提高员工的清洁生产意识。

3 结论与建议

本文将层次分析法和模糊数学综合评价法相结合构建铝酸钙企业的清洁生产评价指标体系,让企业人员直观的了解企业各项指标情况;发现企业的清洁生产潜力和机会,准确的找出能耗高、物耗高、污染重的环节,并提出针对性的改进方法;可以使企业能够在生产过程中有针对性、选择性、合理性的分配资源,从而实现资源配置的最优化;找出最适合企业发展的清洁生产之路,从而使得企业的可持续发展得到十足的保障,同时为企业树立良好的社会形象。

清洁生产指标体系编制通则和专家咨询是本文建立指标体系的主要参考,建议后续研究应尽快构建铝酸钙企业清洁生产标准,为企业的清洁生产进行双重指导。

参考文献:

[1] 郑怀礼,高亚丽,蔡璐微,等. 聚合氯化铝混凝剂研究与发展状况[J].无机盐工业,2015,47(2):1-5.
 [2] 赵宝江,王丽萍,李江,等.磷化工企业清洁生产评价指标体系的构建[J].化工环保,2012,32(4):354-357.
 [3] 马红娜,武征,孙愿,等.硅氢氯化法生产三氯氢硅清洁生产评价指标体系[J].化工环保,2013,33(5):426-430.
 [4] 孙启宏.清洁生产标准体系研究[M].北京:新华出版社,2006:22-40.
 [5] YELLISHETTY M, GAVIN M, RANJITH P. The steel industry, abiotic resource depletion and life cycle assessment: a real or perceived issue[J].Journal of Cleaner Production, 2011, 19(1):78-

- 90.
- [6] 伍名群, 安艳玲, 周锡德, 等. 磷矿山清洁生产评价指标体系的构建[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(2): 189-194.
- [7] 国家发展和改革委员会, 环境保护部, 工业和信息化部. 清洁生产评价指标体系编制通则(试行稿)[S]. 2013.
- [8] 王铮, 苗立永, 马强, 等. 煤矿企业清洁生产评价指标体系研究及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(4): 45-48.
- [9] 刘颖. 钒行业清洁生产评价指标体系的构建及实例研究[D]. 西安: 西北大学, 2012.
- [10] 刘新宪, 朱道立. 选择与判断: AHP(层次分析法)决策[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 1990: 3-32.
- [11] 马俊杰, 程金香, 王伯铨, 等. 稀硝酸清洁生产评价指标体系[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2003, 33(6): 697-700.
- [12] 沈艳红, 高雷更, 万宝春, 等. 基于主成份分析的焦化行业清洁生产评价[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(4): 200-205.
- [13] 冶军, 师懿, 程胜高. 磷开采行业清洁生产评价指标体系研究与应用[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(2): 318-323.
- [14] 朱宝菊, 史翎, 江莉, 等. 尿素法 ADC 发泡剂清洁生产评价指标体系[J]. 化工环保, 2011, 31(3): 260-264.
- [15] 李娟, 王菊, 张弼, 等. 皮江法炼镁行业清洁生产指标体系建立[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(8): 176-178.
- [16] 刘海珠. 矿井清洁生产评价指标体系初探[J]. 煤炭工程, 2004(B05): 36-38.
- [17] 翟英, 路亚静, 刘紫玉, 等. 基于 AHP-DEMATEL 法的权重计算方法研究[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(7): 38-46.
- [18] T. I. Saaty. The Analytic Hierarchy Process: Planning Priority Setting. Resource Allocation[M]. New York, McGraw-Hill International Book Co, 1980: 1-85.
- [19] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层析分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- [20] 吴文广, 张继红, 魏龔伟, 等. 莱州湾泥螺生态安全风险评价——基于 AHP 的 YAAHP 软件实现[J]. 水产学报, 2014, 38(9): 1601-1610.
- [21] 刘立忠. 基于 Yaahp 的土地复垦效益量化及应用[J]. 煤矿开采, 2016, 21(4): 90-94.
- [22] 余进, 陈维进, 王弘, 等. 层次分析法在确定评估体系指标权重中的应用[J]. 中国医疗设备, 2013, 28(12): 44-47.
- [23] 郭鸿, 万金泉, 马崑文, 等. 模糊数学综合评价法在涂料行业清洁生产中的应用[J]. 化工科技, 2008, 16(1): 12-15.
- [24] 李玉珍, 肖怀秋. 模糊数学评价法在食品感官评价中的应用[J]. 中国酿造, 2016, 35(5): 16-19.
- [25] 邱坤, 宋静, 蒲晓东, 等. 层次分析法结合模糊数学法综合评价法在大中型沼气工程绩效评价中的应用[J]. 中国沼气, 2016, 34(1): 58-61.
- [26] 王守兰, 武少华, 焦倩. 清洁生产评价方法——模糊数学法[J]. 北京工业大学学报, 2005, 31(1): 108-112.
- [27] 朱美, 黄占斌. AHP-Fuzzy 综合评价法在燃料乙醇行业清洁生产评价中的应用[J]. 城市环境与城市生态, 2014, 27(4): 43-46.
- [28] 郑健. 2001-2011 年乌鲁木齐市大气环境质量模糊数学综合评价[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(1): 28-41.
- [29] 曹欢, 苏维词. 基于模糊数学综合评价法的喀斯特生态系统健康评价[J]. 水土保持研究, 2009, 16(3): 148-154.
- [30] 吴景武, 吴透明, 任聪, 等. 模糊数学综合评价法在建筑用胶质量评价方面的应用[J]. 中国胶粘剂, 2011, 20(12): 63-64.
- [31] 段礼祥, 张来斌, 钱永梅. AHP-模糊数学综合评价法在离心泵安全评价中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(2): 127-131.
- [32] 金艳, 何德文, 黄良辉, 等. 模糊数学法在电解铝清洁生产评价中的应用[J]. 环境科学与管理, 2007, 3(2): 169-171.
- [33] 韩利, 梅强, 陆玉梅, 等. AHP-模糊综合评价方法的分析与研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(7): 86-89. [34] 吴秉坚. 模糊数学及其经济分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1994.

(责任编辑: 王先桃)

Construction of Evaluation Index System for Cleaner Production of Calcium Aluminate Enterprise Based on AHP-Fuzzy Method

QIN Ling¹, AN Yanling^{1*}, WU Qixin^{1,2}, PENG Hongjia¹

(1. Key Laboratory of Karst Environment and Geohazard Prevention, Guizhou University, Guiyang 550003, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract: Calcium aluminate is mainly used to produce aluminum salt products. It is particularly prominent role is to determine the performance of water treatment agent poly aluminum chloride pros and cons. In order to control the production of calcium aluminate better, to facilitate the implementation of cleaner production and strengthen environmental management, construction of cleaner production evaluation index system is the most important. By the calcium aluminate enterprises throughout the life cycle of investigating and analyzing, combined with the general rules of the national cleaner production evaluation index system, other industries of cleaner production evaluation index system and expert experience, the evaluation index system of cleaner production of calcium aluminate

enterprises was established by using analytic hierarchy process. The weights of the first and second evaluation indexes were determined. According to the domestic and foreign enterprises advanced calcium aluminate clean production model and the recommendations of experts, to determine the level of the evaluation index of the benchmark value. The method of comprehensive evaluation was adopted by using fuzzy mathematics comprehensive assessment method. Meanwhile, an advanced calcium aluminate enterprise participated to carry on the empirical analysis, while achieving consistent results. Therefore, the evaluation index system can be comprehensive, scientific and reasonable response to the level of cleaner production of calcium aluminate enterprises.

Key words: calcium aluminate; cleaner production evaluation; index system; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation method

(上接第 102 页)

Multi-objective Optimization of Reticulated Shell under General Contracting Mode

YU Jinkun, XIAO Jianchun*, WU Xiayan, LUO Jie, MA Kejian

(Space Structures Research Center, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: In order to take into account the owner's intention, cost, duration, component processing and transportation, construction difficulty and other factors, the multi-objective optimization of the reticulated shell under the general contracting model is carried out efficiently, the optimization model is established based on the correlation analysis. In the optimization model, the main target is the steel consumption, the secondary goal is the displacement and the type of the member, the design variables are the shell height, the thickness, the number of grids and the properties of the bar section. Optimization using ISIGHT and ANSYS two software collaboration, the method is based on one-dimensional search and NSGA-II genetic algorithm. The Kewitte single-layer spherical reticulated shell as an example, got the optimal solution to meet the requirements. The proposed method has obvious characteristics of autonomous optimization.

Key words: reticulated shell; project general contracting mode; multi-objective optimization; autonomous optimization