

# 基于 AHP-Fuzzy 的航空工业清洁生产评价研究\*

## Evaluation System for Cleaner Production in Aviation Industry Based on AHP-Fuzzy

郑州航空工业管理学院资源环境研究所 彭伟功 李春光

**[摘要]** 根据航空工业的特点,以“污染预防”为主导思想,结合 AHP-Fuzzy 综合评价方法,构建了面向航空工业的企业清洁生产评价体系。评价指标体系涵盖了工艺设备指标、资源综合控制指标、污染物排放指标、废物综合利用指标、产品清洁指标以及环境管理与劳动安全指标等 6 大类二级指标以及 23 个三级指标。为便于应用,以某具体航空企业为例,详述航空工业清洁生产综合评价方法的评价过程,并探讨了航空企业在清洁生产方面存在的问题及对策建议。研究表明,AHP-Fuzzy 综合评价方法可以成功地应用到航空工业清洁生产评价领域;可以帮助企业发现高物耗、高能耗、高污染的原因,并为企业提出有针对性的清洁生产改进措施和方案,最大限度地提高资源和能源的利用水平,减少环境污染,实现经济效益、社会效益和环境效益的有机统一。

**关键词:** 清洁生产 AHP-Fuzzy 综合评价 航空工业 评价指标体系

**[ABSTRACT]** According to the characteristics of enterprises in aviation industry, with pollution prevention as the dominant idea, the evaluation index system for cleaner production in aviation industry is constructed by combining with AHP-Fuzzy comprehensive evaluation method. Finally, this method is demonstrated by an example. It shows that AHP-Fuzzy comprehensive evaluation method can be successfully applied in the field of cleaner production evaluation in aviation industry and can conveniently help enterprises find the reason of high material-consumption, high energy-consumption, high pollution, and put forward some improvement measures and solutions to maximize the use of resources and energy level, reduce the pollution of the environment so as to realize the organic unity of economic benefit and social benefit and environmental benefits.

**Keywords:** Cleaner production AHP-Fuzzy comprehensive evaluation Aviation industry Evaluation index system

\* 航空科学基金(2009ZG55011)、河南省软科学项目(082400452430)资助。

清洁生产是工业污染防治的最佳模式,是转变经济增长方式的重要举措,也是实现工业可持续发展的必由之路。搞好清洁生产能最终实现经济效益和环境效益的统一,为实现循环经济提供基础。从清洁生产的发展状况来看,航空工业领域的清洁生产<sup>[1]</sup>明显滞后于其他行业。建立面向航空工业的清洁生产体系已成为现代航空工业建设和生产的基本目标,对实现我国航空工业可持续发展具有重要作用。

作为抽象理念被接受的清洁生产与可进入操作层的清洁生产评价之间依然有着很大的距离。为此,本文试图建立一套面向航空工业的清洁生产评价体系,并采用 AHP-Fuzzy 综合评价方法对航空工业生产企业的清洁生产进行评价,以期对航空工业实施清洁生产提供有力的支持和指导。

### 1 面向航空工业的清洁生产评价体系的建立

建立行业分类的清洁生产指标体系是推动行业清洁生产向纵深发展和客观科学考查行业清洁生产程度的一项十分重要的基础工作。

航空工业具有国防工业的特殊性,要充分考虑其行业特点,根据清洁生产的内涵,结合航空工业实际情况,以清洁生产的“3R”(Reduce、Recycle、Reuse)和生命周期分析原则为指导思想,通过对产品生命周期<sup>[2]</sup>的全过程进行考察,参照国内其他行业的清洁生产评价指标体系<sup>[3]</sup>,按照层次分析法(AHP)<sup>[4]</sup>的要求,建立由总到分的递阶层次结构模型,构建了面向航空工业的清洁生产评价指标体系(图1)。

### 2 面向航空工业的清洁生产评价方法

选择面向航空工业的清洁生产评价方法的关键在于解决好 2 个问题。首先,面向航空工业的清洁生产程度是由多项指标确定的,各项指标的属性不同,重要程度不同;其次,在评价过程中,如果只是定性描述指标而没有定量表述,就难以进行科学、客观的评价。解决这 2 个问题需要专家经验及适当的数学方法。本文采用 AHP-Fuzzy 综合评价方法对航空工业生产企业的清洁生产程度进行评价。AHP-Fuzzy 是层次分析与模糊综合评价法的有机结合<sup>[5-7]</sup>,首先通过 AHP 确定评价体

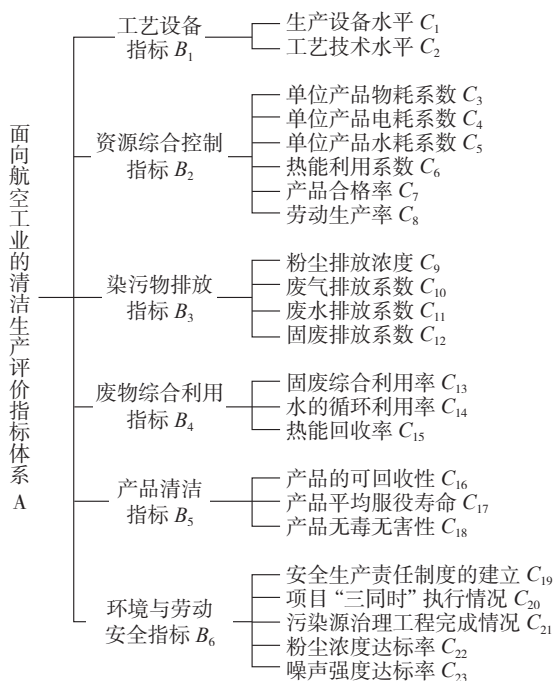


图1 面向航空工业的清洁生产评价指标体系  
Fig.1 Evaluation system for cleaner production  
in aviation industry

系的子目标和指标权重；再对系统进行Fuzzy综合评价，确定定性指标和定量指标的隶属度矩阵；最后根据隶属度最大原则确定评价等级。

### 2.1 确定指标权重

各项指标权重的确定，采用层次分析法(AHP)。首先，依据AHP法原理和程序，通过专家调查，对各个层次的指标进行两两重要性比较；其次在此基础上由航空工业生产领域专业技术人员、生产管理者以及环保科技人员组成专家组，对各层次元素之间进行标度判断，标度结果组成判断矩阵，分别对各层次进行单排序计算和一致性检验；最后进行总排序，并将总排序结果作为各项指标的权重集  $W$ 。

(1) 构造模糊判断矩阵。

模糊判断矩阵  $A$  表示针对上一层某元素，本层次与之有关元素之间相对重要性的比较，采用1~9模糊比例标度给予数量标度进行计算，可得到如下模糊判断矩阵： $R = (r_{ij})_{n \times n}$ 。

(2) 单层权重确定和一致性检验。

单层权重确定是根据判断矩阵，计算对于上一次某因素而言，本层次与之联系各因素之间的重要性权重，本文采用方根法<sup>[8]</sup>，其可以归结为计算判断矩阵的特征值和特征向量问题，即对判断矩阵  $R = (r_{ij})_{nn}$  计算最大特征根  $\lambda_{\max}$  和特征向量  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$  并进行归一化处理 and 一致性检验。

$$\omega_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n r_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n r_{ij}}}, i=1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n r_{ij} \omega_j}{n \omega_i}, i=1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

(3) 层次总排序及一致性检验。

为了得到递阶层次结构中每一个层次的所有元素相对于总目标的相对权重，需要把第二步的计算结果进行适当的组合，并进行总的判断一致性检验。

### 2.2 确定各因素的隶属度

当指标值越大清洁生产程度越好时，其隶属度函数<sup>[6]</sup>取为：

$$A = \begin{cases} 1 & (\text{条件: } a \geq n) \\ \frac{1}{n-m}(a-m) & (\text{条件: } m < a < n) \\ 0 & (\text{条件: } a \leq m) \end{cases}$$

当指标值越大清洁生产程度越差时，其隶属度函数<sup>[6]</sup>取为：

$$A = \begin{cases} 1 & (\text{条件: } a \leq m) \\ \frac{1}{n-m}(n-a) & (\text{条件: } m < a < n) \\ 0 & (\text{条件: } a \geq n) \end{cases}$$

式中：1为理想状态；0为最差状态； $m$ 为最小指标值； $n$ 为最大指标值； $a$ 为评价因素实际指标值。

参照国内外相关行业标准 and 清洁生产先进企业的相关指标<sup>[3]</sup>，确定航空企业清洁生产指标评分标准(表1)。

表1 等级评分标准

等级	差	较差	一般	较高	高
等级分值	(0, 0.2)	(0.2, 0.4)	(0.4, 0.6)	(0.6, 0.8)	(0.8, 1)

### 2.3 综合评价模型

$$A = WB$$

式中， $A$ 为综合评价值； $B$ 为评判因素隶属度矩阵； $W$ 为权重系数矩阵。

根据国内外的相关标准，确定航空企业清洁生产综合评价母系统的评语集为： $V = (V_1, V_2, V_3, V_4, V_5)$ =(清洁生产水平差，清洁生产水平较差，清洁生产水平一般，清洁生产水平较高，清洁生产水平高)，再由隶属度最大原则，即可判断某航空企业所处的清洁生产发展程度。

## 3 方法的实践应用

为便于上述研究结果在航空工业领域得到应用，以河南新乡某厂为例，首先采用1~9比例标度对各指标的

重要性程度进行赋值,构建判断矩阵,并利用方根法确定其归一化权重;然后参照国内外相关行业指标标准和清洁生产先进企业的相关指标,通过专家咨询法对定性指标直接打分,同时将定量指标实际值通过线性内插公式进行计算,确定指标隶属度。

3.1 评价体系中所有指标的权重分配

评价体系中子目指标层对于上一层的指标权重以及对于总目标层的组合权重见表 2。所有权重分配经一致性检验均符合要求。

表2 评价体系中各指标的权重

A	$W_{B_1}$ = 0.0895	$W_{B_2}$ = 0.3397	$W_{B_3}$ = 0.2435	$W_{B_4}$ = 0.2435	$W_{B_5}$ = 0.0352	$W_{B_6}$ = 0.0486	组合权重
$C_1$	0.6						0.0537
$C_2$	0.4						0.0358
$C_3$		0.1284					0.0436
$C_4$		0.181					0.0741
$C_5$		0.2998					0.1018
$C_6$		0.1374					0.0467
$C_7$		0.1144					0.0389
$C_8$		0.1019					0.0346
$C_9$			0.2060				0.0502
$C_{10}$			0.1948				0.0474
$C_{11}$			0.3080				0.0750
$C_{12}$			0.2912				0.0709
$C_{13}$				0.5			0.1218
$C_{14}$				0.4			0.0974
$C_{15}$				0.1			0.0243
$C_{16}$					0.4		0.0141
$C_{17}$					0.4		0.0141
$C_{18}$					0.2		0.0070
$C_{19}$						0.2914	0.0142
$C_{20}$						0.1100	0.0053
$C_{21}$						0.2938	0.0143
$C_{22}$						0.1524	0.0074
$C_{23}$						0.1524	0.0074

3.2 子系统的隶属度矩阵确定

根据专家咨询和企业相关数据,确定各子系统隶属度矩阵如下:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.20 & 0.60 & 0.10 & 0.10 \\ 0 & 0.20 & 0.50 & 0.20 & 0.10 \end{bmatrix},$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.10 & 0.40 & 0.40 & 0.10 \\ 0 & 0.20 & 0.30 & 0.40 & 0.10 \\ 0 & 0.10 & 0.50 & 0.30 & 0.10 \\ 0 & 0.30 & 0.40 & 0.20 & 0.10 \\ 0 & 0 & 0.10 & 0.40 & 0.50 \\ 0 & 0.20 & 0.40 & 0.30 & 0.10 \end{bmatrix},$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0.20 & 0.40 & 0.20 & 0.20 \\ 0 & 0.20 & 0.30 & 0.30 & 0.20 \\ 0 & 0.30 & 0.50 & 0.15 & 0.05 \\ 0 & 0.20 & 0.40 & 0.30 & 0.10 \end{bmatrix},$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0.20 & 0.50 & 0.20 & 0.10 \\ 0 & 0.20 & 0.30 & 0.40 & 0.10 \\ 0 & 0.20 & 0.40 & 0.25 & 0.15 \end{bmatrix},$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.30 & 0.50 & 0.20 \\ 0 & 0 & 0.40 & 0.35 & 0.25 \\ 0 & 0 & 0.35 & 0.40 & 0.25 \end{bmatrix},$$

$$R_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.20 & 0.30 & 0.50 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0.25 & 0.50 \\ 0 & 0 & 0.20 & 0.50 & 0.30 \\ 0 & 0 & 0.30 & 0.40 & 0.30 \\ 0 & 0 & 0.35 & 0.35 & 0.30 \end{bmatrix}。$$

3.3 子系统的模糊综合评价结果

$$B=WR,$$

式中,  $R$  为评判因素隶属度矩阵;  $W$  为权重系数矩阵;  $B$  为子系统综合评价值,  $B_1 = (0, 0.2000, 0.5600, 0.1400, 0.1000)$ ,  $B_2 = (0, 0.1480, 0.3739, 0.3323, 0.1458)$ ,  $B_3 = (0, 0.2308, 0.4113, 0.2332, 0.1247)$ ,  $B_4 = (0, 0.2000, 0.4100, 0.2850, 0.1050)$ ,  $B_5 = (0, 0, 0.3500, 0.4200, 0.2300)$ ,  $B_6 = (0, 0, 0.2436, 0.3761, 0.3803)$ 。

3.4 母系统的模糊综合评价结果

$$A=WB,$$

式中,  $A$  为子系统综合评价值;  $B$  为评判因素隶属度矩阵;  $W$  为权重系数矩阵。

$$A = WB = \begin{pmatrix} 0.0895 \\ 0.3397 \\ 0.2435 \\ 0.2435 \\ 0.0352 \\ 0.0486 \end{pmatrix}^T$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.2000 & 0.5600 & 0.1400 & 0.1000 \\ 0 & 0.1480 & 0.3739 & 0.3323 & 0.1458 \\ 0 & 0.2308 & 0.4113 & 0.2332 & 0.1247 \\ 0 & 0.2000 & 0.4100 & 0.2850 & 0.1050 \\ 0 & 0 & 0.3500 & 0.4200 & 0.2300 \\ 0 & 0 & 0.2436 & 0.3761 & 0.3803 \end{bmatrix}$$

$$= (0, 0.1731, 0.3988, 0.2847, 0.1410),$$

归一化处理:  $A = (0, 0.1735, 0.3998, 0.2854, 0.1413)$ 。

根据隶属度最大原则,运用 AHP-Fuzzy 综合评价法对该航空生产企业进行清洁生产模糊评价的结果显示,该企业处于一般清洁生产水平。虽然产品清洁程度以及环境与劳动安全水平较高,但工艺设备水平、资源综合控制水平、污染物排放水平及废弃物综合利用水平

(下转第 101 页)

且比较细小,无大的撕裂棱,韧窝小且较深;图6(c)为C号合金断口形貌,为穿晶断裂,裂纹窄而浅,出现大量细小解理面和小而深的韧窝,而且出现了韧窝的嵌套。这些表明合金c在断裂失效前发生了较大的塑性变形,断口形貌为具有一定塑性变形的韧性断裂特征,表明合金的塑性得到了一定的改善,也验证了拉伸试验中镁合金伸长率增加的结果,这个可以用“随着Ca地加入,合金中晶粒细化,晶界上网状 $\beta$ - $Mg_{17}Al_{12}$ 相减少,出现 $Al_2Ca$ 相”来解释。这表明了随着合金中Ca含量的增加,挤压合金的晶粒更加细小,力学性能得到了明显的改善。

### 3 结论

(1)添加2.0%和2.5%Ca元素后,合金铸态组织晶粒细化不明显,而挤压态组织明显细化、分布均匀。合金经挤压后, $\beta$ - $Mg_{17}Al_{12}$ 相在晶界和枝晶处以圆润状形态出现,减小了对基体的割裂,从而合金的力学性能得到了提高。

(2)加入2.0%Ca和2.5%Ca后,合金中有 $Al_2Ca$ 新相产生,特别是当Ca含量为2.5%时,铸态合金形成大量层片状或长条状的 $Al_2Ca$ 相,挤压态合金 $Al_2Ca$ 相呈菱形或多边形,随着Ca含量的提高,合金中 $Al_2Ca$ 含量增加, $\beta$ - $Mg_{17}Al_{12}$ 含量减少。

(3) $Mg-10Al-1.5Zn-0.4Mn$ 合金中添加2.5%Ca后,合金的室温力学性能最佳,抗拉强度为353.12MPa,延伸率为6.71%;0%和2.0%Ca合金的延伸率分别为2.16%和3.02%,加入2.0%Ca后比没有加Ca的提高了39.8%,加2.5%Ca合金比2.0%Ca的提高了122.8%。

### 参 考 文 献

- [1] 刘金海,李国禄,刘根生. 镁合金成形工艺及应用研究进展. 轻合金加工技术,2001,29(8):1-4.
- [2] 余琨,黎文献,李松瑞. 变形镁合金材料的研究进展. 轻合金加工技术,2001,29(7):6-9.
- [3] 柳百成,沈厚发. 21世纪的材料成形加工技术与科学. 北京:机械工业出版社,2004. 56-60.
- [4] 闵学刚,孙扬善,薛烽,等. Ca对显微组织及力学性能的影响. 材料科学与工艺,2002,10(1): 93-96.
- [5] 王峰,刘正,冷爱民. Ca对挤压AZ91镁合金组织及性能的影响. 铸造技术,2006,27(11):1200-1204.
- [6] 杨光昱,郝启堂,介万奇,等. Ca加入量对 $Mg-5Al-0.4Zn$ 基铸造合金组织和力学性能的影响. 金属学报,2005,41(9): 933-939.
- [7] 樊昱,吴国华,高洪涛,等. Ca对镁合金组织、力学性能和腐蚀性能的影响. 中国有色金属学报,2005,14(2):210-216.
- [8] 王峰,刘正,冷爱民. Ca对挤压AZ91镁合金组织及性能的影响. 铸造技术,2006,27(11):1200-1204.
- [9] 张金龙,王智民,宋文娟,等. AZ113镁合金显微组织和力学

性能的研究. 热加工工艺,2008,37(12):15-20.

[10] 张金山,高义斌,裴利霞,等. P变质对Si合金化AZ91镁合金组织和力学性能的影响. 中国有色金属学报,2006,16(8):1361-1367.

[11] 黄德明. Mg-4Al-RE-Ca-Si耐热镁合金的组织与性能[D]. 四川大学,2006.

[12] 佟立丰,张帆,于海生,等. Al, Ca元素对镁合金显微组织及蠕变性能的影响. 佳木斯大学学报:自然科学版,2007,25(1):56-58.

(责编 亿霖)

(上接第96页)

还有差距,已成为影响该企业清洁生产水平的主要因素。

### 4 结束语

本文根据航空工业的行业特点,通过AHP-Fuzzy综合评价理论模型构建了面向航空工业的清洁生产评价体系,并在广泛征求各界专家的基础上对评价指标体系进行适当修正,以便于该指标体系能够科学、全面、综合地反应航空工业的清洁生产状况;并以某具体航空企业为例,对该评价模型和评价方法进行验证。

结果表明,AHP-Fuzzy综合评价方法可以成功地应用到航空工业清洁生产评价领域;该体系可以有效地对航空工业生产进行定量的、准确的清洁生产评价,在一定程度上客观地反映出企业的清洁生产水平,帮助企业发现高物耗、高能耗、高污染的原因,并为企业提出有针对性的清洁生产改进措施和方案,最大限度地提高资源和能源的利用水平,减少环境污染,实现经济效益、社会效益和环境效益的有机统一。

### 参 考 文 献

- [1] 陈士明,彭希仁,钟华仁,等. 航空工业推行清洁生产优先生产线及清洁技术. 南昌航空工业学院学报,1999,3:12-14.
- [2] 杨建新,王如松,刘晶茹. 中国产品生命周期影响评价方法研究. 科学学报,2001,21(2):234-235.
- [3] 魏宗华. 工业企业清洁生产评估指标的研究. 环境保护,2000,5:22-24.
- [4] Saaty, Thomas L. The analytic hierarchy process. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [5] 韩利,梅强,陆玉梅,等. AHP-模糊综合评价方法的分析与研究. 国家安全科学学报,2004,14(7):86-89.
- [6] 许树柏. 层次分析法原理. 天津:天津大学出版社,1988:133-148.
- [7] 刘易,马邕文. 模糊数学法在电子行业清洁生产水平评价中的应用. 青岛科技大学学报(自然科学版),2008,5:467-480.
- [8] 张天学,张延欣,张福祥. 系统工程学. 成都:电子科技大学出版社,2004.8:160-171.

(责编 三丰)