

清洁生产改造工程综合效益评价研究

金国辉 李 蒙

内蒙古科技大学 内蒙古 包头 014000

摘要：清洁生产改造工程依靠单纯经济效益评价已不能反映其整体情况，需要同时考虑节能因素、经济因素、环保因素、社会因素等不断增加的因素影响，改造工程的全面价值需要进行综合评价。本次研究确定环保、节能、经济、社会4个一级指标，然后选取12个二级指标，建立清洁生产综合效益评价指标体系。在总结了该项目的所有综合效益评价结果后，确定该项目的总体综合效益评价为“优秀”。项目投产后，可以取得良好的综合效益。

关键词：清洁生产、评价指标体系、综合效益评价

1 清洁生产的重要意义及综合效益评价理论

1.1 清洁生产的重要意义

推进清洁生产是防治环境污染的重要手段^[1]，是建设节约型社会、促进绿色制造发展的有效途径。通过不断优化工艺流程，提高清洁能源的使用比例，减少有毒有害物质的使用，利用先进的产品设备，提高管理水平，综合利用固体废物，促进企业树立绿色发展理念，从根本上减少污染产生，提高能源利用效率，减少生产活动中有毒有害物质的产生和排放，减少对周边居民生活和健康的危害。清洁生产改造工程的定义：通过改进工艺流程；优化管理水平；固体废物的回收利用；淘汰过时的设备；不断更新产品和其他手段，以实现清洁生产的目标。

1.2 综合效益评价理论

综合效益评价（comprehensive benefit evaluation, CBE）综合效益评价是将内部指标相互制约和影响的因素考虑在内的评价方法。这是一种简单的经济效益评价改进方法。随着社会的不断更新发展，项目的整体效益

已不能靠单纯的经济效益评价来反映。环境、社会、能源消耗等因素时刻影响着经济因素，因此要将这些因素考虑在内。在进行评估时，必须将这些因素作为一个整体来考虑，有机地综合各种单一因素的评估结果^[2]，并最终使用单一指标来代表所有影响因素的特征，用于全面、统一地评价整个项目的综合效益状况。

2 清洁生产现状及改造方案概述

2.1 清洁生产现状

本文以JS公司为例，该公司为 100×10^4 t/a捣鼓焦项目。项目总投资20000万元，其中环保投资2567万元，占总投资比例为13%。

参照《焦化行业清洁生产水平评价标准》（YB/T4416-2014）中污染物产生指标，对比可得，企业16项指标中，有13项达到清洁生产一级标准，废水COD产生量指标及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 产生指标达到清洁生产二级标准，焦炉烟囱 SO_2 排放指标达到清洁生产三级标准。考虑到企业废水并不外排，因此企业清洁生产工作的重点在于削减焦炉烟囱 SO_2 排放量。

表1 清洁生产指标评价表

Table 1 Evaluation of Clean Production Indicators

| 指标 | | 一级 | 二级 | 三级 | 企业水平 | |
|---------------------------------------|-------------------------|----|---------|---------|-------------------------------|------------------|
| 气 污 染 物 | 颗粒物/(kg/t) | 装煤 | ≤ 0.5 | ≤ 0.8 | — | 一级 (0.14kg/t) |
| | | 推焦 | ≤ 0.5 | ≤ 1.2 | — | 二级 (0.54 kg/t) |
| | 苯并(a)芘(g/t) | 装煤 | ≤ 1.0 | ≤ 1.5 | — | 一级 (低于检测线) |
| | | 推焦 | ≤ 0.018 | ≤ 0.040 | — | 一级 (低于检测线) |
| | SO ₂ /(kg/t) | 装煤 | ≤ 0.01 | ≤ 0.015 | — | 一级 (0.004kg/t) |
| | | 推焦 | ≤ 0.01 | ≤ 0.015 | — | 一级 (0.0065 kg/t) |
| 焦炉废气污染物无组织 泄露/(mg/m ³) | 颗粒物 | | 2.5 | 3.5 | 一级 (0.129 mg/m ³) | |
| | 苯并(a)芘 | | 0.0025 | 0.0040 | 一级 (未检测出) | |
| | BSO | | 0.6 | 0.8 | 一级 (0.07 mg/m ³) | |

续表:

| 指标 | | 一级 | 二级 | 三级 | 企业水平 |
|--------------------------|---------------------------|---------|---------|---------|----------------|
| 蒸氨废水产生量/(t/t) | | ≤ 0.50 | | ≤ 1.0 | 一级(0.12t/t) |
| 水 蒸 污 氨 染 工 物 段 | COD _{Cr} /(kg/t) | ≤ 1.2 | ≤ 2.0 | ≤ 4.0 | 二级(1.63kg/t) |
| | NH ₃ -N/(kg/t) | ≤ 0.06 | ≤ 0.10 | ≤ 0.20 | 二级(0.086 kg/t) |
| | 总氰化物/(kg/t) | ≤ 0.008 | ≤ 0.012 | ≤ 0.025 | 一级(未检测出) |
| | 挥发酚/(kg/t) | ≤ 0.24 | ≤ 0.40 | ≤ 0.80 | 一级(未检测出) |
| | 硫化物/(kg/t) | ≤ 0.02 | ≤ 0.03 | ≤ 0.06 | 一级(0.002 kg/t) |

注1:除浓度值外,均为吨焦污染物产生量。

通过对企业硫平衡分析,当前焦炉废气排口中的SO₂来自于焦炉中荒煤气燃烧,约占荒煤气总量的47%,但焦炉废气排口SO₂排放量占全厂SO₂排放量90%以上,因此本次清洁生产的主要目标是降低焦炉废气中SO₂含量。企业最终决定实施烟囱脱硫脱硝一体化改造项目作为本次清洁生产改造的高费方案。

2.2 改造方案概述

2.2.1 工艺流程

综合考虑投资、运行费用、适用范围等因素,最终选择SDS干法脱硫+中低温SCR脱硝技术作为本项目的工艺方案。具体方案如下:将烟气引入蒸发器内降温;如低于260℃(冬季或限产),将蒸发器旁路烟道阀打开,部分烟气由旁路通过进入SDS脱硫系统。烟气经脱硫除尘器后,进入SCR中低温脱硝装置,脱硝反应器的运行温度230℃~320℃,焦炉烟气脱硫除尘脱硝整套设备通过蒸发器调节温度。脱硝净化后的烟气一部分通过余热锅炉回收,最终焦炉烟气排放通过145m焦炉烟囱。

2.2.2 效益汇总

焦炉烟囱脱硫脱硝一体化改造工程预计项目完成后,处理后指标为焦炉烟气中NO_x含量150mg/m³、SO₂含量30mg/m³、颗粒物15mg/m³。SO₂、NO_x及颗粒物减排量分别为43.89t/a、68.33t/a及14.02t/a。项目的节能量为6776.8tce,二氧化碳减排量为21847.87t。原本脱硫脱硝设施运行费用为20.34元/吨焦,项目改造完成后,脱硫脱硝成本为16.72元/吨焦。此外根据排污系数法计算,企业可节约环保税13万元/年。则企业可节约经营费用合计375万元/年。

3 综合评价指标体系构建

3.1 指标体系构建意义

本文采用的效益评价方法是多层次模糊综合评价方法。指标体系建立在工程项目综合效益评价系统中,是最为重要的一个环节,关系到后续指标评价的准确性和合理性。

包含以下步骤

(1) 确定清洁生产改造工程综合效益评价因数集合通过效果层或者是指标层各因素之间的相互比较,

得出各因素的标度值。下列为构造的效果层之间的标度值,组成的判断矩阵。

(2) 各因数指标权重计算

各影响因素在整个评价对象中的影响程度及其准确性,将直接影响清洁生产改造工程项目综合评价结果的合理性和准确性。权重是使用专家评估方法确定的。

(3) 各评价因数的隶属度计算

利用权重计算得到的一级评价指标向量,汇总得到模糊评价矩阵,将指标集和评价集结合,最终计算得出权重向量的集。

(4) 综合评价结论

根据模糊综合评价的最大隶属度原则,对照之前设定的评价集,判断评价等级。

3.2 指标体系构建及权重计算

3.2.1 指标选取

通过焦炉烟囱脱硫脱硝一体化改造工程综合效益评价指标构建出焦炉烟囱脱硫脱硝一体化改造项目综合效益评价多层次模糊综合评价模型。

目标层:焦炉烟囱脱硫脱硝一体化改造项目综合效益多层次模糊综合评价A;

准则层:环保效益U1,节能效益U2,经济效益U3,社会效益U4。

指标层:吨焦二氧化硫减排量U11,吨焦氮氧化物减排量U12,吨焦颗粒物减排量U13。吨焦节能量U21,吨焦二氧化碳减排量U22,吨焦节水量U23。净现值U31,内部收益率U32,静态回收期U33。促进地区经济增长U41,改善周边居民生活环境U42,推动节能减排意识提升U43。

3.2.2 权重计算

选择环保、安全、生产、施工、能源等领域内具有扎实专业知识和丰富经验、熟悉相关问题的10位专家。10位专家全部为清洁生产审核师,从事清洁生产工作5年以上,并优先选择内蒙地区清洁生产审核专家库中专家进行打分,按照评价指标之间的横向关系,成对比较,并确定一级、二级指标的判断矩阵。

表2 指标等级含义

Table 2 Meaning of Index Levels

| 等级 | 等级含义 |
|---------|--|
| 1 | 表示指标U1与指标U2同等重要 |
| 3 | 表示指标U1比指标U2略微重要 |
| 5 | 表示指标U1比指标U2重要 |
| 7 | 表示指标U1比指标U2很重要 |
| 9 | 表示指标U1比指标U2极为重要 |
| 2、4、6、8 | 表示介于上述两状态中间 |
| 倒数 | 若指标U1与指标U2的重要性之比为R, 那么指标U2与指标U1的重要性之比则为1/R |

表3 一级评价指标判断矩阵

Table 3 First level evaluation index judgment matrix

| 综合效益 | 环境效益 U1 | 节能效益 U2 | 经济效益 U3 | 社会效益 U4 |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 环境效益 U1 | 1 | 3 | 2 | 5 |
| 节能效益 U2 | 1/3 | 1 | 1/2 | 3 |
| 经济效益 U3 | 1/2 | 2 | 1 | 4 |
| 社会效益 U4 | 1/5 | 1/3 | 1/4 | 1 |

以焦炉烟卤脱硫脱硝一体化改造工程综合效益评价指标体系为基础, 将各指标使用归一法计算权重进行汇总, 具体数据汇总见下表。

表4 评价指标权重汇总表

Table 4 Summary of Evaluation Index Weights

| 目标层 | 一级指标 (准则层) | 二级指标 (指标层) |
|-------------------------|------------|------------------|
| 焦炉烟卤脱硫脱硝一体化改造工程综合评价指标体系 | 环境效益 (U1) | 吨焦二氧化硫减排量 (U11) |
| | | 吨焦氮氧化物减排量 (U12) |
| | | 吨焦颗粒物减排量 (U13) |
| | | 吨焦节能量 (U21) |
| | 节能效益 (U2) | 吨焦二氧化碳减排量 (U22) |
| | | 吨焦节水量 (U23) |
| | | 净现值 (U31) |
| | 经济效益 (U3) | 内部收益率 (U32) |
| | | 投资回收期 (U33) |
| | | 促进地区经济增长 (U41) |
| | 社会效益 (U4) | 改善周边居民生活环境 (U42) |
| | | 推动节能减排意识提升 (U43) |

4 确定综合效益评价评价集

4.1 确定综合效益评价评价集

将焦炉烟卤脱硫脱硝一体化改造工程各评价指标的评价等级分为五个等级从高到低分别是:

$$V = \{ \text{优秀, 良好, 一般, 合格, 差} \}$$

4.2 单因素评价计算

将环保效益、节能效益及经济效益评价采用折线隶属函数法进行评价。以吨焦二氧化硫减排量为例, 具体如下:

吨焦二氧化硫减排量是一个定量的正向指标, 焦炉烟卤脱硫脱硝一体化改造工程预计项目完成后, 处理后指标为焦炉烟气中SO₂含量30mg/m³, 该项目SO₂减排量预计为43.89t/a。企业生产规模达到100 × 10⁴t/a冶金焦, 则项目的吨焦二氧化硫减排量为0.04839kg/t。参照《焦化行业清洁生产水平评价标准》(YB/T4416-2014)及改造工程的工艺水平判断, 将吨焦二氧化硫减排量高于0.05kg/t定为“优秀”, 低于0.02kg/t定为“差”, 高于0.04kg/t定

为“良好”, 高于0.035kg/t定为“一般”, 低于0.03定为“合格”。构建如下隶属函数:

$$V_{\text{差}} = \begin{cases} 1 & x \leq 0.02 \\ (0.03-x)/(0.03-0.02) & x \in (0.02, 0.03) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$V_{\text{较差}} = \begin{cases} (x-0.02)/(0.03-0.02) & x \in (0.02, 0.03) \\ (0.035-x)/(0.035-0.03) & x \in (0.03, 0.035) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$V_{\text{一般}} = \begin{cases} (x-0.03)/(0.035-0.03) & x \in (0.03, 0.035) \\ (0.04-x)/(0.04-0.035) & x \in (0.035, 0.04) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$V_{\text{良好}} = \begin{cases} (x-0.035)/(0.04-0.035) & x \in (0.035, 0.04) \\ (0.05-x)/(0.05-0.04) & x \in (0.04, 0.05) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$V_{\text{优秀}} = \begin{cases} 1 & x \geq 0.05 \\ (x-0.04)/(0.05-0.04) & x \in (0.04, 0.05) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

将企业实际吨焦二氧化硫减排量 $x = 0.04839$ 代入式中, 可得 $A1 = \{0, 0, 0, 0.16, 0.84\}$
 将二级单因素指标汇总后, 得到
 根据指标判定表, 得到单因素模糊判断矩阵

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0.84 & 0.16 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.92 & 0.08 & 0 \\ 0 & 0.20 & 0.80 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad M_2 = \begin{bmatrix} 0.78 & 0.22 & 0 & 0 & 0 \\ 0.37 & 0.63 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.36 & 0.64 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.55 & 0.45 \\ 0 & 0.54 & 0.46 & 0 & 0 \\ 0 & 0.57 & 0.44 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad M_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.7 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.4 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0 \end{bmatrix}$$

根据模糊综合评价模型对二级指标的单因素评价矩阵与对应二级评价指标权重进行合并, 得到一级评价指标的综合评价向量如下:

$$B_1 = W_1 M_1 = \begin{bmatrix} 0.557 & 0.320 & 0.122 \\ 0.84 & 0.16 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.92 & 0.08 & 0 \\ 0 & 0.20 & 0.80 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \{0.468 \quad 0.114 \quad 0.392 \quad 0.026 \quad 0\}$$

$$B_2 = W_2 M_2 = \begin{bmatrix} 0.568 & 0.334 & 0.098 \\ 0.78 & 0.22 & 0 & 0 & 0 \\ 0.37 & 0.63 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.36 & 0.64 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \{0.567 \quad 0.371 \quad 0.063 \quad 0 \quad 0\}$$

$$B_3 = W_3 M_3 = \begin{bmatrix} 0.581 & 0.109 & 0.309 \\ 0 & 0 & 0 & 0.55 & 0.45 \\ 0 & 0.54 & 0.46 & 0 & 0 \\ 0 & 0.57 & 0.44 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \{0 \quad 0.235 \quad 0.186 \quad 0.320 \quad 0.261\}$$

$$B_4 = W_4 M_4 = \begin{bmatrix} 0.737 & 0.186 & 0.077 \\ 0 & 0.2 & 0.7 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.4 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \{0.034 \quad 0.237 \quad 0.624 \quad 0.105 \quad 0\}$$

4.3 一级评价指标的模糊综合评价

根据模糊综合评价模型对二级指标的单因素评价矩阵与对应二级评价指标权重进行合并, 得到一级评价指标的综合评价向量如下:

脱硫脱硝一体化改造方案全部子集:

$A = \{\text{环保效益 (B1)}, \text{节能效益 (B2)}, \text{经济效益 (B3)}, \text{社会效益 (B4)}\}$ 其模糊评价矩阵为:

$$M = \{B_1 \quad B_2 \quad B_3 \quad B_4 \quad B_5\} = \begin{bmatrix} 0.486 & 0.114 & 0.392 & 0.026 & 0 \\ 0.567 & 0.371 & 0.063 & 0 & 0 \\ 0 & 0.235 & 0.186 & 0.320 & 0.261 \\ 0.034 & 0.237 & 0.624 & 0.105 & 0 \end{bmatrix}$$

再结合一级权重指标计算

$$WM = \{0.471 \quad 0.171 \quad 0.284 \quad 0.074\} \begin{vmatrix} 0.486 & 0.114 & 0.392 & 0.026 & 0 \\ 0.567 & 0.371 & 0.063 & 0 & 0 \\ 0 & 0.235 & 0.186 & 0.320 & 0.261 \\ 0.034 & 0.237 & 0.624 & 0.105 & 0 \end{vmatrix}$$

$$= \{0.320 \quad 0.201 \quad 0.294 \quad 0.111 \quad 0.074\}$$

根据模糊综合评价中的最大隶属度原则，与本次评价结果中最大值0.320对应的评价为“优秀”，因此可以认为脱硫脱硝一体化改造方案的综合效益评价属于“优秀”。

5 结语

清洁生产改造工程依靠单纯经济效益评价已不能反映其整体情况，需要同时考虑节能因素、经济因素、环保因素、社会因素等不断增加的因素影响，改造工程的全面价值需要进行综合评价。模糊综合评价法又名模糊多目标决策方法，模糊的经济现象而设计的一种评判模型。在“中国制造2025”的大背景下，绿色制造将成为

中国制造业发展的新主题。综合效益评价是从节能、环保、社会责任等多角度进行评价，符合绿色制造理念。为项目的可持续发展提供理论支持。

参考文献

- [1]刘铮,党春阁,刘菁钧,王璠,周长波.我国西部地区清洁生产产业发展现状、存在问题和建议[J].环境保护,2018,46(17):40-43.
- [2]刘晓君,鲁晶涵.基于topsis-熵权法的绿色施工节地技术综合效益评价研究[J].数学的实践与认识,2023,53(01):1-10.