

文章编号:0253-9993(2011)10-1748-05

多级模糊模式识别模型在评价高炉喷吹混煤中的应用

段旭琴,丁照忠,段健,金龙哲,欧盛南

(北京科技大学 土木与环境工程学院,北京 100083)

摘要:根据相关文献,结合大量的实践经验,建立了高炉喷吹混煤评价模型。从影响煤的喷吹性能的诸多因素中筛选出适合定量分析的性能指标,建立喷吹性能评价指标标准体系,定义各指标相对隶属度的计算方法,采用层次分析法计算指标权重,运用多级模糊模式识别模型得到评价结果。运用该模型对某钢铁厂8种喷吹混煤评价,评价结果与生产实际基本相符。

关键词:多级模糊模式识别模型;高炉喷吹煤;性能指标体系

中图分类号:TQ520.62 文献标志码:A

Application of multi-classification fuzzy pattern recognition model in blast furnace injection assessment of blended coal

DUAN Xu-qin, DING Zhao-zhong, DUAN Jian, JIN Long-zhe, OU Sheng-nan

(Civil & Environment Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Blended coal injection assessment model was established by referring to relevant documents, combining with amounts of practical experience. Properties indicators suitable for the quantitative analysis were selected from many factors that influenced the injection properties. Assessment indicators standard system of properties was founded and the indicators relative optimum membership degrees were defined. Indicators' weight was calculated by analytic hierarchy process and by using multi-classification fuzzy pattern recognition model, the conclusions of the assessment came out. The model is applied to assess the injection properties of 8 different kinds of coal used in some iron mill. Assessment conclusions are in accordance with production practice by and large.

Key words: multi-classification fuzzy pattern recognition model; pulverized injection coal; properties indicator system

高炉喷吹煤喷吹性能评价是对高炉喷吹煤喷吹性能优劣的定性和定量评述,也是钢铁厂选择高炉喷吹用煤的依据。目前,由于没有一个统一的、完善的高炉喷吹煤喷吹性能评价指标标准体系,很难运用科学的、系统的方法对煤的喷吹性能进行评价,在比较煤种之间喷吹性能优劣时,人们通常采用定性分析的方法,直接比较煤的各项喷吹性能实验数据,两两择优,再综合排序^[1-4]。当煤种样品少、性能指标少时,该方法简单、有效。但该方法理论性不高,主观影响较大,结论缺乏一定的说服力。尤其当评价的煤种和性能指标都较多时,该方法难以得出结论,或结论偏差较大。

本文主要借鉴国家标准及生产实践经验尝试性地建立一个高炉喷吹煤喷吹性能评价指标标准体系,并提出应用多级模糊模式识别模型对多种混煤的喷吹性能进行综合评价,该方法结合喷煤专家的意见,利用层次分析确定各指标权重,通过模糊计算弥补层次分析的不足,确保评价结论的科学性和准确性。

1 高炉喷吹混煤评价模型的建立

1.1 评价指标选取的原则

影响高炉喷吹煤喷吹性能的因素很多,主要分为^[5-7]:煤的理化性能、燃烧性与反应性、输送与可磨性能、煤粉安全性等。主要的评价指标有灰分、硫磷

含量、可磨性指数 (HGI)、发热量、煤灰熔融性、煤粉的燃烧率、煤的反应性、煤粉的输送性能、爆炸性和着火点等。

为了全面考察煤的喷吹性能,选取的指标越多越好。但是实际生产中,较难收集全面的指标数据而且并非所有的指标都适合纳入定量化的指标体系中,为此需要对指标进行筛选。

一般认为,粒度、全水分、胶质层厚度、黏结性指数、着火点、返回火焰长度等指标的数值大小用于喷吹性能择优区分度不高,不宜定量比较,而灰分、发热量、硫分、反应性、燃烧性、输送性等指标的数值大小可反映煤喷吹性能某一方面的优劣,需要定量比较。

鉴于此,确定的评价指标为发热量、哈氏可磨指数、燃烧性、反应性、煤灰熔融性、流动性、喷流性、硫分、灰分、磷分、钠钾总量。

1.2 评价指标标准的构建

我国目前还没有关于混煤喷吹性能指标的国家标准,混煤的喷吹性能不易掌握,故制定一个高炉喷吹混煤评价指标标准体系具有重大意义。本文主要借鉴高炉喷吹煤技术条件、行业标准及炼铁厂工人的经验尝试性地制定了一个标准。

根据我国的语言习惯将煤喷吹性能分为优、良、中、差 4 级,分别对应数值 1、2、3、4,相应的评价指标也按照 4 级来描述。

随着高炉安全措施的提高,国内喷吹混煤的挥发分逐渐提高,一般在 10% ~ 25%。分级主要参考 GB/T 18512—2008 高炉喷吹用煤技术条件^[8]对于烟煤的规定,该标准主要按照等差的方法对指标进行分级。

依据 GB/T 18512—2008 分级的基本思想和实践经验,喷吹混煤的 11 个主要指标的分级标准见表 1。例如,哈氏可磨指数:实践经验表明,高炉喷吹用煤的哈氏指数一般在 65 ~ 100 较为适宜,哈氏指数过小,表明煤的硬度大,会给制粉带来一定困难,过高会出现黏磨现象,导致制粉能力下降,故在国标规定的基础上将 50 作为 4 级标准值,65 为 3 级标准值,2 级标准值与 1 级标准值按照等差的方法得到,分别为 80 和 95,哈氏指数高于 100 的暂不考虑。国标对于发热量只是给出了最小值 23.5,没有具体进行分级,取 23.5 和 GB/T 15224—94 规定的 27 分别为混煤的 4 级标准值和 2 级标准值,取两者的平均值 25.25 为 3 级标准值,等差的方法得到 1 级标准值为 28.25。

表 1 高炉喷吹混煤评价指标标准

Table 1 Assessment indicator standard of blended coal used in pulverized coal injection

评价指标	优(1)	良(2)	中(3)	差(4)
灰分 $A_d / \%$	≤ 6.00	6.00 ~ 8.00	8.00 ~ 10.00	10.00 ~ 12.00
全硫 $S_{td} / \%$	≤ 0.30	0.30 ~ 0.50	0.50 ~ 0.75	0.75 ~ 1.00
发热量 $Q_{gr,d} / (\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	≥ 28.25	27.00 ~ 28.25	25.25 ~ 27.00	23.50 ~ 25.25
哈氏可磨指数 HGI	≥ 95	80 ~ 95	65 ~ 80	50 ~ 65
燃烧率 / %	≥ 80	60 ~ 80	40 ~ 60	20 ~ 40
反应性 / %	≥ 65	55 ~ 65	45 ~ 55	35 ~ 45
煤灰软化温度 / °C	≥ 1500	1400 ~ 1500	1300 ~ 1400	1200 ~ 1300
流动性	≥ 55	50 ~ 55	45 ~ 50	40 ~ 45
喷流性	≥ 80	60 ~ 80	40 ~ 60	25 ~ 40
磷分	≤ 0.005	0.005 ~ 0.020	0.020 ~ 0.035	0.035 ~ 0.050
钠钾总量	≤ 0.11	0.11 ~ 0.14	0.14 ~ 0.17	0.17 ~ 0.20

注:燃烧性用 600 °C 的静态燃烧率,此时,所有的煤粉试样燃烧至 600 °C 时,燃烧进入中后期,燃烧稳定;煤灰熔融性一般以煤灰软化温度来衡量。

1.3 指标特征值和标准特征值隶属度的计算方法

设 n 个高炉喷吹混煤样本对模糊概念 A (本文定义为“优”)进行识别, n 个样本 m 个指标的实验检测值组成 $m \times n$ 型的指标特征值矩阵 X , 即

$$X = (x_{ij}) \quad (1)$$

式中 x_{ij} 为样本 j 的指标 i 的特征值。

n 个样本按 m 个指标 c 个级别的指标标准特征值进行识别, 构成 $m \times c$ 型的指标特征值矩阵 Y , 即

$$Y = (y_{ih}) \quad (2)$$

式中 y_{ih} 为指标 i 的级别 h 的标准特征值。

根据文献 [9 - 10] 中对相对隶属度函数及相对隶属度的定义可知, 指标类型通常分为指标递增型、指标递减型两种。

根据指标标准值的变化趋势选择相应的相对隶属度函数, 计算各指标对模糊概念“优”的相对隶属度。

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & (x_{ij} \leq y_{ic} \text{ 或 } x_{ij} \geq y_{ic}) \\ \frac{x_{ij} - y_{ic}}{y_{il} - y_{ic}} & (y_{il} > x_{ij} > y_{ic} \text{ 或 } y_{il} < x_{ij} < y_{ic}) \\ 1 & (x_{ij} \geq y_{il} \text{ 或 } x_{ij} \leq y_{il}) \end{cases} \quad (3)$$

$$S_{ih} = \begin{cases} 0 & (y_{ih} = y_{ic}) \\ \frac{y_{ih} - y_{ic}}{y_{il} - y_{ic}} & (y_{il} > y_{ih} > y_{ic} \text{ 或 } y_{il} < y_{ih} < y_{ic}) \\ 1 & (y_{ih} = y_{il}) \end{cases} \quad (4)$$

式中 y_{il} 为指标 i 的 1 级标准值。

用指标相对隶属度函数式 (3)、(4) 将指标特征值矩阵和指标标准特征值矩阵变换为对模糊概念“优”的相对隶属度矩阵 $R = (r_{ij})$ 、 $S = (S_{ih})$ 。

1.4 权重评价指标的确定^[11-12]

模型计算中采用层次分析法来确定评价指标的权重,该方法可较大幅度地减少主观因素的影响,其主要步骤如下:

(1) 构造判断矩阵。判断矩阵元素的值反映了人们对各评价指标相对重要性(优劣、偏好、强度等)的认识,一般采用 1~9 及其倒数的标度方法,由专家组用两两比较得到判断矩阵 A 。

(2) 权重的确定。一般来说,计算判断矩阵的最大特征根及其对应的特征向量,并不需要追求较高的精确度。这是因为判断矩阵本身具有相当的误差范围。求和法能够保证足够的精确度,而且大大简化了计算,故采用此方法来计算特征向量的近似解:

① 将判断矩阵每一列正规化

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n A_{kj}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n);$$

② 按行相加

$$q_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n);$$

③ 正规化

$$w_i = \frac{q_i}{\sum_{k=1}^n q_k};$$

式中 w_i 为样本指标 i 的权重。

④ 一致性检验。根据层次分析法的检验步骤,计算判断矩阵的随机一致性比率 C_R 。当 $C_R < 0.1$ 时,判断矩阵具有满意的一致性,则 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 为所要求的权向量,否则就需要调整判断矩阵,并使之具有满意的一致性。

1.5 模糊模式识别模型^[13-14]

设样本各级别对模糊概念 A 的相对隶属度矩阵为

$$U = (u_{hj}) \quad (5)$$

由样本 j 的 m 个指标相对隶属度全部落入级别区间 a_j, b_j 范围内,故矩阵应满足约束条件

$$\sum_{h=1}^c u_{hj} = 1, \forall j$$

同时满足

$$u_{hj} = 0 \quad (h < a_j \text{ 或 } h > b_j)$$

模糊模式识别模型为

$$u_{hj} = \begin{cases} 0 & (h < a_j \text{ 或 } h > b_j) \\ \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{b_j} [w_i (r_{ij} - s_{ih})]^2}{\sum_{k=a_j}^{b_j} \sum_{i=1}^m [w_i (r_{ij} - s_{ik})]^2} \right\}^{-1} & (d_{hj} \neq 0, a_j \leq h \leq b_j) \\ 1 & (d_{hj} = 0) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $d_{hj} = \sqrt{\sum_{i=1}^m [w_i (r_{ij} - s_{ih})]^2}$ ($h = a_j, \dots, b_j$) 为样本 j 与级别 h 间的欧氏距离。

1.6 相对级别特征值^[15]

设级别变量 h 以对应的相对隶属度为权重,其总和为

$$H(u) = \sum_{h=1}^c u_{hj} h \quad (7)$$

式中 $H(u)$ 为相对级别特征值。

相对级别特征值 $H(u)$ 是一个描述状态或级别的无量纲属,且 $1 \leq H(u) \leq c$ 。相对级别特征值由于利用了全部相对隶属度信息,其判断结论比最大隶属度原则更符合实际情况。据此,可应用相对级别特征值 $H(u)$ 反馈得到相应的级别,对样本做出归属何种级别的判别。

2 应 用

某钢铁厂目前采用混煤喷吹,即烟煤、北方无烟煤和南方无烟煤各一种的混和喷吹。烟煤、北方无烟煤、南方无烟煤各有两种,分别为峰盛烟煤和渝神烟煤、耒阳无烟煤和马田墟无烟煤、永城无烟煤和皖北无烟煤。配方是由 3 大类煤中的每一类分别选出一种按照 4: 4: 2 的配比混合得到,共组成 8 种混煤,标记为 1~8 号。通过实验得到了发热量、哈氏可磨指数、燃烧率(热重法 600 °C)、反应性、流动性、喷流性、硫分、灰分共 8 个指标的特征值,依序纵向排列,组成指标特征值矩阵 X ,按式 (3) 转换为指标相对隶属度矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 \\ 0.556 & 6 & 0.644 & 4 & 0.666 & 7 & 0.666 & 7 & 0.622 & 2 \\ 0.797 & 3 & 0.832 & 0 & 0.897 & 5 & 0.754 & 8 & 0.729 & 2 \\ 0.907 & 0 & 0.858 & 0 & 0.705 & 3 & 0.656 & 3 & 0.967 & 7 \\ 0.266 & 7 & 0.266 & 7 & 0.333 & 3 & 0.333 & 3 & 0.366 & 7 \\ 0.854 & 5 & 0.927 & 3 & 0.825 & 5 & 0.836 & 4 & 0.763 & 6 \\ 0.614 & 3 & 0.557 & 1 & 0.614 & 3 & 0.614 & 3 & 0.571 & 4 \\ 0 & 0 & 0.043 & 3 & 0.166 & 7 & 0.081 & 7 & 0 & 0.125 & 0 \\ & & & & & & & & 0.585 & 7 & 0.571 & 4 & 0.542 & 9 & 0.101 & 7 \end{bmatrix}$$

同理得到指标标准特征值矩阵 Y , 其指标标准特征值隶属度矩阵为

$$S = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 0.736 & 8 & 0.368 & 4 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0.666 & 7 & 0.333 & 3 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0.666 & 7 & 0.333 & 3 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0.666 & 7 & 0.333 & 3 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0.666 & 7 & 0.333 & 3 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0.636 & 4 & 0.272 & 7 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0.357 & 1 & 0.714 & 3 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0.666 & 7 & 0.333 & 3 & 0 \end{bmatrix}$$

邀请专家依据该钢铁厂的现场条件和经验, 按照层次分析法(AHP)规定的9级标准, 对指标进行两两比较, 因流动性和喷流性2个指标都是表征输送性, 故两者用输送性表示, 列出一个7阶的判断矩阵 A 为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 3 & 6 & 7 & 8 \\ 1/2 & 1 & 2 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1/6 & 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 \\ 1/7 & 1/4 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/8 & 1/5 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

按照求和法求特征向量并正规化得到初始特征向量为

$$w^0 = (0.362 \ 0.207 \ 0.163 \ 0.116 \ 0.074 \ 0.046 \ 0.032)^T$$

流动性和喷流性在表征输送性时, 所起的作用同样重要, 故最终特征向量为

$$w = (0.362 \ 0.207 \ 0.163 \ 0.116 \ 0.037 \ 0.037 \ 0.046 \ 0.032)^T$$

根据层次分析法的检验步骤, 计算判断矩阵的随机一致性比率 C_R 。

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} = 0.0208 < 0.1$$

其中 C_1 为一致性指标; R_1 为平均随机一致性指标。检验合格, 判断矩阵赋值合理, 则最终特征向量即为要求的权重向量。

由式(6)得到模糊识别矩阵为

$$U = \begin{bmatrix} 0.441 & 8 & 0.448 & 6 & 0.079 & 7 & 0.029 & 9 \\ 0.513 & 2 & 0.396 & 5 & 0.065 & 5 & 0.024 & 7 \\ 0.528 & 3 & 0.384 & 9 & 0.063 & 0 & 0.023 & 8 \\ 0.456 & 4 & 0.449 & 3 & 0.068 & 8 & 0.025 & 4 \\ 0.473 & 8 & 0.427 & 9 & 0.071 & 6 & 0.026 & 8 \\ 0.483 & 1 & 0.420 & 9 & 0.069 & 8 & 0.026 & 2 \\ 0.497 & 4 & 0.412 & 1 & 0.065 & 9 & 0.024 & 6 \\ 0.475 & 6 & 0.430 & 2 & 0.068 & 6 & 0.025 & 5 \end{bmatrix}^T$$

由式(7)得到新配方各喷吹煤的性能评价级别特征值 H

$$H = (1 \ 2 \ 3 \ 4) \times U = (1.697 \ 6 \ 1.601 \ 7 \ 1.582 \ 3 \ 1.663 \ 2 \ 1.651 \ 4 \ 1.639 \ 0 \ 1.617 \ 8 \ 1.644 \ 1)^T$$

由此可以看出8种混煤的喷吹性能等级接近, 处在优(1)、良(2)之间, 这与现场工作人员的评价基本相符合。

为全面评价煤喷吹性能优劣, 指标应尽量多选, 但受实验条件限制, 无法取得某些指标的实验值时, 可适当削减指标数; 应用层次分析法求权重时, 如选择的指标过多(如超过9个)可将该层次进一步划分为若干子层次。

3 结 论

(1) 根据喷吹煤性能的特点, 提出了煤的喷吹性能模糊模式识别指标体系及体系中各指标相对隶属度的计算方法。

(2) 参考喷吹烟煤国家标准, 结合生产实践, 尝试建立了统一等级的、较为全面的高炉喷吹混煤性能评价指标标准体系。实例分析表明, 该评价方法得出的结果与实际情况基本符合, 具有一定的实用性。

参考文献:

[1] 孔凡朔, 任铁军, 张建良, 等. 高炉喷吹用煤的选择及经济性评价[J]. 包头钢铁学院学报, 2004, 23(2): 100-112.
Kong Fanshuo, Ren Tiejun, Zhang Jianliang, et al. Selection and evaluation of iron coal injected into BF[J]. Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology, 2004, 23(2): 100-112.

[2] 牛江峰, 徐莹, 胡宾生, 等. 邯钢高炉喷吹煤种的优化选择

- [J]. 河北冶金 2006(5): 4-6.
- Niu Jiangfeng, Xu Ying, Hu Binsheng, et al. Optimized selection of kinds of coal for injection in B. S. in Han Steel [J]. Hebei Metallurgy 2006(5): 4-6.
- [3] 张引刚. 浅论高炉喷吹煤评价指标 [J]. 选煤技术 2003(6): 58-60.
- Zhang Yingang. Superficial study of evaluating indicator of coal injected into BF [J]. Coal Preparation Technology 2003(6): 58-60.
- [4] 曹学章. 高炉喷吹用煤的选择 [J]. 选煤技术 2007(6): 44-45.
- Cao Xuezhong. Selection of coal injected into BF [J]. Coal Preparation Technology 2007(6): 44-45.
- [5] 陈亚飞. 潞安贫煤作喷吹煤的特征分析 [J]. 煤炭学报 2008, 33(7): 803-807.
- Chen Yafei. The feature analysis of Lu'an meager coal as pulverized coal injection [J]. Journal of China Coal Society 2008, 33(7): 803-807.
- [6] 李贵阳, 李新华, 李豪杰, 等. 高炉喷吹煤研究及实践 [J]. 钢铁, 2005 40(5): 9-13.
- Li Guiyang, Li Xinhua, Li Haojie, et al. Study of effect of coal properties on PCI performance [J]. Steel 2005 40(5): 9-13.
- [7] 刘仁生, 刘应书, 金龙哲, 等. 贫煤、贫瘦煤喷吹技术研发及应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社 2006: 14-22.
- [8] GB/T18512—2008 高炉喷吹用煤技术条件 [S].
- GB/T18512—2008, Specifications of coal used in pulverized coal injection [S].
- [9] 陈守煜. 多目标决策系统模糊优选理论、模型与方法 [J]. 华北水利水电学院学报 2001 22(3): 136-140.
- Chen Shouyu. A fuzzy optimum theory, model and approach for multiobjective decision making systems [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power 2001 22(3): 136-140.
- [10] 陈振华, 余永权, 张 瑞. 模糊模式识别的几种基本模型研究 [J]. 计算机技术与发展 2010(9): 32-35.
- Chen Zhenhua, Yu Yongquan, Zhang Rui. Research on several models of fuzzy pattern recognition problems [J]. Computer Technology and Development 2010(9): 32-35.
- [11] 王莲芬, 许数柏. 层次分析法引论 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1989.
- [12] 武卫东, 景国勋, 魏建平. 灰色关联分析法在平六矿通风系统方案(近期)优化中的应用 [J]. 煤炭学报 2001 26(6): 290-293.
- Wu Weidong, Jing Guoxun, Wei Jianping. The application of the grey relevancy analyzing method in ventilation system scheme (in the near future) optimization of pingdingshan coal mine No. 6 [J]. Journal of China Coal Society 2001 26(6): 290-293.
- [13] 徐 扬. 模糊模式识别及其应用 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1999: 50-70.
- [14] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [15] 聂保持, 王 耕, 吴 伟, 等. 应用模糊模式识别模型计算分析辽河中下游安全状况 [J]. 水资源保护 2008 24(6): 31-35.
- Nie Baochi, Wang Geng, Wu Wei, et al. Application of fuzzy pattern model to water security analysis in the lower and middle sections of the Liaohe River [J]. Water Resources Protection 2008 24(6): 31-35.

Journal of Coal Science and Engineering (China) 被 INSPEC 文摘数据库收录

Journal of Coal Science and Engineering (China) 即《煤炭学报》英文版被 INSPEC 文摘数据库收录。

INSPEC(科学文摘)文摘数据库是基于 Web 方式检索的文摘索引数据库。INSPEC 是理工学科最重要、使用最为频繁的数据库之一,由英国机电工程师学会(IEE)出版,涉及电气工程、电子工程、电子学、物理、控制工程、信息技术、通信、计算机科学等领域,收录自 1969 年以来全世界范围出版的 3 300 余种科技期刊、2 000 余种会议论文集以及 1 000 种科技报告、图书、学位论文等其他文献的文摘信息。