

CFB 锅炉煤成灰特性的 6 参数模型研究

杨海瑞¹, 吕俊复¹, 肖显斌¹, M. Winsum²

(1. 清华大学热能工程系, 北京 100084; 2. Universität Siegen, Siegen, Germany, 057076)

摘 要:应用静态燃烧冷态振筛实验方法研究了几种国内煤种的成灰特性并给出了相应煤种的成灰数据库。通过对不同煤种成灰数据库的分析发现,对于任意窄筛分煤,其成灰分布具有双峰分布,即由较细较软的灰成分和较粗较硬的灰成分构成,两种灰成分同时满足 Rosin-Rammler 分布。提出了 6 参数模型,该模型可以描述每种灰成分质量份额和相应的粒径分布。通过加权可以得到宽筛分煤的成灰分布。

关 键 词:成灰特性; 软灰; 硬灰; $R-R$ 分布; 6 参数模型

中图分类号: TQ536.4 文献标识码: A

1 前 言

预测流化床内的床料性质,一个关键问题是如何确定煤灰的初始粒径分布。所谓初始粒径分布,是指在燃烧后生成的惰性灰初期粒径分布。在流化床温度范围,低于团聚和烧结温度(850℃)时对煤样进行静态燃烧,可以得到煤样的初始灰分布,此分布和流化燃烧得到的分布具有相同的性质。通常情况下,可以通过机械振筛的方法得到煤灰的粒径分布,清华大学采用 850℃ 的温度下将约 2 kg 的某窄筛分煤样在马福炉内静态燃烧,然后将收集的灰样在振筛机中用 2.0 mm 振幅冷态振筛 50 min 的方法来研究了几种煤种的成灰特性,得到煤灰的初始粒径分布^[1]。

机械强度和耐磨性能是灰颗粒的物理性质的重要指标。根据机械强度和耐磨性,可以将煤灰分成两种不同的成分,即较软的灰成分(软灰),主要来自煤中的富灰灰核;较硬的灰成分(硬灰),主要来自煤中的矽石^[2]。硬灰同软灰相比,受机械力的影响要小得多,在振筛系统施加机械力的作用下,软灰成分颗粒的粒径将变小,而硬灰将基本保持原有的由煤样的特性和燃烧过程中破裂行为决定的粒径分布。

因此通过机械方式得到的硬灰粒径分布更接近其初始粒径分布,是合理确定总灰粒径分布的关键。

2 Rosin-Rammler 分布

Rosin-Rammler(简称 $R-R$) 分布,可表示为^[4]:

$$R = \exp[-b \cdot (d_A)^a] \quad (1)$$

R 为颗粒粒径大于 d_A 的质量份额(或称筛余量),常数 a, b 表示颗粒的分布特性的参数,由煤种特性决定。式(1)可以写成:

$$\log\left[\log\left(\frac{1}{R}\right)\right] = \log(b) + a \cdot \log(d_A) \quad (2)$$

在 $\log(\log(1/R))$ 及 $\log(d_A)$ 的 $R-R$ 坐标系中, $R-R$ 分布为直线分布。

经过磨煤机加工的煤的粒径分布符合 $R-R$ 分布^[3],通常认为,煤中矽石的粒径分布与煤的粒径分布很近似,故可假设硬灰以及在振筛经过破碎和磨损的煤灰中软灰均符合 $R-R$ 分布。

研究发现,煤在马福炉内燃尽后收集的灰是由软灰和硬灰两种灰构成的,这两种灰在机械性质、粒径分布方面具有明显的区别。每种灰的粒径分布都符合 $R-R$ 分布。通过对两种成分 $R-R$ 分布的线性加权可以得到混和灰的累计份额分布:

$$R_{\text{ash}} = x_1 \exp[-b_1 \cdot (d_A)^{a_1}] + (1-x_1) \exp[-b_2 \cdot (d_A)^{a_2}] \quad (3)$$

其中: x_1, x_2 为软灰和硬灰的质量份额, %。

对于任一煤种的任一筛分,式(3)涉及的 5 个参数(x_1, b_1, a_1, b_2, a_2)需要通过数学优化得到,即求实验值和模型计算值 R_{ask} 的最小方差的方法,可以采用 IMSL 软件包中的 UNLSF 函数进行计算。

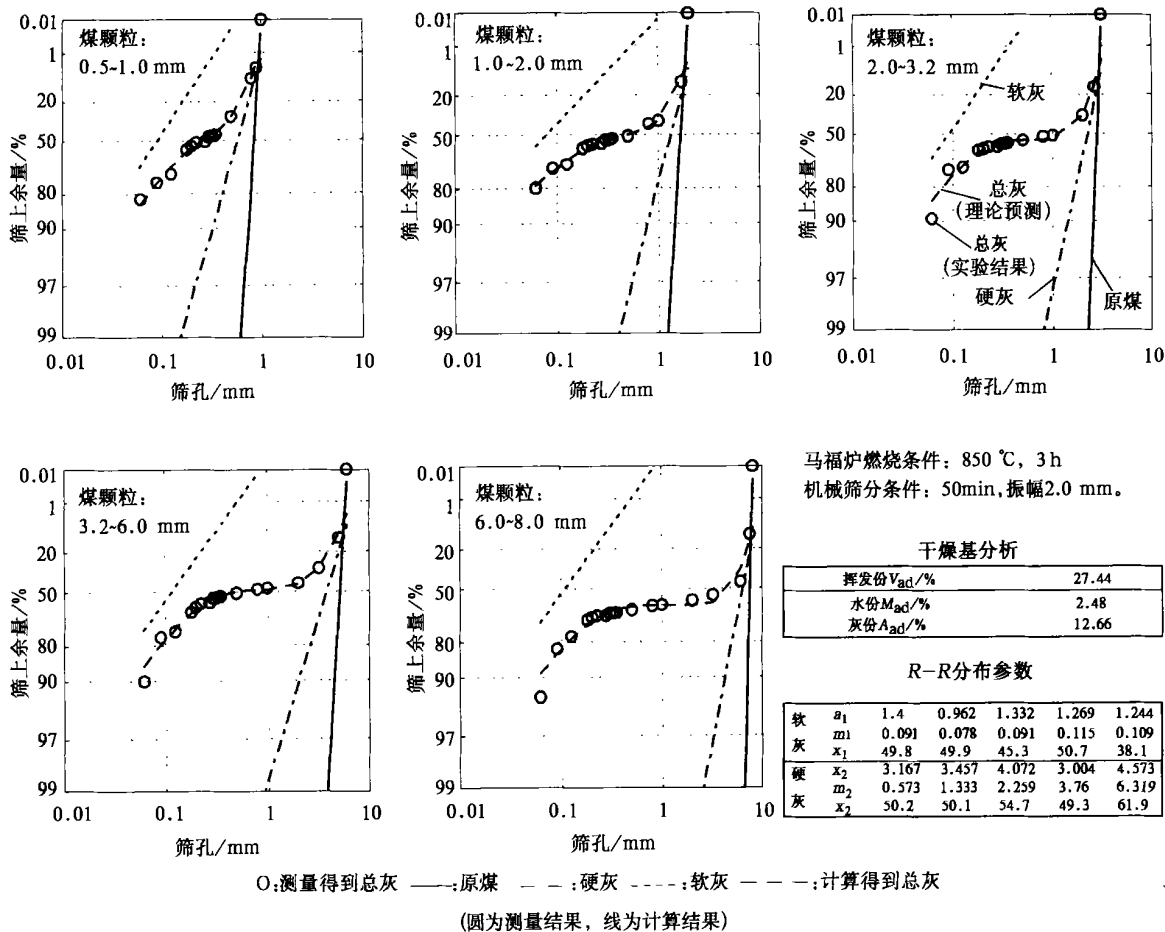


图 1 大同煤总灰的累计分布测量结果及原煤、软灰、硬灰、总灰 R-R 分布

图 1 在 R-R 坐标系中给出了大同煤灰实验测量的累积份额分布和通过优化拟合得到的曲线。每个分图对应于一个筛分档的成灰, 分别给出了软灰和硬灰两种成分的粒径分布和煤样的粒径分布。实验数据表明, 窄筛分煤的成灰分布具有双峰结构——较细和较粗的成分构成, 而位于中间粒径范围的颗粒很少。结果同时表明, 成灰的累积粒径分布实验数据和用式(3)拟合得到的曲线符合得很好, 证明了煤成灰由两种物性不同的灰成分构成且均满足 R-R 分布的假设是合理的。

3 验证实验

到目前为止, 仅通过对已有的实验测量数据进行概率优化来支持理论的合理性。为进一步验证上

述的理论, 补做了一组验证实验。将大同煤筛分成几个粒径档, 采用相同的实验条件, 得到各个筛分档的成灰粒径分布。采用上述数学方法可以得到各个成分的份额和各自的粒径分布。

软灰在机械力的作用下易于碎裂而透过筛网, 可以采用机械研磨的方法(比如用手指研磨灰粒)来提取出每个筛网上灰样中的硬灰。由于硬灰不可避免也会产生碎裂, 需要用比原筛网小 2 个量级的筛网来收集硬灰。图 2 中不仅给出了大同煤各个筛分档中各成分的计算粒径分布, 同时给出了硬灰的粒径分布的实验值。从图中可以看出硬灰的粒径分布的实验值。从图中可以看出硬灰测量值和数学优化分析得到计算值相比, 分布略微偏左, 即含有较多的细颗粒。其原因是研磨导致了部分硬灰碎裂成较小的颗粒。

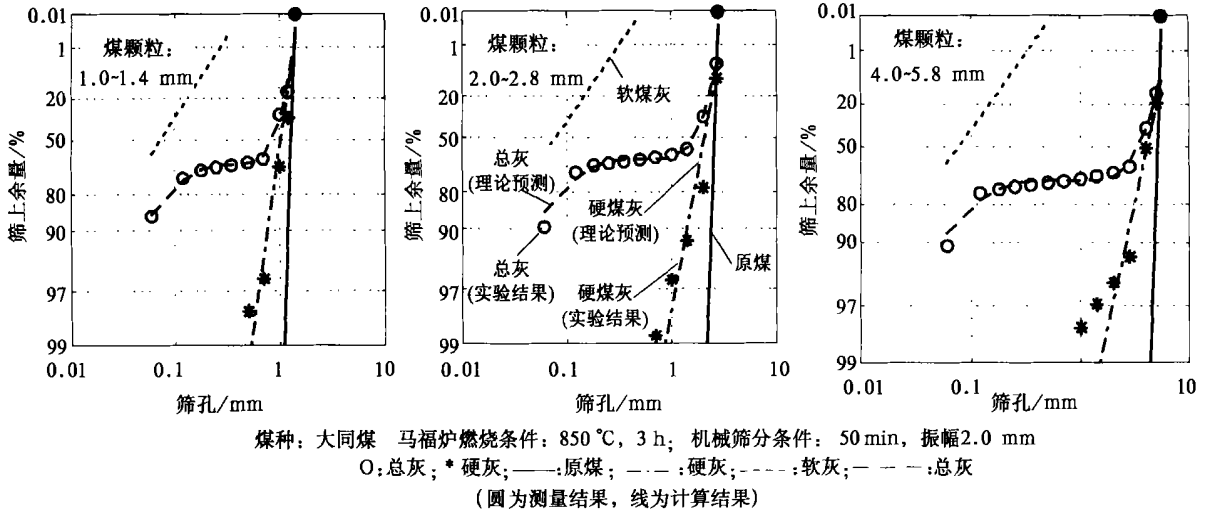


图 2 大同煤总灰和硬灰的累计分布测量结果及原煤、软灰、硬灰、总灰 R-R 分布

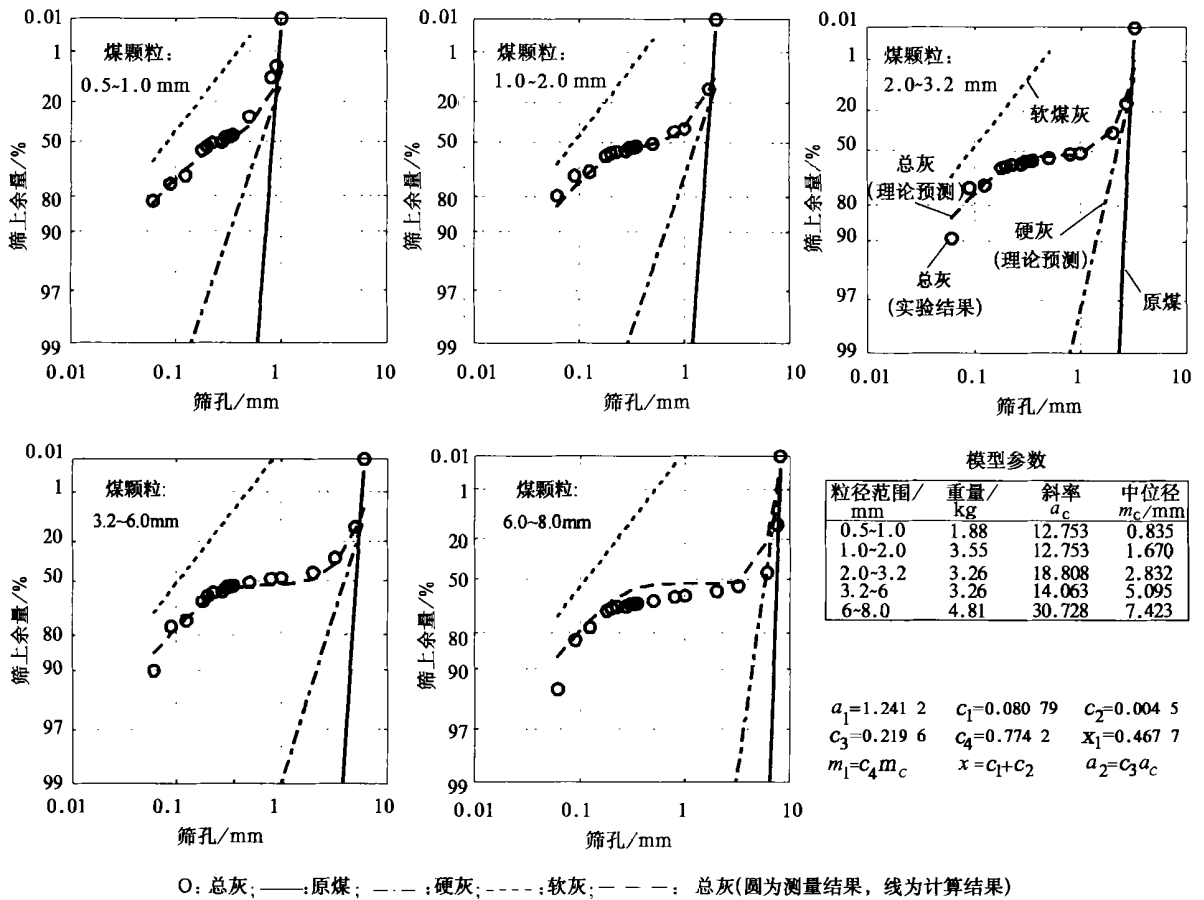


图 3 大同煤总灰的累计分布测量结果及原煤、软灰、硬灰、总灰 R-R 分布

4 参数模型

对于特定煤种的任一筛分的初始成灰分布可以用5个参数(x_1, b_1, a_1, b_2, a_2)按式(3)来描述,为了在CFB模型计算中方便地引入特定宽筛分煤种的初始灰分布,通过分析每一筛分的5个参数 x_1, b_1, a_1, b_2, a_2 , 总结出6个参数 $a_1, c_1, c_2, c_3, c_4, x_1$, 用来描述宽筛分条件下煤种的初始灰分布。

为了便于描述 $R-R$ 分布的粒径范围,用中位径 m , 即筛上份额为 50% 对应的筛分粒径, 来代替较为抽象的参数 b 。二者的关系如下:

$$m = a \sqrt{\frac{1}{b} \cdot \ln(2)} \quad (4)$$

从图1可以看出,软灰的中位径 m_1 随筛分粒径

的增加而略微增加。出于建模的考虑,假设 m_1 满足如下的简化关系:

$$m_1 = c_1 + c_2 \cdot m_c \quad (5)$$

其中: m_c 为窄筛分煤样对应的中位径, c_1 和 c_2 为灰(或煤)的特性参数。

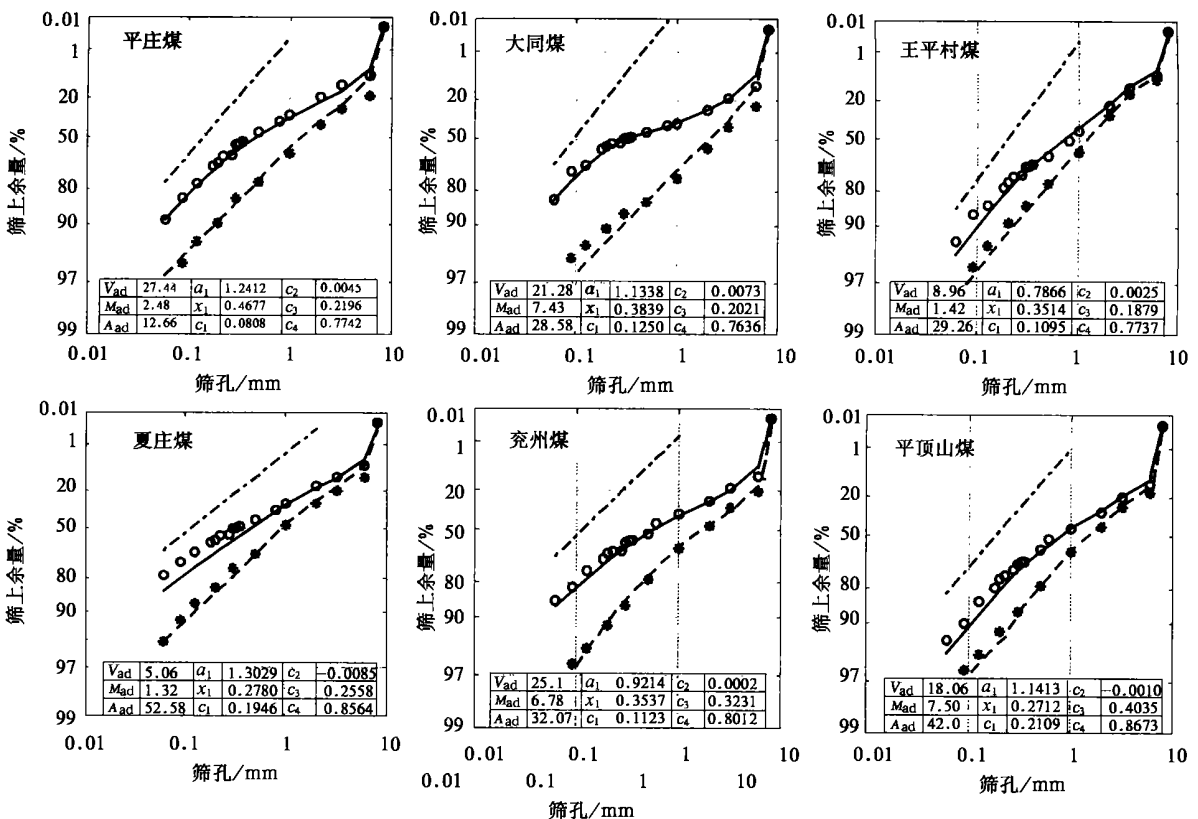
软灰的分布斜率 a_1 可以近似认为是个常数,参数 a_1 反映了粉碎物质的特性。另外,软灰的分布范围明显要比窄筛分煤的分布宽,这是由于较软的软灰在煤中联结比较脆弱,能够反映软灰粒径分布的初期灰结构在振筛过程中被破坏。

$$a_1 = \text{const} \quad (6)$$

硬灰的分布斜率 a_2 可以看成是与窄筛分煤具有线性关系,

$$a_2 = c_3 \cdot a_c \quad (7)$$

$$m_2 = c_4 \cdot m_c \quad (8)$$



○:总灰; * :原煤; --- :硬灰; ····· :软灰; - · - · - :总灰(圆为测量结果, 线为计算结果)

图4 6种原煤及其总灰的累计分布测量结果与软灰、硬灰、混合灰的模型预测结果(原煤粒径在0~8mm)

其中: 参数 c_3 、 c_4 反映了硬灰在燃烧和磨耗振筛过程破碎和磨耗特性。燃烧过程中的破碎降低了硬灰粒径分布的斜率。在筛分粒径较细时, 斜率的变化不很显著, 因为受热引起的破碎现象更易于在 1 mm 以上的颗粒上发生^[2]。

从拟合结果可以看出, 软灰的质量份额 x_1 随煤筛分粒径的增加略微有些降低, 这可能是由于不同筛分煤样中含灰量变化引起的。由于实验数据有限, 简单地假设两种成分的质量份额为独立于筛分粒径的常数, 是煤种的特性参数。

$$x_1 = \text{const.} \quad (9)$$

图 3 给出灰粒径分布的测量值和采用 6 个参数 (a_1 , c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , x_1) 模型计算值的比较, 可以看出, 模型计算符合得很好, 只是在最大的筛分粒档, 模型计算粒径分布比实验测量结果要细一些, 这是由于软灰的份额 x_1 假设为常数不能精确地反映实际的情况, 是随筛分粒径的增加略微降低的。

5 宽筛分煤的成灰分布

一旦确定了描述宽筛分条件下煤初始成灰的 6 个参数, 同时知道各个筛分档质量份额, 软、硬灰的累积粒径份额可以分别采用下式计算:

$$R_{1, \text{tot}} = \sum_{i=1}^n z_i \cdot \exp(-b_{1, i} (d_A)^{\alpha_1}) \quad (10)$$

$$R_{2, \text{tot}} = \sum_{i=1}^n z_i \cdot \exp(-b_{2, i} (d_A)^{\alpha_2}) \quad (11)$$

其中: z_i 为煤筛分档 i 的质量份额。而宽筛分煤的总灰的粒径分布可以通过式(3)对式(10)和式(11)进行线性叠加得到。

大同煤的灰成分的构成和各自的粒径分布见图 4。与窄筛分煤成灰不同, 宽筛分煤的成灰的分布不具备双峰分布, 因为宽筛分的成灰同时包含了较细的硬灰和较粗的软灰。

宽筛分煤燃烧成灰粒径分布的模型计算值和实验测量值符合得很好。研究发现, 宽筛分的软灰的分布近似符合 $R-R$ 分布, 而硬灰的宽筛分分布类似

于宽筛分煤的粒径分布。而在以往的 CFB 模型计算中, 假设灰的粒径分布和给煤的粒径分布一致, 而忽略了较细的软灰的影响, 从而使得煤灰的粒径分布比实际的分布要粗得多。

另外 5 种不同品质含灰量的煤种的灰成分和相应的粒径分布以及各个煤种的模型参数, 见图 4。在所有煤种的成灰中都存在软灰和硬灰成分, 通过 6 参数成灰模型可以计算不同灰成分的份额和相应的粒径分布。

6 结 论

(1) 煤灰通常由两种灰分构成, 这两种灰在硬度、破碎、磨耗等方面具有不同的特性。

(2) 窄筛分煤的成灰具有双峰分布, 即由较细较软成分(软灰)和较粗较硬成分(硬灰)构成, 两种成分同时满足 $R-R$ 分布。

(3) 提出了一种计算煤成灰的粒径分布的 6 参数模型。该模型对 6 种宽筛分煤的成灰分布计算结果和实验测量值吻合得很好。

参考文献:

- [1] YUE GUANGXI, TANG ZHI, MIN QIAN. Experimental investigation on the coal ash size formation in CFB combustion [A]. ed Anthony Proc of the 40 th IEA FBC Meeting [C]. Finland Turku, 2000. 114-120.
- [2] YUE GUANGXI, WANG LAN, LI YAN. Ash size formation characteristics in CFB coal combustion [A]. ed Avidan Proc of 4 th Int Conference on Circulating Fluidized Beds [C]. Hidden Valley Somerset (USA), 1993. 110-115.
- [3] DJAMRANI K M, CLARK I M. Characterization of particle size based on fine and coarse fractions [J]. Powder Technology, 1997, 93(2): 103-108.
- [4] ROSIN P, RAMMLER J. Laws of size distribution in powdered coal [J]. J Inst Fuel, 1933, 7(29): 29-33.
- [5] VISUAL NUMERICS. FORTRAN subroutines for mathematical applications [M]. Manual; Inc IMSL, 1997.

(渠 源 编辑)

the method under discussion is applicable for the numerical simulation of flows featuring great inverse-pressure gradients. Moreover, it can also be employed to conduct the in-depth research of various complicated three-dimensional flow phenomena in a centrifugal compressor. **Key words:** numerical simulation, $q-\omega$ turbulent flow model, high-resolution scheme, MUSCL TVD scheme, LU-SGS-GE implicit scheme

流道几何参数对低压导向器气动性能的影响 = **The Impact of Flow-passage Geometric Parameters on the Aerodynamic Performance of a Low-pressure Guide Vane Assembly** [刊, 汉] / AN Bai-tao (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080), WANG Shong-tao, HAN Wan-jin, WANG Zhong-qi (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(6). — 572 ~ 576

By using a numerical calculation method a numerical simulation was conducted of a prototype and modified low-pressure guide vane assembly. The meridian flow passage of the latter has a relatively long casing transition section with the casing assuming a rather great outer-wall divergence angle. Gas flow is liable to separate at the outer wall, resulting in a deterioration of the cascade inlet flow of the guide vane assembly. The results of the numerical study indicate that the optimized design of the casing outer wall profile and blade contour has improved the overall aerodynamic performance of the guide vane assembly. In the case of identical calculation-domain initial conditions there is a marked reduction of outlet energy loss of the guide vane assembly. **Key words:** low-pressure guide vane assembly, numerical simulation, twisted blade, end wall profile, optimized design

CFB 锅炉煤成灰特性的 6 参数模型研究 = **Six-parameter Model Study of Ash Formation Characteristics of Coals in a Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊, 汉] / YANG Hai-rui, LU Jun-fu, XIAO Xian-bin (National Key Laboratory of Clean Coal Combustion Technology under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), M. WIRSUM (Siegen University, Siegen, Germany) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(6). — 577 ~ 581

An experimental method involving static combustion and cold state vibration screening is employed to study the ash formation characteristics of several Chinese coal ranks with the ash formation data-base being given for these coals. Through an analysis of the ash formation data-base of different coals it is found that the distribution of ash formation of an arbitrary narrow sieve fraction assumes a bimodal nature, i. e. being composed of relatively fine and soft ash components and relatively coarse and hard ash ones. These two kinds of ash components can simultaneously satisfy a Rosin-Rommler distribution. A six-parameter model has been set up, which can predict the ash mass portion and relevant particle size distribution of each kind of ash components. By the use of a weighting method the ash formation distribution of coal with a wide sieve fraction can be obtained. **Key words:** ash formation characteristics, soft ash, hard ash, Rosin-Rommler distribution, six-parameter model

近红外光谱分析技术预测煤质挥发分含量模型的研究 = **A Model Study Concerning the Use of Near Infrared Spectral-analysis Technology for Predicting Volatile Content of Coals** [刊, 汉] / LI Feng-rui, TANG Yu-guo (Changchun Research Institute of Optical Precision Instruments and Physics under the Chinese Academy of Sciences, Changchun, China, Post Code: 130021), XIAO Bao-lan (Department of Thermal Engineering, Jilin University, Changchun, China, Post Code: 130025) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(6). — 582 ~ 583

A near infrared spectral method is used to conduct the on-line analysis of various kinds of coal with an emphasis on the determination of coal volatile content. On the basis of reading numerous spectrograms and with the use of a multiple regression method for data analysis and processing the authors have set up a multi-linear model. The correlation factor between the model-derived forecast volatile content of coal and the artificially tested standard value is found to be 0.96. The