

煤灰熔融温度预测方法研究现状

刘 硕¹ 杨伏生¹ 张小艳² 井云环³ 杨 磊³ 蔡会武¹ 周安宁¹

(1. 西安科技大学 化学与化工学院 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 计算机学院 陕西 西安 710054;
3. 神华宁煤集团煤化工公司 宁夏 银川 750011)

摘要: 为准确预测煤灰熔融温度, 论述了国内外建立煤灰熔融温度预测模型现状, 重点分析了线性回归法、BP 神经网络法、支持向量机法和 FactSage 软件法的应用情况及误差。回归分析法的应用最为广泛, 其中利用最小二乘法拟合的预测公式的相关性系数较高, 但适应性较差; BP 神经网络法适应性较强, 但必须输入大量数据对模型进行训练; 支持向量机法虽然优于回归分析法与 BP 神经网络法, 但不能阐明煤灰熔融过程中矿物演变规律, 不能科学说明灰熔融特性变化机理。FactSage 软件法不仅有较高的预测精度, 还可阐明煤灰熔融过程中矿物质演变规律, 优化煤灰熔融温度的评价标准, 建立更可靠的预测模型。因此, FactSage 软件法是应用前景广阔的煤灰熔融特性预测方法。

关键词: 灰熔融特性; 预测; FactSage; 回归分析法; BP 神经网络; 支持向量机

中图分类号: TQ536 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2016)01-0060-06

Research progress on prediction methods of coal ash melting temperature

LIU Shuo¹, YANG Fusheng¹, ZHANG Xiaoyan², JING Yunhuan³, YANG Lei³, CAI Huiwu¹, ZHOU Anning¹

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. College of Comperure Science, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
3. Coal Chemical Industry Company, Shenhua Ningxia Coal Industry Group, Yinchuan 750011, China)

Abstract: In order to predict coal ash melting temperature, the present situation of ash melting temperature prediction model at home and abroad was introduced, including regression analysis method, BP neural network method, support vector machine (SVM) method and FactSage software method. The application of regression analysis method was widely used, the correlation coefficient of predicting formula fitted by the least square method was higher, while its adaptability was poorer. The adaptability of BP neural network was stronger, but the large amounts of data must be input for training the model. The SVM method was better than the first two, but it couldn't clarify the ash melting process of mineral evolution law, that meant it couldn't scientifically indicate ash melting characteristics change mechanism. FactSage software method had higher prediction accuracy, it could clarify the process of mineral ash fusion conversion and optimize the ash melting temperature of evaluation criteria. Based on the properties of FactSage software method, a more reliable prediction model could be established.

Key words: ash fusion characteristics; prediction; FactSage; regression analysis method; BP neural network; support vector machine

0 引 言

我国煤炭种类齐全, 储量巨大, 同时具有贫油、少气的能源结构特点。据统计, 煤炭的 84% 用于直接燃烧, 由于燃煤设备和燃烧技术相对落后, 煤炭在

燃烧过程中未被充分利用, 特别是一些煤化程度较低的煤, 因为其结构特性在使用过程中受到限制, 燃烧后产生 CO₂、硫化物及烟尘, 不但造成了严重的环境污染, 还威胁人类健康。发展洁净煤技术是煤炭资源清洁高效利用的必然选择, 煤炭清洁高效转化

收稿日期: 2015-05-30; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2016.01.012

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174279); 神华宁煤集团有限责任公司科技创新项目(2014095)

作者简介: 刘 硕(1990—), 男, 陕西榆林人, 硕士研究生, 从事煤的灰化学方面的研究工作。E-mail: billiushuo@139.com。通讯作者: 周安宁(1962—), 男, 陕西蓝田人, 教授, 博士生导师。E-mail: psu564@139.com

引用格式: 刘 硕, 杨伏生, 张小艳, 等. 煤灰熔融温度预测方法研究现状[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(1): 60-65.

LIU Shuo, YANG Fusheng, ZHANG Xiaoyan, et al. Research progress on prediction methods of coal ash melting temperature[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(1): 60-65.

是洁净煤技术的重要领域,煤气化技术是煤炭清洁转化的核心。灰熔融温度作为煤气化的一项重要指标与煤灰的熔融特性有着密切联系。气化原料煤的熔融温度是影响气化炉运行的关键^[1]。实际工业运行数据表明,气化炉中煤的灰熔融温度与实验室测定结果有一定差异^[2]。因此,准确预测煤灰熔融温度不仅有助于选取适合该煤种的气化技术,还可提高气化炉操作的稳定性,从而保证气化炉长周期稳定安全运行。煤灰化学成分与煤灰的熔融温度密切相关,国内外围绕煤灰熔融温度预测已开展了较为系统的研究工作,主要预测方法有回归分析法、反向传播(BP)神经网络法、支持向量机法和 FactSage 热力学软件法等。笔者在分析归纳近年来有关煤灰熔融温度预测相关文献基础上,论述了不同预测方法的优缺点,为准确预测煤灰熔融温度指明方向。

1 回归分析法

回归分析法是利用各种线性关系拟合出煤灰成分与煤灰熔融温度的关系式。回归分析法主要有逐步回归法^[3-6]、分段拟合法^[7-8]、回归分析拟合法^[9]、偏最小二乘回归法^[10-11]、最小二乘回归法等^[12]。樊泉桂等^[11]利用 SPSS(统计产品与服务解决方案软件)软件进行多元回归分析,推导出精度相对较高的预测灰熔融温度的公式。曹祥等^[12]引入煤中矿物因子 Φ_{MF} ,用耐熔矿物相与助熔矿物相最强衍射峰的衍射强度的比值(I [耐熔矿物相]/ I [助熔矿物相])来表示矿物因子,通过回归分析、曲线拟合法得到预测公式,其可靠性较好。煤灰熔融温度的线性回归预测法见表 1。由表 1 可知,利用最小二乘法线性拟合的预测公式的相关系数较高,相对平均误差也较小,是一种较为可靠的预测方法。

表 1 煤灰熔融温度的回归分析预测法

Table 1 Regression analysis prediction method of coal ash melting temperature

煤样数	预测指标	方法	变量	偏差
154	FT	逐步回归分析法	$X = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2) / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO})$	实际温度误差为 71 °C,符合国家标准(80 °C)
43	ST	逐步回归分析法	$\text{SO}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{CaO}$	平均绝对离差为 42.43 °C,平均相对离差 3.6%
181	FT	逐步回归与多元线性法	$\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{CaO}, \text{MgO}, \text{K}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O}, \text{TiO}_2$	相关系数为 0.934
172	FT、ST	分段拟合	$x = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$	实际温度平均误差为 37 °C,符合国家标准
60	DT	偏最小二乘回归法	$\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{CaO}, \text{MgO}, \text{K}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O}, \text{TiO}_2$	相对平均误差为 0.95% ~ 1.50%,精度相对较高
11	FT	最小二乘回归法	$\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{CaO}, \text{MgO}, \text{K}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O}$	相关系数为 0.9993,精度高
23	FT	最小二乘回归法	$\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{CaO}, \text{MgO}$	相关系数为 0.929,精度相对较高
62	FT、DT	回归分析、线性拟合	$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{CaO}$	预测偏差小于 80 °C 的样本占总体的 85%
22	FT、DT、ST	回归分析、曲线拟合	$\text{SO}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{CaO}, \text{MgO}, \text{K}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O}$	相关系数为 0.929,偏差符合国家标准
170	FT、ST	多元回归分析法	$\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{TiO}_2, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{CaO}, \text{MgO}$	误差符合国家标准
34	FT	回归分析、线性拟合	$\Phi_{MF} = I[\text{耐熔矿物相}] / I[\text{助熔矿物相}]$	相关系数为 0.97,精度相对较高

注:DT 为变形温度,ST 为软化温度,FT 为流动温度;氧化物含量均为质量分数。

2 BP 神经网络法

回归分析法使用较为方便,但其预测模型的适应性较差,只有在灰分适用范围内才具有较好的预测效果^[13]。BP 神经网络法是一种非线性回归方法,拥有强大的非线性映射能力。三层神经网络已

经被证明可以近似成任何一个非线性连续函数的任意精度,此外,BP 神经网络法的建模过程更方便、直接,不需指定输入量与输出量直接数量关系^[14]。樊泉贵等^[11]利用线性回归法和 BP 神经网络法分别建立了相应的预测模型,研究发现利用 BP 神经网络建立的预测模型可明显降低预测值与实测值之间的

误差。刘涛^[15]将煤灰成分中的9种组分(SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 SO_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O)和5种组合形式(B/A 、 D 、 S/A 、 R_{250} 、 S)作为BP神经网络输入层单元,其中5种组合形式分别为:酸碱比 $B/A = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$, 碱性氧化物含量 $\text{Base} = \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$, SiO_2 值 $S = \text{SiO}_2 / (\text{SiO}_2 + \text{FeO} + \text{CaO} + \text{MgO})$, 白云石比例 $D = (\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{FeO} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$, R_{250} ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{CaO} + \text{MgO} = 100$, 即视煤灰中仅含有这5种氧化物) $= (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{CaO})$ (以上氧化物含量均为质量分数,%)。混合灰熔融温度的4个特征温度作为输出层单元,使用多组实测值对网络模型进行训练,并建立相应的预测煤灰熔融温度的数学模型。霍正华^[16]以9种煤灰组分(SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 SO_3 、

Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O)作为输入量,煤灰熔融温度作为输出量,选用多个实测值作为网络的训练样本,用MATLAB创建BP神经网络并采用11种计算方法来预测煤灰熔融温度。Yin等^[17]利用带有动量项的BP神经网络对160个煤样的灰熔融温度进行建模预测,预测的最大误差在15%左右,平均相对误差为5%左右,结果好于预测公式的计算结果。

3 支持向量机法

BP神经网络法虽然适应性较强,预测精度较高,但必须输入大量数据来对模型进行训练,但如果出现数据量不充分或缺少具体的理论模型时,支持向量机法是不错的选择。支持向量机的发展历程见表2。

表2 支持向量机的发展历程

Table 2 The development of support vector machine(SVM)

作者	成果	年份
Vapnki	得出一种求解支持向量机二次规划问题的分块算法	1995年
Osuna	提出了子集选择算法,加快了支持向量机的训练速度	1997年
Jachims	找到一种称为SVMLight支持向量机	1998年
Platt	找到更为有效的支持向量机训练算法,即序列最小优化算法	1998年
Cnawebnehgrs	找到一种增量减量式学习方法	2001年
国内外专家学者	应用于语音处理、图像检索、人脸识别、入侵检测以及数据挖掘等领域	2001年至今

支持向量机在发达国家被成功应用于很多领域,如模式识别、绘制相图、分子和材料设计、微量元素分析、化学工程和技术等^[18-19]。张晓龙^[19]利用支持向量机建立了准确率很高的煤灰熔融温度预测模型。王春林^[20]利用支持向量机算法建立煤灰熔融性预测模型,并通过遗传算法对支持向量机模型的参数进行优化,获得了最优的模型参数,该模型对于单煤和混煤的灰熔融温度预测准确度很高。李清毅等^[21]采用支持向量机建立煤灰软化温度预测模型,通过网格搜索寻优方法对支持向量机模型的参数进行优化,在设定的不同精度下分别获得模型的最优参数,利用优化后的模型对单煤和混煤的灰熔融温度进行预测,并将不同精度下的预测结果与试验结果进行对比,预测结果表明,经网格搜索优化后的支持向量机模型对煤灰熔融温度预测较精确。Zhao等^[22]利用基于交叉验证的动态优化搜索技术的最小二乘支持向量机(回归)模型预测煤灰软化温度(ST),并与目前的回归模型和传统模型,如多

重线性回归(近红外)、多重非线性模型以及人工神经网络模型等进行对比,发现其平方误差为0.0128,相关系数为0.9272。此外,基于回归模型对煤灰成分和灰熔融温度之间的相关关系进行分析,有助于深入了解影响煤灰融合行为的参数。

4 FactSage 软件法

支持向量机法虽然优于线性法与BP神经网络法,但不能阐明煤灰熔融过程中矿物演变规律,不能科学说明灰熔融特性变化机理。FactSage是化学热力学领域完全集成数据库最大的计算系统之一^[23]。其中Equilib模型作为FactSage软件最主要的模型,在煤灰熔融特性的研究计算中有突出表现^[24]。该软件可计算灰熔融液相温度,预测已知温度和组成的煤灰液相分率、固相分率^[25],得出特定矿物的反应,灰渣的形成和灰渣液相状态下的组成,可根据平衡关系建立多相平衡图^[26]。FactSage热力学软件已被用于气流床煤气化技术改进和设计。

4.1 多元相图法

煤灰熔融特性与相平衡性质之间有非常密切的关系,而作为多元系相平衡关系的图解的多元相图,可利用 FactSage 软件计算并得出相应的多元相图^[27]。其中三元相图是描述三元系物质的状态图,主要包括在热力学平衡条件下状态随温度、压力、组分等变量变化。根据三元相图可确定三元系中的任一成分随温度变化引起的相平衡点温度及相平衡转变,还可确定任一给定温度下三元系物质处于平衡状态下的相组成,并利用杠杆定律在其等温截面上计算各平衡相的相对量^[28]。

在煤灰熔融特性研究中,三元相图可描述成以煤灰中酸性氧化物、碱性氧化物和酸性非助熔氧化物为顶点的正三角形相图,研究煤灰熔融特性常用的三元相图包括 $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 等。李帆等^[29-30]发现混煤灰在弱还原性气氛、变形温度下的矿物组成与 $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}$ 三元相图的矿物组成基本一致,煤灰熔融温度可以根据煤灰的组成利用相图进行预测,还可进一步预测各种矿物或添加剂对煤灰熔融性的影响。乌晓江等^[31]发现根据已知灰成分 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 之间的比例关系,可以确定相图上对应的主要矿物质,从而预测其灰熔融温度。袁海平等^[32]研究发现煤灰的组成与其在多元相图上所处的结晶区有非常密切的关系,而主固相的熔融过程又在一定程度上决定煤灰的熔融性温度,从而可进一步研究助熔剂添加量对煤灰熔融特性的影响。有学者利用 FactSage 热力学软件计算三元平衡相图了解氧化物对煤灰熔融特性的影响并预测煤灰熔融温度,其预测结果的精度都很高。但这些方法也仅适用于一定的灰分范围^[33-38]。

张子利^[39]用 FactSage 热力学软件绘制了 $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{MgO}$ 类四元相图,添加钙镁氧化物的助熔效果优于 CaO 、 MgO ,其原因是煤灰组成处在相图的两元或三元共晶点附近,导致煤灰的熔融温度低于周围温度,这与煤灰熔融温度的测试结果相一致。

4.2 液相温度、矿物组合法

液相温度、矿物组合法是根据液相温度、煤灰矿物组成的演变与煤灰熔融特性的关系来预测煤灰熔融温度。利用 FactSage 软件计算出相应的液相温度、液相生成量和各阶段的矿物组成,并与煤灰熔融特性联系起来,从而更加准确预测灰熔融温度,并可建立流动温度与液相温度间的关系式: $FT = A_{FT} + B_{FT}$

T_L ,其中 A_{FT} 、 B_{FT} 均为常数; T_L 为液相温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

李寒旭^[40]用 FactSage 热力学模型来计算高温煤灰液相的量和煤灰矿物组成的转变。研究发现用液相生成量为 75% ~ 80% 时对应的计算温度来预测淮南煤灰流动温度是一种比较有效的方法。同时该软件也很好地解释了随温度变化煤灰中矿物组成的变化趋势,从机理上阐述了煤灰熔融温度变化的原因。

李德侠^[13]用 FactSage 热力学模型计算煤灰液相温度进而预测灰熔融温度,线性回归法线温度与流动温度之间的关系式: $FT = 0.74936T_L + 216.24897$,相关性系数为 0.924,表明煤灰流动温度与液相温度之间的线性相关性较强。有学者利用 FactSage 软件法计算煤灰液相温度并预测灰熔融温度,精度均很高(误差为 5 ~ 10 $^{\circ}\text{C}$ ^[40]),且方便有效^[41-44]。

此外, van Dyk 等^[45]发现最重要的并不是具体的流动温度,而是灰渣形成时的气化炉操作温度,用 FactSage 软件进行平衡计算得出不同温度下各种晶型的转变过程,可以弥补利用灰熔融温度标准去预测灰渣形成的不足。

5 结 语

FactSage 热力学软件法克服了回归分析法、BP 神经网络法和支持向量机法的缺点。多元相图预测需要根据相图的具体情况人为操作并得出结果,操作过程较复杂,但其精度很高,可以阐明煤灰熔融过程中矿物的演变过程,还能优化煤灰熔融温度的评价标准,是一个预测灰熔融温度的非常可靠的方法。因此,进一步开展 FactSage 热力学软件法预测不同气化用煤或气化配煤的灰熔融温度,对于提高预测准确度、深入了解矿物的演变过程和优化灰熔融温度评价标准有重大的意义。

参考文献:

- [1] 梁永煌,游伟,章卫星. 我国洁净煤气化技术现状与存在的问题及发展趋势(上) [J]. 化肥工业 2013 40(6): 30-36.
Liang Yonghuang, You Wei, Zhang Weixing. The current situation and development trend of clean coal gasification technology in China(1) [J]. Chemical Fertilizer Industry 2013 40(6): 30-36.
- [2] 周安宁,黄定国. 洁净煤技术 [M]. 北京: 中国矿业大学出版社 2010.
Zhou Anning, Huang Dingguo. Clean coal technology [M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press 2010.

- [3] 马振海,赵志根,黄文辉.汝箕沟煤矿煤灰熔点的逐步回归分析[J].中国煤炭地质,2010,22(11):7-9.
Ma Zhenhai,Zhao Zhigen,Huang Wenhui. Stepwise regression analysis of ash fusion in Rujigou coalmine[J]. Coal Geology of China,2010,22(11):7-9.
- [4] 许洁,刘霞,李德侠,等.煤灰流动温度预测模型的研究[J].燃料化学学报,2012,40(12):1415-1421.
Xu Jie,Liu Xia,Li Dexia,et al. Prediction model for flow temperature of coal ash[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology,2012,40(12):1415-1421.
- [5] 牛苗任,孙永斌,林碧华.煤灰熔融温度计算公式的研究[J].煤质技术,2011(1):69-72.
Niu Miaoren,Sun Yongbin,Lin Bihua. Calculation formula of coal ash melt temperature[J]. Coal Quality Technology,2011(1):69-72.
- [6] 徐志明,郑娇丽,文孝强.基于偏最小二乘回归的灰熔点预测[J].动力工程学报,2010,30(10):788-792.
Xu Zhiming,Zheng Jiaoli,Wen Xiaoqiang. Prediction for ash fusion point based on partial least square regression[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2010,30(10):788-792.
- [7] 张玉磊,尹永志,王希闯.煤灰成分预测灰熔点的模型[J].中氮肥,2012(6):10-12.
Zhang Yulei,Yin Yongzhi,Wang Xichuang. Component analysis based ash fusion point prediction model[J]. M-Sized Nitrogenous Fertilizer Progress,2012(6):10-12.
- [8] 李继炳,沈本贤,李寒旭,等.配煤对煤灰熔点的影响及灰熔点预测模型研究[J].煤质技术,2009(5):66-70.
Li Jibing,Shen Benxian,Li Hanxu,et al. Effect of coal blending on the ash fusion temperature and the prediction model for the ash fusion temperature[J]. Coal Quality Technology,2009(5):66-70.
- [9] Kahramanac H,Bos F,Reifenstein A. Application of A New Ash Fusion Test to Theodore Coals[J]. Fuel,1998,77(10):1005-1011.
- [10] 张德祥,龙永华,高晋生,等.煤灰中矿物的化学组成与灰熔融性的关系[J].华东理工大学报,2003,29(6):590-594.
Zhang Dexiang,Long Yonghua,Gao Jinsheng,et al. Relationship between the coal ash fusibility and its chemical composition[J]. Journal of East China University of Science and Technology,2003,29(6):590-594.
- [11] 樊泉桂,潘攀.化学组分及单组分熔融温度与煤灰熔融温度的相关性分析[J].锅炉技术,2007,38(6):10-13.
Fan Quangui,Pan Pan. The correlativity on shan chemistry component melting temperature and coal ash melting temperature[J]. Boiler Technology,2007,38(6):10-13.
- [12] 曹祥,李寒旭,刘峤,等.三元配煤矿物因子对煤灰熔融特性影响及熔融机理[J].煤炭学报,2013,38(2):314-319.
Cao Xiang,Li Hanxu,Liu Qiao,et al. Study on mineral factor of ternary-component blended coal on coal ash fusibility and its fusion mechanism[J]. Journal of China Coal Society,2013,38(2):314-319.
- [13] 李德侠.煤灰熔融及粘温特性的研究[D].上海:华东理工大学,2012.
Li Dexia. The study on coal ash fusibility and viscosity temperature characteristics[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology,2012.
- [14] Hornik K,Stinchcombe M,White H. Multilayer feed-forward networks are universal approximators[J]. Neural Networks,1989,5(2):359-366.
- [15] 刘涛.秸秆类生物质与煤混合灰的熔融及粘温特性的研究[D].上海:华东理工大学,2012.
Liu Tao. The study on ash fusion and viscosity-temperature characteristics of blend ash of straw biomass and coal[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology,2012.
- [16] 霍正华.基于神经网络的煤灰结渣特性的研究[D].北京:华北电力大学,2007.
Huo Zhenghua. The research of based neural network on ash slagging characteristic[D]. Beijing: North China Electric Power University,2007.
- [17] Yin Chungen,Luo Zhongyang,Ni Mingjiang,et al. Predicting coal ash fusion temperature with a back-propagation neural network model[J]. Fuel,1998,77(15):1777-1782.
- [18] 王晓文.基于支持向量机的火电厂燃煤优化控制[D].乌鲁木齐:新疆大学,2013.
Wang Xiaowen. Optima control of coal-fired thermal power plants based on support vector machine[D]. Urumqi: Xinjiang University,2013.
- [19] 张晓龙.电厂配煤与锅炉运行的整体综合优化研究[D].杭州:浙江大学,2012.
Zhang Xiaolong. Study on the integrated optimization of coal blending and boiler operation of power plants[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2012.
- [20] 王春林,周昊,李国能,等.基于支持向量机与遗传算法的灰熔点预测[J].中国电机工程学报,2007,27(8):11-15.
Wang Chunlin,Zhou Hao,Li Guoneng,et al. Combining support vector machine and genetic algorithm to predict ash fusion temperature[J]. Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering,2007,27(8):11-15.
- [21] 李清毅,周昊,林阿平,等.基于网格搜索和支持向量机的灰熔点预测[J].浙江大学学报(工学版),2011,45(12):2181-2187.
Li Qingyi,Zhou Hao,Lin Aping,et al. Prediction of ash fusion temperature based on grid search and support vector machine[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science),2011,45(12):2181-2187.
- [22] Zhao Bingtao,Zhang Zhongxiao,Wu Xiaojiang. Prediction of coal ash fusion temperature by least-squares support vector machine mode[J]. Energy Fuels,2010,24(5):3066-3071.
- [23] Bale C W,Chartrand P,Degterov S A. FactSage thermochemical software and databases[J]. Calphad,2002,26(2):189-228.
- [24] Bale C W,Chartrand P,Degterov S A,et al. FactSage thermochemical software and databases-recent developments[J]. Calphad,2009,33(2):295-311.

- [25] Evgueni Jak. Prediction of coal ash fusion temperatures with the FACT thermodynamic computer package [J]. *Fuel*, 2002, 81 (13): 1655–1668.
- [26] Li Hanxu, Yoshihiko Ninomiya, Dong Zhongbing. Application of the FactSage to predict the ash melting behavior in reducing conditions [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2006, 14 (6): 784–789.
- [27] Arthur D. Thermodynamic database development—modeling and phase diagram calculations in oxide systems [J]. *Rare Metals*, 2006, 25 (5): 473–480.
- [28] Liang Zhongyou. How to analyze the complex ternary phase diagram [J]. *Journal of Shandong Institute of Light Industry*, 1992, 6 (2): 25–28.
- [29] 李 帆, 邱建荣, 郑楚光. 煤中矿物质对灰熔融温度影响的三元相图分析 [J]. *华中理工大学学报*, 1996, 24 (10): 96–99.
Li Fan, Qiu Jianrong, Zheng Chuguang. The effect of mineral matter in coal on the ash melting point with ternary phase diagram [J]. *Journal of Huazhong University of Science*, 1996, 24 (10): 96–99.
- [30] 李 帆, 邱建荣, 郑楚光. 煤灰中矿物行为对煤灰熔融特性的影响 [J]. *华中理工大学学报*, 1997, 25 (9): 41–43.
Li Fan, Qiu Jianrong, Zheng Chuguang. The influence of the behavior of minerals in blended coal ash on ash fusion characteristics [J]. *Journal of Huazhong University of Science*, 1997, 25 (9): 41–43.
- [31] 乌晓江, 张忠孝, 朴桂林, 等. 配煤对降低高灰熔融性煤的三元相图分析 [J]. *煤质技术*, 2007 (3): 64–67.
Wu Xiaojiang, Zhang Zhongxiao, Piao Guilin, et al. Analysis of coal ash fusion characteristics of high fusibility coal blending with low's with ternary phase diagram [J]. *Coal Quality Technology*, 2007 (3): 64–67.
- [32] 袁海平, 梁钦锋, 刘海峰, 等. CaCO_3 对煤灰熔融特性和黏温特性影响的研究 [J]. *中国机电工程学报*, 2012, 32 (20): 49–55.
Yuan Haiping, Liang Qinfeng, Liu Haifeng, et al. Effects of CaCO_3 on the fusion characteristic and viscosity-temperature behaviour of coal ashes [J]. *Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2012, 32 (20): 49–55.
- [33] 陈龙, 张忠孝, 乌晓江, 等. 用三元相图对煤灰熔点预报研究 [J]. *电站系统工程*, 2007, 23 (1): 22–24.
Chen Long, Zhang Zhongxiao, Wu Xiaojiang, et al. An experiment study on ash fusibility under weak deoxidation atmosphere and oxidation atmosphere [J]. *Power System Engineering*, 2007, 23 (1): 22–24.
- [34] 马尚文, 刘 霞, 许 洁, 等. SiO_2 含量对煤灰熔融特性的影响 [J]. *广东化工*, 2013, 40 (13): 81–82.
Ma Shangwen, Liu Xia, Xu Jie, et al. The effect of SiO_2 on fusion temperature of coal ash [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2013, 40 (13): 81–82.
- [35] 马 岩. 矿物添加剂成分对褐煤高温熔融特性及黏温特性的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- Ma Yan. The effect of mineral additives on ash fusion and viscosity-temperature characteristics of lignite [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [36] 许 洁, 刘 霞, 张 庆, 等. 高钙山鑫煤灰熔融及黏温特性分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33 (20): 46–51.
Xu Jie, Liu Xia, Zhang Qing, et al. Research on ash fusibility and viscosity-temperature characteristics of high-calcium Shanxin coal ash [J]. *Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2013, 33 (20): 46–51.
- [37] Hurst H J, Novak F, Patterson J H. Phase diagram approach to the fluxing effect of additions of CaCO_3 on Australian coal ashes [J]. *Energy Fuels*, 1996, 10 (6): 1215–1219.
- [38] Huggins F E, Kosmack D A, Huffman G P. Correlation between ash-fusion temperatures and ternary equilibrium phase diagrams [J]. *Fuel*, 1981, 60 (7): 577–584.
- [39] 张子利. 钙镁协同作用对煤灰熔融特性的影响研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
Zhang Zili. Effect of synergy between calcium oxide and magnesium oxide on coal ash melting characteristics [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2013.
- [40] 李寒旭. 还原性气氛下淮南煤灰行为特征的研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2009.
Li Hanxu. Study on Huainan coal ash behavior research under the reducing atmosphere [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2009.
- [41] 宋文佳, 唐黎华, 朱学栋, 等. Shell 气化炉中灰渣的熔融特性与流动特性 [J]. *化工学报*, 2009, 60 (7): 1781–1786.
Song Wenjia, Tang Lihua, Zhu Xuedong, et al. Fusibility and flow properties of Shell gasifier slag [J]. *Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering (China)*, 2009, 60 (7): 1781–1786.
- [42] 舒红宁. 钙的多元组合对灰渣熔融特性的影响及数值模拟 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
Shu Hongning. The effect of calcium oxide multi combination on the slagging characteristics of main components in coal ash and numerical simulation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [43] 宋文佳. 高温煤气化炉中煤灰熔融、流动和流变行为特性研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
Song Wenjia. Fusibility, flow characteristics and rheological properties of coal ash in the ultra-high temperature gasifier [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011.
- [44] van Dyk J C. Understanding the influence of acidic components (Si, Al and Ti) on ash flow temperature of South African coal sources [J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19 (3): 280–286.
- [45] van Dyk J C, Keyser M J. Influence of discard mineral matter on slag-liquid formation and ash melting properties of coal—A FACTSAGE™ simulation study [J]. *Fuels*, 2014, 116: 834–840.