

基于 FactSage 软件的煤灰熔融行为预测

宋明光,王群英,岳益锋,陈仕国

(华电电力科学研究院,浙江 杭州 310030)

摘要:煤灰熔融行为是煤炭气化和燃烧的重要指标,为了快速、准确预测煤灰在特定温度下的熔融行为,基于 FactSage 热力学模拟软件的功能特点,论述了该软件在模拟及预测煤灰熔融行为的应用现状及主要特点。利用 FactSage 热力学模拟软件可方便计算并得到相应的多元相图、广义相图,制备微晶玻璃、玻璃纤维等,指导煤灰的资源化利用。此外,FactSage 热力学模拟软件还广泛应用于预测煤灰熔融温度、黏温特性,绘制简化煤灰相图,通过调整煤灰组成研究煤灰熔融特性的影响规律等方面,具有很好的准确性。根据 FactSage 可得到煤灰的简化组成相图,因此 FactSage 热力学模拟软件可高效、快捷、准确预测煤灰熔融行为。

关键词:FactSage;煤灰;熔融;相图;黏温特性

中图分类号:TQ533

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2018)02-0068-06

Prediction of coal ash melting behavior using FactSage

SONG Mingguang, WANG Qunying, YUE Yifeng, CHEN Shiguo

(Huadian Electric Power Research Institute, Hangzhou 310030, China)

Abstract: The melting behavior of coal ash is an important characteristic in pulverized coal combustion and coal gasification. In order to predict coal ash melting behavior quickly and accurately, the application and characteristics of FactSage software in predicting coal ash melting behavior was introduced. Results show that that FactSage software can be used to guide resource utilization of coal ash through drawing multi-component phase and generalized phase diagram and preparation of glass ceramics and glass fiber. In addition, it is found that FactSage software can be widely used in predicting the fusion temperature, drawing simplified phase diagrams, forecasting viscosity-temperature characteristics and studying the regularities of coal ash melting characteristics through adjusting the composition of coal ash. Briefly, the FactSage software is an efficient tool for predicting coal ash melting behavior because of its high efficiency and accuracy.

Key words: FactSage; coal ash; melting; phase diagram; viscosity-temperature characteristics

0 引 言

煤灰熔融行为及黏温特性是煤炭气化和燃烧的重要指标^[1],如燃煤电厂锅炉中的结渣、结灰问题^[2],工业气化炉中的灰渣熔融及流动性问题^[3]。另外煤灰的高温熔融特性还与近年来兴起的煤灰制备微晶玻璃、玻璃陶瓷等新型利用方式^[4-5]直接相关。因此如何采取有效的技术手段快速准确预测煤灰在高温下的熔融行为及黏温特性是当前研究热

点。目前已有多种灰熔融行为的经验判断方法,如角锥法^[6]、热机械分析 TMA 法^[7]、结渣经验指数^[8]等。但由于煤种差异、煤炭燃烧利用工艺、参数等不同造成煤灰中矿物组成及煤灰成分复杂,上述方法均存在精确度不高、耗时长等问题。

FactSage 是化学热力学领域中世界上完全集成数据库最大的计算系统之一,创立于 2001 年,是 FACT-Win 和 ChemSage 两个热力学软件包的结合^[9]。FactSage 热力学软件的本质是将热力学模型

收稿日期:2017-08-29;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2018.02.013

基金项目:杭州市科技发展计划重大科技创新专项资助项目(20132011A05)

作者简介:宋明光(1988—),男,安徽黄山人,工程师,硕士,从事粉煤灰综合利用及智慧燃料的研究工作。E-mail:mingguang-song@chder.com

引用格式:宋明光,王群英,岳益锋,等.基于 FactSage 软件的煤灰熔融行为预测[J].洁净煤技术,2018,24(2):68-73.

SONG Mingguang, WANG Qunying, YUE Yifeng, et al. Prediction of coal ash melting behavior using FactSage[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(2):68-73.

和计算原理与计算机强大的数值计算和处理功能相结合,对不同状态下体系热力学函数、热力学平衡状态相图、复杂体系多元多相平衡等进行评估和模拟计算,因此可对各种组成的灰渣在高温下的状态、性质等进行预测。廖敏等^[10]研究高温条件下不同温度段煤灰熔融过程的物相变化规律时采用了 FactSage 计算软件中的 Equilib 模型进行数值计算,结果表明计算结果与试验结果基本一致。王洋等^[11]、麻栋等^[12]、宋维健等^[13]、刘硕等^[14]研究结果均表明运用 FactSage 软件研究煤灰的熔融特性及黏温特性能获得满意的结果。

虽然已有诸多学者对 FactSage 软件在煤灰熔融行为方面的应用进行尝试,但基本都是作为辅助手段解释试验中的某些规律,而对该方法在煤灰熔融行为预测方面缺少系统性总结,未用于指导实际生产。本文通过总结文献,归纳了 FactSage 软件在预测煤灰熔融温度、绘制简化煤灰相图、预测黏温特性

以及研究熔融特性影响规律等方面的应用现状及特点,以期对相关技术人员在设计优化煤炭燃烧、气化工艺以及拓宽煤灰利用途径等方面提供新思路。

1 煤灰熔融温度预测方法

1.1 主要预测方法对比

煤灰熔融温度能够为锅炉燃用煤种选择、燃烧温度调整提供参考,目前一般采用灰熔点测定仪(角锥法)测定,以流动温度 FT 来表示。但该方法只给出煤灰的平均特性,无法提供开始熔融或由熔融态发生结渣现象时的确切温度,以及特定温度下熔渣的性质。生产经验表明即使气化操作温度高于 FT 分析给出的流动温度时,仍会有一定比例的结渣现象发生。现阶段国内也有诸多预测煤灰熔融温度的方法,主要包括回归分析法^[15]、反向传播(BP)神经网络法^[16]、支持向量机法^[17-18]和 FactSage 热力学软件法^[19]等。各方法原理及优缺点见表 1。

表 1 煤灰熔融温度预测方法比较

Table 1 Comparison of prediction methods of coal ash melting temperature

煤灰熔融温度预测方法	方法原理	优点	缺点
回归分析法	利用函数关系拟合出煤灰成分与煤灰熔融温度的关系式	数学处理手段丰富,拟合得到的相关系数较高	结果适应性差
BP 神经网络法	采用神经网络原理,通过大量数据得到非线性的拟合关系	建模过程方便、直接,结果适应性强,精度较高	需要大量的基础数据
支持向量法	建立在统计学习理论和结构风险最小化原理基础上的新型学习机器	能很好地解决小样本、非线性、高维度以及神经网络中经常出现的局部极小值等实际问题	过程较复杂,不能阐明熔融过程中矿物演变规律
FactSage 热力学软件法	依托丰富的基础物性数据库,建立热力学过程模拟	能够阐述煤灰熔融过程中的矿物演变规律,建立更为精确的预测模型	过程较复杂

由回归分析法特别是利用最小二乘法拟合得到的预测模型相关系数较高,但适应性较差。BP 神经网络法是一种非线性回归方法,具有很强的非线性映射能力,适应性较强,预测精度较高,但其映射过程必须建立在大量数据上。而支持向量法能够在数据不足或缺乏理论模型时,有较好的应用结果,但该方法不能阐明煤灰熔融过程中的矿物演变规律,无法科学说明灰熔融特性变化机理^[20]。

FactSage 热力学软件法可计算煤灰熔融液相温度,预测已知温度和组成的煤灰液相分率、固相分率,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,并可根据平衡关系建立多相平衡图。因此,FactSage 软件在煤灰熔融温度预测上具有准

确性高、预测速度快等特点。

1.2 FactSage 热力学软件法

FactSage 热力学软件法精度高,可解释煤灰熔融过程中矿物的演变过程,进而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。Li 等^[19]运用 FactSage 软件模拟计算了煤灰在高温下的液相含量以及煤灰在升温加热过程中矿物组成的转变。当混合组成中液相含量为 75% ~ 80% 时,用该温度预测淮南灰的流动温度准确性较高。FactSage 软件还可以很好地呈现并解释煤灰中矿物组成随温度的变化趋势,从机理上阐述煤灰熔融温度随组成变化的原因。

赵烁等^[21]通过 FactSage 软件计算分析了 CaO-

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ 四元体系夹杂物的熔点,结果表明温度低于 $1\ 500\ ^\circ\text{C}$ 时,利用 FactSage 预测该四元夹杂物熔化温度可行,计算结果与热丝法所测结果的偏差小于 4%。Dyk 等^[22] 基于 FactSage 热力平衡仿真方法模拟了不同矿物类型及混合矿物对液-渣形成以及灰流动温度的影响,模拟结果与标准的灰熔融温度测试结果误差在 $30\ ^\circ\text{C}$ 以内。

以毕节地区某电厂粉煤灰为研究对象,通过 FactSage 模拟得到了升温过程中各主要组分随温度的变化曲线,结果如图 1 所示。由图 1 可知,温度达到 $1\ 490\ ^\circ\text{C}$ 时,粉煤灰液相含量已达 100%,而实验室采用灰熔点测定仪得出粉煤灰的灰熔融温度为 $1\ 480\ ^\circ\text{C}$,与 FactSage 结果一致,验证了 factSage 预测煤灰熔融温度的可靠性,这对于指导火电厂配煤掺烧,避免结渣具有重要作用。

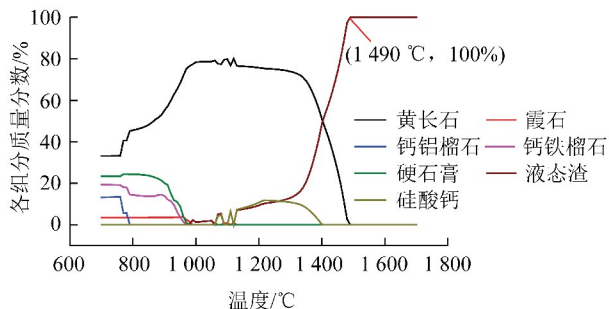


图 1 运用 FactSage 预测灰熔融性温度

Fig. 1 Prediction of ash melting temperature by FactSage

2 FactSage 在煤灰相图中的应用

2.1 常规相图

煤灰熔融特性与其对应组成的相平衡之间关系密切,乌晓江等^[23] 发现根据已知灰成分 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 的比例关系,可通过确定相图上对应的主要矿物质来预测其灰熔融温度。在煤灰熔融特性研究中,可以用三元相图来简化,将煤灰描述成以酸性氧化物、碱性氧化物和酸性非助熔氧化物为顶点的正三角形相图,常用的有 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ 、 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}$ 等。FactSage 软件中的 Phase Diagram 模块是能够计算、画出和编辑单元、二元、三元或多元相图的通用程序,相图坐标轴可以为温度 (T)、压力 (P)、体积 (V)、组成、活度、化学势等各种组合,因此利用 FactSage 软件可方便计算并得到相应的多元相图^[24],并预测煤灰熔融特性。

吴萍^[25] 使用计算软件 Thermo-Calc 和 FactSage 评估了 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 煤灰体系,发现 2 个

软件模拟计算得到的相图存在明显差异,运用 PANDAT 软件以及试验验证了由 FactSage 计算得到的相图更加准确。根据该三元系相图可指导煤灰/渣提取氧化铝,原理为:在煤炭燃烧或煤气化高温炉的原料中准确按照煤灰组成来调控石灰石的投放量,使灰渣中的主要矿物组成为 Ca_2SiO_4 和 $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $5\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ 或 $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$,这样可能用 Na_2CO_3 溶液提取出 Al_2O_3 ,运用相图原理省去石灰烧结法的烧结工序,降低成本。

卢伟佳等^[26] 利用 FactSage 软件通过 $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 四元相图研究得出了改变炉渣碱度、 Al_2O_3 含量等条件对炉渣性能尤其是熔化性温度的变化规律,软件分析结果与试验结果有较好吻合,利用 FactSage 软件可帮助指导高炉造渣制度。

煤灰一般可简化为 $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ 三元体系,利用 FactSage 可以绘制 $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ 三元相图,通过相图又可方便得出煤灰在特定温度下的主要晶相组成。以华电集团 6 种典型煤灰为例(分别为毕节电厂粉煤灰 BJFA、毕节电厂炉渣 BJBA、乌达电厂粉煤灰 W DFA、乌达电厂炉渣 W DBA、巡检司电厂粉煤灰 XJSFA、可门电厂粉煤灰 KMFA),利用 FactSage 计算得到 $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ 三元相图,并通过相图预测煤灰在 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 时的主要矿物组成,结果见表 2。将上述各煤灰在 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 下处理 1 h,采用 XRD 分析其主要矿物组成(表 2)。由表 2 可知,通过相图得到的晶相与 XRD 测试结果完全一致,这对于利用煤灰制备高温陶瓷材料等具有重要的指导意义。

2.2 广义相图

利用多种固体废弃物原料制备微晶玻璃的过程中,通常需要 3 种或 3 种以上的复杂组合,而在基础配方设计中多以 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 等氧化物的三元或四元相图为参考,因此需要对原料进行简化,验证试验结果,增加工作量和不确定性。FactSage 软件的相图模块中,不仅可进行常见物质组合的相图绘制,还包含了化学计量相组分相图的绘制,通过将复杂的化合物按化学计量组成一个独立组元然后参与相图的绘制,此种方法绘制出来的相图称为广义相图。樊涌等^[27] 以城市市政污泥焚烧灰渣和冶金高炉渣为主要原料,以 SiO_2 为成分调整剂,采用 FactSage 热力学软件进行了广义相图的计算与绘制,并以此作为微晶玻璃最佳配方的寻找依据,获得了很好的可靠性。

表 2 各煤灰 1 200 °C 下相图分析及 XRD 检测下的晶相对比

Table 2 Phase diagram analysis and comparison of phase diagram by FactSage with XRD at 1 200 °C

项目	BJFA	WDFA	XJSFA	BJBA	WDBA	KMFA
SiO ₂ 含量/%	21.8	32.1	23.5	25.0	36.0	51.0
Al ₂ O ₃ 含量/%	16.9	29.8	16.6	21.5	29.1	33.4
CaO 含量/%	35.5	22.0	38.4	25.1	18.8	3.9
主要晶相(相图)	G	A	G	A	A	M
主要晶相(XRD)	G	A	G	A	A	M

注:A 为 Anorthite(钙长石),G 为 Gehlenite(钙铝黄长石),M 为 Mullite(莫来石)。

3 预测黏温特性

目前灰渣黏度的测量仍以高温黏度计为主,该方法能客观准确反映出灰渣熔体在特定温度下的流体黏度,但该方法测量不仅耗时、耗力、花费较大,且不同实验室所测数据与黏度推荐值可能相差 50% 以上。

FactSage 热力学计算可得到特定温度下的液-固含量以及晶相组成,结合合适的黏度预测模型便能获得特性温度下的黏度和结渣特性,FactSage 软件中的 Viscosity 模块便是通过处理 Equilib 模块计算出的组成数据得到相应条件下的灰熔体黏度。

Kondratiev 等^[28]采用 FactSage 软件预测 Al₂O₃-CaO-FeO-SiO₂ 体系中固态和液态的比例,并建立准化学黏度模型系统预测灰的熔融态流动特性和渣的黏度,在此基础上建立了 Roscoe 方程评价固体悬浮对部分结晶熔渣黏度的影响,该模型在多组分和较宽温度范围内与试验数据具有较高的相关性。

张明军等^[29]采用 FactSage 的 Equilib 和 Viscosity 模块,结合修正后的 Einstein-Roscoe 公式进行计算并预测黏度。首先采用 Equilib 模块计算各 CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃ 四元渣系在平衡条件下的液相线温度及在指定温度下(1 823 K)析出固相种类与析出量。液相低于 1 823 K,则直接运用 Viscosity 模块进行黏度计算;若高于 1 823 K,则使用 Viscosity 模块计算析出固相后均相渣的黏度,并结合修正后的 Einstein-Roscoe 公式进行黏度估算校正。在通过该方法获得高铝钢包渣 CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃ 体系的黏度计相图的基础上,研究了碱度($R = \text{CaO}/\text{SiO}_2$)、MgO 和 Al₂O₃ 含量对钢包渣黏度的影响,并结合炉渣结构理论作出了合理解释。

Jak 等^[30]运用 FactSage 热力学计算软件结合黏度模型,以 Al-Ca-Fe-O-Si 灰渣体系为例,预测煤

气化工艺中复杂煤灰渣体系中的相平衡、液相温度、黏度等,获得了满意的结果,并借助 FactSage 热力学模拟预测 MgO、NaO、K₂O 等对相平衡的影响。

许洁等^[31]研究高钙山鑫煤灰熔融及黏温特性时采用了 FactSage 软件推断高温下不同温度区间煤灰熔融过程中的物相变化规律,并分析灰熔融温度及黏度变化机理,结果表明 FactSage 软件的计算结果与试验结果一致,说明 FactSage 软件可以用于研究煤灰的黏温特性。

4 煤灰熔融特性影响规律

FactSage 软件可计算煤灰熔融液相温度,预测已知温度和组成的煤灰液相分率、固相分率,得出特定矿物反应,灰渣形成和灰渣液相状态下的组成,并可根据平衡关系建立多相平衡图。因此利用 FactSage 软件可以研究煤灰熔融特性的影响规律。

田洪鹏等^[32]以 SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃-CaO-MgO 五元组分模拟灰作为研究对象,应用 FactSage 软件模拟得到不同 CaO 含量时体系的液含量和主要矿物质含量,同时还通过 Phase Diagram 模块得到 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 三元系统相图。2 种方式均可测量 CaO 含量对煤灰熔融特性的影响,通过与已有试验结果对比,认为应用 FactSage 预测 CaO 助熔剂对熔融特性的影响更合理。

王洋等^[11]采用在真实煤灰中添加不同氧化物以及直接用氧化物配制人工合成灰 2 种方式,研究了不同灰成分对灰熔融特性的影响,并通过 FactSage 模拟软件对不同灰分的熔融过程进行热力学模拟。结果表明,增加 NaO 含量能有效降低灰熔融性温度;增加灰中 MgO、CaO 含量,灰熔融温度先降低后升高;增加灰中硫含量提高了灰熔融温度。熔融过程中的矿物质变化模拟结果说明可将 FactSage 直接作为不同灰成分对熔融特性影响规律的预测手段。

宋文佳等^[3]分析了 Shell 气化炉中灰渣的物理性质,并利用灰熔点测定仪、高温黏度计测定了添加助溶剂 CaO 的灰渣熔融温度和黏度,利用热力学软件 FactSage 计算了灰渣在不同温度下的固液相相对含量及全液相温度。由热力学软件 FactSage 计算出的灰渣全液相温度和相对固含量随 CaO 含量的变化趋势与灰渣的熔融温度、黏度的变化趋势一致。

袁海平等^[33]为了研究 CaCO₃ 在高温条件下对高灰熔融温度煤灰的熔融特性和黏温特性的影响,选取多种煤样为原料,首先利用灰熔点测定仪和高温黏度计对添加 CaCO₃ 的煤灰样品进行熔融特性和黏温特性测量,然后采用热力学计算软件 FactSage 中的 Phase Diagram 和 Equilib 模块进行热力学平衡计算。数值计算结果与试验结果基本一致,因此化学热力学软件 FactSage 分析方法是研究灰渣熔融特性和黏温特性的有效方法。

5 结 语

FactSage 数据库内容包括数千种纯物质数据库、评估及优化过的数百种金属溶液、氧化物液相与固相溶液、熔盐、合金溶液数据库等,因此 FactSage 软件对于多元多相平衡体系具有强大的计算功能,可用于煤灰体系熔融行为的计算。结合热力学数据库,FactSage 可预测计算煤灰的熔融温度、黏温特性,可通过调整煤灰组成研究煤灰熔融特性的影响规律,这对掌握熔融机理,指导煤炭气化工工艺、排渣方式、配煤掺烧等具有重要意义。另外根据 FactSage 可得到煤灰的简化组成相图,制备微晶玻璃、玻璃纤维等,指导煤灰的资源化利用。

参考文献 (References):

[1] 胡晓飞,郭庆华,刘霞,等. 高钙高铁煤灰熔融及黏温特性研究[J]. 燃料化学学报,2016,44(7):769-776.
HU Xiaofei, GUO Qinghua, LIU Xia, et al. Ash fusion and viscosity behavior of coal ash with high content of Fe and Ca[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2016, 44(7): 769-776.

[2] 刘家利. 准东煤灰熔融性与灰成分相关性分析[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(5): 99-102.
LIU Jiali. Correlation analysis of ash fusibility and ash composition of Zhundong coal[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(5): 99-102.

[3] 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]. Journal of Chemical Indus-

try and Engineering, 2009, 60(7): 1781-1786.

[4] 汪振双,苏昊林,周梅. CaO-Al₂O₃-SiO₂ 系粉煤灰微晶玻璃的制备及其性能[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(1): 29-33.
WANG Zhenshuang, SU Haolin, ZHOU Mei. Preparation and properties of CaO-Al₂O₃-SiO₂ glass-ceramics from fly ash by sintering[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(1): 29-33.

[5] 司伟,孙明,章为夷. 固体废弃物制备玻璃陶瓷的研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(15): 37-39.
SI Wei, SUN Ming, ZHANG Weiyi. Research progress in preparation of glass-ceramics from solid wastes[J]. Materials Review, 2014, 28(15): 37-39.

[6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 煤灰熔融性的测定方法: GB/T 219—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[7] 孔令学,白进,李怀柱,等. 利用热机械分析仪测定煤灰熔融性的研究[J]. 煤质技术, 2015(3): 23-27.
KONG Lingxue, BAI Jin, LI Huaizhu, et al. Study on using thermo-mechanical analysis to determinate the coal ash fusibility[J]. Coal Quality Technology, 2015(3): 23-27.

[8] 张超. 无烟煤混烧生物质污染物排放特性及结渣特性的实验研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2015: 23-33.

[9] 曹战民,宋晓艳,乔芝郁. 热力学模拟计算软件 FactSage 及其应用[J]. 稀有金属, 2008, 32(2): 216-219.
CAO Zhanmin, SONG Xiaoyan, QIAO Zhiyu. Thermodynamic modeling software FactSage and its application[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2008, 32(2): 216-219.

[10] 廖敏,郭庆华,梁钦锋,等. 气化条件下煤灰高温物相变化及其对黏度的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(17): 45-50.
LIAO Min, GUO Qinghua, LIANG Qinfeng, et al. Phase transformation of coal ash at high temperature under gasification conditions and its influence on viscosity[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(17): 45-50.

[11] 王洋,李慧,王东旭,等. 煤灰熔融特性与灰成分之间关系的矿物变化研究[J]. 燃料化学学报, 2016, 44(9): 1034-1042.
WANG Yang, LI Hui, WANG Dongxu, et al. Relationship between coal ash fusibility and ash composition in terms of mineral changes[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2016, 44(9): 1034-1042.

[12] 麻栋,白向飞. Al₂O₃ 对神东煤灰渣熔体特性的影响[J]. 煤炭转化, 2017, 40(1): 59-64.
MA Dong, BAI Xiangfei. Effect of Al₂O₃ on Shendong coal ash fusion characteristics[J]. Coal Conversion, 2017, 40(1): 59-64.

[13] 宋维健,宋国良,齐晓宾,等. 准东高钠煤气化过程中 Na 的迁移转化规律[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 490-496.
SONG Weijian, SONG Guoliang, QI Xiaobin, et al. Sodium transformation law of Zhundong coal during gasification[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 490-496.

[14] 刘硕,周安宁,杨伏生,等. 配煤对煤灰熔融性及黏温特性的影响[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(3): 89-93.

- LIU Shuo, ZHOU Anning, YANG Fusheng, et al. Effect of coal blending on ash-fusion and viscosity-temperature characteristics [J]. *Clean coal Technology*, 2017, 23(3): 89-93.
- [15] 肖毅. 褐煤混煤灰熔融特性试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [16] MIAO S, JIANG Q, ZHOU H, et al. Modeling and prediction of coal ash fusion temperature based on BP neural network [C]//MATEC Web of Conferences. France: EDP Sciences, 2016: 181-222.
- [17] 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 A'ping, 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.
- [18] 徐志明, 赵永萍, 文孝强, 等. 一种预测煤灰变形温度的新方法[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(17): 38-43.
- XU Zhiming, ZHAO Yongping, WEN Xiaoqiang, et al. A new method to predict deformation temperature of coal ash [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(17): 38-43.
- [19] LI Hanxu, YOSHIHIKO Ninomiya, DONG Zhongbing, et al. Application of the FactSage to predict the ash melting behavior in reducing conditions [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2006, 14(6): 784-789.
- [20] 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.
- [21] 赵烁, 王谦, 徐建飞, 等. 低碳低合金钢中 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{MgO}$ 系夹杂物熔化温度的控制 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(8): 3121-3128.
- ZHAO Shuo, WANG Qian, XU Jianfei, et al. Control on melting temperature of $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{MgO}$ inclusions in low carbon low alloy steel [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(8): 3121-3128.
- [22] DYK J C V, KEYSER M J. Influence of discard mineral matter on slag-liquid formation and ash melting properties of coal: A FactSageTM simulation study [J]. *Fuel*, 2014, 116(1): 834-840.
- [23] 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]. *洁净煤技术*, 2007, 13(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]. *Clean coal Technology*, 2007, 13(3): 64-67.
- [24] 李德侠, 周志杰, 郭庆华, 等. 榆林煤灰熔融特性及黏温特性 [J]. *化工学报*, 2012, 63(1): 9-17.
- LI Dexia, ZHOU Zhijie, GUO Qinghua, et al. Ash fusion and viscosity-temperature characteristics of Yulin coal [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2012, 63(1): 9-17.
- [25] 吴萍. $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ 三元体系相图的研究 [D]. 上海: 上海大学, 2009.
- [26] 卢伟佳, 张建良, 祁成林, 等. 高炉渣流动性的实验研究及相图分析 [C]//第十五届(2011 年)冶金反应工程学会会议论文集. 北京: 中国金属学会, 2011: 216-223.
- [27] 樊涌, 苍大强, 李宇, 等. 利用计算相图设计微晶玻璃的方法及应用 [J]. *硅酸盐通报*, 2012, 31(4): 1018-1021.
- FAN Yong, CANG Daqiang, LI Yu, et al. Design of solid wastes compound glass-ceramics by FactSageTM [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2012, 31(4): 1018-1021.
- [28] KONDRATIEV A, JAK E. A quasi-chemical viscosity model for fully liquid slags in the $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2$ system [J]. *Metallurgical & Materials Transactions B*, 2005, 36(5): 623-638.
- [29] 张明军, 陈伟庆, 邵俊宁, 等. 高铝钢包渣粘度的计算研究 [J]. *河南冶金*, 2014, 22(4): 10-12.
- ZHANG Mingjun, CHEN Weiqing, SHAO Juning, et al. Viscosity calculation of ladle slag with high alumina [J]. *Henan Metallurgy*, 2014, 22(4): 10-12.
- [30] JAK E, SAULOV D N, KONDRATIEV A, et al. Prediction of phase equilibria and viscosity in complex coal ash slag systems [J]. *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, 2004, 49(1): 159-162.
- [31] 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 Shanxi coal ash [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(20): 46-51.
- [32] 田洪鹏, 朱学栋, 朱子彬. 应用 FactSage 预测 CaO 助熔剂对模拟灰熔融特性的影响 [C]//上海市化学化工学会 2008 年度学术年会论文集. 上海: 上海市化学化工学会, 2008: 148-151.
- [33] 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]. *中国电机工程学报*, 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]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(20): 49-55.