

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.02.001

提质煤与高炉喷吹用烟煤混合燃烧特性及动力学分析

徐润生, 张建良, 王广伟, 宋腾飞, 王海洋, 刘思远

(北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要:利用热重分析仪对提质煤与高炉喷吹用烟煤单独燃烧过程、不同比例混合燃烧过程进行了研究。考察了提质煤添加量与混煤燃烧的特征参数、相互影响程度之间的相关性,并用 DAEM 动力学模型计算了不同提质煤配加量时混煤的活化能。结果表明:提质煤单独燃烧速率要快于高炉喷吹用烟煤单独燃烧速率;随着提质煤配比的增加,混煤着火温度降低,可燃指数和综合燃烧特性指数增大,燃烧性能变好;提质煤与烟煤混燃相互作用因子 K 值均大于 1,两者在燃烧过程中具有相互促进作用;随着提质煤配比量的增加,混煤的活化能逐渐降低,混煤燃烧活性逐渐变强。

关键词:提质煤;烟煤;热重;燃烧特性;相互作用因子;DAEM 动力学模型

中图分类号:TF538.6

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2015)02-0001-10

Combustion characteristics and kinetic analysis of blended coal of upgraded low rank coal and bituminous coal injected into blast furnace

XU Runsheng, ZHANG Jianliang, WANG Guangwei, SONG Tengfei, WANG Haiyang, LIU Siyuan

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P.R.China)

Abstract: Thermo-gravimetric analysis is performed to study the combustion performance of upgraded low rank coal, bituminous coal injected into blast furnace and their mixture. It's studied the relationship between adding quantity of upgraded low rank coal and change rules of blended coal combustion index and their influence on each other. Blended combustion kinetics is analyzed by using the distributed activation energy model (DAEM). The results indicate that the combustion rate of upgraded low rank coal is faster than that of bituminous coal. With the increase of adding quantity of upgraded low rank coal in the blended coal, the ignition temperature gradually decreases, the combustible index and comprehensive combustion index increase, and burning effect gets better. The value of interaction factors K of all blended coals are greater than 1, which suggests that the mutual promotion between upgraded low rank coal and bituminous coal in the combustion process exists. The apparent activation energy of blended coals decrease with the increase of adding quantity of upgraded low rank coal, which indicates the combustion activity of blend coal gradually stronger.

Key words: upgraded low rank coal; bituminous coal; combustion characteristics; interaction factors; DAEM kinetic analysis model

收稿日期:2015-03-04

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2011BAC01B02);国家重点基础研究发展计划资助项目(973 计划)(2012CB720401)。

Supported by National Key Technology Research and Development Program of China(2011BAC01B02) and National Basic Research Program of China(973 Program)(2012CB720401).

作者简介:徐润生(1988-),北京科技大学博士研究生,主要从事炼铁燃料高效利用及非高炉炼铁相关研究;

张建良(联系人),北京科技大学教授,博士生导师,主要从事炼铁新技术相关研究,(E-mail)jl.zhang@ustb.edu.cn。

在钢铁冶金生产工序中,炼铁工序的能耗所占比例最大,炼铁厂的节能在整个钢铁工业节能过程中显得尤为重要,降低焦炭消耗是炼铁节能的主要方向之一,而提高煤比降低焦比是炼铁工序降低能耗的关键^[1]。提高煤比的关键在于保证风口前煤粉燃烧率。因此,随着喷煤技术的发展,喷煤结构逐步实现了由无烟煤喷吹发展到烟煤与无烟煤混合喷吹。混合喷吹不仅可以提高煤粉的燃烧特性,还有助于扩大喷吹用煤的资源范围。徐朝芬^[2]利用热综合分析仪对燃烧性能相差较大的烟煤和无烟煤及其按不同比例掺混得到的混煤燃烧性能进行了热分析试验,结果表明:混煤的着火性能取决于烟煤所占比例,其综合燃烧性能随着烟煤比例的增大而增强。欧阳曙光等^[3]研究表明:混合煤的燃烧性与配入单煤燃烧性有关,同时,也受其可磨性的影响。王永征等^[4]研究表明:组分煤种的燃烧性能相近时,混煤的燃烧特性随掺混比的变化呈现出较好的规律性,燃烧性能相差较大的煤种所组成混煤的燃烧特性与组分煤种相差较大,总体着火燃烧特性变差;混煤的燃烧特性复杂,与组分煤种的燃烧特性不是简单的线性关系。王国忠等^[5]研究表明:无烟煤着火性能比烟煤差,混煤的着火性能随无烟煤比例的增加而变差,无烟煤与烟煤的混煤燃尽性能随着无烟煤比例的增加而降低。刑相栋等^[6]从动力学角度研究了不同比例烟煤与无烟煤混合燃烧时的活化能变化规律。近年来国内外研究学者^[7-13]对生物质、废旧塑料、半焦等与煤粉混合燃烧展开了大量实验研究,但国内对提质煤与高炉喷吹烟煤混燃规律研究较少。基于此,文中主要研究了提质煤和钢铁厂某种喷吹用烟煤的燃烧特性,及其不同混合比例的混煤燃烧性变化规律,为高炉喷吹燃料的范围拓展及优化搭配提供指导。

1 实验试验及方法

1.1 实验样品

实验烟煤取自某钢铁厂喷吹用烟煤 FJB,提质煤取自某劣质煤资源综合利用公司。将两种煤样在 40 ℃ 的烘干箱中干燥 3 h 制得空气干燥基煤样,破碎筛分,取 0.074~0.063 mm 的煤粉作为实验样品,工业分析和元素分析结果如表 1 所示。

表 1 煤样的工业分析和元素分析
Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal samples

煤样	工业分析/%				元素分析/%				
	水份 M_{ad}	灰分 A_{ad}	挥发份 V_{ad}	固定碳 FC_{ad}	C	H	O	N	S
烟煤 FJB	1.12	9.65	20.54	68.69	81.12	2.95	1.99	1.14	0.76
提质煤	1.87	7.71	17.16	73.26	60.76	2.76	13.87	0.64	0.19

混合样品按照提质煤配入比为 20%、40%、60%、80% 进行混合搭配。煤粉的混合方式为干混碾磨 10 min。对参比煤粉也要按照上述过程进行处理,保证不同煤样处理过程相同。

1.2 实验装置与步骤

采用德国耐驰公司综合热分析仪公司生产的 STA409PC 型综合热分析仪进行燃烧试验。反应器直径为 60 mm,反应气氛为空气,两坩埚内径为 6 mm。取 3.5 mg 样品均匀平铺于坩埚内,初始温度为室温,分别以 10、15、20 ℃/min 的升温速率升至 900 ℃,气体流量为 100 ml/min。

2 实验结果与分析

2.1 提质煤和烟煤单独燃烧 TG/DTG 曲线分析

图 1 为提质煤和烟煤在升温速率 20 ℃/min 条件下单独燃烧的 TG 和 DTG 曲线。提质煤与烟煤 FJB 在加热过程中 TG 和 DTG 曲线形状较为相似,表明两者的燃烧过程较为相近。加热温度从室温升到设定温度,都要经过水分蒸发、碳氢化合物以挥发份的形式逐渐析出并着火点燃固定碳,或是固定碳与挥发份同时着火。从曲线上看,煤粉燃烧各个阶段是交叉进行的,没有明显的分界线,燃烧阶段 DTG 曲线都是一个单独的大峰。

对比 DTG 曲线形状可以得到,虽然两者都是单峰型,但提质煤的 DTG 曲线峰型比烟煤的 DTG 曲线峰型尖且窄。这说明提质煤在较烟煤更短的时间内完成了剧烈燃烧过程。虽然提质煤经过低温干馏处理,挥发份部分脱除,且低于所用烟煤挥发份,但提质煤的燃烧着火速率仍要快于所用烟煤。同时,提质煤 TG 曲线的最终拐点温度要早于烟煤的拐点温度,说明提质煤的燃烧过程结束温度要低于所用烟煤燃烧结束温度。从这一方面来看,提质煤的燃烧性要优于所用的烟煤燃烧性。如图 2、图 3 所示,烟煤 FJB 呈石头状,没有明

显的孔隙,而提质煤则呈现出大量的多孔和沟槽状。提质煤的形貌特征更有助于燃烧过程的氧煤接触和气体产物的析出,燃烧过程动力学条件更为优越,这是造成提质煤燃烧性要优于烟煤 FJB 的重要因素之一。

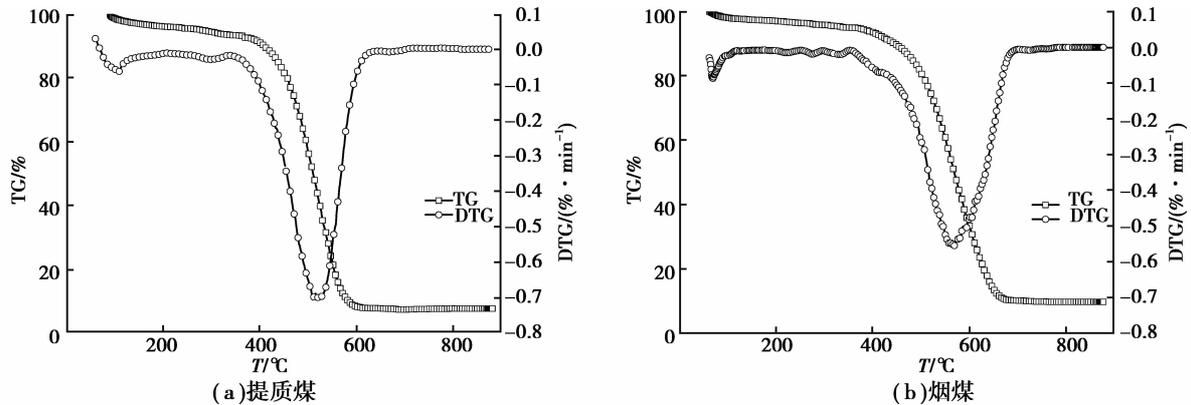


图 1 提质煤和烟煤单独燃烧的 TG/DTG 曲线

Fig.1 TG/DTG curves of upgraded low rank coal and bituminous coal

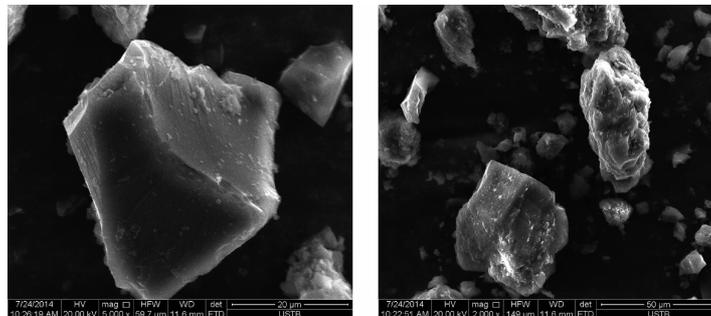


图 2 烟煤 FJB 的形貌表征

Fig.2 The morphology characterization of bituminous coal FJB

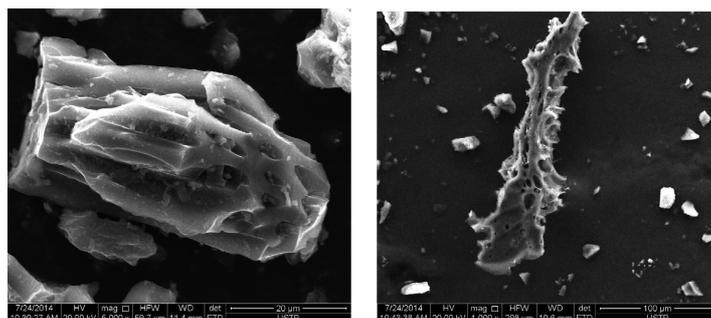


图 3 提质煤的形貌表征

Fig.3 The morphology characterization of upgraded low rank coal

2.2 提质煤与烟煤不同比例混合燃烧 TG/DTG 曲线分析

图 4 为提质煤添加比例为 80%、60%、40%、20% 的混煤,100% 提质煤和 100% 烟煤 FJB 时的 TG 和 DTG 曲线。配加不同比例的提质煤后,混煤的 TG 曲线形状与单煤的相似,表明不同混煤的燃烧过程基本相似。但随着提质煤配比的增加,混煤 TG 曲线逐渐向左移动,斜率不断变陡,并逐渐向 100% 提质煤的 TG 曲线靠拢。不同提质煤配比量条件下,混煤的 DTG 曲线峰均表现出大的单峰型,属于非均相燃烧。随着提质煤的配比量的增加,混煤 DTG 曲线逐渐向左移动,峰型逐渐变窄。同时,随着提质煤配比量的增加,曲线峰值的绝对值先减小后增大。从图 4 中可以定性分析得到,随着提质煤配比量的增加,混煤的挥发份虽然逐渐降低,但混煤的燃烧性却逐渐变好,且燃烧效果逐渐与 100% 提质煤靠近。这表明煤粉燃烧性不仅与挥发份

有很大的关系,还与其自身结构有着密切关系。

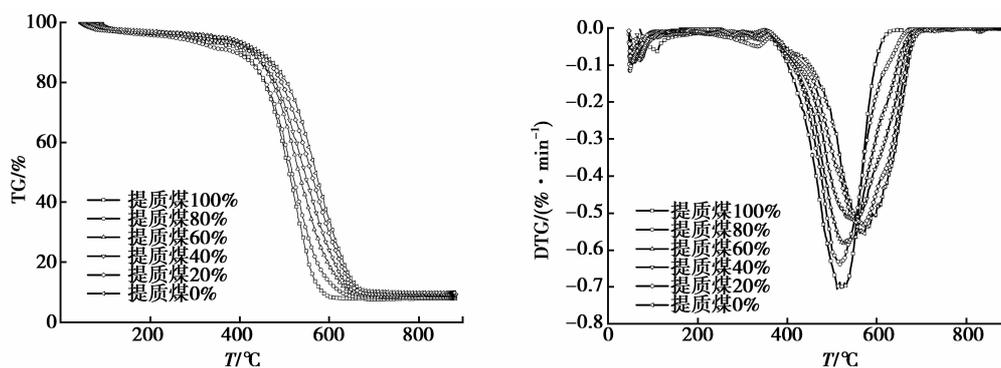


图 4 提质煤和烟煤 FJB 混合燃烧的 TG/DTG 曲线

Fig.4 TG/DTG curves of blending coal combustion

2.3 提质煤与烟煤混合燃烧特性分析

为了定量描述煤粉燃烧特性,众多学者^[14-16]基于煤粉燃烧过程提出了许多燃烧特性参数,包括着火温度、可燃指数、稳燃指数和综合燃烧特性指数等。文中在研究不同提质煤配比条件下混煤的燃烧特性时,采用常用的着火温度(T_i , °C)、燃尽温度(T_f , °C)、可燃指数(C , %/(min·°C²))、综合燃烧特性指数(S_N , %²/(min²·°C³))定量评价。

文中采用常用的 TG-DTG 法来确定着火温度^[17]。采用可燃指数 C 表示混合煤燃烧前期的反应能力。 C 值越大,表示煤样在前期的燃烧性越好,为

$$C = \frac{W_{\text{mean}}}{T_i^2}, \quad (1)$$

式中, W_{mean} 表示平均燃烧速率,%/min。

采用综合燃烧特性指数 S_N 评价煤样的综合燃烧特性。综合燃烧特性指数 S_N 表征煤的综合燃烧性能, S_N 值越大,煤的燃烧特性越佳。

$$S_N = \frac{W_{\text{max}} \cdot W_{\text{mean}}}{T_i^2 T_f}, \quad (2)$$

式中: W_{max} 为最大燃烧速率,%/min; W_{mean} 为平均燃烧速率,%/min; T_i 为燃尽温度,°C; T_f 为着火温度,°C。

表 2 混煤燃烧的特性参数

Table 2 Combustion characteristic parameters of blending coals

样品	T_i /°C	T_f /°C	T_{max} /°C	W_{max} / (%·min ⁻¹)	W_{mean} / (%·min ⁻¹)	C / [10 ⁻⁵ %/(min·°C ²)]	S_N / [(10 ⁻⁷ % ² /(min ² ·°C ³))]
提质煤 100%	454	710	511	14.096	5.656	2.74	5.45
提质煤 80%	457	709	527	13.268	5.618	2.69	5.03
提质煤 60%	457	735	525	11.624	5.324	2.55	4.03
提质煤 40%	455	743	544	10.308	5.024	2.43	3.37
提质煤 20%	476	747	570	10.598	5.358	2.36	3.36
烟煤 100%	495	754	568	11.064	5.406	2.21	3.24

表 2 为计算的单煤及混煤的燃烧特性参数。从表 2 中可以看出,随着提质煤配入比例的减少,混煤开始着火温度逐渐升高,由 454 °C 提高到 495 °C;混煤燃尽温度逐渐升高,由 710 °C 提高到 754 °C。这一变化规律与从 TG 和 DTG 曲线上定性分析得到的结论一致。由于烟煤中含有较高的挥发份,挥发份在挥发过程中吸收的热量多于提质煤,在相同的升温速率条件下,着火温度较提质煤滞后。同时,烟煤中含有较多的灰分,灰分在燃烧后期会对碳质的燃烧起到一定的抑制作用,因此,随着烟煤比例的增加,混煤燃尽温度逐渐升高。

从可燃指数 C 和综合燃烧特性指数 S_N 来看,随着提质煤配入比例的增加,两者均逐渐变大。说明随着提质煤比例的增加,混煤的燃烧效果逐渐变好。对可燃指数与提质煤配比作图,如图 5 所示,可以得到混煤的可燃性与提质煤的配比呈现出线性关系。说明混煤的可燃性主要取决于提质煤的可燃性及配比量,提质煤的配入有

助提高烟煤的初始燃烧效果。从图 5 可以得到,在提质煤比例配入量小于 40% 时,混煤的综合燃烧特性指数与烟煤的相差不大,说明在提质煤配入比例小于 40% 时,混煤的燃烧特性主要是烟煤自身特性起主导作用。当提质煤的配入量继续增大时,混煤综合燃烧特性指数有较大的升高,并逐渐向 100% 提质煤靠近。这一现象表明提质煤配入比例超过 40% 后混煤燃烧特性逐渐受到提质煤燃烧特性影响,综合燃烧效果不断改善。

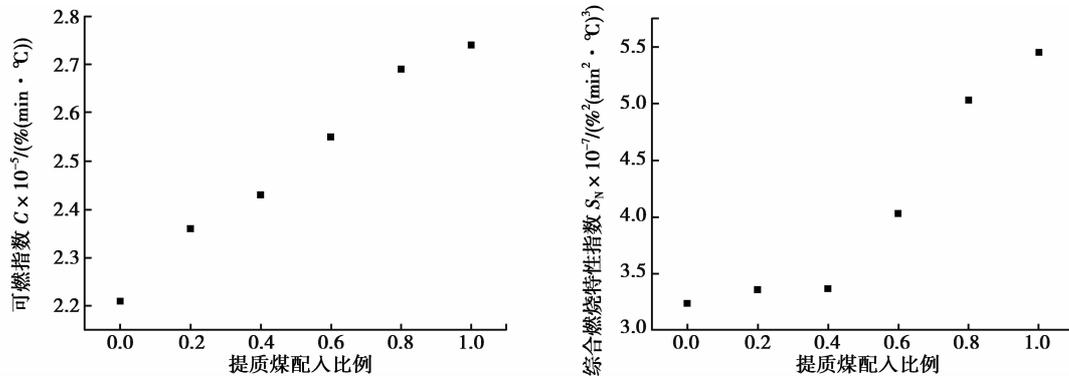


图 5 提质煤与烟煤混燃的特征参数 (C, S_N)

Fig.5 Combustion characteristic parameters of blending coals (C, S_N)

2.4 提质煤与烟煤混合燃烧相互影响规律研究

为了分析提质煤与烟煤混合燃烧过程中是否具有相互影响,对比研究了升温速率 $20\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 条件下的混煤理论加权的失重率、失重速率与实际燃烧过程中的区别。计算方式为

$$W_{\text{cal}} = x_1 \cdot W_1 + x_2 \cdot W_2, \quad (3)$$

$$(\text{d}W/\text{d}t)_{\text{cal}} = x_1 \cdot (\text{d}W/\text{d}t)_1 + x_2 \cdot (\text{d}W/\text{d}t)_2, \quad (4)$$

式中: x_1, x_2 表示混煤中提质煤和烟煤 FJB 的配入比例; W_1, W_2, W_{cal} 分别表示某一时刻提质煤、烟煤和理论加权计算的失重率, %; $(\text{d}W/\text{d}t)_1, (\text{d}W/\text{d}t)_2, (\text{d}W/\text{d}t)_{\text{cal}}$ 分别表示某一时刻提质煤、烟煤 FJB 和理论加权计算的失重速率, %/min。

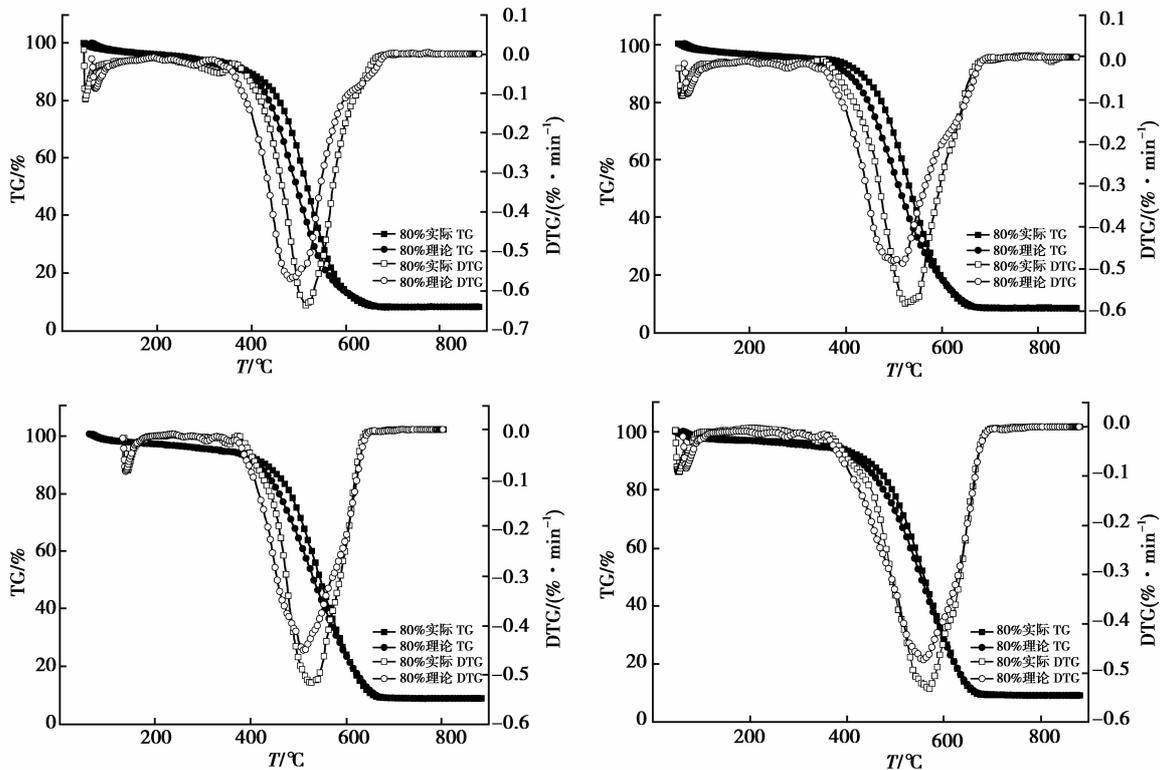


图 6 混燃理论加权计算的 TG 和 DTG 曲线与实际的对比

Fig.6 Comparative analysis of TG/DTG curves between weighted calculation and experiment

从图 6 可以得到,在不同提质煤配入比例情况下,理论加权计算的 TG 曲线都在实验 TG 曲线的左侧,并且随着提质煤配入比例的增加,实验 TG 曲线与理论加权 TG 曲线位置不断拉开。表明随着提质煤比例的增加混合燃烧反应过程较理论加权过程相比逐渐向高温区移动,两者相互作用效果逐渐明显。图 6 中实验 DTG 曲线位于理论加权计算的 DTG 曲线的右下方,且峰型较理论加权计算的 DTG 曲线峰型尖而窄。随着提质煤配入比例的增加,两者的位错越来越大。DTG 曲线的形状和位置变化情况,一方面映证了由 TG 曲线所反映的规律,即随着提质煤配入比例的增加,混煤剧烈燃烧过程较理论加权计算的向高温区移动;另一方面表明提质煤与烟煤混合后在更短的时间内完成燃烧过程,燃烧过程激烈程度要高于理论加权计算值。

研究表明^[18-19],煤粉燃烧行为可以通过 DTG 曲线的形状、位置参数来进行定量的表征。一般情况下用峰值温度(T_{\max} , °C)、峰值高度(H , %/min)和峰的半高宽($W_{1/2}$, °C)这 3 个参数来表征 DTG 曲线。峰值温度越低、峰值高度越高和峰的半高宽越窄表明该煤样的燃烧过程越激烈。为了定量研究提质煤和实验所用烟煤 FJB 混合后,两者之间是否具有促燃效果,定义混燃相互作用因子 K 为

$$K = \frac{H_{\text{exp}} \cdot W_{1/2, \text{cal}} \cdot T_{\max, \text{cal}}}{H_{\text{cal}} \cdot W_{1/2, \text{exp}} \cdot T_{\max, \text{exp}}}, \quad (5)$$

式中,下标 cal 表示理论加权计算获得值,exp 表示实验 DTG 曲线获得值。若 K 值大于 1 表明提质煤与实验用烟煤 FJB 混燃过程中,两者之间具有相互促进作用;若 K 值等于 1 表明两者之间既不相互促进也不相互抑制;若 K 值小于 1 表明两者之间具有相互抑制作用。图形处理数据及混燃相互作用因子 K 值的计算结果见表 3 所示。

表 3 提质煤与烟煤混燃相互作用因子计算结果
Table 3 Interacting factors of blending coal combustion

提质煤配入比例	峰值温度 $T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	峰的半高宽 $W_{1/2}/^{\circ}\text{C}$	峰值 $H/(%/min)$	混燃相互作用因子 K 值
80%-exp	571	155	0.531 8	1.29
80%-cal	559	182	0.472 5	
60%-exp	543	158	0.515 5	1.36
60%-cal	525	195	0.450 8	
40%-exp	523	131	0.552 2	1.31
40%-cal	517	153	0.486 9	
20%-exp	514	106	0.627 0	1.22
20%-cal	480	126	0.570 3	

表 3 中的计算结果显示不同提质煤配入比例情况下,混煤燃烧相互作用因子 K 值均大于 1,表明提质煤与实验用烟煤 FJB 混合后,对两者燃烧过程均有相互促进作用,定量的分析结果与 DTG 曲线和 TG 曲线的定性分析结果是一致的。对于两者的相互作用机理还有待进一步深入研究。

2.5 提质煤与烟煤混合燃烧动力学参数分析

煤粉在加热燃烧过程中,反应内容不断变化,热重过程中的活化能值也在不断变化,因此,对单一失重曲线进行考察很难得到活化能在反应进程中的变化规律。一般认为同一反应体系在相同失重率时反应总是相同的,众多学者研究出新的动力学模型,用来表征反应过程中活化能变化过程^[20-22]。文中采用 DAEM 模型研究提质煤与烟煤混合燃烧动力学过程。DAEM 模型计算时需要至少 3 种升温速率下的燃烧曲线,因此,实验设计了 10、15、20 °C/min 的升温速率。通过 DAEM 模型计算,不仅可以得到混合燃烧活化能的平均值,同时还可以得到整个燃烧过程中的活化能变化趋势。

DAEM 模型基于两点假设:无限平行反应和活化能分布^[23-24]。基于这两点假设混煤燃烧过程可以近似认为是一阶动力学反应,则混煤的燃烧过程可以描述为

$$\frac{dv}{dt} = \frac{d(\Delta v)}{dt} = k_0 e^{-E/RT} (\Delta V^* - \Delta V), \quad (6)$$

式中, v 为任意时刻 t 时已燃烧的可燃基的百分量, ΔV^* 为活化能在 E 至 $E + \Delta E$ 区间内的可燃基百分量, ΔV 为任意时刻 ΔV^* 中燃烧的可燃基百分含量。在热重程序升温下, 有 $T = T_0 + ht$, 即 $h = \frac{dT}{dt}$, 移项采用阶跃近似函数整理得

$$\ln\left(\frac{h}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{k_0 R}{E}\right) - \ln[-\ln(1 - \alpha)] - \frac{E}{R} \frac{1}{T}, \quad (7)$$

式中: α 为燃烧百分率, %; h 为升温速率, $^{\circ}\text{C}/\text{min}$; k_0 为指前因子, E 为燃烧百分率对应的活化能, kJ/mol ; R 为普适气体常数, 其值为 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; 通过做 $\ln\left(\frac{h}{T^2}\right) - \frac{1}{T}$ 直线, 可以从该直线的斜率和截距求的该燃烧百分率下对应的活化能和指前因子。图 7 是以 DAEM 模型为基础绘制计算确定煤粉燃烧活化能时求得的 $\ln\left(\frac{h}{T^2}\right)$ 与 $\frac{1}{T}$ 之间的线性关系。

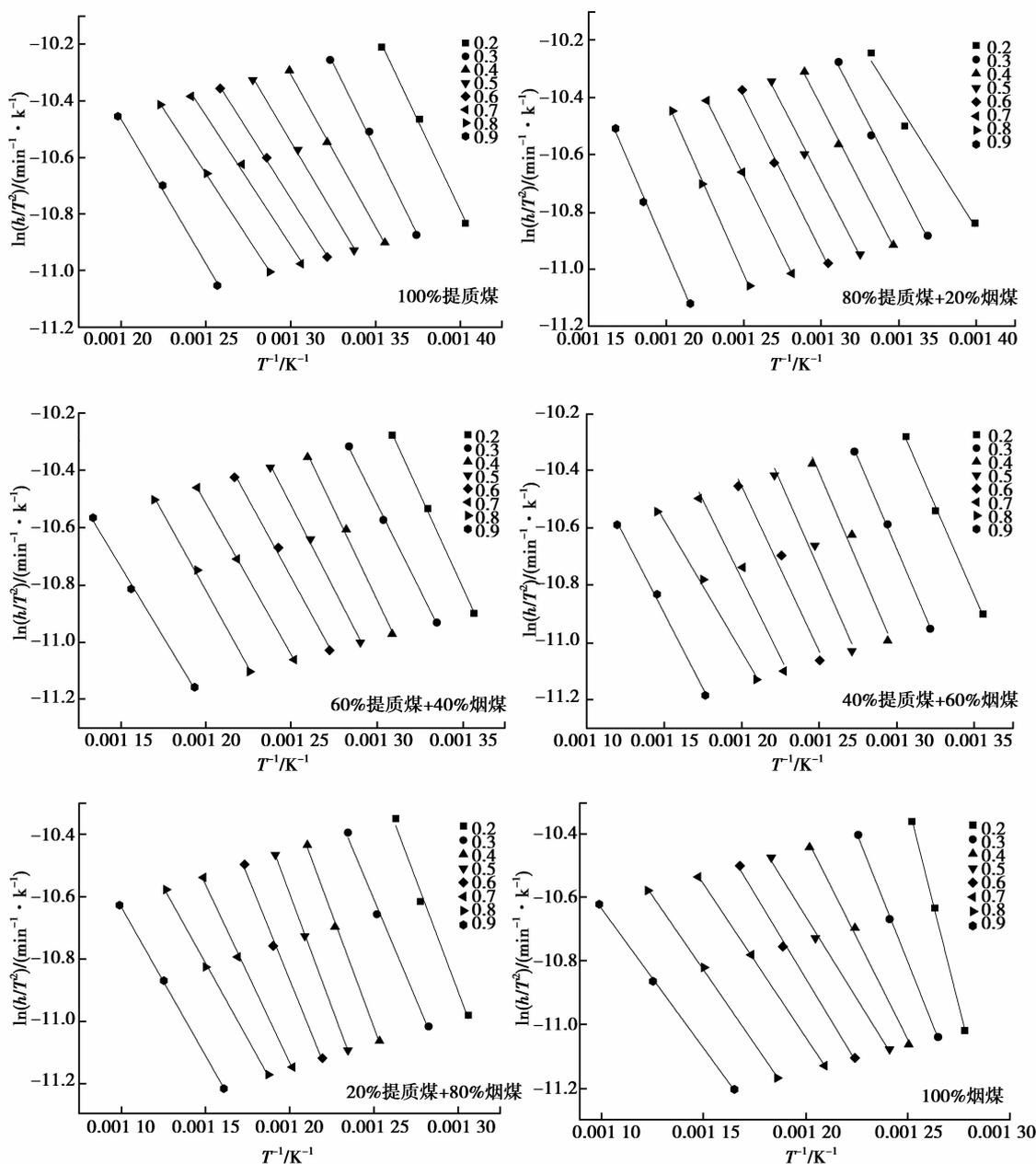


图 7 $\ln(h/T^2)$ 与 $1/T$ 之间的线性关系

Fig.7 Linear relation between $\ln(h/T^2)$ and $1/T$

采用 DAEM 的方法计算了转化率 α 在 $[0.2, 0.9]$ 的活化能, 如表 4 所示。从表 4 可以得到, 活化能 E_a 具有很好的线性相关系数, R^2 值在 $0.952\ 5 \sim 0.999\ 9$ 之间, 证明结果是可靠的。提质煤的平均活化能 ($86.92\ \text{kJ/mol}$) 要小于实验选用的烟煤 FJB 的平均活化能 ($107.55\ \text{kJ/mol}$), 即提质煤的燃烧反应活性要好于烟煤 FJB 的燃烧反应活性。

随着提质煤配入比例的减少, 混煤的平均活化能逐渐增大。当提质煤配入比例由 80% 减少至 20% 的过程中, 计算得到的混煤平均活化能依次为 90.34 、 94.58 、 96.03 、 $104.40\ \text{kJ/mol}$, 混煤燃烧反应活性逐渐降低, 这与之前通过燃烧特性指数所得到规律是一致的。

表 4 DAEM 模型分析不同失重率下的活化能
Table 4 Activation energy under different weightlessness ratio calculated by DAEM

提质煤 添加比例/%	α	$E/$ ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	R^2	提质煤 添加比例/%	α	$E/$ ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	R^2
100	0.2	105.00	0.995 3	40	0.2	103.31	0.997 0
	0.3	101.21	0.994 6		0.3	105.65	0.998 0
	0.4	89.55	0.998 9		0.4	105.72	0.960 3
	0.5	83.93	0.996 5		0.5	102.38	0.961 7
	0.6	78.53	0.998 4		0.6	95.84	0.952 5
	0.7	76.10	0.991 6		0.7	91.35	0.964 7
	0.8	76.19	0.999 5		0.8	76.54	0.990 5
	0.9	84.89	0.995 6		0.9	87.49	0.994 7
	均值	86.92			均值	96.03	
80	0.2	71.98	0.970 9	20	0.2	119.39	0.981 9
	0.3	87.16	0.991 8		0.3	106.88	0.989 6
	0.4	87.59	0.996 8		0.4	121.55	0.997 1
	0.5	87.42	0.993 9		0.5	121.18	0.999 7
	0.6	90.37	0.994 0		0.6	110.86	0.992 3
	0.7	91.70	0.999 9		0.7	95.12	0.996 9
	0.8	101.74	0.997 0		0.8	80.90	0.997 5
	0.9	104.76	0.994 3		0.9	79.35	0.999 6
	均值	90.34			均值	104.40	
60	0.2	107.92	0.998 6	0	0.2	212.54	0.999 1
	0.3	99.00	0.998 1		0.3	134.96	0.998 5
	0.4	103.86	0.994 0		0.4	106.59	0.993 4
	0.5	96.44	0.997 0		0.5	86.24	0.994 2
	0.6	90.31	0.992 4		0.6	88.74	0.994 3
	0.7	87.77	0.999 9		0.7	80.28	0.999 9
	0.8	89.45	0.995 5		0.8	77.75	0.998 6
	0.9	81.88	0.994 3		0.9	73.26	0.999 0
	均值	94.58			均值	107.55	

3 结 论

文中系统研究了提质煤与高炉喷吹烟煤混合燃烧的特性规律及相互影响程度, 并对燃烧过程活化能采用 DAEM 模型进行计算, 得出以下结论:

1) 提质煤与烟煤 FJB 单独燃烧的 TG 和 DTG 曲线差异较大,定量分析可以得到提质煤的燃烧性要优于烟煤 FJB。提质煤多孔状结构为其燃烧过程提供了优越的动力学条件,是造成其燃烧性较好的主要因素之一。

2) 随着提质煤配入比例的增加,混煤的 TG 和 DTG 曲线逐渐向提质煤单独燃烧的 TG 和 DTG 曲线方向移动,混煤的燃烧速率逐渐变快。

3) 通过燃烧特性指数的定量研究表明,随着提质煤配入比例的增加,混煤开始着火温度逐渐降低,可燃指数和综合燃烧特性指数逐渐增大,混煤的燃烧性逐渐变好。

4) 通过实验 TG、DTG 曲线与理论加权平均的 TG、DTG 曲线的对比,研究了两种煤混合后燃烧的相互作用规律,并定义了混燃相互作用因子 K 。结果表明不同提质煤配比条件下混煤的燃烧相互作用因子 K 值均大于 1,两者混合后对燃烧过程具有较好的促进作用。

5) 采用 DAEM 的方法计算得到不同提质煤配入比例条件下混煤燃烧的平均活化能,结果表明,提质煤能够降低混煤燃烧活化能。提质煤配入比例越高,混煤反应活性越好,与通过燃烧特性指数所得的规律一致。

参考文献:

- [1] 申勇,王永挺,关红兵.高炉生产中喷煤降焦优化措施综述[J].矿冶,2009,18(1):64-66.
SHEN Yong, WANG Yongting, GUAN Hongbing. Summary on optimizing measure with pulverized coal injection coke suppression in blast furnace production[J]. Mining & Metallurgy, 2009, 18(1): 64-66.
- [2] 徐朝芬.烟煤与无烟煤混燃特性的热分析试验研究[J].华北电力大学学报,2006,32(6):29-32.
XU Chaofeng. Study on thermoanalysis experiment of combustion characteristics of blended coal[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 32(6): 29-32.
- [3] 欧阳曙光,许杰,吴天礼,等.无烟煤对高炉喷吹用混合煤燃烧性的影响[J].武汉科技大学学报:自然科学版,2013,36(2):108-111.
OUYANG Shuguang, XU Jie, WU Tianli, et al. Effect of anthracite on the combustion performance of blast furnace injection coal[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2013, 36(2): 108-111.
- [4] 王永征,路春美,刘汉涛,等.山东动力用煤掺混燃烧特性的热分析[J].山东大学学报:工学版,2006,36(2):26-31.
WANG Yongzheng, LU Chunmei, LIU Hantao, et al. Thermal analysis on the combustion characteristics of the blended coals in the power plant in Shandong Province[J]. Journal of Shandong University, 2006, 36(2): 26-31.
- [5] 王国忠,吴生来.无烟煤与烟煤混燃特性试验研究[J].热力发电,2009,38(3):61-65.
WANG Guozhong, WU Shenglai. Test study on mixedly burning characters of bituminous coal with anthracite coal[J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(3): 61-65.
- [6] 邢相栋,张建良,任山,等.混煤燃烧特性及动力学分析[J].煤炭转化,2012,35(3):43-47.
XING Xiangdong, ZHANG Jianliang, REN Shan, et al. Study on the combustion characteristics and kinetic of blending coal[J]. Coal Conversion, 2012, 35(3): 43-47.
- [7] 孙佰仲,王擎,申朋宇,等.油页岩干馏残渣与烟煤混合燃烧试验研究[J].煤炭学报,2010(3):476-480.
SUN Baizhong, WANG Qing, SHEN Pengyu, et al. Experimental investigation on combustion characteristics of oil shale semi-coke and bituminous coal blends[J]. Journal of China Coal Society, 2010(3): 476-480.
- [8] 焦克新,张建良,邢相栋,等.生物质焦促进煤粉燃烧动力学分析[J].热力发电,2013(10):70-77.
JIAO Kexin, ZHANG Jianliang, XING Xiangdong, et al. Study on combustion kinetics of coal promoted by biomass char[J]. Thermal Power Generation, 2013(10): 70-77.
- [9] 黄海珍,陈海波,苏俊林,等.煤与生物质混合燃烧特性及动力学分析[J].节能技术,2007,25(1):26-29.
HUANG Haizhen, CHENG Haibo, SU Junlin, et al. Combustion Characteristics and Kinetic Analysis of Coal-biomass Blends[J]. Energy Conservation Technology, 2007, 25(1): 26-29.
- [10] 郝娟,张洪,王兴涌,等.煤粉与废线路板混合燃烧特性[J].中国矿业大学学报,2012,41(3):493-497.
HAO Juan, ZHANG Hong, WANG Xingyong, et al. Combustion characteristics of the mixture of coal powder and printed circuit board scraps[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(3): 493-497.
- [11] 段锋,从胜全,双伟,等.市政污泥与不同烟煤混合燃烧特性[J].环境工程学报,2012,6(8):2865-2869.
DUAN Feng, CONG Shenquan, SHUANG Wei, et al. Co-combustion characteristics of municipal sewage sludge and

- different bituminous coals[J].Chinese Journal of Environmental Engineering,2012,6(8):2865-2869.
- [12] Chen W H, Wu J S. An evaluation on rice husks and pulverized coal blends using a drop tube furnace and a thermogravimetric analyzer for application to a blast furnace[J].Energy,2009,34(10):1458-1466.
- [13] Ren S,Zhang J.Thermogravimetric analysis of anthracite and waste plastics by iso-conversional method[J].Thermochemica Acta,2013,561:36-40.
- [14] 欧阳德刚,罗安智,朱善合,等.混煤燃烧特性的实验研究[J].工业加热,2009,38(1):17-20.
OUYANG Degang,LUO Anzhi,ZHU Shanhe,et al.Study on combustion property of coal blend[J].Industrial Heating,2009,38(1):17-20.
- [15] 高正阳,方立军,周健,等.混煤燃烧特性的热重试验研究[J].动力工程,2002,22(3):1764-1767.
GAO Zhengyang,FANG Lijun,ZHOU Jian,et al.Research on The Combustion Performance of Blended Coal in Thermal-Balance[J].Power Engineering,2002,22(3):1764-1767.
- [16] 黄福幸,杨薇.细煤粉燃烧特性的热分析研究[J].煤炭工程,2011(10):103-106.
HUANG Fuxing,YANG Wei.Study on thermal analysis on combustion features of pulverized coal[J].Coal Engineering,2011(10):103-106.
- [17] 贺鑫杰,张建良,祁成林,等.催化剂对煤粉燃烧特性的影响及动力学研究[J].钢铁,2012,47(7):74-79.
HE Xinjie,ZHANG Jianliang,QI Chenglin,et al.Kinetic Analysis and Effects of Catalysts on Combustion Characteristic of Pulverized Coal[J].Iron and Steel,2012,47(7):74-79.
- [18] 王擎,王海刚,孙佰仲,等.油页岩及其半焦混烧特性的热重试验研究和动力学分析[J].化工学报,2007,58(11):2882-2888.
WNAG Qing,WANG Haigang,SUN Baizhong,et al.Thermo-gravimetric study and kinetic analysis of blended combustion characteristics of oilshale and sem-icoke[J].Journal of Chemical Industry and Engineering (China),2007,58(11):2882-2888.
- [19] 孙佰仲,王擎,李少华,等.油页岩及其半焦混合燃料燃烧特性试验研究[J].中国电机工程学报,2006,26(20):108-112.
SUN Baizhong,WANG Qing,LI Shaohua,et al.Experiment study on combustion performance of oilshale and semicoke blends[J].Proceeding of the CSEE,2006,26(20):108-112.
- [20] 孙庆雷,李文,陈皓侃,等.DAEM 和 Coats-Redfern 积分法研究煤半焦燃烧动力学的比较[J].化工学报,2003,54(11):1598-1602.
SUN Qinglei,LI Wen,CHEN Haokan et al.Comparison between DAEM and Coats-Redfern method for combustion kinetics of coal char[J].Journal of Chemical Industry and Engineering(China),2003,54(11):1598-1602.
- [21] Soria-Verdugo A,Garcia-Hernando N,Garcia-Gutierrez L M,et al.Analysis of biomass and sewage sludge devolatilization using the distributed activation energy model[J].Energy Conversion and Management,2013,65:239-244.
- [22] Soria-Verdugo A,Garcia-Gutierrez L M,Blanco-Cano L,et al.Evaluating the accuracy of the Distributed Activation Energy Model for biomass devolatilization curves obtained at high heating rates[J].Energy Conversion and Management,2014,86:1045-1049.
- [23] 刘旭光,李保庆.分布活化能模型的理论分析及其在半焦气化和模拟蒸馏体系中的应用[J].燃料化学学报,2001,29(1):54-59.
LIU Xuguang,LI Baoqing.Theoretical elucidation of distributed activation energy model and its applications in char gasification and simulation diatililation systems[J].Journal of Fuel Chemistry and Technology (China),2001,29(1):54-59.
- [24] 刘旭光,李文,李保庆.恒温条件下 DAEM 模型新型理论分析及其应用[J].燃料化学学报,2002,30(3):214-217.
LIU Xuguang,LI Wen,LI Baoqing.A new theoretical approach to the diatributed activation energy model under isothermal conditions and its appliction[J].Journal of Fuel Chemistry and Technology (China),2002,30(3):214-217.