

油田废液煤浆的燃烧特性及反应动力学分析

向轶¹ 庞德新² 周建平² 林森明²

(1. 浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室 浙江 杭州 310027; 2. 新疆油田公司工程技术公司 新疆 克拉玛依 834000)

摘要: 采用热重法分别研究了油田废液煤浆、普通水煤浆的着火燃烧特性,并根据实验结果确定了一系列燃烧特性指数,反应动力学参数则用反应级数模型($n=3$)求得。结果显示:油田废液煤浆、普通水煤浆的燃烧TG(热重曲线)都会经历失水阶段、质量稳定阶段、着火燃烧阶段和燃尽阶段;其DTG(微商热重曲线)都有两个失重峰,分别代表快速失水过程、挥发分和固定碳的燃烧反应过程;油田废液煤浆的着火温度、燃尽温度及燃烧活化能均低于普通水煤浆,其它各项燃烧特性指数也都优于后者,由此说明油田废液中的碱金属离子对水煤浆的燃烧性能有明显促进作用。

关键词: 油田废液;水煤浆;热重曲线;燃烧特性指数;反应动力学参数

中图分类号: TD313; TD727 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.07.014

引言

随着采油技术的发展以及国内油田开发的加快,油田废液的产生量逐渐增多,导致废液处理费用大幅上升,因此寻找高效清洁的油田废液处理方法势在必行。油田废液中的含油量较少,且包含大量的悬浮物(粘土颗粒、细砂和结垢等)、细菌和胶状物等,现阶段国内的处理办法主要是“隔油—浮选(或旋流除油)—过滤”,此工艺可基本除去废液中的油类物质和悬浮物,以达到回注水的要求^[1];但该工艺只适合普通的含油废液,对于某些特殊的油田废液,比如稠油开采产生的废液,该方法处理后COD值达标难度较大^[2],且处理成本相对高。因此需要针对此类废液的特点,开发相应的油田废液处理新工艺。

水煤浆是一种新型的代油燃料,具有燃烧效率高、污染物排放低等优点,它是由60%~70%的煤粉、30%~40%的水以及大约0.5%的添加剂混合

而成的两相流浆体^[3]。随着水煤浆技术的发展,利用废液制浆进行燃烧,已成为油田废液清洁资源化利用的一条新途径。

油田废液制备水煤浆不仅是对废物的资源化利用,而且废液中的碱金属离子对水煤浆的燃烧还有催化作用。研究者们在该领域做了大量的研究:兰泽全等将造纸黑液掺混煤制备水煤浆并燃烧^[4],结果显示由于Na离子的催化、助燃作用,黑液水煤浆着火、燃尽更容易,污染物排放量更低;魏砾宏等研究了碱金属盐对煤粉燃烧特性的影响^[5],发现Na、K等碱金属离子对挥发分析出、固定碳燃烧等有催化作用,可降低煤样高温燃烧区的表观活化能,提高燃烧反应速度;贺业光等将KOH作为秸秆与煤混合燃烧的添加剂^[6],发现碱金属K的催化作用使混合燃烧的活化能降低了10 kJ/mol。这些研究结果都表明Na、K等碱金属离子能促进煤的燃烧,因此本文尝试利用油田废液制浆并燃烧,既节约了清洁水,又有效处理了废弃物,变废为宝,同时也提高了水煤浆的燃烧效率,为油田废液的高效清洁利用提供新途径,对煤化工等行业的废液利用也有参考价值。

1 实验样品、装置与方法

本实验分别选取新疆油田公司提供的徐矿3号和徐矿6号两种煤样,其工业分析和元素分析如表1所示,两种煤均经过破碎、干燥处理,并使用标准筛将粒径控制在200目左右。分别采用新疆油田提供的油田采出废液以及实验室的去离子水制浆,浓度控制在60%左右,得到四种煤浆样品,即徐矿3号油田废液煤浆(以下简称“徐矿3号COWS”)、徐矿3号水煤浆(以下简称“徐矿3号CWS”)和徐矿

收稿日期: 2015-10-22; 修订日期: 2015-11-18

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2016YFB0600505)

作者简介: 向轶(1991-),男,重庆人,浙江大学硕士研究生。

6号油田废液煤浆(以下简称“徐矿6号COWS”)、徐矿6号水煤浆(以下简称“徐矿6号CWS”)四种煤浆的工业分析及元素分析如表2所示。利用ICP(即原子发射光谱仪)对油田废液的离子成分进行分析,结果如表3所示,可以发现Na、K等碱金属离子的含量明显高于大多数其它离子。

使用瑞士梅特勒—托利多公司的TGA/SD-

TA851e热重分析仪进行热天平实验,该热重分析仪温度最高可达1600℃,升温速率最高可达100℃/min,称重的解析度为0.1μg,灵敏度为0.01μg;实验气氛为空气,并使用浮子流量计控制流量;样品放置在氧化铝坩埚中,各个工况的样品质量均保持在10mg左右,具体设置如表4所示。

表1 两种煤样的工业分析和元素分析

Tab. 1 Industrial and elementary analysis of two kinds of coal sample

样品	工业分析/%				$Q_{b,ad}/$	$Q_{b,ad}/$	元素分析/%				
	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$	C_{ad}	H_{ad}	N_{ad}	$S_{t,ad}$	O_{ad}
徐矿3号	7.05	16.80	36.01	40.14	24 283	5 807	59.18	4.73	1.11	0.48	10.65
徐矿6号	8.22	18.04	34.32	39.42	22 757	5 442	56.29	4.56	1.04	0.47	11.38

表2 4种煤浆的工业分析和元素分析

Tab. 2 Industrial and elementary analysis of four kinds of coal slurry

样品	工业分析/%				$Q_{net,ar}/$	$Q_{net,ar}/$	元素分析/%				
	M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	$S_{t,ar}$	O_{ar}
徐矿3号COWS	40.75	11.01	22.42	25.82	13 787	3 298	36.87	1.99	0.62	0.32	8.45
徐矿3号CWS	39.07	11.96	22.83	26.14	13 596	3 253	36.42	2.31	0.61	0.31	9.32
徐矿6号COWS	41.80	11.97	21.29	24.94	12 687	3 035	34.86	2.07	0.83	0.41	8.06
徐矿6号CWS	40.51	12.10	21.97	25.42	12 630	3 021	34.95	2.41	0.60	0.34	9.09

表3 油田废液中各离子的浓度分析

Tab. 3 Concentration analysis of various ions in the waste liquid in oil fields

元素	Na	K	Ca	Fe	Mg	Al
浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1 651.625	51.942	120.912	1.108	4.751	0.253

表4 实验工况与目的

Tab. 4 Test conditions and objectives

样品	样品量	气体流量	升温速率	升温区间	气氛	实验目的
徐矿3号COWS 徐矿3号CWS 徐矿6号COWS 徐矿6号CWS	10/mg	$60/\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$	$20/^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$	$20^\circ\text{C} \sim 1\ 100^\circ\text{C}$	空气	分析油田废液煤浆、普通水煤浆的燃烧特性

2 实验结果及分析

2.1 TG-DTG 曲线特性

在实验工况下,对徐矿3号COWS和徐矿3号CWS、徐矿6号COWS、徐矿6号CWS四种样品分

别进行了热重实验,得到的燃烧TG-DTG曲线如图1、图2所示。

分析各样品的TG曲线,发现四种煤浆在实验初期都有一个大幅的失重阶段,这是因为水煤浆含水率 w 很高(40%左右),会在前期($<200^\circ\text{C}$)有一个快速失水的过程,该阶段煤的转化率不会发生变

化;之后会经历一个质量较稳定的阶段;随着温度的升高,样品开始继续失重,挥发分析出并着火燃烧,随后点燃固定碳;最终样品中可燃成分燃尽,剩余质量不再变化。

分析各样品的 DTG 曲线,可以明显发现四种煤浆均有两个失重峰,第一个失重峰代表了失水过程;第二个则是由挥发分析出和固定碳燃烧引起的,之后的 DTG 值逐渐趋向于零,最终到达燃尽阶段。

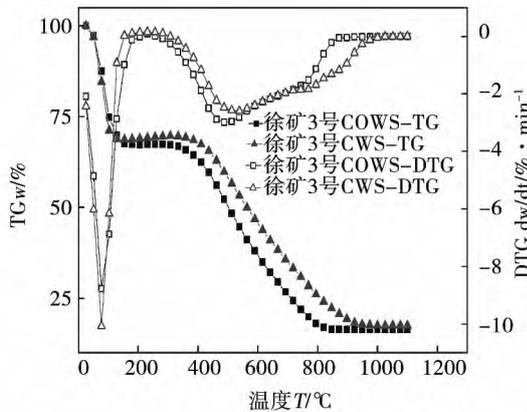


图1 徐矿3号煤浆的TG-DTG曲线

Fig. 1 TG-DTG curves of coal slurry No. 3 in Xu's Mine

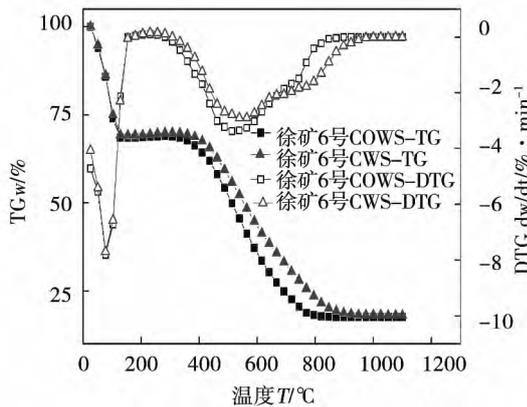


图2 徐矿6号煤浆的TG-DTG曲线

Fig. 2 TG-DTG curves of coal slurry No. 6 in Xu's Mine

2.2 燃烧特性指数的计算

2.2.1 着火温度 T_i 、燃尽温度 T_h 及最大燃烧失重速率点温度 T_{max}

通过热重实验可以获得燃料的着火温度 T_i ,通常采用 TG-DTG 法确定,如图3所示。具体操作是在 DTG 曲线上,过峰值点 A 作垂线与 TG 曲线交于

B 点,过 B 点作 TG 曲线的切线,该切线与失重开始时的平行线相交于 C, C 点对应的温度即为 T_i [7]。

燃尽温度 T_h 取样品中可燃成分燃烧 98% 时所对应的温度。最大燃烧失重速率点温度 T_{max} 即 A 点所对应的温度。

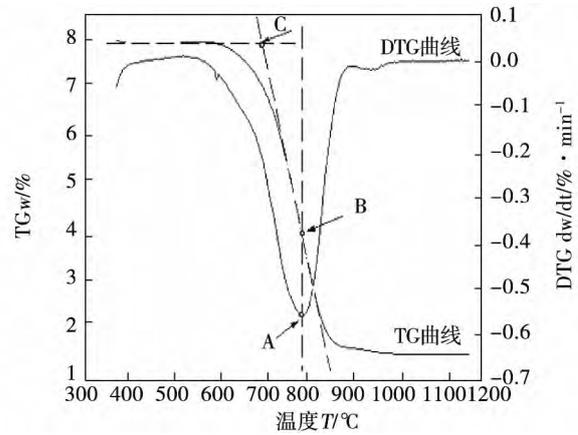


图3 TG-DTG 法定义着火点温度

Fig 3 Ignition temperature defined by using the TG-DTG method

2.2.2 燃烧特性指数

TG-DTG 曲线只能定性地评估样品的部分燃烧特性,此外还需要对 TG-DTG 曲线的特征点进行计算,得出一系列评价燃烧特性的指数 [8-9],从而定量地反映水煤浆整个着火、燃烧和燃尽过程。

(1) 燃烧特性指数 S

燃烧特性指数 $S, K^{-3}/min^2$, 代表样品的综合燃烧特性,值越大说明样品的综合燃烧性能越好。其表达式为:

$$S = \frac{K_{max} \times K_{mean}}{T_i^2 \times T_h} \tag{1}$$

式中: K_{max} —最大燃烧速率, min^{-1} , 其值为 DTG 曲线上的最大失重速率值; K_{mean} —平均燃烧速率, min^{-1} , 指样品从失重开始时刻到结束时刻之间的失重速率平均值。

(2) 可燃性指数 S_w

可燃性指数 $S_w, min^{-1}/K^2$, 代表反应前期达到着火温度后的反应能力,值越大可燃性越好。其表达式为:

$$S_w = K_{max} / T_i^2 \tag{2}$$

(3) 着火稳燃特性指数 R_w

表达式为:

$$R_w = 560/T_i + 650/T_{max} + 0.27 \times K_{max} \tag{3}$$

R_w —着火稳燃特性指数,值越大着火稳定性越好。

(4) 燃尽特性指数 C_b

综合考虑了煤的着火和燃烧稳定性等因素对燃尽的影响,值越大燃尽性能越好。其表达式为:

$$C_b = f_1 \times f_2 / \tau \quad (4)$$

式中: C_b —燃尽特性指数, min^{-1} ; f_1 —初始燃尽率,即着火时煤的转化率,反映了煤的着火特性,值越大可燃性越好; f_2 —后期燃尽率 $f_2 = 0.98 - f_1$,反映了煤中碳的燃尽性能,值越大燃尽性能越好; τ —燃尽

时间, min ,指从燃烧失重开始至达到燃尽温度 T_h 所需的时间。

2.2.3 基于热重的燃烧特性指数分析

各样品的着火温度 T_i 、燃尽温度 T_h 、最大燃烧失重速率点温度 T_{max} 、最大燃烧速率 K_{max} 、平均燃烧速率 K_{mean} 、可燃性指数 S_w 、着火稳燃特性指数 R_w 、燃尽特性指数 C_b 以及综合燃烧特性指数 S 汇总于表 5。

表 5 各样品的燃烧特性指数

Tab. 5 Combustion characteristic indexes of various samples

样品	T_i / K	T_h / K	T_{max} / K	K_{max} / $\% \cdot \text{min}^{-1}$	K_{mean} / $\% \cdot \text{min}^{-1}$	$S_w / 10^{-8} \cdot$ $(\text{min} \cdot \text{K}^2)^{-1}$	R_w	C_b / $10^{-4} \cdot \text{min}^{-1}$	$S / 10^3 \cdot \text{K}^{13}$ $\cdot \text{min}^{-2}$
徐矿 3 号 COWS	657.76	1 196.73	785.86	2.98	1.59	6.89	1.68	18.55	9.15
徐矿 3 号 CWS	683.60	1 247.79	811.31	2.60	1.50	5.56	1.63	10.75	6.71
徐矿 6 号 COWS	678.40	1 180.48	760.67	3.38	1.67	7.34	1.69	27.37	10.38
徐矿 6 号 CWS	690.53	1 217.46	802.44	2.90	1.55	6.08	1.63	15.96	7.74

T_i 是研究燃料燃烧的重要指标,直观地反映了样品的着火特性,它主要受样品中挥发分含量的影响,挥发分越高, T_i 越低。对于同一煤种掺入不同水样制成的浆体,油田废液煤浆的挥发分含量低于普通水煤浆,如表 2 所示,但其 T_i 值却比后者平均降低 18.98 K,这是因为油田废液中的 Na、K 等碱金属离子在煤颗粒表面及孔隙中富集,提高了挥发分的析出、燃烧速率,促进焦炭的生成,由此降低着火温度^[10]。

T_h 直观地反映了水煤浆的燃尽特性,它主要受样品中固定碳含量的影响,固定碳越低, T_h 越低。对于同一煤种制成的两种浆样,油田废液煤浆的 T_h 值比普通水煤浆平均降低 44.02 K, T_{max} 值也比普通水煤浆平均降低 33.61 K,这既是由于其固定碳含量低于后者,如表 2 所示,更是因为油田废液中的碱金属尤其是 Na 离子对固定碳的燃烧有很好的催化作用,提高了燃烧速率,由此将燃尽阶段提前,降低了 T_h 值^[4]。

K_{max} 、 K_{mean} 反映了煤中挥发分析出及着火后的后续燃烧情况,值越大说明燃烧速率越大,尤其是 K_{mean} 表征了水煤浆的总体燃烧速率。对比表中各样品的 K_{max} 、 K_{mean} 值,发现油田废液煤浆总是大于普通水煤浆,这是因为油田废液中富含的碱金属离子除了对固定碳的燃烧有明显的催化作用,还能在燃烧

前期促进煤中残余挥发分的析出,使燃烧能更加剧烈地进行。

对比 S_w 、 R_w 、 C_b 等各项燃烧特性指数可以发现,油田废液煤浆在各项指标上都要更好一些;尤其是综合燃烧特性指数 S 值也明显高于普通水煤浆,表明它的燃烧特性较之普通水煤浆更优,说明了油田废液中的碱金属离子能有效改善水煤浆的燃烧性能。

2.3 燃烧动力学参数的计算

2.3.1 动力学模型

由热重曲线及数据,可得到某一时刻反应的转化率 a 为:

$$a = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_1} \quad (5)$$

式中: m_0 —样品失水结束时的质量, g ; m_1 —反应结束时样品的质量, g ; m —某一时刻样品的质量, g 。

描述动力学问题,一般可采用以下形式的方程^[11]:

$$\frac{da}{dt} = k \cdot f(a) \quad (6)$$

式中: t —时间, min ; k —反应速率常数, min^{-1} ; $f(a)$ —动力学机理函数。

由阿累尼乌斯方程可知:

$$k = k_0 \exp(-E/RT) \quad (7)$$

式中: k_0 —频率因子, min^{-1} ; E —表观活化能, kJ/mol ; R —通用气体常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T —热力学温度 K 。

联合式(5) ~ 式(7), 并由升温速率 $\beta = dT/dt$ 可得:

$$\frac{da}{dT} = \frac{k_0}{\beta} \exp(-E/RT) \cdot f(a) \quad (8)$$

选取反应级数模型作为水煤浆的燃烧机理函数, 则 $f(a) = (1-a)^n$ ($n = 1, 2, 3 \dots$); 由 Coats-Redfern 一级近似^[12], 整理可得:

$$\ln \left[\frac{-\ln(1-a)}{T^2} \right] = \ln \frac{k_0 R}{\beta E} - \frac{E}{RT} \quad (n = 1) \quad (9)$$

$$\ln \left[\frac{1 - (1-a)^{1-n}}{T^2(1-n)} \right] = \ln \frac{k_0 R}{\beta E} - \frac{E}{RT} \quad (n \neq 1) \quad (10)$$

令 $X = 1/T$, $Y = \ln \left[\frac{-\ln(1-a)}{T^2} \right]$ 或

$$\ln \left[\frac{1 - \ln(1-a)^{1-n}}{T^2(1-n)} \right] \quad r_1 = \ln \frac{k_0 R}{\beta E} \quad r_2 = -\frac{E}{R} \quad \text{则式}$$

(9)、式(10)可简化为一次函数:

$$Y = r_1 + r_2 \cdot X \quad (11)$$

由热重实验数据可计算得到 Y 数值, 并对 X 作图, 得到一条曲线, 对曲线进行线性拟合, 得到拟合方程, 根据斜率 r_2 算出表观活化能 E 值, 再由截距 r_1 算出频率因子 k_0 。此种算法也称 Coats-Redfern 积分法。

对于反应级数 n , 假设 n 为 $3/4, 1, 7/6, 5/4, 2, 3, 4, 5$, 代入式(9)、式(10)分别进行计算, 最终取平均相关系数 R 最高的 n 值作为本文中的反应级数。不同 n 值对应的平均 R 值汇总于表 6。由表中数据可见, $n = 3$ 时线性相关度最高, 因此取水煤浆燃烧的反应级数 $n = 3$ 。

表 6 不同反应级数 n 值对应的平均相关系数 R 值

Tab. 6 Average correlation coefficient R values corresponding to various numbers of the reaction order n values

n 值	3/4	1	7/6	5/4	2	3	4	5
平均 R 值	0.962 1	0.970 8	0.975 7	0.977 9	0.989 7	0.990 1	0.985 2	0.977 3

2.3.2 基于热重的燃烧动力学参数分析

表观活化能 E 是使普通分子变为活化分子所需要的最小能量, 它反映了燃料反应活性的高低, E 越小, 燃料的反应活性越高, 就越容易着火燃烧^[13]; 频率因子 k_0 表示活化分子有效碰撞总次数, 值越大说明活化分子间的有效碰撞次数越多, 反应越容易进行, 反应程度也越剧烈^[14]。本实验中反应级数模型的温度范围取着火温度 T_i 到燃尽温度 T_b , 燃烧反应级数 $n = 3$, 各样品的表观活化能 E 、频率因子 k_0 及相关系数 R 如表 7 所示。

表 7 样品的燃烧动力学参数

Tab. 7 Combustion kinetic parameters of the samples

样品	$E/\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	k_0/min^{-1}	相关系数 R
徐矿 3 号 COWS	78.45	41 731.36	0.991 6
徐矿 3 号 CWS	81.73	28 565.86	0.990 1
徐矿 6 号 COWS	90.44	334 814.98	0.991 1
徐矿 6 号 CWS	91.34	170 780.69	0.987 7

由表 7 可知, 对同一煤种制成的浆样, 油田废液煤浆的表观活化能 E 比普通水煤浆平均降低了 2.09 kJ/mol , 频率因子 k_0 也明显大于普通水煤浆,

说明前者更容易着火, 且燃烧反应也更加剧烈, 由此说明了油田废液中的碱金属离子通过降低煤的表观活化能、提高煤中活化分子的碰撞频率来强化其着火燃烧性能。而表中相关系数 R 均非常接近 1, 也说明了反应级数模型 ($n = 3$) 对水煤浆燃烧的拟合度较高。

3 结 论

(1) 利用油田废液与煤掺混制备水煤浆, 既节约了水资源, 又有效减少了污染物的排放, 更能利用废液中碱金属离子的催化作用改善燃烧性能; 同时水煤浆技术在我国已经较为成熟, 因此该技术具有较为广阔的工业应用前景;

(2) 在油田废液煤浆、普通水煤浆的燃烧热重实验中, 对于 TG 曲线, 各样品都会经历失水阶段、质量稳定阶段、着火燃烧阶段和燃尽阶段; 对于 DTG 曲线, 样品的燃烧过程中有两个失重峰, 第一个代表失水过程, 第二个代表挥发分析出和固定碳的着火燃烧过程;

(3) 通过对样品的燃烧热重曲线分析, 发现油田废液煤浆的着火温度 T_i 比普通水煤浆平均降低

了 18.98 K, 燃尽温度 T_b 平均降低了 44.02 K, 且最大燃烧速率 K_{\max} 、平均燃烧速率 K_{mean} 、可燃性指数 S_w 、着火稳燃特性指数 R_w 、燃尽特性指数 C_b 及综合燃烧特性指数 S 均优于普通水煤浆; 同时选取反应级数模型($n=3$)作为水煤浆的燃烧机理函数, 发现油田废液煤浆的燃烧活化能比普通水煤浆平均减小了 2.09 kJ/mol; 由此说明油田废液中富含的 Na、K 等碱金属离子有利于样品挥发分的析出及固定碳的着火燃烧, 对燃烧性能有促进作用。

参考文献:

- [1] 周卫东, 佟德水, 李罗鹏. 油田采出水处理方法研究进展[J]. 工业水处理, 2008, 28(12): 5-8.
ZHOU Wei-dong, TONG De-shui, LI Luo-peng. Advances in the study of the methods for dealing with water produced in oil fields [J]. Industrial Water Treatment, 2008, 28(12): 5-8.
- [2] 李丽, 李萍, 杨旭. 石油废水处理技术[J]. 化工时刊, 2005, 19(2): 59-61.
LI Li, LI Ping, YANG Xu. Petroleum waste water treatment technology [J]. Chemical Industry Times, 2005, 19(2): 59-61.
- [3] 岑可法, 姚强, 曹欣玉等. 煤浆燃烧、流动、传热和气化的理论与应用技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997: 2-3.
CEN Ke-fa, YAO Qiang, CAO Xin-yu, et al. Coal slurry combustion, flow, heat transfer and gasification theory and applied technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997.
- [4] 兰泽全, 曹欣玉, 刘建忠等. 黑液水煤浆燃烧试验研究[J]. 热能动力工程, 2008, 23(1): 92-96.
LAN Ze-quan, CAO Xin-yu, LIU Jian-zhong, et al. Experimental study of black-liquid water coal slurry combustion [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(1): 92-96.
- [5] 魏砾宏, 齐弟, 李润东. 碱金属对煤燃烧特性的影响及动力学分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1706-1711.
WEI Li-hong, QI Di, LI Run-dong. Effect of alkali metals on the combustion characteristics of coal and its kinetic analysis [J]. Journal of Coal, 2010, 35(10): 1706-1711.
- [6] 贺业光, 杨天华, 孙洋等. 钾对秸秆混煤燃烧特性影响的研究[J]. 燃料化学学报, 2011, 39(7): 507-512.
HE Ye-guang, YANG Tian-hua, SUN Yang, et al. Influence of potassium on combustion characteristics of straw mixed with coal [J]. Journal of Fuel Chemistry, 2011, 39(7): 507-512.
- [7] 胡昕, 王智化, 周志军等. 褐煤裂解、燃烧、气化过程的反应动力学分析[J]. 热力发电, 2013, 42(2): 16-25.
HU Xin, WANG Zhi-hua, ZHOU Zhi-jun, et al. Kinetic analysis of the reaction of lignite coal during its pyrolysis, combustion and gasification [J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(2): 16-25.
- [8] 曹晓哲, 赵卫东, 刘建忠等. 煤泥水煤浆燃烧特性的热重研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(10): 1394-1399.
CAO Xiao-zhe, ZHAO Wei-dong, LIU Jian-zhong, et al. Thermogravimetric investigation of the combustion characteristics of coal sludge water coal slurry [J]. Journal of Coal, 2009, 34(10): 1394-1399.
- [9] 刘建忠, 刘明强, 赵卫东等. 褐煤半焦燃烧特性的热重试验研究[J]. 热力发电, 2013, 42(11): 86-92.
LIU Jian-zhong, LIU Ming-qiang, ZHAO Wei-dong, et al. Thermogravimetric experimental study of the combustion characteristics of lignite coal semicoke [J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(11): 86-92.
- [10] 魏砾宏, 李润东, 姜秀民等. Na、K 添加量对超细煤粉燃烧特性的影响[J]. 煤炭学报, 2009, 34(5): 688-691.
WEI Li-hong, LI Run-dong, JIANG Xiu-min, et al. Effect of the amount of Na and K added on combustion characteristics of super fine pulverized coal [J]. Journal of Coal, 2009, 34(5): 688-691.
- [11] Mingqiang Liu, Jianzhong Liu, Yujie Yu, et al. Investigation of lignite combustion characteristics with thermal analysis [J]. Advanced Material Research, 2013, 614: 25-30.
- [12] Coats A W, Redfern J P. Kinetic parameters from thermogravimetric data [J]. Nature, 1964, 201(4914): 68-69.
- [13] 岑可法, 姚强, 骆仲决等. 高等燃烧学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002: 260-270.
CEN Ke-fa, YAO Qiang, LUO Zhong-yang, et al. Advanced combustion science [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002: 260-270.
- [14] 张健. 活化能与频率因子的相关分析[J]. 锅炉制造, 1996(4): 5-8.
ZHANG Jian. Analysis of the correlation between the activated energy and frequency factor [J]. Boiler Manufacturing, 1996(4): 5-8.

(刘瑶 编辑)

油田废液煤浆的燃烧特性及反应动力学分析 = **Combustion Characteristics of Coal Slurry in the Waste Liquid in Oil Fields and Their Reaction Kinetic Analysis** [刊, 汉] XIANG Yi (National Key Laboratory on Energy Source Clean Utilization , Zhejiang University , Hangzhou , China , Post Code: 310027) , PANG De-xin , ZHOU Jian-ping , LIN Sen-ming (Engineering Technology Company , Xinjiang Oil Field Corporation , Karamay , China , Post Code: 834000) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 , 31(7) . -86 ~91

By using the thermogravimetry , studied respectively were the ignition and combustion characteristics of coal slurry in waste liquid in oil fields and common coal-water slurry and determined were a series of combustion characteristic indexes. In this connection , the reaction kinetic parameters were obtained by using the reaction order model ($n = 3$) . It has been found that the combustion thermogravimetric curves of the coal slurry in waste liquid in oil fields and common coal-water slurry will always experience their water loss stages , mass stabilization stage , ignition and combustion stage as well as the burn-out stage. Both differential thermogravimetric curves have two weight loss peaks , respectively representing the rapid water loss process and volatile and fixed carbon combustion and reaction process. The ignition temperature , burn-out temperature and combustion activated energy of the coal slurry in waste liquid in oil fields are all lower than those of the common coal-water slurry , however , other various combustion characteristic indexes are superior to those of the latter , thus indicating that the alkaline metal ions in the waste liquid in oil fields play an obvious role in enhancing the combustion performance of coal-water slurry. **Key words:** waste liquid in oil fields , coal-water slurry , thermogravimetry , combustion characteristic index , parameters in reaction kinetics

基于数值模拟的链条锅炉煤层燃烧分区特性分析 = **Numerical Simulation-based Analysis of the Combustion Zone-division Characteristics of the Coal Bed in a Chain Grate Boiler** [刊, 汉] DU Hai-liang , ZHANG Min , WANG Yuan , LUO Yong-hao (Thermal Energy Engineering Research Institute , Shanghai Jiaotong University , Shanghai , China , Post Code: 200240) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 , 31(7) . -92 ~97

The laminar combustion process of coal in large granules in a chain grate boiler is greatly different from that of pulverized coal. To analyze in depth the combustion characteristics of coal bed and their mechanisms in a coal-fired chain grate boiler , a two-dimensional steady laminar combustion model was employed to conduct a simulation calculation of the combustion process in the boiler and perform a comparison with the test results. It has been found that the simulation results are in a relatively good agreement with the test ones , indicating that the model can accurately reflect the combustion characteristics of the coal bed and at the same time , an analysis and comparison were made of the frontal surface of the precipitation of the water content and volatile content , coke oxidation zone , gasification zone and ash and slag zone of various coal ranks. It has been found that the difference in combustion zone division of various coal ranks has something to do with such factors as the characteristics of coal quality and combustion conditions etc. **Key words:** chain grate boiler , numerical simulation , combustion zone-division , coal bed