

煤燃烧前温和热解汞和硫的释放特性研究

张成, 曹娜, 邱建荣, 陈刚

(煤燃烧国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

Study on Mercury and Sulfur Releasing Characteristics During Mild Thermal Upgrading Before Coal Combustion

ZHANG Cheng, CAO Na, QIU Jian-rong, CHEN Gang

(State Key Laboratory of Coal Combustion (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Two coal samples with high mercury and sulfur content from Guizhou province were selected in this study. The occurrences and contents of mercury and sulfur in these two types of coals were analyzed. The coal samples were then studied for mercury and sulfur releasing characteristics during mild thermal upgrading by using a horizontal tube furnace. The mercury removal efficiencies of these two types of coals reaches up to the top of 89.5% and 82.8% within the temperature range from 350-400°C, respectively. The removal of mercury reaches to the ultimate ratio when the coal is heated for more than 15min. A sharp increased removal of pyrite sulfur in coal under the low oxidizing atmosphere is also observed during mild thermal upgrading, but the removal of organic sulfur in coal is not obvious.

KEY WORDS: mild thermal upgarding; sulfur removal; mercury removal; low oxidizing atmosphere

摘要: 以2种贵州典型的高汞高硫煤为研究对象,对煤中汞和硫的含量及其赋存形态进行了研究。并利用水平管式炉试验台,在惰性气体气氛和微氧化性气氛下对煤样进行燃烧前温和热解试验,研究煤样在温和热解过程中汞的释放规律及其汞硫联合脱除特性。研究表明2种实验煤样在350~400°C温度下脱汞率最大分别达到89.5%和82.8%,煤中汞的释放率在热解15min左右达到极限值;同时还发现在微氧化性气氛下温和热解煤中硫铁矿硫的脱除效率有明显提高,而对煤中有机硫的脱除没有明显效果。

关键词: 温和热解; 脱硫; 脱汞; 微氧化性气氛

基金项目: 国家自然科学基金项目(50721005); 国家杰出青年科学基金(50525619)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50721005); Scientific Funds for Outstanding Young Scientists of China (50525619).

0 引言

我国煤炭资源丰富,并在能源消耗中占主导地位。煤燃烧过程中产生的SO_x和痕量重金属排放给环境带来了巨大危害^[1-3]。目前,用于全过程减排SO₂的技术方法有:燃烧前煤加工脱硫,燃烧中脱硫和燃烧后烟气脱硫等。与现有较成熟的燃烧后烟气脱硫技术相比,煤燃烧前预脱硫技术可以利用热解弥补煤燃前洗煤的不足,并且热解产生气量少,易于处理,同时还可得到部分油品等优点。对于燃煤电厂汞排放的控制技术,目前大多学者研究的重点在燃烧后烟气中的脱汞技术,主要有添加沸石、粉煤灰、活性炭吸附剂,以及提高烟气净化装置的脱汞能力等手段^[4-6]。

煤的燃烧前温和热解作为一种原煤燃烧前脱汞和脱硫技术,近几年国内外学者在此方面也做了相应的研究工作,但未见有关通过温和热解联合脱汞脱硫的报道。国内一些学者已经进行了不同气氛和热解温度下热解脱汞的研究^[7-10],研究表明热解温度是决定脱硫程度的主要原因,相比惰性气体气氛,微氧化性和还原性气氛都更有利于煤中硫的热解脱除,刘粉荣^[8]等人研究表明,在N₂气氛下加入3%体积分数的氧气,600°C时脱硫率由N₂气氛下的25%提高到70%,主要来源于氧化性气氛有利于煤中黄铁矿硫的脱除。国外一些学者在惰性气体环境下,对不同煤种进行温和热解除汞试验。结果表明,在温和热解过程中,汞的脱除率随着热解温度的升高逐渐增大,在某一温度下达到最大值,而后随着温度的升高,脱汞率反而呈降低趋势^[11-15]。Akira Iwashita的研究^[16]还发现对于在温和热解过程中有着较高的汞脱除率的煤种,汞很可能以溶解性和挥

发性都较高的亲水含汞化合物形式(hydrophilic Hg species)存在, 例如 HgCl_2 。相反, 对于汞脱除率较低的煤种, 汞很可能多以挥发性和溶解性都较弱的化合物形式存在, 例如 HgS 。

温和热解作为煤燃前脱硫脱汞技术的一种, 在煤转化过程中起着非常重要的作用。其前提是在保证热解半焦回收率, 即保证煤热值不降低的情况下, 提高煤燃前的脱硫脱汞效率。本文重点考察了2种高硫煤在热解时汞和硫的联合脱除效率, 比较了不同温度下2种有害元素在温和热解过程中的释放机制, 并进一步考察了在微氧化性气氛下汞和硫的释放机理。

1 实验部分

1.1 煤质分析

研究煤样为来自贵州六枝(LZ)和遵义地区(ZY), 为典型的高汞高硫煤。煤样经逐级粉碎、缩分后, 研磨过200目筛, 干燥装瓶备用。工业分析由美国Leco公司的MAC-500工业分析仪进行测定。元素分析使用德国Elementar公司Vario元素分析仪进行测定, 结果见表1、2。

表1 煤样工业分析结果

Tab. 1 Proximate analysis of coal samples

煤样	工业分析/%				低位热值/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
	M_{ad}	A_{d}	V_{daf}	FC_{ad}	
LZ	1.3	31.4	21.6	53.1	23 354
ZY	1.2	23.3	13.3	65.7	26 164

注: LZ为六枝煤; ZY为遵义煤。

表2 煤样元素分析结果

Tab. 2 Ultimate analysis of coal samples

煤样	元素分析/%					汞含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
	C	H	O	N	S	
LZ	57.7	3.0	2.3	1.0	3.7	156.9
ZY	66.1	2.2	0.5	0.6	6.3	187.8

1.2 煤样温和热解试验

煤样的温和热解试验台采用水平管式炉, 结构如图1所示。每次试验称取2g煤样, 放入槽型坩锅样品池内。水平炉加热到设定温度后, 把坩锅放入水平炉入口处, 密封严密, 通载气5min, 用于赶尽管式炉内残留的空气。载气流速设定为 $0.8\text{L}/\text{min}$, 通过改变流量计控制氧气和氮气的流量来改变热解气氛。残留空气被赶尽后, 把坩锅推入水平炉中心, 停留一定的时间后, 然后把坩锅拉到水平炉出口处, 冷却至室温后立刻取出称量装瓶密封备用。实验利用热电偶监测炉内和出口处温度。

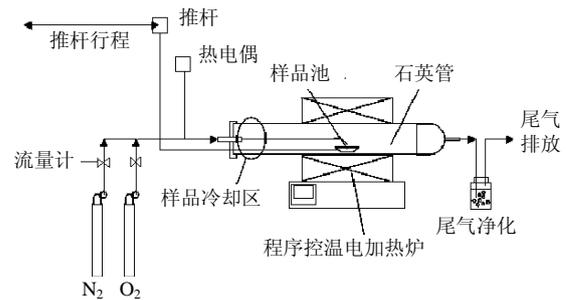


图1 煤温和热解台架结构简图

Fig. 1 Schematic of the experimental set up used for thermal upgrading

本文分别研究了不同热解温度和不同热解停留时间对汞脱除效率的影响。通过测量热解后半焦中汞和硫的含量, 其脱除率由式(1)计算得出:

$$M = \frac{M_{\text{coal}} - M_{\text{char}} \times Y}{M_{\text{coal}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: M_{coal} 为热解前原煤中硫或汞含量; M_{char} 为热解后半焦中硫或汞含量; Y 为热解半焦产率。

1.3 煤样汞含量和硫含量的测量

煤中汞含量由意大利Milestone公司的DMA80直接测汞仪进行测量, DMA80测量汞含量时不需要对煤样进行消解, 直接测量煤粉样品中的汞含量。每次测量过程中用来自美国国家标准技术研究院的煤标准物质SRM 1632对测量结果进行校正。DMA80对标准煤样的测量结果误差在 $\pm 10\%$ 以内。对煤中硫含量的测量利用Horiba EMIA-320V测硫仪进行测量, 对同一煤样, 每次测量取4组平行样, 结果取平均值。

1.4 连续化学提取

本文采用的连续化学提取试验是依据Finkelman等人^[17]在1990年美国地质考察报告(United States Geological Survey, USGS)中提出的传统四级化学提取方法, 在此基础上进行改进得到的方法。准确称量10g制备好的煤样, 加入50mL 1mol/L的醋酸铵溶液, 在室温下振荡18h后过滤, 对过滤后的煤样用热水清洗干燥后提取1g进行分析, 在剩余煤样中加入50mL的浓盐酸在 80°C 水浴下加热30min, 用上述同样方法过滤并提取过滤后煤样进行分析, 在剩余煤样中再加入50mL 10%的硝酸溶液, 在室温下振荡18h过滤, 过滤干燥煤样。经过上述三级化学提取后, 煤中离子交换态, 碳酸盐结合态, 和硫化物结合态的汞在每级化学提取中被分别提取出来, 而附集在煤中粘土矿物和有机质中的汞则留在提取的最后残渣中。测量每级化学提取后残渣中的汞含量, 与上一级煤样中的汞含量进

行差减，得到提取出的各种形态汞的含量。

2 结果与讨论

2.1 煤中汞和硫的形态分析

图 2 为 LZ 和 ZY 煤样的逐级化学提取后煤中汞在各提取级中的分布。对于 LZ 煤样，煤中 47.4% 的汞被 10% HNO₃ 溶液在第 3 级提取中提取出来。这表明，LZ 煤中的汞与煤中的硫化矿物大量相结合；大约 24.1% 的汞在第 2 级提取中被 HCl 溶液提取出来，表明这部分汞与该煤样中的碳酸盐矿物或可溶于酸的氧化物相结合；大约 22.6% 的汞残留在提取后的残渣中，表明这部分汞在该煤样中与煤中的有机质或者粘土矿物相结合；只有大约占煤中 5.9% 的总汞在第 1 级提取中被醋酸胺(NH₄AC)溶液提取出来，这部分汞是以离子交换态存在于煤中的汞。而在 ZY 煤样中，各级提取的汞分别占总汞的 4.8%、15.0%、17.4%、62.8%。这表明，在 ZY 煤样中，大部分汞留在了提取后残渣中，和有机质或者粘土矿物相赋存。

利用 ASTM 标准分析煤中形态硫方法(ASTM D2492—90)，本文对 2 种煤样中硫的形态进行了分析(见表 3)，结果表明，LZ 中的硫绝大多数来自硫酸铁矿硫，而 ZY 中的硫绝大多数来自煤中的有机硫。

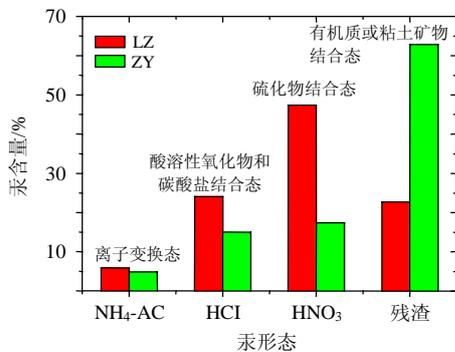


图 2 LZ 和 ZY 煤样连续化学提取中汞的形态分布
Fig. 2 Results of sequential leaching for the forms-of-occurrence of mercury

表 3 煤样中各种形态硫的含量

Tab. 3 Analysis of sulfur forms in LZ and ZY coal samples %

煤样	全硫	硫化铁矿硫	有机硫	硫酸盐硫
LZ	3.65	2.02	1.22	0.41
ZY	6.27	1.48	4.65	0.14

2.2 煤中硫在温和热解过程中的脱除特性

图 3 是 LZ 和 ZY 煤中硫在不同气氛下温和热解过程中的脱除曲线。可以看出，在惰性气体气氛下，2 种煤中硫的脱除率均比较低，随着热解温度

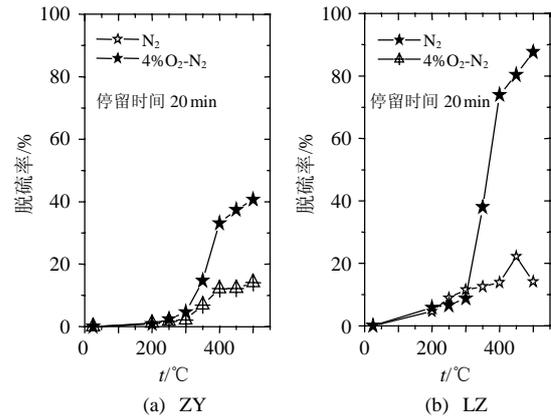


图 3 煤中硫在不同气氛下热解脱除特性
Fig. 3 Sulfur removal of LZ and ZY coals under different atmosphere

的升高，最高达到 20% 左右。而在微氧化性气氛(4% O₂+96% N₂)下，煤中硫在温和热解中的脱除效率有明显提高。热解温度 300 °C 以下时，2 种气氛下煤中硫的脱除曲线基本相似，热解温度高于 300 °C 后，微氧化性气氛下硫的脱除率明显升高，特别是 LZ 煤样，随着温度的升高，在 500 °C 时的脱除率达到了 87.7%，ZY 煤样的脱硫率在 500 °C 微氧化性气氛中达到了 40.7%。

比较 2 种煤中硫的形态发现，LZ 煤中的硫主要以黄铁矿硫的形态存在，占全硫的 55.6%。ZY 中的硫主要以有机硫的形式存在，占全硫的 74.2%。因此说明，微氧化性气氛对于煤中硫铁矿硫的脱除有很大帮助，这与刘粉荣^[8]等人的实验结果一致，LZ 煤在氧化性气氛下表现出高的脱硫率，主要源于 LZ 煤中的硫大部分来自黄铁矿硫，而微氧化性气氛对于煤中有机硫的脱除没有明显促进作用。图 4 反映了不同气氛下热解过程中的 2 种煤样的失重曲线，在微氧化气氛中，煤样失重率略高于惰性

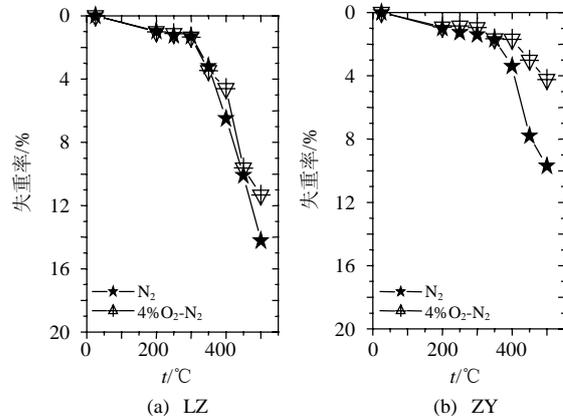
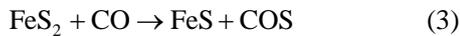


图 4 煤在不同气氛下温和热解过程中失重曲线
Fig. 4 Weight loss of coals during mild thermal upgrading under different atmosphere

气体气氛下的失重率,失重曲线还反映出在微氧化性气氛下进行温和热解,与惰性气体相比失重没有明显增加。通过对半焦的热值分析,2种气氛热解前后热值损失均小于5%。

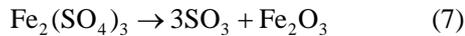
对于LZ煤来说,硫的脱除率在微氧化性气氛下有了极大的提高,可能的原因是,对于煤中的黄铁矿硫,微氧化性热解气氛有利于煤中C-S键的断裂,而对C-C键的断裂没有显著的帮助^[18]。在惰性气体气氛下,煤中黄铁矿硫的热解过程中的析出过程如下式所示^[19-20],其反应发生的温度为550~600℃:



在氧化性气氛下,黄铁矿和硫化物被氧化成硫酸盐、氧化物和SO₂,最终的产物与温度和黄铁矿颗粒的大小及氧分压有关:



反应(5)、(6)在300~400℃的低温环境下就可以发生,高温下Fe₂(SO₄)₃会分解成Fe₂O₃和SO₃:



这也解释了微氧化性气氛下,脱硫效率较惰性气体气氛高的原因,主要由于O₂的存在加速了黄铁矿低温下的分解。

相比LZ煤在微氧化性环境下的高脱硫率相比,ZY煤在微氧化性环境下的脱硫率相对较低,从硫的形态分析结果来看,该煤中的硫绝大部分为有机硫。有机硫在煤中存在主要有3种形式:脂肪硫、芳香硫和噻吩硫^[21]。由于其结构不同,这几种形式的硫在煤中的稳定性也各不相同。脂肪硫最不稳定,在较低温下就会分解;芳香硫其次;噻吩硫最稳定,高温下难分解,也很难通过热解的方法脱除。从ZY煤样的温和热解脱硫率分析,该煤样中大多数有机硫很可能以最难分解的噻吩硫形式存在,而微氧化性热解气氛下所带来的脱硫率的升高可能来自对该煤中少量硫铁矿硫和较易分解的有机硫组分的脱除率的提高。

2.3 煤中汞在温和热解过程中的释放特性

随着热解温度的升高,煤的失重增大,与此同时煤的热值损失也随之增大,这对煤燃烧前温和热解除汞的经济性上带来了影响。本文通过对这2种煤样的实验,发现在热解温度高于500℃时,煤样

的热值损失已经不能忽略不计,因此本文研究的重点放在热解温度500℃以下煤中汞的释放规律上。

图5为不同气氛下煤样LZ和ZY在温和热解过程中汞的释放规律。可以看出,在微氧化性气氛下,煤中汞的释放率在350~400℃温度范围内较惰性气体气氛下有明显的升高。对于LZ煤样,在400℃为氧化性气氛下的脱汞率达到了89.5%,而相同温度下在惰性气体气氛下的脱汞率为61.9%。对于ZY煤样400℃时不同气氛下的脱汞效率分别为82.8%和41.5%。当热解温度继续升高时,2种气氛下汞的脱除率慢慢接近,在500℃时达到最大值90%左右。通常来说,煤在热解过程中,在400℃以下是干燥脱气过程,大多数键能较低的桥键(如-CH₂-, -CH₂-CH₂-, -CH₂-O-, -S-等)产生断裂;400~550℃为活泼反应阶段,以解聚和分解反应为主,键能较大的部分含氧官能团开始裂解,产生焦油和半焦^[22]。通过汞在煤温和热解过程中的释放规律,可以发现,汞在煤中与其赋存体的结合不紧密,大部分汞在热解温度500℃以下可通过低温下的热解被脱除。

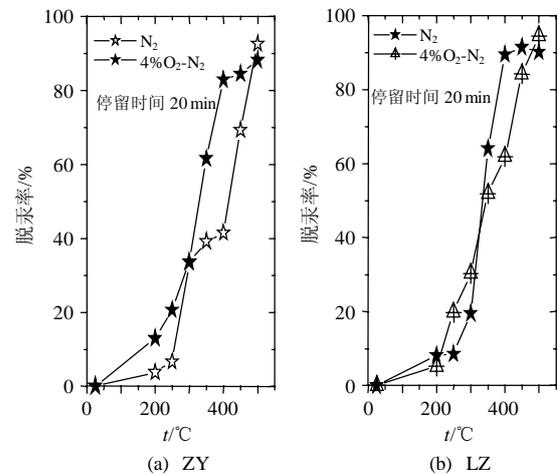


图5 不同气氛下煤中汞在温和热解过程中的释放规律

Fig. 5 Mercury releasing behaviors during mild thermal upgrading under different atmospheres

而微氧化性环境可在较低温度范围内提高煤温和热解的脱汞效率。本文因此进一步研究了在热解温度为300和400℃,不同热解气氛下煤中汞释放随热解时间的变化关系,如图6所示。

图中数据表明,每一温度下,2种煤都具有类似的总体变化趋势。随热解时间延长,热解初期汞脱除率迅速提高,然后增幅减缓并逐渐趋于极限值。对于不同的热解气氛来说,在热解温度300℃时,2种气氛下热解的脱汞率没有明显差异。在该

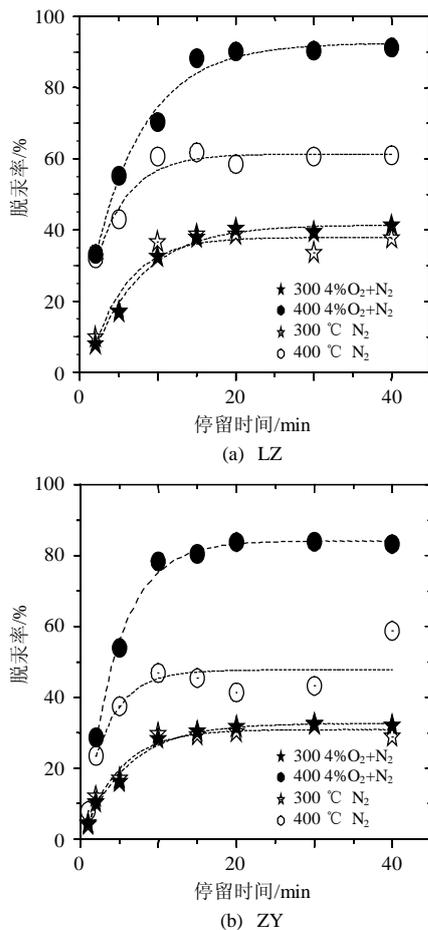


图 6 LZ, ZY 煤样热解过程中脱汞率随时间的变化
Fig. 6 Mercury removals by mild thermal upgrading in LZ and ZY coals in different atmospheres by a function of time

温度下 2 种煤在不同气氛下的脱汞曲线吻合基本一致。但是在热解温度达到 400 °C 时, 在微氧化性气氛下, 汞的最大脱除率的极限值明显高于惰性气体气氛。从达到极限脱汞率的反应时间上来看, 在本实验的反应器条件下, 脱汞率均在热解停留时间 15 min 左右达到最大值, 其后随着热解时间的延长, 脱汞效率趋于极限值。

从文中 2.1 节 LZ 和 ZY 煤中汞的存在形态分析结果可知, 汞在 2 种煤中的存在形态存在明显差异, LZ 煤中汞大部分与硫化矿物相结合, 而 ZY 煤中汞则大量存在于煤中有机质和粘土矿物中, 但 2 种煤中汞在温和热解过程中的释放曲线相近, 在低温下均有较高的脱汞率, 而微氧化性环境会在 300~400 °C 温度范围内明显提高煤温和热解的脱汞效率。说明各种赋存形态汞在煤中与其赋存体相结合并不紧密, 或者说以较低的键能与其赋存体相结合, 热解过程中氧气的存在可能在一定程度上会加快煤的裂解过程, 降低了键能较低的分子键

的断裂温度, 使其热解反应速率较惰性气体气氛下增大, 从而增加了煤中汞低温下的脱除率; 而其汞脱除效率的高低, 与煤中汞的赋存形态并未发现明显关系。

3 结论

1) LZ 煤样中硫大部分来自硫铁矿硫, 而 ZY 煤中的硫绝大部分来自有机硫。LZ 煤中的汞大部分赋存于煤中的硫铁矿, 而 ZY 中的汞与有机质和粘土矿物相赋存的可能性较大。

2) 微氧化性热解气氛对于煤中硫铁矿硫的脱除效果较惰性气体气氛下有很大提高, 而对于煤中有机硫的脱除效果不明显。

3) LZ 和 ZY 煤中汞在 500 °C 以下通过温和热解就能达到 90% 左右的较高脱除率。微氧化性热解气氛会在 300~400 °C 温度范围内提高煤温和热解的脱汞效率。在本实验反应器条件下, 煤中汞的脱除率在 300 和 400 °C 2 种温度下均在热解停留时间 15 min 左右时达到最大值, 其后随着停留时间的延长, 脱汞效率趋近恒定值。在 400 °C 温度下, 微氧化性气氛热解的脱汞效率较惰性气氛下有明显的提高, 而在 300 °C 温度下, 热解气氛对汞的热解脱除率没有显著影响。

4) 脱汞率在 300~400 °C 温度范围, 微氧化性气氛下有明显提高, 其原因可能是氧气的存在加快煤裂解过程, 降低了键能较低的分子键的断裂温度, 汞脱除效率的高低与其在煤中的赋存形态并未发现明显关系。

5) 在热值不损失的前提下, 通过微氧化性气氛下热解提高煤中汞和硫的脱除效率是可行的。

致谢

感谢加拿大阿尔伯塔大学化工材料系 Zhenghe Xu 教授对本文实验提供的帮助。

参考文献

- [1] Clarke L B. The fate of trace elements during coal combustion and gasification: an overview[J]. Fuel, 1993, 72(6): 731-736.
- [2] Finkelman R B. Modes of occurrence of potentially hazardous elements in coal: levels of confidence[J]. Fuel Processing Technology, 1994(39): 21-34.
- [3] 徐明厚, 郑楚光, 冯荣, 等. 煤燃烧过程中痕量元素排放的研究现状[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 33-38.
Xu Minghou, Zheng Chuguang, Feng Rong, et al. Overview of Trace Elements Research in Coal Combustion Process[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 33-38(in Chinese).
- [4] 赵毅, 刘松涛, 马宵颖, 等. 改性粉煤灰吸收剂对单质汞的脱除

- 研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(20): 55-60.
Zhao Yi, Liu Songtao, Ma Xiaoying, et al. Removal of elemental hg by modified fly ash absorbent[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(20): 55-60(in Chinese).
- [5] 任建莉, 周劲松, 骆仲泱, 等. 新型吸附剂脱除烟气中气态汞的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 48-53.
Ren Jianli, Zhou Jinsong, Luo Zhongyang, et al. The application of novel sorbents for mercury vapor removal from simulated flue gases[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 48-53(in Chinese).
- [6] 陈进生, 袁东星, 李权龙, 等. 燃煤烟气净化设施对汞排放特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(2): 72-76.
Chen Jinsheng, Yuan Dongxing, Li Quanlong, et al. Effect of flue-gas cleaning devices on mercury emission from coal-fired boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(2): 72-76(in Chinese).
- [7] 徐龙, 杨建丽, 李允梅, 等. 兖州煤热解预脱硫行为[J]. 化工学报, 2003, 54(10): 1430-1435.
Xu Long, Yang Jianli, Li Yunmei, et al. Desulfurization behavior of yanzhou coal through pyrolysis[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2003, 54(10): 1430-1435(in Chinese).
- [8] 刘粉荣, 李文, 李保庆, 等. 氧化性气氛下流化床中煤的热解脱硫及硫的分布[J]. 燃料化学学报, 2006, 34(4): 404-407.
Liu Fenrong, Li Wen, Li Baoqing, et al. Sulfur removal and its distribution during coal pyrolysis in fluidized bed reactor under oxidative atmospheres[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2006, 34(4): 404-407(in Chinese).
- [9] 齐永琴, 李文, 陈皓侃, 等. 义马煤的流化床热解脱硫研究[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(2): 128-131.
Qi Yongqin, Li Wen, Chen Haokan, et al. Resaearch on desulfurization of yima coal through pyrolysis in fluidized-bed reactor [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(2): 128-131(in Chinese).
- [10] 刘青, 吕俊复, 张建胜, 等. 还原态下流化床煤热解硫的释放[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 367-370.
Liu Qing, Lu Junfu, Zhang Jiansheng, et al. Sulphur removal during coal pyrolysis in a fluidized bed of reducing condition[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4): 367-370(in Chinese).
- [11] Keener T C, Gieskea AC, Khang S J. Precombustion removal of mercury from coal by mild pyrolysis[J]. Coal Science and Technology, 1995(24): 1605-1608.
- [12] Merdes A C, Keener T C, Khang S J, et al. Investigation into the fate of mercury in bituminous coal during mild pyrolysis[J]. Fuel, 1998, 77(15): 1783-1792.
- [13] Min Wang, Keener T C, Khang S J. The effect of coal volatility on mercury removal from bituminous coal during mild pyrolysis[J]. Fuel Processing Technology, 2000(67): 147-161.
- [14] Guffey F D, Bland A E. Thermal pretreatment of low-ranked coal for control of mercury emissions[J]. Fuel Processing Technology, 2004(85): 521-531.
- [15] Xu Zhenghe, Lu Guoqing, Chan Onyi. Fundamental study on mercury release characteristics during thermal upgrading of an alberta sub-bituminous coal[J]. Energy & Fuels, 2004, 18(6): 1855-1861.
- [16] Akira Iwashita, Shomei Tanamachi, Tsunenori Nakajima, et al. Removal of mercury from coal by mild pyrolysis and leaching behavior of mercury[J]. Fuel, 2004, 83(6): 631-638.
- [17] Finkelman R B, Palmer C A, Krasnow M R, et al. Combustion and leaching behavior of elements in the argonne premium coal samples[J]. Energy & Fuels, 1990, 4(6): 755-766.
- [18] Yongqin Qi, Wen Li, Haokan Chen, et al. Sulfur release from coal in fluidized-bed reactor through pyrolysis and partial oxidation with low concentration of oxygen[J]. Fuel, 2004, 83(16): 2189-2194.
- [19] 郑瑛, 史学锋, 周英彪, 等. 煤燃烧过程中硫分析出规律的研究进展[J]. 煤炭转化, 1998, 21(1): 36-40.
Zheng Yin, Shi Xuefeng, Zhou Yinbiao, et al. The research evolution for sulfur forms and releasing in coal[J], Coal Conversion, 1998, 21(1): 21-36(in Chinese).
- [20] Xu Long, Yang Jianli, Li Yunmei, et al. Behavior of organic sulfur model compounds in pyrolysis under coal-like environment[J], Fuel Processing Technology, 2004, 85(8-10): 1013-1024.
- [21] Mae M K, Shimada S, et al. Analysis of formation rates of sulphur-containing gases during the pyrolysis of various coals [J]. Energy & Fuels, 2001, 15(3): 629-636.
- [22] 谢克昌. 煤的结构与反应性[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 210-218.



张成

收稿日期: 2009-02-16.

作者简介:

张成(1980—), 男, 博士研究生, 研究方向为燃煤污染物排放与防治, chengzhang@smail.hust.edu.cn;

陈刚(1965—), 教授, 博士生导师, 研究方向为煤粉燃烧理论及技术, 燃煤污染物排放与防治, 本文通讯作者, gangchen@mail.hust.edu.cn.

(责任编辑 车德竞)