

煤炭转化

低阶煤热转化产品特性影响因素研究及展望

裴 贤 丰^{1 2 3}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 煤化工分院 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室 北京 100013;
3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室 北京 100013)

摘 要: 为实现低阶煤的高效利用,论述了变质程度、煤岩组成、水分等原料煤性质及升温速率、热解终温、压力、气氛等热转化工艺条件对低阶煤热转化产品特性影响的研究进展,分析了各条件下低阶煤热转化产品产率、品质差异,提出了低阶煤适宜转化利用的途径及建议。影响低阶煤热解因素众多,外因热加工条件和内因原料煤性质均明显影响低阶煤热解产品组成和品质,以热解为龙头的低阶煤分级转化多联产产业链是实现我国低阶煤资源合理利用的适宜方式。提出应深入开展低阶煤热转化过程基础科学研究,从分子角度揭示低阶煤热转化过程自由基/官能团裂解、迁移、聚合规律;以热解为先导,分级分质将低阶煤中的挥发分转化为油气资源,并将煤气、半焦、焦油深加工转化为高级产品,实现低阶煤综合利用多联产产业链。

关键词: 低阶煤; 热转化; 产品特性; 展望

中图分类号: TQ530.2 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2016)01-0033-05

Research and development of thermal conversion characteristics for low rank coal

PEI Xianfeng^{1 2 3}

(1. Beijing Research Institute of Coal Chemistry China Coal Research Institute Beijing 100013 China;
2. State Key Laboratory of High Efficient Mining and Clean Utilization of Coal Resources Beijing 100013 China;
3. National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control Beijing 100013 China)

Abstract: In order to efficiently use low rank coal, the influence of raw coal properties which were metamorphism, petrological composition, moisture and technological conditions including heating rate, pyrolysis temperature, pressure and gas atmosphere on products characteristics were analyzed. The yield and quality of low rank coal in thermal conversion under different conditions were analyzed. Some practical utilization methods were introduced. The classification conversion poly-generation technology with pyrolysis as the leader was a suitable way for low rank coal utilization in China. The basic scientific research of low rank coal in thermal conversion process should be deeply developed, such as the rules of free radical/functional groups cracking, migration, polymerization in the process of low rank coal thermal conversion should be revealed from molecular levels. Pyrolysis as a guide, transfer the volatile into oil and gas resources, then put the gas, semi-coke and tar into advanced products.

Key words: low rank coal; thermal conversion; product characteristics; prospect

0 引 言

我国低阶煤资源丰富,约占煤炭资源总储量

的55%^[1]。目前低阶煤主要利用方式为直接燃烧或气化,存在效率低、污染大、碳排放高等问题。热转化是燃烧、气化、液化等煤加工转化工艺中极

收稿日期: 2015-09-09; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2016.01.007

基金项目: 国家自然科学基金-神华集团有限公司煤炭联合基金资助项目(U1361122); 国家自然科学基金资助项目(21406105); 国家国际科技合作专项资助项目(2015DFA60320)

作者简介: 裴贤丰(1970—),男,山西运城人,副研究员,学士,研究方向为煤炭热解与焦化技术。E-mail: 13641199758@139.com

引用格式: 裴贤丰. 低阶煤热转化产品特性影响因素研究及展望[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(1): 33-37.

PEI Xianfeng. Research and development of thermal conversion characteristics for low rank coal[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(1): 33-37.

为重要的中间过程。以热解为龙头,首先将低阶煤中的挥发分转化为煤气及焦油等产品,剩余半焦经过加工转化再利用,是实现低阶煤清洁高效利用的一条有效途径^[2]。低阶煤热转化以中低温热解为主,国外代表性热解工艺包括 COED(char oil energy development process) 工艺、Garrett 工艺、Toscoal 工艺、鲁奇-鲁尔煤气法、日本快速煤热解技术等;国内代表性热解工艺包括多段回转炉(MRF) 热解工艺、新法干馏工艺(DG 工艺)、“煤拔头”工艺等。煤的热转化机制、产物的性质及分布状况均受到原煤性质、加热速率、加热温度、加热压力、热解气氛等特定条件的影响。研究煤的热转化产品特性影响因素对煤的热加工有直接的指导作用,可以指导煤加工转化技术正确选择原料煤,探索扩大加工转化用煤的途径,确定最佳工艺条件和提高产品质量等。笔者论述了原料煤性质及热加工转化工艺条件对低阶煤热转化产品组成、收率及品质等影响,展望了我国低阶煤资源合理高效利用的适宜方式,提出了煤炭科技工作者在我国低阶煤利用过程中需关注的研发重点。

1 原料煤性质对低阶煤热转化产品特性的影响

1.1 煤变质程度

原料煤变质程度对低阶煤热转化特性的影响主要是由于不同煤种在分子结构、元素组成及流变特性等方面存在差异。

温雨鑫等^[3]以云南、山东、内蒙古等地不同煤种为原料,于常压滴管炉中将3种样品分别加热至1273 K,以此考察煤变质程度对热解所得焦炭特性的影响。研究发现,随着煤变质程度的提高,煤热解后所得焦炭的球形度稍有提升。

朱学栋等^[4]以18种不同变质程度煤为试验对象,研究变质程度对低阶煤热转化产品特性的影响,结果发现,热解产率与煤变质程度成反比线性关系,且随着变质程度的降低,焦油、煤气和热解水的产率均会升高。

王鹏等^[5]研究了原料煤变质程度对热解产物产率的影响规律。结果发现,半焦产率与变质程度成正比关系,焦油和煤气产率则相反,随着变质程度升高,煤气中 H_2 、 CH_4 含量相应增加。

1.2 煤岩组成

镜质组、壳质组和惰质组是煤中常见三大类显

微组分。煤热解过程中,镜质组和壳质组有中间相的转变,其加热过程中变化特征明显;而惰质组不产生中间相,变化特性不明显^[6]。赵伟等^[7]以神木煤为原料进行浮选,并对富集物进行终温为600℃的低温热解试验,考察煤岩显微组分对热解产物产率及产品分布的影响。结果表明,煤样热解所得焦油产率与镜质组含量成正比关系,半焦产率与镜质组含量成反比关系;焦油及半焦产率与惰质组含量的关系刚好相反。高志芳等^[8]以低阶煤及一种炼焦煤为原料,研究低阶煤显微组分对二者混合热解过程中含氧官能团变化规律的影响及之间可能存在的交互作用。结果表明,低阶煤及其显微组分与炼焦煤混合热解过程中,C—O官能团热解产生 CO_2 及 H_2 等气体,温度达600℃左右时C—O官能团脱除达到稳定状态;400℃时,H和O开始析出,400~600℃氧析出量增大,600℃后趋于稳定;当热解温度达到700℃后,H/C和O/C近于相等。

1.3 其他原料煤性质

原料煤水分、粒度组成及官能团结构等均会对低阶煤热转化产品特性产生影响。胡二峰等^[9]考察不同水分依兰长焰煤在内构件固定床反应器中的热解特性。结果表明,反应器中有无内构件,原煤水分对热解产品产率的影响表现不同。常规反应器中,焦油、煤气、半焦、热解水的产率与原煤水分关联不大;而有内构件反应器中,焦油、煤气、热解水产率均随原煤水分的增加而提高。潘春秀等^[10]以神府次烟煤为主要原料,分别对原煤、热溶物、热溶残煤进行红外光谱、热重、凝胶色谱及同步荧光光谱分析。结果表明,300~360℃,随着温度升高,热溶率增加;随着热溶温度升高,缩合芳环间桥键断裂。吕太等^[11]应用非等温热重分析技术,考察原煤粒径和升温速率对热解过程的影响。研究发现,粒径大小对热解过程中传热传质产生影响,从而影响热解失重量;升温速率对热解初始温度、失重峰温度及终止温度产生影响。研究同时发现,挥发分释放特性指数与热解过程的升温速率具有一定的相关性。吴国光等^[12]借助热重-傅里叶红外变换光谱手段,研究低阶煤结构及含氧官能团对其热转化过程的影响。结果表明,煤的热解行为与 CH_4 、 CO_2 析出所产生的交联温度不同有关,煤的大分子网络结构和热解温度对吸收峰强弱产生影响。

2 热转化工艺条件对低阶煤热转化产品特性的影响

2.1 升温速率

低阶煤热转化升温速率可分为慢速加热(<5 K/s)、中速加热($5\sim 100$ K/s)、快速加热($100\sim 10^6$ K/s)和闪激加热($>10^6$ K/s) 4种^[13]。升温速率的提高,可使低阶煤热解所得半焦产率降低、焦油产率增加、煤气产率稍微减少。升温速率较慢时,低阶煤热转化选择性较强,煤分子结构中较弱的键断开并发生热缩聚反应,所以慢速加热时半焦产率较高;而快速加热由于供给原料煤高强度能量,致使小分子碎块形成较多,故低分子产物相对较多。解强等^[14]以神木低阶煤为原料,选择3、5、10、15、50、100、225、350、750 °C/min等不同升温速率将原料煤加热至750 °C,考察不同升温速率下所得半焦产品的微晶结构、表面特性及气化活性等。结果表明,快速热解可使半焦石墨化程度明显提高,随着热解升温速率的提高,半焦气化活性降低。王瑞杰等^[15]考察了10、30、50 °C/min等不同升温速率下褐煤热转化情况。研究发现,升温速率的变化对褐煤热解特性产生较大影响,且10 °C/min和50 °C/min下褐煤的放热量大于30 °C/min下的热解放热量。周华等^[16]研究神华煤在10、20、30 °C/min等不同升温速率下的热解特性,结果表明,该煤样失重率与热解过程的升温速率成反比关系。姜迪等^[17]以我国特有煤种——树皮煤为研究对象,考察树皮体、镜质体及树皮煤在不同升温速率下热重特性的差异。研究表明,随着升温速率的提高,三者失重速率曲线呈现出相同的变化趋势;树皮体的热解失重量最大,且在430 °C最为显著;树皮体所表现出的失重现象与其分子结构密切相关。周俊虎等^[18]应用热重-红外光谱联用技术研究混煤热解过程特征,研究得出加热速率及热解终温对混煤热解与单煤热解具有相似影响,即加热速率越大,热解气体释放速率越大,热解终温越高,热解产生的总气体量越大。

2.2 热解终温

热解终温是影响低阶煤热转化产品产率和组成的重要因素。随着热解终温的升高,热解反应需要较高的活化能才能进行,该反应将生成具有高热稳定性的多环芳烃化合物^[19]。热解终温不仅影响一次热解产物的产率及品质,而且温度较高时,热解出

的一次挥发分将发生二次热裂解反应^[20]。商铁成^[21]以陕北长焰煤为原料,应用1 kg/h外热式回转炉,考察500、550、600、650、700 °C等不同热解终温下所得产品产率及品质。研究发现,当热解终温为600 °C时,试验煤样焦油产率获得最大值;热解产品半焦结构强度及煤焦油中脂肪族、芳香族含量均随热解终温的升高而增大。白效言^[22]以5种不同变质程度低阶煤为原料,分别考察其在550、600、650、700、750 °C终温下转化所得热解水中挥发酚含量。结果表明,低阶煤热解水中挥发酚含量基本维持在 $1\times 10^3\sim 9\times 10^3$ mg/L,且热解水中挥发酚浓度与热解终温成正比关系。白向飞等^[23]以我国西北某侏罗纪低阶烟煤为原料,探讨了在不同温度、压力及作用时间下煤轻度加氢过程中的黏结特征及煤岩特性变化情况。结果表明,低阶烟煤增塑过程中,温度达到350 °C后,煤样才能通过热解、溶胀、新组分形成等作用使其黏结性增强。王子兵等^[24]以蔚州长焰煤为原料,分别考察其在400、450、500、550、600 °C等不同热解终温下所得半焦产品特性的差异。研究发现,随着热解终温的升高,半焦产品中C元素含量增加,H、O元素含量降低,S元素含量呈现先升高后降低再升高的趋势。

2.3 压力

压力对低阶煤的热转化产物特性亦产生重要影响。一般而言,随着压力的增大,焦油产率减少,半焦和煤气产率增加。此外,由于热缩聚反应的发生,压力会使半焦强度提高。

李小亮等^[25]借助于管式炉,考察标准大气压、2.3 MPa等不同压力,及550、600、650、700、750、800 °C等不同热解终温下内蒙古低阶煤热解特性。结果表明,增大热解压力,有利于煤气及半焦的生产,而不利焦油的生成;热解终温的提高,可使煤气产率升高,焦油产率降低。

2.4 加热气氛

不同气氛下加热,将对低阶煤热转化产品特性产生不同影响。当前,主要考察 H_2 、 N_2 、 O_2 、水蒸气、 CH_4 、CO、 CO_2 及多种气氛混合条件下低阶煤热转化产品特性的变化。陈思顺等^[26]以河南义马煤为原料,分别研究其在 H_2 、 N_2 等不同气氛下的热解反应活性。结果表明, H_2 气氛有利于义马煤热解转化率的提高, H_2 气氛下失重率较 N_2 气氛下高12%左右。王永刚等^[27]在气流床反应器中考察 O_2 、水蒸

气及其混合气氛对褐煤气化反应性及热转化所得半焦结构的影响。结果表明,反应气氛对褐煤气化反应性及所得半焦结构产生重要影响, O_2 气氛有利于提高褐煤气化反应性及褐煤半焦的有序化程度。史雪君等^[28]在固定床反应器上研究了平朔煤在 H_2 、 N_2 、 CH_4/CO 及 CH_4/CO_2 等不同气氛下的热解特性。研究发现, CH_4/CO 及 CH_4/CO_2 气氛下焦油产率要高于 H_2 和 N_2 气氛下热解所得焦油产率,且 CH_4/CO_2 气氛下热解所得焦油产率最高。钟梅等^[29]以新疆准东煤为原料,考察其在 O_2 、 H_2 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 等不同反应气氛下,热解终温为 $850\text{ }^\circ\text{C}$ 时热解产物分布及产品品质。结果表明, H_2 、 CO_2 气氛使煤焦油产率降低,而 CH_4 及 CO 气氛则使煤焦油产率升高。研究同时发现, CO_2 反应气氛下所得半焦反应活性最高。李超等^[30]考察了在氩气及空气气氛下,煤样热解所表现出的不同行为及热解特性。研究发现,氩气气氛有利于气相产物的生成。

3 结语与展望

将低阶煤作为一种能源的同时,更应该将其作为一种资源加以利用。首先,应深入开展低阶煤热转化过程基础科学研究,从分子角度揭示低阶煤热转化过程自由基/官能团裂解、迁移、聚合规律,为低阶煤分级分质利用奠定科学基础。其次,以热解为先导,分级分质将低阶煤中的挥发分转化为油气资源,并将煤气、半焦、焦油深加工转化为高级产品,从而实现低阶煤综合利用多联产业链,这将是低阶煤资源清洁高效利用的一条切实可行途径。最后,尊重环境容量,以环境可持续发展为前提,从源头杜绝以牺牲环境利益为代价的利用方式,促进资源高效利用与环境协调发展。基础理论研究与应用关键技术相结合,将形成低阶煤热加工转化科学合理利用方式,这将实现我国储量丰富的低阶煤资源绿色、低碳、节能利用,为保障国家能源供给及安全做出贡献。

参考文献:

- [1] 王建国,赵晓红.低阶煤清洁高效梯级利用关键技术与示范[J].中国科学院院刊 2012 27(3):382-387.
Wang Jianguo,Zhao Xiaohong. Demonstration of key technologies for clean and efficient utilization of low-rank coal[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences 2012 27(3):382-387.
- [2] 曲思建,王琳,张颀,等.我国低阶煤转化主要技术进展及工程实践[C]//中国煤炭学会成立五十周年高层学术论坛论

文集.北京[s.n.].2012:1-10.

- Qu Sijian,Wang Lin,Zhang Yang *et al.* Advance in technology for low-rank coal conversion and engineering practice of China[C]// Proceedings of China coal society fiftieth anniversary. Beijing [s.n.].2012:1-10.
- [3] 温雨鑫,徐祥,阳绍军,等.热解条件对煤膨胀和球形度的影响[J].煤炭转化 2014 37(1):32-35.
Wen Yuxin,Xu Xiang,Yang Shaojun, *et al.* Effects of pyrolysis conditions on swelling and sphericity properties of coals[J]. Coal Conversion 2014 37(1):32-35.
- [4] 朱学栋,朱子彬,唐黎华,等.煤的热解研究II:煤化程度对氩气气氛下热解的影响[J].华东理工大学学报,1998 24(3):262-265.
Zhu Xuedong,Zhu Zibin,Tang Lihua *et al.* Foundational study on the pyrolysis of coals II: effect of coals rank on pyrolysis in hydrogen atmosphere[J]. Journal of East China University of Science and Technology,1998 24(3):262-265.
- [5] 王鹏,文芳,步学朋,等.煤热解特性研究[J].煤炭转化,2005 28(1):8-13.
Wang Peng,Wen Fang,Bu Xuepeng, *et al.* Study on the pyrolysis characteristics of coal[J]. Coal Conversion,2005 28(1):8-13.
- [6] 韩德馨.中国煤岩学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1996.
Han Dexin. China coal petrography[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press,1996.
- [7] 赵伟,张晓欠,周安宁,等.神府煤岩显微组分的浮选分离及富集物的低温热解产物特性研究[J].燃料化学学报 2014,42(5):527-532.
Zhao Wei,Zhang Xiaoqian,Zhou Anning *et al.* Flotation separation of Shenfu coal macerals and low temperature pyrolysis characteristics of different maceral concentrate[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology 2014 42(5):527-532.
- [8] 高志芳,张更,郑明东,等.低阶煤显微组分对混煤热解过程含氧官能团析出及转移规律的影响[J].过程工程学报 2014,14(6):984-988.
Gao Zhifang,Zhang Geng,Zheng Mingdong *et al.* Effects of low-rank coal macerals on evolution of oxygen functional groups in pyrolysis of mixed coals[J]. The Chinese Journal of Process Engineering(China) 2014,14(6):984-988.
- [9] 胡二峰,张纯,武荣成,等.内构件固定床反应器中不同水分煤的热解特性[J].化工学报 2015 66(7):2656-2663.
Hu Erfeng,Zhang Chun,Wu Rongcheng, *et al.* Pyrolysis of coal with different moisture contents in fixed-bed reactor with internals [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China) 2015,66(7):2656-2663.
- [10] 潘春秀,刘华龙,祝婉婉,等.神府次烟煤在不同温度下的热溶产物表征[J].燃料化学学报 2015 43(4):416-420.
Pan Chunxiu,Liu Hualong,Zhu Wanwan, *et al.* Characterization of the thermal dissolution products of a subbituminous coal at different temperatures[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology 2015 43(4):416-420.

- [11] 吕太, 张翠珍, 吴超. 粒径和升温速率对煤热分解影响的研究[J]. 煤炭转化 2005 28(1): 17-20.
Lyu Tai, Zhang Cuizhen, Wu Chao. Study on the effect of coal diameter and heating rate on the coal pyrolysis [J]. Coal Conversion 2005 28(1): 17-20.
- [12] 吴国光, 王祖讷. 低阶煤的热重-傅里叶变换红外光谱的研究[J]. 中国矿业大学学报 1998 27(2): 181-184.
Wu Guoguang, Wang Zuna. Research on TG-FT IR of low rank coals [J]. Journal of China University of Mining and Technology 1998 27(2): 181-184.
- [13] 崔银萍, 秦玲丽, 杜鹏, 等. 煤热解产物的组成及其影响因素分析[J]. 煤化工 2007(2): 10-15.
Cui Yiping, Qin Lingli, Du Juan, et al. Products distribution and its influencing factors for coal pyrolysis [J]. Coal Chemical Industry 2007(2): 10-15.
- [14] 解强, 梁鼎成, 田萌, 等. 升温速率对神木煤热解半焦结构性能的影响[J]. 燃料化学学报 2015 43(7): 798-804.
Xie Qiang, Liang Dingcheng, Tian Meng, et al. Influence of heating rate on structure of chars derived from pyrolysis of Shenmu coal [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology 2015 43(7): 798-804.
- [15] 王瑞杰, 宋长忠, 靳振一, 等. 温升速率对混合煤样热解的影响及动力学分析[J]. 洁净煤技术 2014 20(4): 73-76.
Wang Ruijie, Song Changzhong, Jin Zhenyi, et al. Influence of heating rate on mixed coal sample pyrolysis and dynamic analysis [J]. Clean Coal Technology 2014 20(4): 73-76.
- [16] 周华, 王强, 陈志雄, 等. 神华煤热解特性与非等温动力学研究[J]. 煤化工 2010(2): 27-31.
Zhou Hua, Wang Qiang, Chen Zhixiong, et al. Pyrolysis characters and the non-isothermal kinetics of Shenhua coal [J]. Coal Chemical Industry 2010(2): 27-31.
- [17] 姜迪, 王绍清, 韩林璞, 等. 不同升温速率下树皮体的热重特征变化[J]. 中国煤炭地质 2015 27(1): 18-21.
Jiang Di, Wang Shaoqing, Han Linpu, et al. Thermogravimetric characteristic variation of barkinite under different heating rates [J]. Coal Geology of China 2015 27(1): 18-21.
- [18] 周俊虎, 平传娟, 杨卫娟, 等. 用热重红外光谱联用技术研究混煤热解特性[J]. 燃料化学学报 2004 32(6): 658-662.
Zhou Junhu, Ping Chuanjuan, Yang Weijuan, et al. Experimental study on the pyrolysis characteristic of coal blends using TGA-FT-IR [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology 2004 32(6): 658-662.
- [19] 郭树才. 煤化工工艺学[M]. 北京: 化学工业出版社 2006.
Guo Shucai. Coal chemical engineering technology course [M]. Beijing: Chemical Industry Press 2006.
- [20] 袁琦儒. 影响煤热解的一些主要因素探讨[J]. 科技信息, 2011(27): 466.
Yuan Qiru. Investigation of some main factors influence on coal pyrolysis [J]. Science and Technology Information, 2011(27): 466.
- [21] 商铁成. 热解温度对低阶煤热解性能影响研究[J]. 洁净煤技术 2014 20(6): 28-31.
Shang Tiecheng. Influence of temperature on pyrolysis of low rank coal [J]. Clean Coal Technology 2014 20(6): 28-31.
- [22] 白效言. 热解温度对低阶煤热解水中挥发酚的影响[J]. 洁净煤技术 2014 20(2): 87-89.
Bai Xiaoyan. Influence of pyrolysis temperature on volatile phenolic compounds in low rank coal pyrolysis water [J]. Clean Coal Technology 2014 20(2): 87-89.
- [23] 白向飞, 王东升, 张宇宏. 低变质烟煤加氢增塑过程中岩相特征变化试验研究[J]. 煤炭学报 2009 34(2): 247-251.
Bai Xiangfei, Wang Dongsheng, Zhang Yuhong. The experimental research on petrological transformation of low rank coal during its enhancement of plastic characteristics by hydrogenation [J]. Journal of China Coal Society 2009 34(2): 247-251.
- [24] 王子兵, 王超, 么强, 等. 蔚州长焰煤低温热解实验研究[J]. 煤炭技术 2014 33(6): 226-229.
Wang Zibing, Wang Chao, Yao Qiang, et al. Experimental study on low-temperature pyrolysis of Yuzhou long flame coal [J]. Coal Technology 2014 33(6): 226-229.
- [25] 李小亮, 杨宗仁, 唐楠, 等. 温度和压力对煤热解影响的研究[J]. 煤质技术 2014 11(6): 54-56.
Li Xiaoliang, Yang Zongren, Tang Nan, et al. Research on how the temperature and pressure affected the pyrolysis of coal [J]. Coal Quality Technology 2014 11(6): 54-56.
- [26] 陈思顺, 陈新华, 丁明洁, 等. 河南义马煤加氢热解的热重法研究[J]. 煤炭技术 2014 33(6): 211-213.
Chen Sishun, Chen Xinhua, Ding Mingjie, et al. Study on hydro-pyrolysis reactivity of Henan Yima coal by TG/DTG [J]. Coal Technology 2014 33(6): 211-213.
- [27] 王永刚, 孙加亮, 张书. 反应气氛对褐煤气化反应性及半焦结构的影响[J]. 煤炭学报 2014 39(8): 1765-1771.
Wang Yonggang, Sun Jialiang, Zhang Shu. Impacts of the gas atmosphere on the gasification reactivity and char structure of the brown coal [J]. Journal of China Coal Society, 2014 39(8): 1765-1771.
- [28] 史雪君, 汪勤亚, 马委元, 等. 反应气氛对平朔煤热解反应性能的影响[J]. 煤炭转化 2014 37(3): 5-9.
Shi Xuejun, Wang Qinya, Ma Weiyan, et al. Study on reactivity of pyrolysis of Pingshuo coal in different reactive gas [J]. Coal Conversion 2014 37(3): 5-9.
- [29] 钟梅, 马凤云. 不同气氛下煤连续热解产物的分配规律及产品品质分析[J]. 燃料化学学报 2013 41(12): 1427-1435.
Zhong Mei, Ma Fengyun. Analysis of product distribution and quality for continuous pyrolysis of coal in different atmospheres [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology 2013 41(12): 1427-1435.
- [30] 李超, 郑长征, 王晓红. 热解气氛对煤热解行为的影响[J]. 西安工程大学学报 2013 27(5): 616-620.
Li Chao, Zheng Changzheng, Wang Xiaohong. Effect of atmospheres on coal pyrolysis [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University 2013 27(5): 616-620.