

# 低阶煤热破碎研究现状及建议

常赵刚<sup>1,2,3</sup>, 王利斌<sup>1,2,3</sup>, 裴贤丰<sup>1,2,3</sup>, 周琦<sup>1,2,3</sup>

(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:**为解决低阶煤的大规模清洁利用问题,分析了国内外煤颗粒受热发生破碎的研究现状,重点介绍了煤燃烧破碎的机理、煤质特性及热转化条件对破碎的影响。针对低阶煤分级转化制备油气产品中粉尘含量高的技术难题,提出了抑制低阶煤热破碎的方法及途径。应以煤的自身物理化学性质(内因)为出发点研究煤热转化过程中的破碎机理,兼顾外部热转化条件(外因),结合热反应产物,建立破碎过程与受热过程的关系,同时对反应器的结构进行优化创新,最小化颗粒的运动抑制粉尘产生,实现低阶煤的清洁高效利用。

**关键词:**低阶煤; 燃烧; 破碎; 粉化; 粉尘

中图分类号:TQ53 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2016)06-0046-06

## Status and suggestion of thermal fragmentation of low rank coal

CHANG Zhaogang<sup>1,2,3</sup>, WANG Libin<sup>1,2,3</sup>, PEI Xianfeng<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Qi<sup>1,2,3</sup>

(1. Research Institute of Coal Chemistry, China Coal Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China;

3. National Energy Technology and Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to cleanly use lignite in large-scale, the status of fragmentation during thermal conversion of coal at home and abroad was analyzed. The fragmentation mechanism, the effects of coal quality and transformation conditions on fragmentation of coal were investigated. Due to the issue such as high content of dust in tar during the utilization of low rank coal, some solutions for inhibit pathway of thermal fragmentation were proposed. The fragmentation mechanism could be revealed by analyzing and regulating the physical and chemical properties of low rank coal and the transformation conditions. Based on the thermal reaction products, the relationship between fragmentation and heating process was established. The amount of dust could be decreased through exploiting new reactor which minimized the motion of coal particles. A technology approach for clean and efficient utilization of low rank coal was built.

**Key words:** low rank coal; combustion; fragmentation; pulverization; dust

## 0 引 言

低阶煤是动力煤的主要原料,然而由于燃煤特别是褐煤燃烧产生的粉尘污染问题越来越严重,如果对低阶煤在热转化过程中的破碎、粉化规律有足够的认识,就可能得到抑制粉尘形成的可行技术。煤受热破碎主要发生在干燥脱水阶段和脱挥发分阶

段,机械力作用贯穿受热过程始末,煤颗粒在不同的热转化过程中受煤质特性、热应力等影响容易发生热破碎生成较小颗粒。对于流化床锅炉燃烧而言,热破碎会影响炉内颗粒粒度分布、燃烧特性和传热特性,降低锅炉的燃烧效率,煤热破碎产生的粉尘会阻碍气流畅通,增加炉内的阻力及带出物;热破碎对于热解工艺而言,会造成热解油气中的粉尘含量增

收稿日期:2016-08-19;责任编辑:白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2016.06.009

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21406105)

作者简介:常赵刚(1989—),男,河南驻马店人,硕士研究生,从事煤炭热解转化、炼焦等方面研究工作。E-mail: changzhaogang01@163.com。通讯

作者:周琦(1982—),男,山东汶上人,博士,从事煤炭热解转化等方面研究工作。E-mail: zhouqi0419@163.com

引用格式:常赵刚,王利斌,裴贤丰,等.低阶煤热破碎研究现状及建议[J].洁净煤技术,2016,22(6):46-51.

CHANG Zhaogang, WANG Libin, PEI Xianfeng et al. Status and suggestion of thermal fragmentation of low rank coal [J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(6): 46-51.

加,而粉尘与高黏度焦油难以有效分离,造成管路堵塞,影响热解系统正常运转。因此,正确认识煤颗粒在热转化过程中破碎、粉化的规律、机理及模型等,对于实现煤炭的大规模清洁利用具有重要意义。国内外针对煤颗粒燃烧过程的热破碎进行了广泛研究。Chirone等<sup>[1]</sup>通过流化床燃烧试验提出“一次破碎”概念,认为一次破碎是由于煤颗粒受热冲击及孔隙结构中挥发分集聚的膨胀压力共同作用发生的。Sundback等<sup>[2]</sup>研究单个煤颗粒的受热破碎特性,提出“二次破碎”,认为二次破碎是由于煤颗粒内部结合各元素间的化学键力被热应力作用破坏,并在流化床机械力作用下,煤粒中不规则结构崩裂而发生破碎。Chirone等<sup>[3]</sup>对大颗粒煤受热脱挥发分破碎进行了系统研究。Dakić等<sup>[4]</sup>利用流化床研究了6种不同煤阶程度煤的热破碎,认为挥发分、孔隙结构和粒径对大颗粒煤的破碎特性有重要影响。Dacombe等<sup>[5]</sup>通过单颗粒煤的沉降炉试验研究发现高挥发分煤受热破碎程度剧烈,且大颗粒煤的中心部分最先达到破碎临界点。国内较早开展热破碎研究的是浙江大学,张宏焘<sup>[6]</sup>利用小型流化床研究了床层温度、煤阶程度、停留时间、粒径和显微组分对十余种典型煤种的受热破碎影响。马利强等<sup>[7]</sup>通过比较不同宏观煤岩类型(暗煤和亮煤)对煤颗粒受热的影响,发现亮煤比暗煤更容易发生爆裂。吴正舜等<sup>[8]</sup>分析了煤种、粒径、加热速率等因素的影响,建立了一维

破碎模型,较好地解释了燃烧过程热破碎特性。笔者论述了煤炭燃烧时受热发生热破碎的机理,分析了挥发分、粒径、孔隙结构、煤岩组分、升温速率、加热终温等因素对热破碎的影响规律,通过对比指出目前研究的不足,并找出抑制煤颗粒热破碎的途径及方法,为实现低阶煤的大规模工业应用奠定基础。

## 1 煤颗粒热破碎的研究现状及进展

### 1.1 煤燃烧受热破碎机理

Massimilla和Chirone等通过流化床燃烧系统研究煤的破碎,将煤的燃烧热破碎分为3类。

1) 一次破碎,发生在煤颗粒燃烧前,煤颗粒受高温影响产生热应力,同时挥发分受热析出,在颗粒内部膨胀产生较大压力,两者共同作用下使煤颗粒发生破碎<sup>[9]</sup>。Massimilla和Chirone利用Weibull理论研究煤颗粒的球形结构的一次破碎机理<sup>[10]</sup>,建立了破碎模型如图1所示。其中 $T(r,t)$ 为热量函数, $N(r,t)$ 为挥发分析出量函数, $P(r,t)$ 为压力函数。煤燃烧的一次破碎模型由4个子模型构成,包括煤颗粒传热子模型、脱挥发分子模型、挥发分的传递子模型以及煤颗粒网孔中的压力集聚子模型。破碎模型关联了累积破碎概率与脱挥发分产生的荷载应力、煤颗粒表面张力和表面抗力以及煤颗粒承受的最大临界应力,分析结果认为当荷载应力超出颗粒最大表面抗力时,颗粒发生热破碎。

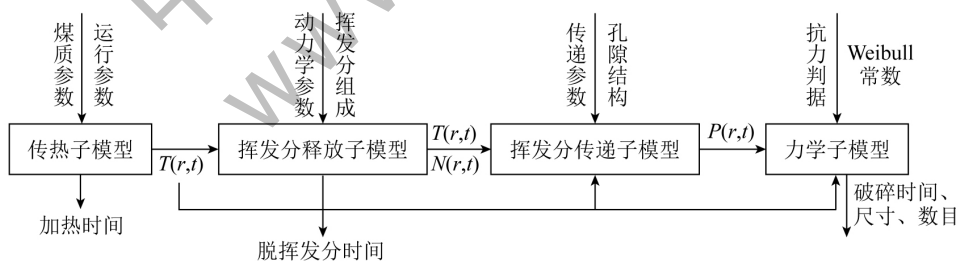


图1 煤燃烧的一次破碎模型

Fig. 1 Primary fragmentation model of coal combustion

2) 二次破碎,发生在煤颗粒燃烧过程中,Sundback等<sup>[2]</sup>认为煤的二次破碎源于煤颗粒内部结合各元素间的化学键力被受热产生的高温热应力削弱、破坏,在流化床碰撞、磨损的机械力作用下,煤颗粒中的不规则晶格结构发生崩裂破碎。Marban等<sup>[11]</sup>应用碰撞理论解释了无烟煤燃烧过程中二次破碎随粒径增加而变化明显,焦颗粒的碰撞次数随其燃烬时间延长而增多的原因,认为二次破碎主要

归因于燃烧中颗粒湍动引起颗粒间碰撞。

3) 逾透破碎,发生在煤颗粒燃烧的最后阶段,燃烧完全受内表面反应控制,逾透破碎根据破碎方式不同可分为均衡逾透和外围逾透。随着燃烧的进行,当燃烧进程处于反应动力学控制区时,煤颗粒的孔隙率受热反应影响大于最大临界值,颗粒破碎迅速扩展到整个颗粒,发生均衡逾透;当燃烧进程受表面扩散控制时,煤颗粒外围发生部分破碎,此时为外

围渗透。Fuertes 等<sup>[12]</sup>简化煤颗粒结构为多孔的网状结构,利用拓扑学理论研究了煤燃烧的外围渗透破碎。研究发现氧在燃烧过程中逐步扩散到煤颗粒内部孔隙,产生径向的温度梯度,造成煤颗粒中心孔隙率减少,而总孔隙量随燃烧进程增多,当外围部分孔隙率超出最大临界值时,同时受机械力作用,发生外围颗粒的剥落。Liu 等<sup>[13]</sup>通过引用渗透理论分析了煤的孔隙结构变化与受热破碎间存在的关联,指出高温下的煤粒结构由外围不均匀的多孔结构、内部中空组成,煤颗粒的内部孔隙与外部环境的连接点以及外围的大孔隙间较易出现的薄弱点,随温度升高被燃断,形成破碎。

Beer 等<sup>[14]</sup>研究煤粒燃烧时细粒子产生过程并提出了相应的模型,认为煤在加热过程中形成旋转的煤胞,内部包裹着由挥发分析出形成的气体。在一定压力下,气泡由内部喷出,在形成焦炭的同时也产生了大量的细粒子,较大颗粒的焦炭继续破碎形成细粒子。Daki Ć 等<sup>[4]</sup>在各反应温度条件下,计算单个球形大颗粒内部不同位置产生的压应力与拉应力的分布,并与煤颗粒自身材料的抗压能力与抗拉强度进行对比,研究发现颗粒中心部位最先达到破碎临界点,并认为大颗粒破碎时,煤粒的表面破碎成许多小颗粒,内部则破碎成较大颗粒(图2)。李爱民等<sup>[15]</sup>通过计算也得到了类似结论,在受热条件下大颗粒外围存在临界最大压应力,临界最大拉应力出现在颗粒中心,且煤粒破碎主要是拉应力的作用。

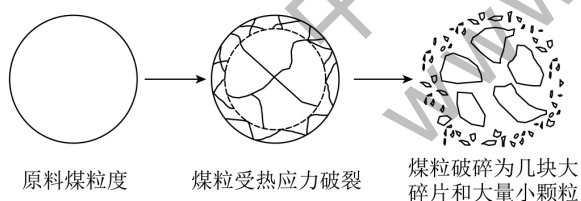


图2 球型颗粒因热应力作用破碎机理示意

Fig. 2 The fragmentation mechanism of spherical particles caused by the thermal stress

## 1.2 热破碎的影响因素

### 1.2.1 挥发分的影响

煤颗粒挥发分对材料本身的应力影响不大,但当对煤颗粒加热后,颗粒内部因挥发分集聚而产生膨胀压力会形成较大的应力,所以挥发分的析出会造成颗粒的破碎。Zhang 等<sup>[16]</sup>研究发现,循环流化床锅炉中煤颗粒受热发生破碎的程度随挥发分的增加而变得剧烈。姚海<sup>[17]</sup>利用热机械分析仪研究燃煤过程中煤颗粒热膨胀破碎特性,发现挥发分的析

出过程是煤颗粒最有可能发生膨胀破碎的阶段。挥发分较高时,挥发分热解析出使颗粒内部膨胀压力急剧增大,颗粒较易粉化。吴正舜等<sup>[8]</sup>应用一维应力场模型研究球形煤粒截面上作用的法向集聚压力和材料本身应力作用,并利用 Simpson 公式计算煤粒内部压力随时间和位置的分布场,认为挥发分在煤粒内部集聚产生的压力梯度是煤燃烧破碎的重要原因。

### 1.2.2 初始粒径的影响

煤颗粒进入高温反应器后,颗粒表面温度迅速升高至反应器温度,但内部温度受传热影响升温较缓慢,从而与表面产生较大的温度差,颗粒内部产生较大的热应力。由于煤本身的不均匀特性,受热也体现不均匀性,随着粒径增大,颗粒受热不均匀性加剧,导致颗粒受热应力作用明显;同时粒径的增大导致颗粒受热挥发分析出路径增长,阻力加大,造成颗粒内部挥发分集聚,产生较高的膨胀压力;此外,颗粒的内部裂隙和缺陷随粒径的增大而增多,也是致使颗粒易破碎的原因。Chirone 等<sup>[3]</sup>利用流化床研究不同产地无烟煤的热破碎特性,发现煤颗粒的破碎程度随颗粒粒径的增大而加剧。Daki Ć 等<sup>[4]</sup>通过沉降炉研究单颗粒煤燃烧,指出随着粒径的增大,颗粒的强度减小,内部张力增大。

### 1.2.3 孔隙结构的影响

煤的孔隙大小影响传热和挥发分的析出速度,从而造成热应力集聚,引起煤颗粒的粉化。大孔隙较多时,可作为挥发分析出的快速通道,利于挥发分及时析出,煤颗粒不易粉化。Lee 等<sup>[18]</sup>利用热天平反应器研究了韩国无烟煤孔隙对破碎的影响,结果表明,破碎指数随孔隙容积的增加而降低。黄建辉等<sup>[19]</sup>、于敦喜等<sup>[20]</sup>建立了简单的煤粒一次破碎模型,研究了孔隙率对煤燃烧粉化的影响,发现随孔隙率的增加煤粉化程度减小。步学朋等<sup>[21]</sup>研究高阶无烟煤的微晶结构大小、破碎裂隙发育、孔洞分布情况以及孔容大小对热爆裂特性的影响,发现微晶结构越大,裂隙发育越不明显,且孔洞小分布较差,爆裂越剧烈,反之稳定性高。

### 1.2.4 煤岩组分的影响

煤是由多种有机显微组分和矿物质组成的。煤的有机显微组分由镜质组、惰质组和壳质组组成,不同显微组分的硬度、脆度、孔隙率、比表面积等存在差异。煤热转化过程中,不同作用条件下各显微组分将发生不同的物理、化学变化,从而发挥不同作

用。何宏舟<sup>[22]</sup>利用小型流化床对无烟煤进行破碎研究,发现富含镜质组的亮煤相比富含惰质组的暗煤更易于发生热破碎,亮煤破碎生成较多小颗粒,而暗煤则破碎不明显。亮煤中的孔隙少,结构较致密等原因使煤颗粒燃烧更易发生破碎。马利强等<sup>[7]</sup>在流化床上对烟煤破碎进行研究,指出亮煤的爆裂程度比暗煤高,原因是亮煤中的水分和挥发分较高,受热过程中析出量较多,且由于亮煤结构致密,析出物难以及时析出,造成析出物集聚,产生较大的膨胀压力,加剧了颗粒的一次爆裂。

### 1.2.5 热转化条件的影响

除了煤颗粒自身的物理、化学性质对破碎有影响外,外部的热转化条件(如升温速率和加热终温等)也会影响破碎的规律。

1) 不同升温速率下得到的煤焦由于挥发分析出速率不同,孔隙结构存在很大的不同,采用慢、中速升温可促进孔隙结构发育;快速升温增加石墨化程度,使颗粒内部结构更加规整,孔隙量减少。半焦的不同孔隙结构会影响挥发分的析出,造成破碎程度的差异化,升温速率增大会使脱出挥发分在煤中的集聚程度加大,产生较大的膨胀压力,导致煤颗粒粉化程度加剧。吴正舜等<sup>[8]</sup>通过在流化床上研究2~4 mm无烟煤和烟煤的燃烧粉化试验,发现随着加热速率的增加,煤的粉化程度加大。

2) 热解温度越高,颗粒所受的热应力越大,越容易出现裂纹和孔隙,挥发分产生的量和逸出速率也增大,能够促进颗粒孔隙的发展。但当热解温度升到一定程度后,半焦的孔隙结构会发生烧结,导致颗粒表面形成致密的保护层,造成比表面积和孔体积降低,影响颗粒的破碎。杨杰<sup>[23]</sup>利用管式炉研究了贫煤和无烟煤燃烧的一次破碎特性,发现在900℃内,破碎程度随反应器温度升高而加剧,煤颗粒入炉后颗粒中心与外表面形成较大的温度梯度,产生的热应力增大,同时挥发分的析出量急剧增加,导致挥发分在颗粒内部集聚,从而使煤颗粒更易于破碎。

### 1.3 热破碎的数学模型描述

Chen等<sup>[24]</sup>根据煤的非各向同性的结构特点,应用随机函数模型研究煤颗粒的一次破碎的分布概率情况。为了较准确地反映颗粒粒径转变概率,利用转化强度函数,结合煤颗粒粒径分布,发现转化强度函数和入炉煤颗粒的粒径平方成反比。通过计算煤颗粒破碎的最大熵形式并对其求导,得出一次破碎任意时刻的最大连续可能尺寸分布函数关系式

$$f(D) \approx (\pi/2) V_m^{-1} D^2 \exp\left(-\frac{\pi D^3}{6 V_m}\right) \quad (1)$$

式中  $f(D)$  为任意时刻最大连续可能尺寸分布函数, mm;  $V_m$  为颗粒的平均体积, L;  $D$  为颗粒粒径, mm。

Lee等<sup>[18]</sup>通过模拟流化床反应器研究韩国无烟煤的一次破碎特性,结合颗粒本身的煤质特性及反应器运行条件,得到了韩国无烟煤在受热破碎前后的平均粒径间的关系式

$$\bar{d}_{out} = 2.75 \bar{d}_{in}^{0.89} T^{-0.2} C_c^{0.11} H^{0.11} \quad (2)$$

式中  $\bar{d}_{out}$  为破碎后颗粒平均直径, mm;  $\bar{d}_{in}$  为入炉原煤的平均粒径, mm;  $T$  为床层温度, °C;  $C_c$  为碳含量;  $H$  为哈氏可磨性指数。

Cui等<sup>[25]</sup>、Marban等<sup>[11]</sup>通过研究流化床中煤燃烧的二次破碎行为,得出2个统计函数描述二次破碎后煤颗粒的分布情况,其中描述焦炭粒径为  $d_b$  的颗粒发生破碎的概率密度函数为

$$F(d_b) = \frac{1}{\sigma_{dev} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(d_b - d_{mean})^2}{2\sigma_{dev}^2}\right] \quad (3)$$

式中  $F(d_b)$  为概率密度函数;  $\sigma_{dev}$  为标准偏差;  $d_{mean}$  为分布平均值, 代表颗粒破碎最可能的粒径, mm。

另一个为描述破碎后颗粒尺寸的分布函数

$$f(d_f/d_b) = a_1 (d_f/d_b)^{a_2} (1 - d_f/d_b)^{a_3} \quad (4)$$

式中  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  为与煤焦特性相关的待定系数;  $d_f$  为煤粒破碎后的体积粒径, mm。

$F(d_b)$  能反应出燃烧中的破碎粒径大小,  $f(d_f/d_b)$  能够预测颗粒破碎后的粒径分布状况。

### 1.4 煤颗粒热破碎研究存在问题

煤的分子结构很复杂。煤的大分子结构是由很多结构单元组成,煤的有机成分是由大分子的网状结构组成的空间大分子聚集体,这些结构单元有着类似但又不完全相同的基本化学结构,通过桥键等彼此相连,低变质煤中性质活泼的侧链、桥键及各种官能团较多,芳香化程度低,芳香碳间的结合力小,容易断开,抗氧化能力差。当煤的大分子结构被加热到一定温度时,煤颗粒会粉化成很多带有结构单元的碎片。

目前的研究工作主要是针对煤颗粒燃烧过程的破碎,关于热解过程中的破碎研究报道较少。煤颗粒自身的物理化学性质是影响其破碎的内因,由于在挥发分、粒径、孔隙结构及煤岩组分等方面的差异,造成不同煤种受热过程中的破碎方式和机理的

不同。虽然目前已有关于煤的性质与破碎关系的研究,但对煤的分子结构、显微组分等特性是如何影响破碎行为的问题认识少。另外,目前单纯的研究各单因素对破碎的影响不科学,因为各因素之间存在交互作用,如挥发分析出速率与粒径大小、升温速率以及孔隙结构都有关系,所以研究热破碎机理时应考虑到各因素间的交互作用。

除了煤颗粒自身煤质特性的影响外,外部热转化条件是影响煤颗粒破碎的外因,因为颗粒破碎过程与床内温度、升温速率、颗粒流动、物料浓度及停留时间等有关,热转化条件的差异会形成不同的破碎规律。目前主要是针对升温速率、反应终温开展的研究,而反应器内流动、传热等转化条件对破碎的影响未被系统研究。

## 2 抑制低阶煤受热破碎的方法及途径

目前针对煤颗粒受热过程发生热破碎所带来的问题,工程上尚未有妥善的解决方案。应以煤的自身物理化学性质(内因)为出发点来研究煤热转化过程中的破碎机理,同时兼顾外部热转化条件(外因)的思路,结合受热反应产物组成及性质的表征,研究煤颗粒受热破碎规律及机理,探索抑制煤颗粒受热发生破碎的方法及途径。

具体途径可通过分析煤的物理、化学性质(挥发分、粒径、孔隙结构、煤岩组分、分子结构、显微组分等)和热转化条件(升温速率、加热终温、颗粒流动、传热等),研究不同条件下煤颗粒的热破碎现象,分析热反应产物组成变化,合理推测破碎过程与受热过程的关系,探寻各工艺因素对热破碎特性的影响,研究热转化过程破碎的主要影响因素及各因素的交互性作用。其中,煤质特性中的挥发分、粒径、孔隙结构等可通过工业分析、筛分、BET(比表面积测试)等检测;通过分析煤、热解半焦及粉尘中的主要官能团,如芳香烃、脂肪烃和含氧官能团的变化状况来探索煤的分子结构对粉化的作用机理。考察外部转化条件时可通过调控加热系统的升温速率及终温实现,而颗粒流动对破碎的影响是在流化床、固定床、移动床等不同床型中通过改变气流的方向、气流的大小、停留时间等来实现。

另外,需对反应器结构进行优化创新。因为颗粒在反应器内运动过程中,煤颗粒之间以及颗粒与炉壁间都存在较大磨损,煤颗粒在不同反应器内的流动特性不同,颗粒在流化床内的机械破碎比固定

床和移动床要高,加之受热过程中煤颗粒本身结构变得脆弱,易产生剧烈的粉化现象,所以应选择固定床或移动床开发低阶煤的利用。但是,固定床和移动床内传热、传质速度相对较慢,会影响煤颗粒的升温、挥发分的释放及产物的品质,所以应通过优化反应器结构,在反应器内设置特殊结构的内构件来调控颗粒的流动及传热传质速率,并尽量避免颗粒床层的大幅度移动,最小化颗粒运动,使煤料在反应器内缓慢移动,减小因机械力作用而引起煤颗粒的热粉化。

## 3 结 语

目前,低阶煤热转化技术因存在颗粒破碎、粉化产生大量的粉尘,阻碍了低阶煤分级转化技术的工业应用,所以亟需研究低阶煤受热破碎、粉化的机理及规律,并探索抑制破碎并降低粉尘含量的方法及途径。现有研究主要针对煤燃烧过程中破碎机理、模型的研究,获得了挥发分、孔隙结构、粒径、加热速率、加热终温等因素对破碎的影响规律,但未明确影响煤颗粒破碎的主要因素及各因素之间的交互作用。针对上述存在的问题,笔者提出以煤的自身物理、化学性质(内因)为出发点来研究低阶煤热转化过程中的破碎机理,兼顾外部热转化条件(外因)的方法,同时优化反应器结构,最小化颗粒的运动抑制粉尘的产生。

### 参考文献(References):

- [1] Chirone R, Massimilla L. Primary fragmentation of coal in fluidized bed combustion [C]//22<sup>th</sup> Symposium on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1988: 267-279.
- [2] Sundback C A, Beer J M, Sarofim A F. Fragmentation behavior of single coal particle in a fluidized bed [C]//20<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1984: 1495-1503.
- [3] Chirone R, Massimilla L. Primary fragmentation in fluidized bed combustion of anthracites [J]. Power Technology, 1991, 64(3): 249-258.
- [4] Dakić D, Honing G, Valk M. Fragmentation and swelling of various coals during devolatilization in a fluidized bed [J]. Fuel, 1989, 68(7): 911-916.
- [5] Dacombe P, Pourkashanian M, Williams A, et al. Combustion-induced fragmentation behavior of isolated coal particles [J]. Fuel, 1999, 78(15): 1847-1857.
- [6] 张宏焘. 煤在流化床燃烧过程中的破碎特性及焦炭表面灰层扩散传质特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1990.
- [7] 马利强, 路霁鸢, 岳光溪. 流化床条件下煤的一次爆裂特性的实

- 验研究[J]. 燃料化学学报, 2000, 28(1): 44-48.  
Ma Liqiang, Lu Jiling, Yue Guangxi. Experimental study on primary fragmentation of coals in fluidized bed [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2000, 28(1): 44-48.
- [8] 吴正舜, 刘欣, 吴创之, 等. 煤在燃烧过程中的破碎[J]. 电站系统工程, 2003, 19(2): 4-6.  
Wu Zhengshun, Liu Xin, Wu Chuangzhi, et al. The fragment of coal during combustion [J]. Power System Engineering, 2003, 19(2): 4-6.
- [9] Chirone R, Massimilla L, Salatino P. Comminution of carbons in fluidized bed combustion [J]. Progress of Energy Combustion Science, 1991, 17(4): 297-326.
- [10] Chirone R, Massimilla L. The application of weibull theory to primary fragmentation of coal during devolatilization [J]. Power Technology, 1989, 57(3): 197-212.
- [11] Marban G, Pis J J, Fuertes A B. Characterizing fuels for atmospheric fluidized bed combustion [J]. Combustion and Flame, 1995, 103(1/2): 41-58.
- [12] Fuertes A B, Marban G. Modelling gasification reactions including the percolation phenomenon [J]. Chemical Engineering Science, 1994, 49(94): 3813-3821.
- [13] Liu G, Wu H, Gupta R P, et al. Modeling the fragmentation of non-uniform porous char particles during pulverized coal combustion [J]. Fuel, 2000, 79(6): 627-633.
- [14] Beer J M, Kim J S, Kim J J. Comminution characteristics of Korean anthracite in a CFB reactor [J]. Fuel, 2003, 82(11): 1349-1357.
- [15] 李爱民, 池涌, 严建华, 等. 大颗粒碳在流化床中燃烧的热应力破碎理论[J]. 煤炭学报, 1998, 23(2): 208-211.  
Li Aimin, Chi Yong, Yan Jianhua, et al. A thermal stress breakage theory for large carbon particles during combustion in fluidized bed [J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(2): 208-211.
- [16] Zhang W N, Johnsson F, Leckner B. Fluid-dynamic boundary layers in CFB boilers [J]. Chemical Engineering Science, 1995, 50(2): 201-210.
- [17] 姚海. 流化床中煤颗粒热膨胀破碎特性的实验研究与定量评价[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [18] Lee S H, Kim S D, Lee D H. Particle size reduction of anthracite coals during devolatilization in a thermobalance reactor [J]. Fuel, 2002, 81(13): 1633-1639.
- [19] 黄建辉, 徐明厚, 于敦喜, 等. 煤燃烧过程中一次破碎的影响因素分析[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(3): 519-522.  
Huang Jianhui, Xu Minghou, Yu Dunxi, et al. Significant factors affecting the primary fragmentation of coal particles during coal combustion [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(3): 519-522.
- [20] 于敦喜, 徐明厚, 黄建辉, 等. 煤焦破碎成灰模型研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(6): 1041-1044.  
Yu Dunxi, Xu Minghou, Huang Jianhui, et al. A model study on char fragmentation and ash formation [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(6): 1041-1044.
- [21] 步学朋, 陈家仁, 彭万旺. 高煤阶无烟煤热爆机理研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(S1): 209-212.  
Bu Xuepeng, Chen Jiaren, Peng Wanwang. Study on thermal cracking of high rank anthracite [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(S1): 209-212.
- [22] 何宏舟. CFB 锅炉洁净燃烧福建无烟煤的理论与试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [23] 杨杰. 燃煤一次破碎特性的实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [24] Chen W Y, Nagarajan G, Zhang Z P. Stochastic modeling of devolatilization-induced coal fragmentation during fluidized-bed combustion [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1994, 33(1): 137-145.
- [25] Cui Y B, Stuvbington J F. A mathematical model of in-bed char combustion of Australian coals in PFBC [J]. Fuel, 2001, 80(14): 2049-2056.

## (上接第45页)

- Chen Hongbo, Li Wenhua, Jiang Ying, et al. Microscopic characteristics and classification of Shendong coal hydroliquefaction residues [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2006, 34(5): 513-518.
- [11] 吴秀章, 朱豫飞, 石玉林, 等. 加氢精制催化剂用于煤直接液化油品加氢稳定的研究[J]. 神华科技, 2009, 7(6): 59-63.  
Wu Xiuzhang, Zhu Yufei, Shi Yunlin, et al. Hydrotreatment of direct coal liquefaction products with a hydrofining catalyst [J]. Shenhua Science and Technology, 2009, 7(6): 59-63.
- [12] 许仁春. Shell 粉煤气化高水气比 CO 耐硫变换工艺流程优化[J]. 中氮肥, 2011(5): 1-4.  
Xu Renchun. Optimization of high water/gas ratio CO shift process flow [J]. M-Sized Nitrogenous Fertilizer Progress, 2011(5): 1-4.
- [13] 赵鹏飞, 李水弟, 王立志. 低温甲醇洗技术及其在煤化工中的应用[J]. 化工进展, 2012, 31(11): 2442-2448.  
Zhao Pengfei, Li Shuidi, Wang Lizhi. Rectisol technology and its application in coal chemical industry [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(11): 2442-2448.
- [14] Shu Geping, Zhang Yuzhuo. Research on maceral characteristics of Shenhua coal and efficient and directional direct coal liquefaction technology [J]. International Journal of Coal Science and Technology, 2014, 1(1): 46-55.
- [15] 吴秀章, 石玉林, 马辉. 煤炭直接液化油品加氢稳定和加氢改质的试验研究[J]. 石油炼制与化工, 2009, 40(5): 1-5.  
Wu Xiuzhang, Shi Yunlin, Ma Hui. Study on the hydrogenation and hydro-upgrading of oil product from direct coal liquefaction process [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2009, 40(5): 1-5.