

文章编号: 1001-1455(2010)03-0325-04

煤粉末的爆炸机理^{*}

来诚锋¹, 段滋华¹, 张永发², 张牢牢¹

(1. 太原理工大学化学化工学院, 山西 太原 030024;

2. 太原理工大学煤科学与技术教育部和山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 针对流态化炭催化 CH_4/CO_2 重整制合成气中可能存在的爆炸问题, 对煤粉末爆炸特性进行了研究, 研究表明煤粉末的挥发分含量越高, 爆炸强度越大。对煤粉末试样及爆炸产物进行的工业分析和 SEM 分析显示, 爆炸后煤粉末的挥发分降低了 5%~10%, 灰分有所增加, 而水分变化不大; 爆炸前煤粉末试样的外表形状棱角分明, 而爆炸后残余物的外表形状比较光滑, 近似球形, 且燃烧不充分。研究认为, 煤粉末爆炸的机理是煤粉末受热后, 挥发分首先被释放, 参与反应, 从而引发爆炸, 煤粉末爆炸实质上是气体爆炸。

关键词: 爆炸力学; 爆炸机理; SEM 分析; 煤粉末; 挥发分

中图分类号: O389

国标学科代码: 130.35

文献标志码: A

1 引言

煤粉末爆炸是一个非常复杂的过程, 受大量物理因素的影响。许多学者都对炭粉末爆炸进行过大量的研究^[1-8], 但对煤粉末的爆炸机理尚无定论。本文中针对国家重点基础研究发展规划“气化煤气与热解煤气共制合成气的多联产应用的基础研究”子课题“无变换焦炉煤气调 H_2 及 CO_2 减排基础研究”, 在“炭催化剂 + O_2 + CH_4 + CO_2 ”体系爆炸特性研究基础上^[8], 通过对爆炸产物进一步的工业分析和扫描电子显微镜 (SEM) 分析, 对煤粉末爆炸机理进行深入的探讨。

2 煤粉末挥发分对爆炸的影响

分别以 200 目的大同烟煤粉末和古交肥煤粉末为试样, 在初始压力 (表压) 为 0.04 MPa、反应管温度为 700 K 下进行实验。其中大同烟煤粉末的挥发分为 31.48%, 古交肥煤粉末的挥发分为 23.98%。流态化煤粉末挥发分对最大爆炸压力 p_{\max} 以及最大爆炸压力上升速率 $(dp/dt)_{\max}$ 的影响如图 1、2 所示, 图中 V 为挥发分。大同烟煤粉末的最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率在煤粉末质量浓度为 5.1 g/L 时达到最大, 分别为 0.36 MPa 和 35 MPa/s; 古交肥煤粉末的最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率在煤粉末质量浓度为 5.5 g/L 时达到最大, 分别为 0.240 MPa 和 6.7 MPa/s。

从图 1、2 中可以看出, 高挥发分流态化煤粉末比低挥发分流态化煤粉末的最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率大, 且流态化煤粉末挥发分对最大爆炸压力上升速率的影响非常显著。从图 1、2 中还可以看出, 高挥发分流态化煤粉末获得最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率时的流态化煤粉末质量浓度 (5.1 g/L) 比低挥发分流态化煤粉末的质量浓度 (5.5 g/L) 略低一些。

流态化煤粉末受热后, 粒子表面的分子由于热分解产生气体并分布在粒子周围。这些气体与氧气接触后发生氧化反应, 释放热量, 从而加速煤的热分解, 加速可燃性物质 (挥发分) 的析出和与氧气的混合, 进一步加强氧化反应。因此, 煤粉末爆炸时的氧化反应主要是在气相内进行的, 实质上是气体爆炸。流态化煤粉末被加热到足够的温度时高挥发分流态化煤粉末比低挥发分流态化煤粉末释放出更多的挥发分, 爆炸强度也就更高。由于流态化煤粉末爆炸可看作为气体爆炸, 这样在相同条件下高挥发分流态

* 收稿日期: 2009-03-31; 修回日期: 2009-08-02

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2005CB221202)

作者简介: 来诚锋 (1985 —), 男, 硕士。

化煤粉末就能在较低的流态化煤粉末质量浓度下获得高强度爆炸的挥发分浓度,所以高挥发分流态化煤粉末会在相对低的流态化煤粉末质量浓度下获得最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率。

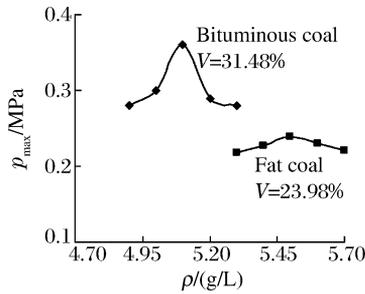


图 1 挥发分对最大爆炸压力的影响

Fig. 1 The influence of the carbon powder volatile on maximum explosion

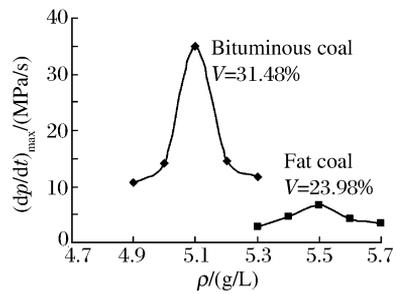


图 2 挥发分对最大爆炸压力上升速率的影响

Fig. 2 The influence of the carbon powder volatile on maximum rates of pressure

3 工业分析比较

大同烟煤粉末、古交肥煤粉末爆炸前后的工业分析数据分别见表 1,表中 M 、 A 分别为水分和灰分。从表中可以发现,爆炸后煤粉的挥发分有所减少,而灰分有所增加(由于挥发分的减小而导致灰分的相对增加),水分损失并不大。爆炸后煤粉的挥发分减少了 5%~10%,约占煤粉爆炸前工业分析值的 20%~30%。其中高挥发性

的大同烟煤粉末的挥发分减少了 8.74%,约占爆前的 28%,低挥发性的古交肥煤粉末的挥发分减少了 5.64%,约占爆前的 24%。从中可以看出高挥发性煤粉末比低挥发性煤粉末更容易释放挥发分。

从工业分析数据得出,煤粉末的爆炸是微小的煤粉粉尘粒子处于悬浮状态的短时间内完成的,对于大多数煤粉粉尘粒子来说,只是一部分挥发分释放出来参与了反应,对于少部分粒子来说,只是表面被烧焦甚至根本没有参与反应。煤粉末挥发分的多少对爆炸强度影响显著,即实质上煤粉末爆炸主要是由挥发分析出引起的气体爆炸。

4 SEM 图像比较

在扫描电子显微镜上对不同煤粉及爆炸后收集到的残余物进行了图像扫描,如图 3、4 所示。从图 3、4 可以看出,煤粉末爆炸后有多颗粒粘结成团的现象,这是因为,当煤粉发生爆炸时,煤粉颗粒表面软化,粘性增强,而爆炸产生的冲击波使煤粉颗粒发生碰撞并粘结成团。通过比较可以看出,煤粉末原样的外表形状棱角比较分明,而发生爆炸后收集到的爆炸残余物的外表形状比较光滑,近似成球形。

实验工况下,煤粉末爆炸时间很短,一般不超过 0.5 s,环境温度上升产生的能量使煤粉末颗粒表面温度很快升高并释放出挥发分,挥发分的氧化和爆炸放出的大量热使温度迅速升高,这种高温使煤粉末

表 1 煤粉末爆炸前后的工业分析

Table 1 The industry analysis of experimental coal

煤粉末	状态	M / %	A / %	V / %
大同烟煤粉末	爆前	1.75	11.55	31.48
	爆后	1.31	16.19	22.74
古交肥煤粉末	爆前	1.16	10.55	23.98
	爆后	1.01	12.42	18.34

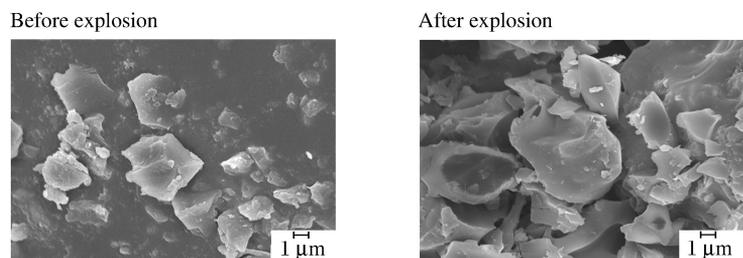


图 3 大同原煤粉爆炸前后的放大图像

Fig. 3 The images of Datong carbon powder before and after explosion

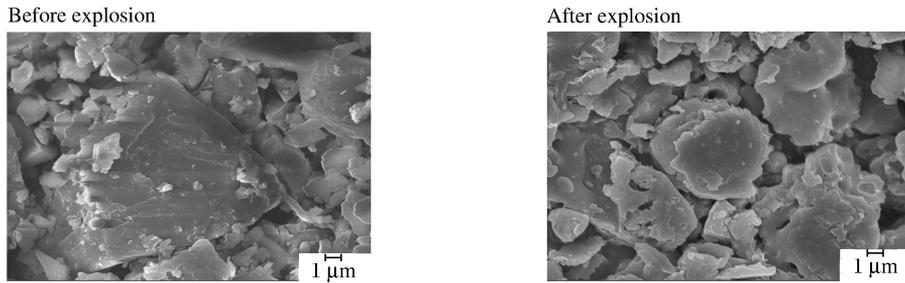


图 4 古交原煤粉爆炸前后的放大图像

Fig. 4 The images of Gujiao carbon powder before and after explosion

颗粒表面发生塑性变形,甚至使颗粒表面变成近似流动的状态,由于表面张力的作用,煤粉末由棱角形转向比较光滑的球形,形成了微球。这种微球形成机理与煤粉末热解模型(图 5)和煤粉末燃烧微球的形成模型(图 6)吻合^[9-11]。煤粉末颗粒在爆炸过程中反应时间短,燃烧不完全,部分粒子形成微球,部分粒子被烧焦,这些结果都说明煤粉末颗粒只是部分参加了反应,爆炸主要由挥发分引起,即煤粉末爆炸实质上是气体爆炸。

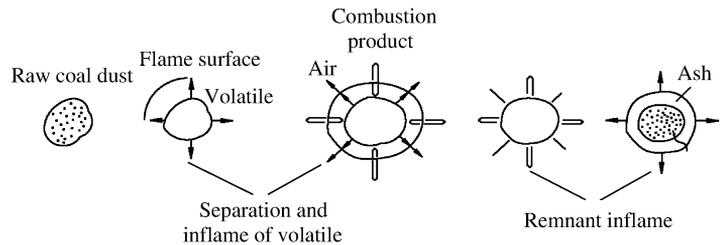


图 5 煤热解反应模型

Fig. 5 Coal pyrolysis reaction model

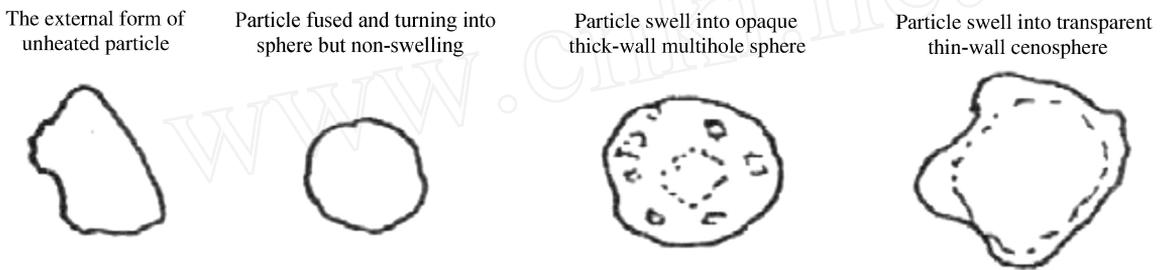


图 6 微球形成过程示意图

Fig. 6 The diagram of bead forming process

5 结 论

从煤粉末挥发分对爆炸强度的影响、煤粉末爆炸前后工业分析和 SEM 分析比较中,分别得出煤粉末爆炸主要是由于挥发分的释放,参与一系列化学反应造成的,煤粉末颗粒只是少部分参加了反应。即煤粉末爆炸本质上属于气相爆炸,但其过程远比气相复杂。煤粉末爆炸经过以下发展过程:(1) 悬浮于空气的煤粉末遇高温后迅速地热解而产生可燃性气体;(2) 可燃性气体与空气混合而燃烧、引爆并放出大量的热;(3) 受热后的煤粉末加速碰撞聚集,其热量以分子热对流、热传导和火焰辐射的方式传给附近悬浮着的煤粉末,使得这些煤粉末受热后挥发分进一步析出,并进入爆炸反应。煤粉末爆炸主要是由于挥发分的析出和燃烧。

参考文献:

[1] Cashdollar K. Coal dust explosibility[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1996,9(1):65-76.
 [2] Cashdollar K. Overview of dust explosibility characteristics[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2000,13(3-5):183-199.

- [3] Dahoe A E, Cant R S. On the transient flow in the 20-liter explosion sphere[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2001, 14(6):75-487.
- [4] Going J, Chatrathi K, Cashdollar K. Flammability limit measurements for dusts in 20-L and 1-m³ vessels[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2000, 13(3-5):209-219.
- [5] Chatrathi K. Dust and hybrid explosibility in a 1 m³ spherical chamber[J]. *Process Safety Progress*, 1994, 13(4):183-189.
- [6] Proust C, Accorsi A, Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the "20 L sphere" and with the standard "ISO 1 m³ vessel". Systematic comparison and analysis of the discrepancies[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2007, 20(4-6):599-606.
- [7] Paul R, Atreyee B, Faisal I. Dust explosion hazard of pulverized fuel carry-over[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 122(1-2):23-30.
- [8] 段滋华, 来诚锋, 张永发, 等. 流态化炭粉在非等容管道中的爆炸特性研究[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(5):78-84.
DUAN Zi-hua, LAI Cheng-feng, ZHANG Yong-fa, et al. Fluidization carbonaceous catalyst fines explosibility characteristics[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(5):78-84.
- [9] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1996:93-102.
- [10] 胡双启, 张景林. 燃烧与爆炸[M]. 北京:兵器工业出版社, 1992:62-68.
- [11] 李延鸿. 粉尘爆炸的基本特征[J]. *科技情报开发与经济*, 2005, 15(14):130-131.
LI Yan-hong. Basic features of the dust explosion[J]. *Sci/tech Information Development & Economy*, 2005, 15(14):130-131.

Explosion mechanism of carbon powder^{*}

LAI Cheng-feng¹, DUAN Zi-hua¹, ZHANG Yong-fa², ZHANG Lao-lao¹

(1. *College of Chemistry and Chemical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;*

2. *Key Laboratory of Coal Science and Technology Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)*

Abstract: Aimed at the explosion of the CH₄/CO₂ reforming reaction, a series of investigations were carried out to explore the explosion characteristics of the carbon powder. It is indicated that the higher the volatile content in the carbon powder, the greater the explosion intensity. The coal powder samples and the explosion products were analyzed by the industry and SEM. The industry analysis shows that after explosion the volatile content in the coal powder decrease 5% ~ 10%, the ash content increases slightly and the moisture content changes weakly. The SEM analysis reveals that the explosion products appear similar to spheres and smoother than the original samples, and that the coal powder cannot combust sufficiently. Investigated results display the explosion mechanism that the volatile matter is firstly released from the heated coal powder samples and joins in reaction, consequently causes explosion. In essence, the carbon powder explosion is a gas explosion.

Key words: mechanics of explosion; explosion mechanism; SEM analysis; carbon powder; volatile matter

* Received 31 March 2009; Revised 2 August 2009

Corresponding author: ZHANG Yong-fa, yongfaz@tyut.edu.cn

(责任编辑 曾月蓉)