

# 中国油页岩粉尘爆炸特性实验研究

于立富,李刚,潘超,苑春苗

( 东北大学 资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110819 )

**摘 要:** 为掌握中国油页岩粉尘爆炸特性,利用标准测试装置对国内4个主要矿区的油页岩样品进行了粉尘着火敏感度及爆炸猛烈度实验研究,并和煤粉尘的爆炸特性进行了对比分析.结果表明,粉尘层最低着火温度为 $240\sim 280\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,粉尘云最低着火温度为 $440\sim 560\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,与烟煤热引燃敏感性近似,油页岩粉尘云最小点火能为 $0.2\sim 16\text{ J}$ ,分布范围较宽,其大小与样品挥发分含量负相关,粉尘爆炸下限为 $200\sim 225\text{ g/m}^3$ ,高于烟煤,爆炸猛烈度在 $300\sim 2\,500\text{ g/m}^3$ 质量浓度范围内表现先增后减的趋势,最大值为烟煤的 $2/3$ .研究结果对了解中国油页岩粉尘爆炸危险性、选择工艺防爆方法具有参考价值.

**关 键 词:** 粉尘爆炸;爆炸特性参数;着火敏感度;爆炸猛烈度;爆炸危险性

中图分类号: X 932 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)08-1203-04

## Experimental Research on China's Oil Shale Dust Explosibility

YU Li-fu, LI Gang, PAN Chao, YUAN Chun-miao

( School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LI Gang, E-mail: ligang@mail.neu.edu.cn )

**Abstract:** To understand China's oil shale dust explosion parameters, by using standard apparatus, a set of experiments has been conducted on the ignition sensitivity and the explosion severity of shale dusts from four main mining areas, and the results are analyzed by comparing with coal dust. The results show that the ignition temperature of the shale dust layer is between  $240\sim 280\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the dust cloud ignition temperature is between  $440\sim 560\text{ }^{\circ}\text{C}$ , both are approximate to that of bituminous coal. The minimum ignition of dust cloud has a wide distribution from  $0.2$  to  $16\text{ J}$ , which has a negative relationship with the volatile content of the shale sample. The explosion limit of oil shale is between  $200\sim 225\text{ g/m}^3$ , higher than that of bituminous coal. From  $300$  to  $2\,500\text{ g/m}^3$  the explosion severity firstly increases with the dust concentration and goes down afterward, the maximum value is about  $2/3$  of the bituminous. The results of the study are helpful for understanding shale dust explosion risk and selecting process explosion-proof methods.

**Key words:** dust explosion; explosive characteristic parameter; ignition sensitivity; explosion severity; explosion risk

油页岩是一种低热值固体化石燃料,其有机质含量通常为 $15\%\sim 50\%$ .在能源消费增加和石油日益紧缺的形势下,油页岩以其资源丰富和开发利用可行性被列为未来重要的接替能源.我国油页岩储量在7 000亿t以上,折算成页岩油近500亿t,有巨大的综合开发利用价值.油页岩资源的利用方式主要有两种:作为原料用于炼油,以替代石油;作为燃料,以粉末状直接燃烧发电.这

两种方式均会产生大量油页岩粉尘,遇到足够能量点火源即有可能发生粉尘爆炸事故<sup>[1]</sup>.

对于可燃粉尘的爆炸危险性 Eckhoff 等已做了广泛研究<sup>[2]</sup>.但是涉及油页岩粉尘的文献较为少见,仅有约旦学者 Hamdan 等<sup>[3-4]</sup>对不同粒径的油页岩粉尘最低着火温度(MIT)和最小爆炸浓度(MEC)进行了实验研究,并对油页岩粉尘和橄榄燃料粉末的爆炸性进行了对比研究;约旦另一

学者 Sweis<sup>[5]</sup>用 Hartmann 装置对约旦油页岩粉尘的爆炸下限进行了研究. 国内学者对油页岩燃烧特性进行了较广泛的研究<sup>[6]</sup>,但未认识到油页岩粉尘本身的爆炸危险性. 到目前为止,国内还没有关于油页岩粉尘爆炸特性的研究成果发表,对油页岩利用过程的爆炸危险分析还处于经验和定性分析阶段.

吉林桦甸、辽宁抚顺、山东龙口和广东茂名是我国油页岩的主要矿产区. 本文对这 4 个产区的油页岩粉尘进行了取样,并进行系统的着火爆炸特性测试研究,以期获得我国油页岩粉尘的爆炸特性规律,为预防油页岩利用过程发生粉尘爆炸事故奠定实验基础,也可防爆设计和管理工作提供技术依据.

## 1 试样准备及工业分析

从龙口、茂名、桦甸及抚顺四个油页岩产区现场采取油页岩原矿石,利用球磨机粉碎研磨,取 200 目(100 目 = 74  $\mu\text{m}$ )筛下物为实验样品,中位径  $D_{50}$  分别为 76.97、51.99、73.75、80.31  $\mu\text{m}$ ,各试样工业分析结果见表 1.

表 1 油页岩工业分析数据(质量分数)					
Table 1 Industry analysis data of oil shale %					
序号	试样名称	工业分析			
		挥发分	水分	灰分	固定碳
1 <sup>#</sup>	龙口油页岩	39.15	1.50	49.28	10.07
2 <sup>#</sup>	茂名油页岩	29.47	2.87	67.76	0.10
3 <sup>#</sup>	桦甸油页岩	27.11	3.87	69.11	0.09
4 <sup>#</sup>	抚顺油页岩	22.73	1.89	74.30	1.08

## 2 实验测试

### 2.1 着火敏感度参数测试

粉尘云最低着火温度(MIT-C)通过 G-G 炉

装置测定. G-G 炉为下端开口的竖直石英管,上端通过石英转接头与储粉仓相连. 实验时,当炉体内温度恒定到设定值后,向储粉仓内装入一定量油页岩粉尘,并向储气罐内充入预定压力的空气,开启电磁阀,储粉仓中的粉尘被喷吹到炉体内. 若炉体下端有火焰喷出,则认为着火,若只有火星喷出,则不能认为着火.

粉尘层最低着火温度(MIT-L)采用恒温热板装置系统测定. 实验时,粉尘放入恒温热板上部 5 mm 高的粉环内并刮平. 若 30 min 粉尘层无明显自热,停止实验,然后更换粉尘层并升高热板温度,若着火,更换粉尘层继续降温实验,直至得到最低着火温度为止. 在测试中如发现粉尘有可见的发光或燃烧,或者温度达到 450  $^{\circ}\text{C}$  或测量到粉尘温度高于热板温度 250 K,则视为着火. 实验时着火点并不一定出现在粉尘层中心位置,因此观察和温度自动探测对于着火判据同等重要.

粉尘云最小点火能(MIE)由改进的 1.2 L Hartmann 装置测定. 电火花采用涓流放电原理获得. 实验时将粉尘分散在 Hartmann 管底部,电磁阀开启后储气仓内空气将粉尘扬起形成云状分散系,同时触发电极放电. 火焰离开电极传播不少于 60 mm 则认为着火.

粉尘云爆炸下限(LEL)在 20 L 球形爆炸装置内测定. 和国家标准不同的是本文采用 2 kJ 化学能点火头,因为国际上的一些研究<sup>[7]</sup>表明,利用 10 kJ 点火能量会引起粉尘云爆炸“过度驱使(over-driven)”现象,导致误判,因此本文参照欧洲标准采用 2 kJ 化学点火头进行测试,当爆炸超压大于 0.05 MPa 即认为爆炸发生.

油页岩粉尘着火敏感度参数测试结果见表 2,为便于和烟煤粉尘的着火特性进行对比,也将其着火特性列入<sup>[2]</sup>.

表 2 油页岩粉尘爆炸特性参数							
Table 2 Explosion characteristic parameters of oil shale							
试样名称	LEL	MIE	MIT-C	MIT-L	$p_{\max}$	$(dp/dt)_{\max}$	Kst 值
	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	J	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	MPa	$\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
龙口油页岩	200 ~ 225	0.20	460	250	0.58	21.33	5.10
茂名油页岩	200 ~ 250	0.42	440	240	0.59	19.76	7.03
桦甸油页岩	> 250	10.00	510	260	0.53	17.55	4.75
抚顺油页岩	> 250	16.00	560	280	0.50	10.24	2.78
烟 煤	60	0.04	510	260	0.74	27.14	7.84

2.2 爆炸猛度参数测试

粉尘爆炸猛度包括最大爆炸压力  $p_{\max}$ 、最大压力上升速率  $(dp/dt)_{\max}$  及 Kst 值,由 20 L 球形爆炸测试装置测定.实验时,用压缩空气将粉尘分散到反应器中,喷粉 60 ms 后在容器中心引爆 10 kJ 化学能点火头.分析采集的压力-时间数据曲线,得到相应浓度下的爆炸压力值、压力上升速率值及 Kst 值,测试结果见表 2.龙口油页岩不同质量浓度的典型爆炸压力-时间曲线见图 1.

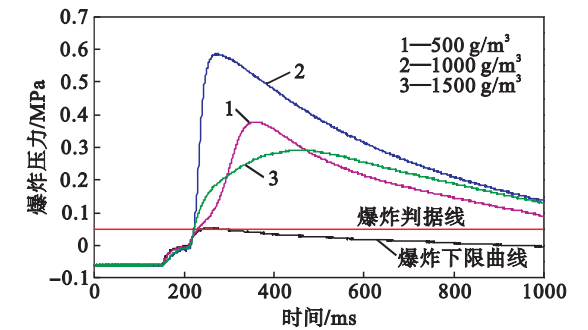


图 1 龙口油页岩粉尘典型爆炸压力-时间曲线  
Fig. 1 Typical explosion pressure-time curves of shale dust

3 测试结果分析

3.1 着火敏感度及影响因素

结合油页岩粉尘云(层)测定温度及工业分析结果,其粉尘云着火温度普遍介于 440 ~ 560 ℃,而粉尘层的着火温度分布在 240 ~ 280 ℃.粉尘层着火温度普遍比油页岩粉尘云着火温度要低 200 ~ 280 ℃(图 2).在测定粉尘云着火温度时,粉尘经过 G-G 炉的时间只有 1.82 ms<sup>[8]</sup>,而测定粉尘层着火温度时,粉尘在热板上静置时间长达 30 min,粉尘层内部容易产生能量蓄积,从而加速油页岩粉尘达到着火温度.因此油页岩粉尘层着火温度比粉尘云着火温度低,

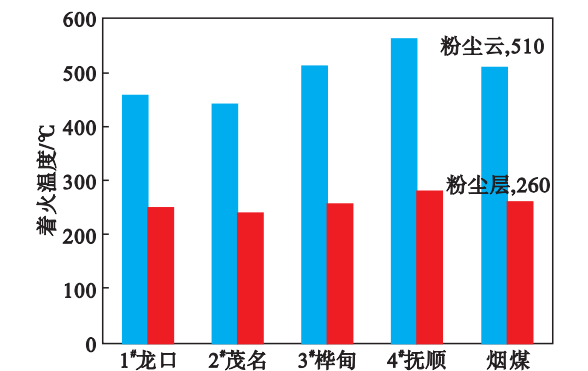


图 2 粉尘云和粉尘层着火温度  
Fig. 2 Ignition temperature of dust cloud and dust layer

这种着火特性及着火温度与烟煤近似.因此,在油页岩利用过程中,设备热表面上沉积的粉尘要及时清理,防止发生粉尘层着火引发火灾或爆炸.

图 3 表明,油页岩最小点火能随挥发分含量增加而下降,挥发分从 22.73% 增加到 39.15%,最小点火能从 16 J 下降到了 0.2 J,相差 80 倍.这主要由于低挥发分的粉尘颗粒在受热时析出的可燃组分少,而形成的活化中心的能量和可燃组分浓度都不足以维持反应的进行.而高挥发分含量的油页岩在点火的开始阶段受热析出的挥发分量大,有利于点火的成功,点火能下降.油页岩粉尘较高的最小点火能也与其高灰分含量有关,由表 1 知,其灰分含量在 49% 以上,而灰分在燃烧过程中吸热,且影响可燃组分与氧的接触,阻碍了燃烧过程的传播,导致点火能升高.

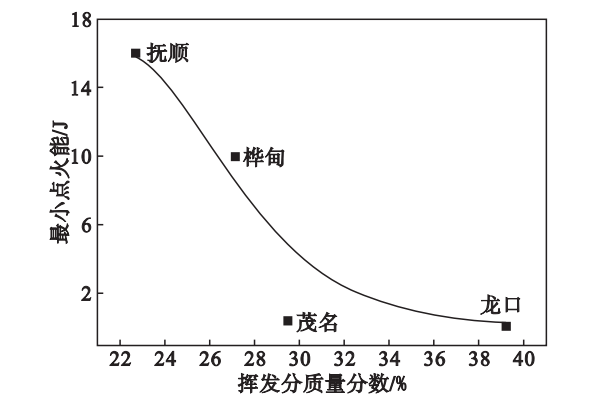


图 3 最小点火能和挥发分含量关系图  
Fig. 3 Relationship between MIE and volatile content

粉尘云超过下限浓度时爆炸才能传播,低于该浓度,粉尘挥发分燃烧的热释放小于热损失,不能维持燃烧或爆炸传播.本实验测得油页岩粉尘下限在 200 ~ 225 g/m<sup>3</sup>,高于烟煤<sup>[2]</sup>.

3.2 爆炸猛度及影响因素

密闭容器中粉尘云爆炸产生的最大压力及最大压力上升速率是描述粉尘云爆炸猛烈程度的两个参数,也是进行抗爆风险评估和设备设计的参考依据.

在环境温度(室温)和点火能量固定(10 kJ 化学能)的情况下,对 4 个试样按照粉尘质量浓度为 300,500,750,1 000,1 500,2 000,2 500 g/m<sup>3</sup> 分别进行实验.在 300 ~ 750 g/m<sup>3</sup> 范围内,爆炸压力随质量浓度的增加而上升,在 750 ~ 1 000 g/m<sup>3</sup> 时压力达到最大,见图 4;继续增大粉尘质量浓度,爆炸压力随之逐渐下降,但降幅变小.对于同一粉尘质量浓度,挥发分含量越高,相应的爆炸压力越大.由以上分析可知,最大爆炸压力浓度分布在 750 ~ 1 000 g/m<sup>3</sup>.当低于最大爆炸压力浓度

时,随着粉尘浓度的增加,单位体积内粉尘爆炸有效颗粒增加,粉尘爆炸压力增大,在高于最大爆炸压力浓度时,随着粉尘浓度的增加,单位体积内颗粒进一步增加,使得较多的粉尘因为氧含量不足而不能参与反应,单位体积内粉尘爆炸的有效颗粒反而减少,且多余的粉尘颗粒吸收爆炸产生的热量和冲击波,使得爆炸压力下降。

实验发现 4 个试样的最大爆炸压力差异不大,在 0.5~0.59 MPa,而最大压力上升速率差异较大,见图 5,且随挥发分含量增加而变大,与表 3 中 Kst 值变化趋势相同。如 1<sup>#</sup>样品最大压力上升速率值为 21.33 MPa/s,是 4<sup>#</sup>样品 10.24 MPa/s 的 2.1 倍,最大压力上升速率的曲线斜率在各个区段也有所不同,在挥发分质量分数为 22.73%~29.47% 区段内,曲线斜率较大,而在 29.47%~39.15% 区段内斜率变小,变化趋势与烟煤类似,且最大压力上升速率低于烟煤。这种变化趋势与油页岩反应机理相关,参与爆炸的粉尘在高温点火源作用下,首先热解逸出挥发分,该组分快速氧化燃烧,挥发分的热解速度及其热解量就成为影响爆炸强烈程度的主要因素。

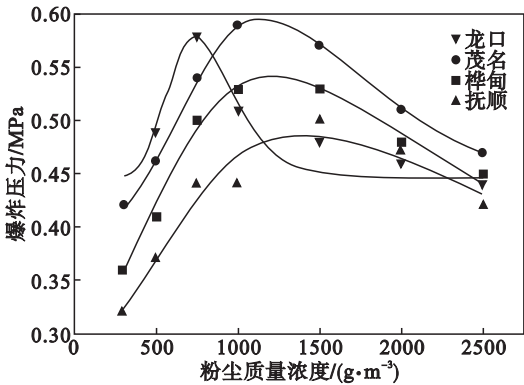


图 4 爆炸压力和粉尘质量浓度关系  
Fig. 4 Explosion pressure and dust concentration

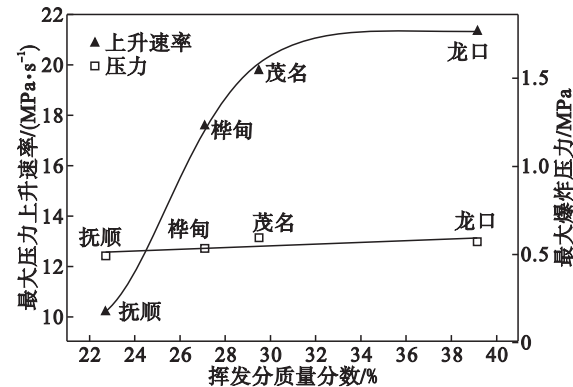


图 5 最大压力上升速率与挥发分含量关系  
Fig. 5 Maximum pressure rise rate and volatile content

4 种油页岩粉尘的爆炸猛度均小于参考烟煤的猛度。

## 4 结 论

1) 根据对中国 4 个主要矿区油页岩粉尘爆炸特性参数的测试,油页岩粉尘具有危险性,但不同产区油页岩由于成分不同,爆炸特性相差较大。

2) 油页岩挥发分含量对其最小点火能影响显著,高挥发分含量的点火能为 200 mJ,低挥发分含量的高达 16 J;油页岩粉尘层的最低着火温度为 240~280 ℃,而粉尘云的最低着火温度为 440~560 ℃,与烟煤近似;爆炸下限为 200~225 g/m<sup>3</sup>,高于烟煤。

3) 油页岩粉尘在质量浓度 300~2 500 g/m<sup>3</sup> 内爆炸猛度随质量浓度增加表现为先增后减,10 kJ 点火能量下最佳爆炸质量浓度为 750~1 000 g/m<sup>3</sup>。最大爆炸压力为 0.59 MPa,最大爆炸压力上升速率为 21.33 MPa/s,低于烟煤。

4) 根据研究结果,油页岩生产工艺可借鉴烟煤的防爆技术和方法进行粉尘爆炸的防治。

## 参考文献 :

[ 1 ] Sweis F K. The effect of admixed material on the ignition temperature of dust layers in hot environments[ J ]. *Hazardous Materials* ,1998 ,63( 1 ) 25 - 35.

[ 2 ] Eckoff R K. Dust explosions in the process industries[ M ]. 2nd ed. Oxford :Butterworth Heineman ,1997.

[ 3 ] Hamdan M A ,Qubbaj A. Inhibition effect of inert compounds on oil shale dust explosion[ J ]. *Applied Thermal Engineering* , 1998 ,18( 5 ) 221 - 227.

[ 4 ] Hamdan M A ,Sakhrieh A. Dust explosion of oil shale and olive cake solid fuels :a comparison study[ J ]. *International Journal of Energy Research* 2005 ,29( 10 ) 872 - 878.

[ 5 ] Sweis F K. The effect of admixed material on the minimum explosible concentration of oil shale[ J ]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2006 ,19( 6 ) 702 - 704.

[ 6 ] Jiang X M ,Han X X ,Cui Z G. Progress and recent utilization trends in combustion of Chinese oil shale[ J ]. *Progress in Energy and Combustion Science* 2007 ,33( 6 ) 552 - 579.

[ 7 ] Going J E ,Chatrathi K ,Cashdollar K L. Flammability limit measurements for dusts in 20 L and 1 m<sup>3</sup> vessels[ J ]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* ,2000 ,13( 3/4/ 5 ) 209 - 219.

[ 8 ] Yuan C M ,Li C ,Li G ,et al. Ignition temperature of magnesium powder clouds :a theoretical model[ J ]. *Journal of Hazardous Materials* 2012 ,239/240 294 - 301.