

## 煤粉爆炸特性与煤粉仓防爆措施研究

肖翠微<sup>1,2,3</sup>

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 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:** 为明确煤粉工业锅炉用煤的爆炸特性 给煤粉仓安全防爆设计提供依据 在 20 L 球型爆炸测试装置上研究了 3 种煤粉(褐煤、烟煤)工业锅炉典型用煤的爆炸特性 得到了 3 种煤粉的爆炸特性参数最大爆炸压力  $P_{\max}$ 、最大爆炸压力上升速率  $\gamma_{\max}$  和最大爆炸指数  $K_{\max}$  同时对煤粉粉尘爆炸的压力随挥发分的变化规律、煤粉爆炸猛烈程度及其影响因素进行了分析;最后对影响煤粉仓安全的防爆因素与处理措施进行了研究。结果表明:3 种煤粉的  $P_{\max}$  依次为 0.764 3、0.756 9、0.752 8 MPa 挥发分对煤粉的爆炸特性有较大的影响 挥发分高的煤粉 其  $P_{\max}$  相应较大;3 种煤粉的  $K_{\max}$  依次为 19.584 5、19.539 1、19.221 0 MPa·m/s 挥发分越高 最大爆炸指数越大 煤粉爆炸猛烈程度越大;  $K_{\max}$  对应的煤粉浓度与煤中可燃基含量有关 可燃基越高  $K_{\max}$  对应的煤粉浓度越低。煤粉工业锅炉系统煤粉仓安全防爆设计可采用浓相操作、封闭、惰性气体保护、防静电接地、泄爆等措施 以保障煤粉仓的安全运行。

**关键词:** 煤粉爆炸;煤粉仓;工业锅炉;防爆措施

**中图分类号:** TK229.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)08-0188-05

### Study on explosion characteristics of pulverized coal and explosion proof measures of coal bunker

Xiao Cuiwei<sup>1,2,3</sup>

(1. China Coal Research Institute Company Limited 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 clarify the explosion characteristics of the coal in pulverized coal-fired industrial boilers and provide the basis for safety and explosion proof design of coal bunker the explosion characteristics of three kinds of typical coal (a lignite sample and two samples of bituminous coal) in pulverized coal-fired industrial boiler were studied in the 20 L sphere explosion test apparatus and the explosion characteristic parameters of three kinds of coal powder were obtained: the maximum explosion pressure ( $P_{\max}$ ), the maximum explosion pressure rising rate ( $\gamma_{\max}$ ) and the maximum explosion index ( $K_{\max}$ ). The pressure on pulverized coal dust explosion with volatile variation, the ferocity of coal dust explosion and the influencing factors were discussed. At the same time, the safety and explosion proof factors and measures of coal bunker were researched. The results show that the  $P_{\max}$  of the three kinds of coal powder are successively 0.764 3, 0.756 9, 0.752 8 MPa. The content of volatile has a great influence on the explosion characteristics of coal and the higher of the volatile, the larger of the  $P_{\max}$  is relatively. The  $K_{\max}$  of the three kinds of coal powder are successively 19.584 5, 19.539 1, 19.221 0 MPa·m/s. The higher of the volatile, the larger of the  $K_{\max}$  is and the greater ferocity of coal dust explosion is. The coal dust concentration corresponding to  $K_{\max}$  is related to the combustible basis of the coal. The higher of the combustible basis, the lower of the coal dust concentration is relatively. The safety and explosion proof design of pulverized coal bunker of pulverized coal-fired industrial boiler can be carried out by the method of dense phase operation, closed, inert gas protection, static electricity protection ground and discharging explosion.

**Key words:** pulverized coal explosion; pulverized coal bunker; industrial boiler; explosion proof measures

收稿日期: 2015-11-20; 责任编辑: 代艳玲 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.08.032

基金项目: 国家国际科技合作资助项目(2015DFR60630)

作者简介: 肖翠微(1973—)女 黑龙江海伦人 副研究员 博士。Tel: 010-84262368 E-mail: xcwei\_2001@163.com

引用格式: 肖翠微. 煤粉爆炸特性与煤粉仓防爆措施研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8): 188-192, 51.

Xiao Cuiwei. Study on explosion characteristics of pulverized coal and explosion proof measures of coal bunker[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8): 188-192, 51.

## 0 引言

煤粉储仓作为重要的储煤设备,在国内众多的生产企业,如电厂、煤化工、水泥厂、工业锅炉房中有广泛的应用。随着煤粉工业锅炉技术和市场的发展壮大,煤粉储仓的应用更加广泛,自燃、爆炸问题时有发生。例如,义马煤业集团水泥有限责任公司曾发生2次煤粉仓着火事故<sup>[1]</sup>,新安中联万基水泥有限公司<sup>[2]</sup>也曾经发生煤粉仓自燃险情,2012年1月,山西定襄县某煤粉锅炉房的煤粉储仓发生爆炸事故。每次自燃、爆炸事故的发生,轻则影响运行生产、烧毁设备,重则造成人员伤亡。因此,研究煤粉储仓内煤粉的爆炸特性,并采取有效预防自燃、爆炸的措施和处理方法对保障煤粉仓储安全至关重要。

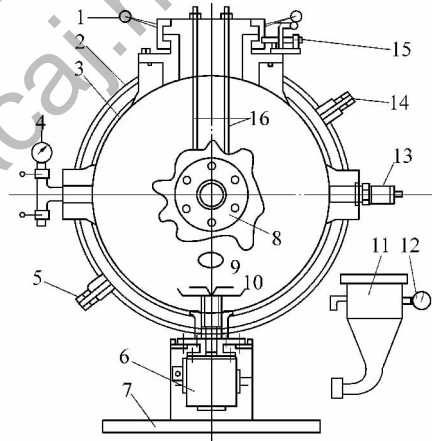
煤粉工业锅炉是近年来发展起来的一种新型工业锅炉,以其高效、节能、环保等优点迅速进入市场。与电站锅炉的直吹式工艺不同,煤粉工业锅炉多采用集中制粉工艺,因此煤粉仓成为煤粉工业锅炉系统的重要燃料储存设备。煤粉工业锅炉使用的燃料煤以高挥发分的烟煤、褐煤为主,易发生氧化、自燃和爆炸,当爆炸发生时火焰瞬间传播于整个混合煤粉的空间,化学反应速度极快,同时释放大量的热,形成很高的温度和很大的压力,系统的能量转化为机械能以及光和热的辐射,具有极强的破坏力。因此必须明确各煤种的爆炸特性并采取有效措施保障煤粉仓的安全。由于工业生产安全的实际需要,关于煤粉爆炸特性的研究一直以来都是粉尘爆炸研究的热点问题。如Cashdollar<sup>[3]</sup>对煤粉的爆炸特性参数进行了测试,并研究了惰化剂的影响;浦以康等<sup>[4]</sup>以高炉喷吹用煤粉为研究对象,利用不同形状与体积的封闭容器进行了系统全面的研究,详细探讨了煤粉浓度、粒度以及气体介质中含氧量、湍流度和初始点火能量对爆炸特性的影响;金龙哲等<sup>[5]</sup>利用20 L爆炸装置测试了高炉喷吹用潞安贫瘦煤的爆炸特性参数;高聪等<sup>[6-7]</sup>利用20 L球形爆炸测试装置对密闭空间内的高灰分、挥发分20%的煤粉爆炸特性进行了研究,探讨了煤粉的爆炸规律。李加护<sup>[8]</sup>利用自制5.125 L的圆柱形爆炸装置研究了超细煤粉的爆炸特性,得出煤粉爆炸主要是挥发分的快速释放和燃烧,且随着煤粉粒径的减小最大爆炸压力增加的结论。上述研究多针对煤化工、高炉喷吹等煤粉的爆炸特性,而针对煤粉工业锅炉用燃料的爆炸特性研究目前鲜见报道。

笔者以煤粉工业锅炉典型用煤为研究对象,选取平均粒径为19~29  $\mu\text{m}$ 的3个煤粉样品,对煤粉的爆炸特性进行研究,并根据煤粉爆炸特性参数对煤粉储仓的防爆设计提出建议,以为煤粉工业锅炉系统煤粉储仓的安全设计提供理论依据。

## 1 煤粉爆炸试验

### 1.1 试验装置与试验方法

目前,粉尘爆炸测试装置已有国际标准,ISO 6184-1—1985《爆炸预防系统 第一部分:空气中可燃粉尘爆炸指数测试方法》推荐采用的粉尘爆炸参数测试装置体积为1  $\text{m}^3$ 和20 L。Proust等<sup>[9-10]</sup>对1  $\text{m}^3$ 和20 L粉尘爆炸装置进行了对比试验,发现20 L爆炸装置的点火效率高于1  $\text{m}^3$ 爆炸装置的点火效率。基于此,笔者采用20 L球形爆炸测试装置,该装置由1个体积为20 L的不锈钢球形容器、粉尘分散阀、点火系统、控制系统及数据采集系统组成(图1)。测试装置的球形容器外有夹套,可充水进行温度控制,点火能量10 kJ,点火延时60 ms。



1—操作手柄;2—外壁;3—内壁;4—真空表;5—冷却水入口;  
6—快速开启阀;7—底座;8—观察窗;9—进气口;10—粉尘分散阀;  
11—储气室(储粉室);12—电接点压力表;  
13—压力传感器;14—冷却水出口;15—安全锁

图1 20 L球形爆炸测试装置结构示意图

Fig. 1 Diagram of 20 L spherical explosion test device

将煤粉样品放入600 mL的储粉罐内,对储粉罐加压到2 MPa(表压),快速开启阀开启后,高压气体将粉尘通过粉尘分散系统分散到容器中。开阀后60 ms,能量为10 kJ的化学点火头在容器中心引爆。容器内的压力由安装在器壁的压力传感器记录下来,试验过程中氧体积分数均为20.95%。典型煤粉爆炸压力随时间变化曲线如图2所示,通过该曲线可得到最大爆炸压力 $P_{\text{max}}$ 、最大爆炸压力上升速

率  $\gamma_{\max}$  ,以及最大爆炸指数  $K_{\max}$  等重要参数。

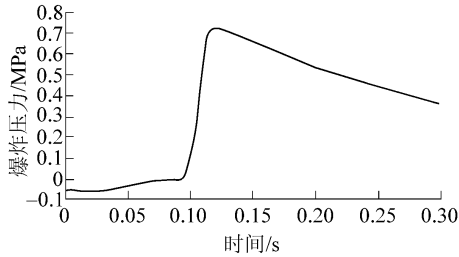


图2 典型煤粉爆炸压力测试历史曲线

Fig. 2 Explosion pressure testing curve of typical coal fine

### 1.2 试验样品

选取3个煤粉工业锅炉房的燃料煤,分别产自内蒙古元宝山、山西保德和内蒙古补连塔,各煤样的工业分析和元素分析结果见表1。从表1可知,煤样1为典型褐煤,含水量高、挥发分高;煤样2和煤

表1 煤粉工业分析与元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of pulverized coal

样品编号	取样地点	平均粒径/ $\mu\text{m}$	工业分析/%				元素分析/%				
			$M_{\text{ad}}$	$A_{\text{ad}}$	$V_{\text{daf}}$	$FC_{\text{d}}$	$w(\text{C})_{\text{ad}}$	$w(\text{H})_{\text{ad}}$	$w(\text{N})_{\text{ad}}$	$w(\text{O})_{\text{ad}}$	$w(\text{S})_{\text{t,ad}}$
1	内蒙古元宝山	28.71	18.80	7.80	43.21	51.32	56.03	3.22	0.92	12.12	0.89
2	山西保德	19.54	4.12	18.79	37.40	50.33	62.88	3.74	1.09	8.91	0.47
3	内蒙古补连塔	28.33	5.57	10.07	31.47	61.22	69.12	3.44	0.73	10.61	0.46

## 2 结果与讨论

### 2.1 煤粉爆炸压力确定

爆炸压力随煤粉浓度的变化曲线如图3所示。从图3可以看出,在同样的试验条件下,爆炸压力随着煤粉浓度的增大先增大后减小,这是因为试验容器内煤粉浓度较低时,氧气量充足,此时影响爆炸压力的主要因素是煤粉的浓度。随着煤粉浓度的增加,容器内煤粉爆炸放热量增加,爆炸压力随之增大并达到最大值  $P_{\max}$ 。进一步增加煤粉浓度,使有限的密闭空间内氧气量不足,导致煤粉颗粒的不完全燃烧。此外,煤粉放出的热量一部分被周围未燃烧的煤粉颗粒吸收,最终导致爆炸压力随着浓度的增大而减小<sup>[13]</sup>。

当煤粉质量浓度为  $300 \text{ g/m}^3$  时,3种煤粉爆炸压力较为接近,均为  $0.75 \text{ MPa}$  左右,2号、3号煤粉的爆炸压力均达到最大值,分别为  $0.7569$ 、 $0.7528 \text{ MPa}$ 。随着煤粉浓度的增加,1号煤粉作为褐煤,其较高的化学活性在最大爆炸压力上有所体现,即3种煤粉中1号煤粉达到爆炸压力最大值  $0.7643$

样3为年轻烟煤,含水量较低、挥发分较高。

### 1.3 煤粉爆炸特性参数确定

煤粉的主要爆炸特性参数包括:爆炸下限、最小点燃能量、粉尘云最低着火温度、极限氧浓度、最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率,以及最大爆炸指数<sup>[11]</sup>。其中,最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率及最大爆炸指数是反映爆炸猛烈程度的重要参数,也是设施、设备的结构强度设计和防爆泄压面积计算、爆炸抑制、爆炸隔离和抗爆设计的基础<sup>[12]</sup>。因此,本文只针对上述3个参数进行讨论。最大爆炸压力上升速率  $\gamma_{\max}$ 、最大爆炸指数  $K_{\max}$  计算式为

$$\gamma_{\max} = (dP/dt)_{\max}$$

$$K_{\max} = \gamma_{\max} V^{1/3}$$

式中: $P$ 为爆炸压力,MPa; $t$ 为爆炸时间,s; $V$ 为爆炸试验装置容积, $\text{m}^3$ 。

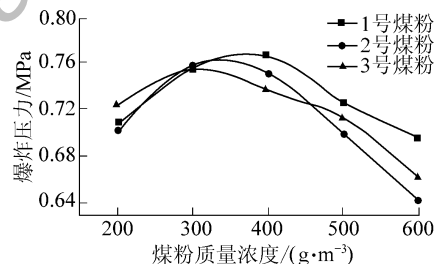


图3 煤粉质量浓度与爆炸压力的关系曲线

Fig. 3 Curve of explosion pressure and pulverized coal concentration

MPa(煤粉质量浓度  $400 \text{ g/m}^3$  时),而另外2种煤粉最大爆炸压力值均出现在煤粉质量浓度  $300 \text{ g/m}^3$  时;且当煤粉质量浓度大于  $300 \text{ g/m}^3$  时,1号煤粉的爆炸压力均高于其他2种煤粉。可见,煤的挥发分对煤粉的爆炸特性有较大的影响,挥发分高的煤粉,其最大爆炸压力相应较大;但是1号煤粉的最大爆炸压力对应的煤粉浓度高于其他2种煤粉样品,则有可能是可燃基含量的影响,1号煤粉的含水量远高于其他2种煤粉,可燃基含量低于2号、3号煤粉。另外,当煤粉尘质量浓度大于  $400 \text{ g/m}^3$  时,2号煤粉

虽挥发分高于3号煤粉,但其爆炸压力却小于3号,由工业分析数据可知,2号煤粉灰分高达18.78%,较其他煤粉高近1倍,灰分中部分成分可在煤粉防爆中起到惰化剂的作用,因此2号煤粉在煤粉浓度较高时,爆炸压力数值相对较小。3号煤粉在煤粉浓度较低时(煤粉质量浓度 $200\text{ g/m}^3$ ),爆炸压力高于其他煤粉,这仍是可燃基含量的影响,3号煤粉的可燃基含量高于其他2种煤粉,与氧气接触充足,煤粉燃烧完全,因此爆炸压力相对较高。

## 2.2 煤粉爆炸压力上升速率及爆炸指数确定

煤粉爆炸压力上升速率及煤粉爆炸指数与煤粉浓度变化关系曲线如图4和图5所示。爆炸指数是评价粉尘爆炸烈度的重要参数。从图4和图5可看出,爆炸压力上升速率曲线和爆炸指数曲线的形状是一致的,可看作是同一参数。3个样品最大爆炸指数依次为1号煤粉 $19.5845\text{ MPa}\cdot\text{m/s}$ 、2号煤粉 $19.5391\text{ MPa}\cdot\text{m/s}$ 、3号煤粉 $19.2210\text{ MPa}\cdot\text{m/s}$ 。可见,最大爆炸指数与挥发分相关,挥发分越高,最大爆炸指数越大,与最大爆炸压力与挥发分间的变化关系一致。

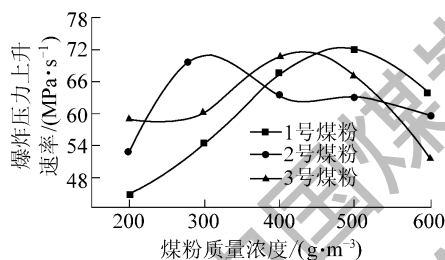


图4 煤粉质量浓度与爆炸压力上升速率的关系曲线

Fig. 4 Curves of rising rate of explosion pressure and pulverized coal concentration

3种煤粉最大爆炸指数对应的煤粉质量浓度与煤中可燃基含量有关,可燃基含量越高,最大爆炸指数对应的煤粉浓度越低。由于1号煤粉的可燃基含量最低、3号煤粉的可燃基含量最高,因此3种煤粉的最大爆炸指数对应的煤粉质量浓度依次为 $500$ 、 $300$ 、 $400\text{ g/m}^3$ 。2号煤粉最大爆炸指数对应的浓度相对较低则可能是挥发分和粒度的双重影响,2号煤粉的挥发分较高,且粒度远小于其他2种煤粉,其燃烧活性更高,因此最大爆炸指数对应的煤粉浓度相对较低。

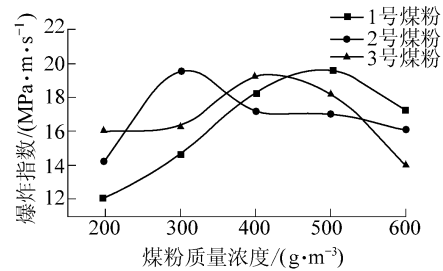


图5 煤粉质量浓度与爆炸指数的关系曲线

Fig. 5 Curves of explosion index and pulverized coal concentration

## 3 煤粉仓防爆措施

煤粉工业锅炉系统用煤粉储仓规模不大,一般不超过 $500\text{ m}^3$ 。通常煤粉爆炸需满足3个条件:①足够的煤粉浓度或粉尘云浓度;②有充足的空气或氧气;③有火源或者足够的能量。由爆炸测试试验可知,空间内的煤粉浓度和氧含量是影响煤粉爆炸特性的主要参数,因此,煤粉仓的防爆措施主要针对爆炸需满足这3个条件进行阻断防爆。

### 3.1 空间内煤粉浓度控制

生产过程中严格控制空间内的煤粉浓度,使其在非爆炸浓度范围内是阻断煤粉爆炸的有效方法。煤粉工业锅炉系统在生产运行时采用浓相(高固气比)供粉技术,无论是将煤粉从运输工具中转移到煤粉仓的过程,还是煤粉输送至燃烧器的过程中,空间内的煤粉浓度远大于煤粉爆炸的煤尘浓度范围,因此浓相输送是一条有效控制煤粉粉尘云浓度的途径。

### 3.2 氧含量控制

煤粉储仓内的氧主要来源于空气,阻断空气的措施有2种:①封闭。上述典型煤粉的最大爆炸压力不超过 $0.8\text{ MPa}$ ,可采用封闭技术来阻断煤粉与空气的接触。煤粉工业锅炉系统中的煤粉仓虽在常压下使用,但可考虑设计成耐压容器保证储仓内的密闭性。②惰性气体保护。2007年4月1日起实施的GB 50229—2006《火力发电厂与变电站设计防火规范》规定,原煤仓应采用惰性气体保护。该标准实施后国内普遍采用低压 $\text{CO}_2$ 系统为惰性气体保护装置<sup>[13-14]</sup>。当煤粉仓中需惰化保护时,启动惰化系统并释放出 $\text{CO}_2$ ,在煤粉堆积表面上方的空间内形成充满 $\text{CO}_2$ 气体的惰性环境。该环境可有效阻断煤粉与氧气的接触,防止煤粉自燃,甚至爆炸的发生和继续,因此可有效保护煤粉仓的安全运行。 $\text{N}_2$ 也

是一种有效的惰性气体,目前在煤粉仓的惰化保护中与CO<sub>2</sub>气体联合使用<sup>[15]</sup>。

### 3.3 火源控制

煤粉仓内最危险的火源是煤粉自燃产生的,可见,防止煤粉自燃是煤粉仓重要的防爆措施之一。煤粉自燃是较高挥发分的煤在密闭空间内的缓慢氧化引起的<sup>[16-18]</sup>,因此,防止煤粉自燃的主要措施是惰性气体保护。该措施同样要求煤粉仓的密闭、耐压设计。另外,静电也是产生火花的途径,因此,防静电接地对煤粉仓安全防爆设计也很有必要<sup>[19]</sup>。

### 3.4 泄爆

由于煤粉工业锅炉系统的煤粉仓采用常压操作,因此可采用泄爆技术防爆。常压下泄爆面积可以根据GB15065—2008《粉尘爆炸泄压指南》计算。合理的泄压防爆门设计不仅具备良好的气密性,保证了煤粉与空气的隔绝,又达到了泄爆的目的<sup>[20-21]</sup>。

## 4 结 论

1) 挥发分对煤粉的爆炸特性有较大的影响,挥发分高的煤粉,其最大爆炸压力 $P_{\max}$ 相应较大。

2) 煤粉挥发分越高,最大爆炸指数越大,煤粉粉尘爆炸猛烈程度越大;最大爆炸指数 $K_{\max}$ 对应的煤粉浓度与煤中可燃基含量有关,可燃基含量越高,最大爆炸指数的对应的煤粉浓度越低。

3) 煤粉工业锅炉系统煤粉仓安全防爆设计可采用浓相操作、封闭、惰性气体保护、防静电接地、泄爆等措施进行防爆,以保障煤粉仓的安全运行。

### 参考文献(References):

[1] 刘飞.煤粉仓自燃的原因分析及处理[J].水泥,2010,47(2):44-45.  
Liu Fei. Analysis of the cause and treatment of spontaneous combustion in coal storehouse [J]. Cement, 2010, 47(2): 44-45.

[2] 程新联.一次煤粉仓自燃的扑救措施和着火原因分析[J].四川水泥,2014(8):17.  
Cheng Xinlian. Analysis of the rescue measures and the cause of ignition of a pulverized coal bunker [J]. Sichuan Cement, 2014(8): 17.

[3] Kenneth L Cashdollar. Coal dust explosibility [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1996, 9(1): 65-76.

[4] 浦以康,胡俊,贾复.高炉喷吹用烟煤煤粉爆炸特性的实验研究[J].爆炸与冲击,2000,20(4):303-312.  
Pu Yikang, Hu Jun, Jia Fu. Experimental studies of explosion characteristics of bituminous coal dust-air mixtures injected in blast

furnace [J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(4): 303-312.

- [5] 金龙哲,金岩辉,张俊燕,等.高炉喷吹用露天贫煤爆炸下限与返回火焰长度的试验研究[J].中国安全科学学报,2005,15(11):61-64.  
Jin Longzhe, Jin Yanhui, Zhang Junyan, et al. Experimental study on lower explosion limit and length of return fire when blasting Lu-an Barren Coal into blast furnace [J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(11): 61-64.
- [6] 高聪,李化,苏丹,等.密闭空间煤粉的爆炸特性[J].爆炸与冲击,2010,30(2):164-168.  
Gao Cong, Li Hua, Su Dan, et al. Explosion characteristics of coal dust in a sealed vessel [J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(2): 164-168.
- [7] 李化,高聪,苏丹,等.烟煤粉爆炸特性实验研究[J].四川大学学报:工程科学版,2009,41(6):79-83.  
Li Hua, Gao Cong, Su Dan, et al. Experimental research on bituminous coal dust explosibility [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(6): 79-83.
- [8] 李加护.超细煤粉爆炸特性的实验研究与分析[D].保定:华北电力大学,2003.
- [9] Proust C. A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(2/3): 104-120.
- [10] Proust C, Accorsi A, Dupont L. Measuring the violence of dust explosion with the "20 liter sphere" and with the standard "ISO 1 m<sup>3</sup> vessel": systematic comparison and analysis of the discrepancies [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007, 20(4): 599-606.
- [11] 邓熙帆,谢林,钟圣俊,等.烟煤粉爆炸性及防爆方法研究[J].粉体技术,1997,3(1):3-8.  
Deng Xufan, Xie Lin, Zhong Shengjun, et al. Study on explosibility and explosion protection measures for bituminous dusts [J]. Powder Science and Technology, 1997, 3(1): 3-8.
- [12] Bartknecht W. Explosions [M]. Burg Almond, Translated. New York: Springer Verlag, 1981.
- [13] 曹卫国,黄丽媛,梁济元,等.球形密闭容器中煤粉爆炸特性参数研究[J].中国矿业大学学报,2014,43(1):113-119.  
Cao Weiguo, Huang Liyuan, Liang Jiyuan, et al. Research on characteristic parameters of coal dust explosion in a spherical sealed container [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(1): 113-119.
- [14] 徐尧,王乃继,肖翠微.小型常压煤粉仓惰性气体保护系统设计及应用[J].煤炭科学技术,2012,40(8):115-117.  
Xu Yao, Wang Naiji, Xiao Cuiwei. Design and application of inert gas protection system to small-scale atmospheric pressure pulverized coal bunker [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(8): 115-117.
- [15] 朱从军.煤化工领域高挥发性煤粉储仓的安全与防护[J].化学工程与装备,2010,39(12):161-162.  
Zhu Congjun. Safety and protection of high volatile pulverized coal

(下转第51页)

- Han Shuqing ,Fan Limin ,Yang Baoguo. Some hydrogeological and engineering-geological problems concerning development of north Shanxi Jurassic Coalfield [J]. Coal geology of china ,1992 4( 1) : 49-52.
- [2] 范立民.神木矿区的主要环境地质问题[J].水文地质工程地质 ,1992 ,19( 6) : 37-40.  
Fan Limin. Environmental geology in Shenmu mining area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology ,1992 ,19( 6) : 37-40.
- [3] 范立民.神府矿区矿井溃沙灾害防治技术研究[J]中国地质灾害与防治学报 ,1996 7( 4) : 35-38.  
Fan Limin. Controlling technological study on suffusion hazard of coal shaft in Shenfu mining area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control ,1996 7( 4) : 35-38.
- [4] Fan Limin. Study on geological disaster from water inrush and sand bursting in mine of shenfu mining distret [C] // Groundwater Hazard Control and Calbed Methane Development and Application Techniques - Proceedings of the International Mining Tech' 96 Symposium ,Xi'an: CCMRI ,1996: 154-161.
- [5] 范立民,马雄德.浅埋煤层矿井突水溃沙灾害研究进展[J].煤炭科学技术 ,2016 44( 1) : 8-12.  
Fan Limin ,Ma Xiongde. Research progress of water inrush hazard in shallow buried coal seam mine [J]. Coal Science and Technology ,2016 44( 1) : 8-12.
- [6] 范立民,马雄德,蒋辉等.西部生态脆弱矿区矿井突水溃沙危险性分区[J].煤炭学报 ,2016 41( 3) : 531-536.  
Fan Limin ,Ma Xiongde, Jiang Hui *et al.* Risk Evaluation on Water Inrush and Sand Inrush in Ecologically Fragile coal mine [J]. Journal of China Coal Society ,2016 41( 3) : 531-536.
- [7] 杨鹏,冯武林.神府东胜矿区浅埋煤层涌水溃沙灾害研究[J].煤炭科学技术 ,2002 30( S1) : 65-69.  
Yang Peng ,Feng Wulin. Research on disaster of water inrush and sand inrush in shallow seam of Shenfu Dongsheng mining area [J]. Coal Science and Technology ,2002 30( S1) : 65-69.
- [8] 张杰,侯忠杰.浅埋煤层开采过程中的溃水灾害研究[J].湖南科技大学学报:自然科学版 ,2005 20( 3) : 15-17.  
Zhang Jie ,Hou Zhongjie. Study on sand inrush disaster in shallow seam mining [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition ,2005 20( 3) : 15-17.
- [9] 许延春,王伯生,尤舜武.近松散含水层溃沙机理及判据研究[J].西安科技大学学报 ,2012 32( 1) : 63-69.  
Xu Yanchun ,Wang Bosheng ,You Shunwu. Mechanism and criteria of crushing sand near loosening sand stone aquifer [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology ,2012 32( 1) : 63-69.
- [10] 隋旺华,董青红,蔡光桃.采掘溃沙机理与预测[M].北京:地质出版社 ,2012.
- [11] 张文义.浅埋深薄基岩厚松散含水层下煤层综合机械化开采防治技术应用[J].中国煤田地质 ,2004 ,16( 4) : 39-41.  
Zhang Wenyi. Application and effect of water control technique in fully mechanized mining in shallow coal seam under a thick loosened aquifer with a thin bedrock [J]. Coal Geology of China ,2004 ,16( 4) : 39-41.
- [12] 韩克勇.上湾煤矿 51208 面防止突水溃沙技术方案探讨[J].中国煤炭工业 ,2012( 3) : 44-45.
- [13] 张连海.薄基岩第四系含水层保水开采技术[J].煤炭科学技术 ,2015 43( 4) : 119-122.  
Zhang Lianhai. Water protection mining technology of Quaternary aquifer with thin bedrock [J]. Coal Science and Technology ,2015 43( 4) : 119-122.
- [14] 刘洋.突水溃沙通道分区及发育高度研究[J]西安科技大学学报 ,2015 35( 1) : 73-75.  
Liu Yang. Study on development height and the partition of water and sand inrush channel [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology ,2015 35( 1) : 73-75.
- [15] 国家煤炭工业局.建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M].北京:煤炭工业出版社 ,2000.
- [16] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.煤矿防治水规定[M].北京:煤炭工业出版社 ,2009.
- [17] 王志杰,王艳红.浅谈新型干法水泥生产煤粉制备系统的安全设计[J].河南建材 ,2007 9( 3) : 35-37.  
Wang Zhijie ,Wang Yanhong. Discuss the safety design of the new dry process cement production system of coal powder preparation [J]. Henan Building Materials ,2007 9( 3) : 35-37.
- [18] 张熾妮.煤氧化自燃微观特征及其宏观表征研究[D].西安:西安科技大学 ,2012.
- [19] 许涛.煤自燃过程分段特性及机理的实验研究[D].徐州:中国矿业大学 ,2012.
- [20] 黄鑫,秘义行,陈彦菲等.煤制油工程中煤粉制备系统的火灾危险性分析[J].消防科学与技术 ,2011 29( 3) : 179-183.  
Huang Xin ,Bi Yixing ,Chen Yanfei *et al.* Fire danger analysis of coal powder manufacture system in coal liquefaction project [J]. Fire Science and Technology ,2011 29( 3) : 179-183.
- [21] 高凤强.煤粉仓防爆措施的研究[J].煤炭科学技术 ,2013 41( S1) : 239-241.  
Gao Fengqiang. Research on explosion-proof measures of pulverized coal bunker [J]. Coal Science and Technology ,2013 41( S1) : 239-241.
- [22] 杨鸿如.浅谈煤粉中间储仓的安全措施[J].石河子科技 ,2010 9( 4) : 62-64.  
Ynag Hongru. Discussion on the safety measures of coal powder storage bin [J]. Shihezi Science and Technology ,2010 9( 4) : 62-64.

(上接第 192 页)

storage in the field of coal chemical industry [J]. Chemical Engineering & Equipment ,2010 39( 12) : 161-162.

- [16] 王志杰,王艳红.浅谈新型干法水泥生产煤粉制备系统的安全设计[J].河南建材 ,2007 9( 3) : 35-37.  
Wang Zhijie ,Wang Yanhong. Discuss the safety design of the new dry process cement production system of coal powder preparation [J]. Henan Building Materials ,2007 9( 3) : 35-37.
- [17] 张熾妮.煤氧化自燃微观特征及其宏观表征研究[D].西安:西安科技大学 ,2012.
- [18] 许涛.煤自燃过程分段特性及机理的实验研究[D].徐州:中国矿业大学 ,2012.
- [19] 陈欢,杨永亮.煤自燃预测技术研究现状[J].煤矿安全 ,2013 44( 9) : 194-197.  
Chen Huan ,Yang Yongliang. Research status of predicting coal spontaneous combustion [J]. Safety in Coal Mines ,2013 44( 9) :