

半焦磨损特性及在电站锅炉上的防磨措施

杨忠灿,刘家利,王志超,姚 伟

(西安热工研究院有限公司,陕西 西安 710054)

摘要:为减轻半焦对锅炉设备的磨损,促进其在电站锅炉上的推广应用,介绍了半焦常规煤质特性和研磨、磨损特性,对我国燃煤电站锅炉设备的磨损防治措施进行了总结。针对半焦磨损严重的特点,宜优先选用双进双出钢球磨;根据各不同部位的磨损特点,对煤粉制备、输送、燃烧过程中的磨煤机研磨件、煤粉管道、燃烧器和附属部件均需加强防磨处理,防磨措施包括提高材料耐磨等级、表面耐磨堆焊、贴或螺栓连接陶瓷片等;另外,对于一次风管道防磨,还可采取降低一次风管风速、减缓其弯头角度、降低煤粉细度、延长耐磨部位的设计长度、增加耐磨部位的厚度等方面进行优化。结果表明,半焦作为煤化工循环经济产业链的副产品,在克服了其固有的磨损严重的问题之后,可以作为动力用煤在电站锅炉上安全燃用。

关键词:电站锅炉;清洁燃烧;半焦;磨损

中图分类号:TK223.23

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2016)03-0074-05

Abrasion characteristics and anti-abrasion measures of semi-coke used for power station boiler

YANG Zhongcan, LIU Jiali, WANG Zhichao, YAO Wei

(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: To reduce the abrasion of semi-coke for boilers, and promote its popularization and application in power station boilers, the coal characteristics, grinding and abrasion characteristics of semi-coke were introduced first, then the anti-abrasion measures for domestic pulverized coal boilers were summarized. In view of serious abrasion characteristics of semi-coke, double in and double out steel ball mill was prior recommended. According to abrasion characteristics at different parts, anti-abrasion measures should be strengthened on all of the parts used for coal powder preparation, conveying and burning process. These parts mainly included the mill grinding partner, coal powder pipeline, burning device and subsidiary parts. Moreover, the primary anti-abrasion measures included improving materials wear-resistant grade, surface wear-resistant heap welding, and posting or bolting the ceramic tablets. As for anti-abrasion on primary air piping, the measures included reducing wind speed, slowing elbow angles, reducing fineness of pulverized coal, extending length of wear-resisting parts and increasing thickness of wear-resisting parts. The results showed that semi-coke as a byproduct of coal chemical industrial chain of circular economy could be safely burned in power station boilers by improving its wear resistance.

Key words: pulverized coal boiler; clean combustion; semi-coke; abrasion

0 引 言

半焦又称兰炭,是由煤中低温干馏所得的可燃固体产物,产率为原料煤的50%~70%。半焦色黑

多孔,主要成分是碳、灰分和挥发分。在我国,半焦主要由挥发分较大的烟煤和褐煤制得,产区主要集中在陕蒙宁晋交界地区,在新疆和内蒙古东部地区也有部分分布^[1-3]。截至2013年底,全国半焦实际

收稿日期:2016-01-29;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.03.016

基金项目:陕西省科技统筹创新工程资助项目(2015KTZDGY05-03)

作者简介:杨忠灿(1977—),男,山东阳谷人,高级工程师,从事燃料特性和电站锅炉高效清洁燃烧技术研究。E-mail: yangzhongcan@tpri.com.cn

引用格式:杨忠灿,刘家利,王志超,等.半焦磨损特性及在电站锅炉上的防磨措施[J].洁净煤技术,2016,22(3):74-78,83.

YANG Zhongcan, LIU Jiali, WANG Zhichao, et al. Abrasion characteristics and anti-abrasion measures of semi-coke used for power station boiler [J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(3): 74-78, 83.

总产量达到5 000万t,其中陕西榆林地区半焦实际产量为2 300万t。榆林半焦是利用神府、榆林、东胜煤田盛产的优质侏罗精煤块烧制而成,结构为块状,粒度一般在3 mm以上,颜色呈浅黑色,已成为榆林地标性产品^[4]。半焦是很好的高热值无烟燃料,主要用作工业或民用燃料,也用于合成气、电石生产等,少量用作铜矿或磷矿等冶炼时的还原剂,此外也作炼焦配煤^[5]。但随着半焦产能的逐渐扩大,原有工业用户已无法消化较高的半焦产能。其中,榆林半焦具有固定碳高、比电阻高、化学活性高、灰分低、铝低、硫低、磷低的特点,但其灰熔融性较低、冲刷磨损指数高,具有易结渣和磨损严重特性^[6]。与大容量煤粉锅炉燃煤比较,半焦的发热量高,含硫量低,具有一定的掺烧优势。目前,国内已有一些电厂锅炉掺烧了部分半焦(比例小于30%)作为燃料,在试验过程中表现出研磨件磨损严重、磨煤机出力不足、燃烧效率下降和环保指标好等特点^[7-8],另外新建半焦锅炉也在筹建中。因此,笔者结合半焦煤质特性,对半焦的磨损特性和磨损防治措施开展研究,以便为现役锅炉半焦掺烧和新建锅炉防磨设计提供参考,对于半焦在电站锅炉上的应用和半焦循

环经济产业链的发展具有现实意义。

1 半焦煤质特性

1.1 常规煤质特性

主要以我国产量较大、较为典型的榆林兰炭、新疆广汇半焦和蒙东褐煤半焦为研究对象,对半焦的燃烧、结渣和磨损特性进行分析。国内典型半焦常规煤质特性见表1。

从表1可以看出,各原煤在经过中低温干馏后,煤质特性发生变化,表现在:①经过干馏后,半焦的全水分降低,由于熄焦方式不同,导致半焦的全水分和原煤有所差别。采用湿熄焦方式,半焦的全水分较原煤有所增加;而采用烟气冷却时,半焦的全水分较原煤有所降低。②不同煤种半焦的挥发分均出现大幅下降,与低挥发分无烟煤接近。③半焦的碳含量大幅增加,硫含量有所下降。④半焦热值主要受水分影响,当水分增加时,热值下降,反之热值升高。⑤从西安热工研究院有限公司燃烧试验台测试结果来看,各煤种原煤在半焦化后,着火温度均升高、燃烬率均下降,结渣指数略有下降、结渣倾向有所增加。

表1 国内典型半焦常规煤质特性

Table 1 Coal quality characteristics of typical semi-coke in domestic

检测项目	广汇原煤	广汇提质煤	榆林原煤	榆林兰炭	贺矿褐煤	褐煤半焦
全水分/%	22.30	8.10	10.00	11.20	40.00	8.70
收到基灰分/%	6.62	12.80	6.24	8.98	10.70	11.21
干燥无灰基挥发分/%	49.20	10.39	38.38	10.96	46.14	10.37
收到基碳/%	54.75	74.42	69.07	72.80	39.65	73.14
全硫/%	0.38	0.40	0.57	0.40	0.47	0.29
收到基低位发热量/(MJ·kg ⁻¹)	20.63	25.35	26.37	25.84	13.90	25.71
着火温度/℃	505	543	605	692	460	530
燃烬率/%	99.76	99.07	98.17	93.20	99.42	95.78
结渣指数	0.91	0.85	1.00	0.90	0.89	0.82
煤灰软化温度/℃	1 260	1 300	1 100	1 120	1 230	1 170

1.2 研磨和磨损特性

半焦和原煤研磨、磨损特性如图1所示。

除上述煤质参数外,原煤在转化为半焦后,相较于原煤,半焦的研磨、磨损特性发生较大变化,尤其是磨损特性发生了较大变化(图1)。半焦的哈氏可磨性指数虽升高不多,但由于其中碳含量升高,导致实际磨煤机的研磨出力下降,小型钢球磨和中速磨试验台试验结果下降幅度达20%左右。另一方面,

原煤的冲刷磨损指数一般小于1,属于轻微磨损等级,而半焦的冲刷磨损指数却迅速升高至20以上,属于极强磨损等级^[9]。半焦的磨损较强,不可避免会对磨煤机磨辊、磨盘、钢球、衬板等研磨件、煤粉分离器叶片、煤粉管道及其弯头以及燃烧器煤粉浓缩装置、钝体和稳燃齿等产生较大磨损,降低磨煤机研磨件和燃烧器相关部件寿命,增加锅炉运行维护成本,影响锅炉的安全稳定运行。

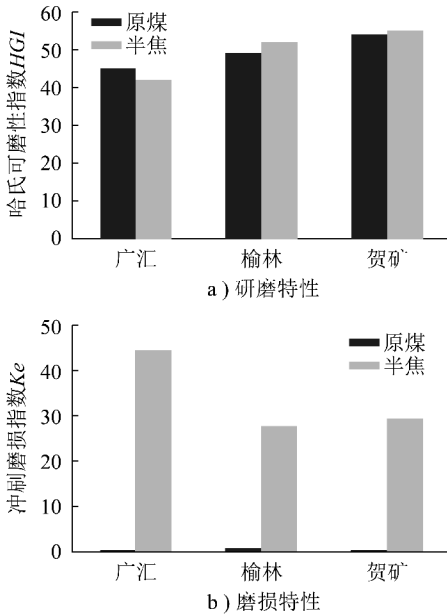


图1 半焦和原煤研磨、磨损特性

Fig. 1 Grinding and abrasion characteristics of semi-coke and coal

半焦和原煤扫描电镜分析如图2所示。从原煤干馏前后的微观结构来看,与原煤相比,半焦的碳粒结构呈现碎片化的特点,即大的碳粒减少、小的碳粒增加,少数的块状结构棱角化特征较为明显。从半焦磨损较原煤大幅增加来看,应是一方面半焦的碳含量增加、硬度变大、小碳粒与设备的碰撞概率增加,另一方面微观结构中碳粒的棱角化造成其切削能力增加,最终造成其对设备的磨损较为严重。

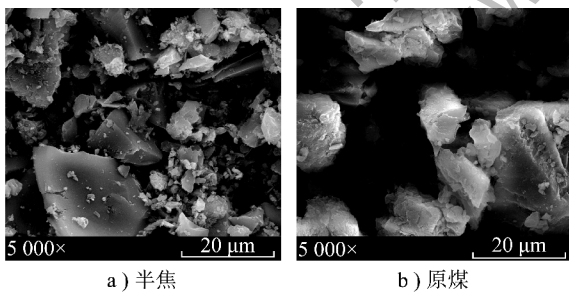


图2 半焦和原煤扫描电镜分析

Fig. 2 Scanning electron microscopy analysis of semi-coke and coal

2 煤粒磨损机理及磨损防治

2.1 磨损机理

管道内壁(或部件表面)受到磨损是煤粒子和壁面间的不断冲击及不断剪切同时作用的结果。煤粒撞击管道内壁(或部件表面)示意如图3所示。假设煤粒以速度 w 撞击管道内壁,煤粒子速度方向

和壁面所成夹角为 α ,称为攻角。在垂直力作用下,粒子渗入表面某一深度,此深度和被刨下来的微粒厚度成正比,而在切向力作用下把此刨屑撕下来。攻角 α 愈大,则在法向力作用下煤粒渗入表面的深度愈大,形成的刨屑厚度愈大。然而,形成的刨屑厚度大并不意味着磨损严重。还需有一定的切向力作用,以将形成的刨屑撕掉,才能构成磨损。因而,只有当在某一攻角下,所需要的撕下剪切力正好等于所能提供的切向分力时,磨损最为严重。大量的试验结果及运行表明,当 $\alpha = 30^\circ \sim 40^\circ$ 时,磨损最为严重。此外,研究表明流速对磨损的影响较为显著。同时,还可发现,气流中煤粒的浓度对磨损同样有影响,磨损量正比于煤粒子的浓度。从电站锅炉设备检查来看,凡是磨损严重的区域,均是受上述因素影响大的区域。

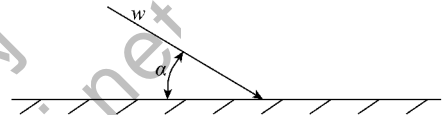


图3 煤粒撞击管道内壁(或部件表面)示意

Fig. 3 Schematic diagram of coal particles strike on pipe's inner wall (or surface)

2.2 国内典型设备防磨措施

我国电站锅炉以燃煤为主,煤粉以气力输送,在煤粉制备、输送和燃烧过程中不可避免会出现管道和部件磨损,部分电厂提出了行之有效的解决措施。

1) 珠海电厂 700 MW 锅炉燃烧器为直流燃烧器,煤粉喷嘴在使用中存在严重磨损,磨损主要位于浓相侧半边内框、钝体及分隔板,而淡煤粉侧的半边喷嘴只有轻微磨损。为减轻喷嘴磨损,采取 2 种措施,一是采用高铬铸铁焊条(HRC67~70、在 600 °C 以上高温下仍然保持较高的硬度)在燃烧器浓相侧内框和喷口内分隔板进行堆焊,堆焊的耐磨金属条长 50 mm,纵向间距 20 mm,高度大于 8 mm,呈品字形交错布置;另一个措施是采用点焊法衬陶瓷技术,对分隔板、钝体、内框底板等平整表面,利用储能式点焊机和特制铆钉,将陶瓷块(21 mm×21 mm×6 mm)铆焊在易磨损部位的钢板上进行防磨,对于分隔板 and 钝体迎风面钢板的端面磨损,可点焊安装 U 型包边陶瓷块防磨,其余一些小面积的磨损部位不适合衬陶瓷的,仍然采用堆焊耐磨金属条的样式防磨。若运行维护得当,2 种方法均可使燃烧器耐磨寿命延长至 10 a^[10]。

2) 哈尔滨热电锅炉煤粉燃烧器为径向浓淡旋

流煤粉燃烧器,燃烧器在运行中突出的问题是燃烧器一次风管内部组件磨损,表现为中心扩锥防磨环、煤粉浓缩器和中心管磨损,尤其是中心扩锥防磨环最为严重,实际使用寿命最短为4个月。为减轻磨损,电厂提高防磨环防磨材料等级,采用的耐磨材料合金成分为C 0.2%~0.45%、Si 1.0%~3.0%、Mn 2.0%~3.0%、Cr 22.0%~35.0%、Ni 7.0%~18.0%、Mo 0.2%~1.2%、W 0.2%~3.0%、Re \leq 0.3%,1 000℃时维氏硬度为HV24.8,对易磨损的浓缩器及其支架采用壁面贴陶瓷的方法。采用上述措施后,燃烧器工作时间可达8 a以上^[11]。

3) 唐山热电300 MW锅炉空预器出口到磨煤机入口之间的热一次风空气管道磨损严重,特别是各台磨煤机入口的分支热风道。为此,采用以下防磨措施:①在风门门轴、一次风流量测量装置等结构复杂的部位采用硬质合金喷涂技术,涂层颗粒细小均匀,喷涂厚度0.5~1.0 mm,硬度达到HRC60以上,防磨效果较好,能保证使用一个大修周期。②与珠海电厂类似,在一次风道伸缩节、入磨热风道和弯头背弧等表面将钻孔的陶瓷片,用沉头螺栓固定,或采用燕尾槽固定在钢带上,然后采用专用焊机把陶瓷片通过沉头螺栓、钢带固定在工作面上,这样的连接方式结合强度高,解决了陶瓷片在高温交变应力作用下易脱落的问题。③采用哈尔滨焊接材料研究所研制的专门用于表面堆焊耐磨层的焊接材料(铁-05硬质合金堆焊焊条或堆焊碳块)进行表面堆焊,表面硬度可达到HRC60以上,防磨效果好。采取这些措施后,设备磨损寿命可延长至一个大修周期^[12]。

4) 克拉玛依热电厂1、2、3号锅炉均采用单进单出低速钢球磨煤机中间储仓式制粉、乏气送粉系统。其投产后制粉系统设备磨损严重,磨损泄漏点主要集中在有弯头的背弧面末端、磨煤机进口螺旋管和出口弯管、粗粉分离器进口收径管和回粉管弯头、粗粉分离器外锥形桶壁中部、粗粉分离器出口管、细粉分离器进口筒壁、一次风管与燃烧器方圆节及制送粉系统管道联接法兰、焊缝等部位。为减轻磨损和泄漏,采取以下措施:①将制粉系统中的易磨损部位沿煤粉气流流动方向弯头出口段背弧面焊接耐磨材质,同时延长耐磨部位的设计长度、增加耐磨部位的厚度、升级耐磨部位的材质,选择GM6耐磨材质或16Mn钢材质。②将磨煤机出料斗、粗粉分离器外锥筒中部、排粉机进口集流器及排粉机蜗壳等极

易磨损泄漏区域在材质耐磨升级改造的基础上,通过在设备内部黏贴耐磨陶瓷衬里,增强防磨能力。采取上述措施后,制粉系统的磨损泄漏频次较改造前下降约95%,年节约补漏维修费用数十万元^[13]。

3 降低锅炉燃用半焦设备磨损的措施

如前所述,从半焦常规煤质特性及其着火、燃烧特性来看,半焦具有热值较高的特点,着火温度高于常规烟煤和褐煤,低于贫煤,处于烟煤和贫煤之间,燃烬率高于典型贫煤,适合作为电站锅炉动力用煤。但同时半焦又具有冲刷磨损指数高、磨损严重的特点,需对制粉系统类型和煤粉制备、输送、燃烧设备防磨进行特殊设计。

3.1 磨煤机类型选择和防磨

根据《电站磨煤机及制粉系统选型导则》规定^[14],对于冲刷磨损指数 ≥ 5.0 的煤,应选用钢球磨或双进双出钢球磨。由于双进双出钢球磨较普通钢球磨结构简单、运行维护量少,目前国内在磨制类似煤种时,均采用双进双出钢球磨。双进双出钢球磨的唯一介质是钢球,通过钢球与原煤的撞击和摩擦完成研磨。由于有研磨现象,研磨介质会出现磨损。研磨过程中受磨损的是衬板和钢球,衬板寿命一般很长。半焦的磨蚀性灰分高或研磨的细度高,磨损现象会更为严重。根据磨损情况判断,可选用普通钢球或高铬铸铁及相应的衬板材料。钢球的造价很低,同时可实现不停机加球,并且针对半焦的特性可选用相应的材质来提高抗磨损性能。因此磨煤机的维修费用很低,可实现连续作业^[15]。需要注意的是,由于半焦的磨损性能极强,在采用双进双出钢球磨煤机的情况下,仍建议采用高铬耐磨钢球,对煤粉分离器叶片等易磨损部位进行贴陶瓷片处理,并适当降低煤粉分离器空间流速。

3.2 输粉管道和部件防磨

半焦煤粉气流在离开磨煤机后,通过数根一次风管道输送进入燃烧器,其基本组成为直管道和弯头。由于磨损与颗粒大小、速度、冲击磨损角度均有关,为减轻一次风管磨损,建议在设计时选取较细的煤粉细度,较低的一次风速(如一次风管风速选为24~25 m/s);尽可能减少弯头数量和减缓其角度,使其避开磨损较大的煤粉气流攻击角 $30^\circ\sim 40^\circ$;将制粉系统中的易磨损部位沿煤粉气流流动方向弯头出口段背弧面堆焊耐磨材质,同时延长耐磨部位的设计长度、增加耐磨部位的厚度、升级耐磨部位的材

质;在弯头处内贴陶瓷片进行防磨等。

3.3 燃烧设备选择和防磨

半焦燃烧器可分为直流燃烧器和旋流燃烧器2种,由于其基本结构有所不同,在防磨处理上也有所区别。

直流燃烧器由燃烧器壁、煤粉浓缩器、喷口内钝体和隔板等组成,其中燃烧器壁、钝体、浓淡分离装置均为铸件。对于常年暴露在煤粉气流燃烧产生的高温氧化、交变热应力当中的燃烧器壁(尤其是浓相侧)、钝体,为提高其耐磨能力,可首先提高其燃烧器材料耐磨等级、提高燃烧器壁厚度,然后在燃烧器壁、钝体表面堆焊耐磨层的焊接材料,使其表面硬度HRC达到60以上,或者采用螺栓连接陶瓷片连接方式,通过将陶瓷片钻孔,用沉头螺栓固定在工作面上,这样的连接方式结合强度高,不存在陶瓷片在高温交变应力作用下易脱落的问题;对于位于燃烧器喷口前风道内的百叶窗、煤粉浓缩器等常温部件,由于基本不存在交变热应力,可采用高等级防磨材料、壁面贴装陶瓷片的方式进行防磨。

旋流燃烧器由燃烧器壁、煤粉浓缩器、喷口内中心风管、稳燃齿等组成,其在防磨处理上与直流燃烧器也基本相同,即对于常年暴露于煤粉气流燃烧产生的高温氧化、交变热应力当中的燃烧器壁、稳燃齿、中心风管端部,宜提高耐磨材料等级、采用耐磨材料堆焊等方式进行防磨,而位于不存在交变热应力区域内的煤粉浓缩器、喷口中心风管等部件,则可以采用提高材料等级、外贴陶瓷片方式进行处理。

4 结 论

1)半焦碳含量高、微观结构中小颗粒多,碳粒具有尖锐棱角。碳颗粒硬大使半焦具有难磨的特点,磨煤机出力较原煤下降约20%;碳粒硬度大、棱角尖锐、颗粒多,使其煤粉磨损能力处于极强水平,在磨煤机设计和煤粉制备、输送、燃烧过程中的防磨设计时需加以注意。

2)为减轻半焦煤粉制备、输送和燃烧过程中对相关部件的磨损,建议优先选择双进双出钢球磨制粉系统,应尽可能地对煤粉气流管路上的所有部位进行耐磨处理,常用手段包括提高材料耐磨等级、表面耐磨堆焊、贴或螺栓连接陶瓷片等。

3)对于一次风管的防磨,还可从降低一次风管风速、减缓其弯头角度、降低煤粉细度、延长耐磨部位的设计长度、增加耐磨部位的厚度等方面

进行优化。

参考文献(References):

- [1] 冯俊凯,沈幼庭,杨瑞昌. 锅炉原理及计算[M]. 3版. 北京:科学出版社,2003:123.
- [2] 张秦龙,杨佳. 发展中的榆林市兰炭产业[J]. 产业与科技论坛,2013,12(8):61.
Zhang Qinlong, Yang Jia. Semi-coke in Yulin city in the development industry[J]. Industry and Technology Forum, 2013, 12(8): 61.
- [3] 李娟. 半焦(兰炭)产业清洁生产技术方案研究[D]. 西安:长安大学,2012:1-4.
- [4] 艾保全. 榆林市兰炭产业发展调研报告[J]. 中国经贸导刊, 2010(18):20-23.
Ai Baoquan. The investigation report on the development of carbocoal industry in Yulin City[J]. China Economic & Trade Herald, 2010(18):20-23.
- [5] 辛收良. 兰炭掺烧技术的研究与应用[J]. 化肥设计, 2013, 53(1):53-55.
Xin Shouliang. Research and application for combustion technology of mixing with blue carbon[J]. Chemical Fertilizer Design, 2013, 53(1):53-55.
- [6] 何璐,尚文智,刘军利,等. 神木烟煤和神木兰炭结构特性研究[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(6):59-62.
He Lu, Shang Wenzhi, Liu Junli, et al. Structural characteristics of Shenmu bituminous coal and Lantan[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(6):59-62.
- [7] 李晓伟,赵红伟,王志超,等. 兰炭与典型煤种掺烧特性试验研究[J]. 煤质技术, 2015(6):56-59.
Li Xiaowei, Zhao Hongwei, Wang Zhichao, et al. Experimental research on co-combustion of blue-coke and typical coal[J]. Coal Quality Technology, 2015(6):56-59.
- [8] 杨忠灿,王志超. 电站锅炉燃用兰炭技术研究报告[R]. 西安:西安热工研究院,2014:38-43.
- [9] GBT 15458—1995, 煤的磨损指数测定方法[S].
- [10] 袁力. 三菱700 MW机组锅炉燃烧器喷嘴的磨损分析及改进[J]. 锅炉技术, 2009, 40(4):53-56.
Yuan Li. The analysis and improvement on the wearing of the burner nozzle of Mitsubishi 700 MW unit boiler[J]. Boiler Technology, 2009, 40(4):53-56.
- [11] 姜尚兴. 提高燃烧器耐磨性、保证锅炉稳定运行[J]. 科技论坛, 2011(3):97.
Jiang Shangxing. Improve the wear resistance of the burner and ensure the stable operation of the boiler[J]. Technology Forum, 2011(3):97.
- [12] 张维宁. 一次风道磨损原因分析及防磨措施[J]. 华北电力技术, 2010(5):29-31.
Zhang Weining. Attrition of primary air duct and improvement for anti-attrition[J]. North China Electric Power, 2010(5):29-31.

(下转第83页)

2)最大爆炸压力 P_{\max} 随 CaCO₃ 混合比例的提高而下降, CaCO₃ 混合比例越高, P_{\max} 降低越多; 煤的挥发分对混合体系的 P_{\max} 影响较大, 挥发分高的煤粉 P_{\max} 降低明显;

3)2种煤粉的的最大爆炸指数 K_{\max} 依次为 19.584 5、19.221 0 (MPa·m)/s, 挥发分越高, 最大爆炸指数值越大, 煤粉粉尘爆炸猛烈程度越大; 煤粉的最大爆炸指数 K_{\max} 随 CaCO₃ 混合比例的提高而下降, CaCO₃ 混合比例越高, K_{\max} 降低越明显;

4)煤粉中混入 CaCO₃ 可以降低粉尘爆炸的风险, CaCO₃ 对煤粉爆炸的抑制效力与煤种挥发分和可燃基含量有关, 挥发分高、可燃基低的煤, 惰化作用明显。

参考文献 (References):

[1] 苏丹, 李化, 高聪. 运用本质安全原理预防煤粉爆炸[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(11): 114-118.
Su Dan, Li Hua, Gao Cong. Coal dust explosion prevention based on inherent safety principles [J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(11): 114-118.

[2] 左前明, 程卫民, 汤家轩. 粉体抑爆剂在煤矿应用研究的现状与展望[J]. 煤炭技术, 2010, 29(11): 78-80.
Zuo Qianming, Chen Weiming, Tang Jiaxuan. Current status and prospects of application and research of powder coal mine explosion suppression agent [J]. Coal Technology, 2010, 29(11): 78-80.

[3] 张博, 张奇, 谭汝媚. 喷粉压力及点火延迟时间对粉尘爆炸参数的影响[J]. 高压物理学报, 2014, 28(2): 183-190.
Zhang Bo, Zhang Qi, Tan Rumei. Influence of dispersion pressure and ignition delay time on the dust explosion parameters [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2014, 28(2): 183-190.

[4] 谭迎新, 王志杰, 高云, 等. 固体惰性介质对煤粉爆炸压力的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(12): 76-79.
Tan Yingxin, Wang Zhijie, Gao Yun, et al. Study on the effect of solid inert mediums on the pressure of coal dust explosion [J]. China Safety Science Journal, 2007, 17(12): 76-79.

[5] Amyotte P R, Pegg M J, Khan F I. Application of inherent safety principles to dust explosion prevention and mitigation [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2009, 87(1): 35-39.

[6] Amyotte P R. Solid inertants and their use in dust explosion prevention and mitigation [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(2/3): 161-173.

[7] 甘媛, 蒯念生, 刘龙, 等. 碳酸钙对粉尘爆炸抑制效力的实验研究[J]. 消防科学与技术, 2014, 33(2): 128-130.
Gan Yuan, Kuai Niansheng, Liu Long, et al. Experimental investigation on the inhibition effectiveness of CaCO₃ on dust explosion [J]. Fire Science and Technology, 2014, 33(2): 128-130.

[8] 杜兵, 蒯念生, 黄卫星, 等. 煤粉-惰性介质混合体系爆炸特

性实验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 44(S1): 229-234.

Du Bing, Kuai Niansheng, Huang Weixing, et al. Experiment-based investigations on explosion behaviors of coal dust-inertant mixtures [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 44(S1): 229-234.

[9] 蒯念生, 李建国, 陈志, 等. 镁粉爆炸特性和惰化抑爆的实验研究[J]. 工业安全与环保, 2011, 37(3): 53-55.

Kuai Niansheng, Li Jianming, Chen Zhi, et al. Experimental investigation on explosive characteristics and inerting of magnesium dust [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2011, 37(3): 53-55.

[10] 焦铸, 张愚, 李肖铸, 等. 典型爆炸粉尘的危险性预测[J]. 现代测量与实验室管理, 2014, 22(3): 19-22.

Jiao Zhu, Zhang Yu, Li Xiaozhu, et al. Risk prediction of typical dust explosion [J]. Advanced Measurement and Laboratory Management, 2014, 22(3): 19-22.

[11] 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.

[12] Proust C, Accorsi A, Dupont L. Measuring the violence of dust explosion with the "20 liter 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): 599-606.

[13] 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 Xifan, 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.

[14] 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.

(上接第 78 页)

[13] 郎济风, 赵晓强, 宋军峰. 煤粉炉制粉系统磨损问题分析及解决措施[J]. 科技创新导报, 2013(16): 33-34.

Lang Jifeng, Zhao Xiaoliang, Song Junfeng. Analysis and solution of the wear problem of pulverized coal system [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(16): 33-34.

[14] 张安国. 电站磨煤机及制粉系统选型导则[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 10-12.

Ma Wenxiang. Key points of selection of the duplex inlet & outlet ball pulverizer [J]. Power Station Auxiliary Equipment, 2005, 92(1): 38-40.

[15] 马文祥. 双进双出钢球磨煤机选型要点论述[J]. 电站辅机, 2005, 92(1): 38-40.