

文章编号:0253-9993(2012)08-1337-05

# 煤粉细化过程静电放电起爆机理

岳高伟<sup>1</sup>,王 林<sup>2</sup>,贾慧娜<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学 土木工程学院,河南 焦作 454000;2. 河南理工大学 安全科学与工程学院,河南 焦作 454000)

**摘 要:**基于水的电离和粉体动力学理论,对煤粉细化过程中静电场和煤粉爆炸的条件进行理论建模和数值计算,分析爆炸的可能性。数值结果表明:带电煤粉浓度分布随时间发生变化;不同时刻节点间电压差大部分在200 V以下,但是在个别位置,相邻节点间电压差可达上千伏,甚至上万伏,这种较高的电压差可能达到击穿电压的临界值,导致电火花产生。在煤粉细化过程中,煤粉的粒度大部分在30~75  $\mu\text{m}$ ,煤粉质量浓度在0.5~2.4  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,某些时刻氧含量和有效点火能量分别大于15%和大于1 J,这些都在煤粉的爆炸范围之内。当这些因素同时满足煤粉爆炸的危险条件时,在煤粉细化过程中就可能产生爆炸。

**关键词:**煤粉细化;静电场;电火花;最小点火能量;爆炸

**中图分类号:**TD714.51 **文献标志码:**A

## Explosion mechanism of electrostatic discharge in coal pulverized process

YUE Gao-wei<sup>1</sup>, WANG Lin<sup>2</sup>, JIA Hui-na<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Based on the theory of water ionization and powder dynamics, theoretical model of electrostatic fields was suggested in coal pulverized process, and numerical calculation was carried out. In order to analyze the possibility of explosion, explosion conditions were calculated. The numerical calculation results show that distribution of pulverized coal density changes with time; at the different moment, most of voltage difference between two nodal points is below 200 V, but some voltage difference can reach thousand volts, even reach ten thousand volt. The higher voltage difference may reach the critical value of the breakdown voltage, and causes the electric spark. In coal pulverized process, coal-dust size distribution is between 30 and 75  $\mu\text{m}$ , coal-dust concentration is between 0.5 and 2.4  $\text{kg}/\text{m}^3$ , at some moment, oxygen percent and the effective ignition energy are more than 15% and 1 J respectively, which are all in the range of coal-dust explosion. When all of the influence factors satisfy the coal-dust explosion conditions at the same time, the explosion may occur.

**Key words:** coal pulverized; electrostatic field; electric spark; the minimal ignition energy; explosion

煤粉细化过程中由于煤粉的碰撞及摩擦,使得大量煤粉带正负电荷,进而产生静电场。一些煤粉表面的电量可达0.1~1.0  $\text{C}/\text{m}^2$ ,在适当条件下,其静电电压可高达数万伏<sup>[1-3]</sup>。统计与实验资料表明,可燃性粉尘大多数属易燃易爆物质,其燃爆事故占粉体灾害事故的60%以上<sup>[4-7]</sup>。当煤粉细化过程中产生的静电荷越积越多,两点间形成很高的电位差时,煤粉本身的静电放电火花即可成为其点火源。因此,为了

确保煤粉细化过程的安全,需要对煤粉细化过程中静电以及由静电放电引发爆炸的机理进行研究。

目前研究者们已从不同的角度分析了煤粉碰撞带电的机理,人们对煤粉带电的成因还提出许多另外的猜测和解释<sup>[8-9]</sup>。本文针对煤粉细化过程中煤粉运动情况,基于水的电离理论和粉体动力学理论,从煤粉碰撞摩擦行为出发研究煤粉系统静电放电机理,并数值分析煤粉细化过程产生电火花引爆的可能性。

收稿日期:2011-09-16 责任编辑:毕永华

基金项目:河南省重点学科资助项目(509919);河南理工大学博士基金资助项目(B2009-84)

作者简介:岳高伟(1977—),男,河南临颖人,副教授。Tel:0391-3987646, E-mail:yuegaowei@hpu.edu.cn

## 1 煤粉碰撞带电模型

基于水的电离理论和粉体动力学理论,从煤粉碰撞摩擦行为出发研究粒径不同的煤粉系统静电放电机理<sup>[10]</sup>。假设煤粉表面笼罩有水分子薄层,煤粉间的碰撞导致能量转移和煤粉温度变化;水电离生成  $\text{H}_3\text{O}^+$  和  $\text{OH}^-$  离子,当两个温度不同或水分子薄层正(负)离子浓度不同的煤粉相接触时, $\text{H}_3\text{O}^+/\text{OH}^-$  以更快的速度从浓度高的处所向浓度低的处所迁移。

煤粉间的接触力按照软球模型进行计算,在图 1 中,煤粉  $j$  作用于煤粉  $i$  上接触力的法向力为  $\mathbf{F}_{nij}$ ,  $\mathbf{F}_{nij}$  为弹性力与阻尼力在法向上的投影和,即

$$\mathbf{F}_{nij} = (-k_n \delta_n - \eta_n \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} \quad (1)$$

式中,  $\delta_n$  为由法向力产生的煤粉位移;  $k_n$  和  $\eta_n$  分别为法向上刚性系数与阻尼系数<sup>[11]</sup>;  $\mathbf{v}_{ij}$  为煤粉  $i$  相对于煤粉  $j$  的速度矢量,  $\mathbf{v}_{ij} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j$ ,  $\mathbf{v}_i$  和  $\mathbf{v}_j$  为煤粉速度;  $\mathbf{n}$  为碰撞瞬时由煤粉  $i$  质心指向煤粉  $j$  质心的单位矢量。

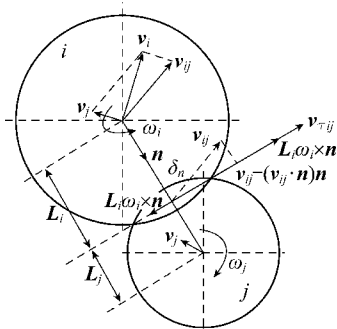


图 1 煤粉碰撞的动力学模型

Fig. 1 Dynamic model of coal dust collision

煤粉  $j$  作用于煤粉  $i$  上接触的切向分量  $\mathbf{F}_{\tau ij}$  为

$$\mathbf{F}_{\tau ij} = k_\tau \delta_\tau - \eta_\tau \mathbf{v}_{\tau ij} \quad (2)$$

式中,  $\delta_\tau$  为由切向力产生的煤粉位移;  $k_\tau$  和  $\eta_\tau$  分别为切向上的刚性系数与阻尼系数;  $\mathbf{v}_{\tau ij}$  为接触点在切向的相对滑移速度。

$$\mathbf{v}_{\tau ij} = \mathbf{v}_{ij} - (\mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} + (\omega_i \mathbf{L}_i + \omega_j \mathbf{L}_j) \times \mathbf{n} \quad (3)$$

式中,  $\omega_i$  和  $\omega_j$  为煤粉的旋转速度;  $\mathbf{L}_i$  和  $\mathbf{L}_j$  分别为煤粉  $i$  和  $j$  沿  $\mathbf{n}$  方向的矢径。

若  $|\mathbf{F}_{\tau ij}| > \xi |\mathbf{F}_{nij}|$ , 则煤粉  $i$  发生滑动, 其切向力为

$$\mathbf{F}_{\tau ij} = -\xi \mathbf{F}_{nij} \boldsymbol{\tau} \quad (4)$$

式中,  $\xi$  为摩擦因数;  $\boldsymbol{\tau}$  为切向单位矢量。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{v}_{ij} / |\mathbf{v}_{ij}| \quad (5)$$

滑动摩擦力做功  $W$  可以表示为

$$W = \mathbf{F}_{\tau ij} \int_{t_s}^{t_e} \mathbf{v}_{\tau ij} dt \quad (6)$$

其中,  $t$  为时间变量;  $t_s$  为煤粉相对滑移开始时间;  $t_e$  为煤粉相对滑移结束时间。忽略相互碰撞时煤粉间法向变形与切向变形等对煤粉温度的影响, 认为煤粉温度的上升只与摩擦力做功相关, 则煤粉温度变化  $\delta T$  可以表示为

$$\delta T = \lambda W / (V_i \rho c) \quad (7)$$

其中,  $V_i$  为煤粉  $i$  的体积;  $\rho$  为煤粉  $i$  的密度;  $c$  为煤粉  $i$  的比热容;  $\lambda$  为摩擦生热转换系数。煤粉相互摩擦的过程中, 煤粉间热传递暂被忽略。由于煤粉在流场中还将通过对流和辐射等方式与其周围的环境换热, 将散热引起的煤粉温度变化表示为

$$\delta T = \psi S \mathbf{v}_i / (V_i \rho c) \quad (8)$$

其中,  $S$  为煤粉表面积;  $\psi$  为散热系数。受温度梯度和环境电场的作用  $\text{H}_3\text{O}^+/\text{OH}^-$  在煤粉间迁移,  $\text{H}_3\text{O}^+/\text{OH}^-$  迁移的综合表现为  $\text{H}_3\text{O}^+$  的流量  $J$  (流入为正, 流出为负), 电流量可以表示为环境电场  $\mathbf{E}$  和相接触煤粉间温度差  $\delta T$  的函数。

$$J = \alpha (|\mathbf{E}| - \beta \delta T) \quad (9)$$

其中,  $\alpha$  为湿度的影响系数, 取 0.11;  $\beta$  为煤粉间的温度差引起离子迁移形成煤粉间的电势差的比例系数, 与水的离子积、 $\text{H}_3\text{O}^+/\text{OH}^-$  迁移速度和煤粉的半径有关, 通过计算得到。因此, 煤粉的带电量表示为

$$q_i = \int_{t_s}^{t_e} J dt, q_j = - \int_{t_s}^{t_e} J dt \quad (10)$$

值得注意的是, 煤粉间的电荷转移主要取决于相互接触煤粉的温度差以及环境电场, 与煤粉间的滑动并没有直接的联系, 煤粉间的相对滑动导致煤粉间的能量传递及煤粉的温度变化。环境电场是煤粉运动发展一定阶段后表现的宏观电场, 它随着粉体煤粉运动不断变化。环境电场可以表示为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{m=1}^N \frac{q_m}{r^2} \mathbf{n} \quad (11)$$

式中,  $q$  为某个煤粉的带电量;  $N$  为系统煤粉总数;  $r$  为某节点到带电煤粉的距离;  $\epsilon$  为介电常数。

## 2 煤粉静电放电的点燃特性

粉体静电放电火花的时间特性和空间分布特征形成放电的初始条件和放电电荷转移量等点火源因素, 可燃物质的燃爆特性参数都对粉体静电放电的实际点燃能力有影响。近年来, 人们将研究重点放在粉体料仓内粉体静电放电的点燃能力研究上, 但由于研究手段上的原因, 只能将料仓内的放电通过环形收集电极引出, 在放电区以外的极隙内做点燃实验。这样由实验得到放电相当能量, 在一定程度上反映了粉体放电的点燃能力。实验与实际静电点燃事例统计表

明,粉体生产过程中可能产生静电灾害的静电放电形态有电晕放电、刷形放电、人体放电、火花放电等,最为常见的是火花放电,其单次放电的有效点燃能量可达  $1 \text{ J}^{[12-15]}$ 。

实际的放电火花特性,最接近于最小点火能测试实验所用的实验火花,所以对于火花放电而言,可以认为其放电的相当能量就是其有效点燃能量(特强火花放电应考虑通道大小的影响)。对于带电导体而言其火花放电的有效点燃能量  $Q$  的表达式为

$$Q = 0.5CV^2 \quad (12)$$

式中,  $C, V$  分别为导体的电容和电位。

### 3 系统静电场数值模拟与分析

如图 2 所示,以原点  $O$  为圆心,作一系列径向间距相等的同心圆。以横坐标正方向为  $0^\circ$ ,沿逆时针方向,将圆分割为 180 份,然后如图示标明标号 1, 2, 3, …… ,则初始时刻在截面内共有 7 200 个节点。初始时刻( $t=0$ )煤粉随机分布于容器内,假定煤粉具有

随机的初始速度( $0 \sim 1 \text{ m/s}$ ),则煤粉将会发生煤粉-煤粉、煤粉-煤磨机壁面的两种碰撞,这两种碰撞形式均认为是弹性碰撞。煤粉间碰撞会产生电荷转移,从而煤粉会带上不同电荷。

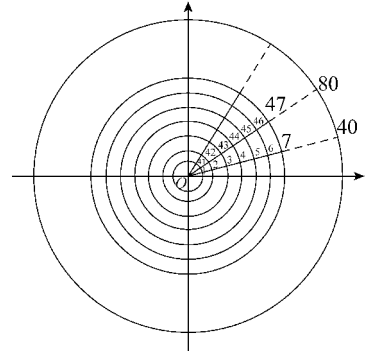


图 2 煤磨机剖面网格划分

Fig. 2 Divided lattice of coal mill section

图 3 给出了不同时刻带电煤粉(红色带正电,蓝色带负电)在煤机中分布剖面图和相邻节点间电压差曲线图。

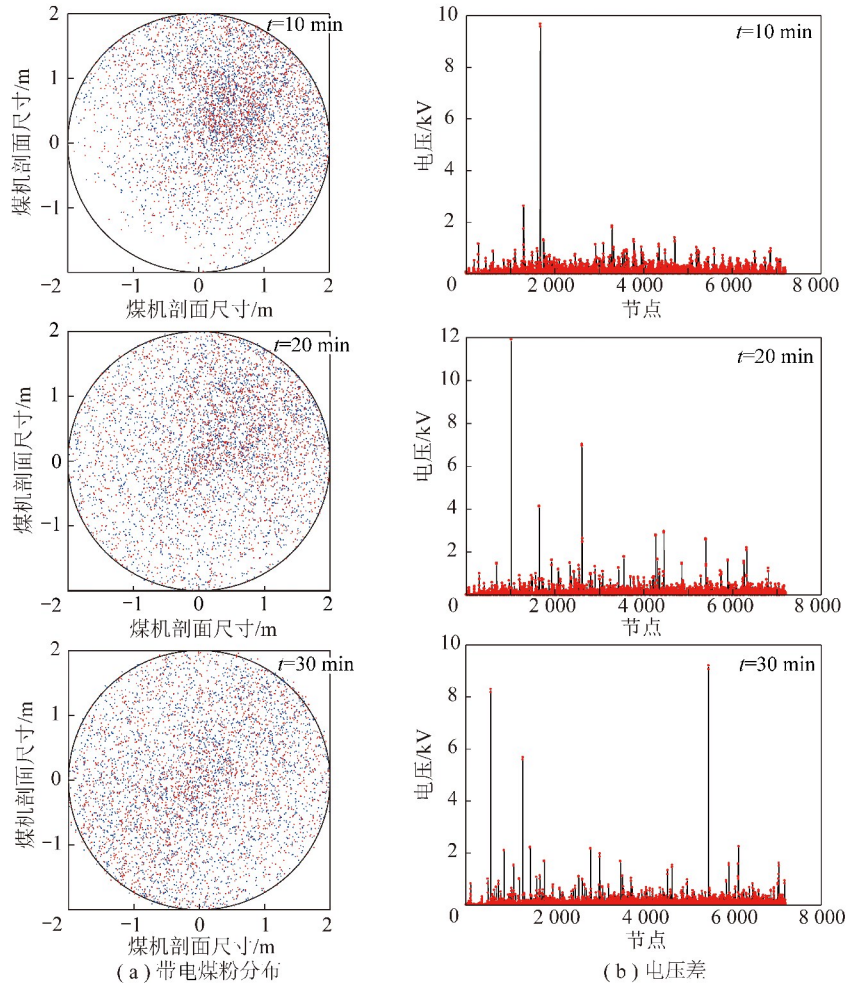


图 3 不同时刻煤机中带电煤粉分布和相邻节点间电压差曲线

Fig. 3 Distribution of charged coal dust and voltage difference between two nodal points at different moment in coal mill

从图 3(a)可以看出,不同时刻带电煤粉浓度分布随时间发生变化,这是因为随着时间的变化,不同位置的煤粉浓度在变化,浓度大的地方粉粒碰撞的几率较大,带电的可能性就越大,带电煤粉数量也越多。从图 3(b)可以看出不同时刻相邻节点间电压差大部分在 200 V 以下,但是在个别位置,相邻节点间电压差可达上千伏,甚至上万伏,这种较高的电压差可能达到甚至超过击穿电压的临界值,导致电火花的产生,达到最小点火能量时,便可能会引发爆炸现象。

#### 4 静电放电起爆条件计算分析

煤粉爆炸必须具备一定的条件,才呈现出危险状态,煤粉发火、爆炸的条件归纳有 3 点<sup>[16]</sup>,即:煤粉粒度和浓度、氧含量、最小点火能量。

图 4 给出了煤细化的粒度分布特征。平均粒径在 1 mm 以下的煤粉都可能参与爆炸,而且爆炸的危险性随粒度的减小迅速增加。粒径在 75  $\mu\text{m}$  以下的煤粉,特别是 30 ~ 75  $\mu\text{m}$  煤粉爆炸性最强,因为单位质量煤尘的粒度小,总表面积及表面能越大。粒径 < 60  $\mu\text{m}$  后,煤粉爆炸性增强的趋势变得平缓。从图 4 可以看出煤粉的粒度主要分布在 30 ~ 70  $\mu\text{m}$ ,满足煤粉爆炸的粒度特征。

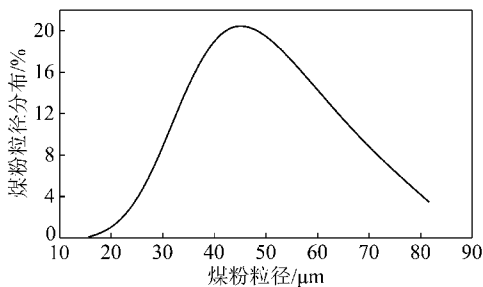


图 4 煤粉粒径分布

Fig. 4 Distribution of coal-dust size

图 5 为煤粉细化过程中煤粉浓度随时间的变化。煤粉只有在一定的爆炸浓度范围才能爆炸,爆炸浓度的下限一般为几十克每立方米至几百克每立方米,上限可达 2 ~ 6  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,而质量浓度在 1.2 ~ 2.0  $\text{kg}/\text{m}^3$  时爆炸危险性最大。从图 5 可以看出,煤粉细化过程中的质量浓度在 0.5 ~ 2.4  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,在爆炸浓度范围之内。

图 6 为煤粉细化过程中氧含量随时间的变化。煤粉爆炸是由煤粉粒子表面与氧气发生反应所引起的,当煤机内空气和煤粉的混合物中氧含量 < 15% 时,煤粉才不可能燃烧爆炸。从图 6 可以看出,煤机内氧含量大都小于 15%,处于安全状态。但是,在某些时刻氧含量超过 15%,这就使得煤粉处于爆炸的氧含量范围内。

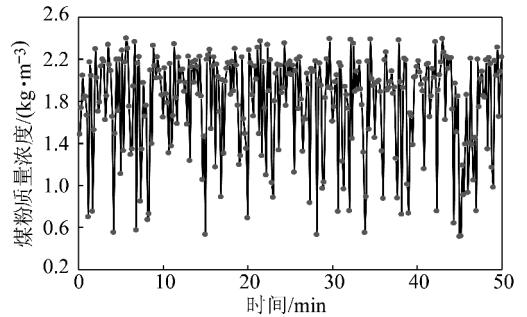


图 5 煤机内煤粉质量浓度随时间变化

Fig. 5 Variation of coal-dust concentration with time

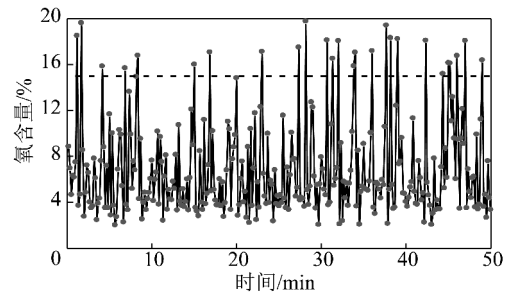


图 6 煤机内氧含量随时间变化

Fig. 6 Variation of oxygen content with time

图 7 为煤粉细化过程中不同时刻的最大电压值产生火花放电的有效点燃能量。为便于对比分析,在实际分析时取火花放电的有效点燃能量上限为 1 J<sup>[17]</sup>。从图 7 可以看出,不同时刻电火花有效点火能量变化差别很大,大多时刻小于 1 J,处于安全状态。但在某些时刻,有效点火能量大于 1 J,个别的甚至 2.5 J 以上,这就使得煤粉处于爆炸的最小点火能量范围。

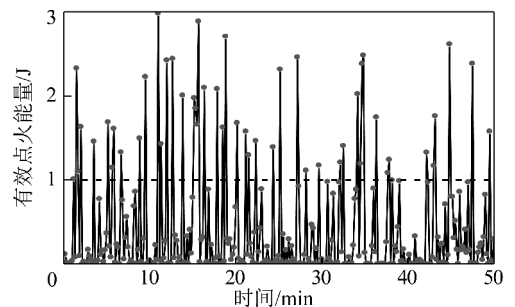


图 7 煤机内最大有效点火能量随时间变化

Fig. 7 Variation of the maximum ignition energy with time

从图 4 ~ 7 的分析可以看出,煤粉的粒度特征和浓度都满足煤粉爆炸的危险条件,虽然氧含量和有效点火能量一般处于安全条件之下(氧含量 < 15%,有效点火能量 < 1 J),但是在某些时刻却处于煤粉爆炸的危险条件之内。如果在某一时刻煤粉爆炸条件同时满足,就可能产生爆炸。

## 5 结 论

(1) 不同时刻带电煤粉浓度分布随时间发生变化;不同时刻节点间电压差大部分在 200 V 以下,但是在个别位置,相邻节点间电压差可达上千伏,甚至上万伏,这种较高的电压差达到击穿电压的临界值将产生电火花。

(2) 在煤粉细化过程中,煤粉的粒度大部分在 30 ~ 75  $\mu\text{m}$ ,煤粉质量浓度在 0.5 ~ 2.4  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,某些时刻氧含量和有效点火能量分别大于 15% 和大于 1 J,这些都在煤粉的爆炸范围之内。

(3) 当煤粉粒度特征、煤粉浓度、氧含量和有效点火能量同时满足煤粉爆炸的危险条件时,在煤粉细化过程中就可能产生爆炸。

### 参考文献:

- [1] 黄郑华. 粉碎研磨设备粉尘爆炸的预防[J]. 工业安全与环保, 1999(8):19-22.  
Huang Zhenghua. Prevention of dust explosion in the smashing and grinding devices[J]. Industrial Safety and Dust Control, 1999(8):19-22.
- [2] 赵 斌,杨尚平,马俊骑,等. 浅谈静电的危害及其应用[J]. 物理与工程,2006,16(3):51-54.  
Zhao Bin, Yang Shangping, Ma Junqi, et al. Brief introduction of the hazards and applications of electrostatic[J]. Physics and Engineering, 2006, 16(3):51-54.
- [3] 侯新凯,徐晶晶,徐德龙,等. 粉煤灰中灰颗粒的摩擦带电特征[J]. 煤炭学报,2007,32(7):757-761.  
Hou Xinkai, Xu Pinjing, Xu Delong, et al. The triboelectrification characteristics of fly ash component[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7):757-761.
- [4] 魏砾宏,李润东,李爱民,等. 超细煤粉着火特性的热重分析[J]. 煤炭学报,2008,33(11):1292-1295.  
Wei Lihong, Li Rundong, Li Aimin, et al. Study on ignition characteristics of micro-pulverized coal by thermogravimetry[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(11):1292-1295.
- [5] 冯武军,李 栋,赵立合,等. 高温空气煤粉点火的试验研究[J]. 煤炭学报,2004,29(5):611-613.  
Feng Wujun, Li Dong, Zhao Lihe, et al. Experimental study on high-temperature air ignition of pulverized coals[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(5):611-613.
- [6] 宫广东,刘庆明,胡永利,等. 管道中煤尘爆炸特性实验[J]. 煤炭学报,2010,35(4):609-612.  
Gong Guangdong, Liu Qingming, Hu Yongli, et al. Experimental research on methane and coal dust explosion characteristics in tube [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4):609-612.
- [7] 景国勋,杨书召. 煤尘爆炸传播特性的实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4):605-608.  
Jing Guoxun, Yang Shuzhao. Experimental study on propagation characteristics of coal dust explosion[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4):605-608.
- [8] Workman E J, Reynold S E. A suggested mechanism for the generation of thunderstorm electricity[J]. The phys. Rev., 1948, 74(1-6):709.
- [9] Latham J. The electrification of snow storms and sandstorms[J]. Q. J. R. Meteorol Soc., 1964, 90:91-95.
- [10] 鲁录义,顾兆林,罗昔联,等. 一种风沙运动的颗粒动力学静电起电模型[J]. 物理学报,2008,57(11):6939-6945.  
Lu Luyi, Gu Zhaolin, Luo Xilian, et al. An electrostatic dynamic model for wind-blown sand systems[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(11):6939-6945.
- [11] 赵永志,程 易. 水平滚筒内二元颗粒体系径向分离模式的数值模拟研究[J]. 物理学报,2008,57(1):322-328.  
Zhao Yongzhi, Cheng Yi. Numerical simulation of radial segregation patterns of binary granular systems in a rotating horizontal drum [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(1):322-328.
- [12] 周本谋,范宝春. 静电放电火花点燃危险性分级方法研究[J]. 北京理工大学学报,2005,25(S0):85-88.  
Zhou Benmou, Fan Baochun. Investigation of the hazardous classification method for ESD sparks[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2005, 25(S0):85-88.
- [13] Schwenzfeuer K. A new apparatus for ignition tests with brush discharges[J]. Journal of Electrostatics, 1997(40/41):383-388.
- [14] Glor M, Lüttgens G, Maurer B, et al. Discharges from bulked polymeric granules during the filling of silos characterization by measurements and influencing factors [J]. Journal of Electrostatics, 1989, 23:35-43.
- [15] Glor M. Ignition source static electricity: Incident investigation[J]. Journal of Electrostatics, 2009, 67(2-3):242-246.
- [16] 刘永芹,许春家. 可燃性粉尘的爆炸特性、分类及防爆措施说明[J]. 防爆电机,2006,41(3):14-18.  
Liu Yongqin, Xu Chunja. The explosion characteristic, classification and protection measures of ignitable dust[J]. Explosion-proof Electricmachin, 2006, 41(3):14-18.
- [17] 周本谋,范宝春,刘尚合. 典型静电放电火花点燃危险性评价方法研究[J]. 中国安全科学学报,2004,14(4):27-31.  
Zhou Benmou, Fan Baochun Liu Shanghe. Study on method for ignition risk assessment caused by electrostatic discharge sparks[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(4):27-31.