

煤矿井下瓦斯抽采PVC管静电场试验

岳高伟,许梦飞,毕伟

河南理工大学土木工程学院,焦作 454000

摘要 针对矿井瓦斯抽采在PVC管壁电荷积聚产生强静电场而导致静电放电的危害,通过搭建塑性管瓦斯流动静电场测试装置,模拟测试瓦斯流动过程中塑性管道的静电场,同时数值计算静电放电有效点火能量。研究表明,改变瓦斯流速、管径和瓦斯浓度,PVC管静电场总体趋势是开始时电场随时间逐渐增大,而后趋于稳定,流动瓦斯与PVC管壁面摩擦产生电荷积聚而导致的静电场可达20 kV/m以上。以甲烷的最小点燃能量0.28 mJ为标准,大多时刻PVC管静电放电有效点火能量小于0.28 mJ,处于安全状态,但某些时刻有效点火能量大于0.28 mJ,使得瓦斯处于爆炸的最小点火能量范围。从试验分析瓦斯抽采PVC管静电场及有效点火能量,可为矿井瓦斯抽采防静电措施提供科学依据。

关键词 PVC管;瓦斯抽采;静电场;有效点火能量

中图分类号 TD712

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.14.009

Electrostatic Voltage Test of Coal Mine Gas Drainage Pipeline of PVC

YUE Gaowei, XU Mengfei, BI Wei

School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

Abstract Electrostatic discharge caused by strong electrostatic voltage due to charge accumulation on the PVC pipe wall has potential damages to coal mine gas drainage. In this paper, a set of device is built to test the electrostatic voltage of the PVC pipe during coal mine gas drainage process, and effective ignition energy of electrostatic discharge is calculated. The test results show that with variation of the gas flow velocity, PVC pipe diameter, and gas concentration, the electrostatic voltage of the PVC pipe increases gradually with time at the beginning, and then tends to be stable. Due to friction between the gas and PVC pipe wall, charge accumulation on the wall causes strong electrostatic field of more than 20 kV/m. With the minimum ignition energy of 0.28 mJ for methane taken as the standard, the effective ignition energy for electrostatic discharge in PVC pipe is usually less than 0.28 mJ, which is under safe conditions. However, at some moments, the effective ignition energy is larger than the safe value, making the gas in the minimum ignition energy range of explosion. This study may provide scientific basis for anti-static measures during coal mine gas extraction.

Keywords PVC pipe; gas drainage; electrostatic field; efficient ignition energy

塑性管道具有许多金属管材无法比拟的优点,在矿井下得到广泛应用。但是,塑性材料都是绝缘材料,因摩擦产生的静电荷积聚在表面不易消失,当静电荷积聚达到一定程度

时会对接地体产生放电现象,当放电能量达到0.28 mJ时,就会引起瓦斯爆炸,威胁矿井生产安全^[1,2]。日本北海道地区的煤矿,中国鹤岗矿务局新一矿、四川省綦江县一乡镇煤矿、北

收稿日期:2014-03-27;修回日期:2014-04-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51274090);中国博士后科学基金项目(2013M531673);河南省高等学校深部矿井建设重点学科开放实验室基金项目(2013KF-01)

作者简介:岳高伟,副教授,研究方向为矿业安全与防治,电子信箱:mxlygw@163.com

引用格式:岳高伟,许梦飞,毕伟.煤矿井下瓦斯抽采PVC管静电场试验[J].科技导报,2014,32(14):59-63.

票矿务局、丰城矿务局、鸡西矿务局、淮南矿务局等,曾发生过多起因静电放电引起瓦斯爆炸的事故^[3,4]。因此,需运用系统科学的观点,对井下静电放电的产生机制和防治措施开展深入研究。

周本谋^[5,6]、ISSA^[7]、Siwek 等^[8]通过理论研究和实验测试,得到不同性质的可燃物质被静电放电火花点燃的条件不同,对6种典型静电放电火花实际点燃能力给予确定。孙可平等^[9]提出一种新的实验技术评估绝缘体在接触分离过程中静电放电的点燃特性,把不同数量的电荷荷电到材料的表面,通过实验校核所加电荷量是否足以使火花点燃实验探极。司春风等^[1]针对煤矿瓦斯抽采聚氯乙烯(poly vinyl chloride, PVC)管道静电引起的瓦斯爆炸事故,分析PVC管道中静电产生和静电放电的原因,提出了预防PVC管道中静电灾害技术。张玉广等^[10]对绝缘管道静电放电研究表明:管内壁的双电层和管道周围的导体之间发生火花放电,所释放的能量能熔融壁面材料,造成管壁穿孔;在管道外壁和管道周围的导体之间发生刷形放电,多次的刷形放电会造成管道表面腐蚀,减少管道寿命。王树玉^[11]、刘尚合^[12]、邬素华等^[13]研究表明静电放电引爆瓦斯需满足3个条件:瓦斯浓度(5%~16%)、氧气含量(大于12%)、静电放电能量大于瓦斯混合气体最小点火能量。

基于以上原因,抽放管道必须具有双抗性能,即阻燃和抗静电性能^[13]。但是,由于矿用MT 558.2—2005所规定的聚氯乙烯矿用管的技术指标高,研发难度大,市面上尚未见到整体阻燃抗静电PVC矿用管材^[10]。中国煤矿生产中,因静电放电造成的重大事故占总事故的比重虽然较小^[4],但深入研究煤矿井下瓦斯抽采塑性管道的防静电措施仍有重要意义。

1 PVC管静电场试验

1.1 静电电压表

静电电压表采用SGB-50交直流数字高压表(图1),测压范围:-50~0 kV, AC精度:1.0%, DC精度:0.5%;绝缘介质:干式介质材料;环境条件,温度:-25~40℃,湿度:<85%,分压比1000:1。实现实时数据采集和实时显示。

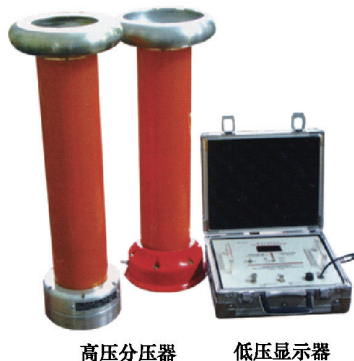
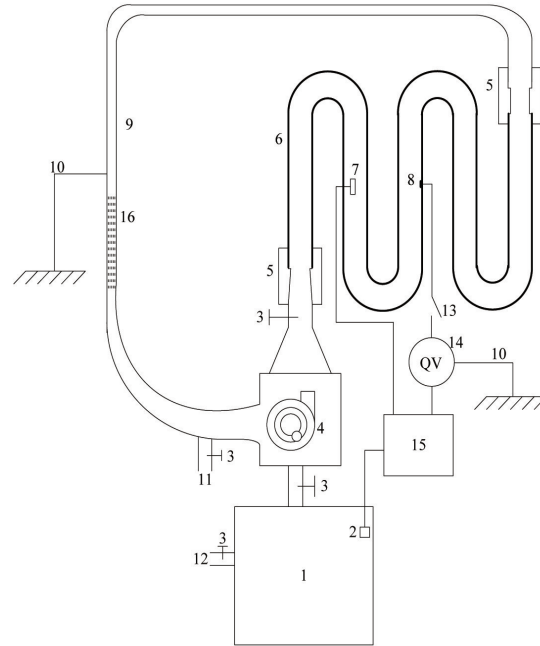


图1 SGB-50静电电压表

Fig. 1 Electrostatic voltmeter of SGB-50

1.2 塑性管管壁面静电场测试原理

图2为瓦斯流动塑性管内壁面静电场测试原理图。塑性管材料采用PVC,混合气体由瓦斯(甲烷)和空气按比例混合。



1—气体混合容器 2—瓦斯含量测试仪 3—阀门; 4—鼓风机;
5—塑胶接头; 6—PVC弯管; 7—气体流速测试仪 8—电压采集探头;
9—钢管; 10—接地线; 11—气体排放口; 12—气体入口; 13—开关;
14—静电电压表; 15—数据采集仪; 16—钢丝滤网

图2 PVC管瓦斯流动静电场测试原理

Fig. 2 Schematic diagram of electro static voltage test with gas flow in PVC pipe

测试原理:在气体混合容器1中按比例输入空气和瓦斯量,通过瓦斯含量测试仪2测量瓦斯浓度;打开阀门3,由鼓风机4将瓦斯混合气吹进PVC管6;气体流速传感器7测混合气体流速,打开静电电压计8测PVC管内壁静电电压;混合瓦斯气体流经由钢管9和钢丝滤网16中和混合气体中的带电粒子后进入鼓风机室,以循环使用。

2 结果与分析

瓦斯在PVC管中流动的过程中,管壁电荷积聚产生的静电场受瓦斯流动速度、管道直径和瓦斯浓度等因素影响。本研究采用正交试验法分别对瓦斯流速、管径和瓦斯浓度对PVC管静电电场的影响进行测试,试验参量如表1所示。

不同瓦斯流速、管道直径和瓦斯浓度下PVC管静电场随时间变化的规律如图3所示。瓦斯在PVC管内流动过程中与管壁长时间摩擦,使管壁失去电子而带上正电荷,由于PVC是良好的绝缘体,表面电阻高达 10^{12} Ω以上,导电性能差,摩擦产生的静电荷积聚在表面,进而产生很强的电场。

表1 试验参量
Table 1 Test parameters

实验序号	管径/mm	瓦斯流速/(m·s ⁻¹)	瓦斯浓度/%
试验1	50	7.20	9.96
试验2	50	10.10	10.08
试验3	50	14.80	10.01
试验4	50	10.01	10.05
试验5	75	9.98	10.01
试验6	110	10.02	9.98
试验7	50	10.03	6.29
试验8	50	9.97	10.86
试验9	50	10.08	14.75

从图3可以看出,虽然不同时刻PVC管电场波动较大,但总体趋势是开始时电场随时间逐渐增大,而后趋于稳定,某时刻静电场可达-28 kV/m。图3(a)表明,随着瓦斯流速增大,PVC管静电场增大,但在瓦斯流速 14.80 m/s 时静电场比流速 10.10 m/s 时略大,因此增大瓦斯流速(10 m/s 以上)对 PVC 管静电场影响不大。图3(b)表明,不同管径 PVC 管静电场变化不大,即管径对静电场的影响不明显。图3(c)表明,瓦斯浓度对 PVC 管静电场影响比较明显,浓度越大,初始阶段静电场越大,但约 70 min 后,瓦斯浓度达 10% 以上时,静电场基本一致。

由于瓦斯流动导致的 PVC 管静电场较大,在某些时刻可达 20 kV/m 以上,这些强静电场极有可能静电放电,静电放电是静电场引起的静电荷快速瞬态转移过程,具有不同静电电位的 2 个物体接近时,强静电场会使两物体间空气或者介质击穿,形成放电火花。PVC 管用作瓦斯抽采管道时,PVC 管壁受气体长时间摩擦而产生电荷积聚,而 PVC 管是绝缘体导致静电不容易被释放,电场持续增大到一定程度时就会达到击穿电压,放出电火花,当瓦斯浓度和氧含量达到爆炸范围,静电放电火花会点燃瓦斯,引起局部爆燃,造成管路振动、流速瞬间急剧增大,并导致产生静电的可能性增大,使管道系统内多个位置出现静电、放电,造成瓦斯在管道内多处发生爆炸^[8]。

在最易点燃浓度混合物中,1 个电路的 1 次放电的能量正好足够点燃混合物,这个电路总能量的最小值,为相应的物质与空气混合物的最小点燃能量。如果 1 次点燃是由于 1 个电容放电引起的,电容的电容量为 C ,电容两端的电压为 V ,则相应的放电能量 W 为

$$W = \frac{1}{2}CV^2 \quad (1)$$

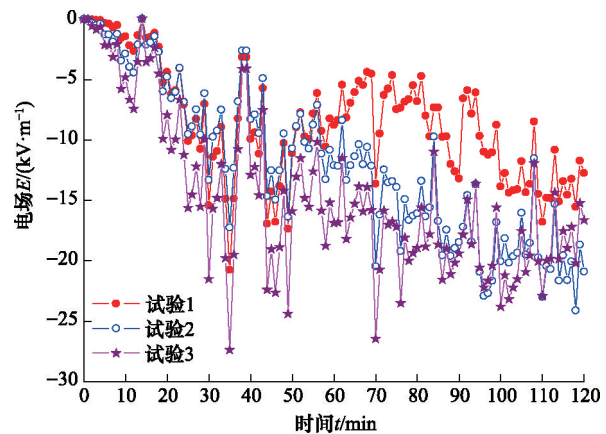
由于可燃性气体(或蒸气)的物质性质差异,它们被点燃时需要的活化能不同,当被电火花点燃时,它们需要的电能也不同。

电容 C 可采用式(2)计算

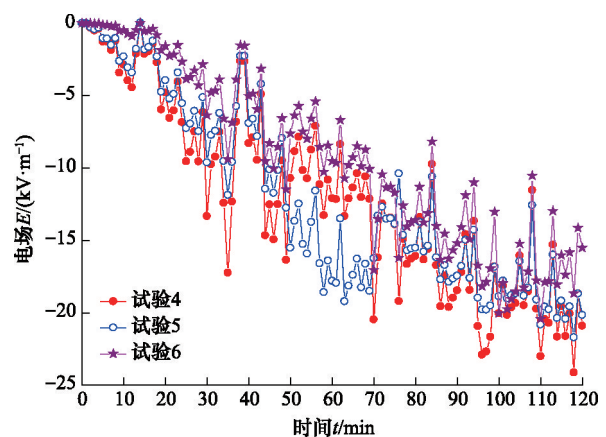
$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi kd} \quad (2)$$

$$S = \pi ld \quad (3)$$

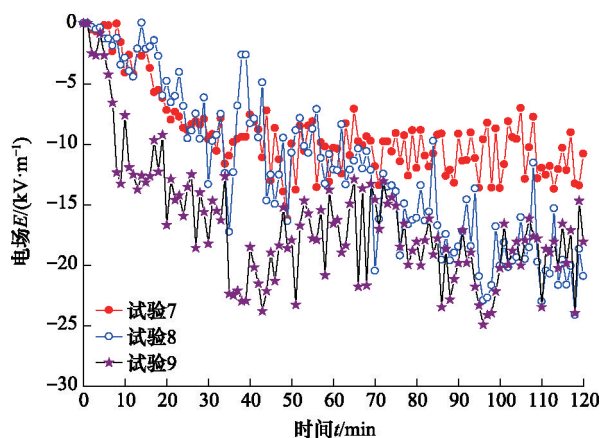
其中, S 为管长 l 的管壁面积; k 为静电力常量; ϵ 为介电常数, d 为管径。



(a) 瓦斯流速影响



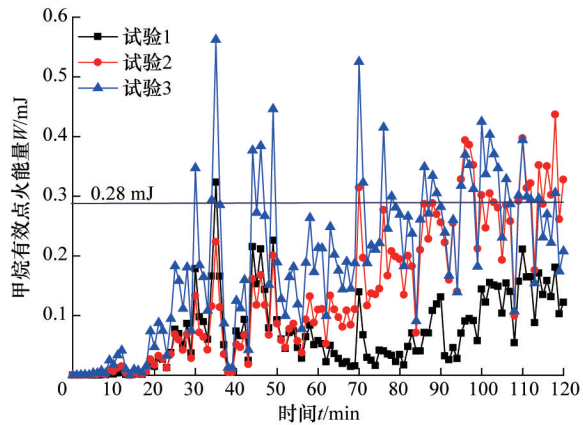
(b) 管径影响



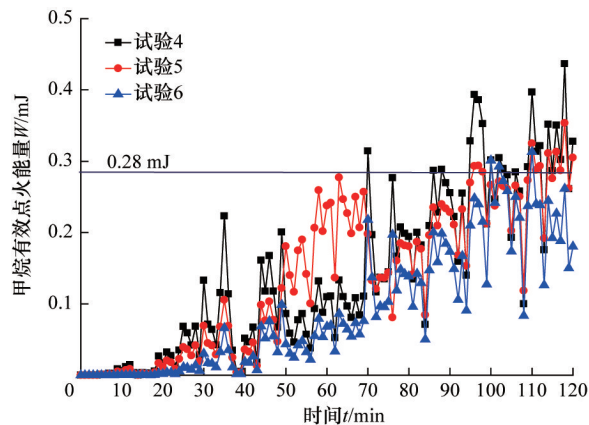
(c) 瓦斯浓度影响

图3 不同影响因素时PVC管静电场随时间变化规律
Fig. 3 Variation of electrostatic voltage law in PVC pipe with different influential factors

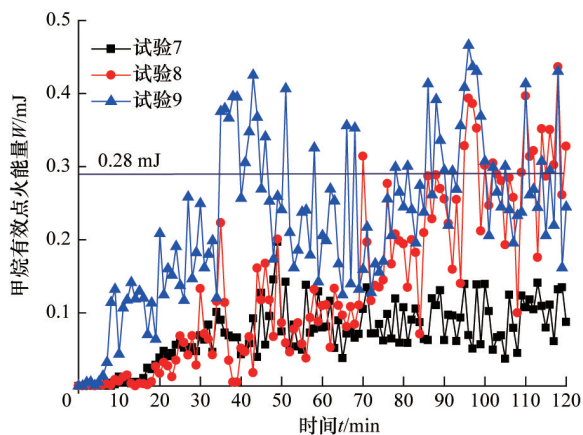
以甲烷的最小点燃能量0.28 mJ为标准^[14],对试验测得PVC管静电场(图3)形成电火花的能量进行计算,结果如图4所示。



(a) 瓦斯流速影响



(b) 管径影响



(c) 瓦斯浓度影响

图4 不同影响因素时PVC管内甲烷有效点火能量随时间变化规律

Fig. 4 Variation of effective ignition energy for methane in PVC pipe with different influential factors

从图4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0.28 mJ,处于安全状态。但在某些时刻,有效点火能量大于0.28 mJ,个别的甚至达到0.56 mJ以上,使得瓦斯处于爆炸的有效点火能量范围。从图4还可以看出,管径对电火花有效点火能量影响不明显(图4(b)),而流速和瓦斯浓度对电火花有效点火能量影响较大,从图4(a)和图4(c)可知,当瓦斯流速超过10.0 m/s、浓度达到10%以上时,若含氧量达到12%以上,PVC管瓦斯发生爆炸的可能性最大。而当瓦斯流速小于7.2 m/s或瓦斯浓度小于6.29%时,电火花点火能量均小于其有效值,相对安全。

3 瓦斯抽采PVC管静电放电防治措施

静电灾害是在一定条件下造成的,静电作为火源引起爆炸和燃烧的条件可归纳为:1)有静电产生的来源;2)静电得以积聚,并达到足以引起火花放电的静电电场;3)静电放电的火花能量达到爆炸性混合物的最小引燃能量;4)静电放电周围必须有爆炸性混合物存在。

瓦斯抽采PVC管静电灾害是由于具备了电荷的产生、电荷的积蓄、放电现象、可燃性物质存在这4个条件而发生的。因此,若能消除以上条件中的任一个,就可以有效消除由于静电放电而导致的爆炸灾害。

国内外一般采用控制流速或流量的方法以实现减少静电积累的目的^[15]。即控制瓦斯气流速、流量减少静电的产生和积累,但是,实际瓦斯抽采过程中需要的流量和安全流量之间有着很大的差异,往往高出安全流量十倍甚至几十倍之多,而且管网中使用PVC管,因而存在静电危害的可能性极大。为了尽可能减少静电带来的危险,在密闭管网的输气操作中,采用降低流速、流量的办法(一般控制在5倍安全流量范围内),尽可能地减少静电的积聚。

从防止、抑制静电的观点出发,防止瓦斯抽采PVC管静电灾害的基本措施可归纳为:

1)抑制静电的产生。由于静电的发生源是物体之间的摩擦或分离作用,因此要尽可能抑制这些作用。在瓦斯抽采PVC管路输送中,最好的方法是降低速度至7 m/s以下,若抽采瓦斯浓度较大(可达60%以上),瓦斯抽采速度应相应减小,可至2 m/s左右(按浓度增大2倍流速降50%估算)。

2)促使电荷泄露。在防治静电灾害对策中,最简单的方法是进行接地。应在输送系统的管道内侧,顺其走向加设两端接地的金属线。即通过金属导体使静电荷迅速泄放到大地中。另外,还可在PVC管道材料中加入金属粉末或碳黑,以防止带电。也可采取专用的管道静电消除器。

3)在输气管道的法兰接头、塑料管两端、阀门等连接处应用金属线跨越。

目前国内尚无静电火花安全规程,这更是一个不安全的因素,因此建立中国的静电火花规程和检验方法仍是一个重要的课题。

4 结论

尽管井下PVC抽放管道具有一定双抗性能,但PVC管是绝缘材料,因瓦斯流动摩擦产生的静电荷积聚在其表面形成强电场,进而可能引发静电放电导致灾害事故。本研究通过搭建PVC管瓦斯流动静电场测试装置,模拟测试了瓦斯流速、管道直径和瓦斯浓度对PVC管壁面静电电场随时间的变化规律,同时,数值计算了不同时刻PVC管静电场产生的有效点火能量。研究结果表明:

1) 不同时刻PVC管电场波动较大,但总体趋势是开始时电场随时间逐渐增大,而后趋于稳定。

2) 管径对静电电场的影响不明显,改变瓦斯流速(大于10 m/s)和瓦斯浓度(大于10%)对PVC管静电场影响不大。

3) 某些时刻瓦斯流动导致的PVC管静电放电能量大于甲烷的最小点燃能量0.28 mJ,使得瓦斯处于爆炸的有效点火能量范围。瓦斯抽采PVC管路输送中,降低速度至7 m/s以下,若抽采瓦斯浓度较大,瓦斯抽采速度应相应减小,此时电火花点火能量均小于其有效值,相对安全。

此研究对井下瓦斯抽采防静电措施的合理完善具有一定的现实意义。

参考文献(References)

- [1] 司春风,袁树杰. 煤矿井下瓦斯抽采PVC管道爆炸原因分析及预防[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版, 2011, 31(3): 48-51.
Si Chunfeng, Yuan Shujie. Analysis of coal mine gas explosion in drainage pipeline of PVC and its prevention[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 31(3): 48-51.
- [2] 张玉川. 塑料管道国内外技术发展动向(II)[J]. 塑料, 2008, 37(4): 59-61.
Zhang Yuchuan. New development of technology for plastics pipe system (II)[J]. Plastics, 2008, 37(4): 59-61.
- [3] 金小汉. 煤矿瓦斯爆炸的火花诱因分析与应对措施[J]. 矿业安全与环保, 2008, 35(5): 66-68.
Jin Xiaohan. Spark inducement analysis and preventive measures of coal mine gas explosion[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2008, 35(5): 66-68.
- [4] 方堃. 高分子材料在煤矿中使用的安全性分析[J]. 华北科技学院学报, 2005, 2(1): 24-27.
Fang Kun. The high-molecular materials is the major source for the accidents in coal mining[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2005, 2(1): 24-27.
- [5] 周本谋,刘尚合,范宝春. 粉体工业典型静电放电辐射场测试研究[J]. 测试技术学报, 2003, 17(4): 302-305.
Zhou Benmou, Liu Shanghe, Fan Baochun. Investigation of the characteristics of radiate field from the ESD according to powder industrial production[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2003, 17(4): 302-305.
- [6] 周本谋,范宝春,刘尚合. 静电放电火花能量耦合特性研究[J]. 高电压技术学报, 2004, 30(4): 33-38.
Zhou Benmou, Fan Baochun, Liu Shanghe. Research for the characteristic of energy coupling linked to the sparks of electrostatic discharge[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(4): 33-38.
- [7] ISSA Prevention Series No.2017(E). Static Electricity (Ignition hazards and protection measures)[S]. D-69115 Hei-delberg, Germany, 1996.
- [8] Siwek R, Cizena Z. Ignition behavior of dusts: Meaning and interpretation[J]. Process Safety Progress, 1995, 14: 107-119.
- [9] 孙可平,刘闻灵,郭鑫. 带电绝缘体静电放电引燃性新型实验[J]. 河北大学学报:自然科学版, 2010, 30(5): 477-480.
Sun Keping, Liu Wenling, Guo Xin. New experimental on the incendivity of charged insulator[J]. Journal of Hebei University: Natural Science Edition, 2010, 30(5): 477-480.
- [10] 张玉广,董秀洁,陈旭,等. 静电火花放电能量的测量实验研究[J]. 中原工学院学报, 2009, 20(4): 1-3.
Zhang Yuguang, Dong Xiujie, Chen Xu, et al. Study on the measurement of the electrostatic spark discharge energy[J]. Journal of Zhongyuan University of Technology, 2009, 20(4): 1-3.
- [11] 王树玉. 煤矿五大灾害事故分析和防治对策[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2006.
Wang Shuyu. Accident analysis and prevention countermeasures for the five disasters in coal mine[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2006.
- [12] 刘尚合,武占成. 静电放电及危害防护[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2004.
Liu Shanghe, Wu Zhancheng. Electrostatic discharge and harm protection [M]. Beijing: Beijing Posts and Telecommunications University Press, 2004.
- [13] 郭素华,王志红. PVC抗静电材料的研究[J]. 塑料, 2005, 34(4): 45-48.
Wu Suhua, Wen Zhihong. Antistatic materials of PVC[J]. Plastics, 2005, 34(4): 45-48.
- [14] 沈德明,王文召. 塑料表面静电荷和放电能量的测定[J]. 煤矿机械与电气, 1982(6): 38-40.
Shen Deming, Wang Wenzhao. Determination of plastic surface electrostatic charge and discharge energy[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 1982(6): 38-40.
- [15] 苏修军,邹敏. 新型煤矿用PVC抗静电管材的研制[J]. 工程塑料应用, 2004, 32(2): 41-42.
Su Xiujun, Zou Min. Development of new PVC antistatic pipe used in colliery[J]. Engineering Plastics Application, 2004, 32(2): 41-42.

(编辑 陈华斌)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。