

文章编号:1000-582X(2010)11-108-05

## 锚索动载荷拉脱(断)火花引爆瓦斯试验

吴仁伦,许家林,孔翔,黄军碗,吕维贇

(中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室;矿业工程学院,江苏徐州,221116)

**摘要:**利用专门研制的锚索冲击拉伸实验装置,在瓦斯浓度和氧气浓度满足瓦斯爆炸的条件下,对 $\phi 15.24\text{ mm}$ 、 $\phi 17.8\text{ mm}$ 和 $\phi 21.6\text{ mm}$ 锚索在动载荷作用下拉脱(断)时产生火花引爆瓦斯的可能性进行了一系列实验研究。结果表明:锚索在动载荷作用下主要产生拉断、拉脱、脱断 3 种破坏形式,且破断处均发生于锚具固定端。采用红外热成像仪对锚索在动载荷作用下破坏产生的火花温度测试表明,锚索不论以何种形式破坏,其产生火花的最高温度远低于瓦斯爆炸所需要的最低温度 $650\sim 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而且,火花存在时间远小于瓦斯爆炸感应期。因此, $\phi 15.24\text{ mm}$ 、 $\phi 17.8\text{ mm}$ 和 $\phi 21.6\text{ mm}$ 锚索不论以何种形式破坏所产生的火花都不能引起瓦斯爆炸。

**关键词:**动载荷;锚索拉脱(断);摩擦火花;瓦斯爆炸;实验装置

**中图分类号:**TD712

**文献标志码:**A

## Experiment on gas explosion detonated by the pull out (broken) sparks of anchor rope under dynamic loading

WU Ren-lun, XU Jia-lin, KONG Xiang, HUANG Jun-wan, LV Wei-yun

(State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety; School of Mining Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, P. R. China)

**Abstract:** By using the specially designed experimental device for anchor rope impact tensile, a series of experiments on the possibility of gas explosion detonated by the pull out (broken) sparks of  $\phi 15.24\text{ mm}$ ,  $\phi 17.8\text{ mm}$  and  $\phi 21.6\text{ mm}$  anchor rope have been performed on the condition that the gas concentration and oxygen concentration are within the range of explosion limit. The results show that there are 3 failure forms of anchor rope when it is under the action of dynamic load, i. e. tensile failure, pull out and pull failure, and the breakages all occur in the fixed-anchorage. Using infrared thermal imaging apparatus to measure the temperature of the broken sparks of anchor rope, the result shows that the maximal temperature of the pull out (broken) sparks of anchor rope is far less than the minimum temperature of gas explosion ( $650\sim 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) and the existence time of sparks is far shorter than the sensitive period of gas explosion. The sparks induced by any failure forms of  $\phi 15.24\text{ mm}$ ,  $\phi 17.8\text{ mm}$  and  $\phi 21.6\text{ mm}$  anchor rope can't detonate the gas.

**Key words:** dynamic load; anchor rope pull out (broken); friction sparks; gas explosion; experimental device

收稿日期:2010-07-02

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50834005);煤炭资源与安全开采国家重点实验室资助课题(SKLCRSM08X05)

作者简介:吴仁伦(1982-),男,中国矿业大学博士研究生,从事煤与瓦斯共采、岩层移动与控制方面的研究。

许家林(联系人),男,中国矿业大学教授,博士生导师,(Tel)0516-83885581。

在煤矿井下实践中,摩擦火花引爆瓦斯,即是由于撞击、冲击或者旋转摩擦产生高温热痕,高温热痕通过导热、热对流等方式与环境换热,若高温热痕具有一定的温度及存在时间、面积组合,就能引起瓦斯-空气混合物燃烧或爆炸<sup>[1-5]</sup>。在煤矿井下,各种摩擦火花已被广泛认定为一种不可忽视的主要的瓦斯引燃引爆源<sup>[6-9]</sup>,如金属摩擦火花、采煤机截齿切割岩石摩擦火花以及岩石冒落撞击摩擦火花等。据 2001 年煤炭工业出版社出版的《中国煤矿事故暨专家点评集》不完全统计<sup>[10]</sup>,在 1976 年至 1999 年间,因顶板冒落或机械摩擦产生火花引起瓦斯爆炸事故 26 起,其中重特大事故 18 起,工作面与采空区瓦斯爆炸事故 12 起。2003 年因金属摩擦火花引起瓦斯爆炸事故 2 起,其中,黑龙江省鸡西矿业集团梨树煤矿井下瓦斯爆炸事故波及临近的回采工作面,造成 16 人死亡。

在煤矿井下各类摩擦火花中,金属摩擦火花越来越引起人们的重视,科研人员也进行了大量研究工作<sup>[11-14]</sup>,对金属摩擦及其产生火花理论进行了深入的研究。目前,我国煤矿在包括高瓦斯矿井在内的煤巷中大量使用预应力锚索进行支护,锚索支护主要由钢绞线、锚具、锚固剂组成,锚索钢绞线由 7 股高强度弹簧钢丝绞合制成。在现场实际生产中,随着上覆岩层的不断破断,特别是老顶上方的关键层破断时,处于软岩层内的锚索自由端、锚具与锚固端将产生很大的冲击速度和冲击力,按 0.5 m 的离层空间计算,锚具随顶板急速飞落的速度可达 3.16 m/s<sup>[15]</sup>。当顶板断裂所产生的冲击力超过锚索强度极限时,锚索会发生不同形式的破坏。锚索发生破坏过程中,弹簧钢丝会出现受拉、断裂的情况,在此过程中钢绞线的温度会不断上升且有可能产生摩擦火花<sup>[7,15]</sup>。在瓦斯浓度较高的瓦斯排放巷道和采空区内,因锚索拉脱(断)产生的火花能否引起瓦斯燃烧或爆炸,这对高瓦斯矿井安全高效生产是十分重要的问题。

许家林等曾在 600 kN 材料试验机上首次对 700 mm 长的  $\phi 15.24$  mm 锚索进行拉伸来测试锚索的拉断破坏规律及其产生火花引爆瓦斯的可能性<sup>[5]</sup>,但该实验仅在一定程度上反映锚索在缓慢拉伸条件下产生拉断摩擦火花的情况及其引爆瓦斯的可能性,不能完全反映锚索实际受力破坏情况。锚索在一定条件下还会受到冲击动载荷的作用<sup>[15]</sup>,而国内外针对锚索在动载荷作用下破坏产生的火花引爆瓦斯可能性的研究尚属空白。本文将以前煤矿井下常用的外径为  $\phi 15.24$  mm、 $\phi 17.8$  mm 和  $\phi 21.6$  mm

的锚索为研究对象,利用自行研制的实验装置开展动载荷作用下锚索拉脱(断)摩擦火花引爆瓦斯可能性的实验研究。

## 1 实验系统及方法

### 1.1 锚索拉脱(断)引爆瓦斯实验系统

为真实再现锚索的受力破坏过程,通过对锚索几何尺寸、初始安装状态、受力过程及受力大小的严格分析计算<sup>[14]</sup>,研制了锚索拉脱(断)引爆瓦斯实验系统,设计的实验系统如图 1 所示。该系统包括锚具冲击张拉机械系统、液压动力系统和操作系统三部分,其中,锚具冲击张拉机械系统完成锚索的基本安装和固定。液压动力系统完成锚索的预紧、张拉和冲击等过程。实验的操作选用电液控制方式集中在操作实验台上进行。实验系统工作性能见表 1,系统提供的冲击力和冲击速度都能够严格满足实际工况及锚索所受动载荷条件。实验时将整根锚索穿过锚具冲击张拉系统,利用锚索锁紧机构将锚索一端锁紧,另一端用锚具锁紧,利用锚索张紧机构将锚索预紧到规定值。启动液压动力系统冲击锚具锁紧端,当锚索受到冲击载荷超过其极限强度时就会发生破坏。

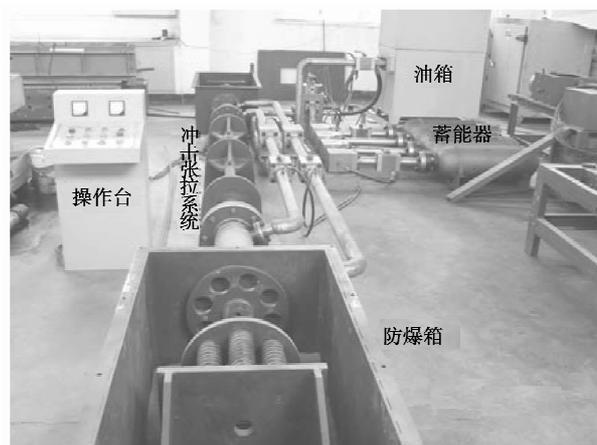


图 1 锚索冲击拉伸实验装置

表 1 锚索冲击拉伸实验台基本参数

项目	参数	单位
油缸最大载荷	260	kN
冲击载荷	230	kN
双油缸冲击最大速度	3.0	m/s
冲击时间	0.267	s
油缸最大行程	450	mm
冲击加速度	5.6	m/s <sup>2</sup>

## 1.2 锚索拉脱(断)火花检测系统

为保证实验的安全性以及检测数据的准确性,实验分两部分进行,第 1 部分在防爆箱内不充瓦斯、不盖密封盖的情况下进行,仅研究锚索拉脱(断)和产生火花规律。第 2 部分在防爆箱内充入瓦斯而且加盖密封盖的情况下进行,仅研究锚索拉脱(断)摩擦火花引爆瓦斯的可能性,期间产生火花及其引爆瓦斯情况可通过密封盖上的有机玻璃观测窗口进行监测。

实验过程中,采用索尼 2100E 高速摄像机(图 2(a))对锚索受冲击时产生的火花强度以及锚索、锚具受冲击的破坏情况进行记录。2100E 高速摄像机总像素 45 万 $\times$ 3CCD,1/3 英寸 3CCD 摄像系统,530 线水平解像度,58 mm 大口径优质镜头,12 倍光学变焦/48 倍数码变焦,有光学防抖系统,先进 HAD 电子画质提升技术,最低拍摄照度 1lux,双扫描系统(隔行/逐行扫描)。

采用 TVS-2000 MKII ST 型红外热成像仪(图 2(b))对锚索拉脱(断)时所产生火花的温度进行检测。红外热成像仪能检测出设定测点的温度变化及能够测出在成像范围内的最高温度,能捕捉到钢绞线在拉脱、拉断瞬间所产生火花的温度。



(a) 索尼2100E摄录放一体机



(b) TVS-2000 MKII ST型红外热成像仪

图 2 火花检测系统

## 2 锚索拉脱(断)火花引爆瓦斯实验

### 2.1 实验方案

实验在 5~20 ℃ 环境下进行,首先进行锚索拉脱(断)及其产生火花规律研究,实验方案如表 2,

3 种规格锚索在不同预紧力条件下均分别进行 30 次对比实验。之后,分别选取 3 种规格锚索拉脱(断)产生火花最强烈的实验参数进行锚索拉脱(断)摩擦火花引爆瓦斯可能性实验研究,防爆箱内瓦斯浓度保持在 5%~20% 之间,3 种规格锚索各进行 30 次对比实验。

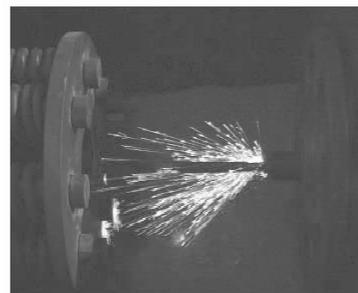
表 2 锚索拉脱(断)及其产生火花规律实验方案

外径/mm	外露段 长度/mm	预紧力/kN			
		$\leq 40\%F_{\text{额}}$	$\leq 80\%F_{\text{额}}$	$\leq F_{\text{额}}$	$> F_{\text{额}}$
15.24	150~200	$\leq 40$	$\leq 80$	$\leq 100$	$> 100$
17.8	150~200	$\leq 64$	$\leq 128$	$\leq 160$	$> 160$
21.6	150~200	$\leq 100$	$\leq 200$	$\leq 250$	$> 250$

注: $F_{\text{额}}$ 为锚索规定预紧力。

### 2.2 锚索拉脱(断)产生火花及引爆瓦斯实验情况

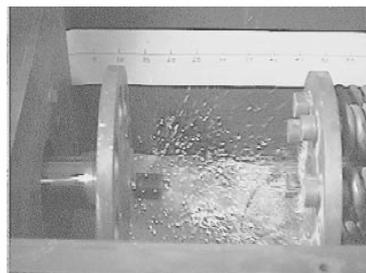
图 3 为锚索拉脱(断)时产生火花的情况,表 3 为锚索拉脱(断)火花引爆瓦斯实验结果。大量的锚索钢绞线拉脱(断)实验结果表明,锚索在冲击载荷作用下主要产生 3 种破断形式:拉断、拉脱及脱断且破断处均发生于锚具固定端。预紧力对锚索的破断形式影响较大,预紧力小于规定值 40% 时,锚索主要发生拉脱和脱断破坏,其中以拉脱为主;预紧力在 40%~80% 时,锚索主要发生拉断和脱断破坏,而且发生拉断的几率随预紧力的增大而增加;预紧力大于规定值 80% 时,锚索主要发生拉断破坏。同时,锚索只有在发生拉脱和脱断破坏时才会产生明显的火花,而且脱断过程产生的火花相对强烈一些。因此,在防爆箱内充入 5%~20% 的瓦斯,将 3 种规格锚索预紧力分别设定在 80% 以下进行 30 次对比实验,通过密封盖上观测窗监测发现,实验过程中有不同强度的摩擦火花出现,但锚索受冲击发生破坏时产生的摩擦火花都未能引起防爆箱内瓦斯爆炸。



(a) 锚索拉脱时产生的摩擦火花



(b) 锚索拉断时产生的摩擦火花



(c) 锚索脱断时产生的摩擦火花

图 3 各种破坏形式下产生的摩擦火花

表 3 锚索拉脱(断)火花引爆瓦斯实验结果

锚索 外径 /mm	预紧力 /kN	瓦斯 浓度 /%	破断形式/次			产生 火花 次数 /次	瓦斯爆 炸次数 /次
			拉 断	拉 脱	脱 断		
15.24	<80	5~20	2	21	7	30	0
17.8	<128	5~20	5	17	8	25	0
21.6	<200	5~20	1	24	5	27	0

为了验证上述实验中瓦斯与氧气浓度是否满足瓦斯爆炸条件,分别在每次实验结束后,进行人工点火,测试实验装置内含瓦斯的空气能否引起瓦斯爆炸。结果表明,尽管锚索钢绞线拉脱(断)时产生的火花未能引爆实验装置内的瓦斯,但在人工点火的条件下却都能发生瓦斯爆炸(图 4)。



图 4 人工点火引爆瓦斯

### 3 实验结果分析

瓦斯爆炸必须同时具备 3 个条件,即 a. 瓦斯的浓度处于爆炸范围;b. 氧气浓度超过失爆氧浓度;c. 引火源的温度高于最低点燃温度、引火源能量大于最小点燃能量和点燃时间长于感应期。只要不满足其中任何一个条件,就不会发生瓦斯爆炸。在实验过程中,已经人为将瓦斯浓度和氧气浓度设置在实验环境下瓦斯最易爆炸的范围内,引火源为锚索拉脱(断)时产生的摩擦火花,该摩擦火花主要为锚索拉脱或脱断时锚索与锁片之间相互摩擦,或锚索钢绞线之间相互摩擦而迸射出的铁屑粒子在空气中氧化所出现的发热发光现象,实验结束后可在防爆箱内发现残留的氧化后的黑色细小金属颗粒。但锚索拉脱(断)火花仍未能引爆瓦斯,因此,可认为锚索拉脱(断)火花不满足引爆瓦斯的第 3 个条件。

根据燃烧学和传热学<sup>[2-3]</sup>可知,摩擦火花引燃瓦斯,是由于火花瞬时升高周围瓦斯-空气混合气体而引燃瓦斯爆炸。当火花产生的温度  $t_a$  很低,低于点火温度  $t_{qr}$  时,由于火花的影响,使得瓦斯-空气混合气体边界层的温度略高于混合气体初始温度  $t_0$ ,这时瓦斯与空气混合气体的化学反应产生少量热,而混合气体远处温度仍接近  $t_0$ ,化学反应速度微不足道,从而瓦斯-空气混合气体难以维持燃烧,不会引燃瓦斯;当火花产生的温度  $t_a > t_{qr}$  时,边界层内瓦斯-空气混合气体的化学反应速度进一步增大,足以维持持续反应,此时,边界层高温区域将向瓦斯-空气混合气体深处扩展,从而点燃瓦斯<sup>[16]</sup>。

因此,在进行实验的同时,采用 TVS-2000MI 红外热成像仪检测锚索拉脱(断)产生火花时的温度值。图 5 为  $\phi 15.24$  mm 锚索在预紧力为 40 kN 条件下发生拉脱破坏时由红外热成像仪捕捉到的温度分布图。从火花温度分布图可以看出,虽然锚索拉脱(断)时火花明显,但火花的最高温度仅为  $262.79$   $^{\circ}\text{C}$ 。此外,采用系统专用软件对保存的热图像进行分析,表 4 为通过热成像仪测量到的大量重复实验中 3 种规格锚索拉脱(断)时产生火花的最高温度的统计结果。实验中测得  $\phi 15.24$  mm、 $\phi 17.8$  mm 和  $\phi 21.6$  mm 锚索拉脱(断)产生摩擦火花的最高温度分别为  $340.30$ 、 $437.33$  和  $490.38$   $^{\circ}\text{C}$ ,而且摩擦火花的最高温度随着锚索外径的增加而升高。同时,摩擦火花存在时间十分短暂,通过高速摄像机拍摄分析,锚索拉脱(断)摩擦火花存在时间约为  $22\sim 72$  ms,远小于实验条件下瓦斯爆炸的感应期。由此,可将  $\phi 15.24$  mm、 $\phi 17.8$  mm 和  $\phi 21.6$  mm 锚索

在环境温度为 5~20 ℃、瓦斯浓度为 5%~20%、锚索外露段为 150~200 mm 条件下发生拉脱(断)破坏时产生摩擦火花未能引爆瓦斯的原因归纳为:摩擦火花最高温度远低于瓦斯的最低点燃温度 650~750 ℃;摩擦火花的存在时间远小于实验条件下引爆瓦斯的感应期。



图 5 温度分布图

表 4 锚索拉脱(断)火花温度记录

锚索外径 /mm	预紧力 /kN	实验次数 /次	火花最高 温度/℃
15.24	<80	60	340.30
17.8	<128	60	437.33
21.6	<200	60	490.38

## 4 结 语

通过大量重复实验和理论分析,对  $\phi 15.24$  mm、 $\phi 17.8$  mm 和  $\phi 21.6$  mm 锚索拉脱(断)摩擦火花引爆瓦斯可能性进行了研究,得出如下结论:

1) 针对原有 600 kN 缓慢拉伸材料实验装置不能完全反映锚索实际受力破坏情况的缺点,重新研制了锚索冲击拉伸实验装置,该装置能够更好地反映现场实际工况并严格满足动载荷条件。

2) 锚索在冲击载荷作用下主要产生 3 种破断形式:拉断、拉脱及脱断且破断处均发生于锚具固定端。预紧力对锚索的破断形式影响较大,锚索发生拉断破坏的几率随预紧力的增大而增加,预紧力大于规定值 80% 时,锚索主要发生拉断破坏;预紧力小于规定值 80% 时,锚索主要发生脱断或拉脱破坏。

3) 锚索只有在发生拉脱和脱断破坏时才会产生

明显的火花,火花主要为锚索与锁片之间相互摩擦,或锚索钢绞线之间相互摩擦而迸射出的铁屑粒子在空气中氧化所出现的发热发光现象,而且脱断过程产生的摩擦火花相对强烈一些。同时,锚索外径对摩擦火花最高温度的影响较大,摩擦火花的最高温度随着锚索外径的增大而升高,实验中摩擦火花最高温度达到 490.38 ℃。

4) 锚索动载荷拉脱(断)摩擦火花不能引爆瓦斯的原因可以归纳为:a. 摩擦火花最高温度远低于引爆瓦斯的最低温度;b. 摩擦火花的存在时间远小于实验条件下瓦斯爆炸的感应期。

虽然试验结果表明锚索拉脱(断)摩擦火花不会引起瓦斯爆炸,但由于煤矿井下条件较为复杂,所以还是应当对锚索拉脱(断)火花加以防范,除控制瓦斯浓度外,保证锚索预紧力是降低锚索拉脱(断)时火花强度的有效措施。作者还将在瓦斯环境下开展不同外露段长度条件下锚索拉脱(断)火花引爆瓦斯可能性的实验研究。

## 参考文献:

- [1] 周心权,周博潇,朱红青,等. 摩擦火花引爆瓦斯时点燃温度特性理论研究[J]. 湘潭矿业学院学报, 2004, 19(1): 1-4.  
ZHOU XIN-QUAN, ZHOU BO-XIAO, ZHU HONG-QING, et al. Study on ignition temperature characteristic of frictional spark inducing gas [J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 2004, 19(1): 1-4.
- [2] 中华人民共和国公安部政治部. 消防燃烧学[M]. 北京: 中国人民公安大学出版社, 1997.
- [3] 陆煜,程林. 传热原理与分析[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [4] POWEL F. Ignition of flammable gas and vapors by friction between footwear and flooring material [J]. Journal of Hazardous Materials, 1997, 78(2): 309-319.
- [5] BRUDERER R E. Ignition properties of mechanical sparks and hot surfaces in dust air mixture [J]. Plant/Operations Progress, 1989, 8(3): 152-164.
- [6] 屈庆栋,许家林,马文顶,等. 岩石撞击摩擦火花引爆瓦斯的实验研究 [J]. 煤炭学报, 2006, 31(4): 466-470.  
QU QING-DONG, XU JIA-LIN, MA WEN-DING, et al. Experimental study on gas explosion detonated by the rock friction sparks [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(4): 466-470.

- electric field characteristics of overburden failure and its applications [J]. *Journal of Coal Science & Engineering*, 1999, 5(1): 24-29.
- [8] YEE K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. *IEEE Transaction*, 1966, 14(3): 302-307.
- [9] ENGQUIST B, MAJDA A. Absorbing boundary condition for the numerical simulation of wave [J]. *Mathematics of the Computation*, 1977, 31(139): 629-651.
- [10] MUR G. Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations[J]. *IEEE Transaction*, 1981, 10:1073-1077.
- [11] MEI K K, FANG J Y. Superabsorption—a method to improve absorbing boundary conditions [J]. *IEEE Transaction*, 1992, 40(9): 1001-1010.
- [12] LOKE M H, BARKER R D. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosection[J]. *Geophysics*, 1995, 60(6): 1682-1690.
- [13] BARKER R. A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface [J]. *First Break*, 1992, 10(2): 53-62.
- [14] TRIPP A C, HOHMANN G W, SWIFF J M. Two-dimensional resistivity inversion [J]. *Geophysics*, 1984, 49(10): 1708-1717.
- [15] SHIMA H, SAKAYAMA T. Resistivity tomography: an approach to 2-D resistivity inverse problems [J]. *SEG Expanded Abstracts*, 1987, 6: 204-207.

(编辑 郑洁)

(上接第112页)

- [7] 许家林, 张少华, 金宏伟, 等. 锚索拉断火花引爆瓦斯的实验研究[J]. *中国安全科学学报*, 2002, 14(2): 3-6. XU JIA-LIN, ZHANG SHAO-HUA, JIN HONG-WEI, et al. Experimental study on gas explosion detonated by the tensile failure sparks of anchor rope[J]. *China Safety Science Journal*, 2002, 14(2): 3-6.
- [8] WARD R C, CROUCH A, COHEN R D. Identification of potential for methane ignition by rock friction in Australian coal mines [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2001, 45(2/3): 91-103.
- [9] PHILIPS H R. Identify methods to reduce the risk of explosions and fires caused by frictional ignition hazards[R]. [S. l.]: SIMRAC, 1999.
- [10] 王捷帆, 李文俊. 中国煤矿事故暨专家点评集[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [11] GONG Y Y, GU W G, TONG J. Ignition capability of friction sparks and hot surface for fire risk[J]. *Fire Safety Science*, 1999, 8(1): 1-14.
- [12] DAOU J, MATALON M. Influence of conductive heat losses on the propagation of premixed flames in channels[J]. *Combustion and Flame*, 2002, 128, 321-339.
- [13] HENRY O. Case study demonstrating benefit of analyzing blast dynamics[C] // *International Conference and Workshop on Process Safety Management and Inherently Safer Process*, October 8-11, 1996, Florida. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1996: 103-117.
- [14] KOMAI T, UCHIDA S, UMEZU M. Ignition of methane-air mixture by frictional sparks from light alloys[J]. *Safety Science*, 1994, 17(2): 91-102.
- [15] 屈庆栋, 许家林, 徐光, 等. 锚索冲击拉伸摩擦火花产生机理的实验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2009, 38(3): 321-325. QU QING-DONG, XU JIA-LIN, XU GUANG, et al. Experimental study on the mechanism of the friction sparks induced by anchor-rope impact tensile [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2009, 38(3): 321-325.
- [16] 邹燕云, 周心权, 朱红青. 高速冲击火花引燃甲烷的环境因素研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2003, 32(2): 186-188. ZOU YAN-YUN, ZHOU XIN-QUAN, ZHU HONG-QING. Research of environmental factors for gas igniting by sparks induced by high-speed strike [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2003, 32(3): 186-188.

(编辑 郑洁)