

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.05.004

# 基于高速摄像的半开口管道内 瓦斯预混火焰传播特征的分析\*

汪 泉<sup>①②③</sup> 沈兆武<sup>①</sup> 郭子如<sup>②</sup> 马宏昊<sup>①③</sup> 吴红波<sup>②</sup>

①中国科学技术大学工程科学学院(安徽合肥,230027)

②安徽理工大学化学工程学院(安徽淮南,232001)

③中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室(安徽合肥,230027)

[摘 要] 采用高速摄像研究了长 1.5m、截面 0.1m×0.1m 半开口有机玻璃方管内 3 种典型浓度下瓦斯预混火焰传播特征。结果表明:典型的瓦斯火焰运动过程分为火焰成长期、火焰加速期和火焰消失期 3 个阶段;甲烷体积分数略高于最佳值时,管内瓦斯火焰传播速度较大;3 种典型浓度下光滑管道内瓦斯火焰传播阵面一点火时间满足 GaussAmp 曲线,其拟合度较高、相关性好;由火焰阵面—时间拟合曲线微分得出的火焰传播速度—时间曲线,更能反映实际瞬时火焰传播速度情况。火焰运动图像分析及瞬时火焰传播速度计算方法,对管内气体火焰或矿井瓦斯火焰特征研究具有一定的借鉴作用。

[关键词] 瓦斯 预混火焰 管道 高速摄像 火焰传播速度 非线性拟合

[分类号] TD712

## 引言

光滑管道内瓦斯火焰传播特性参数如火焰传播速度、燃烧压力等主要受燃料特性和管道状况等因素影响<sup>[1-2]</sup>。对光滑管道内瓦斯火焰传播现象的科学认识,是进行置障条件或其它复杂条件时火焰传播现象研究工作的基础。火焰传播速度是表征管内瓦斯火焰传播特征最重要的参数之一,通常采用高速摄像拍摄火焰锋面运动轨迹或通过光电传感器起跳时间,来估算出其速度平均值<sup>[3-6]</sup>。由于高速摄像拍摄速率和分辨率相互制约,或光电传感器测点布置数有限,传统的火焰传播速度计算方法得到的火焰传播速度往往有较大误差,不能反映瞬时火焰传播速度大小。因此需改进火焰传播速度计算方法以获得接近真实情况的速度值。

本文首先对典型浓度下瓦斯火焰高速摄像照片进行分析,而后给出并比较了传统方法计算的平均火焰传播速度和改进方法计算的瞬时火焰传播速度。火焰高速摄像分析及其传播速度计算方法,对管内气体火焰或矿井瓦斯火焰传播特征研究具有一定的借鉴作用,也为矿井瓦斯爆炸参数预测和爆炸

安全性评估提供理论参考。

## 1 实验设计

实验管道为长 1.5m、截面 0.1m×0.1m 的有机玻璃火焰加速管,点火端封闭,另一端开口。高速摄像机为 FastCAM Super 10KC 彩色型,最大拍摄速率 10000 帧/秒,实际使用 250 帧/秒的拍摄速率。传统的高速摄像测速可用下式表示:

$$v_f = \frac{x_n - x_{n-1}}{1000/F} \quad (1)$$

式中: $v_f$  为由相邻两帧照片计算的平均火焰传播速度, m/s;  $x_n$ 、 $x_{n-1}$  为点火后  $n$  帧和  $n-1$  帧图像中火焰面距点火端实际距离, mm;  $F$  为拍摄速率, 帧/秒。

配气时,先按 Dalton 分压定律在配气装置<sup>[7]</sup>中粗配所需浓度的预混气体,再用 CJG 型甲烷体积分测定器测出其准确体积分数,本文主要有 8.31%、9.35%、10.86% 3 种。实验前,预先将管道抽成真空,充入配制好的预混气,使得管道内气体压力回到常压(1 个大气压)后进行实验。点火器采用简易电容储能式电火花点火装置,点火能量约 250~500 mJ。若需得到瓦斯火焰光信号,则可在管道上布置

\* 收稿日期:2013-04-22

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51134012);火灾科学国家重点实验室开放课题(HZ2011-KF09);安徽省教育厅优秀青年人才基金项目(2010SQRL057ZD)

作者简介:汪泉(1980~),男,博士,讲师,主要从事可燃气体燃烧与爆炸安全研究。E-mail:quanwang@mail.ustc.edu.cn

通信作者:沈兆武(1953~),男,教授,博导,主要从事爆炸安全、爆破器材和工程爆破等方面研究工作。E-mail:zwshen@ustc.edu.cn

若干火焰传感器,由 HIOKI8841 存储记录仪直接记录各测点处光电信号。整个实验测试系统由火焰加速管、高速摄像机、点火装置、配气装置、数据记录仪等组成,如图 1 所示。

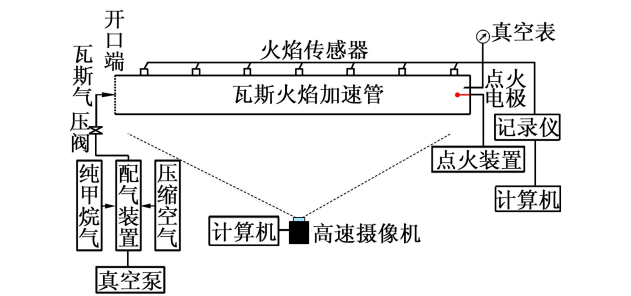


图 1 实验测试系统  
Fig. 1 Experiment test system

## 2 结果与分析

### 2.1 光滑管内瓦斯火焰运动过程的高速摄像分析

以 9.35% 甲烷体积分数下光滑管道内瓦斯火焰传播的高速摄像照片为例进行分析,选取点火后若干典型时刻照片进行剪切、等比例拼接形成如图 2 所示的图像。

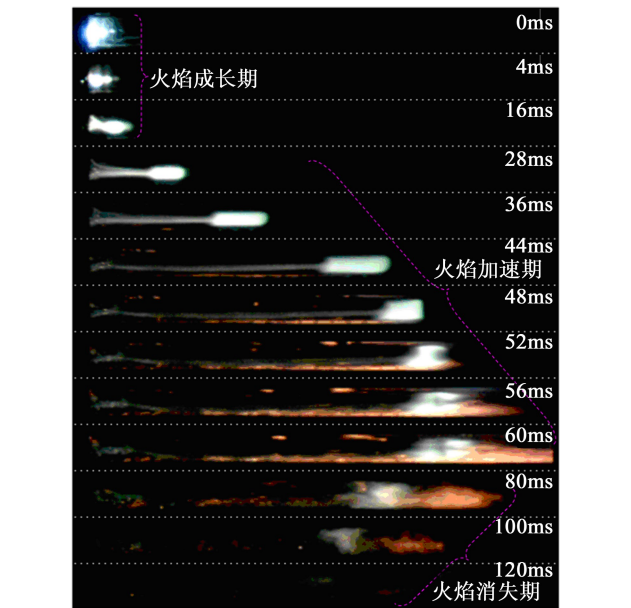


图 2 光滑管道内瓦斯火焰传播高速摄像分幅照片 (9.35% CH<sub>4</sub>)  
Fig. 2 High-speed camera photos for methane-air flame propagation in smooth tube (9.35% CH<sub>4</sub>)

由图 2 可见,整个火焰传播过程大致可分为 3 个阶段<sup>[8]</sup>:

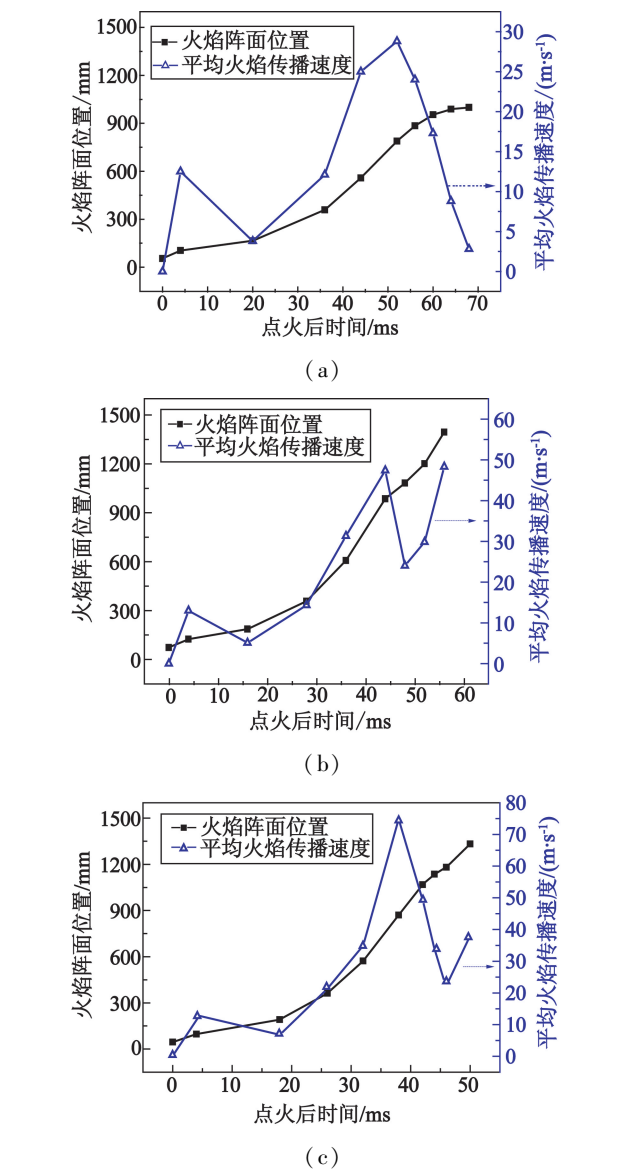
- 1) 火焰成长期 ( $t = 0 \sim 16\text{ms}$ ), 此时燃料着火燃烧,火焰传播初期速度较小,基本上属于层流燃烧状态,火焰传播速度主要由燃料基本燃烧速度决定;
- 2) 火焰加速期 ( $t = 16 \sim 60\text{ms}$ ), 此阶段燃烧反应放出的热量远远大于其散失的热量,火焰阵面前

方未燃气体湍流程度加大,在燃烧和湍流正反馈作用及热膨胀气体推动下,火焰传播速度逐渐增加,直至火焰占满并冲出整个实验管道,此过程火焰传播速度与燃料性质、壁面状况、管径和开口约束等诸多因素有关;

3) 火焰消失期 ( $t = 60 \sim 120\text{ms}$ ), 即火焰发光区消失阶段,从火焰冲出管道至火焰发光区基本消失为止,此时由于燃料逐渐消耗掉,同时管道开口处空气回流至管内,使得火焰发光区开始向点火端回收,最终殆尽。

### 2.2 火焰阵面位置及传统方法计算的火焰传播速度

图 3 为 3 种典型体积分数下光滑管道内瓦斯传



(a) 8.31% CH<sub>4</sub>; (b) 9.35% CH<sub>4</sub>; (c) 10.86% CH<sub>4</sub>  
图 3 光滑管道内瓦斯火焰阵面位置及平均火焰传播速度  
Fig. 3 Methane-air flame front locations and the average flame propagation velocities in smooth tube

播火焰阵面位置按传统方法,即式(1),计算得出的平均火焰传播速度随点火后时间的变化情况。

由图 3 可见:

1)根据若干帧照片中火焰阵面位置计算的平均火焰传播速度有一定脉动性,尤其在火焰传播初期和火焰运动到开口端附近时较为明显,当火焰传播至离开口端较近位置时,平均火焰传播速度下降;

2)对于甲烷—空气混合气体,理论上燃烧反应最剧烈的甲烷体积分数为化学计量值,约为9.48%,实际上燃烧反应存在不完全性和二次反应等因素,所以燃烧的最剧烈点即为最佳体积分数,约为10.1%<sup>[9]</sup>。

3)10.86% 体积分数下火焰传播速度要比9.35% 时大,说明甲烷体积分数略高于最佳值(10.1%)时,管内瓦斯火焰传播速度较大。

2.3 火焰阵面位置—时间拟合曲线

根据第 2.2 节计算得出的速度值为平均火焰传播速度,而非瞬时值<sup>[10]</sup>。而高速摄像所记录的火焰阵面位置和其对应时间是较为一致的。因此,本文先通过 Origin 拟合出火焰阵面—时间曲线,然后对时间进行一次微分,即可得出瞬时火焰传播速度值,相对于传统方法,其得出的速度值更接近于瞬时值。采用 Origin 非线性拟合功能对 3 种典型浓度下实验记录的火焰阵面位置—时间关系进行拟合,发现其满足 GaussAmp 公式( $y = y_0 + Ae^{-(x-x_c)^2/2w^2}$ ),相关系数  $R^2$  值均在 0.994 以上,因此,火焰阵面位置—时间关系可表示为:

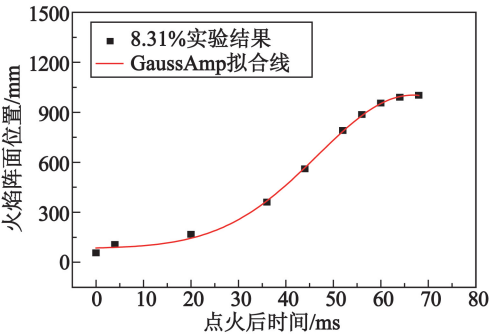
$$L_f/[L] = C_1 + C_2 \exp \left\{ -0.5 \left[ (t/[t] - C_3)/C_4 \right]^2 \right\}$$

(2)

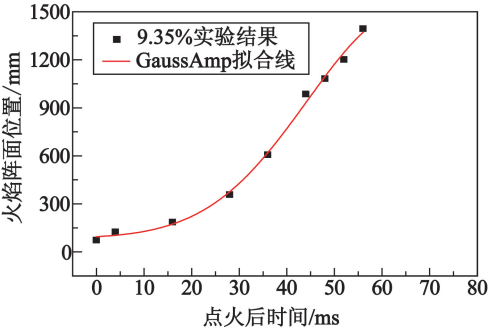
式中: $L_f$  为火焰阵面位置,mm; $t$  为时间,ms; $L_f/[L]$ 、 $t/[t]$  分别为无量纲的火焰阵面位置和时间; $C_1 \sim C_4$  为拟合系数。

图 4 即为 3 种体积分数下光滑管道内瓦斯火焰阵面—时间关系的实验结果和 GaussAmp 拟合曲线。针对图 4,表 1 给出了 3 种情况下的拟合系数和拟合度分析。

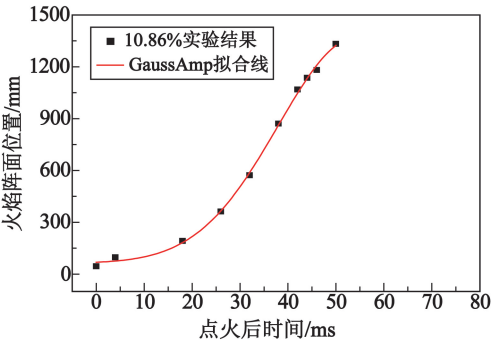
从图 4 和表 1 可见,3 种典型浓度下 GaussAmp



(a)



(b)



(c)

(a) 8.31% CH<sub>4</sub>; (b) 9.35% CH<sub>4</sub>; (c) 10.86% CH<sub>4</sub>  
图 4 光滑管道内瓦斯火焰阵面—时间关系和拟合曲线

Fig.4 Methane-air flame front location-time curves and their fitting curves in smooth tube

拟合相关系数高,偏差平方和较小,说明采用 GaussAmp 公式能较为精确表征不同体积分数下半开口管内瓦斯火焰阵面位置,其规律性较强。

2.4 改进方法得到的火焰传播速度

表 1 GaussAmp 拟合系数及拟合度分析

Tab.1 Analysis of fitting coefficients and fitting degree used GaussAmp

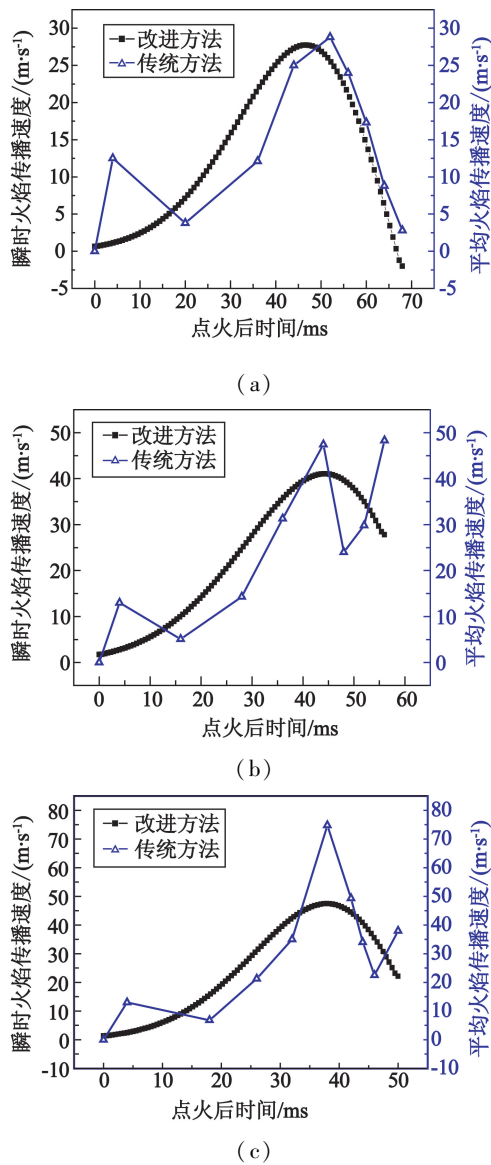
甲烷体积分数/%	系数 $C_1$	系数 $C_2$	系数 $C_3$	系数 $C_4$	偏差平方和	相关系数 $R^2$
8.31	82.322	920.999	66.777	20.130	318.230	0.998
9.35	83.738	1419.293	65.274	20.972	1437.120	0.994
10.86	62.099	1312.992	54.708	16.780	460.328	0.998

将式(2)对时间  $t$  求一次微分,即得到瞬时火焰传播速度:

$$v_f = L_f / dt$$

(3)

采用 Origin 软件对拟合的火焰阵面位置—时间曲线对时间求微分,将得到瞬时火焰传播速度—时间曲线,并与传统方法计算的火焰传播速度进行对照,如图 5 所示。



(a) 8.31% CH<sub>4</sub>; (b) 9.35% CH<sub>4</sub>; (c) 10.86% CH<sub>4</sub>

图 5 光滑管道内瓦斯火焰传播速度计算的改进方法和传统方法比较

Fig. 5 Comparison between traditional method and improved method for the methane-air flame propagation velocities in smooth tube

由图 5 可见:

1)采用传统方法计算的平均火焰传播速度,不是某一时刻瞬时值,无法反映相邻两帧照片时间间隔内的火焰运动细节,当火焰运动速度较快时,产生

的误差会较大;

2)改进计算方法得出的火焰传播速度—时间曲线光滑性较好,能够表征瞬时火焰传播速度值。

3 结论

1)通过典型浓度的瓦斯火焰高速摄像观测,认为光滑管道内瓦斯火焰传播过程一般可分为火焰成长期、火焰加速期和火焰消失期 3 个阶段;

2)实验结果表明,甲烷体积分数略高于最佳值(10.1%)时,管内瓦斯火焰传播速度较大;

3)对 3 种典型体积分数下光滑管道内瓦斯火焰传播阵面一点火后时间的关系进行了 Origin 非线性拟合,发现其 GaussAmp 拟合度高、相关性好;

4)对火焰阵面—时间实验拟合曲线进行一次微分得到火焰传播速度—时间曲线,可以有效减小传统方法计算的火焰传播速度误差,更能反映实际瞬时火焰传播速度情况。

参 考 文 献

[1] Lu Shouxiang, Guo Ziru, Li Yuanlong, et al. Experimental and theoretical analysis of acceleration of a gas flame propagating over a dust deposit[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(2): 2839-2846.

[2] Chen Xianfeng, Zhang Yin, Zhang Ying. Effect of CH<sub>4</sub>-air ratios on gas explosion flame microstructure and propagation behaviors[J]. Energies, 2012, 5(10): 4132-4146.

[3] 陈东梁, 孙金华, 刘义. 甲烷—煤尘复合火焰的传播与温度特征[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(1): 123-126.

Chen Dongliang, Sun Jinhua, Liu Yi. Temperature profiles of the methane-coal dust hybrid flame[J]. Journal of Safety and Environment, 2008, 8(1): 123-126.

[4] 林柏泉, 营从光, 张辉. 管道壁面散热对瓦斯爆炸传播特性影响的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(1): 1-4.

Lin Baiquan, Jian Congguang, Zhang Hui. The influence of heat dissipated in a conduit wall on the transmission characteristics of gas explosions[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(1): 1-4.

[5] 汪泉, 沈兆武, 郭子如, 等. 内铺煤粉方管内瓦斯预混火焰传播特性[J]. 煤炭学报, 2012, 37(10): 1693-1697.

Wang Quan, Shen Zhaowu, Guo Ziru, et al. Flame propagation characteristics for premixed methane-air with coaldust in square tube[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(10): 1693-1697.

[6] 李静. 磁场对瓦斯爆破过程中火焰传播影响的实验研究[J]. 爆破器材, 2007, 36(3): 1-4.

Li Jing. Influence of magnetic field on the fire transmiss-



- sion in gas explosion[J]. Explosive Materials, 2007, 36(3): 1-4.
- [7] Guo Ziru, Shen Zhaowu, Lu Shouxiang, et al. The experimental of methane-air flame propagation in the tube with quadrate cross section[J]. Journal of Coal Science & Engineering(China), 2005, 11(2): 60-63.
- [8] 汪泉, 郭子如, 李志敏, 等. 甲烷与空气预混管内爆炸火焰传播特性试验[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(11): 95-97.
- Wang Quan, Guo Ziru, Li Zhimin, et al. Test on flame spreading characteristics of premixed methane-air in tube[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(11): 95-97.
- [9] 汪泉, 郭子如, 沈兆武, 等. 有机玻璃方管内可燃气体爆燃压力分布研究[J]. 火工品, 2012(5): 18-21.
- Wang Quan, Guo Ziru, Shen Zhaowu, et al. Study on the pressure distribution for combustible gas flame propagation in plexiglass tube with quadrate cross section[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2012(5): 18-21.
- [10] 江丙友, 林柏泉, 朱传杰, 等. 瓦斯爆炸过程中火焰瞬时传播规律研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(8): 97-101.
- Jiang Bingyou, Lin Baiquan, Zhu Chuanjie, et al. Instantaneous flame propagation law of gas explosion[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(8): 97-101.

## Analysis on Propagation Characteristics of Premixed Methane-air Flame in an Half-Open Tube Based on High-Speed Video Camera

WANG Quan<sup>①②③</sup>, SHEN Zhaowu<sup>①</sup>, GUO Ziru<sup>②</sup>, MA Honghao<sup>①③</sup>, WU Hongbo<sup>②</sup>

①School of Engineering Science, University of Science and Technology of China (Anhui Hefei, 230027)

②School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology (Anhui Huainan, 232001)

③State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China (Anhui Hefei, 230027)

[ABSTRACT] A high-speed color video camera was adopted to study the premixed methane-air flame propagation characteristics under 3 typical concentrations in a square plexiglass tube of 1.5 meters long and a cross section of 0.1m × 0.1 m. As the results, the flame movement can be divided into 3 stages involving flame growing stage, flame accelerating stage and flame vanishing stage. When the volume fraction of methane is slightly higher than the optimum value, the flame propagation velocity can reach to the maximum value. The relationships between the flame front location and the time after ignition meet the curve of GaussAmp, and the fitting degree and its correlation coefficient are high. The flame propagation velocity-time curve via the differential of the flame front location-time curve revealed the actual instantaneous values of the flame propagation velocity. The flame movement images analysis and the calculation method of instantaneous flame propagation velocity could be references for studying the gas flame characteristics in experimental tubes or in mine roadways.

[KEY WORDS] methane-air, premixed flame, tube, high-speed video camera, flame propagation velocity, nonlinear fitting

## 民爆专利信息

专利名称: 磁性金属雷管空管体自动检漏机

专利申请号: CN200610046874.6 公开号: CN1896705

申请日: 2006.06.09 公开日: 2007.01.17

申请人: 阜新赛恩斯自动化设备有限公司

本发明属于雷管体质量好坏的检测机械, 特别涉及一种磁性金属雷管空管体自动检漏机, 由外壳、底板、立柱、万向轮、电动机、真空泵、翻转轴横向运动步进电机、翻转轴步进电机、分管梭步进电机部件组成, 在上板上中间固定一个雷管挡板, 上板下面中间与雷管挡板相对应固定一个集管槽体, 上板与上立板端头固定在一起, 上立板内侧固定一个托管体, 在分管梭两侧与上立板间和中板的 4 个角上面均固定有翻转轴滑道。该机结构简单, 工作可靠, 自动化程度高, 经济效益与社会效益十分显著。

专利名称: 爆炸开关起爆装置

专利申请号: CN200610041089.1 公开号: CN1888811

申请日: 2006.07.19 公开日: 2007.01.03

申请人: 中国科学院等离子体物理研究所

本发明公开了一种爆炸开关起爆装置, 包括塑料导爆管、雷管、炸药和炸药筒。炸药筒内装有炸药, 在炸药中插上雷管, 雷管中埋设有塑料导爆管, 高压击发器的放电击发针通过塑料导爆管击发雷管相连接; 高压击发器的电路, 包括一变压器的输入端接在 220V 电源上, 输出端与多倍压电路的输入端相连接, 多倍压电路的输出端连接有继电器、放电击发针串联支路。由于采用塑料导爆管安全性高, 因此, 可将导爆管与雷管直接装配集成在一起, 在运输、储存和实际使用中安全、方便。

(王元荪)