文章编号：1001-1455(2014)04-0489-06 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)04-0489-06

大长径比、高密实火药床点火管点传火特性的影响因素*

王珊珊[1]，王 浩[2]，张博孜[2]，陶如意[2]
(1. 中国舰船研究设计中心，湖北 武汉 430064；
2. 南京理工大学能源与动力工程学院，江苏 南京 210094)

摘要：利用计算程序对影响大长径比、高密实火药床点火管点火性能的主要因素进行了对比模拟，讨论了不同结构尺寸和装填条件下的点传火性能，通过对计算结果的分析，总结了结构参数和装填条件对大长径比、高密实火药床点火管点传火性能的影响规律：小孔直径、首孔高度、单位长度小孔面积及装填密度显著影响点火压力及点传火性能；小孔直径、首孔高度及单位长度小孔面积是影响破膜后泄压速度的主要因素，而装填密度会影响药床的透气性及火焰传播的通畅性，均对点火安全性、瞬时性及一致性产生重要影响作用。

关键词：爆炸力学；点传火；对比模拟；点火管；两相流；内弹道
中图分类号：O381 **国标学科代码**：1303510 **文献标志码**：A

目前，金属点火管能够比较准确地控制管压和破孔规律、点火一致性好、能够较好地抑制压力波等被广泛应用在各类武器系统中[1]。但随着现代武器的发展，射击威力增大，射击精度提高，武器的装药结构越来越复杂，这给点火管的设计带来更高的要求。点火管结构设计的好坏对武器弹道性能影响非常大[2-4]，所以对影响点火管点火性能的因素进行分析具有非常重要的意义。

对于长径比大、装填密度高的金属点火管，点火具在一端作用后，气流推动火药向另一端运动，由于药床的透气性差，容易产生药粒的挤压和堆积现象，极易产生不均匀的压力波动，造成点火不均匀、一致性差，甚至带来安全问题[5-7]。本文中通过数值模拟程序对影响点火管点火性能的关键因素进行对比模拟，深入展开分析大长径比、高密实火药床点火管点传火性能的主要影响因素，为这类点火管的工程设计提供理论依据。

1 数学物理模型

金属点火管点火系统由点火具、金属管、衬纸和端盖等组成，如图 1 所示。

根据点火管工作过程的物理化学现象，并结合大长径比、高装填密度的特点，建立了点火管内气固两相流动的一维两相流数学模型，根据所建模型，采用 Mac Cormack 预估校正二步显格式编制了计算仿真程序，并对长径比为 38，装填密度为 1 027 kg/m^3 的点火管进行了仿真计算，计算结果与实验结果符合良好，最大误差不超过 9%，说明计算模型能准确描述点火管内的实际物理化学过程，计算程序参数取值合理，通过该计算程序来分析结构尺寸及装填条件对点传火过程的影响所得的结论是可信的。

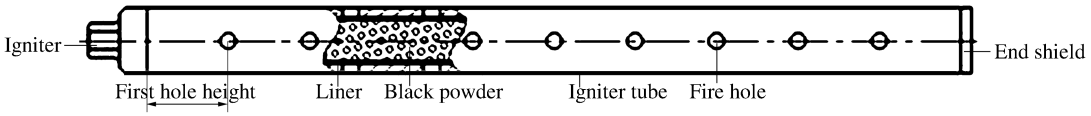

图 1 点火管结构示意图

Fig. 1 Constructional schematic diagram of igniter tube

* **收稿日期**：2012-09-04；**修回日期**：2012-10-12
基金项目：南京理工大学自主科研基金项目(2011YBXM110)
作者简介：王珊珊(1985—)，女，博士研究生。

2 点火管结构的影响

2.1 传火孔径的影响

总的传火面积、首孔高度及孔间距均保持不变，其余装填参量也保持不变，仅改变传火孔的直径(d)，分析孔径对点传火过程的影响。

图 2～4 为不同传火孔直径下燃气压力在不同时刻沿点火管轴向的分布图。在保持总的传火面积、首孔高度及孔间距不变的情况下，小孔直径越大，孔的排数越少。图 3～4 中的管中后部无小孔，压力突升明显，管内压力明显分布不均匀。图 5 为距离点火端 16.7D 处不同传火孔径下的压力时程曲线(D 为点火管直径)。可以看出，改变小孔直径，破膜前压力上升趋势几乎相同，破膜后小孔直径越大，单位长度内从传火孔流走的气固两相越多，管内最大压力越小。因此若传火孔径设计过大，破膜后流走的能量更快更多，对于长径比较大、装填密度较高的点火管而言，易造成由于流走的能量太多而使能量无法向前继续传递的现象；设计过小的传火孔不仅容易造成黑火药颗粒堵塞小孔，使能量流出通道不顺畅而引发安全事故，更可能由于能量流出过小过慢而使管内造成局部高压引发安全问题。

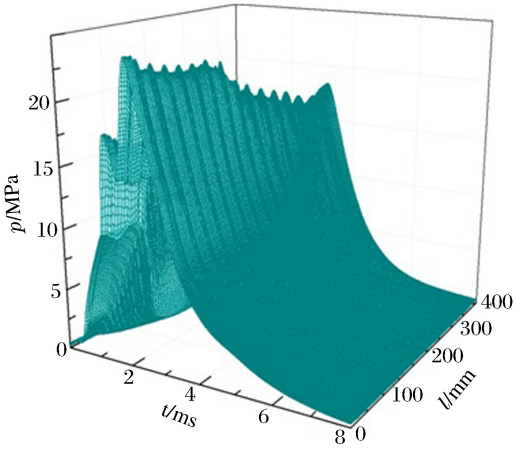

图 2 小孔直径为 1.5 mm 时不同时刻燃气压力点火管的轴向分布

Fig. 2 Pressure distribution in axial of the igniter tube with the hole diameter of 1.5 mm at different times

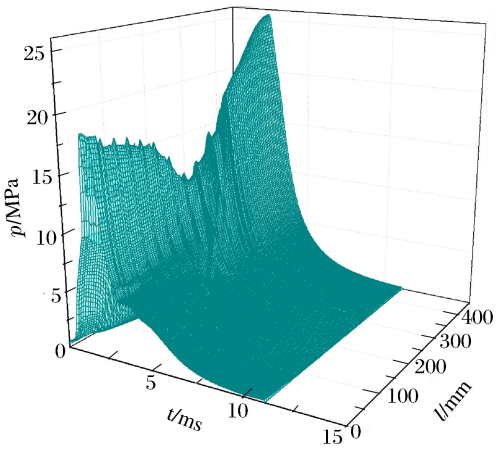

图 3 小孔直径为 1.8 mm 时不同时刻燃气压力点火管的轴向分布

Fig. 3 Pressure distribution in axial of the igniter tube with the hole diameter of 1.8 mm at different times

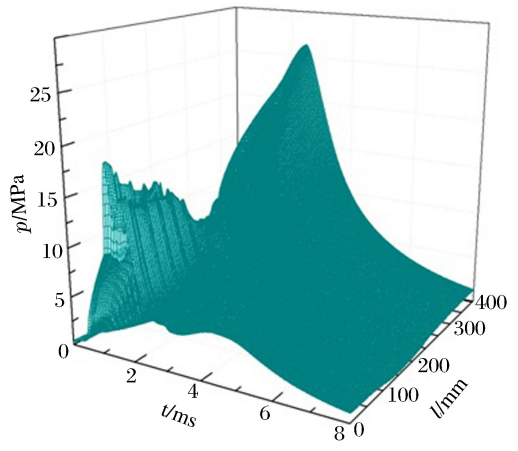

图 4 小孔直径为 2.0 mm 时不同时刻燃气压力点火管的轴向分布

Fig. 4 Pressure distribution in axial of the igniter tube with the hole diameter of 2.0 mm at different times

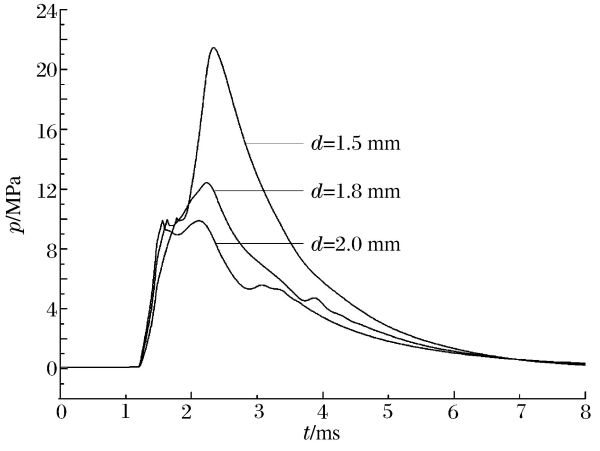

图 5 距点火端 16.7D 处不同小孔直径下的压力时程曲线

Fig. 5 p-t contrast curves of different hole size at the position of 16.7D

2.2　首孔高度的影响

仅改变首孔高度，其余结构尺寸及装填参量保持不变，分析首孔高度(h)对点火过程的影响。

图 6～8 为不同首孔高度下燃气压力在不同时刻沿点火管的轴向分布图，图 9 给出了距离点火端 16.7D 处不同首孔高度下压力对比曲线。由图 6～9 可以看出，仅改变首孔高度将影响管内最大压力，这是由于首孔高度的增加使得破膜前火药气体能量在管内传递的时间加长，造成管内压力增大。由此可知，过大的首孔高度容易造成泄压滞后，近点火端产生高压的情况，不利于安全点火；对于长径比大的点火管而言选用过小的首孔高度，又会提早泄压而造成起始压力不足，产生点火能量传递不迅速甚至间断的情况，严重影响点火的瞬时性及一致性。

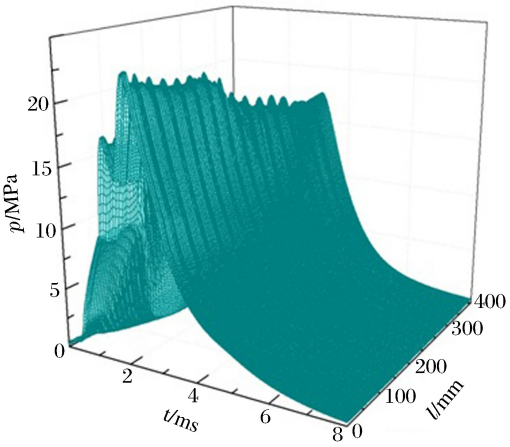

图 6　首孔高度为 15 mm 时不同时刻燃气压力沿点火管的轴向分布

Fig. 6　Pressure distribution in axial of the igniter tube with first hole height of 15 mm at different times

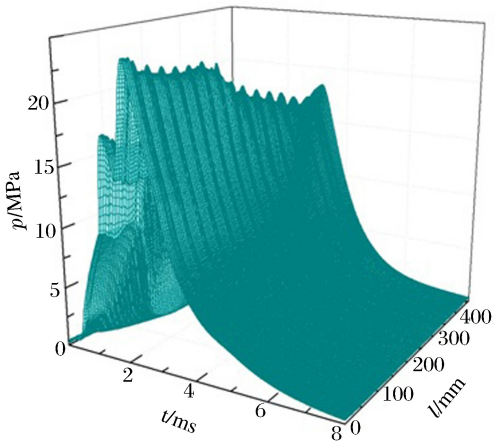

图 7　首孔高度为 22 mm 时不同时刻燃气压力沿点火管的轴向分布

Fig. 7　Pressure distribution in axial of the igniter tube with first hole height of 22 mm at different times

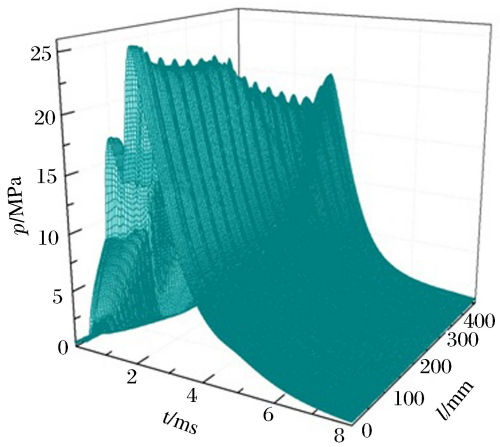

图 8　首孔高度为 32 mm 时不同时刻燃气压力沿点火管的轴向分布

Fig. 8　Pressure distribution in axial of the igniter tube with first hole height of 32 mm at different times

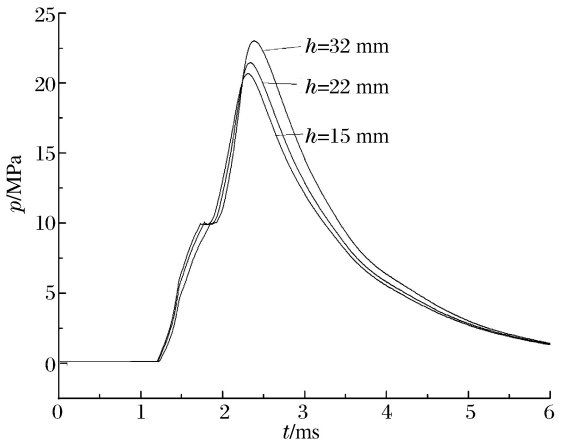

图 9　距点火端 16.7D 处不同首孔高度下的压力时程曲线

Fig. 9　p-t contrast curves of different first hole size at the position of 16.7D

2.3　小孔分布的影响

保证总的传火面积、首孔高度均不变，仅改变小孔分布，分析小孔分布对点传火性能的影响。

图 10～12 为不同小孔分布下沿点火管轴向的燃气压力分布图，图 13 给出了距离点火端 16.7D 处每排孔不同个数(n)下压力对比曲线。由图 10～13 可以看出，小孔分布不仅明显影响管内最大压力及

分布，同时影响压力做功时间。点火管内压力分布与单位长度小孔总面积有关，单位长度小孔总面积越大，破膜后泄压越快，使得管内最大压力降低，做功时间减少。对于长径比大的点火管，若泄压过快则易导致远点火端传火能力减弱，不利于均匀点火；相反，若单位长度小孔面积太小，泄压不够迅速则易导致在无小孔流出的地方有能量累积，形成局部高压，不利于安全点火。

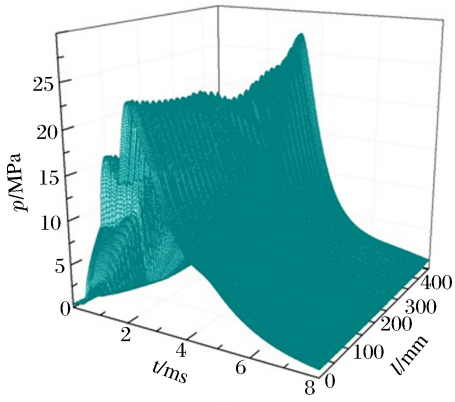

图 10 每排 10 个小孔时不同时刻
燃气压力沿点火管的轴向分布

Fig. 10 Pressure distribution in axial of the igniter tube of 10 holes in a row at different times

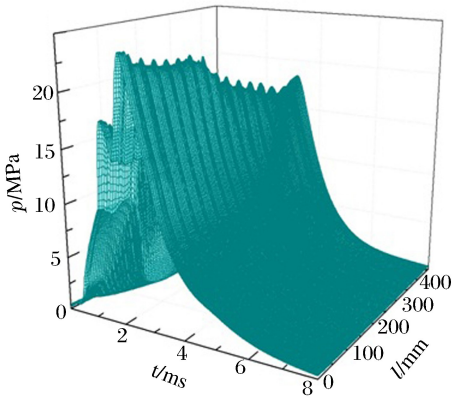

图 11 每排 8 个小孔时不同时刻
燃气压力沿点火管的轴向分布

Fig. 11 Pressure distribution in axial of the igniter tube of 8 holes in a row at different times

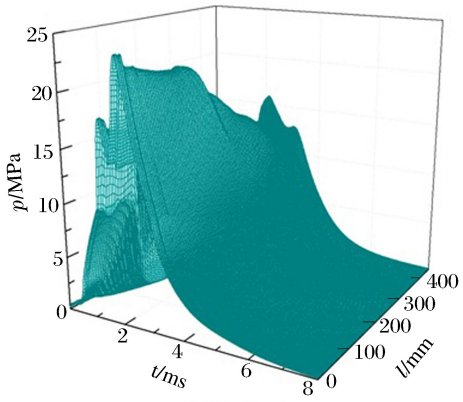

图 12 每排 6 个小孔时不同时刻
燃气压力沿点火管的轴向分布

Fig. 12 Pressure distribution in axial of the igniter tube of 6 holes in a row at different times

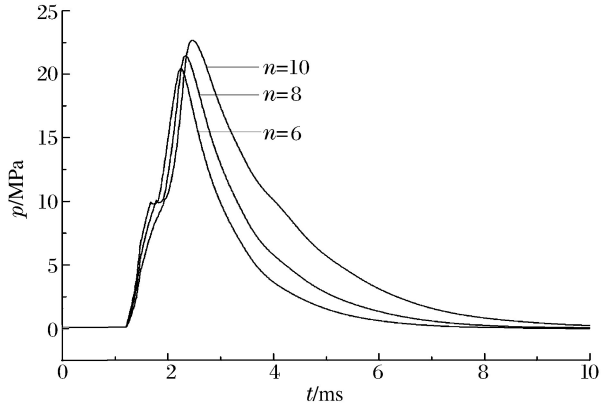

图 13 距点火端 16.7D 处每排
孔个数不同时的压力时程曲线

Fig. 13 p-t contrast curves of different hole count at the position of 16.7D

3 装填密度的影响

仅改变装药量或者仅改变点火管内径等结构尺寸实际表现为装填密度的改变[8]，在此分析装填密度(ρ)对点传火性能的影响。

图 14～16 为不同装填密度下沿点火管轴向的燃气压力分布图，图 17 给出了距离点火端 16.7D 处不同装填密度下压力对比曲线。点火管内的装填密度会影响药床的透气性及火焰传播的通畅性，最终影响点火管内的两相流动环境和传火能量在轴向上分布的均匀性。由图 14～16 可知，点火管内装填密度越低，管内压力上升越慢，管内最大压力也最低。在点火管的装药设计中，若装填密度过低，则能量传播较慢，点火时间长，均匀点火的效果较差；但是装填密度过高，则传火通道不通畅，容易形成局部点火的条件，增大压力波的强度，对安全性构成威胁。

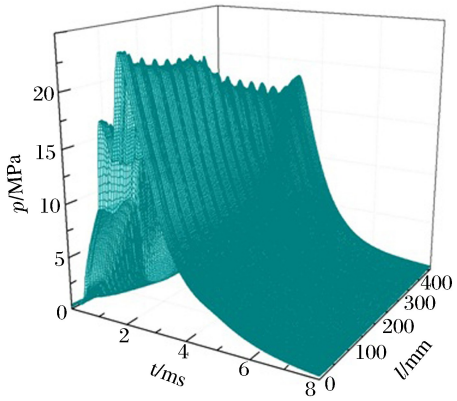

图 14 装填密度为 1 036 kg/m³ 时
不同时刻燃气压力沿点火管的轴向分布

Fig. 14 Pressure distribution in axial of the igniter tube with charge density of 1 036 kg/m³ at different times

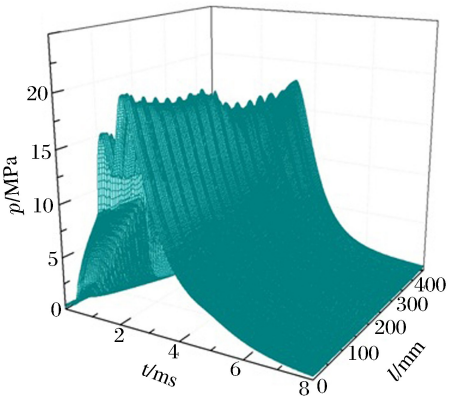

图 15 装填密度为 924 kg/m³ 时
不同时刻燃气压力沿点火管的轴向分布

Fig. 15 Pressure distribution in axial of the igniter tube with charge density of 924 kg/m³ at different times

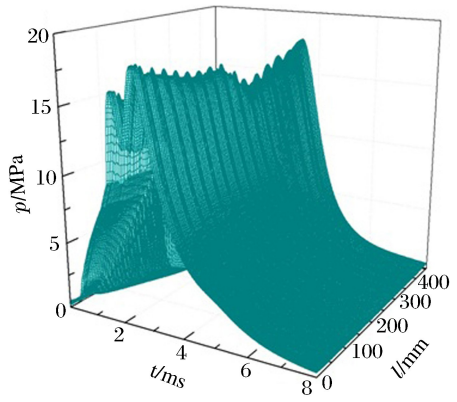

图 16 装填密度为 840 kg/m³ 时
不同时刻燃气压力沿点火管的轴向分布

Fig. 16 Pressure distribution in axial of the igniter tube with charge density of 840 kg/m³ at different times

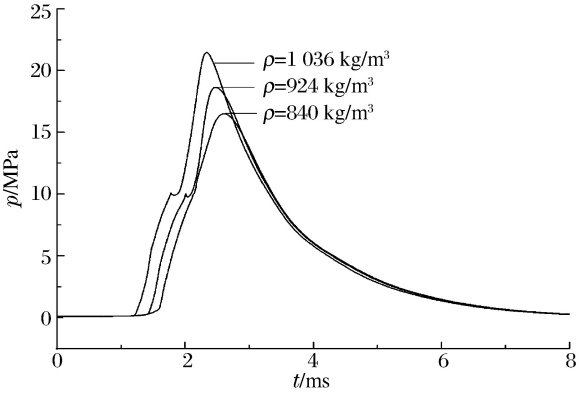

图 17 距点火端 16.7*D* 处每排
孔个数不同时的压力时程曲线

Fig. 17 *p-t* contrast curves of different hole count at the position of 16.7*D*

4 结　语

利用大长径比、高密实火药床点火管的一维两相流程序对影响点火管点传火性能的主要因素进行了计算分析。分析表明，对于大长径比、高装填密度的点火管而言，小孔直径、首孔高度、小孔分布及装填密度显著影响点火压力及点传火性能：小孔直径、首孔高度及单位长度小孔面积是影响破膜后泄压速度的主要因素，而泄压速度是影响点火性能的重要因素之一，泄压过快不利于能量在大长径比点火管内的传播，影响点火的瞬时性和一致性，泄压过慢则易造成局部高压，不利于点火安全，同时也明显影响管内的点火压力；而装填密度对药床的透气性及火焰传播的通畅性影响明显，装填密度过高会导致传火通道不通畅，容易形成局部点火的条件，增大压力波的强度，对安全性构成威胁，而装填密度太低又会使管内压力上升速度偏慢，延长点火时间。在对点火管进行优化设计时需要综合考虑所有的点火要求，合理设计孔径、首孔高度、小孔分布等条件。

参考文献：

[1] 翁春生，王浩. 计算内弹道学[M]. 北京：国防工业出版社，2006.

[2] 张会生，苏明，张小兵，等. 基于两相流动理论的点传火优化仿真[J]. 南京理工大学学报，2001，25(2)：194-199.

Zhang Hui-sheng, Su Ming, Zhang Xiao-bing, et al. Optimization simulation of ignition and flame spreading based on two-phase flow theorem[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2001,25(2):194-199.

[3] 黄明,王浩.传火管中不同装药结构传火性能试验研究[J].弹道学报,2003,15(1):83-86.
Huang Ming, Wang Hao. The experimental study on the performance of ignition and flame spreading in igniter for different charge constructions[J]. Journal of Ballistics, 2003,15(1):83-86.

[4] 袁亚雄,张小兵.高温高压多相流体动力学基础[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.

[5] 王敬,季新源,袁亚雄.基于两相流理论的火炮内弹道设计方法及其在新型装药设计中的应用[J].弹箭与制导学报,2006,26(2):103-106.
Wang Jing, Ji Xin-yuan, Yuan Ya-xiong. The gun interior ballistics design method based on two-phase flow and application in new charge[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006,26(2):103-106.

[6] 韩博,张晓志,邢浴仁,等.大口径火炮发射装药点传火模拟试验装置的研究[J].兵工学报,2008,29(3):262-265.
Han Bo, Zhang Xiao-zhi, Xing Yu-ren, et al. research on simulation testing device of the ignition system for large caliber propellant charging[J]. Acta Aramamentarii, 2008,29(3):262-265.

[7] 金志明.枪炮内弹道学[M].北京:北京理工大学出版社,2004.

[8] 王浩,梁世超,张莺,等.火焰在传火管装药床中的传输特性研究[J].爆炸与冲击,1999,19(1):66-71.
Wang Hao, Liang Shi-chao, Zhang Ying, et al. Study of flame propagation characteristics in fore transferring tube [J]. Explosion and Shock Waves, 1999,19(1):66-71.

Factors affecting the ignition of a large length-to-diameter ratio igniter tube filled with consolidated charge*

Wang Shan-shan[1], Wang Hao[2], Zhang Bo-zi[2], Tao Ru-yi[2]

(1. *China Ship Development and Design Center, Wuhan* 430064, *Hubei, China*;
2. *School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

Abstract: The main factors which influence ignition performance of igniter tube with large ratio of length to diameter and consolidated charge were compared by simulation with the calculation program, and the ignition performance was analyzed in different construction parameters and charge conditions. The influence law is summarized on construction parameters and charge conditions of igniter tube by analysis of the results. The diameter of fire hole, the height of the first hole, the hole area in unit length and charge density evidently effect on the ignition pressure and ignition characteristics. The diameter of fire hole, the height of the first hole, the hole area in unit length are the primary influencing factors of decompressing velocity after the diaphragm breaking, and the charge density effects on the permeability of charge bed and free movement of flame propagation. All of four factors evidently effect on the safety, the transient characteristics and the conformance of ignition.

Key words: mechanics of explosion; ignition; comparative simulation; igniter tube; two-phase flow; interior ballistics

* Received 4 September 2012; Revised 12 October 2012
Corresponding author: Wang Shan-shan, wss_message@163.com

(责任编辑 王小飞)