

装备防护

国外火工品防殉爆技术现状分析

唐平, 罗明文

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 跟踪国外火工品殉爆材料技术和防殉爆技术的研究现状, 为弹药、火炸药等火工品防护技术的改进, 从技术手段上防范以及杜绝火工品爆炸事故的发生提供先进的国外技术情报支撑, 为今后的研究方向提供理论参考。**方法** 查阅近年来国外有关防殉爆技术的相关文献, 并进行整理分析以及总结。重点介绍火工品的材料技术和防殉爆技术的研究现状, 分析应用实例中可能的解决办法。**结论** 研究成果可为防殉爆技术改进、实现低成本化的防殉爆设计提供参考和理论指导。

关键词: 火工品; 防殉爆; 现状分析

中图分类号: TB484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)13-0254-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.13.040

Status of Antisymphathetic Detonation Technique of Foreign Pyrotechnics

TANG Ping, LUO Ming-wen

(Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to provide advanced foreign technical information support for improving the protection technology of ammunition, explosives, powders and other pyrotechnics, and for technically preventing and eliminating the explosive accidents of pyrotechnics, and provide theoretical reference for the research direction in the future by following up the research status of sympathetic detonation material and antisymphathetic detonation technique of foreign pyrotechnics. Foreign literature related to antisymphathetic detonation technique in recent years was looked up, summarized and analyzed. The research status of pyrotechnics material and antisymphathetic detonation technique was introduced emphatically. Possible solutions in application examples were analyzed. Research results can provide reference and theoretical guidance for the improvement of antisymphathetic detonation technique and the achievement of low-cost antisymphathetic detonation design.

KEY WORDS: pyrotechnics; antisymphathetic detonation; status

天津港事件引起国家及业界对火工品的管理、包装、运输、贮存及使用等一系列问题的极大关注, 火工品贮运过程中的安全性显得尤为重要和迫切。贮运防殉爆技术可以防止火工品在贮运状态下由于单个意外爆炸造成殉爆式的大规模燃爆事故, 最大限度减少或避免造成严重的经济损失和人身伤害, 是实现贮运安全行之有效的技术手段。

1 防殉爆材料技术现状

1.1 轻质隔爆材料

隔爆材料大多具有较高的密度和强度, 广泛应用

于各种高强度防爆工程中, 但在一些特殊场合中却要求所使用的材料既要具有冲击防护性能又要具有隔爆安全性能, 如美专利 5158173^[1]公开了一种填充在包装物容器内可防殉爆的包装材料。在此发明实施方案中, 所用材料采用分级浮石颗粒的复合物, 该材料具有轻质量、多孔的特点, 可吸收较强冲击波, 起到减震作用。容器内衬材料以铸造石膏为基质, 将其混合, 再填充到含有分隔室的包装储存容器中, 外壳优选材料为铝。该复合轻质隔爆材料可吸收单个存储弹被引爆的动力冲击波, 此设计即使供体爆炸, 但容器中所存储的爆炸物之间不会发生殉爆, 解决了火工品(弹药)包装在贮运过程中的难题。

收稿日期: 2018-01-05

作者简介: 唐平(1970—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为科技情报和知识产权。

1.2 防殉爆复合材料

2003年, 美国LEYVA用含有聚苯胺的十二烷基苯磺酸与丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物的复合材料, 该复合材料既可溶液成形也可热塑加工, 且电导率与纯聚苯胺在同一数量级, 弹性较好, 可用作防殉爆包装材料^[2]。美国奥美凯公司开发的聚苯胺/聚氯乙烯导电复合材料, 聚苯胺质量分数为30%时, 性能优秀, 体积电阻率为 $10^{-2} \Omega/\text{cm}$, 拉伸强度为4.2 MPa, 伸长率大于250%, 可用作防殉爆包装材料^[3]。

俄罗斯钢研所研制的反应装甲, 主要材料采用声阻抗大于或等于2的防殉爆复合材料, 该装甲结构上采用多个相互连接盒单元组成, 且盒的4个侧壁采用声阻抗不断变化的多层复合材料, 从而达到衰减和消耗了爆炸冲击波, 阻止相邻盒单元发生殉爆的作用^[4]。

1.3 复合涂层

美国陆军研究室开发一种防泡型防火涂层^[5], 该涂层由A-18NV涂层组成, 符合美军标的要求, 不但具有普通涂层的所有特性, 而且不支持燃烧。当暴露在火焰和加热环境下, 它会立即起泡并膨胀, 因此, 该涂层能起到良好的隔爆作用。

1.4 多孔金属防爆材料

多孔金属材料作为一种新型有效的近距离防殉爆材料得到了广泛的研究^[6]。多孔金属材料由于其质量轻, 且内部存在大量孔隙, 具有吸收较高冲击能量的能力, 对爆炸冲击波起到较好的衰减作用。其中多孔铝是多孔金属材料中运用较多的一种, 但单一的多孔铝材料强度低, 故常在其多孔铝表面附着钢板以构成多层复合结构, 该结构具有较好的抗爆功能, 降低了爆炸冲击载荷对结构的破坏, 从而在国防和军事领域得以广泛运用。

1.5 层压结构材料

近年来, 随着爆炸冲击防护领域研究的不断深入, 对包装防护材料及其包装结构的防护功能提出了更高要求。在大多密封包装爆炸容器实验研究中, 如何对包装容器进行防护, 使作用在容器壁上的爆炸冲击波得到有效衰减是当前迫切需要解决的难题。美国专利(US4768418)公开的双面层压设计技术^[7], 有效解决了密封爆炸容器中防护问题。该内衬板材料采用层压复合工艺, 双向层压设计, 并以聚芳酰胺纤维为基体, 充分发挥了该复合板材的强度以及优异的抗冲击性能, 且该发明目的主要防止殉爆, 减少意外爆炸的风险, 使爆炸物和导弹推进剂在储存、运输和处理过程中更安全。

2 火工品的防殉爆技术研究

2.1 引信防殉爆技术

大多数的不敏感弹药主要采用引信起爆技术, 但引信的安全性主要通过引信安全系统保证, 在设计时, 可通过装配隔爆机构、冗余保险和自毁机构来确保引信的安全性。

近年来, 许多国家都在积极研制新式引信隔爆机构, 该机构的特点: 处于安全位置时, 隔爆机构阻断传火通道。处于解保位置时, 隔爆机构开放部分传火通道。从而防止弹药主装药意外起爆, 而产生殉爆事故。在2009年公布的美国专利(US7444937B2)中, 法国人提出了一种应用微机电系统MEMS技术的发火安全装置^[8], 该发火装置包含一个以上的隔爆机构, 确保点火器与装药之间的火工点火序列被有效隔断。

美国国防局为了减少殉爆发生, 研究了自毁装置^[9], 该装置是对现有引信进行改进, 即在引信中增加自毁装置, 改进设计的目标是低于1%, 以降低未爆弹率风险, 实现全新自毁引信。

近年, 国外多个国家都进行了引信冗余技术的相关研究, 其中美国技术最为先进, 且已投入使用。2008年已投入作战使用的155 mm“神剑”炮弹引信就采用冗余保险设计^[10]。

2.2 火工品贮存防殉爆技术^[11]

波兰JAKUSZ公司设计了各种火工品贮存集装箱和弹药库, 便于暂时或永久贮存火工品及其零部件、不稳定的炸药和烟火药剂等。其中移动式弹药库可全方位抵御延时爆炸产生的冲击波和破片。下面主要介绍其中的2种。

1) IC型集装箱式弹药库, 该装置内部由特种钢板制成, 并采用分模块储存方式, 每个独立空间可储存多达1.3 kg的TNT, 该种设计可抵御爆炸和炮射火力等外界刺激。经多次实地试验, 可抵御OF-412式100 mm破片榴弹在其内部爆炸和152 mm弹炮在其外部爆炸, 有效防止了殉爆, 全方位保障了人员安全、减小安全储存距离。

2) 弹药库模块, 采用分模块储存, 每个模块的最大储存量达2.5 kg, 且弹药库模块还采用防水盖和抗静电橡胶密封, 使其具有较好的密闭性和抗静电性能, 主要用于储存高感度(危险度)爆炸物。

2011年9月公开的美国专利中提出了一种安全储存弹药的装置^[12]。该储存装置由2组组件组成, 其中一组件可置于另一组件内部, 并通过一个安全装置连接。该发明装置采用相对独立的弹药储存方式, 能够有效避免弹药在运输过程中因相互碰撞或与储存容器碰撞而发生的损毁。与传统的弹药独立储存装置

相比,此装置更为轻便,安全。

2.3 火工品运输安全技术

弹药在从储存地点向作战使用地点转移的过程中,有可能会受到太阳照射导致温度过高或震荡等因素的影响,使其发生早炸,而引起相邻物发生殉爆,因此应高度重视易爆物在运输过程中的安全性。

以美军为代表的军事强国在弹药运输过程中大多采用集装化运输技术。美国专利US6305544B1^[13]介绍了一种适合运输使用的弹药储存器,该储存器由内部隔间、压力容器组成。新型储存装置采用特殊材质,能够承受极大压力,能有效控制储存装置产生形变,继而抵抗因不同海拔地区间压力差带来的危害,同时能够有效减少湿气或污染物质对弹药的损害,并且采用新材料的新型弹药储存装置还具有轻质量、低维护成本,耐用的优势。

3 火工品的防殉爆试验及应用分析

近年来,随着世界军事科技水平的飞速发展,各类弹药、火药、雷管等易爆品的产量直线上升,由于这些产品自身具有高度危险性,加上生产和管理过程中工作人员的疏忽,殉爆事故在生产、运输和贮存过程中屡见不鲜。该类产品爆炸时形成的高温、高速破片或强大冲击波往往会产生殉爆,带来持续毁灭性伤害,而传统的关于殉爆危险性的研究大多只采用理论分析和数值模拟的方法,缺乏实际殉爆试验数据的支撑,因此设计合理的殉爆试验,通过测试并分析相关的试验数据达到定量评估各类易爆品的殉爆刺激量和殉爆安全距离具有极其重要的意义。

3.1 殉爆试验案例

美国空军研究实验室进行了高能固体推进剂殉爆试验研究,应用了2个小洲际导弹(SICBM)发动机进行殉爆研究^[14]。其中第1级SICBM发动机作供体,第3级SICBM发动机作受体,该试验估算殉爆产生的TNT爆炸当量等价于1.26倍HD1.1推进剂爆炸产生的能量。研究目的有2个:观察受体与供体之间的最佳殉爆距离和收集爆炸产生的碎片特性。

通过实验案例分析得知:第3级发动机爆炸图片显示延迟爆轰时间为20~50 μs ,且第3级发动机的爆炸是通过第1级发动机壳体破片撞击第3级发动机外壳,能量进入第3级发动机的固体推进剂触发而产生的,且殉爆距离至少大于4.6 m;冲击波强弱取决于聚偏二氟乙烯(PVF₂)材料的厚度,试验者也证实了冲击波强度接近100 MPa,但这空气冲击波并非预想的那样,受供体爆炸会产生大量碎片,爆炸产生的碎片最大尺寸2.4 m×0.9 m且由构成的SICBM一级发动机一侧的气缸壳体爆炸形成的碳纤维复合材料碎片,

与发动机爆炸产生的空气冲击波产生的危害相比要小得多,甚至会将伤害降低到最低;单纯的空气冲击是不能引起第3级发动机的冲击爆轰反应,单独的超压不能超过受体发动机的冲击爆轰阈值,只有碎片和冲击波超压的组合才能超过受体发动机的冲击爆轰阈值。

综上所述,该殉爆试验所得的殉爆距离、冲击爆轰阈值、碎片穿透能力、空气冲击波强弱等实验数据对野战时弹药存放分类、库址选取、存储方式选择进行设计提供参考依据,同时为弹药存储防护提供技术支持。

3.2 国外防殉爆应用案例

3.2.1 日本防殉爆案例^[15]

弹药库房由于意外发生火灾或受到敌方打击酿成的重大灾难往往不是这种外部因素直接造成的,大多由外部因素诱发了弹药爆炸而产生的殉爆。日本国立材料研究所为了解决此类安全问题设计了新型地下弹药库。弹药库具体设计模型见图1。

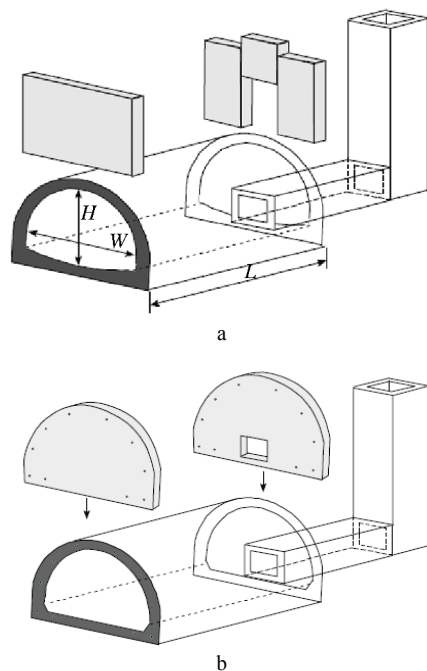


图1 地下弹药库结构设计

Fig.1 Structure design of the subsurface magazines

涉及研究参数有药室容量、装填密度、覆土深度(药室壁外表面到地面的距离)、规模覆土面积以及C-4爆炸物。HASUE等通过使用静态超压峰值和冲击波时间记录冲量,来估计地下弹药库等效质量效率^[15]。基于静态超压峰值的C-4等效质量的最大值大约为0.24,其正脉冲为0.27。如果假设安全距离与等效质量电荷的立方根成比例,安全距离可以减少到60%。9.6 m/kg^{1/3}规模距离的地冲击比土壤的临界值要低,因此,根据气流冲击和地冲击的安全标准,地

下弹药库的贮存安全距离确定为 $9.6 \text{ m/kg}^{1/3}$ 是合理的。从碎片恢复分析中发现,如果装填密度为 5 kg/m^3 ,碎片危害可以降低到最低。

综上所述地下弹药库造成的冲击波比表面爆炸造成的冲击波要弱得多,原因可能是地下弹药库造成冲击波在摧毁药室时能量有损耗,因此,基于此研究,所得实验数据将用于为地下弹药库建立安全标准。

该实验案例以安全防护角度为研究主题,应用理论与实践结合的方法对战场环境下地下储存库专用弹药发生爆炸的主要原因和影响因素进行了探索分析,提出改进战场环境下弹药储存库防殉爆的设计技术和方法,为野战弹药存放降低爆炸事故,减轻殉爆危害提供理论依据。

3.2.2 新加坡防殉爆案例^[16]

新加坡国防局对弹药岩石地下储存库的殉爆实验进行了大量研究。主要针对弹药库房、弹药受体与供体、堆垛之间的殉爆安全距离进行了分析研究。通过具体的殉爆试验分析:除了炸药重量和岩石类型,药室内的装填密度对2个相邻药室之间所需安全距离对弹药安全存放都具有重大影响,并依据该案例中的实验数据,得出了整套确定各种岩石类型的弹药贮存安全距离的合理设计布局与设计思路。

在该实验方案中,防殉爆安全距离只是针对弹药库房、弹药受体与供体、堆垛之间的殉爆进行理论研究,而当弹药贮存库遭受敌人的火力攻击时,由于其爆炸位置的随意性,通过增加殉爆安全距离来进行防护显然是不可能的,只能通过提高库房结构和其他技术手段来增强防爆能力。

4 结语

目前,国内防殉爆技术中的关键材料及工艺发展水平严重滞后,无法支撑工程化应用,已构成国防工业安全生产技术体系的薄弱环节,如在战斗部设计中,尽管已实际应用了某些新的安全设计技术,如“凯芙拉”材料壳体技术等,以降低弹药壳体受热时的爆炸危险,但是与国外相比,仍缺乏深入、系统的研究。在防殉爆防护技术方面,虽然有部分单位开展弹药等火工品的殉爆特性,殉爆安全距离,吸能隔爆材料等研究工作,但防殉爆技术系统的研究,尤其是贮存、运输中的防殉爆技术尚属起步阶段。尽管在“十五”期间,国内突破了一些制约弹药安全自动化装药的关键技术,但呈零星分散状,弹药自动化生产技术成果转化工程应用的技术分散,只能部分工序自动化,且在信息化程度上与国外相比仍有差距。

综上所述,今后有必要实时跟踪国外火工品防殉爆材料技术和防殉爆技术现状,对一些应用实例进行分析提炼,为弹药、火炸药等火工品贮运防护技术改

进,从技术手段上防范与杜绝火工品爆炸事故的发生提供先进的国外技术情报支撑。

参考文献:

- [1] HALSEY C C, BERRY S L. Weapons Storage Container to Prevent Sympathetic Detonation of Adjacent Weapons: US, 5158173A[P]. 1992-10-27.
- [2] CUDZILO S, NITA M. Synthesis and Explosive Properties of Copper (II) Chlorate (VII) Coordination Polymer with 4-amino-1, 2, 4-triazole Bridging Ligand[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010(177): 146—149.
- [3] 韩笑, 王芳. ICP 复合包装材料新进展[J]. 包装世界, 2005(2): 40—42.
HAN Xiao, WANG Fang. ICP Composite Packaging materials of New Development[J]. Packing World, 2015(2): 40—42.
- [4] SHIN H, LEE W. Material Design Guidelines for Explosive Confinements to Control Impact Shock-induced Detonations Based on Shock Transmission/Reflection Analysis[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(5): 465—478.
- [5] SMITH P. Coating Technologies for Insensitive Munitions[J]. Army Research Laboratory, 2006(9): 101—105.
- [6] 赵生伟, 唐玉志, 周刚. 多孔铝应用于爆炸容器防护实验研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(2): 267—271.
ZHAO Sheng-wei, TANG Yu-zhi, ZHOU Gang. Experimental Investigation of Porous Aluminum Used in Protecting Explosion Vessel[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(2): 267—271.
- [7] BLOMMER E J, WHEELER D L. Explosive Attenuating Missile Transportation and Storage Rack: US, 4768418[P]. 1988-09-06.
- [8] MAGNAN P, LAFONT R. Pyrotechnic Safety Device with Micro-machined Barrier: US, 7444937B2[J]. 2008-11-04.
- [9] PERRY SALYERS. Excalibur Fuzing System (FS&A wHOB)[C]// 52nd Annual Fuze Conference, 2008 (5): 56—62.
- [10] SMITH J, SAHLMANN I. Insensitive Munition Tests for Artillery[C]// NDIA's 46th Annual Fuze Conference, 2002: 252—256.
- [11] CUDZILO S, NITA M. Synthesis and Explosive Properties of Copper(II) Chlorate (VII) Coordination Polymer with 4-amino-1,2,4-triazole Bridging Ligand[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010(177): 146—149.
- [12] Ammunition Storage Container, US2011/0233076[P]. 2010-12-30.
- [13] LEE F S, WHITESBORO. TX Ammunition Shipping and Storage Container and Method: US, 6305544 B1[P]. 2012-03-24.
- [14] SCHWARTZ D F, MERRILL C E. Small intercontinental Ballistic Missile(SICBM) Rocket Motor Sym-

- pathetic Detonation Study[J]. 2003, 26(3): 65—72.
- [15] NAKAYAMA Y, WAKABAYASHII K, MATSU MURA T. Blast Wave Effects from Internal Explosion of Subsurface Explosive[J]. Applied Mechanics & Materials, 2011, 82: 663—668.
- [16] Zhou Y X, JENSSEN A. Internal Separation Distances for Underground Explosives Storage in Hard Rock[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(2): 119—125.
- [17] 彭斐. 工兵用弹药战时储存防爆研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2013.
- PENG Fei. Sapper Ammunition Storage and Explosion-proof of Research in Wartime[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2013.
- [18] FREEMAN W. A Study of Ammunition Consumption[D]. Commonwealth of Pennsylvania: US Army Command and General Staff College, 2005.
- [19] RAGHAVAN D. Design Methodology for Understanding the Sympathetic Detonation Characteristics of Insensitive High Explosives[J]. Monterey California Naval Postgraduate School, 2005, 23(6): 233.
- [20] PENG H, SHANG W L, SHI H B, et al. On-Line Monitoring and Diagnosis of Failures Using Control Charts and Fault Tree Analysis (FTA) Based on Digital Production Model[C]// 2nd International Conference on Knowledge Science, Engineering Management, 2007, 4798: 544—549.
- [21] 韩志伟, 解立峰, 宋晓斌, 等. 球形抑爆材料与网状抑爆材料抑爆性能对比研究[J]. 爆破器材, 2011, 40(6): 15—18.
- HAN Zhi-wei, XIE Li-feng, SONG Xiao-bin, et al. Contrast Studies on Explosion Suppression Performance between Spherical Materials and Reticular Materials[J]. Explosive Materials, 2011, 40(6): 15—18.
- [22] 邢志祥, 张贻国, 马国良. 网状多孔材料防爆性能研究进展[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(10): 38—41.
- XING Zhi-xiang, ZHANG Yi-guo, MA Guo-liang. Progress in Study on Explosion-proof Characteristics of Mesh Porous materials[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(10): 38—41.
- [23] AQ 3001—2005, 汽车加油(气)站、轻质燃油和液化石油气汽车罐车用阻隔防爆储罐技术要求[S].
- AQ 3001—2005, Technology-Separate and Explosion-proof of Gasoline, Gas Filling Station and Light-fuel, LPG Tank of Transportation by Truck[S].
- [24] 郭宏晓. HAN 阻隔防爆技术的应用[J]. 消防技术与产品信息, 2012, 19(8): 93—95.
- GUO Hong-xiao. Applications of HAN Separate and Explosion Proof Technology[J]. Fire Protection Technology and Product Information, 2012, 19(8): 93—95.
- [25] NIE B S, HE X Q, ZHANG R M, et al. The Roles of Foam Ceramics in Suppression of Gas Explosion over Pressure and Quenching of Flame Propagation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(2): 741—747.
- [26] SUN J H, ZHAO Y, WEI C R, et al. The Comparative Experimental Study of the Porous Materials Suppressing the Gas Explosion[J]. Procedia Engineering, 2011, 26(18): 954—960.
- [27] 南子江, 宋爱英, 曹法和, 等. 铝合金抑爆材料抑爆性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2001, 24(4): 19—22.
- NAN Zi-jiang, SONG Ai-ying, CAO Fa-he, et al. Study on Explosion Suppression Properties of Aluminum Mesh material[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2001, 24(4): 19—22.
- [28] 王树有, 郑应民, 顾晓辉. 铝合金抑爆材料性能对比试验分析[J]. 爆破器材, 2005, 34(3): 36—38.
- WANG Shu-you, ZHENG Ying-min, GU Xiao-hui. Experimental Research on Explosion Suppression on of Aluminum Alloy Material[J]. Explosive Materials, 2005, 34(3): 36—38.
- [29] 解立峰, 王静虹, 饶丽芳, 等. 网状铝合金材料对爆炸火焰抑制性能研究[J]. 石油化工安全环保技术, 2010, 26(1): 34—38.
- XIE Li-feng, WANG Jing-hong, RAO Li-fang, et al. Study on the Attenuation Performance of Reticulate Aluminum Alloy Material on Explosion Flame[J]. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology, 2010, 26(1): 34—38.
- [30] 邢志祥, 张贻国, 马国良. 甲醇汽油对网状多孔铝合金材料腐蚀的测定[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(12): 110—113.
- XING Zhi-xiang, ZHANG Yi-guo, MA Guo-liang. The Detection of Corrosion of Mesh Aluminum Alloy by Methanol Gasoline[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(12): 110—113.
- [31] CICCARELLI G. Explosion Propagation in inert Porous Media[J]. Philosophical Transactions, 2012, 370(2): 647—667.
- [32] 吴征艳, 蒋曙光, 王兰云, 等. 多层丝网结构抑制瓦斯爆炸传播的数学模型[J]. 工业安全与环保, 2006, 32(12): 1—3.
- WU Zheng-yan, JIANG Shu-guang, WANG Lan-yun, et al. Mathematical Model for Gas Explosion Propagation Suppressed by Multilayer Mesh Structure[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2006, 32(12): 1—3.
- [33] 罗艾民, 刘伟, 吴宗之, 等. HAN 阻隔防爆模型研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(4): 87—89.
- LUO Ai-min, LIU Wei, WU Zong-zhi, et al. Research on HAN Model of Barrier and Explosion proof[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(4): 87—89.
- [34] 韩丰磊. 多孔材料抑制火焰传播的实验研究及数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- HAN Feng-lei. The Experiment and Numerical Simulation of the Flame Spread in Tubes with Porous Mate-

- rial[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [35] MARE L D, MIHALIK T A, CONTINILLO G, et al. Experimental and Numerical Study of Flammability Limits of Gaseous Mixture in Porous Media[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000, 21(1/3): 117—123.
- [36] ZHANG Q, PANG L. Effect of Scale on the Explosion of Methane in Air and Its Shockwave[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011, 24(1): 43—48.
- [37] ZHANG Q, PANG L. Analysis of the Temperature Distribution in the Explosion of a Methane/Air Mixture in a Tunnel[J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2012, 85(6): 1413—1418.
- [38] PANG L, ZHANG Q, WANG T, et al. Influence of Laneway Support Spacing on Methane/air Explosion Shockwave[J]. Safety Science, 2012, 50(1): 83—89.
- [39] 王凯民, 王文站, 张玲香. 90 年代美国火工品技术发展规划及研究进展[J]. 火工品, 2000(4): 37—42.
- WANG Kai-min, WANG Wen-dian, ZHANG Ling-xiang. Development on American Technical Advances of Initiating Explosive Devices in 1990s[J]. Initiating Explosive Devices, 2000(4): 37—42.
- [40] 王成玲. MWMS 数字固体微推进器的制备与性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- WANG Cheng-ling. Study on the Fabrication and Properties of MEMS Digital Solid Micro Thruster System[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.