



国防科技图书出版基金

弹药储存安全风险评估 理论与方法

Theory and Method of Safety
Risk Assessment on Ammunition Storage

安振涛 秦翔宇 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

弹药储存安全风险 评估理论与方法

Theory and Method of Safety Risk
Assessment on Ammunition Storage

安振涛 秦翔宇 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

弹药储存安全风险评估理论与方法/安振涛,秦翔
宇著. —北京:国防工业出版社,2016.12

ISBN 978-7-118-10789-0

I. ①弹… II. ①安… ②秦… III. ①弹药—储
存—安全评价—研究 IV. ①TJ410.89

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第004607号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 8 $\frac{5}{8}$ 字数 237千字

2016年12月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 88.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金

第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

弹药是国家重要的军事战略物资,是毁伤敌方目标的一次性使用的特殊装备,平时长期处于储存状态。弹药在长期的储存过程中,因受到储存和安全环境(温湿环境、储运力学环境、电磁环境、生物环境)应力的影响,发生意外燃爆事故的风险始终存在。因此,将风险评估理论应用于弹药储存安全管理工作,研究并构建弹药储存安全风险评估的技术与方法,对实现我军弹药储存安全管理工作从定性分析到定量评价、从经验型管理到科学型管理的转变,对提高我军弹药储存安全管理水平具有重要作用。

对弹药储存的安全风险进行科学的评估是判定弹药储存安全与否的重要途径。目前对弹药储存安全的评估,多是采用安全检查表的方式,对弹药储存状况进行检查,将安全检查结果与相应的管理制度进行对照,从中找出不符合安全要求的地方,这种评估过程重在发现或找出安全防护、安全管理存在的问题,不对事故危险源、事故概率大小以及事故后果的严重程度进行深入的分析与评估,可以说,只能进行表观的定性安全评估。因此,要建立弹药安全风险评估技术与方法,就必须在弹药安全评价过程中引入更为系统的安全评估方法,采用更为科学的安全评估技术,得到更为准确的安全评估结果,从而为系统、深入、量化地开展弹药储存安全风险评估奠定理论基础。

为了构建较为完整的弹药安全风险评估技术与方法体系,我们系统地总结了近几年的研究成果,形成了本著作的基本内容。本著作共分9章。第1章绪论,主要描述了风险的定义及数学表达,风险评估技术的发展及应用,界定了弹药储存事故概率评估和弹药储存事故危害度评估的主要内容。第2章弹药储存危险源辨识,主要描述了弹药储存基本过程,建立了FTA-SHEL危险源辨识方法,并以此为基础对弹药存放保管环节、弹药装卸作业环节、弹药技术检查环节的危险源

进行辨识。第3章基于模糊影响图事故概率评估,主要简述了模糊影响图概论,给出了模糊影响图编制的一般过程,并对特定事故概率算例进行评估。第4章发射药自燃安全性风险评估方法,介绍了发射药构成及特点,分析发射药的自燃机理,给出了发射药自燃的试验评估和数值模拟方法。第5章库(工)房气体燃爆事故易发性评估,分析了弹药库房工房的燃爆气体源,介绍了弹药库房工房燃爆气体的检测方法,给出了弹药库房工房燃爆气体风险量值计算方法。第6章弹药跌落事故概率评估,对装卸作业操作人员失误进行了分析,描述了装卸作业弹药跌落事故概率评估模型建立方法,给出了弹药装卸跌落概率评估和弹药跌落引信解除保险概率评估实例。第7章人为失误分析与风险评估,介绍了人为失误概念,对人为失误致因进行了分析,介绍了人为失误危险性评估程序与方法。第8章基于数值模拟的事故危害度评估,界定了弹药储存事故危害度评估基本问题,构建了地面库、洞库燃爆冲击波毁伤模型,对地面库、洞库燃爆冲击波毁伤危害度进行了评估。第9章安全风险评估程序,介绍了特定事故和弹药仓库综合安全风险的程序,分别给出了安全风险评估应用实例。

本书由军械工程学院安振涛、装备学院秦翔宇共同策划并统稿,军械技术研究所陈明华、江劲勇,军械工程学院宣兆龙、陈楠、周彬、常文平、李海广、刘建国等共同参与完成。第1章由安振涛、秦翔宇执笔,第2章由秦翔宇、陈楠执笔,第3章由秦翔宇执笔,第4章由陈明华、江劲勇、常文平执笔,第5章由安振涛、宣兆龙、刘建国执笔,第6章由安振涛、秦翔宇、周彬执笔,第7章由陈楠、李海广执笔,第8章和第9章由安振涛、秦翔宇执笔。

本书在撰写过程中,参考或引用了弹药保障与安全性评估军队重点实验室同事和研究生的相关研究资料,以及国内外同行的相关研究成果,在此一并表示感谢。

限于作者的理论与实践水平,加之时间仓促,遗漏和错误之处在所难免,我们真诚地希望专家、同行和广大读者提出宝贵意见。

作 者

目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 风险的定义及数学表达	001
1.1.1 风险的定义	001
1.1.2 风险的数学表达	002
1.2 风险评估技术的发展及应用	003
1.2.1 风险评估技术在不同领域的发展与应用	004
1.2.2 安全理论及评估模型	006
1.2.3 人因可靠性分析方法	008
1.2.4 弹药事故危害度评估技术	010
1.3 弹药储存事故概率评估问题	013
1.3.1 特定事故的概率评估	014
1.3.2 特定事故概率量化的方法途径	014
1.3.3 事故的易发性综合评估	015
1.3.4 事故易发性综合评估的方法途径	016
1.3.5 弹药储存事故概率评估标准	016
1.4 弹药储存事故危害度评估	020
1.4.1 事故危害度表示方式	021
1.4.2 最大风险原则	021
1.4.3 弹药储存事故危害度评估标准	022
参考文献	023
第 2 章 弹药储存危险源辨识	025
2.1 弹药储存过程基本描述	025
2.1.1 接收入库阶段	026

2.1.2	仓库储存阶段	026
2.1.3	出库发运阶段	027
2.2	FTA - SHEL 危险源辨识方法	027
2.2.1	危险源定义	027
2.2.2	危险源辨识的常用方法	028
2.2.3	FTA - SHEL 危险源辨识方法	031
2.3	弹药存放保管环节危险源辨识	033
2.3.1	雷击事故危险源辨识与分析	035
2.3.2	静电事故危险源辨识与分析	037
2.3.3	电气事故危险源辨识与分析	039
2.3.4	火灾事故危险源辨识与分析	041
2.3.5	盗窃事故危险源辨识与分析	042
2.4	弹药装卸作业环节危险源辨识	044
2.4.1	弹药跌落事故分析	045
2.4.2	弹药跌落事故危险源辨识与分析	045
2.5	弹药技术检查环节危险源辨识	047
2.5.1	弹药技术检查基本分析	047
2.5.2	可燃液体燃爆事故	050
2.5.3	弹药或其元件燃爆事故	052
	参考文献	054

第3章 基于模糊影响图事故概率评估 055

3.1	模糊影响图概论	055
3.1.1	影响图的数学定义	055
3.1.2	模糊影响图算法描述	057
3.2	模糊影响图的建立	060
3.2.1	确定价值节点	061
3.2.2	构造拓扑层	061
3.2.3	定义语言词汇模糊集	062
3.2.4	确定数值层	064
3.2.5	确定函数层	064

3.3	特定事故概率评估算例	065
3.3.1	模糊影响图计算	065
3.3.2	结果分析	072
	参考文献	075
第4章	发射药自燃安全性风险评估方法	076
4.1	发射药构成及特点	076
4.1.1	单基发射药	076
4.1.2	双基发射药	077
4.1.3	三基发射药	078
4.2	发射药的自燃机理	079
4.2.1	发射药的自行分解	079
4.2.2	发射药的自催化分解	080
4.2.3	发射药的水解	081
4.2.4	发射药的热分解	082
4.2.5	安定剂存在时发射药的分解	084
4.3	发射药自燃的试验评估	084
4.3.1	试验评估的基本原理	084
4.3.2	试验评估的基本装置	086
4.3.3	湿热条件下发射药自燃的测试程序	088
4.3.4	湿热条件下发射药自燃测试实例	088
4.4	发射药自燃的数值模拟	092
4.4.1	动力学参数计算	093
4.4.2	发射药热自燃数值模拟	100
4.4.3	环境湿度影响的试验结果与分析	110
	参考文献	112
第5章	库(工)房气体燃爆事故易发性评估	114
5.1	弹药库(工)房燃爆气体的来源	114
5.1.1	发射药分解产生的燃爆气体	114
5.1.2	炸药分解产生的燃爆气体	115

5.1.3	涂料产生的燃爆(有害)气体	118
5.1.4	其他的有害气体来源	120
5.2	弹药库(工)房燃爆气体的检测	120
5.2.1	燃爆(有害)气体的检测原理	121
5.2.2	有害气体的采样	121
5.2.3	燃爆(有害)气体的检测分析	123
5.2.4	检测结果	127
5.3	弹药库(工)房燃爆气体的危害	128
5.3.1	燃爆(有害)气体对人体的危害	128
5.3.2	燃爆(有害)气体对弹药的危害	131
5.4	燃爆气体风险量值计算	132
5.4.1	空气中燃爆(有害)气体浓度表示方法	132
5.4.2	可燃气体爆炸极限分析	132
5.4.3	库(工)房燃爆事故易发性评估	134
	参考文献	138
第 6 章	弹药跌落事故概率评估	139
6.1	装卸作业操作人员失误分析	139
6.1.1	装卸作业测试场地及路线设计	139
6.1.2	操作人员动作分析	141
6.1.3	装卸作业操作失效(失误)形式及原因	144
6.2	装卸作业弹药跌落事故概率评估模型	146
6.2.1	弹药跌落事故逻辑模型	146
6.2.2	弹药跌落事故概率评估模型	147
6.3	弹药装卸跌落概率评估实例	148
6.3.1	测试方案设计	148
6.3.2	基于 CREAM 的子任务人为失误概率评估	149
6.3.3	测试数据及人员操作失误概率评估	152
6.3.4	测试数据分析及跌落事故概率风险判定	160
6.4	弹药跌落引信解除保险概率评估	162
6.4.1	试验设计	162

6.4.2	引信跌落冲击加速度测试及分析	165
6.4.3	基于数值模拟的引信解除保险概率评估	166
	参考文献	170
第7章	人为失误分析与风险评估	171
7.1	人为失误	171
7.1.1	人为失误的定义	171
7.1.2	人为失误的特征	172
7.1.3	人为失误的分类及识别	173
7.2	人为失误致因分析	175
7.2.1	人为失误机理的简要分析	175
7.2.2	人为失误的影响因素分析	176
7.3	人为失误危险性评估程序与方法	178
7.3.1	人为失误危险性评估模型	178
7.3.2	基于层次分析法的权重计算方法	179
7.3.3	人为失误固有危险性灰色模糊评估	183
7.3.4	危险性抵消因子评价指标确立及计算	184
	参考文献	186
第8章	基于数值模拟的事故危害度评估	188
8.1	弹药储存事故危害度评估基本问题	188
8.1.1	燃爆毁伤材料模型及参数	188
8.1.2	整库弹药燃爆等效 TNT 当量计算	194
8.1.3	冲击波毁伤评估标准及毁伤区域划分	195
8.1.4	危害度评估基本思路	196
8.2	地面库燃爆冲击波毁伤危害度评估	198
8.2.1	地面库有限元模型构建	198
8.2.2	地面库燃爆冲击波传播规律	200
8.2.3	地面库燃爆冲击波毁伤区域划分	210
8.3	洞库燃爆冲击波毁伤危害度评估	213
8.3.1	洞库有限元模型构建	213

8.3.2	洞库燃爆冲击波传播规律	216
8.3.3	冲击波毁伤区域的工程近似计算	219
8.3.4	冲击波毁伤区域划分	221
	参考文献	225
第9章	安全风险评估程序	226
9.1	特定事故安全风险评估	226
9.1.1	特定事故风险评估基本程序	226
9.1.2	特定事故风险评估标准	228
9.1.3	特定事故风险评估实例应用	229
9.2	弹药仓库综合安全风险评估	233
9.2.1	弹药仓库综合风险评估基本程序	234
9.2.2	弹药仓库综合风险评估标准	235
9.2.3	弹药储存事故易发性综合评估方法	236
9.2.4	弹药仓库综合安全风险评估实例应用	241
	参考文献	250
附录A	室内空气质量标准	251
附录B	车间空气中有毒物质的最高容许浓度	252

Contents

Chapter 1	Introduction	001
1.1	Concept of risk and its mathematical expression	001
1.1.1	Definitions of risk	001
1.1.2	Mathematical expression of risk	002
1.2	Development and application of risk assessment	003
1.2.1	Development of risk assessment	004
1.2.2	Safety theory and its assessment models	006
1.2.3	Human reliability analysis	008
1.2.4	Criticality analysis technology for ammunition accidents	010
1.3	Probability assessment of ammunition storage accident	013
1.3.1	Probability assessment of specific accident	014
1.3.2	Probability assessment method for specific accident	014
1.3.3	Occurrence probability evaluation of accident	015
1.3.4	Method for occurrence probability evaluation of accident	016
1.3.5	Probability evaluation standard of ammunition storage accident	016
1.4	Criticality assessment of ammunition storage accident	020
1.4.1	Expression of criticality assessment	021
1.4.2	Maximum risk principle	021
1.4.3	Criticality assessment standard of ammunition storage accident	022

References	023
------------------	-----

Chapter 2 Dangerous source identification of ammunition storage	025
2. 1 Description of ammunition storage	025
2. 1. 1 Reception of ammunition	026
2. 1. 2 Ammunition storage	026
2. 1. 3 Warehouse – out and transportation of ammunition	027
2. 2 FTA – SHEL dangerous source identification	027
2. 2. 1 Concept of dangerous source	027
2. 2. 2 Method for dangerous source identification	028
2. 2. 3 Identification method of dangerous source based on FTA – SHEL	031
2. 3 Dangerous source identification on ammunition deposit	033
2. 3. 1 Dangerous source identification of lightning strike fault	035
2. 3. 2 Dangerous source identification of static accident	037
2. 3. 3 Dangerous source identification of electric accident	039
2. 3. 4 Dangerous source identification of fire accident	041
2. 3. 5 Dangerous source identification of theft accident	042
2. 4 Dangerous source identification on ammunition handling ...	044
2. 4. 1 Analysis of drop accident	045
2. 4. 2 Dangerous source identification of drop accident	045
2. 5 Dangerous source identification on ammunition inspection ...	047

2. 5. 1	Basic analysis of ammunition technical inspection	047
2. 5. 2	Explosive and burning fault of flammable liquid	050
2. 5. 3	Explosive and burning fault of ammunition or its elements	052
References		054

Chapter 3 Probability assessment by fuzzy influence

diagram		055
3. 1	Introduction of fuzzy influence diagram	055
3. 1. 1	Mathematical expression of influence diagram	055
3. 1. 2	Algorithm of fuzzy influence diagram	057
3. 2	Establishment of fuzzy influence diagram	060
3. 2. 1	Ascertainment of value – node	061
3. 2. 2	Constitution of topological layer	061
3. 2. 3	Defining of language vocabulary fuzzy sets	062
3. 2. 4	Ascertainment of numerical layer	064
3. 2. 5	Ascertainment of functional layer	064
3. 3	Example of probability assessment on the specific accident	065
3. 3. 1	Calculation of fuzzy influence diagram	065
3. 3. 2	Analysis of results	072
References		075

Chapter 4 Risk assessment of propellant cook – off 076

4. 1	Component and feature of propellant	076
4. 1. 1	Single – base propellant	076
4. 1. 2	Double – base propellant	077