



液体推进剂爆炸危害性 评估方法及应用

Evaluation Method and Application of Liquid
Propellant Explosion Harmfulness

陈新华 聂万胜 著



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

液体推进剂爆炸危害性 评估方法及应用

Evaluation Method and Application of Liquid
Propellant Explosion Harmfulness

陈新华 聂万胜 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

液体推进剂爆炸危害性评估方法及应用/陈新华, 聂万胜著. —北京: 国防工业出版社, 2005. 3

ISBN 7-118-03662-5

I. 液... II. ①陈... ②聂... III. 液体推进剂—爆炸—危害—评估 IV. V511

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 104272 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 100044)

腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 8 $\frac{5}{8}$ 216 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 30.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

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 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植			
顾问	黄宁			
主任委员	殷鹤龄			
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋	
秘书长	张又栋			
副秘书长	崔士义	蔡锺		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	彭华良	韩祖南	舒长胜

前 言

深入研究、分析液体火箭推进剂爆炸时的各种破坏效应,揭示其客观规律,制定相关的设计、计算规范,从而采取科学的安全防护措施,减小液体火箭爆炸事故危害性,进一步提高航天发射的安全可靠性,是航天发射工程技术领域追求的目标。

在 20 世纪 50~60 年代,美国和苏联对液体火箭爆炸开展了比较深入的理论和实验研究,编制出了关于液体推进剂爆炸危害和其他危害的设计规范、计算和分析手册等。国内对液体火箭爆炸危害性评估研究起步较晚,但在 20 世纪 90 年代我国实施载人航天工程时加大了对该领域的研究力度,开展了比较全面的理论和实验研究,获得了许多重要的研究成果,对航天事业的发展起到了积极的推动作用。液体推进剂爆炸过程涉及化学动力学、爆炸力学、燃烧学、传热学、结构力学等多门学科知识,以航天发射场和运载火箭为对象,系统、全面地建立液体推进剂爆炸危害性评估的理论和方法,为航天发射场相关设计规范的制定,为运载火箭和战略导弹发射试验中安全技术分析与评估等提供科学和翔实的实验数据是该领域研究的主要目标。

本书是作者对近 10 年来液体推进剂爆炸危害性理论与实验研究成果的总结与拓展。全书共 6 章,由陈新华统稿并撰写第 1

章、第3~6章,聂万胜撰写第2章。在本书撰写过程中,中国科学院院士、航天科技集团公司余梦伦研究员,总装备部工程设计研究所张泽明研究员,中国酒泉卫星发射中心徐克俊少将,中国人民解放军装备指挥技术学院常显奇院长,国防工业出版社熊思华同志等给予了悉心指导和热情支持,作者还参阅了国内外许多专家、学者在液体推进剂爆炸特性研究方面的理论与实验研究文献,在此谨向各位专家、教授和学者表示衷心感谢。

由于水平所限,书中存在的不妥之处,恳请读者不吝指正。

作者

2004年6月于装备指挥技术学院

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 液体火箭爆炸事故的危害性	1
1.2 液体火箭爆炸危害性评估研究的发展过程	2
1.3 液体火箭爆炸事故危险区的划分方法	5
参考文献	6
第 2 章 着火、燃烧与爆炸基本原理	9
2.1 燃烧与爆炸过程的化学机理	9
2.1.1 化学反应速率	9
2.1.2 链反应	15
2.2 着火、燃烧和爆炸的基本知识	18
2.2.1 燃烧现象分类	18
2.2.2 着火	20
2.2.3 自发着火延迟期	25
2.2.4 热自燃理论	27
2.2.5 爆轰与爆燃的基本特征	31
参考文献	37
第 3 章 液体推进剂爆炸热辐射效应	39
3.1 相似理论	39
3.1.1 相似和相似定理	40
3.1.2 量纲分析方法	43
3.2 火球成长历程分析模型	49
3.2.1 火球成长历程经验模型	49
3.2.2 火球成长历程数学模型	53
3.2.3 高空环境对火球成长历程的影响	60

3.2.4	液体推进剂爆炸火球形成的条件	62
3.3	火球热辐射模型	65
3.3.1	火球热辐射经验模型	65
3.3.2	火球热辐射数学模型	67
3.4	液体推进剂爆炸热辐射效应实验研究	77
3.4.1	液体推进剂爆炸实验装置	78
3.4.2	实验数据测量与处理系统	78
3.5	液体火箭爆炸事故热辐射危害性评估方法	79
3.5.1	热化学平衡计算	80
3.5.2	热辐射破坏评估判据	81
3.5.3	液体火箭爆炸事故热辐射效应评估	85
	参考文献	89
第4章	液体推进剂爆炸空气冲击波效应	91
4.1	引言	91
4.2	空气中爆炸物理现象	92
4.2.1	冲击波的概念	92
4.2.2	空气中炸药爆炸的物理现象	93
4.2.3	爆炸反应产物的膨胀规律	95
4.2.4	空气冲击波的形成与传播	98
4.3	液体推进剂爆炸空气冲击波的形成	99
4.3.1	液体火箭爆炸事故模式分类	99
4.3.2	液体推进剂爆炸空气冲击波形成过程	100
4.4	空气冲击波初始参数确定	104
4.5	爆炸相似律在空气冲击波参数确定中的应用	110
4.5.1	爆炸相似律	110
4.5.2	液体推进剂爆炸空气冲击波特征参数计算公式	112
4.6	空气冲击波的反射特性	118
4.6.1	地面爆炸空气冲击波的反射	118
4.6.2	空中爆炸空气冲击波的反射	121
4.7	空气冲击波对目标的破坏作用	123

4.7.1	空气冲击波对建筑物的破坏作用	124
4.7.2	空气冲击波对人体的伤害作用	126
4.8	防止空气冲击波伤害的安全距离	127
4.9	液体推进剂爆炸 TNT 当量系数	130
4.9.1	TNT 当量系数的概念	130
4.9.2	不同组合的液体推进剂爆炸 TNT 当量系数	131
4.9.3	液体推进剂总量对爆炸威力的影响	132
4.9.4	液体火箭失效模式对爆炸威力的影响	135
4.10	自燃液体推进剂爆炸实验研究	137
4.10.1	自燃液体推进剂爆炸实验的推进剂 TNT 当 量系数	137
4.10.2	自燃液体推进剂爆炸实验的空气冲击波超 压测试结果	138
4.11	液体火箭爆炸事故空气冲击波危害性评 估方法	143
4.11.1	评估初始条件设定	143
4.11.2	地面爆炸空气冲击波危害范围估算	144
4.11.3	空中爆炸空气冲击波危害范围估算	147
4.11.4	航天飞机爆炸事故空气冲击波危害范围预测	149
	参考文献	151
第 5 章	液体推进剂爆炸有毒气体生成与扩散	153
5.1	引言	153
5.2	液体推进剂在自然环境中的蒸发	153
5.2.1	液体推进剂无燃烧蒸发模型	154
5.2.2	土壤中液体推进剂蒸发特性	158
5.3	湍流质量扩散的梯度输运理论	172
5.3.1	分子扩散理论	172
5.3.2	湍流质量扩散输运理论	173
5.3.3	湍流质量扩散基本方程	174
5.4	地面有毒气体在大气中扩散的计算模型	176

5.4.1	事故点地面下风向液体推进剂毒气质量扩散模型	176
5.4.2	扩散参数 σ_y 、 σ_z 的确定	179
5.4.3	液体推进剂毒气面源质量扩散模型	183
5.4.4	封闭型山谷中液体推进剂毒气质量扩散模型	185
5.5	液体火箭爆炸火球内毒气扩散计算模型	185
5.5.1	准静风时火球内毒气质量扩散模型	186
5.5.2	有风时火球内毒气质量扩散模型	186
5.6	液体火箭爆炸地面推进剂残余量工程估算方法	187
5.7	液体推进剂毒气扩散实验研究	188
5.7.1	大气中液体推进剂毒气质量浓度测量系统	189
5.7.2	大气中液体推进剂毒气生成与扩散实验测量结果分析	190
5.8	液体火箭爆炸有毒气体危害性评估方法	194
5.8.1	空气中液体推进剂最大允许浓度	195
5.8.2	有毒气体危害性工程评估方法	195
5.8.3	典型发射场液体火箭爆炸有毒气体危害安全性综合评估	219
	参考文献	223
第6章	液体火箭爆炸碎片	225
6.1	液体火箭爆炸碎片散布特点	225
6.2	液体火箭爆炸碎片散布计算模型	226
6.2.1	有关碎片的几个术语	226
6.2.2	碎片散布计算模型	228
6.3	典型液体火箭爆炸碎片散布范围估算	251
6.3.1	典型液体火箭爆炸碎片散布半径估算	251
6.3.2	发射场液体火箭起飞阶段爆炸碎片散布半径估算	252
	参考文献	254

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Harmfulness of Liquid Rocket Explosion Accident	1
1.2 Research History of Liquid Rocket Explosion Harmfulness Evaluation	2
1.3 Harmfulness District Partitions of Liquid Rocket Explosion Accident	5
References	6
Chapter 2 Basic Principles of Ignition, Combustion and Explosion	9
2.1 Chemical Mechanism of Combustion and Explosion Process	9
2.1.1 Chemical Reaction Rate	9
2.1.2 Chain Reaction	15
2.2 Basic Knowledge of Ignition, Combustion and Explosion	18
2.2.1 Classification of Combustion Phenomena	18
2.2.2 Ignition	20
2.2.3 Hypergolic Ignition Delay Time	25
2.2.4 Thermal Ignition Theory	27
2.2.5 Basic Characteristic of Detonation and Deflagration ...	31
References	37
Chapter 3 Thermal Radiation Effect of Liquid Propellant Explosion	39

3.1	Similitude Theory	39
3.1.1	Similitude and Similitude Theorem	40
3.1.2	Dimension Analysis Method	43
3.2	Analytical Model of Fireball Growing up	49
3.2.1	Fireball Growing up Experiential Model	49
3.2.2	Fireball Growing up Mathematics Model	53
3.2.3	Effect of High Altitude on Fireball Growing up	60
3.2.4	Condition of Fireball Formation of Liquid Propellant Explosion	62
3.3	Fireball Thermal Radiation Model	65
3.3.1	Fireball Thermal Radiation Experiential Model	65
3.3.2	Fireball Thermal Radiation Mathematics Model	67
3.4	Experimental Research on Thermal Radiation Effect of Liquid Propellant Explosion	77
3.4.1	Liquid Propellant Explosion Experimental Equipment	78
3.4.2	System of Experimental Data Measure and Treatment	78
3.5	Evaluation Method of Thermal Radiation Harmfulness of Liquid Rocket Explosion Accident	79
3.5.1	Thermochemistry Balance Calculation	80
3.5.2	Evaluation Criterion of Thermal Radiation Demolishment	81
3.5.3	Evaluation of Thermal Radiation Effect on Liquid Rocket Explosion Accident	85
	References	89

Chapter 4 Air Shock Wave Effect of Liquid Propellant

	Explosion	91
4.1	Introduction	91
4.2	Explosion Phenomena in Air	92
4.2.1	Fundamental Concepts of Shock Wave	92
4.2.2	Explosion Phenomena in Air	93
4.2.3	Swelling Law of Explosion Reaction Products	95

4.2.4	Formation and Propagation of Air Shock Wave	98
4.3	Formation of Air Shock Wave in Liquid	
	Propellant Explosion	99
4.3.1	Classification of Liquid Rocket Explosion	
	Accident Modes	99
4.3.2	Formation Process of Air Shock Wave in Liquid	
	Propellant Explosion	100
4.4	Initial Parameters Determination on Air Shock Wave	104
4.5	Application of Explosion Similitude Law in Determining Air Shock Wave Initial Parameters	110
4.5.1	Explosion Similitude Law	110
4.5.2	Calculation Equations of Air Shock Wave Characteristic Parameters in Liquid Propellant Explosion	112
4.6	Reflect Characteristic of Air Shock Wave	118
4.6.1	Reflect of Air Shock Wave of Explosion on Ground	118
4.6.2	Reflect of Air Shock Wave of Explosion in Air	121
4.7	Demolish Effect of Air Shock Wave on Object	123
4.7.1	Demolish Effect of Air Shock Wave on Buildings	124
4.7.2	Demolish Effect of Air Shock Wave on Human Body	126
4.8	Safe Distance Preventing Air Shock Wave From Damage	127
4.9	TNT Equivalence Factor of Liquid Propellant Explosion	130
4.9.1	Concept of TNT Equivalence Factor	130
4.9.2	TNT Equivalence Factor of Different Combination Liquid Propellant Explosion	131
4.9.3	Effect of Liquid Propellant Quantity on Explosion Power	132
4.9.4	Effect of Liquid Rocket Failure Mode on Explosion Power	135

4. 10	Experimental Research on Hypergolic Liquid Propellant Explosion	137
4. 10. 1	TNT Equivalence Factor of Hypergolic Liquid Propellant Explosion Experiment	137
4. 10. 2	Air Shock Wave Overpressure Measurement Results of Hypergolic Liquid Propellant Explosion Experiment	138
4. 11	Evaluation Method of Air Shock Wave Harmfulness in Liquid Rocket Explosion Accident	143
4. 11. 1	Determination of Initial Condition of Evaluation	143
4. 11. 2	Estimating Harmful Scope of Air Shock Wave Explosion on Ground	144
4. 11. 3	Estimating Harmful Scope of Air Shock Wave Explosion in Air	147
4. 11. 4	Predicting Harmful Scope of Air Shock Wave in Space Shuttle Explosion Accident	149
	References	151
Chapter 5 Formation and Diffusion of Poisonous Gas of		
	Liquid Propellant Explosion	153
5. 1	Introduction	153
5. 2	Liquid Propellant Evaporation in Natural Environment	153
5. 2. 1	Liquid Propellant Evaporation Model without Combustion	154
5. 2. 2	Liquid Propellant Evaporation Characteristic in Soil	158
5. 3	Gradient Transportation Theory of Turbulent Flow Mass Diffusion	172
5. 3. 1	Molecule Diffusion Theory	172
5. 3. 2	Transportation Theory of Turbulent Flow Mass Diffusion	173
5. 3. 3	Basic Equations of Turbulent Flow Mass Diffusion	174

5.4	Calculation Model of Poisonous Gas Diffusion in Air	176
5.4.1	Mass Diffusion Model of Poisonous Rocket Propellant Steam in Accident Site down the Wind	176
5.4.2	Determination of Diffusion Parameters σ_y, σ_z	179
5.4.3	Surface Mass Diffusion Model of Poisonous Propellant Gas	183
5.4.4	Mass Diffusion Model of Poisonous Propellant Gas in A Close Valley	185
5.5	Calculation Model of Poisonous Gas Diffusion in Liquid Rocket Explosion Fireball	185
5.5.1	Quasi-static Mass Diffusion Model of Poisonous Gas in Fireball	186
5.5.2	Convective Mass Diffusion Model of Poisonous Gas in Fireball	186
5.6	Engineering Estimation Method of Quantity of Propellant Remainder Underground after Liquid Rocket Explosion	187
5.7	Experimental Research of Poisonous Propellant Gas Diffusion	188
5.7.1	Measure System of Mass Concentration of Poisonous Propellant Gas in Air	189
5.7.2	Experimental Measure and Results Analysis of Formation and Diffusion of Poisonous Propellant Gas in Air	190
5.8	Evaluation Method of Harmfulness of Poisonous Propellant Gas in Liquid Rocket Explosion Accident	194
5.8.1	Most Endurance Concentration of Poisonous Propellant Gas in Air	195
5.8.2	Engineering Evaluation Method of Damage of Poisonous Propellant Gas	195