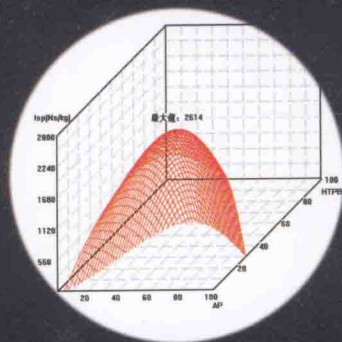




国防科技图书出版基金

火炸药技术系列专著



# 固体推进剂 配方优化设计

Optimization and Design of  
Solid Propellant Formulations

田德余 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

014057390

V512  
09



国防科技图书出版基金

# 固体推进剂配方优化设计

Optimization and Design of Solid Propellant Formulations

田德余 著



V512  
09

国防工业出版社

·北京·



北航

C1742791

01402380



图书在版编目(CIP)数据

固体推进剂配方优化设计 / 田德余著. —北京:  
国防工业出版社, 2013. 8

ISBN 978-7-118-09067-3

I. ①固... II. ①田... III. ①固体推进剂 -  
配方 - 设计 IV. ①V512

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 000409 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 710 × 960 1/16 印张 21 $\frac{1}{4}$  字数 378 千字

2013 年 8 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

**此书呈献给**  
**国防科学技术大学**  
**建校六十周年！**  
**深圳大学建校三十周年！**

## 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  
第六届评审委员会组成人员

主任委员	王峰			
副主任委员	宋家树	蔡镛	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	贺明		
委员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁
	李德毅	杨伟	肖志力	吴有生
	吴宏鑫	何新贵	张信威	陈良惠
	陈冀胜	周一宇	赵万生	赵风起
	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	魏炳波
本书主审委员	赵风起			

## 丛书序

火炸药包括枪炮发射药、推进剂和炸药,是陆、海、空、二炮武器装备实现“远程打击、高效毁伤”的动力能源、威力能源,是武器装备的重要组成部分,是大幅度提高武器装备作战效能最直接、最根本的源泉所在。武器装备的需求,有力促进了火炸药技术的发展;而火炸药的创新发展,又推动了武器装备的更新换代,甚至促使战争模式发生革命性变化。瑞典国防研究院一位专家曾说过:在现有基础上,使武器弹药的威力提高3倍以上时,武器装备的品种和战争模式将发生革命性变化,届时,战场上的毁伤与防护将出现不对称,占有技术和装备优势的一方,将完全占据战争的主动权。

我国火炸药行业经过几十年奋斗,从仿制走向自行研制,至今已形成一定规模的火炸药科研生产体系,为国防科技和武器装备发展做出了重要贡献。近十年来,在总装备部和国防科工局亲切关怀和领导下,火炸药行业技术进步取得令人瞩目的成绩,获得了大量创新性科研成果。

在国防工业出版社的大力支持下,我们开展《火炸药技术系列专著》的编著,目的是反映近十年来火炸药行业构建自主创新平台,加强与前沿技术交叉融合,努力提高自主创新能力等取得的丰硕成果。系列专著将充分展示这些成果的科学技术水平,体现火炸药及相关学科扎实的理论、新颖的学术思想和显著的技术创新。火炸药技术系列专著的出版,将为加强科学发展观的实践,为国防科技和武器装备发展,为科技人才培养做出贡献。

《火炸药技术系列专著》包括以下内容:

1. 先进火炸药设计与制备的理论和实践;
2. 火炸药装药设计与工艺理论及应用技术;
3. 火炸药用新型含能材料与功能材料技术;
4. 火炸药绿色制造与数字化工艺技术;
5. 新概念火炸药技术;
6. 火炸药燃烧爆炸基础理论与基础技术;



7. 火炸药性能测试与评估技术;
8. 废弃火炸药的处理与再利用技术;
9. 固体推进剂配方优化设计。

上述内容,将充分反映著作者近年来在相关领域的最新科研成果,突出先进性和创新性;同时针对性地参考和引用国内外相关研究领域的最新科研动态,特别注重与相关化学、物理学、弹道学、材料力学、测试学、空气动力学、生物学、光学等学科的交叉融合,系统地、全面地描述当今火炸药科学与技术发展的最新研究成果,预测未来新军事变革和信息化战争对火炸药技术的需求、火炸药技术的发展趋势和应用前景。这些专著是火炸药专业人员和相关专业科技人员、管理人员的重要参考书和必备的火炸药学术著作。

总装备部火炸药技术专业组

2010年3月

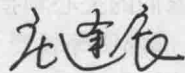
## 序

该书是首次出版的有关推进剂配方优化设计的专著,它概述了能量特性计算原理和方法,研究了多种优化设计和图形处理方法,首次用最新的遗传算法实现了三至八种配方组份的能量特性优化设计,能迅速地优化出最高比冲下固体推进剂的最佳配比;同时设计和开发了等性能三角图、三维立体图、二维等高图等图像处理软件,能形象、直观地反映出推进剂组分与能量特性的关系。

推进剂的比冲大小直接影响火箭和导弹的射程,为此,多年来人们广泛应用优化设计和图像法寻找最高能量特性的最佳配比。本书采用图像法及多种优化方法对常用的固体推进剂进行了配方优化设计,探索了高氮化合物的能量特性,选择某些高氮化合物进行高能和高氮无烟推进剂优化计算和图形绘制研究,探讨了可实现的高能及高能无烟推进剂的配方和途径。

该书是作者及其学生和有关同仁多年科研和教学成果精华的一部分,相关成果曾获国防科工委科技成果奖、广东省和深圳市科技进步奖,在推进剂配方优化设计等方面具有多项独特的创新,对从事推进技术科研、教学和生产的师生及科技工作者有重要的使用价值,对提高我国推进技术领域的科学技术水平具有重要意义。

中国科学院院士



2012年9月

# 前 言

人们在进行各种设计工作时,总是力求从各种可能的方案中选择最优方案。在自然科学、社会科学、工程设计、现代化管理以及人们日常生活所涉及的诸多领域中广泛存在着大量的最优化问题。

多年来人们用多种方法来提高能量,在现有原材料基础上,广泛应用优化设计和图像法寻找最高能量特性的最佳配比,推进剂的能量(比冲)提高直接影响到火箭和导弹的射程,为此,多年来人们用多种方法来提高能量,在现有原材料基础上,广泛应用优化设计和图像法寻找最高能量特性的最佳配比。采用图像法及多种优化方法进行了固体推进剂的配方优化设计。

在现有原材料和挖掘新材料的基础上,广泛应用优化设计和图像法寻找探索了高能及高能无烟推进剂的配方最高能量特性的最佳配比。本书着重研究了化学推进剂能量特性计算的原理和方法,并开发出能量特性计算的大型软件包。首次用最新的遗传算法实现了三至八种配方组份的能量特性优化设计,能迅速地优化出最高比冲下固体推进剂的最佳配比;同时设计和开发了等性能三角图、三维立体图、二维等高图等图像处理软件,能形象、直观地反映出推进剂组分与能量特性的关系。本书在化学推进剂配方优化设计等方面具有多项独特的创新,不少已应用于科研实际中,对提高我国在推进剂领域的科学技术水平具有重要意义。

本书是作者和有关同仁多年科研和教学成果精华的一部分,部分成果曾获国防科工委科技成果奖,曾获广东省和深圳市科技进步奖,并经多年辛劳,整理成书。在此感谢国防科技大学及深圳大学的支持和帮助,感谢中科院庄逢辰院士欣然为本书写序,感谢赵风起教授以及“国防科技图书出版基金”评审委员会的专家们的关心和指导。感谢刘剑洪、庞爱民、张炜、张小平、王明良、洪伟良、贵大勇、邢郁明等教授、专家们的关心、支持和帮助。对参与部分编程、排版工作的朱才镇博士、梁荣坚、赵彦晖、杨斌、郭铭、杨莎等同志的辛勤劳动表示衷心的感谢。由于作者水平所限,书中疏漏或错误之处,望批评指正(联系邮箱为 [tdy8181@sina.com](mailto:tdy8181@sina.com))。

著 者

2012 年 12 月

# 目 录

第1章 绪论	1
第2章 推进剂能量特性的计算原理和方法	7
2.1 概述	7
2.2 最小自由能的计算方法和原理	8
2.3 用 FORTRAN 和 C++ 语言编制的程序	12
2.4 用 Matlab 和 C++ 语言编制的程序框图*	19
2.5 计算结果与常用程序计算结果的比较	25
2.6 某些单元推进剂的能量特性	26
2.7 影响能量特性计算结果的误差分析	30
第3章 用模式搜索法求推进剂最高比冲的最佳配比	34
3.1 概述	34
3.2 原理和方法	36
3.3 优化结果与讨论	39
第4章 混合离散优化及图形绘制法简介	47
4.1 概述	47
4.2 约束变尺度法	50
4.3 混合离散变量直接搜索法	50
4.4 图形绘制的总体思路及处理流程	56
4.5 等性能三角图的绘制及过程	57
4.6 推进剂等高线图的绘制	61
4.7 推进剂三维图的绘制	63
4.8 推进剂二维图的绘制	65
第5章 遗传优化法	70
5.1 概述	70
5.2 原理和方法	71
5.3 遗传算法程序流程	77
5.4 计算结果与讨论	80

小结 .....	90
<b>第 6 章 NEPE 推进剂的优化设计及图形绘制 .....</b>	<b>91</b>
6.1 概述 .....	91
6.2 NEPE-1(PEG-NG-BTTN/AP-HMX/Al)推进剂 .....	93
6.3 NEPE-2(PEG-NG-BTTN/AP-HMX(2)/Al)推进剂 .....	98
6.4 NEPE-3(PEG-NG-BTTN/CL20-RDX/Al)推进剂 .....	103
6.5 NEPE-4(PEG-NG-BTTN/ADN-RDX/Al)推进剂 .....	111
6.6 NEPE-5(PEG-NG-BTTN/ADN-RDX(2:1)/Al)推进剂 .....	116
6.7 NEPE-6(PEG-BAMO/CL20/Al)推进剂 .....	119
6.8 NEPE-7(PEG-BAMO/AND/Al)推进剂 .....	125
6.9 NEPE-8(PEG/ADN/Al)推进剂 .....	130
小结 .....	136
<b>第 7 章 CMDB 推进剂的优化设计及图形绘制 .....</b>	<b>140</b>
7.1 概述 .....	140
7.2 CMDB-1(NC12-NG-DINA/AP-RDX/Al)推进剂 .....	141
7.3 CMDB-2(NC12-NG-TEGN/RDX-AP/Al)推进剂 .....	145
7.4 CMDB-3(NC12-NG-TEGN/RDX-CL20/Al)推进剂 .....	149
7.5 CMDB-4(NC12-NG-TEGN/RDX-AP/Al)推进剂 .....	154
7.6 CMDB-5(NC12-NG/RDX-CL20/Al)推进剂 .....	158
7.7 CMDB-6(NC12-NG-ADN-RDX-Al)推进剂 .....	163
小结 .....	169
<b>第 8 章 复合固体推进剂的优化设计及图形绘制 .....</b>	<b>172</b>
8.1 概述 .....	172
8.2 丁羟复合固体推进剂 .....	172
8.3 丁羧复合固体推进剂 .....	188
8.4 四氢呋喃复合固体推进剂 .....	194
小结 .....	204
<b>第 9 章 高氮化合物的简要性能及能量特性计算 .....</b>	<b>206</b>
9.1 概述 .....	206
9.2 噁类化合物及其能量特性 .....	206
9.3 唑类化合物及其能量特性 .....	212
9.4 偶氮或叠氮类化合物及其能量特性 .....	216
9.5 呋咱类化合物及其能量特性 .....	218
9.6 高氮聚合物及其能量特性 .....	220

9.7	高氮化合物能量特性综述 .....	222
小结	.....	226
<b>第10章</b>	<b>高氮高能推进剂的优化设计及图形绘制 .....</b>	<b>228</b>
10.1	概述 .....	228
10.2	聚叠氮缩水甘油醚推进剂 .....	228
10.3	GAP-1(GAP/CL20/Al)推进剂 .....	230
10.4	GAP-2(GAP/CL20-RDX/Al)推进剂 .....	235
10.5	GAP-3(GAP/ADN1-RDX2/Al)推进剂 .....	240
10.6	GAP-4(GAP/ADN-RDX/Al)推进剂 .....	246
10.7	GAP-5(GAP/BAMO-AP-RDX/Al)推进剂 .....	251
10.8	PGN(PGN/CL20/Al)推进剂 .....	256
10.9	PGN/ADN/Al推进剂 .....	261
小结	.....	266
<b>第11章</b>	<b>高氮无烟推进剂的优化设计及图形绘制 .....</b>	<b>271</b>
11.1	概述 .....	271
11.2	GAP-ADN-DAAOF推进剂 .....	274
11.3	GAP-ADN-DAT推进剂 .....	279
11.4	GAP-ADN-DNADF推进剂 .....	284
11.5	GAP-ADN-DNAOFAF推进剂 .....	290
11.6	GAP-ADN-DNAOF推进剂 .....	295
11.7	GAP-ADN-CDATF推进剂 .....	300
11.8	THF-BAMO-ADN-DAAOF推进剂 .....	305
小结	.....	310
<b>附录</b>	.....	<b>314</b>
附录A	部分主要原材料性能及理论比冲计算值 .....	314
附录B	单位换算 .....	324

# Contents

<b>Chapter I</b>	<b>Introduction</b>	1
<b>Chapter II</b>	<b>The principle and method of calculating energy characteristics</b>	7
2.1	Introduction	7
2.2	Principles of free-energy minimization and computation method	8
2.3	Program written in FORTRAN and C ++ language	12
2.4	Diagram of the program written in MATLAB and C ++ language	19
2.5	Comparison of the results from different programs	25
2.6	The energy characteristics of some mono-propellant	26
2.7	Error analysis of the effects on the calculation of the energy characteristics	30
<b>Chapter III</b>	<b>Pattern search method for best ratio of highest propellant specific impulse</b>	34
3.1	Introduction	34
3.2	The principle and method of pattern search method	36
3.3	Results of optimization and discussions	39
<b>Chapter IV</b>	<b>Introduction of mixed discrete optimization and graphic drawing method</b>	47
4.1	Introduction	47
4.2	Constrained variable metric method	50
4.3	Hybrid discrete variables direct search method	50
4.4	MDOD algorithm for logical structure process	56
4.5	Principles of isoperformance trigonal diagram	57
4.6	The propellant contour mapping	61
4.7	Propellant three-dimensional mapping	63
4.8	Propellant two-dimensional mapping	65

<b>Chapter V Genetic algorithm optimization method</b> .....	70
5.1 Introduction .....	70
5.2 The Principle and method .....	71
5.3 Program flow of Genetic algorithm .....	77
5.4 Calculation of results and discussions .....	80
The Summary .....	90
<b>Chapter VI Optimization design and graphic drawing of NEPE propellant</b> .....	91
6.1 Introduction .....	91
6.2 NEPE-1 ( PEG-NG-BTTN/AP-HMX/Al ) Propellant .....	93
6.3 NEPE-2 ( PEG-NG-BTTN/AP-HMX ( 2 ) / Al ) Propellant .....	98
6.4 NEPE-3 ( PEG-NG-BTTN/CL20-RDX/Al ) Propellant .....	103
6.5 NEPE-4 ( PEG-NG-BTTN/ADN-RDX/Al ) Propellant .....	111
6.6 NEPE-5 ( PEG-NG-BTTN/ADN-RDX ( 2 : 1 ) / Al ) Propellant .....	116
6.7 NEPE-6 ( PEG-BAMO/CL20/Al ) Propellant .....	119
6.8 NEPE-7 ( PEG-BAMO/ADN/Al ) Propellant .....	125
6.9 NEPE-8 ( PEG/ADN/Al ) Propellant .....	130
The Summary .....	136
<b>Chapter VII Optimization design and graphic drawing of CMDB propellant</b> .....	140
7.1 Introduction .....	140
7.2 CMDB-1 ( NC12-NG-DINA/AP-RDX/Al ) Propellant .....	141
7.3 CMDB-2 ( NC12-NG-TEGN/RDX -AP/Al ) Propellant .....	145
7.4 CMDB-3 ( NC12-NG-TEGN/RDX -CL20/Al ) Propellant .....	149
7.5 CMDB-4 ( NC12-NG-TEGN/RDX -AP/Al ) Propellant .....	154
7.6 CMDB-5 ( NC12-NG/RDX-CL20/Al ) Propellant .....	158
7.7 CMDB-6 ( NC12-NG-ADN-RDX-Al ) Propellant .....	163
The Summary .....	169
<b>Chapter VIII Optimization and design of composite solid propellant and graphing</b> .....	172
8.1 Introduction .....	172
8.2 The HTPB composite solid propellant .....	172
8.3 The CTPB composite solid propellant .....	188
8.4 Tetrahydrofuran composite solid propellant .....	194



The Summary .....	204
<b>Chapter IX Properties and energy characteristics of high nitrogen</b>	
<b>compound calculations</b> .....	206
9.1 Introduction .....	206
9.2 The Pyrazine compounds and their energy characteristics .....	206
9.3 The azole compounds of their energy characteristics .....	212
9.4 Azo and azide compounds and their energy characteristics .....	216
9.5 Furazan compounds and their energy characteristics .....	218
9.6 High-nitrogen polymer and its energy characteristics .....	220
9.7 Summary of the energy characteristics of high-nitrogen compounds .....	222
The Summary .....	226
<b>Chapter X Optimization of high-nitrogen and high energy propellant</b>	
<b>and graphing</b> .....	228
10.1 Introduction .....	228
10.2 Poly-glycidyl azide ether propellant .....	228
10.3 GAP/CL20/Al propellant .....	230
10.4 GAP/CL20-RDX/Al propellant .....	235
10.5 GAP/ADN1-RDX2/Al propellant .....	240
10.6 PGN/ADN/AL propellant .....	246
10.7 GAP/BAMO-AP-RDX/Al propellant .....	251
10.8 PGN/CL20/Al propellant .....	256
10.9 PGN/ADN/AL propellant .....	261
The Summary .....	266
<b>Chapter XI Optimization of high-nitrogen and smokeless propellant</b>	
<b>and graphing</b> .....	271
11.1 Introduction .....	271
11.2 GAP-ADN-DAAOF propellant .....	274
11.3 GAP-ADN-DAT propellant .....	279
11.4 GAP-ADN-DNADF propellant .....	284
11.5 GAP-ADN-DNAOFAF propellant .....	290
11.6 GAP-ADN-DNAOF propellant .....	295
11.7 GAP-ADN-CDATF propellant .....	300
11.8 THF-BAMO-ADN-CDATF propellant .....	305
The Summary .....	310