

炸药热安全性 理论与分析方法

陈朗 马欣 著

ZHAYAO REANQUANXING
LILUN YU FENXI FANGFA



国防工业出版社

National Defense Industry Press

本书获得爆炸科学与技术国家重点实验室
(北京理工大学)出版基金资助

陈朗 马欣 著

ZHAYAO REANQUANXING
LILUN YU FENXI FANGFA

炸药热安全性 理论与分析方法



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是关于炸药热安全性的基础理论、计算方法和实验技术的专著。全书共7章,包括:炸药反应动力学基础理论;单质炸药热爆炸理论和计算;单组元混合炸药烤燃研究;多组元混合炸药热反应研究;熔铸炸药热反应研究;烤燃炸药反应剧烈程度分析;典型装药热安全性计算分析等内容。

本书可供从事火炸药技术、弹药工程和安全技术的科研人员、教师、工程师及相关专业的研究生阅读或参考。

图书在版编目(CIP)数据

炸药热安全性理论与分析方法/陈朗,马欣著. —北京:国防工业出版社,2015.12

ISBN 978-7-118-10473-8

I. ①炸... II. ①陈... ②马... III. ①炸药-热学-安全性理论 IV. ①TQ560.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 272900 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 880 × 1230 1/32 印张 5½ 字数 171 千字

2015 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 52.00 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

前言

PREFACE

炸药在热环境下会发生分解反应,同时释放热量。其热分解反应速度与温度密切相关,一般情况下,反应速度随温度上升呈指数增加。当炸药在自身分解放热或外界热刺激下,局部温度到达一定数值时,炸药反应速度会迅速增加,导致炸药发生点火。对于不同种类的炸药和不同的装药状态,炸药点火后有可能出现几种反应情况:一是炸药快速反应不能持续传播,反应在短时间内停止,即点火后熄灭;二是反应以火焰波形式持续传播,即点火后燃烧;三是从燃烧转为爆轰,反应以爆轰波形式传播,即炸药爆炸。显然,如何预测和防止炸药在热作用下的意外点火,点火后尽可能不发生剧烈的燃烧和爆炸,是炸药安全性研究需要解决的问题。

外界对炸药的热作用形式多种多样。有直接加热炸药,例如边界热传导、热对流和热辐射、火焰作用等;还有机械刺激作用下炸药的加热,例如,摩擦或剪切加热炸药导致点火等。按照炸药点火和起爆的“热点理论”,炸药燃烧和爆炸反应都可以被认为是炸药局部热反应加速,导致快速反应迅速传播的结果。因此,研究炸药在热作用下的反应过程,对深入认识外界刺激下炸药反应机理和规律具有重要意义。

对于炸药热安全性分析和评价而言,人们主要关心以下三方面的问题:一是在一定的整体热环境或局部热刺激下,炸药是否会发生点火,即如何确定炸药发生点火的临界条件;二是炸药发生点火的时间和点火区域,即如何准确预测炸药发生点火的时间和点火区的范围;三是炸药点火后是发生燃烧还是爆炸,即如何预测炸药点火后的反应剧烈程度及其毁伤范围。前两个问题主要与炸药点火前的热反应过程有关,而第三个问题与炸药点火后的燃烧和爆炸反应状态相关。无

论是点火前的热反应和点火后的燃烧爆炸,实质上都可以看作是一种带化学反应的传热和传质过程。因此,可以利用流体力学、传热量学、化学反应动力学以及燃烧和爆轰学的相关理论和计算方法,进行分析和处理。

第1章主要介绍传热传质和化学反应动力学基本理论,主要包括流体力学的基本方程、流体输运的主要物性参数、热传递的基本形式、热分解反应动力学模型、可逆反应的过渡态理论等。

1928年,前苏联科学家谢苗诺夫首次提出了热爆炸概念,认为炸药系统热生成速率与温度是强非线性指数关系,而热量损失速率与温度是线性关系。如果系统温度升高,热生成速率随温度呈指数形式提高,会释放更多的热量,热积累与热损失会失衡,最终导致系统发生点火。他通过均温系统热生成和热损失之间的平衡关系,得到了热爆炸的基本判据。之后,冯·卡门斯基把这个理论推广到了非均温系统。直到现在,这一理论仍然是炸药热反应研究的基础。

第2章介绍了谢苗诺夫和冯·卡门斯基的经典热爆炸理论,采用炸药多步热分解反应动力学模型,对几种典型单质炸药一维热爆炸过程进行了数值计算分析,给出了炸药热爆炸特征。

炸药热安全性的分析实验方法通常有两类:一类是炸药热分析实验,包括差热分析法(DTA)、差示扫描量热法(DSC)、热重分析法(TG)、微热量热法(MC)、绝热加热量热法(ARC)等;另一类是炸药烤燃实验(Cook-off test)。烤燃实验是对一定尺寸的炸药装药结构,按一定速率进行加热,通过测量炸药温度变化和观测炸药点火后的反应情况,获得炸药热安全性能。炸药热分析实验虽然具有较高的测量精度,但是只能对很小量的炸药粉体进行热反应分析。由于炸药装药与炸药粉体在结构组成上有很大区别,因此,通过炸药热分析实验获得的炸药热反应规律,难以用于实际炸药装药热安全性分析和评价。而对于炸药烤燃实验,由于实验炸药与实际装药状态基本一致,还可以根据需要很方便地改变装药尺寸、约束条件和加热条件,因此,能够全面准确地研究实际炸药装药的热安全性。

在炸药热安全性研究中,如果只是采用烤燃实验方法进行研究,实验成本会很高,况且实验测得的数据有限,不能获得炸药烤燃反应

细节。对炸药烤燃过程进行数值模拟计算,可以方便地改变实验条件,对炸药的热反应规律进行细致深入的分析,另外,还能够对极端热环境和复杂装药结构下,炸药热安全性进行定量的预测。因此,随着现代计算技术的快速进步,近十多年来,炸药烤燃数值模拟计算已成为研究炸药热安全性的重要手段。

第3章介绍了炸药烤燃实验和数值模拟计算的发展历程和研究现状,给出了炸药慢速烤燃和火烧快速烤燃的实验方法;针对以 HMX 和 CL-20 为基的单组元混合炸药,采用烤燃实验,研究了不同尺寸和加热速率下炸药装药的热反应特征;介绍了单组元混合炸药烤燃计算模型。模型中考虑了炸药热传导、固相相变、多步热分解反应和辐射传热等多种因素;通过数值模拟计算方法,给出以 HMX 和 CL-20 为基的单组元混合炸药热反应特征和规律。

在实际使用的炸药中,有很多是多组元混合炸药,即由两种或两种以上单质炸药组成的混合炸药。相对于单组元混合炸药,多组元混合炸药热反应更为复杂,同时存在不同单质炸药的热分解反应,还存在不同炸药热分解产物之间可能发生的反应。因此,计算分析多组元混合炸药热反应是一个难题。在多组元混合炸药研究中,如果能够预测计算不同配方炸药热安全性,可为炸药配方设计提供有效的参考。

第4章介绍了多组元混合炸药烤燃计算模型,给出了多组分网格单元计算方法;针对 HMX 和 TATB 为基的二组元混合炸药,采用多步热分解反应动力学模型,描述单质炸药热分解反应,计算多组元混合炸药各组分反应对炸药热量的贡献,同时考虑了 TATB 分解产物与粘结剂之间的交叉反应,进行了多组元混合炸药热反应的数值模拟计算,给出了炸药组分变化对热反应性能的影响规律。

在实际的战斗部装药中,有很大部分是熔铸炸药装药。在熔铸炸药烤燃中,部分炸药在一定的加热温度下会先熔化,变成液态,使炸药热反应变得更复杂。炸药从固体变成液体,出现的相变吸热、对流传热以及炸药物性参数变化,会对炸药热传递过程和温度分布产生很大影响,使炸药热反应和点火后的反应剧烈程度发生变化。因此,需要对熔铸炸药烤燃特征进行专门研究。

第5章介绍了以 TNT 和 DNAN 为基的单质熔铸炸药, DNAN 与

HMX 混合熔铸炸药的烤燃实验,给出了熔铸炸药在不同加热条件下的熔化相变特征和热反应规律;介绍了熔铸混合炸药的热反应计算模型,模型考虑了各组分炸药相变和热分解反应,通过对 DNAN/HMX 熔铸炸药烤燃过程进行数值模拟计算,给出了炸药熔化相变以及组分变化对热反应的影响规律。

对烤燃炸药点火后反应剧烈程度的分析和预测,是炸药安全性研究的重要内容。只有全面了解炸药反应剧烈程度,才能有效判断炸药反应后的破坏情况,对炸药危险性等级进行准确评价。由于炸药点火后,刚开始处于局部燃烧状态,受炸药性质和外界的条件的影响,可能出现熄灭、持续燃烧、燃烧转爆轰和爆轰等情况。对于炸药爆轰,其反应过程几乎不受周围条件的影响,可以用爆轰理论和计算方法进行处理,而炸药燃烧过程在很大程度上受到周围环境条件的影响,对于相同炸药在不同装药条件下,其燃烧反应状态会有很大差别。因此,研究炸药在不同约束条件下的燃烧状态,特别是燃烧转爆轰特征,对炸药安全性分析十分重要。

第 6 章介绍了炸药燃烧基本原理、炸药燃烧反应剧烈程度分析方法、密实炸药燃烧转爆轰基本特征。给出了炸药燃烧转爆轰实验方法,分析了不同约束条件下 JOB-9003 压装炸药燃烧转爆轰情况;介绍了基于压力的高密实炸药燃烧计算模型,给出了计算装药壳体膨胀和破裂的网格分离和节点随机失效方法;通过 JOB-9003 炸药燃烧转爆轰的数值模拟计算,给出了约束条件对炸药燃烧及燃烧转爆轰的影响。

不同武器弹药中,炸药装药结构多种多样,受到的热作用形式也有很大差别。在实际炸药使用中,人们更关心整个装药结构或整个弹药的热安全性。因此,炸药热安全性理论与分析方法,只有能够对各种复杂装药结构的热安全性进行定量的预测和分析,才有实际应用价值。

第 7 章介绍了利用炸药热全性理论和计算方法,对典型的炮弹战斗部熔铸装药和固体推进剂装药进行计算分析。主要介绍了炮弹战斗部熔铸装药烤燃中,弹体放置方式对熔铸装药热反应的影响,在固体推进剂装药计算中,介绍了考虑热和力的耦合作用的数值模拟计算

方法,给出了装药结构热反应和点火燃烧全过程的计算分析。

书中所涉及的内容,主要是我们在北京理工大学的研究工作,得到了国家重大安全基础研究项目(国防 973 项目:61383)、国家自然科学基金 - NSAF 联合基金重点项目(10776100)、国防预研重大专项、北京理工大学爆炸科学技术国家重点实验室基金(YBKT16-08)、中国工程物理研究院化工材料研究所、中国工程物理研究院结构总体研究所、西安近代化学研究所、航天科技集团第四研究院四十一所和四十二所、兵器工业 805 厂的资助。在研究中得到了北京理工大学机电学院和材料学院很多老师和同学的支持和帮助。书中部分实验工作与中国工程物理研究院化工材料研究所、西安近代化学研究所和兵器工业 805 厂等单位协作完成,得到了这些单位很多同志的支持和帮助。在此表示衷心感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在缺点或不足,望读者不吝指教。

陈朗

2015 年 7 月于北京

目录

CONTENTS

第1章 炸药反应动力学基本理论	1
1.1 流体输运基本方程 ^[1,2]	2
1.2 流体输运的主要物性参数 ^[3]	5
1.3 热传递基本形式 ^[5]	7
1.4 化学反应动力学基本理论 ^[6]	8
1.5 小结	12
参考文献	12
第2章 单质炸药热爆炸理论和计算	13
2.1 热爆炸基本理论	14
2.2 单质炸药热分解反应动力学模型	17
2.3 炸药一维热爆炸数值计算	18
2.3.1 炸药一维热爆炸实验	18
2.3.2 炸药一维热爆炸计算模型	18
2.3.3 三种单质炸药热安定性对比	22
2.4 小结	26
参考文献	26
第3章 单组元混合炸药烤燃研究	28
3.1 炸药烤燃研究情况	28

3.1.1	炸药烤燃实验研究	28
3.1.2	炸药烤燃数值模拟计算研究	32
3.2	炸药慢速烤燃实验	34
3.2.1	炸药多点测温烤燃实验	35
3.2.2	炸药烤燃弹实验	42
3.3	炸药火烧快速烤燃实验	44
3.4	炸药慢速烤燃的热反应数值模拟	47
3.4.1	单组元混合炸药热反应计算模型	47
3.4.2	炸药内部温度和组分变化分析	52
3.5	炸药火烧烤燃数值模拟	63
3.5.1	炸药火烧烤燃计算模型	63
3.5.2	火烧烤燃下 H-1 炸药温度	66
3.6	小结	70
	参考文献	70
第 4 章	多组元混合炸药热反应研究	75
4.1	多组元混合炸药 PBXC10 炸药烤燃实验	75
4.1.1	PBXC10 炸药多点测温烤燃实验	75
4.1.2	PBXC10 炸药火烧烤燃实验	80
4.2	多组元混合炸药多步热分解反应计算	81
4.3	小结	92
	参考文献	92
第 5 章	熔铸炸药热反应研究	93
5.1	单组元熔铸炸药热反应	94
5.1.1	熔铸炸药烤燃弹实验	94
5.1.2	熔铸炸药热反应数值模拟计算	96
5.2	多组元熔铸炸药热反应	102

5.2.1	DH-1 炸药多点测温烤燃实验	102
5.2.2	DH-1 炸药热反应数值模拟计算	105
5.3	柱形装药和药型罩装药热反应特征	114
5.4	小结	119
	参考文献	119
第 6 章	烤燃炸药反应剧烈程度分析	120
6.1	炸药燃烧基本特征	120
6.1.1	传导燃烧	121
6.1.2	对流燃烧	125
6.1.3	烤燃炸药燃烧反应剧烈程度分析方法	127
6.2	密实炸药装药燃烧转爆轰	130
6.2.1	密实炸药燃烧转爆轰基本特征	130
6.2.2	JOB-9003 炸药燃烧转爆轰实验	133
6.2.3	炸药燃烧转爆轰数值模拟分析	135
6.2.4	约束条件对炸药燃烧转爆轰的影响	139
6.3	小结	142
	参考文献	142
第 7 章	典型装药热安全性计算分析	144
7.1	炮弹熔铸装药热安全性分析	144
7.2	固体推进剂装药热安全性分析	153
7.2.1	固体推进剂装药热力耦合计算方法	154
7.2.2	推进剂装药热反应特征	157
7.2.3	推进剂装药点火后反应剧烈程度分析	161
7.3	小结	165
	参考文献	165

第1章

炸药反应动力学基本理论

炸药在热作用下的热分解、点火燃烧和爆炸,都涉及炸药的化学反应过程,其结果都是发生了化学能的释放,如气体产生,温度和压力的升高,物质间发生热量传递和流动。在炸药热安全性研究中,最理想的分析方法是能够对炸药本质化学反应过程,从微观(原子、分子尺度)、细观(颗粒尺度)到宏观(装药尺度)的全面定量描述。目前,尽管炸药反应的微细观计算已取得了很大进展,但还不能够与宏观理论计算进行有效地结合,解决工程计算问题。在炸药装药反应计算中,还需要忽略化学反应的细节过程,对问题进行必要的简化,才能够获得定量的计算结果。现有炸药反应动力学理论,主要基于两个基本假设:一是连续介质假设,认为炸药及其反应产物为连续介质,可采用流体力学理论和计算方法,对炸药反应中的质量、动量和能量变化进行分析;二是炸药唯像反应假设,即以炸药消耗程度,描述炸药反应进程,其反应速率与温度或压力相关,而不考虑炸药化学反应的具体过程。通常采用合适的化学反应动力学模型,对炸药不同的反应过程进行计算描述。基于这两个基本假设,目前,人们主要是采用考虑化学反应的流体力学理论和分析方法,研究炸药热安全性涉及的炸药反应动力学问题。因此,需要流体力学、传热学和化学反应动力学的基础知识和计算方法。

本章主要介绍流体输运基本方程、热量传递基本形式、流体输运涉及的物性参数,以及与炸药热分解相关的化学反应动力学模型。目

的是使读者对炸药热安全性分析涉及的主要基础理论有所了解,能够更容易理解本书其他章节的内容。

1.1 流体输运基本方程^[1,2]

流体力学分析主要是建立在连续介质假设基础上。连续介质假设认为对于研究对象,其内部空间中由连续的流体质点所充满,流体质点尺寸比流体分子平均自由程大得多,但又远小于流场中的宏观特征尺度。流动过程满足一切宏观物理规律及性质,因此可以用流体力学基本方程组来描述流体输运过程。

在描述流体输运过程时,一般采用欧拉和拉格朗日两种描述方法。欧拉法主要研究空间中某一固定位置,流体质点的参量变化,如果获得了空间中每一位置的流体质点参量变化,就能知道整个空间的流体输运情况。拉格朗日法是研究系统内,流体某一质点参量随时间的变化,如果获得了每一流体质点参量,也同样能够了解整个系统的流体输运情况。

这两种方法分别用于研究不同的作用过程。例如,在炸药热安全分析中,对于炸药点火前内部的热传导和自热反应,适合用欧拉法进行计算分析;而对于炸药点火后的燃烧或爆炸反应,我们主要关心反应剧烈程度和毁伤效应,可采用拉格朗日法计算产物膨胀和壳体破片飞散。

连续介质输运过程都遵守质量、动量和能量守恒定律,由质量、动量和能量三个基本守恒方程进行描述。

1. 质量守恒方程

单位时间内,流体微元体中质量的增加,等于同一时间间隔内流入该微元的净质量。

可以得出质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1.1)$$

采用散度 ∇ ,式(1.1)可表示为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1.2)$$

式中: ρ 为流体密度, u, v 和 w 分别为流体微元件在 x, y 和 z 轴向的速度, t 为时间。

2. 动量守恒方程

动量守恒方程实际上是牛顿第二定律, 即微元体中流体的动量对时间的变化率, 等于外界作用在该微元体上的各种力之和。可导出 x, y 和 z 三个方向的动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x \quad (1.3a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y \quad (1.3b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{w}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (1.3c)$$

式中: p 为流体微元体上的压力; $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}$ 和 τ_{zx} 等为作用在微元体表面上的粘性应力的 τ 分量; F_x, F_y 和 F_z 为微元体上的体力。

3. 能量守恒方程

能量守恒方程实际上是热力学第一定律。微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流量, 加上体力与面力对微元体所做的功。如果以内能和动量表示总能量, 能量守恒方程可表示为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \mathbf{V} \right] \\ &= \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \\ & \quad \frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} + \\ & \quad \frac{\partial(u \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zx})}{\partial z} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \\ & \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho f \cdot V \end{aligned} \quad (1.4)$$

式中: e 为内能; q 为内部热源释放的热量。

由于内能 e 与温度 T 之间存在一定关系, 即 $e = c_p T$, 其中 c_p 是比热容。如果不考虑动能和体积力的做功, 把粘性力的做功也作为内部热源考虑, 可得到以温度 T 为变量的能量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u T) = \operatorname{div}\left(\frac{k}{c_p} \operatorname{grad} T\right) + S_T \quad (1.5)$$

式(1.5)可写成展开形式, 即

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial z}\right) + S_T \end{aligned} \quad (1.6)$$

式中: c_p 为比热容; T 为温度; λ 为流体的热导率; S_T 为内热源。

综合各基本方程式(1.2)、式(1.3)、式(1.6), 发现有 6 个未知量, 还需要补充状态方程方程组才能封闭, 即

$$p = p(\rho, T) \quad (1.7)$$

比较三个基本的方程式(1.2)、式(1.3)和式(1.5), 可以看出, 虽然这些方程中因变量各不相同, 但它们均反映了单位时间单位体积内物理量的守恒性质。如果用 ϕ 表示通用变量, 则上述各控制方程都可以表示成以下通用形式:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u\phi) = \operatorname{div}(\Gamma \operatorname{grad}\phi) + S \quad (1.8)$$

其展开形式为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z}\right) + S \end{aligned} \quad (1.9)$$

式中: ϕ 为通用变量, 可以代表 u 、 v 、 w 、 T 等求解变量; Γ 为广义扩散系

数; S 为广义源项。

式(1.8)中各项依次为瞬态项、对流项、扩散项和源项。对于特定的方程, ϕ 、 Γ 和 S 具有特定的形式。

1.2 流体输运的主要物性参数^[3]

求解输运方程, 涉及的物理性质主要有热容、密度、热导率、热扩散性、黏性以及物质扩散系数等。这些物性参数与系统的热力学状态相关。一般情况下, 固体炸药都有固定的热容、密度和热导率, 但在加热过程中, 部分参数会随着温度变化。在相关炸药性能的参考文献中^[4], 提供了各种炸药的相关参数。在炸药反应中, 气相和液相粘性系数和扩散系数也是重要的参数。

1. 比热容

比热容是衡量系统热惯量的参数, 它代表了系统抵抗内能(温度)变化的能力。因此, 比热容仅对瞬态热传导有影响, 对稳态热传导却没有影响。它在数学上被定义为

$$C = \left(\frac{\partial q}{\partial T} \right)_{\text{path}} \quad (1.10)$$

在恒定体积条件下, 比热容与内能相关, 即

$$C_V = \left(\frac{du}{dT} \right)_V \quad (1.11)$$

在恒定压力条件下, 比热容与焓相关, 即

$$C_P = \left(\frac{dh}{dT} \right)_P \quad (1.12)$$

对于理想气体, 上述关系可以表示为

$$C_P - C_V = R$$

将气相问题中常见的比热比设为

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} \quad (1.13)$$

对于凝聚态物质的相对不可压缩性, 即 $u = h$, 则

$$C_P \approx C_V$$

HMX 炸药在室温下的比热容为 $325\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

2. 密度

点火前炸药密度可以通过测量得到。一般单质炸药及其粘结剂的密度在 $1.5 \sim 2.0\text{g}/\text{cm}^3$ ^[5]。

在常温常压下,气体密度可由理想气体状态方程求得。在高压燃烧条件下,可用考虑余容修正的维也尼状态方程或范德华方程描述。在爆轰条件下,应采用 BKW 状态方程或 JWL 状态方程计算。

3. 热导率(导热系数)

热导率是热传导傅里叶定律中的比例系数,它表示热流量与温度梯度的关系。

在固体中,声子和自由电子的动量交换是导致热传导的原因。不同的材料热导率不同,即使是同一种材料,热导率还与温度等因素有关。一般而言,金属材料的热导率最高,液体次之,气体最小。各种物质的热导率可查阅有关工程手册。

对于常见的有机炸药和粘结剂,热导率则在 $0.1 \sim 0.6\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 范围内^[5]。

热导率 λ 与物质密度 ρ 和比热容 C 的比为热扩散系数,即

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C} \quad (1.14)$$

它代表热能存储量一定时,热能在传导时的效率,可以理解为热惯性或者热量的扩散速率。热扩散系数经常出现在热传输瞬态解的指数计算分析中,值越大表示时间越短。常见的炸药及其粘结剂热扩散率通常在 $(1 \sim 2) \times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$ 内。

4. 粘性

粘性是牛顿粘度定律的比例系数,将动量通量(剪切应力)与速度梯度联系起来。

与热导率一样,粘性与压力之间并不存在依赖关系。气体粘度在正常条件下一一般为 10^{-5} ,在燃烧温度下可增加到原来的 10 倍。

运动粘度为物质粘性和密度之比,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.15)$$