

冯长根 著

热爆炸理论

科学出版社

热 爆 炸 理 论

冯 长 根 著

国家自然科学基金资助项目

科 学 出 版 社

1 9 8 8

内 容 简 介

热爆炸理论又称热自燃理论,是关于放热化学反应和放热系统的热“自动”点火的理论。自从1928年苏联著名科学家 Semenov 首先从理论上研究热爆炸以后,经各国科学工作者的努力,热爆炸理论发展很快,到八十年代初已经得到许多理论结果。作者收集了国内外大量有关的资料,加上作者博士论文的内容,经过系统整理编纂成书。全书分为三篇(共九章),主要从理论上讨论系统由于热平衡被破坏而引起的爆炸现象,从经典的 Semenov 理论、Frank-Kamenetskii 理论、Thomson 理论入手,由浅入深地讨论了均温系统热爆炸稳定理论、均温系统热爆炸非稳定理论(第一篇);温度具有空间分布的系统的热爆炸稳定理论、温度具有空间分布的系统的非稳定理论(第二篇);多相系统的热爆炸、开放流动系统的热爆炸、同时具有自催化和自热作用的系统的非稳定理论以及热点学说的热理论(第三篇)。本书在阐述热爆炸理论结果时,注意运用数学、物理学上最新的概念和方法,如转变点、转向点、分岔点、临界点等;书中还较细致地介绍了分岔理论、摄动理论、常微分方程的定性分析方法在热爆炸理论中的应用。书末列出有关参考文献。

本书可供从事化学动力学、燃烧学、传热学、爆炸物理学、力学、热物理学以及化工、煤炭、矿业、国防、航空、航天、消防、环保、安全工程等有关科技领域的研究、教学、设计、管理人员及大专院校师生、研究生学习参考。

热 爆 炸 理 论

冯 长 根 著

责任编辑 陆晓明

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1988年5月第一版 开本:850×1168 1/32

1988年5月第一次印刷 印张:14 1/2

印数:1-750 插页:2

平 1-1,900 字数:373,000

ISBN 7-03-000168-0/O·48

定价: 布脊精装 7.70 元

平 装 6.10 元

序*

大多数自发化学反应伴随着能量的释放,并且具有自热的趋势。同时,化学应对温度相当敏感,化学反应速率对温度的增加有着显著的响应:一个原始的经验规则认为,温度每上升 10°C ,化学反应速率就可能增加一倍。上述两个考虑构成了传播最广泛的爆炸和热逃逸机理的基础。它们之间相互关系的定性认识,从 J. H. van't Hoff (1884 年)时期就已存在了。

由此算来,热爆炸理论已有了约一个世纪的历史。对热爆炸的理论研究是国际性的,其近代理论在 1913 年开始于法国, C. Taffanel 和 J. le Floch 当时给出了清晰的热图。这些早期阶段的结果在二十年代被 N. N. Semenov 重新发现;他被普遍地确认是热爆炸近代理论之父,当时他在列宁格勒工作。Semenov 和他的同事 D. A. Frank-Kamenetskii (1938 年)开创了热爆炸理论的新时代,直到今天,苏联科学工作者在这方面仍在作出连续不断的、有重大价值的贡献。在同一时期(三十年代,四十年代),在英国和美国,人们也进行了卓越的实验研究。

这些早期的研究集中在弄清热点火的清晰和基本的图象上:把热点火看成是稳定状态的临界消失。当时也已进行了有关稳定性(包括同火焰传播有关的研究)的更深入的研究;在五十年代,化学反应工程师们的工作开辟了一个同两个课题有关的新领域:有催化剂存在的放热反应以及有连续流动存在的均相系统(开放系统)的行为。在 1950—1970 年这一时期内,研究人员对热爆炸的研究贡献很多,在那时已有全面的结论性的综述(A. G. Merzhanov 和 F. I. Dubovitskii; P. Gray 和 P. R. Lee)。在非稳定系

* 这是作者在英国攻读博士学位时的导师用英文为本书撰写的序言,现译成中文。

统方面, P. H. Thomas 以及 J. Adler 作出了显著的创新工作。

在较长的一段时间里, 热爆炸实验研究落后于理论研究。自热和临界安全极大值的值得注意的直接实验应归于 Vanpée (1956 年); 仅仅在六十年代后期才充分研究了温度上升及其同空间位置、时间的关系 (P. Gray 等人)。这以后不久 (1965 年以后), 我们看到了 T. Boddington 及其他研究者对热爆炸理论的系统的数学处理; 由 B. F. Gray 所作的热爆炸和链-分支不稳定性之间的联系也开始于此时。

冯长根博士的工作主要属于近代的数学时代。他对我们了解温度具有空间分布的系统作出了相当显著的贡献, 在一系列的研究中 (其中多数在利兹同 T. Boddington 一起), 解决了许多经典问题, 指出了进一步研究的途径。他的书侧重于理论问题。这本由一个具有国际声望的中国科学工作者所著的新书会成为在中华人民共和国研究本课题的基础, 我想这是合适的和适时的。

P. Gray

利兹大学, 英格兰

前 言

热爆炸理论又称热自燃理论,是关于放热化学反应和放热系统的热“自动”点火的理论。上世纪末本世纪初,人们在研究气体的燃烧和火焰的成因时,逐步形成了热失衡的概念,后来出现了描述热“自动”点火的热图。热图的出现,反映了人们对热爆炸现象的科学认识。但是热图的出现并不等于热爆炸理论的形成。文献中一般认为,热爆炸理论是由苏联著名科学家 N. N. Semenov 在 1928 年创立的。Semenov 热爆炸理论也是以热图为基础的,但是他的杰出贡献却在于他通过对热图的数学分析,首次从理论上提出了定量的热爆炸判别准则。这也就使得热爆炸理论从一开始就被应用于许多反应系统的研究中。涉及到的反应物不仅有可燃性气体,而且有凝聚相的物质;这些凝聚相物质包括爆炸性的(如炸药等)和非爆炸性的液体和固体系统。由于这些物质几乎出现于各行各业,因此,关于热爆炸理论的应用,除了化学和化学动力学领域以外,还见于其他一些领域,例如:石油、化工、煤炭、冶金、国防、航空、消防、环保以及力学、热物理等。近年来,热爆炸理论还被用来研究某些生物现象。由于实践的需要,使得热爆炸理论从创立以来,不断得到发展。特别是近二十年来,在各国科学工作者的努力下,出现了不少理论成果,文献量迅速增加。

考虑到有关热爆炸理论的中文资料在国内尚十分缺乏,作者在国外学习期间,收集了有关文献;同时作者在对热爆炸理论的研究过程中,日益感到较为系统地综述热爆炸理论,是有必要的。这样就形成了本书的大部分内容。本书另一些内容则是作者攻读博士学位时在导师指导下得到的理论结果。这些结果已公开发表。必须说明的是,本书不是巨细无遗的,书中把重点放在反映热爆炸理论的基本的和重要的内容上。

本书除绪论外分为三篇。第一篇共两章，分别介绍均温系统的热爆炸稳定理论(第一章)和非稳定理论(第二章)。第一章的内容是从最经典的 Semenov 热爆炸理论开始阐述的。虽然这些内容已经有五十七年的历史了，但仍然十分重要且简单明了。第二篇包括三章，主要研究温度具有空间分布的系统，介绍了 Frank-Kamenetskii 放热系统的稳定态热爆炸(第三章)，Thomas 放热系统的稳定态热爆炸(第四章)和非均温系统热爆炸非稳定理论(第五章)。从以上对第二篇内容的介绍也可以看出上述两位科学家对于热爆炸理论的贡献。第三篇有四章，主要介绍一些其他系统的热爆炸理论成果，即多相系统的热爆炸(第六章)，开放流动系统的热爆炸(第七章)，自催化系统的热爆炸(第八章)和热点理论(第九章)。为了给研究热爆炸理论提供最大的方便，作者还尽可能整理了从 1880 年以来热爆炸理论的有关文献目录，作为附录附于书后。有个别文献虽不属热爆炸理论文献，但其方法在热爆炸理论研究中十分重要，因此附录中也收入了，以便于参考和研究。对近几年的文献虽尽力收集，但总难免遗漏。

最近几年，对热爆炸的理论研究出现了新的动向。首先是热爆炸理论的基本思想开始应用于研究生物现象。就本书的主旨而言，未将这方面的内容列入，然而，这个趋势值得读者注意，因为这是当前世界上各种交叉学科迅速发展的反映。其次，是关于分歧(bifurcation)现象和相应的分歧理论。分歧是现代物理新概念发展的生长点，即在今后一段时间将被迅速开拓的新领域。热爆炸就是一种分歧现象。就热爆炸现象而言，本书中使用的分歧点(bifurcation point)、临界点(critical point)、转向点(turning point)等词是同一个概念¹⁾。爆炸准则的研究，实际上是分歧现象的定量研究。可以预言，对热爆炸理论的进一步探索，将使它成为分歧理论在化学上的典型应用。第三，关于奇异扰动方法(本书中称为小参数扰动法)，这是近代十分有效的近似方法之一，它在各个领域

1) 分歧点是分歧理论中的概念；临界点是物理上的概念；而转向点反映的是曲线上点的运动方向。请参看本书有关叙述。

显示出很强的生命力，本书比较详细地介绍了它在热爆炸理论研究中的应用。

在此，作者希望表达对陈福梅教授(北京工业学院)的感激，她是作者涉入热爆炸理论研究的启蒙先生。英国皇家学会会员、英国利兹大学物理化学系主任、著名的热爆炸研究学者 P. Gray 教授及 T. Boddington 博士是作者的博士学位导师，他们在热爆炸理论上的造诣颇深，本书的问世也凝聚着他们的劳动。从本书的酝酿到内容安排，P. Gray 教授都给予了认真的指导。同时在写作出版过程中，得到了邹仁鋆教授(河北省科学院，河北工学院)、丁懋教授和劳允亮副教授(北京工业学院)的热情帮助和指导，丁懋教授还校阅了全书。本书中引用了大量文献资料，涉及许多中外学者，借此向他们表示衷心感谢。

作者水平有限，书中如有错误，欢迎读者指正。

冯长根

1985年6月

绪 论

第一节 放热反应热稳定性和热爆炸理论

本书研究的对象是放热系统。

一个正在进行放热化学反应的系统是放热系统。

工厂、学校和科学研究机构每天都在进行这种化学反应,这样的放热系统是所有放热系统中最大量、最重要的一类。

另外有一些系统,例如工业生产以及化学反应的不少原料、最终产品等等,这些东西是可反应的,在平时运输、储存、保养等状态下,这些东西可能是稳定的,也可能进行着缓慢的、不易察觉的反应,放出极微的热量。这样的系统也是放热系统。在石油、化工、煤炭、国防、航天、核工业中,也不乏放热系统之例。

还有一些系统,常温下并不会导致化学反应,但在一定条件下却可以成为放热系统。例如火灾出现时,木、棉、纸、塑料等都能成为放热物质,构成危害极大的放热系统。例如森林工业中大量堆积的原木以及木屑、枯叶就是放热系统,有时可自动引起火灾。

放热反应系统的例子在生物工程中也比比皆是,我们的人体是一个放热系统,各种动、植物的活体一般来说也是放热系统。

热爆炸理论涉及的主要对象是放热化学反应以及诸如上述列举的各种放热反应系统。

几乎所有的放热反应都具有以下两个显著的特征:一、不同的化学反应机理在系统中同时存在;二、这类放热反应从一种机理到另一种机理突然转变的可能性。从某个初始条件(温度、压力)开始,这类反应以很慢的速度“平静地”进行,即随时间变化很缓(“平静”反应)。从另一个稍微不同的初始条件(温度、压力)开始,仍然是同一个反应就可能导致激烈加速和随之而来的急骤变

化(“爆炸”反应),这种急骤变化的例子有着火点火、燃烧、爆炸、放热反应的热逃逸、化工上的飞温、煤的燃烧、炸药的爆轰、火箭推进剂的爆燃、人体的高温症状(如伤寒)等等。消防工程实际上是对放热反应系统失控的再控制。在安全工程中,几乎一半以上的事故起因于这类急骤变化。

这些变化与放热反应的热稳定性有关。热爆炸理论以放热反应的热稳定性为着眼点,研究放热系统化学反应动力学过程、热传递过程、着火点火(包括燃烧和爆炸的初始过程)三者之间的联系。热爆炸理论是一门涉及化学动力学^[1]、传热学^[2]、燃烧学^[3,4]和爆炸物理学^[5]的科学。

热爆炸理论的基本思想和基本方法是物理上的能量守恒定律和热力学第一定律。一个放热系统的基本特征是有热量产生,因此,放热反应系统的能量守恒就是热量的得失平衡。一般来说,放热反应的不稳定性往往表现为热量不能平衡。放热反应在反应过程中不断释放热量,提高温度,同时和它的周围环境发生热量传递。由于热量产生的速率和温度的关系是强非线性的指数关系(通常取 Arrhenius 关系式),而热量损失的速率和温度的关系通常是接近线性或线性的关系(例如 Newton 冷却定律),一旦系统产生的热量不能够全部从系统中传递出去或损失掉,系统就会出现热量的积累,使系统的温度有所上升。这叫做热平衡的破坏,或称为热失衡(thermal unbalance)。热失衡的结果,是热产生的速率随着温度的提高指数地增加,释放更多的热量,热量积累和热量损失的失衡更加恶化,系统里出现更多的热量积累,温度进一步提高。如此循环,整个系统就好象是自己在加热自己。因此,这个过程称为自热(self-heating)过程,相应的系统称为自热系统。如果自热过程未被控制,势必使系统达到温度很高的状态。一旦满足点火条件,系统就会出现点火(有些场合下则导致起燃或起爆)。这种变化具有自发性和热性质,在热爆炸理论中被称为“热爆炸”,有的文献^[6]上又称为“热自燃”。热爆炸理论由此出发,用化学动力学和传热学^[7]的基本定律和原理对放热系统的临界性进行数学分析,从

而归纳和提出热爆炸判据,使放热反应系统两种不同反应机理之间的区别有定量的划分和严格的定义。

热爆炸理论在燃烧理论的研究中具有重要的地位^[6,8]。在凝聚态爆炸物质和可燃性气体的整个燃烧历程中,发火过程是一个重要阶段。发火可分为点火和自燃。自燃的理论主要有链自燃^[1,5,9-12]和热自燃(即热爆炸)。链自燃是因为活化中心在短时间内增加很快所导致的发火,它甚至可以在等温下进行^[1]。而热自燃则属于另一种类型,是由于热量积累和热平衡的破坏所致。热自燃的定义可以简单地表述为:一个被加热的物质的突然点火或突然燃烧,即“自动”发火。这样就和那些通过外界的发火源(如火焰、火花、灼热桥丝、摩擦、碰撞等)而引起的点燃区别开来了。从热物理学的观点来看,热自燃与众不同之处,就是由于系统有一个内热源(化学源),它的强度和温度之间具有很强的非线性关系,即指数关系,通常用 Arrhenius 定律来表示。热爆炸理论研究这种具有热自燃能力的系统,提出热自燃界限。

热爆炸理论在爆炸物理研究中也具有十分重要的地位^[9]。热自燃是爆炸物理中所考虑的物理现象的最简单形式,对其它复杂现象的研究往往要从热爆炸开始。热爆炸理论又是起爆理论^[13,14]的基本依据。传爆系列和爆破器材^[15]能否按预定目的起爆或者作用,通常归为感度问题^[16]。对大多数起爆现象来说,起爆问题和感度问题具有热的性质。热爆炸理论提供了研究这些机理的基本理论。

含能材料^[17-20](例如火药、炸药和推进剂)的热分解,往往伴有热量的释放。只要含能材料本身处于低的环境温度中,其热分解只消耗微量的反应物,适中的热传递条件使热分解产生的热量全部传递到周围环境,内部温度最终和环境温度一样,这类热分解就能缓慢地进行。但是,在某些条件下,如果热分解所释放的热量不能扩散到周围环境,而是储存于反应物内部,那么就会导致含能材料的自热和热分解的自动加剧。于是初始时的缓慢反应达到了一种“爆炸”般的速率,结果就发生热爆炸。在这方面,热爆炸理

论提供了有力判据,在生产、储存和使用含能材料的工业过程中,指导安全生产,预测自发爆炸,防止事故发生^[21]。

在实验室,热爆炸实验是进行物理化学或化学物理研究的一个方法^[22],是提供化学动力学参数的一个重要途径^[8]。关于热爆炸的实验及对热爆炸理论的验证一直吸引着各国数理化学工作者。参考文献[23—87]反映了这方面的工作(篇幅有限,本书对这部分内容从略)。

热爆炸理论按其内容分为稳定理论和非稳定理论。热爆炸稳定理论研究不考虑反应物消耗时放热系统得热和失热的临界平衡问题,从数学上讨论临界条件的定义、临界点的确定、各种情况下系统的爆炸判据和临界温度的表达式。热爆炸非稳定理论考虑热爆炸问题中与时间有关的问题,这些问题包括反应物消耗的影响,反应物的温度历程等。在热爆炸理论中,由于对象的性质不同,还可以从另一些角度分类。例如,按放热系统内部温度的不同分布情况,可分为两大系统:(1)均温系统的内部温度不随空间位置改变而不同;(2)温度具有空间分布的系统。本书是以这两种系统而分类阐述热爆炸理论的。其它分类如均相系统的热爆炸和多相系统的热爆炸;封闭系统的热爆炸和开放系统的热爆炸等。本书的重点是阐述有关均相、封闭系统的热爆炸理论结果(第一篇和第二篇),第三篇阐述关于其它系统的理论结果。

第二节 热爆炸理论的早期简史

严格说来,热爆炸理论已有一百多年的历史。早期的文献由E. Mallard 和 H. L. le Chatelier^[88-90]合作发表于1880和1883年。比较引人注意的是J. H. van't Hoff 在1884年发表的观点^[91],他认为热自燃只有在反应所放出的热和向周围的散热不能维持平衡时发生,据此解释了为什么火焰现象和点火现象不需要物理和化学性质的不连续。但是,他只认识到热平衡的破坏,并没有进一步提到临界性,即从热平衡到热失衡的界限问题。因此,他的热自燃

概念仅仅是定性的。

后来, C. Taffanel 和 J. le Floch^[92-96] (1913 年前后), F. G. Liljenroth^[97] (1918 年), 在文献中提出了“热图”, 图中把热产生速率和热损失速率的关系通过这两者随温度变化的曲线来表示。他们用这两条曲线的相切点的条件, 来表示临界点; 这就比 van't Hoff 进了一步。但是由于这些文章并没有引起人们注意, 所以在当时并没有促进热爆炸理论的研究。

热爆炸理论的重要发展是在 1928 年。Semenov 在研究某些混合气体反应的自燃时, 提出了热自燃(热爆炸)理论^[98,99]。他独立地画了“热图”, 并从“热图”出发, 通过热产生和热损失速率曲线的切点, 联系切点的数学表达, 推导了热爆炸界限的定量的判据。他假定热损失可用 Newton 冷却公式表示, 即 $\chi S(T - T_a)$, 反应热的产生服从 Arrhenius 定律, 即反应速率常数正比于 $Ae^{-E/RT}$ 。这样, 他得到爆炸时的升温

$$\Delta T_{cr} = (T - T_a)_{cr} \approx RT_a^2/E$$

用 Frank-Kamenetskii 提出的无量纲的量^[100,101], 上式表示

$$\theta_{cr} = 1$$

其中 $\theta = (T - T_a)/(RT_a^2/E)$ 称为无量纲温差。实际温差 ΔT_{cr} 通常都很小, 约在 10—20℃。如果只有很小一部分热散失了, 那么百分之一反应物的消耗就足以把系统带到临界状态。当然, 如果没有热损失, 那么热爆炸是不可避免的。Semenov 得到的热爆炸判据是

$$[VQEA_0 \exp(-E/RT_a)/\chi SRT_a^2]_{cr} = e^{-1} = \phi_{cr}$$

其中 ϕ 称为 Semenov 数^[102]。Semenov 数是均温系统热爆炸的判据。如果系统的 Semenov 数 ϕ 大于它的临界值 ϕ_{cr} , 热爆炸就不可避免。

Semenov 的热爆炸理论^[4,10,98,99,103-106], 建立在整个系统内各点的温度都相等这一假设上, 这和实际情况有一定差距。尽管如此, Semenov 理论在三十年代促进了对热爆炸的研究^[34-36,101,107-114]。

1939 年 Frank-Kamenetskii^[101,115] 提出了新的热爆炸理论, 其

中考虑了热传导。该理论指出,对于球对称的放热系统,若反应物边界 ($r = a_0$) 温度等于环境温度 T_a , 则系统内中心点爆炸时的升温为

$$\Delta T_{0,cr} = 1.61 RT_a^2 / E$$

或用无量纲的温差来表示

$$\theta_{0,cr} = 1.61$$

和 Semenov 数相应的临界关系式为^[12]

$$[a_0^2 Q E A c_0^2 \exp(-E/RT_a) / \kappa R T_a^2]_{cr} = 3.322 = \delta_{cr}$$

其中 δ 称为 Frank-Kamenetskii 参数,它是温度具有空间分布的系统的热爆炸判据。Frank-Kamenetskii 热爆炸理论研究三种对称的简单形状,即无限大平板、无限长圆柱和球,在热爆炸理论中称这些形状为 A 类形状^[116]。

这以后,热爆炸理论发展较快。比较重要的有 P. H. Thomas 在 1958 年^[117] 把 Semenov 热爆炸理论和 Frank-Kamenetskii 理论作为一个具有更普遍边界条件的热爆炸理论的两个极限情况。他考虑更为一般的边界条件,即在反应物表面

$$\kappa dT/dr + \chi(T - T_a) = 0, r = a_0$$

如果采用无量纲的量,则得到 Biot 数 Bi

$$d\theta/d\rho + Bi\theta = 0, \rho = 1$$

其中 $Bi = \chi a_0 / \kappa$ 。这样, δ 或 ϕ 的临界值将是 Bi 的函数。这个边界条件称为 Thomas 边界条件。相应的 Thomas 理论更接近于实际情况,是热爆炸理论的重要组成部分。

继 Frank-Kamenetskii 之后,对热爆炸理论的研究越来越多^[12, 6, 8, 106, 118], 至今方兴未艾。1967 年英国 P. Gray 和 P. R. Lee 第一次以“热爆炸理论”为题对那时该理论的情况进行了综述^[119]。同一时间,苏联 A. G. Merzhanov 和 F. I. Dubovitskii 也作了类似的工作^[21]。1977 年, P. Gray 和 M. E. Sherrington 发表了一篇有关 1975 年以前热爆炸理论的综述文章^[120]。1981 年, A. G. Merzhanov 和 V. G. Abramov 又发表了对热爆炸理论的综述^[24]。本书在上述综述文章和各时期历史性文献的基础上,向读者较为

系统地介绍热爆炸理论。

本书分为三篇。第一篇介绍均温系统的热爆炸理论；第二篇介绍温度具有空间分布的系统的热爆炸理论；第三篇则介绍其他一些重要系统的热爆炸理论。在第一篇和第二篇中，又以热爆炸稳定理论和非稳定理论的顺序分别阐述。为了便于进一步研究，附录中列出了热爆炸理论有关文献。

目 录

序.....	v
前言.....	vii
绪论.....	xi
第一节 放热反应热稳定性和热爆炸理论.....	xi
第二节 热爆炸理论的早期简史.....	xiv

第一篇 均温系统的热爆炸

第一章 均温系统热爆炸稳定理论.....	1
第一节 化学反应和能量守恒.....	1
一、化学反应和放热.....	1
二、热图和热量守恒.....	3
三、热爆炸理论的一些基本概念.....	5
第二节 均温系统热爆炸基本判据.....	6
一、切线求法.....	6
二、极值求法.....	9
三、放热反应临界性的消失(转变点).....	16
四、热爆炸判据的直线形式.....	18
第三节 热传递随温度变化对临界性的影响.....	22
一、热传递随温度变化的形式.....	22
二、守恒方程.....	23
三、指数近似和相应的热爆炸判据.....	24
四、Arrhenius 反应速率常数和相应的热爆炸判据.....	28
第二章 均温系统热爆炸非稳定理论.....	38
第一节 热爆炸延滞期.....	38
一、热爆炸非稳定理论和延滞期的一般描述.....	38
二、边缘超临界系统的热爆炸延滞期.....	46
三、边缘亚临界行为.....	49
四、热传递随温度变化对起爆延滞期的影响.....	52
第二节 反应物消耗的影响.....	54

一、基本方程	54
二、绝热系统	56
三、非绝热系统	58
四、反应物消耗对边缘超临界系统的影响	67
五、考虑反应物消耗时临界性的新定义	73
第三节 “反应物边界温度随时间变化时对热爆炸的影响”	84
一、引言	84
二、大活化能近似法	85
三、普适方法	90

第二篇 非均温系统的热爆炸

第三章 Frank-Kamenetskii 放热系统的稳定态热爆炸	97
第一节 导热问题基本概念	97
一 Fourier 定律和导热系数	97
二、导热方程	102
三、导热方程的近似和边界条件	109
第二节 Frank-Kamenetskii 系统的热爆炸 (A 类形状)	118
一、惰性近似和线性近似时热平衡方程的解	118
二、指数近似时热平衡方程的解	124
三、五次多项式近似时热平衡方程的解	132
四、级数近似时热平衡方程的解	134
五、温度分布和边界上的温度梯度	137
六、Arrhenius 定律及相应的爆炸判据	141
七、求临界值和转变值的积分法	146
第三节 非 A 类形状反应物的爆炸判据	151
一、加权平均估计	152
二、当量球	152
三、稳定方法	154
四、非稳定方法	157
五、级数近似法	161
六、Frank-Kamenetskii 参数的应用及直线形式	165
第四节 导热系数随温度变化对热爆炸的影响	174
一、热平衡方程	174
二、导热系数随温度线性变化对临界性的影响	175
三、导热系数随温度成指数比例变化对临界性的影响	183
四、导热系数随温度指数变化的分析解	186
第四章 Thomas 放热系统的稳定态热爆炸	192