

含铝炸药爆炸

陈朗 龙新平 著
冯长根 蒋小华



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

含铝炸药爆轰

陈 朗 龙新平 著
冯长根 蒋小华

2

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

含铝炸药爆轰/陈朗等著. —北京:国防工业出版社,2004.6

ISBN 7-118-03492-4

I.含... II.陈... III.含铝炸药-爆轰-研究
IV.0381

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 041029 号

2

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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 6 $\frac{1}{4}$ 159 千字

2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:20.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

炸药爆炸是一种快速的物理化学反应,能够在短时间内释放大量的能量。为了提高炸药爆炸威力和更好地利用炸药爆炸能量,深入认识炸药爆轰规律十分重要。

根据 Chapman 和 Jouguet 提出的 CJ 爆轰模型,可以把炸药爆轰现象分为理想爆轰和非理想爆轰。基本满足 CJ 条件的爆轰现象被认为是理想爆轰,而明显偏离 CJ 条件的爆轰现象被认为是非理想爆轰。非理想爆轰现象主要有两类:一类是炸药爆轰波在传播中出现的非理想爆轰现象,例如,爆轰波的拐角效应,小尺寸和弯曲装药中的爆轰波等;另一类是炸药自身性质引起的非理想爆轰,这些炸药也被称为非理想炸药。非理想炸药爆轰与理想炸药爆轰的主要区别是有较宽的爆轰反应区,偏离 CJ 爆轰理论中反应在 CJ 面上完成的假设。为此,在非理想炸药爆轰研究中,需要面对复杂的反应过程,其研究方法和研究重点与理想炸药爆轰有差别。

含铝炸药是一种典型的非理想炸药,其爆轰行为呈现显著的非理想爆轰特征,对含铝炸药爆轰行为的研究,有利于加深对非理想爆轰现象的认识。含铝炸药在军用和民用上,都有比较广泛的应用,深入了解含铝炸药的爆轰性能,对研制和使用含铝炸药具有实际价值。本书从理论计算和实验两方面介绍了在含铝炸药爆轰研究中的主要研究方法和结果,以及相关研究方法在其他炸药爆轰研究中的应用。

本书是作者分别在北京理工大学、中国工程物理研究院化工材料研究所和中国工程物理研究院流体物理研究所科研工作的基础上写成的。全书分为 8 章:第 1 章分析综述了国内外含铝炸药

爆轰研究的情况;第2章简要介绍炸药爆轰的CJ理论和ZND模型;第3章介绍含铝炸药爆轰产物的数值计算和近似计算方法;第4章介绍含铝燃料空气炸药爆轰参数计算;第5章介绍含铝炸药驱动金属平板实验;第6章介绍含铝炸药圆筒试验;第7章介绍含铝炸药爆轰数值模拟计算;第8章介绍炸药做功能力评价的数值计算方法。

本书写作的分工是:陈朗主要完成了第1章、第2章、第5章、第6章和第7章;龙新平主要完成了第3章、第4章、第8章;参与完成了第7章;蒋小华参与完成了第3章、第5章和第7章;冯长根对全书进行了修改。

书中所涉及的研究工作得到了中国工程物理研究院常规项目基金、中国人民解放军总装备部国防科技预研跨行业基金和中国工程物理研究院化工材料研究所的资助。书中部分实验工作在中国工程物理研究院化工材料研究所和流体物理研究所完成,得到了中国工程物理研究院很多同志的指导和帮助。作者感谢中国工程物理研究院的张寿齐教授(已故)的指导,感谢中国工程物理研究院经福谦院士,赵玉华教授的支持和帮助。中国工程物理研究院化工材料研究所的黄辉教授,张明教授,黄勇副研究员等在炸药样品制备方面提供了帮助;韩敦信教授,黄毅民副研究员等在圆筒试验中提供了帮助,何碧副研究员参加了部分炸药爆轰参数计算工作;中国工程物理研究院流体物理所的于川教授,方青教授,赵峰教授等在炸药驱动实验中提供了帮助;李泽仁教授,周显明教授和马如超副研究员在激光速度干涉仪测量中提供了帮助,在此向他们表示衷心的感谢。作者还要感谢西安近代化学研究所的吴雄教授在炸药爆轰参数数值计算方面的指导。感谢北京理工大学博士生伍俊英和硕士生鲁建英在书稿校对中提供的帮助。

作者才疏学浅,本书肯定存在许多缺点或错误,望读者指正。

作者

2004.3

目 录

第 1 章 绪论	1
参考文献	8
第 2 章 炸药爆轰的基本理论	10
2.1 爆轰的 CJ 爆轰理论	10
2.1.1 爆轰波的基本方程式	10
2.1.2 CJ 爆轰的稳定传播条件	13
2.2 爆轰波的 ZND 模型	18
2.2.1 ZND 爆轰模型	18
2.2.2 ZND 模型爆轰波反应区内的定常解	20
参考文献	22
第 3 章 含铝炸药爆轰参数理论计算	23
3.1 炸药爆轰产物状态方程	23
3.1.1 BKW 状态方程	25
3.1.2 VLW 状态方程	30
3.1.3 VLW 状态方程改进	36
3.1.4 爆轰产物的 JWL 状态方程	42
3.2 炸药爆轰参数理论计算	43
3.2.1 计算原理	43
3.2.2 计算结果及分析	45
3.3 炸药爆轰参数的近似计算方法	53
3.3.1 单质炸药爆轰参数的近似计算	54
3.3.2 混合炸药爆轰参数的近似计算	56
3.4 小结	58
参考文献	58

第 4 章 含铝燃料空气炸药爆轰参数计算	63
4.1 引言	63
4.2 用最小自由能技术确定燃料空气炸药 CJ 爆轰 产物组成	64
4.2.1 最小自由能理论	64
4.2.2 CJ 爆轰产物组成计算	68
4.3 燃料空气炸药初始密度的确定	69
4.4 计算结果及分析	71
4.5 小结	77
参考文献	78
第 5 章 含铝炸药驱动金属平板实验	79
5.1 激光速度干涉仪测量炸药驱动金属的运动速度	79
5.1.1 激光速度干涉仪的工作原理	80
5.1.2 干涉条纹信号分析	81
5.1.3 速度修正方法	83
5.2 无氧化剂含铝炸药驱动金属平板实验	86
5.2.1 无氧化剂含铝炸药制备	86
5.2.2 炸药驱动金属平板实验装置	87
5.2.3 实验结果及讨论	88
5.2.4 含铝炸药爆轰中铝粉反应情况讨论	92
5.3 有氧化剂含铝炸药驱动金属平板实验	94
5.3.1 有氧化剂含铝炸药	94
5.3.2 有氧化剂含铝炸药驱动金属平板实验	95
5.3.3 实验结果及分析	96
5.4 含铝炸药与窗口界面粒子速度测量	102
5.4.1 实验装置	102
5.4.2 实验结果及分析	103
5.5 爆炸载荷作用下金属层裂现象	104
5.6 小结	106
参考文献	106

第 6 章 含铝炸药圆筒试验	108
6.1 炸药圆筒试验简介	108
6.2 含铝炸药 25mm 圆筒试验	112
6.2.1 试验装置及测量方法	112
6.2.2 高速相机测量结果	113
6.2.3 VISAR 测量结果	116
6.3 含铝炸药 50mm 圆筒试验	117
6.3.1 试验装置和测试系统	117
6.3.2 试验结果	118
6.4 试验结果讨论	119
6.5 小结	120
参考文献	121
第 7 章 含铝炸药爆轰数值模拟	122
7.1 引言	122
7.2 非线性有限元方法及 DYNA 程序	122
7.2.1 基本方程	123
7.2.2 材料模型	126
7.3 含铝炸药圆筒试验爆轰数值模拟	128
7.3.1 JWL 状态方程参数	128
7.3.2 圆筒试验计算模型及数值模拟结果	132
7.4 无氧化剂含铝炸药驱动金属平板数值模拟	142
7.4.1 含铝炸药反应速率方程参数	142
7.4.2 金属平板驱动实验计算模型	142
7.4.3 数值模拟结果	143
7.5 含铝炸药反应讨论	153
7.6 有氧化剂含铝炸药爆轰数值模拟	157
7.6.1 含铝炸药本构参数	157
7.6.2 计算模型	158
7.6.3 计算结果及讨论	158
7.7 含铝炸药与窗口界面粒子速度模拟计算	166

7.7.1 计算模型	167
7.7.2 计算结果及讨论	167
7.8 爆炸载荷作用下金属层裂现象数值模拟	170
7.8.1 材料本构参数	170
7.8.2 计算模型	171
7.9 小结	176
参考文献	177
第8章 炸药做功能力评价的数值计算方法	178
8.1 炸药爆轰产物等熵膨胀的热力学计算	178
8.1.1 原理简介	178
8.1.2 计算结果	178
8.2 炸药圆筒试验计算与实验数据对比	181
8.3 钝感炸药 JB-9014 做功能力的评价	186
8.4 小结	188
参考文献	188

第 1 章 绪 论

炸药是一种可发生快速反应的含能材料,在工业生产和军事应用等方面有广泛用途。为了提高炸药的含能密度,人们在新炸药合成和复合炸药设计两方面进行了大量研究。在炸药中加入适量金属是提高炸药能量的途径之一,这对于一些要求高能量的爆炸很有意义。大约在 1900 年人们开始把铝粉加入炸药中,利用炸药爆炸时铝氧化反应释放能量,来提高炸药爆炸威力。第一次世界大战期间,德国首先使用了主要成分为硝酸铵和铝粉的阿莫纳尔炸药装填炮弹,增强了爆炸效果。美国在第二次世界大战期间,又以 TNT 代替部分硝酸铵,制成了新型的阿莫纳尔炸药,进一步提高了爆炸威力^[1]。此后,含铝炸药作为一族性能优良的混合炸药被广泛应用,尤其常用于水中和空中爆炸。

在含铝炸药爆炸中,由于存在铝参加反应这一特殊现象,而铝的氧化反应又同炸药组分、约束条件、铝颗粒形状和尺寸、爆轰产物的温度和化学组分等多种因素有关,这就增加了正确认识含铝炸药反应机理的困难。多年以来,对于凝聚炸药爆轰中铝的反应状态,不同研究中没有统一的结论。对于铝参加反应的时间,铝粉对反应产物状态和炸药做功能力的影响,铝粉燃烧如何改变炸药内能等问题还缺乏清楚的认识。铝在爆轰中的反应情况是含铝炸药爆轰研究中需要认识清楚的问题。

含铝炸药爆轰呈现显著的非理想特征,通常评价理想炸药爆轰性能的方法,不适用于含铝炸药。一般认为,含铝炸药在大装药尺寸和强约束条件下,其非理想爆轰特征才容易被观察到,而大装药爆轰实验存在费用昂贵,周期长等问题,有时对于一些新配方的含铝炸药是难于进行大型爆轰实验的。如何找到经济实用评价含

铝炸药爆轰性能的方法,也是含铝炸药配方研究中需要解决的问题。因此,对含铝炸药爆轰特征的深入研究有利于加深对非理想爆轰现象的认识,能更有效地使用含铝炸药和研制性能优良的新型含铝炸药。

从含铝炸药产生不久,为了改进含铝炸药配方和更有效地使用含铝炸药,人们就不断地对含铝炸药爆轰现象进行研究。而近十几年来,随着爆轰实验和计算技术的进步,为深入认识含铝炸药爆轰现象提供了有利条件,人们加强了对含铝炸药爆轰反应机理、做功能力等方面的研究。

1966年斯维特洛夫^[2]研究了铝粉粒度对阿莫纳尔炸药爆速和爆压影响。在研究中发现,当炸药中加入铝粉时,粗颗粒铝粉含铝炸药爆速低于细颗粒铝粉含铝炸药爆速;炸药爆速随铝粉含量增加而降低。炸药中铝粉含量与爆速关系如表 1.1 所列,铝粉含量与爆压关系如图 1.1 所示。这一研究结果使人们认识到,铝粉尺寸和含量对含铝炸药爆轰性能有很大的影响。

表 1.1 炸药中铝粉含量与爆速关系

炸药组成	$\rho_0/(g/cm^3)$	$U_D/(m/s)$
RDX/W/Al(87.975/2.025/10)	1.726	8148
	1.761	8292
RDX/W/Al(78.2/1.8/20)	1.739	7713
	1.808	8042
RDX/W/Al(68.425/1.575/30)	1.723	7045
	1.885	7693

1970年美国加州大学的 M. Finger 等人系统地研究了含铝炸药的做功能力。他们对含有铝、无机氧化物和二者混合物的塑料粘结炸药(PBX)进行了标准金属圆筒试验,测量了炸药爆速和加速金属能力^[3]。实验结果表明,铝和氧化剂能够提高炸药驱动金属能力。

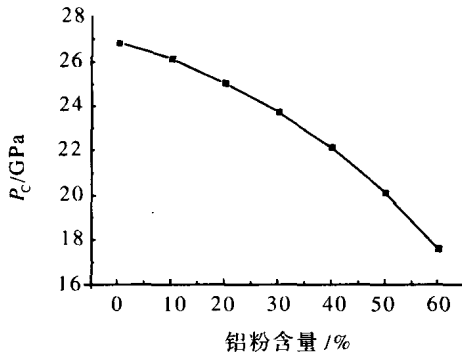


图 1.1 炸药中铝粉含量与爆压关系

1976年瑞典的Gert. Bjarnholt等人进行了含铝15%的Comp B和RDX/TNT炸药的标准圆筒实验^[4]。为了清楚地区分炸药含铝和不含铝两种情况下对做功能力影响,他们以氟化锂(LiF)代替铝加入炸药进行实验,由于LiF在爆轰中基本上保持惰性,它的物理性质,如密度、可压缩性、熔点和沸点同铝相似,以LiF代替铝可以显示铝在炸药中为惰性的爆轰特征。采用BKW状态方程方法计算了爆轰参数,根据实验和计算的比较研究了铝反应对炸药性能的影响。在实验中发现了在爆轰 $4\mu\text{s}$ 后由于铝反应使得压力增加的证据。

1976年德国人Pfeil^[5]对RDX/Al炸药的爆热进行了研究,实验结果表明,铝含量为40%时,爆热达到极大值;铝含量超过40%时,随铝含量增加爆热降低。爆热代表炸药总能量,此研究结果揭示了铝含量与炸药总能量的联系。

20世纪90年代以后,由于爆轰数值模拟技术的进步,在炸药爆轰数值计算中,已能够考虑更复杂反应过程,含铝炸药的爆轰反应模型成为人们关注的对象。

1993年美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的William C. Tao等人对几种含铝炸药的反应速率进行了研究^[6]。用Fabry-Perot激光速度干涉仪测量炸药驱动金属板的自由面速度和炸药与窗口界面的粒子速度。目的是发展一种考虑铝颗粒尺寸、铝同氧的比例和

其他与能量释放值有关参数的爆轰模型。

法国的 G. Baudin 和 D. Bergues 认为常用于水中战斗部的高能含铝炸药,存在与铝的氧化有关系的特殊性质^[7]。他们对三种含铝炸药进行驱动金属试验,分析了以 HMX 和高氯酸铵(AP)为基的含铝炸药爆轰中铝的反应特征。其研究目的是要发展一种模型,来预测高能含铝炸药在空气中和水中的爆炸性能。

美国海军水面武器研中心的 R. H. Guiruis 和 P. J. Miller^[8]认为水下爆炸的含铝炸药,含有大量的铝和其他帮助完成铝氧化的非理想成分,属高非理想爆轰炸药,爆轰时是在 CJ 面外释放大量能量。如果炸药的尺寸太小或约束条件不好,非理想组分将不会完全反应,甚至在一些特殊情况下根本不反应。因此,用一些传统的方法,如小型的圆筒试验,楔形试验很难确定这类炸药的特性。他们通过引入炸药后期反应速率,揭示了水中含铝炸药产物状态方程依赖于装药尺寸和约束条件的特征。介绍了一种依赖于时间的 JWL 状态方程,方程中考虑了后期反应段产物的变化和限制能量释放的分解作用。

美国水面武器研究中心的 J. S. Deiter 和 G. B. Wilmot^[9]为了解释含铝炸药在水中爆炸的反应机理和爆炸产物,对一系列含铝量为 0~20% 的 PETN/Al 炸药在水中和惰性气体下的密闭容器中进行爆轰实验,分析了气相和固相爆炸产物。确定了产物气体成分同炸药中铝的含量和爆炸环境的关系,并同热力学计算程序(TIGER)的计算结果进行了比较,发现实验结果同计算结果很相似。他们认为未反应铝的数量随着炸药的铝含量增加而增加。在水中爆炸比在惰性气体中爆炸的未反应铝的数量稍多;固相反应产物的形状特征相似,由表面有坑孔的圆形颗粒组成;反应产物固相有单独的铝和中间有内核外层包裹 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 两种物质;铝的反应是从外向里的凝聚态反应。

美国的 M. Cowperthwaite 对 H6N 炸药(74.20% CompB, 20.61% Al, 4.69% CompD2)的非理想爆轰进行了理论研究^[10],目的是了解铝在爆轰中的作用。他假设非理想爆轰过程为一维,模型是稳定

的 ZND 结构后面跟一个非稳定的反应区,铝在稳定区内和后面的非稳定区反应。因此需要估计出有多少数量的铝在稳定区内反应支持爆轰的传播和多少数量的铝在稳定区之后反应支持非稳定流动。他用 TIGER 计算 H6N 炸药中不同含量的铝为冻结状态时的 CJ 参数,通过与 H6N 炸药给定的 CJ 参数比较,表明 70% ~ 77% 的铝支持了反应区的流动。在处理铝在 CJ 点的反应终态时,认为铝颗粒在表面形成了一层 Al_2O_3 阻止了反应。得到了 70% 的铝支持了爆轰和剩余的铝没有支持稀疏波中流动的结论。

澳大利亚的 David L. Kennedy 对 PBXW - 115 炸药(20% RDX, 43% AP, 25% Al, 12% 粘合剂)爆轰现象进行了研究^[11]。用两种化学平衡计算程序计算了 CJ 状态。运用了小发散爆轰理论(small divergent detonation theory)修正无约束条件下的爆速,来描述不同装药直径下的 CJ 状态。用流体动力学程序对几种起爆和爆轰实验进行了数值模拟,得到了与实验相符的结果,并发现对于非理想炸药很多实验参数,包括爆速, CJ 区的长度和 Pop 图需要完全不同的解释。

1996 年 Philip J. Miller^[12]提出了一种含铝炸药爆轰反应模型,该模型把反应过程主要分为两阶段:第一阶段(CJ 反应区内)是含铝炸药的理想组分爆轰分解形成中间产物,同时少部分铝粉参加反应;第二阶段(CJ 面以后),大部分铝粉与中间产物反应形成最终产物。

1998 年美国人 M. Cowperthwaite 对含铝炸药的非常理想爆轰进行了数值模拟研究^[13],计算模型采用稳定的 ZND 结构后面跟着一个非稳定的反应区,铝粉在稳定区内和后面的非稳定区内反应。

1999 年美国海军水中武器研究中心的 R. Guirgins 和 R. Mckecown^[14]研究了在充满水的密闭爆发器中含铝炸药的爆轰行为,通过测定容器中水的超压和体积膨胀,标定了含铝炸药的反应速率方程:

$$\frac{d\lambda}{dt} = k(t)a(1-\lambda)^{\alpha}p^{\beta} \quad (1.1)$$

式中： λ 是反应度， p 是压力， t 是时间， a, k, α, β 为参数。

他们将 ZND 模型和铝粉反应度方程引入到计算程序，使计算结果更趋合理。

1999 年美国洛伦斯·利弗莫尔的 W. Michael Floward 和 Lawrence E. Fried 等^[15]应用 ZND 模型理论，建立了含铝炸药中铝粉的反应速率方程：

$$\frac{d\lambda}{dt} = (1 - \lambda)Rp^2$$

式中： λ 是反应度， p 是压力， R 是常数(根据不同物质标定)。

他们计算了 PBXN - 110, 111, PBX - 9502, IRX - 1 等含铝炸药的爆轰参数，并得到了与实验相符的结果。

1999 年澳大利亚的 Jing Ping Lu 等^[16]对 PBXW - 115 进行了水下实验，并对气泡膨胀过程进行了数值模拟。他们认为，用点火增长模型能够比较好地描述含铝炸药水下爆轰作用过程。

在国内，1986 年殷海权^[17]对不同含铝炸药的化学反应区长度进行了研究。结果表明，随着铝粉颗粒度减小，铝粉比表面积增加，参加反应的铝粉量增加，爆轰反应区宽度增加。含铝炸药的铝粉含量增加，化学反应区宽度也随之增加。

1994 年丁刚毅和徐更光利用锰铜压阻计和拉氏分析法对 HexalPW30 含铝炸药的爆轰反应进行了研究^[18]，采用了点火—增长模型的反应速率方程，利用二维非线性有限元程序对拉氏试验进行了模拟，以标定该炸药的上述反应速率方程。对以石墨代替铝的配方进行了实验，以考察铝粉在爆轰区内是否参加反应。通过圆筒试验和数值模拟标定了爆轰产物的 JWL 状态方程。他们认为铝粉在爆轰区内可能参加了反应，在爆轰区外继续反应，使含铝炸药具备较强的驱动做功能力。

1994 年胡栋等利用光谱探测技术，从微观上研究了铝含量对黑索今含铝炸药快速反应的影响^[19]。研究表明：增加铝含量可以增加与氧(或氢)直接反应的铝原子；铝粉含量大于 33% 后，AlO 和 AlH 的辐射强度不发生明显的改变。对于某些含铝炸药，

存在一个最佳铝粉添加量,黑索今含铝炸药的最佳铝添加量为33%左右。

1995年李银成等通过二维流体力学计算,比较了HBX-1含铝炸药,HMX炸药和Comp B炸药对破片的加速能力及其产生的冲击波超压。在计算中考虑了壳体破裂后产物运动流场对破片的继续加速能力。认为含铝炸药的高爆热、低爆速、低爆压的爆轰特性,是由于铝在反应区内完全反应,至少是大部分反应造成的^[20]。

1998年刘云剑和徐更光等^[21]用KHT(Kihara-Hilita-Tanaka)和BKW方程计算了含铝炸药的爆轰参数,并拟合了JWL状态方程。计算结果表明,设定铝粉在反应区为惰性时,计算结果与实验数据符合较好;而把铝粉设为活性时相差较大。

薛再清和徐更光研究了含铝炸药(90%B炸药+10%铝)的铝粉粒度对炸药反应的影响^[22,23]。他们认为铝在反应区内不参加反应或者参加反应的量很少,铝粉在反应区内主要是吸收能量,在CJ面之后才与炸药爆轰产物进行二次反应释放能量,并建立了含铝炸药的带二次反应模型的爆轰产物JWL状态方程。

1999年龙新平^[24]用VLWR程序计算了(RDX76/AL20%/粘结剂4%)含铝炸药的爆轰参数。计算中将铝粉分别作活性和惰性处理,计算的爆轰速度和压力与实验数据较为吻合,铝粉作活性处理时计算爆轰温度过高。

1999年陈朗^[25]对铝粉直径从几十纳米到几十微米的几种含铝炸药RDX/Al及RDX/LiF进行了小尺寸装药条件下炸药加速金属平板实验。用激光速度干涉仪测量了金属平板自由面速度。实验结果表明在相同装药条件下铝粉尺寸大小对含铝炸药爆轰性能有明显影响。

从含铝炸药爆轰性能研究状况来看,几十年来,人们对含铝炸药爆轰现象进行大量研究工作。由于含铝炸药的非理想爆轰特征,对含铝炸药的爆轰研究,重点是含铝炸药爆轰中铝粉对反应过程的影响,爆轰产物状态方程及爆轰性能参数的计算,含铝炸药的做功能力等方面。本书也从这几方面总结介绍作者在含铝炸药爆

轰研究中的主要研究方法和结果,以及相关研究方法在其他炸药爆轰研究中的应用。

参 考 文 献

- 1 孙业斌,惠君明,曹欣茂.军用混合炸药.北京:兵器工业出版社,1995
- 2 Svetlov B Ya. AD610342,1966
- 3 Finger M, Horning H C, Lee E L, et al. Metal acceleration by composite explosives. Fifth Symposium (International) on Detonation . Office of Naval Research Report .ACR-184, 1970
- 4 Gert .Bjarnholt. Effects of Aluminum and Lithium Flouride Admixtures on Metal Acceleration Ability of Comp B. Sixth Symposium(International) on Detonation. Office of Naval Research Report .ACR-221, 1976
- 5 Pfeil. ICT,1976,139 ~ 153
- 6 William C T, Craig M T, John W K, et al . Understanding Composite Explosive Energetics: IV. Reactive Flow Modeling of Aluminum Reaction Kinetics in Pent and TNT Using Normalized Product Equation of State. In: Tenth Symposium (International) on Detonation, 1993
- 7 Baudin G, Bergues D. A Reaction Model for Aluminized PBX Applied to Underwater Explosive Calculations. Tenth Symposium (International) on Detonation, 1993
- 8 Guiruis R H, Miller P J, Time-Dependent Equations of State for Aluminized Underwater Explosives. Tenth Symposium (International) on Detonation, 1993
- 9 Deiter J S, Wilmot G B. Detonation Chemistry of Underwater Explosives. Proceedings Tenth International Detonation Symposium. Bosten(Massachusetts), 1993
- 10 Cowperthwaite M. Non-ideal Detonation in a Composite CHNO Explosive Containing Aluminum. Tenth Symposium (International) on Detonation, 1993
- 11 Kennedy D L. Modelling Shock Initiation and Detonation in the Non-ideal Explosive PBXW-155. Tenth Symposium (International) on Detonation, 1993
- 12 Philip J M. A reactive flow model with coupled reaction kinetics for detonation and combustion in non-ideal explosives. MRS(Materials Research Society), 1996,413 ~ 420
- 13 Cowperthwaite M. Steady-state detonation in ammonium perchlorate/aluminum compositions with components in mechanical but not thermal equilibrium. Eleventh Symposium (International) on Detonation,1998
- 14 Guiruis R H, Miller P J. Time-Dependent Equations of State for Aluminized Underwater Explosives . 11th Symposium (International) on Detonation, 1998