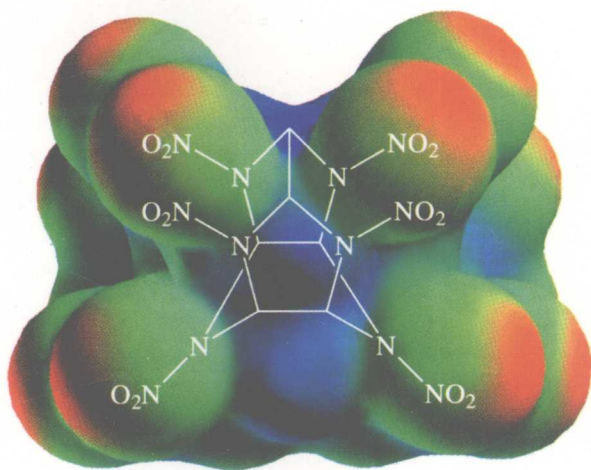


[德] Ulrich Teipel 主编
欧育湘 主译

含能材料

Energetic Materials

Particle Processing and Characterization



国防工业出版社
National Defense Industry Press



含能材料
Energetic Materials

Particle Processing and Characterization

[德] Ulrich Teipel 主编
欧育湘 主译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2007-065号

图书在版编目(CIP)数据

含能材料/(德)泰皮(Teipel,U)主编;欧育湘主译.
北京:国防工业出版社,2009.2
书名原文:Energetic Materials
ISBN 978-7-118-06058-4

I. 含... II. ①泰...②欧... III. 功能材料
VI. TB34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 181742 号

Originally published in the English language by WILEY - VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, BoschstraBe 12, D-69469 Weinheim, Federal Republic of Germany, under the title "Energetic Materials. Particle Processing and Characterization". Copyright 2005 by WILEY - VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

本书中文简体版由德国 WILEY - VCH Verlag GmbH & Co. KGaA 授权国防工业出版社独家出版发行。
版权所有,侵权必究。

※

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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 35 字数 620 千字

2009 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 86.00 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

序

德国 Fraunhofer 化工研究所(ICT) Ulrich Teipel 博士主编、Wiley - VCH 出版社 2005 年出版的 Energetic Materials《含能材料》一书,系统而全面地论述了含能材料粒子的现代加工工艺(包括粉碎、结晶、压缩空气结晶(超临界溶液)、粒子的混合、微胶囊化、纳米化及它们的数学 - 物理模型),含能材料粒子的特征、微观结构及其分析和表征等。上述内容对提高含能材料的关键性能和保证含能材料的质量稳定是十分重要的,但它们在中国以前出版的含能材料专著中,甚为少见,或者是不够系统,所以本书的翻译出版一定会受到中国含能材料领域同仁的欢迎,也预期能对中国含能材料的科研和教学提供有价值的参考和借鉴。

《含能材料》一书的 40 名作者,来自美国、俄罗斯、德国、英国、法国、意大利、荷兰、匈牙利、韩国 9 个国家,他们均系国际含能材料学科知名的学者,书中不仅有他们对学科基础理论精湛而严谨的论述,而且有他们多年从事含能材料研究的实践成果,所以该书既有很高的学术水平,又有很强的新颖性和实用性,理论与实践相得益彰。我相信,阅读该书的读者一定能从书中领略含能材料粒子现代加工工艺和粒子微观结构的精髓,并获得匪浅的收益。

《含能材料》一书由欧育湘教授主译。他著述经验丰富,文字水平上乘,译文规范、流畅,忠实原文,可读性强。

我以非常高兴的心情,期待《含能材料》中译本问世。

中国工程院院士

2008 年 10 月

译者前言

由德国 Fraunhofer 化工研究所 (ICT) Ulrich Teipel 主编的《含能材料》(Energetic Materials)一书系统地论述了粒状含能材料的加工工艺及性能表征。

本书分两大部分。第一部分包括粉碎、结晶、分散、混合、包覆及微胶囊化等加工工艺,及其工艺参数对粒子质量和性能的影响;第二部分包括粒状含能材料的微观结构、晶型、粒度、润湿型、流变性、化学性能、热性能及爆炸性能等的理论分析和测定方法。书中还对有关加工工艺及性能预测的仿真和模型进行了精辟的述评。此外,书中还专门论述了含能纳米粒子,扼要介绍了近 20 年出现的几种新的含能化合物,如 CL-20(六硝基六氮杂异伍尔兹烷)、ONC(八硝基立方烷)、TNAZ(1,3,3-三硝基氮杂环丁烷)、ADN(二硝酰胺铵)、FOX-7(1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烷)等。

全书由 40 位全球含能材料领域的知名专家撰写,他们来自美、英、法、德、俄罗斯、意大利、荷兰、韩国及匈牙利。这些作者在书中阐述了他们对粒状含能材料加工工艺及性能表征的卓越的科学见解、精湛的理论知识和丰富的实践经验,还结合了他们自身多年的科学研究成果。此书反映了含能材料某些领域理论和实践的现代水平,是一本能提供指导和非常实用的含能材料专著。

为扩大和加强与国外学者的技术交流,在总装备部“国防科技图书出版基金”的资助下,在国防工业出版社的指导、支持和帮助下,经德国 Wiley-VCH 的许可和授权,我们组织翻译了此书,现以中文版出版。我们希望读者能从书中发现含能材料的精彩世界,以轻松而愉快的心情阅读此书,并从中获益。

此书第 1、3、5、10 章及第 13 章的 13.1~13.3 节由欧育湘译、校;第 2、4、12 及第 13 章的 13.4~13.5 节由韩廷解译,李战雄及欧育湘校;第 6、7 章由赵毅译,欧育湘及韩廷解校;第 9 章由孟征译,欧育湘校;第 8、11 章由李战雄译,欧育湘校。全书由欧育湘审定,韩廷解及赵毅整理。

值此书中译本出版之际,作为主译,我在此首先要感谢全书的译者和校者,感谢他们两年来所付出的艰辛劳动和始终如一的热情;其次要感谢总装备部“国防科技图书出版基金”评审委员会的专家们,感谢他们热心的帮助、中肯的指导和厚爱;

最后要感谢国防工业出版社的领导和同仁,感谢他们为出版此书所作的努力和与译、校者和谐的合作。

限于译、校者的水平,加上书中内容涉及的知识面广而新,译文中不妥甚至错误之处势难避免,期望读者斧正。

欧育湘

2008年5月于北京阳春光华家园

原书前言

当前使用的推进剂、炸药及烟火药剂主要是由粒状含能材料组成的。优化这些粒状含能材料的能量水平、燃烧行为、稳定性、爆轰性能、加工特性等的方法,特别是降低含能系统感度的技术途径,具有很重要的意义,且正日益受到重视。通过改变这些含能材料的特征外形,产品设计可提供一些新型的粒状组分,特别是适于某些还在讨论中的应用场所的新组分。一些为人熟知的形成固体的工艺和操作,如结晶、沉淀、粉碎或细化等,也常用于制备含能材料粒子。尽管对于粒状材料的合成或加工,已有一定的信息可资借鉴,但在某些方面,目前人们还缺乏对其详细的了解,而对于如何充分控制粒子的形成过程或者使用户能对其使用的粒状含能材料所需的性能进行可靠的预测,这种对粒子的详细了解则是完全必要的。对粒状含能材料的制造工艺,仍未解决的十分重要的问题和任务是,粒状组分的综合性能表征、粒子形成过程动力学的实验测定方法、材料制造过程对粒子一些重要特性(如粒度分布、晶型(形态)和多晶型)的影响、粒子形成过程和粒状含能材料的仿真和模拟,以及低缺陷粒子的制造(考虑到低感度推进剂和炸药的需要)等。本书的读者群是有关工厂的工程技术人员、政府官员、研发人员以及涉足含能材料或其他特殊材料领域的人员。希望本书能反映和综述现有的含能材料知识水平。

本书系以含能材料导论开始(第1章),而导论的重点则是新的含能材料。本书的主要论题之一是含能材料的生产,它在书中第2章至第4章叙述,其内容首先是简述用于粉碎(减少粒径)含能材料的工艺,接着是结晶工艺的详细描述。在结晶工艺中,除了某些基本原理外,更主要的是采用结晶工艺设计含能材料 RDX、HMX、CL-20、NTO(3-硝基-1,2,4-三唑-5-酮)、AN(硝酸铵)、ADN(二硝酸酰胺)的可能性。此外,对近期研发的压缩空气下结晶的模拟和应用可能性也给予了适当叙述。本书随后的内容是分散系统的混合过程,该过程对粒子的加工也是相当重要的,所以第5章整章都是有关粒状含能材料微胶囊化和包覆的产品设计。本书接着论述的是纳米粒子,这种粒子正日益显现其重要性。本书其他各章涉及的是本书的第二个主要课题,即粒子特性的表征,其内容包括粒子粒度分析的方法及其局限性,粒子的微观结构,粒子的晶型和多晶性,以及粒子化学性能、热性

能及润湿性的分析技术。由含能材料粒子及有关粘结材料组成的分散系统的流变行为以及固体的流变行为,则是在本书第 12 章分开讨论的。本书的这一部分旨在让读者对含能材料的行为(包括粒径对反应的影响,晶体缺陷对含能材料配方感度的影响、冲击波和燃烧过程的诊断技术)有一个基本的了解。

本书的作者在书中引述了他们对有关含能材料粒子制造工艺的卓越的科学见解、精湛的理论知识和丰富的实践经验。本书有很多知名的同行专家作为作者,这一点对本书是极为重要的。作为本书的主编,首先我要感谢本书所有的作者,感谢他们和我一起为出版本书所进行的工作。其次,我还要感谢那些以不同方式在后台配合各位作者和主编工作的同仁。还有,特别值得我衷心感谢的是 Ulrich Förfer-Barth, Hartmut Kröber 及 Irma Mikonsaari,感谢他们为本书的筹划及出版,为本书手稿的评阅、加工和订正所做的坚持不懈的各种支持。最后,我还要感谢 Wiley-VCH 出版社的同仁,感谢他们在出版本书的整个过程中自始至终与我愉快而有成效的合作。

Ulrich Teipel

2004 年 9 月于德国 Pfinztal

原书主编及作者

主 编

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Teipel
Fraunhofer 化工研究院(ICT)
含能材料部
粒子工艺部
Joseph-von-Fraunhofer-Strasse 7
76327 Pfinztal, Germany

作 者

Prof. Dr. A. Yu Babushkin
Krasnoyarsk 国立工业大学
26, Kirensky St.
Krasnoyarsk 660074, Russia
(第 7 章)

M. Sc. Julie K. Bremser
材料表征实验室
Los Alamos 国家实验室
P. O. Box 1663, MS G770
Los Alamos, NM 87545, USA
(第 8 章)

Dr. Yuri A. Biryukov
Tomsk 国立大学
创新技术科教中心
36, Lenin
Tomsk 634050, Russia
(第 7 章)

Dr. G. A. Chiganova
Krasnoyarsk 国立工业大学
26, Kirensky St.
Krasnoyarsk 660074, Russia
(第 10 章)

Dr. Lionel Borne
法-德 Saint-Louis 研究院(ISL)
5 Rue Du General Cassagnou
P. O. Box 34
68301 Saint-Louis, France
(第 9、13 章)

Dr. Helmut Ciezki
德国航天中心
Raumfahrtantriebe Lampoldshausen
72439 Hardthausen, Germany
(第 13 章)

Dr. Norbert Eosenreich
Fraunhofer 化工研究院(ICT)
含能材料部
粒子工艺部
Joseph-von-Fraunhofer-Strasse 7
76327 Pfinztal, Germany
(第 13 章)

Dr. D. Mark Hoffman
California 大学

Lawrence Livermore 国家实验室
P. O. Box 808, L-282
Livermore; CA 94551, USA
(第 12 章)

Dr. Jerry W. Forbes
California 大学
Lawrence Livermore 国家实验室
P. O. Box 808, L-282
Livermore; CA 94551, USA
(第 13 章)

Ing. Aat C. Hordijk
TNO Prins Maurits 实验室
烟火及含能材料研究室
Lange Kleiweg 137, P. O. Box 45
2280 AA Rijswijk, The Netherlands
(第 6、12 章)

Dipl.-Ing. Ulrich Förter-Barth
Fraunhofer 化工研究院(ICT)
含能材料部
粒子工艺部
Joseph-von-Fraunhofer-Strasse 7
76327 Pfinztal, Germany
(第 12 章)

Dr.-Ing. Christof Hübner
Fraunhofer 化工研究院(ICT)
含能材料部
粒子工艺部
Joseph-von-Fraunhofer-Strasse 7
76327 Pfinztal, Germany
(第 12 章)

Dr. Alexander E. Gash
California 大学
Lawrence Livermore 国家实验室
P. O. Box 808, L-282
Livermore; CA 94551, USA
(第 7 章)

Dr. Manfred Kaiser
Wehrwissenschaftliches 研究院炸药及
推进剂厂
Außenstelle Swisttal-Heimerzheim
Großes Cent
53913 Swisttal, Germany
(第 10 章)

Dipl.-Ing. Thomas Heintz
Fraunhofer 化工研究院(ICT)
含能材料部
粒子工艺部
Joseph-von-Fraunhofer-Strasse 7
76327 Pfinztal, Germany
(第 5 章)

Dr. John Kendrick
ICI 技术部
Wilton 研究中心
P. O. Box 90
Wilton, Middlesbrough
Cleveland TS 90 8JE, UK
(第 3 章)

Dr. Michael Herrmann
Fraunhofer 化工研究院(ICT)
含能材料部
粒子工艺部

Joseph-von-Fraunhofer-Strasse 7
76327 Pfinztal, Germany
(第 9 章)

Prof. Dr. Kwang -Joo Kim
韩国化学工艺研究所
化学工程部
P. O. Box 107, Yuseong
Taejon 305-600, Korea
(第 3 章)

Dipl. -ING. Irma Mikonsaari
Fraunhofer 化工研究院 (ICT)
含能材料部
粒子工艺部
Joseph-von-Fraunhofer-Strasse 7
76327 Pfinztal, Germany
(第 2、11 章)

Dr. Horst Krause
Fraunhofer 化工研究院 (ICT)
含能材料部
粒子工艺部
Joseph-von-Fraunhofer-Strasse 7
76327 Pfinztal, Germany
(第 1 章)

Dr. Rudolf Nastke
Fraunhofer 聚合物应用研究所 (IAP)
GeiselbergstraBe 69
14476 Golm, Germany
(第 5 章)

Dipl. -Ing. Hartmut Kröber
Fraunhofer 化工研究院 (ICT)
含能材料部

粒子工艺部
Joseph-von-Fraunhofer-Strasse 7
76327 Pfinztal, Germany
(第 3、4 章)

M. Sc. Kirk E. Newman
含能材料和技术部
海军面武器中心
Indiana 总部
Bldg 457, Manley Road
Yorktown, VA 23691-0160, USA
(第 12 章)

Dr. Ronald S. Lee
California 大学
Lawrence Livermore 国家实验室
P. O. Box 808, L-282
Livermore; CA 94551, USA
(第 13 章)

Dr. Michael Niehaus
德国 Orica 公司
Kaiserstr.
53840 Troisdorf, Germany
(第 5 章)

Dr. Stefan Löbbecke
Fraunhofer 化工研究院 (ICT)
含能材料部
粒子工艺部
Joseph-von-Fraunhofer-Strasse 7
76327 Pfinztal, Germany
(第 10 章)

Prof. Dr. Ernesto Reverchon

食品工程系
Salem 大学
Via Ponte Don Melillo
84084 Fisciano(SA), Italy
(第 4 章)

Dr. Alexey I. Lyamkin
Krasnoyarsk 国立工业大学
26, Kirensky St.
Krasnoyarsk 660074, Russia
(第 7 章)

Prof. Dr. Eberhard Schmidt
Bergische 大学 Wuppertal 安全技术与
环境保护分院
Rainer-Gruenter-Strasse21
42119 Wuppertal, Germany
(第 5 章)

Dr. Ferenc Simon
化学和化工过程研究院
Kaposvár/Campus Veszprém 大学
Egyetem u. 2, P. O. Box 125
8200 Veszprém, Hungary
(第 3 章)

Dr. Simon Torry
未来系统技术部, QinetiQ
Fort Halstead
Sevenoaks
Kent, TN 14 7BP, UK
(第 11 章)

Dr. Randall C. Simpson
California 大学
Lawrence Livermore 国家实验室

P. O. Box 808, L-282
Livermore; CA 94551, USA
(第 7 章)

Prof. Dr. Victor Valtsifer
技术化学研究院
俄罗斯科学院
13, Lenin
Perm 614600, Russia
(第 12 章)

M. Sc. Cary B. Skidmore
猛炸药科学技术研究部
Los Alamos 国家实验室
P. O. Box 1663, MS C936
Los Alamos, NM 87545, USA
(第 9 章)

Dr. Antoine E. D. M. van der Heijden
TNO Prins Maurits 实验室
烟火及含能材料研究室
Lange Kleiweg 137, P. O. Box 45
2280 AA Rijswijk, The Netherlands
(第 3、6 章)

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Teipel
Fraunhofer 化工研究院(ICT)
含能材料部
粒子工艺部
Joseph-von-Fraunhofer-Strasse 7
76327 Pfinztal, Germany
(第 2、3、4、5、8、11、12 章)

Prof. Dr. Alexander Vorozhtsov
Tomsk 国立大学

54, Belinsky
Tomsk 634050, Russia
(第 7 章)

M. Sc. Fred Tepper
Argonide 公司
291 Power Court
Sanford, Florida 32771, USA
(第 7 章)

Prof. Vladimir E. Zarko
化学动力学和燃烧研究院

俄罗斯科学院
Siberian 分院
Nowosibirsk 630090, Russia
(第 7 章)

Dr. Joop ter Horst
Delft 工业大学
化工过程设备实验室
Leeghwaterstraat 44
2628 CA Delft, The Netherlands
(第 3 章)

目 录

第 1 章 新含能材料	1	2.2.3 胶体磨	32
1.1 导论	1	2.2.4 超声波研磨	33
1.2 应用要求	3	2.2.5 转子-定子分散 系统	38
1.2.1 炸药	3	2.2.6 搅拌球磨机	41
1.2.2 固体火箭推进剂	7	2.3 参考文献	44
1.2.3 发射药	9	第 3 章 结晶	46
1.3 新含能材料	11	3.1 结晶基本原理	46
1.3.1 CL-20	11	3.1.1 热力学和动力学	46
1.3.2 八硝基立方烷	13	3.1.2 结晶设备和结晶 工艺	49
1.3.3 TNAZ	14	3.1.3 结晶缺陷	53
1.3.4 ADN	16	3.2 含能材料结晶	56
1.3.5 FOX-7(1,1- 二氨基-2,2- 二硝基乙烯)	19	3.2.1 导言	56
1.4 结论	20	3.2.2 结晶和产品质量	56
1.5 感谢	21	3.2.3 HMX 和 RDX 的 结晶	66
1.6 参考文献	22	3.2.4 CL-20 的结晶	71
第 2 章 粉碎	24	3.2.5 NTO 的结晶	72
2.1 粉碎的基本原理	24	3.2.6 相稳定化硝酸铵 (PSAN)	92
2.1.1 材料性质和断裂 行为	24	3.2.7 ADN 的结晶	96
2.1.2 粉碎能量	26	3.3 模拟	98
2.1.3 选择粉碎工艺的 原则	28	3.3.1 导言	98
2.2 粉碎工艺	29	3.3.2 含能材料的分子 模型	99
2.2.1 销式圆盘研磨机	29	3.3.3 结晶过程的模拟	125
2.2.2 喷射研磨机	29	3.4 参考文献	130

第 4 章 压缩气体结晶	138	5.1.4 设备和过程	161
4.1 导论	138	5.2 微胶囊化和包覆工艺	163
4.2 超临界溶液的快速膨胀(RESS)	139	5.2.1 工艺的基本原理	163
4.2.1 预膨胀的压力、温度和浓度对 RESS 的影响	140	5.2.2 前言	165
4.2.2 后膨胀压力及温度对 RESS 的影响	140	5.2.3 微胶囊制造方法	167
4.2.3 喷管形状和尺寸对 RESS 的影响	141	5.2.4 含能材料的微胶囊化	176
4.2.4 RESS 模型	141	5.2.5 流化床超临界流体包覆法	180
4.3 超临界反溶剂沉淀(SAS)	142	5.3 参考文献	190
4.3.1 压力和温度对 SAS 的影响	145	第 6 章 混合	194
4.3.2 液体溶液的浓度对 SAS 的影响	146	6.1 导言	194
4.3.3 液体溶剂和溶质的化学成分对 SAS 的影响	146	6.2 原理	195
4.3.4 SAS 模型	147	6.3 混合机类型	196
4.4 超临界流体沉析含能材料	147	6.4 混合时间及混合效率	198
4.5 结论和展望	154	6.5 添加剂添加次序	201
4.6 参考文献	155	6.6 放大效应	202
第 5 章 粒径增大	159	6.7 结论	203
5.1 团聚	159	6.8 参考文献	203
5.1.1 导言	159	第 7 章 纳米粒子	205
5.1.2 粘结机理——粒子间力	159	7.1 溶胶-凝胶化学法制备纳米含能材料	205
5.1.3 生长机理及生长动力学	160	7.1.1 导言	205
		7.1.2 溶胶-凝胶法	207
		7.1.3 实验	209
		7.1.4 含能纳米材料	210
		7.1.5 溶胶-凝胶法制备纳米金属氧化物	211
		7.1.6 铁氧化物-铝纳米复合材料	216
		7.1.7 可产生气体的含能纳米材料	218
		7.1.8 碳氢化合物-高氯酸	

铵纳米复合材料·····	219	形状·····	251
7.1.9 结论·····	220	8.1.2 粒子尺寸分布·····	253
7.2 炸药爆炸合成超细		8.1.3 取样和制样·····	255
钻石·····	220	8.1.4 粒径测试方法·····	257
7.2.1 导言·····	220	8.2 粉末性能·····	278
7.2.2 超细钻石形成		8.2.1 密度·····	278
机理·····	220	8.2.2 水含量·····	279
7.2.3 外部条件对钻石		8.2.3 表面积·····	280
产率的影响·····	223	8.2.4 流动性能·····	281
7.2.4 超细钻石的性质		8.3 参考文献·····	283
与应用·····	228		
7.2.5 结论·····	229	第9章 晶体的微观结构和	
7.3 Alex®纳米铝在含能		形态 ·····	285
领域的应用·····	229	9.1 导言·····	285
7.3.1 导言·····	229	9.2 炸药晶体颗粒的缺陷·····	285
7.3.2 工艺·····	230	9.2.1 内部缺陷·····	285
7.3.3 铝粉的特征·····	231	9.2.2 表面缺陷·····	289
7.3.4 作为固体推进剂组分		9.3 X射线衍射表征的晶体	
及添加剂·····	232	微观结构 ·····	293
7.3.5 用作液体燃料		9.3.1 原理·····	293
添加剂·····	233	9.3.2 评定·····	293
7.3.6 用于炸药·····	235	9.3.3 应用·····	294
7.3.7 用于发射药·····	236	9.4 显微镜探测混合炸药·····	301
7.3.8 结论·····	236	9.4.1 导言·····	301
7.4 粉状含能材料的气动		9.4.2 方法·····	302
制备法·····	236	9.4.3 应用于HMX混合	
7.4.1 基本原理及优点·····	236	炸药·····	303
7.4.2 处理含能材料及		9.4.4 应用于TATB混合	
亚微米级粉体的		炸药·····	308
新型气动装置·····	237	9.5 参考文献·····	311
7.4.3 粉体处理的研究			
结果·····	238	第10章 热分析和化学分析 ·····	314
7.5 参考文献·····	247	10.1 热分析表征含能材料·····	314
第8章 粒子表征 ·····	251	10.1.1 导言·····	314
8.1 粒径分析·····	251	10.1.2 二硝酰胺铵(ADN)	
8.1.1 单一粒子的尺寸和		的热分析·····	315

10.1.3	六硝基六氮杂 异伍兹烷(CL-20) 的热分析	320	11.3.2	典型的 IGC 实验 条件	356
10.2	核磁共振(NMR)表征 含能材料	324	11.3.3	IGC 原理	357
10.2.1	导言	324	11.3.4	RDX 和 HMX 表面 的典型 IGC 测试 结果	360
10.2.2	NMR 理论	325	11.3.5	反相液相色谱	364
10.2.3	仪器和方法	327	11.3.6	结论	368
10.2.4	核磁共振表征 ADN 及 CL-20	327	11.4	参考文献	369
10.2.5	用 NMR 鉴定 4-甲 酰基五硝基六氮杂 异伍兹烷(4- FPNIW)的结构	332	第 12 章 流变学	372	
10.3	冲击波合成材料分析中 的化学分解法	338	12.1	稳态剪切流	372
10.3.1	导言	338	12.2	流体的流动特性	372
10.3.2	实验	339	12.3	非稳态剪切流	374
10.3.3	结果和讨论	340	12.4	流变仪	376
10.4	结论	342	12.4.1	旋转流变仪	376
10.5	参考文献	343	12.4.2	毛细管流变仪	378
第 11 章 润湿性分析	346		12.5	悬浮液的流变性	379
11.1	前言	346	12.5.1	分散系统的相对 黏度	379
11.2	表面能测试	346	12.5.2	基质流体	380
11.2.1	表面张力理论	347	12.5.3	分散相	381
11.2.2	自由界面能测定 模型	348	12.5.4	铸造性	385
11.2.3	平面接触角 测试	349	12.5.5	固化和时间的 影响	386
11.2.4	以毛细管渗透法测 定粉体的接触角	350	12.5.6	纳米悬浮系统	387
11.2.5	实验结果	352	12.6	凝胶推进剂	392
11.3	色谱法表面表征	355	12.6.1	材料和方法	393
11.3.1	反相气相色谱 (IGC)	356	12.6.2	硝基甲烷/二氧 化硅凝胶的稳态 剪切流变特性	394
			12.6.3	硝基甲烷/二氧化硅 凝胶的黏弹特性	396