

射孔器材检验 理论与应用

王 赞 主编



石油工业出版社

射孔器材检验理论与应用

王 赞 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书共分4章,系统阐述了射孔器材产品的检验方法,并从实验室检验的实际出发,详细介绍了油气井射孔器材在现场的检验与应用,具有较强的理论和应用价值。

本书可供石油勘探开发各级领导干部和从事射孔工作的广大技术人员及大专院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

射孔器材检验理论与应用 / 王赞主编.

北京:石油工业出版社,2013.5

ISBN 978-7-5021-9531-1

I. 射…

II. 王…

III. 油气井—射孔器—检验

IV. TE925

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第047992号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址: <http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部:(010) 64523736 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013年5月第1版 2013年5月第1次印刷

850×1168毫米 开本:1/32 印张:5

字数:122千字

定价:40.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《射孔器材检验理论与应用》

编委会

主 编：王 赞

副主编：王海东 李东传 高树峰 王锐

编写和审定人员名单

第一章

编写人：刘 辉

审定人：王海东

第二章

编写人：李东传（第1、3节）、王宝玲
（第2节）

审定人：李东传

第三章

编写人：金成福（第1、2、4、8节）、刘辉
（第3、8节）、张贵杰（第5节）、李险峰（第
6节）、王宝玲（第7节）

审定人：李东传

第四章

编写人：庆彩屏（第1节）、梁 纯（第2节）

审定人：王海东

序

近年来,国内射孔器材制造水平有了显著提高,部分产品已接近国际先进水平。为了更好地控制国内射孔器材产品质量,并做好射孔器材质量检验工作,需要严格规定射孔器材检验程序和提高检验人员的技术水平,为此石油工业油气田射孔器材质量监督检验中心编写了《射孔器材检验理论与应用》。

本书主要是依据 GB/T 20488—2006《油气井聚能射孔器材性能试验方法》、GB/T 20489—2006《油气井聚能射孔器材通用技术条件》规定的检验、评价方法并参考了 API RP19B《油气井射孔器评价的推荐作法》而编写的,反映了我国射孔器材检验技术水平。全书共分四章,系统地阐述了射孔器材产品检验方法,并且从实验室检验的实际出发,详细介绍了油气井射孔器混凝土靶射孔试验、油气井射孔器贝雷砂岩靶射孔试验、油气井射孔器贝雷砂岩靶流动试验、油气井射孔器高温常压钢靶射孔试验、油气井射孔器高温高压砂岩靶射孔试验、油气井射孔器模拟井射孔试验、油气井射孔枪耐温耐压试验、油气井射孔弹模拟运输振动试验、油气井射孔弹地面打钢靶射孔试验等检验方法以及配套的评价方法。

相信本书的出版将有助于射孔器材检验机构、射孔器材生产厂家和油田用户组织相关技术人员用标准的检验方法来检验产品质量,为在油田现场进行不同厂家产品性能的对比提供依据,还可为产品质量控制提供可靠的方法,必将有助于进一步促进国内射孔器材产品质量的提高。这本书具有较高的实用价值。

石油工业技术标准化委员会

测井专业委员会主任: 陆大旦

2010年12月8日

目 录

第一章 爆炸和炸药概论	1
第一节 概述	1
一、爆炸的概念	1
二、爆炸三要素	2
三、炸药爆炸的五个标志量	3
四、炸药爆炸形式分类	4
五、炸药的分类	5
第二节 射孔器常用单质炸药及其技术指标	7
一、国内射孔器常用单质猛炸药技术指标	7
二、国外射孔器常用单质猛炸药技术指标	10
第三节 炸药性能检测方法	11
一、炸药爆速的测定	11
二、炸药威力的测定	11
三、炸药猛度的测定	12
四、炸药机械感度的测定	12
第二章 射孔器	14
第一节 聚能射孔器	14
一、概述	14
二、分类及基本性能	16
第二节 射孔枪	22
一、发展简史	22
二、射孔枪的概念、结构和分类	23
第三节 聚能射孔弹	26

一、有枪身聚能射孔弹	27
二、无枪身聚能射孔弹	30
三、射孔弹包装、标识检测	31
四、射孔弹外观、尺寸、装药量检测	33
第三章 射孔器(弹)检验技术	37
第一节 混凝土靶射孔试验	37
一、原理	37
二、检验方法	38
三、评价方法	50
第二节 应力条件下贝雷砂岩靶射孔试验	55
一、原理	55
二、检验方法	55
三、评价方法	62
第三节 高温常压钢靶射孔试验	63
一、原理	63
二、检验方法	63
三、评价方法	67
第四节 模拟井底条件下射孔孔眼流动特性试验	68
一、原理	68
二、检验方法	69
三、评价方法	80
第五节 模拟井射孔及套管检测	80
一、模拟井及工作原理	80
二、检测技术分类	83
三、检测工艺及执行标准	83
四、射孔器模拟试验井检测技术	84

五、评价方法	89
第六节 射孔弹模拟运输震动检测	91
一、原理	91
二、检验方法	92
三、评价方法	94
第七节 射孔枪耐温耐压检测	95
一、耐温耐压实验装置	96
二、检测方法	100
三、评价方法	104
第八节 地面打钢靶射孔检测	107
一、原理	107
二、检验方法	107
三、评价方法	111
第四章 油气井用电雷管、导爆索检测	112
第一节 油气井用电雷管检测	112
一、概述	112
二、油气井用电雷管基本结构、分类、命名和机理	114
三、检测技术及检测方法	117
四、异常情况处理	133
五、试验后仪器设备检查	133
第二节 油气井用导爆索检测	133
一、概述	134
二、油气井用导爆索的结构及分类	136
三、油气井用导爆索的检测	139
四、评价方法	148
参考文献	150

第一章 爆炸和炸药概论

第一节 概 述

一、爆炸的概念

(一) 爆炸

爆炸是物质急剧的物理或化学变化。在变化的同时，伴随着该物质含有的能量急剧地转变为压缩能和运动能。爆炸最重要的特征是爆炸点周围介质发生剧烈的压力突跃。

爆炸做功的基本原因在于系统中原有的高压气体或在爆炸瞬间形成的高温高压气体迅速膨胀，导致在爆炸点周围介质中压力发生急剧的突跃，从而产生爆炸破坏作用。

(二) 爆炸现象

1. 物理爆炸现象

物理爆炸过程是一个物理过程，即爆炸前后物质的化学成分没有发生改变，只是物态发生了变化。例如，当蒸汽锅炉内压力过大，超过了锅炉所能承受的抗压强度时，使锅炉突然破裂，并发出巨大的声响，就是典型的物理爆炸。

2. 化学爆炸现象

化学爆炸过程是急剧的化学反应过程，放出足够的热能，形成高温高压气体，并对外界膨胀做功。爆炸后物质的化学成分和性质已不同于爆炸前物质的化学成分和性质，如硝酸铵炸药爆炸后生成水蒸汽、氧气和氮气。瓦斯爆炸和炸药爆炸都属于化学爆炸。

3. 核爆炸现象

某些物质的原子发生核裂变 (^{235}U 的裂变) 或核聚变 (氘、

氘、锂的聚变)的连锁反应时,瞬间释放出巨大能量,使裂变或聚变产物形成高温高压的气体而迅速膨胀做功,造成巨大的破坏作用。核爆炸过程释放的能量,可以达到普通炸药爆炸能量的几百万倍,具有强烈的爆破作用。

二、爆炸三要素

(一) 炸药爆炸

在外界作用下(如撞击、电流、热等),炸药内部发生剧烈的化学变化,急剧地释放出大量的热能,并且产生大量气体,对外界做机械功,称为炸药爆炸。

(二) 爆炸三要素

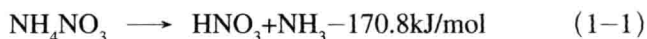
炸药爆炸必须具备反应的放热性、生成大量气体和反应的快速性三个条件。

三个因素是互相关联的,反应放热量大,则将炸药本身加热到很高的温度,从而化学反应速度大大提高,即增加了反应的快速性;同时,由于放热量大,反应产物将被加热到更高的温度,也会使更多的产物处于气体状态。

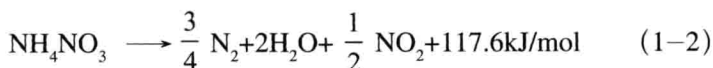
1. 反应的放热性

炸药爆炸实质上是炸药中的化学能在瞬间转化为对外界做功的过程。化学反应释放出的热是做功的能源,也是化学反应进一步加速进行的必要条件。所以化学反应过程是否释放能量,决定了炸药能否产生爆炸。释放热量的多少是爆炸作用大小的决定因素之一。如硝酸铵在不同条件下有不同的反应。

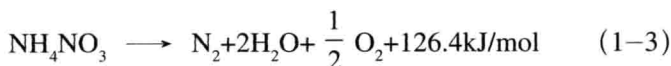
(1) 在较低温度时(低于 150℃),硝酸铵产生分解反应,吸热不爆炸:



(2) 在迅速加热到 400 ~ 500℃ 时,硝酸铵产生放热反应,发生热分解:



(3) 在强烈冲能（如炸药爆炸产生的冲能）作用时，硝酸铵产生放热反应，可以形成爆炸：



2. 反应的快速性

爆炸反应的快速性是爆炸变化更重要的条件，是区别爆炸反应与一般化学反应的重要标志。只有迅速的化学反应，才能使炸药在瞬间释放出大量能量，达到很高的能量密度，形成高温高压的反应产物，使炸药爆炸具有巨大的功率密度和强烈的破坏作用。如煤在空气中燃烧释放出的热量（8960kJ/kg）是 TNT 炸药爆炸时释放热量的两倍多，但由于没有必要的反应速度，其能量密度远小于 TNT 爆炸时的能量密度，不能形成爆炸。

3. 反应生成大量气体

气体具有良好的压缩性和很大的膨胀系数，炸药爆炸瞬间（十至几十微秒时间内）生成大量的气体容纳在原有体积内，必然产生很高的压力，高温高压气体为做功提供了必要条件，气体膨胀就是做功。产生气体的多少和释放热量的多少决定了炸药爆炸做功的多少。

炸药的化学反应只有同时具备以上三个条件，才能形成爆炸反应，产生爆炸效应。

三、炸药爆炸的五个标志量

综合评定一种炸药爆炸性能的优劣时，常采用如下五个标志量，即炸药的爆热、爆容、爆温、爆速和爆轰压力。

（一）爆热

单位质量炸药爆炸时所释放出的热量称为炸药的爆热，工程计算上常以每千克炸药爆炸所放出的热量来表示。

（二）爆容

每千克炸药爆炸后形成的产物在标准状态下（压力为0.01MPa，温度为0℃）所占有的体积称为炸药的爆容。由于固体产物的体积与气体产物的体积相比很小，故爆容一般可用气体产物在标准状态下占有的体积表示。

（三）爆温

爆炸产物在原有体积内达到热平衡时的温度称为爆温。

爆温的高低取决于爆炸时放出的热量及爆炸产物的组成。军工上一般采用爆温高的炸药，采矿用炸药则要求爆温低一些。

（四）爆速

爆炸反应的速度通常用爆速来衡量。爆速指爆炸过程在炸药中传播的最大的稳定的速度。可以认为，在同等条件下，爆速高的炸药爆炸反应速度快，爆炸的威力也高。

（五）爆轰压力

炸药爆炸时，爆轰波阵面上的压力称为爆轰压力。

四、炸药爆炸形式分类

炸药爆炸按反应的速度和性质分为燃烧（爆燃）和爆轰两种形式。

（一）燃烧（爆燃）

炸药本身含有氧化组分和可燃组分，在无外界提供氧的情况下也能燃烧。炸药在不从空气中补充氧的情况下的燃烧为爆燃。

炸药的爆燃是一种很猛烈的氧化还原反应，这种反应只在炸药装药的局部区域内进行，此区域称为反应区。反应区和未反应区的交界面称为燃烧阵面或燃烧表面。燃烧表面沿其法线方向向未反应区传播的速度叫燃烧速度。燃烧速度通常为每秒几毫米至数百米，但低于炸药本身的爆速，而且受当地条件影响很大。例如，大气压力增高，则通常燃速增大。当炸药在大

气中燃烧时，燃烧速度一般较慢，而且没有显著的声响效应；但在密闭容器中，燃烧速度快得多，并有显著的声响效应，能够做出机械功。

（二）爆轰

爆轰与燃烧现象相似，也是一种化学反应区的传播过程，但其传播速度极快，一般每秒为数百米至数千米。这种化学反应区的高速传播现象称为爆轰波的传播，传播的速度称为爆速。正常情况下，导爆索和聚能炸药爆炸后均能产生爆轰。

炸药的爆速都超过炸药本身的音速，很少受外界条件的影响。由于爆轰反应区内压力、温度等都产生突变，无论是否在密闭的容器中，爆轰反应产物都急剧地冲击周围介质，导致周围介质的破碎和变形。

（三）燃烧和爆轰的传播机理

燃烧通过热的传导、扩散和辐射在炸药中传播；爆轰则是通过冲击波传播的，爆轰波就是伴有高速化学反应的冲击波。

炸药的两种爆炸变化形式是互相转化的，在一定条件下，爆燃可以过渡到爆轰。

五、炸药的分类

（一）按组分分类

可以将炸药分为单质炸药和混合炸药两大类。爆破工程中大量使用的是猛炸药，尤其混合猛炸药；起爆器材中使用的是起爆药和高威力的单质猛炸药。

1. 单质炸药

单质炸药为单一化学成分的爆炸物质，多数单质炸药为内部含有氧的有机化合物。

单质炸药按它们的化学分子结构又分为许多类型，主要有：

（1）乙炔及其衍生物，如乙炔银、乙炔汞等；

（2）雷酸及其盐类，如雷汞、雷酸银等；

- (3) 硝酸酯类炸药，如硝酸甘油、太安等；
- (4) 硝仿系炸药，如 TNT、黑喜儿等；
- (5) 硝胺系炸药，如黑索金、奥克托金、特屈儿等；
- (6) 胺类硝酸盐系列炸药，如硝酸脲、二硝酸乙二胺等；
- (7) 呋咱系炸药，如 7311、重呋咱等；
- (8) 含氟炸药，如重硝胺等；
- (9) 其他，如氯酸盐、叠氮化物等。

2. 混合炸药

混合炸药是指由两种或两种以上独立的化学成分构成的爆炸物质。

混合炸药可分为爆炸的气体混合炸药、液体混合炸药及固体混合炸药三类，目前应用最广的是固体混合炸药。

固体混合炸药又可分为以下几种类型：

- (1) 普通混合炸药，如钝化黑索金、铵黑-1 炸药等；
- (2) 含铝混合炸药，如钝黑铝炸药、新铝 2 号炸药等；
- (3) 有机高分子黏结炸药，如 8321 炸药、1871 炸药等；
- (4) 特种混合炸药，如塑性炸药、弹性炸药、橡皮炸药等。

(二) 按用途分类

按照用途，可以将炸药分为起爆药、猛炸药和火药（或发射药）以及烟火剂。

1. 起爆药

起爆药又叫初发炸药，主要用于激发高猛炸药爆轰的引爆剂。常用的起爆药有雷汞、叠氮化铅、二硝基重氮酚等；

2. 猛炸药

猛炸药又称次发炸药，只在相当强的外力作用下才发生爆炸。一旦起爆后，它们就具有更高的爆速和更强烈的破坏威力。常用的猛炸药有 TNT、黑索金、特屈儿、奥克托金等。

3. 火药

火药主要用于发射枪弹或炮弹，以及用作发射火箭的燃料。

常用的火药有黑火药、无烟火药等。

火药按成分和形态结构可分为均质火药和异质火药两大类。均质火药是利用高分子炸药与溶剂，经溶解塑化和压实成型而制成基本单相物体，包括单基火药、双基火药两类。异质火药是由多种组分组合而成，有粉碎良好的氧化剂（如过氯酸铵）、惰性或活性胶黏剂（如聚丁二烯、硫黄、双基火药胶等）、金属粉添加剂（如铝粉）等，各组分的分子保持着不同的接触关系，构成了多相物体。异质火药包括混合火药、复合火药、复合双基火药、三基火药。

4. 烟火剂

烟火剂通常由氧化剂、有机可燃物或金属粉以及少量黏合剂混合而成，如照明弹中的照明剂、烟幕弹中的烟幕剂等。

第二节 射孔器常用单质炸药及其技术指标

一、国内射孔器常用单质猛炸药技术指标

（一）梯恩梯（TNT）

梯恩梯即三硝基甲苯 $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$ ，简称 TNT，是甲苯经三段硝化制成的，主要用于雷管装药。TNT 的吸湿性很小，几乎不溶于水，可用于有水的炮孔中进行爆破。TNT 的热安定性好，常温下不自行分解，温度达到 180°C 以上才显著分解。TNT 遇火能燃烧，大量燃烧或在密闭条件下燃烧时可转为爆炸。TNT 的机械感度较低，但如果混入硬质掺和物时则容易引爆，所以在制造、运输和使用时应特别注意。TNT 的技术指标见表 1-1。

（二）黑索金（RDX）

黑索金即环三次甲基三硝铵 $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$ ，简称 RDX，由乌洛托平经硝化制成。RDX 广泛用于普通射孔弹混合装药的

主炸药，并用于雷管和导爆索等。RDX 的技术指标见表 1-2。

表 1-1 TNT 的技术指标

项 目	指 标
外 观	淡黄色至黄色鳞片状物，无肉眼可见的机械杂质，允许有个别粘在一起的药片状和发暗的斑点
熔点 (°C)	≥ 80.2
水分及挥发含量 (%)	≤ 0.07
酸度 (以硫酸计) 含量 (%)	≤ 0.01
丙酮、苯或甲苯不溶物含量 (%)	≤ 0.10
灰分含量 (%)	≤ 0.08
硝酸含量 (%)	痕迹
亚硫酸钠含量 (%)	无
渗油含量 (%)	不大于标准样品

注：丙酮、苯或甲苯不溶物不大于灰分指标时，不测定灰分。

表 1-2 RDX 的技术指标

项 目	一级品	二级品
外 观	结晶的白色粉末，允许呈浅灰色或粉红色能通过边长为 1.6mm 的方孔筛的粉粒	
熔点 (°C)	≥ 202.5	≥ 201.5
水分及挥发含量 (%)	≤ 0.10	≤ 0.10
酸度 (以硫酸计) 含量 (%)	≤ 0.05	≤ 0.06
丙酮不溶物含量 (%)	≤ 0.15	≤ 0.30
灰分含量 (%)	≤ 0.08	≤ 0.20
硅土含量 (%)	≤ 0.03	≤ 0.10
钝感剂含量 (%)	无	≤ 1.0
外来杂质 (个/100cm ²)	≤ 10	≤ 30

注：(1) 丙酮不溶物含量不超过硅土允许含量时，不测定硅土和灰分含量；

(2) 灰分含量不超过硅土允许含量时，不测硅土含量。

(三) 奥克托金 (HMX)

奥克托金即环四次甲基四硝胺 $C_4H_8N_8O_8$ ，白色颗粒状结晶，中等毒性，遇震动、摩擦、明火、高温可爆。奥克托金是目前已实际应用爆速最高的炸药，主要用于高温射孔弹用混合炸药装药，并用于雷管和导爆索等配套器材。HMX 的技术指标见表 1-3。

表 1-3 HMX 的技术指标

项 目	指 标	
纯度 (%)	一级品 ≥ 98	二级品 ≥ 93
熔点 ($^{\circ}C$)	≥ 270	
酸度 (以醋酸计) 含量 (%)	≤ 0.02	
丙酮不溶物含量 (%)	≤ 0.05	
无机不溶物 (灰分) 含量 (%)	≤ 0.03	

(四) 特屈儿

特屈儿即三硝基苯甲硝胺 $C_6H_2(NO_2)_3NCH_3NO_2$ ，淡黄色晶体，主要用于军事，也可用于雷管的加强药。特屈儿难溶于水，机械感度和热感度均高，爆炸性能好。特屈儿容易和硝酸铵强烈作用放出热量而自燃，故严禁将特屈儿和硝酸铵混合使用。特屈儿的技术指标见表 1-4。

表 1-4 特屈儿的技术指标

项 目	指 标
外 观	均匀淡黄色细小结晶，无肉眼可见的机械杂质
熔点 ($^{\circ}C$)	≥ 127.9
酸度 (以硫酸计) 含量 (%)	≤ 0.02
丙酮不溶物含量 (%)	≤ 0.05
水分及挥发分含量 (%)	≤ 0.02
二氧化硅含量 (%)	≤ 0.015

注：丙酮不溶物含量低于 0.015% 时，不测定二氧化硅含量。