



YOUQIJING SHEKONG JISHU

油气井射孔技术

陆大卫 主编



射孔技术作为完井工程的重要组成部分和试油技术的主要环节,是利用高能炸药爆炸形成射流射穿油气井的管壁、水泥环和部分地层,建立油气层和井筒之间油气通道的一种技术。

石油工业出版社

内 容 提 要

本书总结了 60 年来我国油气井射孔技术的实践经验及技术发展,并介绍了部分国外的先进技术、方法,包括石油射孔器、特殊条件下射孔及射孔完井优化设计、安全等内容。既有方法理论的介绍,也有实践经验总结。

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

油气井射孔技术 / 陆大卫主编.

北京:石油工业出版社,2012.4

ISBN 978-7-5021-9026-2

I. 油…

II. 陆…

III. 油气井—射孔

IV. TE257

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 075015 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:www.petropub.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

2012 年 4 月第 1 版 2012 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:26.5

字数:642 千字

定价:110.00 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

《油气井射孔技术》编委会

主 任：陆大卫

副 主 任：王志信 潘永新 陈 锋 郑长建 鲜于德清

委 员：袁吉诚 王 赞 朱建新 吴永清 朱进初

宋留群 陈军友

《油气井射孔技术》编写组

主 编：陆大卫

主要成员：袁吉诚 陈军友 郑长建

前 言

射孔技术作为完井工程的重要组成部分和试油技术的主要环节，是利用高能炸药爆炸形成射流射穿油气井管壁、水泥环和部分地层，建立油气层和井筒之间油气流通道的一种技术。1998年，石油工业出版社出版了《油气井射孔井壁取心技术手册》，在油田现场发挥了应有的作用。十多年来，射孔技术快速发展，射孔效率提高，安全性增强。为此，中国石油学会测井专业委员会发挥跨部门、跨学科、跨地区的桥梁作用，组织中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团公司、中国海洋石油总公司以及军工单位的射孔专家，总结射孔技术新成果，编写了本书。2009年12月召开了编写工作启动会，确定了本书的编写目的、适用对象，以及章节框架，并对编写时间做了详细安排。此后分别于2010年5月、2010年12月、2011年3月、2012年1月召开了四次审稿会。

本书分为基础理论、射孔器及配套装置、射孔器检验技术、射孔深度计算与装炮、射孔方案优化设计、射孔仪器、射孔工艺技术、工程作业技术、油气井射孔安全技术和射孔技术应用事例共10章。各章节编审人员如下：

绪论是由王志信、鲜于德清编写，陆大卫审核。

第一章是由刘玉存（中北大学）、王建华（中北大学）、蒋芳芳、刘学（湖北航天化学技术研究所）、何金锐（湖北航天化学技术研究所）、陈华彬、任国辉、姜晓燕、蔡山编写，陆大卫、郑长建、陈军友等审核。

第二章是由潘永新、罗苗壮、庄金勇、赵开良、肖勇、石前、顾军、张兴民、郭鹏、胡咏梅、李明厚、王雪艳、郭伟民、张志强、魏永刚、郭景学、王文红、刘增、王峰、张伟民编写，袁吉诚、赵明辉审核。

第三章是由李东传、王海东、李险峰、金成福、刘辉、张贵杰、梁纯、朱贵宝编写，郑长建审核。

第四章是由石莹、王树申编写，陆大卫、郑长建等审核。

第五章是由姜晓燕、蔡山、荣学艺编写，陆大卫、郑长建等审核。

第六章是由赵福前、郭建峰、张振波、苗久厂、荣学艺、王树申、郑红日、郭希明、汤科、梁岩、蔡山、张伟民、郭景学、蔡山、刘桥、刘贯虹编写，王志信、陈军友等审核。

第七章是由张振波、郑红日、陈锋、朱进初、庄金勇、郭希明、吴永清、罗苗壮、赵开良、刘增、唐凯、王树申、李明厚、葛莉、汤科、程启文、欧跃强、梁岩、张伟民、王培禹、郭景学、蔡山、赵金文、刘桥、胡咏梅编写，袁吉诚、赵明辉审核。

第八章是由赵明辉、赵延升、赵春辉、俞海、刘桥、荣学艺、洪雯霞编写，王志信等审核。

第九章是由陈军友、纪传友、徐志国、庄金勇、张立涛、张维强编写，王志信等审核。

第十章是由陈锋、姜晓燕、袁吉诚、唐凯、李明厚、张林、董淑高、荣学艺、梁岩、

程启文、张伟民、王培禹、郭景学、刘桥、罗苗壮、朱进初、刘贯虹编写，袁吉诚审核。

全书由陆大卫负责统稿。

在本书编写过程中，得到大庆、胜利、四川、中原等油田的测井公司或测试公司，中海油田服务股份有限公司，大庆石油管理局射孔弹厂，石油工业油气田射孔器材质量监督检验中心，西安物华巨能爆破器材有限责任公司，中北大学和湖北航天化学技术研究所的大力支持，在此表示衷心的感谢！

限于作者水平，书中存在的不足或错误，敬请读者提出宝贵意见。

目 录

绪论	1
第一章 基础理论	9
第一节 炸药基础	9
第二节 炸药的爆轰理论基础	19
第三节 油气井用火药理论	39
第四节 渗流力学	48
第五节 材料学和材料力学	52
第六节 射孔参数对油气井产能的影响	69
第二章 射孔器及配套装置	77
第一节 射孔器	77
第二节 射孔弹	83
第三节 射孔枪	99
第四节 雷管、起爆器及起爆装置	112
第五节 传爆管、导爆索及传爆装置	130
第六节 特殊射孔器	135
第七节 配套工具	146
第三章 射孔器检验技术	158
第一节 概述	158
第二节 油气井聚能射孔器材检测技术	159
第三节 油气井复合射孔器检测技术	177
第四节 油气井用电雷管、起爆装置检验技术	182
第五节 油气井用导爆索、传爆管检测技术	189
第六节 油气井用射孔器材质量评价	195
第四章 射孔深度计算与装炮	202
第一节 射孔深度计算所使用的资料	202
第二节 标图	205
第三节 放射性校深	208
第四节 射孔深度计算	210
第五节 特殊情况下的射孔深度计算	212
第六节 装炮施工设计及工艺	214
第七节 自动化标图、校深	218
第五章 射孔方案优化设计	221
第一节 常规射孔优化设计	221

第二节	复合射孔优化设计	229
第三节	水平井射孔优化设计	233
第四节	射孔液优选	237
第五节	负压值设计	241
第六章	射孔仪器	244
第一节	射孔地面控制仪	244
第二节	射孔井下深度、方位测量仪器	250
第三节	射孔监测仪	257
第七章	射孔工艺技术	260
第一节	电缆输送射孔	260
第二节	电缆输送射孔分次起爆技术	263
第三节	油管输送射孔	265
第四节	油管输送射孔多级起爆技术	268
第五节	联作射孔	275
第六节	复合射孔	287
第七节	定方位射孔	291
第八节	水平井射孔	294
第九节	负压射孔	299
第十节	超正压射孔	304
第十一节	井口带压射孔	306
第十二节	全通径射孔	311
第十三节	高压气井射孔	313
第十四节	含硫化氢气井射孔	316
第十五节	连续油管输送射孔	319
第八章	工程作业技术	324
第一节	爆炸松扣与切割	324
第二节	电缆桥塞	331
第三节	封窜射孔	337
第四节	井壁取心	339
第五节	套管补贴	352
第九章	油气井射孔安全技术	354
第一节	环境分析	354
第二节	射孔器材制造安全技术	357
第三节	射孔器材储存要求	360
第四节	射孔器材的运输要求	362
第五节	射孔器材的销毁方法	364
第六节	现场作业安全措施	365
第七节	油气井射孔安全自控系统	367
第十章	射孔技术应用事例	371

第一节	射孔优化设计技术在肇212区块的应用	371
第二节	KL2气田射孔技术的应用	375
第三节	超高温射孔技术在胜利油田的应用	380
第四节	射孔一下泵联作工艺技术应用实例	382
第五节	可控气体压裂增效射孔技术在LG×井的应用	384
第六节	复合射孔技术应用事例	387
第七节	高能气体压裂技术应用实例	391
第八节	定方位射孔技术在P××井的应用	393
第九节	动态负压射孔技术的应用	395
第十节	超正压射孔技术在天东五百梯构造的应用	398
第十一节	全通径射孔技术在DN2-X井的应用	400
第十二节	连续油管输送过油管射孔的应用	403
第十三节	TCP监测识别系统监测实例	407
参考文献		413

绪 论

射孔技术作为完井工程的重要组成部分和试油技术的主要环节,是利用高能炸药爆炸形成射流射穿油气井管壁、水泥环和部分地层,建立油气层和井筒之间油气流通道的一种技术。按照技术分类,射孔技术可分为射孔器技术、射孔工艺技术、射孔检测技术、射孔安全技术、工程作业技术、射孔仪器和优化设计技术等。

射孔技术涉及火药、炸药、爆炸力学、流体力学、材料力学、石油地质、测井、油藏工程等多个学科的知识。由于这些学科的不断发展和进步,特别是油气开发对射孔的认识和需求不断提升,从 20 世纪 30 年代使用简单的射孔技术打开油气流通道,到现在以改造油层,提高产能为目的,并与多种井筒条件相配套的工艺技术需求,使射孔技术内容越来越丰富。射孔弹也由最初的子弹式射孔发展成为目前广泛使用的聚能射孔。射孔弹分为深穿透型和大孔径型两种,能满足高温、中温和低温地层完井。

历经几十年的发展,射孔技术有了长足的进步,特别是 20 世纪 90 年代以后,射孔技术更是飞速发展。法国的斯伦贝谢公司研制出穿深达 1.2m 的射孔弹。除了在现有射孔弹基础上努力提高穿透深度外,美国还完成了水动力射孔工艺技术与开发工作,进行了石油井下激光射孔装置的方法的研究。此外,美国的哈里伯顿公司还率先在 102 型射孔枪中装 DP37 型射孔弹开创了小枪装大弹之先河,这样又进一步推动了高强度射孔枪的研制。

目前,我国油气田的射孔作业主要分为三个方面:

第一,射孔设计、器材及工艺的优选。聚能射孔是指带有空穴的成型炸药在爆炸时,爆轰产物以特定的速度和方向汇聚并向低压区传播形成射流,射流穿透金属套管射入地层,形成出油孔道。将射孔弹药一端设计成一定形状的空穴,能够提高对靶的破坏(即穿孔深度)作用,这种效应称为聚能效应。射流的锋头速度可达约每秒几千到上万公里。射孔弹的穿孔造缝效果,对提高油井产能至关重要。射孔的孔深、孔径、孔密(每米装弹的数量)等参数都影响到油井产能,所以射孔的枪型、弹型、孔密、装弹的方位等需要优化匹配,才能达到最佳效果。炸药是聚能射孔弹的能量基础。据有关资料报道,聚能射孔弹中炸药的爆炸能量只有 5% ~ 10% 用于产生射孔孔眼。而剩余的 90% ~ 95% 则是产生损害套管水泥环的震动力。现在对弹型结构和药型罩的材料等研究已有很大进展,射孔弹炸药的利用率有了很大提高,但射孔弹对枪体及井筒(包括作业管柱)的损害仍然是不可忽视的。另外,聚能射孔弹形成的射流穿入岩层时,对孔道周围岩层强烈的压实而形成压实带,降低了岩层的渗透性;弹片、碎屑等堵塞孔道影响油气的流出,这是聚能射孔在为油气提供流动通道的同时产生的负面作用。

第二,准确地控制射孔深度是射孔作业的关键环节。要射开的油层深度是在裸眼完井测井资料解释时确定的。在固井后的套管内进行射孔作业时,要确保施工作业深度与裸眼井测井的深度一致。目前采用的方法是,在同一口井中,完井时在裸眼井中所测的自然伽马曲线与固井后在套管井中所测的自然伽马(或中子伽马)曲线之间进行深度对比,以固

井后所测得的套管接箍曲线作为电缆输送射孔深度的依据，为射孔施工提供准确的深度。根据校正的接箍深度与射孔时实测接箍深度进行比较，将射孔器与油层的位置对应，达到控制深度的目的。

第三，如何准确确定射孔器与油层的深度是射孔施工中深度控制的关键技术。直到 20 世纪 60 年代，我国研制成功 GSQ-652 型跟踪射孔取心仪后，才实现了用仪器控制射孔作业深度的目的，结束了人工丈量电缆射孔的历史。这项成果是我国射孔技术创新的起点和亮点。后来随着电子技术的发展，国内相继研发并广泛应用了 SQ-691 型数控射孔取心仪等多种型号的仪器。在深度控制精度方面都有新的提高。1969 年至 1988 年，由西安石油勘探仪器总厂生产的 SQ-691 型数控射孔取心仪共生产 300 余套；1988 年至 2003 年 SSGC 型数控型射孔仪共生产 193 套。

我国射孔技术始于 20 世纪 50 年代初，历经了创业、探索、开拓和发展的艰辛历程。经过 60 年的艰苦努力，无论在射孔工艺技术上，还是在射孔器材的性能和配套上都取得了显著的成绩，较好地满足了我国油气开发的需求。

一、艰难创业

新中国成立之初，王曰才先生在玉门油田参与了首次射孔作业。1952 年，在苏联专家的帮助下，玉门油矿组建了由 6 人组成的新中国第一支射孔队，队长杜有名。当年，在老君庙首次使用苏联生产的 ПП-6 型和 ППХ-4 型射孔器成功地完成了射孔试油任务。ПП-6 型和 ППХ-4 型射孔器都是利用火药燃烧产生的高压推进子弹，使它穿透套管的。ПП-6 型和 ППХ-4 型射孔器分别有 3 个和 4 个弹道，火药室为一节，每三节组成一个整体，所以又称 9 孔和 12 孔射孔器。ПП-6 型射孔器最大穿透深度为能穿透 10 ~ 15mm 厚的钢板（管），或 100 ~ 110mm 厚的水泥，适合在壁厚 8 ~ 10mm 的 5 ~ 6in 套管内射孔，一次只能射开 0.6 ~ 0.7m 油层。ППХ-4 型射孔器最大穿透深度为能穿透 15 ~ 20mm 的钢板（套管），或能穿透 120 ~ 140mm 厚的水泥，适合在壁厚 10 ~ 12mm 的 6in 以上套管内射孔，一次只能射开 0.85 ~ 1m 的油层。

ТПК 子母弹是一种特别的子弹。子弹里面装有炸药，底部装有小型冲击雷管，外面装有一个防水的紫铜垫圈，子母弹靠火药能穿透套管进入地层，弹底部的冲击雷管被猛击后而起爆，引起弹头内部炸药的爆炸，使周围的地层受到猛烈冲击破坏，被震松或震开裂缝。就此降低了油、气、水向井内流动的阻力。ТПК-22 型射孔器最大穿透深度为能穿透 20mm 厚的钢管，ТПК-37 型最大穿透深度为能穿透 35mm 厚的钢管，这两种射孔器都能穿透 150mm 厚的水泥。

1953 年，宝鸡石油机械厂成功试制出 ТТХ-4 型射孔枪并投入批量生产，替代了苏制产品。子弹式射孔器的优点是射孔后不破裂套管，射孔孔眼规整；缺点是穿孔浅。由于当时国产低碳素钢热处理工艺不过关，用这种钢材制造的子弹经常射不穿油井套管，有时子弹卡在套管上或射孔枪上，只好进行打捞作业。子弹式射孔器在我国一直沿用到 20 世纪 60 年代初。

1956 年，石油工业部派谭廷栋等人到苏联、罗马尼亚进行技术考察，将聚能射孔技术介绍到国内。在第五机械工业部的大力支持下，重庆 152 厂（即江陵机械厂）于 1956 年开始研究苏联和罗马尼亚式聚能射孔器技术，1957 年成功试制出 57-103 型有枪身射孔器，

装枪穿深 45 号钢靶 55mm，穿孔孔径 10mm，耐温 90℃，耐压 40MPa。1958 年成功试制出 58-65 型和 58-40 型两种无枪身射孔弹。58-65 型射孔弹穿深 45 号钢靶 75mm，穿孔孔径 10mm，耐温 85℃，耐压 25MPa。58-40 型射孔弹穿深 45 号钢靶 56mm，穿孔孔径 7mm，耐温 80℃，耐压 14MPa。三种射孔器在玉门油田、克拉玛依油田和青海油田推广使用，射孔后油井产量明显比子弹式射孔器提高。由于射孔弹喷孔和枪头处引火电路的密封方式落后，使用成功率偏低，一次下井最多射开 2.5m，每米最高孔密 10 孔。57-103 型有枪身射孔器枪体一般可以重复使用 10 ~ 15 次（与井的深度有关），因此，这种射孔器一直沿用到 20 世纪 80 年代。

58-65 型射孔弹和 58-40 型射孔弹由于成本低、工效高，用电缆钢丝做炮架，射孔弹直接裸露在压井液中，这种射孔方式在大庆油田开发初期曾大量使用。在一次事故处理中，拔出油井套管后发现射孔造成套管开裂长达 430mm。为了检验射孔的质量，大庆油田于 1963 年建成一口射孔专用模拟试验井（东八-4 井）。在这口井中对 57-103 型、58-65 型和 58-40 型三种射孔器模拟射孔进行了大量的对比试验。实验表明，58-65 型射孔弹用两方向和四方向射孔，射孔套管裂缝率分别达到 94% 和 80%，最大裂缝长 1180mm。58-40 型射孔弹射孔后套管开裂程度比 58-65 型射孔弹射孔后套管开裂程度小，57-103 型有枪身射孔器射孔后对 J-55 钢 7.72mm 厚的套管没有出现过一次开裂。

1964 年，石油工业部要求在全国各油田禁止使用 58-65 型射孔弹，并将库存的 58-65 型射孔弹全部报废销毁。57-103 型有枪身射孔器一直使用到 20 世纪 80 年代。

同年，应用定位射孔技术，根据磁定位器信号的变化确定标准套管接箍的位置，能够较准确地计算接箍与油层的距离，大大减少了丈量电缆的工作量，提高了射孔深度的精度。

1965 年以前，我国没有专用的射孔作业设备，射孔作业时使用 AKC51 型测井绞车，配备 CIIY 型射孔仪器面板，射孔时通过仪器面板进行点火起爆。随后相继成功研制出 CIIY-3000 型绞车的射孔仪器面板和国产 53 型射孔仪器面板，施工时采用人工丈量电缆确定射孔的深度，精度低、劳动强度大。

随着大庆、胜利等大型油田的相继发现，我国石油工业得到了快速发展。为了满足石油业大发展的需求，1964 年，胜利油田电测站组建了射孔弹实验室（即后来的射孔弹厂，负责人赖维民），专门研发新的射孔器材。当年研制成功文胜二型无枪射孔弹，这种射孔弹的炸药柱没有弹壳保护，下井时用泡沫塑料包扎后固定在钢筋架体上。穿 45 号钢靶深度为 55 ~ 60mm，耐压 16MPa。

1965 年，石油工业部决定在大庆建立射孔弹研究室，1968 年在第五机械工业部 763 厂的帮助下研制成功“文革一号”无枪身射孔弹，穿 45 号钢靶深度 65mm，穿孔孔径 10mm，使用温度 65℃，耐压 20MPa。

1969 年，四川石油局建立射孔弹厂并试制出火炬一型和火炬二型玻璃壳无枪身射孔弹。

1970 年，西安石油仪器厂在陕西礼泉建立了射孔弹车间。同年年底，受燃料化学工业部委派，陆大卫等人在大庆油田试验井经反复试验，确定一次下井使用 60 发，可以确保大庆油田射孔后分层开采的需要。

1978 年，胜利油田和西安兵器工业 204 研究所（204 所）合作研制成功耐热一号炸药（即聚黑-10G3）和 SWD- 型链杆式铝合金无枪身射孔弹。

这一时期，我国射孔行业在一没技术、二没经验的情况下，广大技术人员通过认真学习苏联等国的技术和经验，通过艰难的摸索，取得了一些可喜成果，初步建立了我国油气射孔技术体系。但整体技术水平较低，与国外先进技术相差较远，仍不能满足当时我国快速发展的油气田勘探开发的需求。

二、探索发展

为了解决我国油气射孔技术水平整体较低的局面，迅速缩短与国外先进技术的差距，射孔界有志之士通过调研和分析认识到，我国射孔技术要想全面快速发展，只有走技术引进和自我探索相结合之路，才能满足我国油气工业快速发展的需要，

1977年，石油化学工业部组织以胜利油田为基地，引进美国德莱赛·阿特拉斯公司的五种无枪身铝合金射孔弹、三种有枪身射孔弹和两种切割弹。石油化学工业部科技司组织了西安石油仪器厂五分厂射孔弹车间，大庆、胜利、四川等油田的射孔弹厂和第五机械工业部的204所、西安应用物理化学研究所（213所）和内蒙古金属材料研究所（52所）等单位联合对引进的射孔器材进行系统解剖、分析和试验。德莱赛·阿特拉斯公司的带钢外壳装药合压方法和无杵堵粉罩技术的优点在于提高了射孔弹质量的稳定性和射孔孔道的流动特性。

通过对引进产品的解剖、分析和试验，积累了丰富的技术资料，开阔了思路。尽管如此，由于当时各油田正处在开发时期，对射孔造成套管及油层的损害认识不够，致使国内带外壳装药的工艺技术在五年后才研制成功，粉末罩的推广应用推迟了近十年。20世纪50—60年代，西方国家已将这一技术用于生产中，我国晚了将近30年。

1978年，石油工业部从美国吉尔哈特公司和欧文公司引进了8种射孔器（有枪身射孔器3种、无枪身射孔器5种），其中有直径为51mm（2in）的过油管射孔器。过油管射孔是一项新的射孔技术，射孔前先把油管下放到射孔井段的上部，用清水或其他轻质射孔液替代井筒内的钻井液，抽去部分井筒液体。射孔时射孔器通过井口防喷盒、油管及其下端的喇叭口下放到射孔目的层，在平衡压力或欠平衡压力条件下射孔。其优点是减少了射孔时对油气层的污染，对提高油井产能有利，工效高、成本低；其缺点是枪型及弹型较小，穿孔深度较浅。

1979年，大庆石油管理局试油试采公司射孔弹厂研制的GF-2型和胜利射孔弹厂研制的麦克落两种无枪身过油管射孔弹通过了现场试验，为我国推广过油管技术创造了条件。

1980年初，石油工业部派出由制造局、大庆油田和西安石油勘探仪器总厂组成的射孔技术赴美考察组，先后考察了德莱赛公司、阿特拉斯公司、吉尔哈特公司、欧文公司和威日伏尔德公司，这次较为全面的考察看到了我国射孔技术与国外先进水平的差距。

1984年，石油工业部引进美国吉奥·范公司的油管输送射孔器。油管输送射孔技术实现了真正意义上的对油层在负压差条件下的射孔，克服了过油管射孔弹装药少、穿深浅的缺点，为大斜度井射孔、水平井射孔提供了条件。石油工业部勘探局在大港油田举办油管输送射孔技术培训班，促进了该技术在各油田的推广。

1989年，在大庆石油管理局试油试采公司射孔弹厂的基础上成立大庆石油管理局射孔弹厂（以下简称大庆射孔弹厂），试制成功69-1型聚氯乙烯软管导爆索，用于无枪身射孔弹的传爆。当年，大庆射孔弹厂从美国吉尔哈特公司引进API RP43贝利砂岩射孔流

动实验装置，并派技术人员出国培训。把美国石油学会推荐的评价油气井射孔器的标准 API RP43 引进到国内，大大推进了我国射孔器材评价技术。

1991 年，大庆石油管理局和四川石油管理局共同组团赴美国考察油气井导爆索和射孔弹制造工艺技术。美国英森比柯福特公司是油井专用导爆索的生产公司。其生产的 PYX 系列导爆索最高使用温度 220℃ /48h，最高爆速 7500m/s。

1995 年，石油工业油气田射孔器材质量监督检验中心从哈里伯顿公司全套引进 API RP43（第五版）技术及设备。主要包括：应力条件下射孔及流动测试装置、高温常压下钢靶射孔装置和混凝土靶样块强度测试机等。同时，四川射孔弹厂从欧文公司引进了射孔弹自动化生产线的使用权。药型罩制造采用金属粉末施压技术，使射孔弹产品质量显著提高。

1996 年，大庆射孔弹厂从美国引进编织导爆索技术投入批量生产。先后完成了 80RDX、80RDXLS 等六种型号导爆索的技术开发。导爆索最高爆速（80HMXXHV 型）达到 7760m/s，最高耐温（80PYX 型）达到 200℃ /2h。大庆射孔弹厂还向哈里伯顿公司引进了射孔弹自动生产线和弹架成型激光切割机。

从技术人员出国学习考察和引进技术中，看到了我国射孔技术与国外的差距，同时迫于油气田勘探开发大发展需求的压力，引起了管理部门的高度重视。

1977 年，石油化学工业部与第五机械工业部在四川联合召开了第一次射孔器材科研攻关协作会。参加这次会议的有两个部委的机关管理人员、石油系统四家射孔弹厂的技术人员和 204 所、213 所等的技术人员。

1978 年，石油工业部和第五机械工业部在西安联合召开了第二次射孔器材科研攻关协作会。会上讨论了深井射孔炸药、雷管、导爆索和射孔弹的攻关方向，落实了研制单位。

1979 年，石油工业部和 NL 集团在北京共同组织了首次中美射孔技术交流会议。

1980 年，石油工业部在大港召开过油管射孔新技术应用座谈会。当时国内各油田累计完成过油管射孔 244 井次。射孔最大井深 4330m。

1987 年到 1988 年历时两年，石油工业部勘探司组织大庆、辽河、胜利、中原、大港、四川六个油田 21 名技术人员，依据 SY/T 5128-86 标准和 API RP43 标准，对全国各油田使用的 25 种射孔弹在大庆进行了首次全国射孔弹性能统一测试。检测结果反映出国内生产的大部分射孔弹穿透深度浅，不能满足石油勘探开发的要求。12 种过油管射孔弹穿 API 混凝土靶，穿深最浅的一种射孔弹平均穿深为 44.9mm，穿深最最深的一种射孔弹平均穿深为 138.2mm。

1986 年，斯伦贝谢公司 5g 装药量过油管射孔弹，穿混凝土靶平均穿深为 269mm。国内的 13 种套管射孔弹穿混凝土靶，穿深最浅的一种射孔弹平均穿深为 154mm/6g，73 型有枪身射孔弹，穿深最深的 YD073 型射孔弹平均穿深为 204mm，32g 装药量 YD114 型射孔弹平均穿深为 308mm。其余 11 个品种平均穿深都在 160 ~ 80mm 之间。当时，斯伦贝谢公司 15g 装药量 3³/₈in 射孔弹混凝土靶平均穿深为 500mm，22.7g 药量 4in 射孔弹穿混凝土靶平均穿深为 609mm，37g 装药量 5in 射孔弹平均穿深为 726mm。

我国生产的射孔弹射孔后堵孔现象严重，穿钢靶的堵孔率最高为 95%，穿混凝土靶堵孔率最高为 44%。九种铜板聚能罩的过油管弹平均射孔流动效率为 66%，最低射孔流动效率为 21%。经测试粉末罩的过油管弹不堵孔，其平均射孔流动效率为 91%。

1989年,中国石油天然气总公司在大庆召开全国射孔井壁取心工作会,总地质师阎敦实参加了会议。会议讨论了射孔器材配套研究攻关计划,提出了两年射孔弹穿深达到400mm,五年射孔弹穿深达到700mm的奋斗目标。

1991年,西安石油勘探仪器总厂射孔弹厂研制的SYZ-41型射孔弹混凝土靶穿深达到487mm,大庆射孔弹厂研制的YD89-1型射孔弹穿深达到455mm,山西新建机器厂研制的89弹穿深达到402mm。

1992年,大庆射孔弹厂研制的YD89-3型射孔弹,混凝土靶穿深达到514mm。1994年吉林油田9214射孔弹厂、四川射孔弹厂、山东机器厂(732厂),辽宁双龙石油器材联营公司、新疆燎原机械厂研制的89弹穿深也相继突破500mm。127型射孔弹穿深超过780mm。当时斯伦贝谢公司发布的最新成果中,相当于国内127型射孔弹在51BHJ2RDX型射孔弹混凝土靶穿深848mm,在51BHJ2HMX型射孔弹混凝土靶穿深765mm。1979年五机部474厂(华丰化工厂)试制成功了SW-3型深井油井雷管,第二机械工业部川南机械厂、煤炭工业部阜新十二厂分别试制成功深井射孔用铅管导爆索。1999年大庆射孔弹厂、213所、阜新十二厂和云南燃料二厂常用导爆索的爆速相继突破700m/s的指标。

20世纪80—90年代,在炸药研制方面也有较大进展。1985年,204所研制出以黑索金为主体的R-852(即聚黑-16)混合炸药。此药成为使用量最大,使用时间最长的射孔弹用药产品;90年代,204所成功研制出以PYX、HNS、TATB为代表的耐高温(250℃/2h)单质炸药和混合炸药。在射孔器方面,204所首先研制成功复合射孔器;大庆射孔弹厂成功研制出YS-114型大口径有枪身射孔器,主要用于稠油油层射孔;1984年,山西新建机器厂率先研制成功油管输送式射孔起爆器,在华北油田和大港油田试验成功。

在此期间,大庆射孔弹厂古广钦编写出版了SY/T 5128-86《油气井聚能射孔弹通用技术条件》;陆大卫、王文祥编写出版了《射孔新技术》;牛超群、张玉全编写出版了《油气井完井射孔技术》;西安石油勘探仪器总厂研究所编写出版了《油井射孔译文集》;刘玉芝编写出版了《油气井射孔井壁取心技术手册》;惠宁利、王秀芝编写出版了《石油工业用爆破技术》;陈益鹏编写出版了《射孔技术译文集》;傅阳朝、刘中振、王西平等翻译出版了《射孔》。王志信、蔡景瑞于1984年在《测井技术》发表了《谈谈射孔对套管的损害及改进措施》等。这些著作和文章的出版和发表不仅助推了射孔技术的发展和使用,同时也反映了我国射孔技术全面快速发展的局面,以及当时我国射孔技术的水平和生产使用中存在的问题。

三、开拓创新

20世纪90年代,通过技术引进和自我探索,我国的射孔技术处于快速发展阶段。在改革开放的大环境下,在借鉴国外技术的基础上,在实践中积累的丰富经验的基础上,我国射孔器材的制造能力和射孔技术能力得到空前发展。除原有的大庆射孔弹厂、四川射孔弹厂、西安石油勘探仪器总厂射孔弹分厂、吉林金星配件厂(9214厂)、辽宁双龙石油器材联营公司、河北二机厂、山东机械厂、山西新建机械厂之外,又涌现出了204所、213所和秦川机械厂(804厂)、川南机械厂等。生产的射孔弹达20余种之多,年生产能力射孔弹在400万至450万发。导爆索生产有大庆射孔弹厂、阜新十二厂、云南燃料二厂、山西阳泉104厂和川南机械厂等厂家。油井起爆器和雷管生产厂家有213所、辽宁华丰化工

厂和川南机械厂。射孔枪的生产厂家有宝鸡石油机械厂，以及华北、大庆、胜利等各油田的射孔枪厂总计约 29 家。

半个多世纪以来，射孔技术在学习前中前进、在实践中创新。胜利油田赖维民等人研制的 GSQ-651 型跟踪射孔取心仪在 1980 年获国家发明奖，并在朝鲜、阿尔巴尼亚等国使用。在此基础上，各油田相继使用了西安石油勘探仪器总厂生产的 SQ-691 型数控射孔取心仪等不同型号的数控射孔仪。大庆石油管理局试油试采公司射孔弹厂研制的中深井系列射孔器和西安石油勘探仪器总厂与 204 所联合研制的耐热一号炸药获 1978 年国宝科学大会奖。由胜利、大港等五个油田研究的防止油（气）层损害的射孔新技术及其推广应用获国家科技进步二等奖。大庆油田以 89 型和 127 型为代表的射孔弹研制成果深穿透系列射孔器技术研究被评为中国石油天然气总公司 1994 年十大科技成果之一。胜利油田研制的“SLAS-9700 型油气井射孔多极自控型安全起爆装置”在 1996 年北京国际发明展览会上荣获金奖，2000 年获国家经济贸易委员会安全科学技术进步二等奖……

大批量使用的 102 型射孔弹混凝土靶穿深平均为 800mm，127 型射孔弹混凝土靶穿深 860mm，89 型射孔弹混凝土靶穿深 760mm，装药量 45g，每米枪装弹 13 ~ 16 孔条件下混凝土靶穿深平均为 940mm。耐高温和超高温炸药、导爆索的研制取得新进展。

目前，我国已研制出满足油田勘探开发需要的常温、高温、超高温、深穿透系列射孔弹和大孔径射孔弹。研制出高孔密、大直径及小井眼系列的射孔器有百余种规格。适合低孔、低渗油层和稠油开发工艺的每米枪装弹 20 ~ 40 孔、穿深 500 ~ 1000mm，以及孔径 16 ~ 25mm 的大孔径高孔密射孔技术已在各油田大量推广应用。

射孔工艺技术在实践中形成了较为完善和规范的技术。其主要内容有油气井射孔安全技术、水平井射孔工艺技术、起正压射孔工艺技术、射孔—测试联作工艺技术、一次管柱分层射孔—测试联作工艺技术、射孔—高能气体压裂复合技术、油管传输射孔分级起爆工艺技术、定方位射孔工艺技术、一次性完井管柱工艺技术、WCP 带压作业工艺技术、电缆射孔分级点火射孔工艺技术、射孔—抽油泵联作工艺技术、全通径射孔工艺技术等。

石油工业油气田射孔器材质量监督检验中心具有对射孔器、射孔弹、雷管、导爆索及油层套管等六项内容 87 个技术参数的检测能力。胜利油田建立的高温高压射孔效能实验装置可以模拟在温度 200℃、压力 80MPa 条件下进行单发射孔弹打靶试验，可以模拟在温度 150℃、压力 80MPa 条件下进行单发或多发射孔弹打靶试验；P-T 仪及尾声弹等检测技术在生产中得到广泛应用。这些都标志着我国射孔技术的水平和实力已经达到国际先进水平。

目前，我国的射孔技术不仅能够满足国内油气田勘探开发的需求，而且已走出国门服务到中东、西亚、南亚和非洲等世界各地。据不完全统计，截至 2010 年 5 月，我国射孔器材生产行业申报国家专利 78 项，射孔技术服务行业申报国家专利 772 项。

大庆油田是我国最大的油田。1959 年 9 月 26 日，第一口出油井松基三井采用射孔完井喷出工业原油，从而揭开大庆油田勘探开发大会战的序幕。大庆油田油气井射孔技术的发展大体上经历了四个阶段：

第一阶段（油田开发初期至 1962 年），以钻井液压井、57-103 型有枪身射孔器射孔、人工丈量电缆定深为标志的简单射开油气层射孔工艺技术阶段；

第二阶段（1963 至 20 世纪 80 年代中期），以钻井液压井、WD67-1 型射孔器射孔、半自动及 SQ-691 型数控射孔取心仪应用为标志的准确打开油气层射孔工艺技术阶段；

第三阶段（20 世纪 80 年代中期至 90 年代初期），以清水压井、过油管射孔、负压射孔、油管输送射孔、射孔液应用为标志的保护油气层射孔工艺技术阶段；

第四阶段（20 世纪 90 年代初期至今），以深穿透射孔、复合射孔、射孔方案优化设计、数字化射孔仪应用为标志的解放油气层射孔工艺技术阶段。

经过 50 多年的发展，大庆油田射孔完井工艺技术逐步形成了数字化射孔、大孔径射孔、深穿透射孔、高温高压射孔、负压射孔、油管输送射孔、高能气体压裂及复合射孔、水平井射孔、定方位射孔、动态负压射孔和射孔方案优化设计、射孔完井液等工艺技术系列，适应了高渗透、高丰度油层和中低渗透、特低渗透油层开发的需要，为油田高产稳产提供了技术支撑。同时也走出国门，在印度尼西亚、哈萨克斯坦等国进行技术服务。

大庆石油管理局射孔弹厂是规模化生产射孔弹的专业工厂，大庆油田射孔技术发展集中反映了中国石油射孔技术的发展历程。

第一章 基础理论

第一节 炸药基础

一、爆炸及其现象

爆炸是自然界中经常发生的一种现象。广义地说，爆炸是指物质的物理或化学变化，在化学变化过程中，伴随有能量的快速转化，内能转化为机械压缩能，且使原来的物质或其变化产物、周围介质产生运动。

爆炸做功的根本原因在于系统原有高压气体或爆炸瞬间形成的高温高压气体或蒸气的骤然膨胀，使爆炸点周围介质发生急剧的压力突跃，形成冲击波。爆炸的一个最重要的特征是在爆炸点周围介质中发生急剧的压力突变，而这种压力突变是爆炸破坏作用的直接原因。

爆炸现象包括两个阶段：(1) 内能转化为强烈的物理压缩能；(2) 压缩能的膨胀一释放，潜在的压缩能转化为机械功。机械功可使与之相接触或相近的介质运动。

爆炸可以由各种不同的物理现象或化学现象所引起。常将爆炸现象大致分为如下几类。

(一) 物理爆炸现象

物理爆炸是系统的物理变化所引起的爆炸。例如，闪电是一种强力的火花放电，在放电区可达到极其巨大的能量密度和极高的温度（数万摄氏度），这就导致放电区空气压力迅速上升而发生爆炸。蒸汽锅炉的爆炸是由于锅炉内的水受热生成水蒸气，其压力超过了锅炉壁的承受应力，造成锅炉碎裂，锅炉内的过热水蒸气快速膨胀，产生破坏。除此之外，地震、物体的高速撞击以及火山爆发等也都属于物理爆炸的范畴。

(二) 化学爆炸现象

通常将能够进行化学爆炸的物质称为炸药。炸药的爆炸变化有燃烧和爆轰两种典型的形式，且这两种形式之间在一定条件下可以相互转变。矿井瓦斯爆炸、煤矿粉尘爆炸以及炸药爆炸等都属于化学爆炸现象。

化学爆炸是由于快速的化学变化而使化学能快速地转化为压缩气体势能。这也就是人们常说的爆炸。发生化学爆炸要有三个反应条件：放热化学反应、反应的高速率和反应生成大量气体产物。

(1) 放热化学反应。

化学反应释放的热量是爆炸的能源。反应中的吸热或放热、发热的多少决定其是否具有爆炸性质。

放热化学反应是由分子内的键能决定的，因此也就和分子的化学结构有关。碳键的惰性有可能形成热力学不稳定的物质，生成这类化合物时要吸收能量，所以当它们分解时，就要释放能量。表 1-1-1 列出了可使化合物具有爆炸性的基团。