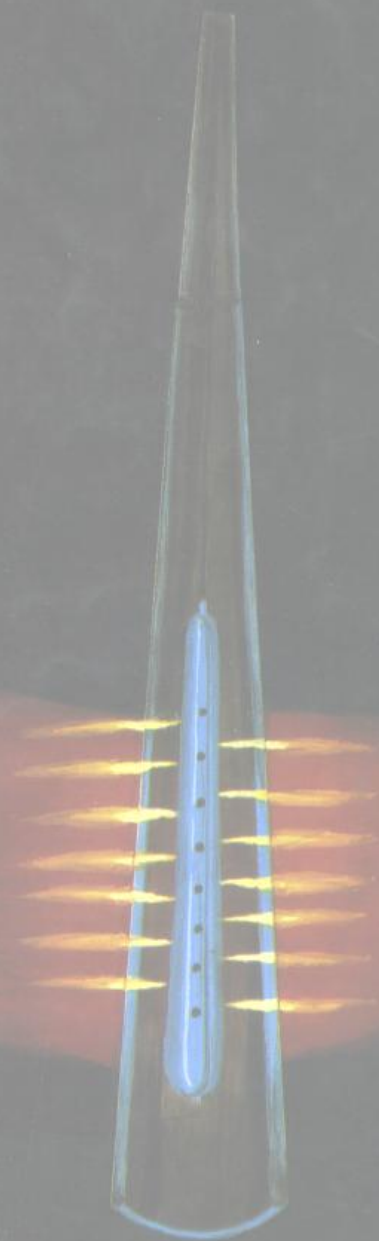


用射孔枪打开油气层

苏日·门·格里戈良

石油工业出版社



用射孔枪打开油气层

石



社

用射孔枪打开油气层

〔苏〕 H.Γ.格里戈良

李继康等 译 金振武 校

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统地论述了用射孔枪打开油气层的技术、方法和工艺,射孔枪的结构特点和性能,以及射孔子弹和聚能流射开多层介质的过程。同时对射孔孔眼大小的影响因素,孔眼的渗透能力和射孔对套管的影响进行了研究。本书作为射孔工作者的参考书具有一定的指导性和启发性,并且也可供大专院校师生参考。

* * *

第一、二、三、四、五章由李继康译;第六章由郝志兴译;第七、八章由赵耀武译。

ВСКРЫТИЕ НЕФТЕГАЗОВЫХ ПЛАСТОВ СТРЕЛЯЮЩИМИ ПЕРФОРАТОРАМИ

Н.Г.ГРИГОРЯН
МОСКВА «НЕДРА» 1982

*

用射孔枪打开油气层

〔苏〕Н.Г.格里戈良
李继康等译 金振武校

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
北京地质出版社印刷厂排版
北京顺义燕华印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 10¹/₂ 印张 252 千字 印 1—2,500

1991年8月北京第1版 1991年8月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0505-0/TE·483

定价: 3.45元

目 录

绪 言	(1)
第一章 射孔打开油气层的条件	(6)
第一节 周围介质的压力和温度	(6)
第二节 射孔打开产层时要克服的中间障碍物的特性	(6)
第三节 射孔打开的油气储集层的物理机械特性	(7)
第二章 射孔井和射开孔道的水动力理论特性	(13)
第一节 井的水动力特性与孔道的尺寸和位置以及射孔密度的关系	(15)
第二节 在井眼周围地层的自然渗透率变坏的情况下射孔井的水动力学特性与射孔孔道的关系	(22)
第三章 射孔枪的结构特点和技术特性	(29)
第一节 子弹式射孔枪	(30)
第二节 有枪身聚能射孔枪	(31)
第三节 聚能射孔枪壳体的形变	(33)
第四节 无枪身聚能射孔枪	(35)
第五节 聚能射孔枪的射孔弹	(37)
第六节 高温高压下工作的射孔枪	(38)
第七节 射孔枪的综合性能对比	(40)
第四章 在井筒中打开地层时子弹和聚能射流穿透多层障碍物的过程	(41)
第一节 子弹射入连续地层	(41)
第二节 子弹穿透钢管壁	(45)
第三节 子弹穿透管外水泥层	(46)
第四节 子弹穿透复杂的障碍物	(46)
第五节 聚能流射入均匀的障碍物	(49)
第六节 聚能流射入复合障碍物	(55)
第七节 聚能流穿透的孔道直径	(57)
第五章 各种因素对射出孔道大小的影响的试验研究	(62)
第一节 射孔枪穿透能力的试验研究的技术和方法	(62)
第二节 炮弹对聚能射孔枪穿透能力的影响	(66)
第三节 液层厚度及其密度对孔道大小的影响	(66)
第四节 套管硬度对孔道大小的影响	(67)
第五节 射孔枪能射开管外水泥环的极限厚度	(68)
第六节 附加障碍物对孔道大小的影响	(68)
第七节 流体静压力、地质静压力和地层压力对孔道大小的影响	(70)
第八节 岩石的物理机械特性对孔道大小的影响	(73)
第九节 环境温度对孔道大小的影响	(76)
第六章 射孔孔眼的穿透能力的研究	(78)
第一节 研究方法	(78)

第二节	射孔孔眼穿透力的实验研究和试验装置	(83)
第三节	射孔孔眼穿透能力实验研究的结果	(84)
第四节	美国用“ИОТЧКА”装置完成的试验结果	(89)
第五节	在射孔模型上液体与成岩矿物相互关系的研究	(92)
第七章	射孔对套管影响的研究	(99)
第一节	用实体模型研究各种因素对套管和水泥环形变的影响	(100)
第二节	套管的机械特性对其抗破坏强度影响的研究	(105)
第三节	射孔对套管抗外压压皱强度和抗稳定性消失强度的影响	(108)
第四节	对射孔后水泥环状况的研究	(108)
第五节	聚能弹爆炸在周围介质中产生的应力波参数的研究	(109)
第八章	用射孔枪打开油气层的经验、方法和工艺	(116)
第一节	用射孔枪打开地层的经验和效果	(116)
第二节	聚能射孔和子弹射孔同水力喷砂射孔的比较	(124)
第三节	用射孔枪打开地层的合理方法	(127)
第四节	评价射开地层岩石特性的方法	(135)
第五节	射孔层段的选择	(137)
第六节	最佳射孔密度的确定方法	(138)
第七节	套管和水泥环实际状况的确定方法	(142)
第八节	评价射孔效果的方法	(146)
第九节	射孔与提高地层产能各种方法的配合使用	(147)
第十节	爆炸式封隔器的应用	(149)
第十一节	用射孔枪打开地层的设计、组织和工艺	(150)
结束语		(154)
参考文献		(157)

绪 言

燃料和钢材是现代工业的基础，进一步快速地增加燃料的产量是国民经济的重要任务之一。在油气田上应逐步铺设管线，以便更好地把它们作为化工原料使用。石油、天然气和煤的产量应当充分保证国民经济的需要，且应广泛地采用那些先进而经济的开采矿物燃料方法。

最近二十年来，石油和天然气在国家燃料平衡中所占的比例增加了二倍。与此同时，由于大量地从地下采出油气及世界上石油储量的消耗，使这个贵重的燃料陷入严重危机。因此必须大力发展地质勘探工作，提高勘探效率和质量以提供有效矿藏的储量，提高原油的利用率，增加油层采收率，加快新油田的投产速度，缩短井的安装、测试和疏导周期。

近十年内，石油和天然气产量的增加要求大量增加勘探和开发的钻井工作量。

欲解决上述问题，要求有钻深井的工艺和技术，加快深井钻井速度，进一步提高打开生产层和试井的技术。现代世界钻井工艺和技术的状况可以钻很深的井。在苏联最深的探井已超过其它国家，达到11000m（柯里斯克超深井），在美国为9600m（俄克拉何马州的隆·斯塔巴登和伯萨·罗杰斯井）。在苏联，探井的平均深度超过3000m，生产井为2000m。

建井过程中的一个最重要的阶段就是打开产层，即探井中要试验的或者工业生产时要测试的那些生产层位。打开产层分两个基本阶段：一是钻井过程中打开产层，从钻头进入产层的顶部开始到钻头钻达这个层位的底部为止；二是在下套管并在管外空间注水泥固井之后将产层射开。井的射孔是这样进行的：即经过套管壁和管外的水泥环在岩层里造成通道。

在探井中，钻开预计的生产层之后，越来越广泛地采用随管子下入或用电缆下入的各种地层测试器对还没有固井的生产层段进行测试。但是，也常常进行固井，再逐段射开井筒，第二次打开产层进行最终测试，特别是在裸眼井筒里进行测试时很难对不同的层位进行封隔。在生产井中（包括注水井）打开下套管井的产层常常采用射孔方法，在特殊情况下采用爆炸的方法。

在过渡到开采上面的层段时，以及准备进行压裂、酸化和用其它方法对井附近区域进行处理时，为了恢复生产或提高产量，都广泛采用射孔方法帮助打开产层。

用射孔方法高质量地打开产层（与钻井时第一次钻开产层一起）对于正确地评价探井的生产价值、确定要开发的油田的油、气真实储量、实现最大采油的可能性或者加速开采的可能性，以及对缩短建井周期和试井周期、提高采收率或地层加速开采获得最大效率的方法、在长期开采中有效地利用油井等方面都具有重要的、有时是决定性的意义。

苏联和外国许多学者和专家们认为，射孔在整个完井作业中是一项主要的作业。成功的射孔可能会增加油、气产量，或者在低耗资的情况下提高注水井的接受程度，射孔是确定井的生产率的基本因素之一^[3,54,79,89]。

本世纪30年代以来，开始广泛采用射孔枪射开油层。射孔枪的能源是高聚能爆炸材料，与纯机械式机构相比，聚能材料可以下到很深的井里，并且引爆简单、有效。

射孔枪发明之前，即30年代以前，在苏联井深不超过1000~1500m，每口油井的合理开采问题还不尖锐，而且只在一个油层上完井。套管上的筛管常常是在修理厂用钻孔或割缝的方法事先做好的。

在极少情况下，才在现场套管上做筛管（即把套管下入井里并安装好以后）。为此目的，曾采用了钻孔装置和钻孔器，它们用绳索下入井里，并用机械或液压传动装置带工作业。

没有可靠的手段对套管进行就地射孔是使具有明显缺点的“从上到下”完井和试井方法在当时占优势的基本原因。从1930年起，在阿塞拜疆油田开始采用M.B.尼基金推荐的称之为“从下到上”的油田测试和处理方法。按这种直到现在还在采用的方法，把井钻到最下面的地层的底部，下入套管并全井固井，然后，从最深层开始，依次用射孔方法打开油层。

这种方法的优点如下：

- 1) 可以准确及时地对井底进行地层评价，正确地引导钻井作业，取得所钻过地层的油气饱和度的概念，特别是和电测井有关的资料。
- 2) 可以减少钻井中的危险性，加快钻井速度，消除生产井粘结封固的可能性。
- 3) 当井的下部地层不能生产时，可以继续开发上部的生产层，同时开采两个或几个层位。
- 4) 可以减少探井和生产井数。

“从下到上”对油气层进行测试和开采的方法在国外也得到很高的评价。按“从下到上”方法试井和完井的实际应用使当时的旋转钻井取得了很大的成效，出现了新的电测井方法，和新的固井方法，但由于没有可靠的在已下套管固井的井筒中打开油层的射孔枪又使它的发展受到阻碍。这个问题在30年代初由于苏联和美国出现了子弹式射孔枪得到了解决（图1）。

在苏联推广新的射孔方法的时间是在实行国家工业化开始的时候，而美国却在经济危机之后和新的工业复苏开始的时候。射孔枪的应用促进了完井技术和工艺的革命，以及油井测试和开发技术的发展。子弹式射孔枪出现之后，很快就在工业上得到了广泛地使用。

按石油技术专家的意见，应当通过往地层里注入冲洗液的方法在近井底区域消除封闭效应，建立起深而干净的通道，这样会大大提高地层的渗透率（在以前认为是不可能的），从而可按新的方法解决布井问题。因此，油和气流入井筒的旧理论就被抛弃了。

电测井方法的出现促进了用射孔枪打开产层方法的发展，电测井方法可以较准确地确定井的地质剖面。此后，放射性测井方法的发明可以在已下套管的井里查清含油气层的位置。

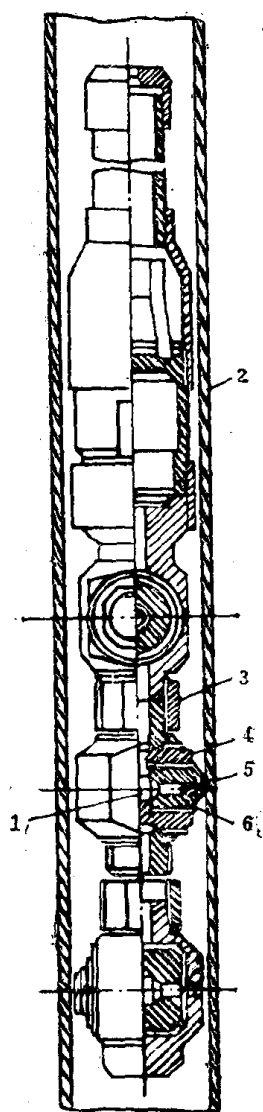


图1 K. A. 维尔潘多夫和
A. H. 巴尔费洛夫的子弹式
射孔枪

1—火药；2—套管；3—联接套；
4—枪身；5—射弹；6—枪筒

置，从而更进一步扩大了射孔方法的应用。

广泛应用子弹式射孔方法的实践表明，它还可以解决下列与加快建井和试井、提高油气产量和降低油气开采成本等有关的附加问题：

- 1) 依次或有选择性地已在已下套管的井里“自下而上”地打开和测试油层。
- 2) 为了恢复和增加产量再次打开产层。
- 3) 在压力下通过已有的孔道或重新射出的孔道重新固井，然后再用射孔方法重新射开地层，以消除产层水淹或高油气比。
- 4) 可以在已下套管的井里用放射性测井方法搞清楚先前漏掉的产层，并投入开采。
- 5) 在平面上拉开井网。

在苏联曾建立和完善了由“阿塞拜疆石油地球物理公司”和“格罗兹石油地球物理公司”的专家们设计的子弹式射孔枪（A. A. 阿里-查德、С. М. 阿那良、С. А. 阿里特谢里、К. И. 邦达连柯、К. А. 维尔潘多夫、С. Ф. 述波尔内、И. А. 达维点柯、С. Я. 李特运诺夫、А. Н. 彼德拉响茨、П. Н. 斯特洛茨基、С. П. 阿不拉良、К. А. 希洛夫、А. И. 巴夫连柯、Ю. Н. 捷尔—格里戈良、П. К. 切尔洛乌索夫、Л. Е. 帕棉度）。在美国“连·贝尔斯”、“马克·库洛乌”、“哈里伯顿”公司设计和采用了子弹式射孔枪，在法国是斯仑贝谢公司。

在多数情况下，子弹式射孔枪是用电缆下到井里。射孔枪一次下入井里后，不论是齐发式的还是选发式的子弹，都可以在井壁上射出大量的孔，保证高效率地打开弱胶结砂岩的油层。

射孔枪由从地面送出的电脉冲信号引爆。曾经采用钢丝绳和管子把子弹式射孔枪下入井底，用机械式投入重物的方法引爆。这种方法不可靠，没有被广泛地应用。

1942年Г. М. 马斯凯特首先解决了射孔密度对井的生产率发生影响的理论问题（不考虑在地层中孔道深度的影响）。射孔密度超过一定限度后不会使产量有明显的提高。

为了保证或者恢复近井地区的自然渗透率和清洗射出的孔道，研究和采用了射孔前后对井进行处理的新方法——液压清洗方法，用油基泥浆打开产层，化学和机械清洗方法，在将井口密闭的情况下打开产层，射孔与盐酸处理相结合等等。

为了恢复被战争破坏了的石油和天然气工业，在苏联和其它国家做了大量的工作，油气田勘探和开发的迅速发展导致了钻井、试油、开采技术和工艺从根本上进行了完善。钻井、石油开采和地球物理企业的技术重新装备开始了。与此同时，广泛开展了对致密的和坚硬的砂层和石灰岩储集层油气田的勘探和处理技术的研究。钻井速度很快提高了，在复杂地质条件下用加重泥浆在高压地层中钻井的技术发展起来了。套管的强度提高了，直径缩小了。二次采油技术即盐酸处理和50年代初期出现的地层水力压裂技术被广泛采用。

所有这些都要求相应地完善和改进射孔枪。当时，射孔枪还不能在复杂的地质、技术条件下保证必要的效率和快速地打开油层。

地下水力学的进一步发展证明，不仅是射孔密度，而且还有孔道的长度都对井的产油率系数有很大的影响。

为了解决在复杂地质、技术条件下和在致密的油气储集层中打开油层的问题，Ю. А. 柯罗价日累和М. Я. 别尔柯维奇于1939年提出了鱼雷式射孔枪，在其中采用了含有爆炸性炸药的大口径炸弹和慢作用引爆雷管（图2）。这种炸弹在进入地层岩石中足够的深度之后

才爆炸，在它周围形成空穴和裂缝网。鱼雷式射孔枪直到现在还在石油工业中使用。

为了进一步提高在井里打开产层的有效性，在40年代初期，不论是苏联还是美国都提出了研制以爆破的聚能效应为基础的射孔枪。这些设想与战争开始时出现的穿甲弹和聚能手榴弹有密切关系。

系统地研制国产聚能射孔枪的工作于1952年开始，在石油工业部的专门设计处(CKБ-1)进行，从1954年开始在新组建的射击和爆破局继续开展下去。

在工业上应用的第一种聚能射孔枪(1954年)是IIK103型多次使用的有枪身射孔枪(图3)。据此又研制出了一系列得到广泛使用的高效聚能射孔枪。

在国外，研制和广泛使用聚能射孔枪的国家主要是美国、法国、匈牙利、罗马尼亚和捷克斯洛伐克。

在苏联和国外采用对比试验和研究的经验表明，聚能射孔枪与子弹式射孔枪相比有以下优点：

1) 对高于平均强度的油气储集层有较好的和稳定的穿透能力。

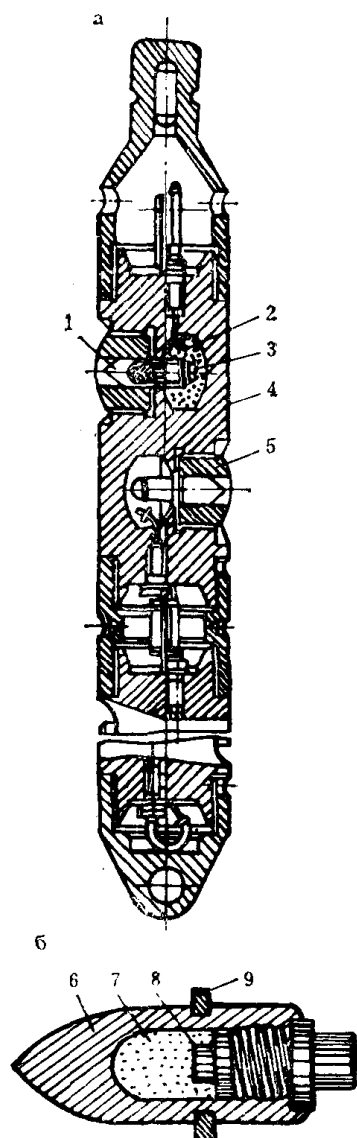


图2 Ю. А. 柯罗价日累的ТИК22型鱼雷式射孔枪(a)和射孔子弹(б)

1—炸弹；2—电雷管；3—火药仓；4—壳体；5—枪筒；6—弹体；7—爆炸炸药；8—惯性雷管；9—钢环-挡圈

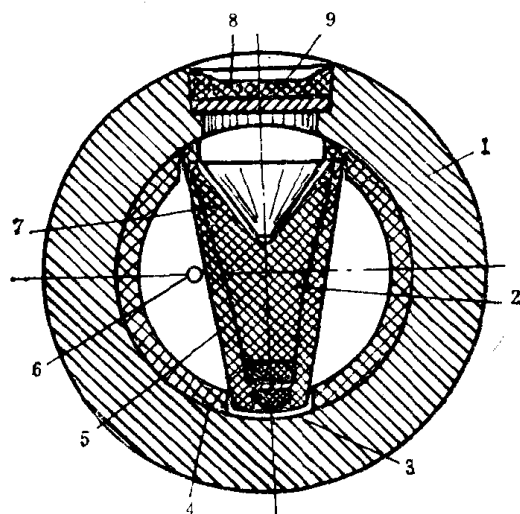


图3 IIK103型有枪身聚能射孔枪(第一方案的剖面)

1—枪身；2—炸药筒；3—引爆索；4—安装纸管；5—炸药橡皮套；6—至爆破筒的电线；7—锥形聚能铜套；8—橡胶密封塞；9—密封金属圆盘

- 2) 热稳定性高。
- 3) 生产效率高。
- 4) 操作简便、安全。
- 5) 不需要刮套管内壁来清除射出的子弹和射出的孔道周围的毛刺。
- 6) 在下入泵抽管柱和井口密封的情况下能够在负压条件下射开产层。

由于聚能射孔枪的迅速发展和它的优点明显，子弹式射孔枪的使用量逐年减少，到60年代末，弹筒横置的齐发式子弹射孔枪在苏联已停止生产。随后研制成功了大功率垂直-曲

线枪筒的子弹式射孔枪，它成功地与聚能射孔枪并列使用。

为了打开产层，特别是为了提高它的产量，早先曾使用过鱼雷式大块炸药的井下射孔器。在美国这种方法用得很广泛。但是，到50年代初期，地层压裂方法和大功率射孔手段的出现使鱼雷式井下射孔方法使用停止。其原因是它破坏套管且对操作人员有危险性。近些年来又恢复了用新的爆炸方法来强化油气开采的研究工作^[76]。

到60年代，拉缅斯科地区全苏地球物理研究所研制并成功地采用了同聚能射孔枪一起借助于压力火药发生器（聚能弹）来提高井眼附近区域渗透率的方法和技术。美国曾建立了类似的方法，但没有广泛使用。

在别尔姆油田上压力火药发射器（聚能弹）得到广泛应用，其特点是火药缓慢地燃烧，对地层形成热气化学作用（ТГХВ）^[64]。

近十五年来，在苏联和国外，水力喷砂射孔方法得到了发展（ГПП），它主要用于准备进行水力压裂的地层，以及在射孔枪效率不高的地质、技术条件复杂的地层和一些特殊条件下使用。但是，在下套管的井内打开产层的方法基本上还是用射孔枪射孔，占井下射孔作业的95%左右。

现在，用聚能射孔枪一次下井可以射开100米的地层。射孔的成本只占建井总成本的1.0~1.5%。

打开油气层的问题在一系列书中已讲到了^[3,54,79]。但在这些著作中基本上只讲了用钻井方法打开产层的第一阶段，而对第二个决定性的阶段——用射孔方法打开产层却很少谈到。

本书对用射孔枪射开地层的过程中的问题进行介绍，特别是对打开油气层的有效方法作了介绍。第六章的第五节和第八章的第三、四节是由B. C. 扎马哈耶夫的参与写出的^①。

● 作者对在完成手稿时给以帮助和建议的Г. М. 阿夫强，И. В. 沃尔里茨基，А. С. 捷尔查夫茨，В. М. 基卡索夫，А. И. 彼特拉香茨，Н. С. 沙拉沙良，В. М. 捷烈金，Ю. И. 彼尔·格里戈良，М. Я. 夫里德良捷尔，Н. С. 基赫拉德，Б. И. 沙赫捷尔等表示感谢。

第一章 射孔打开油气层的条件

第一节 周围介质的压力和温度

现有的钻机可以钻出11000m的深井，未来的十年内，探井的深度可能会达到15000m。在这样深的井里，当钻井液的极限密度达 2.3g/cm^3 时，要打开地层压力非常高的产层，最大静液压力会达到300~350MPa。

在苏联，根据地质条件，7km以上的温度梯度变化范围为 $10\sim 100^\circ\text{C/km}$ 。地温梯度最高的（高于 45°C/km ）地区是高加索北部、外高加索、克里米、中亚、西伯利亚西部和堪查加地区。井底最高温度（ 223°C ）是1968年在西普列德高加索区门德耶捷夫探区2号井里测到的，井深为6318m。在伏尔加-乌拉尔油气田和西伯利亚油田的大部分地区观测到了最低的地温梯度。在美国从墨西哥边界地区的井里测的温度最高（ 305°C ），井深6100~6400m，在其它区域测得的高温为 $230\sim 250^\circ\text{C}$ ，井深为8300~9160m。这些高温井都与异常高的地层压力相关^[9]。

按工作要求，用电缆下入的射孔枪，在7km深的压力和温度的作用下，6小时内应保证它的工作性能，即在把仪器下入到给定的深度所必需的时间和给定的下入和安装设备的时间，同时在24小时内不出现自发的动作（考虑到排除事故，从井里取出已不用的仪器所需的时间等）。在用管子将仪器下入的情况下，这个时间要相应地增加。

井下的温度和压力还必须考虑到子弹进入岩石建立通道的进程中克服中间障碍物的强度性能。在温度和压力同时作用的条件下，射孔枪应对腐蚀介质具有稳定性，井中常充满有石油、石油气、硫化氢、酸、碱等等。

第二节 射孔打开产层时要克服的中间障碍物的特性

一、液体层

进行射孔的井中可能充满了各种液体：不同密度的洗井液密度 $\rho_{\text{洗}}$ 从 0.8g/cm^3 （油基泥浆）到 2.3g/cm^3 （加重泥浆），水（包括矿化水）的密度 $\rho_{\text{水}}=1\sim 1.2\text{g/cm}^3$ ，石油的密度 $\rho_{\text{油}}=0.72\sim 0.98\text{g/cm}^3$ ，以及在压力作用下的烃类气体。液层的厚度取决于仪器和套管的直径和仪器在套管中位置。例如，如果仪器没有专门的扶正器，一般会靠在井壁上（而且井筒中心很少是理想地垂直），那么，要射开的液层厚度沿井筒直径将是不一样的。

在用射孔枪经过泵压缩管柱打开产层时，在井口密封的情况下，液层由于井筒和仪器的直径相差甚大，对于一部分子弹来说可能达到90~100cm。而这时液体的密度一般不超过 1.0g/cm^3 。

二、管柱

射孔时必须射穿的套管壁厚约在6~8mm（直径114mm的套管）到7~12mm（大直

径套管)之间变化。在那些由于地层相互错动可能会破坏套管的地区,例如巴库,为了固井通常采用按特殊要求制造的壁厚达16mm的套管。在有接箍的地方,壁厚可能大到17mm(对直径114mm的套管)和26mm(对大直径套管)。

钻杆的壁厚在7~11mm之间,但在接头处要射穿的钢材厚度可达54mm,而在钻铤里,可达28~99.5mm。石油管材由7组碳素合金钢和高合金钢制成,机械强度特性如下:破裂应力 $\sigma_b=550\sim 1100\text{MPa}$,屈服强度 $\sigma_r=320\sim 500\text{MPa}$,冲击韧性 $\alpha_k\geq 40\text{GT/cm}^2$ (对钻铤 $\alpha_k=60\text{GJ/cm}^2$)。

在过去(30年代以前)用顿钻方法钻成的老井中,铆接或者焊接的管柱常用锅炉铁板制成,厚度为5~8mm,连接处的厚度加倍。

三、管外水泥环

管外水泥环的厚度由套管和井筒的直径确定,当套管在井筒里居中放置时,其厚度为23~50mm。考虑到套管在没有扶正器时,一侧水泥环的厚度可能增加一倍。此外,当岩石不稳固时,在井筒中可能会出现洞穴,水泥层的厚度可能会达到150mm以上。

固井水泥和管外水泥环的物理机械特性研究得还不够,特别是在井眼条件下研究得更少。干粉状水泥的矿物颗粒的密度为 3.1g/cm^3 。水泥块的密度为 ρ_n ,通常固井时水灰比为1:2,这时 ρ_n 等于 1.8g/cm^3 (地层中没有失水)。最轻的水泥块(带硅藻土的)的密度为 1.3g/cm^3 ,最重的(当加重剂为 4.45g/cm^3 时)为 2.3g/cm^3 。

水泥块的机械强度、密度和渗透性明显地与它的成分、套管固井质量、水泥的状态、温度、周围的压力和存在的时间有关。矿渣水泥的机械强度取决于含砂量。例如,当含砂量为30%、温度 $T=150^\circ\text{C}$ 、静液压力 $p_r=50\text{MPa}$ 时,抗压强度 $\sigma_{n\text{极限}}$ 最大(20~27MPa)。一般的波特兰水泥的机械强度在很大的程度上取决于水灰比,随水灰比的增加,强度降低,水泥块的渗透性增强。

在大气压力和 $T=20^\circ\text{C}$ 的条件下,各种水泥浆硬化过程中纵波的传播速度 C_n 在24~36小时内急速升高,变化范围为 $100\sim 3200\text{m/s}$,然后 C_n 的增大速度减慢,在过两昼夜后稳定在 $2900\sim 3600\text{m/s}$ 之间^[83]。

因此,在用射孔枪打开产层时,在较好的条件下要穿透不厚的液层、6~12mm厚的钢管壁和23~50mm厚的水泥层;而在复杂的条件下要穿透的液层厚达100mm、钢壁厚达50mm(在多层套管的井里考虑到会碰上接箍)和水泥层厚达150mm以上,即300mm以上的各种复杂的障碍物,其中200mm为坚硬的障碍物。

第三节 射孔打开的油气储集层的物理机械特性

石油和天然气储集层是由碎屑的、碳酸盐的、粘土的或水化学沉积岩石形成的,有效孔隙度 k_n 和渗透率 k_{np} 的变化范围很大: $k_n=2\sim 35\%$; $k_{np}=5\cdot 10^{-15}\sim 20\cdot 10^{-12}\text{m}^2$ 。

干的不饱和液体岩石的密度为 $1.7\sim 2.9\text{g/cm}^3$ 。被密度为 ρ_* 的液体所饱和的岩石的密度 ρ_n 在以下范围内变化:

$$\rho_n=(1\sim 0.01k_n)\rho_{n.c}+0.01k_n\rho_*$$

含油气岩石的粒度成分用馏分0.01~1mm来表征。其中胶结物的含量在10%~50%之间。流体可流过的细小通道的尺寸为1mm。

储集层的机械性质与晶体状固体物质的性质根本不同。但是，当样品的尺寸足够大和负荷很小时，可采用固体弹性理论。

对大多数油气沉积岩层，在大气压力、温度 $T = 20^\circ\text{C}$ 和在干燥状态下，弹性纵波的传播速度 C_n 从 $1500 \sim 3700 \text{ m/s}$ （砂岩）到 $3600 \sim 5900 \text{ m/s}$ （白云石）之间变化。对于火成岩石 C_n 在 2000 m/s （流纹岩）到 8800 m/s （辉岩）之间变化。岩石的密度、矿物成分、孔隙空间结构、固井物质的成分和其分布特征、以及层理方向（水平层理岩石的 C_n 大于垂直层理岩石的 C_n ）、周围压力、温度和加上应力状态等都对 C_n 值有影响。

干储集层岩石的体积压缩性 β_0 为 $(1.0 \sim 6.4) \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ （砂岩）到 $(0.2 \sim 1.6) \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ （白云石）。它比火成岩的 β_0 大。

在块状岩石中 C_n 和 β_0 的关系式为：

$$C_n = \left[\frac{3(1-\nu)}{\rho_n \beta_0 (1+\nu)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中 ν ——甫安松系数。

当用液体饱和时，岩石的压缩性降低，弹性波的传播速度增大。例如，对 $k_n = 10 \sim 30\%$ 的砂岩，当用原油饱和后， β_0 将降低 $3.7 \sim 3.3$ 倍，而用矿化水饱和后（5% 的 NaCl 溶液）降低 $5 \sim 3.5$ 倍，当用原油饱和后 C_n 则增大 $40 \sim 30\%$ ，用矿化水饱和后 C_n 增大 $67 \sim 37\%$ 。随着孔隙度增大，饱和液体的粒状结构和碳酸盐岩储集层的速度 C_n 降低。

岩石的强度常常用它们的单向压缩应力 $\sigma_{c,n}$ 和硬度来表示。用硬度计可以方便地打出岩石的硬度，方法是把一个具有一定尺寸的圆柱形钢模压入岩石中（冲模硬度 ρ_m ）。

在大气压力和温度为 20°C 下，干燥状态的储集层岩石硬度在 50 MPa （石灰石） $\sim 3000 \text{ MPa}$ （白云石）之间变化。

大孔隙的砂岩和石灰岩的硬度在被液体饱和的条件下要降低 $25 \sim 50\%$ ，而小的颗粒状的致密岩石只降低 $15 \sim 20\%$ 。

石油储集层的机械性质研究得很少。

研究一下作用在地球内部的热力学条件对岩石物理机械性能的影响。

在不同深度埋藏条件下，储集岩层的物理机械特性基本上由形成矿层的地质构造过程、有效压力 P_{ϕ} 和温度所决定。

压力 P_{ϕ} 是矿物压力 $P_{r,op}$ 与地层内部压力 $P_{n,n}$ 之差值。在多数情况下，当储集层露出地面时，地层压力 $P_{n,n}$ 近似于静水压力。在封闭的油气矿床中，初始地层压力可能明显地与 P_r 不同。异常高的地层压力可达 $2.8 P_r$ ，而异常低的地层压力为 $0.2 P_r$ 。随着矿层的开发和枯竭，如果不人为地保持 $P_{n,n}$ 处于一定的水平，那么， $P_{n,n}$ 值就会逐步降低。

由于钻井和打开产层的结果、使得井眼附近区域的地层（等于井筒半径 3 到 5 倍的区域）处于复杂的应力状态下。在井眼附近区域内会发生切向压缩应力 σ_θ 和径向压缩应力 σ_r 。如果把这个区域看成是厚壁圆筒且认为岩石是弹性体，它们的值可用拉姆（Ламе）和克拉别依龙（Клапейров）公式求解。在这种情况下应力 σ_θ 和 σ_r 分别用下式表示：

$$\sigma_\theta = P_{\phi} \left[1 + \left(\frac{R_c}{R} \right)^2 \right] - P_r \left(\frac{R_c}{R} \right)^2 \quad (2)$$

$$\sigma_r = P_{\phi} \left[1 - \left(\frac{R_c}{R} \right)^2 \right] + P_r \left(\frac{R_c}{R} \right)^2 \quad (3)$$

式中 R_c ——井筒半径；

R ——岩石应力单元所处位置的半径。

在任一点上，应力 σ_θ 和 σ_r 之和保持为常数。最大切向应力 σ_θ 发生在井筒的表面上，即 $R=R_c$ 处。这时， σ_r 总比 σ_θ 小；当 $R \rightarrow \infty$ 时， $\sigma_r = \sigma_\theta = P_{\phi 0}$ 。

当 $P_r=0$ 时，在井壁上的切向应力 σ_θ 最大。即井筒没有充满液体，或者与地层没有动液联系；这时 $\sigma_\theta=2P_{\phi 0}$ 。如果地层的渗透性小或者处于很深的位置（ $P_{\phi 0} \rightarrow P_r$ ），那么， σ_θ 就增大到等于 $2P_r$ 。在一般情况下，当 $P_{\text{un}}=P_r=0.4P_{\text{rop}}$ 和 $P_{\phi 0}=0.6P_{\text{rop}}$ ，当井筒里充满水时，在井壁上的最大应力 $\sigma_\theta=0.8P_{\text{rop}}$ ， $\sigma_r=P_r=0.4P_{\text{rop}}=0.67P_{\phi 0}$ 。

图4是当 $P_r=0$ 时，参数 σ/P_{rop} 与 R/R_c 的关系。

σ_θ 和 σ_r 的主要变化发生在 $0 \sim (2 \sim 3) R/R_c$ 之间。

用套管固井以后，井底附近区域的应力状态减弱。减弱程度取决于下列因素之间的相互关系，即岩石的弹性、套管和管外水泥、水泥的膨胀能力、温度变化、井内静水压力变化和地层内部孔隙压力变化、应力松弛状况等。由于这些因素的多样性，在井的生存过程中很难评价 σ_θ 和 σ_r 应力的程度。在复杂地质、构造条件下，其中包括有背斜褶皱存在时，会出现垂直压缩应力，对这个应力也很难做出评价。

除了石英砂岩和粉砂岩外，所有的沉积岩的孔隙度都随埋藏深度而有规律地减小。根据美国超深井钻井的经验，产层的最大孔隙度在1500~6000m井段，每1km减小4.9%，到8km处不超过5~10%。

在个别情况下，在5~7km处，碰到过孔隙度达25%的砂岩。

在储集层现有强度和有内部孔隙压力的情况下，砂岩沉积的极限深度（可能有石油和天然气储集层的深度）可达20~40km。所以，在一系列情况下观察到的岩石储集性能有随埋藏深度变坏的趋向，不仅是重力的作用，而且还有沉积变质和次生成岩作用，特别是在沉积形成的初期。现在在那个深度上是否会碰到油和气还是个未知数。

岩石的强度随有效压力的增大而明显地提高（图5）。岩石的塑性随强度提高而增大，强度的初始值越大，塑性也越大。在一定的有效压力下，塑性系数急速变化直到无限大。这种状况会导致在很深的处于塑性状态的岩层中射出的孔道重新闭合。

温度（特别是在孔隙空间充满液体时与压力混合作用）对岩石强度特性的影响研究得还很少。目前仅有一些对干的和硬地层岩石的零散研究。

在多数情况下，在岩石沉积的地方，温度对岩石的弹性和强度性质的影响恰恰与有效压力的作用相反。这时，温度按地温梯度可能会部分地或全部地降低有效压力对岩石的这些特性的作用效果。温度随深度的增加而升高前面已叙述了（见第一章第一节）。

当岩石处于大气压力和室温条件下，岩石的强度和弹性特性之间，在多数情况下呈直线关系。但这不是对所有的岩石都适用，这种关系对那些矿物成分和结构相同的岩石是对的。

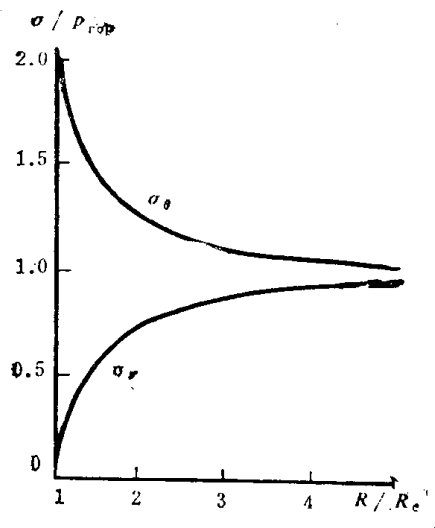


图4 压缩应力 σ 与井眼附近区域内岩石压力 P_{rop} 之比与参数 R/R_c 的关系曲线（当 $P_r=0$ 时）

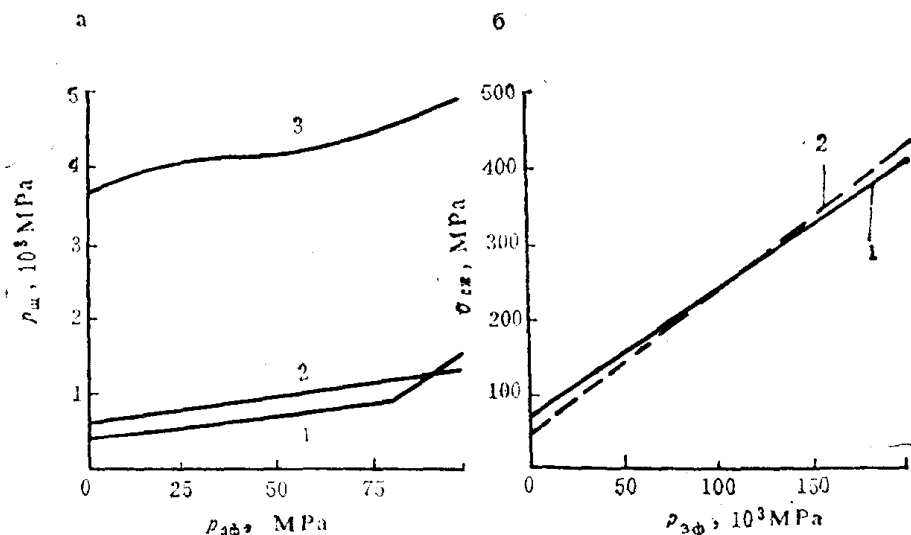


图 5 有效压力对岩石强度特性的影响

a—冲模硬度 P_m 与 P_{ϕ} 的关系：1—泥灰岩；2—大理石；3—白云石（按布拉多夫方法）； σ —强度变化与压缩应力关系曲线：1—河岸砂；2—钠柱石灰岩（按赫金方法）

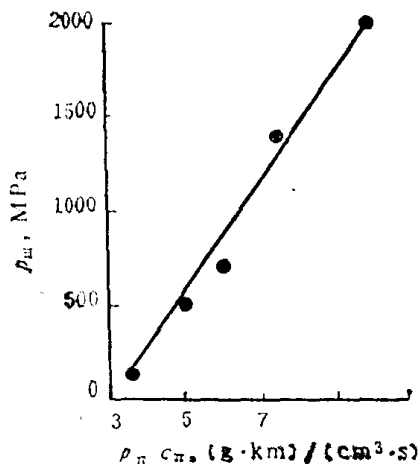


图 6 冲模硬度 P_m 与岩石的波阻 $\rho_n C_n$ 之间的关系曲线。岩石用 5% 的 NaCl 溶液饱和

作者对一组砂岩和石灰岩储集层用 5% 的 NaCl 水溶液饱和后，在冲模硬度 P_m 和波阻 $\rho_n C_n$ 之间得到的是直线关系（图 6）。岩石的特性参数列于表 11 中（见第五章第八节）。

作者认为，对于井下条件，即考虑地层压力和温度时，在强度和弹性之间不存在线性关系是由于以下原因造成的。被液体饱和的孔隙岩石的强度特性在大多数情况下（到一定极限）随有效压力的增加而增加，并且呈线性关系。同时纵向弹性波的传播速度 C_n 随压力增加在 $0 < P_{\phi} < 50$ MPa 的范围内明显地提高，此后 C_n 的增长速度减慢， C_n 曲线在 $P_{\phi} > 100$ MPa 时变平滑了。

图 7 所示是砂岩的 $\sigma_{c\pi}(P_{\phi})$ 与 $C_n(P_{\phi})$ 之间的关系曲线，而图 8 是按这些参数绘制的 $\sigma_{c\pi}(C_n)$ 关系曲线。这里给出的关系是指数曲线，即是 $\sigma_{c\pi} \sim (C_n)^n$ ，而且指数 n 在 $C_n 7.4$ km/s 时急速升高。这种现象可以用岩石塑性随 P_{ϕ} 的增大而提高来解释。弹性特点对此没有反映，因为当 P_{ϕ} 值很大时，岩石的弹性几乎没有变化。在这种情况下就要采用通过声波阻尼系数 α 来考虑岩石塑性的依从关系。在声波测井时，除了测量 C_n 外，也测量 α ，使

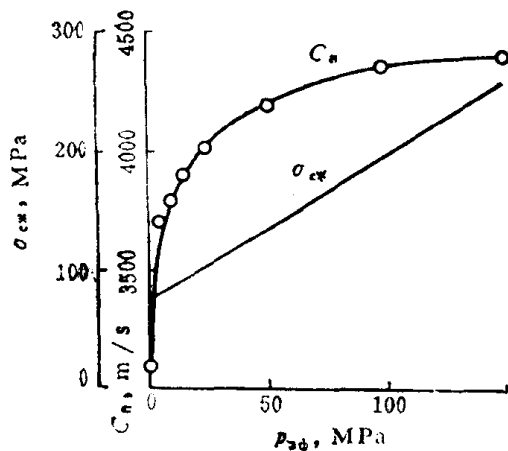


图 7 压缩强度 $\sigma_{сж}$ 和声波在砂岩中的传播速度 C_n 与有效压力 $P_{эф}$ 的关系曲线 (按Л. 谢金和作者的数据)

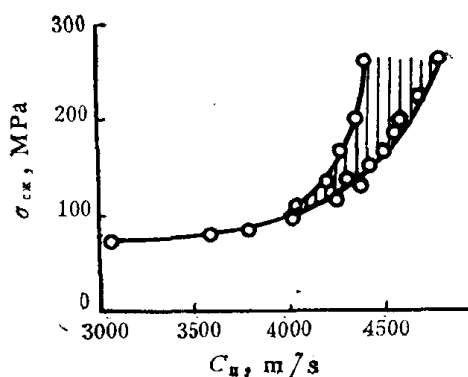


图 8 当有效压力 $P_{эф}$ 在 $0 \sim 150$ MPa 范围内增大时, 压缩强度 $\sigma_{сж}$ 与砂岩声波速度 C_n 的关系曲线根据 Л. 谢金等人的 (见图 5) $\sigma_{сж}(P_{эф})$ 曲线和作者根据图 7 的数据给出的相比较而绘出的关系曲线

用这些关系曲线是可以的。为此, 要求在实验室内对各种类型的石油和天然气储集层的类别预先的实验研究。

将强度特性与孔隙度或岩石密度 (由于这些参数对于给定的岩石来说很少与深度变化) 联系起来, 它们间的相互关系可能只对一定的条件是正确的 (例如, 对一定的深度)。为了用超声波检测在大气条件下水泥和混凝土的强度性能, 确立了 $\sigma_{сж} = \sigma_{сж_1} (C/C_1)^n$ 类型的 $\sigma_{сж}$ 与 C 之间的关系, 这种水泥看来可用作固井水泥^[66] ($\sigma_{сж_1}$ 和 C_1 — 相应的压缩强度和声波在已知性质的样品中的传播速度)。

所以, 现在根据矿场地球物理测井的数据来确定岩石和水泥的强度特性是非常困难的, 特别是深井。为此, 要在能模拟地下压力和温度条件的专用试验台上对岩样的 ρ_m 和 $\sigma_{сж}$ 变化进行研究。

但是必须指出, 从油气饱和地层中取出预定的岩心, 其收获率非常低。此外, 用地层压力来对岩心重新加载不是都能恢复它在地层条件下的状态和性质的。

在上面讲到的数据和设备的基础上, 在表 1 中列出了地下被水或石油饱和的储集岩层物理机械特性的变化范围。这些变化在评价用射孔方法打开产层时应当加以考虑。

表 1 石油和天然气储集层在埋藏条件下的物理机械特性的变化范围

特 性	埋藏深度, km	
	4以下	4~8
密度 $\rho_m, g/m^3$	1.6~2.6	2.0~2.7
孔隙度 $k_n, \%$	35~2	30~3
渗透率 $k_{np}, 10^{-15} m^2$	5000~5	1000~1
冲模硬度, p_m, MPa	2300以下	3400以下
声波传播速度 $C_n, m/s$	1.5~6.5	3.0~7.0

在确定表 1 中的特性值时, 取最大可能的有效压力 $P_{\phi} = 1.5P_r$, 即处在上面的岩石的平均密度为 2.5g/cm^3 , 而地层 (内部孔隙) 压力等于静液压力。考虑温度的影响, 认为 P_m 在 $H = 4000\text{m}$ ($T_{cp} = 125^\circ\text{C}$) 时平均降低 15%, 而在 $H = 8000\text{m}$ 时 ($T_{cp} = 250^\circ\text{C}$) — 30%。

管外水泥环的物理机械特性很难确定, 因为埋藏深度对这些特性的影响还研究得很少。大致可以采用以这些极限值: 密度 $\rho_n \leq 2.3\text{g/cm}^3$, 抗压强度 $\sigma_{c,n} \approx 25\text{MPa}$, 声波传播速度 $C_n \approx 4\text{km/s}$ 。

除了上述因素外, 对生产层的强度特性和储集特性有影响的因素还有井内液体 (洗井液、射孔液) 与组成岩石的矿物之间的相互作用, 其影响也很大。这种相互作用的影响将在第四章、第五节和第八章的第八节中说明。

上述射孔枪的工作条件和射孔所遇到的障碍物的特性对于确定射孔枪的要求和评价井壁中穿透的孔道尺寸是不可少的。