



油气藏增产新技术

马建国 主编



石油

京)

7
2

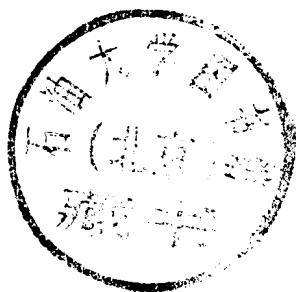
社



登录号	127334
分类号	TE 357
种次号	014

油气藏增产新技术

马建国 主编



石油0121208

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了目前国内蓬勃发展的各种油气藏增产新技术的技术原理、增产机理、技术装备和应用现状。这些新技术包括油气藏高能气体压裂增产技术、井下脉冲放电增产技术、地面人工地震处理技术、井下水力振荡增产增注技术、井下超声波处理技术、电磁波微波处理技术、油藏微生物处理技术以及深穿透射孔技术。本书资料翔实，选材广泛深入，较全面地反映了目前国内这些新技术的发展水平。本书可作为高等院校石油工程专业本科生教材，也可供石油工程技术人员及油气增产技术人员阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

油气藏增产新技术/马建国编.
北京:石油工业出版社,1998.3
ISBN 7-5021-2212-5

- I. 油…
- II. 马…
- III. 采收率(油气开采), 提高-新技术
- IV. TE357

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 00442 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 16 开本 7½ 印张 180 千字 印 1-2000
1998 年 3 月北京第 1 版 1998 年 3 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5021-2212-5/TE·1854
定价: 9.00 元

序 言

国内有关油气藏常规增产技术的丛书已大量出版，而相关的增产新技术虽有单项报导尚无综合的丛书。本书介绍了国内外不同类型的油气藏增产新技术，对我国增产技术的发展将产生重大促进作用。

我国的增产技术已基本配套，现已形成系列，各种增产措施的年增产量占全国原油产量的8%左右，已成为改善油田开发效果和保持原油产量稳定增长的重要因素，现在开发油气藏增产新技术，当然也是非常重要的。

由于我国的油气藏多为陆相沉积，油藏类型多、油层物性差、层薄且互层多、原油物性差异大、油层压力偏低、单井产量不高，而且油水关系复杂，不少油气层都要采取增产措施。由于油藏的上述情况，采取增产措施会遇到不少困难，增产措施一般投入较多。而对一些低产井来说，因为增产幅度不大，采用常规增产措施往往是得不偿失。前苏联研究了不少物理法增产措施，如人工地震、高能气体压裂及超声波等方法，美国、加拿大对一些深层的稠油采用了电磁波加热等方法，我国的石油大学研究了油水井水力振荡解堵等方法。这些增产新措施简单易行，设备及操作费用投入少，而且增产效果明显，即使用于低产井仍可获得效益。正如上面所述的人工地震，只要在地面上震动（打夯），附近的油井液面即有所上升，产量也就增加了；又如电磁波加热法开采深层稠油，注蒸汽开采深层稠油时，因为井深，沿程热损失太大，井下蒸汽干度太低，不足以用热力方法开采稠油，而用电磁波加热法则可以将深层的稠油开采出来。

在采用当今增产措施的同时，不要忽视油气藏增产新措施的作用，油气藏增产新措施有时能够解决常规增产措施不能或不易解决的问题；但另一方面，又不能用油气藏增产新措施去代替常规增产措施。比如高能气体压裂不能代替水力压裂，因为高能气体压裂只能在近井地区形成大量微裂缝，不能加支撑剂，只能起到解堵作用，从而达到增产的目的；而采用水力压裂时，裂缝长度可达数十米到数百米，裂缝中可充填支撑剂，从而使导流能力大幅度增加，同时增产倍数高，有效期长。每种增产措施都有其适应范围，应根据油气藏的条件、增产要求及经济效益去选择增产方法，发挥各自的特长，这样才能产生好的增产效果和效益。

此书的出版，相信将会进一步推动增产技术的发展，开阔有关技术人员优化增产措施的思路，为提高油气藏增产效果和经济效益创造有力的条件。

万仁溥

1996年7月31日 北京

前 言

80年代后期以及进入90年代以来,在我国,关于油气藏增产的各种新技术大量出现,发展异常迅速,有的已经形成了一定规模的工业应用。例如,经过国内十多年的研究,高能气体压裂技术取得了很大成绩,截止1995年底,全国各油田累计施工700多口井,增产原油7万多吨,成功率达90%以上,有效率达70%以上。水力振动技术自1991年6月投入现场使用以来,已施工850多井次,增产增注效果明显,累计增油已达20多万吨,增注达300多万立方米。

一般来说,这些新技术成本低廉,工艺简便,增产效果显著,经济效益高,对环境污染很小,具有很大的发展前途。但是由于发展历史短,对它们的增产机理及对设计与效果预测的理论研究还不够,应用规模尚不够大。因此,作为石油工程专业的大学生、研究生,很有必要学习和研究,以促进其发展。

本书使用已公开发表的文献以及有关专业会议的技术报告,反映了各项技术在国内外的的发展状况、国内的研究深度以及现场应用情况。选材主要立足于国内,有的技术比较成熟,资料也多;有的资料较少,就使用了一些国外资料。目的是给学生作出尽量全面的介绍,使他们对各项技术有一定深度的了解。本书作为校内教材——《油气藏非常规增产技术》已使用多年,为正式出版,分析了历届学生的反应,征求了西安石油学院、石油大学(华东)、中国石油天然气总公司勘探开发科学研究院知名专家、教授的意见,中国石油天然气总公司咨询中心开发部万仁溥副主任对本书也提出了宝贵意见。初稿完成后,周春虎教授不厌其烦地多次修改、审定。另外,贺礼清教授修改、审定了第四章和第五章。在此,对所有关心本书的专家学者表示衷心的感谢。万仁溥副主任在百忙之中为本书作了序,在此也深表谢意。

本书第四章由马建国与张建国合编;第六章由马建国与刘文梅合编;第八章由马建国与耿海平合编,其他各章均由马建国编撰。且大章高级工程师提供了大量资料,书中也应用了各油田射孔界人士的技术报告,在此深表谢意。

由于时间仓促,编者水平有限,疏漏、错误和选材不当之处在所难免,欢迎批评指正。

编 者

1997年7月

目 录

第一章 高能气体压裂增产技术	(1)
第一节 关于火工的有关知识.....	(1)
第二节 国外高能气体压裂技术发展概况.....	(4)
第三节 高能气体压裂的增产机理及理论研究.....	(8)
第四节 高能气体发生器的研制.....	(13)
第五节 高能气体压裂的压力监测及施工工艺.....	(20)
第六节 高能气体压裂技术应用效果.....	(23)
第二章 井下脉冲放电增产技术	(26)
第一节 井下脉冲放电设备的结构及原理.....	(26)
第二节 井下脉冲放电增产技术油田试验情况.....	(29)
第三章 油藏人工地震处理技术	(35)
第一节 油藏人工地震处理技术机理研究情况.....	(35)
第二节 人工地震震源设备.....	(42)
第三节 国内油田应用及效果评价.....	(43)
第四章 油水井水力振荡增产增注技术	(47)
第一节 增产增注原理.....	(47)
第二节 现有井下水力振荡设备、原理及施工工艺.....	(51)
第三节 井下水力振荡技术应用现状.....	(57)
第四节 对现有技术的评价.....	(60)
第五章 井下超声波增产技术	(61)
第一节 井下超声波提高油气渗流能力的机理研究.....	(61)
第二节 超声波处理油层设备.....	(66)
第三节 现场应用简介.....	(69)
第六章 稠油油藏电磁波和微波加热技术	(72)
第一节 油藏电磁波加热技术.....	(72)
第二节 油藏微波加热技术.....	(77)
第七章 油气藏微生物处理技术	(81)
第一节 油藏微生物处理技术的特点.....	(81)

第二节	油藏微生物增产技术的室内研究	(85)
第三节	油藏微生物增产技术的现场应用	(89)
第八章	深穿透射孔增产技术	(94)
第一节	深穿透聚能射孔技术	(94)
第二节	近几年国内深穿透射孔技术现状	(97)
第三节	深穿透射孔枪弹的配套技术	(102)
第四节	水力喷射穿孔技术	(105)
第五节	兼有压裂功能的射孔器	(107)
参考文献	(111)

第一章 高能气体压裂增产技术

高能气体压裂是一种独特的油气井增产新工艺。它既不同于爆炸压裂，又区别于水力压裂。其基本原理就是利用脉冲加载并控制压力的上升速度，使迅速释放的高温高压气体在井筒附近压开多方位的径向裂缝，使储层中的天然裂缝能够与井筒连通，从而达到增产的目的。

高能气体压裂涉及到很多学科领域。70年代以来，特别是80年代，国外先后动员了许多科研机构 and 高等院校，进行了大量的室内外实验、机理研究及现场应用。国外主要是美国和前苏联开展了许多室内研究与现场应用工作，取得了可喜成就。国内起步较晚，但发展很快。1986年以来，现场施工试验获得了可喜的成果，在油井增产、水井增注等方面获得了较好的效果，并展示出很好的发展前景。

高能气体压裂增产技术大量涉及燃烧、爆炸等知识，使用了许多火工材料，主要是火药、固体推进剂。因此，我们在本章第一节中首先介绍一些关于火工的有关知识。

第一节 关于火工的有关知识

一、爆炸与燃烧

燃烧^[1]是物质进行剧烈的氧化还原反应，并伴随着发热和发光的现象。通常所称的燃烧是指某些物质（如柴、煤、油等）与空气中的氧气化合引起的剧烈氧化反应现象。而火药含有足够的氧化剂，燃烧时不需要空气或外加的氧化剂。它的燃烧过程是一个复杂的物理化学过程。火药表面受到点火作用的加热后，开始分解、气化，气化后的产物在气相中继续进行化学反应，直到生成最后的燃烧产物，并将火药中贮存的化学能释放出来。整个燃烧过程依靠其本身的作用得以稳定进行。火药的燃烧按照反应程度分为完全燃烧和不完全燃烧；根据燃烧的稳定性，分为稳态燃烧和非稳态燃烧，非稳态燃烧包括振荡燃烧、燃烧转爆轰等。燃烧以传导、扩散和辐射方式在物质中自行传播，常压下通常以每秒几毫米到几十毫米的速度传播。倘若在密闭或半密闭容器中，燃烧速度急剧加快，压力高达数百兆帕，此时燃烧的气体产物能做抛射功，如火炮发射弹丸正是利用燃烧的这一特征。

爆燃是燃速很快，伴有火焰、火花，并且（或者）燃烧着的粒子四面飞散、不需外界供氧的燃烧。反应区以低于音速进入未燃物质。爆破弹不能完全爆炸的现象就是一种爆燃。

爆炸是在极短时间内发生能量转变或气体体积急剧膨胀的现象，是由迅速的物理或化学变化所引起的。广义的爆炸过程包括爆轰、爆燃与燃烧。爆炸一般分为物理爆炸、化学爆炸和核爆炸三类。炸药的爆炸属于化学爆炸，它有三个特征：①反应的放热性。放热化学反应是产生化学爆炸的必要条件。目前常规军用炸药的爆热一般为3~6MJ/kg。②反应的高速性。爆炸反应是在微秒级（ 10^{-6} s）时间内完成的，这是爆炸反应的一个重要特征，是爆炸具有大功率和爆破作用的原因。过程的传播速度可达每秒数千米，与外界条件关系不大。③生成大量高温高压气体产物。这些气体产物是爆炸作功的工质，是爆炸过程中实现炸药势能转变为机械功的物理因素。每千克军用炸药爆炸时生成的气体产物的体积一般为600~

1000L，使爆炸点的压力急剧地突变。

爆轰是带有化学反应的间断面（或冲击波）以大于物料中的声速沿爆炸物传播的流体动力学过程。冲击波传入爆炸物内以后，在受压缩的薄层爆炸物内产生高速化学反应并释放大量的热能，支持冲击波继续传播。这种带有高速化学反应的冲击波称为爆轰波。爆轰波通过后，原来的爆炸物变成高温、高压、高能量密度的气体爆轰产物，急剧膨胀，对周围物体产生压缩、抛掷或其他破坏作用。气体、液体和固体炸药以及气液、气固和液固混合多相爆炸物在达到爆炸浓度极限范围的条件下，都可以激发爆轰。

燃烧转爆轰是爆炸性物质的燃烧和稳定爆轰之间的一种不稳定变化（指速度）的中间过程。变化由点燃引起，起初以每秒百米以上的速度燃烧，最终以出现速度达每秒千米左右的爆轰现象结束，通常分为四个阶段：层燃烧、不稳定对流燃烧、低速爆轰和高速爆轰。燃烧转爆轰的变化大多数发生在密闭或半密闭空间内，由于爆炸物质燃烧释放的热量和气体产物使空间内的压力急剧上升，导致冲击波的形成而转为爆轰。大型固体推进剂发动机装药在一定条件下也会产生燃烧转爆轰，导致发动机严重损坏。这种现象与推进剂发动机的能量、装药尺寸和形状以及燃速特性有关。

二、火工材料

火药是在无外界供氧条件下，可由火花、火焰等外界能源正常引燃，并迅速进行有规律的燃烧，同时生成大量热和气体产物的混合物，属我国历史沿用词。从广义上说，火药属于炸药的一类，通常由氧化剂、粘结剂、可燃剂及附加剂（如安定剂、燃烧催化剂）等组成，可作为发射枪炮弹丸、火箭、导弹武器及各种驱动装置的能源材料。火药按一定方式装填在武器中燃烧时，其化学能转变为热能，同时产生的高压气体变成弹丸、火箭或导弹的动能。火药的能量及其释放速率是这两个过程的决定因素，也是决定武器性能的重要因素之一。火药的能量性质主要由爆热、比容、火药力或比冲等表征。

发射药也就是枪炮发射药，是用来发射枪炮弹丸的一类火药。它在枪炮药室内被引燃后，迅速产生高压气体，推动弹丸沿身管高速运动。弹丸离开身管时，一般说发射药已燃烧完。常用的枪炮发射药有单基、双基和三基火药以及混合硝酸酯火药等。

单基火药又称单基发射药、硝化纤维素火药，以硝化纤维素为主要能量组分，并加入适量的其他添加剂。单基火药属于易挥发性溶剂火药。单基火药能量较低、烧蚀小，广泛用于各种枪械和大口径低装药量的火炮。

双基火药以硝化纤维素和二元醇或多元醇的硝酸酯为主要能量组分，属于难挥发性溶剂火药。以硝酸酯类为主要化学成分的有硝化甘油火药、硝化二乙二醇火药、硝化木糖醇发射药等品种。其能量范围大于单基火药，烧蚀也较大。用于大口径火炮和迫击炮的发射装药时，称双基发射药；用于火箭发动机时，称为双基火箭推进剂。

三基火药以硝化纤维素、硝化甘油（或其他硝酸酯）和一种固体含能材料为主要能量组分。通常根据所加入的固体含能材料的类别来命名，如硝基胍发射药、太安发射药、硝胺发射药等。在能量相同时，三基火药爆温低，烧蚀小，火焰也小，适于弹丸初速高、烧蚀小的大口径高膛压火炮装药。

固体火箭推进剂简称固体推进药，在使用和贮存条件下呈固态，其主要组分是固体氧化剂、可燃剂、粘结剂以及交联剂、燃烧催化剂、燃烧稳定剂等。固体推进剂装入发动机点燃后，通过排出燃气的反作用力驱动火箭或导弹飞行。常用的有双基推进剂、改性双基推进剂、复合推进剂等。目前在能量、燃烧力学、安全等性能和加工工艺方面已提高到了新的水

平，在战略与战术导弹、卫星发射、航天及人工降雨火箭等方面获得了广泛应用。

气体发生剂是可以产生气体的物质。火药型（也称推进剂型）气体发生剂是依靠自身的化学反应产生气体的药剂。和高压气瓶的气源相比，它有以下特点：①成气率高，尤其是单、双基型气体发生剂，燃烧时几乎不形成固体产物。其气体产物的主要成分是 CO 、 CO_2 、 N_2 、 H_2O 和 H_2 。②力学性能好，结构致密，便于造型。这类发生剂的强度较高，可承受高压、高加速度载荷，能在很宽的温度范围内使用，也能在不同的环境条件下稳定而有规律地燃烧。③潜能大，燃气温度高。加之成气率高，所以这类发生剂比其他类型的气体发生剂有更高的做功能力。④成气速度可以控制。速度可以提高，也可变慢，能够通过药剂的不同组分和不同药型以及阻燃技术来实现，因此可以用在不同要求的装置中。但是火药型气体发生剂是一种容易点燃、对冲击较敏感的危险性物质，使用中应避免过热和撞击。由于成气过程较快，如果装置设计不当，成气时会造成装置的超压。这些都是设计火药型气体发生剂的科技人员应予以注意的。

黑火药是我国古代四大发明之一，是最古老而有意义的烟火型气体发生剂。典型的黑火药配方为：硝酸钾：碳：硫 = 75:15:10。其中硫既是一种可燃物，又起粘合剂的作用。黑火药被广泛用作点火剂和动力药剂，如火炮中的点燃发射药装药和火箭中的点燃推进剂装药，是点火器的辅助点火药，也是点火药盒中的主要发火成分，具有较强的点火能量。

起爆药^[2]用作爆炸过程的引爆剂，用来激发主要爆药的爆炸。它在不大的上界热作用的影响下，能以爆轰的形式爆炸，如火花、撞击、针刺、摩擦电热等就能引起爆炸。它的爆炸转化有一个特点，即爆炸速度增大到最大值的时间非常短，其他炸药无法相比，而且过程与装药多少无关。压制雷管时，常用的起爆炸药有雷汞、迭氮铅、三硝基间苯二酚铅等。雷汞 $[\text{Hg}(\text{ONC})_2]$ 为白色或灰色的细结晶粒的发光粉物或针状物，有毒密度为4.4，干雷汞极敏感，草棍轻轻一碰都能引起爆炸。迭氮铅 $[\text{Pb}(\text{N}_3)_2]$ 为白色或粉红色的细微结晶粉，密度为4.8，对撞击摩擦火花很敏感（比雷汞稍差一些）。三硝基间苯二酚铅为黄色或棕色的结晶物质，对于火焰较迭氮铅敏感，在制造雷汞中，用作易燃附合物，通常与迭氮铅一起使用。

炸药是在一定的外界能量作用下，能发生高速的化学反应，放出大量的热，生成气体产物并对外界做功的化合物或混合物。广义的炸药包含起爆药、猛炸药、火药和烟火剂。国内通常所谓的炸药是指猛性炸药。炸药和火药的主要区别是，炸药爆炸变化的主要形式是爆轰，对外界做爆破功，作用瞬间功率极高；火药通常是燃烧，对外界主要由高温、高压气体做抛掷功。炸药的性能由化学安定性、感度、爆速、爆热、爆温、爆压、爆容、猛度和做功能力等表征。

猛性炸药具有相当大的稳定性，它的爆炸是在相当大的外力影响下引起的，通常是借助起爆药来激发。它的爆炸转化的主要形式是爆轰，不过在激发起爆的时候，过程速度增大到最大值的时间比起爆药要大得多。它的爆炸威力非常强大，油井射孔用的黑索金、梯恩梯、硝化甘油、硝胺等均属此类炸药。

黑索金（ $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_6\cdot\text{N}_6$ ）属硝胺类炸药，是本类炸药中应用最广泛的一种，其爆炸威力和化学稳定性都比较好，又称三亚甲基三硝胺，简称RDX。黑索金的爆速和爆压比一般炸药（如梯恩梯、特屈儿等）高得多，同时机械感度也较高。由于黑索金撞击敏感度较高，所以长期以来只能作雷管的主装药，而目前黑索金广泛地用于石油射孔器材中的导爆索装药。钝感的黑索金与微量高分子物质的混合物制成的炸药，是目前石油射孔弹的主装药。

奥克托今又名环四亚甲基四硝胺，简称 HMX。奥克托今的化学结构很类似于黑索金，但是它的结晶密度较高，因此能够达到更高的爆速和爆压。据目前所知，爆速超过 9000m/s 的炸药较少，而奥克托今的爆速已达 9000m/s。它的稳定性好，特别是高温时的热稳定性更优于黑索金、梯恩梯等普通炸药，仅此一点，该炸药就成为石油深井射孔弹理想的主装药。

混合炸药又称爆炸混合物，是指由两种或两种以上的物质组成的能发生化学爆炸的混合物。石油射孔弹、军用弹药及爆破工程器材等使用的炸药装药，绝大部分为混合炸药。混合炸药的成分中除主炸药外，常通过增加某些成分来改善炸药的耐热性能，爆炸性能及加工性能，常添入的附加剂有钝感剂、粘结剂、增塑剂等。

油气井射孔弹用耐热混合炸药^[3]属于高能混合炸药，绝大部分以黑索金、奥克托今为主体。近年来，国内专为射孔弹主装药研制了多种耐热单质和耐热混合炸药，这里仅举几例。

①1235 号耐热传爆药：具有较高的爆轰感度，能在 180℃ 温度下工作 2h，爆轰性能、成型性能好，机械强度高，使用安全。目前主要作为无枪身陶瓷射孔弹（或玻璃弹）的传爆炸药，也可作为其他的高温传爆炸药。

②2 号耐热炸药：该炸药系以 TATB（三氨基三硝基苯）为主体的耐热混合炸药，耐热性能好，敏感度极低，使用安全，可用于耐高温（≤250℃）的射孔弹或其他爆破器材中。

③411 号耐热炸药：可在温度为 210~220℃ 条件下工作 2h，它的爆轰性能好，破甲深度深，撞击感度和摩擦感度低，有较好的安全性能，成型性能好，机械强度高，是一种综合性能较好的耐热炸药。可用于 210℃ 以下的石油深井射孔弹装药，也可用于其他的高温（210℃）破甲弹装药。

第二节 国外高能气体压裂技术发展概况

一、美国高能气体压裂技术发展情况

1858 年，美国德瑞凯（C. Dreak）首创性地发现了改造油层从而使油井增产的概念。1860 年，丹尼斯（H. H. Dennis）第一次成功地使用步枪火药改造了油层。1864 年 11 月，罗伯茨（E. L. Roberts）申请了第一个油井爆炸增产的专利^[4]。

在这之后的 80 多年里，人们利用多种井筒爆炸技术来使油井增产，其中有步枪火药爆炸器、黑火药爆炸器、硝化甘油爆炸器。20 世纪 40 年代以前，使用最多的是将胶凝硝化甘油装在大直径的硬纸筒里进行井筒爆炸，还有采用硝化甘油和各种钝化剂混合物的井筒爆炸。当时井筒爆炸已成为世界上油气井标准的改造技术。除炸药外，还有核爆炸增产法试验，但它们都对井筒、套管有严重损坏。

由于水力压裂技术的问世，爆炸改造技术受到了挑战。水力压裂技术之所以推广很快，主要是造缝能力强、可加支撑剂，而且它比爆炸改造危险性小。

随着 70 年代油价的上涨，人们重新对爆炸改造油层技术产生了兴趣，出现了种种高爆产品，如浓稠硝基甲烷炸药、可压缩液体炸药、散装固体推进剂、液体推进剂等。同时实验室研究及理论研究有了新的突破，油田试验逐渐扩大规模。据不完全统计，仅美国至少有 18 个单位从事该项技术的研究。他们研究的爆燃压裂技术有动力压裂、运动压裂、辐射压裂，炸药及火药爆燃压裂、压挡诱生爆燃压裂、双基固体推进剂多层段高能气体压裂、液体推进剂多层段高能气体压裂以及套管井燃烧压裂等，其采用的火（炸）药类型有黑火药、硝

基甲苯、硝化甘油、浓稠硝基甲烷、固体和液体推进剂、硝化纤维、硝酸铵/燃油炸药等。这些技术的特点是对井筒危害小、成本低、清井快、增产效果明显。

美国采用的实验方法及测试手段均比较先进，其技术有爆燃时压力—时间相关曲线测定技术、实验室物理模拟及裂缝设计和控制技术、爆燃压裂井段裂缝几何形态照相技术、裂缝形态井下电视录像技术等。

1. 应力压裂 (Stressfrac) 气体发生器的应用情况

应力压裂技术是美国 Servo-Dynamics 公司研制的高能气体压裂工具，据介绍已有近 30 年的历史，施工井次已达 4000 口以上，应用的也最广。它于 1979 年开始油田技术服务，到 1984 年共施工 1100 井次；1986~1987 年施工 300 井次，其中 95% 在套管井中进行，5% 在裸眼井中进行，处理深度为 90~4268m，缝长可达 10m 以上。可适应的压力范围为 1.725~41.4MPa，一般可增产 69%~279%。

应力压裂技术可应用于新井的油气层增产处理，包括多次处理，也可以在水力压裂等工艺措施前或工艺措施后进行处理，还可应用于不宜进行水力压裂及酸化处理的油气层，如水敏性油气层等，对砂岩及碳酸盐岩油气层均可取得较好的效果。它可以产生多条裂缝，并可使之与天然裂缝沟通，因而增产效果明显。

应用实例如下。

1) 东得克萨斯油田某注水井：

岩性：细砂岩，孔隙度为 14%，渗透率为 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

井况：该井第一次酸化处理未成功，用水泥封固后射孔，再次酸化处理仍未成功，又用水泥封固、射孔。

应力压裂前，该井的注水量为 $1.98\text{m}^3/\text{h}$ ，注入压力为 6.9MPa；应力压裂后，注入量上升到 $2.64\text{m}^3/\text{h}$ ，而注入压力下降到 1.38MPa。

2) 中阿但特戴维油田某油井：

岩性：砂岩，孔隙度为 7%，渗透率为 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

井况：该井由于细砂堵塞了射孔孔眼，因而产量很低。

应力压裂前，该井的原油产量为 $1.5\text{m}^3/\text{d}$ ，压裂后上升到 $4.0\text{m}^3/\text{d}$ ，一年后产量仍有 $3.5\text{m}^3/\text{d}$ 。

2. 双基推进剂在泥盆系页岩中进行多缝压裂的研究情况^[5]

美国桑迪亚 (Sandia) 国家实验室的 Cuderman 认为，泥盆系页岩用过去的高速爆炸处理会在井筒附近出现压碎和压实区域，犹如一个应力罩而封堵了产出物。近年来发展的水力泡沫压裂虽可避免应力罩的产生，但仅能在井壁产生类似天然的单一裂缝。而使用满眼推进剂 (如 M5A, M5B) 药柱的高能气体压裂，在强大的气流挤压作用下，既可避免压碎井壁，又可产生辐射状的多条裂缝。实验是在内华达州火山凝灰岩矿坑内进行的，该结论已由肯塔基州一口 183m 深的泥盆系页岩井所做的试验而证实，测出的压力值和预计的是一致的，而且预计的裂缝几何形态也通过井下电视所核实。实验虽是在泥盆系页岩中进行的，然而，为了实现多缝压裂而采用的特定的推进剂和上升时间，可以应用到任何类型的岩石中。

多缝压裂的设计包括压力上升的时间和确定推进剂的类型等。

(1) 压力上升时间

图 1-1 为多缝压裂测得的典型压力波曲线。可以看出，正常的初始压力上升到一定值后，压力开始下降，其原因可以用最初的裂缝产生时自由空间突然增大来解释。压力下降到

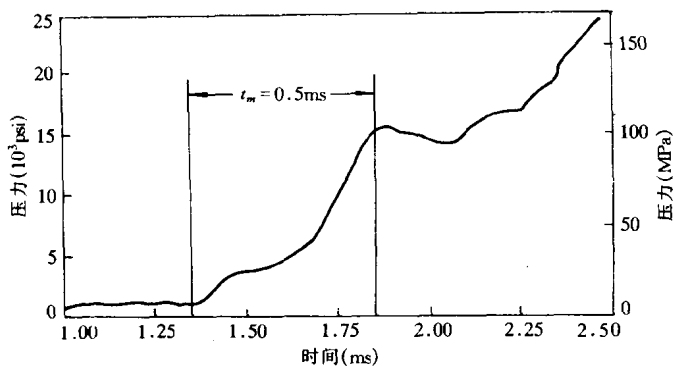


图 1-1 多缝压裂测得的典型压力波曲线

一定值后，因为裂缝空间增加缓慢而使压力再次上升，直到推进剂燃烧完毕或信号消失为止。

影响裂缝性质最重要的参数是压力的上升时间 t_m 的值，将模拟成果和试验验证结合起来考虑，多条裂缝特性可以用 t_m 表达。

$$\frac{\pi d}{2C_R} < t_m < \frac{8\pi d}{C_R}$$

(1-1)

式中 C_R ——罗利 (Raleigh) 地面波速度，m/s；

d ——井筒直径，m。

当泊松比接近 0.3 时，地面波速度大约为压力波速度的一半。

(2) 油田试验情况

试验在俄亥俄州 Meigs 县 10056 号井进行，井深为 1040m，井径为 $7\frac{1}{8}$ in，试验前的产量为 $190\text{m}^3/\text{d}$ ，油层压力为 4.1MPa。

使用六段各 2.4m 长的推进剂（如 M5）组合发生器，共装混合比为 1:1 的 M5A 和 M5B 推进剂 161kg。设计采用的上升时间为 0.33ms 的压力波，预计产生 8 条主裂缝。但实际测出的压力波上升时间为 0.5ms，裂缝仅有 4 条，这已由井下电视测井所证实。试验后的产量增加到 $620\text{m}^3/\text{d}$ 。

二、前苏联高能气体压裂技术发展情况

1991 年，据前苏联专家介绍，前苏联的高能气体压裂技术研究主要由全苏石油矿物地球物理研究所及其他有关单位合作进行。在 60 年代末期大量使用由军工厂生产的带壳体的气体发生器 (ACГ)，并形成了成套的技术规范。自 70 年代开始，主要使用的是无壳的气体发生器 (AДC-5 型、AДC-6 型、ПГД·BK-150 型)，广泛用于生产井、注水井和探井，主要处理对象为砂岩和灰岩地层，对粘土含量较高的砂岩地层处理较少。目前主要使用的是 ПГД·BK-100 型和 ПГД·BK-150 型发生器，施工井深为 1000~6500m，最高井温达 200℃，最大装药量可达 140kg。1991 年以前，每年施工 2000 井次左右，平均增产比为 1.5~2.0，平均施工有效率为 66%。施工无效的主要原因是由于选井不当所致。使用 ГOC (氧化燃烧混合物) 进行高能气体压裂是一项新研制的具有较大发展前途的方法，装药的燃烧速度更为缓慢，最大装药可达 1t 左右，常用的药量为 400~500kg，施工井深已达 2500m。到 1991 年以前，在前苏联的巴什基里亚（已经试验 23 井次）等油田已进行了 50 井次的现场施工，平均增产比为 2.0~2.5，取得了较好的效果。

前苏联专家们认为，由于高能气体压裂过程中既存在着机械作用，产生的高温高压燃气又起着热化学作用，同时在井筒中形成的压力脉冲又可造成物理作用。因而，高能气体压裂是将前述的几类增产方法结合起来的有效措施，其增产效果并不比水力压裂差。当时，前苏联的水力压裂施工量为 300~400 井次/年。由于在动载荷的作用下井眼周围的岩石产生了压裂裂缝和永久变形，使得压裂裂缝因残余变形而保持了一定的缝宽，从而不需要支撑剂支撑

裂缝。使用 ПГД·BK-100 型和 ПГД·BK-150 型发生器时，其缝长可达到 2~10m，压后的残余缝宽为 1.5~3.0mm；使用 ГОС 进行压裂时，缝长可达 20~50m，残余缝宽为 1.5~5.0mm。

从油田应用情况来看，高能气体压裂技术在前苏联亦取得了较好的效果。

1) 杜玛兹油田：自1980年开始应用这项技术，到1984年共施工66井次，累计增产原油2.04万t（其中仅1984年1月就施工34井次，增产原油1.11万t），施工成功率为60%，一次施工平均增产原油309t。表1-1显示了该油田在1975~1984年间不同增产措施的效果。杜玛兹油田的实际资料还表明：当含水率为20%~40%时，施工一次平均增产原油223t；含水率为40%~60%时，施工一次平均增产原油176t；而在含水率为60%~80%时，施工一次平均增产原油59t；但在含水率超过80%以后，处理效果变差，而且不经济。

表 1-1 杜玛兹油田 1975~1984 年各种增产措施的效果

增产措施	作业次数	增加采油量 (万 t)	成功率 (%)	有效期 (月)	一次作业增产油量 (t)	一次作业经济效果 (卢布)	一次作业费用 (卢布)
盐酸处理	96	1.45			151	-672	2209
碳酸处理	64	0.7			109	-375	1480
热酸处理	8	0.14			175	442	1325
热气化学作用	66	2.04		9	309	1907	1215
油层测试器排油	5	0.07					
油层补充射孔	253	8.66	50	6.4	342	2420	1037
油层水力压裂	16	0.42			262	282	2369
油层电加热	69	0.28			40		411
电动液压作用	71	0.83	60		117	663	518
水力冲洗处理	10	0.05					
液态 CO ₂	108	1.42	54	7.3	243		
电冲击	9	0.14	55.5	7	276		

2) 乌津油田：早在1972年10月就开始采用高能气体压裂技术。1972~1977年共处理214井次，其中42井次（占19.6%）由于技术原因无法估计效果。这样，按172井次计算，有效101井次，占58.8%；压后产量无变化的有35井次，占20.3%；产量下降的有36井次，占20.9%。有效井的平均有效期为120天，共增产原油18万t。乌津油田1973~1974年（含水率为14%）施工成功率为50%，施工一次平均增产原油2119t；1979~1987年（含水率为57.7%）成功率仅为22.1%，施工一次增产原油821t。

在前苏联，高能气体压裂技术已经得到了较大规模的应用，从新井评价、生产井投产到油田高含水阶段的开发等各个阶段都应用了这一技术，并取得了较好的效果。

总的来看，前苏联在现场应用规模、技术成熟性、压裂效果等方面均优于美国，值得我们借鉴。

三、美国与前苏联在高能气体压裂理论研究及设计方法方面的比较

前苏联方面：基于理论分析及由室内模拟实验得到的装药不能在窄裂缝中燃烧结论，认为在高能气体压裂过程中，裂缝的起裂、扩展及延伸机理与水力压裂相同，因而其机理研究可借鉴

水力压裂的理论。他们通过研究，形成了一套包括描述火药的燃烧、热交换，流体向地层的流动，流体在井筒中的运动，燃气的泄流规律，裂缝的起裂及其延伸、扩展等在内的 19 个方程组成的设计计算方法。前苏联专家们认为，高能气体压裂一般形成 1 到 2 条垂直裂缝，出现 3 条以上垂直裂缝的可能性较小。

美国方面：通过室内模拟实验及现场试验（坑道回掘及井下电视），证实了高能气体压裂在恰当的加载速率下形成多条径向裂缝的事实，因而对多条径向裂缝的起裂及其延伸、扩展、闭合，套管保护及高能气体压裂的设计、控制等做了大量的研究，并进行了多缝网络增产效果的分析，形成了初步的设计方法，但有待进一步完善。

可以看到，前苏联和美国的高能气体压裂理论研究工作并非是完全相同的，值得我们对比、分析，并结合我国的具体情况，形成一套适用的设计计算方法。

第三节 高能气体压裂的增产机理及理论研究

一、高能气体压裂的特点

1) 高能气体压裂的压力—时间过程：高能气体压裂、爆炸压裂和水力压裂的压力—时间过程如图 1-2 所示。表 1-2 中列出了三种压裂方法的主要参数

表 1-2 三种压裂方法的主要参数（前苏联）

压裂方法	峰值压力 (MPa)	升压时间 (s)	加载速率 (MPa/s)	总过程 (s)
爆炸压裂	$>10^4$	10^{-7}	$10^6 \sim 10^7$	10^{-6}
高能气体压裂	10^2	10^{-3}	$10^3 \sim 10^4$	10^1
水力压裂	10^1	10^2	$10^{-1} \sim 10^{-2}$	10^4

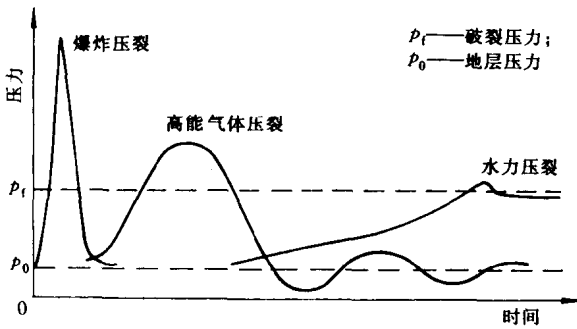


图 1-2 三种压裂方法的 $p-t$ 过程

高能气体压裂的过程是一种剧烈的化学反应过程，是火药或推进剂的燃烧或爆燃反应过程，在几毫秒或几百毫秒内就能完成这个过程。所以它不同于水力压裂，也不同于井筒爆炸压裂（在几微秒内完成），因而能在地层中形成多条随机裂缝而又不伤害井筒或套管。

2) 不论哪种类型的高能气体压裂，均有成本低廉、工艺简便、动用设备少、对施工场地无特别要求、工艺时间短、增产增注效果好、经济效益好、对油层伤害小、对环境无污染等优点，因此具有广泛的应用前景。

二、高能气体压裂的增产机理

1. 增产原理

国内外的实验研究表明，高能气体压裂的增产原理^[6]有以下几点。

1) 气体发生器内的发射药和固体推进剂被点火后，在几个毫秒内迅速爆燃，并产生压力近

100MPa、温度为 2500℃（很快下降）的高速气流，使井壁地层产生多条径向裂缝，其中长裂缝的长度为井径的 50~100 倍或 200 倍。裂缝中的一条或几条可能和垂直于最小主应力 (σ_{\min}) 的油层天然裂缝相沟通，这就大大改善了油层的渗流能力，因此增产作用是明显的，如图 1-3 所示。而水力压裂产生的一条裂缝却与天然裂缝走向一致，不会沟通。

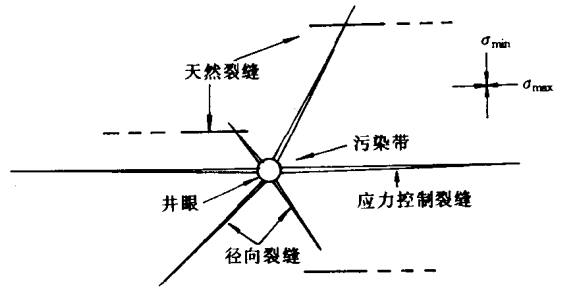


图 1-3 爆燃压裂裂缝和原始微细裂缝的沟通

2) 由于高能气体压裂形成的多条径向裂缝 (2~5 条) 的方向是随机的，基本上都不垂直于最小主应力方向。根据岩石的力学规律，岩石破裂时，裂缝的方向总是垂直于最小主应力轴。这样，在地层岩石的应力控制下，就会对高能气体压裂产生的随机裂缝造成剪切、错动效应，使两缝面产生错动位移、两个缝面上的凹凸处相互交错，形成不会闭合的自行支撑的裂缝，如图 1-4 所示

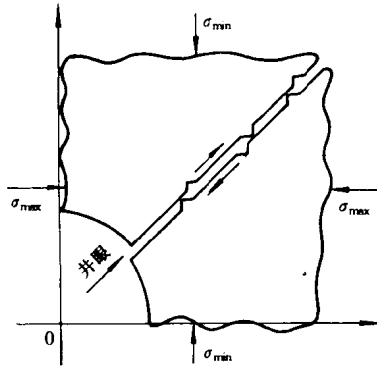


图 1-4 偏轴裂缝的剪切位移支撑

关于不闭合裂缝，西安石油学院周春虎教授推荐使用前苏联的理论进行分析。

前苏联《无壳火药压力发生器应用指南》^[7]指出，欲形成不可恢复的残余变形裂缝，必须遵循下列条件：

$$\frac{p_c - p_\pi}{q_\infty} \geq \frac{\frac{E_2}{E_1}}{\frac{E_2}{E_1} - 1} \quad (1-2)$$

式中 p_c ——压裂时的井底压力，MPa；
 p_π ——地层压力，MPa；
 q_∞ ——地层的水平地应力，MPa；
 E_1 ——地层岩石加载过程的弹性模量，MPa；
 E_2 ——地层岩石卸载过程的弹性模量 (E_2 一般大于 E_1)，MPa。

3) 高能气体压裂的高温、高压、高频冲击气流会使多条裂缝缝面处的岩石产生少量崩垮、剥落的碎屑，其硬度与岩石完全一致，它们也会变成自行支撑裂缝的支撑物。

2. 解堵原理

国内外的实验研究证明，高能气体压裂的解堵原理有以下几点。

1) 高能气体压裂产生的径向多条裂缝穿过井筒附近的污染带，形成了新的油气流动通道。一般井筒周围的污染带半径不大，多在 1m 以内。所以不论药量多少，一般高能气体压裂形成的多条裂缝均能远远超出污染带的范围而与油层深处沟通，从而得到解堵效果。

2) 发射药或固体推进剂爆燃时，产生的爆燃气流温度在 2500℃ 以上，压力近 100MPa，它会向一切孔隙冲击。随着各装药段爆燃反应的进行，冲击不断产生，形成高温、高压、高频的冲击气流波，它能够将油层原生孔隙中产生堵塞作用的机械杂质或各种盐类微粒、油层岩石剥落的微粒、胶结物中因膨胀而堵塞孔道的松散物质绝大部分冲刷、清扫干净，基本恢复孔隙结构的原始状态，从而解除堵塞。

3) 产生高能气体的同时也产生了冲击波、超声波、强声场，它穿透性能极强，作用于油层

可疏通油流通道,降低毛细孔道的表面张力,使原油降粘、除垢并解堵、清蜡防蜡,抑制地层中细菌的生长和聚集,从而提高油层的泄油能力。

4) 高能气体压裂处理后 2h,井底还维持有足够高的温度异常。高温场可以溶解沉积在处理层段井筒及地层渗滤面上的蜡质、胶质和沥青质沉积物,疏通渗流通道,降低渗流阻力。温度升高后,原油粘度降低,流度也相应提高了。

5) 火药或推进剂燃烧生成的 CO 、 CO_2 、 N_2 、 NO 、 HCl 等携带热能的生成物进入油层。前二种易溶于原油,从而降低了原油的粘度,提高了原油溶解蜡及胶质、沥青的能力。后二种生成物均易溶于水而产生腐蚀性强的硝酸和盐酸,相当于对地层进行了酸处理。

由于这几方面的解堵效能,所以高能气体压裂的解堵作用是很强的,而且适应于许多地层。

高能气体压裂在以下场合较为合适:

- ①新井试油评价,可解除污染,获得测试结果;
- ②酸化压裂后的地层,可进行油气层解堵;
- ③对天然裂缝发育的区域,可进行增产改造;
- ④注水井,通过解堵、压裂达到增注目的;
- ⑤水敏、盐敏、酸敏地层,可压裂改造或解堵;
- ⑥尤其适于常规改造技术不宜进行的沙漠、滩海、高山地区的油气井。

另外,高能气体压裂作用的介质是爆燃气体,不会对地层产生任何伤害,施工中也不向井外排出废液,不会引起环保问题;施工中使用设备少,人力少,工艺简便,施工周期短,成本低,效益极大,因而深受用户欢迎。

三、高能气体压裂的理论研究^[8]

西安石油学院利用弹性动力学方法研究了多裂缝的生成规律,分析了套管与水泥环的抗压强度,并根据渗流理论推出了增产倍数与缝数及缝长的关系,按照火药燃烧规律和井及裂缝的气体流动规律制定了高能气体压裂的设计方法。

1. 高能气体压裂的关键因素

升压速度是影响裂缝条数的主要因素。不计阻尼影响的弹性动力方程式为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{R\} + \{R^*\} \quad (1-3)$$

式中 $[M]$ ——质量矩阵;
 $[K]$ ——刚度矩阵;
 $\{R\}$ ——地应力向量;
 $\{R^*\}$ ——载荷向量;
 $\{\ddot{u}\}$ ——加速度向量;
 $\{u\}$ ——位移向量。

根据式 (1-3),依照最大拉应力的强度极限并考虑起裂与延伸,采用 Newmark 近似法求解。求解步骤如下:

- ①求 $(t + \Delta t)$ 时刻的等效载荷,包括压力载荷与动载荷;
- ②求 $(t + \Delta t)$ 时刻的位移;
- ③计算孔壁应力 σ_0 ;
- ④若有裂纹,计算缝尖应力 σ_p ;