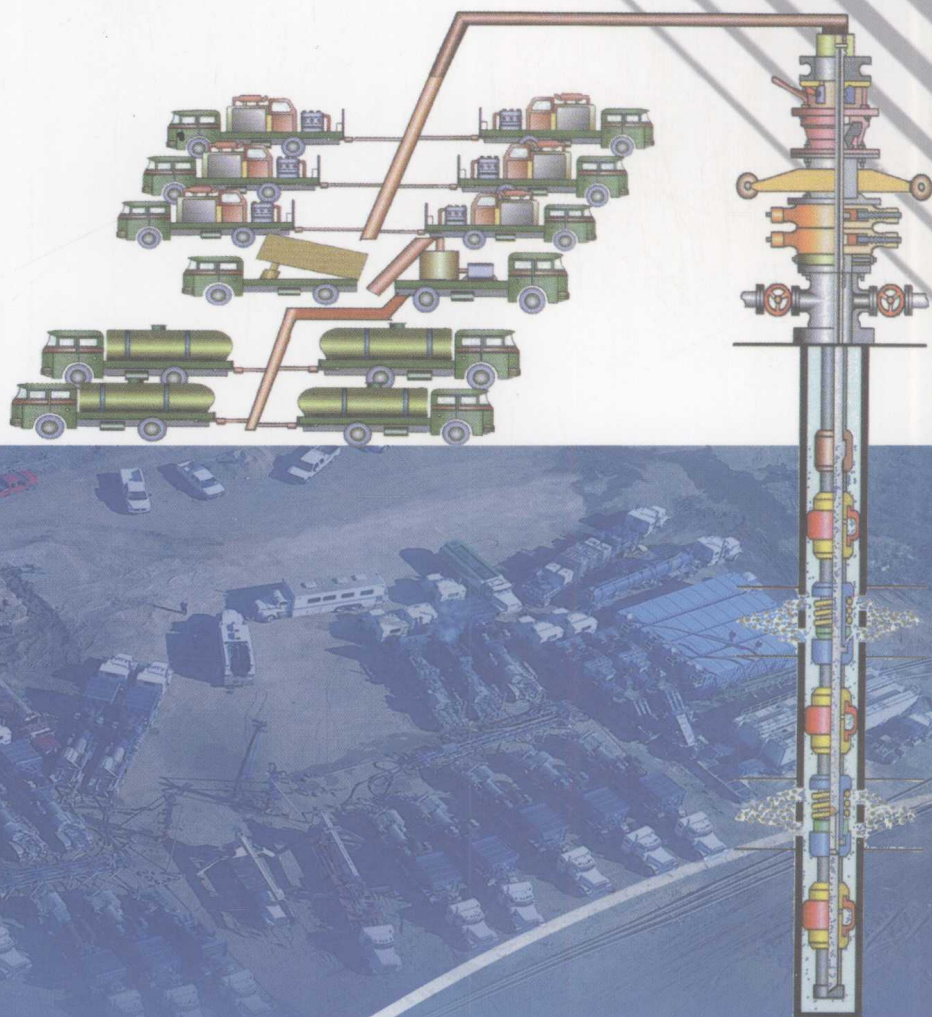


俞绍诚 等编著

水力压裂技术手册



水力压裂技术手册

俞绍诚 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本手册系统介绍了水力压裂工作的全过程,内容包括:压裂的选井选层、压裂液、支撑剂、水力裂缝模型与压裂设计软件、油气藏数值模型与设计计算软件、压裂设计与设计优化、压裂工艺技术、压裂现场测试与诊断、压后评价技术、压裂质量控制等。使读者在获得一个完整概念的同时,认识到压裂技术涉及诸多学科。

本手册可供从事压裂技术工作的科研人员和技术人员,以及相关大、专院校的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

水力压裂技术手册/俞绍诚等编著.

北京:石油工业出版社,2010.6

ISBN 978-7-5021-7596-2

I. 水…

II. 俞…

III. 油层水力压裂-技术手册

IV. TE357.1-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第001410号

水力压裂技术手册

俞绍诚 等编著

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)64523536 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技有限公司

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2010年6月第1版 2010年6月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:37.75

字数:963千字 印数:1—2000册

定价:158.00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

前 言

水力压裂是改造油气藏储层的一项增产技术。中国石油工业生产中最早的水力压裂始于1952年,在陕北延长油矿用手压泵在地面油层露头处压出了水平裂缝。1955年在玉门油田用水泥车、原油和石英砂在新5井进行了第一次压裂施工,获得增产效果。这些具有历史意义的现场作业,开创了我国借助水力压裂技术改造油气储层的新纪元。

50余年来,我国的水力压裂技术不断发展进步,至今已形成了一套基本适用于我国陆上油气藏特点,并以浅井—中深井,深井—超深井为内容的压裂技术体系,满足了不同油气藏在不同阶段的开发要求。“八五”以来,尤其是进入21世纪之后,压裂工作紧紧围绕提高老油田挖潜,提高低渗透、特低渗透,以及难以动用储量的整体开发效益这一课题,依靠科学技术进步,依靠科学系统管理,使其技术能力与技术水平日臻完善。在我国国计民生中起着不可替代的作用,对促进我国经济持续发展作出了积极重大的贡献。

本手册就是在这一大背景下,在1998年出版的《采油技术手册》第九分册《压裂酸化工艺技术》的基础上,经修订充实后完成的一本关于油气藏水力压裂技术方面的专业书籍,也是一本对该项技术极具指导性、操作性和实用性的工具书。

与20世纪末出版的手册比较,本手册的贡献在于:首先,它自压裂选井选层开始,经压裂材料及其优选、数值模拟、压裂设计与设计优化、现场施工方法与压裂前后的各项测试,至压后评价技术与压裂的质量控制,全面系统地论述了水力压裂这项技术的全过程。其次,本手册指出水力压裂技术是由油气藏地质、油气藏开发、岩石力学、油田化学、数值模拟、测试技术、机械仪表和经济管理等诸多学科、诸多环节共同构筑而成的,并强调了基本概念的重要性。为此,在行文上力求深入浅出,以便读者理解掌握。书中现场实例多,使读者便于类比,以解决各自遇到的实际问题。这样,本手册不仅可以作为各油气田勘探开发实际应用的依据,也可作为科研单位和大专院校的参考书,更是压裂工作者的案头工具书。

本手册的编撰者均是中国石油勘探开发研究院廊坊分院压裂酸化技术服务中心的技术骨干,皆有20年左右专门从事压裂工作的资历,有着扎实的理论功底和极强的科研能力,有着丰富的现场实践和严谨的工作态度。即使如此,本手册中错误难免,全体编撰者愿高悬鞭策自警,切盼读者指正。

目 录

第一章 压裂的选井选层	(1)
第一节 选井选层的基本原则	(1)
第二节 低产原因分析与诊断	(1)
第三节 选井选层的基本条件	(3)
第四节 选井选层方法	(4)
第五节 压裂时机的选择	(13)
第二章 压裂液	(16)
第一节 压裂液的作用	(16)
第二节 压裂液类型	(17)
第三节 压裂液的性能要求与添加剂的筛选	(19)
第四节 常用压裂液典型配方及性能评价方法和标准	(30)
第五节 压裂液的流变性和滤失性对工艺设计的影响	(45)
第六节 压裂液优化设计	(56)
第七节 压裂液质量控制	(60)
附录 A 新型压裂液体系	(63)
附录 B 国外大型服务公司使用的压裂液添加剂	(68)
附录 C CO ₂ 的基本性能曲线及 CO ₂ 泡沫压裂液的流变性	(80)
第三章 支撑剂	(83)
第一节 支撑剂类型	(83)
第二节 支撑剂的物理性质、评价方法与评价标准	(87)
第三节 支撑裂缝导流能力及其试验测定	(94)
第四节 影响裂缝导流能力的因素	(98)
第五节 我国部分现用支撑剂的试验评价结果	(113)
第六节 支撑剂的优选	(113)
第四章 水力裂缝模型与压裂设计软件	(131)
第一节 水力裂缝模型的发展简述	(131)
第二节 水力裂缝模型	(134)
第三节 TerraFrac 和 FracPro 软件介绍	(152)
第五章 油气藏数值模型与设计计算软件	(170)
第一节 油气藏数值模拟发展概况	(170)

第二节	油气藏数值模拟基本原理	(172)
第三节	数值模拟工作过程简述	(174)
第四节	数值模拟软件的使用介绍——以 Eclipse Office 模块为例	(177)
第六章	压裂设计与设计优化	(186)
第一节	压裂设计的基本任务	(186)
第二节	压裂设计参数的分类	(186)
第三节	主要设计参数的作用及其采集方法	(188)
第四节	就地应力场	(232)
第五节	压裂设计计算	(258)
第六节	压裂设计优化	(278)
第七节	压裂设计参数的敏感性分析	(292)
第七章	压裂工艺技术	(304)
第一节	压裂现场的施工方法	(304)
第二节	压裂配套技术新发展	(333)
第三节	不同类型油气藏的压裂技术系列	(352)
第八章	压裂现场测试与诊断	(372)
第一节	就地应力场的现场测试	(372)
第二节	压裂压力的现场测试	(386)
第三节	裂缝高度测试技术	(396)
第四节	压裂压力诊断	(405)
第五节	小型测试压裂	(412)
第九章	压后评价技术	(417)
第一节	水力裂缝的评价	(417)
第二节	压后储集层评价	(429)
第三节	压裂材料的使用与评价	(433)
第四节	压裂效果评价方法	(435)
第十章	压裂质量控制	(440)
第一节	质量控制的目标与作用	(440)
第二节	压裂设计质量控制	(440)
第三节	压裂施工现场的质量控制	(441)
附件 I	低渗透油藏整体压裂	(450)
一、概述		(450)
二、油藏综合评价		(453)
三、压裂材料的评价与优选		(454)

四、整体压裂方案的设计与优化	(455)
五、整体压裂方案的实施、诊断与压后评价	(461)
六、整体压裂实例分析	(463)
附件 II 低渗透油藏开发压裂	(470)
一、开发压裂概述	(470)
二、水力压裂油藏工程评价	(472)
三、井网与裂缝系统组合方案的比较研究	(472)
四、风险评价	(473)
五、开发压裂实施研究	(473)
六、开发压裂实例分析	(474)
附件 III 连续油管液氮气举排液	(486)
一、连续油管液氮气举排液	(486)
二、液氮(氮气)	(492)
三、连续油管	(499)
附件 IV 压裂用封隔器及其配套工具	(508)
一、封隔器分类与型号编制	(508)
二、压裂用封隔器的技术规范	(509)
三、压裂用配套工具	(525)
附件 V HQ-2000 型压裂设备	(529)
一、HQ-2000 型压裂车	(529)
二、CHF BT 100 型混砂车	(532)
三、T300 型仪表车	(534)
四、HSE-15000 型管汇车	(536)
附件 VI 油管、套管的技术性能	(538)
一、油管、套管的技术性能	(538)
二、油管、套管和油套环形空间的容积	(538)
附件 VII 计量单位与单位换算	(588)
一、法定计量单位	(588)
二、常用单位换算	(590)

第一章 压裂的选井选层

选好、选准压裂目的井层是全部压裂工作的起点。它决定了后续一切压裂行为的确认、优化、运作和评价,必须精细有加,慎之又慎。

也由于不同油气藏具有不同的地质特征、开发要求和工程条件,因此,压裂工作者应参照本章内容制定出符合各油气藏的压裂选井选层标准。

第一节 选井选层的基本原则

选好、选准压裂目的井层是获得压裂增产的首要条件。压裂的选井选层应遵循以下原则,不可缺一:

(1)选定的压裂目的层必须具有一定的可采(或剩余可采)储量(以孔隙度、有效厚度和含油气饱和度来表示),这是保证压后增产的物质基础。

(2)选定的压裂目的层必须具有一定的供给能力(以有效渗透率、有效厚度和地下油气黏度为表征),这是保证压后增产的生产基础。

(3)选定的压裂目的层必须具有足够的地层压力(以压力水平或压力系数的高低为衡量指标),它是压后驱油入井的能量基础。

(4)一旦选定压裂目的层,该压裂井的井况、地面场地和环保措施必须具备进行现场施工所需要的工作条件。

第二节 低产原因分析与诊断

一、低产原因分析

油气层是否应当压裂,关键在于找出低产的原因。低产可能是以下一种因素造成的,也可能是几种因素的综合:

(1)油气层孔隙度低,或储能系数($\phi_e h_e S_o$ 值)低、可采(或剩余可采)储量低,储集层没有足够的物质基础。

(2)油气层低渗、特低渗,或有效厚度薄,产能系数($K_e h_e$ 值)低;或地下原油黏度高,流动系数($K_e h_e / \mu_o$ 值)低,储集层没有足够的产出能力。

(3)油气层压力低,或天然驱动能量不足,或投产后能量消耗大,而又未能及时注水补充能量,储集层没有足够的驱动能力。

(4)受钻井、完井或历次井下作业的影响,储集层近井地带的渗透率受到伤害。

(5)油气层纵、横向非均质性强,各油组、各产层相互干扰。

(6)油气层砂体小,呈透镜状展布,连通性差,供给边界有限。

(7)油气层出砂严重,隔层塌陷。

(8)油气井层管外或层间窜通。

- (9)注采井网不尽合理,或注、采井数互不匹配。
- (10)油气层的注采关系发生变化。
- (11)周围邻井生产发生变化。
- (12)油套管规范、尺寸、固井质量或射孔状况与开发生产要求的工作制度不匹配。

二、低产原因诊断

油气井层低产可根据以下测试解释、动静态资料研究和数值模拟结果进行综合分析,诊断出低产的原因。

- (1)压力恢复曲线。
- (2)压力降落曲线。
- (3)中途测试。
- (4)生产测井。
- (5)就地应力场(地应力大小及其方位)分析。
- (6)岩心分析。
- (7)储集层连通对比。
- (8)油气层生产记录。
- (9)对应注水层与周围邻井的生产记录。
- (10)油气井层历次井下作业记录。

三、应对措施

一旦弄清低产原因,即可制定出目的明确、针对性强的压裂应对措施。例如:

- (1)对低渗或特低渗油气层,原则上应压出长缝,尽量扩大油气层的泄油面积。
- (2)对于中渗油气层,则应压出高导流能力的长缝。
- (3)对于高渗油气层,且仅近井地带受到污染,一次解堵型的压裂即可奏效。
- (4)中高渗油气层,采取高砂比压裂或端部脱砂压裂必能获得显著增产效果。
- (5)如果是由于驱油能量衰竭造成油层低产,则应先对对应注水层强化注水,进行注水培养,待其地层压力恢复到一定程度后再进行压裂改造(见本章第五节)。

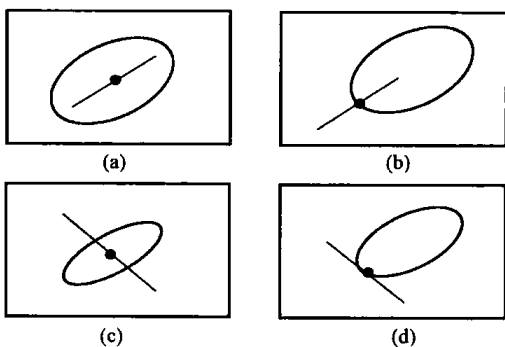


图 1-1 压裂井层、砂体和裂缝方位匹配关系示意图

(6)对透镜状砂体的油气层压裂,应注意砂体走向、裂缝延伸方位与压裂井层在砂体中的位置三者之间的匹配关系。见图 1-1。由图可见,若三者关系匹配,可望压后增产[图 1-1(a)],否则事半功倍[图 1-1(b)、(c)],甚至劳而无功[图 1-1(d)]。

(7)出砂或严重出砂的井层应采用高砂比的填砂压裂(见第七章第一节),并使用树脂包层砂作为压裂用支撑剂(见第三章第一节)。

(8)已落实管外窜通造成低产的井层,应在压前进行封窜作业。

(9)如油气层低产是由井网设置、注采关系、供油边界或套管尺寸、完井方式以及射孔等因素不匹配所致,则应调整开发方案和钻井、完井措施,使它们达到一个最佳的平衡。

第三节 选井选层的基本条件

由于油气藏各具不同的地质特征、开发部署和工程条件,所以,压裂工作者必须根据油气藏实际,制定出各自的选井选层标准。

一、适合与不适合压裂的井层

1. 适合压裂的井层

(1) 需经压裂投产才具备开发价值的低渗、特低渗油气井层。

(2) 孔隙度高、含油(气)饱和度高和有效厚度大的油气层。这3个参数的乘积定义为储集层储能系数($R = \phi_e h_e S_o$ 值),反映油气层的储油能力,储能系数越大越好。

(3) 有效渗透率高、有效厚度大、油气的地下黏度低的油气层。它们的乘积或比值定义为产能系数($K_e h_e$ 值)、流动系数($K_e h_e / \mu_o$ 值)或流度(K_e / μ_o 值),反映油气层产出能力。其值越大越有利。

(4) 反映油气层驱油能力的压力水平(目前地层压力/原始地层压力,%)或压力系数(同压力水平,无因次)的下限应在65%~70%或0.65~0.70以上的油气层。

(5) 已证明油气层内储有大量油气,由于近井地带受到污染,使本井层低产,而周围同层邻井高产。

(6) 油气层平面上连通性好。压前产量递减曲线平缓,说明供油面积大。通过压出高导流能力的长缝,努力扩大井层的供油半径,必可实现增产。

(7) 油气层压裂井段相对集中,跨度越小越好(上限为50m);且井段上下有较好的遮挡层。

(8) 油气层井段的固井质量好;套管、压裂管柱、井下工具与井口承压能力以及压裂设备的功率足以完成压裂施工任务;场地平整、地面和环保条件符合施工要求及国家法规。

2. 不适合压裂的井层

(1) 油气层储能系数(R 值)太低。如油层孔隙度、含油饱和度分别低于10%和30%,气层孔隙度低于6%,在没有足够有效厚度的支持下,压后大多无效。

(2) 油气层经长期生产可采储量已近枯竭。

(3) 油气层压力水平(压力系数)衰落到65%(0.65)以下。

(4) 由岩心测定的空气渗透率,油层如小于0.1mD、产能系数($K_e h_e$ 值)小于0.15mD·m;气层渗透率如小于0.01mD,若没有足够有效厚度的支持,压后难见成效。

(5) 已确认压开的垂向裂缝将延伸到目的层上下的产气层或出水层。

(6) 压裂井的井况极差。例如:套管承压能力低,或有破损、漏失、变形处,且无法以工具予以封隔;或在压开缝高的跨距中有固井质量差、窜槽出砂的井层。

(7) 不具备压裂现场施工场地,或环保措施不达标的压裂井层。

二、注水开发油藏在不同含水期的压裂选层

1. 低含水期(综合含水率小于20%)

(1) 选压主力层中的低产储集层。判断方法如下:

- ① 压裂目的层地层压力高,生产压差大,采油指数小;
- ② 在同一开采层系中,压裂目的层的产量明显低于邻井同层;
- ③ 分层测试结果说明,压裂目的层的动、静态资料不匹配;
- ④ 经试井或压降曲线分析证实,目的层确有污染;
- ⑤ 有资料证明目的层在钻井、完井或历次井下作业过程中受到伤害。

(2) 选压非主力层中注采关系明确、注水层吸水好而对应生产层低产的储集层。

(3) 对前次压裂施工质量差、压后效果差强人意,经诊断确有增产把握的储集层进行重复压裂。

2. 中含水期(综合含水率介于 20% ~ 60%)

(1) 经分层测试,选压或重复压裂尚有(剩余可采储量与地层压力)增产潜力的储集层。

(2) 选压主力或非主力层中的低含水层。

(3) 选压久未动用的非主力层。

3. 高含水期(综合含水达 60% 以上)

(1) 选压主力或非主力层中的薄油层和差油层。

(2) 选压加密调整井中不含水或中低含水层。

(3) 压裂新层系开发井中的储集层。

(4) 压裂储量标准以外的含油气砂层。

第四节 选井选层方法

下面举出常规和数学两类四种压裂选井选层方法,供压裂工作者参照。需说明:(1) 这些方法均应建立在采集、使用准确可靠参数的基础上;(2) 每种方法都有其局限性。因此,应根据油气藏实际抉择。

一、注、采井小层对比法

这一选层方法的实质是,在掌握油气井层及其对应注水井全部地质与生产史的基础上,借助常规动、静态资料进行小层对比,选出压裂层段。

1. 资料准备

1) 静态资料

包括井史、完井地质总结报告、综合测井曲线和小层数据表等。

2) 动态资料

包括注采井的生产(注水)月报表、产油剖面、吸水剖面、分层吸水测试等资料。

2. 压裂选层示例

现以华北二连阿南油藏的 11-305 井为例,予以说明。

1) 采油井 11-305 井条件

1995 年 3 月完井。射开 6 个小层,砂层厚度 16.8m,有效厚度 11.0m。平面上连通关系好。中部深度 1368m。小层数据见表 1-1。

表 1-1 11-305 井小层数据表

小层号	射孔井段 m	厚度, m		岩性	电阻 $\Omega \cdot m$	电位 mV	时差 $\mu s/m$	电测解释			综合解释
		砂岩	有效					孔隙度 %	渗透率 mD	含油饱和度, %	
2	1346.2 ~ 1347.2	1.0	0.6	细砂岩	12	3	265	16	35.6	23	差油层
3	1352.2 ~ 1356.6	4.4	2.6	细砂岩	15	3	275	18	63.8	43	油层
4	1361.6 ~ 1363.2	1.6	0.8	细砂岩	14	4	275	18	49.3	40	差油层
4	1364.0 ~ 1366.0	2.0	0.6	细砂岩	20	—	250	13	10.7	36	差油层
6	1377.6 ~ 1380.2	2.6	1.8	细砂岩	15	6	220	8	4.0	0	致密层
8	1384.0 ~ 1389.2	5.2	4.6	细砂岩	15	9	265	16	35.6	37	油层
平均	1367.7	16.8	11.0	细砂岩	15	4	260	15	36.5	32	致密—油层

该井投产初期日产油 13t, 压前降至 1.1t, 含水 55%。累计产油 1669t, 累计产水 945m³。

2) 对应注水井条件

井 11-305 有 11-304 和 11-306 两口对应注水井, 使其双向受效。如图 1-2 所示。

(1) 对应注水井 11-304 井。

11-304 井 1995 年 7 月投注。砂层厚度 18.8m, 9 层; 有效厚度 9.2m, 6 层。分注 2-4 和 5-8 号层(小层号, 以下同)上下两段, 分别与选出压裂的 11-305 井对应。1995—1996 年两次测吸水剖面。

(2) 另一对应注水井 11-306 井。

11-306 井于 1995 年 7 月投注, 砂层厚度 20.2m, 5 层; 有效厚度 9.8m, 4 层。1995 年测得吸水剖面。

3) 注采井层的对应关系

表 1-2 对比了待选压裂的 11-305 井与其两口对应注水井的动、静态资料。

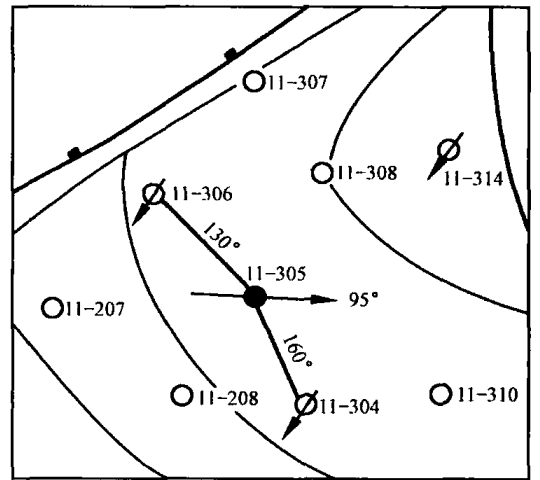


图 1-2 11-305 井与周围邻井的关系

表 1-2 11-305 井与对应注水井之间的动、静态资料的对应

小层号	11-304 注水井 1995.7.5 投注				11-305 待选井 1995.4.18 投产				11-306 注水井 1995.7.5 投注	
	有效厚度 m	渗透率, mD		吸水剖面, %		有效厚度 m	渗透率, mD		1995.10 吸水剖面 %	有效厚度 m
		小层	分段	1995.10	1996.3		小层	分段		
2	1.2	97	82	41	64	0.6	36	45	0	2.0
3	2.0	85		5	0	2.6	64		0	0
4	0.8	49		20	17	1.4	43		65	2.2
5	2.2	64	44	29	19	—	—	25	—	—
6	0	—		0	0	1.8	4		13	2.6
8	1.2	64		0	0	4.6	36		22	3.0

4) 压裂目的层段的确定与设计思路

(1) 确定选压井的压裂层段。

依据表 1-2 中的数据,可以有把握地选定该井的压裂层段:

① 两口对应注水井中的 2~4 号(或称为上段)高渗层段是该注水井中的高吸水层段(有吸水剖面为证);

② 与之对应的 11-305 生产井中的 2~4 号层(上段)则应是高受效层段,也是该待压裂井中的高产出和高含水层段,其中 2 号和 4 号小层为主力层段,3 号小层因其高渗可能受到污染,并未出尽全力;

③ 11-305 井的下段,即 6 号和 8 号小层显然是该井的潜力层段,应是首选的压裂层段。

(2) 设计思路。

① 最终目的是要解放 11-305 井下段 6 号和 8 号两个小层;

② 压裂前后均需加强两口对应注水井下段的注入量,压前是为了恢复已降低了的地层压力,进行注水培养;压后则是为了获得持续的高产、稳产进行必需的注水支持。

③ 待该井产量低于压前 1.1t/d 后,可考虑用双封隔器法分压该井主力层段中的 3 号小层。

5) 实施结果

分压 11-305 井下段 6 号和 8 号小层后,以当年年底(连续生产 108d 后,继续有效)的统计数据为据,压裂效果如下:

(1) 日产油由压前(58d 的平均值)的 1.1t 增至压后(108d 的平均值)的 10.1t,日净增油 9.0t;

(2) 累计产油 868t,累计增油 754t,含水由压前的 55% 降至 32%,净降 23%;

(3) 压裂施工总支出 21.7×10^4 元,以当年华北二连地区内部油价 852.35 元/t 计算:净收入 64.3×10^4 元,净收益 42.6×10^4 元;如按当年国家二档油价 1220 元/t 计算,净收入和净收益则分别为 92.0×10^4 元和 70.3×10^4 元,投资回收期为 16d。

6) 结论

(1) 这是油藏进入中含水期后借助开发生产必备的常规数据找出潜力层段进行压裂、实现稳油控水的范例(见本章第三节)。这一选层方法不需要再进行(花钱的)各项测试就能完善油藏开发效果。

(2) 实施要点:

① 油藏动、静态资料数据必须齐全可靠。

② 压裂工作者在油藏地质与开发方面必须具备扎实的基本功,在工程技术方面具备一定的现场经验,能将二者融会贯通。

下面介绍的是利用模糊识别、人工神经网络和多因素非线性统计 3 种数学模型进行压裂选井选层的方法。与上述注、采井小层对比法比较,它们更能做出定量的分析判断。

二、模糊识别模型

1. 模型的概念

所谓模糊识别模型是指,将压裂选井选层中必须考虑的(剩余)可采储量、目前选压层的压力系数(目前地层压力)、存储能力(孔隙度、有效厚度和目前含油饱和度)、产出能力(目前有效渗透率、有效厚度和目前地下原油黏度)以及射开井段及其跨度(长度)等储集层特征参

数进行分析,结合目的油藏(区块或井区)的压裂效果,确定出该油藏(区块或井区)压裂效果最好的井层在上述各项特征参数中的分布范围,并以此作为待选压裂井层的衡量标准。然后,借助模糊数学的计算手段,求取各个待选压井层与这一标准井层的欧氏贴近度。显然,求出的欧氏值越大,即说明该待选的压裂井层与标准井层越相似、越贴近压后,获得预期压裂效果的把握就越大。

2. 模型的计算表达式

设 A 是由 $n-1$ 个待选压裂井层 A_1, A_2, \dots, A_{n-1} 的集合; P 是对应 A 的特征参数 P_1, P_2, \dots, P_m 的集合。

由集合 A 到集合 P 的模糊关系记为 R 。由于 A 和 P 都是有限论域,故 R 可用矩阵表示为:

$$\begin{cases} R = [r_{ij}]_{n \times m} & i = 1, 2, \dots, h_j \quad j = 1, 2, \dots, m \\ r_{ij} \in [0, 1] \end{cases} \quad (1-1)$$

式中 r_{ij} ——待选的压裂井层具有参数 P_j 特征的隶属度。

其实,选层工作者在尚未选出待压井层之前,已经知道标准井层特征参数(P_j)应具备哪些特征,并将(P_j)中的各项特征参数作为参照指标。然后,在集合待选的($A_i, i=1, 2, \dots, n-1$)诸多待选层中,找出能够最大限度地接近于(P_j)综合特征参数的层(或层段),该层(或层段)即为最佳的压裂候选层(或层段)。

按下述半升梯形法求解集合 A 至集合 P 之间的模糊关系 R :

$$r_{ij} = \mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 < x < a_2 \\ 1 & x \geq a_2 \end{cases} \quad (1-2)$$

式中 x ——待选压裂层中的任一特征参数;

a_1 ——待选压裂层中的任一特征参数的最小值;

a_2 ——待选压裂层中的任一特征参数的最大值。

将定一模糊关系 R 划分为 n 个次级模糊矩阵 R_1, R_2, \dots, R_{n-1} 及 R_n^* 。其中 R_1, R_2, \dots, R_{n-1} 分别表示 $n-1$ 个压裂待选井层与相应特征参数间的模糊关系, R_n^* 则表示标准井层与其特征参数间的模糊关系。

接下来以标准井层作为理想模式,求解 $n-1$ 个待选压裂井层与理想标准井层的贴近程度。

它可用欧氏贴近度来表征,其表达式为:

$$P(R_j, R_n^*) = 1 - \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \{W_i \cdot [R_j(P_i) - R_n^*(P_i)]^2\}} \quad (1-3)$$

式中, W_i 为各项特征参数的权重,该值的确定是用灰关联方法进行的。

计算步骤如下:

(1) 数据的初值化处理。

设原始数列为 $X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(num)\}$, 对 $X^{(0)}$ 初值化后变

为 $Y(0)$:

$$Y(0) = \{Y^{(0)}(1), Y^{(0)}(2), Y^{(0)}(3), \dots, Y^{(0)}(num)\}$$

$$= \left\{ \frac{X^{(0)}(1)}{X^{(0)}(1)}, \frac{X^{(0)}(2)}{X^{(0)}(1)}, \frac{X^{(0)}(3)}{X^{(0)}(1)}, \dots, \frac{X^{(0)}(num)}{X^{(0)}(1)} \right\} \quad (1-4)$$

(2) 求差序列:

$$\Delta_{0i}(k) = |Y_0^{(0)}(k) - Y_i^{(0)}(k)|, i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, 3, \dots, num \quad (1-5)$$

(3) 求两级最大差与最小差:

$$\Delta_{\max} = \max_i \min_k |Y_0^{(0)}(k) - Y_i^{(0)}(k)|; \Delta_{\min} = \min_i \max_k |Y_0^{(0)}(k) - Y_i^{(0)}(k)| \quad (1-6)$$

(4) 计算关联系数:

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \cdot \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho \cdot \Delta_{\min}} \quad (1-7)$$

式中 ρ ——分辨系数,其作用在于提高关联系数间差异的显著性, $\rho \in (0, 1)$, 通常取作 0.5;
 num ——数据个数。

(5) 计算关联度:

$$r_{0i} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n \xi_{0i}(k) \quad (1-8)$$

(6) 计算权重:

$$W_i = \frac{r_{0i}}{\sum_{i=1}^m r_{0i}} \quad (1-9)$$

3. 选取压裂井层的步骤

- (1) 确定各影响参数类型与数值;
- (2) 按式(1-4)进行归一化处理;
- (3) 按式(1-5) ~ 式(1-9)计算各影响参数的权重 W_i ;
- (4) 按式(1-2)计算模糊矩阵的子元素 r_{ij} ;
- (5) 由上述计算的子元素,构成模糊关系矩阵 R ,并将其分为 R_1, R_2, \dots, R_{n-1} 及 R_n^* ;
- (6) 由式(1-3)计算各待选压裂井层与标准压裂井层间的欧氏贴近度 $P(R_j, R_n^*)$;
- (7) 按欧氏贴近度大小对待选压裂井层排队。

4. 压裂选层实例

1) 例一

仍以前述华北二连阿南油藏的 11-305 井为例,该井经注采井小层对比法选出分压 6 号和 8 号小层后,再用模糊识别法加以验证。

按上述计算步骤计算出 2~4 号(上段)小层的欧氏贴近度为 0.335,而 6 号和 8 号(下段)小层为 0.487,显然应选压下段,这一结果与注采井小层对比法一致。

2) 例二

以储集层有效厚度、目前有效渗透率、目前地层压力等 7 项参数作为综合特征参数 P_i , 按模糊识别模型的计算方法选出华北二连阿南油藏一批待压井层。计算出的欧氏贴近度与预测和实际的压裂效果列于表 1-3 中。由表可见, 欧氏贴近度越高, 压后成功的把握越大, 获得的压裂效果越好。

表 1-3 5 口压裂井的日增油量与欧氏贴近度的关系

井号	欧氏贴近度	压后日增油, t			累计增油 t
		预测值	实际值	统计天数, d	
阿 31-227	0.569	9.9	11.8	96	1133
阿 11-305	0.487	10.9	9.0	104	936
阿 31-22	0.486	7.9	8.9	102	908
阿 31-426	0.462	5.4	4.4	124	546
阿 10-38	0.211	3.8	2.0	97	194
平均值		7.6	7.2	105	743
以往 15 口井平均值		—	2.0	108	216

三、人工神经网络模型

1. 三层 BP 网络模型的概念

人工神经网络是模拟人脑的思维方式和组织而建立起来的一个具有较好收敛性、高度线性和非线性复合的数学模型。它由若干个处理单元连接而成为一套复杂的网络系统。该系统的模拟预测包括学习建模和外推预测两个过程。

采用比较成熟且应用广泛的 BP 网络模型进行分析。BP 网络结构由输入层节点、隐含层节点和输出层节点三部分组成。为简便起见, 只研究一个隐含层的网络模型, 如图 1-3 所示。

对于输入信息, 先向前传播到隐含层的节点上, 经过各单元的特性为 Sigmoid 的激活函数运算后, 把隐含节点的输出信息传播到输出层节点上并给出输出结果。网络的学习过程由正向和反向两个传播过程组成。正向传播过程中, 第一层神经元的状态只影响下一层神经网络。如果输出层不能得到期望的输出, 即实际输出值与期望输出值之间有误差, 那么就转入反向传播过程, 将误差信号沿原来的连接通路返回, 通过修改各层神经元的权值, 逐次向输入层传播进行再计算, 再经正向传播至输出层, 如此反复使误差信号最小。当误差达到人们所希望的要求时, 网络的学习过程就告结束。

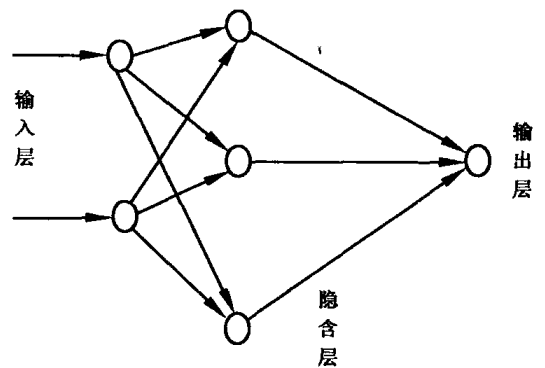


图 1-3 三层 BP 网络结构示意图

2. 模型的计算表达式和计算步骤

由于理论上的推导过于抽象, 在此只给出了具体计算步骤。

(1) 对所有的样本进行归一化处理, 设定输入层、隐含层和输出层的节点个数分别为 n 、 h 和 c 。

(2) 产生随机数,用随机数对权值 W_{ij} 和 W_{kj} (分别表示输入层与隐含层、输出层与隐含层间各个神经元的连接权) 进行初始化。其中, i, j, k 分别表示输入层、隐含层和输出层的节点。

(3) 用 0 对权值的改变量 ΔW_{ji} 、 ΔW_{kj} 进行初始化。并设定学习步长为 η , 加速因子为 α 。

(4) 输入第 P 个样本 (X_1, X_2, \dots, X_n) 及其相应的期望输出 (d_1, d_2, \dots, d_c) 。

(5) 先计算隐含层各节点的输出 O_j :

$$O_j = f(y_j) \quad (1-10)$$

其中, $y_j = \sum_{i=1}^{n+1} W_{ji} \cdot X_i$, 当 $i = n + 1$ 时, $X_{n+1} = 1$

再计算输出层各节点的输出 O_k :

$$O_k = f(y_k) \quad (1-11)$$

其中, $y_k = \sum_{j=1}^{n+1} W_{kj} \cdot O_j$, 当 $j = h + 1$ 时, $O_{h+1} = 1$

$$W_{kj} = W_{kj} + \Delta W_{kj}$$

(6) 计算累计误差:

$$e \leftarrow e + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^c (d_k - O_k)^2 \quad (1-12)$$

(7) 修正权系数从输出层开始,先修正 W_k :

$$\delta_k = (d_k - O_k) \cdot O_k \cdot (1 - O_k) \quad (1-13)$$

$$\Delta W_{kj} \leftarrow \eta \cdot \delta_k O_j + \alpha \cdot \Delta W_{kj}$$

其中, $k = 1, 2, \dots, c; j = 1, 2, \dots, h + 1$ 。

(8) 再修正 W_{ji} :

$$\delta_j = O_j \cdot (1 - O_j) \cdot \sum_{k=1}^c \delta_k W_{kj} \quad (1-14)$$

$$\Delta W_{ji}(l) \leftarrow \eta \cdot \delta_j \cdot O_i + \alpha \cdot \Delta W_{ji}(l-1)$$

$$W_{ij}(l) \leftarrow W_{ij}(l-1) + \Delta W_{ji}(l)$$

(9) 如 $p < N$, 则 $p \leftarrow p + 1$, 转至第(4)步, 否则, 转入第(10)步。

(10) $L \leftarrow L + 1$, 如 $L > L_{\max}$, 迭代结束, 否则:

如 $e < e_{\max}$, 迭代结束;

如 $e > e_{\max}$, 则 $p \leftarrow 1, e \leftarrow 0$, 再转至第(2)步, 进入下一轮迭代。

3. 选取压裂井层的步骤

使用人工神经网络模型选取压裂井层的步骤如下:

(1) 确定影响压裂效果的关键因素;

(2) 评价与确认上述关键参数的大小;

(3) 收集以往压裂井的资料, 建立神经网络模型的学习样本;

(4) 按上述计算式对学习样本进行学习;