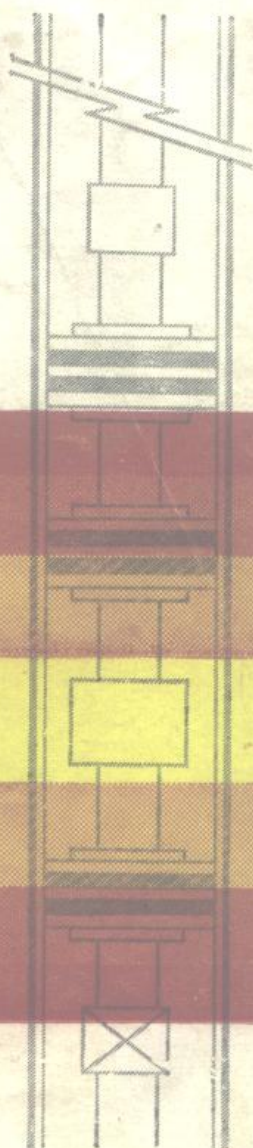


封隔器 理论与应用 基础

江汉石油管理局采油工艺研究所
江汉石油学院采油教研室

编



石油工业出版社

13147

T-913
002

封隔器理论基础与应用

江汉石油管理局采油工艺研究所 编
江汉石油学院采油教研室

石油工业出版社

内 容 提 要

本书着重探讨封隔器密封元件和整个封隔器管柱井下工作的基本理论。全书主要内容有封隔器的发展、应用、分类和现状；密封元件的井下工作分析、室内试验研究及密封元件的合理设计；封隔器管柱受力分析，详细探讨了井下温度、压力的变化对封隔器系统的影响；最后介绍了有关封隔器系统力学分析理论的实际应用。

本书适用于从事封隔器研制、使用和管理的科技人员、现场工程技术人员，也可供钻采专业的师生参考。

封隔器理论基础与应用

江汉石油管理局采油工艺研究所 编
江汉石油学院采油教研室

*

石油工业出版社出版

(北京安定门内外恒东后街甲36号)

北 京 印 刷 一 厂 排 版

妙 峰 山 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米32开本 9 $\frac{3}{4}$ 印张 213千字 印 1—2,800

1983年11月北京第1版 1983年11月北京第1次印刷

书号：15037·2432 定价：1.05元

前 言

在石油勘探和开发中，封隔器的使用由来已久，其范围包括钻井、试油、生产、测试、注入、增产作业等许多工艺措施。作为一项井下工具，向为人们重视。目前，涉及封隔器各种结构及其实际应用的文献，可以说比比皆是。然而，致力于深入、系统地介绍封隔器有关理论问题的专著，在国内尚付阙如。因此，专门从事封隔器研制等工作的人员，迫切希望能看到这方面的理论书籍。有鉴于此，笔者不揣冒昧，抛砖引玉，试图在填补空白方面做一些有益的工作，以应有关人员亟需。

本书写作初衷，不是为了提供一种包罗万象的封隔器手册，而是重点探讨封隔器密封元件和整个封隔管柱井下受力的基本概念和基础理论。因为单单囿于封隔器的具体结构，或仅仅注重其实际应用，势必使封隔器的研究工作拘泥于较小的范围，失去赖以提高和深化的基础。我们希望：这本书的出版，能为专事封隔器研制工作的有关人员提供借鉴和参考，能对促进我国封隔器的研究工作，提高封隔器的设计水平有所裨益。

本书是在江汉石油管理局采油工艺研究所多年搜集、调查国外文献并综合研究的基础上编写而成的。书中第一章，由江汉石油学院郑锡铎写出；第二、三、四章，系江汉局采油工艺研究所李海金写成；第五、六两章，则由采研所刘章节和江汉石油学院张柏年合写（采研所曾宪锦曾参与过这两

章初稿阶段的部分工作)。在各章的编写过程中,张柏年老师一直予以具体指导并对全书详为校核、订正。最后,复由郑锴铤对全书进行了统一符号、协调文笔和润色文字等工作。

本书的初稿,石油部开发司罗英俊工程师、石油勘探开发规划研究院刘文章总工程师以及华北石油管理局的有关同志,曾提出不少宝贵意见。此外,我们还参阅了国内兄弟单位的一些资料,在此一并表示感谢。

本书在酝酿、执笔和改定阶段,力图占有尽可能多的资料;凡涉及书中内容者,笔者莫不悉力以赴。但由于所据文献毕竟有限,不免有挂一漏万之虞;加之国外封隔器的研究工作各有侧重,致使本书符号命名不尽一致,度量单位也难以统一。所有这些不足,敬希读者见谅。本书虽然几易其稿,但限于笔者水平,错讹之处恐还不少,恳望读者批评指正。

编者

1982年4月

目 录

第一章 概述	1
第一节 引言	1
第二节 封隔器的发展	2
第三节 封隔器的应用	4
一、封隔器基本用途	4
二、封隔器选用依据	5
第四节 封隔器的结构	7
一、密封部分	7
二、锚定部分	8
三、扶正部分	9
四、坐封部分	9
五、锁紧部分	9
六、解封部分	9
第五节 封隔器的类型	10
一、封隔器基本类型	10
二、封隔器的命名和分类	15
参考文献	22
第二章 封隔器密封元件井下工作分析	23
第一节 压缩式密封元件	24
一、有“防突”结构的压缩式密封元件	25
二、无“防突”结构的压缩式密封元件	30
三、根据结构特征和压差求坐封力	37
四、根据静压和压差求坐封力	42
五、密封元件合理参数的确定	46

第二节 膨胀式密封元件	51
第三节 楔入式密封元件	56
第四节 皮碗式密封元件	59
符号命名	61
参考文献	64
第三章 密封元件试验研究	66
第一节 室内试验装置	66
一、地面常温试验装置	66
二、高温热采封隔器试验装置	70
三、自封式密封元件试验装置	71
第二节 接触应力的测定及合理形状的选择	73
第三节 井下工作稳定性的试验	76
第四节 应力松弛现象	80
第五节 密封特性试验分析	82
第六节 膨胀式密封元件自封性的研究	86
第七节 摩擦力的测定	90
参考文献	95
第四章 密封元件设计	97
第一节 合理形状和尺寸的确定	97
一、压缩式密封元件	97
二、膨胀式密封元件	102
三、皮碗式密封元件	107
四、复合式密封元件	109
第二节 密封元件的“防突”措施	112
一、为什么要采取“防突”措施	112
二、两种类型的“防突”问题	115
三、各种“防突”方法	116
第三节 密封元件材质选用	131
一、密封元件材料的演变	131
二、密封元件常用的材料	134

参考文献	140
第五章 封隔器管柱受力分析理论	142
第一节 基本效应	145
一、活塞效应	145
二、螺旋弯曲效应	147
三、鼓胀效应	167
四、温度效应	171
第二节 管柱与封隔器的关系	173
一、自由移动	173
二、有限移动	174
三、不能移动	177
第三节 单一管柱的计算方法	181
一、允许油管自由移动(例 1)	183
二、允许油管有限移动(例 2)	186
三、不允许油管移动(例 3)	190
四、环形空间压力超过油管压力	193
五、最初油管压力不等于最初套管压力	193
六、中和点超过管柱上端	194
第四节 永久性螺旋弯曲	195
第五节 复合管柱完井的各种效应的计算	201
一、活塞效应	201
二、螺旋弯曲效应	205
三、鼓胀效应	209
四、温度效应	209
第六节 复合管柱的计算实例	210
一、允许油管自由移动	210
二、允许油管有限移动	213
三、不允许油管移动	214
四、环形空间压力超过油管压力	223
五、永久性螺旋弯曲	223

六、水力坐封式封隔器	227
第七节 单管多封隔器管柱的受力分析	227
一、中间封隔器对油管的作用力	227
二、中间封隔器处的作用力	232
三、实例计算	234
四、水力坐封式中间封隔器	243
五、打开封隔器之间的层段时力的计算	247
六、两级以上的封隔器	248
七、复合管柱	248
八、基本假设	248
符号命名	250
参考文献	254
第六章 封隔器管柱受力分析理论的现场应用	256
第一节 封隔器管柱受力的经验公式	256
一、经验公式	256
二、经验公式的局限性	261
第二节 封隔器管柱所受的其他力	262
一、管柱顶部的张力	262
二、打开平衡阀的力	263
三、封隔器上需要的压重	264
四、封隔器上实际的压重	264
第三节 计算中图表的使用	269
一、油管伸长图	269
二、油管螺旋弯曲图	270
三、油管平均温度图	272
第四节 封隔器管柱受力分析图解法	275
第五节 用计算机计算深井增产作业时的压力和温度 对管柱长度的影响	286
一、活塞效应	286
二、鼓胀效应	287

三、螺旋弯曲效应	289
四、温度效应	290
五、计算实例	295
符号命名	300
参考文献	302

第一章 概 述

第一节 引 言

所谓“封隔器”，系指具有弹性密封元件，并藉此封隔环空，隔绝产层，以控制产(注)液，保护套管的井下工具。也就是说，封隔器所具备的种种功能，主要依靠弹性密封元件的密封作用来实现。这种密封作用，根据密封部位的不同，可分为两种：一种是油管与套管(或裸眼井壁)之间的密封，谓之“外密封”；一种是油管或油管密封短节(也称密封段)与封隔器内腔(或密封腔容座)之间的密封，谓之“内密封”^[1]。前者问世很早，使用相当普遍；后者兴起较晚，但在深井完井中日益显示其优越性。正是由于封隔器独特的密封作用，为油气水井的正常生产和各种井下工艺措施的顺利进行提供了有效的机械手段，因此，封隔器被认为是实现油气田合理开采的战略性武器。

通常，封隔器是接在油管上下井的^①。现场上，往往把这种带封隔器的油管柱叫做“封隔器管柱”，也有人称为“油管-封隔器系统^[2]”。为方便起见，不妨简称作封隔器系统。

目前常用的封隔器分为两大类：可取式封隔器和永久式封隔器，前者指可以用油管(或钻杆)或电缆下井坐封，必要时采用动管柱和其他非破坏性手段解封，并从井下起出以备

① 也有接在电缆(钢丝)上下井的。

重复使用的封隔器；后者则指较长时间(永久性地)封隔地层，一般不易从井下起出的封隔器。

对于封隔器本身来说，最关键的部件莫过于弹性密封元件，有人比之如封隔器的心脏，因为它在很大程度上影响甚至决定着封隔器系统井下工作的成败。本书第二至第四章，将较为详尽地讨论这方面的问题。

其次，我们知道，封隔器系统在井下工作的条件——主要是温度和压力，往往因井的工艺方式的变更而改变，因而引起系统的受力和管柱长度发生变化，导致封隔器过早解封、错封或窜封^①，乃至无法起出封隔器及其他更为严重的恶性故障^[3]。因此，从理论上了解和分析温度、压力的变化如何影响封隔器系统的受力状况，则是至关重要的。本书第五、六两章将深入地介绍有关的问题。

第二节 封隔器的发展

石油工业的兴起和发展，伴随着封隔器的问世和演变。据记载，世界上最早使用的封隔器，是美国的“种子袋”封隔器，由早期的油田经营者J. 拉夫纳(Ruffners)兄弟等人开始应用。1861年，经木质的表层导管下入的早期油管柱(因为当时的油井未下套管)，就带有这种封隔器。1865年，世界上第一次采用小尺寸(3½英寸)的套管，其底端所接的也是这种封隔器^[4]。

早期的封隔器，结构简单，用途单一，性能低下。图1-1为美国布赖森(Bryson)于1868年发明的裸眼封隔器。1880年，美国斯图尔特(Stewart)发明了一种开有油、套压

① 解封指封隔器解除密封状态；错封指封隔器封隔了非目的层位；窜封指封隔器所封隔的区域发生了漏泄。

连通孔的单胶筒封隔器，其胶筒是在锥形体的楔入作用下膨胀的。随后，美国封隔器的研究工作又加快了步伐^[4]。

苏联封隔器的研究工作，起步也比较早。三十年代初，阿塞拜疆油田首先开始采用正反扣螺栓式封隔器（Пакер с винтом）。1936年，阿塞拜疆矿机研究所研制了结构比较完善的尾管式封隔器，但其下入深度只有300~650米，有效工作压差不超过25公斤/厘米²^[5]。

为了合理地开发多油层非均质油田，避免层间干扰和确保各层有效生产，三十年代末，美国和苏联相继开始了分层开采工艺的研究和其他分层工艺技术（如分层注水、分层测试、分层进行增产措施）的试验^[6]，这就导致了适应分层开采工艺技术的各种封隔器的发展。1942年，第一次双层完井使用了美国贝克工具公司制造的封隔器。1951年，用于多管完井作业用的双管封隔器也已经问世^[7]。

近几十年来，随着钻井、完井工艺不断向高压、高温和复杂的深部地层方面发展，对封隔器提出了种种更高的要求，因而促使封隔器研制工作趋向专业化，研制的产品日益丰富。目前，美国参予封隔器研制、销售的厂商或公司不下于20家^[8]（还出现了专事封隔器研制的贝克封隔器公司）。据统计，早在六十年代，见诸于美国有关产品目录上的封隔器品种已达300种^[9]。近几年来，则大大超过此数，并涌现出不

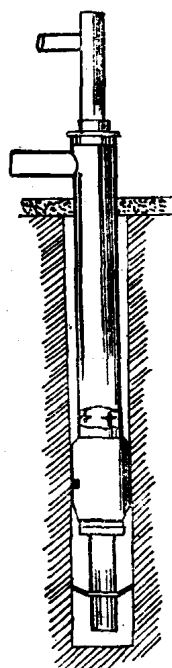


图 1-1

少结构改进,性能提高的新型封隔器。目前,美国封隔器一般能耐温 $100\sim 220^{\circ}\text{C}$, 耐压 $170\sim 700$ 大气压^[10]; 而苏联封隔器一般最深下至 3000 多米^①, 耐压 500 多大气压, 耐温 $20\sim 250^{\circ}\text{C}$ ^[11]。

应当指出的是,由于人类对石油后备储量勘探的需要,不得不在越来越恶劣的环境——极端高温、极端高压、极端复杂的条件下进行钻井和完井。为了适应这种需要,从六十年代起,密封腔容座完井法应运而生,用作苛刻条件下的密封材料相继问世,因而突破了封隔器只限于外密封的旧概念,开拓了封隔器实现内密封的新途径。最近,出现了一种新型的高压完井工具——可取式下放短节(RLN),可以代替永久式封隔器下在密封腔容座的底部,使密封腔容座完井具有更大的灵活性和更好的控制性^[1,13],从而导致油气井完井工艺的重大改革。

看来,封隔器今后可能会朝着高性能、多用途、适应性强和更多地采用内密封结构的方向发展。

第三节 封隔器的应用

一、封隔器基本用途

如前所述,封隔器使用范围之广,几乎遍及勘探和开发的各个生产过程。之所以应用封隔器,除了可满足生产中的各种工艺要求外,也有经济上和操作上的考虑,因为借助封隔器进行井下作业,比之其他井下工具更为合算、更为方便。封隔器一旦在井下有效工作,就可以达到下列目的:

- ① 隔绝井液和压力,以保护套管免受影响,从而改善

① 据最近报导,封隔器下深已达 6000 米,耐压达 700 大气压^[12]。

套管工作条件;

② 封隔产层或施工目的层,防止层间流体和压力互相干扰,以适应各种分层技术措施的需要,或便于进行堵漏、封窜等修井作业;

③ 保存并充分利用地层能量(包括溶解气能量),以提高油井生产效率,延长其工作时间;

④ 使井的控制仅限于地面油管,以确保安全和最大限度地控制地层;

⑤ 便于采用机械采油的方式(如为气举和水力油塞泵抽油提供必要的生产通道,或将套管分隔为吸入和排出两部分,以利无管泵进行抽油);

⑥ 用在气井中(尾管下至射孔段以下),可以缓和气井液面过早上升。

通常,封隔器不能用于下列场合:

① 杆式泵抽油井;

② 电潜泵抽油井;

③ 靠环形空间生产的低硫高产油井(因为油管要用作压井管线或用来下测压、测井仪表);

④ 油套同出的低硫干气井^[2]。

二、封隔器选用依据

封隔器选用得当,就会确保甚至提高井下工作效果。因此,必须对预定的井下作业的目的进行分析。一般来说,应当结合油井现在的和将来的情况,并在预计到要可能进行其他作业的情况下,选择既尽可能达到多项使用目的,而总成本又最低的封隔器类型。

下面,列举了选用封隔器时应当考虑的一些因素。

(一) 封隔器的结构性能

封隔器的结构性能是决定使用效果和成本的关键因素，应当优先予以考虑。通常，对封隔器性能上的基本要求是下得去、封得严、能耐久。具体说来，包括坐封或解封动作是否简单，耐压、耐温、抗腐蚀的程度和连续密封的时间及最为适合何种作业。在结构设计上，要求具有可取性（对可取式封隔器，只需进行简单的地面操作，就能起封），或者打捞性（对于永久式封隔器，零部件系可钻材料加工；在对比此类封隔器时，就得考虑必须磨铣的金属量）以及过油管作业的能力（凡预计要进行过油管作业的井，应选用内通径至少等于油管内径的封隔器，而且务必使油管尽量少弯曲为度）。

（二）封隔器的价格和使用成本

在许多情况下，可能有好几种可供选择的封隔器，能同时满足某一种工艺要求，但最终多半选用其价格较低者。最便宜的封隔器，莫过于结构简单的压重式封隔器和张力式封隔器（但前者如加上水力锚，则价格就会提高）。多管水力式封隔器由于结构比较复杂，自然价格偏高，使用时还需要较多的配套工具。

值得注意的是，封隔器的性能是影响封隔器使用成本的主要因素，一定要结合起来评价。

（三）井下流体性质和种类

井下流体性质和种类，对于封隔器的使用效果和寿命长短有一定影响。当井中含有二氧化碳和硫化氢时，选用封隔器必须考虑到加工封隔器的材质。

（四）地面设备和井下工具的相互关系

坐封封隔器时，一般要进行地面操作，例如，上提下放油管柱，正反转油管柱或通过油管施加压力。因此，选用封

隔器必然涉及到井口设备。由于完井是一种协同作业，故应当选用可以互相配合的地面设备和井下设备，以确保安全、可靠地进行作业(尤其在高压施工和高压井中)。

此外，套管尺寸，完井层数，井的类型和工作方式，井身质量，管柱配合，井下压力和温度条件以及预计的修井次数等等，都应予以考虑。

第四节 封隔器的结构

目前，尽管国外研制的封隔器花样繁多，但基本结构相差无几。主要包括密封、锚定、扶正、坐封、解封六大部分，而每一部分又各自包含若干零、部件。当然，由于使用目的和工艺要求的不同，各种类型的封隔器并不一定各大部分样样俱全。下面，简要介绍各部分的基本功能及其主要零、部件。

一、密封部分

密封部分是在外力(机械力或液压力)的作用下，发生动作，最终密封环形间隙，防止流体通过的机械。它是封隔器的关键部分，主要由弹性密封元件，赖以安装密封元件的钢碗，隔环(挡圈)和各种防止密封元件“肩部突出”的“防突”部件构成。其中，密封元件是至关重要的核心部件，通常制作成圆筒状，所以也俗称胶筒。只是近来为了实现油管与封隔器之间的内密封，密封元件才制成各种形状(如V形)的盘根。

自封隔器问世以来，人们花了大量的气力，对密封元件(尤其是实现外密封的胶筒)进行了多方面的深入研究，进而带动了整个封隔器的研究工作，因此是本书的一个重点研究对象。