

封隔器设计基础

FENGGEQI SHEJI JICHU

朱晓荣 主编 吴雷泽 代理震 副主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

图书在版编目(CIP)数据

封隔器设计基础 / 朱晓荣主编. —北京:中国石化出版社, 2012. 4
ISBN 978 - 7 - 5114 - 1459 - 5

I. ①封… II. ①朱… III. ①封隔器 - 设计
IV. ①TE931. 02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 030746 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

*

700 × 1000 毫米 16 开本 14.5 印张 174 千字

2012 年 4 月第 1 版 2012 年 4 月第 1 次印刷

定价:56.00 元

《封隔器设计基础》

编委会

主 编：朱晓荣

副主编：吴雷泽 代理震

成 员：徐兴权 姜建平 刘 斌

孔 萍 罗 君 张燕平

陈爱平 赵 杰

前 言

封隔器是实现油气田开采的重要工具，能够为油气井的正常生产和各种井下工艺措施的顺利进行提供有效的机械手段，在油气田勘探开发过程中占据着非常重要的地位。封隔器性能的优劣以及可靠与否直接影响到油气井的措施成功率和开发成本。

1983 年，以江汉石油管理局采油工艺研究所(现中国石化江汉油田分公司采油工艺研究院)为主编写的《封隔器理论基础与应用》一书论述了封隔器结构、密封元件设计及试验研究、封隔器及管柱力学分析的基本理论，对于指导封隔器设计与研究发挥了重要作用。此后，封隔器技术取得长足发展和进步。为了体现技术的发展变化，适应新形势下封隔器设计 and 研究的要求，中国石化江汉油田分公司采油工艺研究院以《封隔器理论基础与应用》一书为蓝本编写了本书。本书共分七章，各章主要内容如下：

第一章给出了封隔器的定义和涉及的常用概念，简述了封隔器发展史，介绍了封隔器用途和选用依据，描述了封隔器的结构组成，介绍了封隔器的各种分类，给出了封隔器的型号编制依据。

第二章 对封隔器密封元件、卡瓦及其他部分，分别提出了结构设计的一般要求和方法，进行了理论分析，介绍了相关研究情况，给出了一些可参考的结论。

第三章 介绍了封隔器密封元件材质、常用钢材、可钻材料的类型、选用依据等，介绍了材料的防腐处理方法及防腐材料的类型、选用依据。

第四章 介绍了几种有关密封元件力学特性的分析理论，给出了

一些胶筒结构参数计算公式,给出了一些研究实例和结论。

第五章 介绍了封隔器有限元分析的概念、方法,分别对一般零件、胶筒、卡瓦进行了有限元分析,介绍了封隔器工作过程仿真分析的概念、方法,介绍了一种封隔器工作过程仿真分析的情况。

第六章 介绍了封隔器基本试验方法、室内试验装置和试验内容,密封元件试验的方法及相关研究成果。

第七章 综述了管柱理论研究现状,介绍了三维弯曲井眼中管柱模型的建立及求解,介绍了基本效应力学模型,不同管柱结构类型的力学模型,单一管柱、复合管柱的计算方法,多管柱结构受力分析。

全书由朱晓荣、吴雷泽、代理震负责总编,徐兴权、姜建平、刘斌负责统稿,第一章由姜建平、孔萍负责编写,第二章由姜建平、徐兴权负责编写,第三章由姜建平负责编写,第四章由罗君、孔萍负责编写,第五章由姜建平负责编写,第六章由罗君、孔萍负责编写,第七章由徐兴权负责编写。在本书编写过程中,赵杰、陈祈提供了大量的调研和翻译资料,姜建琼、汪森、陈红、杨丽、戚玉荆等为该书中的文字、图、表做了大量的编辑及修改工作。

本书在编写过程中,中石化股份公司曾庆坤教授级高工、胡风涛教授级高工,西南石油大学刘清友教授、长江大学周思柱教授、中国石油大学(华东)徐兴平教授,以及中原油田工程技术研究院韩进教授级高工、胜利油田采油工艺研究院唐高峰高级工程师等提出了许多宝贵的意见,其中刘清友教授还负责进行了最后审查;各级领导和同行也给予了关心、支持;本书的内容还吸取了《封隔器理论基础与应用》一书作者的智慧。在此一并表示衷心的感谢!

本书适用于封隔器设计与理论研究人员、封隔器使用人员和井下作业技术管理人员,也可作为大专院校石油工程和石油机械专业的参考教材。本书在编写工作中,力图占有尽可能多的资料,听取多方面的意见。但由于编者水平有限,书中错漏和不足之处在所难免,恳请读者批评指正!

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 封隔器的组成	(6)
一、密封机构	(6)
二、锚定机构	(7)
三、坐封机构	(7)
四、锁紧机构	(9)
五、反洗机构	(9)
六、解封机构	(9)
七、扶正机构	(10)
八、防坐机构	(10)
第五节 封隔器的类型	(10)
一、封隔器的各种分类	(10)
二、封隔器的型号编制	(12)
三、封隔器的类型实例	(14)
第二章 封隔器结构设计	(17)
第一节 密封元件形状和尺寸设计	(17)
一、压缩式密封元件	(17)
二、扩张式密封元件	(22)
三、自封式密封元件	(26)
四、组合式密封元件	(27)
第二节 密封元件的防突设计	(30)

一、为什么要采取防突措施	(30)
二、各种类型的防突方法	(32)
第三节 卡瓦的结构设计	(44)
第四节 其他部分结构设计	(46)
一、封隔器主体外径设计	(46)
二、直杆轴向拉伸和压缩应力及变形计算	(46)
三、接头及中心管的抗滑扣计算	(47)
四、管柱抗压强度设计	(48)
五、卡簧的设计计算	(49)
六、锁环的设计计算	(49)
七、活塞及活塞缸套的计算	(50)
八、剪断销钉的设计	(52)
第三章 封隔器材质选择	(53)
第一节 密封元件材质	(53)
一、密封元件材料的演变	(53)
二、密封元件常用的材料	(55)
第二节 常用钢材	(64)
第三节 可钻材料	(66)
一、金属可钻材料	(66)
二、非金属可钻材料	(68)
第四节 防腐材料	(69)
一、防腐处理	(69)
二、防腐材料	(70)
第四章 封隔器密封元件力学分析	(75)
第一节 压缩式密封元件	(75)
一、有防突结构的压缩式密封元件	(76)
二、无防突结构的压缩式密封元件	(81)
三、根据结构特征和压差求坐封力	(86)
四、根据静压和压差求坐封力	(91)
五、根据力学分析求设计参数	(96)
第二节 扩张式密封元件	(101)

第三节 自封式密封元件	(107)
第五章 封隔器有限元仿真分析	(113)
第一节 封隔器有限元分析	(113)
一、有限元分析原理	(113)
二、封隔器零件有限元分析	(115)
三、封隔器胶筒有限元分析	(119)
四、封隔器卡瓦有限元分析	(121)
第二节 封隔器工作过程仿真分析	(124)
一、仿真分析模型的建立	(125)
二、计算结果分析	(130)
第六章 封隔器室内试验	(135)
第一节 封隔器基本试验方法	(135)
一、封隔器强度试验	(137)
二、封隔器密封性能试验	(137)
三、坐封压力试验	(138)
四、坐封销钉剪断力试验	(138)
五、封隔器解封试验	(138)
六、封隔器锁环试验	(138)
七、丢手可钻封隔器卡瓦破裂试验	(139)
第二节 室内试验装置	(139)
一、水浸试验装置	(139)
二、高温高压油浸试验装置	(143)
三、力加载试验装置	(148)
第三节 密封元件试验	(149)
一、接触应力的测定	(149)
二、压缩式密封元件工作性能试验	(153)
三、扩张式密封元件自封效应试验	(161)
四、摩擦力的测定	(165)
第七章 封隔器管柱力学分析	(170)
第一节 引言	(170)

第二节 管柱力学模型.....	(171)
一、基本效应的力学模型.....	(172)
二、不同管柱结构类型的力学模型.....	(183)
三、单一管柱的计算.....	(185)
四、管柱的强度计算.....	(187)
五、复合管柱完井的各种效应的计算.....	(189)
六、多管柱结构受力分析.....	(192)
第三节 三维弯曲井眼中管柱模型及求解.....	(194)
一、三维弯曲井眼中管柱的变形几何关系分析.....	(195)
二、三维弯曲井眼中管柱的受力分析.....	(200)
三、管柱静力平衡方程、物理方程及微分方程.....	(202)
四、根据最小势能原理建立管柱变形微分方程.....	(206)
五、管柱变形微分方程的无因次化及其特例.....	(209)
六、管柱非线性变形微分方程的求解及临界载荷的确定.....	(212)
参考文献.....	(218)

第一章 概述

第一节 引言

封隔器是指用来密封环空和(或)隔离目的层段,控制注入或采出流体,并能承受压差的井下工具。

封隔器一般用油管(钻杆)或电缆下井。现场上,往往把用油管(钻杆)下井的管柱称为封隔器管柱或封隔器系统^[1]。

封隔器的密封和隔离功能主要依靠密封元件来实现。有人把密封元件比作封隔器的“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。

封隔器的分类依据很多。依据我国石油天然气行业标准规定,按照密封元件的工作原理,封隔器的基本类型分为压缩式、扩张式、自封式三种,这三种还可以进行组合。

封隔器的设计包含结构设计、材质选择、力学分析、室内试验评价等多方面内容。

封隔器的结构涉及多种机构,其中,密封机构和锚定机构是设计的核心。在材质选择上,要考虑到用途、强度、成本等多种因素。

封隔器系统在井下工作受温度、压力、介质等环境因素的影响,同时,也受到不同井下工作方式的影响,从而引起系统的受力和管柱长度发生变化,导致封隔器失效、无法起出及其他更为

严重的故障。因此,针对这些影响因素对封隔器系统进行受力分析至关重要。除传统的理论分析外,近年发展了有限元分析方法。

室内试验是评价封隔器设计好坏的重要依据,这涉及试验方法、试验装置的建立及使用等方面。

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. 拉夫纳兄弟(Ruffners)等人开始应用。1861年,经木质的表层导管下入的早期油管柱就带有这种封隔器。1865年,世界上第一次采用小尺寸($3\frac{1}{2}$ 英寸)的套管,其底端所接的也是这种封隔器。

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

1930年代初,阿塞拜疆油田首先开始采用正反扣螺栓式封隔器。1936年,阿塞拜疆研制了结构比较完善的尾管式封隔器,但其下入深度只有300~650m,有效工作压差不超过2.5MPa。

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,1930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、分层增产措施)的试验,带来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,出现了用于多管完井作业用的双管封隔器。

近几十年来,油气田开发技术不断发展,国内外油田出现了大量深井、超深井和热采井。为了适应油气勘探开发的新需要,开发应用新型耐高温、耐高压封隔器已是大势所趋。目前有研制的永久封隔器适用于高温、深井、大斜度井等环境,可在最大压力高达 137MPa、温度高达 316℃ 的环境中使用;热采封隔器可适应 360℃ 的工作环境^[2]。

为提高密封效果,提供大通径,提出了金属密封封隔器^[3,4]。其中一种密封件采用易熔合金制成,在加热的作用下,易于被熔化,将封隔器本体的外壳与井下套管内壁“焊接”起来,从而达到封隔油套环空的目的。随后出现的另一种金属密封封隔器,其密封件采用超弹性合金制成,当入井管柱在预定位置被锚定时,锥体承受管柱的应力负荷迫使超弹性密封件横向膨胀,实现封隔油套环空的目的。

根据地层不同的油气含量、井筒条件、作业要求,国外公司研制了自膨胀封隔器技术。自膨胀封隔器胶筒在遇油或遇水的条件下自主膨胀来实现封隔地层,也被称为遇油/遇水自膨胀封隔器^[5]。该项技术发展迅速,从最初主要应用于完井作业,发展到可用于封隔水层、辅助固井和防砂等作业中。自问世以来,该项技术在中东、北海油田已经成功应用约 1200 次。在北海油田的一口井中,同时下入了 12 个自膨胀系统,成功的隔离了各个油层。国内的冀东油田、胜利油田、塔里木油田等也开始应用。

随着人工智能技术在石油工业中应用日趋成熟,智能井用封隔器技术也随之发展。智能井用封隔器^[6]是一种贯通式封隔器,也称直通隔离封隔器,封隔器上可以穿过用于控制和传输的直通系统和供电电缆,使水力控制管线和地下控制阀连通。这种封隔器能够减少泵送期间可能伤害光缆的接点数量并提高光学性能。

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。随着油气田的不断开发,封隔器在井下工作的环境越来越恶劣,如高温、高压、酸性腐蚀等复杂的条件。为了适应这种需要,封隔器正朝着高性能、多用途、适应性强的方向发展。

第三节 封隔器的应用

一、封隔器基本用途

封隔器使用范围之广,遍及油气田勘探和开发的各个生产过程。封隔器的用途包括以下一些方面:

① 在钻井作业中,作为永久型或可回收型桥塞、作业封隔器或永久型水泥承留器^[7]。

② 在测试作业中,将测试层段与钻井液及其他层段隔开^[8]。

③ 在固井作业中,作为管外封隔器,避免钻井液窜槽和微间隙带来的地层流体上窜。

④ 在射孔作业中,保持高能气体压力^[9]。

⑤ 在增产措施作业中,为注水、注汽、措施改造和堵漏、封窜提供条件。

⑥ 在生产管柱中,为采油采气等提供条件。

⑦ 在砾石充填及防砂作业中,起封隔、循环和分离作用。

封隔器在正常工作条件下可以达到下列目的:

① 保护套管免受高压和腐蚀破坏;

② 封隔施工目的层,防止层间流体和压力互相干扰;

③ 保存并充分利用地层能量;

④ 便于地面控制,以确保安全和最大限度地控制地层。

二、封隔器选用依据

封隔器选用得当，可以确保甚至提高井下工作效果。因此，必须对井下作业的目的进行分析。一般来说，应当结合油气井现在的和将来的情况，在预计可能要进行其他作业的情况下，选择尽可能达到多项使用目的，而总成本又最低的封隔器类型。

通常，选用封隔器时应当考虑以下一些因素：

(1) 施工工艺要求

施工工艺要求是决定选用何种类型封隔器的首要考虑因素。如进行堵水施工，一般应选用不带反洗通道的堵水封隔器；如进行压裂措施，封隔器一般需带锚定机构。如需要拖动管柱作业，则要求封隔器可重复坐封。如高压井措施后需要完井生产，则需要选用永久式封隔器。有时，还必须考虑到多种措施作业或后期修井作业的需要。

(2) 井下工作状况

完井方式、井身结构、固井质量、井深、井径、井下流体性质和种类、井下压力和温度条件对于封隔器的选用都是必须考虑的重要因素。一般来说，裸眼井段的密封必须选用裸眼封隔器，套管有变形的井要考虑封隔器下过变形井段的能力，深井中施工要选用可以承受高温和高压的封隔器。此外，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较大影响，如当井中含有硫化氢和二氧化碳时，必须考虑到封隔器材质的选用，以确保封隔器具备足够的抗硫和防腐能力。

(3) 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。通常，对封隔器性能上的基本要求是下得去、封得严、耐得久、起得出。具体来说，包括坐封或解封动作是否简单有效，耐压、耐温、抗腐蚀性能是否可靠，密封有效期是否足够长，以及适合何种作业。

在结构设计上,可取式封隔器要求具有可取性,必要时采用动管柱和其他非破坏手段即可解封取出;永久式封隔器要求具有可钻性,其零部件系可钻材料加工,在选取此类封隔器时,必须考虑磨铣效率。

(4) 地面设备和井下工具的配套

坐封封隔器时,一般要进行地面操作,例如,提放、旋转管柱或通过油管施加压力。因此,选用封隔器必然涉及井口设备和井下配套工具,以确保安全、可靠地进行作业。

第四节 封隔器的组成

封隔器一般由多种机构组成,每一机构又由若干零部件组成。为便于叙述,下面以一种常用的封隔器(见图1-1)为例,简要介绍各个机构的基本功能及其主要零部件。

一、密封机构

密封机构是在外力或外部环境的作用下,发生动作,最终密封环形空间,防止流体通过的机构。它是封隔器的关键机构,主要由密封元件、各种防止密封元件肩部突出的防突部件等构成,图1-1中件10、件11即属于密封机构。密封元件是至关重要的核心部件,通常制作成圆筒状,所以也常称作胶筒。

密封机构所起的作用称为密封作用。压缩式封隔器在坐封时,胶筒被轴向压缩的长度称为压缩距。胶筒压缩到位后,泄去液压,胶筒轴向回弹的长度称为后坐距。这两个数据与胶筒使用的材料,胶筒的尺寸、硬度,以及锁紧机构的设计均有关系,是封隔器结构设计时要考虑的重要参数。封隔器坐封后所能承受的压差和温

度关键取决于胶筒材质、结构及其肩部保护机构。

二、锚定机构

锚定机构是将封隔器固定在井壁或管柱上，防止封隔器由于轴向移动而影响密封性能，或引起封隔器过早解封的机构。图 1-1 中件 1、2、3、4、5、6、18、21、22 属于锚定机构。

锚定机构所起的作用称为锚定作用。这种锚定作用主要由锚爪(件 4)或卡瓦(件 21)来实现。锚爪和卡瓦分布在圆柱面上，其起锚定作用的面通常被设计成齿形。卡瓦根据齿形方向和所起的作用分为单向卡瓦和双向卡瓦。只带一个单向卡瓦的封隔器称为单向卡瓦封隔器。带有整体式双向卡瓦或上、下均带有单向卡瓦的封隔器称为双向卡瓦封隔器。

为了防止封隔器的轴向移动，在深井和高压作业中，往往采用正、反多级卡瓦，或配套采用其他锚定工具，即使是支撑式封隔器，也往往采用这种方式，以防止压坏尾管。

三、坐封机构

坐封机构是使封隔器进入密封状态的机构。坐卡机构是使封隔器进入锚定状态的机构。对于带卡瓦的封隔器，由于坐封和坐卡动作通常是同步或顺序进行，且实现坐封、坐卡的零部分大多相同，常将坐封机构和坐卡机构合称为坐封坐卡机构，或简称坐封机构。坐封、坐卡动作如果是逐级或分步实现的，一般称这种坐封机构为逐级坐封机构。坐封机构通常包括坐封活塞，中心管(或开有轨迹换向槽的轨迹管)，上、下接头，滑环套等。图 1-1 中件 15、23、24、25、26、27、28、29、30 属于坐封机构。

一般来说，在封隔器的结构不变的情况下，增加坐封活塞部分的级数，可以增大坐封力，或者说，可以减小所需的坐封压力。

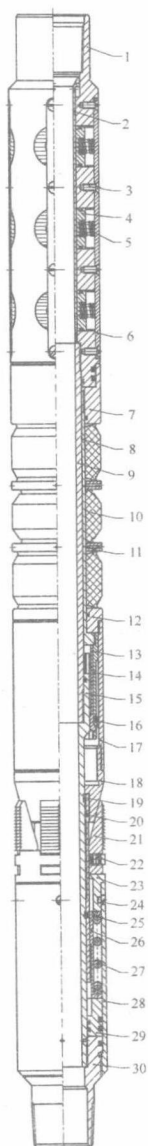


图 1-1 封隔器的基本结构

- 1—锚体；2—中心管；3—固定螺钉；4—锚爪；5—弹簧；6—压板；7—上胶筒座；
 8—外中心管；9—内中心管；10—胶筒；11—隔环；12—下胶筒座；13—弹簧爪；
 14—锁簧座；15—下中心管；16—锁簧；17—锁套；18—锥体；19—卡簧；20—连接套；
 21—卡瓦；22—压簧；23—卡瓦座；24—坐封剪钉；25—锁球；26—弹簧座；27—弹簧；
 28—活塞套；29—坐封活塞；30—下接头