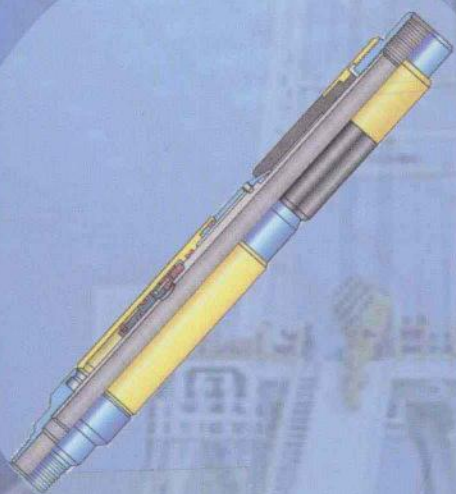


● 刘清友 王国荣 湛精华 著

井下封隔器 工作行为仿真

JINGXIA FENGGEQI GONGZUO XINGWEI FANGZHEN



石油工业出版社

井下封隔器工作行为仿真

刘清友 王国荣 湛精华 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了通过有限元方法采用计算机进行封隔器工作行为仿真的应用,汇集了笔者近几年在这方面的研究成果。内容主要包括了国内外学者在封隔器方面的研究现状,有限元分析的基本原理,封隔器接触有限元模型的建立,封隔器工作行为动态仿真的思路和策略,以及仿真分析软件的编制。着重讲述了采用有限元方法对封隔器进行力学分析研究的要点,建立封隔器接触有限元模型的方法,单元离散和模型求解的特征,以及采用计算机程序在模型的基础上如何实现对封隔器工作行为仿真的步骤与思路。书中还给出了利用自行研制的软件对目前国内常用的Y341封隔器进行工作行为仿真的分析过程,并得到了一些有工程实际意义的仿真分析结果。

本书可供从事石油天然气机械工程、井下工具的科研和设计人员使用,也可供高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

井下封隔器工作行为仿真/刘清友,王国荣,湛精华著.
北京:石油工业出版社,2010.8
ISBN 978-7-5021-7811-6

I.井…

II.①刘…②王…③湛…

III.井底封隔器-动态仿真-研究

IV.TE931

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第094272号

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) 64523535

发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2010年8月第1版 2010年8月第1次印刷

787×960毫米 开本:1/16 印张:9.25

字数:118千字 印数:1-1200册

定价:35.00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

封隔器是石油勘探和开发中经常使用的一种工具，其应用范围包括钻井、试油、生产、测试、注入、增产作业等，其工作可靠性和产品性能是影响作业成败的一个至关重要的因素，向来为各类专家所重视。

由于封隔器本身结构中含有橡胶非线性材料，且在井下的工况复杂多变，在这种情况下采用传统的力学分析手段局限性太大，同时也无法对封隔器在井下的工作过程进行真实再现。有限元方法的发展，弥补了传统力学分析手段的不足，它已成为分析连续体的强有力工具，尤其是随着计算机技术的飞速发展，有限元方法在各个领域得到了越来越广泛的应用，已经成为结构和工况复杂条件下机械设备力学分析的一个重要手段。目前，虽然各种学术期刊上涉及封隔器的相关论文较多，但是致力于深入系统地介绍封隔器力学分析方法、工作行为仿真，尤其是将现代设计理论应用到封隔器设计当中的专著，在国内还未见到。这在一定程度上给国内从事封隔器相关工作的研究学者和工程人员增加了一定的工作难度，使得我国封隔器以及相关井下工具的设计与分析中采用的现代设计理论与方法较少。

近些年来，笔者与江汉石油管理局采油工艺研究院就封隔器的相关领域开展了广泛深入的合作，取得了一些可喜的研究成果。尤其是通过多年的合作研究，将现代设计理念融入到封隔器等井下工具的研究领域当中，从系统的角度出发，综合应用弹塑性力学、接触有限元理论、数值分析方法、计算机仿真技术等多学科知识，在国内率先建立了考虑胶筒非线性、大变形特征的封隔器系统工作行为仿真模型，通过实验建立了封隔器胶筒材料在井底实际工况下的本构关系模型，运用混合编程思想开发了具有自主知识产权的封隔器系统工作行为仿

真软件，并在自行设计的封隔器试验台架上完成了Y341-148型封隔器台架试验，验证了所建立数学模型和所开发仿真软件的正确性，为封隔器及井下工具的设计、改进和新产品开发提供了一种新的理论方法和技术手段。

结合近几年的研究成果，笔者经过总结与提炼，写成本书。它在内容上对有限元方法和计算机仿真技术在封隔器中的应用进行了阐述，内容包括如何建立封隔器各零部件以及整体的接触有限元模型，在研究过程中的考虑要点，材料本构关系的不同处理方法，采用计算机进行仿真求解的策略和思路，以及工作行为的仿真等，对各方面内容都进行了深入的讨论。

本书注重理论和实际的紧密结合，内容丰富、翔实，实用性和可操作性强，不仅能够为从事封隔器研制工作的相关研究人员提供借鉴和指导，其研究思路和方法同时也可以延伸到相关井下工具的研制领域，具有一定的参考价值。

本书中的部分内容来源于笔者与中国石化江汉油田分公司采油工艺研究院合作项目中的研究内容。在项目的进行当中，中国石化江汉油田分公司采油工艺研究院的各位领导和专家都给予了极大的帮助和支持，提出了不少宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

本书虽然几易其稿，但限于笔者学识有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

笔者

2010年3月

目 录

第1章 概述	1
§ 1.1 采油工艺及增产措施简介	1
§ 1.2 封隔器在措施管柱中的封隔作用概述	4
第2章 封隔器工作原理及国内外发展现状	13
§ 2.1 封隔器概述	13
§ 2.2 封隔器基本结构、分类及其工作原理	14
§ 2.3 国内外封隔器研究与发展现状	19
§ 2.4 封隔器有关专利技术	27
第3章 有限元分析基本原理	30
§ 3.1 有限元法概述	30
§ 3.2 接触区问题的求解方法	35
第4章 胶筒橡胶材料的本构关系	40
§ 4.1 试验目的及内容	41
§ 4.2 试验方法及步骤	41
§ 4.3 数据记录及处理	44
§ 4.4 实验结果分析	47
第5章 封隔器接触有限元模型建立	50
§ 5.1 封隔器研究要点及模型简化	50
§ 5.2 封隔器系统工作行为仿真模型的建立	54
§ 5.3 模型求解特征及单元离散	61
§ 5.4 封隔器有限元模型计算所需参数确定	66
第6章 井下封隔器工作行为仿真软件研制	69
§ 6.1 井下封隔器工作行为仿真软件简介	69

§ 6.2	仿真软件总体设计及模块功能	69
§ 6.3	有限元计算软件的编制	75
§ 6.4	软件使用简介	78
第7章	Y341-148型井下封隔器工作行为的仿真分析	87
§ 7.1	Y341-148型封隔器简介	87
§ 7.2	坐封过程启动载荷	88
§ 7.3	坐封、稳压、解封全过程仿真分析（光滑接触）	89
§ 7.4	坐封、稳压、解封全过程仿真分析（摩擦接触）	91
§ 7.5	不同工作油压对坐封、稳压、解封过程的影响	101
§ 7.6	不同工作油压下胶筒的坐封压应力	102
§ 7.7	仿真结果分析	103
第8章	Y341-148型封隔器工作性能台架试验	119
§ 8.1	试验台架的设计与建造	119
§ 8.2	试验目的及内容	123
§ 8.3	试验的方法和步骤	124
§ 8.4	台架试验结果分析	125
§ 8.5	小结	128
参考文献		129
附录	封隔器胶筒材料力学性能试验数据	132

第1章 概 述

随着世界范围内对石油、天然气需求的加剧，对石油和天然气生产的重视及石油工程技术的发展，已经形成了针对各种类型油气田的生产开发体系和完整的工艺技术。而随着越来越多的油气田投入大规模的开发，其难度也越来越大，从而又推动了石油工程技术的迅速发展，使之成为一门高度综合的工程技术。

众所周知，石油和天然气大都是深埋于地下几百米、几千米甚至更深的液体、气体矿物资源，具有较强的隐蔽性，它不像普通固体矿物那样可以由人工直接采掘。所以要成功地开发油气资源，首先要制定合理的开发方案，然后采用科学的钻井方法和先进的钻进工艺技术，建立起一条开采油气的永久性通道，满足油田长期生产的要求。

当油气流的通道建成以后，再采用科学先进的采油工艺技术和方法，以最小的代价、合理的速度将油气开采到地面，并要随时了解和掌握地下油气水运动的状态和规模，随时对油气田的开采动态进行监测和分析，调整、完善开采技术和措施，保持长期稳产、高产，从而实现开发方案中的各项指标和较高的经济效益。

§ 1.1 采油工艺及增产措施简介

采油工艺技术和油田开发的重要技术条件，没有先进适用的采油工艺技术，油田开发将不可能实现高水平、高效益。现对采油工艺及增产措施作如下简单介绍：

(1) 自喷采油。当油藏压力高于井内流体柱的压力时，油藏中的石油通过油管 and 采油树能自行举升至井外的采油方法。石油中大量的

伴生天然气能降低井内流体的密度，降低流体柱压力，使油井更易自喷。油层压力和气油比是油井自喷能力的两个主要指标。

油、气同时在井内沿油管向上流动，其能量主要消耗于重力和摩擦力。在一定的油层压力和气油比的条件下，每口井中的油管尺寸和深度不变时，有一个充分利用能量的最优流速范围，即最优日产量范围。必须选用合理的油管尺寸，调节井口节流器（常称油嘴）的大小，使自喷井的产量与油层的供油能力相匹配，以保证自喷井在最优产量范围内生产。

(2) 机械采油。机械采油包括气举采油和抽油泵采油。

气举采油是利用空气压缩机把空气或天然气压入油井内，将原油从井底举升到地面来的采油方法。实际中多用天然气作为气源。其工作原理为：当空气或天然气通过压缩机压缩，提高压力后压入油管，迫使油管中的液面下降，油管中的油液便通过油管底部进入油管、套管环形空间。当油管中的液面降低至油管鞋处时，被压入的气体便进入油管、套管环形空间，使环形空间的油液发生气化，密度变小，液面高度增加。不断从油管压入气体，油管、套管环形空间的油液就不断地被汽化，其环形空间的液面高度也就不断地增加至井口，直到气液混合物从套管出口喷出地面。

按是否使用抽油杆来传递动力，一般又将抽油泵采油分为无杆泵采油和有杆泵采油两类。有杆泵地面动力设备带动抽油机，并通过抽油杆带动深井泵。无杆泵是不借助抽油杆来传递动力的抽油设备。目前无杆泵的种类很多，如水力活塞泵、电动潜油离心泵、射流泵、振动泵、螺杆泵等。目前应用最广泛的还是游梁式抽油机深井泵装置，此装置结构合理、经久耐用、管理方便、适用范围广。

(3) 注水。利用注水井把水注入油层，以补充和保持油层压力的措施称为注水。油田投入开发后，随着开采时间的增长，油层本身能量将不断地被消耗，致使油层压力不断地下降，地下原油大量脱气，

黏度增加，油井产量大大减少，甚至会停喷停产，造成地下残留大量死油采不出来。为了弥补原油采出后所造成的地下亏空，保持或提高油层压力，实现油田高产稳产，并获得较高的采收率，必须对油田进行注水。注水方式即注采系统，是指注水井在油藏所处的部位和注水井与生产井之间的排列关系，可根据油田特点选择以下注水方式：①边缘注水，分为缘外注水、缘上注水和边内注水3种；②切割注水；③面积注水，可分五点法注水、七点法注水、歪七点法注水、四点法注水及九点法注水等。

(4) 压裂。压裂是人为地使地层产生裂缝，改善油在地下的流动环境，使油井产量增加。压裂的方法分水力压裂和高能气体压裂两大类。

水力压裂是靠地面高压泵车车组将流体高速注入井中，借助井底憋起的高压，使油层岩石破裂产生裂缝。为防止泵车停止工作后，压力下降，裂缝又自行合拢，在地层破裂后的注入液体中，混入比地层砂大数倍的沙子，同流体一并进入裂缝，并永久停留在裂缝中，支撑裂缝处于开启状态，使油流环境长期得以改善。

高能气体压裂是用火药弹与液体火药合用，预先置于井筒内的油层位置，点燃火药，靠燃烧产生的高温高压气体，以数倍于水力压裂的速度施加于地层上。由于施压速度极快，地层产生的裂缝，既不是单一的也无固定的方向，一般成辐射状的多条裂缝。长度没有水力压裂造出的缝那么长，一般只有10多米，裂缝也无需沙子支撑，只是依靠裂缝的条数多，从而改善油流环境。另外，燃烧产生的高温达1000℃以上，可提高油层温度，使地下油变稀，油更容易产出。由于该工艺产生的裂缝较短，一般用于解除油层近井地带的堵塞。

(5) 酸化。酸化是利用地面高压泵把酸液通过井筒挤入油气层，酸液与油气层的孔隙发生化学溶蚀作用，扩大油气的通道，提高油气层的渗透率；或者依靠酸液溶解井壁附近的堵塞物，如泥浆、泥饼及

其他沉淀物质，以提高油气井的产量。

根据酸液在地层中的作用，酸化一般可分为两类：一类是注酸压力低于油气层破裂压力的常规酸化（也叫一般酸化），这时，酸液主要发挥化学溶蚀作用，扩大与其接触岩石的孔隙、裂缝、溶洞；另一类是注酸压力高于油气层破裂压力的酸化压裂（简称酸压），这时酸液将同时发挥化学作用和水力作用，以扩大孔洞和压开新的裂缝，形成通畅的油气渗流通道。

一般来说，对于砂岩油气藏，通常采用常规酸化；而对裂缝性灰岩油气藏，采用酸化压裂。

同时，油井出砂、结蜡和出水是油田生产过程中经常遇到的问题，它直接影响到油井是否能正常生产。这不仅给采油工艺带来许多复杂问题，而且将影响油层采油速度及采收率的提高。因此，要确保油田高产稳产和较高的最终采收率，也要采取各种技术措施来解决所遇到的这些问题。

§ 1.2 封隔器在措施管柱中的封隔作用概述

措施管柱中包括封隔器、配水器、筛管、导向丝堵、卡瓦、阀类、水力锚等各种设备。在不同情况下组成了形式多样的管柱，完成相应的功能。比如，采油管柱、注水管柱、压裂管柱、酸化管柱、化堵管柱、防砂管柱、机泵管柱等。但是它们大多数都离不开一个重要设备——封隔器。

所谓封隔器，系指具有弹性密封元件，并借此封隔环形空间，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”；另一种是油管或油管

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”。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。

封隔器使用范围广泛，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、方便。封隔器一旦在井下有效工作，就可以达到以下目的：（1）隔绝井液和压力，保护套管，从而改善套管工作条件；（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）满足机械采油工艺（如为气举和水力活塞泵抽油提供必要的生产通道，或将套管分割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；（7）注水；（8）压裂酸化；（9）洗井；（10）卡堵水。

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。

下面以酸化压裂施工为例简单说明封隔器在油田增产措施施工中如何实现封隔作用。

油层酸化压裂是开发低渗透油藏较为有效的措施。根据压裂井井况选择压裂封隔器和配套压裂管柱是压裂施工中的关键工作，因为压裂封隔器能够在井下要求的位置顺利坐封并达到油层压裂所要求的密封性能，是整个压裂施工能够顺利进行的前提条件。压裂井井况多种多样，需要多种压裂管柱与之适应。

1.2.1 无卡瓦锚定液压坐封的压裂管柱

如图1.1 (a) 所示, 无卡瓦锚定液压坐封的压裂管柱由节流阀、K344型封隔器和水力锚组成或者由集节流阀、K344型封隔器、水力锚三者功能于一体的Y531型封隔器组成。

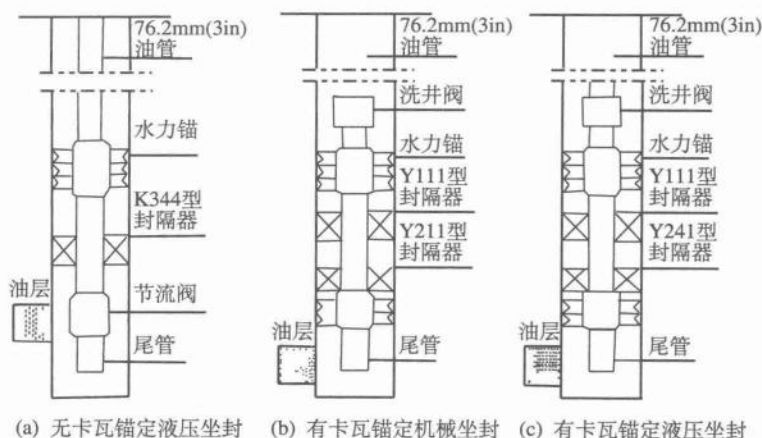


图1.1 三种锚定压裂管柱示意图

该管柱中的K344型封隔器无卡瓦, 只有活塞和胶筒。节流阀在一定压力下才能开启。应用时, 给油管内加压, 节流阀的作用使油管内可达到一定压力, 该压力推动K344型封隔器活塞挤压胶筒, 密封油管、套管环形空间, 同时, 液压力推动水力锚锚爪卡紧套管内壁, 实现管柱锚定。继续加压到节流阀开启, 管柱内液体可进入地层, 实现油层压裂。将管柱压力泄掉后, 水力锚锚爪和封隔器胶筒自动缩回, 实现解封。

该管柱的特点是:

- (1) 节流阀的存在会损耗部分工作压力;
- (2) 管柱内加1次压, 封隔器胶筒胀缩1次, 封隔器易在使用过程中失效;
- (3) 封隔器无法进行确定的验封;
- (4) 在其他压裂管柱中, 一旦发现水力锚被卡住, 可从套管反加

压使水力锚锚爪缩回，而该压裂管柱不具有该项功能。

1.2.2 有卡瓦锚定机械坐封的压裂管柱

如图1.1 (b) 所示，有卡瓦锚定机械坐封的压裂管柱工具由Y211型和Y111型封隔器、水力锚及洗井阀组成。

使用时，将Y211型封隔器、Y111型封隔器、水力锚和洗井阀依次连接，按设计要求下到井下某一深度。上提管柱，使Y211型封隔器摩擦块上的换向销钉转换到长轨道，然后下放管柱，封隔器的摩擦块将卡瓦牙推出撑到套管内壁上，实现Y211型封隔器卡瓦锚定。继续下放管柱，管柱的重力会逐渐加到Y211型封隔器卡瓦上，位于卡瓦上部的Y211型封隔器胶筒和Y111型封隔器胶筒都会受到管柱重力的挤压，胶筒挤压后在径向膨胀，从而贴紧套管内壁，实现密封。胶筒受压的程度可以由坐封时上提管柱的高度来控制。在压裂施工时，油管、套管环形空间的压差使水力锚卡住套管内壁，防止压裂施工时管柱蠕动而影响封隔器密封。压裂完成后可给套管加压打开洗井阀进行反洗井。

该管柱的特点是：

(1) 封隔器坐封操作简单，封隔器下到位置后，不需要给油管加压，只需上提和下放管柱就能实现封隔器坐封。

(2) 封隔器坐封力的大小可以人为控制，现场操作人员可以通过控制上提管柱高度来控制加在封隔器胶筒上的力，以保证足够的坐封力加在封隔器胶筒上。

(3) 封隔器坐封后，可以进行正加压验封和反加压验封，在压裂施工进一步实施前可以确定封隔器的密封性能。

(4) 双级封隔器的密封性能可靠，成功率高。

(5) 封隔器解封操作简单，解封力小，只需上提管柱至上提力达到其自重时，便能实现封隔器解封。

(6) 套管加压有利于水力锚锚爪缩回，减小水力锚卡住的概率。

该压裂管柱适用于直井和小斜度井。现场试验表明，井斜超过

30° 时, Y211型封隔器坐封困难。另外, 在大斜度井中, 管柱重力会分散加到斜井段的套管壁, 不利于封隔器坐封。

1.2.3 有卡瓦锚定液压坐封的压裂管柱

如图1.1 (c) 所示, 液压坐封压裂管柱工具由加压球座、Y241型封隔器、Y111型封隔器、水力锚和洗井阀组成。

使用时, 将压裂工具依次连接, 按设计要求下到井下某一深度。油管正加压, Y241型封隔器在液压力作用下实现卡瓦锚定和胶筒密封。油管压力卸掉后下放管柱, Y241型封隔器卡瓦形成支撑, 管柱重力会逐渐加到Y111型封隔器上, 挤压胶筒, 实现坐封。水力锚可实现管柱锚定, 防止压裂施工管柱窜动而影响封隔器密封。压裂施工完成后, 给套管加压可打开洗井阀进行反洗井。

该管柱的特点是:

(1) 坐封封隔器时需要油管正加压, Y241型封隔器依靠液压力坐封, Y111型封隔器依靠管柱重力压缩胶筒坐封。

(2) 封隔器坐封后, 可进行正加压验封和反加压验封, 在压裂施工进一步实施前可以确定封隔器的密封性能。

(3) 使用双级封隔器密封, 密封性能可靠, 成功率高。

(4) 封隔器解封时需要上提管柱, 上提力将Y241型封隔器解封剪钉剪断使封隔器解封。

(5) 可给套管加压帮助水力锚锚爪缩回, 减小水力锚卡住的概率。

该管柱的特点是:

(1) 该管柱不仅工作压力高, 可以大排量正反替液, 也可以对任意需要压裂改造的油层进行压裂施工;

(2) 该管柱还可以用于任意层酸化作业施工;

(3) 该管柱设计有反洗井通道, 可以很方便地进行反洗井冲砂或排酸。

1.2.4 任意层酸化压裂管柱

目前有很多油田的大部分油井均进行过酸化压裂改造，甚至进行过多次改造，因此其中的部分油层已得到过酸化压裂改造，为了让未得到改造的油层发挥作用，就需要有针对性地进行酸化压裂，即处理其中某一油层，而其他层位不受影响。为了解决这个问题，研制了一种任意层酸化压裂工艺管柱。

任意层酸化压裂管柱由水力锚、Y341系列酸化压裂封隔器、定压喷砂器、平衡阀、坐封球座等组成（图1.2）。

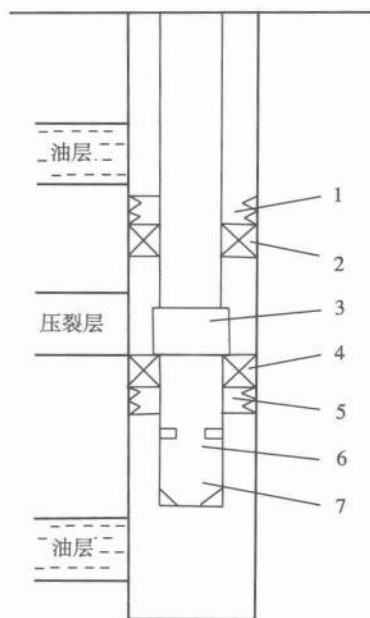


图1.2 任意层酸化压裂管柱

1, 5—水力锚；2, 4—Y341封隔器；3—定压喷砂器；
6—平衡阀；7—坐封球座

按设计要求配好管柱；连接管线，循环泵、替液（该管柱正反顶替均可）；先投球（ $\leq 38\text{mm}$ ）至坐封球座处，油管内憋压15MPa坐封封隔器，继续憋压至20MPa左右打开定压喷砂器；然后按照酸化压裂设计要求进行选定层位的酸化压裂施工。施工完成以后，可由套管泵

入洗井液进行反洗井快速排酸或冲砂，然后投入专用撞击杆打开下部平衡阀，使管柱的内外均连通平衡，便于上提管柱解封封隔器，起出施工管柱。

该管柱不仅工作压力高，可以大排量正反替液，也可以对任意需要压裂改造的油层进行压裂施工，该管柱还可以用于任意层酸化作业施工，而且该管柱设计有反洗井通道，可以很方便地进行反洗井冲砂或排酸。

1.2.5 不动管柱分层酸化压裂工艺管柱

有很多油田的油层厚度薄而多，常规的酸化压裂只能处理其中的一个油层，因此酸化压裂后通常只有一个油层开采，在需要酸化压裂多个油层时就需要进行多次施工，施工复杂，周期长，难度大。为了解决这个问题，江汉油田分公司采油工艺研究院研制出了一套不动管柱压裂3层的压裂工艺管柱。

不动管柱压裂3层的压裂工艺管柱由水力锚、Y341压裂封隔器、滑套喷砂器、坐封球座及割缝喷砂器等组成（图1.3）。

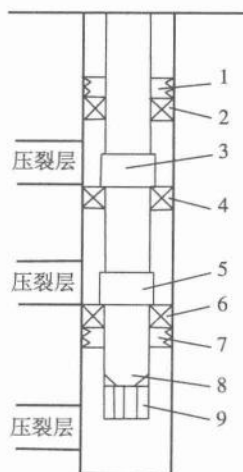


图1.3 不动管柱分层酸化压裂工艺管柱

1, 7—水力锚；2, 4, 6—Y341封隔器；
3, 5—滑套喷砂器；8—坐封球座；9—割缝喷砂器