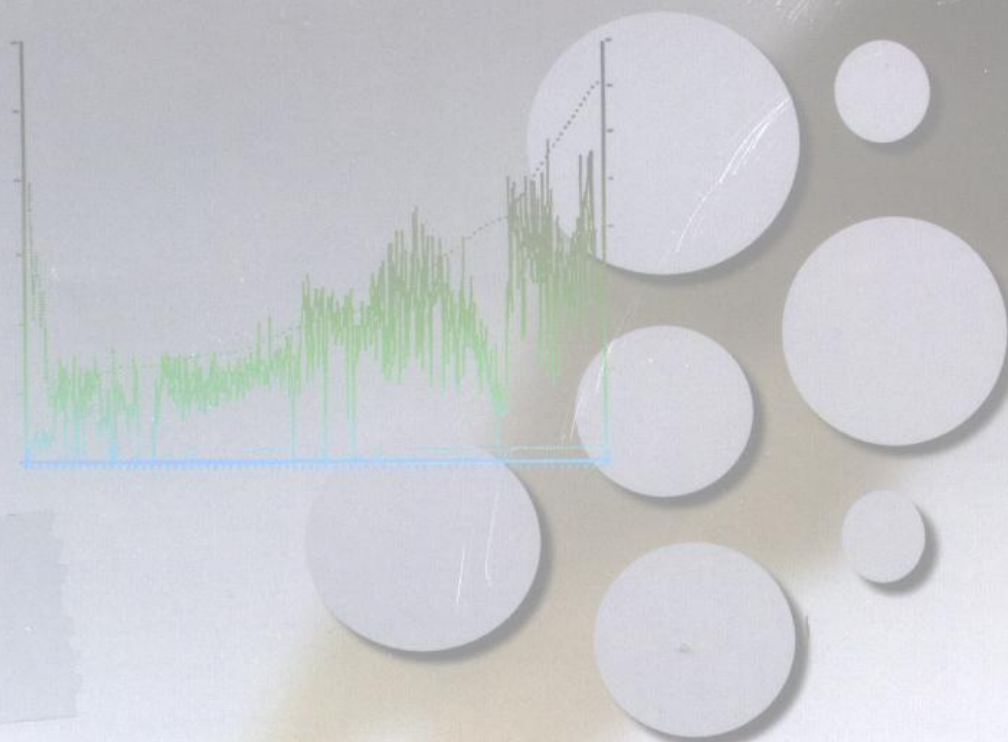


PIP

稠油出砂冷采技术

● 程绍志 胡常忠 刘新福 编著



石油工业出版社

周由出沙冷采技术

石油工业

(北京)

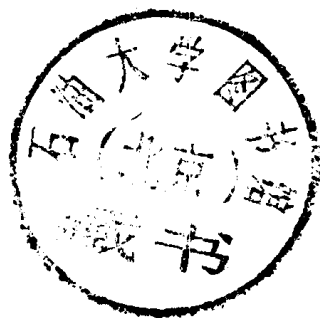
55.9

06

登录号	137096
分类号	TE355.9
种次号	006

稠油出砂冷采技术

程绍志 胡常忠 刘新福 编著



石油大学0136873

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书全面系统地阐述了稠油出砂冷采技术的开采机理、适用范围、开发程序和开采特征以及钻井、完井、采油、集输、废物处理和矿场监测技术；对水平井出砂冷采和出砂冷采后提高采收率方式进行了深入探讨；并结合河南油田稠油出砂冷采可行性试验和矿场试验成果，阐述了中国稠油油藏应用该技术的可行性及实施对策。

本书可供从事稠油开采的科研人员、工程技术人员和矿场管理人员及石油院校有关专业师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

稠油出砂冷采技术/程绍志等编著.

北京:石油工业出版社,1998.8

ISBN 7-5021-2362-8

I.稠…

II.程…

III.稠油开采-技术

IV.TE355.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 21426 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 $9\frac{1}{2}$ 印张 234 千字印 1—1000

1998 年 8 月北京第 1 版 1998 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2362-8/TE·1968

定价: 16.00 元

前 言

我国有丰富的稠油资源，稠油年生产能力达 1300 万吨以上，稠油产量占全国原油总产量的 10%，是世界上四大稠油生产国之一。

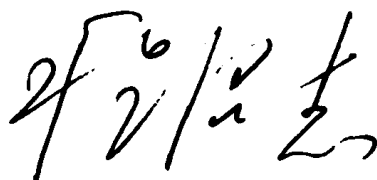
目前，我国稠油油藏主要采取注蒸汽开采方式，普遍面临着油层出砂、汽窜和采油成本高的严峻挑战。即使如此，仍有相当数量的稠油资源由于油层厚度薄，纯总厚度比低或原油粘度太高，达不到注蒸汽开采筛选标准，而无法投入开发，致使已探明的稠油储量难以有效、充分地利用，有限的后备资源难以实现有效的开发接替，严重地制约着我国稠油开发的持续、稳定发展。

稠油出砂冷采技术的兴起，从很大程度上缓解了上述矛盾。该技术在加拿大的应用已有十多年的历史，特别是近几年获得了长足的进展。稠油出砂冷采技术属于一次采油范畴，它不需要向油层中注入蒸汽，而是通过诱导油层出砂和泡沫油的形成，大幅度地提高油层孔隙度和渗透率，极大地增加稠油流动能力来开采稠油油藏。由于该技术对油层厚度和纯总厚度比、原油粘度以及油层压力没有明显的限制，只要油层胶结疏松容易出砂，地层原油中含有一定的溶解气量，就可以进行出砂冷采，因此，对不同类型稠油油藏具有较广泛的适应性，是开采稠油（特别是低品位稠油）的有效方法。国外矿场经验表明，稠油出砂冷采日产油量可达 $10\sim 40\text{m}^3/\text{d}$ ，是常规开采（稠油）方法的数十倍，也大大高于注蒸汽开采产量，且每桶原油开采成本一般低于 4.5 美元，采收率可达 $8\%\sim 15\%$ 。河南油田也开展了稠油出砂冷采矿场试验，并取得了良好的开采效果。可以预计，稠油出砂冷采技术将在我国具有广阔的应用前景。

在第七届重油及沥青砂国际会议即将在中国召开之际，我们编撰《稠油出砂冷采技术》，作为献给大会的一份礼物，以期对我国稠油开发及石油工业的发展有所裨益。

本书由程绍志、胡常忠、刘新福执笔撰著，编委会成员有（以姓氏笔画为序）：王全、王珏、王远明、白理明、冯为民、刘新福、江勇、杨凤波、宋振宇、张爱卿、范从武、胡常忠、黄盛崇、程绍志、程绪船、樊中海、罗洪。在本书编撰过程中，参加文献调研的有宋鹏瑞、李彦平、马超、高孝田、邬侠、吴官生、贺静等同志，国内外有关研究机构和专家为我们提供了大量有益的技术资料和研究成果，在此谨致谢意。

本书是中国石油天然气总公司“九五”科技工程重点项目的科研成果。由于稠油出砂冷采技术起步较晚，许多理论研究尚处于探索、完善中，加之编著者水平有限，时间仓促，书中不妥之处，敬请读者指正。



1997 年 9 月于河南南阳

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 稠油出砂冷采技术的由来及应用现状.....	(1)
第二节 稠油出砂冷采技术发展趋势.....	(2)
第二章 开采机理	(3)
第一节 理论研究现状.....	(3)
第二节 出砂冷采机理.....	(3)
第三节 预测模型	(20)
第三章 适用范围及开发程序	(40)
第一节 应用油藏范围	(40)
第二节 适用的油藏范围分析	(41)
第三节 适用开发阶段	(43)
第四节 开发程序	(44)
第四章 基本开采特征	(45)
第一节 引言	(45)
第二节 产砂特征	(46)
第三节 产油量与采收率	(48)
第四节 原油流动特征	(51)
第五节 蚯蚓洞延伸状况	(52)
第六节 外来水的影响	(53)
第七节 油层压力的影响	(55)
第八节 构造部位的影响	(55)
第九节 油层出砂对地表的影响	(56)
第五章 钻井完井技术	(57)
第一节 钻井技术	(57)
第二节 完井技术	(57)
第六章 采油工艺技术	(60)
第一节 地面驱动设备	(60)
第二节 抽油泵及下入深度	(62)
第三节 井下管(杆)柱	(69)
第四节 井筒降粘技术	(72)
第七章 地面集输及废物处理	(77)
第一节 地面集输及井口管网优化设计	(77)
第二节 产出液脱砂与储罐清砂	(78)
第三节 脱出砂等废物的处理	(79)
第八章 矿场监测	(86)

第一节	油层亏空程度及部位的监测	(86)
第二节	蚯蚓洞延伸方向和长度的监测	(87)
第三节	地面高程变化的监测	(88)
第九章	水平井出砂冷采	(90)
第一节	概述	(90)
第二节	高含气稠油油藏水平井冷采	(92)
第三节	薄层稠油油藏水平井出砂冷采	(95)
第四节	高密度天然沥青水平井冷采	(98)
第十章	出砂冷采后提高采收率	(99)
第一节	提高采收率观点综述	(99)
第二节	提高石油采收率矿场应用实例及分析	(100)
附录一	Celtic 油田薄层稠油出砂冷采	(104)
附录二	Burnt Lake 项目 (特) 稠油出砂冷采	(114)
附录三	Elk Point 天然沥青 (超稠油) 出砂冷采	(124)
附录四	中国稠油油藏出砂冷采前景	
	——河南油田稠油出砂冷采可行性研究及矿场试验	(133)
参考文献		(143)

第一章 绪 论

第一节 稠油出砂冷采技术的由来及应用现状

80年代中期，随着国际油价的下跌和轻重油差价的扩大，稠油注蒸汽开采等方法面临着经济上的严重挑战。为了降低采油成本，提高稠油开采经济效益，80年代末90年代初，加拿大的一些小石油公司率先开展了稠油出砂冷采。其主要作法是，不注蒸汽，也不采取防砂措施，射孔后直接应用螺杆泵进行开采，矿场实施取得了令人意想不到的、令人振奋的效果。从而引起了有关研究人员对其机理进行探讨。“出砂冷采”这一概念正是在这种情况下建立起来的。

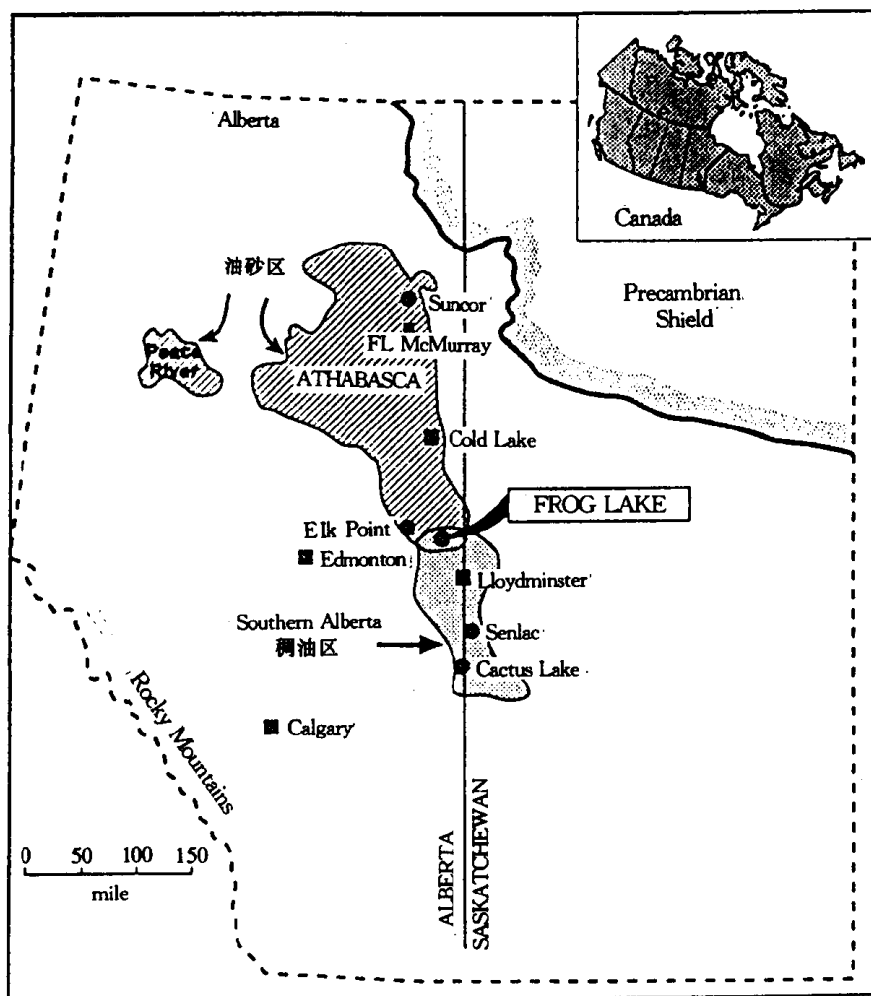


图 1.1 加拿大西部沥青和稠油分布图

其实，早在六七十年代，Husky 石油公司就在疏松砂岩稠油油藏中采用了“不防砂的常

规开采”方式，而这种开采方式就是现在所说的“出砂冷采”，但是，由于规模太小而未引起人们的注意。到了 90 年代中期，稠油出砂冷采已成为热点，除众多小石油公司外，一些大石油公司也纷纷涉足这一领域，国际上尤其是加拿大有关研究机构竞相开展相应的理论研究。1995 年以来召开的有关石油开发的大型国际会议均将此作为重要交流内容。

经过这十多年特别是近几年的发展，这项技术尤其是开采工艺已相当成熟。稠油出砂冷采已显示出良好的经济效益，单井日产油基本上大于 10m^3 ，采收率为 10% 左右，原油操作费用约 4~6 加元/bbl^① (3.0~4.6 美元/bbl)，采油成本大大低于蒸汽吞吐等原有开采方式。目前，该技术已由摸索、试验阶段转入工业化推广应用阶段，加拿大除众多的小石油公司外，Husky, Suncor, Mobil, Texaco 等大石油公司均已大规模采用了这项技术。据统计，1996 年，加拿大共有稠油出砂冷采井 6000 多口，主要分布在阿尔伯达省东部的 Cold Lake, Elk Point, Lindbergh, Lloydminster, Frog Lake 和 Cactus Lake 等油田 (图 1.1)；加拿大已有 20 多家石油公司采用这项开采技术，总产油量约占全国产量的 1/4。另外，委内瑞拉 Copven 石油公司也开展了稠油冷采试验。中加公司也成功地在阿尔伯达地区进行了稠油出砂冷采。

第二节 稠油出砂冷采技术发展趋势

目前，稠油出砂冷采技术已得到了广泛应用，而且，薄层稠油出砂冷采、水平井出砂冷采均取得了矿场试验的成功，并呈现出良好的发展势头。由于有关理论研究起步相对较晚，而大规模矿场应用又需要成熟理论作指导，目前，加拿大和美国的有关研究机构正在和大石油公司联手对该项技术进行更为深入的研究。由于出砂冷采采收率相对较低，所以如何进一步提高采收率，搞好后续开采方式的接替，也是有关研究机构正致力攻关的对象。

① 1bbl=0.159m³。

第二章 开采机理

第一节 理论研究现状

尽管稠油出砂冷采技术已经以其高产油量和低采油成本受到工业界的广泛认可，矿场配套工艺也已相当成熟，但是，有关理论研究仍处于不断探索和完善之中。

近年来，加拿大阿尔伯达研究中心（ARC）、计算机模拟集团（CMG）和 Waterloo 大学孔隙介质研究所等研究机构对该技术的有关理论，尤其是开采机理进行了大量研究，并进行了相应的室内实验。研究结果表明，出砂冷采之所以能保持长期高产的主要机理，一是大量出砂形成蚯蚓洞网络，二是稳定的泡沫油流动，三是上覆地层的挤压驱动，这些机理已被室内实验和矿场监测资料所验证。此外，远距离边底水的存在，也为出砂冷采提供了部分驱动能量。

CMG 的 STARS 数模软件（97 版）中已加入了稠油出砂冷采油藏数模内容。但是该软件只是在常规开采软件的基础上，将模拟对象划分成若干区带，同一区带内是均质的（参数一致），这显然不能很好地表征这种开采方式。其它研究机构所开发出的油藏数模软件也基本上存在这种弊端。

目前，表征单个蚯蚓洞以至整个蚯蚓洞网络流动特征的数学模型已经开发出来了，然而，油藏中蚯蚓洞网络的分布是十分复杂的，所以，如何充分而准确地体现这一特点，以达到对整个油藏进行完善的动态预测的目的，仍是一个十分棘手的问题。但是，上述研究机构正在朝这个方向努力，预计不久将有更为成熟的预测理论问世。

第二节 出砂冷采机理

稠油出砂冷采增产的机理，目前认为主要有四个方面。其中大量出砂形成蚯蚓洞网络和稳定泡沫油流动已形成基础；关于上覆地层的挤压驱动作用，所作研究较少；至于边底水作用，尚存争议。下面结合室内实验和矿场实施成果，对这些机理及其相应的研究成果进行详细介绍。

一、大量出砂形成蚯蚓洞网络

稠油油藏埋藏浅，油层胶结疏松，而原油粘度高，携砂能力强，使砂粒随原油一道产出。随着大量砂粒的产出，油层中产生“蚯蚓洞”网络（蚯蚓洞的形成主要靠砂粒间结合力强弱的差异来实现，而蚯蚓洞的维持与稳定，则靠砂粒间的结合力强弱、溶解气、岩石骨架膨胀来实现），使油层孔隙度和渗透率大幅度提高，孔隙度可以从 30% 提高到 50% 以上；渗透率从 $2\mu\text{m}^2$ 左右提高到数十至数百平方微米，极大地提高稠油的流动能力。室内实验和矿场观察结果均证实了这一点。

1. 表征蚯蚓洞形成的物模实验

ARC 的 B. Tremblay 等人应用 Suncor 石油公司所属的 Burnt Lake 油田 Clearwater 油层产出砂及其原油进行了室内冲刷实验，以模拟出砂冷采过程，并通过 CT 扫描了解蚯蚓洞延伸

状况及蚯蚓洞本身的特性。

实验装置如图 2.1 所示，压力容器总长 1220mm，内径 102mm。所用砂样取自生产油罐，粒径分布如图 2.2 所示。填砂模型长 365mm，平均孔隙度 36.4%。实验温度与地层温度相同，为 18.5℃，在此温度下原油粘度为 27000mPa·s。实验结果表明：

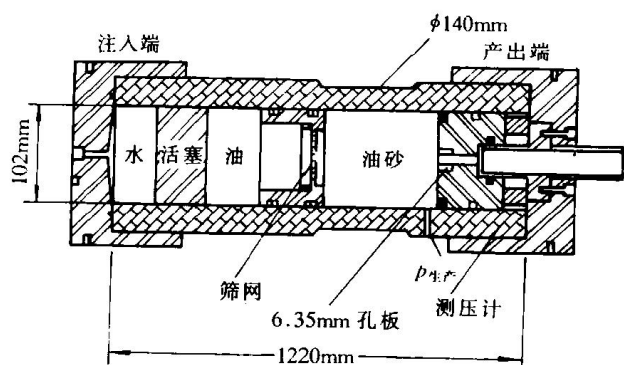


图 2.1 室内试验装置

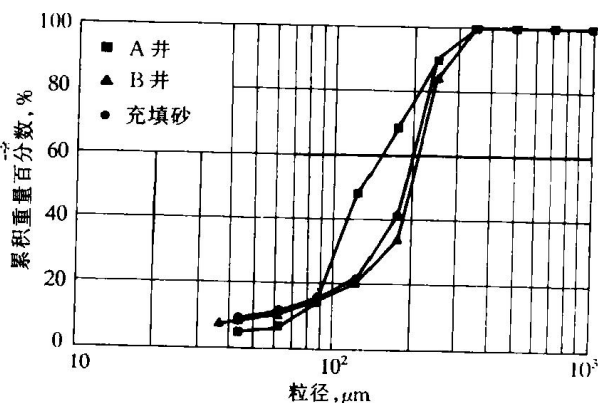


图 2.2 Clearwater 砂岩粒径分布

1) 实验过程中确实形成了蚯蚓洞，且蚯蚓洞在高孔隙度区域内形成并延伸 (图 2.3)。E.Fjjaer 等人研究认为，孔眼 (如蚯蚓洞) 末端稳产的临界条件是：

$$q_c = 4\pi C_o K r / \mu_o \quad (2.1)$$

式中 C_o ——地层胶结强度；
 K ——渗透率；
 r ——孔眼半径；
 μ_o ——原油粘度；
 q_c ——临界流速。

当孔眼末端实际流速大于 q_c 时，则孔眼末端砂粒崩落。使蚯蚓洞得以形成并延伸。由于孔隙度较高的区域也就是压实和胶结强度较弱的区域，所以这些区域的临界流速较低，更容易形成蚯蚓洞。

2) 蚯蚓洞直径为 25~55mm。蚯蚓洞形成后，其中仍充填着砂子，孔隙度约 53% (图 2.4)；经

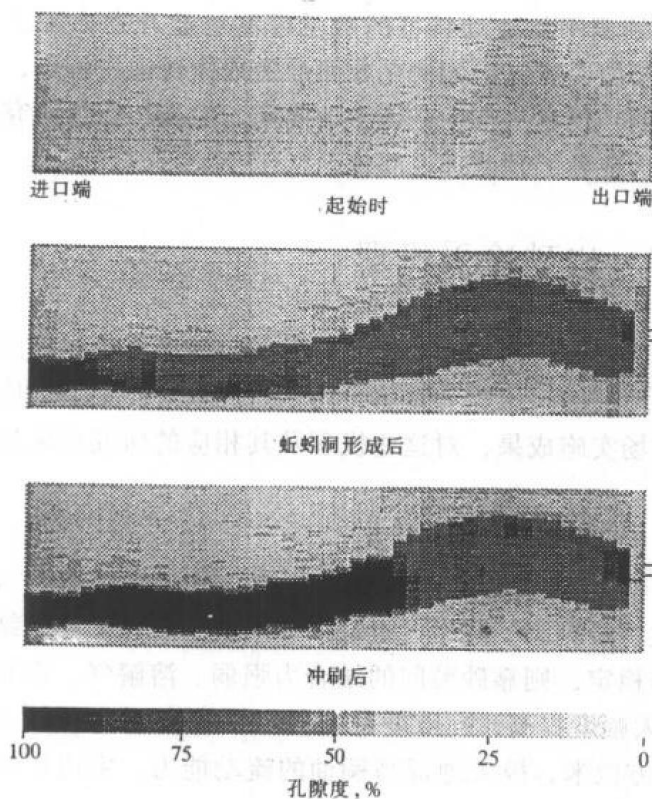


图 2.3 蚯蚓洞轴向 CT 扫描图 (纵切面)

冲刷 (相当于蚯蚓洞稳定阶段) 后，蚯蚓洞内砂子从上到下逐渐被采出，孔隙度接近 100%

(图 2.5, 图 2.6)。

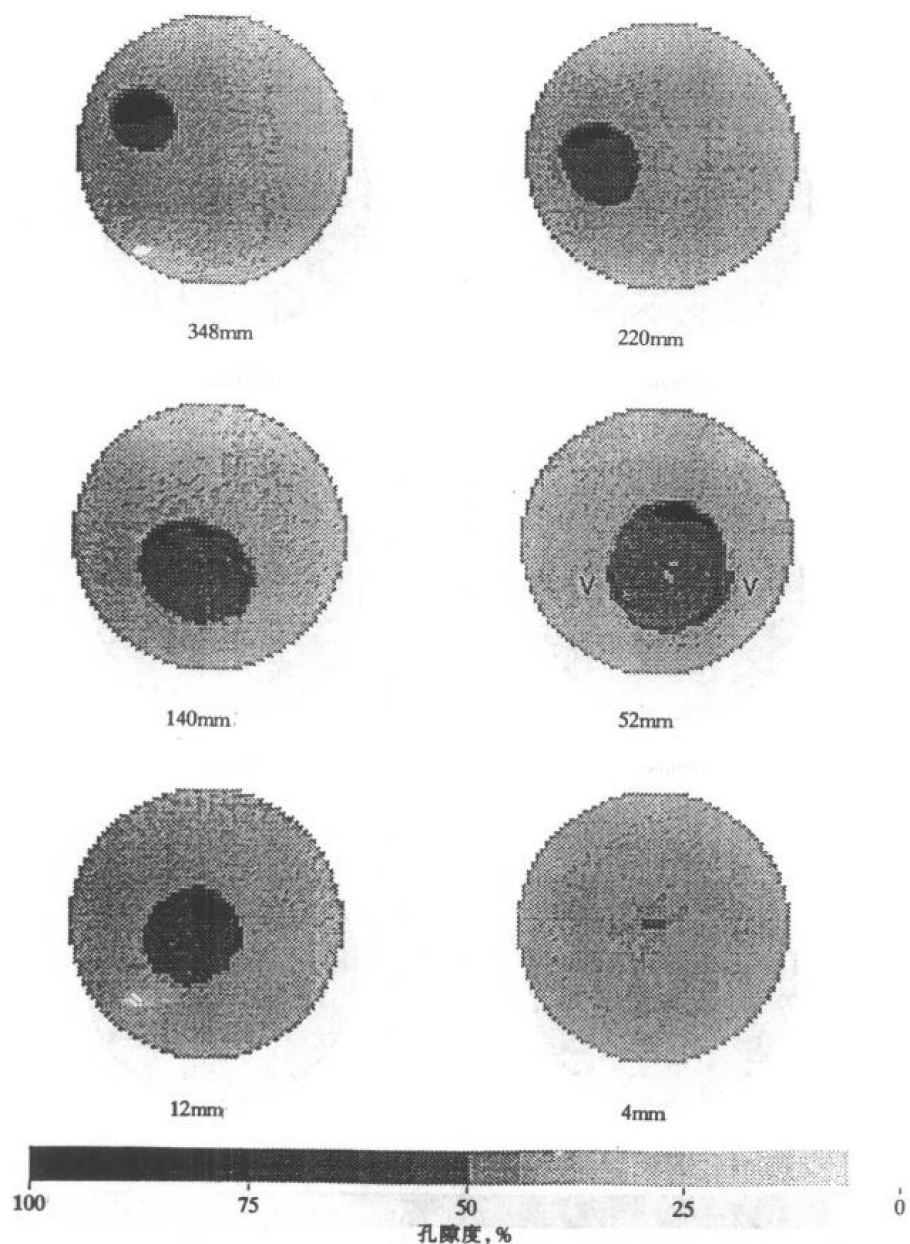


图 2.4 蚯蚓洞形成后 CT 扫描图 (横切面)

3) 蚯蚓洞稳定延伸, 一直贯穿整个填砂模型。实验全过程中, 蚯蚓洞未出现垮塌。实验结束后, 经长期搁置, 蚯蚓洞仍保持完好。可见蚯蚓洞延伸距离远, 稳定性好。

4) 室内实验结果与矿场实际开采动态吻合。蚯蚓洞形成和延伸过程中, 产油量相对较低, 产出液含砂量达 44%; 蚯蚓洞稳定过程中, 产油量提高, 而产出液含砂量降至 5% 以内, 并呈逐渐下降趋势 (表 2.1, 图 2.7, 图 2.8)。

2. 蚯蚓洞与孔径的关系

Waterloo 大学孔隙介质研究所 M.B.Dusseault 教授等人所进行的室内实验结果表明: 当射孔孔眼直径小于油砂粒径的 4 倍时, 砂粒容易在孔眼外形成砂桥, 不利于出砂形成蚯蚓洞; 当孔眼直径大于油砂粒径的 6 倍时, 才有利于出砂并形成蚯蚓洞 (图 2.9)。因此, 出

砂冷采井采用大孔径射孔是必要的。

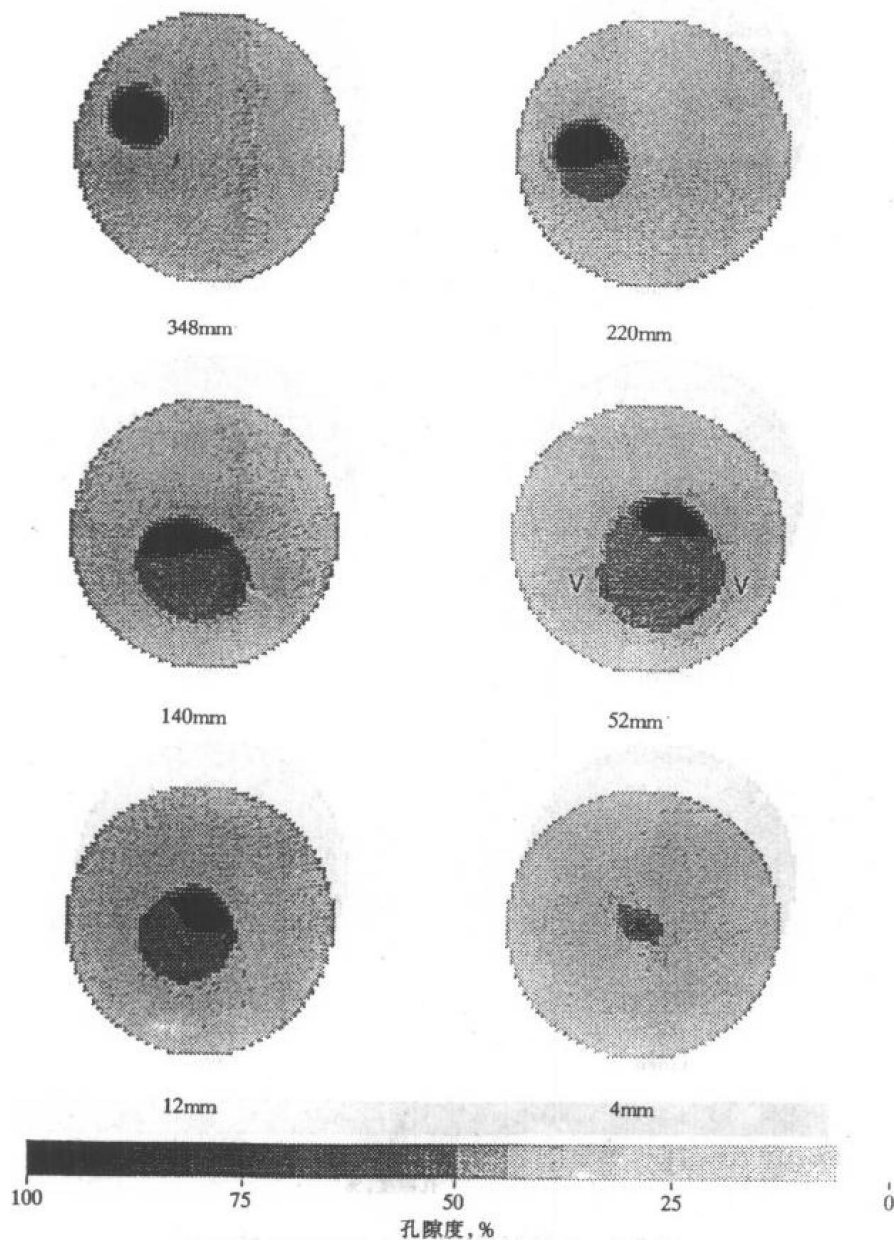


图 2.5 冲刷后 CT 扫描图 (横切面)

3. 蚯蚓洞网络

M.B.Dusseault 等人认为：随着砂子的大量和不断产出，井筒周围应力发生了不同程度的变化，油层呈现出相应的分带性（图 2.10）；蚯蚓洞经流化带、屈服带和破坏带呈树枝状逐渐向外延伸，形成蚯蚓洞网络（图 2.11）；蚯蚓洞网络的延伸及流体在其中的流动与流水汇聚现象十分相似（图 2.12）。

二、稳定泡沫油流动

1. 泡沫油的形成及其作用

与稀油相比，虽然天然气在稠油中的溶解系数低，但是，稠油油藏中一般含有 5~

20m³/t 溶解气。稠油油藏埋藏浅，地层压力低，地饱压差小，天然气在地层压力附近处于溶解平衡状态。在含气原油从油层深处向井筒流动过程中，随着孔隙压力的降低，地层原油中产生大量微气泡形成泡沫油流动，且气泡不断发生膨胀（图 2.13）。而且，由于稠油中胶质和沥青质含量高，包裹气泡的油膜强度大，所以气泡不易破裂，即使在压力非常低的情况下，泡沫油仍能保持长时间稳定。随着压力的降低，除了气泡本身发生膨胀外，原油、水以及岩石骨架也会发生弹性膨胀，从而为原油的流动提供了驱动能量。

尽管出砂冷采过程中，产出液高峰含砂量可达 20%~60%，但这是原油经脱气等处理后所计算出的含砂体积比。泡沫油弹性膨胀理论表明，由于井筒内压力非常低，流动于其中的泡沫油密度很低，其实际体积远大于脱气处理后的体积，所以井筒中的实际含砂体积比例也大大低于处理后所得到的结果，即砂子在泡沫油中的分散程度相对较高。因此，泡沫油的存在使高粘度稠油的携砂变得更容易。此外，泡沫油的存在对保持蚯蚓洞的稳定也有重要作用。

2. 泡沫油的膨胀性和稳定性

阿尔伯达大学的 J.J.Sheng 等人利用 Lindbergh 等油田矿场产出的稠油样，进行了一系列泡沫油膨胀性和稳定性室内实验研究。实验装置如图 2.14 所示。油样先在高压下饱和甲烷气，然后转入带玻璃视窗和高度仪的高压设备中。据此可以观察到：随着压力的下降，溶解气发生聚集并生成气泡；这些气泡最初分散在液相的原油中，形成泡沫油；随着泡沫油体积的增加，液面相应升高；最后，这些气泡在稳定低压下，又慢慢从液相原油中脱出成为游离气，原油体积随之变小。通过监测泡沫油柱高度随时间的变化，就可以估算泡沫油及分散气泡的体积。在 Sheng 等人所作的实验中，实验起始压力一般设定为 4.8MPa，终值压力为 2.4MPa（而不是大气压力，因为如果压力降得太低太快，则会使含气原油发生剧烈膨胀，使视窗变得模糊，不便于观察）。

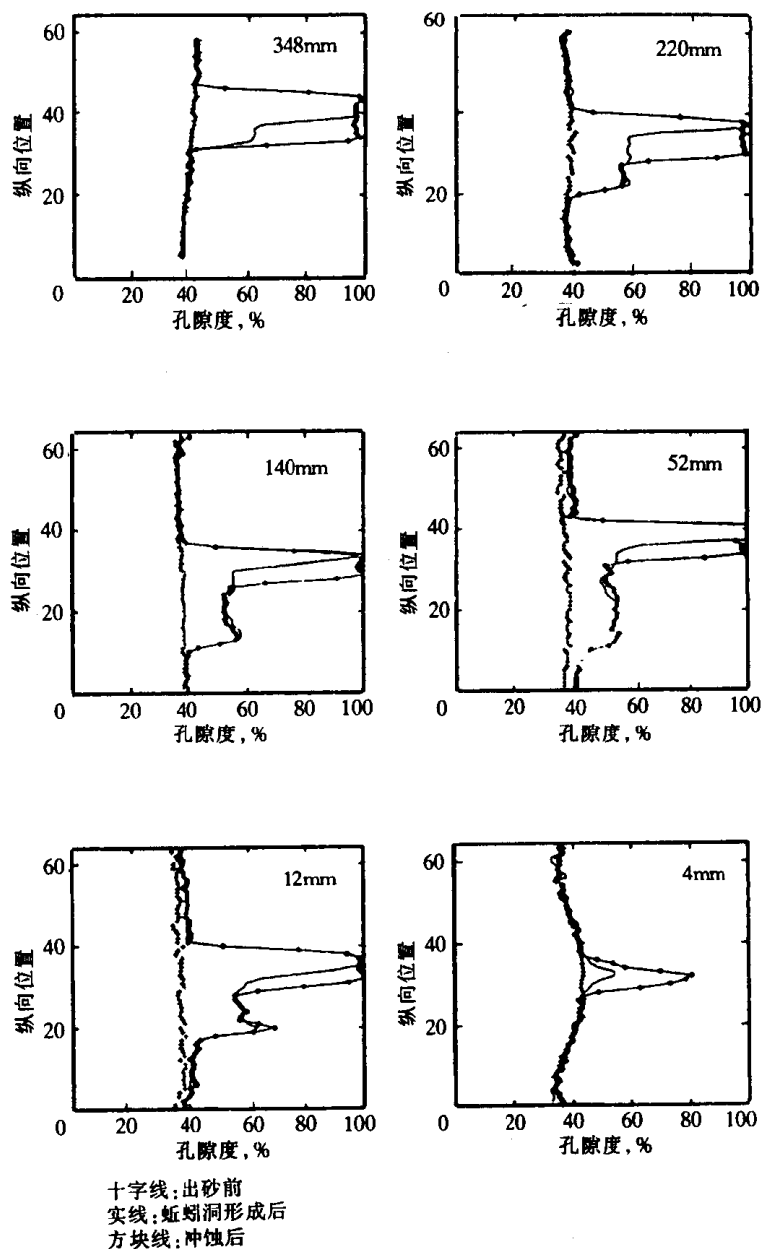


图 2.6 纵向孔隙度分布图

表 2.1 产出流体的 Dean—Stark 分析

序 号	时间 h	固体重量 g	沥青含量 %	含 水 %	固体含量 % (体积)
1	72.0	0.075	0.0	99.98	0.020
2	88.57	0.26	81.36	18.50	0.14
3	95.65	4.40	96.18	1.87	1.94
4	96.73	0.0096	98.06	1.94	0.00911
5	97.67	21.83	85.86	3.16	10.97
6	98.17	54.90	52.72	3.20	44.08
7	98.67	54.40	54.90	1.28	43.82
8	99.24	35.50	53.95	2.60	43.45
9	100.46	54.80	67.94	2.04	30.03
10	100.86	21.60	94.08	0.27	5.65
11	101.23	6.40	96.19	0.60	3.21
12	101.60	7.60	97.98	0.13	1.89
13	101.78	6.60	98.57	0.11	1.32
14	102.21	4.60	98.66	0.46	0.88
15	102.59	4.30	98.97	0.37	0.66
16	103.01	3.30	99.10	0.38	0.52
17	103.63	3.30	99.31	0.32	0.37
18	104.41	2.40	99.67	0.06	0.27

注：表中序号 1~4 为低速注入阶段，尚未形成蚯蚓洞。

根据 I.C.Callaghan 等人的研究成果，可用下式表示泡沫油中分散气泡的平均保存时间：

$$t_1 = \frac{1}{h_o(0)} \int_0^{t_o} h_{dg}(t) dt \quad (2.2)$$

式中 t_1 ——分散气泡平均保存时间；

$h_o(0)$ ——起始油柱高度；

$h_{dg}(t)$ ——分散气泡在 t 时刻的高度，它等于 t 时刻泡沫油柱高度与起始油柱高度之差；

t_o ——从起始时刻至油柱回落到起始高度所用时间。

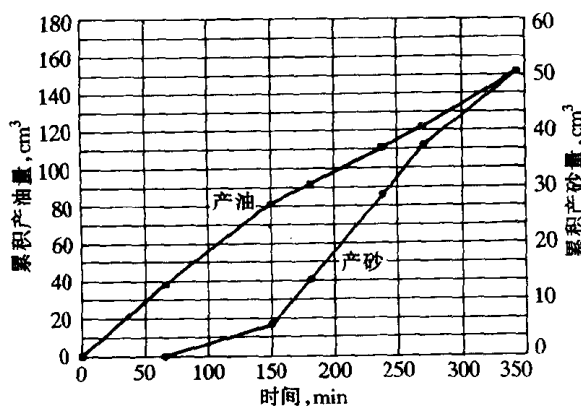


图 2.7 蚯蚓洞形成过程中累积产油和产砂量随时间变化

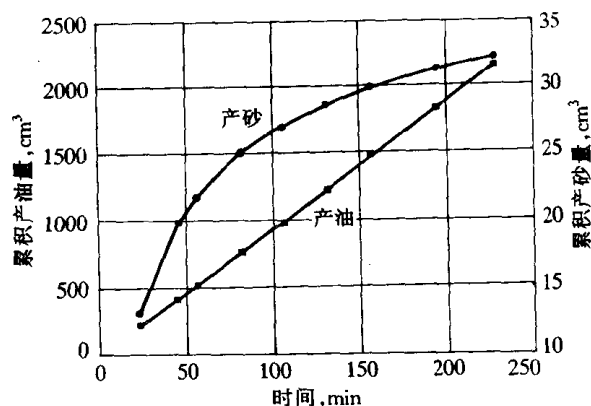


图 2.8 蚯蚓洞冲刷过程中累积产油和产砂量随时间变化

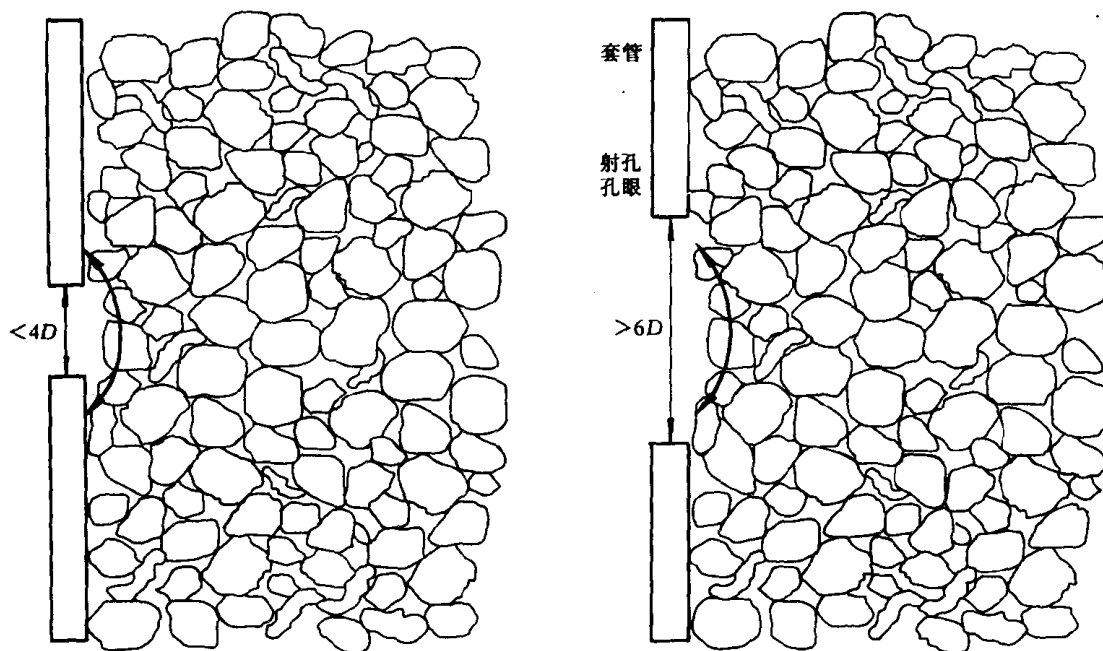


图 2.9 射孔孔眼大小对出砂的影响

各实验的基本情况及分散气泡平均保存时间计算结果如表 2.2 所示。实验结果表明，原油粘度、油柱高度、溶解气含量以及压降速度等因素对泡沫油膨胀性和稳定性具有重要影响。

(1) 原油粘度的影响

在相同条件下，脱气原油粘度越高（表 2.2 中实验 1~8），泡沫油稳定性越好，表现在

分散气泡所占体积增加，泡沫油持续时间大幅度延长。对于脱气原油粘度为 13000mPa·s 的稠油（表 2.2 中实验 1），当压力从 4.8MPa 降至 2.4MPa 时，分散气泡的最大体积比例达 16.7%，泡沫油持续时间达 3.5h；当原油粘度只有 29mPa·s 时（表 2.2 中实验 8），随着压力的降低，所产生的气泡以极快的速度消失，基本上监测不到泡沫油存在这一过程，可以认为，粘度太低时，不会存在泡沫油（表 2.2，图 2.15）

表 2.2 泡沫油稳定性实验条件及结果（据 J.J.Sheng 等人）

实验号	油 样	脱气原油粘度 mPa·s	饱和溶解气 m ³ /m ³	原始压力 MPa	最终压力 MPa	原始油样高度 mm	压降速度 MPa/min	分散气泡占最大体积 %	分散气泡最大高度 mm	分散气泡平均保存时间 min
1	Lindbergh1	13000.0	15.5	4.8	2.4	87.5	突然	16.67	17.5	21.43
2	Lindbergh2	9000.0	14.2	4.8	2.4	87.5	突然	16.51	17.3	13.53
3	Medicine Hat	3000.0	17.0	4.8	2.4	87.5	突然	11.88	11.8	5.09
4	Tangleflag	450.0	19.0	4.8	2.4	87.5	突然	15.05	15.5	3.36
5	Crest Hill	250.0	18.4	4.8	2.4	87.5	突然	10.26	10.0	1.53
6	PAO—100	3300.0	16.0	4.8	2.4	87.5	突然	10.07	9.8	5.20
7	PAO—40	897.0	16.0	4.8	2.4	87.5	突然	5.81	5.4	0.62
8	PAO—4	29.0	16.0	4.8	2.4	87.5	突然	0.00	0.0	0.00
9	Lindbergh2	9000.0	14.2	4.8	2.4	43.8	突然	15.62	8.1	8.69
10	Lindbergh2	9000.0	15.0	4.8	2.4	131.3	突然	18.55	29.9	30.48
11	Lindbergh1	13000.0	15.5	3.6	2.4	87.5	突然	6.82	6.4	7.37
12	Lindbergh1	13000.0	15.5	4.8	2.4	87.5	0.080	16.11	16.8	19.37
13	Lindbergh1	13000.0	15.5	4.8	2.4	87.5	0.042	6.22	5.8	6.11

（2）油柱高度的影响

随油柱高度增加（实验 9，2，10），分散气泡所占比例增加，泡沫油持续时间延长。这是因为，油柱越高，气泡逸出所经历路径和时间越长，障碍越多。当原始油柱高度从 43.8mm 增到 131.3mm 时（增加 2 倍），分散气泡所占最大体积比例从 15.6% 增加到 18.6%，与原始油柱高度之比从 0.18 增加到 0.23，泡沫油持续时间从不足 2h 延长到 6.5h，延长 2 倍以上（表 2.2，图 2.16）。

（3）溶解气含量的影响

溶解气含量越高，泡沫油稳定性越好。当原始压力由 3.6MPa 降至 2.4MPa 时（表 2.2

中实验 11), 压降值为 1.2MPa, 有 3.9m^3 溶解气逸出变为分散气泡, 分散气泡所占最大体积比例仅 6.8%, 泡沫油持续时间不到 3h; 而当原始压力由 4.8MPa 降至 2.4MPa 时 (表 2.2 中实验 1), 压降幅度和逸出溶解气量均是前者 2 倍, 而分散气泡所占最大体积比例和分散气泡平均保存时间分别是前者的 2.5 和 2.9 倍, 泡沫油持续时间延长 1/4 (表 2.2, 图 2.17)

(4) 压降速度的影响

压降速度越快, 泡沫油稳定性越好。当压降速度为 $0.080\text{MPa}/\text{min}$ 时 (表 2.2 中实验 12), 分散气泡动态曲线与压力突然降落的情况 (表 2.2 中实验 1) 相似; 而当压降速度为 $0.042\text{MPa}/\text{min}$ (表 2.2 中实验 13, 约为前者的一半) 时, 分散气泡所占最大体积比例和分散气泡平均保存时间分别比前者降低 61% 和 68% (表 2.2, 图 2.18)。

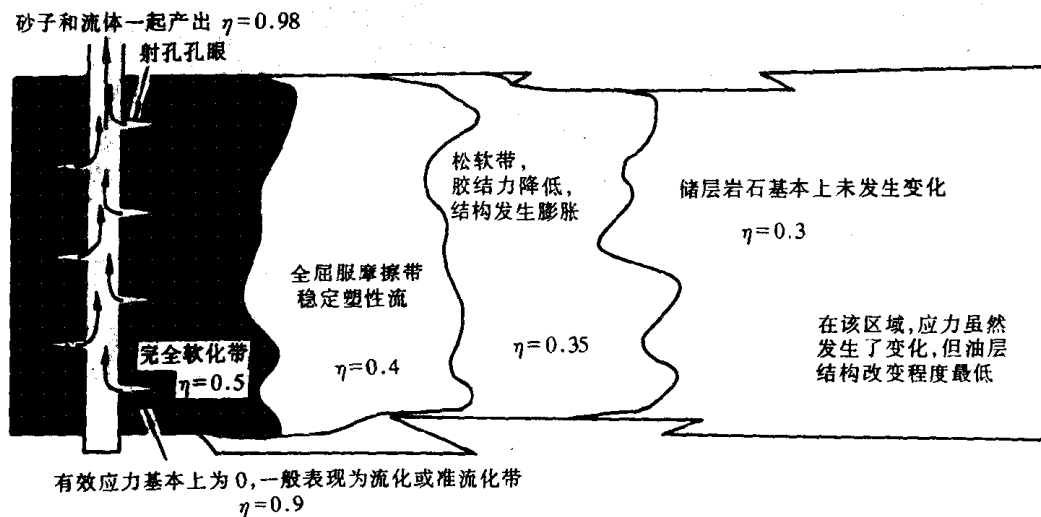


图 2.10 井筒周围应力不同所呈现出的分带性

从以上分析可以看出, 从提高泡沫油稳定性出发, 应用出砂冷采技术的油藏原油粘度不能太低, 实际生产时, 应尽量降低采油井井底压力, 提高压降幅度和压降速度。

由于矿场实际应用出砂冷采技术的油藏脱气原油粘度多数在 $20000\text{mPa}\cdot\text{s}$ 以上, 井筒内液柱高度也远远大于室内实验值, 实际生产中井底压力一般降至 1MPa 以下, 所以, 在矿场实际情况下, 泡沫油稳定性应该比室内实验所测结果更好。

矿场实际资料也证实了这一点。第一, 如果将一个泡沫油样置于大容器中并暴露于大气下, 则其中的气泡需经过好几天才消失。第二, 出砂冷采井稳产期往往可达数年之久, 生产

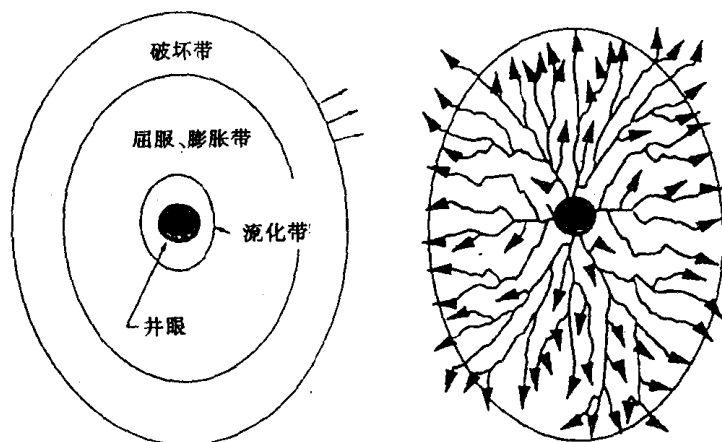


图 2.11 蚯蚓洞网络生长示意图