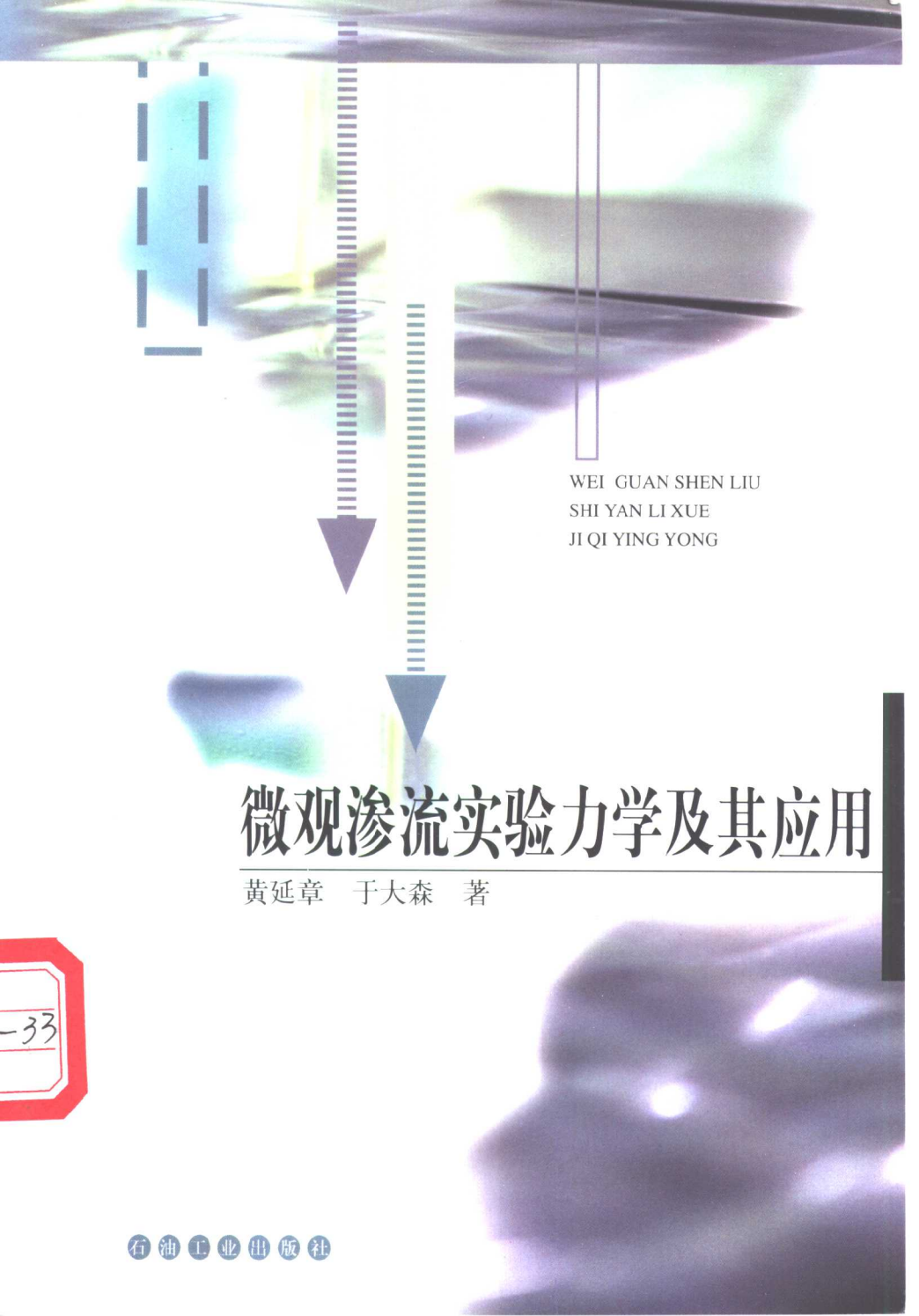




WEI GUAN SHEN LIU
SHI YAN LI XUE
JI QI YING YONG

微观渗流实验力学及其应用

黄延章 于大森 著

微观渗流实验力学 及其应用

黄延章 于大森 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了微观渗流实验力学的基本内容及其在油田开发中的应用,包括微观模型的制做技术、微观渗流实验力学的研究方法、微观渗流实验力学在油田注水开发及提高原油采收率方面的应用等。可供油田开发方面的领导和科技人员,以及石油院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

微观渗流实验力学及其应用/黄延章等著.

北京:石油工业出版社,2001.12

ISBN 7-5021-3624-X

I. 微…

II. 黄…

III. 渗流力学

IV. O357.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 088536 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)

北京乘设伟业科技排版中心排版

北京密云华都印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 3.5 印张 93 千字 印 1—1000

2001 年 12 月北京第 1 版 2001 年 12 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3624-X/TE·2670

定价:10.00 元

序 言

微观渗流实验力学是研究多孔介质中孔隙水平的流体流动机理和规律的科学,是渗流力学的重要组成部分。它对油田开发研究有重要的意义。

渗流理论是合理开发油气田的理论基础。在科学渗流理论指导下的油气田开发实践将使石油资源得到合理的利用和人力物力财力的节约。在油气田开发过程中当一种流体驱替另一种流体时,其驱替效果决定于:多孔介质孔隙系统的几何形态和大小分布;孔隙系统的表面性质;两种流体的性质及它们之间的相互作用;流体和固体表面的相互作用;驱替的压力等,即所有作用于该系统的力。这些多相流体渗流过程中复杂的相互作用,总是通过各种现象表现出来的,而微观渗流实验力学可以显示出这些现象,它可以帮助我们更好地理解 and 掌握驱替过程的各种机理和规律性,帮助我们解决生产中所遇到的问题。

在从事长期的微观渗流实验力学研究中,作者深感需要系统地总结这个研究领域的成果,适经有关同志建议,遂完成这本拙著。

本书系统地阐述了微观渗流实验力学及其应用,重点介绍了在水驱油两相渗流及提高原油采收率方面的应用等,可供从事油田开发科研生产部门的科技人员及院校师生参考。

在本书撰写的过程中,渗流流体力学研究所的刘福海、田根林、童正新、陈权、王芳、俞理等同志为本书提供了有关的资料,作者深表谢意。

由于作者水平有限,书中难免有不当之处,敬请赐教。

作者

目 录

绪论	(1)
第一章 微观渗流实验的物理模型	(4)
第一节 夹珠模型	(5)
第二节 毛管网络模型	(6)
第三节 孔隙网络模型	(7)
第四节 砂岩孔隙模型	(8)
第二章 微观渗流中油层特征的模拟	(10)
第一节 微观模型的光成像与化学刻蚀	(10)
第二节 微观模型烧结成型	(12)
第三节 微观模型孔隙内表面润湿性处理	(14)
第四节 微观模型的再生	(17)
第五节 微观模型矿物仿真	(20)
第三章 微观渗流实验力学的研究方法	(22)
第一节 微观渗流实验的观测	(22)
第二节 微观渗流实验的测试	(24)
第三节 微观渗流图像处理技术	(27)
第四节 分形计算方法在微观渗流实验力学研究中的应用	(30)
第五节 微观渗流实验力学分析	(36)
第四章 微观渗流实验力学在注水开发油田中的应用	(42)
第一节 水驱油微观机理研究	(42)
第二节 最佳驱油速度的研究	(49)
第三节 注水过程中粘土矿物的膨胀和迁移	(52)
第四节 注水过程中结垢问题的研究	(56)
第五章 微观渗流实验力学在化学驱方面的应用	(59)
第一节 碱水驱油微观渗流机理	(59)

第二节	表面活性剂驱油微观渗流机理	(67)
第三节	聚合物驱油微观渗流机理	(73)
第四节	复合体系驱油机理研究	(79)
第六章	微观渗流实验力学在其它驱油方面的应用	(86)
第一节	混气水驱油渗流机理	(86)
第二节	裂缝介质中油气水微观渗流机理	(90)
第三节	交联聚合物调剖和驱油机理	(94)
第四节	微生物采油机理研究	(96)
参考文献		(101)

绪 论

你看到过水驱油的微观渗流过程吗？你看到过各种三次采油提高采收率的微观渗流景象吗？作为一个油田开发工作者，如果你已经看到了，并且深刻地理解了这些复杂现象的本质和这些现象所表达的规律性，那么，我相信你在解决该领域有关增产原油的一些技术问题时，会更胸有成竹和得心应手。

微观渗流实验力学技术展现给人们一个绚丽多彩的渗流世界，但你既可能陷入繁杂的多种现象而不能自拔，也可能驾驭各种渗流现象而把握事物发展的规律。

如同其它学科一样，微观渗流实验力学的发展也经历了一个孕育和发展的过程。它始于 20 世纪 40 年代末，但发展缓慢。从 20 世纪 80 年代始，微观渗流的研究工作有了快速的发展。在国内外有一批从事微观渗流的科技工作者，他们有模拟各种渗流环境条件，再现各种渗流过程，捕捉显示各种渗流景象和综合分析渗流规律方面的理论造诣和技术功底。模拟的技术和条件都有了很大的提高，可以制作各种微观模型。润湿性的变化，可从强亲水、中性，直到强亲油均可控制，模型可以再生重复使用。模型的孔道表面的粗糙度和矿物成分可以模拟控制。可模拟高温(150℃)、高压(41.4MPa)下的渗流过程。因而所研究的渗流问题的范围也日益广泛。

微观渗流属于图像学的范畴，它以复杂的连续变化的影像而别具芳姿。在微观渗流过程中，呈现出许许多多的流态现象，如何从这繁杂变化多端的现象中找出事物发展的规律性，就成了微观渗流实验力学研究的主要目的。

事物在发展过程中会显示出各种各样的现象。现象并不是规律性，它只是事物在发展过程中某种条件下其规律性的特殊定格，即在特定条件下规律性的某种表现显现。我们经常提到本质现

象,所谓本质现象是指具有事物发展规律性主要方面特征的现象,有时我们称之为有代表性的现象。

事物发展的因果关系是非常复杂的,一种现象可以由多种因素引起的,即一种现象可以有多种起因,而一种因素也可以引发不同的现象。因而想要掌握事物发展的规律性,还需要依据多种学科方面的知识,对现象进行综合的分析研究。

但是,现象是重要的,现象是入门的响导。在微观渗流实验力学的研究中,首先需要观测大量的各种不同的现象,对各种现象要有科学的、恰如其分的、切合实际的描述。然而,我们的目的并不局限在观察现象,而是透过各种复杂的现象,找到事物发展的规律。在认真研究发生各种现象的动力、环境和条件之后,经过综合分析,去伪存真,发现事物发展的规律性,用此规律性的认识,指导实践,在实践中进一步提高完善对这一规律性的认识。在这实践—认识—再实践的循环发展进程中,科学实验和生产过程将会有更高的产率和更大的效益产生。

微观渗流实验力学的研究也具有三步曲:第一是观测,研究人员观察到许多现象,并对所观测到的现象进行直观描述。第二是探索,随着工作的扩展,研究者将陆续观察到更多的现象,这些现象有些是重复的,而大部分又不完全重复,现象的细节更是变化多端。而对这复杂变化的微观世界,令人难以确切地用数学方程描述,这就需要从现象发生的机理上进行探索。第三是提高,在实验研究的同时,努力吸收多种学科的基础知识,包括物理(力、电、磁、波……)、化学(物理化学、胶体化学……)、多孔介质理论、流变学等,进而对现象综合分析,得出一些规律性的认识,指导进一步的科学实验和生产实践。

目前的研究论文,大部分属于上述的第一阶段范畴,有少量是属于第二、三阶段的,而且也只是在某些观点上进入第三阶段。因此对微观渗流实验力学研究来说可谓任重道远。

一般来看,从事微观渗流实验力学的研究人员,应具备以下三个条件:第一是技术条件,掌握模拟和观察各种渗流过程的技术;

第二是基础理论知识,较好地具有多种学科的基础理论知识,第三是唯物辩证的思维方法,能够由表及里去粗取精地研究各种现象,对事物的发展得出规律性的认识。

本书系统地综述了微观渗流实验力学的基本内容及其在油田开发方面的应用。它涉及各种微观模型及制作技术,油层特征的模拟技术,微观渗流实验的观测与研究,微观渗流实验力学技术在水驱油、化学体系驱油和其它采油方面的应用。作为石油科技的组成部分,已显示出它在认识油气渗流规律和提高采收率研究方面所具有的独特作用。

虽然微观渗流实验力学的研究有了很大发展,但是它必竟还是渗流学科发展的一个新的领域,历时不长,有很多问题还没有解决,有待进一步提高,以对石油科技和石油工业的发展起到更大的作用。

第一章 微观渗流实验的物理模型

在渗流的过程中存在多尺度的问题,它以研究对象所在空间的大小为标志,对于不同的学科和运动过程,会有不同的尺度范围和等级的划分。以油气渗流为例:在油田生产中,所研究的范围以公里和公尺为尺度;在实验中的宏观物理模拟实验,一般以公分 as 尺度,而微观渗流实验力学的模拟实验,则以微米为尺度。

在油气渗流的研究中,可以归纳为三个尺度:

- (1)以油田、井组为渗流单元的公里公尺;
- (2)宏观物理模拟实验范围的公分;
- (3)微观模拟实验研究的微米。

当然,在连续的过程中,任何界限的划分都是相对的,其间总有“过渡区”,其性质具有该界限两边事物的某些特征。关于微观渗流的界定也同样存在这个问题,因而,对于微观渗流,我们作如下界定:微观渗流是孔隙水平的渗流,它直接观察和研究多孔介质孔道内各种流体的分布、流动的具体细节和规律性。

虽然微观渗流在整个渗流领域中不仅局限在第三尺度的研究范围,即使这样,它所涉及的研究内容也还是相当广泛的。为了适应不同研究内容的要求,人们设计研制了各种各样的物理模型,用以模拟多孔介质的孔隙系统,进行各种实验,以求得到尽量接近地下真实情况的详细确切的研究结果。因此,物理模型必须具备以下两种性能。其一是模拟多孔介质的孔隙系统的孔径大小,孔径几何形态,以及表面矿物成分等,模拟得越逼真,越接近实际油层的孔隙介质的孔隙系统就越好;其二是具有必要的透光性,以便于藉助光学仪器观测研究孔道内多相流体的分布和流动状况。透光性越好,越能得到清晰的图像,这种模型就越具有实用研究价值。但是,事情往往不能尽如人意,油层岩心具有真实的孔隙系统,如用这种岩心模型进行微观渗流实验研究,可谓百分之百地逼真;但

是,它不透光,无法借助光学仪器观察孔道内流体的分布和流动。因此,在满足一定透光性的前提下,人们根据研究内容的需要,从不同角度模拟多孔介质的孔隙系统,从而研制了不同类型的物理模型,以进行微观渗流实验力学的模拟实验,研究微观渗流的各种问题。这些物理模型大体上可分为四类:夹珠模型、毛管网络模型、孔隙网络模型和砂岩孔隙模型。

每一种微观模型都有自己的特点,我们应该针对自己所要研究的问题去选择合适的模型,这样才能得到比较理想的研究结果。

第一节 夹珠模型

在研究微观渗流的历史上,应用最早的是夹珠模型。它的制作工艺是用两片玻璃或有机玻璃密集地夹持一层分选良好的玻璃微珠,封闭四周,留下进口和出口,制成一个层状的多孔介质模型,Chatenever等在文献[1]中详细介绍了在单层玻璃珠夹层模型上所作的水驱油实验结果。他们发现,在互不溶两种流体同时流动时,每种流体沿着各自联通的渠道网络运动,即所谓渠道流态。当饱和度改变时,渠道网络的范围大小也相应改变,在水驱油后期,还发现油以珠状形态流动。当驱替时,油水前沿产生指进。在玻璃珠模型中,残余油的分布,有大片的,也有珠间岛状的,残余水则存在于平板与玻璃珠的接触点处,或珠与珠的接触之处呈水环形状。在有机玻璃珠模型中,油水分布与上述的相反。

Donaldson 和 Thomas^[2]用石英砂填充夹层模型,模型厚1mm,石英砂颗粒直径少于0.5mm。研究实验表明,在水湿系统中,油的小滴呈球形,大的油块停靠在水膜上,死油区较小,在增大压差时,死油区的油可以部分被驱出。当油湿时,油就占据更多的小孔隙,附着在孔隙表面,注入水的指进现象比水湿时严重。

文献[3]介绍了用夹珠模型研究凝析气在多孔介质中的反向凝析和多相渗流机理问题。实验表明,当压力降到露点时,模型中颜色突然暗下来,产生雾状的混淆,微细液滴悬浮在气流中飘流,

然后,在固体颗粒上出现液滴,随着压力的继续下降,液滴不断增大,数量也增加,优先充满小的孔道,出现气液界面,即弯月面。当压力继续下降时,逐渐增加的液体呈连续相,占据整个孔隙空间。多孔介质中的露点低于无多孔介质条件下的露点。

凝析气体体系具有特殊的渗流机理:

- (1)当压力高于露点压力时,呈单相气体流动。
- (2)当压力等于露点压力时,呈液气两相悬浮流。
- (3)当压力低于露点压力时,液相处于束缚状态,仅单相气体流动。
- (4)当压力接近最大凝析压力时,存在气液两相流。

文献[4]介绍了用油砂制作的夹珠模型,实验研究了水驱,表面活性剂驱和微乳液驱油的微观机理。

夹珠模型能够较好地再现孔隙介质的三维孔隙结构,且因为它是透明的,所以在一定程度上,适于显示流动的某些特征细节。因此不少研究者用它来研究各种驱油过程^[5,6]。

但是,夹珠模型不易精确地控制孔隙系统孔道大小的变化,而且在这种三维模型内,要想完整地显示和详细地观察相间运动和各相的相互作用是非常困难的。

第二节 毛管网络模型

Mattax 和 Kyte^[7]研制了另外一种微观渗流实验的物理模型,它是刻蚀在玻璃平板上的毛细管网络。

在这种模型上他们研究了油水的流动状态,他们发现大部分的油为活塞式驱动。同时还观察到,在亲水模型中,水能沿着毛管壁上的水环流动。Michaels 和 Stancell 等人^[8]在上述模型内观察了胺液驱油时润湿性的转换现象,己胺溶液可以暂时地使孔隙介质表面从亲水变为亲油的润湿性,使孤立的油滴展开并连片,以增加油的流动通道,导致油的采收率提高。

渗流力学所在 20 世纪 80 年代初研制成了毛管网络模型,并

且研制成了孔道内表面润湿性控制技术,孔道表面粗糙度控制技术,模型再生和改性技术等配套技术,使微观渗流的模拟技术有了很大发展。虽然这种模型在理论上是毛管网络,但在制作时毛管交叉处腐蚀的毛管半径增大,所以实际上具有一定程度的孔喉特征。应用这种模型和配套技术系统地进行了水驱油、泡沫驱油、碱水驱油、微乳液驱油等方面的驱油机理的实验研究工作,取得了一系列成果^[9~16],所得结论在一定程度上已反映了孔隙结构的影响。

毛管网络模型是二维的透明模型,它的优越之处在于,能够确切设定孔隙系统的孔道大小和形态分布。例如,孔隙系统的配位数可以从3到6任意控制,因而它得到广泛的应用^[17~20]。

但是,毛管网络模型不具备三维孔隙系统的某些形态分布特征,特别是孔喉变化的特征。

第三节 孔隙网络模型

Davis 和 Jones^[21]用光刻技术制成了多孔介质孔隙系统的图案,制作了孔隙网络模型。

他们制作的微观模型,孔道宽约 $25 \sim 76 \mu\text{m}$,深约 $25 \mu\text{m}$,有亲水的润湿性。他们在该模型上进行了微乳液(胶束)驱油的实验。该微乳液驱油是互溶性驱替,在微乳液段塞和油之间没有明显的界面,而和水之间则有明显界面;微乳液有比水更好的润湿能力,在微乳液段塞前面形成高饱和度油带;在段塞和油水之间形成混合或过渡带,在段塞后部,微乳液逐渐被水稀释而变成水外相的乳状液。

中国科学院渗流力学所在20世纪80年代中期已掌握了光刻技术,用以前已研制成功的烧结成型技术相应地制成了孔隙网络模型,结合以前研制成功的配套技术,进行了系统的实验研究工作^[22~23]。

文献[24,25]介绍了这种模型在水驱油和束缚水形成方面的研

究工作。Bonnet、Lenormand^[26]和Mahers^[27]用光成像和化学腐蚀的方法制作尼龙微观模型,进行了一系列的实验研究^[28~30]。Dawe R. A. 研究了润湿性和流体分布形态对岩石电阻率的影响^[31]。Peden 等人还进行了高温高压(150℃, 41.4MPa)下的CO₂驱^[32]。

用尼龙作的微观模型,其优点是可以把孔隙作得很小,但是,其润湿性和粗糙度却不易控制。而用玻璃烧结成型制作的微观模型,其孔道孔径很难小于20μm,但其润湿性和粗糙度则容易控制,且模型可以重复再生使用。

孔隙网络模型是一种在某种程度上可模拟三维结构的二维透明模型,它可以再现多孔介质的孔隙结构特征,特别是孔喉变化的特征。这种二维透明模型非常适用于观察研究孔道中流体分布和流动的实验,适用于研究各种流体之间界面现象和相互作用的机理。但是,不论是用玻璃制作的,还是用尼龙制作的,这种模型都难以模拟真实岩心和矿物成分及孔道内表面的复杂性质。

第四节 砂岩孔隙模型

以上介绍了几种微观模型,由于它们具有各自的特长和优越性,所以都得到了广泛的应用,进行了大量的实验研究工作,取得了一批有重要的研究成果。但是,应该指出,岩石特性的复杂变化,如宏观和微观非均质性,孔隙几何尺寸和配位数,孔隙形态,表面粗糙度和润湿性,矿物组成,泥质含量及成分等,使得制作逼真的孔隙系统是非常困难的。所使用的上述各种微观模型只能近似地再现研究的过程。虽然制作技术可以不断改进,但是与真实岩石孔隙系统上述特征完全一致的模型是难以制作的,而生产中的某些问题只有在真实的岩石孔隙中进行才更有意义。因此,人们又研制了砂岩孔隙模型。

砂岩孔隙模型是一种真实油层孔隙结构的微观模型,它是用实际岩心经洗油、制成切片后,粘夹在两个光学玻璃板之间,将周围封好,联上进口和出口而制成的。其优点在于:由于它是由真实

岩心制作的,所以它基本上保持真实岩心的孔隙结构、形态及矿物成分,如果在制作模型时操作细心,还可以保留大部分胶结物(粘土矿物等)。这是其它各类模型所不具备的。

砂岩孔隙模型的缺点是透光性差,使部分流场的显示不清晰。

孔令荣、曲志浩等^[33]研制了砂岩孔隙模型,进行了水驱油实验,观察了水驱气、水驱煤油和水驱正辛醇时的渗汲现象,它们的渗汲程度依次减弱。粘土胶结物和微裂缝对渗汲影响甚大。贾红育等研究了油层在注水过程中的结垢问题^[34]。

第二章 微观渗流中油层特征的模拟

渗流力学所在 20 世纪 80 年代初研制成功了毛管网络模型,其制作工艺包括蜡封、刻图、化学腐蚀和烧结成型,其中最关键的是烧结成型。同时,研究成功了孔道表面润湿性控制技术,模型再生技术,孔道表面粗糙度控制技术等。应用这种模型系统地进行了水驱油、泡沫驱油、碱水驱油、微乳液驱油等方面的驱油机理实验研究工作。到 20 世纪 80 年代中期,渗流力学所又掌握光成像技术,制成了孔隙网络模型,并应用电子工业中的镀膜技术,提高了孔隙网络模型的质量;随后,又研究成功了孔道表面矿物仿真技术,综合应用上述几种模拟技术,使微观渗流的研究更加深入和系统化,本章将详细介绍这些微观渗流模拟技术。

第一节 微观模型的光成像与化学刻蚀

一、制版

将铸型岩心薄片的孔隙结构图案(照片)适当放大。也可将多张照片复制品对接起来,并注意将原始照片中孔隙或孔道不清析的轮廓加工处理使其轮廓清楚,同时把照片上不连通的孔隙或半连通的孔隙都用不同大小的孔道连通起来。这相当于把三维空间的孔隙和孔道都安置在平面上,得到一个高透明度(孔隙度)的多孔介质的图案,再按照一定的比例关系,将这个图案制成正片待用。

如果想制造毛管网络模型(均匀的或非均匀的,不同配位数的等),或孔隙网络模型(不同孔喉比、不同配位数,或局部不均匀的)均可按需要设计绘制出各自相应的清晰的图案,制成正片待用。

二、涂胶

取一块与设计图案大小相等的光学玻璃,洗净,烘干,在弱光下把感光胶(如柯达感光胶)均匀地涂在玻璃上,这个过程可以在离心机上完成,也可以将玻璃在不同方向上反复倾斜,使涂胶均匀。涂胶后将玻璃置于烘箱内,在 85℃ 条件下恒温 20min,然后自然冷却,待用。

这仅是基本的工序。但是,这样制作的模型质量不高,一是腐蚀的孔道深度较小,二是容易在模型上留下麻点。改进的办法是在感光胶与玻璃之间加一个金属银、铜或铬的涂层,或者直接用背面涂有一层银或铜的镜子作涂胶的玻璃板。具体作法是:取一块大小合适的镜子片,置于 70℃ 的浓度为 400mg/L 的氢氧化钠的碱水中,浸泡十几分钟后,用热水冲洗干净,烘干,然后再进一步上胶。更简单的办法是直接购置铬板使用,它是电子加工企业制造电子线路的器件。

三、光成像

将一个黑白透明的正片夹在涂有感光胶的玻璃上,进行紫外线曝光,曝光时间与感光胶涂层厚度有关,与光强度及距离有关。曝光后,用显影液浸泡和蒸馏水冲洗,除去未感光的胶残留物,烘干,自然冷却。把玻璃板放入 50% 硝酸液中,十几秒钟后,金属膜即被除去,用蒸馏水冲洗。为了提高质量,最好再用热碱水浸泡一次,用蒸馏水洗净,烘干,待用。

四、化学刻蚀

将图案以外的玻璃各方向的表面用蜡封起来,把型模置于 25% 的氢氟酸中,浸泡设定的时间,取出、用煤油清除封蜡,用丙酮清除感光胶,用硝酸清除金属膜,用热水洗净,烘干,待用。