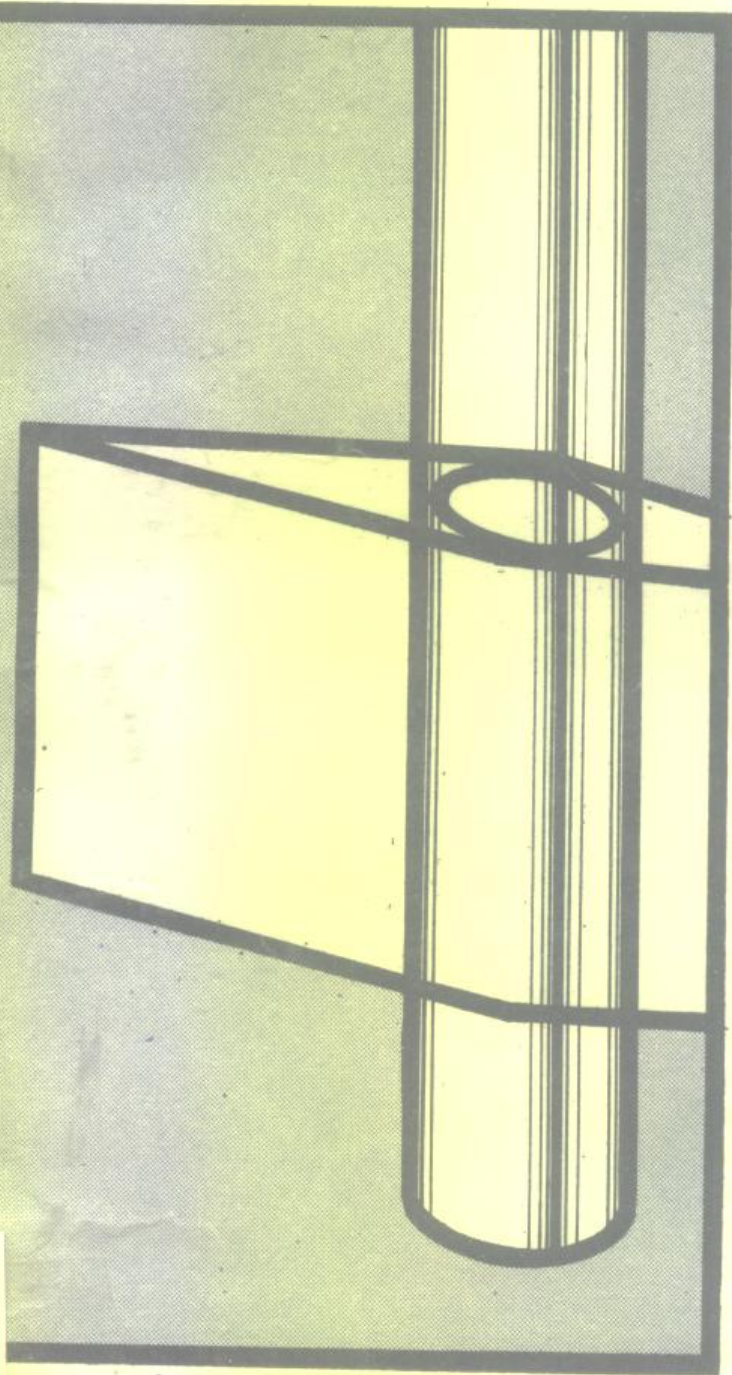


油藏增产技术

张宏逵 等译
张人和 等校

Michael J. Economides
Kenneth G. Nolte 著



石油大学出版社



123752
TE34
030

油 藏 增 产 技 术

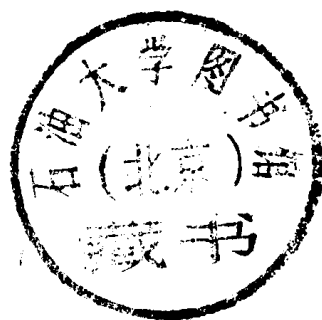
Michael J. Economides Kenneth G. Nolte 著

张宏逵 翁家乡 杨义连 译
胡济世 张建国

张人和 张宏逵 校



石油0117523



石 油 大 学 出 版 社

鲁新登字10号

油藏增产技术

Michael J. Economides Kenneth G. Nolte 著

张宏逵 等译

张人和 等校

•

石油大学出版社出版

(山东省东营市)

山东省新华书店发行

山东电子工业印刷厂印刷

(淄博市周村)

•

开本787×1092 1/16 24.5印张 4插页 608千字

1991年12月第1版 1991年12月第1次印刷

印数 1—3000册

ISBN7-5636-0172-4/TE·41

定价: 12.80元

内 容 提 要

本书是国外最新出版的油藏增产技术方面的专著，全面、系统地阐述了半个世纪以来油气藏压裂、酸化在理论研究、实验方法、现场应用方面的发展历程和研究成果。包括：(1) 压裂和酸化原理、设计依据、施工工艺效果预测与分析评价方法；(2) 各种压裂液、支撑剂和添加剂的性能特征、作用和优化应用范围；(3) 地层损害机理和预处理技术、压裂裂缝产状预测和测量以及酸压裂的应用。

本书可供采油工艺、油藏工程等有关专业科研人员和现场工程技术人员参考学习，也可作为石油院校师生的教学参考书。

译 序

美国道威尔·斯伦贝谢(D·S)公司两位资深的高级工程师M·J·Economides博士和K·G·Nolte博士,几十年来从事油藏工程和增产技术理论研究,享有盛名。本专著在系统总结该公司多年从事压裂酸化理论与实践经验的基础上融合了当代该领域中的先进技术,是一本反映80年代后期油气田增产技术最新成果和先进水平较有权威性的著作。

本书应用了现代油田地质、地球物理、岩石力学、液体流变学、化学动力学以及油藏工程等的理论和方法,通过一系列的模拟和现场试验,全面、系统地论述了半个世纪以来油气藏压裂、酸化在理论研究、实验方法、现场应用方面的发展历程和研究成果。具体地阐述了压裂和酸化原理、设计依据、施工工艺、效果预测与分析评价方法。同时还介绍了各种压裂液、酸液、支撑剂和添加剂的性能特征、作用和优化应用范围。并对地层损害机理和预处理技术、压裂裂缝产状预测和测量以及酸压裂的应用等均作了详细的论述。

本书由胜利石油管理局采油工艺研究院组织有关人员进行翻译,采油工艺研究院领导给予了支持,陈德坦同志参与了部分技校,刘玉辛同志参与了部分校对。在出版过程中,得到石油大学出版社的热情帮助与合作,在此一并表示感谢。

译 者

1990年11月

目 录

序言	(1)
前言	(9)
第一章 油层增产措施的合理性	(12)
一、绪论	(12)
二、不稳定压力分析原理	(12)
(一) 无限大油藏中一口定产量生产井的扩散方程解	(12)
(二) 叠加原理、压力恢复分析、空间叠加	(15)
(三) 气井试井	(16)
(四) 拟压力函数	(17)
(五) 典型曲线拟合/干扰分析	(18)
(六) 双重孔隙系统的不稳定压力分析	(20)
(七) 压力导数	(21)
三、油井和油藏分析	(22)
(一) 酸化井和表皮效应分析	(24)
(二) 表皮效应的组成	(25)
(三) 致密地层的压裂和一般特性	(25)
(四) 油层最大渗透率的估算	(26)
(五) 致密地层生产井分析方法的建议	(26)
四、结论	(30)
第二章 岩石力学基础	(32)
一、绪论	(32)
二、基本概念	(32)
(一) 应力	(32)
(二) 应变	(33)
(三) 应力-应变关系	(34)
(四) 孔隙压力和有效应力	(35)
(五) 破坏准则	(36)
三、有关的岩石性质及其测量	(37)
(一) 单轴和三轴试验	(37)
(二) 孔隙度和渗透率	(39)
(三) 压缩系数	(41)
(四) 断裂韧性	(42)
(五) 动态特性	(44)

四、原位应力及其确定方法	(44)
(一) 原始应力	(44)
(二) 构造应力	(45)
(三) 其它应力	(46)
(四) 诱导应力	(46)
(五) 原位应力场的重要性	(48)
(六) 矿场方法	(48)
(七) 实验室方法	(50)
第三章 水力压裂模型	(55)
一、绪论	(55)
二、守恒定律和本构方程	(56)
(一) 基本定律	(56)
(二) 本构方程	(57)
三、裂缝扩展模型	(59)
(一) 线性弹性断裂力学 (LEFM)	(59)
(二) 裂缝扩展准则	(61)
(三) 裂缝扩展模型概论	(61)
(四) 二维模型	(63)
(五) 径向模型	(68)
(六) 拟三维模型	(69)
(七) 三维模型	(72)
(八) 注入过程中压力变化趋势	(74)
四、压裂液流动模型	(74)
(一) 液体流变性	(74)
(二) 支撑剂携带	(75)
(三) 滤失	(78)
(四) 热传导	(82)
(五) 可压缩流体	(84)
五、酸压裂	(85)
(一) 反应速度模型	(85)
(二) 酸压应用实例	(87)
(三) 酸液滤失	(88)
(四) 粘性指进	(88)
(五) 酸压裂缝的导流能力	(89)
六、结论	(89)
第四章 压裂液的组成和化学性质	(95)
一、绪论	(95)
二、水基压裂液	(95)
(一) 聚合物	(95)

(二) 交联剂	(98)
三、油基压裂液	(100)
四、多相压裂液	(101)
(一) 泡沫	(101)
(二) 乳状液	(102)
五、添加剂	(102)
(一) 缓冲剂	(103)
(二) 杀菌剂	(103)
(三) 稳定剂	(103)
(四) 破胶剂	(103)
(五) 表面活性剂	(104)
(六) 粘土稳定剂	(104)
(七) 降滤失剂	(106)
六、施工	(106)
(一) 混合	(107)
(二) 质量保证	(107)
第五章 压裂液和支撑剂的特性	(111)
一、绪论	(111)
二、流变学	(111)
(一) 流动的基本关系式	(111)
(二) 流体特性	(112)
(三) 幂律模型	(112)
三、剪切和温度对压裂液性质的影响	(113)
四、泡沫压裂液	(120)
五、携砂液流变性	(121)
六、支撑剂携带	(122)
七、滤失	(125)
(一) 压裂液滤失性能的评价	(126)
(二) 静止状态下的滤失	(126)
(三) 流动状态下的滤失	(127)
八、地层和裂缝的损害	(128)
(一) 粘度与损害的关系	(128)
(二) 稠化聚合物的潜在损害特征	(129)
九、支撑剂	(130)
(一) 砂子	(131)
(二) 树脂涂层砂	(131)
(三) 中等强度支撑剂	(131)
(四) 高强度支撑剂	(131)
(五) 支撑剂的物理性质	(131)

第六章 压裂前的资料要求	(139)
一、绪论	(139)
二、资料类型	(140)
(一) 地层潜在产能	(140)
(二) 裂缝几何尺寸和方位特征	(140)
(三) 压裂液和支撑剂的评价	(141)
三、各种资料来源	(141)
(一) 地质	(141)
(二) 地球物理和岩石物理测井	(141)
(三) 岩心试验	(144)
四、井下动态试验	(147)
(一) 微型压裂试验	(147)
(二) 地面测斜仪	(149)
(三) 井下地震	(150)
五、资料要求的优化	(151)
(一) 探井或初期开发井	(152)
(二) 后期井、即开发井	(152)
六、结论	(153)
第七章 压裂过程中的压力分析	(157)
一、绪论	(157)
二、裂缝压开与闭合期间的物质平衡	(157)
三、压力下降分析	(159)
(一) 应用	(161)
(二) 实例	(162)
四、支撑剂影响	(164)
五、压裂过程中的压力剖面	(164)
(一) 破裂压力实例	(166)
(二) 注入过程中压力的解释	(167)
(三) 注入时的压力模拟	(172)
六、泵入-返排试验	(173)
第八章 加支撑剂压裂设计	(177)
一、绪论	(177)
二、物理系统和数学公式	(178)
(一) 油层供油能力	(178)
(二) 生产系统的动态	(182)
(三) 生产系统(NODAL)分析法	(183)
(四) 裂缝几何尺寸模型——二维解析反演解	(183)
(五) 压裂液的选择	(188)
(六) 支撑剂携带	(188)

(七) 施工限制因素	(193)
(八) 经济分析	(194)
三、优化施工设计程序	(194)
(一) 最优标准	(194)
(二) 实例	(195)
四、压裂设计变量的参数研究	(201)
(一) 压裂设计的比较	(201)
(二) 压裂净现值参数分析	(205)
五、结论	(208)
第九章 压裂设计考虑的因素	(214)
一、绪论	(214)
二、施工规模的限制因素	(214)
(一) 生产管柱的影响	(214)
(二) 裂缝导流能力的影响	(214)
(三) 井距影响	(215)
(四) 临界有效压力的限制	(217)
(五) 粘度影响	(217)
(六) 压裂液效率限制	(218)
三、压裂规模或压裂液和支撑剂用量预定的因素分析	(218)
(一) 支撑剂用量恒定, 最佳 F_{CD}	(218)
(二) 缝长恒定, 最佳 F_{CD}	(218)
(三) 缝长恒定, 导流能力变化	(220)
四、采用高支撑剂浓度的优点	(221)
五、油层性质的影响	(222)
(一) 油层孔隙度的影响	(222)
(二) 高估地层厚度的影响	(223)
(三) 多层性或层状油藏	(224)
六、结论	(224)
第十章 缝高预测和压裂后的测量	(227)
一、绪论	(227)
二、预测缝高的线性断裂力学模拟	(227)
三、缝高预测方法	(229)
(一) 用纵波和横波的速度计算岩石弹性参数	(229)
(二) 用横向弹性模型计算应力	(230)
(三) 用线性断裂力学模型预测缝高增长	(230)
四、测量缝高的方法	(233)
(一) 井温测井	(233)
(二) 伽马测井	(234)
(三) 地震法	(237)

(四) 井下电视.....	(238)
(五) 地层微扫描仪.....	(238)
(六) 噪声测井.....	(238)
(七) 转子流量计测量.....	(238)
五、结论	(238)
第十一章 压裂后的评价和压裂井动态	(241)
一、绪论	(241)
二、选择运用有限导流能力裂缝模型的依据	(242)
三、Cinco和Samaniego(1978,1981上半年)模型	(244)
四、关于损害和堵塞裂缝的评论	(248)
五、压裂后的油井分析	(251)
六、存在井筒储能效应时有限导流能力裂缝井的解释	(254)
七、压裂和未压裂井产量预测的对比	(255)
第十二章 地层损害的性质	(258)
一、绪论	(258)
二、拟损害与地层损害的比较	(258)
(一) 拟表皮效应和油井结构.....	(259)
(二) 拟表皮效应和生产条件.....	(259)
(三) 其它拟损害.....	(259)
三、真地层损害	(260)
四、地层损害的原因	(260)
(一) 钻井损害.....	(260)
(二) 固井损害.....	(262)
(三) 完井液和修井液的损害.....	(264)
(四) 砾石充填的损害.....	(264)
(五) 生产过程中的损害.....	(264)
(六) 增产措施过程中的损害.....	(266)
(七) 注入井的特殊问题.....	(267)
五、各种损害类型	(267)
(一) 乳状液.....	(268)
(二) 润湿性改变.....	(268)
(三) 水堵.....	(268)
(四) 垢.....	(269)
(五) 有机沉淀物.....	(270)
(六) 混合沉淀物.....	(270)
(七) 粉砂和粘土.....	(271)
六、结论	(271)
第十三章 酸化原理	(281)
一、绪论	(281)

二、非流动条件下固-液反应	(281)
(一) 表面反应控制动力学	(282)
(二) 传质控制动力学	(282)
(三) 混合动力学	(282)
(四) 实际岩石	(283)
(五) 温度影响	(283)
(六) 化学计算法	(283)
三、液体流动条件下的固-液反应	(284)
(一) 表面反应控制动力学	(284)
(二) 传质控制动力学	(285)
(三) 混合动力学	(290)
四、其它不稳定性	(290)
(一) 粘性指进	(290)
(二) 与溶解现象有关的不稳定性	(291)
(三) 井筒附近不均匀损害	(291)
(四) 润湿液体的吸入	(291)
(五) 几种现象的综合影响	(292)
五、砂岩酸化的实际意义	(292)
六、碳酸盐岩酸化的实际意义	(292)
(一) 泵排量的影响	(293)
(二) 微乳液的应用	(293)
(三) 液体粘度的影响	(293)
七、结论	(293)
第十四章 砂岩基质酸化	(296)
一、绪论	(296)
(一) 酸液配制的必要性	(296)
(二) 施工设计	(297)
二、酸液选择标准	(297)
(一) 基本概念	(297)
(二) 矿物标准	(297)
(三) 酸液选择方法	(300)
(四) 用于防止产生损害性沉淀物的酸	(300)
(五) 酸液选择的其它标准	(301)
三、决策系统图	(302)
(一) 细粒移动	(302)
(二) 裂缝性地层	(302)
(三) 高渗透含灰质砂岩	(302)
(四) 井筒液体中固相物质形成的损害	(303)
(五) 酸液配方中的其它添加剂	(303)

四、前置液和后置液	(303)
(一) 前置液	(303)
(二) 后置液	(304)
五、砂岩土酸化	(304)
(一) 化学计算方程式	(304)
(二) 副产物溶解度	(306)
(三) 动力学——影响反应速度的因素	(308)
(四) 氢氟酸反应模拟	(310)
六、其它酸液配方	(310)
(一) 氟硼酸	(311)
(二) 顺序土酸	(313)
(三) 含醇土酸	(313)
(四) 土酸加氯化铝的缓速液	(314)
(五) 有机土酸	(314)
(六) 自生土酸系统	(314)
(七) 缓冲液调节的氢氟酸系统	(315)
七、基质酸化设计	(315)
(一) 注入压力	(316)
(二) 最大注入速度的确定	(316)
(三) 基于经验确定的酸液用量	(316)
(四) 基于数学模拟确定的酸液用量	(318)
八、结论	(319)
第十五章 砂岩酸化中的酸液挤入和转向	(323)
一、绪论	(323)
二、挤酸技术	(323)
(一) 化学转向技术	(323)
(二) 机械转向挤入技术	(324)
三、转向剂	(326)
(一) 转向剂分类	(326)
(二) 转向酸处理过程中的主要问题	(327)
四、转向剂效率的实验室评价	(327)
五、油藏条件下转向剂效率预测	(328)
(一) 转向剂滤饼形成的拟表皮	(328)
(二) 转向剂滤饼的增长	(329)
(三) 多油层油藏的井底压力和产量的关系	(329)
(四) 转向处理中酸液分布的实例	(331)
第十六章 基质酸处理评价	(333)
一、绪论	(333)
二、由井口测量换算井底参数	(333)

(一) 井底压力	(333)
(二) 井底注入量	(335)
三、酸处理过程中表皮效应的监测	(335)
(一) Mcleod 和 Coulter 方法	(335)
(二) Paccaloni 方法	(336)
四、Prouvost 和 Economides(1987)方法	(337)
(一) 酸处理过程中表皮因子的推导	(338)
(二) 酸处理前油藏特征的确定	(338)
五、压力响应综述	(339)
六、计算实例	(340)
七、结论	(341)
第十七章 酸压裂原理	(343)
一、绪论	(343)
二、酸压与用支撑剂和不反应液压裂的对比	(343)
三、控制酸压处理效果的因素	(343)
四、酸液滤失	(345)
五、注酸液过程中的酸消耗	(346)
六、酸压施工设计	(348)
(一) 控制酸液滤失的材料和方法	(348)
(二) 控制酸反应速度的材料和方法	(350)
(三) 提高裂缝导流能力的材料和方法	(352)
七、酸压处理模型	(353)
八、酸压设计的应用实例	(353)
附录	(356)
附录A. 岩石特性	(356)
附录B. 压裂液流变性	(357)
附录C. 确定压裂液特性的实验室技术	(364)
符号说明	(367)
美制与法定计量单位换算表	(375)

序 言

当Economides和Nolte博士请我为本书写篇序言时,我觉得选用我本人和D.G.Willis三十年前编写的一篇论文进行转载是最恰当的,因为,其中大部分内容至今仍然适用*。

水力压裂力学

摘要 井下加压的岩石破裂理论研究结果表明:不论压裂液是穿透型还是非穿透型的,造缝应大致垂直于最小应力轴。三个主应力不等,这是地下应力所处的一般状态。对于以正断裂为特征的构造应力释放区来说,最小应力应是水平的;在注入压力小于上覆岩层压力的情况下,造缝应是垂直的。在活跃的构造挤压区,最小应力应垂直并等于上覆岩层压力;在注入压力等于或大于上覆岩层压力的情况下,造缝应是水平的。

当水力压力小于上覆岩层总压力时不可能产生水平裂缝。

上述这些结论与现场压裂经验及实验室试验结果是一致的。

绪 论

油井水力压裂增产技术是近十年来石油工程中取得重大发展的一个领域。1948年,Stanolind 油气公司**的J.B.Clark编写的一篇论文中,把这项技术引用到了石油工业。此后,该技术的应用范围逐步扩大,到1955年底为止,已进行了10万多井次的作业。

从力学角度看,该技术联系到其它三种有关现象(以前在内容广泛的一篇文献中曾阐明过这些现象)。这三种现象是:(1)二次采油中,注水造成的地层破裂;(2)钻井过程中的井漏;(3)挤水泥作业中地层破裂。这些现象似乎都涉及到通过井筒加压形成开启裂缝。当时,对上述这种机理最普遍的解释是,压力沿层面使地层裂开,并抬起了上覆岩层。尽管绝大多数情况压力是已知的,而且这些压力显然都低于上覆岩层总重量(据其密度确定)形成的压力。

上述这一流行的观点表明,造成地层破裂的压力大多小于上覆岩层造成的压力,并推测造缝应该是垂直的。这一观点早在1948年前就曾受到从事水力压裂研究的Dickey和Andresen以及从事挤水泥研究的Walker的质疑。J.B.Clark在一篇介绍水力压裂的文章中

* 选材于经美国石油工程师学会准许再版的M.K.Hubbert和D.G.Willis编著的“水力压裂力学”一书

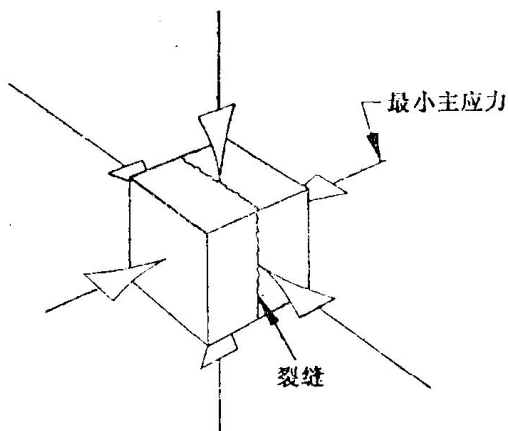
——编者注

** 现为AMOCO公司——编者注

以及后来的Howard和Fast、以及Scott、Bearden、还有Howard都认为：产生水平裂缝时，无须举起上覆岩层全部重量，只需举起“有效上覆岩层”即可。于是，相应来说，要求的压力就比较低了。在讨论Scott及其同事写的论文时，Hubbert指出：正常的地下应力状态，其中主应力是不相等的；在以正断层为特征的构造应力释放区中，最小应力应是水平的。因此，在大多数情况下，在压力小于上覆岩层压力的情况下出现破裂应当是可能的，而且，这种裂缝应是垂直的。Harrison、Kieschnick和McGuire等人根据最小主应力应该呈水平方向这一估计，也非常赞同垂直破裂。

地下应力状态

在进行地下应力研究过程中经常假定应力场呈静水压力状态或近似于静水压力状态，其三个主应力彼此几乎相等，且等于上覆岩层压力。显然，这种假定通常是不能成立的。事实是：在漫长地质时期中，地球一直显示出强烈活动性，在地球内部，岩石已经受断裂活动和褶皱作用而反复变形，到了破坏的极限。要使这种情况发生，要求主应力之间有相当大的差别才行。



因此，地下总的应力状况是三个相互垂直的主应力不相等。在这种条件下，如果岩石内部受到局部施加的流体压力，且压力增大到岩石发生破裂或裂开为止，那么最容易发生破裂的面是垂直于最小主应力的面。这里假设，这个面即是沿此最可能发生裂开的面(见图1)。

因此，为了能根据力学原理预测不同部位岩石的破裂特性，了解可以预期的应力状态的某些方面是有必要的。与这些应力状态有关的最有效证据就是岩石本身被断裂活动或褶皱作用造成的破坏。

Hubbert 在 1951 年发表的一篇论文中就指出过，导致不同类型地质变形的大致应力状态是能推测的。

图2和图3示出了前面为玻璃板的箱子，箱中装的是普通砂。箱中央有一个隔板，拧

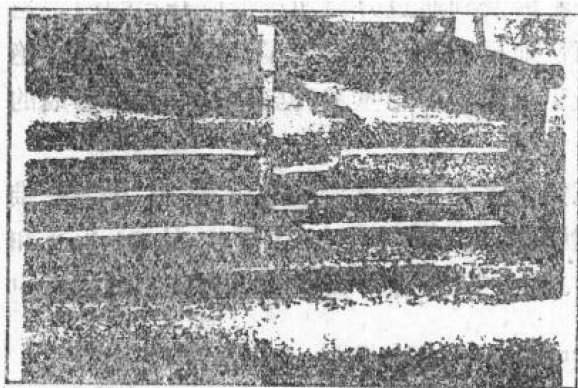


图2 显示正断层的砂箱试验

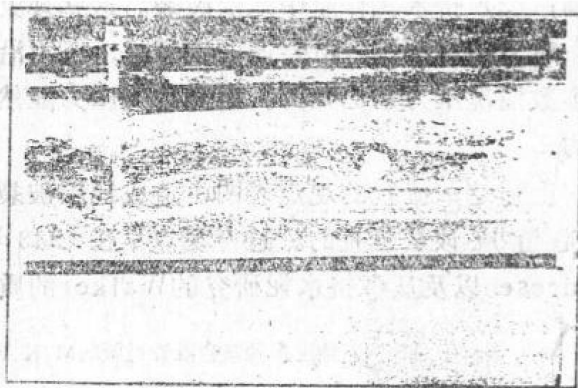


图3 显示逆断层的砂箱试验

动一个丝杠，隔板就能从左向右移动。白线条表示无力学意义的粉状熟石膏。当隔板向右移动时，在左室中显示出一条倾角约 60° 的正断层（见图2）。隔板进一步向右移动，右室中出现一系列倾角约 30° 的逆断层（见图3）。

砂层破裂的同时，就显示出应力的一般特性（见图4）。为了采用通常的惯用符号，分别用 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 表示最大、中等和最小主应力（这里系指压应力），在左室中， σ_3 是水平应力，它随隔板向右移动而减小， σ_1 表示垂直应力，它等于上覆物质的压力。然而，在右室， σ_1 表示水平应力，它随隔板向右移动而增大。 σ_3 表示垂直应力，等于上覆物质的压力。第三种破裂类型，即所谓的横推断裂，没有在砂箱试验中得到证实。这种情况出现在最大和最小主应力都是水平应力的时候，破裂则是沿垂直面发生水平运动时出现的。在所有三种断层中，破裂都是在 σ_1 和 σ_3 之间呈某种临界关系时发生的……。

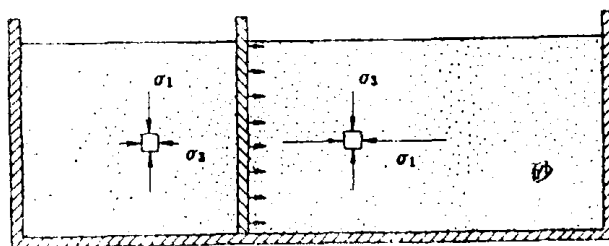


图4 表示砂箱中大致应力状态的剖面

确定会诱发破裂的剪应力与正应力的合应力则是进一步要作的事情。

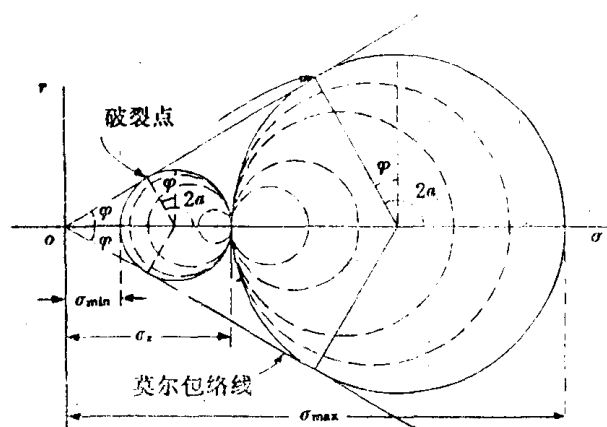


图5 莫尔图

该图表示在给定垂直应力 σ_z 下水平应力的可能范围。水平应力值变化范围大致为垂直应力值的 $\frac{1}{3}$ （相对于正断裂）到垂直应力值的3倍（相对于逆断裂）。

断裂则发生在与最小应力成 $(45^\circ + \phi/2)$ 角的一个面上。对内摩擦角为 30° 的砂层来说，正断层的倾角为 60° ，这与上述做的试验相符。对逆断裂情况来说，最小主应力可能是垂直的，且可能仍等于上覆岩层压力，而水平应力在达到不稳定条件之前是逐渐增加的，断裂则发生在与最小主应力成 $(45^\circ + \phi/2)$ 角的一个面上，或发生在与水平应力成 $(45^\circ - \phi/2)$ 角的一个面上。对砂层来说，该断层的倾角约 30° ，这与试验又相符。

可见，对内摩擦角为 30° 的砂层来说，当最大主应力达到约三倍于最小主应力时，不论哪一种情况都将出现破裂，而且破裂将是沿着与最小主应力约成 60° 角的一个面发生的。另外，对于一固定不变的垂直应力 σ_z 来说，水平应力值可以是介于 $\frac{1}{3}\sigma_z$ 和 $3\sigma_z$ 范围之间的任意值。