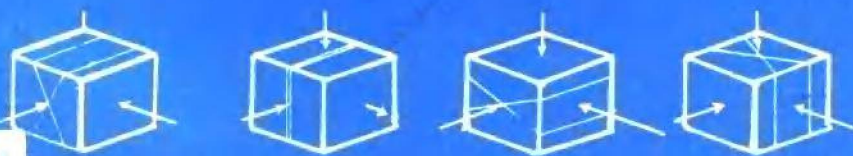
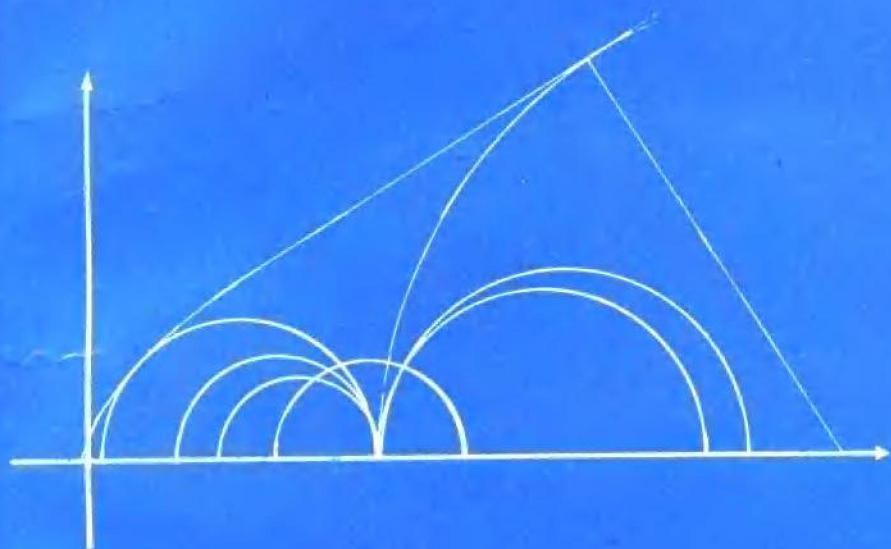


含油盆地构造力学原理

王平 著



石油工业出版社

- 073882



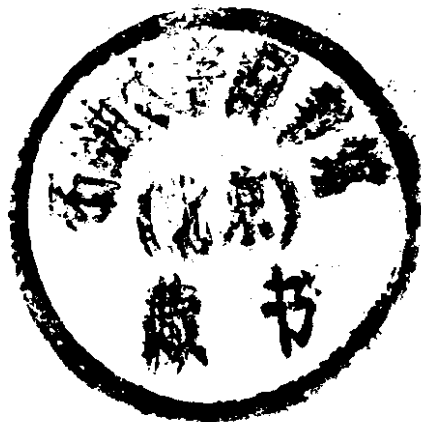
含油盆地构造力学原理

王平 著



200289641

5320/15



石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

本书阐述了一种新的构造力学理论。与以往理论不同之处在于强调多种应力叠加后的总应力是构造作用的决定因素。解决了构造力、构造应力(张量)、地应力(张量)与结构面应力四者的区别和相互关系。指出了影响地应力的因素。提出了地应力分布规律的研究方法。分析了不同性质构造力作用下含油盆地的地应力特点、类型、分布规律及相应的构造特征,从而阐明了许多构造现象的力学机理。本书适合于从事石油勘探开发的地质研究人员以及其他从事构造地质工作的人员阅读。也可作为有关院校师生的重要参考书。

含油盆地构造力学原理

王 平 著

*

石油工业出版社出版

(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

北京顺义燕华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 $5\frac{1}{8}$ 印张 132 千字 印 1-3,000

1993 年 11 月北京第 1 版 1993 年 11 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0940-4 / TE · 879

定价: 4.60 元

引 言

油气运移和聚集，都是受盆地内构造控制的，石油勘探和开发都离不开对构造的调查和研究。构造工作是石油地质的基础工作之一。众所周知，构造的发生和发展都是构造力作用在岩体上的结果，只有从力学入手才能理解构造发生和发展的机理，找到构造现象的内在联系和展布规律，从而正确认识构造，取得一定程度的预见性。这是石油勘探开发实践向构造力学提出的要求。如果没有符合盆地实际的构造力学观念，不用说进行科学的预测，就是利用实际资料来构组地下构造形态的基础工作也常常会误入歧途。

含油盆地是研究构造力学非常有利的地方。一方面这里有非常丰富的地球物理资料，密如蛛网的地震测线以及成片的三维地震取得了数量庞大的地下信息。又有成千上万口钻孔揭露的地质资料，使我们对数千米深度以内的三维构造有了深入细致的了解。另一方面含油盆地一般都是构造比较简单的地区。有许多盆地只经历了一次构造旋回，这里构造现象和构造力学之间的关系较少受其他因素的干扰。不象经历多次构造旋回的地区那样，多期构造形迹交叉叠加在一起，使问题大大复杂化。含油盆地石油勘探开发实践对构造力学理论的需求又是推动这门学科前进的强大动力。本书不涉及大地构造问题，不涉及构造力的成因，而只讨论在构造力作用下，含油气盆地内的构造力学问题。

将力学用到地质领域，用力学原理来解释构造现象是地质界多年来的努力目标。我国著名地质学家李四光用很大力量来倡导此项工作，并亲自从事此项研究，作出了重大贡献。在“地质力学”的名义下提出了他的大地构造学说，用力学观念来解释各级构造单元的展布规律，提出了多种构造体系^(1, 2)。他的成就是

大家熟知的。限于当时我国石油勘探开发程度，他对含油盆地内部构造力学的论述较少。他虽然讲到了构造应力问题。但在构造体系的研究中并未涉及各种构造力作用下的构造应力和地应力的特点。

60年代以后随着我国石油勘探开发的进展，对含油盆地构造力学研究和讨论日益增多，但基本上还是沿袭着将构造力直接与构造展布相联系的方法，而很少涉及应力问题。近年来用构造应力分析含油盆地构造规律已经成为一种趋向。这方面的研究很多，都是对某一区域构造应力场的讨论，例如石油地质文集(1979)中的许多文章⁽¹⁸⁾，又如80年代以来，赵从俊对川东应力场⁽¹⁹⁾、郭忠铭等对鄂尔多斯西缘和河套弧形地堑系^(11、24)、刘振等对廊固凹陷⁽²⁵⁾，和陈大贤对沧东断裂的讨论⁽²⁶⁾。但所有这些讨论都只谈到了构造应力而没有谈到总地应力。

数十年来作者一直注意学习前人有关构造力学的理论和方法，希望用来解释油田的构造现象，但是，发现很难用这些理论使各类构造现象都得到合理解释。

实践迫使我们探索新的路子。经过多年的努力，终于发现了问题的症结。原来作为过去构造力学基础的力学观念不够确切。从力学观念来说，他们研究物体变形时只考虑了新加上去的应力，而忽视了原来物体所承受的应力。实际上物体变形是作用在物体上所有应力的总和总应力所决定的，目前流行的构造力学的基本特征都是将构造现象直接与构造应力相比较，而忽视了同时作用在岩体上的其他应力。实际上构造应力只是总地应力的一个组成部分，而构造现象是总地应力决定的。构造应力是通过改变总地应力来间接决定构造现象的。问题在于没有分清构造力、构造应力（张量）总地应力（张量）与结构面应力四者之间的区别和联系。本书全面地阐述了构造力、构造应力、总地应力、与结构面应力之间的区别和关系，用它们来阐述构造现象的形成机理和规律。本书所提出的构造力学原理与目前流行的构造力学间的

分歧是在进入构造力学领域之前的分歧，来源于力学观念上的差别。二者建立在不同的力学观念上。因此本书所提出的构造力学原理作为一个体系是与目前流行的构造力学观念根本不同的。

本书的理论是建立在前人成果基础上的，是消化和吸收了过去构造力学观念中有用的部分，把它们结合在一起形成一个体系而已。当然有一些是经过修改和补充。从下述情况可以看出这个脉络。当然有些概念是笔者创立的。

早在 1951 年 Anderson E. M.⁽²⁹⁾ 就利用应力状态来解释断层的产生，指出正断层、逆断层、平移断层分别与三种应力状态相对应。当时他并未明确指出他所说的应力状态是构造应力还是总地应力，因为他并未讨论到二者的区别与关系。我们在他的基础上，发展成为地应力类型的划分。补充了 Ib 类型（见本书第二章第四节），这是他没有注意到的。

数十年来，围绕着地震预报和工程地质，包括石油工业中的水力压裂，做了大量的地应力研究工作，发展了许多地应力测量方法，开展了规模巨大的地应力测量工作，取得了大量数据，因而对地应力的分布有了较多的认识。瑞士构造学家海穆首先论证了大地静力场下的应力状态[5]。指出垂向压应力等于上覆岩体重量造成的压力：

$$\sigma_z \approx \gamma H$$

水平压力为：

$$\sigma_x = \sigma_y \approx \lambda \gamma H$$

式中 γ 为岩体的容量， H 为深度。 $\lambda = \frac{\mu}{1-\mu}$ 为横压系数， μ 为岩石泊松比一般在 0.3 左右。这里所说大地静力场就是没有构造力作用的区域。裴伟⁽⁵⁾ 指出了大地动力场的存在，他说：“在这里除了重力场，即上覆岩层的重量外，应力还由其他构造的或综合的因素（如新构造运动）所造成”，这些观念里已经包含着地应力是由重力引起的应力，构造应力等多种应力叠加而成的观念

了。然而这样的观念并未为构造力学家们注意，没有扩展到对地质历史上地应力的认识和运用到构造力学分析中去。

Van Der Knapp (1959) 研究了孔隙岩石的非线性压缩问题，认为在巨大的压力下岩石的压缩是非线性的^[53]。在此基础上，Dirk Teeuw^[33] (1971) 在三轴压缩试验中令水平形变为零，得出垂向应力 σ_z 与水平应力 σ_H 的关系：

$$\frac{\sigma_H}{\sigma_z} = \left(\frac{\mu}{1-\mu} \right)^{1/n}$$

这实际上就是水平方向不自由条件下，重力垂向应力与重力水平应力的关系。这是有实验为依据的，因此海穆论证的大地静力场的水平应力计算公式应据此加以修正。

Terzaghi (1923) 引入了有效应力观念，认为在孔隙介质中，岩石变形是由有效应力，即环境应力与流体压力的差值决定的^[39]。Hubbert 1959 年开始把这个观念应用到逆掩断层的产生机理中^[47]。Gretener 特别强调孔隙流体压力在地质上的重要性 (1969)^[37]，并且在 1977 年系统地论述了孔隙流体压力的影响及其在构造地质上的应用^[39]。

Gretener 在 1969 年作了把挤压构造应力流体压力与重力应力叠加在一起来进行观察的尝试^[38]。这实际上已经解决了构造应力、流体压力、重力应力与总地应力的关系问题。他作了一个设想的垂向剖面来研究 σ_x , σ_y , σ_z 的纵向变化。这实际上已经显示出深度和岩石物理性质（包括弹性模量及泊松比）对总地应力及其类型的影响。应该说他这个尝试对构造力学来说是一个突破性的进展，然而他未能把这个突破性进展和杰出思维发展成为系统的构造力学理论。他接触到了构造应力与总地应力的关系问题，但未能明确地指出来并加以讨论。他接触到了埋深及岩性对总地应力及其类型的影响问题，但未能从地应力及其类型的影响因素和分布规律的高度来进行系统的分析。他未能解决构造应力

的类型和各类构造应力的根本特点，所以忽略了不同构造应力作用下地应力分布的研究。后者也许是他未能充分利用这个突破性进展的主要原因。总之，他提出了一个杰出的思想，实现了突破，但未能把这个杰出思想和突破性进展发展成一套系统的构造力学理论，把这项工作留给了后来者。

笔者正是基于以上思想和认识前进的。如果我们能有所前进也是与前人思想和成果分不开的。

目 录

引言	(1)
第一章 基本力学概念	(6)
(一) 应力与应力张量	(6)
(二) 物体的形变	(19)
第二章 地壳应力状态分析	(34)
(一) 地壳环境的一些特点	(34)
(二) 地壳内几种重要的子应力状态	(38)
(三) 子应力状态的叠加	(48)
(四) 地应力状态的分布	(50)
(五) 地应力的变迁	(60)
(六) 岩石强度对应力状态的限制	(60)
第三章 挤压盆地	(64)
(一) 地应力类型的临界条件	(64)
(二) 三个地应力带	(68)
(三) 岩性的影响	(70)
(四) 不稳定带地应力状态	(71)
(五) 不稳定带构造特征	(74)
(六) II下带和III带后上部	(77)
(七) 超稳定区	(77)
(八) 构造带的发育状况	(78)
(九) 岩体的向上运动	(79)
第四章 拉张盆地	(81)
(一) 地应力类型	(81)
(二) 断裂占优势	(85)
(三) 断层的性质	(86)

(四) 拉张构造力的大小	(86)
(五) 正断层走向的多变性	(87)
(六) 岩体的向下运动	(89)
(七) 滚动构造机理	(90)
(八) 复杂程度的分布规律	(93)
(九) 岩性的影响	(95)
第五章 扭性盆地	(99)
(一) 地应力分布的一般规律	(99)
(二) 张扭和单扭盆地	(105)
(三) 弱压扭盆地	(109)
(四) 强压扭盆地	(113)
第六章 断层面正应力	(117)
(一) 断层发生时地应力类型	(117)
(二) 断裂的影响	(118)
(三) 断层活动前后应力变化	(119)
(四) 构造力消失以后	(121)
(五) 埋深的影响	(122)
(六) 新的构造旋回	(123)
(七) 岩性的影响	(124)
第七章 构造裂缝	(125)
(一) 微裂缝、显裂缝和断层	(125)
(二) 裂缝的力学类型	(128)
(三) 裂缝的可变性	(130)
(四) 裂缝性砂岩储层的类型	(131)
(五) 开发中的构造力学问题	(133)
第八章 构造力学分析	(140)
(一) 构造力学分析方法	(140)
(二) 区别四个层次的问题	(143)
(三) 影响构造力学分析的一些因素	(148)

结束语·····	(151)
参考文献·····	(152)

引 言

油气运移和聚集，都是受盆地内构造控制的，石油勘探和开发都离不开对构造的调查和研究。构造工作是石油地质的基础工作之一。众所周知，构造的发生和发展都是构造力作用在岩体上的结果，只有从力学入手才能理解构造发生和发展的机理，找到构造现象的内在联系和展布规律，从而正确认识构造，取得一定程度的预见性。这是石油勘探开发实践向构造力学提出的要求。如果没有符合盆地实际的构造力学观念，不用说进行科学的预测，就是利用实际资料来构组地下构造形态的基础工作也常常会误入歧途。

含油盆地是研究构造力学非常有利的地方。一方面这里有非常丰富的地球物理资料，密如蛛网的地震测线以及成片的三维地震取得了数量庞大的地下信息。又有成千上万口钻孔揭露的地质资料，使我们对数千米深度以内的三维构造有了深入细致的了解。另一方面含油盆地一般都是构造比较简单的地区。有许多盆地只经历了一次构造旋回，这里构造现象和构造力学之间的关系较少受其他因素的干扰。不象经历多次构造旋回的地区那样，多期构造形迹交叉叠加在一起，使问题大大复杂化。含油盆地石油勘探开发实践对构造力学理论的需求又是推动这门学科前进的强大动力。本书不涉及大地构造问题，不涉及构造力的成因，而只讨论在构造力作用下，含油气盆地内的构造力学问题。

将力学用到地质领域，用力学原理来解释构造现象是地质界多年来的努力目标。我国著名地质学家李四光用很大力量来倡导此项工作，并亲自从事此项研究，作出了重大贡献。在“地质力学”的名义下提出了他的大地构造学说，用力学观念来解释各级构造单元的展布规律，提出了多种构造体系^(1, 2)。他的成就是

大家熟知的。限于当时我国石油勘探开发程度，他对含油盆地内部构造力学的论述较少。他虽然讲到了构造应力问题。但在构造体系的研究中并未涉及各种构造力作用下的构造应力和地应力的特点。

60年代以后随着我国石油勘探开发的进展，对含油盆地构造力学研究和讨论日益增多，但基本上还是沿袭着将构造力直接与构造展布相联系的方法，而很少涉及应力问题。近年来用构造应力分析含油盆地构造规律已经成为一种趋向。这方面的研究很多，都是对某一区域构造应力场的讨论，例如石油地质文集(1979)中的许多文章⁽¹⁸⁾，又如80年代以来，赵从俊对川东应力场⁽¹⁹⁾、郭忠铭等对鄂尔多斯西缘和河套弧形地堑系^(11、24)、刘振等对廊固凹陷⁽²⁵⁾，和陈大贤对沧东断裂的讨论⁽²⁶⁾。但所有这些讨论都只谈到了构造应力而没有谈到总地应力。

数十年来作者一直注意学习前人有关构造力学的理论和方法，希望用来解释油田的构造现象，但是，发现很难用这些理论使各类构造现象都得到合理解释。

实践迫使我们探索新的路子。经过多年的努力，终于发现了问题的症结。原来作为过去构造力学基础的力学观念不够确切。从力学观念来说，他们研究物体变形时只考虑了新加上去的应力，而忽视了原来物体所承受的应力。实际上物体变形是作用在物体上所有应力的总和总应力所决定的，目前流行的构造力学的基本特征都是将构造现象直接与构造应力相比较，而忽视了同时作用在岩体上的其他应力。实际上构造应力只是总地应力的一个组成部分，而构造现象是总地应力决定的。构造应力是通过改变总地应力来间接决定构造现象的。问题在于没有分清构造力、构造应力（张量）总地应力（张量）与结构面应力四者之间的区别和联系。本书全面地阐述了构造力、构造应力、总地应力、与结构面应力之间的区别和关系，用它们来阐述构造现象的形成机理和规律。本书所提出的构造力学原理与目前流行的构造力学间的

分歧是在进入构造力学领域之前的分歧，来源于力学观念上的差别。二者建立在不同的力学观念上。因此本书所提出的构造力学原理作为一个体系是与目前流行的构造力学观念根本不同的。

本书的理论是建立在前人成果基础上的，是消化和吸收了过去构造力学观念中有用的部分，把它们结合在一起形成一个体系而已。当然有一些是经过修改和补充。从下述情况可以看出这个脉络。当然有些概念是笔者创立的。

早在 1951 年 Anderson E. M.⁽²⁹⁾ 就利用应力状态来解释断层的产生，指出正断层、逆断层、平移断层分别与三种应力状态相对应。当时他并未明确指出他所说的应力状态是构造应力还是总地应力，因为他并未讨论到二者的区别与关系。我们在他的基础上，发展成为地应力类型的划分。补充了 Ib 类型（见本书第二章第四节），这是他没有注意到的。

数十年来，围绕着地震预报和工程地质，包括石油工业中的水力压裂，做了大量的地应力研究工作，发展了许多地应力测量方法，开展了规模巨大的地应力测量工作，取得了大量数据，因而对地应力的分布有了较多的认识。瑞士构造学家海穆首先论证了大地静力场下的应力状态[5]。指出垂向压应力等于上覆岩体重量造成的压力：

$$\sigma_z \approx \gamma H$$

水平压力为：

$$\sigma_x = \sigma_y \approx \lambda \gamma H$$

式中 γ 为岩体的容量， H 为深度。 $\lambda = \frac{\mu}{1-\mu}$ 为横压系数， μ 为岩石泊松比一般在 0.3 左右。这里所说大地静力场就是没有构造力作用的区域。裴伟⁽⁵⁾ 指出了大地动力场的存在，他说：“在这里除了重力场，即上覆岩层的重量外，应力还由其他构造的或综合的因素（如新构造运动）所造成”，这些观念里已经包含着地应力是由重力引起的应力，构造应力等多种应力叠加而成的观念

了。然而这样的观念并未为构造力学家们注意，没有扩展到对地质历史上地应力的认识和运用到构造力学分析中去。

Van Der Knapp (1959) 研究了孔隙岩石的非线性压缩问题，认为在巨大的压力下岩石的压缩是非线性的^[53]。在此基础上，Dirk Teeuw^[33] (1971) 在三轴压缩试验中令水平形变为零，得出垂向应力 σ_z 与水平应力 σ_H 的关系：

$$\frac{\sigma_H}{\sigma_z} = \left(\frac{\mu}{1-\mu} \right)^{1/n}$$

这实际上就是水平方向不自由条件下，重力垂向应力与重力水平应力的关系。这是有实验为依据的，因此海穆论证的大地静力场的水平应力计算公式应据此加以修正。

Terzaghi (1923) 引入了有效应力观念，认为在孔隙介质中，岩石变形是由有效应力，即环境应力与流体压力的差值决定的^[39]。Hubbert 1959 年开始把这个观念应用到逆掩断层的产生机理中^[47]。Gretener 特别强调孔隙流体压力在地质上的重要性 (1969)^[37]，并且在 1977 年系统地论述了孔隙流体压力的影响及其在构造地质上的应用^[39]。

Gretener 在 1969 年作了把挤压构造应力流体压力与重力应力叠加在一起来进行观察的尝试^[38]。这实际上已经解决了构造应力、流体压力、重力应力与总地应力的关系问题。他作了一个设想的垂向剖面来研究 σ_x , σ_y , σ_z 的纵向变化。这实际上已经显示出深度和岩石物理性质（包括弹性模量及泊松比）对总地应力及其类型的影响。应该说他这个尝试对构造力学来说是一个突破性的进展，然而他未能把这个突破性进展和杰出思维发展成为系统的构造力学理论。他接触到了构造应力与总地应力的关系问题，但未能明确地指出来并加以讨论。他接触到了埋深及岩性对总地应力及其类型的影响问题，但未能从地应力及其类型的影响因素和分布规律的高度来进行系统的分析。他未能解决构造应力

的类型和各类构造应力的根本特点，所以忽略了不同构造应力作用下地应力分布的研究。后者也许是他未能充分利用这个突破性进展的主要原因。总之，他提出了一个杰出的思想，实现了突破，但未能把这个杰出思想和突破性进展发展成一套系统的构造力学理论，把这项工作留给了后来者。

笔者正是基于以上思想和认识前进的。如果我们能有所前进也是与前人思想和成果分不开的。

第一章 基本力学概念

(一) 应力与应力张量

1. 力的内效应与外效应

力是物体间相互的机械作用，这种作用可使物体的运动状态发生变化，亦可使物体发生变形。力不能脱离物体而存在。

力使物体运动状态发生变化的效应称为力的外效应，而力使物体产生变形的效应称为力的内效应。

由经验可知，力对于物体作用的效应，决定于力的大小、方向和作用点三个要素。这三个要素中任何一个改变时，力的效应也随之改变。力的量纲为 LMT^{-2} ，国际单位的基本单位为牛(N)，即 $kg \cdot m / s^2$ 。

发生外效应的作用力，都不会对物体产生内效应。只有当作用力受到抵抗，亦即作用于同一物体上的两个力处于平衡状态而不发生外效应时，才在物体内部产生内效应。作用于物体上两个力处于平衡状态的必要和充分条件是两力大小相等，方向相反，作用在同一直线上。此时物体内部的各质点间的相互作用力发生了改变，这种改变称为附加内力，简称内力。图 1-1 所示 F_1 和 F_2 为在相反方向作用于物体上的两个大小相等的外力。图中 a 与 b 为物体内部相邻的两个质点，由于 F_1 与 F_2 的作用，在 a 与 b 的分界面上增加了一对相互作用力 f ，这个力就是附加内力，用一对小箭头表示。附加内力的分布密度称为应力。应力的量纲为 $L^{-1}MT^{-2}$ ，国际单位的基本单位为帕斯卡 (Pa)，即 $M^{-1}KG.S^{-2}$ 。

附加内力是物体内部相邻质点沿分界面的相互作用力，服从作用与反作用定律，即“两物体间相互作用力总是大小相等，方向相反，沿同一作用线，并分别作用在这两个物体上”。附加内