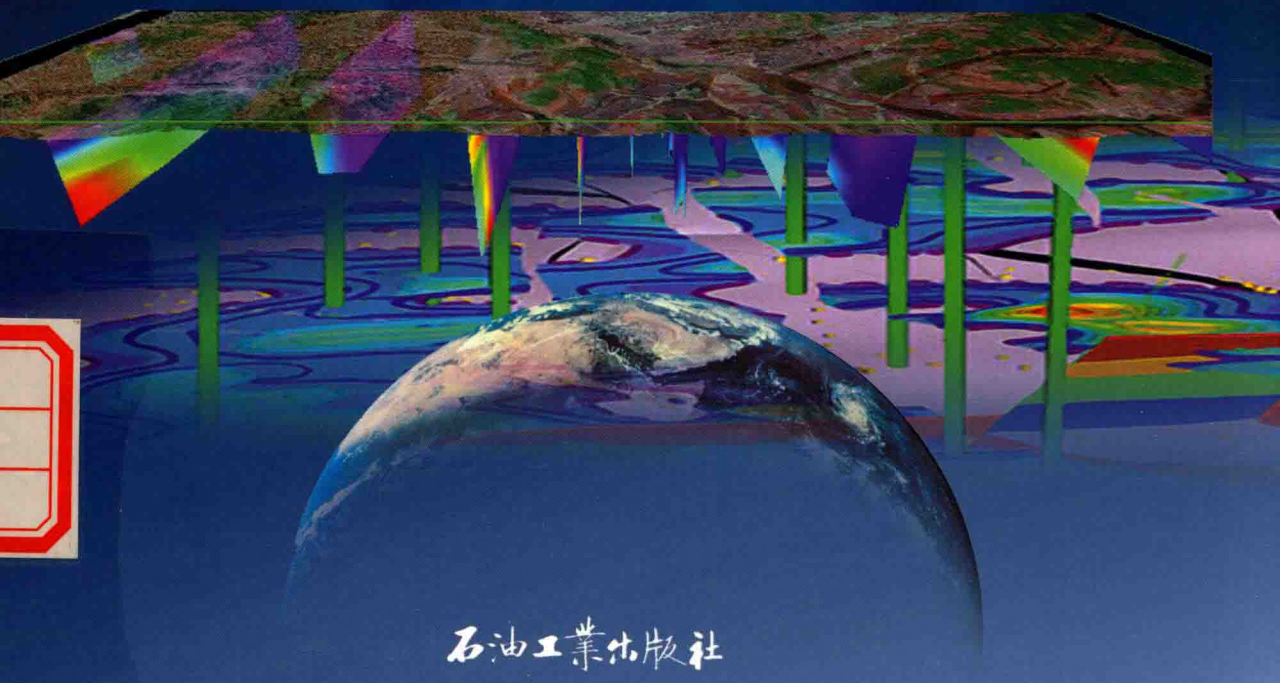


# 油藏地球物理

桂志先 高刚 编著

RESERVOIR GEOPHYSICS



石油工业出版社

# 油藏地球物理

桂志先 高 刚 编著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书阐述了油藏地球物理的基本理论、方法与应用。主要内容包括：油藏地球物理的岩石物理基础；地震波属性的概念、地球物理意义、分类及其应用概述，几种典型地震波属性在储层预测中的应用，如AVO特征及应用、地震波主特征参数的提取与应用、地震波吸收系数的提取与应用、地震相干体的计算与应用，图像边缘检测技术及其在地震勘探中的应用；统计模式识别技术、神经网络原理及其在储层预测中的应用；地震波阻抗反演方法理论与应用；基于叠前地震资料的储层预测原理与方法；四维地震勘探技术与应用；多波多分量地震储层描述与应用等。

本书具有一定的理论与应用价值，可以作为从事地球物理研究与应用的技术人员和高校教师的参考书，并可作为研究生教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

油藏地球物理 / 桂志先, 高刚编著 .

北京 : 石油工业出版社, 2015.9

ISBN 978-7-5183-0468-4

I. 油…

II. ①桂…②高…

III. 油藏—地球物理学

IV. P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 251195 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

编辑部：(010) 64523533 图书营销中心：(010) 64523633

经 销：全国新华书店

印 刷：北京中石油彩色印刷有限责任公司

---

2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本：1/16 印张：11

字数：280 千字

---

定价：78.00 元

(如出现印装质量问题，我社图书营销中心负责调换)

**版权所有，翻印必究**

# 前 言

地球物理勘探实质上就是用物理学的理论方法解决地质问题。根据物理学理论方法的不同，地球物理勘探方法主要分为重力勘探、电法勘探、磁法勘探、地震勘探等。油气资源探测，尤其是油气开发阶段，主要依靠地震勘探。油藏地球物理方法的实质就是用地震勘探方法解决油气田勘探与开发中储层的问题。地震勘探起源于20世纪10年代，当时的地震勘探方法是折射波法勘探，探测地层深度较浅，精度相对较低；30年代地震勘探发展到反射波法勘探，并使用组合检波技术；50年代出现了多次覆盖技术，产生了模拟磁带地震记录仪；60年代出现了滤波技术、反褶积技术，产生了数字地震记录仪；70年代，出现了地震数字化技术与地震资料数字处理技术、振幅相对保持的“亮点”技术、地震资料的偏移归位成像技术、VSP技术等；80年代，三维地震勘探技术、数字处理技术进一步发展，波动方程偏移技术逐步成熟，后期，在地震资料解释方面，出现了人机联作技术；90年代以后，地震储层预测技术发展迅速，并与高速发展的计算机技术交会，处理能力与精度大幅度提高，为油藏地球物理学的形成与发展奠定了基础。

随着地震勘探的发展，地震资料处理方面，在常规处理的基础上，逐步形成高分率精确成像、振幅相对保持等核心技术；地震资料解释方面，由单一利用同相轴的形态解决地层构造形态、断层分布等问题，逐步发展到利用地震记录的振幅、频率、波形等地震波属性及地震属性分析技术、波阻抗反演技术、模式识别等储层预测技术解决地层岩性、储层参数与油气分布等问题。由此自然形成了油藏地球物理或储层地球物理这门学科，主要用在油气田开发阶段。油藏地球物理也是开发地震的延伸。

地震资料的使用贯穿于油气勘探与开发的全过程。地震资料的解释分为构造解释、岩性解释、储层参数预测等。地震勘探以精确成像和地层构造为目标。在油气勘探阶段，查明地层构造的主要方法与技术手段称为勘探地球物理。进入到油气田开发阶段，特别是开发后期，需要寻找岩性油气藏、预测油气与储层参数分布，需要应用地震资料作岩性解释、储层参数（孔隙度、渗透率、饱和度、砂岩厚度、油气分布等）预测等，这一阶段的地震勘探方法称为油藏地球物理。由勘探地球物理到油藏地球物理是地球物理学发展的必然过程。

20世纪70年代，地震勘探数字化技术与地震资料数字处理技术等全面发展，出现了振幅相对保持的“亮点”技术，开始了应用地震资料直接寻找油气，揭开了油藏地球物理技术的序幕。“亮点”技术的实质是应用地震波的振幅属性作烃类检测。之后出现了三瞬（瞬时振幅、瞬时频率、瞬时相位）、道积分、地震资料的偏移归位成像等技术。80年代，数字处理技术进一步发展，三维地震勘探技术、波动方程偏移技术逐步成熟，出现了地震地

层学、层序地层学，以及 AVO 技术、波阻抗技术。在地震资料解释方面，出现了人机联作技术。90 年代以后，地震勘探各方面技术发展迅速，主要有：3C（三分量）技术、用地震振幅等属性研究储层、用地震速度研究孔隙度、预测地层压力、多波勘探技术、模式识别、模糊判别、神经网络技术、分形技术、波形聚类、地震岩性模拟（SLIM）、相干体计算及应用、反演吸收系数预测含气层、各种地震反演（递推法带限反演、稀疏脉冲法阻抗反演、以模型为基础的宽带反演）。21 世纪出现的技术包括：谱分解与时频分析、地震属性体、地层切片、吸收系数反演预测含气储层、弹性阻抗反演、横波阻抗、纵波阻抗与密度同时反演与岩石物理参数预测、流体识别技术。储层预测方法的发展为油藏地球物理学的形成与发展奠定了基础。

油藏地球物理研究的内容，是在地震资料精细构造解释的基础上，通过不同的数学运算提取目的层地震波属性，应用地震属性分析、模式识别等技术，预测砂体分布、油气分布与储层参数分布等；或利用波阻抗反演技术、图像边缘检测等其他技术，预测砂体分布、油气分布与储层参数分布等。

本书主要描述的就是油藏地球物理的基本理论、方法与应用，主要内容有：油藏地球物理的岩石物理基础；地震波属性的概念、地球物理意义、分类及其应用概述，几种典型地震波属性在储层预测中的应用，如 AVO 特征及应用、地震波主特征参数的提取与应用、地震波吸收系数的提取与应用、地震相干体的计算与应用，图像边缘检测技术及其在地震勘探中的应用；统计模式识别技术、神经网络原理及其在储层预测中的应用；地震波阻抗反演方法理论与应用；基于叠前地震资料的储层预测原理与方法；四维地震勘探技术与应用；多波多分量地震储层描述与应用等。

书中第 1 章第 3、4 节，第 2 章，第 4 章，第 5 章，第 7 章，第 8 章，第 9 章由桂志先撰写，第 1 章第 1、2 节，第 3 章，第 6 章由高刚撰写，全书由桂志先统稿。由于水平所限，书中不妥或谬误之处，敬请各位读者批评指正！

本书主要研究成果得到了国家及油田有关部门的大力支持，主要资助的项目有：

国家自然科学基金项目（40774072 和 41074104）；

国家油气重大专项（2008ZX05013 和 2011X05006-004）；

国家“973”项目（2009cb219404 和 2013cb228605）。

# 目 录

<b>1 油藏地球物理的岩石物理基础</b> .....	1
1.1 常用的岩石物理参数 .....	2
1.2 岩石物理的基础理论 .....	3
1.3 地震波速度的影响因素及变化规律 .....	13
1.4 地震波的衰减 .....	22
<b>2 地震波属性及应用</b> .....	28
2.1 地震属性分类及其地质含义 .....	28
2.2 常用地震波属性的地球物理意义与计算 .....	31
2.3 地震波属性的优化 .....	34
2.4 几种典型地震波属性原理及应用 .....	35
2.5 图像边缘检测技术与应用 .....	45
<b>3 地震谱分解烃类检测技术</b> .....	52
3.1 谱分解的数学基础 .....	52
3.2 谱分解识别地震薄层 .....	63
<b>4 模式识别技术及其在储层预测中的应用</b> .....	75
4.1 统计模式识别技术的基本原理与应用 .....	75
4.2 人工神经网络基本原理与应用 .....	77
<b>5 地震波阻抗反演方法理论与应用</b> .....	83
5.1 递推波阻抗反演方法 .....	83
5.2 基于模型的波阻抗反演方法 .....	84
<b>6 地震资料叠前方法与技术</b> .....	93
6.1 AVO 技术原理 .....	93
6.2 AVO 正演模拟 .....	106
6.3 测井参数敏感性分析 .....	110
6.4 AVO 属性反演 .....	112
6.5 叠前弹性波阻抗反演 .....	116
<b>7 其他储层预测方法及应用概述</b> .....	128
7.1 相关滤波及其在储层预测中的应用 .....	128
7.2 多元统计方法在储层预测中的应用 .....	130
7.3 基于灰色系统的地震储层预测方法 .....	131
7.4 分形理论储层预测方法 .....	134

<b>8 四维地震勘探技术与应用</b> .....	140
8.1 四维地震的可行性与研究前提 .....	141
8.2 四维地震资料处理方法与原则 .....	143
8.3 四维地震资料解释方法 .....	143
8.4 四维地震资料应用实例 .....	147
<b>9 多波多分量地震勘探</b> .....	150
9.1 多波地震勘探的理论基础 .....	150
9.2 多波地震资料采集 .....	154
9.3 多波地震资料处理 .....	156
9.4 多波地震资料解释和反演 .....	160
<b>参考文献</b> .....	165

# 1 油藏地球物理的岩石物理基础

20 世纪 40 年代至今，地震勘探技术和成像方法不断取得新的突破，同时，地震解释也经历了构造解释、地层解释、岩性分析和岩石物理分析等多个发展阶段。

先进的地震勘探技术提供了高品质的地震资料，从中可以获取除反射界面时间（深度）信息以外的更多信息。20 世纪 70 年代，勘探地球物理学家利用“亮点（bright spots）”技术第一次从地震资料中获得构造之外的信息。计算能力的提高、地震处理解释技术的进步和叠前资料品质的不断改善，使振幅随偏移距变化的特征受到了勘探地球物理学家的重视。岩石物理学在地震数据与油气特征和储集参数之间架起了沟通的桥梁，使得地震技术的应用领域被大大拓宽了。近年来，岩石物理新技术在油气勘探开发中发挥了重要作用，促进了时延地震油藏监测、地震岩性识别、储层流体识别等油气直接检测技术的发展。

地球物理学家、测井工程师和岩石物理学家都会对岩石进行研究，但研究角度和观测方式存在巨大的差异。地球物理学家主要通过地面地震的手段研究油田尺度的岩石物理特征；测井工程师利用井孔中的测井资料进行岩石物理特征的研究；岩石物理学家更关注岩石的组成、结构和温压条件，在孔隙尺度上进行岩石物理特征研究。

就纵向分辨率而言，地球物理学家利用的地震资料是低分辨率的；测井工程师利用的资料是高分辨率的；而岩石物理学家的研究目标是微观的，接近于纵向分辨率的极限。在过去相当长的时间里，三者之间缺少必要的联系和互动，原因在于：

(1) 地球物理学家更关注于地面地震的构造成像结果，大量的研究集中在如何改进地震成像质量方面，很少关注岩性和流体对地震成像的影响；

(2) 测井工程师的注意力主要集中在如何获取孔隙度、渗透率和饱和度等参数方面，很少关注不同的物性和流体状态对弹性参数的影响；

(3) 岩石物理学家对错综复杂的岩石微观特征总是通过实验数据的分析归纳得到某些经验公式或等效的岩石物理模型。

图 1.1 给出了 3 个学科研究对象的差异，正是这种差异造成了学科之间的隔阂。地震岩石物理学研

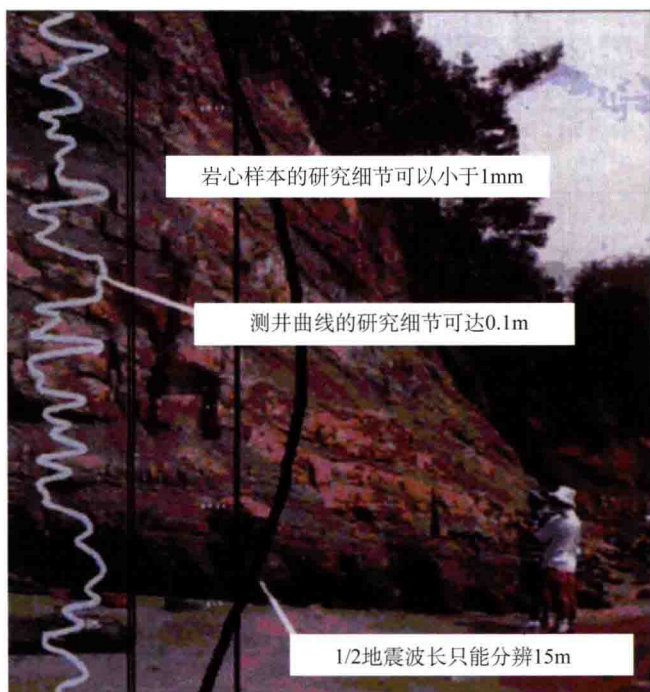


图 1.1 岩心、测井和地震纵向分辨率的对比（据唐建伟）



究首先面对的就是由这种差异带来的一系列技术上的困难，仅仅依靠岩石物理分析数据无法全面认识整个油气藏；仅仅依靠测井资料的“一孔之见”，难于把握整个油气藏的全貌；仅仅依靠地震资料，忽视地震分辨率的存在，无法正确认识油气藏。因此，必须首先在不同尺度上进行针对性研究，然后，根据统一的地质观点，实现不同尺度研究成果的统一，以便正确全面地表征油气藏特征。

## 1.1 常用的岩石物理参数

这些弹性常数对地震研究也很重要，这些参数两两之间可以转换，详细可参见表 1.1。因而我们只要已知其中两个参数，即可推导出各种具有不同物理意义的弹性参数。

表 1.1 弹性参数关系

$K$	$E$	$\lambda$	$\nu$	$\rho v_p^2$	$\rho v_s^2 = \mu$
$\lambda + 2\mu/3$	$\mu \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu}$		$\frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$	$\lambda + 2\mu$	
	$9K \frac{K - \lambda}{3K - \lambda}$		$\frac{\lambda}{3K - \lambda}$		$\frac{3(K - \lambda)}{2}$
	$\frac{9K\mu}{3K + \mu}$	$K - \frac{2}{3}\mu$	$\frac{3K - 2\mu}{2(3K + \mu)}$	$K + \frac{4}{3}\mu$	
$\frac{E\mu}{3(3\mu - E)}$		$\mu \frac{E - 2\mu}{3\mu - E}$	$\frac{E}{2\mu} - 1$	$\mu \frac{4\mu - E}{3\mu - E}$	
		$3K \frac{3K - E}{9K - E}$	$\frac{3K - E}{6K}$	$3K \frac{3K + E}{9K - E}$	$\frac{3KE}{9K - E}$
$\lambda \frac{1 + \nu}{3\nu}$	$\lambda \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{\nu}$			$\lambda \frac{1 - \nu}{\nu}$	$\lambda \frac{1 - 2\nu}{2\nu}$
$\mu \frac{2(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)}$	$2\mu(1 + \nu)$	$\mu \frac{2\nu}{1 - 2\nu}$		$\mu \frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu}$	
	$3K(1 - 2\nu)$	$3K \frac{\nu}{1 + \nu}$		$3K \frac{1 - \nu}{1 + \nu}$	$3K \frac{1 - 2\nu}{2 + 2\nu}$
$\frac{E}{3(1 - 2\nu)}$		$\frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$		$\frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$	$\frac{E}{2 + 2\nu}$
$\rho \left( v_p^2 - \frac{4}{3} v_s^2 \right)$	$\frac{9\rho v_s^2 R_2^2}{3R_2^2 + 1}$	$\rho(v_p^2 - 2v_s^2)$	见注释①的表达式		

$$\textcircled{1} \quad 2\nu = \frac{R_1^2 - 2}{R_1^2 - 1} = \frac{3R_2^2 - 2}{3R_2^2 + 1} = \frac{2(3R_3^2 - 1)}{3R_3^2 + 1} \circ$$

若岩石的应力、应变间若存在着线性关系，则代表了岩石的弹性变形，对于各向同性的线弹性体，其应力、应变关系用公式来表示，即

$$\sigma_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1.1)$$

式中， $\sigma_{ij}$  和  $\varepsilon_{ij}$  分别为应力张量和应变张量的分量； $\lambda$  是拉梅弹性常数； $\mu$  是剪切模量； $\delta_{ij}$  是克罗内克记号（当  $i \neq j$  时， $\delta_{ij} = 0$ ；当  $i = j$  时， $\delta_{ij} = 1$ ）； $\theta$  是体积应变，即

$$\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

从线弹性体的应力、应变关系式我们可以看出，对于描述线弹性体，两个弹性常数  $\lambda$ 、 $\mu$  就足够了，换言之，弹性参数中只有两个是独立的。实际上，描述线弹性体的弹性参数，除  $\lambda$  和  $\mu$  以外，还有  $K$  (体积模量)、 $E$  (杨氏模量)、 $\nu$  (泊松比)、 $v_p$ 、 $v_s$  (弹性 P、S 波的速度) 等。

## 1.2 岩石物理的基础理论

岩石物理学研究的是油藏条件下和采油过程中流体与岩石的特征改变量及其对地震特性的影响。它是连接地震与油藏工程的纽带，也是把地震特征转换为油藏特征的物理基础。本节将介绍一些岩石物理的基础理论，为后面的储层预测技术奠定基础。

### 1.2.1 Voigt–Reuss–Hill 的平均模型

Voigt–Reuss–Hill 理论使我们可以从组成岩石的矿物弹性参数计算岩石的平均弹性参数，然后再计算岩石的泊松比。

该理论可用于计算矿物组分弹性系数的平均值，从而计算非孔隙岩石的骨架特性。为了预测岩石的实际机械特性，理论上必须知道岩石各种颗粒的形状，并计算各颗粒周围的应变和应力场。

Voigt 模型给出了  $N$  种矿物组成的复合介质的有效弹性模量  $M_V$ ，即

$$M_V = \sum_{i=1}^N f_i M_i$$

式中， $M_V$  是 Voigt 有效弹性模量； $f_i$  是第  $i$  种组分的体积分数； $M_i$  是第  $i$  种组分的弹性模量。Voigt 有效弹性模量是一个代数平均，它代表上边界。

Reuss 模型给出了有效弹性模量的下边界  $M_R$ ，即

$$M_R = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{M_i}$$

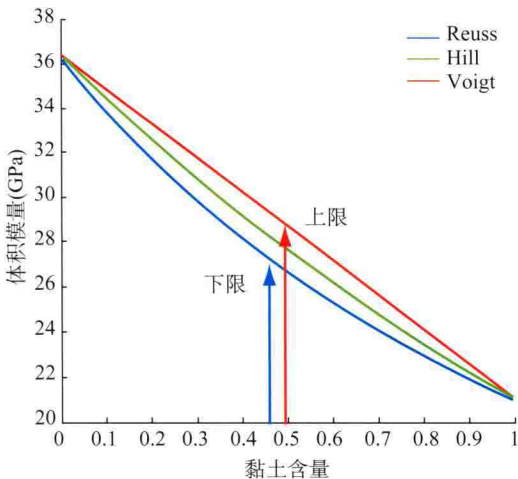


图 1.2 体积模量

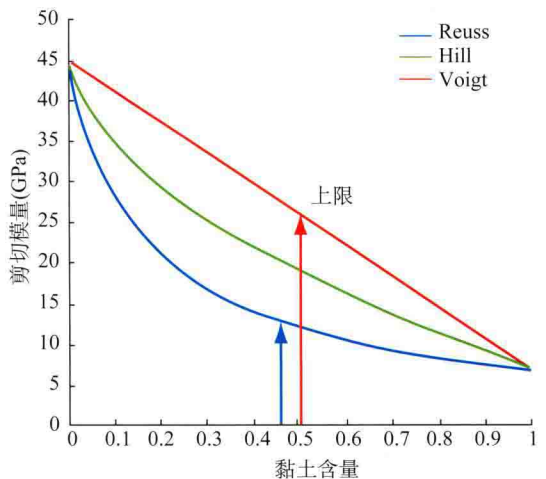


图 1.3 剪切模量

数学上, Voigt 和 Reuss 公式中的  $M$  可以表示任何模量, 如体积模量  $K$ 、剪切模量  $\mu$ 、杨氏模量  $E$  等。但是, 它仅用来计算剪切模量和体积模量的 Voigt 和 Reuss 平均, 然后由这两个量来计算其他模量, 这使得 Voigt 和 Reuss 平均更有意义。

Hill 曾建议利用对它们进行平均的方法来提供岩石有效模量 ( $M_{\text{VRH}}$ ) 的更实际的评价, 即

$$M_{\text{VRH}} = \frac{M_{\text{V}} + M_{\text{R}}}{2} \quad (1.2)$$

这个方法对于含有不同矿物成分的岩石骨架的弹性模量的评价十分有效, 图 1.2 与图 1.3 是应用以上方法计算的混合物的等效模量图。

## 1.2.2 Hashin–Shtrikman 边界

各向同性弹性复合介质的最好范围是 Hashin–Shtrikman (HS) 边界, 它给出了最可能窄的弹性模量上下限范围, 并且不用具体说明组成成分的几何形状。对于由两种成分组成的复合介质, Hashin–Shtrikman 边界为

$$K^{\text{HS}} = K_1 + \frac{f_2}{(K_2 - K_1)^{-1} + f_1 \left( K_1 + 4\mu_1/3 \right)^{-1}} \quad (1.3)$$

$$\mu^{\text{HS}} = \mu_1 + \frac{f_2}{(\mu_2 - \mu_1)^{-1} + 2f_1(K_1 + 2\mu_1) \left[ 5\mu_1 \left( K_1 + 4\mu_1/3 \right) \right]}$$

式中,  $K_1$ 、 $K_2$  是单相的体积模量;  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  是单相的剪切模量;  $f_1$ 、 $f_2$  是单相的体积分数。

上下界限是通过交换相的下标 1 和下标 2 计算出来的。一般而言, 当刚性较大的相的下标是 1 时, 上面的表达式给定上限; 当刚性小的相的下标是 1 时, 上面的表达式给定下限。

因为许多有效介质模型假设矿物模量是单相的, 当把混合矿物表示成一种“平均矿物”的模量时, 它等于由 HS 计算的混合矿物的边界之一或它们的平均。另一方面, 当组成成分差别很大时, 例如矿物和孔隙流体, 那么上下限差别很大, 会丢失一些预测值。

## 1.2.3 Wood 的孔隙流体模量模型

在组成的岩石及其各组分都是各向同性的假设前提下, Wood (1955) 模型认为岩石的压缩系数  $\beta$  是各组分压缩系数  $f_i \beta_i$  之平均。

$$\beta = \sum_{i=1}^N f_i \beta_i \quad (1.4)$$

对于流体悬浮物或流体混合物, 由 Wood 公式可以精确地给出其声波速度, 即

$$v = \sqrt{K_{\text{R}} / \rho} \quad (1.5)$$

式中,  $K_{\text{R}}$  是采用 Reuss (等应力) 平均模型计算的混合物有效体积模量 (剪切模量赋予零值), 即

$$\frac{1}{K_R} = \frac{(1-\phi)}{K_{ma}} + \frac{S_w\phi}{K_{BR}} + \frac{(1-S_w)\phi}{K_{HYD}}$$

式中,  $K_{BR}$ 、 $K_{HYD}$  分别为孔隙中盐水和烃类的体积模量;  $K_{ma}$  为基质矿物的体积模量;  $\phi$  为孔隙度;  $S_w$  为含水饱和度; 而  $\rho$  是平均密度, 即

$$\rho = (1-\phi)\rho_{ma} + S_w\phi\rho_{BR} + (1-S_w)\phi\rho_{HYD}$$

地质学家们在两种情况下使用 Wood (1955) 模型: 估算孔隙流体的有效体积模量  $K_n$ , 估算浅层海底沉积 (基本上为悬浮状态) 的有效体积模量。图 1.4 举例说明了 Wood 方程的两种应用。图 1.4a 代表一个海底沉积模型, 混合物质是石英颗粒和海水,  $S_w=0$ 。在图下标出了它们的密度和体积模量。在  $\phi=0$  处, 混合物质都是石英; 在孔隙度取值 50% ~ 100% 之间, 模型代表海底沉积, 在这个孔隙度范围的速度基本上是水的速度。图 1.4b 中模拟的孔隙流体为气和海水, 被表示为含水饱和度 ( $S_w$ ) 的函数。这张图上最明显的特征是含有少量气体 ( $S_w=95\%$ ) 时, 孔隙流体的速度和有效体积模量就迅速降低。在孔隙中含气量达到 5% 之后, 孔隙流体体积模量或孔隙流体速度的变化很小。显然, 孔隙流体的这种效应与部分气体饱和砂岩的弹性性质有关。

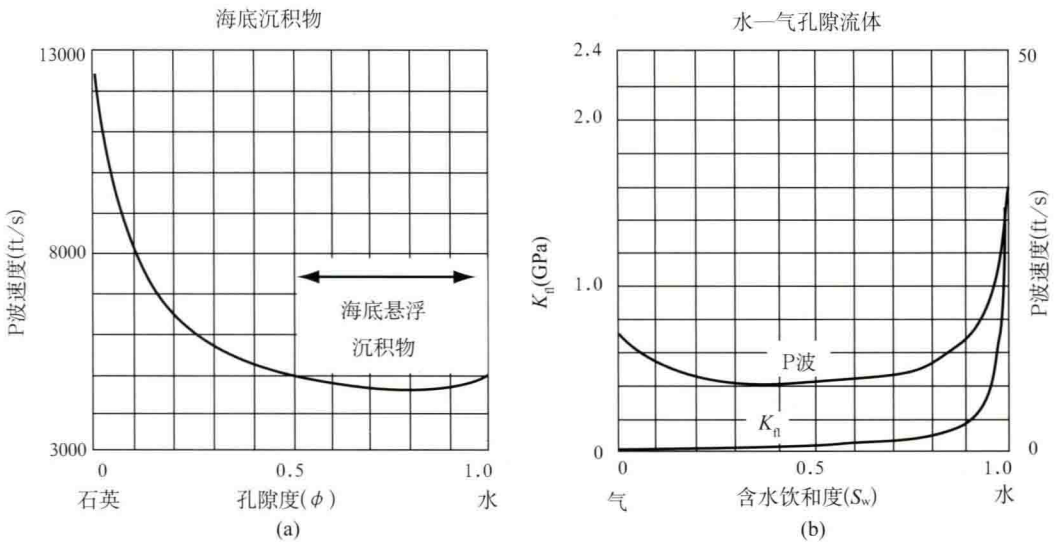


图 1.4 Wood 流体模量模型的应用 (据王炳章)

## 1.2.4 Wyllie 时间平均方程

基于空间平均模型的基本思路, Wyllie 等人 (1956, 1958, 1963) 通过水饱和固结岩石的测量分析, 提出了著名的 Wyllie 时间平均方程, 即

$$\frac{1}{v} = \frac{(1-\phi)}{v_{ma}} + \frac{\phi}{v_n} \quad (1.6)$$

式中,  $v$  为饱和岩石纵波速度;  $\phi$  为孔隙度;  $v_{ma}$  和  $v_n$  分别为基质矿物和孔隙流体的纵波速度。

Wyllie 时间平均方程是一个在声波测井界广泛应用的波速—孔隙度经验公式，它在理论上的假设前提是各向同性、波长小于岩石颗粒和孔隙尺寸，且矿物和孔隙呈平层状。所以，Wyllie 方程很好地适用于高有效压力下（通常 30MPa，相对于埋深大于 2700m）的流体饱和和岩石，而不适用于建立未固结、未胶结岩石的速度—孔隙度关系。在低压力或欠压实状态下，Wyllie 方程趋于高估速度和孔隙度；对于固结的低—中等孔隙度岩石和高孔隙度胶结岩石，Wyllie 方程则会低估速度。Wyllie 方程对原生孔隙度的预测很好，但对于次生孔隙度或溶洞孔隙则趋于低估预测速度和孔隙度，对此可尝试进行经验性校正。Wyllie 方程假设了单一均质矿物组分，对于混合矿物（特别是泥质含量）也需要进行经验性校正。

Raymer 等（1980）提出了对 Wyllie 方程的改进公式（Raymer—Hunt—Gardner 关系），即

$$\left. \begin{aligned} v &= (1-\phi)^2 v_{ma} + \phi v_{fl} & (\phi < 37\%) \\ \frac{1}{\rho v^2} &= \frac{(1-\phi)}{\rho_{ma} v_{ma}^2} + \frac{\phi}{\rho_{fl} v_{fl}^2} & (\phi > 47\%) \\ \frac{1}{v} &= \frac{(0.47-\phi)}{0.1v_{37}} + \frac{\phi-0.37}{0.1v_{47}} & (37\% < \phi < 47\%) \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

注意，在  $\phi > 47\%$  时的关系式识别沉积物的性质为悬浮物，纵波模量  $M = \rho v_p^2$ 。R—H—G 关系式仍然是一个严格的经验关系，具有与 Wyllie 时间平均方程同样的假设前提和应用条件。在足够高的有效压力（通常 30MPa 量级）下可以很好地适用，并适用于固结的低—中等孔隙度岩石和高孔隙度胶结岩石，但不适用于未固结或未胶结岩石，会高估泥质砂岩的纵波速度（图 1.5）。

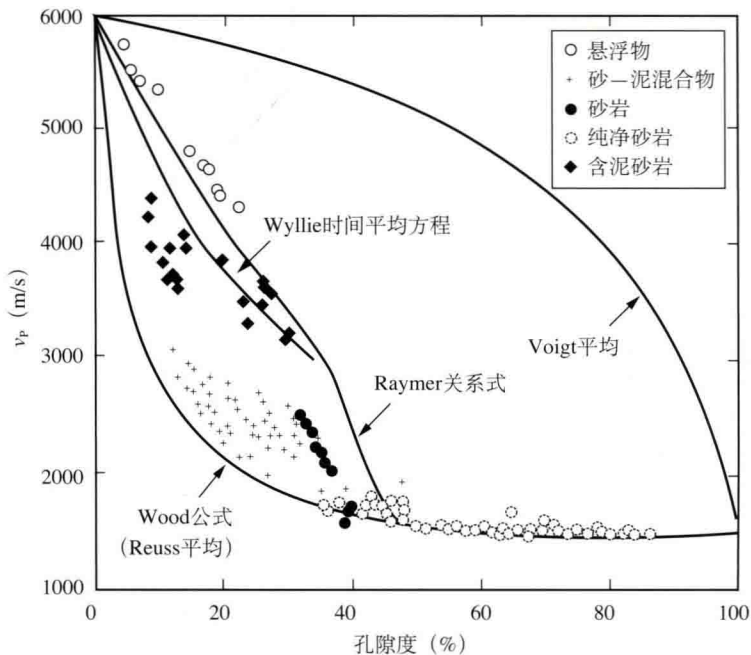


图 1.5 Wyllie 时间平均方程和 Raymer 改进公式的比较

黄绪德 (2003) 也在 Wyllie 时间平均方程的基础上给出了他所称的百灵公式, 用于计算含泥质、部分油气饱和砂岩与石灰岩的纵波速度, 即

$$\frac{1}{v_p} = \frac{(1-\phi-\phi_{sh})}{v_{ma}} + \frac{\phi_{sh}}{v_{sh}} + \phi \left( \frac{S_o}{v_o} + \frac{S_g}{v_g} + \frac{S_w}{v_w} \right) \quad (1.8)$$

式中,  $\phi_{sh}$  是泥质所占岩石固体组分的体积百分比 (即测井所得占岩石整体体积百分比的泥质含量);  $v_{sh}$  为泥质的纵波速度;  $S_o$ ,  $S_g$ ,  $S_w$  和  $v_o$ ,  $v_g$ ,  $v_w$  分别为孔隙所含油、气、水的饱和度和纵波速度。公式的适用范围是:  $5\% \leq \phi \leq 40\%$ ;  $105\% \leq S_w \leq 90\%$ ;  $5\% \leq \phi_{sh} \leq 40\%$ 。

## 1.2.5 Kuster-Toksoz 理论

Kuster 和 Toksoz 利用散射理论建立一个应用广泛的两相媒介的模型, 把孔隙度和孔隙纵横比与岩石的体积和剪切模量联系起来, 从而建立了孔隙度和孔隙纵横比与纵横波波速的联系 (KT 理论)。对于各种形状的包裹体, 其有效模量的表达式的一般形式为 (Kuster 和 Toksoz, 1974; Zimmerman, 1980)

$$\begin{aligned} K - K_m &= \frac{1}{3}(K' - K_m) \frac{3K + 4\mu_m}{3K_m + 4\mu_m} \sum_{l=s,c} \phi_l T_{ijj}(\alpha_l) \\ \mu - \mu_m &= \frac{1}{3}(\mu' - \mu_m) \frac{6\mu(K_m + 2\mu_m) + \mu_m(9K_m + 8\mu_m)}{5\mu_m(3K_m + 4\mu_m)} \sum_{l=s,c} \phi_l F(\alpha_l) \end{aligned} \quad (1.9)$$

式中,  $K'$  为孔隙内含物的体积模量;  $\mu'$  为孔隙内含物的剪切模量;  $K$  为有效体积模量;  $\mu$  为有效剪切模量;  $K_m$  和  $\mu_m$  分别为骨架体积模量和剪切模量;  $\alpha$  为孔隙纵横比。上述方程要求  $\phi/\alpha \ll 1$ 。泥页岩孔隙纵横比的典型值是 0.035, 砂岩为 0.12, 因此该方程仅适用于小孔隙, 且

$$T_{ijj}(\alpha_l) = \frac{3F_1}{F_2} \quad (1.10)$$

$$F(\alpha_l) = \frac{2}{F_3} + \frac{1}{F_4} + \frac{F_4F_5 + F_6F_7 - F_8F_9}{F_2F_4} \quad (1.11)$$

其中

$$A = \frac{\mu'}{\mu_m} - 1, \quad B = \frac{1}{3} \left( \frac{K'}{K_m} - \frac{\mu'}{\mu_m} \right), \quad R = \frac{3\mu_m}{3K_m + 4\mu_m}$$

$$\theta = \frac{\alpha}{(1-\alpha^2)^{3/2}} \left[ \cos^{-1}(\alpha) - \alpha\sqrt{1-\alpha^2} \right], \quad g = \frac{\alpha^2}{(1-\alpha^2)} (3\theta - 2)$$

$$F_1 = 1 + A \left[ \frac{3}{2}(g + \theta) - R \left( \frac{3}{2}g + \frac{5}{2}\theta - \frac{4}{3} \right) \right]$$

$$F_2 = 1 + A \left[ \frac{3}{2}(g + \theta) - \frac{R}{2}(3g + 5\theta) \right] + B(3 - 4R) + \frac{A}{2}(A + 3B)(3 - 4R) \left[ g + \theta - R(g - \theta + 2\theta^2) \right]$$

$$F_3 = 1 + \frac{A}{2} \left[ R(2 - \theta) + \frac{1 + \alpha^2}{\alpha^2} g (R - 1) \right]$$

$$F_4 = 1 + \frac{A}{4} [3\theta + g - R(g - \theta)]$$

$$F_5 = A \left[ R \left( \theta + g - \frac{4}{3} \right) - g \right] + B\theta(3 - 4R)$$

$$F_6 = 1 + A [1 + g - R(\theta + g)] + B(1 - \theta)(3 - 4R)$$

$$F_7 = 2 + \frac{A}{4} [9g + 3\theta - R(3g + 5\theta)] + B\theta(3 - 4R)$$

$$F_8 = A \left[ 1 - 2R + \frac{g}{2}(R - 1) + \frac{\theta}{2}(5R - 3) \right] + B(1 - \theta)(3 - 4R)$$

$$F_9 = A [g(R - 1) + R\theta] + B\theta(3 - 4R)$$

Kuster-Toksoz 模型计算有效体积模量时，如果所有孔隙是球形的（纵横比是 1），则变为 Gassmann 方程。此外，纵横比为 1 时，如同 Gassmann 方程一样，有效剪切模量不受饱和流体影响。然而，用纵横比小的孔隙求得的干岩石的有效剪切模量远小于饱和水情况下的模量（图 1.6，图 1.7）。

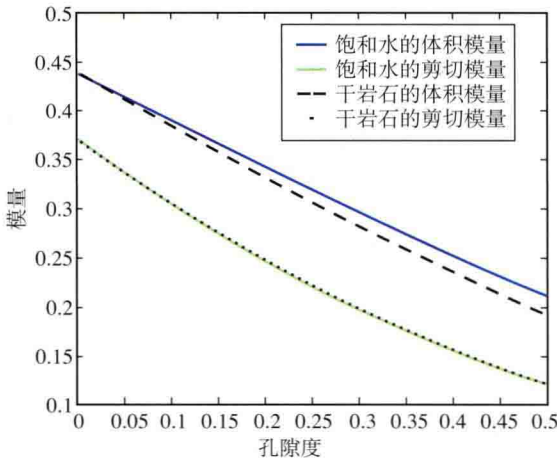


图 1.6 KT 理论模拟体积、剪切模量

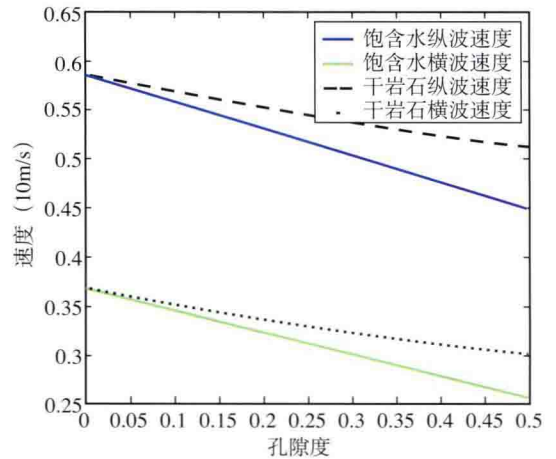


图 1.7 KT 理论模拟纵、横波速度

Kuster-Toksoz 方法经常用来计算干岩石模量。它的局限性在于孔隙纵横比必须已知而且它仅适用于各向同性岩石。

## 1.2.6 Gassmann 方程

岩石是由固体的骨架基质和流动的孔隙流体组成的饱和多孔介质，多孔介质孔隙结构的不规则性和介质组分的多相性构成了这类介质的非均匀性。这种微观的非均匀性导致孔隙介质的宏观物理性质对流体含量、流体性态或孔隙结构的轻微变化十分敏感。当声波或弹性波在多孔介质中传播时，孔隙或裂缝受其影响而发生闭合或张开，流体产生相对运动，致使多孔岩石的宏观物理性质发生变化，从而引起弹性波传播速度的改变、能量的耗散和振幅的衰减。可见，多孔介质的动态特征与介质受弹性波传播的扰动密切相关；而弹性波在多孔介质中传播特性的变化又与多孔介质的动态特性相互关联。因此，研究含流体多孔介质特性和弹性波传播特征变化的相互影响是地震岩石物理学的核心内容。图 1.8 列出了描述这一动态相互作用过程的主要流体机制模型。1951 年，Gassmann 提出了预测岩石体积模量的 Gassmann 方程。它建立了岩石基质模量、孔隙度、流体和干岩石模量之间的关系，为孔隙流体与地震波速的联系架起了桥梁。据粗略统计，有关岩石弹性物理研究的文献，三分之一以上都涉及 Gassmann 方程。可见 Gassmann 方程对岩石物理的重要性。

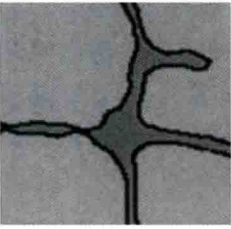
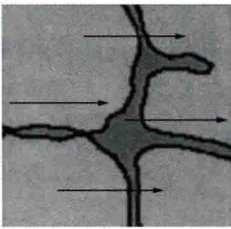
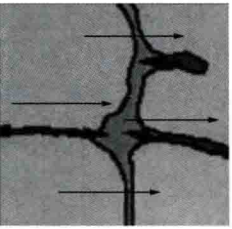
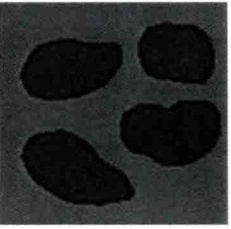
Gassmann模型 (静态模型)	Biot模型 (全局流动)	喷流模型 (局部流动)	斑块饱和模型 (部分饱和)
			
静态，零频率限制 没有黏性/惯量作用 统一的孔隙压力	黏性/惯量作用 仅有平均流动 流体和固体平均相对运动 导致频散和衰减	黏性/惯量作用 颗粒尺度的流体运动导致 频散和衰减 有效地硬化软孔隙度	饱和的大尺度斑块 斑块尺度的扩散导致频散 和衰减 可以添加微尺度喷流
适于地震频率范围	$f_c = \eta \phi / 2\pi\rho_n$	$f_c = K_{ma} \alpha^3 / \eta$	$f_c = kK_n / L_c^2 \eta$
统一了Biot和喷流的BISQ模型：高频上限速度=Biot高频速度；低频下限速度>Biot低频速度			

图 1.8 含流体多孔介质中弹性波传播的主要流体机制模型 (据王炳章)

根据 Gassmann 方程，理想的孔隙岩石体由四部分组成：岩石基质、孔隙流体系统、干岩石框架（岩石骨架）和饱和岩石本身。该形式下的多孔介质的特征推动了弹性理论的扩展——多孔弹性理论的诞生。多孔弹性理论描述了在正常压力和温度下，介质的性态，同时考虑到了孔隙中充填的流体的作用。在许多文献中，岩石的四部分组成中，人们用抽空岩石骨架和湿润岩石两项替换了上面所说的干岩石框架（岩石骨架）和饱和岩石两项 (Avsech, 1995)。

Gassmann 提出骨架的特性可以用某种方法测量，并且它为任何一种性质已知的饱和流体，都推导出了相应岩石的表达式。在这种推导中，假定流体和固体间的任何相对运动与



饱和岩层自身的运动相比可以忽略不计，在低频时，从直观上看是正确的。他指出，骨架中的任何各向异性必然加在饱和的岩层上，为了简单起见，我们讨论的骨架将是由固有的各向同性的弹性固体组成的，就其平均特性来说，骨架是各向同性固体。

在干岩石（不等同于空气饱和岩石，定义为孔隙压缩只导致骨架体积形变而不诱发孔隙压力的变化）的体积模量和孔隙度之间存在一个一般和严格的关系，即

$$\frac{1}{K_{\text{dry}}} = \frac{1}{K_{\text{ma}}} + \frac{\phi}{K_{\phi}} \quad (1.12)$$

式中， $K_{\phi}$  是孔隙空间刚度，这是量化孔隙形态刚度的一个新概念。由 Bettie 功能互等定理可得饱和和岩石体积模量和孔隙度之间的类似关系，即

$$\frac{1}{K_{\text{sat}}} = \frac{1}{K_{\text{ma}}} + \frac{\phi}{\tilde{K}_{\phi}} \quad (1.13)$$

式中， $\tilde{K}_{\phi} = K_{\phi} + \frac{K_{\text{ma}} K_{\text{fl}}}{K_{\text{ma}} - K_{\text{fl}}} \approx K_{\phi} + K_{\text{fl}}$ 。从以上二式中消去  $K_{\phi}$ ，即得

$$\frac{K_{\text{sat}}}{K_{\text{ma}} - K_{\text{fl}}} = \frac{K_{\text{dry}}}{K_{\text{ma}} - K_{\text{dry}}} + \frac{K_{\text{fl}}}{\phi(K_{\text{ma}} - K_{\text{fl}})} \quad (1.14)$$

这就是著名的 Gassmann 方程。式中， $K_{\text{sat}}$  是以有效体积模量为  $K_{\text{fl}}$  的孔隙流体所饱和和岩石的有效体积模量； $K_{\text{dry}}$ 、 $K_{\text{ma}}$  分别是干岩石（骨架）、基质矿物（颗粒）有效体积模量； $\phi$  是孔隙度。对于多相混合流体，式中  $K_{\text{fl}}$  则取各流体体积模量的 Reuss 平均。对于剪切模量  $\mu$ ，Gassmann 曾指出饱和岩石的剪切模量不受流体饱和的影响。而饱和岩石的密度  $\rho_{\text{sat}}$  简化为

$$\rho_{\text{sat}} = \rho_{\text{dry}} + \phi \rho_{\text{fl}}$$

混合流体的体积密度  $\rho_{\text{fl}}$  给出： $\rho_{\text{fl}} = S_w \rho_w + S_o \rho_o + S_g \rho_g$

上式中， $S_w$ 、 $S_o$ 、 $S_g$  水、原油、气体的饱和度，且要求， $S_w + S_o + S_g = 1$ 。

Gassmann 方程的其他常用形式有

$$K_{\text{sat}} = K_{\text{dry}} + \frac{\left(1 - \frac{K_{\text{dry}}}{K_{\text{ma}}}\right)^2}{\frac{\phi}{K_{\text{fl}}} + \frac{1 - \phi}{K_{\text{ma}}} - \frac{K_{\text{dry}}}{K_{\text{ma}}^2}} \quad (1.15)$$

$$\frac{1}{K_{\text{sat}}} = \frac{1}{K_{\text{ma}}} + \frac{\phi}{K_{\phi} + K_{\text{ma}} K_{\text{fl}} / (K_{\text{ma}} - K_{\text{fl}})} \quad (1.16)$$

Gassmann 方程的基本的限制条件是（陈信平，1996；Zhijing Wang, 2001）：（1）岩石（基质和骨架）宏观上是均质的；（2）所有孔隙都是连通或相通的；（3）所有孔隙都充满流体（液体、气体或混和物）；（4）研究中的岩石-流体系统是封闭的（不排液）；（5）孔隙流体不对固体骨架产生软化或硬化的相互作用。