

岩石弹性参数测量的激光实验研究

王云山 刘业厚 王明吉 傅石友

(大庆石油学院物理教研室, 安达市 151400)

提要 本文介绍了用激光实时全息术测量岩石的泊松比 μ ; 用激光散斑照相放大技术测量岩石的杨氏模量 E ; 电阻应变片法; 易于现场应用的岩石弹性参数散斑照相测量法。

关键词 激光全息术, 散斑照相法, 岩石弹性参数

Laser measurement of rock elasticity parameters

WANG Yunshan, LIU Yehou, WANG Mingji, FU Shiyu

(Daqing Petroleum Institute, Heilongjing, 151400)

Abstract The application of laser real-time holography and speckle photography amplification to measure the rock elasticity parameters is briefly introduced. The data concluded in interference fringe was analyzed and compared with those from traditional measurement. Measurement results are presented as follows: Poisson's ratio μ of rock by laser real-time holography, and Young's modulus E of rock by speckle photography amplification; straining slice of resistance; speckle photography amplification method is easy to measure rock elasticity parameter in practice.

Key words laser holography, speckle photography, rock elastic parameter

1 实验原理与技术

1.1 用激光实时全息术测量岩石的泊松比 μ

实验装置如图1所示。使试样的主平面在两个相等的反向力偶矩 M 的作用下发生纯弯曲, 试样发生弯曲时, 其反翘曲面的双曲线型等高线的渐进方程为^[1]

$$z^2 - \mu y^2 = 0 \quad (1)$$

式中 μ 为试样的泊松比, z, y 为主平面上某点坐标。把试样加载前的全息图就地显影、定影, 然后加载, 边观察边调整实验装置, 使试样反翘曲面上能出现清晰的、对称性好的双曲线型等高线, 再用照相机拍下, 并测量照片上双曲线型等高线的渐近线的最小夹角 2β , 再由关系式

$$\mu = \text{tg}^2\beta \quad (2)$$

求得所测试样的泊松比。

1.2 用激光散斑照相放大术测量岩石的杨氏模量 E

实验装置如图2所示。成像透镜 L 使物表面放大 M 倍, 则散斑平均大小为

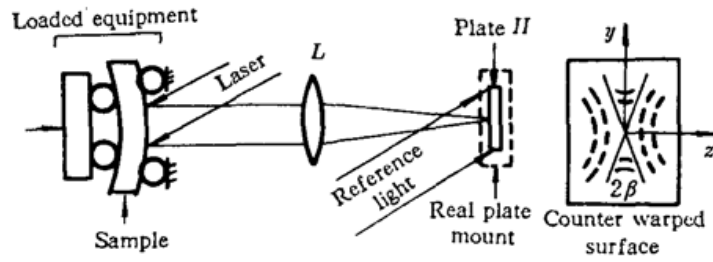


Fig. 1 Schematic diagram of laser real-time holography experiment

$$\sigma = 1.22\lambda F(1 + M) \tag{3}$$

式中, λ 是激光波长, F 是系统焦距 f 和孔径 D 的比值, M 是成像透镜的横向放大率。因为 σ 太大, 提取位移信息有困难, 所以取 $M = 5, F = 4.5$ 。

对双曝光散斑照相底片的分析是采用逐点分析法, X 方向的位移 d 为

$$d = \lambda L / MA \tag{4}$$

式中, L 是底片到屏幕的距离, A 是屏幕上所测杨氏条纹间距。

根据弹性理论, 由测得的 d 和已知的应力 σ_x , 便得到杨氏模量的测量值

$$E = \sigma_x / \epsilon_x \tag{5}$$

ϵ_x 是 X 方向的应变。

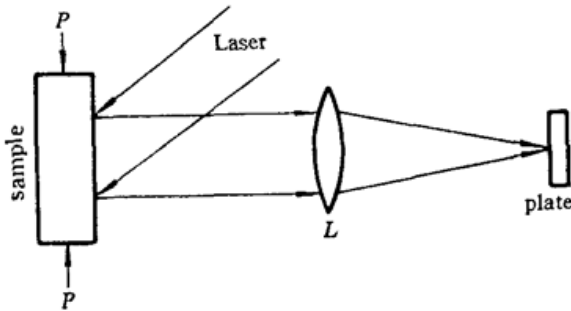


Fig. 2 Schematic diagram of laser speckle photography amplification experiment

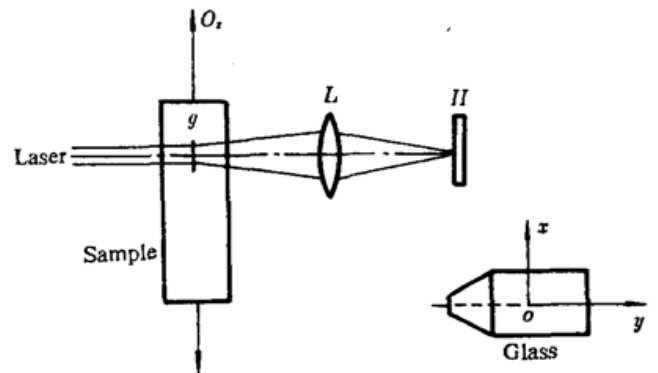


Fig. 3 Skematic of measurement principles

1.3 电阻应变片法

为了确认测试技术的精度和可靠性, 在试样上同时粘贴电阻应变片, 以获得同一试样在相同状态下的泊松比和杨氏模量, 并与前者进行比较。

1.4 易于现场应用的岩石弹性参数散斑照相测量法

实验装置如图 3 所示。将刻有 $O-XY$ 坐标的毛玻璃片 g 用粘合剂固定于岩石试样侧面中心靠上处, 让毛玻璃片 g 的 X 轴与被测试样的纵向主轴平行, 它的 Y 轴与试样的横向位移相一致。经扩束后的一束 He-Ne 激光垂直入射到毛玻璃片上的待测位置 $P(x, y)$ 点附近, 从玻璃片上散射出来的光被透镜 L 成像于照相底片 II 上。保证被测试样的纵向应变沿 OX 轴方向, 横向应变沿 OY 方向。

令第一次曝光记录下来的散斑光强为 $D(x_i, y_i)$, 其中 x_i, y_i 是像面坐标, 沿 OX 轴加载。令试样纵向位移为 OX 轴, 横向位移为 AY , 做第二次曝光, 记录下来的像面散斑光强为 $D(x_i - MAx, y_i - MAy)$, 其中 M 是系统的横向放大率。

底片 II 经正确显影定影处理后作逐点分析。让激光细光束垂直入射于底片 II 上 $P_i(x_i, y_i)$ 点。由光在屏上形成的杨氏干涉条纹, 即可获得被测点的位移

$$\Delta R = |\Delta R| = \lambda L / M \Delta \quad (6)$$

式中 λ 是所用激光波长, Δ 是条纹间距, $\Delta R = \Delta x_i + \Delta y_j$ 。把 ΔR 沿 x, y 轴分解, 得到被测试样所测点的纵向位移 $\Delta x = \Delta R \cos \alpha$, 横向位移 $\Delta y = \Delta R \sin \alpha$ 。 α 是位移 ΔR 与 x 轴的夹角。注意到 Δy 是试样横向改变量的一半则得试样的泊松比为

$$\mu = |\varepsilon_y / \varepsilon_x| = (2a/b) \operatorname{tg} \alpha \quad (7)$$

式中 a, b 分别为加载前与被测点相对应的纵向、横向尺寸, 故只需测出 a, b 和 α 便可求出 μ 。

同时, 根据公式

$$E = \sigma_x / \varepsilon_x \quad (8)$$

式中 σ_x 是 X 轴向应力, ε_x 是相应 X 方向发生的应变。测出 σ_x, ε_x 就可获得相应的杨氏模量 E 。再利用公式

$$G = E / 2(1 + \mu) \quad (9)$$

计算出相应的切变弹性模量 G 。

2 实验结果及讨论

把现场提供的大庆油田不同井位、不同层位的岩样, 分割成棱柱形条状试样。对每块试样分别做 6 次不同加载状态下的测试, 所得结果及讨论如下:

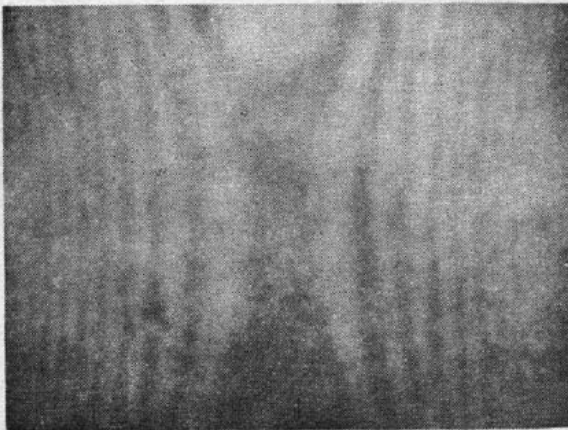


Fig. 4 Photography of hyperbola-type contourline

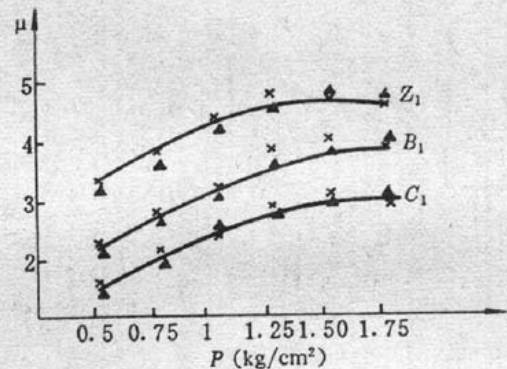


Fig. 5 Poisson's ratio μ versus load P

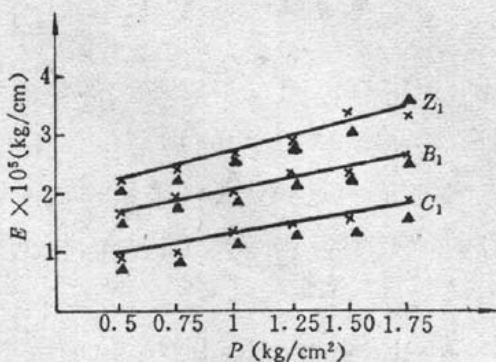


Fig. 6 Young's modulus E versus load P

2.1 用实时全息术测量岩石的泊松比, 因等高线的对称性好, 使测量的精度高; 就地显影, 就地调整加载系统, 就地拍摄试样表面上双曲线型等高线照片, 显得集中而紧凑, 具有省时、快速及准确等优点。实时法所测双曲线型等高线图的照片如图 4 所示。由实时法测得的不同试样的泊松比 μ 随加载量 P 的改变情况如图 5 所示。试样不同则实验曲线不同, 但是每个试样的泊松比 μ 随加载量 P 变化的规律基本一致, 这反映了岩石弹性的一般规律。同时也可以看到与电阻应变片的测量值相符合。

2.2 用激光散斑照相放大术测量岩石的杨氏模量 (E)。使用照相放大技术, 提高了杨氏

条纹的测量精度。用这种方法测量所得杨氏模量(E)的实验值随加载量(P)的变化关系如图 6 所示。三种试样对应三条曲线,而三条曲线基本上是直线,这表明岩石弹性的一般规律。并可以看到与电阻应变片的测量值相符合。

2.3 弹性体试样的切变弹性模量 G 与试样的杨氏模量 E 、泊松比 μ 的关系由(9)式给出。将上述方法测得的岩石样品的杨氏模量(E)和相应的泊松比(μ)代入(9)式,可得到相应的切变模量(G)。测量结果列于表 1。用电阻应变片监视所测得的对应状态下的岩石样品的杨氏模量、泊松比和切变模量列于表 2。

Table 1 The measuring average of kinds of rock elastic parameters

Number	C1-01	C2-02	B1-01	B2-02	Z1-01	Z2-02
$\bar{E}(\times 10^{10} \text{ Pa})$	1.596	2.538	2.314	3.790	2.857	3.560
$\bar{\mu}$	0.321	0.497	0.422	0.498	0.469	0.493
$\bar{G}(\times 10^{10} \text{ Pa})$	0.604	0.848	0.814	1.265	0.972	1.192

Table 2 The measuring average of kinds of rocks by straining slice of resistance

Number	C1-01	C2-02	B1-01	B2-02	Z1-01	Z2-02
$\bar{E}(\times 10^{10} \text{ Pa})$	1.587	2.504	2.310	3.781	2.845	3.558
$\bar{\mu}$	0.318	0.490	0.419	0.490	0.461	0.480
$\bar{G}(\times 10^{10} \text{ Pa})$	0.602	0.840	0.814	1.268	0.973	1.202

2.4 易于现场应用的岩石弹性参数散斑照相测量法

岩芯样品由大庆朝阳沟油田提供,将岩芯分别切割成 $21 \times 27 \times 72 \text{ mm}^3$ 和 $17 \times 29 \times 72 \text{ mm}^3$ 的棱柱形条状试样各 10 块。按不同井位和层位编号。分别采用电阻应变片法、激光全息法和本实验方法测试,在相同的起始压力和相同的加载间隔的条件下作对比性实验。结果表明,在相同条件下,同一块试样采用三种方法测量的数值基本上接近。并做出 A_{1-1} 岩石样品的三种实验方法的泊松比 μ 与加载量 P 的变化曲线(见图 7)。试样的三种实验方法的杨氏模量 E 的测量值随加载量 P 的变化曲线(见图 8)。可见测量值稳定,线性拟合度较好。

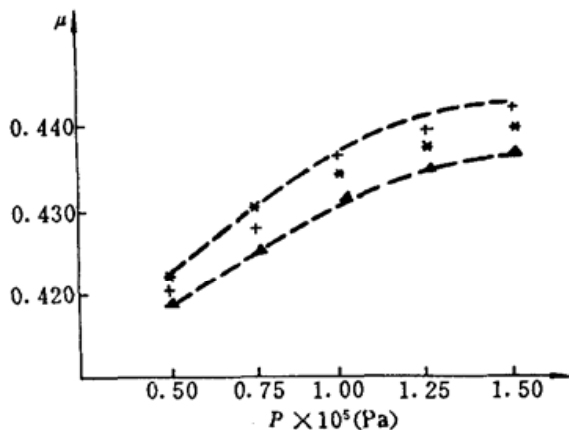


Fig. 7 Poisson's ratio μ versus load P

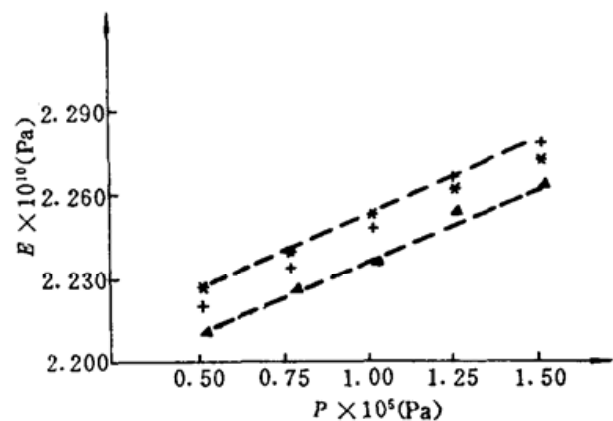


Fig. 8 Young's modulus E versus load P

我们把激光全息法、电阻应变片法和易于现场应用的散斑照相法这三种岩石弹性实验测量法,在实验的重复性、测量误差、设备复杂程度、试样的形状和几何尺寸的要求、实验操作的难易程度以及现场适用性等六方面进行对比,经过分析和估算列于表 3。可见易于现场应用的岩石弹性参数散斑照相测量法更具优势。

Table 3 The comparing table of perfect and non-perfect of 3-kind experimental method

	holopathy	resistance straining	speckle
repeatatality error	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Exp. measur. error	≤ 3	≤ 4	≤ 4
equipment	complex	simple	simplest
sample size	square prism long, large	square prism, large or cylinder	square or cylinder
operation	difficulty	easy	easeest
applicability	yer	no	yes

参 考 文 献

- 1 Timoshenko, S. P., Gooder, J. N., Theory of Elasticity, Third Edition, 1970, 272~281