

褶皱构造应力场及其演化

刘家仁^{1,2}

(1. 贵州省地质矿产勘查开发局, 贵州 贵阳 550004;

2. 贵州省地质学会, 贵州 贵阳 550004)

摘要: 为了弄清褶皱构造形成过程中应力场的分布及动态演化状况, 运用弹性力学理论对褶皱构造形成过程中的应力场进行了分析并对其动态演化进行了探索。通过分析给出了单一岩层褶皱启动时应力场的解析式; 根据解析式求出了褶皱波长与岩层厚度、刚度模量之间的关系, 从而揭示了褶皱等距性的成因; 同时研究了褶皱驱动应力与岩层厚度、刚度模量以及褶皱波长之间的关系, 从而指出褶皱作为“古地应力记录仪”用以测量古地应力的可能性。通过对不同结合状态复合岩层的分析, 揭示了平行褶皱、相似褶皱、不协调褶皱的成因; 在单一岩层褶皱启动时应力场解析式的基础上, 提出了能体现褶皱应力场演化状况的解析式并做了部分求证, 进而对褶皱应力场的演化做了分析。

关键词: 构造; 褶皱; 应力场; 褶皱波长; 褶皱等距性; 古地应力记录仪

中图分类号: P551; P542

文献标识码: A

STRESS FIELD OF FOLD STRUCTURE AND ITS EVOLUTION

LIU Jiaren^{1,2}

(1. Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Guiyang 550004, Guizhou, China;

2. Guizhou Geological Society, Guiyang 550004, Guizhou, China)

Abstract: The theory of elastic mechanics is applied to find out distribution and dynamic evolution of stress field in the forming process of fold structure. The analytical expression of stress field when a single fold starts is deduced, through which the relationship between fold wavelength and the thickness and stiffness modulus of rock formation is obtained, and the cause of fold equidistant distribution is revealed. The relationship between fold driving stress and rock layer thickness, stiffness modulus and fold wavelength is obtained, and the possibility of fold as "paleogeostress recorder" to measure paleogeostress is proposed. Based on analysis of the composite strata in different binding states, the causes of parallel fold, similar fold and incongruous fold are revealed. According to the analytical expression of the stress field when a single fold starts, an analytical expression reflecting the evolution of fold stress field is proposed and partially verified, and then the evolution of the fold stress field is analyzed.

Key words: structure; fold; stress field; fold wavelength; fold equidistant distribution; paleogeostress recorder

基金项目: 贵州省地质矿产勘查开发局科技基金项目 (黔地矿科 (2010) 14 号)

作者简介: 刘家仁 (1950-), 男, 研究员, 从事地质科学研究、区域地质调查、地质科技管理等工作。E-mail: 1069345391@qq.com

收稿日期: 2018-11-06; **修回日期:** 2019-01-05; **责任编辑:** 吴芳

引用格式: 刘家仁. 褶皱构造应力场及其演化 [J]. 地质力学学报, 2019, 25 (3): 341-348 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.03.031

LIU Jiaren. Stress field of fold structure and its evolution [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25 (3): 341-348 DOI: 10.12090/j.issn.1006-

构造应力场对油气^[1-3]和成矿物质^[4-6]的驱动作用已被越来越多的人所认识。褶皱作为广泛存在的构造形式之一,其应力场的形成与演化对成矿作用的影响、应力分布状况对采矿工程的影响已引起人们的重视。弄清褶皱构造形成过程中应力场的分布及动态演化状况,进而揭示该过程中成矿流体的运移规律,对于指导矿产的勘探和开采均具有重要意义。为此,不少学者从不同的角度采用地质调查^[7-9]、数值模拟^[10-12]等不同的方法进行了研究。文章根据弹性力学理论^[13-14]对褶皱构造形成过程中的应力场进行分析,对其动态演化进行探索,得到了比较简洁直观的应力场公式,印证了上述引用文献的部分研究结论,并获得了一些新的认识。

1 模型的简化

褶皱依受力情况不同而分为横弯褶皱和纵弯褶皱两类。

横弯褶皱即所谓底劈构造,水平岩层因受下方塑性地质体向上顶拱而弯曲隆起。因作用力方向垂直于岩层层面,故谓之横弯褶皱。横弯褶皱远不及纵弯褶皱普遍,其找矿意义也远不及纵弯褶皱重要,故在文中不再进行讨论。

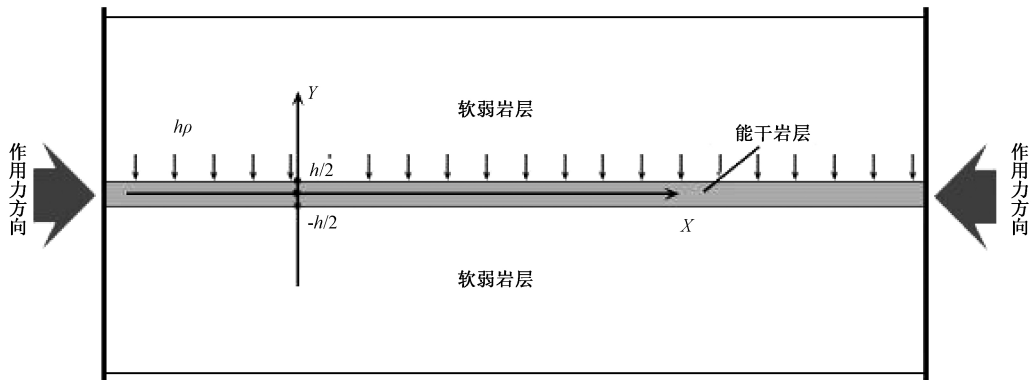


图2 水平岩层受力情况示意图

Fig. 2 Schematic diagram of horizontal strata stress

当岩层尚未失稳时,岩层呈水平状态。其内应力分布沿 X 轴方向没有变化,是均匀的,为常量 C ;沿 Y 轴方向受岩层自重的影响与静水压力类似呈线性变化,但由于岩层厚度相比于其长度、宽度是很小的,上下层面的静水压力相差不大,故近似地将岩层自重简化为分布于岩层上表面的面力 $h\rho$,下表面有对应的顶托力与之平衡,岩层内的应力则可视作均匀的即常量 D ,以简化计算;

纵弯褶皱为水平岩层因受平行于层面的作用力强烈挤压失稳褶曲而成(图1),是最普遍的褶皱构造形式。

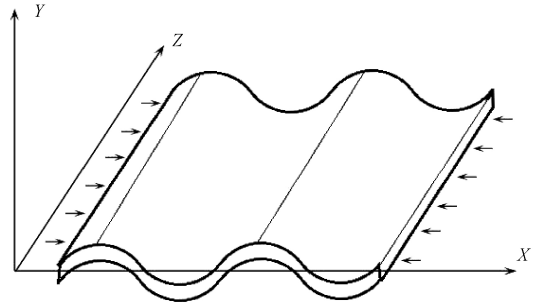


图1 纵弯褶皱构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of longitudinal bend fold structure

纵弯褶皱大多为长轴状,有不少为线状,与弹性力学^[13-14]中的平面应变状态类似,岩层的变形主要沿图1中的 X 轴和 Y 轴方向进行,沿 Z 轴方向变化相对小得多以致可以忽略。现按平面应变求解其应力场。

先考察单一岩层纵弯的情况。设有一厚度为 h 的能干性水平岩层,其上下均为巨厚的相对软弱塑性岩层,能干岩层类似于“悬浮”在软弱岩层中的状态,当其受到水平方向作用力而失稳时可在塑性岩层内“自由”褶曲(图2)。

沿 X 轴和 Y 轴方向的剪应力为零。即:

$$\sigma_x = C$$

$$\sigma_y = D$$

$$\tau_{xy} = 0$$

式中 σ_x 为沿 X 轴方向的正应力, σ_y 为沿 Y 轴方向的正应力, τ_{xy} 为沿 X 轴或 Y 轴方向的剪应力;规定正应力以拉(张)应力为负、压应力为正,剪应力顺时针方向为正,反时针方向为负。容易看

出，图 2 中作用在岩层左右两端面的水平作用力大小为 $h\sigma_x = hC$ 。

当水平作用力增大到一定程度而使岩层失去水平稳定状态时即产生褶皱，形成若干个波长和波幅相等的连续褶皱。此时，岩层内的应力分布

不再是均匀的，而是在沿 X 轴方向按褶皱周期呈周期性的变化。沿 Y 轴方向，岩层中褶皱凹侧 σ_x 增大，而 σ_y 减小。取其中一个褶皱加以考察（图 3），并设波长为 $2L$ ，波幅为 $2g$ 。

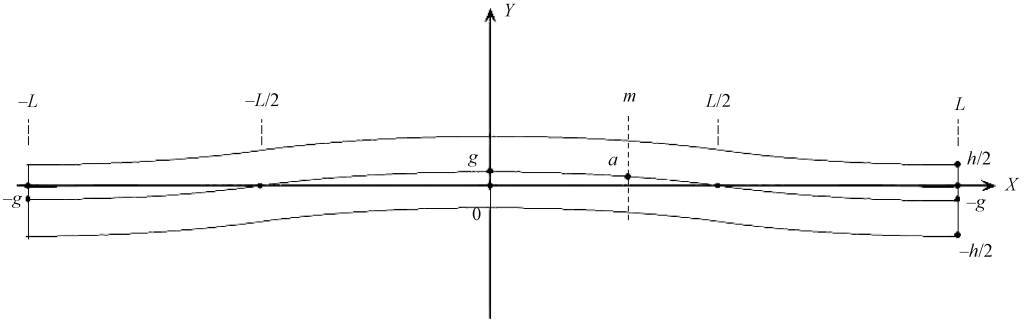


图 3 褶皱变形示意图

Fig. 3 Diagram of fold deformation

2 应力分析

2.1 应力公式求取

先分析刚刚失稳时的状态。此时褶皱的波幅 g 很小，与厚度 h 相比几乎可以忽略，岩层内的应力分布可以运用弹性力学理论求得。设应力函数为

$$\Phi = A \cos \frac{\pi}{L} x \operatorname{sh} \frac{\pi}{L} y + D x^2 + C y^2 \quad (1)$$

容易验证，该函数满足双调和方程

$$\nabla^4 \Phi = \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \Phi}{\partial y^4} = 0 \quad (2)$$

从该函数可以求出褶皱岩层中的应力分布：

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = A \frac{\pi^2}{L^2} \cos \frac{\pi}{L} x \operatorname{sh} \frac{\pi}{L} y + C \quad (3)$$

$$\partial_y = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = -A \frac{\pi^2}{L^2} \cos \frac{\pi}{L} x \operatorname{sh} \frac{\pi}{L} y + D \quad (4)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} = -A \frac{\pi^2}{L^2} \sin \frac{\pi}{L} x \operatorname{ch} \frac{\pi}{L} y \quad (5)$$

上式中的待定系数 A 和半波长 L 可以通过形变和位移分析求出。为此要用到几何方程和物理方程：

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1 - \mu^2}{E} \left(\sigma_y - \frac{\mu}{1 - \mu} \sigma_x \right)$$

将公式 (3)、(4) 代入其中并积分，求得

$$v = -A \frac{(1 + \mu) \pi}{EL} \cos \frac{\pi}{L} x \operatorname{ch} \frac{\pi}{L} y$$

令式中 $y = 0$ ，得出褶皱岩层中心线的形状方程

$$v = -A \frac{(1 + \mu) \pi}{EL} \cos \frac{\pi}{L} x \quad (6)$$

可见褶皱后的岩层中心线类似余弦曲线呈波状起伏，在 $x = 2nL$ (n 为 $0, \pm 1, \pm 2$ 等，下同) 处 $v = g$ 。令公式 (6) 中的 $x = 0$ ，得到关系式

$$g = -A \frac{(1 + \mu) \pi}{EL} \quad (7)$$

代入公式 (6)，则岩层中心线形状方程简化为

$$v = g \cos \frac{\pi}{L} x \quad (8)$$

从公式 (7) 中可求得关于 A 和 L 的一个关系式

$$A = - \frac{ELg}{(1 + \mu) \pi} = - \frac{2GLg}{\pi} \quad (9)$$

公式中 E 为弹性模量，亦称杨氏模量； μ 为侧向收缩系数，又称为泊松比； $G = E/2(1 + \mu)$ 为剪切弹性模量，又称为刚度模量。

将 (9) 代入公式 (3)、(4)、(5) 并整理后得

$$\sigma_x = - \frac{2\pi Gg}{L} \cos \frac{\pi}{L} x \operatorname{sh} \frac{\pi}{L} y + C \quad (10)$$

$$\sigma_y = \frac{2\pi Gg}{L} \cos \frac{\pi}{L} x \operatorname{sh} \frac{\pi}{L} y + D \quad (11)$$

$$\tau_{xy} = \frac{2\pi Gg}{L} \sin \frac{\pi}{L} x \operatorname{ch} \frac{\pi}{L} y \quad (12)$$

此三式描述了褶皱启动时岩层的应力场状况。

可见岩层虽然变形尚很微小,但应力场已在原来均匀场的基础上发生了畸变。三个公式右边第一项描述的就是畸变部分:沿 X 轴方向三个应力值均呈类似于正弦或余弦曲线的周期性变化, σ_x 、 σ_y 的极大或极小值位于褶皱核部 $x=nL$ 处, τ_{xy} 的极大或极小值位于褶皱翼部 $x=(n+1/2)L$ 处。沿 Y 轴方向的变化是, σ_x 、 σ_y 在 X 轴上等于零,在其两侧正负相反,在 $y=\pm h/2$ 处绝对值最大,在褶曲凸侧 σ_x 为拉(张)应力、 σ_y 为压应力,在褶曲凹侧 σ_x 为压应力、 σ_y 为拉(张)应力; τ_{xy} 则在 X 轴上绝对值最小,在 $y=\pm h/2$ 处绝对值最大。

2.2 边界条件分析

褶皱以后,岩层内外的应力分布发生了变化。在 $x=\pm L$ 处岩层断面上, σ_x 不再均匀分布,但在其断面上的积分为 hC ,与水平作用力相等。在岩层上下表面上, σ_y 也不再均匀分布而发生了变化,但岩层褶皱引起上下围岩的变形所产生的应力与之相平衡。因此,以上边界条件得到了满足。

褶皱后岩层中不再均匀分布的应力所产生的力矩也必须平衡,边界条件才能全面满足。为此,进行如下计算:

考察图 3 中岩层中心线上的任意点 (m, a) ,该点左侧受三个力矩的作用: M_1 ——作用于岩层上表面的 σ_y 与力臂 $m-x$ 产生的力矩; M_2 ——作用于岩层下表面的 σ_y 与力臂 $m-x$ 产生的力矩; M_3 ——作用于岩层 $x=m$ 处左端面上的 σ_x 与力臂 y 产生的力矩。其中

$$M_1 = \int_0^m (m-x)\sigma_y dx \quad \left(y = \frac{h}{2}\right)$$

$$M_2 = \int_0^m (m-x)\sigma_y dx \quad \left(y = -\frac{h}{2}\right)$$

$$M_3 = - \int_{-h/2}^{h/2} y\sigma_x dy \quad (x=0)$$

积分计算后得

$$M_1 + M_2 + M_3 = \frac{4LGg}{\pi} \text{sh} \frac{\pi h}{2L} \left(1 - \cos \frac{\pi m}{L}\right) +$$

$$2Ggh \text{ch} \frac{\pi h}{2L} - \frac{4GgL}{\pi} \text{sh} \frac{\pi h}{2L} Cgh$$

$$= - \frac{4LGg}{\pi} \text{sh} \frac{\pi h}{2L} \cos \frac{\pi m}{L} + 2Ggh \text{ch} \frac{\pi h}{2L} - Cgh$$

三个力矩形成平衡状态,即其和为零。故有

$$- \frac{4LGg}{\pi} \text{sh} \frac{\pi h}{2L} \cos \frac{\pi m}{L} + 2Ggh \text{ch} \frac{\pi h}{2L} - Cgh = 0$$

整理后得

$$hC = - \frac{4LG}{\pi} \text{sh} \frac{\pi h}{2L} \cos \frac{\pi m}{L} + 2Ggh \text{ch} \frac{\pi h}{2L} \quad (13)$$

从中可看出,无论 m 取何值公式恒能成立,即 M_1 、 M_2 、 M_3 总处于平衡状态。还可看出, h 值不是恒定的,在 $m=(n+1/2)L$ 时取得极大值,在 $m=nL$ 时取得极小值。

褶皱后 h 值随 m 值(即 x 值)变化有两个原因:一是 h 褶皱前是真厚度,褶皱后是铅直厚度,受岩层倾角的影响而发生变化;二是不同部位应变不同而至岩层的真厚度也有所变化。

上面计算说明,岩层褶皱后所产生的力矩也是平衡的。因此,褶皱后的岩层所有边界条件均得到满足,公式(10) — (12) 是褶皱应力场的正解。

容易看出,公式(10) — (12) 中用岩层褶皱前各处的几何关系代替了其褶皱后的几何关系。当岩层褶皱幅度微小时计算结果误差不大,当褶皱幅度较大时误差就不可接受了。因此,公式(10) — (12) 仅适用于褶皱幅度微小时的情况,而不能用于计算大幅度褶皱时岩层内的应力状况。

3 讨论

3.1 褶皱波长相关讨论

3.1.1 褶皱波长计算

在力矩平衡关系式

$$hC = - \frac{4LG}{\pi} \text{sh} \frac{\pi h}{2L} \cos \frac{\pi m}{L} + 2Ggh \text{ch} \frac{\pi h}{2L}$$

中,令 $m=(n+1/2)L$ 则右边第一项值为零,关系式变为

$$hC = 2Ggh \text{ch} \frac{\pi h}{2L} \quad (14)$$

从中解得

$$L = \frac{\pi h}{2 \ln [C/2G \pm (C^2/4G^2 - 1)^{1/2}]} \quad (15)$$

从公式(15)可以看出,褶曲的波长与岩层的厚度和刚度模量呈正相关,即岩层越厚、刚度模量越大则褶曲的波长越长;与岩层失稳时所受的水平作用力呈负相关,即岩层失稳褶皱时所承受的水平作用力越小则波长越长。

二十世纪五十年代末六十年代初由 Biot 和 Ramberg 提出的“主波长理论”,中国学者叶柏龙等^[15-16]介绍了该理论给出的两个褶皱“主波长”的公式:

$$\text{弹性体: } Lm = 2\pi T (\sigma B_1/B_2)^{1/3} \quad (Z1)$$

$$\text{粘性体: } Lm = 2\pi T (\mu_1/\sigma\mu_2)^{1/3} \quad (Z2)$$

公式中： B_1 、 B_2 为主层及介质的弹性模量， μ_1 、 μ_2 为主层及介质的粘性系数。

对比公式 (15) 和 (Z1)、(Z2)，既有相同之处，也有不同之处。

(1) 相同之处

①描述的都是岩层刚刚失稳时的状况，此时的褶皱“波”基本上还是平直状态，褶皱“波长”与“弧长”无异。随着褶皱程度的加大“波长”逐渐变短，弧长虽有变化但变化相对小得多。因此，就褶皱现今的状态而言，三个公式描述的都是它们的近似“弧长”。

②描述的褶皱“波长”都与岩层的厚度和刚性程度成正相关。

(2) 不同之处

①公式 (15) 中，影响褶皱波长的仅为能干岩层本身的几何尺寸和物理状况，排除了周围介质的影响。但周围介质对能干层褶皱过程的影响是客观存在的，因此在能干层与其上下介质两者能干性相差悬殊的状况下 (15) 式的计算结果误差较小，应当是适用的；但当两者能干性相差较小时，误差可能就会较大，这时应用公式 (15) 需谨慎。公式 (Z1)、(Z2) 中同时考虑了“主层”与介质的力学性质，从形式上看能适用于“主层”和介质为各种力学性质的情况，但用于实际计算可能误差会很大——只需假设 $B_1=B_2$ 、 $\mu_1=\mu_2$ 或者令 B_2 、 μ_2 趋近于零，就可看出问题的所在。

②根据公式 (Z1)、(Z2)，“主波长理论”得出“褶皱主波长与作用力的大小无关，只与‘主层’和介质的力学性质有关的”结论；而公式 (15) 显示，褶皱波长与能干层失稳时的受力状况有关。

总之，公式 (15) 与“主波长理论”给出的公式，孰能更好地反映地质实际，有待地质科研和生产实践的检验。

3.1.2 褶皱等距性的成因

褶皱的等距性是一种常见的地质现象，早已被地质调查与勘探实践所证实。上述褶皱波长的公式 (15) 和岩层中心线形状方程 (6)，揭示了这一现象的成因：岩层褶皱后产生类似余弦曲线的波状起伏，如果在一定区域内岩层厚度和刚度模量基本稳定，则褶皱的波长就基本相同，褶皱就“等距”；

如果岩层的厚度或刚度模量发生变化，则褶皱的波长就要发生变化，褶皱就不“等距”。

3.1.3 复合岩层褶皱

复合岩层主要有三种情况：层间结合牢固的复合岩层、岩性和厚度基本相同但层间结合不牢固的复合岩层、岩性和厚度差别较大且层间结合不牢固的复合岩层。

(1) 层间结合牢固的复合岩层——平行褶皱

层间结合牢固的复合岩层在开始褶皱时层间没有分离仍为一个整体，与单一岩层一样，决定褶皱波长的是复合岩层的整体厚度和整体刚度模量，褶皱后各子岩层面尽管已经弯曲但仍保持平行关系。

(2) 岩性和厚度基本相同但层间结合不牢固的复合岩层——相似褶皱

这种复合岩层在开始褶皱时各层之间即发生分离而“各行其事”，但因各子岩层岩性和厚度基本相同且紧密接触互相影响，形成褶皱波长相同、形状相似、波峰波谷同步的相似褶皱。

(3) 岩性和厚度差别较大且层间结合不牢固的复合岩层——不协调褶皱 (图4)

这种复合岩层开始褶皱时就可能按不同的波长各自褶皱，从而形成所谓的不协调褶皱：厚度大、刚度模量大的岩层形成波长大的褶曲，对厚度小、刚度模量小岩层的活动空间加以限制；厚度小、刚度模量小的岩层形成波长短小的褶皱充填于大褶曲包围的空间之中。

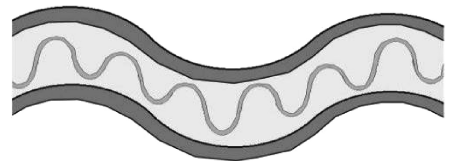


图4 不协调褶皱示意图

Fig. 4 Diagram of disharmonic folds

3.2 褶皱作为“古地应力记录仪”的可能

从公式 (14) 中可将 C 解出，得到关系式

$$C = 2Gch \frac{\pi h}{2L} \quad (16)$$

式中 C 是褶皱启动时岩层所受水平地应力，为岩层厚度 h 、刚度模量 G 、褶曲波长 L 三者的函数。此式反映的是翼部 $m = (n+1/2)L$ 处的情况， h 为铅直厚度。

如果令 $m = nL$ ，则力矩平衡关系式变为

$$Ch = 2hGch \frac{\pi h}{2L} - \frac{4LG}{\pi} \text{sh} \frac{\pi h}{2L}$$

从中解得

$$C = 2Gch \frac{\pi h}{2L} - \frac{4LG}{\pi} \text{sh} \frac{\pi h}{2L} \quad (17)$$

可以选择褶皱中的骨干岩层, 测量其厚度和刚度模量以及褶皱的弧长 (用以近似地代替褶皱启动时的波长), 代入公式 (16) 或 (17) 求出启动褶皱时该褶皱岩层所受水平地应力的近似值, 从而将褶皱作为“古地应力记录仪”用以测量地层开始褶皱时的古地应力数据。由于处于轴部的 $m = nL$ 点较处于翼部的 $m = (n+1/2)L$ 点易于把握, 可优先考虑测量轴部岩层数据利用式 (17) 进行计算。

由于受褶皱时的地温及褶皱后岩层的变形、破裂等多种因素的影响, 这个近似值可能偏差较大, 但这里毕竟从理论上指出了一条“测量”古地应力的路子, 值得深入探索下去。

3.3 对褶皱岩层内应力场演化的探索

上述分析是假设褶皱刚刚开始, 水平岩层仅有极微小的变形, 以致可以用岩层褶皱前各处的几何关系代替褶皱后的几何关系的情况下进行的。虽然已经求出了在这种情况下褶皱岩层内部的应力分布状况, 并进而求出了褶曲波长、岩层所受的水平地应力与岩层厚度、刚度模量之间的关系, 但对褶皱进一步发展时的应力场状况, 所得关系式 (8) — (10) 是不能描述的。

如果在该三个公式中以 $y - g\cos(\pi x/L)$ 代替 y , 则三个公式变成

$$\sigma_x = -\frac{2\pi Gg}{L} \cos \frac{\pi}{L} x \text{sh} \frac{\pi}{L} [y - g\cos(\pi x/L)] + C \quad (18)$$

$$\sigma_y = \frac{2\pi Gg}{L} \cos \frac{\pi}{L} x \text{sh} \frac{\pi}{L} [y - g\cos(\pi x/L)] + D \quad (19)$$

$$\tau_{xy} = \frac{2\pi Gg}{L} \sin \frac{\pi}{L} x \text{ch} \frac{\pi}{L} [y - g\cos(\pi x/L)] \quad (20)$$

以上三个公式右边第一项描述的应力场状况是: 沿 X 轴方向 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 的变化情况与公式 (8) — (10) 描述的相同, 三个应力值均呈类似于正弦或余弦曲线的周期性变化, σ_x 、 σ_y 的极大或极小值位于褶皱核部 $x = nL$ 处, τ_{xy} 的极大或极小值位于褶皱翼部 $x = (n+1/2)L$ 处。沿 Y 轴方向

的变化是, σ_x 、 σ_y 在岩层中心线上等于零, 在其两侧正负相反, 于岩层层面处绝对值最大, 在褶曲凸侧 σ_x 为拉 (张) 应力、 σ_y 为压应力, 在褶曲凹侧 σ_x 为压应力、 σ_y 为拉 (张) 应力; τ_{xy} 则在岩层中心线处绝对值最小, 在岩层层面处绝对值最大。公式中不再以岩层褶皱前各处的几何关系代替褶皱后的几何关系, 计算结果能够追踪褶皱的发展演化, 随褶皱拱高 g 的变化而变化。

直观上这三个公式比依据弹性力学理论推导出的公式 (8) — (10) 更加合理, 且可用以追踪褶皱发展演化的情况, 但运用弹性力学理论只能对其进行部分求证:

①当褶皱幅度很小即 g 趋近于 0 以致可以忽略时, 公式 (18) — (20) 式变得与前面的 (8) — (10) 一样, 而 (8) — (10) 是运用弹性力学理论推导出来的。因此此时 (18) — (20) 是符合弹性力学理论的;

②当褶皱幅度增大至 g 不能忽略时, 岩层的变形已背离弹性力学研究对象必须是“小变形”的基本假设, 超越了弹性力学研究的范围, 公式 (18) — (20) 是否还能正确描述褶皱岩层中的应力场已经不能用弹性力学理论加以求证, 有待寻求其他的求证方法。

虽然公式 (18) — (20) 描述大幅度褶皱应力场时的正确性在理论求证上尚有障碍, 但在地质观察实践上却得到了支持: 背斜能干层之上岩层普遍存在轴向张裂隙、其下存在虚脱空间反映的正是公式 (18)、(19) 描述的应力状态。

按照公式 (18) — (20) 推算, 褶皱岩层中的畸变应力场将随着拱高 g 的增大而增强。当应力增加到超过岩层的耐受极限时岩层即发生断裂, 褶皱过程因此而终止。岩层最容易发生断裂的地方为应力取极值的部位, 即褶曲核部 $x = nL$ 处和翼部背向斜过渡处即 $x = (n+1/2)L$ 处。于核部断裂者, 一侧能干岩层插入另一侧的负压区而形成半边背斜或半边向斜; 于翼部断裂者, 可造成地层的推覆。

3.4 能干岩层褶皱时对上下相对软弱岩层的影响

能干岩层褶皱时与拱桥十分相像, 背斜相当于桥拱, 向斜相当于桥墩。褶皱刚开始时, 岩层变形极小, 对上下岩层的作用极微; 发展过程中, 在背斜部位能干岩层对上方相对软弱岩层进行顶托挤压使其变薄并“流”向两侧向斜, 能干岩层

下方则形成负压区乃至虚脱空间;在向斜部位,“桥墩”将“桥拱”上传递来的所有力量施加于下方的软弱岩层,压迫其向背斜方向“流动”。因此,在背斜部位,可能出现能干岩层上方岩层变薄而下方岩层增厚乃至虚脱的现象;在向斜部位侧反过来出现能干岩层上方岩层变厚而下方岩层变薄的情况。

4 结论

文章运用弹性力学理论对褶皱构造应力场进行了研究,得到如下收获。

(1) 求出了反映能干岩层失稳、褶皱启动时的应力场公式(8) — (10),仅适用于计算褶皱刚刚启动时的应力状况。

(2) 提出了反映褶皱发展过程中应力场演化状况的公式(18) — (20),适用于褶皱发展的全过程。但受条件所限,仅对该式做了部分求证,需要进一步补充验证。

(3) 褶皱应力场公式推导过程中获得了一个关于褶皱波长的公式(15),与已流行多时的“主波长理论”中的波长公式存在部分差异。两者孰能更好地反映地质实际,有待地质科研和生产实践的检验。

(4) 褶皱应力场公式推导过程中还获得了反映褶皱过程启动时岩层所受水平地应力与岩层厚度、刚度模量、褶皱波长的关系式(16) ~ (17),从而指出了褶皱可作为“古地应力记录仪”。但“古地应力记录仪”要落地应用还需要进行大量研究及验证。

(5) 利用褶皱波长的公式(15),指出了褶皱等距性、平行褶皱、相似褶皱、不协调褶皱的成因:当一定区域内岩层厚度和刚度模量基本稳定,则褶曲的波长就基本相同,褶皱就“等距”,否则就不“等距”;层间结合牢固的复合岩层像单一岩层一样整体褶皱,从而形成平行褶皱;岩性和厚度基本相同但层间结合不牢固的复合岩层分别但同步褶皱,从而形成相似褶皱;岩性和厚度差别较大且层间结合不牢固的复合岩层,各层分别按不同波长褶皱,从而形成不协调褶皱。

致谢: 在研究和写作过程中得到了廖莉萍女士与何立贤、陈履安、刘子忠、郑伟等先生的鼓励、支持和帮助,审稿老师提出的修改意见对文

章的完善起到了至关重要的作用,在此一并由衷致谢!

参考文献/References

- [1] 王连捷,张利容,袁嘉音,等.地应力与油气运移[J].地质力学学报,1996,2(2):3-10.
WANG Lianjie, ZHANG Lirong, YUAN Jiayin, et al. Crustal stress and oil and gas migration [J]. Journal of Geomechanics, 1996, 2 (2): 3-10. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王连捷,孙宝珊,王薇,等.地应力对油气运移的驱动作用[J].地质力学学报,2011,17(2):132-143.
WANG Lianjie, SUN Baoshan, WANG Wei, et al. Driving effect of the crustal stress on petroleum migration [J]. Journal of Geomechanics, 2011, 17 (2): 132-143. (in Chinese with English abstract)
- [3] 宋洪亮,徐守余,郑丁.构造应力场与油气运移[J].断块油气田,2007,14(5):12-14.
SONG Hongliang, XU Shouyu, ZHENG Ding. Tectonic stress field and hydrocarbon migration [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2007, 14 (5): 12-14. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李文杰,梁金城,陆小平,等.广西老堡铅锌矿褶皱形成机制及其控矿规律[J].桂林工学院学报,2009,29(2):242-246.
LI Wenjie, LIANG Jincheng, LU Xiaoping, et al. Formation mechanism and ore-controlling rules of the folds in laobao Pb-Zn deposit, Guangxi [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2009, 29 (2): 242-246. (in Chinese with English abstract)
- [5] 钟道崇,高必松.褶皱控矿与找矿勘探的探讨[J].甘肃地质,1991,(2):89-95.
ZHONG Daochong, GAO Bisong. On the tentative approach of the fold control ore & prospection [J]. Gansu Geology, 1991, (2): 89-95. (in Chinese with English abstract)
- [6] 汪吉林,李仁东,姜波.构造应力场对煤与瓦斯突出的控制作用[J].煤炭科学技术,2008,36(4):47-50.
WANG Jilin, LI Rendong, JIANG Bo. Control function of tectonic stress field to coal and gas outburst [J]. Coal Science and Technology, 2008, 36 (4): 47-50. (in Chinese with English abstract)
- [7] 孙叶,谭成轩.构造应力场研究与实践[J].地质力学学报,2001,7(3):254-258.
SUN Ye, TAN Chengxuan. Research and practice on tectonic stress field [J]. Journal of Geomechanics, 2001, 7 (3): 254-258. (in Chinese with English abstract)
- [8] 赵玉琛.宣泾地区褶皱构造的节理谱分析和应力场研究[J].安徽地质,1992,2(2):15-24.
ZHAO Yuchen. Stress field study and joint frequency analysis of folds in Xuanjing area [J]. Geology of Anhui, 1992, 2 (2): 15-24. (in Chinese with English abstract)
- [9] 莫时旭,杨荣丰,黄昔容.涟邵煤田金竹山向斜构造应力场

- 探讨 [J]. 湖南地质, 1998, 17 (2): 76-80.
- MO Shixu, YANG Rongfeng, HUANG Xirong. A discussion of the structural stress field in Jinzhushan Syncline, Lianshao coalfield [J]. Hunan Geology, 1998, 17 (2): 76-80. (in Chinese with English abstract)
- [10] 付京斌. 煤层褶皱构造形成演化应力场分布特征数值模拟 [J]. 煤矿安全, 2010, 40 (1): 56-59.
- FU Jingbin. Numerical simulation of stress field distribution characteristics for evolution of coal seam fold structure [J]. Safety in Coal Mines, 2010, 40 (1): 56-59. (in Chinese with English abstract)
- [11] 杨玉山, 沈晓华, 邹乐君. 褶皱变形应力场对断裂控制作用的有限元模拟 [J]. 科技通报, 2006, 22 (5): 616-621.
- YANG Yushan, SHEN Xiaohua, ZOU Lejun. Finite element simulation on control effect of deformation stress field of folds on fractures [J]. Bulletin of Science and Technology, 2006, 22 (5): 616-621. (in Chinese)
- [12] 陈国祥, 窦林名, 乔中栋, 等. 褶皱区应力场分布规律及其对冲击矿压的影响 [J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37 (6): 751-755.
- CHEN Guoxiang, DOU Linming, QIAO Zhongdong, et al. The stress field distribution in folding structure areas and its impact on rock burst [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37 (6): 751-755. (in Chinese with English abstract)
- [13] 徐芝纶. 弹性力学 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1978.
- XU Zhilun. Elastic mechanics of [M]. Beijing: The People's Education Publishing Company, 1978. (in Chinese)
- [14] 杨桂通. 弹塑性力学 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1980.
- YANG Guitong. Elasto mechanics [M]. Beijing: The People's Education Publishing Company, 1980. (in Chinese)
- [15] 叶柏龙, 何绍勋, 彭恩生. 有限不等厚介质中单层褶皱的理论及模拟实验研究 [J]. 大地构造与成矿学, 1992, 16 (2): 211-213.
- YE Bailong, HE Shaoxun, PENG Ensheng. Theoretical and experimental Studies on Folds of single layer intercalated between limitedly and differently thick media [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1992, 16 (2): 211-213. (in Chinese with English abstract)
- [16] 叶柏龙, 喻爱南. 主波长理论在地质勘探中的应用 [J]. 中南工业大学学报, 1995, 26 (2): 148-152.
- YE Bailong, YU Aiguo. Application of the dominant wavelength theory to the geological exploring [J]. Journal of Central South University of Technology, 1995, 26 (2): 148-152. (in Chinese with English abstract)