

柱状薄壳失稳与地质构造的力学分析

吴海威

(青海省地质局第一区测队)

一、地质构造现象

我国地质构造有一个明显的特征：在稳定的沉陷区周围环绕着相对活动的褶皱隆起带。反映在地貌上就形成平缓的平原与高峻的山系镶边的局面，不同方向的褶皱隆起交织成菱形网络。

在西部地区，大体以海西运动为基础，中生代以来继续运动发育了一系列北西西到东西方向连续排列的菱形盆地：如准噶尔、塔里木、柴达木等。它们的四周环绕着褶皱隆起的阿尔泰山、天山、阿尔金山、祁连山和昆仑山。在东部地区，燕山运动以来，又形成一系列北北东、北东方向排列的菱形盆地，如松辽平原、华北平原、鄂尔多斯盆地、四川盆地等。它们的周围环绕着巨大的褶皱隆起带，如太行山、吕梁山褶皱隆起带就夹于华北平原与鄂尔多斯盆地之间。而秦岭又是夹于四川盆地与鄂尔多斯盆地之间的强烈活动的中生代褶皱山系。许多地质工作者注意到四川盆地的构造线，从龙门山到大巴山在盆地边缘绕了半个圈子，在华蓥山向东地区，构造线由北北东渐变到北东东走向，整个构造线排列成扇形，好象这些盖层构造绕着一个核心旋转。这些鲜明的形态是否是在某种应力场下形成的统一地壳结构，是值得探讨的。

《地质力学讲话》编写组在论述新华夏体系时认为：“应当指出，这些构造盆地和山脉都不是连成一气的，它们中间均为东西复杂构造带所分隔。其西，还有分隔更加清楚的呼伦贝尔——巴音和硕、陕甘宁和四川等几

个盆地。但是把它们联系起来看，仍然是走向北北东的一条沉降带。”* 可见这种网状分布格局是有规律的。

较小的构造形态，如山西隆起区的断陷带内，有与盆地发育期间同时形成的盆地之间的横向断裂——隆起带。象太原盆地和临汾盆地之间的韩侯岭隆起。

西太平洋地区轴向近南北的日本海盆，菲律宾海盆，也都是以凸起岛弧，弧形断裂为菱形镶边。如菲律宾海盆的两个菱形钝角区就是台湾地区和关岛地区，有研究成果表明，现在台湾地区地震活动所反映的主压应力方向极近于南东东—北西西向。

张文佑同志在 1960 年指出，中国以贺兰山—六盘山—龙门山—横断山为界的两套菱形盆地的方位特点，并指出地中海带和环太平洋带中普遍存在菱形地块夹断裂带和褶皱带的规律性的形态特点^[1]。

为了进一步认识这一构造形态的必然性和运动规律，我们试用更接近地壳轮廓特点的柱壳模型和弹性薄壳稳定理论，来作实验和力学分析加以探讨。

二、实验及力学分析

假如，由盖层和结晶基底组成的构造层，厚度 d 为 15 公里，地球半径 R 取 6370 公里时， $d/R \approx \frac{1}{424.7}$ ，地壳就是一个天然的球形薄壳结构。当然 d 取得更大，也不会使 d/R

本文 1977 年 4 月 20 日收到。

* 地质力学讲话，地质出版社，1972，38。

值的数量级超出薄壳的定义^[2-4]。采用薄壳模拟显然比用杆件、板件模拟更逼近于实际情况。

由地球自转速度变化引起壳层中经向应力的变化,使低—中纬度地壳环和轴向受压的柱壳屈曲较为近似(图1)。屈曲的结果形成菱形拗褶。文献记载多为金属柱壳实验,我们用推纸实验来了解菱形拗褶的成生。取普通软质光面薄纸,厚度和铁筒半径的比在1/100—1/500左右,将纸蒙在筒外壁,用双手卡住筒柱两端(所卡弧长占圆周2/3以上),也可以固定一端,另一端用稍稍紧箍在纸壳上的环,缓缓沿轴向推挤或者扭转纸壳(图1,2)。



图 3



图 4

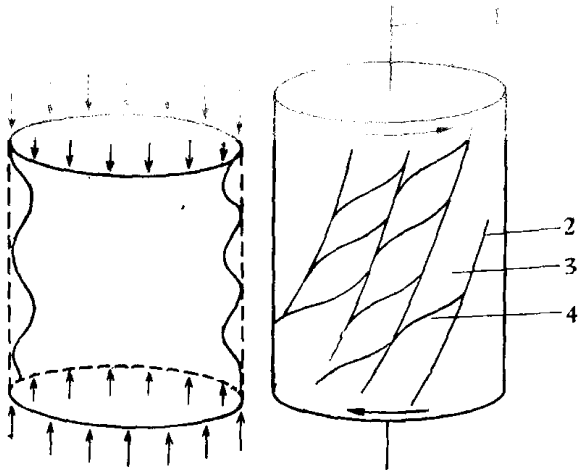


图 1

图 2

1. 在轴压作用下

(1) 屈曲开始时,微弱的少量凹凸发生在失稳带的随机部位上,当纸壳端部有微量位移时,柱壳产生了较明显的多个凹凸。

(2) 持续加力,凹陷扩展并作有限位移,每个凸部轴向变窄,而经向抬升,最后凸褶迅速沿凹陷边缘凸起,较快地连成菱形拗褶图案。这是壳体从旧平衡达到新平衡的过程,每个菱形的长轴垂直于压力方向(图3)。

(3) 继续沿轴向增加压力,长轴拉长,菱形变扁,长轴的两端部的内外两侧有小的凹凸变动,再加大压力,柱壳端部有很小的位移,菱形挤扁,柱壳完全破坏。

2. 柱壳两端部顺时针扭动(图2),柱壳屈曲呈现出一系列斜列的凸褶和凹陷,凹陷中同时凸起横向凸褶,但横向凸褶要比纵向凸褶小一些,横竖凸褶之间呈联合弧样联接,构成一个个雁行状斜列的菱形拗褶(图4),形态和我国东部的新华夏构造体系相似。

3. 几个现象

(1) 实验初始阶段的微形凹凸卸载后,凹凸全消失,对于刚出现的菱形拗褶若立即

卸载,凹凸也全消失,重新加载,新的凹凸不一定在老位置上出现。如果屈曲强烈凹凸显著,或长时间加载造成的痕迹鲜明,卸载后再加载往往沿某些缺陷屈曲,形成一套不规则的菱形图案,变换压力方向,也形成先后形迹复合的情况。

(2) 柱壳屈曲过程中,可在菱形拗褶中形成小菱形,好象大菱形套小菱形一样(图3)。

(3) 在屈曲初期也出现过某凸起部位,其周围有几个小的菱形凹陷环绕着的现象。这和壳体不均质、施外力不均匀有关。

(4) 实验中可见,每个菱形凹陷的最深部位在没有连成整个图案之前是有移动的,凹陷有一个扩展阶段,图案形成后,凹陷的最深部位一般在凸褶内侧的边缘部,这和我们采用铁柱壳做内衬有关,因此可以近似地认为在凹陷过程中受到了愈来愈大的内压。还发现铁壳上的纸绷的稍松一些,推出的凹凸要宽缓一些。

薄壁柱壳为什么屈曲的最后阶段会发展成菱形拗褶,原因是:在柱壳中,抗弯刚度 $D \left(D = \frac{Ed^3}{12(1-\nu^2)} \right)$ 与 d^3 成正比,而抗薄膜变形刚度仅与 d 成正比。因此当薄壳壁 d 很小时,抵抗伸长的能力要比抵抗弯曲的能力大得多^[5]。

一个变形壳的应变能由两部分组成:(1) 由于弯曲的应变能

$$U_1 = \frac{1}{2} D \iint [(\chi_x + \chi_y)^2 - 2(1-\nu)(\chi_x \chi_y - \chi_{xy}^2)] dA,$$

其中 χ_x 、 χ_y 、 χ_{xy} 为壳曲率的改变,显然 U_1 是和 d^3 成正比的量。(2) 由于中面拉伸的应变能:

$$U_2 = \frac{Ed}{2(1-\nu^2)} \iint [(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2 - 2(1-\nu)\left(\varepsilon_1 \varepsilon_2 - \frac{1}{4}\gamma^2\right)] dA,$$

其中 ε_1 、 ε_2 、 γ 为壳中面三应变分量, U_2 是和 d 成正比的量^[6]。

由此可见,在薄壳中 U_2 要比 U_1 变化平稳的多。这就解释了为什么壳体(或地壳)厚度的差别,会造成构造形态的巨大差异。

U_1 和 U_2 相加即得总变形能。

为了获得较低的应变能的位形,柱壳薄壁要选择使中曲面具有小拉伸的形状。实际柱壳中弯曲集中于菱形凸褶周围,同时也有小量拉伸,壳体的其余部分本质上是不弯曲的^[5]。理论上知道,大挠度情况下,壳体挠度曲面为可展曲面时,中面才无伸长。而柱壳就是一个可展曲面,由平三角面规则排列的菱形图案也是可展的,这保证了在理想状态下,一个柱壳可以转变成具有适当尺寸和理想凸褶的菱形图案而不具薄膜伸长^[5-7]。柱壳壁越薄,形成菱形拗褶的趋向越强。

实验指出,对于相当厚壁的柱壳,可屈曲成如线性理论所指出的正弦波样褶皱,或其与菱形拗褶的过渡状况。但厚壁壳发生的往往是材料的屈服而不是屈曲(即失稳),而且厚壁模型放大后,代表的构造层也远远超过实际地质构造所达到或影响到的深度。由于地壳变形的复杂程度,用线性理论研究的缺点也是显然的。

对地质体,由于总存在某些初挠曲和断裂等其它缺陷,所以当应力值较小时,薄壳屈曲就可以开始。而且目前以地球自转速度为根据所得到的理论和实测地应力值普遍较小,远不足以克服岩石的弹性强度。显然在考虑长时间效应时,再看到地质体的巨大尺度和其厚度较小的情况,考虑结构的稳定性,这样可以允许较小的应力源存在,更符合地球的运动情况^[8,9]。

三、体会与讨论

现试从地震地质角度就菱形拗褶这种格架,讨论区域结构的稳定性问题。因为任何构造体系一旦生成就等于造成了一种地壳结

构,地壳运动是发生在结构物中而不是简单的平板中,从力学角度看就有稳定问题。

从内因方面考虑,凸褶及其附近集中了弯曲和小拉伸,所以在构造盆地边缘区集中了较大的活动能量,而发育的边缘断裂又反过来加剧了这种能量的集中。盆地内部相对稳定一些。

从外因方面考虑,菱形拗褶是对某种应力场的某种平衡结构。所以在区域应力场变化不大的时期,盆地内部是较稳定的,容易在那些边缘断裂区和顶角区域累积能量,导致边缘地震带的活动,如塔里木盆地的边缘地震活动。若区域应力场发生大的变化,平衡结构就变成不平衡的结构,要改造原菱形的形态,变动凹陷和凸褶,产生新的菱形拗褶来达到新的平衡状态。这就要在边缘区到盆地内部逐渐累积变形能量,不断用地壳升降(即用小弯曲)来调整各部分的位能形态,这可以观察先后作相反扭动(或压扭)的纸柱壳实验来说明。因此,不仅在凸褶区,而且在盆地内部也会发震,好象有弯曲与小拉伸能量跃入凹陷内一样。这也就是为什么华北浅源地震在平原内部频繁存在的可能原因之一。已有资料证明,华北沉陷区的断裂活动方式不同于新华夏的扭动方向,例如邢台、海城、唐山等大震所得的平移方式都是右旋扭动。由于这是区域应力场发生变化,所以在一段时间内,应力集中常常还是沿袭老的缺陷,但是经过一个阶段,它的特点还会暴露出来。根据这个分析,需要注意靠近菱形结(几个菱形顶角复合部位)和凸褶地区附近的大地垂直变形及菱形顶点之间的距离变化。在地壳升降变形的最大梯度部位,又有原断裂构造配合的地区,可能会形成浅源地震能量的“储蓄

所”。

从模拟实验的情况看,某些稳如地台的凹陷区和活如地槽的褶皱隆起带,是否本质如向斜和背斜不是孤立存在一样,而是地壳运动表现的两个侧面,它们是有内在的统一的力学联系的,即同一壳体中抗拉伸与抗弯曲能力之间的对立统一。可能不全是地槽褶皱为揉性地层对刚性地层的塑性镶边,即简单的固体外在机械性质的问题。从这个意义讲,槽、台是统一的。从前述知,稳定的凹陷,也会活动起来,凸褶也会变动凹陷下去。从实验的初凹陷——凹陷扩大——凸褶迅速隆起,似会形成某些类似槽、台型建造之分,也会在时间上大体分出区域构造运动“幕”。

总之地壳某一部分的构造运动发生了,它就可能采取局部或整体屈曲的形式,屈曲的结果往往有形成菱形拗褶的趋势并产生断裂,反过来这种结构又影响地壳的构造运动,这是由地壳结构的力学本质所规定。是否如此,还需探讨。

本文承张文佑、王仁同志审阅指导,桂文立同志摄影,在此一并致以深切谢意。

参 考 资 料

- [1] 张文佑、孙广忠,地质科学,1963,2,65.
- [2] H. B. 科尔库诺夫,弹性壳体计算的基本理论,高等教育出版社,1966.
- [3] A. C. 沃耳密耳,揉切板与揉切壳,科学出版社,1956,210.
- [4] 冯元桢译,壳体结构文汇,第四册,中国工业出版社,1965,81.
- [5] 冯元桢译,壳体结构文汇,第四册,中国工业出版社,1965,165.
- [6] S. P. 铁摩辛柯, J. M. 盖莱,弹性稳定理论,科学出版社,1965,366,471.
- [7] S. 铁摩辛柯,材料力学,科学出版社,1964,79.
- [8] 黄庆华,力学,1976,2,84—85.
- [9] 王仁,力学,1976,2,86—87.