

构造物理学基础

[苏] M. B. 格佐夫斯基 著

刘鼎文 杜奉屏 王礼棠 译

马 瑾 校

地震出版社

1984

内 容 提 要

构造物理学是地球科学一个新的分支,是大地构造学、地球物理学和物理学之间的一门边缘学科,其目的在于研究构造过程的物理规律。

本书是构造物理学奠基人之一 M. B. 格佐夫斯基的科学遗著。书中以作者不同时期发表的和未发表的构造物理学基本问题方面的重要论著为基础,论述了构造物理学的任务、内容和物理基础,其中包括构造过程模拟实验方法的基础;研究了褶皱和断裂形成的机制、规律和构造应力场;还包括了构造物理学对最新和现代构造运动的解释、深部过程的研究、地震危险性的评价、地壳应力状态的探讨、构造过程能量的估计等方面的许多基本问题。

本书可供从事地质学、构造地质学、构造物理学、地球物理学、地震学、矿山地质学的研究人员、教学人员参考。

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОРДЕНА ЛЕНИНА ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ им. О. Ю. ШМИДТА
М. В. ГЗОВСКИЙ
ОСНОВЫ
ТЕКТОНОФИЗИКИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА
1975

构造物理学基础

〔苏〕M. B. 格佐夫斯基 著
刘鼎文 杜奉屏 王礼棠 译
马 瑾 校
责任编辑:李树菁

地震出版社 出版
北京复兴路43号
北京印刷三厂印刷
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售

787×1092 1/16 26.5印张 1插图 660千字
1984年8月北京第一版 1984年8月北京第一次印刷
印数 1—4,000
统一书号: 13180·231 定价: 4.10元

前 言

地壳上层，首先是地球坚硬外壳（岩石圈）中正在发展的构造过程，几十年来都是由大地构造学和地球物理学这两门独立的科学平行进行研究的。当研究对象一致时，地质构造现象的研究观点、研究方法和所研究现象的时间尺度的差别都很大。由于不能直接观测深部过程，在企图建立地球构造发展统一理论的过程中，产生了极大的困难，只有通过地质和地球物理的综合研究以及创立统一的综合地球科学才有可能克服这些困难。

构造物理学这一新兴科学领域的产生是统一地球科学发展过程的一种表现，它是在大地构造学、地球物理学和物理学结合的情况下，在最近二、三十年内产生和迅速发展起来的。

苏联卓越的地质学家、构造地质学家和地球物理学家 M. B. 格佐夫斯基是构造物理学创始人之一和这一领域的重要专家。在 M. B. 格佐夫斯基开始他的科学活动时，构造物理学还是一堆杂乱的、彼此矛盾的、常常是不能加以正确解释的事实。由于多年的劳动，M. B. 格佐夫斯基把构造物理学变成了完整的科学体系。正是 M. B. 格佐夫斯基创立和奠定了现代构造物理学及其物理基础和独创的野外和实验室研究方法。

地球的固态圈层，首先是地壳部分，从各个岩层到整个地壳都是构造物理学研究对象。构造物理学从事探讨确定物理量的客观定量方法。这些物理量包括：应变，应力，与水平运动和垂直运动、褶皱和断裂的形成、地震的发生这样一些构造过程表现相对应的能量。

构造物理学的基本内容是在具体机制不同时确定地壳应力分布及变形和断裂发展的普遍规律。因此，根据在地表所记录的运动来推断深部应力状态的问题具有极重要的意义。构造物理学研究的成果可以用来解决地质和地球物理许多极重要的实际和理论问题，其中包括普查、勘探和矿床开发，深部过程成因的研究，地震危险性预测等。

M. B. 格佐夫斯基是这样来描述构造物理学所提供的新的可能性的：“和其他学科一样，在最近的将来，构造物理学研究将为解决地质学的许多重要课题奠定基础。第一，扩大了预测深部和地层出露不良地区构造细节的可能性，……。在将来普查和勘探地下矿床时，这将具有很大的意义，因此预测深部构造细节的意义将越来越重要。这种预测对于隐蔽式矿床和大型构筑物建设地区的工程地质勘测也是有益的。第二，把构造物理学研究，与构造地质学、地球物理学和其他地质科学综合起来，就可以利用地壳上部的地质资料来研究地壳下半部分和地幔上部所发生的深部地质过程。利用这样的方法可以成功地确定构造运动的成因，这个问题是整个地质学史上长期激烈争论的问题。因为构造物理学加上岩石学，为解释各种化学成分岩浆的产生条件开辟了道路。第三，构造物理学开辟了研究地球物理现象的另一种可能性。它能阐明地球内部物质的应力状态，还能预测地震和解释重力异常。上述地质和地球物理课题具有很大的理论意义。它们的解决可使许多远非事先能预见的各种实际问题得到说明” [196]。

本书起初想编成一本包括 M. B. 格佐夫斯基已发表和未发表的论文以及他写的构造物理学最基本和最重要的论文选集。但在以 M. B. 格佐夫斯基的学生和同事为主的编辑组进行选编的过程中，把选集完全编成了对构造物理学基本问题有次序的论述。

随着大地构造学和地球物理学新的实际资料的积累，作者发展了某些观点，因此本书具

有一定的特点。例如，如果说在30年代的文章中作者强调垂直力在构造过程中的主导作用，那么，在后一些年代的文章中，作者的结论却是“在地壳中垂直作用力和水平作用力复杂结合在一起共同起作用”。

全书由七编组成。其中叙述了：构造物理学的历史和任务（第一编），构造物理学的物理基础（第二编），构造过程的物理理论（第三编），利用构造物理研究地震危险性的问题（第四编），构造运动和深部过程的问题（第五编），地壳应力状态和构造过程能量研究的问题（第六编），构造物理学的发展远景（第七编）。上述七编实质上组成了论述构造物理学现状、方法和基本成就的一本专著，这本专著是苏联和国外在这方面的唯一著作。

在编辑和整理本书时，编辑组遇到许多困难。编辑组所收集的作者阐述构造物理学基本问题的一些最重要的论文，足够使本书编成一本专著。同时，由于构造物理学的边缘学科性质和综合特点，以及在解决各个相邻知识领域问题时在本书的若干章节中所叙述的用构造物理学解决这些问题的结果和方法，使本书涉及的问题极其广泛。又由于本书的编写特点，使某些问题叙述得不够完善，个别原理有所争议，有许多地方没有引用近期的参考文献。编辑组对这些地方都用注解加以说明或补充。同时，当把书编成专著而需要对材料作某些修改时，常常与保留作者原文的愿望有矛盾。

总的来说，对原著只作了最少的修改，一般只是删节和编排；在极个别情况下，编辑组认为需要按照作者后期的观点修改书中的个别地方。例如，第B部分中材料有一部分是根据文献〔178〕叙述的，而另一部分却是根据文献〔195〕中的第三十六章叙述的。在第二十八章中，根据文献〔193〕叙述构造运动速度梯度问题时，以及从此进一步论述深部变形速度时，曾引用了作者后期文献〔200〕中阐述的原理。在第四章中，对第三章和其他章节中所研究的应力强度值与变形强度值的关系进一步作了一些确切的说明。在有些章节中由于篇幅所限而删去了一部分原始资料。第1，4，7，10，11，12，13，18和23章作了较大的删节。

书中没有介绍M. B. 格佐夫斯基的地质和构造地质著作以及他的部分地震构造学著作。读者可在本书后面所附的作者全部科学著作目录中查找这些论文。所列1000多种参考文献，主要是根据作者引用过的，以及注解中引用的编排而成；在个别情况下把最近几年的论文的引文编入正文。参考文献包括了大部分构造物理学的论文和与其有关的某些学科的文章，因此本书后面附的参考文献具有独特的价值。

书末附有编辑本书用的资料目录。书中还包括了M. B. 格佐夫斯基和其他研究人员合写的一些文章，在这种情况下，文献目录中列出了作者的姓名。

最后必须指出，除了编辑组成员外，苏联科学院大地物理研究所构造物理实验室的同事З. Е. 沙赫穆拉多娃（Шахмурадова），Н. Ю. 茨维特科娃（Цветкова），В. В. 斯杰帕诺夫（Степанов）也参加整理本书的工作。此外，В. В. 库德利雅绍娃（Кудряшова），Г. А. 格利雅兹诺娃（Грязнова），Т. П. 马尔吉娜（Мальгина），В. Н. 普尔尼科夫（Пульников）和А. А. 洛马金（Ломакин）参加了原稿整理工作。

作者的夫人和忠实的朋友Г. В. 格佐夫斯卡娅（Гзовская）对原稿整理和校订付出了巨大的精力和劳动。

原书编辑组

目 录

前 言	(i)
-----------	-------

第一编 构造物理学的历史和任务

导 论	(1)
第 一 章 构造物理学发展的主要阶段	(3)
第 二 章 构造物理研究的主要方向	(12)

第二编 构造物理学的物理基础

A 岩石的物理力学性质	
第 三 章 应变和应力的一般概念	(17)
第 四 章 岩石的蠕变	(21)
第 五 章 岩石的弹性	(30)
第 六 章 岩石的粘性	(34)
第 七 章 岩石的强度 (断裂形成的物理理论)	(41)
B 构造现象的模拟实验	
第 八 章 构造现象模拟实验的基本原则	(52)
第 九 章 相似条件	(54)
第 十 章 等效材料 (对等效材料的理论要求)	(66)
第 十 一 章 用模型研究应力的光学方法	(71)

第三编 构造过程的物理理论

C 构造应力场	
D 断裂的形成机制	
第 十 二 章 断裂分类的基本问题	(93)
第 十 三 章 简单剪切变形理论	(103)
第 十 四 章 与剪应变有关的雁列式裂隙的野外研究	(112)
第 十 五 章 与剪应变有关的裂隙模拟	(117)
第 十 六 章 大型断裂的野外研究	(127)
第 十 七 章 大型断裂的模拟实验	(135)
第 十 八 章 断裂对应力的影响	(139)

第十九章	大断裂研究的若干结果	(144)
E	褶皱的形成机制	
第二十章	研究褶皱的新方向	(149)
第二十一章	褶皱分类的基本问题	(158)
第二十二章	横向弯曲褶皱的模拟试验	(162)
第二十三章	纵向挤压和纵向弯曲褶皱的模拟试验	(176)
F	构造变形机制与应力场类型	

第四编 构造物理学在估计地震危险性中的应用

第二十四章	地震地质准则的构造物理学基础	(199)
第二十五章	最新和现代构造运动在新型详细地震区划中的应用	(216)
第二十六章	地震概略区划的方法基础	(237)

第五编 构造物理学在研究构造运动和深部过程中的应用

第二十七章	编制地壳深部构造区划图的原则	(260)
第二十八章	关于最新和现代深部构造运动资料的地球物理解释	(267)
第二十九章	在构造状态和地震活动性不同的各个区域中现代和 年青构造运动的定量特征	(285)
第三十章	岩浆作用和构造物理问题	(296)

第六编 地壳应力状态和构造过程的能量

第三十一章	考虑地壳各区段构造特性及其应力状态的模型实验	(309)
第三十二章	根据矿山巷道测量分析地壳上部的应力状态	(320)
第三十三章	估计地壳中构造应力的可能性	(326)
第三十四章	地震活动区构造过程的能量	(346)

第七编 构造物理学的发展前景

第三十五章	构造物理学新的发展方向	(355)
参考文献		(388)
作者简介		(415)

第一编 构造物理学的历史和任务

导 论

广泛采用各种地质研究方法的大地构造学是研究与地球及地壳总的发展有关的褶皱、断裂分布的一般地质规律，以及搞清褶皱和断裂产生的历史。但是，仅在地表或极小深度内单纯进行地质观测是不够的，因为这种地质观测不能观测地壳随时间的变形过程以及测量地壳任一点的应变和应力。

为了全面研究褶皱和断裂形成的过程，不仅需要阐述褶皱和断裂的分布规律和产生的历史，还要解释它们的形成机制。因为地壳岩层变形和连续性的破坏是一种物理过程，应该用物理方法去研究它们。因此，研究地壳褶皱和断裂形成机制的课题不仅是构造地质学的任务，而且也是物理学的任务。为了解决这一问题，形成了特殊的研究方向，在这个方向确立了“构造物理学”这一名称。因此，构造物理学的总任务是阐明在深部过程的作用下地壳中产生的变形和断裂的发育机制。

由于这些变形和断裂形成了广泛分布的地壳构造单元，它们可以称为变形构造单元。此外，还有岩浆成因（基岩，岩盘，岩床等）和沉积成因（礁状岩体，三角洲沉积岩体，盐矿层等）的构造单元。利用上述名词，可以确定构造物理学为关于地壳变形构造单元发展机制的学说*。

构造物理学是介于构造地质学、地球物理学、岩石力学、材料强度学和水力学之间的边缘学科。构造物理学与有用矿产理论和其他地质学科（矿物学，岩石学，地史学）的联系具有很大意义。

构造物理学是联接地质学和地球物理学之间的一个环节，构造现象在构造物理学中看作是物理过程。在构造物理学中，把地质资料转换成地球物理学和整个物理学的定量特征和数学语言。由于构造学的一部分变成了精确科学，就使地质和地球物理资料进行定量对比有了可能，并且在解决需要定量答案问题时，能综合利用地质和地球物理资料。

由于地壳的发展是地球内部、水圈和大气圈产生的深部和表部过程复杂的相互作用的结果，因此，构造物理学地质方面的问题难度较大。每个褶皱和每个断裂的形成都是在地壳许多过程同时出现的条件下发生的，地质研究应该解释这些过程，评价它们对褶皱和断裂发展的可能影响，从而得出恢复褶皱和断裂形成历史的资料。

构造物理学物理方面的问题也是复杂的，其原因首先在于目前在地表和矿井中只能观测到某些结果，我们不但需要根据这些片断的资料来判断产生变形和断裂的力的方向和性质，

* 在50年代，当时地壳褶皱和断裂构造形成机制的研究还是构造物理学研究的历史性发展的主要目的时候，作者提出的构造物理学的定义就相当准确地反映了构造物理学最重要的任务。后来在著作[197, 199, 203, 802a]中作者更广泛地把构造物理学定义成物理学理论或构造过程的物理研究（还可参见16页的附注）——原编者注

而且还要对不能直接进行研究的地球其它地区的构造作出结论，而这些片断的资料又远未反映出进行得极为缓慢的过程的全部结果。其次，在于岩石是非均质各向异性的塑性变形层状物质，其内部结构极其复杂，并且在不同深度，即在不同围压和温度下的应变和破坏过程发展时间极为漫长，这就使问题更加困难。解决这类问题的理论基础是目前研究较差的蠕变理论，这种理论包含材料的弹性、粘性和持久强度的内容。最后应该指出，对解决这些任务所必需的岩石物理性质方面的知识研究得还很差。

因此，构造物理学面临的困难相当大。这些困难就是解决构造物理学问题的多次尝试成效不大的原因，这些问题是从十九世纪中叶开始由许多地质学家在解决其他纯地质学问题时顺便提出的。

只有进行了专门系统的地质和地球物理的综合研究，同时考虑到以前在这方面所作的工作，并且正确理解构造物理学现状之后，才能有效地解决构造物理学的问题。

第一章 构造物理学发展的主要阶段

构造物理学研究史只有在整个地壳构造研究史和一般大地构造观念发展的背景上才可能正确了解。因此,下面讨论一下整个大地构造学发展的各主要阶段,同时把主要注意力集中到构造物理学上。

第一阶段——十九世纪后半期和二十世纪初

十九世纪后半期,褶曲和断裂的发生和形成机制已经成为迫切的问题。由于对广大的沉积岩分布区进行了地质测量和对其中的矿床结构进行了研究,发现了分布十分广泛的褶曲和断裂。解释褶曲的形成及其与地球总的发展相联系的必要性,产生了地球发展的收缩假说。此假说很容易与曾经获得广泛流传的康德-拉普拉斯宇宙起源假说联系起来。

收缩假说认为褶曲是由于地球深部产生冷却和体积收缩,致使地壳发生普遍挤压的结果。这种褶皱形成的概念在当时占统治地位。

在此时期孕育了按照总的大地构造概念开始发展的构造物理方向。A. 海姆 (Heim)^[810] 在阿尔卑斯进行的研究工作对发展褶曲形成的概念具有重大意义,这些工作注意到了在岩石中广泛发育的各种形状的塑性变形。同时,确定了在褶曲形成时,由不同岩石组成的岩层表现也不一样。此后,很快在地质学中出现了关于粘性较强的(“刚性的”)岩石夹层在褶曲形成机制中起主要作用的观念,这种岩石夹层由于受到纵向弯曲而变形,并起着决定褶皱特性的骨架作用。这样的夹层叫做“主干”岩层。其他粘性较低的夹层叫“非主干”岩层。当时认为“非主干”岩层分布于大型褶曲翼部的“主干”层之间,被挤压到岩层弯曲的部位,在那里形成小的次级褶曲^[892]。

由 H. 卡德尔(Cadell)^[757], A. 法弗 (Favre)^[778], A. 多勃列(Daubree)^[778], B. 维利斯 (Willis)^[892] 提出的通过实验恢复褶曲及其伴生断裂的想法与收缩假说有联系。当时由于岩石力学性质的资料贫乏,又由于缺少足够成熟的塑性理论、强度理论和物理相似理论,所有这些实验都是在不考虑相似条件下进行的。在褶曲形成过程中,认为纵向弯曲具有很大的意义,因此通过对各种弹性和塑性材料(铁板,锌,铅以及石膏,蜡,树脂,松节油的混合物)制成的薄板进行纵向挤压来模拟褶曲。断裂用玻璃、石膏和石蜡的棱柱体来模拟。

E. 莱伊尔 (Reier)^[862] 也作过褶曲、断裂和裂隙的模拟实验。

在许多实验中对变形样品加力的方式与天然的情况是很不相同的,这是由于研究人员企图得出变形模型与天然实体在几何上相似,然而模型材料却不满足相似条件。

1893年, G. F. 贝克尔 (Becker)^[734] 提出了一个解释强烈变形体中发生的断裂的分布假说,后来此假说在地质学家中得以广泛流传,直到不久前在许多著作中还用来解释断裂产生的原因。G. F. 贝克尔在发展自己的假说时,不是依据岩石的真实力学性质,而是依据他提出的岩石与橡胶性质的相似性。因此,他得出了不正确的概念,认为岩石变形时产生的断裂面的方向与椭球体的圆截面方向一致,此椭球体是空间某一研究点周围变形的图解(“应变椭球体”)。

十九世纪末,一个不大的俄罗斯地质学家团体致力于研究俄罗斯平原、中亚、西伯利亚、乌拉尔和高加索广大地区的主要地质特点。

在俄国,于1883—1919年,A. П. 卡尔宾斯基(Карпинский)总结区域地质资料后,作出了在大地构造方面极重要的关于地壳各处经常发生缓慢垂直振荡运动的结论。奠定了地壳地台区构造的基本观念。

第二阶段——二十世纪开始的三十年

这一时期,由于总结了许多地区地质构造的新资料,产生了对收缩假说正确性的怀疑。因为,当时还没有出现相当成功的新假说,大地构造处于严重危机的状态。在一些新假说中,最流行的是大陆水平漂移假说^[126,818,881]。根据这些观念,褶皱是地壳大陆部分水平挤压的结果。

从构造物理学的观点来看,褶皱形成的机制问题是当时的一个主要问题,该问题已由偶然的野外研究和模型实验得到了解决。在安排实验时,研究人员继续依据引起褶皱和断裂的力是水平方向力的概念(W. J. Mead^[841], P. D. Torry^[885], T. A. Link^[835,837,838], H. Cloos^[765,767,770], F. Rinne^[865], W. Riedel^[884])。由于普查和勘探褶皱构造油田,认为这些褶皱是由于岩盐从重的岩石下面浮起而产生的。T. A. 林克^[837]进行了一些实验,实验中的褶皱是由垂直压力由下而上作用于水平岩层而形成的。

和以前一样,在选择模型材料时,材料的性质不是根据相似理论来选择,而是从不正确的期望出发,看怎样能使模型材料的性质比较接近于岩石的性质(T. A. Link),或者根据经验选择材料,以便能恢复在几何上与天然变形相似的变形(H. Cloos)。所有这些实验都带有概略的定性特征。

在这段时间内,在美国地质文献中讨论了分析地壳变形和断裂的独特原理,这些原理没有足够的物理数学基础,许多都不符合力学观念(W. J. Mead^[841], W. H. Bucher^[747], Ч. Лизе^[400]等)。这些原理首先是从力学中搬用的,但是,没有理解这些原理的实质,然后被极大地歪曲,并补充了一些常常是外行的、没有考虑岩石力学性质的推理。这样形成的观念总和就构成了一套相当矛盾的、互无联系的概念,以及对天然断裂和褶皱资料进行形式上的解释的步骤和方法。在A. B. 派克(Пэк)^[860]的书可找到对这些观念不加批判而又相当完整的论述。结果,造成在地质学中关于应力、应变和断裂本身概念的不正确,这些不正确的概念还写进了构造地质学和大地构造学教科书中。

为了发展构造物理学,利用偏光显微镜和E. C. 费多洛夫(Федоров)旋转台来研究岩石塑性变形的的方法具有很大的意义。这一方法是B. 桑德尔(Sander)^[889,870]和W. 施米特(Schmidt)^[876]提出和发展的,取名叫构造岩石学方法。此方法是根据变质岩矿物分布方向的不同是由塑性变形造成的这一概念建立起来的。该原始理论的正确性曾由实验所证实。构造岩石学方法以后获得了相当广泛的发展。现代构造岩石学概念的最大缺点是,其中利用了美国地质学家提出的不正确的变形、断裂的解释方法和原理。

最后,在二十世纪初,开始了对构造物理学具有很大意义的实验,即在高压下研究岩石的力学性质。之所以进行这些实验,首先是由于建筑业任务的需要和深入研究材料强度理论^[822]的需要。随后,П. 勃利奇曼(Бриджмен)^[746]和F. D. 亚当斯(Adams)^[727-731]利用这种方法企图解决某些地质问题而对岩石进行高压实验。这些实验的主要结果证明,全部岩石能在高围压条件下产生大塑性变形。实验时曾获得造岩矿物颗粒的各种定向排列,并确定了岩石强度极限与围压的关系。

第三阶段

这一阶段是接近1930年初开始的。首先,此阶段具有这样的特征,即在大地构造学的发

展中,苏联地质学家的研究具有很大意义。在苏联,这段时期内的地质研究达到空前的规模,结果在研究全国的地质构造方面获得极大的成就。

从前发表的关于垂直力在形成地壳构造中起主要作用的概念被苏联地质学家 A. Д. 阿尔汉格尔斯基 (Архангельский), В. В. 别洛乌索夫 (Белюсов), В. Е. 哈因 (Хайн), М. В. 穆拉托夫 (Муратов), В. И. 波波夫 (Попов) 等人加以发展。这些概念解释了发生振荡运动的主要特点,这些特点是收缩假说观点无法了解的。但是,拒绝收缩假说意味着拒绝已经建立的褶曲成因的解释。

在新的大地构造假说范围内 [R. W. 贝梅列姆 (Bemmel)]^[736], В. С. 维利斯^[893], В. В. 别洛乌索夫^[37]为了解释褶皱的产生,只有去寻找新的途径。其中之一就是利用早在十九世纪就由 E. 莱伊尔^[861]阐述过的、后来被 E. 哈阿尔曼恢复的原理,即褶曲是由于岩石随地壳巨大隆起所造成的滑动而形成的。这种重力滑动假说曾得到相当广泛的流传。

以后,为了解释以岩盐或石膏为核心的穹窿(所谓盐丘)的形成,开始广泛利用埋藏在深部的密度较小的岩石(岩盐,石膏)从密度较高的上覆岩层之下向上作重力浮起的原理 (E. Harbort^[805,806], D. C. Borton^[732,733], В. Е. Руженцев^[599], Ю. А. Косыгин^[351], А. А. Богданов^[74])。

最后,不用收缩假说来解释产生褶曲的第三个可能性是要用地壳个别地区,由于岩层垂直挤压而产生物质局部的水平顺层流动的概念来解释 (М. М. Тетяев^[646])。В. В. 别洛乌索夫对这一观点作了最全面的发展^[38-41,46,48]。

因此,在构造地质学中形成了关于垂直力在改造地壳构造中起主导作用的概念。这时认为水平力是垂直力产生的,而在水平力的直接作用下产生褶曲。

但是,在大地构造学中,收缩假说的思想仍然保持并继续发展。收缩假说的新观点与老观点的重要差别在于,新观点认为地球内部物质的压缩和膨胀过程是互相矛盾而发展的。在壳下层物质总收缩的背景上产生的地幔物质体积的周期性脉动,是暂时性的、时而压缩、时而膨胀占优势的结果 [W. Н. 布克^[748], М. А. 乌索夫 (Усов)^[663], В. А. 奥勃鲁切夫 (Обручев)^[595]的脉动假说]。这时,认为褶曲产生的原因是地幔物质体积周期性的总收缩。关于体积收缩是发生在比地壳深得多的地方的假说乃是最重要的 (П. Н. Кропоткин) 的深部收缩假说^[367]。

收缩假说的新方案不可能理解地壳缓慢的垂直振荡运动的基本规律。褶曲形成历史的以下许多细节与这些观点是相矛盾的:褶曲同时发育区的空间局限性,地槽内部褶曲的发生以及褶皱作用逐渐向地台方向移动*。

1930年以后,构造物理方向得到了显著的发展。首先须要指出的是在当时扩大了一些专门的野外研究工作。在许多主要说明地壳个别地区构造详细情况的文章和图书中,对褶曲和断裂进行了描述,并企图重现它们形成的原因和环境。Н. С. 安德列耶夫 (Андреев), А. А. 别里茨基 (Белицкий), В. В. 别洛乌索夫, А. А. 波格达诺夫 (Богданов), Н. Н. 博罗达耶夫斯基 (Бородаевский), В. В. 布龙古列耶夫 (Бронтулеев), Ф. И. 沃尔弗松 (Вольфсон), В. Н. 达尼洛维奇 (Данилович), Т. М. 杰姆保 (Дембо), Е. Е. 扎哈洛夫 (Захоров) 和 Н. Н. 柯罗列夫 (Королев), Г. А. 依万诺夫 (Иванов), И. В. 基里洛娃 (Кириллова), Ю. А. 柯西金, И. П. 库什纳列夫 (Кушнарев), Л. И. 鲁金 (Лукин), М. В. 穆拉托夫, В. А. 聂夫

* 现代大地构造假说的叙述见文献[60, 61, 63a, 922, 929]和其他著作——原编者注

斯基(Невский), А. М. 奥夫钦尼科夫(Овчинников), Е. Н. 别尔米雅科夫(Пермяков), А. А. 派克, Н. П. 谢麦年科(Семенов), А. А. 索尔斯基(Сорский), А. С. 赫拉穆舍夫(Храмушев)和许多其他人的著作都是这样作的。这些著作中的一部分是描述矿区范围内地壳的变形和阐明有用矿体和各种小构造单元之间的联系。另外一部分是研究地壳中形成褶曲和断裂构造形态的机制。有些著作成功地利用了上述构造岩石学方法。

从1944年开始,在 В. В. 别洛乌索夫的领导下,构造物理学的研究首先在理论大地构造实验室中进行,从1949年开始在苏联科学院地球物理研究所构造物理实验室中进行。这些工作是在垂直力起主导作用的总观点下进行的。

在1944—1950年期间,主要致力于阐明褶曲形成的机制,而且用小褶曲为例进行研究。研究结果^[43,351,352]证实了在岩石中塑性流动的痕迹是广泛发育的,并找出了对从前 М. М. 捷恰耶夫^[646]和 В. В. 别洛乌索夫^[38-41]所阐述的褶皱成因的观念有利的新证据。

在所讨论的论文中,应该区分企图寻找两个与褶曲形成有关的问题答案:“为什么出现褶曲”的问题涉及到直接形成褶曲的哪部分力产生的原因和性质;“如何产生褶曲”的问题却在于说明岩层变形的过程本身。

第一个问题的答案是:在地球个别地区发生的深部物质的膨胀和浮起在地壳中引起从下而上的垂直力。在这些力的作用区,地壳各层抵抗隆起和弯曲变形造成向下的反作用力。因此,在上升速度最大的地方,在地下某一深度就造成了岩层垂直挤压和把它们物质在水平方向上挤向形成褶曲的地方。因此,直接产生褶曲的力认为是在平行层理方向上起作用的力,它是由于在岩层内部物质重新分布而产生的。研究了物质沿岩层的重新分布后,必须把压出地段和压入地段区分开来。

应该指出,现在还不清楚上述概念在多大程度上可用在大型褶曲上,大型褶曲的成因仍是当代一谜。以东阿尔卑斯^[43]为例曾指出了有可能用解释小褶曲的形成来解释大褶曲的形成。但是,在其他地区,例如在东喀尔巴阡、顿巴斯、高加索和天山的某些地区,类似的假说很难用来解释大型褶曲的形成。

岩石从隆起处重力下滑的假说和某些岩石从密度较大的上覆岩层之下向上浮起的假说,以及垂直挤压假说,都提出了地壳内部物质在水平方向的重新分布是褶曲产生的原因。因此,对于认为垂直力起主导作用的追随者来说,要求继续研究的一个主要问题是解释物质在地壳中为什么重新分布,以及如何重新分布。

关于“如何产生褶曲”的问题,在上述著作中曾强调指出:在形成小的附加褶曲时主要变形不是弯曲,而是引起它们的厚度增加的岩层纵向挤压。

把单个小褶曲的研究结果加以综合之后,曾得出如下结论:把褶曲看成是最高粘性层在其中起主干作用的岩层弯曲结果的这种观点是无根据的。在褶曲形成中起主要作用的是粘性最小的岩层,并强调指出,问题不在于弯曲,而在于各岩层内部通过物质的运动,即从一些区段流出,而又在另一些区段聚集而形成物质的重新分布。在流出的地方,岩层的厚度减小,而粘性较大的夹层的纵向拉伸使其中产生香肠构造。在受挤压的地方,全部岩层的厚度增大,褶曲就是这种膨胀的结果。

需要指出的是,上述文献对于全面检验老的观点是不够的,因为把一些地区塑性大的岩层挤出,又把它们挤入另一些地区,伴随产生一些小的附加褶曲的现象在老概念中也有所反映。试图把小的附加褶曲的形成机制的结论推广到包括其形成机制尚未研究过的大型褶曲在内的所有褶曲的形成上,是危险的。还需指出,在分析岩层厚度变化时,在这些论著中被否

定了的弯曲现象, 后来又在劈理*资料的基础上加以引用, 而劈理出现的机制和解释方法还不清楚。弯曲的可能性反不正确地与弹性变形联系起来了, 而错误地认为与塑性变形是不相容的。

从以上所述可以作出结论: 褶曲形成的机制问题还很不清楚, 还需要研究。

在注意到褶曲和断裂的同时, 地质学家还注意到香肠构造的结构, 它是一种把岩层分割成板状和柱状的单个小块的结构。香肠构造曾在强烈变形的古变质岩中和较年青的各种沉积岩中发现^[637, 631, 632, 43-45, 764, 763等]。大多数研究人员把香肠构造与在垂直层面方向上挤压岩层的作用同时发生的岩层的纵向拉伸联系起来, 关于这个过程的具体机制, 不同作者有不同的看法。B. B. 别洛乌索夫^[43, 46]和 H. 兰伯格 (Ramberg)^[854]曾利用模拟试验很详细地研究过香肠构造。

D. T. 格利格斯^[784-788]在高围压、剪应力长时间作用的条件下进行的岩石力学性质实验研究有很大意义。结果获得了第一批关于岩石粘性和应力作用时间对强度影响的可靠资料。

苏联在五十年代曾开始研究岩石的变形和破裂过程, 也研究了岩石在高围压下的力学性质^[355, 303, 142, 143, 145, 147]。

在第三阶段开始, 实验地质学家^[836, 783]批评了上述大地构造学中确立的断裂分析法。尽管争论很激烈, 但其后大多数地质学家仍继续利用以贝克尔假说为基础的老观念。

M. K. 哈伯特 (Hubbert)^[816], Б. Л. 施聂尔松 (Шнеерсон)^[798]和 E. H. 柳斯季赫 (Люстрих)^[420]在研究天然构造现象和实验室模型的相似条件方面的尝试具有原则性的意义。他们曾指出, 为了达到相似的塑性变形, 必须用粘性比岩石低得多的材料制作的模型来补偿比天然实体尺寸小很多的、实验时间很短的模拟过程。可是, 在这些著作中没有阐明断裂模拟试验时所必须遵守的相似条件。

在国外, 在30—40年代, L. L. 内特尔顿 (Nettleton)^[846]和 M. 多布林 (Dobrin)^[777]偶尔做过一次规模很小的模拟试验, 他们重现了岩盐从较重岩层下向上浮起的机制。在这些实验中, 模型的粘性按塑性变形的相似条件来选择, 但这些条件的考虑是不合逻辑的。

在苏联的构造物理学研究中, 构造现象的模拟试验起了很大作用。系统的模拟试验是在1944年由 B. B. 别洛乌索夫开始进行的。在研究褶曲的实验中, 模拟材料按相似理论的一般要求来选择。但是, 在断裂模拟试验时, 没有考虑相似条件, 因为这些条件还是未知的, 而材料则凭经验选择; 当时曾力求使模型与自然断裂的形态和形成历史相似。在这种模拟试验中, 只成功地获得了纯粹定性的结果, 尽管如此, 这些资料仍具有很大意义。例如曾经证明, 由于垂直力作用在某一深度上形成岩层隆起时, 可以产生从隆起的轴部压出塑性最大的物质, 并把它压入翼部。这些实验证明, B. B. 别洛乌索夫关于褶曲形成原因的观念, 从力学的观点来看, 似乎是可信的。B. B. 别洛乌索夫和 E. И. 切尔特科娃 (Черткова) 为证明其假说的正确性而进行的香肠构造模拟实验是很有意义的^[465]。

E. H. 别尔来雅科夫^[537]和 A. A. 别里茨基^[32]也偶尔在模型上作过不考虑相似条件的重现裂隙和劈理的实验。

应该指出, 在这一时期在中国也成功地开始利用模拟试验来进行构造物理学的研究^[758-760]。尤其是在这些论文中曾指出, G. F. 贝克尔的强度假说与实验和野外观测是有矛盾的。

1940年, 为了协调构造物理性质的研究, 美国地球物理协会开创了构造物理讲座。

* 岩石易于沿具有一定空间方位的、彼此近于平行的方向裂成薄片的性能叫做劈理——原编者注

从这些年所做的工作看来,必须指出用数学方法解决与褶皱和断裂形成有关的问题的重大意义,这些尝试由 Л. С. 列边仲 (Лейбензон)^[396] 确定地球冷却时地球表面产生褶皱的动力-温度条件开始。Б. Л. 施聂尔松^[710,711] 研究了重力浮起的褶皱形成过程; R. 华莱士 (Wallace)^[888] 和 W. 哈夫纳 (Hafner)^[804] 在理论上作出了在垂直力和水平力的作用下地壳中褶皱增长时的最大剪应力迹线。

四十年代末,对构造断裂的兴趣显著提高。这是由于构造物理这一部分内容落后于褶皱产生的概念,这也由于在苏联广泛开展了地震预报工作所引起。B. B. 别洛乌索夫发表了在1952年所获得的断裂形成规律的研究结果^[45,46,48],稍晚一些在 M. B. 格佐夫斯基^{[176-178,182]*} 的著作中也叙述了这一研究。

研究结果发现,在构造物理现有的物理基础水平上不可能成功地解决它的主要问题。在许多情况下应该抛弃关于变形和断裂资料解释方法的陈旧概念,应该用在物理学中常采用的、在工程技术中成功应用的概念代替它们。但在工程技术中允许的一系列简化在研究构造过程时不应保留。任何一种强度假说都不能满足我们的要求,因为它们没有考虑时间的作用。很明显,必须大大改进构造模拟试验。

应该指出,在已出版的构造物理研究的大多数著作中,地壳变形过程研究的方面还不全,只讨论了这些研究的某些结果,如小褶皱或大褶皱、香肠构造、断裂以及一些小的或大的构造形式。所有这些现象和大范围内长期构造发展过程之间的关系通常还很少研究。研究了许多资料之后,只好判定一下选择研究对象中的偶然性。作者们没有研究一些重要的原则问题,而只是引用了一些感兴趣的实际资料和注意了次要的细节问题。这是由于大多数研究人员没有系统地研究构造物理,因此不可能提出和解决重大理论性和方法性的原则问题。

1950年,当作者在苏联科学院地球物理研究所(现苏联科学院大地物理研究所)的构造物理实验室开始进行构造物理方面的工作时,构造物理研究的状况就是这样。作者在这段时间作了大量工作,但是对于许多原则性的原理,甚至总的工作方向仍不清楚。每个概念都要求检验,须要把正确的与不正确的概念分开,确定什么是构造物理学继续发展所必需的,什么问题为首要的,这就开始了构造物理基本问题的研究。

在要求开辟新的研究方向的同时,有的人企图保留和稍微修改一下老的有缺陷的概念,以及企图建立另外的脱离物理学的、根据不充分的概念和方法。A. Ж. 马沙诺夫 (Машанов)^[442] 发表的研究金属矿床构造的方法就是不成功的建议的一个例子。这位作者不正确地肯定地壳首先被许多裂隙切成立方形碎块,然后发生塑性变形。

在 B. B. 达尼罗维奇^[278] 的书中有许多缺点,此书作者继续用他的“应力”概念,坚持明显不合理的 G. F. 贝克尔的假说。B. H. 达尼罗维奇引用了许多可以靠资料形式论述的任意假设来研究褶皱形成的机制,很遗憾,另外一些作者也有类似的缺点,这些缺点的存在就是 Г. И. 古列维奇 (Гуревич)^[267] 对当时在构造物理方面全部已作出的和那时正在作的结论提出极尖锐批评的原因。不得不表示遗憾的是,醉心于个别缺点的批评后,Г. И. 古列维奇也作出了明显不正确的结论。

在五十年代,构造物理学的研究不仅在苏联,而且在其他国家也活跃起来。随着模拟试验的引用,在李四光的书^[497] 中提出了有意义的新问题。在美国杂志中发表了有关构造断裂^[772]、香肠构造^[854] 和盐丘形成^[851] 机制的文章,这些文章中都谈到了广泛利用模拟试验的方

* 还可见作者的著作[180, 181, 189, 195, 199, 213—215]——原编者注

法。

苏联在整个五十年代曾获得一定的成果,这些成果在许多文章和1957年1月召开的第一次全苏构造物理学会议的通报^[558]中都可找到反映。

根据在西阿尔卑斯、中国和高加索的观测和对这些地区资料的总结,В. В. 别洛乌索夫作出了关于断块构造这一具有巨大意义的结论。他提出根据运动学特点划分三种基本褶皱类型,即断块褶皱,压入褶皱和一般揉皱。他把各种类型的褶皱看成是塑性沉积岩层相对于由断裂包围的断块状地壳各区垂直位移的反映^[51,52]。А. В. 裴维(Пейве)^[534-536], В. В. 布龙古列耶夫^[55]对其他地区也作出过类似结论。

许多研究人员作出了矿田变形构造形成过程长期性的结论。在这一过程中,划分了许多阶段和时期,其中成矿作用占了一定的位置。因此,研究矿床变形的历史是科学论证各种金属矿床的勘探方法所必需的(В. М. Крейтер^[367], Ф. И. Вольфсон^[152-158], Г. Д. Ажгирей^[31], Н. И. Бородаевский, Н. П. Кушинарев, Л. И. Лукин, Г. М. Вировлянский^[558]等)。

在此时期,作者曾获得如下结果。提出了新的、断裂形成的综合物理条件的观念来代替G. F. 贝克尔假说。此观念综合了若干强度假说,并考虑了目前已知的岩石实验成果。划分出形成复杂结构大断裂的一系列机制。研究了构造应力场的概念,并在野外和通过模型对它们进行研究,还提出了地震活动性地质准则的构造物理论据。建立了产生纵向弯曲褶曲和纵向挤压褶皱所必需的物理条件。重新研究和补充发展了地壳变形、断裂理论基础和模拟试验方法。为了解决构造问题,首先引进和补充发展了研究纯弹性模型应力状态的光学方法。由于地质学家、物理学家和物理化学家的共同工作,提出了塑性变形中研究应力的光学方法(М. В. Гзовский^[176-184], Д. Н. Осокина^[512], Д. Н. Осокина, Г. В. Виноградов, В. П. Павлов, М. В. Гзовский^[516])。

继续研究了岩石的力学性质,特别是岩石的弹性,研究了岩石这些性质和岩性特征的关系(М. П. Волярович, Э. И. Пархоменко^[146], Д. Б. Балашов^[22], Б. В. Залесский, Ю. А. Розанов, Б. П. Беликов^[558]),扩大了劈理的野外研究(А. Е. Михайлов^[464], Р. Н. Белевцев, Г. В. (Тохтуев^[558])*

※ ※ ※ ※ ※

在最近一些年代(1958—1974年)里,在苏联,М. В. 格佐夫斯基、В. В. 别洛乌索夫、И. В. 鲁奇茨基、И. В. Лучицкий和他们的助手们的工作,在国外,М. А. 拜特和Н. 兰伯格的工作在很大程度上决定了构造物理学的发展。在这个时期的构造物理研究中可划分出七个基本方向。

1. 在不透明等效材料上模拟构造结构、变形和断裂获得了广泛的发展。М. В. 格佐夫斯基和助手们^[179,184,188,195,207a,212,513,514等]的工作对奠定这种模拟试验的物理基础作出了重要贡献。М. В. 格佐夫斯基和И. М. 库兹涅佐娃(Кузнецова)、马瑾和А. В. 米哈依洛娃(Михайлова)用模型对褶曲形成的机制进行了各种影响因素的定量估计的研究^[178,188,192a,195,207a,377,469,470等]。

Н. 兰伯格^[564,557等]和В. В. 别洛乌索夫与А. В. 塞切娃-米哈依洛娃(Сычева-Михайлова)^[539,540]对重力浮起构造(底辟构造)的产生进行了模拟。这时发现了所形成的构造特征与许

* 作者对构造物理研究的概述大约叙述到1957—1958年为止。编者用小号字继续了这一概述——原编者注

多物理和构造因素之间的关系。B. B. 别洛乌索夫和H. B. 列别杰娃模拟了由轻花岗岩物质重力浮起及岩块垂直移动产生的层状岩层水平挤压所引起的普遍发生揉皱的全形褶皱^[391]。И. B. 鲁奇茨基和助手们采用新手段,模拟了沉积岩盖层区升降产生的构造,这种新手段包括加热发生膨胀的材料或者模仿重力场作的人工磁场^[412,413]。在A. B. 维赫尔特(Вихерт), В. Д. 帕尔费诺夫(Парфенов), В. Г. 古捷尔曼(Гутерман), С. 斯托雅诺夫(Стоянов), В. В. 爱兹(Эз)^[720,139,529,552,906]等用模型研究了各种条件下褶曲、断裂、裂隙的形成。在《实验构造学》^[905]一书中列出了构造结构模拟试验方面的详细图书目录。

2. B. B. 别洛乌索夫, И. B. 基里洛娃, A. A. 索尔斯基, В. В. 爱兹, A. B. 维赫尔特, В. Н. 肖尔波(Шолпо)和其他人^[57,62,140,328,833,712,717]对褶皱构造的形成机制进行了专门的野外研究,获得了关于褶皱带结构和褶曲形成机制的特点的更精确资料。这些野外研究和实验工作的总和^[391,639,640等],使从前的构造变形发展的物理条件的概念更系统和更精确^[62,63]。

3. 积极发展了 M. B. 格佐夫斯基所创立的新方向:即构造应力场的野外研究。M. B. 格佐夫斯基提出的根据裂隙构造恢复应力场的地质方法使他首次恢复了拜占塞复背斜各个发展时期的应力状态^[178,179,195]。许多研究者用这种方法恢复了苏联许多地区,其中包括矿田地壳的应力状态。这些工作的简短评论刊载于文献^[199,200,203]中。总结这些工作的成果可以确定苏联地壳变形的的主要机制^[203]。M. B. 格佐夫斯基的方法在 O. И. 古申科(Гушенко)的著作中得到了进一步的发展^[275,276]。O. И. 古申科提出,为了恢复古代和现代应力场,可利用地质或地震资料对构造破裂面的总体位移进行运动学分析。

4. M. B. 格佐夫斯基、Д. Н. 奥索金娜发展和利用了偏光、光学模拟构造应力场的工作。曾研制了新的模拟材料和仪器。研究了这些材料的流变学和偏光-光学性质。提出了在弹性和非弹性模型中研究应力的方法,并进行了可以确定地壳一系列变形机制所固有的应力场特点的研究^[184,187,188,195,203,212,214,513,514,517,518,521,803]。后来, M. B. 格佐夫斯基和 Д. Н. 奥索金娜利用专门的方法^[199,203,213,215]开始用模型研究了构造应力场的局部异常,它们是地壳中的断裂破坏引起的。这方面的工作,包括方法研究,断裂带和震源区主应力重新取向的研究,以及地壳具体地段的模型研究等,后来是由 Д. Н. 奥索金娜, Н. Ю. 茨维特科娃, O. И. 古申科等^[516,519,523,694,920]继续进行的。

5. 在 M. 拜特, A. 申福尔德, H. 兰伯格, В. 车朴拉, A. C. 格利戈里耶夫, E. B. 阿尔丘什科夫(Артюшков)和其他研究人员的工作中,发展了应用连续介质力学方法在理论上研究构造的形成过程这种方法。这些工作中有很大一部分是研究在纵向挤压或横向弯曲条件下褶皱的形成^[128,195,248,250,253,356,405,699,738-741,761,804,856,871]。还研究了在相变和相界面运动时^[907,908]重力不稳定性^[14,15,858,859]、均衡运动^[16,17]、地幔对流区以上的岩石圈变形^[251]、重力作用下的物体变形^[249,255,667]等问题。在 A. C. 格利戈里耶夫的论文中,除了解决许多具体构造物理问题外^[248-251,253,699],还发展了均质和塑性非均质材料大型壳体 and 薄板的变形理论^[245-247,249]。这些工作可使理论问题的提法与地壳中的条件相接近。1971年前完成的基本理论工作的简介和参考目录发表在文献^[252]中。

6. 定量评价描述构造过程物理量的研究可包括下列几个问题: M. B. 格佐夫斯基, A. A. 尼柯诺夫(Никонов)开始研究具有不同构造条件和地震活动性地区的构造运动定量特征^[209-211]。曾试图根据地球物理资料估计地壳的粘性和它们随深度的变化^[199,203,515,520]。开始拟订利用模拟试验来定量表示褶皱(M. B. Гзовский, A. B. Михайлова^[199,203,469])和天然实体的统计研究方法(A. B. Вихерт^[139]等)。

7. 在 M. B. 格佐夫斯基的著作中开始发展了应用构造物理学解决许多重要理论和实际地球物理和地质问题。由于研究了地壳褶皱和断裂形成机制及与它们有关的应力场, 从而阐明了许多确定矿体分布的规律性^[181, 182, 187, 195, 197等]。他曾研究过地震危险性的构造物理准则, 并且发展了用构造物理方法进行地震区划^[94, 95, 183, 190, 194, 203a, 205, 206, 211, 803a等]。M. B. 格佐夫斯基还利用构造物理学来研究地壳剪应力的估计, 深部应力状态对形成各种成分岩浆的影响, 各种条件下的构造过程的能量计算^[192, 193, 196-200, 203, 203a, 208, 802等]。

这一时期所获得的地质构造、地球物理和物理学的研究成果, 对构造物理学的发展具有很大的意义, 这些成果包括: 定量研究现代和最新构造运动^[458, 460, 498, 533, 800, 918, 919, 930等], 褶皱构造和地质破坏的野外研究^[87, 328, 353, 650, 712, 719等], 根据震源机制^[20, 21, 116-120, 755等]和在矿井中用应力解除法测量^[617, 656, 682, 773, 807, 849等]来研究地壳的应力状态, 在通常条件下和在高温高压下进行岩石蠕变和破裂的物理实验^[141, 145, 294, 295, 414, 634, 649, 762, 899, 901, 903, 910, 915, 924-928等]。

1963年, M. B. 格佐夫斯基专题学术论文^[195]的发表是构造物理学史上的一件大事。在这篇论文中, 第一次系统论述了构造物理学的物理基础、褶皱和断裂形成机制的研究结果和利用这些结果来解释地壳各部分的构造, 以及以拜占塞复背斜为例对成矿进行精确的预测。

从1958年到1974年出版了构造物理学研究文集和专题论文^[65, 160, 185, 195, 021, 568, 615, 640, 843]。