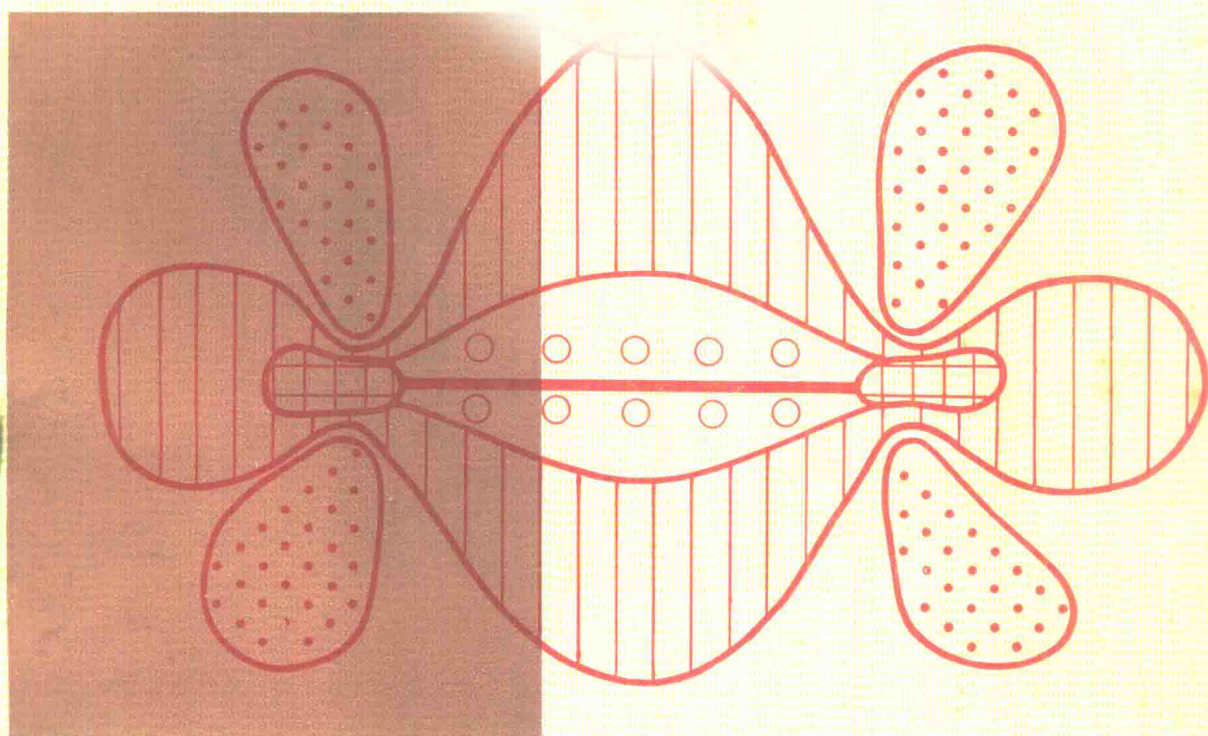


地壳断裂发育 的物理规律

〔苏〕C. И. 舍尔曼 著 高中和 译 张裕明 校



地震出版社

地壳断裂发育的物理规律

〔苏〕С. И. 舍尔曼著

高中和译 张裕明校

地震出版社

1980

本书研究了地壳大断裂的形成过程，阐明了断裂长度与深度，长度与密度等断裂主要参数之间的关系，并对决定这些关系的因素进行了评价。提出了建立在地壳物理性质随深度而变化的基础上的断裂结构模式，分析了决定断裂网络密度的普遍规律。并提出了在地质、测量和找矿勘探工作中这些参数关系的应用。

本专著可供对地壳断裂形成问题感兴趣的构造学家、地质学家、地球物理学家以及矿田和矿床构造方面的专家参考。

С. И. Шерман

Физические Закономерности Развития
Разломов Земной Коры

1977

Издательство «Начка»
Сибирское Отделение

地壳断裂发育的物理规律

〔苏〕С. И. 舍尔曼
高中和译 张裕明校

*

地震出版社出版

北京三里河路54号

北京印刷二厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 43/4印张 插页1 116千字

1980年4月第一版 1980年4月第一次印刷

印数 0,001—5,000

统一书号: 13180·76 定价: 0.55元

引 言

现在,如果对地质作用的物理本质缺乏了解,对实际材料缺乏深入的定量分析,许多地质问题就很难解决。断裂构造可能就属于这类问题之一,它在地质历史中的意义和作用从显生宙开始以来一直在增长。鉴于这种情况,地质学家在自己的研究中实际上无论何时都不能不注意断裂构造。А. В. 裴伟 (А. В. Пейве) 和他的学生及其追随者,对不同成因类型、不同发育时期和不同显露规模的地壳断裂进行了详细的地质评定。裴伟 (1945, 1956等) 综合了各种判据,并给“深大断裂”这一概念下了定义,得到了绝大多数研究者的支持。

裴伟及其学生的著作促进了构造断裂的广泛研究和资料总结工作,使整个地壳断裂的空间位置和网络以及某些地区断层构造的细节成为人所共知的事情。这一切证明,几何上常常是稳定的断裂构造图象,所反映的不只是稳定不变的构造应力方位。恰恰相反,很多例子表明,应力场方位和构造作用的强度是随时间而变化的。这时候,沿断裂的错动符号也随之变化,但断裂网络却保持不变。几何学上规则的断裂网络图形,不仅是由断裂系方向的稳定性,还由形成断裂系的各条断裂之间的距离变动很小所决定。仅仅用固定不变的应力场作用,即稳定的构造状态不可能解释断裂网络的守恒性和继承性。

随着断裂定性评定方面地质资料的积累,对它们进行定量分析的要求就越来越迫切了。人们开始提出了有关断裂的切入深度、断裂影响带的宽度以及断裂长度和位移幅度之间的相互关系等问题。十分清楚,不管多么复杂的地质作用都不能不纳入物理规律的范围。今天,仅仅从定性方面已经不可能对地壳某一地区断裂构造的一切复杂性做出令人满意的解释。了解作为地壳破裂作用基础的物理规律,可能是深刻理解断裂网络自然景观的一种保障。有些规律对我们来说还不完全清楚。地质情况为我们提供如此众多的、初看起来是互相矛盾的事实,使人顿时产生一种来解释这些事实的愿望。在地质学中引进数学方法,特别是数理统计方法,就容易从各种自相矛盾的事实中合理地阐明过去的地质事件。地质事件或者构造参数之间相互关系的数学表达,是揭开和认识作为所分析的地质现象基础的物理规律的第一步。

根据这种观点,作者尝试分析了断裂发育的动力学,并且把地壳当作一种物理体来揭示其破裂、“破坏”的规律性。

断裂是进行这类研究最合适的构造。由于它们在地表上的具体显露,使必要的参数资料的收集工作和断裂发育的动力过程的进一步重建变得容易了。

为了研究和解决所提出来的问题,选择了贝加尔裂谷带作为研究对象。这里主要的断裂大部分形成于前新生代,断裂带的侵蚀断面上刻记了过去一段时期内中等深度和深部的地质作用。研究贝加尔裂谷带现阶段的发展,将断裂构造同地震活动性、震源应力方位、热流及某些其他地球物理场相比较,就可以较深刻地理解断裂的形成机理及其诸参数间的相互关系。所得的结论已为其他地区的资料所验证。一系列参数的共性为理解地壳破坏作用的物理规律奠定了基础。

作者对苏联科学院院士裴伟,通讯院士卢奇茨基 (И. В. Лучицкий)、哈因 (В. Е. Хаин)、弗洛列索夫 (Н. А. Флоренсов),地质矿物学博士苏沃罗夫 (А. И. Суворов)、佐林 (Ю. А.

Зорин)、乌沙科夫 (С.А.Ушаков)、物理数学博士谢巴林 (Н.В.Шебакин) 和库兹涅佐娃 (К.И.Кузнецова)、地质矿物学副博士普列沙诺夫 (С.П.Плешанов)、邦达连科 (П.М.Бондаренко)、格罗明 (В.И.Громин)、雷萨克 (С.В.Лысак)、赫列诺夫 (Х.М.Хренов)、鲁日奇 (В.В.Ружич) 和罗戈日娜 (В.А.Рогожина) 表示深切的感谢,他们对本书的手稿及其出版准备工作提供了宝贵的意见。

作者特别要向责任编辑 Н. А. 洛加乔夫 (Н.А.Логачев) 表示深挚的谢意,在完成本书稿的过程中始终得到他的关怀和帮助。

在出版付印过程中,还得到苏联科学院西伯利亚分院地壳研究所新构造和地貌实验室的同人鲍尔尼亚克 (С.А.Борняк)、斯捷潘诺夫 (В.В.Степанов)、祖巴连科夫 (Л.А.Зубаренков) 和吉尔斯基 (Н.В.Тирский) 的大力帮助。

目 录

引言

第一章 问题现状的概况和定量评定断裂的原则	1
第二章 研究断裂网络定量规律的实验场——贝加尔裂谷带地质简述	4
第三章 大陆地壳断裂主要参数的相互关系及其构造物理分析	7
一、断裂方向及其与地壳结构和发育时间的关系	7
二、断裂密度及最理想的断裂网络密度	9
三、断裂长度和数量之间的关系	17
四、地壳内区域断裂和局部断裂活动切入的下界	22
五、断裂长度和位移幅度之间的关系	27
六、单条构造裂缝的长度与它们裂口宽度间关系的计算经验	30
七、关于断裂参数相互关系的某些其它形式	33
八、某些裂隙参数相互关系的模拟实验	36
第四章 地壳断裂形成的一般理论问题	41
一、巨型断裂形成的物理过程和特点	41
二、断裂发育的能源	55
三、断裂在地壳中的地质发展规律	65
结束语	69

第一章 问题现状的概况和定量评定断裂的原则

引入构造形态的数字表示和描述过程的物理本质是限制大地构造学说抽象性的方法之一。用来进行这类研究的最有代表性的构造是地壳的断裂。它们在地表的具体显露使必不可少的有关参数资料的收集工作和进一步再造它们动力过程的工作变得容易了。正如格佐夫斯基 (М. В. Гзовский, 1971) 曾正确指出的那样, 现代大地构造学如果没有地层埋藏深度等值线的构造图和具有位移量等值线 (可用等厚线代替) 的地壳运动历史图, 那是不可思议的。可以举出其他一系列地质和地球物理图, 那里作用或现象的定量特征是用等值线来表示的。这类图是由纯定性地质 (构造) 图向半定量图过渡的环节。构造规律性的数学记录开创了新的可能性, 同时可以预防某些匆忙的结论。

近些年来, 发表了许多涉及地质知识数学化原则的文献 (А. М. Боровиков, 1971; Л. И. Боровиков, 1971; Вистелиус, 1968; Вихерт, Гончаров, 1966; Воронин и др., 1967; Гзовский, 1971; Джекобс и др., 1964; Косыгин и др., 1964; Менакер, 1971; Мурашев и др., 1972; Оноприенко, 1972; Рыбин, 1964; Сидоренко, 1967; Шлапатов, 1965; Weber, 1961; 等等)。作者支持这样的观点: 数学方法现在已能对本身已被证明是有效的经典的构造研究方法提供重要的补充。

并非所有定性的变化都能转换成数字和公式。大多数地质现象与其他现象有时空联系, 而通常可以把构造研究中的地质对象看作为处于连续发展中的自然物体, 因此是定性的特征“过渡”到相对的定量公式经常是必不可少的一步, 而且这一步在研究的所有阶段都是比较重要的。在概括破裂构造材料方面, 定量方法已成为实际研究中相当好的方法 (Бывшев, 1971; Вихерт, 1972, 1975; Воронов, Незаметдинова, 1968; Каттерфелд, Чарушин, 1970; Кнорринг, 1969; Чарушин, 1960; 等等)。

以古拉里等人 (Ф. Г. Гулари, 1970) 组成的研究小组在据定量参数编制断层构造图的研究方法上做出了很大的贡献。在他们已发表的著作中, 引用了西西伯利亚台坪广大范围内不同类型断裂破坏的密度图。

雷宾 (А. И. Рыбин, 1971) 引入了地层位移及断裂破坏程度的数学概念。既然位移的结果使地层不再呈原始水平产状 (除极少例外), 那么地层的倾角就可以在在一定程度上用来表示它的位移量。断裂破坏的位移程度相当于断层裂缝的平均倾角。如果 α_1 表示 S_1 面积内某地层的平均倾角, α_2 表示累积面积 S_2 上断层裂缝的平均倾角, 那么, 在 S_1 (或 $S_1 + S_2$) 面积上地层位移程度将等于 (Рыбин, 1971);

$$\alpha = (\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2) / (S_1 + S_2) \quad (1.1)$$

位移程度既可按面积也可按截面积计算。

格佐夫斯基 (1971) 给大地构造中的定量参数赋予了特殊的意义。为了对不同规模的断裂进行纯几何学上的比较, 格佐夫斯基曾建议引入无量纲限界系数 (Безразмерные габаритные коэффициенты), 并且沿走向取断裂带的长度 (L) 作为基本起始参数, 因为断裂带长度常常能够准确地测定。他按照与断裂带长度的关系分为以下几种系数:

1) K_M ——断裂带离散系数 (断裂带宽度 M 与总长度 L 之比);

$$K_M = M/L \quad (1.2)$$

2) K_D ——断裂带倾伏系数 (断裂带沿倾向延伸深度 D 与沿走向总长度 L 之比);

$$K_D = D/L \quad (1.3)$$

3) K_W ——断裂带波形系数 (断裂带波形振幅 W 与半波长 l 之比);

$$K_W = W/l \quad (1.4)$$

4) K_A ——断裂带断距系数 (断裂带总断距 A 与沿走向总长度 L 之比);

$$K_A = A/L \quad (1.5)$$

格佐夫斯基认为, 分析断裂带的断距与宽度、断距与倾伏之间的关系是合宜的。

笔者对于所提出的全部断裂无量纲系数无例外地进行计算的合理性表示怀疑, 因为:
(1) 不是一切无量纲系数都是常数, 甚至对同样一个断裂组或一条断裂来说, 随着研究的详细程度不同, 结果就不一样 (不管研究的详细程度变化与否, 系数都应该是相对的常数);
(2) 对系数的计算来说, 并不是所有参数都适合于同一定义。事实上, 现在已经确定, 从构造的观点来说, 断裂是具有复杂内部结构的带, 由于断裂研究的范围和详细程度的不同, 它们在我们面前呈现的情况也各不相同 (Гзовский, 1971; Паталаха, 1970б; Бургман и др., 1963; 等等)。

据作者所知, 东西伯利亚南部的断裂, 在小比例尺构造图上表现为一条直线, 在中等比例尺图上它们有可能以 2~3 组近于平行的边幕形式出现, 也就是与自然界的实际情况相接近; 在大比例尺构造纲要图和构造图上, 由于详细描绘了复杂的断裂格架, 断层裂缝面已根本不可能显示为一条单一的线, 也不可能使之简化。因此, 我们所提到的形态、内部结构、破碎岩带的宽度甚至断层裂缝的倾角等都是概略性的。但简要地、概括地描述断裂的单个断面、一组断面以及其它特征时, 就会抹掉许多由野外笔记转述到文章中的细节。据此, 对同样的断裂来说, 离散系数 K_M 将随着工作详细程度的增加而增大, 断裂的波形系数 K_W 和非线性系数 K_A 也是如此。换句话说, 这一类系数对断裂的定量评定来说已不再起指示剂的作用。为了确定系数 K_D 和 K_A , 就必须知道断裂沿倾向的延伸和位移幅度。然而要知道, 迄今只有在详细勘探中采用钻井技术才是确定地壳内断裂切入下界唯一有效的方法, 而这主要也只是指地壳内的一些不大的断裂。对于更大的一些断裂, 这些参数目前仍停留在不确定阶段, 至于断裂带倾伏系数的确定连一点可靠的办法都没有。

确定位移幅度同样很复杂。已经清楚地知道, 平移断层的断距在其中心部位最大, 在其两端为零 (Бургман и др., 1963)。而正断层的垂直断距沿其走向方向也不是固定不变的, 它仍然是在断层的中心部位最大, 在端点处减小。否则, 断裂沿走向衰减是不可能的。无论是正断层还是平移断层, 沿走向都要过渡为高裂隙带, 在过渡范围内断距逐渐减小。所以, 即使对同一条断裂来说, 断距系数 K_A 也是沿走向逐点变化的, 因而同样不可能认为它是一种稳定的定量参数。

格佐夫斯基没有用他所研究的系数进行广泛的总结。作者根据确定断裂定量参数的工作经验证明, 对它们进行计算, 实际上是困难的。上面已经提及, 由于地质过程的复杂性, 大地构造学的数字化必须在概括和确定一般规律的前提下才是有效的。在现有断裂研究方法的条件下, 断裂的许多无量纲的限界系数可以完成同类的任务。

拉茨和车尔尼雪夫 (М. В. Рац и С. Н. Чернышев, 1970) 曾提出以定量公式表示裂

隙特性和裂隙岩石的性质这一有价值的建议。

作者支持这样的观点,即在把断裂特征转为某种定量参数时,只有在下列情况下才有意义:所得出的数字能提供新的定性结论,或者断裂参数能同其它与地壳断裂作用有物理联系的数字(定量)资料进行对比。属于这一类参数的有:断裂方向、长度不同的断裂分布、不同长度断裂的密度、断裂的总密度及其他某些更局部的参数。

应该把断裂的定量参数理解为用数字表示的断裂长度、切入深度、位移幅度和方向、影响带宽度以及形成断裂带的某些裂隙系的密度(Шерман, 1974)。断裂组可以看作是具有共同参数的同一体系。在这种情况下,我们就可以获得断裂的定量评定或断裂系的参数。断裂的定量参数不仅与断裂发育的动力作用有非常密切的关系,而且各参数彼此之间也有很密切的联系。在研究断裂参数的重要性时必须特别注意断裂参数之间的本质联系。

为了确定断裂的某些平均参数(密度和平均长度),需要将研究地区的范围适当进行分区。例如,贝加尔裂谷带曾划分成经度为 1° 、纬度为 $40'$ 的图幅,其面积(取决于该地区的纬度)大约相当于 65×75 公里(约4500平方公里)。图幅大小的选择,取决于地壳厚度的最大变异和已知的断裂平均长度,并且要与中等比例尺的地质图图幅接近一致(Шерман, Лобацкая, 1972)。在图幅范围内,确定断裂的平均长度,测量同一长度组内的断裂之间的距离,并且,计算用以分析和阐明断裂各参数之间相互关系的某些其它物理指数。所得的平均数列入图幅中心。

根据断裂的不同方向处理不同长度的断裂分布。可以把近于平行的长度相近的断裂以5公里间隔为单位(1—5、6—10、11—15公里等)合并到一个组里,平均间距的测量只能在同一长度组或同一系列内的断裂之间进行。测量方法并不复杂,如果同组里近于平行的断裂间距超过断裂长度本身的一倍,那么就不考虑它们,并把它们看成是相互独立的平行断裂系统。

在进行一定的室内资料整理工作以后,按照上述原则就可以获得断裂的整体信息和完美分类。但是,如果对所研究的构造原型的实际材料缺乏具体的选择,断裂的研究就不可避免地会陷入盲目性。因此,由于许多特征缺少准确(定量)的定义,就很难对没有预先分类的断裂进行连续研究。

根据构造区划的总原则(Косыгин, 1972; Красный, 1972; Спичарский, 1972; 等等),可以力求做到:一方面在研究开始时就引入定量的标准;另一方面是消除特征的多解性。最简单的方法是把断裂进行分组:首先根据彼此长度的差别分为巨型断裂、区域大断裂和局部断裂。正如谢莫夫(В. Н. Семов, 1973)所指出的那样,根据构造结构的分类,长度指数易于确定,这是各个研究者在地质制图时所确定的最统一的判别准则。这样一种定性的分类符合于构造分级的关系(Красный, 1972)。例如,在贝加尔裂谷带,属于第一类的断裂,长度超过80公里(二倍于裂谷带的地壳平均厚度);属于第二类的断裂,长度在30—80公里之间(与地壳厚度相当);属于局部断裂,长度由几百米到几十公里。众所周知,巨型断裂切穿了莫霍面,区域大断裂也可能达到这个界面,而局部断裂却是地壳本身的构造。猜测这种情况的产生可能与深部的构造产状、断裂的大小和次序之间存在着某种联系有关(Беляевский, 1974)。

根据断裂的方位可以分为顺向的、横向的和斜向的。它们的判据取决于同主要褶皱带或裂谷带总体走向的关系。

上述分类对以前没有进行过什么专门研究的任何地区可能都适用。

定量参数的计算结果及由此而得出的结论将在第三章中介绍。

第二章 研究断裂网络定量规律的实验场

——贝加尔裂谷带地质简述

作者同意大多数学者的意见,把岩石圈的张性地段理解为裂谷带 (Белоусов, Шейнманн, 1968; Зорин, 1971; Логачев, 1972; Милановский, 1970, 1972, 1975; Солоненко, 1968; Ушаков, Красс, 1972; Флоренсов, 1968; Хаин, 1973; и др.). 它们由显露的或者掩覆的基底隆起所包围的裂谷盆地组成,并为以正断层为主的各种成因类型的活动性断裂的密集网络所切割。由于裂谷带宽于裂谷盆地本身的轮廓,所以它占据了与断陷相邻的隆起。裂谷带两侧的构造界线最好划在远离地堑轴部、新生代活化程度表现微弱的断层上。按此定义,裂谷带由四种必须的构造要素的综合体组成:盆地、交接带 (перемычка),以及与盆地相邻的山脉和断裂。

贝加尔裂谷带从蒙古西北经过东西伯利亚山体直到南雅库梯,长达 2000 公里以上 (图 1)。它所涉及的构造包含了在贝加尔或加里东大地构造旋回已完成发育的不同期的褶皱带。基底本身在结构上可分为:太古代基底、早元古代—中寒武世形成的地槽杂岩体、晚寒武世—新生代形成的造山杂岩体。

中生代初期,裂谷带地区曾是受到强烈剥蚀的低平原。白垩纪时,它的结构发生了本质变化,这时在东西伯利亚的南部形成了巨大的萨彦-斯塔诺夫拱形隆起,在隆起的西界出现了西伯利亚地台的缝合线,在隆起的东界和东南界出现了乌季诺-维季姆断裂系的分枝,并以此分隔开雅布洛诺夫-斯塔诺夫中生代隆起 (Боголепов, 1967)。中生代穹隆要比贝加尔裂谷带现在的界线宽得多。

新生代开始了相对稳定的构造时期,但在晚第三纪时受到了活动构造上升运动的破坏,并导致了穹隆的复杂化。

表层的横向沉降带可分为东萨彦带、贝加尔带本身及斯塔诺夫带 (Зорин, 1971)。

面上的火山活动表现是不平衡的,主要分布在裂谷带边缘地段。火山作用同最新构造的联系仅表现在最一般的形态上,并具有共生特征 (Флоренсов и др., 1968)。

在贝加尔裂谷带的下面,已确认上地幔内的弹性波速存在着低值异常,这就证明了上地幔内有密度降低现象 (разуплотнение) (Пузырев и др., 1974)。低密度现象上部边界的平均分布深度为 36~40 公里范围。大型盆地下面的莫霍面显示出有点上隆。通常,上地幔内的低密度带对应了贝加尔地区已知的电导率和热流异常 (Косыгин и др., 1963; Любимова, 1968; Лысак, 1969a; Горностаев, 1972)。

高度的地震活动性是裂谷带活动性构造发育的标志。对于带内大部分地区来说,有代表性的地震强度大部在 7 度和 7 度以上。米沙里诺依 (Л. А. Мишариной, 1967) 确定了滨贝加尔的震源应力;在滨贝加尔裂谷带,张应力近于水平,方向为北西—南东。这类张应力是主要的构造应力,这与作为地壳拉伸区的一般裂谷概念完全一致。

贝加尔裂谷带总的构造布局具有一定的顺序性,这种顺序性可以用断裂构造已有的影响来解释。影响程度取决于两个因素:断裂的规模及它们产生的时代。所述原因同样是在长

期（从前寒武纪到新生代）发育的现代贝加尔裂谷带范围内断裂发育动力作用的产物。

根据贝加尔裂谷带中断裂的发育规模和长度，可以将其分为巨型断裂（>80公里）、区域断裂（35*—80公里）和局部断裂（<35公里）。断裂长度以及它们在地壳和上地幔内的切入深度是分类的根据。

如所周知，巨型断裂是形成于前寒武纪的切穿了整个地壳的深断裂。它们的主要走向为北东或者近东西向**；它们对裂谷带的某些区段及一些最大的盆地的定位起了决定性的构造作用。属于最大的巨型断裂有：主萨彦断裂、通金断裂、滨海断裂、巴尔古津断裂，统称为奥勃鲁切夫的正断层系，沃尔霍湖东岸和贝加尔湖西岸的断裂组、上安加拉断裂、基切尔断裂、上穆依断裂、科达尔断裂、托金断裂以及其它一些断裂。它们中的大部分是深成构造（参看图2.1）。

贝加尔裂谷带巨型断裂发育的主要动力学特征归结如下：

1. 所有巨型断裂都是前新生代的深部构造，它们在新生代时期明显活化。

2. 在裂谷形成过程中，巨型断裂控制了盆地的位置，并发挥了平移-正断层的作用。尽管平移分量表现程度不一样，但实际上却是所有巨型断裂所特有的。它明显地集中在裂谷带的西南部和东北部的边缘，而在裂谷带的中心部位较弱，如围限上安加拉盆地的断裂实际上没有反映出平移性质。平移类型与断裂方向之间有一定的关系：近东西向断裂具有左行平移分量，北东向（北东60°以内）断裂具有右行平移分量，北东65°左右的断裂为典型的正断层或者张性断层。这是贝加尔裂谷带断裂的特征之一。

3. 新生代垂直运动的幅度沿断裂可达几百米到数千米，经计算水平位移最大不超过1.2公里。

4. 对于巨型断裂来说，都以边幕式结构为其特征。

区域断裂在数量上形成很大的断裂群。从断裂发育的动力学观点来说，最适合研究它们的基本的成因原型。在它们中间，逆掩断层尤为重要，其中的一些在形成时间上和成因上都和该区新生代时期的地质发育有关（Ружич и др., 1972）。年轻逆掩断层的形成，其本身是一个非常有趣的现象。因为，众所周知，盆地和围限它们的正断层——地壳拉张时形成的典型构造形态——才是裂谷带的主要构造单元。沿逆掩断层，新生代的运动幅度并不大，在通金秃峰山（Тункинские гольцы）不超过数百米，经计算最大也不到1000米。

与裂谷带总体走向一致的、数量最多的区域断裂组是正断层。在许多情况下，若是采用与断裂位移有关的裂隙带研究方法，则能顺利确定出它们有不大的平移分量，平移类型几乎总是与断裂走向有成因联系。

横向断裂按其成因类型主要有正-平移断层和正断层，而且，无论是水平断距还是垂直断距都不会超过几十到几百米。

作者的研究结果表明，横向区域断裂不应属于羽状构造。横向断裂中只有很小一部分在发育程度上以及在地区地质结构中所起的作用上可以同主要的北东向断裂相提并论。根据对资料的研究可以得出一个结论：大部分横向断裂是由于新生代的活化作用和裂谷形成作用而

*原文为34，似有误——译者注。

**原文为“субширотное”（近纬向），译文中统一译成“近东西向”，以区别地质力学中的“纬向构造”术语。同理，下文中的“субмеридиональное”（近经向），“меридиональное”（经向）和“широтное”（纬向）分别译为“近南北向”“南北向”和“东西向”——译者注。

发育起来的较年轻的构造。它们中的最大者，如穿过邻区地质构造的叶洛欣断裂，可能属于该区最早发展阶段产生的断裂。根据横向断裂的出露规模及其在地质过程中所起的作用，可以将其作为北东向主要断裂的次级构造看待。

整个说来，区域断裂是由不同时期的断层组合而成，但多半在新生代前就已形成。它们的切入深度随地壳的厚度而变化，走向以北东、近东西和近南北向为主。区域断裂决定了某些盆地的位置及其形态轮廓，并伸向盆地内部和盆地间的交接带。

局部断裂主要形成于新生代，决定着盆地和交接带的内部结构。

不管以前的发展历史如何，裂谷带中所有的主要断裂在新生代都重新得到了改造，它们都转变成平移-正断层。平移方向取决于断裂的方向：所有近东西向断裂都具有左行平移分量，而近南北和北东向断裂都具有右行平移分量。

裂谷带中的断裂在发展上可以分为四个主要阶段，我们分别称之为：前裂谷阶段、开始阶段（始新世至上新世初）、主要阶段（上新世中期至全新世）和结束阶段。

在裂谷形成过程中，断裂发育的继承性图式是：地壳普遍拉张；在近地表，主要是在未来裂谷轴部的地方产生很多裂纹；在裂谷形成前大断裂端点处应力集中，沿走向和倾向应力增长；在裂谷轴部地区变动加强，物质开始准塑性流动；平移现象出现在巨型断裂上。平移断层方向明显地与断层偏离主张应力矢量角度相关。

如果注意到沿近东西向断裂的移动、断裂发育的一般动力学特点以及地震活动性的某些要素，那么就有根据推测，在贝加尔裂谷带中现在发育的近东西向断裂组可以看做是一种转换断层。

对断裂移动的运动学进行构造物理分析，就可以恢复与新生代发育时期相符合的区域应力场。该应力场在北西—南东矢量方向上显示了张性特征，这与地震学资料是一致的。

断裂活化和发育以及裂谷形成的主要能源是裂谷带下面软流圈内物质的向上对流。地壳中原先具有的前新生代的一些薄弱带与老断裂的走向是一致的或者经常是相符的，这些薄弱带只是促进了其下物质向上对流的进程，它们在整体上或部分环节上预先决定了裂谷带的结构布局。由于沿薄弱带的主要张应力矢量的不一致，所以剪切应力就集中，结果出现了平移分量。

上述理由为详细定量研究贝加尔裂谷带的断裂打下了基础，目的是认识它们发育的物理规律及其与其它地质构造和地球物理场的相互关系。

研究贝加尔裂谷带断裂的经验，可用来对其它不同构造发展历史的地区的已有资料进行分类和总结，从而试图对地壳破坏的规律性作出构造物理分析。

第三章 大陆地壳断裂主要参数的相互 关系及其构造物理分析

一、断裂方向及其与地壳结构和发育时间的关系

断裂的方向在世界上许多地区是了解和研究得最透彻的参数之一。

对于每一个大的大地构造分区来说,都以一组、二组、偶尔也以数组占优势的断裂方向为其特征。通常认为,断裂的方向控制了该地区地槽的发育阶段、它的褶皱构造或后期迭加其上的活化作用。有严格的证据证明行星旋转状态对断裂构造网络的形成有影响。

作者根据对在构造上属于同一贝加尔裂谷带的不同地区的大断裂走向统计规律的分析,来着手解决本节标题中提出来的问题。图3.1提供的是裂谷带不同地区巨型(深大)断裂和区域断裂的走向玫瑰图。从图中可以看出,裂谷带中心部分以北东 60° 方向占优势,也就是说以同裂谷带总体走向一致的断裂为主。占第二位的是横切裂谷带走向的北西向断裂。

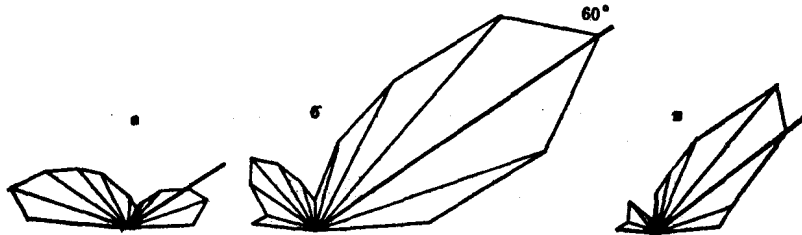


图3.1 贝加尔裂谷带断裂走向玫瑰图

a. 西南部分(苏联范围内); b. 中心部分; c. 东北部分。粗线表示裂谷带的总体走向

在裂谷的端部,情况有了变化。在西南翼,主要是北西向断裂,近东西向(北东东向)和东西向断裂属第二位。在这里,横向的、南北向的断裂从数量上看都很少发育。而在东北翼,主要是北东向(45°)断裂,它们的方向与主裂谷带并不一致;其次是东西向断裂,再其次是横向断裂。

因此,精细地定量计算不同方向断裂的分布情况,就可显出在同一裂谷带的不同地区断裂方向之间的变化关系。从玫瑰图中可以明显看出,与裂谷带总体走向一致的断裂仅在裂谷带的中心部位才是(数量上)最多的。而在两侧,占优势的断裂方向与前新生代形成的延伸最长的基底深大断裂的走向较为一致。由此可见,从裂谷成因的观点上说,在裂谷最年轻的远端部分,它的新生代应力场并不能使在数量上占优势的断裂群“置于”自己的影响之下。这就表明,现代应力场的解除(разрядка)主要是通过地壳“前裂谷阶段”不均一性和构造变动的活化作用来进行的。这一结论与我们在裂谷带中心部位观察到的情况并没有矛盾。同时,裂谷带中某些区段的方位在很大程度上与占优势的断裂方向相一致。因此,地壳结晶基底上的前新生代“缺陷”(дефект)决定着贝加尔裂谷带某些区段的方向(Замараев、

Шерман и др., 1972)。

弗洛连索夫 (1964) 在采用了某些其它证明方法后指出：“在形态上控制贝加尔盆地的主要因素是……3) 前寒武纪形成的深大断裂的位置和方位。可用它们来解释被研究盆地的总体轮廓界限、方位，甚至不对称特征” (第255页)。完全可以肯定：地壳的前新生代“缺陷”对较后期构造方位的影响，即使不是主要的也是重要的。如果着手分析有关断裂相对年龄的地质资料，那么这种情况就变得更加清楚了。

我们按照断裂的方向详细分析了它们平均长度的分布范围 (图3.2)。裂谷带的所有部分都有一条总的规律：走向北东 55° — 60° 的断裂，也就是与裂谷带总体走向相一致的断裂，其平均长度的绝对值占第一位或第二位。

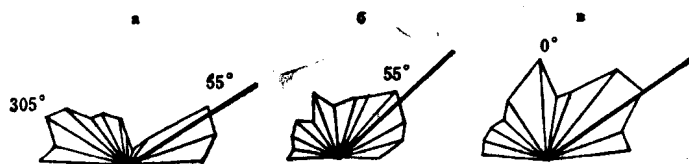


图3.2 贝加尔裂谷带中不同方向断裂的平均长度
(a、б、в的说明参看图3.1)

在贝加尔裂谷带的西南部，与巨型断裂和盆地群方向相一致的东西向断裂，其平均长度较大，而北西向断裂占第三位。在裂谷带的中部，东西向、北西向和近南北向的断裂平均长度大致相当，而北东向断裂的平均长度在这里占优势。在裂谷带的东北部，北东向、南北向和东西向断裂的平均长度也大致相同。

究竟是什么因素影响裂谷带内部断裂的平均长度呢？最古老的同时也是最大的断裂——巨型断裂——在裂谷带的不同地区其走向彼此有别。不难看出，巨型断裂的方向制约了裂谷带各部分断裂平均长度的分布。但是，如所周知，巨型断裂与裂谷带有关地区的其它断裂相比较是最老的。由此得出结论，较老的断裂具有较大的平均长度。

在裂谷带的东北部，近南北向和近东西向断裂大约与北东向断裂具有同样的平均长度。这里最老的首先是近东西向断裂，稍年轻一点的（也可能属同一年龄范畴）是近南北向构造。在这里，断裂的相对年龄同样有助于断裂长度的更加强烈“生长”（加长作用）。下述情况是主要的，即新生代时裂谷的活化作用所引起的应力场，对北东向断裂的高平均长度值有很大影响，垂直于断裂走向的北西向的张应力轴及高地震活动性，乃是地壳构造中北东向断裂破坏加速发展的有利条件。因此，断裂的相对年龄及它们与地壳上最强活化带方向的一致性，是决定贝加尔裂谷带不同地区断裂平均长度绝对值的主要因素之一。换句话说，当其它条件相同时，断裂形成的时间越早相对平均长度就越大。所以，“古缺陷”对现代地壳构造的影响，表现在随着每一次新的大地构造旋回，它们使长期活动带在宽度和长度上都得到扩展。由于缺少不同长度断裂生长的绝对年龄资料，因此就不能对这一重要的规律性作出准确的定量分析。列格利 (В.Р.Регель, 1956) 曾研究了固体破坏过程中裂缝生长的动力学试验*。对于形态和体积不大的标本，在通常情况下，裂缝的平均长度 l (毫米) 取决于施加负

* 试验是在具有各种不同增塑剂成分的甲基丙烯酸酯聚合物标本中进行的——原注。

荷所经历的时间 t (秒), 两者具有下列关系:

$$\overline{l} = a + k \lg t \quad (3.1)$$

参数 k 取决于破裂材料的性质和变形时施加的负荷 σ 的大小(系数 k 随 σ 的增大而减小)。在其它条件相同时, 裂缝平均长度的增大与负荷作用的时间成正比。没有理由认为, 在宏观断裂发育中, 上述过程的基本规律会有所变化(图3.3)。因此, 在对给定地区内具有代表性方向的断裂进行比较时, 可以认为它们中的较长者也是相对较老的。断裂方向同地质构造的关系是一个较复杂的问题。有一种意见认为地球的旋转力是形成地壳的巨大

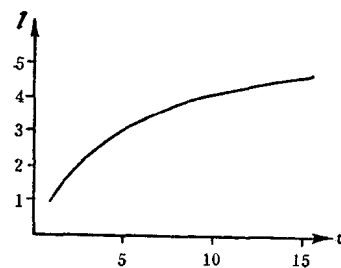


图3.3 在应力不变的条件下, 断裂的长度 l 与断裂发育时间 t 的关系

线性构造 (линеамант) 的能源(Воронов, 1964; Воронов, Незамягдинова, 1968; Каттерфельд, 1962; Стовас, 1962, 1963; Хренов, Шерман, 1968; Хренов, 1972; Чебащенко, 1963; и др.).柳斯季赫(Е.Н.Лястич, 1962)曾提出对剪切应力的总的评价。这种剪切应力可能在地球旋转速度发生变化时出现在地壳的底部附近。已知赤道上质点的移动速度为463米/秒, 或者 $\approx 5 \times 10^4$ 厘米/秒。柳斯季赫取12天内, 也就是在 10^6 秒期间内地球旋转速度变化了 5×10^{-8} (觉察到的最大变化)算出了赤道上的加速度等于 2.5×10^{-9} 厘米/秒²。与它相当的力场为 2.5×10^{-9} 达因/厘米。当地壳的密度为3克/厘米³时它所产生的力为 7.5×10^{-9} 达因/厘米³。在地壳厚度相当于40公里或 4×10^6 厘米的地方, 它的底部所具有的剪切应力为 3×10^{-2} 达因/厘米², 也就是说比岩石的坚固程度要低好几个量级。由此, 按照柳斯季赫的意见(1962, 第110页):“……除了有很微弱的弹性变形外, 什么也不可能出现。”

柳斯季赫曾对高度为40公里、横截面积为1平方厘米的相应性质的质点或者“柱体”进行了计算。在这种情况下, 计算没有引起什么疑问。如果我们使断裂的所有破裂网络都绝对地用旋转的影响来解释, 那么计算就是正确的。

作者认为, 只有当地球旋转力所衍生的应力矢量与内营力作用所产生的应力矢量一致时, 地球的旋转力才是地壳巨大断裂形成的原因。正因为如此, 根据全球性的统计, 断裂的方向相对于地球的转轴来说是始终如一的, 而对一个具体地区而言, 分布在同一纬度带但在不同地点(不同大地构造结构区)的断裂方向是不同的。看来实质在于: 地壳上由内力作用所引起的应力(特别是在地壳发育的开始阶段)只有当它们的矢量与某些应力的矢量(其中包括在时间上有某种不均匀性的、层圈发生不稳定旋转状况而引起的应力矢量)一致时, 才能起到较好的作用。地壳上部的不均匀程度随地质年代而增长, 而旋转应力的释放沿着已有的大大小小的断裂越来越频繁地发生。与壳内构造力源有关的构造力的作用变得越来越大, 裂谷带在地球上的分布就是这一现象的最好证明。

区域断裂和局部断裂与地壳褶皱构造的内在联系多半已被确定了。这些断裂的长度取决于褶皱构造的规模, 而褶皱构造内部的断裂则取决于变动发育的长期性。对于参加到新生代活化作用中去的前新生代构造来说, 断裂规模显然超过了决定它们方向的更古老的构造形态。

二、断裂密度及最理想的断裂网络密度

断裂图提供了关于断裂的方向、成因类型的概念, 偶尔还反映了它们变动时代的概念。但是, 它们没有反映出地壳破碎程度的数量指标。从这个观点上说, 由这些图所得到的资料并

不总是完美的。在研究裂隙构造的时候，其实早已着手编制了表明单位面积上构造裂隙性强度的分布图(Шерман, 1966)。比一般裂隙更大的断裂变动的区域性密度图的编制是大家所知道的成功例子(Самелов, 1961; Гурари и др., 1970)。然而，编制这类图件的标志总是统一不起来。事实表明，除了直接从数字上评定地壳破碎的特征以外，这类图件还会带来大量的补充资料，并有可能获得新的定性的地质结论(Шерман, 1975)。关于这一点可从贝加尔裂谷带断裂密度图的分析中得到证明。我们可以把单位面积内的断裂数量理解为密度。

现在让我们看一下编制和分析这一类图的例子。编制的断裂密度图是以作者的野外研究成果和中等比例尺的国家地质图为基础的。我们取面积大致为 65×70 公里左右的梯形作为面积单位。因为所有的图幅面积实际上是相等的，为了不致使数值很小，断裂密度不是按一平方公里来计算的，不过，要想做到后一点也很容易，只要将下面引用的密度值乘以系数0.00022就可以了。编图中曾考虑到了中等和大比例尺地质测量中记下的所有断裂。密度数据列入图幅的中心。当图幅部分为贝加尔湖水域地区或者为第四系沉积所覆盖时，就要添加一个校正系数，也就是在覆盖面积上添上与邻近基底同样的密度。按照这种方法处理了24万平方公里以上的面积。

贝加尔裂谷带断裂密度图(图3.4)是根据四百多种资料编制而成。从图上可以明显看出与裂谷带总体走向一致的密度等值线的展布情况。就整个研究地区而言，每一幅图的断裂平均密度为82，或者每平方公里为0.013—0.018。裂谷带轴部的密度最大。在这里，在普遍高值背景下，局部异常表现得很突出，其密度要比一般地方高出一倍或一倍以上。这样一些异常区向西南可延至贝加尔湖的西南端和色楞格河三角洲，向东南可至巴尔古津湾沿岸，甚至到了齐帕-巴翁托夫盆地群。更远，这个带可延伸到察尔盆地。不难看出，断裂密度高的地段是互相靠近的，在整体上形成了地壳上破碎程度很高的地带。其方向与贝加尔裂谷带的总体走向相一致，并位于裂谷带的轴部。断裂高密度带的总走向为北东 55° — 60° 。

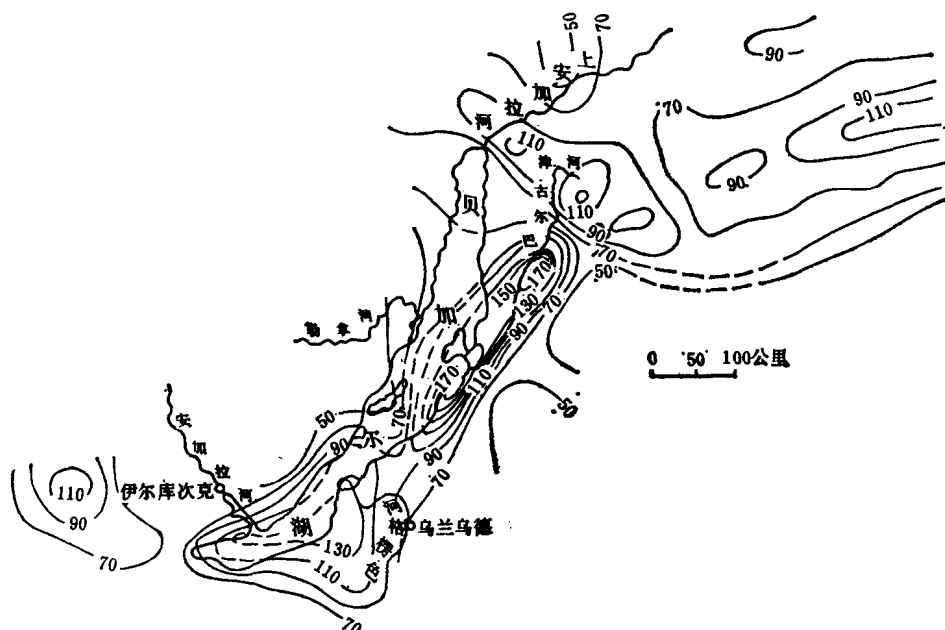


图3.4 贝加尔裂谷带的断裂密度图

将断裂密度增高地段的分布位置同贝加尔裂谷带地震构造图(Соловьевко и др., 1968)相比较,特别是同按 A_{10} 所编制的滨贝加尔地震活动度略图(Ризниченко и др., 1969)相比较,发现它们与相应的异常有相当好的空间上的一致性。其实,区分这些异常所根据的标志是不同的。由普申尼科夫(Пшеников, 1970)所划出的地震震源密集区的中心和主要部分同样与这个带在空间上相吻合。温泉露头和高热流局部异常也往往沿这条线集中分布(Лысак, 1968)。贝加尔裂谷带中的链状盆地(南贝加尔凹地、巴尔古津盆地、齐巴-巴翁托夫盆地和图京盆地)也沿着此带展布。最后,如果按佐林的略图(1971),相对于周围地区的地壳最大破碎地段分布在地壳相对厚度最小的地方。

因此,按断裂密度图划分出来的区域异常带,实际上反映了区域断裂或较小断裂的局部(指狭窄的线性延伸条带范围内)加密和互相靠近的分布状态,还反映了某些地震震中的加密以及温泉和局部高热流异常出露点的集中。上述的地质现象可以作为深大断裂带所特有的综合标志。对于深大断裂带来说最重要的因素是发育的长期性,然而在这里基本上不具备这一因素,尽管所划出的带中的有些地段(例如巴尔古津断裂)显然是由形成于前新生代的巨型断裂或者区域性大断裂组成。

上述事实为讨论这样一个问题的可能性提供了基础:把所划分的带看做是一种正在发展中的巨型断裂,其年龄完全可以同裂谷形成的活动周期相提并论。作者将它称为新生代贝加尔-察尔(深大?)断裂。进一步的地质研究将会指明,究竟有多大把握可以划出这种构造。只需要补充一点,根据从巴尔古津盆地到托金地区宇航照片判读资料可以分辨出大断裂,这条断裂与我们所划出的目前还是假定的贝加尔-察尔断裂相吻合。

过去,曾有人(Фельднскан, 1951)试图解释沿贝加尔湖记录到的并反映地壳变动的地球物理异常。鲍里索夫(А.А.Борисов, 1967)曾将由重力最低带所显示的异常与地壳的密度减小状态联系在一起,并主要根据高地震活动性和强烈的新构造运动,在我们所述的带的中心部分的滨贝加尔地震活动单元图上,有可能分出主贝加尔断裂(Борисов, 1967, p. 171)。

总括上述,可以断定,通过近几年来对滨贝加尔地区的研究,主要是地球物理方面的研究,证明北东向巨大构造异常是确实存在的,并沿着贝加尔裂谷带的轴部延伸。当补充了地壳高破碎性和宇航照片判读等地质资料后,有关下列问题的疑点就越来越少了:新生代时期这里的地壳和上地幔所发生的一切作用无论是在空间上还是成因上都是相互联系的,它们也许反映出大断裂发育阶段中的一个阶段。

必须指出,根据现代的假说,大裂隙发育之前总是有小裂隙发育,然后这些小的裂隙汇合在一起并形成更大的裂缝。如果把上述局部断裂和区域断裂加密和集中这个事实看作巨型断裂发展的初始阶段,那么我们从物理观点出发只能得出一种假设——即把宏观现象的规律性搬到了宇观的规模(мегаскопические масштабы)。

因此,断裂密度图不仅能表示单位面积内地壳破碎程度的变化,而且可以划分出地壳大断裂,并且可能是深大断裂的某个初始发展阶段。同时,可以清楚地预计组成深大断裂的各个地段的“年龄差异”,并对它们发展的长期性要素寻求物理上的解释。密度图提供了划分和编绘“隐伏”断裂带的可能性。详细编绘的断裂密度图可以广泛地应用于工业或民用建筑建设之前的工程地质分析。定量评定各种不同长度断裂的大量资料就来源于断裂的密度图,它使我们转入分析断裂长度和它们间的平均距离,即密度之间的相互关系。