

56.545
56.68

岩石的褶皱作用和断裂作用

FOLDING AND FRAC-
TURING OF ROCKS

J.G. 兰姆赛 著



地质出版社

岩石的褶皱作用和断裂作用

545

8

地质出版社

岩石的褶皱作用和断裂作用

〔英〕 J.G. 兰姆赛 著

单文琅 宋鸿林 蒋荫昌 译

宋鸿林 校

地质出版社

内 容 提 要

本书为J·G·兰姆赛教授关于岩石变形的应变测量及应变分析的著作。全书共分十章,第一章至第六章介绍了有关应变分析的基本原理和方法;第七章专门探讨了褶皱的分类、褶皱的应变分析及褶皱作用的机制;第八章至第十章则分别介绍了与褶皱作用有关的线状构造的变形效应及非平行或斜交面的褶皱特征,探讨了叠加褶皱的变形效应。本书可作为构造地质学教材的补充和提高读物,可供大专院校师生及有关科研、生产部门地质科技人员参考。

Folding and Fracturing of Rocks

J. G. Ramsay

Professor of Geology

Imperial College of Science and Technology London

McGRAW-HILL BOOK COMPANY

1967

岩石的褶皱作用和断裂作用

〔英〕 J. G. 兰姆赛 著

单文琅 宋鸿林 蒋荫昌 译

宋鸿林 校

责任编辑:李鄂荣 王章俊

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本: 787×1092¹/₁₆印张: 25 字数: 581,000

1985年12月北京第一版·1985年12月北京第一次印刷

印数: 1—3,315 册 定价: 5.90 元

统一书号: 13038·新139

译者的话

随着构造地质学的发展,对于小型构造的研究已从单纯描述性的定性研究,进入了深入进行数理分析的阶段。然而,由于构造地质学研究的客观对象——构造变形,是地壳构造变动的最终产物,对它们的起因、发展过程以及它们发展过程中所处的物理化学环境及其变化,特别是涉及的漫长时间因素,都是人们无法直接经历的。因而长期以来,对构造变形的分析研究不得不遵循反演程序。通过长期实践,这种构造分析方法逐渐地完善了起来。人们把构造分析的全过程概括为三个顺序的步骤:几何学分析、运动学分析和动力学分析。这样,在构造的变形分析中,应变测量和应变分析很自然成了贯通上述全分析过程的关键性的中间环节。因此在基本理论和方法学方面,必须引进有关应力、应变的力学理论及其数理分析方法,并配合一定的岩石力学实验及模拟试验。但是正如本书作者所指出的,现有的有关力学教科书都不是专门针对地质学的需要编写的,特别是由于构造地质学研究的对象属于有限应变、即大变形范畴,一般力学教程显然不能满足需要。这种情况在我国也不例外。

J·G·兰姆赛教授的“岩石的褶皱作用和断裂作用”一书,就是为了适应上述需要而编著的基础性专著。书中系统介绍了有关应变测量和应变分析的基本原理和方法,总结了作者多年来从事这方面研究工作的成果。为了适应相当多的构造研究者的力学和数学基础,作者在数理推导方面尽量限于使用普通代数和初等微积分。因此,本书内容既全面丰富又通俗易懂,非常适合作为地质院校构造地质、地质力学等专业的教学参考书,可作为构造地质学教材的补充和提高读物。本书作为一本专门性著作,为进行构造变形分析提供了重要的基本原理和方法。所以它出版以来已经成了构造地质研究的重要参考书,至今仍经常地、广泛地为各国构造地质学家所引用。由于我国构造地质工作者,越来越对这方面的研究感兴趣,而且也广泛地开展了这个方面的工作,在国内尚无有关的系统读物的情况下,我们特将此书译出以应急需,至于原书作者在此书出版以来的进展,另有专著,也将予以译出、以飨读者。

全书共有十章。第一章至第六章着重介绍了有关应力-应变的基本理论,特别是关于对小型构造进行应变测量和应变分析的基本原理和方法;第七章专门探讨了褶皱的分类、褶皱的应变分析方法及褶皱作用的形成机制;第八章至第十章则分别介绍了与褶皱作用有关的线状构造的变形效应及非平行或斜交面的褶皱特征,探讨了叠加褶皱的变形效应。

为了便于读者对所研究的课题进行深入地探讨,作者在每章末都列举了大量的参考文献。尽管从1967年本书出版以来,有关构造变形的应变测量和应变分析的研究工作又有了极大的发展,发表了许多有关论文,散见于各种书刊,如“构造物理学”杂志(Tectonophysics)等,原书所列参考目录显然已经不能反映当前的研究状况,但为了便于我国读者检索,译文中仍予以保留。

原书由于印刷原因,文内、特别是有关公式内的算式符号存在一些错误,除部分根据兰姆赛教授提供的勘误表加以更正外,其余的皆在译文中作了修正,对此在译文中不再一

一注释了。

本书译稿，第一、二、九、十章由蒋荫昌译；第三、五、七、八章由单文琅译，第四、六章由宋鸿林译。全部译稿由宋鸿林校阅。

由于译者水平所限，错误在所难免，谨请读者对译文提出宝贵意见。

序 言

在整个地质时期中,地壳受过多次变形。这种现象已被人们完全认识,当前,构造研究已进入了一个新的阶段,即对构造形态及其形成进行精确定量分析,对导致变形的力的性质和原因进行研究的阶段。为此,本书概述了应力和应变的基本原理和岩石材料的特性,并研究它们在地质作用中的某些意义。

现有的与这方面有关的教科书基本上都是为工程技术人员及物理学家编写的;对地质学家说来,尽管他们可从中找到一些有用的资料,但对他们所面临的有关问题却是十分有限的。举例来说,在工程学教科书中对应变的讨论主要集中在对小于2%的应变的分析,而对在变形的岩层中所经常出现的大应变却可能忽略不作任何研究。本书主要是应地质学家及地球物理学家之所需而编写的;但对土木及机械工程师,对矿山工作者以及对其他关心材料在应力下的力学特性的人们说来也会是有用的。

我试图用初等数学的术语来说明如何由基本原则导出各种应力及应变的公式,以及如何将其应用于岩石变形。在使用较先进的技术就能做出较迅速和较完全的分析的情况下,我也写入了一些可供选择的方法。不过,学习自然科学的学生只须具有简单代数和初等微积分的知识就能够领会这里所提到的有关的数学推导。一般都已列出推理过程中的中间步骤;尽管这对有经验的数学家来说会是多余的,但对许多学生来说却会是有益的。

在此基础工作的引导下,将对断裂和滚动以及对岩石材料的断裂及褶皱等地质方面的情况进行研究,希望它能够弥补描述性构造地质学教科书的不足,有助于对这些过程的基本方面的理解。本书不研究特定区域的构造发育情况,但选取了许多实例用以说明所讨论的特殊构造现象。书中用图解法表明在三度空间中应力与应变的直观意义,并不断指出理论分析的地质意义。

第一章介绍用于分析构造方位的方法。第二章到第六章阐述了根据基本原则对应力和应变的分析。还说明了基本的数学方法,并描述了处理地质资料的标准技术。在第七章中描述了岩石中的各种褶皱型式,分析了它们的形成作用并探讨了它们的一般的构造环境。在讨论了褶皱的几何特性及意义之后,对褶皱时变形的原始线性构造的几何特性进行了描述(第八章)。并讨论了原来不相平行的面的褶皱效应(第九章)。这些课题都具有重大的地质应用价值:如变形的不整合和假整合,地层的重复褶皱,变形的沉积构造等等。第十章研讨当两个系统的褶皱叠加时所产生的某些构造复合体,而这种分析大部份是以第七章和第九章中所确立的原则为根据的。

由于篇幅所限,不容许对显微组构技术以及对用于组构分析的弗氏台的用法做出充分的说明,所以,便下决心把讨论这个问题的内容完全取消了。

我愿对协助校改和提出宝贵意见的同事和朋友们,特别是对D. Elliot, M. J. Fleuty, N. J. Price, F. J. Turner和J. Watson表示谢意。我十分感激鼓舞起我对构造地质学的积极性的Gilbert Wilson。此外也要对J. Gee表示谢意,感谢他对准备用于说明的照片工作上所给予的内行的忠告和帮助。最后,只是由于我爱人的不断帮助和鼓舞才使得本书能够完成。

约翰·G·兰姆赛

术 语 符 号

x, y, z	直角坐标轴
l, m, n	一条线对于 x, y , 和 z 轴的方向余弦
A	面积
δA	面积增量
V	体积
δV	体积增量
Δ	面积或体积应变 $\delta A/A$ 或 $\delta V/V$
e, e_x, e_y, e_z	线应变, 及在 x, y 和 z 轴方向上的线应变
e_1, e_2, e_3	主线应变
$\dot{e}$	线应变速率, $\partial e / \partial t$
λ	平方长度比
λ'	倒数平方长度比 $=\frac{1}{\lambda}$
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	主平方长度比
$\omega, \omega_1, \omega_2, \omega_3$	刚体旋转角, 及绕 x, y 和 z 轴的刚体旋转角
X, Y, Z	自半径为 r 的球变形后所测的椭球轴, $X=r(1+e_1)$ 等
a	主应变比 $(1+e_1)/(1+e_2)=X/Y$
b	主应变比 $(1+e_2)/(1+e_3)=Y/Z$
ϵ	对数应变或自然应变 $=\log_e(1+e)$
ϕ	角剪应变; 塑性比例系数; 流函数
γ	剪应变 $=\tan\phi$
γ'	应变参数 γ/λ
$\dot{\gamma}$	剪应变速率 $\partial\gamma/\partial t$
J_1, J_2, J_3	有限应变张量的不变量
K_1, K_2, K_3	无限小应变张量的不变量
$\sigma, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	正应力及平行于 x, y 和 z 轴的正应力
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	主应力
$\bar{\sigma}$	平均或静水应力
σ'	偏应力
$\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$	主偏应力
σ_Y	屈服应力
I_1, I_2, I_3	应力张量的不变量
I'_1, I'_2, I'_3	偏应力张量的不变量
ϕ	应力函数

- E** 杨氏弹性模量
 ν 泊松比
 m 泊松数 $= \frac{1}{\nu}$
 G 刚性或剪切弹性模量
 K 体积弹性模量
 μ, λ Lamé氏弹性模量
 μ 粘性剪切模量
 η 粘性线模量
 a, b, c 规定由简单剪切所引起的平移方向的轴
 A, B, C 单斜对称组构轴

译者的话
序 言
术语符号

第一章	方位分析	1
1-1	赤平投影的编制	1
1-2	面状构造	3
1-3	线状构造	3
1-4	线的方向性	3
1-5	面的交线	3
1-6	线间夹角及面间夹角	4
1-7	构造资料的表示	5
1-8	用等值线法确定分布密度	5
1-9	曲面形态的分析	6
	π 图解	6
	β 图解	8
1-10	用于构造分析的统计法	10
	单峰极点的分布	10
	圆柱状排列的S面极点的最优拟合面(π 圆)	11
	圆锥状排列的S面极点的最优拟合圆锥	13
第二章	应力	16
2-1	应力符号	16
2-2	应力分量	16
2-3	平面应力分析	17
2-4	主应力值	18
2-5	平面应力中的不变量	18
2-6	作用在其法线与主应力轴成 ϕ 角的平面上的应力	19
2-7	三维应力	20
2-8	主应力轴的方位	22
2-9	三维应力不变量	23
2-10	作用在任一平面上的应力	23
2-11	最大剪应力面	24
2-12	静水应力	26
2-13	偏应力	26
2-14	物体内的应力变化	27

2-15	应力轨迹	29
2-16	应力系统的叠加	30
2-17	确定应力分布的光弹技术	31
第三章	二维应变	34
3-1	应变的量度	35
3-2	均匀应变和非均匀应变	36
3-3	有限应变和无限小应变	37
3-4	二维有限应变	37
3-5	线的长度变化	43
	无伸缩线	44
3-6	角度变化	45
3-7	剪应变	45
	有限剪应变最大值	46
3-8	莫尔图解	46
3-9	应变不变量	55
3-10	简单剪切	56
3-11	两次有限应变的叠加	62
3-12	有限应变椭圆形状的图解表示方法	64
3-13	二维无限小应变	66
3-14	线的长度变化	68
	无限小无伸缩线	69
3-15	无限小剪应变	69
3-16	无限小面积变化	70
3-17	二维变形的地质意义	70
第四章	三维应变	82
4-1	三维有限应变	82
4-2	有限应变张量	82
4-3	线的长度变化	84
	无伸缩线	86
4-4	剪应变	86
4-5	变形时的角度变化	87
4-6	有限应变各组分的图解记录法	90
	应变组分(1)、(2)和(3)	91
	应变组分(4)到(9)	94
	变形岩石数据应用的局限性	95
4-7	根据二维的资料确定应变椭球的主应变	96
	在任何三个互相垂直的平面上的应变测量	96
	三个不平行平面上的应变测量	99
	已知椭球的主轴方位时利用一个平面上的应变状态求主应变	100

4-8	表示三维应变状态的莫尔图解	101
4-9	五种类型等积椭球的有限应变的性质	103
	五类椭球的应变椭圆切面	105
	变形时的体积变化	109
4-10	应变导致面和线的散布性	109
4-11	两个有限应变的叠加	111
4-12	三维无限小应变	112
4-13	无限小长度应变	116
4-14	无限小剪应变	117
4-15	表示三维无限小应变的莫尔图解	117
4-16	无限小体积变化	117
4-17	三维递进变形	118
4-18	二维和三维递进变形间的关系	119
4-19	劈理和片理的意义	120
第五章	岩石中有限应变的测定	126
5-1	原始球形体的变形	127
5-2	应变椭圆的确定	131
5-3	根据应变椭圆计算应变分量	135
5-4	单个椭球的测量	136
5-5	非球状体的变形	136
5-6	具随机组构的椭圆形物体的变形	142
5-7	具随机组构的椭球形物体的变形	143
5-8	具原始组构的椭球形物体的变形	146
5-9	韧性介质中刚性或强硬物体的行为	150
5-10	变形砾岩中的压溶作用及其影响	154
5-11	根据变形化石测定应变	155
5-12	随基质均匀变形的化石	155
	原来呈圆盘状的化石	155
	原来呈圆管状的化石	155
	左右对称的化石	156
	原来左右非对称的化石	164
5-13	与基质呈非均匀变形的化石	167
5-14	根据褶皱的或香肠化的脉及其它特征确定应变	169
第六章	应力和应变的关系	173
6-1	实验条件下岩石的变形行为	174
6-2	多晶集合体的变形	180
6-3	用机械模拟表示的岩石变形行为	182
6-4	开尔文或沃伊特粘弹性模型	183
6-5	马克斯威尔弹粘性模型	186

6-6	标准线性固体(粘弹性体)	188
6-7	蠕变的弹粘性和塑性模型	190
6-8	应力和应变张量间的关系	191
6-9	弹性固体	193
6-10	脆性破坏: 断层和破裂的发育	196
6-11	应力函数及其在断层问题中的应用	202
6-12	粘性流体	207
6-13	流函数及粘性流动问题的解	211
6-14	塑性流动	212
6-15	递进变形	219
6-16	对称和构造轴的概念	226
第七章	褶皱和褶皱作用	234
7-1	褶皱的描述和分类	235
7-2	单一褶皱面的描述	236
7-3	相邻褶皱面的关系	242
7-4	描述褶皱产状的常用术语	243
7-5	褶皱的几何分类	244
7-6	纵弯作用形成的褶皱	254
7-7	纵弯作用: 褶皱层的形态	263
7-8	弯曲岩层内的应变状态	266
	平行岩层界面的剪切作用	266
	平行岩层界面的长度应变	270
	层间滑动和切向长度应变的联合	274
	叠加均匀应变对褶皱形态的改造	278
7-9	纵弯曲层外侧的应变状态	282
7-10	相似褶皱和剪切褶皱作用的问题	286
7-11	剪切分量	288
7-12	压应变分量	290
7-13	相似褶皱内的有限应变状态	291
7-14	相似褶皱的形成机制	292
7-15	膝折带、尖棱褶皱和共轭褶皱	296
第八章	线状构造的变形	314
8-1	纵弯作用形成的褶皱	315
8-2	锥状褶皱	318
8-3	相似褶皱	319
8-4	线状构造未变形状态的复原	331
第九章	斜交面的褶皱作用	335
9-1	弯滑褶皱作用	335
9-2	由弯滑作用所引起的两面角的变化	338

9-3 压扁的弯滑褶皱	339
9-4 切向长度应变产生的具内部变形的纵弯褶皱	341
9-5 剪切形成的相似褶皱	344
9-6 剪切褶皱中两面角的变化	345
9-7 剪切和均匀应变形成的相似褶皱	345
第十章 叠加褶皱作用	355
10-1 叠加褶皱作用的环境	355
10-2 两个相继的褶皱作用产生的干涉型式	356
10-3 地层顺序	368
10-4 在叠加褶皱系统中新褶皱几何形态控制	369
10-5 变形的早期褶皱的几何形态	375
10-6 老褶皱的复活	377
10-7 早期褶皱的原始方位	377
10-8 利用投影技术对叠加褶皱的几何分析	379
英汉术语对照索引	383

第一章 方位分析

在构造地质学中所遇到的许多问题都要求做三度空间的仔细的几何分析。赤平投影就是一种最有用的表示地质构造的面状及线状构造间角度关系的方法。它是一种解决这些几何关系的方便而快速的图解法。其精确度通常在半度之内；这要比得自野外研究的资料的精确度更大些。在对某一区域的详细分析中，也许需要收集大量关于变形岩石中面、线方位的数据。有可能把几千个这种原始观测数据放在一张简单的图解中，对这些资料使用统计方法，就能获得精度很高的结果。

1-1 赤平投影的编制

赤平投影的编制法可以直接和在为表示地球表面上海陆的全球分布而使用的某种类型的地图投影的编制法相比较。如果我们取空间中的一个平面，并通过球心而把它投影到球的下半球^①上去(图1-1A)，这个平面与半球面相交为半圆弧，称为这个平面的球面投影。这个投影是一大圆。现在从上半球的顶点把它投影到半球的水平面上。以此方式所获得的曲线就是这个面的赤平投影(图1-1B, 1-1C)。如果平面是直立的，它的投影就是圆的直径；倘若它是水平的，则其投影与圆周相一致。在编制赤平网或吴氏网时，将在半球上以 10° 为间隔所绘出的小圆和大圆的全部网格(相当于经度和纬度)投影到水平面上(图1-2)。这个网格就是一张能表示出任一平面或线的三度空间方位的图。在任何两个给定小圆间的地带中以 10° 大圆分划的各表面面积虽然在半球表面上是相等的，但在赤平投影网上却并不相等(图1-2, A和A₁)。为了资料分布频率的统计解释，可以调整网格线的位置，使其面积相等。这种调整直接与某些地图投影所用的面积扭曲的校正相似。由此校正而成的等面积施密特或兰勃特网(图1-3)是投影和解释构造资料的最有用的图解。本书全部使用等面积投影。网格的另一种变化是制成一种类似极投影图的网。在有大量的线理方位数据需要

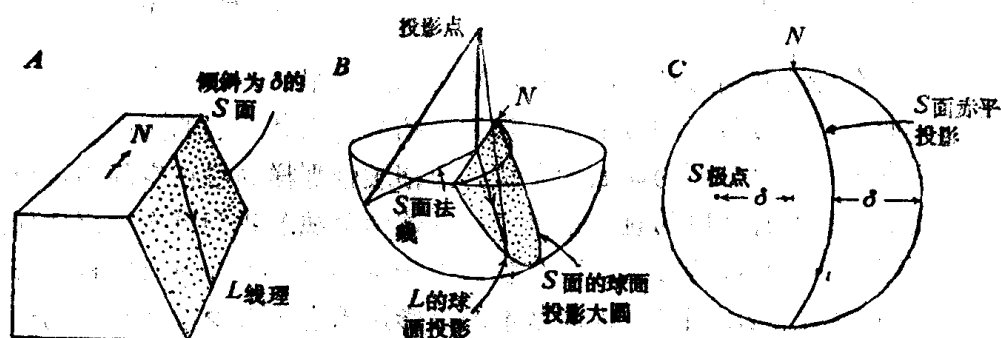


图 1-1 具有线理 L 、倾斜为 δ 的平面的赤平投影的编制

① 在结晶学中惯于将晶面投影在上半球上，而在大多数已出版的有关地质构造分析的著作中，通常是用下半球。这一规则并不总都得到遵守，因此在应用图解时最好能注明用的是那一个半球。

投影的场合下，这种极或Billing等面积网(图1—4)尤为有用。

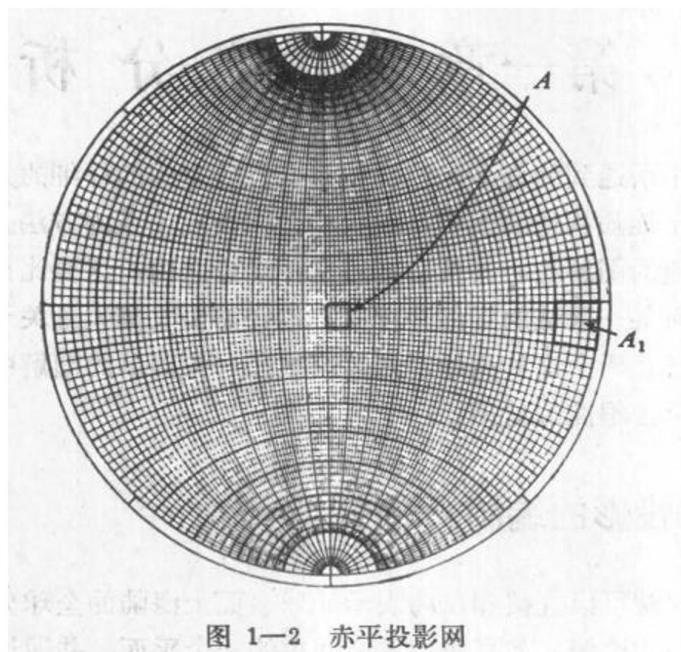


图 1—2 赤平投影网

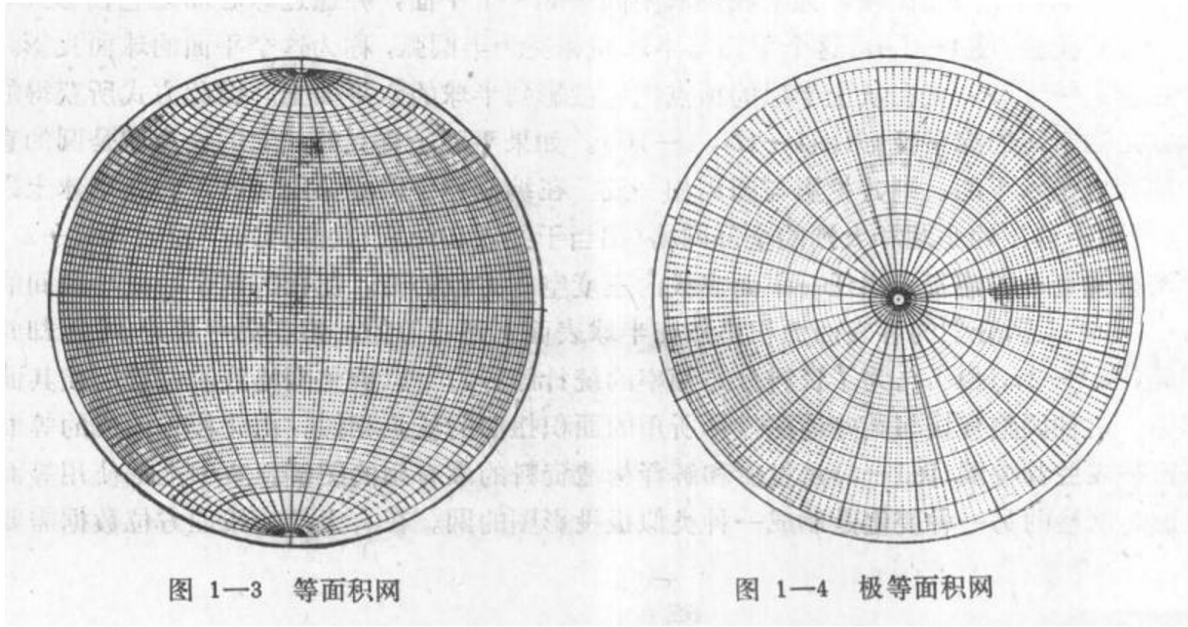


图 1—3 等面积网

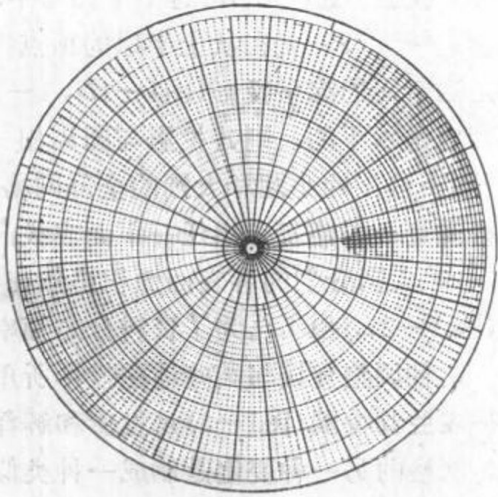


图 1—4 极等面积网

所有涉及岩石构造几何方位的测量资料都可归入两组之一中：即面或线。可将曲面看成是无数个切面来进行分析。举例来说，当记录褶皱翼上某个层的走向和倾角时，我们实际上是在这个点上测量褶皱面的切面的方位。像褶皱轴那样的线在空间中可成曲线状，也可把它看成是无数的直线段的轨迹来研究。从这两个观念我们可推导出任何曲面或曲线都可通过投影其平面或直线的分量，而在投影中表示出来。因为所有的构造形态都可用一系列的各种平面或线段表示出来，因而基本的投影技术也只有少数几种。构造资料的投影通常是在一张放在网上的透明纸上进行的，并且用在圆心上的一根针来固定位置，这样上面的纸就可以围绕此点而转动。

1-2 面状构造

任一平面在投影网上都可表示为一大圆。用实例来说明这个大圆的绘制方法最为方便。一个走向 38° 、倾向东南、倾角 71° 的平面的大圆，其投影方法如下：

1. 把透明纸放在网上并标出北的方位。
2. 将透明纸逆时针旋转 38° 并描出具有 71° 倾斜的大圆。角度是从网的右边沿东西向直径向中心来计算的。

如果要投影大量的面状构造，这时要把它们每一个都记录为一大圆并不总是可行的，因为这会使图上的线条过多而产生十分混乱的后果。在要记录大量资料的场合下，通常是通过标绘出每个面的法线或垂线以使图解简化。这样每个面就可由投影中的单个点或极所代表。极总是落入与倾斜方向相反的那一部份网里，而其距网边的距离是 90° 减去该面的倾角。为标绘前例中同一平面的极，第二个步骤应作如下改正：

- 2a. 逆时针方向旋转透明纸 38° ，并沿东西直径上在距中心为 71° 的距离上于网的左侧（即NW象限）将点定位。

1-3 线状构造

记录一条向 77° 倾伏 35° 角的线理的位置的方法：

1. 将透明纸盖在网上并标明北的方位。
 2. 将纸反时针向旋转 77° ，并从下伏网的南北直径上由北向中心数 35° ，将点标上。
- 如果需要标绘大量的线理，使用极网要比使用兰勃特网更方便些，因为这时不用旋转透明纸就能将点标上。

1-4 线的方向性

线状构造及平面的极是用代表它们在下半球上投影的点来记录在赤平投影图上的。以此方式记录下来的线不一定有方向意义。例如，劈理面的极或褶皱枢纽线都不具有方向性意义，而层理面的极则可指向或离开地层“上层面”的方向，而一条与沉积时的水流相平行的线则具有显著的方向性意义。有时用不同的符号来区分指向下半球及背向下半球而出射的线的方向性是重要的。图1—5表示这种涉及具有同样方位的层理面的符号的用法。一个的层序是倒转的，另一个则是正常的。此类方向性符号也应用来指明断层面相邻侧的相对位移方向（图1—6）。

1-5 面的交线

两个不相平行的平面都相交成一条直线。通过作图很容易确定这条交线的方位，代表两个平面的大圆交于一点，这个点即其交线。用此方法所能迅速解决的另一个问题是从两个视倾斜确定真倾斜。两个视倾斜就是在不同露头面上的层理面的交线。如果将代表这两

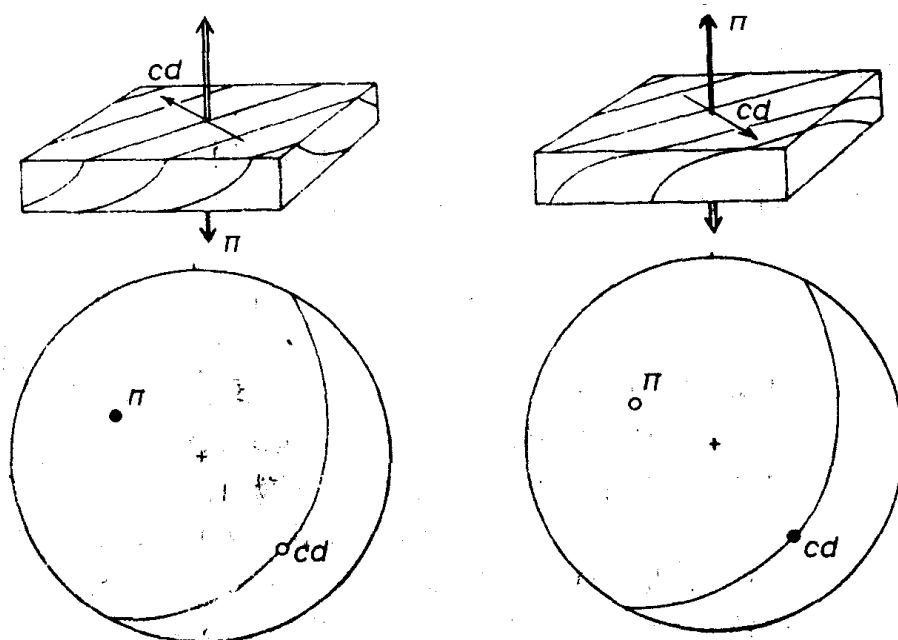


图 1—5 线的方向性意义。层理面 π 及流向 cd 的极都具有方向性,指向下的极用实圆,指向上的极用空心圆标绘在下半球上

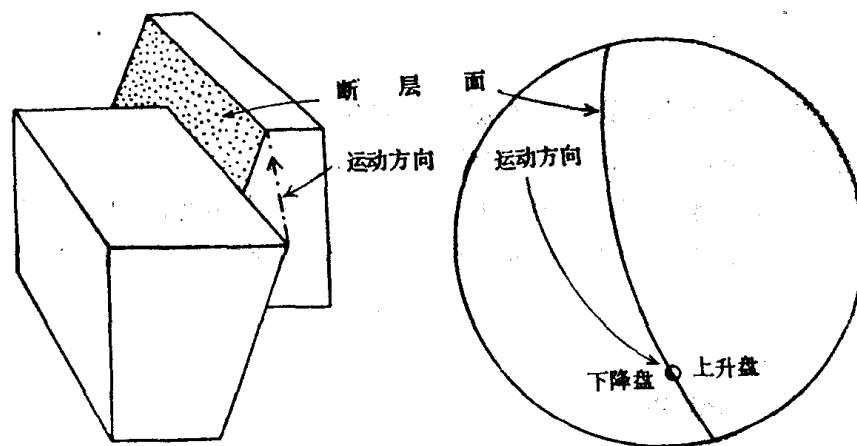


图 1—6 用对分圆符号指示断层两侧相对位移的方法

条交线的两个极点标绘在图上,通过旋转透明纸就会发现只有一个下伏网上的大圆通过这两个点;这个大圆即这个点的真方位。

1-6 线间夹角及面间夹角

要测量任何两条不平行(或斜交)线间的夹角,首先应把代表这些线的点标绘在网上。旋转上覆纸直到这两个点落在一个大圆上为止。在此大圆上由横切的小圆所标出的两点间的角度(图1—7),即此二线间的夹角。这种方法可以直接和计算地球表面

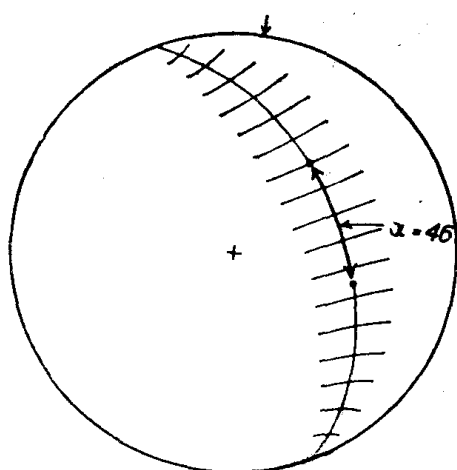


图 1—7 测量两条线之间的 α 角