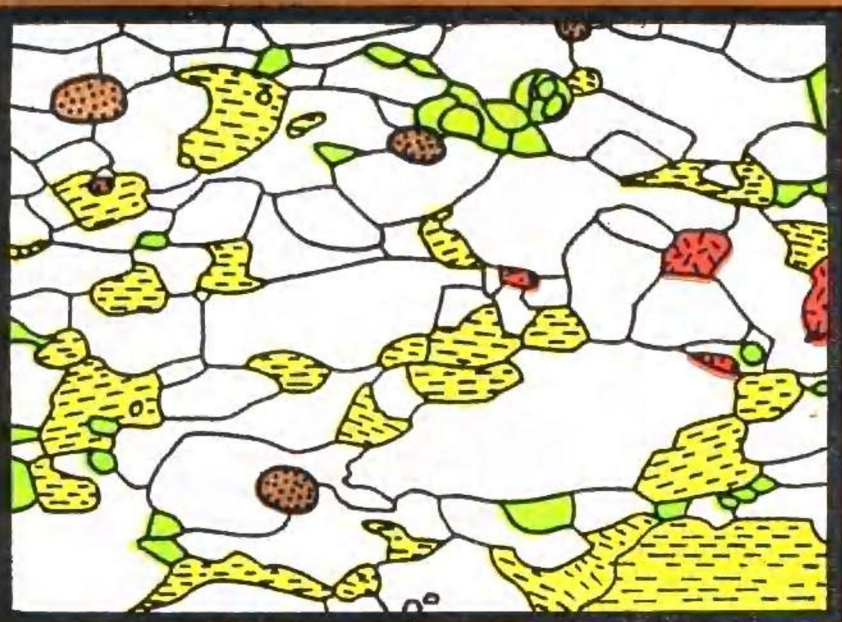


构造地质学 原理

● (法)A.尼古拉 著



石油工业出版社

39375

构造地质学原理

〔法〕 A.尼古拉 著

嵇少丞 译 刘小汉 校

S

石油工业出版社

译者的话

尼古拉 (A.Nicolas) 教授, 1936年2月18日生于法国雷恩。50年代中期留学美国, 1966年获法国国家博士学位。自1968年起任法国科研中心构造物理实验室主任。尼古拉教授是国际上开展岩石圈塑性变形以及显微构造, 特别是上地幔的固态流变和变形机制等方面研究的先驱者之一, 在同行中享有盛誉。他已在国际学术刊物上发表了近百篇论文。他和巴黎第六大学J.P. Poirier教授 (1976) 合著的《变质岩的晶质塑性和固态流变》一书, 以物理冶金学理论为基础研究岩石的塑性变形以及构造和显微构造, 对构造资料进行运动学和动力学解释。该书对于近年来国际上关于变形矿物岩石的显微构造及流变机制的研究起了非常重要的促进作用。科学出版社于1984年出版了该书的中译本 (林传勇、史兰斌译)。

现在我们翻译尼古拉教授的《构造地质学原理》一书, 是1984年法国Masson出版公司出版的法文版。该书是著者为与地质科学有关的大学生、研究生写的一本教材。全书共分9章, 另有3个附录, 每一章末尾都列有参考文献。本书的最大特点就是打破了世界上多年来形成的构造地质学教科书的传统体系, 系统地论述了近年来构造地质学, 特别是显微构造、变形实验和变形机制研究的最新进展, 介绍了构造分析的现代理论和最新技术方法。它不象以往构造地质学教科书的作者那样, 满足于对褶皱、断层、节理、片理和线理等

进行按步就班、面面俱到般的描述或分类，而在构造的动力学、运动学分析上狠下功夫。它也不象以往的构造地质学教科书那样连篇累牍，而是简明扼要，重点放在培养学生的理论思维能力和实际工作能力上，故在教学方法上也别具一格。1987年初英国D. Reidel出版公司出版了该书的英文版。国外构造地质学界的同行们对该书给予很高的评价。

本书翻译过程中得到了钟大赉教授的关怀和鼓励，在百忙中审读、修饰译文，并大力联系出版，在此深致谢意。

译者

1988年于北京

前 言

物理学家力图将所研究的自然现象抽象归纳为一些基本要素，然后通过适当的简化和近似来理解这一现象，用定律来概括它的本质。随着野外地质数据的爆炸性增长，地质研究领域中也迫切需要这类简化方法。然而奇怪的是，地质学家们常常仍停留在大量的形态描述阶段。他们这种传统的谨慎态度是由于所研究对象的性质造成的，因为在浩如烟海的观测数据中，往往很难检析出有意义的参数。这种态度也和地质学的研究方式有关，地质学家们的工作方法与警察进行刑事侦察一样，采用“反演法”，从现状重塑过去的事件。诚然，在地球科学领域进行大范围的物理实验必然有一定局限性，尤其对实验结果的解释更需小心翼翼。但地质学家由于过分谨慎而对数字化和模式化采取的保守态度，有时几乎到了应受指责的地步。如果至今仍拒绝某种程度的数学近似和估计，就等于关闭通向成功的大门，依旧停留在原始推理的水平。值得庆幸的是，目前日益增多的研究工作正试图将研究对象的有意义数据条理化。虽然仅仅是近似的数值估计，但毕竟能帮助我们检验各种假说，建立更新的模式。

构造地质学不应回避这个趋势。请想想看，文献中堆积如山的构造形态描述，尽管它们是那样准确和严格，实际上却往往派不上什么用场。总之，我们确实是处于一个以广泛的物理实验为基础的改革创新阶段了。

我早想介绍构造地质研究中的最新进展。本书中有些观

点与传统概念相违，并且内容仅限于变形基本机制和构造。此外，本书仅论及构造地质的分析要素。自然界中只存在有限数目的构造类型，它们是由不同的构造要素按一定的规律组合起来，如地壳的拉张或缩短、走向滑动断层、底辟构造、重力构造等等。关于这些构造的研究已超出本书论述的范围。最后，构造的运动学和动力学分析，也时常要借助于简化和逼近。鉴于这种分析方法目前尚处于发展的初步阶段，所以，某些象劈理成因这样的基本问题也还未完全搞清楚。在本书中，我试图大胆地、甚至是武断地对这一课题的研究现状——认识和假说作些介绍。

本文在侧重物理分析的同时，对地质现象及地质过程进行了适当的简单介绍。为了通俗易懂，文中没有引用高深的数学知识。

在本书撰写过程中，J.L.Bouchez常和我共同讨论，他还和其他几位同事F.Boudier, J.P.Brun, P.Choukroune, P.Cobbold, J.P.Gratier, M.Mattauer, J.Mercier, A.Pecher, J.P.Poirier, P.vialon, J.L.Vignerese, C.Willaume以及我们的几个博士研究生M.Cannat, G.Ceuleneer, S.Serot-Crambert参加了审稿。此外，J.P.Brun和P.Choukroune还和我合写了附录II。M.C.Brehier和A.Cossard负责全书的排版、打字、绘图和装订，在此特致谢意。

A.尼古拉

目 录

1. 引言	(1)
2. 应变和应力	(3)
2.1. 应变	(3)
2.1.1. 定义	(3)
2.1.2. 有限应变椭球	(5)
2.1.3. 应变状态	(6)
2.2. 流变学基础	(7)
2.2.1. 实验变形	(7)
2.2.2. 弹性、塑性和粘性变形	(8)
2.2.3. 渗滤阈：粘性和塑性之间的转化	(11)
2.3. 应力	(12)
2.3.1. 应力椭球	(12)
2.3.2. 莫尔圆	(15)
2.4. 递进应变	(17)
2.5. 应力与应变之间的关系	(18)
3. 不连续变形理论	(20)
3.1. 引言	(20)
3.2. 破裂方式及其和应力的关系	(20)
3.2.1. 实验变形	(20)
3.2.2. 莫尔包络线和库仑准则	(22)
3.2.3. 流体分压和有效压力	(24)
3.2.4. 有液压参与的断裂作用	(25)
3.2.5. 液压致裂	(26)
3.3. 脆性和韧性之间的转化	(27)
3.3.1. 显微破裂	(27)

3.3.2.	载荷流体的侵蚀作用	(28)
3.3.3.	扩容作用	(29)
4.	连续变形机制	(31)
4.1.	引言	(31)
4.2.	固态塑性变形	(31)
4.2.1.	蠕变单元和变形机制	(31)
4.2.2.	晶体缺陷	(33)
4.2.3.	塑性变形的机制和过程	(39)
4.3.	有流体参与的变形	(50)
4.3.1.	溶解和结晶	(50)
4.3.2.	被动旋转	(54)
4.3.3.	边界滑移和液化作用	(54)
5.	不连续变形：构造及其解释	(56)
5.1.	引言	(56)
5.2.	节理及节理裂隙	(57)
5.3.	张破裂	(58)
5.4.	缝合线状节理	(63)
5.5.	断层	(64)
5.5.1.	断层和断层系的几何分析	(64)
5.5.2.	断层的内部构造	(66)
5.5.3.	地震断层和非地震断层	(70)
5.5.4.	位移的显微构造分析	(71)
5.5.5.	动力学分析	(71)
5.5.6.	复合系——断层的扩展	(72)
6.	岩石中均匀变形的标志	(76)
6.1.	引言	(76)
6.2.	面状构造	(77)
6.2.1.	板劈理和片理	(77)
6.2.2.	细褶劈理	(78)
6.2.3.	破劈理	(81)

6.2.4.	构造层理	(82)
6.2.5.	片理、面理和应变椭球	(86)
6.2.6.	片理、面理和褶皱	(86)
6.3.	线理	(88)
6.3.1.	矿物线理	(88)
6.3.2.	矿物集合体线理	(91)
6.3.3.	交面线理	(91)
6.3.4.	细褶皱线理	(92)
6.3.5.	线理和应变椭球	(92)
6.3.6.	线理和褶皱	(93)
7.	均匀变形的构造解释	(96)
7.1.	引言	(96)
7.2.	构造形成的主要机制	(97)
7.2.1.	流体中的沉积和流动	(97)
7.2.2.	塑性变形	(98)
7.2.3.	溶解-结晶作用产生的变形	(102)
7.3.	粘性流动构造的解释	(102)
7.4.	由溶解-结晶作用形成的变形构造的解释	(105)
7.4.1.	片理-线理和主应力的关系	(105)
7.4.2.	细褶皱理的成因	(106)
7.4.3.	破劈理的成因	(107)
7.5.	晶内塑性变形构造的解释	(108)
7.5.1.	优选方位的发育	(109)
7.5.2.	晶体的非均匀变形	(111)
7.5.3.	共轴变形和非共轴变形	(112)
7.5.4.	应力与优选方位的关系	(115)
8.	不均匀连续变形: 典型构造	(117)
8.1.	引言	(117)
8.2.	显微构造	(118)
8.2.1.	隐蔽带和压力影的结晶作用	(118)

8.2.2.	螺旋形和“Z”形包体矿物	(123)
8.2.3.	张破裂中的矿物生长	(125)
8.3.	剪切带	(128)
8.3.1.	几何学和运动学的研究	(128)
8.3.2.	力学研究	(133)
8.4.	拉伸——布丁构造	(137)
9.	褶皱	(143)
9.1.	引言	(143)
9.2.	褶皱的几何分析：单层褶皱	(144)
9.2.1.	褶皱的形态学	(144)
9.2.2.	褶皱的方位	(145)
9.2.3.	褶皱系	(147)
9.3.	单层的褶皱作用	(149)
9.3.1.	等厚褶皱	(150)
9.3.2.	相似褶皱	(155)
9.4.	多层叠合体的褶皱作用	(159)
9.5.	褶皱和应变轴的关系	(162)
9.5.1.	片理和褶皱轴面之间的关系	(162)
9.5.2.	线理和褶皱轴之间的关系	(163)
9.6.	叠加褶皱	(165)
9.6.1.	几何分析	(167)
9.6.2.	连续变形和多期变形	(169)
附录I	应力和应变的张量分析	(173)
I.1.	应变	(173)
I.1.1.	张量分析	(173)
I.1.2.	应变类型	(180)
I.2.	应力	(183)
I.2.1.	张量分析	(183)
I.2.2.	应力的种类	(187)
I.3.	弹性变形	(190)

附录 II 有限应变测量	(193)
II .1. 引言	(193)
II .2. 定义	(193)
II .2.1. 线状物体的应变	(193)
II .2.2. 简单剪切应变	(194)
II .2.3. 应变椭球体	(194)
II .2.4. 应变椭圆	(195)
II .2.5. 应变莫尔圆	(197)
II .3. 应变椭圆的确定	(198)
II .3.1. 伸长应变的测定	(198)
II .3.2. 剪应变的测定	(200)
II .3.3. 椭球状物体的应变	(200)
II .3.4. 点状标志物的分布变化	(203)
II .4. 应变椭球的确定	(208)
II .4.1. 在椭圆上的测量	(208)
II .4.2. 面-线状标志的重新定向	(208)
II .4.3. 矿脉的变形	(210)
II .5. 简单剪切应变	(212)
II .5.1. 剪切面和片理间的夹角	(213)
II .5.2. 面状标志物的旋转	(215)
II .5.3. 显微构造标志物的旋转	(215)
附录 III 球面投影和图示法	(218)
III .1. 引言	(218)
III .2. 定义	(218)
III .3. 直线和平面的图示法	(221)
III .4. 等密图	(224)
III .5. 等密图的解析	(225)

1. 引言

地球科学原则上既不属于历史学也不属于应用科学，据其侧重于研究对象的构造或者成分可分为两大类。地球物理学、结晶学、构造物理学、构造地质学、大地构造学、地貌学以及宏观的沉积学，就是要探讨客观对象的构造及其演化；而地球化学、矿物学、岩石学则是要明了研究对象的化学成分及化学变化。完整的地质学研究当然要综合这两个方面。

简而言之，构造地质学是地球科学的一门基础学科，研究方法分为两种。研究构造成因的属于历史分析。在研究一个变形区域（如山脉）时，首先必须研究复杂变形的几何形态，尤其是那些叠加在层系上的褶皱，尽量搞清楚错综复杂的构造关系，然后借助于地层学、地质年代学、岩石学和地球化学的方法，恢复区域构造发展史。

物理或构造物理（构造物理是物理学和地质学相结合的产物）方法则是详细研究变形机制。虽然说早在上世纪，一些先驱者如Sorby和Daubrée等在这方面就进行了最早的理论 and 实验尝试，但是显著的进展确实是在近年来才取得的，因为构造物理领域中最近的研究进展是与第二次世界大战以后材料科学的迅速发展密切相联的。到了本世纪60年代，造岩矿物的实验研究真正进入了一个大跃进时期。通过几何学描述，特别是变形的定量化研究，人们可以深刻地认识有关岩体运动（运动学）以及产生这些运动的力（动力学）。将

这些结果进一步纳入更大范围的地球物理背景，就能够更好地了解一个体系或某一确定区域的地球动力学特征。此外，对地震易发区的活动断层的运动学和动力学分析，同时结合震源机制（地球物理）的研究，可以更好地探明地球中局部的应力状态，从而预报现代构造的演变。

必须强调指出，历史分析和物理方法并不互相排斥，而是互相补充的。所以，在对某一山脉进行构造分析时，必须同时进行历史分析和地球动力学的综合研究。

几何学（即狭义的构造学）、运动学以及动力学是构造地质学研究中的三个方面。对某一天然变形的物体，首先进行几何学描述。如果已知或可以恢复该物体在变形前的形状，我们就能够加以描述和定量研究这一形变。这就是有限应变分析，即分析物体记录下来的总应变量，这属于狭义构造分析或几何分析。然后查明该物体从始态到终态变形过程中各质点位移的途径，这就是运动学分析。动力学分析作为构造分析的最终目的，就是要确定哪些力导致变形。可以想象，在天然变形研究中，如果按照从构造分析到运动学分析、再到动力学分析这样的顺序进行，一定会遇到很多的困难。为此，可以求援于变形实验，因为在变形实验中应力状态已知，也容易比较物体变形前后的始终状态，能够了解所研究的材料的流变学性质，即应变速率随各种参数（应力、温度等等）变化的规律。

我们对大规律均匀变形要比对非均匀变形更感兴趣，尤其当非均匀变形规模较大（如开阔褶皱）时更是如此。我们的偏向基于两个原因：板块前缘或其内部的巨大位移如推覆构造、扩张和剪切作用，常常都出现在相当狭窄的构造带中，并表现为相对的均匀变形。此外，也只有均匀变形的

情况下，我们能够借助于本文介绍的工作方法推导出有关的运动学、动力学和流变学的结论。

2. 应变和应力

2.1. 应 变

2.1.1. 定义

地质体在外力的作用下发生形状的变化，产生质点位移，即平移和旋转。形变一词的原义系指所研究物体的形状变化。当物体作平移时，各质点的位移矢量是相同的；而在形变时，该物体各质点的位移矢量是不同的，所以我们说在该物体中有位移梯度的存在(图2-1)。数学上分析应变要借助于张量(见附录I)。

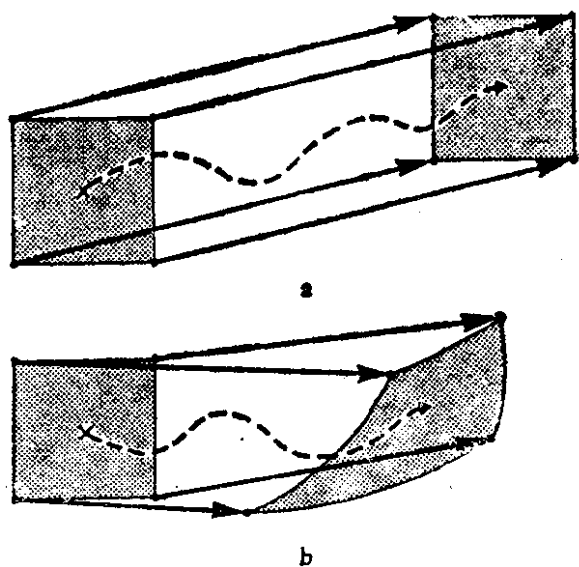


图 2-1 平移(a)和形变(b)的位移矢量场
平移时，位移矢量场是由相同的矢量构成的，而对形变来说，则由不同的矢量构成；材料质点在变形过程中移动的真实途径不一定和它的位移矢量保持一致，后者只和始、终态有关

地质学的一个重要任务就是在外部的地理参照系中确定地质体的平移和旋转。例如，测量山脉中推覆体的位移；一板块相对于另一板块绕垂直轴发生旋转的角度(如Corso-

Sarde地块相对于欧洲大陆发生的旋转)。为了达到上述目的,可采用下述两种可行的方法:一是将始、终态进行比较,条件是始态已知(如第一个例子中推覆体的原地系统,第二个例子中古地磁的定向);二是对有关地层中的现存的应变进行分析(褶皱、剪切带等等)。我们在第7章中将具体论述这些方法。

如果我们对后面将要讨论的一些变形实验结果进行比较,不难看出图2-6中的应变是不均匀的,而在图2-7中的应变是均匀的。更准确地说,固体内的所有直线在经过一个均匀应变之后,仍为直线(图2-2a);但在经过一个非均匀应变之后,原来的直线至少有一部分变成了曲线(图2-2b)。对于非均匀应变来说,试件内部各质点的相对位移有连续性或不连续性之分。不连续性表现为破裂,如断层(图2-2c)。

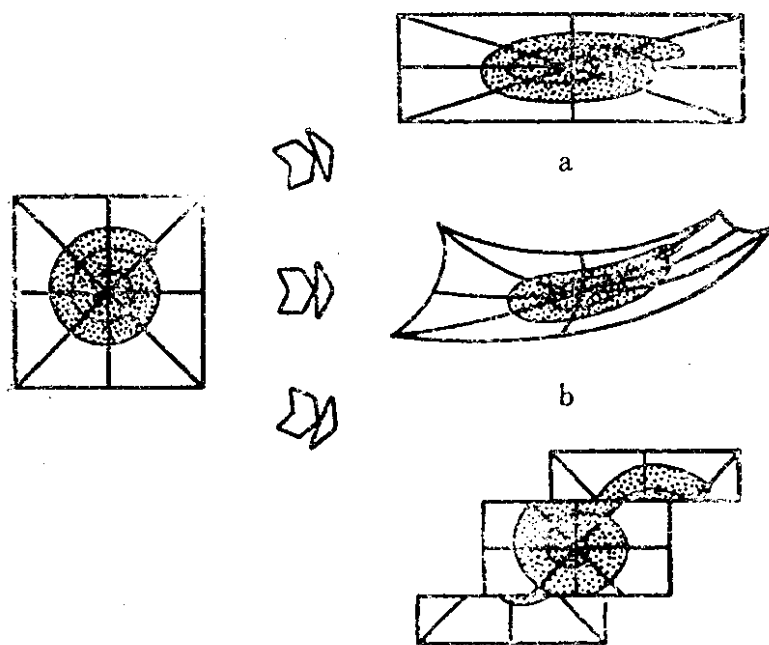


图 2-2 应变种类

a—连续均匀应变, 直线在变形之后仍为直线; b—连续非均匀应变, 直线在变形之后通常变成曲线; c—不连续应变

应变的均匀性是相对的，它与观察的尺度有关。有的应变在岩体或露头的尺度范围内看是均匀连续的；但当观察的尺度缩小到手标本或薄片范围内看则是不连续的，具有一系列的分隔面。我们称前者为透入性应变（图2-3a），后者为非透入性应变（图2-3b）。

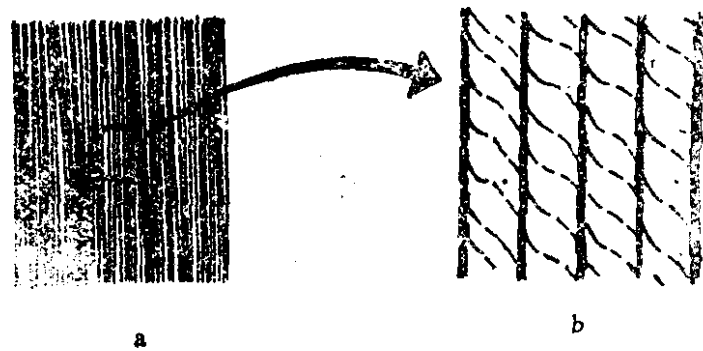


图 2-3 在露头(a)观察域内的透入性应变和在手标本(b)观察域内的非透入性应变

2.1.2.有限应变椭球

设想在原始物体中包含一些小球体，例如岩石中的鲕粒，经均匀变形之后，这些球体变成了椭球。通过对比球和椭球的形状和大小，我们就可以定量地计算出应变，这样的椭球就称之为有限应变椭球或总应变椭球（参阅2.2.2，图2-4）。椭球的三根主轴分别用X、Y、Z表示。在将椭球和原先假想的球进行定量比较的过程中，始终都必须牢记只有狭义的塑性变形才具有等体积的特征。正如在后面有关章节里要提到的，有流体参加的变形过程中，常伴随由于流体的

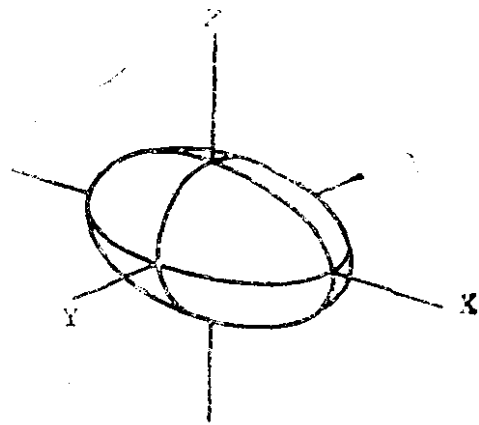


图 2-4 应变椭球体，其主轴 $X \geq Y \geq Z$

排出而造成的体积损失。

就均匀应变来说，我们可以利用一些标志物（岩脉、卵石、氧化或还原斑等等）来测定应变，其方法是在XY、XZ和YZ面上用统计方法估算出应变椭球各主轴的长度。在非均匀应变的情况下，可以将该研究区域划分为几个小区，将每一小区内的应变看成是均匀的（8.1）。由于各种应变标志物的合理利用，应变测量现已得到一定程度的完善。附录II

将对这个问题进行详细讨论。

2.1.3. 应变状态

态

用应变椭球的形状来表示应变状态，例如压扁的和拉长的椭球分别代表不同的应变状态。当椭球的Y轴既不伸长也不缩短时，应变为平面应变。不同的应变状态在Flinn图上相应的位置也不同

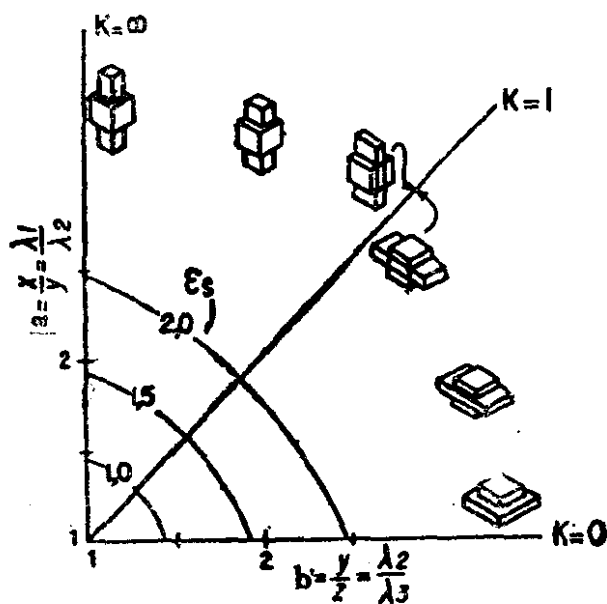


图 2-5 Flinn图解——据应变椭球各主轴的比率将有限应变的所有状态表示出来（据Hobbs, Means和Williams, 1976）小插图用来说明在这一图解中每一分区的应变状态，有关方面的详细内容见附录II

（图2-5）。K值——通过代表椭球的投影点和（1，1）点的直线之斜率，被定义为：

$$K = \frac{a - 1}{b - 1}$$

式中， $a = \frac{X}{Y}$ ， $b = \frac{Y}{Z}$ 。