

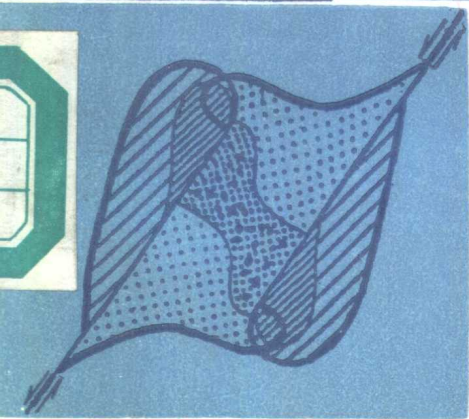
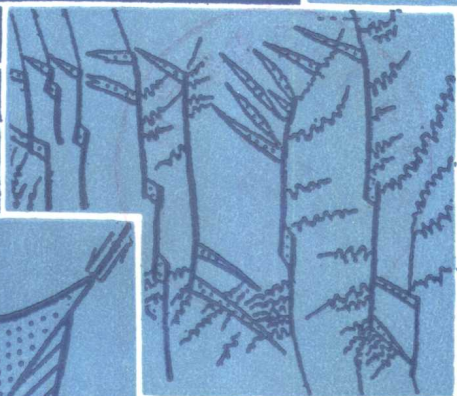
7354 57-56
基础地质工作方法丛书

脆性构造

—应力扰乱分析方法

刘小汉 编著

地质出版社



基础地质工作方法丛书

脆 性 构 造

——应力扰乱分析方法

刘小汉 编著

地质出版社

基础地质工作方法丛书

脆性构造

——应力扰乱分析方法

刘小汉 编著

•

责任编辑 张义勋 王芸生

地质出版社出版发行

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所经销

•

开本: $850 \times 1168^{1/32}$ 印张: $3^{7/16}$ 插页: 1 字数: 87,000

1988年2月北京第一版·1988年2月北京第一次印刷

印数: 1—1,590册 国内定价: 1.25元

ISBN 7-116-00174-3/P·158

引 言

法国朗盖多克科技大学 (Université des Sciences et Techniques du Languedoc) 构造地质实验室实施的科研项目之一, 是通过野外微构造及区域构造观察分析, 来恢复不同地质时代的古构造应力场。

这项研究首先在法国南部始新统及渐新统构造区开展。研究表明, 人们能够顺利恢复古构造应力场, 而且在该平缓褶皱区, 构造主应力 σ_1 及 σ_3 的轨迹区域性分布是相当简单而有规律的 (Arthaud et al. 1969)。类似的研究也曾在其它国家和地区进行过, 如在希腊 (Mercier et al. 1980)、北部非洲 (Bousquet, 1981)、西阿尔卑斯山链 (Mallavielle, 1982) 以及苏联等。在阿尔及利亚 1981 年阿斯南 (El. Asnam) 地震活动期间, philip (1981) 也从活动构造的角度进行过这项研究。

在实际工作中, 当我们将注意力从区域范围缩小到局部构造时, 对于某一已知的构造运动幕, 常会发现, 实测的构造主应力 σ_1 及 σ_3 的方向与具有明显宏观规律的区域平均应力方向之间存在或多或少的偏差, 而且这类偏差存在于各种比例尺范畴。在一块石灰岩手标本上, 可以看到张裂隙及压溶缝合线的齿峰方向发生偏转或叠加。在野外微构造测量点 (如采石场或路边岩壁), 常常测到与区域应力方向不同的“异常”方向。同样, 在一个区域的不同地点, 地壳缩短方向发生变化也是常见现象。人们对这些异常数据往往采取两种态度: 一种是认为它们属于多次构造运动的产物, 于是尽力判断它们之间的先后关系, 然后进行大范围对比, 希望据此反推出若干构造运动幕。但这种努力的结果, 却常使不少构造学家陷入迷惘之中。随着野外测量的进行, 他们得出越来越多的构造幕, 致使他们从根本上开始怀疑这种方法的可靠

性。另一种态度是对这些异常数据予以忽略不计。这实际上是一种不公正的选择，因为人们可以随意排除这些“讨厌”的却极有价值的数据。

本书的目的是通过典型应力扰乱现象的地质实例来解释为什么在古构造应力场中存在这些异常现象。书中还提出“应力扰乱”概念，并对与之相应的应变构造形迹进行几何学及运动学分析，探讨它们的形成及发展机制。为了寻求应力扰乱的力学依据，则又根据野外构造实例设计了数字模拟模型。

本书微构造形迹素描图的比例尺均界于1:5—1:50之间。

这项工作仅仅是一次新的尝试，它将在今后不同物理性质的岩石介质中应力扰乱的研究中得到不断的补充和提高。

目 录

引言

第一章 脆性微构造的应力扰乱分析	(1)
一、朗盖多克区域构造背景.....	(1)
二、弹性介质应力扰乱定义.....	(3)
三、微构造级别的应力扰乱.....	(4)
四、小结及讨论.....	(41)
第二章 数字模拟模型	(42)
一、弹性介质的数学模型.....	(42)
二、有限单元方法.....	(44)
三、电子计算机计算程序.....	(47)
四、模拟模型.....	(49)
五、小结及讨论.....	(70)
第三章 区域构造规模的应力扰乱分析	(72)
一、区域构造简介.....	(73)
二、主干断裂.....	(73)
三、区域构造应力扰乱分析.....	(74)
四、小结与讨论.....	(95)
第四章 大陆构造规模的应力扰乱分析	(96)
一、西班牙索里亚盆地应力扰乱应用一例.....	(96)
二、华北地区活动大断裂应力扰乱分析.....	(98)
第五章 总结及讨论	(100)

第一章 脆性微构造的应力扰乱分析

一、朗盖多克区域构造背景

为便于理解文中所叙述的脆性微构造实例，先简单介绍该地区的构造地质概况。

朗盖多克地区位于法国中部高原与地中海之间，西起黑山 (Mpmtagne Noire)，东至罗纳河 (Rennes)，面积约一万平方公里。地势西北高，东南低。西北和西部为低山区，其中埃古阿尔峰 (Mount-Aigoual) 海拔高度为 1564m。中部主要为丘陵和低海拔台地 (海拔 200—500m)。东部及南部为现代河谷及滨海平原。西北部赛文山区 (Cévennes) 为古生代褶皱变质岩，并发育晚期大型花岗岩体及第四纪玄武岩帽。西部黑山地区出露古生代含化石地层，并发育有典型的海西期韧性推覆-滑脱构造。在黑山与赛文区之间，则是由平缓的侏罗系石灰岩组成的著名喀斯特 (Causses) 地貌。朗盖多克中部大面积出露中生代 (侏罗纪及下白垩世) 细晶灰岩及白云质灰岩，最大厚度可达 3000m。灰岩一般为浅海相沉积。作为例外，Buége 一带可见三叠系湖相砂页岩零星露头。中生代海相沉积终止于欧特里阶 (早白垩世)，后沿杜朗斯地峡 (Isthme durancien) 向东南渐次海退，形成局部湖相沉积 (发育红色铝土矿)，其余白垩系地层则遭受剥蚀，如今仅局部可见。朗盖多克南部蒙比利埃地区 (Montpellier) 广泛发育白垩纪末期至始新世的陆相沉积，而渐新世的陆相沉积只出现于局部断陷地带。中—上新统及第四系沉积层集中于地中海沿岸。

比利牛斯 (Pyrennées) 造山运动在该地区表现为自东向西、

由南往北的构造迁移趋势，即从普罗旺斯 (Provances) 省向科斯区及赛文区，从比利牛斯山链向台地及中部高原发展。中生界碳酸盐岩建造形成以前，该区地壳已遭受海西晚期脆性构造的强烈切割，形成主要断裂，如比利牛斯北缘断裂、赛文断裂、马代尔 (Matelles) 断裂等。晚白垩世至巴耳顿阶 (晚始新世) 的比利牛斯运动的水平挤压应力，使全区地壳沿南北向缩短，形成褶皱及逆冲断层。同时，在该区中部巨厚碳酸盐岩地层中，造成大

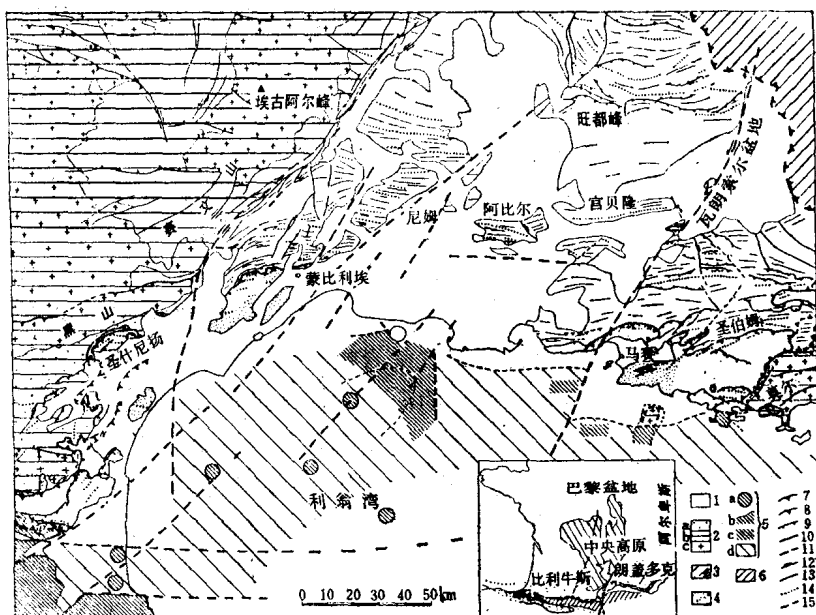


图 1—1

1. 渐新世至第四纪盖层分布区；2. 轻微或未褶皱北部山前拗陷带，a 始新统，b 中生界，c 古生界；3. 比利牛斯褶皱带；4. 南部逆冲构造区 (奥比叶 (Orbières) 推覆体，蒙比利埃褶皱，南普罗旺斯逆冲带)；5. 利翁湾受比利牛斯造山运动影响的古生代地层，a 海底钻孔，b 露头，c 地球物理数据，d 推测；6. 掩盖比利牛斯构造形迹的渐新世早期以后的阿尔卑斯褶皱带；7. 南部主要滑脱构造前缘；8. 基底逆冲断层；9. 盖层冲断层；10. 深部断裂构造；11. 古生界重褶皱区北部边界；12. 走滑断层；13. 未确定断层；14. 背斜轴；15. 主要断裂构造

量微构造形迹。早期的北东—南西向大断裂，此时则作为比利牛斯左旋走滑断层而重新活动。在西部，构造线方向发生扭转，形成所谓“朗盖多克弧形带”。最后，比利牛斯期构造形迹又被渐新世张力作用改造或掩盖。左旋的比利牛斯走滑断层又演变为张性正断层，沿断层形成一系列半地堑构造——掀斜地堑(图1—1)(Arthaud, Mattauer, 1969a)。

二、弹性介质应力扰乱定义

定义：若干无限大均匀弹性介质中置入某力学界线（如晶面、位错、断裂等），则原有应力分布状态（方向、强度、剪切方式）将在界线附近发生相对变化。这种现象称为应力扰乱。

实际上，受力弹性介质变形的全过程中，始终存在着应力扰乱现象，它们随着变形介质中微观—宏观应力边界的发展演化而在不断变化。

可以认为应力扰乱最初产生于晶格水平，亦或可将此水平的应力扰乱本质视为某种物质能量转换的方式。在晶格位错理论中对比已有所论述，如缺陷的活化，位错的移动、积累、攀移等。在这个阶段，介质表现为宏观塑性变形。

当应力继续增加而超过介质破裂界限时，脆性破裂开始形成。它们往往从软弱点（缺陷、亚晶界等）开始，沿最大剪切方向产生。这样，在连续不可逆变形阶段（塑性变形）之后，一个新的变形阶段（脆性变形）就开始了。

然而，当无限大介质进入不连续变形阶段后，连续变形绝非完全消失，而是范围比以前更加集中，或更加局部化，同时强度增加。它们一般集中于已成为新的力学边界的破裂线（面）周围，尤其集中于有限破裂线（面）的端点处。在这些部位，常常出现肉眼可见的渗透性构造形迹，亦即脆性构造背景中的塑性变形构造。正是这种现象给我们提供了研究“可见”应力扰乱机制的理想图景。

在受力介质中，破裂构造的几何形态控制着应力扰乱的分布及强度。同时，应力扰乱又强烈影响破裂构造的发展演变，二者相辅相成。在地壳上部较低温的脆性构造层中，岩石介质发生有限破裂时，由于应力扰乱而产生的局部渗透性变形往往极快地转化为新的脆性破裂，致使人们很长时期以来没有注意和捕捉到这类应力扰乱的图象。可以说，应力扰乱现象一般总在不停地变化，不同的阶段具有不同的状态。下文提出的数字模拟模型就仅仅是描述应力扰乱的瞬时状态的。

本书不进行与脆性变形同时存在的其它变形范畴问题的专门讨论，如晶体塑性态、扩散蠕动、碎裂蠕散、渗透及非渗透压溶机制等问题。

三、微构造级别的应力扰乱

(一) 实例

在细晶石灰岩地区，与脆性破裂及非渗透性压溶（压溶缝合线）构造相关的应力扰乱现象极为常见。在图1—2所示手标本上（下白垩统灰岩，取自巴黎树林区），压溶缝合线及张裂隙指示了主压应力方向。但在微断裂附近，可以看到：

(1) 局部压应力方向发生连续或突然变化；

(2) 局部缝合线密度增加，说明应力强度相对增加。

这就是应力扰乱在方向及强度上的表现。如果不运用应力扰乱概念，将很难解释标本上的构造现象。对这类现象，过去常运用“岩石内部结构不均一”的思辨方式来自圆其说。既然是不均一，这类现象就应当是随机的。但事实上它们却具有很强的规律性。在这块标本上至少可以区分出两期缝合线：第一期走向东西，齿峰指向南北，并伴生南北走向的张裂隙；第二期是比较细小的、集中于微断层终端、走向北西至北北西的缝合线。显然，形成较晚的第二期缝合线本身应当属于与第一期缝合线及微断层相关的应力扰乱的产物。它们集中分布于一定的部位，并按一定

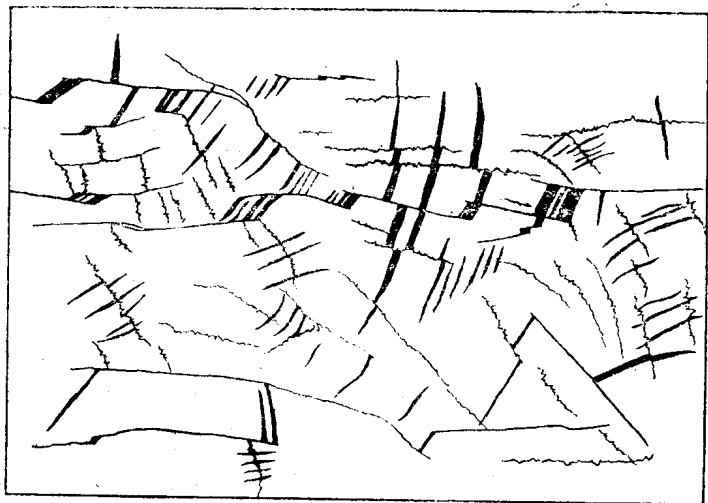


图 1—2

的方向展开。

图1—3表示用应力扰乱概念对本构造现象的解释。这个解

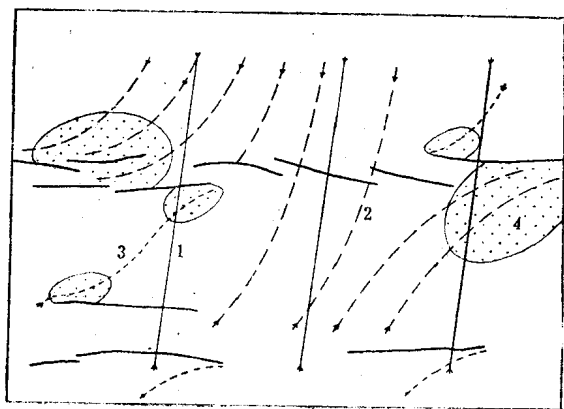


图 1—3

1. 初始最大压应力迹线；2. 微断层组扰乱最大压应力迹线；3. 一条微断层的扰乱压应力迹线；4. 扰乱压应力集中域

释显然已大大简化，因为对这一复杂的应力-应变演化过程，我们仅将其分为两个阶段。

在石灰岩区恢复古构造应力场的工作中，主要就是对这类相应时代的微构造形迹进行应力分析和统计，如张裂隙、压溶缝合线、压溶劈理、充填裂隙的纤维状方解石、微断层的擦痕及切错标志等等。当然，除了微构造分析外，还应结合超微构造、区域构造及有关的邻区构造分析的结果。

（二）张裂隙与压溶缝合线

1. 定义：

张裂隙：张裂隙是指岩石介质在应力作用下形成的裂开构造，其裂开面一般垂直于主张应力 σ_3 。不少地质学家曾做过弱中间应力条件下的岩石模拟实验，并详细描述了张裂隙形成及发展的机制。按成因可将张裂隙分为两类：岩石纵向压弯张裂隙及剪切张裂隙。张裂隙形成以后，可以按继续裂开、分枝、互相接合等各种方式继续发育。

压溶缝合线：压溶缝合线是指岩石介质在应力作用下由于局部溶失而形成的不连续面。面上布满齿状尖峰，两壁峰谷咬合，其间往往夹有溶余泥质薄层。齿峰呈柱状、锥状或截锥状，峰壁上常见擦痕（压溶擦痕，与断层面的擦痕有所不同）。齿峰高度多为0.2—1cm，但也有齿峰高度大于10cm的大型缝合线（面），如在法国南部赛特港上侏罗统石灰岩中的大规模水平重力压溶缝合线（面）。那里石灰岩的溶失量是相当惊人的。当缝合线的分布密度很大时，可以形成非渗透性压溶劈理带。缝合线标志出岩石介质沿齿峰方向缩短。

由于在世界许多地区的平缓石灰岩层中，常可见到近水平的压溶缝合线构造，所以人们一直认为它们属于石灰岩自身重力作用的产物。Mattauer (1968) 等人在朗盖多克地区进行野外微构造测量时发现：1. 除了水平压溶缝合线以外，该区还发育大量垂直或高角度倾斜的缝合线，尤其在水平构造挤压带更是如此；2. 这些垂直或陡倾的缝合线的分布密度很有规律。当接近

与断层相关的压力集中域时，它们的密度迅速增加，以至形成压溶劈理带。反之，远离压力集中域时，密度很快减小，甚至在很短的距离内完全消失；3. 这些缝合线完全可以与其它构造形迹（尤其是微构造形迹）进行配套分析，用以解释区域地质构造及恢复构造应力场。从那时以来，压溶缝合线构造就成为确定石灰岩建造的构造应力状态的最常用标志之一。

图1—4及图1—5是两块手标本，其中张裂隙及压溶缝合线反映出介质简单的应力状态。在标本1—4中，可明显看出纵向主压应力（ σ_1 ）和横向次生张应力（ σ_3 ），它们的方向和强度都没有发生变化。而在标本1—5中，一条右旋微断层（组）将标本分为左、右不同的两部分。在右半部分，张裂隙及压溶缝合线指示纵向压应力及横向次生张应力；而在左半部分，则看到两个叠加的方向：一是与右半部分相同的方向，另一组是叠加于其上的斜向主压应力的方向。可以设想标本的初始主压应力方向是纵向的，表现为纵向张裂隙及横向压溶缝合线。后来形成右旋微走滑断层。随着微断层的活动，应力分布发生变化，出现较强的扰乱。在新的“扰乱”应力作用下，形成第二期的微构造形迹。相对于岩石



图 1—4

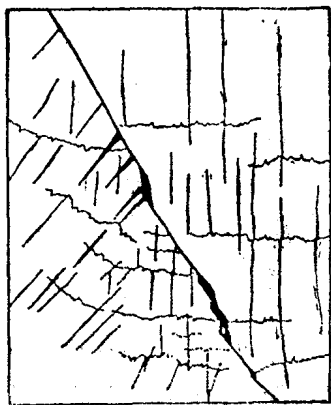


图 1—5

的初始（或区域）构造形迹，我们将扰乱应力作用形成的构造称为扰乱微构造形迹。由于野外各种微构造形迹常配合成组出现，所以又可称为扰乱微构造组合。在这块标本上，张裂隙和压溶缝合线就构成一组微构造组合。

2. 张裂隙及压溶缝合线的应力扰乱

在受力弹性介质中，应力分布将在缺陷（广义）附近发生变化。首先研究二维空心圆的情况。有人已根据介质物理参数及边界条件精确计算出应力分布。图1—6a表示在纵向边界压力下空心圆附近的应力分布状态。图中实线表示主压应力 σ_1 的轨迹，虚线表示次生张应力 σ_3 的轨迹。可看出 σ_1 轨迹在空心圆附近有与其边界平行的趋势，反之， σ_3 则趋于与其边界垂直。于是形成局部压应力或张应力集中。

应力扰乱的影响范围取决于介质的刚度。对于碳酸盐岩说来，扰乱影响区的半径大致十倍于空心圆半径（王仁，1978）。

空心椭圆附近的应力扰乱与空心圆大致相仿，不同之处在于，在椭圆长、短轴端点处，应力集中现象比空心圆强得多（图1—6b）。在石灰岩中，椭圆长轴端点处的次生张应力集中强度与椭圆长、短轴成正比（在无边界引张力情况下）：

$$\sigma_3 = \sigma_1 \left(1 + 2 \frac{a}{b} \right)$$

其中： σ_1 ，边界压应力； σ_3 ，次生张应力； a ，椭圆长轴； b ，椭圆短轴。

当椭圆长、短轴比为10时，长轴端点处的次生张应力强度相当于边界压应力的21倍。

如果继续增大椭圆长、短轴比，图形将逐渐变得窄长，最终变成一条裂隙。

以上介绍了空心圆及椭圆的应力扰乱分布状态，但没有考虑圆及椭圆的“构造演变过程”，即其在时间上发生、发展的不同阶段。也就是说，我们无形中已假定圆和椭圆是原先存在的。但自然界岩石介质中的张裂隙却不是这样，它们是岩石介质在构造

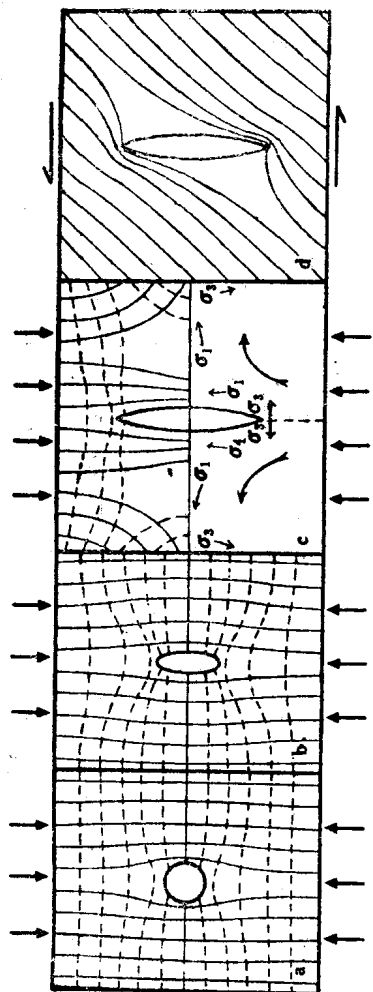


图 1—6

应力场中逐渐变化的结果，经历过发生、发展的不同阶段，每一阶段都系自上一阶段继承演变而来。这种演变来的张裂隙周围的应力扰乱状态与假设原先已存在的情况大不相同。

对于纵向压弯而张开的张裂隙，必须考虑介质内部旋转的存在。在类如石灰岩这样的脆性介质中，张裂隙的形成和发展必然伴随如图1—6c中所示的小块体旋转应变，而这些旋转应变(图中以曲线箭头表示)将极大地改变空心长椭圆周围的应力扰乱分布。

随着裂隙张开，两壁相互远离，介质沿垂直于裂隙长轴的方向拉长；同时，在其两侧短轴端点附近，介质趋于沿平行长轴方向缩短。这一运动将介质分割为四个小刚性单元，双双做相对旋转运动。于是，扰乱压应力高度集中于裂隙两侧，并在此处产生压溶缝合线；当远离裂隙时，该压应力迅速减弱并偏转方向。与主压应力 σ_1 相垂直的次生主张应力 σ_3 的轨迹则集中于裂隙两端，并在那里使裂隙继续开裂延伸。如果裂隙两侧沿长轴的缩短量级小到可以忽略不计时，随着裂隙张开，在其两侧稍远处就可出现应力奇点，然后 σ_3 转而平行于裂隙长轴方向(图1—6c)。当然这只是在介质为理想刚性体时的理论分布。在天然石灰岩中，实际上裂隙两侧沿长轴的缩短量十分可观，表现为渗透性或非渗透性变形(压溶缝合线)。这些变形始终伴随着张裂隙的发展。

对于剪切型张裂隙，应力分布则呈另一种状态(图1—6d)。在裂隙的端点处，扰乱压应力集中于一侧，而扰乱张应力(次生张应力)集中于另一侧，二者紧密相邻，方向却互相矛盾。在这种应力条件下，张裂隙趋向于按“S”型曲线发展。

Rispoli (1983) 曾对 Inglis (1913) 关于张裂隙的计算公式予以修改，并提出“反张裂隙”的压溶缝合线公式。但是，当我们观察压溶缝合线的应力扰乱现象时，却发现它们很难与张裂隙的应力扰乱现象进行对比。它们之间不仅找不到共同的方向，也没有类似的强度规律。显然，不能依靠仅仅改变计算公式中的应力符号来导出“反张裂隙”机制。张裂隙内部一般是空的，其两

壁属不能传递垂向应力的自由边界面。而压溶缝合线充满齿峰的
两壁间虽然夹有溶余泥质薄层，但二者毕竟相接，能够顺利传递
压应力。

如前所述，我们讨论缝合线应力扰乱时也要考虑介质的小刚
性单元的旋转运动。假设在缝合线中心产生平行于齿峰的最大缩
短位移，而在两端位移量为零，于
是形成类似于张裂隙情况的四个小
刚性单元，双双相对旋转。只是，
这里没有发生沿缝合线走向的侧向
位移。这些旋转运动在缝合线两端
附近产生压应力集中（促使缝合线
继续延伸）；而在中心形成平行于
裂隙走向的张应力集中，由之导致
产生“裂隙-缝合线”微构造组
合，正如在野外所常见的那样。

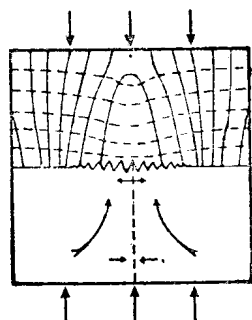


图 1—7

（三）裂隙-缝合线组合

1. 定义

在野外进行微构造观察时，常可见到裂隙-缝合线组合。它
们交叉共生、互相垂直，在交叉点附近产生最大张开和最大缩短
位移。显然，裂隙的张开过程与缝合线的物质溶失密切相关。
Delair (1977) 曾提出过这类组合的运动学模式。

2. 裂隙-缝合线组合的应力扰乱

据Rispoli (1983) 的工作，无论从运动学、动力学、亦或物
质运移角度来说，裂隙-缝合线组合都是符合逻辑的完美状态。
组合的形成也要求刚才讨论过的小单元旋转，而且更加容易。与
单纯裂隙或单纯缝合线的应力扰乱分布相比较，在组合中可以看
到：压溶缝合线中部的溶失，大大减缓了裂隙两侧的高度压应力
集中强度；同样，裂隙的张开，也减缓了缝合线两侧原有的张应
力集中强度。因此，对于组合来说，应力扰乱状态反而显得简单
了。至于物质运移，缝合线溶失的物质恰好可以作为裂隙充填物