

断裂构造研究

庄培仁 常志忠 编著



地震出版社

断裂构造研究

庄培仁 常志忠 编著

地震出版社

1996

内 容 提 要

本书系统、全面地论述近些年来国内外断裂构造研究的基本问题,扼要叙述岩石破坏和断层摩擦的力学理论和物理机制,断裂发育的基本约束条件(岩石圈流变学、应力状态和物理、化学环境);以比较断裂构造学的观点并侧重于断裂研究的新进展,论述地壳不同构造层次里各类断裂构造的发育特征和形成条件,断裂发展演化中的一般问题;概略介绍目前研究断裂构造的构造地质学、地球物理、遥感、地球化学、构造模拟和测年等方法的基本依据和使用及限制条件,以较大篇幅并用大量实例,着重评述这些方法在分析断裂构造几何学、运动学、动力学和断裂活动史及变形史方面的具体应用及效果;各章分别附有大量参考文献。本书可供从事构造地质学和与构造地质学有关的地质学学科的科研、教学和生产人员参考。

断裂构造研究

庄培仁 常志忠 编著

责任编辑:宋炳忠

责任校对:李俊 李珺

*

地震出版社出版

北京民族学院南路9号

中国地质大学轻印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 22.25印张 570千字

1996年6月第一版 1996年6月第一次印刷

印数 001—800

ISBN 7-5028-1280-6/P·801

(1709) 定价:30.00元


序

断裂构造是地壳里发育的基本构造型式之一。某些大型断裂在区域构造演化中起着重要作用，对成岩、成矿和地震活动具有直接影响，因此，对断裂构造的研究一向具有重要理论意义和实用价值。《断裂构造研究》一书概括总结了近些年来国内外有关断裂构造研究的主要最新成就，综合评述了有关断裂构造研究的一些基本问题，对全面、系统地了解断裂构造研究的现状，从事有关的教学工作、理论研究和实际应用都具有重要参考价值。

本书从宏观力学条件和微观物理机制两个方面简要阐述了岩石破坏和断层摩擦理论及其适用范围，这有助于分析断裂的起始、扩展、运动、变形和演化的力学条件。本书综合许多典型实例，以构造类比的方式分析不同构造层次里的各类断裂构造的发育特征，比较其异同。作者强调岩石圈流变学性质和动力学条件对断裂构造发育的制约作用，并按照这个观点，探讨各类断裂发育特征及其形成条件所以产生异同的基本原因，这有助于深化对断裂构造发育特征及其制约条件的认识。

本书以构造解析的原则依次讨论了断裂构造的几何学、运动学、动力学和演化历史的分析方法，突出多学科方法在研究断裂构造中的作用，说明了构造地质学、地球物理、遥感、地球化学、岩石变形试验及构造模拟和同位素测年等方法用于研究断裂的基本依据和使用及限制条件，以多种研究实例评述了各学科方法在分析断裂几何学、运动学、动力学和演化史方面应用的实际效果及存在问题，从而能够多侧面、多层次地研究断裂构造，从三维和动态上分析断裂构造，并逐步实现断裂研究的半定量和定量化，对丰富断裂构造解析内容，提高断裂构造研究水平具有重要意义。

本书是作者基于多年教学和科研方面的经验和体会，广泛吸取国内外有关研究成果进行系统总结编著的，对于它的出版特表衷心的祝贺！



1995年10月20日

前 言

断裂构造研究历史悠久,无论在理论上抑或在应用上都有相当的基础。然而,近30年来,重要断裂构造现象的一再发现,板块构造学说的兴起,岩石圈流变学和动力学研究的深入,断裂力学理论的进展,尤其是自70年代以来新技术、新方法的不断引进,所有这些都大大促进断裂构造研究的迅速发展,使之在广度和深度上取得显著进步。断裂构造研究内容之广泛,探索之深入,使得有必要在已有基础上对这些研究结果进行概括和总结,从一定的广度和深度上进一步认识断裂构造的基本特征、形成条件和发育历史,并更好地应用和完善断裂构造的研究方法,本书正是为此目的而作的抛砖引玉的尝试。基于上述考虑,本书比较全面、系统地阐述有关断裂构造研究的三部分的内容。

1. 岩石破坏、断层摩擦和断裂构造发育的约束条件

以往对岩石破坏和断层摩擦的宏观力学条件已有比较成熟的理论,近若干年来对二者者的微观物理机制有了更深入的认识,这些认识是对岩石破坏和断层摩擦理论的重要补充和发展。过去对各种类型断裂构造的变形行为和发育条件曾做出各种推断和解释,材料科学,尤其是实验构造地质学为解释岩石破坏、断层摩擦和断裂构造的起始、扩展的力学原因和物理、化学条件确曾起到积极作用,然而,对实验室条件下试验结果的外推是有其限制条件的。近若干年来,根据连续介质力学原理和微观物理学观点并从二者结合上对大陆岩石圈流变学的系统研究获得某些具有构造意义的重要结论,同时对岩石圈应力状态和物理、化学条件方面的研究也取得进展,所有这些使得有可能将断裂构造的变形行为和发育条件同岩石圈流变学性质、应力状态和物理及化学条件直接相联系,从而有可能更加符合实际地分析断裂构造的变形行为和断裂的起始、形成及演化的条件。

2. 各种类型断裂构造发育特征

发育在不同构造区域、不同构造层次的各种类型的断裂构造在几何构型、运动特征和形成力学条件诸方面都显著不同,然而,它们在某些方面却又具可对比性或者某种程度的共性,对各类断裂的仔细对比发现,它们之间的差异和可对比性或共性都受到岩石圈及其组成岩石的流变学性质和应力状态的制约。因此,有可能以比较断裂构造学的观点,并从断裂构造发育的约束条件的角度,讨论不同构造层次各类断裂构造。在这部分内容里,还简略涉及到断裂演化史中的某些一般问题。

3. 断裂构造研究方法

断裂构造研究的显著进步在很大程度上归因于断裂构造研究方法的进步。除构造地质学方法的进步外,包括地球物理、遥感、地球化学、构造试验及模拟和各种测年方法在内的多学科方法的引进和应用,使得能够多侧面、多层次地研究断裂构造,并从三维和动态的角度更深入地认识断裂构造。重要的是,在断裂构造研究中,按照构造解析的原则和思路,恰当选择和正确使用各学科方法和多学科综合方法,就能够完善原有的研究方法并显著地提高研究水平。举凡重大断裂构造的发现,某些断裂构造三维几何图像的建立,运动学演化史的复原,动力学分析的逐渐趋近实际,所有这些都依赖于研究方法的不断完善,这是提高断裂构

造研究水平的重要途径，正是基于这个原因，本书以许多实例并以较大篇幅系统全面地评述多学科方法在研究断裂几何学、运动学和动力学以及分析断裂演化历史等方面的应用及其效果，期望这对读者能有所裨益。

这里需要说明，节理构造是断裂构造的重要类型，在断裂构造形成中具有重要作用，在矿田构造、油田构造等应用研究中也占有重要地位，并且有它自身的一套研究方法，然而，限于篇幅，本书只好从略。此外，本书初稿是在1993年完成的，引用参考文献截止于1992年底，而且主要是国外文献。此后在修改期间，限于条件和时间，仅增用部分国内文献。限于作者学术水平和知识面，书中疏漏和错误之处必不可免，敬请读者指正。

本书是在许多同事们的鼓励、支持和指导下编写完成的，并得到地质矿产部岩石圈构造与动力学开放研究实验室的资助。马杏垣院士、郭令智院士和王仁院士审阅编写提纲，提出宝贵建议，给予热情鼓励；万天丰教授和郑亚东教授审阅部分初稿，提出有益意见，给予大力支持；王玉芳教授、金凤英教授、王润生教授级高级工程师、李成堡高级工程师和姚国清同志对本书编写也给予热情关心；周春荣同志协助绘图，郭京平同志对图件作了审改。对所有老师、同事们的鼓励、支持和指导在此表示衷心的感谢。特别感谢芝加哥大学 A. M. Ziegler 教授为本书编写工作提供了良好的条件，感谢聂上游博士、姚继平博士、尹安博士、吴镭博士和庄慧博士给予的热情关心和帮助。最后还要感谢本书所引用的文献的作者们。

作者

1995年10月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 断裂构造的研究内容和研究途径	(1)
第二节 断裂构造的研究进展	(4)
第二章 岩石破裂、断层摩擦和断裂构造发育的约束条件	(11)
第一节 岩石破裂	(11)
第二节 断层摩擦	(24)
第三节 断裂构造发育的约束条件	(29)
参考文献	(46)
第三章 各类断裂构造发育特征	(51)
第一节 覆盖层里断裂构造的几何形态及其演变	(51)
第二节 双重构造	(62)
第三节 拆离构造	(70)
第四节 韧性剪切带	(86)
第五节 断层运动、韧性流与岩石圈的缩短和伸展	(92)
第六节 断裂构造形成、发展的某些问题	(98)
参考文献	(105)
第四章 断裂构造研究方法概述	(113)
第一节 构造地质学方法	(113)
第二节 地球物理方法	(121)
第三节 遥感方法	(144)
第四节 断裂地球化学法	(153)
第五节 岩石变形试验和构造模拟方法	(157)
第六节 构造断裂时代确定方法	(160)
参考文献	(163)
第五章 断裂几何学分析	(169)
第一节 断裂产状的研究	(169)
第二节 断裂几何形态分析	(175)
第三节 断裂的分段和分布型式的分形几何学分析	(191)
第四节 影响断裂方位和几何形态因素的分析	(200)
参考文献	(202)
第六章 断裂运动学分析	(206)
第一节 剪切指向的确定	(206)
第二节 位移距离研究和运动量估算	(227)

第三节	断裂运动方式分析·····	(250)
第四节	剪切带应变分析·····	(259)
第五节	位移速率的确定·····	(267)
第六节	断裂运动学定量分析·····	(270)
参考文献	·····	(278)
第七章	断裂动力学分析·····	(284)
第一节	动力学分析的内容及步骤·····	(284)
第二节	断裂力学分析·····	(289)
第三节	物理模拟试验·····	(294)
第四节	数值模拟·····	(301)
参考文献	·····	(314)
第八章	断裂构造历史分析·····	(318)
第一节	断裂带历史分析·····	(318)
第二节	断裂带测年研究·····	(325)
参考文献	·····	(344)

Contents

Chapter 1	Introduction	(1)
1.	Contents and Approaches of Research for Fault Structures	(1)
2.	Developments of Research for Fault Structures	(4)
Chapter 2	Rock Failure, Fault Friction and Constrains on Development of Fault Structures	(11)
1.	Rock Failure	(11)
2.	Fault Friction	(24)
3.	Constrains on Development of Fault Structures	(29)
References	(46)
Chapter 3	Characteristics of Different Kinds of Fault Structures	(51)
1.	Geometric Shapes and their Evolution of Fault Structures in Sedimentary Cover	(51)
2.	Duplexes	(62)
3.	Detachment Tectonics	(70)
4.	Ductile Shear Zone	(86)
5.	Fault Motion, Ductile Flow and Shortening and Stretching of Lithosphere	(92)
6.	Some Problems about Formation and Development of Fault Structures	(98)
References	(105)
Chapter 4	Outline of Methods Used for Studing Fault Structures	(113)
1.	Structural Geologic Methods	(113)
2.	Geophysical Methods	(121)
3.	Techniques of Remote Sensing	(144)
4.	Geochemical Methods for Fault Structures	(153)
5.	Experiments for Rock Deformation and Structural Modeling	(157)
6.	Chronometry Used for Determining Age of Fault Motion	(160)
References	(163)
Chapter 5	Geometric Analysis for Fault Structures	(169)
1.	Research on Attitude of Faults	(169)
2.	Geometric Shape Analysis for Fault Structures	(175)
3.	Fractal Analysis Used for Studing Segmentation and Pattern of Faults	(191)
4.	Factors Influencing on Orientation and Shape of Faults	(220)
References	(202)
Chapter 6	Kinematic Analysis for Fault Structures	(206)

1. Determination of Shear Sense	(206)
2. Research on Displacement Distance and Estimation for Amount of Fault Motion	(227)
3. Research on Modes of Fault Motion	(250)
4. Strain Analysis of Shear Zones	(259)
5. Determination of Displacement Speed of Faults	(267)
6. Quantitative Analysis for Fault Kinematics	(270)
References	(278)
Chapter 7 Dynamic Analysis for Fault Structures	(284)
1. Requirements and Steps of Dynamic Analysis	(284)
2. Research on Fault Mechanics	(289)
3. Physical Modeling	(294)
4. Numerical Modeling	(301)
References	(314)
Chapter 8 Historical Analysis for Fault Structures	(318)
1. Research on Evolutionary Series of Fault Zones and Strain History of Ductile Shear Zones	(318)
2. Chronometry for Fault Structures	(325)
References	(344)

第一章 绪 论

第一节 断裂构造的研究内容和研究途径

一、研究内容

断裂构造是地壳中广泛发育的基本构造类型。某些断裂在区域构造演化中起着重要的控制作用，与矿产、能源的富集或地震活动有着密切的关系，因而断裂构造历来受到人们的关注。断裂构造的研究目的在于揭示断裂构造的发生及发展规律，查明其与矿产、能源的聚集或地震活动之间在空间分布及时间演化方面的关系，解决理论认识和实际应用两方面的问题。由此，断裂构造的研究内容一般侧重于以下三个方面：

1. 岩石破坏和断层摩擦

前者包括从岩石内微裂隙生长到宏观破裂发生所经历的物理及力学过程，和根据力学分析及物理考虑两个方面的推导而得到的岩石破坏判据，后者包括断层摩擦的滑移行为和本构关系。对岩石破坏和断层摩擦的研究自然涉及到对制约这些行为的约束条件的研究，即对岩石圈流变学特征和应力状态以及物理、化学条件的研究。

2. 断裂构造发育特征

除节理的类型及其力学成因外，主要包括断层的类型（正断层、逆断层和走滑断层）和各类断层的基本特征。对断层特征的研究一般是从以下四个方面进行的：

①断层的力学形成机制。主要是各类断层的力学形成条件和断裂岩石的流变学性质。显然，对大型和地壳规模的断层而言，自然必须了解这些断层所在地区的深部地壳结构及岩石圈动力学背景。

②断层的运动学状态。包括断层的运动方式、运动矢量和运动速率及其空间变化等。

③断层的几何学特征。涉及断层面的形态和产状、断层的组合型式或结构类型及其演变，断层几何构型与断层运动及能量调节之间的关系，以及影响断层几何构型的因素。此外，还涉及与断层有关的变形构造。

④断层的发育历史。包括断层带活动史及韧性剪切带应变史，其中涉及到断层活动的测年研究，此外还包括断层的分段发育和连接扩展，断层发育过程中的构造继承和构造反转。

3. 断裂构造研究的实际应用

通常是基于断裂构造与矿产及能源聚集或地震活动之间关系的研究，对矿产和能源的勘查或地震灾害的评估提出构造依据。

总体而言，对断裂构造的研究是对断裂起始的力学条件及物理机制，断层分段、扩展直至就位过程中的运动状态和最终形成的几何构型及变形构造等方面进行全面的系统研究，并再造断裂活动的演化历史。据此所建立起来的有关断裂构造的发育模式应当能够说明某些理论问题和用于解决某些实际问题。

二、研究途径

断裂构造是地壳岩石受力破坏以至滑移的产物，是地质历史中构造事件的遗迹；断层通常是地壳中的不连续面（带），这种构造不连续在其它侧面，例如地球物理场、电磁波辐射场和地球化学场等方面也可能反映出来。由于这些缘故，断裂构造的研究方法首先应当遵循反序法这一分析原则，其次应当采取多学科方法（综合分析）相结合，观测、模型分析与试验相结合，以及力学分析与历史分析相结合这样一种途径。

1. 反序法

前已提到，断裂构造研究目的在于揭示断裂构造的发生及发展规律，查清其与矿产、能源聚集或地震活动之间在空间分布及时间演化方面的关系；同时，地壳岩石受力产生断裂构造这种行为属于连续介质力学范畴。这二者决定着断裂构造研究的基本要求是：阐明具有某种流变性质的地壳岩石在特定的边界条件和物理化学环境下，由于经受特定方式和大小的载荷而发生断裂的变形行为及其后果；然而，由于显而易见的原因，在地质时间尺度上进行的断裂构造作用多半只能遗留下其变形产物（断层本身的几何形体和伴生构造及现象），而不能保存下其变形过程（变形行为，即运动状态）、载荷条件及环境，于是必须采用反序法来实现上述研究基本要求，也就是说，正如对所有构造变形的研究一样，必须遵循构造解析的原则，以断裂构造几何形态的观测为基础，结合伴生构造及有关现象的分析，阐明断裂构造的运动学特征，并根据流变学和连续介质力学的原理和方法进而探讨地壳岩石的流变性质，载荷条件和所处的物理及化学环境。当着需要解决实用问题时，则同样采用反序法，从断裂构造与矿产、能源或地震在时、空和成因的关联上进行研究加以解决。这就是说，从方法学上说，断裂构造研究方法中居于首位的是反序法，构造解析是反序法在构造变形研究中的具体运用。

构造解析或构造分析是国内外比较普遍采用的一种构造地质学研究方法，尽管不同作者对这一方法从概念理解到具体运用还略有差异。马杏垣（1981，1982，1983）多次全面、系统地阐述了这一方法的含义和基本原则。根据这些阐述表明，构造解析方法的作用在于：①它完全适合于分析变形体运动（即在分析力与岩石变形之间的关系时，同时计入变形体的流变学性质和变形期间所处的物理及化学条件）；②它完全适合于分析地质学中经常遇到的反演问题，对断裂构造分析而言，如上所述，即根据断裂的几何构型及伴生变形构造所得的变形场，通过结合有关现象分析恢复断裂运动图像（位移路径或应变迹线），进而探讨断裂形成的力学机制（力与断裂变形行为之间的关联以及变形岩石的流变性质及变形条件）；③它使得有可能从空间上分析具有不等尺度和处于不同构造层次的构造现象，区分其差异，并将其中可能具有相关性的那些构造现象关联起来；④而且从时间上理顺构造序列和构造世代，并查明在构造演化中可能出现过的叠加、置换、转化和改造关系。

2. 多学科方法相结合

断裂构造研究方法还取决于其本身性质固有的特点。前已提到，断层的基本性质在于其不连续性。这种不连续性不仅表现在地质构造方面，而且还表现在诸如地壳物质的密度、弹性、磁性、电性以至电磁波辐射特性等地球物理性质和地球化学性质方面。正是由于这种原因，对断裂构造的研究也不仅采用地质构造方面的方法，而且还采用地球物理、地质遥感和地球化学方面的方法。况且，就地质构造方面而言，这种不连续性也不仅表现在构造本身，而且表现在与断层活动有关的岩性及岩相侧向变化，岩浆活动沿断层的发育，地下水及油气的

运移和富集等方面。因而，这些方面的表现就可以做为识别断裂构造的标志，或者可以提供研究断裂构造的信息。在断裂构造的构造表现不够明显的情况下，尤其有必要采用其它方面的方法或标志。鉴于上述理由，在断裂构造研究中，往往采用地质、地球物理、遥感和地球化学综合分析方法。除此之外，地壳中的断裂构造在其分布方位、规模大小、发育频率和运动幅度等方面千差万别，这些差别在数量特征上表现出来，因此可以采用概率统计学方法研究断裂构造，揭示不同断裂构造的数值特征。不言而喻，任何一个断裂构造的表现不可能是无所不包的，往往限于某些或某个方面，于是对这样的断裂构造的研究方法的选择也就应当有所侧重。大量研究实践表明，恰当地选择研究手段，在必要情况下采用综合分析方法，往往可以收到比较明显的研究效果。在各类研究方法中，地质方法是基础，也就是说，对其它各类研究方法所得结果的解释必须以地质观测事实为依据，或者得到地质观测事实的检验和证实。当然，这丝毫没有降低其它各类研究方法的作用以至重要程度，相反，不少实例说明，正是由于其它各类研究方法所得结果，为发现、识别断裂构造的存在和性质提供了重要信息。实际上，各类研究方法及其所得结果可以互为补充、互为印证，并由此提高所得结果的可信度。

断裂构造发育深度不同，因而流变性质各异，断裂构造规模大小和年龄新老更是千差万别，因此对各种不同的断裂构造的研究方法也自然应当有所不同。其中，对不同尺度断裂构造的研究结果是可以用来互为补充的，这是由于某些断层尽管其尺度不同，但却是在同一构造应力场作用下的产物，它们具有成因上的联系。

可以说，多学科方法的综合运用使得有可能多侧面、多层次地研究断裂构造的三维几何构型、运动图像及其空间变化和时间演化。

3. 观测、试验及模型分析

在断裂构造研究中，也正如对所有构造变形研究一样，以对地表出露的天然变形岩石的直接观测和根据上述多学科方法所得资料对隐伏及深部构造的间接推断为基础，结合实验室条件下的岩石变形试验结果，进行对比分析，必要时进行构造模拟（物理的和数值的），其目的在于与观测事实和试验结果互为检验，由此不断完善、加深对断裂构造的规律性的认识。在断裂构造分析中往往需要建立某种模型或模式，这些模型的建立多半源出于观测事实和试验结果，并以某种原理和理论为依据。例如断裂构造的三维几何模型是以地质制图、地球物理资料和其它已知资料为依据的，这种模型是对地壳岩石中断裂构造的分布和方位的三维描绘，可以作为地质图和沿某个地区特定测线的垂直横剖面的模型。再如运动学模型是以对断裂构造的几何学分析为基础而提出的，这种模型描绘出将地壳岩石某个体系从未变形状态导致断层摩擦状态的运动的特定历史，当然，这种模型并不涉及到这种运动何以发生和怎么样发生，也不涉及这个体系具有何种流变性质和经受何种载荷条件。对这种模型的有效性或置信度可以通过下述途径而得到检验：将根据这种模型推导的运动和变形的几何特征与根据观测得到的运动和变形的几何特征加以对比。又如力学模型是以对于地壳岩石中的断裂构造变形特征的应力—应变分析为基础，并以连续介质力学基本定律或流变学基本定律为依据而提出的。前者主要源出于对天然断层的实际观测，后者则多半根据实验室试验，这些试验显示出的断层及摩擦变形行为及其所处的条件与地球中的天然变形和条件尽可能地相似。力学模型可以用来计算地壳中某个岩体在给定条件（载荷、压力和温度等）下的理论变形。力学模型分析代表着比运动学模型更深层次的分析。这是由于，模型中的变形行为（即物质体系内的相对运

动)不是假定的,而必须是具有给定流变性质的物质体系在给定条件下的变形结果。因而,对力学模型的约束条件就不仅包含有变形的几何学特征,而且还包含有岩石的流变学性质和其变形期间的条件。总而言之,利用几何学模型、运动学模型和力学模型有助于理解不同尺度的断层变形。然而,应当认识到,即使我们可能创造某些模型,这些模型的性质与在地球某些部分观测到的事实比较相似,可是这样的模型也未必就是完美无缺的模型。根据模型所预测的结果显示的只不过是模型的性质和特征,而不是地球的实际状况。因此,为了解这种实际状况,总是必须对模型的有效性加以检验。观测事实导致模型及其表达式的建立,模型转过来提出能够与实际对比的预测,藉此可模拟对实际的新的观测,通过模型预测与观测事实的对比而检验模型。预测得到观测的证实,模型也就得到支持。预测与观测相矛盾,就必须改善原有模型,乃至拚弃原有模型而设计新模型。实际上,这也是所有科学共同采用的一种方法。

4. 力学分析与历史分析相结合

“地质科学由其性质所决定,总要归结到历史的过程”(王鸿楦,1988)。构造地质学也不例外,断裂构造反映着地壳历史中的构造力学事件。因此,在断裂构造研究中,除分析断层的力学过程外,还应当分析其历史过程。具体地说,应当强调三点:①必须弄清为断层所切割的岩石的形成顺序或地层关系;②必须查明断层形成和再活动的期次关系;③必要时,应当结合同位素或其它方法的测年资料,并结合区域构造背景,分析断裂构造的形成和演化历史。对于在地壳演化中具有重要控制或影响的断层而言,尤有必要进行这种历史分析。

总之,以构造解析为主线,以三种结合为途径,即地质研究与地球物理、遥感、地球化学及概率统计等方法相结合;观测、试验与模型分析相结合;力学分析与历史分析相结合,这就是断裂构造的基本研究方法。

第二节 断裂构造的研究进展

近几十年来,由于大量实际地质资料的积累,断裂构造研究在理论上的深入和方法上的改进,加以现代断裂力学的引进,岩石圈流变学及动力学的启迪,板块构造学说深入发展的促进,以及构造地球物理学方法的不断完善和遥感技术的应用等,使得断裂构造研究在广度和深度上都取得明显的进步。这些进步可以从下述四个方面的研究进展得到说明。

一、有关断裂构造的力学形成机制及其约束条件的研究进展

1. 岩石破坏的机制和理论方面

可以说,以往库伦-莫尔破坏判据对岩石受力破坏从宏观关联上所做的理论表述和格里费思裂隙理论从微观机理上所做的解释是比较成功的,尽管还存在某些问题(Mandl,1988),但这些理论是对脆性域岩石破坏的清晰说明。近些年来的研究强调对作为裂隙起源的裂痕的识别,对个体裂隙荷载下的性质和生长裂隙之间的相互作用的了解,以及对自微观裂隙发展到宏观破裂的有关现象的分析。相当多的研究集中在裂隙的固有性质,尤其是促进裂隙急速不稳定生长的局部条件以及裂隙缓慢生长在脆性蠕变和静疲劳(滞后破裂)方面引起的作用等。在更多的综合研究中,将破裂力学与微构造研究结合起来,取得的成效尤为显著。值得一提的是线弹性破裂力学的应用。Atkinson和Meredith(1987)详细介绍过线弹性破裂力学

并且将近年所获得的岩石和矿物破裂粗糙度的数据汇编一起。Pollard 和 Segall (1987) 和其它一些著作中都曾给出许多野外构造地质应用实例。线弹性破裂力学在岩石破坏研究方面可以用来说明诸如亚临界裂隙生长 (Atkinson 和 Meredith, 1987)、完整岩石里的脆性破坏和剪切局部化 (例如 Sammis 和 Ashby, 1986; Isida 和 Nemat-Nasser, 1987; Fredrich 等, 1990; Ashby 和 Sammis, 1990; Lockner 等, 1991 等) 以及热裂隙作用和弹性各向异性 (例如 Ghahremani 等, 1990) 等。特别是, 线弹性破裂力学中应力强度因子概念的提出和对亚临界裂隙生长机制的解释, 是对岩石破坏机制和理论的重要发展。

2. 断层摩擦滑移方面

自从 Brace 和 Byerlee (1966) 提出粘滑滑移不稳定性并将之作为一种地震机制以来, 曾做出许多努力来了解断层摩擦滑移中所包含的物理过程和微观机制。这类研究主要集中在摩擦滑移的本构行为, 决定断层滑移稳定性的条件, 断层泥的性质及其对滑移稳定性的影响, 断层带里的变形构造以及岩石碎裂化的过程和发育特征等。此外, 还有一些作者提出了某些试验结果, 这些结果对地震预报具有积极意义。近些年来, 提出两类模式用来模拟摩擦行为和滑移不稳定性, 一类是对速率不敏感的滑移弱化模式 (Lockner 和 Byerlee, 1990), 另一类是将滑移对速率的依赖关系与变形史结合一起的速率-状态摩擦定律, 或称状态变量摩擦定律 (Dieterich, 1978; Ruina, 1983, 1985)。值得指出的, 在研究有关断层摩擦和不稳定性机制中, 除去必要的实验室试验和各种模拟计算外, 根据野外观测来考虑断层带摩擦本构关系及其约束条件具有重要价值 (Segall, 1991)。可以预期, 将试验、模拟与野外实际结合起来进行研究, 必将获得更为逼近实际的结果, 这对解决例如地震预测等实际问题具有直接意义。

3. 研究断裂构造发育的约束条件方面

对岩石圈流变学、应力状态和物理及化学条件的深入了解具有重要意义。人们对实验室条件下岩石的变形及破坏行为和岩石所具有的力学性质、载荷状况和变形条件已有相当充分的认识和比较系统的总结。这些研究结果对研究岩石圈的变形行为和流变学特征具有重要参考价值。

近若干年来, 根据连续介质力学观点和微观物理学观点并从二者的结合上对岩石圈特别是大陆岩石圈的流变学进行过系统的研究, 获得了一些重要的结论, 尤其是有关岩石圈具有流变学层化特征和存在着力学上的软弱带这些结论, 具有重要的构造意义和地球动力学意义。

对岩石圈内应力状态的研究, 在构造偏应力的方向、幅度、水平分量及垂直分量之比以及偏应力的侧向变化和垂向分布方面, 无论是观测手段和测量结果都取得显著的进步。当然, 由于构造作用条件的复杂性, 规模大小悬殊, 时间长短各异, 以及观测和估算构造偏应力所采用方法的不同及使用条件的限制性等, 所得结果不尽一致, 有时甚至相去甚远是不足为奇的。重要的是, 对岩石圈内应力状态的现有认识已有可能为研究断裂构造的发育在载荷方面提供基本的约束条件。

大陆岩石圈内的物理及化学环境无论是对岩石圈的流变学性质, 还是对岩石破坏、断层发育和构造变形都有显著影响, 因此早为人们所注意, 并且已有系统的研究。值得特别提到的是对水流体的作用有了更深入的认识, 主要是对水流体存在可能达到的深度, 流体孔隙压力、水解弱化及水的其它作用的效应等方面有了更深入的了解, 这十分有助于深入研究岩石圈流变学和断裂构造的发育条件。

二、各类断裂构造发育特征的研究进展

对各类断裂构造发育特征的研究始终是地质学家们关注的重点。这类研究不仅具有理论意义,而且对矿产、能源及水资源的勘查、地震预报以及区域和工程稳定性评价等都有直接作用。

1. 正断层或伸展断层

正断层的几何学特征及其演变受到较大的注意。人们对活动断层运动期间的瞬时三维形态比处于静态的断层的形态了解得更为清楚,因此对现今活动正断层作用进行了大量的研究。在这方面,地表资料和地震资料往往能够提供许多有用信息。一些作者对希腊、土耳其西部、意大利、苏伊士湾、蒙古、东非和我国西藏、西南及东北地区以及美国西部等广大地区的大陆正断层作用进行了地质学及地震学研究,这为了解正断层系几何学及其演变提供了有价值的资料。

近若干年来,在伸展断层研究中的重要发现之一是近平面状低角度正断层的存在。Wernick (1981)、Lister (1983) 和 Davis (1983) 等都曾指出这类断层在调节岩石圈伸展方面具有重要作用。近些年来,的调查还发现,双重构造也常发育在伸展构造地区。Wernicke (1981) 首次描绘了这种构造。Wernicke 和 Burchfiel (1982) 指出,美国西部盆岭区出露的伸展“杂乱”(chaos)构造可能也是由类似机制所形成的。Gibbs (1984) 引入“伸展双重构造”这个术语,并提出一个概念性的构造图解。Root (1990) 初步研究了发育在加拿大不列颠哥伦比亚省 Purcell 山区元古代地层里的 Delphine 伸展双重构造,这是首次得到证实的伸展双重构造之一,它在几何学上和运动学上都类似于逆冲双重构造。

不少作者分析了正断层的掀斜作用和垂直运动,指出这些运动型式与正断层上的滑移和旋转以及断层几何形态变化之间的关系。研究并定量地预测这些运动的幅度及其分布,可以用来了解断陷盆地的沉积历史,认识正断层如何运动,也可用来尝试性地预测地质记录里见到的长期的有限位移。与此相关的是,一些作者发展了估算由于正断层作用引起的拉张量的方法,并获得了深入的认识。对雁列式断层的伸展作用和旋转运动也有了更深入的研究,古地磁学方法在分析大型断层的旋转运动方面具有显著作用。还有些作者(例如 Westaway, 1991, 等)根据观测数据并结合理论模型,系统地讨论了平行断层组上的运动在调节上地壳脆性层里的大陆伸展方面的作用。一些作者(例如 Mandl, 1988)较详细地讨论了这一问题。

2. 逆断层或收缩断层

自 19 世纪 40 年代 Esher 研究瑞士境内的 Glarus 逆掩断层,首次提出巨大岩席大规模水平运移的概念以来,迄今已有一个半世纪之久。如果说 19 世纪对逆冲-推覆构造的研究主要是围绕着发现和证实它们是否存在这一问题的话,那么 20 世纪初期以后的这类研究则已经深入到对逆冲-推覆构造的形成机制方面。

20 世纪 70 年代中期,美国大陆反射剖面协调组织(COCORP)采用可控震源法发现阿帕拉契亚主脉兰岭之下的巨型推覆拆离构造,接着又发现落基山逆冲断裂带内的 Pineview 油田,这标志着对逆冲-推覆构造的研究和认识的新的飞跃,即人们可以从浅部与深部的结合上,也即从三维上更全面更深入地研究和认识逆冲-推覆构造。这些发现同时掀起了对逆冲-推覆构造研究的高潮。除北美、欧洲等地区外,我国也开展了大规模的调查研究,发现或确认了一批逆冲-推覆构造,其中既有大陆边缘或陆-陆碰撞带的褶皱-逆冲带,又有板块内部变形区