



断层力学科学范畴、发展脉络评论及未来发展思考

关成尧¹, 赵国春², 白相东¹, 袁四化¹, 张艳¹, 刘晓燕¹

(1. 防灾科技学院地震科学系, 河北 三河 605201;
2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 为了看清单层力学的理论全貌, 文章研究了断层力学的发展脉络、应有体系、框架性缺失, 总结了学术界关注点及研究内容差异。结果表明断层力学关联领域存在尺度差异和目标差异, 断层力学是多学科纽带, 却是“三不管”地带。岩石裂纹和含内部构造的断层之间存在尺度差异和变形速度差异。断层力学的百年发展经历了从外力研究断层—构造应力场—滑移线场研究断层三个阶段, 这三个阶段总的发展方向就是逐渐简化、实用化, 阻碍了定量理论的发展。“Mohr 范式”是支撑, 带有实用化、简单化特点, 也阻碍了断层力学向机理化和定量化方向发展。断层研究存在正演和反演两类方法, 正演主要包括实验断层力学和理论断层力学两类途径, 正演和反演结合是未来发展方向。“地质力学”秉承“力学统一律”, 体现断层空间联系和力学联系, 属于“广义断层力学”范畴。“广义断层力学”体系适用“统一发展, 关注联系”发展途径, “狭义断层力学”体系适用“分散发展, 各自攻克”发展途径。先存断层或薄弱带控制后生断层, 并影响应力展布, “应力制约论”是重要方向。未来将产生“流变摩擦学”和“断层岩组构摩擦学”两个方向, “断层岩组构摩擦学”应整合显微构造学成就, 研究岩石组构稳定特征、流变特征、广义摩擦特征等, 需要将显微构造学唯象理论上升到大尺度断层力学理论中, 将岩石组构引入到岩石力学实验中。不同尺度关注点不同、理论不同、取用参数不同, 加剧了研究群体的隔离。断层内泥粒是可以迁移的, 由此产生“断层泥粒迁移学”。断层闭锁的概念需要重新考虑, 未来研究应立足“慢应变”和“大尺度”的断层摩擦延展力学。

关键词: 断层力学; 摩擦; 慢应变; Mohr 范式; 组构

中图分类号: P55 文献标识码: A DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2018.24.04.058

REVIEW OF CATEGORY AND DEVELOPMENT CONTEXT OF FAULT MECHANICS

GUAN Chengyao¹, ZHAO Guochun², BAI Xiangdong¹, YUAN Sihua¹, ZHANG Yan¹, LIU Xiaoyan¹

(1. Institute of Disaster Prevention Science and Technology, Sanhe 065201, Hebei, China;
2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to reveal the whole-theory of fault mechanics, this paper reviews the development of fault mechanics, the due system, the lack of frame and summarizes the differences of academic concerns and research contents. The results show that there are scale differences and target differences in the

基金项目: 河北省高等学校人文社会科学研究重点项目(SD162001); 中央高校基本科研业务费团队项目(ZY20180104); 中央高校科研基本业务费项目(SD162001); 中国地震局教师科研基金(20150103)

作者简介: 关成尧(1976-), 男, 博士, 讲师, 主要从事盆地构造、地质力学、岩土力学研究。E-mail: gcywww@126.com

收稿日期: 2018-01-08; 修回日期: 2018-06-29

吴芳编辑

correlation field of fault mechanics. Fault mechanics is a link in multi-disciplinary fields, yet it is still a zone no one to manage. There are differences in size and deformation velocity between rock cracks and faults with internal structures. The centennial development trajectory of fault research from external forces to fault-tectonic stress field and then to slip-line-field is a simplified and practical way, which hinders the development of quantitative theory. “*Mohr* paradigm” is the support, with practical and simplified features, which also hinders the development of fault mechanics towards mechanism and quantification. There are two kinds of methods in fault research, forward modeling and inversion. Forward modeling mainly includes experimental fault mechanics and theoretical fault mechanics. The combination of forward modeling and inversion is the future development direction. In accordance with the “unified law of mechanics”, “geomechanics” embodies the spatial relation and mechanical relation of faults and belongs to the category of “generalized fault mechanics”. The “generalized fault mechanics” system is applicable to the development of “unified development, concern and connection”, while the “narrow sense mechanics” system is applicable to the development of “decentralized development, individual achieve”. The pre-rift always controlling the secondary fault and influencing the stress distribution and the “theory of stress restriction” is an important direction in the future. “fault rheological tribology” and the “fault rock fabric tribology” will emerge as two directions in the future, and the “fault rock fabric tribology” should be integrated micro-tectonics, the stability of rock fabric characteristics, the rheological characteristics, generalized friction characteristic and so on. The microscopic structural phenomenology theory needs to be promoted to the large-scale fault mechanics theory, and rock fabric needs to be introduced to the rock mechanics experiment. Different scales have different concerns, different theories and different parameters, which aggravate the isolation of research groups. The mud-particles in faults can be migrated, resulting in “The theory of fault mud-particles transport”. The concept of fault-locking needs to be reconsidered, and future research should be based on the “slow strain” and “large-scale” frictional extension mechanics of fault.

Key words: fault mechanics; friction; slow strain; *Mohr* paradigm; fabric

0 引言

我国断层力学基础理论研究非常薄弱, 断层力学一般以岩石断裂力学为基础, 如马胜利等 1996 翻译的肖尔茨的《地震与断层力学》^[1]是以岩石断裂力学为基础的第二代断层力学, 该书立足于比其早 30 多年的 *Anderson* 的《断层力学》^[2]和 *Richter* 的《地震学基础》^[3]这两本名著的理论基础, 且其内容填补了这两本名著的空缺, 初步实现了机理化和定量化^[1], 为地震界和工程地质界所采用。以《地震与断层力学》^[1]为代表的第二代断层力学适用于裂纹尖端的发展传播模型, 属于微观尺度的内容, 目前能见到的断层力学理论专著的基础理论基本都是直接以裂纹和微凸起为主要研究对象的“微观”力学^[1,4-6], 这对于工程地质领域有较好的指导意义^[7-8], 对于地震断层摩擦

曾经也发挥不少作用^[9-12], 而地震地质领域对于断层泥摩擦特性的研究使断层摩擦参数更接近实际^[13-15]。无疑, 这些成果在无法实现理论长足进步的条件下促进了实践总结, 一定程度上解决了小尺度岩块内部的工程地质应用问题。与断层力学有关的岩石摩擦学一般以接触力学和摩擦学为基础, 这些都是微观尺度的内容, 岩石摩擦学即使在肖尔茨《地震与断层力学》中也较少涉及, 理论建设的距离还很远。在肖尔茨《地震与断层力学》之后也鲜有代表跨时代理论进步的相关著作, 相关研究还在步履蹒跚地进行着。

肖尔茨的《地震与断层力学》实现了机理化和定量化之后, 构造地质学界和地震断层力学界依然在相对独立地发展着。在 *Anderson* 《断层力学》^[2]之后构造地质学界出现了 *Ramsay* 这样的解析构造集大成者, 专著方面出现了 *Ramsay* 的《岩石的褶皱作用和断裂作用》^[16]和波兰学者雅罗谢夫斯基的《断裂与褶曲构造学》^[17], 国际上以

Ramsay 为代表的解析构造学迅速发展,我国则产生了以马杏垣为代表的解析构造学派^[18]。解析构造学实现了构造变形的(半)定量过程恢复,显而易见的是解析构造学的产生虽然是立足于力学基础,但其应用则基本不依赖于其产生所需要的岩石力学基础,而是以构造变形的平衡及连续作为研究准则,弱化了应力的变化,仅在应变方面做足了工作。我国构造地质学界在地质力学学说^[19]和断块构造学说^[20]两个主要倡导力学与地质学相结合的学派之后,产生了力学与地质结合逐渐退化的现象,虽偶有青年学者有一息新论^[21]。着眼于跨学科视角的加强,无论是以岩石力学为基础产生的地震与断层力学,还是以大尺度断层为视觉界限和运动标志的构造地质学,都需要能够服务于这两个体系甚至是统一体系下的断层力学新体系。

为了看清断层力学的理论全貌,文章旨在粗框架地评论断层力学发展的基本脉络,阐明断层力学应有的框架,并力图从史学观点总结学术界对断层研究的关注点和基本研究内容以及关联领域之间的差异,说明断层力学未来发展方向,以及牵涉其中的哲学理念。文中并未能细论断层力学的前沿进展,搭建的框架和描述的发展脉络或有些启发,旨在促进思考,抛砖引玉。

1 断层力学科学范畴

上世纪九十年代断层力学有了划时代的成就,其代表是肖尔茨的《地震与断层力学》,但发展到现在其理论不足已逐渐暴露。地球深部地质体的构造运动都是极慢速的,地质断裂的尺度量级也远大于岩石裂纹,相对于裂纹这种微观尺度来说,断层更加宏观,可以用“大尺度”和“慢应变”来概括地质断层和岩石裂纹之间的特性差别。那么,基于岩石力学、岩石断裂力学、摩擦学的断层延展与摩擦力学是否能够直接应用于“大尺度”、“慢应变”的地质体相关计算中需深入探讨,其理论鸿沟事实存在,大概也是断层基础理论依然落后的重要原因。

在岩石物理学发展过程中,各类岩石实验观测是人类认识岩石物理性质的一种重要手段,但作为一门衍生的交叉学科领域,岩石物理学在发展过程中的一些核心理论、方法、手段,却不是

直接从实验观测与分析中得到的,而是由一些相邻学科领域的一些成熟认识引进、融合与归纳得到^[22]。断层力学是一个非常薄弱的领域,同时也是很多领域共同关注的边缘领域(见图1),不同学术领域对断层的关注点差异较大,每个领域只关注与自己直接相关的部分,就如“盲人摸象”,无法立足于断层力学的理论全貌进行研究。如石油地质界关注断层的开启和流体封闭性^[23-24],对于何为断层开启的概念本身也存在争议。总结来说,构造地质学界对断层的研究可以体现其关注“大尺度”的优点,并且不是以单一断层作为研究对象,关注不同断层之间的成因联系(但不是力学联系),这值得其它学术板块所借鉴。岩石力学界则关注微观的机理。目前,不是靠简单的学科领域交叉就可以形成跨领域发展,实现学科领域融合。以上比对简要说明了断层力学发展存在的问题,对这种差异的认识能够促进各个领域实现对自身研究的跨越。

从学科体系的角度来讲,断层力学属于岩石物理学和构造物理学两大领域体系共同关注的内容,岩石物理学和构造物理学有很大交集,但两者差异也很大,构造物理学主要服务于各种地质构造现象的物理机制方面研究,属于宏观的范畴,构造物理学是地质学一门分支领域,是构造地质学与地球物理学、物理学、岩石力学、流变学等领域相结合的边缘领域。岩石物理学以岩石微观性质为主要关注点,专门研究岩石各种物理性质及其产生机制,一般将其划归为地球物理学范畴。石油地质、盆地与造山带等地质领域关注的内容和构造物理学更加接近,其落脚点是地质构造,而岩土工程、岩石力学、断裂力学等关注的内容与岩石物理学更加接近,其研究落脚点是岩石介质,所以出现两者的差异就是必然的(见图1)。从各个学科关系及上文讨论可见,断层力学是相关领域的纽带,是这些领域的“公共产品”,其可能起到的作用可以窥见一斑。断层力学作为很多领域的“公共产品”,却又容易被这些领域所“忽视”,这也是“公共产品”经常遇到的情况。

地震地质是一个需要构造物理学和岩石物理学深厚结合的领域,同时也代表着构造物理学和岩石物理学两个领域融合是否成功,断层物理学是两者的集中体现,断层力学又是断层物理学中的最重要内容,断层力学是否能够融合地质界和

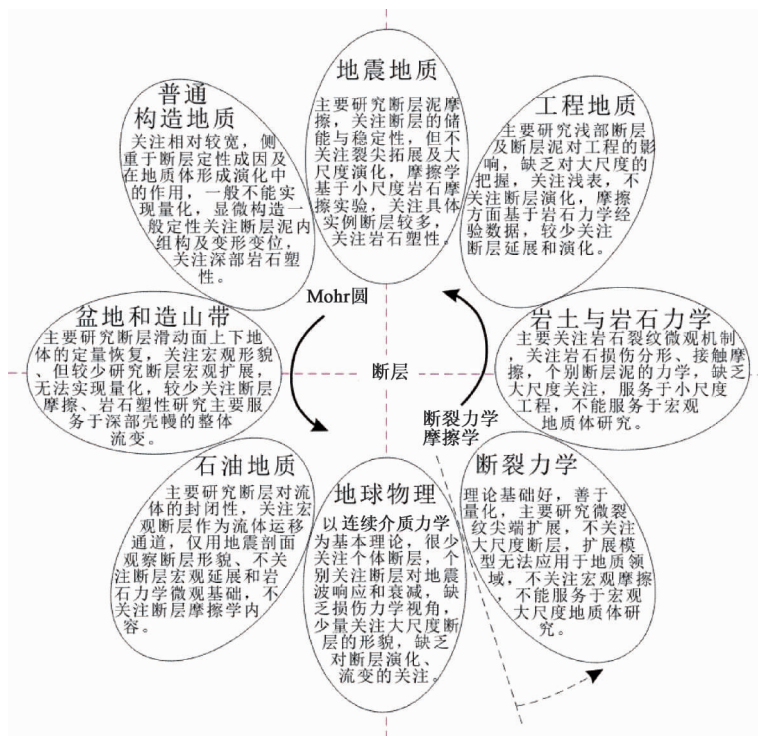


图1 学术界各板块对断层研究的关注点和研究概况

Fig. 1 Research focus and overview on fault of each Academic groups

岩石力学界成果，是检验地震地质领域学术发展水平和学术高度的重要标志。

与岩石介质相关的力学（固体力学）存在两大力学体系，一个是连续介质力学体系，另一个是损伤（介质）力学体系，构造物理学和岩石物理学都和这两大力学体系有交集，断层力学整体属于损伤力学体系（见图2）。同为断层力学，不同学者研究的侧重点不同，如 Anderson 的《断层力学》以构造物理学范畴为主，肖尔茨的《地震与断层力学》则以岩石物理学为主要视角，构造物理学和岩石物理学本身也是如此，如巴晶的《岩石物理学进展与评述》^[22]以连续介质力学为基本力学框架讨论岩石物理学问题，目标是服务于地球物理计算。席道瑛的《岩石物理学基础》^[25]则不同，是相对浅显但更加全面的岩石物理学。马瑾的《构造物理学概论》^[26]一定程度上离岩石物理学稍近，兼有构造物理学和岩石物理学两个方面内容。目前，国内尚缺乏能特别好地服务于地质学领域的《构造物理学》专著或者教材。在李四光和张文佑之后，我国似乎出现了构造地质逐渐和构造物理相对脱离的现象，我国学者在《Tectonophysics》杂志发表的文章大多都是基于我国的观测实例展开研究，较少介入到基础理论方

面研究，这似乎正体现了我国地质学和国外地质学的某种差距，断层力学则是其中一个缩影。

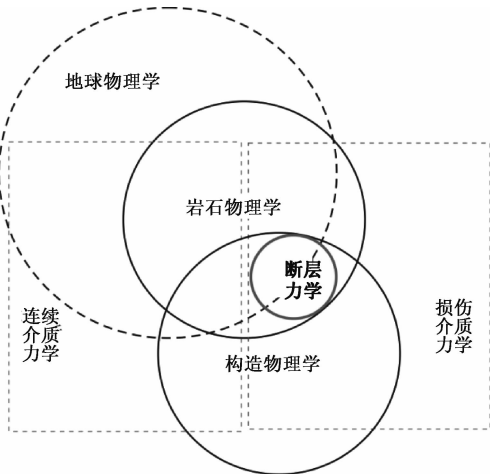


图2 断层力学与岩石物理学、构造物理学的关系

Fig. 2 Relationship between fault mechanics and rock physics, tectonophysics

整体来说，地震地质界对断层研究最接近地质断层，但是依然存在以下问题：

主要研究断层泥摩擦，关注断层的储能与稳定性，不关注裂尖拓展及断层大尺度演化。断层摩擦学主要基于小尺度岩石的摩擦实验，较少上升到理论高度，关注具体实例断层较多，实验多、

理论少,实例断层多、理论总结少。由于地震地质界比其它基础地质板块更加关注断层物理机制和断层内部摩擦问题,因此其工作内容更加接近断层物理学,同时,其研究尺度也大于工程地质界和岩石力学界,工程地质界和岩石力学界关注更多的是岩石节理和裂隙级别的薄弱面,因此,地震地质是研究尺度和地质断层最接近的学术板块,也更加需要发展断层力学,当然,不能将断层力学发展的责任强加给地震地质界。

对于断层带的关注,大尺度的视角也并非只有构造地质学界所独有,对于整个地球地壳内断层带模型,常见的有 *Sibson* 模型、*Strehlau* 模型、*Scholz* 模型、*Shimamoto* 模型等^[27],视角尺度足够大,但并非针对单个断层,也不是针对相互关联的断层组系,而是一种地壳摩擦规律的分层定性描述,不能和断层发展的应力变化耦合在一起计算实际断层的运动。对于地震断层力学的多尺度问题,高祥林^[28]认为“断层力学仍是跨世纪难题,不同尺度的差异需要不同本构关系等力学定律进行描述分析,这尚未引起理论界注意,另一个问题则是各个尺度之间如何耦合或相互作用”^[28]。

2 断层力学的科学起点

构造地质学中的力学一般和应力 *Mohr* 圆有关,应力 *Mohr* 圆是构造地质学重要的力学基础,应力 *Mohr* 圆及其破裂方向及破裂判据均不需要复杂的单裂纹计算和摩擦系数刻画,相当于 *Mohr* 圆为构造地质学界提供了一个力学捷径,使得地质学家不用理会岩石力学微观机理就可以完成地质学中必要的力学分析。*Anderson* 的《断层力学》中力学理论起点是 *Mohr* 圆,故而能被构造地质界较为方便地应用。肖尔茨的《地震与断层力学》的理论起点是断裂力学和摩擦学,如果剔除著作中与地震相关的部分,肖尔茨的《地震与断层力学》的理论终点是裂纹扩展、摩擦这种适用于厘米到米级尺度的理论直接推广到千米尺度的地质断层,这就能清楚看到从岩石力学微观理论到构造地质学之间的尺度跨越中所遗失的环节。这个缺失的环节仍然是岩石裂纹和含断层泥的断层之间的两大差异,一个是空间上的尺度差异,一个是变形速度上的“时间”尺度差异,空间尺度差异方面,地质学概念下的断层已经带有“大尺度”概念,

而变形时间尺度上的差异方面,地质断层活动属于“慢形变/慢应变”的时间尺度范畴。

不同领域应用断层力学的科学起点问题,其实质就是科学研究范式^[29]问题。由于与断层力学相关的很多理论的起点是 *Mohr* 圆,或者广义的破裂理论。依据 *Mohr* 圆理论的研究范式可称其为:“*Mohr* 圆破裂力学研究范式”(简称“*Mohr* 范式”)对于岩石力学的发展,首先是接受了“*Mohr* 范式”,而 *Nadai* 的《*Theory of flow fracture of solids*》^[30] 可谓是这部分的范例。如果需要讨论 *Mohr* 范式的科学内涵问题,*Mohr* 范式的实质至少表现在以下方面:

(1) 屈服面理论:将材料的弹性和塑性做了界定,“面内”为弹性,“面外”为塑性;

(2) 破裂理论:材料破裂理论是突破屈服面行为。

(3) 基于实验的包络线理论:实验数据的应用产生了很多 *Mohr* 圆理论的变体,很多后继研究者都可以在该领域大有可为,*Mohr* 圆理论留给学者们很大的应用空间和提升空间。

(4) 强度理论:材料屈服就是超过强度,这个强度包含“摩擦强度”概念。

(5) 内摩擦角理论(或者可称为“内摩擦理论”):规定了剪应力和正应力之间的关系。

(6) 能够支撑变形连续性理论、应力路径和应变路径^[31]理论。

如用以上6条来概括“*Mohr* 范式”,就可以发现“*Mohr* 范式”作为一种研究的重要理论起点和研究范式,已经成为岩石力学和构造地质学的力学根基之一,后来的构造地质学发展,尤其解析构造学的产生和发展,都是以应力、应变理论为其根基。“*Mohr* 范式”在二十世纪根深蒂固,用“*Mohr* 范式”来概括 *Mohr* 的科学成就似乎夸大了广义 *Mohr* 理论的科学及工程成就,但是,这个体系的应用价值值得肯定,*Mohr* 范式留下的影响非常深远。

3 断层力学的历史外延

国际上地质界对断层力学的理论研究大体经历了3个阶段,分别是:从外力作用方式分析断层机制;通过构造应力场分析断层展布规律;应用滑移线场理论研究断层力学机理^[32]。这既是断层

力学发展的历史问题,同时也涉及到断层力学、构造应力场、滑移线场三者之间关系问题。

Hafner^[33]提出了应力场分析法,这一理论的核心是先由地块外力作用方式计算区域内应力场,再用破坏准则加以检验,划出潜在断层^[32]。对于构造应力场方面研究,安欧的《构造应力场》^[34]专著较能体现其理论全貌。应用构造应力场对断层进行研究时,能够建立地质体中断层几何展布和应力场形态之间的关系,这种关系符合一般的地质规律,并近似的体现力学联系,虽有其实用价值,但也使得人们对断层定量理论的需求弱化,在一定程度上遏制了断层力学向量化方向发展。

滑移线场理论由 Prandtl^[35]于1920年依据 Mohr 破裂准则提出,这就决定了滑移线场理论的起点是 Mohr 破裂准则。地质界应用的滑移线场理论实质是 Hafner^[33]提出的“势断层”理论的一个变体,所谓“势断层”可以理解成按照外加应力场的布局,有 α 和 β 两个方向的滑移趋势,是发生剪切行为最有利方向。虽然滑移线场理论能使使用者较容易地建立目标地质体剪切破裂的空间展布规律,甚至能解决较为复杂的几何学问题^[35-37],但其理论整体及理论^[35-37]起点仍是基于 Mohr 破裂准则的构造应力场理论范畴(虽然滑移线场理论产生较构造应力场理论产生时间更早),而滑移线场理论比构造应力场相比更具有简单实用性,可以理解为简单近似的构造应力场,因此,断层力学经历了从外力研究断层—构造应力场—滑移线场研究断层的三个阶段,这三个阶段总的发展方向是逐渐简单化、实用化。滑移线场理论在基础地质领域的应用主要是 Tapponnier^[38]滑移线场理论及解释青藏高原及围区构造运动形态的“碰撞—挤出一逃逸”构造学说,成为青藏问题(印亚碰撞)广为人知的模式。

近年来地质界对滑移线场的应用产生了“第二春”,主要的进展集中在对挤压造山体系中挤压滑移线场理论方面有些代表性的进展^[39-42]。Jo Lohrmann^[40]的文献是挤压构造解析量化方面的重要研究材料,理论起点依然是 Mohr 圆。Antje Kellner^[41]文中涉及挤压构造解析加数值模拟方法,虽然加入了很多定量公式,也有很多对宏观规律的描述,但是研究起点同样是 Mohr 圆。

滑移线场理论在工程地质界^[37,43]以及金属成型^[44]、力学^[45]领域应用极其广泛,与工程地质领

域对比,构造地质学领域似乎还没有迎来滑移线场理论与地质学的深度结合,滑移线场理论值得一部分基础地质领域学者重视,宏观尺度的大地构造滑移线场作为大小尺度均可实用的理论是有研究前途的。

还需要讨论的问题是:构造应力场和滑移线场是量化模型吗?事实上构造应力场中有指导意义的成果并不属于定量物理意义的理论。首先其对于应力理论建设高度不够,构造应力场在“应力学”还没有得到很好发展的前提下局部地、经验地通过扩大了“场”的概念,是将“场”进行经验性的总结所得到的统计规律,是以构造物理实验和光弹模拟实验为支持的可视化总结,研究者们看到了外力加载导致的实验材料内部“场”的分布图景,几十年来较大数量实验带来了较大数量统计认知,其功用不可磨灭。但是,要注意“构造应力场”发展不是理论逐渐深入的科学道路。相对于构造应力场来说,滑移线场剔除了对应力研究需要和基本支撑,而简化为依据应力场所决定的主压应力迹线和主剪应力迹线的某些特征化规律。这个模式需要有一个自由表面,外力(工程领域为负重)作用点总是小于被作用面,那么就会转化为两类问题,一类是半无限空间问题,这是一个无限大的极端问题,其在工程地质界的应用就是一个半无限空间模型。另一类是有限板问题,Tapponnier^[42]的两个例子可以认为都是有限板的模型,只是板厚度和负重的加载尺度之间比值不同而已。

由以上分析可见,构造应力场理论和滑移线场理论均不是实现量化的理论,也不是逐步向量化发展的理论。从定量理论发展的视角看,滑移线场理论在工程地质领域的广泛应用以及在构造地质学领域的应用,反而阻碍了基于单个断层量化发展的科学道路。那么,在地质学领域就产生了两个努力方向,第一个努力方向是力图推进地质学量化的学者,这类学者就需要摒弃构造应力场理论和滑移线场理论这类应用型的简化模型,以微观岩石裂纹的延展和摩擦为研究起点,并逐级向更大尺度的节理、地质断层(含断层泥)、断裂带进行模型跨接升级。第二个努力方向是可以推进滑移线场在地质学领域应用,这种简化的模型可以带来很多的研究便利。

4 断层和岩石裂纹的本质差异

一般对断层封闭性的研究多是基于断层的“泥抹效应”^[46],在实际断层封闭性判断中发现误差较大。在地壳浅部的断裂核部通常厚几米到几十米,主要是断层泥,与断层核部连接的原岩通常是一个裂缝密集的破坏带,破坏带作为一个过渡带,其中间的断层或者裂纹的广泛分布使得破坏带具有远大于断裂带核部和原岩处的渗透率^[47],实验结果表明,断裂带破坏带的渗透率有时比断裂核部和原岩处的渗透率大1万倍^[48]。这说明断层渗透性的关键不在于断裂核部,而在于破坏带,断层封闭性研究方法需要重新审视。

断层和岩石裂纹有着什么样的本质差异呢?两者差异主要表现在以下方面:

(1) 断层是一个地质概念,而裂纹是一个岩石力学或断裂力学概念。

(2) 裂纹研究的主要是摩擦和扩展,断层研究的范畴很宽,包括摩擦、发展、内部构造、岩石性质、断层泥。

(3) 断层有内部构造,裂纹研究基本不关注其内部构造,或者根本不存在内部构造。

(4) 裂纹的摩擦主要关注断面的形态及阻隔导致的力学问题,断层的摩擦需要研究断层岩整体变形能力。

(5) 裂纹扩展的阻力主要在于裂尖的岩石强度和破裂所需能量,断层扩展的阻力主要在断层面本身的摩擦阻力,这种摩擦阻力主要是流变能力的函数,和速度相关。

(6) 裂纹的扩展可以认为主要决定因素是应力集中,一般认为和速度无关,而断层的扩展则和速度有关,速度越快,驱动力越强,阻力也越大。

(7) 裂纹的扩展和裂纹的张开尺度之间关系很微弱,断层扩展和断层宽度之间关系很敏感,同样的断层泥变形摩擦能力,宽断层在很高的变形速度下不需要很大阻力,窄断层则表现为很大阻力,如果设定滑移的动力相同,宽断层会倾向于发生断层泥内部的塑性流变,而窄断层则发生断层泥内的高速滑移带,这种高速滑移带在速度仍可以接受时表现为片理化的韧性剪切带,速度再增加则表现为宏观滑移面的产生和发展。

(8) 裂纹能够较容易地用力学来描述其规律,而断层较难用力学来描述等规律,主要是基于实验来确定摩擦系数,但是,这并不意味着断层没有必要实现或者部分地实现力学规律的研究。

以上断层和岩石裂纹的本质差异决定了断层力学和岩石破裂力学之间的巨大差异,也说明了基于岩石物理学的断层力学仍然存在巨大差距。

5 非均质及先存脆弱带的启示

宏观断层作用主要针对均匀介质模型,对于非均匀介质(如有先存薄弱面)断层作用自90年代以来有很大进展^[49-51]。*Morley*^[52]把先存构造分为“分隔性构造”和“透入性构造”^[21],前者是指介质中存在一个截然的破裂面,相当于先存断层,内聚力很小或为零,后者是由一系列弥漫性构造组成,力学性质上为一相对薄弱带^[21]。先存断层对后形成断层有明显的控制作用^[52-54],尤其基底先存构造对裂陷盆地断裂系统形成和演化有明显影响^[53-54],基底先存构造经常控制盆地的斜向伸展和不协调伸展模型^[55]。先存“透入性构造”构成的薄弱带对后形成断层、节理等构造有明显控制作用^[56-59],先存脆弱面的存在对岩石圈尺度也可能支持了初始俯冲的形成^[60]。先存脆弱带可以是成熟的断层,也可以是脆弱带,脆弱带方面曾有一个会议文集^[61],该文集主要是小尺度方面的文章,以工程地质和灾害领域文章为主体,里面有一些工程地质和灾害领域学者关于先存破裂对后成破裂影响方面的研究,值得构造地质界借鉴。在大尺度方面,例如大地构造方面,有很多先存破裂制约和影响断层发生和发展的因素^[62],这些基于观测的结果有很强的指导意义。在小尺度领域,先存组构和先存节理这些导致岩石本身非均质或者方向性材料性质差异的因素则对断层发展有较大影响^[63]。

先存断裂对于新生断层的形成与发展有所影响,主要是从空间组合的角度来研究的,可分为小尺度和大尺度两个方面,大尺度方面主要是空间组合观,这种组合观需要从静态演化为动态控制观,由李四光^[64]提出的构造体系复合与联合理论,及由乐光禹在川黔具体构造研究中得到丰富的内涵发展的构造组合叠加分析原理^[65],均蕴含了“动态控制”理念,但是,由于当时研究方法

所限,只能看到历史积累的最终结果,而不能看到发展历程,现在依据三维地震反演方法可以看到这种发展过程中对于新生断层的限制作用。

先存脆弱带往往影响断层附近的应力场分布和断层的发展,未来的理论发展过程中,如果要实现比应力场解释模式更加有理论深度的研究方法,至少可以从以下四个方面开展研究:①摩尔空间^[59,66-67]方法。童亨茂等提出的摩尔空间^[59,66-67]不仅把摩尔图解从二维(应力摩尔圆)扩展到三维(摩尔空间),而且把库伦—摩尔准则(针对均匀介质)和摩擦律统一起来。②由应力转向^[68]作为指导思想来分析计算。“应力制约论”是较大尺度空间未来研究的重要发展方向,这种理论估计也可以用于小尺度,相关讨论在后文加强。③应力路径分析法。应力路径^[31]分析法是从应力路径和摩尔圆之间建立联系的重要方法,这部著作^[31]将应力路径和破裂之间的关系应用到了极致,但这个文献没有将这些路径和宏观几何学(如盆地几何学)联系起来,究其困难,是由于理论界尚没有建立起来应力转向和应力运动的理论体系。④破裂及发展、摩擦、应力之间的耦合观^[69]为指导的分析计算。上述所提及的断层摩擦学基本均是对先存脆弱面的研究,贝尔利定律^[70]从先存断层摩擦的角度讨论摩擦系数,破裂的角度问题主要针对新生断层,摩擦则主要研究先存断裂,耦合观可以提示研究者在断层发展过程中应力场和摩擦参数的进化。是否有更多的途径去研究这种边破裂边耦合的过程还值得积极探索。

6 正演与反演,理论与实验的研究方法

如果说已有的断层力学研究主要强调正演,那“反演”的工作则比较薄弱。90年代以来出现的三维地震很好的解决了断层的三维空间信息问题^[71],但无法观察其细结构。反演方法是盆地构造研究的重要模式^[70-72],地震方法提供的三维空间信息对于看清地下结构,从而归纳总结分析断层空间及发展规律相当有裨益,尤其对于盆地空间内的断层空间组合关系方面作用很大。构造物理模拟则是重要的正演模式^[72-74],在构造物理模拟方面在最近几十年产生了大量研究成果^[75-76]。正演和反演的有机结合^[52,72]是未来断层“反演”研究工作的方向。更加有价值的正演和反演

的有机结合不是目前常用的构造物理模拟和三维地震解释的结合,而是未来可能出现的断层力学和三维地震解释的结合,这种结合既有尺度层面的结合,也包含方法论之间的结合,是理论断层力学、实验断层力学、反演研究之间的彼此联系(见图3)。

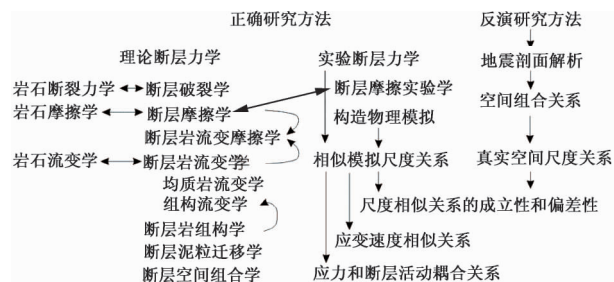


图3 断层力学体系与正演及反演的结合

Fig. 3 The combination of fault mechanics system with forward modeling and inversion

正演主要包括实验和理论分析两个重要研究途径,如在实验构造地质学方面,从地质力学^[19,64]、断块学说^[29],再到钟嘉猷等的实验构造地质学^[75],再到现今广泛应用的构造物理模拟^[75],这是一条实验构造地质学或者构造物理学的发展道路,可以将这中间以研究断层活动规律的或者能够体现断层活动规律的部分理解为实验断层力学,在这套研究方法里面,断层大致是以破裂为特性,内部构造较少关注。

以李四光的构造体系为出发点,延伸到构造体系的复合联合观,从宏观尺度开启了区域断层体系之间的联系,中间又经过张文佑^[20]对岩石圈内断裂体系的分类描述,最后到川黔构造复合联合^[65],这套研究范式以走向不同尺度的地质力学结构的“统一律”为基本目的和特色,也是重要的发展方向,这套体系可以概括为明显的“地质力学”特征,其范畴不是断层力学所能概括的,其中的断层力学相关部分可以理解为“地质力学”范式的宏观视角的断层力学,可以认为是理论断层力学的一部分,或者,这种断层力学研究范式更多地是以“断层空间组学”为主要视角,“地质力学”方法里面另一个重要部分就是“断层(岩石)破裂学”,这并非是“地质力学”学派独占的研究,岩石力学领域也都关注,但“地质力学”学派更体现了“系统论”这样的倾向。

包含断层内部构造的研究则启动较晚,在构造地质学界主要是做“小构造”研究的群体较为

关注,地震领域也相对较为关注,因其涉及深部构造地震机理,故有不少学者对断层摩擦开展了研究,主要涉及了“断层(岩石)破裂学”、“断层(岩石)摩擦学”、“断层岩流变学”三个方面,后两者的研究还相当薄弱。这在后面的“摩擦学”和“慢应变”部分继续展开讨论,关于“断层泥粒迁移学”(见图3),由于其相对独立性,下文专门做延展性讨论。

7 广义断层力学与狭义断层力学

7.1 “广义”、“狭义”之分

首先说“广义断层力学”和“狭义断层力学”在内涵上的差异。广义断层力学内涵包括断层力学、节理力学、劈理力学、断层岩组构学、颗粒迁移的物理化学变化等等,“广义断层力学”不仅仅包含断层力学,也包括节理力学、劈理力学、韧性剪切带(糜棱岩)的相关力学。节理经常成为断层发展的前身^[77],也经常成为地表脆性岩石断层发展的伴生结果,劈理可以成为断层的一部分而发展为断层,在中等深度,劈理可以成为断层的一部分,韧性剪切带(“韧性断层”)本身是深部断层的另一种指代,韧性断层内的糜棱岩有大量的组构,也应该是断层力学的一部分。并且,一个重要的研究方向是关注这些具有损伤性质的构造元素是否有力学性质“一致性”的特点。节理、劈理、糜棱岩相关力学并非只有断层体系内,更在于断层体系之外。另外,由于先存最弱带对断层的发展有明显制约控制作用,节理^[77]、劈理、韧性剪切带(糜棱岩^[78])等都应该是在断层力学体系该考虑的因素。“狭义的断层力学”则研究断层的形成,将断层和节理、劈理等内容排斥在外,这样的划分容易引导人们分别研究断层力学、节理力学、劈理力学、糜棱岩相关力学,关注到“节理、劈理、糜棱岩相关力学并非只有断层体系内,更在于断层体系之外”,分别建立其力学体系,宜采用“分散发展,各自攻克”的研究方法。

在李四光时代的断层力学体系里面,从材料劈裂的角度来看,断层、节理和应力场的关系是有一致性的,Neville J的著作^[79]就可以看做断层和节理力学统一理论的典范。裂纹的拓展也和断层发展有共性,也有个性,如翼裂纹,作为区域真实断层和构造应力场方面存在“光弹模拟”这样

的研究有很多,这种断层活动的应力场及应力集中的格局和(材料)断裂力学领域展现的裂纹发展何其相似。显微构造里面也有脆性材料的破裂一致性,然而在脆性条件和韧性环境下,岩石以及组构的发育模式不同。显微构造体制下组构排布和最大主应力 σ_1 的关系与脆性环境下断层(或节理)和 σ_1 的关系不同,郑亚东所提的“最大有效力矩准则”和摩尔库伦准则体系之间的差异,似乎表达了脆性材料和韧性材料之间的差异,脆性破裂中锐夹角平分线是 σ_1 ,而郑亚东的 110° 角现象似乎是韧性材料(或者慢应变条件)下不同力学体制的结果。郑亚东所提的“最大有效力矩准则”和摩尔库伦准则体系之间的差异体现了深部韧性和慢应变条件下的力学体制的不同,然而目前,在构造地质学体系内,关于深部韧性和慢应变条件的研究虽开始崭露头角,但针对性的力学体系还没有建立起来。

如果把“广义断层力学”和“狭义断层力学”认定是两个不同的研究体系,那么“广义断层力学”体系中应用“统一发展,关注联系”的研究方法需要有人去加以应用并产生系统性的研究成果,同样,“狭义断层力学”体系中应用“分散发展,各自攻克”的研究方法也同样需要有人去加以应用。“狭义断层力学”、“狭义节理力学”、“狭义劈理力学”、“狭义糜棱岩相关力学”的各自发展可以为“广义断层力学”提供研究的实例、参数、素材以及宽厚的认识,各自发展的争鸣是基本的驱动力。“广义断层力学”是一个重要的发展方向,是从纷繁的认识中总结统一的必要途径,同时,“广义断层力学”可以用更高度的思想指导“狭义”力学体系,促进“狭义”体系的健康发展。

7.2 节理力学与断层力学可否统一

关于节理力学,主要有以下几个方面的研究需要引起注意:1990年,召开了一次国际断层和节理岩石力学大会,会议出版了《Mechanics of jointed and faulted rock》^[80]文集,这次会议是以工程地质界为主体的节理力学的会议,内容较为全面。2004年,为了纪念Paul Hancock,出版了《The initiation, propagation, and arrest of joints and other fractures》文集^[77],这是一部高水平文集,还有其它典型的节理力学研究文献^[81-83]。这些节理力学研究中,有的闪现了和断层力学的结合问

题^[84],有的考虑了先存脆弱带对节理破裂形成的制约^[85],有的提出或论证了节理的空间关系和集合系列方面的力学规律^[86-88],有的则考虑了高温条件下相对脆性破裂的一般规律和影响因素^[89-90],为深部岩石存在节理提供了理论指导^[90]。在研究方法方面,节理研究也一样存在应用构造物理模拟方法的例子^[87,91-92]。需要注意的是,虽然节理研究经常是小尺度的、服务于工程地质,但这并不意味着节理尺度不可以很大,甚至在尺度上远远大于一般的断裂和断裂带,如加拿大地盾的基性岩墙群尺度就大于一般断裂^[93],基性岩墙群可以理解为地壳早期较冷时期重要的巨型节理构造,它的产状是连续和接近直线的,这种很直的线状构造用节理力学来解释最为恰当,其它地区也发现了大型的一般性节理^[94]。不少研究可以为节理和断裂的统一性研究提供一些倾向性论据^[95],这种破裂可以是节理,也可以是断层,这一领域的研究充分体现了其带有明显的 *Mohr* 范式特点^[96]。

8 尺度方面研究的状况

如果岩石是一种内在缺陷分布相同的非均质材料,那么随着尺寸增大,同种类型的岩石强度就一定表现为逐渐降低的现象,根本不会出现小尺度岩样强度小于大尺度岩样强度的现象^[97]。杨圣奇^[98]相对系统地评述了岩石的尺寸效应、流变力学特性,这些研究主要集中在实验和数值计算方面,或者从实验层面上归纳和争论强度等参数和尺度之间的关系,在理论方面较多地应用损伤概率分布、损伤分形相似性等,这些理论的支撑主要是统计学,尚不能用相对可靠和可推导的力学来描述。岩石力学领域对于岩石破裂的尺度关系有大量实验数据及其拟合规律^[99],其中基于概率分布研究占有较大比重^[100-101]。对于地质断裂,必须根据断层泥及泥外的破碎带和变形带进行综合性的研究,这方面国外的研究比较丰富^[102-103]。

对于尺度问题,可以从以下几个方面进行思考:

(1) 构造物理模拟的依据和相似性问题

我国构造物理模拟技术是在地质力学和断块构造学说倡导下发展起来的,构造物理模拟技术在19世纪基本上不考虑相似条件^[62],20世纪相似理论得到较好发展,对构造地质学、构造物理

学发展作出了重要贡献^[19-20,61,104-105]。1937年,Hubbert将相似理论引入地学界,后来才逐渐实现相似理论在地学界的应用、发展与完善^[106-107]。物理模拟实验的相似性主要是几何学、运动学、动力学三方面的相似^[75-76,105,108],应用这些相似条件,产生了大量优秀成果^[75-76],PIV等现代实验监测方法^[73,109]和颗粒流模拟等新技术新理念也开始投入应用^[110]。

构造物理模拟的相似性,其实质是应力场的相似,是在连续介质力学的指导下实现和完成的,如颗粒流和岩石流变的相似性,既然整体流变规律是颗粒比例代换的。这种物理模拟本身的相似主要基于塑性流变学参数,而非损伤力学参数,因此,它不体现断层本身的差异。构造物理模拟本身能够实现相似,是因为宏观真实地质体和物理模拟砂流变散粒体两者共同都掩盖了断层本身的强度差异。宏观真实地质体中,断层作为脆弱面强度相对于原岩几乎可以忽略;物理模拟砂流变散粒体中,其颗粒之间某一个陷落剪切带的摩擦强度也小于完善的散粒体系。

构造物理模拟实验本身是砂流变散粒体的塑性运动,颗粒支撑体的结构对其性质有明显影响^[111-112]。孙其诚著作^[111]的第五章有“颗粒物理学本构关系研究中涉及的细—宏观联系,侧重强调细观组构对宏观力学的影响”,这种理念涉及到“最小内功原理”,用更加高深的数学来理解则涉及到“系综平均”,岩土材料破裂还有“最小能比原则”^[111]。散粒体结构强度等参数和力链有关^[111],在砂箱颗粒体运动过程中,力链局部断裂或者弱化,形成“断层”滑移带,散粒体的稳定力链“平均场”决定的力链强度和滑移剪切带的“剪胀”力链之间也有一定自相似性。在同尺度级别滑移带附近,滑移带内的力链强度和散粒体相对稳定区域的比例关系也有一定的稳定性,这种比例系数大到一定程度后,体系的运动就由薄弱面来完成。

(2) 尺度相似律何时成立,何时不成立

对于尺度问题,地质力学^[19,20,61-62]学者认为地质力学规律是支持尺度相似性的,对于断层展布关系,宏观上相似性比较强;如对于滑移线场,Tapponnier^[38]的印—亚碰撞导致的地体相对滑移格局^[38]和工程地质滑坡^[35-37,39]相似,拆离断层尺度也有相似关系,这在宏观上就有一定相似性。从

构造物理模拟相似性角度来讲,断层力学和节理力学不能直接相似,断层力学相关的构造物理模拟是散粒体由于重力或挤压力等的差异产生的散粒体塑性单元之间的相对滑动,节理力学模拟则是张性或者简单剪切体内部的张性破裂。因此,需要研究尺度相似律何时成立,何时不成立。

(3) 大尺度研究,时间—速度是否相似

大尺度领域的研究特色是地质要素的展布关系、组合关系研究,这和地质力学以及解析构造学是息息相关的。这种尺度之间的组合关系,既有不同尺度之间相似性,也有同一地质体内部大小两个参考块之间的相似性。大尺度的相似性还涉及到和外力加载的速度之间是否相似^[113]的问题,以及涉及采用相似律时哪些微弱的差异被忽略掉并可以被忽略掉的问题。大尺度运动更加体现物质的塑性,而慢速加载应变更加显示地质体的塑性,大尺度和慢应变响应之间似乎有某种替代关系,尺度效应^[114]和应变效应的耦合是一个重要的研究方向。

(4) 宏观中微观的平均问题,宏观中蕴含着微观规律

在宏观的研究中,往往会采用对微观进行平均的方法来处理,连续介质力学的处理就是如此。在地球物理领域,事实上计算采用的弹性模量和泊松比参数已经折算为含有很多层次自相似性损伤的平均弹性模量和平均泊松比,强度参数也已经大尺度材料平均化;如原子的结合强度达到1000~100 GPa量级,矿物的强度则有100~1 GPa量级,岩石强度则一般在1~0.001 GPa量级左右,不同岩石强度差异较大^[115~116]。颗粒堆积体弹性模量存在砂粒弹性模量和堆积体弹性模量之间的巨大差异,并且这种堆积结构的弹性模量还和环境应力有很大的关系^[112],因此不同尺度研究所适应参数可以相差很大。这种平均的方法在微观方面也一样存在,如孙其诚^[111]文中的平均场理论,就是将各种力学分布差异中总的规律按照某种规则,甚至是概率规则,来进行平均化;这种平均化方法广泛应用在自然科学和社会科学的各个领域,有一定的“方法论”普遍原理的属性。

这种宏观中的平均问题就是宏观中蕴含着微观规律,只是参数不同,理论之间的继承性也比较好,经验性参数积累也比较容易,这些相似性思想经常成为不错的工作理念及工作依据,有很

强的现实意义。平均法这种层层参数传递的方法很多地质学家应该采用,历史继承性的成果大多以参数数据积累的方式得到进步,这种科学进步以“旧理论”(旧瓶)装上“新参数”(新酒)为特征。除了以平均化为基本思想方法以外,还可以采用不同尺度不同本构关系的方式,甚至不同尺度采用不同的支撑性理论;如劈理力学的研究方法就可以和节理力学不同,节理力学和断层力学又可以不同。这种理论差异的缺点是容易造成不同理论体系之间的阻隔,不容易形成统一的理论,不利于理论领域的跨越;优点是可以更好地促进本领域内理论体系的较快速进步。

(5) 不同尺度关注点不同,解决问题的理论不同

上文提到,不同尺度可采用不同的支撑性理论,其缺点是容易造成不同理论体系之间的阻隔。一般情况下,构造地质学上的宏观断层属于大尺度,节理可以理解为中到小尺度,或者属于米到数百米的尺度。节理和断层的明显不同是节理内没有内部构造,或者内部构造不完善,断层有内部结构,且存在明显的滑动和摩擦;节理则不需要研究摩擦,节理的研究以破裂和应力为主,不涉及到内部构造和摩擦,这也是上文中断层和裂纹之间的差异。劈理也是跨尺度的,可以属于显微构造尺度,也可以是达到数米的分辨尺度,劈理的流、破、滑等机制属于相对塑性的体系,更多与晶体的变形能力有关,但主要是不同位置或者不同晶体晶簇的差异变形能力所致。糜棱岩也是厘米尺度到微米尺度都有,这种组构是制约力学性质的重要因素,这种韧性构造的力学规律和脆性构造的力学规律则不同;如按照构造地质学一般知识,次生破裂的锐夹角指示本盘运动方向,同时也和应力来源一致,这是破裂(Mohr范式)力学体系所决定的。在劈理力学中,流劈理和滑劈理则没有该破裂力学所有的规律(锐夹角指示本盘运动方向),这是韧性剪切力学和破裂力学的明显不同;S-C组构等的倾向大致和促进变形的 σ_1 大角度(大于120度)斜交,不同于脆性破裂的“锐夹角原理”,可见,塑性或韧性体制既含有损伤力学的内涵,也有连续介质力学变形规律整体内涵。整体来看,节理的破裂更加符合“Mohr范式”,也更符合肖尔茨《地震与断层力学》这样的发展阶段,即不用考虑摩擦,不用考虑内部结构

的体制,目前随着断层力学的进步,不考虑内部结构构造是不合理的,劈理和糜棱页理这种塑性力学或韧性剪切力学所研究的体系和基于“Mohr范式”的理论会有很大的不同。

(6) 不同尺度的参数不同

不同尺度的研究所采用的参数不同,如摩擦系数问题,大尺度的摩擦系数很低,而小尺度的摩擦系数很大。“旧理论”(旧瓶)装上“新参数”(新酒)就是对这一点的概括。上文提到的原子结合强度、矿物强度、岩石强度三者差异较大^[115-116]。再如岩石的弹性模量问题,地球物理所用的弹性模量就是含有宏观缺陷岩体的平均弹性模量,这个平均弹性模量势必小于不含有宏观缺陷岩石的弹性模量,岩石泊松比在单块小岩石的研究中就会明显小于0.5,一般在0.2~0.3之间^[33],岩石表现出明显的体变特性,然而,在巨大变形或地球物理尺度研究时,岩石体变特性就不再明显。对于岩石波速的参数,地球物理领域的大尺度研究采用的是缺陷岩石的平均波速,小于真实小块岩石的波速。对于变形速度不同,材料的弹性参数和塑性参数也表现明显不同。不同尺度参数不同,其本身是由于不同尺度之间在物理上没有建立起来自洽的跨尺度理论联系和参数过渡,并在没有理论的基础上发展为不同尺度分别研究的格局,这中间往往存在研究群体的相互隔离,各自独立。

9 慢应变方面研究脉络及趋势

断层岩石的流变学研究需要包含三个部分(见图3),第一部分是均质材料流变学研究,第二部分是而非均质的(含显微组构)流变学,第三部分就是流变摩擦学研究。

9.1 均质流变方面研究

对于慢应变方面的研究,岩石力学方面存在岩石流变力学、流变断裂力学等领域,孙钧^[117-118]系统论述了岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展。近几十年,我国学者在均质流变学方面取得了大量的进展^[119-121],塑性力学方面也取得了大量的进展^[98,113,122-123],值得地质界学习和借鉴。尽管流变力学和塑性力学已经较为完善,但是这种整体属于连续介质力学体系的流变学并不能很有效地指导缺陷体相关理论。“流变断

裂学”^[119]由流变学向损伤体流变迈进了巨大的一步,但是,这种流变断裂学和其它断裂学一样,还不能服务于“大尺度”地质断层,尺度跨接还有相当大的困难。塑性力学相当程度上是以Mohr理论为基础的,如Frederick R. Eirich主编了系列《Rheology theory and application (1956~1969)》^[122],第一卷17~37页就已经以Mohr准则展开讨论。

解决慢应变问题的钥匙是否就是流变学?事实上流变学不等于慢应变,流变学服务于慢应变的能力还十分有限。慢应变问题的解决必然离不开流变学,如果以流变学为起点的话,该如何才能实现断层慢应变与物理理论的非经验性无缝连接呢?流变学并不能很自洽地解决“蠕变”和“松弛”这两个物理概念;宏观的蠕变和松弛通常伴随着物质内部微破裂“成族系”地发展,这种“成族系”地发展不同于微裂隙统一步调地发展。

慢应变的力学表现主要在以下方面:

①存在应变带,应变是不均匀的;

②破裂不是一根裂纹的发展,而是“裂纹族系”的系统协调一致的发展。“族系”可能既包含了一套裂纹体系中像树一样的裂纹展布,也包括了裂纹或族系前方存在缺陷的逐渐长大,从晶体尺度则表现为“位错塞积”、“晶格缺陷发射”等形式。

③“流变摩擦学”是一个等待着成形和发展的领域,这种摩擦理论表现为摩擦面附近一定宽度内的材料以流变形式来提供摩擦力,阻力大小和流变带宽度以及摩擦速度有关。在一定速度范围内,速度越大,卷入的流变带宽度越大,到达某个材料流变学最大剪切速度后,流变带内会出现强滑移带,强滑移带也可以是断层的前身。断层流变摩擦学则是流变摩擦学在断层领域的应用,从流变摩擦学到断层流变摩擦学还有较远的路要走。

在研究慢应变相关力学时,需要注意几个关系:

①宏观流变中包含着微观弹性。岩石材料或地质材料的显著特性是宏观上流变特性显著,而在微观层面则是弹性特性更加显著,大尺度变形和小尺度变形的组构模型存在差异。

②弹性中包含着塑性,塑性中包含着弹性。材料的塑性变形并不是在屈服之后才开始的,微

小的力产生更加微小的塑性变形,这些微小变形在地质慢应变过程中的累加变形相当可观。另一方面,在材料屈服之后,材料塑性变形过程中一直以应力的形式保持一种弹性变形,这种弹性变形和应力之间的线性关系依然存在。这些弹性塑性耦合关系可以在弹—塑性力学中找到相关的理解,但是,弹—塑性力学并不能完备地解决这些问题。

在慢应变流变学思想指导下,慢应变在微观层面的很多研究成果都是基于金属力学的研究成果,对于位错理论,这方面代表性如 *John Price*^[124]、*Barrett*^[125]、*Smith*^[126]、冯端^[127]等的著作较有参考价值;晶体位错规律是慢应变的重要基础内涵之一^[124,128-129],流变破裂学应充分吸收晶体位错理论,并建立流变破裂学中位错理论机理化模型,这两者还有很大的理论距离需要跨越。对于慢应变测试及外推问题,在 *Giansky and Payer* 主编的文集^[130]中有一定研究。

9.2 非均质(组构)流变方面研究

在慢应变研究方面,一个工作方向是借鉴和吸收塑性力学的相关成果,另一个工作方向就是需要充分借鉴主要用于变质岩区构造研究的显微构造学的相关成果,并把这些成果引入到断层力学慢应变变形力学体系之中。对劈理力学和糜棱岩相关力学的研究主要集中在显微构造学这个研究群体,对于显微组构的研究中,《*Deformation Microstructures and Mechanisms in Minerals and Rocks*》^[131]可谓是一部难得的专著。劈理力学和糜棱岩相关力学主要涉及到物质慢应变导致的变形叠加的结果,这种变形积累的结果和弹性变形以及脆性破裂形成的节理和脆性断层不同。

显微构造变形中的与力学相关的主要变形机制主要有以下三种常见原理:

①岩石破裂准则。岩石的破裂准则较多地被用于显微构造的研究中^[132-133],尤其劈理等破裂机制研究中,这种破裂准则是对传统力学体系的继承与发展,在显微构造中也得到应用和发展,这至少说明了:传统脆性破裂体制的相关理论可以用在深部劈理力学和糜棱岩相关力学中。

②摩擦滑动定律(frictional sliding laws)。这是一套以 *Amonton's Law*^[134]和贝尔利定律(*Byerlee's law*)^[12]为基本假设的摩擦学研究理论方法,*Amonton's Law*认为摩擦力和材料的名义接

触面积没有关系,贝尔利定律是岩石学界通过实验确定的剪切强度和正应力之间关系的定律。贝尔利定律可以认为属于一套静态内摩擦滑动定律,事实上,内摩擦和岩石表面摩擦不同,实验岩石脆性摩擦变形往往也体现这种规律^[133]。在岩石韧性变形体制内,韧性摩擦更多地体现了速率和状态依赖的摩擦滑动(Rate and state dependent frictional sliding),速率相关的摩擦定律可以应用于地壳中地震的成核^[135-136],这解释了为什么地震通常会在地壳15公里处成核^[137]。摩擦滑动定律研究体系下,典型的分形因子研究也经常作为重要的研究支撑手段^[138-139]。

③流变定律(flow laws)。流变定律涉及到晶内塑性变形、晶体生长的各向异性、晶间扩散与质量转移、扩散传质、晶粒尺寸敏感性蠕变等等内涵,这方面的研究在国外有很多代表性的研究^[140-142]。流变定律反映了更加复杂的力学机制,这种力学机制和脆性体制产生较大的差异。

显微构造相关力学的研究中,有很多有价值的研究^[143-145]。显微构造中,尤其在韧性剪切带中,剪切面和剪切方向是和外部应力场配合的重要研究内容,在熔融岩变形过程中存在的剪切面和剪切方向可能难以识别,因为它们没有留下任何微结构痕迹^[146],或者由于其流变各向异性,复合分层可作为剪切面^[147]。显微构造相关力学中,也需要应力和力学分析^[148-149],岩石或晶体塑性变形的分析则更有必要性,或更具特色,这种塑性变形分析的手段和方法^[150]值得关注,也值得以慢应变的视角融入到韧性剪切带和断层力学之中。岩浆页理或者高温部分熔融状态形成的页理或者流动组构有一定的特殊性^[151-152],虽和断层力学相去较远,但也并非没有联系,岩浆活动或者热液活动经常顺着断层运动的,也经常造成新断层的发展,此类热区断层的活动更具有热的特色。

对显微组构的研究是显微构造研究的关键,也是理解显微构造相关力学的必要途径,对于劈理的专项研究有一些比较典型的实例^[153-154],其它组构的研究也有很多有价值的文献^[155-157]。在显微构造研究中,也有实验类的研究方法^[158],构造物理模拟实验同样也是研究手段之一。断层力学中慢应变研究,实现的途径不仅仅是断层力学和塑性力学的唯象学理论结合,更重要的是将显微构造学的研究成果和宏观的断层力学联系起来,

其一糜棱岩本身是岩石圈深部断层的组成要素,其二显微构造学的研究成果在慢应变方面提供了一种微观变形学的研究范式。另外,显微构造和大地构造环境、区域构造环境以及断层环境的联系^[159-160]也是将显微构造学成果引入断层力学的重要手段。

10 断层摩擦方面研究趋势

10.1 摩擦学与断层力学的基本联系

在摩擦学领域, *Jerrald S. Durtsche*^[161]较好地研究了滑动摩擦, *Alberto Carpinteri*^[162]对摩擦定律的综述也有一定价值。摩擦学有三个基础性的定律:摩擦力和应力成正比,摩擦力和接触面积成正比,摩擦力和滑移速度相关。作为岩石材料的摩擦问题,理论界鲜有关心,需要从微观裂纹的摩擦问题讨论岩石的摩擦^[69,112,163-165],目前的研究仅从材料结构形体的角度讨论岩石颗粒或突起导致的摩擦因数构成,尚无法上升到地质体的尺度。摩擦学的理论和实验发展很不均衡,只是个年轻的领域,仅取得从接触力学上升到动压润滑的小幅度进展,摩擦学目前在岩石力学和地质领域影响甚微。接触力学是摩擦学中的力学含量相对较高的分支,地质界关心岩石摩擦主要是地震地质领域,黏滑摩擦成为地震地质领域重要的概念。接触力学在1882年由赫兹(*Hertz*)提出,系统的接触力学专著到1953年才在俄国首次出现,英译本在1980年出现^[166],1984年*Johnson*编辑出版更加完善的接触力学^[166],成为目前接触力学的主要参考书,足见接触力学发展很晚。具有现代意义的摩擦学的产生应该也是从*Hertz*的接触力学开始,最近十几年迅速发展的是纳米摩擦学。

Jirgen^[167]较为系统地论述了地壳深部摩擦强度,摩擦强度可以作为脆性破裂段摩擦性质转变的重要界限之一。*Sibson*^[168]的文献对于理解断层摩擦比较有价值,也是断层岩和断层力学的重要参考,对于深层次的断层摩擦学问题,初期的材料摩擦研究需要参考冶金学内容及所取得的成就^[169-170]。汪凌云《金属塑性变形力学》^[170]中对于应力应变及滑移线场理论的应用具有很高的参考价值,事实上,*Mohr*体系中还是有很多方法可以借鉴。摩擦学的研究方法经常关注分形问题^[171],分形问题是不同尺度材料之间摩擦性质联

系的重要纽带,不过,这些分形的问题主要是针对脆性原生缺陷,对于塑性变形则相去甚远,塑性流变体系下不同尺度的摩擦凸起如何变形还需要深化研究。

10.2 基于均质思想的流变摩擦学

从变形形式来讲,大尺度的岩石材料变形趋向于塑性,小尺度变形更趋向于脆性,其力学组构规律也不同,大尺度的塑性应力加载变形与小尺度的脆性应力加载破裂在地质体中很常见;在力学理论方面,两者适用于不同的力学体系,在地质实际方面,这两者却同时存在和同时进行。岩石的变形表现为宏观的塑性和微观局部的破裂同时发展,塑性变形和微观破裂同时吸收着岩石的变形,这两部分的变形该如何分离?这两部分变形在研究尺度进行“无级变速”过程中是否存在跃迁?脆性—弹性组构和塑韧性组构两种力学体系在具体研究中如何实现模型跨接将是一个难题。对于断层面摩擦问题,也一样存在小尺度的脆性损伤和大尺度的近断层面地带塑性变形量分离、耦合以及模型跨接问题。(脆性)弹性和(韧性)塑性两类模型的尺度跨接问题的力学范畴,除了涉及到脆性组构和韧性组构划分问题,也存在连续介质力学和损伤力学这两大力学理论体系之间的跨接问题。宏观尺度的变形和应力在三维空间分布及变化与连续介质力学理论及计算结果更加接近,而微观尺度的变形和应力在三维空间分布及变化与损伤力学理论及计算结果更加接近,这两套力学体系交互地应用于同一岩体中,处理方法及模型的跨接也会成为研究及处理的难题。

对于地质断层,不仅仅是研究初生断层的摩擦和变形,还需要关注断层内断层泥形成和逐渐泥化的过程,且泥化过程属于物理和化学的范畴。显微构造领域对断层泥关注相对较多,断层泥内的微构造特征与断层的蠕滑、黏滑有一定的关系^[172-173],而*S-C*组构和*Riedel*剪切或许是泥内滑移的重要形式之一,除了个别翻译文章和简单应用型文章以外,国内专门深度讨论*S-C*组构和*Riedel*剪切的文章非常稀少。在国外文献中,关于*S-C*组构和*Riedel*剪切方面有些进展^[174-175]。如果将断层泥内的微构造分布取一个物理统计平均,那么这个物理平均将是*S-C*组构和*Riedel*剪切的有机组合,这种有机组合有希望能更好地代表断层泥的平均摩擦系数。这个物理平均仅仅是微组构

内部摩擦阻力的平均,这种平均只有断层泥基本物理性质的意义,或者只对泥内微观尺度和特定泥厚度的断层有意义。还需要注意到,在塑性变形为主的宏观断层摩擦体系中,摩擦(阻力)系数是摩擦速度的函数,同时也是断层泥厚度的函数,更准确地说,是断层泥、两侧脆弱带、远场慢变形带三者共同构成的变形带厚度的非线性函数,这个非线性函数是和三者的各自微观摩擦物理平均、三者比例、过渡带存在与否等很多力学因素有关。通过以上分析,实际宏观断层的局部等效摩擦阻力和微观断层实验摩擦系数相差甚多,宏观断层的摩擦系数会比微观局部(由实验获得的)摩擦系数小很多,甚至存在相差达到一个数量级的可能,宏观断层和泥内某个岩块两者的摩擦组构的模型跨接依然会成为难题,简单地说,如果取一块断层泥研究摩擦系数,这个摩擦系数不能用来表示宏观断层的摩擦系数。

地震断层力学中,实验是重要手段,自马瑾在地震局工作以来,我国的研究成果一直较为卓著^[13-15,176-177]。对于岩石塑性蠕变问题,章根德的《岩石介质流变学》^[120]在模型上有深度的研究,国内外这类普通的文献或专著^[176-188]数量也不少,对于岩石摩擦本构关系的研究,何昌荣^[176-177]关注较多,但理论计算和实验数据之间模型空间尺度跨接方面研究还属于空白。上文主要关注的是“模型的空间尺度跨接”问题,模型的时间尺度跨接或者叫速度函数跨接也需要关注,毕竟“实验速率”不能等同于“地质速率”,这种依据速率曲线形成的关系模式外推到地质速率的时候存在产生跨数量级误差的可能性。研究中可能会遇到空间尺度跨接和时间尺度跨接并存的问题,时间、空间两类跨接的耦合问题显然增加了模型偏差的维度,也就增加了模型空间的不确定性。

10.3 基于非均质思想的组构摩擦学

文中提出的岩石组构摩擦学的概念,是相对于均质岩石思想体系下探讨流变学和流变摩擦学的思想而提出的。那么,由于岩石内部存在很多组构现象,尤其在变质岩区,如S-C组构、劈理、眼球状糜棱岩等等各种显微构造现象,这种微观上强烈的非均质性显然不能再用均质思想来研究。此类变质岩区的断层摩擦或者更有代表性的韧性剪切带的摩擦形式,更多地以岩石组构单元之间的相对滑移来完成断层运动,如果将这种理念融

入到断层摩擦学,则可以理解为“组构摩擦学”。那么,这种流变体制下的相对运动应该叫摩擦学吗?事实上这个问题已经进入广义岩石摩擦学的哲学范畴。可以从以下几个方面来阐述。

断层摩擦学需要解决在特定应力场提供的应力作用下,断层两盘的运动速度和摩擦阻力之间的关系。大概有两种摩擦学体系与此有关:一种是和摩擦速度无关的思想指导的摩擦理论,摩擦系数和速度无关,摩擦系数就是摩擦力和界面应力之间的比例系数;另一种是速度依赖关系的摩擦系数,即摩擦系数和摩擦速度有关系,在机械力学领域,随着摩擦速度的增加,一般摩擦系数减小为主,尤其在流体动压润滑体系下更是如此。然而在断层摩擦学领域,在地表浅层的摩擦可以出现与切入深度有关^[163-164]局部的随摩擦速度增加而摩擦系数减小的情况,在浅层的大尺度范围存在大块的岩石阻挡,这里面有该大块岩石塑性变形参与其中,断层滑动越快,摩擦阻挡越明显,摩擦阻力越不容易以岩石的流变来吸收,折算的断层摩擦系数就越大,因此摩擦系数整体趋向是随着速度而增大。在深部韧性断层摩擦过程中,剪切面受到环境应力中的正应力分量和摩擦阻力之间的比例系数仍可定义为“广义摩擦系数”,这段剪切摩擦系数仍然可用于宏观断层总摩擦系数的计算,也可以只是其中一段的摩擦系数。在深部韧性摩擦体制内,断层泥首先可以理解为均质流变体来计算摩擦系数,此时,剪切面受到环境应力中的正应力分量可以理解为断层泥的围压,而断层理解为一个均质剪切流变体。另外,如果断层泥断层岩内的组构现象明显,就可以探讨岩石组构的稳定性,以岩石组构的变形力成本和速度关系作为断层滑动阻力的评估方法,这是还有待于深入研究的新领域。断层组构摩擦学是新领域,比断层组构摩擦学更宽泛一些的“岩石组构(流变)摩擦学”需要大量研究来实现,这种“岩石组构(流变)摩擦学”的成果必将转化成断层组构摩擦学的一部分。

另外,在脆韧性过渡地区,断层泥内部存在诸多的破裂面,势必存在着真实的破裂面之间摩擦和断层泥内流变摩擦两个因素共同完成摩擦和阻力的情况。这种情况计算的摩擦系数的复合需要根据断层泥的实际情况来选择均质流变模型还是组构流变模型来和破裂面摩擦进行耦合。由于

一个深穿透的宏观断层从浅部到深部既有脆韧性有差异（能干性有差异）的岩层交替，又要经历整体上脆性断层段、脆韧性断层段、韧脆性断层段、韧性断层段的整体过渡，并且，有的断层泥段有内部破裂面，有的有内部显微组构，这就使得一个具体断层的情况变得很复杂。

11 断层泥形成理论的“天窗”——“断层泥粒迁移学”

断层岩的岩性本身是多样的^[176,179]，在地壳浅部，断层在演化过程中逐渐泥化似乎是一个总趋势，尤其在沉积岩中更是如此，因此，断层泥可以认为是断层演化的重要趋向，断层泥研究就显得很重要。与构造相关研究的各界中，对断层泥关注最多的要数地震地质领域，产生了不少可喜的成果^[176,179-182]，分析这些文献可见，国内学者对断层泥研究主要在于其物理性质，对老断层泥的研究包括以下几方面^[180]：

①测定断层泥样品的力学及物理性质；

②野外现场波速 V_p 、 V_s 、 Q 值和热流测量；

③微构造研究。包括摩擦性质以及发震机制，化学方面研究相对薄弱，主要是研究已经形成的断层泥对于摩擦和发震有什么作用，对断层泥是如何形成和如何演化的关注很少。

理论界对断层力学的研究不应缺失断层发展史这一重要内容，如需开展断层发展史方面研究，断层泥（粒）的颗粒或者物质迁移学就很重要。粘土断层泥是断层反复运动时两侧岩石破碎形成的，断层泥中粘土含量与断层生成时间有关，断层生成时间越长，粘土含量越多^[12,181]。断层泥成分主要为粘土矿物，如蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石等混合物，以及一些石英、长石、方解石碎屑等，其组成与断层母岩有关^[12]，并且，断层泥的发展存在极限粒度^[182-183]，一般从整个断层摩擦滑动过程来看，断层间矿物颗粒破碎仅为耗能的一个方面，即为摩擦功的部分，其它诸如颗粒移动和旋转、摩擦热、凸凹体作用等将共同分配整个摩擦滑动过程中的摩擦功^[181]。由于颗粒不断变细，其破碎所需耗功愈来愈大。因此，断层滑动摩擦的耗能形式将发生转变，主要以新组构（如 P 叶理、R 剪裂面）的形成逐渐取代颗粒细化而继续耗能^[182]。这用传统的解释^[12]自然可以解释得自洽，

以往的认识大致如此：粘土断层泥是断层反复运动时两侧岩石破碎形成的，这已成为地震界的基本认识。但从颗粒迁移力学相关的文献可知，地下颗粒可以运移，那么，就不能排除断层形成的过程中，断层泥存在外来的成分，是外源和本源共同作用的结果。

断层内断层泥的物质来源，可以定义为“断层泥（粒）迁移学”，在断层泥粒迁移的微观层面，该领域涉及到很多微观物理化学机理，这是地震地质领域所做的断层形成物理力学类实验所不能独立解释和支撑的。悬浮颗粒在多孔介质中沉积引起地层渗透率变化在很多领域已经得到证实。悬浮颗粒在多孔介质中沉积引起地层渗透率变化模型早期主要以经验和半经验方程为主，其中由 *Kozeny* 于 1927 年首次提出并由 *Carman* 进行模型修正的 *Kozeny-Carman* 方程最为著名^[184-185]。这个具体参数也有大量的实验研究作为支撑，这些实验中也有专门针对泥岩的实验^[186-187]。对断层泥的形成来讲，可以理解为颗粒释放过程、颗粒迁移过程和沉积（含堵塞）过程三个重要步骤。对于颗粒释放过程，*Bedrikovetsky*^[188] 等人基于力学平衡建立了滤饼或岩石孔隙表面颗粒释放模型，该模型考虑了孔隙表面和水流对颗粒的拖拽力、静电力、升力和重力的力矩平衡，力矩平衡决定了作用在颗粒表面的拖拽力和法向应力的比例关系^[189]。对于沉积（含堵塞）过程，则涉及到相对复杂的颗粒尺度的对比关系，以及复杂的化学理论，如吸附作用^[189]，也涉及到溶液中物质的过饱和和迁移过程，甚至需要考虑生物碳颗粒在饱和多孔介质中的迁移与滞留^[190]。对于堵塞过程，其主要堵塞方式有捕获、沉积、吸附^[189] 这 3 种形式^[191]。*Yao* 等^[192] 于 1971 年率先提出收集器收集效率是拦截作用、沉淀作用和扩散作用的叠加结果^[193]。对于石油行业的经验，也有可借鉴之处^[194-195]。岩石基质扩散^[196]（*Matrix diffusion*）也是重要的概念，最近 20 年，水岩相互作用^[197] 的研究也逐渐繁盛，这些理论说明地下岩石矿物及化学物质迁移是更加复杂的物理化学过程。

“断层泥（粒）迁移学”领域可以从以下几个方面借鉴并拓宽研究思路：

①石油开发领域有“颗粒迁移”的例子，这方面的知识体系涉及到油藏“出砂”^[198]、“胶结物堵塞喉道”^[199-200]、“速敏”^[201]等常见的石油工程

概念,这种以石油开发中的“储层保护”^[194-195]为目标的研究成果为研究“颗粒迁移”相关现象、知识以及理论体系的建立打下了基础;

②基于应力矿物学^[202]理论,在压实和应力作用下,对矿物的物质迁移展开研究;

③基于水热矿物结晶学^[203]理论;

④基于矿物压溶理论^[204];

⑤基于成岩作用理论^[205]研究,吸收沉积学中成岩作用的相关成果;

⑥基于粘土矿物^[206-207]理论研究,建立粘土矿物的物理化学机制;

⑦基于物理化学的理论研究颗粒的溶解、饱和、析出等规律,如PH等影响饱和度的物质平衡体系。

在宏观层面,该领域涉及却不限于以下研究思路:

①泥岩涂抹效应,如吕延防^[48]研究的结果在泥岩盖层封闭油气方面有很好的应用^[46,208];

②断层及破碎带渗流理论,断裂带破坏带渗透率有时比断裂核部和原岩处的渗透率大1万倍^[52],这种破碎带成为流体运动和泥粒运动的主要通道;

③断层碎裂带碎裂岩孔隙尺度分布、容泥通道及容泥体积模型;

④断层带的分段泥化特征差异及控制因素,包括深切断层的深度差异导致分段泥化特征差异及控制因素的不同,也包括同一断裂不同大地坐标位置(同深度)下由于岩性不同或者应力不同导致分段泥化特征差异及控制因素不同;

⑤断裂带多条断裂组合在空间上的差异对流体运动及泥粒运动的影响,包括容泥通道及容泥体积方面的差异。

这些方面的研究宗旨是以宏观控制因素作为主要研究内容,并通过与实验配合的微观泥粒迁移物理化学因素的理论描述,建立起一套微观与宏观相结合、理论与实验相结合、理论与经验相结合的“断层岩成因学”理论体系,在这方面,国内外的研究都非常薄弱。

需要注意的是“断层泥迁移学”和“断层泥粒迁移学”是有差异的,如吕延防的“泥抹效应”^[48]属于“断层泥迁移学”,旨在研究宏观泥岩的泥的整体运动,而单个粘土矿物颗粒等在断层内随着水的迁移属于“断层泥粒迁移学”范畴。

上文所提的泥“粒”并非仅限于物理上的悬浮颗粒,也包括化学上的溶质颗粒,以溶解态随着水运动而运动。

12 断层力学研究的未来发展方向

针对以上断层力学研究过程中存在的问题,未来断层力学的研究需要关注以下问题。

(1) 断层闭锁的概念需要重新考虑,传统断层摩擦学计算得出的闭锁无法实现高速滑动,可以超慢速塑性滑动,超慢速塑性滑动可能是大多数断层活动的主要形式,地震发震则可能是超慢速塑性滑动条件下积蓄能量的失稳导致的快速非闭锁滑动。

(2) 即使是非闭锁的滑动,形如S-C组构和Riedel剪切等模式依然是摩擦面滑动和块体塑性变形并存,这种断层泥处于脆韧性过渡阶段的摩擦模式在断层泥内很普遍,此深度的原岩及其新裂纹则是脆性的,体现了原岩和断层泥的脆韧性差异。

(3) 裂纹发展动力在于应力和裂纹面的角度关系,传统认为裂纹发展的阻力在于裂尖的应力集中因子,也就是断裂力学所论述的I, II, III型裂纹的临界扩展、临界应力集中问题,这不能直接移植到有摩擦的贯通裂纹领域,更不能直接移植到断层领域,贯通裂纹与和它配套的翼裂纹及分支裂纹之间的发展交互或时间弛豫,是决定其发展阻力和发展速度的关键,裂尖发展动力受翼裂纹和分支裂纹竞争的限制,发展速度受翼裂纹和分支裂纹竞争的拖慢,新旧理念对于裂纹发展阻力和发展速度的量级差异可能很大,大尺度断层的发展速度也受到这两种限制,这部分内容是难点,如果能够突破,则可以建立裂纹和断层扩展速度模型,就有希望和超慢地质演化速度相配合。

(4) 在断层泥方面,S-C组构和Riedel剪切是泥内滑移的重要形式,而广义的Riedel剪切体系内的R、Y、S、P等破裂模式虽然都可以存在,但在不同的环境下主次关系不同,需要更加系统地研究这些主次关系的成因,成因差异既可能属于动力学环境差异,也存在时间先后。如果将断层泥内的构造型式取一个统计平均,那么这个平均将是S-C组构和Riedel剪切的有机组合,这种有机

组合有希望能够更好地代表断层泥平均摩擦系数。

(5) 岩石组构摩擦学将成为未来重要的研究方向, 显微构造学可以给理论界丰富的组构思想, 但这些组构的稳定特征、流变特征、广义摩擦特征都在等待被深入探究, 物理力学理论的建设 and 实验观测都非常必要。

(6) 从以上阐述的理念可以发现, 未来研究的立足点是以“慢应变”和“大尺度”为基本点的摩擦延展力学, 需要建立“新概念”断层力学体系, 并力求发掘断层力学的全新视角。

(7) “机理化”和“量化”发展诉求需要基于岩石物理的断层机理和量化模型的发展与宏观的构造应力场进行深度融合, “机理化”和“量化”的理论起点不是 *Mohr* 圆, 而是断层内部构造的“机理化”和“量化”, 是基于断层泥摩擦学、岩石裂纹破裂学、断层“慢应变”和“大尺度”摩擦学、接触力学、损伤力学等的融合。

13 岩石力学界在断层力学领域的作为在哪里

如果将断层力学相关的领域分为两个学术单元, 一个是不太具备丰富力学基础的地质学界, 一个是具备力学建设能力的岩石力学界, 那么微观方面的模型建设任务无疑就落到岩石力学界。岩石力学的进步本身举步维艰, 虽年文章量汗牛充栋, 但在断层力学领域理论原创型内容越来越少。岩石力学本身是多范式的力学体系, 岩石力学学者要在断层力学领域有所发展, 就要学者们丢掉或弱化 *Mohr* 范式, 开展岩石摩擦学、岩石流变学、断层岩物理化学等方面研究。可以开展的工作包括但不限于以下内容:

(1) 断层微观机理方面研究。

对于断层微观机理, 需要实现微观裂纹和宏观断层之间的本质物理差异, 并从纯粹力学角度建立断层机理化模型, 裂纹扩展族系之间关联需要得到体现。慢应变断层延展力学、摩擦力学相对于传统断层力学更加符合地质断裂实际, 能够更好地解释地质问题, 和传统机械力学不同。

(2) 断层“塑性摩擦”及其变形速度分带方面研究。

所谓断层“塑性摩擦”, 是指断层的摩擦是以非滑移面岩石及凸起的塑性变形为主要滑移量的

摩擦变形形式, “塑性摩擦”方面需要关注局部突起的流变学研究, 以及速度依赖性。在一个断层带中, 离断层核心向两侧的变形速度可能分带, 不同速度梯度带中的塑性变形程度不同, 岩性差异和塑性变形差异应该具有一定的相配性。

(3) 断层岩组构的力学性质及其岩性差异研究。

断层内的岩性主要可以划分为胶结成岩和未胶结成岩两大类, 胶结成岩的有: ①强片理化糜棱岩; ②弱片理化或无片理化的胶结碎裂岩; ③弱片理化或无片理化的假玄武玻璃; ④富泥非胶结碎裂岩(断层泥); ⑤贫泥非胶结的碎裂岩(超碎裂岩、中碎裂岩、原碎裂岩), 超碎裂岩也经常被称为断层泥, 而中碎裂岩、原碎裂岩经常被称为断层角砾岩。一般地震地质领域研究的是断层泥, 而对于胶结类断层岩较少关注。

断层岩并不是均质岩石, 不同研究尺度的断层岩所包含的组构类型不同, 其组构特征也不同, 不同断层岩组构具有不同的力学性质, 其性质具有宏观规律的统一性和具体参数的差异性。断层岩的力学性质需要针对糜棱岩、碎裂岩、假玄武玻璃、断层角砾岩、断层泥分别展开研究; 目前, 针对这类岩性的国内研究很少, 主要关注群体是构造地质学界, 并以研究显微构造学者为主, 对力学问题则鲜有关注, 因此, 这是构造地质界和岩石力学界可以共同关注的领域。断层岩组构的力学性质可以包括摩擦力学、塑性变形力学、摩擦阻力的速度依赖性、显微组构规律、不同显微组构摩擦变形差异及滑移临界值、不同温度应力条件下片理化快速发育的临界剪切速度梯度、快速片理化前后摩擦性质变化及不同带之间的速度梯度分配等等。在构造地质学界, 断层岩中各个岩性的研究程度差异较大, 研究较多的是断层泥, 以关注地震事件的学者占比重较大。断层泥形成和演化研究还没形成系统理论, 对其成因的认知目前还处于模糊状态, 其它断层岩类的相关研究相比则更加薄弱。

(4) 尺度跨接模型研究

地质断层和岩石裂纹之间存在多个数量级的尺度跨越, 力学模型之间存在尺度跨接问题, 在研究力学模型中, 不同尺度模型之间的跨接问题既包括基于统计的拟合、平滑、对比, 也应该包括纯粹力学模型建立, 应力求实现物理力学角度

的模型自洽性,统计拟合只能是为这些力学自洽性提供验证和参数确定。

(5) 构造“应力学”研究

如果说存在“岩石应力学”这样一个领域,那么,理想的“岩石应力学”就不仅仅是应力向量描述和构造应力场。“岩石应力学”应该是一个动态场作用下的“应力变动学”,是弹性应力场、塑性变形场、时间累积效应三者耦合作用的结果,也许不是用“应力路径”^[31]的概念和理论就可以简单表述。在“慢变形岩石应力学”中,岩石变形在特定平衡应力下保持一定的弹性变形,并存在持续塑性变形的累加,局部热应力变化会干扰更大区域应力场变化,流体压力场变化也导致岩石骨架应力动态变化,骨架应力、流体压力、热应力相互耦合和变动是深部岩石的主要特性。“构造应力学”是在区域岩石框架下的应力分布及动态变动,至少涉及到区域应力积累,区域塑性波动下的应力响应,岩石层能干性差异导致的应力与应变响应差异,岩石固结应力、残余应力在应力变动下的响应,脆弱面的岩石应力场扭曲、弱化、改向,等等内容。构造应力方面有不错的研究成果^[209-211],这个领域的研究发展很缓慢。“断层构造应力学”关注断层及附近变形带对应力的响应,断层内部组构控制下的应力体制及变动体制,断层附近应力数值大小的变化(以应力小于周围应力为主,可以简称为“应力弱化”)及应力方向的改变。这个领域需要解决应力是否能够积累、如何累积?断层附近的应力变化及方向改变在国外有较多进展^[212-214],在国内除了苏瑞生、黄润秋团队^[210]以外目前仍鲜有关注。

(6) 断层启动与渗流问题

断层启动可以从两个层面来理解,一个是构造运动导致的断层启动,可以理解为塑性应力波的加载或卸载导致的断层带沿着与断层面平行方向的错动,与断层附近应力大小变化以及应力方向的改变相耦合。另一个是由于流体压力变化导致断层带沿着与断层面垂直方向张开,这种流体压力导致的断层活动对油气田开发^[208]、断层渗流^[48]、断层封闭性能^[46,208]等均有较大影响;这种运动模式下的断层渗流是流体压力场和断层周围骨架环境应力场之间的响应及耦合。从物质变化角度讲也是断层及原岩之间物质交换过程;从原岩的裂纹损伤发展角度来讲,这种流体的变化也

是裂纹扩展或闭锁的诱导因素,断层破碎带和裂纹损伤带随时间的演化在这种“开合”中得到体现。更严格地讲,构造运动导致的断层启动也是构造应力导致塑性波、流体压力运动响应下断层带内构造及流体的慢速变化。

14 宏观断层研究可以怎么做

作为与宏观地质体更加接近的构造地质学界,开展有一定力学内涵的断层力学研究并不容易,我国急需培养一批有很好的数理力学功底的结构地质学家,让构造地质学从解析走到机理化、力学化、定量化,要实现这一目标至少需要和岩石力学家的学科领域体系相融合。就目前构造地质学界的现状来看,可以开展的工作包括但不限于以下内容:

(1) 断层究竟如何延展

大尺度断层如何延伸?这是构造地质学界的任务。断层延展的主要阻力是断层带内的摩擦,断层尖端的摩擦总阻力较小。断层分段摩擦研究较为容易。地质学立足于现场的研究需要关注断裂尖部裂纹的几何构型,这种尺度的研究和岩石内部裂纹显然不是一个尺度,这个尺度的研究应主要侧重于解决断层尖端发展的定向问题。同时也需要关注断层尖端的节理破坏追踪问题,断层尖端损伤带的整体构型问题,断层尖端损伤带和应力场构型之间的关系问题,断层尖端损伤带发展为小断层系的模式,小断层系贯通问题,浅部弱胶结岩、深部强胶结岩、深部塑性岩石中断层尖端的组构和延展差异问题。断层闭锁的宏观力学规律也需要重新认识。以上是大尺度的断层如何扩展的问题,对于小尺度断裂,有相应的成核理论^[215]可以支撑,小尺度成核问题更加接近岩石力学学者的研究范式,其在大尺度方面的应用还需要做“服水土”方面的确证和改进。

(2) 断层与膝折带的差别及“逢弯必断”地震解释问题

断层是非连续面,而膝折带则是连续面,断层形成与膝折带形成在力学上会有很多异同点,这些异同点需要从机理差别和主控因素方面进行研究与确定,膝折带有时候也会成为断层的前身。郑亚东在全国构造地质会议上批评盆地构造界对于盆地地震剖面“逢弯必断”的“默认解释准

则”，认为很多盆地深部的膝折带被解释成了断层，这种误解只是局部的，这是由于理论界无法提供断层与膝折带准确的几何构型规律所致，导致那些并非大区域的非典型的膝折带被解释成断层，这与地震解释工作中难以对深部岩石变形的脆性和塑性判断有关，况且，岩石究竟表现为脆性和塑性还与变形速度有关。

(3) 断层岩的组构差异性及其统一性问题

与岩石力学界的关注点不同的是，构造地质界的学者更加关注断层岩内的结构构造，目前国内专门深度讨论 *S-C* 组构和 *Riedel* 剪切的文章非常稀少，国外有很多进展可供借鉴，但是，国外的研究离公认的定性机理解释还有一定的差距，定量或依赖严格力学机制的机理解释则更加遥远，断层泥以外的断层岩力学机理化的距离更加远，显示了研究的不均衡性，这方面也需要构造地质界来逐步弥补差距。前文提到的断层岩内部的“组构平均化摩擦”问题的半定量解决也需要很大的跨越和工作量。在不同尺度断层岩的组构差异以及应用方面影响领域，国内有一定数量的研究成果^[216-217]，这些成果大多是基于实验和野外观测的统计研究，尚不能建立在力学机理的基础之上，还有待于理论界在力学机理方面取得长足进步。对于断层内部构造，国外有不错的研究成果^[218-221]，值得我国深入学习。

(4) 盆地及造山带内断层系发展的力学关联与宏观构造应力场

盆地及造山带解析是我国目前构造地质界两个重要的学术活跃点，工作方法以 *Ramsay*^[16] 为代表的解析构造学为主，解析构造学通过平衡剖面技术实现构造剖面的“量化”恢复，这种体积或面积守恒理论并无多少力学内涵，尚不能发展为岩石力学及断层力学的机理化理论，只能建立盆地及造山带内断层系发展的几何学关联，尚不能建立盆地及造山带内断层系发展的力学关联。盆地和造山带内的断裂系统如何在构造应力场的约束下实现断层的延展，目前的理论很难描述出断层附近应力变化和整体构造应力场之间的力学响应。

(5) 显微构造研究如何上升到大尺度

显微构造学者是最关心岩石组构学的群体，岩石组构学主要解决的是断层的构造历程问题以及断层的滑移方向问题，对断层摩擦相关的

力学分析则基本不关注，而显微组构大量的研究成果需要引入到断层力学之中。严格地讲，岩石组构并不都是显微构造尺度的，但显微构造学大量的文献积累却是岩石组构学中最重要文献来源，如何将显微构造学的成就引入断层力学是一个很有意义的发展方向。大概发展方向有两种，一种是显微构造学的唯象理论成果上升到大尺度断层力学理论之中，另一个则是肉眼可观察的岩石组构可以引入到岩石力学实验之中。

(6) 构造地质学和构造物理学的协同发展

断层力学发展是岩石物理学家和构造物理学家共同的事业（见图2），同时也是（构造）地质力学学家可以参与的，断层力学要发展，对岩石力学为起点的岩石力学家来讲，需要抓住“大尺度（跨尺度）”和“慢应变”这两个时空差异要素进行理论提升，对构造物理学家和地质力学学家来说则要放弃 *Mohr* 圆这个捷径，从岩石微观机理上入手来建立纯粹理论的断层力学模型。如果将“地质力学”（或构造物理学）作为教学目标，构造地质学中力学内容的教学起点就不应该是 *Mohr* 圆这个“捷径”，而是应该先开展岩石力学教育，甚至需要具备连续介质力学^[222]和损伤（介质）或岩体力学^[223-224]基础，这或者也是我国地质专业需要开设力学相关课程的内在要求，当然，这个地质专业相关力学不仅仅是李四光所开创的“地质力学”。

15 近期研究可考虑的着力点

断层力学的发展是一个系统工程，需要把断层力学当成一门基础性力学来看待。全面开展断层力学的理论建设需要耗费2~3代人的努力才可能趋于完善。从近些年的研究需要来看，岩石力学界和构造地质界需要精诚合作，首先做好浅层次的基本理论建设，最好是从微观机理方面开展基础理论研究。

虽然这些认识也只能是片面的、支离破碎的，但期望能起到提纲挈领的作用。根据近几年的研究需要，不妨从以下研究思路开展工作，立足于针对地质慢应变特点的摩擦闭锁、裂纹扩展的阻力因素、塑性摩擦变形、断层岩（泥）内构造的摩擦形式研究，优先开展断层带摩擦学研究，再

以摩擦学为基础开展宏观尺度的单一断层、断层系、盆地造山带内断层系统研究 (见图 4), 当然,

以上发展还不属于完全机理化力学模型, 完全机理化力学模型的发展任重而道远。

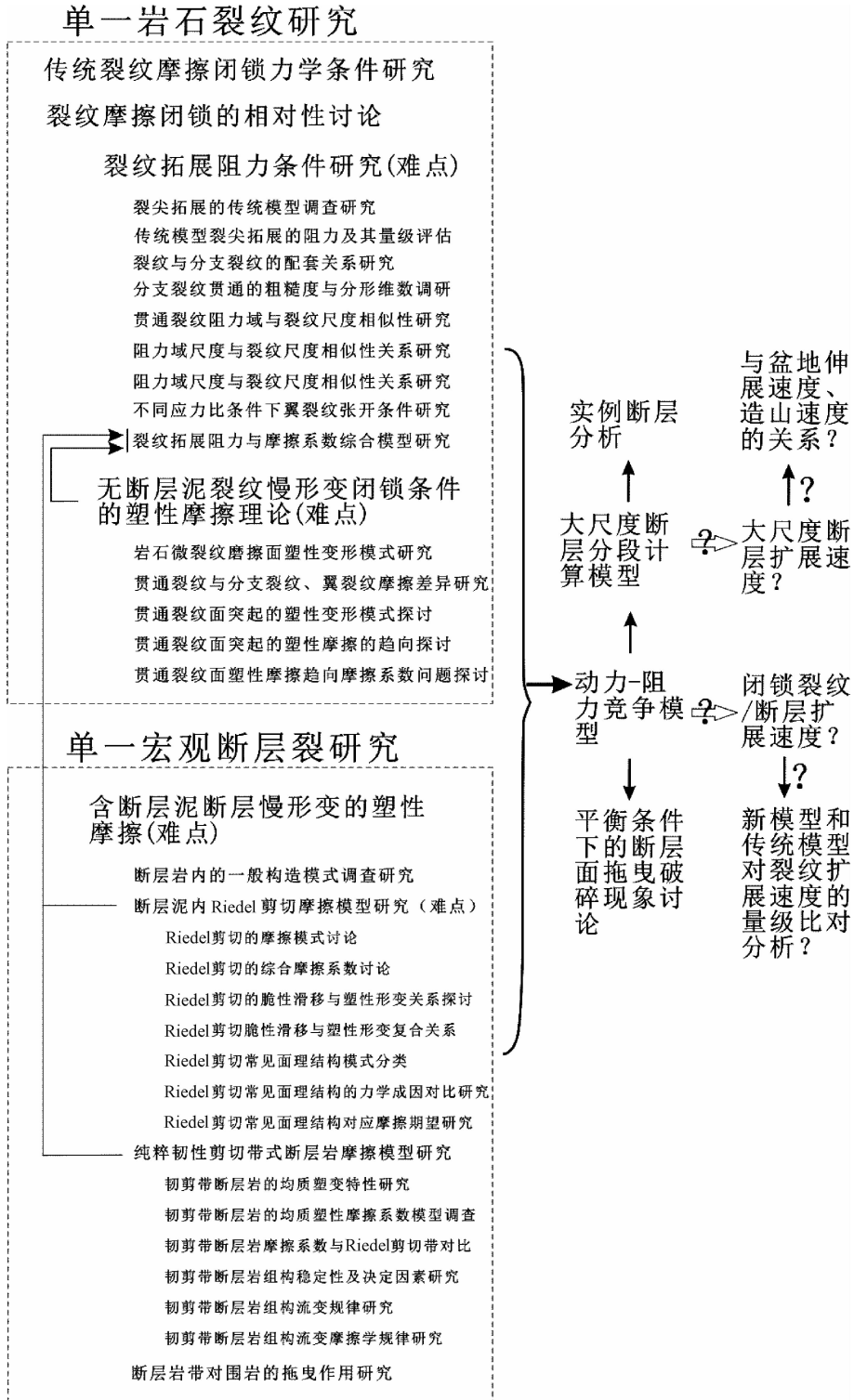


图 4 近年断层力学微观 (摩擦) 机理方面基础理论研究

Fig. 4 Basic research aspects of the microscopic mechanism of fault (friction) mechanics in recent years

从理论发展的意义来讲, 短期内能够开展的慢应变断层摩擦学研究应立足于跨空间尺度的断层研究, 权且称其为“慢应变体制下断层摩擦与

延展力学”, 具体研究的开展也应立足于学科领域的交叉, 研究成果也将有希望促进相关性领域的发展。“慢应变体制下断层摩擦与延展力学”和其

他领域之间联系如图 5 所示。

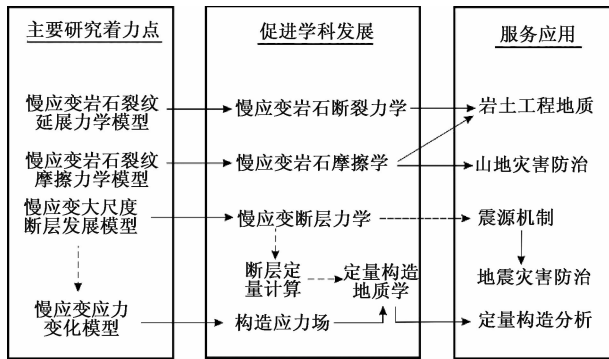


图 5 “慢应变体制下断层摩擦与
延展力学”与其它领域之间联系

Fig. 5 The relationship among “the fault friction and extension mechanics under the slow-strain system” and other academic fields

16 断层力学研究的“混沌态”和发展途径

目前,断层力学理论“科研性”越来越强,离教学培养学生越来越远,或者由于理论涉及面太宽,材料越来越多,即使是国外的研究成果,也是非常分散地分布在大量地质、地球物理、力学、岩土力学等大类的诸多杂志上,这对于科研人员来讲,大概也只能花费数年之力而了解一个方面的研究历史、脉络以及前沿进展;在科研领域,越来越难以出现能够系统综合这些理论观点的学者,而导致研究和断层力学相关的人员大多都属于“有一技之长”,越来越难以形成非常有效的能够涵盖现今国际最新前沿的《断层力学》专著,而对于广大学生来讲,越来越难以看到一本全面的《断层力学》专著,更无法形成有力的教材。这种高度分散的资料分布状态加剧了各个领域之间沟通难度,让系统总结断层力学的成本越来越高,因此,在国际学术界,需要有新一轮系统总结。这种纷繁复杂与断层力学相关文献汗牛充栋的现象,一方面代表着断层力学本身的繁荣,另一方面,这种状态也导致了断层力学进步艰难,以及涉入其中的学者难以看到断层力学的理论框架和全貌,因此,断层力学发展处于过分分散的不同学科之间分别散落的某种“混沌态”。从这个角度讲,这种发展艰难首先存在于世界范围,且在我国尤为突出,这大概是我国断层力学相对落

后的重要原因。

讨论至此,可以粗略地发现,我国断层力学发展相对滞后有以下三个原因:①由于地质力学退化是全国范围的一个趋势,爱好者和建设者从意识形态的角度越来越少,学者源及学习者供给均不足;②学科之间跨越成本太高,我国学者和广大学子也无法看到断层力学相关体系的理论全貌,更不能综合方方面面理论内涵,出现“只见树木,不见泰山”的现象,理论学习和理论研究双双遇到瓶颈;③国际上综合性质的断层力学专著过于匮乏,研究者做全面研究的调研成本已经非常高,想系统学习断层力学的学习者学习成本更高得不能想象。

断层力学的未来进步,既需要不基于 Mohr 范式的理论创新,也需要有一个系统总结的过程,这个创新过程需要在特定研究尺度继续创造高深理论的研究人员,进一步将断层力学推进到“物理”和“化学”的新高度。同时也需要一些学者将“走向统一理论”作为纲领,继续完善“统一理论”。在系统总结方面,为了服务于人才培养和文献获取的便利及系统性目标,目前非常需要一部能够系统总结断层能力学理论体系的专著出现,得以让广大研究者和学习者开阔视野,这个专著不仅是理论和观点的集合,还应该包含断层力学所蕴含的哲学思想差异、研究范式对比、理论基础差异、理论局限、理论冲突等内容,这应该是一部哲学视角指导下的理论解构与各理论之间优劣选择及适用性分析的专著。同时,在学习界,广大学生需要系统化的“教材”。上述的这种状态不仅仅是我国和世界的差异,也是断层力学在世界整体的发展缺陷,但我国是哲学大国,对于断层力学发展涉及的理论体系和哲学范畴研究还是有可能会迎头赶上的。

17 结论

(1) 传统断层力学以岩石断裂力学和摩擦学为起点,直接将裂纹扩展、摩擦这种米级尺度的研究内容推广到断层中,从岩石力学微观理论到构造地质学之间的尺度跨越中所遗失的环节是岩石裂纹和含断层岩断层之间的两大差异,一个是空间上的尺度差异,一个是变形速度上的“时间”差异,尺度差异方面,地质学概念下的断层已经

带有“大尺度”概念,而变形时间上的差异方面,地质断层活动属于“慢形变/慢应变”时间范畴。

(2) 断层力学长期处于发展的“三不管”地区,作为地质界的“公共产品”发展成为地质学领域的一块“荒地”。机理化和定量化向宏观尺度和慢应变尺度的延伸是未来的发展方向。

(3) 从外力研究断层—构造应力场—滑移线场研究断层的发展轨迹就是逐渐简单化、实用化的过程,实用化和简单化的应用为地质问题解决提供了途径,但是也阻碍了理论定量模型的发展。

(4) 断层力学要发展,对岩石力学为起点的岩石力学家来讲,就需要抓住“大尺度”和“慢应变”这两个时空差异要素进行理论提升,而对构造物理学家和地质力学学家来说则要放弃 *Mohr* 圆这个捷径,从岩石微观机理上入手来建立纯粹理论化的断层力学模型。

(5) 我国目前的地质学教育存在力学基础逐渐退化,构造物理教育缺失的现象,无法实现地球物理和地质学有效结合的局面。应该将“地质力学”(含构造物理学)作为教学目标。

(6) 均质岩流变学和非均质(组构)流变学都需要渐次引入到断层力学领域,据此会产生“基于均质思想的流变摩擦学”和“断层岩组构摩擦学”两个新概念理论方向,两者结合发展才能解决断层慢应变摩擦问题。

(7) “广义断层力学”和“狭义断层力学”在内涵上存在巨大差异,“广义断层力学”体系应用“统一发展,关注联系”的研究方法,“狭义断层力学”体系应用“分散发展,各自攻克”的研究方法。

(8) 先存脆弱带往往影响了断层附近的应力场展布,“应力制约论”是较大尺度空间未来重要研究方向。

(9) 在尺度方面,相似律是一个相对概念,需要深入探讨与构造物理模拟相关联的尺度相似律何时成立,何时不成立?不同尺度关注点不同,解决问题的理论不同,采用参数不同,这加剧了研究群体的相互隔离。

(10) 以往一般认为粘土断层泥是断层反复运动时两侧岩石破碎形成的,事实上地下颗粒可以运移,在断层泥形成理论方面需要重视“断层泥粒迁移学”。

(11) 岩石力学界在断层力学领域的工作可以

主要从断层微观机理、断层“塑性摩擦”及其变形速度分带、断层岩组构的力学性质及其岩性差异、尺度跨接模型、“构造应力学”、断层启动与渗流等方面开展研究。构造地质界在断层力学领域的工作可以主要从断层延展机理、断层与膝折带的差别、断层岩组构差异性及其统一性、盆地和造山带内断层系发展的力学关联及宏观构造应力场等方面展开研究。

(12) 短期内理论界应开展类似“慢应变体制下断层摩擦与延展力学”方面研究。

(13) 我国断层力学相对发展滞后有学者源及学习者供给不足、学科之间跨越成本太高、研究者做全面研究的调研成本太高等原因。

参考文献/References

- [1] Scholz C H. 地震与断层力学 [M]. 马胜利,译. 地震出版社,1996: 1~471.
Scholz C H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting [M]. MA Shengli, trans. Beijing: China Earthquake Press, 1996: 1~471. (in Chinese)
- [2] Anderson E M. The Dynamics of Faulting and Dike Formation with Application to Britain [M]. 2nd ed. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1951: 1~206.
- [3] Richter C F. Elementary Seismology [M]. San Francisco: W H Freeman, 1958: 1~768.
- [4] 黄福明. 断层力学概论 [M]. 北京: 地震出版社, 2013: 1~332.
HUANG Fuming. Introduction to Fault Mechanicas [M]. Beijing: China Earthquake Press, 2013: 1~332. (in Chinese)
- [5] 陶振宇. 节理与断层岩石力学 [M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1992: 1~279.
TAO Zhenyu. Mechanics of Joints and Faults [M]. Beijing: China University of Geoscience Press, 1992: 1~279. (in Chinese)
- [6] B K 阿特金森. 岩石断裂力学 [M]. 尹祥础,译. 北京: 地震出版社, 1992: 1~595.
Atkinson B K. Fracture Mechanics of Rock [M]. YIN Xiangchu, trans. Beijing: China Earthquake Press, 1992: 1~595. (in Chinese)
- [7] 湛文武. 断层岩的工程性质与环境效应 [D]. 兰州: 兰州大学, 2004: 1~188.
ZHAN Wenwu. Engineering properties of fault rocks and environment effect [D]. Lanzhou: Lanchou University, 2004: 1~188. (in Chinese)
- [8] 李兴唐. 活动断裂研究与工程评价 [M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1~288.
LI Xingtang. Activity Faults Research and Engineering

- Evaluation [M]. Beijing: China Geology Press, 1991: 1 ~ 288. (in Chinese)
- [9] 马胜利, 马瑾. 我国实验岩石力学与构造物理学研究的若干新进展 [J]. 地震学报, 2003, 25 (5): 528 ~ 534.
MA Shengli, MA Jin. Recent progress in studies of experimental rock mechanics and tectonophysics in China [J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25 (5): 528 ~ 534. (in Chinese)
- [10] HE Changrong, WANG Zeli, YAO Wenming. Frictional sliding of gabbro gouge under hydrothermal conditions [J]. Tectonophysics, 2007, 445 (3~4): 353 ~ 362.
- [11] 丁文镜. 地震预报的力学问题 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 1 ~ 96.
DING Wenjing. Mechanical Problems in Earthquake Prediction [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 1 ~ 96. (in Chinese)
- [12] 邵顺妹. 断层泥研究的现状和进展 [J]. 高原地震, 1994, 6 (3): 51 ~ 56.
SHAO Shunmei. Present condition and progress of fault gouge research [J]. Earthquake Research in Plateau, 1994, 6 (3): 51 ~ 56. (in Chinese)
- [13] 马瑾, Moore D E, Summers R, 等. 温度压力孔隙压力对断层泥强度及滑动性质的影响 [J]. 地震地质, 1985, 7 (1): 15 ~ 24.
MA Jin, Moore D E, Summers R, et al. The effect of temperature, pressure and pore pressure on the strength and sliding behavior of the gouges [J]. Seismology and Geology, 1985, 7 (1): 15 ~ 24. (in Chinese)
- [14] 周永胜, 蒋海昆, 何昌荣. 不同温压条件下居庸关花岗岩脆塑性转化与失稳型式的实验研究 [J]. 中国地震, 2002, 18 (4): 389 ~ 400.
ZHOU Yongsheng, JIANG Haikun, HE Changrong. Experiments of brittle-plastic transition, modes of instability of Juyongguan granite at different T-P condition [J]. Earthquake Research in China, 2002, 18 (4): 389 ~ 400. (in Chinese)
- [15] 缪阿丽. 几种模拟断层泥摩擦滑动速度依赖性转换的实验研究 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2011: 1 ~ 81.
MIU Ali. Experimental study on velocity-dependence transition of friction for simulated fault gouges [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2011: 1 ~ 81. (in Chinese)
- [16] Ramsay J G. 岩石的褶皱作用和断裂作用 [M]. 单文琅, 译. 北京: 地质出版社, 1985: 1 ~ 387.
Ramsay J G. Folding and Fracturing of Rocks [M]. SHAN Wenliang, trans. Beijing: China Geology Press, 1985: 1 ~ 387. (in Chinese).
- [17] B 雅罗谢夫斯基. 断裂与褶曲构造学 [M]. 李树菁, 译. 北京: 地震出版社, 1987: 1 ~ 233.
Ярошевский В. Petrotectonic of Faults and Folds [M]. LI Shuqing, trans. Beijing: Earthquake Press, 1987: 1 ~ 233. (in Chinese)
- [18] 马杏垣. 解析构造学 [M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1 ~ 463.
- MA Xingyuan. Analytical Structural Geology [M]. Beijing: China Geology Press, 2004: 1 ~ 463. (in Chinese)
- [19] 李四光. 地质力学方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1976: 1 ~ 259.
LI Siguang. Introduction to Geomechanics [M]. Beijing: Science Press, 1976: 1 ~ 259 (in Chinese)
- [20] 张文佑. 断块构造导论 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1984: 1 ~ 385.
ZHANG Wenyu. Introduction to Fault-Block Structural Geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984: 1 ~ 385. (in Chinese)
- [21] 童亨茂. 岩石圈脆性断层作用力学模型 [J]. 自然杂志, 2013, 35 (1): 56 ~ 63.
TONG Hengmao. Mechanical model of brittle faulting in lithosphere [J]. Chinese Journal of Nature, 2013, 35 (1): 56 ~ 63. (in Chinese)
- [22] 巴晶. 岩石物理学进展与评述 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 1 ~ 384.
BA Jing. Progress and Review of Rock Physics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 1 ~ 384. (in Chinese)
- [23] Koestler A G. Hydrocarbon Seal Quantification [M]. Amsterdam: Elsevier, 2002: 1 ~ 253.
- [24] Nollet S. Fracture Sealing Processes in Sedimentary Basins: A Mutli-Scale Approach [M]. Aachen: Sharker Verlag, 2006: 1 ~ 116.
- [25] 席道瑛, 徐松林. 岩石物理学基础 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2012: 1 ~ 350.
XI Daoying, XU Songlin. Rock Physics [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2012: 1 ~ 350. (in Chinese)
- [26] 马瑾. 构造物理学概论 [M]. 北京: 地震出版社, 1987: 1 ~ 394.
MA Jin. Outline of the Tectonophysics [M]. Beijing: Seismological Press, 1987: 1 ~ 394. (in Chinese)
- [27] 马胜利, 马瑾. 岩石的流变性质与断层模型 [J]. 地球物理学进展, 1995, 10 (3): 21 ~ 42.
MA Shengli, MA Jin. Rheology of rocks and fault models [J]. Progress in Geophysics, 1995, 10 (3): 21 ~ 42. (in Chinese)
- [28] 高祥林. 地震断层力学的多尺度问题 [J]. 地学前缘, 2005, 12 (2): 187 ~ 188.
GAO Xianglin. Multiscale Problems in earthquake fault mechanics [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12 (2): 187 ~ 188. (in Chinese)
- [29] 郭本禹. 科恩的科学范式论与心理科学革命 [J]. 南京师大学报 (社会科学版), 1993, (3): 60 ~ 63.
GUO Benyu. On Cohen's scientific paradigm and psychological science revolution [J]. Acta Nanjing Normal University (Social Science Edition), 1993, (3): 60 ~ 63. (in Chinese)
- [30] Nádai A. Theory of Flow and Fracture of Solids [M]. New York: McGraw-hill, 1950: 1 ~ 572

- [31] Parry R H G. Mohr Circles, Stress Paths and Geotechnics [M]. New York: Spon Press, 2004: 264.
- [32] 阮怀宁. 滑移线场理论与断层力学研究进展 [J]. 河海科技进展, 1993, 13 (1): 22~28.
YUAN Huaining. Progress in slip line field theory and fault mechanics [J]. Technology Advances in Rivers and Sea, 1993, 13 (1): 22~28. (in Chinese)
- [33] Hafner W. Stress distributions and faulting [J]. GSA Bulletin, 1951, 62 (4): 373~398.
- [34] 安欧. 构造应力场 [M]. 北京: 地震出版社, 1992: 1~747.
An Ou. Tectonic Stress Field [M]. Beijing: Seismological Press, 1992: 1~747. (in Chinese)
- [35] Prandtl, L. "Über die Härte plastischer Körper." Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen [C]. Mathematisch-physikalische Klasse aus dem Jahre. Berlin. 1920: 74~85.
- [36] 郑颖人, 邓楚键, 王敬林. 基于非关联流动法则的滑移线场及上限法研究 [J]. 中国工程科学, 2010, 12 (8): 56~69.
ZHENG Yingren, DENG Chujian, WANG Jinglin. The study of slip line field and upper bound method based on the non-associated flow rule [J]. Engineering Science, 2010, 12 (8): 56~69. (in Chinese)
- [37] 俞茂宏, 杨松岩, 刘春阳, 等. 统一平面应变滑移线场理论 [J]. 土木工程学报, 1997, 30 (2): 14~26, 41.
YU Maohong, YANG Yansong, LIU Chunyang, et al. Unified plane-strain slip line field theory system [J]. Journal of Civil Engineering, 1997, 30 (2): 14~26, 41. (in Chinese)
- [38] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine [J]. Geology, 1982, 10 (12): 611~616.
- [39] YIN An. Mechanics of wedge-shaped fault blocks. 1: an elastic solution for compressional wedges [J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98 (B8): 14245~14256.
- [40] Lohrmann J. Identification of parameters controlling the accretive and tectonically erosive mass-transfer mode at the South-Central and North Chilean Forearc using Scaled 2D sandbox Experiments [D]. Berlin: Berlin University, 2002: 1~233.
- [41] Kellner A. Different styles of deformation of the fore-arc wedge along the Chilean convergent margin: Insights from 3D numerical experiments [D]. Potsdam, Germany: University of Potsdam, 2007: 1~150.
- [42] Sanz P F, Borja R I, Pollard D D. Mechanical aspects of thrust faulting driven by far-field compression and their implications for fold geometry [J]. Acta Geotechnica, 2007, 2 (1): 17~31.
- [43] Ip K W. Bearing capacity for foundation near slope [D]. Concordia, Canada: Concordia University, 2005: 1~110.
- [44] Deshpande A A. Improved understanding of metal cutting based on slip-line field theory [D]. Wichita: Wichita State University, 2012: 1~126.
- [45] Dundur S T. Slipline field analysis of deformation in metal machining with worn tool with adhesion friction in contact regions [D]. Deemed: Deemed University, 2001: 1~213.
- [46] 吕延防, 张发强, 吴春霞等. 断层涂抹层分布规律的物理模拟实验研究 [J]. 石油勘探与开发, 2001, 28 (1): 30~32.
LV Yanfang, ZHANG Faqiang, Wu Chunxia, et al. Simulation experiment on distribution of fault smear layer [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28 (1): 30~32. (in Chinese)
- [47] Gudmundsson A, Simmenes T H, Larsen B, et al. Effects of internal structure and local stresses on fracture propagation, deflection, and arrest in fault zones [J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32 (11): 1643~1655.
- [48] Evans J P, Forster C B, Goddard J V. Permeability of fault-related rocks, and implications for hydraulic structure of fault zones [J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19 (11): 1393~1404.
- [49] Corti G. Evolution and characteristics of continental rifting: Analog modeling-inspired view and comparison with examples from the East African Rift System [J]. Tectonophysics, 2012, 522~523: 1~33.
- [50] 童亨茂, 蔡东升, 吴永平, 等. 非均匀变形域中先存构造活动性的判定 [J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41 (2): 158~168.
TONG Hengmao, Cai Dongsheng, Wu Yongping, et al. Activity criterion of pre-existing fabrics in non-homogeneous deformation domain [J]. Chinese Science China Earth Sciences, 2010, 53 (8): 1115~1125.
- [51] Versfelt J, Rosendahl B R. Relationships between pre-rift structure and rift architecture in Lakes Tanganyika and Malawi, east Africa [J]. Nature, 1989, 337 (6205): 354~356
- [52] Morley C K, Haranya C, Phoosongsee W, et al. Activation of rift oblique and rift parallel pre-existing fabrics during extension and their effect on deformation style: Examples from the rifts of Thailand [J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26 (10): 1803~1829.
- [53] 童亨茂, 聂金英, 孟令箭, 等. 基底先存构造对裂陷盆地断层形成和演化的控制作用规律 [J]. 地学前缘, 2009, 16 (4): 97~104.
TONG Hengmao, NIE Jinying, MENG Lingjian, et al. The law of basement pre-existing fabric controlling fault formation and evolution in rift basin [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16 (4): 97~104. (in Chinese)
- [54] Smith M, Mosley P. Crustal heterogeneity and basement influence on the development of the Kenya rift, east Africa [J]. Tectonics, 1993, 12 (2): 591~606.
- [55] 童亨茂. 不协调伸展作用下裂陷盆地断层的形成演化模式 [J]. 地质通报, 2011, 29 (11): 1606~1613.
TONG Hengmao. Fault formation and evolution model under uncoordinated extension in rift basin [J]. Geological Bulletin

- of China, 2010, 29 (11): 1606 ~ 1613. (in Chinese)
- [56] Morley C K. How successful are analogue models in addressing the influence of pre-existing fabrics on rift structure? [J]. *Journal of Structural Geology*, 1999, 21 (8 ~ 9): 1267 ~ 1274.
- [57] Dunbar J A, Sawyer D S. Continental rifting at pre-existing lithosphere weaknesses [J]. *Nature*, 1988, 333 (6172): 450 ~ 452.
- [58] TONG Hengmao, Koyi H, Huang S, et al. The effect of multiple pre-existing weaknesses on formation and evolution of faults in extended sandbox models [J]. *Tectonophysics*, 2014, 626: 197 ~ 212.
- [59] TONG Hengmao, AN Yin. Reactivation tendency analysis: A theory for predicting the temporal evolution of preexisting weakness under uniform stress state [J]. *Tectonophysics*, 2011, 503 (3 ~ 4): 195 ~ 200.
- [60] NIU Yaoling. Geological understanding of plate tectonics: Basic concepts, illustrations, examples and new perspectives [J]. *Global Tectonics and Metallogeny*, 2014, 10 (1): 23 ~ 46.
- [61] Akai K, Hayashi M, Nishimatsu Y. *Weak Rock: Soft, Fractured and Weathered Rock* [C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1981.
- [62] Withjack M O, Baum M S, Schlische R W. Influence of preexisting fault fabric on inversion-related deformation: A case study of the inverted Fundy rift basin, southeastern Canada [J]. *Tectonics*, 2010, 29 (6): TC6004.
- [63] Moir H, Lunn R J, Shipton Z K, et al. Simulating brittle fault evolution from networks of pre-existing joints within crystalline rock [J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32 (11): 1742 ~ 1753.
- [64] 李四光. 旋卷构造及其他有关中国西北部大地构造体系复合问题 [J]. *科学通报*, 1955, (7): 53 ~ 56, 85.
LI Siguang. Coiling structure and other related issues related to the tectonic system in northwest China [J]. *Scientific Bulletin*, 1955, (7): 53 ~ 56, 85. (in Chinese)
- [65] 乐光禹, 杜思清, 黄继钧, 等. 构造复合联合原理-川黔构造组合叠加分析 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1996: 1 ~ 281.
YUE Guangyu, DU Siqing, HUANG Jijun, et al. *Principle of Structural Compounding-Combine* [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1996: 1 ~ 281. (in Chinese)
- [66] 童亨茂, 王建君, 赵海涛, 等. “摩尔空间”及其在先存构造活动性预测中的应用 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44 (9): 1948 ~ 1957.
TONG Hengmao, WANG Jianjun, ZHAO Haitao, et al. Mohr space and its application to the activation prediction of pre-existing weakness [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57 (7): 1595 ~ 1604.
- [67] 童亨茂, 陈正乐, 刘瑞珣. 广义剪切活动准则 [J]. *自然杂志*, 2015, 37 (6): 441 ~ 447.
TONG Hengmao, CHEN Zehngle, LIU Ruixun. Generalized shear activation criterion [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2015, 37 (6): 441 ~ 447. (in Chinese)
- [68] Engelder T, Fischer M P. Influence of poroelastic behavior on the magnitude of minimum horizontal stress, Sh in overpressured parts of sedimentary basins [J]. *Geology*, 1994, 22 (10): 949 ~ 952.
- [69] 关成尧, 漆家福, 邱楠生, 等. 应力比影响下的破裂角、闭锁角、摩擦系数及其耦合关系 [J]. *岩土力学*, 2012, 33 (12): 3570 ~ 3576.
GUAN Chengyao, QI Jiafu, QIU Nansheng, et al. Crack angle, lock angle, friction coefficient under stress ratio affection and their coupling relationship in a compression-shear crack [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33 (12): 3570 ~ 3576. (in Chinese)
- [70] Byerlee J D. Friction of rocks [J]. *Pure and Applied Geophysics Pageoph*, 1978, 116 (4): 615 ~ 626.
- [71] Henza A A, Withjack M O, Schlische R W. How do the properties of a pre-existing normal-fault population influence fault development during a subsequent phase of extension? [J]. *Journal of Structural Geology*, 2011, 33 (9): 1312 ~ 1324.
- [72] Morley C K, Gabdi S, Seusutthiy K. Fault superimposition and linkage resulting from stress changes during rifting: Examples from 3D seismic data, Phitsanulok Basin, Thailand [J]. *Journal of Structural Geology*, 2007, 29 (4): 646 ~ 663.
- [73] Adam J, Klinkmüller M, Schreurs G, et al. Quantitative 3D strain analysis in analogue experiments simulating tectonic deformation: Integration of X-ray computed tomography and digital volume correlation techniques [J]. *Journal of Structural Geology*, 2013, 55: 127 ~ 149.
- [74] Marques F O, Cobbold P R. Topography as a major factor in the development of arcuate thrust belts: insights from sandbox experiments [J]. *Tectonophysics*, 2002, 348 (4): 247 ~ 268.
- [75] 钟嘉猷. *实验构造地质学及其应用* [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
ZHONG Jiayou. *Experimental Structural Geology and Its Applications* [M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [76] 周建勋, 周建生. 渤海湾盆地新生代构造变形机制: 物理模拟和讨论 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36 (6): 507 ~ 519.
ZHOU Jianxun, ZHOU Jiansheng. Mechanisms of Cenozoic deformation in the Bohai Basin, Northeast China: Physical modelling and discussions [J]. *Science in China Series D*, 2006, 49 (3): 258 ~ 271.
- [77] Cosgrove J W, Engelder T. *The Initiation, Propagation, and Arrests of Joints and Other Fractures* [M]. London: The Geological Society London, 2004: 1 ~ 327.
- [78] Bahat D. *Tectonofractography* [M]. Berlin: Springer, 1991.
- [79] Price N J. *Fault and Joint Development, in Brittle and Semi-Brittle Rock* [M]. New York: Pergamon Press, 1966: 1

- ~176.
- [80] Rosmanith H R. Mechanics of Jointed and Faulted Rock [M]. Balkema: CRC Press, 1990.
- [81] Pollard D D, Aydin A. Progress in understanding jointing over the past century [J]. Geological Society of America Bulltin. 1988, 100: 1181 ~ 1204.
- [82] Pollard D D, Bergbauer S, Mynatt I. Using differential geometry to characterize and analyse the morphology of joints [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2004, 231: 153 ~ 182.
- [83] Snow D T. Rock fracture spacings, openings, and porosities [J]. Journal of Soil Mechanics & Foundation Division, 1968, 94 (SM1): 73 ~ 91.
- [84] Bai T, Pollard D D. Closely spaced fracture in layered rocks: initiation mechanism and propagation kinematics [J]. Journal of structural geology. 2000, 22: 1409 ~ 1425.
- [85] Germanovich L N, Salganik R L, Dyskin A V, et al. Mechanisms of brittle fracture of rock with pre-existing cracks in compression [J]. Pure and Applied Physics, 1994, 143 (1 ~ 3): 117 ~ 149.
- [86] BAI Taixu, Pollard D D. Fracture spacing in layered rocks: a new explanation based on the stress transition [J]. Journal of Structural Geology, 2000, 22 (1): 43 ~ 57.
- [87] WU Haiqing, Pollard D D. An experimental study of the relationship between joint spacing and layer thickness [J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17 (6): 887 ~ 905.
- [88] Cross M R. The origin and spacing of cross joints: Examples from the Monterey formation, Santa Barbara coastline, California [J]. Journal of Structural Geology, 1993, 15 (6): 737 ~ 751.
- [89] Sabljic D B, Wilkinson D S. Influence of a damage zone on high temperature crack growth in brittle materials [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1995, 43 (11): 3937 ~ 3945.
- [90] Eichhubl P, Aydin A, Lore J. Opening-mode fracture in siliceous mudstone at high homologous temperature-effect of surface forces [J]. Geological Research Letters, 2001, 28 (7): 1299 ~ 1302.
- [91] Holder J, Olson J E, Philip Z. Experimental determination of subcritical crack growth parameters in sedimentary rock [J]. Geological Research Letters, 2001, 28 (4): 599 ~ 602.
- [92] Sheldon P. some observations and experiments on joint planes [J]. The Journal of Geology, 1912, 20 (1): 53 ~ 70.
- [93] Sanderson D J, ZHANG Xing. Stress-controlled localization of deformation and fluid flow in fractured rocks [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2004, 231: 299 ~ 314.
- [94] Halls H C, Fahrigh W F. Mafic Dyke Swarms [R]. The Geological Association of Canada, Special Papers 34, 1987.
- [95] Bahat D, Engelder T. Surface morphology on cross-fold joints of the Appalachian Plateau, New York and Pennsylvania [J]. Tectonophysics, 1984, 104 (3 ~ 4): 299 ~ 313.
- [96] Jolly R J H, Sanderson D J. A Mohr Circle construction for the opening of a pre-existing fracture [J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19 (6): 887 ~ 892.
- [97] 李先炜. 岩块力学性质 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983: 1 ~ 302.
- LI Xianwei. Mechanics Properties of Rock Bulk [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1983: 1 ~ 302. (in Chinese)
- [98] 杨圣奇. 裂隙岩石力学特性研究及时间效应分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 1 ~ 338.
- YANG Shengqi. Fractured Rock Mechanical Properties and Time Effect [M]. Beijing: Science Press, 2011: 1 ~ 338. (in Chinese)
- [99] Spyropoulos C, Griffith W J, Scholz C H, et al. Experimental evidence for different strain regimes of crack populations in a clay model [J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26 (8): 1081 ~ 1084.
- [100] Ackermann R V, Schlische R W, Withjack M O. The geometric and statistical evolution of normal fault systems: an experimental study of the effects of mechanical layer thickness on scaling laws [J]. Journal of Structural Geology, 2001, 23 (11): 1803 ~ 1819.
- [101] Bonnet E, Bour O, Odling N E, et al. Scaling of fracture systems in geological media [J]. Reviews of Geophysics, 2001, 39 (3): 347 ~ 383.
- [102] Aydin A, Berryman J G. Analysis of the growth of strike-slip faults using effective medium theory [J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32 (11): 1629 ~ 1642.
- [103] Schultz R A, Klimczak C, Fossen H, et al. Statistical tests of scaling relationships for geologic structures [J]. Journal of Structural Geology, 2013, 48: 85 ~ 94.
- [104] 周建勋, 漆家福, 童章茂. 盆地构造研究中的砂箱模拟实验方法 [M]. 北京: 地震出版社, 1999: 1 ~ 123.
- ZHOU Jianxun, QI Jiafu, TONG Hengmao. Experimental Method of Sandbox Simulation in the Study of Basin Structure [M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1999: 1 ~ 123. (in Chinese)
- [105] 单家增. 构造模拟实验在石油地质学中的应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- SHAN Jiazeng. The Application of Structural Simulation Experiments in Petroleum Geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996. (in Chinese)
- [106] Hubbert M K. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures [J]. GSA Bulltin, 1937, 48 (10): 1459 ~ 1520.
- [107] Hubbert M K. Mechanical basis for certain familiar geologic structures [J]. GSA Bulltin, 1951, 62 (4): 355 ~ 372.
- [108] Buchanan et al., 1991. Sandbox experiments of inverted listric and planar fault systems [J]. Tectonophysics, 188 (1 ~ 2): 97 ~ 115.
- [109] 沈礼, 贾东, 尹宏伟, 等. 构造物理模拟和 PIV 有限应变分析对构造裂缝预测的启示 [J]. 高校地质学报, 2016, 22 (1): 171 ~ 182.
- SHEN Li, JIA Dong, YIN Hongwei, et al. Structural analogue modeling and PIV finite strain analysis: implications to tectonic

- fracture prediction [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2016, 22 (1): 171 ~ 182. (in Chinese)
- [110] Adam J, Urai J L, Wieneke B, et al. Shear localisation and strain distribution during tectonic faulting—new insights from granular-flow experiments and high-resolution optical image correlation techniques [J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27 (2): 283 ~ 301.
- [111] 孙其诚, 厚美瑛, 金峰. 颗粒物质物理与力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 191 ~ 193.
SUN Qicheng, HOU Meiying, JIN Feng. *Particle Physics and Mechanics* [M]. Beijing: Science Press, 2011: 191 ~ 193. (in Chinese)
- [112] 关成尧, 漆家福, 邱楠生, 等. 疏松砂岩层宏观弹性模量计算模型研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2013, 35 (5): 84 ~ 89, 139.
GUAN Chengyao, QI Jiafu, QIU Nansheng, et al. Macroscopic Elastic Modulus model of particle packing sandstone [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2013, 35 (5): 84 ~ 89, 139. (in Chinese)
- [113] Das S, Scholz C H. Theory of time-dependent rupture in the earth [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86 (B7): 6039 ~ 6051.
- [114] Cowie P A, Sornette D, Vanneste C. Multifractal Scaling properties of a growing fault population [J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 122 (2): 457 ~ 469.
- [115] П И 波卢欣. 塑性变形的物理基础 [M]. 黄克琴, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1989: 1 ~ 536.
Полухин П И. *Physical Basis of Plastic Deformation* [M]. HUANG Keqin, trans. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989: 1 ~ 536. (in Chinese)
- [116] Houwink R, Decker H K. *Elasticity, Plasticity and Structure of Matter* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1971.
- [117] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26 (6): 1081 ~ 1106.
SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26 (6): 1081 ~ 1106. (in Chinese)
- [118] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 1 ~ 715.
SUN Jun. *Geomaterials Evolution and Engineering Applications* [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1999: 1 ~ 715. (in Chinese)
- [119] 袁龙蔚, 智荣斌, 李之达. 流变断裂学基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1992: 1 ~ 188.
YUAN Longwei, ZHI Rongbin, LI Zhida. *Fundamentals of Rheological Fracture* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1992: 1 ~ 188. (in Chinese)
- [120] 章根德, 何鲜, 朱维耀. 岩石介质流变学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 1 ~ 378.
ZHANG Gende, HE Xian, ZHU Weiyao. *Rheology of Rock Media Materials* [M]. Beijing: Science Press, 1999: 1 ~ 378. (in Chinese)
- [121] 袁龙蔚. 流变力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1986: 1 ~ 738.
- YUAN Longwei. *Rheological Mechanics* [M]. Beijing: Science Press, 1986: 1 ~ 738. (in Chinese)
- [122] Eirich F R. *Rheology Theory and Application (Volume 1 ~ Volume 5)* [M]. London: Academic Press, 1956 ~ 1969: 1 ~ 761.
- [123] 黄克智, 余寿文. 弹塑性断裂力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1985: 1 ~ 402.
HUANG Kezhi, YU Shouwen. *Plastic fracture mechanics*. Beijing: Tsinghua University Press, 1985: 1 ~ 402. (in Chinese)
- [124] Hirth J P, Lothe J. *Theory of Dislocations* [M]. New York: McGraw-Hill Press, 1968: 1 ~ 780.
- [125] Barrett C S, Massalski T B. *Structure of Metals: Crystallographic Methods, Principles and Data* [M]. 3rd ed. Oxford: Pergamon Press, 1980: 1 ~ 654.
- [126] Smith R A. *Fatigue Crack Growth: 30 Years of Progress* [M]. Oxford: Pergamon Press, 1986: 1 ~ 146.
- [127] 冯端. 金属物理学 (第三卷): 金属力学性质 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 1 ~ 604.
FENG Duan. *Metal Physics (Vol. 3): Mechanical Properties of Metals* [M]. Beijing: Science Press, 1999: 1 ~ 604. (in Chinese)
- [128] Boyle J T, Spence J. *Stress Analysis for Creep* [M]. London: Butterworths Press, 1983: 1 ~ 147.
- [129] 葛庭燧. 固体内耗理论基础: 晶界弛豫与晶界结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1 ~ 688.
GE Tingsui. *Theoretical Basis of Solid Friction: The Grain Boundary Relaxation and Grain Boundary Structure* [M]. Beijing: Science Press, 2000: 1 ~ 688. (in Chinese) (未找到本条文献英文信息, 请核对)
- [130] Ugiansky G M, Payer J H. *Stress Corrosion Cracking-The Slow Strain-Rate Technique* [M]. Southampton: American Society of Testing and Materials, 1979: 1 ~ 442.
- [131] Blenkinsop T G. *Deformation Microstructures and Mechanisms in Minerals and Rocks* [M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [132] Ramsay J G. Shear zone geometry: a review [J]. *Journal of Structural Geology*, 1980, 2 (1 ~ 2): 83 ~ 89.
- [133] Paterson M S. *Experimental Rock Deformation: The Brittle Field* [M]. Berlin: Springer Verlag, 1978.
- [134] GAO Jianping, Luedtke W D, Gourdon D, et al. Frictional forces and Amonton's Law: from the molecular to the macroscopic scale [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 2004, 108 (11): 3410 ~ 3425.
- [135] Tse S T, Rice J R. Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip properties [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91 (B9): 9452 ~ 9472.
- [136] Scholz C H. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting* [J].

- New York: Cambridge University Press, 1990.
- [137] Meissner R, Strehlau J. Limits of stresses in continental crusts and their relation to the depth-frequency distribution of shallow earthquakes [J]. *Tectonics*, 1982, 1 (1): 73 ~ 89.
- [138] Blenkinsop T G. Thickness-displacement relationships for deformation zones: Discussion [J]. *Journal of Structural Geology*, 1989, 11 (8): 1051 ~ 1053.
- [139] Blenkinsop T G. Cataclasis and processes of particle size reduction [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1991, 136 (1): 59 ~ 86.
- [140] Paterson M S. Problems in the extrapolation of laboratory rheological data [J]. *Tectonophysics*, 1987, 133 (1 ~ 2): 33 ~ 43.
- [141] Passchier C W. The reliability of asymmetric *c*-axis fabrics of quartz to determine sense of vorticity [J]. *Tectonophysics*, 1983, 99 (1): T9 ~ T18.
- [142] Carter N L, Officer C B, Drake C L. Dynamic deformation of quartz and feldspar: clues to causes of some natural crises [J]. *Tectonophysics*, 1990, 171 (1 ~ 4): 373 ~ 391.
- [143] Johnson S E, Vernon R H. Inferring the timing of porphyroblast growth in the absence of continuity between inclusion trails and matrix foliations: can it be reliably done? [J]. *Journal of Structural Geology*, 1995, 17 (8): 1203 ~ 1206.
- [144] Borradaile J G, Bayly M B, Powell C M A. *Atlas of Deformational and Metamorphic Rock Fabrics* [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1982.
- [145] Hacker B R, Kirby S H. High-pressure deformation of calcite marble and its transformation to aragonite under non-hydrostatic conditions [J]. *Journal of Structural Geology*, 1993, 15 (9 ~ 10): 1207 ~ 1222.
- [146] Park Y, Means W D. Direct observation of deformation processes in crystal mushes [J]. *Journal of Structural Geology*, 1996, 18 (6): 847 ~ 858.
- [147] Benn K, Allard B. Preferred mineral orientations related to magmatic flow in ophiolite layered gabbros [J]. *Journal of Petrology*, 1989, 30 (4): 925 ~ 946.
- [148] Green II H W, Burnley P C. A new self-organizing mechanism for deep-focus earthquakes [J]. *Nature*, 1989, 341 (6244): 733 ~ 737.
- [149] Cox S F. Antitaxial crack-seal vein microstructures and their relationship to displacement paths [J]. *Journal of Structural Geology*, 1987, 9 (7): 779 ~ 787.
- [150] Gilotti J A, Hull J M. *Phenomenological superplasticity in rocks* [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1990, 54: 229 ~ 240.
- [151] Rushmer T. An experimental deformation study of partially molten amphibolite: application to low-melt fraction segregation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100 (B8): 15681 ~ 15695.
- [152] Rutter E H, Neumann D H K. Experimental deformation of partially molten Westerly granite under fluid-absent conditions, with implications for the extraction of granitic magmas [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100 (B8): 15697 ~ 15715.
- [153] Mancktelow N S. On volume change and mass transport during the development of crenulation cleavage [J]. *Journal of Structural Geology*, 1994, 16 (9): 1217 ~ 1231.
- [154] Erslev E A, Ward D J. Non-volatile element and volume flux in coalesced slaty cleavage [J]. *Journal of Structural Geology*, 1994, 16 (4): 531 ~ 553.
- [155] Knipe R J. Deformation mechanisms - recognition from natural tectonites [J]. *Journal of Structural Geology*, 1989, 11 (1 ~ 2): 127 ~ 146.
- [156] Lister G S, Snoke A W. S-C mylonites [J]. *Journal of Structural Geology*, 1984, 6 (6): 617 ~ 638.
- [157] Burg J-P. Quartz shape fabric variations and *c*-axis fabrics in a ribbon-mylonite: arguments for an oscillating foliation [J]. *Journal of Structural Geology*, 1986, 8 (2): 123 ~ 131.
- [158] Ten Brink C E, Passchier C W. Modelling of mantled porphyroclasts using non-Newtonian rock analogue materials [J]. *Journal of Structural Geology*, 1995, 17 (1): 131 ~ 146.
- [159] Wenk H-R, Christie J M. Comments on the interpretation of deformation textures in rocks [J]. *Journal of Structural Geology*, 1991, 13 (10): 1091 ~ 1110.
- [160] Price N J, Cosgrove J W. *Analysis of Geological Structures* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [161] Durtche J S. *Sliding friction and fracture of rocks* [D]. New Mexico: New Mexico Institute of Mining and Technology, 1973: 1 ~ 294.
- [162] Carpinteri A, Paggi M. Size-scale effects on the friction coefficient [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2005, 42 (9 ~ 10): 2901 ~ 2910.
- [163] 关成尧, 杜成旺, 刘广虎, 等. 异质材料凸起切向变形摩擦研究 [J]. *科学技术与工程*, 2018, (2): 86 ~ 92. GUAN Chengyao, DU Chengwang, LIU Guanghu, et al. Dynamic tribology of heterogeneous materials based on asperities tangential deformation [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, (2): 86 ~ 92. (in Chinese)
- [164] GUAN Chengyao, QI Jiafu, QIU Nansheng, et al. The relationship between the friction coefficient and the asperities original inclination angle [J]. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2013, 6 (11): 1906 ~ 1910.
- [165] 关成尧, 漆家福, 邱楠生, 等. 裂缝三级摩擦因数及影响因素研究 (以砂岩 (颗粒胶结体) 为例) [J]. *应用数学和力学*, 2013, 34 (2): 209 ~ 216. GUAN Chengyao, QI Jiafu, QIU Nansheng, et al. Three levels friction coefficients of cracks and their influencing factors-taking the sandstone (particle packing layers) as an example [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2013, 34 (2): 209 ~ 216. (in Chinese)
- [166] Johnson K J. *Contact Mechanics* [M]. Cambridge:

- Cambridge University Press, 1985: 1 ~ 448.
- [167] Streit J E. Low frictional strength of upper crustal faults: A model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102 (B11): 24619 ~ 24626.
- [168] Sibson R H. Fault rocks and fault mechanisms [J]. *Journal of the Geological Society*, 1977, 133 (3): 191 ~ 213.
- [169] G S 乌帕达耶, R K 杜布. 冶金热力学与动力学的应用计算 [M]. 金宝忠, 阎庆甲, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1981: 1 ~ 222.
- Upadhyaya G S, Dube R K. Problems in Metallurgical Thermodynamics and Kinetics [M]. JIN Baozhong, YAN Qingjia, trans. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1981: 1 ~ 222. (in Chinese)
- [170] 汪凌云. 金属塑性变形力学 [M]. 重庆: 重庆出版社, 1986: 1 ~ 339.
- WANG Lingyun. Metal Plastic Deformation Mechanics [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1986: 1 ~ 339. (in Chinese) (未找到本条文献信息, 请核对)
- [171] 葛世荣, 朱华. 摩擦学中的分形 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 1 ~ 338.
- GE Shirong, ZHU Hua. Fractal in Tribology [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2005: 1 ~ 338. (in Chinese)
- [172] 张秉良, 方仲景, 李建国, 等. 根据断层泥的微观特征探讨断层的活动性 [J]. *地质力学学报*, 1996, 2 (2): 41 ~ 46.
- ZHANG Dingliang, FANG Zhongjing, LI Jianguo, et al. Activities of faults as determined from the microstructural features of the clay gouge [J]. *Journal of Geomechanics*, 1996, 2 (2): 41 ~ 46. (in Chinese)
- [173] 杨主恩, 胡碧茹, 洪汉净. 活断层中断层泥的石英碎砾的显微特征及其意义 [J]. *科学通报*, 1984, 29 (8): 484 ~ 486.
- YANG Zhu'an, HU Biru, HONG Hanjing. Microscopic characteristics of quartz grains in fault gouges from active faults and their implication [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1984, 29 (8): 484 ~ 486. (in Chinese)
- [174] Mwambwa L K. Brittle tectonics in the Lufilian fold-and-thrust belt and its foreland. An insight into the stress field record in relation to moving plates (Katanga, DRC) [D]. Katholieke: Katholieke Universiteit, 2013: 1 ~ 161.
- [175] Katz Y, Weinberger R, Aydin A. Geometry and kinematic evolution of Riedel shear structures, Capitol Reef National Park, Utah [J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26 (3): 491 ~ 501.
- [176] 何昌荣, 陶青峰, 王泽利. 高温高压条件下辉长岩的摩擦强度及其速率依赖性 [J]. *地震地质*, 2004, 26 (3): 450 ~ 460.
- HE Changrong, TAO Qingfeng, WANG Zeli. Frictional strength and rate dependence of gabbro gouge under elevated temperature and pressure [J]. *Seismology and Geology*, 2004, 26 (3): 450 ~ 460. (in Chinese)
- [177] 唐户俊一. 流变与地球动力学 [M]. 何昌荣, 译. 北京: 地震出版社, 2005: 6 ~ 14.
- Ichro K S. Rheology and Eodynamics [M]. HE Changrong, trans. Beijing: Seismological Press, 2005: 6 ~ 14. (in Chinese)
- [178] Mescall J, Weiss V. Material Behavior Under High Stress and Ultrahigh Loading Rates [M]. New York: Plenum Press, 1983: 1 ~ 326.
- [179] Ahlgrén S G. The nucleation and evolution of Riedel shear-zones as deformation bands in porous sandstone [J]. *Journal of Structural Geology*, 2001, 23 (8): 1203 ~ 1214.
- [180] 姚孝新. 断层泥的研究动向 [J]. *四川地震*, 1985, (3): 26 ~ 27.
- YAO Xiaoxin. Research trend of fault gouge [J]. *Sichuan Earthquake*, 1985, (3): 26 ~ 27. (in Chinese)
- [181] 皇甫岗, 马瑾. 非粘土断层泥带厚度与断层错距关系的实验研究 [J]. *中国地震*, 1990, 6 (3): 62 ~ 69.
- HUANG Fugang, MA Jin. Experimental study on the relationship of fault displacement to the thickness of non-clay gouge layer [J]. *Earthquake Research in China*, 1990, 6 (3): 62 ~ 69. (in Chinese)
- [182] 皇甫岗, 马瑾. 断层泥极限粒度存在的可能机理及其意义 [J]. *西北地震学报*, 1990, 12 (4): 30 ~ 35.
- HUANG Fugang, Ma Jin. A Possible mechanism of fault gouge limit grain size and its significance [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 1990, 12 (4): 30 ~ 35. (in Chinese)
- [183] Engelder J T. Cataclasis and the generation of fault gouge [J]. *GSA Bulletin*, 1974, 85 (10): 1515 ~ 1522.
- [184] 刘泉声, 崔先泽, 张程远. 基于变孔隙率的多孔介质中悬浮颗粒沉积渗透率衰减模型研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35 (Z1): 3308 ~ 3314.
- LIU Quansheng, CUI Xianze, ZHANG Chengyuan. Permeability reduction model of particles deposit in porous medium considering changeable porosity [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35 (Z1): 3308 ~ 3314. (in Chinese)
- [185] XU Peng, YU Boming. Developing a new form of permeability and Kozeny-Carman constant for homogeneous porous media by means of fractal geometry [J]. *Advances in Water Resources*, 2008, 31 (1): 74 ~ 81.
- [186] 李琪. 悬浮微小颗粒在饱和多孔介质中运移特性的理论与试验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014: 1 ~ 114.
- LI Qi. A theoretical and experimental study on the moving characteristics of suspended particles in saturated porous media [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 1 ~ 114. (in Chinese)
- [187] 王路珍. 变质量破碎泥岩渗透性的加速试验研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014: 1 ~ 221.
- WANG Luzhen. Accelerated experimental study on permeability for broken mudstone with mass loss [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014: 1 ~ 221. (in Chinese)
- [188] Bedrikovetsky P, Siqueira F D, Furtado C A, et al. Modified

- particle detachment model for colloidal transport in porous media [J]. *Transport in Porous Media*, 2011, 86 (2): 353 ~ 383.
- [189] 陈星欣,白冰,蔡奇鹏. 饱和多孔介质中颗粒释放-迁移问题的理论求解 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44 (6): 610 ~ 618.
- CHEN XingXin, BAI Bing, CAI Qipeng. Theoretical solution of particle release-transport in saturated porous media [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2014, 44 (6): 610 ~ 618. (in Chinese)
- [190] 杨雯,郝丹丹,徐东昊,等. 生物炭颗粒在饱和多孔介质中的迁移与滞留 [J]. *土壤通报*, 2017, 48 (2): 304 ~ 312.
- YANG Wen, HAO Dandan, XU Donghao, et al. Transport and retention of biochar particles in saturated porous media [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48 (2): 304 ~ 312. (in Chinese)
- [191] 刘泉声,赵军,张程远. 考虑尺寸排除效应颗粒迁移模型的建立 [J]. *岩土力学*, 2012, 33 (8): 2265 ~ 2268.
- LIU Quansheng, ZHAO Jun, ZHANG Chengyuan. Establishment of particulate transport: size exclusion effect [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33 (8): 2265 ~ 2268. (in Chinese)
- [192] YAO Kuanmu, Habibian M T, O' Melia C R. Water and waste water filtration. Concepts and applications [J]. *Environmental Science & Technology*, 1971, 5 (11): 1105 ~ 1112.
- [193] 刘泉声,崔先泽,张程远. 多孔介质中悬浮颗粒迁移-沉积特性研究进展 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34 (12): 2410 ~ 2427.
- LIU Quansheng, CUI xianze, ZHANG Chengyuan. Research advances in the characterization of transportation and deposition of suspended particles in porous media [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34 (12): 2410 ~ 2427. (in Chinese)
- [194] 王新亮. 石油储层微通道纳米颗粒吸附法双重减阻机制研究 [D]. 上海: 上海大学, 2013: 1 ~ 139.
- WANG Xinliang. The mechanical-chemical drag reduction mechanism with nanoparticles adsorption method in reservoir micro-channels [D]. Shanghai: Shanghai University, 2013: 1 ~ 139. (in Chinese)
- [195] 蒋官澄,鄢捷年,吴学诗. 计算完井液中固相颗粒侵入储层深度的数学模型 [J]. *钻井液与完井液*, 1995, 12 (2): 66 ~ 73.
- JIANG Guancheng, YAN Jienian, WU Xueshi. mathematical model for the calculation of invasion depth of solid particles of completion fluid into reservoir [J]. *Drilling Fluid and Completion Fluid*, 1995, 12 (2): 66 ~ 73. (in Chinese)
- [196] Jakob A. Matrix Diffusion for Performance Assessment Experimental Evidence, Modelling Assumptions and Open Issues [M]. Paul Scherrer Institut, Villigen PSI, 2004: 1 ~ 87.
- [197] Bullen T D, Wang Y. *Water Rock Interaction* [C]. London: Taylor & Francis, 2007: 1 ~ 849.
- [198] 谢一婷. 疏松砂岩油藏适度出砂并近井地层渗透率变化规律研究 [D]. 重庆: 西南石油大学, 2013: 1 ~ 140.
- XIE Yiting. Research on changes of in-situ permeability near wellbore in unconsolidated sandstone reservoir with sand management [D]. Chongqing: Southwest Petroleum University, 2013: 1 ~ 140. (in Chinese)
- [199] 鞠斌山. 油藏渗流系统物性变化机理与数学模拟研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2006: 1 ~ 191.
- JU Binshan. Study of mechanism and mathematical simulation on the changes in physical properties of flow system in oil reservoirs [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2006: 1 ~ 191. (in Chinese)
- [200] 苏崇华. 疏松砂岩储层伤害机理及应用 [D]. 重庆: 西南石油大学, 2011: 1 ~ 155.
- SU Chonghua. Loose sand reservoir damage mechanism and its application to HND-1/2 oilfield [D]. Chongqing: Southwest Petroleum University, 2011: 1 ~ 155. (in Chinese)
- [201] 王正茂. 油藏含砂流体渗流机理及流固耦合单井数值模拟研究 [D]. 重庆: 西南石油大学, 2004: 1 ~ 160.
- WANG Zehngmao. The study of fluid flow mechanism with sand erosion and sand particulates migration in the reservoir and fluid-solid coupling single-well numerical simulation [D]. Chongqing: Southwest Petroleum University, 2004: 1 ~ 160. (in Chinese)
- [202] 王嘉荫. 应力矿物概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1978.
- WANG Jiayin. Introduction to Stress Minerals [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1978. (in Chinese)
- [203] 施尔畏,陈之战,元如林. 水热结晶学 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- SHI Erwei, CHEN Zhizhan, YUAN Rulin. Hydrothermal Crystallography [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [204] Lehner F K. Thermodynamics of rock deformation by pressure solution [A]. Barber D J, Meredith P G. *Deformation Processes in Minerals, Ceramics and Rocks*. London: Unwin Hyman, 1990: 296 ~ 333.
- [205] Chilingarian G V. Developments in Sedimentology 18B: Compaction of Coarse-Grained Sediments, II [M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976: 1 ~ 808.
- [206] Ingerson E. Clay and clay minerals [A]. Proceedings of the Sixth National Conference on Clays and Clay Minerals [C]. London: Pergamon Press, 1957.
- [207] Ruhovets N, Fert W H. Volumes, types, and distribution of clay minerals in reservoir rocks based on well logs [R]. SPE 10796, 1982.
- [208] 刘新宇. 泥岩涂抹变形机制的物理实验模拟研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2015: 1 ~ 51.
- LIU Xinyu. The physical simulation experiments for formation and evolution of clay smear [S]. Daqing: Northeast

- Petroleum University, 2015: 1~51. (in Chinese)
- [209] 裴伟. 地壳应力状态 [M]. 国家地震局地震地质大队情报资料室, 译. 北京: 地震出版社, 1978: 1~103.
Пейве А В. Crustal stress state [M]. National Earthquake Bureau Geological Team Information Reference Room, trans. Beijing: China Earthquake Press, 1978: 1~103. (in Chinese)
- [210] 苏生瑞, 黄润秋, 王士天. 断裂构造对地应力场的影响及其工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1~175.
SU Shengrui, HUANG Runqiu, WANG Shitian. The Influence of Fracture Structure on Ground Stress Field and Its Engineering Application [M]. Beijing: Science Press, 2002: 1~175. (in Chinese)
- [211] Means W D. Stress and Strain: Basic Concepts of Continuum Mechanics for Geologists [M]. New York: Springer-Verlag, 1976: 1~339.
- [212] Reinecker J, Tingay M, Müller B, et al. Present-day stress orientation in the Molasse Basin [J]. Tectonophysics, 2010, 482 (1~4): 129~138.
- [213] Zoback M D, Barton C A, Brudy M, et al. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40 (7~8): 1049~1076.
- [214] Bonini M. Mud volcanoes: Indicators of stress orientation and tectonic controls [J]. Earth-Science Reviews, 2012, 115 (3): 121~152.
- [215] Reches Z, Lockner D A. Nucleation and growth of faults in brittle rocks [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99 (B9): 18159~18173.
- [216] 皇甫岗. 断层泥的厚度、粒度与断层错距的关系 [J]. 四川地震, 1988, (1): 50~56.
HUANG Pugang. Relationship between gouge thickness, size and faulting distance [J]. Sichuan Earthquake, 1988, (1): 50~56. (in Chinese)
- [217] 童亨茂. 断层开启与封闭的定量分析 [J]. 石油与天然气地质, 1998, 19 (3): 215~220.
TONG Hengmao. Quantitative analysis of fault opening and sealing [J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19 (3): 215~220. (in Chinese)
- [218] WANG Chiyuan. Internal Structure of Fault Zones [M]. Boston: Birkhäuser Verlag, 1986: 1~373.
- [219] Seminsky K Z. Internal structure of fault zones: spatial and temporal evolution studies on clay models [J]. Geodynamics and Tectonophysics, 2012, 3 (3): 183~194.
- [220] Bullock R J, De Paola N, Holdsworth R E, et al. Lithological controls on the deformation mechanisms operating within carbonate-hosted faults during the seismic cycle [J]. Journal of Structural Geology, 2014, 58: 22~42.
- [221] Holland M, Urai J L, van der Zee W, et al. Fault gouge evolution in highly overconsolidated claystones [J]. Journal of Structural Geology, 2006, 28 (2): 323~332.
- [222] 黄筑平. 连续介质力学基础 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 1~441.
HUANG Zhuping. Fundamentals of Continuum Mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 1~441. (in Chinese)
- [223] 戚承志, 钱七虎. 岩体动力变形与破坏的基本问题 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1~371.
QI Chengzhi, QIAN Qihu. Basic Problems of Dynamic Deformation and Fracture of Rock Mass [M]. Beijing: Science Press, 2009: 1~371. (in Chinese)
- [224] 王思敬. 坝基岩体工程地质力学分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1990: 1~371.
WANG Sijing. Dam Foundation Rock Mass Engineering Geological Mechanics Analysis [M]. Beijing: Science Press, 1990: 1~371. (in Chinese)