

“构造地质学的理论方法与实践”丛书

国家自然科学基金项目
国家自然科学基金重点项目 资助
高等学校博士学科点专项基金
华中构造力学研究中心

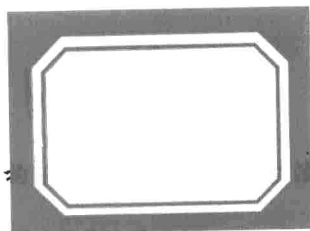
香肠构造与流变学

BOUDINAGE STRUCTURES AND ROCK RHEOLOGY

曾佐勋 吴林波 徐云峰 等著



中国地质大学出版社有限责任公司
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI



“与amp;实践”丛书 曾佐勋 主编

国家自然科学基金项目

国家自然科学基金重点项目

高等学校博士学科点专项基金

华中构造力学研究中心

资助

香肠构造与流变学

曾佐勋 吴林波 徐云峰 付永涛

吴武军 樊 春 蔡永建 张 鲲

等著



中国地质大学出版社有限责任公司

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

图书在版编目(CIP)数据

香肠构造与流变学/曾佐勋,吴林波,徐云峰,付永涛,吴武军,樊春,蔡永建,张鯤等著. —武汉:中国地质大学出版社有限责任公司,2013.3

ISBN 978-7-5625-3079-4

I. ①香…

II. ①曾…②吴…③徐…④付…⑤吴…⑥樊…⑦蔡…⑧张…

III. ①香肠构造-构造地质学②岩体流变学

IV. ①P542②TU452

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 052807 号



香肠构造与流变学

曾佐勋 吴林波 徐云峰 付永涛 等著
吴武军 樊春 蔡永建 张鯤

责任编辑:段连秀

策划编辑:段连秀

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社有限责任公司(武汉市洪山区鲁磨路 388 号) 邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传 真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:340 千字 印张:12.25

版次:2013 年 8 月第 1 版

印次:2013 年 8 月第 1 次印刷

印刷:武汉教文印刷厂

印数:1—1 000 册

ISBN 978-7-5625-3079-4

定价:68.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

《构造地质学的理论方法与实践》丛书序言

随着科学技术的发展,构造地质学正在逐步朝着解析构造学和定量化构造研究方向发展。解析构造学要求加强力学的研究,将构造几何学、运动学、流变学和动力学有机结合起来进行综合研究;定量化构造研究则要求运用先进技术,不断改进和完善定量化研究手段和方法,以加深对构造过程和构造形成机制的认识。为了促进这两方面的研究,中国地质大学(武汉)与华中科技大学联合成立了“华中构造力学研究中心”。我校“华中构造力学研究中心”的同志们正按此方向进行不懈的努力,做出了一些初步成绩。《构造地质学的理论方法与实践》丛书,部分地反映了这方面的一些探索与实践。

《构造地质学的理论方法与实践》丛书目前先奉献给读者四本专著:《陕甘川邻接区复合造山带与成矿》、《香肠构造与流变学》、《构造地质学软件包——StructKit 的设计与开发》、《信阳市燃气混气站断裂活动性和场地稳定性研究》。在这些成果中,既有造山带理论研究,也有构造变形与岩石流变学研究;既有在贵金属成矿预测和石油地质方面的应用研究,也有在工程场地稳定性应用方面的研究;还有计算机在构造地质应用方面的研究。

《陕甘川邻接区复合造山带与成矿》一书,根据作者在该区的实践,将滑脱构造和挤出构造有机结合起来,将造山带二维挤出推广到三维挤出,建立了陕甘川邻接区复合造山带三维滑脱挤出构造新模式,将造山带构造几何学、运动学、流变学、年代学和动力学研究紧密结合起来,并结合地球物理、地球化学、遥感地质、计算力学等多种手段和方法,采用地理信息系统综合分析,建立了该区复合造山带与成矿的关系,探索了成矿规律和成矿条件,进行了成矿远景区预测。提出的新模式、新概念、新理论和新方法对造山带与成矿的理论和实践具有重要意义。

《香肠构造与流变学》一书,重点介绍了作者们在香肠构造和岩石流变学方面的研究进展,特别是作者应用香肠构造定量反演岩石流变参数(包括应力指数和黏度比)方面的成果。利用构造变形反演岩石流变参数的定量方法主要有应变折射流变计、能干层褶皱流变计和香肠构造流变计。《香肠构造与流变学》一书中重

点研究的香肠构造流变计方法是目前国际上常用的这三种方法之一,是作者们的开创性成果。作者们在国内首次(国际上第二次)发现了骨节状石香肠构造,并对复合石香肠构造进行了专题研究。在模型流变参数测定、透射电镜的应用以及在香肠构造控矿作用等方面,都有作者们自己的探索。

《构造地质学软件包——StrucKit 的设计与开发》一书,介绍了作者们编制的包含地质构造数据投图、有限应变测量、断裂和岩层几何参数测定、岩石流变参数测量等方面的 12 项功能的构造地质学软件包 StrucKit 以及构造面曲率分析软件 SurCurv 和液压模拟实验仪数据自动采集系统。这些软件反映了作者们在应用计算机进行构造地质学定量研究方面的一些成果和探索,对于构造地质学的量化教学和有关科研和教学人员使用,是非常有益的。

《信阳市燃气混气站断裂活动性和场地稳定性研究》一书中,作者们以地球系统科学理论为指导,应用构造地质学、岩石学、地层学、新构造学、地貌学及第四纪地质学、计算力学、年代学、地球物理学、地震地质学、工程测量学、遥感地质学、工程地质学等多学科的理论与方法,对信阳市燃气混气站断裂活动性和场地稳定性进行了综合研究和评价,在多学科知识、方法的整合和技术的有效应用方面有显著的进展,为工程场地稳定性评价积累了有益的经验。

对“华中构造力学研究中心”的目标而言,这些成果虽然还是初步的,但反映了作者们朝着解析构造学和定量构造学方面做出的探索和实践。今后我们将沿着这两方面不断努力,期望有更多的新成果奉献给读者。

华中构造力学研究中心副主任



2002 年 10 月

序

华中构造力学研究中心前任副主任杨巍然教授在《构造地质学的理论方法与实践》丛书序言中指出：“随着科学技术的发展，构造地质学正在逐步朝着解析构造学和定量化构造研究方向发展。”解析构造学要求加强力学的研究，将构造几何学、运动学、流变学和动力学有机结合起来进行综合研究；定量化构造研究则要求运用先进技术，不断改进和完善定量化研究手段和方法，以加深对构造过程和构造形成机制的认识。

这些年来，华中构造力学研究中心的师生们正朝着这样的目标在不断努力。主要表现在以下几个方面：

(1)利用天然构造变形恢复岩石古流变参数的方法，即构造流变计，逐步形成天然岩石流变学研究的新方向，与高温高压实验岩石流变学互补。

(2)积极探索构造微分几何学方法，并应用于褶皱分析和油气田的裂缝预测。

(3)探索岩石有限应变测量和涡度计算在小构造成因机制方面的应用研究，特别是在各种石香肠构造形成机制的研究方面取得系列成果。

(4)将 MAPGIS 技术和影像云纹法应用于缝合线的分析，取得三维缝合线研究的新进展。

(5)将有限元数值模拟技术应用于各种构造力学研究，其中包括不同尺度构造研究；应用于成矿预测、工程场地稳定性和区域稳定性分析；应用于油气田断层封堵性、裂缝预测和油气成藏有利部位预测；应用于行星构造研究和地震研究等。

(6)开发构造物理模拟实验技术方法并应用于理论构造学和应用构造学研究。

(7)积极配合国家 985 平台建设，综合利用次声波、卫星热红外技术、宽频地震仪、地应力测量、地球排气、卫星重力异常、天然电磁脉冲、地震云、地倾斜等监测资料进行地震前兆信息分析、探索地震成因机制，服务于地震监测与预测。

《香肠构造与流变学》一书初稿早成。因种种原因一直未能与读者见面。历时数年,完善和补充,现在付梓。但是,香肠构造和天然岩石流变学有很多问题值得深入研究。这些问题是华中构造力学研究中心努力的目标之一。

本书研究工作和出版得到国家自然科学基金项目(No. 49972068)、国家自然科学基金重点项目(No. 41230206)和高等学校博士学科点专项基金(No. 9349103和 No. 20120145110002)资助,是由华中构造力学研究中心组织出版的《构造地质学的理论方法与实践》丛书的组成部分,是香肠构造研究和基于构造变形的岩石流变学研究的集成性成果。

构造学与力学的结合不是一件轻而易举的事情,然而这又是大势所趋。因此,“华中构造力学研究中心”以此为已任,任重而道远。

华中构造力学研究中心主任
《构造地质学的理论方法与实践》丛书主编

曾佐勋

2013年7月

前 言

香肠构造与天然岩石流变学作为本书的两大主题,是作者们在国家自然科学基金项目(No. 49972068)、国家自然科学基金重点项目(No. 41230206)和高等学校博士学科点专项基金(No. 9349103 和 No. 20120145110002)支持下,10 多年来在湖北铁山和北京西山为主要基地开展这两方面研究的阶段性总结。同时本书也部分地反映了国内外的相关研究进展。

香肠构造从显微尺度至岩石圈尺度均有发育,其对于了解香肠化的岩脉、岩层乃至岩石圈的构造演化,对于构造几何学、运动学、动力学和岩石流变学研究具有重要的理论意义;对香肠化地区的矿产勘查、工程地质领域的地质灾害防御等具有一定的指导意义。

经过 100 多年的研究,主要的石香肠类型端员的基本成因机制大多已经获得了较清晰的认知与较充分的论证,而各类型石香肠具体的应力、应变特征及流变学性质却仍有很大的探索空间,对各类石香肠端员名称及组成要素的命名也五花八门。为了便于大家对石香肠构造有一个统一的称谓与系统的认知,本书将石香肠构造组成要素及重要的石香肠构造类型进行了系统的厘定,分别从石香肠的形成机制复杂程度(一期或两期)、流变性质与香肠体形态共划分出两大类、五小类和十五种具有代表性的香肠构造,并根据这个分类方案对各种香肠构造从理论研究、应用研究、实验研究三大方面分别进行了专题探讨。

天然岩石流变学研究起步较晚,是构造地质学的前沿课题,也代表着构造地质学的主流发展方向。本书的天然岩石流变学内容以不同的香肠构造流变计为主体,兼顾应变折射流变计、能干层褶皱流变计以及粒度对于岩石流变性质的影响等。

课题组进行的新型流变仪的研制、实验模型材料流变学参数的测定及相关实验研究也在本书中得到了介绍。

作为香肠构造与天然岩石流变学研究的首部专著,虽然作者们尽力对于本课题组这两个方面研究成果进行总结,仍难免存在许多不足之处,还望广大读者不吝斧正!

目 录

第一章 概 论	(1)
第一节 流变学在构造地质学和大陆动力学研究中的意义	(1)
第二节 香肠构造在构造地质学研究中的意义	(2)
第三节 香肠构造与天然岩石流变学研究	(3)
第四节 参加研究与编写人员	(4)
第二章 香肠构造理论研究	(5)
第一节 香肠构造的研究概况	(5)
第二节 梯形香肠构造研究	(11)
第三节 骨节状香肠构造研究	(21)
第四节 不对称骨节状香肠构造研究	(31)
第五节 对称鱼嘴构造研究	(37)
第六节 不对称鱼嘴构造研究	(41)
第七节 复合香肠构造研究	(46)
第八节 “巧克力方盘”香肠构造研究	(52)
第三章 香肠构造的应用研究	(59)
第一节 利用肿缩香肠构造恢复岩层初始厚度	(59)
第二节 利用鱼嘴构造恢复岩层初始厚度	(63)
第三节 利用矩形香肠构造恢复岩层初始厚度	(68)
第四节 利用骨节状香肠构造恢复岩层初始长度	(71)
第五节 显微香肠构造在岩石古应力计算中的应用	(74)
第六节 香肠构造在大地构造研究中的应用	(77)
第七节 香肠构造在找矿勘探研究中的应用	(80)
第四章 天然岩石流变学	(86)
第一节 流变学与构造流变计	(86)
第二节 岩石圈流变结构研究进展	(92)

第三节	高黏度模型材料流变参数的实验测定	(98)
第四节	筒式拖曳式流变仪的研制	(101)
第五节	筒式拖曳式流变仪的测试应用	(104)
第六节	肿缩香肠构造流变计	(108)
第七节	断裂香肠构造线应变折射流变计	(113)
第八节	菱形香肠构造流变计	(118)
第九节	对称鱼嘴构造流变计	(124)
第十节	不对称鱼嘴构造流变计	(127)
第十一节	剪应变折射流变计	(129)
第十二节	真应变差折射流变计	(131)
第十三节	能干层褶皱流变计	(134)
第十四节	粒度对岩石流变性质的影响	(136)
第五章	香肠构造实验研究	(141)
第一节	肿缩香肠构造的实验研究	(141)
第二节	鱼嘴构造的实验研究	(148)
第三节	骨节状香肠构造的实验研究	(157)
第四节	平行四边形香肠构造的实验研究	(163)
参考文献		(172)
Abstract		(185)
后 记		(186)

第一章 概 论

第一节 流变学在构造地质学和大陆动力学研究中的意义

流变学是研究物质流动和变形的科学,它是一门起源很早而又发展迅速的学科(何平笙,1997;中川鹤太郎,1989;王振东,2001)。我国古代劳动人民早在 2000 多年前就对流变学有了一定的认识(周彦豪,1988)。古希腊哲学家赫拉克利特的名言“万物皆流”更是一语道破流变学的精髓。在地质学研究领域,流变学是研究大陆构造的重要理论基础,大陆岩石圈对构造作用、重力作用和热作用的响应在很大程度上决定于其几何特征和流变学性质。

构造地质学主要研究由内动力地质作用所形成的各种地质构造的形态、产状、规模、形成条件、形成机制、分布和组合规律及其演化历史,并进而探讨产生地质构造的地壳运动方式、规律和动力来源。其中内动力指的是由地球内部的能量(如重力势能、地热能)引起的地质动力。由于岩石流变学、行星地质学等新兴学科的发展,以及高温高压实验技术的日益成熟,导致传统的构造地质学正逐步朝着系统化、量化的方向发展。岩石的物理性质特别是流变学性质是控制其在构造应力作用下长期力学行为的本构关系。在构造地质学研究中,运用流变学的研究方法和理论成果,可以使我们对地质构造的几何特征以及形成的力学机制有更加科学的把握。也正因如此,2002 年 9 月,在美国科罗拉多州丹佛市召开的题为“构造地质学与大地构造学的新航程(New Departures in Structural Geology and Tectonics)”的研讨会上,美国构造地质学家提出将“超越板块构造:流变学与大陆造山作用”作为当代构造地质学研究的首要课题。

构造变形和动力学问题是地质学研究的重要内容,以研究大陆生成和演化的动力学过程为主要目标的大陆动力学已经成为地球科学研究的热点和前沿。大陆动力学是建立在一般的固体力学、流体力学、流变力学以及岩土力学等学科的基础之上的,其研究的地壳、地幔是处于不同温度、不同压力、宽时域、大尺度和大变形条件下的非均质体,其中,脆性和延性兼有,固体变形与黏性流动并存。因此必须引入流变学的观点、方法来研究大陆动力学(Robinson 和 Edwin,1982;Carter 和 Tsenn,1987;Rutter 和 Brodie,1991;王绳祖等,2001)。

正确地建立大陆动力学模型,不可避免地需要查清所研究地质体的几何结构、流变性质和边界条件(付永涛等,1997)。因此流变学被认为是板块构造和大陆构造几何学、运动学及动力学研究之间的桥梁,是大陆动力学研究的一个重要方面(索书田,1992,1993)。要了解构造过程的力学机理,就必须了解地壳与地幔岩石的流变性质。高温、高压实验研究已经为我们提供了一些岩石(矿物)流变学参数的定量信息。但是对于一些常见的地质构造,如能干层褶皱和石香肠等,其构造变形时的温压和应变速率与实验条件有较大的差别,同时天然构造的物质组成是多矿物的,而目前实验得到的多是单矿物的流变参数。从天然构造变形获取定量的

岩石古流变参数,如应力指数及强硬岩层对基质的黏度比,可避开对于温度和压力等条件的估计,为从实验室得到的岩石流变参数推广到天然构造提供了很好的检验和补充。正是基于这样一种与实验岩石流变学互补的需要,天然岩石流变学应运而生。

第二节 香肠构造在构造地质学研究中的意义

香肠构造也称布丁构造(Boudinage structure)(图 1-1),总体上,它是在不同性质的岩石相间成层,相互之间具有明显韧性差异的条件下,受到顺层伸展作用而形成的一种构造,其剖面形态似香肠,因而取名石香肠。关于香肠构造的形成作用,一般认为是当岩层发生顺层伸展时,软弱岩层向两侧作塑性流动,夹在其中的强硬岩层(能干层,competent layer)则在软弱岩层(基质层,matrix layer)顺层流动引起的摩擦力的牵引作用下发生破裂、形变并位移,以致形成构造断面上形态各异、平面上呈一致排列的长条状块段,即香肠体(boudin),而XZ断面上源于同一岩层的香肠体排列表现出的层位即为香肠层(boudinaged layer)。在拉断强硬岩层的间隔中,两侧软弱岩层或呈褶皱形式楔入,或被变形岩层所分泌的物质所充填。由于断开程度、受力对称性以及岩石韧性程度等的差异,实际的香肠构造更加丰富多彩,形态各异。这种构造记录了地层岩石的流变信息和变形过程。

香肠构造的发育与褶皱作用的后期阶段有密切的联系,不同的褶皱作用过程中形成的香肠构造形态也不相同,如在纵弯褶皱作用过程中,当褶皱两翼岩层弯曲到与轴面呈低角度斜交时,近乎垂直岩层的挤压作用就可以导致香肠构造的产生,造成一种长轴平行褶皱枢纽的大型线理。因此,在圆柱状褶皱系统中,香肠体线理指示中间应变轴的方向,而其断面上宽度和厚度则反映香肠体拉伸和缩短的应变情况。反之,在横弯褶皱作用过程中,由于拱曲的结果,在背斜顶部往往发育长度和宽度大体相近的香肠体,在空间上呈“巧克力方盘”状石香肠(徐开礼和朱志澄,1989)。

岩石古流变性质指的是构造变形时岩石在当时所处物理化学条件下的流变性质。为了获得岩石的古流变参数,一般需要在实验室内再造构造变形过程温压等物理化学条件进行流变实验。由于在实验室无法将岩石的应变速率控制到岩石在天然条件下的低应变速率水平,将实验结果应用于地质研究时往往需要外推几个数量级。香肠构造产出普遍,种类众多,含有丰富的岩石流变学信息,而且形式简单,通过研究有望发掘研究岩石古流变性质的方法。运用这些方法得到的岩石古流变参数与高温高压条件下取得的参数进行对比研究,可进一步提高构

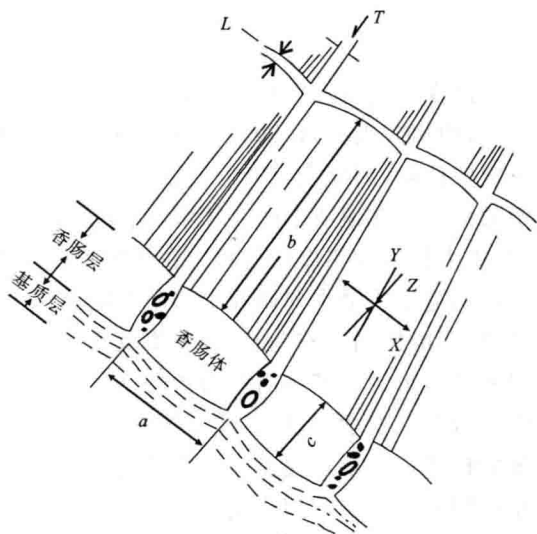


图 1-1 香肠构造的要素及有限应变主轴方位图
(据马杏垣,1965,修改)

a. 香肠体宽度; b. 香肠体长度; c. 香肠体厚度; L. 香肠体纵间隔; T. 香肠体横间隔; X、Y、Z 分别表示最大伸长主应变轴、中间主应变轴及最大缩短主应变轴

造地质学定量化的研究水平。

香肠构造除了其岩石流变学研究意义外,还具有岩石有限应变测量的研究意义。另外,香肠构造在构造运动学和动力学研究、深部构造和大地构造研究、成矿规律与成矿预测研究等方面都具有重要意义。

第三节 香肠构造与天然岩石流变学研究 ——本书的主要进展

香肠构造是一种典型的大型线理构造,因含有丰富的流变学信息而引起了众多研究者的关注;构造流变计作为构造地质学前沿课题之一,也倍受国内外学者的重视。在国家自然科学基金项目“香肠构造流变计研究”(No. 49972068)、国家自然科学基金重点项目“大陆岩石圈天然流变典型区(辽西兴城)解剖研究”(No. 41230206)及高等学校博士学科点基金项目(No. 9349103 和 No. 20120145110002)的资助下,本书对香肠构造和天然岩石构造流变计,特别是香肠构造流变计作了较系统的研究,取得了如下成果。

1. 理论研究方面

(1)通过总结我们在湖北铁山和北京西山等地的研究工作,并参考国内外其他学者的研究成果,重新对香肠构造做了系统的分类与厘定。

(2)系统化分类骨节状石香肠构造,结合形态学与岩石学分析,深入探讨了其不同成因机制。

(3)发现了不对称鱼嘴构造。通过理论和实验研究,对鱼嘴构造分门别类,并提出了其在岩石剪切应变测量方面的方法。通过岩石学和几何形态学研究,系统地分析了铁山鱼嘴构造的形成过程。

(4)重新定义复合石香肠,发现了一些新的复合石香肠构造样式。详细描述了复合石香肠,并系统地予以分类,且深入探讨了成因。

(5)通过有限应变测量,从显微尺度研究了不对称鱼嘴状、不对称骨节状、梯形石香肠构造基质层的XZ面二维应变分布特征,并结合岩石学和形态学特征分析,探讨了后两类香肠构造的成因机制。

(6)探讨了利用肿缩香肠构造反演岩石古流变参数的方法,并在北京西山与川西北地区初步应用。

(7)探讨了利用能干层褶皱计算岩层古流变参数的方法,并在北京西山地区初步应用。

(8)探讨了利用菱形石香肠、对称鱼嘴状石香肠及不对称鱼嘴状石香肠的几何参数估算岩石古流变参数的方法。

(9)提出了线应变折射流变计和真应变差折射流变计,并在湖北铁山、北京西山和川西北地区初步应用。

(10)分析了矿物颗粒粒度对岩石流变性质的影响。

(11)介绍了“巧克力方盘”香肠构造成因机制的研究进展和剪应变折射流变计。

2. 实验研究方面

- (1) 自制了夹心式流变仪, 并成功应用于高黏度物理模拟材料流变参数的测定。
- (2) 自行研制且论证了筒式拖曳式流变仪, 获得国家专利, 并成功应用于中等黏度模拟材料流变参数的测定。
- (3) 自行加工制作了简易纯剪切、简单剪切实验装置, 并大量应用于模拟实验。
- (4) 以物理模拟和数值模拟方法, 研究了肿缩香肠构造、鱼嘴构造和骨节状香肠构造。
- (5) 介绍了肿缩香肠构造的数值模拟研究和平行四边形香肠构造的实验研究。

3. 应用研究方面

- (1) 通过模拟实验及理论研究, 提出了利用野外观测的肿缩石香肠、鱼嘴构造和矩形石香肠反演岩层初始厚度的方法, 及利用骨节状石香肠推算岩层初始长度的方法。
- (2) 介绍了利用显微香肠构造测算岩石古应力的方法。
- (3) 综述了香肠构造在大地构造地质学研究中的应用研究进展。
- (4) 综述了香肠构造在找矿勘探方面的研究进展。

第四节 参加研究与编写人员

本书由曾佐勋、吴林波、徐云峰统编, 编写分工如下: 序和前言由曾佐勋执笔; 第一章由曾佐勋、吴林波执笔; 第二章由吴林波、曾佐勋、徐云峰、蔡永建、刘富、储玲林、樊光明执笔; 第三章由徐云峰、曾佐勋、吴林波、吴武军、蔡永建、李泉执笔; 第四章由曾佐勋、徐云峰、付永涛、樊春、张鲲、林彦蒿、樊光明执笔; 第五章由吴林波、吴武军、刘立林、许海萍执笔; 后记由曾佐勋执笔; 英文摘要由曾佐勋、吴林波执笔。参与具体研究工作的有曾佐勋、吴林波、徐云峰、付永涛、吴武军、樊春、蔡永建、张鲲、储玲林、李泉、刘富、张志勇、林彦蒿、许海萍、樊光明、刘立林、李艳霞、赵兰等。

第二章 香肠构造理论研究

第一节 香肠构造的研究概况

香肠构造由比利时人 Lohest 等(1908)首次系统化论述,用来描述比利时巴斯托尼(Bastogne)地区夹在下泥盆统页岩中酒桶状展布的石英砂岩,而这一现象之前 Ramsay 和 Salter (1866)已经大略观察与描述过。从那时起的 100 多年来,香肠构造的研究取得了巨大的进展。构造样式已从最初单一的酒桶状香肠构造发展到了今天丰富多彩的构造样式;关于香肠构造形成理论研究已取得了较大的进展;香肠构造的应用研究,如香肠构造与大地构造的关系,与成矿的关系,以及香肠构造流变计的研究等,已经展开。我国著名构造地质学家马杏垣(1965, 2004)在描述北京西山的香肠构造时,将藕节状香肠(肿缩石香肠)纳入香肠构造的范围。本书也认同这一观点,并将探讨香肠构造的形态学及其相应的理论与应用。此处提到的各种石香肠,在后文有详细定义,亦见于图 2-1 及表 2-1。

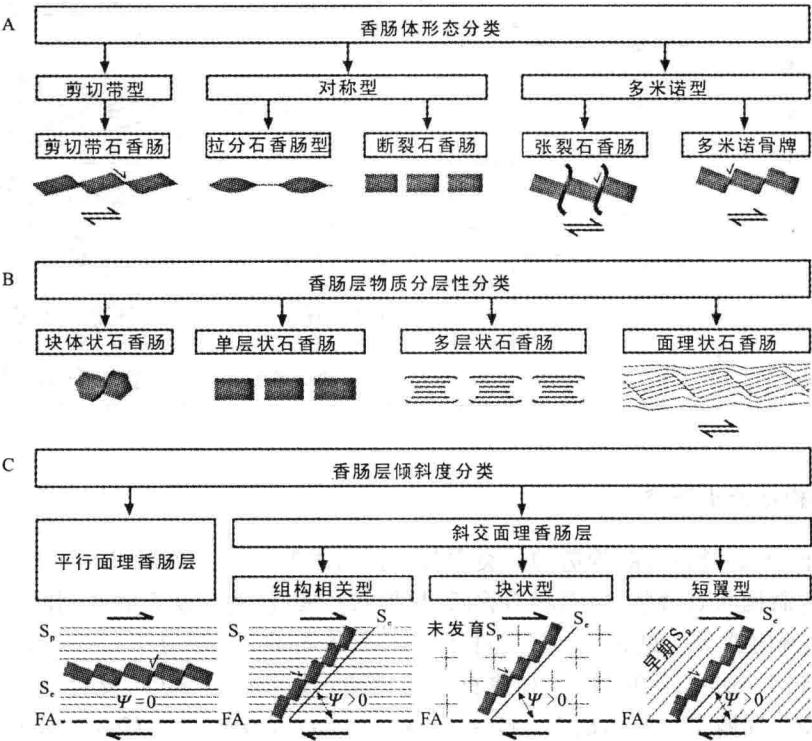
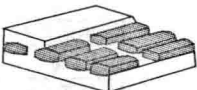


图 2-1 香肠构造分类图(据 Goscombe 等, 2004)

图中边框之间的阴影表示边框内石香肠类型端员之间存在转换联系, FA 为剪切带边界, S_p 为透入性面理, S_c 为香肠层包络面, 单箭头指示相对剪切方向

表 2-1 石香肠构造分类表

复杂程度 分类	力学性质分类	形态学分类		示意图
简单 石 香 肠	脆性石香肠	平行四边形 石香肠	矩形石香肠	
			菱形石香肠	
			一般平行四边形 石香肠	
		梯形石香肠		
		不规则盘状石香肠		
	脆韧性石香肠	对称鱼嘴状石香肠		
		不对称鱼嘴状石香肠		
	韧性石香肠	透镜状石香肠		
		肿缩石香肠		
	复 合 石 香 肠	脆性复合石香肠	断裂复合石香肠	
“巧克力方盘”石香肠				
脆韧性复合石香肠		肿缩断裂复合石香肠		
		酒桶状石香肠		
		对称骨节状石香肠		
		不对称骨节状石香肠		

一、香肠构造分类研究

迄今为止,人们对石香肠构造的分类主要根据石香肠构造断面的几何形状来分类。传统的构造样式有酒桶状石香肠、矩形状石香肠、梯形状石香肠、菱形状石香肠、肿缩石香肠、“巧克力方盘”石香肠构造等。此外,人们还对不规则形状石香肠(李应平,2002)、骨节状石香肠(Malavieille 和 Lacassin,1988)、不对称石香肠构造(Hanmer,1986)、复合石香肠(Ghosh 和 Sengupta,1999)等做了一定的研究。Goscombe 和 Passchier(2003)、Goscombe 等(2004)从石香肠块体几何形态、香肠层物质分层性和香肠层倾斜度三个方面对石香肠构造进行分类(图 2-1)。Twiss 和 Moores(2007)主要从剖面形态及物质组成的角度对石香肠构造进行分类。但

这些分类方案所包含的石香肠类型都不甚齐全。

为了便于野外实践、研究及交流,在前人基础上,结合野外实际观察和香肠构造研究现状,本书对具有较大应变、应力、流变等研究意义的,野外常见的香肠构造端员类型,从香肠构造动力学成因机制复杂程度(主要看是否具有多期性)、香肠体流变性质及其几何形态方面系统分类,并给出了相应的石香肠形态示意图(表 2-1)。首先,将所有香肠构造概分为主要受单期次香肠化作用形成的简单石香肠和两期或两期以上香肠化作用成因的复合石香肠两大类;再根据能干层与基质层的黏度比值由大至小将两大类石香肠构造分别划分出三类和两类;最后,主要依据香肠体形态,同时参考香肠构造的物质能干性组成,依次列举出 15 种指示不同应变、应力、流变等地质信息的石香肠类型端员(不计平行四边形石香肠)。需要说明的是,各力学性质大类内部对应的形态学石香肠类型端员的排列顺序,不指示其能干层与基质层黏度比的相对大小。各石香肠类型端员的具体阐述详见于本书后文不同章节。

至于其他与本分类表给出种类异名同种的、不同端员间过渡的、受后期构造事件严重改造的,或者野外不常见且也不具有特别研究意义的石香肠类型,均未列入。例如西方学者使用较多的多米诺骨牌石香肠即为一列平行四边形石香肠的叠瓦状组合,酒桶状石香肠也称膨凸石香肠,剪切带型石香肠可视为一系列平行四边形石香肠向透镜状石香肠过渡的石香肠类型的叠瓦状组合。

随着野外地质资料的积累,新的香肠构造样式不断被发现。关于香肠构造样式的研究,正从经典的规则形态向不规则形态方向完善。与此相适应,关于香肠构造的成因的理论研究和实验研究也在逐步深化。

二、理论研究

香肠构造理论的早期研究者主要有 Ramberg(1955)、刘如琦(1963)、马杏垣(1965)、Smith(1975,1977)、Lloyd 和 Ferguson(1982)、Stromgard(1973)等。目前,不少学者已经较广泛地分析了香肠构造的形成机制,亦探讨能干层和基质的物质组分和黏度(Mandal 等,2000);有的从石香肠的空间形态(厚度比、裂隙比等)上加以分析(Mandal 等,1994);有的对比能干层遭受的应力状态、石香肠断裂的性质和方向(Mandal 和 Khan,1991;Kidan 和 Cosgrove,1996);其中很多分析都结合了模拟实验。

在断裂石香肠的成因研究上,Lloyd 提出的应力转换模式(Lloyd 和 Ferguson,1982)得到了广泛的认同。该模式认为,从能干层边缘至中间,张应力从最小值增至极大值。根据应力转换模式,能干层在张应力作用下,将不断发生中点断裂作用,直至其抗张强度等于中点张应力。同时,这种递进张裂作用受两种因素的控制:① 自然界岩层由于其物质组成、分布的不均匀和各种局部小构造的存在,往往表现出多个抗张极限;② 岩层中先存的局部缺陷会影响断裂部位的分

布。在分析单层断裂石香肠的形成机制时,Ramberg(1955)假定压应力作用下,厚为 t_1 弹性能干层夹在两片厚为 t_2 的黏性层中,提出了断裂石香肠几何宽度与岩石流变参数之间的关系式:

$$2l = t_2 \sqrt{S_L t_1 / 1.5 \eta \dot{\epsilon}} \quad (2-1)$$

式中: l 为断裂香肠体宽度; S_L 为能干层的抗张强度; $\dot{\epsilon}$ 为垂直层面方向的应变速率; η 为黏性层的黏度。