

国家自然科学基金资助项目

小秦岭变质核杂岩的 构造特征、形成机制及构造演化

张进江 郑亚东 刘树文 著



海洋出版社

国家自然科学基金资助项目

小秦岭变质核杂岩的 构造特征、形成机制及构造演化

张进江 郑亚东 刘树文 著

海洋出版社

1998年·北京

内 容 简 介

本书运用现代造山带构造演化理论和方法,在大量野外调查、室内分析和理论推导的基础上,对华北板块南缘小秦岭变质核杂岩的构造及运动学特征、成因机制、成矿作用和区域构造演化进行了全面论证。重点对剪切带剪切作用类型理论进行了论证,提出了运动学涡度和极摩尔圆系统的理论、方法与应用,并将其与岩浆作用、构造热历史、年代学相结合,对小秦岭变质核杂岩的成因机制进行了综合分析,认为小秦岭变质核杂岩的形成机制为岩浆主动侵位地壳被动拆离伸展,即地壳增厚和岩浆上涌→地壳颈缩→拆离伸展。本书还采用先进方法对假熔岩的成因机制和糜棱岩的成分变化进行了研究。

本书可供从事构造地质的教学、科研和生产人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

小秦岭变质核杂岩的构造特征、形成机制及构造演化/
张进江等著. - 北京:海洋出版社, 1998.10
ISBN 7-5027-4659-5

I.小… II.张… III.①变质岩-构造-秦岭②变质岩-成因-秦岭 IV.P588.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 25666 号

责任编辑:钱晓彬

海洋出版社 出版发行

(100081 北京市海淀区大慧寺路 8 号)

北京兰空印刷厂印刷 新华书店发行所经销

1998 年 10 月第 1 版 1998 年 10 月北京第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 8.9

字数: 214 千字 印数: 1-500 册

定价: 15.00 元

海洋版图书印,装错误可随时退换

前 言

自 70 年代后期, 北美盆岭省的地质研究使造山带伸展构造形成了地质学界一个研究热点, 并认识到造山带伸展构造运动在造山带乃至地壳和岩石圈的演化过程中具有普遍而重要的地质意义。造山带伸展构造的特征、演化过程、动力学以及成因机制的研究日趋深入, 新认识和新观点层出不穷。变质核杂岩和拆离断层是造山带伸展构造形成的特征产物。变质核杂岩的厘定、内部构造及其出露过程和机制, 拆离断层的特征和组成、运动学特征和变形机制, 以及拆离断层和成矿的关系等, 成为众多地质学家关注的研究内容。

自变质核杂岩被认识以来, 其形成机制是共轴纯剪切还是非共轴简单剪切就一直存在着争论。变质核杂岩中普遍发育大型花岗岩体, 花岗岩体侵入作用在变质核杂岩的形成过程中是主动的还是被动的, 即拆离伸展与岩浆侵位何者为主导因素也意见不一。解决上述问题的方法目前尚无突破, 我们通过研究认为确定伸展型拆离断层的剪切作用类型是解决这些争论的有效手段, 将剪切作用类型与岩浆成因学、构造热历史相结合, 是解决变质核杂岩形成机制及其与岩浆作用关系的一种途径。由于剪切作用类型理论尚待完善, 测量方法还不成熟, 因而其应用存在很大局限。据此, 我们对剪切作用类型理论进行了深入探讨, 使该理论进一步完善和系统化, 同时对该理论的研究方法进行了研究, 提出了新的更实用的极摩尔圆编制方法和应用。在此基础上, 提出以运动学涡度理论为基础, 用极摩尔圆法对拆离断层伸展型韧性剪切带的剪切作用类型进行定量测定, 进而确定变质核杂岩形成机制的思路。极摩尔圆是一种较新的应变分析方法, 它既适合于共轴变形分析, 又适用于非共轴变形分析。本书提出的编制极摩尔圆的新方法和极摩尔圆的新应用, 解决了其应用中的局限性问题, 拓宽了其应用范围, 从而使剪切作用类型的研究和应用更为有效。剪切作用类型的研究不仅为定量化构造地质学增加了新的研究内容, 而且还为判别大型构造的形成环境、构造体制以及恢复构造演化提供了有力佐证, 特别是为解决变质核杂岩成因机制问题提供了新的思路和途径。

在秦岭造山带北麓, 即华北地台南缘, 发育一条由造山期、造山后期及期后伸展构造形成的东西向伸展走廊, 其内分布若干个变质核杂岩, 其中小秦岭最大并较为典型。小秦岭变质核杂岩上下盘关系明确, 拆离断层体系发育完整, 为研究造山带伸展构造提供了有利条件, 引起国内一些学者的关注。石铨曾等人 (1993) 认为, 燕山期造山运动结束后, 本区进入造山期后伸展构造阶段, 在 ESE-WNW 向伸展作用下, 地壳发生拆离, 形成区域性统一的拆离断层, 上盘物质向 NWW 运动, 下盘物质由于伸展形成的构造剥蚀而均衡隆升, 形成变质核杂岩, 即小秦岭变质核杂岩是在一个拆离断层的单一方向拆离作用下形成的不对称型变质核杂岩。胡正国和钱壮志 (1994) 以及胡正国等人 (1994) 则认为小秦岭变质核杂岩是一对称型变质核杂岩, 其南北两侧各发育一拆离断层体系, 上盘岩石背

离变质核杂岩运动,形成类似地垒的构造体系。可见,小秦岭变质核杂岩的形成机制尚无统一的认识,形成时代也没有准确厘定。此外,该变质核杂岩的内部构造、面理线理的产状、相关剪切带的剪切指向、拆离断层运动规律和成矿及其岩石学均需进行系统和深入的研究。根据造山带伸展构造理论研究发展的需要和小秦岭变质核杂岩研究中所存在的问题,由郑亚东教授主持进行了题为“变质核杂岩剪切作用类型、相关矿化与地震事件”的国家自然科学基金项目(编号49472142)的研究。此项目目的在于除对小秦岭变质核杂岩的构造、运动学特征、成矿作用和构造演化进行研究外,重点利用运动学涡度理论定量确定其伸展型韧性剪切带的剪切作用类型,并以此为基础结合其他手段对拆离断层的运动规律和变质核杂岩的形成机制进行探讨。本项目的主要工作如下。

(1) 造山带伸展构造机制和剪切作用类型的理论探讨。其中主要对剪切作用类型分析的理论依据——运动学涡度理论进行了论证,对其所采用的有效分析方法——极摩尔圆进行了推导,提出了编制极摩尔圆的新方法和极摩尔圆的新应用。

(2) 小秦岭变质核杂岩的组成、构造特征与大地构造背景。

(3) 小秦岭拆离断层体系及其构造岩。对糜棱岩的应变和成分变化、假熔岩的形成过程与机制以及断层泥的粒度、成分和超显微形态进行了分析测试。

(4) 小秦岭变质核杂岩的构造运动学特征。证明了小秦岭变质核杂岩在形成过程中经历了同造山走滑伸展和造山后期及期后垮塌伸展两个阶段,并确定了各阶段的时代。

(5) 小秦岭变质核杂岩的剪切作用类型。利用运动学涡度理论、岩组分析和应变分析方法确定了小秦岭拆离断层的伸展性质、剪切作用类型及其沿运动方向的变化。

(6) 利用剪切作用类型特征,结合岩浆成因和构造热历史对小秦岭变质核杂岩的形成机制进行了探讨。

(7) 小秦岭变质核杂岩的演化历史。包括利用 PTt 轨迹分析其构造热历史,以及利用构造运动学特征和年代学恢复其构造演化历史。

(8) 构造作用与金成矿的关系。

本书是对项目的总结,也是项目组成员辛勤劳动的成果。项目进行过程中,除作者外,项目组其他成员也始终积极地参与,为项目的顺利完成作出了巨大贡献。河南省地质研究所的石铨曾高级工程师、尉向东和薛良伟工程师,参与了课题的野外及部分室内工作,为野外工作提供了一切便利条件,同时还为本书的编写提供了许多必要的资料。特别是石铨曾高级工程师,还将其在本研究区多年来的研究资料毫无保留地提供给作者,并及时提出指导意见,为本书的完成给予了极大帮助。

项目进行和本书的编写过程中,北京大学地质学系、北京大学城市与环境学系、北京大学电镜室、中国科学院地质研究所、中国科学院广州地球化学所、地矿部西安地质研究所等单位在测试方面给予了大力帮助,中国科学院地质研究所邵兴亚老师对全书进行了审校并提出了许多指导意见,北京大学地质学系徐筠老师为本书中所用图件进行了清绘,胥云承担图件复照,文稿计算机排版由关静完成。作者还先后得到北京大学地质学系韩宝福副教授、李江海副教授、王学潮博士和刘波博士的指导与帮助。

除国家自然科学基金项目“变质核杂岩剪切作用类型、相关矿化与地震事件”资助外,

本书还是国家自然科学基金项目“太行山太古宙杂岩区深成变形变质作用相关性研究”（编号 49672135，刘树文主持）、博士后基金（张进江主持）和中国科学院地质研究所研究生部博士后经费（张进江主持）联合资助成果。

作者对以上指导、资助和帮助表示衷心的感谢。由于作者的水平有限，书中难免有不妥之处，望广大读者不吝赐教。

作者

1998.8.26

第一作者简介



张进江，男，1964年9月出生，祖籍河北。1982年考入北京大学地质学系并于1986年和1989年分别获学士、硕士学位，1989~1994年在铁道部从事科研管理工作，1994年再次考入北京大学地质学系攻读博士学位，师从郑亚东教授，1997年获理学博士学位，现为中国科学院地质研究所博士后。多次参加国内及国际合作项目，主要从事构造地质研究，重点研究方向为构造解析和构造演化，尤其在构造岩石学、构造几何及运动学和变形机制等方面具有一定造诣，近年来通过精细构造解析在解决大地构造演化问题中的应用，在构造年代学和变形历史方面有所发展，现主要从事对青藏高原及三江地区变形机制和构造演化的研究。近几年已在国内外重要学术刊物上发表论文20余篇。

目 录

第一章 造山带伸展构造综述	(1)
第一节 伸展构造的地质意义	(1)
第二节 岩石圈伸展构造的发育位置	(1)
第三节 造山带伸展构造的阶段性的	(2)
第四节 造山带伸展构造机制	(3)
第五节 变质核杂岩和拆离断层	(4)
第六节 变质核杂岩与岩浆作用成因关系综述	(6)
第二章 小秦岭变质核杂岩的区域地质背景和华北地台南缘的伸展走廊	(12)
第一节 区域地质背景	(12)
第二节 华北地台南缘伸展走廊	(14)
第三章 小秦岭变质核杂岩的组成和构造特征	(17)
第一节 小秦岭变质核杂岩的组成及特征	(17)
第二节 小秦岭拆离断层体系	(21)
第三节 小秦岭变质核杂岩的内部构造特征	(25)
第四节 小秦岭变质核杂岩上盘的岩石组成和构造特征	(29)
第五节 小秦岭变质核杂岩内金成矿与构造的关系	(30)
第四章 小秦岭拆离断层构造岩石学研究	(34)
第一节 糜棱岩的应变和成分变化	(34)
第二节 假熔岩及其形成过程和成因机制	(37)
第三节 断层泥的粒度、成分和超显微形态分析	(45)
第五章 小秦岭变质核杂岩的构造运动学特征及其伸展构造的阶段性的	(50)
第一节 概述	(50)
第二节 线状运动学构造要素	(50)
第三节 小秦岭变质核杂岩的构造运动学特征	(52)
第四节 小秦岭变质核杂岩的形成时代	(56)
第五节 小秦岭变质核杂岩形成过程中伸展构造的阶段性的	(61)
第六章 剪切作用类型理论	(64)
第一节 伸展构造的共轴与非共轴机制及其与岩浆活动的关系	(64)
第二节 造山带共轴与非共轴伸展构造机制的判定	(67)

第三节	剪切作用类型理论	(68)
第四节	运动学涡度理论的基本原理和应用	(70)
第五节	极摩尔圆的基本原理	(73)
第六节	极摩尔圆的建立方法	(78)
第七节	极摩尔圆的应用	(80)
第七章	小秦岭变质核杂岩的剪切作用类型、形成机制和构造演化	(85)
第一节	剪切作用类型——岩组、运动学涡度和应变分析	(85)
第二节	糜棱状岩带中剪切作用类型与应变强度的关系	(92)
第三节	岩浆岩成因分析	(94)
第四节	构造热演化	(96)
第五节	小秦岭变质核杂岩的形成机制	(101)
第六节	小秦岭变质核杂岩的构造演化	(104)
结论		(106)
参考文献		(108)
英文摘要		(116)
图版说明及图版		(118)

第一章 造山带伸展构造综述

第一节 伸展构造的地质意义

自 70 年代末北美盆岭区确立大型伸展构造以来 (Davis, 1977; Davis and Coney, 1978; Crittenden, 1980; Wernicke, 1981), 造山带伸展构造就引起地质学界的极大关注并形成了一个研究热点。就目前研究现状, 对伸展构造有以下几点重要的新认识: ①伸展构造的概念性变化。广泛的地质与地球物理研究结果证明, 过去被公认的由高角度穿壳正断层组成的裂堑式伸展构造只发育于局部特殊地区, 而绝大多数的伸展构造则是以置根于中下地壳的铲式或低角度正断层为特征。②在全球范围内, 伸展构造主要发育于造山带。这是因为造山带具有较厚的地壳和较大的重力势能差以及较弱的抗拉强度和构造不连续性, 而其下部热活动又极为强烈, 所以造山带是伸展构造发育的有利位置, 这也是洋盆多次开合于同一位置的主要原因之一。③造山带伸展构造具有普遍意义 (Dewey, 1988)。全球不同地区不同时代的造山带几乎均发育伸展构造, 如南非太古代巴比顿花岗绿岩带 (张家声, 1995), 欧洲加里东和海西造山带 (Osmundsen and Anderson, 1994; Dietz *et al.* 1995), 北美科迪勒拉 (Davis and Lister, 1988), 欧亚特提斯-喜马拉雅山系 (Burchfiel and Royden 1985; Behrmann and Wallis, 1990; Carmignani and Kligfield, 1990; Burchfiel, 1992), 中国天山-兴蒙造山带 (郑亚东, 张青, 1993; 郑亚东等, 1994)、太行山 (牛树银, 1994)、燕山 (戴维斯等, 1994) 和南岭 (Faure *et al.* 1996) 以及本文研究的秦岭等。④造山带伸展构造具有多阶段性和多样性。既有造山后 (包括造山末期) 伸展构造, 也有同造山伸展构造; 既有垂直于造山带的伸展, 也有平行于造山带的伸展。同时, 伸展构造的发育机制也各不相同。⑤造山带的夷平作用过去认为以剥蚀为主, 现认为伸展构造形成的构造剥蚀更为重要, 甚至起主导作用。⑥伸展构造与造山带的岩浆活动有着密切的关系, 岩浆活动既可以是伸展构造的起因或促成因素, 也可以是伸展构造的产物。⑦造山后伸展运动标志着一个造山旋回的结束, 其进一步发展可作为下一构造旋回的开端。由此可见, 造山带伸展构造是造山带地壳演化, 乃至岩石圈演化的一个重要阶段, 因而具有极其重要的地质意义。

第二节 岩石圈伸展构造的发育位置

伸展构造发育位置主要受两个因素的控制, 即板块运动和地球内部物质运移导致的应力场以及岩石圈的强度。地球内部物质运移和板块运动导致的岩石圈应力场是首要控制因素, 它决定了岩石圈中以下几个伸展构造发育的有利位置: ①地幔物质上涌地区, 即洋中脊和大陆裂谷区。②活动大陆边缘, 即弧后扩展区。③挤压应力减小或消失的大陆或地体边界, 即造山带。造山运动使地壳增厚和垂向压力增大, 垂向压力的增大、水平挤压应力的减小和消失以及造山带下部热物质上涌导致应力三主轴的转换, 产生水平拉伸应力场 (Genser and Neubauer, 1993)。

伸展构造发育位置的第二个控制因素是岩石圈的抗拉强度。大量的模拟实验和理论计算证明,岩石圈的抗拉强度是圈内各层强度的垂向积分,主要受地热梯度、物质组分和地壳厚度的影响,其中地壳厚度起着至关重要的作用(图 1-1)(Kusznir and Park, 1987; Lynch and Morgan, 1987)。岩石圈由石英蠕变机制的上地壳、长石蠕变机制的下地壳以及橄榄石蠕变机制的上地幔组成,所以岩石圈的抗拉强度自上而下增强。地热梯度增高,岩石圈流变性质发生变化,塑性软弱层增厚,接受应力能干区域相应上移,岩石圈整体抗拉强度降低,外加应力集中于强度低的上部岩石圈使岩石圈破裂形成伸展构造。在相同地热梯度下,岩石圈抗拉强度主要受地壳厚度的控制,地壳的抗拉强度最小,而其增厚同样会使岩石圈的能干区域上移,使其抗拉强度减小(图 1-1)。

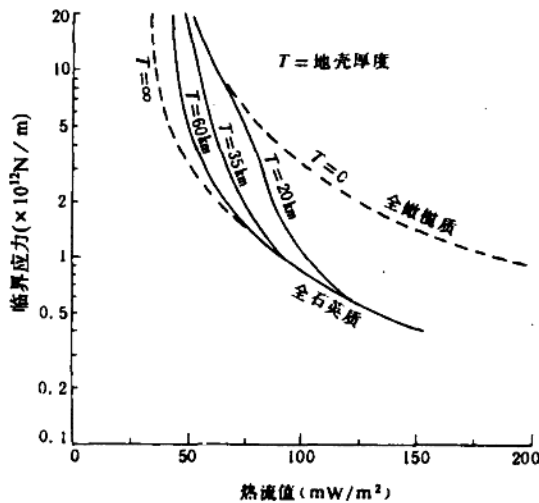


图 1-1 岩石圈抗拉强度与地热梯度和地壳厚度的关系 (据 Kusznir and Park, 1987)

大陆地体碰撞形成造山带,俯冲板片拆沉、热的软流物质补充于造山带根部并形成热穹隆 (Visser and Van der Wal, 1993),或造山带根带的热松弛或热对流夷平作用 (Costa and Rey, 1993),都可能使造山带地热梯度增高。造山作用是岩石圈增厚的主要机制并以地壳特别是上地壳增厚为主,使造山带具有较大厚度的地壳。同时造山带为一构造薄弱带,本身具有构造不连续性,如逆冲断层等。上述因素分析说明造山带具备伸展构造发育的应力条件,而且其抗拉强度最弱,是伸展构造发育的有利位置,决定了造山带伸展构造的普遍意义。

第三节 造山带伸展构造的阶段性的

造山带伸展构造发育的阶段性的首先由 Coney (1987) 提出,他在研究北美盆岭区伸展构造的演化历史时发现其经历了两个阶段的伸展,第三纪中期法拉龙板块俯冲减速形成的以变质核杂岩和拆离断层为特征的伸展为第一阶段,第三纪后期东太平洋洋隆消失、

圣·安德列斯转换断层形成所引起的盆岭式伸展为第二阶段。自 90 年代起, 伸展构造的阶段性被赋予了新的含义, 即根据与造山运动的时间关系, 伸展构造运动可分为同造山伸展阶段和造山后 (包括造山末期) 伸展阶段 (Brun and Driessche, 1993; Mattauer, 1993)。同造山伸展构造与造山作用同期形成, 其伸展形式和机制多种多样, 但以造山挤压导致的侧向挤出最为常见, 伸展方向也多与造山带平行。该阶段持续时间与造山运动一致, 可发生于造山运动的各阶段, 并可以造成地壳减薄和深部物质的隆升, 形成拆离断层和变质核杂岩等伸展构造的特征产物。此外, 该阶段处于收敛期, 可能产生高压变质与伸展构造伴生现象, 如喜马拉雅造山带和海西造山带都存在这种情况。造山后 (包括造山末期) 伸展构造更为普遍, 为碰撞挤压作用减弱或消失后, 增厚的造山带楔体在重力势能差、深部动力作用以及其他因素作用下形成的大规模伸展构造。其伸展方向总体与造山带垂直, 造成地壳的减薄和中下地壳的抬升, 形成拆离断层和变质核杂岩。该阶段持续时间约 30Ma, 但主要集中于前 10 Ma, 之后呈衰减状态直至地壳恢复正常厚度 (Brun and Driessche, 1993)。由于下部热作用和构造剥蚀, 使造山后伸展构造处于高温低压环境。

第四节 造山带伸展构造机制

一、同造山伸展构造机制

该阶段伸展构造形式多样, 机制也各不相同, 其中侧向挤出最为普遍并形成平行于造山带的伸展构造。侧向挤出的机制是不平整大陆边缘的碰撞或斜向碰撞在局部形成较大的挤压应力和具有较大高差的造山带楔体, 使物质侧向挤出形成平行于造山带的伸展构造。不平整边界的碰撞还会改变板块的运动方式和构造应力场。另外, 单纯的造山带楔体高差和重力势能差也会使造山带物质发生重力扩散, 但由于造山挤压体制的约束使物质只能侧向逃逸, 形成平行于造山带的同造山伸展。第二种同造山伸展构造的重要机制是断坡垮塌机制, 造山运动形成大规模的断坪-断坡构造, 多次叠置形成具有超过重力稳定临界边坡角的楔体, 加之断坪-断坡的弯曲作用而形成正断层伸展构造 (Lacassin *et al.* 1993)。如果断坪-断坡构造形成于不平整边界的突出部位, 就会形成平行于造山带的侧向断坡垮塌伸展构造 (Mattauer, 1993)。走滑拉分伸展是另一种同造山伸展构造机制, 大陆碰撞形成雁列式走滑断层系统, 相邻断层末端产生正断层揭顶作用, 使下部物质抬升, 形成平行于造山带的伸展构造 (Genser and Neubauer, 1993)。增生楔逆冲前锋迁移也是同造山伸展构造的一种机制, 俯冲边界形成增生楔及其后的伸展区, 在俯冲前缘的低温高压环境下形成稳定的大厚度增生楔, 但增生楔逆冲前锋不断向外迁移 (俯冲带后退), 使先前形成的增生楔进入伸展区形成与挤压同期的伸展构造 (Jolivet *et al.* 1993)。

二、造山后 (包括造山末期) 伸展构造机制

造山后伸展构造较为普遍, 研究也较为深入, 其成因机制可从深部和浅部机制两方面考虑。在深部机制方面, 大陆碰撞形成造山带并在其下形成下凸的根带, 根带通过拆沉作用 (Sengor, 1990; Vissers and Van der Wal, 1993) 或对流夷平作用 (Platt and England,

1993)而消失,导致造山带的浮力反弹。去根作用及热的软流物质的补充在造山带下部形成热穹隆,同时使地壳产生广泛的部分熔融,形成岩浆上涌,进一步加强浮力反弹效应,从而导致造山带的拉伸应力场。Shemenda (1993)提出了两种软流层超压机制,一种是地幔软流圈在大陆碰撞后形成的软流圈透镜体超压机制;另一种是造山运动使地壳增厚并在下地壳形成楔状壳内软流层,进一步收缩造成类似于流体的超压作用,使造山带产生水平拉伸应力场。

造山后(包括造山末期)伸展构造的上部机制主要是造山运动形成的造山带楔体与周围相比,存在较陡的压力梯度和较大的势能差,使楔体发生重力扩散以达到与周围的平衡。但这只是一种趋势,增厚不是一个足够的驱动力,还需要诸多因素的促使作用(Gans and Miller, 1993)。首先,水平挤压应力的减小和消失,使增厚产生的巨大垂向压应力变成主压应力,形成有利于重力扩散的应力场(Genser and Neubauer, 1993)。在造山带增厚过程中,流变性质的弱化和水分的加入在造山带下部形成韧性软弱带,其规模随增厚的程度增大而增大并进一步弱化,形成造山带楔体的不稳定基底(Willet, 1993)。造山带上地壳的叠置在其内部形成稳定性最差、强弱互层的三明治式结构(Vigneresse, 1993)。造山带下部的热剥蚀、热穹隆和热松弛以及部分重熔使上述软弱层进一步弱化,使造山带楔体处于一种极不稳定状态,这种不稳定状态在造山带楔体向正常地壳的过渡区域最为明显(Daniel *et al.* 1993)。另外,造山带中普遍发育的低角度逆冲断层是构造薄弱面,在失稳的重力作用下极易活化,促使伸展构造的形成。

综上所述,在垂向压力梯度和重力势能差的作用下,在深部和壳内各种因素的影响下,造山带在挤压体制末期和期后发生大规模的伸展构造运动,使地壳减薄,下部物质隆升。但岩石圈上下层变形分布的不同会产生不同的伸展结果。下部变形广泛而上部变形集中则产生拆离断层—变质核杂岩体系,上下部变形范围基本相同则形成裂谷体系,但以前者较为常见(Hopper and Buck, 1993)。

第五节 变质核杂岩和拆离断层

变质核杂岩和拆离断层是造山带伸展构造的特征性产物。Davis (1977)首先提出了“变质核杂岩”这一名词,Coney (1980)将其定义为“一组近圆形或椭圆型的由强烈变形的变质岩石和深成岩组成的分散孤立的穹状隆起,上覆以断层分割并远距离滑移的未变质盖层岩石”。Sefert (1987)进一步将其定义为“近圆形或椭圆形,由强烈变质变形的岩石以及侵入其中的岩体组成的孤立隆起,其上或者被远比核部岩石变质变形轻的岩石覆盖(I型),或者被覆以拆离并远距离运移的盖层岩石(II型)”。变质核杂岩一般具有以下特征(Coney, 1980; Lister and Davis, 1989; 朱志澄, 1994; 宋鸿林, 1995):

- (1) 空间上呈穹状或长垣状孤立隆起,通常具有一翼陡—翼缓的特征。
- (2) 由深部隆升的中、下地壳古老的中深变质岩组成,其中常见有晚期的中酸性岩浆侵入体。
- (3) 变质核杂岩顶部和周缘为一条以糜棱状岩石为特征的韧性剪切带,糜棱岩带的顶部被大型低角度正断层,即拆离断层切割,使早期形成的糜棱状岩石发生脆性变形和蚀变,形成绿泥石化碎裂岩系,出现超碎裂岩,甚至假熔岩。

- (4) 拆离断层的上盘为变质变形较轻的上地壳岩石。
- (5) 变质核杂岩和拆离断层上盘岩石的变形性质绝然不同，变质核杂岩表现为韧性变形，上盘为脆性变形并表现为一期或多期不同类型的正断层。
- (6) 上盘的脆性伸展方向和拆离断层的滑动方向以及下盘糜棱状岩石中的运动方向具有一致性，反映了统一的运动方式。

拆离断层 (Detachment Fault) 一词最先由 Pierce 于 1963 年提出，当时指叠瓦状逆冲断层系的底板断层，即滑脱面。Davis 于 1980 年将其应用于伸展构造，其新定义为“结晶变质基底杂岩与上覆沉积盖层之间的大型低角度正断层或伸展性断层” (见 Ramsay and Huber, 1987)，即分割变质核杂岩与上盘岩石的，并将此两种构造层次相差很大的岩石单元叠置于一起的大规模低角度正断层。拆离断层一般具有以下特征 (Davis and Lister, 1988)：

- (1) 将年轻的变质变形程度轻微的浅构造层次岩石叠置于古老的强烈变质变形的深构造层次岩石之上。

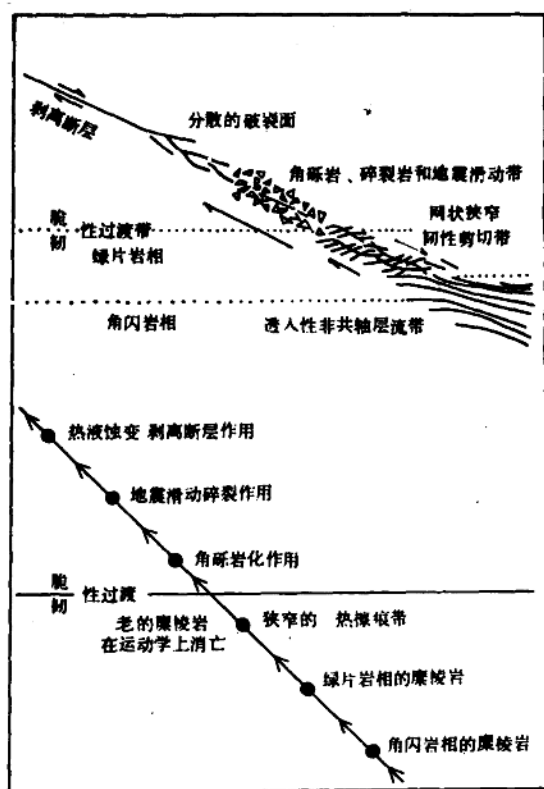


图 1-2 拆离断层的时空演化模式 (据 Davis and Lister, 1988)

- (2) 规模巨大，一般具有区域性或次区域性。
- (3) 位移量大，可达数十公里。
- (4) 上盘以一期或多期正断层形式伸展，这些正断层呈铲状或多米诺状，向下合并于

拆离断层。

⑤ 拆离断层具有特征的构造岩系，即糜棱状岩石、绿泥石化角砾岩、微角砾岩（含假熔岩）、断层角砾和断层泥。它们自下而上顺序产出，向上变新并且发生后对前者的叠加，各类构造岩的发育厚度也依次变薄。

Davis 和 Lister (1988) 认为拆离断层置根于中地壳，其前缘或分支断层向高构造层次扩展并切出地表。沿拆离断层的不同构造层次，自下而上分别形成糜棱状岩石、绿泥石化角砾岩、微角砾岩和假熔岩、断层角砾和断层泥（图 1-2）。由于拆离作用的持续抽拉和伸展作用的构造剥蚀，拆离断层及其下盘岩石隆升，最终出露地表形成变质核杂岩。在出露和隆升过程中，拆离断层某点所处的构造层次逐渐升高，断层带随之变窄，后期形成的浅构造层次的构造岩叠加于先期形成的深构造层次的构造岩之上，形成变质核杂岩所特有的拆离断层边界，即糜棱状岩带—绿泥石化角砾岩带—微角砾岩和假熔岩带—拆离断层面—断层角砾和断层泥。

第六节 变质核杂岩与岩浆作用成因关系综述

在造山带伸展构造成因机制研究中，岩浆作用和伸展构造的关系一直为众多地质学家所关注，其中两者何者为主动因素以及伸展作用过程中岩浆的生成模式尚存在较大争议。特别是作为伸展构造的特征产物，变质核杂岩一般都与大型岩浆侵入体相伴生，使岩浆侵入作用与变质核杂岩形成机制的关系成为一个较为前缘的研究课题。近年来国际地质学界开展的研究，对伸展作用过程中岩浆作用的认识日趋深入，并逐步认识到地幔活动在岩浆作用中的重要性。但由于世界各地地质情况不同，所得结论也存在差异。伸展构造与岩浆作用的成因关系存在两种不同的观点：一种观点认为岩浆作用是伸展作用的结果；另一种观点认为伸展构造是岩浆作用诱发形成的。目前总趋势认为，区域水平拉伸应力场为伸展构造和岩浆作用提供了条件，但未必是先决条件，也不一定是伸展构造发育的直接原因，而岩浆作用则是形成伸展构造的必要因素，并且可能是产生拉伸应力场的原因之一。关于变质核杂岩与岩浆侵入体的关系，以前倾向于伸展构造为主导，但越来越多的研究表明岩浆侵位在变质核杂岩的形成过程中起着决定作用。

一、岩浆作用与伸展作用的关系

关于岩浆作用和现代意义上伸展作用关系的研究，较早见于对北美科迪勒拉岩浆岩的研究（见 Metcalf and Smith, 1995）。认为科迪勒拉内新生代的岩浆岩可分为较老的钙碱系列和较新的碱性系列，其中钙碱系列与低角度俯冲相关，碱性系列的出现标志俯冲的结束和区域性伸展的开始。但以后的研究证明，钙碱性岩浆发生于伸展前和伸展期间，碱性岩浆形成于伸展作用后期及期后（Davis and Hawkesworth, 1993）。目前就伸展与岩浆作用的成因关系存在两种不同的观点，一些学者认为伸展作用是岩浆作用的前提条件（Leeman and Harry, 1993; Harry and Leeman, 1995; Hawkesworth *et al.*, 1995; Hooper *et al.*, 1995），另一些学者则认为岩浆作用导致上部地壳的伸展（Gas *et al.*, 1989; Meyer and Foland, 1991; Lister and Baldwin, 1993）。伸展作用与岩浆作用的成

因关系,目前多采用两种方法加以确定:①时间关系,②岩浆岩的岩性和岩石地球化学。伸展构造和岩浆活动的时间关系有三种:①伸展构造早于岩浆作用;②伸作用与岩浆作用同期;③伸展作用晚于岩浆作用。根据这些时间关系,得出了以下两种不同的岩浆作用和伸展作用的成因关系。

1. 伸展作用导致岩浆的产生

一些地区伸展断层构造早于岩浆的形成或两者同时形成,但岩浆活动受控于伸展构造。根据北美西部岩石圈伸展断层早于岩浆形成,认为岩浆是伸展作用下岩石圈地幔减压部分熔融所致 (Hooper *et al.*, 1995; Broocks *et al.*, 1995); 根据美国内华达东南部的伸展与岩浆活动同时发生但前者控制后者,提出岩浆形成于岩石圈韧性伸展,即岩石圈韧性伸展使软流圈上涌,导致地幔和地壳的部分熔融 (Scott *et al.*, 1995); 根据科勒拉多和下加利福尼亚地区岩浆作用与伸展构造的时间关系和两者的迁移情况,认为岩浆的形成受伸展构造的控制,伸展构造为岩浆的上升提供了通道 (Wenrich *et al.*, 1995; Luhr *et al.*, 1995)。

2. 岩浆作用是伸展构造形成的诱因

岩浆作用引发伸展构造的观点已有许多论述,如造山根带的拆沉和热对流夷平作用在导致地壳均衡反弹的同时,热松弛和热物质补充形成大规模重熔,重熔物质的上升进一步加强浮力反弹,加之侵位的侧向应力,形成拉伸应力场 (Vissers and Van der Wal, 1993; Platt and England, 1993)。该观点的根据是岩浆作用和伸展构造时间的顺序性和连续性,以及构造热历史方面的证据。例如郑亚东等人 (Zheng *et al.*, 1988) 根据北京云蒙山区岩浆活动与变质核杂岩的时空关系提出了热隆—伸展模式。本书以后章节的研究认为,小秦岭变质核杂岩中的岩浆活动早于拆离断层的形成但两者有一定的时间连续性,通过构造、变形机制和热动力学分析,认为岩浆的侵位是伸展构造的起因之一,即地壳增厚和岩浆上涌导致地壳的拉伸,进而导致伸展构造的发生。这一研究结果与 Spencer 等人 (1995) 的研究结果相同,即造山运动形成的高差和地壳根带的浮力作用是伸展构造的主要驱动力,而伸展构造的发生是岩浆上升及其对地壳的加热和弱化所致。通过构造、变质作用和 PTt 轨迹的研究,进一步证明了岩浆上涌和对地壳的加热弱化是伸展构造发生的主要诱导因素 (Lister and Baldwin, 1993; Hill *et al.*, 1995)。

伸展构造的发育需要两个必要的因素:①重力势能差、挤压应力降低和下部作用形成的拉伸应力场;②岩浆的上涌及其加热导致的地壳弱化,其中岩浆作用是伸展构造发育不可缺少的因素。合理的解释应是在各种因素导致的拉伸应力场作用下,岩石圈地幔和地壳通过减压或深部热活动发生部分熔融而形成岩浆,岩浆的上涌和对地壳的弱化作用触发伸展构造的发生。

二、岩浆成因

1. 岩浆来源

与伸展相关的岩浆有三种来源,即地幔楔、软流圈和地壳,其中被交代富集的地幔楔可能是最主要的来源。北美盆岭区岩浆岩地球化学分析证明,与伸展构造相关的基性岩来源于伸展期岩石圈地幔的减压部分熔融,而不是地幔柱(Metcalf and Smith, 1995; Hawkesworth *et al.*, 1995),因为其大离子亲石元素(LIL)极度富集、高场强元素(HFSE)亏损、Sr 初始比高、 ϵNd 低,不相容元素的富集程度比幔柱岩浆高。模拟计算证明在岩石圈伸展的初期阶段,俯冲增厚并交代富集的地幔楔是伸展作用中岩浆的主要来源,导致其化学性质与俯冲型岩浆的相似性(Harry and Leeman, 1995; Hawkesworth *et al.*, 1995; Hooper *et al.*, 1995; Spencer *et al.*, 1995; Falkner *et al.*, 1995; Rogers *et al.*, 1995)。

科勒拉多高原西部的基性岩地球化学性质和洋岛玄武岩(OIB)相似,认为其来源于软流圈(Wenrich *et al.*, 1995)。壳源主要指下部熔体上升过程中的地壳混染和地壳受来自地幔热影响产生的部分熔融,如小秦岭变质核杂岩中的壳幔混熔型岩浆(见本书第七章)和加拿大 Shuswap 变质核杂岩中的高铝花岗岩(Vanderhaeghe and Teyssier, in press)。拆离断层剪切热和剪切脱水作用以及构造剥蚀的减压作用在地壳浅部导致的纯壳内部分熔融,也可形成伸展构造带内的壳源岩浆,如浅色花岗岩脉等。

综合已有研究,伸展区岩浆除少量来源于拆离断层剪切热和剪切脱水作用下的浅部地壳外,绝大多数岩浆与地幔相关,或来源于地幔楔和软流圈,或受地幔物质影响。

2. 成因机制

伸展构造带内岩浆的成因有两类观点,一是伸展构造的减压作用,一是岩石圈下部和软流圈的热活动,目前后者最为流行,造山带伸展构造中更是如此。造山作用形成富集根带,在随后的热松弛过程中必然产生部分熔融,即增厚—松弛—熔融—垮塌过程(Vanderhaeghe and Teyssier, in press)。下部熔融的另一种方式可能是根带的拆沉和软流物质的补充而形成的热穹隆(Vissers and Van der Wal, 1993; Platt and England, 1993)。Hill 等人(1995)在研究巴布亚新几内亚现仍在活动的变质核杂岩时提出了岩浆的地幔热源成因机制:地幔的对流使地幔热物质进入下地壳并提供热源,导致下地壳部分熔融产生岩浆,岩浆因浮力上升到中地壳,使之发生部分熔融、混合岩化和高温变质(图1-3)。这种物质自下而上的传递,形成变质核杂岩下地壳减薄中地壳增厚。美国西部伸展地区一些变质核杂岩也具有上、下地壳减薄中地壳增厚的现象。除上述两类成因外,一些变质核杂岩中存在与拆离断层或大型剪切带平行的脉状、透镜状浅色花岗岩,可能是拆离断层剪切热和剪切脱水作用下浅层地壳的部分熔融。