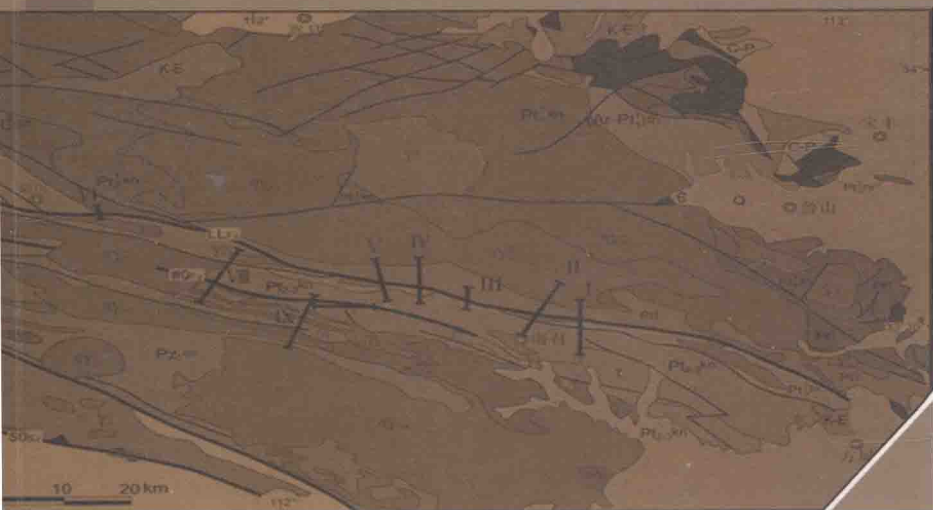


# 秦岭伏牛山构造带的

# 变质-变形分析

任升莲 著



合肥工业大学出版社

# 秦岭伏牛山构造带的 变质-变形分析

任升莲 著

合肥工业大学出版社

## 内容简介

秦岭造山带是扬子和华北两大板块俯冲、碰撞及陆间造山作用的结果。伏牛山构造带位于秦岭造山带的北部,是板块汇聚作用导致华北板块南缘强烈变形,并最终被卷入秦岭造山带之中,成为造山带的重要组成部分,它记录了造山带形成和演化的全部过程。

以板块构造学和构造矿物学为指导,作者对伏牛山构造带开展了运动方式、剪切类型、变形强度、应变速率、构造环境、变形机制、古应力大小和构造年代学的精细研究,恢复了古板块的俯冲、碰撞作用下板块的汇聚方式和运动学过程,揭示了构造带不同类型岩石变质相和变形相及其相互的关系,进一步认识了秦岭造山带的结构、演化和动力学特征。

本书是国家自然科学基金项目“秦岭伏牛山构造带的变形作用与构造过程研究”(41272213)和“东秦岭北部造山过程中不同变形作用和转换关系研究”(41072161)的重要研究成果之一。

### 图书在版编目(CIP)数据

秦岭伏牛山构造带的变质-变形分析/任升莲著. —合肥:合肥工业大学出版社, 2013. 12

ISBN 978-7-5650-1590-8

I. ①秦… II. ①任… III. ①秦岭—构造带—研究 IV. ①P548.241

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第267118号

## 秦岭伏牛山构造带的变质-变形分析

任升莲 著

责任编辑 陆向军

出版	合肥工业大学出版社	版次	2013年12月第1版
地址	合肥市屯溪路193号	印次	2013年12月第1次印刷
邮编	230009	开本	787毫米×1092毫米 1/16
电话	综合编辑部: 0551-62903028 市场营销部: 0551-62903198	印张	12
网址	www.hfutpress.com.cn	字数	277千字
E-mail	hfutpress@163.com	印刷	安徽联众印刷有限公司
		发行	全国新华书店

ISBN 978-7-5650-1590-8

定价: 38.00元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。



# 前 言

秦岭造山带是横贯我国东西的一条大型陆内造山带，是华南和华北两大板块俯冲、碰撞及陆内造山作用的结果。板块汇聚作用引起了华北板块南缘强烈变形，并最终被卷入秦岭造山带中成为造山带的重要组成部分。伏牛山构造带就位于这个特殊的位置，它记录了造山带形成和演化的全部过程。所以，对其变质-变形作用细节的研究，可以恢复板块的俯冲碰撞作用，反演古板块的汇聚方式和运动学过程，对建立大陆造山带的结构、演化和动力学模式有着重要意义。

本书以构造矿物学和板块构造学为指导，以秦岭伏牛山构造带内的洛栾断裂带和瓦乔断裂带及其影响的旁侧岩石为标志体，以其构造岩石的宏观、微观及超微观变质-变形特征为主要研究内容，以9条横穿伏牛山构造带的横剖面和1条沿构造带的纵剖面为主线，通过重点地段的地质填图、剖面绘制、运动学涡度分析、有限应变测量等构造解析常规方法，分析有关的面理、线理组构、运动学矢量、剪切类型和方式等内容；利用矿物变形与应力关系研究构造岩相带变形的应力、应变状态，估算构造岩相带变形的古应力大小；利用岩石学手段结合不同尺度分析，研究变质岩的矿物成分、结构、构造特征，并确定其分布规律，分析变质相与构造带的关系；利用特征变质矿物研究分析断裂带及两侧变形岩石中特征变质矿物种类、数量及组合关系，解析变形时期构造环境；利用矿物变形特征研究构造岩的变形方式和变形机制，揭示矿物塑性变形序列，特别是特征变质矿物的脆—塑性转换变形机制及影响脆—塑性转换的温度、压力、应变速率等因素；通过对变形过程中产生的同构造变质流体的变形特征、成分特征进行分析，探讨其来源及其形成年代；通过对构造带岩石变质与变形特征研究，划分构造带岩石的变质相和变形相，分析同一构造背景下构造带岩石形变与相变之间的关系，建立构造带岩石的变质相—变形相的关系模式。

通过大量阅读相关资料和前人成果，在充分了解区域地质背景和研究现状的基础上，针对秦岭伏牛山构造带的特点分析其存在问题，作者进行了大量的野外现象观测、室内分析测试等综合研究，尝试用矿物学与构造地质学相结合的研究思路和宏观、微观、超微观变形技术相结合的研究手段和方法，在变形变质岩石学、构造矿物学、构造地质学和地质-热事件年代学等方面做了相应的研究，并取得以下研究



成果:

### (1) 伏牛山构造带的宏观地质特征

伏牛山构造带位于北秦岭北部,北界为洛栾断裂带,南界为瓦乔断裂带。

洛栾断裂带作为北秦岭与秦岭北缘的界线,宽十几公里,是由一系列韧性剪切带和夹在其间的岩片组成的构造带。断裂带西窄东宽,总体走向 $290^{\circ}$ ,倾向NNE,倾角多为 $60^{\circ}$ 。具有四期变形,早期由南向北俯冲,随后产生大规模的左行剪切作用,形成大量的糜棱岩,这期的糜棱岩是本书研究的重点。第三期为弱糜棱岩化作用,最后一期是岩片产生由北向南的逆冲作用。糜棱岩自东向西由粗粒糜棱岩向中粒糜棱岩—细粒糜棱岩变化,分别对应于中下部地壳的变形、上部地壳的下构造层和上部地壳的中上构造层的变形。

瓦乔断裂带为伏牛山构造带的南界,是二郎坪岩群与宽坪岩群的界线,宽几公里至十几公里不等,也是由多条韧性剪切带组成。各剪切带产状基本一致,走向 $290^{\circ}$ ,倾向NNE,倾角约 $50^{\circ}$ 。断裂带内广泛发育糜棱岩,超糜棱岩,糜棱岩矿物 $\sigma$ 、 $\delta$ 残斑,石英脉体形态等特征指示其具有由北向南逆冲兼左行平移的特征。

### (2) 伏牛山构造带的显微变形特征

伏牛山构造带的岩石主要有糜棱岩、构造片岩、糜棱岩化岩石等。其中糜棱岩按原岩成分的不同分为:长英质糜棱岩、碳酸盐质糜棱岩、基性糜棱岩等。通过大量的显微观察和分析,发现整个构造带的矿物组合和矿物变形特征自东向西明显不同,且具有一定的规律。

### (3) 构造岩的变形机制、变形相和矿物塑性变形序列

长英质糜棱岩是伏牛山构造带出现最多的一类糜棱岩。东部石英的变形机制为位错攀移成为重要的蠕变机制,为高温塑性变形机制,西部石英则以脆性微破裂、位错滑移与重结晶为主。东部长石的变形机制为位错蠕变为主;西部则以微裂隙、双晶与重结晶为主。因此,东部长英质糜棱岩的形成机制为中地壳偏深的环境下的晶质塑性变形、高温扩散蠕变为主的塑性变形机制;西部则为上地壳下部—中地壳上部环境下的低温扩散蠕变、颗粒边界滑移以及晶质塑性变形控制的塑性变形机制。

伏牛山构造带中矿物塑性变形序列为:方解石、黑云母、石英、斜长石、钾长石等。

伏牛山构造带长英质糜棱岩的变形相变化为:自东向西,依次为二长石变形相、石英斜长石变形相、石英变形相等。

### (4) 伏牛山构造带的形成环境

#### 1) 变质相

通过岩石的矿物共生组合分析伏牛山构造带变质相:东部为低角闪岩相,往西逐渐转变为高绿片岩相和低绿片岩相。

#### 2) 变质-变形温度

通过变质相、石英动态重结晶型式、石英脉包裹体测温、糜棱岩中的动态重结



晶石英分维数、石英组构分析、斜长石和角闪石地质温度计等多种方法的分析和计算，得出伏牛山构造带的形成温度为中温偏高的条件，东部的温度高于西部。洛栾断裂带形成温度范围为 300~550℃，瓦乔断裂带形成温度范围为 500~550℃。

### 3) 压力和应变条件

① 糜棱岩的动态重结晶石英分维数计算的洛栾断裂带差异应力为 0.32~0.41 GPa，应变速率值为  $3.92917E-11 \sim 3.17713E-16$ ；瓦乔断裂带的差异应力为 32.417~33.524 MPa，应变速率值为  $3.45769E-14 \sim 2.14687E-16$ 。两条断裂带的差异应力均表现为自东向西逐渐增大趋势，属于中等应变速率条件。

② 同构造石英脉的石英晶体位错特征显示：洛栾断裂带具有先挤压后叠加较强剪切改造的特征；瓦乔断裂带则表现出先强烈挤压后叠加弱剪切力为辅的特征。根据位错密度计算的差异应力为：0.71~0.87 GPa，应变速率值为： $2.34445E-11 \sim 4.05872E-11$ 。

③ 利用角闪石全铝压力计获得洛栾断裂带的压力为：0.75~0.95 GPa，瓦乔断裂带的压力为：0.60~0.85 GPa。

④ 利用 Massonne 多硅白云母压力计计算出伏牛山构造带的压力为 0.27~0.87 GPa。

通过上述不同方法得出伏牛山构造带岩石的变质-变形的温压条件基本相同，均表现出东部温压条件高于西部。说明东段抬升强，西段抬升弱。

### (5) 构造带运动学特征

伏牛山构造带两条主要断裂带的岩石有限应变测量结果显示，其运动学特征各自不同：洛栾断裂带单剪作用较强，而瓦乔断裂带以纯剪作用为主。

### (6) 伏牛山构造带年代学特征

同构造石英脉的 ESR 测年结果显示：在  $372.9 \pm 30.0$  Ma 时洛栾断裂带产生剪切走滑作用，瓦乔断裂带韧性剪切走滑的年龄是  $275.0 \pm 20.0$  Ma。所测  $218.0 \pm 20.0$  Ma、120 Ma、 $71.6 \pm 7.0$  Ma 的年龄则反映了扬子、华北两大板块印支晚期全面闭合以及燕山期的构造-热事件在北秦岭也产生了一定的影响。北秦岭各构造带在时代上自北向南依次变新，说明是自北向南演化的。

### (7) 伏牛山构造带岩石变质相与变形相的对应关系

伏牛山构造的岩石变质相和变形相有明显的对应关系：长英质糜棱岩变形相自东向西依次为二长石变形相、石英斜长石变形相、石英变形相。在地壳层次上表现为从中地壳到上地壳层次。矿物共生组合显示出东部岩石的变质相为低角闪岩相，往西逐渐转变为高绿片岩相和低绿片岩相。所以，伏牛山构造的变质-变形条件自东向西是由高到低的。

总之，本书以伏牛山构造带中具有特殊构造作用的洛栾断裂带、瓦乔断裂带和受其影响的宽坪岩块、二郎坪岩块北缘、栾川岩片、陶湾岩片、石人山岩块南缘为切入点，通过分析伏牛山构造带岩石的变形细节和应变特征，确定华北板块南缘的



变形作用、构造型式，恢复其所在岩相带、主压应力方位及作用方式；通过研究伏牛山构造带岩石的变质特点、形成方式、机理、环境，分析断裂带对其周边岩石的变质-变形影响，建立岩石变质相-变形相的耦合关系等，从构造矿物变质-变形过程、形成方式的角度进一步认识秦岭造山带中大型剪切带在造山过程中的应力、应变状态及演化，利用矿物学-岩石学-微观构造地质学的研究内容和方法，建立板块运动与大陆边缘变质-变形模式，为探索大陆造山带的结构、演化和动力学问题，提供可靠的、精细的支撑数据和资料。

任升莲

2013年12月



# 目 录

## 第一章 绪 论 ..... (001)

- 第一节 研究现状 ..... (001)
- 第二节 存在问题及研究内容 ..... (005)
- 第三节 研究思路及研究方法 ..... (007)
- 第四节 主要成果与认识 ..... (010)

## 第二章 北秦岭区域地质概况 ..... (013)

- 第一节 北秦岭区域地质概况 ..... (013)
  - 一、新太古代—古中元古代变质基底杂岩和过渡性浅变质基底 ..... (015)
  - 二、主造山期受板块构造和垂向增生构造控制的相关构造岩片 ..... (016)
  - 三、中生代后造山期在陆内沉积及花岗岩活动形成的构造岩石单元 ..... (018)
- 第二节 北秦岭主要构造界线 ..... (018)
  - 一、洛栾断裂带 ..... (020)
  - 二、瓦乔断裂带 ..... (020)
- 第三节 北秦岭的构造演化 ..... (020)

## 第三章 洛栾断裂带的宏观变形特征 ..... (022)

- 第一节 留山镇—上关村构造剖面 (剖面 I) ..... (024)
- 第二节 南召—王庄构造剖面 (剖面 II) ..... (024)
- 第三节 北大庄—十里庙构造剖面 (剖面 III) ..... (027)
- 第四节 龙头沟构造剖面 (剖面 IV) ..... (029)
- 第五节 马市坪—焦园村构造剖面 (剖面 V) ..... (030)





第六节	庙子实测构造剖面 (剖面 VI)	(032)
第七节	陶湾—红庙构造剖面 (剖面 VII)	(034)
第八节	线理、面理特征	(036)
第九节	小结	(036)
一、	构造特征	(036)
二、	岩石学特征	(039)
三、	运动学特征	(040)

#### 第四章 洛栾断裂带的显微构造特征 (042)

第一节	长英质糜棱岩的显微变形特征	(043)
一、	留山镇—上关村地区的长英质糜棱岩	(044)
二、	南召—王庄地区的长英质糜棱岩	(044)
三、	北大庄—十里庙地区的长英质糜棱岩	(048)
四、	龙头沟地区的长英质糜棱岩	(049)
五、	马市坪—焦园村地区的长英质糜棱岩	(049)
六、	栾川庙子地区的长英质糜棱岩	(049)
七、	陶湾—红庙地区的长英质糜棱岩	(049)
第二节	变形相与变形机制	(054)
一、	地壳岩石的变形相	(054)
二、	地壳岩石的变形机制	(054)
三、	长英质糜棱岩的塑性变形机制	(056)
四、	洛栾断裂带长英质糜棱岩的变形机制	(058)
第三节	碳酸盐质糜棱岩的显微变形特征	(059)
第四节	基性糜棱岩的显微变形特征	(062)
第五节	构造片岩的显微变形特征	(065)
一、	伏牛山构造带构造片岩特征	(066)
二、	伏牛山构造带构造片岩的形成环境	(068)
第六节	小结	(071)

#### 第五章 瓦乔断裂带的构造变形特征 (073)

第一节	瓦乔断裂带的宏观构造特征	(073)
一、	上庄坪—栗扎树村构造特征 (剖面 VIII)	(074)
二、	洞街—八里湾构造特征 (剖面 IX)	(074)



三、北大庄—十里庙构造特征 (剖面 III) .....	(079)
四、纵向剖面 (剖面 X) .....	(080)
第二节 瓦乔断裂带的构造岩石学特征 .....	(081)
一、长英质岩石显微变形特征 .....	(081)
二、基性糜棱岩的显微变形特征 .....	(083)
三、碳酸盐质糜棱岩显微变形特征 .....	(086)
第三节 小 结 .....	(088)

## 第六章 伏牛山构造带变质流体特征 ..... (090)

第一节 变质脉体的变形特征 .....	(091)
一、变质脉体的宏观变形特征 .....	(091)
二、显微变形特征 .....	(093)
三、变质脉体的超微变形特征 .....	(094)
第二节 变质脉体中的包裹体特征 .....	(097)
一、包裹体岩相学特征 .....	(097)
二、变质脉体形成的温压条件 .....	(098)
三、包裹体成分和 H、O 同位素分析 .....	(101)
第三节 小 结 .....	(104)

## 第七章 伏牛山构造带的形成环境 ..... (105)

第一节 矿物微观变形特征及变质相 .....	(106)
一、长英质糜棱岩 .....	(106)
二、碳酸盐质糜棱岩 .....	(108)
三、基性糜棱岩 .....	(109)
四、构造片岩 .....	(109)
第二节 伏牛山构造带的形成温度 .....	(111)
一、石英动态重结晶型式的温度分析 .....	(111)
二、石英动态重结晶颗粒分维数估算流变参数 .....	(115)
三、石英组构测温 .....	(123)
四、地质温压计测温压 .....	(127)
第三节 岩石有限应变测量 .....	(137)
第四节 运动学涡度分析 .....	(141)
第五节 伏牛山构造带年代学特征 .....	(142)



一、锆石 U-Pb 同位素测龄 .....	(142)
二、白云母年代学分析 .....	(145)
三、石英 ESR 年代学分析 .....	(145)
四、伏牛山构造带的年代学特征与构造意义 .....	(146)
第六节 总 结 .....	(147)

---

**第八章 结 论 .....** (150)

---

参考文献 .....	(156)
------------	-------



# 第一章

## 绪论

### 第一节 研究现状

造山带是地球表层构造变形最强烈的地区之一，是揭示地球演化史最重要的地方。20世纪80年代以来，国际地科联等三大国际地学组织的合作项目“造山带的性质和演化”、“俯冲带的构造细节”，德国地球科学的重点项目“造山作用过程”，美国岩石圈计划的优选课题“自然实验室”，中国重视的重大前沿研究领域“造山带的结构、过程和动力学”，以及国家自然科学基金委员会的重大项目“秦岭造山带”，使得古板块俯冲和碰撞过程的恢复、古板块演化历史的再造，已经成为当今地球科学研究的最重要科学问题之一（宋述光，2009；Bowman et al, 2003；Allen et al, 2003；Chardon, 2003；Little et al, 2002；张国伟等，2001a, 2001b；McClelland et al, 2000；Richard et al, 2000；Bell et al, 1999；Teyssier et al, 1999；李晓波，1993）。

根据形成大地构造位置或背景，造山带可以划分为板内和板缘造山带两大类型。其中，板块俯冲、碰撞作用形成的大陆造山带是主要类型，并已成为大陆动力学的研究热点。板块边缘地区由于汇聚作用常常产生强烈变形，并最终被卷入造山带中，成为造山带的重要组成部分。因此，它记录了造山带形成和演化的全部过程。所以，研究造山带的变形作用细节不仅可以恢复板块俯冲碰撞作用、反演古板块的汇聚方式和运动学过程，而且对建立大陆造山带的结构、演化和动力学模式也至关重要。因此，古板块俯冲碰撞作用精细的构造物理过程和造山带的变形作用细节研究已成为造山带研究的关键热点问题和重要研究内容，而造山带中构造岩片和剪切带变质-变形作用的精细解析和构造年代学研究，则自然成为造山过程研究的重要研究方法和切入点（万天丰，2011；杨经绥等，2010；Neves et al, 2005；Klepeis et al, 2004；Chardon, 2003；Bowman et al, 2003；Allen et al, 2003；索书田等，2001；Jiang et al, 2001；张国伟等，2001a；许志琴等，2001；Richard et al, 2000；李晓波，1993；Sengor et al, 1996b）。



古大陆边缘变形作用与板块的汇聚方向和速率密切相关。板块运动过程中的斜向汇聚作用普遍存在，并在变形板块体内发生多种变形作用，导致大陆边缘变形倾向滑动和走向滑动的产生。致使板块的俯冲碰撞、板缘变形走滑和伸展构造等力学性质完全不同的构造现象同存于挤压汇聚型的造山带中，侧向挤出、块体旋转、发散性的冲断和走滑等现象则是非平直板缘边界、非同时对接的真实记录，而边界突出部位往往成为最早对接且强烈变形的地区。造山带前陆大量同向冲断层的产生，基底的卷入和高压变质岩的出露，说明板块运动速度较快；大规模的断层弯曲、双重构造、后退式冲断作用或无序的前进冲断作用，水平汇聚分量增大，发生造山作用等，表明板块俯冲角度较小 (Royden, 1993)；大陆与岛弧之间俯冲极性、活动大陆边缘变形带的宽度、分带性、复杂性与汇聚板块的规模、形状和性质密切相关。由此可见，板块的运动方向、运动速度和俯冲角度控制着古大陆边缘的俯冲极性、俯冲形式等变形行为；板块的规模、形态和性质控制着大陆边缘的构造样式和变形强度。因此，板块运动方向和速率的研究对认识大陆边缘变形作用细节，探索造山带的成因以及大陆增生等科学问题意义重大。

002

剪切带是造山带中最重要的变形型式之一，它往往记录了大陆边缘从板块俯冲、碰撞到造山带形成、演化过程中各个阶段的变质变形作用。通常，人们认为挤压过程中产生逆冲，剪切背景下产生走滑。但是，近年来逐渐认识到构造取向和构造样式既受挤压应力控制，又受剪切分量控制。所以，各种动力体制下变形带的构造方位与运动方式关系密切 (Krantz, 1995)。变形分解作用使得岩石产生纯剪变形和单剪变形，且不受尺度影响。这些不同方位、不同性质的变形组合，形成多种变形分解图案，正是这些图案成为分析和判断大陆边缘剪切变形作用和板块汇聚方式、运动方向的重要标志 (Jiang, 2001; 索书田等, 2001; 索书田, 1991; Vignerresse et al, 1990; Bell et al, 1986; Bell, 1981)。造山带内不同性质、不同类型的构造变形和组合图案是板块汇聚方式在板块边缘变形分解的结果，也是恢复古板块运动方向、碰撞过程中最重要的内容和解析对象，自然也就成为研究大陆造山带结构、过程、运动学和动力学问题的关键。因此，变形分解理论和方法常被用于解析造山带不同尺度变形的许多构造问题 (Song et al, 2009)。从显微尺度的变斑晶的成核、生长及其变形，面理、线理的形成和置换，到造山带中区域尺度下的线性剪切变形带的交织组合，再到岩石圈尺度下的流变学分层等不同尺度的研究表明：变形分解在大陆边缘和造山带变形研究中发挥着重要的作用。

一直以来，许多地质学家利用多种理论和方法研究古板块运动方向与大陆边缘变形作用，并使其成为造山带形成过程的最重要研究内容之一，成果令人瞩目 (Neves et al, 2005; Bowman et al, 2003; Allen et al, 2003; Klepeis et al, 2004; Chardon, 2003; Little et al, 2002; McClelland, 1994; Teyssier et al, 1999; Neubauer et al, 1999; lammerer et al, 1998; Linzer et al, 1997; Gursoy et al, 1997; Piper et al, 1996; Tatar et al, 1995; Pichon et al, 1995; Krantz, 1995; Miller, 1994; McCaffrey, 1992, 1994; DeMets et al, 1990; Sanderson et al, 1984)。Platt (1989)



曾利用多种方位线状指示物与面理交切轴之间的关系,分析了阿尔卑斯造山带西段的上覆岩层运动方向,以此判定挤压缩短的应力状态和斜向汇聚引起的侧向挤出作用;Wallance (1990) 研究认为,圣安德烈斯断裂变形分解显示出不同地段的混合式(左阶或右阶)组合和岩体斜向就位方式,是科迪勒拉造山带右行斜向汇聚的结果;Jones (1995) 也曾利用显微构造方法分析苏格兰上地壳泥盆系的变形,探索其左行斜向汇聚的特点;Michel (1995) 和 Piper (1996, 1997) 在研究土耳其安纳托利亚地区主要走滑断层图案和运动状态时,认为阿拉伯板块在新生代与欧洲板块斜向汇聚时存在向西挤出的剪切变形分量;Malod (1996) 和 Bell (1985, 1989) 也曾利用美国佛蒙特州东南部多种线状、面理构造研究应力方位,分析了阿巴拉契亚造山带右行斜向汇聚的演化过程;Richard (2000) 和 Jiang (2001) 认为澳大利亚板块的右行斜向汇聚导致了新西兰 Alpine 断裂带在不同深部的岩石变形及构造叠加;Reutter (1996) 在研究智利北部 Chuquicamata 地区断裂样式图案时,证实了平行于岛弧走滑断裂带的存在。另外,苏格兰的 Mid-Devonian 造山带左行斜向汇聚方式 (Jones, 1995), 多米尼加加勒比岛弧的斜向汇聚和变形分解作用 (Viruete et al, 2006) 以及苏门答腊造山带的右行斜向汇聚等现象,都是不同方式板块运动与变形分解作用的典型记录,并得到广泛认同。

目前需要解决的重要科学问题是:汇聚边界带中不同的构造样式和变形类型记录了怎样的板块运动方向和运动速率?不同构造变形反映了板块汇聚过程中不同形状、不同规模块体间怎样的碰撞、对接或叠置方式?不同类型结晶岩石的变质-变形信息提供了怎样的由板块碰撞引起的构造环境和持续时间?可见,采用构造解析方法,利用变形分解理论,分析大陆边缘变形作用细节,恢复古板块俯冲碰撞方式、运动过程和时限,是大陆造山带研究的重要内容和方法。

近 20 年来,我国大陆造山带的研究也取得了丰硕的成果 (陈衍景, 2010; 袁四化等, 2009; Windley et al, 2007; Wang et al, 2002; 李三忠等, 2002; 王涛等, 2002; 曾佐勋等, 2001; 宋传中等, 2000, 2009; 许志琴等, 1999, 2001; 索书田等, 2001; 索书田, 1991; 张国伟等, 1997b, 2001; Nelson et al, 1996; Grujic et al, 1996; 袁学诚等, 1994), 不同形式的大陆边缘变形特点十分明显。张国伟 (1996a, 1996b), 许志琴 (1999), 索书田 (1991) 分别通过造山带结构、变形分析和花状构造组合研究,指出秦岭造山带由多块体组成,存在平行造山带的左行平移现象;张进江 (2001), 王成善 (1998) 对东喜马拉雅构造结东西两条构造带中的面理、线理构造研究认为:喜马拉雅造山带左行斜向汇聚的同时伴有挤出构造;宋传中 (2006, 2009) 研究了东秦岭北部的变形图案,认为扬子板块以左旋俯冲的方式与华北板块汇聚—拼合;郑亚东 (2000) 和张长厚 (2001) 等对燕山地区近东西走向右行走滑构造和运动学特征进行了研究,认为与燕山板内造山带平行的走滑断裂是西伯利亚板块与华北板块右行斜向汇聚的结果。Sengor (1996) 也认为阿尔泰造山带也存在走滑断裂的活动。这些成果都是古板块汇聚背景下大陆边缘变形作用的真实记录,推动了造山带结构、过程和动力学的研究。

伏牛山构造带是秦岭造山带最重要的组成部分之一,位于华北板块南缘的古二



郎坪弧后盆地与古华北板块之间的汇聚带上, 现今构造近东西向延伸 (Song et al, 2009; 张国伟等, 1997a; 吴正文等, 1991)。伏牛山构造带精细构造过程的研究, 对深入认识秦岭造山带的形成、演化和动力学有重要的科学意义。伏牛山构造带主要包括古二郎坪岩块北缘、宽坪岩块、栾川岩片、陶湾岩片和石人山岩体南缘等; 是扬子、华北两大板块汇聚背景下, 主要沿瓦穴子—乔端断裂带、洛南—栾川断裂带拼贴、堆垛在一起而成的复杂构造带; 当今主要表现为低绿片岩相—高角闪岩相岩石组合, 强烈变形的构造岩块(片)与流变特征十分明显的韧性剪切带相间, 并清晰记录了中—深层次环境下有规律的变质-变形特征; 同时, 伏牛山构造带内构造叠加强烈, 虽然主造山期汇聚背景下形成的构造岩石仍然是该构造带主体, 但不同时期、不同性质的构造现象共同存在, 不同层次的构造变形清晰可辨, 为我们精细地研究秦岭造山带的形成、演化和汇聚过程提供了可靠的第一手资料, 是揭示古大陆边缘的变形作用与构造过程提供了极好的天然实验室。

现今对伏牛山构造带主要有以下几点认识:

1. 二郎坪岩块的主体是一套基性岩, 其构造位置为秦岭古岛弧北侧的古弧后盆地, 在扬子板块与华北板块俯冲—碰撞的汇聚过程中, 具有同时分别向南、北双向消减的构造特征;

2. 瓦穴子—乔端断裂带为二郎坪岩块与宽坪岩块的分界线, 断裂带向北倾, 宽坪岩块向南逆冲在二郎坪岩块之上, 并发育有大量叠瓦状的逆冲推覆构造;

3. 宽坪岩块主要为绿片岩相变质, 原岩以火山岩为主。虽然多期构造变形强烈, 但由南向北俯冲于华北板块南缘之下的构造记录保留完整, 运动学指向明显, 是进行精细构造解析的良好场所;

4. 洛南—栾川断裂带是北秦岭与秦岭北缘的分界线, 具有斜向汇聚特征, 表现为北秦岭向华北板块之下由南西向东北方向的左旋斜向俯冲;

5. 栾川岩块和陶湾岩块位于洛南—栾川断裂带的北侧, 是华北板块南缘两个规模较小的岩块, 在二郎坪弧后盆地封闭过程中卷入伏牛山构造带, 并参与了秦岭造山带的变质变形作用;

6. 石人山岩体南缘的一套混合岩多被认为属于太华群, 在石人山南部呈带状分布, 由颜色深浅不一、宽度不等、含不同暗色矿物的长英质条带组成。混合岩的北部为花岗片麻岩和花岗岩体, 它们之间为渐变式接触关系, 部分暗色条带或团块与浅色条带之间界限清晰。关于这套岩石的成因争议较多 (叶会寿等, 2008; 卢欣祥等, 1999, 1996; 王金贵等, 1988)。

综上所述, 当今的伏牛山构造带位于特殊的构造部位, 是由多个规模不等的构造岩石单元和剪切带组成的强烈构造变形带, 作为秦岭造山带的重要组成部分, 构造特色鲜明, 是难得的大陆造山带动力学研究场所, 特别适合古板块汇聚和弧后盆地封闭等构造物理过程细节的研究。因此, 对伏牛山构造带的深入研究不仅可以了解两板块的汇聚、碰撞以及进一步的陆内造山的方式、作用过程、年代等详细信息, 也对研究华北板块边界在汇聚过程中的变形特征有着极为重要的作用 (肖庆辉等,



1995), 还对分析古板块碰撞缝合带和研究现代板块的汇聚边界变形有重要意义。

## 第二节 存在问题及研究内容

岩石圈应力-应变研究是当今地球动力学研究的前沿领域, 流变学研究是岩石圈应力-应变研究的重要内容, 而结晶岩石的变质-变形研究则是流变学研究的关键和基础。因此, 人们迫切希望掌握结晶岩石的变质类型与变形行为二者之间的成因关系, 掌握不同温压条件下矿物变形与变形机制的有机联系, 从而进一步揭示岩石圈演化过程中的物理化学作用、运动学和动力学特性。所以, 近 20 年来结晶岩石变质作用和变形行为及其二者之间关系的研究一直是地球科学研究的热点问题 (刘正宏等, 2007; 刘祥等, 2006; 赵中岩等, 2005; 罗震宇等, 2003; 周永胜等, 2000; 王小凤, 1993), 而大陆造山带也自然成为结晶岩石的变质类型和变形行为研究的天然实验室。

近年来, 不同环境条件、不同成分岩石的变形研究已积累了丰富的资料, 从早期的对矿物和单矿物岩石的变形实验研究, 发展到后期对多矿物岩石的变形研究; 研究内容也从早期单纯的岩石力学或流变学研究发展到后来多方面的、多学科的综合研究。通过对天然岩石与岩石实验的研究, 建立和完善了岩石圈的应力状态与流变学结构的统一 (刘俊来, 1999, 2004a, 2004b; 李昶等, 2001; 宋传中等, 1998, 2000a; 索书田, 1993; 金振民, 1993)。1976 年 Nicolas 系统地总结了主要造岩矿物的变形机制和变形结构与构造; 1977 年 Sibson 对 Moine 断层带天然变形岩石进行了研究, 建立了地壳断层带双层结构模型, 并提出了地壳层次的概念, 认为不同的地壳层次对应着不同的地质构造样式变化。他认为 5 km 以上为脆性变形域, 5~10 km 为脆-韧性过渡域, 10~15 km 为韧性变形域。我国地质工作者也开展了深地壳变形岩石方面相应的研究。1987 年张家声发现了中-浅层次岩石中石英、长石以及角砾状混合岩柔性和脆性并存的现象, 提出二相变形的概念; 1989 年在中国境内发现了中地壳构造岩; 1989 年何永年对取自于 Alps 深地壳的变形岩石进行了研究, 阐述了深地壳变形岩石的矿物变形特征; 1990 年马宝林等在中国境内发现下地壳构造岩, 并阐述了深层次构造岩的基本特征和层次划分 (马宝林, 1990a, 1990b); 1988、1990 年马宝林等通过天然变形和实验变形确定了矿物的变形序列, 提出了变形相的概念; 1991 年赵中岩发表了榴辉岩相构造岩的基本特征。目前, 地壳岩石的变形相共划分为三个基本层次和五个变形相, 其命名系统是根据变形序列中临界塑性变形矿物或矿物组合来确定的。即中-上地壳、中地壳和下地壳三个基本层次, 五个变形相是石英变形相、石英斜长石变形相、二长石变形相、二长角闪石变形相和二辉石变形相 (马宝林, 1990)。

最新的研究显示: 岩石圈不同层次岩石的流变类型、流变强度及流动机制有很





大的变化,其变化受控于变形环境,在不同尺度上既有相似性又有差异性。因此,进一步深入研究不同环境、不同尺度下多相岩石的流变性,尤其对变质类型与变形行为对应关系的研究十分必要(刘俊来,2004a,2004b)。晶体、岩石、岩石圈尺度上的力学性状与流动机制的研究内容主要为:矿物晶内缺陷的形成因素,岩石破裂、微破裂的成核与扩展;剪切带的发生、发展与演化。即在显微或亚微尺度上晶体变形机制或更大尺度上,变形效应的扩展、岩石圈的结构分层与区域不均匀性等方面的研究以及在应变过程中矿物相变化的研究意义重大,这也是近年来的研究热点。

近30年来,虽然有众多地质学家在秦岭造山带做过大量的、精细的研究,在其岩石圈结构、演化和动力学的研究成果丰富(Wang et al, 2002;高山等,1999;王涛等,1997;袁学诚,1997;金昕等,1996;张进江等,1996;张国伟等,1996a,1996b,1997b;索书田等,1993,2001;周国藩等,1992;许志琴等,1997)。但他们的研究主要集中在地层、岩浆岩、板块构造演化方面,在变质岩方面多涉及其形成、原岩恢复、地球化学特性和形成年代方面的研究;在岩浆岩方面则以各期次岩浆岩的成分、物质来源、形成年代等及所反映出的板块碰撞的阶段特征为主;而构造方面的研究多从板块构造角度研究秦岭微陆块的形成和演化,扬子与华北两板块的汇聚、碰撞、隆升、造山作用等方面展开,且研究成果丰硕。但在扬子与华北板块汇聚、碰撞后,引起华北板块南缘变形以及由此形成的一系列剪切带方面的研究却很少,特别是对二郎坪弧后盆地封闭过程的基础构造研究仍显不足,尤其是针对板块运动方向与变形作用细节、变形环境及其彼此耦合关系的精细研究涉及甚少。

所以,对位于秦岭造山带中特殊位置的伏牛山构造带,仍存在一些重要的科学问题亟待解决:

① 伏牛山构造带作为二郎坪弧后盆地与华北大陆的拼接带,是由多个块体组成的强构造变形带,各个次级岩块有着怎样精细的汇聚—拼合方式和叠置—就位过程?各个次级岩块内部有着怎样的变形样式?其块体边缘有着怎样的变形规律、运动学指向和构造物理过程?

② 二郎坪弧后盆地北缘是怎样消减的?有什么样的构造变形组合图案?伏牛山构造带是否是华北与扬子板块斜向汇聚的产物?具有什么样的精细构造物理过程和动力学机制?记录了怎样的时空信息?

③ 洛南—栾川断裂带和瓦穴子—乔端断裂带作为伏牛山构造带内两大主要剪切带,形成的时代和时限如何?是否存在差异?两者在二郎坪弧后盆地北缘消减过程中有何控制作用?两大剪切带在变形样式、几何学、运动学特征方面有何差异?

这些问题的解决对于进一步深入认识秦岭造山带十分重要,不仅仅因为伏牛山构造带位于秦岭造山带的北侧,更是因为伏牛山构造带是秦岭造山带和华北板块的结合部位,它的变质变形特征涉及秦岭造山带与华北板块汇聚过程中,华北板块边界变形和碰撞后陆内造山导致的进一步变质变形方式、几何学、运动学和动力学特征。为了解决这些问题,制定研究内容如下: