

秦岭造山带根部地壳结构及流变学演化*

索书田 游振东 钟增球 陈能松 桑隆康

(地质系, 武汉 430074)

摘要 在地质和地球物理资料基础上, 运用物理学观点, 研究和分析了秦岭造山带根部——大别前寒武纪变质地体的三维结构及流变学演化历史, 通过现代及中—新元古代时期地壳流变学剖面的构筑, 强调地壳流变学分层性及变质变形分解作用对中下地壳结构及地球动力学演化的控制作用。线状强应变带与透镜状弱应变域的规律组合, 是秦岭造山带及其根部地壳结构的基本样式, 并具尺度不变性。将古老中下地壳近3 Ga的流变学演化历史划分为7个阶段, 它们既反映了华北地块与扬子地块间长期的运动及动力学过程, 也代表了组成秦岭造山带地壳不同层次物质的流变行为和物理过程。

关键词 根部, 中下地壳, 流变学分层性, 秦岭造山带, 应变—变质分解作用。

中图分类号 P542, P551

第一作者简介 索书田, 男, 教授, 1935年生, 1960年毕业于北京地质学院地质系, 长期从事变质岩区构造、重力滑动构造及造山带流变学的研究工作。

桐柏—大别山区, 是秦岭造山带的东延部分或根带, 其中由出露于现代侵蚀面上的大别(桐柏)杂岩及红安(宿松)群组成的变质地体, 代表秦岭造山带的古老中下地壳。详细研究其物质组成、结构样式、流变学演化历史对于理解整个秦岭造山带地壳甚或岩石圈的结构、地球动力学演化过程是极为重要的。在整个巨大的秦岭造山带尺度上, 古老中下地壳岩石出露如此良好, 构造热事件记录如此详细的地段是罕见的, 因而, 它提供了一个窥视秦岭多期俯冲、对接、碰撞、叠置和伸展坍塌造山带早期演化历史及中下地壳物质状态和流变行为的窗口。

1 地质思维方法

近年来, 随着大别山及苏北胶南高压(high-pressure)和超高压(ultra-high-pressure)带的研究不断深入及同位素年代学资料的累积^[1~6], 华北地块与扬子地块于印支期间强烈的消减、碰撞作用以及造成的变质、变形、地壳和岩石圈结构的变化, 已被越来越多的国内外岩石学家及构造学家所公认。但是, 正是由于这次强大的构造热事件严重地掩盖和改造了造山带先期地壳演化历史的踪迹, 也给鉴别和分析秦岭造山带早期构造演化历史带来很大的困难, 出现了一些认识上趋于简单化的倾向。

1994年2月25日收稿。

* 本文是国家自然科学基金 85040093、49290100及 49172090 项目成果的一部分。

理论和实践均指出^[7~10],从显微尺度到岩石圈尺度的地质体结构和演化,都是不均一的.变质和应变分解作用(metamorphism and strain partitioning)在不同的尺度、岩石圈不同层次及不同类型的变质变形阶段,都会有所反映.地学断面揭示的上地幔的地幔块体和地幔软体^[11],地震层析成像解译出的大陆岩石圈三维结构样式^[12],显微镜下观察到的岩石中残斑和流动基质组成的糜棱结构^[7,9],几何学和运动学都是相似的,具尺度不变性(scale-invariance).从流变学观点来看,均是应变软化作用、应变局部化作用以及变质和应变分解作用的必然结果.变质和应变分解作用既受变质变形物质(矿物、岩石、地质体、岩石圈不同圈层)力学性质(各种强度、粘度、密度、渗透性及其他物理特征)的控制,又受构造背景和物理环境(温度、压力、流应力、差异应力、应变速率、流体等)的控制.这样,就给我们一种机会,在每一主构造演化阶段造成的变质和应变相对弱的区段,去识别先期变质、变形事件及相应的物理环境,而主要在那些变质变形较强的线状地带,去观察研究主构造阶段的变质变形作用及物理条件.因为,大陆地壳区域应变及变质作用,主要是由这些线状强应变软化带或局部化带进行调整的^[13].武当山地区的中新元古代变沉积—火山岩群的变质变形特征(图1),可作为一个典型的实例.强烈线状应变带具高压蓝闪绿片岩相变质作用,主要是印支期陆内俯冲、碰撞的结果,而夹持于网状强应变带之间的透镜状弱应变域内的岩石,仍保留中新元古代低级区域变质作用的特征,且尚可依据原始沉积和火山岩组构,恢复基本地层序列.同样,在含柯石英、金刚石榴辉岩体群的桐柏—大别地区,在高压、超高压变质作用阶段,也非全部围岩卷入高压及超高压变质作用,而是形成由高压—超高压剪切带分割或环绕的弱应变块体相互拼贴的图象,块体内部保留丰富的高压—超高压变质作用前的地质历史信息.

从物理冶金学的观点来看,秦岭造山带可以看成为华北地块与扬子地块之间的一个巨型应变软化或局部化带,因而,它的地壳三维结构样式及近 3Ga 的流变学演化历史,与两个地块

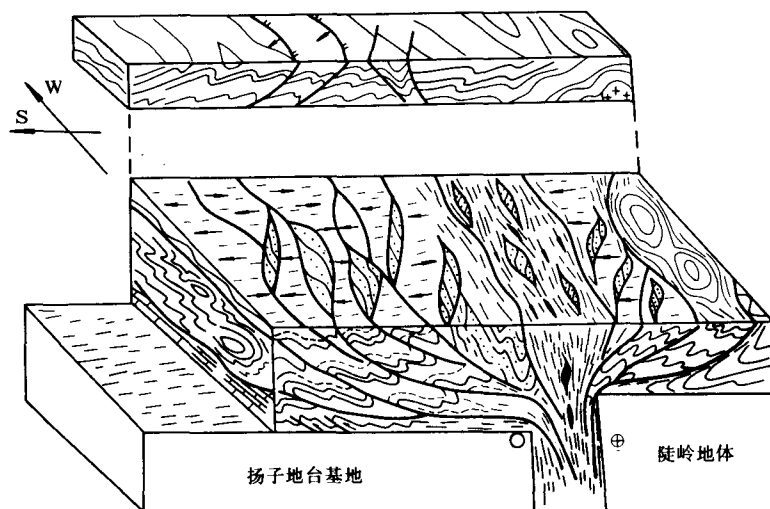


图1 具花状构造特征的武当山区三维构造样式

Fig.1 Block diagram to illustrate schematically the three-dimensional deformation model with the flower structure in the Wudangshan area

尤其是其大陆边缘的结构、地球动力学历史,是紧密关联的.所以,在研究造山带古老中下地壳物质组成及状态时,还应将其置于更大更深的区域构造背景之上^[2].

2 桐柏—大别地区现代地壳结构

地表地质及地球物理研究所揭示的桐柏—大别地区现代地壳结构的基本特征,主要反映印支期华北与扬子两地块间陆—陆向斜碰撞及燕山期陆内俯冲、叠复变形造成的构造格局,同时也是造山带长期构造演化及造山期后揭顶作用(unroofing)、伸展坍塌的综合图象^[14].据收集到的桐柏—大别区及相邻地区的20个面热流值数据(平均为 $60\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$),脆性强度用剪切摩擦滑动律^[15]估算,塑性强度用幂蠕变律^[16]测算,按伸展体制及正断层几何学,结合贾家湾—沙园地震测深剖面、麻城—九宫山大地电磁测深剖面、六安—瑞昌大地电磁测深剖面资料解释^[17]、地壳及下岩石圈地震层析成像地质解释^[12],初步进行了桐柏—大别区现代地壳—维深度—强度剖面模拟(图2).

由图可以看出,桐柏—大别地区地壳流变学分层性(rheological stratification)是极为明显的.在厚 $32.0\sim 34.5\text{km}$ 的地壳内部,除 $14\sim 21\text{km}$ (东段 $12\sim 23\text{km}$)的低速高导层外,在下地壳还发育一个低阻层($40\sim 50\Omega\text{m}$),剖面上强度及其他物理性质的差异,既反映了物质组成上的不同,更主要的则反映了物理环境的变化.按中等面热流值及地热梯度 $20^\circ\text{C}/\text{km}$ 估算,

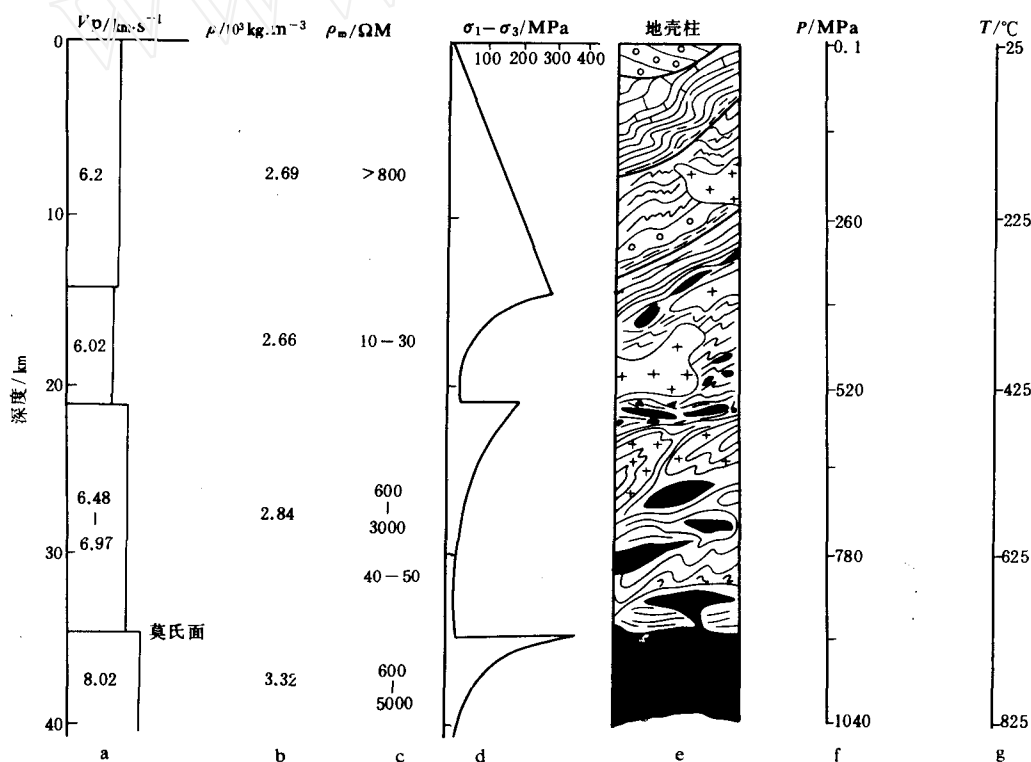


图2 桐柏—大别地区现代地壳—维深度—强度剖面(详见正文)

Fig. 2 Current crustal profile of strength versus depth for the Tongbai-Dabie area

地壳中上部的低速层温度达 $280 \sim 420^{\circ}\text{C}$, 压力约为 $364 \sim 546\text{MPa}$. 在这种条件下, 长英质地壳的石英发生塑性变形并控制了岩石的流变行为, 长石类矿物具塑性变形及脆性变形行为的双重性. 近代浅源地震震源就位于这一低速层顶界面脆—塑性转换带附近, 表明该层属于流体地壳层 (fluid crustal layer)^[18] 或重要的力学不稳定性带及拆离带. 上地壳以地堑或半地堑红色断陷盆地为主要伸展型式的脆性变形, 垂直造山带伸展量达 52.17% , 必然是由低速层内的塑性伸展流动进行调整的. 先期的大型逆冲推覆形成的双侧造山带或漂浮体^[19], 其双向逆冲面与造山带核部高角度走滑型剪切带, 也在该流体地壳层内会聚, 构成以其为统一拆离面的花状构造. 下地壳的组成中基性—超基性岩石会有所增加, 不过, 从地壳的速度剖面判断, 其主要成分可能还是花岗质 ($V_p = 6.5 \sim 6.6\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) 及闪长质 ($V_p = 6.6 \sim 7.2\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)^[20], 与出露在现代侵蚀面上的大别(桐柏)杂岩岩石组合雷同. 壳幔边界仍是一个重要的力学和物性界面, 虽然岩浆板底垫托作用 (magmatic underplating)^[21] 和近代大陆岩石圈动力学过程对壳幔边界流变行为及横向不均一性有重要的影响. 总体说来, 流体地壳层控制中上地壳变形, 而下地壳低阻层及壳幔边界则控制地壳整体的构造样式. 燕山期的中上地壳内弱化带或拆离带, 在造山带两侧, 如南侧的随州、钟祥地区及北侧的信阳、确山地区, 尚有保留并能直接进行观察, 而在结晶轴地带, 几乎全被剥蚀掉了. 所以, 现代桐柏—大别地区不同变质地体及构造层次几何配置关系, 具有变质核杂岩 (metamorphic core complex) 的一些特征.

三维空间上, 桐柏—大别地区地壳组成和结构极为不均一, 平行造山带方向的、垂直造山带方向的以及产状平缓的包括上述流体地壳层的剪切带或强应变带, 构成网结状型式, 夹持于其间的为应变相对弱的块体、板片^[8]. 强应变带与弱应变域内的组成、变形和变质作用都迥然不同, 是长期的构造演化和应变分解作用的结果. 其中, 桐柏—商城剪切带及新城—浠水剪切带是造山带内部一级构造边界, 两者间的“结晶轴带”, 虽然也可能会卷进去一些年轻的变质地体或岩片并遭受了各种岩浆、变质和变形的再造作用, 但古老硅铝壳的残留部分, 仍可鉴别出来, 可以将其视为桐柏—大别造山带晚期演化阶段的一个弱应变域, 变质和流变行为与北侧北淮阳板块会聚带及南侧的扬子地块北缘的强应变带呈明显的对照, 这也是我国及世界上许多陆—陆碰撞造山带的共同特征之一^[22], 也是本文讨论的主要对象.

3 根部物质组成及状态特征

桐柏—大别造山带的根部或古老中下地壳, 出露于造山带的轴带, 由两部分组成, 其主体是由大别(桐柏)杂岩构成的硅铝壳. 另一部分是红安(宿松)群绿帘—角闪岩相变质沉积—火山岩系, 它是通过复杂的动力学过程, 增添或拼贴到古老硅铝壳之上的.

由于强烈的物质及变形再造, 真正属于大别(桐柏)古老硅铝壳的岩石组合, 在整个“结晶轴带”内占的体积比例不足 $1/3$, 包括表壳岩系、变基性岩及花岗片麻岩 (TTG 岩系) 3 部分. 表壳岩系岩石组合只在木子店、惠兰山、黄土岭、贾庙、洗马河及燕子河等地的后期再造作用和应变较弱的区段才能识别出来. 主要岩石类型有黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩、紫苏石榴黑云片麻岩、二辉麻粒岩、含榴斜长二辉麻粒岩、石榴夕线云斜片麻岩、夹条带状磁铁矿石岩、角闪磁铁矿石岩 (硅铁建造)、大理岩等. 由于这些岩石组合仅只出露在孤立的面积很小 (最大 30km^2) 的透镜域内, 因而, 完整的岩石组合叠置序列已很难建立起来. 典型地区的岩石学、岩相学、岩石化学、稀土元素、变质作用、显微构造及构造学研究指出, 表壳岩系的原岩化学类型包

括长英质、泥质、钙质沉积岩和基性—酸性火山岩, 具高温低流应力 ($\sigma_1 \sim \sigma_3$) 条件下的粗粒等粒变晶结构, 遭受高角闪岩相—麻粒岩相变质作用, 其中麻粒岩相变质作用的物理条件为 $T=750 \sim 900^\circ\text{C}$, $p=890 \sim 1040\text{MPa}$, 平均地热梯度 $28.21^\circ\text{C}/\text{km}$. 与 Harley^[23] 所统计的世界上 90 个麻粒岩产地的温压条件相比较, 属压力较高类型. 投在 Chapman^[24] 设计的压力—温度—深度图 (图 3) 上, 也显示了同样的特点, 相当于 30km 深处的下地壳物质组成及物理环境.

麻粒岩相及高角闪岩相岩石普遍遭受了混合岩化, 有各种不同形态的混合岩类型, 反映下地壳的高热流体及部分熔融作用, 曾经是一个非常重要的物理化学因素, 这可从复杂的多期叠加褶皱和“粘性褶皱” (viscous fold) 特征得到佐证. 一般说来, 不能用简单的几何学原理去分析其形态和叠加关系. 表壳岩系经过上述复杂的变质变形过程, 与古老的变花岗岩类岩石及古老变基性侵入体一起, 形成了中国大陆高级变质硅铝壳的一部分, 奠定了秦岭造山带发育的基础. 因基性麻粒岩在硅铝壳中占的比例较小, 所以, 真正的下地壳下部岩石组合可能尚未剥露出来.

由大别(桐柏)杂岩组成的中下地壳岩石时代, 目前还未取得一致认识. 岩石组合、原岩特征及主要岩石的稀土配分型式等^[14], 似拟可与华北地块内部新太古麻粒岩相地体类比, 变质变形特征及物理环境也类似. 陈汉宗^[25] 曾利用罗田大别杂岩中 4 个锆石样获得一致曲线上交点年龄值为 $2\,820\text{Ma}$. 新近在麻城县获得的大别杂岩的斜长角闪岩全岩 Sm—Nd 年龄值为 $2\,650 \pm 100\text{Ma}$ ^①, 与大别变质地体之北相距 50km 处的霍丘县周集新太古斜长角闪片岩 Rb—Sr 等时线年龄 $2\,796 \pm 65\text{Ma}$, 苏北东海群锆石 U—Pb 年龄 $2\,675.7\text{Ma}$ 及 Pb—Pb 年龄 $2\,662\text{Ma}$ 很接近. 因而, 由大别(桐柏)杂岩构成的造山带根部, 可能曾是新太古形成的中国“东亚古陆”硅铝壳的

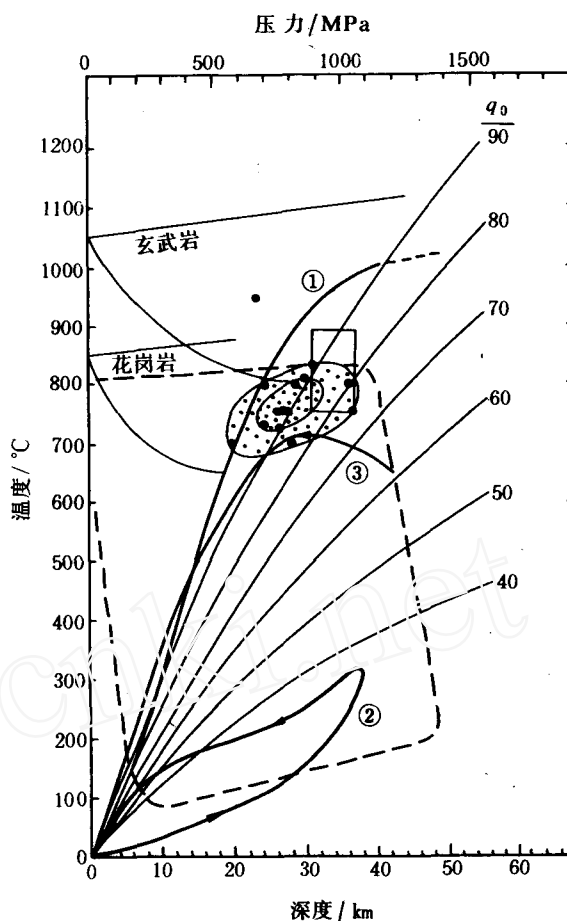


图 3 叠加于静态地热体制上的动态地壳过程的等地温线及 $p-T$ 轨迹

Fig. 3 Geotherms and $p-T$ paths resulting from dynamic crustal processes superimposed on the static geotherms in which the parameter is characteristic surface heat flow q_0 in $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ (after Chapman 1986)
图中方框示大别地区麻粒岩相物理条件; q_0 为面热流值 ($\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$)

① 据湖北省区域地质调查所, 1992.

组成部分^[1],它与陕西略阳鱼洞子群(含条带状硅铁建造)组成的变质地体(锆石 U-Pb 一致曲线年龄 2 675 Ma)等,都是秦岭造山带内部剥露出来的新太古硅铝壳结晶基底或裂解出来的古老块体。

红安(宿松)群的下部为相对稳定的细粒陆缘碎屑岩及碳酸盐岩沉积,包括石英砂岩、灰岩、页岩及含石墨、含磷沉积岩系,代表覆于中国东部太古宙硅铝壳或大陆基底之上的第一个真正的变沉积岩组合;上部为活动型的钙碱性火山沉积岩系,原岩是玄武岩-安山岩-流纹岩,主要变质岩石为白云钠长片麻岩、绿帘二云钠长片麻岩、含榴白云钠长片麻岩和绿帘角闪岩等,主期区域变质作用为中压绿帘角闪岩相,物理条件为 $T=432 \sim 585^{\circ}\text{C}$, $p=500 \sim 600\text{MPa}$,相当约 22 km 深部中地壳的环境。红安群的主期变形以区域尺度缓倾斜(向东)的韧性推覆体、重褶堆垛样式为特征,形成近南北向的褶皱-逆冲推覆带,并以统一的韧性底剪切带(ductile basal shear zone)为界面,覆于或拼贴到古老新太古硅铝壳之上,成为大陆壳的一个组成部分。在这一构造热事件发生过程的初期,由新太古代高角闪岩相-麻粒岩相岩石组成的古老硅铝壳与由古元古代绿帘角闪岩相岩石组成的年轻地壳,具有明显的强度及粘性差,表现了不同的流变行为。在统一的挤压应力作用下,形成常见的基底-盖层共同构成的尖圆形(cusate lobate)褶皱(图 4),即红安(宿松)群岩系以透入性韧性流动为主。据石榴子石内部包裹体残余面理形态分析,纯剪及不均匀简单剪切应变轨迹非常复杂,而下伏的大别(桐柏)杂岩组成的古老地壳,则表现了明显的应变局部化及变形分解。沿着尺度不同的应变软化带,发生由东向西的叠瓦状逆冲作用,形成线状高温剪切带及退变质带。伴随着递进应变和热构造的演化,新太古硅铝壳相对于上覆盖层出现流变学反转(rheological inversion),弱化带加宽,并与盖层一起卷入到透入性的变形变质及构造抬升过程中。除小型的透镜状弱应变域外,硅铝壳的主体退变为角闪岩相,变质反应条件为 $T=650 \sim 530^{\circ}\text{C}$, $p=386 \sim 593\text{MPa}$ 。

红安(宿松)群的主要热-构造事件时代,可由锆石 U-Pb 年龄 1 850 Ma^[29]、磷灰石 U-Th-Pb 年龄 2 000 Ma 等加以限定。大别杂岩中锆石 U-Pb 年龄 2 080 Ma、1 952 Ma 也可能代表这次事件。桐柏地区二道河片麻状花岗岩锆石 U-Pb 年龄 1 950 Ma,大悟县周家湾片麻状花岗岩锆石 U-Pb 年龄 $1\,973 \pm 89\text{Ma}$ 、枣阳地区含金红石的大阜山基性-超基性杂岩体中橄长岩 Sm-Nd 年龄 $1\,937 \pm 74\text{Ma}$,则反映伴随该期变质变形事件的岩浆活动及岩体就位时限。因而,虽然红安群进一步解体是可能的,并且在其中也获得了介于 432~1 486 Ma 不同年龄段的同位素年代学资料,但其主体确实曾经历了相当北美 Trans-Hudson 古元古代碰撞造山带^[27]的历史,而且,该期构造热事件的物质主要流动方向及形成的造山带构造线方向,与现今秦岭

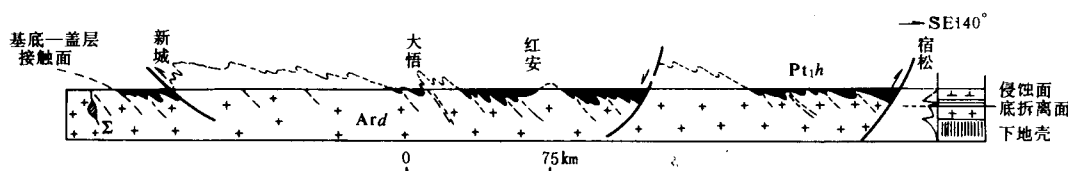


图 4 新城-宿松北西-东南向剖面图(示大别杂岩与上覆红安群的构造关系)

Fig. 4 Schematic NW-SE cross-section from Xincheng to Susong in the Tongbai-Dabie area to show the tectonic relationship between the Dabie complex and the overlying Hong'an Group

造山带的延长方向大相径庭,充分表明秦岭造山带的早期构造演化历史及地球动力学状况是复杂的。

4 中新元古阶段流变学模拟

中—新元古岩群在扬子地块北缘及秦岭造山带内部都有广泛的分布。如前述武当山区的中—新元古变沉积—火山岩系一样,通过区域地质测量及详细岩石学和构造学研究^[14],均能鉴别出应变和变质作用截然不同的两部分,即(1)网结状强应变带或剪切带,具高压变质作用矿物组合,物理条件为 $T=440\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=700\text{ MPa}$,地热梯度约 $14\text{ }^{\circ}\text{C/km}$; (2)透镜状弱应变带,具区域低级变质作用矿物组合及结构构造特征,变质条件为 $T=190\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=367\text{ MPa}$,变形特征和变质作用物理参数,与扬子地块北部基底中的中新元古岩群近趋一致,代表 $10\sim 12\text{ km}$ 深处的脆性上地壳层次构造物理环境,变形机制以摩擦滑动及低温剪切作用为主。从随县群中获得的7个锆石 U—Pb 年龄 $646\sim 1299\text{ Ma}$ 、尖山地区耀岭河群变细碧岩2个锆石 U—Pb 年龄 730 Ma 及 970 Ma 、张八岭群全岩 Rb—Sr 等时线年龄 $730\pm 50\text{ Ma}$ 及全岩 U—Pb 年龄 860 Ma 等,均可反映这一构造热事件时限,与扬子地块基底中的四堡 (1000 Ma)—晋宁 (800 Ma) 运动^[28] 大体相应。新近 Ames 等^[5] 从取自大别杂岩中超高压榴辉岩的锆石样品,获得 U—Pb 一致曲线下交点 $209\pm 2\text{ Ma}$ 、上交点 $685\pm 64\text{ Ma}$,认为前者代表超高压榴辉岩的变质作用或印支期碰撞事件的年代下限,而后者则反映镁铁质火山岩的原始结晶年龄。总而言之,在高压及超高压主期变质作用之前,秦岭造山带曾经历了中—新元古代区域低级变质作用,在扬子地块范围内,中—新元古变质岩系构成了基底一部分,并被未变质的震旦纪—古生代沉积盖层不整覆。

中—新元古代,造山带根部以硅铝壳部分熔融和岩浆再造为主要物质过程,在统一的碰撞造山动力学控制下,主要沿着网状剪切带发生陆壳部分熔融及花岗岩类岩体的就位,形成全熔合岩 (diatexite) 和半熔合岩 (metatexite) 以及 TTG 岩系列。地质标志、岩石化学及稀土元素模拟^[29] 指出,具明显 Eu 异常的灰色片麻岩是由石榴斜长角闪岩经 65% 的部分熔融形成的,稍有正或负 Eu 异常或无 Eu 异常,但具 HREE 强烈亏损的灰色片麻岩,是由斜长角闪岩经 25% 的部分熔融形成的;富钾花岗质片麻岩具有明显的负 Eu 异常和很高的 ΣREE ,是由灰色片麻岩经 30% 的部分熔融及 49% 的角闪石黑云母等矿物的分离结晶作用而成的。用黑云母—角闪石矿物对和二长矿物对地质温度计、角闪石地质压力计估算,钠质混合岩的物理条件为 $T=742\pm 44\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=439\pm 142\text{ MPa}$,地热梯度约 $55.78\text{ }^{\circ}\text{C/km}$; 钾质混合岩的物理条件是 $T=760\pm 160\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=435\pm 38\text{ MPa}$,地热梯度约 $57.66\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ 。

中—新元古代造山带根部热流值增高及部分熔融作用时限,有较充分的同位素年代学证据。如罗田凤凰关英云闪长质片麻岩中暗色黑云闪长质包体中锆石 U—Pb 一致曲线上交点为 761.1 Ma ,大悟县大磊山穹窿核部二长片麻岩锆石 U—Pb 一致曲线上交点为 823.8 Ma ,鲤鱼寨英云闪长岩体年龄为 $858\pm 137\text{ Ma}$,溢流河花岗岩体年龄为 $994\pm 34\text{ Ma}$ 、锅岭寨花岗岩体年龄为 $983\pm 39\text{ Ma}$ 等。值得提及的是, $1000\sim 800\text{ Ma}$ 阶段混合岩及花岗岩体就位,一般限于红安群底剪切带之下伏的结晶基底内部,而且全熔合岩、半熔合岩及未受混合岩化作用影响的岩石组合三维配置格局,具有热穹窿及古变质核杂岩的基本特征,与特殊的地球动力学状况、水动力条件及物理化学环境密切相关。因将有另文专门进行讨论,此处不赘述。

基于上述,利用估测的流应力 50~100MPa,按挤压体制,模拟出中—新元古阶段—维古地壳强度—深度剖面图(图5).由图可以说明和解释:(1)1000~800Ma期间地壳也具有明显的流变学分层性,不同层次地壳物质的组成、变形机制及物理状态,存在着显著的差异;(2)新太古硅铝壳部分熔融并抬升到中地壳位置,类似于现代地壳中(见图2)流体地壳层的行为;(3)热流值上升及部分熔融作用,导致密度倒置及重力不稳定性,促使构造体制由挤压向伸展

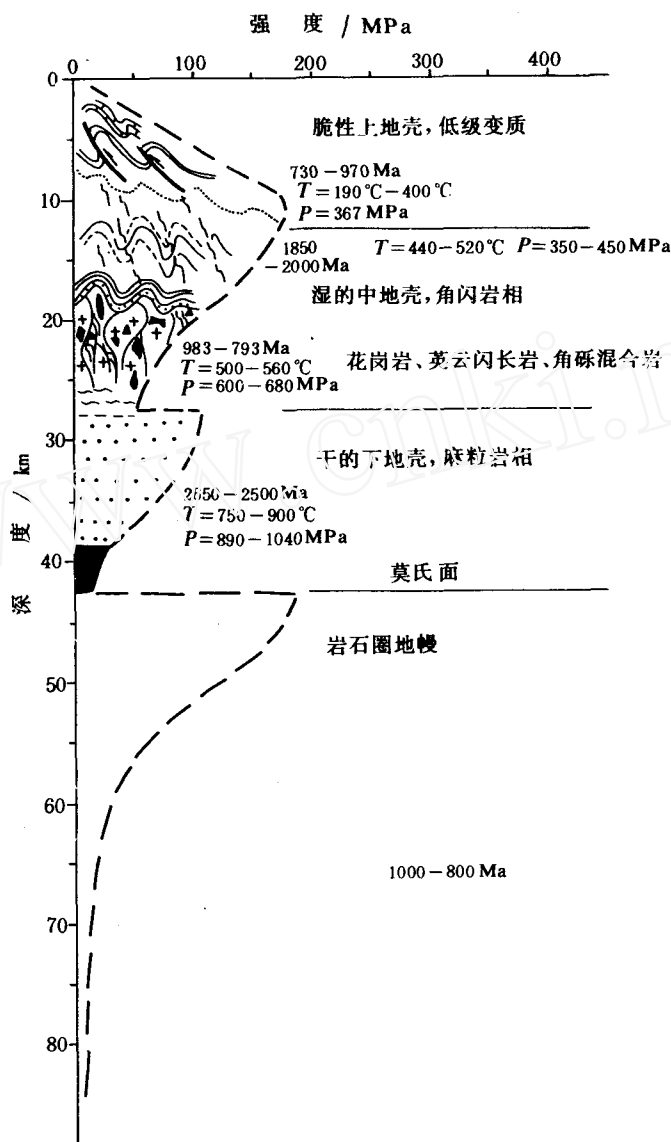


图5 中—新元古代古地壳强度—深度剖面图

Fig. 5 Simplified profile of strength versus depth for the crust of the orogenic belt at around 1000–800Ma, showing the inferred rheology after the collision which took place during the Mid–Late Proterozoic

作用的转换,形成罗田古变质核杂岩和热穹窿^[4]; (4) 硅铝壳部分熔融的动力学机制是碰撞作用和岩浆板底垫托作用,因而,推测该阶段地壳厚度较现代地壳厚度大得多. 所以,许多学者^[30,31]强调中—新元古代秦岭造山带演化阶段的重要性是完全正确的,它奠定了古老中下地壳进一步再造作用的基础,总体反映了其特有的物质状态和构造样式.

5 流变学演化

秦岭造山带根部的许多岩石和矿物结构、应变图象和地壳结构样式,提供了大量的岩石变质变形的物理环境及流变行为的信息. 例如,上述中—新元古代形成的全熔合岩及半熔合岩,分别反映了岩石的粘性流动和塑性变形特征,具有特殊的地壳热状态和构造背景. 又例如,湖北浠水县大别杂岩内的蓝晶石铝直闪石片岩,发育多种冠状体,主期变质条件为 $T=600 \sim 700^{\circ}\text{C}$, $p>1000\text{MPa}$, 属高压变质环境,而出现蓝晶石+铝直闪石=十字石+堇青石等变质反应形成的冠状体,又反映了近等温迅速降压环境, $p-T$ 轨迹为一斜率 $45^{\circ}\text{C}/100\text{MPa}$ 的单变线^[32],代表早期逆冲推覆、地壳缩短增厚,晚期地壳薄化快速抬升、折返的动力学过程.

分布于造山带根部的超高压榴辉岩体群,有不同的类型和岩石学特征,它们的内部变形、产出形态及与围岩的关系(图6)表明,绝大多数榴辉岩体是沿着几个大型的剪切带或分支剪切带构造侵位的,早期塑性变形和侵位后的脆—塑性变形, $p-T-t$ 轨迹^[6] 等特征,与围岩一般不协调,也具有应变及变质作用分解的性质,不能不加区分地与围岩混同起来进行分析. 据现有同位素年代学资料判断,秦岭造山带根部的高压及超高压榴辉岩体,主要的侵位时代是印支期,但不排除多期超高压及高压变质作用的可能性,而且,其形成和折返过程是极为复杂的.

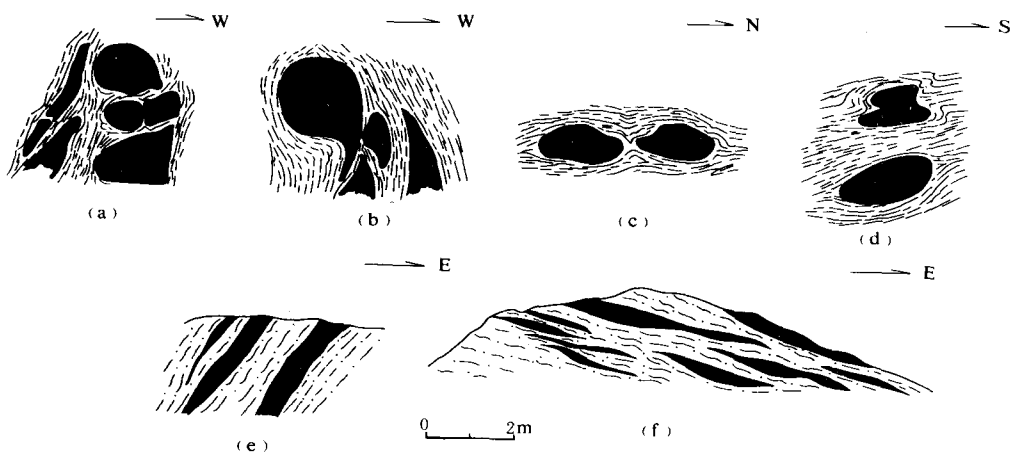


图6 大别地区榴辉岩体变形特征^②

Fig. 6 Examples of the deformation of eclogite blocks from the Dabie area

a. b. 宣化店; c. 石马; d. 南山岭; e. 碧溪岭; f. 毛屋

② 张泽明. 大别山榴辉岩带的岩石学、地球化学及成因研究: [硕士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 1991, 略改.

综合造山带根部各变质地体变质作用 $p-T$ 轨迹(图 7)和造山带地壳尺度剪切带变形机制图(图 8), 可以观察到出露于现代侵蚀面的秦岭造山带古老中下地壳, 是通过复杂的流变学

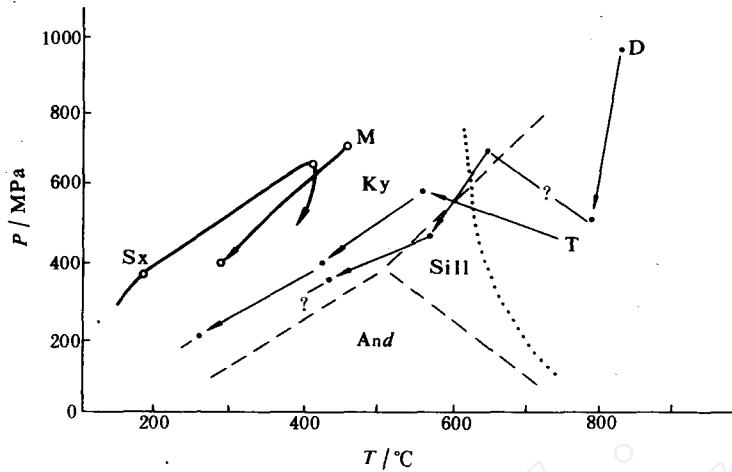


图 7 秦岭造山带根部变质地体变质作用 $p-T$ 轨迹

Fig. 7 $p-T$ paths of metamorphism of terranes in the root part of the Qinling Orogenic Belt

D. 大别杂岩; T. 桐柏杂岩; M. 木兰山蓝片岩; Sx. 随县群. 点线为花岗岩系始熔线

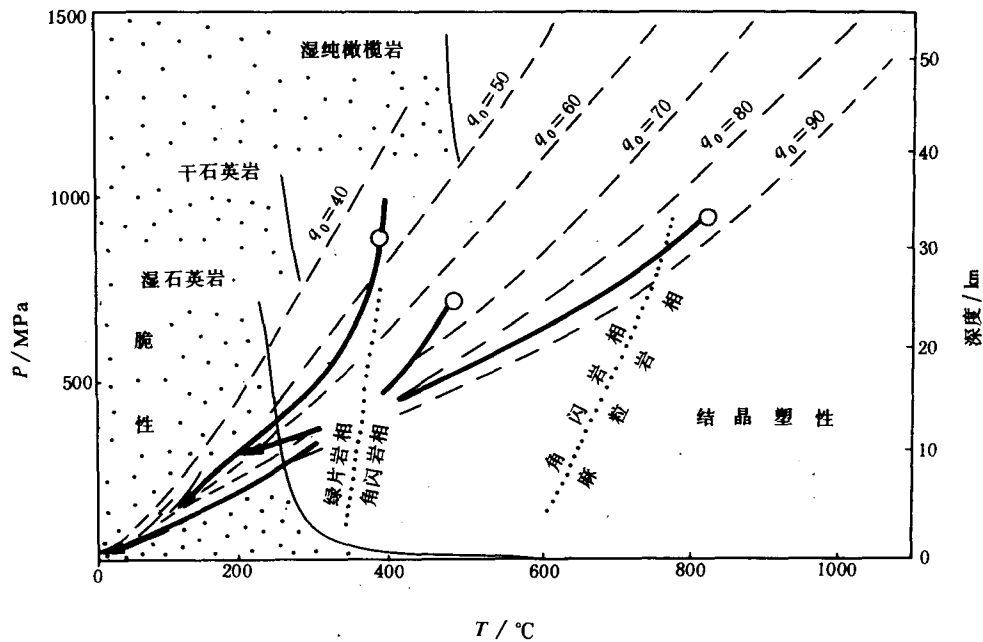


图 8 桐柏—大别区地壳剪切带变形机制图

Fig. 8 Schematic deformation regime map showing the $p-T$ paths for the crustal scale shear zones in the Tongbai-Dabie area

演化过程,包括不同动力学体制、物理过程及宏观、微观变形机制的转换,最终抬升到地壳表层脆性域的。

概略解析,秦岭造山带古老根带或中下地壳近 3Ga 的流变学演化历史,可划分成如下 7 个阶段:

- (1) 新太古硅铝壳形成,构成造山带古老结晶基底;
- (2) 古—中元古硅铝壳的裂解与碰撞,形成近南北向造山型褶皱—推覆构造带;
- (3) 中—新元古硅铝壳俯冲、碰撞和部分熔融,导致地壳增厚及热结构的变化,晚期形成古老变质核杂岩及热穹窿;
- (4) 加里东期硅铝壳韧性再造,形成网结状应变局部化带或剪切带阵列,局部发育高压—超高压剪切带;
- (5) 印支期(或从晚海西始)陆—陆斜向俯冲、碰撞,超高压—高压剪切带发育,榴辉岩体形成并折返于中下地壳;
- (6) 燕山期陆内碰撞、地壳缩短增厚及双侧造山带的形成^[14];
- (7) 造山期后伸展坍塌及揭顶作用,形成新的变质核杂岩和盆岭型的上地壳结构样式。

很明显,造山带根部的流变学演化历史,是在华北及扬子两个地块间的开裂、会聚、俯冲、走滑和碰撞的统一地球动力学背景下进行的,总的趋势是,地壳流变学分层性越来越清楚,应变和变质分解作用越来越显著,岩石强度和粘度增大,热结构及地壳结构不均一性增强,塑性变形体制逐渐被脆性摩擦滑动体制代替。根带通过上述复杂的流变和再造过程,新太古硅铝壳物质遭到了深刻的改造,并逐渐被剥露和抬升到现代侵蚀面。无疑,它的下部又经岩浆板底垫托和拆沉作用(delamination)^[33]动力学过程,有新的中下地壳物质形成和运动。

6 结论

(1) 秦岭造山带根部现代地壳及古老地壳,都具流变学分层性,不同层次的物质组成及流变行为,都有其特性,影响和控制着地壳不同尺度的物理过程。

(2) 无论现代地壳和古老中下地壳,三维空间的结构样式,都是网状线型应变局部化带或剪切带与夹持其间的弱应变域规律组合,是经复杂的应变和变质分解作用及应变软化作用的结果。

(3) 根部经历了近 3Ga 的流变学演化历史,初步划分了 7 个构造—热演化阶段,每一个阶段的物质状态、物理环境、流变行为也具有规律性的变化,反映了特定的动力学及变形体制的转换过程。

(4) 秦岭造山带根部的结构与流变学演化历史,是与南北两侧的华北地块和扬子地块的构造—热历史密切相关的,在物理冶金学意义上,它们是线状应变软化带与弱应变域的关系,而在动力学上则是统一的。因而,应当在大陆动力学的框架内,建立秦岭造山带的演化模式。

本文曾在 1994 年 4 月于北京召开的大陆构造学术讨论会上宣读,付印前据许多同志的意见作了文字上的部分修改;张国伟教授曾给予热情鼓励,特此致意。

参 考 文 献

- 1 李曙光,葛宁洁,刘德良.大别山北翼大别群中 C 型榴辉岩的 Sm-Nd 同位素年龄及其构造意义.科学通报,1989,34:522 ~ 525
- 2 周高志,康维国.鄂北蓝片岩带研究.北京:地质出版社,1991
- 3 徐树桐,江来利,刘贻灿.大别山区(安徽部分)的构造格局和演化过程.地质学报,1992,65:1 ~ 14
- 4 翟明国,从柏林,赵中岩.大别山榴辉岩带的高压硬玉石英岩块体及其地质意义.科学通报,1992,37:1013 ~ 1015
- 5 Ames L, Tilton G R, Zhou G. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtse cratons : U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites. Geology, 1993, 21:339 ~ 342
- 6 张泽明,游振东.大别山地区柯石英榴辉岩变质作用的 p - T - t 轨迹及其地球动力意义.地球科学——中国地质大学学报,1992,17(2):141 ~ 149
- 7 Bell T H. Deformation partitioning and porphyroblast rotation in metamorphic rocks: a radical re-interpretation. J metamorphic Geol, 1985,3:109 ~ 118
- 8 索书田.造山带的网结状构造样式.地质科技情报,1993,12(2):1 ~ 7
- 9 索书田.地壳内部剪切带阵列的分形几何学.见:辛厚文主编.分形理论及其应用.合肥:中国科学技术大学出版社,1993.341 ~ 344
- 10 Henry C, Michard, Chopin C. Geometry and structural evolution of ultra-high-pressure and high-pressure rocks from the Dora-Maira massif, Western Alps, Italy. Journal of Structural Geology, 1993,15:965 ~ 981
- 11 袁学诚.秦岭造山带的深部构造与构造演化.见:叶连俊,钱详麟,张国伟主编.秦岭造山带学术讨论会论文选集.西安:西北大学出版社,1991.174 ~ 184
- 12 赵永贵,王思敬,刘建华.大别造山带的地壳和下岩石圈构造特征.见:徐贵忠,常承法主编.大陆岩石圈构造与资源.北京:海洋出版社,1992.161 ~ 170
- 13 Dunbar A, Sawyer D. How preexisting weaknesses control the style of continental breakup. J Geophys Res, 1989, 94:7278 ~ 7292
- 14 索书田,桑隆康,韩郁菁.大别山前寒武纪变质地体岩石学与构造学.武汉:中国地质大学出版社,1993
- 15 Sibson R H. Frictional constraints on thrust, wrench and normal faults. Nature (London), 1974,249:542 ~ 544
- 16 Kirby S H. Rheology of the lithosphere. Reviews of Geophysics and Space physics, 1983,21:1458 ~ 1487
- 17 董树文,孙先如,张勇.大别山碰撞造山带基本结构.科学通报,1993,38:542 ~ 545
- 18 Wernicke B. The fluid layer and its implications for continental dynamics. In: Salisbury M H, Fountain D M, eds. Exposed Cross-Sections of the Continental Crust. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1990.510 ~ 544
- 19 索书田,张维吉.论双侧造山带——以桐柏—大别造山带为例.西安地质学院学报,1993,15(增刊):29 ~ 37
- 20 Drummond B J. A review of crust/upper mantle structure in the Precambrian areas of Australia and implications for Precambrian crustal evolution. Precambrian Res, 1988,40/41:106 ~ 116
- 21 Rutter E H, Brodie K H, Evans P J. Structural geometry, lower crustal magmatic underplating and

- lithospheric stretching in the Ivrea-verbano zone, northern Italy. *Journal of Structural Geology*, 1993, 15: 647~662
- 22 游振东, 索书田, 韩郁菁. 年轻褶皱带内前寒武纪基底的地质特征. *地学研究*, 1993, 25: 27 ~ 36
- 23 Harley S L. The origin of granulites, a metamorphic perspective. *Geol Mag* 1989, 126: 215 ~ 247
- 24 Chapman D S. Thermal gradients in continental crust. In: Dawson J B, Carswell D A et al, eds. *The Nature of the Lower Continental Crust*. Geological Society of London, Special Publication, 1986, 24: 63 ~ 70
- 25 陈汉宗. 鄂东北早前寒武系地质年代学研究. *地球化学*, 1987, (2): 153 ~ 159
- 26 Sang L, You Z. The metamorphic petrology of the Susong Group and the origin of the Susong phosphorite deposits, Anhui Province. *Precambrian Res*, 1988, 39: 65 ~ 76
- 27 Bickford M E, Collerson K D, Lewry J F et al. Proterozoic collisional tectonism in the Trans-Hudson orogen, Saskatchewan. *Geology*, 1990, 18: 14 ~ 18
- 28 王鸿祯. 中国华南地区地壳构造发展的轮廓. 见: 王鸿祯等主编. *华南地区古大陆边缘构造史*. 武汉: 中国地质大学出版社, 1986. 1 ~ 15
- 29 王江海, 游振东. 耗散结构理论在混合岩研究中的应用. *地学探索*, 1988, (1): 8 ~ 15
- 30 张国伟, 周鼎武, 于在平. 秦岭造山带岩石圈组成、结构和演化特征. 见: 叶连俊, 钱详麟, 张国伟主编. *秦岭造山带学术讨论会论文选集*. 西安: 西北大学出版社, 1991. 112 ~ 137
- 31 刘国惠, 张寿广, 游振东. 秦岭造山带主要变质岩群及变质演化. 北京: 地质出版社, 1993
- 32 游振东, 周汉文, 吕学森. 湖北潘水蓝晶石铝直闪石片岩中的冠状体结构的研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 1990, 15(4): 345 ~ 356
- 33 Kay R W, Kay S M. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 1993, 219: 177 ~ 189

Crustal Texture and Rheological Evolution of Root Zones in Qinling Orogenic Belt

Suo Shutian You Zhendong Zhong Zengqiu Chen Nengsong Sang Longkang
(China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract

The Qinling Orogenic Belt (QOB) represents a polyphase boundary collision zone between the North China Block and the Yangtze Block, in which the Dabie Precambrian metamorphic terrane is an exhumed portion of the middle-lower crust or root part of the orogenic belt. The root part has an extremely complicated crustal texture and the most outstanding tectonic features of the crust are their anastomosing tectonic patterns with lens-shaped domains of low strain separated by anastomosing belts of high strain. The rheological nature of the middle-lower crust is approached from a physical standpoint. The crustal rheology was assessed on the basis of the frictional failure in the brittle regime, and power-law creep in the ductile regime. Rheological profiles are constructed for 1-D crustal structural and thermal

model limited to the current and the Mid-Late Proterozoic configurations of the deformed belt, respectively. The profiles highlight the rheological stratification of the crust and indicate that the deformation was strongly heterogeneous and partitioned since Mid-Late Proterozoic times at least. Seven rheological evolution stages for the root part are defined on the basis of large body of geological and geophysical data available in the region. The rheological profiles and stages are used to explain tectonic-metamorphic features such as the depth of the brittle-ductile transition, the old metamorphic core complexes and the strength discontinuities or decollement zones in the Qinling Orogenic Belt. It is emphasized that an understanding of the middle-lower crustal rheology in the orogenic belt is therefore essential to the understanding of the dynamics of large-scale tectonic processes.

Key words root part, middle-lower crust, rheological stratification, Qinling Orogenic Belt, strain-metamorphism partitioning.

www.cnki.net

* * * * *

《地球科学——中国地质大学学报》

1994 年 第 19 卷 第 6 期 要目预告

塔里木板块周缘晚古生代以来的构造演化	刘 训
天山两侧前陆冲断系构造样式与前南盆地演化	刘和甫
近 20 年来中国第四纪冰川研究的进展	孙殿卿
河南桐柏地区三叠纪早期放射虫动物群及其地质意义	冯庆来
应力遥感监测地质灾害研究的进展和展望	游永雄
加利福尼亚沟-弧-盆系地质景观	陆克政