

桐柏—大别—苏鲁 UHP 和 HP 变质带的结构及流变学演化

索书田^{1,2}, 钟增球², 韦必则², 张宏飞², 周汉文², 游振东²

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 在岩石圈流变学基本原理指导下, 运用现代构造解析学方法, 在不同尺度上判别和分析了桐柏—大别—苏鲁 UHP 和 HP 变质带内深俯冲、同碰撞构造及 UHP 和 HP 岩石折返过程中的变形特征, 重点讨论同碰撞形成的高角度网状榴辉岩相剪切带阵列、高角闪岩相剪切及有关变形组合以及碰撞期后伸展韧性薄化变形样式, 强调指出不同地壳层次和物理条件下变形分解作用的重要性, 而且, 在 UHP 和 HP 变质带内最有效的应变体制是剪切作用, 并在三维空间上形成不同格式的剪切带网状系统. 以构造学记录为主线, 结合已有可利用的岩石学、变质作用 pT 轨迹和同位素年代学资料, 提出一个 UHP 和 HP 变质带尺度上的流变学演化模式, 其中, UHP 和 HP 变质岩石由地幔深度折返到地壳表层, 经历了楔状挤出、碰撞期后地壳韧性薄化及晚造山伸展塌陷、揭顶作用等多个阶段的动力学过程.

关键词: 桐柏—大别—苏鲁区; UHP 和 HP 变质带; 岩石圈流变学; 剪切带; 韧性薄化作用; 变形分解作用.

中图分类号: P542

文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2002)05-0549-09

作者简介: 索书田(1936—), 男, 教授, 博士生导师, 1960年毕业于北京地质学院, 主要从事岩石圈流变学、构造地质学及 UHP 和 HP 变质带构造学研究和教学工作.

0 引言

自从许志琴在大别地块内发现柯石英假象, 并在 1987 年北京国际大陆岩石圈的构造演化与动力学讨论会上作了报道以来, 大别—苏鲁地区的超高压(UHP)和高压(HP)变质带, 已成为国际上固体地球科学的研究热点地区之一, 有大量的专著和论文发表^[1~11]. 但是, 总的来说, 超高压变质带的构造学研究相对滞后, 多限于一些抽象性的演化模式讨论.

岩石圈流变学^[12,13]是 20 世纪 80 年代逐渐发展和形成的一门新型地球科学, 其基本原理如岩石圈不均一性及流变学分层性、应变局部化、变形分解作用、力学及热不稳定性、多矿物岩石固态流变及构造体制转换等, 在解释板块构造、造山带和盆地形成的几何学、运动学和动力学方面, 作出了令人鼓舞的成绩. 本文目的就是企图在岩石圈流变学基本原理

指导下, 结合桐柏—大别—苏鲁超高压和高压变质带不同尺度变形组构的实际, 运用现代构造分析方法, 以典型地区构造解析为基础, 结合区域上构造学、岩石学和变质作用的研究, 分别描述不同构造体制及变质条件下的岩石变形特征, 努力建立其区域构造框架. 在此基础上, 综合利用已有的构造学分析、变质作用 pT 信息及同位素年代学资料, 提出桐柏—大别—苏鲁超高压和高压变质带的推测性流变学演化模式, 解释超高压和高压岩石的形成和折返过程.

1 区域地质背景

桐柏—大别—苏鲁区是秦岭造山带的东延部分, 代表中朝克拉通与扬子克拉通之间的碰撞缝合带^[11,14]. 通过近年来国内外地质学者的研究, 在巨型的昆仑—秦岭—大别山系或中国大陆内部“中央造山带”内, 发现有 2 个超高压(UHP)和高压(HP)变质带. 其一是自阿尔金山西段始, 经柴达木盆地北

收稿日期: 2002-05-09

基金项目: 国家重点基础项目(No. G1999075506); 国家自然科学基金项目(No. 49972067, 49794041).

缘的大柴旦、都兰及沙柳河,向东延至秦岭的河南省卢氏县官坡和狮子坪一带.已有的岩石学和同位素年代学研究认为^[15],其超高压和高压峰期变质年龄为 503~494 Ma,代表了加里东早期的深俯冲及碰撞缝合带.其二是桐柏—大别—苏鲁带,它是现已知的世界上规模最大、出露最好和研究程度较高的超高压和高压变质带之一,仅在桐柏—大别—苏鲁区,延长就达 1 000 余 km,而且向西越过南襄盆地有继续向秦岭延伸的趋势,向东则越过黄海与朝鲜半岛的临津江变质带沟通.多种方法及多个实验室的同位素年龄测试结果证实,主体峰期变质作用时代为印支期(250~220 Ma),代表另一个大陆深俯冲或碰撞缝合带.在空间上,这 2 个超高压和高压变质带不能直接联系起来.一个巨型造山系内出现年代及结构不同的 2 个缝合带,也是大陆碰撞造山带的特征之一^[16],反映了复杂的造山带根带地壳结构及造山地球动力学过程.详细的桐柏—大别—苏鲁超高压和高压变质带岩石学、构造学和变质作用 pT 轨迹研究,不支持桐柏—大别—苏鲁区经历过多期超高压变质作用的观点,因其缺乏与多期超高压变质作用相对应的构造学、岩石学及变质作用的记录.

桐柏—大别—苏鲁超高压和高压变质带有长期和复杂的碰撞前、同碰撞和碰撞后的构造演化历史,因此,不同构造阶段的地壳流变学结构也是不相同的.例如,现今地壳结构及流变学分层性,根据各种地球物理资料分析,上、中、下地壳的划分及特征都较明确,最大地壳厚度达 41.5 km^[17,18].天然地震震源分布(图 1)也证明了地壳结构的流变学分层性,震源大都位于低速层或“流体地壳层”(fluid crustal layer)^[19,20]上下 2 个界面附近.显然,经过深俯冲和而后折返过程的超高压和高压变质岩石,现今大都处于上地壳脆性层次,其变形服从摩擦滑动

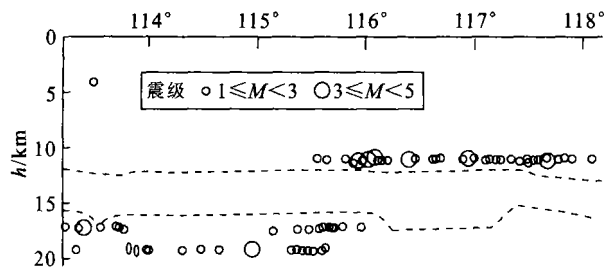


图 1 天然地震震源深度分布^[19]

Fig. 1 Earthquake depth distributions during 1970—1979 in the Tongbai-Dabie area^[19]

流变学(frictional rheology)定律^[13].我们的主要研究目的,是要揭示超高压和高压变质岩石在其深俯冲到地幔深度及折返到中下地壳层次时的变形行为和物理状态.由此可以看出,研究桐柏—大别—苏鲁超高压和高压变质带的构造演化,必然要涉及到四维的问题.

2 野外关系

迄今为止,已经获得和积累了大量的有关桐柏—大别—苏鲁超高压和高压变质带的岩石学、同位素年代学及地球化学方面的资料,也提出了多种深俯冲和折返过程的概念性模式^[8,11,21].但是,不少模式都不符合超高压和高压变质带内不同岩石组合及构造变形之间的实际关系,因此,还没有一个模式被广大的国内外学者所认同.

在桐柏—大别—苏鲁超高压和高压带分布范围内,我们选择了 30 个关键位置,结合大比例尺制图(1:10 000),进行了较详细的几何学、运动学、流变学及动力学分析,首要目的是鉴别不同岩石组合及各种构造热事件的几何学和相对时间关系.这里只举 2 例详细说明之.

例 1 位于安徽省岳西县碧溪岭地区.该区进行过详细的岩石学及同位素年代学研究^[22~24].作者在约 6 km² 范围内,进行了比例尺为 1:10 000 的构造制图和构造解析工作^[25,26],基本上分清楚了出露于这一地区的主要岩石组合及不同构造热事件的野外关系,见 Suo 等^[26](图 2).其中,超高压剪切带内面理化榴辉岩与块状榴辉岩及石榴橄榄岩之间的关系,表现得尤为清楚(图 2a).块状榴辉岩相当程裕淇等^[23]的深色榴辉岩,由石榴子石(50%) + 绿辉石(47%) + 金红石(2%) + 柯石英组成,具微弱的面理,由短柱状辉绿石定向排列显示出来.石榴橄榄岩的矿物组合为石榴石(20%) + 单斜辉石(30%) + 斜方辉石(40%) + 橄榄石(10%) + 钛铁矿(少量),强烈蛇纹岩化.辉石也略具定向排列,显示微弱面状组构.面理化榴辉岩的矿物组合为石榴石(40%) + 绿辉石(33%) + 多硅白云母(10%) + 蓝晶石(5%) + 黝帘石(5%) + 金红石(少量) + 石英(7%).具面状和线状组构,由超高压榴辉岩相矿物石榴子石、绿辉石、蓝晶石、黝帘石、多硅白云母及金红石塑性变形及优选定向排列显示出来,其中石榴子石多呈拔丝结构(ribbon texture)及多晶集合体,长可达 10 mm,

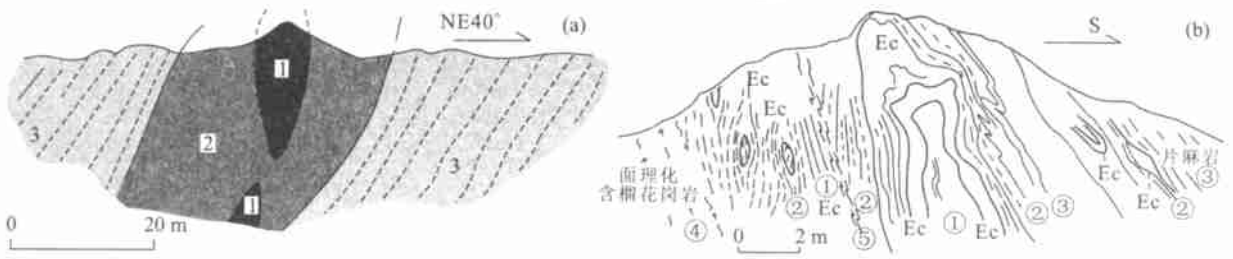


图2 露头尺度的横剖面,表示(a)具小的石榴橄榄岩透镜体的块状榴辉岩与面理化榴辉岩的几何关系,碧溪岭;(b)面理化榴辉岩、高压片麻岩及退变质榴辉岩与面理化花岗岩的几何关系,荣城市大疃

Fig.2 Schematic cross-sections on the outcrop scale showing the geometry between massive eclogite with minor garnet peridotite lenses and foliated eclogite (a), and the geometry between foliated eclogite, retrograded eclogite and high pressure gneiss, and foliated garnet-bearing granite (b)

a: 1. 石榴橄榄岩; 2. 块状榴辉岩; 3. 面理化榴辉岩. b: ①面理化榴辉岩 (Ec); ②退变质榴辉岩; ③高压片麻岩; ④面理化含榴花岗岩; ⑤角闪岩相剪切带

形态比(x/z)为10~12,内部新生颗粒粒径一般为0.02~0.09 mm.代表性面理产状为SE111°/75°.很明显,面理化榴辉岩与块状榴辉岩(含石榴橄榄岩小透镜体)之间属于强应变带与弱应变域的关系,是超高压榴辉岩相条件下变形分解作用的必然结果^[27].

例2位于山东省荣城市大疃地区.详细的平面和剖面(图2b)研究指出,面理化含榴花岗岩、高压片麻岩及退变质榴辉岩和面理化榴辉岩等之间的空间和叠加关系是极为明显的,至少从岩石薄片尺度到露头尺度,均可依据几何学、运动学、流变学和动力学标志进行判别和解释.图2b中Ec为面理化榴辉岩,由石榴子石(65%) + 绿辉石(30%) + 金红石(3%)等组成,退变质作用很弱,透入性面理发育,受石榴子、绿辉石及金红石的塑性拉长和定向排列制约,其中绿辉石及石榴子石的形态比(x/z)分别为3.5~10.5及10.5.露头尺度上的面理代表产状为NW330°~350°/80°~85°.高压片麻岩及退变质榴辉岩(榴闪岩)面理产状为NW310°~320°/80°~82°,它们或小角度切割面理化榴辉岩的面理,或与面理化榴辉岩的面理平行,形成复合状面理(composite foliation),局部也大体平行面理化榴辉岩面理形成的褶皱轴面,并伴生有部分熔融作用形成的浅色脉体.面理化含榴花岗岩中的透入性面理产状为SE120°~140°/30°~50°,与面理化榴辉岩中的面理及退变质榴辉岩中的面理明显不协调.但在区域尺度上,它们与高压片麻岩中的面理有复杂的置换过程,多以复合面理的形式出现,分离型角闪岩相韧性剪切带发育,糜棱面理产状与面理化含榴花岗岩内

的面理近趋一致.

上述2个实例所显示的岩石组合及各种构造热事件,在所研究的30个关键地区及区域上,大体都是一致的,表明它们具有普遍性和规律性.为此,以构造变形记录为主线,可划分出5个大的变形阶段及相关变形,分别称作D₁、D₂、D₃、D₄和D₅.D₁指块状榴辉岩中以微弱面理为代表的变形;D₂指高角度网状超高压剪切带;D₃包括后成合晶的发育、减压部分熔融作用及复杂的挤压及剪切变形;D₄代表碰撞期后韧性伸展和薄化作用;D₅表示造山塌陷(orogenic collapse)和揭顶作用(unroofing)产生的构造,本文不予详细讨论.实际上,D₁—D₅代表了桐柏—大别—苏鲁超高压和高压变质带从深俯冲和碰撞至折返到地壳表层的不同构造演化阶段,具有不同的变形体制及流变学状态.

3 深俯冲及同碰撞变形(D₁及D₂)

扬子克拉通向北深俯冲于中朝克拉通之下并与其碰撞,产生一个地壳堆垛楔(crustal-stacking wedge)^[16].根据桐柏—大别—苏鲁超高压和高压带内不同变质条件下形成的岩石构造单位或岩片的展布,可以推测,在这一俯冲和碰撞形成的地壳堆垛楔内部结构,是相当复杂的,不同构造岩片俯冲的深度是有差别的,这可由高压单位和超高压单位内岩石和矿物的不同变形特征得到佐证.一般说来,高压单位榴辉岩中的石榴子石及辉石没有明显的塑性变形,石榴子石多呈自形晶体,含有大量具旋转或纯剪标志的包裹物;而超高压单位内的石榴子石、绿辉石

等矿物组合,尤其是位于强应变带位置,则会发生强烈的塑性变形,表明高压岩片和超高压岩片在地壳堆垛楔中处于不同的深度和 pT 物理环境,也具有流变学分层性。Handy 等^[28]通过对 Ivrea 带的研究,编制出了岩石和矿物蠕变强度与温度相关性图解,其具有普遍意义,在解释超高压和高压带变形分解作用及不同物理条件下榴辉岩的变形特征方面,有很大的参考价值。

深俯冲及同碰撞构造的残余形迹,在大别山地区的双河、张家、碧溪岭、东冲河和何家湾,苏北东海及山东省荣城等地区,都可识别出来。前已述及,具微弱面理的块状榴辉岩(D_1),一般矿物组合简单,含柯石英或金刚石,形成时压力大于 28×10^5 kPa,代表深俯冲和碰撞的终端产物。块状榴辉岩形成的透镜体规模从几 cm 到几十 m 尺度,取决于超高压榴辉岩相条件下的变形分解作用的进程。面理化榴辉岩代表超高压变质单位或岩片内部最早形成的韧性剪切带(D_2)。考虑到后期的改造和变位,这期超高压剪切带区域上呈网结状,带内面理多具高角度倾斜(大于 60°),面理面上矿物线理倾伏角一般大于 50° 。温压条件为 $p = 32 \times 10^5 \sim 38 \times 10^5$ kPa 和 $t \approx 850^\circ\text{C}$ ^[7]。但肖益林等^[29]的测算结果, $p \approx 15 \times 10^5 \sim 20 \times 10^5$ kPa, $t \approx 770 \sim 810^\circ\text{C}$,已属于高压变质作用的环境,与岩石的矿物组合所反映的物理环境有很大矛盾。

4 初期折返变形(D_3)

由深俯冲到地幔深度和碰撞产生超高压变质岩石,向这些变质岩石开始折返到地壳层次转换,是一个极为复杂的动力学过程,是地质学者正在努力探究的课题之一,已有各种推测性模式提出^[8, 11, 21]。依据构造记录分析,桐柏—大别—苏鲁超高压和高压变质岩石的初期折返,是在挤压体制下完成的,很可能是在扬子克拉通与中朝克拉通继续会聚和碰撞的大背景下楔状挤出作用的结果^[8]。挤出楔(extruded wedge)内的变形(D_3),在超高压单位内部以退变质榴辉岩相及高角闪岩相条件下形成的陡倾透入性面理、剪切带及紧闭小型斜卧褶皱为主(图 2b),将有另文进行详细的描述和分析。这里只强调指出 D_3 透入性面理的主要特征。在后期未被彻底改造和置换的地区,如太湖县石马、潜山县双河和毛岭等地区,面理主要由残余超高压和高压矿物石榴子

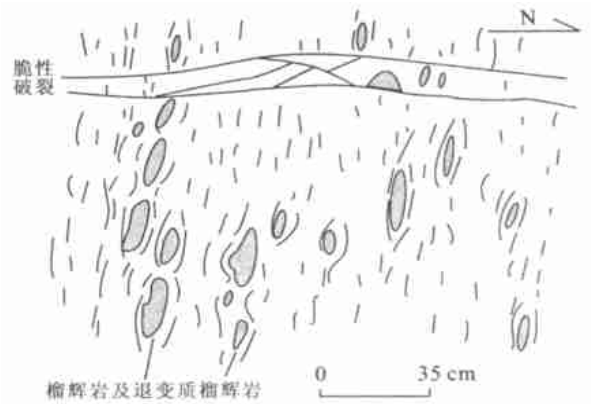


图 3 超高压单位内部的透入性 D_3 面理(石马)

Fig. 3 Sketch showing the penetrative D_3 foliation in the UHP unit, Shima, Anhui Province

长椭圆形灰色体为榴辉岩或退变质榴辉岩,该处 D_3 面理产状为 $NE40^\circ \angle 78^\circ$

石、后成合晶化绿辉石和多硅白云母等以及高角闪岩相矿物冻蓝闪石或非闪石等定向排列显示出来;露头尺度上,经常出现厘米级榴辉岩与退变质榴辉岩或角闪岩的平行条带状构造,因此,面理具复合面理行为。在不少情况,从 cm 到几十 cm 级的榴辉岩、退变质榴辉岩、角闪—绿帘—石榴子石岩扁透镜体平行面理排列(图 3),面理的初始产状是陡倾斜的,几何学及运动学标志指明水平挤压和逆冲型剪切作用为主,同时也表明,虽然有时 D_3 透入性面理的位态与先期超高压剪切带内面理是一致的或近似的,但 pT 环境及变质相确截然不同了,初步估测, $p < 16 \times 10^5$ kPa, $t = 600 \sim 700^\circ\text{C}$ ^[22, 29]。

D_3 变形阶段的后期,伴生有强烈的减压部分熔融作用,形成阴影状、脉状浅色体及大规模含榴或不含榴的面理化花岗岩系列就位,反映了挤出楔内热状态的变化并导致力学—热的大尺度不稳定性。

D_3 变形阶段的后期,伴生有强烈的减压部分熔融作用,形成阴影状、脉状浅色体及大规模含榴或不含榴的面理化花岗岩系列就位,反映了挤出楔内热状态的变化并导致力学—热的大尺度不稳定性。

5 碰撞期后伸展变形(D_4)

笔者曾经指出,现今观察到的桐柏—大别—苏鲁超高压和高压变质带的基本构造框架,主要是在碰撞及超高压变质作用期后(200~170 Ma)伸展体制下形成的^[30, 31]。区域构造样式类似于北美科迪勒拉型变质核杂岩,最显著的构造特征是多层伸展拆离带的发育,至少有 4 个地壳尺度的拆离带被识别出来,自下而上为下拆离带、中拆离带、上拆离带和顶拆离带。这些拆离带分别代表 $8 \times 10^5 \sim 15 \times 10^5$ kPa 正向压力差,分隔开具有不同岩石组合及变质

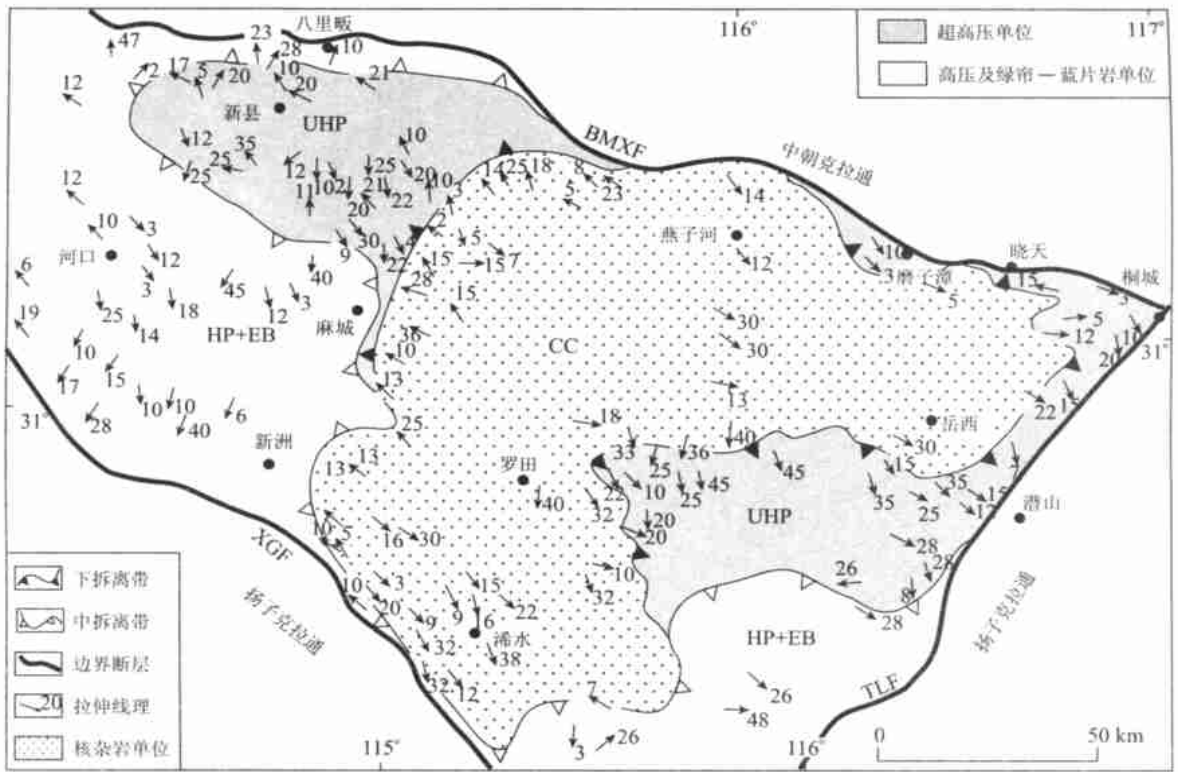


图4 大别山超高压和高压变质带内碰撞期后拉伸线理

Fig. 4 Map of stretching lineations formed mainly under amphibolite facies conditions in the UHP and HP metamorphic belts, Dabie Mountains

BMXF·八里畈—磨子潭—晓天断裂带;TLF·郟城—庐江断裂带;XGF·襄樊—广济断裂带;CC·核杂岩单位;UHP·超高压单位;HP+EB·高压及绿帘—蓝片岩单位

特征的岩石构造单位或岩片,由下而上,它们是核杂岩单位(CC)、超高压单位(UHP)、高压单位(HP)、绿帘—蓝片岩单位(EB)和沉积盖层单位(SC)。换言之,现今不同岩石构造单位之间,均以拆离带为边界,其中分隔核杂岩单位和超高压单位的下拆离带,分隔绿帘—蓝片岩单位与沉积盖层的顶拆离带,是主要的拆离带和构造边界,也是先期地壳堆垛楔及挤出楔底基及顶板剪切带,本文所研究的超高压和高压变质岩石,均限于下拆离带与顶拆离带之间。沉积盖层序列基本未变质或只遭受了极低级变质作用。而在核杂岩单位的岩石组合中,至今尚未发现典型的超高压变质作用证据,它是碰撞期后地壳韧性伸展和薄化作用形成的地壳构造柱最下部的一个岩石构造单位。

运动学及应变分析表明,拆离带内的应变以正向简单剪切为主,发育厚层角闪岩相或高绿片岩相糜棱岩。超高压和高压构造岩石单位内部,应变以纯剪兼简单剪切为特征,而且,不同构造部位也有显著的差别。例如,在麻城县北超高压单位分布区(图

4),靠近罗田穹窿的顶部,区域面理及线理产状平缓,发育大量轴面近水平的斜卧褶皱、对称的榴辉岩或退变质榴辉岩布丁、面理化布丁和共轭的剪切条带。运用多种标志进行的应变测量可知,高压片麻岩及面理化含榴花岗岩的垂向压扁量为70%~80%,水平伸展量达100%~150%,榴辉岩、退变质榴辉岩的垂向压扁量为50%,近水平的伸展量为100%。显示了不同岩石之间存在的强度差,使得岩石进一步遭到变形分解作用的改造。而在罗田穹窿的翼部,如太湖县石马、潜山县双河及岳西县菖蒲一带,正向的剪切作用兼左行或右行剪切分量特点较为明显。据统计测量和露头观察初步证实,这些地带斜卧褶皱枢纽和拉伸线理的优选倾伏方向是SE140°~150°,偏向南或偏向北倾伏的拉伸线理,分别显示具左行或右行的剪切分量。自然,这还要依据实际的面理和线理产状及它们的几何关系谨慎进行判断。

总之,碰撞期后伸展变形(D₄),以地壳垂向韧性薄化作用(ductile thinning)为特征。同时,总体上的韧性伸展流动格局及大量的部分熔融产物的变

形,显示了该阶段中地壳“流体地壳层”的特点,上地壳脆性层次的变形,由于后期侵蚀作用的影响,仅在局部地区有所保存.所以,我们现在观察到的实际上是深剥离的中下地壳的斜向剖面.图 4 是大别山超高压和高压变质带碰撞期后变形的拉伸线理图,它反映了该阶段中下地壳生动的韧性薄化及流动的景象.在超高压单位内部,碰撞期后伸展变形阶段的温压条件是 $p \approx 5 \times 10^5 \sim 8 \times 10^5 \text{ kPa}$, $t = 400 \sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[8],主要相当于角闪岩相环境.

6 流变学演化

综合上述构造分析及现有可利用的岩石学、变质作用 pT 和同位素年代学信息,提出桐柏—大别—苏鲁超高压及高压变质带流变学演化模式(图 5).这个模式中,扬子克拉通向北深俯冲于中朝克拉通之下并与其发生碰撞,形成地壳堆垛楔并发生超高压变质作用(250~220 Ma).超高压和高压变质岩石在挤压体制下从地幔深度向地壳层次折返,形成挤出楔(220~200 Ma),该阶段的晚期伴生有大规模减压部分熔融作用及热状态的变化,其热的来源与增厚的岩石圈拆沉作用或板块断离(slab breakoff)^[32]也有成因的联系.碰撞期后(200~170 Ma)地壳韧性薄化和伸展流动,是超高压和高压岩石进一步向地壳表层折返的体制之一,变形特征及流变学环境主要反映该阶段中地壳“流体地壳层”的行为.而晚造山塌陷作用,伴随有大规模岩浆岩体就位、脆性断裂阵列及陆相盆地的发育,使得超高压和高压变质岩石最终裸露于地壳表层.这个模式表明,超高压和高压岩石从地幔深度折返到地壳表层,是一个多阶段的动力学过程,在这个过程中,随着所处地壳层次和物理环境的改变,超高压和高压变质岩石的流变行为也相应发生变化,形成不同的构造样式和组合图像.但是,在各个阶段,变形分解作用都有重要的功能,其最明显的效应是榴辉岩体逐渐被分解,个体越来越小,并由格架支撑经布丁—基质最终演化到残斑—基质流变学格式^[33].另一方面也可看到,与上地壳脆性层次不同,在超高压和高压变质带内的变形过程中,剪切应变作用是主要的变形机制,应变局部化及力学不稳定性是普遍现象,在建立变形序列及构造图像时,必须考虑到这一点^[34].

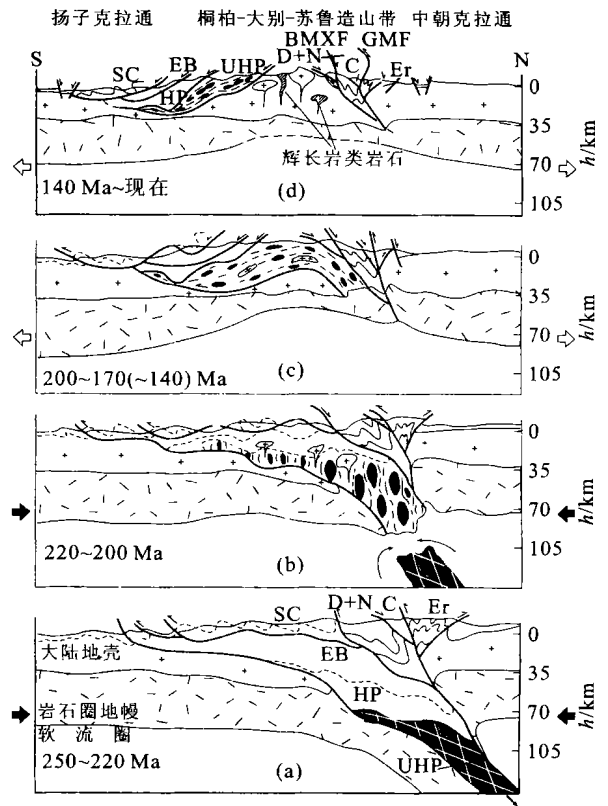


图 5 桐柏—大别—苏鲁超高压和高压变质带流变学演化模式

Fig. 5 Schematic diagrams showing a model for the rheological evolution of the UHP and HP metamorphic belts in the Tongbai-Dabie-Sulu region

(a)深俯冲和碰撞阶段,超高压和高压变质岩形成,出现地壳堆垛楔;(b)超高压和高压变质岩初期折返阶段,形成挤出楔,伴随减压部分熔融作用;(c)第二阶段折返,以碰撞期后地壳伸展和薄化作用为特征;(d)第三折返阶段,晚造山塌陷伴随大规模岩浆岩活动.GMF·龟梅断裂带;BMXF·八里畎—磨子潭—晓天断裂带;UHP·超高压单位;HP·高压单位;EB·绿帘—蓝片岩单位;SC·沉积盖层;Er·二郎坪群;C·石炭系;D+N·定远组及南湾组

7 结论

(1)桐柏—大别—苏鲁超高压和高压变质带内部结构极其复杂,但是,在岩石圈流变学基本原理指导下,运用现代构造分析方法,可以在不同尺度上进行分解、识别和区分不同层次及物理环境条件下矿物和岩石的变形行为及形成的构造样式.至少可以把深俯冲和碰撞形成的块状榴辉岩、网状超高压韧性剪切带,初期折返形成的陡倾斜透入性面状构造及伴生构造和碰撞期后地壳韧性薄化及伸展变形等区分开.

(2)超高压和高压变质岩石的形成和折返是一个复杂的地球动力学过程,单就其由地幔深度折返到地壳表层而言,就经历了多个阶段.初期折返是在挤压体制下楔状挤出到地壳层次的,后期伴随减压部分熔融作用及热状态的改变;第二折返阶段以地壳韧性薄化和伸展流动为特征,反映了该阶段中地壳“流体地壳层”的变形行为,是超高压和高压岩石向地壳表层折返的重要体制.第三折返阶段,以造山(伸展)塌陷和揭顶作用为主,使超高压和高压岩石最终大面积裸露于地壳表层.

(3)现今桐柏—大别—苏鲁区地壳结构不均一性及流变学分层性很明显,而超高压和高压变质带的区域构造样式,主要代表第二折返阶段地壳韧性薄化作用及伸展流动的变形结果,先期构造变形均遭受了强烈的叠加和改造,需要采用详细的观察及特殊的技术进行复位和再造.

(4)无论在构造演化过程中的哪一个阶段或哪一个尺度上,超高压和高压变质带内有效的应变体制是剪切作用,变形分解和应变局部化反映了力学不稳定性是普遍存在的,其综合结果是形成不同模式的网结状剪切带.

参考文献:

- [1] Xu S, Okay A I, Ji S, et al. Diamonds from Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting [J]. *Science*, 1992, 256: 80.
- [2] Ames L, Tilton G R, Zhou G. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb dating of coesite-bearing eclogites [J]. *Geology*, 1993, 21: 339—342.
- [3] 从柏林,王清晨.中国高压变质岩评述[J].*科学通报*, 1994, 39(24): 2214—2218.
CONG B L, WANG Q C. Review of researches on ultra-high-pressure metamorphic rocks in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(24): 2214—2218.
- [4] Li S, Chen Y, Emil J, et al. Geochemical and geochronological constraints on the tectonic outline of the Dabie Mountains, central China: a continent-microcontinent-continent collision model [J]. *Continental Dynamics*, 1998, 3: 14—31.
- [5] 游振东,韩郁菁,杨巍然,等.东秦岭大别高压、超高压变质带[M].武汉:中国地质大学出版社,1998.
YOU Z D, HAN Y J, YANG W R, et al. The high-pressure and ultra-high-pressure metamorphic belt in the east Qinling and Dabie Mountains, China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1998.
- [6] 索书田,桑隆康,韩郁菁,等.大别山前寒武纪变质地体岩石学与构造学[M].武汉:中国地质大学出版社,1993.
SUO S T, SANG L K, HAN Y J, et al. The petrology and tectonics in Dabie Precambrian metamorphic terranes, central China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993.
- [7] Carswell D A, O'Brien P J, Wilson R N, et al. Thermobarometry of phengite-bearing eclogites in the Dabie Mountains of central China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1997, 15: 239—252.
- [8] Maruyama S, Liou J G, Zhang R Y. Tectonic evolution of the ultrahigh-pressure (UHP) and high-pressure (HP) metamorphic belts from central China [J]. *The Island Arc*, 1994, 3: 112—121.
- [9] Okay A I, Sengor A M C, Satir M. Tectonics of an ultra-high-pressure metamorphic terrane: the Dabie/Tongbai Shan orogen, China [J]. *Tectonics*, 1993, 12: 1320—1334.
- [10] Liou J G, Zhang R Y, Wang X, et al. Metamorphism and tectonics of high-pressure and ultra-high-pressure belts in the Dabie-Sulu region, China [A]. In: Yin A, Harrison M T, eds. *Rubey Volume VIII, Tectonic development of Asia* [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 300—344.
- [11] Hacker B R, Ratschbacher L, Webb M, et al. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing [J]. *J Geophys Res*, 2000, 105: 13339—13364.
- [12] Kirby S H. Rheology of the lithosphere rev [J]. *Geophys*, 1983, 21: 1458—1478.
- [13] Ranalli G. Rheology of the lithosphere in space and time [A]. In: Burg J P, Ford M, eds. *Orogeny through time* [C]. London: Geological Society Special Publication, 1997, 121, D: 19—27.
- [14] 王清晨,从柏林.大别山超高压变质岩的地球动力学意义[J].*中国科学(D辑)*, 1996, 26: 271—276.
WANG Q C, CONG B L. Geodynamic significance for Dabie ultra-high pressure metamorphic rocks [J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 26: 271—276.
- [15] Yang J, Xu Z, Song S, et al. Subduction of continental crust in the Early Palaeozoic north Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt, NW China: evidence from the discovery of coesite in the belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(1): 63—68.
- [16] Mattauer M. Intracontinental subduction, crust-mantle de'collement and crustal tacking wedge in the Himalayas

- and other collision belts [A]. In: Coward M P, Ries A C, eds. *Collision tectonics* [C]. London: Geological Society Special Publication, 1986, 19: 37—50.
- [17] 王椿镛, 张先康, 陈步云, 等. 大别造山带的地壳结构研究[J]. 中国科学(D 辑), 1997, 27(3): 221—226.
- WANG C Y, ZHANG X K, CHEN B Y, et al. Study on crustal structures of the Dabie orogen [J]. *Science in China (Series D)*, 1997, 27(3): 221—226.
- [18] Wang C, Zeng R. A crustal model of the ultrahigh-pressure Dabie Shan orogenic belt, China, derived from deep seismic refraction profiling [J]. *J Geophys Res*, 2000, 105(B5): 10857—10869.
- [19] 郑晔, 滕吉文. 随县—马鞍山地带地壳与上地幔结构及庐构造带南段的某些特征[J]. 地球物理学报, 1989, 32(6): 648—658.
- ZHENG Y, TENG J W. Crustal and upper-mantle structure and some features in southern section of the Tancheng-Lujiang fault of the Suixian-Maanshan region [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1989, 32(6): 648—658.
- [20] Wernicke B. The fluid crustal layer and its implications for continental dynamics [A]. In: Salisbury M H, Fountain D M, eds. *Exposed cross-section of the continental crust* [C]. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 1990. 509—544.
- [21] Jahn B M, Wu F, Lo C, et al. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China [J]. *Chemical Geology*, 1999, 157: 119—146.
- [22] Zhang R Y, Liou J G, Cong B. Talc, magnesite and Ti-clinohumite-bearing UHP meta-mafic and ultramafic complex in the Dabie Mountains, China [J]. *J Petrol*, 1995, 36: 1011—1037.
- [23] 程裕淇, 刘敦一, Williams I S, 等. 大别山碧溪岭深色榴辉岩和片麻状花岗质岩石 SHRIMP 分析—晋宁期高压—超高压变质作用的同位素年代学依据[J]. 地质学报, 2000, 74(3): 193—205.
- CHENG Y Q, LIU D Y, Williams I S, et al. SHRIMP dating of a dark eclogite and a garnet-bearing gneissic rock from Bixiling, eastern Dabie area, Anhui Province: isotope chronological evidence of Neoproterozoic UHP metamorphism [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 74(3): 193—205.
- [24] Chavagnac V, Jahn B M. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications [J]. *Chemical Geology*, 1996, 133: 29—51.
- [25] 索书田, 钟增球, 周汉文, 等. 大别山碧溪岭地区超高压变质岩构造分析[J]. 地质前缘, 2001, 8(2): 385—394.
- SUO S T, ZHONG Z Q, ZHOU H W, et al. Structural analysis of UHP metamorphic rocks in the Bixiling area, Dabie Mountains, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(2): 385—394.
- [26] Suo S, Zhong Z, Zhou H, et al. Triassic collisional structures and post-collisional deformation of the Bixiling UHP rock stack: insights for the tectonic evolution of the UHP metamorphic belt in Dabie massif, central China [J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2002, 13(1): 1—13.
- [27] Bell T H. Deformation partitioning and porphyroblast rotation in metamorphic rocks: a radical reinterpretation [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1985, 3: 106—118.
- [28] Handy M R, Zingg A. The tectonic and rheological evolution of an attenuated cross section of the continental crust: Ivrea crustal section, southern Alps, northwestern Italy and southern Switzerland [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1991, 103: 236—253.
- [29] 肖益林, 傅斌, 李曙光, 等. 大别山碧溪岭榴辉岩变质温压条件计算及氧同位素研究[J]. 地球学报, 1997, 18(3): 318—323.
- XIAO Y L, FU B, LI S G, et al. Metamorphic p - T and oxygen isotope studies of eclogites from Bixiling in the Dabie Mountains [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1997, 18(3): 318—323.
- [30] 索书田, 钟增球, 游振东. 大别地块超高压变质期后伸展变形及超高压变质岩石折返过程[J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(1): 9—17.
- SUO S T, ZHONG Z Q, YOU Z D. Extensional deformation of post-ultrahigh-pressure metamorphism and exhumation process of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie massif, China [J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 30(1): 9—17.
- [31] 索书田, 钟增球, 游振东. 大别—苏鲁超高压—高压变质带伸展构造格架及其动力学意义[J]. 地质学报, 2001, 75(1): 14—24.
- SUO S T, ZHONG Z Q, YOU Z D. Extensional tectonic framework of the Dabie-Sulu UHP-HP metamorphic belt, central China, and its geodynamical significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(1): 14—24.
- [32] Von Blanckenbury F. Slab breakoff: a model for syn-collisional magmatism and tectonics in the Alps [J]. *Tecton-*

ics, 1995, 14(1): 120—131.

[33] Handy M R. The solid-state flow of polymineralic rocks [J]. *J Geophys Res*, 1990, 95: 8647—8661.

[34] Burg J P. Ductile structures and instabilities: their implication for Variscan tectonics in the Ardennes [J]. *Tectonophysics*, 1999, 309: 1—25.

Structure and Rheological Evolution of UHP and HP Metamorphic Belts in the Tongbai-Dabie-Sulu Region, China

SUO Shu-tian^{1,2}, ZHONG Zeng-qiu², WEI Bi-ze², ZHANG Hong-fei², ZHOU Han-wen²,
YOU Zhen-dong²

(1. *Faculty of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 2. *Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*)

Abstract: The basic principles of lithospheric rheology and the modern analytical tectonics are used to examine deformational features of the rocks and the processes responsible for their formation and exhumation in the UHP and HP metamorphic belts within the Tongbai-Dabie-Sulu region, China. The discussion is concentrated on high-angle, anastomosing shear zone arrays which were formed under UHP eclogite facies conditions, and related to the Triassic (250—220 Ma) collision between the Sino-Korean and Yangtze cratons, and shear zone assemblages accompanied, following the collision, by decompressional partial melting, formed by a compressional regime on upper amphibolite facies conditions, as well as deformation pictures formed by ductile extension flow and thinning on amphibolite facies conditions, mostly between 200 Ma and 170 Ma. It is suggested that the deformation partitioning plays an important role in the deformational processes for the rocks within the UHP and HP belts, at different crustal levels and on different physical conditions. The efficient strain-regime in the UHP and HP metamorphic belts is shear, which is generally localized in networks of ductile shear zones on all scales. On the basis of structural records mainly and combined with the previous data on petrography, *pT* paths of UHP metamorphic rocks and geochronology, a speculative rheological evolution model for the UHP and HP metamorphic belts is proposed. In this model, 250 to 220 Ma is considered as the most reliable estimated age for the occurrences of both the UHP and HP metamorphism and the continental collision between the Sino-Korean and Yangtze cratons. The major consequence of this collision was the development of a crustal-stacking wedge. The UHP and HP metamorphic rocks were exhumed from the mantle depth to the surface during a multistage history, including wedge intrusion (220—200 Ma), crustal ductile thinning and extension flow (200—170 Ma) and late-orogenic collapse and unroofing.

Key words: Tongbai-Dabie-Sulu region; UHP and HP metamorphic belt; rheology of lithosphere; shear zone; ductile thinning; deformation partitioning.