

秦岭石人山岩块的构造岩石学特征及其意义

任升莲 宋传中 李加好 陈泽超 黄文成 张浩然 张 华

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:通过对石人山岩块进行系统的矿物学、岩石学特征分析,总结出在洛南—栾川断裂带的影响下,该岩块的变质—变形特征,并阐述其变化规律。石人山岩块的南部边缘发育有一套混合岩带,褶皱强烈,基性岩条带十分清晰。岩石的变质程度由南向北逐渐变浅,从低角闪岩相和角闪岩相的片岩到片麻岩,再到花岗岩,暗色矿物逐渐减少,与花岗岩呈过渡关系;由南向北,随着远离断裂带,岩石结构由碎裂结构向变晶结构—变余结构变化;岩石构造由片状构造向片麻状构造—变余构造变化,变质程度总体是由强变弱、连续的渐变过程;石英的重结晶型式和边界形态、长石变形情况显示:洛南—栾川断裂带和石人山岩块岩石的变质温度范围在 300~550℃,属中高温条件;由于后期构造作用的影响,出现温度的非协调现象;动态重结晶石英颗粒边界的分维数为 1.332~1.243,从洛南—栾川断裂带往北,随着远离断裂带,呈减小趋势;应变速率值为 6.75577×10^{-16} ~ 1.81072×10^{-16} ,属于中应变速率条件,并且越靠近断裂带应变速率越大,远离断裂带应变速率逐渐减小。

关键词:构造矿物学;岩石有限应变;流变学;递进变形;秦岭造山带

中图分类号: P313 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2010)02-0347-10

秦岭造山带是一条著名的复合型大陆造山带。目前,利用地质、地球化学、地球物理手段,在秦岭造山带的结构、演化及其动力学研究方面,取得了许多世界瞩目的研究成果^[1-2];但区内精细的构造过程,岩石的变质—变形特征,以及二者之间的成因联系,尤其是大型剪切带对岩石变质—变形的干涉作用的研究,尚显不足。

石人山岩块是出露在秦岭北缘的一个独立的、岩性复杂的地质体,主要岩性有花岗岩、片麻状花岗岩、花岗片麻岩、片麻岩、混合岩和糜棱岩等^[1,2],呈带状分布,在早期区域地质调查和花岗岩体遥感解译中曾被划分为各自独立的构造地层单元,但缺乏有力的证据。近期的野外观测发现,该岩块岩石的变质程度由南向北,随着远离断裂带逐渐变浅,从中—高绿片岩相→低角闪岩相的片岩、糜棱岩→片麻岩→花岗岩;岩石结构由变晶结构→碎裂结构→变余结构变化;岩石构造由片状构造→片麻状构造→

变余构造变化,总体显示由强变弱的连续、渐变过程,各类变质岩带之间并未有明显的界线。石人山岩石块递进式变质—变形的规律,显示出结晶岩石的变质—变形强度与构造活动和应力作用的强度有密切关系,对进一步认识变质岩的成因和新生矿物的结晶机理有重要的科学意义。本文旨在通过对石人山岩块的岩石学、矿物学和构造变形特征的研究,分析强变形带及其附近岩石变质—变形规律,探讨矿物、岩石对构造作用和动力学的响应,为揭示秦岭造山带内强变形带及其附近岩块精细的构造物理过程提供资料。

1 石人山岩块的地质特征

秦岭造山带东西向横亘于中国中部,是一个典型的大陆造山带;在不同的地质发展阶段,以不同的构造体制演化,具有长期复杂的演化历史;秦岭造山带地表地质包含有各个时代,多种组合的岩石地层

单位,不同构造层次与性质的复合叠置,表现出垂向分层,横向分带分块的特征;秦岭造山带内有商丹缝合带和洛南—栾川断裂带两条重要的构造带,前者是扬子板块与华北板块的缝合线,后者是位于华北板块南缘内部的一条大型剪切带^[1-3](图1)。

石人山岩块位于洛南—栾川断裂带北侧,是一个独立的、变质-变形作用明显的特殊地质体(以下称石人山岩块)。该岩块出露长约250 km,宽约40 km,南界为著名的洛南—栾川断裂带,北界为马超营—下汤断裂带;西端尖灭在卢氏地区,东端在拐河一带仍向东延。该岩块呈透镜状,近东西向展布,构造变形总体上南强北弱。

1.1 边界断层的特征

石人山岩块南界的洛南—栾川断裂带主要表现为一条由北向南逆冲的剪切带^[1,2]。带内岩石变形强烈,主要为一套糜棱岩系列和低绿片岩-绿片岩相的浅变质岩,局部出现低角闪岩相的变质岩^[2-5]。大量的揉皱、香肠状构造和新生面理(片麻理、片理)产状稳定,一般为 $23^{\circ} \angle 43^{\circ}$,与洛南—栾川断裂带的产状基本一致。带中线理发育,包括矿物生长线理(A型线理)、拉长线理(A型线理)和皱纹线理(B型线理)

理)。矿物生长线理主要由石英、白云母和黑云母呈定向排列组成,其倾伏方向 $30^{\circ} \sim 56^{\circ}$,倾伏角为 $46^{\circ} \sim 53^{\circ}$,矿物结晶规律明显。拉长线理主要由拉长的石英颗粒、石英颗粒集合体、长石残斑和拉长的杏仁体等组成,其产状与矿物生长线理一致^[3-6]。

1.2 岩石类型的分布

如上所述,石人山岩块内出露的岩石主要为花岗岩、片麻状花岗岩、花岗片麻岩、片麻岩、混合岩和糜棱岩等。在垂直于洛南—栾川断裂带和石人山岩块构造线的方向上,石人山岩块内的这些岩石具有如下特征:①在石人山岩块的南部边缘发育一套似混合岩带,其褶皱强烈,基性岩条带十分清晰,条带最宽者可达1 m左右(图2);基性岩条带向北逐渐变少、变窄,仅1~2 mm^[1],直至过渡为不含暗色条带的花岗岩;其间不存在断层接触关系。②岩石中的面理和线理构造,由南向北逐渐不明显或不发育,矿物生长现象由强烈的定向到随机分布。③岩石的变质程度由南向北逐渐变浅,从低角闪岩相和角闪岩相的片岩到片麻岩,再到花岗岩,暗色矿物逐渐减少(图2)。

综合上述特征可知,石人山岩块内的岩石随着

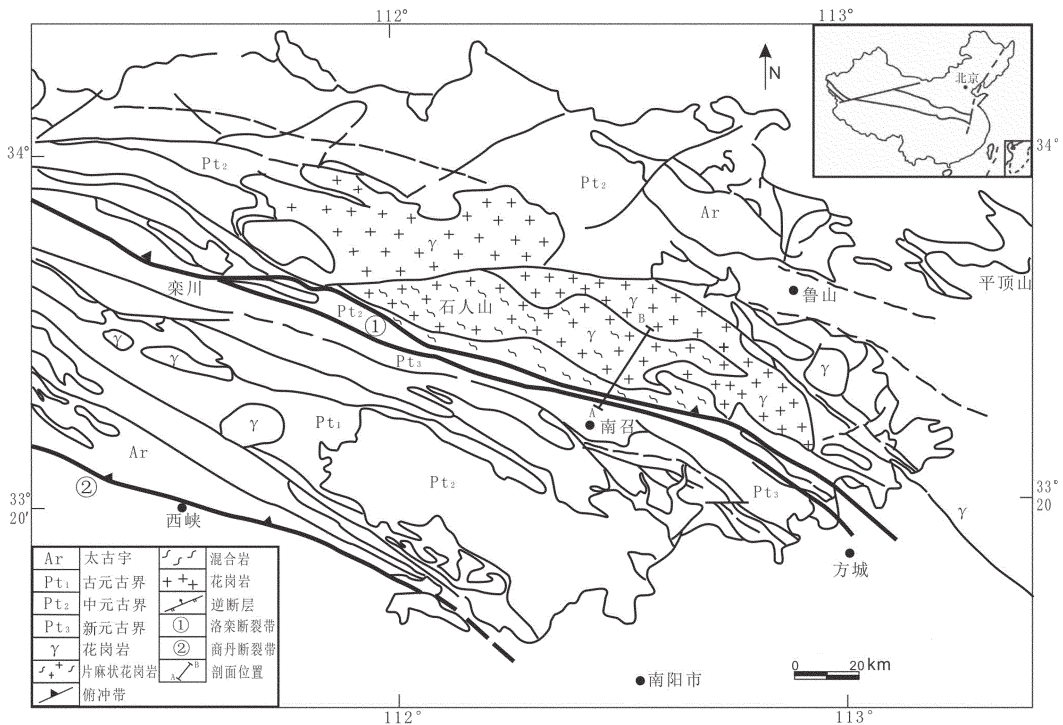


图1 石人山及其邻区构造地质图

Fig.1 Geological map of the Shiren Mountain and adjacent areas



图 2 石人山岩块内的混合岩

A—含大量暗色矿物的混合岩;B—混合岩与花岗岩的过渡关系;C—剪切带内的混合岩;D—含少量暗色矿物的混合岩

Fig.2 Migmatite in blocks of the Shiren Mountain

A—Migmatite with a large amount of dark minerals; B—The transition between migmatite and granite;

C—Migmatite in shear zone; D—Migmatite with a small amount of dark minerals

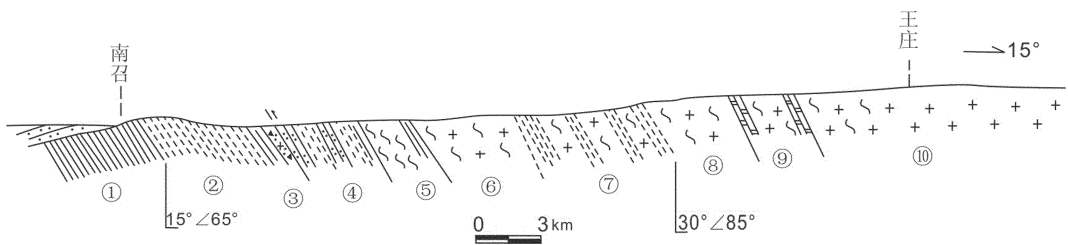


图 3 南召—王庄地质剖面

①—绿片岩;②—糜棱岩;③—角砾岩;④—石英岩夹片岩;⑤—混合岩;⑥—花岗岩片麻岩;
⑦—片麻岩夹糜棱岩;⑧—花岗岩片麻岩;⑨—片麻岩夹大理岩;⑩—花岗岩

Fig.3 Geological section from Nanzhao to Wangzhuang

①—Green schist;②—Mylonite;③—Breccia;④—Quartzite intercalated with schist;⑤—Migmatite;
⑥—Granite gneiss;⑦—Gneiss and mylonite;⑧—Granite gneiss;⑨—Gneiss and marble;⑩—Granite

远离强构造带,其变质-变形强度逐渐减弱;不同类型的岩石没有明显的界线,逐渐过渡之间,未见构造接触关系。

2 岩石学特征及其变化规律

石人山岩块内主要岩石为多种片麻岩、糜棱岩

和变余花岗岩等,石英动态重结晶明显,多出现核—幔构造和竹节状构造;长石多出现碎裂结构、石英化、亚颗粒化,表现出较强的变质—变形特征(表1);根据各类岩石的分布规律可见,岩石变质程度、构造变形强度与断裂带的活动密切相关^[1,9]:①从洛南—栾川断裂带向北,岩石中矿物的粒度由细粒化、细长状、定向极强向粗粒状、半定向逐渐过渡到原岩(花岗岩);②深色矿物是在岩石变质变形过程中析出的;离断裂带越远深色矿物越少、浅色矿物越多,且深色矿物自形程度降低。③靠近断裂带深色矿物条带是洛南—栾川断裂带的活动导致的,形成时间较晚。④石英、长石颗粒的动态重结晶由强逐渐变弱,直至没有变化(图4)。

从洛南—栾川断裂带往北,石人山岩块内主要岩石从角闪片岩、云母片岩→糜棱岩→石英岩、花岗片麻岩→黑云角闪片麻岩、花岗片麻岩、角闪片麻岩、角

闪花岗片麻岩、花岗片麻岩→黑云角闪片麻岩、花岗片麻岩→黑云角闪片麻岩、变余花岗岩逐渐过渡,其连续分布,相邻岩石之间无明显界线;其原岩主要为花岗岩和少量的中—基性火山岩。其中初糜棱岩与原岩成分相同,只是矿物有破裂现象,碎斑棱角状,基质较粗。糜棱岩非常典型,碎斑多为长石、石英,呈眼球状,基质较细,定向好。片岩重结晶强烈,残斑很少甚至没有,几乎全部都是新生矿物。片麻岩为花岗质,矿物形态虽然变化不大,但波状消光强烈。

上述现象显示,石人山岩块中不同变质深度的岩石常常是带状分布,相间排列;岩石结构由变晶结构向碎裂结构—变余结构变化;岩石构造由片状构造向片麻状构造—变余构造变化。可见,该岩块的变质—变形条件虽具有强弱交替变化的不均一性,但总体是由强到弱的变质过程,连续渐变、递进变形现象十分明显。

表1 石人山岩块的岩石学特征一览表

Table 1 Petrological characteristics of blocks in the Shiren Mountain

样号	主要矿物	结构构造	重要特征	定名
NX2	Hb (60%)、Qz (30%)、Pl (10%)、Ep 少数	角闪石呈自形变晶结构,角闪石、石英、长石碎裂结构,糜棱构造	石英呈骨牌构造,长石呈眼球状残斑	糜棱岩
NX3	Ms (90%)、Qz (10%)、Bi (1%)、Ep 少数	白云母呈显微鳞片状,石英重结晶很好,镶嵌粒状变晶结构,糜棱构造	石英有竹节构造,白云母定向极好	糜棱岩
NX4	Ms (50%)、Qz (40%)、Bi (10%)	白云母呈显微鳞片状,石英重结晶很好,镶嵌粒状变晶结构,糜棱构造	石英有竹节构造,白云母定向极好	初糜棱岩
NX5	Qz (95%)、Ms (2%)、Bi (1%)、Cc (2%)	石英镶嵌粒状结构,块状构造	石英呈块状构造	石英岩
NX6	Pl (50%)、Qz (40%)、Ms (10%)	石英以基质及幔形式存在,重结晶强烈、粒状变晶结构,部分长石石英化	长石部分亚颗粒化、石英化,核幔构造	初糜棱岩
NX8	Pl (50%)、Qz (40%)、Bi (<10%)	石英以基质及幔形式存在,重结晶强烈、粒状变晶结构,多数长石石英化	长石大多亚颗粒化、石英化,核幔构造	花岗片麻岩
NX9	Qz (70%)、Pl (10%)、Bi + Hb (20%)	黑云母比角闪石自形程度高,结晶较迟,片麻状构造	长石大多亚颗粒化、石英化,核幔构造	黑云角闪片麻岩
NX10	Pl (70%)、Qz (30%)、Hb (<1%)	暗色矿物极少,长石石英呈碎裂结构,片麻状构造	长石大多亚颗粒化、石英化,核幔构造	花岗片麻岩
NX12	Pl (70%)、Qz (30%)、Hb (<1%)	长石石英裂纹较多,呈碎裂结构,片麻状构造	长石多亚颗粒化、石英化,都有核幔构造	角闪片麻岩
NX14	Qz (90%)、Pl (10%)、Bi (<1%)	石英残斑呈眼球状,重结晶的石英为缝合粒状变晶结构,片麻状构造	长石全部亚颗粒化、核幔构造	花岗片麻岩
NX15	Qz (90%)、Pl (5%)、Hb (<5%)、Ep 少数	重结晶的石英为缝合粒状变晶结构,片麻状构造	长石全部粘土化,部分石英有核幔构造	角闪花岗片麻岩
NX17	Qz (90%)、Pl (5%)、Bi (5%)	石英裂纹较多,为镶嵌粒状变晶结构,片麻状构造	长石几乎全部亚颗粒化、石英化	花岗片麻岩
NX19	Qz (70%)、Pl (20%)、Bi (5%)、Hb (<5%)	蠕石英为交代结构,石英粒状变晶结构,黑云母自形、片麻状构造	长石几乎全部亚颗粒化、石英化	黑云角闪片麻岩
NX20	Qz (50%)、Pl (50%)、Bi (<1%)	石英亚颗粒化,交代穿孔、蠕石英为交代结构和粒状变晶结构,块状构造	长石可见亚颗粒化、石英化	变余花岗岩

注:Qz—石英;Pl—斜长石;Hb—角闪石;Ms—白云母;Bi—黑云母;Ep—绿帘石;Cc—方解石。

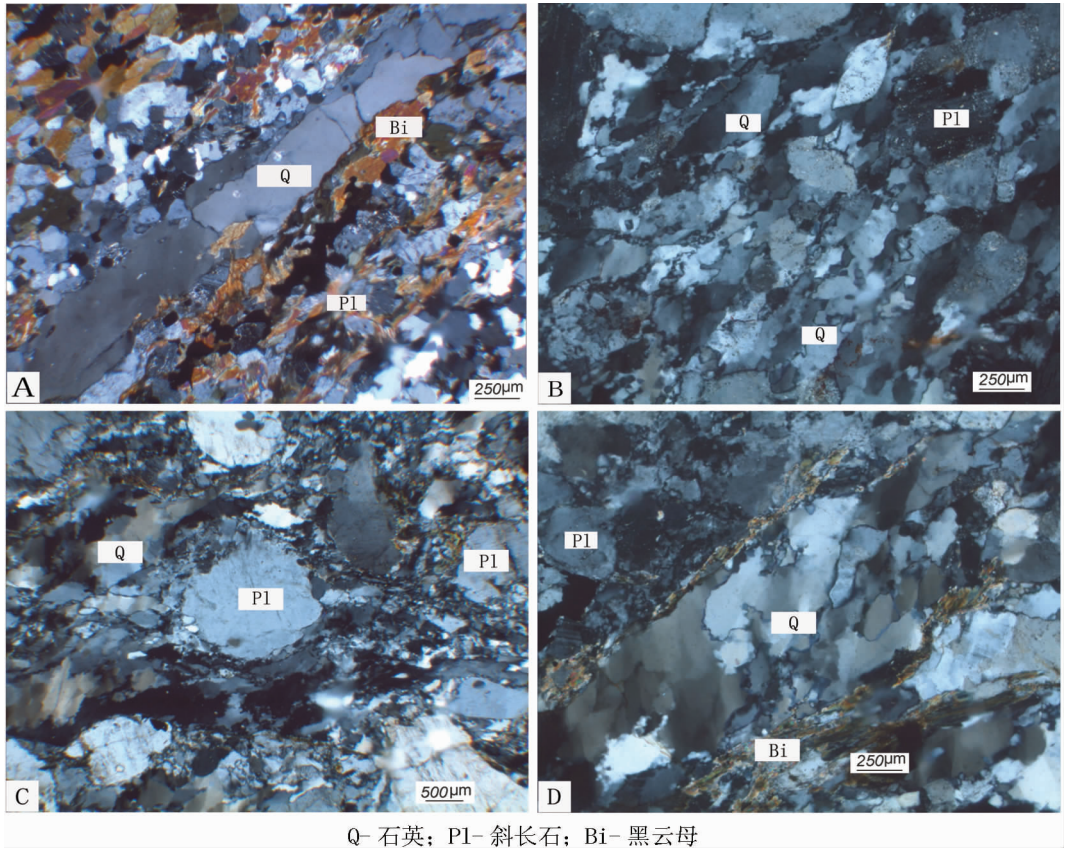


图 4 石人山岩块主要岩石的矿物学特征

A—竹节状石英;B—石英动态重结晶;C—长石的核幔构造;D—石英边界为缝合线状

Fig.4 Mineralogical characteristics under microscope

A—Banding quartz; B—Dynamical recrystallization of quartz; C—Core-mantle structure of feldspar; D—Quartz grain boundaries consisting of interfingered sutures

分析认为:从洛南—栾川断裂带往北远离断裂,石人山岩块由强应变向弱应变至无应变逐渐过渡;越靠近剪切带其所含基性物质条带越多,岩石变形越强;越远离剪切带基性物质条带越少,岩石变形越弱。在断裂带附近,可能是压力较高,浅色矿物较多溶解流出,造成深色矿物和浅色矿物的分带富集;在断裂带相对较远的地方该现象并不存在。

可见,区内基性物质的富集可能是在变质作用下酸性物质析出的产物;混合岩带的形成与构造活动带密切相关。

3 矿物变形特征分析

3.1 石人山岩块的矿物学特征

通过显微镜下观察,石英的波状消光、缎带构造、亚颗粒、动态重结晶和核幔构造普遍发育,石英颗粒定向排列、拉长明显,由碎裂逐渐向重结晶至不

变。沿剖面由南向北,石英的消光性由波状、带状消光、位错滑移逐渐变为波状消光,说明从南向北应变由强到弱;矿物颗粒边界由平直向港湾—缝合线状变化,局部出现蠕石英,说明交代作用较强;长石的变形由眼球状、白云母化严重、破碎、应力条纹多,逐渐变为石英化、亚颗粒化、核幔构造^[7-9](表 2)。

3.2 石人山岩块的变质环境

洛南—栾川断裂带和石人山岩块内岩石基质矿物组合主要为:角闪石+石英、黑云母+长石、白云母+角闪石+石英、石英+长石、黑云母+角闪石+石英、石英+角闪石、角闪石+黑云母。断裂带附近的黑云母、角闪石自形程度很高,远离断裂带自形程度下降,说明断裂带附近的黑云母、角闪石是后期构造作用下新形成的。根据矿物组合特征,自断裂带到花岗岩的岩石变质相依次为中—高绿片岩相→低角闪岩相→片麻岩相→花岗原岩,表示近断裂带变质—变

表 2 石人山岩块的矿物学特征

Table 2 Mineralogical characteristics of blocks in the Shiren Mountain

编号	岩石类型	矿物组合(基质)	石英变形	长石变形	云母变形
NX1	糜棱岩	角闪石、石英、长石	波状、带状消光	石英亚颗粒化、长石重结晶,白云母化	自形,变形不强
NX2	糜棱岩	角闪石、长石、石英、	波状消光、骨牌状、眼球状、边界港湾状	眼球状、白云母化严重,破碎,应力条纹	自形,不变形
NX3	糜棱岩	白云母、角闪石、石英	波状消光、骨牌状、长条状、边界平直	极少,白云母化	白云母定向、S-C
NX4	初糜棱岩	白云母、角闪石、石英	波状消光、骨牌状、边界平直	极少,白云母化	白云母、肿-缩式构造
NX5	石英岩	白云母、黑云母	波状消光、边界平直状		
NX6	初糜棱岩	白云母、角闪石、石英	波状消光、骨牌状、边界平直-港湾状	极少,白云母化	白云母、肿-缩式构造
NX8	花岗片麻岩	黑云母、金属矿物	波状消光、边界缝合线状、锯齿状	破碎、有石英幔、大多石英化	黑云母定向
NX9	黑云角闪片麻岩	黑云母、角闪石、石英	波状消光、裂纹多、颗粒破碎	石英亚颗粒化	破裂、没有弯曲
NX10	花岗片麻岩	角闪石、黑云母	波状消光、变形纹极多、核幔构造	核幔构造、边界缝合线状	弯曲
NX12	角闪片麻岩	黑云母、角闪石	波状消光、多变形纹、边界港湾状	多石英化	
NX14	花岗片麻岩	石英、黑云母	波状消光、裂纹多、边界港湾状、核幔构造	几乎全部石英化	
NX15	角闪花岗片麻岩	角闪石	波状消光、核幔构造、破碎颗粒多	裂纹多、核幔构造、石英化、亚颗粒多	
NX17	花岗片麻岩	角闪石、黑云母	带状消光、变形纹、裂纹多、破碎颗粒多	少见石英化、亚颗粒化	
NX18	黑云角闪片麻岩	黑云母、角闪石	波状消光、变形纹、蠕石英、核幔构造	亚颗粒化、石英化	
NX19	角闪片麻岩	角闪石	波状消光、变形纹、边界港湾-缝合线状	聚片双晶、变形纹、有核幔构造、硅化轻	
NX20	变余花岗岩	黑云母	波状消光、变形纹	亚颗粒、石英化,少数有幔	

形作用强,远离断裂带变质-变形作用减弱^[8,9]。

根据石人山岩块中石英的重结晶型式和边界形态、长石的变形情况可以得出:洛南—栾川断裂带和石人山岩块岩石的变质温度范围在 300~550℃,属中高温条件^[9,10]。断裂带附近的温度为 300~380℃;之后为 420℃左右,一直到 530~550℃,再逐渐降低,显示出洛南—栾川断裂带附近温度低,远离断裂带温度高的状态,

分析认为:断裂带附近所测的石英主要是同构造期动态重结晶的石英,而远离断裂带,由于断裂带构造影响不强,所测石英颗粒多是岩浆活动期的石英,二者不是同一时期的产物,理论上二者不具可比性。但就是这种现象反证了,近断裂带变质-变形作用强,远离断裂带变质-变形作用减弱的真实记录。

也说明,动态重结晶作用使得矿物颗粒粒度随重结晶程度和应变强度的增加而减小^[10-11]。

4 石英颗粒边界分维数分析

岩石形成与变形依赖于其形成环境的温压条件和应变速率的变化,这些因素可以用多种方式进行估算,如矿物组合、岩组测试及适当的地质温压计等方式均可估算温度、压力及应变速率。分形作为一种简单而有效的工具自引入地质科学以来,已得到广泛应用,特别是近年来在岩石变形条件估算方面取得了有意义的进展。

石英动态重结晶颗粒的边界形态具有明显的分形结构,其分维数可作为地质温度计和应变速率计^[12-18]。

分维数是定量表示自相似性的随机形态和现象

的最基本的量,是分形几何学中的一个十分重要的参数^[12-14]。不同温度范围的石英颗粒边界的分形具有不同的维数,低绿片岩相岩石中石英颗粒边界的分维数为 1.23~1.31;高绿片岩相-低角闪岩相岩石中的分维数为 1.14~1.23;麻粒岩相及同构造花岗岩中的分维数为 1.05~1.14;可见,在石英颗粒形成过程中,温度越高石英颗粒边界的分维数越小。另外,实验发现分维数还随应变速率的增大而增大,因此利用动态重结晶石英颗粒边界分维数的测算是获得结晶岩石变形温度和应变速率另一行之有效的办法^[15,16]。

本文通过对洛南-栾川断裂带和石人山岩块内动态重结晶石英分维数的分析对其形成条件进行了估算。

4.1 分维数分析的基本方法

面积-周长法是通过不规则复杂曲线的周长与

具相同面积的圆的直径相比较来确定分维数^[14-17]。具体做法是:在变形岩石显微照片上用 AutoCAD 绘图软件对动态重结晶石英颗粒边界逐个矢量化,借助软件的面积和周长查询功能统计石英颗粒的周长(P)和面积(A),再换算同面积圆直径 d (即粒径),以周长的对数 $\log P$ 为纵轴,粒径的对数 $\log d$ 为横轴,将测量数据投在双对数图上,其最小二乘法拟合线的斜率即为分维值 D ^[17-20]。

4.2 石人山地块分维数分析

本文采用面积-周长法,选定研究剖面上 4 个有代表性的观察点取样,对同一构造背景下的石英动态重结晶颗粒进行分析,将测试数据分别投图,并计算出分维数^[20-24](图 5)。

然后,利用 Twiss 提出的石英动态重结晶颗粒

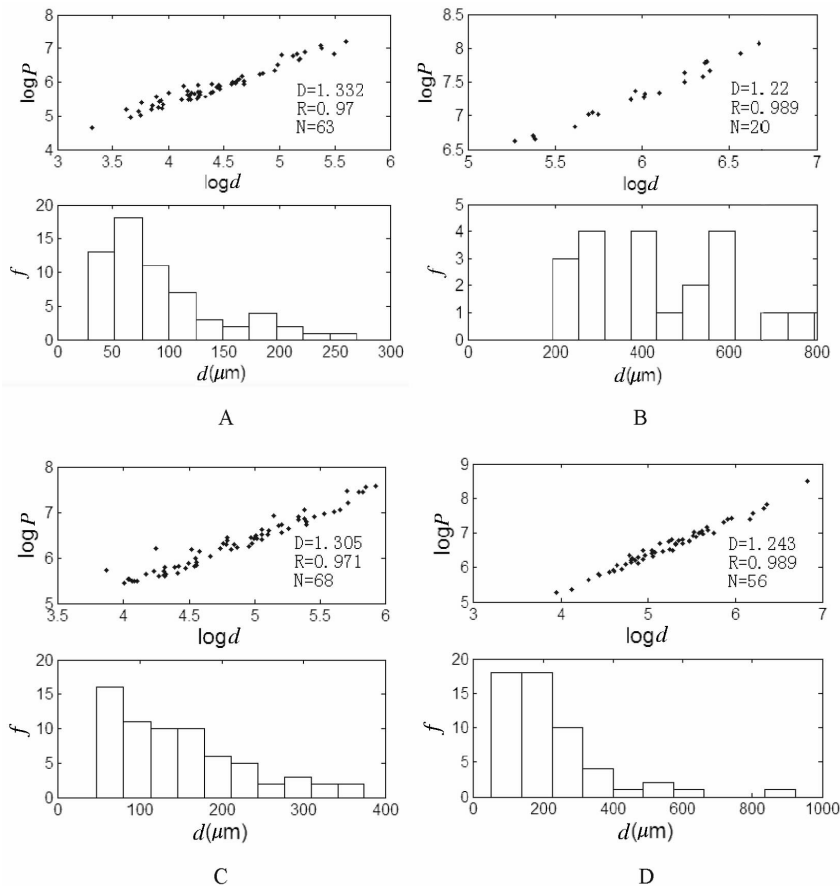


图 5 动态重结晶石英颗粒的周长-粒径双对数图和频率-粒径分布图

A—糜棱岩(NX3-1);B—石英岩(NX5-1);C—花岗岩片麻岩(NX 14-4);D—角闪片麻岩(NX 19-3)

Fig.5 Circumference-gain diameter log chart and frequency-gain diameter distributing graph of dynamically recrystallized quartz grain

A—Mylonite(NX3-1); B—Quartzite(NX5-1); C—Granite gneiss(NX 14-4); D—Hornblende gneiss(NX 19-3)

粒径计算差异应力的公式^[24]:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = A \cdot D^{-m} = 6.1 \times D^{-0.68}$$

式中: D 为石英动态重结晶颗粒粒径, 单位为 mm; $\sigma_1 - \sigma_3$ 为差异应力, 单位为 MPa, 分别计算出岩石变形的差应力(表 3)。

再应用 Parrish 的湿石英流变速率公式^[15]:

$$\dot{\epsilon} (\text{s}^{-1}) = 4.4 \times 10^{-2} \times (\sigma (\text{MPa}))^{2.6} \times \exp(-27778/T(\text{K}))$$

选取平均变形温度 $T=400^\circ\text{C}$, 分别计算出应变速率(表 3)。

通过动态重结晶石英颗粒边界的分维数分析结果(表 3, 图 5)可以看出, 洛南—栾川断裂带和石人山岩块变质变形具有如下特征:

①动态重结晶石英颗粒边界的分维数为 1.332~1.243, 从洛南—栾川断裂带往北, 随着远离断裂带, 呈减小趋势, 颗粒的平均粒径和平均周长逐渐增大。符合 Kruhl 提出的动态重结晶石英颗粒边界的分形维数, 随着石英颗粒形成温度的升高而减小, 随应变速率的增加而增大的基本规律^[12, 13]。其分维数可以作为变质变形温度和应变的强度的标度计。

②动态重结晶石英颗粒边界的分维数与韧性剪切带中糜棱岩化程度有关。从剪切带内至远离剪切带, 随着糜棱岩化程度的减弱, 矿物颗粒粒径变大, 应变趋向于减小。该现象与野外和镜下观察的矿物、岩石特征吻合, 与 Kruhl 提出的低角闪岩相—绿片岩变质相的研究结论一致^[12, 13]。

③研究区所获得的应变速率值为 6.75577×10^{-16} ~ 1.81072×10^{-16} , 属于中应变速率条件^[25-26]。并且在垂直洛南—栾川断裂带和石人山岩块的方向上, 越靠近断裂带应变速率越大, 远离断裂带应变速率逐渐减小。

由此可见, 分维值可以真实地反映石英动态重结晶的程度。

5 结 论

石人山岩块内主要岩石有角闪云母片岩、黑云角闪片麻岩、花岗片麻岩、石英岩、糜棱岩、变余花岗岩等, 它们连续分布, 逐渐过渡, 递进变形现象十分明显; 动态重结晶石英颗粒边界的分维数随着远离断裂带, 呈减小趋势, 颗粒的平均粒径和平均周长逐渐增大, 应变趋向于减小, 与其南界的洛南—栾川断裂带同期的活动关系密切:

①作为华北板块南缘与秦岭造山带汇聚—拼合带的石人山岩块南界洛南—栾川断裂带主要表现为一条由北向南逆冲的韧性剪切带, 带内发育一套糜棱岩, 岩石变形强烈。

②石人山岩块的南部边缘发育一套混合岩带, 褶皱强烈, 基性岩条带十分清晰。岩石的变质程度由南向北逐渐变浅, 从中—高绿片岩相—低角闪岩相的片岩、糜棱岩到片麻岩, 再到花岗岩, 暗色矿物逐渐减少, 与花岗岩呈过渡关系。

③由南向北, 随着远离断裂带, 岩石结构由变晶结构向碎裂结构—变余结构变化; 岩石构造由片状构造向片麻状构造—变余构造变化, 总体是由强变弱的连续、渐变过程。

④石英的重结晶型式和边界形态、长石变形情况显示, 洛南—栾川断裂带和石人山岩块岩石的变质温度范围在 $300\sim 550^\circ\text{C}$, 属中高温条件; 由于后期构造作用的影响, 出现温度的非协调现象。

⑤动态重结晶石英颗粒边界的分维数为 1.332~1.243, 从洛南—栾川断裂带往北, 随着远离断裂带, 呈减小趋势。

⑥应变速率值为 6.75577×10^{-16} ~ 1.81072×10^{-16} , 属于中应变速率条件, 并且越靠近断裂带应变速率越大, 远离断裂带应变速率逐渐减小。

表 3 石人山岩块动态重结晶石英颗粒边界的分形特征
Table 3 Fractal characteristics of dynamically recrystallized quartz grain boundary in the Shiren Mountain

样品号	点数	粒径分布	周长分布	分维数	相关系数	差应力	应变速率估算 (s^{-1})
		($d/\mu\text{m}$)	($P/\mu\text{m}$)				
NX3-11	63	37.44~270.02	141.90~270.02	1.332	0.970	0.288	6.75577×10^{-16}
NX5-1	20	216.20~793.94	761.09~3189.44	1.220	0.989	0.489	3.68947×10^{-16}
NX14-4	68	48.01~374.47	241.23~1934.26	1.305	0.971	0.659	3.43769×10^{-16}
NX19-3	56	191.84~4939.35	52.04~562.77	1.243	0.989	0.598	1.81072×10^{-16}

石人山岩块中的岩石、矿物的变质-变形与大型剪切带密切相关。

参考文献(References):

- [1] Song Chuanzhong, Zhang Guowei, Wang Yongsheng, et al. The constraints of strain partitioning and geochronology in Luonan - Luanchuan tectonic belts on Qinling orogenic belt [J]. Science in China, 2009, 52(3):300-312.
- [2] 路凤香, 王春阳, 郑建平, 等. 秦岭北界岩石圈组成及结构 [J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(1):1-9.
Lu Fengxiang, Wang Chunyang, Zheng Jianping. The composition and structure of lithosphere on northern margin of Qinling Orogen [J]. Science in China(Ser.D), 2003, 33(1):1-9(in Chinese).
- [3] Davis G A, 郑亚东. 变质核杂岩的定义、类型及构造背景[J]. 地质通报, 2002, 21(4/5):185-192.
Davis G A, Zheng Yadong. Metamorphic core complexes: Definition, types and tectonic setting[J]. Geol. Bull. China, 2002, 21(4/5):185-192 (in Chinese with English abstract).
- [4] 张进江, 郑亚东, 石铨增, 等. 小秦岭变质核杂岩、拆离断层及其运动学特征的研究[J]. 岩石圈地质科学, 1996, (4):42-52.
Zhang Jinjiang, Zheng Yadong, Shi Quanzeng, et al. The study of metamorphic core complex, detachment faults and features of kinematics in the XiaoQinling area [J]. Geosciences of Lithosphere, 1996, (4):42-52 (in Chinese with English abstract).
- [5] 张进江, 郑亚东, 刘树文. 小秦岭变质核杂岩的构造特征、形成机制及构造演化[M]. 北京:海洋出版社, 1998.
Zhang Jinjiang, Zheng Yadong, Liu Shuwen. The Xiaoqinling Metamorphic Core complex; Structure, Genetic Mechanism and Evolution [M]. Beijing: The Ocean Publishing House, 1998 (in Chinese with English abstract).
- [6] 吴春明, 耿元生. 变质作用精细过程研究进展 [J]. 地球科学进展, 2001, 16 (6):785-790.
Wu Chunming, Geng Yuansheng. Some research advances on detailed metamorphic process in the last five years [J]. Advance in Earth Science, 2001, 16 (6):785-790 (in Chinese with English abstract).
- [7] 胡玲. 显微构造地质学概论[M]. 北京:地质出版社, 1998:14-56.
Hu Ling. Generality of Microstructure Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998:14-56(in Chinese).
- [8] 刘瑞珣. 显微构造地质学[M]. 北京:北京大学出版社, 1988:58-79.
Liu Ruixun. Microstructure Geology [M]. Peking University Press, 1988:58-79.
- [9] 刘树文, 张进江, 郑亚东. 小秦岭变质核杂岩同变形期的 P-T 路径[J]. 科学通报, 1997, 42:312-318.
Liu Shuwen, Zhang Jinjiang, Zheng Yadong. P-T path of the metamorphism coeval to deformation, Xiaoqinling metamorphic complex [J]. Chinese Science Bulltin, 1997, 42:312-318 (in Chinese).
- [10] 王嘉荫. 应力矿物概论[M]. 北京:地质出版社, 1978:45-67.
Wang Jiayin. Introduction to Stress Mineral [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1978:45-67(in Chinese).
- [11] 宋传中, 等. 岩石有限应变与造山带构造块体变形要素的估算 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005, 28(9):1141-1145.
Song Chuanzhong, et al. Rock finite strain and estimation of deformed components of structural blocks in an orogenic belt [J]. Journal of Hefei University of Technology (Nature Science), 2005, 28(9):1141-1145(in Chinese with English abstract).
- [12] Kruhl J H, Nega M, Milla H E. The fractal shape of grain boundary sutures: reality, model and application as a geothermometer. 2nd Int. Conf. on Fractal and Dynamic Systems in Geosciences. Frankfurt. Book of Abstracts, 1995, 84:31-32.
- [13] Kruhl J H, Nega M. The fractal shape of sutured quartz grain boundaries: application as a geothermometer [J]. Geologishe Rundschau, 1996, 85:38-43.
- [14] 高安秀树. 分形[M]. 沈步明, 常子文译. 北京:地震出版社, 1989:65-71.
Gao an xiushu. Fractal [M]. Translation by Chen Buming, Chang Ziwen. Beijing: Seismological Press, 1989:65-71.
- [15] Parrish D K, Krivz A, Cater N L. Finite element folds of similar geometry[J]. Tectonophysics, 1976, 32:183-207.
- [16] 肯尼恩. 法尔科内. 分形几何-数学基础及其应用 [M]. 曾文曲, 刘世耀, 戴连贵, 等译. 沈阳:东北工学院出版社, 1991, 58-66.
Kenneth J Falconer. Techniques in Fractal Geometry [M]. Translation by Zeng Wenqu, Liu Shiyao, Dai Liangui, et al. Shenyang: Northeastern University of Technology Press, 1991, 58-66.
- [17] 陈颢, 陈凌. 分形几何学[M]. 北京:地震出版社, 1998:63-74.
Chen Yong, Chen Ling. Fractal Geometry[M]. Seismological Press, 1998:63-74(in Chinese).
- [18] Gillepie P A, Howard C B, Walsh J J, et al. Measurement and characterization of spatial distributions of fractures[J]. Tectonophysics, 1993, 226:113-141.
- [19] Lovejoy S. Area perimeter relation for rain and cloud areas [J]. Science, 1982, 216:185-187.
- [20] Takahashi M, Nagahama H, Masuda T. Fractal analysis of experimentally, dynamically recrystallized quartz grains and its possible application as a strain rate meter [J]. Journal of structural Geology, 1998, 20(2/3):269-275.
- [21] Turcotte D L. Implication of chaos, scale invariance, and fractal statistics in geology [J]. Global and Planetary Change, 1990, 89:301-308.
- [22] 王新社, 郑亚东, 杨崇辉, 等. 用动态重结晶石英颗粒的分形确定变形温度及应变速率[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(1):36-41.
Wang Xinshe, Zheng Yadong, Yang Chonghui, et al. Determination of the deformation temperature and strain rate by the fractal shape of dynamically recrystallized quartz grains [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2001, 20 (1):36-41 (in Chinese with English abstract).
- [23] Volland S, Kruhl J H. Anisotropy quantification; the application of

- fractal geometry methods on tectonic fracture patterns of a Hercynian fault zone in NW Sardinia [J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26:1499–1510.
- [24] Twiss R. J. Variable entity piezometric equations for dislocation density and subgrain diameter and their relevance to olivine and quartz[J]. *Geophysical Monography*, 1986, 36:261–274.
- [25] Gleason G C, Tullis J. A flow law for dislocation creep of quartz aggregates determined with the molten salt cell [J]. *Tectonophysics*, 1995, 247:1–23.
- [26] 刘德良, 杨晓勇, 杨海涛, 等. 郯庐断裂南段浮槎山韧性剪切带糜棱岩变形条件和组分迁移系[J]. *岩石学报*, 1996, 12(4):573–588.
- Liu Deliang, Yang Xiaoyong, Yang Haitao, et al. The deformational condition and component migration of mylonites in Fuchashan ductile shear zones in the southern Tancheng–Lujiang fault belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1996, 12 (4):573–588 (in Chinese with English abstract).

Petromorphology of the Shiren Mountain block in the Qinling orogenic belt and its significance

REN Sheng-lian, SONG Chuan-zhong, LI Jia-hao,
CHEN Ze-chao, HUANG Wen-cheng, ZHANG Hao-ran, ZHANG Hua

(*School of Resources and Environment Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China*)

Abstract: Based on a mineralogical and petrological analysis of the Shiren Mountain block, the authors summed up the deformation–metamorphic characteristics of this block and the regularity of its changes under the influence of the Luonan–Luanchuan faulted belt. A migmatite zone is developed on the southern margin of the Shiren Mountain. In this zone, the rocks have been strongly folded and basite bands can be observed clearly. The metamorphic grade of rocks becomes weak from south to north. From the low amphibolite facies and amphibolite facies schist through gneiss to granite, dark minerals gradually decrease, showing a transitional relationship with granite. From south to north, with the increasing distance from the faulted belt, the rocks change from cataclastic to palimpsest in texture and from sheet to gneissic–palimpsest in structure. Generally, the changes assume a continuous and gradual process from strong to weak. The recrystallization type and boundary shape of quartz and the deformation of feldspar show that the deformation temperatures of the Luonan–Luanchuan faulted belt, the Shirengou Mountain block and the metamorphic rock block vary in the range of 300–550 °C, belonging to the middle–high temperature condition. Under the influence of the late tectonic process, there appeared a phenomenon of non–coordination of the temperatures. The fractal dimensions of the dynamically recrystallized quartz grain boundary are in the range of 1.332~1.243 and tend to decrease with the increasing distance from the Luonan–Luanchuan faulted belt northward. Strain rates are in the range of 6.75577E–16 to 1.81072E–16, which belong to the middle strain rate condition. The strain rate and the distance from the fault belt are positively correlated with each other.

Key words: structural mineralogy; rock finite strain; rheology; progressive deformation; Qinling orogenic belt

About the first author: REN Sheng-lian, female, born in 1963, associate professor, mainly engages in the teaching and study of mineralogy and petrology; E-mail: ren_lotus@126.com.