

构造动力变质作用初论^{*}

王治顺 朱大岗

(中国地质科学院地质力学研究所)

摘要 本文提出了构造动力变质作用的基本概念。即在构造动力及其引发的动力热流共同作用下,岩石、矿物在构造运动中发生的形变、相变而呈现的变质作用。按构造动力变质作用的物理化学条件,动力变质岩的结构构造、动态重结晶和混合岩化作用、应力矿物共生组合关系及其空间分布等特征,将构造动力变质作用由弱到强划分为4个发展阶段和相应的4种基本变质类型——脆性、脆—塑性、塑性和动力热流变形变质,并论述了它们各自的基本特征。

关键词 构造动力变质作用 动力变质岩带 基本类型和特征

1 构造动力变质作用的概念

李四光先生早就指出:变形、位移和相变都是构造运动的结果,应把变形和变质统一起来研究^[1]。但就现有资料看,在众多的变质岩分类和对动力变质作用的论述中,对于构造动力及其引发的构造热流,在动力变质作用中的意义和作用未予充分的重视,也未能将它们统一起来去研究构造动力变质岩系的成因和分布规律,而在实际工作中常遇到诸多难以解释的难题,为此,笔者根据动-热能量转换与耗散原理,提出构造动力变质作用这一基本概念。

所谓构造动力变质作用是指:在构造动力及其引发的动力热流的共同作用下,岩石、矿物发生的变形变质作用。笔者提出这一基本概念的主要依据是:

(1) 客观的地质现象:如同一动力变质岩带中,常见强(深)、弱(浅)变质岩石,或不同温压条件下形成的变质矿物呈线性条带,彼此相邻、相间或相互过渡,甚至在一条断裂带中也出现条带状、透镜状混合岩和花岗岩化带;有时在背斜核部也有混合岩类出现。这些现象,用建立在封闭体系平衡态热力学基础上的经典变质相系的理论,是难以解释的。对此,莫柱荪^[2]、杨开庆^[3]等分别称之为:“断裂变质作用”或“构造动力成岩成矿作用”。另外,地震和地热活动受现今活动构造带控制,乃是现代地壳运动中动-热能量转换与耗散的天然实验场;应力矿物、断层动力薄膜、玻化岩等的生成,则是挤压磨擦、碰撞等构造动力变质作用的产物,这些已为人们所熟知。

(2) 按照动-热能量转换与耗散原理,在构造动力长期持续挤压或快速碰撞等挤压应力作用下,构造动能转化为构造热能,而加热构造带中的冷岩块、岩片,促使构造带中的物质在形变的同时产生相变,不断消耗构造热能。据 Furlong 等(1987)研究表明:在大范围冷系统中,因剪

^{*} 地质矿产部“八五”重大基础项目《地质力学方法与实践》研究成果的部分内容。

切生热而转化成熟系统是可能的。由冷系统向热系统转化的重要条件是,俯冲片的快速、持续俯冲和陆壳的急剧增厚的载荷效应,使俯冲岩片逐渐由冷系统向热系统转化,最终将导致岩石的局部熔融。换言之,按照能量转化与耗散原理,处于造山带的岩石在长期持续的构造动力作用下,因挤压、剪切应力作用,构造动能可能转化成热能,因而耗散机械能。由于构造动力的持续作用,构造动能可继续再积累、再转化,从而呈现多期次、多阶段的积累与耗散,在其引发的构造热流参与下,形成构造带中不同世代的变形变质作用产物。

(3) 岩石中所含的各种水分等流体的大量存在,已为钻探资料所证实。当岩石遭受压剪性构造应力作用而析出部分水分时,他们被构造热能加热会形成热流体(构造热流)。而这些热流体促使元素定向迁移和聚积,进行物质交换,导致岩石部分重熔,形成不同变形变质矿物的相带,以致产生混合岩化、花岗岩化,且呈带状分布,可称为构造动力——热流变质作用。然而,热流变质作用并不一定要在埋藏很深的条件下发生,在较具规模的构造带中,只要能产生上述动-热能量转换和动力热流,就可以在引起岩石矿物形变的过程中产生相变等变质作用。这样一来,认识一些超高压变质带的所谓折返机制,也就迎刃而解了。

据研究,由于岩石在强大的压剪应力作用下,岩石中的变质水或自由水的析出,使原始岩石晶体结构中的水含量从4%下降到2.1%;又据计算,绿帘角闪岩相矿物组合的体积,仅占原始总体积的96%,而释放出的自由水则占原始体积的6.6%,比原始岩石体积增加了2.6%,如果把这些自由水再挤回到岩石内,就需要3GPa以上的压力。可见,释放出来多余的2.6%的水具有强大的挤压力,这些挤压力一旦超过岩石的抗张强度,就可导致水压破裂作用^[4],使岩石发生破碎,形成破碎带。这些被析出的水分在构造动力作用下,被加热而形成热流体,在周围介质的参与下,原岩就会发生复杂多样的形变和相变,即构造动力变质作用。近20年来,岩石力学试验发现岩石随温度上升的同时,其强度变小,受力以后易产生蠕变而引起重结晶,在构造动力及其引发的构造热流作用下,导致力学强度急剧丧失而形成塑性变形带或韧性剪切带。

上述因构造动力及其引发的动力热流,不独在岩石圈分层结构的剪切滑移与层型流变等变形变质带中存在,而且在地壳中、上部的线型构造带中亦普遍存在。当然,如果有深部上升热流参与构造带的变形变质作用,效果会更加显著和复杂,可能会出现低温高压相系与高温中、高压相系的变质矿物共生或混生的动力变质岩带。又因陆壳结构,尤其是基底结构的差异,在区域的或全球性的定向构造动力作用下,构造带或变形变质带就会因边界条件的不同而呈现定位性和定型性,随着时间的推移和构造带的演进,构造动力变质岩系将出现有规律的时、空组合。崔军文等(1992)根据喜马拉雅构造带的前进式逆冲-推覆作用的迁移规律,推测在10—20Ma内,俯冲的陆壳岩片就可以达到局部熔融,并不断出现第二个陆内俯冲带和俯冲岩楔^[5]。这个推断符合地壳运动演进迁移规律和能量耗散——转化与积累的规律。当然,由于原岩物质组分和结构构造等物化性能不同,在同一场构造运动中,同一构造动力及其引发而生的构造热流作用下,会呈现不同的构造动力变形变质现象有规律的时、空分布特征。如在构造带中不同类型变质相带的相间分布;或因构造带内的潜热作用和构造动力热流各阶段的温度不一,或因热流通道物质组分的不同,而生成有明显差异的构造岩相带。

2 构造动力变质作用阶段划分

在构造动力作用下,组成岩石及矿物从形变到相变,再到岩石重熔形成新相矿物和岩石类型,这一过程的各个阶段有着不同的变形特点和变质产物,大体可划分为4个阶段^[6]。

2.1 脆性变形变质阶段

这个阶段主要表现为构造动力对原岩的机械破碎,使原岩结构遭受破坏。这一阶段的岩石变形仍处于冷环境,尚难呈现相变,对于矿物单个晶体而言,破裂的产生是由于空位凝聚和受力后发生缺陷的集聚而引起^[7]。

2.2 脆-塑性变形变质阶段

这一阶段可视为构造动力变形变质作用的发展阶段。主要表现为不同类型的矿物、岩石的强烈变形,原岩建造特征大多趋于消失。碎裂的岩石矿物形成细碎屑或细粉,固体的表面张力加大,总表面积增加;由于遭受压剪作用,岩块开始出现生热效应,岩石矿物中释放出部分水因而有构造热流活动;矿物中元素的活性增加,原岩显示某些塑性变形特点,有时产生部分重结晶,偶见少量新相矿物。

2.3 塑性变形变质阶段(构造动力变质作用的持续阶段)

主要表现为不同类型新相矿物的生成,原岩建造特征全部消失,岩石发生塑性流变。在这一阶段,伴随强应力作用而产生的构造热能与活性介质的加入或析出,先期形成的岩石矿物碎屑和细粉,发生较普遍的矿物成分及组构的变更——岩石和矿物的相变。在这个过程中,由于强应力导致固体溶液的出溶,动力热流的普遍出现,促使原有矿物分解;此外,外来物质的加入,氧化还原反应的进行,动态重结晶、塑性形变,以及能量释放等物质和能量的移聚与交换都可以形成新相矿物。

2.4 动力热流变形变质阶段(构造动力变质作用的终结阶段)

主要表现为不同类型的构造片岩、片麻岩和混合岩化、花岗岩化及气液蚀变。这是由于岩石在压剪性构造强应力及其引发的构造热流的持续作用下产生剪切热流,构造带中岩片被加热、挤压(压剪),岩石中的物质发生定向流动和组成元素的定向迁移和聚集,形成大量的新相(应力)矿物,直至形成混合岩和花岗质岩石等^[2]。

总的看来,脆性、脆-塑性变形变质阶段,原岩基本上只发生变形和破坏,而无新相矿物生成,可称为低级构造动力变形变质作用;塑性和动力热流变形变质阶段,以岩石、矿物广泛出现相变和新相矿物为特征,可称为高级构造动力变形变质作用。不待言,低级构造动力变形变质岩系在其后发展阶段的强应力和构造热流作用下,尚可被高级构造动力变形变质作用叠加或改造,因而在较古老的大型动力变质岩带中,很难见到保存较好的低级动力变质岩石。一些碎裂岩、碎斑岩、糜棱岩等常具某些动力热流变质的特点,常被视为高级构造动力变质作用的产物,借助构造岩的结构构造和矿物成分的变化及其变形变质世代的研究,是可区分开来的。同样,在一些高级动力变质岩系中,又可见某些低级变形变质产物。

上述构造动力变质作用的4个阶段是连续的,但不同阶段又有其自身的变形变质特点和产物。

3 构造动力变质作用的主要类型

按照构造动力变质作用各阶段的物理化学条件及其产物,即动力变质岩系的结构构造,变形变质程度和特征,应力矿物共生组合与空间分布等,可划分为与构造动力变质作用相对应的4个主要变质作用类型(表1)。

3.1 脆性形变动力变质作用类型

岩石在不同力学性质的断裂带中,受到不同构造应力的作用,当这种应力达到或超过岩石

的弹性强度时,岩石内部的结合力将遭到破坏,产生破裂,直至粉碎。这种破裂或粉碎取决于岩石的力学性质,也取决于构造动力的强度和受力的方式:某些矿物(如石英、长石等)易产生波状消光,而那些弹塑性较强的矿物(如云母类)易产生弯曲;脆性矿物则首先产生大小不等的裂隙,形成碎裂结构和角砾状构造,进而形成碎斑或碎粉结构;还有一些矿物(如方解石等)在扭应力作用下,常沿扭裂面发生晶架滑移,形成机械双晶。由于原岩的性质、应力作用方式和强度不同,岩石破碎的程度也不同。因此,可根据岩石特征的结构构造,将脆性形变动力变质作用形成的岩石按由弱至强的顺序划分为:初裂岩类、构造角砾岩类和碎裂岩类。

表 1 构造动力变质作用主要类型的划分及其基本特征

Table 1 Division and main features of the structure dynamometamorphism

主要变质类型	基本岩石类型	地质构造背景	原岩建造特征	变质作用强度		变质作用主要因素		分布状态	单相或复相变质	特征应力矿物及现象	重结晶作用(%)
				变质相	变质相系	温度	应力状态				
脆性形变动力变质作用	初裂岩类	压、张、扭性(压扭、张扭等)断裂带	无一定原岩建造类型	碎裂相	低压 中压	极低温 低温	弱 较强	条状 带状	单相 变质	碎裂、扭折、波状消光、机械双晶、皮壳、蠕石英、沙钟构造	无
	构造角砾岩类										
	碎裂岩类										
脆、塑性形变动力变质作用	糜棱岩类	压性(压扭性)大断裂带(剪切带)	无一定原岩建造类型	石英-钠长石相	中压 高压	低温 高温	强应力 强应力冲击下	条带状 条痕状	单相 变质	扭曲、混浊、变形纹 柯石英、假玄武玻璃	弱 较弱
	玻状岩类										
塑性形变动力变质作用	硬板岩类	压性、扭性、压扭性断裂带	中酸性-基性火山岩-碎屑岩建造	绿纤石-硬绿泥石相	低压 中压	低温 <400℃	较强应力	狭条状 长垣状	单相 变质	绿纤石、硬绿泥石、压力影构造	0—10
	千糜岩类	大断裂带和剪切带	复理石型含火山岩-碎屑岩建造	硬绿泥石-多硅白云母相	中压	低温 中温	较强 应力	条状 带状	单相 变质	多硅白云母、环带石英、旋转石榴石、金红石、云母鱼构造、多米诺构造	10—50
	片糜岩类	韧性剪切带、逆冲推覆构造	含火山岩-碎屑岩建造	多硅白云母-石榴石相	中压	中温	强应力	线状条带状	单相 变质		50—90
动力热流变质作用	构造片岩类	继承性、持续性深、大断裂带,地块边缘或内部活动带	复理石型含火山岩、凝灰岩、硬砂岩、碎屑岩建造	多硅白云母-透闪石相	中压 高压	中温 低温	强应力	局部带状、狭条状	单相 多相	兰闪石、软玉、透闪石	>90
	构造片麻岩类			硬玉-绿辉石相	中压 高压	中温	强应力	狭长带状	多相 变质	硬玉、绿辉石、棋盘状钠长石	
	构造混合岩类			条纹长石-微斜长石相	高压	中温 高温	强应力	宽窄不等的带状	多相 变质	条纹长石、环带微斜长石	

3.2 脆-塑性形变动力变质作用类型

在强烈的构造应力作用下,断裂带内已碎裂或尚未碎裂的岩石,全部被搓碎成细粉或极细的粒状和粉末状,并伴有一定量的新生片状矿物,主要特征为普遍的糜棱岩化^①。该类型以颗粒细密和少量重结晶有别于断裂带中的脆性形变动力变质岩,又以其发生在特定的地质构造环境及岩石的广泛糜棱岩化不同于区域变质作用,并常在动力作用最强的核部(强应力区)出现少许玻璃质岩石。这类变质作用形成的岩石类型常呈带状、条状、长垣状分布,是压扭性、扭性大断裂活动的产物。这类岩石是在强应力和低温条件下形成的,往往具有透镜状或条带状构造,并出现密集劈理或以线性延伸的强直面理发育而来的带状动力变质岩。岩石脆性破碎极为明显,由应变自由能差引起的固相间的扩散常导致重结晶和新相矿物的生成,因而表现出脆-塑性形变的特征。根据结构构造和形变特征差异,可分为糜棱岩和玻状岩两种基本岩石类型。

3.3 塑性形变动力变质作用类型

在构造强应力持续作用下,引发动力热流而导致温度升高和较多介质参与。此时,断裂带中的柔性岩石或围压较大的刚性岩石,往往沿垂直挤压应力或剪应力方向发生板状劈开或片理;或已被搓碎的矿物和岩石碎屑发生动态重结晶,形成大量新生矿物组成的线性条带构造。它们均为塑性形变动力变质作用的产物。应力的性质和强弱、构造热能和流体介质,是产生变质的主因,也是引起组成岩石物质组分的扩散、迁移与聚集的主因。因此,在强应力作用下,随着矿物晶格畸变的加速,促进了元素的移聚,造成组成岩石的矿物出现明显的优选方位或动态重结晶,形成新相矿物并出现特殊的结构构造。一般地讲,应力从以下3个方面影响矿物晶格的变化:即可导致晶格(晶内)扩散、晶界扩散和压溶作用^[8]。塑性形变的变形梯度及应变率,受元素扩散、空位和位错等所支配;而变形及优选方位则是这些因素综合作用的结果,只不过是在不同温度和应力条件下所起的作用不同而已。塑性形变动力变质作用属低—中温动力变质,多为单相变质,其强度一般为绿帘石—硬绿泥石相,最高不超过多硅白云母—石榴石相,无混合岩化现象,以出现广泛的密集板理、轴面劈理、塑性形变和动态重结晶为其特点。按重结晶强度和塑性形变特征等方面的差异,可将该变质作用类型划分为硬板岩类、千糜岩类和片糜岩类。

3.4 动力热流变质作用类型

在塑性形变动力变质作用的基础上,由于构造热能和众多介质的参与,原岩中的部分物质组分活化、分异或迁移,在应力弱带聚集,形成条带状、条状、脉状展布的动力变质岩带。在这种动力变质带中,塑性形变依然是最主要的,但热流作用更加明显。一般来说,压力大、温度高,则矿物中析出的水溶液就多。应力蠕散、温热扩散和溶液弥散等不断作用于围岩及构造带中的岩石,导致物质的交换与能量转换,以达到新的平衡系统的有序状态,或称耗散结构^[9]。该类型变质作用的强度较塑性形变动力变质作用强,由于不同构造部位存在着应力差,导致组成岩石的物质组分(元素)的分散、迁移、重新分配和富集,即构造动力成岩成矿作用^[3]。该类动力变质岩可分为构造片岩类、构造片麻岩类和构造混合岩类。其中构造片岩类从变质相上又可分为多硅白云母—透闪石相和兰闪石相。

4 构造动力变质作用的基本特征

从以上的论述中可以看出,构造动力变质作用不仅包括了传统的动力变质作用^[10],也包

^① 关于糜棱岩的概念这里是指,由于原岩遭受强烈挤压破碎后所形成的一种粒度较细的动力变质岩石^[10]

含了一部分传统的区域动力变质作用和热动力变质作用的内容^[11],作者赋予了新的含义,称其为“构造动力变质作用”,其特征可归纳如下:

(1) 构造动力变质作用所形成的狭窄的条状、带状、条带状动力变质岩系,均沿压性、压剪性深、大断裂构造带或强烈挤压带分布,离开了压性、压剪性构造带,构造动力变质作用即迅速减弱以至消失。

(2) 构造动力变质作用形成的动力变质岩系,在断裂的不同地段,具有强弱不同的分带性,组成不同的构造岩相带。它们常交切地层而与断裂构造或褶皱构造平行。构造岩相带不受地层拗陷的深度控制,而受构造作用的强度控制。

(3) 反映特定温压条件的指相矿物,即应力矿物(如绿纤石、硬绿泥石、多硅白云母、蓝闪石、软玉、硬玉、绿辉石等)和应力矿物现象(如波状消光、机械双晶、扭折、沙钟构造、变形纹、压力影等)普遍出现,并常表现出明显的分带性,是构造动力变质相系划分的标志之一。

(4) 在动力变质岩带中常显示出构造动力变质作用的不均一性,表现为宏观、微观上的深浅变质带相间,并呈条带状共生,两者之间往往没有截然的界线。如蓝闪石和绿纤石混生,硬绿泥石和硬玉共存等极不协调的变质分异现象。

(5) 在构造动力变质过程中,由于应力的性质、强弱、时效及热力条件的差异,导致受变质的岩石在不同的变形—变质阶段形成各具特征的结构构造,即脆性阶段具破裂、碎裂、碎斑等结构和角砾状构造;脆-塑性阶段为糜棱或玻璃质结构,透镜状、条痕状和带状构造;塑性阶段具变余糜棱结构、千枚糜棱结构、变晶糜棱结构和片麻糜棱结构,板状、千糜状和片麻状构造;动热阶段则具鳞片变晶结构、花岗变晶结构和交代结构,片状、片麻状、眼球状和条带状构造^[12]。

综上所述,构造动力变质作用反映了某一次大的构造运动。构造动力变质岩是构造动力变质作用从发生、发展到结束的变形—变质整个阶段的产物。按照构造动力由小到大,变形由弱至强,变质程度由低至高的顺序,可依次出现脆性→脆-塑性→塑性→动热变形变质作用各阶段的岩石类型。简言之,即出现由低级到高级的递进构造动力变质岩带,并显示出具间歇性和周期性的特点。从时间上看,构造动力变质作用是连续的、渐变的;但在空间分布上看,变质相带又是突变的;每一个变形变质阶段都是在它前一个变形变质阶段的基础上发展起来的,往往在本阶段变形—变质特征的基础上,或多或少保留前一阶段变形—变质的某些记录。所以,若在较高级别的动力变质岩系中有低级构造动力变质作用特征的显示,应考虑可能是构造叠加所致而加以区别之。另外,在大型构造活动带中,由于原岩力学性质和物质组分的差异,导致在同一应力场中应力强度的不均一,也就是说,构造带的不同部位会出现应力差、温度差和浓度差,从而造成局部变形—变质环境的不同,带内变质程度当然可以不同,因而出现变质程度不同的动力变质岩带可相间出现或相互过渡。

上述构造动力变质作用的基本概念、主要特征、基本类型、动力变质岩相带的划分,是笔者依据多年来对断裂带、动力变质带,从野外到室内,从宏观到微观,从矿物、岩石的形变到相变等多方面综合研究工作的初步总结和系统概括,尚存在一些问题,有待于进一步研究探讨。

参 考 文 献

- 1 李四光,在第一届全国构造地质学术会议开幕会上的讲话。地质论评,1965,23。
- 2 莫柱荪,论断裂变质作用。中国区域地质(5),北京:地质出版社,1983。

- 3 杨开庆,动力成岩成矿理论的研究内容和方向。地质力学研究所所刊(7),北京:地质出版社,1986。
- 4 肖庆辉,大陆岩石圈的结构与动力学。见:肖庆辉等编著:当代地质科学前沿——我国今后值得重视的前沿研究领域,武汉:中国地质大学出版社,1993。
- 5 崔军文等,青藏高原岩石圈变形及其动力学。中华人民共和国地质矿产部地质专报(五),构造地质、地质力学(17),北京:地质出版社,1992。
- 6 董申保等,中国变质作用及其与地壳演化的关系。中华人民共和国地质矿产部地质专报(三),岩石、矿物、地球化学(4),北京:地质出版社,1986。
- 7 王嘉荫,应力矿物概论。北京:地质出版社,1978。
- 8 刘瑞珣,显微构造地质学。北京:北京大学出版社,1988。
- 9 杨国清,构造地球化学。桂林:广西师范大学出版社,1990。
- 10 地质部地质辞典办公室,地质辞典(二),矿物、岩石、地球化学分册。北京:地质出版社,1981。
- 11 都城秋穗(周云生译),变质作用与变质带。北京:地质出版社,1979。
- 12 朱大岗、王治顺,构造岩的结构成因分类与命名。地质力学研究所所刊(16),北京:地质出版社,1994。

A PRELIMINARY NOTE ON DYNAMOMETAMORPHISM DUE TO TECTONIC FORCES

Wang Zhishun Zhu Dagang

(Institute of Geomechanics, CAGS)

Abstract In this article a basic concept on dynamometamorphism as a result of the action of tectonic forces is presented. This means the metamorphism caused by the deformation and facies transformations of rocks and minerals during the tectonic movement in response to the tectonic forces and the resulting rise of temperature. In terms of the texture and structure of the metamorphic rocks, the dynamic recrystallization and the migmatization, as well as the association of stress minerals and their spatial distribution etc., there can be divided four stages in increasing grade of metamorphism and four corresponding metamorphic rock types as follows: (a) brittle deformation/metamorphism stage; (b) brittle-ductile transition deformation/metamorphic stage; (c) ductile deformation stage and (d) a fourth stage in which significant flow occurs due to local high heat flow stage. A brief description of the main features is here given.

Key words tectonic dynamometamorphism, dynamometamorphic zone, basic type and feature

第一作者简介

王治顺,男,研究员,1934年生,1959年毕业于昆明工学院地质系,长期从事区域地质和地质力学研究工作。通讯地址:北京海淀区民族学院南路11号地质力学研究所。邮政编码:100081。