

侵入体顶上带的地质流变学现象*

Georheological Phenomena in the Top Belts of Intrusive Bodies

龙斌**

Long Bin

陈儒庆

Chen Ruqing

(广西遥感中心 南宁市

建政东路 530023)

(Guangxi Remote Sensing Centre, East

Jianzheng Road, Nanning, Guangxi, 530023)

(桂林工学院 桂林市

建干路12号 541004)

(Guilin Institute of Technology,

12 Jiangan Road, Guilin, Guangxi, 541004)

摘要 提出了热流变断裂、热流变节理、热流变褶皱等概念。论述了侵入体顶上带热流变断裂、热流变节理、热流变褶皱和各种热液脉体围岩流变性不同在空间上的变化规律。分析了石英、长石、方解石等多种矿物的显微热流变特征。

关键词 流变学 岩浆作用 断裂构造 岩石学

Abstract Some new concepts, a thermal rheological fracture, a thermal rheological joint and a thermal, rheological fold etc. were established. The distributive regularities on space of thermal rheological fractures, joint, folds and various hydrothermal veins were studied. The microscopic thermal rheological features of quartz, feldspar, calcite etc. were analysed.

Key words rheology, magmatism, fracture, petrology

万物皆流，万物皆变。地球上的一切地质作用诸如地幔对流、板块俯冲、岩层弯曲、沉积物压实、韧性断裂发生、冰川消融引起地壳回跳以及岩浆上侵、喷溢等，都反映了流变现象的存在。

袁奎荣等^[1]1990年将“顶上带”定义为“以花岗岩侵入定向及成岩成矿作用过程为主，并与其后经历的地质历史叠加、改造作用有关，在顶部围岩内直接造成各种地质的、地球化学的、构造的作用效应和由此间接造成各种地球物理的、遥感地质的异常效应所对应的地带”。由此可见，侵入体顶上带是一个包含甚广的地质空间。陈儒庆等人^[2]于1988年提出了“地质流变学”(Geroheology)概念，其从地质体的运动方程及流动参数出发、推求地质体的流变性及所产生的地质现象，建立了花岗岩浆岩体的本构方程，从一个全新的角度建立了花岗岩体内成矿元素在不同的

流型条件下的迁移富集规律。但目前对侵入体顶上带围岩中的地质流变学现象的识别和研究不够深入具体，多年来也一直没有引起地学界的足够重视。1992年，陈儒庆、吴海鸥、龙斌等在《湘桂粤热液变质煤与金属矿产关系》研究中，对侵入体顶上带及煤层中的热流变学现象分别进行研究。认为，侵入体顶上带中存在着丰富的地质流变学现象；其与侵入体的形成及作用有着密切的成生关系，具有明显的规律性特征。本文将就侵入体顶上带中与热流变相关的一系列构造及显微流变现象作简要的阐述，并探讨其对有关找矿工作的指导意义。

1 热流变断裂

热流变断裂是指由于岩浆侵入使围岩的流变性增大，在围岩中形成的与岩浆成因有关的断裂构造系统，共有两种：一为岩浆侵入活动派生的局部应力场形成的断裂构造；二为岩浆侵入前的断裂构造在侵入作用影响下受到诱导而重新活动，形成新的多期次的断裂构造。热流变断裂具有以下特征：

(1) 断裂面极不规则，凹凸不平、延伸相对不远，

1996-07-19 收稿。

* 国家自然科学基金资助项目(编号49070168)的子项目。

** 现工作单位为广西壮族自治区计划委员会 Planning Commission of Guangxi Zhuang Autonomous Region.

有时沿走向有断续分布的现象。

(2) 断裂性质的多样性。有时同一条断裂,在同一水平面上或同一剖面上,可以看到正断层与逆断层或压性、压扭性断层与张性、张扭性断层等的互相交替变化。一般地,由近岩体围岩往远岩体围岩延伸,热流变断裂的性质通常由压性、压扭性断裂过渡到张性、张扭性断裂。

(3) 断裂严格受岩性控制,由于这种断裂受围岩流变性的影响较大,并且由于不同岩性的围岩受热影响后的流变性极不相同,例如砂岩和碳酸盐岩,在相同的温度、外应力和时间下,后者的流变性就比前者大得多,所以在野外有时可以看到热流变断裂在岩性发生变化时突然中断或产生“折射”等现象,并且这种现象排除了后期构造影响的可能性。

(4) 由接触带往顶上带围岩方向,热流变断裂带内的充填物厚度有由小→大→小的变化规律。

(5) 热流变断裂围绕岩体产出,最典型的产状是放射状、环状。

2 热流变节理

热流变节理是热流变断裂的一种特殊形式,由于它在侵入体顶上带显示出的特殊性质而将其单独列出加以讨论。热流变节理常发育于侵入体顶上带内的碳酸盐岩中,它以弧形、波浪形的节理面和大角度(有时为钝角)的剪裂角为特征。据尹国栋^[3](1987)研究,栗木隐伏花岗岩体分布区上覆碳酸盐岩地层,热流变节理的剪裂角为钝角;而远离隐伏岩体的正常地层中,非热流变节理的剪裂角为锐角;用90°剪裂角等值线所圈定的范围和形态与已知岩体凸起部位的实际情况基本吻合。

钝剪裂角分布区内常伴生着热流变小褶皱,这反映出剪裂角的增大、钝剪裂角的形成与围岩的流变性有着密切的关系。由于模拟实验的结果表明剪裂角不可能增大到90°以上,所以国内外学者对此争论较大。但考虑到地质过程的缓慢性,我们是否可以这样认为,在岩浆热作用影响下,易发生流变的碳酸盐围岩的塑性迅速增大;而流变也是一个缓慢的变形过程,因此可以把围岩看作是粘塑性体或塑性体。这样,热流变节理的剪裂角很可能在一种无法模拟的缓慢的时间范围内和粘塑性环境下形成,并随着围岩塑性的增大剪裂角逐渐增大,甚至达90°以上。

3 岩(矿)脉的流变特征

隐伏花岗岩顶上带中通常产有与花岗岩有成因关系的岩(矿)脉,其在空间上的变异,主要表现在脉体大小、出现频率、延长和形态上。明显受制于围

岩的流变性。

3.1 脉体厚度

研究表明:由接触带往顶上带围岩方向,脉体厚度的总体变化是由小→大→小。如表1所示,萤石脉的变化是1.2 cm→6.5 cm→1.7 cm。长石石英脉的变化是7.0 cm→30.6 cm→4.5 cm。当岩浆向围岩挤压时,在岩体上方产生了放射状的裂隙,如果整个顶上带的围岩为弹性体,那么裂纹的扩展就会导致越近岩体形成的裂隙越宽,充填的岩(矿)脉也就越宽。实际上,在岩浆热的影响下,近接触带的围岩发生了流变,趋向变为粘塑性体,使扩展了的裂纹再趋于闭合;远接触带处的围岩,即使发生轻微流变而变为粘弹性体,在岩浆上穹派生的侧向拉伸情况下形成的裂纹扩展,与围岩的流变性基本上是无关系的,形成的裂隙没有闭合的趋势。裂纹的扩展和围岩流变引起裂隙闭合的共同作用,导致在顶上带某个部位产生的裂隙比近岩体和远岩体的围岩中发育的裂隙在厚度上要大得多,因此,顶上带的脉体自下往上的厚度变化是由小→大→小。

3.2 岩(矿)脉出现频率

以广西栗木锡矿为例:距隐伏岩体不到100 m的围岩中,花岗岩脉的频率为10.75 m/条;距隐伏岩体100 m~190 m的围岩中,花岗岩脉的出现频率为3.3 m/条,花岗伟晶岩为3.0 m/条,长石石英脉的出现频率是7.22 m/条;距隐伏岩体190 m~900 m的围岩中,长石石英脉的出现频率为1.50 m/条。方解石细脉带的出现频率平均为0.30 m/条,锂云母萤石细脉带的出现频率为0.69 m/条,钨锡长石石英脉带的出现频率平均为4.67 m/条,花岗岩脉带的出现频率平均为10.75 m/条。

由此可见:单脉和脉带的出现频率,由接触带往顶上带围岩上部逐渐升高。这主要是由围岩的流变性决定的,近接触带围岩塑性较大其内部裂隙易于闭合,岩(矿)脉的出现频率低;而远接触带围岩近于粘弹性体,其内部裂隙不易闭合,岩(矿)脉的出现频率较高。

3.3 岩(矿)脉延长

不考虑后期构造的影响,岩(矿)脉延长主要受两方面因素的制约:一是围岩的流变性;二是矿液的供给。岩浆侵入到围岩时,单纯考虑到围岩的流变性,由接触带往顶上带围岩,裂纹扩展长度的变化应该是短→长→短。这是因为岩浆挤压而引起围岩的裂纹扩展,不但表现在裂纹宽度上,而且也表现在裂纹长度上,由此看来,岩(矿)脉的延长也应表现短→长→短的空间变化特征。这个规律在矿液的供给充足时是

表 1 栗木花岗岩顶上带岩脉分带特征

Table 1 Characteristics of veins in the top belt of Limu granite body

脉带名称 Vein group	脉体种类 Single vein	平均厚度 Average thickness (cm)	平均脉距 Average separation of veins (cm)	花岗岩埋深 Deep of granite (m)
方解石细脉带 Calcite vein group	方解石细脉 Calcite veinlet	0.2-0.5	0.03	>900~1200
锂云母萤石细脉带 Lithionite-fluorite veinlet group	锂云母萤石细脉 Lithionite-fluorite-veinlet	2.5	0.20	190~900
	萤石细脉 Fluorite veinlet	1.7	0.72	
	萤石石英脉 Fluorite-quartz vein	6.5	0.34	
	长石石英脉 Feldspar-quartz vein	4.5	1.50	
钨锡长石石英脉带 W-Sn feldspar-quartz vein group	萤石(锂云母)脉 Fluorite (-lithionite) vein	1.2	0.16	100~190
	钨锡长石石英脉 W-Sn feldspar-quartz vein	30.6	7.22	
	花岗岩脉 Granite vein	58	8.3	
	花岗伟晶岩脉 Granite pegmatite vein	40	3.0	
铌钽花岗岩、花岗细晶岩脉带 Nb-Ta granite and granite-aplite vein group	长石石英脉 Feldspar-quartz vein	7.0		
	花岗细晶岩脉 granite-aplite vein	350		<100
	铌钽花岗岩脉 Nb-Ta granite vein	355	10.75	

适合的。但要注意到,金属元素的搬运大多是与挥发分结合成配合物往上迁移的,不同类型的矿床,元素的迁移有远近的差异。总体上,远离岩体的容矿构造,矿液的供给是不足的,因而形成的岩(矿)脉并不能真实地全面地反映出被充填裂隙的长度,顶上带的上部岩(矿)脉就属于这一情况。

3.4 岩(矿)脉形态

围岩发生流变,对裂纹的扩展、岩(矿)脉的形态产生较大的影响。在流变性较大的近接触带围岩中,多连通域的裂纹扩展由于围岩的流变性较大而趋于闭合甚至完全闭合。闭合的程度、方式不同,就会形成各种各样的岩(矿)脉形态,主要有揉皱状、肠状、囊状、团块状、透镜状和突然的尖灭现象。

4 热流变褶皱

4.1 热流变小褶皱

侵入体的热动力作用使诸如泥质岩碳酸盐岩类的围岩流变性得到较大提高,而围岩组成及热动力作用的非均一性,又使其内部质点发生复杂多向的流

变,以致形成了轴向混乱的小褶皱,称之为热流变小褶皱。这种褶皱大致分布在离接触带 20 m~400 m 的顶上带围岩(尤其是碳酸盐岩)中,离岩体越近,褶皱的数目越多,轴向越混乱。如栗木、大厂等地的隐伏花岗岩体上覆碳酸盐岩地层中就常见这种热流变小褶皱。

4.2 顶薄褶皱

对于粘结很牢固的岩层,诸如碳酸盐岩、泥质岩、砂岩夹泥质岩等,可以看作是一受力的整体,当岩浆以底辟式向上侵位并使岩层隆起形成褶皱时,褶皱顶部(转折端附近)的岩层受到双向拉伸作用。热作用影响使围岩的流变性迅速增大,导致顶部物质向两翼流动,使顶部岩层变薄、两翼岩层增厚,形成的褶皱称顶薄褶皱。其是侵入体顶上带主要的流变构造之一。

5 显微热流变现象

5.1 岩石的流变特征

侵入本围岩的岩石流变性,可由其随侵入体结晶

时间、温度及应力的变化,岩石特征性结构构造相应的演变而得以反映。结晶时间越长、温度越高、外应力越大,围岩的流变性越大。随着变质温度由低到高的变化,岩石结构依次出现变余结构→细粒变晶结构→中粒变晶结构→粗粒变晶结构,岩石构造依次出现变余构造→斑点状构造→板状构造→千枚状构造→片状构造→片麻状构造。随着岩浆施加于围岩的外应力增大、时间增长,处于热环境的围岩,岩石结构依次出现碎裂结构→碎斑结构→旋转结构,岩石构造依次出现块状构造→褶皱构造→肠状构造。温度增加、时间增长、外应力增大所形成的结构构造特点,反映出岩石流变性的增大。

5.2 矿物的流变特征

侵入体围岩流变性的指示矿物主要有石英、方解石、长石、云母等,其次为白云石、橄榄石、绿泥石、角闪石、辉石。在侵入体顶上带,这些矿物的流变特征呈现出规律性的变化。

5.2.1 石英的流变特征

当岩浆侵入到含石英的围岩时,围岩中的石英晶体随温度和应力的差异而显示出不同的流变特征。有关测试表明:由岩体向顶上带围岩,矿物定向排列由片麻状→片状→千枚状→板状(有时缺失片麻状和片状的矿物定向),它们之间的界线是渐变的,片麻理、片理、页理方向平行岩体接触面,构成了围绕岩体的一个“半球面”。在片麻岩、片岩中,石英的流变特征主要表现为晶体被压成长条状、不同晶粒同时消光,出现变形纹、变形条带等;在千枚岩、板岩中,石英的流变特征主要表现为毕姆纹、亚颗粒、波状消光、碎裂现象和指示岩浆挤压方向的非均质岩组等。

5.2.2 方解石和白云石的流变特征

碳酸盐岩受岩浆热作用影响而变质成大理岩或大理岩化灰岩。由重结晶作用形成的方解石,其流变特征最为显著,也最为普遍;其次为白云石。围岩一方面受岩浆热作用的影响而变质,另一方面受岩浆挤压而产生流变。因此,方解石、白云石的重结晶过程与岩浆侵入是近于同步的。方解石、白云石晶体的流变性由弱至强的变化是:

(1)“干净的”大方解石、白云石晶体。解理发育完全、正常,晶体内部没有显微状的同类矿物包裹体分布。这是在近平静(无外力干扰)的热环境下结晶形成的。

(2)“脏的”大方解石、白云石晶体。显微镜下,完好的大方解石、白云石晶体中常见到许多显微状的同类矿物,它们与大晶体的光性方位相差只有 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$,即只有稍微的错动,大晶体的解理显得有些零乱、

断续。这是晶体在缓慢的重结晶过程中,受热围岩处于流变状态,外应力的作用使塑性或准塑性、弹塑性的晶体内部较容易地受到破坏,原来完好而规则的面网产生轻微滑动而形成显微状的同类晶体。

(3)方解石出现e双晶-(0112)双晶,白云石出现f双晶-(0221)双晶。重结晶形成的方解石、白云石,在呈流变状态的围岩中,外应力的进一步增加和作用时间延长,就会分别形成e双晶和f双晶。

(4)方解石、白云石的双晶纹和解理缝发生强烈扭曲,晶体也发生拉长、细颈化、扭曲等现象。

5.2.3 长石的流变特征

长石主要出现在泥质岩、钙质岩、长英质岩类的热变质岩石中。受围岩流变性的影响,它也表现出不同的特征。

与花岗岩侵入有成因关系的片麻岩、片岩、千枚岩、板岩中,长石的流变特征较为明显:

(1)一般地,应力愈大,流变性愈大,斜长石愈向基性变化。这一方面是由于应力作用下分子体积缩小析出 SiO_2 的缘故,析出的 SiO_2 形成蠕虫状构造;另一方面是由于粘度变小的围岩其粘滞活化能降低,容易富集指示粘度降低的成分(Na_2O 、 K_2O 、Li、Rb、Nb、Ta、W、Sn等),而耗损指示粘度升高的成分(SiO_2 和呈四次配位的Al、Ge、Mo、P等)。因此,长石中 SiO_2 的降低, K_2O 、 Na_2O 的升高,蠕虫状构造的发育,代表围岩流变性的增大。

(2)斜长石的有序度和钾长石的三斜度具有显示时间、应力、温度大小的功能。结晶温度越高、外应力越大、作用时间越长,斜长石的有序度和钾长石的三斜度越小,反映出围岩的流变性越大。这种情况在前进变质作用形成的热变质岩中较为简单。但当围岩是火山岩类、高级变质岩类的岩石时,遭受的常是退化变质作用,上述情况就变得复杂化,很可能会出现再生长石。然而一般的情形是:由岩体向顶上带围岩方向,斜长石有序度、钾长石三斜度的变化是小(近岩体的热变质岩)→大(远岩体的热变质岩)→小(未受热影响的围岩)。

(3)当围岩产生较强烈流变时,如在片岩、片麻岩中,微斜长石光轴角因受压而变小,当挤压强烈时光性也可由负变正,有时也出现环带构造模糊的微斜长石和条纹长石,亦可见到长石的“砂钟构造”。

5.2.4 其他矿物的流变特征

云母、镁橄榄石、角闪石、辉石、绿泥石主要出现于泥质岩、钙质岩的热变质岩石中。随变质程序和流变性的变化,它们表现出不同的结构和成分特点。

云母主要有两方面的指示意义:

(1) 温度: 温度由高至低, 自岩体往顶上带围岩依次出现金云母或棕色黑云母→绿色黑云母→黑云母与白云母与白云母的组合→白云母→鳞片状白云母→绢云母, 反映出围岩流变性由于温度的降低而逐渐减弱。

(2) 应力: 随着围岩流动性的增大, 云母发生挠曲、错动或产生次生滑动双晶; 白云母有波状消光, 常变为 3T 型、含硅较高、2V 变小、b 轴增大、光轴面平行 (010) 面的低温高压型多硅白云母; 黑云母的光轴角可增大到 20°。

镁橄榄石通常只出现于钙质岩石, 如镁质碳酸盐岩、镁质较高的火山岩等的高级热变质产物中。其出现本身就代表整个岩石处于较高温的流变状态中。(但要注意到, 当围岩为含橄榄石的火山岩类、侵入岩类、高级变质岩类岩石时, 花岗岩浆的侵入导致围岩中橄榄石晶体产生流变就变得较为复杂)。一般地, 在强烈流变的围岩中, 橄榄石的 (010) 面平行于可见的 S 面, 常发育 (010) 的平行方位, 近于平行的 (100) 页理常发生滑移运动, 带状波纹消光、晶体扭曲也常见到。

角闪石、辉石、绿泥石对围岩流变性的指示意义还研究得很不够。不过有一点是清楚的, 绿泥石的首次出现基本上代表低温低应力的热环境, 表示围岩的流变性较小; 角闪石多出现于低—中级热变质岩, 随着围岩流变性增大, 晶体由小至大, 由完整的纤维状、放射状、柱状至不完整的片状、扭曲状、波状消

光的晶体; 辉石多再现于中—高级热变质岩, 随着围岩流变性增大, 依次出现透辉石、普通辉石, 晶体逐渐增大, 有时可见应力双晶、波状消光、晶体扭曲等现象。

6 结论

侵入体顶上带围岩中, 随其侵入而由岩浆热力导致一定范围内围岩的流变性增大, 形成具明显特征的流变构造; 这些流变构造的形成和分布严格受侵入体的规模、侵入期次及活动时间变化而控制, 与其间矿物显微流变特性有着明显的对应指示关系。这些流变构造无疑是晚期岩浆热液及矿液运移充填的主要空间。由此, 加强对侵入体顶上带流变构造的研究, 将有助于指导寻找与之相关的岩浆热液矿产, 应引起必要的重视。

参考文献

- 1 袁奎荣. 隐伏花岗岩预测及深部找矿. 北京: 科学出版社出版, 1990.
- 2 陈儒庆, 袁奎荣. 栗木—圆石山地区花岗岩浆地质流变学和侵位定位. 桂林冶金地质学院学报, 1988, 8 (4), 367~377.
- 3 尹国栋. 栗木隐伏岩体上覆地层中的小型构造特征. 桂林冶金地质学院学报, 1987, 7 (1, 2).
- 4 韩金炎. 广西晚二叠聚煤带的划分及其控制因素的探讨. 煤田地质与勘探, 1983, (1): 26~32.

(责任编辑: 蒋汉明 邓大玉)

我国“九五”将实施的 10 项资源综合利用工程

1. 以循环流化床锅炉完善化和提高整体运行效率、工业型煤、热电煤气三联产为主要内容的洁净煤燃烧工程;
2. 以高效风机水泵、调速技术等为主要内容的电力电子节电工程;
3. 以高效电光源为主要内容的绿色照明工程;
4. 以高新技术改造工业锅炉、窑炉工程;
5. 以干法熄焦、高炉顶压差发电、油田放散气回收技术为主要内容的工业余能、余压、余热回收工程;
6. 以少无切削、表面处理新技术和连续挤压为主要内容的节材工程;
7. 以大掺量、低成本和高附加值利用粉煤灰、煤矸石及磷石膏制硫酸联产水泥为主要内容的“三废”综合利用工程;
8. 以高附加值利用和精深加工技术为主要内容的共伴生矿产资源综合回收利用工程;
9. 以废金属、废橡胶、废塑料、废玻璃高附加值利用为主要内容的再生资源回收利用工程;
10. 以风力发电及大型风力发电装置国产化、太阳能光电光热利用、大中型工业沼气等生物质能利用为主要内容的新能源产业化工程。