

深部岩浆流动形成的岩石的特征及其与糜棱岩、片麻岩的比较

——以华南北缘隆化地区古生代晚期大光顶岩体为例

周丽云, 王 瑜

ZHOU Li-yun, WANG Yu

中国地质大学科学研究院, 北京 100083

Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

摘要:在片麻岩地区识别后期侵位的岩浆的流动特征, 识别岩浆流动形成的岩浆岩、变质作用形成的片麻岩、韧性变形条件下形成的糜棱岩三者的差异和进行野外、室内不同环境下的判别, 是现代岩石学、构造地质学需要重新审视的问题。通过对华南北缘大光顶岩体的塑性流动特征、相关的后期叠加韧性变形特征和区域变质片麻岩特征的比较, 结合国内外对于岩浆塑性变形(magmatic flow)与韧性变形(solid-state flow)的比较研究, 分析了在强变质岩石中如何分析和识别出岩浆的流动, 这些岩浆的流动并不是区域变质作用形成的, 也不是高温环境下韧性变形作用形成的, 而是形成于岩浆侵位后期的冷却结晶作用。对于如何识别和分析岩浆流动提出了野外和室内的标志。

关键词:岩浆流动; 侵入岩; 糜棱岩; 片麻岩; 大光顶岩体; 华南北缘

中图分类号: P581; P534.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2012)04-0541-08

Zhou L Y, Wang Y. The features of magmatic flow in comparison with mylonite and gneiss: a case study of Late Paleozoic Daguangding pluton on the northern margin of the North China block. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(4):541-548

Abstract: The identification of magmatic flow that intruded into the metamorphic basement and the recognition of the differences between magmatic flow and metamorphic gneiss and mylonite along the ductile shear zones constitute important problems that should be reconsidered in modern petrology and structural geology. According to a comparative study of the features of magmatic flow from Daguangding pluton on the northern margin of the North China block and the relevant superimposed ductile shear deformation and metamorphic gneiss, in combination with the investigation of magmatic flow and solid-state flow, the authors identified magmatic flow which was formed in the cooling crystallization process from the metamorphic basement during the late magmatic emplacement period. This paper provides criteria for structures and microstructures produced by magmatic flow.

Key words: magmatic flow; intrusive rock; mylonite; gneiss; Daguangding pluton; northern margin of North China block

国内外的研究发现, 在以往认为的具有片麻理发育的变质岩区, 发育着一些与片麻岩具有类似一致“片麻理”的岩浆岩。但这些曾被认为属于老变质岩的岩石与周边的片麻岩或其它岩石具有明显不同的边界, 而且“变质岩”锆石 U-Pb 年龄很年轻, 与周

边的老片麻岩年龄差别很大^[1]。这是否意味着这些类似于片麻岩的物质是后期岩浆活动的产物? 从区域构造和演化分析, 类似地区的变质作用或构造演化中不可能形成强变质的片麻岩。也就是说, 这些岩石并不是片麻岩, 更可能是在后期岩浆流动

收稿日期: 2011-11-25; 修订日期: 2012-01-11

资助项目: 国家自然科学基金项目《华北克拉通破坏的构造过程与大地构造背景》(批准号: 90914004)

作者简介: 周丽云(1984-), 女, 在读博士, 构造地质专业。E-mail: tidy_137@163.com

过程中形成的。本文在华北北缘晚古生代晚期岩浆岩研究的基础上,结合国际上对于岩浆流动特征的研究,以及与韧性变形、片麻岩的野外和室内特征比较的基础上,提出了如何识别和分析片麻岩区的岩浆流动的问题,从而更好地理解认识深层地质演化的过程,特别是对于一些克拉通基底的活动特征等。

1 何为岩浆流动

岩浆流动(magmatic flow)是岩浆处于熔融状态,在其流动的过程中,外力作用使其成分发生分异,暗色矿物定向排列形成面理,自形矿物晶体(如长石、角闪石等)可发生定向拉长,先结晶的矿物甚至发生旋转,而岩石中的矿物颗粒没有塑性变形的现象。Paterson等^[2]、Vernon等^[3-4]将岩浆流动定义为熔体位移产生的变形,随后刚性晶体颗粒发生旋转,晶体之间没有足够的相互影响力导致塑性变形的发生。

熔融体带着刚性的固体晶粒发生流动,这种状态得以保存下来就需要熔融体具有足够的粘稠度。例如流水载着小木块流动,小木块可以随意地变更方向,这是由于流水没有粘稠度;再如热的糖丝中的花生粒,糖丝的粘性就会令花生粒固定,这时让它们向某一个方向流动,花生粒就可以定向排列,这就相当于岩浆的流动作用。但是岩浆流动的后期要复杂得多,在其侵位冷却的过程中,持续经受应力的作用,先结晶的矿物就会发生颗粒的重结晶等韧性变形,这时可以称其为亚岩浆流动或过渡岩浆流动(submagmatic flow)^[2]。冷却后经受应力作用发生的变形就为韧性变形(solid-state flow)。

岩浆流动的透入性构造特征并不能记录其经历的所有应力过程,在岩浆上升的过程中,熔融体所形成的组构特征很容易被破坏,而岩体保存下来的构造特征仅仅反映了岩浆冷却后期所受到的应力特点^[5-6]。Paterson等^[6]在前人实验成果^[7-11]的基础上,初步总结出玄武质岩浆和花岗质岩浆的黏性、温度、晶体百分比与变形机制之间的关系,岩浆固结到一定程度之后其中固体的比例即到达50%以上,结晶的矿物之间就会发生相互作用从而产生变形,所以岩浆流动的构造特征提供了岩浆冷却过程中上升或侵位的信息。

岩浆流动的显著特点是岩体露头显示“片麻状”

构造,矿物镜下不显示变形特点。岩体中的面理可以在多种情况形成^[2]:①上升过程中流动形成的;②底侵作用形成的,这种情况下形成的岩体边部具有环状面理和放射状拉伸线理;③区域变形条件下侵位,岩浆流动的面理是这种情况下形成的;④侵位后受到后期变形的改造,这种情况岩体发生碎裂化和糜棱岩化。岩浆流动是地壳深部岩石受到应力的作用变得软弱,形成软弱层,甚至发生熔融的现象。华北北缘地区在晚古生代由于受到由北向南的挤压力,地壳强烈缩短,下地壳的岩石发生熔融,在持续的由北向南的挤压作用下,熔融的粘稠岩浆被推动着向南流动,从而矿物发生分异作用,其中的暗色矿物定向排列,形成岩浆面理,甚至一些无根钩状小褶曲。

2 岩浆流动形成的岩体的特征——以河北隆化大光顶岩体为例

位于河北北部的丰宁-隆化韧性剪切带隆化以南的大光顶岩体,岩性为一套花岗闪长岩,其中暗色矿物定向排列,形成“片麻理”(这里的片麻理并不是指片麻状构造),并发育无根小褶曲。这种强烈的“变形现象”均被认为是片麻岩的片麻理或糜棱岩,以前将其划分为太古宙—古元古代的混合岩^{[12]①},张拴宏^[13]认为岩体是侵位后期未完全冷却条件下韧性剪切带构造变形的产物。通过对大光顶岩体锆石U-Pb定年,发现发生岩浆流动的岩体侵位于320~290Ma,岩浆在侵位的同时由北向南流动,形成了独特的岩浆流动构造,并且岩体中的继承锆石U-Pb年龄与围岩古老片麻岩的锆石U-Pb年龄一致,为1800~2500Ma,说明晚石炭世花岗闪长岩中的锆石继承自围岩^[1]。

2.1 岩体的露头特征

岩体位于河北省隆化县西南西沟—太平庄一带,呈不规则形状,长轴近东西向,出露面积约200km²。岩体的南北侧均与太古宙—古元古代基底片麻岩、混合岩呈侵入接触,东西侧被侏罗系—白垩系所覆盖,并且在东部和东北部有二叠纪的岩体侵入。其构造位置比较独特,处于丰宁-隆化断裂带与大庙-娘娘庙断裂带之间。北部受丰宁-隆化断裂带的影响,产状近直立;南部边界与古元古代片麻岩的产状一致(向南倾),说明共同受到后期大庙-娘娘庙断裂的影响。岩体“变形”强烈,露头上花岗闪长岩具有明显的“片麻状”构造,其中暗色矿物定向排列,

发育面理,面理倾向 NNW—N—NNE 向。岩体中的捕虏体定向排列,与“片麻理”走向一致,岩浆流动的矿物线理和拉长的显微花岗质包体向着捕虏体偏斜。在西沟公路边上看到有一系列轴面向北倾的小褶曲,褶曲枢纽近 EW 走向,褶曲轴面倾向为 NNW—N—NNE 向,倾角较缓,小于 45°。岩体中局部发育透镜体构造,透镜体为角闪岩或花岗闪长岩及一些水滴状角闪岩包体。岩体的北侧被丰宁—隆化韧性剪切带所切过,岩石发生糜棱岩化,产状近直立,可见断层破碎带。岩体南部边界产状向南倾,与围岩的产状一致,都发生糜棱岩化,表明后期受到大庙—娘娘庙韧性剪切带的影响。

2.2 岩浆流动形成的岩石在显微镜下的特征

岩体镜下矿物颗粒显示出岩浆结构的特征,中粗粒粒状结构。主要矿物组成为石英、长石、角闪石及黑云母。其中,石英呈它形粒状,平行消光,含量约 25%;斜长石呈自形板状,见聚片双晶,部分可见环带结构,含量约 35%;钾长石呈自形一半自形粒状,可见简单双晶,含量约 15%;角闪石呈自形长柱状,晶体较完整,多色性明显,可见双晶发育,定向排列形成“片麻理”;黑云母呈长片状,褐色,多色性明显,其长轴方向与角闪石的长轴方向一致,定向排列形成“片麻状构造”。岩石中石英没有细粒化或重结晶等指示变形的现象,角闪石也没有发生绿泥石化或者旋转构造等指示变形的特征。与通常的花岗闪长岩相比,岩体中矿物出现定向排列,并且部分颗粒有拉长现象,显微花岗质包体也有拉长现象,但是颗粒内部没有塑性变形,这可以与韧性变形相区别。

2.3 华北北缘岩浆流动的形成条件

晚古生代期间,华北地块北缘经历了古亚洲洋板块向华北地块俯冲—消减—碰撞的过程^[14-22]。在这一构造背景下,本区最大主压应力的方位为近 SN 向。正是在这种应力的作用下,在华北地块北缘“内蒙地轴”或“华北北缘古隆起”内部及南北形成了大量岩浆的流动及其所代表的中下地壳的流动。与此同时,在华北地块北缘还有大量岩体侵入活动(可能还有火山岩发育,只是在晚古生代—早中生代强烈的隆升过程中被剥蚀殆尽),其中一些岩体受后期韧性剪切带的影响发生了强烈的韧性变形,形成近 EW 向展布的逆冲型韧性剪切带。这些大量发育于“内蒙地轴”或“华北北缘古隆起”南北两侧及其内部的韧性剪切带与侵入岩一起,构成了华北北缘的晚

古生代构造—岩浆岩带。晚古生代的岩浆活动可能与古亚洲洋板块向华北地块俯冲—消减相对应,地壳在挤压条件下发生强烈的缩短,造成古老变质基底在中下地壳的重熔。岩浆岩中的矿物生长线理、近水平方向的延伸、倒转褶曲、相邻片岩中同期的重结晶等都反映了中下地壳的流动^[23-24]。

由于是塑性的岩浆状态,岩浆流动形成的特征很容易被改造,其保留下来的形态只能代表后期在冷却过程中的状态,所以华北北缘岩浆流动特征表明粘稠的岩浆是在侵位过程中的同变形,在其结晶完成以后受到的应力不足以使它发生韧性变形。

3 岩浆流动形成的岩石与韧性变形糜棱岩、区域变质片麻岩的识别标志

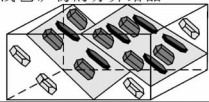
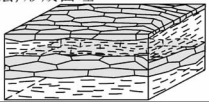
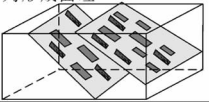
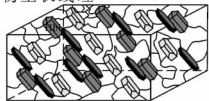
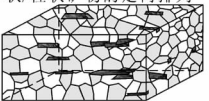
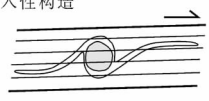
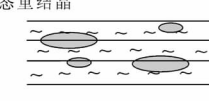
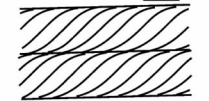
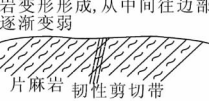
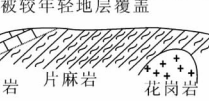
岩浆流动形成的侵入岩体,在露头上与韧性变形形成的糜棱岩和区域变质作用形成的片麻岩有很多相似性,很多学者容易把它们搞混淆。另外有时将岩浆流动形成的岩浆岩看成是发生了塑性变形的变质岩。以前有一些学者针对如何区分岩浆流动和塑性变形这 2 种现象写了不少文章^[2-3,25]。岩浆流动与韧性变形的相似处表现在野外露头上主要有以下几点:①“片麻状”面理,条带状构造;②暗色矿物定向排列,自形晶体有拉长现象;③矿物有一定的拉伸线理;④捕虏体定向排列等。露头上的相似性使我们很难将它们区分开,要从变质岩中区分出流动的侵入岩,就要结合它们在显微镜下的构造特征(图 1)^[26]。

3.1 岩浆流动的岩石—矿物结构特点

(1)平行于面理排列的自形晶体(如长石、角闪石)出现拉长现象,矿物颗粒定向排列,但颗粒内部没有变形(图版 I—a、b)。说明颗粒在旋转的过程中有足够的自由度,颗粒间不会相互作用发生塑性变形。而定向排列的面理能够保存下来需要载体有足够的粘稠度,岩浆是符合条件的最好物质。岩浆流动的面理只能代表岩浆在后期侵位冷却过程中的形成状态,由于是熔融状态,定向排列很容易被改造,所以岩浆的粘稠度是形成流动的一个重要的因素^[6]。

(2)叠瓦状排列的自形晶体内部没有发生塑性变形,同样说明先结晶的颗粒在流动过程中有足够的空间自由度,并且叠瓦状排列表明岩浆在流动过程中受到剪切挤压力。

(3)在平行面理排列或者呈叠瓦状排列的自形晶体中有些颗粒显示微弱的变形现象,表明塑性变

宏观形态特征(野外现象)			
	岩浆流动形态特征	糜棱岩形态特征	片麻岩形态特征
矿物分层形成的面理	岩浆流动过程中形成的暗色矿物与浅色矿物的分异结晶 	糜棱岩中应力集中带引起的矿物分层,形成面理 	片麻岩中片状、板状矿物定向排列形成面理 
线理	岩浆岩中板状/片状矿物形成的矿物生长线理 	糜棱岩中的拉伸线理,可以是矿物集合体,也可以是单矿物的定向拉长 	片麻岩静态重结晶作用形成的片状/柱状矿物的定向排列 
岩石中包体(旋转斑)形态特征	岩浆流动中面理绕过包体,包体矿物长轴方向与面理方向一致,其中矿物没有韧性变形特点 	糜棱岩中面理切过旋转斑,为透入性构造 	片麻岩中包体与围岩共同经受静态重结晶 
褶皱形态特征	岩浆流动的褶皱形态,可以指示运动学方向 	韧性剪切带中褶皱形态S-C组构 	片麻岩区褶皱形态 
与围岩的接触关系	侵入接触到围岩中,与围岩岩性往往不一致 	糜棱岩形成于韧性剪切带中,为围岩变形形成,从中间往边部变形逐渐变弱 	片麻岩往往被后期岩体侵入,或者被较年轻地层覆盖 

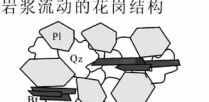
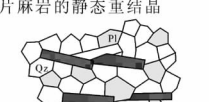
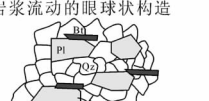
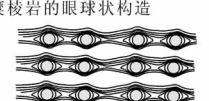
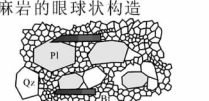
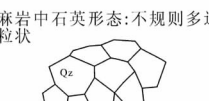
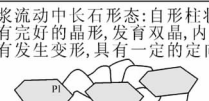
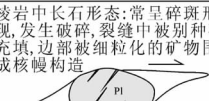
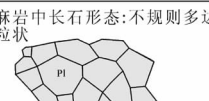
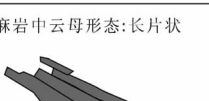
微观结构构造特征(显微尺度)			
	岩浆流动形态特征	糜棱岩形态特征	片麻岩形态特征
岩石结构特征	岩浆流动的花岗结构 	糜棱岩的残斑颗粒边界不平整,被细粒化的细小矿物包围 	片麻岩的静态重结晶 
“眼球”状构造	岩浆流动的眼球状构造 	糜棱岩的眼球状构造 	片麻岩的眼球状构造 
石英的形态	岩浆流动中石英形态:他形粒状,直消光 	糜棱岩中石英形态:细粒化,波状,消光,亚颗粒,单晶石英丝带(上)或矩形石英条带(下) 	片麻岩中石英形态:不规则多边形粒状 
长石类矿物的形态	岩浆流动中长石形态:自形柱状,具有完好的晶形,发育双晶,内部没有发生变形,具有一定的定向性 	糜棱岩中长石形态:常呈碎斑形态出现,发生破碎,裂缝中被别种矿物充填,边部被细粒化的矿物围绕组成核幔构造 	片麻岩中长石形态:不规则多边形粒状 
云母类矿物的形态	岩浆流动中云母形态:自形片状 	糜棱岩中云母形态:常呈云母鱼构造 	片麻岩中云母形态:长片状 

图 1 岩浆流动、糜棱岩、片麻岩的宏观、微观特征对比

(图中部分显微结构的特征参考了文献[26])

Fig. 1 Comparison of macroscopic and microscopic structures among magmatic flowing, mylonite and gneiss

形在岩浆流动中不会占主导地位。这种微弱的变形发生在局部区域,特别是富云母的物质中。在岩浆侵位的后期,随着结晶的矿物颗粒越多,转变成固态物质,就会发生塑性变形。

(4)拉长的显微花岗质包体中的矿物没有塑性变形(图版 I -c、d),在岩浆中包体作为小颗粒随着岩浆一起流动,相当于岩浆中的结晶颗粒。这些来自于围岩的小花岗质包体会发生拉长和定向排列。包体中的长石或者角闪石颗粒同样发生拉长而没有塑性变形。

(5)岩浆流动的线理和拉长的显微花岗质包体向着捕虏体偏斜,表明液态物质载着固态物质流动时,流体会绕着固体流动。

(6)捕虏体定向排列,岩浆载着捕虏体流动的过程中,由于向着同一个方向运动,在应力的推动下,捕虏体会发生定向排列,与岩体的面理方向大致一致,一定程度上能反映岩浆的流动方向。

(7)岩浆流动岩石中的锆石为典型岩浆成因的锆石,自形晶体,四方锥状或复四方锥状,一般有特征的岩浆振荡环带,往往会有继承锆石的残留核。Th/U 比值一般大于 0.4,并有明显的负 Eu 异常。

3.2 韧性变形岩石的特点

韧性变形是指韧性剪切作用下岩石中矿物颗粒发生的塑性变形。其代表性岩石为糜棱岩,糜棱岩有许多构造特征为我们所熟知,糜棱岩内 S-C 组构、矿物动态重结晶结构、石英的核幔结构、眼球状构造、条带状构造、曲颈状构造等,显示明显的流动构造特征,不仅具纹层状透入性面理,还常发育明显的矿物线理。

(1)韧性变形的典型特征为矿物颗粒内部变形和动态重结晶,石英出现波状消光、长石的机械双晶、云母的解理纹发生弯曲等变形现象(图版 I -e)。

(2)岩石中残斑重结晶的“拖尾”构造,构成残斑的矿物常为长石或角闪石。长英质糜棱岩中长石常为斑晶,边部也可见动态重结晶颗粒,残斑尾部的成分可以由残斑同成分的细小重结晶颗粒组成,也可以由不同成分的细小晶粒组成(图版 I -f、g)。

(3)在变形的花岗质岩石中重结晶矿物集合体(石英、云母)的拉长现象非常普遍,如动态重结晶的矩形石英条带、新品粒呈拉长状(图版 I -h)。

(4)颗粒的细粒化,核幔结构是颗粒细粒化的中间产物,主要由动态恢复和重结晶作用来完成。恢复

作用使得颗粒边部(也常常是高应力部位)首先形成亚晶粒,随着应变的发展,亚晶粒旋转和边界迁移形成重结晶新品粒,亚晶粒化也逐渐向核部扩展,这就形成核幔结构。应变继续,核部逐渐缩小直至消失,全部变为重结晶的新品粒集合体。

(5)面理穿过包体,而不是围绕包体。在岩浆流动中形成的面理是围绕先结晶颗粒的,所以先结晶颗粒不会显示内部变形;韧性变形中的面理是穿过矿物颗粒的,长石的机械双晶代表了这一特征。

(6)硬度较大矿物形成布丁构造,即眼球状构造。在布丁之间,常有石英或者云母等易变形的矿物重结晶的集合体出现。

(7)在长英质糜棱岩中经常出现蠕状石,代替长石颗粒的边缘(图版 I -g),或者在剪切变形的高应变带破碎的长石裂缝被化学流体物质所充填,形成新的矿物。

(8)云母鱼构造,变形岩石中大的云母片在变形过程中沿解理裂开或破碎成几个小颗粒,形成 σ 形拖尾(像鱼状)(图版 I -i、j)。

(9)S-C 组构在糜棱岩中常发育,S 面理指的是矿物长轴的定向排列,C 面理是剪切面理。

(10)糜棱带不均匀的应力分布。

(11)韧性变形岩石中的锆石,根据糜棱岩原岩岩性的特征,锆石可能为变质成因的锆石或岩浆成因的锆石,但最大的特征是锆石较破碎或有裂纹,糜棱岩中锆石的年龄往往较老,可通过新生矿物如云母等矿物做 Ar-Ar 定年得出变形年龄来做比较。

3.3 区域变质片麻岩的特征

片麻岩为中高级变质岩,广泛出露于前寒武纪结晶基底和显生宙造山带中,矿物组成主要为石英、长石及一定量的片状、柱状矿物^[27]。片麻岩区别于岩浆岩的首要特征为其结构构造(组构要素),包括粒状变晶结构、片麻状构造、层状构造等,其次为新生的变质矿物,如堇青石、矽线石、石榴子石、蓝晶石等特征变质矿物,这些矿物由于其组构特征的不同表现为不同的颗粒形态。另外,中等尺度的“眼球”构造、褶皱和石香肠也是识别片麻岩的标识。

(1)大部分高级片麻岩区的变质条件在 750~850℃、500~800MPa 范围之内^[28]。在这一条件下,矿物多会发生重结晶,典型结构为花岗变晶结构,粒状矿物为它形的边界平直的多边形等轴颗粒或者不规则的变晶颗粒(长石、石英),普遍没有可见的颗粒拉

图版 I Plate I



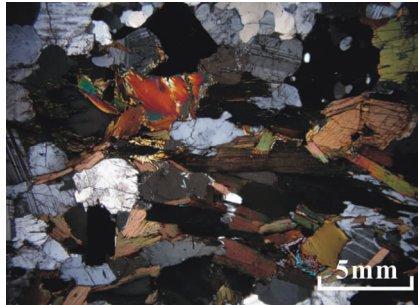
a. 岩浆流动的侵入岩的露头形态特征, 暗色矿物和浅色矿物的分层形成了岩浆流动面理



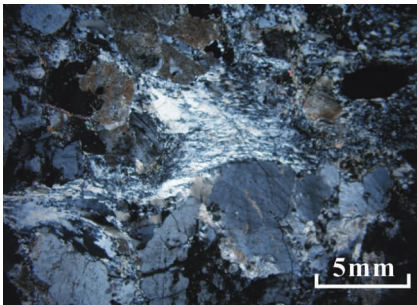
b. 花岗闪长岩中定向排列的自形黑云母形成岩浆流动面理



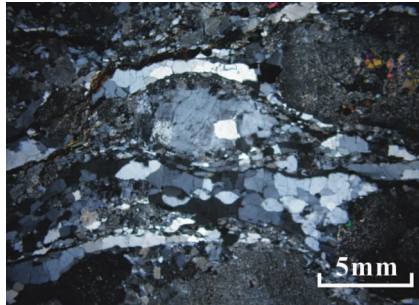
c. 岩浆流动的侵入岩中的花岗质包体被拉长、定向排列



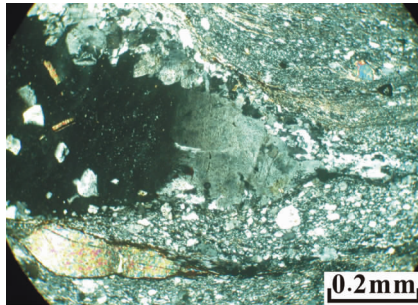
d. 拉长的花岗质包体内部没有变形



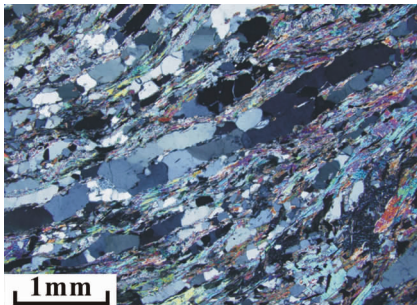
e. 石英动态重结晶(华北北缘大庙-娘娘庙韧性剪切带)



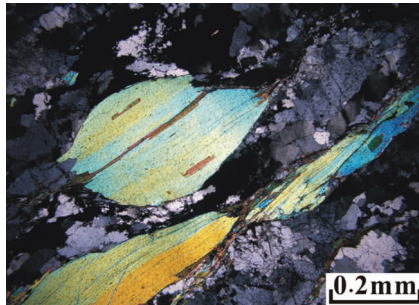
f. 重结晶的石英和黑云母集合体围绕着斜长石残斑分布, 形成斜长石的“拖尾”构造



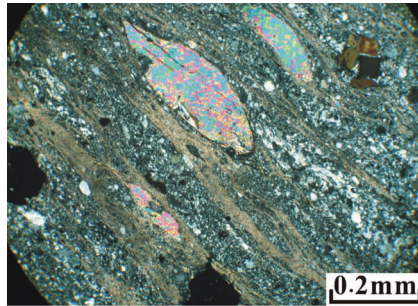
g. 钾长石形成的残斑, 残斑边缘被蠕状石替代(西藏定结地区)



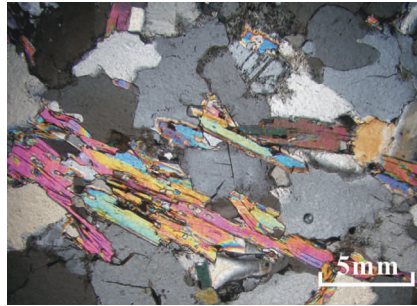
h. 石英矩形条带和云母的拉长定向排列(内蒙古阿拉善地区)



i. 韧性变形形成的云母鱼构造



j. 石英的动态重结晶(西藏定结地区)



k. 片麻岩由多边形粒状矿物和自形长板状白云母组成, 白云母定向排列形成片麻状构造



l. 片麻岩中的浅色长英质脉体, 呈香肠状, 其产状与围岩片麻理的产状一致(辽南)

长现象(图版 I -k);片状、柱状矿物表现为长方形(云母、角闪石),在许多情况下是自形的,特别是当它们孤立地出现在石英和长石颗粒之间时更加典型。这些颗粒内部一般无应变,在显微镜下表现为直消光,并且长石中没有环带结构。

(2)黑云母、角闪石等矿物多呈不连续定向分布,形成片麻状构造,或者当岩石中的石英和长石在构造应力作用下,粒状的晶体被拉长、定向排列,也能形成明显定向分布的片麻状构造(图版 I -k)。

(3)岩石中由不同矿物组分的分层或片状矿物的定向排列而形成面理。大多数片麻岩形成年代较老,往往会经历多期次变形,从而形成多组面理,部分先存面理会被后期面理所改造和替代,改造不彻底就会见到由不同期矿物组成的多组面理。这些片麻岩中的层状构造可能是沉积的或火成的原生构造,也可能是后生的、强烈变形或固态变质分异的结果。

(4)新生的特征变质矿物,如堇青石、矽线石、石榴子石、蓝晶石等的共生可以很好地指示其变质程度。

(5)片麻岩中分布着大量浅色的长英质脉体,包括深熔脉体和原生脉体^[29]。深熔脉体是片麻岩遭受重熔混合岩化作用形成的,常呈块状构造,与暗色包体伴生,脉体的矿物成分与围岩一致,其中暗色矿物的定向排列与围岩片麻理连续一致。原生脉体形成于变质、变形作用之前,与围岩一起遭受了区域变质、变形作用的改造。

(6)眼球状构造,片麻岩中较硬的矿物晶体(如长石)会呈眼球状、透镜状孤立地分布于石英、绿泥石、黑云母等矿物中;或者外来物质沿着片麻理注入形成眼球体、透镜体的团块,而长英质集合体往往也是眼球体的组成,常断续分布,构成定向排列,或者成串珠状断续连接逐步过渡为条带状构造。

(7)石香肠构造和褶皱在片麻岩中很常见(图版 I -l),它们可以同时在不同定向的岩层或岩脉中发育。石香肠可以有 2 种类型:一种是因强度差异而形成于某一种特殊成分的岩层中,另一种是由于拉伸强度各向异性而形成于强面理化的岩石中。褶皱可以由强硬岩层的弯曲而形成,也可以由岩层为适应非共轴流动发生转动而形成。

(8)区域变质岩中锆石的形态为粒状,由众多的晶面组成,其表面常发育凹坑或麻点,晶体为不

同长宽比的粒状,包括浑圆粒状、椭圆粒状、长粒状等形态^[30]。由于经过变质作用,其 Th/U 比值通常低于 0.1,并且 HREE 相对 LREE 的富集程度变化较大^[31]。

4 结 论

对冀北隆化大光顶岩体的岩浆流动特征进行了观察,对其与燕山地区的区域变质古老长英质片麻岩、剪切作用形成的韧性糜棱岩进行了比较,对其它地区的糜棱岩也进行了露头 and 显微观察。根据野外宏观露头的特征和显微镜下单矿物的特点,可以发现它们之间存在着显著的差别。在露头尺度上,这三者都具有矿物定向排列形成的层状构造,片麻岩的片麻状构造,糜棱岩的条带状构造,岩浆岩的暗色矿物与浅色矿物的分异,表面上看有着相似性,但是通过各自的捕虏体、脉体、与围岩的关系等可以分辨其差异。在显微镜下对岩石中单矿物的特征进行仔细的观察,糜棱岩的矿物特点可以很轻易地区别出来;其次是片麻岩与岩浆岩的分辨,片麻岩的花岗变晶结构与花岗质岩浆岩的花岗结构都是粒状结构,其中主要矿物成分也相似,但是片麻岩中往往会有特征变质矿物的存在,而显微镜下单矿物的自形程度、形态特征都有着显著的差别。这一系列的差异特点可以指示我们完成对岩浆流动的岩浆岩与区域变质的片麻岩、韧性剪切的糜棱岩的识别。

虽然岩浆流动的判定标准很清晰,但是岩浆流动的构造特征很容易被后期的变形作用所改造,即被后期的韧性变形作用所叠加,这就加大了其区分的难度。因此需要对区域构造背景、古地理特征、古构造应力场加以了解,结合现代高科技手段,如利用多种测年手段来对岩体进行年代约束,查明不同矿物的封闭温度体系^[32],从而识别出变质变形区域的侵入体。

致谢: 中国地质大学罗照华教授在成文过程中给予指导和帮助,在此深表感谢。

参考文献

- [1]周丽云. 冀北花岗闪长岩的岩浆流动特征及其地质意义[D].北京:中国地质大学硕士学位论文, 2009.
- [2]Paterson S R, Vernon R H, Tobisch O T. A review of criteria for the identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids[J]. Journal of Structural Geology, 1989, 11: 349-363.
- [3]Vernon R H. Review of microstructural evidence of magmatic and

- solid-state flow[M]. Electronic Geosciences ISSN, 2000:1436–2511.
- [4] Vernon R H, Paterson S R. How extensive are subsolidus grain – shaoe changes in cooling granites? [J]. Lithos, 2008, 105: 42–50.
- [5] Paterson S R, Fowler T K. Re-examining pluton emplacement processes [J]. Journal of Structural Geology, 1993, 15: 191–206.
- [6] Paterson S R, Fowler T K, Schmidt K L, et al. Interpreting magmatic fabric patterns in plutons [J]. Lithos, 1998, 44: 53–82.
- [7] Wickham S M. The segregation and emplacement of granitic magmas [J]. J. Geol. Soc. London, 1987, 144: 281–297.
- [8] Cruden A R. Flow and fabric development during diapiric rise of magma [J]. J. Geol., 1990, 98: 681–698.
- [9] Lofgren G. Experimental studies of the dynamic crystallization of silicate melts [C] // Hargraves R B. Physics of Magmatic Processes. Princeton University Press, 1980: 585.
- [10] Wildemuth C R, Williams M C. Viscosity of suspensions modeled with a shear-dependent maximum packing fraction [J]. Rheol. Acta, 1984, 23: 627–635.
- [11] Lejeune A M, Richet P. Rheology of crystal-bearing silicate melts: an experimental study at high viscosities [J]. J. Geophys. Res., 1995, 100_B3: 4215–4229.
- [12] 河北省地质矿产局. 河北省北京市天津市区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1989.
- [13] 张拴宏. 燕山构造带内蒙古隆起东段晚古生代—早中生代构造岩浆活动及其地质意义 [D]. 北京: 中国地质科学院地质力学研究所博士学位论文, 2004.
- [14] 邵济安. 中朝板块北缘中段地壳演化 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1991.
- [15] 邵济安, 何国琦, 张履桥. 燕山陆内造山作用的深部制约因素 [J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 138–148.
- [16] 程裕淇. 中国区域地质概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [17] 崔盛芹, 李锦蓉, 孙家树, 等. 华北陆块北缘构造运动序列及区域构造格局 [M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- [18] Davis G A, Zheng Y, Zhang C, et al. The Mesozoic Fengning–Longhua and Jiaoqier Fault Zones, North China: New interpretations of controversial structures [J]. GSA Abstrscts With Programs, 2001, 33(3): A49.
- [19] Badarch G, Cunningham W D, Windley B F. A new terrane subduction for Mongolia: Implication for the Phanerozoic crustal growth of central Asia [J]. J. Asian Earth Sci., 2002, 21: 87–110.
- [20] Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt [J]. Tectonics, 2003, 22, doi: 10.1029/2002TC001484.
- [21] 高长林, 叶德燎, 黄泽光, 等. 中国晚古生代两大古海洋及其对盆地的控制 [J]. 石油实验地质, 2005, 27(2): 104–110.
- [22] 王惠初. 冀北闪长质岩石的锆石 SHRIMP U–Pb 年龄: 晚古生代岩浆弧的地质记录 [J]. 岩石学报, 2007, 23(3): 597–604.
- [23] Miller R B, Patterson S R, Lebit H, et al. Significance of composite lineations in the mid-to deep crust: a case study from the North Cascades, Washington [J]. Journal of Structural Geology, 2006, 28: 302–322.
- [24] Williams P F, Jiang D Z. An investigation of lower crustal deformation: Evidence for channel flow and its implications for tectonics and structural studies [J]. Journal of Structural Geology, 2005, 27: 1486–1504.
- [25] Zak J, Paterson S R, Memeti V. Four magmatic fabrics in the Tuolumne batholith, central Sierra Nevada, California (USA): Implications for interpreting fabric patterns in plutons and evolution of magma chambers in the upper crust [J]. Geological Society of America Bulletin, 2007, 119 (1/2): 184–201.
- [26] Passchier C W, Trouw R A J. Microtectonics [M]. Springer, 2005: 1–366.
- [27] 路凤香, 桑隆康. 岩石学 [M]. 北京: 地质出版社, 2001: 253–254.
- [28] 朱志澄. 高级片麻岩区野外地质工作方法 [M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [29] 隋振民. 太古宙古深成侵入体的识别标志 [J]. 吉林地质, 1993, 12(1): 53–58.
- [30] 简平, 程裕淇, 刘敦一. 变质锆石成因的岩相学研究——高级变质岩 U–Pb 年龄解释的基本依据 [J]. 地学前缘, 2001, 8(3): 183–191.
- [31] Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon [J]. J. Metamorphic Geol., 2000, 18: 423–439.
- [32] 王瑜, 周丽云. 从同位素年代学到构造年代学 [J]. 地质通报, 2008, 27(12): 2014–2019.
- ① 河北省地质矿产局第十一地质大队. 1:50000 隆化县幅区域地质调查报告. 1994.