

华北克拉通阜平杂岩的深熔和混合岩化作用^{*}

任留东¹ 耿元生¹ 杜利林¹ 王彦斌¹ 刘平¹ 郭进京²

REN LiuDong¹, GENG YuanSheng¹, DU LiLin¹, WANG YanBin¹, LIU Ping¹ and GUO JinJing²

1. 中国地质科学院地质研究所,北京 100037

2. 天津城市建设学院,天津 300384

1. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China

2. Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China

2010-12-01 收稿, 2011-02-15 改回.

Ren LD, Geng YS, Du LL, Wang YB, Liu P and Guo JJ. 2011. Anatexis and migmatization of the Fuping Complex, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4):1056–1066

Abstract Most of the quartzofeldspathic rocks in the Fuping Complex of the Trans-North China Orogen bear a large quantity of leucocratic veins, dykes and granitic intrusions. Magmatism or melt activity was responsible for the ubiquitous migmatization of the complex. Migmatization can be manifested with prominent melt injections in the felsic gneisses and faint dispersed melt crystallization in the competent quartzite of the Wanzi Series metasedimentary rocks. Melt infiltration migmatization can be deduced through euhedral crystallization of feldspar and quartz, transition of biotite to amphibole, albite rims and rare occurrence of partial melting reactions. In the process of melt infiltration migmatization, the rock composition was changed and the system was open in chemistry. Due to crystallization of the infiltrated melt, some zircons of magmatic feature may be formed and can be easily mistaken as detrital zircons in metasedimentary rocks.

Key words Melt; Reaction texture; Melt infiltration migmatization; Anatexis; Fuping Complex

摘要 华北克拉通的阜平杂岩长英质岩石中常产出显著的浅色体、岩脉和花岗岩侵入体,并形成广泛的混合岩化作用。通过矿物自晶的形成、黑云母向角闪石的转换和大量钠长石净边的出现以及其它与熔体活动有关结构的分析,浅色脉体和混合岩化作用的发生与外来熔体的注入有关。在长英质片麻岩中可出现明显的熔体注入,在一些不易片理化的岩石如石英岩中亦可形成浸染状熔体渗入。熔体汇集可形成浅色体、岩脉,直至花岗岩侵入体。而深熔作用本身形成熔体的作用在本区几乎可以忽略不计。在遭受渗透式混合岩化作用的过程中,岩石成分发生了改变,形成开放系统。随着渗透熔体的结晶,可形成一些岩浆锆石,在副片麻岩中则很容易被当作碎屑锆石。

关键词 熔体;反应结构;渗透式混合岩化;深熔作用;阜平杂岩

中图法分类号 P586

1 引言

华北克拉通是一个由周围显生宙断裂限定的大地构造单元,曾被划分出多个微陆块(伍家善等,1998;翟明国和卞爱国,2000)。近年来通过变质事件的时代和变质作用 *PTt* 轨迹性质又识别出西部陆块、东部陆块和其间的中部带

(Zhao *et al.*, 2001) 或中部造山带(Kusky *et al.*, 2007; Santosh, 2010, Fig. 1)。其中中部带内又可包括复杂的岩石-构造单元,阜平杂岩即其中重要的一个组成部分。阜平杂岩包括新太古代 TTG 片麻岩、新太古代变质表壳岩(狭义的阜平群或陈庄群)、以浅粒岩和副片麻岩为主的古元古代湾子岩系和古元古代的南营正片麻岩以及基性脉岩等(Guan *et al.*, 2002; 程裕洪等,2004;Liu *et al.*, 2005;图1)。

* 本文受国土资源大调查项目(1212010811033,1212010611802 和 1212010811048)和国家自然科学基金项目(41072053)联合资助。

第一作者简介:任留东,男,1965年生,博士,研究员,从事变质岩石学和南极地质研究,E-mail: ldren@cags.ac.cn

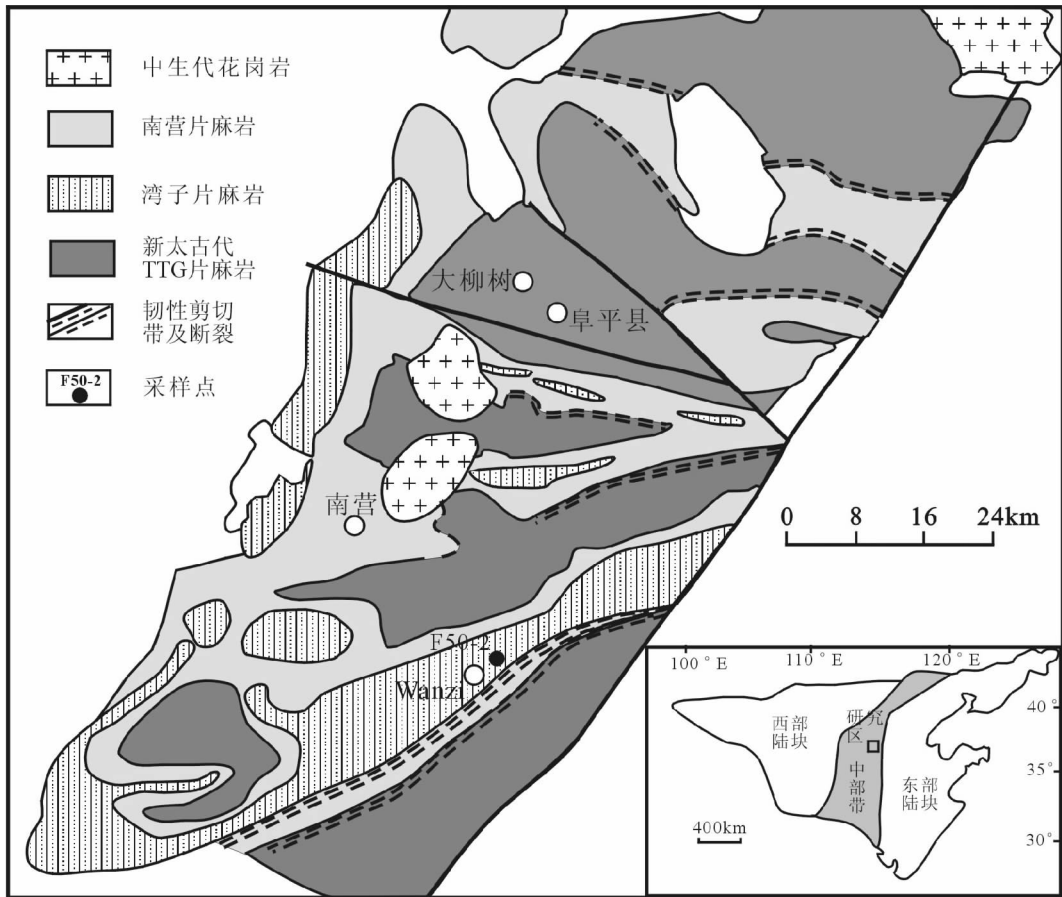


图1 阜平杂岩地质简图(据 Liu *et al.*, 2005)

Fig.1 Geological map of the Fuping Complex (after Liu *et al.*, 2005)

阜平杂岩近似一个片麻岩穹隆(马杏垣等,1963)。张寿广等(1983)认为太古宙阜平群岩系构成了穹状复合褶皱群,并经历了水平构造和垂直构造体制的转换。从露头尺度上看,阜平杂岩的变形程度并不是很强,片(麻)理并不是很密集,无论是早期的片麻岩,还是相对晚期的岩浆岩,如南营片麻岩,片麻理发育程度较弱;有的副变质岩中可能还保留一些沉积构造如交错层、粒序层等(伍家善等,1989)。较明显的变形或韧-脆性破裂性片(麻)理集中在后期剪切带如阜平杂岩西部的龙泉关剪切带和东南部的剪切带上(李江海等,2004)。

TTG 片麻岩主要形成时期在 2.7Ga、2.5Ga (Guan *et al.*, 2002),其中部分的侵入体形态可以从野外界定(河北地勘局第十三队,1995^①)。这些正片麻岩包裹着一些斜长角闪岩、麻粒岩、富角闪石的片麻岩和少量的表壳岩石,间夹少量的浅粒岩、副片麻岩、大理岩、磁铁石英岩和镁铁质变质岩(伍家善等,1989)。湾子岩系分布在阜平杂岩的东南和西部,属角闪岩相的层状表壳岩。阜平杂岩变质程度主要为高角闪岩相,局部达麻粒岩相(伍家善等,1989;谭应佳等,1993)。阜平杂岩各组成部分均受到 1.88 ~ 1.85Ga 区域变质事件的改造(Kröner *et al.*, 2005)。

阜平杂岩多数岩石显现出强烈的混合岩化特征,一般认为,这些混合岩化作用代表阜平杂岩经历了中-高级变质作用改造和强烈的深熔作用活动(如程裕淇等,2000,2004;张西平等,2003)。通过我们详细的观察和分析得知,阜平杂岩中的混合岩化作用主要是由外来熔体注入所引起的,深熔作用较弱,熔体活动对片麻岩的成分、结构均有重大影响,甚至在一些不易显示明显混合岩特征的岩石(如石英岩,图 2a)中,亦可产生影响。

2 关于混合岩化作用

混合岩化作用是由新生成的长英质或花岗质组分和原来的变质岩相互作用并形成混合岩的一种地质作用。混合岩即变质岩和花岗质岩石两种岩石的复合体,其中的变质岩多呈窄条或条痕状,另一部分即花岗质岩石多经历过熔体阶段(Sederholm, 1907)。

关于混合岩化作用的方式目前存在不同认识,一般认为

① 河北地勘局第十三队. 1995. 1:5 万稻田幅,下平阳幅地质图及说明书

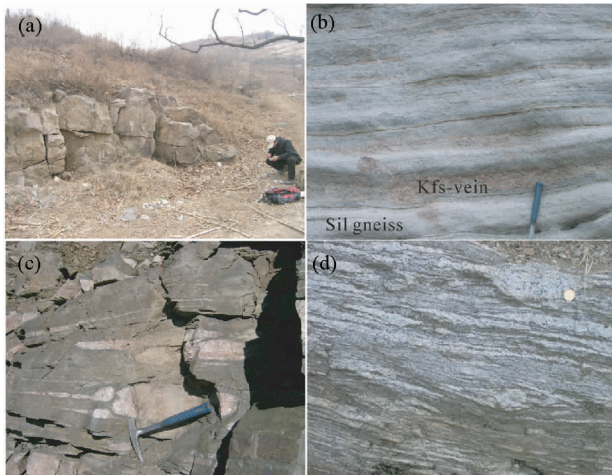


图2 阜平杂岩混合岩化作用的野外照片

(a)-湾子石英岩;(b)-湾子岩系含夕线钾长浅粒岩及其中的钾质脉体;(c)-龙泉关剪切带中的长英质脉体;(d)-阜平杂岩正片麻岩及其中的浅色脉体

Fig.2 Outcrops photographs of migmatization in the Fuping Complex

(a)-Quartzite, Wanzi Series; (b)-Sil-Kfs leucocleptite and the penetrating Kfs-rich vein, Wanzi Series; (c)-Felsic vein in the Longquanguan ductile shear belt; (d)-Leucocratic veins in the TTG orthogneiss of the Fuping Complex

主要有如下4种方式:(1)岩浆注入作用,由外来的花岗岩质岩浆注入变质岩中所形成,强调外来岩浆与原地变质岩的相互作用,关键是浅色体组分与变质岩差别较大甚至基本无联系;(2)再生作用:由来自地壳深部的富含碱金属和二氧化硅的流体(有人称为岩汁,ichor)与变质岩发生交代作用所形成的混合岩,长石含量比原岩中明显增多,长石和石英具缝合线结构、蠕英石结构、交代条纹和反条纹结构、交代棋盘结构、净边结构、交代斑晶等;(3)深熔作用(或重熔作用, anatexis):是在区域变质作用的基础上,主要由于地壳内部温度的继续升高,可使部分岩石发生选择性熔融,生成部分熔浆,它们与已变质的岩石发生混合岩化作用;(4)变质分异作用,由原来的变质岩发生部分熔融后经变质分异作用所形成。前2种属开放体系,后2种属封闭体系。这4种方式在不同的混合岩地区都可能存在。实际上,所谓的“岩汁”仅是一种推测性的描述,这样的“流体”很难存在,应是经过一定改造的熔体,再生作用可隶属于岩浆注入作用;变质分异作用则可划入广义的深熔作用范畴。这样,混合岩化作用应有两种基本类型:岩浆注入和深熔作用。

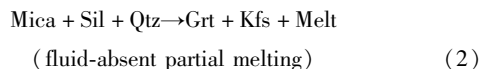
混合岩的形成离不开熔体。Sawyer (1999, 2001)总结了变质岩粒间曾存在熔体的重要标志:(1)固相产物具有面向熔体的晶面;(2)结晶熔体中残留经溶蚀圆化了的反应残留物 (Büsch *et al.*, 1974), (3)以及熔体池结晶造成的尖状、舌状矿物集合体 (Jurewicz and Watson, 1984),也包括钾长石粒间的斜长石窄边等 (Hasalová *et al.*, 2008a),尤其是一

些矿物面向石英的自形晶面 (Vernon and Collins, 1988)。

在我国,有一种趋势是把大部分的混合岩的形成简单归因于深熔作用。根据流体的有无,深熔作用可以分为两种:存在流体相的熔融和缺乏流体相的熔融。存在流体相的熔融开始于固相线上或其附近 (Zen, 1988),熔融涉及的矿物主要是长石和石英。如果是存在于颗粒之间的自由水,其含量很低,仅能产生少量 (< 1%)的熔体 (Stevens and Clemens, 1993)。该过程相当于低共熔,仅涉及长石、石英的熔融,云母不参与熔融。饱和水熔融通常需要外来含水流体的加入,尽管可以形成黏度很低的长英质熔体,但与源岩的分离程度很低,侵位能力有限,一般不形成大的花岗岩体,但可以产生混合岩 (Thompson and Connolly, 1995; Jung *et al.*, 2000a, b)。因体系中有一定的水,较高温度下可发生一定程度的脱水,出现有水深熔作用 (Mogk, 1992; Escuder Viruete, 1999):



相反,水缺乏的熔融发生则远高于固相线之上,主要涉及含水矿物如白云母、黑云母和角闪石的分解,形成一些无水矿物,结果,形成的熔体通常缺水,而且,所形成的熔体量可以达到30%以上 (Clemens, 1984),远远超过流体相存在情况下形成的熔体:



典型的无水深熔作用的特征是出现大量的石榴子石、堇青石、辉石和钾长石等“干”矿物(名义上无水的矿物) (Kriegsman, 2001; Brown, 2007)。无流体条件下由白云母脱水形成的深熔熔体(5vol% ~ 10vol%)可留在原地形成混合岩,随后由黑云母脱水形成的深熔熔体(> 15vol%)可因挤压而分凝或汲出。变形更容易使得熔体分凝而难以形成混合岩。

由此可看出深熔混合岩与熔体注入混合岩的区别。深熔作用是在高级变质作用的基础上进一步脱水、直至熔融的结果,必然有含水矿物的转化、减少和溶蚀分解,必然发生熔体的形成过程。除了上述“干”矿物的出现外,往往还可伴随早期反应矿物的溶蚀、残留,以及一些相关结构和构造。Sawyer (1999)指出,混合岩中的浅色体、中色体和暗色体同时出现是高级变质地质体中深熔作用存在的主要宏观标志。而且,浅色体与变质岩成分往往呈互补关系。若是熔体注入式混合岩,混合岩的形成主要是外来熔体的结晶,其中的变质岩部分缺少熔体的诞生过程;在浅色体、甚至相邻的变质岩中主要表现为熔体的结晶,如云母、角闪石、长石的结晶,甚至石英可出现自形晶 (Vernon, 1988),除晚期流体影响外很少有早期矿物的溶蚀、残留;浅色体与变质岩成分之间没有关系或联系不密切。总之,深熔混合岩与熔体注入混合岩都可发生熔体的结晶过程,而深熔作用还伴随着前期的熔体形成过程。

3 与混合岩化有关的岩相特征

与阜平杂岩的不同类型相对应,混合岩化的特点各有不同(图2b-d)。TTG片麻岩的混合岩化主要表现为花岗片麻岩中不同宽度的浅色脉体(图2d),片麻岩中的造岩矿物为钾长石、斜长石、云母、角闪石和石英,局部见石榴子石。其中云母、角闪石多呈他形-半自形晶,偶见自形晶,如黑云斜长片麻岩中的黑云母常呈半自形晶(图3a),极少溶蚀;可见黑云母与钾长石接触处黑云母转化为白云母边的现象;副矿物有不透明金属氧化物、帘石、榭石、磷灰石、独居石、锆石,偶见萤石。

南营片麻岩的混合岩化表现为花岗岩类的片麻理化和

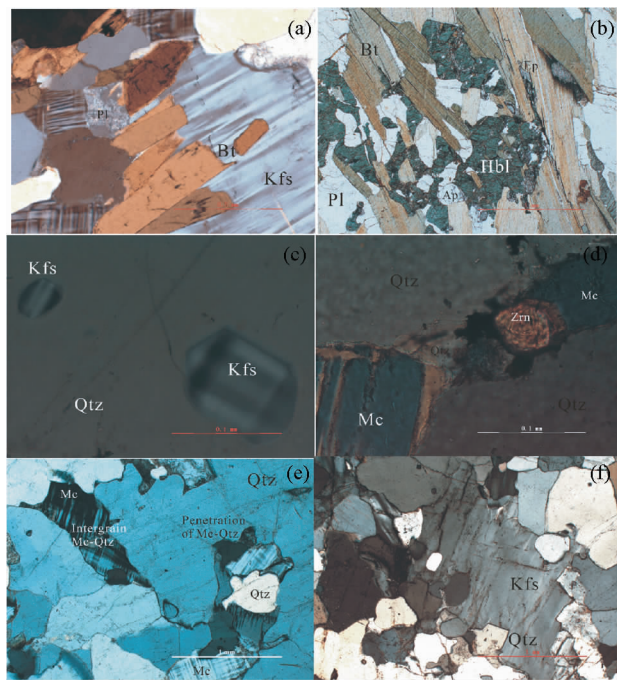


图3 阜平杂岩混合岩化作用的显微照片

(a)-钾长花岗片麻岩中半自形、自形黑云母;(b)-黑云母向角闪石、绿帘石的转化,南营片麻岩中的长透镜体;(c)-石英颗粒内的微斜长石自形晶,湾子石英岩;(d)-石英粒间微斜长石-石英-锆石组合,湾子石英岩;(e)-石英粒间、粒内的微斜长石-石英集合(注入)体,湾子石英岩;(f)-微斜长石中石英半自形晶,花岗片麻岩

Fig. 3 Microphotographs of migmatization in the Fuping Complex

(a) -Subhedral to euhedral biotite in Kfs-granitic gneiss; (b) -Transition from biotite to amphibole and epidote, Bt-Hbl-Pl gneiss lens in the Nanying gneiss; (c) -Euhedral microcline in quartz, quartzite, Wanzi Series; (d) -Intergrain assemblage of microcline-quartz, quartzite, Wanzi Series; (e) -Inter- and intra-grain assemblage of microcline-quartz (penetration), quartzite, Wanzi Series; (f) -Subhedral quartz in plagioclase, granitic gneiss

少量的脉体。在南营片麻岩内的黑云角闪斜长片麻岩透镜状包体中,黑云母后可叠加一定量的角闪石(图3b)。在同时具有黑云母和角闪石的岩石中,有时出现钾长石,可见钾长石粒间生长角闪石,斜长石边缘具有钠长石净边。

湾子岩系因岩性差异而表现出不同的混合岩化强度:大理岩、磁铁石英岩、斜长角闪岩混合岩化较弱,而云母石英片岩、浅粒岩、黑云斜长片麻岩等往往具有较显著的混合岩化特征,如夕线片麻岩中见富钾长石脉体大致沿片麻理注入(图2b),夕线片麻岩的造岩矿物为夕线石、钾长石、石英和白云母,少量黑云母和斜长石,往往具有不透明金属氧化物(磁铁矿、钛铁矿和赤铁矿),副矿物为磷灰石、榭石、独居石和锆石,锆石可以呈集合体出现,极其罕见的情况下出现刚玉和尖晶石,并包裹于钾长石中。

湾子岩系石英岩出露较少,呈2~3m长的透镜状(图2a),岩石SiO₂含量达88.2%,观察表明,石英岩呈致密块状构造,不显示片麻理,未见明显的浅色脉体注入。岩石中除石英外,还分布有一定量的长石,其中以钾长石居多,少量角闪石、黑云母、白云母、绿泥石、绿帘石、磷灰石、磁铁矿和锆石。在斜长石周围具有少量的钠长石净边,石英颗粒内可有钾长石(微斜长石)自形晶(图3c),石英粒间偶见微斜长石的半自形晶、斜长石-微斜长石-石英的镶嵌结构、微斜长石-磷灰石-磁铁矿的镶嵌结构和微斜长石-石英-锆石组合(图3d);微斜长石-石英呈舌状位于石英粒间或嵌入石英粒内、以及石英粒间的钾长石窄条(图3e)、三角形的钾长石-斜长石-石英镶嵌团块,斜长石可与角闪石共存。人工重砂分析表明,石英岩中的锆石主要为碎屑锆石。

不论是正片麻岩还是副片麻岩,阜平杂岩的混合岩中花岗质浅色脉体主要分为两种类型(任留东等,2009),早期浅色体基本沿片麻理分布,较富钾长石(微斜长石)、石英,贫斜长石;晚期浅色体可近于平行片麻理,也可呈团块状散布于片麻岩中,切割片麻理,较富斜长石、石英,贫钾长石,可含黑云母、角闪石,其组合为Pl + Qtz ± Mc,这些团块可切割变质岩(片麻理)部分(Hbl + Bt + Kfs + Pl + Qtz + Ap)。浅色体旁的变质岩中可具有富角闪石的组合:Bt + Hbl + Pl + Qtz ± Mc + Tit,并具有一定的分异现象。分异形成分别富集Bt + Hbl + Pl和Kfs ± Pl + Bt + Ms的两部分,且均有榭石、磁铁矿和石英。花岗质浅色团块或平行或切割片麻理,表明其形成与变形作用没有必然的联系,形成于片麻理晚期或之后。

阜平杂岩的多种长英质片麻岩和浅粒岩中,发育或显著或轻微的混合岩化现象。经受了混合岩化改造的大部分长英质岩石,如TTG片麻岩、南营片麻岩、湾子岩系云母石英片岩、浅粒岩、黑云斜长片麻岩和夕线片麻岩,甚至石英岩中,有一个较为普遍的现象:沿其中的斜长石边缘或钾长石粒间,经常可以发现清晰的钠长石净边。这些岩石中有钾长石和斜长石两种长石,且以钾长石为主。钠长石净边一般分布于Pl-Kfs之间的Pl边缘,紧邻的Pl-Qtz之间不见Ab净边的延伸(图4a)。若净边量较多(通常钾长石/斜长石比值远大

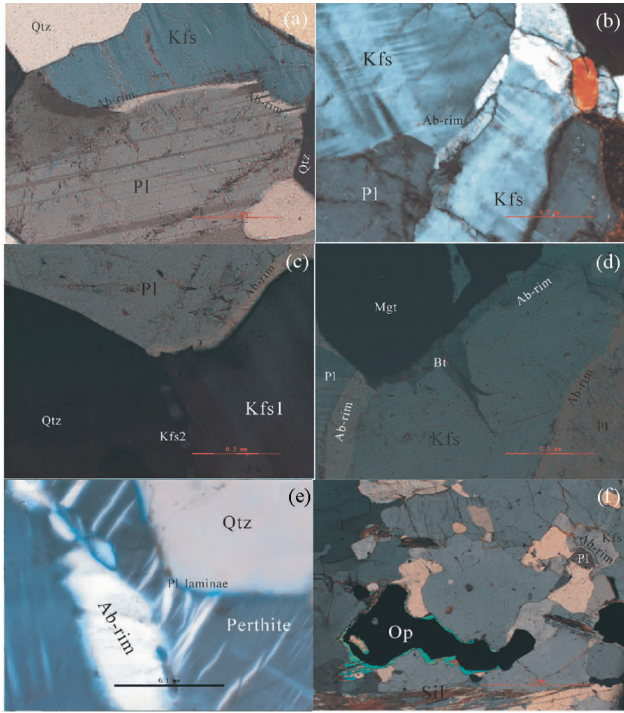


图4 阜平杂岩混合岩化作用与相关的钠长石净边的显微照片

(a)-钠长石净边仅出现于斜长石-钾长石间,而斜长石-石英间则无,钾长花岗岩片麻岩;(b)-钾长石间的透镜状钠长石净边,且与斜长石-钾长石间净边不连续,钾长花岗岩片麻岩;(c)-两期钾长石之后形成钠长石净边,钾长花岗岩片麻岩;(d)-磁铁矿边缘黑云母与钠长石净边相伴,钾长花岗岩片麻岩;(e)-钠长石净边之后形成条纹长石,黑云钾长片麻岩;(f)-磁铁矿外的白云母退变边,湾子岩系含夕线钾长浅粒岩

Fig. 4 Microphotographs of migmatization and related albite-rims in the Fuping Complex

(a)-Albite-rim only present between Pl-Kfs, absent between Pl-Qtz, Kfs-granitic gneiss; (b)-Lensoid albite-rims between K-feldspar, discontinuous with the rim between Pl-Kfs, Kfs-granitic gneiss; (c)-Albite-rim after two generations of K-feldspar, Kfs-granitic gneiss; (d)-Biotite accompanying albite-rim along magnetite margin, Kfs-granitic gneiss; (e)-Perthite after albite-rim, Bt-Kfs-granitic gneiss; (f)-Retrograded muscovite rim along magnetite, Sil-Kfs leucoplecite, Wanzi Series

于1)时还可同时出现于 Kfs-Kfs 之间(图4b)。Pl-Kfs 之间的 Ab 净边基本呈单一晶体(图4a, c, d, f),而 Kfs-Kfs 之间的 Ab 净边往往呈叠置的小透镜状(图4b);有时见两期 Kfs, 早期(隐)条纹长石、晚期微斜长石,钾长石之后出现钠长石净边(图4c),净边之后形成白云母。与不透明金属氧化物(Op)相伴时可见钠长石净边插入 Kfs 内部,并有黑云母相伴(图4d)。与钠长石净边仅限于长石边缘不同,钾长石中的斜长石出溶条纹出现于颗粒内部,且晚于净边(图4e)。钾长石中可包裹半自形斜长石,有石英的多期加大现象。

岩石的结构观察表明,钠长石净边与混合岩化作用、花岗岩具有密切联系。后面的论述将试图说明,钠长石净边是熔体过程的一种反映。

4 混合岩化作用的表现——熔体特征

阜平杂岩大多数片麻岩显示了明显的混合岩化作用,甚至有人提出阜平杂岩中有广泛的“阜平混合岩”地质体(Trap *et al.*, 2008)。混合岩化表现为平行或切割片麻理的浅色体或脉体(Kfs + Pl + Qtz + Bt + Ms)(图2b, c, d)。这些混合岩脉体均属于熔体结晶所致。

4.1 矿物的自形晶

湾子岩系石英岩中自形磁铁矿、磷灰石及其与微斜长石间的镶嵌结构表明磁铁矿和磷灰石属于自熔体或流体直接结晶或重结晶,而不是碎屑成因;石英中包裹自形微斜长石(图3c)、钾长石中可见半自形、自形斜长石细小颗粒,石英粒间的微斜长石可见半自形晶、石英的半自形晶(图3f)。一般变质作用很难形成长石、石英的自形晶。虽说石英岩中石英晶体内的微斜长石自形晶亦可以由碎屑石英裹挟而来,但这种自形微斜长石与石英粒间的微斜长石光性、三斜度等特征完全一致,表明了同期形成;阜平杂岩内与正片麻岩、副片麻岩有关的混合岩中,钾长石内包裹早期斜长石自形晶,这些结构均表现为熔体结晶的特征(Zeck, 1970; Vernon, 1988)。花岗质片麻岩中的钾长石斑晶可具有自形斜长石定向包裹体,这种结构代表了晶体可自由漂浮的岩浆环境,在有限的岩浆活动如深熔导致的局部熔体中难以形成类似的结构(Hibbard, 1987)。

石英粒间的钾长石窄条和近三角状的长英质集合体,实验表明,熔体可在粒间形成熔体膜(Mehnert *et al.*, 1973),形成三角状或尖状、舌状长英质矿物聚集体(图3e),表明发生过熔体的结晶(Jurewicz and Watson, 1984; Sawyer, 1999, 2001)。石英岩中有很多的碎屑锆石,说明其原岩属沉积成因,但是,这并不排除有部分石英系熔体结晶而成,包裹钾长石自形晶的石英即可能属于这种类型。

片麻岩中石英的多次生长可能与熔体脉动注入有关;钾长石中常见圆化石英、偶见圆化斜长石,表明经历了熔(溶)蚀而不仅仅是固相变质改造,如同 Büsch *et al.* (1974)所总结的,一些矿物自形晶的出现、早期矿物的圆化和港湾状结构并被新生矿物包裹等,都可以作为熔体存在的依据。

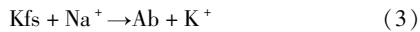
4.2 钠长石净边

一般说来,钠长石净边被当作一种典型的交代结构(陈曼云等,2009),被当作交代混合岩的依据之一(程裕淇等,1963;程裕淇,1987;Mehnert, 1971),而阜平杂岩中微斜长石之间的钠长石净边被称为铰链结构,并被当作深熔作用的一

种标志(程裕淇等,2004)。

通过详细观察和对比发现,沿龙泉关剪切带内大部分岩石中净边量较少,片(麻)岩伴随少量长英质脉体(图2c)时,仅在脉体中有净边;阜平杂岩中若有明显的钾质熔体结晶,即可形成净边(图4a-e)。在吕梁群中等变形强度的条带状混合岩(Hbl + Mc + Bt + Pl(±rim) + Qtz + Tit + Ap)中,有一定量的黑云母,以及少量的钠长石净边;随着局部后期韧性变形的叠加,矿物组合发生改变(Hbl + Mc + Pl + Qtz + Tit + Ap),最突出的变化就是黑云母和钠长石净边的消失。表明与熔体有关的混合岩中可见净边,真正的变质岩中钠长石净边则不再出现(另文发表)。我们的观察表明,钠长石净边仅见于花岗质岩浆岩或与涉及熔体活动的混合岩、变质岩中。净边与熔体的关系更为密切。

通过镜下观察得知,净边的形成不仅仅是粒间流体结晶所致,而是与钾长石的直接参与有着密不可分的联系,如钾长石的分解可提供成分和空间:



若仅是钾长石出溶或分解所致,净边应限于钾长石内部或周围,但是,Kfs-Qtz间无净边,Kfs-Kfs间亦可无净边,净边的形成相对于钾长石而言是外部因素在起作用。此外,钾长石可有斜长石出溶条纹(图4e),条纹似乎晚于净边形成,且出溶条纹的斜长石An牌号可达更长石,而净边仅为An牌号极低的钠长石。钠长石净边与斜长石出溶条纹分属不同的形成机制。

钠长石净边仅限于钾长石与钾长石或斜长石之间,表明净边的形成与溶蚀钾长石有关,而不是溶蚀斜长石。游振东等(1996)专门报道过大别罗田黄土岭长英质片麻岩中的钠长石净边,并认为片麻岩实际上是由片麻状A-型花岗岩,经历了明显的混合岩化,只是其认为净边由交代斜长石而成,这可能与实际情况不符。张春华等(1990)指出,一些混合花岗质岩石或岩浆型花岗质岩石中的钠长石净边起因于岩浆晚期或末期的强烈钠质交代作用。Peng(1970)认为,花岗岩、正长岩矿物粒间钠长石净边结晶于残余岩浆流体,并交代钾长石,而不是钾长石出溶所致。

正如Hasalová *et al.* (2008a, b)所指出的,净边结构从条痕状混合岩开始出现,并可当作熔体存在的依据之一。即钠长石净边与熔体作用有着更为密切的联系,甚至具有岩浆成因的指示意义。正是石英岩中的钠长石净边的出现促使作者意识到,以沉积成因为主的石英岩中的熔体显然是他处迁移而来,该岩石曾经历了熔体的渗透改造。阜平杂岩中钠长石净边的普遍发育与该岩系经历了广泛的熔体渗透式混合岩化作用有关,钠长石净边可能形成于熔体作用后期非岩浆的流体(减少)阶段。钠长石净边仅存在于长石粒间,从不出现于粒内,也表明其时岩石处于岩浆结晶晚期,尚未彻底凝固或变形。类似的,钾长石粒间晚期愈合而成的长石-石英聚集体亦形成于熔体尚未彻底固结的阶段(Trap *et al.*, 2009, fig. 12B)。

5 深熔作用与熔体

混合岩化作用伴随着密切的熔体活动。我们知道,阜平杂岩经历了中-高级变质作用,并具有较高的水活度(刘树文和梁海华,1997),这些条件与深熔作用的温压范围(Thompson and Connolly, 1995)大致相当,因此,很容易考虑到熔体源于深熔作用的可能性。如前所述,深熔作用可分为无水 and 有水两种类型,下面分别讨论其可能性。

5.1 无水深熔作用?

绝大多数花岗岩的产生与脱水熔融反应有关,但脱水反应多发生在此角闪岩相-麻粒岩相变质条件下,往往伴随石榴子石、斜方辉石、钾长石、堇青石部分或多数“干矿物”的出现,如东南极拉斯曼丘陵高级变质岩系,因含水矿物含量较少,尽管经历了典型的大面积麻粒岩相脱水部分熔融反应,形成大量的深熔浅色体,但浅色体并不显示明显的岩浆结晶结构(Carson *et al.*, 1997);在长英质片麻岩及深熔浅色体中可形成锆石的变质增生边但极少形成岩浆增生边(Wang *et al.*, 2008),即无水深熔作用或脱水部分熔融作用形成的浅色体反而不具有典型的熔体特征,有一定的流体活动参与时即可形成真正的深熔花岗岩(正长花岗岩)(Zhao *et al.*, 1992)。

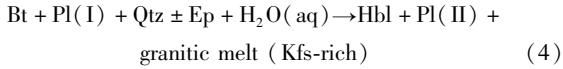
阜平杂岩中熔体所致浅色脉体普遍发育,其中有较多的含水矿物如角闪石、黑云母、白云母、帘石、楣石等,但上述“干矿物”极少,如仅有少量的石榴子石、辉石,大部分情形下甚至缺失这些矿物;虽有晚期钾化,但未见到部分熔融反应的岩相证据,即片麻岩没有发生典型的脱水深熔作用(Kriegsman, 2001),刚玉、尖晶石的形成可能与此有关,但这类结构非常局限。大部分的阜平杂岩片(麻)岩仅达中级变质程度,如十字石、白云母的出现(刘树文和梁海华,1997),片岩矿物组合Grt + Bt + Ms + Mc ± Pl + Qtz + Ttn,仅达角闪岩相,变质温度较低的部位甚至不足700℃,阜平杂岩仅有少量的变基性岩和长英质岩石达角闪-麻粒岩相变质,如大柳树一带。即使在那些部位,根据岩石学特征和变质流体研究,黑云母斜长片麻岩和眼球状片麻岩亦未经历过麻粒岩相变质作用(刘树文等,2000)。极少见到麻粒岩相残留组合也不支持花岗岩脉体的原地重熔成因(Chen and Grapes, 2007)。此外,由侵入体引起深熔作用的情况(Jung *et al.*, 1998)在本区似乎没有发生。因此,阜平杂岩中没有或极少无水深熔作用的指示结构,混合岩熔体不应该由无水深熔作用形成。

5.2 有水深熔作用?

尽管在稍低温(~700℃)、有流体存在的条件下片麻岩中可以发生一致熔融(低共熔),但这种熔融主要是长石、石英和少量云母的熔融,而本区大多数混合岩脉体、花岗岩脉

及侵入体较富钾长石或斜长石,并非低共熔组成,而与此有所不同。

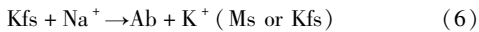
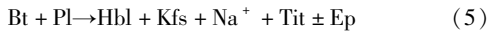
在阜平杂岩多种岩石中可识别出角闪岩相的变质矿物组合,在中-基性成分的变质岩内可见 $\text{Grt} + \text{Bt} + \text{Hbl} + \text{Pl} + \text{Kfs} + \text{Tit} \pm \text{Ep} + \text{Qtz}$ 组合,变质岩及相伴的混合岩中则可见到黑云母向角闪石的转化(图 3b), Mogk (1992) 和 Escuder Viruete (1999) 把这种现象称之为有水深熔作用:



闪石和钾长石的密切共生可能即与此反应有关。的确,黑云角闪片麻岩的浅色体或团块中往往含有一定量的黑云母和角闪石。问题是,尽管变质岩中可以见到自形角闪石,少量石英和斜长石的残留,但是极少有残留的黑云母,实际上,黑云母反而常呈半自形-自形晶(图 3a),表明片麻岩中由反应(4)对混合岩熔体形成的贡献并不大,温度仍低于云母的脱水熔融条件。许多片麻岩中浅色脉体量较多,片麻岩本身仍具有较多的黑云母,因此,现今层次上的变质岩(片麻岩)由反应(4),即黑云母向角闪石转化所形成熔体的量也不足以解释区域上浅色脉的分布密度(图 2d),帘石是产物而不是反应物(图 3b)也不支持反应(4)的发生。所以,阜平杂岩中的变质岩(片麻岩)由反应(4)通过有水深熔作用形成主要的混合岩化熔体脉的可能性不大。由于熔体结晶产物中有较多的云母尤其是黑云母,前期熔体的形成必然牵涉到黑云母的分解,不排除反应(4)发生在较深层次的可能性,这样的话,浅色脉体可通过熔体上升、注入到现今的位置。

此外,与一般理解的变质岩中出现熔融反应和部分反应物的残留,浅色体中主要为产物及熔体结晶有所不同,黑云角闪片麻岩与其中的浅色团块均有 $\text{Bt} \rightarrow \text{Hbl}$ 的转化,且片麻岩和浅色体中的黑云母、角闪石在光性、成分特征上均非常类似,片麻岩(变质岩)和浅色体中发生的主要是结晶过程而不是进变质反应,很难看到直接由变质岩生成熔体的迹象。

角闪石、钾长石和钠长石净边往往相伴出现,可能代表了如下两个相继发生的反应(递进反应):



反应(5)可能代表了熔体结晶或与之相关的变质反应,反应(6)则反映净边的形成过程,实际上是一个置换反应。其中 Na^+ 离子可存在于以钾长石为主的长石结晶后的残余流体中,而释放出的 K^+ 离子则迁移至其它位置,形成云母(图 4d, f)或钾长石,可能是该杂岩中有较多钾质伟晶岩脉的原因。黑云母向角闪石的转化,可能与钠长石净边一样,反映了与熔体活动有关的一种结构。

由于变质岩、浅色体中主要发生的是云母及其他造岩矿物的结晶过程而罕见形成熔体的熔融反应,在阜平杂岩现今出露的层次发生无水或有水深熔作用的可能性都不大。相反,若采用源自外来(深部)熔体的注入形成混合岩的模型,对一些岩相和结构更容易解释。当然,这些脉体在深部源区

可能是由深熔作用形成,如 Whalen *et al.* (1987)所指出的,富钾长石的 A 型花岗岩是富含 F-Cl 的麻粒岩在地下壳部分熔融的产物,但已不属于本文讨论的范围。

5.3 相关的退变质结构

外来熔体的注入可能是多幕次的,如石英的多次生长。早期混合岩化与特定的变质级别相伴随,后期的熔体注入对早期的变质矿物进行改造,形成退变质矿物组合,如变质作用形成镁铁闪石、黑云母、白云母、帘石,甚至绿泥石、方解石。与钾长石接触处的黑云母转化为白云母蚀变边,可能与熔体注入对早期矿物的改造有关。当然,白云母可以是退变形成,也可能是岩浆结晶的结果(Jung *et al.*, 1998)。一般来说,深熔浅色体本身不能使麻粒岩相组合发生明显的退变质(Carson *et al.*, 1997)。若后期的混合岩化与早期的中-高变质不属于同一个变质过程,后期熔体注入式混合岩化容易引起早期变质岩的退变质改造。熔体固化结晶过程中,释放出的流体可水化变质体,或向上迁移诱发退变质作用,甚至某些变质体中的熔融作用(Thompson and Connolly, 1995)。多次或多种类型的退变质现象与可能发生了熔体的多阶段注入或渗透是一致的。

6 混合岩化对岩石化学成分及锆石的影响

对于封闭体系下的深熔作用,浅色体与变质岩部分的岩石化学应是互补的,开放体系下外来熔体注入所致混合岩浅色体与变质岩部分的地化特征可以相似或无关。Pinarelli *et al.* (2008) 根据阿尔卑斯山南部 Serie dei Laghi 混合岩中花岗岩部分与变质岩部分地球化学(Sr-Nd-Pb)特征呈现相似而不是互补,指出不可能是原地深熔。阜平杂岩中的大石峪片麻岩/浅色体、平阳岩体及其附近的片麻岩/浅色体稀土、微量元素(具体含量数据从略)对比表明,大石峪片麻岩与其早期富钾质浅色体相比,除锆异常互补外,稀土元素的分馏(图 5a)较为相似,微量元素的 MORB 配分也较为相似(图 6a),而晚期富钠质浅色体的稀土、微量元素则与片麻岩既不相似、也不互补。平阳岩体附近的片麻岩与浅色体除微量元素略有相似(图 6b)之处外,稀土元素(图 5b)之间似乎没有联系。这些特征均表明,阜平杂岩的浅色体应是外来熔体注入、而不是原地深熔形成。

引起混合岩化作用的熔体系外来岩浆注入,大多数情况下,岩浆源与这些被混合岩化岩石没有关系,但是,在熔体注入过程中,其与先存变质岩间的相互作用使得变质岩、结晶熔体的成分都有一定的改造。对于经历了变形-变质作用和注入式混合岩化改造的阜平杂岩,出现变质流体迁移、组分活动,即形成开放系统;在遭受注入式混合岩化作用的过程中,如湾子表壳岩熔体沿片麻理注入形成钾质浆体结晶(图 2b)。强烈混合岩化地区的岩石组分改造较为明显(Hasalová *et al.*, 2008a, b),这种改造使得正、副片麻岩的成分均有向岩浆

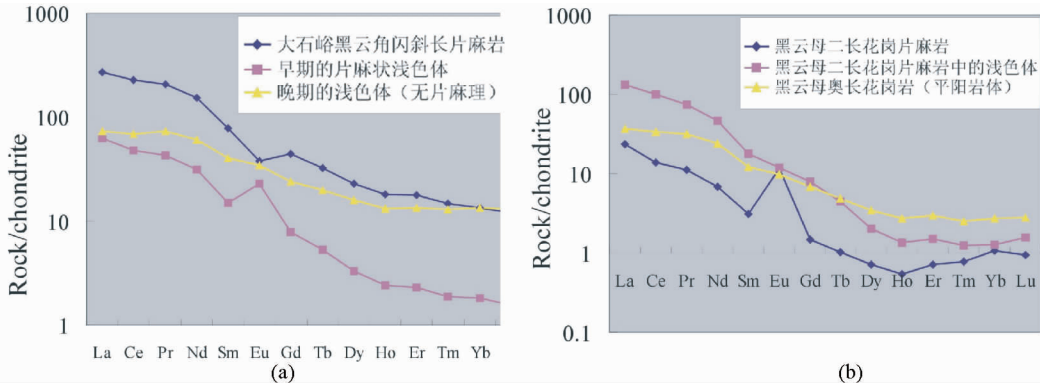


图5 阜平杂岩中片麻岩及其中浅色体的稀土球粒陨石配分型式

(a)-大石峪片麻岩;(b)-平阳岩体及围岩片麻岩

Fig.5 Chondrite REE patterns of the gneiss and its leucosomes in the Fuping Complex

(a)-The gneiss at Dashi village;(b)-The Pingyang trondhjemite and adjacent gneiss, leucosome

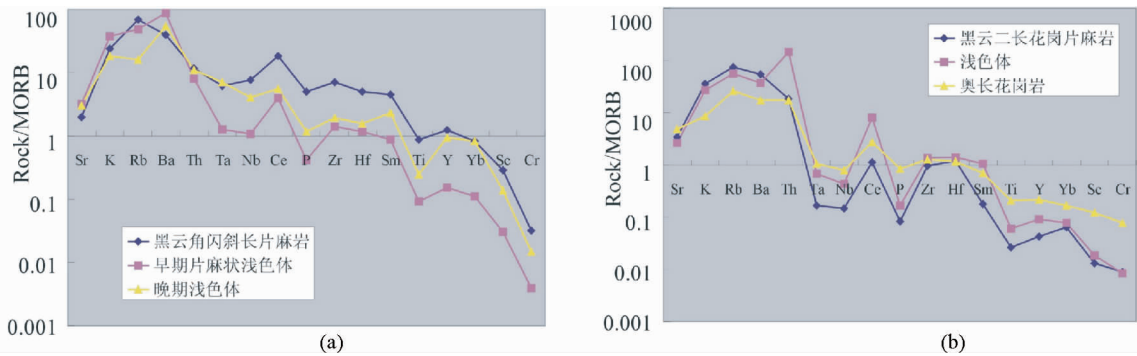


图6 阜平杂岩中的浅色体或花岗岩微量元素相对于 MORB 的变化

(a)-大石峪片麻岩;(b)-平阳岩体及围岩片麻岩

Fig.6 The trace element MORB patterns of the leucosome and granite in the Fuping Complex

(a)-The gneiss at Dashi village;(b)-The Pingyang trondhjemite and adjacent gneiss, leucosome

岩成分靠近的趋势,从而在野外极似副片麻岩的岩石却显示岩浆岩的成分特征,如湾子表壳岩浅粒岩的地球化学特征显示为岩浆成因(孙敏和关鸿,2001),即可能与此有关。

从元素组成上,万渝生和杨崇辉(2002)注意到,阜平杂岩深熔作用(即本文强调的外来熔体注入式混合岩化作用)刚开始、即仅有少量浅色体时其元素含量、分布模式与熔融母岩(变质岩部分)完全不同(无关),Nd 同位素组成存在较大差别。随着深熔作用(混合岩化作用)的进行,两者 Nd 同位素组成的差异越来越小,最后几乎完全消失。若采用外来熔体注入模型来解释,实际上是原地岩石与外来熔体两个完全不同系统的混合,当浅色体比例较小时,两者的组成差别较为明显;当熔体注入比例较大,变质岩组分的则逐渐显示出注入熔体组分的性质,浅色体与变质岩间的差异逐渐被弥合。

如前所述,多数人认为阜平杂岩经历了强烈的变质-深熔作用(如程裕淇等,2004),当然,本文强调发生了显著的熔体注入式混合岩化作用,不论哪种情形,都说明存在熔体

活动,从而可形成岩浆锆石(图3d)。对于副变质岩,其中的锆石基本为碎屑来源和变质成因两种情形。若这些岩浆锆石出现在副片麻岩中,很容易被当作碎屑锆石,对于此类混合岩地区,若采用副变质岩碎屑锆石年龄限定原岩沉积时代的做法需要慎重。

7 混合岩化作用的类型

混合岩的形成既可与原地深熔有关,亦可与熔体的注入或渗透有关。对于与熔体的注入有关的混合岩化,可称之为熔体注入式混合岩化(任留东等,2010),但在我国的一些混合岩分类中,注入混合岩有其特定的含义,专指较弱的混合岩化作用,表示浅色体的含量较低(15%~50%),基体与脉体间界线清楚(陈曼云等,2009)。

通过野外观察、构造分析和室内显微构造、矿物成分和同位素地球化学的研究,Hasalová *et al.* (2006, 2008a, b)提出了混合岩化作用可由外来“熔体渗透”(Melt infiltration)造

成,该过程导致一些早期矿物的消减、新矿物的形成以及岩石化学成分有明显改变,因而与封闭体系下的深熔作用有所不同,Hasalová *et al.* (2006, 2008a, b)称之为“熔体渗透式混合岩化”(Melt infiltration migmatization),从而与注入混合岩化有所区分。“熔体渗透式混合岩化”发生在体系晚期剥露、上升阶段的温压降低过程中,类似的情形已有报道(Weinberg and Searle, 1999; Baumgartner *et al.*, 2001; Hasalová *et al.*, 2006, 2008a, b)。阜平杂岩亦经历了后期的构造隆升(唐先梅和刘树文,1997; Zhao *et al.*, 2001)。

阜平杂岩经历了中-高级变质作用(690~800°C, 0.65~0.82 GPa),并且在变质作用中具有较高的水活度(刘树文和梁海华,1997),与世界范围内混合岩和花岗岩的熔融和形成条件(620~860°C, 0.15~0.75 GPa, 相当于5~28 km)(Chen and Grapes, 2007)较为接近,从而,空间上与变质岩密切相伴的、与混合岩作用有关的酸性熔体较富水、粘度小,结晶缓慢,并具有较大的活动性,使得熔体在保持浆体或与之相当的流体状态的时间较长、可作较长距离的迁移,很容易沿片(麻)理裂隙迁移注入形成浅色脉体,在熔体就位、结晶过程中不断(脉动)发生分异、挤出,在适当的部位聚集成块状、脉状,形成各种注入式浅色脉体,表现出混合岩的外貌;熔体沿致密岩石(如石英岩片状矿物较少,难以形成明显的片(麻)理)的岩石中的微裂隙渗入或浸染状注入,在矿物粒间出现显微尺度的钾长石-石英聚集团块(图3e),岩石的结构和成分均发生明显的改造。

8 关于混合岩化作用的时间

孙敏和关鸿(2001)指出,阜平地区有一期2.05 Ga的岩浆活动,以岗南岩体和南营花岗岩片麻岩为代表。南营片麻岩代表了2077 ± 13 Ma和2024 ± 21 Ma前侵位的深熔花岗岩(Guan *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2002)。刘树文等(2002)认为2.0~2.1 Ga的花岗岩可广泛分布于吕梁山-太行山-恒山-五台山变质地块中,是吕梁运动的产物,代表了太行山-恒山变质地块的活化事件,强调2.0~2.1 Ga的深熔花岗岩侵位结晶事件。对照本文的论述,该期事件可能相当于阜平杂岩中的熔体渗透式混合岩化作用(另文讨论)。

一些Kfs-Qtz脉平行片麻理且呈条带分布(图2b),说明熔体注入的时间与阜平杂岩的变形-变质阶段基本同期,与混合岩化作用有关的熔体注入可能是多期次或脉动式的,如晚期浅色脉体切割片麻理和早期脉体。而且,可能是注入熔体的活动导致了阜平杂岩的主要变质过程。这也是阜平杂岩变质作用、深熔作用、岩浆活动、混合岩化以及退变质作用均有显示、并且变质岩石结构异常复杂的原因。

9 结论

(1)阜平杂岩中有大量的浅色熔体脉,外来岩浆活动形

成侵入脉体、条带和一些侵入岩,以及广泛的混合岩化作用。强烈的混合岩化作用使得在长英质片麻岩中可形成较明显的熔体注入,甚至在一些不易片理化的岩石中形成浸染状熔体渗入;

(2)虽然形成于岩浆作用之后,净边的出现是熔体或相关流体活动的一种重要标志;其它与熔体活动有关的结构包括一些矿物自形晶的形成、黑云母向角闪石的转换。浅色脉体、岩脉和花岗岩侵入体的形成与岩浆的直接侵位有关,阜平杂岩片麻岩中深熔作用直接形成熔体的作用几乎可以忽略不计;

(3)对于经历了变形-变质作用和混合岩化改造的阜平杂岩,在遭受熔体渗透式混合岩化作用的过程中,岩石成分发生了改变,即体系属于形成开放系统。与熔体的渗透相关,可形成一些岩浆锆石。若这些岩浆锆石出现在副片麻岩中,很容易被当作碎屑锆石。

致谢 论文准备和写作过程中,中国地质科学院地质研究所的沈其韩院士、杨崇辉研究员和张寿广研究员、中国科学院地质与地球物理研究所的翟明国院士和郭敬辉研究员给予了充分的关注,提出了许多非常有益的建议;审稿人提出了一些根本性的问题,对论文的改进起了关键作用;均在此深表感谢。

谨以此文献给尊敬的导师沈其韩院士,祝沈先生健康长寿!

References

- Baumgartner LP, Clemens RM, Putlitz B, Roselle GT and Wenzel TU. 2001. Fluid and melt movement in contact aureoles. 11th Annual Goldschmidt Conference
- Brown M. 2007. Crustal melting and melt extraction, ascent and emplacement in orogens: Mechanisms and consequences. *Journal of the Geological Society*, 164: 709–730
- Büsch W, Schneider G and Mehnert KR. 1974. Initial melting at grain boundaries. Part II. Melting in rocks of granodioritic, quartz dioritic and tonalitic composition. *Neues Jahrbuch Für Mineralogie Monatshefte*, 8: 345–370
- Carson CJ, Powell P, Wilson CJL and Dirks PHGM. 1997. Partial melting during tectonic exhumation of a granulite terrane: An example from the Larsemann Hills, East Antarctica. *Journal of Metamorphic Geology*, 15: 105–126
- Chen GN and Grapes R. 2007. *Granite Genesis: In-situ Melting and Crustal Evolution*. Springer, 1–278
- Chen MY, Jin W and Zheng CQ. 2009. *Guide Book in Geological Survey: Identification of Metamorphic Rocks*. Beijing: Geological Publishing House, 1–232 (in Chinese)
- Cheng YQ, Shen QH, Liu GH and Wang ZJ. 1963. *Basic Problems and Research Methods on Metamorphic Rocks*. Beijing: China Industry Publishing House (in Chinese)
- Cheng YQ. 1987. Some problems on migmatite and migmatization: Retrospect for some basic understandings in geology in the last half century. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, No. 16, 5–19 (in Chinese)
- Cheng YQ, Wan YS and Gao JF. 2000. Preliminary study on the isotopic age of metamorphism and anatexis of the Fuping Group of the environs of Xiaojue, Pingshan County, Hebei Province. *Acta*

- Geologica Sinica, 74: 30–38 (in Chinese with English abstract)
- Cheng YQ, Yang CH, Wan YS, Liu ZX, Zhang XP, Du LL, Zhang SG, Wu JS and Gao JF. 2004. Precambrian Geology and Anatexis and Its Reworking in the Crustal Rocks at the Central-Northern Segments of the Taihangshan Mountain. Beijing: Geological Publishing House, 1–191 (in Chinese)
- Clemens JD. 1984. Water contents of intermediate to silicic magmas. *Lithos*, 17: 273–287
- Escuder Viruete J. 1999. Hornblende-bearing leucosome development during syn-orogenic crustal extension in the Tormes gneiss dome, NW Iberian Massif, Spain. *Lithos*, 46: 751–772
- Guan H, Sun M, Wilde SA, Zhou XH and Zhai MG. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping Complex: Implications for formation and assembly of the North China craton. *Precambrian Res.*, 113: 1–18
- Hasalová P, Štípský P, Powell R and Schulmann K. 2006. The role of melt infiltration in the formation of migmatitic orthogneiss. *Geolines*, 20: 48–49
- Hasalová P, Schulmann K, Lexa O, Štípský P, Hrouda F, Ulrich S, Haloda J and Tycová P. 2008a. Origin of migmatites by deformation-enhanced melt infiltration of orthogneiss: A new model based on quantitative microstructural analysis. *Journal of Metamorphic Geology*, 26: 29–53
- Hasalová P, Štípský P, Powell R, Schulmann K, Janoušek V and Lexa O. 2008b. Transforming mylonitic metagranite by open-system interactions during melt flow. *Journal of Metamorphic Geology*, 26: 55–80
- Hibbard MJ. 1987. Deformation of incompletely crystallized magma systems: Granitic gneisses and their tectonic implications. *Journal of Geology*, 95: 543–561
- Jung S, Mezger K, Masberg P, Hoffer E and Hoernes S. 1998. Petrology of an intrusion-related high-grade migmatite: Implications for partial melting of metasedimentary rocks and leucosome-forming processes. *Journal of Metamorphic Geology*, 16: 425–445
- Jung S, Hoernes S and Mezger K. 2000a. Geochronology and petrogenesis of Pan-African, syn-tectonic, S-type and post-tectonic A-type granite (Namibia): Products of melting of crustal sources, fractional crystallization and wall rock entrainment. *Lithos*, 50: 259–287
- Jung S, Hoernes S and Mezger K. 2000b. Geochronology and petrology of migmatites from the Proterozoic Damara Belt: Importance of episodic fluid-present disequilibrium melting and consequences for granite petrology. *Lithos*, 51: 153–179
- Jurewicz SR and Watson EB. 1984. Distribution of partial melt in a felsic system: The importance of surface energy. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 85: 25–29
- Kriegsman LM. 2001. Partial melting, partial melt extraction and partial back reaction in anatectic migmatites. *Lithos*, 56: 75–96
- Kröner A, Wilde SA, Li JH and Wang KY. 2005. Age and evolution of a Late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 577–595
- Kusky TM, Li JH and Santosh M. 2007. The Paleoproterozoic North Hebei Orogen: North China Craton's collisional suture with the Columbia Supercontinent. *Gondwana Research*, 12: 4–28
- Li JH, Niu XL, Chen Z, Kusky T and Polat A. 2004. Occurrence of the deep thrusts in the Taihang Mountains and their geological significance. *Progress in Natural Science*, 14: 1118–1127 (in Chinese with English abstract)
- Liu SW, Li JH, Pan YM, Zhang J, Li QG and Huang XN. 2002. Archean blocks in Taihang-Hengshan Mountains: Constraints from geochronology and geochemistry. *Progress in Natural Science*, 12: 826–833 (in Chinese with English abstract)
- Liu SW and Liang HH. 1997. Metamorphism of Al-rich gneisses in Taihang Mountain Archean metamorphic complex. *Acta Petrologica Sinica*, 13: 303–312 (in Chinese with English abstract)
- Liu SW, Liang HH, Zhao GC, Hua YG and Jian AH. 2000. Geochronology and geological events in the Precambrian complexes in Taihang Mountains. *Science in China (Series D)*, 30: 18–24 (in Chinese)
- Liu S, Pan Y, Xie Q, Zhang J, Li Q and Yang B. 2005. Geochemistry of the Paleoproterozoic Nanying granitic gneisses in the Fuping Complex: Implications for the tectonic evolution of the Central Zone, North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 643–658
- Ma XY, You ZD, Tan YJ and Cai XL. 1963. Tectonic pattern in Precambrian of eastern China. *Acta Geologica Sinica*, 43: 27–52 (in Chinese)
- Mehert KR, Busch W and Schneider G. 1973. Initial melting at grain boundaries of quartz and feldspar in gneisses and granulites. *N. Jb. Mineral. Mh.*, 1973: 165–183
- Mehert KR. 1971. Migmatites and the Origin of Granitic Rocks. Amsterdam: Elsevier
- Mogk DW. 1992. Ductile shearing and migmatization at mid-crustal crustal levels in an Archean high grade gneiss belt, northern Gallatin Range, Montana, USA. *Journal of Metamorphic Geology*, 10: 427–438
- Peng CCJ. 1970. The intergranular albite in some granites and syenites of Hong Kong. *American Mineralogist*, 55: 270–282
- Pinarelli L, Bergomi MA, Boriani A and Giobbi E. 2008. Pre-metamorphic melt infiltration in metasediments: Geochemical, isotopic (Sr, Nd, and Pb), and field evidence from Serie dei Laghi (Southern Alps, Italy). *Mineral Petrol.*, 93: 213–242
- Ren LD, Yang CH and Du LL. 2009. Some geochemical features of the leucosomes in the quartzfeldspathic gneisses of Fuping complex. *Geological Bulletin of China*, 28: 857–966 (in Chinese with English abstract)
- Ren LD, Wang YB, Yang CH, Han J, Xie HQ and Li LS. 2010. Metamorphism, migmatization and granites of the Mashan complex in Heilongjiang Province, Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 26: 2005–2014 (in Chinese with English abstract)
- Santosh M, Zhao D and Kusky T. 2010. Mantle dynamics of the Paleoproterozoic North China Craton: A perspective based on seismic tomography. *Journal of Geodynamics*, 49: 39–53
- Sawyer EW. 1999. Criteria for the recognition of partial melting. *Phys. Chem. Earth (A)*, 24: 269–279
- Sawyer EW. 2001. Melt segregation in the continental crust: Distribution and movement of melt in anatectic rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 19: 291–309
- Sederholm JJ. 1907. Om Granit och Gneis, deras uppkomst, upptr? dande och utbredning inom urberget i Fennoscandia. *Bull. Comm. Géol. Finl.*, 23: 1–110
- Stevens G and Clemens JD. 1993. Fluid-absent melting and the roles of fluids in the lithosphere: A slanted summary? In: Touret JLR and Thompson AB (eds.). *Fluid-Rock Interaction in the Deeper Continental Lithosphere*. *Chemical Geology*, 108: 1–7
- Sun M and Guan H. 2001. Zircon U-Pb ages of the Fuping complex and their implications: Some comments on the geochronological study of the Precambrian high-grade metamorphic terranes. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 145–156 (in Chinese with English abstract)
- Tan YJ, Wang FZ and Zhao WX. 1993. Early Precambrian Geology at the Fuping Uplift, Taihangshan Mts and Some Questions and Study Methods in Archean Geology. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 1–161 (in Chinese)
- Tang XM and Liu SW. 1997. An initial research on the extension deformation belt in the Archean metamorphic rocks in the Northern Taihang Mountains. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 33: 447–455 (in Chinese with English abstract)
- Thompson AB and Connolly JAD. 1995. Melting of the continental crust: Some thermal and petrological constraints on anatexis in continental collision zones and other tectonic settings. *Journal of Geophysical Research*, 100(B8): 15565–15579
- Trap P, Faure M, Lin W, Bruguier O and Monié P. 2008. Contrasted tectonic styles for the Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Evidence for a ~2.1 Ga thermal and tectonic event in the Fuping Massif. *Journal of Structural Geology*, 30: 1109–1125
- Trap P, Faure M, Lin W and Meffre S. 2009. The Lüliang Massif: A key

- area for the understanding of the Palaeoproterozoic Trans-North China Belt, North China Craton. Geological Society, London, Special Publications, 323: 99–125
- Vernon RH and Collins WJ. 1988. Igneous microtextures in migmatites. *Geology*, 16: 1126–1129
- Wan YS and Yang CH. 2002. Geochemical study on anatexis of leucopelites in Fuping Group of Xiaojue area, Pingshan County, Hebei Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21: 421–428 (in Chinese with English abstract)
- Wang YB, Liu DY, Chung SL, Tong LX and Ren LD. 2008. SHRIMP zircon age constraints from the Larsemann Hills region, Prydz Bay, for a Late Mesoproterozoic to Early Neoproterozoic tectono-thermal event in East Antarctica. *American Journal of Science*, 38: 573–617
- Weinberg RF and Searle MP. 1999. Volatile-assisted intrusion and autometamorphism of leucogranites in the Khumbu Himalaya. *Nepal. J. Geol.*, 107: 27–48
- Whalen JB, Currie KC and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 95: 407–419
- Wu JS, Geng YS, Xu HF, Jin LG, He SY and Sun SW. 1989. Metamorphic geology of Fuping Group. *Journal of Chinese Institute of Geology*, 19: 1–213 (in Chinese)
- Wu JS, Geng YS, Shen QH, Wan YS, Liu DY and Song B. 1998. Archean Geological Feature and Structural Evolution of the Sino-Korean Craton. Beijing: Geological Publishing House, 1–211 (in Chinese)
- You ZD, Zhong ZQ, Tang ZD and Chen NS. 1996. Corrosion-reaction margin with inversion of polysynthetic twinning of plagioclase in migmatites: An example from quartzofeldspathic gneiss in Dabieshan. *Earth Science*, 21: 513–518 (in Chinese with English abstract)
- Zeck HP. 1970. An erupted migmatite from Cerro de Hoyazo, S. E. Spain. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 26: 225–246
- Zen EA. 1988. Thermal modelling of step-wise anatexis in a thrust thickened silica crust. *Transactions of Royal Society, Edinburgh Earth Science*, 79: 223–235
- Zhai MG and Bian AG. 2000. Assemblage of the North China Craton at the end of Neoproterozoic and its breakup in the period of Late Paleoproterozoic-Mesoproterozoic. *Science in China (Series D)*, 30 (Suppl.): 129–137 (in Chinese)
- Zhang CH, Wang QC, Gao MW, Li ZL and Shi XL. 1990. Early Precambrian Metamorphism in Hebei Province. Beijing: Geological Publishing House, 1–178 (in Chinese)
- Zhang SG, Jin LG and Xiao QH. 1983. Structural style and deformational history of the Fuping Archean domal composite fold group. *Regional Geology of China*, 6: 97–110 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XP, Wan YS and Yang CH. 2003. Geology and petrography of the Pingyang gneissic trondhjemite, Fuping, Hebei. *Geology in China*, 30: 61–71 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Res.*, 107: 45–73
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 2002. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping Complex: Implications for late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton. *American Journal of Science*, 302: 191–226
- Zhao Y, Song B, Wang Y, Ren L, Li J and Chen T. 1992. Geochronology of the late granite in the Larsemann Hills, East Antarctica. In: Yoshida Y, Kaminuma K and Shiraishi K (eds.). *Recent Progress in Antarctic Earth Science*. Tokyo: Terrapub, 155–161
- 岩鉴定手册. 北京:地质出版社, 1–232
- 程裕淇,沈其韩,刘国惠,王泽九. 1963. 变质岩的一些基本问题和工作方法. 北京:中国工业出版社
- 程裕淇. 1987. 有关混合岩和混合岩化作用的一些问题——半个世纪以来某些基本认识的回顾. *中国地质科学院院报*, 16号, 5–19
- 程裕淇,万渝生,高吉凤. 2000. 河北平山小觉地区阜平群变质作用和深熔作用同位素年代研究的初步报道. *地质学报*, 74: 30–38
- 程裕淇,杨崇辉,万渝生,刘增效,张西平,杜利林,张寿广,伍家善,高吉凤. 2004. 太行山中北段早前寒武纪地质和深熔作用对地壳岩石的改造. 北京:地质出版社, 1–191
- 李江海,牛向龙,陈征, Kusky T, Polat A. 2004. 太行山区深层次推覆构造的发现及其地质意义. *自然科学进展*, 14: 1118–1127
- 刘树文,梁海华. 1997. 太行山太古宙变质杂岩中富铝片麻岩的变质作用. *岩石学报*, 13: 303–312
- 刘树文,梁海华,赵国春,华永刚,简安华. 2000. 太行山早前寒武纪杂岩同位素年代学和地质事件. *中国科学(D辑)*, 30: 18–24
- 刘树文,李江海,潘元明,张健,李秋根和黄雄南. 2002. 太行山-恒山太古代古老陆块:年代学和地球化学制约. *自然科学进展*, 12: 826–833
- 马杏垣,游振东,谭应佳,蔡学林. 1963. 中国东部前寒武纪大地构造发展的样式. *地质学报*, 43: 27–52
- 任留东,杨崇辉,杜利林. 2009. 阜平杂岩长英质片麻岩中一些浅色体的地化性质及其地质意义. *地质通报*, 28: 857–866
- 任留东,王彦斌,杨崇辉,韩娟,颜颜强,李林山. 2010. 麻山杂岩的变质-混合岩化作用和花岗岩活动. *岩石学报*, 26: 2005–2014
- 孙敏,关鸿. 2001. 阜平杂岩年龄及其地质意义:兼论前寒武高级变质地体的定年问题. *岩石学报*, 17: 145–156
- 谭应佳,王方正,赵温霞. 1993. 太行山阜平隆起南部早前寒武纪地质——兼论太古宙地质若干问题及研究方法. 武汉:中国地质大学出版社, 1–161
- 唐先梅,刘树文. 1997. 太行山北段晚太古宙变质杂岩伸展变形带的初步研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 33: 447–455
- 万渝生,杨崇辉. 2002. 河北平山小觉地区阜平岩群浅粒岩深熔作用的地球化学研究. *岩石矿物学杂志*, 21: 421–428
- 伍家善,耿元生,徐惠芬,金龙国,贺绍英,孙世伟. 1989. 阜平群变质地质. *中国地质科学院地质研究所所刊*, 19: 219
- 伍家善,耿元生,沈其韩,万渝生,刘敦一,宋彪. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京:地质出版社, 1–211
- 游振东,钟增球,汤中道,陈能松. 1996. 混合岩中斜长石的交代净边结构和倒转双晶研究——以大别罗田黄土岭长英片麻岩为例. *地球科学*, 21: 513–518
- 翟明国,卞爱国. 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末-中元古代裂解. *中国科学(D辑)*, 30(增刊): 129–137
- 张春华,王启超,高明文,李增龙,石晓兰. 1990. 河北早前寒武纪变质作用. 北京:地质出版社, 1–178
- 张寿广,金龙国,肖庆辉. 1983. 阜平太古宙穹状复合褶皱群的构造样式及变形史. *中国区域地质*, 6: 97–110
- 张西平,万渝生,杨崇辉. 2003. 河北阜平平阳片麻状奥长花岗岩的地质和岩相学特征. *中国地质*, 30: 61–71

附中文参考文献

陈曼云,金巍,郑常青. 2009. 地质调查工作方法指导手册——变质