

网脉状微角砾岩的构造意义

张家声^① 黄雄南^① 刘建民^②

(①中国地震局地质研究所, 北京 100029; ②中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081. E-mail: jszhang@public3.bta.net.cn)

摘要 在大别山、贺兰山等地发现的网脉状微角砾岩与陨石撞击和隐爆火山活动无关, 也没有直接的断层位移联系, 表现为相对强硬的长英质结晶岩石中受张性或张剪性破裂网络控制、具黑色隐晶基质的角砾岩。其公里尺度的规模、复杂的破裂组合关系、原地无序的围岩碎片, 尤其是化学成分与围岩接近一致的隐晶基质中无显著位移联系的超碎裂岩化作用, 以及可能的固态非晶质化变形性状等, 意味着该地区的深地壳岩石曾经发生了大规模、高能量的快速脆性破裂。

关键词 网脉状微角砾岩 大别山 隐晶基质 二长花岗岩 原地的 固态非晶质化

本文研究的“网脉状微角砾岩”尚未见诸国内外的研究报道, 但在显微构造上与撞击成因和月岩样品的微角砾岩有某些相似之处^[1-3]。目前, 关于微角砾岩的命名、隐晶基质的性质和成因解释上均存在许多争议^[1,2]。在撞击构造中这类岩石被描述为震动角砾岩(shock breccias), 象假玄武玻璃的角砾岩(pseudotachylyte-like breccias)、熔结角砾岩、撞击熔岩、碎屑角砾岩(fragmental breccias)、灌入角砾岩(injection breccias)、冲击岩(impactite)、震动岩(shocktite)、网状角砾岩(network breccias)、A型角砾岩、压碎岩(crushed rock)以及碎裂岩、碎屑撞击角砾岩等。而关于它们复杂多样和不稳定的隐晶基质的性质则有超碎裂化、熔融或固态非晶质化(solid-state amorphization, SSA)等不同描述。对它们的成因解释也存在不同看法, 包括: (1)震动或冲击变质作用^[4]; (2)撞击熔融(impact melt)^[5]; (3)断层围岩在相当大的深度上发生强烈震动变形(shock deformation)并出现了活动液态物质的结果^[6]; (4)震动波产生的角砾化作用及紧随其后的热变质作用^[6]; (5)震动角砾岩化作用(shock brecciation); (6)破裂引起的减压熔融(fracture-localized decompression melts)^[7]等, 反映了对此类微角砾岩成因的困惑。

本文对大别山、贺兰山等地在构造上与陨石撞击^[1,8]、断裂位移^[9,10]、隐爆火山作用^[11,12]无关的网脉状微角砾岩(stockwork microbreccias)进行了初步研究。根据微角砾岩的野外特征、显微结构构造和隐晶基质的性质、岩石化学成分和Raman光谱分析结果, 讨论

了网脉状微角砾岩的性质和成因。

1 网脉状微角砾岩的野外产状

迄今为止, 在大别山东麓、太行山、大青山中段的结晶基底和贺兰山中段的长石石英岩中, 均发现了呈网脉状产出的微角砾岩。尽管它们的局部野外产状和岩石学特征类似于假玄武玻璃的断层脉或灌入脉, 但它们分布在远离主断层的完整围岩中, 并不存在与现今主断层位移的直接构造联系^[13-15]。不同地区网脉状微角砾岩分布的范围达数百米~数公里尺度, 区域上也不存在与陨石撞击和隐爆火山作用的联系。

在大别山东麓, 网脉状微角砾岩主要出现在以长石为主的结晶岩石中, 包括前寒武纪二长花岗质片麻岩(水吼岭二长花岗片麻岩、撞钟河奥长花岗片麻岩、陶冲二长花岗片麻岩, 胡家湾、砂河阜以西的花岗质和花岗闪长质片麻岩)和中生代二长花岗岩(万山、主簿、对牛石、下浒山、五聚岭等)岩体中(图1)。网脉状微角砾岩在露头上表现为受上述完整结晶岩石中密集的张性或张剪性破裂组合控制的黑色网脉, 与发育断层角砾岩、断层泥的脆性邻庐断裂的位移无直接联系。脉体厚度一般在毫米~厘米量级, 含有少量无序排列的原地围岩角砾和矿物碎斑, 基质呈黑色、致密、隐晶。典型的露头尺度破裂样式及其组合关系包括: 张破裂、网结状破裂(图2(a), (b))、向主破裂一侧分叉的帚状破裂、向两侧分叉的树枝状破裂, 以及体现这些破裂复杂关系的平行破裂组合、剪切破裂对(图2(c), (d))等。破裂面的力学性质以张性

1) Shimamoto T. Pseudotachylytes and Pseudotachylyte-like Rocks of “Crush” Origin. In: Reches Z, ed. Abstracts of the 1st workshop of “Drilling Active Faults in South Africa Mines”. Sponsored by the International Continental Scientific Drilling Program (ICDP). Norman, South Africa: University of Oklahoma. 2002. Post on website

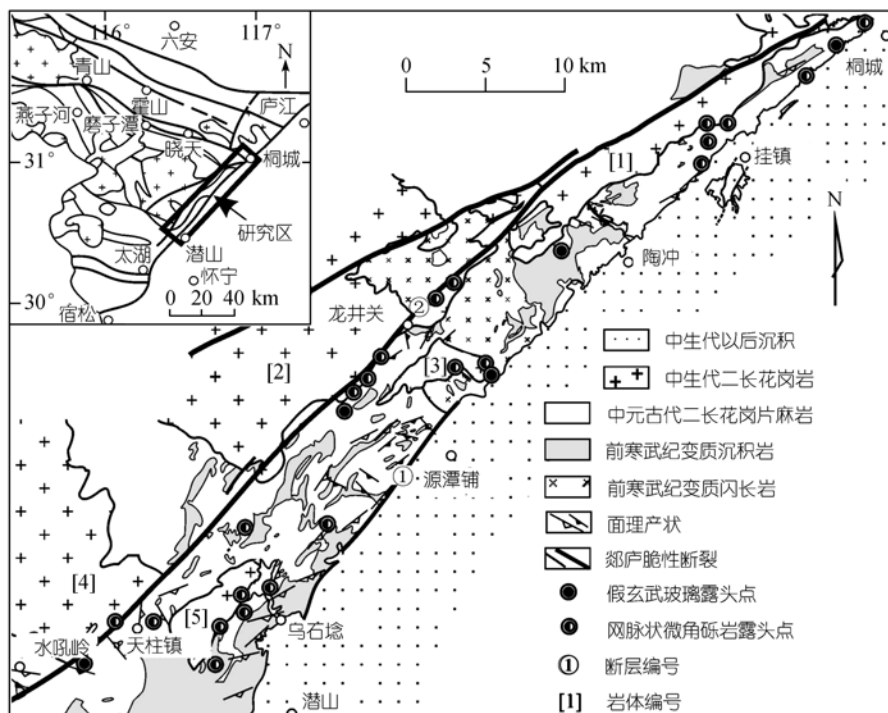


图 1 大别山东麓基底岩性-构造略图

① 桐城-太湖断裂; ② 水吼岭-龙井关断裂. [1] 五聚岭岩体; [2] 主簿岩体; [3] 下浒山岩体; [4] 万山岩体; [5] 对牛石岩体

或张剪性为主, 偶然可以见到伴生的羽状破裂(图 2(e)). 所有破裂和破裂网络两侧围岩没有显著位移. 主破裂和分支破裂中均出现黑色微角砾岩, 其内部未见灌入流动构造或定向组构.

贺兰山中段小口子西部发现的网脉状微角砾岩, 仅出现在厚约 50 m 的新元古代厚层长石石英岩层内部. 破裂网络具有明显的张性特点, 含较大的原地围岩碎片, 基质黑色致密, 肉眼可以见到细小的长英质矿物碎斑(图 2(b)), 破裂组合没有规律. 尽管厚层状长石石英岩及其上、下相对软弱的浅变质泥页岩、砂岩等共同卷入了中生代以后的冲断层变形, 但网脉状微角砾岩与外部构造没有直接联系. 在太行山中段军庄附近的长英质片麻岩中, 网脉状微角砾岩与一组近于平行的破裂有关, 主破裂间距在数十厘米~数十米不等, 其间存在规模较小的次级破裂. 此外, 在大青山中段油坊营附近也发现了类似的网脉状微角砾岩.

2 网脉状微角砾岩基质的性质

2.1 显微结构构造

网脉状微角砾岩的显微构造特征与断裂成因的

假玄武玻璃有许多类似之处, 二者均表现为典型的基质-碎斑结构(图 3), 但隐晶基质的显微特征存在明显差异. 我们的观察表明, 与假玄武玻璃基质中熔体相物质的玻璃状或脱玻化结构不同(图 3(a), (b)), 微角砾岩的隐晶基质中没有熔体物质的证据, 也不存在假玄武玻璃灌入脉中通常所能见到的舌状流动构造(图 3(a)). 网脉状微角砾岩与围岩之间具有截然的, 但不规则的边界, 脉体中含有大小和形状不一的菱形围岩碎片和矿物碎斑(图 3(c), (e), (g)). 当母岩中含黑云母、角闪石等镁铁质矿物时, 可见这类矿物的残片, 这一点与假玄武玻璃不同. 较大的石质碎片和长石、石英等碎斑矿物的边缘存在的“锯齿”状结构(图 3(c), (h)), 代表不规则破裂边界的光学效应, 不同于假玄武玻璃中碎斑边缘的“熔蚀港湾”结构, 其中还出现指向碎斑内部的楔形裂纹(图 3(c), (f), (h)). 基质大体上可分为灰色和黑色两部分, 灰色部分含有大量形状不规则的碎粉状硅酸盐矿物晶体(图 3(c), (d)), 黑色部分的性质不明, 在正交和偏光显微镜下均不透明(图 3(f)).

2.2 岩石化学

断裂成因假玄武玻璃和网脉状微角砾岩都是快

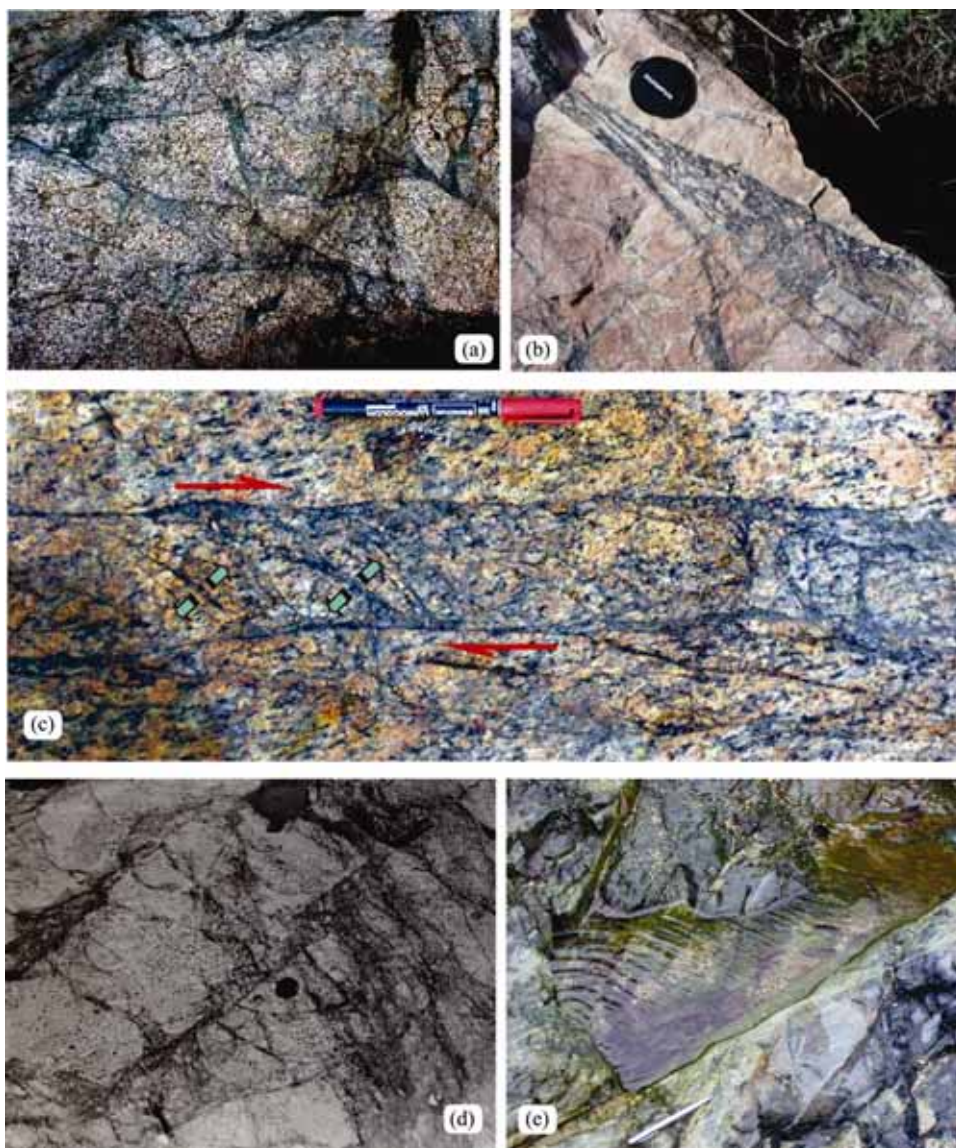


图2 网脉状微角砾岩的野外露头照片

- (a) 二长花岗岩中的网脉状微角砾岩, 安徽潜山电站; (b) 厚层长石石英岩(新元古代)中的网脉状微角砾岩, 贺兰山中段小口子;
(c) 二长花岗片麻岩中受剪破裂对控制的网脉状微角砾岩, 桐城天柱镇; (d) 斜长花岗片麻岩中发育网脉状微角砾岩的平行破裂对, 桐城乌石垭; (e) 与网脉状微角砾岩破裂伴生的羽状破裂, 潜山龙井关

速构造过程的产物, 不仅由于不同样品的母岩性质不同, 脉体中基质物质明显不均一, 以及脉体中大量存在的不同粒度的围岩碎屑等原因, 而且微角砾岩的野外构造联系和显微构造证据, 也表明它们的形成过程很可能是一种机械行为. 因此, 用传统岩石化学的平衡反应来分析它们与母岩之间的成分交换显然是不对的. 但母岩与脉体基质间的成分差异将有可能提供关于它们形成过程的重要信息. 作为分析比较的对象, 脉体围岩的成分全部采用全岩分析方

法, 而脉体基质的成分分析则分别采用了电子探针和人工挑选后的全岩分析两种方法, 分析结果的解释也根据方法的不同而区别对待. 脉体基质的全岩分析样品通过多级人工剔除碎斑矿物和岩屑, 已尽可能地接近隐晶基质的成分. 以下3个理由说明这一操作是可行的: (1)用于全岩分析的样品质量只需要1 g, 因此可以尽可能肉眼选取样品中相对均匀的基质组分; (2)对选取的脉体基质进行分级(60、300目)粉碎, 并通过反射显微镜筛选, 可以最大限度逼近(95%)

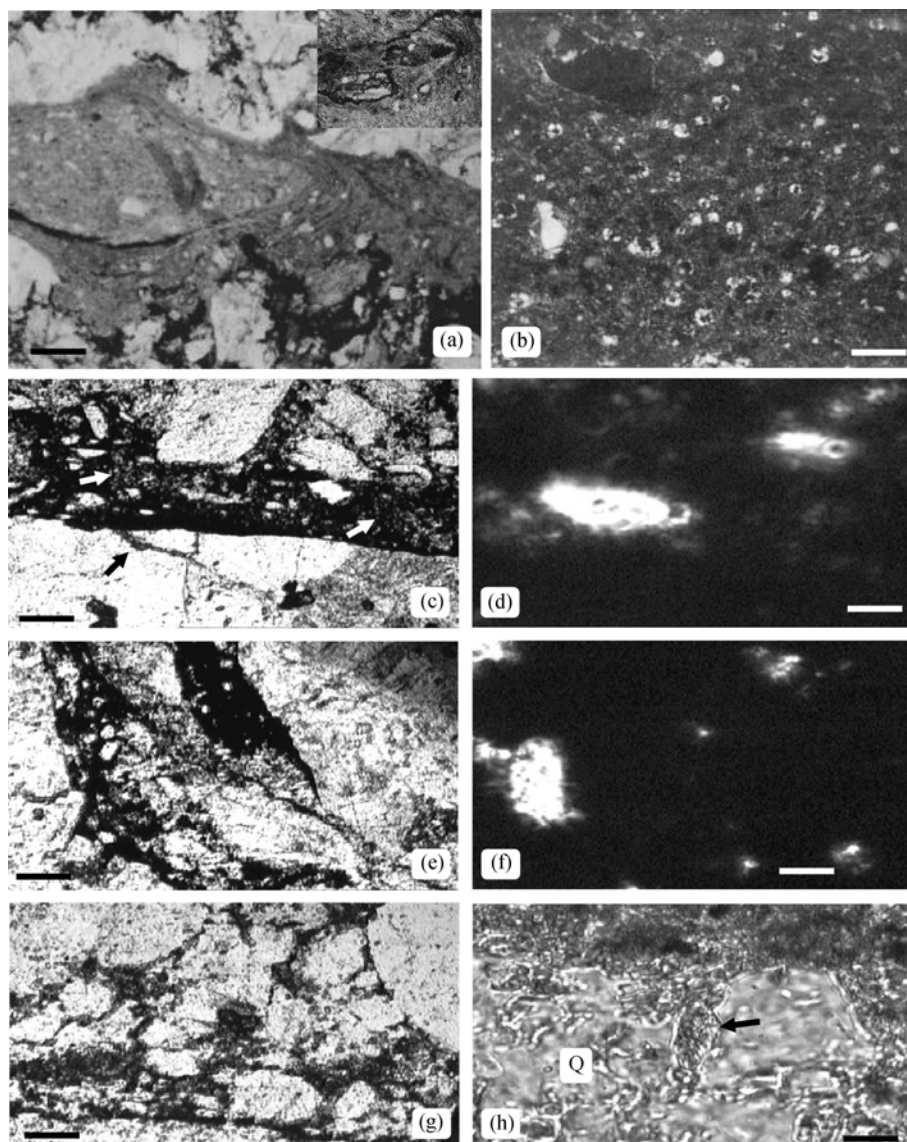


图 3 大别山地区网脉状微角砾岩的显微构造及其与断裂成因假玄武玻璃的对比

天然断裂成因假玄武玻璃灌入脉的舌状流动构造(a)和熔融基质的脱玻化结构(b)。网脉状微角砾岩与围岩之间具有截然但不规则的边界,脉体中含有大小和形状不一的菱形围岩碎片和矿物碎斑((c), (e), (g)),并出现指向碎斑内部的楔形裂纹((c), (h)中黑色箭头指向)。基质大体上可分为灰色和黑色两部分,灰色部分含有大量矿物碎粉((c)中白色箭头指向和(h)上部),黑色部分的性质在光学显微镜下无法识别。样品: (a) Orobic Alps, north Italy, (b) 秦岭蛇尾; (c), (d)斜长花岗岩片麻岩中的网脉状微角砾岩, Db03, 安徽桐城; (e), (f)钾长花岗岩片麻岩中的网脉状微角砾岩, Db66, 安徽潜山天柱镇, (g), (h)长石石英岩中的网脉状微角砾岩, Nx36, 银川小口子。 (a), (b)为正交偏光, 其他均为单偏光。 (a), (c), (e), (g)中的比例尺为 200 μm 。 (b), (d), (f), (h)中的比例尺为 20 μm

较纯的基质组分; (3)在本项目的研究中,基质和围岩的全岩化学分析结果主要用作定性的对比分析,而不是用于严格的平衡反应。因此,脉体基质中主要元素质量百分比存在 $\pm 5\%$ 的误差是可以接受的。国际上目前也承认这一方法所获得的分析结果和对结果的解释^[16]。

对大别山地区 11 条网脉状微角砾岩的围岩和脉体成分分别进行岩石化学分析的结果表明,尽管电

子探针分析(图 4(a))比全岩分析(图 4(b))更能显示母岩与脉体基质在成分上的差别,但它们的变化趋势基本上是一致的。其中 SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , CaO 等主要元素的重量百分比相对各自的围岩有较大变化,且变化趋势较为明显; TiO , MnO 和 MgO 等元素与围岩接近一致;而 Na_2O 和 K_2O 的含量虽然有所不同,但变化趋势不明显。考虑到网脉状微角砾岩母岩的主

要矿物组分为长石和石英, 脉体基质中主要元素含量变化更多的是反映了长英质矿物的行为. 脉体基质中 SiO_2 的明显减少被认为是石英较少被破碎到 $2\text{ }\mu\text{m}$ 以下. 而电子探针分析结果也显示 Al_2O_3 和 CaO 的明显增加, 以及 Na_2O 和 K_2O 的不稳定变化, 说明相对石英来说, 长石类矿物在微角砾岩基质的形成过程中起了更加重要的作用. 与此同时, FeO 含量增加的趋势和 MgO 的轻微变化, 反映镁铁质矿物也充分参与了这一过程. 主要元素含量在脉体基质中增加的范围, 说明这一过程应该没有外来流体成分的加入.

尽管网脉状微角砾岩的基质中不存在熔体相物质, 但其脉体基质相对围岩的变化趋势与断裂成因(熔融)的假玄武玻璃有某些类似之处. 对 5 组采自不同地区的假玄武玻璃进行的岩石化学分析结果, 基本上显示了与上述微角砾岩一致的变化趋势. 其中, 围岩为中基性岩(图 4(d))的脉体基质成分较围岩为中

酸性岩(图 4(c))的脉体基质更接近母岩, 说明前者熔融更加充分. 虽然二者的 SiO_2 含量均较母岩有不同程度的下降, 但 Al_2O_3 的含量则呈现出相反的变化. 总的说来, 尽管成因机制不同, 网脉状微角砾岩的成分变化更接近中酸性岩石摩擦熔融的产物.

2.3 Raman 光谱谱线分析

Raman 光谱谱线是通过英国 RENISHAW 公司 RM-1000 激光 Raman 仪的氦氖激光器获得的. 所使用的激光波长为 514.5 nm , 发射功率 20 mW , 接收功率 $4.5\sim 5.0\text{ mW}$, 狭缝宽度 $50\text{ }\mu\text{m}$, 光栅密度 1800 mm , 分析区域直径 $2\text{ }\mu\text{m}$, 波数分辨率误差为 $\pm 2\text{ cm}^{-1}$. 分析样品包括 2 个采自大别山东麓不同母岩(Db03 和 Db66)和 1 个采自贺兰山中部(Nx36)的网脉状微角砾岩, 测试对象包括脉体基质中的矿物碎斑、碎斑边缘暗灰色物质和相对均匀的黑色隐晶基质等.

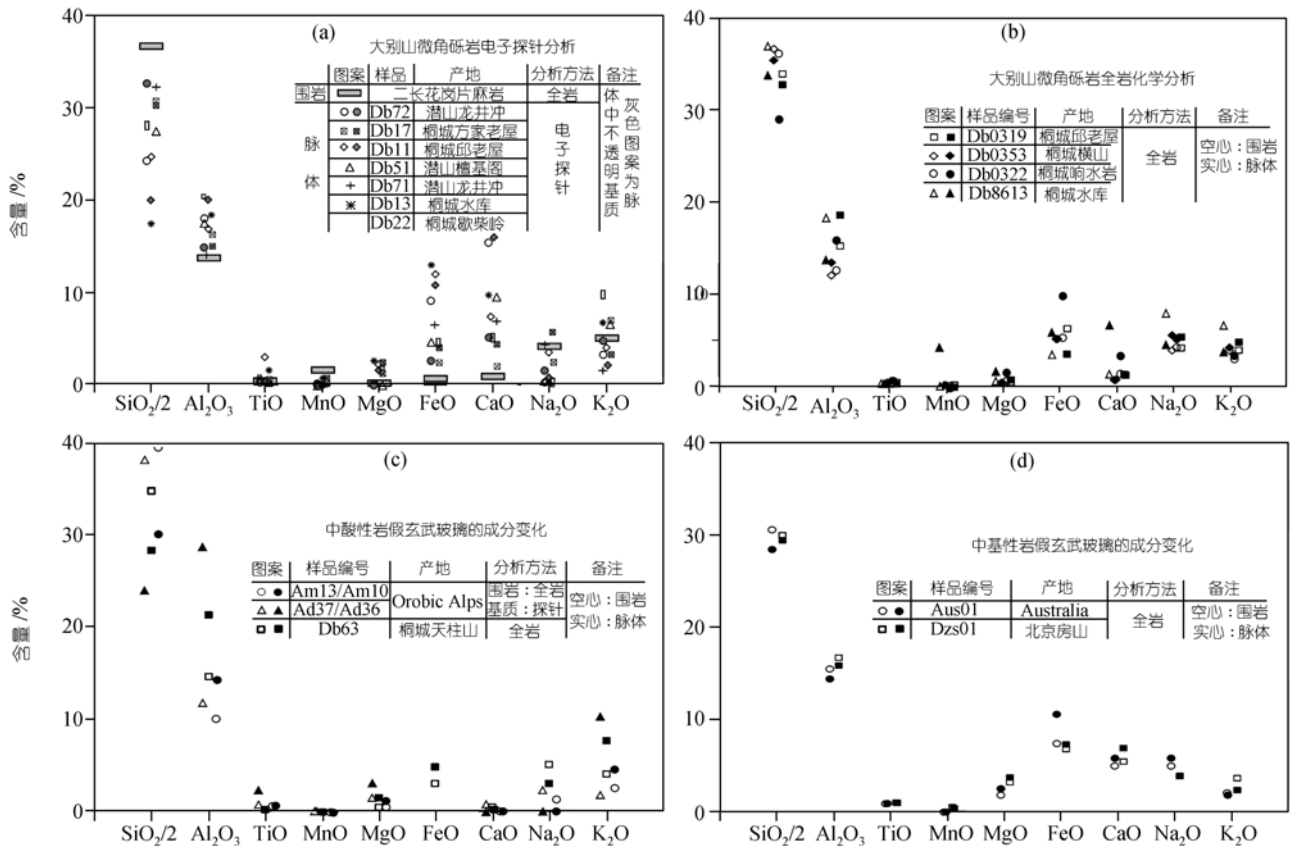


图 4 网脉状微角砾岩和断裂成因假玄武玻璃的成分变化

(a), (b) 的围岩为前寒武纪二长花岗岩片麻岩或中生代二长花岗岩, 其中钾长石和斜长石含量变化在 66%~95% 之间, 石英含量为 20%~30%, 黑云母、角闪石等暗色矿物含量小于 10%. (c) 展示长英质岩石中断裂成因假玄武玻璃的成分变化, 其中 Orobie Alps 样品的围岩为二云母石英片岩, Db63 的围岩为二长花岗质糜棱片麻岩. (d) 展示斜长角闪岩中假玄武玻璃的成分变化, 其中 Aus01 为天然断裂成因, Dzs01 为人工摩擦熔融的假玄武玻璃

贺兰山中部网脉状微角砾岩(Nx36)的母岩是沉积变质的厚层长石石英岩(见图 2(b)), 长石、石英含量超过 90%, 其他沉积来源的碎屑矿物成分复杂. 脉体基质中石英碎斑(图 5(a), 谱线 Nx3601)的特征谱峰 130, 466 明显, 碎斑边缘(谱线 Nx3602)和碎斑内部裂隙中细粒物质(见图 3(h), 谱线 Nx3608)的谱峰强度明显减小, 但 130, 466 等峰值仍然存在. 黑色隐晶基质的谱线(Nx3604)变得平滑, 仍见较弱的石英和长石(554)谱峰.

对大别山东麓分别出现在黑云斜长片麻岩(样品编号 Db03)和二长花岗片麻岩(样品编号 Db66)中的微角砾岩进行的激光 Raman 分析结果表明: Db03 的基质中存在低温钠长石、微斜长石(图 5(b), 谱线 Db0301, 谱峰 475, 514 等)和石英(谱线 Db0302, 谱峰 130, 214, 466)等矿物的碎屑, 但黑灰色基质(见图 3(c), (d))中基本未见典型石英和长石的谱峰(谱线 Db0303 和 Db0305), 其中在 227, 293 和 412 处出现的微弱谱峰的性质不明确. 但值得注意的是, 其黑色隐晶基质(见图 3(d))的谱线完全不存在谱峰(图 5(d), 谱线 Db0304). 二长花岗片麻岩(样品编号 Db66)中微角

砾岩基质的 Raman 光谱分析结果相对简单, 石英碎斑(见图 3(f))在 130, 208, 466 等处的谱峰普遍较弱(图 5(c), 谱线 Db6604 和 Db6606). 在暗灰色隐晶基质中存在低温钠长石和钾微斜长石碎屑(谱线 Db6607, 谱峰 293, 508 等). 隐晶基质的黑色部分无论在低能区(图 5(c), 谱线 Db6601)还是在高能区(图 5(d), 谱线 Db6602 和 Db6603)都不存在谱峰. 尽管如此, 样品 Db03 和 Db66 的黑色基质中均未发现代表玻璃物质(熔体)的特征谱线.

上述 Raman 光谱分析结果表明: 贺兰山中段长石石英岩中的网脉状微角砾岩主要是原地超碎裂作用形成的, 其最小粉碎粒度应该大于 $2\text{ }\mu\text{m}$ (Raman 光谱测试域直径). 大别山东麓的微角砾岩的暗灰色基质含有少量石英、长石碎粉, 但黑色基质物质的谱线无特征峰, 其原因一方面可能由于粒度小于 $2\text{ }\mu\text{m}$, 即所谓的隐晶质微细颗粒. 另一方面, 由于没有观测到玻璃物质宽缓突起的特征谱线, 甚至在一定波位上出现小型宽缓凸起——初熔现象^[17], 不排除有固态非晶质化物质存在的可能.

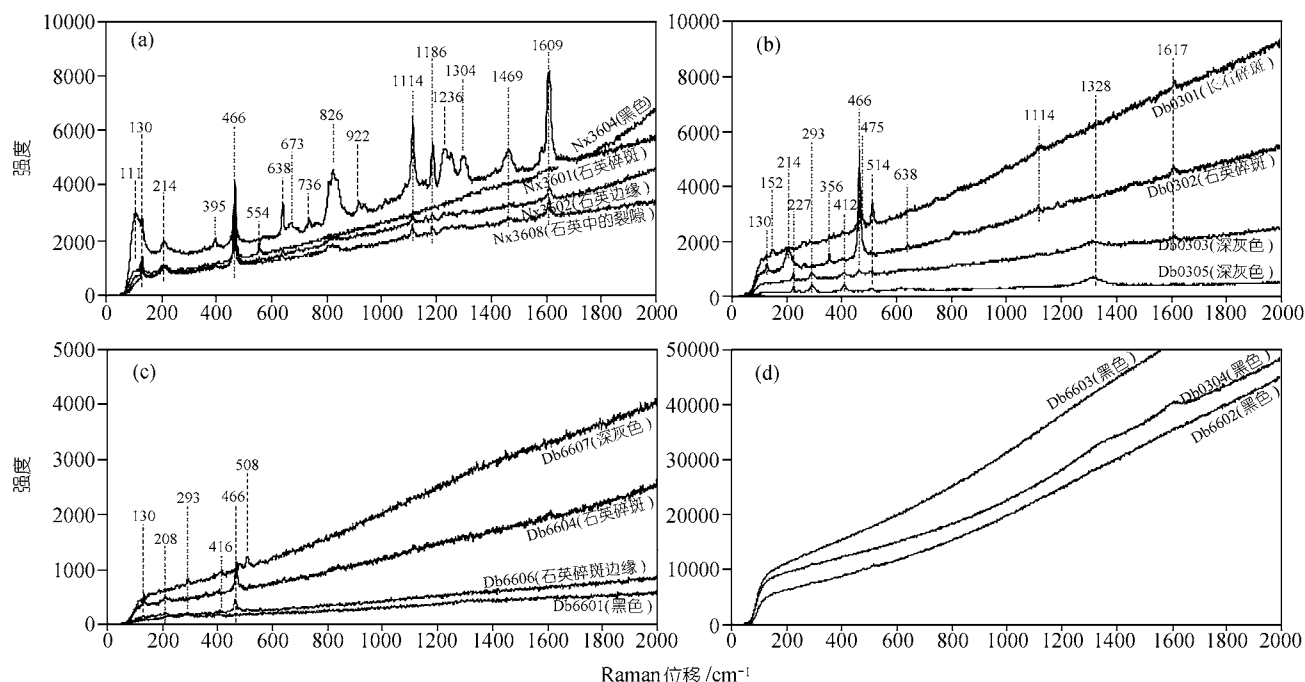


图 5 网脉状微角砾岩脉体的 Raman 谱线特征

(a)贺兰山中部长石石英岩中的微角砾岩, 样品 Nx36, 银川小口子; (b)大别山东麓斜长花岗片麻岩中的微角砾岩, 样品 Db03, 安徽桐城; (c)大别山东麓二长花岗片麻岩中的微角砾岩, 样品 Db66, 安徽潜山天柱镇; (d)网脉状微角砾岩脉体基质中非晶质化组分的 Raman 谱线, 样品 Db03, Db66, 地点同上. Raman 谱线在 130, 208, 214, 466 等出现的峰值为石英, 在 293, 412, 475, 514, 508 出现的峰值为长石. 峰值出现在 826 以及大于 1000 的主要为树脂类有机物质. 其他峰值所代表的矿物不详, 可能包括氟石(481), 钙硅石(638), 钛铁矿(640)等

3 讨论和结论

已知的微角砾岩成因解释均与超大能量的自然现象有关:月岩样品中观察到的微角砾岩被认为是高速宇宙粒子撞击(太阳风)的结果^[18],陨石坑周围出现的微角砾岩无疑是陨石撞击引起岩石高频振动的产物^[1,8],而与断层直接相关的微角砾岩则可能与地震断层作用引起的超碎裂岩化或持续大位移断裂过程有关^[9,19]。本文研究对象的野外构造联系、显微构造、岩石化学和Raman光谱分析结果表明,在大别山、贺兰山等地发现的网脉状微角砾岩成因与上述过程不同,是结晶岩石原地快速破裂的产物。其中大量碎粉状或非晶质化隐晶基质的存在,无疑与瞬间出现的巨大能量有关。其性质和展布规模可能意味着曾经发生了无主断层位移的地震事件。

露头观察没有发现网脉状微角砾岩与主要断层位移的直接联系。在大别山东麓详细的断裂构造和断层岩石的研究表明^[15],主要出现在完整二长花岗质结晶岩石中的网脉状微角砾岩,是郯庐断裂早期在地壳一定深度上的断裂作用,因岩性差异出现韧性剪切和脆性破裂共存的“二相变形”阶段的产物。在长英质地壳的韧-脆转换深度上,发生在石英支撑岩石中的韧性剪切位移导致相邻长石支撑岩石中的应力积累和脆性破裂。因此,出现在完整二长花岗质结晶岩石中的网脉状微角砾岩与近地表条件下脆性郯庐断裂无直接联系。尽管如此,我们目前仍然不清楚,在这些没有显著位移、又未与主断层勾通的破裂中,微角砾岩从何而来?大量隐晶基质物质从何而来?完整的结晶围岩又怎么在其中被“粉碎”或被非晶质化的?这些问题仍然须要开展进一步研究。

尽管目前对不同性质微角砾岩的成因机制作出了不同的解释,包括振动引起的岩石液化、冲击变质、破裂减压和高能粒子轰击产生的固态非晶质化或界面扩散反应(超晶格效应)^[20]等,进一步查明网脉状微角砾岩隐晶基质的性质和矿物晶体的破坏过程,将提高对高能地质灾变事件的理解。

致谢 野外工作得到安徽地质调查院和宁夏地质调查院的大力协助,Raman光谱和岩石化学分析得到北京大学和中国地震局地质研究所的支持,一并表示感谢。本工作受国家重点基础研究发展规划项目(G1999075511)和国家自然科学基金(批准号:40172077,40472114)资助。

参 考 文 献

- discussion of major problematics. *Earth-Sci Rev*, 1998, 43: 25~47 [\[DOI\]](#)
- Dressler B O, Reimold W U. Terrestrial impact melt rocks and glasses. *Earth-Science Reviews*, 2001, 56: 205~284 [\[DOI\]](#)
- Goltrant O, Leroux H, Doukhan J, et al. Formation mechanisms of planar deformation features in naturally shocked quartz. *Phys Earth Planet Inter*, 1992, 74: 219~240 [\[DOI\]](#)
- Stoffler D, Langenhorst F. Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: I. Basic observation and theory. *Meteoritics*, 1994, 29: 155~181
- Melosh H J. *Impact Cratering — a Geologic Process*. New York: Oxford University Press, 1989. 245
- Duff P McL D. Holmes' *Principles of Physical Geology*, 4th ed. London: Chapman and Hall, 1993. 791
- Schwarzman E C, Meyer C E, Wilshire H G. Pseudotachylyte from the Vredefort Ring, South Africa, and the origin of some lunar breccias. *Bull Geol Soc Am*, 1983, 94: 926~935
- Spray J G. Pseudotachylyte controversy: Fact or Friction? *Geology*, 1995, 23: 1119~1122 [\[DOI\]](#)
- Kenkmann T. Dike formation, cataclastic flow, and rock fluidization during impact cratering: An example from the Upheaval Dome structure, Utah. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 214: 43~58 [\[DOI\]](#)
- Lloyd G E, Knipe R J. Deformation mechanisms accommodating faulting of quartzite under upper crustal conditions. *Journal of Structural Geology*, 1992, 14: 127~143 [\[DOI\]](#)
- Lin A. Injection veins of crushing-originated pseudotachylyte and fault gouge formed during seismic faulting. *Engineering Geology*, 1996, 43: 213~224 [\[DOI\]](#)
- Ferguson J, Martin H, Nicolaysen L O, et al. Gross Bruggaros: A kimberlite-carbonatite volcano. *Physics and Chemistry of The Earth*, 1975, 9: 219~226
- Allaby A, Allaby M. *The concise Oxford Dictionary of Earth Sciences*. Oxford: Oxford Univ Press, 1996. 410
- 张家声,周春平,杨桂枝.古震源实体初步研究. *地震地质*, 1992, 14(2): 165~175
- 张家声,江来利,许建东.大别山东麓前寒武纪二长花岗质片麻岩抬升冷却过程的递进变形. *地质科学*, 2003, 38(1): 114~127
- Liu J, Dong S, Zhang J, et al. Origin, age and significance of pseudotachylites from the eastern Dabie Shan orogenic belt, China. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(1): 52~60
- Philpotts A R. Origin of pseudotachylites. *American Journal of Science*, 1964, 262: 1008~1035
- 张进江,刘树文,郑亚东,等.小秦岭拆离断层假熔岩的Raman光谱分析及其成因机制. 1998, *中国科学, D辑*, 28(2): 170~174
- Curewitz D, Karson J A. Ultracataclasis, sintering, and frictional melting in pseudotachylites from East Greenland. *J Struct Geol*, 1999, 21(7): 1693~1713 [\[DOI\]](#)
- Jankowski A F, Sandoval P, Hayes J P. Superlattice effects on solid-state amorphization. *NanoStructured Materials*, 1995, 5(5): 497~503 [\[DOI\]](#)

(2004-08-13 收稿, 2004-11-25 收修改稿)

1 Reimold W U, Miller R McG. Exogenic and endogenic breccias: A