

湘中锡矿山矿区与成矿有关的角砾岩及其形成机制

刘守林¹⁾, 彭建堂^{1,2)}, 胡阿香¹⁾, 林芳梅¹⁾, 李玉坤¹⁾, 伍华进¹⁾

1) 中南大学 地球科学与信息物理学院, 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙, 410083;

2) 中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳, 550002

内容提要: 湘中锡矿山铋矿床的角砾岩广泛发育, 可以分为同生角砾岩、古岩溶角砾岩、断层角砾岩、液压致裂角砾岩等类型。本文主要对与成矿有关的角砾岩进行了深入研究, 在详细的野外调研与定性研究基础上, 应用分形几何的定量描述方法, 确定了其角砾颗粒大小分布维数 D_s 和形态分布维数 D_f 以及 D_l 等参数, 并在此基础上, 探讨了该区角砾岩的形成机制。研究表明, 与矿有关的角砾岩主要可分为两类: 方解石胶结的角砾岩和硅质胶结的角砾岩; 含矿方解石胶结弱硅化灰岩角砾主要为液压致裂的物理成因, 而含矿硅质胶结的强硅化灰岩角砾既有物理致裂作用, 又伴有热液参与的化学溶蚀作用; 液压致裂是锡矿山矿区角砾岩形成的重要机制。

关键词: 角砾岩; 分形几何; 液压致裂; 锡矿山铋矿; 湘中

自然界中角砾岩分布广泛, 80% 以上的金属热液矿床中发育有角砾岩 (Laznicka, 1988); 由于角砾岩具有良好的孔隙度和渗透率等特征, 能够为成矿流体运移提供通道和为成矿物质沉淀富集提供充足的空间 (Phillips, 1972; Sibson et al., 1986; Laznicka, 1989; Jébrak, 1997; 张洪涛等, 1991; 汪劲草等, 1999, 2000, 2001; 王国富等, 2002; 张会琼等, 2012; 李真真等, 2014), 因此, 角砾岩一直是矿床地质学家研究的热点之一。无需讳言, 在过去的很长一段时间内, 人们对角砾岩的研究大多数是基于野外观察和简单的定性描述 (真允庆, 1976), 对角砾岩的分类也主要是依据其野外地质特征, 缺乏一个定量的标准。因此, 受研究者自身认识的影响, 人们对角砾岩的描述难免带有主观色彩, 这往往导致人们对同一角砾岩的认识存在很大争议。直到上世纪末, Jébrak (1997) 分析了脉型矿床中的角砾岩化过程, 并在前人工作的基础上, 用分形理论对角砾岩的成因机制进行了较系统的探讨。国内肖龙和王方正 (2002)、毛政利等 (2009) 亦应用分形几何方法, 分别对我国部分地区的金矿和铜矿中的角砾岩进行了定量研究。

锡矿山铋矿床产于湘中碳酸盐盆地的中央, 是世界上最大的铋矿床。自 20 世纪 20 年代以来, 人

们对该矿床进行了大量的研究, 如矿床地质特征 (Tegengren, 1921; 蒋永年, 1963)、矿床成因 (谌锡霖等, 1983; Fan Delian et al., 2004)、矿物岩石学特征 (彭志忠, 1960; 何明跃、楼亚儿, 2002; 何明跃、王濮, 2002)。之后, 随着地球化学这门学科的发展与兴起, 地质工作者还对锡矿山铋矿床的元素地球化学 (唐建武等, 1999; 彭建堂等, 2004; 林芳梅等, 2015)、同位素地球化学 (杨照柱等, 1998; 彭建堂等, 2001; 彭建堂和胡瑞忠, 2001; Yang Dongsheng et al., 2006)、成矿年代学 (Hu Xiongwei et al., 1996; 彭建堂等, 2002; Peng Jiantang et al., 2003) 等进行了系统的研究, 但是, 目前为止人们对矿区角砾岩关注非常少。事实上, 破碎带构造及其对应的角砾岩在锡矿山矿区十分发育, 其分布范围延展十余平方千米 (胡雄伟, 1995)。野外地质特征显示, 硅化破碎带角砾岩是该区直接的容矿构造, 因此, 该区角砾岩与铋成矿关系密切。尽管如此, 前人对锡矿山矿区角砾岩的关注并不多, 少量已有的研究也主要是基于野外观察的定性描述, 对其成因认识也存在很大争议。如黄任军 (1992)、文国璋等 (1993) 提出该区角砾岩属古岩溶成因; 而胡雄伟 (1995) 则认为该区角砾岩为与褶皱或断裂作用有关的构造角砾岩。本文拟在前人已有工作的基础上, 对锡矿山矿区的角砾

注: 本文为国家自然科学基金资助项目 (编号: 41272096, 41473043)、国土资源部公益性行业科研专项课题 (编号: 200911007) 的成果。

收稿日期: 2015-06-25; 改回日期: 2016-11-11; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.01.007

作者简介: 刘守林, 男, 1989 年生。硕士研究生。矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: liushoulin89jim@126.com。通讯作者: 彭建堂, 男, 1968 年生。博士、教授。主要从事矿床地球化学研究。Email: jtpeng@126.com。

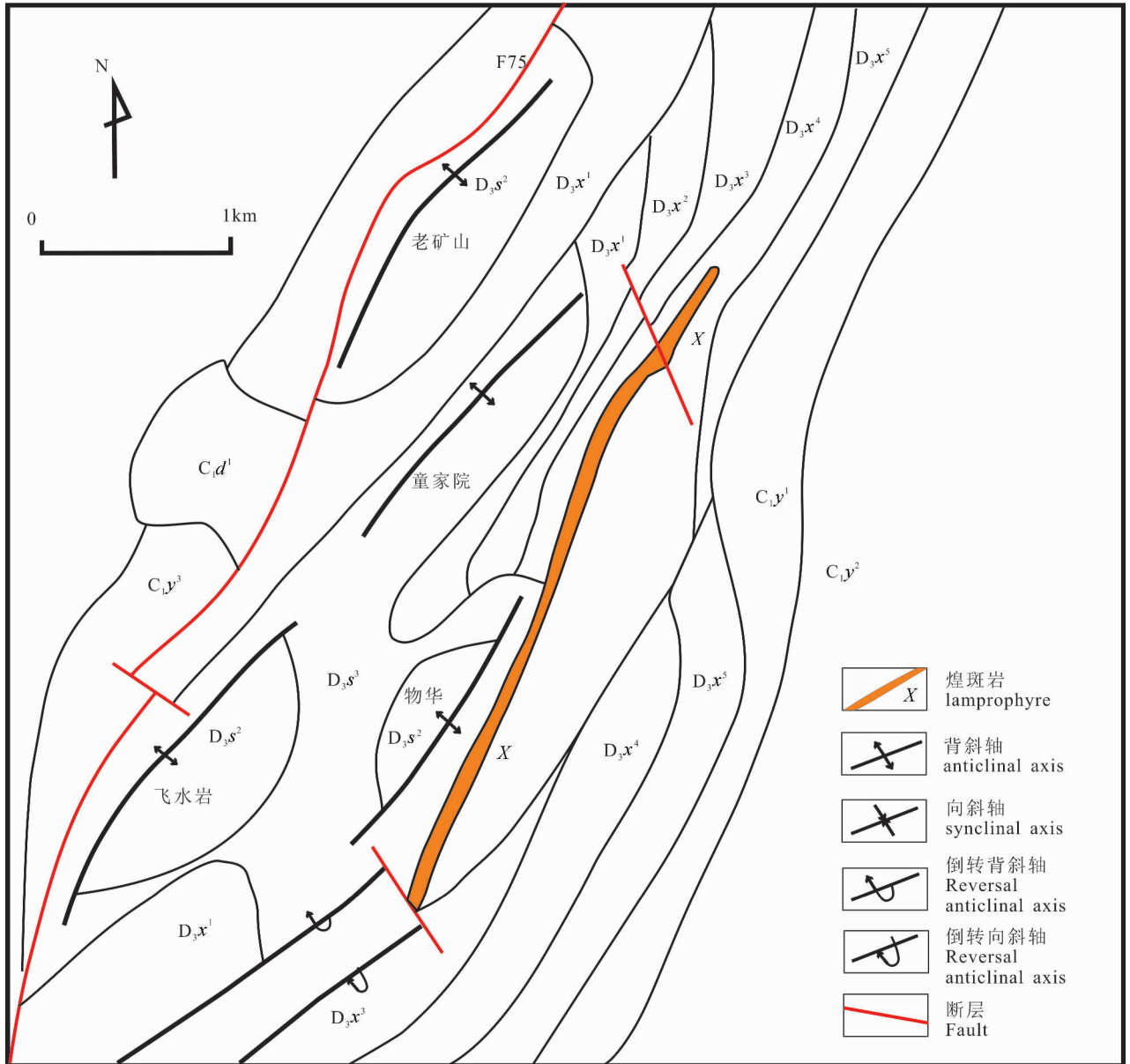


图 1 湘中锡矿山锑矿床地质图(据刘焕品等,1985, 修改)

Fig. 1 Geological map of the Xikuangshan Sb deposit, Central Hunan Province(modified after Liu Huanpin et al. ,1985#)

C_1d^1 —下石炭统大塘组石凳子段;下石炭统岩关组: C_1y^3 —刘家塘段, C_1y^2 —孟公坳段, C_1y^1 —邵东段;上泥盆统锡矿山组: D_3x^5 —欧家冲段, D_3x^4 —马牯脑段, D_3x^3 —泥塘里段, D_3x^2 —兔子塘段, D_3x^1 —长龙界段;上泥盆统余田桥组: D_3s^3 —上段, D_3s^2 —中段

C_1d^1 —Shidengzi Member of the Lower Carboniferous Datang Formation;The Lower Carboniferous Yanguan Formation: C_1y^3 —Liujiatang Member, C_1y^2 —Menggong'ao Member, C_1y^1 —Shaodong Member;The Upper Devonian Xikuangshan Formation: D_3x^5 —Oujiachong Member, D_3x^4 —Magunao Member, D_3x^3 —Nitangli Member, D_3x^2 —Tuzitang Member, D_3x^1 —Changlongjie Member;The Upper Devonian Shetianqiao Formation: D_3s^3 —Upper Mmember, D_3s^2 —Middle Member

岩进行系统的野外调研,并利用分形几何方法对本区角砾岩进行定量研究,试图揭示角砾岩的成因和形成机制,这将有助于深化对锡矿山锑矿的矿床成因和该区巨量矿石堆积过程的认识。

1 矿床地质特征

矿区出露地层为下石炭统的岩关组和大塘组、上泥盆统的锡矿山组和余田桥组,岩性以灰岩为主,夹少量页岩、泥质岩和粉砂岩。整个矿区受复式背

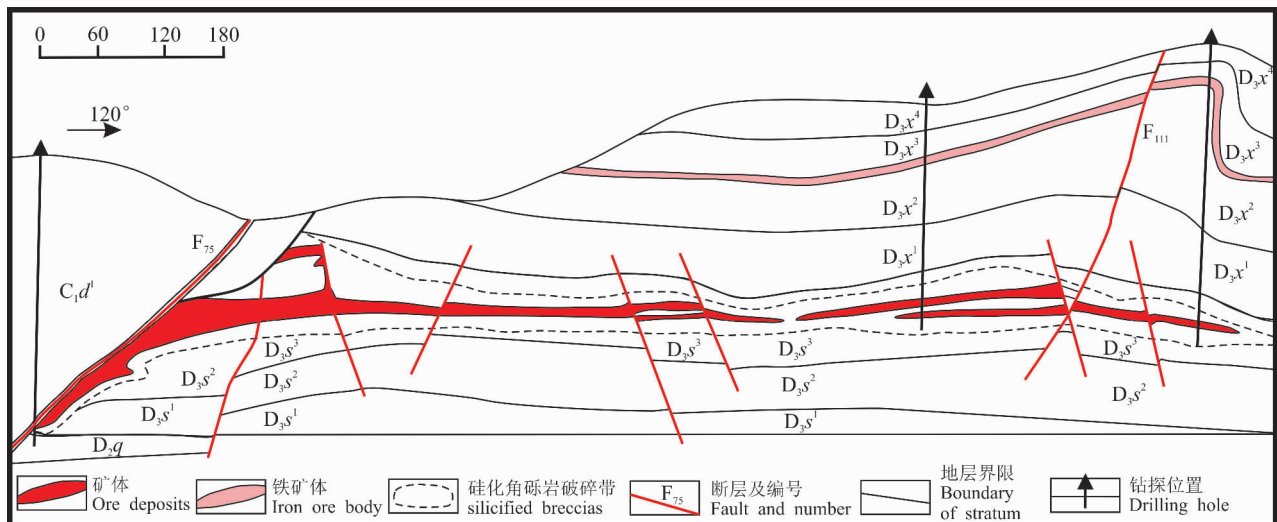


图 2 湘中锡矿山锑矿床地质剖面图(据锡矿山矿务局资料)

Fig. 2 Geological section of the Xikuangshan antimony deposit, Central Hunan Province

(modified after Xikuangshan Mining Bureau)

C_1d^1 —下石炭统大塘组石凳子段;上泥盆统锡矿山组; D_3x^4 —马牯脑段, D_3x^3 —泥塘里段, D_3x^2 —兔子塘段, D_3x^1 —长龙界段;

上泥盆统余田桥组; D_3s^3 —上段, D_3s^2 —中段, D_3s^1 —下段; D_2q —中泥盆统棋梓桥组

C_1d^1 —Shidengzi Member of Lower Carboniferous Datang Formation; The Upper Devonian Xikuangshan Formation; D_3x^4 —Maguanao Member, D_3x^3 —Nitangli Member, D_3x^2 —Tuzitang Member, D_3x^1 —Changlongjie Member; The Upper Devonian Shetianqiao Formation; D_3s^3 —Upper Mmember, D_3s^2 —Middle Member, D_3s^1 —Lower Member; D_2q —Qiziqiao Formation of Middle Devonian

斜构造控制,其西侧受大断裂 F_{75} 限制(图 1)。矿区岩浆活动较弱,仅在其东侧有一条 NNE 向的煌斑岩脉出露。赋矿围层主要为泥盆系的余田桥组(D_3s),其次为棋梓桥组(D_2q) (谌锡霖,1978;刘焕品等,1985)(图 2)。

锡矿山锑矿包括老矿山、童家院、飞水岩、物华四个矿区,该区锑矿的分布均受这四个雁行排列的短轴次级背斜控制。矿体形态较为简单,以层状或似层状为主(图 2),但在深部往往有不规则状矿体产出。矿石类型主要有石英—辉锑矿型、石英—方解石—辉锑矿型和方解石—辉锑矿型等三种。矿物共生组合亦较为简单,金属矿物主要为辉锑矿,辉锑矿常呈浸染状、放射状、针状产出。脉石矿物主要为石英和方解石,局部可见少量萤石、重晶石和滑石等。围岩蚀变主要有硅化、碳酸盐化,局部见萤石化和重晶石化。其中硅化与矿化关系密切,所有锑矿体均产于硅化灰岩中(图 2)。

2 矿区角砾岩基本类型

锡矿山矿区角砾岩十分发育,在南矿(飞水岩、物华)和北矿(老矿山、童家院)均有分布,其分布范

围达十余平方千米,规模之大,十分罕见(胡雄伟,1995)。该区角砾岩的种类也较复杂,有同生角砾岩、古岩溶角砾岩、断层角砾岩、液压致裂角砾岩等类型。但该区与成矿有关的角砾岩主要是硅质胶结的角砾岩和方解石胶结的角砾岩,前者主要与早期成矿作用(石英—辉锑矿型矿石)有关,而后者主要与晚期成矿作用(方解石—辉锑矿型矿石)有关。这两种与矿有关的角砾岩在纵向空间上,具有明显的分带现象,浅部以硅质胶结的角砾岩为主,而深部则以方解石胶结的角砾岩为主。北矿的开采深度较浅,以硅质胶结的角砾岩居多,如在童家院矿区,矿体均赋存于余田桥组的硅化破碎带角砾岩层;而在南矿飞水岩矿区,浅部以硅质胶结的角砾岩为主,深部则以方解石胶结的角砾岩为主。在横向空间上,越靠近 F_{75} 断层硅质胶结的角砾岩越发育,远离 F_{75} 这种角砾岩趋于减少直至消失。

2.1 硅质胶结角砾岩

在北矿 1~5 中段和南矿的浅部中段硅质胶结角砾岩十分发育(图 3a—d)。

在剖面上,角砾岩发育为层状、似层状或带状等。角砾的成分较单一,与围岩成分相同,主要为强

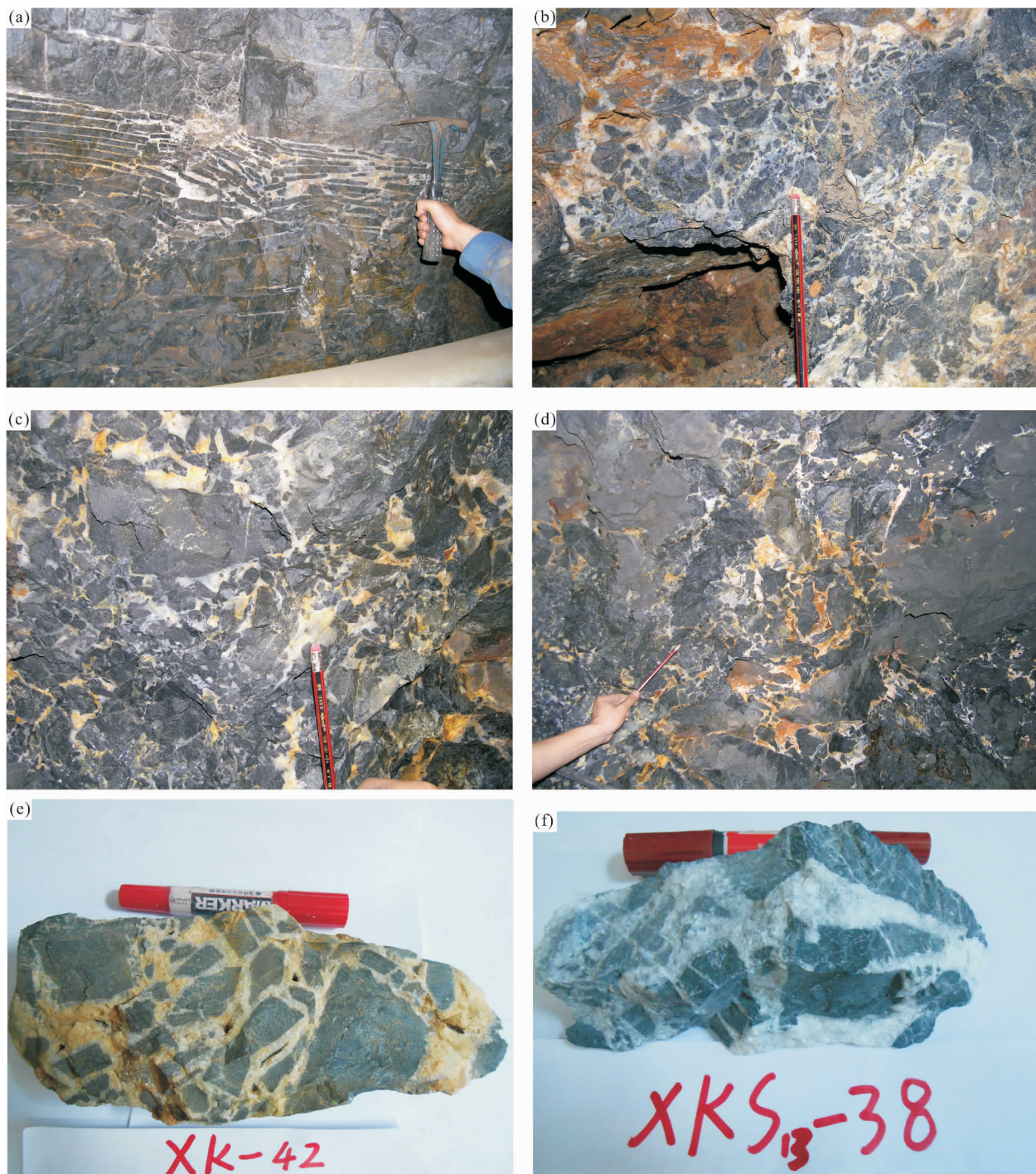


图3 湘中锡矿山矿床硅质胶结的角砾岩

Fig. 3 The silica-cemented breccia in the Xikuangshan deposit, Central Hunan Province

(a)北矿3中段4021采场似层状硅化灰岩角砾;(b)北矿3中段4115采场破碎带硅化灰岩角砾;(c)、(d)南矿1中段62采场破碎带硅化灰岩角砾;(e)、(f)硅质辉锑矿胶结硅化灰岩角砾

(a)Layered silicified limestone breccias, at No. 4021 stope on No. 3 Level, in north mine;(b)Silicified limestone breccias of fracture zone, at No. 4115 stope on No. 3 Level, north mine;(c), (d)Silicified limestone breccias of fracture zone at No. 62 stope in No. 1 Level, south mine;(e), (f)Silica—stibnite cemented silicified limestone breccias

硅化灰岩,呈灰黑色,角砾大小不等,基本在0.1~4cm之间,部分颗粒可达40cm;角砾呈棱角状、次棱角状、长条状及不规则状等;部分角砾边界被硅化溶

蚀,边界变得模糊,可见明显的锑矿化(图3c、d)。角砾被硅质胶结,角砾之间无接触,呈游离状分布;角砾整体与围岩的接触性较好,基本没有发生位移

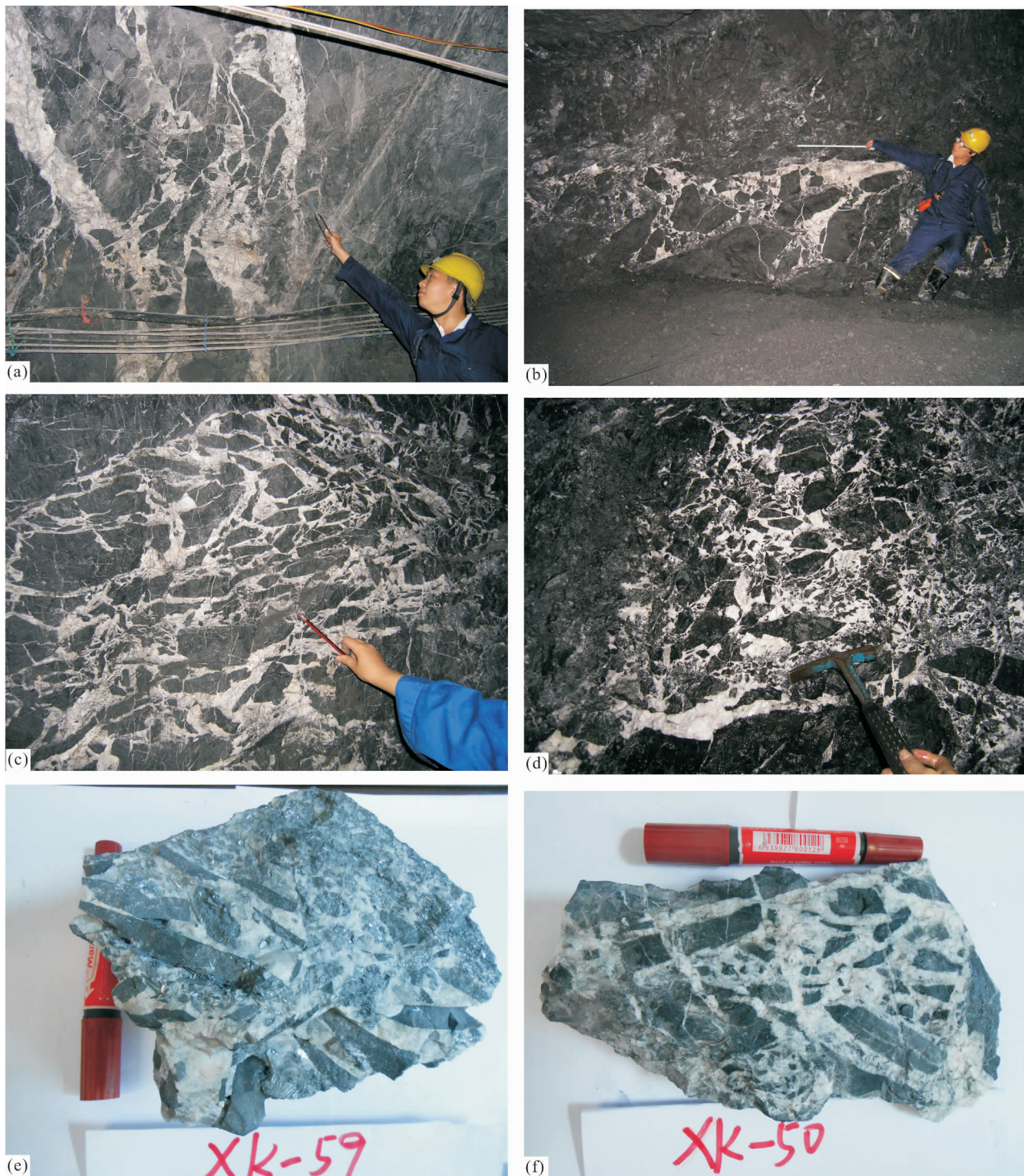


图 4 湘中锡矿山矿区方解石胶结的角砾岩

Fig. 4 The calcite-cemented breccia in the Xikuangshan deposit, Central Hunan Province

(a) 方解石脉中的弱硅化灰岩角砾,南矿 27 中段;(b) 方解石胶结的弱硅化灰岩角砾,南矿 25 中段 77 采场;(c) 方解石胶结弱硅化灰岩角砾呈网状,南矿 25 中段;(d) 方解石辉锑矿胶结灰岩角砾,南矿 9 中段;(e)、(f) 被方解石、辉锑矿胶结的角砾岩手标本

(a) Calcite-cemented weakly-silicified limestone breccias, No. 27 level, south mine;(b) Calcite-cemented weakly-silicified limestone breccias, No. 77 stope in 25 Level, south mine;(c) Network breccias cemented by calcite, No. 25 level, south mine;(d) Calcite—stibnite cemented breccias, No. 9 level, south mine;(e), (f) Hand specimen of calcite—stibnite cemented breccias

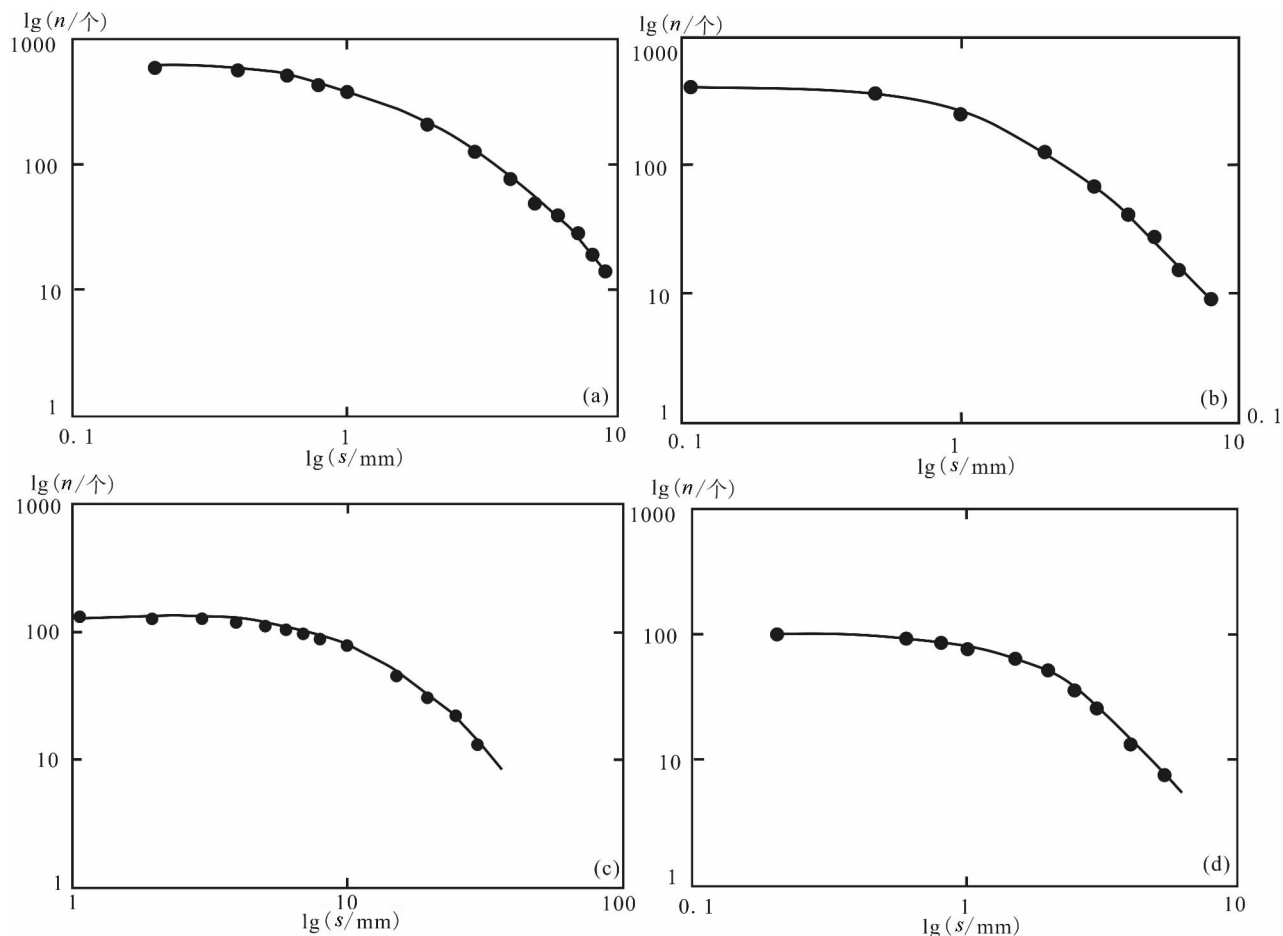


图5 湘中锡矿山矿区角砾颗粒大小分布图

Fig. 5 The size distribution of fragments in various breccias in the Xikuangshan deposit, Central Hunan Province

s —角砾粒径; n —大于某粒径的角砾累计个数

s —diameter of braccia; n —number of the braccia whose diameter more than a certain value

和旋转(图3a),角砾间具有良好的拼合性,显示其为原位破裂;角砾长轴方向大体一致呈定向排列,与整个似层状破碎带方向基本相同。角砾岩的厚度与似层状破碎带有关,破碎带规模越大,角砾岩发育越厚,角砾颗粒亦较粗大;从破碎带的中心到边缘,角砾分布具有明显的渐变性,越向边缘其定向性越好,位移量越小。

角砾岩手标本中,角砾为硅化灰岩,角砾呈棱角状、次棱角状,分选性极差,角砾具有拼接性;胶结物

主要为硅质(玉髓或石英),也可见含辉锑矿,甚至是石英和辉锑矿共同胶结,通常呈网脉状胶结硅质角砾,可见部分脉体具有穿插关系(图3e、f)。辉锑矿呈铅灰色,为长柱状或粒状晶形,解理面上有横纹,成团块状或放射集合体状产出。

2.2 方解石胶结角砾岩

方解石胶结的角砾岩在锡矿山各个矿区都有发育,特别是在南矿飞水岩矿区的深部9~27中段分布广泛。

表1 湘中锡矿山矿区角砾岩大小分维值

Table 1 The size fractal dimensions of fragments in various breccias in the Xikuangshan deposit, Central Hunan Province

序号	(a)	(b)	(c)	(d)
角砾岩类型	方解石胶结角砾岩	方解石胶结角砾岩	硅质胶结角砾岩	硅质(含矿)胶结角砾岩
产地地点	南矿25中段85穿脉	北矿3中段西沿石门处	北矿3中段2~6线通道	北矿3中段4115-2采场
D_s 维数值	1.497	1.473	1.524	1.665

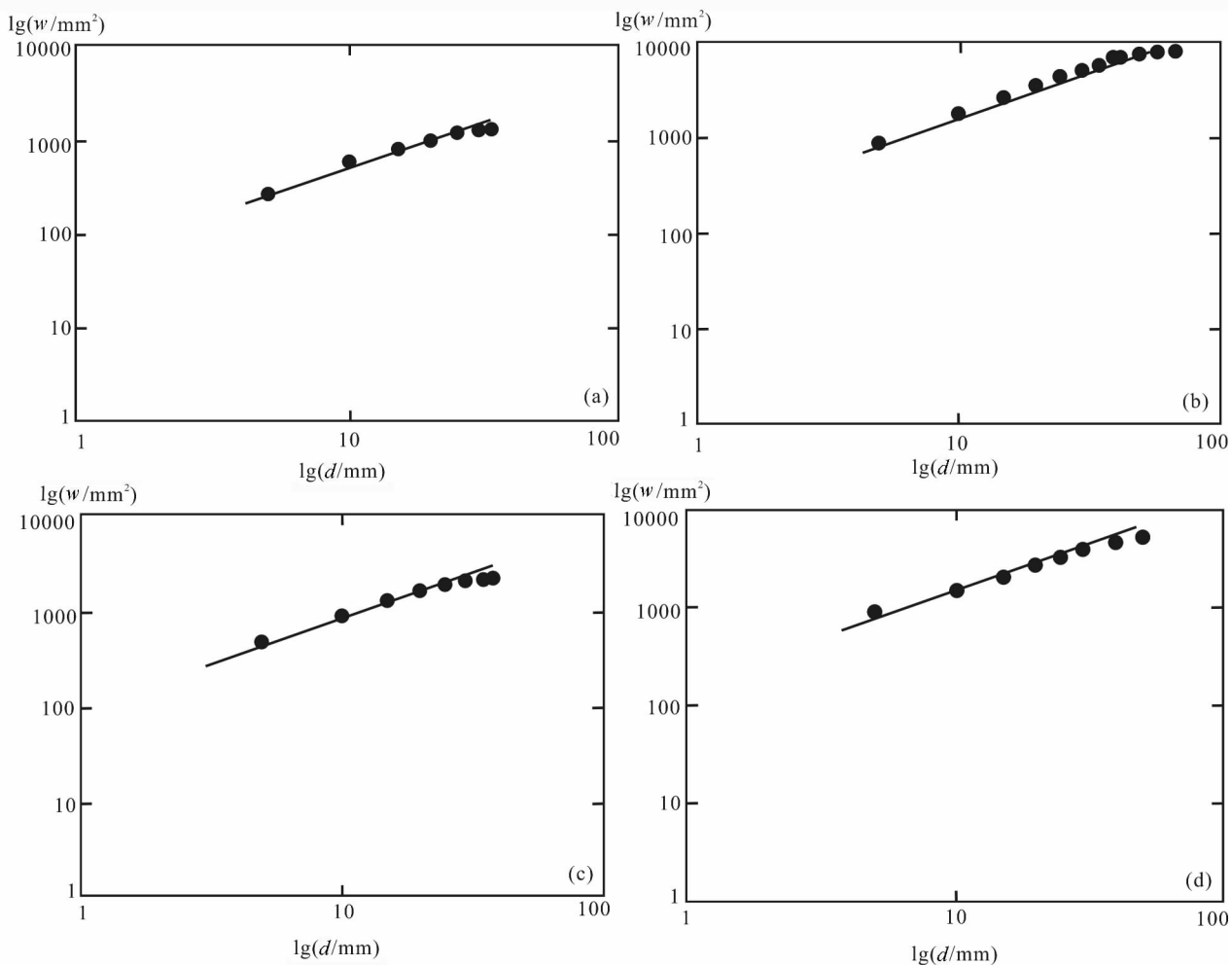


图 6 湘中锡矿山矿区角砾岩形态分布图

Fig. 6 The morphology fractal distribution of fragments in various breccias in the Xikuangshan deposit, Central Hunan Province
 d 为角砾长轴带宽; w 为该带宽面积

角砾岩产状多为倾斜或者近垂直产出,形态发育为层状、似层状或脉状(图 4a—d)。角砾岩中角砾成分单一,与围岩组成相同,为弱硅化的灰岩;角砾形态多呈棱角状、次棱角状和不规则状;角砾大小相差悬殊,粒径在 0.5 ~ 40cm 之间;角砾被方解石胶结,角砾之间无接触或呈点接触。角砾均为原地破碎,无明显位移,亦无旋转,从总体上观察,角砾之间拼接性较好,具有定向排列的特征,与围岩具有较

好的拼接性(图 4c、d)。角砾岩间方解石脉发育,粗脉两侧发育细脉,局部可见锑矿化,胶结物组分主要为方解石,也有部分与石英同生胶结,一般方解石晶形发育较好,颗粒粗大。角砾岩厚度受破碎带控制,灰岩破碎带规模越大,角砾岩越厚,且其延伸与破碎带方向一致。

在角砾岩手标本中,角砾成分为弱硅化灰岩,角砾颗粒大小 1 ~ 7cm,多为棱角状、长柱状及针柱状,

表 2 湘中锡矿山矿区角砾岩形态分维值

Table 2 The morphology fractal dimensions of various breccias in the Xikuangshan mining district, Central Hunan Province

序号	(a)	(b)	(c)	(d)
角砾岩类型	方解石胶结角砾岩	硅质胶结角砾岩	方解石(含矿)胶结角砾岩	硅质(含矿)胶结角砾岩
产地地点	南矿 25 中段 85 穿脉	北矿 3 中段 4115 采场	南矿 23 中段 77 采场	北矿 5 中段 6105 采场
D_r 维数值	1.132	1.134	1.234	1.199

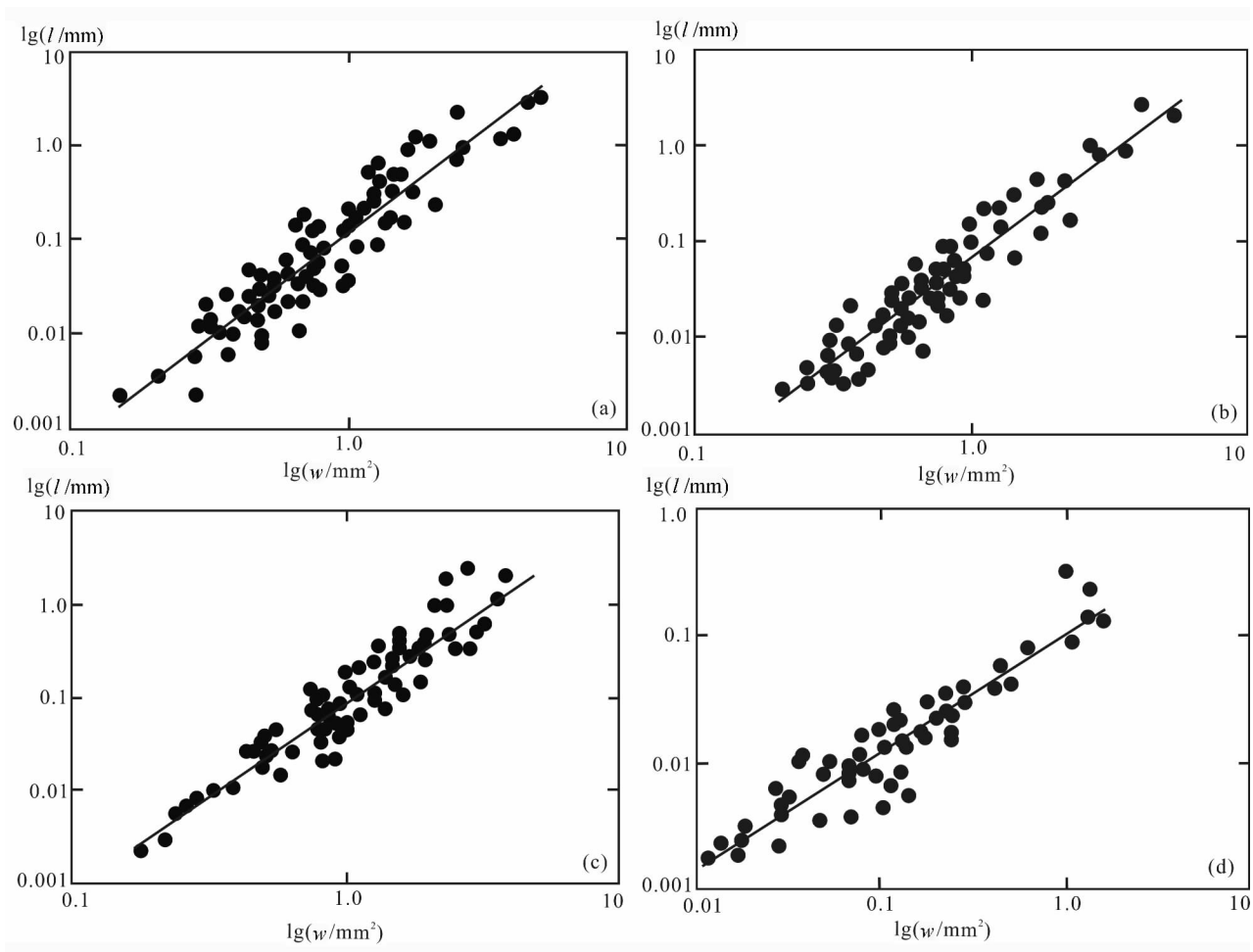


图 7 湘中锡矿山矿区角砾岩周长—面积形态分布图

Fig. 7 The perimeters—area morphology fractal distribution of various fragments in breccias in the Xikuangshan deposit, Central Hunan Province

l —角砾周长; w —该角砾的面积

l —Perimeter of braccia; w —area of braccia

角砾定向排列。胶结物主要为方解石,也有少量石英或玉髓颗粒(图 4e、f)。由于生长空间较大,胶结物方解石的晶形、解理发育较好,呈乳白色或无色透明,为片状或板状,方解石与角砾之间界线清晰。方解石细脉切穿灰岩角砾,沿裂隙呈网脉状胶结角砾。方解石胶结物中常见锑矿化,辉锑矿呈铅灰色,针状

或者星点状产出,其晶体自形程度和矿物粒径大小明显不同于硅质胶结角砾岩中的辉锑矿。

角砾岩中角砾多呈棱角状、次棱角状,无旋转和位移,角砾具有一定的可拼接性,角砾与胶结物之间的界限清晰,组成成分简单。胶结物为热液成因的充填物,如石英(玉髓)、方解石等,具有液压致裂

表 3 湘中锡矿山矿区角砾岩周长—面积分维值

Table 3 The perimeter—area morphology fractal dimensions of various fragments breccias in the Xikuangshan deposit, Central Hunan Province

序号	(a)	(b)	(c)	(d)
角砾岩类型	方解石胶结角砾岩	方解石胶结角砾岩	硅质胶结角砾岩	硅质(含矿)胶结角砾岩
产出位置	南矿 25 中段 85 穿脉	北矿 3 中段西沿石门处	北矿 3 中段 2~6 线通道	北矿 3 中段 4115-2 采场
DI 维数值	1.664	1.501	1.754	1.854

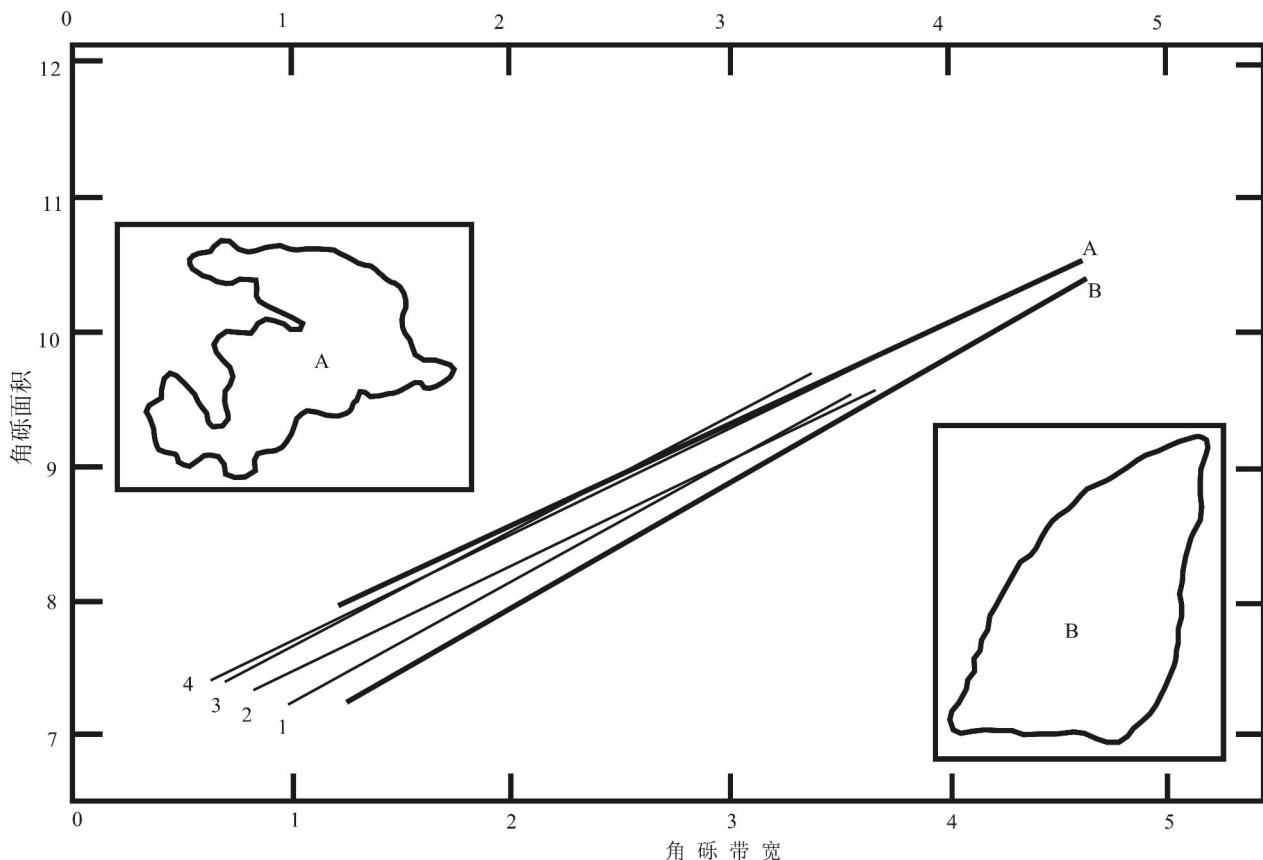


图 8 湘中锡矿山矿区角砾岩形态分布特征图解 (Jébrak, 1997)

Fig. 8 The fractal dimension D_r of the morphology of particle in the Xikuangshan mining district, Central Hunan Province (Jébrak, 1997)

A—澳大利亚 Olympic Dam 矿区化学角砾岩; B—加拿大 West Rouyn 矿区液压致裂角砾岩; 1—方解石胶结的角砾岩; 2—方解石(含矿)胶结的角砾岩; 3—硅质胶结的角砾岩; 4—硅质(含矿)胶结的角砾岩

A—Chemical breccias in Olympic Dam, Australia; B—Hydraulic fracturing breccias in West Rouyn, Canada; 1—Calcite-cemented breccia; 2—Calcite-cemented (stibnite-bearing) breccia; 3—Silica-cemented breccia; 4—Silica-cemented (stibnite-bearing) breccia

角砾岩的野外特征 (Phillips, 1972; Jébrak, 1997; 李建威和李先福, 1997)。另外, 汪劲草等 (2000) 认为含矿液压致裂角砾岩的角砾组成单一, 原位角砾亦呈棱角状或次棱角状, 胶结物也多为外来热液流体沉淀结晶 (如方解石或石英)。因此, 我们初步认为锡矿山矿区硅质胶结角砾岩和方解石胶结角砾岩可能为液压致裂成因。

3 角砾岩的分形特征及其分析

3.1 角砾的分形参数及确定方法

角砾岩中角砾的大小分布和形态复杂程度可以采用不同的参数来描述, 目前角砾岩分形定量研究中最常用的两个参数为角砾形态分形维数 D_r 和砾径分布分维数 D_s (Jébrak, 1997)。前者用于标定角砾岩中角砾的形态特征, D_r 值越大, 表明颗粒边界

越复杂, 利用该值可鉴别角砾究竟是化学作用还是物理 (机械) 作用所致; 后者表示角砾颗粒的大小分布特征, D_s 值越大, 表明颗粒大小差异性很大, 意味着岩石发生角砾化过程中需要的能量越大。

对于角砾颗粒粒径分布维数 D_s 的测量, 统计角砾岩在不同等级范围内的颗粒累计量。然后, 用粒径和其范围内的颗粒数作对数分析图, 其拟合曲线斜率即为角砾岩颗粒大小分布的分维值 D_s 。前人对 D_r 值的测量方法有很多种, 如 Mandelbrot (1985, 1986) 用不同尺度去测量分形目标物体的边界长度, 但该方法偶然误差和人为误差都较大; 而另一种更为有效的方法是欧几里德 (Euclidean) 距离填图法。后者是根据角砾的边界形态, 然后划分出不同的带宽, 分别测量不同带宽的角砾面积, 最后将带宽和面积作对数图。由图求得拟合直线斜率 r , 从而

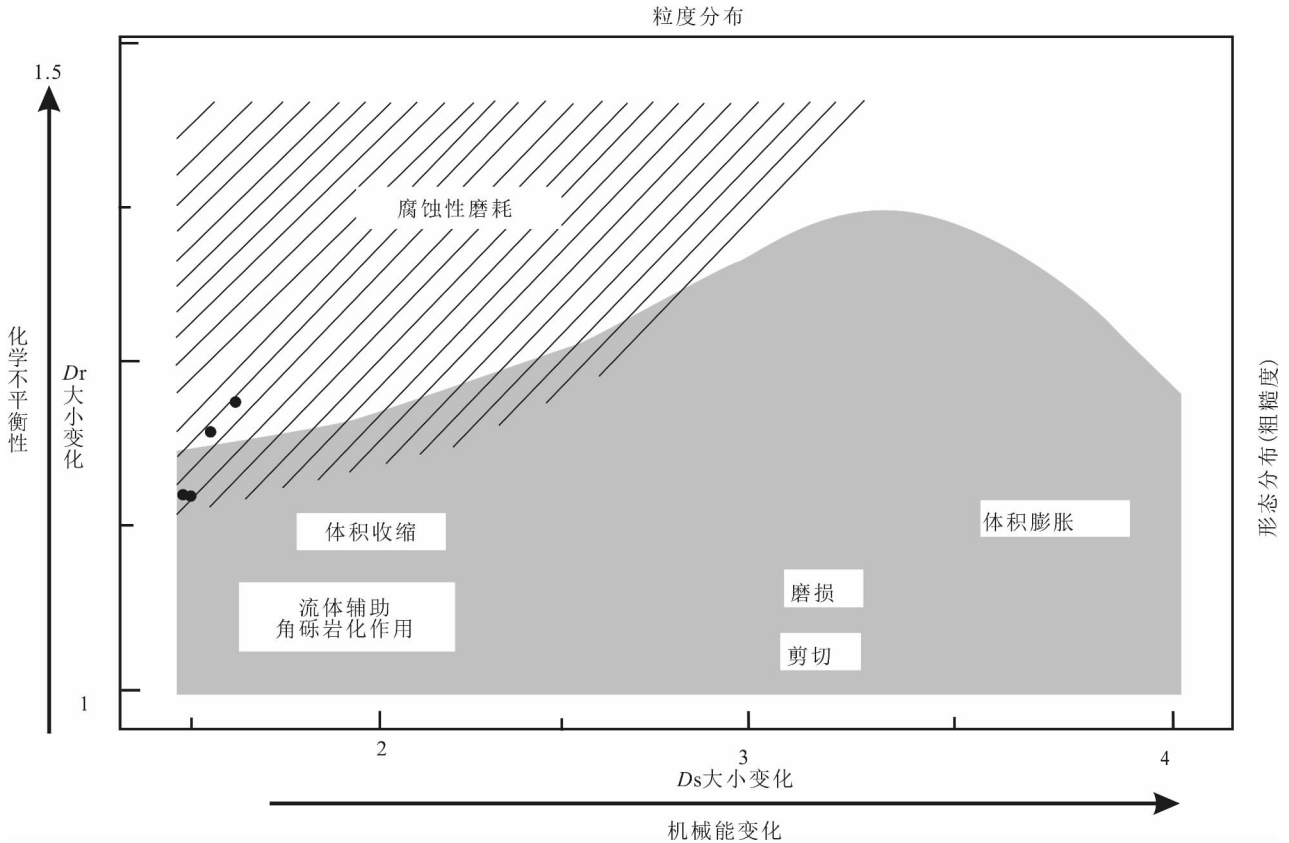


图 9 湘中锡矿山矿区角砾岩的 D_r — D_s 关系图(Jébrak, 1997)

Fig. 9 D_s vs. D_r diagram for breccias in the Xikuangshan mining district, Central Hunan Province(Jébrak, 1997)

求得分形维度值 $D_r = 2 - r$ 。在本次研究中,我们还尝试应用分形维数 D_1 ,即角砾的周长与面积的曲线斜率分维值。前人已有的研究表明, D_1 值在一定程度上也可以反应物体形态的复杂性。如 Kent 和 Wong(1982)应用该方法调查了加拿大安大略地区不同周长的湖泊分布,说明了湖泊周长与其面积大小没有必然的联系,但与其边界复杂程度有关;Hentschel 和 Procaccia(1984a, 1984b)亦确认了英国的曲折海岸线分维值比圆形岛屿的周长分维值要大。因此,周长与面积的分维值 $D_1 = 3 - l$ (l 为拟合直线斜率值)应用于分形目标物体的边界复杂性研究是可行的。当我们将湖泊或海岛的比例缩小数千倍之后,投影到平面上亦相当于角砾的大小。所以,对于角砾边界复杂性定量分析我们运用周长与面积分维值亦是值得尝试的。

3.2 角砾岩的分形特征及其分析

本次主要借助 D_s 、 D_r 和 D_1 等参数,对锡矿山矿区不同类型的角砾岩进行分形研究,试图研究该区与矿有关角砾岩的角砾大小分布和形态分布特征,

并进一步推断这些角砾岩形成机制。由图 5 和表 1,可以看出锡矿山矿区角砾岩中角砾大小分布特征,不同角砾岩,其描述角砾大小分布的参数 D_s 存在明显的差异。方解石胶结弱硅化灰岩角砾的 D_s 值为 1.5 左右,硅质胶结强硅化灰岩角砾的 D_s 值偏大为 1.5 以上,特别是含矿硅质胶结角砾的 D_s 值最大, D_s 值大于 1.6,这说明硅质胶结的强硅化灰岩角砾,在形成过程中需要的物理能量较大,而方解石胶结的角砾岩只需要中等能量就能形成。

由图 6 和表 2,可以看出锡矿山矿区角砾岩中角砾形态分布特征,不同类型角砾岩其角砾的形态维数 D_r 值有所差异,方解石胶结的与不含石英胶结的硅化灰岩角砾的 D_r 值略大于 1.1,表明这些角砾岩中角砾的形态较为简单,角砾边界较清晰。因此,这些角砾岩的形成机制应以物理作用为主。而含矿硅质胶结的角砾或含矿方解石胶结角砾,其 D_r 值变化较大, D_r 值为 1.2 左右,指示这些硅化灰岩角砾的形态较复杂,很可能受到化学溶蚀作用的影响。

由图 7 和表 3 得出,硅质胶结的角砾,其 D_1 值明显大于被方解石胶结的角砾,说明硅质胶结的硅化灰岩角砾的形态复杂程度,明显高于方解石胶结的角砾岩;含矿角砾明显大于不含矿角砾。这与前面利用 D_r 参数得到的结论相吻合。

前人的研究表明,利用角砾岩中角砾的面积和宽度或 D_s 与 D_r 之间的相互关系,可以有效区分不同成因的角砾岩(Jébrak, 1997)。角砾岩成因较为复杂,大多数为物理液压致裂作用与化学溶蚀作用的叠加成因(图 8、图 9),相对而言,锡矿山方解石胶结的角砾岩趋于类似加拿大 West Rouyn 矿区的液压致裂角砾岩(图 8B),其成因应以物理致裂为主;而锡矿山硅质胶结的角砾岩与澳大利亚奥林匹克坝矿区角砾岩较为类似,趋于化学溶蚀角砾岩,反映矿区硅化灰岩经历前期液压致裂破碎之后,又受到后期热液流体的化学溶蚀作用,从而使得角砾边界形态变得复杂(Jébrak, 1997)(图 8A)。

因此,锡矿山矿区的角砾形成,应是以物理的液压致裂作用为主,且伴有热液化学溶蚀作用,呈现多期液压致裂特征。

由 D_r — D_s 关系图可知,锡矿山矿区角砾岩的形成必定伴有流体辅助角砾岩化作用(图 9)。辉锑矿或石英胶结的硅化灰岩角砾的 D_r 值最大,高于硅质胶结强硅化灰岩角砾 D_r ,而后者又明显高于被方解石胶结的弱硅化灰岩角砾,反映了其物理机械能量变化也是由强变弱。同时,根据角砾岩的磨蚀性磨蚀程度分析,其化学反应强度变化由强到弱依次为,含矿硅质胶结的角砾岩、硅质胶结的角砾岩、方解石胶结的角砾岩(图 9)。同时,说明了早期的锑矿化与早期硅质胶结的液压致裂角砾岩为同期产物,反映角砾岩化过程中,流体辅助与化学溶蚀作用对成矿起到了积极作用。

4 含矿角砾岩形成的讨论

沉积盆地中不仅可以形成石油和天然气等有机矿产,盆地中的热液流体活动也可以导致大量金属的沉淀富集(苏文超, 2002)。前人的研究表明,超压流体在沉积盆地中是普遍存在的(Rehn, 1972),很多热液矿床的形成均与盆地中的这种超高压流体有关,如密西西比河谷型铅锌矿(Fertl, 1972)、陕西双龙金矿(汪劲草等, 2001)、金顶铅锌矿(池国祥等, 2011)等。高压流体的形成多种因素的影响,如流体的热膨胀(Hunt, 1979)等。

锡矿山矿区与成矿有关的两种角砾岩都是液压

致裂的产物,但这两种角砾岩在空间产出位置、角砾的成分、胶结物的种类、角砾形成应力状态及所需的能量大小等方面均存在明显差异,表明该区不同类型的液压致裂角砾岩很可能是不同期次高压流体作用的产物。前人的研究也发现,锡矿山矿区确实存在早、晚两期大规模流体的作用(彭建堂等, 2002):早期成矿约为 156 Ma,主要形成石英—辉锑矿型矿石;晚期成矿发生于 124Ma 左右,形成方解石—辉锑矿型矿石。因此,该区两种不同类型含矿角砾岩(硅质胶结角砾岩和方解石胶结角砾岩)应该分别与早、晚两期高压成矿流体活动有关。

前期含硅质的热液流体,与围岩发生反应交代其中钙质,形成大范围的强硅化灰岩,硅化灰岩具有较高致密性、低渗透性和强脆性。早期成矿流体沿裂隙通道侵入上升,到达矿区浅部中段强硅化灰岩下部,由于低渗透性灰岩阻挡,流体压力在硅化灰岩底部进一步升高,压力不断在流体前缘聚集,流体和围岩压力之间产生应力不平衡,当 $P_f \geq \sigma_3 + R_1$ (P_f 为流体压力, σ_3 为岩石最小主应力, R_1 为岩石最薄弱处岩石张性强度)(李建威等, 1997)时硅化灰岩发生致裂。由于早期硅化灰岩岩石脆性较高,角砾更加易于破碎,角砾岩化程度较高,因此, D_s 值较大。岩石破裂之后压力得到释放,含矿物质开始在裂隙中沉淀和富集;同时,流体与围岩之间发生较强化学活动,伴随热液硅化灰岩角砾的化学溶蚀作用加强,破碎的硅化灰岩角砾边界形态变得复杂,从而 D_r 和 D_1 维数值较大。由于早期高压流体各方向的应力差较小,瞬间释放的压力致使硅质灰岩角砾破碎方向多近于水平(图 3a),并且各方向都有发育(图 3b—d)。压力持续增加驱使热液流体在岩脉墙中压力不断释放,裂隙不断地向前延伸和扩张,矿物质继续沉淀和胶结,形成早期石英—辉锑矿型矿体。

晚期成矿流体的上侵,其规模和能量较早期流体要小,但是在深部中段,仍然存在液压致裂发生的条件。晚期高压流体沿早期裂隙上升,在早期强硅化围岩的下部,压力开始聚集,当 $P_f \geq \sigma_3 + R_1$ 时,致使弱硅化灰岩围岩发生破碎,由于弱硅化灰岩的脆性较弱,使得弱硅化灰岩的破碎程度较低。当压力释放后,破裂灰岩收缩,矿物质广泛的发生沉淀和富集,形成方解石—辉锑矿型矿体。高压流体在垂直方向上存在应力差异较大,因此,方解石脉发育呈倾斜状或垂直状(图 4a、b)。

5 结论

(1) 锡矿山矿区角砾岩分布广泛,类型也较复

杂,与成矿有关的角砾岩有硅质胶结的角砾岩和方解石胶结的角砾岩。前者与形成石英—辉锑矿型矿石的早期成矿作用有关,后者主要与形成方解石—辉锑矿型矿石的晚期成矿作用有关;

(2) 硅质胶结的角砾岩,其角砾为强硅化灰岩,这些角砾岩形成需要的能量大,其形成除液压致裂作用外,还有化学溶蚀作用的参与,特别是那些含矿的角砾岩,化学溶蚀作用更加明显;

(3) 方解石胶结的角砾岩,其角砾为弱硅化灰岩,其形成机制主要为液压致裂作用,所需要的能量中等;

(4) 矿体浅部以硅质胶结的角砾岩为主,硅质角砾更加易于破碎,而深部则以方解石胶结的角砾岩为主;

(5) 液压致裂是锡矿山矿区角砾岩形成的重要机制,与锑成矿关系密切。

致谢:感谢锡矿山闪星锑业有限责任公司邹利群、肖亮明等有关领导对野外工作给予的支持,衷心的感谢本刊编辑章雨旭先生和审稿专家提供的宝贵意见和建议,在此致以诚挚的谢意!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

谌锡霖,蒋云杭,李世永,廖洪震. 1983. 湖南锡矿山锑矿成因探讨. 地质论评,29(5):486~493.

谌锡霖,罗自立,廖洪震,余福新,杨庭显. 1978. 锡矿山锑矿田矿床构式的新认识及其西部大断层下盘带状矿体找矿远景. 地质与勘探,(6):9~18.

池国祥,薛春纪,卿海若,薛伟,张江伟,孙远强. 2011. 中国云南金顶铅锌矿碎屑灌入体和水力压裂构造的观察及流体动力学分析. 地学前缘,18(5):29~42.

何明跃,楼亚儿. 2002. 湖南锡矿山辉锑矿的矿物标型特征研究. 地质与勘探,38(4):73~77.

何明跃,王濮. 2002. 湖南锡矿山锑矿床的石英标型特征. 现代地质,16(2):180~185.

胡雄伟. 1995. 湖南锡矿山超大型锑矿床成矿地质背景及矿床成因. 导师:裴荣富. 北京:中国地质科学院博士学位论文.

黄任军. 1992. 论与古岩溶有关的锑矿床的找矿预测. 矿山地质,13(2):130~141.

蒋永年. 1963. 湖南新化锡矿山锑矿床的地质特征及成因. 成都理工大学学报(自然科学版),(2):19~35.

李建威,李先福. 1997. 液压致裂作用及其研究意义. 地质科技情报,16(4):29~34.

李真真,李光明,孟昭君,秦克章,宋国学,金露英,阙学胜,王进,张夏楠. 2014. 大兴安岭岔路口巨型斑岩钼矿床角砾岩相的划分、特征及成因. 矿床地质,33(3):607~624.

林芳梅,彭建堂,胡阿香,邓穆昆. 2015. 锡矿山锑矿床萤石稀土元素地球化学研究. 矿物学报,35(2):214~220.

林芳梅. 2014. 湘中锡矿山锑矿床成矿流体研究. 导师:彭建堂. 长沙:

中南大学硕士学位论文.

刘焕品,张永龄,胡文清. 1985. 湖南省锡矿山锑矿床的成因探讨. 湖南地质,4(1):28~40.

刘建明,叶杰,刘家军,谭骏,应汉龙. 2000. 盆地流体及其成矿作用. 矿物岩石地球化学通报,19(2):85~94.

毛政利,赖健清,彭省临. 2009. 铜陵凤凰山铜矿床角砾岩的形成与矿床定位机制. 矿物学报,29(4):491~495.

彭建堂,胡瑞忠,邓海琳,苏文超. 2001. 湘中锡矿山锑矿床的 Sr 同位素地球化学. 地球化学,30(3):248~256.

彭建堂,胡瑞忠,林源贤,赵军红. 2002. 锡矿山锑矿床热液方解石的 Sm-Nd 同位素定年. 科学通报,47(10):789~792.

彭建堂,胡瑞忠,漆亮,赵军红. 2004. 锡矿山热液方解石的独特 REE 分配模式及其制约因素. 地质论评,50(1):25~32.

彭建堂,胡瑞忠,邹利群,刘建雄. 2002. 湘中锡矿山锑矿床成矿物质来源的同位素示踪. 矿物学报,22(2):155~159.

彭志忠. 1960. 锡矿山辉锑矿的晶体形态. 北京地质学院学报,(2):32~34.

苏文超. 2002. 扬子地块西南缘卡林型金矿床成矿流体地球化学研究. 导师:胡瑞忠. 北京:中国科学院博士学位论文,90~95.

唐建武,金景福,陶琰. 1999. 锡矿山锑矿田硅化岩的稀土元素特征及其地质意义. 地质地球化学,27(4):40~44.

汪劲草,彭恩生,孙振家. 1999. 东川因民角砾岩为水压角砾岩的地质证据及其成因意义. 地质论评,45(1):70.

汪劲草,彭恩生,孙振家. 2000. 流体动力角砾岩分类及其地质意义. 长春科技大学学报,30(1):18~23.

汪劲草,汤静如,王国富,史静海. 2001. 太白双王含金水压角砾岩形成过程和矿体预测. 地质论评,47(5):508~513.

王国富,孙振家,彭恩生,汪劲草,汤静如,史静海. 2002. 陕西双王金矿床角砾岩动力学成因探讨. 大地构造与成矿学,26(1):81~85.

万国璋,刘汉元,谢国柱,吴强,雷秀柳. 1993. 锡矿山超大型锑矿床控矿规律及形成机理初步研究. 地质与勘探,29(7):20~27.

肖龙,王方正. 2002. 新疆伊犁京希—伊尔曼德金矿区角砾岩特征及成因. 矿物岩石,22(2):9~12.

杨照柱,卢新卫,丘卉. 1998. 锡矿山锑矿稳定同位素地球化学研究. 西安工程学院学报,20(4):1~5.

张洪涛,芮宗瑶. 1991. 论与斑岩矿床有关的矿化角砾岩成因类型及其地质意义. 矿床地质,10(5):265~272.

张会琼,王京彬,王玉往. 2012. 山西灵丘支家地铅锌银矿隐爆角砾岩筒的岩相分带性研究及其勘查意义. 地质论评,58(6):1046~1055.

真允庆. 1976. 角砾岩及其找矿. 地质与勘探,(8):14~24.

Chen Xilin, Jiang Yunhang, Li Shiyong, Liao Hongzhen. 1983&. A preliminary study on the origin of the Xikuangshan antimony deposit in Hunan, Geological Review,29(5):486~493.

Chen Xilin, Luo Zili, Liao Hongzhen, Yu Fuxin, Yang Tingxian. 1978#. New understanding of the structure of ore-deposits and ore prospecting of footwall ore belt in the Xikuangshan antimony ore-field. Geology and Exploration,(6):9~18.

Chi Guoxiang, Xue Chunji, Qing Hairuo, Xue Wei, Zhang Jiangwei, Sun Yuanchao. 2011&. Observations of clastic injection and hydraulic fracturing structures in the Jinding Zn—Pb deposit, Yunnan, China and hydrodynamic analysis. Earth Science Frontiers,18(5):29~42.

Fan Delian, Zhang Tao and Ye Jie. 2004. The Xikuangshan Sb deposit hosted by the Upper Devonian black shale series, Hunan, China. Ore Geology Reviews,24:121~133.

Fertl W H. 1972. Worldwide occurrence of abnormal formation pressure.

- Part I. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Paper No. 3844, Dallas: American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers.
- Henschel H G E and Procaccia I. 1984. Building blocks of percolation clusters: volatile fractals. *Physical Review Letters*, 53: 1121 ~ 1124.
- Henschel H G E and Procaccia I. 1984. Relative diffusion in turbulent media, the fractal dimension of clouds. *Physical Review*, 29: 1461 ~ 1470.
- He Mingyue, Lou Yaer. 2000. Mineralogical typomorphic characteristics of stibnite in the Xikuangshan antimony deposit, Hunan province. *Geology and Exploration*, 38(4): 73 ~ 77.
- He Ming, Wang Pu. 2002. Mineralogical typomorphic characteristics of quartz in Xikuangshan antimony deposit, Hunan province. *Geoscience*. 16(2): 180 ~ 185.
- Hu Xiongwei. 1995. Metallogenic geological background and ore genesis of Xikuangshan superlarge antimony deposit, Hunan. Tutor: Pei Rongfu. Beijing: Doctoral Dissertation of Chinese Academy of Geological Sciences.
- Hu Xiongwei, Pei Rong Fu and Zhou Su. 1996. Sm-Nd dating for antimony mineralization in the Xikuangshan deposit, Hunan, China. *Resource Geology*, 46(4): 227 ~ 231.
- Huang Renjun. 1992. Ore prospecting theory related with paleokarst of the antimony deposit. *Mine geology*, 13(2): 130 ~ 141.
- Jébrak M. 1997. Hydrothermal breccias in vein type ore deposit: A review of mechanisms, morphology and size of distribution. *Ore Geology Reviews*, 12: 111 ~ 134.
- Jiang Yongnian. 1963. Geological characteristics and genesis of Xikuangshan antimony deposit, Hunan. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, (2): 19 ~ 35.
- Kent C and Wong J. 1982. An index of littoral zone complexity and its measurement. *Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 39: 847 ~ 853.
- Laznicka P. 1989. Breccias and ores, Part I, History, organization and petrology of breccias. *Ore Geology Review*, 4(4): 315 ~ 344.
- Li Jianwei, Li Xianfu. 1997. Hydraulic fracturing and its study significance. *Geological Science and Technology Information*, 16(4): 29 ~ 34.
- Li Zhenzhen, Li Guangming, Meng Zhaojun, Qin Kezhang, Song Guoxue, Jin Luying, Kan Xuesheng, Wang Jin, Zhang Xianan. 2014. Petrofacies classification, characteristics and formation mechanism of breccias in Chalukou giant molybdenum deposit of Da Hinggan Mountains. *Mineral Deposits*, 33(3): 607 ~ 624.
- Lin Fangmei, Peng Jiantang, Hu A' Xiang, Deng Mukun. 2015. Geochemical study of REE in fluorite from Xikuangshan antimony deposit, central Hunan Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(2): 214 ~ 220.
- Lin Fangmei. 2014. On the ore-forming fluid in the Xikuangshan antimony deposit, Central Hunan. Tutor: Peng Jiantang. Changsha: Master's dissertation of Central South University.
- Liu Huangping, Zhang Yongling, Hu Wenqing. 1985. Discussion on the genesis of antimony deposits of Xikuangshan, Hunan. *Hunan Geology*, 4(1): 28 ~ 40.
- Liu Jianming, Ye Jie, Liu Jiajun, Tan Jun, Ying Hanlong. 2000. On ore-forming processes of basin fluids. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 19(2): 85 ~ 94.
- Mandelbrot B B. 1985. Self-affine fractals and fractal dimension. *Physica Scripta*, 32: 257 ~ 260.
- Mandelbrot B B. 1986. Self-affine fractal sets, *Fractals in Physics*. North-Holland, Amsterdam, 3 ~ 28.
- Mao Zhengli, Lai Jianqing, Peng Shenglin. 2009. The formation of breccia and ore body's localization mechanism in fenghuangshan copper deposit, Tongling Area, Anhui Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(4): 491 ~ 495.
- Peng Jiantang, Hu Ruizhong, Deng Hailin, Su Wenchao. 2001. Strontium isotope geochemistry of the Xikuangshan antimony deposit, Central Hunan. *Cochimica*, 30(3): 248 ~ 256.
- Peng Jiantang, Hu Ruizhong, Lin Yuanxian, Zhao Junhong. 2002. Sm-Nd isotopic dating of hydrothermal calcite in the Xikuangshan antimony deposit. *Chinese Science Bulletin*, 47(10): 789 ~ 792.
- Peng Jiantang, Hu Ruizhong, Qi Liang, Zhao Junhong. 2004. REE distribution pattern for the hydrothermal calcites from the Xikuangshan antimony deposit and its constraining factors. *Geological Review*, 50(1): 25 ~ 32.
- Peng Jiantang, Hu Ruizhong, Zou Liqun, Liu Jianxiong. 2002. Isotope tracing of ore-forming materials for the Xikuangshan antimony deposit, Central Hunan. *Acta Mineralogica Sinica*, 22(2): 155 ~ 159.
- Peng Zhizhong. 1960. Crystal morphology of Xikuangshan stibnite. *Journal of Beijing Institute of Geology*, (2): 32 ~ 34.
- Peng Jian Tang, Hu Rui Zhong, Burnard P G. 2003. Samarium—neodymium isotope systematics of hydrothermal calcites from the Xikuangshan antimony deposit (Hunan, China): the potential of calcite as a geochronometer. *Chemical Geology*, 200: 129 ~ 136.
- Phillips R. 1972. Hydraulic fracturing and mineralization. *Journal Geologic Society*, 128: 337 ~ 359.
- Rehn B. 1972. Worldwide occurrence of abnormal formation pressure. Part II. Paper No. 3845, Dallas: American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. p8
- Sibson R H. 1986. Brecciation processes in fault zones; Inferences from earthquake rupturing. *Pure and Applied Geophysics*, 124: 159 ~ 174.
- Su Wenchao. 2002. The hydrothermal fluid geochemistry of the carlin-type gold deposits in southwestern Yangtze Craton, China. Tutor: Hu Ruizhong. Beijing: Doctoral Dissertation of Chinese Academy of Sciences, 90 ~ 95.
- Tang Jianwu, Jin Jingfu, Taoyan. 1999. REE geochemical characteristics of silicified rocks of Xikuangshan antimony deposits and their geological significance. *Geology—Geochemistry*, 27(4): 40 ~ 44.
- Tegengren F R. 1921. The His-Kuang-Shan antimony mining fields, Hsin-Hua district, Hunan. The former Ministry of Agriculture Report of Geological Survey, 1(3): 1 ~ 26.
- Wang Jincao, Peng Ensheng, Sun Zhenjia. 1999. Geological evidence for the hydraulic pressure and genesis significance of breccias in the Yinming, Dongchuan. *Geological Review*, 45(1): 70.
- Wang Jincao, Peng Ensheng, Sun Zhenjia. 2000. Classification and geological significance of fluid dynamic breccia. *Journal of ChangChun University of Science and Technology*, 30(1): 18 ~ 23.
- Wang Jincao, Tang Jingru, Wang Guofu, Shi Jinghai. 2001. Formation of gold-bearing hydrofracturing breccia body and prognosis of gold ore body in the Shuangwang gold deposit, Shanxi Province. *Geological Review*, 47(5): 508 ~ 513.
- Wang Guofu, Sun Zhenjia, Peng Ensheng, Wang Jincao, Tang Jingru, Shi Jinghai. 2002. A discussion on dynamic genesis of the breccia developed in the Shuangwang gold deposit in Shanxi province, China. *Geotectonica et metallogenia*, 26(1): 81 ~ 85.
- Wen Guozhang, Wu qiang, Liu Hanyuan, Xie Guozhu, Lei Xiuli. 1993. Preliminary study on ore controlling regularities and metallogenic

mechanism of super large-sized Sb-deposits in Xikuangshan. *Geology and Exploration*, 29(7):20~27.

Xiao Long, Wang Fangzheng. 2002. Study of characteristics and origin of breccias in the Jinxi—Yilmend gold deposit, Yiling, Xinjiang. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 22(2):9~12.

Yang Zhaozhu, Lu Xinwei, Qiu hui. 1998. Isotope geochemistry of the Xikuangshan antimony deposit stability. *Journal of XiAn Engineering University*, 20(4):1~5.

Yang Dongsheng, Shimizu M, Shimazaki H, Li Xianhua, Xie Qinglin. 2006. Sulfur isotope geochemistry of the supergiant Xikuangshan Sb-deposit, Central Hunan, China: Constraints on sources of ore

constituents. *Resource Geology*, 56(4):385~396.

Zhang Hongtao, Rui Zongyao. 1991. On the genetic classification of mineralized breccias related to porphyry deposits and its geological significance. *Mineral Deposits*, 10(5):265~272.

Zhang Huiqiong, Wang Jingbin, Wang Yuwang. 2012. A study on lithofacies zonation of crypto-explosive breccia pipe in Zhijiadi Pb—Zn—Ag deposit, Lingqiu County, Northeastern Shanxi Province, and its exploration significance. *Geological Review*, 58(6):1046~1055.

Zhen Yunqing. 1976. Characteristics and significances ore-prospecting of breccias. *Geology and Exploration*, (8):14~24.

Breccias Related to Mineralization and Its Formation Mechanism in the Xikuangshan Antimony Deposit, Central Hunan

LIU Shoulin¹⁾, PENG Jiantang^{1,2)}, HU A'xiang¹⁾, LIN Fangmei¹⁾, LI Yukun¹⁾, WU Huajin¹⁾

1) School of Geosciences and Info-physics & Key Laboratory of Non-ferrous Metals Metallogenic Prediction of Ministry of Education, Central South University, Changsha, 410083;

2) State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550002

Abstract: Breccias are widespread throughout the Xikuangshan antimony deposit, central Hunan. Breccias can be divided into syndepositional breccia, paleo-karst breccia, fault breccia, and hydraulic breccia. The ore-related breccias in the Xikuangshan deposit are emphatically discussed in this study. On the basis of detailed field investigation and qualitative analysis for these ore-related breccias, the fractal parameters D_s for breccia's particle size distribution, and D_r and D_l for breccia's fragment morphology distribution are determined by quantitative description approaches using fractal geometry methods, and the formation mechanism of these ore-related breccias is finally discussed. It is revealed that breccias related to antimony mineralization in the studied deposit can be divided into calcite-cemented and silica-cemented breccias. Fragments of those calcite-cemented breccias mainly consist of weakly-silicified limestone, but highly-silicified limestone constitutes the silica-cemented breccias' fragments. Based on qualitative analysis and fractal quantitative investigations, it is concluded that hydraulic fracturing is responsible for the formation of calcite-cemented breccias. Besides hydraulic fracturing, the formation of silica-cemented breccias is also affected by chemical dissolution of hydrothermal solution. Therefore hydraulic fracturing is the most important mechanism for the formation of those ore-related breccias in the Xikuangshan mining district.

Keywords: breccia; fractal geometry; hydraulic fracturing; Xikuangshan antimony deposit; central Hunan

Acknowledgements: This research was funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 41272096 and No. 41473043) and the National Special Research Programs for Non-Profit Trades (No. 200911007). Thanks to XIAO Liangming and ZOU Liqun for their help in the field work, and Professor ZHANG Yuxu provided with valuable comments and suggestions.

First author: LIU Shoulin, male, born in 1989. Master's degree, major in Mineralogy, Petrology, Mineral Deposit Geology. Email: liushoulin89jim@126.com

Corresponding author: PENG Jiantang, male, born in 1968. Professor, major in Geochemistry of ore deposits. Email: jtpeng@126.com

Manuscript received on: 2015-06-25; Accepted on: 2016-11-11; Edited by: ZHANG Yuxu.

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.01.007