

湘西合仁坪金矿床角砾岩的地质特征及形成机制^{*}

李玉坤¹, 彭建堂^{1,2*}, 邓穆昆¹, 胡诗倩¹, 刘守林¹

(1 中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室 地球科学与信息物理学院, 湖南 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, 贵州 贵阳 550002)

摘 要 湘西合仁坪钠长石-石英脉型金矿中, 角砾岩普遍发育, 主要分布于矿脉中, 与金成矿关系密切。在详细的野外观察和室内研究的基础上, 文章对合仁坪金矿床中角砾岩的形态、大小及胶结物进行了较系统的研究, 并结合角砾岩的矿物组合特征, 探讨了该区角砾岩的形成机制。研究表明, 合仁坪金矿床中的角砾岩大多数呈原地破裂特征, 角砾分选差, 成分简单, 且角砾之间的拼合性较好, 为钠长石、石英等热液矿物所胶结, 角砾的长轴方向大致具有定向排列的特点, 表现出明显的液压致裂特征, 反映出成矿流体的特征。研究区的液压致裂作用具有脉动性, 每期液压致裂作用大致可分为应力腐蚀、岩石破碎、裂隙愈合 3 个阶段。

关键词 地质学; 角砾岩; 形成机制; 液压致裂; 合仁坪脉型金矿; 湘西

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Geological characteristics and formation mechanism of breccias in Herenping gold deposit, western Hunan Province

LI YuKun¹, PENG JiangTang^{1,2}, DENG MuKun¹, HU ShiQian¹ and LIU ShouLin¹

(1 Key Laboratory of Non-ferrous Metals Metallogenic Prediction of Ministry of Education, School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2 State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China)

Abstract

Breccias are widespread in the Herenping albite-quartz lode deposit, western Hunan Province. Breccias are mostly distributed in ore veins and are closely associated with gold mineralization. Based on detailed field observation and indoor study, the authors systematically studied the morphology and size of fragments as well as the cements in breccias. In combination with the mineral assemblage, the formation mechanism for breccias was further ascertained. It is shown that most breccias are in-situ fractured, poorly sorted and simple in composition, and that slate fragments are usually in good collage and cemented by hydrothermal albite and quartz. The long-axis of fragments is approximately aligned. All these characteristics show that the breccias in the Herenping mining district were caused by hydraulic fracturing, which can reveal the characteristics of ore-forming fluid. It is concluded that hydraulic fracturing in the studied deposit was continual and periodic, and each period can be divided into three stages: Wear erosion, rock fracturing and crack sealing.

Key words: geology, breccias, formation mechanism, hydraulic fracturing, Herenping lode gold deposit,

^{*} 本文得到国家自然科学基金项目(编号:41073036、41272096)的资助

第一作者简介 李玉坤, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 矿产普查与勘探专业。Email: liyukunyx@163.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

收稿日期 2015-06-11; 改回日期 2016-06-20。秦思婷编辑。

western Hunan

在自然界,角砾岩是普遍存在的,特别是在以脆性形变为主、流体饱和为特征的那部分地壳中,角砾岩最为常见(Sibson, 1986; Scholz, 1990; Jébrak, 1997)。已有的研究表明,角砾岩与热液成矿作用关系密切(Bryner, 1961; 真允庆, 1976; Ohle, 1985; Laznicka, 1988; 张洪涛等, 1991; Jébrak, 1997; 罗镇宽等, 1999; Cas et al., 2011), 80% 以上的金属矿床中均存在不同类型的角砾岩(Laznicka, 1988), 因此,角砾岩被视为热液矿床、特别是脉型热液矿床中分布最为广泛的岩石组构(Jébrak, 1997)。作为热液矿床良好的通道或容矿构造(容矿主岩),角砾岩的存在可以有效地指导找矿勘探工作;另一方面,对角砾岩本身特征及角砾岩与围岩接触关系的研究,人们可以确定角砾岩的形成时间和形成机制,进而可以判断相关矿床的成因和形成过程。因此,角砾岩一直是地质学家、特别是矿床学家研究的重点。

湖南雪峰山一带前寒武纪的浅变质岩中,金矿床广泛分布,湖南省 80% 金矿床(点)分布于该区,是该省最重要的黄金产地(黎盛斯, 1991; 中国人民武装警察部队黄金指挥部, 1996; 彭建堂, 1999);特别是在湘西沅陵、安化、桃源一带,脉型金矿尤为发育,这些脉型金矿主要为石英脉型金矿,沃溪金矿是其典型代表。但在柳林汉一带,含金的钠长石-石英脉发育广泛,目前已发现 20 多处矿床(点),分布于该成矿带东北端的合仁坪金矿为其典型代表。相对于区域上沃溪等石英脉型金矿床而言,柳林汉一带钠长石-石英脉型金矿研究程度很低,目前仅有少量文献报道(王国强等, 2009; 张婷等, 2014)。合仁坪钠长石-石英脉型金矿床中角砾岩分布广泛,且很有特色,但目前尚无人对其进行任何研究。因此,本文拟以合仁坪金矿床为研究对象,揭示该类脉型金矿中角砾岩的基本特征,并进一步探讨其形成机制,这对重新认识流体在成矿过程中的作用,深化对该区钠长石-石英脉型金矿的形成过程及形成机理的认识,均具有非常重要的意义。

1 矿床地质概况

合仁坪矿区分布于湖南沅陵县境内,在大地构造位置上处于江南古陆雪峰山隆起区内(图 1)。除

第四系覆盖层外,该区出露的地层为新元古界板溪群马底驿组和五强溪组,这两套地层呈整合接触关系。赋矿地层主要为马底驿组,其下部为紫红色浅变质厚至巨厚层中粒长石砂岩及含铁质砂岩,局部见砾岩及灰绿色板岩;上部为紫红色砂质板岩、砂质条带状板岩夹少量紫红色、灰绿色变质细砂岩。矿区主要构造为 NE 向长岭岗复式背斜,两翼地层为五强溪组,核部地层主要为马底驿组,而在背斜的核部,又有少量五强溪组地层分布,构成两个次级向斜。在矿区及其外围未见岩浆岩出露。

该区所有的金矿脉均产于长岭岗复式背斜的次级褶皱两翼或轴部新元古界板溪群马底驿组紫红色条带状绢云母板岩中。矿体一般呈层状、似层状产出(图 2a~c),与赋矿地层产状基本一致,局部可见穿层现象(图 2d),网脉状矿体亦可见;矿脉分支复合,尖灭再现特征明显。目前已发现 20 余条矿脉,这些矿脉走向呈 NEE,倾向 NNW 或 SSE,倾角 25~72°。单脉走向长 10~1000 m,沿倾斜延深 126~135 m,厚 0.3~1.2 m。矿脉主要由肉红色的钠长石和石英构成,钠长石的含量一般为 30%~40%,局部可达 80% 以上。

在合仁坪矿区,近矿围岩可见绢云母化、黄铁矿化、绿泥石化等蚀变现象,局部可见高岭石化及叶蜡石化,其中绢云母化和黄铁矿化与成矿关系密切。该矿的金属矿物主要有自然金、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿和黝铜矿;非金属矿物主要有石英、钠长石、方解石、叶蜡石及绿泥石。矿石中金的平均品位为 4.0~7.0 g/t,金主要以自然金的形式存在,载金矿物主要为石英、钠长石和黄铁矿。

2 角砾岩的基本特征

合仁坪矿区含金的钠长石-石英脉中角砾岩广泛发育,特征明显,下面笔者主要从野外特征和岩石学特征两方面阐述其基本特征。

2.1 野外特征

合仁坪金矿床中的角砾岩发育广泛(图 3),脉体发育处均可见角砾产出,这些角砾岩主要分布在钠长石-石英脉体中及其边部围岩中;特别是在构造发育处,如复式背斜轴部,角砾尤为发育。然而脉体的形态不同,角砾的分布亦有差异:顺层单脉中的角砾

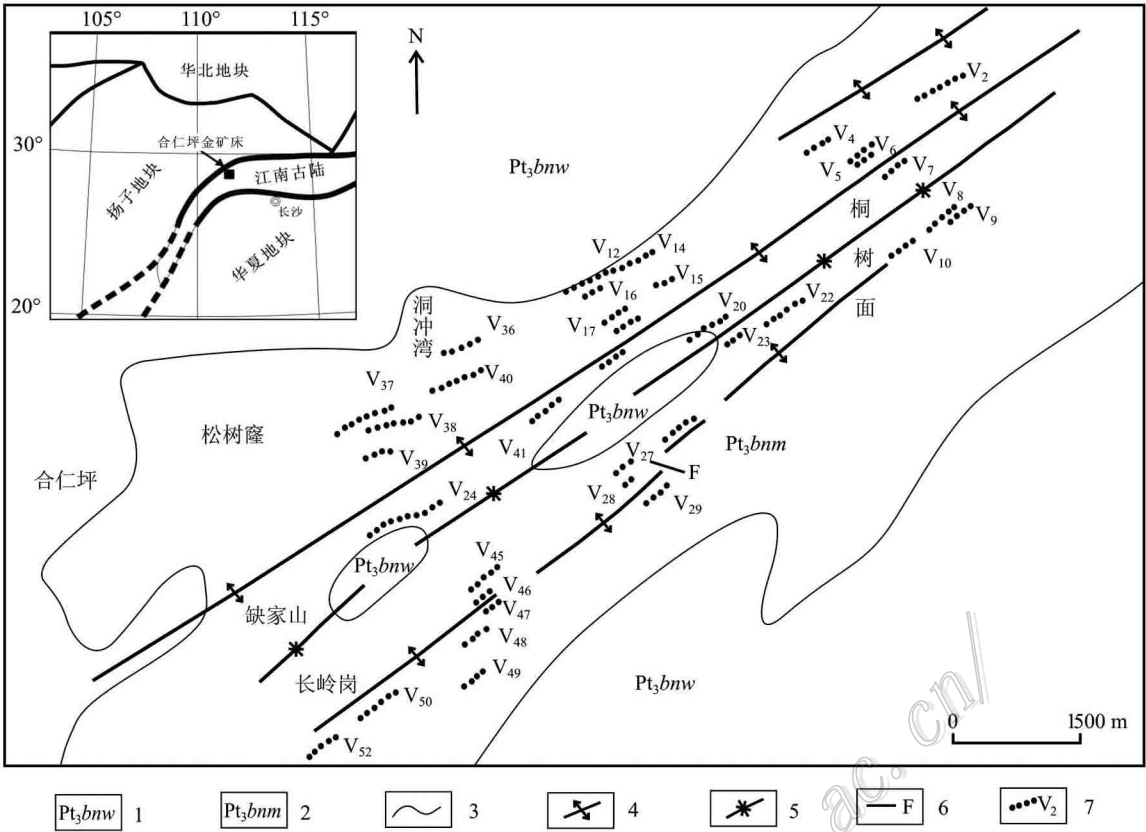


图 1 湘西合仁坪金矿地质图(据中国人民武装警察部队黄金指挥部,1996 修改)

1—板溪群五强溪组; 2—板溪群马底驿组; 3—地质界线; 4—背斜轴; 5—向斜轴; 6—断层; 7—矿脉及编号

Fig. 1 Geological map of the Herenping gold deposit, western Hunan (modified after Gold Command of Chinese People's Armed Police, 1996)

1—Neoproterozoic Wuqiangxi Formation; 2—Neoproterozoic Madiyi Formation; 3—Geological boundary; 4—Anticline axis; 5—Syncline axis; 6—Fault; 7—Ore vein and its serial number

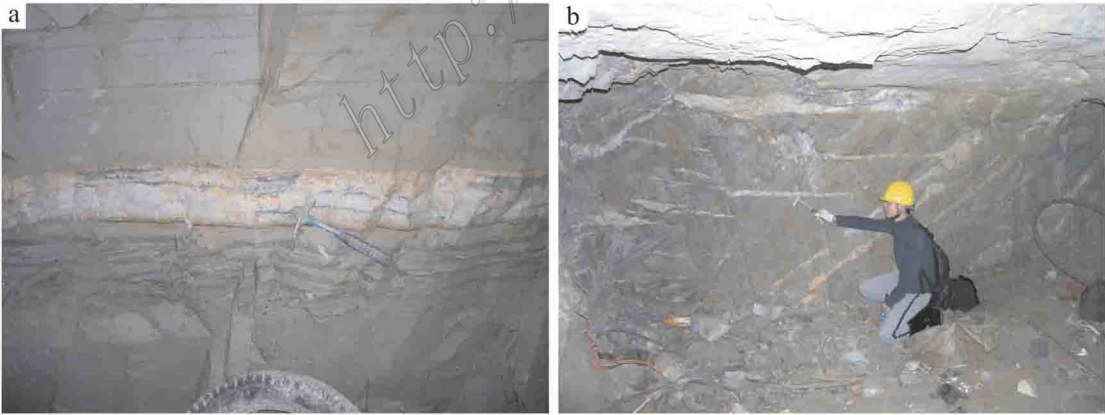


图 2 合仁坪金矿床含金的钠长石-石英脉

a. 顺层产出的矿脉; b. 穿层产出的矿脉

Fig. 2 Auriferous albite-quartz veins in the Herenping gold deposit, western Hunan

a. Ore veins concordant with the host rocks; b. Ore veins crosscutting the host rocks

通常较少,特别是那些脉宽较窄的脉体中,角砾基本缺失;平行复脉中的角砾较发育,总体上沿脉体延伸方向产出(图 3a)。

该区矿脉中角砾大多呈长条形、三角形或不规则状,少数呈透镜状,大小混杂,小者仅 2~3 mm,大者可达 90 cm,一般在 1~50 cm。角砾的成分单一,与近矿围岩成分相同,主要为褪色化蚀变板岩;角砾棱角分明,基本未发生旋转、位移及磨蚀现象,整体具有良好的拼合性(图 3b),局部可见角砾有一定的偏转和位移,但角砾之间拼合关系较好(图 3c);角砾的长轴方向与脉体的延伸方向大体一致,定向性明显(图 3d),角砾岩两壁未见有擦痕和阶步。在矿脉两侧常有细脉发育,这些脉体主要为肉红色的钠长石,多呈分叉脉体,常见分支复合现象(图 3e),其中部分围岩较为破碎,呈网脉状胶结(图 3f),靠近围岩一侧角砾较为粗大,由边部向中心逐渐减少,甚至完全缺失。从脉体的边缘到中心,岩石变形特征具有分带性,其变化顺序为:未发生破裂围岩、半破碎角砾、破碎角砾(图 3a),半破碎角砾和破碎角砾皆为近矿蚀变围岩就地发生角砾化的产物,前者是围岩发生破裂,角砾之间无明显位移,其根部尚与围岩相连,保持其可拼性;后者为围岩破裂后角砾与原岩发生脱离,成为脉体的一部分,但其拼合性也较好,且脉体中一些大的角砾可进一步破裂为很多小角砾(图 3g)。而在背斜的核部,脉体较厚,且角砾岩的规模较大,角砾形态不规则,有些呈撕裂状,部分角砾中还可可见围岩发生扭曲变形,整体呈“漂浮状”分布在钠长石-石英脉中,角砾基本未有磨损,相邻角砾间结合较好(图 3h)。

2.2 岩石学特征

角砾 角砾岩手标本中,角砾的大小不一,棱角分明,分选性差,大小在 0.2~8.0 cm(图 4a~d),部分细小角砾仅在显微镜下可见;角砾的含量约为 40%~80%,角砾与胶结物之间界线清晰,无明显的溶蚀作用,亦未见复砾结构,角砾间的拼合性较好。角砾成分简单,均为褪色化板岩,主要由泥质颗粒、石英、长石组成,其中,长石普遍发生绢云母化。

胶结物 该区角砾岩的胶结物为热液成因的钠长石、石英和方解石,其中角砾大多被石英、钠长石胶结(图 4e),少数被石英、钠长石和方解石共同胶结(图 4f),胶结物含量约为 20%~60%。角砾之间基本互不接触,热液矿物呈脉状或网脉状分布,角砾整体上呈基底胶结的形式产出。镜下可见热液胶结物

较为破碎。

金属矿物 角砾和胶结物均可见有硫化物分布,角砾中的黄铁矿颗粒较为粗大,常为立方体晶形,呈零散星点状分布于角砾中;矿脉胶结物中黄铁矿粒度较小,呈细脉状充填,并常伴有少量黄铜矿、斑铜矿、方铅矿和闪锌矿。

3 角砾岩的成因

由于合仁坪矿区角砾岩成分单一,角砾之间拼合性较好,大体有定向分布趋势,胶结物均为热液成因矿物,角砾岩附近也未见断层泥、擦痕等明显的构造活动标志,因此,我们可排除该区角砾岩为构造成因的可能性。上述角砾岩的特征,指示其很可能是流体作用的产物。

越来越多的研究表明,流体不仅可以胶结角砾,而且流体作用也可导致岩石发生破裂,形成角砾岩(李建威等,1997;汪劲草等,1999;汤静如等,2002)。目前,液压致裂作用被认为是自然界角砾岩形成的一种重要方式(Sibson, 1990;李建威等,1997;Clark et al., 2003;毛政利等,2009),液压致裂现象在热液矿床中普遍存在,特别是在脉型金矿床中,液压致裂被认为是最重要的矿脉形成方式(邵世才等,1993;1994;彭恩生等,1994;唐诗佳等,1998;2000)。另外,液压致裂作用在生产实践中也得到广泛应用,如用于石油开采及原地应力测量等(Mahrer, 1999)。合仁坪矿区的角砾岩,其许多特征与液压致裂角砾岩的特征吻合,应该为液压致裂作用的产物。下文具体从角砾岩本身特征、脉体特征、岩相学特征及均一温度值偏低等方面,对该区角砾岩的液压致裂成因进行论证。

(1) 合仁坪矿区角砾岩的特征指示其形成与流体作用有关。矿区的角砾成分单一,均为近矿围岩;角砾多呈棱角状、次棱角状,形状不规则,基本无明显的位移及偏转,并具有良好的拼合性,显示为岩石原地破裂特征;角砾分布整体上具有定向性,长轴方向与脉体延伸方向一致;在脉体两侧靠近围岩部位,角砾较为粗大,而矿脉中间的角砾较为破碎、细小,甚至消失,这符合液压致裂作用的基本规律(李建威等,1997;汪劲草等,2000;李先福等,2001)。因为脉体形成时不同位置所受的流体应力的挤压强度不同,导致其角砾岩的特征不同:越靠近水压作用的能量中心,液压作用越强,角砾越破碎(汪劲草等,



图 3 湘西合仁坪矿区矿脉中的角砾

a. 角砾呈分带性分布; b. 角砾之间有较好拼合关系; c. 角砾整体拼合性较好, 局部有一定偏转; d. 角砾长轴方向与脉体延伸方向一致, 定

向性明显; e. 分支复合脉体; f. 网脉状脉体; g. 脉体中大的角砾破裂为小的角砾; h. “漂浮状”角砾

Fig. 3 Breccias in auriferous veins of the Herenping mining area, western Hunan

a. Breccias distributed in zonation; b. Slate breccias with usually well jigsaw-fit fragments; c. Breccias with well jigsaw-fit, and slightly-rotated fragments; d. Fragments with approximately aligned long-axis, parallel to vein extension; e. Small branching veins within composite vein; f. Network vein; g. Small breccias split by large fragments in ore veins; h. Floating-shaped breccias

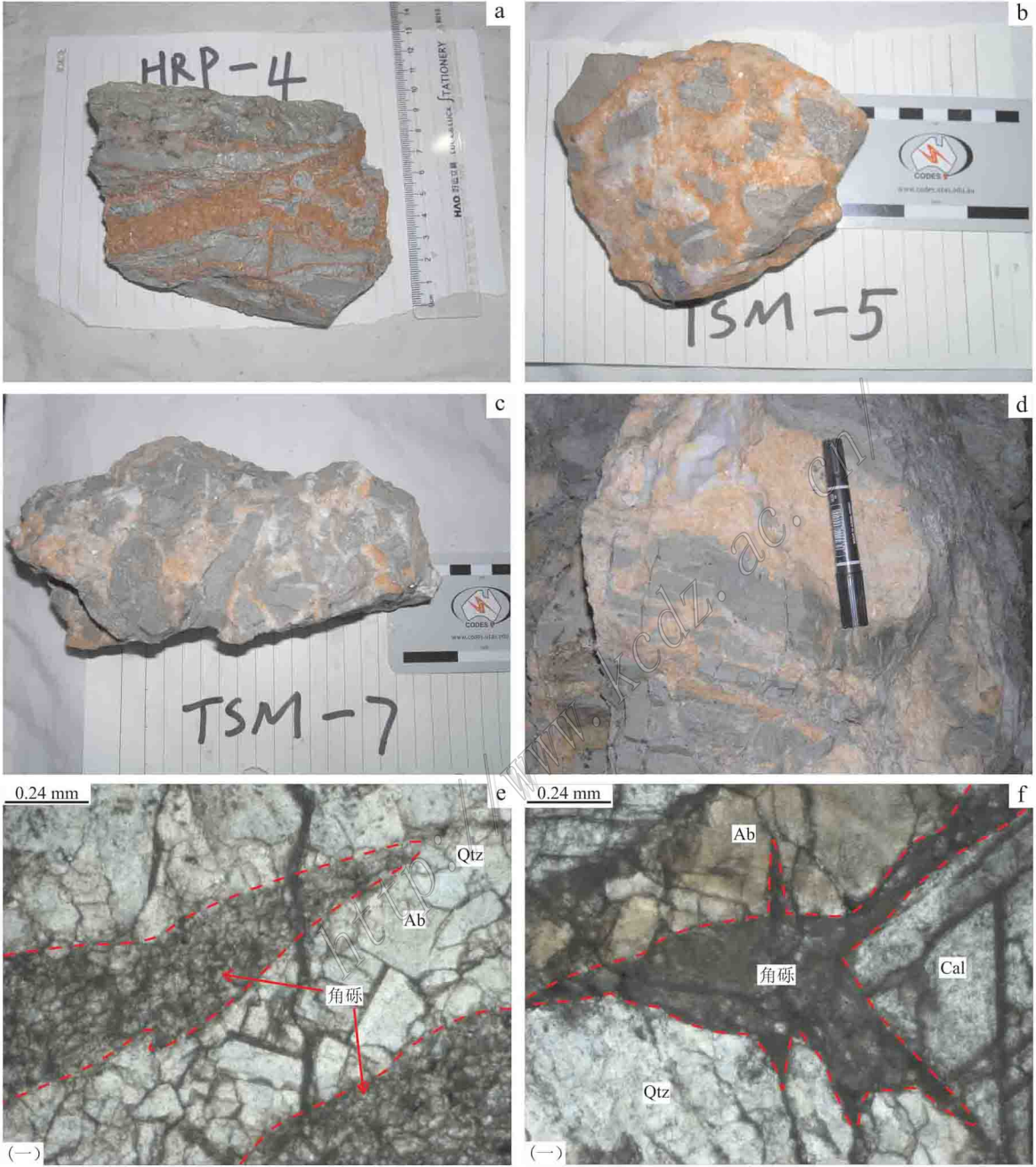


图 4 湘西合仁坪矿区角砾的岩石学特征

a~d. 角砾呈棱角状、次棱角状,分选性差,无磨蚀,与胶结物间界线清晰,拼合性较好; e. 角砾被石英、钠长石胶结; f. 角砾被石英、钠长石和方解石胶结

Qtz—石英; Ab—钠长石; Cal—方解石

Fig. 4 Petrological features of breccias in the Herenping mining area, western Hunan

a~d. Angular and sub-angular breccias, usually well jigsaw-fit, without being rounded, poorly sorted and clear boundaries between breccias and cement; e. Breccias cemented by hydrothermal albite and quartz; f. Breccias cemented by hydrothermal albite, quartz and calcite

Qtz—Quartz; Ab—Albite; Cal—Calcite

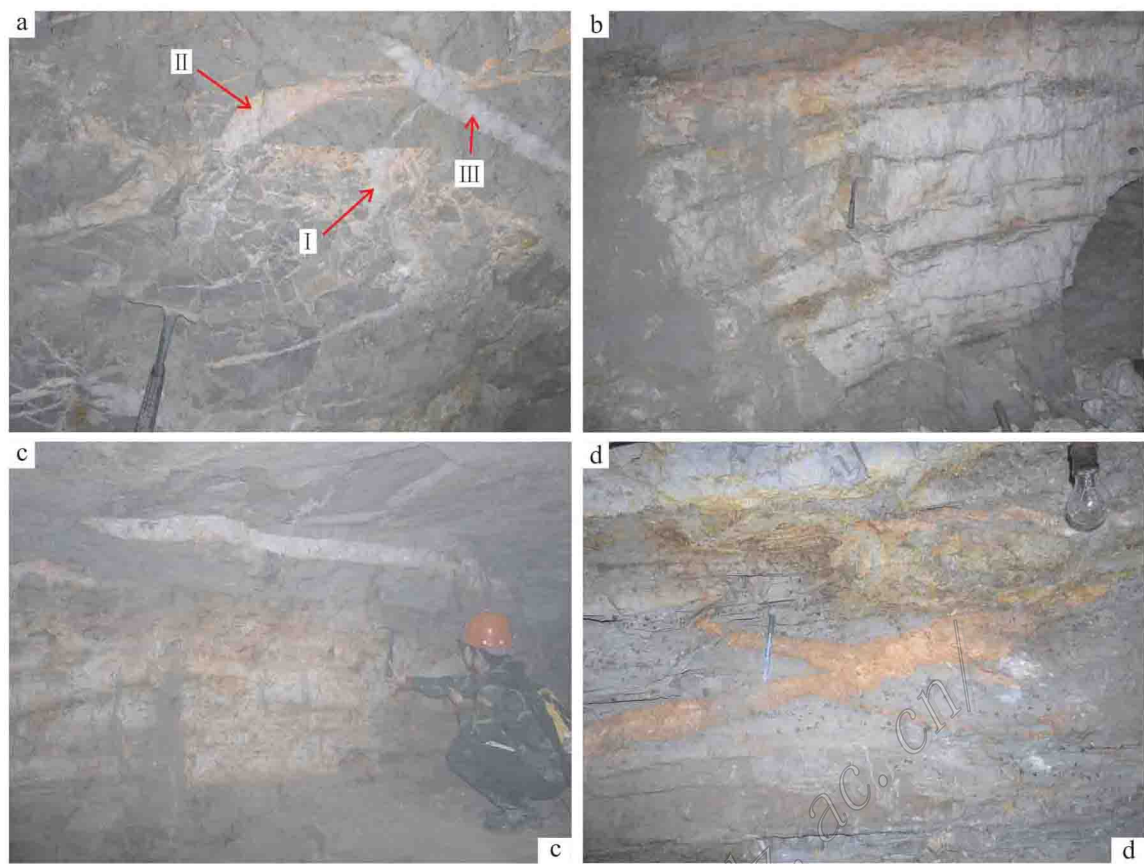


图5 湘西合仁坪金矿的脉体特征

a. 多期次钠长石-石英脉; b, c. 呈平行复脉的钠长石-石英脉体; d. 树枝状脉体

Fig. 5 Characteristics of ore veins in the Herenping gold deposit, western Hunan

a. Multi-stage albite-quartz veins; b, c. Albite-quartz veins parallel to composite vein; d. Dendritic vein

2000; 2001)。

(2) 合仁坪矿区矿脉的脉体特征指示其为液压致裂的产物, 矿区存在多期流体活动。矿脉附近可见网脉状钠长石胶结的角砾(图 3f, 5a), 角砾之间拼合性较好, 这明显是围岩受到高压流体挤压破裂的结果。

根据近矿围岩中脉体的穿插关系(图 5a), 反映该处至少存在 3 期热液活动, 即早期形成的钠长石-石英脉被后期钠长石-石英透镜体截断, 而钠长石-石英透镜体脉体又被石英透镜体截断; 这是由于围岩受液压作用破裂, 裂隙扩张产生负压空间, 引起热液流体泵吸注入(赵伦山等, 2000; 汪劲草等, 2001), 伴随着热液流体的多期活动, 形成脉体间复杂的穿插组合关系。该区的平行复脉普遍发育(图 5b, c), 也表明成矿流体的活动是呈周期性变化的, 多期次的流体活动造成矿脉多次开裂-愈合。

合仁坪矿区的矿脉常呈现分叉状(图 5d)、侧羽

状及分支复合构造(图 3e), 这些脉体形态亦指示其与流体作用有关。前人的研究表明, 侧羽状脉体是由于容矿断裂扩展到不同区域时的应力方向旋转所形成的张性脉, 通常需要充填到断裂中的液体压力作用才能形成(彭恩生等, 1994; 李石锦等, 1999; 彭渤等, 2002); 受热液流体脉动性作用的影响, 羽列状脉体在相邻脉段间应力干扰下岩石破碎扩展联通才会形成分支复合构造。

(3) 岩相学特征指示合仁坪矿区液压致裂作用较为普遍。合仁坪矿区钠长石-石英脉的石英中常发育有硫化物条带状构造(图 6a, b), 同时, 在光片中可以见到破碎钠长石被石英胶结(图 6c), 说明热液流体活动具有脉动性, 当先期热液矿物钠长石充填围岩裂隙, 冷凝结晶胶结角砾后, 受后期贯入的流体挤压破碎, 结晶的石英充填胶结钠长石; 高压热液流体多次注入使脉体发生破裂, 硫化物沿裂隙快速沉积富集。此外, 镜下还可见在破碎钠长石内部及

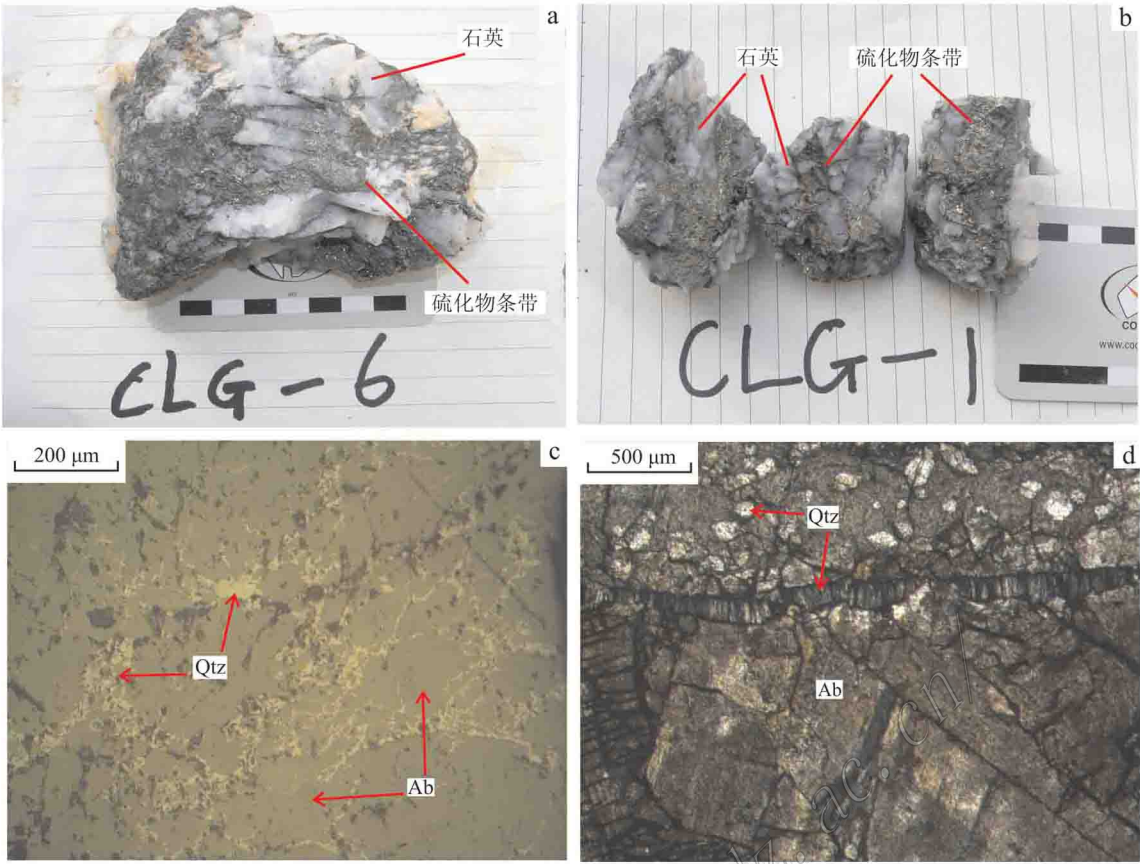


图 6 湘西合仁坪金矿中钠长石-石英的岩相学特征
a, b. 硫化物呈条带状构造; c. 石英胶结破碎钠长石; d. 石英梳状构造
Qtz—石英; Ab—钠长石

Fig. 6 Petrographic features of albite-quartz in the Herenping gold deposit, western Hunan
a, b. Stripe sulfide; c. Albite ruptured and cemented by quartz; d. Quartz with comb structure
Qtz—Quartz; Ab—Albite

边部发育石英梳状构造(图 6d), 这些石英垂直于脉壁生长, 显示出存在多期流体作用, 在早期形成的脉体受挤压裂开后, 后期热液流体在开放空间中结晶。

(4) 主成矿期流体包裹体均一温度的测定值偏低也证实该区成矿流体压力确实偏高。相关流体包裹体研究显示 (Ruggieri et al., 1999; Cox et al., 2001; 陈衍景等, 2007), 高压流体易引起液压致裂作用, 导致岩石破碎而发生角砾化。合仁坪金矿床中与成矿有关的石英和方解石中的包裹体主要为原生气液两相包裹体, 通过显微测温结果显示, 该矿主成矿期石英中流体包裹体的均一温度为 120~280℃, 显著低于晚期方解石中包裹体的均一温度(170~300℃)(图 7), 这显然与野外地质事实不符。前人研究表明, 较高的压力效应是导致矿物中流体包裹体

均一温度测定值偏低的重要原因(涂光炽, 1984); 而合仁坪金矿床中早期石英中的流体包裹体均一温度明显偏低, 这恰好符合上述现象, 显示成矿流体具有较高的压力。

4 角砾岩的形成机制

液压致裂(hydraulic fracturing)是由 Hubbert 和 Wills 于 1957 年首次提出, 它被认为是地壳内一种重要的岩石变形破裂方式, 这种地质作用从宏观到微观尺度上都存在, 且许多热液脉体和热液矿床直接受其控制(Fyfe et al., 1978)。对于液压作用导致岩石发生破裂的机制, 一直受到地质学家关注 (Groves et al., 1995; 李先福等, 2001; 王国富等, 2002; Willson et al., 2009; Cas et al., 2011; Chi et

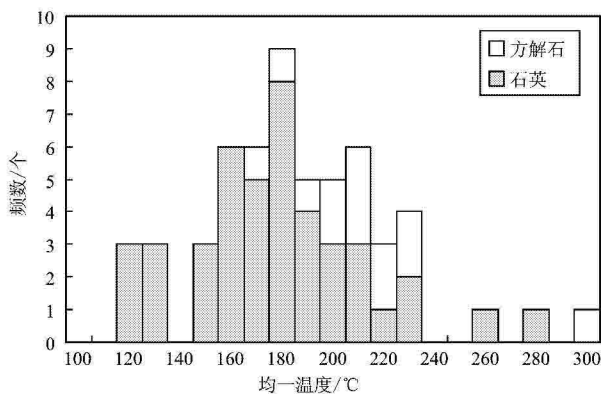


图 7 合仁坪金矿床流体包裹体均一温度直方图

Fig. 7 Histogram of homogenization temperature for fluid inclusions in the Herenping gold deposit

al., 2012)。岩石发生破裂的主要影响因素为抗张强度、主应力和流体压力；根据 Griffith 准则，岩石发生破裂的惟一条件是应力莫尔圆与破裂包络线相切，即当流体压力大于或等于最小主应力与岩石的抗张强度之和时，岩石就会发生破裂(Sibson et al.,

1988; 邵世才等, 1994; 唐诗佳, 1998)。此外，岩石本身的性质及流体与围岩之间的作用等辅助机制对岩石破裂也相当重要，岩石的不均匀性、先存断裂以及蚀变等均可降低岩石的强度(Germanovich et al., 1997; Lorilleux et al., 2002; 丁梧秀等, 2009; Ord et al., 2012)。

液压致裂角砾岩的形成过程较为复杂，在这个过程中热液脉动性贯入，会造成流体压力的反复变化，从而引起周期性的岩石破碎。地质学家将这种岩石周期性破裂过程划分为不同的阶段，如 Jébrak (1997)将热液作用导致岩石发生破裂划分为应力传播、岩石磨蚀及裂隙扩张 3 个阶段；Cas 等(2011)通过对意大利帕纳雷阿火山区域角砾进行分析，提出该区热液成因角砾岩经历了液压平衡、初始破裂、完全破裂、压力衰减 4 个阶段。通过对合仁坪矿区的角砾岩系统分析，并结合前人的研究成果，笔者将该区岩石的角砾化过程划分为应力腐蚀、岩石破碎及裂隙愈合 3 个阶段，并对不同阶段的形成过程进行初步反演(图 8)。

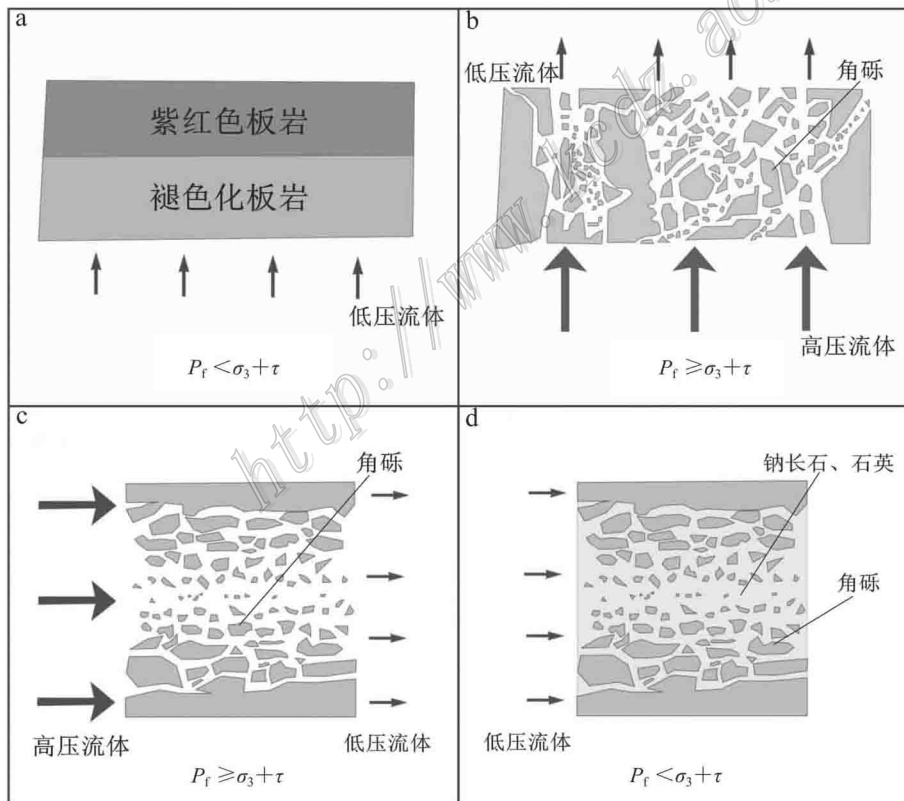


图 8 湘西合仁坪矿区角砾岩形成过程示意图

a. 应力腐蚀阶段；b. 岩石破碎阶段(垂直)；c. 岩石破碎阶段(顺层)；d. 裂隙愈合阶段
 P_f —流体压力； σ_3 —最小主应力； τ —抗张强度

Fig. 8 Diagram showing the formation of hydraulic breccias in the Herenping mining area, western Hunan
a. Stage of wear erosion; b. Stage of rock fracturing (vertical); c. Stage of rock fracturing (horizontal); d. Stage of crack sealing
 P_f —Fluid pressure; σ_3 —Minimum principal stress; τ —Tensile strength

4.1 应力腐蚀阶段

矿区马底驿组主要为紫红色板岩,热液流体从底部上侵,由于围岩的不均一性及颗粒之间的孔隙,使流体与围岩之间发生交代,流体作用区域产生褪色化蚀变(图 8a),围岩的强度发生改变;同时,流体不断积累产生的流体压力不断增大,但此时的流体压力小于最小主应力与岩石抗张强度之和,围岩未完全发生破裂。

4.2 岩石破碎阶段

伴随区域蚀变作用达到饱和以及围岩微裂隙的存在,当流体积聚的压力大于或等于最小主应力与岩石抗张强度之和,此时引起岩石破碎,所产生的角砾具有明显的原地破裂特征,且呈现良好的拼合性,同时岩石破裂也为成矿流体提供运移通道(图 8b)。Baker 等(1986)认为在地下 0.5~1 km 附近,岩石力学结构导致应力从垂直方向往水平方向转换,这有利于水平方向产生裂隙;该区受到近 NW 向挤压应力作用,形成 NE 走向的背斜,在背斜核部产生多条近 NEE 向的节理裂隙,对后期矿脉的走向有一定控制作用;同时,构造挤压作用影响,会使沉积岩岩层间的薄弱面上产生微弱的层间滑动和裂隙,引起局部应力集中,在流体运移过程中,从而使顺脉体延伸方向更易发生破裂;高压流体的灌入,使围岩破裂,形成棱角分明的角砾,其中差异应力的存在,液压作用会根据应力场产生定向性(池国祥等,2011),并在矿脉中形成大量呈定向排布的不规则状角砾,由于不同位置所受的流体应力的挤压强度不同,围岩破碎角砾具有较为明显的分带性(图 8c)。

4.3 裂隙愈合阶段

岩石破裂产生负压区,热液流体迅速进入裂隙,伴随着流体的压力及温度迅速下降,热液矿物冷凝结晶为石英与钠长石,胶结破碎岩石,同时,充填于蚀变围岩的微裂隙之中,产生侧羽脉、分叉脉(图 8d);由于裂隙中液压的降低,以及围岩中流体及深部流体涌入裂隙中快速沉淀,造成围岩渗透率下降,为后期热液再次上升积累压力,达到岩石破裂条件,引发下一次液压致裂过程。

5 结 论

(1) 合仁坪金矿床角砾岩表现出原地破裂特征,角砾棱角分明,成分简单,分选性差,拼合性较好,角砾排布定向性明显,为液压致裂产物。

(2) 矿脉中脉体呈现分叉状、侧羽脉、分支复合现象及石英透镜体特征,同时,脉体内的细脉黄铁矿及微观石英胶结钠长石现象,反映了成矿流体的脉动性贯入。

(3) 该区角砾岩形成过程经历了应力腐蚀、岩石破碎及裂隙愈合 3 个阶段,这 3 个阶段周期性重复出现,形成了矿区较复杂的液压致裂型角砾岩。

References

- Baker E M, Kirwin D J and Taylor R G. 1986. Hydrothermal breccia pipes[M]. EGRU Contribution, James Cook University of North Queensland. 1-45.
- Bryner L. 1961. Breccia and pebble columns associated with epithermal ore deposits[J]. Econ. Geol., 56:488-508.
- Cas R, Giordano G, Balsamo F, Esposito F and Mastro S L. 2011. Hydrothermal breccia textures and processes: Lisca Bianca Islet, Panarea volcano, Aeolian Islands, Italy[J]. Econ. Geol., 106:437-450.
- Chen Y J, Ni P, Fan H R, Pirajno F, Lai Y, Su W C and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(9): 2085-2108 (in Chinese with English abstract).
- Chi G X, Xue C J, Qing H R, Xue W, Zhang J W and Sun Y Q. 2011. Observations of clastic injection and hydraulic fracturing structures in the Jinding Zn-Pd deposit, Yunnan, China and hydrodynamic analysis[J]. Earth Science Frontiers, 18(5): 29-42 (in Chinese with English abstract).
- Chi G X, Xue C J, Qing H R, Xue W, Zhang J and Sun Y Q. 2012. Hydrodynamic analysis of clastic injection and hydraulic fracturing structures in the Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan, China[J]. Geoscience Frontiers, 3: 73-84 (in Chinese with English abstract).
- Clark C and James P. 2003. Hydrothermal brecciation due to fluid pressure fluctuations: Examples from the Olary Domain, South Australia[J]. Tectonophysics, 366:187-206.
- Cox S F, Knackstedt M A and Braun J. 2001. Principles of structural control on permeability and fluid flow in hydrothermal systems[J]. Society of Economic Geologists Reviews, 14:1-24.
- Ding W X and Feng X T. 2009. Damage effect and fracture criterion of rock with multi-preexisting cracks under chemical erosion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 31(6): 809-904 (in Chinese with English abstract).
- Fyfe W S, Price N J and Thompson A B. 1978. Fluids in the earth crust[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company. 253-274.
- Germanovich L N, Astakhov D K, Mayerhofel M J, Shlyapobersky J and Ring L M. 1997. Hydraulic fracture with multiple segments I. Observations and model formulation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34:1-19.
- Gold Command of Chinese People's Armed Police. 1996. Geology of

- Woxi-type stratabound gold deposit in Hunan Province[M]. Beijing: Earthquake Publishing House. 90-92 (in Chinese).
- Groves D I, Ridley J R, Bloem E M J, Gebre-Mariam M, Hagemann S G, Hronsky J M A, Knight J T, Mcnaughton N J, Ojala J, Vielreicher R M, Mccuaig T C and Holyland P W. 1995. Lode-gold deposits of the Yilgarn Block: Products of late Archaean crustal-scale overpressured hydrothermal systems[J]. *Geologies Society Special Publication*, 95:155-172.
- Hubbert M K and Wills D G. 1957. Mechanics of hydraulic fracturing[M]. *Transactions of Society of Petroleum Engineers of AIME*, 210:153-166.
- Jébrak M. 1997. Hydrothermal breccias in vein-type deposits: A review of mechanisms, morphology and size distribution[J]. *Ore Geology Reviews*, 12:111-134.
- Laznicka P. 1988. Breccias and coarse fragmentites: Petrology, environments, associations, ores[J]. *Econ. Geol.*, 25:832.
- Li J W and Li X F. 1997. Hydraulic fracture and its study significance[J]. *Geological Science and Technology Information*, 16(4):29-34 (in Chinese with English abstract).
- Li S J and Peng E S. 1999. Study on fracture structure and ore fluid fracturing metallogenesis in the Qingshitang ore field[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 23(4):328-333 (in Chinese with English abstract).
- Li S S. 1991. Elementary opinion about the ore-finding breakthrough in Hunan[J]. *Hunan Geology*, 10(1):5-9 (in Chinese with English abstract).
- Li X F, Li J W, Li Z J and Fu S R. 2001. Hydraulic fracturing breccia: An important geological anomaly and ore-finding indicator[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 26(2):135-138 (in Chinese with English abstract).
- Lorilleux G, Jébrak M, Cuney M and Baudemont D. 2002. Polyphase hydrothermal breccias associated with unconformity-related uranium mineralization (Canada): From fractal analysis to structural significance[J]. *Journal of Structural Geology*, 24: 323-338.
- Luo Z K, Miao L C and Guan K. 1999. Breccia-hosted Au deposit: An Au deposit type to which attention should be paid[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resource Research*, 14(4):15-23 (in Chinese with English abstract).
- Mahrer K D. 1999. A review and perspective on far-field hydraulic fracture geometry studies[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 24:13-28.
- Mao Z L, Lai J Q and Peng S L. 2009. The characteristics of breccias and analysis of origin near ore boodles in Fenghuashan copper deposits, Tongling[J]. *Mineral Petrol.*, 29(4):491-495 (in Chinese with English abstract).
- Ohle E L. 1985. Breccias in Mississippi Valley-type deposits[J]. *Econ. Geol.*, 80:1736-1752.
- Ord A, Hobbs B E and Lester D R. 2012. The mechanics of hydrothermal systems: I. Ore systems as chemical reactors[J]. *Ore Geology Reviews*, 49: 1-44.
- Peng B and Cheng G H. 2002. Some important structure-fluid interactions during the geological processes[J]. *Geological Review*, 48(5): 495-504 (in Chinese with English abstract).
- Peng E S and Sun Z J. 1994. Study on metallogenic structure of vein-shaped deposits[J]. Changsha: Central South University of Technology Press. 52-93 (in Chinese).
- Peng J T. 1999. Gold mineralization and its evolution in the Xuefengshan district, Hunan[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 23(2):144-151 (in Chinese with English abstract).
- Ruggieri G and Gianelli G. 1999. Multi-stage fluid circulation in a hydraulic fracture breccia of the Larderello geothermal field (Italy)[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 90: 241-261.
- Scholz C H. 1990. The mechanics of earthquakes and faulting[M]. Cambridge University Press. 439.
- Shao S C and He S X. 1994. Formation mechanism of the gold-bearing quartz veins[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 18(2):155-162 (in Chinese with English abstract).
- Shao S C, He S X and Xi X S. 1993. Research on mechanism of formation of the ore-hosted fractures and gold -bearing quartz veins at Xiaoqinling area[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resource Research*, 8(2):26-33 (in Chinese with English abstract).
- Sibson R H. 1986. Brecciation processes in fault zones: Inferences from earthquake rupturing[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 124:159-175.
- Sibson R H, Robert F and Poulsen K H. 1988. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling and mesothermal gold-quartz deposits[J]. *Geology*, 16:551-555.
- Sibson R H. 1990. Conditions of fault-valve behavior[J]. *Geological Society, London, Special Publication*, 54:15-28.
- Tang J R, Wang J C, Wang G F, Peng E S and Shi J H. 2002. The geological features and preliminary study of gold-hosted breccias in Shuangwang ore deposit, Shanxi[J]. *Northwest Geology*, 35(1): 60-64 (in Chinese with English abstract).
- Tang S J, Peng E S, Sun Z J and Gao G M. 1998. High-pressure fluid and mesothermal and epithermal gold-quartz deposits[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 22: 73-77 (in Chinese with English abstract).
- Tang S J, Sun Z J, Peng E S and Gao G M. 2000. The type of hydrofracturing and its discussion of mechanism[A]. *China mine geological prospecting and mineral economy proseminar papers*[C]. Changsha: Central South University of Technology Press. 151-154 (in Chinese).
- Tu G Z. 1984. Geochemistry of strata-bound deposits in China (vol.2)[M]. Beijing: Science Press. 1-708 (in Chinese).
- Wang G F, Sun Z J, Peng E S, Wang J C, Tang J R and Shi J H. 2002. A discussion on dynamic genesis of the breccias developed in the Shuangwang gold deposit in Shanxi Province, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 26(1):81-85 (in Chinese with English abstract).
- Wang G Q, Peng J T, Zhang D L, Yang J H and Shen N P. 2009. Mineralogy and geochemistry of albties from the Liulincha gold ore

- belt, western Hunan Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(4):463-470 (in Chinese with English abstract).
- Wang J C, Peng E S and Sun Z J. 1999. The Yinmin breccias in Dongchuan is hydrofracturing breccias-Geological evidences and genetic significances[J]. *Geological Review*, 45(1):70 (in Chinese).
- Wang J C, Peng E S and Sun Z J. 2000. Classification and geological signification of fluid dynamic breccias[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 35(1):18-23 (in Chinese with English abstract).
- Wang J C, Tang J R, Wang G F and Shi J H. 2001. Formation of gold-bearing hydrofracturing breccia body and prognosis of gold ore body in the Shuangwang gold deposit, Shanxi Province[J]. *Geological Review*, 47(5):508-513 (in Chinese with English abstract).
- Willson C J L, Robinson J A and Dugdale A L. 2009. Quartz vein fabrics coupled to elevated fluid pressures in the Stawell gold deposit, south-eastern Australia[J]. *Mineralium Deposita*, 44:245-263.
- Zhang H T and Rui Z Y. 1991. On the genetic classification of mineralization breccias related to porphyry deposits and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 10(5):265-272 (in Chinese with English abstract).
- Zhang T and Peng J T. 2014. Wall-rock alteration and mass balance of Herenping albite-quartz vein-type gold deposit in the western Hunan[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 36(4):1-13 (in Chinese with English abstract).
- Zhao L S, Cen K and Ye R. 2000. Dynamic simulation of the uplifting pipe flow of hydrothermal fluid by tectonic pumping and its prediction significance[J]. *Earth Science Frontiers-China University of Geosciences (Beijing)*, 7(1):205-215 (in Chinese with English abstract).
- Zhen Y Q. 1976. Breccia and prospecting[J]. *Geology and Prospecting*, (8):14-24 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 23(9):2085-2108.
- 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[J]. *地学前缘*, 18(5):29-42.
- 丁梧秀, 冯夏庭. 2009. 化学腐蚀下裂隙岩石的损伤效应及断裂准则研究[J]. *岩土工程学报*, 31(6):809-904.
- 黎盛斯. 1991. 湖南找矿突破浅议[J]. *湖南地质*, 10(1):5-9.
- 李建威, 李先福. 1997. 液压致裂作用及其研究意义[J]. *地质科技情报*, 16(4):29-34.
- 李石锦, 彭恩生. 1999. 清水塘矿田断裂构造与矿液致裂成矿浅析[J]. *大地构造与成矿学*, 23(4):328-333.
- 李先福, 李建威, 李紫金, 傅昭仁. 2001. 水力压裂角砾岩: 一种重要的地质异常和找矿标志[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 26(2):135-138.
- 罗镇宽, 苗来成, 关康. 1999. 角砾岩金矿床——一种值得重视的金矿类型[J]. *地质找矿论丛*, 14(4):15-23.
- 毛政利, 赖建清, 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[J]. *矿物学报*, 29(4):491-495.
- 彭渤, 陈广浩. 2002. 地质过程中几种重要的构造-流体作用[J]. *地质论评*, 48(5):495-504.
- 彭恩生, 孙振家. 1994. 脉状矿床成矿构造研究[M]. 长沙: 中南工业大学出版社. 52-93.
- 彭建堂. 1999. 湖南雪峰地区金成矿演化机理探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 23(2):144-151.
- 邵世才, 何绍勋, 奚小双. 1993. 小秦岭脉型金矿床容矿断裂及石英脉形成机制的探讨[J]. *地质找矿论丛*, 8(2):26-33.
- 邵世才, 何绍勋. 1994. 剪切带型金矿床中含石英英脉的一种可能成生机制[J]. *大地构造与成矿学*, 18(2):155-162.
- 汤静如, 汪劲草, 王国富, 彭恩生, 史静海. 2002. 陕西双王含金角砾岩地质特征及成因初探[J]. *西北地质*, 35(1):60-64.
- 唐诗佳, 彭恩生, 孙振家, 高光明. 1998. 高压流体与中、低温石英脉型金矿床[J]. *大地构造与成矿学*, 22:73-77.
- 唐诗佳, 孙振家, 彭恩生, 高光明. 2000. 矿液致裂作用的类型及其力学成因探讨[A]. 中国矿山地质找矿与矿产经济——中国矿山地质找矿和矿产经济研讨会论文集[C]. 长沙: 中南大学出版社. 151-154.
- 涂光炽. 1984. 中国层控矿床地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 1-708.
- 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[J]. *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[J]. *长春科技大学学报*, 35(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体形成过程和金矿体预测[J]. *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[J]. *大地构造与成矿学*, 26(1):81-85.
- 王国强, 彭建堂, 张东亮, 阳杰华, 沈能平. 2009. 湘西柳林汉金矿带中钠长石的矿物学和地球化学特征[J]. *矿物学报*, 29(4):463-470.
- 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[J]. *矿床地质*, 10(5):265-272.
- 张婷, 彭建堂. 2014. 湘西合仁坪钠长石-石英脉型金矿床围岩蚀变研究[J]. *地球科学与资源学报*, 36(4):1-13.
- 赵伦山, 岑况, 叶荣. 2000. 热液流体泵吸上侵管流动力学模拟及其预测意义[J]. *地学前缘*, 7(1):205-215.
- 真允庆. 1976. 角砾岩及其找矿[J]. *地质与勘探*, (8):14-24.
- 中国人民武装警察部队黄金指挥部. 1996. 湖南省沃溪式层控金矿地质[M]. 北京: 地震出版社. 90-92.