

水力压裂角砾岩：一种重要的地质异常和找矿标志

李先福¹ 李建威² 李紫金² 傅昭仁²

(1. 武汉化工学院资源工程研究所, 武汉 430073; 2. 中国地质大学资源学院, 武汉 430074)

摘要: 水力压裂作用是地壳内的一种重要变形破裂方式, 许多热液脉体和热液矿床直接受其控制. 以华南金银寨大型铀矿床为例, 详细介绍了水力压裂角砾岩和裂隙一脉的几何特征、鉴别标志和形成机制. 水力压裂角砾岩不仅是一种重要的地质异常; 而且常伴随不同程度的金属矿化而使之成为一种重要的矿化体和找矿标志.

关键词: 水力压裂作用; 矿化角砾岩; 裂隙一脉; 地质异常; 金银寨铀矿床.

中图分类号: P618.4; P612 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2001)02-0135-04

作者简介: 李先福, 男, 副教授, 1962年生, 1998年毕业于中国地质大学研究生院, 获博士学位, 现主要从事构造地质及矿产勘查的教学和研究工作.

水力压裂作用(hydraulic fracturing)是地壳范围内一种重要的变形破裂方式, 而且从宏观到微观尺度上都有反映^[1,2]. 此处的水泛指各种热水溶液和超临界流体. 当流体压力 p_f 超过最小主应力 σ_3 和岩石抗张强度 R_t 之和时, 理论上便会发生水力压裂作用, 其结果是形成一定规模的角砾岩和热液脉体. 作者近几年来对华南的花岗岩型和硅质岩型铀矿床、热液型铅—锌矿床和鲁西地区的一些金矿床进行了深入的研究, 发现相当数量矿床的形成与水力压裂作用密切相关. 在许多矿区, 水力压裂角砾岩作为主要的矿石类型进行开采. 本文以华南金银寨大型铀矿床为例, 对水力压裂角砾岩的几何特征、鉴别标志、形成机制和找矿意义进行详细论述.

1 成矿地质背景

金银寨铀矿床位于华南中生代陆内走滑造山带的西缘^[3], 区域构造隶属于 NNE 向茶陵—郴县—临武左行走滑断裂(图 1). 该断裂自三叠纪末期开始活动, 并经历了从会聚走滑(侏罗纪)向离散走滑(白垩纪—老第三纪)的构造性质转换. 其中侏罗纪时期的会聚走滑导致区域上众多重熔型花岗岩体

的侵位, 而自白垩纪早期开始的离散走滑则形成大量走滑盆地, 如矿区附近的茶陵—永兴盆地(图 1). 金银寨矿床直接赋存于末阳—临武复式向斜东南翼由下二叠统当冲组(P_1d)硅质岩和硅质页岩夹泥质岩组成的次级背斜核部.

矿区及其外围出露的地层为泥盆系至第三系(图 1). 泥盆—石炭系主要为砂岩、粉砂岩、泥质灰岩夹白云岩. 二叠系从下到上分为栖霞组、当冲组和斗岭组, 其中当冲组为细粒石英砂岩、黑色硅质页岩和炭质页岩夹少量煤层, 总厚 800 余 m, 是金银寨矿床最重要的赋矿层位(90%的矿石位于当冲组内). 当冲组内总共含有 9 层强烈硅化的黑色硅质、炭质页岩, 每层厚 15~42 m 不等. 这些页岩富含粘土矿物、有机质和生物腐殖质, 对于铀的初始预富集具有重要的作用. 白垩—第三系红层厚 5 000 余 m.

2 金银寨矿床基本矿化特征

金银寨矿床的铀矿化全部产于由当冲组组成的 3 个次级背斜核部(图 2), 铀矿石类型以角砾岩型为主, 矿石平均品位 0.4%, 主要的矿石矿物为沥青铀矿, 在矿床顶部可见一些表生铀矿物, 如湘江铀矿等. 沥青铀矿常呈胶状、葡萄状、草莓状、烟灰状显微颗粒或集合体产于角砾的边缘和胶结物中, 金属矿物为辉钼矿和少量的黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方

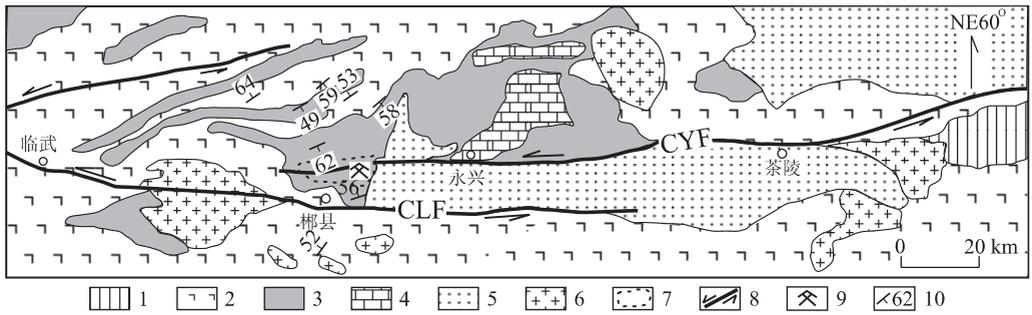


图 1 金银寨矿床地质略图

Fig. 1 Sketch map showing the geological setting of Jinyinzhai uranium deposit

1. 前泥盆系; 2. 泥盆系—石炭系; 3. 二叠系; 4. 三叠系; 5. 白垩—第三系; 6. 中生代花岗岩; 7. 水力压裂角砾岩分布区; 8. 走滑断裂; 9. 金银寨矿床; 10. 地层产状

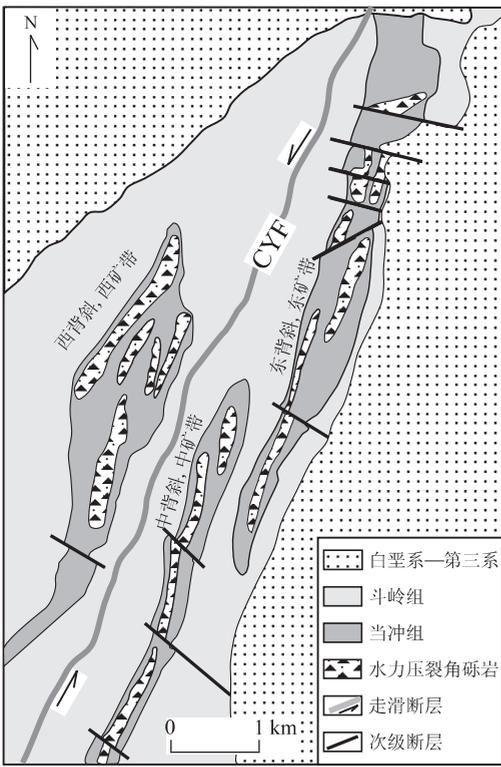


图 2 金银寨矿床矿化水力压裂角砾岩平面分布特征

Fig. 2 Planar distribution of the U-bearing hydraulic fracturing breccias

铅矿、黄铜矿、硫镉矿、方硫镉矿和赤铁矿。脉石矿物为石英和少量的方解石、萤石、绿泥石和粘土矿物。围岩蚀变很简单, 主要为硅化作用, 其次为碳酸盐化。沥青铀矿的铀—铅同位素测年结果表明, 角砾岩型矿石的成矿年龄为 $(60 \pm 5) \text{Ma}$, 相当于白垩纪末期和老第三纪之间。

角砾岩型矿石中含有大量的原生和次生包裹体, 镜下常见富气相包裹体与富液相包裹体共存, 表

明成矿流体可能发生过沸腾和相分离。原生包裹体的均一温度 $150 \sim 280 \text{ }^\circ\text{C}$, 盐度 $w(\text{NaCl}) = 5.6\% \sim 13.4\%$, 主要成分包括 Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_2 。稳定同位素研究结果表明, 成矿流体的 $\delta(\text{D}) = -110 \times 10^{-3} \sim -134 \times 10^{-3}$, $\delta(^{18}\text{O}_{\text{水}}) = -0.6 \times 10^{-3} \sim 3.1 \times 10^{-3}$, 相当于建造水和经过充分循环的大气降水^[4]。

3 矿化角砾岩和裂隙—脉

3.1 矿化角砾岩特征

矿化角砾岩体呈 NNE 向线状排列, 与区域走滑断裂和次级背斜构造线方向一致(图 2), 其基本特征如下: (1) 单个角砾岩体的形态在平面上以近椭圆为主, 剖面上呈向上分枝的锥状和筒状, 主要产于次级背斜核部的当冲组内。角砾岩体具有明显的水平和垂直分带性, 中心部位和深处为成分复杂的角砾岩带, 由中心向外和由深部向上过渡为成分较简单的角砾岩带→震碎围岩角砾岩带→硅化围岩→新鲜围岩。(2) 角砾主要为棱角状、次棱角状, 分选性很差, 大者可达几十 cm, 小者仅在显微镜下可见。角砾的胶结物(基质)基本上为含铀微晶石英和隐晶质硅质物, 宏观上表现为含铀微晶石英网脉杂乱穿插于角砾之间。硅质脉粗大处, 角砾有一定的旋转和溶蚀; 硅质脉细小处, 角砾几乎没有位移和溶蚀, 可拼性很好。(3) 角砾一般具有多次角砾岩化的特征, 为当冲组岩石经多次破碎胶结的产物。晚期形成的角砾常包裹早期角砾。角砾有时呈撕裂状, 甚至呈藕断丝连的布丁构造, 似断非断、断而相连。(4) 角砾与基质之间界线截然, 二者的来源和成分很不一致, 反映

胶结物的异地性。显微构造研究表明,角砾与围岩的内部变形程度一致,而胶结物内部不发育显微构造,说明角砾岩并非构造应力作用的产物。(5)角砾中晶洞和孔洞构造发育,晶洞内可见大量气孔,部分孔洞中尚保存有密封的高压流体^[5]。

3.2 裂隙—脉几何特征

通常岩石中水压裂隙会迅速被高压热液流体充填,形成裂隙—热液脉体系统。金银寨矿床的裂隙—脉具有以下特征:(1)以角砾内部的孔洞为中心,往往发育放射状裂隙,每条裂隙呈直线状,其宽度自放射状中心向外由粗变细,直至尖灭。这些裂隙一般被灰色含铀微晶石英充填。(2)脉的两壁平直,与围岩界线截然。脉壁没有擦痕和阶步等断层作用的标志。脉中常有呈漂浮状的围岩夹石,在脉的两侧和端部,夹石含量高,向中心逐渐减少直至缺失。(3)单条脉体往往具有平行复脉的特征。扫描电镜分析发现^[4],硅质脉中至少有 5 个清晰的晶体生长带,反映裂隙—脉具有增量沉淀的历史^[6]。(4)裂隙—脉在空间上无优选方位,排列组合杂乱无章,多呈网脉状胶结角砾,单条脉的几何特征主要包括长直线状、“之”字形、树枝状和羽列状。脉的终端分叉现象十分常见。这些几何特征与 Beach^[7]对水力压裂裂隙—脉的数学模拟结果一致。(5)裂隙—脉中含有丰富的流体包裹体,常见富气相和富液相包裹体共存。包裹体的均一温度为 150~280 °C,压力(189~654)×10⁵ Pa^[4],可见其温压条件变化范围很大。

4 水力压裂角砾岩形成机制及其对铀成矿的作用

构造解析表明金银寨矿区的矿化角砾岩是水力压裂作用的产物,这主要表现在:(1)形成时间稍早于金银寨矿化角砾岩的茶陵—永兴走滑盆地规模较大,面积几百 km²,沉积厚度逾 5 000 m,沉积物为渗透性很强的红色砂砾岩,从而为大量地下水(其组成主要为建造水和大气降水)的汇聚、下渗和循环创造了良好的条件,从而保证大规模水力压裂作用和铀矿化作用有足够的水源。(2)经过矿区的茶陵—永兴和郴县—临武走滑断裂深切达下地壳—上地幔^[3],为不同深度层次的流体运移提供了有利的通道。该断裂在侏罗纪时期的强烈会聚走滑促进了岩石的部分熔融,于中—下地壳形成了规模较大的深熔体

(带),其中部分岩浆沿断裂向上侵位冷凝形成了花岗岩体。显然,矿区处于热异常范围内。除深熔岩浆房提供的热以外,该区还是一个显著的地热异常和放射性衰变热异常区^[4]。所有这些热异常能持续不断地加热流体,而白垩纪—老第三纪的离散走滑运动及由其产生的大量张扭性断层,有力地促进了冷流体的对流循环。可见,矿区的构造—岩浆条件为水力压裂作用的进行提供了必要的能量保证。(3)当冲组硅质、炭质页岩充当了良好的屏蔽层。深部被加热的流体逐渐汇聚于这种屏蔽层组成的背斜核部时,其能量将不断积累,内压逐渐增大,甚至超过静岩负荷。当 $p_f \geq \sigma_3 + R$ 时,水力压裂作用便会发生。高压热流体中的能量将因使岩石发生破裂、裂隙和角砾岩化而被消耗,并同时导致成矿物质的沉淀。随后流体压力将再次积聚,水力压裂作用再次发生,具体表现为矿区岩石的多次角砾岩化和裂隙—脉的增量沉淀。

水力压裂作用直接导致了金银寨矿床的形成,并控制了矿化特征。水力压裂作用所产生的大量网状裂隙为含铀微晶石英脉的沉淀提供了良好的空间。该区的角砾岩型矿石为最重要的矿石类型,沥青铀矿主要赋存于裂隙—脉中和角砾的边缘,这些事实充分证实了上述结论。另外,沥青铀矿、石英和黄铁矿等矿物的结晶程度都极差,主要就是因水力压裂作用之后流体压力聚降,流体迅速膨胀,其温度、压力、pH 值、氧逸度、相态、压力组成等物理化学性质发生急剧变化,由此使成矿作用得以快速进行,成矿物质结晶很不充分。最后,水力压裂作用多次发生,使矿化得以持续进行,所形成的矿石品位较富。矿区内最大最富的矿体均位于角砾岩体中上部。

5 讨论和结论

形成水力压裂角砾岩的必要条件是异常流体压力的存在。张性体制下发生水力压裂作用所需的最小流体压力 p_f 可用下式估算^[1]:

$$p_f \approx (p_l + 2p_h)/3.$$

设金银寨矿区角砾岩化和铀矿化的深度为 1 200~1 500 m,上覆岩石的平均密度为 2.6 g/cm³,则静岩压力 p_l 和静水压力 p_h 分别为(300~375)×10⁵ Pa 和(117~150)×10⁵ Pa。从而由上式计算出 $p_f = (178~225) \times 10^5$ Pa;而根据流体包裹体温度和盐度(密度)估算的流体压力为(189~654)×10⁵

Pa^[4]。显然,成矿热液属于一种异常流体压力体系,满足水力压裂作用发生的力学条件。

不渗透屏障对于异常流体压力的发育至关重要。金银寨矿区以页岩为主的当冲组可能充当了流体屏蔽层;3 个次级背斜核为热流体的汇集和形成异常流体压力提供了构造场地。在相对封闭条件下,温度的适度增高会使流体压力急剧增大,因此,热流体在不渗透屏障之下的背斜核部的聚积以及深部热流的持续供热而导致热流体内能(内压)增大并发生近绝热膨胀,进而发生水力压裂作用和铀矿化作用。

成矿元素铀可能呈硅酸络合物 $n\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{UO}_2 \cdot m\text{SiO}_2$ 和碳酸盐络合物 $M \cdot \text{UO}_2(\text{CO}_3)_3$ 及 $M[\text{UO}_2(\text{SiO}_2)_4(\text{CO}_3)]$ 等形式迁移(M 代表阳离子),因为这类络合物溶解度很大,在弱酸—弱碱性条件下很稳定。当水力压裂作用使含铀流体的物理—化学性质发生急剧变化时,这些络合物便会迅速解体和沉淀。矿区内呈微晶和隐晶质的沥青铀矿、石英及砂糖状碳酸盐化能合理地解释以上过程。

越来越多的研究表明,水力压裂作用是形成热液矿床的一种重要机制。典型的例子有加蓬共和国的 Francevillian 铀矿、美国内华达州南部 Nelson 地区的第三纪角砾岩型 Au—Ag 矿床、英国 Irish Vanscides 地区的含金石英脉、印度尼西亚 Tandai 矿区的含金角砾岩及众多卡林型金矿等等,国内的水口山铅锌矿床、黄峰岭铀矿床、牛尾岭铀矿床、邵

东铅锌矿床、高桥多金属矿床、鲁西归来庄金矿床等与水力压裂作用有着非常密切的成因联系。此外水力压裂角砾岩还是一种十分重要的地质异常和找矿标志。国外称这种矿化角砾岩为“选厂岩”,形象地表明了其重要的找矿意义。

研究工作得到了宋鸿林教授的指导及陈小东、方适宜等同志的协助,在此致以衷心感谢。

参考文献:

- [1] Hubbert M K, Willis D G. Mechanics of hydraulic fracturing [J]. Trans Am Inst Mech Engrs, 1957, 210: 153~169.
- [2] Fyfe W S. Fluids, tectonics and crustal deformation [J]. Tectonophysics, 1986, 119: 29~36.
- [3] 傅昭仁,李紫金,郑大瑜. 湘赣边 NNE 向走滑造山带构造发展样式[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 263~272.
- [4] 李建威. 湘东 NNE 向走滑断裂—流体—铀成矿作用及靶区圈定[D]. 武汉:中国地质大学, 1998. 92~94.
- [5] 肖晋,郑福端,韩兰生. 320 铀矿床隐爆成矿特征及其找矿意义[J]. 铀矿地质, 1994, 10(5): 12~20.
- [6] Ramsay J G. The crack-seal mechanism of rock deformation [J]. Nature, 1980, 284: 135~139.
- [7] Beach A. Numerical models of hydraulic fracturing and the syntectonic veins [J]. J Struct Geol, 1980, 2(4): 425~438.

HYDRAULIC FRACTURING BRECCIA: AN IMPORTANT GEOLOGICAL ANOMALY AND ORE-FINDING INDICATOR

Li Xianfu¹ Li Jianwei² Li Zijin² Fu Zhaoren²

(1. Institute of Resources Engineering, Wuhan College of Chemical Technology, Wuhan 430073, China; 2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Hydraulic fracturing is one of the most significant deformation form within the crust. Many hydrothermal veins and ore deposits are formed through hydraulic fracturing. As a case study, this contribution integrates available geological data in an attempt to document the geometric pattern, recognizing features as well as origin of the breccia-vein system from the Jinyinzhai uranium deposit, South China. Current study demonstrates that hydraulic fracturing has exerted critical effects on hydrothermal mineralization, and that the associated breccia is a significant ore-finding indicator.

Key words: hydraulic fracturing; mineralized breccia; fissure-vein; geological anomaly; Jinyinzhai uranium deposit.