

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.07.011

安徽省池州抛刀岭金矿床金的赋存状态及成因研究

冷慧聪^{1,2,3}, 袁峰^{1,2,3}, 邓宇峰^{1,2,3}, 周涛发^{1,2,3}, 李跃^{1,2,3}

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 矿床成因与勘查技术研究中心, 安徽 合肥 230009; 3. 安徽省矿产资源与矿山环境工程技术研究中心, 安徽 合肥 230009)

摘要:抛刀岭金矿床位于长江中下游成矿带的安庆—贵池矿集区, 该矿床矿体主要赋存于蚀变的英安玢岩岩体中。文章对该矿床岩石样品岩相学采用电子探针、激光剥蚀多接收电感耦合等离子体质谱仪等测试分析。结果表明:抛刀岭金矿床的矿石矿物主要为黄铁矿、闪锌矿和毒砂等;脉石矿物主要为石英、方解石及黏土矿物;主要载金矿物为黄铁矿, 其次为毒砂;Au 主要以银金矿的形式存在于上述矿物中。载金黄铁矿微量元素结果显示, Au 与 As、Cu、Pb、Zn 等质量分数呈正相关, 与 Fe、S 质量分数呈负相关, 黄铁矿晶格中 As 的存在有利于 Au 代替 Fe 进入晶格中, 使得 Au 在黄铁矿裂隙中沉淀。电子探针分析金的赋存状态显示, 抛刀岭金矿床金主要以晶格金的形式存在于黄铁矿中, 部分以银金矿的形式存在于黄铁矿和毒砂的裂隙中。矿床硫化物中的硫主要来源于岩浆, 同时有少量的地层物质参与。混染成矿流体主要为来源于岩浆的出溶流体。

关键词:抛刀岭矿床;斑岩型金矿;黄铁矿;银金矿;地球化学;金的赋存

中图分类号:P611.11

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)07-0931-11

Occurrence state and genesis of gold in Paodaoling gold deposit, Chizhou City, Anhui Province

LENG Huicong^{1,2,3}, YUAN Feng^{1,2,3}, DENG Yufeng^{1,2,3}, ZHOU Taofa^{1,2,3}, LI Yue^{1,2,3}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Ore Deposit and Exploration Center(ODEC), Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Anhui Province Engineering Research Center for Mineral Resources and Mine Environments, Hefei 230009, China)

Abstract: The Paodaoling gold deposit is located in the Anqing-Guichi ore concentration area of the metallogenic belt in the middle and lower reaches of the Yangtze River. The ore body of the deposit mainly occurs in the altered dacite porphyrite. In this paper, the petrographic analysis for the rock samples of the deposit was conducted using electron microprobe and LA-(MC)-ICP-MS. The results show that the ore minerals of the Paodaoling gold deposit are mainly pyrite, sphalerite and arsenopyrite; gangue minerals are mainly quartz, calcite and clay minerals; the main gold-bearing mineral is pyrite, followed by arsenopyrite; Au mainly exists in the above minerals in the form of silver and gold. The analysis of trace element of gold-bearing pyrite shows that Au is positively correlated with the mass fractions of As, Cu, Pb, Zn, etc., and negatively correlated with the mass fractions of Fe and S. The presence of As in pyrite lattice is conducive to Au substitution for Fe into the lattice, making Au precipitate in pyrite cracks. Electron microprobe analysis of the occurrence of gold shows that the gold in the Paodaoling gold deposit mainly exists in pyrite in the form of lattice gold, and some in the form of silver and gold in the cracks of pyrite and arsenopyrite. The sulfur in the sulfide of the deposit mainly comes from magma, and a small amount of stratum material is involved. The mixed ore-forming fluid is mainly derived from magmatic exsolution fluid.

Key words: Paodaoling deposit; porphyry gold deposit; pyrite; silver-gold deposit; geochemistry; occurrence of gold

收稿日期:2022-06-21;修回日期:2022-08-15

基金项目:安徽省公益性地质调查资助项目(2021-g-2-12);安徽省国土资源科技资助项目(2020-K-14)

作者简介:冷慧聪(1995—),男,山东青岛人,合肥工业大学硕士生;

袁峰(1971—),男,广西桂林人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

周涛发(1964—),男,安徽庐江人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

长江中下游成矿带是我国东部一条重要的铜铁多金属成矿带,自西向东共分为 8 大矿集区:鄂东南、九瑞、安庆、贵池、铜陵、庐枞、宁芜、宣城、宁镇^[1],其中安庆—贵池矿集位于长江中下游成矿带中部,区内矿产资源丰富。近年来,区内相继探明了多个矿床,矿床规模主要为大中型,例如铜山铜矿、黄山岭铅锌矿、桂林郑钼矿、西山钼矿、抛刀岭(铺庄)金矿、花山锑金矿等,具有巨大的找矿潜力^[2]。与其他长江中下游成矿带矿集区相比,安庆—贵池矿集区矿床成因研究程度相对较低,仅铜山铜矿、马头铜钼矿、抛刀岭金矿和鸡头山、百丈岩钨钼矿等部分矿床有一些成果^[3]。这限制了对安庆—贵池矿集区岩浆与成矿系统特征的全面理解。

据研究,长江中下游成矿带斑岩型矿床成矿流体主要来自岩浆热液,为拆沉的富集岩石圈地幔部分熔融产生的基性岩浆和下地壳部分熔融产生的酸性岩浆混合而成。混合岩浆中基性岩浆端元对成矿至关重要,基性岩浆的混入使得混合岩浆富水、硫、金属(Cu、Au)和高氧逸度^[4]。

抛刀岭金矿是近年来安庆—贵池矿集区新发现大型金矿床之一。根据斑岩型铜金矿规律和本区最深的钻孔原生晕分析推测,矿体向深部仍有较大延伸,该区域可能存在一个大型斑岩型成矿体系,具有特大型金矿找矿潜力。俯冲带熔流体

高氧逸度特征对金和铜均具有较强的携带性^[5],因此常见矿床均表现为铜金共生,然而,抛刀岭金矿仅有 Au 成矿,为解释斑岩型矿床中 Au 运移与矿化机制的良好条件。

大量研究表明,成矿过程中金总与硫化物共生。黄铁矿的沉淀贯穿整个成矿过程,也是金的重要寄主矿物。黄铁矿微量元素可示踪成矿流体的性质和元素的地球化学性质,被广泛用于约束成矿流体特征和解释金矿床的成因^[6]。因此,本文拟利用黄铁矿的电子探针、背散射图、原位硫同位素、微量元素等分析手段对金的赋存状态进行研究并确定该矿床中金的主要赋存状态,同时探讨金元素和其他元素在成矿过程中的行为及相关性,以研究矿床成矿的详细过程和控制因素,也可体现流体的演化过程,显示金沉淀时的流体性质。

1 区域地质背景

1.1 长江中下游成矿带地质背景

长江中下游成矿带位于扬子板块北缘的长江断裂带内,受特提斯构造域、古太平洋构造域和深部壳幔作用过程复合形成的中生代转换构造背景控制^[7-8],长期的构造作用、岩浆活动和成矿作用形成了断隆区、断凹区的构造格局及丰富多样的铁、铜、金多金属等矿床组合,示意图^[1]如图 1 所示。

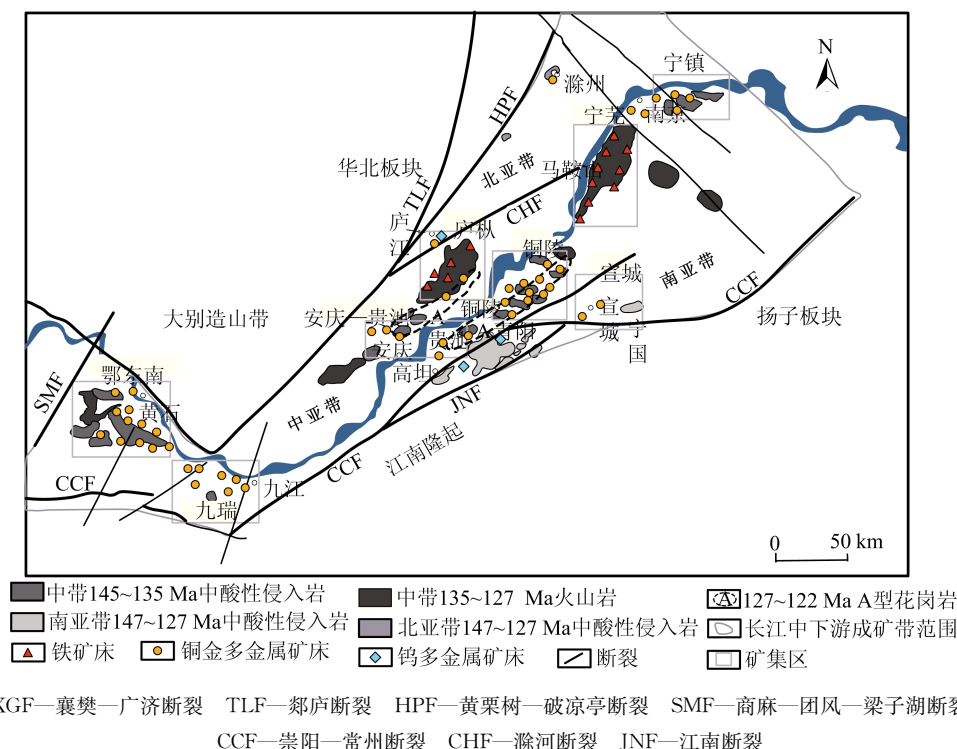


图 1 长江中下游成矿带划分示意图

其中,庐枞、宁芜矿集区主要位于断陷火山盆地(断凹区),铜陵、安庆—贵池、九瑞、宁镇等矿集区位于隆起区(断隆区),鄂东南矿集区则具有断隆区和断凹区的过渡性质。长江中下游地区矿床类型多样,以(层控)矽卡岩型、斑岩型(玢岩型)和热液脉型铜、铁、金成矿系列矿床为主,与燕山期岩浆作用和演化有关^[1]。

1.2 安庆—贵池矿集区地质背景

安庆—贵池矿集区位于下扬子沿江断褶带和

阳新一常州断裂之间,分布略图^[9]如图 2 所示。该断裂带将江南隆起带和沿江断褶带分隔开来,区内发育的岩体主要为晚中生代中酸性岩体,且岩体延伸方向与断裂带延伸方向基本相同,整体向北东向展布^[10]。地层属下扬子地层分区贵池地层小区,主要出露南华纪—早三叠世以碳酸盐建造为主、碎屑岩建造为辅的一套沉积盖层。古生代—早三叠世地层是本区 W、Mo、Pb、Zn、Cu、Au、Ag 等金属矿床主要的容矿层位^[11]。

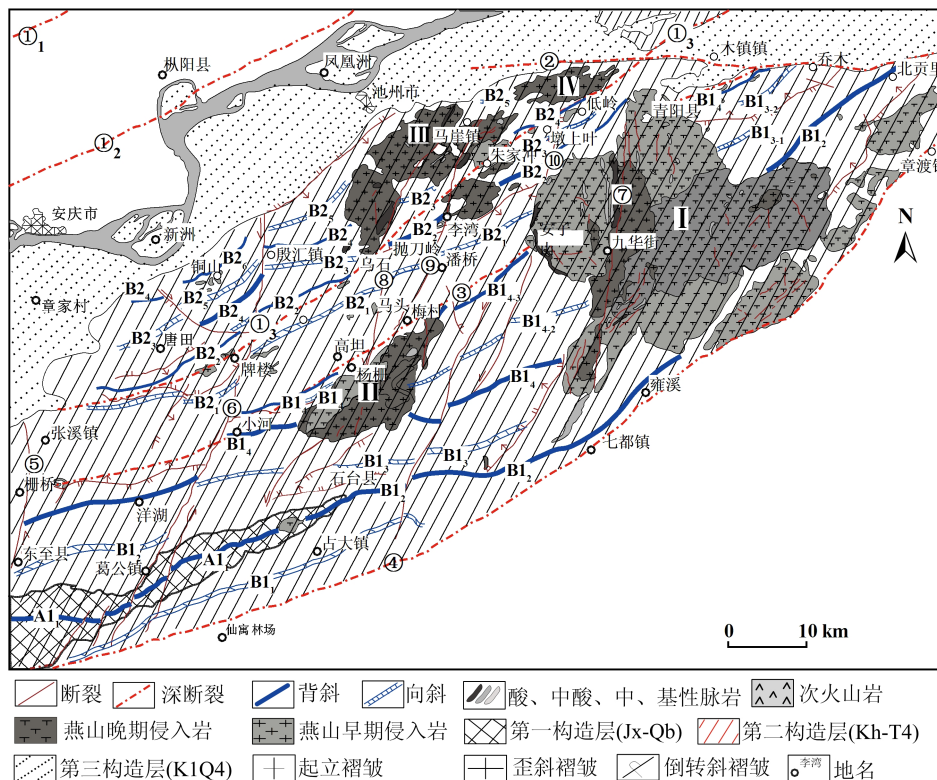


图 2 贵池地区及邻区构造、岩浆岩分布图

2 矿床地质特征

2.1 矿床地质特征

抛刀岭金矿位于安庆—贵池矿集区白笏—铜关里背斜之次级构造小福岭—自来山背斜的北西翼,地质图^[12]如图 3 所示。累计查明金金属质量大于 20 t,为池州地区首例大型金矿床。矿区主要出露地层为志留系地层,以下统高家边组的页岩和粉砂质页岩为主。北西部有中统坟头组和上统茅山组的砂岩、砂质页岩及少量泥质粉砂岩,北

西部边缘出露有泥盆系上统五通组中细粒石英砾岩和石英砂岩。邻近英安玢岩体的志留系地层岩石具轻微的角岩化和黄铁矿化。矿区内地层走向北东、倾向北西。

区内岩浆作用强烈,与金矿密切的英安玢岩分布面积占矿区总面积的 30%,是金矿体赋存的主要围岩。岩体走向为北东向,延伸长度约为 3 km,宽为 80~450 m,出露面积小于 1 km²,呈带状、树枝状^[13]。含矿英安玢岩的成岩年龄为 139~160 Ma,为晚侏罗—早白垩世(燕山期)形

成。矿体与金矿密切的英安玢岩呈北东向贯穿矿区,主岩体侵入在 F1、F2 断层之间。

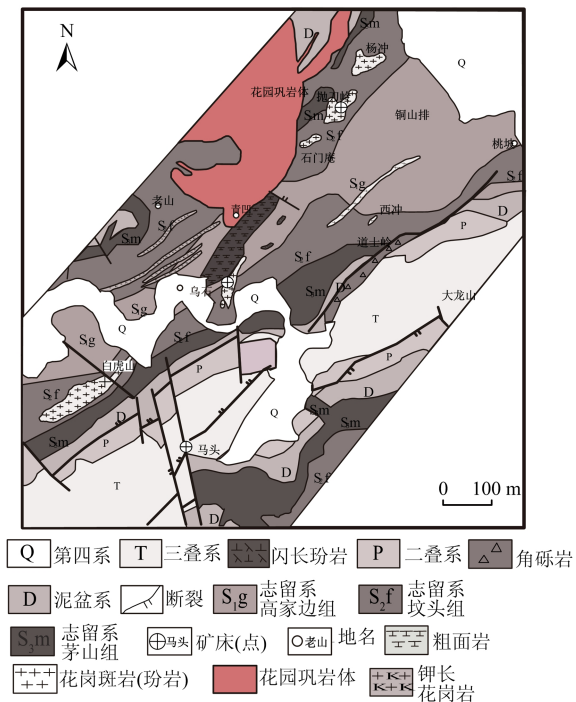


图 3 抛刀岭金矿区域地质图

矿床热液蚀变发育,矿区内主要蚀变作用发

生在英安玢岩岩体中。英安玢岩岩体主要蚀变作用有黄铁矿化、绢云母化和硅化,次要蚀变有碳酸盐化、绿泥石化和高岭土化等。

岩体蚀变范围较广,岩体蚀变已延深至 700 m 附近。热液蚀变作用与燕山早期的钙碱性、中酸性岩浆的侵入和次火山作用有密切的成因和时空联系。其中金矿化与黄铁矿化、绢云母化和硅化等有密切的关系。

英安玢岩体的主要蚀变类型为绢云母化、硅化,局部蚀变类型有碳酸盐化、绿泥石化、高岭土化,抛刀岭岩体中常见蚀变如图 4 所示。

由图 4 可知:绢云母化是矿区最主要、最广泛的蚀变类型,蚀变常呈面状分布,英安玢岩体绢云母交代了长石斑晶,绢云母粒度在 0.01 mm 以下;高岭土化仅在局部发育,常在表生阶段风化较强的部位发育,岩体中交代长石斑晶,偶见呈脉状分布;硅化一般呈线状,部分石英沿构造裂隙分布,以石英硫化物脉或以石英微细脉的形式交代两侧岩体基质中的绢云母,或者形成石英硫化物脉体,岩体靠近地表的部位一般会发生较强的硅化作用;碳酸盐化主要发育于岩体黄铁绢英岩化的部位,以碳酸盐脉或者碳酸盐硫化物共生脉的形式穿插岩体。

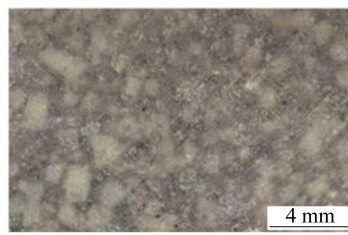
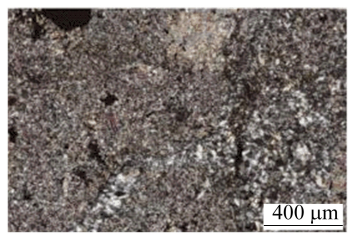
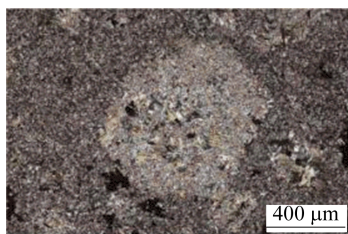


图 4 抛刀岭岩体中常见蚀变

2.2 矿石特征

通过对抛刀岭矿床的钻孔样品的野外观察和薄片镜下鉴定等手段进行总结,主要矿石结构和构造如图 5 所示。

1) 黄铁矿(Py)呈浅铜黄色,分布广泛,主要分布于黄铁矿矿石、黄铁矿脉和部分岩体中,呈自形-半自形粒状、脉状、浸染状存在,粒度大小不一。黄

铁矿是矿石中质量分数最高且分布最广的硫化物,主要分为 4 个期次:第 1 期次黄铁矿呈自形-半自形不规则粒状发育在早期石英-黄铁矿阶段,如图 5a 所示,以集合体形式呈浸染状分布在英安玢岩中,该阶段黄铁矿与金矿化无较大联系;第 2 期次黄铁矿呈粗脉状或细脉网脉状发育在石英-多金属硫化物阶段,如图 5b 所示,多与闪锌矿、毒砂等

共生,该期次与金矿化关系密切;第 3 期次的黄铁矿发育在黄铁绢英岩化阶段,如图 5c 所示,与金矿化关系密切;第 4 期次黄铁矿发育在碳酸盐岩中的石英-多金属硫化物脉和黏土脉中,如图 5d 所示,呈他形细脉状,与金矿化有关。

2) 闪锌矿(Sp)呈灰色,常与黄铁矿、石英共生,呈脉状或者浸染状如图 5c、图 5d 所示。

3) 毒砂(Apy)呈浅灰色,常与黄铁矿、闪锌矿共生,呈脉状或针状。主要出现在金矿石中,是载金矿物之一,呈亮白色,半自形-他形浸染状或星散状分布于石英黄铁矿脉中以及岩石中,可见其与黄铁矿共生,呈他形粒状分布于破碎黄铁矿裂隙以及黄铁矿边部(图 5a)。

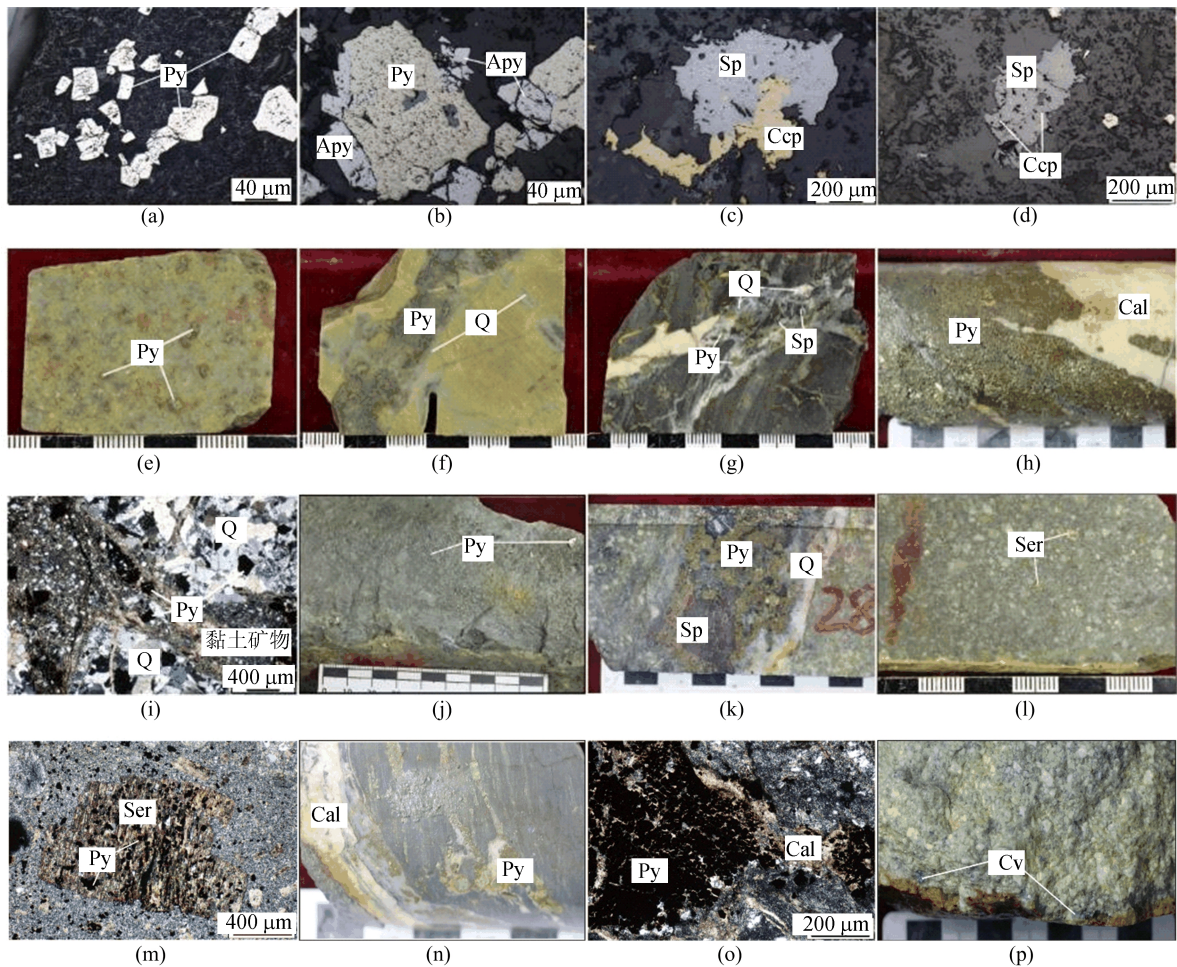
4) 石英(Q)是主要的脉石矿物,多与黄铁矿、闪锌矿、毒砂等共生呈脉状,少部分呈脉状单独产出。

5) 方解石(Cal)的质量分数较小,呈细脉状与黄铁矿共生或单独产出。

抛刀岭金矿床的矿石构造主要包括以下 2 种:
① 浸染状构造,如图 5e 所示,黄铁矿、闪锌矿呈现

细粒状点状分布在英安玢岩岩体或者石英脉中;
② 脉状构造,如图 5f 所示,广泛分布在岩体中,主要存在于各种类型的矿石中,包括石英-黄铁矿脉、黄铁矿-闪锌矿脉、方解石-黄铁矿脉和黄铁矿碳酸盐岩脉等。

抛刀岭金矿床的矿石结构主要包括以下 3 种:
① 自形-他形粒状结构如图 5a 所示,自形结构黄铁矿主要出现在早期黄铁矿阶段,成规则或不规则的粒状,自形程度较好,他形结构主要出现在石英-多金属硫化物阶段、黄铁绢英岩化阶段和碳酸盐-硫化物阶段中,以粒状集合体的形式呈稀疏浸染状分布在岩体中;
② 共生结构:石英-多金属硫化物阶段出现闪锌矿与黄铁矿共生、黄铁矿与毒砂和闪锌矿共生(图 5b),碳酸盐-硫化物阶段出现黄铁矿与闪锌矿共生(图 5k)、黄铁矿与毒砂共生、闪锌矿与黄铜矿共生(图 5c);
③ 固溶体出溶结构(图 5d)中石英-多金属硫化物阶段有少量黄铜矿在闪锌矿中呈乳滴状,闪锌矿呈不规则粒状。



Py—黄铁矿 Sp—闪锌矿 Apy—毒砂 Ccp—黄铜矿 Q—石英 Cal—方解石 Cv—铜蓝 Q—石英 Ser—绢云母

图 5 抛刀岭金矿床主要矿石结构构造

2.3 成矿期次

根据矿物的自形程度、大小及相互穿插关系,该矿床成矿过程主要发生在热液期和表生期,矿物生成次序如图 6 所示。

表生期主要发生较大规模的氧化作用,先前的黄铁矿和黄铜矿等硫化物被氧化,在地表形成褐铁矿、铜蓝等氧化矿物,热液期主要分为 4 个阶段。

1) 黄铁矿阶段:从图 5a、图 5j 可以看出,岩体中矿石矿物主要为黄铁矿,自形-半自形粒状结构,粒径为 0.2~2.0 mm。

2) 石英-多金属硫化物阶段:从图 5k 可以看出,大量生成黄铁矿、闪锌矿、毒砂等金属矿物并

与石英共生形成脉体,脉宽为 0.3~20.0 mm,晚期细脉穿切早期含矿脉体。黄铁矿粒径较大,为 0.05~1.20 mm,闪锌矿和毒砂的粒径较小,为 0.02~0.06 mm。

3) 黄铁绢英岩化阶段:从图 5l、图 5m 可以看出,主要生成石英、绢云母等蚀变矿物以及黄铁矿、白铁矿、毒砂等金属硫化物。

4) 碳酸盐-硫化物阶段:从图 5n、图 5o 可以看出,地层中黄铁矿、闪锌矿、少量毒砂等金属与石英脉、方解石脉共生,脉宽为 0.5~20.0 mm,部分方解石脉被晚期石英脉穿切,黄铁矿粒径相对较大,为 0.05~0.80 mm,闪锌矿粒径相对较小,为 0.02~0.40 mm。

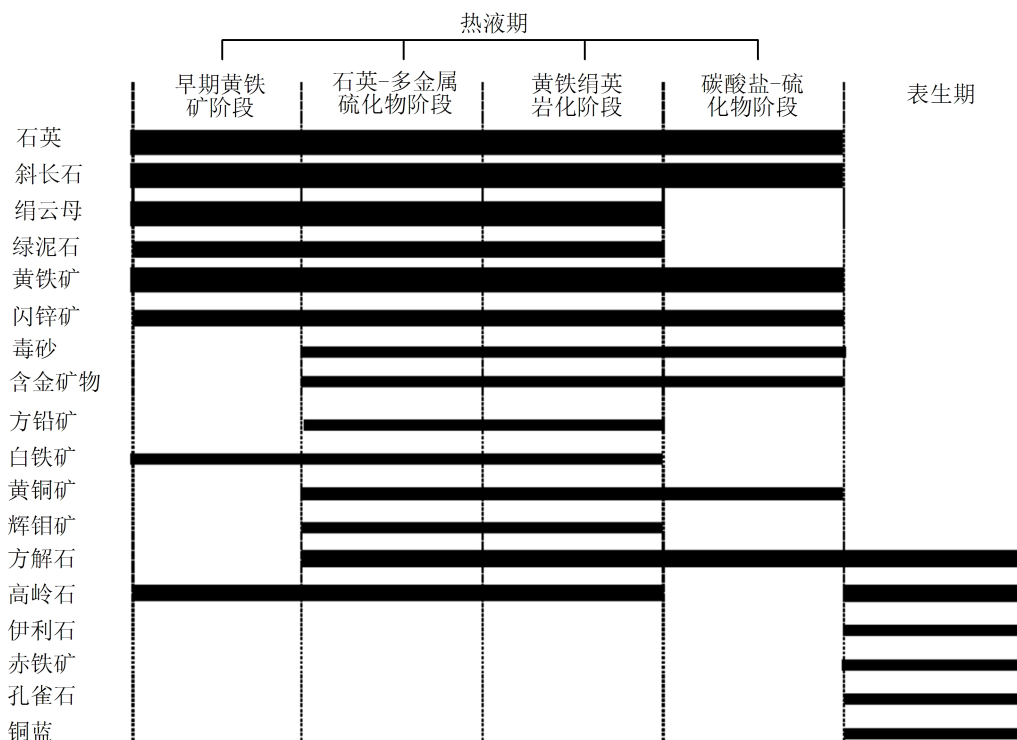


图 6 抛刀岭金矿床矿物生成顺序

3 样品特征及测试分析

抛刀岭金矿典型剖面^[11]如图 7 所示。通过对钻孔 ZK2203、ZK3005、ZK2805、ZK3204 钻孔样品野外观察、光薄片镜下鉴定以及电子探针测试,金矿物主要以超微包体金和微粒金 2 种形式大量生成,并主要赋存在黄铁矿和毒砂 2 种矿物中,故结合相关研究结果和手标本、镜下薄片等,选取黄铁矿和毒砂样品进行测试。

黄铁矿原位硫同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室矿床地球

化学分室完成,使用激光剥蚀多接收电感耦合等离子体质谱仪对矿石中黄铁矿进行原位微区硫同位素研究。黄铁矿原位硫同位素分析仪器为 Neptune Plus 多接收杯电感耦合等离子体质谱仪(德国 Thermo Fisher Scientific 公司)和 GeoLas 2005 准分子激光剥蚀系统(德国 Lambda Physik 公司),激光波长为 193 nm,能量密度范围为 1.6~4.8 J/cm²,激光束斑直径为 33 μm,剥蚀频率 8 Hz,剥蚀时间 40 s,采用氦气作为载气,氮气作为补偿气进行实验,分析精度±5%。测试前及测试过程中选用国际硫化物标样 NBS-123(闪锌矿)和 WS-1(黄铁矿)

进行质量监控。本次测试每 4 个测点添加 2 个

WS-1 标样进行控制。

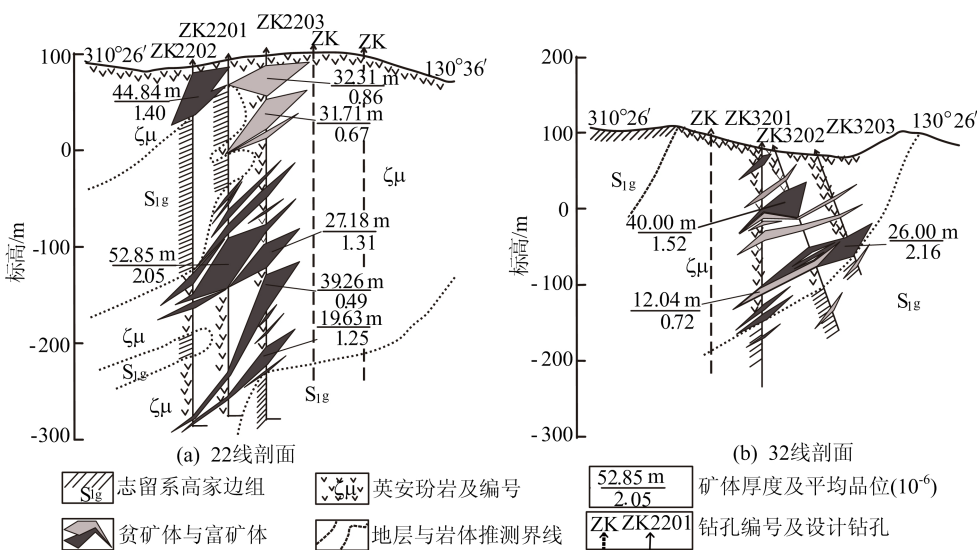


图 7 抛刀岭金矿典型剖面

在合肥工业大学电子探针实验室,使用 JE-OL JXA-8230 型电子探针(日本电子)进行电子探针分析,测试加速电压为 15 kV,探针电流为 20 nA,标样来源于周建雄标样组和美国 SPI: 02753-AB 53 Minerals Standard。

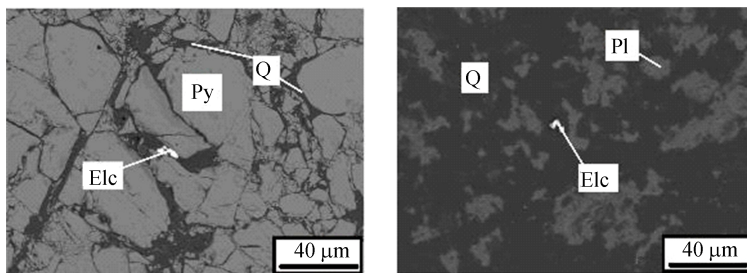
在合肥工业大学的矿床成因与勘查技术研究中心,使用 Agilent 7900 Quadrupole 激光烧蚀电感耦合等离子体质谱技术测试黄铁矿微量元素。每次分析都是在测量气体空白 20 s 后,在 8 Hz、能量为 4 J/cm²、束斑直径为 30 mm 的均匀光斑

上进行的,持续时间为 40 s。对黄铁矿的以下基本同位素进行监测:Co、Ni、As、Se、Te、Cu、Au、Ag、Pb、Zn、Mo、W、Ti、Bi、Cr、Sn、REE 等 33 种元素。使用标准参考物质 GSE-1g、GSD-1g、BCR-2G 和 NIST 610 作为外标绘制校准曲线,所得结果分析误差小于 5%。

4 测试结果

4.1 电子探针分析

抛刀岭矿床 Au 的赋存特征如图 8 所示。



(a) 黄铁矿裂隙中的银金矿 Py—黄铁矿 Q—石英 Elc—银金矿 (b) 英安玢岩岩体中的银金矿 Pl—斜长石

图 8 抛刀岭金矿床金矿物赋存特征

Au 主要是以不规则粒状的粒间金的形式存在于黄铁矿周围或裂隙中,载金矿物主要为银金矿。根据背散射图的检测结果,矿石中的黄铁矿外形不规则,常呈现不规则粒状,大小为 12 μm×6 μm、11 μm×7 μm,银金矿颗粒表面不平整,以微细粒为主。金与黄铁矿在空间上关系密切。

4.2 原位硫同位素示踪分析

本文选取抛刀岭矿床中较有代表性的 3 个黄

铁矿样品进行原位硫同位素测试,硫同位素测试结果见表 1 所列。抛刀岭矿床中页岩地层中黄铁矿 δ³⁴S 值最高,2 个点在 9.3‰~11.3‰之间,平均值为 10.3‰;英安玢岩中浸染状黄铁矿 5 个点的 δ³⁴S 值在 4.8‰~5.0‰之间,平均值为 4.9‰;英安玢岩中细脉浸染状黄铁矿 5 个点的 δ³⁴S 值在 0.3‰~1.6‰之间,平均值为 1.1‰。全部黄铁矿矿石硫同位素总体范围为 0.3‰~11.3‰之间。

表 1 抛刀岭矿床含矿英安玢岩原位硫同位素数据表

样品号	矿物	赋存岩石	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	样品号	矿物	赋存岩石	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
30054-PY-1	黄铁矿	页岩	9.3	300513-PY-1	黄铁矿	细脉浸染状黄铁矿石	0.8
30054-PY-2	黄铁矿	页岩	11.3	300513-PY-2	黄铁矿	细脉浸染状黄铁矿石	1.5
3204-22-2-PY-1	黄铁矿	浸染状黄铁矿石	5.0	300513-PY-3	黄铁矿	细脉浸染状黄铁矿石	1.6
3204-22-2-PY-2	黄铁矿	浸染状黄铁矿石	5.0	300513-PY-4	黄铁矿	细脉浸染状黄铁矿石	1.1
3204-22-2-PY-3	黄铁矿	浸染状黄铁矿石	5.0	300513-PY-5	黄铁矿	细脉浸染状黄铁矿石	0.3
3204-22-2-PY-4	黄铁矿	浸染状黄铁矿石	4.8				

4.3 黄铁矿微量元素质量分数测试结果

黄铁矿微量元素质量分数的测试结果见表 2 所列。

由表 2 可知:抛刀岭矿床中 $w(\text{Au})$ 为 $(0.01 \sim 1.32) \times 10^{-6}$, 平均质量分数为 0.47×10^{-6} ; $w(\text{Ag})$ 为 $(0.12 \sim 22.61) \times 10^{-6}$, 平均质量分数为 8.60×10^{-6} ; $w(\text{As})$ 为 $(9.31 \sim 45\,929.58) \times 10^{-6}$, 平均质量分数为 $8\,521.31 \times 10^{-6}$; $w(\text{Cu})$ 为

$(1.52 \sim 78.84) \times 10^{-6}$, 平均质量分数为 26.24×10^{-6} ; $w(\text{Fe})$ 为 $50.59\% \sim 57.61\%$, 平均质量分数为 54.48% ; $w(\text{Pb})$ 为 $(5.77 \sim 578.08) \times 10^{-6}$, 平均质量分数为 250.16×10^{-6} ; $w(\text{S})$ 为 $8.30\% \sim 13.11\%$, 平均质量分数为 10.61% ; $w(\text{Zn})$ 为 $(0.01 \sim 97.76) \times 10^{-6}$, 平均质量分数为 18.86×10^{-6} ; $w(\text{Ni})$ 为 $(0.03 \sim 226.78) \times 10^{-6}$, 平均质量分数为 39.85×10^{-6} 。

表 2 抛刀岭矿床矿石黄铁矿微量元素质量分数

检测项目	$w(\text{Au})/10^{-6}$	$w(\text{Ag})/10^{-6}$	$w(\text{As})/10^{-6}$	$w(\text{Cu})/10^{-6}$	$w(\text{Fe})/\%$	$w(\text{S})/10^{-6}$	$w(\text{Pb})/10^{-6}$	$w(\text{Zn})/10^{-6}$	$w(\text{Ni})/10^{-6}$	$w(\text{Co})/10^{-6}$	$w(\text{Co})/10^{-6}$	$w(\text{Ni})$
PDL3-14-Fe-5	0.23	1.20	202.24	40.42	55.18	125 480	34.33	5.53	24.28	5.11		0.21
PDL3-14-Fe-8	0.82	1.71	1 917.69	78.84	55.12	123 008	102.05	5.22	23.85	124.04		5.20
PDL3-14-Fe-9	0.42	1.32	1 044.36	53.33	55.08	123 158	64.00	9.61	17.84	1.44		0.08
PDL3-14-Fe-10	0.40	0.50	787.26	47.35	55.33	122 781	30.73	5.36	18.83	3.09		0.16
3204-22-2-Fe-2	0.09	2.85	1 257.12	43.49	56.34	111 754	160.22	4.92	0.04	0.01		0.28
3204-22-2-Fe-3	0.91	22.61	9 623.03	23.18	55.01	114 374	626.65	97.76	0.03	0.11		3.26
3204-22-2-Fe-4	1.13	4.36	10 305.37	2.42	55.18	111 338	98.20	0.79	0.04	0.02		0.41
3204-22-2-Fe-5	0.77	7.00	8 034.76	12.99	55.66	108 046	450.68	0.08	1.36	0.08		0.06
300513-Fe-1	1.16	3.44	45 929.58	6.60	51.30	85 881	134.70	30.27	0.04	0.02		0.52
300513-Fe-3	1.31	4.33	45 915.32	9.05	51.64	83 062	251.52	30.14	0.08	0.03		0.40
300513-Fe-4	0.78	2.07	44 833.02	2.18	51.64	83 044	78.94	27.40	0.16	0.20		1.23
zk3204-22-1-1	0.32	20.32	4 280.67	27.73	53.71	86 352	379.36	32.67	69.83	158.27		2.27
zk3204-22-1-2	0.18	20.89	1 562.26	33.68	54.92	93 013	857.08	39.27	43.85	85.84		1.96
zk3204-22-1-3	0.14	20.27	1 915.09	24.34	55.10	92 303	560.59	30.34	101.72	166.15		1.63
zk3204-22-1-4	0.68	4.72	13 166.15	14.31	53.94	111 043	156.49	3.42	228.78	190.03		0.83
zk3204-22-1-5	0.12	16.85	1 544.96	33.15	53.50	106 856	238.59	18.39	45.72	66.71		1.46
zk3204-22-1-6	0.23	19.60	1 694.83	40.24	52.88	112 785	608.72	26.71	43.91	65.48		1.49
zk3204-22-1-7	0.12	17.76	1 597.87	40.43	53.23	114 356	318.95	28.39	61.25	80.34		1.31
zk3204-22-1-8	0.10	18.18	1 319.99	43.86	53.08	116 641	302.76	46.20	35.69	47.42		1.33
zk3204-22-1-9	0.36	10.01	6 881.15	16.77	50.59	131 076	389.93	3.64	55.46	51.13		0.92
ZK300511-Fe-1	0.02	0.12	17.58	1.52	56.86	104 546	12.18	0.01	36.28	343.12		9.48
ZK300511-Fe-3	0.13	3.10	370.03	12.03	57.17	97 702	80.91	2.24	35.58	88.77		2.50
ZK300511-Fe-4	0.01	0.19	9.31	1.79	57.36	96 704	5.77	1.85	40.11	108.42		2.70
ZK300511-Fe-5	1.32	2.08	301.88	19.11	57.61	92 982	60.60	2.49	71.67	308.63		4.31

根据表 2 中的数据形成 Au 与其他元素相关性散点图,结果如图 9 所示。由图 9 可知,矿石中 Au 与 As、Pb、Zn 元素呈比较好的正相关关系,与 Cu、Ag 元素呈负相关关系。

将样品投点到黄铁矿 Co-Ni 元素特征图中,形成的特征图^[14]如图 10 所示。图 10 中: I 区为

火山成因; II 区为热液成因; III 区为沉积成因; IV 区为岩浆成因。

投点多落于热液成因区域,少数落于火山成因区域,仅一个样品落于沉积成因区域的边界位置。抛刀岭矿床黄铁矿微量元素表明:Co、Ni 的质量分数较高, $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值变化较大,样品

投点主要落于热液成因区域内,有部分落于火山 成因部分。

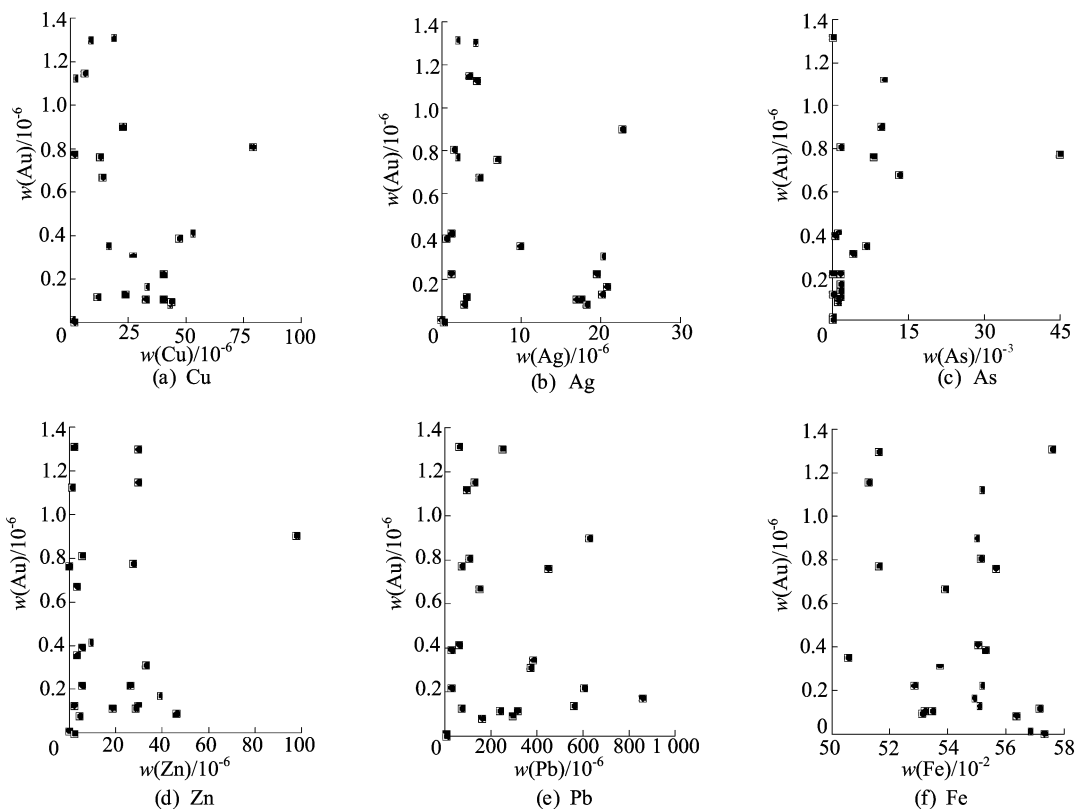


图 9 抛刀岭金矿床金矿石中元素相关性图

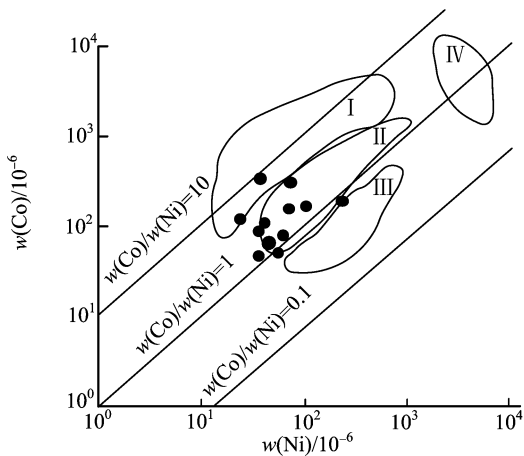


图 10 Co-Ni 元素特征图

5 讨 论

5.1 成矿流体来源与演化

矿床中的金属硫化物主要是以成矿流体作为载体进行迁移,因此可以通过对硫同位素值进行分析比对,间接确定成矿物质的来源^[15]。根据文献^[16]的统计结果,长江中下游地区与燕山期中酸性侵入岩有关的斑岩型和接触交代型矿床硫主要是岩浆硫,少部分属于地层硫。根据文献^[17]

的统计结果,池州地区的马头、百丈崖、鸡头山等铜钨钼矿床中,矿石中黄铁矿、辉钼矿等硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值主要在 3.03‰~5.59‰之间,而灰岩地层中硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 6.99‰~8.78‰之间。抛刀岭矿床中多金属硫化物阶段的黄铁矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 0.30‰~5.90‰之间,碳酸盐-硫化物阶段样品在 5.30‰~11.30‰之间。前者的黄铁矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值略高于幔源硫($0 \pm 3\text{‰}$)而低于地层硫(10‰),远小于海水硫(20‰)而远大于强还原性地层硫^[5]。因此说明抛刀岭矿床硫化物中的硫主要来源于岩浆,同时有少量地层物质参与混染。

5.2 成因分析

电子探针分析显示,抛刀岭矿床中金主要赋存于黄铁矿中,少部分赋存于毒砂中,Au 主要是以银金矿形式存在于黄铁矿和毒砂的裂隙中。因此探究黄铁矿的载金特征对于研究抛刀岭金矿的金的赋存状态具有重要的指示意义。

关于在载金矿物中 Au 的成因方式,根据研究主要包括 2 种:① Au 以类质同象的方式进入黄铁矿,在黄铁矿晶格中取代 Fe 的位置^[18];② 由于 Au 共价伴生位置与 As 相似,Au 会在毒砂或黄铁矿中以晶格金的形式赋存^[19-21]。但同

时文献[22]在对黄铁矿和毒砂中次显微金的赋存状态进行研究时发现,含 Au 黄铁矿与含 Au 毒砂中不存在类质同象的金。

根据上文对黄铁矿进行的微量元素测试结果,发现 Au 与 As 具有很好的正相关性,而与 Fe、S 等元素呈负相关性。由于 As 和 S 可以共价键形式进行结合,形成 $[AsS]^{2-}$,因此在黄铁矿晶格中 As 可以形成 $[AsS]^{2-}$ 以硫的类质同象的方式存在^[23]。但由于黄铁矿中硫的离子半径相比于后来的砷的离子半径要小,As 置换 S 后会改变初始的黄铁矿晶格形态,原来的位置发生畸变^[24]。As-S 置换造成的畸变会使得金离子 $[Au^{+} + Au^{3+}]$ 更容易进入黄铁矿的晶格,置换铁离子 $[2Fe^{2+}]$,最终提高含砷黄铁矿中呈离子态的晶格金的富集程度^[25],也提高了矿物的载金的能力。抛刀岭矿床的黄铁矿中,As 质量分数相对较高,属含砷黄铁矿,因此前文提出的黄铁矿(毒砂)晶格畸变现象在抛刀岭矿床中相对较为普遍,利于 Au 进入矿物中富集,最终形成金矿体。

不同的黄铁矿在粒度、自形程度、晶体形态、裂隙发育程度和杂质的质量分数等方面存在差距,由于性质不同,黄铁矿之间载金的能力也会有所差距^[26]。可见在经过热液蚀变作用以及在高砷条件下,温度和硫逸度升高,溶出不可见金^[27-28];在温度下降和还原条件下,Au 以可见金形式存在于黄铁矿中,且后期溶出的可见 Au 通常沿裂隙分布。

由上文可知抛刀岭金矿床的黄铁矿颗粒多数较为破碎,该现象可能与后期热液活动有关。该阶段的黄铁矿由于受到后期热液活动的影响发生破碎,最终也会在内部形成一些微裂隙。而在这些颗粒裂隙的外侧壁上有一些凹陷的地方,会有后期的可见金溶出,这些可见金会以裂隙金的形式生长。同理,在毒砂中赋存的可见金也可能是以类似的形式存在的^[29]。

6 结 论

1) 安徽池州抛刀岭金矿床的含金矿物主要在黄铁矿或毒砂中以晶格金的形式赋存,其次以金银矿的形式存在于黄铁矿和毒砂的裂隙中。

2) 矿石中 Au 与 As、Pb、Zn 元素呈正相关关系,黄铁矿晶格中 As 的存在可能有利于 Au 代替 Fe 进入晶格中,同时也有利于 Au 在黄铁矿裂隙中沉淀。

3) 抛刀岭矿床硫化物中的硫主要来源于岩浆,同时有少量的地层物质参与,混染成矿流体主要来源于岩浆的出溶流体。

[参 考 文 献]

- [1] 常印佛,刘湘培,吴言昌. 长江中下游铁铜成矿带[M]. 北京:地质出版社,1991:1-379.
- [2] 赵德奎,古黄玲,舒旺杰,等. 安徽贵池地区岩浆岩演化特征及其与金银多金属矿的关系[J]. 华东地质,2019(2):126-134.
- [3] 古黄玲. 长江中下游贵池矿集区燕山期岩浆作用与铜(钼)金成矿关系研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2017.
- [4] 王世伟. 长江中下游成矿带(安徽段)斑岩型矿床成岩成矿作用研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2015.
- [5] 段留安. 安徽南部地区典型金矿床地质及成矿地球化学研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2016.
- [6] LARGE R R, DANYUSHEVSKY L, HOLLIT C, et al. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: implications for the timing of gold in orogenic and carlin-style sediment-hosted deposits[J]. *Economic Geology*,2009,104(5):635-668.
- [7] 翟裕生,姚书振,林新多. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M]. 北京:地质出版社,1992:12-35.
- [8] 周涛发,岳书仓,袁峰. 安徽月山矿田成岩成矿作用[M]. 北京:地质出版社,2005:1-146.
- [9] 杨晓勇,古黄玲,严志忠,等. 安徽贵池地区燕山期岩浆岩与铜金钼成矿关系:来自地质-地球化学-地球物理证据[J]. *地球科学与环境学报*,2016(4):444-463.
- [10] 彭戈,闫峻,初晓强,等. 贵池岩体的锆石定年和地球化学:岩石成因和深部过程[J]. *岩石学报*,2012,28(10):3271-3286.
- [11] 唐永成,吴言昌,储国正,等. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M]. 北京:地质出版社,1998:1-351.
- [12] 段留安,杨晓勇,汪方跃. 长江中下游成矿带抛刀岭大型斑岩型金矿特征及找矿前景[J]. *地球科学与环境学报*,2014,36(1):161-170.
- [13] 陈国光,应祥熙. 安徽省贵池铺庄金矿地质特征[J]. *地球学报*,2002,23(3):213-216.
- [14] BAJWAH Z U, SECCOMBE P K, OFFLER R. Trace element distribution, Co : Ni ratios and genesis of the Big Caddia iron-copper deposit, New South Wales, Australia[J]. *Mineral Deposita*,1987,22:292-300.
- [15] CHEN L, LI X H, LI J W, et al. Extreme variation of sulfur isotopic compositions in pyrite from the Qiling sediment-hosted gold deposit, West Qinling Orogen, Central China; an in situ SIMS study with implications for the source of sulfur[J]. *Mineralium Deposita*,2015,50(6):643-656.
- [16] 周涛发,岳书仓,袁峰,等. 长江中下游两个系列铜、金矿床及其成矿流体系统的氢、氧、硫、铅同位素研究[J]. *中国科学(地球科学)*,2000,30(增刊1):122-128.

(下转第 947 页)

- [5] 潘继平,乔德武,李世臻,等. 下扬子地区古生界页岩气地质条件与勘探前景[J]. 地质通报,2011,30(增刊1):337-343.
- [6] 廖志伟,胡文瑄,曹剑,等. 下扬子皖南大隆组黑色岩系发育特征及油气资源潜力初探[J]. 高校地质学报,2016,22(1):138-151.
- [7] 陈平,张敏强,许永哲,等. 下扬子巢湖泾县地区上二叠统大隆组泥页岩储层特征[J]. 岩石学报,2013,29(8):2925-2935.
- [8] 侯阳红. 下扬子皖南地区上二叠统页岩沉积环境及储层特征研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2020.
- [9] 黄保家,施荣富,赵幸滨,等. 下扬子皖南地区古生界页岩气形成条件及勘探潜力评价[J]. 煤炭学报,2013,38(5):877-882.
- [10] 梁狄刚,陈建平. 中国南方高过成熟区海相烃源岩的油源对比问题[J]. 石油勘探与开发,2005,32(2):8-14.
- [11] 吴浩,姚素平,焦堃,等. 下扬子区上二叠统龙潭组页岩气勘探前景[J]. 煤炭学报,2013,38(5):870-876.
- [12] 刘章平,许卫,王俊涛,等. 下扬子地区早寒武系成气地质条件分析[J]. 安徽地质,2015,25(2):111-118.
- [13] 徐曦,朱晓颖,单希鹏,等. 下扬子区中生代沿江盆地群的盆地结构与沉积特征[J]. 石油实验地质,2018,40(3):5-16.
- [14] 朱光,刘国生,李双应,等. 下扬子地区盆地的“四层楼”结构及其动力学机制[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2000,23(1):47-52.
- [15] 周存亭,杜建国,许卫,等. 安徽省大地构造相与成矿地质背景研究[M]. 北京:中国地质大学出版社,2017:23-88.
- [16] 安徽省地质矿产局. 安徽省地质志:二叠纪分册[M]. 合肥:安徽科学技术出版社,1989:4-188.
- [17] 许卫. 安徽下扬子地区二叠纪锰矿的成矿成矿地质地球化学[D]. 合肥:合肥工业大学,2004.
- [18] 朱洪发,秦德余,陈跃,等. 苏浙皖交界二叠系沉积演化及构造背景[J]. 石油实验地质,1993,15(3):252-261.
- [19] 石油勘探开发科学研究院地质研究所. 中国陆相油气生成[M]. 北京:石油工业出版社,1982:175-193.
- [20] 雷勇,冯庆来,桂碧雯. 安徽巢湖平山顶山剖面上二叠统大隆组有机质富集的地球生物学模式[J]. 古地理学报,2010,12(2):202-211.
- [21] 李飞史,海英,笱灵,等. 安徽南陵一无为地区二叠系烃源岩有机地球化学特征[J]. 地质学刊,2013,37(1):31-40.
- [22] 曹涛涛,宋之光,王思波,等. 下扬子地台二叠系页岩储集物性特征及控制因素[J]. 天然气地球科学,2015,26(2):341-351.
- [23] 韩京,陈波,赵幸滨,等. 下扬子地区二叠系页岩有机质孔隙发育特征及其影响因素[J]. 天然气工业,2017,37(10):17-26.
- [24] 潘磊,陈桂华,徐强,等. 下扬子地区二叠系富有机质泥页岩孔隙结构特征[J]. 煤炭学报,2013,38(5):787-793.
- [25] 李琪琪,徐尚,陈科,等. 下扬子地区上二叠统页岩气成藏条件分析[J]. 中国地质,2022,49(2):383-397.
- [26] 李新景,吕宗刚,董大忠,等. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. 天然气工业,2009,29(5):27-32,135-136.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 940 页)

- [17] 宋国学,秦克章,李光明. 长江中下游池州地区矽卡岩-斑岩型 W-Mo 矿床流体包裹体与 H, O, S 同位素研究[J]. 岩石学报,2010,26(9):2768-2782.
- [18] 李德忍. 黄铁矿中金赋存状态的电子探针研究和超微粒金的发现[J]. 矿物学报,1992,12(3):284-288.
- [19] JOHAN Z. Arsenopyrite aurifere: mode de substitution de Au dans la structure de Fe As S[J]. Comptes Rendus De L'Academie Des Sciences,1989,308:185-191.
- [20] SCS A, LQY A, LIANG Z A, et al. In-situ trace elements on pyrite and arsenopyrite of the Zhengchong gold deposit, Jiangnan Orogen: insights for the mineralization mechanism[J]. Ore Geology Reviews,2020,122:103486.
- [21] CHEN J H, LI Y Q, ZHONG S P, et al. DFT simulation of the occurrences and correlation of gold and arsenic in pyrite[J]. American Mineralogist,2013,98(10):1765-1771.
- [22] 王玉明,季寿元,陈克荣. 次显微金在黄铁矿和毒砂中的赋存状态新探讨[J]. 矿物学报,1994,14(1):83-87.
- [23] RL A, XW A, LY B, et al. The characteristic of microstructural deformation of gold bearing pyrite in Jiaodong: The links between nanoscale gold enrichment and crystal distortion[J]. Ore Geology Reviews,2020,122:103495.
- [24] KUSEBAUCH C, GLEESON S A, OELZE M. Coupled partitioning of Au and As into pyrite controls formation of giant Au deposits[J]. Science Advances,2019,5(5):1-8.
- [25] DEDITIUS A P, UTSUNOMIYA S, RENOCK D, et al. A proposed new type of arsenian pyrite: composition, nanostructure and geological significance [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,2008,72(12):2919-2933.
- [26] 杨治,邓宇峰,袁峰,等. 西准噶尔地区阔尔真阔腊金矿床金的赋存状态研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2019,42(9):1258-1263.
- [27] DEDITIUS A P, REICH M, KESLER S E, et al. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,2014,140:644-670.
- [28] LI W, COOK N J, XIE G Q, et al. Textures and trace element signatures of pyrite and arsenopyrite from the Gutaishan Au-Sb deposit, South China[J]. Mineralium Deposita,2019,54:591-610.
- [29] 高振敏,杨竹森,李红阳,等. 黄铁矿载金的原因和特征[J]. 高校地质学报,2000,6(2):156-162.

(责任编辑 吴亮)