

doi: 10.12029/gc20190715001

卢飞, 吕新彪, 杨帅, 肖强, 李军, 任龙. 2023. 陕西省庞家河金矿黄铁矿标型特征及对深部找矿的启示[J]. 中国地质, 50(1): 277–288.

Lu Fei, Lü Xinbiao, Yang Shuai, Xiao Qiang, Li Jun, Ren Long. 2023. Typomorphic characteristics of pyrites in the Pangjiahe gold deposit, Shaanxi Province and indication for deep ore prospecting[J]. Geology in China, 50(1): 277–288(in Chinese with English abstract).

陕西省庞家河金矿黄铁矿标型特征 及对深部找矿的启示

卢飞¹, 吕新彪², 杨帅³, 肖强¹, 李军¹, 任龙⁴

(1. 中陕核工业集团 211 大队有限公司, 陕西 西安 710024; 2. 中国地质大学(武汉)地质调查院, 湖北 武汉 430074; 3. 中陕核工业集团公司, 陕西 西安 710100; 4. 中国科学院广州地球化学研究所, 矿物学与成矿学教育部重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要:【研究目的】黄铁矿是庞家河金矿床最常见的金属矿物, 也是最主要的载金矿物, 其标型特征蕴藏着丰富的地质信息。【研究方法】本文选取矿区东段新发现的 IV-2 号矿体黄铁矿的形态标型、热电性标型和成分标型进行了系统分析。【研究结果】研究发现该矿体黄铁矿晶体形态以立方体和五角十二面体为主, 具有高砷、亏铁和硫的特点, Fe/(S+As) 含量平均值为 0.860, Co/Ni 比值主要集中在 1~10。【结论】统计分析显示该矿床形成于浅成中低温环境中, 成矿流体有明显的变质属性; 黄铁矿热电性及形态的垂向变化规律, 均表明深部找矿仍有一定的潜力, 且初步计算表明至标高 861 m 向下矿体仍有 186 m 的延伸。

关键词: 金矿; 黄铁矿; 标型特征; 深部找矿; 矿产勘查工程; 庞家河; 陕西

创 新 点: (1) 利用黄铁矿的环带结构、形态变化和热电性变化特征可以鉴别出成矿作用具有多期多阶段叠加的特点; (2) 金矿床中黄铁矿的晶体形态和热电性在空间上分布具有一定的分带规律, 可以有效的指示矿体的贫富及成矿潜力。

中图分类号: P618.51 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)01-0277-12

Typomorphic characteristics of pyrites in the Pangjiahe gold deposit, Shaanxi Province and indication for deep ore prospecting

LU Fei¹, LÜ Xinbiao², YANG Shuai³, XIAO Qiang¹, LI Jun¹, REN Long⁴

(1. Brigade No.211 of Sino Shaanxi Nuclear Industry Group, Xi'an 710024, Shaanxi, China; 2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Sino Shaanxi Nuclear Industry Group, Xi'an 710000, Shaanxi, China; 4. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] Pyrite is the most common metal mineral of the Pangjiahe gold deposit, and it is also the most important gold-bearing

收稿日期: 2019-07-15; 改回日期: 2019-09-26

基金项目: 陕西省地质勘查基金项目(61201304171)资助。

作者简介: 卢飞, 男, 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 从事地质矿产勘查与研究; E-mail: 419571318@qq.com。

mineral. Its typomorphic characteristics contain abundant geological information. **[Methods]** This paper conducts systematic analysis and research by selecting the morphological typomorphic characteristic, pyroelectric typomorphic characteristics and compositional typomorphic characteristic of pyrite, which is newly discovered in IV-2 ore body in the eastern part of the deposit. **[Results]** It is found that crystal morphology of pyrite is mainly cubic and pentagonal dodecahedron, characterized by high arsenic, iron deficiency and sulfur. The average value of Fe/(S+As) is 0.860, and the ratio of Co/Ni is mainly concentrated between 1 and 10. **[Conclusions]** The calculation shows that the deposit is formed in a shallow depth, medium-low temperature environment, and the ore-forming fluid has obvious metamorphic properties. The vertical variation of pyroelectricity and morphology of pyrite indicates that there is still potential for deep ore prospecting, and preliminary calculations indicate that there is still an extension of 186 m downward ore at elevation of 861 m.

Key words: gold deposit; pyrite; typomorphic characteristics; deep prospecting; mineral exploration engineering; Pangjiahe; Shaanxi

Highlights: (1) Using the characteristics of the ring structures, morphological changes and thermoelectric changes of pyrites, it can be identified the gold multi-phase and multi-stage mineralizations. (2) Crystal morphology and thermoelectricity of pyrite in gold deposits has a certain zoning rule in the spatial distributions, which can effectively indicate the enrichment of the ore body and its metallogenic potential.

About the first author: LU Fei, male, born in 1985, master, senior engineer, engaged in geological and mineral exploration and research work; E-mail: 419571318@qq.com.

Found support: Supported by the Shaanxi Geological Exploration Fund (No.61201304171).

1 引 言

黄铁矿是金矿床中发育最常见的金属矿物,也是最主要的载金矿物,其标型特征蕴含着丰富的地质信息。从20世纪80年代开始,国内学者(陈光远,1987;杨国杰和孟舞平,1992;胡楚雁,2001;宫丽和马光,2011)开始对黄铁矿形态标型特征进行研究,总结其规律,解释其蕴含的地质找矿信息。同时黄铁矿标型特征在金矿床研究中得到广泛应用(宋焕斌,1989;初凤友等,2004;李红兵和曾凡治,2005),前人总结了金矿床中黄铁矿晶形主要是立方体、五角十二面体、八面体及它们之间相互聚合的聚形晶,黄铁矿热电性特征可以反映金矿在空间上展布及形成时的温度,成分标型特征具有很好指示矿床成因的意义。以上的研究成果和认识,在河南前河金矿(要梅娟等,2008)、浙江怀溪铜金矿(彭丽娜等,2009)、新疆阿希金矿(魏佳林等,2011)、山东玲珑金矿(申俊峰等,2013)、黑龙江三道湾碲金矿(翟德高等,2013)、新疆210金矿(曹煦等,2015)、内蒙古新地沟金矿床(刘华南等,2018)、黔西南架底金矿(田冲等,2021)等金矿床的研究中得到了有效的应用,对判断矿床的成矿温度、剥蚀程度、矿床成因以及寻找隐伏矿体等方面起到了很重要的作用。

庞家河金矿位于陕西省凤县以北20 km,是核工业西北地质局211大队于1989年在该地区化探异常查证时发现,1990年至1993年完成矿区西段的勘查评价工作,2013—2015年对矿床的深部及东段进行了大量的勘查工作,取得了好的找矿成果,目前累计探明的金资源量超过了20 t,达到了大型规模。前人(王建平,1993;刘平立,1994;权志高和李占游,1995;权志高,1995,1996a,b;吴孔运和高利鹏,2011;马健等,2015;刘普凯等,2018;Ma et al.,2018)对该矿床的研究主要通过多元同位素示踪手段来探讨矿床成因及成矿地质背景,并取得了丰硕的成果,但对与金成矿密切相关的黄铁矿标型特征研究尚未涉及。本文选取矿区东段新发现IV-2号矿体为研究对象,系统采集坑道及钻孔内5个不同标高矿石样品,通过对矿石中黄铁矿的形态标型、热电性标型及成分标型进行系统分析研究,研究黄铁矿形态和热电性在垂直空间上的变化规律,及其对矿床形成温度和剥蚀程度的指示意义,研判矿床成因,为该矿床深部及外围找矿提供理论依据和实践指导。

2 矿区地质概况

庞家河金矿大地构造位置处于商丹结合带中部(图1a),属于秦岭—大别成矿省北秦岭成矿带天水—唐藏—蟒岭金及多金属成矿亚带(宋小文等,

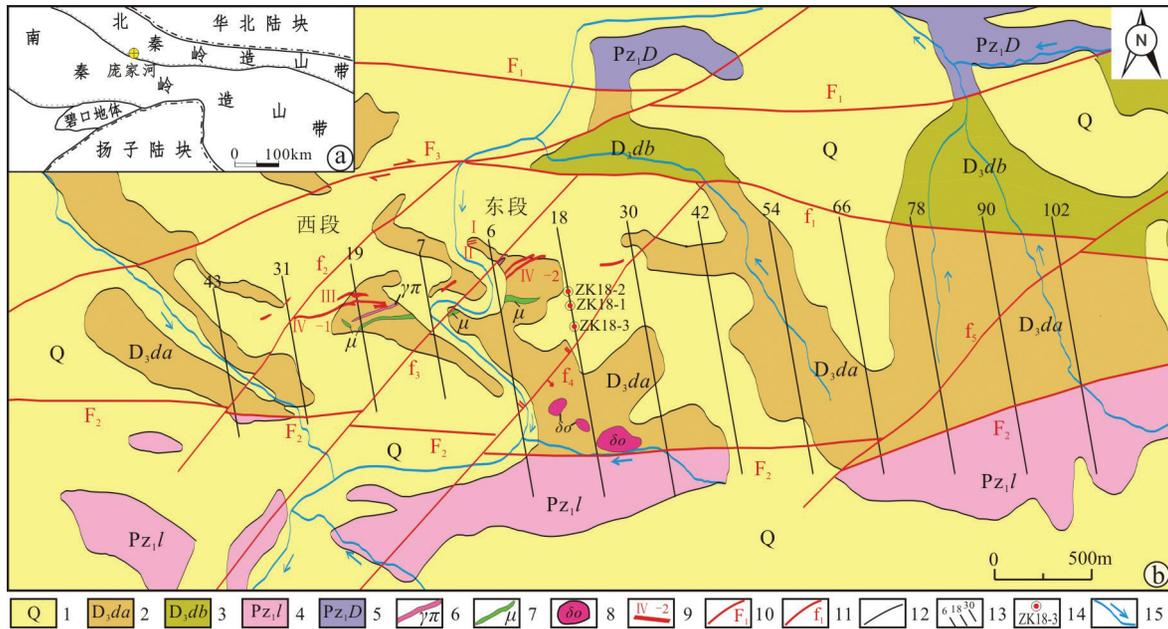


图1 矿区在秦岭造山带中的位置图(a)、矿区地质简图(b)

1—第四系;2—大草滩组a岩段;3—大草滩组b岩段;4—罗汉寺岩组;5—丹凤岩群;6—花岗斑岩脉;7—辉绿岩脉;8—石英闪长岩株;9—金矿体;10—区域断裂;11—次级断裂;12—地质界线;13—勘探线及编号;14—钻孔及编号;15—水系

Fig.1 Location of ore district in the Qinling orogenic belt(a), simplified geological map of ore district(b)

1—Quaternary; 2—a lithologic member of Dacaoatan Formation; 3—b lithologic member of Dacaoatan Formation; 4—Luohansi Formation; 5—Danfeng Group; 6—Granite-porphry vein; 7—Diabase vein; 8—Quartz-diorite stock; 9—Gold ore body; 10—Regional fault; 11—Secondary fault; 12—Geological boundary; 13—Number of exploration line; 14—Drill hole and number; 15—Rivers

2004;姜寒冰等,2014),该成矿亚带金成矿与热液活动、变质作用、构造运动关系密切,受韧性剪切带控制。

矿区内出露的地层主要为下古生界丹凤岩群(Pz₁D)和罗汉寺岩组(Pz₁l)、上泥盆统大草滩组(D₃d)及第四系(Q)(图1b)。上泥盆统大草滩组是主要的含矿层位,北以庞家河—鹿母寺断裂(F₁)与丹凤岩群分界,南以罗汉寺—套坝断裂(F₂)与罗汉寺岩组为邻。上泥盆统大草滩组普遍浅变质,原生沉积构造保存良好,据岩石组合特征可划分为两个岩段,二者呈断层接触。其中a段(D₃da)为一套浅灰、绿灰色浅变质碎屑岩,主要由石英砾岩、含砾石英砂岩、变粉砂岩和粉砂质千枚岩组成,总体具由粗变细的变化特点,构成了厚度不等的韵律性互层,是主要赋矿围岩;b段(D₃db)为一套紫红色夹灰绿色浅变质细碎屑岩,多呈中—薄层状产出,局部夹厚层状砾岩,沉积构造较发育,有平行层理、交错层理、冲刷充填构造和火焰状构造等。矿区主要受近东西向的区域性断裂F₁、F₂和北东向的区域走滑性断裂(F₃)影响,在区内形成一系列菱形地质块

体。矿体主要产于近东西的次级断裂带,但受到后期北东向构造的改造和破坏。矿区脉岩发育,其中240 Ma花岗斑岩形成于成矿前,局部被矿化蚀变,而辉绿岩脉破坏矿体,成矿作用发生在230 Ma秦岭造山带由挤压向伸展转换的初始阶段(Ma et al., 2018)。

IV-2号矿体是矿区东段发现的主要矿体,是西段矿化带向东的延伸,由7—30号勘探线控制(图1a)。矿体长1100 m,真厚度0.42~7.51 m,平均厚度2.70 m,品位1.02~12.76 g/t,平均品位5.79 g/t,已控制最大垂直延伸386 m(图2),矿体仍未圈闭,其深部延伸情况有待进一步研究。该矿体矿石呈浅黄绿色,以强蚀变的绢云千枚岩、粉砂质绢云千枚岩为主,相对于灰黑色千枚岩围岩具有褪色蚀变特征,围岩蚀变类型主要有黄铁矿化、毒砂化、硅化、绢云母化、碳酸盐化、绿泥石化等。矿石构造以浸染状和纹层状构造为主,矿石结构多样,主要有交代、环带和自形—他形结构。

结合镜下观察和前人研究可将庞家河金矿划分为两个成矿期,包括热液成矿期和表生氧化期。

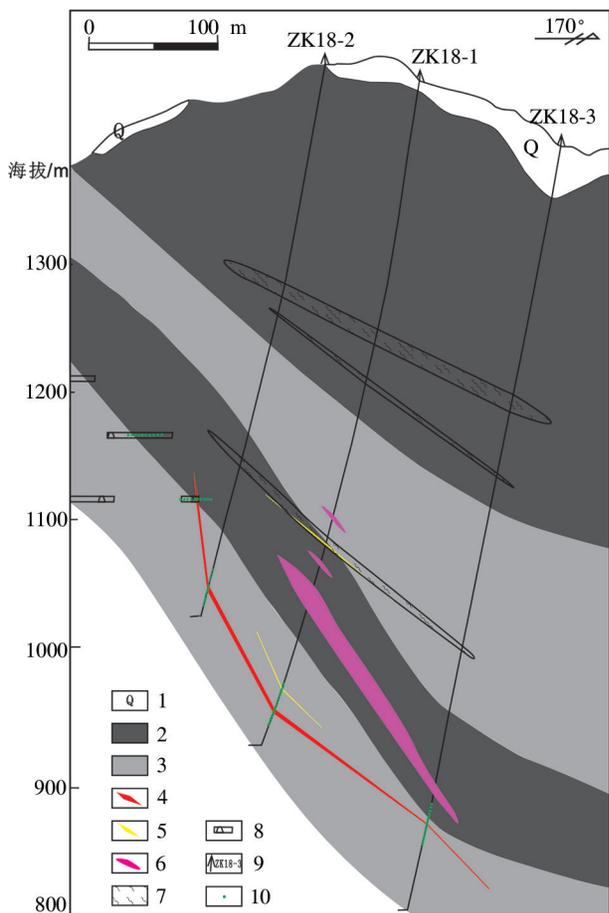


图2 庞家河金矿18号勘探线剖面图

1—第四系;2—变质砂岩;3—千枚岩;4—金矿体;5—矿化体;6—花岗斑岩脉;7—片理化带;8—坑道;9—钻孔;10—采样点

Fig.2 Profile of No.18 exploration line in the Pangjiahe gold deposit

1—Quaternary; 2—Metasandstone; 3—Phyllite; 4—Gold ore body; 5—Mineralized body; 6—Granite-porphry dyke; 7—Foliation zone; 8—Tunnel; 9—Drill hole; 10—Sampling location

其中热液成矿期可进一步划分出4个成矿阶段,依次为:黄铁矿-绢云母-石英阶段(I),石英-黄铁矿-毒砂阶段(II),石英-黄铁矿-毒砂-多金属硫化物阶段(III),石英-碳酸盐阶段(IV),其中第II、III阶段为主成矿阶段(Ma et al., 2018)。

3 黄铁矿产状及生成顺序

黄铁矿是庞家河金矿床最常见的金属矿物,也是最主要的载金矿物,广泛分布于矿区各类岩矿石中。黄铁矿在矿石中占5%~30%,是最主要的金属硫化物,主要呈纹层状(细脉浸染状)(图3a)、稠密浸染状(图3b)、星点状(图3c)、团块状(图3d)产

出。依据黄铁矿的产出特征、结构构造及矿物共生组合关系可分出4个世代:

第I世代黄铁矿自形程度好,中粗粒(0.3~2 mm),以立方体晶型为主,可见少量的五角十二面体,受后期构造挤压作用影响矿物碎裂结构明显(图3e),主要产于黄铁矿-绢云母-石英阶段,多以星点状、团块状、脉状发育在早期的石英脉中。

第II世代黄铁矿多呈自形、半自形,粉细粒(0.05~0.16 mm),五角十二面体、立方体及两者的聚形均发育,以五角十二面体和聚形为主,可见大量黄铁矿与毒砂共生(图3f),交生结构、环带结构发育(图3g),产于石英-黄铁矿-毒砂阶段,以浸染状、纹层状、条带状发育在强片理化的千枚岩中,含量最高,约占40~60%。

第III世代黄铁矿呈自形、半自形,细粒(0.08~0.16 mm),以五角十二面体晶型为主,立方体及两者的聚形减少,环带结构、碎裂结构发育,可见少量的早期黄铁矿和毒砂的裂隙中发育黄铜矿、黝铜矿、闪锌矿、方铅矿等(图3h),呈浸染状产于石英-黄铁矿-毒砂-多金属硫化物阶段,约为30%。

第IV世代黄铁矿呈自形,中粗粒(0.1~0.3 mm),形态多为立方体,五角十二面及聚形减少,与碳酸盐矿物共生,常成团块状、脉状发育在石英-碳酸盐脉中,切穿早期形成的纹层状黄铁矿(图3i),约为5%。

4 样品采集及测试方法

本次研究样品均采集自矿区东段矿化连续好的18号勘探线不同标高,包括1164中段、1114中段、ZK18-1、ZK18-2和ZK18-3。本次工作共采集了5件样品进行了黄铁矿的形态和热电性研究。采用双目镜观察黄铁矿的晶形并进行挑选统计,每件样品挑选的矿物颗粒不少于60粒,共计419粒。利用光学显微镜观察黄铁矿的产出形式和其他矿物之间的关系,实验在中国地质大学(武汉)综合勘查技术实验室的RDY-II型矿物热电系数测量仪上进行,设定温差100℃,测得的热电动势直接从测量仪上读取。

选取ZK18-2中矿化富集段采集了2件样品进行电子探针微区成分研究,该分析在武汉理工大学材料研究与测试中心的JXA-8230电子探针上完成,测试条件加速电压20 kV,电流20 nA,温度

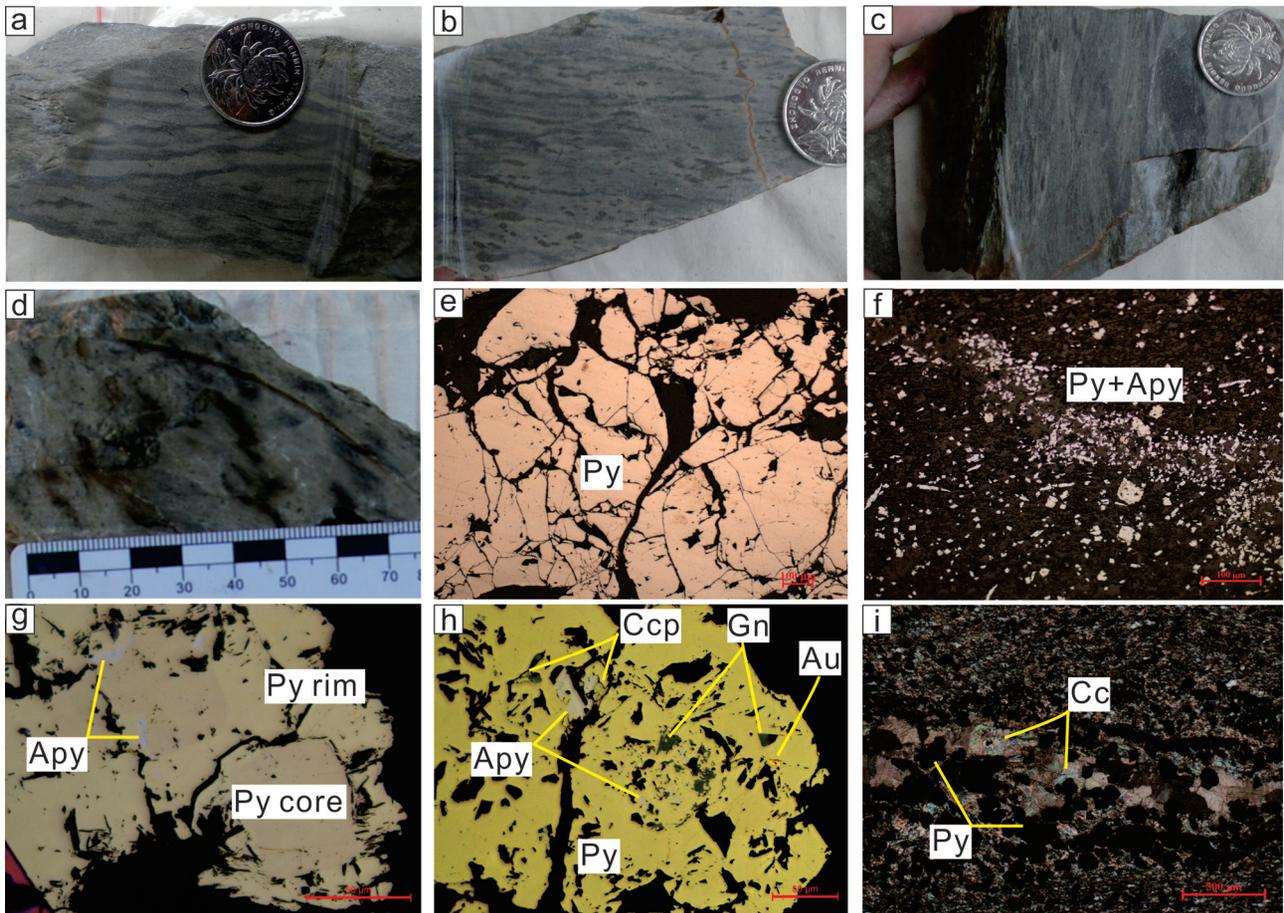


图3 庞家河金矿矿石结构构造图

Py—黄铁矿; Apy—毒砂; Ccp—黄铜矿; Gn—方铅矿; Cc—方解石; Au—金

Fig.3 Ore textures and structure maps of the Pangjiahe gold deposit

Py—Pyrite; Apy—Arsenopyrite; Ccp—Chalcopyrite; Gn—Galena; Cc—Calcite; Au—Gold

23℃,湿度40%RH,电子束直径5 μm,测试前先对样品镀碳处理。

5 黄铁矿的标型特征

5.1 黄铁矿形态标型特征

黄铁矿在自然界中形态复杂多样,最常见的晶形主要是立方体{100}、五角十二面体{210}、八面体{111}及它们之间相互聚合的聚形晶(陈光远等,1987;胡楚雁,2001),但在金矿床中最常见的晶形立方体和五角十二面体,两者占到金矿床黄铁矿总数的90%以上(李红兵和曾凡治,2005;申俊峰等,2013)。本次通过对庞家河金矿床IV-2号矿体中黄铁矿晶形统计(表1)研究发现,晶体形态以立方体(图4a)、五角十二面体(图4b)为主,也可见立方体与五角十二面体两两之间的聚形(图4c~f)。在IV-

2号矿体在矿化较弱的矿体上部(1164 m标高附近)黄铁矿形态晶形主要为立方体,且立方体大小在1~2 mm;越向矿体中部矿化富集地段(1114~1044 m标高)黄铁矿晶形向五角十二面体转变,晶体形态的类型也增多,逐渐出现聚形,可见立方体及立方体与五角十二面体的聚形,聚形在富矿位置最发育,含金性也较高,粒径在0.01~0.18 mm;在矿体的深部(951~861 m标高),立方体占比逐渐增大,五角十二面体占比逐渐减少,在861 m标高处立方体占比已经超过五角十二面,粒径在0.05~0.3 mm。

5.2 黄铁矿热电性特征

热电性是黄铁矿最重要的物性标型特征之一,用热电系数 α 来度量, α 为正值,显示空穴型(P型), α 为负值,显示电子导型(N型)(宋焕斌,1989;彭丽娜等,2009)。本次通过对IV-2号矿体18号勘探线

表1 庞家河金矿IV-2号矿体黄铁矿形态特征统计

样品编号	标高/m	品位/(g/t)	晶形形态			合计	百分比/%		
			{100}	{210}	{100}+{210}		{100}	{210}	{100}+{210}
64CM18-1	1164		50	21		71	70.5	29.5	
14CM16-3	1114		2	114	3	119	1.7	95.8	2.5
ZK18-2-9	1044	19.40	6	66		72	8.3	91.7	
ZK18-1-1	951	2.46	36	56		92	39.1	60.9	
ZK18-3-1	861	3.06	33	32		65	50.8	49.2	
合计			127	289	3	419	30.3	69.0	0.7

不同标高的黄铁矿的热电动势进行测定计算统计(表2)。黄铁矿的热电系数 α 变化范围为 $-268.56\sim 353.41\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$,其中P型的变化范围 $3.68\sim 353.41\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$,平均值 $226.56\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$;N型变化范围 $-6.54\sim -268.56\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$,平均值 $-103.72\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$;P型黄铁矿出现频率为77.08%,主要出现在标高1114~950 m标高(表2)。不同标高黄铁矿的热电性特征呈有规律变化:从

近地表向深部,黄铁矿的热电系数 α 值表现为减小 \rightarrow 增大 \rightarrow 减小,导型由N型 \rightarrow P型 \rightarrow N-P型。

5.3 黄铁矿成分标型特征

针对庞家河金矿黄铁矿结构的多样性,本次选取了IV-2号矿体富矿地段具有代表主成矿阶段的微细粒他形结构、加大边结构和环带结构的黄铁矿进行电子探针微区成分分析,具体结果见表3。

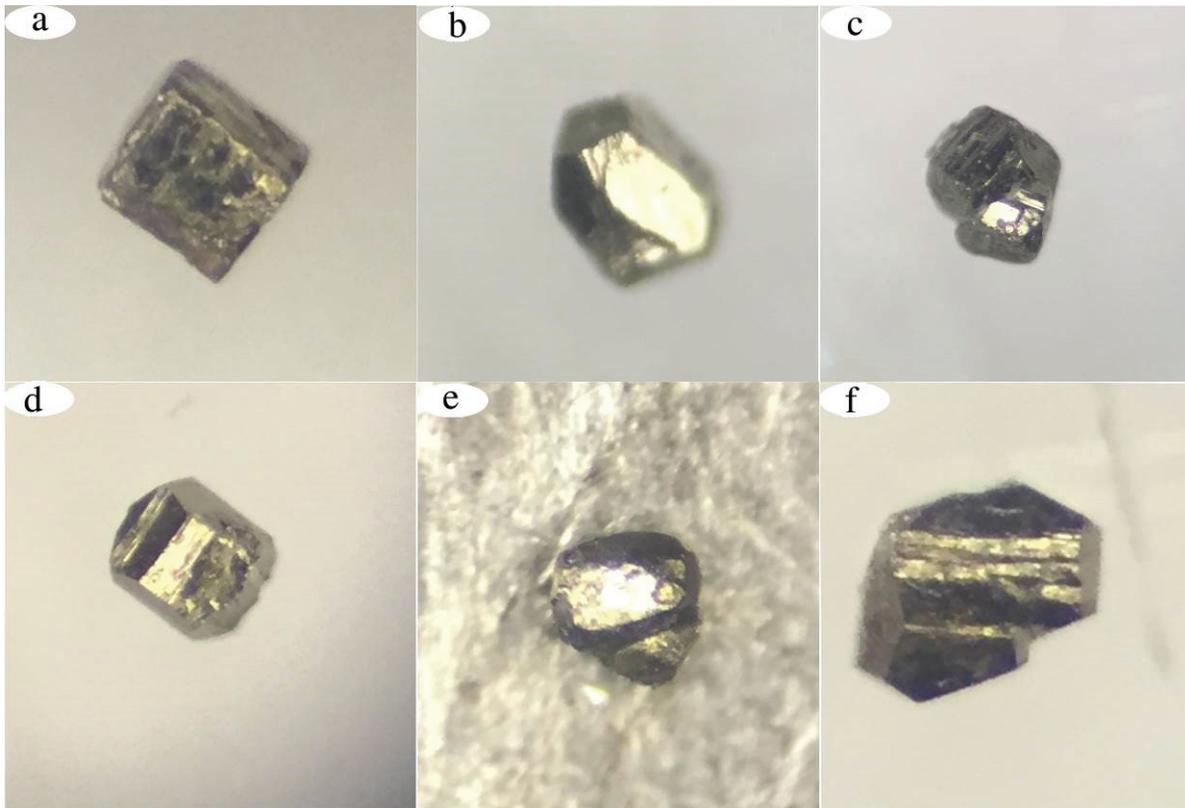


图4 黄铁矿形态标型特征

a—立方体黄铁矿; b—五角十二面体黄铁矿; c—立方体与五角十二面体连晶黄铁矿; d—五角十二面平行连晶黄铁矿; e—五角十二面体黄铁矿晶面上生长子晶; f—五角十二面体双晶黄铁矿

Fig.4 Morphological typomorphic characteristics of pyrite

a—Cubic pyrite; b—Pentagonal dodecahedral pyrite; c—Cube and pentagonal dodecahedral pyrite; d—Pentagonal twelve-sided parallel crystallized pyrite; e—Growth of crystal grains on the face of pentagonal dodecahedral pyrite; f—Pentagonal dodecahedral double crystal pyrite

表2 庞家河金矿IV-2号矿体黄铁矿热电性特征
Table 2 Thermoelectric properties of pyrites of IV-2 in the Pangjiahe gold deposit

样品编号/ 标高	数 量	N型热电系数 $\alpha/(\mu\text{V}/^\circ\text{C})$			P型热电系数 $\alpha/(\mu\text{V}/^\circ\text{C})$			导电 类型
		变化范围	平均值	出现频率/%	变化范围	平均值	出现频率/%	
CM18-1/1164 m	71	-53.03~-268.56	-131.53	100%	—	—	0	N
CM16-1/1114 m	119	—	—	0	3.68~353.42	235.82	100%	P
ZK18-2-9/1044 m	72	—	—	0	228.46~308.75	245.38	100%	P
ZK18-1-1/951 m	92	—	—	0	36.87~328.34	199.84	100%	P
ZK18-3-1/861 m	65	-98.32~-6.54	-45.56	38%	23.07~167.58	76.86	62%	N-P

5.3.1 Fe、S及Fe/(S+As)含量特征

标准黄铁矿 S/Fe(原子数比)比值近似为2,理论值 S=53.45%, Fe=46.55%, 而含金黄铁矿中因有其他元素的进入,其S、Fe含量与理论略有差异。庞家河金矿床IV-2号矿体中黄铁矿S平均含量50.71%, Fe平均含量45.04%, S/Fe值小于2,与标准黄铁矿相比,整体表现出亏S、亏Fe的特点,且S亏损强度较Fe大,但加大边结构黄铁矿的S/Fe大于2,表现出相对富S贫Fe, Fe含量最低达35.73%。环带结构黄铁矿的S/Fe比值表现出从核部向中环变小,中环向外环逐渐变大的特征,且核部的比值最

接近2。经前人研究并综合验证, Fe/(S+As)含量比值具有重要的意义,可用于计算成矿深度(周学武等,2005;彭丽娜等,2009;曹熙等,2015)。庞家河金矿床IV-2号矿体中黄铁矿的Fe/(S+As)含量比值为0.848~0.866,变化范围较小,平均值为0.860。

5.3.2 Co、Ni及Co/Ni含量特征

Co、Ni与Fe属于同族元素,它们具有相似的化学行为,Co、Ni常以类质同象的形式代替Fe而进入到黄铁矿中,而Co在元素周期表中的位置离Fe更近,因此Co较Ni更易进入黄铁矿中。由于黄铁矿形成时所处的地质环境背景不一,其Co、Ni含量及

表3 庞家河金矿IV-2号矿体不同结构特征黄铁矿电子探针分析结果(%)
Table 3 The analysis of EPMA of different structural pyrites of IV-2 in the Pangjiahe gold deposit(%)

样品编号	结构特征	测点位置	Fe	S	As	Au	Zn	Cu	Ti	Ag	Te	Sb	Pb	Ni	Co	总量
ZK18-2-8	环带结构	晶体1外环	46.715	52.920	0.181	0.042	-	-	-	0.032	-	0.011	-	0.013	0.069	99.98
		晶体1外环	46.967	53.004	0.153	0.012	-	-	-	-	0.014	0.004	0.011	0.031	0.076	100.27
		晶体1中环	45.808	49.546	4.956	0.017	0.028	0.047	-	-	-	0.008	-	-	0.076	100.49
		晶体1中环	45.805	49.859	4.689	0.075	0.089	0.124	-	0.002	-	-	0.057	0.010	0.096	100.81
		晶体1核部	46.507	53.127	0.025	0.012	0.027	0.024	-	0.024	0.030	0.006	-	-	0.323	100.11
		晶体2外环	46.888	52.626	0.836	0.032	-	0.053	-	-	-	-	0.002	-	-	0.083
ZK18-2-11		晶体2外环	46.802	52.149	1.108	-	0.035	-	0.005	-	-	-	-	0.007	0.104	100.21
		晶体2中环	46.092	51.215	1.167	0.107	-	0.028	0.005	-	0.006	0.036	-	0.017	0.082	98.76
		晶体2中环	45.744	49.749	4.767	-	0.008	0.027	-	0.003	-	-	-	-	0.107	100.41
ZK18-2-8	加大边结构	晶体2核部	46.630	52.229	1.495	0.051	-	0.006	-	-	-	-	-	0.012	0.076	100.50
		晶体3外环	44.324	49.249	4.587	-	0.064	0.343	0.029	-	0.004	0.120	-	0.024	0.090	98.83
ZK18-2-11		晶体3核部	47.113	53.146	-	0.025	0.026	0.017	-	-	-	0.001	-	0.022	0.135	100.49
ZK18-2-11		晶体4外环	24.939	40.947	4.389	0.056	2.601	19.602	0.002	0.865	-	7.220	-	0.026	0.063	100.71
		晶体4核部	46.516	53.141	-	0.047	0.002	0.017	-	0.009	0.030	-	0.026	0.377	0.173	100.34
ZK18-2-8	细粒他形	晶体5	47.051	53.232	0.022	0.042	0.002	-	-	-	0.020	-	-	-	0.158	100.53
		晶体6	44.829	47.999	7.077	0.028	0.042	0.119	-	-	0.005	0.015	-	-	0.067	100.18
		晶体7	45.115	49.229	5.155	-	0.001	0.060	0.018	-	-	-	-	-	0.091	99.67
ZK18-2-11		晶体8	46.356	50.917	1.672	0.046	0.037	0.083	-	-	-	0.026	-	0.069	0.086	99.29
		晶体9	45.525	49.226	5.242	0.049	-	0.050	-	0.024	-	0.013	0.028	-	0.054	100.21

注:“-”表示未检出。

Co/Ni 比值又有一定的差异。庞家河金矿床 IV-2 号矿体中黄铁矿 Co 含量较高,检出率 100%,平均含量 1.06%,而 Ni 含量较低,检出率 58%,平均含量 0.55%,Co/Ni 含量比值范围 0.46~14.86,平均 5.66,主要集中在 1~10。

5.3.3 Au、As 含量特征

电子探针分析显示黄铁矿 Au 含量极不均一,单个矿物颗粒内金含量从低于检出限到 0.107%(晶体 2)。不同阶段黄铁矿含金量不同,其中核部黄铁矿平均含金 0.034%,中环和加大边平均含金 0.039%,外环平均含金 0.027%。由于 As 往往以类质同象的形式替代 S 而进入黄铁矿的晶格中,黄铁矿中 As 含量可高达 10%,尤其是在成矿流体富砷的情况下。本次研究黄铁矿内 As 含量范围较大,介于 0.02%~7.78%,其中核部和最外环含 As 较低,分别平均含 As 0.38%和 0.46%;中环和加大边 As 含量最高,平均含 As 4.37%。

6 讨 论

6.1 矿床成因分析

6.1.1 成矿温度

不同温度下形成的黄铁矿的导电类型与热电系数是不同的,如高温条件下多为 N 型电子导型,中温条件下多为 N-P 或 P-N 混合型,低温条件下则多为 P 型空穴导型(翟德高等,2013)。要梅娟等(2008)从戈尔巴乔夫于 1964 年做出的黄铁矿热电性-温度图中获得线性方程:

$$T=(704.51-\alpha)/1.818(\text{N型}) \quad (1)$$

$$T=3(122.22+\alpha)/5.0(\text{P型}) \quad (2)$$

其中, T 为黄铁矿形成温度($^{\circ}\text{C}$); α 为热电系数($\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$)。

利用该公式计算得出庞家河金矿 IV-2 号黄铁矿形成温度范围为 75.54~418.78 $^{\circ}\text{C}$,形成了 3 个峰值区域,分别是小于 170 $^{\circ}\text{C}$, 190~250 $^{\circ}\text{C}$, 大于 300 $^{\circ}\text{C}$ 。

马健等(2018)对该矿床石英中的流体包裹体进行均一测温,其分布范围较广,在 83.6~371.3 $^{\circ}\text{C}$,数据也形成了 3 个峰值,代表了成矿作用的降温过程,早成矿阶段温度峰值在 290~300 $^{\circ}\text{C}$,主成矿阶段温度峰值为 220~250 $^{\circ}\text{C}$,晚成矿阶段温度峰值在 170~190 $^{\circ}\text{C}$ 。热电系数计算得到的黄铁矿结晶温度变化范围与石英包裹体测温基本吻合,能指示成矿作用温度变化的过程,显示成矿流体具有中低温的特征。对其不同标高黄铁矿的结晶温度进行计算和对比(表 4),发现该矿体黄铁矿的结晶温度在矿体浅部和深部呈两个区间集中,在矿体中部(标高 1044 m)结晶温度较集中,而且矿体品位最高,可能代表了该矿床成矿流体多期叠加的过程,反映了主成矿温度为 210~250 $^{\circ}\text{C}$ 。

6.1.2 形成深度

周学武等(2005)研究表明黄铁矿的 Fe/(S+As)含量比值与其形成的深度有较好的相关性,相关系数为 0.870,深成环境产出的黄铁矿 Fe/(S+As)值约为 0.846,中成环境黄铁矿其值约为 0.863,浅成为 0.926。庞家河金矿 IV-2 号矿体中黄铁矿 Fe/(S+As)比值主要介于 0.863~0.926,但也有少量的黄铁矿 Fe/(S+As)小于 0.846,表明庞家河金矿形成于浅成环境,与马健等(2018)通过对石英包裹体捕获压力和形成深度(1.08~3.09 km)计算结果基本一致。

6.1.3 成矿流体性质及 Au 的赋存状态

黄铁矿中的 Co/Ni 值可用于指示其形成环境,前人(陈光远等,1987;宋焕斌,1989;胡楚雁,2001;李红兵和曾凡治,2005)研究认为:岩浆热液成因的黄铁矿 Co、Ni 含量较高,且 Co/Ni 多介于 1~5;沉积成因的黄铁矿 Co/Ni 多小于 1;变质热液成因的黄铁矿多继承沉积成因黄铁矿特征,其 Co/Ni 一般也小于 1。庞家河金矿中环带黄铁矿不同部位 Co/Ni 值多介于 1~10,具有明显的热液属性(图 5a),仅有 1 个数据点落于岩浆成因黄铁矿区域。前人对成矿

表 4 庞家河金矿床 IV-2 号矿体不同标高黄铁矿结晶温度计算结果

Table 4 Calculated crystallization temperature of pyrite in different depths of IV-2 in the Pangjiahe gold deposit

采样标高/m	黄铁矿颗粒数/个	温度变化区间/ $^{\circ}\text{C}$	温度集中区间/ $^{\circ}\text{C}$	温度平均值/ $^{\circ}\text{C}$
1164	71	239.79~358.34	239.79~270.48, 300.08~358.34	315.17
1114	119	75.54~285.34	153.06~195.26, 218.42~285.38	214.82
1044	72	210.40~258.58	210.40~258.58	220.56
951	92	95.45~270.33	105.64~168.77, 198.56~254.33	193.24
861	65	87.17~418.78	87.17~173.88, 363.71~418.78	232.30

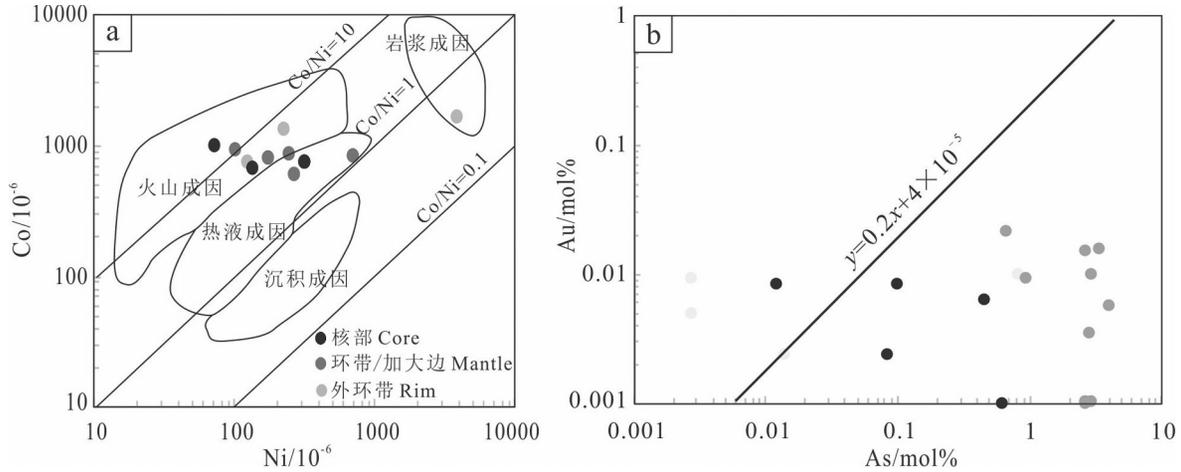


图5 不同类型黄铁矿 Co、Ni 含量散点图(a), Au-As 关系图解、金饱和曲线(b)(据 Reich et al., 2005)

Fig.5 Scatter plot of Co and Ni content of different types of pyrite (a); Au-As relationship diagram, gold saturation curve (b) (after Reich et al., 2005)

期石英脉氢、氧同位素研究表明(吴孔运和高利鹏, 2011; 马健等, 2018), 庞家河金矿成矿流体以变质流体为主, 不排除混染少量岩浆热液, 与本次研究结果一致。

前人研究显示黄铁矿内金的溶解度与 As 含量有密切的关系 (Reich et al., 2005), Au-As 溶解度曲线如图 5b, 当数据点位于该曲线上时被认为金多以自然金包裹体的形式存在, 当数据位于曲线下则表明金多以晶格金的形式赋存在黄铁矿中。庞家河金矿中金多以晶格金的形式存在(图 5b), 也不排除少量以金的包裹体存在(图 3h)。

综上所述, 庞家河金矿可初步划分为浅成中低温热液金矿, 成矿热液应主要来自于秦岭地区印支期强烈造山变质作用, 金的赋存状态以晶格金为主, 含少量自然金包裹体。

6.2 黄铁矿的找矿信息分析

通过前人(李红兵和曾凡治, 2005; 周学武等, 2005; 彭丽娜等, 2009; 魏佳林等, 2011; 翟德高等, 2013)对金矿床中黄铁矿标型的研究显示, 黄铁矿的晶体形态和热电性在空间上分布具有一定的分带规律, 可以有效的指示矿体的贫富及成矿潜力。总体上, 在矿体的上部、近矿围岩、弱矿化地段以立方体黄铁矿为主, 在矿体中、下部及矿化富集地段黄铁矿形态多样, 有立方体、五角十二面体、八方体及它们的聚形; 在矿体尾部, 则出现立方体、立方体和八方体的聚形等。庞家河金矿床 IV-2 号矿体黄铁矿晶体形态从近地表以立方体为主, 在中部逐渐以五角

十二面体为主, 向深部立方体逐渐增多, 五角十二面体逐渐减少(表 1)。需要指出的是, IV-2 号矿体向深部延伸(951~861 m 标高), 五角十二面体黄铁矿仍然占比很大, 说明目前工程仍未揭露矿体的底部, 即深部仍有一定的成矿潜力。

前人(杨国杰和孟舞平, 1992; 权志高和李占游, 1995; 谢玉玲等, 1999; 魏佳林等, 2011; 申俊峰等, 2013)研究证实, 黄铁矿的热电性特征可用于估算矿体的剥蚀程度, 而且前人在庞家河金矿床 IV 号矿体中初步应用得到了后期开采验证(权志高和李占游, 1995), 且情况基本一致。本文将对新发现 IV-2 号矿体采用同样的方法来计算矿体剥蚀率。计算公式如下:

$$\gamma = 50 - X_{mp}/4 \tag{3}$$

其中, γ 为剥蚀率, X_{mp} 为热电参数。

$$X_{mp} = (2f_I + f_{II}) - (f_{IV} + 2f_V) \tag{4}$$

其中, f 为样品中相应热电系数数值的黄铁矿百分比, f_I 为 $\alpha > 400 \mu V/^\circ C$, f_{II} 为 $\alpha = 200 \sim 400 \mu V/^\circ C$, f_{III} 为 $\alpha = 0 \sim 200 \mu V/^\circ C$, f_{IV} 为 $\alpha < -200 \sim 0 \mu V/^\circ C$, f_V 为 $\alpha < -200 \mu V/^\circ C$ 。利用公式(3)(4)对 IV-2 号矿体的剥蚀率进行计算见表 5。可以看出, IV-2 号矿体剥蚀程度在 28.13%~75%, 平均剥蚀率为 45.05%, 与西段 IV 号矿体的剥蚀率(30%~35%)(权志高和李占游, 1995)相比, 东段矿体被后期构造抬升, 剥蚀程度相对较高。由于剥蚀率具有从浅部向深部由大变小又增大的特征, 推测成矿流体在 951~861 m 标高存在多期热液叠加的情况, 导致剥蚀率出现反复。

表5 庞家河金矿床IV-2号矿体不同标高黄铁矿热电性参数特征

Table 5 Thermoelectric parameters of various levels of IV-2 in the Pangjiahe gold deposit

样品编号	标高/m	P型出现率/%	热电性参数 (X_{np})	剥蚀率 γ /%
64CM18-1	1164	0	-100	75.00
14CM16-3	1114	100	84.03	28.99
ZK18-2-9	1044	100	87.50	28.13
ZK18-1-1	951	100	60.87	34.78
ZK18-3-1	861	62	-33.78	58.45

根据金矿床黄铁矿导型垂向分带的变化规律及热电性参数还可以判断矿体向深部的延伸趋势。热液脉状金矿体的黄铁矿热电系数存在明显的垂向分带,即自上而下依次为P型(上部)→N-P混合型和P-N混合型(中部)→N型(下部)(李红兵和曾凡治,2005)。庞家河金矿床IV-2号矿体向深部逐渐由P型向N-P混合型过渡(表2),说明勘探的矿体属于中上部,向深部仍与一定的延伸。前人(权志高和李占游,1995;魏佳林等,2011)利用黄铁矿热电性参数(X_{np})可大致估算矿体的延伸深度,具体公式如下:

$$L=(X_{np,i}+200)(H1-H2)/(X_{np,1}-X_{np,2}) \quad (5)$$

其中, L 为相对采样点矿体延伸深度, $X_{np,i}$ 为相应采样点黄铁矿的热电性参数; $X_{np,1}$ 、 $H1$ 和 $X_{np,2}$ 、 $H2$ 分别为剖面上、下样品的热电性参数和高程。

利用公式(5)计算得出相对861 m标高矿体向下延伸深度约186 m,表明矿体向深部仍有较大的延伸。

综上所述,IV-2矿体黄铁矿的形态标型和热电性标型均指示18线矿体深部仍有较大的延深,上述结果与刘普凯等(2018)对相同位置的原生晕研究的结论一致,均反映了该矿床成矿具有多期性,且在861 m标高向下仍有相当的找矿潜力。

7 结 论

通过对庞家河金矿床IV-2矿体黄铁矿的形态标型、热电性标型以及成分标型进行研究,并结合矿床的地质背景和前人研究成果,可以得出如下3点结论:

(1)庞家河金矿床可初步定义为浅成中低温热液金矿床,成矿流体主要来源于变质热液,不排除岩浆热液的加入;金的赋存状态以晶格金为主,含

少量明金包裹体。

(2)成矿作用具有多期多阶段叠加的特点。IV-2矿体在不同标高的黄铁矿表现出的形态变化和热电性变化特征都表现出热液的多期多阶段叠加作用,热液黄铁矿普遍发育不同环带的结构特征也说明了这一点。

(3)矿床深部找矿仍有一定的潜力。在IV-2矿体深部(标高861 m附近)反映出矿头与矿尾相叠加的特点,而且至标高861 m向下仍有186 m的延伸。

致谢:非常感谢中国地质大学(武汉)资源学院李昊熹在实验测试和数据整理方面给予的帮助,也非常感谢评审专家及编辑部提出的宝贵意见。

注释

①中陕核工业集团211大队有限公司. 2018. 陕西省凤县庞家河金矿深部及外围金矿详查阶段性总结报告[R].

References

- Cao Xu, Li Quanheng, Ye Rong, Wang Yong. 2015. Typomorphic characteristics of pyrites in the 210 gold deposit, Xinjiang Province and its geological significance[J]. Xinjiang Geology, 33(1): 56-60 (in Chinese with English abstract).
- Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Zhang Li, Zang Weisheng, Wang Jian, Lu Anhuai. 1987. Morphogenesis of Pyrite[J]. Geoscience, 1(1): 60-76(in Chinese with English abstract).
- Chu Fengyou, Hu Daqian, Yu Honglin, Yao Jie. 2004. The significance of crystal form typomorphism of pyrite in assessment of gold deposit[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 34(4): 531-535(in Chinese with English abstract).
- Gong Li, Ma Guang. 2011. The characteristic typomorphic composition of pyrite and its indicative meaning to metal deposits[J]. Contributions to Geology and Resources Research, 26(2): 162-166 (in Chinese with English abstract).
- Hu Chuyan. 2001. Characteristics of trace elements, thermoelectricity and crystal form of pyrite[J]. Geoscience, 15(2): 238-241(in Chinese with English abstract).
- Jiang Hanbing, Li Zonghui, Yang Hequan, Dong Fuchen, Tan Wenjuan, Jia Jian, Sun Yanglong. 2014. Division of metallogenic unit in the Qinling area[J]. Northwestern Geology, 47(2): 146-155 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongbing, Zeng Fanzhi. 2005. The pyrites typomorphic characteristics in gold deposit[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 20(3): 199-203(in Chinese with English abstract).
- Liu Huanan, Liu Jiajun, Li Xiaowei, Liu Chonghao, Dai Hongzhang, Tao Yinlong, Wang Jianfeng, Du Yingdong, Fan Yunfei. 2018.

- Thermoelectric characteristics of pyrite from the Xindingou gold deposit in Inner Mongolia and its significance on deep prospecting[J]. *Geology in China*, 45(4): 819–838(in Chinese with English abstract).
- Liu Pingli. 1994. Characteristics of associated elements of the gold deposits in Pang–Jia–He/Zuo–Jia–Zhuang area, Feng County, Shaanxi Province and their geological significance[J]. *Gold*, 15(5): 10–16(in Chinese with English abstract).
- Liu Pukai, Lu Fei, Zhao Xiaozhen. 2018. Primary halo zoning features along line 18 and deep ore prediction in Pangjiahe gold deposit, Fengxian County, Shaanxi Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 33(1): 115–123(in Chinese with English abstract).
- Ma Jian, Lü Xinbiao, Escolme Angela, Li Song, Zhao Ningli, Cao Xiaofeng, Zhang Lejun, Lu Fei. 2018. In–situ sulfur isotope analysis of pyrite from the Pangjiahe gold deposit: Implications for variable sulfur sources in the north and south gold belt of the South Qinling orogen[J]. *Ore Geology Reviews*, 98: 38–61.
- Ma Jian, Lü Xinbiao, Wang Zhongduo, Lu Fei. 2015. Analysis of ore–controlling factors and genesis of Pangjiahe gold deposit in Fengxian County, Shaanxi Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(S1): 714(in Chinese).
- Peng Lina, Wei Junhao, Sun Xiaoyan, Li Yanjun, Ye Zefu. 2009. Typomorphic Characteristics of pyrites in the Huaixi copper–gold deposit, southeastern Zhejiang province and its geological significance[J]. *Geology and Exploration*, 45(9): 577–587(in Chinese with English abstract).
- Qing Min, Han Xianju. 2003. A summarize of typomorphic features of minerals in gold deposit[J]. *Gold Geology*, 9(4): 39–45(in Chinese with English abstract).
- Quan Zhigao, Li Zhanyou. 1995. Applications on pyrite pyroelectricity to the evaluation of gold deposit in Pangjiahe[J]. *Geology of Shaanxi*, 13(1): 54–60(in Chinese with English abstract).
- Quan Zhigao. 1995. Structural characteristics of Pangjiahe gold deposit and its relationship with gold mineralization[J]. *Gold Science and Technology*, 3(1): 24–29(in Chinese).
- Quan Zhigao. 1996a. Study on gold host stste of the microimpregnation glod deposit in Pangjiahe[J]. *Journal of East China Geological Institute*, 19(3): 224–230(in Chinese with English abstract).
- Quan Zhigao. 1996b. The metallogenesis and geological features of the Pangjiahe gold deposit in Fengxian County, Shaanxi[J]. *Geology of Shaanxi*, 14(2): 43–52(in Chinese with English abstract).
- Reich M, Kesler S E, Utsunomiya S, Palenik C S, Chryssoulis S L, Ewing R C. 2005. Solubility of gold in arsenian pyrite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(11): 2781–2796.
- Shen Junfeng, Li Shengrong, Ma Guanggang, Liu Yan, Yu Hongjun, Liu Haiming. 2013. Typomorphic characteristics of pyrite from the Linglong gold deposit: Its vertical variation and prospecting significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(3): 55–75(in Chinese with English abstract).
- Song Huanbin. 1989. Applications of typomorphic characteristics of pyrite in gold geology[J]. *Geology and Exploration*, 25(7): 31–37 (in Chinese with English abstract).
- Song Xiaowen, Hou Mantang, Chen Ruyi. 2004. Division of Shaanxi matellogenic province(belt) [J]. *Northwestern Geology*, 37(3): 29–42(in Chinese with English abstract).
- Tian Chong, Zhang Wengao, He Hujun, Yang Xingke, Han Ke, Wang Xiaohu, Wu Yu. 2021. Mineralogical characteristics of gold–bearing pyrite and gold occurrence regularity of the Jiadi gold deposit in southwestern Guizhou Province[J]. *Geology in China*, 48(4): 1255–1266(in Chinese with English abstract).
- Wang Jianping. 1993. Preliminary discussion on geological characteristics of Pangjiahe gold deposit at Fengxian County, Shaanxi Province[J]. *Uranium Geology*, 9(5): 266–272(in Chinese with English abstract).
- Wei Jialin, Cao Xinzhi, Wang Qingfeng, Han Jianmin. 2011. Typomorphic characteristics and geological significance of the pyrites from Axi gold deposit, Xinjiang, China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 30(5): 89–96(in Chinese with English abstract).
- Wu Kongyun, Gao Lipeng. 2011. Geological characteristics and ore–forming material sources of the Pangjiahe gold deposit in Shaanxi Province[J]. *Geology in China*, 38(3): 716–723(in Chinese with English abstract).
- Xie Yuling, Xu Jihua, Qian Dayi, He Zhili. 1999. Pyroelectricity of pyrite and application to prospectingin Taibai gold deposit[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 21(1): 1–5(in Chinese with English abstract).
- Yang Guojie, Meng Wuping. 1992. Application mechanism of pyrite pyroelectric as gold ore prospecting mineralogy[J]. *Shandong Geological Information*, (3): 36–43(in Chinese).
- Yao Meijuan, Shen Junfeng, Li Shengrong, Cao Ye, Liu Xiuyan. 2008. Thermoelectric and thermal decrepitation characteristics of pyrite in the gold deposit, Songxian County, Henan, China, and their relationships with gold mineralization[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(5): 649–656(in Chinese with English abstract).
- Zhai Degao, Liu Jiajun, Han Siyu, Wang Jianping, Zhang Hongyu, Liu Zhenjiang, Yang Longbo, Lü Jun. 2013. Typomorphic characteristics of pyrite and processes of changes and preservation of the Sandaowanzi telluride–gold deposit in Heilongjiang Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(1): 81–90(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xuewu, Li Shengrong, Lu Li, Li Junjian, Wang Jizhong. 2005. Study of pyrite typomorphic characteristics of Wulong quartz–vein–type gold deposit in Dandong, Liaoning Province, China[J].

Geoscience, 19(2): 231–238(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹煦, 李权衡, 叶荣, 王勇. 2015. 新疆210金矿床黄铁矿标型特征及地质意义[J]. 新疆地质, 33(1): 56–60.
- 陈光远, 孙岱生, 张立, 藏维生, 王健, 鲁安怀. 1987. 黄铁矿成因形态学[J]. 现代地质, 1(1): 60–76.
- 初凤友, 胡大千, 于洪林, 姚杰. 2004. 黄铁矿晶体形态标型在金矿评价中的意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 34(4): 531–535.
- 官丽, 马光. 2011. 黄铁矿的成分标型特征及其在金属矿床中的指示意义[J]. 地质找矿论丛, 26(2): 162–166.
- 胡楚雁. 2001. 黄铁矿微量元素及热电性和晶体形态分析[J]. 现代地质, 15(2): 238–241.
- 姜寒冰, 李宗会, 杨合群, 董福辰, 谭文娟, 贾健, 孙颜龙. 2014. 秦岭地区成矿单元划分[J]. 西北地质, 47(2): 146–155.
- 李红兵, 曾凡治. 2005. 金矿中的黄铁矿标型特征[J]. 地质找矿论丛, 20(3): 199–203.
- 刘华南, 刘家军, 李小伟, 刘冲昊, 代鸿章, 陶银龙, 王建锋, 杜映东, 范云飞. 2018. 内蒙古新地沟金矿床黄铁矿热电性特征及深部找矿意义[J]. 中国地质, 45(4): 819–838.
- 刘平立. 1994. 陕西凤县庞家河—佐家庄地区金矿伴生元素特征及其地质意义[J]. 黄金, 15(5): 10–16.
- 刘普凯, 卢飞, 赵晓振. 2018. 陕西凤县庞家河金矿床18号勘探线原生晕分带特征及深部预测[J]. 地质找矿论丛, 33(1): 115–123.
- 马健, 吕新彪, 王仲铎, 卢飞. 2015. 陕西凤县庞家河金矿控矿因素分析及成因研究[J]. 矿物学报, 35(S1): 714.
- 彭丽娜, 魏俊浩, 孙晓雁, 李艳军, 叶泽富. 2009. 浙东南怀溪铜金矿床黄铁矿标型特征及其地质意义[J]. 地质与勘探, 45(9): 577–587.
- 卿敏, 韩先菊. 2003. 金矿床主要矿物标型特征研究综述[J]. 黄金地质, 9(4): 39–45.
- 权志高, 李占游. 1995. 黄铁矿热电性研究在庞家河金矿评价中的应用[J]. 陕西地质, 13(1): 54–60.
- 权志高. 1995. 庞家河金矿床构造特征与金成矿[J]. 黄金科学技术, 3(1): 24–29.
- 权志高. 1996a. 庞家河微细浸染型金矿金的赋存状态[J]. 华东地质学院学报, 19(3): 224–230.
- 权志高. 1996b. 陕西凤县庞家河金矿床基本地质特征及成矿作用分析[J]. 陕西地质, 14(2): 43–52.
- 申俊峰, 李胜荣, 马广钢, 刘艳, 于洪军, 刘海明. 2013. 玲珑金矿黄铁矿标型特征及其大纵深变化规律与找矿意义[J]. 地学前缘, 20(3): 55–75.
- 宋焕斌. 1989. 黄铁矿标型特征在金矿地质中的应用[J]. 地质与勘探, 25(7): 31–37.
- 宋小文, 候满堂, 陈如意. 2004. 陕西省成矿区(带)划分[J]. 西北地质, 37(3): 29–42.
- 田冲, 张文高, 何虎军, 杨兴科, 韩珂, 王晓虎, 吴玉. 2021. 黔西南架底金矿床载金黄铁矿的矿物学特征及金的赋存规律研究[J]. 中国地质, 48(4): 1255–1266.
- 王建平. 1993. 陕西凤县庞家河金矿床地质特征初探[J]. 铀矿地质, 9(5): 266–272.
- 魏佳林, 曹新志, 王庆峰, 韩建民. 2011. 新疆阿希金矿床黄铁矿标型特征及地质意义[J]. 地质科技情况, 30(5): 89–96.
- 吴孔运, 高利鹏. 2011. 陕西庞家河金矿成矿地质特征及成矿物质来源研究[J]. 中国地质, 38(3): 716–723.
- 谢玉玲, 徐九华, 钱大益, 何知礼. 1999. 太白金矿黄铁矿热电性及其在找矿中的应用[J]. 北京科技大学学报, 21(1): 1–5.
- 杨国杰, 孟舞平. 1992. 黄铁矿热电性作为金矿找矿矿物学应用的机理探讨[J]. 山东地质情报, (3): 36–43.
- 要梅娟, 申俊峰, 李胜荣, 曹焯, 刘秀艳. 2008. 河南嵩县前河金矿黄铁矿的热电性、热爆特征及其与金矿化的关系[J]. 地质通报, 27(5): 649–656.
- 翟德高, 刘家军, 韩思宇, 王建平, 张红雨, 柳振江, 杨隆勃, 张华锋, 吕军. 2013. 黑龙江三道湾碲金矿黄铁矿标型特征及矿床变化保存过程分析[J]. 地质学报, 87(1): 81–90.
- 周学武, 李胜荣, 鲁力, 李俊建, 王吉中. 2005. 辽宁丹东五龙矿区石英脉型金矿床的黄铁矿标型特征研究[J]. 现代地质, 19(2): 231–238.