

胶东杜家崖金矿黄铁矿热电系数、热电阻率 与金矿化关系研究

庞阿娟, 李胜荣, 王 潇, 刑金蕊

中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

摘 要: 杜家崖金矿为层间滑脱蚀变岩型金矿, 不同于山东蚀变岩型、石英脉型及破碎角砾岩型金矿。前人对该矿床的研究极少, 因此, 希望通过对该矿床矿石中黄铁矿热电性的研究, 可以为深部找矿提供依据。利用 BHTE-06 热电系数测试仪对 I 号矿体 37 件矿石样品中 1692 粒黄铁矿进行了热电系数分析, 并用 BHMR-08 型半导体矿粒调温电阻测试分析仪测出了 38 件矿石样品中 1900 粒黄铁矿的热电阻率。根据所得热电性系数数据计算出该矿床的黄铁矿形成温度范围为 78.6~380.8℃, 主要集中在 141.3~350.9℃。据所得数据进行黄铁矿热电系数及热电阻率填图, 可推测 36~38、54 勘探线海拔—100 m 以下附近的区域可能为富矿段, 成矿远景较好。

关 键 词: 杜家崖; 金矿; 黄铁矿; 热电系数; 热电阻率

中图分类号: P618.510.652 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2012)05-0495-10

A Study on Correlations of Thermoelectric Coefficient, Thermal Resistance Rate of Pyrite and Golden Mineralization in the Dujiaya Gold Deposit, East Shandong Province

PANG A-juan, LI Sheng-rong, WANG Xiao, XING Jin-rui

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Faculty of Earth Sciences
and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Different from other types (quartz vein, alteration and broken breccia) of gold deposits in the Shandong Province, the Dujiaya gold deposit, which has been studied very little, is an interlayer gliding alteration type deposit. It hopes that the study of the thermoelectricity of pyrite can provide evidence for deep exploration. 1692 pyrite grains from 37 ore samples of the I orebody were analyzed by BHTE-06 type thermoelectric instrument and 1900 pyrite grains from 38 ore samples of the I orebody were analyzed by BHMR-08 type impedance analyzer. The calculation on the basis of the measured thermoelectric coefficients indicated that the pyrite crystallization temperatures are in the range of 74.3—387.5℃ and mostly in the range of 141.3—343.4℃. Based on the map of thermoelectric coefficient and thermal resistance rate, this study predicts that locations of —100 meter below the 36~38 and 54 prospecting lines may contain high grade gold ore and have good perspective of mineralization.

Key words: Dujiaya; gold deposit; pyrite; thermoelectric coefficient; thermal resistance rate

胶东地区是我国金的主要产地之一, 金储量约占全国金储量的 1/4^[1]。大量的研究与地质事实表明, 黄铁矿是金矿床中重要的载金矿物^[2]。陈光远先生及多位学者已经对黄铁矿的标型特征进行研究, 黄铁矿标型特征在对金矿的开采与远景预测方

面起到了十分重要的作用^[3~13]。将黄铁矿的热电系数应用于金矿床的研究已经多年, 而将黄铁矿热电阻率性质应用于金矿的研究是最近几年新兴的一种研究方法, 已有的研究发现黄铁矿的热电阻率与金品位存在着一定的关系^[14]。将黄铁矿的热电系

收稿日期: 2011-12-14 收到, 12-24 改回

基金项目: 全国危机矿山接替资源找矿项目(20089937); 国家自然科学基金资助项目(90914002)

第一作者简介: 庞阿娟(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 成因矿物学与找矿矿物学。E-mail: pangajuan@163.com.

通讯作者: 李胜荣(1956—), 男, 教授, 研究方向: 成因与找矿矿物学及环境与生命矿物学。E-mail: lisr@cugb.edu.cn.

数与热电阻率性质应用于金矿床的研究具有操作简单、成本低等优点,但缺点是必须有大量的数据。

前人对胶东地区各个金矿进行过大量的研究,将黄铁矿热电系数应用于对金矿的研究也很多^[15,16]。而对杜家崖金矿的研究却非常少^[17,18],杜家崖金矿不同于胶东一般的蚀变岩型和石英脉型金矿,是一种层间滑脱蚀变岩型金矿。此次通过对杜家崖黄铁矿热电性标型的研究,希望增加对杜家崖金矿的认识,预测成矿远景。

1 地质概况

杜家崖金矿位于著名的胶东金矿集中区的中部(图 1A),其大地构造位置属于华北克拉通东南缘的胶北隆起区中部区域(图 1B)。出露地层主要以下元古界粉子山群为主,其次为太古-下元古界胶东群、上元古界蓬莱群和中生界白垩系以及新生界第

四系。区域构造复杂,受栖霞复式背斜影响,展布一系列规模不等的轴向近东西的背形向斜褶皱,断裂构造以北北东向、东西向为主,构成区域构造格架,其它方向的断裂不发育(图 1C)。区域出露元古宙和中生代的岩浆岩侵入体,以次火山岩、脉岩为主,其中元古宙侵入岩大多经过后期的构造和变质作用改造,岩性复杂,从基性到酸性均有,代表岩体为磁山岩体,岩性为片麻状二长花岗岩和石榴黑云花岗闪长岩;中生代侵入岩以中酸性、酸性为主,除大规模的郭家岭花岗闪长斑岩深成岩体外,其余出露的闪长玢岩、石英闪长玢岩、花岗闪长斑岩、花岗斑岩、花岗闪长岩等都呈不规则状、脉状、带状分布。

矿区位于张格庄倒转向斜南翼,杜家崖韧性剪切带北侧,地理座标:东经 121°05'28"~121°09'48",北纬 37°22'03"~37°25'02",面积约 35 km²。矿区地层主要为下元古界粉子山群下中部碎屑岩-碳酸盐

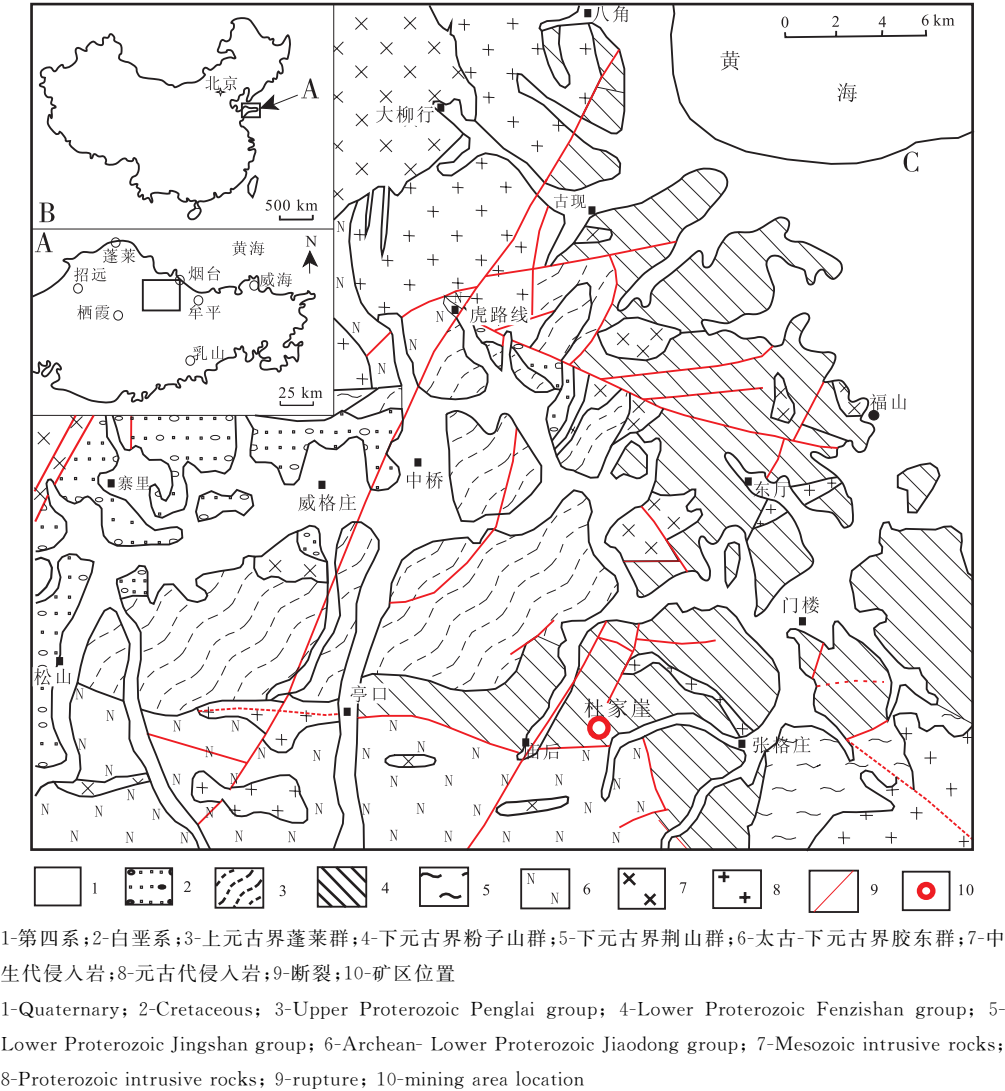


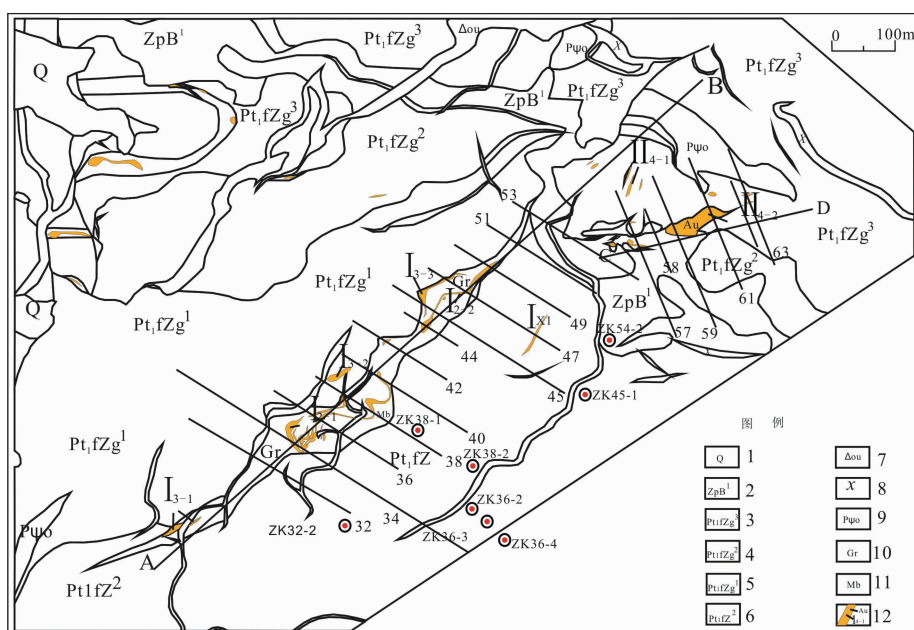
图 1 杜家崖区域地质图(底图据文献[19])

Fig. 1 Regional sketch geological map of the Dujiaya area(modified from ref. [19])

建造的祝家乔组、张格庄组,其次为太古-下元古界胶东群齐山组、上元古界蓬莱群下部的豹山口组及新生界第四系。矿区发育不同规模的褶皱构造和北北东向、北西向、东西向和逆冲断裂。矿区内岩浆岩主要为脉状,以燕山晚期的石英闪长玢岩脉最为发育,其次为少量的闪斜煌斑岩、伟晶岩等,岩脉以不规则的脉状、带状、透镜状沿不同时代、不同方位的断裂展布。矿体周围岩石蚀变严重,蚀变类型主要有绢英岩化、绢云母化、硅化、黄铁矿化、碳酸盐化,其次为绿泥石化、透闪石化等。

该金矿床位于杨家乔和杜家崖之间,为露天矿床,面积约 5 km²,为层间滑脱蚀变岩型金矿^[1],与胶东地区焦家金矿(蚀变岩型)、玲珑金矿(石英脉型)和蓬家乔金矿(破碎角砾岩型)相比,杜家崖金矿是一种新类型金矿。矿体主要受杨家乔次级穹隆构造和组成穹隆构造的层间滑脱拆离构造带控制,穹隆构造控制了矿带的分布,而层间滑脱带控制了矿体的形态、规模。这些导矿、储矿的层间滑脱带又表现为多次活动的特点,主要产于不同时代岩层组段界面或附近,如粉子山群祝家乔组与张格庄组之间。

含矿的层间滑脱带一般随地层产状变化而变化,偶见斜切地层现象,构造结构面特征为岩石破碎,劈理发育,具明显绢英岩化、硅化、黄铁矿化(褐铁矿化)。矿区有 5 条金矿带,其中杜家崖矿段 3 条,分别为 I 号、I x1 号、II 号(图 2)。I 号金矿位于粉子山群祝家乔组与张格庄组的接触带上;II 号金矿带位于矿床东部粉子山群祝家乔组与张格庄接触带上,并被后期逆冲推覆构造破坏和改造;I x1 号金矿带在 I 号金矿带北端东 250 m,产于粉子山群祝家乔组二段长石石英岩中。杜家崖金矿成矿阶段可分为热液成矿期和表生期。热液成矿期,成矿介质由碱性向酸性,氧化向还原,金由迁移向沉淀转化,可分为黄铁绢英岩阶段(成矿期开始)、黄铁石英阶段-石英黄铁矿阶段(中等品位金矿石形成阶段)、多金属硫化物阶段(高品位金矿石形成阶段)及碳酸盐阶段(黄铁矿颗粒大数量少)。表生期,生成褐铁矿和方解石脉,方解石脉多沿层间构造或裂隙分布,它是杜家崖矿区氧化矿石的主要阶段。该金矿的矿石类型可分为变粒岩型金矿石和大理岩性金矿石。



1-新生代第四系粘质砂土,砂质粘土及砂砾石;2-新元古代蓬莱群豹山口组一段,千枚状板岩,石英岩;3~5-古元古代粉子山群张格庄组 1~3 段,白云石大理岩、透闪大理岩、透闪岩;6-祝家乔组二段,变粒岩、长石石英岩、透闪岩、斜长角闪岩;7-石英闪长玢岩脉;8-煌斑岩脉;9-斜长角闪岩;10-变粒岩;11-大理岩;12-金矿体。基准线 AB 北东 40°,基准线 CD 北东 75°
1-Cenozoic Quaternary clayey sand, sandy clay and gravel; 2-Neoproterozoic Penglai Group Baoshankou Formation First member, phyllitic slate, quartzite; 3~5- Paleoproterozoic Fenzishan Group Zhanggezhuang Formation 1~3 member, dolomite-marble, tremolite-marble, tremolite; 6-Zhujiakuang Formation second member, granulite, feldspar-quartzite, tremolite, amphibolite; 7-Quartz diorite porphyry dikes; 8- lamprophyre dikes; 9- amphibolite; 10- Granulite; 11-marble; 12-gold deposit. Datum line AB NE 40°, datum line CD NE 75°.

图 2 杜家崖金矿区平面地质略图(底图据文献[19])

Fig. 2 Geological map of the Dujiaya gold deposit(modified from ref. [19])

2 黄铁矿产出特征

该矿床黄铁矿从早到晚形成过程可大致分为黄铁绢英岩阶段(图 3A)、黄铁石英阶段(图 3B)、石英黄铁矿阶段(图 3C)、多金属硫化物阶段(图 3D)和碳酸岩阶段(图 3E)五个阶段。

I 黄铁绢英岩阶段:该阶段黄铁矿自形程度较好,以立方体为主,粒度一般在 0.01 mm 以上,以细粒星点状分布为主,偶见中粗粒团块状集合体,共生矿物以石英、绢云母为主,含少量钾长石和碳酸岩矿物,含量约 10%。该阶段是矿液中金元素以微细粒单质金的形式与黄铁矿、石英、绢云母一起聚集沉淀的初始阶段,含金性较低,但在矿体中分布最广泛。

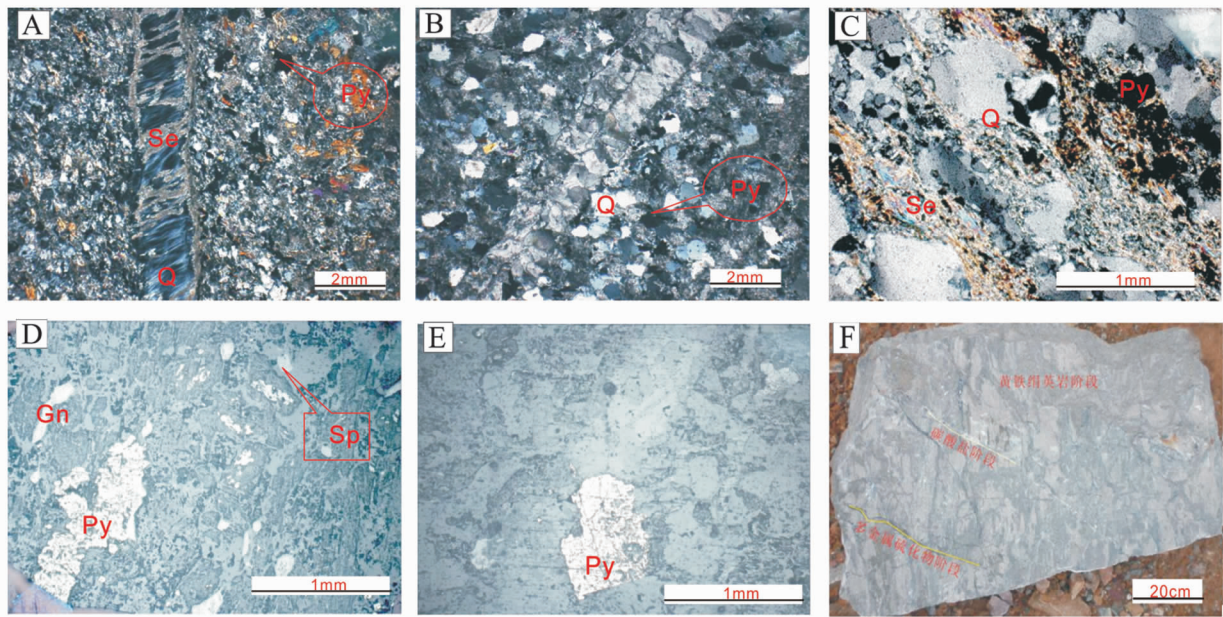
II 1 黄铁矿-石英阶段:黄铁矿粒度极细,一般在 0.01~0.007 mm,少量在 0.007 mm 以下,呈细脉浸染状或条纹状分布,呈八面体或五角十二面体晶形,共生矿物以石英为主,含量约 15%。该阶段黄铁矿含金性有所提高,在矿体中较为发育。

II 2 石英-黄铁矿阶段:粒度一般小于 0.01

mm,部分小于 0.007 mm,呈细脉浸染状或条纹状分布。主要呈五角十二面体或八面体晶形,碎裂现象比较严重,共生矿物以石英为主,但含量相对较少,含量约 40%~70%。该阶段是金沉淀的主要阶段,含金性较好,在矿体中较为发育。

III 石英-多金属硫化物阶段:黄铁矿颗粒大小不一,呈细粒脉状穿切早期生成的黄铁矿细脉,粒径一般小于 0.01 mm,破碎程度强烈,常见五角十二面体、立方体的黄铁矿呈小团块状集合体分布,共生矿物为石英、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等,含量约 10%。该阶段含金性最好,但最不发育。

IV 石英-碳酸盐阶段:为成矿晚期产物,黄铁矿结晶颗粒相对粗大,一般在 0.01 mm 以上,最大者可到 3 mm。形态多为圆状或立方体,主要以网脉状产出,穿插在早期的矿石中。共生矿物有石英、方解石、白云石,此矿床中该阶段黄铁矿数量较少,含量约 3%。该阶段黄铁矿含量最少,含金性也最差,在矿体中分布较发育。



Q-石英,Se-绢云母,Py-黄铁矿,Sp-闪锌矿,Gn-方铅矿
Q-quartz,Se-sericite,Py-pyrite,Sp-sphalerite,Gn-galena

图 3 不同成矿阶段种的黄铁矿

Fig. 3 Pyrites in different mineralization stages

3 黄铁矿热电系数与热电阻率

3.1 测试方法

本次实验黄铁矿热电系数(α)与热电阻率(ρ)测试均在中国地质大学(北京)成因矿物学实验室完成

的,测试仪器分别为 BHTE-06 型热电系数测试仪与 HMR-08 型半导体矿粒调温电阻测试分析仪。测试前对样品处理步骤为:①粉碎标本,过筛(粒径 40~60 目),挑取纯的黄铁矿单矿物;②用酒精清洗黄铁矿表面杂质;③运用测试仪器对黄铁矿进行热电系数和热电阻率测试。BHTE-06 型热电系数测

试仪分辨率为 $0.1\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, 工作环境温度为 $0\sim 30^{\circ}\text{C}$, 相对湿度(RH) $<85\%$ 。HMR-08 型半导体矿粒调温电阻测试分析仪测试精度为 3% , 工作环境温度为 $0\sim 35^{\circ}\text{C}$, RH $<85\%$ 。实验最好在 $15\sim 25^{\circ}\text{C}$ 进行, 热电系数测试选定活化温度为 Δt 为 $67\pm 3^{\circ}\text{C}$, 热电阻率测试条件为 $\Delta t=40\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。

3.2 热电系数研究

3.2.1 热电系数结果 本次试验选取 37 件样品, 采自 I 号矿体 32~54 勘探线上的 ZK32-1、ZK36-2、ZK36-3 等 8 个钻孔的岩芯。挑取 1692 粒纯净黄铁矿单晶进行了热电系数测试, 测试结果见表 1。

由表 1 可看出, 黄铁矿 α 的变化范围: P 型在 $14.8\sim 277.943\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, 主要集中在 $50\sim 205\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$; N 型在 $-303.2\sim -11.575\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 之间, 主要集中在 $-130\sim -60\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, P 型黄铁矿出现率(P%)为 60% 。

3.2.2 不同阶段黄铁矿的热电系数 由于形成条件不同, 四个成矿阶段的黄铁矿 α 特征也不相同。本矿床四个成矿阶段黄铁矿的 α 分布结果(表 1)及其直方图可看出(图 4), 第 I 阶段: N 型黄铁矿占 7% , P 型黄铁矿占 93% , 黄铁矿 α 主要集中在 $50\sim 100\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 之间; 第 II 阶段: N 型黄铁矿占 31% , P

表 1 杜家崖黄铁矿热电系数参数
Table 1 Thermoelectric coefficients of pyrites in the Dujiaya gold deposit

勘探线	标高/m	成矿阶段	样品号 (粒数)	P 型黄铁矿 α 平均值 $/\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	P 型黄铁矿 出现频率 (%)	N 型黄铁矿 α 平均值 $/\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	α 平均值 $/\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	成矿温度 $t/^{\circ}\text{C}$
45	154.5	III	ZK45-1-1(50)	197.973	98	-126.1	191.49	282.2
38	128.5	I	ZK38-1-3(50)	142.323	96	-17.4	135.93	312.7
32	119	III	ZK32-2-1(50)	35.6	8	-80.206	-70.94	115.9
54	95	III	ZK54-2-1(50)	36.02	10	-80.629	-68.96	114.7
36	68.67	I	ZK36-2-1(50)	131.531	90	-64.78	111.90	326.0
36	66.5	III	ZK36-4-2(50)	52.962	42	-53.586	-8.84	78.6
36	61	III	ZK36-3-10(50)	98.502	98	-33.7	95.86	334.8
36	50	III	ZK36-3-3(50)	86.7	98	-33.7	84.29	341.2
32	50	II	ZK32-2-3(30)	0	0	-81.54	-81.54	122.3
45	45	III	ZK45-1-3(30)	277.943	100	0	277.94	234.6
32	40	III	ZK32-2-4(50)	96.679	48	-65.712	12.24	380.8
36	32	III	ZK36-3-2(50)	140.79	100	0	140.79	310.1
36	31.5	III	ZK36-4-5(50)	0	0	-113.198	-113.20	141.3
54	26	III	ZK54-2-3(50)	0	0	-110.382	-110.38	139.6
36	23	III	ZK36-3-9(50)	205.42	100	0	205.42	274.5
36	14.9	II	ZK36-4-6(50)	195.696	92	-11.575	179.11	289.0
36	5.5	III	ZK36-4-7(50)	165.252	100	0	165.25	296.6
54	-4	III	ZK54-2-4(50)	26.9	14	-96.928	-79.59	121.1
38	-5.5	IV	ZK38-1-21(50)	113.377	94	-174.267	96.12	334.6
36	-13.5	IV	ZK36-4-9(50)	182.7	4	-95.767	-84.63	124.1
38	-15.4	III	ZK38-2-28(31)	76.064	71	-47.022	40.37	365.3
38	-16.5	III	ZK38-1-22(50)	113.219	98	-29.9	110.36	326.8
38	-31.5	III	ZK38-1-25(50)	148.949	98	-303.2	139.91	310.6
38	-44	II	ZK38-1-27(31)	165.807	100	0	165.81	296.3
45	-55	III	ZK45-1-6(50)	14.8	2	-84.39	-82.41	122.8
54	-57	III	ZK54-2-8(50)	85.205	42	-107.772	-26.72	89.4
38	-60.4	III	ZK38-2-35(30)	89.22	16.7	-89.128	-59.34	108.9
54	-65	III	ZK54-2-10(50)	126.487	92	-35.2	113.55	325.1
36	-81.5	III	ZK36-4-11(30)	91.492	83	-46.18	68.09	350.1
38	-86.4	IV	ZK38-2-40(30)	190.012	56.7	-94.931	66.63	350.9
32	-130	III	ZK32-2-6(50)	291.3	2	-125.004	-116.68	143.3
36	-137.33	III	ZK36-2-6(50)	172.429	98	-91.6	167.15	295.6
38	-159.4	IV	ZK38-2-48(50)	54.931	70	-44.12	25.22	373.6
36	-160.33	III	ZK36-2-4(50)	160.463	96	-168.05	147.32	306.5
36	-170.33	III	ZK36-2-3(50)	113.674	100	0	113.67	325.0
38	-172.9	IV	ZK38-2-49(50)	0	0	-131.488	-131.49	152.2
36	-221	IV	ZK36-3-13(30)	253.5	3.3	-134.031	-121.24	146.1

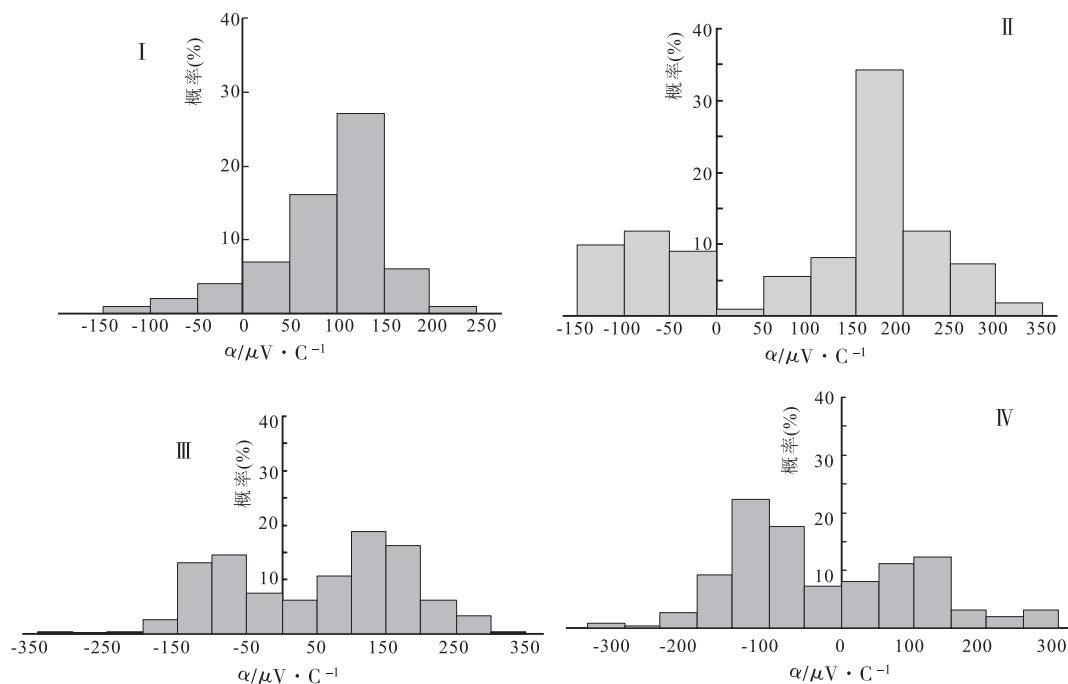


图4 各个成矿阶段黄铁矿热电系数分布图

Fig. 4 Distribution histogram of thermoelectric coefficients of pyrites from different stages

型黄铁矿占 69%，黄铁矿 α 主要集中在 $-150 \sim 0 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 和 $100 \sim 300 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 之间；第Ⅲ阶段：N 型黄铁矿占 38%，P 型黄铁矿占 62%，黄铁矿 α 主要集中在 $-150 \sim 0 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 和 $50 \sim 250 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ；第Ⅳ阶段：N 型黄铁矿占 60%，P 型黄铁矿占 40%，黄铁矿 α 主要集中在 $-200 \sim 150 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 之间。第Ⅰ阶段主要为 P 型黄铁矿，第Ⅱ、Ⅲ阶段为 P、N 混合型黄铁矿，第Ⅳ阶段主要为 N 型黄铁矿。

根据前人的研究可知金矿中黄铁矿 α 在“时空”分布上有一定的规律：矿体上部及边部、晚期、低温黄铁矿 α 为正值，导电类型为 P 型；矿体中部、中期、中温黄铁矿为混合型；矿体下部、早期、较高温黄铁矿 α 为负值，导电类型为 N 型^[20,21]。这是由于黄铁矿中类质同象杂质的种类和浓度以及晶体结构缺陷的类型与密度所致，而黄铁矿类质同象中杂质元素的种类、浓度与形成时的温压条件密切相关^[22]。本区矿床却与一般规律不一致，成矿初期高温黄铁矿以 P 型为主，而成矿晚期低温黄铁矿却以 N 型为主。因为影响黄铁矿 α 标型参数的杂质种类有 Co、Ni、As、Sb、Cu 等，高温下结晶的黄铁矿，高价离子杂质易进入其晶格，如 Co、Ni，使黄铁矿中铁过饱和（硫空位或亏硫）而呈电子型（N 型）黄铁矿；低温下低价离子杂质易进入晶格，如 As、Sb，使黄铁矿中硫过饱和（铁空位或亏铁）而呈空穴型（P 型）黄铁矿^[23,24]；中温条件下为混合型。但也有特殊情况，如高温下形成的黄铁矿也可能是 P 型^[25]，这是由于

As 离子随温度升高类质同象进入黄铁矿增多，如果当时 As 离子浓度大于 Co、Ni，则可能形成 P 型黄铁矿；Cu、Pb、Zn 一般不以类质同象的方式代替 Fe^{2+} ，而有可能是呈硫化物或硫盐等包裹体存在，从而消耗一定数量的 S、As 等的阴离子，造成黄铁矿晶格中硫的空位或 As、Sb 等杂质类质同象替代硫数量的减少，有利于形成电子型（N 型）黄铁矿。该矿床第Ⅰ阶段为 P 型黄铁矿，可能就是由于 As 过多所致，而第Ⅳ阶段为 N 型可能是 Cu、Pb、Zn 所致。

3.2.3 成矿温度计算 黄铁矿的 α 与其形成温度有关，戈尔巴乔夫^[22]利用大量数据做出黄铁矿热电系数-温度图。从该图获得线性方程：

$$\begin{aligned} t &= (704.51 - \alpha) / 1.818 && \text{N 型} \\ t &= 3(122.22 + \alpha) / 5.0 && \text{P 型} \end{aligned}$$

利用上面的方程计算出杜家崖金矿黄铁矿形成温度范围为 $78.6 \sim 380.8^\circ\text{C}$ （表 1），主要集中在 $141.3 \sim 350.9^\circ\text{C}$ ，表明矿床为低-中-高温矿床。

3.2.4 热电系数填图 以垂直勘探线方向为横坐标，标高为纵坐标，NE40°矿体走向基准线剖面为投影剖面，利用 Surfer 软件绘制出Ⅰ号矿体金品位与 P 型黄铁矿热电系数均值垂直纵投影图（图 5）及金品位与 P 型黄铁矿出现率垂直纵投影图（图 6）。

从图 5 可以看出杜家崖 P 型黄铁矿 α 的高值区主要集中在 32 勘探线海拔 -100 m 以下和 45 勘探线海拔 50 m 附近。32 和 36 勘探线从上到下 α_p 值变化趋势为小→大→小→大，45 勘探线附近从上到

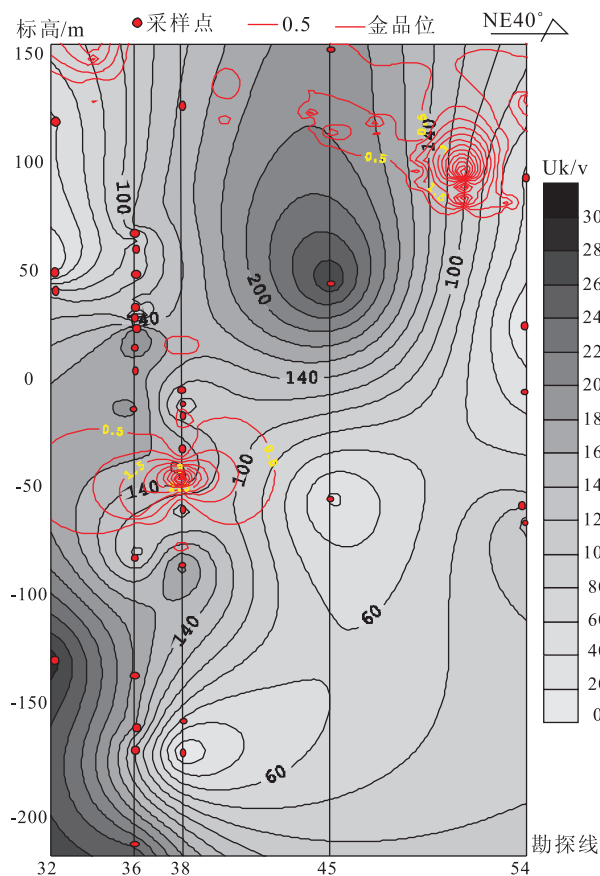


图5 I号矿体金品位与 α_p 均值等值线垂直纵投影图

Fig. 5 Vertical longitudinal isopleths of gold grade and α_p from the I ore body

下 α_p 值由大变小。但从整体上来看,P型黄铁矿热电系数从上到下表现为由高到低的变化趋势。金品位的高值区集中在 α_p 值为80~160 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$,因此推测36~38勘探线,45~54勘探线附近海拔-100 m以下为富矿段。

从图6可以看出P型黄铁矿主要出现在矿体上部,下部出现概率较小。P型黄铁矿在-50~150 m之间的36线、38线、45线上的出现概率极大,几乎都在0.8以上,在36线的-150 m附近出现的概率也在0.8以上。金品位的高值区主要出现在P型黄铁矿出现概率为0.4~0.9的区域,因此36~38勘探线海拔-100 m以下,54勘探线海拔-60~-160 m附近可能为富矿段。

3.3 热电阻率研究

3.3.1 热电阻率结果 本次热电阻率(ρ)研究的38件样品采自ZK32-2、ZK36-2、ZK36-3等8个钻孔的岩心。每件50粒,共计1900粒黄铁矿进行了热电阻(R)测试,所测数据见表2。

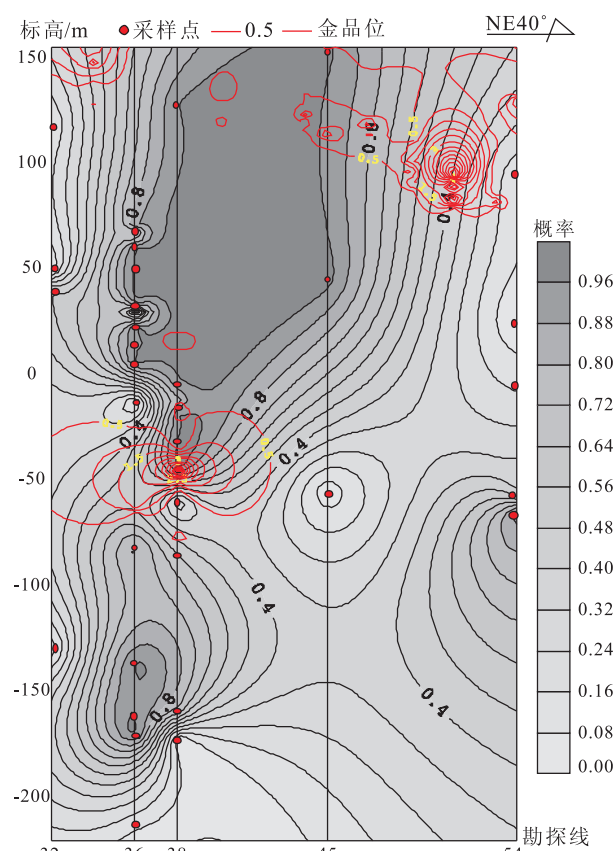


图6 I号矿体金品位与P型黄铁矿出现率等值线垂直纵投影图

Fig. 6 Vertical longitudinal isopleths of gold grade and P-type pyrite occurrence rate from the I ore body

本次试验测得黄铁矿 R 为8.43~1282.74 Ω ,差值为1274.31 Ω , ρ 为0.002~0.059 Ω/mm ,差值为0.057 Ω/mm 。

3.3.2 热电阻率填图 以垂直勘探线方向为横坐标,标高为纵坐标,NE40°矿体走向基准线剖面为投影剖面,利用Surfer软件绘制出I号矿体金品位与黄铁矿热电阻均值垂直纵投影图(图7)及金品位与黄铁矿热电阻率垂直纵投影图(图8)。

因为电阻与电阻率成正比,所以图7与图8垂直投影图面积与金品位的关系基本一致。从图7与图8看出:黄铁矿热电阻高值与热电阻率高值主要集中在-40~-110 m之间的36线和38线,而在32线与45线之间的-81~-31 m标高处的 R 值小于150 Ω , ρ 值小于0.03 Ω/mm 。黄铁矿的 R 与 ρ 从上到下的变化趋势基本是高→低→高→低,黄铁矿 R 与 ρ 较低处对应金品位值反而高。因此,可推断在38~54勘探线附近海拔-100~-200 m为富矿段。

表 2 杜家崖黄铁矿电阻率参数

Table 2 Thermal resistance rates of pyrites in the Dujiaya gold deposit

样品号	成矿阶段	标高/m	R/Ω	ρ / $\Omega \cdot \text{mm}^{-1}$	样品号	成矿阶段	标高/m	R/Ω	ρ / $\Omega \cdot \text{mm}^{-1}$
K32-2-1	Ⅲ	119	133.25	0.021	K38-1-3	Ⅰ	128.5	37.51	0.006
K32-2-3	Ⅱ	50	27.65	0.005	K38-1-21	Ⅳ	-5.5	34.55	0.005
K32-2-4	Ⅲ	40	99.8	0.015	K38-1-22	Ⅲ	-16.5	105.27	0.017
K32-2-6	Ⅲ	-130	75.25	0.012	K38-1-25	Ⅲ	-31.5	61.87	0.01
K36-2-1	Ⅰ	68.67	165.15	0.026	K38-1-27	Ⅱ	-44	32.32	0.005
K36-2-6	Ⅲ	-137.33	88.54	0.014	K38-2-28	Ⅲ	-15.4	362.81	0.057
K36-2-4	Ⅲ	-160.33	138.15	0.022	K38-2-35	Ⅲ	-60.4	136.23	0.021
K36-2-3	Ⅲ	-170.33	27.97	0.004	K38-2-40	Ⅳ	-86.4	217.63	0.034
K36-3-10	Ⅲ	61	8.43	0.002	K38-2-48	Ⅳ	-159.4	115.86	0.018
K36-3-3	Ⅲ	50	175.76	0.028	K38-2-49	Ⅳ	-172.9	111.47	0.018
K36-3-2	Ⅲ	32	122.23	0.019	K45-1-1	Ⅲ	154.5	214.89	0.034
K36-3-9	Ⅲ	23	51.1	0.008	K45-1-3	Ⅲ	45	43.55	0.007
K36-3-13	Ⅳ	-221	38.12	0.006	K45-1-5	Ⅲ	-25	297.19	0.043
K36-4-2	Ⅲ	66.5	112.55	0.019	K45-1-6	Ⅲ	-55	423.87	0.067
K36-4-5	Ⅲ	31.5	128.17	0.02	K54-2-1	Ⅲ	95	133.31	0.021
K36-4-6	Ⅱ	14.9	339.82	0.053	K54-2-4	Ⅲ	-4	29.39	0.005
K36-4-7	Ⅲ	5.5	206.89	0.042	K54-2-5	Ⅲ	-34	375.24	0.059
K36-4-9	Ⅳ	-13.5	35.44	0.006	K54-2-8	Ⅲ	-57	178.29	0.028
K36-4-11	Ⅲ	-81.5	1282.74	0.201	K54-2-10	Ⅲ	-65	131.5	0.021

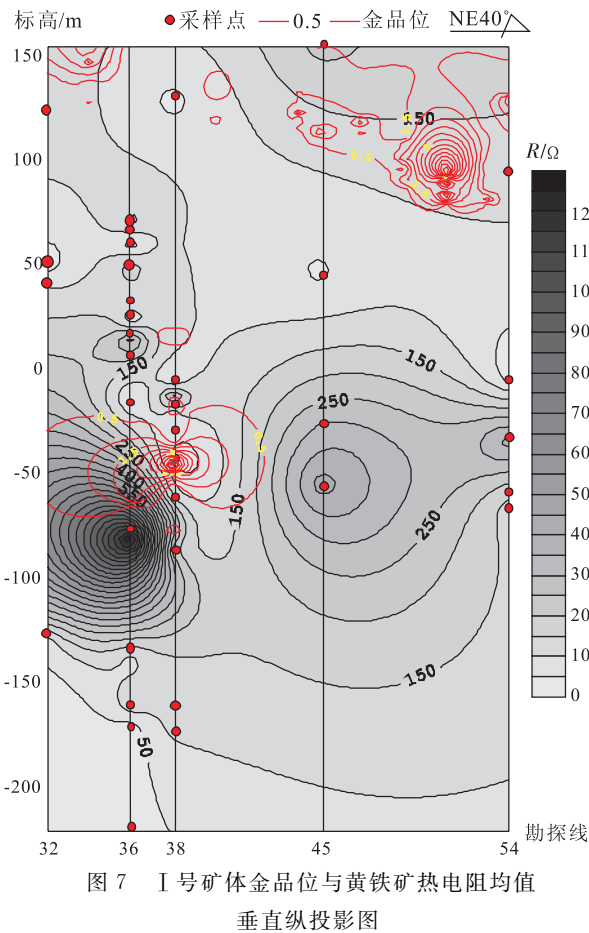


图 7 I 号矿体金品位与黄铁矿热电阻均值垂直纵投影图

Fig. 7 Vertical longitudinal isopleths of gold grade and thermal resistance of pyrites from the I ore body

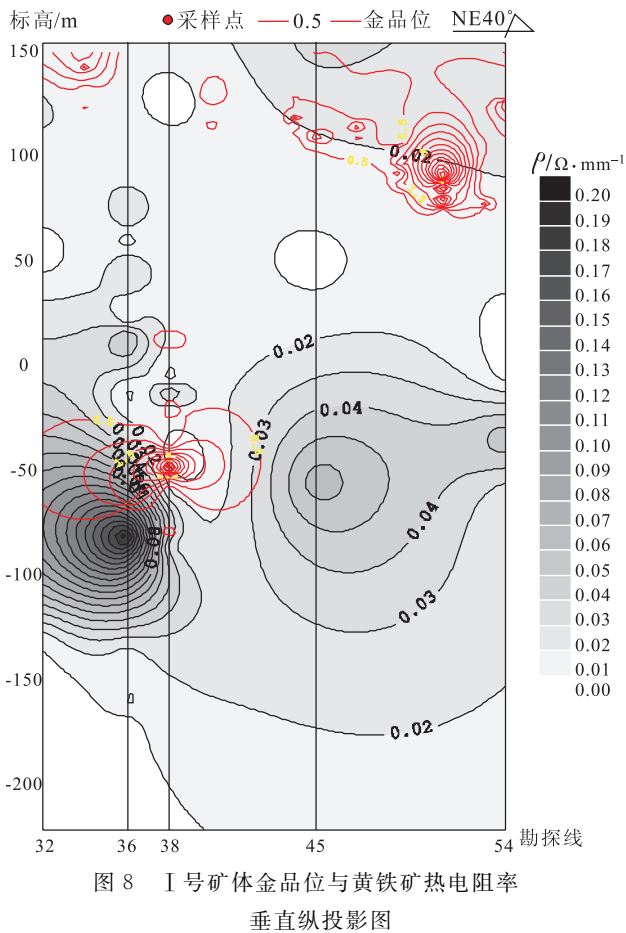


图 8 I 号矿体金品位与黄铁矿热电阻率垂直纵投影图

Fig. 8 Vertical longitudinal isopleths of gold grade and thermal resistance rate of pyrites from the I ore body

矿物 ρ 的差别取决于组成矿物元素的化学键类型和数量,即导体矿物以金属键为主,构成矿物晶体的原子或离子的电子构型比较松散,原子核对核外电子约束力较小,电子很容易受到外部电场的激发而定向移动,使之成为导体;绝缘体矿物以离子键和共价键为主,原子核对核外电子有较大的约束力,电子受到电场作用时不能表现为定向流动,因而成为绝缘体。半导体矿物的化学键则为上述两种键型的过渡键或混合键,原子核外有一定量的自由电子,受到电场作用时表现为弱的定向电子流动成为半导体^[26, 27]。金是导体,原子核对核外电子约束力较小,电阻率较小,黄铁矿为半导体,核外有一定的自由电子,电阻率较大,这可能是黄铁矿电阻率低金品位高的缘故。

4 结 论

(1)根据热电系数得到的黄铁矿形成温度范围为78.6~380.8℃,主要集中在141.3℃~350.9℃,说明矿床为低-中-高温矿床。

(2)由图5与图6可看出在杜家崖黄铁矿 α_P 及P%、 α_N 和N%均随深度呈韵律式变化,矿体顶部 α_P 值较高,P/(P+N)较大,而在矿体下部则反之。由 α_P 和 α_N 空间分布知,温度较低时,P/(P+N)较大;反之,矿体下部的黄铁矿 α_N 较高,N/(P+N)较大。

(3)黄铁矿的R与 ρ 高值区集中在-40~-110 m之间的36线和38线,R与 ρ 从上到下的变化趋势基本是高→低→高→低,黄铁矿R与 ρ 较低处对应金品位高值。

(4)黄铁矿 ρ 与 α 成反比,这可能是 α 高值区含金较多,金的 ρ 低于黄铁矿的所致。

(5)根据金品位高值区出现在 α_P 为80~160 $\mu V/^\circ C$, α_P 出现概率在0.3以上的及热电阻值低于200 Ω 的区域,我们可以推断出:36~38勘探线海拔-100 m以下,54勘探线-100 m以下附近的区域可能为富矿段,成矿远景较好。

参考文献 (References):

- [1] 李士先,刘长春,安郁宏.胶东金矿地质[M].北京:地质出版社,2007:174-175.
Li Shixian, Liu Changchun, An Yuhong. Geology of gold deposits in jiaodong[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007:174-175. (in Chinese)
- [2] 高振敏,杨竹森,李红阳,罗泰义,姚林波,饶文波.黄铁矿载金的原因和特征[J].高校地质学报,2000,6(2):156-160.
Gao Zhenmin, Yang Zhusen, Li Hongyang, Luo Taiyi, Yao Linbo, Rao Wenbo. Genesis and characteristics of gold hosted by pyrite[J]. Geological Journal of China Universities, 2000, 6(2): 156-160. (in Chinese with English abstract)
- [3] 陈光远,邵伟,孙岱生.胶东金矿成因矿物学与找矿[M].重庆:重庆出版社,1989,324-336.
Chen Guangyuan, Shao Wei, Sun Daisheng. Genetic mineralogy of gold deposits in Jiaodong region and gold prospecting [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1989: 324-336. (in Chinese)
- [4] 李胜荣,陈光远,邵伟.胶东乳山金矿田成因矿物学[M].北京:地质出版社,1993:78-97.
Li Shengrong, Chen Guangyuan, Shao Wei. Genetic mineralogy of Rushan gold deposit in Jiaodong region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 78-97. (in Chinese)
- [5] 杨赞中,石学法,于洪军,田贵山,唐竹兴.矿物热电性标型及其在大洋地质找矿中的应用[J].矿物岩石,2007,27(1):11-17.
Yang Zanzhong, Shi Xuefa, Yu Hongjun, Tian Guishan, Tang Zhuxing. Ypomorphic characteristic of mineral thermoelectricity and its application to oceanic prosspecting[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2007, 27(1): 11-17. (in Chinese with English abstract)
- [6] 赵亨达.黄铁矿热电性研究及其在金矿找矿中的应用[J].矿物学报,1990,10(3):278-284.
Zhao Hengda. A study on the thermoelectricity of pyrite and its application in gold prospecting [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1990, 10(3): 278-284. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李红兵,曾凡治.金矿中的黄铁矿标型特征[J].地质找矿论丛,2005,20(3):199-203.
Li Hongbing, Zeng Fanzhi. The pyrite's typomorphic characteristics in gold deposit[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2005, 20(3): 199-203. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈曦,赵旭,李薇.黄铁矿标型特征在矿床中的应用[J].科技创新导报,2009,(4):54.
Chen Xi, Zhao Yan, Zhao Xu, Li Wei. The application of pyrite typomorphic peculiarities in ore deposits[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2009, (4): 54. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈升平,肖克炎,吴有才.陕西东沟坝金银矿床黄铁矿标型性研究[J].地球科学,1994,19(1):43-51.
Chen Shengping, Xiao Keyan, Wu Youcai. Study on pyrite typomorphic peculiarities of donggouba gold-silver deposit, Shaanxi[J]. Earth Science, 1994, 19(1): 43-51. (in Chinese with English abstract)
- [10] 邓磊,王建国,李胜荣,曹焱,要梅娟,王明燕.河北大西沟金矿床中石英热释光和黄铁矿热电性标型特征研究[J].地质找矿论丛,2008,23(3):213-317.
Deng Lei, Wang Jianguo, Li Shengrong, Cao Ye, Yao Meijuan, Wang Mingyan. Research on the characteristics of heat release light of quartz and typomorph of pyrite from Daxigou gold deposit [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2008, 23(3): 213-317. (in Chinese with English abstract)

- [11] 要美娟, 申俊峰, 李胜荣, 曹烨, 刘秀艳. 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, 2008, 27(5): 649—656.
Yao Meijuan, Shen Junfeng, Li Shengrong, Cao Ye, Liu Xiuyan. Thermoelectric and thermal decrepitation characteristics of pyrite in the Qianhe gold deposit, Songxian County, Henan, China, and their relationships with gold mineralization[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(5): 649—656. (in Chinese with English abstract)
- [12] 胡大千. 黄铁矿电子-空穴心在金矿找矿勘探中的应用[J]. 地质与勘探, 1993, 29(9): 33—37.
Hu Daqian. Thermal conductivity characteristics of pyrite hsing for gold exploration[J]. Geology and Prospecting, 1993, 29(9): 33—37. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李成禄, 李胜荣, 罗军燕, 宋继叶, 张聚全. 山西繁峙义兴寨金矿黄铁矿热电系数与矿型特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2009, 23(6): 1056—1063.
Li Chenglu, Li Shengrong, Luo Junyan, Song Jiye, Zhang Juquan. Thermoelectric coefficient, conductive type and significance of the pyrite from Yixingzhai gold deposit in Fanshi County, Shanxi Province, China[J]. Geoscience, 2009, 23(6): 1056—1063. (in Chinese with English abstract)
- [14] 胡传胜, 罗建宏, 王鹏, 车林睿, 张春执, 殷娜. 玲珑金矿黄铁矿电阻率特征及含金性研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2011, 30(2): 156—159.
Hu Chuansheng, Luo Jianhong, Wang Peng, Che Linrui, Zhang Chunzhi, Yin Na. Characteristics research on resistivity of gold-bearing pyrite in the Linglong Gold Deposit[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2011, 30(2): 156—159. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陈海燕, 李胜荣, 张秀宝, 周起凤, 张运强, 刘振豪, 张海芳, 王宁. 胶东金青顶金矿床黄铁矿热电性标型特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 2010, 29(6): 1125—1137.
Chen Haiyan, Li Shengrong, Zhang Xiubao, Zhou Qifeng, Zhang Yunqiang, Liu Zhenhao, Zhang Haifang, Wang Ning. Thermoelectric character of pyrite from Jinqingding gold deposit in eastern Shandong Province and its significance[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(6): 1125—1137. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张运强, 李胜荣, 陈海燕, 薛建玲, 孙文燕, 张旭. 胶东照岛山金矿黄铁矿成分与热电性标型特征研究[J]. 矿物岩石, 2010, 30(3): 23—33.
Zhang Yunqiang, Li Shengrong, Chen Haiyan, Xu Jianling, Sun Wenyan, Zhang Xu. Research on the typomorphisms of compositions and thermoelectric characteristics of pyrite from Zhaodaoshan gold deposit in the eastern Shandong province [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2010, 30(3): 23—33. (in Chinese with English abstract)
- [17] 杨敏之. 金矿床围岩蚀变带地球化学: 以胶东金矿床为例[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 15—23.
Yang Minzhi. The geochemistry of wallrock alteration zone of gold deposits-as exemplified by Jaodong gold deposits[M]. Geological Publishing House, 1998: 15—23. (in Chinese)
- [18] 叙述平, 文中田. 胶东莱阳和臧家庄盆地金矿成矿及找矿预测[J]. 黄金地质, 2003, 9(1): 20—25.
Xu Shuping, Wen Zhongtian. Mineralization and ore prospecting of gold deposit in Laiyang and Zangjiazhuang basin of Jiaodong[J]. Gold Geology, 2003, 9(1): 20—25. (in Chinese with English abstract)
- [19] 吕文杰. 胶东烟台市福山区杜家崖金矿床成因矿物学与找矿[D]. 北京: 中国地质大学, 2010: 6—13.
Lv Wenjie. Genetic mineralogy with emphasis on gold prospecting of Dujiaya Gold deposit in Yantai Fushan area, Jiaodong Region[D]. Beijing: Chian University of Geosciences, 2010: 6—13. (in Chinese with English abstract)
- [20] 徐国风. 金矿找矿矿物学[J]. 地质与勘探, 1987, (2): 30—34.
Xu Guofeng. Prospecting mineralogy of gold ore[J]. Geology and Prospecting, 1987, (2): 30—34. (in Chinese with English abstract)
- [21] 宋焕斌. 黄铁矿标型特征在金矿地质中的应用[J]. 地质与勘探, 1989, 25(7): 31—37.
Song Huanbin. Applications of typomorphic characteristics of pyrite in gold geology[J]. Geology and Prospecting, 1989, 25(7): 31—37. (in Chinese with English abstract)
- [22] 邵伟, 陈光远, 孙岱生. 黄铁矿热电性研究方法及其在胶东金矿的应用[J]. 现代地质, 1990, 4(1): 46—57.
Shao Wei, Chen Guangyuan, Sun Daisheng. Method of investigating thermoelectricity of pyrite and its application to pyrites from gold deposits in Jiaodong region[J]. Geoscience, 1990, 4(1): 46—57. (in Chinese with English abstract)
- [23] Shuey R T. Semiconducting ore minerals[J]. Developments in Economic Geology, New York, 1975: 110—115.
- [24] 张志启, 王建国, 邓军, 韦延光, 闫顺令, 马启光, 刘娜. 黄铁矿热电性研究在谢家沟金矿评价中的应用[J]. 山东国土资源, 2005, 21(11): 26—29.
Zhang Zhiqi, Wang Jianguo, Deng Jun, Wei Yanguang, Yan Shunling, Ma Qiguang, Liu Na. Applications of pyrite thermoelectricity on Xiejiaogou Gold Deposit Assessment[J]. Land and Resources in Shandong Province, 2005, 21(11): 26—29. (in Chinese with English abstract)
- [25] 蔡元吉, 马承安, 蒋永才. 金矿床黄铁矿热电性质形成机理实验研究及其找矿应用[J]. 资源调查与环境, 1999, 20(3): 218—224.
Cai Yuanji, Ma Cheng'an, Jiang Yongcai. The experimental study on thermal electricity forming mechanism of pyrite in au deposit and its exploring practice[J]. Resources Survey & Environment. 1999, 20(3): 218—224. (in Chinese with English abstract)
- [26] 黄昆, 谢希德. 半导体物理学[M]. 科学出版社, 1958: 1—22.
Huang Kun, Xie Xide. Semiconductor physics studies[M]. Scientific Publishing House, 1958: 1—22. (in Chinese)
- [27] 徐婉棠, 吴芙凯. 固体物理学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1990: 253—268.
Xie Wantang, Wu Fukai. Solid-state physics[M]. Beijing: Beijing Normal University Publishing House, 1990: 253—268. (in Chinese)