山西繁峙义兴寨金矿黄铁矿热电系数与导型特征及其地质意义

李成禄[1,2]，李胜荣[2,3]，罗军燕[2]，宋继叶[3]，张聚全[3]

（1. 黑龙江省地质调查研究总院，黑龙江 哈尔滨 150036；2. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室，北京 100083；
3. 中国地质大学 岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室，北京 100083）

摘要：山西省繁峙县义兴寨金矿为一大型石英脉型矿床。为了获得含金石英脉空间分带性和相对埋深的信息，利用 BHTE－6 型热电仪，对 35 件矿石样品 4 158 粒黄铁矿进行了热电系数分析。结果表明，该矿床黄铁矿的热电导型以 N 型为主，N 型黄铁矿出现率为 75.1%，热电系数均值$\overline{\alpha}_N$ 为 －155.3 μV/℃。时间上从早到晚，从黄铁绢英岩化阶段到石英碳酸盐阶段，黄铁矿热电导型组合从 N% > P% 渐变为 N% < P%；空间上从上到下，从 1 190 m 中段到 830 m 中段，N 型黄铁矿热电系数均值的绝对值$|\overline{\alpha}_N|$和 N% 增大，P 型热电系数均值$\overline{\alpha}_P$ 和 P% 减小，具正向分带的变化规律。通过上述参数获得矿床的形成温度为 143.3～323.3 ℃，为一中低温热液矿床。热电系数在 0～－200 μV/℃之间的黄铁矿是富金矿段的标志。按照经验公式计算结果，现开采中段属矿体的中下部位置，但相对埋深部位稳定。综合分析认为，该矿床 830 m 以下仍有良好的找矿潜力。

关键词：金矿；黄铁矿；热电系数；热电导型；义兴寨；山西

中图分类号：P574；P578.2⁺92　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000－8527(2009)06－1056－08

Thermoelectric Coefficient, Conductive Type and Significance of the Pyrite from Yixingzhai Gold Deposit in Fanshi County, Shanxi Province, China

LI Cheng-lu[1,2], LI Sheng-rong[2,3], LUO Jun-yan[2], SONG Ji-ye[3], ZHANG Ju-quan[3]

(1. *Heilongjiang Institute of Geological Survey, Harbin, Heilongjiang* 150036; 2. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*; 3. *Key Laboratory of Lithospheric Tectonics and Lithoprobing Technology, China University of Geosciences, Ministry of Education, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The gold deposit in Yixingzhai area, Fanshi County of Shanxi Province, is a large scaled quartz vein type deposit. In order to obtain more information about the zoning of the gold veins, totally 4,158 pyrite grains from 35 ore samples were analysed using a BHTE－6 type of thermoelectric instrument. The result reveals that the thermoelectric conductive type of the pyrite is mainly of N type, and the percent of the N type pyrite grains (N%) amounts to 75.1% of the total, with a mean thermoelectric coefficient of the N type pyrite ($\overline{\alpha}_N$) being －155.3 μV/℃. The assembledge of the thermoelectric conductive types of the pyrite changes successively from N% > P% of the early gold-poor pyrite-sericite-silicification stage to N% < P% of the later silicate-carbonatification stage. Spatially, the absolute mean value of $\overline{\alpha}_N$ ($|\overline{\alpha}_N|$) and N% increase downward from the 1,190 m level to the 830 m level with decreasing of the value of $\overline{\alpha}_P$ and P%, indicating a normal vertical zoning sequence. A low-medium temperature of 143.3－323.3 ℃ is derived by calculation of pyrite thermoelectric coefficient. The thermoelectric coefficient of the pyrite in the rich ore segment is confined within the range of 0－－200 μV/℃. A calculation with empirical formula implies that the lower to middle parts of the orebody have been exhumed until now, whereas the buried ore is spatially quite stable. Furthermore, the authors suggest that

收稿日期：2009－07－15；**改回日期**：2009－09－20；**责任编辑**：楼亚儿。

基金项目：教育部高等学校学科创新引智计划项目(B07011)。

作者简介：李成禄，男，硕士，1984 年出生，矿物学、岩石学、矿床学专业，主要从事成因矿物学与找矿矿物学的研究工作。Email：lcl230881@163.com。

good exploring prospect would be expectable below 830 m level.

Key words: gold deposit; pyrite; thermoelectric coefficient; thermoelectric conductive type; Yixingzhai; Shanxi

0　引　言

黄铁矿热电性是在地质找矿及矿床评价中应用十分广泛的标型特征之一，能够较好地反映矿物形成过程中所经历的各种环境变化，从而对矿床地质方面有一定的指示意义，是矿(床)体定位预测中的一种快速、有效、便捷的技术方法。国内外利用热电性标型特征在金矿找矿和预测工作中取得了不错的效果。陈光远等[1]和李胜荣等[2]、胡大千[3]、杨赞中[4]等对黄铁矿热电性进行过专门的研究，并取得了一系列的成果。前人在义兴寨金矿中对黄铁矿的晶体形态与热电性的关系做过较细致的研究[5]，但对热电性所反映的其他信息还有待进一步发掘。笔者在前人研究的基础上，对黄铁矿热电性的时空分布特征及其特征参数在矿床地质应用方面进行了较细致的探讨。

1　矿床地质特征

义兴寨金矿位于山西省繁峙县砂河镇，大地构造位置属华北克拉通中间带北部山西陆台与燕山沉降带交切部位的构造岩浆活动带上。矿区出露一套太古宙五台群、石咀群和庄旺群变质岩，主要为变闪长岩－黑云斜长片麻岩，长英质片麻岩[6](图 1)。区内构造发育，表现了多期、多次褶皱变形和断裂活动，前五台—吕梁期以褶皱构造为主导形式，经多期多次活动，区域上形成 NEE 向复背斜。到了燕山期构造运动主要形成 NNE 向、NW 向及其派生的 NNW 向次级断裂。其中 NW 向龙山断裂、义兴寨断裂成为矿区的主要控岩、控矿构造，NNW 向断裂为矿区的容矿构造[6]。

矿区内出露的岩浆岩以燕山期中酸性岩浆岩为主，主要为酸性次火山岩和孙庄闪长杂岩体。早期孙庄杂岩体位于矿区东南部，产出明显受 NW 向义兴寨断裂控制，出露面积约 4 km^2。有辉石闪长岩、石英二长闪长岩和似斑状花岗岩等[7]，据宋继叶 2007 年研究，石英二长闪长岩中锆石年龄(LA－ICPMS)为 133 Ma；晚期的酸性次火山岩主要分布在矿区中部的河湾、铁塘硐、南门山、金鸡岭 4 个角砾岩筒中及其外侧。由长石石英斑岩、石英斑岩、长石斑岩和霏细岩组成，其中石英斑岩的 K-Ar 年龄为 116.0 Ma①。此外矿区脉岩也极为发育，主要有辉绿玢岩脉、闪长玢岩脉、闪斜煌斑岩脉、石英斑岩脉等。

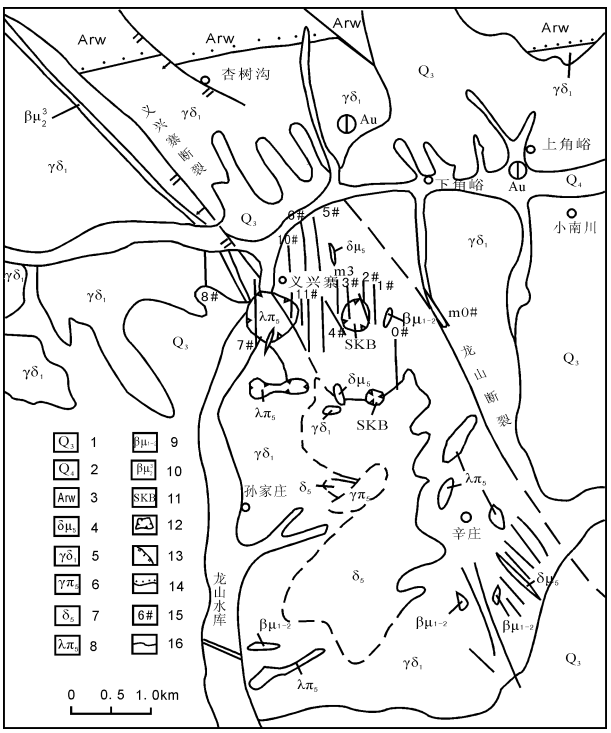


图 1　义兴寨金矿矿区地质图

(据山西省地质矿产局 211 地质队，1985 修编)

Fig. 1　Geological sketch map of the Yixingzhai gold district

1. 第四系黄土、亚砂土；2. 第四系冲洪积；3. 五台超群金岗库组；4. 闪长玢岩脉；5. 斜长片麻岩夹变粒岩；6. 似斑状花岗岩；7. 孙庄闪长杂岩体；8. 超浅成相酸性岩；9. 变基性岩；10. 辉绿岩；11. 矽卡岩化隐爆角砾岩；12. 隐爆角砾岩筒；13. 实测或推测断层；14. 不整合界线；15. 含金石英脉编号；16. 地层界线

2　黄铁矿的产出特征

义兴寨金矿以含金多金属石英脉型矿体为主，也有少量的含金石英脉—蚀变岩型矿体和含金矽卡岩—隐爆角砾岩型矿体，矿区主要由 12 条近南

①景淑慧．山西省繁峙县义兴寨金矿床成矿地质条件及成矿规律的研究．山西省地质矿产局 211 队．1985.

北向的石英单脉及简单复脉组成，以单脉型为主，由多金属含金石英脉和脉侧蚀变岩构成，脉宽0.5～5 m，矿体向深度延伸一般为延长的1～5倍。黄铁矿是该矿床的主要载金矿物。作者对该金矿正在开采的8条矿脉(表1)的矿石矿物组合及穿插关系进行了细致的观察研究，得出该区黄铁矿在形成过程中经历了Ⅰ(成矿早期)→Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ(成矿期)→Ⅴ(成矿晚期)5个阶段，具体特征如下：

Ⅰ,黄铁绢英岩阶段：为早期的脉侧蚀变岩阶段，主要位于围岩与矿脉之间，与矿脉平行产出，厚度在3～8 cm左右，黄铁矿主要呈星散浸染状产出，粒度一般为0.1～0.5 mm，立方体晶形，

表1 义兴寨金矿黄铁矿的热电系数与导型特征参数表

Table 1 The thermoelectric coefficients and conductive type of pyrites from Yixingzhai gold deposit

矿脉	标高/m	成矿阶段	N型热电系数 α/(μV/℃)		出现频率/%	P型热电系数 α/(μV/℃)		出现频率/%	热电性参数	矿体剥蚀百分比/%	矿体平均剥蚀百分比/%	矿体相对埋深/m	矿体平均相对埋深/m
			范围	平均		范围	平均						
1#c4	1 190	Ⅱ	10.4～263.1	154.4	81.5	5.9～265.8	128.3	18.5	-124	81.0		-120.2	
1#c6	1 190	Ⅲ	14.6～242.6	113.0	60.8	21.8～285.9	135.4	39.2	-71	67.5	71.1	-137.0	-132.5
2#c6	1 190	Ⅲ	11.6～239.9	99.8	58.3	16.1～281.4	135.7	41.7	-59	64.8		-140.4	
4#c1	1 070	Ⅰ	10.0～256.0	134.3	90.0	31.0～321.4	118.9	10.0	-92	73.0		-131.8	
1#c20	1 070	Ⅱ	15.5～285.9	154.8	90.0	11.3～211.3	96.9	10.0	-93	73.3		-118.5	
1#c22	1 070	Ⅱ	2.9～273.2	151.7	80.0	13.0～203.7	101.4	20.0	-51	62.3		-125.6	
2#c10	1 070	Ⅱ	4.3～189.4	96.7	48.0	15.7～298.4	148.4	51.9	-23	55.8		-137.4	
3#c3	1 070	Ⅱ	11.4～243.0	150.9	41.0	2.8～278.8	156.9	59.0	-20	55.0		-115.4	
m0#c0	1 070	Ⅱ	21.0～285.1	187.7	84.0	21.5～202.1	118.0	16.0	-62	65.5		-103.5	
1#c1	1 070	Ⅲ	19.5～275.4	166.2	96.0	168.8～188.3	178.5	4.0	-57	64.3		-111.5	
1#c32	1 070	Ⅲ	1.4～411.3	150.9	82.0	15.3～431.5	157.7	18.0	-95	73.8	61.8	-120.3	-123.5
2#c6	1 070	Ⅲ	15.7～263.6	141.8	58.0	4.3～257.4	130.5	42.0	-27	56.8		-126.7	
3#c4	1 070	Ⅲ	20.8～269.3	151.2	66.0	7.9～287.3	115.2	34.0	-82	70.5		-128.9	
m0#c30	1 070	Ⅲ	2.8～275.3	100.1	24.5	4.3～286.1	152.3	75.5	-3	50.8		-124.9	
m3#c15	1 070	Ⅲ	45.6～214.9	117.3	86.0	27.6～246.3	113.5	14.0	-43	60.8		-138.6	
m3#c16	1 070	Ⅲ	14.1～209.3	114.6	85.7	60.3～193.7	123.6	14.3	-44	61.0		-138.5	
3#c6	1 070	Ⅳ	4.4～297.6	155.7	30.0	10.1～294.6	204.5	70.0	5	48.8		-96.6	
2#c34	1 070	Ⅴ	7.2～293.7	108.2	44.0	20.5～255.0	136.8	56.0	-19	54.7		-134.9	
5#N50	950	Ⅰ	2.8～206.0	80.9	38.0	8.3～240.9	113.9	62.0	-17	54.3		-146.3	
6#c9	950	Ⅰ	12.6～242.0	159.6	91.2	25.4～186.5	80.7	8.8	-131	82.8		-115.1	
6#c15	950	Ⅰ	44.6～166.9	125.1	100.0	-	-	0	-100	75.0		-133.8	
6#c4	950	Ⅱ	22.7～281.0	199.6	93.8	17.3～185.2	87.5	6.2	-123	80.8		-92.9	
6#c5-7	950	Ⅱ	8.8～176.3	89.1	20.0	21.8～306.6	169.0	80.0	6	48.5		-119.1	
6#c7N	950	Ⅱ	21.7～258.9	157.7	54.0	11.1～273.0	114.0	46.0	-31	57.8	62.2	-125.5	-120.0
5#N80	950	Ⅲ	21.5～292.2	147.8	74.0	41.9～242.7	164.7	26.0	-74	68.5		-118.0	
6#c13	950	Ⅲ	48.6～281.9	196.3	90.0	9.9～159.2	59.34	10.0	-69	67.3		-97.9	
6#c3	950	Ⅳ	35.9～240.6	139.5	42.5	30.9～264.8	180.2	57.5	-10	52.5		-109.3	
5#N60	950	Ⅳ	10.2～143.5	66.7	33.3	11.4～268.6	132.2	66.7	-13	53.3		-141.7	
5#c10	830	Ⅰ	4.2～226.2	104.2	75.0	7.1～257.2	114.8	25.0	-60	65.0		-143.7	
5#c12	830	Ⅱ	67.8～270.1	179.1	100.0	-	-	0	-130	82.5		-100.6	
6#c1	830	Ⅱ	22.9～273.0	197.1	96.1	117.5～258.7	177.9	3.9	-115	78.8		-95.1	
6#c3	830	Ⅱ	13.2～302.0	192.5	86.0	15.3～290.9	145.8	14.0	-63	65.8	68.5	-100.9	-105.6
5#c11	830	Ⅲ	96.3～250.4	160.0	100.0	-	-	0	-60	65.0		-119.6	
6#S20	830	Ⅲ	69.5～287.8	227.2	98.0	108.3～108.3	108.3	2.0	-84	71.0		-73.4	
6#c5	830	Ⅳ	11.6～283.4	145.6	37.0	18.6～289.5	189.4	63.0	-6	51.5		-105.7	

注："-"表示未测出数值；第1列前面的编号1、2、3、4、5、6、m0、m3为8条矿脉的编号。

共生矿物以石英、绢云母为主，几乎不含金。此矿区该阶段较为普遍。

Ⅱ,黄铁矿—石英阶段：粒度多为 0.1 mm 左右，立方体晶形为主，主要呈浸染状、条带状产出。共生矿物以石英为主，含量相对较高。

Ⅲ,石英—黄铁矿阶段：粒度一般小于0.1 mm，呈五角十二面体晶形，碎裂现象比较严重，主要以条带、团块、脉状形式产出，为主成矿期的产物，含金量较高，金在其中以包体金、粒间金的形式存在。共生矿物以石英为主，但含量相对减少。

Ⅳ,石英—多金属硫化物阶段：黄铁矿颗粒大小不一，一般为 0.1 ~ 1 mm，破裂程度强烈，呈五角十二面体及复杂聚形，条带状产出，与方铅矿、闪锌矿等硫化物共生，亦为主成矿期的产物，含金量高，金主要呈裂隙金、粒间金赋存于黄铁矿、黄铜矿中。

Ⅴ,石英—碳酸盐阶段：为成矿晚期产物，黄铁矿颗粒较大，一般为 1 ~ 4 mm，八面体晶形，主要呈浸染状、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，含金量较低。

3　黄铁矿热电性研究

3.1　工作原理

矿物热电性是金属或半导体矿物在温差条件下产生热电效应的反应，主要受温度和微量元素组分等条件制约。矿物热电性包括热电系数和导电类型(简称导型)等含义。热电系数(α)是单位温度差的热电动势，其计算公式：

$$\pm\alpha = (\pm E/\triangle t) \times 10^6$$

式中：α 为热电系数，单位 μV/℃；E 为热电动势，单位为 μV；$\triangle t$ 为活化温度，单位℃。导电

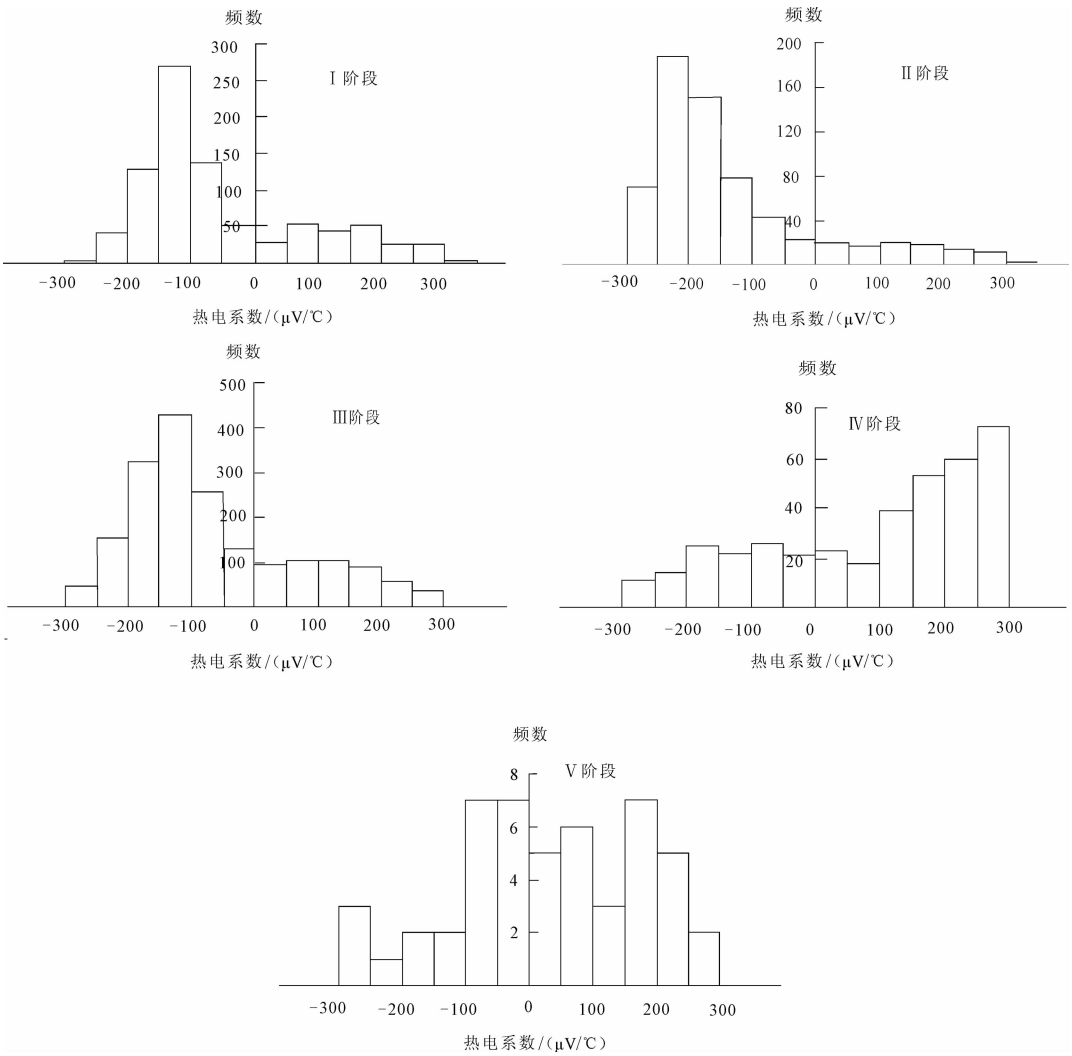


图 2　不同成矿阶段黄铁矿热电系数分布直方图

Fig. 2　Histogram of distribution of thermoelectric coefficients of pyrites in different mineralization stages

类型有两种：电子型导电(N 型)和空穴型导电(P 型)，当 E 为负值时，矿物表现为 N 型导电；E 为正值时，为 P 型导电。

黄铁矿热电性在时间和空间上有其规律性。根据大量的实验测试与研究分析[8-11]，早期高温条件下结晶的黄铁矿 Co、Ni 等离子杂质进入晶格，使黄铁矿呈现电子导型或 N 型，晚期低温条件下 As、Sb、Te 等离子杂质进入晶格，使黄铁矿呈现空穴导型或 P 型；而在轴向上，从一般热液矿床原生晕的分带序列来看，Co、Ni 晕常在矿体下部相对富集，而 As、Sb 等挥发组分常在矿体上部聚集[12-14]，即在矿体上部易形成 P 型导电的黄铁矿，矿体下部易形成 N 型导电的黄铁矿，中间部位导型呈过渡变化。

3.2 实验方法与测试结果

本文实验测试采用的是 BHTE-6 型热电仪，由笔者在中国地质大学(北京)成因矿物实验室完成，对4 个中段35 件样品，Ⅰ→Ⅴ阶段共计4 158 粒黄铁矿(粒径为 0.3 ~ 0.4 mm)进行测试，测试前先用酒精震荡充分清洗黄铁矿单晶的表面杂质，选定活化温度 $\triangle t$ 为(68 ± 3)℃。测试结果如表1。

义兴寨金矿区黄铁矿热电系数变化范围为 -350 ~ 350 μV/℃，主要集中在 -250 ~ 250 μV/℃范围内，数值变化比较稳定。热电导型主要以 N 型为主，N 型热电系数平均值 $\bar{\alpha}_N$ 为 -155.3 μV/℃，其出现率(N%)为 75.1%。

4 讨 论

4.1 黄铁矿热电性的时间分布特征

义兴寨金矿区黄铁矿在Ⅰ→Ⅴ形成阶段中，热电系数和热电导型呈规律性的变化。总体上 N 型热电导型出现率(N%)逐渐减小，P 型出现率(P%)逐渐增大，其热电导型组合由 N% > P% → N% < P% 呈渐变过渡。在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ阶段其热电系数 α 及其常见值变化比较稳定，主要集中在 -50 ~ -250 μV/℃之间；Ⅳ、Ⅴ阶段 α 明显向正高值移动，主要集中在 100 ~ 300 μV/℃之间，且所占比例明显增大(图 2)。这与黄铁矿热电性在时间上的变化规律是一致的，即早期形成的黄铁矿温度高，导电类型以 N 型为主，随温度逐渐下降，导电类型逐渐从 N 型向 P 型过渡。

4.2 黄铁矿热电性的空间分布特征

一般认为，脉状矿体的黄铁矿热电性在空间位置上具有正向分带，即自上而下为 P 型(上部)、N-P 混合型和 P-N 混合型(中部)至 N 型(下部)。研究表明(图 3)，在轴向上，义兴寨金矿区同一阶段的黄铁矿从上到下，N 型热电系数均值的绝对值($|\bar{\alpha}_N|$)及出现率(N%)，总体上呈增大

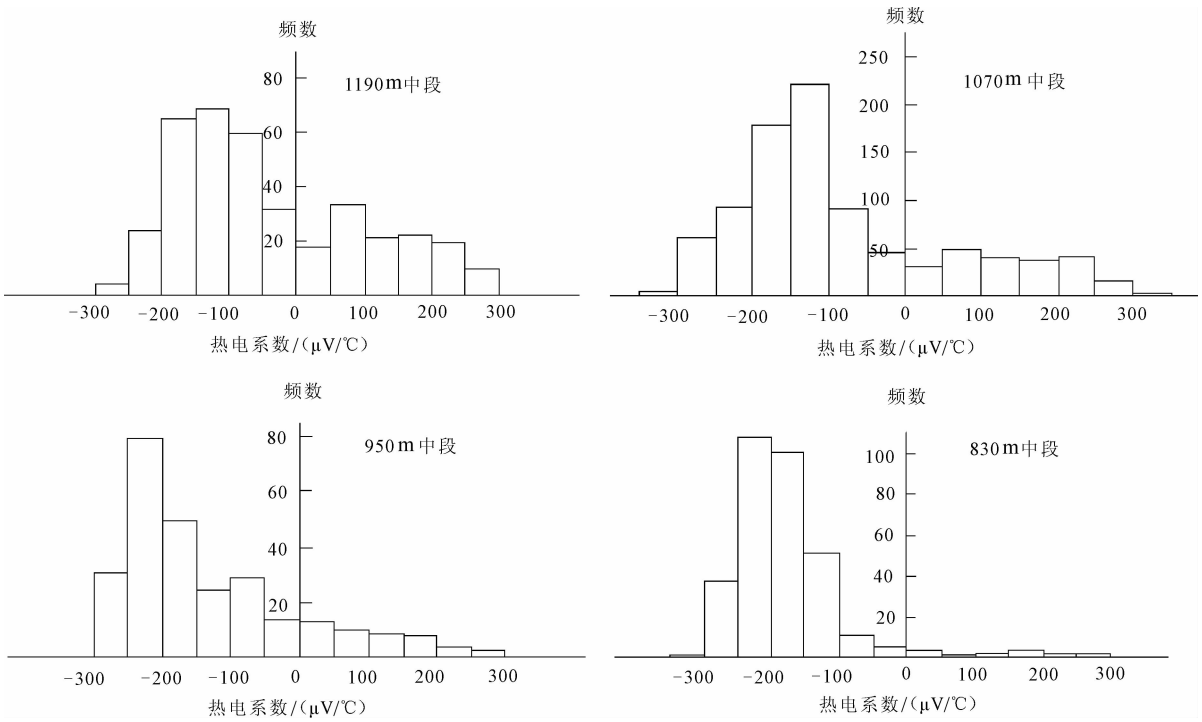


图 3 不同标高黄铁矿热电系数分布直方图

Fig. 3 Histogram of distribution of thermoelectric coefficients of pyrites in different elevations

的趋势，而 P 型热电系数的均值$\bar{\alpha}_P$及所占比例则相反，呈明显减少的趋势，如Ⅲ阶段黄铁矿热电系数均值的绝对值$|\bar{\alpha}_N|$和出现频率(N%)从上到下分别为 106.8 μV/℃(59.6%)、134.6 μV/℃(62.8%)、174.4 μV/℃(83%)、189.1 μV/℃(98.9%)。这说明义兴寨金矿床中的黄铁矿热电性在轴向总体上亦呈正向垂直分带。

4.3　据热电性对成矿温度的判定

Γ. A. 戈尔巴乔夫 1964 年对大量黄铁矿的热电性进行了研究，发现在不同温度条件下形成的黄铁矿，其热电系数和导电类型是不同的，其与矿物的形成温度有密切关系，可作为地质温度计用于判断成矿温度，并根据黄铁矿热电性与矿物结晶温度之间的这种制约关系，得出了黄铁矿热电性系数的温度标尺(图 4)，从该图获得的线性方程为[15]：

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

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

本文利用此方程，结合表 1 中的数据来推算义兴寨金矿床的形成温度。据计算得出该矿区黄铁矿的形成温度范围为 75.0 ~ 386.7 ℃，其中 N 型黄铁矿的形成温度为 221.4 ~ 386.7 ℃(α 值采用表 1 中 N 型热电系数值 -302 ~ -1.4 μV/℃)，P 型黄铁矿的形成温度为 75.0 ~ 266.17 ℃(α 值采用表 1 中 P 型热电系数值 2.8 ~ 321.4 μV/℃)，主要集中在 143.3 ~ 323.3 ℃，该矿床石英的流体包裹体的均一温度 190 ~ 349 ℃[16]，作者通过对该矿床 1 070 m 中段的 24 件黄铁矿的爆裂温度进行测试，得出温度在 140 ~ 320 ℃之间，都与热电系数反映的温度有较好的吻合性，表明该热电系数温度标尺在一定的误差范围内，是可以接受的，即表明该金矿床属于中低温型的矿床。

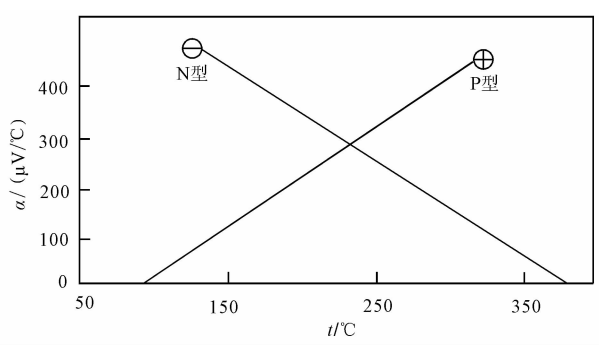


图 4　黄铁矿热电系数温度标尺

Fig. 4　Thermoelectric coefficients temperature scale of pyrite

4.4　据热电性对富矿段的判断

根据黄铁矿的热电性质与矿石中含金量的对应关系，可以确定富金矿石的热电系数范围，从而对富金矿段具有一定的指示意义。本文通过对义兴寨金矿不同矿脉金品位值及其相对应的主成矿期黄铁矿的热电系数值进行统计对比，结果如表 2 所列。通过表 2 可以看出，义兴寨金矿中含金矿石的黄铁矿热电系数 α 变化范围较稳定，主要集中在 0 ~ -300 μV/℃之间。富金矿石黄铁矿热电系数值则主要集中在 0 ~ -200 μV/℃的较小范围内，且随着矿石含金量的降低，其热电系数值减小，而范围扩大。在金品位极低(接近 0 g/t)的情况下，热电系数值向正值(P 型)方向移动，集中区也逐渐分散为多个区域。因此据以上规律可以判断在热电系数值为 0 ~ -200 μV/℃时基本代表富金矿石的出现，这对寻找有利矿段具有很好的指示意义。

崔艳合 1984 年曾对河北石湖石英脉型金矿进行过研究，认为矿石含金品位越高，黄铁矿热电系数亦越高，并总结出含金黄铁矿热电系数范围在 -100 ~ 160 μV/℃之间，含金高的矿石样品热电系数值主要集中在 0 ~ 160 μV/℃较小的范围内；胶东玲珑石英脉型金矿，含金品位高的黄铁矿热电性则以 P 型导电为主。上述 2 个金矿与义兴寨矿床同为含金多金属石英脉型金矿，但热电性特征与含金量的关系却明显不同。原因很可能是本矿区经历过多期构造、岩浆活动导致发生多次成矿作用，引起参加成矿的 Co、Ni、As、Cu、Pb、Zn 等元素在成矿中组分的析出过程和集散空间与金矿化分布的不一致性[8]，但具体原因还有待今后进一步研究。

4.5　热电性对矿体剥蚀程度和相对埋深的启示

4.5.1　热电性与矿体剥蚀程度的关系

杨国林等②根据黄铁矿热电系数值，利用下列方程求出了黄铁矿的热电性参数 X_{NP}，并推测可以定性地确定金矿体的剥蚀切面。

$$X_{NP} = (2f_{\text{I}} + f_{\text{II}}) - (f_{\text{IV}} + 2f_{\text{V}})$$

② 杨国林，孟舞平. 黄铁矿热电性作为金矿找矿矿物学方法应用的机理探讨. 第三次全国重砂矿物学术会议交流资料. 山东地质研究所，1991.

表 2 黄铁矿热电系数与含金性关系

Table 2 Relationship between the thermoelectric coefficients of pyrite and its gold-bearing property

矿脉号	标高/m	热电系数范围/(μV/℃)	α 主要集中区/(μV/℃)	N 型比例/%	金品位/(g/t)
1#c22	1 070	-273.2 ~ 203.7	-100 ~ -200	80	20.1
1#c32	1 070	-411.3 ~ 431.5	-100 ~ -200	82	4.8
1#c1	1 070	-275.4 ~ 188.3	-100 ~ -200	96	0.5
2#c6	1 070	-263.6 ~ 257.4	-150 ~ -200, -50 ~ 50	58	0.2
2#c10	1 070	-189.4 ~ 298.4	-50 ~ -10, 50 ~ 100, 150 ~ 253	48	0.2
5#N80	950	-292.2 ~ 242.7	-100 ~ -200	74	10.0
6#c9	950	-242.0 ~ 186.5	-100 ~ -250	91	3.6
6#c13	950	-281.9 ~ 159.2	-150 ~ -250	90	3.4
6#S20	830	-287.8 ~ 108.3	-150 ~ -300	98	4.3
6#c3	830	-281.0 ~ 264.8	-200 ~ -300	86	3.5
5#c10	830	-226.2 ~ 257.2	0 ~ -150	75	30.0

式中：f_{I} 表示相应的黄铁矿热电系数区间为 $\alpha >$ + 400 μV/℃的黄铁矿数量百分比；f_{II} 表示 α 在 200 ~ 400 μV/℃之间的黄铁矿数量百分比；f_{IV} 为 α 在 0 ~ -200 μV/℃之间的黄铁矿数量百分比；f_{V} 为 $\alpha <$ -200 μV/℃的黄铁矿数量百分比。矿体最上部 X_{NP} 值为 200 ~ 100，矿体上部 X_{NP} 值为 100 ~ 50，矿体中部 X_{NP} 值为 50 ~ -50，矿体下部 X_{NP} 值为 -50 ~ -100。

本文利用上述公式讨论该矿区的剥蚀程度。由表 1 可以看出，义兴寨金矿床黄铁矿的热电性参数 X_{NP} 值的范围为 6 ~ -131，主要集中在 -55 ~ -95 之间。此外，根据热电性参数计算出的矿体相对矿化总长度的剥蚀百分比 $\gamma(\gamma = 50 - X_{\mathrm{NP}}/4)$ 在 48 ~ 82.8 之间，平均集中在 62.2 ~ 71.1 之间。以上数据说明矿体被剥蚀到中下部位置，这与黄铁矿热电导型多以 N 型为主的情况是一致的。但在该区矿体轴向上，从上到下平均剥蚀百分比数值呈现高—低—高的韵律式变化，这说明矿体向下 120 m 可能又会有剥蚀百分比低的富矿段重复出现。

4.5.2 热电性与矿体相对埋深的关系

黄铁矿的补偿热电动势在矿体轴向上具有规律性的变化[17-18]，因此可以利用此特征值作为反映矿床相对埋深的标志。许虹[18]、胡大千[3]分别对土岭—石湖金矿的黄铁矿热电性进行了详细研究，发现黄铁矿的补偿热电动势 V_{NP} 平均值与矿体相对埋深 D 具有很好的线性对应关系，并据此建立了关系式：

$$D = -207.945 + 8.53V_{\mathrm{NP}}$$

式中：V_{NP} 为黄铁矿的补偿电动势，$V_{\mathrm{NP}} = V_{\mathrm{P}}D_{\mathrm{P}} - V_{\mathrm{N}}D_{\mathrm{N}}$，$V_{\mathrm{P}}$、$V_{\mathrm{N}}$ 是样品中 P、N 型导电的黄铁矿热电动势平均值，D_{P}、D_{N} 为 P、N 型导电的黄铁矿颗粒百分含量。

义兴寨金矿与土岭—石湖金矿成矿背景相似(矿区出露的地层都为太古宙的片麻岩类，矿区构造格局和岩浆岩类型相似，矿床类型都为含金多金属石英脉型，黄铁矿产出特征几乎相同，热电系数范围和 P 型出现率也相近(分别为 -350.7 ~ 350.1 μV/℃，24.9% 和 -320.7 ~ 327.1 μV/℃，23.0%[3]))，据此本文采用上述土岭—石湖金矿的矿体相对埋深与黄铁矿补偿热电动势的关系式来计算义兴寨金矿床的相对埋藏深度。计算表明，义兴寨金矿床相对埋藏深度为 -73.4 ~ -146.3 m。各中段矿体相对埋深平均值在 -105.6 ~ -132.5 m 之间，平均值为 -120.75 m，变化梯度较小、产出较稳定。因此可以认为该金矿床深部 830 m 以下还会有稳定的富矿体产出，延伸依然很大，有进一步研究开采的价值。

5 结 论

义兴寨金矿区黄铁矿的热电导型以 N 型为主，整个矿区 N 型出现率为 75.1%，热电系数均值 $\overline{\alpha}_N$ 为 -155.3 μV/℃，研究得出以下结论：(1)不同世代的黄铁矿，从早到晚其热电导型 N 型出现率逐渐降低，P 型出现率逐渐升高，导型组合由 N% > P% → N% < P% 呈渐变过渡；(2)同一时代的黄铁矿，在矿体轴向上，从上到下 N 型黄铁矿的热电系数均值的绝对值($|\overline{\alpha}_N|$)和出现率(N%)总体上逐渐增加，P 型黄铁矿的热电系数均值($\overline{\alpha}_P$)和出现率(P%)则相反，呈明显减小的趋势，总体

上有正向分带的规律；(3)通过计算得出义兴寨金矿床的形成温度为 143.3 ~ 323.3 ℃，与石英包裹体的均一温度吻合性较好，确定为中低温型矿床；(4)通过黄铁矿热电系数与含金性的关系，确定本矿区热电系数值在 0 ~ －200 μV/℃范围内为富金矿段出现范围；(5)按照经验公式确定矿体已基本剥蚀到中下部位置，但埋深部位相对稳定，表明该金矿床 830 m 下部还会有稳定的矿体产出，延伸依然很大。

致谢：感谢邵伟老师对文章提出的建设性意见，同时感谢山西紫金矿业有限公司义兴寨金矿副总工程师曹荣秀、地质科科长张翔在野外工作中给予的大力支持和张华锋老师、李真真在成文和英文摘要中提出的宝贵意见。

参考文献：

[1] 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，1989：452.

[2] 李胜荣，陈光远，邵伟，等. 胶东乳山金矿田成因矿物学[M]. 北京：地质出版社，1993：65－78.

[3] 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.

[4] 杨赞中，石学法，于洪军，等. 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.

[5] 姜绍飞，杜振国，刘之洋. 黄铁矿的晶形与热电性的标型及其实际意义[J]. 东北大学学报，1995，16(5)：458－462.

[6] 叶荣，赵伦山，沈镛立，等. 义兴寨金矿成矿作用地质地球化学动力学研究[J]. 现代地质，1997，11(1)：58－64.

[7] 李双保，李俊建. 山西恒山脉金矿田成矿地球化学特征[J]. 前寒武纪研究进展，1997，20(2)：1－4.

[8] 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)：46－56.

[9] 唐耀林，真允庆. 黄铁矿的热电性在金矿勘查中的地质意义[J]. 矿产与勘查，1991(1)：39－47.

[10] 李胜荣，陈光远，邵伟，等. 胶东乳山金矿金青顶矿区黄铁矿热电性研究[J]. 有色金属矿产与勘查，1994，3(5)：302－307.

[11] Андреев Б С. Пирит золоторудных месторождений[M]. Изд：Наука，Москва，1992：51－63.

[12] 苏文超. 黔西南烂泥沟金矿黄铁矿热电性研究及其找矿意义[J]. 黄金地质，1997，3(2)：7－12.

[13] 邵洁涟. 金矿找矿矿物学[M]. 武汉：中国地质大学出版社，1989：26－29.

[14] 科罗别伊尼科夫 А Ф. 金矿床中黄铁矿的地球化学特点[J]. 国外地质科技，1986(1)：126－135.

[15] 要梅娟，申俊峰，李胜荣，等. 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)：650－656.

[16] 叶荣，赵伦山，沈镛立. 义兴寨金矿床地球化学研究[J]. 现代地质，1999，13(4)：415－417.

[17] 阴翠珍. 内蒙古撰山子金矿黄铁矿的热电性特征及其与金成矿作用的关系[J]. 矿物学报，2003，23(2)：153－157.

[18] 许虹，李鸿超，李高山. 土岭－石湖金矿床黄铁矿找矿矿物学研究[J]. 地质找矿论丛，1992，7(4)：67－74.