

陕西双王金矿黄铁矿晶体形态和热电性特征对深部含矿性的预测

张方方¹ 王建平¹ 刘冲昊¹ 曹瑞荣²
程建军² 杨永荣² 齐 峰² 王 罗²

(1. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

2. 陕西太白黄金矿业有限责任公司, 陕西 太白 716000)

摘要:黄铁矿是一种重要的载金矿物,在金矿床的寻找和评价工作中,黄铁矿晶体形态及热电性标型的研究尤为重要。本文通过对陕西双王角砾岩型金矿床矿体 KT8 和矿体 KT9 中 ZK18、ZK30 和 ZK40 三个坑内钻孔进行系统采样,从矿物学角度研究主要载金矿物黄铁矿的晶型及热电性特征。结果表明:黄铁矿晶形较为简单,仅出现立方体、八面体、五角十二面体及其组合成的聚形,其中以{hk0}习性的晶形为主,总体上晶形出现率由高到低依次为{hk0}、{100}、{111}。黄铁矿热导电型多以混合型为主,其中 N 型热电系数为 $-322.0 \sim -1.7 \mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$, P 型热电系数为 $1.7 \sim 346.7 \mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$,黄铁矿热电参数变化较大,估算矿体剥蚀率为 53.67%~60.12%,指示矿体 KT8 中钻孔 30 和 40、矿体 KT9 中钻孔 18 深部均具有较好的矿化前景。

关键词:黄铁矿;晶体形态;热电性;双王金矿;陕西

中图分类号:P618.51;P574.1⁺9 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2013)05-1634-10

黄铁矿是各类金矿床中最常见的金属矿物,不仅与金的矿化有密切的联系,而且还是主要的载金矿物。黄铁矿的晶体形态、热电性、微量元素、晶胞参数、红外光谱等各种标型特征对解决金矿成因问题、估计矿体剥蚀深度、判断矿床规模及预测深部矿体等方面都具有重要的意义。陈光远、李胜荣等^[1]对黄铁矿的形态和热电性标型进行过详细的研究,并有效指导了胶东金矿区的找矿工作。

陕西双王金矿床为一大型、易采易选的低品位角砾岩型金矿床,具有重要的研究价值。自 1984 年开始,前人对双王金矿床进行了详细研究,在矿床地质特征、同位素地球化学、流体包裹体及矿床成因等方面取得了丰硕的成果^[2-4]。目前双王金矿已开拓到

第四中段(1 100 m 标高),第四中段以上的矿体研究较多,资源利用率也较高,急需对矿床开展深部探矿工作。本文以双王金矿区 KT9 和 KT8 矿体中 ZK18、ZK30、ZK40 三个坑内钻孔为研究重点,系统分析了 33 件不同标高含黄铁矿岩心样品中黄铁矿晶型、热电性特征及其时空变化规律,为金矿床的深部远景预测提供依据。

1 矿床地质概况

双王金矿床位于陕西省太白县西南部,呈 NWW-SEE 向带状分布于王家楞—王家庄一带。其大地构造位置处于扬子板块、秦岭微板块、华北板块碰撞结合部位。区内构造发育,主要有一系列轴向为

收稿日期:2012-11-06;改回日期:2013-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目(41030423、41272106)、中国黄金集团公司科技项目“陕西省太白县双王金矿床地质特征、成矿规律及找矿靶区再研究”共同资助。

作者简介:张方方,女,1990 年生,硕士生,矿物学、岩石学、矿床学专业;E-mail:zff19901008@126.com。

通讯作者:王建平,男,1972 年生,副教授,矿物学、岩石学、矿床学专业,主要从事矿床学教学与科研工作;E-mail:jpwang@cugb.edu.cn。

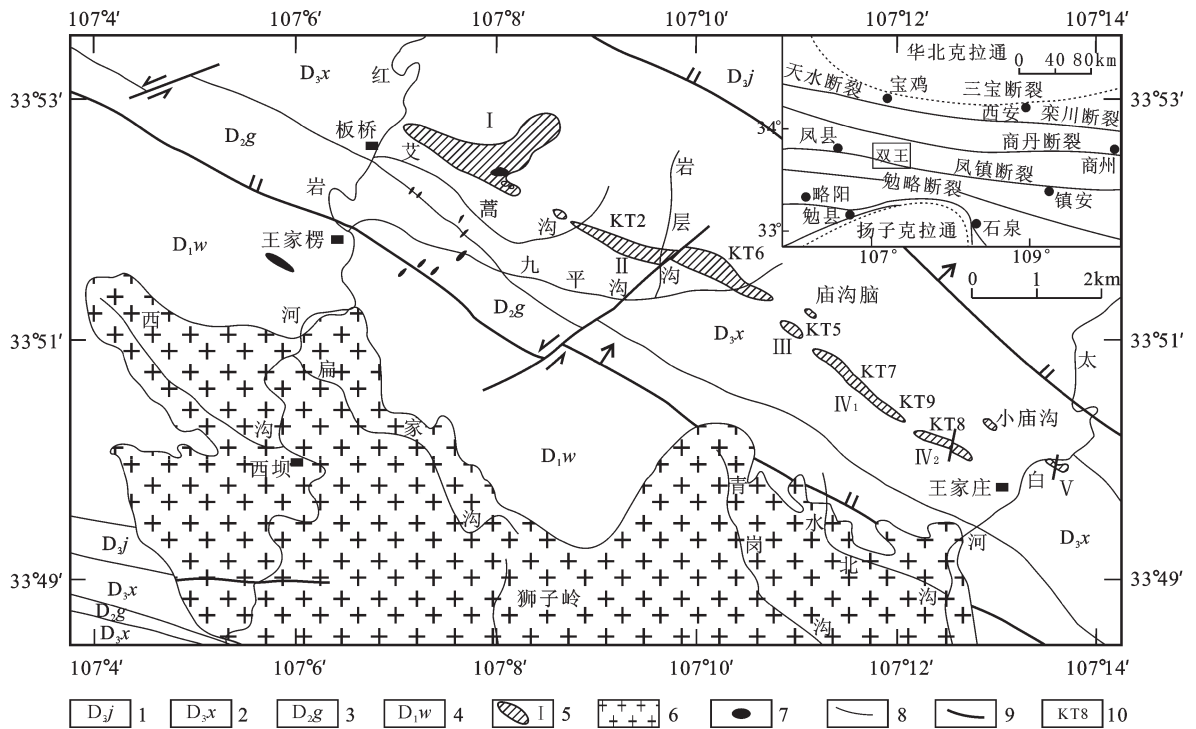


图 1 陕西省双王金矿区地质简图(修改自文献[6])

1—上泥盆统九里坪组;2—上泥盆统星红铺组;3—中泥盆统古道岭组;4—下泥盆统王家楞组;5—含金角砾岩体及编号;6—西坝花岗岩质岩体;7—燕山期花岗岩斑岩;8—地层界线;9—断层;10—矿体编号

Fig.1 Geological sketch map of the Shuangwang gold deposit, Shaanxi Province (modified after Reference [6])

1—Upper Devonian Jiuliping Formation;2—Upper Devonian Xinghongpu Formation;3—Middle Devonian Gudaoling Formation;4—Lower Devonian Wangjialeng Formation;5—Auriferous breccia body and its serial number;6—Xiba granite;7—Yanshanian granite porphyry;8—Stratigraphic boundary;9—Fault;10—Ore body and its serial number

NW310°—SE130°向的复背、向斜构造及走向断裂构造。矿区内褶皱构造为西坝复式背斜,主要断层为南部的王家楞断层和北部的修石崖断层^[5]。岩浆活动以印支期中酸性岩浆侵入为主,形成西坝复式岩体,由石英二长闪长岩和二长花岗岩组成。另外,矿区内还有燕山期小规模花岗岩脉和煌斑岩脉侵入含金角砾岩带中。

双王金矿床矿区内出露的地层主要为一套泥盆系浅海相浅变质粉砂质泥岩、粉砂岩夹砂岩和碳酸盐岩沉积(图 1)。地层由老到新依次为下泥盆统王家楞组(D_{1w})、中泥盆统古道岭组(D_{2g})、上泥盆统星红铺组(D_{3x})和九里坪组(D_{3j}),其中星红铺组(D_{3x})为赋矿地层,岩性为浅灰绿色变质粉砂岩,粉砂质绢云板岩、薄层状粉砂岩和夹层状钠质岩系。金矿赋矿岩体为角砾岩体,受 NW-SE 向构造控制,在平面上呈透镜状或带状产出。目前在已发现的金矿体中,以 IV 号角砾岩体内的矿体 KT8 规模最大,位于 22~50 勘探线之间;其次为矿体 KT9,也产于 IV 号角砾

岩体中,位于 0~20 勘探线之间。双王金矿床含金角砾岩中,角砾成分主要为浅灰—浅棕黄色石英钠化板岩、粉砂质钠化板岩或铁白云石化板岩,角砾形态多为板条状、似板状及不规则棱角状,一般具有明显的可拼性,粒度大小不等。

矿石内的金属矿物以黄铁矿为主,其次为磁黄铁矿、黄铜矿等。脉石矿物以石英、钠长石、铁白云石(图 2-A)、方解石为主,其次为绿泥石、电气石、石膏、硬石膏、萤石等。矿石主要结构有自形—半自形粒状结构(图 2-C)、包含结构、碎裂结构(图 2-D)、交代残余结构;矿石主要构造有角砾状、细粒浸染状(图 2-E)、网脉状(图 2-F)、团块状构造(图 2-B)。角砾岩蚀变类型有强度不等的硅化、钠长石化、黄铁矿化、碳酸盐化及少量的孔雀石化、褐铁矿化。

2 黄铁矿晶体形态标型

2.1 黄铁矿形态标型意义

黄铁矿的形态十分复杂,但最常见的晶型主要

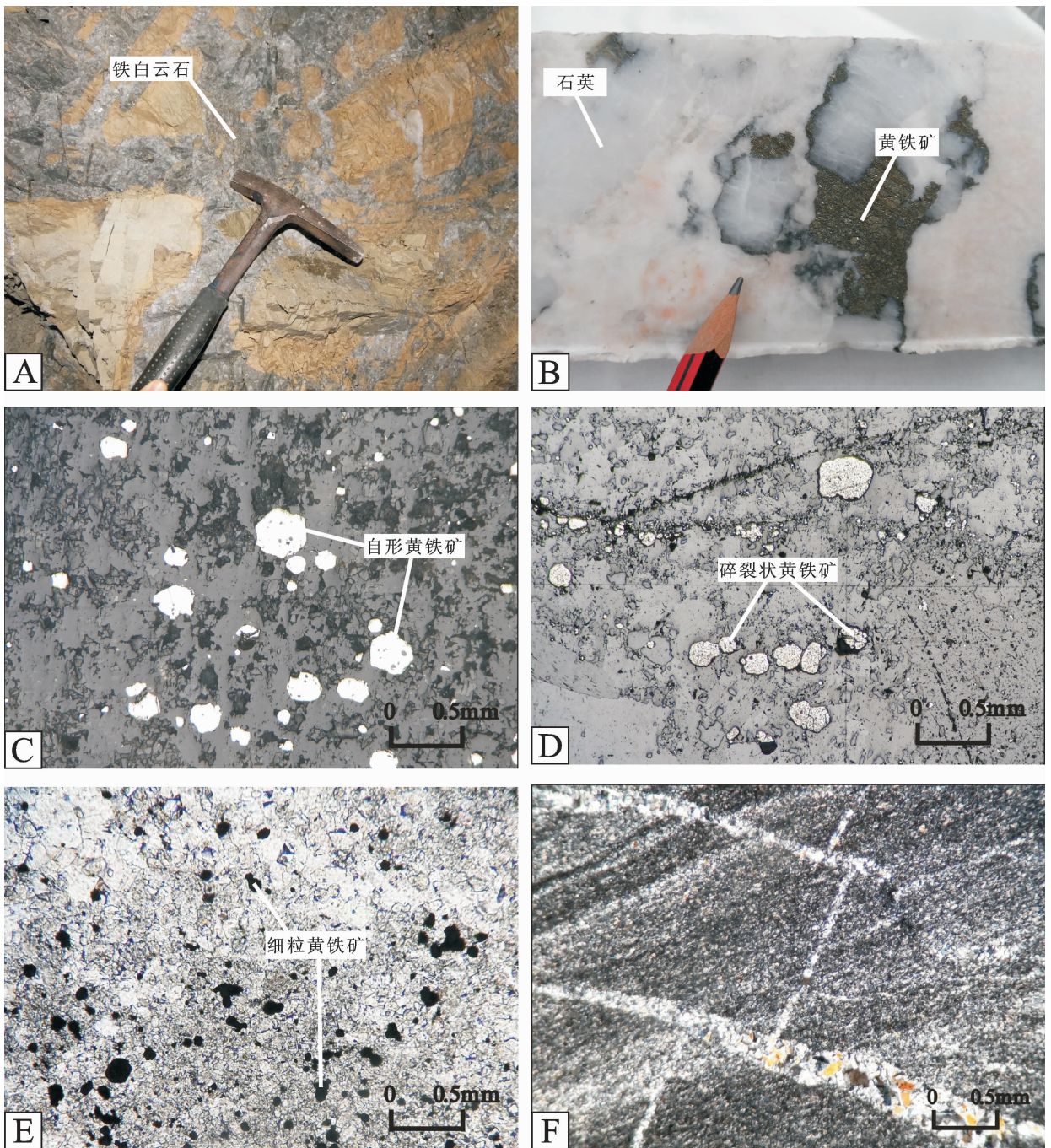


图2 双王金矿岩矿石结构构造特征

A—铁白云石胶结角砾岩;B—石英脉中的团块状黄铁矿;C—自形粒状黄铁矿(反射单偏光);D—碎裂状黄铁矿(反射单偏光);E—细粒黄铁矿呈浸染状分布(透射单偏光);F—板岩中的脉状构造(透射正交偏光)

Fig.2 Textural and structural characteristics of some rocks and minerals in the Shuangwang gold deposit

A - Breccia containing ferrodolomite cement;B - Cloddy pyrite in quartz veins;C - Euhedral granular pyrite (metallographic Microscope, plainlight);D - Cataclastic pyrite(metallographic microscope, plainlight);E - Disseminated tectonic fine-grained pyrite(petrographic microscope, plainlight);F - Veinlet structure in slate (petrographic microscope, crossed nicols)

由立方体 $\{100\}$ 、八面体 $\{111\}$ 、五角十二面体 $\{hk0\}$ 及它们相互的聚形组成。黄铁矿晶型特征取决于其形成的地质环境(温度、压力、硫逸度、组分)。一般认为,在低过饱和度、低硫逸度以及在较高温度(约 320°C)或较低温度(约 200°C),温度变化梯度大的条件下,有利于黄铁矿 $\{100\}$ 习性的晶体生长,晶形较简单;在高过饱和度、高硫逸度以及适中温度($250\sim 300^{\circ}\text{C}$),温度变化梯度小的条件下,有利于黄铁矿 $\{111\}$ 、 $\{hk0\}$ 习性的晶体形成,晶型趋于复杂^[7,8]。另外,早期成矿阶段结晶的黄铁矿,生长缓慢多以粗粒的立方体、五角十二面体等晶体($>1\text{ mm}$)为主,载金能力较差;主成矿阶段结晶的黄铁矿,生长较快颗粒相对较细($<1\text{ mm}$),以聚形晶体为主,载金能力较高^[9]。

2.2 测试方法及结果

根据 3 个新勘探钻孔的不同标高位置的岩心样观察,选取了 33 个黄铁矿样品进行形态统计分析。首先进行碎样挑选单矿物,然后清洗整理后采用立体双目镜进行形态观察(图 3)。由于人工碎样会增加颗粒的破碎度,所以仅对晶型较好的黄铁矿颗粒进行统计,最后得到 31 个样品共 1543 个颗粒的有效形态特征(表 1)。双王金矿黄铁矿主要晶型特征如下:

① $\{100\}$:立方体晶型,多具粗糙的晶面条纹,条纹细密,光滑明亮;于温度较高或温度梯度较大,且硫饱和度低的低温环境下形成(图 3-A)。

② $\{100\}+\{111\}$:以立方体晶型为主,角顶上有不太发育的八面体晶面。若 $\{111\}$ 晶面发育,则对应为 $\{111\}+\{100\}$ 。

③ $\{100\}+\{hk0\}$:是 $\{100\}$ 晶面与 $\{hk0\}$ 晶面同时发育,但 $\{100\}$ 晶面比 $\{hk0\}$ 晶面略较发育的结果。常见晶形具弧形曲面,或在晶面上发育粗糙不平阶梯状晶面。 $\{hk0\}$ 晶面较发育时对应为 $\{hk0\}+\{100\}$ 。

④ $\{111\}$:八面体晶型,单形晶型发育较好,角顶易破碎(图 3-B)。

⑤ $\{hk0\}$:五角十二面体晶型(图 3-C),部分晶体具晶面条纹,均为正条纹(平行 (001) 为正条纹);有时呈聚晶出现,部分呈歪晶出现。

⑥ $\{hk0\}+\{111\}$:以五角十二面体晶型为基本形态,与不太发育的八面体晶面构成的聚形。若八面体晶面较发育,则对应为 $\{111\}+\{hk0\}$ 。

⑦ $\{hk0\}+\{100\}+\{111\}$:由 $\{hk0\}$ 晶面与发育程

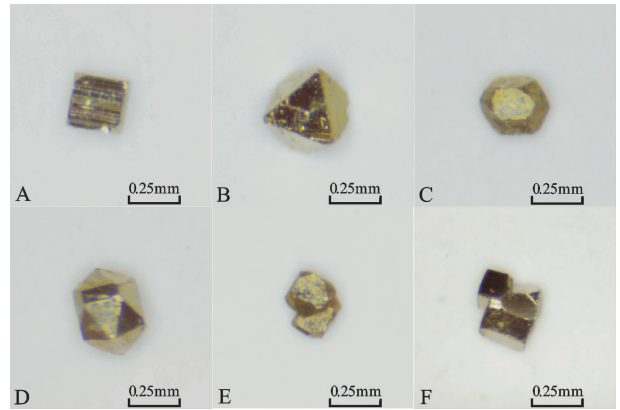


图 3 立体双目镜下黄铁矿晶体形态

A—立方体单形;B—八面体单形;C—五角十二面体单形;D—五角十二面体、立方体和八面体聚形;E—二连晶;F—三连晶

Fig.3 Pyrite crystal form under the stereo binocular
A—Cubic single form;B—Octahedral single form;C—Single form of pentagonal dodecahedron;D—Glomerocryst forms of pentagonal dodecahedron, cube and octahedron;E—Twinning;F—Trilling

度不等的 $\{100\}$ 晶面和不太发育的 $\{111\}$ 晶面构成聚形(图 3-D)。

经过对双王金矿床矿体 KT8、KT9 中黄铁矿晶体形态观察统计,表明其黄铁矿晶型比较简单,晶体形态整体上以 $\{100\}$ 、 $\{111\}$ 、 $\{hk0\}$ 习性及其相互组合的聚形为主,少量的黄铁矿单形出现有歪晶、规则和不规则二连晶(图 3-E)和三连晶(图 3-F)等。总体上,黄铁矿晶型出现率由高到低依次为: $\{hk0\}$ 习性占 55%、 $\{100\}$ 习性占 32%、 $\{111\}$ 习性占 13%。根据各钻孔黄铁矿晶型特征统计结果,分别绘制不同习性黄铁矿出现比例的垂向变化规律图(图 4)。

钻孔 ZK18 位于双王金矿矿体 KT9 中,以 $\{hk0\}$ 习性晶为主,所占比例约为 51%。不同标高的黄铁矿各习性晶所占比例呈一定的变化规律,从钻孔浅部到深部出现率较多的习性晶由 $\{hk0\}\rightarrow\{100\}\rightarrow\{hk0\}\rightarrow\{100\}$ 反复变化(图 4-A)。钻孔 ZK30 和钻孔 ZK40 位于双王金矿矿体 KT8 中,其中钻孔 ZK30 以 $\{100\}$ 习性晶为主,所占比例约为 75%,而 $\{hk0\}$ 习性晶平均仅占 11%,除在标高 1 050 m 处出现 $\{111\}$ 习性比例为 71%外,整体上钻孔 ZK30 黄铁矿的晶型沿垂向变化幅度不大(图 4-B);钻孔 ZK40 以 $\{hk0\}$ 习性晶为主,所占比例约为 61%,其次为 $\{100\}$ 习性晶约占 28%,从图 4-C 中明显看出 $\{hk0\}$ 习性晶出现率与 $\{100\}$ 习性晶出现率呈明显的反消长关系,黄铁矿晶型由浅部到深部的变

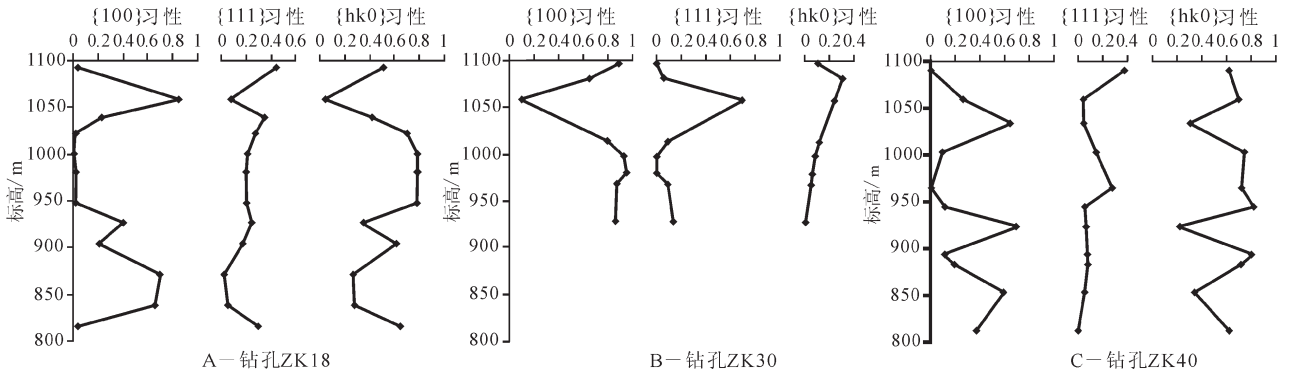


图4 双王金矿床黄铁矿晶型比例垂向变化图

Fig.4 Vertical variation diagram of frequencies of pyrite crystal forms in the Shuangwang gold deposit

化规律为 {hk0} → {100} → {hk0} → {100} → {hk0}。

3 黄铁矿热电性标型

3.1 测试原理及应用

矿物热电性是金属或半导体矿物在温差条件下产生的热电效应，主要受温度和微量元素组分等条件的制约，包括热电系数和导电类型两层含义。热电系数 α 即为单位温差 Δt 时的热电动势（陈光远，1989^[10]），其计算公式为：

$$\alpha = E / (t_H - t_L) = E / \Delta t$$

式中， α ——热电系数 ($\mu V \cdot ^\circ C^{-1}$)； E ——热电动势(mV)； Δt ——温差($^\circ C$)。

矿物的导电类型有两种：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；当E为正值时，矿物表现为P型导电。

热电性是黄铁矿最重要的标型特征之一，热电系数的大小取决于类质同象杂质的种类、浓度和晶格结构缺陷的类型、密度等。根据前人研究成果，黄铁矿热电性在时间和空间上具有普遍意义的规律。在矿体浅部以晚期较低温的P型黄铁矿为主，在矿体深部以早期较高温的N型黄铁矿为主，并且在垂向上 α_P 随取样位置的升高而增大， α_N 随取样位置的升高而绝对值减少， α 值越大黄铁矿的含金性越好。另外，在矿体的不同高度黄铁矿的热电系数变化梯度也是有差别的。如果空穴型黄铁矿热电系数变化梯度较小，表明矿体本身的规模较大，沿该方向矿体延伸较大，深部远景比较好；如果空穴型黄铁矿热电系数变化梯度较大，表明该矿体的规模本身比较小，沿该方法向矿体延伸较小，可能为矿体的边缘或

矿化尖灭的边缘，深部远景不好。所以，根据上述变化规律，可以判断金矿床成因、分析矿体剥蚀程度、确定矿体延伸规模以及进行深部预测。

3.2 样品及测试结果

样品与黄铁矿晶形标型研究样品相同，均取自双王金矿床KT9号和KT8号矿体中3个坑内钻的不同标高，并选取了其中33件具有代表性的岩心样，对黄铁矿单矿物进行热电性分析测试，测试前样品进行表面氧化膜和杂质的去除。由于热电动势易受多种因素影响，所以在测试过程中每个样品选择50粒黄铁矿进行统计性测试。得出黄铁矿热电性特征如表2。

从表2中可以看出，双王金矿床黄铁矿一般属于混合导型，黄铁矿热电系数变化范围为-322.0~346.7 $\mu V \cdot ^\circ C^{-1}$ ，其中N型黄铁矿的 α 分布于-322.0~-1.7 $\mu V \cdot ^\circ C^{-1}$ ，集中区为-200.0~-50.3 $\mu V \cdot ^\circ C^{-1}$ ；P型黄铁矿的 α 分布于1.7~346.7 $\mu V \cdot ^\circ C^{-1}$ ，集中区为151.1~299.7 $\mu V \cdot ^\circ C^{-1}$ ；各钻孔中黄铁矿热电系数分布情况如图5。各钻孔中P型黄铁矿出现率在垂向空间分布上呈规律性变化，平均为50.86%(图6)。

钻孔ZK18中黄铁矿热电系数变化范围-184.0~337.9 $\mu V \cdot ^\circ C^{-1}$ ，主要集中在-200~-100 $\mu V \cdot ^\circ C^{-1}$ 范围内。P型黄铁矿热电系数在1100~800 m标高范围内呈逐渐增大的趋势，且黄铁矿导型由N型到P型再到N型再到P型呈现明显的脉动式变化规律，说明此区段内成矿比较活跃，也反映了双王金矿床多期多阶段成矿的特征。从图5中可以看出，P型黄铁矿出现率亦呈波动变化，认为在800 m以下有可能再次出现P型概率的高值，预示深部仍具有较好的矿化前景，与前人对矿体KT9预测的找矿靶区

表 1 双王金矿床矿体 KT8、KT9 黄铁矿形态特征统计表

Table 1 Morphological features of pyrites from No.8 and No.9 orebodies in the Shuangwang gold deposit

样号	标高/m	{100}习性				{111}习性				{hko}习性				合计	百分率/%		
		{100}	{111}	{hko}	3*	{111}	{100}	{hko}	3	{hko}	{100}	{111}	3		{100}	{111}	{hko}
ZK18-1	1092		1	1		7	4	7	5	11	3	8	4	51	0.04	0.45	0.51
ZK18-3	1059	28	13	2	2		3	1					2	51	0.88	0.08	0.04
ZK18-4	1039	6	1		5	5	6	3	5	8	1	3	10	53	0.23	0.36	0.42
ZK18-5	1022		1			5	6	3	1	18	4	13	3	54	0.02	0.28	0.70
ZK18-6	1000					3		7	1	21	1	16	2	51	0.00	0.22	0.78
ZK18-7	980				1	1	1	4	5	19	2	12	10	55	0.02	0.20	0.78
ZK18-9	948				1	3	1	3	3	22	5	5	8	51	0.02	0.20	0.78
ZK18-10	927	2	10	6	5	1	10		3	8	7		3	55	0.42	0.25	0.33
ZK18-11	905		2	6	2		5	2	2	8	12	5	7	51	0.20	0.18	0.63
ZK18-13	871	31	3	2	1				1	6	4	2	2	52	0.71	0.02	0.27
ZK18-15	839	33	1	1		2	1			13	2			53	0.66	0.06	0.28
ZK18-16	817	2				5	1	10				21		52	0.04	0.31	0.65
ZK30-1	1098	40	3	2						3	2			50	0.90	0.00	0.10
ZK30-2	1081	4			28		3			9	1	5		50	0.64	0.06	0.30
ZK30-3	1058		3	1		17	7	9	4	5	2	4	1	53	0.08	0.70	0.23
ZK30-5	1014	12	25	3	2		5			2	3	1		53	0.79	0.09	0.11
ZK30-6	998	43	3	2							4			52	0.92	0.00	0.08
ZK30-7	980	45	2	1							3			51	0.94	0.00	0.06
ZK30-8	968	35	3	3			3	1			2			47	0.87	0.09	0.04
ZK30-10	928	12				2								14	0.86	0.14	0.00
ZK40-3	1090					17		3		22	1	8	1	52	0.00	0.38	0.62
ZK40-5	1060	2	6	5	1		1	1		9	1	18	9	53	0.26	0.04	0.70
ZK40-7	1034	20	8	2	3			2		10	5			50	0.66	0.04	0.30
ZK40-8	1003		3	1	1			8		15		25		53	0.09	0.15	0.75
ZK40-9	965					12		3		8		30		53	0.00	0.28	0.72
ZK40-11	945	5		1				3		35	3	5		52	0.12	0.06	0.83
ZK40-12	925	20	18	2	1	2		1	1	4	3		5	57	0.72	0.07	0.21
ZK40-15	894	3	2			1		3		15		25	3	52	0.10	0.08	0.83
ZK40-17	883	4	3	2	1	2		2		2	1	31	3	51	0.20	0.08	0.73
ZK40-19	854	18	10		3			2	1	2	5	4	7	52	0.60	0.06	0.35
ZK40-21	813	4	1	2						10		2		19	0.37	0.00	0.63

注:3为{100}+{111}+{hko}的聚形。

结论一致^[11]。

钻孔 ZK30 中黄铁矿热电系数变化范围 $-322.0 \sim 337.3 \mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$, 主要集中在 $-200 \sim 300 \mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 范围内。如图 5 所示,岩心样品自标高 928~1 098 m, 总体上以 P 型黄铁矿为主,仅在 980 m 处存在 N 型黄铁矿出现率的最高值。表明该钻孔中所采取的黄铁矿位于矿体的浅部,850 m 标高以下可能存在较好的矿化前景。

钻孔 ZK40 中黄铁矿热电系数变化范围 -281.2

$\sim 346.7 \mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$, 主要集中在 $-100 \sim 200 \mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 范围内。从表 2 中可以看出, α_p 平均值从上到下呈现先减小后增大的趋势。根据 P 型黄铁矿热电系数在矿体上部值较大,说明在 750 m 以下还会有 P 型黄铁矿出现,且在 900~750 m P 型黄铁矿所占比例逐渐增大,认为目前控制标高范围内仍处于矿体的中上部位置,矿体沿钻孔方向向深部仍有一定的延伸。

3.3 热电系数离散性特征

黄铁矿热电系数离散成程度能准确地反映相差

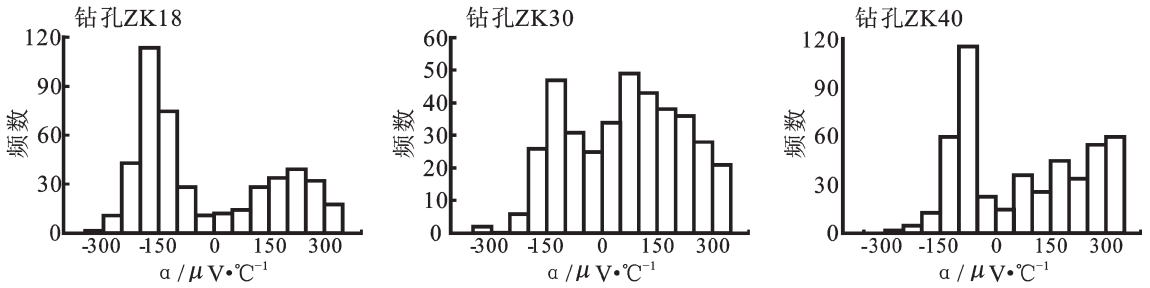


图5 双王金矿床各钻孔黄铁矿热电系数直方图

Fig. 5 Histograms of thermoelectric coefficients of pyrites from various drill holes in the Shuangwang gold deposit

较大的不同样品的热电系数值相对集中与分散的情况^[2]。本文采用相对标准差(σ α')作为各样品热电系数分布离散程度的指标。其计算公式为:

$$\sigma \alpha' = \frac{\sigma \alpha}{|\alpha|} \times 100\%$$

式中,σ α'-热电系数离散度(%);σ α-热电系数的标准差(μV·°C⁻¹);|α|-热电系数的平均值(μV·°C⁻¹)。

利用黄铁矿热电系数的离散度可以反映其成矿环境的稳定性。Σ α'数值越小,指示黄铁矿形成时的环境越稳定;σ α'数值越大,指示黄铁矿形成时的环境越不稳定。如果P型黄铁矿出现率高对应σ α'数值较小,表明矿化较好;P型黄铁矿出现率高但σ α'数值偏大,表明矿化不连续;P型黄铁矿出现率低且σ α'数值较大,表明矿化较差。分别将各钻孔岩心样的热电系数值代入上述公式,计算出每个样品的σ α'值,并绘制黄铁矿热电系数离散

度与P型黄铁矿出现率随标高变化的对比图(图7)。从图中可以看出钻孔ZK18热电系数离散度总体较小,随孔深变化幅度不大,表明成矿环境较稳定,在标高950m附近矿体产出稳定矿化程度较好;钻孔ZK40热电系数离散度及变化幅度也较小,表明成矿环境较稳定,在控制标高的最上部和最下部矿化程度较好,并推断在标高800m附近可能有新矿体的出露;钻孔ZK30中除个别样品σ α'值较大外,总体上离散度普遍较小,与钻孔ZK18、钻孔ZK40相比成矿环境略不稳定,在标高960m附近矿化相对较好。

3.4 矿体延伸标定分析

根据黄铁矿热电系数值,利用下述方程可以求出黄铁矿的热电性参数X_{np}。

$$X_{np} = (2f_I + f_{II}) - (f_{IV} + 2f_V)$$

式中:f_I-黄铁矿样品中热电系数α>400 μV·°C⁻¹的百分比;f_{II}-α在200~400 μV·°C⁻¹之间的百分

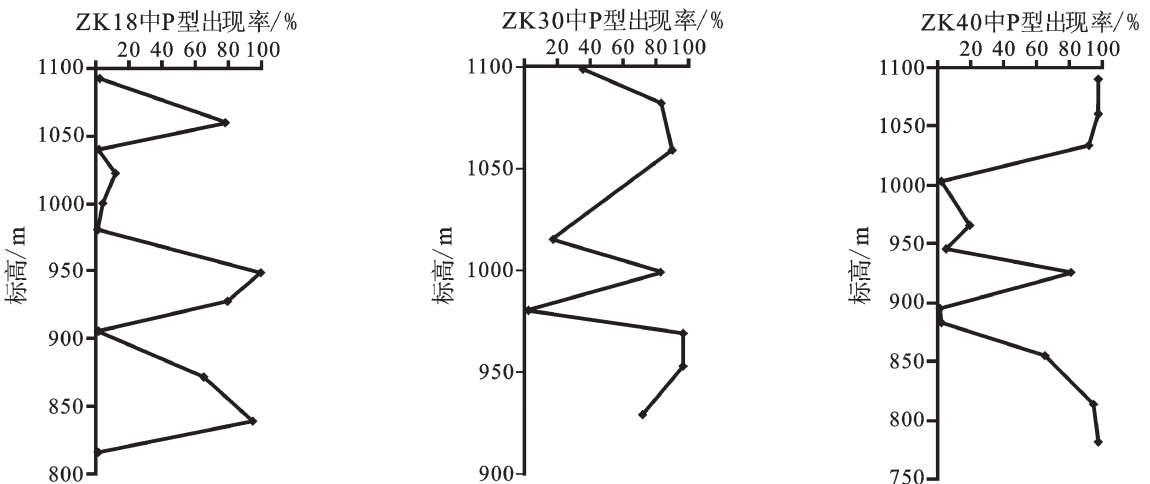


图6 双王金矿床各钻孔P型黄铁矿出现率垂向变化趋势图

Fig. 6 Attitude-changing trend diagram of frequencies of P-type pyrites from various drill holes in the Shuangwang gold deposit

表 2 双王金矿床黄铁矿的热电性特征统计
Table 2 Thermoelectric characteristics of pyrites in the Shuangwang gold deposit

样品编号	标高/m	N 型热电系数/ $(\mu V \cdot ^\circ C^{-1})$		N 型出现频率/%	P 型热电系数/ $(\mu V \cdot ^\circ C^{-1})$		P 型出现频率/%	矿体剥蚀率/%
		范围	平均值		范围	平均值		
ZK18-1	1092	-292.2 ~ -62.2	-155.09	97.50	156.0	156.00	2.50	33.13
ZK18-3	1059	-223.5 ~ -18.9	-85.78	20.00	6.8 ~ 337.9	158.99	80.00	48.13
ZK18-4	1039	-297.6 ~ -73.0	-184.03	100.00	—	—	—	83.75
ZK18-5	1022	-249.6 ~ -3.5	-105.45	87.50	19.3 ~ 201.8	111.48	12.50	71.25
ZK18-6	1000	-306.1 ~ -20.4	-164.91	95.00	25.5 ~ 27.4	26.45	5.00	78.13
ZK18-7	980	-257.0 ~ -77.2	-175.14	100.00	—	—	—	81.88
ZK18-9	948	—	—	—	74.7 ~ 346.6	233.93	100.00	31.25
ZK18-10	927	-135.3 ~ -27.7	-82.26	20.00	20.5 ~ 317.9	172.33	80.00	47.50
ZK18-11	905	-265.9 ~ -115.4	-177.03	100.00	—	—	—	81.88
ZK18-13	871	-198.3 ~ -47.9	-117.67	35.00	3.5 ~ 306.5	187.62	65.00	51.25
ZK18-15	839	-108.6 ~ -105.2	-106.90	5.00	108.0 ~ 327.0	218.59	95.00	38.13
ZK18-16	817	-237.0 ~ -95.8	-148.74	100.00	—	—	—	76.25
ZK30-1	1098	-304.3 ~ -16.9	-126.49	64.00	25.6 ~ 266.7	96.75	36.00	65.00
ZK30-2	1081	-90.4 ~ -22.0	-57.24	15.60	53.2 ~ 292.8	180.13	84.40	45.56
ZK30-3	1058	-199.3 ~ -77.5	-144.33	9.30	81.9 ~ 333.9	244.19	90.70	36.05
ZK30-5	1014	-204.8 ~ -5.1	-90.32	82.60	14.9 ~ 292.5	85.31	17.40	70.65
ZK30-6	998	-322.0 ~ -13.7	-127.91	15.32	30.1 ~ 337.3	165.51	84.78	48.91
ZK30-7	980	-230.4 ~ -86.6	-145.85	100.00	—	—	—	76.25
ZK30-8	968	-172.5	-172.50	2.50	35.8 ~ 340.2	218.32	97.50	35.00
ZK30-9	952	-1.7	-1.70	2.50	1.7 ~ 154.6	53.85	97.50	50.63
ZK30-10	928	-118.3 ~ -14.0	-49.65	27.50	23.0 ~ 301.6	109.31	72.50	55.00
ZK40-3	1090	-141.6	-141.60	2.50	37.3 ~ 327.7	221.53	97.50	37.50
ZK40-5	1060	-29.3	-29.30	2.50	50.8 ~ 339.6	227.29	97.50	34.38
ZK40-7	1034	-207.8 ~ -25.4	-108.50	7.50	11.3 ~ 332.2	161.56	92.50	45.63
ZK40-8	1003	-196.6 ~ -39.5	-119.56	97.50	96.1	96.10	2.50	75.00
ZK40-9	965	-281.2 ~ -12.2	-127.15	80.00	26.2 ~ 232.9	119.16	20.00	72.50
ZK40-11	945	-135.1 ~ -15.1	-80.42	95.00	25.4 ~ 88.9	57.15	5.00	73.75
ZK40-12	925	-128.8 ~ -8.0	-74.16	17.78	21.0 ~ 221.5	108.82	82.22	53.33
ZK40-15	894	-108.1 ~ -43.0	-78.20	100.00	—	—	—	75.00
ZK40-17	883	-203.5 ~ -52.7	-97.86	97.50	186.0	186.00	2.50	75.00
ZK40-19	854	-115.5 ~ -8.6	-68.17	35.00	15.5 ~ 323.0	229.72	65.00	46.88
ZK40-21	813	-76.9 ~ -56.1	-68.00	5.00	45.4 ~ 346.7	255.03	95.00	32.50
ZK40-23	780	-38.7	-38.70	2.28	99.0 ~ 342.6	284.20	97.72	26.25

注:“—”表示未检出。测试单位为中国地质大学(北京)资源勘查实验室,2012。测试仪器为 BHTE-8 型热电仪(温差设定为 $\Delta t=60 \pm 3^\circ C$)。

比; $f_{IV}-\alpha$ 在 $0 \sim -200 \mu V \cdot ^\circ C^{-1}$ 之间的百分比; $f_V-\alpha < -200 \mu V \cdot ^\circ C^{-1}$ 的百分比。

计算表明, 双王金矿矿体上部 $+50 < X_{mp} < +100$, 矿体中部 $-50 < X_{mp} < +50$, 矿体下部 $-100 < X_{mp} < -50$, 矿体最下部 $-200 < X_{mp} < -100$ 。根据黄铁矿的热电性参数可以进一步计算出矿体剥蚀率(矿体相对矿化总长度的剥蚀百分比) γ ($\gamma = 50 - X_{mp}/4$)^[13](表 2)。

双王角砾岩型金矿的形成具有多期多阶段成矿特征, 在同一钻孔中, 同一标高位置测试的不同样品, 可能存在不同成矿阶段的产物, 从而出现个别样品热电性参数值偏大或偏小, 所以采用各钻孔 X_{mp} 及 γ 的平均值来判断矿体延伸规模。钻孔 ZK18 中 X_{mp} 变化范围为 $-127.5 \sim 67.5$, 平均值为 -40.83 , 剥蚀百分比平均为 60.12%, 认为矿体为中下部出露, 向

深部仍有小规模的延伸。但在该钻孔的垂向上, γ 值波动起伏较大, 表明矿化不集中, 矿体出露不是很连续; 钻孔 ZK30 中 X_{mp} 变化范围为 $-105.0 \sim 60.0$, 平均值为 -14.69 , 剥蚀百分比平均为 53.67% , 为矿体中部热电性特征, 认为向深部仍具有较好的矿化前景; 钻孔 ZK40 中 X_{mp} 变化范围为 $-100.0 \sim 95.0$, 平均值为 -15.90 , 剥蚀百分比平均为 53.98% 。在该钻孔垂向上, 从上到下呈现由低 \rightarrow 高 \rightarrow 低的韵律式变化, 与黄铁矿热 P 型出现率由多 \rightarrow 少 \rightarrow 多的情况一致, 且在标高 850 m 处 γ 值和 P 型出现率大小出现反转现象, 其黄铁矿的热电性参数 X_{mp} 也由 -100.0 上升为 12.5 , 据此判断 850 m 标高附近可能有新矿体的出露, 自 850 m 向深部矿体仍有较大规模的延伸。

4 结 论

本文根据三个钻孔中黄铁矿单矿物晶体形态及热电性特征, 对双王金矿的深部矿化远景进行了预测。

(1) 黄铁矿晶体标型分析表明双王金矿床中黄铁矿的晶体形态较为简单, 主要出现三种习性的晶形, 其中 $\{hk0\}$ 为优势晶形, 晶形出现率由高到低依次为 $\{hk0\}$ 、 $\{100\}$ 、 $\{111\}$ 。

(2) 双王金矿床中黄铁矿一般属于混合热电导型, 个别样品出现单一 N 型或 P 型, 总体上黄铁矿热电系数变化范围为 $-322.0 \sim 346.7 \mu V \cdot ^\circ C^{-1}$, 集中区为 $-200 \sim 300 \mu V \cdot ^\circ C^{-1}$; 热电系数离散度较小; P 型黄铁矿出现率在垂向上呈韵律式变化规律, 平均为 50.86% 。钻孔 ZK18 中黄铁矿的热电性参数 X_{mp} 平均值为 -40.83 , 平均剥蚀百分比为 60.12% ; 钻孔 ZK30 中 X_{mp} 平均值为 -14.69 , 平均剥蚀百分比为 53.67% ; 钻孔 ZK40 中 X_{mp} 平均值为 -15.90 , 平均剥蚀百分比为 53.98% 。

(3) 结合同一钻孔中黄铁矿晶型和热电性特征及在空间上的变化规律, 推断矿体 KT9 中钻孔 ZK18、矿体 KT8 中钻孔 ZK30 和 ZK40 深部都有较好的找矿前景, 其中钻孔 ZK40 研究区段位于矿体中部, 深部矿化最好, 在标高 850 m 附近推断有新矿体出露; 钻孔 ZK18 研究区段位于矿体中下部, 深部矿化前景次之, 在标高 950 m 附近矿化程度最好; 钻孔 ZK30 研究区段位于矿体中部, 深部矿化相对较差, 在标高 960 m 附近矿化程度最好。

参考文献 (References):

[1] 李胜荣, 陈光远, 绍伟, 等. 胶东乳山金矿黄铁矿形态研究 [J]. 地

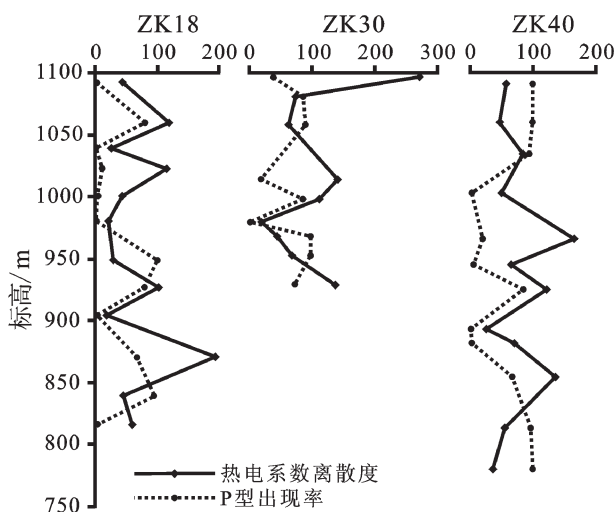


图 7 各钻孔黄铁矿热电系数离散度与 P 型出现率垂向对比图

Fig.7 Vertical comparison between thermoelectrical coefficient dispersions of pyrites and frequencies of P-type pyrites from various drill holes

质找矿论丛, 1994, 9(1):79-86.

- Li Shengrong, Chen Guangyuan, Shao Wei, et al. Study on morphology of pyrite from Rushan gold mines, Jiaodong region [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 1994, 9 (1):79-86(in Chinese with English abstract).
- [2] 侯满堂, 金玉铭, 胡继民, 等. 太白庙金矿床黄铁矿晶体形态学研究及其找矿意义 [J]. 陕西地质, 1999, 17(1):26-32.
Hou Mantang, Jin Yuming, Hu Jimin, et al. A study for the crystal morphology of pyrite in Taibaimiao's gold deposit and ore-finding significance [J]. Geology of Shaanxi, 1999, 17(1):26-32(in Chinese with English abstract).
- [3] 李惠, 郑涛, 汤磊, 等. 陕西双王金矿床的原生叠加晕模式 [J]. 桂林工学院学报, 2000, 20(4):327-333.
Li Hui, Zheng Tao, Tang Lei, et al. The model of superimposed primary halos in Shuangwang gold deposit, Shaanxi [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2000, 20 (4):327-333 (in Chinese with English abstract).
- [4] 张军. 陕西双王金矿床地质特征及找矿标志 [J]. 桂林工学院学报, 2004, 24(1):19-23.
Zhang Jun. Geological characteristics and indicators in Shuangwang gold deposit [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2004, 24 (1):19-23(in Chinese with English abstract).
- [5] 王可新, 王建平, 刘家军, 等. 陕西太白双王金矿床地质特征及稳定同位素地球化学研究 [J]. 中国地质, 2012, 39(5):1359-1374.
Wang Kexin, Wang Jianping, Liu Jiajun, et al. Geological characteristics and stable isotopes study of Shuangwang gold deposit in Shaanxi Province [J]. Geology in China, 2012, 39(5):1359-1374 (in Chinese with English abstract).
- [6] 石准立, 樊硕诚, 张文宣, 等. 陕西双王金矿床地质特征及其成因 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1989:1-113.

- Shi Zhunli, Fan Shuocheng, Zhang Wenxuan, et al. Geological Characteristics and Ore Genesis in Shuangwang Gold Deposit in Shaanxi Province, China [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1989:1-113(in Chinese with English abstract).
- [7] 饶东平,曹新志,徐伯骏,等.新疆金窝子矿床黄铁矿标型特征及其找矿意义[J].黄金,2010,31(10):10-16.
- Rao Dongping, Cao Xinzhi, Xu Bojun, et al. Typomorphic characteristics of pyrite and its prospecting significance in Jinwozi deposit, Xinjiang [J]. Gold, 2010, 31 (10):10-16 (in Chinese with English abstract).
- [8] 曹焯,李胜荣,敖翀,等.黄铁矿热电性特征在冀西石湖金矿床中的应用[J].中国地质,2008,35(4):746-753.
- Cao Ye, Li Shengrong, Ao Chong, et al. Application of thermoelectric properties of pyrite in gold exploration in the Shihu gold deposit, Western Hebei [J]. Geology in China, 2008, 35 (4): 746-753(in Chinese with English abstract).
- [9] 初凤友,胡大千,于洪林,等.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),2004,34(4):531-535.
- Chu Fengyou, Hu Daqian, Yu Honglin, et al. The significance of crystal form typomorphism of pyrite in assessment of gold deposit[J]. Journal of Jiling University (Earth Science Edition), 2004, 34(4): 531-535(in Chinese with English abstract).
- [10] 陈光远,孙岱生,绍伟,等.胶东金矿成因矿物学与找矿[M].重庆:重庆出版社,1989.
- Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Shao Wei, et al. Genetic Mineralogy of Gold Deposit in Jiaodong Region with Emphasis on Gold prospecting [M]. Chongqing:Chongqing Press, 1989 (in Chinese with English abstract).
- [11] 曾祥涛.陕西省太白县双王金矿床黄铁矿标型特征研究及深部预测[D].中国地质大学(北京),2012:1-46.
- Zeng Xiangtao. Typomorphic Characteristics of Pyrite and Deep Prognosis of the shuangwang Gold Deposit, in Taibai, Shaanxi Province[D]. China University of Geosciences(Beijing), 2012:1-46 (in Chinese with English abstract).
- [12] 杨竹森,李红阳,高振敏,等.胶东北部超高品质金矿黄铁矿热电性研究[J].矿床地质,2000,19(4):307-314.
- Yang Zhusen, Li Hongyang, Gao Zhenmin, et al. A study on thermoelectricity of pyrite from superhigh-grade gold deposits, Northern Jiaodong [J]. Mineral Deposits, 2000, 19 (4):307-314(in Chinese with English abstract).
- [13] 权志高.庞家河、左家庄金矿床载金矿物黄铁矿热电性的研究[J].矿产与地质,1995,9(6):509-513.
- Quan Zhigao. A study on thermoelectricity of gold-bearing pyrite in Pangjiahe and Zuojiashuang deposits [J]. Mineral Resources and Geology, 1995, 9(6):509-513(in Chinese with English abstract).

The crystal forms and thermoelectricity of pyrite from the Shuangwang gold deposit, Shaanxi Province and their applications to metallogenic prognosis

ZHANG Fang-fang¹, WANG Jian-ping¹, LIU Chong-hao¹, CAO Rui-rong²,
CHENG Jian-jun², YANG Yong-rong², QI Feng², WANG Luo²

(1.State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2.Shaanxi Taibai Gold Mining Co., Ltd., Taibai 716000 Shaanxi, China)

Abstract: Pyrite is one of the most important gold-bearing minerals, and its crystal forms and thermoelectricity have important implications to the prospecting and evaluation of gold deposits. Based on systematic sampling from drill holes ZK18, ZK30 and ZK40 in the Shuangwang breccias-type gold deposit, the authors mainly studied the crystal forms and thermoelectricity of pyrite, and have reached the following conclusions. The crystal forms of pyrite are fairly simple, comprising cube, octahedron, pentagonal dodecahedron and their composite combination, with the main crystal habit being {hk0}. Overall, the number of crystal forms is in decreasing order of {hk0}, {100}, {111}. The thermoelectric conductive type of pyrite is mainly N-P type, with the thermoelectric coefficients of N-type pyrite ranging from -322.0 to $-1.7 \mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ and those of P-type pyrite ranging from 1.7 to $346.7 \mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$; the thermoelectric parameters of pyrite vary greatly; the degree of denudation varies from 53.67% to 60.12%. All of the above data indicate a better exploration prospect at the depth of drill holes ZK18, ZK30 and ZK40 in No. 9 and No. 8 ore bodies.

Key words: pyrite; crystal form; thermoelectricity; Shuangwang gold deposit; Shaanxi

About the first author: ZHANG Fang-fang, female, born in 1990, master candidate, majors in mineralogy, petrology and mineral deposits; E-mail: zff19901008@126.com.

About the corresponding author: WANG Jian-ping, male, born in 1972, associate professor, mainly engages in the study of mineral deposits; E-mail: jpwang@cugb.edu.cn.