山西堡子湾金矿床黄铁矿标型特征①

卿 敏[1]，张立庆[2]，牛翠伊[1]，雷时斌[3]，赵利青[1]
(1. 武警黄金地质研究所，河北 廊坊 065000；2. 中国冶金地质勘查工程总局 三局 311 队，山西 侯马 043000；3. 武警黄金指挥部，北京 101102)

摘要：从成因矿物学及找矿矿物学观点出发，系统研究了堡子湾金矿床黄铁矿的产状、形态、化学成分、热电性质和热爆特征。该矿床黄铁矿富含 Co、Ni、As、Ag，Au 与 W、Cu、Hg、Ag、As、Bi、Ni、Co、Pb 相关性较好，构成特征元素组合，与通常认为的与火山-次火山热液有关的明矾石-高岭土型浅成中低温热液型金矿床特征元素及其组合基本一致。黄铁矿空穴型导电性与 As、Au 正相关，与 Co、Ni 呈明显的负相关，P 型和 N 型导电性是由 As/（Co+ Ni）值决定的。利用黄铁矿热电性及热爆特征空间分带与赋矿空间的对应关系进行成矿预测，效果明显。

关键词：金矿床；黄铁矿；标型特征；山西
中图分类号：P618.51；P578.2+5 文献标识码：A 文章编号：1006-558X（2001）04-0022-06

1 矿床地质概况

堡子湾金矿是一个以金为主，伴生银、铜及铅锌的多金属矿床，是近年来在山西东北部发现的一个特殊的线性隐爆角砾岩型中型金矿床。矿床位于华北板块北缘中国最著名的金银-多金属成矿带的次级成矿带中。该带为一呈 NEE 向线性展布、同岩浆作用形成的张剪性断裂构造破碎带。印支期隐爆角砾岩体、石英二长斑岩（石英二长斑岩角砾岩）、石英二长岩（243.7 Ma，K-Ar 法）、燕山期花岗斑岩［（105±6）Ma，Rb-Sr 法］以及矿体和矿脉多以脉状和短透镜状沿构造破碎带方向展布[1]。矿体有 2 种类型，一种产于浅部，平面上呈短透镜状、剖面上呈楔状的厚大矿体，该类金矿体埋藏浅，规模大，品位高；另一类为产于深部的平行薄脉状贫矿体。矿石主要为金银-多金属富硫化物角砾岩型。黄铁矿（褐铁矿）是最主要的金属矿物，其次为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、硫砷铜矿及自然金、自然银、银金矿、辉银矿等。非金属矿物以石英、斜长石为主，其次为碳酸盐矿物、明矾石、玉髓、高岭土。高岭土化为其特征蚀变类型。堡子湾金矿属与次火山岩有关的明矾石-高岭土型浅成中低温热液型金矿床，形成于印支期［（245.9±0.3）Ma，^{39}Ar-^{40}Ar］，在燕山期［（142.9±0.5）Ma］受过热事件的影响[2]。

2 黄铁矿标型特征

2.1 产状、形态

堡子湾金矿床黄铁矿形成有 3 期，早期黄铁矿多为中细粒、自形—半自形立方体、

① 仅以此文纪念我国著名矿物学家陈光远教授。

收稿日期：2001-09-18。李莉编辑。

作者简介：卿敏（1967-），男，四川安县人，武警黄金地质研究所高级工程师，博士研究生，从事金矿床地质及盲矿预测研究。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www

五角十二面体，呈星点弥散于整个构造-岩浆角砾岩带，含 Au 低。中期黄铁矿呈细脉状，以他形—半自形碎裂状及团块状集合体产出，大多为五角十二面体，并有立方体、八面体及其聚形晶，压碎结构发育，常被较晚的黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、硫砷铜矿及金银矿沿其裂隙充填交代，为主要载金矿物。晚期黄铁矿晶纹发育，粒度较粗，独立出现或与石英、碳酸盐矿物镶嵌成脉状，形态多为八面体，少量立方体晶形，金矿化较弱。

2.2　化学成分

2.2.1　微量元素含量　堡子湾金矿黄铁矿微量元素含量化学分析结果见表 1，电子探针分析结果见表 2。

黄铁矿主成分(Fe 45.903%, S 53.595%)

表 **1**　堡子湾金矿黄铁矿微量元素含量　　w (B) /10^{-6}

采样位置	标高/ m	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	As	Sb	Bi	Hg	W	Mo
	1 448	3. 60	134. 0	17 038	611	256	302	286	307	2. 00	89	0. 24	6. 8	4. 8
	1 398	0. 11	10. 7	761	120	50	308	394	68	0. 48	21	0. 14	2. 9	1. 5
	1 335	13. 4	28. 4	805	516	81	246	1 260	263	2. 40	14	0. 19	3. 1	0. 5
	1 309	3. 50	127. 0	1 205	539	141	165	468	139	1. 50	41	0. 15	2. 5	0. 5
ZK131	1 308	0. 93	8. 9	20	294	50	60	110	693	1. 10	36	0. 06	0. 6	1. 0
	1 303	0. 15	10. 6	29	506	50	140	312	120	0. 68	6. 4	0. 11	3. 6	1. 0
	1 227	0. 65	12. 8	38	436	50	274	482	68	0. 77	4. 6	0. 15	3. 1	0. 5
	1 250	0. 28	52. 6	20	5 790	50	70	233	130	1. 60	22	0. 14	1. 9	0. 5
	1 228	11. 0	92. 0	3 097	1 901	244	239	406	73	1. 40	75	0. 26	0. 8	0. 5
	1 260	0. 37	50. 1	111	2 383	289	228	494	85	0. 87	12	0. 19	5. 6	5. 3
	1 227	0. 28	19. 9	18	838	177	157	371	140	1. 10	7	0. 18	4. 9	2. 3
	1 192	0. 48	24. 2	41	1 235	64	552	386	99	0. 97	11	0. 09	2. 5	0. 8
ZK132	1 158	12. 65	27. 1	129	2 997	171	204	336	305	1. 20	2. 7	0. 13	5. 3	0. 5
	1 138	0. 41	26. 6	195	2 057	1 697	135	366	293	1. 40	8. 8	0. 12	3. 4	1. 5
	1 109	2. 10	78. 0	794	4 958	5 546	146	535	360	4. 10	8. 6	0. 19	1. 0	6. 4
	1 094	1. 70	43. 5	803	4 846	3 605	151	253	137	1. 40	13	0. 20	3. 5	1. 8
	1 442	13. 9	17. 9	14 478	1 343	12	210	469	73	1. 20	78	0. 28	4. 2	1. 5
	1 373	4. 80	21. 7	1 260	1 083	186	239	314	74	0. 48	34	0. 19	0. 8	0. 5
	1 313	1. 70	37. 5	395	853	50	186	389	226	1. 40	36	0. 23	0. 6	0. 5
	1 253	0. 30	24. 1	49	865	80	148	393	142	0. 97	16	0. 13	1. 1	1. 8
	1 238	9. 30	62. 8	1 770	1 608	241	229	321	234	2. 10	31	0. 17	1. 1	0. 5
ZK133	1 236	1. 20	48. 8	367	1 902	211	404	251	108	0. 97	24	0. 17	2. 5	0. 5
	1 212	3. 10	108. 0	9 817	1 557	387	133	249	515	6. 90	18	0. 26	4. 8	0. 5
	1 199	148. 00	78. 2	9 939	3 470	297	230	317	300	2. 50	19	0. 29	7. 5	1. 0
	1 188	2. 00	106. 0	9 938	342	1 720	251	419	293	6. 70	14	0. 39	1. 9	0. 5
	1 173	1. 40	63. 6	347	1 083	80	202	529	117	11. 00	22	0. 14	0. 6	1. 1
	1 123	0. 42	42. 2	60	72	50	206	336	121	0. 97	21	0. 10	3. 5	0. 5
	1 083	0. 06	1. 1	50	149	50	187	285	14	0. 29	12	0. 12	0. 5	0. 5
		0. 8	1. 7	40	1 750	100	350	380	600	0. 3	30. 0	0. 02		
		0. 5	1. 7	150	500	130	110	250	1	0. 3	80. 0	0. 10		
		2. 0	2. 2	750	11 300	1 700	45	240	300	22. 5	0. 02			
其他①		0. 5	1. 9	150	11 000	180	215	375	26	19. 5	27. 5	0. 10		
		5. 6	2. 5	140	750	420	145	225	194	0. 3	80. 0	0. 08		
		10. 5	3. 7	2 500	3 000	130	25	20	360	3. 5	12. 80	0. 25		
		1. 0	63. 0	500	1 250	200	130	260	210	2. 0	38. 0	0. 15		
		18. 0	4. 0	80	1 000	190	115	250	88	0. 3	35. 0	0. 02		

①为黄铁矿单矿物分析结果，据李景云等，1994；其余样品由武警黄金指挥部测试中心分析，1998。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www

表 2 堡子湾金矿黄铁矿电子探针定量分析结果

w (B) / %

样号	S	Fe	Co	Ni	As	Ag	Sb	Au	Pb
H1	53.99	45.61	0.21	0.30	0	0	0.11	0	0
H2	53.89	45.38	0.08	0.03	0.04	0.04	0	0.02	0.08
H3	53.18	46.28	0	0	0.10	0	0	0.03	0
H4	53.32	46.34	0.01	0.26	0.11	0	0	0	0

注: Cu、Zn、Hg 含量均为 0; 由中国地质大学 (北京) 电子探针室测试, 1998。

与黄铁矿化学成分理论值 (Fe 46.55%, S53.45 %) 相比, 属富 S 贫 Fe 黄铁矿。与大多数金矿床类似, 堡子湾金矿黄铁矿化学成分的显著特点是杂质元素复杂, 富含 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Co、Ni、As、Sb、Bi, 其次是 Mn、V、Ti、W、Mo、Hg 等, Co 含量多大于 100×10^{-6}, Co/Ni 平均值为 0.61 (40 个样品), (Pb+Zn) / (Co+Ni) 平均为 4.95, Au 含量多小于 Ag, Au/Ag 平均值为 0.03。黄铁矿微量元素含量变化很大, 说明黄铁矿的多期性及成矿的多阶段性。Co、Ni、As、Ag 高含量及微量元素特征比值显示矿化与火成活动有关[3~4]。

2.2.2 *微量元素组合* 相关分析结果表明 (表 3), Au 与 W、Cu、Hg、Ag、As、Bi、Ni、Co、Pb 相关性较好, 构成特征元素组合, 与通常认为的火山+次火山热液有关的明矾石-高岭土(高硫化物型)浅成中低温

表 3 黄铁矿微量元素相关系数

元素	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	As	Sb	Bi	Hg	W	Mo	α_P
Au	1.00													
Ag	0.352	1.00												
Cu	0.487	0.545	1.00											
Pb	0.113	0.271	0.048	1.00										
Zn	-0.1	0.205	-0.02	0.631	1.00									
Co	0.121	0.01	0.098	-0.212	-0.197	1.00								
Ni	0.255	-0.026	-0.078	-0.132	0.034	0.151	1.00							
As	0.273	0.259	0.239	0.118	0.215	-0.37	-0.138	1.00						
Sb	0.047	0.482	0.252	0.188	0.201	-0.108	0.160	0.293	1.00					
Bi	0.266	0.412	0.628	-0.192	-0.215	0.076	-0.101	-0.002	-0.064	1.00				
Hg	0.372	0.564	0.713	0.323	0.197	0.061	0.129	0.075	0.358	0.349	1.00			
W	0.505	0.215	0.505	0.092	-0.096	0.113	-0.008	0.102	-0.102	0.025	0.261	1.00		
Mo	-0.001	0.222	0.179	0.258	0.546	-0.057	0.071	0.109	0.024	0.085	0.087	0.279	1.00	
α_P①	0.19	0.026	0.046	0.045	-0.117	-0.351	-0.458	0.677	-0.109	-0.029	-0.171	0.176	-0.081	1.00

①参数 α_P 为黄铁矿 P 型导电性出现率 (%), α_P= 黄铁矿 P 型导电性颗粒数/ (黄铁矿 P 型导电性颗粒数+ 黄铁矿 N 型导电性颗粒数)。

热液型金矿床特征元素组合[5~7]基本一致。

R 型聚类将微量元素划分为 4 组 (图 1): 1) Au、W、Ag、Cu、Hg、Bi、 (As)、α_P、Sb; 2) Pb、Zn、Mo; 3) Ni; 4) Co。Au 与 W、Ag、Cu、Hg、Bi、As、Sb 自成一组; 而 Pb、Zn、Mo 自成一组, 可能说明主要铅锌矿化和主要金矿化是不同阶段的产物; Co、Ni 各自成体系。

2.2.3 *微量元素空间变化规律* 黄铁矿中微量元素在空间上有较明显的分带性。Cu、Pb、Zn 与 Au、Ag 空间位置基本一致, As、Sb、Hg 位于矿体中、上部, Bi、W、Mo、Co、Ni 位于矿体尾部。因子分析表明, Au 与 Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、W 位于同一组内, 关系密切, 构成金矿化的有效指示元素。利用表 1 列出的 13 号勘探线 3 个钻孔不同标高黄铁矿中微量元素求得的元素垂向分带序列及特征指示元素为: As、Sb、Hg—Au、Ag、Pb、Zn、Cu—Bi、W、Mo—Co、Ni。黄铁矿中微量元素得出的地球化学异常

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www

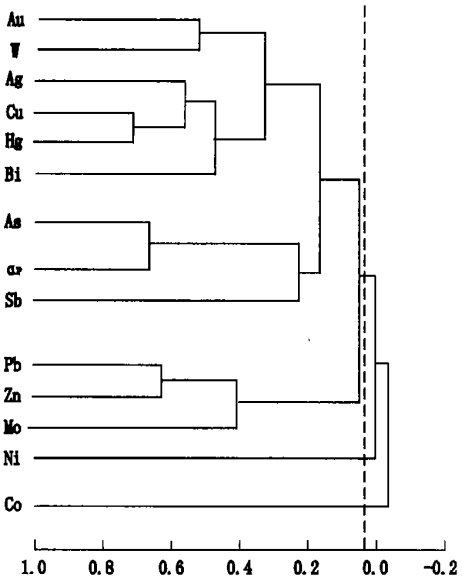

图 1　黄铁矿微量元素 R 型聚类谱系图

分带模式和原生晕得出的结论基本一致，但黄铁矿中微量元素的原生晕有更高度的浓集，异常的宽度和衬度也大大超出了原生晕。

2.3　热电性

2.3.1　*热电性与微量元素的关系*　黄铁矿 P 型导电性出现率（α_P）与 As、Au、W、Cu、Ag、Pb 呈正相关，尤其与 As 、Au 关系密切，相关系数分别达 0.67，0.19，并与 Au、W、Ag、Cu、Hg、Bi、As、Sb 聚类为一组，和 As 同属一个因子。黄铁矿中 As、Au、W、Ag、Cu、Hg 等矿体中、上部晕元素高含量值决定了其空穴导电型。而 P 型导电性出现率与 Co、Ni 呈明显的负相关，相关系数分别为 - 0.351、- 0.458 ，说明 Co、Ni 决定了黄铁矿电子型热电性质。As/（Co+ Ni）值大小是决定黄铁矿电动势符号的决定因素。黄铁矿热电性分带性内因是其中微量元素含量的空间分带性，反映了成矿时物理化学条件变化而引起的元素沉淀的结果。

2.3.2　*热电性时空变化规律*　堡子湾金矿床所测的 8 000 余粒黄铁矿中，以 N 型为主，占 82%，其变化范围为 - 52~ - 768 μV/ ℃，集中在 - 150~ - 300 μV/ ℃，P 型导电型占 18%，其变化范围为 87~ 799 μV/ ℃，离散性极强，反映其形成的多期、多阶段性。P 型导电型黄铁矿集中出现在第二世代。

黄铁矿热电性空间分带性明显，P 型黄铁矿多产于含 Au 矿体中部及偏上部位，顺矿体倾向和朝侧翼方向为 P—N 或 N—P 型黄铁矿所取代，最后在矿体延伸尖灭处和矿体侧翼向外为 N 型黄铁矿。就 α_P 值而言，有矿化异常显示，$\alpha_P > 10\%$；矿体上部 $\alpha_P > 15\%$；中部或偏上部位 α_P 为 25% ~ 30%；下部及两侧翼 $\alpha_P < 10\%$（图 2）。

2.4　黄铁矿的热爆特征

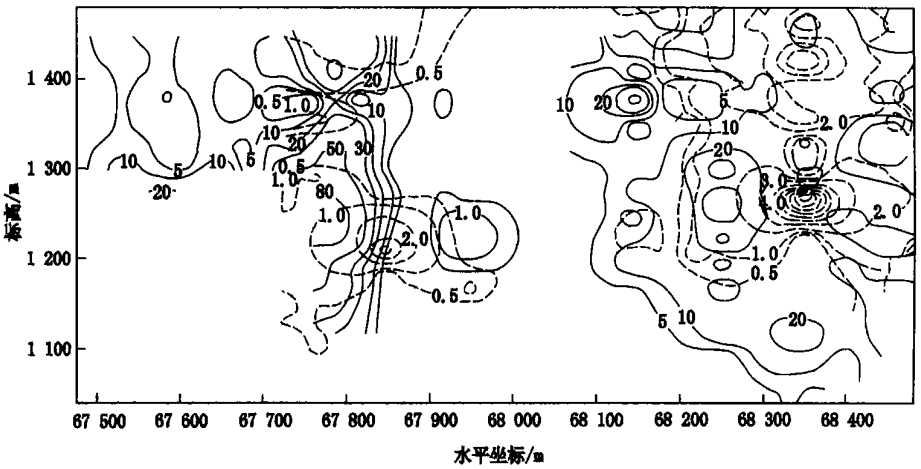

图 2　黄铁矿 α_p/μV·℃$^{-1}$值（实线）、w（Au）/10^{-6}（虚线）垂直纵投影等值线图

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www

2.4.1 爆裂温度（T）、起爆温度（T_b）特征及其与金矿化的关系 堡子湾金矿床黄铁矿爆裂温度的一个显著特点是多值性，一般一个样品具有 2~ 5 个爆裂温度，反映了黄铁矿的多期、多阶段性，或受到多期次热液扰动、叠加，和矿床的多次脉动成矿（多阶段性）是相吻合的。

黄铁矿爆裂温度区间较宽（110~ 360 ℃），成矿温度变化范围大，各个阶段成矿热液叠加明显。有 3 个比较明显的峰值，即 110~ 220、230~ 290 和 300~ 390 ℃，该温度区间分别对应 3 个世代黄铁矿，与均一温度得出的结论完全一致。

黄铁矿的起爆温度变化在 73~ 249 ℃，温度范围较大，矿液脉动变化性明显。

金矿化和黄铁矿起爆温度值大小成反比，起爆温度小于 160 ℃的黄铁矿分布范围和金矿体的分布范围基本一致。起爆温度低温槽区反映了矿液流动、运移的方向，因为起爆温度低的黄铁矿基本上是在中、晚阶段中温和低温热液中形成，或早期形成的黄铁矿遭受晚阶段低温热液叠加的产物。

2.4.2 爆裂活度（N）特征及其与金矿化的关系 黄铁矿爆裂活度变化在 60~ 2 477，平均 531（黄铁矿样重 2 g，40~ 60 目，加热温度区间 0~ 400 ℃）。Au 与 N 值为正相关，相关系数 0.43。$N>500$ 的范围与金矿体的范围基本一致（图 3）。

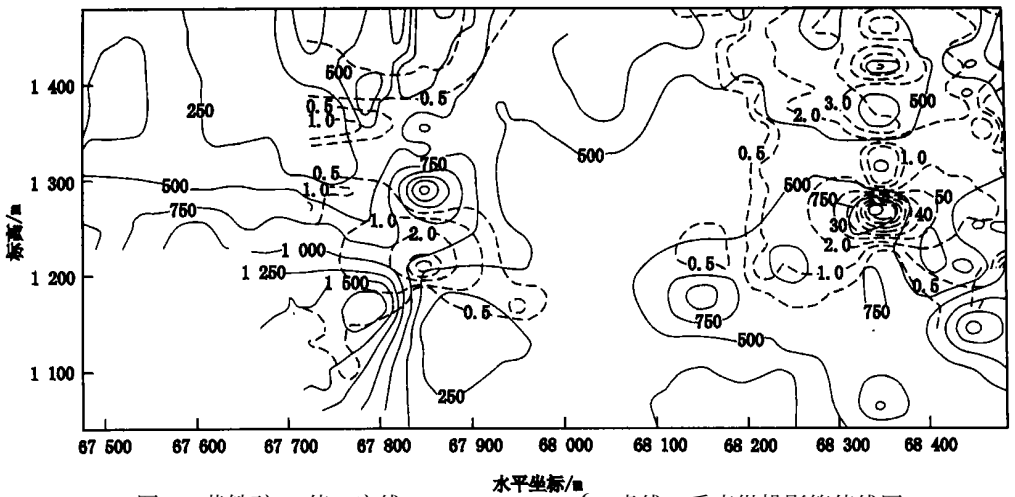

图 3 黄铁矿 N 值（实线）、w（Au）/10^{-6}（虚线）垂直纵投影等值线图

3 结 论

1) 黄铁矿标型特征和矿床地质特征表明，堡子湾金矿床为与次火山岩浆热液有关的明矾石-高岭土（高硫化物型）浅成中低温线状爆破角砾岩型金矿床。

2) 黄铁矿标型特征与已知金矿体有较好的空间对应关系，利用黄铁矿 α_P 值，起爆温度及爆裂活度平面、剖面、纵投影立体三维填图，综合预测找矿靶位 4 处，验证效果明显。

参考文献:

[1] 李景云，王振玉，魏广庆，等. 山西堡子湾金矿成矿规律研究 [R]. 太原：冶金部第三地质勘查局地勘院，1994.

[2] 雷时斌，卿敏，牛翠伊，等. 山西大同大吴窑矿区赋矿规律与找矿远景评价 [R]. 河北 廊坊：武警黄金地质研究所，2000.

[3] 陈光远，孙岱生，殷辉安，等. 成因矿物学与找矿矿物学 [M]. 重庆：重庆出版社，1987.

[4] 陈光远，孙岱生，周若珣，等. 胶东郭家岭花岗闪长

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www

岩成因矿物学与金矿化 [M]. 北京：中国地质大学出版社，1993.

[5] Hayba D O. Geologic, mineralogic and geochemical characteristics of volcanic-hosted epithermal precious-metal deposits [J]. Rer. Econ. Geol., 1986, 2: 129-167.

[6] Heald P, Foley N K, Hayba D O. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits-acid-sulfate and adularia-sericite types [J]. Economics Geology, 1987, 82 (1): 1-26.

[7] Spooner E T C. Magmatic sulphide/volatile interaction as a mechanism for producing chalcophile element enriched, Archean Au-quartz, epithermal Au-Ag and Au skarn hydrothermal ore fluids [J]. Ore Geology Reviews, 1993, 7 (5): 359-378.

Typomorphic characteristics of pyrite in the Puziwan gold deposit, Shanxi

QING Min[1], ZHANG Li-qing[2], NIU Cui-yi[1], LEI Shi-bin[3], ZHAO Li-qing[1]

(1. *Gold Geological Institute of CAPF, Langfang, Hebei* 065000, *China*; 2. *No.* 311 *Party of No.* 3 *Bureau of China Metallurgy Geology exploration engineer Bureau, Houma, Shanxi* 043000, *China*; 3. *Gold Headquarters of CAPF, Beijing* 100102, *China*)

Abstract: Utilizing the theories of mineragenv and prospecting mineralogy, we studied the attitude, morphotype, chemical composition, pyroelectricity and thermal explosion of pyrites in the Puziwan gold deposit. The pyrites of the doposit are enriched with Co, Ni, As and Ag. Au has well correlation with Cu, Hg, Ag, As, Bi, Ni, Co, Pb. These have formed the characteristic association of elements which are in coincidence with those of alunite-Kaolin type mesothermal-epithermal gold deposits related to volcanic-subvolcanic hydrothermal solutions. The hole type conductance of pyrite appears positive correlation with As, Au, and appears negative correlation with Co, Ni. The P type and N type conductance of pyrites are dominated by As/ (Co+ Ni) value. It has great efficiency in metallogenic prognosis by the corresponding relation between the space zoning of the pyroelectricity and thermal explosion of pyrite and host space of ore deposits.

Key words: gold deposit; pyrite; typomorphic characteristics; shanxi

---

《黄金地质》加入“万方数据库——数字化期刊群”的声明

为了实现科技期刊编辑、出版发行工作的电子化，推进科技信息交流的网络化进程，我刊现已入网“万方数据——数字化期刊群”，所以，向本刊投稿并录用的稿件文章，将一律由编辑部统一纳入“万方数据——数字化期刊群”，进入因特网提供信息服务。凡有不同意者，请另投它刊。本刊所付稿酬包含刊物内容上网服务报酬，不再另付。

“万方数据——数字化期刊群”是国家“九五”重点科技攻关项目。本刊全文内容按照统一格式制作，读者可上网查询浏览本刊内容，并征订本刊。

《黄金地质》编辑部

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www