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

要梅娟[1,2],申俊峰[1,2],李胜荣[1,2],曹 烨[1,2],刘秀艳[3]
YAO Mei-juan[1,2], SHEN Jun-feng[1,2], LI Sheng-rong[1,2], CAO Ye[1,2], LIU Xiu-yan[3]

1. 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;
2. 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;
3. 内蒙古克什克腾旗国土资源局,内蒙古 赤峰 025350
1. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*;
2. *Key Laboratory of Lithospheric Tectonics and Lithoprobing Technology, China University of Geosciences, Ministry of Education, Beijing* 100083, *China*;
3. *Hexigten Qi Bureau of Land and Resources, Chifeng* 025350, *Inner Mongolia, China*

摘要:通过研究前河金矿黄铁矿的热电性和热爆特征,探讨了成矿温度、矿体规模、成矿阶段等方面的信息,并应用矿物学填图法对该区的深部找矿远景进行了预测。研究结果表明,该矿床形成温度为222.3~360.1℃,为一中温矿床,各中段黄铁矿导型均以N型为主,总含量达81.4%,矿体剥蚀程度在空间上存在高—低—高式的韵律特征,表明金矿体在200m中段至520m中段产出稳定,往深部有延续的趋势;黄铁矿的热爆峰主要有3种类型,分别对应早、中、晚3个成矿阶段。

关键词:黄铁矿;热电性;爆裂温度;金矿化;河南前河金矿
中图分类号:P618.51;P631 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-2552(2008)05-0649-08

Yao M J, Shen J F, Li S R, Cao Y, Liu X Y. Thermoelectric and thermal decrepitation characteristics of pyrite in the Qianhe gold deposit, Songxian County, Henan, China, and their relationships with gold mineralization. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(5):649-656

Abstract: The authors discuss the ore-forming temperatures, orebody size and mineralization stages of the Qianhe gold deposit by using the thermoelectricity and decrepitation temperatures of pyrite from the deposit and evaluate the ore prospects at depths in the ore district by using mineralogical mapping. The study results show that the ore-forming temperatures of the deposit range from 222.3 to 360.1℃, indicating that the deposit is a mesothermal one. The thermoelectric properties of pyrite in all the levels are of the N type, with the total content reaching 81.4%. Spatially, the degree of erosion of the orebody shows the rhythmic feature, i.e. being from high to low and again to high, which indicates that the gold orebody is persistent form the 200 to 520 m levels and has a tendency to continue downward. There are mainly three types of decrepitation peak for pyrite, which correspond to the early, middle and late mineralization stages respectively.

Key words: Pyrite; thermoelectric properties; decrepitation temperature; gold mineralization; Qianhe gold deposit, Henan

前河金矿位于河南省嵩县旧县镇以南,地理坐标为E111°49′48″~E111°52′12″、N34°45′08″~N34°47′23″,矿区面积约10 km²。自20世纪80年代发现前河蚀变岩型金矿床以来,已有一些学者对其进行过研究,研究工作涉及矿床地球化学、矿物岩石特征、找矿方向[1-4]等方面。卿敏等①较为详细地总结了前河蚀变

收稿日期:2007-07-18;**修订日期**:2008-01-21
科技项目:高等学校创新引智计划项目(编号:B07011)资助。
作者简介:要梅娟(1981-),女,在读博士,从事矿床地球化学研究。E-mail:yaomeijuan1016@126.com

岩型金矿的地质地球化学特征,并进行了找矿预测,取得了有重要参考价值的结果。就本矿区目前的勘探和研究成果来看,对该区金矿的勘查主要是对控矿构造形迹的追踪,对于成因矿物学方面的研究还比较少。

黄铁矿热电性测量是前苏联和中国在找矿勘探中总结出的一种有效的矿(床)体快速定位预测方法[5-7],它在判断成矿温度、剥蚀程度、矿床规模、找隐伏矿体等方面均起到了重要作用[8-9]。热液成因的黄铁矿含有丰富的流体包裹体,不同成矿阶段形成的含金性不同的黄铁矿,由于形成过程中热液成分和物化条件的变化,其流体包裹体的发育程度和特征往往存在一定差异,导致在加热过程中黄铁矿内的流体包裹体热爆裂特点不同[10]。通过对黄铁矿热爆裂特征的研究,可以揭示有关矿床成因、成矿物理化学条件、黄铁矿含金性等方面的多种信息。

1 矿区的地质概况

嵩县前河金矿区位于华北地台南缘,华熊台隆熊耳山隆断区。区内有NW向的马超营大断裂和若干条NE向、近EW向的次级断裂分布。金矿体分布于近EW向的次级断裂带中。区内地层主要为中元古界,赋矿地层的岩性为熊耳群鸡蛋坪组流纹斑岩、英安岩、安山岩和马家河组安山岩、杏仁状安山岩夹凝灰岩。矿区断裂构造发育,大小断裂共19条,走向主要为近EW向,次为NE向(图1)。断裂多具有多期活动的特点,由于破碎带经历了不同期次、不同性质、不同方向的构造应力的叠加改造,在破碎带内发育初糜棱岩、碎裂岩、断层角砾岩、断层泥等韧脆性—脆性变形的岩石,并有强烈的钾化、硅化、绿帘石化、绢云母化、黄铁绢英岩化等蚀变。

金矿体严格受近EW向断裂的控制。含金构造蚀变带长3800 m,宽5~30 m,分东、中、西3个矿段。东矿段位于甚沟口-沟脑分水岭,矿带长1100 m,宽5~30 m,平均20 m。东矿段共圈定金矿体3个,以Ⅳ号矿体规模最大(图2),矿体长830 m,厚度最大14.97 m,平均3.05 m,呈不规则状、豆荚状,沿走向及倾向具膨缩、分支现象,产状在88线以西走向为95°,以东走向为110°,倾向NE,倾角58~76°,平均67°(图3),具浅部缓深部变陡的特点。金品位最高为238.0 g/t,平均7.87 g/t,预计金总储量约10 t。金矿石的主要矿石矿物有黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、磁黄铁矿、白钨矿、硅锌矿、红锌矿、自然金、银金矿等,主要脉石矿物有石英、钾长石、方解石等,次生矿物有褐铁矿、白铅矿、黄钾铁矾、针铁矿等。

通过宏观的野外观察并综合各类蚀变矿物组合之间的交代和脉体穿切关系:矿床的蚀变作用应是多期次相继发生的,但又不是连续的过程,可将前河金矿床的成矿划分为早、中、晚3个成矿阶段,即以石英为特征的早成矿阶段、以黄铁矿为特征的主成矿阶段和以方解石为特征的晚成矿阶段。

2 黄铁矿的产出特征

黄铁矿是区内最普遍、最主要的载金矿物,根据野外的脉体穿插关系和室内的镜下观察(图4),前河金矿之黄铁矿可以分为3期。

Ⅰ期黄铁矿产于黄铁矿-石英阶段。黄白色,以自形、半自形和碎裂为主,晶形以{100}、{211}、不规

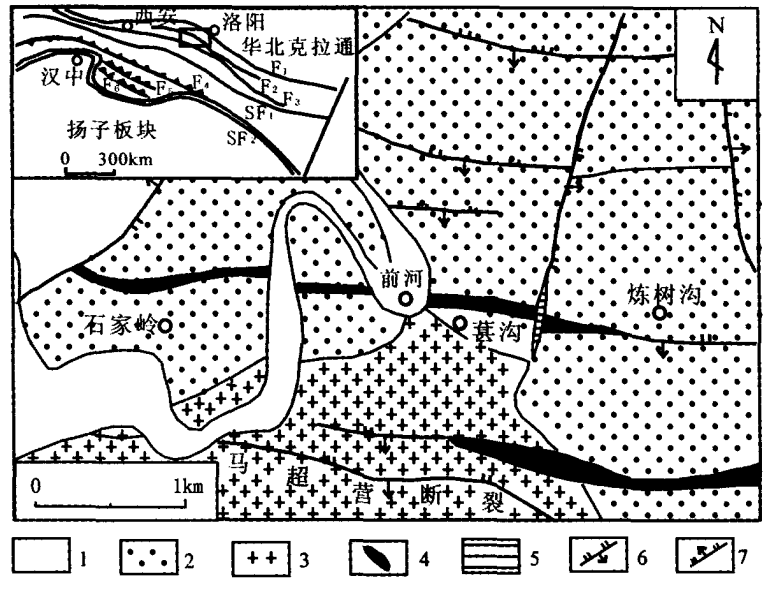


图1 河南前河金矿矿区地质简图[2,11]

Fig.1 Geological sketch map of the Qianhe gold district, Henan

1—第四系;2—中元古界熊耳群;3—燕山晚期斑状二长花岗岩;4—构造蚀变岩型金矿体;5—角砾岩脉;6—逆断层;7—正断层;F_1—秦岭北界冲断带;F_2—马超营断裂带;F_3—洛南-栾川断裂带;F_4—十堰冲断带;F_5—石泉-安康冲断带;F_6—红椿坝-利平冲断带;SF_1—商丹缝合带;SF_2—勉略缝合带

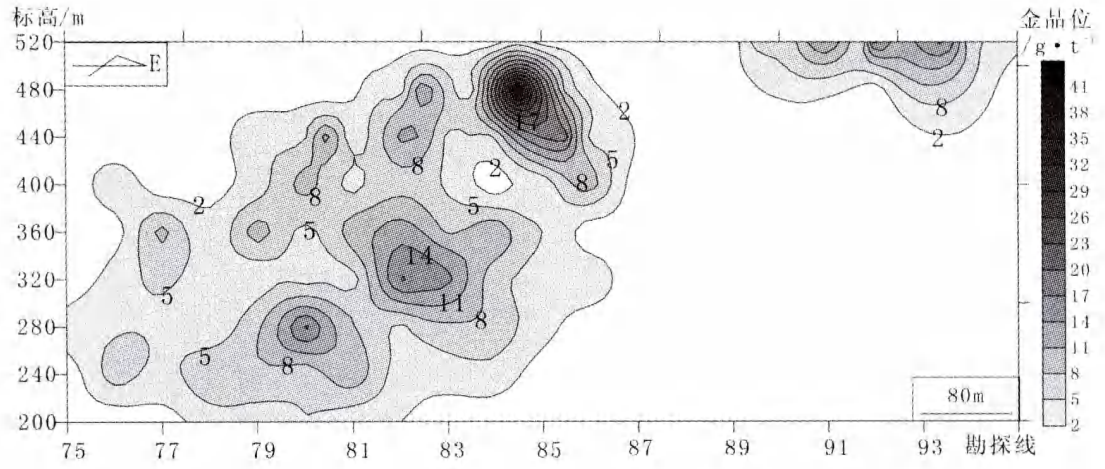


图2　前河金矿床Ⅳ矿体的形态及金品位等值线垂直纵投影图

Fig.2　Vertical projection of the shape and gold grade contours of orebody IV of the Qianhe gold deposit

则体为主,呈稀疏浸染状产出,且含量小于5%。

Ⅱ期黄铁矿产于石英-黄铁矿阶段。铜黄色和淡黄色,以它形和碎裂为主,晶形以{100}、{210}、{111}、{212}、不规则体、不规则团聚体为主,稠密浸染状产出,黄铁矿含量大于10%。

Ⅲ期黄铁矿产于石英-碳酸盐阶段。黄白色至淡黄色,晶形以{111}、{100}、{210}、不规则体为主,稀疏浸染状和稠密浸染状都有,黄铁矿含量小于5%。

3　研究方法和结果

3.1　热电性测试

利用北京航空航天大学研制的BHTE-06型热电系数测量仪，对矿区520~200 m的9个中段从75勘探线至91.5勘探线的37个样品进行了热电性测试。样品的选择中考虑了黄铁矿分布的规律性布局,每个样品随机取30粒,设定活化温度ΔT=49.5℃。

表1显示前河金矿的黄铁矿导型以N型为主,占总数的81.4%,P型为17.5%,混合型为1%。单粒黄铁矿热电系数α的变化范围为-511.2~+583.3 μV/℃,其中N型黄铁矿α变化于-49.5~-511.2μV/℃之间，集中区为-50~-300μV/℃;P型黄铁矿α变化于+45.2~+583.32 μV/℃之间,所占比率较小,且数值比较分散。

热电系数直方图(图5)显示,前河金矿的黄铁矿导型比较稳定，各中段的黄铁矿均以N型为主,整体上表现出较好的一致性，预示着矿体呈稳定的规模产出。

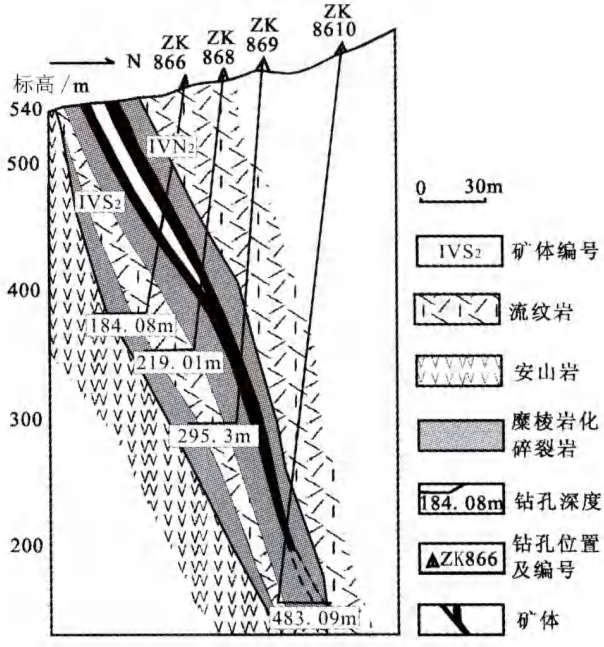


图3　前河金矿87号勘探线剖面(据文献①,有修改)

Fig.3　Profile of exploratory line 87 of the Qianhe gold deposit

3.2　热爆法测温

选取200 m中段至520 m中段的75至92勘探线之间的黄铁矿样品16件，在室内提纯并磨碎至40~60目,经显微镜下手工挑选,保证所选样品晶形完好,纯度达100%,取30mg进行热爆裂测试分析。样品测

表1 河南前河金矿黄铁矿的热电性特征

Table 1 Thermoelectric properties of pyrite from various levels in the Qianhe gold deposit

样品编号	N型热电系数α/-μV·℃$^{-1}$				P型热电系数α/-μV·℃$^{-1}$				混合型	剥蚀率/%
	最大值	最小值	平均值	出现频率/%	最大值	最小值	平均值	出现频率/%	出现频率/%	
20078	282.90	99.00	190.43	100.00	—	—	—	0.00	0.00	
20079	511.20	50.50	199.28	100.00	—	—	—	0.00	0.00	
20081	504.50	140.90	350.09	100.00	—	—	—	0.00	0.00	67.03
20082	233.50	85.20	128.30	50.00	415.90	146.00	230.10	42.00	8.00	
20083	203.80	97.70	156.77	94.12	189.30	189.30	189.30	5.88	0.00	
24075	280.70	77.60	176.40	100.00	—	—	—	0.00	0.00	
24079	441.90	136.40	270.30	100.00	—	—	—	0.00	0.00	65.33
24080	338.00	111.70	189.08	100.00	—	—	—	0.00	0.00	
24083	295.80	74.80	186.85	93.33	149.80		149.80	3.33	3.33	
28080	261.70	60.20	177.84	93.33	453.30	453.30	453.30	6.67	0.00	
28081	199.00	105.30	172.08	100.00	—	—	—	0.00	0.00	
28082	248.80	107.30	184.73	100.00	—	—	—	0.00	0.00	
28083	119.30	62.80	85.20	30.00	461.20	50.20	215.20	40.00	30.00	61.58
28083.5	341.30	74.80	180.77	63.33	542.90	94.30	240.06	36.67	0.00	
28084	222.20	96.60	182.04	100.00	—	—	—	0.00	0.00	
28085	289.20	140.00	172.00	100.00	—	—	—	0.00	0.00	
32075	110.60	53.60	90.10	25.00	484.30	61.70	216.50	67.00	8.00	
32076	187.50	81.10	132.88	33.30	438.40	45.20	224.09	60.00	6.67	
32080	277.30	51.10	151.40	50.00	558.40	51.30	360.53	30.00	20.00	47.04
32082	175.40	116.60	140.67	92.86	107.60	107.60	107.60	6.67	0.00	
32083	327.60	51.30	165.42	90.00	426,1	290.00	336.40	10.00	0.00	
32084	128.40	69.40	97.55	23.53	472.50	64.80	285.52	58.82	17.65	
36080	231.10	100.80	162.67	30.00	576.60	54.60	387.52	66.67	3.33	
36082	278.30	50.90	165.48	100.00	—	—	—	0.00	0.00	47.86
36086	240.70	87.10	172.58	100.00	—	—	—	0.00	0.00	
40077	295.80	93.50	211.10	100.00	—	—	—	0.00	0.00	
40080	212.80	53.70	169.64	70.00	141.70	83.00	104.70	30.00	0.00	75.00
40081.5	273.60	91.40	193.59	90.00	—	—	—	0.00	10.00	
40084	378.90	67.00	236.23	76.67	444.90	132.20	223.60	30.43	0.00	
44079	322.40	70.40	187.40	93.75	—	—	—	0.00	6.25	
44081	200.00	49.50	130.50	50.00	281.10	99.50	220.70	40.00	10.00	66.67
44084	385.70	84.40	184.65	96.67	—	—	—	0.00	0.00	
48080.5	413.50	133.30	214.43	90.00	142.20	142.20	142.20	10.00	0.00	
48082	460.90	155.60	239.52	90.00	583.30	583.30	583.30	10.00	0.00	70.12
48085.5	228.60	124.50	166.36	80.00	159.40	114.30	136.85	20.00	0.00	
52088.5	384.30	160.90	208.30	90.00	129.90	129.90	129.90	10.00	0.00	50.01
52091.5	—	—	—	0.00	464.80	84.10	324.86	100.00	0.00	

注："—"代表未检测出；测试精度为±0.05μV/℃

试在中国科学院地质与地球物理研究所进行，所用仪器为DT-5型矿物包裹体热爆测温仪。测试结果列于表2。

依据黄铁矿的起爆温度、爆裂温度范围、热爆曲线形态和主爆峰高的特点，将黄铁矿的热爆裂曲线归纳为以下3种基本类型(图6)：Ⅰ型爆裂曲线为产

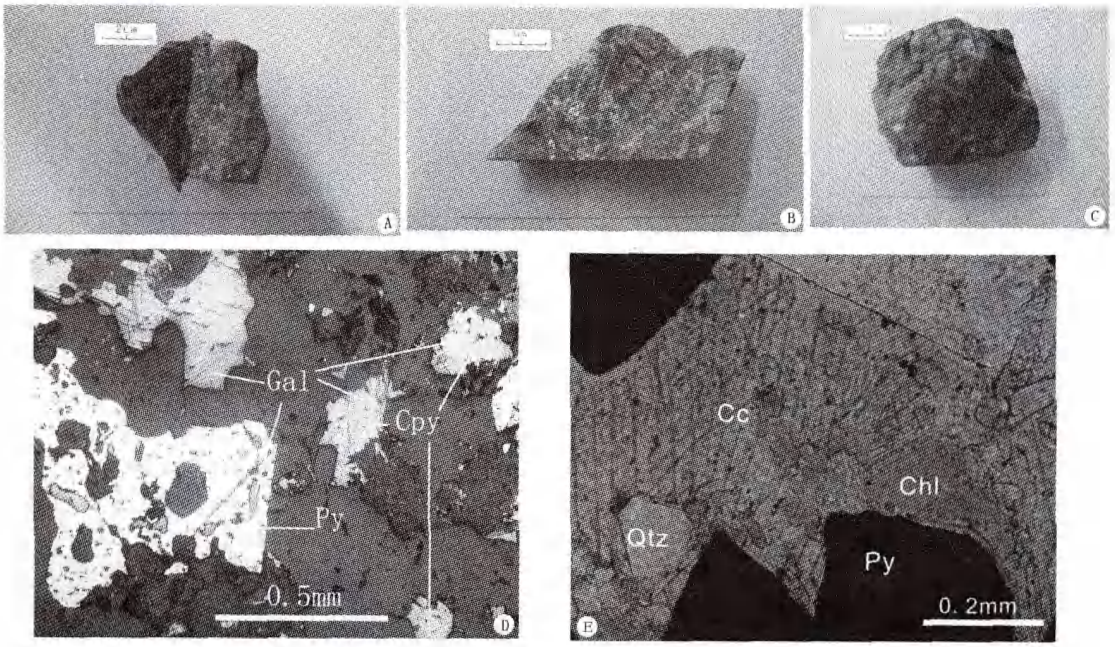


图4　前河金矿各成矿阶段的黄铁矿和矿物组合

Fig.4　Pyrite and mineral assemblage of various mineralization stages in the Qianhe gold deposit

A—黄铁矿石英脉;B—网状黄铁矿细脉;C—晚期含碳酸盐石英脉;D—石英黄铁矿阶段矿石矿物组合(反光镜);E—石英碳酸盐阶段的矿物组合(单偏光)。Gal—方铅矿;Cpy—黄铜矿;Py—黄铁矿;Cc—方解石;Qtz—石英;Chl—绿泥石

于黄铁矿-石英阶段的Ⅰ期黄铁矿；Ⅱ型爆裂曲线为产于石英-黄铁矿阶段的Ⅱ期黄铁矿；Ⅲ型爆裂曲线为产于石英-碳酸盐阶段的Ⅲ期黄铁矿。

4　讨　论

4.1　成矿温度计算

黄铁矿的热电系数与其形成温度有一定的关系,戈尔巴乔夫(1964年)利用大量数据做出了黄铁矿的热电性-温度图(图7)。从该图获得线性方程:

$$t=(704.51-\alpha)/1.818 \qquad (N型)$$

$$t=3(122.22+\alpha)/5.0 \qquad (P型)$$

利用该方程计算得出前河金矿黄铁矿形成的温度范围为106.1~423.3℃，主要集中在222.3~360.1℃之间,表明该矿床为中温矿床。

4.2　矿体剥蚀程度

根据热电系数值求出黄铁矿的热电性参数X_{op}(表1),来确定金矿体的剥蚀切面[12]。

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

式中f_{I}为样品中相应的补偿热电系数的黄铁矿百分比;$f_{\mathrm{I}}-\alpha>400\ \mu V/℃$,$f_{\mathrm{II}}-\alpha=200\sim400\ \mu V/℃$,$f_{\mathrm{IV}}-\alpha=$

表2　前河金矿黄铁矿流体包裹体热爆法测温结果

Table 2　Measurements of decrepitation temperatures of fluid inclusions of pyrite in the Qianhe gold deposit

标高/m	勘探线	重量/mg	爆裂温度/℃			爆裂频次/mg
			Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	
200	81	30.5	203	292~326		50
200	82	30.4	189	247	313	83
240	75	30.4		252	326	32
240	80	30.0	193	275	326	20
280	80	30.5		255	328	61
280	81	30.2		262	343	17
280	84	30.3		250	348	31
320	76	30.6	189	260	301	27
320	80	30.2		234	328	39
320	82	30.3			301	8
320	84	30.1		277	335	19
440	79	30.0	166	260	328	148
440	80	30.2	210		313	44
480	82.5	30.5			313	25
480	85.5	30.4	215		297	77
520	85	30.0	189	239	328	49

注:测试日期2006-11-07,测试人谢奕汉,精度±2℃

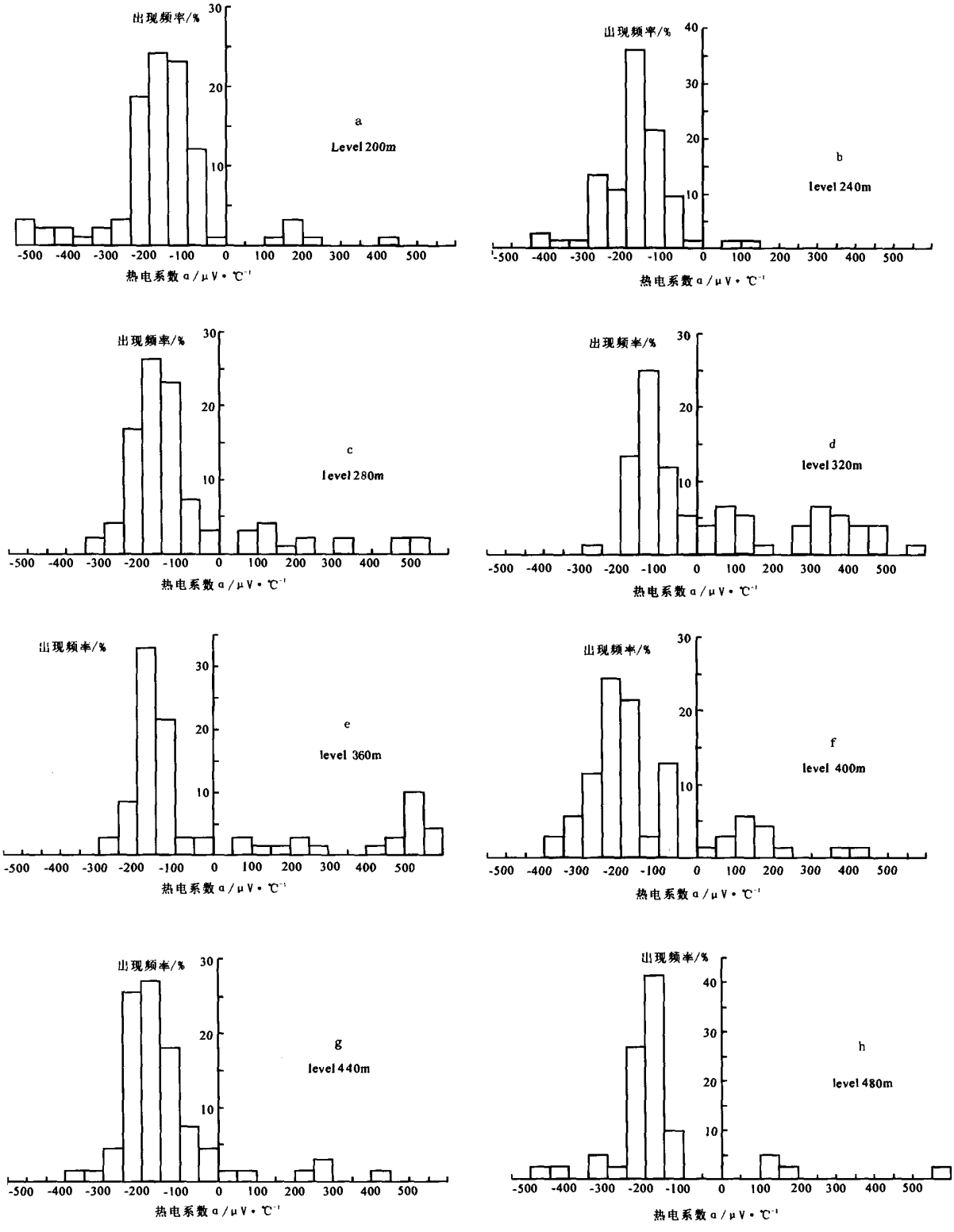


图5 前河金矿各中段黄铁矿热电系数统计直方图

Fig.5 Statistical histogram of thermoelectric coefficients of pyrite from various levels in the Qianhe gold deposit

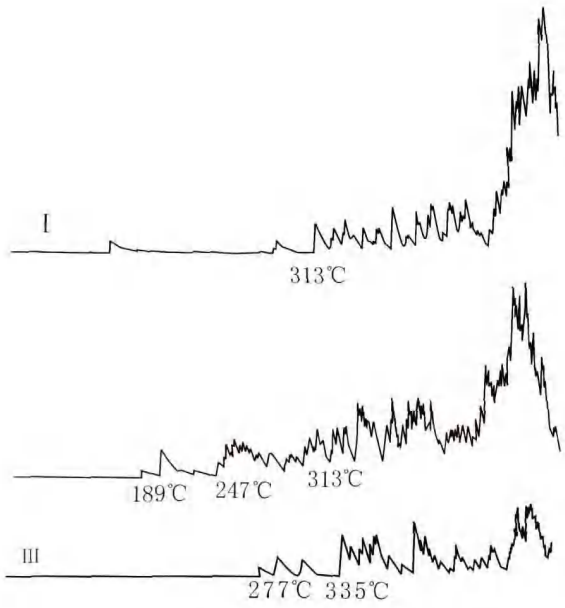


图6　前河金矿黄铁矿爆裂曲线分类图

Fig.6　Decrepitation curves of pyrite in the Qianhe gold deposit

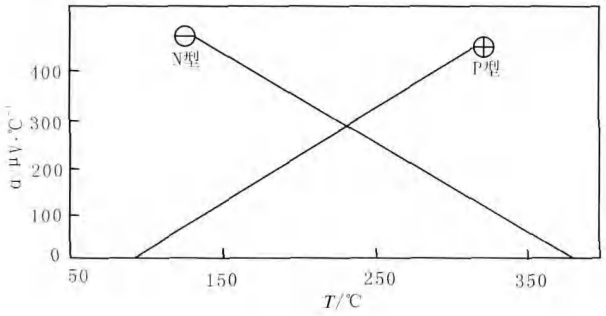


图7　黄铁矿热电性-温度图[12]

Fig.7　Relationship between thermoelectricity and temperatures of pyrite

0~-200 μV/℃,$f_V-\alpha<-200$ μV/℃。然后根据热电性参数值计算矿体剥蚀率γ(矿体剥蚀部分相对于总延伸的百分比):

$$\gamma=50-X_{np}/4$$

各中段的剥蚀率显示520~400 m中段矿体的剥蚀率为65%~75%;360 m和320m中段的矿体剥蚀程度较低,为47%;280~200中段又变为60%~70%。总体来看,前河金矿矿体剥蚀程度的变化也呈韵律式,且以大约200 m为一个旋回,推测200 m中段以下的200 m范围内为剥蚀率的低值区。

4.3　爆裂曲线分析

(1) Ⅰ型为具明显主爆峰的曲线,起爆温度大于300℃,显示成矿早期流体的温度最高。

(2) Ⅱ型为具有主爆峰的曲线,起爆温度低于200℃,具此型曲线的样品处于热液活动强烈的地段,指示金矿化的有利部位。主成矿阶段热液活动强度大且剧烈,则矿物捕获包裹体数量多、类型多,相应的热爆曲线高且形成相对较多的起爆极点,这是较长时间的热液活动造成的。

③Ⅲ型为无主爆峰的曲线,起爆温度在250~300℃之间,在矿体各标高均有出现,但总的变化趋势为,随标高增高出现率增大。爆峰高低显示黄铁矿是在热液活动强度明显减弱、温度降低的条件下形成的,明显为成矿晚期的产物。

图8显示,Ⅱ型爆裂曲线对应金品位高的地段,分布于520 m中段的85线,440 m中段的79线,320 m中段的76线和240 m中段的80线,而Ⅰ型和Ⅲ型曲线基本位于金矿的边缘部位,在200 m中段的81线和82线之间出现的Ⅱ型爆裂曲线,以及82线以东的大片起爆温度低值区,均预示着200 m中段的82线以东存在很好的找矿前景。

5　结　论

前河金矿为一产于构造破碎带中的蚀变岩型金矿,矿区广泛发育黄铁矿,通过野外和室内的观察,

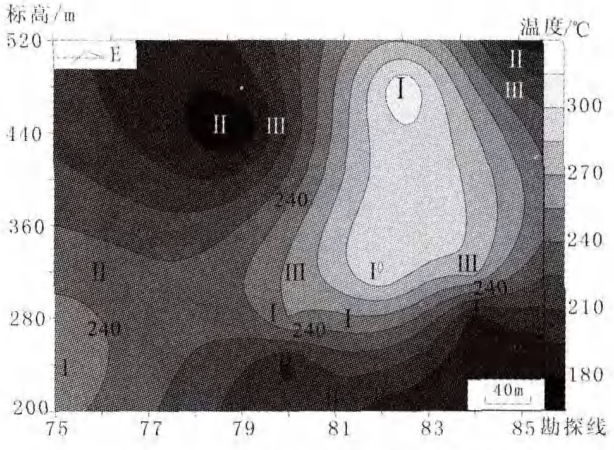


图8　黄铁矿起爆温度等值线垂直纵投影及曲线类型的分布

Fig.8 Vertical projection of initial decrepitation temperatures and distribution of curve types of pyrite in the Qianhe gold deposit

Ⅰ为具明显主爆峰的曲线,起爆温度大于300℃;Ⅱ为具有主爆峰的曲线,起爆温度低于200℃;Ⅲ为无主爆峰的曲线

根据黄铁矿的粒度、形态、颜色等特征，将其划分为3期，并对各期黄铁矿的热电性和热爆特征进行了研究。前河金矿床的形成温度为222.3~360.1℃，为一中温矿床，各中段黄铁矿导型均以N型为主，总含量达81.4%，P型和混合型占18.5%。矿体剥蚀率范围为47.04%~75%，在空间上存在高—低—高式的韵律特征，且以大约200 m为一个旋回，表明金矿体在200 m中段至520 m中段产出稳定，往深部有延续的趋势。黄铁矿的热爆曲线主要有3种类型，分别对应早、中、晚3个成矿阶段，其中Ⅱ型起爆温度低于200℃，具有主爆峰曲线对应金矿化的有利地段。通过分析黄铁矿起爆温度和爆裂曲线的分布规律认为，200m中段及其深部的82线以东存在很好的找矿前景，这一结论和热电性研究所推测的远景区相符。

致谢：本项研究得到河南省嵩县前河矿业有限公司专项科研经费的支持，在野外工作中得到了总经理苗新华，副总经理李日旺、张奇和地测处同仁的大力支持，谨此致以诚挚的谢意。

参考文献：

[1]袁鹤皋，裴玉华.前河地区正长斑岩构造蚀变岩型金矿围岩及容矿岩石特征[J].河南地质，1997，15(1)：24-28.

[2]李莉，卿敏，陈祥.河南前河金矿床地球化学特征[J].黄金地质，1999，5(3)：75-80.

[3]巴安民，马红义，张松盛，等.河南省嵩县前河金矿矿床地质特征和找矿方向[J].地质找矿论丛，2006，21(2)：100-114.

[4]裴玉华，严海麒，张明云.河南前河金矿岩石矿物特征[J].矿产与地质，2006，20(4/5)：513-518.

[5]Kerrich R，Wyman D A. Geodynamic setting of mesothermal gold deposits: An association with accretionary tectonic regimes[J].Geology，1990，18：882-885.

[6]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.

[7]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.

[8]陈光远，孙岱生，殷辉安.成因矿物学找矿矿物学[M].重庆：重庆出版社，1984：11-32.

[9]Chen Guangyuan，Sun Daisheng，ShaoWei，et al. Atlas of Mineralogical Mapping in East Jiaodong Gold Province[M]. Beijing: Geological Publishing House，1996：73-95，119-125.

[10]谢奕汉，李秉伦.造岩矿物中气液包裹体热爆测温的可靠性[J].岩石学研究，1983，(2)：117-124.

[11]张元厚，张世红，韩以贵，等.华熊地块马超营断裂走滑特征及演化[J].吉林大学学报(地球科学版)，2006，36(2)：169-176.

[12]侯满堂.陕西镇安太白庙金矿黄铁矿热电性特征研究及其应用[J].黄金，2000，21：5-9.

① 卿敏，等.河南省嵩县前河金矿区外围物化探找矿预测研究.2001.