

玲珑金矿黄铁矿标型特征及其大纵深变化规律与找矿意义

申俊峰¹, 李胜荣¹, 马广钢², 刘 艳³, 于洪军⁴, 刘海明¹

1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083
2. 辽河油田 金马油田开发公司, 辽宁 盘锦 124010
3. 浙江大学 地球科学系, 浙江 杭州 310007
4. 中国五矿集团公司 投资管理部, 北京 100010

SHEN Junfeng¹, LI Shengrong¹, MA Guanggang², LIU Yan³, YU Hongjun⁴, LIU Haiming¹

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China
2. Jinma Petroleum Development Company, Liaohe Oil Field, Panjin 124010, China
3. Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China
4. Investment Management Department, China Minmetals Corporation, Beijing 100010, China

SHEN Junfeng, LI Shengrong, MA Guanggang, et al. Typomorphic characteristics of pyrite from the Linglong gold deposit: Its vertical variation and prospecting significance. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(3): 055-075

Abstract: Linglong Gold deposit is one of largest quartz vein gold deposits in Jiaodong region. Its resources quantity was seriously reduced by about 50 years mining, so it is very important to evaluate the deep resources potential and prospecting. Based on genetic and prospecting mineralogy theory, the pyrite which is main mineral loaded gold has been studied systemtically on the typomorphic characteristics by the mineralogy and mineral geochemistry methods. The results showed that the following typomorphic characteristics of the pyrite are very significant for prospecting: (1) the fine grain pyrite with irregular pyritohedron or complicated combinate form are gold enriched; (2) the S/Fe value increases with depth increasing; (3) high total quantities of trace elements in pyrite is one of important signature for prospecting enriched gold body, and the rare earth elements characteristics showed that the pyrite came from the earth deep; (4) the occurrence rate of the P-conductor type pyrite are more than 60% for the gold vein No. 55 in the Western Mountain mine area, and the denudation degree is about 36.67%-47.73%, which means that the prospecting potential will be better in deep of the vein; (5) the trace element (As+Sb+Te), (Cu+Pb+Zn) and (Co+Ni+Ti+Cr) assemblies in pyrite are varied as cyclic oscillation along vertical in the Eastern Mountain area, and the occurrence rate of the P-conductor type pyrite is more than 39.63% in average, and the denudation degree is about 32.92%-75.40%, suggesting that the prospecting potential will be better in deep of the area; and (6) the thermoelectricity mapping of pyrite for the gold vein No. 47 at Dakaitou in the Eastern Mountain area was carried out, and the result showed that great prospecting potential exists under -770 m elevation between exploration line 93 and 75, also between exploration line 72 and 63. All the typomorphic characteristics of the pyrite mentioned above are very significant for deep gold prospecting in Linglong gold mine.

Key words: pyrite; typomorphic characteristics; deep prospecting; Linglong gold deposit; Jiaodong area

摘 要: 玲珑金矿床是胶东地区最大的石英脉型金矿床之一。经过近 50 年的开采,资源量几近枯竭,因此开展深部资源量评价和找矿预测具有重要实际意义。笔者基于成因矿物学与找矿矿物学理论,采用矿物学和矿

收稿日期:2013-05-03;修回日期:2013-05-07

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(1212011220926,20089937);国家自然科学基金重点项目(90914002)

作者简介:申俊峰(1962—),男,博士,教授,研究方向:成因矿物学与找矿矿物学。E-mail:shenj@cugb.edu.cn

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2013,20(3)

物地球化学方法对主要载金矿物黄铁矿的标型特征进行了系统研究,结果表明黄铁矿标型特征具有如下重要找矿意义:(1)细粒不规则五角十二面体或复杂聚形黄铁矿晶体含金性高;(2)黄铁矿 S/Fe 比值随矿体延深有增高趋势;(3)黄铁矿微量元素总量高是富矿段的找矿标志,其中黄铁矿稀土元素特征显示成矿物质具深源特征;(4)西山矿区 55 号脉 P 型黄铁矿出现率多在 60% 以上、剥蚀度为 36.67%~47.73%,指示该矿脉向下仍有良好的找矿前景;(5)东山矿区自上而下黄铁矿微量元素组合(As+Sb+Te)、(Cu+Pb+Zn)和(Co+Ni+Ti+Cr)沿垂向呈旋回震荡变化规律,同时 P 型黄铁矿平均出现率 39.63%,剥蚀度为 32.92%~75.40%,指示-770 m 标高以下仍具较好的找矿潜力;(6)东山大开头矿区 47 号脉黄铁矿热电性填图结果显示,-670 m 标高以下,第 93 至 75 勘探线之间及第 72 至 63 勘探线之间具有良好的找矿前景。上述黄铁矿标型特征对于玲珑金矿床深部找矿评价具有重要指导意义。

关键词:黄铁矿;标型特征;深部预测;玲珑金矿;胶东

中图分类号:P618.51;P578.292 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2013)03-0055-21

胶东地区是我国最大的金矿集中区之一,也是大型、特大型金矿床数目最多、最集中的地区^[1]。截至目前,该区已陆续发现和开采大小金矿 250 多处,其中特大型金矿(储量为 50~100 t)有 8 处,包括胶东西北部的三山岛金矿、焦家金矿、新城金矿、大尹格庄金矿和玲珑金矿田的东风、台上、九曲金矿以及胶东东部的金青顶金矿。长期以来,我国四分之一黄金产量源自胶东,其中 70% 以上来自这些大型、特大型金矿^[2],甚至超大型金矿^[3-5]。

近年来国土资源部组织实施了“危机矿山接替资源找矿”专项,对胶东多个老矿山进行了危机矿山勘查和研究,使得多个大型、超大型金矿在其深部新获储量,其中一些金矿新增储量超过 50 t,如焦家的寺庄,三山岛,玲珑的东风矿床等。显示出胶东地区深部仍有巨大的找矿潜力。

玲珑金矿位于胶西北著名的招(远)-平(度)成矿带北段。广义的玲珑金矿是指玲珑金矿田,具体范围是东以破头青断裂为界,西以罗山为界,北至后地,南至台上。一般来说,玲珑金矿田包括如下十多个金矿床,即玲珑的东山、西山、九曲、大开头、台上、阜山、后地、温家、大庄、罗山、欧家夼、东风、双顶等金矿床,矿田总面积约 75 km²。狭义的玲珑金矿主要指位于玲珑金矿田中部的几个矿床,包括玲珑东山、西山、九曲、大开头和东风金矿床等。

目前,玲珑金矿主矿区已累计产金超过 100 t,应属于超大型金矿床^[3]。从勘探深度看,该矿揭露深度已超过 1 000 m,勘探标高深达-720 m。

前人曾对玲珑金矿黄铁矿标型进行过研究^[5],但取样深度未及 500 m,不能获得其大纵深变化规律。本文基于现有约 1 000 m 的探采深度,系统分析黄铁矿标型的空间变化,为总结本矿床乃至区域金矿化的深部变化规律和前景预测提供了重要

的新证据。

1 区域地质特征

胶东地区大地构造位置属华北地台(I)之胶辽地盾(II)的胶北隆起区(III)上。该区也是中国东部中—新生代大陆边缘活动带(也称滨太平洋成矿带)的重要组成部分^[1]。

胶东地区西部紧邻郯庐断裂带,东部以五莲—荣成深断裂为界,北接渤海湾,南与胶南地体相邻,是地壳构造运动活跃、变质作用、岩浆作用和成矿作用发育的多旋回成矿有利地带^[1],也是白垩纪岩石圈强烈减薄^[6-7]和深部流体大规模上涌^[8-9]的地区。区域地质简图见图 1。

1.1 区域构造特征

胶东地区位于著名的郯庐断裂北段沂沭断裂带的东侧,也称胶东西北部金矿集中区或招莱金矿集中区。整个胶东地区主要发育 NNE 和 NE 向构造带,少量 EW 向构造带。其中主要构造带有三山岛—仓上断裂带、新城—焦家—莱州断裂带、招平断裂带,这些断裂带主要形成于中生代的印支—燕山期,其切割改造早期形成的东西向构造带。在切割交汇处,形成了若干的次级断裂,这些次级断裂均为本区主要的控矿和容矿构造^[11-12]。

玲珑金矿区位于胶东西北部的金矿集中区,构造位置处于招平断裂带的北端。

NE—NNE 走向的招平断裂带延伸约 100 km,其沿玲珑型花岗岩和滦家河型花岗岩、胶东群、荆山群接触带曲折展布。断裂带总体倾向 SE,倾角 20°~57°。断裂带破碎蚀变发育,破碎蚀变带宽数十 m 至几百 m,由构造角砾岩、碎裂岩、糜棱岩、黄铁绢英岩等组成。在该断裂带内发现了众多大型—超大

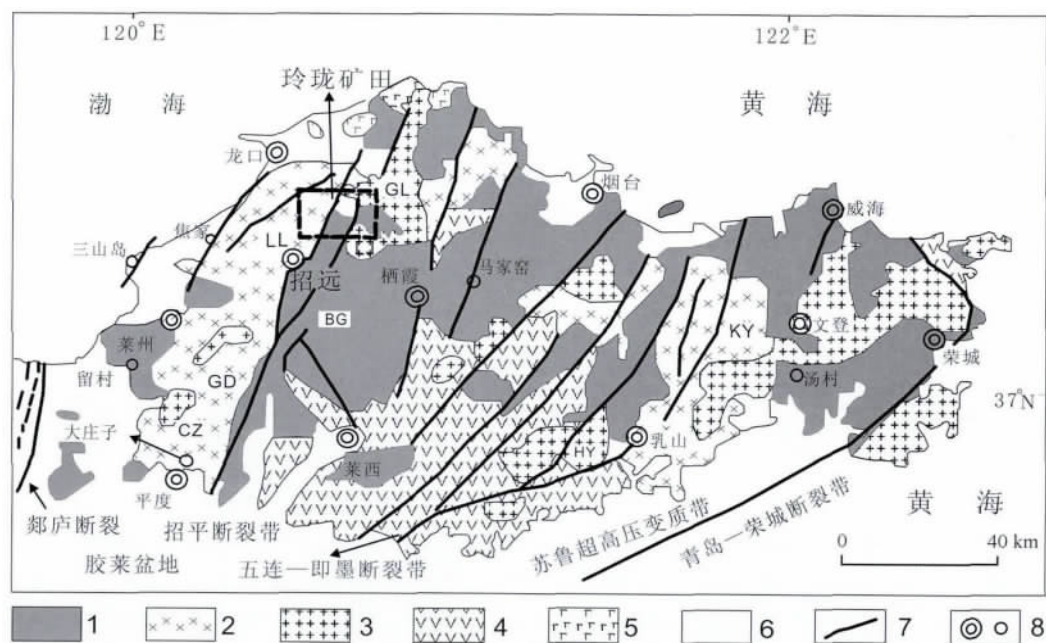


图1 胶东地区区域地质图

(引自文献[10],略有修改)

Fig. 1 Geological sketch map of gold deposits in the Jiaodong area

1—前寒武纪岩石;2—侏罗纪侵入岩体;3—白垩纪侵入岩体;4—白垩纪火山岩;5—新生代玄武岩;6—新生代沉积物;7—重要断裂;8—地名;LL—玲珑岩体;BG—毕郭岩体;GD—郭家店岩体;CZ—崔召岩体;LJ—滦家河岩体;KY—昆嵛山岩体;GL—郭家岭岩体;HY—海洋岩体。

型和中型金矿床,由北至南主要包括大磨曲家金矿床、阜山金矿床、玲珑金矿床、九曲金矿床、台上金矿床、大尹格庄金矿床、曹家洼金矿床、姜家窑金矿床、夏甸金矿床、山后金矿床和旧店金矿床等,其探明储量超过800多t。控制玲珑金矿的破头青断裂属于招平断裂的北段。最近几年的勘探显示,该断裂带深部和走向方向上均具有良好的找矿前景。

1.2 区域地层

胶东金矿集中区的地层主要由太古宇胶东岩群,古元古界荆山群、粉子山群,新元古界蓬莱群和中生代莱阳盆地中的火山-陆源碎屑岩组成。其中,前寒武纪变质地层特别是胶东岩群与金矿的形成关系最为密切。

胶东岩群自上而下划分为唐家庄组、齐山组和林家寨组^[13]。唐家庄组由角闪紫苏变粒岩、黑云斜长角闪片麻岩和黑云角闪二辉麻粒岩等组成;齐山组由黑云片岩、黑云变粒岩、斑点状斜长角闪岩等组成;林家寨组则主要由黑云变粒岩、变粒岩、黑云角闪片麻岩组成,局部夹有斜长角闪岩。胶东群呈北东东-北西西向展布,同位素年龄为2477~2497 Ma,属于新太古代成岩^[13]。

1.3 区域岩浆岩

胶东西北地区金矿集中,与金矿较为密切的花岗岩主要有3种类型,即玲珑型片麻状黑云母二长花岗岩、郭家岭型似斑状花岗闪长岩和滦家河型花岗岩。

玲珑型花岗岩主要沿北东向、东西向展布,多分布于招平断裂带和新城—焦家断裂带之间,包括双顶片麻状黑云母花岗岩体、罗山细粒含石榴石花岗岩体、磨山中粒黑云母花岗岩体、崔召中粒黑云母花岗岩体和云山细粒片麻状花岗岩体,常呈不规则环状、不规则圆状和椭圆状的岩基、岩株和岩脉形式产出。目前的研究^[14]认为,玲珑超单元岩浆来自上地幔花岗岩浆同化交代、熔融陆核物质形成的交代式再生花岗岩浆及后期的同熔型花岗岩浆,这类岩浆结晶分异形成“S”型、“I”型花岗岩的过渡类型。

郭家岭型似斑状花岗闪长岩主要分布于玲珑岩基的北侧,呈东西向展布。由东至西分别由郭家岭、丛家、北截、上庄和三山岛5个岩体组成。这种类型岩体以含角闪石和巨大的钾长石斑晶(一般为2~6 cm,大者可达15~20 cm)为特征。其与玲珑型岩体间有明显的侵入接触关系。

滦家河型花岗岩包括滦家河、岗山(毕郭)和郭家店三个岩体,该类型岩体的主要特征是块状构造、中粗粒等粒结构,结构构造相对较均一。矿物成分以含有较多的钾长石和局部含白云母为特征。岩体内老地质体的残留体比较少,与胶东岩群有较为明显的侵入接触关系,但接触带的热变质和热液蚀变并不发育。

前人^[14,16]关于这3类花岗岩的成岩年龄研究结果显示,玲珑型花岗岩成岩年龄为153~160 Ma,滦家河型花岗岩为152~154 Ma,郭家岭型花岗岩闪长岩为126~130 Ma^[1]。

关于胶东金矿成矿事件的期次,一些学者^[11,17-18]认为主要存在3期成矿事件,即太古宙—元古宙的绿岩地体产生时期,形成了金的初始矿源系统;中生代花岗岩—绿岩带强烈活化改造为第二成岩成矿期,该时期交代重熔或深熔壳源花岗岩的形成,为矿化提供了热源和热液,使得绿岩带的金得以活化,在有利的变质岩区形成石英脉型金矿;第三期属于岩浆期后的构造—热液交代蚀变成矿时期,也是最重要的成矿期。这一时期发生的岩浆期后构造和热液蚀变

事件是金矿化形成的最重要的地质作用,许多金矿的工业矿体即在这一时期形成^[1]。东部北东向剪切构造系统控矿,特别是岩浆岩与围岩接触区域内压剪性断裂控制了细脉浸染状蚀变岩型金矿的形成,而其下盘岩浆岩地带张剪性断裂充填形成了石英脉型金矿或过渡型矿脉,总体上形成该区诸多玲珑—焦家式金矿。

2 玲珑金矿田地质特征

总体上看,玲珑矿田内出露地层较简单,但构造和岩浆活动非常强烈。玲珑矿田构造地质简图见图2。

2.1 矿田内地层发育特点

矿田内地层出露简单,分布范围很小,主要为太古宇胶东群苗家岩组变质岩(*Arjm*)和新生界第四系松散沉积物(Q)。其中,太古宇胶东群变质岩多呈岩浆岩体中的残留体产出。

其中,胶东群苗家岩组变质岩的岩性主要为黑云母片岩和斜长角闪岩,多呈透镜体状或似层状产出,一般分布于玲珑超单元之中,延长和延深规模均

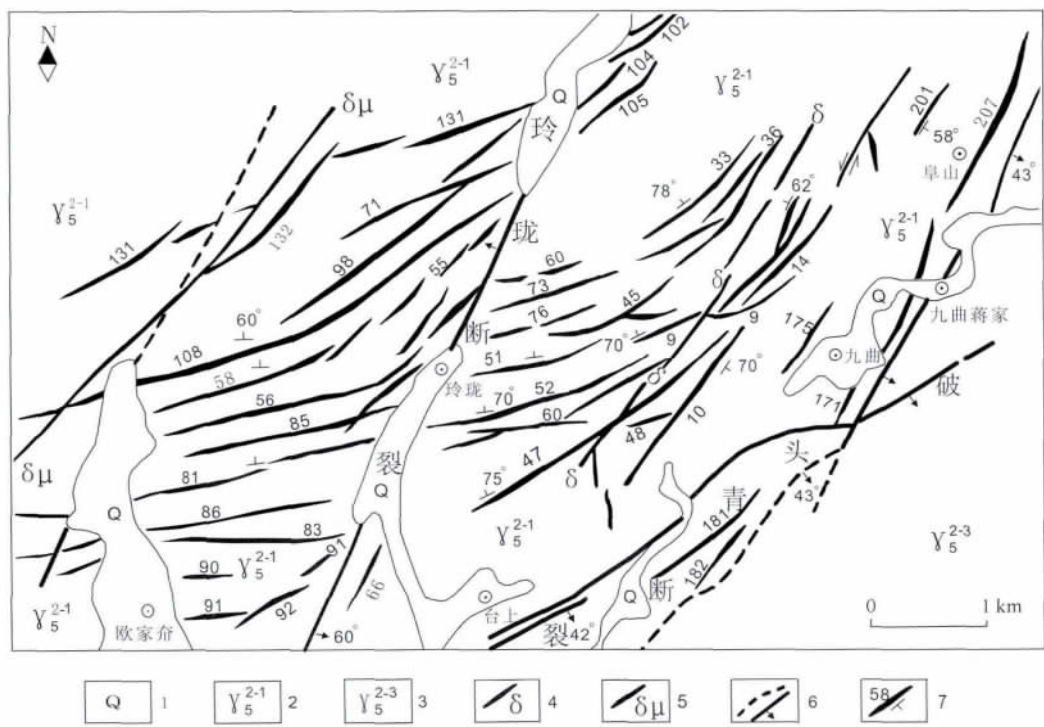


图2 玲珑金矿地质简图

(据文献^[19],略有修改)

Fig. 2 Geological sketch map of Linglong gold deposit

1—第四系;2—滦家河型中粗粒花岗岩;3—玲珑型片麻状黑云母花岗岩;4—闪长岩脉;5—闪长玢岩脉;6—断裂;7—构造蚀变岩带或矿体。

很小,总体走向北西西,倾向北北东,倾角较陡。

2.2 矿田构造

矿田内主要存在3条规模较大的断裂,走向均呈NNE—NE,自西至东依次为玉皇顶断裂、玲珑断裂和破头青断裂。其中,玲珑断裂和破头青断裂为控制矿脉产出的主要断裂,断裂内发育一系列密集的次级裂隙,这些次级裂隙被矿液充填形成一系列含矿石英脉(图2)。

总的来看,由大断裂控制产出的矿脉走向也近于NEE—NNE,但与大断裂有一定交角。从整个矿田来说,西部矿脉与玲珑断裂交角较大,多呈NE—NEE走向。在破头青和玲珑断裂夹持的地块中,靠近玲珑断裂一侧,矿脉仍然多呈NE—NEE走向。而靠近破头青断裂一侧的矿脉则呈NNE—NE走向,局部与破头青断裂走向一致。从图2还可看出,自南至北,矿脉与更大一级大断裂(玲珑断裂和破头青断裂)的交角逐渐变小^[12]。

(1)破头青断裂带。西起招远温家,经台上、九曲至龙口市黑山、田家镇,全长22 km。本区出露的为断裂带的中段(台上、九曲段),是招平断裂带与破头青断裂带的复合地段,属区域性招平断裂带的北段。它沿玲珑花岗岩与滦家河花岗岩之间的接触带发育,走向NE60°~70°,倾向SE,倾角30°~40°。断裂带宽一般为250~340 m,最宽达700 m。主要构造岩组合为碎裂花岗岩、花岗质碎裂岩、碎裂岩、构造角砾岩和糜棱岩等,局部见不连续的断层泥,多处构造岩显示其经历了不同程度的热液蚀变或矿化。该断裂是区内主要控矿断裂之一。

破头青断裂控制了台上特大型金矿床及下盘九曲、大开头一带的石英脉-蚀变岩过渡型矿脉。破头青断裂在九曲村附近分为两支,一支呈70°方向继续向北东东方向延伸至黑山一带;另一支呈35°方向往北东向延伸为阜山断裂,控制了阜山特大型金矿床。

(2)玲珑断裂带。是一条呈NE走向的区域性断裂构造,表现为左旋压扭性质,纵贯本区中部。该断裂在大蒋家村南出露较好,长4.6 km,宽50~150 m,走向NE 25°~30°,南部倾向SE,北部倾向NW,倾角65°~85°,其南端于潘家集北切割破头青断裂带,继续向SW延伸。岩性为碎裂二长花岗岩、花岗质碎裂岩,具硅化、钾化、绿泥石化、绢云母化蚀变,断裂带的浅部见有矿化^[17]。

关于玲珑断裂在成矿中的作用目前还存在争议。长期以来,许多学者^[20-21]认为玲珑断裂为一

条成矿后断裂,切错含金石英脉;也有学者^[22]认为玲珑断裂为矿区内的二级控矿构造,控制了次级矿脉的富集,导致矿脉的斜列和走向的变化,其产状对两侧次级矿脉的赋矿标高产生一定的制约。对玲珑断裂带中的钾长石蚀变年龄进行测定后发现,钾长石蚀变年龄分布范围是 $(69.47 \pm 0.9) \sim (110.3 \pm 1.0)$ Ma^[10],在成矿期间和成矿后都发生过强烈运动,其中成矿期间的运动使后期热液再次叠加于早期品位较低的矿化体上而形成工业矿体(52号脉),成矿后的活动主要是破坏早期形成的矿体,表现在西山和东山的矿体的连续性被玲珑断裂分割,例如51号脉。

本次工作根据井下对玲珑断裂的观察及危机矿山勘查项目对玲珑断裂的钻孔揭露结果,认同玲珑断裂为一条长寿断裂^[23],即成矿前已经形成,成矿后仍然活动的观点。其中,玲珑断裂成矿前即存在的证据有:①危机矿山勘查项目钻孔ZKA-1揭露显示,玲珑断裂有较好的金矿化,在深110 m标高处,发现一厚0.65 m、品位14.62 g/t的黄铁绢英岩矿体,在深265 m左右处发现一厚0.4 m、品位1.42 g/t的黄铁矿化硅化花岗岩矿体;②玲珑断裂带中钾长石蚀变年龄为 $(69.47 \pm 0.9) \sim (110.3 \pm 1.0)$ Ma^[10],显然,断裂至少在110 Ma之前即存在。

该断裂成矿后继续活动的证据有:①玲珑断裂以西矿脉,例如51号脉,整体上以NEE走向为主,在东部接近玲珑断裂处发生了转折或斜列,走向由NNE转为NE向,可能与玲珑断裂早期右行走滑和后期左行走滑有关^[22];②玲珑断裂切割矿体,如55、51号矿体被切割。

因此,玲珑断裂为一条长寿断裂,成矿前即存在,成矿后继续活动的可能性比较大。

矿区内上述两条大断裂控制发育了众多的NNE和NE走向的次级裂隙,次级裂隙被充填形成本区的矿脉展布形式(如图2)。

2.3 矿田岩浆岩

矿田内岩浆活动强烈,主要出露有玲珑型片麻状黑云母二长花岗岩和郭家岭型似斑状花岗闪长岩。这两类花岗岩均为富碱质的钙碱性岩石^[24]。其中玲珑片麻状黑云母二长花岗岩为主要赋矿围岩,局部可见郭家岭花岗闪长岩侵入到玲珑花岗岩中,同样成为赋矿围岩。

玲珑型花岗岩,主要矿物有长石、石英、黑云母和白云母等,副矿物有锆石、褐帘石、金红石和磷灰

石等。该岩体中常可见到有大量胶东群斜长角闪岩和变粒岩残留体。

郭家岭型似斑状花岗闪长岩呈灰色和暗灰色,具有典型似斑状结构、蠕虫状结构和微文象结构,块状构造。主要矿物有角闪石、更长石、钾长石、石英和黑云母等,副矿物有榍石、褐帘石、锆石和磷灰石等。在矿区西北部丛家村一带和九曲矿区井下均可见到郭家岭花岗闪长岩直接侵入到玲珑花岗岩的现象。年代学数据显示郭家岭花岗闪长岩的侵位事件与成矿时间较为接近或一致^[15]。显然,郭家岭花岗闪长岩侵位于玲珑花岗岩的事件是矿区内成矿事件的重要构造热事件。李兆龙和杨敏之^[25]通过铷-锶同位素、氧同位素和硫、铅同位素特征,认为上述几种花岗岩均为壳源深熔花岗岩,且均接近于“S”型花岗岩,稀土元素组成配分模式揭示上述岩体属于同源而不同演化阶段的产物。

值得注意的是,矿区内脉岩较为发育,多为 NE 走向。主要脉岩类型有煌斑岩脉、辉长岩脉、辉绿岩脉、闪长岩脉、闪长玢岩脉、石英脉、伟晶岩脉及晚期花岗岩脉等。其中与金矿脉时空关系较为密切的是煌斑岩脉和少量闪长岩脉。它们常与矿脉相互伴生或相互交切,为该区重要的找矿标志。

2.4 矿脉地质特征

据统计,玲珑矿田内金矿脉共有约 543 条^[26],仅玲珑东、西山矿区内出露的主要矿脉就有 200 余条,其中具一定规模的矿脉近百条。众多的矿脉相互交切,形成了纷繁复杂的矿脉展布格局。在一些地段,矿脉之间分合交切至难以区分彼此。

值得一提的是,在主矿脉的两侧常常发育许多次级支脉,有些矿脉由于支脉复合而连生成一条矿

脉,部分主矿脉和支脉呈密集状出现。所以孙景贵等^[27]针对该矿脉产出的特点提出了“脉群”的概念,即把一组空间关系密切、在同一构造机理形成下的矿脉称之为“脉群”。

总体来看,在玲珑矿区内,具有工业意义的矿脉均分布在破头青断裂下盘约 6 000 m 范围内,且距离破头青断裂由近及远,矿脉由密变疏^[22]。

在上述矿脉中,具有工业价值的矿脉约 30 条^[19]。主要有 9、10、36、47、48、51、52、53、55、58、69、96、98、101、107、108、171、176、175 号脉群等(如图 3)。

总之,该区矿脉主要受控于破头青和玲珑两个主干断裂。夹于两个断裂之间的矿脉产状变化较大且相互交切关系复杂。靠近破头青断裂的矿脉最显著特征是由上至下产状由 SE 倾转向 NW 倾(图 3)。矿脉产出特征与破头青和玲珑断裂具有密切的成生关系。

2.5 围岩蚀变特征

主要赋矿围岩玲珑花岗岩中常见发育有不同的热液蚀变现象,主要有钾长石化、绢英岩化、硅化、黄铁绢英岩化、绿泥石化及碳酸盐化等。蚀变带一般沿矿脉两侧呈对称分布,以矿脉为中心,自内向外依次表现为黄铁绢英岩化、绢英岩化、钾化,直至未蚀变花岗岩带。矿脉宽度与蚀变带宽度比值一般为 1:3~1:10(图 4)。

需要说明,随着成矿过程中热液蚀变作用的不断加强,金的含量有明显增加的趋势。由表 1 可以看出,金含量由未蚀变花岗岩的不足 1×10^{-6} 至钾化、绢英岩化、至矿体金含量可达几千 10^{-6} 。这种金含量分带的特点,可能是成矿期流体处于半开放体系,由温度下降和蚀变作用不断加强等原因所致^[5]。

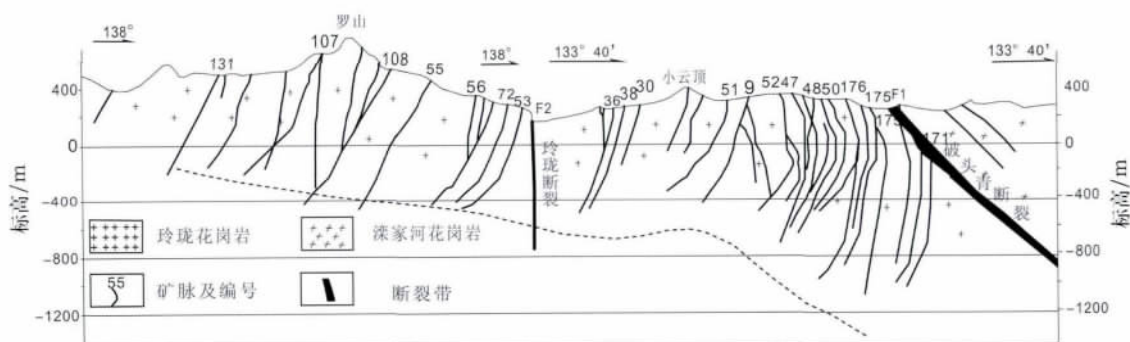


图 3 玲珑金矿区垂直主要矿脉地质剖面图^①

Fig. 3 Geological profile of the vertical main veins in Linglong gold deposit^①

① 山东黄金集团有限公司. 玲珑金矿接替资源勘查 2006 年度设计. 北京:国土资源部全国危机矿山接替资源找矿项目管理办公室, 2006.

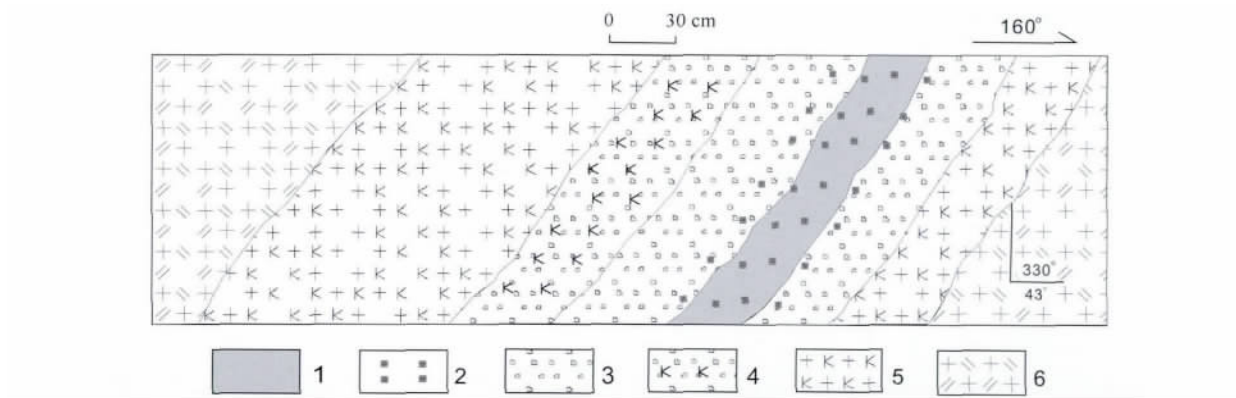


图4 西山55号脉-10 m中段矿体蚀变带素描图

Fig. 4 Sketch map of the orebody's alteration zone in the middle -10 m of No. 55 gold vein in Western Mountain Mine area
1—矿体;2—黄铁矿化;3—绢英岩化;4—钾化-绢英岩化;5—钾化;6—未蚀变花岗岩。

表1 玲珑花岗岩、蚀变岩和矿体金含量
Table 1 Linglong granites, altered rocks and gold content of orebodies

样品名	样品数	Au 含量/ 10^{-6}	Au 含量平均值/ 10^{-6}
未蚀变花岗岩	3	0.3~0.4	0.33
弱钾化花岗岩	4	1~132	34.23
强钾化花岗岩	5	1~136	61.38
绢英岩化花岗岩	7	2.4~405.2	91.91
矿体	2	21 000~56 500	38 750

注:表中统计数据来自文献[5]和本次工作(2011)。

2.6 金的赋存状态

金矿物主要赋存在黄铁矿中,其次为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿及石英等。赋存状态有包体金(图 5A、B)、裂隙金(图 5C)、晶隙金(图 5D)和晶格金(超显微金)4 种。多数情况下以晶隙金和包体金为主,占金赋存状态的 70%以上,局部显示以晶隙金和裂隙金为主。其中,裂隙金沿各种矿物的破碎裂隙充填分布,尤其在粗大而破碎的黄铁矿裂隙中赋存最多,

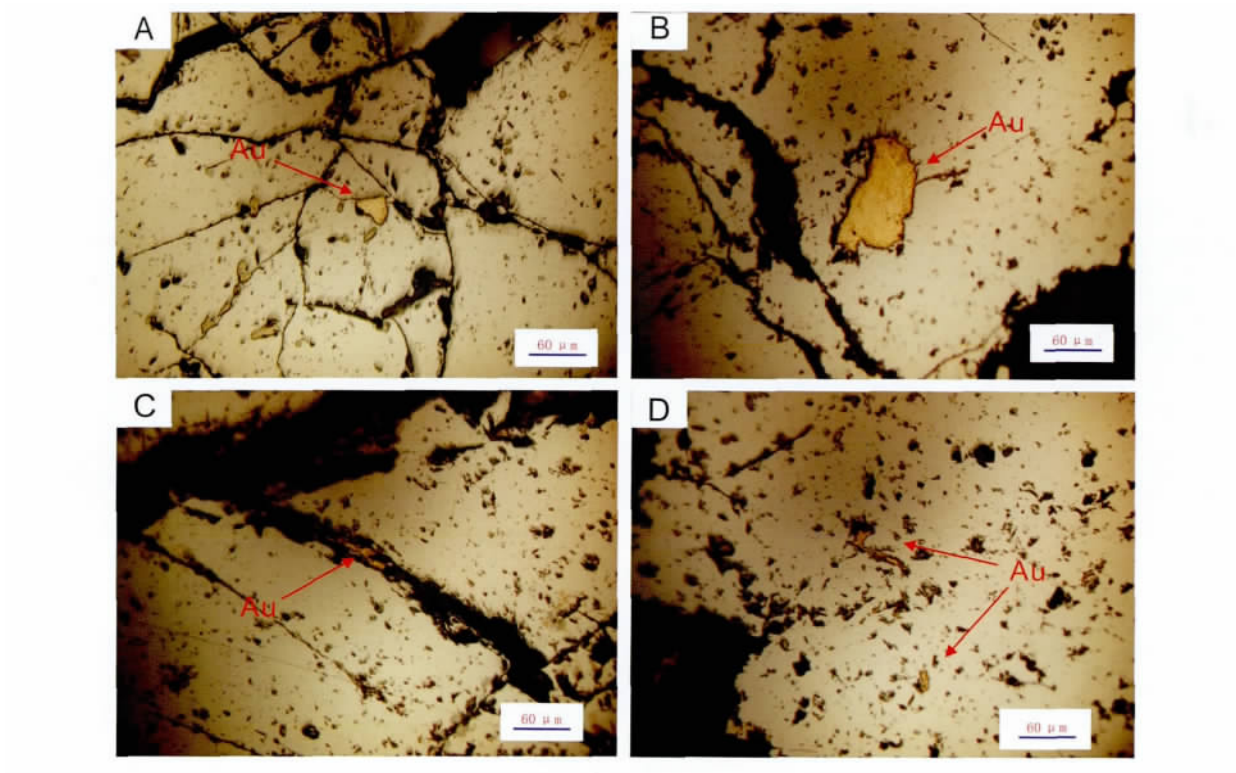


图5 金的赋存状态(偏光 10×20)

Fig. 5 Occurrence of gold (by polarizing microscope 10×20)
A,B—包体金;C—裂隙金;D—晶隙金。

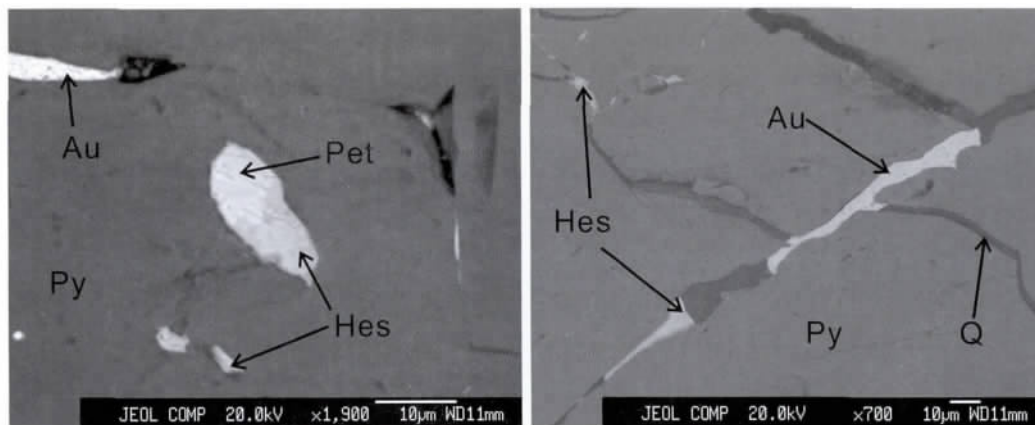


图6 碲化物的产状及其与金共生关系(电子探针背散射图像)

Fig. 6 Occurrence of tellurides and its symbiotic relationship with gold (EMPA backscattered images)

Py—黄铁矿; Q—石英; Hes—碲银矿。

表明金的沉淀晚于黄铁矿。晶隙金主要嵌布在各种矿物的晶隙中,特别是黄铁矿晶隙中最多,表明此种金矿物与载金矿物同时结晶。包体金多被包含于黄铁矿、黄铜矿、石英等晶体之中,此种金矿物生成早于或同时于黄铁矿晶体。另外,在黄铁矿的晶格面网中发现有晶格金,多呈微细分散状^[28]。

值得强调的是,本次在九曲矿区+50 m中段矿石中还发现了碲银矿与金密切共生(图6)。碲是亲地幔深源、高挥发、水溶性差、易富集于硫化物的元素^[29-31],因此,本区金、银碲化物的发现是幔源物质参与成矿直接而有力的证据。

2.7 成矿阶段

玲珑金矿的成矿作用可分为热液期和表生期,热液期又包括4个成矿阶段:分别为黄铁矿-石英阶段、金-石英-黄铁矿阶段、金-多金属硫化物阶段和石英-碳酸盐岩阶段。其中,黄铁矿-石英阶段(也称第Ⅰ阶段)为成矿的早期阶段,常见于矿脉或矿体的边部,主要矿物为乳白色石英和零星分布的粗粒立方体黄铁矿。肉眼观察条件下,石英较为纯净,透明度高,块状或粗粒状,有时呈梳状构造,受构造应力作用破碎现象明显。这一阶段中的黄铁矿也普遍具有压碎结构,含金性较差。金-石英-黄铁矿阶段(也称第Ⅱ阶段)石英的主要变化是颜色变为灰白色、烟灰色,透明度较差。石英的烟灰色主要是由于其含有细粒分散状黄铁矿等硫化物微粒所致。黄铁矿含量较前一阶段明显增多,颗粒明显变细,常呈浸染状分布,局部呈团簇状。手标本或显微镜下常可见到这一阶段的硫化物矿物集合体包含或胶结第一阶段的碎裂状乳白色石英角砾,也可见直接穿插于第一阶

段石英脉中,该阶段为主要金成矿阶段之一。金-多金属硫化物阶段(也称第Ⅲ阶段)为金富集的最主要阶段。特征是黄铁矿含量不仅增加,其颜色也变得更深,为暗铜黄色,黄铁矿反射率相对第二阶段明显变低。另外,这一阶段其他金属矿物含量明显增多,主要有黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿、自然金等。这些多金属硫化物常常呈细脉状、网脉状或细脉浸染状分布。石英的含量明显减少,而且常呈烟灰色、青灰色等暗色颗粒。常可见到细粒黄铁矿脉或多金属硫化物脉切穿烟灰色石英现象。石英-碳酸盐岩阶段(也称第Ⅳ阶段),是成矿晚期阶段,明显特征为出现大量碳酸盐矿物,且黄铁矿含量变得极其稀少。主要矿物组合为方解石、石英、铁白云石、菱铁矿等。石英、碳酸盐矿物常呈晶洞状构造。这一阶段偶见少量自然金产出。有时可见碳酸盐岩脉切断或依多金属硫化物脉边缘展布。上述四个阶段中,一般前三个阶段较为发育。

表生期主要金属矿物为褐铁矿、菱铁矿、铜蓝、磁铁矿等。其中褐铁矿多为黄铁矿被氧化淋滤形成的次生矿物,呈黄铁矿假象。这一阶段金矿物被淋滤掉或下渗至次生富集带。

3 黄铁矿的主要标型特征

黄铁矿是含金石英脉的主要矿石矿物,也是与金矿关系最为密切的矿物之一^[5,32]。据胶东金矿主要矿床类型的统计资料^[14],黄铁矿占金属矿物总量的90%以上,并有85%以上的金分布在黄铁矿的晶隙、裂隙及晶体中,因而研究黄铁矿的特征对研究金

矿成因及找矿都具重大意义。

3.1 黄铁矿的产出特征及其含金性

如前所述,玲珑金矿的热液成矿作用可划分为四个阶段。不同的成矿阶段,黄铁矿的产出状态明显不同,其各阶段主要产出特征如下:(1)黄铁矿-石英阶段。黄铁矿呈立方体晶形,颗粒粗大,晶形较好,黄白色,星散状分布,与乳白色石英共生,一般不含金或含金量极低。(2)金-石英-黄铁矿阶段。黄铁矿多呈五角十二面体晶形,碎裂严重,中粗粒结构,黄色,常呈团簇状或条带状产出,与灰白色或烟灰色石英共生。含金量比第Ⅰ阶段黄铁矿高,镜下观察可见到裂隙金和少量包体金。(3)金-多金属硫化物阶段。黄铁矿呈五角十二面体或复杂聚形,破碎强烈,粒度较细,黄色-金黄色,常呈细脉状、浸染状或条带状产出,与黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等硫化物及青灰色石英共生,该阶段黄铁矿一般含金量高。(4)石英-碳酸盐岩阶段。黄铁矿多呈复杂聚形,少见立方体晶形,中细粒结构,黄色至黄白色调,多呈条带状、细脉状产出,与方解石等碳酸盐岩共生,一般含金量较低。

3.2 黄铁矿的形态标型

黄铁矿在金矿中最常见的晶形为立方体 $\{100\}$ 和五角十二面体 $\{hk0\}$,两者占金矿床中黄铁矿总量的90%以上^[32]。此外,黄铁矿也往往呈聚形出现,如 $\{100\}+\{hk0\}$ 、 $\{100\}+\{111\}$ 等。从自形程度和集合体形态看,还常呈半自形、他形、草莓状、胶状、变胶状、钟乳状、细脉状等产出。

关于黄铁矿的晶形与其含金性之间的关系,一般认为^[5]:在金-石英-黄铁矿细晶岩矿床中黄铁矿具有 $\{100\}$ 、 $\{210\}$ 、 $\{111\}$ 单晶形;在高温石英-金矿中,黄铁矿主要以上述聚形产出;在中温硫化物组合的矿床中,黄铁矿更多地呈立方体晶形;在中、低温石英-金-硫化物组合的矿床中,则多呈五角十二面体晶形。不同矿床类型的矿体内部黄铁矿在空间上也有一定的规律性,如:热液成因的黄铁矿在矿脉上部以 $\{100\}$ 晶形为主,矿脉中部以 $\{100\}+\{hk0\}$ 、 $\{100\}+\{111\}$ 、 $\{111\}+\{hk0\}$ 及 $\{111\}$ 等多种晶形为主,而矿脉下部则主要为 $\{hk0\}$ 晶形。玲珑金矿晶形与含金性的关系符合上述规律。

在胶东地区,普遍存在从矿体头部到矿体尾部、从边部蚀变围岩到矿体中心,黄铁矿晶形具有由简单向复杂、由单形向聚形变化的趋势^[5]。多数金矿床黄铁矿的形态标型研究结果表明,含金最高的是

五角十二面体自形微粒状黄铁矿以及胶状黄铁矿。另外,黄铁矿粒度和破碎程度也与其含金量有密切关系。很多情况下,细粒黄铁矿集合体和破碎状、裂纹状黄铁矿大多具有较高的金含量。因为细粒黄铁矿集合体和破碎状、裂纹状黄铁矿具有较大的比表面积,对金的吸附更加有利。所以,金矿床中细粒状、烟灰状、破碎状等形态对金的富集具有重要指示意义。

此外,从颜色来看,一般富金的黄铁矿多为浅黄色、黄色、暗黄色,而浅黄白色的黄铁矿含金量低。

3.3 黄铁矿成分标型

3.3.1 主量元素标型

据陈光远等^[5]资料,玲珑金矿190 m标高以上,黄铁矿S/Fe值为1.91~2.18,平均值为1.95,黄铁矿成分呈贫硫特征。

本次采用JXA-8100电子探针分析仪,对玲珑金矿九曲、大开头及西山等矿区标高-670~50 m的主成矿期金属矿物进行了电子探针化学成分分析。测试条件:加速电压20 kV,束流 1×10^{-8} A;波谱分析,ZAF法修正。可以看出(表2),主成矿阶段黄铁矿S元素含量为49.22%~51.49%,平均值为50.79%,小于理论值53.45%,Fe元素含量为45.35%~47.85%,平均值为47.23%,大于理论值46.55%。S/Fe值为1.81~1.97,平均值1.874,小于理论值2(表3)。

综合前人研究成果,玲珑金矿黄铁矿为富铁贫硫型,且从浅部(300~-190 m)至深部(50~-670 m),S/Fe平均值从1.95降至1.874,表明体系中硫逸度降低,深部杂质混入较多。

3.3.2 黄铁矿微量元素标型

黄铁矿中微量元素包括两部分:一是呈类质同象替代形式进入黄铁矿晶格的元素,如替代Fe的Co、Ni元素和替代S的As、Se、Te等元素;二是呈机械混入物形式存在于黄铁矿中的元素,如Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Sb、Bi、W和Sn等元素。

黄铁矿中微量元素主要是黄铁矿在形成过程中捕获的,其含量的多少直接与形成时矿液的介质成分和形成的物理化学条件相关。若成矿溶液的介质成分复杂,黄铁矿中的微量元素成分便复杂;反之则简单^[5]。不同期次或不同矿化类型形成的黄铁矿,由于其形成的物理化学条件不同,使微量元素的成分存在明显的差异,因此对微量元素的标型特征进行对比分析具有找矿意义^[32]。

表 2 玲珑金矿金属矿物电子探针分析结果

Table 2 Microprobe analyses of metallic minerals in Linglong gold deposit

样品号	产状	矿物	$w_B/\%$																	总量
			S	Fe	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Te	As	Sb	Se	Ag	Au	Bi	Sn	Mo	Cr	
J50-19-17-01	多金属硫化物	黄铜矿	33.13	31.39	34.06	0.11	0.04	0.05	—	—	—	—	0.03	—	0.14	0.08	—	0.42	—	99.47
J50-19-17-01	多金属硫化物	黄铁矿	37.33	62.1	0.06	—	—	0.07	—	—	—	—	—	—	0.16	—	—	0.49	—	100.2
J50-38ZX-04	多金属硫化物	黄铁矿	50.91	47.85	—	0.08	—	0.04	—	—	0.04	—	—	—	0.11	0.1	—	0.64	0.03	99.8
J50-38ZX-04	多金属硫化物	方铅矿	13.32	0.19	—	83.18	—	—	—	0.13	—	—	—	0.17	—	0.33	—	—	—	97.32
J-230-176-3	石英-黄铁矿	黄铁矿	50.79	46.92	—	0.08	—	—	—	—	—	—	0.03	—	0.1	0.21	—	0.5	—	98.64
LLD502	石英-黄铁矿	黄铁矿	50.73	46.86	—	—	—	0.1	—	—	—	—	—	0.03	0.17	0.16	—	0.61	0.02	98.66
LLD537	石英-黄铁矿	黄铁矿	51.49	47.56	—	0.15	—	0.04	—	—	0.04	—	—	0.02	—	0.23	—	0.65	0.02	100.19
LLD543	多金属硫化物	黄铜矿	32.92	30.87	33.46	0.08	0.07	0.05	—	—	—	—	0.04	0.04	0.13	0.19	—	0.36	—	98.22
LLD543	多金属硫化物	黄铁矿	51.41	47.38	—	0.08	—	0.05	—	0.02	0.03	—	0.04	0.06	0.12	0.25	—	0.57	—	100.02
D-420-47-5	石英-黄铁矿	黄铁矿	49.36	47.32	—	0.07	0.04	0.09	—	—	—	—	—	—	—	0.1	—	0.69	—	97.65
D-420-47-5	石英-黄铁矿	黄铁矿	49.22	47.32	0.04	0.1	0.03	0.06	0.13	—	0.04	—	0.03	—	—	0.18	—	0.61	—	97.76
D-670-93S-01	石英-黄铁矿	黄铁矿	51.43	47.29	0.03	0.12	—	0.07	—	—	—	—	—	—	—	0.21	—	0.62	—	99.78
D-670-93S-01	石英-黄铁矿	黄铁矿	51.11	47.36	—	—	—	0.08	—	—	—	—	—	0.02	—	0.21	—	0.57	—	99.35
TK037-1	多金属硫化物	黄铁矿	51.37	45.35	—	—	0.06	—	—	—	—	0.03	—	—	—	0.19	—	0.63	—	97.63
TK037-2	多金属硫化物	方铅矿	12.8	0.03	—	86.34	—	—	—	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	99.23
X50-51M-01	石英-黄铁矿	黄铁矿	50.31	47.72	—	0.15	0.05	0.05	—	—	—	0.04	—	0.02	—	0.12	—	0.61	—	99.06
X50-51M-01	石英-黄铁矿	黄铁矿	50.19	47.14	—	0.09	—	0.24	0.02	—	0.09	—	—	0.02	0.35	0.15	—	0.53	0.02	98.86
X50-55-3	石英-黄铁矿	黄铁矿	51.46	47.38	—	—	—	0.06	—	—	0.03	—	—	—	—	0.1	—	0.61	—	99.63
X90-55-1	石英-黄铁矿	黄铁矿	51.27	47.74	—	0.12	—	0.05	—	0.04	—	—	—	—	—	—	—	0.55	0.02	99.8

注:测试单位为核工业北京地质研究院,2010;“—”表示低于检出限。

表 3 玲珑金矿黄铁矿及黄铜矿晶体化学式

Table 3 Crystal chemical formulas of pyrite and chalcopyrite in Linglong gold deposit

样号	矿物	化学式	S/Fe
J50-19-17-01	黄铜矿	$Cu_{1.0369}Fe_{1.0874}(S_{1.9993}Se_{0.0007})_2$	
J50-38ZX-04	黄铁矿	$(Fe_{1.0787}Co_{0.0009})(S_{1.9993}As_{0.0007})_2$	1.85
J230-176-3	黄铁矿	$Fe_{1.0603}(S_{1.9995}Se_{0.0005})_2$	1.89
LLD502	黄铁矿	$(Fe_{1.0605}Co_{0.0021})S_2$	1.89
LLD537	黄铁矿	$(Fe_{1.0601}Co_{0.0008})(S_{1.9993}As_{0.0007})_2$	1.89
LLD543	黄铜矿	$Cu_{1.0250}Fe_{1.0761}(S_{1.9990}Se_{0.0010})_2$	
LLD543	黄铁矿	$(Fe_{1.0574}Co_{0.0011})(S_{1.9987}As_{0.0005}Se_{0.0006}Te_{0.0002})_2$	1.89
D420-47-5	黄铁矿	$(Fe_{1.1006}Co_{0.0020})S_2$	1.82
D420-47-5	黄铁矿	$(Fe_{1.1031}Co_{0.0013}Ni_{0.0029})(S_{1.9988}As_{0.0007}Se_{0.0005})_2$	1.81
D670-93S-01	黄铁矿	$(Fe_{1.0557}Co_{0.0015})S_2$	1.89
D670-93S-01	黄铁矿	$(Fe_{1.0638}Co_{0.0017})S_2$	1.88
TK037-1	黄铁矿	$Fe_{1.0135}S_2$	1.97
X50-51M-01	黄铁矿	$(Fe_{1.0890}Co_{0.0010})S_2$	1.84
X50-51M-01	黄铁矿	$(Fe_{1.0775}Co_{0.0052}Ni_{0.0004})(S_{1.9985}As_{0.0015})_2$	1.85
X50-55-3	黄铁矿	$(Fe_{1.05681}Co_{0.0013})(S_{1.9995}As_{0.0005})_2$	1.89
X90-55-1	黄铁矿	$(Fe_{1.0688}Co_{0.0011})(S_{1.9996}Te_{0.0004})_2$	1.87

注:黄铁矿 S/Fe 理论值为 2。

(1)不同成矿阶段黄铁矿微量元素特征

早期的研究者^[5]注意到不同产状黄铁矿微量元素含量及特征明显不同。从表4可以看出,富矿阶段(第Ⅱ、Ⅲ阶段)微量元素总量大于贫矿及无矿阶段,特别是(Cu+Pb+Zn)及(Ga+In+Cd+Tl)含量具有显著差异。这可能是中低温条件下,硫化物快速冷却,黄铁矿结构缺陷多,易吸附杂质的结果。Au与Fe、Cu、Pb、Zn等元素具有相似的迁移及沉淀条件,而Ga、In、Cd与Zn共生,Pb与Tl共生,所以多金属硫化物阶段黄铁矿更容易富集上述元素。另外,西山样品黄铁矿微量元素总量及(Cu+Pb+Zn)、(Ga+In+Cd+Tl)含量等均大于东山样品,显然与孙国胜等^[33]关于“玲珑金矿由南东向北西随远离破头青断裂,多金属硫化物种类及含量呈增加的趋势”研究结果非常吻合。

表4 玲珑金矿黄铁矿微量元素组合与贫富矿关系

Table 4 Relationship between trace elements in pyrite combination and rich or poor ore in Linglong gold deposit

产状	$w_b/\%$			数据来源
	微量元素总量	Cu+Pb+Zn	Ga+In+Cd+Tl	
无矿	0.10	0.014 0	0.000 37	文献 ^[32]
围岩	0.25	0.100 0	0.000 64	
黄铁矿-石英(Ⅰ)	0.48	0.360 0	0.000 96	
石英-黄铁矿(Ⅱ)	1.83	1.636 0	0.002 5	
多金属硫化物(Ⅲ)	2.13	2.045 0	0.003 9	
Ⅱ-Ⅲ(西山)(2)	1.16	0.900 4	0.001 7	本文
Ⅱ-Ⅲ(东山)(6)	0.14	0.050 7	0.000 23	

此外,不同温度条件下的元素组合在不同成矿阶段黄铁矿中含量也有明显差异(表5)。其中,高温元素Co、Ni等趋向于在成矿早阶段(第Ⅰ阶段)黄铁矿中富集。随着热液演化,在第Ⅱ、第Ⅲ阶段依次减少。这一规律与多金属硫化物阶段成矿的温度较低^[34]的特点是一致的;另外,中温元素Cu、Pb、Zn等在多金属硫化物阶段(第Ⅲ阶段)富集最多,而在第Ⅰ阶段含量最少,也与金的富集规律一致^[34]。

值得注意的是,在石英-黄铁矿阶段的11个黄铁矿测点数据中(表2),有3个点检测出Au,金检出率为27%;而在多金属硫化物阶段的黄铜矿、黄铁矿6个测点中,有5个点检出Au,检出率高达83%,其中两个黄铜矿均含金,再次证明Au更趋向于在多金属硫化物阶段富集。

表5 玲珑金矿西山黄铁矿不同成矿阶段微量元素特征

Table 5 Characteristics of trace elements in different mineralization stages of pyrite in Western Mountain Mine area of Linglong gold deposit

阶段 (样数)	$w_b/10^{-6}$							数据来源
	Co	Ni	Cu	Pb	Zn	As	Sb	
Ⅲ(1)	42.0	25.0	13 700.0	250.0	6 500.0	830.0	6.0	文献 ^[32]
Ⅱ-Ⅲ(2)	86.3	11.6	1 179.5	3 490.5	5 553.5	1 056.5	3.2	本文
Ⅱ(6)	74.8	26.2	12 066.7	1 068.3	3 488.3	601.7	7.0	文献 ^[32]
I(1)	140.0	40.0	500.0	260.0	240.0	1 200.0	10.0	

(2)黄铁矿微量元素空间分布规律

近年来,对金矿中的黄铁矿微量元素的研究结果^[35-37]表明:受温度的影响,黄铁矿的微量元素在空间上具有明显的分布变化规律。一般地,Hg、As、Sb、Ba、Se、Te等高活动性的低温亲铜元素与Au总体呈正相关关系,它们多富集在矿体上部或顶部边缘晕的黄铁矿中;Cu、Pb、Zn等中温亲铜元素与Au、Ag的位置基本一致,多富集在矿体中部的黄铁矿中;而Co、Ni、Ti、Cr等高温亲铁、亲石元素与Au常呈负相关关系,多富集在矿体下部或根部原生晕的黄铁矿中。显然,当黄铁矿中的中、低温微量元素相对富集并且含量变化较大时,往往指示可能存在金的矿化。因此,利用黄铁矿的微量元素标型特征,可以对矿床的深部进行金矿化远景预测。

从表6可以看出,西山108号脉中黄铁矿的As、Cu元素分别代表矿体头部及中部,总体呈随标高的降低而递减趋势,而Pb、Ni元素含量有增高的趋势。

东山矿区(表6)总体表现为自上而下黄铁矿矿体头部微量元素(As+Sb+Te)呈先减小后增大的趋势,同时(Cu+Pb+Zn)也呈现相似的趋势,但在-230~-570 m标高段有明显波动。而(Co+Ni+Ti+Cr)的变化趋势与(Cu+Pb+Zn)正好相反。上述规律总体显示旋回式变化特点(图7),显然应该是成矿热液多期叠加所致。

一般来说,元素垂向上含量变化的转折点可能预示着一个矿体尾部与下一个矿体头部的叠加。玲珑金矿东山矿区-770 m标高处,其矿体头部元素组合(As+Sb+Te)及中部元素组合(Cu+Pb+Zn)含量的明显升高,而尾部特征元素组合(Co+Ni+Ti+Cr)含量的明显降低,这一转折现象可能指示矿体尾部元素与下一个矿体头部元素的叠加特征。由此推测,东山矿区-770 m标高段以下仍具较好的找矿潜力。

表 6 玲珑金矿黄铁矿微量元素含量

Table 6 Content of trace elements in pyrite of Linglong gold deposit

样号(样数)	标高	矿脉号	$w_{\text{B}}/10^{-6}$											Co/Ni	资料来源
			As	Sb	Se	Te	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Ti	Cr		
300-2-21	300		1 400	4	1.500	1	20 800	250	190	190	20	10	7	9.50	
260-1(2)	260		725	8.5	0.900	0.2	16 600	250	8 450	41	25	2	4	1.64	
230-1(2)	230	108(西山)	475	5	0.950	0.4	11 850	755.5	770	53.5	59	15	5	0.91	文献[32]
220-3-7	220		620	6	0.900	0.1	2 800	2 900	2 600	9	25	22	3	0.36	
190-6-3	190		20	11	0.800	0.2	5 600	1 400	6 200	19	50	7	2	0.38	
X-50-55-3	—50	55(西山)	495	1.150	0.935	0.015	1 282	6 806	10 126	96.2	13.3	6.75	0.435	7.23	
X-90-55-1	—90		1 618	5.260	0.382	0.006	1 077	175	981	76.4	9.9	5.09	0.37	7.72	
J50-38-01	50	38(东山)	271	0.781	0.505	0.021	521	828	62.1	21	5.63	10.5	—	3.73	
J-230-47-1	—230	47(东山)	153	0.195	0.790	0.040	146	55.3	39.2	433	121	129	11.6	3.58	本文
D-420-47-2	—420		74.2	0.271	0.439	0.010	474	12.5	37	90.2	48.9	81.1	—	1.84	
LLD483	—570		68	0.450	—	0.049	72.4	59.6	13	319	114	—	6.17	2.80	
D-670-93-01	—670		129	0.261	—	0.099	142	50.6	18.1	505	16.2	0.843	5.82	31.17	
SZK59-37-370	—770	175(东山)	190	0.266	0.606	0.021	99	217	201	147	10.9	10.9	—	13.49	

注：“—”表示未检出。本表数据测试单位：核工业北京地质研究所，2010。测试方法：ICP-MS。仪器型号：FinniganMAT 制造，HR-ICP-MS。

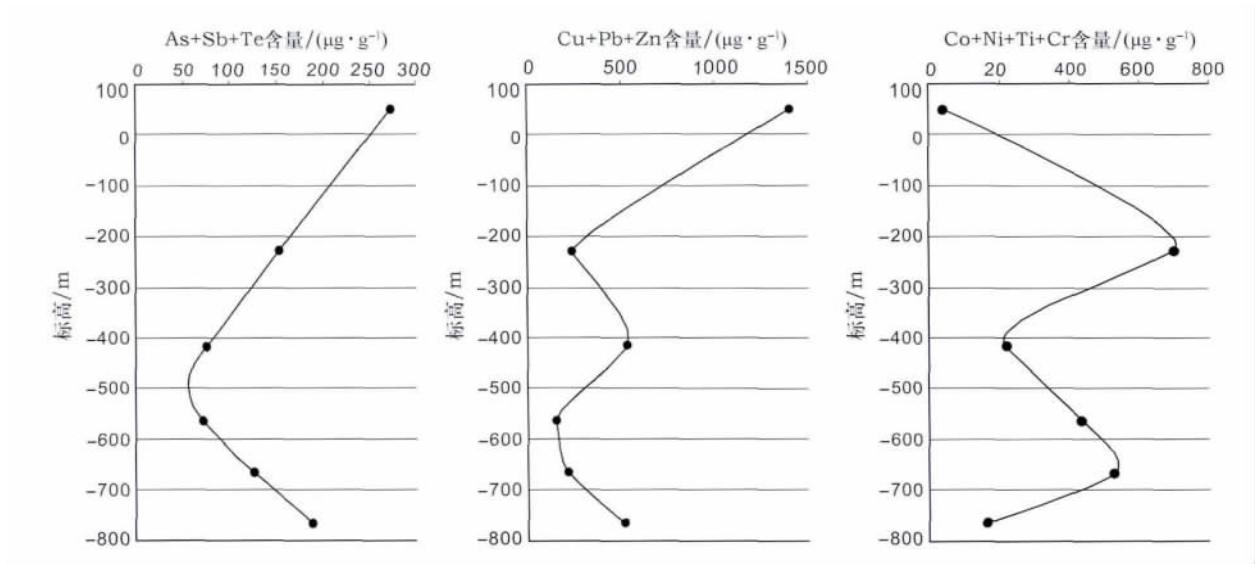


图 7 东山黄铁矿微量元素纵向含量分布图

Fig. 7 Longitudinal content distribution map of trace elements in pyrite of Eastern Mountain Mine area

实际上,在多金属硫化物矿床中,共生产出的黄铜矿-黄铁矿还可以很好的指示其形成的温压条件,特别是依据其中微量元素 Co 的分配系数与温度之相关关系,即经验公式 $T=[1\ 000/(1.292\times\lg K_{\text{Cpy-Py}}+2.382)]-273.15$ (其中 $K_{\text{Cpy-Py}}=1.53\times w(\text{Co}_{\text{Cpy}})/w(\text{Co}_{\text{Py}})$)。

将本区 J50-19-17-01 和 LLD543 两样品黄铜

矿-黄铁矿矿物对 Co 含量代入上式,得出温度分别为 138.06 ℃和 108.43 ℃,说明多金属硫化物阶段,黄铜矿-黄铁矿生成温度为 108.43~138.06 ℃。

3.3.3 黄铁矿稀土元素特征

现代海底热液研究表明,硫化物具有与热液流体相似的 REE 组成特征^[38]。由于 REE³⁺ 离子半径((0.977~1.16)×10⁻¹⁰ m)与 Fe²⁺ 离子半径(0.78×

表7 玲珑金矿主成矿阶段(Ⅱ、Ⅲ)黄铁矿稀土元素含量及特征值
Table 7 Pyrite rare earth element contents and characteristic values in the main
metallogenic stage(Ⅱ,Ⅲ) of Linglong gold deposit

序号	样号	取样位置	成矿阶段	$w_B/10^{-6}$											资料来源	
				La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er		
1	X-50-55-3	西山 55 号脉	Ⅱ+Ⅲ	1.060	1.690	0.184	0.616	0.126	0.036	0.083	0.022	0.087	0.018	0.054	本文	
2	X-90-55-1	西山 55 号脉	Ⅱ+Ⅲ	0.089	0.153	0.018	0.092	0.032	0.012	0.017	0.006	0.035	0.005	0.012		
3	J-50-38 支西-01	九曲 38 支西	Ⅱ+Ⅲ	0.709	1.160	0.131	0.442	0.084	0.015	0.042	0.004	0.015	0.000	0.007		
4	J-230-7-1	九曲 47 号脉	Ⅱ+Ⅲ	2.020	3.480	0.349	1.260	0.117	0.037	0.105	0.015	0.099	0.017	0.043		
5	D-420-47-2	大开头 47 号脉	Ⅱ+Ⅲ	13.300	21.900	2.310	8.410	1.140	0.223	0.713	0.062	0.206	0.030	0.071		
6	LLD483	大开头 47 号脉	Ⅱ+Ⅲ	0.251	0.441	0.046	0.179	0.015	0.010	0.018	0.002	0.009	0.002	0.003		
7	D-670-93 南-01	大开头 47 号脉	Ⅱ+Ⅲ	0.218	0.368	0.043	0.142	0.013	0.005	0.010	0.002	0.006	0.002	0.002		
8	SZK59-37-370	175 支 1	Ⅱ+Ⅲ	0.563	0.937	0.094	0.370	0.077	0.018	0.039	0.004	0.021	0.003	0.008		
9	2-1			0.610	1.018	0.101	0.363	0.066	0.030	0.079	0.012	0.048	0.009	0.018	文献[43]	
10	2-2			0.392	0.685	0.060	0.214	0.039	0.019	0.044	0.006	0.024	0.004	0.009		
11	2-3			0.562	0.379	0.045	0.158	0.029	0.021	0.030	0.006	0.026	0.006	0.016		
12	2-4			0.332	0.277	0.028	0.095	0.016	0.014	0.016	0.002	0.008	0.001	0.004		
13	2-5			0.492	0.422	0.044	0.145	0.028	0.021	0.026	0.004	0.018	0.004	0.009		
14	2-6			0.521	0.446	0.058	0.198	0.037	0.022	0.040	0.007	0.031	0.007	0.017		
序号	样号	取样位置	成矿阶段	$w_B/10^{-6}$							LREE/		(La/	δEu	δCe	资料来源
				Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	HREE	Yb) _N				
1	X-50-55-3	西山 55 号脉	Ⅱ+Ⅲ	0.005	0.039	0.006	0.549	4.026	3.712	0.264	11.822	18.324	1.013	0.849	本文	
2	X-90-55-1	西山 55 号脉	Ⅱ+Ⅲ	0.001	0.027	0.004	0.160	0.503	0.396	0.075	3.701	2.222	1.421	0.871		
3	J-50-38 支西-01	九曲 38 支西	Ⅱ+Ⅲ	0.001	0.005	0.001	0.060	2.616	2.541	0.068	33.880	95.601	0.688	0.854		
4	J-230-47-1	九曲 47 号脉	Ⅱ+Ⅲ	0.005	0.037	0.005	0.375	7.589	7.263	0.279	22.279	36.807	1.001	0.919		
5	D-420-47-2	大开头 47 号脉	Ⅱ+Ⅲ	0.011	0.051	0.008	0.714	48.435	47.283	1.082	41.044	175.819	0.706	0.877		
6	LLD483	大开头 47 号脉	Ⅱ+Ⅲ	0.000	0.003	0.001	0.041	0.980	0.942	0.034	24.789	56.408	1.858	0.920		
7	D-670-93 南-01	大开头 47 号脉	Ⅱ+Ⅲ	0.001	0.003	0.000	0.026	0.815	0.789	0.022	30.346	48.991	1.292	0.863		
8	SZK59-37-370	175 支 1	Ⅱ+Ⅲ	0.003	0.010	0.002	0.101	2.149	2.059	0.075	22.878	37.957	0.898	0.897		
9	2-1			0.002	0.015	0.003	0.003	2.374	2.188	0.166	11.738	27.417	1.269	0.901	文献[43]	
10	2-2			0.001	0.008	0.002	0.001	1.506	1.409	0.086	14.466	35.238	1.398	0.965		
11	2-3			0.003	0.024	0.007	0.227	1.311	1.194	0.084	10.188	15.787	2.160	0.430		
12	2-4			<0.001	0.005	0.002	0.058	0.799	0.762	0.031	20.374	47.624	2.649	0.527		
13	2-5			0.002	0.011	0.003	0.141	1.228	1.152	0.060	15.198	30.155	2.342	0.536		
14	2-6			0.003	0.021	0.005	0.224	1.413	1.282	0.102	9.794	16.726	1.739	0.512		
平均值								4.915	4.725	0.165	18.735	43.92	1.52	0.765		

注:2-1 至 2-6 号样品均为大西洋中脊 TAG 热液活动区表层块状硫化物。

10^{-10} m) 相差较大^[39], 稀土元素多不以类质同象的形式进入黄铁矿, 可能主要以机械混入物的形式存在于黄铁矿中, 因此黄铁矿对稀土元素没有选择性。王京彬^[40]认为黄铁矿中稀土元素组成特征主要取决于其沉淀时成矿溶液的稀土元素特征和形成环境。因此, 黄铁矿的 REE 组成特点可以指示流体的来源和形成环境。

玲珑金矿主成矿期黄铁矿稀土元素分析结果显示(表 7, 图 8), 稀土总量较低 $\Sigma \text{REE} = 0.50 \sim 48.44 \mu\text{g/g}$, 主要富集轻稀土, 且东山样品较西山样品轻、重稀土分馏更加显著。其中, 东山黄铁矿 $\text{LREE}/\text{HREE} = 22.28 \sim 41.04$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 36.81 \sim 175.82$, 西山黄铁矿 $\text{LREE}/\text{HREE} = 3.70 \sim 11.82$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 2.22 \sim 18.32$, 反映了两个矿区成矿环境具有一定的差异性。

另外, 玲珑金矿中黄铁矿铈异常值波动较大 $\delta \text{Eu} = 0.69 \sim 1.86$, 平均值为 1.11。铈显示弱的异常, $\delta \text{Ce} = 0.85 \sim 0.92$, 说明主成矿阶段流体形成于还原环境, 这与矿石中大量发育黄铁矿等硫化物的地质事实相吻合。

徐九华等^[41]研究了玲珑-焦家式金矿床脉石英和绢英岩中流体包裹体的微量元素特征后认为, 该区流体包裹体中 REE 配分模式均表现为 LREE 富集型, $\text{LREE}/\text{HREE} = 6.07 \sim 26.41$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 2.15 \sim 5.11$, 成矿流体具有弱的 Eu 正异常, $\delta \text{Eu} = 1.05 \sim 7.09$ 。这一规律与玲珑金矿黄铁矿稀土元素组成特点非常一致。

根据现代中高温酸性 ($T > 230^\circ\text{C}$, $\text{pH} < 6$) 地热系统的热液 REE 配分模式^[42], 大西洋中脊 (MAR)、东太平洋中隆 (EPR) 等海底热液均具有明显的 Eu 正异常。对比(表 7, 图 9)发现, 玲珑金矿主成矿阶段黄铁矿与大西洋中脊 TAG 热液活动区表层块状硫化物稀土元素含量及特征值惊人的相似 (大西洋中脊 TAG 热液活动区表层块状硫化物稀土总量较低, $\Sigma \text{REE} = 0.799 \sim 2.374$; 富集轻稀土, $\text{LREE}/\text{HREE} = 9.794 \sim 20.374$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 15.787 \sim 47.624$; 铈均为正异常, $\delta \text{Eu} = 1.269 \sim 2.649$, 铈负异常较明显, $\delta \text{Ce} = 0.43 \sim 0.965$)。显然可以推定二者具有相似的形成环境, 因此推测玲珑金矿的成矿流体来源较深。

3.4 黄铁矿热电性标型

黄铁矿是半导体矿物, 在受到温差作用时, 可以产生温差电动势。已有成果^[45]显示, 黄铁矿产

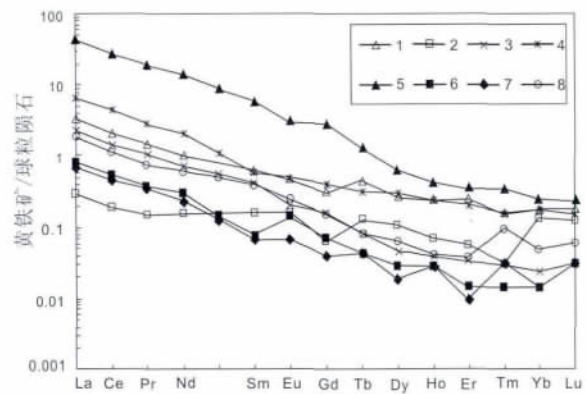


图 8 玲珑金矿黄铁矿 (II+III) 稀土元素球粒陨石标准化 REE 分布模式
(球粒陨石数据据文献[44])

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of pyrite (II+III) rare earth elements in Linglong gold deposit

1—X-50-55-3; 2—X-90-55-1; 3—J50-38 支西-01; 4—J-230-47-1; 5—D-420-47-2; 6—LLD483; 7—D-670-93 南-01; 8—SZK59-37-370。

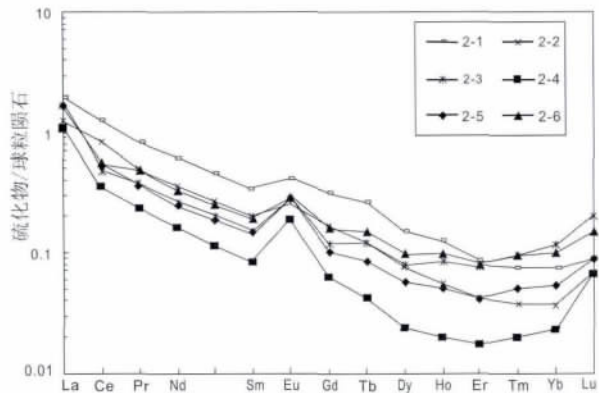


图 9 大西洋中脊 TAG 热液活动区表层块状硫化物的球粒陨石标准化 REE 分布模式
(球粒陨石数据据文献[44]; 样号同表 7)

Fig. 9 Chondrite-normalized REE data for the surface massive sulfides from the TAG hydrothermal field

出状态不同, 其热电性特征也不同。一般认为, 引起黄铁矿热电性差异的主要因素有晶体的形态、产状、矿床成因类型、微量元素含量、产出深度等^[5]。因此, 黄铁矿热电性对矿床成因、找矿预测、确定矿体剥蚀深度及其矿体深部定位预测都具有重要意义。

一般来说, 亏 S 并富 Cu、Co、Ni 的高温深成黄铁矿为电子导型 (N 型), 而亏 Fe 且 As、Sb 含量高的低温浅成黄铁矿则多为空穴导型 (P 型)。而当黄铁矿的成分和结构近于理想晶体时, 其导型变化不明显, 且热电势值很小。

金矿中黄铁矿热电性与黄铁矿的时空分布及形

成温度具有一定的相关性:矿体上部、晚期、较低温形成的黄铁矿,其热电系数 α 为正值,属P导型;矿体中部、中期、中温条件下形成的黄铁矿,其热电系数或正或负,多属混合导型(P-N型或N-P型);矿体下部、早期、高温条件形成的黄铁矿,其热电系数为负值,具有N导型特点。

3.4.1 玲珑金矿黄铁矿热电性测试结果

黄铁矿热电性测试在中国地质大学(北京)矿物标型实验室完成。测试仪器:BHTE-6型热电仪。测试条件: $\Delta T=(60\pm 3)^{\circ}\text{C}$ 。样品来自玲珑金矿9个中段及部分钻孔岩心样,共计50件约1944粒纯净黄铁矿颗粒。测试结果见表8。

测试数据分为西山组和东山组两组(表8),结果如下。

(1)西山黄铁矿热电性特征

前人^[5,46]所测的西山108号脉及55号脉黄铁矿热电性样品主要是位于标高+380~+190 m区段,其黄铁矿热电系数均较大,且以P型为主,夹杂少量N型。本次测试样品主要来自西山55号脉-10~-90 m标高,热电系数普遍偏小,且多为P-N混合导型。

从表8看出,西山55号脉P型黄铁矿出现率总体较高,多在60%以上。这说明,该深度范围仍处于矿化系统的上部或中上部位置。此外,随着深度增加,矿体在向下延伸的过程中,黄铁矿的导型总体呈现由P型至P-N型,再折返至N-P型、P型的变化趋势,且据黄铁矿热电性垂向分布及变化规律估算矿体的剥蚀程度维持在较低水平(36.67%~47.73%)。这一结果预示西山55号脉向下仍有较好的找矿前景。

(2)东山黄铁矿热电性特征

刘星^[46]对玲珑金矿东山52号脉黄铁矿热电系数进行了系统研究,发现它与黄铁矿的形成深度密切相关。即矿体从上到下,P型热电系数 α 值减小,出现率也逐渐减少,但P型出现率总体维持在较高水平(90%~77.7%)。本次测试样品主要来自东山的47号脉、175脉群和36号脉群。样品取自+50~-850 m标高区段。

从表8看出,东山黄铁矿热电系数变化幅度较大,为-401.8~+552.1 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 。但是,黄铁矿的导型在垂向上显示出明显的规律性变化(图10a)。

总体看:在+50~-850 m标高范围内,黄铁矿导型主要以P-N和N-P混合型为主,且P型出现率呈现脉动式变化。说明在+50~-850 m区段,是成矿比较活跃的深度,也反映了东山矿区热液成矿具多期次叠加的特点。这一范围内P型出现率平均为39.63%,理论上应该是位于矿体中部或中、下部。P型出现率波动规律显示,-850 m以下可能再次出现P型出现率增高的趋势。因此-850 m向下仍有较好的找矿前景。

3.4.2 黄铁矿P型出现率与微量元素的关系

由表9、图10a及图10b可以看出,东山矿区随着矿体向下延伸,P型黄铁矿出现率呈脉动式变化,但总体呈减小趋势。同样地,黄铁矿Co+Ni含量随深度增加亦呈脉动式变化,但总体呈增大趋势,且其含量变化转折点与P型出现率变化转折点相对应,表明黄铁矿Co+Ni含量可能是影响本区P型黄铁矿出现率变化的主导因素之一。一定程度上,P型黄铁矿出现率的降低及Co+Ni含量的升高反映了成矿温度的升高。

综合以上分析认为,该深度范围可能已处于矿床的中部或中、下部。继续下延,若P型黄铁矿出现率进一步降低,表明成矿温度会进一步升高,黄铁矿载金性可能有所降低,矿石品位会出现降低的趋势。

3.4.3 矿体剥蚀程度

根据黄铁矿热电性垂向分布及变化规律,可以估计矿体的剥蚀程度^[38]。依据热电性参数 X_{np} ,采用公式 $X_{np}=(2f_I+f_{II})-(f_{IV}+2f_V)$ (其中 f 为样品中相应热电系数值域的黄铁矿百分比, f_I 为 $\alpha>400\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, f_{II} 为 $\alpha=200\sim 400\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, f_{IV} 为 $\alpha=0\sim -200\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, f_V 为 $\alpha<-200\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$)计算矿体剥蚀率 $\gamma=50-X_{np}/4$ (实际是指采样空间范围相对于矿化总延伸的百分比),结果见图10c。可以看出,东山剥蚀水平主要在32.92%~75.40%,并具有脉冲式变化规律,且其脉动变化与P型黄铁矿出现率呈负相关关系,也与微量元素Co+Ni含量具有变化相应性。这一现象反映了该区成矿的多期性,表明深部仍有成矿潜力。其中P型出现率、Co+Ni含量和剥蚀水平一致的脉动式变化规律,预示在-900 m以下很可能有新的盲矿体头部出现。

表 8 玲珑金矿黄铁矿热电性特征及剥蚀度一览表

Table 8 Thermoelectricity of pyrite and denudation degree list in Linglong gold deposit

标高 /m	勘探线	矿脉	样品编号	P 型热电系数			P 型出现 频率/%	N 型热电系数			N 型出现 频率/%	导型	热电性 参数	剥蚀 率/%	资料来源
				$\alpha/(\mu V \cdot ^\circ C^{-1})$				$\alpha/(\mu V \cdot ^\circ C^{-1})$							
				最大值	最小值	平均值		最大值	最小值	平均值					
380						278.20	75			387.9	25	P-N			
340						287.90	100			0	0	P			
300		108(西山)				342.40	62.5			195.3	37.50	P-N			文献[5]
230						294.50	77.78			369.1	22.22	P-N			
220						325.60	62.5			325.4	37.5	P-N			
190						275.50	80			244.1	20	P-N			
230		55(西山)		615	12	223.20	64	812	12	240	36.00	P-N			文献[46]
190				731	11	305	62.9	708	9	157.1	37.10	P-N			
-10	598		X-10-55-3	335	10.2	171.20	78.79	252.50	39	94.1	21.21	P-N	0.09	47.73	
-50	616	55(西山)	X-50-55-3	335.6	13.2	137.60	36.67	176.70	11.7	85.2	63.33	N-P	53.33	36.67	本文
-90	635		X-90-55-1	315	10	187.80	96.67	65.40		65.4	3.33	P-N→P	46.67	38.33	
350				494	58	301	90	234	35	139	10	P-N→P			
255				438	31	222	86.8	221	32	163	13.20	P-N			
206		52(东山)		560	22	214.02	85	259	13	187	15	P-N			文献[46]
170				569	22	237	82.1	337	35	180	17.90	P-N			
130				536	14	196.40	77.7	474	15	203	22.30	P-N			
	18		J50-18-01	341.3	3.4	231.2	100				0	P	70	32.5	
	19	5(东山)	J50-19-01	552.1	48.8	404.3	94	291.3	108.8	203.4	6	P-N→P	140	15	
	19		J50-19-17-01	459.1	184.7	377.5	98	350		350	2	P-N→P	67	33.25	
	20		J50-38 支西-01	494.6	21.6	297.6	94	75.6	18.8	56.1	6	P-N	94	26.5	
	20	38(东山)	J50-38 支西-02	485	1.6	291.2	100				0	P	100	25	
	20		J50-38 支西-03	404.8	9	233.6	86	78.2	10.6	41.4	14	P-N	44	39	
50	20		J50-38 支西-04	391.1	3	151.5	52	130	7.5	54.2	48	P-N	-36	59	
	638		X-50-51m-03	306.5	6	128.8	30	401.8	36.5	170.8	70	N-P	-90	72.50	
	660		X-50-141c-1	418.4	1.5	149.8	66	93.2	7.4	41.4	34	P-N	-8	52.00	
-50	660	51(东山)	X-50-141c-1(2)	324.8	25.2	152.5	40	260.9	22.1	129	60	N-P	-76	69.00	
	660		X-50-141c-2(3)	418.6	1.5	129.9	24	302.4	3	133.2	76	N-P	-62	65.50	
	660		X-50-141c-3	415.6	2.9	110.2	46	248.9	2.9	94.4	54	N-P	-46	61.50	
	12		J-230-47-1				0	182.1	46.1	127.3	100	N	-100	75.00	
-230	16	47(九曲)	J-230-47-3	261.5	14.8	150.4	20	221.5	35.2	136.9	80	N-P	-76.67	69.17	本文
	16		J-230-47-4				0	150.3	78.4	113.6	100	N	-100	75.00	
-406	59	176N	ZK59-37-5.5	247.5	13.6	103.9	26.67	158.9	13.3	90.5	73.33	N-P	-70	67.50	
		176N	Zk59-37-7	162.1	6.8	82.6	22.5	216.4	5.1	94.4	77.5	N-P	-82.50	70.63	
	59		LLD530	71.3	5.1	38.4	13.33	150.7	20	72.1	86.67	N-P	-28.13	57.03	
	60		LLD531	340.2	3.5	246.2	90.91	219	68.1	123.7	9.09	P-N→P	-86.67	71.67	
	61		LLD532	178.3	1.7	94.5	13.33	135.5	5	67.1	86.67	N-P	57.58	35.61	
-420	63	47(大开头)	LLD533	81.7		81.7	3.1	278.6	53	132.9	96.9	N-P→N	-86.67	71.67	
	64		LLD534	303.7	17.1	122.5	20	258.1	31.1	103.8	80	N-P	-109.38	77.34	
	68		LLD537	263	1.7	132.4	6.7	265	27.3	127.6	93.3	N-P→N	-77.14	69.29	
	82		D-420-47-2	307.8	15.3	132.7	65.63	286.4	59.2	133.8	34.37	P-N	-93.33	73.33	
-505	17	175 支 1	ZK17-34-305	274.8	27.1	120.2	43.33	282.2	45.9	136.2	56.67	N-P	-66.67	66.67	
	17		ZK17-34-306	330	5.1	127.7	63.33	334.5	1.7	94.8	36.67	P-N	-23.33	55.83	

续表

标高 /m	勘探线	矿脉	样品编号	P 型热电系数			P 型出现 频率/%	N 型热电系数			N 型出现 频率/%	导型	热电性 参数	剥蚀 率/%	资料来源	
				$a/(\mu V \cdot ^\circ C^{-1})$				$a/(\mu V \cdot ^\circ C^{-1})$								
				最大值	最小值	平均值		最大值	最小值	平均值						
-570	70	47(大开头)	LLD479	308	3.3	99.7	37.93	161.9	15	70.9	62.07	N-P	-55.17	63.79	本文	
	73		LLD484	64.1		64.1	3.33	224.1	10.1	108.5	96.67	N-P→N	-100	75.00		
	73		LLD499	139.2	12	75.6	6.06	153.1	10.3	88.9	93.94	N-P→N	-93.94	73.49		
	74		LLD500	97.5		97.5	3.13	181.3	38.6	111.7	96.87	N-P→N	-96.88	74.22		
	78		LLD506				0	143.8	54.7	89.2	100	N	-100	75.00		
	83		LLD512	219.6	9.8	80.8	28.13	142.2	6.5	72.6	71.87	N-P	-68.75	67.19		
83	175 支 2	ZK83-32-137	296.9	6.7	118.8	24.14	189.1	8.4	81.9	75.86	N-P	-72.41	68.10			
-620	60	47(大开头)	LLD514	52.1		52.1	3.03	233.5	8.5	102.5	96.97	N-P→N	-100	75.00		
	70		LLD524	334.5	98.6	239.5	77.78	182	15	91.7	22.22	P-N	33.33	41.67		
	72		LLD526				0	129.1	15.1	82.9	100	N	-100	75.00		
-670	85	47(大开头)	D-670-47m-01	214.4	21.3	107.9	17.65	170	25	122.4	82.35	N-P	-78.43	69.61		
	88		D-670-88-01	333.3	4.4	119.6	28	226.8	1.5	93.6	72	N-P	-68	67.00		
	93		D-670-93-1	1 432.5	9	283.4	20	204.3	22.6	102	80	N-P	-72	68.00		
-770	59	175 支 1	ZK59-37-367	324.9	19.9	179.4	76.67	158.9	25.3	76.3	23.33	P-N	13.33	46.67		
			ZK59-37-367.5	332.2	13.6	192.8	56.67	150.9	20.1	86.7	43.33	P-N	-20	55.00		
			ZK59-37-370	319.9	16.7	110.7	43.33	212.2	13.3	109.9	56.67	N-P	-53.33	63.33		
			ZK59-37-369.5	279.8	3.4	104.2	59.46	164.1	1.7	63.5	40.54	P-N	-35.14	58.78		
-850	17	175 支 2	ZK17-34-641.5	92.8		92.8	3.33	217.1	49.3	135.7	96.67	N-P→N	-100	75.00		
			ZK17-34-648.5	207.8	8.5	126.7	18.75	244.6	2.7	122.3	81.25	N-P	-90.63	72.66		
			ZK17-34-654.5	241.6	37.4	124.1	7.50	301.5	3.7	155.3	92.5	N-P→N	-112.5	78.13		
			ZK17-34-652.5	216.3	71.3	103.7	10	256.7	23.5	133	90	N-P	-103.33	75.83		

表 9 玲珑金矿东山不同标高黄铁矿的导型变化趋势
Table 9 Change trend of conduction-type of pyrite in different elevations in Eastern Mountain Mine area in Linglong gold deposit

中段高度(或标高)/m	P 型出现率/%	黄铁矿 Co+Ni 含量 $(\mu g \cdot g^{-1})$	导型变化趋势	平均剥蚀率/%
50	91.33	26.63	P→P-N	32.92
-50	41.2		P-N→N-P	64.10
-230	6.67	554	N-P→N	73.06
-420	29.13	139.1	N→N-P	66.01
-505	48.2		N-P→P-N	61.25
-570	14.67	433	P-N→N-P	70.97
-620	26.94		N-P	63.89
-670	21.88	521.2	N-P	68.20
-770	59.03	157.9	N-P→P-N	55.95
-850	9.90		N-P→N	75.40

3.4.4 黄铁矿热电性填图 成矿预测^[46]。本次黄铁矿热电性填图样品采自进行热电性填图并与同位空间金富集特点对比,可以总结金富集规律并能够进行深部和近外围号勘探线。

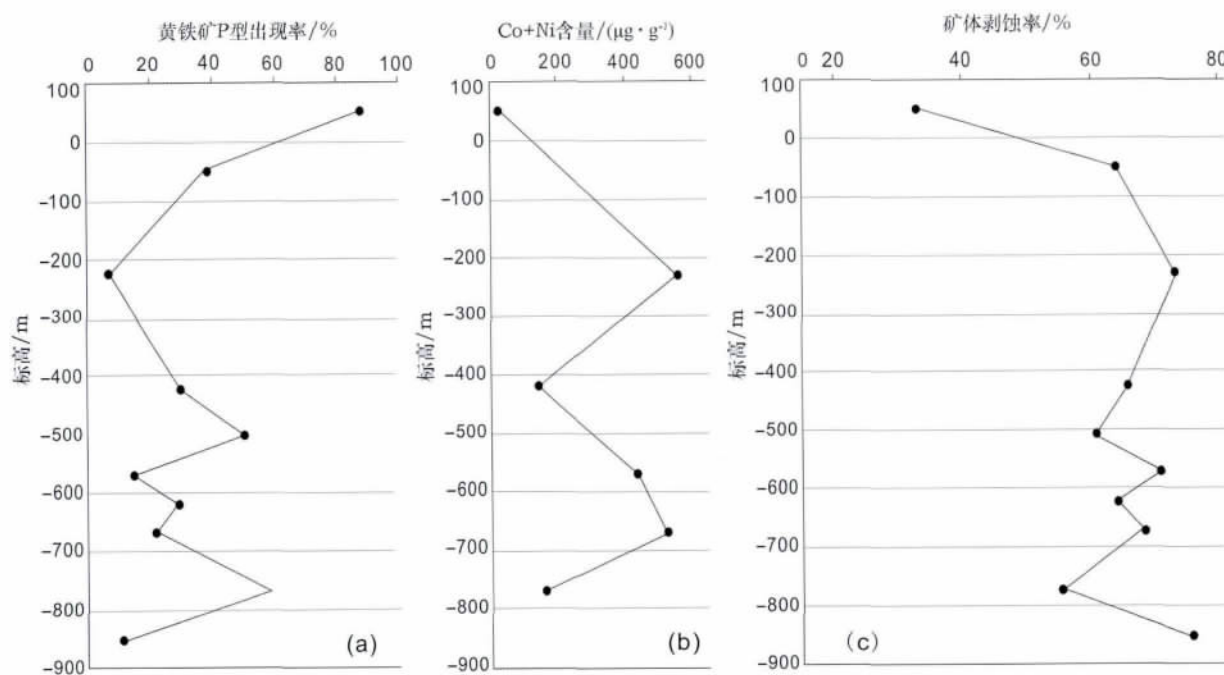


图 10 东山矿区 P 型黄铁矿出现率(a)、Co+Ni 含量(b)及矿体剥蚀率垂向变化(c)

Fig. 10 Occurrence rate of P-type pyrite(a), content of Co+Ni(b), and vertical variation of denudation rate of ore body(c) in Eastern Mountain Mine area

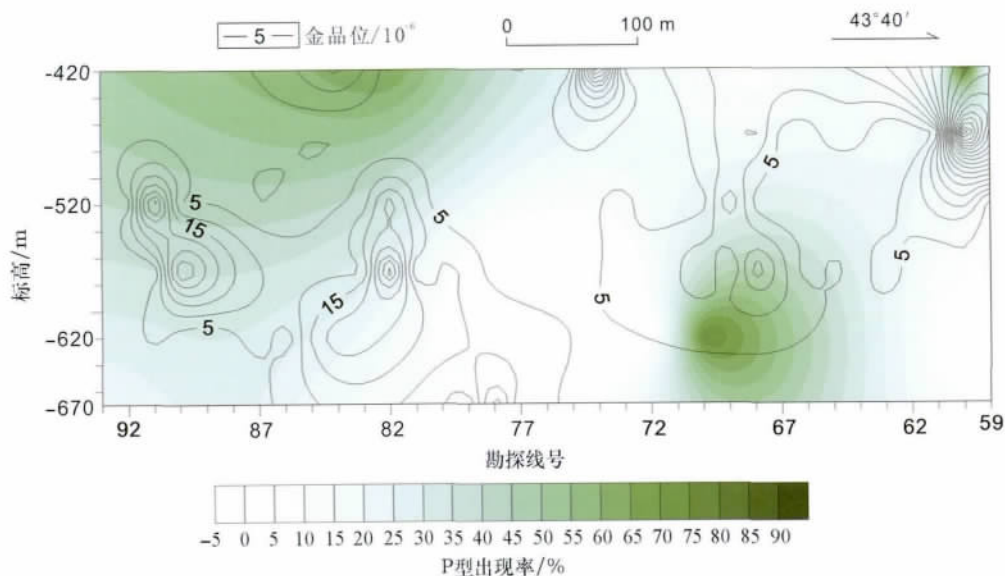


图 11 玲珑金矿东山 47 号脉金品位与 P 型黄铁矿出现率等值线垂直纵投影图

Fig. 11 Contour vertical projection of gold grade and occurrence rate of P-type pyrite in No. 47 vein of Eastern Mountain Mine area of Linglong gold deposit

图 11 是玲珑金矿东山大开头矿区 47 号脉金品位与 P 型黄铁矿出现率等值线垂直纵投影叠合图。

由图 11 可以看出,47 号脉金品位高值区多分布在 P 型出现率高值区下部,反映了 P 型出现率高值区多集中在矿体头部,尤其如图面的左侧区域,其

金品位高值区(-500~-620 m 中段、第 82 至 92 号勘探线)明显对应于 P 型出现率高值区下部。在图的右上部区域,金品位高值区明显对应于-420 m 标高之第 59 号勘探线 P 型出现率高值区的下部。特别值得强调,-620 m 中段第 65 至 71 号勘探线

之间的P型出现率高值区可能是一个新的盲矿体的头部,其上部的金品位高值区正是下部成矿元素晕叠加所致。

据以上分析结果推测,−670 m 标高以下,第93至75号勘探线之间及第72至63号勘探线之间具有良好的找矿前景。

图12是金品位与热电系数等值线垂直纵投影叠合图。可以看出,金品位高值区并不与黄铁矿热电系数高值区重合,而是主要分布在黄铁矿热电系数中、高值区过渡区域。据金品位高值区分布规律及黄铁矿热电系数中高值等值线闭合趋势,对照图11黄铁矿P型出现率变化趋势,同样可以预测−670 m 标高以下,第93至75号勘探线之间及第72至62号勘探线之间具有良好的找矿前景。

4 黄铁矿标型特征的深部找矿意义

由上述分析研究结果可以看出,对于明确黄铁矿是载金矿物的金矿床而言,全面系统地研究黄铁矿的主要标型特征,并统计分析其标型特征与金矿化时空分布规律关系,进而建立黄铁矿标型特征找矿模型,可以为找矿预测提供依据。因此,玲珑金矿黄铁矿标型研究,特别是进行黄铁矿标型特征空间矿物学填图,对于深部找矿预测具有十分重要的意义。

综合上述研究认为,玲珑金矿黄铁矿具有显著

找矿意义的标型特征表现如下。

(1)黄铁矿为产出于各成矿阶段的贯通性矿物,也是主要的载金矿物。主成矿阶段(第Ⅱ、Ⅲ阶段)黄铁矿含金性较高,多呈五角十二面体晶形或复杂聚形出现,颜色为黄色-金黄色,粒度一般较细,常呈裂纹状、破碎状。

(2)黄铁矿的主量元素表现为富铁贫硫特征,从浅部至深部其S/Fe平均值具逐渐升高趋势,表明含矿流体在上升运移过程中硫逸度是逐渐降低的。

(3)多金属硫化物阶段共生的黄铁矿-黄铜矿矿物对可以计算成矿温度,计算结果显示玲珑金矿成矿温度较低,约为108.43~138.06℃。

(4)富矿阶段(第Ⅱ、Ⅲ阶段)黄铁矿微量元素总量大于贫矿和无矿阶段黄铁矿。这可能是在中低温成矿条件下,硫化物快速冷却,导致黄铁矿结构缺陷明显增多,以至于非常易吸附流体体系中的杂质元素所致。所以,黄铁矿微量元素总量高是富矿段的找矿标志之一。

(5)玲珑金矿东山矿区自上而下,黄铁矿微量元素(As+Sb+Te)组合与(Cu+Pb+Zn)组合呈现明显的先降低后升高趋势,而(Co+Ni+Ti+Cr)组合呈现相反变化趋势,同时沿垂向显示旋回式震荡变化规律。这说明金富集不仅存在垂向规律性变化,而且成矿热液可能存在多期叠加现象。据此推测东山矿区−770 m 标高以下仍具较好的找矿潜力。

(6)随着成矿热液流体的不断演化(自Ⅰ阶段至

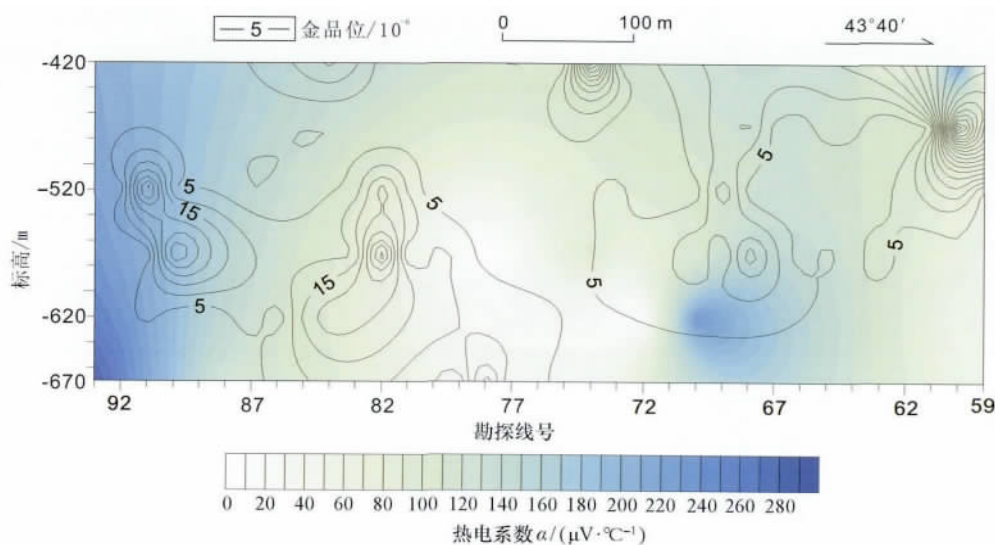


图12 玲珑金矿东山47脉金品位与热电系数等值线垂直纵投影图

Fig. 12 Contour vertical projection of gold grade and thermoelectric coefficient of pyrite in No. 47 vein of Eastern Mountain Mine area of Linglong gold deposit

II、III阶段),黄铁矿中高温元素 Co、Ni 等含量逐渐减少,反映成矿温度由早阶段至主成矿阶段具有逐渐降低的趋势。

(7)该矿主成矿阶段黄铁矿稀土元素总量较低,且富集轻稀土, δEu 平均值为 1.11,具弱铈负异常($\delta\text{Ce}=0.85\sim0.92$),显示其主成矿阶段流体呈还原环境,与矿石中大量发育黄铁矿等硫化物的地质事实一致。此外,其稀土元素配分模式与大西洋中脊 TAG 热液活动区表层块状硫化物相似,说明成矿流体具深源特征。

(8)西山矿区 55 号矿脉 P 型黄铁矿出现率总体维持在较高水平(多在 60%以上),显示为矿体的中-上部特征。根据黄铁矿热电性垂向分布及变化规律,估算该矿脉的剥蚀率为 36.67%~47.73%,说明剥蚀水平不大。综合判断该矿脉向下仍有良好的找矿前景。

(9)东山矿区 P 型黄铁矿出现率在垂向上呈脉动式变化,且随着矿体向下延伸,总体出现率水平呈减小趋势。另外,(Co+Ni)元素组合的含量随延深亦呈脉动式变化,但总体具增高趋势。二者的变化转折点完全耦合对应,表明黄铁矿(Co+Ni)含量是本区 P 型黄铁矿出现率变化的主导因素。依据黄铁矿热电性垂向分布及变化规律,估算矿床剥蚀度为 32.92%~75.40%。对照 P 型黄铁矿出现率及(Co+Ni)含量变化规律,说明东山矿区已开采至矿体中、下部区域。

(10)由东山大开头矿区 47 号脉 P 型黄铁矿出现率空间填图可知,金品位高值区多分布在 P 型黄铁矿出现率高值区下部。据此推测:—670 m 标高以下,第 93 至 75 号勘探线之间及第 72 至 63 号勘探线之间具有良好的找矿前景。

(11)东山大开头矿区 47 号脉黄铁矿热电系数与金品位等值线垂直纵投影叠合图显示:金品位高值区与黄铁矿热电系数中、高值区相对应。结合金品位高值区分布规律及黄铁矿热电系数中、高值等值线闭合趋势,推测—670 m 标高以下,第 93 至 82 号勘探线之间及第 72 至 62 号勘探线之间具有良好的找矿前景。

感谢玲珑金矿武际春总工程师和刘维民高级工程师对野外工作的大力支持。

参考文献

[1] 翟明国,范宏瑞,杨进辉,等.非造山带型金矿:胶东型金矿

的陆内成矿作用[J].地学前缘,2004,11(1):85-98.

[2] 李惠,张文华.胶东大型金矿床的地球化学分带特征[J].贵金属地质,1999,6(4):217-222.

[3] 涂光炽.超大型矿床的探索与研究的若干进展[J].地学前缘,1994,1(3):45-53.

[4] 申维.利用“p100/q100”律对胶东地区金矿资源潜力估计[J].地学前缘,2001,8(4):463-466.

[5] 陈光远,孙岱生,邵伟,等.胶东金矿成因矿物学与找矿[M].重庆:重庆科技出版社,1989.

[6] Li S R, Santosh M. Metallogeny and craton destruction: Records from the North China Craton[J]. Ore Geology Reviews, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.03.002>.

[7] Guo P, Santosh M, Li S R. Geodynamics of gold metallogeny in the Shandong Province, NE China: An integrated geological, geophysical and geochemical perspective[J]. Gondwana Research, 2013, doi: 10.1016/j.gr.2013.02.004.

[8] Shen J F, Li S R, Santosh M, et al. He-Ar isotope geochemistry of iron and gold deposits reveals heterogeneous lithospheric destruction in the North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, doi: 10.1016/j.jseaes.2013.04.004.

[9] Yang Q Y, Shen J F, Li S R, et al. Oxygen, boron, chromium and niobium enrichment in native Au and Ag grains: A case study from the Linglong gold deposit, Jiaodong, eastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 62: 537-546.

[10] 周国发.玲珑金矿田构造蚀变岩带及找矿预测研究[D]:北京:中国地质大学(北京),2009.

[11] 邓军,翟裕生,杨立强,等.构造演化与成矿系统动力学:以胶东金矿集中区为例[J].地学前缘,1999,6(2):315-323.

[12] 吕古贤,林文蔚,郭涛,等.金矿成矿过程中构造应力场转变与热液浓缩稀释作用[J].地学前缘,2001,8(4):253-264.

[13] 张增奇,宋志勇,张淑芳,等.鲁东前寒武纪岩石地层清理意见[J].山东地质,1994,10:17-20.

[14] 李士先,刘长春,安郁宏,等.胶东金矿地质[M].北京:地质出版社,2007.

[15] 罗镇宽,苗来成.胶东招徕地区花岗岩和金矿床[M].北京:冶金工业出版社,2002.

[16] 陈衍景, Pirajno F, 赖勇,等.胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境[J].岩石学报,2004,20(4):907-922.

[17] 吕古贤,韦昌山,邓军,等.典型矿集区成矿地质事件研究和填图方法初探[J].地质通报,2005,24(5):451-454.

[18] 陈光远,鲁安怀.矿物成分标型继承性与金矿矿质来源[J].地学前缘,1994,1(4):204-210.

[19] 吕古贤,武际春,郑小礼,等.山东省玲珑金矿田深部资源第二富集带的研究和预测[J].矿床地质,2006,25(增刊):436-438.

[20] 孔庆存,宋玉国,邓永高,等.玲珑金矿田矿脉深部成矿预

- 测方法[J]. 地质找矿论丛, 1987, 2(4): 77-83.
- [21] 陈光远, 孙岱生, 殷辉. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1987: 11-35.
- [22] 孙国胜, 刘颖, 李绪俊, 等. 玲珑金矿田不同级别构造控矿特征[J]. 地质地球化学, 2003, 31(2): 18-24.
- [23] 刘维民, 武际春, 郭万臣, 等. 玲珑金矿田东山矿床地质特征、成矿规律研究及找矿应用[J]. 2008, 16(4): 41-44, 57.
- [24] 张华锋, 翟明国, 何中甫, 等. 胶东崂崂山杂岩中高锆花岗岩地球化学成因及其意义[J]. 岩石学报, 2004(3): 369-380.
- [25] 李兆龙, 杨敏之. 胶东金矿床地质地球化学[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1993: 1-300.
- [26] 刘连登, 姚凤良, 孔庆存, 等. 岩脉在热液矿床成因研究中的意义: 以胶东西北部金矿床为例[J]. 长春地质学院学报, 1984(4): 13-26.
- [27] 孙景贵. 胶东地区地质体的含金性与金成矿关系[J]. 地质找矿论丛, 1999, 14(2): 43-54.
- [28] 王安平, 姚杰, 马丽群, 等. 玲珑金矿黄铁矿中显微金、超显微金的矿物学特征[J]. 黄金, 1999, 20(2): 6-9.
- [29] Afifi A M, Kelly W C, Essene E J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria[J]. Economic Geology, 1988, 83: 377-394.
- [30] 杜乐天, 刘若新, 邓晋福. 地幔流体与软流层(体)地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 456-457.
- [31] 周起凤. 胶东乳山英格庄金矿成因矿物学与深部远景研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- [32] 严育通, 李胜荣, 贾宝剑, 等. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J]. 地学前缘, 2012, 19(4): 214-226.
- [33] 孙国胜, 李绪俊, 姚凤良, 等. 玲珑金矿田矿物组合与地球化学分带及矿体定位预测意义[J]. 地质与勘探, 2002, 38(4): 28-32.
- [34] 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, 1996: 1-42.
- [35] Boyle R W. The Geochemistry of Gold and Its Deposits[M]. Hull, Quebec: Canadian Government Publishing Centre, 1979.
- [36] 李惠, 张文华, 常凤池. 大型、特大型金矿盲矿预测的原生叠加理想模型[J]. 地质找矿论丛, 1999, 14(3): 25-33.
- [37] 胡楚雁. 黄铁矿的微量元素及热电性和晶体形态分析[J]. 现代地质, 2001, 15(2): 238-241.
- [38] Mills R A, Elderfield H. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TSG Mond, 26°N Mid-Atlantic Ridge[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59: 3511-3524.
- [39] Shannon R D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides[J]. Acta Crystallographica, 1976, A32: 751-767.
- [40] 王京彬. 石英和硫化物中的稀土元素: 成矿物质来源的指示剂[M]//矿床地质与矿床地球化学研究新进展. 兰州: 兰州大学出版社, 1990: 131-132.
- [41] 徐九华, 谢玉玲, 刘建明, 等. 玲珑-焦家式金矿床流体包裹体的稀土和微量元素特征[J]. 岩石学报, 2005, 21(5): 1389-1394.
- [42] 别风雷, 侯增谦, 李胜荣, 等. 川西呷村超大黑矿型矿床成矿流体包裹体稀土元素组成[J]. 岩石学报, 2000, 16(4): 575-580.
- [43] 曾志刚, 翟世奎, 赵一阳, 等. 大西洋中脊 TAG 热液活动区中热液沉积物的稀土元素地球化学特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(3): 60-66.
- [44] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[M]//Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-107.
- [45] 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.
- [46] 刘星. 玲珑金矿床的矿化垂直分带[J]. 矿床地质, 1990, 9(3): 243-256.