金 矿 找 矿 矿 物 学

徐国风

（武汉地质学院）



作者简介 1953年毕业于北京地质学院留校任教至今。现任武汉地质学院矿产系教授，中国地质学会矿相学委员会副主席。曾出席过锡矿地质国际讨论会、国际矿物学协会第十四届大会并赴美考察金属矿床。专长为金矿床地质学、金属矿物学。

本文提出了贵金属页岩型金矿床、金铀变质砾岩型金矿床、浅成火山热液型金矿床、赫姆洛型金矿床和铁帽型金矿床矿物共生组合具有标型意义。同时指出只有镍黄铁矿、水硅铀矿和火山热液型金矿床蚀变带中的绿帘石为标型矿物。并以新资料介绍了金矿石矿物具有形态、化学成分、晶体结构、物理性质、包裹体成分及同位素组成方面的找矿标型特征。最后列举了近几年成功地应用金矿找矿矿物学，对中国一些金矿区的找矿工作成果。

矿物的标型性研究包括矿物共生组合、标型矿物和矿物的标型特征三方面内容。现就金矿找矿矿物学已经取得的成果简介如下。

一、金矿石的标型矿物共生组合

在许多不同类型的金矿床中，矿石的矿物共生组合大体相同，主要为自然金—石英—硫化物组合。它们不具标型意义。但有少数类型的金矿床，其矿石的矿物共生组合具有标型意义，例如：二十世纪八十年代发现的贵金属（金、银、铂）页岩矿床；储量及产量均居世界首位的早元古代金—铀变质砾岩型金矿床；产在中元古宙奥林匹克坝组和格林菲尔德组沉积岩中的层控铜—铀伴生金矿床；产在中、新生代火山岩、次火山岩及其围岩中的浅成火山热液型金银矿床；产于太古代绿岩带地层上部长英质变质火山碎屑—沉积岩中的层控浸染型矿床——赫姆洛型金矿床；产于太古代绿岩带地层下部变质基性岩（科马提岩）和中部的中性火山岩—沉积岩系中的绿岩带型脉状及浸染状金矿床；铁帽型金矿床。这些矿床的标型矿物共生组合见表1。

此外，金矿床的矿物组合在空间分布上往往有一定的规律，一般是高温矿物组合在矿体深部较为发育；低温矿物组合在矿体浅部较为发育。

二、金矿床的标型矿物

金矿床中的标型矿物有待进一步深入研究。由于许多不同类型金矿床的形成条件在大的方面有相似之处，故不象碱性岩浆岩、超基性岩、金伯利岩等岩石中的霓石、白榴石、橄榄石、镁铝榴石和镁钛铁矿等矿物那样可以作为标型矿物。目前只有镍黄铁矿和金、铂、钯、铜的互化物可作为基性—超基性岩中的岩浆熔离成因的铬—钛—铜—铂—镍型金矿床的标型矿物。水硅铀矿可以作为奥林匹克坝型层控型铜—铀—金矿床的标型矿物。据Г.М.Гундобин等1984年对苏联火山带中的火山热液型金银矿床的研究，金矿床蚀变带中如有绿帘石存在，则表示该矿床是在中等深度条件下形成的，而不是浅部矿床或近地表矿床[1]。

三、金矿石中矿物的标型特征

每种矿物都包括有反映其形成时的物理化学条件和地质环境的信息，这些信息就是矿物的标型特征。现将金矿石中矿物的形态、化学成分、晶体结构、物理性质、包裹体特征、同位素组成等方面的标型特征分述如下：

（一）形态标型特征

据А.Я.Пшеничкин1985年对苏联阿尔泰库兹涅茨金矿田中、低温热液型金多金属硫化物建造金矿

各类型金矿床标型矿物共生组合表　　表1

矿床类型	标型矿物共生组合
贵金属页岩型金矿床	银金矿、砷钯矿、硫钼铜矿、辉钼矿、硫铋铜矿、砷镍矿、辉砷镍矿、斜方砷镍矿、方钴矿、辉钴矿、斜方砷钴矿、铜蓝、留色铜蓝、蓝辉铜矿、磷灰石、方硼石、石英、金有机酸盐、硫金酸盐、铂烯烃族化合物。矿石含有（克/吨）金5～200、银2～1000、铂10～370、钯10～120、钼200～4800、铋100～4000、镍100～1500、钴40～1850、汞200～800、磷0.5%、氟3～4%、硼0.2%、有机碳2.4～1.8%、部分沥青物质。
金铀变质砾岩型金矿床	石英、绢云母、黄铁矿、自然金、沥青铀矿、钛铀矿、碳铀钍矿、铬铁矿、赤铁矿、金刚石、锆石、钛铁矿、金红石、刚玉、柘榴石、锇铱矿、方解石、绿泥石、滑石、角闪石、石墨、毒砂、磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、辉锑矿及钴和镍的砷化物等。
层控铜铀伴生金矿床	斑铜矿、黄铜矿、辉铜矿、蓝辉铜矿、铜蓝、自然铜、水硅铀矿、钛铀矿、沥青铀矿、自然金、自然银、赤铁矿、磁铁矿、菱铁矿、黄铁矿、富铁绿泥石、辉砷钴矿、氟碳铈矿、磷铝铈矿、石英、萤石、重晶石、多硅白云母、金红石、锐钛矿等。
浅成火山热液型金银矿床	金银矿、银金矿、石英、玉髓、黄铁矿、毒砂、辉银矿、螺状硫银矿、浓红银矿、银硒化物、含银黝铜矿族、脆银矿、冰长石、片沸石、菱锰矿、蔷薇辉石、明矾石、萤石、重晶石、绢云母、绿泥石、绿帘石、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、辉锑矿等。
绿岩带型金矿床	石英、极高成色的自然金、绿泥石、磁铁矿、钛铁矿、白钨矿、方铅矿、磁黄铁矿、毒砂、黄铜矿、微量碲银矿和碲铅矿。
赫姆洛型金矿床	黄铁矿、辉钼矿、辉锑矿、黝铜矿、砷黝铜矿、自然金、闪锌矿、辉锑铅矿、雄黄、辰砂和硫砷汞铜矿、微量方锑金矿、硫锑铅矿、车轮矿、特硫锑铅矿、砷硫锑铅矿、硫锑铊铜矿、自然锑、脆硫锑铅矿、硫锑铁矿、辉锑镍矿、辉铁锑矿、砷锑矿、自然砷、毒砂、雌黄、辉砷镍矿、副雄黄、硫砷铅矿、褐硫砷铅矿、砷车轮矿、碲汞矿、碲铅矿、硫砷锑汞矿、钡砷钛钒石、斜硫锑铊矿、硫砷锑铊矿、钛铁矿、磁铁矿、铬铁矿。脉石矿物主要为石英、重晶石、绢云母、钒白云母、金红石、钡微斜长石、微量电气石、榍石、金云母—黑云母、微斜长石、钠长石、角闪石、砷钛铁沸石、钛锑钙石、褐帘石、独居石、钙铝榴石、符山石、白钨矿。
铁帽型金矿床	黄钾铁矾、褐铁矿（针铁矿等）、赤铁矿、臭葱石、高岭石、锰的氧化物和氢氧化物、自然硫、自然银、自然汞、自然铜、自然碲、黄碲矿、碲铋华、氧硒矿、汞矾、橙汞矿、硒钾铁矾、黄硒铅矿、方锑华、黄锑华、锑华、角银矿、溴银矿、碘银矿、铝磷酸盐、次生石膏、方解石、玉髓、蛋白石、铜铅锌的氧化物和次生硫化物等。

床的研究，黄铁矿具型态标型特征[2]。早世代黄铁矿为立方体晶习，最晚世代为五角十二面体—菱形十二面体晶习。最富矿段的黄铁矿以五角十二面体—菱形十二面体晶习占绝对优势。从矿体到近矿蚀变围岩，进而到较远的围岩，黄铁矿依次发育五角十二面体—菱形十二面体到立方体—菱形十二面体晶习，进而到立方体晶习。随着深度的加大，由矿带进入矿下带，黄铁矿由五角十二面体—菱形十二面体晶习逐渐变为立方体晶习。又据С．К．Смирнова等1983年的资料，苏联东乌兹别克斯坦金矿床中，矿脉上部黄铁矿绝大多数呈立方体晶习；矿体中部为五角十二面体和立方体、五角十二面体和八面体、立方体和八面体的聚形晶习；再往下五角十二面体增加。有一处在矿脉上部没有金矿化，在矿脉下部200米黄铁矿发育五角

十二面体晶习的部位成矿。黄铁矿的形态特征对于金矿找矿、评价、判断剥蚀面水平及寻找盲矿体都有实际意义。自然金的形态也可帮助确定金矿化的深度和矿脉的剥蚀深度。据С.К.Смирнова的资料，东乌兹别克斯坦金矿脉的上部，自然金呈网状、团粒状、锯齿状和不规则状等，沿矿脉倾向往下则变为立方体、立方体和八面体聚晶、八面体等晶习。矿物的粒度大小可以指示金矿石的贫富。毒砂的粒度越小，金矿石的品位越高。黄铁矿晶面生长条纹，据А.Ф.Коробейников等1985年统计，由浅部向金矿体根部明显存在随深度加大而减弱的趋势[3]。用电子显微镜观察，东乌兹别克斯坦金矿床中的含金石英具有台阶状、纤维状断口和直角三角形蚀象等特征。

（二）化学成分标型特征

金矿床中与毒砂共生的黄铁矿含砷较高有利于金的富集，反映矿液的S/As比值越小，越有利于金矿生成。毒砂的S/As比值低，指示可以找到具有工业价值的金矿床。据Г.Н.Гамянин等1985年的资料[4]，近矿蚀变围岩中的浸染状毒砂和早世代不含金毒砂的S/As比值高达1.25～1.30；晚世代含金毒砂S/As比值为1.12～1.18；更晚世代与银矿化有关的毒砂S/As为1.02～1.06。东乌兹别克斯坦金矿床中与金共生的黄铁矿As，Te含量较高，Au，Ag含量比非金组合中的黄铁矿高出十至百倍。黝铜矿族矿物的含量也可作为衡量金矿石品位高低的标志。据Е.А.Борисова等1986年对苏联浅成火山热液型金矿床中黝铜矿的研究，黝铜矿族矿物分早晚两个世代[5]，早世代为含银高的含银黝铜矿、含银砷黝铜矿，平均含银15.17%；晚世代为含碲、铋的变种，含Te0.5～18%，含Bi 10.9～0.1%，呈较粗大的集合体条带或透镜体产在闪锌矿和石英的胶状条带中。苏联古生代褶皱带中的金矿床，黄铁矿的微量元素含量也具有标型意义。矿体上部的黄铁矿含Ba，Hg，Ag，Sb（As）较多；矿体中部富集Au，Cu，Pb，Bi（Ag）；靠近矿体根部则含Ni，Co，Ti，Cr（As，Cu）较高。据Г.А.Юртенсон1985年资料[2]，浅成火山热液型金银矿床中，石英的Au，Ag，Sn，Pb（Sb，As），C，K，Na，OH等含量最高。随深度加大，杂质元素含量降低。东乌兹别克斯坦金矿床，含金石英中的Au，Ag，Hg，Rb，Cs，Sb，Bi，As等含量比无矿石英高2～3个数量级。苏联北东部与花岗岩有成因联系的石英—自然金—辉锑矿矿床，由母岩向外500米范围内，石英中Li的含量由11ppm逐渐降低趋于零。近来研究发现，石英中炭质混入物也可作为金的找矿标型特征。

（三）晶体结构标型特征

含金石英的单位晶胞$a_0>1.9125$Å、$c_0>5.404$Å，晶胞体积大于112.94Å^3；无金石英则小于以上数值。苏联北东部金矿带内无金石英的单位晶胞体积为112.929Å^3；含金石英则为113.065Å^3。据Г.А.Юртенсон 1985年的研究，浅成火山热液型金银矿床中，石英的晶胞参数与矿脉厚度成正比[2]。

（四）物理性质标型特征

金矿床中黄铁矿的热电系数在空间和时间上都有一定的规律性。矿体上部晚期较低温的黄铁矿显示空穴导型，热电系数α为正值，为p型导电性；矿体中部中期中温黄铁矿为空穴导型和电子导型的混合型导电性，α数值越大，含金性越好；矿体根部早期较高温黄铁矿显示电子导型，α为负值，为n型导电性。用这种热电动势可以确定金矿床剥蚀面水平、矿化深度并揭露盲矿体[3]。黄铜矿的热电系数也有助于评价金矿床类型，α为－450微伏/度以上，表明为独立金矿床；－450～－380微伏/度多为伴生金矿床；－320微伏/度以下，指示黄铜矿含金很少。石英的红外吸收光谱也具有标型意义。含金石英有3100～3900cm^{-1}吸收带（水峰），3640cm^{-1}吸收峰（羟峰）和2800～3000cm^{-1}吸收带（碳氢化合物峰）。据Г.А.Юртенсон的资料，随着深度的加大，K_4/K_3值降低，富矿柱中石英的K_4/K_3比值最大。石英的热发光强度有随深度加大而增强的趋势，同一矿区内，含金石英的热发光强度低于无金石英，热发光曲线显示双峰形态[2]。

（五）包裹体标型特征

一般含金石英脉中的石英，包裹体成分多为碱性重碳酸盐，$Na^+/K^+>1$，$HCO_3^-/Cl^->0.5$，主要成矿温度为130～200℃。浅成火山热液型金矿床包裹体仅CO_2可作为找矿评价标志，CO_2/H_2O克分子比值多为0.02～0.03、$CO_2/(CH_4+H_2)$为200～300。用冷冻法测出的包裹体盐度（单位为NaCl的重量百分数），由经验公式计算成矿压力和成矿深度，具有实用价值，该公式为：

初始温度$T_0 = 374 + 920 \times N$(℃)

(1)

初始压力$P_0 = 219 + 2620 \times N$盐度($10^5$Pa)

(2)

初始深度$H_0 = P_0 \times 1/300 \times 10^5$(km)

(3)

成矿压力$P_1 = P_0 \times T_1$(实测温度)$/T_0$(10^5Pa)

(4)

成矿深度$H_1 = P_1 \times 1/300 \times 10^5$(km)

(5)

(六) 同位素标型特征

根据矿物的同位素组成资料,可以获得以下信息:

1.通过硫、碳同位素组成和变异规律,推测矿化剂的来源和成矿作用发生的物理化学条件;

2.通过铅同位素组成和演化模式,追索金属的来源和成矿作用的演化历史;

3.通过氢、氧同位素组成,了解成矿介质的来源和演化;

4.通过锶同位素组成测定与金矿成矿作用有关的地质年龄,探索其物质来源、成因及演化历史。

四、金矿找矿矿物学研究实例

下面是近年来我们应用金矿找矿矿物学研究中国一些金矿区、金矿床的工作成果。

(一) 探讨金矿找矿方向

对浙江冶岭头银坑山金矿的找矿方向有3种方案:①在陈蔡群老变质岩分布区找矿,认为矿床是变质热液成因;②在有少量燕山期岩浆、火山活动产物的陈蔡群老变质岩分布区找矿,认为矿床是古变质成矿作用叠加中生代火山热液成矿的;③在大片火山岩区内的老变质岩构造窗出露地区找矿,认为矿床是浅成火山热液成因。笔者主张采用第③种方案,主要论据有:①该矿床为锰—金—银建造,具金银矿、螺状硫银矿、玉髓、冰长石、蔷薇辉石、菱锰矿、硫锰矿等标型矿物组合;②金的成色低,多为金银矿,成色为232.5~481.2;少量银金矿,成色为539.2~820.2。金银矿含Se 0.37~0.97%,银金矿含Se 1.59%,表明矿床系中生代火山热液成因(银金矿含Se 0.7~2.2%、金银矿含Se 0.8%);③矿物包裹体特征表明,成矿压力为$2 \sim 3 \times 10^7$Pa,深度为0.69~0.83km,在近地表浅成热液矿床的压力、深度范围之内,与变质矿床不符。含矿流体属$HCO_3—SO_4—Na—Mg$型,表示岩浆热液参与了成矿作用。包裹体气相成分CO_2/H_2O克分子比值为0.029;④$\delta^{34}S_{\Sigma S}$为低正值,铅同位素组成基本上为太平洋西岸的岛弧铅,氢、氧同位素组成与浅成火山热液型金矿床的δD为-50~-108‰,$\delta^{18}O$ -13~+12.5‰相符。

(二) 评价金矿点远景

我们曾对陕西镇安马鹿坪方柱石大理岩中的锑矿点作过金矿化远景评价。该矿点黄铁矿含Au 0.275克/吨、As 716ppm,辉锑矿含Au 1.716克/吨等,认为该锑矿点的金不具工业意义。

(三) 评价金矿床规模

在浙江火山岩区,金—银系列矿物的粒度越小,矿床的规模越大。如银坑山大型矿床,金银矿的粒度小于0.1毫米,银金矿小于0.037毫米;八宝山中小型矿床金银矿的粒度大于0.25毫米;而工业意义不大的东阳罗山矿化点金银矿和银金矿粒度可达1~3毫米。含金石英的铝碱总量和含金量、晶胞体积大小也可以反映金矿床的规模。如银坑山金银矿石中石英的铝碱总量为0.92‰,Au平均为2.18克/吨,V为113.021 Å^3;罗山石英的铝碱总量为0.58‰,Au平均为0.017克/吨,V为112.988 Å^3。银坑山黄铁矿比罗山黄铁矿含Co,Sn,Pb,Au,Sb,Bi,Te较高,Ag/Au,Ag/Pb,Cu/Zn,Se/Te,(As+Sb+Bi)/(Se+Te)比值较小,S/Se,Pb/Ni值较大。

(四) 评价金矿石质量

浙江火山岩区的金矿床中,一般富矿内石英的热发光性弱,贫矿的热发光性强。含金最富的绍兴中岙铜金矿石内石英的热发光强度小于1.5×10^{-10}流明;次富的银坑山金银矿石内石英的热发光强度为8×10^{-10}流明;含金较少的武义弄坑金银矿石内石英的热发光强度达33×10^{-10}流明,含金性最差的东阳罗山金银矿石内石英的热发光强度达70×10^{-10}流明。中岙黄铜矿含金达800克/吨,其热电系数α达-526.32微伏/度。黄铁矿的含金量也可表示金矿石的贫富,中岙黄铁矿含金95.29克/吨;银坑山黄铁矿含Au 45.59克/吨;八宝山黄铁矿含金25.27克/吨;罗山黄铁矿含金15.11克/吨。

(五) 评价金矿床深部找矿远景

研究黄铁矿热电性导型在空间上的分布规律表

浙江火山岩区闪锌矿的化学成分标型特征　　表2

矿床类型	Fe+Mn (%)	Zn (%)	Au (g/t)	Ag (g/t)	Sn (ppm)	Bi (ppm)	As (ppm)	Au/Ag	Zn/Fe+Mn
独立金矿床	>6	55～58	10～20	<1000	10～100	<10	1	>0.01	>9.7
伴生金矿床	<4	>60	<10	>2000	<10	20	100	<0.005	<15

明，银坑山金银矿床中，黄铁矿在500米标高以上为空穴导型，较深部出现混合导型，八宝山金银矿床上部黄铁矿为空穴导型，下部为混合导型。据此可以推测银坑山、八宝山金银矿床，目前勘查深度还未达到矿体中尾部，深部可能有一定的找矿远景。

（六）评价矿床类型

通过对浙江火山岩区闪锌矿的标型性研究（表2），可以区分独立金矿床和伴生金矿床[6]。

（七）评价矿石类型

表3列出了银坑山矿床不同类型矿石中黄铁矿的化学成分标型特征。金银矿石中的黄铁矿富含Au，Ag，Co，Ag/Pb，Co/Ni值大；硫铁矿石中的黄铁矿Au，Ag，Pb，Co含量低，Co/Ni值小；铅锌矿石中的黄铁矿富含Pb，Ag/Pb值小。还可以由Ag/Pb值10^{-1}、10^{-2}、10^{-3}数量级直接判定是金银矿石、硫铁矿石或铅锌矿石。

银坑山矿床不同类型矿石中黄铁矿的化学成分　　表3

矿石类型	Au (g/t)	Ag (g/t)	Pb (ppm)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Ag/Pb	Co/Ni
金银矿石	57.15	1054.26	3958.57	127.71	42.71	0.266	2.99
硫铁矿石	0.30	34.14	860.66	15.09	18.75	0.0397	0.80
铅锌矿石	1.99	59.49	7566.00	27.00	32.93	0.0079	0.82

主要参考文献

[1] Гундобин, Г.М. и др.: Геол.рудн. местрожд., 1984, №5

[2] Суставов, О.А. и др.: Картирование рудоносиых территорий, УНЦАН СССР, 1985, С. 48～71

[3] Коробейников, А.Ф. и др.: Геол. руди. месторжд., 1985, №1

[4] Гамянии, Г.Н.: Геол.рудн.месторожд., 1985, №5

[5] Борисова, Е.А. и др.: Зап. Всес. Минерал о-ва, 1986, вып.1

[6] 徐国风等：桂林冶金地质学院学报，1985，第四期

Prospectiong Mineralogy of Gold Ore

Xu Guofeng

(Wuhan College of Geology)

Abstract

Mineral associations of gold deposits of following types are of typomorphic significance. There are: precious metal bearing shale hosted type, Au-U bearing meta-conglomerate (conglomerite) type, volcanogene epithermal type, Hemlo type and gossany type. In addition, only pentlandite, coffinite and the epidote in the alteration zone of volcanogene hydrothermal gold deposit are typomorphic minerals. In this paper the author, with new data he collected, illustrates the typomorphic characteristics of minerals in gold ore, including morphology, chemical composition, crystalline structure, physical property nclusion data and isotope abundance. Lastly, some successful results recently obtained by the application of prospecting mineralogy Chinese to gold ore exploration are cited.