

胶东乳山金矿床成因*

李 治 平

(冶金部天津地质研究院, 天津)

摘要: 乳山金矿床位于牟平—乳山金矿带中部, 产于昆崙山花岗岩体中部, 是胶东近年来探明的重要金矿床之一。在地质和地球化学方法综合研究基础上提出乳山金矿床属于石英脉型金矿床, 是由中生代壳源深熔花岗岩岩浆期中温热液作用形成的; 矿石中金以碲金银矿、银金矿、自然金等形式产在黄铁矿及裂隙中, 其物质来源于太古界胶东群地层。

关键词: 石英脉型金矿床 矿床地质特征 形成机理

乳山金矿床(原称金青顶金矿)位于胶东牟平—乳山金矿带中部, 产于昆崙山花岗岩体内, 受两组断裂复合控制, 是一个重要的黄铁矿石英脉型金矿床。本文试图从控矿地质条件、矿石类型、矿石矿物和金的赋存状态等方面来介绍该金矿的地质特征; 并根据矿体及围岩的石英中流体包裹体、稳定同位素等来研究成矿物质来源和成岩成矿的物理化学条件。结果表明, 乳山金矿床与中生代壳源深熔花岗岩具有密切的成因联系。

1 矿床地质特征

1.1 区域构造背景

牟平—乳山金矿带位于文登隆起的西侧边缘, 产于昆崙山倒转背斜核部的昆崙山花岗岩体中。该金矿带有四条北北东(15°)方向的断裂, 构成北北东向地堑式构造。乳山金矿床即产于地堑构造中部的金青顶—三甲断裂中。

1.2 地层

区内出露上太古界胶东群的鲁家乔组、马格庄组和枣园组。岩性主要为黑云斜长片麻岩、黑云斜长角闪岩、黑云变粒岩夹大理岩透镜体^①。其片麻理走向一般为 $310^\circ\sim 350^\circ$ 。它们分布在昆崙山花岗岩体两侧, 即倒转背斜两翼。

1.3 昆崙山花岗岩体

岩体出露面积约 1550 km^2 , 产于昆崙山倒转背斜核部, 沿NNE向断裂呈长条状分布。其两侧边部岩石具片麻状构造, 中部为中粗粒块状构造。作者在显微镜下采用直线法统计其矿物含量(7个样品平均值)为: 石英 35.76% , 钾长石 18.72% , 斜长石 35.15% , 黑云母 6.40% , 白云母 0.83% , 磷灰石 0.46% , 锆石 0.44% 。镜下鉴定和X光分析表明该岩体中的钾长石为正长石, 斜长石以更钠长石($An\ 5\sim 20$)为主, 黑云母为镁铁黑云母。岩石化

* 国家自然科学基金资助项目

李治平, 男, 35岁, 工程师, 1987年于冶金工业部天津地质研究院研究生毕业。邮政编码: 300061

本文由刘浩龙编辑

① 据山东冶金地勘公司三队资料, 1973年

学成分(22个样品平均值^①)为: SiO₂ 71.30%, TiO₂ 0.05%, Al₂O₃ 14.45%, Fe₂O₃ 0.46%、FeO 1.98%, Mn 0.04%, MgO 0.27%, CaO 1.20%, Na₂O 4.82%, K₂O 4.02%, H₂O 0.59%、P₂O₅ 0.05%、CO₂ 0.49%; 结合镜下鉴定将昆崙山花岗岩定名为中粗粒黑云母二长花岗岩。稀土元素分析^②表明该岩体继承了胶东群地层稀土配分模式的两个主要特点:(1)都是轻稀土富集型;(2)都没有Eu亏损。第一过渡族元素分布图^③也显示出二者具有相似的“W”型分布模式。该岩体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为+11.15‰, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为0.7095~0.7124(计算值, 据 $I_{\text{Sr}}=(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0^{t_1}$), 铅同位素组成^④为 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 36.96~37.57, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 15.35~15.63, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 16.40~17.37; K-Ar同位素年龄为 $154 \times 10^6 \sim 134 \times 10^6$ a。上述特征证明, 昆崙山花岗岩以富碱质尤其以富钠为主要特征; 其成岩物质来源于胶东群地层; 它是在中生代由昆崙山倒转背斜核部的胶东群地层经断裂重熔作用形成的。

矿区内大面积出露的主要是昆崙山花岗岩, 仅见到少量呈孤岛状分布的胶东群地层残留体, 其岩性多为斜长角闪岩, 形状为长条形或椭圆形, 呈定向分布, 其长轴方向与区域片麻理走向近于一致。化学分析表明胶东群地层残留体金含量达 20×10^{-9} 。此外, 矿区内产有许多煌斑岩脉, 它们分布在金矿脉两侧, 产状与金矿脉基本一致(图1)。

1.4 控矿构造^[2]

该金矿主要受NE 65°(F₁)和NNE 15°(F₂)两组压扭性断裂复合控制, (F₁隐伏于深部, 图1中未能绘出)复合部位具有张扭性质。在浅部矿体主要受F₂控制, 其产状为走向15°, 倾向北西、倾角80°; 在深部(-155 m标高)矿体主要受F₁控制, 其产状为走向50°、倾向南东、倾角75°。从地表(+119 m标高)到-155 m水平中段随深度增加, 矿体走向从NNE 15°顺时针旋转到NE 50°(矿体仍未尖灭)。

1.5 围岩蚀变

坑道观察表明该金矿围岩蚀变具有分带特征, 不同蚀变带之间呈渐变关系, 以矿体为中心向两侧依次对称出现有黄铁绢英岩带、钾化花岗岩带, 外侧为未蚀变花岗岩。从未蚀变花岗岩到黄铁绢英岩, 石英、绢云母和黄铁矿等逐渐增多, 长石和黑云母逐渐减少, 蚀变带的矿物组成及演化关系见图2。据X光粉晶衍射分析和红外光谱分析, 由钾化形成的“红色”长石是最大微斜长石; 花岗岩中的更钠长石蚀变形成2M₁型绢云母; 黑云母退色蚀变成1M型白云母。蚀变带物质成分带出带入计算结果表明, 在成矿作用过程中有大量的K₂O、CO₂、H₂O加入围岩, 而花岗岩中的Na₂O、CaO大量淋失; 稀土元素在钾化带相对富集, 在黄铁绢英岩带则明显被淋滤, 但它们都继承了未蚀变花岗岩稀土配分模式的主要特征。

1.6 金矿体

实际开采资料证明, 乳山金矿床矿体是由黄铁石英脉、铜-铅-锌多金属硫化物石英脉和菱铁石英脉三种矿脉叠加而成的复合金矿体。其中黄铁石英脉为主矿体, 在中上部呈较规则的单脉与围岩边界清楚, 随深度增加在主矿脉两侧产出许多细脉, 局部可形成细脉浸染状矿化带。

① 由冶金部天津地质研究院分析室分析

② 李治平, 1987, 硕士研究生论文

③ 徐金方, 1986, 山东地质情报, 第二期

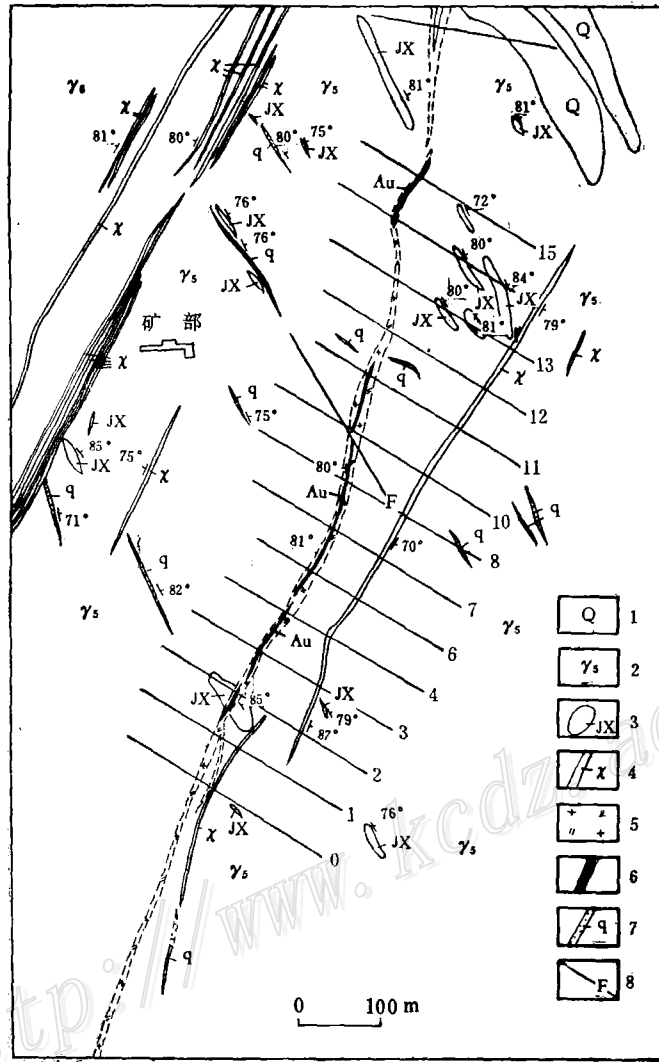


图1 乳山金矿床矿区地质略图

1—第四系；2—黑云母花岗岩；3—斜长角闪岩（胶东群地层残留体）；4—煌斑岩；5—黄铁绢英岩；6—矿体；7—石英脉；8—断裂

Fig. 1. Sketch geological map of the Rushan ore district.

1—Quaternary; 2—Biotite granite; 3—Amphibolite (Relict of Jiaodong Group); 4—Lamprophyre; 5—Beresite; 6—Ore body; 7—Quartz vein; 8—Fault.

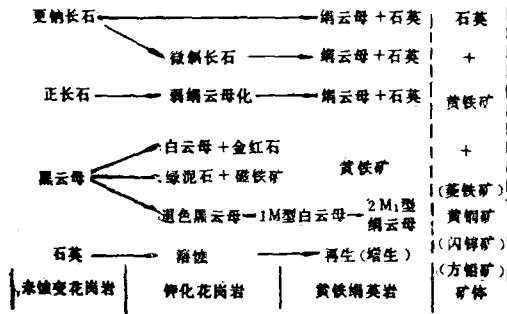


图2 蚀变带矿物组成及关系
Fig. 2. Mineral composition of alteration zones and relationship of minerals.

铜-铅-锌多金属硫化物石英脉在浅部(+35m标高以上)可形成独立的工业矿体;在中部(+35m~-250m)则呈微细脉产在黄铁石英脉的裂隙中;在深部(-250m以下)比较少见。该种矿脉的矿物成分有垂直分带现象,上部主要为闪锌矿和方铅矿,下部则主要为黄铜矿。

菱铁石英脉规模较小,厚度一般在几厘米至几十厘米。常见有两种产出形式:一种是呈独立的脉体产出;另一种是贯入破碎的黄铁石英脉中形成胶结物。呈独立的菱铁石英脉产出时具有典型的对称分带,以具有梳状结构的石英核为中心,两侧依次对称出现块状菱铁矿带和块状石英带(含少量黄铁矿)。该类矿脉不能构成工业矿体,但对研究金矿成矿热液的演化具有重要意义。

2 金矿石类型、矿石矿物及蚀变矿化阶段

2.1 金矿石类型

如前所述,由于三种矿脉的叠加,矿体不同部位的矿石矿物成分差异较大。根据矿物成分可划分为五种矿石类型(表1)。其中黄铁矿金矿石是构成工业矿体的主要矿石类型;其次为黄铜矿黄铁矿金矿石,产在-250m标高以上,是黄铁石英脉和多金属硫化物石英脉叠加的产物;多金属硫化物型金矿石在上部(+35m标高以上)形成可采矿体;而由菱铁石英脉胶结破碎黄铁石英脉形成的菱铁矿黄铁矿金矿石,仅在局部产出。

表1 金矿石类型及特征

Table 1. Major types and characteristics of gold ore

金矿石类型	矿石构造	矿石结构	矿物组合	样数(个)	矿石分析						
					Au (g/t)	Ag (g/t)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Sc (g/t)	Tc (g/t)
黄铁矿型金矿石 ^①	致密块状	中粗粒	黄铁矿、自然金、银金矿、碲金矿、石英	8	37.73	112.4	0.0159	0.0072	0.0449	—	0.00895
黄铜矿黄铁矿型金矿石 ^①	致密块状	中粗粒 压碎状 网脉状	黄铁矿、黄铜矿、自然金、银金矿、碲金银矿、碲银矿、石英	3	95.31	291.67	0.2995	0.0109	0.0115	—	0.0242
菱铁矿黄铁矿型金矿石	致密块状 梳状	中粗粒 碎裂状 半自形	黄铁矿、菱铁矿、黄铜矿、自然金、银金矿、碲金银矿、石英	1	3.31	11.56	0.079	0.041	0.031	0.88	8.0
多金属硫化物型金矿石	黄铜矿型金矿石	致密块状 网脉状	黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、菱铁矿、自然金、银金矿、金、碲金矿、碲金银矿、碲银矿、碲铋矿、碲铅矿、石英、方解石	1	2.13	79.44	19.68	0.24	0.17	2.1	9.8
	闪锌矿方铅矿型金矿石	浸染状 碎裂状 梳状		1	2.63	43.93	0.28	2.84	27.37	0.88	4.0

① 矿石分析据山东冶金地勘公司三队资料, 1989

2.2 矿石矿物

通过对黄铁矿金矿石和黄铜矿黄铁矿金矿石两种主要矿石类型的镜下研究,表明金主要以金-银矿物类和金-银碲化物两类形式产出,黄铁矿是其主要载体矿物,其次为黄铜矿、闪锌矿等。

2.2.1 金-银矿物类 包括自然金^[3](Au>80%)、银金矿(Au 50%~80%)、金银矿(Au 50%~10%)。粒度一般在0.069~0.036 mm,呈乳滴状,蠕虫状或细脉状产于黄铁矿裂隙及晶隙中。据它们与黄铁矿的嵌布关系分为包体金、裂隙金和间隙金(图3)。据统计,裂隙金占57.14%,包体金占25.0%,间隙金占17.8%,探针分析结果(表2)表明黄铁矿中不存在晶格金。

2.2.2 金-银碲化物类 包括碲金银矿、碲银矿并共生有碲铅矿、碲铋矿,其成分见表2。碲金银矿呈粒状、不规则状,包含有许多粒径在0.018~0.0012 mm的微粒自然金(图3)。

金银碲化物主要分布于中粗粒黄铁矿中,少量沿黄铁矿裂隙产出;在黄铁矿的浸蚀结构中见碲化物沿黄铁矿的生长环带穿插并交代,说明它们是在略晚于黄铁矿的贫硫条件下形成的。金银碲化物形成的晚期已有许多微粒自然金形成并包含在金银碲化物之中,大量的金-银类矿物则是在金银碲化物形成之后,以裂隙金和间隙金形式产在黄铁矿的裂隙和晶隙之中。据此认为矿石矿物生成顺序为:黄铁矿→金银碲化物→自然金银类矿物。

2.2.3 黄铁矿 黄铁矿是工业矿体黄铁矿石英脉的主要矿物组分,也是金的主要载体矿物。我们在不同标高系统采样并测定了黄铁矿的各种物理性质(表3)。通过对比可以看出,黄铁矿的晶形、密度、硬度、反射率和晶格常数在纵向上有一定规律性变化趋势:即浅部黄铁矿以立方体为主,深部则以五角十二面体为主;随深度增加立方体黄铁矿的反射率渐小,五角十二面体黄铁矿的反射率则逐渐增大;黄铁矿的晶格常数、密度和硬度随产出深度增加而增大。可见黄铁矿的物理特征参数有可能成为矿体产出深度的标志,值得深入研究。

2.3 蚀变矿化阶段

在矿区内常见有少量的花岗伟晶岩脉沿花岗岩的原生节理穿入,并被矿脉穿切。花岗伟晶岩的形成标志着花岗岩作用结束和岩浆期后热液蚀变矿化作用的开始。

如前所述,矿体由三种矿脉组成,在坑道和镜下都能见到它们之间的穿切关系。其中多金属硫化物石英脉除在+35m标高以上形成独立矿体外,在+35m~-250m之间多呈网脉状穿切黄铁矿石英脉;具对称分带的菱铁矿石英脉在宏观上穿切矿体及围岩(图4),在镜下可见

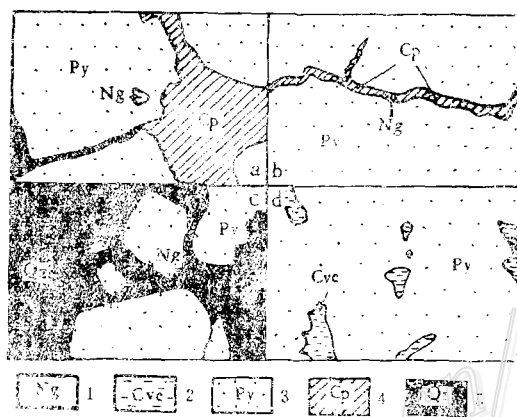


图3 金矿物素描图

1—自然金; 2—碲金银矿; 3—黄铁矿; 4—黄铜矿;
5—石英; a—包体金; b—裂隙金; c—间隙金;
d—产在黄铁矿中的碲金银矿

Fig. 3. Sketch of gold minerals.

1—Native gold; 2—Calaverite; 3—Pyrite; 4—
Chalcopyrite; 5—Quartz; a—Enclave gold; b—
Fissure gold; c—Pore gold; d—Calaverite in
pyrite.

表 2 乳山金矿床矿物及载体矿物探针分析结果
 Table 2. Electron microprobe analyses of gold minerals and carrier mineral (pyrite) from the Rushan gold deposit

矿物名称	序号 ^①	样号	产出形式	粒度 (mm)	反射率 ^② (%)	分析结果 (%)													
						Au	Ag	Cu	Pb	Bi	Fe	Tc	S	Sc	As	合计			
自然金	1	L ₁	包体金	0.012	76.84	83.545	15.454	0.000	—	—	—	—	0.002	—	0.000	0.000	99.001		
	2	L ₂	包体金	0.015	66.67	85.964	12.990	0.200	—	—	—	—	0.000	—	0.057	0.150	99.361		
	3	L ₃	间隙金	0.038 × 0.01	83.11	90.374	10.120	0.000	—	—	—	—	0.121	—	0.000	0.000	100.613		
	4	L ₄	间隙金	0.02 × 0.008	66.86	72.985	26.122	0.000	—	—	—	—	0.445	—	0.000	0.000	99.552		
	5	L ₅	裂隙金	0.005 × 0.01	59.60	76.243	23.046	0.093	—	—	—	—	0.000	—	0.051	0.000	99.433		
碲金银矿	6	H ₃₈	产于黄铁矿及 裂隙中	0.36~0.021	40.60	24.30	41.92	0.04	0	—	—	0	32.56	0.05	—	—	98.87		
	7	H ₃₉				25.03	38.57	0	0.45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	98.64
	8	H ₅				21.07	44.94	0	—	—	—	0	0.02	34.74	0.02	—	—	—	—
碲银矿	9	H ₇₈	0.25~0.012	35.85	0.06	63.21	0.63	0.10	—	—	—	—	—	—	—	—	98.54		
碲铅矿	10	H ₅₈			0.07	1.82	0.03	61.30	0.32	0.03	36.38	0.04	—	—	—	—	—	100.89	
碲铋矿	11	H ₆			0.04	0.22	0	0.53	52.42	0.06	46.60	0.03	—	—	—	—	—	99.9	
黄铁矿 ^③	12	L ₆	—	中粗粒	83.62	0.000	0.146	0.000	—	—	—	46.145	0.129	53.032	0.077	0.277	99.806		

① 1~5、12号样品由中国地质大学(北京)探针室分析,作者资料(1987); 6~11号样品由天津地质研究所探针室分析,据韩东风、汪山资料(1988)

② 反射率采用波长 $\lambda = 591 \text{ nm}$ 数据

③ 黄铁矿的分析数据为三个样品的平均值

表 3 不同标高黄铁矿物理特征参数对比表

Table 3. Physical properties of pyrite from different levels

序号	水平中段		+5m	-75m	-115m
	特征参数				
1	标准晶格常数(Å)		5.417		
2	实测晶格常数(Å)		5.4184	5.4185	5.4192
3	晶 形		立方体为主	二者混杂	五角十二面体为主
4	密 度(g/cm ³)		4.90	4.86	4.95
5	硬 度 (Hv)	五角十二面体	1010	1187	1163
		立方体	1240	1571	2121
6	反射率 ^{b)} (%)	五角十二面体	54.61	53.80	53.65
		立方体	46.93	53.87	55.60

b) 工作条件: λ=591nm, 0.7kV, 9A

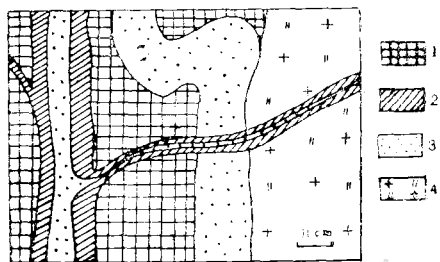


图 4 菱铁石英脉穿切黄铁石英脉
(115米中段1号采场)

1—黄铁石英脉; 2—菱铁矿; 3—石英; 4—黄铁绢英岩

Fig. 4. Siderite quartz vein penetrating pyrite quartz vein at No. 1 quarry of 115 m level.

1—Pyrite quartz vein; 2—Siderite; 3—Quartz; 4—Beresite.

脉破碎的黄铁石英脉。在矿体两侧对称产出黄铁绢英岩和钾化蚀变带。其中钾化带在深部更为发育，黄铁绢英岩与矿体紧密共生，是矿体的直接围岩。

综上所述将该金矿蚀变矿化作用分为四个阶段：(1) 钾化；(2) 绢云母化-黄铁石英脉；(3) 多金属硫化物石英脉；(4) 菱铁石英脉。

3 成矿机理

3.1 成矿作用物理化学条件

3.1.1 温度、压力 利用石英包裹体测定成矿温度和压力，目前有许多方法，但都需要比较齐全的均一温度、部分均一温度和盐度资料，除此之外尚需用独立的方法首先确定一个参数(成矿温度或压力)，然后才能确定另一个参数。乳山金矿床矿体中的石英包裹体粒度较小，测试比较困难。因此本文采用较简便的“综合利用均一法和爆裂法测定压力”(纳乌莫夫和马里宁，1968)^[4]，并将其原理拟合为一个代数方程：

$$P = \left(\frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} \right) \cdot (t_0 - t_1) + P_1 \quad (1)$$

其中：P——成岩成矿压力； t_0 ——气液包裹体的均一温度； t_1 ——含CO₂包裹体的部分均一温度； P_1 ——对应 t_1 时CO₂的饱和蒸汽压(查表)^[4]； t_2 ——包裹体爆裂温度；

P_2 ——对应 t_2 包裹体爆裂时的压力, 一般近似为常数 (石英包裹体爆裂时压力 $P_2 = 850 \times 101325 \text{ Pa}$)。

同时将纳乌莫夫等人的“石英包体压力对其均一温度校正曲线”也拟合为代数式:

$$\Delta t = \frac{70}{1000} P - 3 \quad (2)$$

则: $t = t_{均} + \Delta t$ (3)

其中: t ——是经压力校正过的均一温度, 比较接近真实成矿温度; P ——由(1)式求出的压力, 近似代表成矿压力。

一般来说均一温度和压力都低于真实成矿温度和压力, 但可以利用(1)~(3)式循环计算逐渐逼近真实的成矿温度和压力。

例如, 乳山金矿床黄铁绢英岩中石英包裹体的部分均一温度(t_1)为 23.6°C , 查表得 CO_2 饱和蒸气压(P_1)为 $61.24 \times 101325 \text{ Pa}$, 爆裂温度(t_2) 345°C , 石英包体爆裂压力(P_2)为 $850 \times 101325 \text{ Pa}$, 均一温度($t_{均}$)为 268°C 代入(1)式:

$$P = \frac{850 - 61.24}{345 - 23.6} \times (268 - 23.6) + 61.24 = 661 \times 101325 \text{ Pa}$$

将 $P = 661 \times 101325 \text{ Pa}$ 代入(2)式:

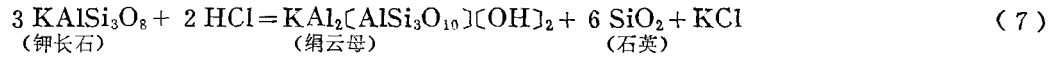
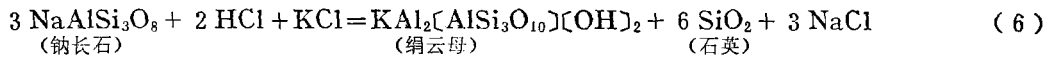
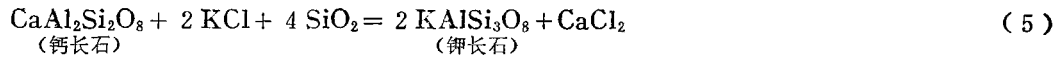
$$\Delta t = \frac{70}{1000} \times 661 - 3 = 43^\circ\text{C}$$

由(3)式得: $t = 268 + 43 = 311^\circ\text{C}$ (近似代表成矿温度)

再将 $t = 311^\circ\text{C}$ 代回(1)式, 计算得 $P = 767 \times 101325 \text{ Pa}$ 。因此将 $t = 311^\circ\text{C}$ 、 $P = 7.77 \times 10^7 \text{ Pa}$ 近似代表该金矿黄铁绢英岩的形成温度和压力。

乳山金矿床矿体及蚀变岩中石英包裹体测定参数及形成温度和压力的估算见表4。从表4看出该金矿的成矿作用从早期钾化到黄铁矿石英脉形成, 其温度、压力都逐渐变小, 主矿体和黄铁绢英岩几乎同时形成, 成矿温度为 $295 \sim 311^\circ\text{C}$ 属于岩浆期中温热液矿床。

3.1.2 酸碱度 (pH 值) 和氧逸度 定量计算成矿溶液的 pH 值十分困难, 但据围岩蚀变前后的矿物组合, 利用昂里科夫的矿物酸度表征法^[5]可估计成矿溶液酸度的变化, 该金矿成矿作用过程中产生的钾化和绢云母化可用下列反应式表示:



据(4)~(7)式计算成矿热液体系酸度变化, 结果见表5。可见当花岗岩产生钾化和绢云母化后成矿热液体系将向酸度增加的方向演化。

据矿物包裹体气体成分的物理化学参数图解^[6], 利用矿体及围岩中石英包裹体气相成分及成岩成矿温度和压力, 求得该金矿成矿热液近似的氧逸度(表6)。

3.1.3 成矿热液的组分及演化 在不同标高的矿体和围岩中系统采集了10个样品, 将其石

表 4 乳山金矿床各成矿阶段石英包裹体测定及温度、压力计算结果

Table 4. Temperature measurements of quartz inclusions of various stages and calculations of their salinity, ore-forming temperature and ore-forming pressure

参数	成矿阶段	钾化	绢云母化-黄铁石英脉		多金属硫化物石英脉	菱铁石英脉
			黄铁绢英岩	矿体		
均一温度 (°C)	范围	445~210(11) ^①	350~185(11)	335~170(9)	240~140(9)	360~145(8)
	中值	328	268	253	190	253
部分均一温度 (°C)	范围	22.6~27(18)	22~25.2(7)	—	24.6(2)	—
	中值	24.8	23.6	24.1 ^②	24.6	—
爆裂温度 (°C)	范围	400~420	370~320	360~310	—	—
	中值	410	345	335	310 ^③	—
盐度(wt%NaCl)		11.5~16.7	11.3~13.5(2)	10.2~12.5(3)	—	—
成矿温度(°C)		373	311	295	223	—
成矿压力(Pa)		7.84×10^7	7.77×10^7	7.58×10^7	6.19×10^7	—

① 括号中的数字为测定包体个数

② 取黄铁绢英岩和多金属硫化物石英脉的平均值近似代替

③ 取黄铁石英脉的下限值近似代替

表 5 乳山金矿围岩蚀变发生后热液体系的酸度变化

Table 5. Variation in acidity of hydrothermal system during wall rock alteration of the Rushan gold deposit

围岩蚀变	反应式	ΣY 值 ^① (kJ/mol)		热液体系酸度变化	时 间
		反应物	产物		
钾化	(4)	694.3	697.0	反应后体系酸度增加	早
	(5)	632.6	648.6	反应后体系酸度增加	
绢云母化	(6)	781.2	789.0	反应后体系酸度增加	晚
	(7)	852.4	870.1	反应后体系酸度增加	

① Y 值——矿物的平均解离能

英包裹体的液相和气相成分计算后在图 5 中投影。通过对比可以看出: (1) 气相成分以 H_2O 和 CO_2 为主; (2) 相比之下花岗岩和钾化花岗岩中石英包裹体成分富含 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- ; 而矿体和黄铁绢英岩中石英包裹体的成分随深度发生变化, 即在深部 (-115m 中段) 它们(8、9、10 号样) 以含 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 为主, 与花岗岩石英包裹体成分的特点类似; 在浅部 (+5m 中段) 它们(1、2 号样) 则以 Fe^{2+} 、 SO_4^{2-} 等元素为主。这表明从早期到晚期, 由深部到

表 6 乳山金矿床部分成矿阶段的氧逸度

Table 6. Oxygen fugacity of hydrothermal solutions at some ore-forming stages of the Rushan gold deposit

成矿阶段		钾化	绢云母化-黄铁石英英脉	
			黄铁绢英岩	矿体
logf _{O₂}	范围	—	-28.9~-29.7	-33.3~-35
	平均值	-23.8	-29.1	-34.5
样品数		1	3	5

浅部, 富含 Fe^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 CO_2 等组分的成矿热液是由含 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 的岩浆期后热液从深部上升过程中逐渐演化而成的。

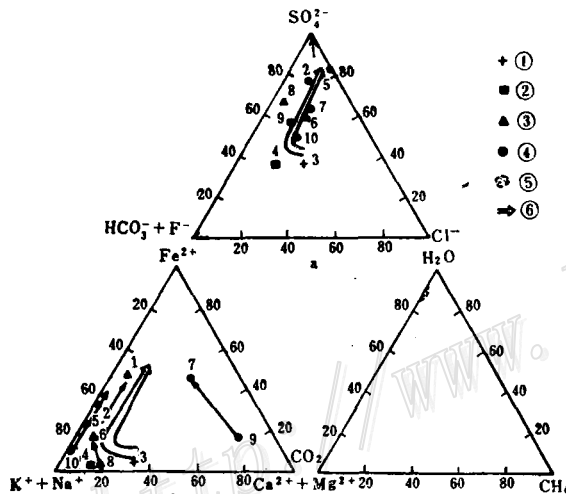


图 5 石英包裹体成分演化

a—阴离子; b—阳离子; c—气相成分; 1—黑云母花岗岩; 2—钾化花岗岩; 3—黄铁绢英岩; 4—金矿体; 5—气相成分分布范围; 6—热液成分演化方向

Fig. 5. Compositional evolution of inclusions in quartz.

a—Anions; b—Cations; c—Composition of gaseous phase; 1—Biotite granite; 2—K-feldspathized granite; 3—Beresite; 4—Gold ore body; 5—Limits of gaseous phase; 6—Direction of hydrothermal composition.

3.2 蚀变矿化作用的演化机制

花岗岩固结后, 岩浆期后热液从深部沿断裂上升, 并与花岗岩作用依次产生钾化、绢云母化蚀变, 这些蚀变反应的发生促使岩浆期后热液向成矿热液演化。

3.2.1 钾化和绢云母化的形成与转化 热力学计算表明, 当热液温度较高、 K^+/Na^+ 值较大时, 斜长石易产生钾化; 在中低温条件下, 当热液中富含 CO_2 时斜长石易产生绢云母化, 按其难易程度顺序依次为钙长石、钠长石、微斜长石, 且温度降低有利于长石的绢云母化。因此认为: 钾化是岩浆作用结束后早期富含 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 偏碱性的高温热液交代花岗岩而成的; 随热液上升, 温压降低, 同时钾化反应使热液中部分 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 进入围岩, 而 Fe^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_2 相对富集, 从而使蚀变由钾化转化为绢云母化, 此外 Fe^{2+} 离子的增加促使金的络合物分解沉淀。

3.2.2 金的迁移和富集 在成矿热液中金主要与硫、氯形成两大类络合物^[7]。如图 6 所

示, 在一定的氧逸度条件下, 随溶液的 pH 变小(由碱性变为酸性), 金的氯络合物 (AuCl_2^-) 溶解度变大, 而金的硫氢络合物 ($\text{Au}(\text{HS})_2^-$) 溶解度逐渐减小。参考包体成分分析结果以及成矿溶液从早到晚由弱碱性变为弱酸性, 可以推测金在热液中是以 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 形式迁移的, 随热液演化其溶解度逐渐降低并富集成矿。引起金络合物分解沉淀的主要原因之一, 是由于

随蚀变反应进行热液中 Fe^{2+} 离子的增加其反应如下：

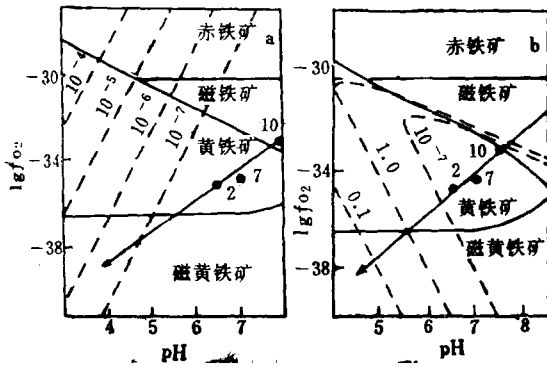
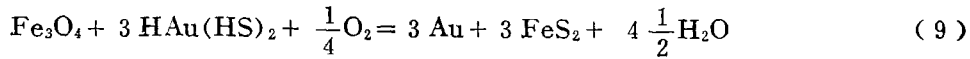
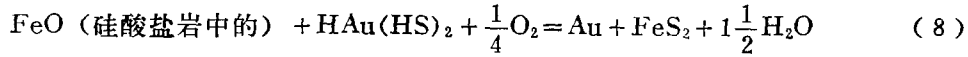


图6 金在不同溶液和介质条件下的溶解度 (据 J. N. 菲利普斯, 1980)

a—浓度为 0.2 克分子 Cl^- ，温度为 300℃ 氯化物溶液的 fO_2 -pH 图解和金的溶解度等值线；b—浓度为 0.05 克分子 S_2 ，温度为 300℃ 的二硫化物溶液 fO_2 -pH 图解和金的溶解度等值线；箭头示乳山金矿床成矿溶液的演化方向。黑点及编号为样品点

Fig. 6 Solubility of gold in a variety of solutions under different conditions. a—Au (aq) - fO_2 -pH diagram of chloride-bearing solution at $Cr^- = 0.2 \text{ mol}$ and $t = 300^\circ C$; b—Au (aq) - fO_2 -pH diagram of S_2^- -bearing solution at $S = 0.05 \text{ mol}$ and $t = 300^\circ C$. Arrows indicate evolution direction of ore-forming solutions in the Rushan gold deposit. Solid circles represent points of samples.

4 成矿物质来源

4.1 氢氧同位素

在同一位置采集矿脉及直接围岩（黄铁绢英岩），并测定石英中的氧同位素和绢云母中的氢同位素（表 7）。它们在图 7 中的分布表明该金矿成矿溶液是岩浆水、变质水和大气水组成的混合热液体系，从黄铁绢英岩到菱铁石英脉，热液中大气水的比例逐渐增加。

表 7 乳山金矿床氢氧同位素测定结果

Table 7. Hydrogen and oxygen isotopic determinations of the Rushan gold deposit

序号	样品名称	测试矿物	$\delta^{18}O_{\text{石英}}(\%)$	$\delta D_{\text{绢云母}}(\%)$	$\delta^{18}O_{H_2O}(\%)$ ①	$\delta D_{H_2O}(\%)$ ②	t/℃
1	黄铁绢英岩	石英 绢云母	+10.13	-120	+3.56	-75	311
2	黄铁石英脉	石英 绢云母③	+10.66	-120	+3.54	-71	295
3	黄铁石英脉	石英 绢云母	+8.9	-102	+1.78	-53	295
4	黄铁石英脉	石英 绢云母	+13.0	-110	+5.88	-60	295
5	闪锌石英脉	石英 绢云母	+11.1	-110	+0.84	-39	223
6	菱铁石英脉	石英 绢云母	+11.6	-120	+0.02	-41	200

注 由国家地震局地质研究所上官志冠测定

① $\delta^{18}O_{\text{石英}} - \delta^{18}O_{H_2O} = 3.26 \times 10^6 T^{-2} - 2.98$ (贝克尔, 1976)

② $\delta D_{\text{绢云母}} - \delta D_{H_2O} = -22.1 \times 10^6 T^{-2} + 19.1$ (置铃等, 1976)

③ 矿脉的氢同位素测定是利用同一采样位置黄铁绢英岩中的绢云母代替的

4.2 硫同位素

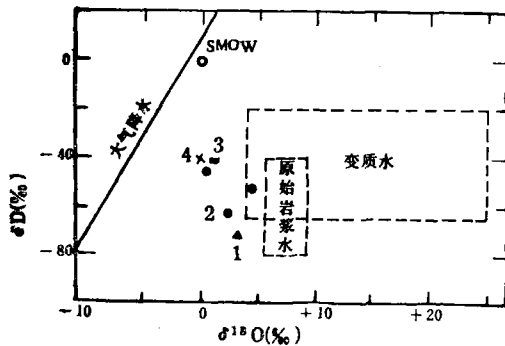


图7 成矿溶液的氢氧同位素

(据 Taylor, 1979)

1—黄铁绢英岩; 2—黄铁石英脉; 3—多金属硫化物石英脉; 4—菱铁石英脉

Fig. 7. Hydrogen and oxygen isotopic composition of ore-forming fluids.

1—Beresite; 2—Pyrite quartz vein; 3—Polymetallic sulfide quartz vein; 4—Siderite quartz vein.

该金矿黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ 平均值为 +7.92, 变化在 +6.4~+9.4 之间(表 8)。与胶东群地层和花岗岩的硫同位素组成基本一致, 它们都无例外地正向偏离陨石硫值, 以富含 ^{34}S 为特征。

表 8. 乳山金矿床、花岗岩和胶东群地层硫同位素比较

Table 8. Sulfur isotopic comparison of the Rushan gold deposit with Jiaodong Formation and granite

序号	样品名称	样数	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$		资料来源
			平均值	变化范围	
1	乳山金矿床	5	+7.92	+6.4~+9.4	作者
2	胶东群地层	6	+7.4	+7.0~+7.8	据王义文
3	玲珑花岗岩	6	+9.5	+7.9~+10.7	据敬成贵
4	郭家岭花岗岩	5	+6.68	+2.7~+10.0	据敬成贵
5	滦家河花岗岩	5	+4.8	+4.2~+5.5	据敬成贵

4.3 铅同位素

铅同位素分析(表 9)表明该金矿的铅同位素组成与胶东群和昆崙山花岗岩相似都属于正常铅, 三者铅同位素比值十分接近, 表明它们具有同源关系。

总之, 稳定同位素研究表明乳山金矿床的成矿物质来源于胶东群地层。

表 9 乳山金矿床铅同位素组成

Table 9. Lead isotopic composition of the Rushan gold deposit

序号	样号	测试矿物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
1	J-35-003	闪锌矿	17.104	15.601	37.842
2	J-75-029	闪锌矿	17.047	15.489	37.629
3	J-155-019	闪锌矿	16.997	15.412	37.283
4	GI-006	闪锌矿	16.939	15.364	37.263

注: 由天津地质研究院同位素室分析

5 成矿模式

据矿物成分可将胶东金矿分为黄铁矿型和多金属型两类。其中黄铁矿型金矿主要产于花岗岩中（如招-掖、牟-乳金矿带），而多金属硫化物型金矿主要产于变质岩内（如栖霞百里店、金冠顶金矿等）。这是由于 Au 属于软酸类元素，在胶东群地层发生区域变质时，只有少量 Au 及 Cl、F、Cu、Pb、Zn 等性质相对活泼的硬碱硬酸类元素随变质热液析出，并在变质岩中形成与多金属硫化物伴生的小型金矿床；而大量的 Au 及 W、As、Sb、Bi、Hg、B、HS⁻、HCO₃⁻ 等软碱软酸类元素仍保留在变质岩中，只有当胶东群地层部分熔融或重熔形成花岗岩岩浆时，Au 及相关元素才从固相岩石中析出，并在岩浆期后热液中趋于富集成矿。

综合上述对乳山金矿床的分析研究，将胶东金矿床的形成演化过程归纳于图 8。胶东金矿床的形成过程可分为三个阶段：（1）胶东群地层形成和变质。原岩恢复证明胶东群地层是

一套富含 Au 等成矿元素的中基性火山岩夹沉积岩，在晚太古代（约 26~28 亿年）发生大规模区域变质，形成一套低角闪岩相到麻粒岩相的中深变质岩系。（2）花岗岩形成。中生代（1.5 亿年左右）由于太平洋板块与欧亚板块的剧烈碰撞，使崑崙山等背斜核部的胶东群地层断裂重熔形成花岗岩岩浆，并使 Au 及相关元素从岩石中活化转移，随结晶分异作用进行，金及相关元素趋向在岩浆期后热液中富集。（3）黄铁矿石英脉型金矿形成。当花岗岩固结后，早期富 K⁺、Na⁺、Au 及相关元素的高温弱碱性岩浆热液从深部沿断裂上升，并与断裂两侧花岗岩反应形成钾化，随钾化作用进行和热液继续上升，其温压降低，碱度降低，溶液成分中 K⁺、Na⁺ 减少，SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₂ 相对

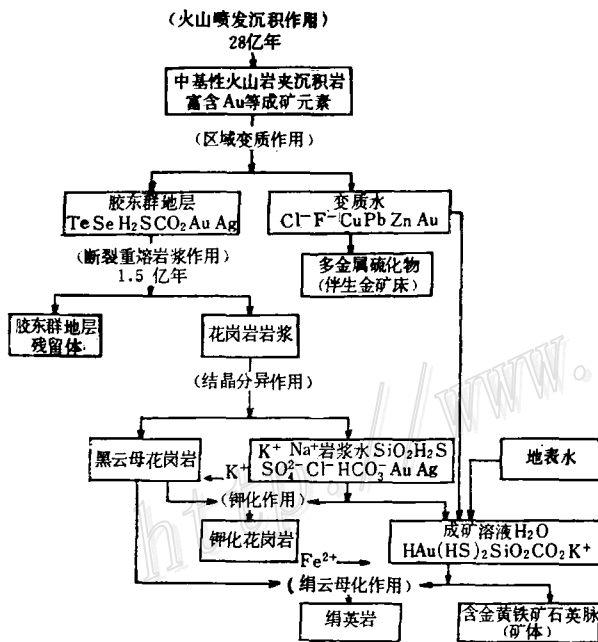


图 8 乳山金矿床成矿模式
Fig. 8. Metallogenetic model of the Rushan gold deposit.

富集形成了最初的成矿热液，蚀变作用也由钾化转化为绢云母化，随绢云母化进行及其它物理化学条件的演化，使成矿热液中金的络合物最终分解沉淀富集成矿。

本文是在杨敏之教授的指导下完成的，野外工作得到山东乳山县黄金局、乳山金矿和山东冶金地勘公司三队的支持，在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 许荣华等. 稀土元素地球化学和同位素地质新方法. 北京: 地质出版社, 1985.
- 2 李治平. 胶东东部乳山金矿床控矿构造格式及找矿方向的研究. 天津地质学会志, 1991, (1)
- 3 张成喜等. 金矿床地质学. 沈阳: 东北工学院出版社, 1989.
- 4 苏守田. 用包裹体测定压力的方法. 地质地球化学, 1979, (1)
- 5 艾永富等. 矿床学参考书. 北京: 地质出版社, 1985. 118~121
- 6 李秉伦等. 矿物中包裹体气体成分的物理化学参数图解. 地球化学, 1986, (2)
- 7 G. N. 菲利普斯等. 太古宙含金热液的性质 (以澳大利亚金矿为例). 国外地质科技, 1984, (4)

THE GENESIS OF THE RUSHAN GOLD DEPOSIT IN EAST SHANDONG

Li Zhiping

(Tianjin Geological Academy, Ministry of Metallurgical Industry, Tianjin)

Abstract

The Rushan gold deposit, one of the recently-proven large gold deposits in east Shandong, lies in the central part of the Muping-Rushan gold metallogenic belt. Based on research work in such aspects as regional geology, ore deposit geology, wall rock alterations, ore types, ore minerals, ore-forming stages, thermometry and gas-liquid composition of inclusions in quartz, and hydrogen-oxygen isotopic geochemistry, the author has reached the following conclusions:

1. The Rushan gold deposit is a postmagmatic mesothermal pyrite quartz-vein type gold deposit related to Mesozoic Kunyushan granite.
2. The ore-control structure is a compound structure formed by two sets of faults trending respectively N 15°E and N 65°E.
3. From potassic alteration to the formation of siderite quartz veins, the ore-forming process experienced four stages, in which the formation of pyrite quartz veins and phyllic rock seemed to be the major stage whose formation temperature, pressure and oxygen fugacity ($\log f_{O_2}$) being 295~311°C, $7.58 \times 10^4 \sim 7.77 \times 10^4$ KPa and $-33.3 \sim -35$ respectively.
4. The ore-forming substances were derived from Jiaodong Group, and the weak acid ore-forming hydrothermal solutions rich in Fe^{+2} , SO_4^{-2} , HCO_3^{-} and CO_2 evolved from postmagmatic weak alkaline hydrothermal solutions rich in K^+ , Na^+ and Cl.
5. Gold occurs in pyrite and its cracks as micrograined native gold, electrum and petzite, associated with altaite and tellurobismuthite.