胶东马家窑金矿地质地球化学 特征及矿床成因

李兆龙 张连营 肖秀梅 樊秉鸿^①

提 要 马家窑金矿是产在胶东群古老变质岩中的含金黄铁矿石英脉型金矿床。它是胶东地区有 代表性的重要金矿类型之一。本文论述了马家窑金矿的地质特征、矿物组合、微量元素、稳定同位 素地球化学和矿物包体学特征等,探讨了金矿的物质来源、金矿成因和成矿时代,指出了金矿的演 化和最后定位于燕山期。

关键词 胶东马家窑 金矿床 地球化学 矿物包体学



图例说明:1、第四系河流沉积物2、胶东群角闪黑云斜长片麻岩 3、胶东群黑云变粒岩及白云母片岩4、胶东群斜长角闪岩 5、含金石英脉及产状6、马家窑一下瑶沟断裂 7、性质不明断裂8、地层产状

> 图 1 马家窑金矿矿区地质简图(据王健 1989) Fig. 1 Schematic geological map of Majiayao Gold Mine

①参加野外及室内部分工作的有许文斗、庞文忠、秦敏琪

胶东地区是我国金矿的重要产 地。按金矿产出的图岩主要有三大 类型,产在花岗岩断裂带中的破碎 蚀变岩型和含金石英脉型金矿,常 为大型、特大型矿床;其二为产在胶 东群变质岩中的金矿床,以马家窑 金矿为代表,金品位较高并含有 Ag、Cu、Pb、Zn、W等伴生元素;其三 是产在中生代火山岩中的金矿,如 三甲金矿。本文仅对产于胶东群变 质岩中的马家窑金矿地质特征及矿 床成因进行讨论。

一、矿床地质特征

马家窑金矿位于栖霞复背斜的 轴部,马家窑一下瑶沟断裂的旁侧 (见图 1)。

区域内胶东群蓬夼组地层广泛



图例说明:1、胶东群斜长角闪岩2、胶东群角闪黑云斜长片麻岩;3、煌斑岩;4、辉绿岩;;5、闪长玢岩 6、细晶岩;7、细粒闪长岩;8、绢英岩化带;9、含金石英脉;10、矿脉编号; 11、岩性界线;12、矿脉或岩脉产状;13、地层产状

图 2 杨霞金矿区脉岩分布图

(据山东地质六队, 1982,山东省栖霞县马家窑金矿地质勘探报告) Fig. 2 A sketch showing dyke distribution

出露,并遭受了角闪岩相区域变质作用。岩石主要有角闪黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩、黑云 变粒岩及云母片岩等。原岩为一套泥砂质一基性火山岩沉积建造。在该地区出露面积占全区 岩石的 96%。马家窑金矿就产于胶东群角闪黑云斜长片麻岩和斜长角闪岩中(图 1)。矿区及 近处未见岩体出露。主要发育一系列脉岩,有辉绿岩、细粒闪长岩、细晶岩、煌斑岩等。据脉岩 间的相互穿插关系,其生成顺序为:早期辉绿岩一含金黄铁矿石英脉一细粒闪长岩一细晶岩一 晚期辉绿岩一煌斑岩一闪长玢岩(图 2)。

矿区属栖霞复背斜的东段,栖霞断裂和亭口断裂之间,发育有一系列紧闭同斜褶皱和 NE 向断裂构造。主要有马家窑一下瑶沟断裂、盘山涧一百里店断裂等。断裂带上分布有百里店、 盘山涧、马家窑、金冠顶等中小型矿床和几十个金矿点,NE 向断裂控制了金矿的区域分布。马 家窑金矿的容矿断裂为 NNW 向,被含金石英脉所充填,具压扭性特性。

1、矿体特征

马家窑金矿由产在胶东群斜长角闪岩和角闪黑云斜长片麻岩中的两组含金石英脉构成(I 号、II号),地表为两条 NW—SE 向并列延伸的含金黄铁矿石英脉及绢英岩化带,两条矿脉 NW 向收敛,SE 向撒开(图 2)。 □号矿脉地表出露长1100米,最大厚度2.8米,平均厚度1.4米,平均品位12.2g/t。在走向和垂向上均有膨胀收缩、分枝复合特征(图2、图3、图4)。它是马家窑金矿的主要工业矿体,由大小不等的五个扁豆状矿体组成。矿脉厚度向深部有总体变小的趋势。Ⅱ号矿脉由三个单脉组成,呈右列式雁行排列组成(图2),脉体以白色石英脉为主,绢英岩化带不发育,矿体规模较小。

2、围岩蚀变

近矿围岩蚀变比较简单,强度较弱,是矿床的重要特点之一,主要为黄铁绢英岩化、硅化和 碳酸盐化。在石英脉的两侧及尖灭再现部位蚀变强度不同,蚀变带宽度各异,矿床下盘蚀变较 发育,绢英岩化带范围较广,是很好的找矿标志,远离矿脉,围岩蚀变较弱,主要见有钾化、绿泥 石化和硅化。



图例说明:1、条带状斜长角闪岩 2、煌斑岩 3、 绢英岩蚀变带 4、含金黄铁矿石英脉 矿体

图 3 马家窑金矿 19 线地质剖面图

(据山东省地质六队)

Fig. 3 Geological profile of the 19th line in Majiayao Gold Mine



图例说明:1、斜长角闪片麻岩 2、绢英岩蚀变带 3、含金硫化物石英脉

图 4 马家窑金矿分枝状矿脉(马家窑沟南头)

Fig. 4 Ramificated ore veins in Majiayao Gold Mine

3、矿物组成及矿化阶段

对矿石矿物进行了较详细的显微镜下研究及电子探针分析,矿床内主要金属矿物有黄铁 矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、银金矿,其次为磁铁矿、辉钼矿、黑钨矿、菱铁矿等。非金属矿物主 要为石英,其次为绢云母、方解石、绿泥石、铁白云石、镁菱铁矿等。

矿石多为块状构造、脉状构造和角砾状构造,局部见有晶洞构造和条带状构造。矿石结构 有黄铁矿的自形一半自形晶粒状结构,压碎结构,交代残留结构,填隙结构为晚期黄铜矿、方铅 矿、闪锌矿交代充填早期黄铁矿形成。闪锌矿中的黄铜矿乳滴状分离呈乳滴状结构。

矿石中金主要以银金矿及含银自然金存在。银金矿颗粒较粗,常见 0.1~0.01 毫米,呈不 规则粒状、长条状、树枝状、椭园状等。含银自然金、银金矿在矿石中有四种存在形式:①呈微 粒金被包在黄铁矿、石英中,为乳滴状,乳黄色,多为含银自然金,可能为黄铁矿、石英结晶时同 时沉淀的金;②金在黄铜矿、方铅矿、闪锌矿细脉中,切割交代早期黄铁矿晶体,充填在黄铁矿、 石英裂隙和粒间中;③银金矿呈细脉或不规则状存在于石英中;④银金矿呈不规则状产在碳酸 盐细脉及矿物裂隙中。据显微镜下几百颗粒统计,在黄铁矿、石英、黄铜矿、方铅矿等矿物中的 包体金约占 10%,粒间金占 45%,裂隙金约占 44.8%。自然金与载金矿物之间的关系,与黄 铁矿伴生的金约占 63%,与石英伴生的约为 10.3%,与黄铜矿伴生的约为 12.8%,与闪锌矿 伴生的约占 5.9%,与方铅矿伴生的约为 4.2%,与菱铁矿伴生的金为 3.8%。显然,自然金以 粒间金和裂隙金形式存在为主,仅少量以包体金形式存在。自然金主要与黄铁矿伴生,其次为 石英、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿,与菱铁矿伴生的金较少。

		Ore stages and inneral	paragenesis	
成矿阶段	1	П	III	IV
矿物名称	1	ц 		
石英				
磁铁矿				
菱铁矿				
银金矿				~
含银自然金				
辉钼矿				
铁白云石				
绢云母				
绿泥石				
方解石				

表 1 马家窑金矿成矿阶段及矿物生成顺序 Table 1 Ore steers and minuted assessments

据矿物共生组合和矿石结构构造的研究,金的成矿作用可划分为四个阶段,即(1)黄铁矿 一(菱铁矿)一石英阶段,主要由粗粒黄铁矿和乳白色石英组成,其次有少量镁菱铁矿和黑钨 矿,碎裂明显;(11)含金黄铁矿一石英阶段,主要组成矿物为含银自然金、银金矿、细粒黄铁矿和 石英,是金的主要成矿阶段之一;(III)含金多金属硫化物阶段,是主要成矿阶段之一,共生矿物 主要有黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、银金矿和石英,见有少量辉钼矿;(IV)含金黄铁矿一石 英一铁白云石阶段,该阶段硫化物较少,仅见有细粒黄铁矿和少量辉钼矿、方铅矿及银金矿,脉 石矿物以石英和铁白云石为主。其中以 II、III 成矿阶段最为主要,其次为 VI 成矿阶段(表 1)。 金富矿体形成于矿脉膨大部位,和多期矿化叠加的中心部位。

二、地球化学特征及成矿物理化学条件

1、地球化学特征

为了解矿床地球化学特征,测定了矿床中主要硫化物黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿和自 然金的痕量元素,其测定结果列在表2及表3中。

Table 2 Native gold analysis by electronic probe of ores of Majiayao Gold Mine

样号	矿物名称	Au	Ag	As	Sb	Bi	Cu	Рь	Fe	Pt	Pd	s	Se	Te	总量	$\frac{Au}{Au+Ag} \times 1000$
1	银金矿	73.50	24. 55	0	0	0	0	0		0	0.04	0.14	1.59	0.10	99. 92	750
2	银金矿	69. 89	28.20	0	0	0	0	0		0	0. 08	0.15	1.43	0.07	99.82	713
3	含银自然金	85.13	13.21	0. 08	0	0	0.04	0		0	0. 03	0.07	1.81	0.10	100. 47	866
4	银金矿	70.46	27.41			0	0. 07		0. 41			0. 03		0.01	98.39	720
5	银金矿	77.35	21.55			0	0. 08		0.36			0.05		0.0 1	99.90	782
6	银金矿	76. 76	21.39			0	0.10		0.48			0.13		0.06	98.92	782
7	银金矿	59. 83	88.19	0.04		0.54	0		0.45	0	0.04		0	0.12	99.21	610
8	银金矿	64.7 1	32.61	0		0.26	0		0.36	0	0		0	0.10	98.04	665
9	银金矿	67.47	31.02	0. 03		0.15	0.14		0.10	0	0.03		0	0.14	99.08	707
10	含银自然金	80. 83	17.94	0	ĺ	0.05	0. 09		0.56	0	0		0	0	99.47	818

表 2 马家窑金矿自然金电子探针分析结果 *

* 天津地质研究院探针组分析

该矿区金矿物按其金银的比率分含银自然金和银金矿两种,并主要为银金矿。据电子探 针分析结果(表 2),含银自然金和银金矿表现出银含量的连续性增加。在微量元素含量方面 无明显差别,这表明了矿区成矿溶液和成矿物理化学条件的一致性,二者是在同一成矿热液中 沉淀的。含银自然金呈黄铁矿包体产出,一般较银金矿沉淀早。二者普遍含有 Te 和 Fe,部分 样品含有 As、Bi、Cu、Pd、S 等元素。

硫化物中都有较高的金含量(表 3),这可能表明金是在整个矿化时期由热液携带和沉淀的。显微镜下见含银自然金和银金矿与黄铁矿关系密切,约 62%的金颗粒产在黄铁矿裂隙中或呈包体出现。黄铁矿含金平均达 33.54ppm,与玲珑金矿的黄铁矿含金相似。而黄铜矿和闪

		Ţ					41							1		r	
样品号	样品名称														Au/Te	Ag/Te	Co/Ni
		Au	Ag	As	Sb	Bi	Co	NI	Cu	РЪ	Zn	Cđ	Te		l		L
M-31	黄鉄矿(Ⅲ)**	83. 34	15.45	775.7	353. 00	24. 29	240	110	360	350	460	< 1	5	0. 24	12.67	3.09	2.18
M28	黄鉄矿(11)	4.25	5.58	646.4	99. 58	4.11	100	200	1100	550	480	3. 9	< 0. 03	1.31			0.50
M-27	黄铁矿(111)	33. 56	(1300)	533. 3	72.91	20. 71	600	610	J 40	2100	130	1.5	< 0. 03	38.74			0. 98
M-26	黄铁矿(II)	6. 62	3. 02	500. 9	37.34	1, 96	63	76	78	630	250	1.8	< 0. 03	0.46			D. 83
M-23	黄铁矿(IV)	18.91	19.63	339. 1	26. 67	47. 32	200	260	78	2300	590	4.2	2.3	1.01	8. 22	8.53	0.77
M-21	黄铁矿(11)	91. 23	45.88	500. 9	21. 34	84. 82	(1100)	79	510	2800	1100	10	4. 4	0.50	20. 73	10, 13	13.92
M-17	黄铁矿(11)	43. 76	18. 41	565. 6	25. 00	10. 10	190	660	220	660	415	4.5	0. 52	0. 42	84. 15	35.40	0.29
M-16	黄铁矿(11)	6.62	5. 58	694. 9	14. 23	7.50	55	92	1700	1900	490	5.7	< 0. 3	0.84			0.60
平均		33. 54	16.26	569.6	81.26	25.10	206. 9	260. 9	523	1411	526. 9	1.1	1.58	5.44			2.51
M-1	黄铜矿(III)	1.14	94.01	177.8	10.61	3. 93	5.9	< 5				15		82.46			< 1.18
M-2	黄铜矿(Ⅲ)	7.93	52.85	80. 8	24. 90	6.25	32	86				14	0.52	6. 66	ī5. 2 5	101.63	0.37
平均		4.54	73. 13	129. 3	17.76	5.09	18.9	45		-		14.5	0. 52	44.56			0.78
m-1	闪锌矿(III)	0.10	46.53	6.25	2.5	27.98	81	2				9600	4. 9	465.3	0.02	9.50	40.5
ma,—9	闪锌矿(11)	0.51	42.69	6.25	4.38	29. 17	41	2			ĺ	6700	0.4	83.71	1.28	106.73	20. 5
m-24	闪锌矿(川)	1. 27	48.35	6. 25	6. 25	43. 02	59	6				7000	1.3	38.07	0.98	37.19	9.8
m — 30	闪锌矿(III)	12. 27	56. 44	107. 2	7.5	47.67	370	170				4700	0.8	4.60	15.34	70. 55	2. 2
平均		3.54	48, 50	31. 48	5.16	36, 96	138	45	<u> </u>			7000	1.85	J 47. 92	4.41	55, 99	18.25

表 3 马家窑金矿硫化物矿物痕量元素组成 *

Table 3 Trace elements in sulfides of gold ore in Majiayao Mine

*天津地质研究院化验室分析 **括弧内数字为成矿阶段

锌矿中金平均含量分别为 4.5ppm 和 3.5ppm,比黄铁矿少得多。银和金不一样,银的高含量 主要在方铅矿中(1300ppm),方铅矿含银高是一个典型特征。其次是黄铜矿(平均含量 73.43ppm),闪锌矿(平均 48.50ppm),黄铁矿含银较少,平均为 16.22ppm。显微镜下见与方铅 矿共生的银金矿,呈淡黄色这意味着含银高的缘故。

方铅矿、闪锌矿中的 Te 含量相对偏高。未见 Te 的独立矿物,这可能在晚期硫化物阶段, 热液中 Te 相对浓集随硫化物沉淀有关。在闪锌矿中 Cd 含量相对较高,平均含量为 7000ppm, 但未发现镉的独立矿物。

笔者计算了 Ag/Au、Au/Te、Ag/Te 和 Co/Ni 比值,Ag/Au 比值随成矿阶段由早期到晚期向 增大方向演化,其中第 III 成矿阶段最高,第 IV 成矿阶段又降低。如第 II 成矿阶段的黄铁矿中 Ag/Au 比值平均为 0.63,而第 III 成矿阶段的黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿中则分别平均为 38.74、 44.56 和 147.92,第 IV 成矿阶段的黄铁矿则为 1.04。黄铁矿的 Co/Ni 比值从 0.29 到 13.92 间变化,八个样品中有六个样品比值小于 1,二个样品大于 1,变化区间较大及多为小于 1 的特 点是黄铁矿多阶段沉淀晶出的标志,亦是成矿热液中 Fe、Mg、Ni 含量受富铁镁质基性火山岩 一角闪斜长片麻岩变质和蚀变作用影响的结果。

据黄铁矿的微量元素含量,将其投在 Co-Ni-As 三角图上(图 5),样品主要落在变质热液金矿床区,部分落在岩浆热液金矿分布区。这同样表明马家窑金矿具变质热液和岩浆热液成因双重特点。



图 5 不同成因类型金矿中黄铁矿的 Co-Ni-As 三相图解 (据黄绍峰, 1987)

N

Fig. 5 Triangle plot showing pyrites in different genetic ores

335 C。在黄铁矿附近的包体,以165~280 C为主,盐度11.7wt%。在M。样品中,见纯CO2包体,椭园状,包体大小在2.5×3(µm²),含CO2>95%。

液相包体有两种产状, 一种为极细小密集定向拉长 的包体,一般短轴<1.5μm, 气/液比一般<15%,含或 不含 CO₂。另外,在黄铁矿 附近的石英中,还见到少量 水溶液大包体,(冷冻到零下 40 C未出现 CO₂),大小能达 15~20μm。又不含 CO₂,均 一温度 110-115℃,盐度

5 A Π 200 300 350 400 500 250 150 45.0 Ν 201 B 01 15 🗆 11 目日 10 0 150 200 250300 3 50 100 图例说明:「、气相包体 II、含 CO, 包体 III、液相包体 A 斜长角闪片麻岩 B金矿床 图 6 马家窑金矿气液包体均一温度盲方图 Fig. 6 Histogram showing homogenization temperatures of Majiayao Gold Mine

6.2wt%。这些包体沿一定方向串珠状排列,看来是后期的。

2、矿床形成温度、成矿溶液 性质

(1)包裹体类型

马家窑金矿是产在胶东群变 质岩中的含金石英脉型金矿。含 矿石英脉中石英包裹体的研究表 明,按包体特征、组成可分为纯 CO₂ 包裹体、气相包裹体、液相包 裹体、含 CO₂ 包裹体四种。含 CO₂ 包裹体在石英中含量最高, 而液相、气相包裹体和纯 CO₂ 包 体较少。

含 CO₂ 包裹体在含金石英脉 中广泛分布,包体形状呈自形、半 自形,大小为 1×2.5~7.2×7.2 (µm²)。含 CO₂ 体积比在 15 -40%,部分含 CO₂ 多达 60 ~ 80%,均一温度范围为 150 ~

表 4 马家窑金矿成矿流体温度、盐度及压力

Table 4 Temperature, salinity and pressure of ore fluid in Majiayao Gold Mine

样品号	样品名称	类型及矿化期	矿区	均一渴度(C)	$CO_1: 5-\frac{3}{4}H_20 分解(C)$	盐度(wt%NaCl 当量)	密度(g/cm')	压力(Pa)
M2	石英	原生包体(Ш)	马家窑	260	2. 5	12.4	0.87	14.4 × 10°
		原生包体(Ⅲ)	马家窑	280	2.9	12	0.90	15.4 \times 10°
M10	石英	原生包体(1)	马家窑	260	3. 1	11.7		
		次生包体	马家窑	110-115	冰点-6.6	6.2	0.99	13.6 \times 10 ⁴

表 5 马家窑金矿矿物中包体成分及微量气体成分分析结果(ppm)

Table 5 Analysis of gases in fluid inclusion from quartz in ores of Majiayao Gold Deposit

样品号	样品名称	PH 值	к+	Na+	Ca'+	Mg ²⁺	нсо,	C1	so, -	F ⁻	H,	СН,	CO:	н,о	Na ⁺ /K ⁺
M-2	石英(多金属硫化物阶段)	5.68	0.59	7.42	14.03	1.80	38.00	12.50	8.27	4.93	0.03	0.04	20.10	923.0	12.6
M - 23	石英(含金黄铁矿阶段)	5.44	1.19	16.70	6.12	0.69	17.64	25. 89	3. 38	2.07	0.01	0.01	34. 59	1130.3	14.03
M-24	石英(多金属硫化物阶段)	5.12	1.07	8.75	5.10	0.60	7.32	14.52	6.02	0.33	0. 03	0. 03	19.11	867、4	8.18

在角闪斜长片麻岩和含金黄铁矿石英脉中均见有气相包体。角闪斜长片麻岩中气相包体 为半自形,大小4.5×10.5(µm²),CO₂体积比65%~90%,均一温度450~530℃,为变质温 度。在含金黄铁矿石英脉中的气相包体2.7×4~3×5.5(µm²)多为半自形,气液体积比55~ 70%,均一温度335~370C。

(2)成矿温度测定 根据 267 个包裹体均一测温数据,将温度分为四组,110~140℃, 150~230℃,240~330℃和 340~370℃(图 6)。由显微镜下观察及矿物共生组合关系,110~ 140℃这组温度可能是成矿后的次生包体,150~230℃和 240~330℃为主要成矿温度,前者可 能与多金属硫化物阶段相当.后者可能与含金黄铁矿石英脉阶段相符,340~370℃这组温度 可能是黑钨矿的沉淀温度。

(3) 成矿溶液盐度 由含 CO₂ 包裹体测得原生成矿流体盐度为 11.7~12.4wt%, 平均为 12.03wt%(表 4)。与玲珑黑云母花岗岩及玲珑金矿、三山岛金矿热液流体的盐度值近似。表 明了区域性金矿的演化和断承性关系(图 7)。

马家窑金矿次生包体的盐度为 6.2wt % NaCl 当量, 明显与原生成矿流体不同。

成矿压力是粗略估算的。计算结果见表 4。马家窑 | 号矿脉第 III 成矿阶段的成矿压力在 14.4×10°~15.4×10° 帕 间。平均 压力为 14.9×10° 帕。次生流体压力估算为 13.6×10° 帕。压力偏低。可能与金矿主要在断裂、裂隙等压力释放和消减带成矿有关。

(4)**成矿溶液性质** 选取了含金黄铁矿石英阶段和多金属硫化物阶段的石英,测定了其包体的化学成分。气液包裹体主要含有 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₅⁻、Cl⁻、SO₂⁻⁻、H,、CH,、CO₂和 H,O,其中 Na⁺、Ca²⁺、HCO₅⁻、Cl⁻、SO₂²⁻、H,O 和 CO₂含量较高。阳离子 Na⁺、/K⁺ 比值变化于 8.18~14.03 之间(表 5)。

成矿溶液所含阳离子按含量多少顺序为: Cl⁻ > HCO₅⁻ > SO₅⁻ > F⁻,或 HCO₅⁻ > Cl⁻ > SO₅⁻ > F⁻,或 HCO₅⁻ > Cl⁻ > SO₅⁻ > F⁻,溶液中以 Cl⁻、HCO₅⁻离子占优势。这点与玲珑含金黄铁矿石英脉型和焦家式破碎蚀变岩型金矿不同,后二者分别是以 Cl⁻、SO₅⁻和 HCO₅⁻、SO₅⁻占优势。在上述三类型金矿



中 F⁻均不显重要 作用。成矿溶液的 PH 值在 5.12 ~ 5.68 间,平均为 5.41,为弱酸性。

气液包裹体中 微量气体分析表明,包裹体中含有 H₂、CH₄、CO、CO₂、 H₂O等微量气体, 并以 CO₂、H₂O 为 主。

通过气液包体 成分分析和 PH 计 算,表明该成矿溶 液主要是 Na⁺ — K⁺ — Ca²⁺ 和 Cl⁻ — HCO₃⁻ — SO²⁻ 型的弱酸性溶液。

在矿物包体气

体成分的物理化学

图例说明:1、马家窑金矿 2、三山岛金矿 3、玲珑金矿 4、滦家河花岗岩 5、玲珑花岗岩 6、灵山沟金矿 7、乳山金矿 8、钾长伟晶岩

图 7 胶东地区花岗岩及金矿床的温度和盐度关系图

Fig. 7 Plot Showing relation between salinity and temperature of fluid inclusion of granite bodies and gold deposits in Jiaodong Area

参数图和利用矿物包体气一液成分及热力学参数确定热液中组分的浓度等基础上,根据热力 学原理,导出了计算成矿流体的物理化学参数公式,并编制计算机程序,计算了马家窑矿区成 矿流体的矿化度 MR、Eh、PH、还原参数 R、f_{H2}、f_{cH}、f_{co}、f_{co}、f_{co}、f_{co}等各项参数,计算结果列在表 6 中。

由表 4.5.6 可知,成矿热液是弱酸性,弱还原性质的热液体系。Eh 值在-0.36~-0.78 伏间。随成矿溶液的演化 fo₂、fco、fco,向增大的方向进行,f_{cn},向减小方向发展。

3、稳定同位素特征

(1)硫同位素特征 矿区含金石英脉中金属矿物黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿硫同位 素主要特征如下:① δ³⁴S值的分布范围为+6.3‰~+13.91‰,算术平均值为+9.9‰,具塔式 分布。黄铁矿的 δ³⁴S值分布范围从+6.95‰~+11.7‰,平均值为 8.32‰,与玲珑花岗岩和 胶东群变质岩中黄铁矿的 δ³⁴S值相似,后两者 δ³⁴S平均值分别为+9.5‰和+7.4‰。具变质 热液和岩浆热液矿床的双重特征。②不同矿化阶段的硫化物同位素组成基本相同,表明为同 一硫源。③同一成矿阶段的黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿的硫同位素微有差别,它们 δ³⁴S 的平均值分别是 7.0‰、12.57‰、11.95‰、和 11.58‰。黄铜矿、方铅矿和闪锌矿 δ³⁴S值近于

一致,而黄铁矿的δ³⁴S值相对较低。

表 6 马家窑金矿石英包体成分计算的成矿流体物理化学参数

Table 6 Physiochemical parameters calculated from composition of quartz inclusion

样品号	样品名称	MR (g/t)	Eh	R	lgf _H ,	lgf _{CH} ,	lgfco	lgfco,	lgfo,	H:C:0:S:CI
M-2	多金属硫化物石英脉之石英	53.67	-0.78	0.04	-0.66	-1.44	-3.27	0.75	- 29. 90	0.09:1.0:1.99:0.20:0.83
M-23	含金黄铁矿石英脉之石英	19.57,	- 0.36	0. 01	- 1. 62	3.57	- 3. 81	0. 16	- 52. 38	0. 01; 1. 00; 2. 00; 0. 04; 0. 82
M-24	多金属硫化物石英脉之石英	55.92	-0.60	0.01	-2.17	-1.31	- 3. 33	0.58	-33.21	0.04:1.00;1.98;0.60:0.93

表 7 马家窑金矿床铅同位素组成模式年龄及源区特征值*

Table 7 Pb-isotope composition and model ages of Majiayao Gold Deposit

			铅同位素组成			模式	年齢	特征	E计算值	* *			
样品号	样品名称	样品位置	²⁰⁶ Pb 264 Pb	²⁰⁷ Pb ²⁰⁷ Pb	²⁰⁸ Pb ¹⁰⁴ Pb	● 值	年齢值 (Ma)	μ	v	ω	k,	k,	k,
M-2	方铅矿	马家窑	16.594	15.230	36.979	0.67737	1051	8.59	0.0623	37.70	4.39	605.14	4.05
M - 4	方铅矿	马家窑	16.533	15.224	37.005	0.68226	1091	8.59	0.0623	38.21	4.45	613.32	4.11
M-21	黄铁矿	马家窑	16.4832	15.2111	37.0592	0.68519	1110	8.57	0.062	38.69	4.515	624.03	4.370
M-23	黄铁矿	马家窑	16.6493	15.2788	37.2443	0.67892	1070	8.69	0.063	39. 21	4.512	622. 38	4.367
M — 26	黄铁矿	马家窑	16. 4762	15.3143	37.5668	0.70026	1250	8.83	0.064	37.38	4. 233	584.06	4.097
800	方铅矿	金冠顶	17.059	15.366	37.317	0.65429	865	8.79	0.064	37.57	4. 274	587.05	4.04
S-46	方铅矿	金冠顶	17.040	15.362	37.292	0.65537	874	8.78	0.0637	37.52	4.27	589.01	4.03
JX - 32	斜长角闪岩		16.8291	15.3006	36.7515	0.66559	960	8.70	0.063	35.70	4.103	566.67	3.971
JX-75	斜长角闪片麻岩		17.3988	15. 4588	37.4450	0.63828	720	8.92	0.065	36.86	4.132	567.08	3.999

*天津地质研究院 同位素地质室测定

* * $\mu = {}^{238} U/{}^{204}Pb, \nu = {}^{232} U/{}^{204}Pb, \omega = {}^{232} Th/{}^{204}Pb, K_1 = {}^{232} Th/{}^{238}U, K_2 = {}^{232} Th/{}^{238}U, K_3 = Th/U$

表 8 马家窑金矿碳酸盐碳氧同位素组成

序号	样品号	样品名称	采样位置及产状	δ''C‰(PDB)	δ''O‰(SMOW)	资料来源
1	M-8	菱铁矿	马家窑1号矿,菱铁矿石英脉	5. 11	10.71	本文
2	M -12	菱铁矿	马家窑1号矿,菱铁矿石英脉	- 5.86	10.62	本文
3	M-15	菱铁矿	马家窑1号矿,菱铁矿石英脉	-5.33	10.64	本文 本文
4	M4-178	镁菱铁矿	马家窑金矿	- 5. 91	9.66	王建资料
5	M4-126	铁白云石	马家窑金矿	-5.19	11.21	王建资料
	平均			-5.48	10. 57	

Table 8 C, O isotope composition of carbonats from Majiayao Gold Deposit

天津地质研究院同位素地质室测定

(2) **铅同位素特征及成矿物质来源** 为详细研究马家窑金矿铅同位素地球化学特征,我们 测定了方铅矿、黄铁矿和成矿围岩胶东群斜长角闪岩的铅同位素组成;为了对比,将金冠顶金 矿的方铅矿样品也进行了测定,其结果列在表7中。该矿床铅同位素组成有以下特征。

①总体看,铅同位素组成相对稳定,变化较小²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 为 16.4762~16.6493,²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 为 15.2111~15.3143,²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 为 36.979~37.5668,后者变化相对明显(表 7)。

②由测定的铅同位素组成计算了模式年龄和源区特征值(表 7)。模式年龄在 1051Ma~ 1250Ma 间。金冠顶金矿的模式年龄为 870Ma。矿床围岩斜长角闪岩铅模式年龄为 870Ma,表







来自铀亏损型源区。根据μ、ω和 Th/u 等数据判断,这个源区与胶东群变质岩相似,成矿物质 可能来自下地壳和部分上地幔的双重来源。

金冠顶金矿铅同位素组成特征,年龄值及源区特征计算值在马家窑金矿与胶东群变质岩 之间,表现出基本类似的特点。

(3)碳、氧同位素特征 马家窑金矿碳酸盐矿物碳、氧同位素组成见表 8。由表 8 可见菱铁矿、镁菱铁矿和铁白云石的碳氧同位素组成基本相同,反映出它们来源和成因的相同性。 δ¹³C值从-5.11%~-5.91%间变化,平均为-5.48%,属于原生碳,与深成岩浆岩的 δ¹³C 一致。碳酸盐的 δ¹⁶O值从 9.66%到 11.21%间变化,平均为 10.57%,与花岗岩中碳酸盐的 δ¹⁶O 平均值一致(10%,Taylor,1968)。在 δ¹³C-δ¹⁶O图中(图 9),马家窑金矿碳酸盐碳、氧同位素 组成落在岩浆碳酸盐(Taylor,1967)和玲珑花岗岩热液分布区之间(图 9),即落入典型的岩浆 热液碳酸盐碳、氧同位素区内,进一步说明了成矿热液来源于地壳深部岩浆熔体。

明矿床铅主要来自前寒武纪地体。与角闪斜长片麻岩的铅同位 素组成相似,后者可能是铅源之 一。二者铅同位素组成、模式年 龄等差异,指示了成矿物质可能 存在的其它来源。

③马家窑金矿床铅源区 μ 值 主要在 8.57~8.69 间,胶东群变 质岩的 μ 值为 8.70~8.92,前者 较后者 普遍偏低。在 Doe, B.R 和 Zatman, R.E 构造铅环境分布 图 8 中,矿石铅多数落在下地壳 和地幔铅平均演化曲线附近,克 拉通化地壳边缘。胶东群角闪斜 长片麻岩的铅数据落在地幔铅平 均演化曲线附近,克拉通化地壳 范围内。指出了成矿物质为下地 壳和幔源两种来源。

马家密矿床的 ω 值从 37.57~39.21,变化较大,Th/u 值从4.05~4.37,均高于金冠顶 金矿,也较胶东群变质岩的高,但 二者差别不大。与相应的地球正 常值($\mu = 9.58, \omega = 36.50, Th/$ u = 3.8)比较,马家窑金矿的 μ 值偏低, ω 、Th/u偏高,成矿物质

三、结论与讨论

关于马家窑金矿床的成因目前尚有不 同认识。一种观点认为马家窑金矿是变质 热液型金矿。主要依据是金矿赋存在胶东 群变质岩中,在矿床近距离内未见侵入岩 体,并且矿脉的延伸方向是 NW 向的,与 中生代 NE 向断裂构造方向不一致;另一 种观点认为马家窑金矿属岩浆中温热液成 因,设想深部有岩浆岩体,金矿是深部岩体 热液产物。

笔者认为,马家窑金矿是产在胶东群 变质岩中的含金石英脉型金矿床,矿脉赋 存于 NE 向马家窑一下瑶沟断裂旁侧,次 一级 NW 向压扭性断裂中,矿区范围内, 未见岩体出露,但脉岩发育。被脉岩穿插 的花岗斑岩 K—Ar 年龄为 240Ma,切割矿 脉的晚期煌斑岩 K—Ar 年龄为 150Ma。



图 9 胶东金矿碳酸盐的 δ¹³C---δ¹⁴O 关系示意图

Fig. 9 Plot of $\delta^{13}C - \delta^{16}O$

矿体中硫化物微量元素特征具变质热液金矿和岩浆热液金矿双重特点,黄铁矿 Co/Ni 比值变化,多阶段沉淀晶出标志更加明显。石英包裹体均一温度为 160~370℃,并有 190℃、250℃、340 C 三个峰值;成矿溶液的盐度平均为 12.03%,具低盐度的特点;PH 平均为 5.41;包体成分分析表明,成矿溶液是弱酸性、弱还原性质的 Na⁺--K⁺--Ca²⁺;和 Cl⁻-HCO₇--SO₄⁻型热液。

硫同位素研究表明,δ⁴S 为较小的正值,分布范围较窄,具塔式分布特征。其数据特征与 胶东群变质岩和玲珑花岗岩中的δ⁴S 近似。矿石铅同位素稳定,模式年龄为1051~1250Ma, 源区特征值μ=8.65,ω=38.14,Th/U=4.18,表明具下地壳和上地幔源混合特点,据此认 为成矿物质主要来自胶东群变质岩并有部分深源物质加入。矿床碳酸盐矿物碳、氧同位素, δ¹⁴C 平均为-5.48‰,δ¹⁸O 平均为10.57‰,具岩浆碳酸盐特点,进一步表明了成矿热液来源于 地壳深部岩浆熔体。

由上讨论可知,马家窑金矿是胶东群地质体中的成矿物质(有部分幔源成分)经区域变质 作用,后经燕山期构造一岩浆作用,多次活化、迁移、富集,最后成矿的,故具有下地壳和上地幔 两个物质来源,变质和岩浆热液双重成矿作用的特征。矿床的最后定位是燕山期。

工作期间得到了马家窑金矿的热情支持,本院包体组测定了包体均一温度和盐度,在此谨 致谢忱。

参考文献

〔1〕陈光远等,《胶东金矿成因矿物学与找矿》,重庆出版社,1989

〔2〕王义文,胶东西北部地区金矿床铅同位素特征及其地质意义,长春地质学院学报,(3) 1989

(3) Zartman, R. E. and Doe, B. R., Plumbotectonics-The Model, Tectonophysics, 75, 1981, 135-162

(4) Mookherjee, A. and Philip. R., Distribution of Copper, cobalt and nickel in ore and host-rocks, Mimeral Deposita (14) 1979

GEOLOGICAL AND GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND GENESIS OF MAJTAYAO GOLD ORE DEPOSIT, SHANDONG PROVINCE

Li Zhaolong Zhang Lianting Xiao xiumei Fan Binghong

Abstract

Majiayao is a quartz vein — typed gold deposit. It is a representative of such kind of gold deposit in the East Shandong Province, China.

This paper deals with geolgical, geochemical, paragenetic, microelement and isotope characteristics of the deposit and physiochemical condition of the ore—forming process. Co/Ni ratios of pyrite are in the range of $0.29 \sim 13.2$ which falls in the fields of metamorphic and magmatic hydrothermal gold ore in the triangle plot of Co,Ni and As.

Homogenization temperatures of quartz inclusion from ore veins are $110^{\circ}C \sim 370^{\circ}C$ with ore forming Tem. of $150^{\circ}C \sim 330^{\circ}C$. The average salinity value is 12.03° wt %. According to the composition of inclusions ore fluid is weak acidic.

S — isotope somposition of ore is similar to Linglong Granite and the metamorphic rocks of Jiaodong Grotp with value range of $+6.3 \sim +13.91\%$. Pb — isotope is stable similar to that of hornblend — plagioclase gneiss of Jiaodong Goroup belonging to normal Pb. Model age range is $1051 \sim 1250$ Ma. Majiayao gold deposit is slightly lower in μ value and slightly higher in w and Th/U velue indicating a U — depletion source area of ore materials. Both Jiaodong Group and upper mantle supply materials for the metallogeny.

C, O isotope composition of carbonate minerals from the deposit falls about the boundary between the fields of carbonatite fluid and Linglong Granite fluid, furtherly indicating ore fluid may be derived from melting magma in the deep crust. Ore was formed in Yanshanian Period.