

山东旧店金矿成因矿物学研究及其意义

李洪奎¹, 李军², 嵇传源¹, 耿科¹, 梁太涛¹

(1.山东省地质科学研究所, 国土资源部金矿成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东省金属矿产成矿过程与资源综合利用重点实验室, 山东 济南 250013; 2.寿光市国土资源局, 山东 寿光 262700)

摘要:平度旧店金矿床位于华北板块之胶北隆起区内,其赋矿围岩为晚侏罗世玲珑花岗岩,矿床成因为岩浆期后热液裂隙充填石英脉型金矿。据成矿物质沉淀时序可分为I黄铁矿化-绢英岩化、II石英-磁黄铁矿-中粗粒黄铁矿、III石英-黄铁矿-微细粒黄铁矿、IV石英-多金属硫化物和V石英-碳酸盐岩等5个成矿阶段,其中II, III, IV阶段为金的主要富集成矿阶段。该文在对山东平度旧店金矿床中黄铁矿和石英矿物标型特征研究的基础上,根据成矿阶段,划分出5个时代的黄铁矿,即形成于黄铁绢英岩中的I阶段黄铁矿、黄铁石英脉中的II阶段黄铁矿、石英黄铁矿矿石中的III阶段黄铁矿、多金属硫化物矿石中的IV阶段黄铁矿和产于石英碳酸盐岩细脉中的V阶段黄铁矿。黄铁矿晶形主要为{100}, {210}, {111}单晶形态, {100}+{210}, {100}+{111}和{100}+{210}+{111}的聚形晶态,随着成矿阶段的变化,立方体出现率逐渐减小,五角十二面体、立方体+五角十二面体的聚形晶出现率则逐渐增加,直至晚期成矿阶段又有出现率高的立方体黄铁矿。旧店金矿在石英黄铁矿成矿阶段(III阶段)中黄铁矿晶形以{100}+{210}为主,在多金属硫化物成矿阶段(IV阶段)中,黄铁矿晶形以{100}+{111}和{100}+{210}+{111}聚形为主,而在早期阶段和晚期阶段,黄铁矿晶形简单,以{100}, {210}, {111}单晶为主。对黄铁矿主成分的研究表明,成矿阶段黄铁矿表现为早期亏S、富Fe的特点,在主成矿阶段III, IV阶段中,黄铁矿则表现富S、亏Fe的特点,反映了在多金属硫化物成矿阶段,不仅是金大量沉淀形成的时期,也是载金矿物黄铁矿快速富集沉淀的时期,说明富S、亏Fe的地球化学环境有利于金的沉淀。黄铁矿物理特征及石英标型亦佐证了在多金属硫化物阶段的黄铁矿、石英晶胞参数稍高,说明同波谱段反射率和晶胞参数的变化与金含量有对应关系。

关键词:黄铁矿; 石英; 晶形; 标型矿物; 成因矿物学; 旧店金矿

中图分类号: P618.51

文献标识码: A

引文格式: 李洪奎, 李军, 嵇传源, 等. 山东旧店金矿成因矿物学研究及其意义[J]. 山东国土资源, 2016, 32(3): 1-9.
LI Hongkui, LI Jun, ZHUO Chuanyuan, etc. Mineralogy Study and Its Significance of the Origin of Jiudian Gold Deposit in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2016, 32(3): 1-9.

在对金矿的研究中,黄铁矿、石英是与金矿化关系最密切的矿物之一,也是研究金矿成因矿物学最重要的载体矿物^[1]。目前随着测试技术的进步,成因矿物学的研究向高精深发展,在矿物岩石、矿床成因和找矿勘探方面具有重要的指导作用^[2]。研究矿物标型特征及其微区地球化学性质,可以查明矿床中有关物质的来源^[3],通过矿物标型的定位研究,还可查明形成矿物岩石和矿床的有关流体的性质和运移途径,含矿和无矿地段的判别等^[4],进一步确定找

矿方向。在胶东地区,与金矿成因矿物学研究有关的论著颇多,陈光远^[2]、李胜荣^[3]、于洪军^[5]、王枫^[6]、薛建玲^[7]、严育通^[8]、周起凤^[9]、吕文杰^[10]等对胶东金矿区或不同金矿床的成因矿物学特征进行了深入的研究。该文以山东平度旧店金矿床中黄铁矿、石英作为研究对象,探讨与金关系密切的黄铁矿、石英矿物标型与成矿作用的关系,以期对金矿床的成因和成矿作用研究提供成因矿物学佐证。

收稿日期: 2015-03-27; **修订日期:** 2016-01-06; **编辑:** 曹丽丽

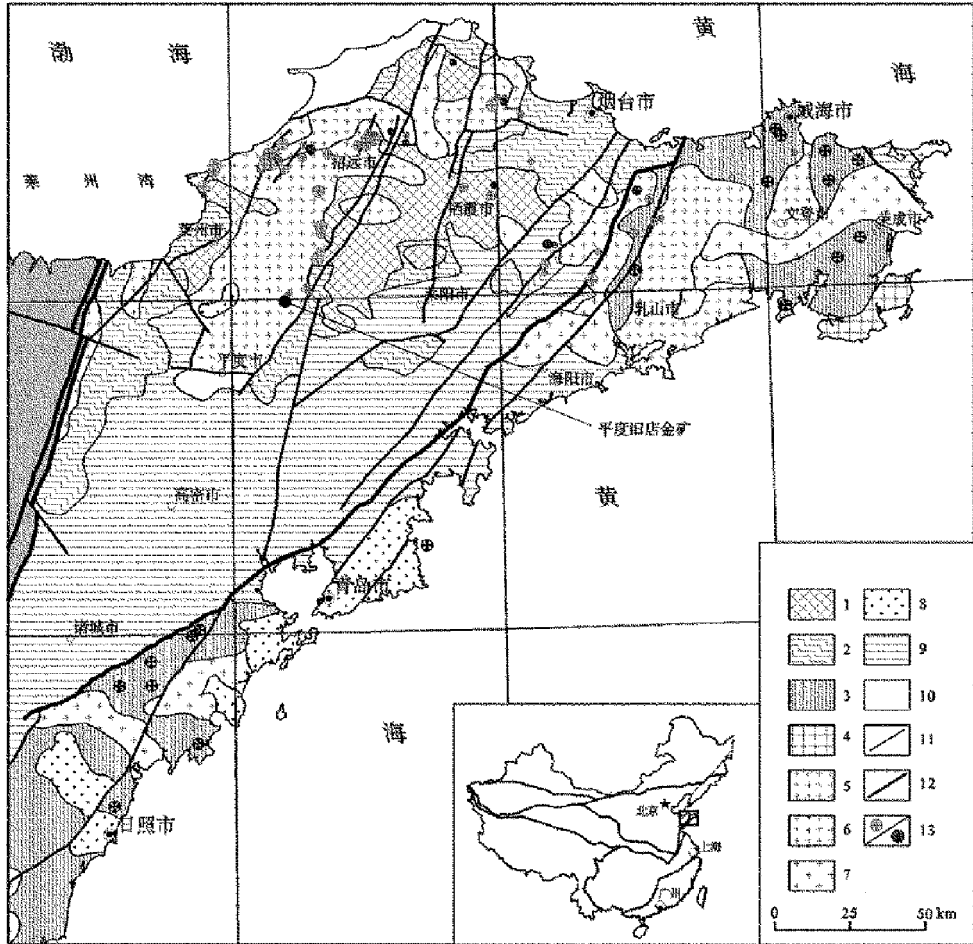
基金项目: 该文受山东地质勘查基金项目山东省胶东地区金矿深部成矿机制与找矿方法研究(2010061)、山东省招远-莱州地区金矿成矿条件和成矿规律研究(2012003)和山东省泰山学者建设工程专项经费联合资助

作者简介: 李洪奎(1962—),男,山东昌乐人,研究员,主要从事地质矿产勘查及深部勘查技术方法研究工作;E-mail:lhklhk126@126.com

1 成矿地质背景

平度旧店金矿床地处华北板块与苏鲁造山带二个一级大地构造单元结合部位之胶北隆起区(图 1),区内以前寒武纪结晶基底为主,盖层不发育。基底有太古宇、元古宇,在断陷盆地内有中生界和新生

界分布^[11-12]。区内 NNE, NE 向断裂十分发育; NW, EW 向断裂次之。岩浆岩有新太古代 TTG 岩系、震旦期片麻状二长花岗岩系列,三叠纪岩浆杂岩、侏罗纪玲珑花岗岩、早白垩世郭家岭花岗闪长岩-花岗岩、伟德山长岩-花岗闪长岩-花岗岩、崂山碱性花岗岩等发育,呈岩基、岩株产出^[13]。



1—太古宙 TTG+表壳岩;2—元古宙变质表壳岩;3—高压-超高压变质带;4—三叠纪岩浆杂岩;5—侏罗纪玲珑侵入岩;6—早白垩世郭家岭侵入岩;7—早白垩世伟德山侵入岩;8—早白垩世崂山侵入岩;9—白垩纪沉积-火山沉积岩系;10—新生代沉积-火山沉积岩系;11—主要地质界线;12—主要断裂;13—金矿/榴辉岩

图 1 旧店金矿区大地构造位置图

旧店金矿床围岩是玲珑花岗岩,为一典型的石英脉型金矿。石英脉的分布受断裂构造控制,其两侧往往是绢英岩,界线明显,在绢英岩中有大量细小石英网脉,造成强烈硅化^[14-15]。金属硫化物(主要是黄铁矿)以脉状、团块状、浸染状赋存于含矿构造带及蚀变围岩中。

矿区范围内已发现大小 29 条矿脉(图 2),1 号脉是矿区内规模最大且最典型的矿脉,总体走向 20°~55°,倾向 NW,倾角 60°~80°之间。该脉断续

延长约 5 km,脉内已查明 11 个矿体,最大单体延长 220 m,延深 354 m,金矿品位 $1.52 \times 10^{-6} \sim 67.83 \times 10^{-6}$,平均 4.57×10^{-6} 。矿体呈透镜状或扁豆状,矿石类型为含金硫化物石英脉型。矿物组成见表 1,可划分为 5 个成矿阶段,其中 II, III, IV 为金的主要富集成矿阶段^[16-17]。

2 黄铁矿标型特征

2.1 黄铁矿世代划分

旧店金矿床中的黄铁矿是与金关系密切的一种贯通矿物,在金矿的 5 个成矿阶段中均有产出。黄铁矿为矿石中主要金属矿物,占金属硫化物的 90% 以上。其集合体在矿石中呈脉状、网脉状、团块状、浸染状分布。半自形、中—细粒结构,粒度均匀,多与黄铜矿、方铅矿共生(表 1)。

I 阶段黄铁矿形成于黄铁绢英岩中。铜黄色,颗粒一般较粗,晶形以 {210}, {100} 为主,其晶形完好,常见立方体状,呈稀疏浸染状产出,含量小于 10%。矿物共生组合为绢云母、黄铁矿、石英和绿泥石等。

II 阶段黄铁矿形成于黄铁矿石英脉中。浅黄白色,颗粒以中粒为主,晶形以 {100} 为主,多为立方体和五角十二面体,自形、半自形结构,呈稀疏浸染状产出,含量小于 15%。矿物共生组合为黄铁矿、石英等。

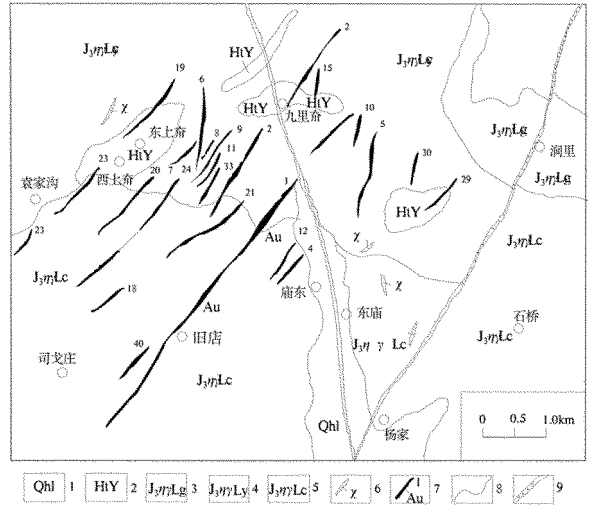
III 阶段黄铁矿形成于石英黄铁矿矿石中。淡黄色和铜黄色,颗粒以中粗粒为主,晶形以 {100}、{210} 为主,晶粒多有裂隙,集合体也多破碎,其裂隙多被中晚期、粗粒—细粒致密他形的黄铁矿充填,他形、浑圆和碎裂结构,呈浸染状产出,含量 50% 左右。矿物共生组合为石英、黄铁矿和磁黄铁矿等。

IV 阶段黄铁矿形成于多金属硫化物矿石中。铜黄色,颗粒以细粒为主,晶形以 {210}、{100} 为主,多为细粒状,半自形结构和碎裂结构,小豆荚状分布。含量 20% 左右。矿物共生组合为石英、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿等。

V 阶段黄铁矿产于石英碳酸盐岩细脉中。浅黄白色,颗粒一般为中粗粒,晶形以 {100} 为主,自形结构,呈多呈立方体稀疏浸染状或团块状集合体产出,含量 5% 左右。矿物共生组合为石英、方解石、黄铁矿等(图 3)。

2.2 黄铁矿晶形标型

矿物的形态是其化学成分、内部结构及其形成时的地质环境互相制约的结果,它记录了晶体发生、



1—第四系;2—野头组;3—晚侏罗世郭家店二长花岗岩;4—晚侏罗世云山二长花岗岩;5—晚侏罗世崔召二长花岗岩;6—煌斑岩;7—金矿脉及编号;8—地质界线;9—断层

图 2 旧店金矿区脉分布图

表 1 旧店金矿矿石矿物成分统计

相对含量	金属矿物			非金属矿物
	自然金属	金属硫化物	金属氧化物	
主要	银金矿	黄铁矿	赤铁矿	石英、绢云母
次要	自然金	黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿	褐铁矿	方解石、长石
少量	金银矿	锌铜矿	磁铁矿、铜蓝、铅矾、金红石	绿泥石、绿帘石、楣石、锆石、高岭土

生长及变化的全部历史^[18]。黄铁矿生长过程中随着粒径增大,最优位置的 F 面 {100} 和次优位置的 {210} 和 {111} 面有不同消长趋向,将表现为不同晶形。旧店金矿黄铁矿典型晶形包括 {100}、{210}、{111} 以及它们的聚形。研究表明立方体 {100} 主要发生在成矿的早期或晚期,五角十二面体 {210} 反映了成矿流体中富硫, S⁻² 浓度大,晶体的垂向生长速度低于水平向生长速度,故形成五角十二面体及其与立方体 {100} 的聚形集合体且晶体表面生长纹发育,是主成矿阶段的判断依据之一。八面体 {110} 的形成环境介于立方体和五角十二面体之间,因此常形成与上述两者所组成的聚形。另外该区黄铁矿还可见平行连晶、不规则连生、规则连生以及黄铁矿歪晶现象。

黄铁矿形态特征突出表现在晶形和粒度上^[19]。旧店地区黄铁矿晶形以立方体 {100} 为主,其次为五角十二面体 {210}, 偶见八面体 {110}。与金矿化有关的晶形主要为 {210} 和中细粒 {100}。在含石英较多的近矿围岩、构造破碎带和脉状矿体两侧中,多见

{100}的黄铁矿,在矿体内部强矿化区段有时可见 {210}的黄铁矿,大量出现的仍是他形晶集合体。

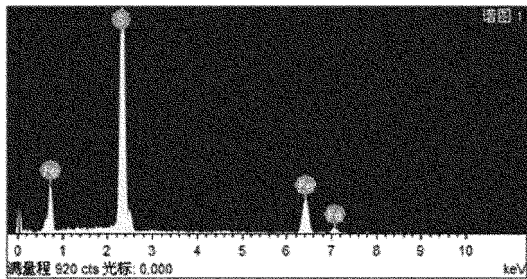
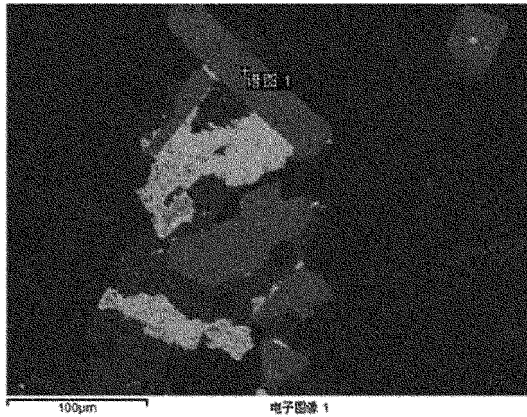


图 3 14043-9 黄铁矿电子探针分析图谱

2.3 黄铁矿物理特征

黄铁矿物理特征见表 2。黄铁矿晶胞参数均高

表 2 旧店金矿床不同阶段黄铁矿物性特征

不同阶段黄铁矿	形态	颜色	光泽	密度 t/m ³	反射率	硬度 kg/m ²	晶胞参数 a°
I、II 矿化-石英-磁黄铁矿-中粗粒黄铁矿阶段 (I、II 世代)	自形粒状立方体, 粒度 0.5~2.5mm, 裂纹发育	浅黄白色	强金属光泽	4.94	433λ, 43.75% 544λ, 52.70% 587λ, 53.10% 647λ, 54.13%	927	5.4194A°
III 石英-黄铁矿-微细粒黄铁矿阶段 (III 世代)	自形一半自形粒状立方体, 粒度 0.1~0.6 mm	浅黄色	弱金属光泽	4.90	433λ, 43.75% 544λ, 50.63% 587λ, 52.66% 647λ, 53.36%	1587	5.4197A°
IV 石英-多金属硫化物阶段 (IV 世代)	半自形粒状立方体, 粒度 0.01~0.05mm	铜黄色	光泽暗	5.28	433λ, 36.42% 544λ, 41.27% 587λ, 45.95% 647λ, 48.02%	1230	5.4192A°

3 石英矿物标型

石英是热液金矿床中的重要脉石矿物,与金矿化具有密切的成因联系。作为金矿床研究的主要信息载体,石英的典型标型特征,对于矿床成因的认识

于标准值(5.4170A°),范围值在 5.4192~5.4197A°,以石英-黄铁矿阶段的中期细中粒黄铁矿晶胞参数为最高,可能与金含量的多寡有关。

从表 2 还可以看出:黄铁矿的粒度大小与黄铁矿世代及含金量有密切的对应关系,早期世代黄铁矿颗粒较粗大,自形程度较高,颜色为浅黄白色,具强金属光泽,同波段反射率较高而硬度较低,晶胞参数稍高,其含金量较低;中、晚期世代黄铁矿多呈自形一半自形粒状,自形程度较低,颗粒较细小,颜色为浅黄色至铜黄色,具弱金属光泽—暗色光泽,同波段反射率较低而硬度相对较高,晶胞参数稍低,含金量较高,这与成矿地质事实相符。

2.4 黄铁矿成分标型

黄铁矿主成分为 Fe 和 S,就旧店金矿床黄铁矿主成分(表 3,图 4)与标准黄铁矿(S: 53.45%, Fe: 46.55%)相比的 ΔS 和 ΔFe 参数及不同成因类型黄铁矿 δS 和 δFe 参数特征(其中 $\delta Fe = (w(Fe) \times 100 - 46.55) \times 100 / 46.55$; $\delta S = (w(S) \times 100 - 53.45) \times 100 / 53.45$),成矿阶段黄铁矿表现为早期亏 S、富 Fe 的特点,在主成矿阶段 III、IV 阶段中黄铁矿则表现富 S、亏 Fe 的特点,这反映了在多金属硫化物成矿阶段,不仅是金大量沉淀形成的时期,也是载金矿物黄铁矿快速富集沉淀的时期,说明富 S、亏 Fe 的地球化学环境有利于金的沉淀。这与大部分内生热液矿床的黄铁矿趋势性相同,反映黄铁矿的形成深度较浅。

及找矿预测具有重要的理论研究和实践指导意义^[3]。

该区矿石石英主要产出于不同阶段的石英脉中,具中粗粒—中细粒—微细粒状,多呈团块状、细脉状或网脉状,无色或烟灰色,主要与绢云母、黄铁矿、方铅矿等共生。不同阶段的石英野外特征见图

5—图 8。石英主要有 5 个阶段：第一阶段石英脉充填分布于矿脉的外侧，沿节理裂隙分布，表现为纯白的石英细脉及网脉；第二阶段为主成矿阶段，烟灰色石英呈细脉或网脉，分布于早期石英脉的两侧，强硅化部位往往矿化较好；第三、四阶段为细脉状或网脉状石英与多金属硫化物共生；第五阶段表现为与碳酸岩共生，形成石英-碳酸岩脉。

表 3 旧店金矿床黄铁矿主要成分统计

样品	$\omega\text{S}\%$	$\omega\text{Fe}\%$	ΔS	δS	ΔFe	δFe	$\omega\text{Fe}/\omega\text{S}$
1 号脉 17-1	52.76	47.214	-0.690	-1.291	0.664	1.426	0.895
1 号脉 17-2	52.884	47.115	-0.566	-1.059	0.565	1.214	0.891
1 号脉 19-1	53.212	47.227	-0.238	-0.445	0.677	1.454	0.888
6 号脉 3-8	52.336	46.75	-1.114	-2.084	0.200	0.430	0.893
9 号脉 3-1	52.214	47.633	-1.236	-2.312	1.083	2.327	0.912
9 号脉 3-3	52.635	47.64	-0.815	-1.525	1.090	2.342	0.905
14043-1	55.84	44.16	2.390	4.471	-2.390	-5.134	0.791
14043-2	56.41	43.59	2.960	5.538	-2.960	-6.359	0.773
14043-5	56.18	43.82	2.730	5.108	-2.730	-5.865	0.780
14043-6-1	56.34	43.66	2.890	5.407	-2.890	-6.208	0.775
14043-6-2	53.52	46.48	0.070	0.131	-0.070	-0.150	0.868
14043-6-3	56.1	43.9	2.650	4.958	-2.650	-5.693	0.783
14043-6-4	55.69	44.31	2.240	4.191	-2.240	-4.812	0.796
14043-6-5	56.44	43.56	2.990	5.594	-2.990	-6.423	0.772
4043-6-6	56.3	43.7	2.850	5.332	-2.850	-6.122	0.776
14043-9	55.21	44.79	1.760	3.293	-1.760	-3.781	0.811

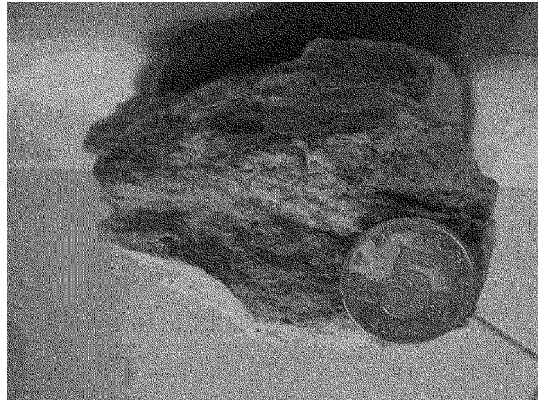


图 5 I 阶段黄铁矿绢英岩阶段矿石

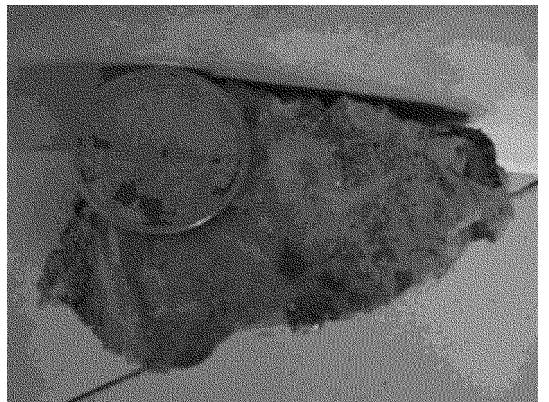


图 6 II 阶段黄铁矿—石英阶段矿石

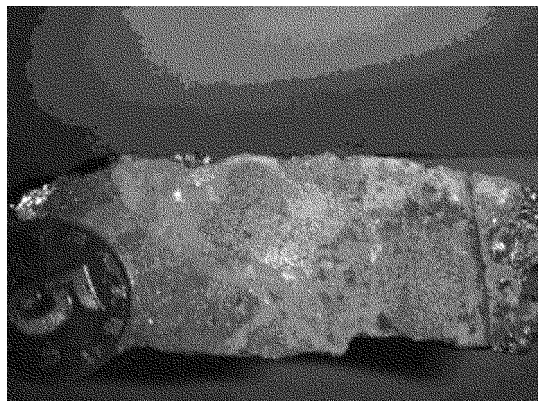


图 7 III 阶段石英—黄铁矿阶段

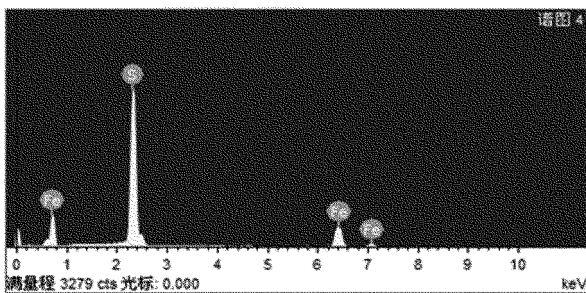
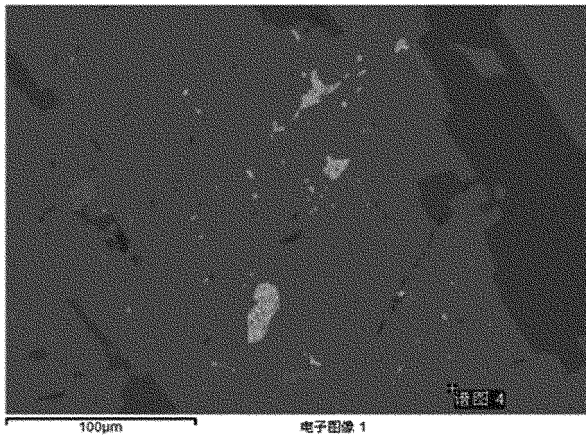


图 4 14043-1 黄铁矿电子探针分析图谱

石英按成因可分为热液石英、蚀变硅化石英、原岩残留石英。与金矿关系密切的热液石英，可分为 3 期：黄铁矿石英阶段的石英、石英细一中粒黄铁矿阶段的石英、多金属硫化物阶段的石英。不同阶段的石英物性特征有一定的差异，各阶段的石英物性特征见表 4，早期石英颗粒粗大，呈半自形板状，受

应力作用后,强烈波状消光。具压碎,有颗粒化现象,变形纹发育。与早期黄铁矿共生,构成黄铁矿石英脉。中期石英呈半自形柱粒状,颗粒细小,呈粒状集合体或细脉状与中期黄铁矿、绢云母共生,并充填在早期粗粒黄铁矿间隙中构成黄铁绢英岩,与银金矿关系密切。晚期石英:半自形或自形柱状,粒度细小,嵌布于铜、铅、锌等多金属硫化物或碳酸盐中。矿床内不同成矿阶段的石英,其含金性各异,含金性较好的石英其粒度较细,颜色为灰白—灰色,密度、晶胞参数相对较大,相对密度值较高,Al+K+Na 值相对较大。

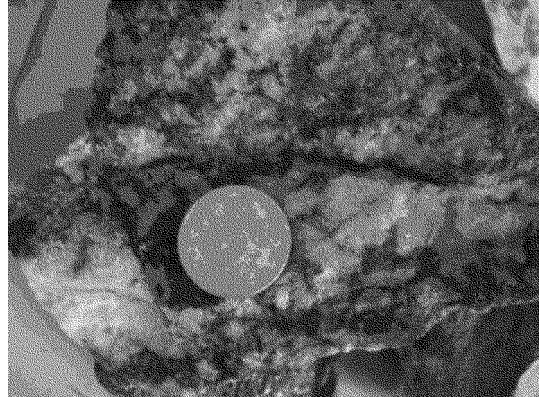


图 8 IV 阶段石英—多金属硫化物阶段

表 4 不同阶段的石英物性特征

成矿阶段	颜色	光泽	密度 t/m^3	晶胞参数	红外光谱	Al+K+Na%	含金性 $\times 10^{-6}$
黄铁矿—石英阶段	乳白色	油脂光泽	2.61	$a^\circ=4.9116; v=112.23$	A1: 0.1985; A2: 0.2056; A1/A2:0.9655	927	<0.10
石英—黄铁矿阶段	浅灰色	玻璃光泽	2.68	$a^\circ=4.9162; v=112.64$	A1: 0.1826; A2: 0.1893; A1/A2:0.9644	1587	4.16
多金属硫化物阶段	烟灰色	玻璃光泽	2.62	$a^\circ=4.9174; v=113.19$	A1: 0.1388; A2: 0.1439; A1/A2:0.9647	1230	7.21

4 问题讨论

成因矿物学是现代矿物学的重要组成部分,它研究矿物与矿物组合的时空分布、矿物各内外属性间的关联、矿物形成与变化的条件和过程、矿物与其介质间的相互作用及相应的宏微观标志、和矿物成因分类及矿物成因信息的应用等方面的内容^[20]。陈光远^[1-2]提出矿物标型六性和矿物学填图的四化法则及对矿床的矿物成因标型和找矿标志研究将成因矿物学提到新的高度,李胜荣^[3]在成因矿物学研究上有独特的建树,对矿物标型分带规律、矿物标型的地球动力学、构造动力学和矿物系统的演化进行了深度阐释^[20]。运用矿物标型理论和矿物学填图新技术进行矿床成因研究和深部远景预测取得了较好的找矿效果^[21-34];利用矿物生长理论进行岩浆岩研究,提供了火成岩晶体群和岩浆混合作用最关键的证据^[35-36];运用阴极发光新技术研究矿物内部结构,提出了矿物发生史方面的新认识^[37-38];利用副矿物锆石、磷灰石、独居石的裂变径迹分析技术,对造山带隆升历史和矿产的保存利用提供了新的依据^[39-41];锆石等矿物的微区同位素和化学成分测试技术,更广泛地用于重大地质事件定年和地质体演

化历史追索^[42-44]。黄铁矿、石英都是胶东金矿的贯通性金属矿物,也是金的主要载体之一。黄铁矿的晶体形态、化学成分和热电性等标型特征与其形成介质的物理化学环境密切相关。矿物的形态记录了晶体生长变化的全部过程,受到了晶体内部结构、化学成分及形成环境的综合影响^[18]。黄铁矿最优生长位置 $\{100\}$ 和次优生长位置 $\{hk0\}$ 及 $\{111\}$ 随着生长过程中温度、成矿流体性质的变化,呈现不同的消长,而表现出不同的晶体形态,因此对黄铁矿的形成环境具指示意义。而旧店金矿黄铁矿晶形主要为 $\{100\}$ 、 $\{210\}$ 、 $\{111\}$ 单晶形态与 $\{100\} + \{210\}$ 、 $\{100\} + \{111\}$ 和 $\{100\} + \{210\} + \{111\}$ 之聚形,表明该区黄铁矿常见单形有立方体、五角十二面体,八面体少见,并在此基础上叠加其他晶形,如:立方体+五角十二面体、立方体+八面体等,其中以立方体和五角十二面体的聚形居多。黄铁矿不同晶形的出现规律表明:随着主成矿阶段的来临,立方体出现率逐渐减小,五角十二面体、立方体+五角十二面体的聚形晶出现率则逐渐增加。

研究表明^[6]:在低饱和度、低硫逸度以及最佳形成温度过高或过低时形成的黄铁矿多呈 $\{100\}$ 晶形^[18],因此 $\{100\}$ 常出现在矿体的围岩、弱矿化带、成矿早阶段或成矿最晚阶段,表明此时的成矿流体

硫浓度不高,温度过高或过低。 $\{100\}$ 晶面上的生长纹是形成温度变化梯度大,或过饱和度小(硫逸度低)导致。当成矿流体中富硫,晶体的垂向生长速度低于水平生长速度时,就可能形成五角十二面体和立方体的聚形。八面体的生长环境介于五角十二面体和立方体之间,在本矿区统计晶形中发现较少。此外,该区黄铁矿还可见平行连晶,说明黄铁矿晶体的垂向生长速度与水平生长速度相似,具有异向同时生长记录。旧店金矿在石英黄铁矿成矿阶段(Ⅲ阶段)中以 $\{100\} + \{210\}$ 为主,在多金属硫化物成矿阶段(Ⅳ阶段)中以 $\{100\} + \{111\}$ 和 $\{100\} + \{210\} + \{111\}$ 聚形为主,说明金含量的多寡与成矿阶段和黄铁矿晶形关系密切,黄铁矿晶形越多、聚形越复杂则金含量越高,反之黄铁矿晶形越简单、呈 $\{100\}$ 立方体形或 $\{100\}$ 晶面上的生长纹发育者,则不含金或含量甚微。

徐国凤^[19]认为,沉积成因的黄铁矿富硫或接近理论值;陈光远等^[1-2]则认为低温或者沉积成因黄铁矿 S/Fe 比值较大。严育通^[8]认为浅成低温热液型金矿、岩浆热液型金矿、卡林型金矿黄铁矿化学成分均具亏铁亏硫特征,变质热液型金矿则富铁亏硫。标准差由大到小依次为卡林型金矿、岩浆热液型金矿、变质热液型金矿、浅成热液型金矿,并总结了不同成因类型黄铁矿 δFe 及 δS 特征。该区黄铁矿大部分属富硫亏铁型,整体更亏硫。 δFe 与 δS 变化范围在 5% 以内,分布状态与岩浆热液型金矿类似,这表明旧店金矿为岩浆热液型金矿。

旧店金矿黄铁矿晶胞参数在 $5.4192 \sim 5.4197\text{Å}$,以石英-黄铁矿阶段的中期细中粒黄铁矿晶胞参数为最高,略高于标准值 5.4170Å 。石英晶胞参数在 $4.9116 \sim 4.9174\text{Å}$, $v = 112.23 \sim 113.19$,以多金属硫化物阶段的石英晶胞参数为稍高,说明旧店金矿中金的沉淀富集与成矿阶段的关系是十分密切的。

5 结论

(1)旧店金矿床中的黄铁矿是与金关系密切的一种贯通矿物,在金矿的 5 个成矿阶段中均有产出。黄铁矿为矿石中主要金属矿物,占金属硫化物的 90% 以上。其集合体在矿石中呈脉状、网脉状、团块状、浸染状分布。半自形、中-细粒结构,粒度均匀,多与黄铜矿、方铅矿共生。根据成矿阶段而划分出

5 个世代的黄铁矿,即形成于黄铁绢英岩中的 I 阶段黄铁矿、黄铁矿石英脉中的 II 阶段黄铁矿、石英黄铁矿矿石中的 III 阶段黄铁矿、多金属硫化物矿石中的 IV 阶段黄铁矿和产于石英碳酸岩细脉中的 V 阶段黄铁矿。

(2)旧店金矿黄铁矿晶形主要为 $\{100\}$, $\{210\}$, $\{111\}$ 单晶形态与 $\{100\} + \{210\}$ 、 $\{100\} + \{111\}$ 和 $\{100\} + \{210\} + \{111\}$ 之聚形,表明该区黄铁矿常见单形有立方体、五角十二面体,八面体少见,并在此基础上叠加其他晶形。旧店金矿在石英黄铁矿成矿阶段(Ⅲ阶段)中以 $\{100\} + \{210\}$ 为主,在多金属硫化物成矿阶段(Ⅳ阶段)中以 $\{100\} + \{111\}$ 和 $\{100\} + \{210\} + \{111\}$ 聚形为主,而在早期阶段和晚期阶段,黄铁矿晶形简单,以 $\{100\}$, $\{210\}$, $\{111\}$ 单晶为主,反映了金之富集与黄铁矿晶形具有成因上的联系。

(3)旧店金矿黄铁矿物理特征及石英标型与金含量有内在的多寡关系。黄铁矿的粒度大小与黄铁矿世代及含金量有密切的对应关系,早期世代黄铁矿颗粒较粗大,自形程度较高,颜色为浅黄白色,具强金属光泽,同波谱段反射率较高而硬度较低,晶胞参数稍高,在 $5.4192 \sim 5.4197\text{Å}$,以石英-黄铁矿阶段的中期细中粒黄铁矿晶胞参数为最高。石英晶胞参数在 $4.9116 \sim 4.9174\text{Å}$, $v = 112.23 \sim 113.19$,以多金属硫化物阶段的石英晶胞参数为稍高,说明同波谱段反射率和晶胞参数的变化与金含量有对应关系。

(4)旧店金矿床黄铁矿主成分与标准黄铁矿相比的 ΔS 和 ΔFe 参数及不同成因类型黄铁矿 δS 和 δFe 参数特征表明:成矿阶段黄铁矿表现为早期亏 S、富 Fe 的特点,在主成矿阶段 III,IV 阶段中黄铁矿则表现富 S、亏 Fe 的特点,这反映了在多金属硫化物成矿阶段,不仅是金大量沉淀形成的时期,也是载金矿物黄铁矿快速富集沉淀的时期,说明富 S、亏 Fe 的地球化学环境有利于金的沉淀。

参考文献:

- [1] 陈光远,孙岱生,殷辉安.成因矿物学与找矿矿物学[M].重庆:重庆科技出版社,1987:713-733.
- [2] 陈光远,孙岱生,邵伟.胶东金矿成因矿物学与找矿[M].重庆:重庆科技出版社,1989:59-126.
- [3] 李胜荣,陈光远,邵伟.胶东乳山金矿田成因矿物学[M].北京:

地质出版社,1993:33-56.

- [4] 李胜荣.成因矿物学[R],北京:中国地质大学,2012:24-36.
- [5] 于洪军.胶东蚕庄金矿上庄矿区成因矿物学研究及深部远景评价[D].北京:中国地质大学,2012:21-33.
- [6] 王枫.胶东大尹格庄金矿黄铁矿成因矿物学与深部远景研究[D].北京:中国地质大学,2012:20-35.
- [7] 薛建玲,李胜荣,孙文燕,张运强,张旭.胶东邓格庄金矿黄铁矿成因矿物学特征及其找矿意义[J].中国科学,2013,43(11):1857-1873.
- [8] 严育通,李胜荣.胶东流口金矿黄铁矿成因矿物学及稳定同位素研究[J].矿物岩石,2011,31(4):58-66.
- [9] 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,2010,23-28.
- [10] 吕文杰.胶东烟台市福山区杜家崖金矿床成因矿物学与找矿[D].北京:中国地质大学,2010:35-63.
- [11] 李洪奎,李逸凡,耿科,嵯传源.山东鲁东碰撞造山型金矿成矿作用探讨[J].大地构造与成矿学,2011,35(4):533-542.
- [12] 李洪奎,嵯传源,耿科,梁太涛.胶东金矿成矿构造背景探讨[J].山东国土资源,2012,28(1):5-13.
- [13] 李洪奎,李逸凡,耿科,嵯传源,梁太涛.山东鲁东地区中生代构造-岩浆事件与金矿成矿作用[J].地球科学前沿,2013,3(3):141-154.
- [14] 陈果.旧店金矿 1 号脉支脉的勘探及矿床成因分析[J].矿产与地质,2008,22(4):322-325.
- [15] 陈果.旧店金矿区韧性断层及其成矿作用探讨[J].黄金科学技术,2009,17(1):10-13.
- [16] 谢成连,何国强,史维全.平度旧店金矿区同成矿构造与金的富集关系[J].山东国土资源,2008,24(2):9-11.
- [17] 代军治,李绪俊,殷茜,杨言辰.山东平度旧店金矿床 1 号脉深部成矿远景评价[J].黄金地质,2004,25(12):10-13.
- [18] 邵洁涟.金矿找矿矿物学[M],武汉:中国地质大学出版社,1988:9-31.
- [19] 徐国风,邵洁涟.黄铁矿的标型特征及其实际意义[J].地质论评,2013,26(6):541-546.
- [20] 李胜荣.成因矿物学在中国的传播与发展[J].地学前缘,2013,20(3):46-54.
- [21] Ying J F, Li S R, Sun D S, et al. Genetic mineralogical research of galena from Jindoushan gold deposit, Yantai, Shandong[J]. Scientia Geologica Sinica, 2009, 9(3): 353-358.
- [22] 江永宏,李胜荣.云南墨江金厂金矿床含铬层状硅酸盐矿物成分标型特征[J].岩石矿物学杂志,2004,(4):351-360.
- [23] 曹焯,李胜荣,申俊峰.便携式短波红外光谱矿物测量仪(PIMA)在河南前河金矿热液蚀变研究中的应用[J].地质与勘探,2008,44(2):82-86.
- [24] 李成禄,李胜荣,罗军燕.山西繁峙义兴寨金矿床金矿物特征研究[J].中国地质,2011,38(1):119-128.
- [25] 罗军燕,李胜荣,杨苏明.石英傅里叶变换漫反射红外光谱在成矿作用研究中的应用:以山西繁峙义兴寨金矿床为例[J].矿物岩石,2009,29(1):25-32.
- [26] 佟景贵,李胜荣,肖启云.贵州遵义中南村黑色岩系黄铁矿成矿分标型与成因探讨[J].现代地质,2004,19(1):41-47.
- [27] 周起凤,李胜荣,陈海燕.胶东乳山英格庄金矿碲化物的发现及其意义[J].岩石学报,2011,27(6):1847-1856.
- [28] 周学武,李胜荣,鲁力.浙江弄坑金银矿化区黄铁矿标型研究[J].矿物岩石,2004,24(4):6-13.
- [29] Cao Y, Li S R, Zhang H F, et al. Laser probe $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating for quartz from auriferous quartz veins in Shihu gold deposit, western Hebei Province, North China[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2010, 29(4): 438-445.
- [30] Cao Y, Li S R, Y M J, et al. Thermo luminescence of quartz from Shihu gold deposit, western Hebei Province, China: Some implications for gold exploration [J]. Central European Journal of Geosciences, 2010, 2(4): 433-440.
- [31] Cao Y, Li S R, Zhang H F, et al. Significance of zircon trace element geochemistry, the Shihu gold deposit, western Hebei Province, North China [J]. Journal of Rare Earths, 2011, 29(3): 277-286.
- [32] Yan Y T, Li S R, Jia B J. A new method to quantify morphology of pyrite, and application to magmatic-hydrothermal gold deposits in Jingdong peninsula, China [J]. Advanced Materials Research, 2012, 446-449, 2015-2027.
- [33] Yan Y T, Li S R, Jia B J. Composition typomorphic characteristics of pyrite in various genetic type gold deposits [J]. Advanced Materials Research, 2012, 463-464: 25-29.
- [34] Li S R, Deng J, Hou Z Q, et al. Regional fracture and gold denudation in the Gangdise tectonic zone, Tibet: Evidence of Ag/Au value [J]. Science in China: Series D, 2001, 31(Sup-pl): 121-127.
- [35] 李胜荣,孙丽,张华锋.西藏曲水碰撞花岗岩的混合成因:来自成因矿物学证据[J].岩石学报,2006,22(4):884-894.
- [36] 罗照华,杨宗锋,代耕.火成岩的晶体群与成因矿物学展望[J].中国地质,2013,40(1):176-181.
- [37] Zhang H F, Zhai M G, Santosh M, et al. Geochronology and petrogenesis of Neoproterozoic potassic meta-granites from Huai'an Complex: Implications for the evolution of the North China [J]. Gondwana Research, 2011, (20): 82-105.
- [38] Zhang H F, Zhai M G, Santosh M, et al. Low-Al and high-Al trondhjemites in the Huai'an Complex, North China Craton: Geochemistry, zircon U-Pb and Hf isotopes, and implications for Neoproterozoic crustal growth and remelting [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, (49): 203-213.
- [39] 袁万明,侯增谦,李胜荣.雅鲁藏布江逆冲带活动的裂变径迹定年证据[J].科学通报,2002,47(2):147-150.
- [40] 袁万明,王世成,李胜荣.拉萨地块南缘热液金铜矿床成矿时代的裂变径迹研究[J].自然科学进展,2002,12(5):541-544.
- [41] Li S R, Santosh M, Zhang H F, et al. Metallogeny in response to lithospheric thinning and craton destruction: Geochemistry and U-Pb zircon chronology of the Yixingzhai gold deposit, central North China Craton [J]. Ore Geology Reviews. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.10.018>.

[42] Li S R, Santosh M, Zhang H F, et al. Inhomogeneous lithospheric thinning in the central North China Craton; Zircon U-Pb and S-He-Ar isotopic record from magmatism and metallogeny in the Taihang Mountains [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(1): 141-160.

[43] 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.\(3\):2](http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.(3):2).

Mineralogy Study and Its Significance of the Origin of Jiudian Gold Deposit in Shandong Province

LI Hongkui¹, LI Jun², ZHUO Chuanyuan¹, GENG Ke¹, LIANG Taitao¹

(1. Shandong Institute of Geological Sciences, Shandong Key Laboratory of Geological Processes and Resource Utilization in Metallic Minerals, Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resources Utilization Subordinated to the Ministry of Land and Resources, Shandong Jinan 250013, China; 2. Shouguang Bureau of Land and Resources, Shandong Shouguang 262700, China)

Abstract: Jiudian gold deposit is located in the North China plate in Jiaobei uplift. Its ore-bearing country rocks are late Jurassic Linglong granite. The origin of this deposit is post magmatic hydrothermal fissure filling quartz vein type gold deposit. According to metallogenic materials, precipitation sequences can be divided into five mineralization stages, such as pyritization-sericite quartz alteration (I stage), quartz-magnetic pyrite and medium-coarse grained pyrite (II stage), quartz-pyrite and fine grained pyrite (III stage), quartz and multi-metal sulfide (IV stage) and quartz-carbonate rocks (V stage). Among them, II stage, III stage and IV stage are major gold enrichment and mineralization stages. On the basis of studying standard type characteristics of pyrite and quartz in Jiudian gold deposit in Shandong province, according to the mineralization stages, five generations of pyrite have been divided, they are pyrite of I stage formed in beresite, pyrite of II stage formed in pyrite quartz vein, pyrite of III stage formed in quartz pyrite, pyrite of IV stage formed in polymetallic sulfide ores and pyrite of V stage formed in quartz carbonate veins. Major pyrite crystal forms are single crystal as {100}, {210}, {111} and combination forms as {100} + {210}, {100} + {111} and {100} + {210} + {111}. Accompanying with changes in the mineralization stage, cube occurrence rate gradually decreases, while occurrence rate of combination forms in pentagonal dodecahedron, cube + pentagonal dodecahedron gradually increased. In late stage of mineralization, cubic pyrite with high occurrence rate occurred. Crystal forms of pyrite in the pyrite quartz mineralization stage (III stage) in Jiudian gold deposit are mainly composed of {100} + {210}, while in pyrite polymetallic sulfide mineralization stage (stage IV), crystal forms are mainly composed of combination forms as {100} + {111} {100} + {210} + {111}. In the early and late stage, pyrite crystals are very simple. They are mainly composed of single crystal form as {100}, {210}, {111}. Through study on main components of pyrite, it is showed that pyrite mineralization stage perform the characteristics of loss in S and rich in Fe. In the main metallogenic stage (III, IV stage), pyrite is rich in S and loss in Fe. It reflects that the mineralization stage of polymetallic sulfide is not only the stage of gold enrichment, but also rapid enrichment of pyrite. It is indicated that geochemical environment with rich sulfur and loss of Fe is favorable for the precipitation of gold ore. The physical characteristics of pyrite and quartz scale also show that the parameters of pyrite and quartz are slightly higher in the polymetallic sulfide stage, which indicate that there is a corresponding relationship between the variation of reflectivity and unit cell parameters.

Key words: Pyrite; quartz; crystal; typomorphic mineral; mineralogy; Jiudian gold deposit