

甘肃寨上金矿床矿物组成特征与矿质沉淀机理

刘家军^{1,2} 毛光剑^{1,2} 吴胜华^{1,2} 刘光智³

廖延福³ 郑卫军³ 华曙光³ 岳连雄³

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学 岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室, 北京 100083; 3. 中国人民武装警察部队黄金第五支队, 陕西 西安 710100)

摘要:位于西秦岭礼(县)—岷(县)成矿带西段的寨上金矿床,是近年发现的一个大型微细浸染型金矿。笔者通过显微镜观察、电子探针和扫描分析等综合分析技术,确认金矿床中矿物组成相当丰富,既有大量硫化物、硫盐、氧化物、硫酸盐、碳酸盐、钨酸盐,又有碲化物、自然金属及多金属互化物。除常见矿物为自然金、黄铁矿、黄铜矿、黝铜矿、方铅矿、闪锌矿、辉锑矿、石英、白钨矿、方解石、菱铁矿、铁白云石和重晶石外,笔者还鉴定出在卡林型金矿床较少见的一些矿物,如硫铜锑矿、车轮矿、辉锑铅矿、辉钼矿、碲汞矿、碲镍矿、Cu-Zn-Ni-Sn-Fe 的金属互化物和白钨矿等。矿石中矿物种类较多,组成较复杂以及存在显微自然金,构成寨上金矿床的一大特色。赋矿围岩中含 Fe 碳酸盐矿物溶解释放 Fe 以及溶解 Fe 的大量硫化物,是寨上金矿床中存在显微可见自然金的最重要因素和金沉淀富集的有利条件。

关键词:金矿床;矿物组成;沉淀机理;寨上;甘肃

中图分类号:P618.51

文献标志码:A

文章编号:1000-3657(2010)02-0453-10

西秦岭地区是中国境内产出大规模卡林—类卡林型金矿床的集中地之一。近 30 年来在该区不断发现了一系列不同规模的大、中、小型的金矿床和矿点,如阳山、八卦庙、金龙山超大型金矿,鹿儿坝、李坝、东北寨等大型金矿。甘肃寨上金矿床,是近年来在西秦岭地区发现的又一十分重要的大型卡林型金矿床^[1,2],Au 储量已超过 80 t,资源前景乐观,是一个在近期有望达到百吨的超大型金矿床。笔者对寨上金矿床的矿物组分进行了研究,在该矿床的矿石中首次发现了显微自然金颗粒和其他一些较少见或罕见的矿物。其对进一步探讨矿质沉淀机理具有一定的指示意义。

1 矿床基本特征

位于岷—礼成矿带西部的寨上金矿床,赋存于中泥盆统(南矿带)、下二叠统(北矿带)中,为一套由

石英砂岩、粉砂岩、板岩和灰岩组成的浊积岩建造。金矿体明显受 NWW-NW 向断裂构造的控制(图 1)。已发现的金矿体无一例外地赋存于容矿层中的构造破碎带内。

金矿体多呈层状、似层状和透镜状产出,与围岩界线不清楚,矿体的边界须依赖化学分析数据加以圈定。但矿体的围岩蚀变较强,以硅化和碳酸盐化最为普遍。在围岩蚀变较强烈的地段,金属硫化物发育,矿化较好。

根据赋矿原岩特点,可将金矿石自然类型划分为碎裂岩化炭质板岩型、碎裂岩化粉砂质—泥质板岩型、碎裂岩化灰岩型、钙质板岩型和强硅化蚀变角砾岩型^[1,2]。矿石的工业类型为以 Au 为主的 Au-Sb-W 共生矿石,伴生有益组分有 Pb、Zn、Cu 等元素。

矿石结构主要有自形、半自形、他形、草莓状、交代、环带、碎裂等结构。矿石构造有脉状—网脉状、角

收稿日期:2009-08-16;改回日期:2009-11-23

基金项目:国家重点基础研究发展规划(2006CB403500、2009CB421003)、国家自然科学基金(40773036)、高等学校学科创新引智计划(B07011)、教育部长江学者和创新团队发展计划、中国人民武装警察部队黄金指挥部勘查资助项目共同资助。

作者简介:刘家军,男,1963 年出生,教授,博士生导师,主要从事矿床地球化学的教学和科研工作;E-mail: liujiajun@cugb.edu.cn。

含氧盐类矿物,又有碲化物、自然元素及金属互化物等。矿物种类较多,组成较复杂,是寨上金矿床的一大特色。

2.1 自然金属与多金属互化物

在金矿石中存在自然金、自然铜、自然镍以及 Cu-Zn、Cu-Ni-Fe-Fe-Sn 金属互化物。有关 Cu-Zn、Cu-Ni-Fe-Fe-Sn 金属互化物^[3],笔者已有报道。这里仅介绍自然金。

在反光显微镜下观察到的自然金为金黄色,形态多样:椭圆粒状(图 2-A)、片状(图 2-A)、三角粒状(图 2-A)、棒状(图 2-B)、丝状(图 2-B)、不规则粒状等(图 2-C)。自然金颗粒大小变化也较大,大者可达 150 μm ,小者仅 3 μm 。电子探针分析结果(表 2)表明,自然金中 Au 含量为 88.23%~92.73%,含较高的 Ag (7.41%~9.08%),个别颗粒中含微量的 Cu、Hg、Te(表 2)。根据化学成分所计算的自然金的成色变化范围为 905~926。可见自然金的成分不纯,含有较高的杂质。

2.2 金属硫化物及硫盐矿物

寨上金矿床中的金属硫化物及硫盐矿物,除存在卡林型金矿床中常见的黄铁矿、黄铜矿、毒砂、辉锑矿、方铅矿、闪锌矿、黝铜矿、铜蓝等外,还存在硫铜锑矿、车轮矿、辉锑铅矿、辉钼矿等一些较为少见的矿物。现择要介绍如下。

2.2.1 硫铜锑矿

硫铜锑矿是寨上金矿床中存在的一个相当典型的金属矿物。其与黝铜矿等矿物紧密连生在一起呈团块状、脉状产出,尤其在矿区南矿带 31 号矿脉中普遍出现。该矿物形态为柱状和他形粒状(图 2-D),粒度大小变化大(0.01~2 mm)。因其颜色为铅灰色,不易与黝铜矿、方铅矿区别。但在反光显微镜下,其反射色为白色,反射率明显高于黝铜矿,与方铅矿类似,且非均质性十分明显。电子探针分析结果(表 2)表明,硫铜锑矿主要元素的含量:Cu 为 24.25%~25.63%(平均 25.15%),Sb 为 49.15%~50.88%(平均 49.68%),S 为 24.24%~25.27%(平均 24.73%),并含微量 Fe、Ni、Ag、Se 等元素。根据电子探针分析结果的平均值计算,硫铜锑矿的化学分子式为 $\text{Cu}_{1.03}\text{Sb}_{1.06}\text{S}_{2.00}$,简写式为 $\text{CuSbS}_{2.0}$ 。

2.2.2 车轮矿

矿石中车轮矿极为少见,仅能在反光显微镜下观察到几个微细颗粒,粒度小(0.01~0.02 mm),形态

不规则,呈他形粒状分布于黝铜矿中(图 2-D)。其反射色为白色,反射率比黝铜矿大。电子探针分析结果(表 2)显示,车轮矿主要元素含量(%):Sb 为 24.93~25.07(平均 25.00),Pb 为 40.88~41.23(平均 41.06),Cu 为 13.75~13.83 (平均 13.79),S 为 19.56~19.73 (平均 19.65)。矿物中还含微量的 Ag、Se。根据电子探针分析结果的平均值计算,车轮矿的化学分子式为 $\text{Pb}_{1.06}\text{Cu}_{1.05}\text{Sb}_{1.00}(\text{S}_{2.98},\text{S}_{\text{e}0.02})_{3.00}$,简写式为 PbCuSbS_3 。

2.2.3 辉锑铅矿

辉锑铅矿是笔者在研究矿石物质组成过程中,通过显微镜下观察与电子探针分析后,确认在寨上金矿床中存在的又一个数量较多、分布较广的典型金属矿物。矿石中的辉锑铅矿与辉锑矿、闪锌矿紧密连生在一起呈放射状、团块状集合体产出,形态为细长柱状(图 2-E)、颗粒状,粒度大小变化大(0.01~4 mm)。因在手标本上该矿物的颜色、晶形等物理特征与辉锑矿完全类似而不易于区别,在反光显微镜下其反射率大小与辉锑矿类似,但明显高于黝铜矿(图 2-E)。

电子探针分析结果(表 2)表明,辉锑铅矿主要元素的含量(%):Sb 为 43.70~45.45(平均 44.44),Pb 为 28.58~29.28 (平均 28.92),S 为 21.84~22.34 (平均 22.04)。辉锑铅矿中 S 被少量的 Te、Se 替代,Sb 被少量的 As 替代。矿物中含一定量的 Zn。根据电子探针分析结果的平均值计算,辉锑铅矿的化学分子式为 $(\text{Pb}_{8.29},\text{Zn}_{0.73})_{9.02}(\text{Sb}_{21.70},\text{As}_{0.26})_{21.96}(\text{S}_{40.84},\text{Se}_{0.20},\text{Te}_{0.96})_{42.00}$,简写式为 $\text{Pb}_9\text{Sb}_{22}\text{S}_{42}$ 。

2.2.4 辉钼矿

辉钼矿产于石英-方解石-菱铁矿脉中,在矿石中较少见,主要呈浸染状产出(图 2-F),粒度细小(0.02 mm 左右),形态较规则,呈不规则的片状。通过显微镜下观察,其反射色为亮白色,反射率相当高,多色性明显,非均性强。因其硬度低,部分辉钼矿磨光较差。电子探针分析结果(表 2)表明,辉钼矿主要元素的含量(%):Mo 为 58.99~60.69(平均 59.85),S 为 39.43~39.81 (平均 39.67)。矿物中含微量的 Fe、Re、Zn、Se、Te。根据电子探针分析结果的平均值计算,辉钼矿的化学分子式为 $\text{Mo}_{1.01}\text{S}_{2.00}$,简写式为 MoS_2 。

2.3 碲化物

在显微镜下观察到的碲化物有碲汞矿和碲镍矿。

2.3.1 碲汞矿

碲汞矿颗粒细小(<0.05 mm),反射色呈白色、浅

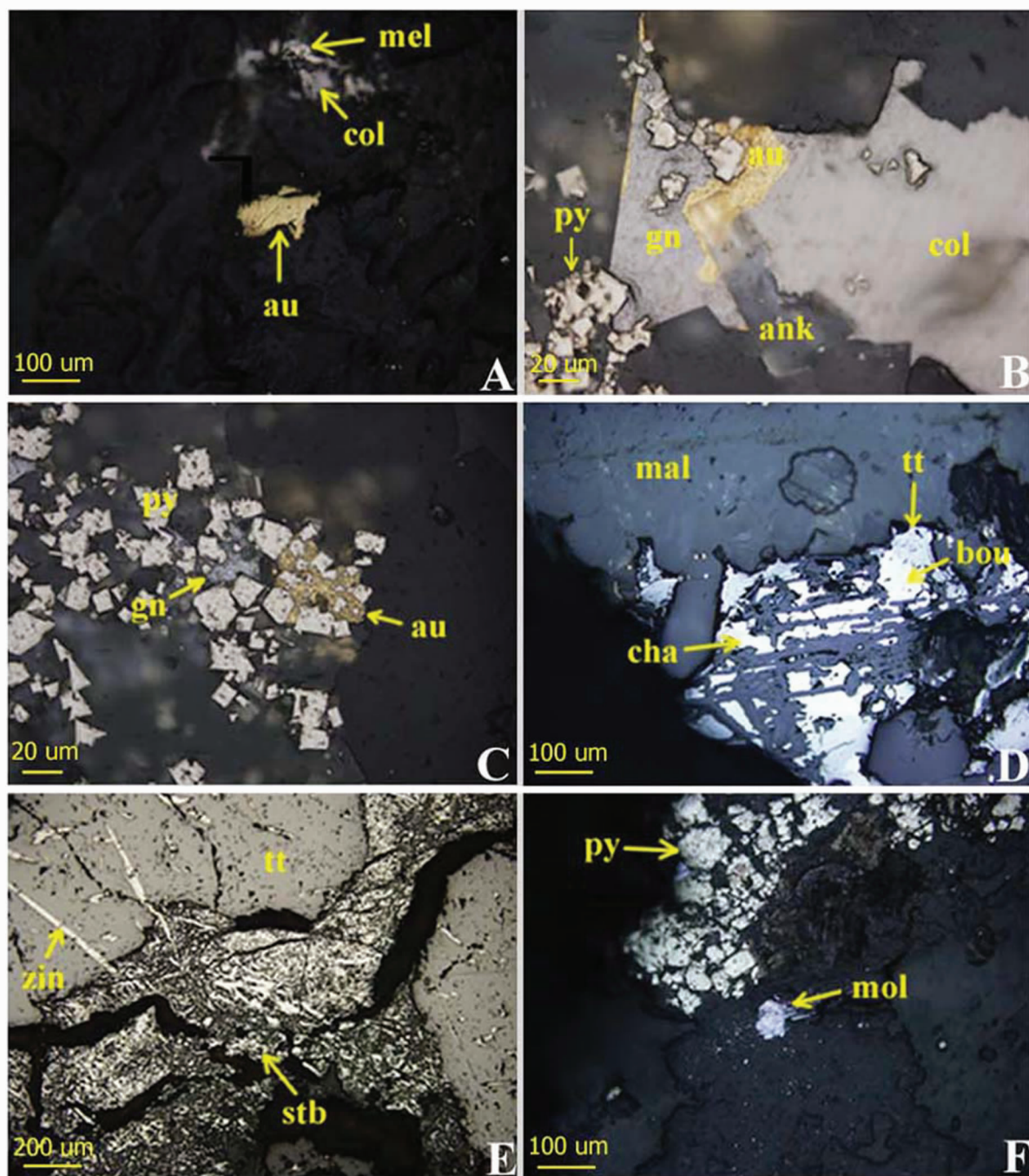


图 2 金矿石中某些少见金属矿物(反射光下的单偏光照片)

A—自然金与碲化物, 07ZS-48; B—自然金、碲化物、方铅矿与铁白云石共生, 07ZS-48; C—自然金与含砷黄铁矿、方铅矿共生, 06ZS-48; D—硫铜锑矿、车轮矿、黝铜矿共生, 06ZS-27; E—辉锑铅矿、辉锑矿与黝铜矿共生, 06ZS-51; F—黄铁矿与辉钼矿共生, 06ZS-43. py—黄铁矿; tt—黝铜矿; gn—方铅矿; stb—辉锑矿; mol—辉钼矿; zin—辉锑铅矿; cha—硫铜锑矿; bou—车轮矿; au—自然金; col—碲汞矿; mel—碲镍矿; az—蓝铜矿; mal—孔雀石; ank—铁白云石.

Fig.2 Some rare metallic minerals in gold ores (plainlight under reflected light)

A—Native gold and tellurides, sample 07ZS-48; B—Coexistence of native gold with tellurides, galenite, and ankerite, sample 07ZS-48; C—Coexistence of native gold with As-bearing pyrite and galenite, sample 06ZS-48; D—Coexistence of chalcostibite with bournonite and tetrahedrite, sample 06ZS-27; E—Coexistence of zinckenite with stibnite and tetrahedrite, sample 06ZS-51; F—Coexistence of pyrite with molybdenite, sample 06ZS-43; py—Pyrite; tt—Tetrahedrite; gn—Galenite; stb—Stibnite; mol—Molybdenite; zin—Zinckenite; cha—Chalcostibite; bou—Bournonite; au—Native gold; col—Coloradoite; mel—Melonite; az—Azurite; mal—Malachite; ank—Ankerite

表 2 寨上金矿床中部分金属矿物的电子探针分析数据(%)

Table 2 Electron microprobe analyses of some minerals in the Zhaishang gold deposit (%)

样号	矿物	Au	Ag	Cu	Fe	Pb	Zn	Co	Ni	Hg	Mo	Re	Sb	As	S	Se	Te	总量
ZS48	自然金	91.16	8.23	0.00						0.00							0.00	99.40
ZS48	自然金	92.73	7.41	0.00						0.00							0.00	100.14
ZS48	自然金	91.34	8.15	0.08						0.00							0.00	99.57
ZS48	自然金	88.23	9.08	0.14						1.66							0.18	99.28
ZS48	自然金	91.39	8.61	0.00						0.00							0.00	100.00
ZS48	自然金	92.11	7.42	0.00						0.00							0.42	99.95
ZS48	自然金	92.09	7.64	0.00						0.00							0.00	99.73
ZS51	硫铜锑矿 ^a			24.83				0.07	0.14				49.20		24.80			99.04
ZS51	硫铜锑矿 ^a			25.43	0.09								49.32		25.27			100.11
ZS51	硫铜锑矿 ^a		0.25	25.59	0.31								49.45		24.68	0.05		100.33
ZS51	硫铜锑矿 ^a			24.55	0.14				0.20				49.59	0.11	24.84	0.19		99.62
ZS51	硫铜锑矿 ^a		0.01	25.59				0.18					49.15	0.08	24.45	0.17		99.63
ZS51	硫铜锑矿 ^a			25.31									50.47	0.18	24.24	0.11		100.31
ZS51	硫铜锑矿 ^a			25.63									49.36	0.09	24.67			99.75
ZS51	硫铜锑矿 ^a			24.25									50.88		24.87			100.00
ZS13	辉锑铅矿 ^a					28.58	0.71						45.45	0.10	22.34	0.11	2.13	99.42
ZS13	辉锑铅矿 ^a					28.89	0.85						43.70	0.55	21.84	0.17	2.63	98.63
ZS13	辉锑铅矿 ^a					29.28	0.56						44.18	0.33	21.94	0.51	1.43	98.23
ZS51	车轮矿 ^a		0.13	13.75		41.23							24.93		19.73	0.36		100.13
ZS51	车轮矿 ^a		0.11	13.83		40.88							25.07		19.56	0.21		99.66
ZS43	辉钼矿 ^a				1.23						58.99				39.78			100.00
ZS43	辉钼矿 ^a				0.67						59.55				39.72			99.94
ZS43	辉钼矿 ^a				0.15						60.68	0.25			39.56	0.15		100.81
ZS45	辉钼矿 ^a										60.18	0.01			39.43		0.38	100.00
ZS45	辉钼矿 ^a				0.08						58.99	0.21			39.72			99.27
ZS45	辉钼矿 ^a										60.69	0.24			39.81			100.74
ZS48	碲汞矿 ^a									59.92							38.95	98.87
ZS48	碲汞矿 ^a				0.37				0.25	60.00						0.18	39.32	100.12
ZS48	碲汞矿 ^a				0.13				0.34	59.25						0.09	39.45	99.26
ZS48	碲汞矿 ^a								0.2	59.62						0.01	39.29	99.12
ZS48	碲汞矿 ^a			0.53				0.31		59.09							39.19	99.12
ZS48	碲汞矿 ^a									59.25							41.11	100.36
ZS48	碲汞矿 ^a				0.05				0.23	59.59							39.49	99.36
ZS48	碲汞矿 ^a				0.15				0.34	59.83							39.95	100.28
ZS48	碲镍矿 ^a								18.98								80.54	99.51
ZS48	碲镍矿 ^a								18.81								81.19	100.00
ZS48	碲镍矿 ^a								18.87							0.26	80.92	100.05
ZS48	碲镍矿 ^a								18.33								81.25	99.58

注:中国地质大学(北京)实验中心电子探针室分析。仪器型号:日本 EPMA-1600。工作条件:加速电压 15 kV,探针电流 20×10⁻⁸A,电子束斑直径 0.5 μm。

灰褐色,为均质矿物,无内反射,反射率高于方铅矿(图 2-B)。在矿石中,碲汞矿与自然金、碲镍矿(图 2-A)紧密连生在一起。电子探针分析结果(表 2)表明,碲汞矿主要元素的含量(%):Hg 为 59.25~60.00 (平均 59.57),Te 为 39.19~41.11(平均 39.59)。矿物中含微量的 Fe、Cu、Co、Ni、Se。根据电子探针分析结果的平均值计算,碲汞矿的化学分子式为(Hg_{0.96}Fe_{0.01},Ni_{0.01})_{0.98}Te_{1.00},简写式为 HgTe。

2.3.2 碲镍矿(NiTe₂)

碲镍矿颗粒细小(<0.05 μm),个别达 1 mm(图 2-A),反射色为白色、淡玫瑰色,非均质性较强。与其共生的矿物有碲汞矿、自然金等。电子探针分析结果(表 2)表明,碲镍矿主要元素的含量(%):Ni 为 18.33~18.98(平均 18.75),Te 为 80.54~81.25(平均 80.98)。个别颗粒中含微量的 Se。根据电子探针分析结果的平均值计算,碲镍矿的化学分子式为 Ni₁₀₁Te₂₀₀,简写式为 NiTe_{2o}。

2.4 氧化物及含氧盐类

在金矿石中,经常观察到一些由金属矿物氧化而形成的氧化物及含氧盐类矿物(图 3),如针铁矿、纤铁矿、蓝铜矿、白铅矿等,还可见大量由热液作用形成的氧化物、碳酸盐、硫酸盐、钨酸盐、硅酸盐类的矿物,如石英、赤铁矿、磁铁矿、方解石、铁白云石、菱铁矿、菱锰矿、重晶石、石膏、白钨矿、地开石等。有关白钨矿的产出特点,笔者已进行了报道^[4]。以下仅对铁白云石、菱铁矿、菱锰矿、重晶石作简要阐述。

2.4.1 菱铁矿

菱铁矿分布于石英-方解石脉中,呈自形、半自形菱面体(图 3-A、B),颗粒大小(0.01~2 mm)变化较大。主要形成于成矿晚期。其反射色为深灰色,反射率明显高于方解石和白云石,但低于菱铁矿,非均质性显著。内反射色明显,为白色、乳白色和淡黄色。主要成分为 Fe 和 CO₃²⁻,含微量的 Mn、Ca。

2.4.2 菱锰矿

目前仅在显微镜下观察到菱锰矿。菱锰矿与菱铁矿紧密连生在一起呈脉状产出(图 3-A),颗粒较细(0.01~0.2 mm),具有胶状结构特征(图 3-B)。其反射色为灰色,反射率明显高于菱铁矿,非均性显著。内反射色明显,为棕色、粉红棕色与淡黄色。主要成分为 Mn 和 CO₃²⁻,含微量的 Fe、Ca。

2.4.3 重晶石

重晶石也仅在显微镜下才被观察到。目前所观察到的重晶石,主要分布在晚期石英-方解石脉中,

与石英、方解石、菱铁矿等共生。其颗粒较小(0.01~0.1 mm),形态有板状自形晶(图 3-D)、他形粒状(图 3-C)。其在反光显微镜下为深灰色,略带暗红色,非均质性,无双反射特点,但内反射明显,呈乳白色。在化学成分中,除主要成分为 Ba、SO₄²⁻外,还含有微量的 Sr、Ca、Fe、Mg。

2.4.4 铁白云石

石英-方解石脉体中的铁白云石大多呈自形菱形(图 3-E、F),粒径为 0.2~4 mm。在反光显微镜下,铁白云石呈反射色为深灰色,反射率略高于石英,具有反射多色性,内反射色为乳白色-棕黄色,具有强非均质性,具有明显的生长环带结构。电子探针分析结果(表 3)显示,该矿物中 Fe、Mg 元素含量变化较大,可以形成含铁白云石-铁白云石-菱铁矿的类质同像系列,化学分子式为 Ca(Mg_{1-x}Fe_x)[CO₃]₂,其中的 x=0~1。铁白云石的各环带中铁、镁元素含量变化较大(表 3),在颗粒环带的内带铁含量总体较高,而外带铁含量降低,中带铁含量有一定的波动。

3 金的沉淀机制讨论

在卡林型金矿床中,不可见金、金颗粒极细(纳米级)是金的两种重要存在形式^[7、8]。其中金以 Au⁺形式进入含砷黄铁矿的结构中形成固溶体金,是该类型矿床中金的主要存在形式。固溶体金是“不可见”的,其受一溶解度极限(Au/As=0.02)的控制^[9、10];其次是纳米级自然金(Au⁰)颗粒(5~10 nm)。这种纳米金颗

表 3 铁白云石的电子探针分析结果(%)
Table 3 Electron microprobe analyses of ankerite in the Zhaishang gold deposit (%)

样品号	点号与点位	分子式	CaO	MgO	MnO	FeO	总量
07ZS49-2	31-内环	Ca(Mg _{0.41} Fe _{0.54} Mn _{0.02})(CO ₃) _{1.96}	29.78	9.76	0.19	20.39	62.12
07ZS49-2	32-中环	Ca(Mg _{0.75} Fe _{0.19} Mn _{0.01})(CO ₃) _{1.90}	33.14	17.98	0.24	8.12	59.48
07ZS49-2	33-外环	Ca(Mg _{0.38} Fe _{0.49} Mn _{0.01})(CO ₃) _{1.88}	31.47	10.06	0.73	17.72	59.98
07ZS-48	34-内环	Ca(Mg _{0.54} Fe _{0.35} Mn _{0.01})(CO ₃) _{1.89}	31.41	8.68	0.46	19.58	60.13
07ZS-48	35-中环	Ca(Mg _{0.49} Fe _{0.49} Mn _{0.02})(CO ₃) _{1.78}	32.69	12.65	0.33	14.55	60.23
07ZS-48	36-外环	Ca(Mg _{0.38} Fe _{0.40})(CO ₃) _{1.78}	33.76	9.24	0.00	17.48	60.48
07ZS-48	12	Ca(Mg _{0.49} Fe _{0.49} Mn _{0.02})(CO ₃) _{2.00}	29.74	10.58	0.59	18.71	59.61
07ZS-49	内环	Ca(Mg _{0.44} Fe _{0.51})(CO ₃) _{1.96}	29.99	9.54	0.11	19.66	59.3
07ZS-49	中环	Ca(Mg _{0.85} Fe _{0.23} Mn _{0.02})(CO ₃) _{2.10}	30.97	18.94	0.65	9.18	59.74
07ZS-49	外环	Ca(Mg _{0.41} Fe _{0.40} Mn _{0.02})(CO ₃) _{1.83}	32.49	9.67	0.33	16.8	59.29
07ZS-48	内环	Ca(Mg _{0.39} Fe _{0.51} Mn _{0.02})(CO ₃) _{1.90}	30.74	8.58		20.1	59.42
07ZS-48	外环	Ca(Mg _{0.55} Fe _{0.36} Mn _{0.01})(CO ₃) _{1.92}	31.52	12.49	0.46	14.61	59.08

注:中国地质大学(北京)实验中心电子探针室分析。仪器型号:日本 EPMA-1600。工作条件:加速电压 15 kV,探针电流 20×10⁻⁸A,电子束斑直径 0.5 μm。

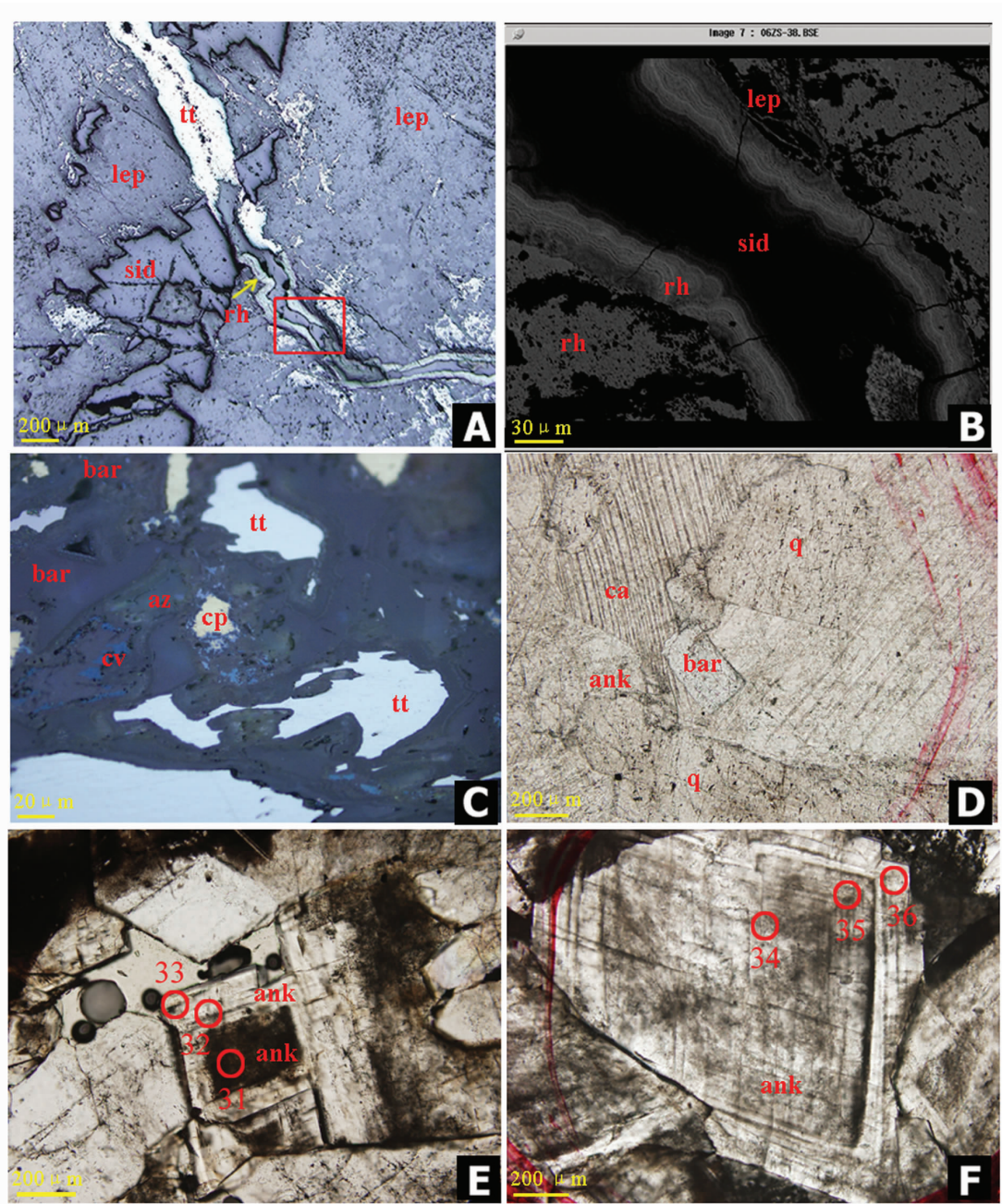


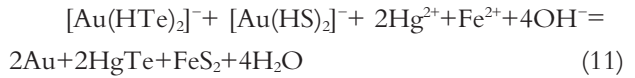
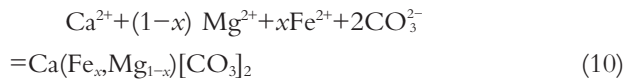
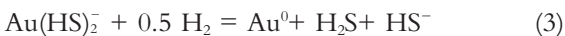
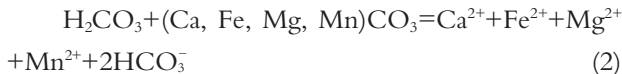
图 3 金矿石中碳酸盐与硫酸盐矿物

A—氧化矿石中菱铁矿—菱锰矿—黝铜矿脉, 光片(-), 07ZS-38; B—图 A 中红色矩形框内矿物的背散射电子图像, 07ZS-38; C—矿石中重晶石与黝铜矿、黄铜矿、铜蓝和蓝铜矿之间的关系, 光片(-), 06ZS-51; D—方解石脉中的重晶石、铁白云石与石英, 薄片(-), 07ZS-61; E—白云石—铁白云石环带(雾心亮边), 薄片(-), 07ZS-49; F—白云石—铁白云石环带, 薄片(-), 06ZS-48; cp—黄铜矿; tt—黝铜矿; cv—铜蓝; az—蓝铜矿; lep—纤铁矿; sid—菱铁矿; rh—菱锰矿; ank—铁白云石; ca—方解石; q—石英; bar—重晶石。图中的数字为电子探针点位置编号, 与表 3 中的点号相对应

Fig. 3 Carbonate and sulfate minerals in gold ores

A—Siderite, rhodochrosite and tetrahedrite vein in oxidation ore, reflected light, sample 07ZS-38; B—Back-scattered electron image of the area in the red outlined box of photograph A, sample 07ZS-38; C—Relationship of barite to tetrahedrite, chalcopyrite, covellite and azurite, reflected light, sample 06ZS-51; D—Coexistence of barite with ankerite and quartz in calcite vein, thin section, sample 07ZS-61; E—Dolomite—ankerite zone, thin section, sample 07ZS-49; F—dolomite—ankerite zone, thin section, sample 06ZS-48; cp—Chalcopyrite; tt—Tetrahedrite; cv—Covellite; az—Azurite; lep—Lepidokrocite; sid—Siderite; rh—Rhodochrosite; ank—Ankerite; ca—Calcite; q—Quartz; bar—Barite. The figures in photographs E and F are locations of electron microprobe analysis, corresponding to serial numbers in Table 3

粒的形成被解释为:(1)Au 含量超过其在含砷黄铁矿中的溶解度极限;(2)Au 从亚稳相含金的含砷黄铁矿中出溶^[9,10]。然而,在局部的成矿微环境下,如含铁碳酸盐的溶解释放 Fe 及其硫化物化(含砷黄铁矿)等,可以使成矿热液中的 Au 发生过饱和而导致显微可见自然金的聚集^[11,12]。寨上金矿床中金元素的分布特征与自然金颗粒的存在,反映出金在不同成矿阶段的富集特点:在成矿早阶段,由于成矿流体 f_{S_2} 较高, f_{O_2} 较低^[9],不仅有利于大量硫化物的形成,而且有利于金以 Au^+ 形式进入含砷黄铁矿的结构中形成固溶体金而“不可见”。随着成矿作用的进行和大量硫化物的沉淀,使成矿流体中的 f_{S_2} 不断降低, f_{O_2} 、 f_{Te_2} 相对较高,这时形成的硫化物相对较少,更有利于碲化物、含氧盐类等矿物的形成。同时,在早期 Au-As 发生共沉淀形成的固溶体金可能从中“出溶”^[13]而形成了包裹在早世代含砷黄铁矿内部的细粒自然金颗粒。但一些聚集在晚世代含砷黄铁矿表面或边缘的较粗粒自然金颗粒,其形成时间明显比晚世代含砷黄铁矿的形成时间要晚。这种现象被解释为热液中金发生过饱和的结果^[14]。已有实验研究结果表明,在中性至弱酸性、富硫的热液系统中, $Au(HS)_2^-$ 是 Au 的主要迁移形式^[14]。当热液中 f_{Te_2}/f_{S_2} 达到 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 时,热液中金主要以碲络合物 $[Au(HTe)_2]^-$ 形式运移^[15,16]。对寨上流体包裹体特征研究表明^[9],含矿流体中含有一定量的 CO_2 , Fe 含量极低,说明成矿流体具有弱酸性、不含铁的特点。因此,矿床中硫化物化(含砷黄铁矿)中的 Fe 很可能来源于地层本身,特别是含矿岩系中含铁碳酸盐溶解而释放的 Fe。溶解 Fe 的大量硫化物化(含砷黄铁矿)可以使热液中 Au 的过饱和而导致自然金的聚集,其形成过程的化学反应式如下:



根据寨上金矿床的产出特征、矿物共生组合特点,尤其是在金矿石中存在自然金与铁白云石、含砷黄铁矿等密切共生的现象,可将矿石中显微自然金的形成过程解释为:(1)含矿热液的弱酸性使赋矿岩石中的含 Fe、Mn 碳酸盐溶解,释放 Fe、Ca、Mg、Mn 而进入含矿热液体系(反应 1~2);(2)溶解 Fe 的大量硫化物化,以及溶解 Fe、Ca、Mg、Mn 又与 CO_3^{2-} 结合形成方解石、菱铁矿、菱锰矿、白云石和铁白云石脉等,导致含矿热液中 Au 的过饱和而发生沉淀,形成自然金颗粒,并与含砷黄铁矿、铁白云石等矿物密切共生在一起(反应 3~10);(3)在成矿流体中 f_{S_2} 降低, f_{Te_2}/f_{S_2} 较高时,金以碲络合物 $[Au(HTe)_2]^-$ 形式进行迁移。由于成矿流体 pH 值的增大以及温度、压力等因素的变化,使金碲络合物 $[Au(HTe)_2]^-$ 的稳定性被破坏而使金发生沉淀(反应 11)。

因此,赋矿围岩中含 Fe 碳酸盐矿物溶解释放 Fe 以及溶解 Fe 的大量硫化物化,既是寨上金矿床中存在显微可见自然金的最重要因素,又是金沉淀富集的有利条件。

4 结 论

寨上金矿床中矿物组成相当丰富,既有大量硫化物、硫盐、氧化物及含氧盐类矿物,又有碲化物、自然金属及多金属互化物等。矿石中矿物种类较多、组成较复杂以及存在显微自然金,构成寨上金矿床的一大特色。赋矿围岩中含 Fe 碳酸盐矿物溶解释放 Fe 以及溶解 Fe 的大量硫化物化,是寨上金矿床中存在显微可见自然金的最重要因素和金沉淀富集的有利条件。

参考文献(References):

- [1] 刘新会, 于岚, 张复新, 等. 甘肃岷县寨上金矿床地质特征及成因初探[J]. 地质与勘探, 2005, 38(4): 45-53.
Liu Xinhui, Yu Lan, Zhang Fuxin, et al. Geological features and genetic analysis of Zhaishang gold deposit, Min County, Gansu [J]. Northwestern Geology, 2005, 38(4): 45-53(in Chinese with English abstract).
- [2] 路彦明, 李汉光, 陈勇敢, 等. 甘肃岷县寨上金矿地质地球化学特征及成因[J]. 地质与勘探, 2006, 42(4): 25-31.

- Lu Yanming, Li Hanguang, Chen Yonggan, et al. Geological and geochemical features and origin of Zhaishang gold deposit in the Min County, Gansu[J]. *Geology and Prospecting*, 2006, 42(4):25–31(in Chinese with English abstract).
- [3] 刘光智, 刘家军, 刘新会. 西秦岭寨上金矿床地球化学特征及成因机制研究[J]. *地质与勘探*, 2009, 45(2):27–37.
- Liu Guangzhi, Liu Jiajun, Liu Xinhui. Geochemical characteristics and genetic model of the Zhaishang gold deposits in west Qinling[J]. *Geology and Prospecting*, 2009, 45 (2):27–37 (in Chinese with English abstract).
- [4] 刘家军, 毛光剑, 马星华, 等. 甘肃寨上金矿床中 Cu–Ni–Zn–Sn–Fe 多金属互化物、S 合金矿物的发现及其地质意义 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2008, 38(4):414–423.
- Liu Jiajun, Mao Guangjian, Ma Xinghua, et al. Discovery of Cu–Ni–Zn–Sn–Fe intermetallic compound and S-bearing alloy in the Zhaishang gold deposit, southern Gansu Province and its geological significance[J]. *Science in China (D series)*, 2008, 51(6):769–777.
- [5] 刘家军, 刘光智, 廖延福, 等. 甘肃寨上金矿床中白钨矿体的发现及地质特征[J]. *中国地质*, 2008, 35(6):1057–1064.
- Liu Jiajun, Liu Guangzhi, Liao Yanfu, et al. Discovery and significance of scheelite orebodies in the Zhaishang gold deposit, southern Gansu [J]. *Geology in China*, 2008, 35 (6):1057–1064 (in Chinese with English abstract).
- [6] 马星华, 刘家军, 李立兴, 等. 甘肃寨上金矿床成矿流体性质与成矿作用探讨[J]. *岩石学报*, 2008, 24(9):2069–2078.
- Ma Xinhua, Liu Jiajun, Li Lixin, et al. The Zhaishang gold deposit in Gansu Province: characteristics, evolution of ore-forming fluids and their metallogenic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(9):2069–2078(in Chinese with English abstract).
- [7] Arehart G B. Characteristics and origin of sediment-hosted gold deposits: a review[J]. *Ore Geology Review*, 1996, 11:383–403.
- [8] Hofstra A H, Cline J S. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits[J]//Hagemann S G, Brown P E (eds.), *Gold in 2000. Reviews in Economic Geology*, 2000, 13:163–220.
- [9] Simon G, Kesler S, Chrysosoulis S. Geochemistry and textures of gold-bearing arsenian pyrite, Twin Creeks, Nevada:Implications for deposition of gold in Carlin-type deposits [J]. *Economic Geology*. 1999, 94:405–422.
- [10] Reich M, Kesler S, Utsunomiya S, et al. Solubility of gold in arsenic pyrite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69 (11): 2781–2796.
- [11] Su W C, Xia B, Zhang H T, Zhang X C, et al. Visible gold in arsenian pyrite at the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China:Implications for the environment and processes of ore formation[J]. *Ore Geology Reviews*, 2008, 33:667–679.
- [12] 张弘毅, 苏文超, 田建吉, 等. 贵州水银洞卡林型金矿床金的赋存状态初步研究[J]. *矿物学报*, 2008, 28(1):17–24.
- Zhang Hongtao, Su Wenchao, Tian Jianji, et al. Occurrence of gold in the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2008, 28 (1):17–24 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张复新, 马建秦, 陈衍景. 秦岭卡林型金矿床金、砷地球化学探讨[J]. *地球化学*, 1999, 28(5):453–463.
- Zhang Fuxin, Ma Jianqin, Chen Yanjing. Geochemistry of gold and arsenium in Qinling Carlin-type gold deposits [J]. *Geochemistry*, 1999, 28(5):453–463(in Chinese with English abstract).
- [14] Seward T M. The complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal ore solutions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1973, 37:370–399.
- [15] Plotinskaya O Yu, Kovalenker V A, Seltmann R, et al. Te and Se mineralogy of the high-sulfidation Kochbulak and Kairagach epithermal gold telluride deposits (Kurama Ridge, Middle Tien Shan, Uzbekistan) [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2006, 87:187–207.
- [16] Mikulski S Z. The telluride mineralization event (s) within the late-variscan gold deposits in the western Sudetes (NE part of the Bohemian massif, SW Poland) [M]. *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*, Springer, 2005, vol.2, 1415–1418.

Characteristics of mineral association and mechanism of Au precipitation in the Zhaishang gold deposit, southern Gansu

LIU Jia-jun^{1,2}, MAO Guang-jian^{1,2}, WU Sheng-hua^{1,2}, LIU Guang-zhi³,
LIAO Yan-fu³, ZHENG Wei-jun³, HUA Shu-guang³, YUE Lian-xiong³

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Lithosphere Tectonics and Lithoprobe Technology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. No. 5 Gold Geological Party of Chinese Armed Police Force, Xi'an 710100, Shaanxi, China)

Abstract: Located in the western part of the Minxian County–Lixian County metallogenic belt, West Qinling Mountains, the Zhaishang gold deposit is a recently discovered large-sized Carlin-type disseminated gold deposit. Examination of ores by optical microscope, electron microprobe and X-ray surface scanning has revealed that the ore deposit is quite complex in mineralogy. Up to now more than 40 minerals have been identified. These minerals include not only sulfides and sulfosalt of Cu, Pb, Zn, As, Mo, Ni and Sb –bearing minerals, a variety of oxides, sulfate, carbonate, and tungstate minerals but also visible gold grains, tellurides, native metals, and polymetallic intermetallic compounds. Among the most common minerals there are native gold, pyrite, chalcopryrite, tetrahedrite, galena, sphalerite, stibnite, quartz, calcite, ankerite, siderite, and barite. The identification of some rare minerals in the Carlin-type gold deposits such as chalcostibnite, bournonite, zinkenite, molybdenite, coloradoite, melonite, native metals, Cu–Zn–Ni–Sn–Fe intermetallic compounds and scheelite is of great significance. The diversity of mineral species in the ores and the occurrence of visible native gold minerals constitute outstanding features of the gold deposit. Dissolution of ferruginous limestone in the host rocks and sulfidation of the dissolved iron by H₂S introduced by ore fluids were not only the most important depositional mechanism for visible gold grains but also the advantageous conditions for gold enrichment in the Zhaishang gold deposit.

Key words: gold deposit; mineralogy; precipitation mechanism; Zhaishang; southern Gansu

About the first author: LIU Jia-jun, male, born in 1963, professor and supervisor of doctor candidates, engages in the study of ore deposit geochemistry; E-mail: liujiajun@cugb.edu.cn.