

东天山维权银铜矿床中钴矿化发现及成因意义^{*}

李立兴,李厚民,丁建华,宋哲,孟洁,马玉波

(中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037)

摘要 新疆东天山地区是中国重要的钴成矿带之一,在多个与基性-超基性岩有关的铜镍硫化物矿床和磁铁矿床中伴生有中小型钴矿资源。最近,笔者在研究东天山维权矽卡岩型银铜矿床物质组分的过程中,通过显微镜观察、电子探针扫描和成分分析发现了独立钴矿物辉砷钴矿,不仅代表了东天山含钴矿床的新类型,而且具有综合利用的前景。文章对维权矿床中铜银钴矿石类型、矿石中辉砷钴矿和其他主要金属矿物的赋存状态进行了研究,划分出铜矿石、铁铜矿石、含银铜钴矿石、银矿石、含钴铁铜矿石和铅银铜矿石6种矿石类型,认为它们可能是铁铜、钴、银3期成矿作用叠加的产物,钴成矿作用为独立的一期中高温热液成矿作用,含钴铁铜矿石是钴成矿作用叠加在铁铜成矿作用之上形成,而含银钴铜矿石是银成矿作用叠加在钴成矿作用之上形成。

关键词 地球化学;辉砷钴矿;钴矿;银矿;维权矿床;东天山

中图分类号:P618.52, P618.41

文献标志码:A

The discovery of cobaltite mineralization in Weiquan Ag-Cu deposit, eastern Tianshan Mountains, and its significance

LI LiXing, LI HouMin, DING JianHua, SONG Zhe, MENG Jie and MA YuBo

(MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

The eastern Tianshan is one of the important cobalt metallogenic belts of China, and hosts several middle- to small-sized magmatic Cu-Ni-Co and hydrothermal Fe-(Co) deposits. Their cobalt is generally developed in sulfides or sulfo-arsenides, showing a disseminated distribution, and occurrences of independent cobalt minerals such as carrollite, cobaltite and linnaeite are scarce. However, microscope observations, X-ray surface scanning and electron microprobe analysis have revealed widespread distribution of independent cobalt mineral of cobaltite in the hydrothermal Weiquan Ag-Cu deposit in eastern Tianshan, with mineral proportions up to 5%, which is of economic significance. Therefore, on the basis of assemblages of iron, copper, cobalt and silver from the Weiquan Ag-Cu deposit, ores have been classified into six types, i.e., Cu ores, Fe-Cu ores, Ag-bearing Cu-Co ores, Ag ores, Co-bearing Fe-Cu ores and Pb-Ag-Cu ores. Ore mineral assemblages as well as their textural relationships indicate that all of the ores resulted from superimposition of three stages of mineralization, which were firstly Fe-Cu stage, then Co stage and lastly Cu-Ag stage. Co mineralization is characterized by a middle- to high-temperature hydrothermal mineralization. Co-bearing Fe-Cu ores were superposed as a result of Fe-Cu and Co mineraliza-

^{*} 本文得到国家自然科学基金项目(编号:41672078、41402067)和中国地质调查局中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务(矿产地质志)项目(编号:DD20160346)联合资助

第一作者简介 李立兴,男,1984年生,博士,副研究员,从事金属矿床研究。Email:lilixing1984@sina.com

收稿日期 2017-08-17;改回日期 2017-12-23。赵海杰编辑。

tion, and Ag-bearing Cu-Co ores were formed by superposition of Co and Cu-Ag mineralization.

Key words: geochemistry, cobaltite, cobalt deposit, silver deposit, Weiquan deposit, eastern Tianshan

钴是一种重要的有色金属,具有良好的物理、化学和机械性能,是制造电池材料、超级耐热合金和硬质合金、磁性材料、催化剂、燃料的重要原料,被广泛应用于电子工业、生物化学、航空航天等高科技领域。中国目前已经成为世界上最大的钴消费国,2017年钴消费的80%用于充电电池工业,与近年来电动汽车行业的迅猛发展有关(U.S. Geological Survey, 2018)。中国钴矿产品进口量逐年上升,钴已成为对外依存度最高的有色金属,供求矛盾日益突出。然而,中国钴矿资源严重短缺,查明资源量仅占到世界钴资源量的1.1%,且贫矿多,富矿少,伴生矿产多,独立矿产少(丰成友等, 2004; 刘彬等, 2014)。因此,研究和寻找钴矿资源迫在眉睫。

钴在地球上分布广泛,但地壳丰度仅为 20×10^{-6} 。钴元素具有亲铁性和亲硫性,地球化学行为和铁、镍十分接近,在矿床中多以伴生元素产出,很少形成独立钴矿物为主的钴矿床(刘英俊等, 1984; Dill, 2010)。新疆东天山地区是中国重要的钴成矿带之一,已发现多个伴生的中小型钴矿床,最重要的为与基性-超基性侵入体有关Cu-Ni矿床中伴生Co(如图拉尔根、黄山、白石泉等矿床),其次为与火山热液有关铁矿中伴生Co(如磁海矿床)。这些矿床中含Co矿物主要呈微量组分赋存在硫化物和硫砷化物中,如磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿和毒砂等中,如Cu-Ni矿床中镍辉砷钴矿和钴辉砷镍矿分布在磁黄铁矿晶粒内的微裂隙中(丁奎首等, 2007; 秦克章等, 2007),磁海Fe矿床中辉砷钴矿和斜方砷钴矿以他形粒状包裹于黄铁矿和磁黄铁矿中(唐萍芝等, 2012)。笔者最近在东天山维权矽卡岩型银铜矿床中新发现了较多的独立钴矿物辉砷钴矿,部分矿石中含量可达5%,这不仅代表了东天山含Co矿床的新类型,而且具有综合利用的前景。文章拟对维权银铜矿床中矿石类型、矿石中辉砷钴矿和其他主要金属矿物的赋存状态进行介绍,以期为进一步探讨钴成矿机理和矿床的成矿作用,对该矿床以及东天山地区钴找矿方向和资源综合利用打下基础。

1 矿床基本特征

维权银铜矿床位于东天山阿齐山-雅满苏铁

(铜)银多金属成矿带(秦克章等, 2002),维权-彩霞山铅锌银铜大型矿集区(陈毓川等, 2007),百灵山铁铅锌金银铬重点远景区(丁建华等, 2016)(图1)。该矿集区内赋存成矿元素银的矿床有3个,分别为彩霞山大型铅锌银矿床、吉源中型银多金属矿床和维权中型银铜矿床。维权银铜矿床由新疆地质矿产勘查开发局第一地质大队姬厚贵等人于2000年5月发现,是在新疆发现的第一个独立中型银矿床(秦跃群, 2001),经新疆地质矿产勘查开发局第一地质大队勘探与评价,共获得资源量:银532吨,铜1.5万吨(小型),同时伴生铅、锌等金属。

维权矿床赋存于上石炭统吐古吐布拉克组浅海相中酸性-基性火山岩、碎屑岩和碳酸盐岩中,容矿岩石为钙铁榴石矽卡岩。经地表槽探工程揭露和深部钻探验证,共圈定3个矿体。I号矿体为主矿体,平面上呈似透镜状,长250 m,宽0.4~24 m,延深340 m,剖面上呈上宽下窄的似层状(图2)(王龙生等, 2005; 陈毓川等, 2007; 冯京等, 2008)。矿体北倾,浅部陡,倾角 $72^{\circ} \sim 75^{\circ}$,深部缓,倾角 54° ,与地层产状相反。矿体总体以银为主,银平均品位 378.85×10^{-6} ;共生铜最高品位32.86%,平均品位为1.69%;共生铅、锌,平均品位2.7%。II号银矿体长300 m,见矿视厚4.7~5.9 m,平均视厚5.13 m,平均银品位 228.6×10^{-6} ,最高 400.6×10^{-6} ,地表银品位向东逐渐增高。此外,在22线施工的ZK2201孔见2层锌矿体,视厚分别为25.06 m和15.97 m,平均品位分别为1.54%和1.65%。III号银铜矿体位于II号银矿体北侧,由一条探槽控制,矿体视厚2.1 m,银平均品位 143.49×10^{-6} ,铜平均品位1.46%。

2 矿石类型及矿物生成顺序

前人研究认为维权矿床的矿石类型主要有含铜矽卡岩型、角砾状矽卡岩型、团块状硫化物型等(王龙生等, 2005; 秦跃群, 2001; 冯京等, 2008)。矿石构造为浸染状、细脉状、团块状、致密块状、碎裂状;矿石结构有自形-半自形粒状变晶结构、变余砂状结构。矿石中金属矿物有辉银矿、黄铜矿、辉铜矿、铜蓝、自然银、闪锌矿、方铅矿、斑铜矿、磁铁矿、黄铁矿、毒砂等。非金属矿物主要以钙铁榴石为主,透辉

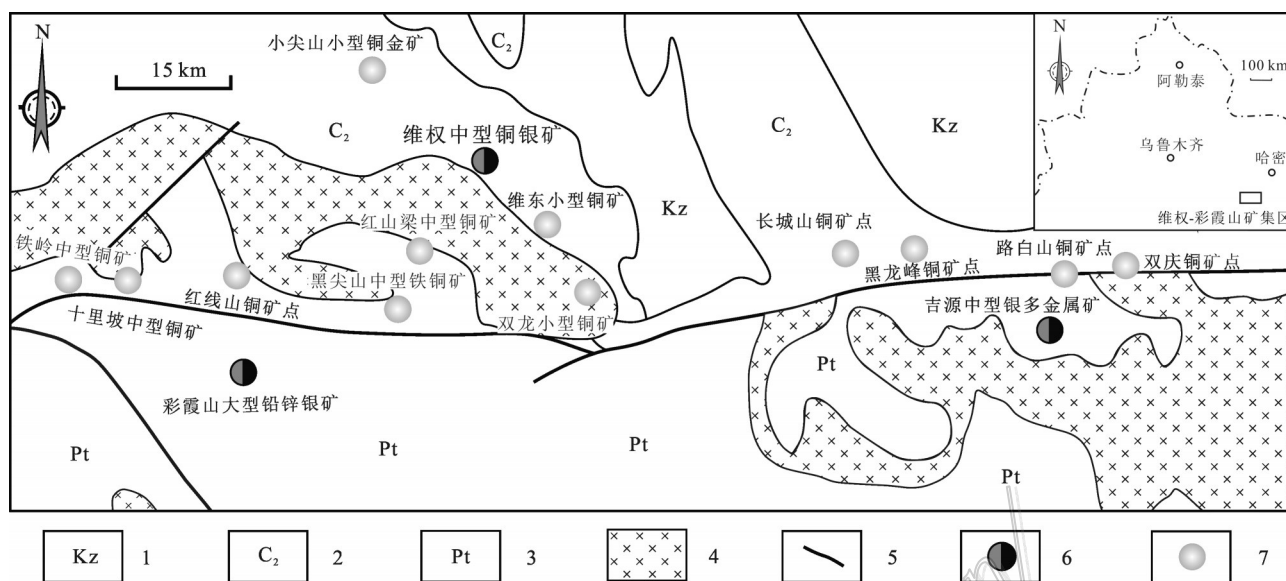


图1 东天山维权-彩霞山铅锌银铜矿集区区域地质矿产图(修改自陈毓川等,2007)

1—新生界沉积物;2—上石炭统碎屑岩建造;3—元古界大理岩;4—石炭纪花岗岩;5—断层;6—含银矿床;7—铜矿床

Fig. 1 Geological map of the Weiquan-Caixiashan ore belt in the Eastern Tianshan area, Xinjiang, showing distribution of Pb-Zn-Ag-Cu deposits (modified after Chen et al., 2007)

1—Cenozoic sediments; 2—Upper carboniferous clastic formation; 3—Proterozoic marble; 4—Carboniferous granitoid; 5—Fault; 6—Ag-bearing deposit; 7—Cu deposit

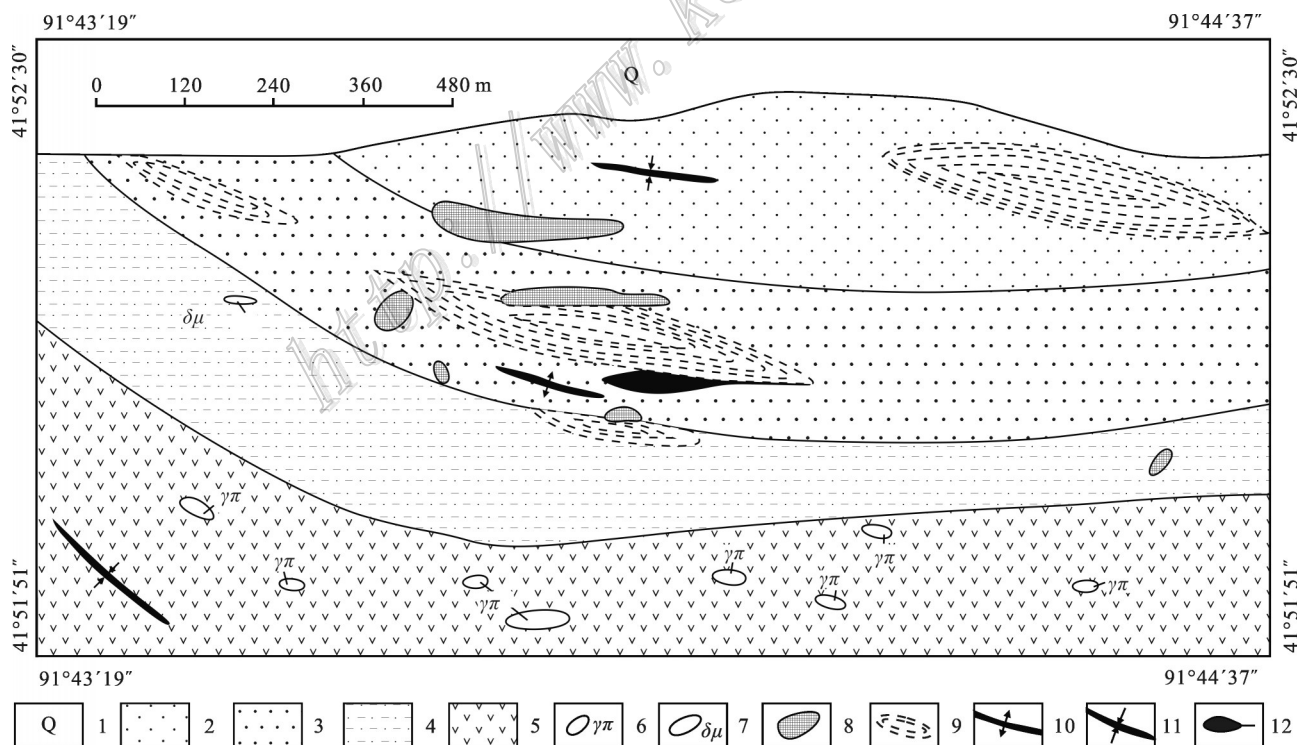


图2 新疆维权银铜矿床地质图(据新疆地质调查院,2003)

1—第四系沉积物;2—含砾砂岩、凝灰岩;3—砂卡岩化砂岩、凝灰岩;4—含砾砂岩、硅质砂岩;5—硅质砂岩、含砾砂岩;6—花岗斑岩;7—闪长玢岩;8—砂卡岩;9—韧性剪切带;10—背斜;11—向斜;12—矿体

Fig. 2 Geological map of the Weiquan Ag-Cu deposit, Xinjiang (after Xinjiang Geological Survey, 2003)

1—Quaternary sediments; 2—Conglomeratic sandstone, tuff; 3—Skarnized sandstone, tuff; 4—Conglomeratic sandstone, siliceous sandstone; 5—Siliceous sandstone, conglomeratic sandstone; 6—Granite porphyry; 7—Dioritic porphyrite; 8—Skarn; 9—Ductile shear zone; 10—Anticline; 11—Syncline; 12—Orebody

石、绿帘石、方解石、斜长石、绢云母、黑云母、绿泥石和阳起石等次之。由矿体中心向两侧金属矿物分带特征明显,内带:磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、辉铜矿、辉银矿;外带:黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、辉钼矿。围岩蚀变有碳酸盐化、绿泥石化、绿帘石化、黄铁绢英岩化和阳起石化,其中与成矿作用有关的围岩蚀变为绿泥石化、绿帘石化和阳起石化,为近矿围岩蚀变,这些围岩蚀变大量发育在矿体的内外矽卡岩或矽卡岩化岩石中。矿体外侧围岩中主要发育有黄铁绢英岩化和较弱的绿泥石化、绿帘石化。维权银多金属矿床分为矽卡岩期、热液期和表生期 3 个矿化期(冯京等,2008)。矽卡岩期包含有石榴子石-阳起石阶段和绿帘石-绿泥石-黄铁矿阶段;热液期有硫化物-氧化物-碳酸盐阶段和硫化物-自然银-碳酸盐阶段,前者发生于中高温热

液环境,形成以石英-黄铜矿为主的矿物组合;后者发生于中温热液环境,形成以方解石-闪锌矿-方铅矿-辉银矿组合为特征的矿化。

文章按照 Fe、Cu、Co、Ag 金属元素组合及含量高低,将矿石划分为 6 种类型。

2.1 铜矿石

笔者采集铜矿石样品 5 件(WQK-8、13、14、15、16)。手标本上见块状黄铜矿富矿脉穿插于蚀变火山岩的裂隙中,脉中包裹火山岩角砾。火山岩中还有微细矿脉。矿石中金属矿物含量 > 85%,主要由黄铜矿组成,黄铜矿中有时可见呈孤立分布的细粒磁铁矿、黄铁矿和方铅矿(图 3a,b),黄铁矿碎裂并被黄铜矿网脉穿插交代(图 3c)。黄铜矿粗粒,但在块状黄铜矿脉边部细粒磁铁矿增多,形成细粒磁铁矿

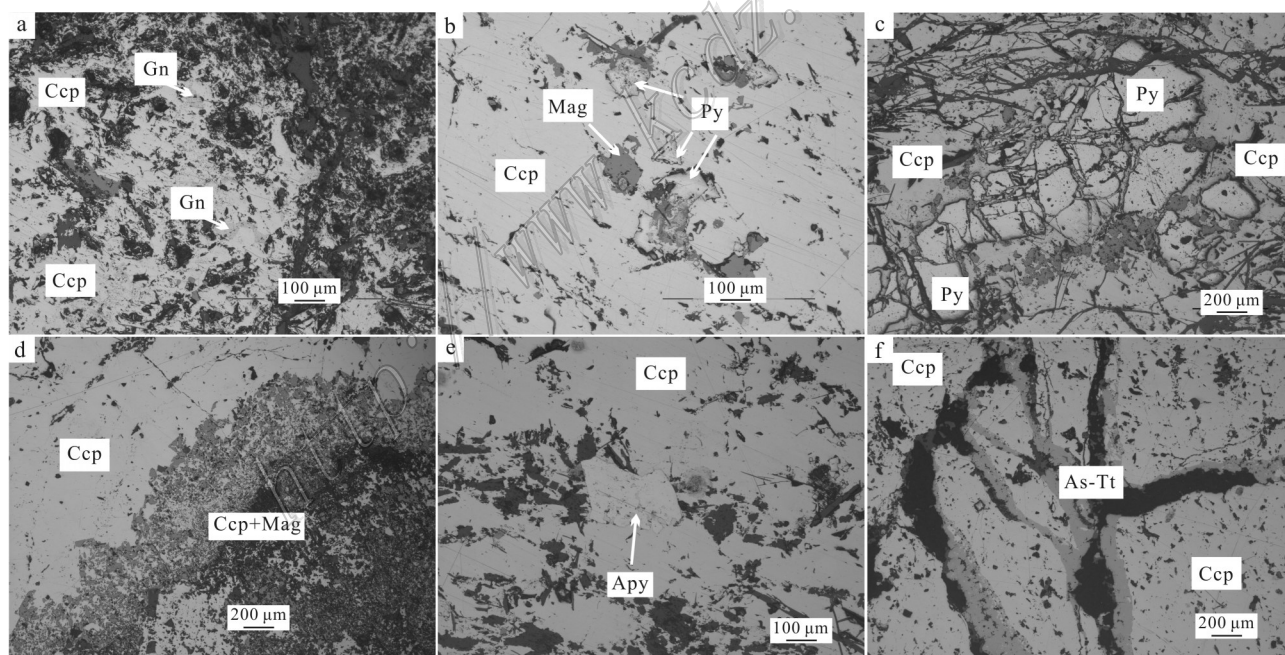


图 3 新疆维权银铜矿床铜矿石镜下特征(反射光照片)

a. 黄铜矿中含有细粒方铅矿; b. 黄铜矿中含有细粒磁铁矿和黄铁矿; c. 黄铁矿碎裂并被黄铜矿网脉穿插交代; d. 块状黄铜矿脉边部发育细粒磁铁矿和细粒黄铜矿的共生体; e. 黄铜矿中有自形骸晶状毒砂自形晶; f. 黄铜矿中的裂隙常被细脉状砷黝铜矿充填

APy—毒砂; As-Tt—砷黝铜矿; Ccp—黄铜矿; Gn—方铅矿; Mag—磁铁矿; Py—黄铁矿

Fig. 3 Photomicrographs of the copper ores in the Weiquan Cu-Ag deposit, Xinjiang (reflected crossed nicols)

a. Fine-grained galena in chalcopyrite; b. Fine-grained pyrite and magnetite in chalcopyrite; c. Chalcopyrite stockwork cross-cutting pyrite; d. Intergrowth of fine-grained magnetite and chalcopyrite on the margin of chalcopyrite stockwork; e. Skeleton-textured arsenopyrite hosted in chalcopyrite; f. Fractures of chalcopyrite filled with tennantite

APy—Arsenopyrite; As-Tt—Tennantite; Ccp—Chalcopyrite; Gn—Galena; Mag—Magnetite; Py—Pyrite

和细粒黄铜矿的交生体(图3d)。黄铜矿中有自形骸晶状毒砂自形晶,表明黄铜矿之前有富砷硫化物(图3e)。黄铜矿中的裂隙常被细脉状砷黝铜矿、铜蓝充填(图3f),电子探针分析还在铜矿石中黄铜矿的裂隙中发现硫砷铜银矿(表1中样点WQ14-1、WQ14-2)。非金属矿物含量小于15%,以石英、绿泥石为主,有少量白云母。综上所述,该类矿石可以识别出3组金属矿物组合,从早到晚生成顺序为:①黄铁矿+毒砂;②黄铜矿+磁铁矿+方铅矿;③砷黝铜矿+铜蓝+褐铁矿,黄铜矿(CuFeS_2)+As $\rightarrow$ 砷黝铜矿($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$)+铜蓝(CuS)+ Fe_2O_3 。

2.2 铁铜矿石

采集铁铜矿石样品1件(WQK-4)。该矿石手标本上呈绿黄色,条带状构造,由黄铁矿黄铜矿条带和含磁铁矿的灰黑色条带相间构成(图4a)。金属矿物>80%。显微镜下见矿石受到强烈构造片理化而呈条带状,并见构造透镜体。黄铜矿有2个世代(黄铜矿₁和黄铜矿₂)。在构造透镜体中有条带状黄铁矿和黄铜矿(黄铜矿₁),被构造片理截切,表明该铁铜矿化早于构造片理(图4a)。也见黄铜矿脉(黄铜矿₂)穿切构造片理(图4b)。褐铁矿化顺片理、构造透镜体边部及内部分布,表明褐铁矿化晚于构造片理,可见切片理的褐铁矿脉(图4c)。综上所述,该类矿石可以识别出4组金属矿物组合,其从早到晚生成顺序为:①黄铁矿;②磁铁矿+黄铜矿₁;③黄铜矿₂;④褐铁矿化。黄铜矿有两个世代(黄铜矿₁和黄铜矿₂)。

2.3 含银铜钴矿石

这是笔者新识别出的矿石类型,在前人的文献中未见报道。本次采集了2件含银铜钴矿石样品(WQK-5、6)。手标本上这类矿石呈灰白色、淡灰绿色,碎裂状、条纹条带状。金属矿物细小星点状、浸染状分布于蚀变岩中。显微镜下金属矿物含量10%~30%,浸染状、少量细脉状分布于蚀变岩中,与绿帘石、白云母密切共生,可见金属矿物产于活化的碳酸盐脉及石英脉中。金属矿物以黄铜矿和砷黝铜矿为主,见较多辉砷钴矿(含量可达1%~5%)分布于黄铜矿边部(图5a、b)。此外还有少量铜蓝、硫砷铜银矿,偶见斑铜矿。非金属矿物以石英和碳酸盐为主,其次为绢云母、绿帘石、绿泥石。综合分析矿物的相互关系,可以识别出4组金属矿物组合,从早到晚生成顺序为:①砷黝铜矿+第一世代黄铜矿(黄铜矿₁):可见黄铜矿₁与砷黝铜矿呈文象状交生(图5c),也可见砷黝铜矿呈黄铜矿₁环边(图5d),表明二者同期或黄铜矿₁稍早;可见黄铜矿₁被辉砷钴矿交代(图5a、b、e~i),也可见硫砷铜银矿呈细脉状分布在砷黝铜矿中(图5c),且砷黝铜矿被第二世代黄铜矿(黄铜矿₂)交代,说明砷黝铜矿和黄铜矿₁最早形成;②辉砷钴矿+铜蓝:可见辉砷钴矿与铜蓝呈交生体(图5j),也可见硫砷铜银矿呈细脉穿插辉砷钴矿(图5k);③硫砷铜银矿:可见硫砷铜银矿呈细脉状分布在砷黝铜矿中,但黄铜矿₂中没有硫砷铜银矿,表明黄铜矿₂晚于硫砷铜银矿(图5l);④第二世代黄铜矿(黄铜矿₂):可见黄铜

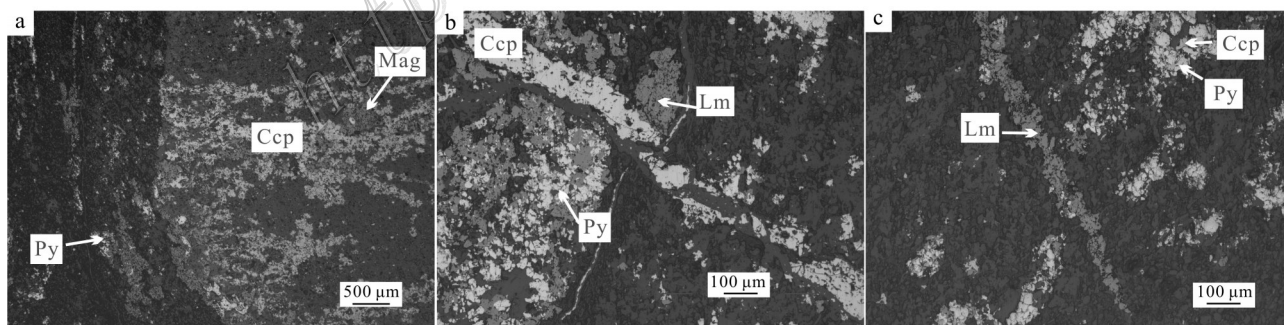


图4 新疆维权银铜矿床铁铜矿石镜下特征(反射光照片)

a. 第一世代条带状黄铜矿被构造片理截切;b. 第二世代黄铜矿买截切构造片理;c. 褐铁矿脉截切构造片理

Ccp—黄铜矿;Lm—褐铁矿;Mag—磁铁矿;Py—黄铁矿

Fig. 4 Photomicrographs of the Fe-Cu ores from the Weiquan Cu-Ag deposit, Xinjiang (reflected crossed nicols)

a. The foliation texture cross-cutting early-stage banded chalcopyrite;b. Late-stage chalcopyrite cross-cutting the foliation texture;

c. A limonite vein cross-cutting the foliation texture

Ccp—Chalcopyrite;Lm—Limonite;Mag—Magnetite;Py—Pyrite

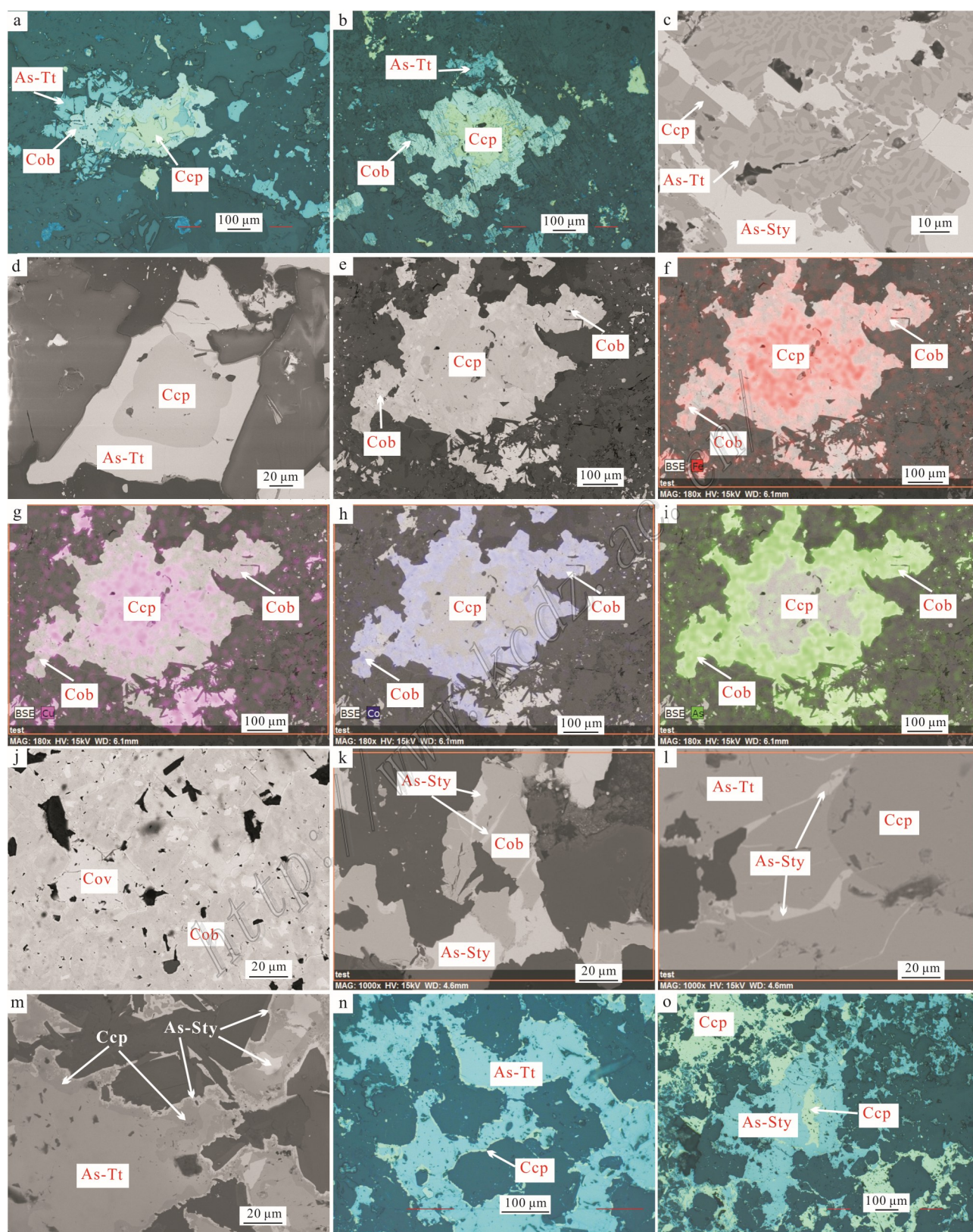


图 5 新疆维权银铜矿床含银铜钴矿石镜下特征

a-b. 辉砷钴矿分布于黄铜矿边缘部;c. 第一世代黄铜矿与砷黝铜矿交生;d. 砷黝铜矿呈第一世代黄铜矿环边;e. 第一世代黄铜矿被辉砷钴矿交代;f-i. 第一世代黄铜矿被辉砷钴矿交代的 Fe-Cu-Co-As 面扫描图像;j. 辉砷钴矿与铜蓝交生;k. 硫砷铜银矿呈细脉穿插辉砷钴矿;

1. 硫砷铜银矿呈细脉状分布在砷黝铜矿中;m~n. 第二世代黄铜矿位于砷黝铜矿边部;o. 第二世代黄铜矿穿插硫砷铜银矿;
a~b,n,o. 反射光照片;c~e,j~m. 背散射照片;f~i. Fe、Cu、Co、As元素面扫描照片
As-Sty—硫砷铜银矿;As-Tt—砷黝铜矿;Ccp—黄铜矿;Cob—辉砷钴矿;Cov—铜蓝;Lm—褐铁矿;Mag—磁铁矿;Py—黄铁矿

Fig. 5 Photomicrographs of the Ag-bearing Cu-Co ores from the Weiquan Cu-Ag deposit, Xinjiang

a~b. Cobaltite on the margin of chalcopyrite;c. Coexisting tennantite and early-stage chalcopyrite;d. Tennantite on the margin of the early-stage chalcopyrite;e. Early-stage chalcopyrite replaced by cobaltite;f~i. X-ray scanning images of Fe-Cu-Co-As, showing the replacement of early-stage chalcopyrite by cobaltite;j. Coexisting cobaltite and covellite;k. As-bearing stromeyerite veins cross-cutting cobaltite;l. As-bearing stromeyerite veins cross-cutting tennantite;m~n. Late-stage chalcopyrite on the margin of tennantite;o. Late-stage chalcopyrite cross-cutting As-bearing stromeyerite;a~b,n,o. Reflected crossed nicols;c~e,j~m. BSE images;f~i. X-ray scanning image of Fe-Cu-Co-As (f-i)

As-Sty—As-bearing stromeyerite;As-Tt—Tennantite;Ccp—Chalcopyrite;Cob—Cobaltite;Cov—Covellite;

Lm—Limonite;Mag—Magnetite;Py—Pyrite

矿₂呈细线分布于砷黝铜矿边部(图5m、n),也可见黄铜矿₂穿插硫砷铜银矿(图5o),或切穿含砷黝铜矿的硫砷铜银矿脉(图5l)。

2.4 银矿石

笔者采集银矿石样品1件(WQK-9)。该矿石原岩为细晶灰岩,致密块状、碎裂状,灰白色,金属矿物较少,但常见发丝状自然银。这些自然银暴露在空中很快会氧化消失。镜下可见沿灰岩的碎裂处有金属矿化及碳酸盐重结晶,其他蚀变不强。金属矿物见以微晶斜方砷铁矿和毒砂集合体为主,在其边部可见辉银矿和自然银细脉,有的自然银细脉穿插毒砂集合体(图6a、b)。显微镜下可以识别出2组金属矿物组合:①斜方砷铁矿+毒砂(图6c~e);②硫砷铜银矿+黄铜矿+自然银+辉银矿+方钴矿:共生的黄铜矿与硫砷铜银矿穿插斜方砷铁矿(图6c),辉银矿呈细脉穿插毒砂(图6a),辉银矿与硫砷铜银矿共生(图6f),自然银与辉银矿共生(图6g),方钴矿分布在斜方砷铁矿的边缘或呈脉状穿切斜方砷铁矿(图6h~l)。

2.5 含钴铁铜矿石

笔者采集含钴铁铜矿石样品1件(WQK-1)。该矿石手标本呈灰绿色,见黄铜矿等矿石矿物呈斑块状不均匀分布于蚀变火山岩中。金属矿物以黄铜矿为主,其次为磁铁矿,有少量黄铁矿、闪锌矿、方铅矿及辉砷钴矿(图7a、b)。铜矿化发育于凝灰岩中,与绿泥石化密切相关,铜矿化处绿泥石化强。绿泥石化、铜矿化矿物又被碳酸盐脉穿插,表明碳酸盐化晚(图7c)。电子显微镜下可见辉砷钴矿在黄铜矿中呈网脉,可能晚于黄铜矿(图7d~f)。磁铁矿与黄铜矿、闪锌矿、方铅矿共生,但黄铜矿被辉铜矿交代,与褐铁矿共生。因此可识别出3个阶段的矿物组合,从早到晚生成顺序为:①磁铁矿+黄铜矿+闪锌矿+方铅矿组合;②辉砷钴矿;③辉铜矿+褐铁矿组合。

2.6 铅银铜矿石

笔者采集铅银铜矿石样品1件(WQK-3)。该矿石手标本上可见主要由黄铜矿和方铅矿组成,金属矿物含量>80%,块状构造,矿物颗粒较细。金属矿物主要由黄铜矿(60%)组成,其次为方铅矿(10%)、黄铁矿(5%)和硫砷铜银矿(5%)。非金属矿物含量<20%,以石英为主。可以识别出4组金属矿物组合,从早到晚生成顺序为:①黄铁矿:黄铁矿较早,被黄铜矿包裹呈残留状(图8a);②方铅矿+第一世代黄铜矿(黄铜矿₁):方铅矿、黄铜矿₁和硫砷铜银矿互相穿插(图8a、b);③硫砷铜银矿:硫砷铜银矿穿插黄铜矿(图8c);④第二世代黄铜矿(黄铜矿₂):可见黄铜矿₂在硫砷铜银矿边部呈环边(图8b)。

3 主要金属矿物化学成分

前人报道该矿床中的金属矿物有辉银矿、自然银、黄铜矿、辉铜矿、铜蓝、斑铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁铁矿、黄铁矿、毒砂。刘妍等(2017)在银矿石中还发现了与银矿物共生的自然铋、辉铋矿、硫铋银矿3种铋矿物。笔者利用偏反光显微镜和电子显微镜在该矿床的矿石中找到了除铋矿物外的所有矿物,另外在含银铜钴矿石、铜矿石和石榴子石矽卡岩中还发现较多的辉砷钴矿、硫砷铜银矿、砷黝铜矿、斜方砷铁矿和方钴矿等多种富砷金属矿物。此外,还发现了一粒铜锌合金。为了准确鉴定矿石中的主要金属矿物,对辉砷钴矿、硫砷铜银矿、砷黝铜矿、黄铜矿、铜蓝、方铅矿、毒砂、铜锌合金进行了电子探针分析。测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室JXA8230型电子探针上完成,测试条件为:加速电压20 kV,电流 2×10^{-8} A,束斑直径2~5 μm 。测试结果见表1。

(1)辉砷钴矿:分析数据全部来自含银铜钴矿

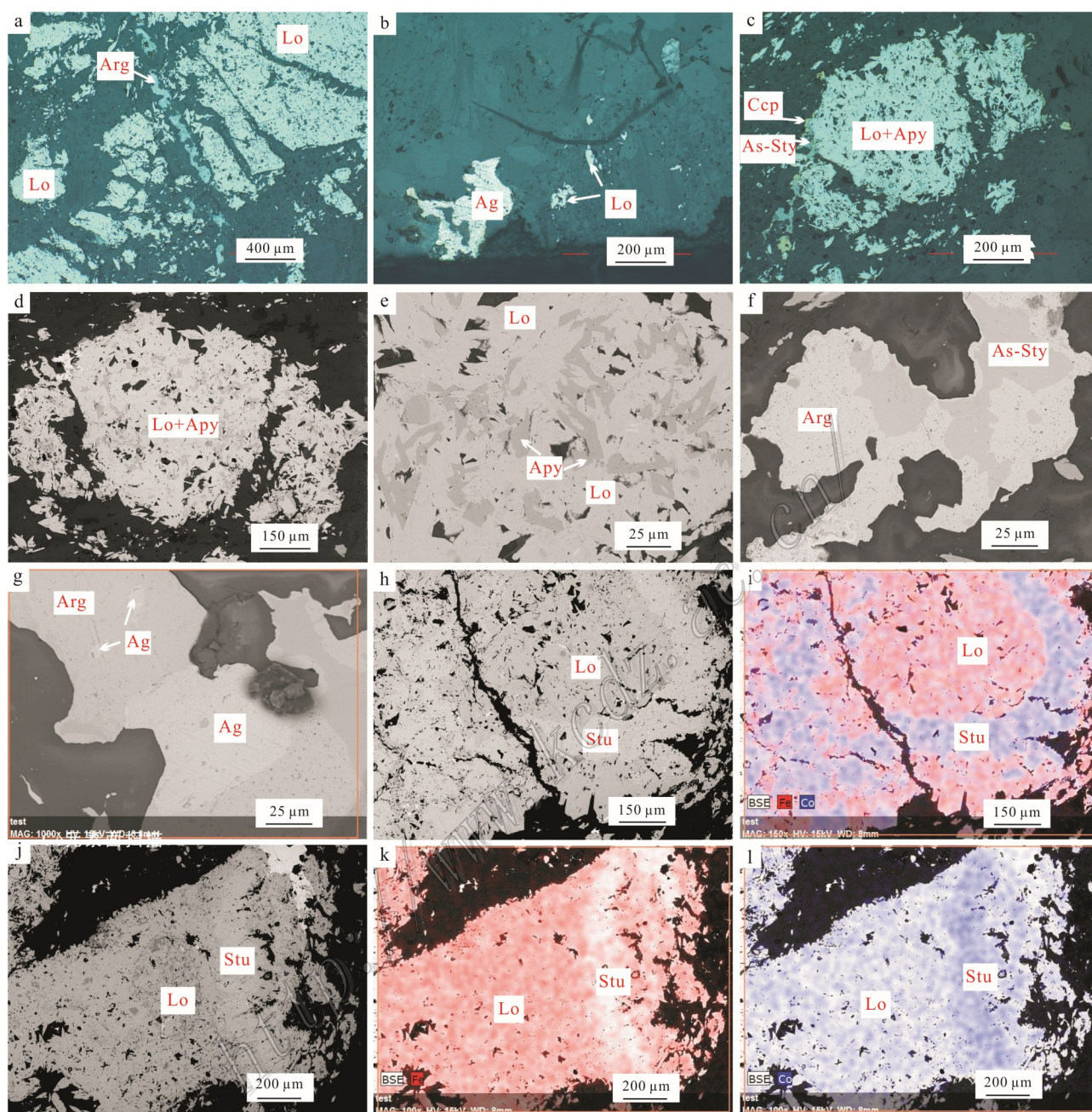


图 6 新疆维权银铜矿床银矿石镜下特征

a~b. 矿石中自然银和辉银矿细脉;c. 共生的黄铜矿与硫砷铜银矿穿插斜方砷铁矿和毒砂集合体;d~e. 斜方砷铁矿和毒砂共生;f. 辉银矿与硫砷铜银矿共生;g. 自然银与辉银矿共生;h~l. 方钴矿分布在斜方砷铁矿的边缘或呈脉状穿插斜方砷铁矿;a~c. 反射光照片;

d~h, j. 背散射照片;i, k, l. Co-Fe元素面扫描照片

Ag—自然银;Apy—毒砂;Arg—辉银矿;As-Sty—硫砷铜银矿;Ccp—黄铜矿;Lo—斜方砷铁矿;Stu—方钴矿

Fig. 6 Photomicrographs of the silver ores from the Weiquan Cu-Ag deposit

a~b. Natural silver and argentite veins in ores;c. Coexisting chalcopyrite and As-bearing stromeyerite cross-cutting aggregates of arsenopyrite and loellingite;d~e. Coexisting arsenopyrite and loellingite;f. Coexisting argentite and As-bearing stromeyerite;g. Coexisting natural silver and argentite;h~l. Skutterudite cross-cutting or on the margin of loellingite;a~c. Reflected polarized light;d~h, j. BSE images;

i, k, l. X-ray scanning image of Co and Fe

Ag—Natural silver;Apy—Arsenopyrite;Arg—Argentite;As-Sty—As-bearing stromeyerite;

Ccp—Chalcopyrite;Lo—Loellingite;Stu—Skutterudite

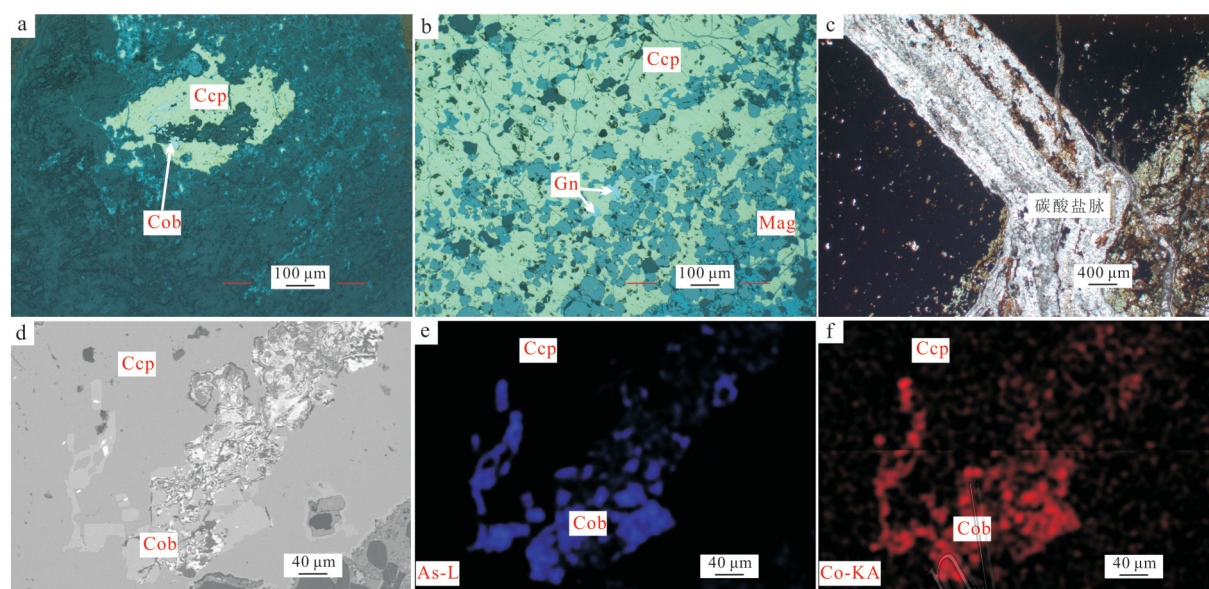


图7 新疆维权银铜矿床含钴铁铜矿石镜下特征

a~b. 金属矿物组成包括辉砷钴矿、黄铜矿、方铅矿、磁铁矿;c. 铜矿化被碳酸盐脉穿插;d~f. 辉砷钴矿晚于黄铜矿;

a~b. 反射光照片;c. 透射光;d. 背散射照片;e, f. As、Co元素面扫描照片

Ccp—黄铜矿;Cob—辉砷钴矿;Gn—方铅矿;Mag—磁铁矿

Fig. 7 Photomicrographs of the Co-bearing Fe-Cu ores from the Weiwan Cu-Ag deposit, Xinjiang.

a~b. Metallic minerals including cobaltite, chalcopyrite, galena and magnetite;c. Veins of carbonate minerals cross-cutting chalcopyrite;

d~f. Cobaltite later than chalcopyrite;a~b. Reflected crossed nicols;c. Plainlight;d. BSE image;e, f. X-ray scanning image of As and Co elements

Ccp—Chalcopyrite;Cob—Cobaltite;Gn—Galena;Mag—Magnetite

石。辉砷钴矿主要由 Co (27.19%~31.20%)、As (0.05%~0.75%)。分子式为 $\text{Co}_{0.9-0.8}\text{As}_{1.1-1.0}\text{S}_{1.0}$, 与标准分子式 (CoAsS) 相比, Co 相对亏损 (表 1), 可能是 Fe、Ni 类质同象替代 Co 的缘故。

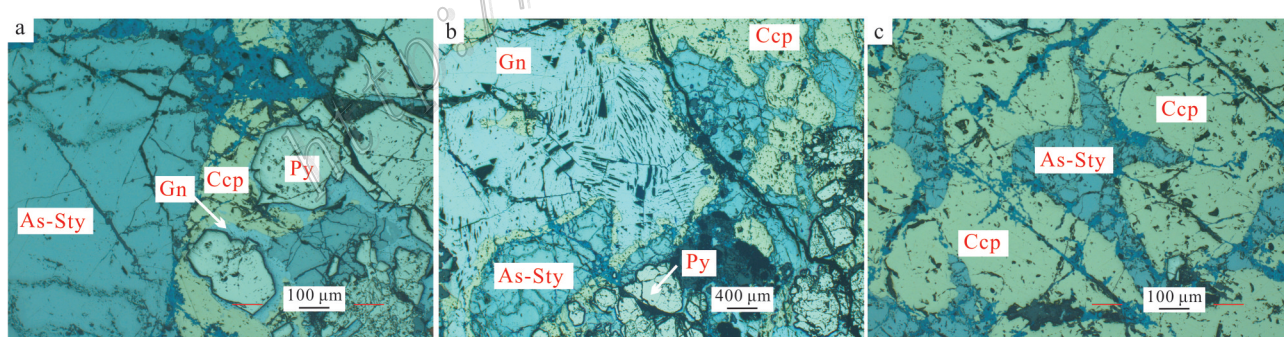


图8 新疆维权银铜矿床铅银铜矿石镜下特征,反射光照片

a. 较早形成的黄铁矿被黄铜矿包裹,黄铜矿、方铅矿、硫砷铜银矿共生;b. 第一代黄铜矿与方铅矿、硫砷铜银矿共生,第二世代的黄铜矿呈环边环绕硫砷铜银矿;c. 硫砷铜银矿穿插黄铜矿

As-Sty—硫砷铜银矿;Ccp—黄铜矿;Gn—方铅矿;Py—黄铁矿

Fig. 8 Photomicrographs of the Pb-Ag-Cu ores from the Weiwan Cu-Ag deposit, Xinjiang (Reflected polarized light)

a. Early formed pyrite enclosed by chalcopyrite, and chalcopyrite coexisting with galena and As-bearing stromeyerite;b. Early-stage chalcopyrite coexisting with galena and As-bearing stromeyerite, and late-stage chalcopyrite surrounding As-bearing stromeyerite;

c. As-bearing stromeyerite cross-cutting chalcopyrite

As-Sty—As-bearing stromeyerite;Ccp—Chalcopyrite;Gn—Galena;Py—Pyrite

表1 新疆维权银铜矿床部分金属矿物电子探针分析结果(w(B) %)

Table 1 Electron microprobe analyses (w(B) %) of metal minerals from the Weiquan Cu-Ag deposit, Xinjiang

组分	As	S	Te	Bi	Sb	Pb	Fe	Cu	Zn	Co	In	Ag	Cd	Sn	Ni	总和	矿石类型	矿物	化学式
WQ6-2	45.1	19.24	0.02	0	0	0.13	2.89	0.2	0	31.2	0	0.02	0.01	0.01	1.47	100.34	含银铜钴矿石	辉钼矿	$\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{As}_{1.0}\text{S}_{1.0}$
WQ6-8	46.56	19.02	0	0.11	0	0	2.14	0.23	0	30.63	0.02	0.04	0	0.45	1.36	100.54	含银铜钴矿石	辉钼矿	$\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{As}_{1.0}\text{S}_{1.0}$
WQ6-3	45.45	19.19	0	0	0	0	2.39	0.4	0	30.53	0	0.74	0.01	0.01	1.19	99.91	含银铜钴矿石	辉钼矿	$\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{As}_{1.0}\text{S}_{1.0}$
WQ6-9	46.67	18.84	0.03	0	0	0.04	2.35	0.58	0	30.19	0	0.09	0	0	1.59	100.38	含银铜钴矿石	辉钼矿	$\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{As}_{1.0}\text{S}_{1.0}$
WQ6-17	46.66	18.74	0	0	0	0	2.54	0.11	0	30.03	0	0.03	0	0.01	1.93	100.05	含银铜钴矿石	辉钼矿	$\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{As}_{1.0}\text{S}_{1.0}$
WQ6-18	46.78	18.91	0	0	0	0	2.68	0.43	0	29.93	0.01	0	0.02	0	1.64	100.42	含银铜钴矿石	辉钼矿	$\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{As}_{1.0}\text{S}_{1.0}$
WQ6-11	46.22	19.13	0	0	0	0.09	2.66	0.05	0.01	29.9	0	0.03	0.01	0.46	1.73	100.31	含银铜钴矿石	辉钼矿	$\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{As}_{1.0}\text{S}_{1.0}$
WQ6-16	46.63	18.99	0.03	0	0.02	0	2.47	0.17	0	29.62	0	0.04	0	0.04	1.87	99.95	含银铜钴矿石	辉钼矿	$\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{As}_{1.0}\text{S}_{1.0}$
WQ6-15	46.65	19.26	0.05	0	0	0	2.48	0.11	0	29.58	0	0.01	0	0.47	2.03	100.69	含银铜钴矿石	辉钼矿	$\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{As}_{1.0}\text{S}_{1.0}$
WQ6-5	46.08	19.22	0.05	0	0	0.07	2.51	0.15	0.03	29.54	0	0.03	0	0.48	1.6	99.76	含银铜钴矿石	辉钼矿	$\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{As}_{1.0}\text{S}_{1.0}$
WQ6-10	46.8	19.27	0.05	0	0	0	2.92	0.4	0	28.46	0	0.04	0.02	0.02	2.18	100.15	含银铜钴矿石	辉钼矿	$\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{As}_{1.0}\text{S}_{1.0}$
WQ6-19	47.78	18.63	0.05	0	0	0.04	2.76	0.75	0.04	27.19	0	0	0.01	0	1.75	99.03	含银铜钴矿石	辉钼矿	$\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{As}_{1.0}\text{S}_{1.0}$
WQ5-5	21.04	36.95	0.02	0	0	0	11.43	0.17	0.01	30.59	0	0.02	0	0.04	0.21	100.48	含银铜钴矿石	含铁硫砷钴矿	$\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}\text{Cu}_{0.1}\text{As}_{0.9}\text{S}_{1.6}$
WQ5-1	40.78	22	0	0	0	0.05	5.76	4.75	0	26.32	0.03	0.01	0.01	0.92	0.55	100.27	含银铜钴矿石	含铁铜辉砷钴矿	$\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}\text{Cu}_{0.1}\text{As}_{0.9}\text{S}_{1.1}$
WQ14-2	6.81	16.77	0.15	0.08	0.18	0.06	0.82	12.53	0.05	0.05	0	61.2	0.19	0.12	0	99.08	铜矿石	硫砷铜银矿	$(\text{Ag}_{11.9}\text{Cu}_{4.1}\text{Fe}_{0.3})_{16.3}\text{As}_{1.9}\text{S}_{11.0}$
WQ14-5	6.9	16.96	0.05	0	0.57	0	0.41	12.44	0.02	0.02	0	62.91	0.15	0.1	0.02	100.64	铜矿石	硫砷铜银矿	$(\text{Ag}_{12.1}\text{Cu}_{4.0}\text{Fe}_{0.2})_{16.3}(\text{As}_{1.9}\text{Sb}_{0.1})_{2.0}\text{S}_{11.0}$
WQ14-1	7.08	16.97	0.14	0	0.09	0.05	0.96	12.08	0.06	0	0	61.71	0.22	0.1	0.01	99.61	铜矿石	硫砷铜银矿	$(\text{Ag}_{11.8}\text{Cu}_{3.9}\text{Fe}_{0.4})_{16.1}\text{As}_{2.0}\text{S}_{11.0}$
WQ6-1	7.11	17.41	0.14	0	0	0	0.06	16.79	0	0.04	0	58.8	0.15	0.13	0.01	100.7	含银铜钴矿石	硫砷铜银矿	$(\text{Ag}_{11.0}\text{Cu}_{3.3})_{16.3}\text{As}_{1.9}\text{S}_{11.0}$
WQ6-13	7.4	17.46	0.13	0	0	0.06	0	16.75	0	0.02	0	58.08	0.13	0	0.01	100.09	含银铜钴矿石	硫砷铜银矿	$(\text{Ag}_{10.8}\text{Cu}_{3.3})_{16.1}\text{As}_{2.0}\text{S}_{11.0}$
WQ6-12	7.32	17.62	0.09	0.1	0	0	0	16.58	0	0	0	58.16	0.15	0.11	0	100.22	含银铜钴矿石	硫砷铜银矿	$(\text{Ag}_{10.8}\text{Cu}_{3.2})_{16.0}\text{As}_{2.0}\text{S}_{11.0}$
WQ6-14	7.27	17.63	0.13	0	0	0.04	0.01	16.52	0	0	0	58.64	0.14	0.15	0.03	100.59	含银铜钴矿石	硫砷铜银矿	$(\text{Ag}_{10.9}\text{Cu}_{3.2})_{16.1}\text{As}_{1.9}\text{S}_{11.0}$
WQ10-28	4	16.26	0	0	4.86	0	0.75	9.66	0.02	0.04	0	63.85	0.2	0	0.01	99.69	石榴子石砂卡岩	硫砷铜银矿	$(\text{Ag}_{12.7}\text{Cu}_{3.2}\text{Fe}_{0.3})_{16.2}(\text{As}_{1.1}\text{Sb}_{0.7})_{2.0}\text{S}_{11.0}$
WQ10-13	4.54	16.53	0	0	3.8	0	0.63	12.38	0.04	0.03	0	61.46	0.24	0	0.02	99.72	石榴子石砂卡岩	硫砷铜银矿	$(\text{Ag}_{12.0}\text{Cu}_{4.2}\text{Fe}_{0.2})_{16.4}(\text{As}_{1.3}\text{Sb}_{0.7})_{2.0}\text{S}_{11.0}$
WQ10-25	4.85	15.47	0	0.01	2.86	0	0.89	10.86	0	0.02	0	64.64	0.16	0.02	0	99.82	石榴子石砂卡岩	硫砷铜银矿	$(\text{Ag}_{13.7}\text{Cu}_{3.8}\text{Fe}_{0.3})_{17.8}(\text{As}_{1.5}\text{Sb}_{0.5})_{2.0}\text{S}_{11.0}$
WQ10-30	4.87	16.55	0	0.02	3.49	0.01	0.49	10.19	0.04	0.01	0	64.9	0.22	0	0	100.83	石榴子石砂卡岩	硫砷铜银矿	$(\text{Ag}_{12.7}\text{Cu}_{3.4}\text{Fe}_{0.2})_{16.3}(\text{As}_{1.4}\text{Sb}_{0.6})_{2.0}\text{S}_{11.0}$
WQ10-11	4.8	16.91	0	0.02	3.77	0.16	0.8	12.52	0	0	0	60.94	0.24	0	0	100.24	石榴子石砂卡岩	硫砷铜银矿	$(\text{Ag}_{11.7}\text{Cu}_{4.1}\text{Fe}_{0.3})_{16.2}(\text{As}_{1.3}\text{Sb}_{0.6})_{1.9}\text{S}_{11.0}$
WQ5-9	20.88	28.06	0	0	0	0.03	3.98	44.95	0.73	0.86	0	0.16	0.02	0	0	99.66	含银铜钴矿石	砷黝铜矿	$(\text{Cu}_{10.4}\text{Fe}_{1.1})_{11.5}\text{As}_{4.1}\text{S}_{13.0}$
WQ5-4	20.48	28.07	0	0	0.03	0.06	3.8	45.69	0.63	0.52	0.03	0.16	0	0	0	99.49	含银铜钴矿石	砷黝铜矿	$(\text{Cu}_{10.7}\text{Fe}_{1.0})_{11.7}\text{As}_{4.1}\text{S}_{13.0}$
WQ10-2	19.86	27.87	0	0	1.32	0.04	6.39	41.66	0.81	0.08	0	1.28	0.02	0	0	99.34	石榴子石砂卡岩	砷黝铜矿	$(\text{Cu}_{9.8}\text{Fe}_{1.7})_{11.5}(\text{As}_{3.9}\text{Sb}_{0.2})_{4.1}\text{S}_{13.0}$

续表 1
Continued Table 1

组分	As	S	Te	Bi	Sb	Pb	Fe	Cu	Zn	Co	In	Ag	Cd	Sn	Ni	总和	矿石类型	矿物	化学式
WQ10-7	19.7	27.67	0	0	1.15	0.04	8.01	40.63	0.82	0.02	0	1.28	0	0	0	99.32	石榴子石砂卡岩	砷黝铜矿	$(\text{Cu}_{9.6}\text{Fe}_{2.2})_{11.8}(\text{As}_{4.0}\text{Sb}_{0.1})_{4.1}\text{S}_{13.0}$
WQ10-31	19.43	28.3	0	0	1.25	0.09	7.25	41.54	0.9	0.01	0	1.02	0.01	0	0.01	99.82	石榴子石砂卡岩	砷黝铜矿	$(\text{Cu}_{9.7}\text{Fe}_{1.9})_{11.6}(\text{As}_{3.8}\text{Sb}_{0.2})_{4.0}\text{S}_{13.0}$
WQ10-9	19.78	27.82	0	0	1.5	0	6.52	41.49	0.88	0.01	0	2.05	0.01	0	0	100.08	石榴子石砂卡岩	砷黝铜矿	$(\text{Cu}_{9.8}\text{Fe}_{1.8})_{11.6}(\text{As}_{3.9}\text{Sb}_{0.2})_{4.1}\text{S}_{13.0}$
WQ10-20	19.24	27.74	0	0.02	1.77	0	6.53	42.08	0.9	0	0	1.23	0	0	0	99.51	石榴子石砂卡岩	砷黝铜矿	$(\text{Cu}_{9.9}\text{Fe}_{1.8})_{11.7}(\text{As}_{3.9}\text{Sb}_{0.2})_{4.1}\text{S}_{13.0}$
WQ10-19	19.5	27.79	0	0	1.47	0	6.68	41.65	0.89	0	0	1.27	0.01	0	0	99.32	石榴子石砂卡岩	砷黝铜矿	$(\text{Cu}_{9.8}\text{Fe}_{1.8})_{11.6}(\text{As}_{3.9}\text{Sb}_{0.2})_{4.1}\text{S}_{13.0}$
WQ10-18	19.29	27.74	0	0	1.45	0	6.71	42.54	0.86	0	0	1.32	0.03	0	0	99.94	石榴子石砂卡岩	砷黝铜矿	$(\text{Cu}_{10.0}\text{Fe}_{1.8})_{11.8}(\text{As}_{3.9}\text{Sb}_{0.2})_{4.1}\text{S}_{13.0}$
WQ10-1	19.49	28.16	0	0	1.35	0.01	6.5	41.54	0.77	0	0	1.5	0.04	0	0	99.37	石榴子石砂卡岩	砷黝铜矿	$(\text{Cu}_{9.8}\text{Fe}_{1.8})_{11.6}(\text{As}_{3.8}\text{Sb}_{0.2})_{4.0}\text{S}_{13.0}$
WQ10-3	19.55	27.8	0	0.05	1.27	0	6.58	42.46	0.88	0	0	1.55	0.02	0	0	100.16	石榴子石砂卡岩	砷黝铜矿	$(\text{Cu}_{10.0}\text{Fe}_{1.8})_{11.8}(\text{As}_{3.9}\text{Sb}_{0.2})_{4.1}\text{S}_{13.0}$
WQ6-7	0	34.3	0.01	0	0	0.05	30.07	34.8	0.01	0.17	0	0.2	0.03	0	0	99.69	含银铜钴矿石	黄铜矿	$\text{Cu}_{10}\text{Fe}_{10}\text{S}_{20}$
WQ6-4	0	34.56	0.02	0	0	0	30.23	34.22	0	0.13	0	0.06	0.02	0	0	99.25	含银铜钴矿石	黄铜矿	$\text{Cu}_{10}\text{Fe}_{10}\text{S}_{20}$
WQ5-8	0	34.5	0	0	0	0	29.94	34.6	0.03	0.06	0.03	0.01	0	0	0	99.18	含银铜钴矿石	黄铜矿	$\text{Cu}_{10}\text{Fe}_{10}\text{S}_{20}$
WQ5-3	0.01	34.48	0.01	0	0	0.07	29.93	34.72	0.07	0.04	0	0.01	0.02	0.01	0	99.4	含银铜钴矿石	黄铜矿	$\text{Cu}_{10}\text{Fe}_{10}\text{S}_{20}$
WQ6-6	0.17	34.48	0.03	0	0	0.11	30.18	34.63	0.04	0.04	0	0.6	0.02	0	0	100.3	含银铜钴矿石	黄铜矿	$\text{Cu}_{10}\text{Fe}_{10}\text{S}_{20}$
WQ5-2	0	34.95	0.01	0	0.01	0	29.79	34.83	0.01	0.03	0	0.03	0	0	0	99.71	含银铜钴矿石	黄铜矿	$\text{Cu}_{10}\text{Fe}_{10}\text{S}_{20}$
WQ14-3	0.2	34.19	0	0	0.18	0.07	29.93	34.51	0.01	0.07	0	0.61	0.03	0	0	99.8	铜矿石	黄铜矿	$\text{Cu}_{10}\text{Fe}_{10}\text{S}_{20}$
WQ14-4	0.49	34.56	0	0	0.22	0.07	30.08	33.59	0.03	0.03	0	0.85	0.02	0	0	99.96	铜矿石	黄铜矿	$\text{Cu}_{10}\text{Fe}_{10}\text{S}_{20}$
WQ14-6	0.49	34.64	0	0	0.17	0	30.03	34.26	0.29	0.05	0	0.15	0	0	0	100.08	铜矿石	黄铜矿	$\text{Cu}_{10}\text{Fe}_{10}\text{S}_{20}$
WQ10-29	0.08	34.66	0	0	0.16	0.03	30.35	34.41	0	0.04	0	0	0.03	0	0	99.77	石榴子石砂卡岩	黄铜矿	$\text{Cu}_{10}\text{Fe}_{10}\text{S}_{20}$
WQ10-21	0.19	34.41	0	0	0.06	0.1	30.37	34.63	0.03	0.03	0	0.03	0.01	0	0.02	99.89	石榴子石砂卡岩	黄铜矿	$\text{Cu}_{10}\text{Fe}_{10}\text{S}_{20}$
WQ10-24	0.11	34.3	0	0	0.12	0.08	30.34	34.73	0	0.03	0.02	0.04	0	0	0	99.78	石榴子石砂卡岩	黄铜矿	$\text{Cu}_{10}\text{Fe}_{10}\text{S}_{20}$
WQ5-7	0	32.51	0	0	0	0.02	0.24	66.69	0.04	0	0	0.24	0.03	0	0	99.79	含银铜钴矿石	铜蓝	CuS
WQ10-15	0	13.06	0.08	0	0	86.02	0	0.05	0.03	0	0	0	0.1	0	0.01	99.92	石榴子石砂卡岩	方铅矿	$\text{Pb}_{10}\text{S}_{10}$
WQ10-16	0	12.97	0.08	0	0	84.66	0.15	0.84	0	0	0	0	0.13	0.03	0	99.11	石榴子石砂卡岩	方铅矿	$\text{Pb}_{10}\text{S}_{11}$
WQ10-17	0	12.99	0.04	0	0	85.03	0.05	0	0	0	0	0	0.32	0	0.02	98.78	石榴子石砂卡岩	方铅矿	$\text{Pb}_{10}\text{S}_{12}$
WQ5-6	0	22.94	0	0	0	0	5.35	70.62	0.04	0.01	0	0.43	0	0.01	0	99.41	含银铜钴矿石	斑铜矿	$\text{Cu}_{63}\text{Fe}_{0.5}\text{S}_{4.0}$
WQ10-4	43.87	20.79	0.08	0	0	0.76	34.81	0.13	0	0.08	0	0.04	0	0	0.13	100.74	石榴子石砂卡岩	毒砂	$\text{Fe}_{10}\text{As}_{0.9}\text{S}_{1.1}$
WQ10-5	44.69	20.59	0.16	0	0	0.07	35.03	0.09	0	0.06	0.01	0	0.01	0.01	0	100.72	石榴子石砂卡岩	毒砂	$\text{Fe}_{10}\text{As}_{1.0}\text{S}_{1.0}$
WQ10-27	0	0.02	0	0	0	0.62	1.36	59.02	37.51	0.01	0	0.05	0.01	0.39	0.28	99.29	石榴子石砂卡岩	铜锌合金	
WQ10-26	0	0.02	0	0	0	1.46	1.32	59.02	37.81	0	0.02	0	0	0.48	0.22	100.37	石榴子石砂卡岩	铜锌合金	

(2) 硫砷铜银矿:分析数据来自含银铜钴矿石、铜矿石和石榴子石矽卡岩。硫砷铜银矿主要由 Ag (58.08%~64.90%)、Cu (9.66%~16.79%)、S (15.47%~17.63%)、As (4.00%~7.40%) 组成,有时含 Fe (0~0.96%)、Sb (0~4.86%)。分子式为 $\text{Ag}_{12.8-10.8}\text{Cu}_{5.3-3.2}\text{Fe}_{0.4-0.0}\text{S}_{11.0-10.3}\text{As}_{2.0-1.1}\text{Sb}_{0.9-0.0}$, 考虑到 Fe 与 Cu 的类质同象替换和 Sb 和 As 的类质同象替换,该分子式与硫砷铜银矿的标准分子式 $(\text{Ag,Cu})_{16}\text{S}_{11}\text{As}_2$ 十分接近。不同样品中硫砷铜银矿的组成有一定差异:含银铜钴矿石中硫砷铜银矿 $w(\text{As})$ (7.11%~7.40%)、 $w(\text{S})$ (17.41%~17.63%)、 $w(\text{Cu})$ (16.52%~16.79%) 高于石榴子石矽卡岩中硫砷铜银矿 ($w(\text{As})$ 4.00%~4.87%, $w(\text{S})$ 15.47%~16.91%, $w(\text{Cu})$ 9.66%~12.52%), 而前者的 $w(\text{Ag})$ (58.08%~58.80%)、 $w(\text{Fe})$ (0~0.06%)、 $w(\text{Sb})$ (0%) 低于后者 ($w(\text{Ag})$ 60.94%~64.90%, $w(\text{Fe})$ 0.49%~0.89%, $w(\text{Sb})$ 2.86%~4.86%), 铜矿石中硫砷铜银矿的 $w(\text{As})$ (6.81%~7.08%)、 $w(\text{S})$ (16.77%~16.97%)、 $w(\text{Cu})$ (12.08%~12.53%)、 $w(\text{Ag})$ (61.20%~62.91%)、 $w(\text{Fe})$ (0.41%~0.93%)、 $w(\text{Sb})$ (0.09%~0.57%) 介于上述银铜钴矿石和石榴子石矽卡岩之间,这可能与矽卡岩中铜矿化形成温度高、银铜钴矿化温度低有关。在较高温度下,更容易发生类质同象替代,因此矽卡岩中的硫砷铜银矿中有大量 Sb 类质同象替代 As, Fe 类质同象替代 Cu。

(3) 砷黝铜矿:分析数据来自含银铜钴矿石和石榴子石矽卡岩。砷黝铜矿主要由 Cu (40.63%~45.69%)、S (27.67%~28.30%)、As (19.24%~20.88%) 组成,分子式为 $\text{Cu}_{9.7-10.8}\text{As}_{3.9-4.2}\text{S}_{13.1-13.3}$, 与标准分子式 $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$ 相比, Cu 明显亏损,这可能与 Fe 对 Cu 的类质同象替代有关,矿物中 $w(\text{Fe})$ 为 3.80%~8.01%。不同来源砷黝铜矿的组成有一定差异:含银铜钴矿石中砷黝铜矿 $w(\text{Cu})$ (44.95%~45.69%)、 $w(\text{As})$ (20.48%~20.88%)、 $w(\text{Co})$ (0.52%~0.86%) 高于石榴子石矽卡岩中砷黝铜矿 ($w(\text{Cu})$ 40.63%~42.54%, $w(\text{As})$ 19.24%~19.86%, $w(\text{Co})$ 0~0.08%), 而含银铜钴矿石中砷黝铜矿 $w(\text{Fe})$ (3.80%~3.98%)、 $w(\text{Sb})$ (0~0.03%)、 $w(\text{Ag})$ (0.16%)、 $w(\text{Zn})$ (0.63%~0.73%) 低于石榴子石矽卡岩中砷黝铜矿 ($w(\text{Fe})$ 6.39%~8.01%, $w(\text{Sb})$ 1.15%~1.77%, $w(\text{Ag})$ 1.02%~2.05%, $w(\text{Zn})$ 0.77%~0.90%)。这种差异可能是形成矽卡岩的高温条件下砷黝铜矿中发生了 Fe 对 Cu、Sb 对 As 等的类质同象替换,也可能是与矽卡岩成因联系不大的另一期 Co 矿化叠加的结果。

(4) 黄铜矿:分析数据来自含银铜钴矿石、铜矿

石和石榴子石矽卡岩。黄铜矿主要由 Cu (33.59%~34.83%)、Fe (29.79%~30.37%)、S (34.19%~34.95%) 组成,分子式 $\text{Cu}_{1.0}\text{Fe}_{1.0}\text{S}_{2.0}$, 与标准分子式 CuFeS_2 一致。

(5) 铜蓝:分析数据来自含银铜钴矿石, Cu 66.69%, $w(\text{S})$ 32.51%, 另外含 $w(\text{Fe})$ 0.24%, $w(\text{Ag})$ 0.24%, 分子式 $\text{Cu}_{1.05}\text{S}_{1.02}$, 与标准分子式 CuS 一致。铜蓝含 Ag 较高,表明其与银矿化一起形成于晚期较低温阶段。

(6) 方铅矿:分析数据来自石榴子石矽卡岩,含 Pb (84.66%~86.02%)、S (12.97%~13.06%), 分子式为 $\text{Pb}_{1.0}\text{S}_{1.0-1.2}$, 与标准分子式 PbS 基本一致。该矿物中含稀散元素 Ge (0.22%~0.46%), Cd (0.10%~0.32%), 今后值得关注。

(7) 毒砂:分析数据来自石榴子石矽卡岩,含 Fe (34.81%~35.03%)、S (20.59%~20.79%)、As (43.87%~44.69%), 分子式为 $\text{Fe}_{1.0}\text{S}_{1.0-1.1}\text{As}_{0.9-1.0}$, 与标准分子式 FeSAs 基本一致。

(8) 铜锌合金:分析数据来自石榴子石矽卡岩,含 Cu (59.02%)、Zn (37.51%~37.81%), 另外含 Pb (0.62%~1.46%)、Fe (1.32%~1.36%)、Sn (0.39%~0.48%)、Ni (0.22%~0.38%)。在薄片为一不规则颗粒,需要进一步研究其是矽卡岩中矿物还是外来混入物。

4 讨论

4.1 成矿作用

根据上述矿石类型及其矿物组合特征,可以将本矿床的成矿作用从早到晚划分为铁铜成矿作用、钴成矿作用、铜银成矿作用及表生作用(表2)。

4.1.1 铁铜成矿作用

前人已注意到矿区多金属矿化与矽卡岩化关系密切,为矽卡岩型矿床(张亮亮,2014)。矽卡岩成矿作用形成铁铜矿石和铜矿石,金属矿物组合及其生成顺序从早到晚为:①黄铁矿+毒砂;②黄铜矿+磁铁矿+方铅矿;③砷黝铜矿+铜蓝+黄铜矿;④褐铁矿(表生作用)。该成矿作用磁铁矿与黄铜矿含量相当时为铁铜矿化,以黄铜矿为主时为铜矿化,没有银及钴矿化,也没有相应的银矿物和钴矿物。

铁铜成矿作用可能与矽卡岩化有密切的成因联系,成矿流体为岩浆热液,因为在石榴子石矽卡岩(WQK-2)中石榴子石的间隙中,可见绿泥石、石英、碳酸盐和闪锌矿、黄铁矿、方铅矿、黄铜矿等金属矿

表2 维权银铜矿床成矿作用及对应的矿石类型和矿物组合
Table 2 Stages of mineralization and associated ore types and mineral assemblages of the Weiquan Ag-Cu deposit, Xinjiang

矿石类型		铁铜成矿作用		钴成矿作用		铜银成矿作用		表生作用	
铜矿石	黄铁矿 毒砂	黄铜矿 磁铁矿 方铅矿	砷黝铜矿 铜蓝						褐铁矿
铁铜矿石	黄铁矿	磁铁矿 黄铜矿	黄铜矿						褐铁矿
含银铜钴矿石			砷黝铜矿 黄铜矿	辉砷钴矿 铜蓝		硫砷铜银矿	黄铜矿		
银矿石	斜方砷铁矿 毒砂					硫砷铜银矿 黄铜矿 自然银 辉银矿 方钴矿			
含钴铁铜矿石		磁铁矿 黄铜矿 闪锌矿 方铅矿		辉砷钴矿					辉铜矿 褐铁矿
铅银铜矿石	黄铁矿	方铅矿 黄铜矿				硫砷铜银矿	黄铜矿		

物充填(图9),表明金属化发生于矽卡岩期。闪锌矿中常见黄铜矿出溶体,但有时可见黄铜矿中包裹黄铁矿并呈细脉穿插闪锌矿,表明黄铜矿与闪锌矿同期但稍晚。

含矿矽卡岩中的角闪石 Ar-Ar 年龄为 (275.7 ± 2.8) Ma(毛景文等,2002;潘成泽等,2005)。王龙生等(2005)认为矽卡岩的形成可能与矿区南部 3 km 的百灵山花岗岩体有关,对岩体中的黑云母花岗岩进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测定,获得其结果为 (297 ± 3) Ma,代表了铁铜成矿年龄的上限。

4.1.2 钴成矿作用

钴成矿作用可能为独立的一期热液成矿作用。因为有的矿石中有含钴矿物,有的矿石中没有。钴成矿作用叠加在铁铜矿化之上形成的含钴铁铜矿石,其中辉砷钴矿明显晚于磁铁矿+黄铜矿+闪锌矿+方铅矿组合,而辉铜矿+褐铁矿组合是表生作用产物。钴成矿作用叠加银成矿作用,形成含银钴铜矿石,其中硫砷铜银矿晚于辉砷钴矿,矿石中未见磁铁矿、黄铁矿、闪锌矿和方铅矿。

矿石矿物辉砷钴矿中 Co 被少量的 Fe 和 Ni 类质同象替代,成分中含有少量的 Fe(2.14%~2.92%)和 Ni(1.19%~2.18%),在 FeAsS-CoAsS-NiAsS 图解上

(图10)投点集中落在 300℃等温线附近,成矿温度约为 290~350℃。

东天山地区含钴矿化的矿床集中形成于石炭纪末—早二叠世:磁海 Fe-(Co)矿床成矿时代为 295~262 Ma(Huang et al., 2013; 陈继平等,2013; 孟庆鹏等,2014; 郑佳浩等,2014; 陈博等,2015);图拉尔根 Cu-Ni-Co 矿床成矿时代为 301 Ma(三金柱等,2010; 焦建刚等,2013);白石泉 Cu-Ni-Co 矿床成矿时代为 285~281 Ma(吴华等,2005;毛启贵等,2006);黄山和黄山东 Cu-Ni-Co 矿床成矿时代为 285~274 Ma(毛景文等,2002; Zhou et al., 2004; 韩宝福等,2004; 顾连兴等,2007; 张小连等,2012)。

4.1.3 铜银成矿作用

王京彬等(2006)认为维权银铜矿床是早石炭世沿康古尔缝合带再次拉张形成的石炭纪裂陷槽在封闭过程中,形成的矽卡岩型银多金属矿床。但韩春明等(2006)认为维权银铜矿床形成于晚石炭世—早二叠世后碰撞构造演化阶段,与喀拉通克、黄山和黄山东等岩浆铜镍硫化物同期。但是,也有人注意到维权银铜矿体跟矽卡岩无空间专属性,认为铜银矿化是海相火山岩期的初步银富集和在构造有利地段的低温热液成矿作用(张亮亮,2014)。笔者也认为

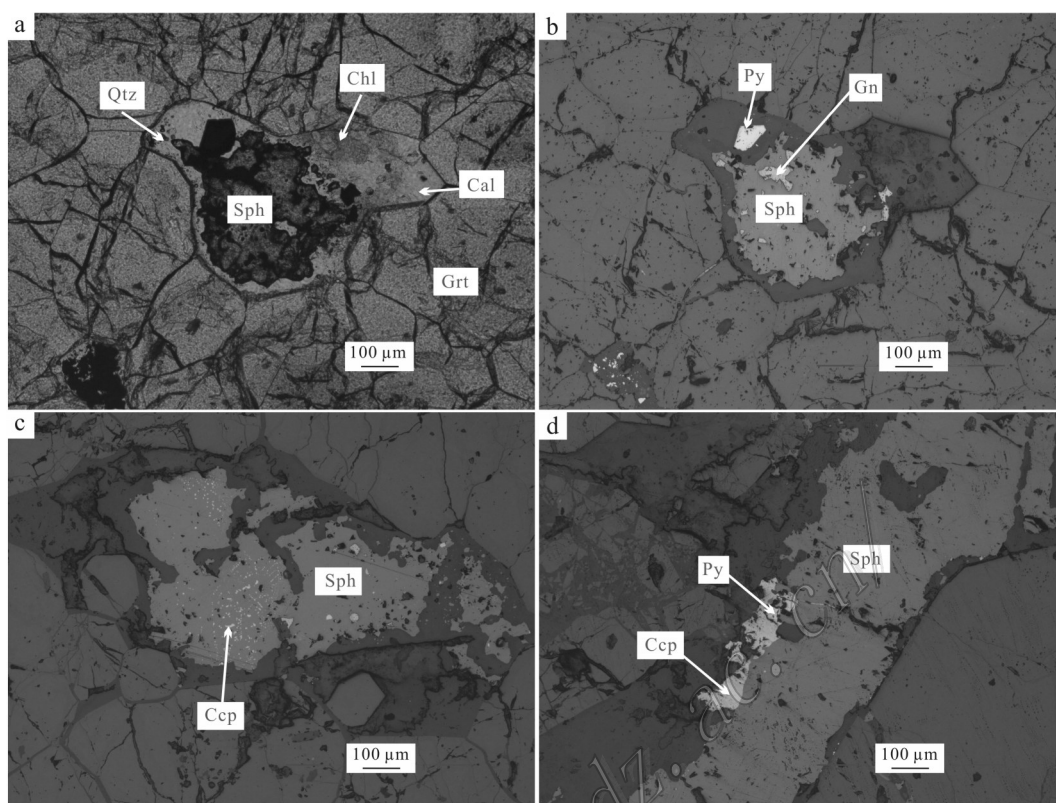


图9 新疆维权银铜矿床石榴子石矽卡岩中石榴子石间隙的矿物组成

a~b. 共生的闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、石英、绿泥石、碳酸盐矿物;c~d. 共生的闪锌矿、黄铜矿和黄铁矿;a. 透射光照片;b~d. 反射光照片
Cal—碳酸盐矿物;Ccp—黄铜矿;Chl—绿泥石;Gn—方铅矿;Grt—石榴子石;Py—黄铁矿;Qtz—石英;Sph—闪锌矿

Fig. 9 Photomicrographs of the interstitial mineral assemblages among garnets of the garnet skarn of the Weiquan Cu-Ag deposit, Xinjiang

a~b. Coexisting sphalerite, galena, pyrite, quartz, chlorite and carbonate minerals;c~d. Coexisting sphalerite, chalcopyrite and pyrite;
a. Plainlight;b~d. Reflected cross nicols

Cal—Carbonate minerals;Ccp—Chalcopyrite;Chl—Chlorite;Gn—Galena;Grt—Garnet;Py—Pyrite;Qtz—Quartz;Sph—Sphalerite

铜银成矿作用为独立的成矿作用,形成的银矿石中金属矿物组合从早到晚为毒砂+斜方砷铁矿、黄铜矿+硫砷铜银矿+自然银+辉银矿,缺少铁铜成矿作用的磁铁矿、方铅矿、闪锌矿(偶见少量方钴矿)。该成矿作用主要发生在碳酸盐岩中,蚀变作用不强。

当铜银成矿作用叠加在铁铜矿化之上时,形成铅银铜矿石,硫砷铜银矿晚于方铅矿+黄铜矿组合。在石榴子石矽卡岩(WQK-10)中石榴子石的间隙和裂隙中,与石英和碳酸盐共生的硫化物除黄铜矿、磁铁矿、方铅矿、砷黝铜矿等(图11a)外,还有辉银矿(图11b)。当铜银成矿作用叠加在钴矿化之上时,形成含银钴铜矿石,硫砷铜银矿晚于辉砷钴矿+铜蓝组合。

区域上重要的含银矿床还有吉源银多金属矿床

和玉西银矿床,维权矿床的银矿化与这两个矿床有类似之处,都主要赋存于碳酸盐岩或强烈碳酸盐化的岩石中。但差异也十分明显,维权矿床的银矿石富砷,其中有大量毒砂,而玉西和吉源矿床中没有毒砂的报道。

4.2 成矿期次及矿物生成顺序

根据上述成矿作用的分析 and 金属矿物之间的相互关系,可以将维权矿床的成矿期次划分沉积期、热液成矿期和表生期(表3)。成矿主要发生于热液成矿期。沉积期在火山岩中形成少量毒砂和斜方砷铁矿,表生期以褐铁矿为主。

热液成矿期从早到晚可分为铁铜成矿阶段、钴成矿阶段和铜银成矿阶段。

(1)铁铜成矿阶段:从早到晚可细分为黄铁矿

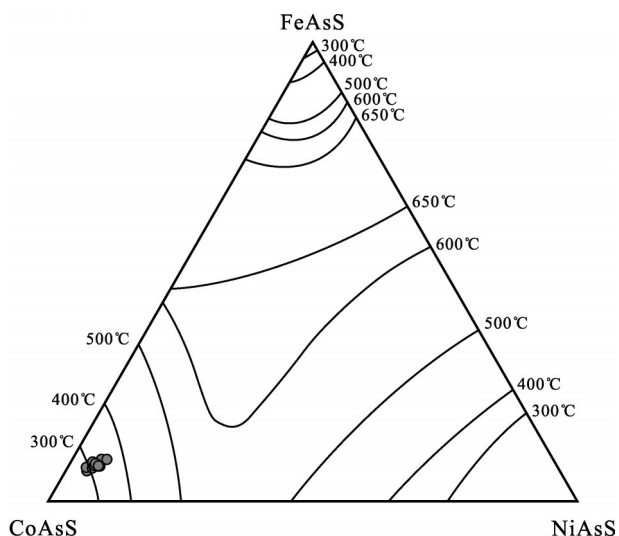


图10 新疆维权银铜矿床辉砷钴矿成分的FeAsS-CoAsS-NiAsS图解(等温线数据引自Klemm, 1965)

Fig. 10 Compositions of cobaltites of the Weiquan Cu-Ag deposit, Xinjiang (isotherms data after Klemm, 1965)

亚阶段、铁铜亚阶段和铜亚阶段,相应地金属矿物组合为黄铁矿+毒砂、磁铁矿+方铅矿+闪锌矿+黄铜矿、黄铜矿+砷黝铜矿+铜蓝。其中黄铜矿从铁铜亚阶段到铜亚阶段皆可形成,成为第一世代黄铜矿(黄铜矿₁)。

(2) 钴成矿阶段:以形成辉砷钴矿为代表。

(3) 铜银成矿阶段:可分为银亚阶段和铜亚阶

段,前者以形成辉银矿、硫砷铜银矿、自然银为特征,后者以形成第二世代黄铜矿(黄铜矿₂)为特征。黄铜矿₂在银亚阶段就开始形成了。

4.3 钴的赋存状态

中国热液成因的多金属矿床中,可作资源利用的钴多数以类质同象分散在铁氧化物或硫化物中,较少以独立钴矿物的形式产出(薛春纪等, 2000; 许德如等, 2008; 刘家军等, 2010; Wang et al., 2015)。维权银铜矿床矿石中钴普遍赋存在独立钴矿物辉砷钴矿中。在含钴铁铜矿石中,辉砷钴矿呈自形粒状与黄铜矿共生,亦有辉砷钴矿在黄铜矿中呈网脉状。在含银铜钴矿石中,辉砷钴矿多呈带状分布于黄铜矿边部,或与铜蓝形成交生体而呈粒状产出。电子探针分析结果中还鉴别出了2个钴的独立矿物:含铁硫砷钴矿($\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}\text{S}_{1.6}\text{As}_{0.4}$)和含铁铜辉砷钴矿($\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_{0.2}\text{Cu}_{0.1}\text{S}_{1.1}\text{As}_{0.9}$)。Co元素面扫描在银矿石中鉴别出了钴的独立矿物方钴矿,分布在斜方磁铁矿的边部呈带状或环状,含量不多,可能与银矿物同期形成。此外,维权银铜矿床中的钴还以类质同象形式分散在其他硫化物中,这些矿物中 $w(\text{Co})$ 介于0~0.86%之间,但绝大多数<0.1%(表1)。毒砂和黄铜矿中 $w(\text{Co})$ 稳定且较高,分别介于0.06%~0.08%和0.03%~0.17%之间。含银铜钴矿石中的2个砷黝铜矿数据 $w(\text{Co})$ 高,分别为0.52%和0.86%,但石榴子石矽卡岩中的砷黝铜矿 $w(\text{Co})$ 甚微。硫砷铜银矿中 $w(\text{Co})$ 较低,介于0~0.05%之间。方铅矿中不含Co。

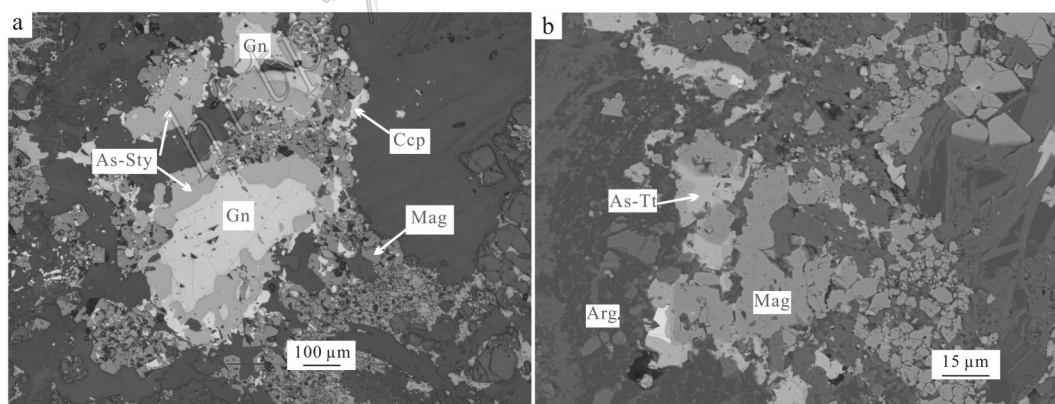


图11 新疆维权银铜矿床石榴子石矽卡岩中的银矿物

a. 石榴子石裂隙中的金属矿物,反射光照片;b. 石榴子石裂隙中与磁铁矿共生的辉银矿,背散射照片

Arg—辉银矿;As-Tt—砷黝铜矿;Ccp—黄铜矿;Gn—方铅矿;Mag—磁铁矿

Fig. 11 Photomicrographs of Ag-bearing minerals of the garnet skarn of the Weiquan Cu-Ag deposit, Xinjiang.

a. Metallic mineral in the fracture of garnets, reflected crossed nicols; b. Coexisting magnetite and argentite, BSE image

Arg—Argentite; As-Sty—Tennantite; Ccp—Chalcopyrite; Gn—Galena; Mag—Magnetite

表 3 新疆维权银铜矿床矿物生成顺序表
Table 3 Paragenetic sequence of the Weiquan Ag-Cu deposit, Xinjiang

	沉积期	热液成矿期					表生期	
		铁铜成矿阶段			钴成矿阶段	铜银成矿阶段		
		黄铁矿亚阶段	铁铜亚阶段	铜亚阶段		银亚阶段		铜亚阶段
斜方砷铁矿	√							
毒砂	√							
黄铁矿		√						
毒砂		√						
磁铁矿			√					
方铅矿			√					
闪锌矿			√					
黄铜矿			√	√		√		√
砷黝铜矿				√				
辉砷钴矿					√			
方钴矿						√		
辉银矿						√		
硫砷铜银矿						√		
自然银								
辉铜矿								√
褐铁矿								√

维权银铜矿床中的辉砷钴矿全部发育在含钴铁铜矿石和含银铜钴矿石中, $w(\text{Co})$ 大于 0.1% 的 2 个砷黝铜矿和 2 个黄铜矿电子探针数据也仅发育在含银铜钴矿石中, 表明钴矿化集中发生在钴成矿作用阶段。

4.4 找矿指示意义

(1) 需要评估矿石中钴的综合利用价值。据张亮亮(2014)报道矿石中 $w(\text{Co})$ 可达 $811 \times 10^{-6} \sim 972 \times 10^{-6}$, 角砾凝灰岩中 $w(\text{Co})$ 为 18950×10^{-6} , 组合样分析钴达到伴生组分的工业要求。因此, 矿石中钴达到综合利用的指标是可能的, 需要进一步研究和评估。

(2) 重视 As 地球化学异常对寻找钴、银矿床的指示意义。维权矿床钴、银矿石中多种矿物含 As 较高, 钴矿石中发现了大量的独立钴矿物辉砷钴矿, 银矿石中有大量毒砂, 说明钴、银矿化与富 As 的热液活动有关。As 元素具有多价性和挥发性的特点, 地球化学性质活泼, 具有极强的迁移活动能力, 能够在矿体周围形成广泛的地球化学异常(Boyle et al., 1973)。因此, 东天山地区钴、银矿找矿需要重视 As 的地球化学异常。

(3) 重视区域上多种成矿作用叠加的研究。维权银铜矿床识别出铁铜、钴、铜银 3 期成矿作用。这说明多期次、多种成矿作用的叠加, 对形成大矿、富矿十分有利。

5 结 论

(1) 维权银铜矿床中新发现独立钴矿物辉砷钴矿, 具有综合利用前景。

(2) 厘定了铜矿石、铁铜矿石、含银铜钴矿石、银矿石、含钴铁铜矿石、铅银铜矿石 6 种矿石类型, 认为它们是铁铜、钴、铜银从早到晚成矿阶段叠加的产物, 钴矿化集中发生在钴成矿阶段。

(3) 多期次、多种成矿作用的叠加有利于形成钴的矿化, 东天山地区钴矿找矿勘查应重视 As 的地球化学异常。

志 谢 野外工作得到了新疆地质矿产勘查开发局第一地质大队的协助, 室内电子探针分析得到陈振宇博士的大力支持, 杨富全研究员及两名匿名审稿专家对本文提出了宝贵的修改建议。在此一并表示感谢。

References

- Boyle R W and Jonasson I R. 1973. The geochemistry of arsenic and its use as an indicator element in geochemical prospecting[J]. Journal of Geochemical Exploration, 20 (3): 223-302.

- Chen B, Qin K Z, Tang D M, Mao Y J, Feng H Y, Xue S C and Yao Z S. 2015. Lithological, chronological and geochemical characteristics of Cihai iron deposit, eastern Xinjiang: Constraints on genesis of mafic-ultramafic and syenite intrusions and mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 31(8): 2156-2174(in Chinese with English abstract).
- Chen J P, Liao Q A, Luo T, Zhang X H, Guo D B, Zhu H L and Liu X M. Zircon U-Pb geochronology and genesis study on the mafic complex from diabase-type iron deposit in Cihai, Beishan area[J]. *Geological Science and Technology Information*, 32(4): 76-83(in Chinese with English abstract).
- Chen Y C, Liu D Q and Tang Y L. 2007. Strategic research on large scale ore concentration areas of solid minerals in Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-491.
- Dill H G. 2010. The "chessboard" classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium[J]. *Earth Science Reviews*, 100: 1-420.
- Ding J H, Xing S W, Xiao K Y, Ma Y B, Lin J C and Deng G. 2016. Geological characteristics and resource potential analysis of the Dongtianshan-Beishan Cu-Ni-Au-Pb-Zn metallogenic belts[J]. *Acta Geologica Sinica*, 16(3): 113-119(in Chinese with English abstract).
- Ding K S, Qin K Z, Xu Y X, Sun H, Xu X W, Tang D M, Mao Q and Ma Y G. 2007. Typomorphic characteristics and ore-forming significance of pyrrhotite in the major Cu-Ni deposits, East Tianshan, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 26(1): 109-119 (in Chinese with English abstract).
- Feng C Y, Zhang D Q and Dang X Y. 2004. Cobalt resources of China and their exploration and utilization[J]. *Mineral Deposits*, 23(1): 93-98.
- Feng J, Gao Y B, Wang L, Li W Y, Zhang Z W and Tan W J. 2008. Geological characteristics and prospecting orientation of Wei-quan silver-polymetallic deposit, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 27(5): 559-569 (in Chinese with English abstract).
- Gu L X, Zhang Z Z, Wu C Z, Tang J H, San J Z, Wang C S and Zhang G H. 2007. Permian geological, metallurgical and geothermal events of the Huangshan-Jing'erquan area, eastern Tianshan: Indications for mantle magma intraplating and its effect on the crust[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2869-2880(in Chinese with English abstract).
- Han B F, Ji J Q, Song, B, Chen L H and Li Z H. 2004. Zircon U-Pb SHRIMP ages of the mafic-ultramafic complexes from the Kalatongke and Huangshandong Cu-Ni sulfide deposits, Xinjiang Province, and their tectonic significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49: 2324-2328 (in Chinese).
- Han C M, Xiao W J, Cui B, Mao Q G, Zhang J E and Ao S J. 2006. Major types and characteristics of late Paleozoic copper deposits in North Xinjiang, northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 74-89 (in Chinese with English abstract).
- Huang X W, Zhou M F, Qi L, Gao J F and Wang Y W. 2013. Re-Os isotopic ages of pyrite and chemical composition of magnetite from the Cihai magmatic-hydrothermal Fe deposit, NW China[J]. *Mineralium Deposita*, 48: 925-946.
- Jiao J G, Zheng P P, Liu R P, Duan J and Jiang C. 2013. SHRIMP zircon U-Pb age of the No. 3 intrusion in the Tulargen Cu-Ni mining area, East Tianshan Mountains, Xinjiang and its geological significance[J]. *Geology and Exploration*, 49(3): 393-404(in Chinese with English abstract).
- Klemm D. 1965. Synthesen und Analysen in den Dreiecksdiagrammen FeAsS-CoAsS-NiAsS und FeS₂-CoS₂-NiS₂. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*, 103: 205-255.
- Liu B, Wang Y H, Wang C, Wang J P, Zhang F F and Zhao Z N. 2014. Situation and suggestions of China's cobalt resources industry. *Resources and Industries*, 16(3): 113-119(in Chinese with English abstract).
- Liu J J, Zhai D G, Li Z M, He M Q, Liu Y P and Li C Y. 2010. Occurrence of Ag, Co, Bi and Ni elements and its genetic significance in the Baiyangping silver-copper polymetallic metallogenic concentration area, Lanping basin, southwestern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1646-1660(in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Ge W S, Wu C, Zhang L L, Nie F F, Wang J P and Song W J. 2017. Discovery of native bismuth and fluid evolution characteristics of the Wei-quan silver deposit, eastern Tianshan[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(1): 121-133(in Chinese with English abstract).
- Liu Y J, Cao L M, Li Z L, Wang H N, Chu T Q and Zhang J R. 1984. Element geochemistry[M]. Beijing: Science Press. 101-111(in Chinese).
- Mao J W, Yang J M, Qu W J, Du A D, Wang Z L and Han C M. 2002. Re-Os dating of Cu-Ni sulfide ores from Huangshandong deposit in Xinjiang and its geodynamic significance[J]. *Mineral Deposits*, 21(4): 323-330(in Chinese with English abstract).
- Mao Q G, Xiao W J, Han C M, Sun M, Yuan C, Yan Z, Li J L, Yong Y and Zhang J E. 2006. Zircon U-Pb age and geochemistry of the Baishiquan mafic-ultramafic complex in the eastern Tianshan, Xinjiang: Constraints on the closure of the Paleo-Asian ocean[J].

- Acta Petrologica Sinica 22, 153-162 (in Chinese with English abstract)
- Meng Q P, Chai F M, Li Q, Zheng J H, Shao F Z, Geng X X and Han W Q. 2014. Zircon U-Pb geochronology, Hf isotopes and the petrogenesis of mafic intrusions in the Cihai Fe (-Co) deposit, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 30(1): 109-124(in Chinese with English abstract).
- Pan C Z, Xiao W J, Cui B and Han C M. 2005. Geological characteristics of copper deposits in the middle section of the East Tianshan Mountains[J]. Xinjiang Geology, 23(2): 127-130(in Chinese with English abstract).
- Qin K Z, Fang T H, Wang S L, Zhu B Q, Feng Y M, Yu H F and Xiu Q Y. 2002. Plate tectonics division, evolution and metallogenic settings in eastern Tianshan Mountains, NW China. Xinjiang Geology, 20(4): 302-308(in Chinese with English abstract).
- Qin K Z, Ding K S, Xu Y X, Sun H, Xu X W, Tang D M and Mao Q. 2007. Ore potential of protoliths and modes of Co-Ni occurrence in Tulargen and Baishiquan Cu-Ni-Co deposits, East Tianshan, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 26(1): 1-14(in Chinese with English abstract).
- Qin Y Q. 2001. First found medium class independence deposit of silver in Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 19(4): 304 (in Chinese).
- San J Z, Qin K Z, Tang Z L, Tang D M, Su B X, Sun H, Xiao Q H and Liu P P. 2010. Precise zircon U-Pb age dating of two mafic-ultramafic complexes at Tulargen large Cu-Ni district and its geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 26: 3027-3035(in Chinese with English abstract).
- Tang P Z, Wang Y W, Wang J B, Long L L and Liao Z. 2012. Geochemical characteristics of cobalt from the Cihai ore district, Xinjiang, and their significance[J]. Acta Mineralogica Sinica, 32(3): 379-385(in Chinese with English abstract).
- U. S. Geological Survey. 2018. Mineral Commodity Summaries-Cobalt. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cobalt/>
- Wang J B, Wang Y W and He Z J. 2006. Ore deposits as a guide to the tectonic evolution in the East Tianshan Mountains, NW China[J]. Geology in China, 33(3): 461-469(in Chinese with English abstract).
- Wang L S, Li H Q, Liu D Q and Chen Y C. 2005. Geological characteristics and mineralization epoch of Weiquan silver (copper) deposit, Hami, Xinjiang, China[J]. Mineral Deposits, 24 (3): 280-284 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z L, Xu D R, Zhang Z C, Zou F H, Wang L, Yu L L and Hu M Y. 2015. Mineralogy and trace element geochemistry of the Co- and Cu-bearing sulfides from the Shilu Fe-Co-Cu ore district in Hainan Province of South China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 113: 980-987.
- Wu H, Li H Q, Mo X H, Chen F W, Lu Y F, Mei Y P and Deng G. 2005. Age of the Baishiquan mafic-ultramafic complex, Hami, Xinjiang and its geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 79 (4): 498-502 (in Chinese with English abstract).
- Xinjiang Geological Survey. 2003. Report of comprehensive study and regional resource prospecting of the eastern Tianshan[R].
- Xu D R, Wang L, Xiao Y, Liu Z L, Fu Q J, Cai Z R and Huang J R. 2008. A preliminary discussion on metallogenic model for Shilu-type iron oxide-copper-gold-cobalt ore deposit[J]. Mineral Deposits, 27(6): 681-694.
- Xue C J, Ji J S and Yang Q J. 2000. Subvolcanic hydrothermal metallogeny of the Cihai iron (cobalt) deposit, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 19(2): 156-164.
- Zhang L L. 2014. Geochemistry and metallogenesis of the Weiquan silver-copper polymetallic deposit, Shanshan, Xinjiang[D]. Supervisor: Lin S Y. Beijing: China University of Geosciences. 01-67.
- Zhang X L, Wu C Z, Huang J H, Gu L X, Zhang Z Z and Lei R X. 2012. Geochronology and its geological significance of the Huangshan intrusion in eastern Tianshan, Xinjiang[J]. Geological Science and Technology Information, 31(1): 22-26(in Chinese with English abstract).
- Zheng J H, Meng Q P, Liu H L, Wu B, Liu F, Li Q and Han W Q. 2014. Geochronology of intrusive rocks and their constraint on formation age of Cihai iron deposit, eastern Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 33(2): 271-285(in Chinese with English abstract).
- Zhou M F, Leshner C M, Yang Z X, Li J W and Sun M. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, eastern Xinjiang, north-west China: Implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt [J]. Chemical Geology, 209: 233-257.

附中文参考文献

- 陈博, 秦克章, 唐冬梅, 毛亚晶, 冯宏业, 薛胜超, 姚卓森. 2015. 新疆磁海铁矿区镁铁质岩及正长岩锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学特征: 对成岩、成矿作用的制约[J]. 岩石学报, 31(8): 2156-2174.
- 陈继平, 廖群安, 罗婷, 张雄华, 郭东宝, 朱和林, 柳小明. 2013. 北山磁海辉绿岩型铁矿区基性杂岩锆石 U-Pb 年代学及岩石成

- 因[J]. 地质科技情报, 32(4): 76-83.
- 陈毓川, 刘德权, 唐延龄. 2007. 中国新疆战略性固体矿产大型矿集区研究[M]. 北京: 地质出版社. 1-491.
- 丁建华, 邢树文, 肖克炎, 马玉波, 林健宸, 邓刚. 2016. 东天山-北山Cu-Ni-Au-Pb-Zn成矿带主要成矿地质特征及潜力分析[J]. 地质学报, 90(7): 1392-1412.
- 丁奎首, 秦克章, 许英霞, 孙赫, 徐兴旺, 唐冬梅, 毛骞, 马玉光. 2007. 东天山主要铜镍矿床中磁黄铁矿的矿物标型特征及其成矿意义[J]. 矿床地质, 26(1): 109-119.
- 丰成友, 张德全, 党兴彦. 2004. 中国钴资源及其开发利用概况[J]. 矿床地质, 23(1): 93-98.
- 冯京, 高永宝, 王磊, 李文渊, 张照伟, 谭文娟. 2008. 新疆维权银多金属矿床地质特征及找矿方向[J]. 矿床地质, 27(5): 559-569.
- 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 唐俊华, 三金柱, 汪传胜, 张光辉. 2007. 东天山黄山-镜儿泉地区二叠纪地质-成矿-热事件: 幔源岩浆入侵及其地壳效应[J]. 岩石学报, 23(11): 2869-2880.
- 韩宝福, 李建清, 宋彪, 陈立辉, 李宗怀. 2004. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿铁-超镁铁杂岩体的SHRIMP锆石U-Pb年龄及其地质意义[J]. 科学通报, 22: 2324-2328.
- 韩春明, 肖文交, 崔彬, 毛启贵, 张继恩, 敖松坚. 2006. 新疆北部晚古生代铜矿床主要类型和地质特征[J]. 地质学报, 80(1): 74-89.
- 焦建刚, 郑鹏鹏, 刘瑞平, 段俊, 姜超. 2013. 东天山图拉尔根Ⅲ号岩体锆石年龄及地质意义[J]. 地质与勘探, 49(3): 393-404.
- 刘彬, 王银宏, 王臣, 王建平, 张方方, 赵泽南. 2014. 中国钴资源产业形势与对策建议[J]. 资源与产业, 16(3): 113-119.
- 刘家军, 翟德高, 李志明, 何明勤, 刘玉平, 李朝阳. 2010. 兰坪盆地白秧坪银铜多金属矿集区中银、钴、铋、镍的赋存状态与成因意义[J]. 岩石学报, 26(6): 1646-1660.
- 刘妍, 葛文胜, 吴楚, 张亮亮, 聂俊杰, 王江朋, 宋文杰. 2017. 东天山维权银矿床自然铋的发现及流体演化特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 36(1): 121-133.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 101-111.
- 毛景文, 杨建民, 屈文俊, 杜安道, 王志良, 韩春明. 2002. 新疆黄山东铜镍硫化物矿床Re-Os同位素测定及其地球化学意义[J]. 矿床地质, 21(4): 323-330.
- 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 孙敏, 袁超, 闫臻, 李继亮, 雍拥, 张继恩. 2006. 新疆东天山白石泉铜镍矿床基性-超基性岩体锆石U-Pb同位素年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约[J]. 岩石学报, 22(1): 153-162.
- 孟庆鹏, 柴凤梅, 李强, 郑佳浩, 邵发志, 耿新霞, 韩文清. 2014. 新疆磁海铁(钴)矿区镁铁质岩锆石U-Pb年龄、Hf同位素特征及岩石成因[J]. 岩石学报, 30(1): 109-124.
- 潘成泽, 肖文交, 崔彬, 韩春明. 2005. 东天山中段铜矿床主要类型及地质特征[J]. 新疆地质, 23(2): 127-130.
- 秦克章, 方同辉, 王书来, 朱宝清, 冯益民, 于海峰, 修群业. 2002. 东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究[J]. 新疆地质, 20(4): 302-308.
- 秦克章, 丁奎首, 许英霞, 孙赫, 徐兴旺, 唐冬梅, 毛骞. 2007. 东天山图拉尔根、白石泉铜镍钴矿床钴、镍赋存状态及原岩含矿性研究[J]. 矿床地质, 26(1): 1-14.
- 秦跃群. 2001. 新疆首次发现中型银矿[J]. 新疆地质, 19(4): 304.
- 三金柱, 秦克章, 汤中立, 唐冬梅, 苏本勋, 孙赫, 肖庆华, 刘平平. 2010. 东天山图拉尔根大型铜镍矿区两个镁铁-超镁铁岩体的锆石U-Pb定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 26(10): 3027-3035.
- 唐萍芝, 王玉往, 王京彬, 龙灵利, 廖震. 2012. 新疆哈密磁海铁矿床中钴的地球化学及地质意义[J]. 矿物学报, 32(3): 379-385.
- 王京彬, 王玉往, 何志军. 2006. 东天山大地构造演化的成矿示踪[J]. 中国地质, 33(3): 461-469.
- 王龙生, 李华芹, 刘德权, 陈毓川. 2005. 新疆哈密维权银(铜)矿床地质特征和成矿时代[J]. 矿床地质, 24(3): 280-284.
- 吴华, 李华芹, 莫新华, 陈富文, 路远发, 梅玉萍, 邓岗. 2005. 新疆哈密白石泉铜镍矿区基性-超基性岩的形成时代及其地质意义[J]. 地质学报, 79(4): 498-502.
- 新疆地质调查院. 2003. 东天山地区综合研究与区域资源潜力预测评价报告[R].
- 许德如, 王力, 肖勇, 刘朝露, 符启基, 蔡周荣, 黄居锐. 2008. “石榴式”铁氧化物-铜(金)-钴矿床成矿模式初探[J]. 矿床地质, 27(6): 681-694.
- 薛春纪, 姬金生, 杨前进. 2000. 新疆磁海铁(钴)矿床次火山热液成矿学[J]. 矿床地质, 19(2): 156-164.
- 张亮亮. 2014. 新疆鄯善维权银-铜矿地球化学特征及矿床成因研究[D]. 导师: 林善圆. 北京: 中国地质大学. 0-67.
- 张小连, 吴昌志, 黄建华, 顾连兴, 张遵忠, 雷如雄. 2012. 东天山黄山岩体的侵位时代及其地质意义[J]. 地质科技情报, 31(1): 22-26.
- 郑佳浩, 孟庆鹏, 刘海龙, 武斌, 刘锋, 李强, 韩文清. 2014. 新疆东天山磁海铁矿区侵入岩年龄及其对矿床形成时代的制约[J]. 矿床地质, 33(2): 271-285.