引用格式: 唐卫东,何佳乐,刘天航,等,2023.内蒙古北山老硐沟金矿石榴子石地球化学特征 [J].地质力学学报,29(1): 60-75. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022098

Citation: TANG W D, HE J L, LIU T H, et al., 2023. Geochemical characteristics of the garnets from the Laodonggou gold deposit, Beishan, Inner Mongolia[J]. Journal of Geomechanics, 29 (1): 60–75. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022098

内蒙古北山老硐沟金矿石榴子石地球化学特征

唐卫东¹,何佳乐¹,刘天航¹,魏立勇¹,范堡程^{1,2},赵福东¹,何 毅³, 郭永超³,杨 冰³ TANG Weidong¹, HE Jiale¹, LIU Tianhang¹, WEI Liyong¹, FAN Baocheng^{1,2}, ZHAO Fudong¹, HE Yi³, GUO Yongchao³, YANG Bing³

1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心,陕西西安 710000;

2. 中国地质调查局西安地质调查中心,陕西西安 710000;

3. 额济纳旗圆通矿业有限责任公司,内蒙古阿拉善盟 750300

1. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710000, Shaanxi, China;

2. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Xi'an 710000, Shaanxi, China;

3. Eji'na Yuantong Mining Company, Alashan 750300, Inner Mongolia, China

Geochemical characteristics of the garnets from the Laodonggou gold deposit, Beishan, Inner Mongolia

Abstract: The Laodonggou gold deposit is a medium-sized gold deposit discovered in the eastern section of the Beishan metallogenic belt. It resulted from the superposition of multi-phase and multi-stage metallogenesis. Due to its complex deposit genesis, the deposit has five sections, of which skarn orebodies dominate Section III. Skarn minerals are mainly garnet, which can be divided into early and late phases, with early garnet having more oscillatory ring bands. We systematically studied the two types of garnet by detailed microscopic observation and electron microprobe. The core of the early garnet primarily consists of essonites, and the edge is calcium–iron to calcium–aluminum composition. Andradites dominate the late garnet. The chemical composition of garnet indicates that the early skarnization stage is under a moderately acidic and weakly oxidizing–to–weakly reducing hydrothermal environment, while the iron content increases in the later stage and the oxygen escape increases, resulting in increased alkalinity and oxidation. The garnets in Section III, originating from hydrothermal metasomatism, belong to the andradite–essonite series. Essonites and andradites prevail in the early stage, accompanied by copper mineralization. With the late hydrothermal environmental changes, andradites increase, and pyrite mineralization and arsenopyrite mineralization increase as well, resulting in gold-rich mineralization. **Keywords:** garnet; electron probe; skarn; Laodonggou gold deposit; Beishan metallogenic belt

摘 要:老硐沟金矿是北山成矿带东段发现的中型金矿床,是多期次多阶段成矿作用叠加的产物,矿床成因类型复杂。矿床共分为5个矿段,其中Ⅲ矿段以砂卡岩矿体为主。砂卡岩矿物以石榴子石为主,可分为早、晚两期,早期石榴子石更具震荡环带。通过详细的镜下观察和电子探针对两期石榴子石进行了系统研究,早期石榴子石核部以钙铝榴石组分为主,向边部为钙铁-钙铝过渡组分;晚期石榴子石以钙铁榴石为主。石榴子石化学成分特征表明,早期砂卡岩化阶段,热液环境为中酸性、弱氧化—弱还原环境;后期铁质含量增多,氧逸度增加,热液环境碱性、氧化性增强。老硐沟金矿Ⅲ矿段石榴子石为钙铁-

- This research is financially supported by the Geological Survey Programs of the China Geological Survey (Grants DD20211552, DD20208009, DD030301). **第一作者:** 唐卫东(1990-),男,硕士,工程师,主要从事矿产资源调查评价工作。E-mail: 1009321162@qq.com
- 收稿日期: 2022-07-18; 修回日期: 2022-08-16; 责任编辑: 王婧

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20211552, DD20208009, DD030301)

钙铝榴石系列,属热液交代成因,早期多形成钙铝-钙铁榴石,伴随铜矿化,晚期热液环境变化,钙铁榴石增多,黄铁矿化、毒砂矿化增多,造成金富集成矿。

关键词:石榴子石;电子探针;砂卡岩;老硐沟金矿;北山成矿带

中图分类号: P618.51 文献标识码: A 文章编号: 1006-6616 (2023) 01-0060-16

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022098

0 引言

作为砂卡岩矿床中最为重要的砂卡岩矿物,石 榴子石主要有6种端元组分,通常在自然界中纯端 元组分的石榴子石并不多见,大多数都是含有多种 端元组分的过渡性石榴子石(艾永富和金玲年, 1981;赵斌等,1983;梁祥济,1994; Meinert et al., 1992)。石榴子石不同的端元组分组成也反映了溶 液的成分、温度、酸碱度、氧化-还原环境等物理化 学环境(艾永富和金玲年,1981;赵斌等,1983; Bau, 1991; Jamtveit et al., 1993;梁祥济,1994)。在热液交 代过程中,溶液环境大多会发生变化,形成的石榴 子石多具有震荡韵律环带,因此针对石榴石子环带 特征的研究对于确定矿床成因及热液演化过程有 着非常重要的意义(Yardley et al., 1991; Jamtveit et al., 1993; Smith et al., 2004; Martin et al., 2011; Zhai et al., 2014)。

老硐沟金矿自2013年规模化开采以来,累计探 明资源储量已达中型规模,但是目前矿山开采在找 矿勘查方面遇到了较大的阻力。大量实践证明,老 旧矿山的勘查突破必须依托对矿床的成矿规律的 综合认识,提出新的找矿思路。老硐沟金矿成矿作 用类型多样,主要有3种矿石类型,分别为"溶洞 型"氧化矿石(Ⅰ、Ⅱ、Ⅴ矿段)、原生脉状硫化物矿 石(I、I、I、V 矿 段) 和 矽 卡 岩 型 矿 石(II、IV 矿 段)。不同的矿石类型受控于不同的构造子系统, 分别为加里东期近东西向、印支期北西西向和喜马 拉雅期溶洞构造子系统(钱建平等,2018)。张国震 等(2021)通过对矿区内的主要控矿地质体——闪 长玢岩开展锆石原位微区同位素测年,限定老硐沟 金矿成矿时代为243 Ma,为印支期。目前矿山主要 的开采类型为"溶洞型"氧化矿石,该类型氧化矿石 以其赋存状态的特殊性,成为矿区的典型代表,国 内首次发现的砷钙锌石和烃砷锌石就是在对该矿 区氧化矿石开展研究过程中取得的成果(黄典豪 等,1996;黄典豪和王宝林,1997)。其他学者通过研 究老硐沟金矿 I、II、V 矿段矿石特征、成矿作用、 控矿因素等提出了氧化淋滤型(黄典豪和王宝林, 1997;何毅等,2016)、热液(蚀变)型(于文松等, 2013)等成因认识。目前对于老硐沟金矿的成因尚 存争议,而且已有研究多针对于 I、II、V 矿段的原 生硫化物矿体和氧化矿体,对于矿区的另一重要矿 石类型——砂卡岩型矿石研究不足,仅限于描述矿 体特征,对其矿物学特征、成矿作用特征等均未揭 示。基于此,文章以野外和镜下岩相学观察为基 础,结合电子探针分析,讨论老硐沟金矿 III 矿段石 榴子石形态、成分、环带、形成环境等特征及其与 矿化关系,为进一步研究老硐沟金矿成矿机制提供 重要依据。

1 区域地质

北山地区位于西伯利亚、塔里木-中朝、哈萨克 斯坦3大板块过渡部位,大地构造位置非常特殊. 以4条蛇绿岩带为界由北向南划分出5个岛弧构造 单元(左国朝等, 1990, 2003; 杨合群等, 2006, 2008)。 北山地区岩浆-热事件在该区地壳演化过程中起到 了非常重要的作用,自前寒武纪至早古生代均有活 动,侵入岩出露广泛,受构造活动影响,区内岩浆岩 主要呈北西向带状展布,其中与成矿关系最为密切 的岩浆岩类型为花岗岩。北山地区是国内西北地 区重要的金属资源地之一(聂凤军等, 2002),以洗 肠井缝合带为界,北部在雀儿山-狐狸山和公婆泉-七一山活动陆缘带主要产出斑岩型铜矿,在红石山-路井陆内裂谷带主要产出基性一超基性侵入体有 关的铁矿、铜镍矿,缝合带南侧在营毛沱-鹰嘴红山 被动陆缘带产出沉积型磷钒铀锰矿,同时在成矿带 东缘还发育有古陆壳重熔花岗岩有关的钨锡稀有 萤石成矿系统。

北山成矿带东缘盘陀山-古硐井一带发育有多 处金矿床,该区位于洗肠井蛇绿混杂岩带南侧,方 山口-营毛沱-鹰嘴红山早古生代被动陆缘带东段 (图 1a)。区内主要出露地层为长城系古硐井群、蓟 县系平头山组、青白口系大豁落山组、二叠系双堡 堂组和白垩系赤金堡组,与金成矿密切相关的建造 为长城系古硐井群细碎屑岩和蓟县系平头山组碳 酸盐岩,古硐井群为主要的金矿源层(图 1b)。区内 发育有鹰嘴红山加里东期黑云母二长花岗岩,主要 呈岩基状产出,与区内金、钨矿化关系较为密切(杨 合群等, 2009, 2010; 赵国斌等, 2010, 2011; Tian et al., 2013, 2014; 丁嘉鑫等, 2015; 赵鹏彬等, 2019; 云龙 等,2021)。受早古生代活动陆缘带向南俯冲影响, 在该区形成了一系列北西向、近东西向脆韧性剪切 带和脆性断层带,控制了区内金矿的产出。区内已 发现有鹰嘴红山钨矿、老硐沟金矿等。

矿区地质 2

老硐沟金矿位于盘陀山-鹰嘴红山花岗岩带东 段,区内出露地层主要为长城系古硐井群和蓟县系 平头山组。古硐井群分布于矿区南侧,主要岩性为 灰绿色石英粉砂质-泥质板岩、变质石英粉砂岩、 灰绿色变质长石石英砂岩。平头山组在矿区内大 面积出露,主要岩性为白云石大理岩,其次为结晶 灰岩,局部夹泥质、炭质板岩,与岩体接触部位砂卡 岩化较普遍,可见透辉石石榴石矽卡岩带。平头山 组白云石大理岩为矿区内的主要赋矿围岩。

受北西向、近东西向脆韧性剪切带控制,矿区



1一第四系; 2一下白垩统赤金堡组; 3一下二叠统双堡堂组; 4一青白口系大豁落山组; 5一蓟县系平头山组上岩段; 6一蓟县系平头山组下岩 段;7一长城系古硐井群;8一三叠纪斑状黑云母花岗岩;9一二叠纪花岗岩;10一志留纪黑云母二长花岗岩;11一蛇绿岩;12一逆断层;13一地 质界线;14一角度不整合;15一矿床;16一省界

a-北山造山带地质简图; b-老硐沟地区地质简图

北山造山带老洞沟地区区域地质简图(据张国震等, 2021 修改) 图 1

Fig. 1 Geological sketch of Laodonggou area in the Beishan orogenic belt (modified from Zhang et al., 2021)

(a) Geological sketch of the Beishan orogenic belt; (b) Geological sketch of the Laodonggou area

1-Quaternary; 2-Chijinbao Formation of the lower Cretaceous; 3-Shuangbaotang Formation of the lower Permian; 4-Dahuoluoshan Formation of the Qingbaikouan System; 5-Upper member of the Pingtoushan Formation; 6-Lower member of the Pingtoushan Formation; 7-Gudongjing Group of the Changchengian System; 8-Triassic porphyritic biotite granite; 9-Permian granite; 10-Silurian biotite monzogranite; 11-Ophiolite; 12-Reversed fault; 13-Geological boundary; 14-Angular unconformity; 15-Deposit; 16-Provincial boundary

内断裂构造较为发育,大致可分为近东西向、北西 西向、北北西向和北东向4组(钱建平等,2018)。 其中近东西向、北西西向、北北西向断裂构造为主 要的控矿构造(图2)。

区内侵入岩主要有黑云母二长花岗岩、斑状花 岗闪长岩、闪长玢岩、辉绿玢岩。黑云母二长花岗 岩位于矿区南侧,呈岩基状产出,侵位时间为 423.1±1.5 Ma(赵鹏彬等,2016),与区域上的钨矿化 关系较为密切。斑状花岗闪长岩呈岩株状产出,与 矽卡岩化铜金矿体关系较为密切。闪长玢岩主要 成脉状、透镜体状沿断裂产出,广泛分布于矿区内, 与金矿化关系极为密切(图3),并具有多幕侵位的 特点,侵位时间233.8±0.9 Ma~243.0±1.0 Ma(张国震 等,2021)。辉绿玢岩主要成脉状产于北西西向、近 东西向断裂内,根据其与闪长玢岩脉间切割关系判 断,其侵位时间早于闪长玢岩。

老硐沟金矿分为5个矿段,共圈定金矿体36条。 I 矿段矿体东西方向控制的最大长度为400 m,厚 度为0.8~13 m,品位为0.38~31.40 g/t,平均Au品 位1.90 g/t,赋矿标高1100~1290 m,产状190°~ 230° \angle 65°~83°。II 矿段均属于氧化矿,赋矿标高 996~1311 m。矿体总体倾向北东,倾角60°~70°。 Au品位0.52~24.90 g/t,平均品位5.11 g/t,矿体厚度 0.73~15.54 m,平均7.09 m。III 矿段位于矿区南西部, 长度约350 m,厚度为2.0~10 m,品位为0.27~3.98 g/t,平均Au品位1.64 g/t。矿体倾向355°~10°,倾角 55°~65°,矿体标高1188~1282 m。IV 矿段位于矿 区东南部,倾向北东,倾角60°~70°,矿体形态简单, 长约200 m,厚0.1~0.8 m,Au品位2.98~7.93 g/t。



图 2 老硐沟金矿矿区地质简图(据钱建平等, 2018 修改)

Fig. 2 Geological sketch of the Laodonggou gold mine (modified from Qian et al., 2018)



图 3 老硐沟金矿 II 段 P12 勘探线地质剖面图

Fig. 3 Geological profile of Exploration Line P12 in Section II of the Laodonggou gold deposit

240°, 倾角 70°~80°, 赋矿标高 1117~1283 m, Au 品 位 0.57~17.04 g/t, 平均品位 1.83~4.61 g/t, 矿体厚度 0.65~3.52 m, 平均厚度 1.52 m。

其中Ⅲ、Ⅳ矿段主要为矽卡岩型矿体,产于斑 状花岗闪长岩与白云石大理岩、含硅质条带灰岩的 接触带上。矽卡岩化呈带状分布,距岩体越近矽卡 岩化越强,矽卡岩化带宽几米至几十米,矽卡岩呈 灰绿色,纤状变晶结构,块状、条带状构造,非金属 矿物有石榴子石、绿帘石、透闪石、透辉石、方解 石,金属矿物有磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿等。

受多期次不同类型矿化作用影响(黄典豪和王 宝林,1997;于文松等,2013),金矿石主要分为原生 矿石和氧化矿石,原生矿石又可分为砂卡岩型和热 液脉型(图 4a-4c)。原生矿石矿物组合主要有自 然金、自然银、黄铁矿、方铅矿、黄铜矿、毒砂、闪 锌矿、磁铁矿、石英、方解石、石榴子石等,自然金 主要为裂隙金(图4d),从各金属矿物之间的交代关 系判断,热液脉型金矿体的形成至少经历了3期热 液活动(图4e-4k)。氧化矿石矿物组合主要臭葱 石、褐铁矿、针铁矿、砷菱铅矾、砷钙锌石、羟砷锌 石等(黄典豪等,1996)。围岩多发育热液蚀变,主 要有矽卡岩化、黄铁矿化、硅化、绢云母化、褐铁矿 化、绿泥石化、碳酸盐化、高岭土化等。

根据矿石矿物组合及相互关系,划分3个成矿 阶段(图5)。①早期高温热液接触交代砂卡岩成矿 阶段,生成的主要金属矿物为磁铁矿、黄铁矿、黄 铜矿、毒砂、辉钼矿等,脉石矿物为石英、透闪石、 透辉石、石榴石。围岩蚀变为砂卡岩化、绢云母 化、黑云母化、蛇纹石化。②晚期中低温热液阶 段,是一次主要的多金属成矿期,也是金、铅、银的



Qtz一石英; Grt一石榴子石; Ep一绿帘石; Py一黄铁矿; Apy一毒砂; Ccp一黄铜矿; Gn一方铅矿; Mag一磁铁矿; Au—自然金; Lm—褐铁矿 a一氧化矿石; b一原生矿石; c一Ⅲ矿段矽卡岩带; d—氧化矿石中的裂隙金; e—方铅矿交代黄铁矿; f—两期毒砂; g一碎裂石英脉; h一方铅矿 交代黄铜矿; i—矽卡岩型矿石中沿裂隙充填的石英-黄铁矿脉; j—毒砂褐铁矿化; k—黄铜矿交代毒砂; l—矽卡岩矿石中沿裂隙发育的浸染 状黄铁矿、磁铁矿

图4 老硐沟金矿不同类型矿石矿物特征图

Fig. 4 Mineral characteristics of different ores in the Laodonggou gold deposit

(a) Oxidized ore; (b) Primary ore; (c) Skarn belt in Section \mathbb{II} ; (d) Au-grains along the fissures in oxidized ore; (e) Pyrite replaced by galena; (f) Two phases of arsenopyrite; (g) Tractured quartz vein; (h) Chalcopyrite replaced by galena; (i) Quartz-pyrite vein filled along the fissures in skarn ore; (j) Limonitized arsenopyrite; (k) Arsenopyrite replaced by chalcopyrite; (l) Disseminated pyrite and magnetite developed along the fractures in skarn ore

Qtz-quartz; Grt-garnet; Ep-epidote; Py-pyrite; Apy-arsenopyrite; Ccp-chalcopyrite; Gn-galena; Mag-magnetite; Au-natural gold; Lm-limonite

成矿期。它们由早到晚的生成顺序是:磁铁矿-黄铁矿-方铅矿-黄铜矿-毒砂-褐铁矿-铜 蓝。这阶段非金属矿物主要为石英、方解石、绿泥 石、绿帘石。围岩蚀变有硅化、砂卡岩化、黄铁矿 化、褐铁矿化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化等。 硅化早于黄铁矿化,碳酸盐化最晚。③表生期金属 硫化物氧化阶段,矿区内多金属矿床均受到不同程度的氧化作用。金属矿物除金以稳定的状态存在 外,其他多已发生了一系列的次生变化,形成了角 银矿、黄钾铁钒、自然银、铜蓝、孔雀石、褐铁矿和 一系列砷酸盐矿物,如臭葱石、砷菱铅矾、砷钙锌 石、羟砷锌石等。

矿物名称	早期高温热液接触交代	晚期。	中低温热液阶段	表生期金属硫化物氧化阶段			
	矽卡岩成矿阶段	早	晚				
磷灰石							
透辉石							
石榴子石							
磁铁矿							
绿帘石							
绿泥石							
蛇纹石							
黄铁矿							
黄铜矿			_				
方铅矿							
闪锌矿							
自然金							
银金矿							
自然银							
角银矿							
毒砂	_						
石英							
方解石							
黄钾铁矾							
砷铅矿							
赤铁矿							
褐铁矿							
菱砷铁矿							
砷菱铅矾							
臭葱石							
孔雀石							
铅矾							
铅丹							

图5 老洞沟金矿矿物生成顺序表

Fig. 5 Mineral generation sequence of the Laodonggou gold deposit

金主要为微细粒自然金和含金自然银,自然金 主要以包裹体形态产出于各矿物之间,其次为裂隙 金和晶隙金,主要的载金矿物有菱砷铅钒、菱砷铁 矿、臭葱石等。

3 石榴子石岩相学特征

老硐沟金矿床III、IV矿段斑状花岗闪长岩与大 理岩接触带发育砂卡岩带,砂卡岩矿物以石榴子 石、透辉石为主,并伴随有浸染状黄铁矿化、黄铜 矿化、磁铁矿化。系统采集了III矿段新鲜的砂卡岩 样品磨制成光薄片,开展了详细的显微镜下鉴定工 作。石榴子石与绿帘石呈间隔条带状产出,局部夹 泥质板岩透镜体。石榴子石主要呈粒状或粒状集 合体产出,手标本颜色呈浅褐一深褐色,呈他形、半 自形一自形粒状结构,颗粒粒度一般为1.5~3 mm,个别可达8 mm,晶形以六边形为主,环带较为发育,几至几十条,环带宽窄不一。环带的宽窄变化也反映了石榴子石在形成过程中物理化学条件和成分等发生了变化(Jamtveit et al., 1993, 1995; Jamtveit and Hervig, 1994; Gaspar et al., 2008)。

根据老硐沟金矿Ⅲ矿段石榴子石镜下光学特征,可初步将该矿床的石榴子石分为早(Grt I)、晚(Grt Ⅱ)两期。早期石榴子石,多呈半自形一自形晶(图 6a),颗粒大小1.5~3mm,最大可达8mm,大 多发育环带,环带条数及宽度不等,但均有内带宽 外带窄的特征,极正高突起,正交光下可见对称消 光、波状消光,可见有 I 级灰、I 级黄、I 级白异常 干涉色(图 6a—6c),环带呈黑白相间的干涉色条纹 (图 6b),多发生蚀变,且核部蚀变程度多高于边



GrtⅠ一早期石榴子石;GrtⅡ一晚期石榴子石;Qtz一石英;Ep一绿帘石;Py一黄铁矿;Ccp一黄铜矿

a一早期石榴子石对称消光(+);b一早期石榴子石核部全消光(+);c一早期碎裂石榴子石(+);d一早期石榴子石环带发育(+);e一晚期石榴 子石充填于早期石榴子石裂隙中(+);f一晚期石榴子石充填在早期石榴子石颗粒之间(+);g一晚期石榴子石与方解石脉充填于早期石榴子 石裂隙中(-);h一晚期石榴子石多不发育环带(+);i一碎裂的早期石榴子石与晚期石榴子石、方解石脉充填于裂隙中;j一l一黄铁矿、黄铜矿 呈浸染状充填在早期石榴子石裂隙中(反射光)

图6 Ⅲ矿段石榴子石镜下特征

Fig. 6 Microscopic characteristics of garnet in Section III

(a) Symmetrical extinction of the early garnet (+); (b) Total extinction of the early garnet core(+); (c) Early cataclastic garnet (+); (d) Ring band development of the early garnet (+); (e) Late garnet filled in the fissures of the early garnet (+); (f) Late garnet filled in early garnet grains (+); (g) Late garnet and calcite veins filled in the fissures of early garnet (-); (h) Ring band rarelty occurs in late garnet (+); (i) Early cataclastic garnet, late garnet and calcite veins filled in the fractures; (j–l) Pyrite and chalcopyrite are disseminated and filled in the fissure of early garnet (reflected light)

Grt I -early garnet; Grt II -late garnet; Qtz-quartz; Ep-epidote; Py-pyrite; Ccp-chalcopyrite

部。早期石榴子石发育比较广泛,晶体多被破坏呈 碎裂状,或呈不规则角砾状充填于后期的方解石、 石英脉内。晚期石榴子石,颜色较之早期石榴子石 要深一些,呈脉状、粒状充填于早期石榴子石颗粒 之间或者裂隙内(图 6d—6f),多呈他形一半自形结构(图 6g—6i),颗粒一般较小,多不发育环带,极正高突起,显均质性,正交光下全消光或异常消光(图 6e、6f、6h、6i)。晚期石榴子石蚀变程度弱于早期石榴

And Gro

Pvr

Spe

67.96 62.30 40.00

0.13 0.17

1.18

0.71

0.32

1.30

0.03

0.76

69.72 67.97 52.48

0.04

1.24

0.15

1.13

子石,并可见有溶蚀结构(图 6i)。

矽卡岩带中常见黄铁矿化、黄铜矿化、磁铁矿 化,以黄铁矿化、黄铜矿化为主,磁铁矿化次之。金 属矿物的形成多晚于石榴子石,呈他形浸染状充填 于石榴子石颗粒之间的孔隙中,或者呈细脉状充填 于石榴子石的裂隙中(图 6j-6l)。

石榴子石地球化学特征 4

4.1 样品采集及测试方法

此次研究样品均采集于老硐沟金矿Ⅲ矿段,早 期石榴子石编号为LDG11、LDG12、LDG13、LDG14、 LDG15、LDG16,晚期石榴子石编号为LDG21、LDG22、 LDG23、LDG24,其中LDG11、LDG12、LDG21、LDG22 为同一件样品的不同期石榴子石,LDG13、LDG14、 LDG23、LDG24为同一件样品的不同期石榴子石。 采集的样品为新鲜的石榴子石砂卡岩,岩石均未发 生明显的退化蚀变。首先通过显微镜进行了详细 的观察鉴定,在此基础上选取具有代表性的石榴子 石进行电子探针分析测试。主量分析测试在中国

表1 老硐沟金矿Ⅲ矿段石榴子石电子探针分析结果(w/%)

0

0

0.18

0

0

0

0

0

0.18

0.44

0.88

36.37 28.47 21.09

0.06

0.97

0.33

1.43

0.32

0.75

43.57 30.85 52.77 42.76

0.26

1.44

0.28

1.20

0

0.25

0.01

0.78 0 0

0

0.68

20.46 41.72

0.48

1.06

0.35

0.96

Table 1 Electron probe analysis results of garnets in Section III of the Laodonggou gold deposit (w/%)

地质调查局西安地调中心电子探针实验室完成,电 子探针仪器型号为JXA-8230,测试加速电压为 15 kV, 束斑电流为10 nA, 束斑直径为1 um, 测试数 据使用 ZAF 方法进行修正计算。

4.2 测试结果

10件石榴子石样品主量元素分析结果如表1所 示。10件样品的w(SiO₂)为34.91%~38.72%,w(TiO₂) 为 0~0.54%, w(CaO)为 33.31%~36.50%, w(Al₂O₃) 为 0~15.00%, w(FeO)为 8.63%~29.06%, w(MnO) 为 0.08%~0.60%, w(MgO)为 0~0.27%, 以 富 钙、 铝、铁为特点,同时还含有少量的锰、镁。不同期 次和环带的不同位置铁、铝含量变化较大,并表现 为明显的负相关。根据主量元素计算出的端元组 分以钙铁榴石(And)、钙铝榴石(Gro)为主,其他端 元组分镁铝榴石(Pyr)、锰铝榴石(Spe)含量为 $0.05\% \sim 1.55\%$

早期石榴子石 w(SiO₂)为 34.91%~38.64%, $w(Al_2O_3)$ 为 0~15.00%, w(FeO)为 8.63%~29.06%, w(CaO)为33.31%~36.50%。测试结果表明,SiO,和 CaO含量变化较小, Al₂O₃和 FeO含量变化较大,并

样品号	1号 LDG11核部→边部									LDG12核部→边部								LDG21		
SiO ₂	38.26	38.01	36.87	34.97	35.19	35.07	36.54	36.54	37.48	37.53	36.37	37.82	37.08	35.22	34.91	36.04	37.48	38.72	38.38	37.70
TiO ₂	0.30	0.08	0.11	0	0.06	0	0.11	0	0	0.27	0.24	0.11	0.09	0	0	0.15	0.15	0.13	0.11	0.02
Al ₂ O ₃	14.13	12.68	7.59	0	0.03	0.03	6.84	5.26	3.90	8.40	5.84	10.59	8.17	0.04	0.11	3.72	8.03	14.59	14.16	10.34
FeO	10.48	12.58	19.04	29.06	28.07	27.98	19.73	21.60	24.00	18.08	21.05	15.17	18.53	26.71	27.27	22.62	18.63	10.48	11.22	15.89
MnO	0.55	0.49	0.28	0.19	0.08	0.37	0.33	0.36	0.51	0.30	0.45	0.58	0.31	0.26	0.39	0.34	0.41	0.48	0.53	0.31
MgO	0.08	0.03	0.04	0.13	0.16	0.20	0.09	0.01	0.07	0.07	0.06	0.06	0	0.13	0.27	0.07	0.11	0.04	0.01	0.01
CaO	35.95	35.67	35.16	33.74	33.65	33.67	34.49	34.90	33.41	35.47	34.79	35.61	35.20	33.67	33.77	34.40	34.77	36.07	35.78	35.61
Na ₂ O	0.05	0.01	0.07	0.03	0	0	0	0	0.02	0	0	0.02	0.04	0.02	0.01	0	0.01	0	0	0.03
K ₂ O	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0
以12个氧	氰原子计	算的阳	离子数																	
Si	2.99	3.00	3.00	2.99	3.02	3.01	3.01	3.01	3.08	3.00	2.99	3.00	3.00	3.05	3.01	3.03	3.02	3.00	2.99	3.00
Al	1.33	1.21	0.76	0	0	0	0.69	0.54	0.40	0.83	0.59	1.03	0.81	0	0.01	0.39	0.80	1.36	1.33	1.01
Ti	0.02	0	0.01	0	0	0	0.01	0	0	0.02	0.01	0.01	0.01	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0
Fe ³⁺	0.57	0.67	1.05	1.67	1.63	1.65	1.10	1.22	1.28	0.98	1.18	0.83	1.01	1.61	1.64	1.32	1.00	0.54	0.58	0.85
Fe ²⁺	0.12	0.16	0.24	0.41	0.38	0.36	0.26	0.27	0.37	0.23	0.26	0.18	0.24	0.32	0.33	0.27	0.26	0.13	0.15	0.21
Mn	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02
Mg	0.01	0	0	0.02	0.02	0.03	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0.02	0.04	0.01	0.01	0	0	0
Ca	3.01	3.02	3.06	3.09	3.09	3.09	3.04	3.08	2.94	3.04	3.06	3.03	3.05	3.12	3.12	3.10	3.00	3.00	2.99	3.04
And	30.42	36.39	59.12	100.00	99.82	99.82	62.32	70.50	77.15	55.36	67.67	45.53	56.45	99.75	99.32	78.23	56.73	29.01	30.75	46.73

续表 1																			
样品号		LDG22		LDG13核部→边部										L	DG14杉	ௌ→边	部		
SiO ₂	38.11	38.02	37.23	36.76	36.24	35.24	35.58	35.52	35.21	35.08	35.42	37.00	37.07	35.37	35.18	35.42	35.53	36.05	35.37
TiO ₂	0.08	0.04	0	0.02	0	0	0	0.04	0.09	0.04	0	0.24	0.06	0.09	0	0	0	0.20	0
Al_2O_3	13.55	11.87	9.91	6.68	3.05	0.06	0.07	0.15	0.12	0	0.02	8.53	7.13	0.11	0.07	0.17	0.32	3.65	0
FeO	11.47	13.42	16.24	20.02	24.50	28.18	28.07	27.40	28.26	27.46	27.79	17.83	20.36	27.91	28.38	27.72	26.90	23.81	28.47
MnO	0.49	0.39	0.30	0.35	0.31	0.09	0.22	0.26	0.24	0.16	0.16	0.60	0.41	0.08	0.16	0.28	0.20	0.27	0.25
MgO	0.05	0	0.02	0.08	0.06	0.06	0.10	0.07	0.09	0.04	0.07	0.11	0.10	0.10	0.05	0.07	0.10	0.07	0.02
CaO	36.02	35.36	35.54	34.75	33.95	33.57	33.60	33.54	33.67	33.81	33.72	34.33	34.72	33.50	33.73	33.64	33.74	33.93	33.31
Na ₂ O	0.03	0	0.02	0	0	0.01	0	0	0.06	0.01	0	0	0.03	0.05	0.01	0	0.01	0.01	0.01
K ₂ O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0
以12个氧	原子计	算的阳	离子数																
Si	2.99	3.02	2.99	3.01	3.03	3.03	3.04	3.05	3.01	3.03	3.04	3.01	3.00	3.03	3.01	3.03	3.05	3.02	3.03
Al	1.29	1.15	0.97	0.68	0.32	0.01	0.01	0.02	0.01	0	0	0.85	0.71	0.01	0.01	0.02	0.03	0.38	0
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0.01	0	0.01	0	0	0	0.01	0
Fe ³⁺	0.62	0.72	0.89	1.11	1.38	1.63	1.62	1.60	1.63	1.63	1.62	0.96	1.09	1.61	1.64	1.61	1.59	1.33	1.63
Fe ²⁺	0.13	0.18	0.20	0.26	0.34	0.39	0.39	0.36	0.39	0.35	0.37	0.25	0.29	0.39	0.39	0.37	0.34	0.33	0.41
Mn	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.04	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02
Mg	0.01	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0
Ca	3.03	3.01	3.06	3.05	3.05	3.09	3.07	3.08	3.08	3.13	3.10	2.99	3.01	3.08	3.09	3.09	3.10	3.04	3.06
And	33.17	39.18	48.64	63.29	82.06	99.60	99.59	99.06	99.28	100.00	99.89	54.08	61.56	99.29	99.56	98.94	98.01	78.72	100.00
Gro	65.49	59.84	50.53	35.43	16.77	0	0	0	0	0	0	43.89	36.93	0	0	0	0.89	20.21	0
Pyr	0.19	0.02	0.08	0.35	0.29	0.30	0.41	0.38	0.45	0	0.11	0.48	0.45	0.53	0.23	0.37	0.50	0.32	0
Spe	1.15	0.96	0.74	0.92	0.87	0.09	0	0.56	0.26	0	0	1.55	1.06	0.18	0.20	0.69	0.60	0.75	0
样品号			LDG	23							I	.DG15柞	该部→辻	部					
SiO ₂		35.19	35.5	50	35.87	37	.75	37.46	31	7.06	37.71	3	8.45	37.31	3	37.95	37.7	7	36.85
TiO ₂		0	0.0)6	0	0	.07	0.54	(0.15	0	(0.34	0.13		0.06	0		0
Al_2O_3		0.12	0.1	17	0.12	13	.09	11.54	8	8.60	12.13	1:	5.00	9.80) 1	2.31	10.8	7	7.59
FeO		28.06	27.8	36	28.50	12	.29	13.85	1′	7.33	13.50	:	8.84	15.26	5 1	2.79	15.3	7	19.05
MnO		0.09	0.2	25	0.19	0	.42	0.33	(0.20	0.35	().39	0.28	;	0.35	0.4	1	0.34
MgO		0.04	0.0)3	0.09	0	.09	0.13	(0.05	0.08	(0.17	0.10)	0.10	0.0	8	0.12
CaO		34.02	33.8	30	33.66	35	.94	35.64	3:	5.08	35.64	30	5.21	35.38	3	35.24	35.4	2	34.78
Na ₂ O		0.01	0.0	02	0	0	.01	0	(0.02	0	(0.01	0		0.02	0.0	1	0.02
K ₂ O		0	0		0	0		0	(0	0.01	()	0		0	0.0	1	0
以12个氧	原子计	算的阳	离子数																
Si		3.01	3.0)3	3.04	2	.98	2.97	-	3.01	2.99	-	3.00	3.01		3.02	3.0	0	3.00
Al		0.01	0.0	02	0.01	1	.25	1.12	(0.86	1.17		1.41	0.97	,	1.19	1.0	5	0.76
Ti		0	0		0	0		0.03	(0.01	0	(0.02	0.01		0	0		0
Fe^{3+}		1.64	1.6	51	1.61	0	.67	0.76	(0.96	0.73	(0.50	0.86	5	0.68	0.8	1	1.05
Fe^{2+}		0.37	0.3	38	0.41	0	.14	0.16	(0.22	0.17	(0.08	0.17	,	0.17	0.2	1	0.25
Mn		0.01	0.0	02	0.01	0	.03	0.02	(0.01	0.02	(0.03	0.02	!	0.02	0.0	3	0.02
Mg		0.01	0		0.01	0	.01	0.02	(0.01	0.01	(0.02	0.01		0.01	0.0	1	0.01
Ca		3.12	3.0)9	3.06	3	.04	3.03	3	3.05	3.03		3.02	3.06	5	3.00	3.0	1	3.04
And		99.27	98.9	94	99.29	35	.37	41.18	53	3.79	39.00	20	5.61	48.10) 3	37.22	44.4	8	59.00
Gro		0.25	0.1	17	0	63	.28	57.46	4:	5.49	59.81	7	1.77	50.74	÷ 6	51.47	54.1	8	39.57
Pyr		0.22	0.1	14	0.45	0	.35	0.55	(0.22	0.35	(0.71	0.46	5	0.45	0.3	4	0.56
Spe		0.26	0.7	75	0.26	1	.00	0.81	(0.50	0.83	().91	0.70)	0.86	1.0	0	0.88

· + --

绥 衣											
样品号	8			LDG16核	部→边部					LDG24	
SiO_2	38.46	38.64	38.04	38.15	36.70	37.69	37.17	37.09	35.25	35.14	35.33
TiO ₂	0.26	0.37	0.23	0.42	0.04	0.21	0	0.53	0	0.07	0.09
Al_2O_3	13.84	13.59	12.73	14.35	7.35	12.41	11.17	10.93	0.32	0.04	0.06
FeO	11.02	11.34	12.21	8.63	19.91	12.54	15.09	14.42	27.93	28.27	27.83
MnO	0.33	0.42	0.51	0.45	0.24	0.56	0.31	0.47	0.21	0.12	0.20
MgO	0.10	0.10	0.10	0.18	0.08	0.10	0.11	0.11	0.06	0.04	0.07
CaO	35.95	35.90	35.78	36.50	34.83	34.97	35.23	35.28	33.66	33.81	33.76
Na ₂ O	0.01	0.02	0.01	0	0	0.01	0	0.02	0	0	0.02
K ₂ O	0	0.01	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0
以12个氧原	(子计算的阳离于	子数									
Si	3.00	3.01	3.00	3.00	2.99	3.01	2.98	2.97	3.02	3.01	3.03
Al	1.31	1.28	1.22	1.36	0.74	1.20	1.09	1.07	0.03	0	0.01
Ti	0.02	0.02	0.01	0.02	0	0.01	0	0.03	0	0	0.01
Fe^{3+}	0.59	0.60	0.67	0.54	1.08	0.67	0.80	0.80	1.61	1.64	1.62
Fe^{2^+}	0.13	0.14	0.14	0.03	0.28	0.16	0.21	0.17	0.39	0.39	0.37
Mn	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.04	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01
Mg	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0.01
Ca	3.01	2.99	3.02	3.07	3.04	2.99	3.02	3.03	3.09	3.10	3.10
And	31.52	32.45	36.10	28.74	60.46	36.62	43.23	43.54	98.06	99.74	99.60
Gro	67.29	66.15	62.24	69.46	38.58	61.59	55.57	54.82	0.99	0	0
Pyr	0.40	0.41	0.43	0.74	0.34	0.41	0.45	0.48	0.32	0.20	0.35
Spe	0.79	0.99	1.23	1.07	0.62	1.38	0.75	1.16	0.62	0.06	0.05

注:本次实验误差范围0.01%

具有明显的负相关性。根据主量元素计算的端元 组分以钙铁榴石和钙铝榴石为主,端元组分含量自 核部向边部具有一定的变化规律。

根据其镜下及端元组分含量特征,早期石榴子 石可分为3类。第1类以LDG11、LDG12为代表, 在正交光下核部与环带表现出明显的差异性,核部 异常消光或全消光,环带为黑白相间条纹,宽度均 较窄且无明显差别,核部以钙铝榴石为主,边部以 钙铁榴石为主,并由核部到边部具有钙铝榴石(40%~ 67.96%)+钙铁榴石(30.42%~59.12%)→钙铁榴石 (99.82%~100.00%)→钙铁榴石(62.32%~77.15%)+ 钙铝榴石(21.09%~36.37%)的变化特点。第2类以 LDG13、LDG14为代表,核部无明显异常干涉色,多 表现为均质性,环带较宽,且黑色条纹普遍宽于白 色条纹。端元组分以钙铁榴石为主,核部为钙铁榴 石(54.08%~82.06%)+钙铝榴石(16.77%~43.89%), 边部为钙铁榴石(78.72%~100.00%)。第3类以 LDG15、LDG16为代表, 白色条纹宽于黑色条纹, 端 元组分中钙铁榴石与钙铝榴石含量近于相当,钙铁 榴石含量为26.61%~59.00%,钙铝榴石含量为39.57%~ 71.77%

晚期石榴子石 w(SiO₂)为35.14%~38.72%, w(Al₂O₃)为0.04%~14.59%,w(FeO)为10.48%~ 28.50%,w(CaO)为33.66%~36.07%。测试结果表明, SiO₂和CaO含量变化较小,Al₂O₃和FeO含量变化 较大,呈负相关。端元组分主要为钙铁榴石和钙铝 榴石,镁铝榴石和锰铝榴石等其他端元组分含量极少。

根据其石榴子石镜下及成分特征,晚期石榴子 石可分为2类。第1类以LDG21为代表,正交光下 具有异常消光的特征,端元组分出现3个波峰、波 谷,钙铝榴石和钙铁榴石含量互为消长,且近于相 当。第2类以LDG23为代表,正交光下全消光,端 元组分为钙铁榴石,几乎不含钙铝榴石或者含量极少。

5 讨论

5.1 石榴子石化学成分对形成环境的指示作用

实验结果表明,老硐沟金矿Ⅲ矿段矽卡岩型铜 金矿中的石榴子石为钙铝-钙铁榴石系列,并以过 渡性石榴子石为主,纯钙铁榴石端元组分石榴子石 次之,几乎无纯钙铝榴石端元组分石榴子石。纯钙 铝榴石仅发育在早期石榴石子核部,过渡性钙铁- 钙铝榴石多发育在早期石榴子石边部,钙铁榴石主 要发育于晚期石榴子石(图 5,图 7)。已有研究表 明,钙铝--钙铁石榴子石系列的形成可以归纳为下 列4个平衡反应式(梁祥济,1994):

$$2SiO_2 + Al_2O_3 + 3CaCO_3 + 2H_2O = Ca_3Al_2Si_2(OH)_4O_8 + 3CO_2 \uparrow$$
(1)

水榴石

$$2.5SiO_{2} + Al_{2}O_{3} + 3CaCO_{3} + H_{2}O = Ca_{3}Al_{2} (SiO_{4})_{2.5} (OH)_{2} + 3CO_{2} \uparrow$$
(2)

水钙铝榴石

 $3\mathrm{SiO}_2 + \mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3 + 3\mathrm{CaCO}_3 = \mathrm{Ca}_3\mathrm{Al}_2(\mathrm{SiO}_4)_3 + 3\mathrm{CO}_2\uparrow(3)$

钙铝榴石

 $3\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CaCO}_3 = \text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3 + 3\text{CO}_2\uparrow (4)$

钙铁榴石

石榴子石的光学特性受外部应力、二价和三价 阳离子成分、稀土含量、双晶等诸多因素的影响; 钙铁-钙铝榴石系列的形成、结晶速率、晶体特征 也受外部因素,如温度、压力、酸碱度、氧化-还原 环境等因素的影响;石榴子石环带的形成受溶液自 身饱和程度和外部因素的影响(艾永富和金玲年, 1981;赵斌等,1983; Bau, 1991; Jamtveit et al., 1993; 梁 祥济,1994; Fei et al., 2019; 闫岩等,2020)。在一定 压力条件下钙铁榴石主要形成于450~600℃温度 区间,钙铝榴石则在550~700℃温度区间内更易形 成;钙铝榴石的晶出需要中一酸性环境,而钙铁榴 石在较为碱性的环境中也能形成(pH=4.5~11.0范 围内均能形成钙铁榴石);氧化一弱还原环境的介 质更利于钙铁榴石形成,钙铝榴石的形成更易发生 在弱氧化一弱还原的环境介质中(梁祥济,1994)。

老硐沟金矿 III 矿段砂卡岩中早期石榴子石环带 较为发育,晚期石榴子石环带不甚发育,反映出早 期热液在与围岩交代过程中物理化学条件变化较 大。早期石榴子石中(图 8),LDG11核部以钙铝榴 石组分为主,但钙铁榴石和钙铝榴石组分几近相 等,向边部过渡钙铁榴石含量增多,并出现了纯钙



Pyr+Spe

Fig. 7 Diagram of garnet end group in Section III of the Laodonggou gold deposit

铁榴石端元组分石榴子石。LDG12核部以钙铝榴石为主,向边部钙铁榴石逐渐占据主导,而后又过渡为钙铁榴石和钙铝榴石组分基本相等的情况。 LDG13核部以钙铁榴石为主,向边部过渡为纯钙铁榴石端元组分石榴子石。LDG15自核部向边部一直表现为钙铁榴石和钙铝榴石组分含量大致相等 的情况,且出现相互交替增减的现象。总的来看, 早期石榴子石由核部向边部 Al₂O₃含量减少,而 FeO含量增多。同时这些特征也反映出,早期石榴 子石在形成过程中温度逐渐降低,早期热液表现为 中酸性、弱氧化一弱还原环境,而后随着热液与大 理岩围岩的交代作用,热液环境逐渐向着弱碱性、



图 8 老硐沟金矿Ⅲ矿段早期石榴子石环带成分变化示意图

Fig. 8 Schematic diagram of composition change of the ring belt of early garnet in Section III of the Laodonggou gold deposit

氧化一弱还原环境转变,从而导致边部形成的石榴 子石铁质含量增多。晚期石榴子石环带不发育(图9), LDG21、LDG22 端元组分钙铝榴石和钙铁榴石含量 几近相当,LDG23、LDG24 端元组分则主要为钙铁 榴石,几乎不含钙铝榴石。说明晚期热液中铁质含 量更多,且热液环境相较早期碱性更强、氧逸度更高。



图 9 老硐沟金矿Ⅲ矿段晚期石榴子石成分变化示意图

Fig. 9 Schematic diagram of composition change of the late garnet in Section III of the Laodonggou gold deposit

5.2 石榴子石与矿化关系

已有研究表明,不同的石榴子石端元组分组成 反映了石榴子石的成因类型不同,岩浆和变质作用 通常形成铁铝-镁铝榴石系列,而钙铝-钙铁榴石系 列通常以热液蚀变成因为主(Boyd et al., 2004;纪敏 等,2018; Fei et al., 2019; 王一川和段登飞,2021)。 在砂卡岩化过程中,石榴子石促进了脆性围岩裂隙 的进一步发育,为热液的运移和沉淀提供通道和场 所(Somarin,2010)。砂卡岩矿床的形成大多经历岩 浆就位期间的化学接触变质作用、交代砂卡岩形成 和硫化物沉淀3个阶段,在砂卡岩形成后,早阶段 形成的砂卡岩矿物遭受了后期热液蚀变,由于温度 降低、氧逸度增加、氧化-还原环境的改变,硫化物 沉淀,金、铜、铅等成矿物质富集成矿(翟裕生,1983)。

在一定的溶液环境条件下,石榴子石的成分和 矿化种类也具有一定的规律性,碱性环境中铁矿化 和钙铁榴石易于形成,酸性介质对钙铝榴石和钼矿 化较为有利,近于等量的钙铝-钙铁榴石和铜矿化 在弱酸或弱碱、中性介质中更易沉淀(艾永富和金 玲年,1981)。老硐沟金矿主要载金矿物为菱砷铅 钒、菱砷铁矿、臭葱石等,以含砷、铁类矿物为主, 说明铁矿化的形成时期为金富集的最有利时期。 矽卡岩早期阶段,溶液以中酸性为主,核部形成钙 铝榴石,伴随矿物结晶,溶液成分发生震荡变化,溶 液 pH 环境也由酸性渐渐向中性、弱酸性过渡,钙铝-钙铁榴石形成,并在边部形成环带,该阶段主要伴 随黄铜矿化等。在晚期矽卡岩阶段,溶液 pH环境 为碱性,随着温度降低、氧逸度增加,溶液中铁质含 量增多,铁过饱和,钙铁榴石逐渐占据主导,黄铁 矿、毒砂等载金矿物结晶沉淀,并造成了金富集。 同时在镜下也可观察到,黄铁矿主要呈脉状、浸染 状发育在早期石榴子石颗粒间隙内,并可见早期环 带较为发育的石榴子石被后期含矿热液交代的现 象(图 5k),而金属硫化物也主要发育在晚期石榴子 石颗粒之间,并未见到明显的交代现象。

6 结论

(1)老硐沟金矿Ⅲ矿段石榴子石可分为2个世代:早期石榴子石,多呈半自形一自形晶,颗粒大小 1.5~3 mm,最大可达8 mm,大多发育环带,多发生 蚀变,且核部蚀变程度多高于边部;晚期石榴子石, 颜色较早期石榴子石更深,多呈他形一半自形结 构,充填于早期石榴子石颗粒之间或者裂隙内,蚀 变程度弱于早期石榴子石。

(2)早期石榴子石组分主要为钙铁-钙铝榴石过 渡系列,核部以钙铝榴石为主,向边部钙铁榴石逐 渐增多并占据主导。晚期石榴子石以钙铁榴石为 主,并含有极少量的钙铝榴石。反映了在砂卡岩的 形成阶段,早期热液环境为中酸性、弱氧化一弱还 原环境,后期铁质含量增多,氧逸度增加,热液环境 碱性、氧化性增强。 (3)老硐沟金矿Ⅲ矿段石榴子石主要发育在大 理岩围岩中,属热液交代成因。早期砂卡岩化阶 段,石榴子石以钙铝榴石、钙铁-钙铝榴石为主,并 伴随铜矿化形成;晚期随着溶液 pH 值升高、氧逸度 增加、铁质含量增多,钙铁榴石形成,并伴随铁矿 化,造成金富集。

致谢:感谢圆通矿业有限责任公司何毅、杨晓 奇、王晓亮、杨冰、郭永超、常成文等人在野外 工作中给予的大力支持和帮助。感谢编辑部老师 和评审专家对本文提出的宝贵意见、建议。

References

- AI Y F, JIN L N, 1981. The study of the relationship between the mineralization and the garnet in the skarn ore deposits[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 9(1): 83-90. (in Chinese with English abstract)
- BAU M, 1991. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium[J]. Chemical Geology, 93(3-4): 219-230.
- BOYD F R, PEARSON D G, HOAL K O, et al., 2004. Garnet lherzolites from Louwrensia, Namibia: bulk composition and *P*/*T* relations[J]. Lithos, 77(1-4): 573-592.
- DING J X, HAN C M, XIAO W J, et al., 2015. Geochemistry and U-Pb geochronology of tungsten deposit of Huaniushan Island arc in the Beishan orogenic belt, and its geodynamic background[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(2): 594-616. (in Chinese with English abstract)
- FEI X H, ZHANG Z C, CHENG Z G, et al., 2019. Factors controlling the crystal morphology and chemistry of garnet in skarn deposits: a case study from the Cuihongshan polymetallic deposit, Lesser Xing'an Range, NE China[J]. American Mineralogist, 104(10): 1455-1468.
- GASPAR M, KNAACK C, MEINERT L D, et al., 2008. REE in skarn systems: a LA-ICP-MS study of garnets from the crown jewel gold deposit[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72(1): 185-205.
- HE Y, WANG L J, LIU P H, 2016. Geological. characteristics and metallogenic regularity of Laodonggou gold deposit, Inner Mongolia [J]. Nonferrous Metals Abstract, 31(1): 20-21. (in Chinese)
- HUANG D H, WANG B L, WU C Y, et al., 1996. Austinite and adamite discovered for the first time in China and their significance [J]. Acta Petrologica Mineralogica, 15(3): 259-268. (in Chinese with English abstract)
- HUANG D H, WANG B L, 1997. Ore forming characteristics of Laodonggou oxidized leached type gold deposit in Ejinaqi[J]. Journal of Precious Metallic Geology, 6(2): 93-100. (in Chinese with English abstract)
- JAMTVEIT B, WOGELIUS R A, FRASER D G, 1993. Zonation patterns of skarn garnets: records of hydrothermal system evolution[J]. Geology, 21(2): 113-116.
- JAMTVEIT B, HERVIG R L, 1994. Constraints on transport and kinetics in hydrothermal systems from zoned garnet crystals[J]. Science, 263(5146): 505-508.
- JAMTVEIT B, AGNARSDOTTIR K V, WOOD B J, 1995. On the origin of zoned grossular-andradite garnets in hydrothermal systems[J]. European Journal of Mineralogy, 7(6): 1399-1410.
- JI M, ZHAO X F, ZENG L P, et al., 2018. Microtexture and geochemistry of garnets from Tonglushan skarn Cu-Fe deposit in the southeastern Hubei

$$\label{eq:states} \begin{split} \text{metallogenic province: implications for ore-forming process} [J]. \ Acta \ Petrologica \ Sinica, 34(9): 2716-2732. \ (in \ Chinese \ with \ English \ abstract) \end{split}$$

- JIAO H, KANG J Z, HUANG G B, et al., 2022. Magmatism, metallogenic characteristics, and prospecting prediction for gold deposits in the north of Kunlun River Area, Qinghai, China[J]. Journal of Geomechanics, 28(3): 383-405. (in Chinese with English abstract)
- LIANG X J, 1994. Garnets of grossular-andradite series: their characteristics and metasomatic mechanism[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 13(4): 342-352. (in Chinese with English abstract)
- MARTIN L A J, BALLÈVRE M, BOULVAIS P, et al., 2011. Garnet re-equilibration by coupled dissolution-reprecipitation: evidence from textural, major elementand oxygen isotope zoning of 'cloudy' garnet[J]. Journal of Metamorphic Geology, 29(2): 213-231.
- MEINERT L D, 1992. Skarns and skarn deposits[J]. Geoscience Canada, 19(4): 145-162.
- NIE F J, JIANG S H, BAI D M, et al., 2002. Metallogenic studies and ore prospecting in the conjunction area of Inner Mongolia autonomous region, Gansu Province and Xinjiang Uygur Autonomous Region(Beishan Mt.), Northwest China[M]. Beijing: Geology Press: 1-408. (in Chinese)
- QIAN J P, FU Y J, ZHOU Y N, et al., 2018. Analysis of the metallogenic structure system and the regularities of tectonic ore control of the Laodonggou gold polymetallic mining area, Ejinaqi, Inner Mongolia[J]. Geotectonica et Metallogenia, 42(6): 1046-1063. (in Chinese with English abstract)
- SMITH M P, HENDERSON P, JEFFRIES T E R, et al., 2004. The rare earth elements and uranium in garnets from the Beinn an Dubhaich aureole, Skye, Scotland, UK: constraints on processes in a dynamic hydrothermal system[J]. Journal of Petrology, 45(3): 457-484.
- SOMARIN A K, 2010. Garnetization as a ground preparation process for copper mineralization: evidence from the Mazraeh skarn deposit, Iran[J]. International Journal of Earth Sciences, 99(2): 343-356.
- TIAN Z H, XIAO W J, SHAN Y H, et al., 2013. Mega-fold interference patterns in the Beishan orogen (NW China) created by change in plate configuration during Permo-Triassic termination of the Altaids[J]. Journal of Structural Geology, 52: 119-135.
- TIAN Z H, XIAO W J, WINDLEY B F, et al., 2014. Structure, age, and tectonic development of the Huoshishan-Niujuanzi ophiolitic mélange, Beishan, southernmost Altaids[J]. Gondwana Research, 25(2): 820-841.
- WANG Y C, DUAN D F, 2021. REE distribution character in skarn garnet and its geological implication[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 57(3): 446-458. (in Chinese with English abstract)
- YAN Y, PENG R M, CHEN S Y, et al., 2020. Quantitative structure analysis of ore-bearing garnet-rich crystal in the Huogeqi mining area in Inner Mongolia and its significance[J]. Journal of Geomechanics, 26(1): 135-150. (in Chinese with English abstract)
- YANG H Q, LI Y, YANG J G, et al., 2006. Main metallogenic characteristics in the Beishan orogen[J]. Northwestern Geology, 39(2): 78-95. (in Chinese with English abstract)
- YANG H Q, LI Y, LI W M, et al., 2008. General discussion on metallogenitic tectonic setting of Beishan Mountain, Northwestern China [J]. Northwestern Geology, 41(1): 22-28. (in Chinese with English abstract)
- YANG H Q, LI Y, ZHAO G B, et al., 2009. Stratigraphic correlation and its significance of Xinjiang-Gansu-Inner Mongolia join area[J]. Northwestern Geology, 42(4): 60-75. (in Chinese with English abstract)
- YANG H Q, ZHAO G B, LI W M, et al., 2010. Formation age and source tracing of the tungsten-bearing granite belt in the Pantuoshan-Yingzuihongshan area, Inner Mongolia[J]. Geology and Exploration, 46(3): 407-413. (in Chinese with English abstract)

- YARDLEY B W D, ROCHELLE C A, BARNICOAT A C, et al., 1991. Oscillatory zoning in metamorphic minerals: an indicator of infiltration metasomatism[J]. Mineralogical Magazine, 55(380); 357-365.
- YU W S, LIAO C X, CHEN G, 2013. Analysis of the genetic types and prospect of Laodonggou gold deposit in Inner Mongolia[J]. Gold Science and Technology, 21(2): 24-27. (in Chinese with English abstract)
- YUN L, ZHANG J, WANG J, et al., 2021. Discovery of active faults in the southern Beishan Area, NW China: implications for regional tectonics[J]. Journal of Geomechanics, 27(2): 195-207. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI D G, LIU J J, ZHANG H Y, et al., 2014. Origin of oscillatory zoned garnets from the Xieertala Fe-Zn skarn deposit, northern China: *in situ* LA-ICP-MS evidence[J]. Lithos, 190-191; 279-291.
- ZHAI Y S, 1983. Some problems in the study of skarndeposits[J]. Mineral Resources and Geology(1): 46-54. (in Chinese)
- ZHANG G Z, ZHANG Y, XIN H T, et al., 2021. Geochronology and geochemistry of diorite porphyrite from Laodonggou gold-polymetallic deposit, Beishan, Inner Mongolia, and its metallogenic significance[J]. Mineral Deposits, 40(3): 555-573. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO B, LI T J, LI Z P, 1983. Experimental study of physico-chemical conditions of the formation of skarns[J]. Geochimica, 12(3): 256-267. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO G B, LI W M, YANG H Q, et al., 2010. Geological and geochemical characteristics of the Guoqing tungsten deposit in Beishan orogen, Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 29(S1): 341-342. (in Chinese)
- ZHAO G B, LI W M, YANG H Q, et al., 2011. Geological and geochemical characteristics of the Pantuoshan tungsten-bearing granite mass in Inner Mongolia and its genesis[J]. Geology and Exploration, 47(5): 828-836. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO P B, FU L, GAO F, et al., 2016. Geological characteristics and prospecting potentiality of Laodonggou tungsten deposit, Inner Mongolia[J]. Western Resources(6): 83-85. (in Chinese)
- ZHAO P B, LI W C, LUO Q Z, et al., 2019. Formation age and tectonic environment of Yingzuihongshan granite in Beishan, Inner Mongolia[J]. Northwestern Geology, 52(4): 1-13. (in Chinese with English abstract)
- ZUO G C, ZHANG S L, HE G Q, et al., 1990. Early Paleozoic plate tectonics in Beishan Area[J]. Chinese Journal of Geology, 25(4): 305-314. (in Chinese with English abstract)
- ZUO G C, LIU Y K, LIU C Y, 2003. Framework and evolution of the tectonic structure in Beishan Area across Gansu Province, Xinjiang Autonomous Region and Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Acta Geologica Gansu, 12(1): 1-15. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 艾永富,金玲年,1981.石榴石成分与矿化关系的初步研究[J].北京 大学学报(自然科学版),9(1):83-90.
- 丁嘉鑫,韩春明,肖文交,等,2015.北山造山带花牛山岛弧东段钨矿 床成矿时代和成矿动力学过程[J].岩石学报,31(2):594-616.
- 何毅,王乐进,刘培海,2016.内蒙古老洞沟金矿床地质特征与成矿 规律研究[J].有色金属文摘,31(1):20-21.

黄典豪,王宝林,吴澄宇,等,1996.我国首次发现的砷钙锌石和羟砷

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版,也有可能听到作者的 语音介绍及更多文章相关资讯 锌石的矿物学特征及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 15(3): 259-268.

- 黄典豪,王宝林,1997.额济纳旗老硐沟氧化-淋滤型金矿床成矿特征[J].贵金属地质,6(2):93-100.
- 纪敏,赵新福,曾丽平,等,2018.鄂东南铜绿山矿床石榴子石显微结构及微区成分对成矿过程的指示[J].岩石学报,34(9):2716-2732.
- 焦和,康继祖,黄国彪,等,2022.青海昆仑河北地区岩浆活动、金矿成矿特征及找矿前景分析[J].地质力学学报,28(3):383-405.
- 梁祥济,1994.钙铝-钙铁系列石榴子石的特征及其交代机理[J].岩石矿物学杂志,13(4):342-352.
- 聂凤军,江思宏,白大明,等,2002.北山地区金属矿床成矿规律及找 矿方向[M].北京:地质出版社:1-408.
- 钱建平,符有江,周永宁,等,2018.内蒙古额济纳旗老硐沟金多金属 矿区成矿构造系统解析和构造控矿规律[J].大地构造与成矿 学,42(6):1046-1063.
- 王一川,段登飞,2021. 砂卡岩中石榴子石的稀土配分特征及其成因 指示[J]. 北京大学学报(自然科学版),57(3):446-458.
- 闫岩,彭润民,陈思雨,等,2020.内蒙古霍各乞矿区含矿富石榴石岩 晶体定量化结构分析及其意义[J].地质力学学报,26(1):135-150.
- 杨合群,李英,杨建国,等,2006.北山造山带的基本成矿特征[J].西 北地质,39(2):78-95.
- 杨合群,李英,李文明,等,2008.北山成矿构造背景概论[J].西北地 质,41(1):22-28.
- 杨合群,李英,赵国斌,等,2009.新疆一甘肃一内蒙古衔接区地层对 比及其意义[J].西北地质,42(4):60-75.
- 杨合群,赵国斌,李文明,等,2010.内蒙古盘陀山-鹰嘴红山含钨花岗 岩带形成时代及源区示踪[J].地质与勘探,46(3):407-413.
- 于文松,廖昌溪,陈果,2013.内蒙古老硐沟金矿床成因类型与找矿 前景分析[J].黄金科学技术,21(2):24-27.
- 云龙,张进,王驹,等,2021.甘肃北山南部活动断裂的发现及其区域 构造意义[J].地质力学学报,27(2):195-207.
- 翟裕生, 1983. 砂卡岩矿床研究的若干问题 [J]. 矿产地质 (1): 46-54.
- 张国震,张永,辛后田,等,2021.内蒙古北山老硐沟金多金属矿床闪 长玢岩年代学、地球化学及其成矿意义[J].矿床地质,40(3): 555-573.
- 赵斌,李统锦,李昭平,1983. 夕卡岩形成的物理化学条件实验研究 [J]. 地球化学,12(3):256-267.
- 赵国斌,李文明,杨合群,等,2010.内蒙北山国庆钨矿床成矿特征与成因探讨[J].矿床地质,29(S1):341-342.
- 赵国斌,李文明,杨合群,等,2011.内蒙盘陀山含钨花岗岩体地质地 球化学特征及成因讨论[J].地质与勘探,47(5):828-836.
- 赵鹏彬,付垒,高峰,等,2016.内蒙古老硐沟钨矿床地质特征与找矿 潜力分析 [J].西部资源(6):83-85.
- 赵鹏彬,李维成,罗乾周,等,2019.内蒙北山鹰嘴红山花岗岩体形成 时代及构造环境分析[J].西北地质,52(4):1-13.
- 左国朝,张淑玲,何国琦,等,1990.北山地区早古生代板块构造特征 [J].地质科学,25(4):305-314.
- 左国朝,刘义科,刘春燕,2003.甘新蒙北山地区构造格局及演化[J]. 甘肃地质学报,12(1):1-15.

