

# 卡林型金矿金的赋存状态研究方法与发展

刘晓宇

成都理工大学地球科学学院

DOI:10.12238/gmsm.v4i6.1280

**[摘要]** 卡林型金矿是二十世纪六十年代在美国内华达州卡林省发现的赋存于碎屑岩-碳酸盐岩中的金矿床。金以“不可见金”赋存于砷黄铁矿和毒砂中。本文综述了卡林型矿床金的赋存状态的研究方法及最新进展。不可见金的赋存状态研究方法主要有微束分析法、质谱分析法以及波谱法。目前对于晶格金的沉淀剂及晶格位置仍有争议。

**[关键词]** 卡林型金矿; 金的赋存状态; 晶格金

**中图分类号:** S-0 **文献标识码:** A

## Research Methods and Progress of Occurrence State of Carlin-type Gold Deposit

Xiaoyu Liu

College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology

**[Abstract]** Carlin-type gold deposit is a clastic carbonate gold deposit discovered in carlin, Nevada, USA in the 1960s. Gold occurs as invisible gold in arsenopyrite. This paper reviews the research methods and the latest progress of the occurrence state of gold in Carlin-type deposits. The main methods to study the occurrence state of invisible gold are microbeam analysis, mass spectrometry and spectral analysis. At present, there are still controversies about the precipitator and lattice position of lattice gold.

**[Key words]** Carlin-type gold deposit; gold occurrence state; lattice gold

金赋存状态的研究对于分析成矿流体性质、演化规律,探讨成矿元素迁移和沉淀机制、查明矿床成因类型等具有重要的科学意义,并且有助于矿石的冶炼,提高经济效益。近年来,对于卡林型金矿这种不可见金,微束分析、质谱分析与波谱法的结合利用大大提高了测试的精度与准确度。

### 1 卡林型金矿金的赋存状态

上个世纪六十年代在美国内华达州卡林镇发现了一种赋存于沉积岩中的微细粒浸染型的金矿床,被称为卡林型金矿。它产于碎屑岩和碳酸盐建造中并严格受断裂构造控制,Au与As、Sb、Hg、Tl等中低温热液元素密切相关。Au主要以“不可见”形式赋存于含砷黄铁矿中<sup>[1]</sup>。

“不可见金”指在光学显微镜不能观测到( $<1\ \mu\text{m}$ ),后来研究发现扫描电镜下也无法检测到金。不可见金主要有两种存在形式:一种为晶格金,以原子或离

子形式通过类质同象进入介质晶格中;另一种为 $<0.1\ \mu\text{m}$ 的纳米金颗粒。大量研究已表明As与金成矿密切相关,且As的含量与Au的呈正相关,而Au在砷黄铁矿和毒砂中含量为 $\mu\text{g/g}$ 量级,其化学状态难以测量,因此大量研究通过As的化学状态来推断Au的赋存状态。Reich总结了大量载金黄铁矿成分数据,拟合出Au-As固溶体溶解度曲线,推测在溶解度曲线以上,金在黄铁矿中便可以以纳米金( $\text{Au}^0$ )形式出现,以下则主要以晶格金( $\text{Au}^+$ )形式存在<sup>[2]</sup>,并发现卡林型金矿金主要为晶格金。

### 2 金的赋存状态研究方法

#### 2.1 微束分析技术

微束分析技术可以对载金矿物进行定性和定量的分析,并且通过高分辨率电子成像进行矿物结构以及元素分布的分析。例如扫描电镜(SEM)、电子探针(EPMA)以及透射电镜(TEM)等技术,近些

年来,随着技术的进步,许多研究利用聚焦离子束扫描电镜结合(FIB-SEM)来进行原位微区制样,并结合高分辨率透射电镜实现纳米尺度直接观测分析,获得矿物形态、结构、晶格参数等信息,有效的连接了微米和纳米尺度的研究。梁金龙利用高分辨透射电镜在黄铁矿中观察到纳米金区域存在晶格位错,认为Au的富集与黄铁矿中的晶格缺陷(如位错、层错、堆垛层错等)有关<sup>[1]</sup>。

#### 2.2 质谱分析技术

常用的为激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)和纳米二次例子质谱,可快速进行微区元素和同位素分析的技术,实现高分辨率的定性定量分析,尤其是金这种微量元素的可以进行准确的元素定量。其空间分辨率高、分析速度快,但对样品会有一定的损伤。赵静利用Nano-SIMS对贵州水银洞金矿进行研究,发现Au、As分布于砷黄铁矿的

环带<sup>[3]</sup>。

### 2.3 波谱学研究

波谱学主要是对金的化学状态进行研究,可以获得元素的化学价态、电子结构、相邻原子的结构、配位原子的种类和数量、配位距离等。常用的方法主要有X射线光电子谱(XPS)、X射线近吸收边结构谱(XANES)、扩展X射线吸收精细结构谱(EXAFS)、激光拉曼光谱分析(LRM)等。杨荣生对甘肃阳山金矿载金矿物进行XPS分析,发现主要元素在载金矿物中存在形式为 $As^{-}$ 、 $Fe^{+2}$ 、 $S^{-}$ <sup>[4]</sup>。

### 3 存在的问题与研究趋势

对于晶格金黄铁矿中的沉淀机制,目前还存在争议,主要有以下观点:(1)砷黄铁矿中存在 $As^{3+}$ ,认为金是以 $Au^{+}+As^{3+} \rightarrow 2Fe^{2+}$ 的形式进入黄铁矿晶格中;(2)金发生类质同象替代了黄铁矿中Fe的位置,但根据类质同象替代规则,当替代离子的半径比被替代离子的半径大30%以上就很难发生替代,而Fe与Au的离子半径相差很大,远远大于30%;(3)Au的富集与黄铁矿中的晶格缺陷(如位错、层错、堆垛层错等)有关。

对于卡林型金矿赋存状态,在实际的研究中应将微束分析、波谱分析与金的化学状态的定量分析等多种方法相结合,更深入的解决金的赋存状态和金的运移、沉淀机制的问题以及找矿方面的应用。前人的研究大多是对元素的化学状态的定性的研究,到目前为止,定量解决两种化学状态金的研究很少,这反映了卡林型金矿的表征面临的巨大挑战。近期Yang等利用控制酸蚀法首次对不可见金进行定量XPS分析<sup>[5]</sup>,得到金总浓度、 $Au^{+}$ 和 $Au^0$ 的百分比、 $Au^0$ 的大小以及金砷的比例,且该方法对样品是无损,为研究金赋存状态提供了一个新的思路。

### 4 结论

卡林型金矿金为“不可见金”,并主要为晶格金进入砷黄铁矿。对于不可见金的研究方法应用较广泛的主要有微束分析法、质谱分析法以及波谱法,并且以多种方法结合研究。近期利用酸蚀法对不可见金进行定量XPS分析为研究金赋存状态提供了一个新的思路。

### [参考文献]

[1]梁金龙,孙卫东,南争路,等.阳山

金矿地质地球化学特征及金赋存状态[M].北京:地质出版社,2015.

[2]Reich M, Kesler S E, Utsunomiya S et al. Solubility of gold in arsenian pyrite[J].*Geochimica et Cosmochimica Acta*,2005,69(11):2781-2796.

[3]赵静,梁金龙,李军,等.贵州贞丰水银洞金矿矿床成因与成矿模式:来自载金黄铁矿NanoSIMS多元素Mapping及原位微区硫同位素的证据[J].*地学前缘*,2018,25(1):157-167.

[4]杨荣生,陈衍景,谢景林.甘肃阳山金矿床含砷黄铁矿及毒砂的XPS研究[J].*岩石学报*,2009,25(11):2791-2800.

[5]Yang M,Wan Q,Nie X et al.Quantitative XPS characterization of “invisible gold” in Carlin-type gold ores through controlled acid erosion[J].*Journal of Analytical Atomic Spectrometry*,2021,36(9):1900-1911.

### 作者简介:

刘晓宇(1996--),女,汉族,河北邢台人,硕士研究生,地质学专业,成都理工大学,研究方向:矿物学、岩石学、矿床学。