

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.09.010

# 海南抱伦金矿工艺矿物学研究

陈桥<sup>1</sup>, 佟琳琳<sup>1</sup>, 陈贵民<sup>2</sup>, 杨洪英<sup>1</sup>

(1. 东北大学冶金学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 海南山金矿业有限公司, 海南乐东 572531)

**摘要:** 采用化学分析、X射线衍射、光学显微镜及扫描电子显微镜分析等检测技术,对抱伦金矿原矿石进行工艺矿物学研究,为选矿工艺的选择提供理论依据.结果表明:该矿石含金 $10.1\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ ,含硫 $0.65\%$ ,主要脉石矿物为石英和白云母,属低硫石英脉型金矿.矿石中的金矿物主要为自然金,质量分数为 $90.58\%$ .金矿物粒度范围广,巨粒金( $>300\ \mu\text{m}$ )、粗粒金( $74\sim300\ \mu\text{m}$ )、中粒金( $37\sim74\ \mu\text{m}$ )、细粒金( $10\sim37\ \mu\text{m}$ )及微粒金( $0.10\sim10\ \mu\text{m}$ )的质量分数分别为 $3.84\%$ , $28.85\%$ , $18.04\%$ , $23.52\%$ 和 $25.75\%$ .金矿物在矿石中的赋存状态为包裹金、粒间金和裂隙金,质量分数分别为 $48.37\%$ , $43.24\%$ 和 $8.39\%$ .在工艺矿物学研究的基础上,提出多段磨矿配合尼尔森重选-浮选的选矿工艺流程.

**关键词:** 石英脉型金矿;工艺矿物学;金矿物;粒度分布;赋存状态

中图分类号: TD 912 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2019)09-1268-05

## Process Mineralogy of Baolun Gold Mine in Hainan Province

CHEN Qiao<sup>1</sup>, TONG Lin-lin<sup>1</sup>, CHEN Gui-min<sup>2</sup>, YANG Hong-ying<sup>1</sup>

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Hainan Shandong Gold Mining Co., Ltd., Ledong 572531, China. Corresponding author: TONG Lin-lin, E-mail: tongll@smm.neu.edu.cn)

**Abstract:** In this work, the characterization of process mineralogy of the gold ore from Baolun gold mine was studied through chemical analysis, X-ray diffraction, optical microscope and scanning electron microscope analysis. That can provide a theoretical basis and guideline to select ore dressing process. The results show that the Au and S contents of the ore are  $10.1\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$  and  $0.65\%$ , respectively, and the main gangue minerals are quartz and muscovite. The gold minerals in the ore are mainly native gold with the relative content of  $90.58\%$ . The particle size range of gold mineral is wide, and the contents of giant-grained gold ( $>300\ \mu\text{m}$ ), coarse-grained gold ( $74\sim300\ \mu\text{m}$ ), medium-grained gold ( $37\sim74\ \mu\text{m}$ ), fine-grained gold ( $10\sim37\ \mu\text{m}$ ) and micro-grained gold ( $0.10\sim10\ \mu\text{m}$ ) are  $3.84\%$ ,  $28.85\%$ ,  $18.04\%$ ,  $23.52\%$  and  $25.75\%$ , respectively. The occurrence state of gold minerals in the ore is wrapped by gold, intergranular gold and fissure gold, the content of which accounts for  $48.37\%$ ,  $43.24\%$  and  $8.39\%$ , respectively. Based on the researches of process mineralogy, a Knelson gravity separation-flotation technology cooperated with multi-stage grinding process is proposed.

**Key words:** quartz-vein-type gold deposits; process mineralogy; gold mineral; size distribution; occurrence state

海南抱伦金矿属于典型的石英脉型金矿.该矿石目前的选矿流程为跳汰-全泥氰化工艺,由于氰化物本身危害巨大,同时受海南省建设国际旅游岛政策的影响,开发绿色环保的新工艺成了有效开发利用该金矿石的唯一出路.金矿石的工

艺矿物学是制定选冶工艺的基础研究和决定性因素<sup>[1-3]</sup>.在此之前,国内许多地质及黄金选冶工作者对抱伦金矿进行了一定的研究,但主要集中在成矿时代、地质构造、金矿床成因及选矿工艺改进等方面<sup>[4]</sup>.王莘等在对抱伦金矿选矿工艺优化研

收稿日期: 2018-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1608254).

作者简介: 陈桥(1993-),男,甘肃白银人,东北大学博士研究生; 杨洪英(1960-),女,河北张家口人,东北大学教授,博士生导师.

究中涉及到了工艺矿物学,但仅做了简要探究<sup>[5]</sup>。综合以上分析,目前对抱伦金矿的工艺矿物学特性研究不够深入,对其中金矿物分选特性的描述不够全面,因此,有必要对该金矿石进行详细的工艺矿物学研究<sup>[6-7]</sup>。

本文利用化学分析、偏光反光显微镜、体视镜、X射线衍射及扫描电子显微镜等检测手段,研究抱伦金矿原矿石的工艺矿物学性质<sup>[8-10]</sup>,旨在查清该金矿石的工艺类型、矿物组成、金矿物粒度分布、赋存状态及嵌布特征等关键问题,为该矿石选矿工艺的选择提供可靠的理论依据<sup>[11-12]</sup>。

## 1 实验设备及方法

本研究所用的原矿石由抱伦金矿提供。原料经适当预处理后,利用X射线荧光光谱法进行定性分析,分别利用原子吸收光谱法(AAS)和碳硫分析仪定量分析矿石中金、银和硫元素的含量。利

用X射线衍射仪(荷兰帕纳科公司,X Pert pro)分析矿石物相。挑选块矿制成矿石光片和薄片,在光学显微镜(德国,LEICA DMRX)下分析主要矿物种类及其含量。原矿光片经表面喷碳处理后,在扫描电子显微镜(日本岛津公司,SSX-550)下观察金矿物形貌及其赋存状态等特征。实验中主要矿物含量、金矿物粒度、形态及赋存状态等均采用线测法统计得出。

## 2 化学成分

定量分析结果表明,该矿石中金和银的品位分别为 $10.1 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $1.3 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ ,硫元素质量分数为0.65%。X射线荧光光谱分析结果见表1。结果表明,该金矿石中 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量较高,分别为62.19%和18.25%,硫含量较低,属于低硫石英脉型金矿。

表1 原矿石的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of the raw ore (mass fraction)

元素	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{SO}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	%
w	62.19	18.25	7.68	6.04	1.97	1.29	0.95	0.69	0.52	
元素	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{MnO}$	$\text{ZrO}_2$	$\text{PbO}$	$\text{Rb}_2\text{O}$	$\text{Cl}$	$\text{ZnO}$	$\text{SrO}$	其他	%
w	0.12	0.11	0.04	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.04	

## 3 矿物组成

### 3.1 XRD 定性分析

为了查明矿石中主要矿物种类,首先对原矿石进行X射线衍射分析,结果(图1)表明,该矿石中主要矿物为石英、白云母和绿泥石。

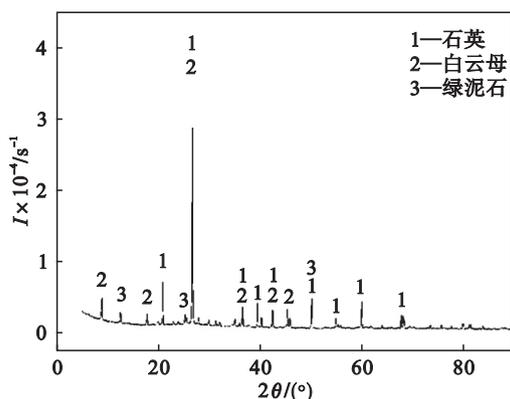


图1 原矿石的X射线衍射图谱

Fig. 1 X-ray diffraction patterns of the raw ore

### 3.2 光学显微镜定量分析

在光学显微镜下进一步分析矿物种类及其含量,结果(表2)表明,原矿石中矿物组成相对简单,金属矿物主要为黄铁矿和钛铁矿,黄铁矿多成颗粒状和条带状(图2),还有少量的方铅矿、黄铜矿、闪锌矿、辉铋矿及单质铋,以及微量的金、银及金银矿等;脉石矿物主要为石英、白云母和绿泥石,还有少量长石、方解石、高岭石和锆石等,图3所示为正交镜下脉石矿物形貌;矿石中主要的载金矿物有石英、白云母、绿泥石、黄铁矿、铋及辉铋矿。

## 4 金矿物研究

### 4.1 金矿物种类

利用扫描电镜及EDS能谱分析可知,原矿石中的金矿物种类比较单一,均属金银系列矿物,大多为自然金,成色为950‰~960‰,占金矿物总量的90.58%;金银矿含量较少,占金矿物总量的9.42%,成色为810‰~930‰。

表 2 矿石主要的矿物成分(质量分数)  
Table 2 Main mineral of the raw ore(mass fraction)

矿物	石英	白云母	绿泥石	长石	黄铁矿	钛铁矿	其他	共计	%
w	49	37	8	2	1	1	2	100	

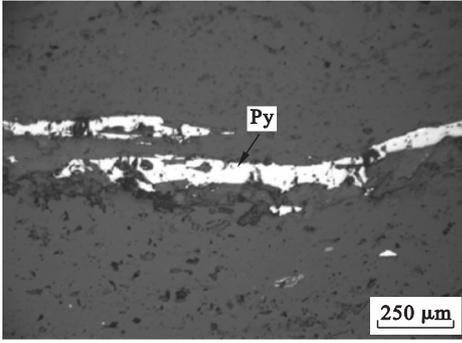


图 2 条带状黄铁矿(Py:黄铁矿)  
Fig. 2 Thin banded pyrite(Py: pyrite)

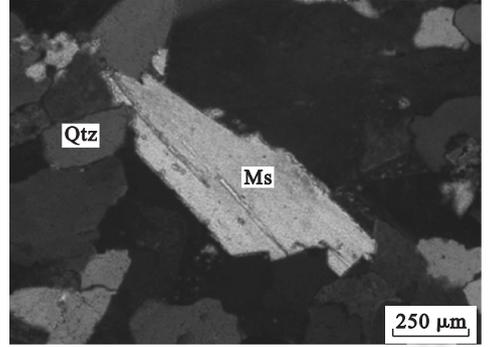


图 3 脉石矿物(+;Qtz:石英;Ms:白云母)  
Fig. 3 Gangue minerals(+; Qtz: quartz; Ms: muscovite)

#### 4.2 金的赋存状态

元素赋存状态是指元素在矿物原料中的存在形式及其在不同存在形式中的分布数量。按照金与其他矿物的共生关系,可将金的赋存状态分为包裹金、裂隙金、粒间金(晶隙金)和吸附金<sup>[13]</sup>。利用光学显微镜及扫描电子显微镜分析金矿物嵌布特征,结果表明该矿石中金的赋存状态为包裹金、粒间金及裂隙金。包裹金中以石英包裹金和白云

母包裹金为主,含有少量黄铁矿包裹金,图 4a,4b 分别为石英包裹金和黄铁矿包裹金。粒间金中以石英/白云母粒间金为主,在脉石矿物与金属矿物之间也存在较多,图 5a,5b 分别为石英/黄铁矿粒间金和石英/绿泥石粒间金。裂隙金以石英和白云母裂隙金为主,分别如图 6a,6b 所示。包裹金不易解离,适当的细磨可提高这部分金的回收率;粒间金和裂隙金易磨矿解离,可在选矿中有效回收。

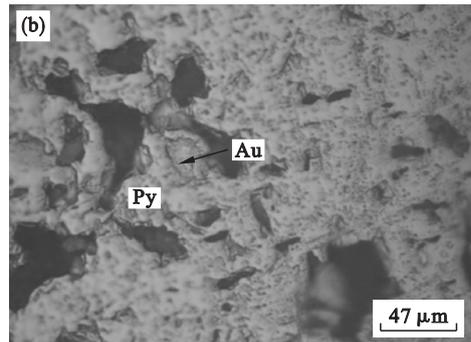
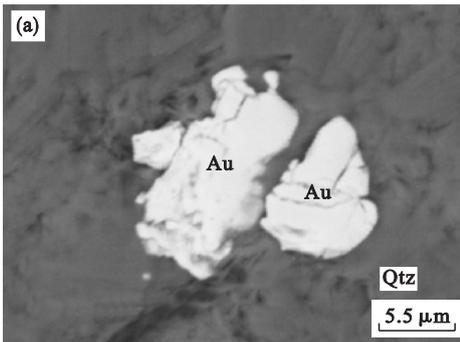


图 4 包裹金  
Fig. 4 Wrapped gold

(a)一石英包裹金;(b)一黄铁矿包裹金。

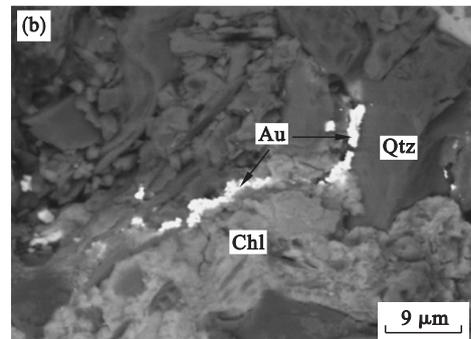
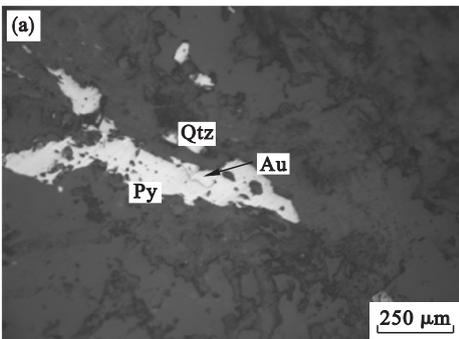


图 5 粒间金  
Fig. 5 Intergranular gold

(a)一黄铁矿/石英粒间金;(b)一石英/绿泥石粒间金,Chl:绿泥石。

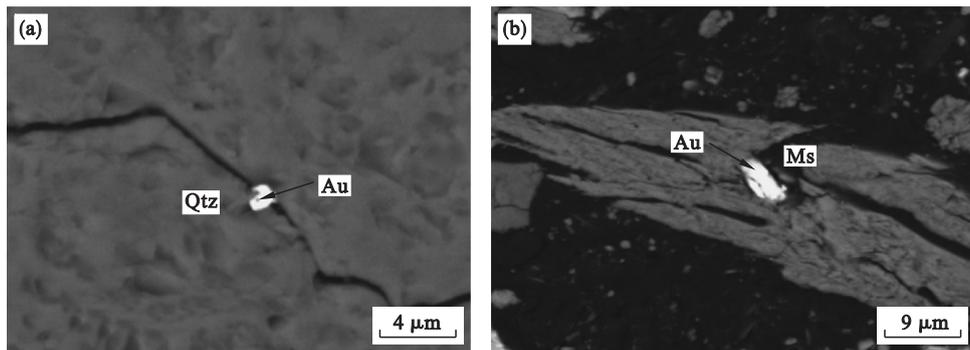


图6 裂隙金  
Fig. 6 Fissure gold

(a)—石英中裂隙金；(b)—白云母中裂隙金。

统计金矿物不同嵌布类型的含量,详细结果见表3.结果表明矿石中包裹金、粒间金及裂隙金的质量分数分别为48.37%、43.24%和8.39%.

表3 原矿中金矿物的嵌布特征

Table 3 Dissemination characteristics of gold minerals in ore %

嵌布特征	载体矿物	所占比例
包裹金	石英	30.59
	白云母	14.13
	绿泥石	0.37
	黄铁矿	2.53
	其他	0.75
	合计	48.37
粒间金	石英/白云母	19.19
	石英/绿泥石	8.11
	白云母/绿泥石	4.08
	石英/黄铁矿	6.56
	石英/辉铋矿	1.96
	铋/辉铋矿	2.35
	其他	0.99
	合计	43.24
裂隙金	石英	4.83
	白云母	2.55
	绿泥石	0.93
	其他	0.08
	合计	8.39
总计		100

### 4.3 金矿物形态

金矿物形态对其选矿性能有很大影响,不同形态的金颗粒在介质中受力不同导致其沉降速度也不相同,从而影响重选效果;同时形态差异还会导致浮选过程中固体与气泡接触面的差异,进而导致浮选性能的差异.利用扫描电镜和光学显微镜观察金矿物形态并统计其含量.结果(如表4

所示)表明,原矿石中金矿物形态主要有圆粒状、麦粒状、长条状、棱角状和不规则形状,其中粗、中粒金多为棱角状及不规则形状,微、细粒金多为圆粒状及麦粒状.

表4 原矿中金矿物形态分布

形态	圆粒状	麦粒状	长条状	棱角状	不规则形状
分布率	22.70	10.15	19.31	18.93	28.91

### 4.4 金矿物嵌布粒度

金矿物的嵌布粒度是其磨矿和分选工艺选择的重要参考,按照金颗粒大小将其分为巨粒金( $> 300 \mu\text{m}$ )、粗粒金( $300 \sim 74 \mu\text{m}$ )、中粒金( $74 \sim 37 \mu\text{m}$ )、细粒金( $37 \sim 10 \mu\text{m}$ )、微粒金( $10 \sim 0.10 \mu\text{m}$ )及次显微金( $< 0.1 \mu\text{m}$ )<sup>[13]</sup>.在偏光显微镜及扫描电镜下观察分析金矿物粒度,发现原矿石中金矿物的粒度分布范围较广,本次实验中观察到的金颗粒最大为 $600 \mu\text{m}$ ,最小为 $0.3 \mu\text{m}$ ,图7和图8分别为细粒金和微粒金的形貌图.

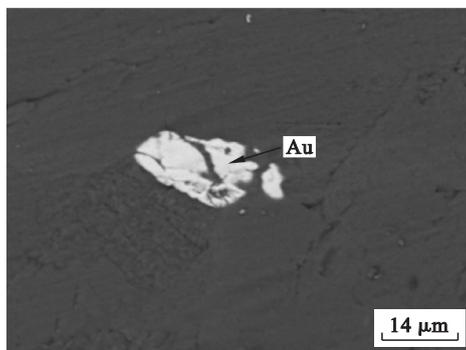


图7 细粒金 SEM 图(21 μm)

Fig. 7 SEM image of fine-grained gold(21 μm)

统计分析金矿物粒度分布,结果(表 5)表明,矿石中金矿物粒度范围较宽且各粒级含量大致接近,适合多段磨矿、多段选别.其中巨粒、中粒及粗粒金属于易选金,含量超过一半,可在粗磨阶段通过重选提前回收;适当细磨后可用尼尔森选矿机强化重选以回收部分微、细粒金,重选尾矿中流失的金可利用浮选进一步回收.

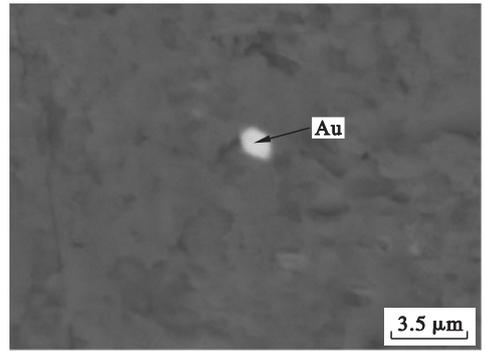


图 8 微粒金 SEM 图(1.6 μm)

Fig. 8 SEM image of micro-grained gold(1.6 μm)

表 5 原矿中金矿物的粒度分布  
Table 5 Size distribution of gold minerals in ore

粒级/μm	巨粒 >300	粗粒 300~74	中粒 74~37	细粒 37~10	微粒 <10	合计
w/%	3.84	28.85	18.04	23.52	25.75	100

## 5 结 论

1) 该矿石金品位  $10.1 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ ,脉石矿物主要为石英和白云母,是典型的低硫石英脉型金矿.载金矿物主要有石英、白云母、绿泥石、黄铁矿、铋及辉铋矿.

2) 金矿物的种类主要有自然金和金银矿,其中自然金占 90.58%,金银矿占 9.42%.原矿石中金的赋存状态为包裹金、粒间金和裂隙金,其质量分数分别为 48.37%,43.24% 和 8.39%.

3) 金矿物的形态包括圆粒状、麦粒状、长条状、棱角状和不规则形状,其质量分数分别为 22.70%,10.15%,19.31%,18.93% 及 28.91%.金矿物粒度分布广,巨粒金、粗粒金、中粒金、细粒金和微粒金质量分数分别为 3.84%,28.85%,18.04%,23.52% 及 25.75%.

4) 综合分析金矿物的赋存状态、粒度分布及形态特征,建议采用多段磨矿配合尼尔森重选-浮选工艺流程.

致谢 感谢海南山金矿业有限公司的大力支持,特别感谢东北大学朱张甫对本研究的贡献.

### 参考文献:

[1] Chryssoulis S L, McMullen J. Mineralogical investigation of gold ores [J]. *Developments in Mineral Processing*, 2005, 15 (5): 21-71.

[2] Coetzee L L, Theron S J, Martin G J, et al. Modern gold departments and its application to industry [J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24(6): 565-575.

[3] Vaughan J P. The process mineralogy of gold: the classification of ore types [J]. *JOM*, 2004, 56(7): 46-48.

[4] 舒斌,王平安,董法先,等.海南乐东地区抱伦金矿矿石特征及其成因矿物学意义 [J]. *地质通报*, 2006, 25(6):

745-755.

(Shu Bin, Wang Ping-an, Dong Fa-xian, et al. Ore characteristics and minerageny of the Baolun gold deposit in the Ledong area, Hainan Islan, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(6): 745-755.)

[5] 王苹,陈贵民.抱伦金矿重选工艺优化及摇床远程操作实践 [J]. *黄金科学技术*, 2014, 22(1): 60-63.

(Wang Ping, Chen Gui-min. Baolun gold deposit gravity separation process optimization and table concentrator unattended remote operation [J]. *Gold Science and Technology*, 2014, 22(1): 60-63.)

[6] 杨洪英,杨立,佟琳琳,等.广西金牙难浸金矿的工艺矿物学研究 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(8): 1156-1158.

(Yang Hong-ying, Yang Li, Tong Lin-lin, et al. Process mineralogy of refractory gold ore in Jinya, Guangxi Province [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2007, 28(8): 1156-1158.)

[7] 董再蒸,高鹏,张淑敏,等.甘肃早子沟金矿工艺矿物学研究 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(5): 711-715.

(Dong Zai-zheng, Gao Peng, Zhang Shu-min, et al. Process mineralogy of gold ore in Zaozigou gold mine, Gansu Province [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2017, 38(5): 711-715.)

[8] Chryssoulis S, Dunne R, Coetzee A. Diagnostic microbeam technology in gold ore processing [J]. *JOM*, 2004, 56(7): 53-57.

[9] Cabri L J, Beattie M, Rudashevsky N S, et al. Process mineralogy of Au, Pd and Pt ores from the Skaergaard intrusion, Greenland, using new technology [J]. *Minerals Engineering*, 2005, 18(8): 887-897.

[10] Spry P G, Chryssoulis S, Ryan C G. Process mineralogy of gold: gold from telluride-bearing ores [J]. *JOM*, 2004, 56(8): 60-62.

[11] Ahmed M M. Effect of comminution on particle shape and surface roughness and their relation to flotation process [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2010, 94(3/4): 180-191.

[12] Ofori-Sarpong G, Amankwah R K. Comminution environment and gold particle morphology: effects on gravity concentration [J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24(6): 590-592.

[13] 吕宪俊.工艺矿物学 [M].长沙:中南大学出版社,2011: 269.  
(Lyu Xian-jun. Process mineralogy [M]. Changsha: Central South University Press, 2011: 269.)