

# 热液矿床矿物微形貌与晶体生长环境研究

叶 荣<sup>1</sup>, 涂光炽<sup>2</sup>, 马喆生<sup>1</sup>, 赵伦山<sup>1</sup>

1. 中国地质大学 地球科学与资源学院,北京 100083
2. 中国科学院 地球化学研究所,贵州 贵阳 550002

YE Rong<sup>1</sup>, TU Guang-chi<sup>2</sup>, MA Zhe-sheng<sup>1</sup>, ZHAO Lun-shan<sup>1</sup>

1. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China

YE Rong, TU Guang-chi, MA Zhe-sheng, et al. The surface micromorphology of minerals in hydrothermal ore deposits and growth environments of crystal. Earth Science Frontiers, 2005, 12(2) :240-246

**Abstract:** The surface growth micromorphology of some sulfide minerals in hydrothermal deposits has been observed by means of STM and SEM at nano-scale resolution. For comparison, the surface structures of a set of artificial pyrite and galena crystals have also been studied. It was discovered that on the surface of some natural pyrite pisolitic hillock micromorphology was developed, which shows a natural 3-dimensional nucleation. In addition, on the crystal surface of both natural and artificial minerals, funnel-shaped crystals and pustular-shaped (cellular) growth hillocks were observed. The level and smooth growth steps on the artificial pyrite surface imply a static crystallization environment, without disturbance and nearly in equilibrium. At the same time, a great number of pustular-shaped structures and stretched pustular-shaped growth hillocks developed on the crystal surface of hydrothermal sulfide minerals indicate the high super-saturation of the ore-formation system. The present study reveals that mineral crystallization during the hydrothermal ore-formation characteristically evolved in three stages: (1) 3-dimensional nucleation, (2) step growth, and (3) equilibrium polyhedron; correspondingly the surface micromorphology evolved from pisolitic hillock, to pustular and finally to the growth steps with smooth surface. Therefore, the mineral surface microstructures formed in complex geological environments bear rich information on the thermodynamic and dynamic conditions of the ore-formation.

**Key words:** scanning tunneling microscopy; micromorphology; 3-dimensional nucleation; step growth with pustular-shaped structure; hydrothermal deposit

**摘 要:**应用高分辨率扫描隧道显微镜(STM)和场效应扫描电镜(FEG-SEM),对取自山西义兴寨金矿等4处热液矿床的黄铁矿、方铅矿、赤铁矿等矿物的表面生长微形貌进行了观察研究,并与实验合成的黄铁矿、方铅矿等矿物的微形貌特征进行对比。发现了自然矿物结晶三维成核成因的黄铁矿微球状晶,在合成和自然矿物的晶面观察到漏斗状晶和胞状结构等生长形貌。合成黄铁矿表面发育平整光滑的生长台阶,反映静态无扰动、接近平衡的晶体生长环境;而大量产于热液矿床的黄铁矿、方铅矿等晶体普遍发育胞状或拉长的胞状结构表面,并总体呈台阶状排列的表面结构,证明自然成矿热液体系的高过饱和度和流动生长环境。研究表明,热液成矿过程中矿物结晶作用有从成核、台阶状晶体生长、到形成“平衡”多面体生长的一个演化过程;形成于复杂条件的矿物晶体表面微观结构,包含丰富的成矿环境信息。

收稿日期:2004-07-26;修回日期:2004-11-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(49973192,40473034)

作者简介:叶 荣(1956—),女,博士,副教授,地球化学专业。

关键词:扫描隧道显微镜;硫化矿物微形貌;自然三维成核;胞状结构台阶生长;热液矿床

中图分类号:P611.1<sup>+</sup>3;O74 文献标识码:A 文章编号:1005-2321(2005)02-0240-07

20世纪80年代发明的扫描隧道显微镜 (STM) 和原子力显微镜 (AFM) 等设备的引入,给地球物质科学提供了一个新的学科生长点——纳米矿物学。纳米级的观测精度使人类能够在原子尺度上观察矿物和晶体的微细结构,把矿物的原子排列、晶体生长结构,以及介质温度、压力、浓度、杂质和环境的动力学状态对矿物结晶产生的影响,都能够直观生动的显现在研究者面前,使直接追踪成岩、成矿、晶体生长等过程中原子的行为成为现实<sup>[1,2]</sup>。本课题研究目标是,使用扫描隧道显微镜等观测手段,研究热液矿床矿物和实验合成矿物的表面微形貌,并试图应用晶体生长理论分析和释译其所代表的成矿环境意义。

## 1 矿物表面微形貌 STM 研究现状和意义

矿物及其晶体是一定自然条件下形成的产物,1878年吉布斯最早发现晶体晶面生长和发育的规律,建立了“晶体形貌学”。现代矿物学的成果之一,是在先进科技观察手段的基础上,发展了成因矿物学和矿物标型学,把矿物的结晶习性,及各种物理和化学性质与其形成的地质环境相联系,以阐明地质体的产状和成因<sup>[3,4]</sup>。近20年来,晶体生长理论和新材料合成技术得到了迅速发展,在理论上形成了具有边缘学科性质的“晶体生长动力学”和“微形貌学”,为自然矿物晶体微形貌的释译分析提供了理论依据<sup>[5,6]</sup>。

STM于1987年开始引入矿物学,研究晶体的表面显微结构,观测目标集中在纳米尺度的晶体生长结构、单位晶胞大小和形状的变化、晶体缺陷、位错、原子的占位、有序度和电子态等现象<sup>[2,6]</sup>。先后有Carrick等(1990)、Hochella(1990)、Eggleston等(1990)、马哲生等(1996)、廖立兵等(1991,1992)观察了辉钼矿、黄铁矿、方铅矿、黝锡矿、赤铁矿、自然金、辉锑锡铅矿、单斜铜泡石等矿物的晶面微形貌<sup>[7-13]</sup>。发现了大量的阶梯状、螺旋状生长结构、各种生长丘、生长纹,以及晶体缺陷等,原位直观地显示或新发现了晶体中原子的排列结构,以及重构、超结构等结晶现象。同时研制了测定方法,发展

了成像技术。对新的事实和信息的分析,加深了对结晶过程和地质成矿作用的认识,并形成了新的研究领域,如微形貌学、显微结晶学、纳米矿物学、纳米矿床学、微观岩石学等<sup>[6]</sup>。近年来,矿物微形貌研究有两个发展趋势:一是应用STM或超高真空UHV STM在晶格“原位”上观察研究单个原子的化学反应(氧化、水解、离子交换等)行为,以及矿物表面原子级物理(扩散等)作用,如Eggleston和Rosso等<sup>[14-16]</sup>。另一个方向是综合矿物微形貌形成的物理化学条件和地质环境,应用结晶学和晶体生长理论分析其成因,阐明微形貌所揭示的成矿信息。Penn和Banfield<sup>[17]</sup>应用实测和实验的方法,研究了在热液条件下金红石的纳米晶粒晶面生长发育的规律和动力学制约关系。叶荣、赵伦山等对采自热液矿床和实验合成的黄铁矿和方铅矿进行了微形貌观察,并探讨了矿物显微结构所传递的成矿条件信息和动力学意义,提出了矿物的生长形貌具有成因意义的认识<sup>[18-20]</sup>。目前该方向正处于积累观测资料的阶段,如对更多种类矿物的微形貌还需扩大观察,对已取得的矿物微形貌资料根据晶体生长理论,结合产出地质条件和实验模拟研究进行综合分析还处于探索阶段。

## 2 样品的地质产状、合成实验条件和 STM 的工作环境

### 2.1 自然矿物样品产状及描述

选择了热液型、层控型和沉积型矿床,山西义兴寨金矿、湖南柿竹园钨锡铅锌矿床、湖南清水塘铅锌矿、甘肃210金矿以及大同煤矿等进行了矿床地球化学研究,采集黄铁矿、方铅矿、辉铋矿、毒砂、赤铁矿等矿物样。观测了矿物形成的地质环境、生成阶段、矿物组合,以及成矿温度、压力等条件。

研究矿区的简要地质地球化学特征列于表1。为了综合热液矿床矿物微形貌的共同规律,对产于张剪性构造裂隙的中、低温矿床的成矿阶段演化进

马喆生,施倪承. 矿物及矿物材料(含材料)表面微形貌及其表面结构的STM、AFM研究. 第30届国际地质大会项目成果报告. 1996:1-38.

表 1 矿物微形貌研究样品产出矿区地质地球化学特征<sup>[21,22]</sup>Table 1 The occurrence conditions of samples<sup>[21,22]</sup>

矿区	控矿构造	矿物组合	元素组合	温度/	压力/ MPa	矿床成因
义兴寨	张剪断裂	Py-Au-Gn	Au-Fe-Pb	350~210	100~20	岩浆热液
210 金矿	张剪断裂	Py-Au-Gn	Au-Fe-Pb	300~180	80~30	热液金矿
柿竹园	张性	Wol-Mt-Cp	W-Sn-Bi-Cu	430~260	500~40	中温热液
清水塘	张剪断裂	Sp-Gn	Zn-Pb-Ba	280~160	30~10	低温热液

行对比,发现该类热液矿化脉动成矿与构造脉动同期,几个矿区有大体相似的成矿阶段演化。以山西义兴寨金矿为例,各构造成矿期矿物组合如下。

第 1 期为含浸染状黄铁石英脉期;第 2 期为含包体金块状黄铁矿期,为金主成矿期;第 3 期为含裂隙金多金属硫化物期,方铅矿、闪锌矿、黄铜矿组合;第 4 期为碳酸盐石英脉期。多数矿区根据含矿断裂张剪活动的动力学演化进程,主成矿期还可以进一步划分为两个亚期,以 1<sub>1</sub>、1<sub>2</sub>、2<sub>1</sub>、2<sub>2</sub> 标之;1 表示张剪裂隙的脆性张开亚期,2 表示裂隙的韧-脆性扩张亚期,它们各代表热液成矿和矿物晶体生长所处的不同构造动力学环境<sup>[20,21]</sup>。

## 2.2 硫化矿物合成实验及合成物特征

模拟合成矿物实验由中国地质科学院矿床研究所高温高压实验室完成。前后进行了 3 组共 16 次实验,合成的矿物有黄铁矿、方铅矿、赤铁矿。实验是在自紧式密封高压釜(石英管衬套)中完成的,为取得较大颗粒晶体,采用水热体系长时间恒温反应、缓慢降温的实验方案,釜内条件和物料选择力求接近自然成矿条件<sup>[22]</sup>,见表 2。

对合成产物进行了反光显微镜、电子探针和 X 射线粉晶衍射分析。合成产物黄铁矿反光显微镜下观察为淡黄色,金属光泽,多数为立方体晶形,{100} 面发育良好,也见五角十二面体晶形,粒径为 0.01~0.2 mm,照片 5。合成方铅矿为铅灰色,强金属光泽,立方体晶形。所有的合成实验矿物都经 X 射线粉晶衍射结构分析确认。

## 2.3 扫描隧道显微镜工作条件

样品的观测是在中国地质大学(北京)矿物岩石材料国家专业实验室晶体结构室的 CSTM-9000 扫

描隧道显微镜上进行的。部分样品在清华大学材料系场效应扫描电镜(FEG-SEM)和北京科技大学材料系扫描电镜进行表面图像观测和成分扫描。CSTM-9000 扫描隧道显微镜数据采集使用恒流工作模式,扫描范围为 1 474 nm × 1 474 nm ~ 61.5 nm × 61.5 nm,相应的放大倍数为 5 × 10<sup>4</sup> ~ 1.1 × 10<sup>6</sup> 倍。观测结果经过图像处理以平面扫描图像、简三维图像和线形貌扫描图像的形式给出。

## 3 硫化矿物表面微形貌特征及其成矿环境意义

本次对自然产出和实验合成的黄铁矿、方铅矿等矿物共 82 件样品,进行晶体表面 STM 和 FEG-SEM 微形貌观测,共获得平面扫描图像、快三维图像和简三维图像等显微照片 500 多张。立方体黄铁矿和方铅矿观测的晶面为{100}面,五角十二面体黄铁矿观测的晶面为{210}面。矿物样在多个颗粒上观察到的 STM 微形貌特征相类似,证明矿物相同晶面上的微形貌特征具有普遍性和代表性。所获得的大量图像资料表明,矿物晶体表面的显微结构与其宏观晶形及物理化学性质一样具有丰富多彩的变化形式,其中有一些生长形貌是文献中尚未报导过的。笔者仅就几种典型的具成因意义的形貌类型进行描述,并对其所传递的成矿环境条件进行分析和探讨。

### 3.1 平整规则的台阶状生长形貌

在高压釜中实验合成的黄铁矿晶体表面上,观察到了棱角整齐、表面平整光滑的规则台阶状生长形貌,见照片 1,台阶宽度为 7~84.5 nm,高度 3~20 nm。光滑表面台阶状生长形貌也见于取自一些热液

表 2 硫化矿物合成实验条件和结果

Table 2 Experimental data for artificial sulfide minerals

实验号	物料	微量组分	温度/	压力/ MPa	体系 pH	恒温时间/ d	降温速率	合成产物
实验 4	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + S	Au(氯金酸)	400	50	2~6.5	11	自然冷却	(含金)黄铁矿
实验 9	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + S		400	40	2	7	约每小时 5	黄铁矿
实验 14	PbO + S	Ag	400	40	2	7	自然冷却	(含银)方铅矿

矿床的黄铁矿、方铅矿晶体表面,但是台阶通常棱角不尖锐,阶面粗糙,台阶排列不规则,如照片 2、7、8。大多数情况下,自然产出的硫化矿物表面生长台阶为非平整面,或被各种次级的胞状或拉长的胞状结构或堆积生长丘复杂化(照片 6、7、8)。据晶体生长理论,矿物表面的台阶状生长是晶体生长主要的和基本的方

式,这在本次大量的观测结果中得到了证实。因此认为:无论是自然形成还是实验合成的矿物表面,台阶状生长形貌都是最常见的表面结构,同时在黄铁矿、方铅矿等硫化物矿物中普遍发育。但是表面光滑、规则生长的台阶形貌在自然产出的矿物中罕见。结晶热力学认为,在低过饱和度和静态封闭的生长环境中,结晶单位在晶面上的“添加”顺序,严格按照晶格位置的成键能量最有利的原则和顺序,即扭折-棱边-晶面表面进行。因此,晶面生长过程按顺序首先添加在晶面的扭折凹角处,循序排满晶棱和完整的晶面。在理想的、静态封闭的环境中结晶的矿物有可能形成原子级平整的台阶面。

新的层面是在已有的平整表面上经过二元成核形成。二元成核的速率以及生长台阶的厚度与降温梯度和结晶的过饱和度有关,光滑平整的台阶界面形成于正温度梯度下的晶体生长,即在弱过饱和度条件下从晶体内部到流体介质的温度是渐升的,如图 1a;此时有可能造成符合热力学理论顺序的原子的添加和排列。而在高过饱和负温度梯度和界面薄层内负温度梯度条件下的晶体生长,在生长界面上温度和物质浓度存在局部不均匀性,则将产生枝晶生长或胞状结构,如图 1b 和 1c。观察结果表明,本次设计的实验合成黄铁矿条件接近理论的平衡静态生长环境;少量观察到的产于热液矿床的黄铁矿光滑台阶生长形貌也反映自然矿物形成也存在类似的低过饱和度接近平衡的结晶环境。

### 3.2 黄铁矿微球状晶堆积形貌

笔者观测到自然矿物结晶过程的成核现象——微球状晶堆积微形貌(义兴寨金矿<sub>1</sub>成矿亚期块状黄铁矿石),照片 3。球状晶单体略呈椭球状或豆状,直径约为 16.5~44 nm,体积为 2 350~44 580 nm<sup>3</sup>,约含 28 250~46 729 个黄铁矿晶胞。

据晶体生长理论微球状晶代表的是高过饱和度体系三维均匀成核,并经过了短期的晶核生长的产物。在过饱和或过冷的液相(或气相)亚稳态体系中,由于在局部范围内温度和物质浓度的不均匀和波动,首先在小范围内成核。新形成的基元团为晶

胚,近似球状的晶胚经过长大达到临界半径  $r_c$ ,形成晶核。系统物质由亚稳相转变为稳定相,释放出部

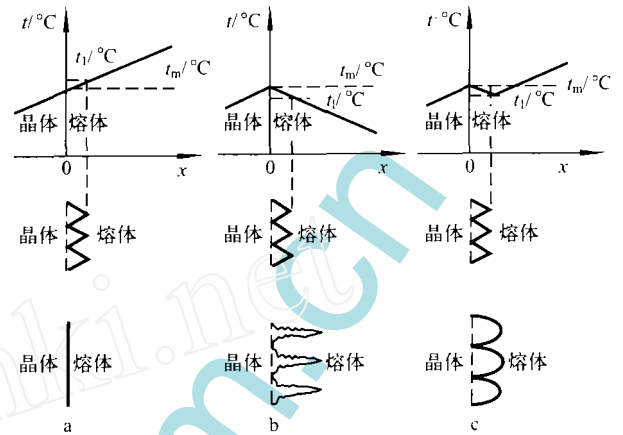


图 1 结晶温度梯度条件与晶面形貌<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Temperature gradients for crystallization and surface micromorphology  
a—正温度梯度-平整界面 b—负温度梯度-枝晶生长  
c—反常温度梯度-胞状形貌

分能量,使体系总吉布斯自由能降低,以“体积自由能”(  $G_v$  )表示。体系中固、液相之间的界面不断增大,为“界面自由能”(  $G_s$  )。成核作用体系总吉布斯自由能改变为:

$$G = G_v + G_s;$$

对球形晶核:

$$G_s = - (4 r^3 / 3) g / s + 4 r^2 s_l$$

式中:  $s$  为每一单个原子的体积;  $g$  为每一原子由液相转变为晶相的自由能改变;  $s_l$  为固、液相界面比表面自由能;  $r$  为晶核半径。

由图 2 可见:随着  $r$  加大,  $G_s$  以  $r^2$  倍增大,而  $G_v$  以  $r^3$  的比例减小;在  $r = r_c$  (临界半径)时,体系总自由能达最大值。半径  $< r_c$  的晶胚能量上不稳定,重新被溶解;只有半径  $> r_c$  的晶核才能继续生长成为球形晶,以致更大的晶体。

$$r_c \text{ 的关系式为 } r_c = (2 s_l s T_m / T_l) (1 / T)$$

$T$  为过冷度,在溶液体系可用过饱和度表示。由式可见,三维成核的晶核的临界半径  $r_c$  与过饱和度成反比,即体系具有较高过饱和度时,晶核只要达到较小的半径时就可以稳定保存,并继续生长;相反在低过饱和度情况,只有较大半径的晶核才能生长成晶体。Elwell 根据实验认为,物质从水溶液相中成核,大约需要 10% 的过饱和度;成核作用初期可能有约 100 个分子聚合形成晶胚。Mullins 指出,球形固相生长在自然和实验中都很常见,它代表晶体

生长过程中体系结晶开始阶段的成核,即在高过饱和度条件下产生多结晶中心三维成核。在初期高结晶驱动能作用下晶核生长较快;后期若在相对封闭环境中,体系过饱和度下降,在溶质供应不畅、环境相对稳定无明显定向流动的动力学条件下,可以形成光滑的球形表面,称为球体无扰动(无动力流动,无毛细作用)生长。球体半径  $r$  为溶质扩散系数  $D_c$  和时间  $t$  的函数:  $r = (4^{-2} D_c t)^{1/2}$ 。

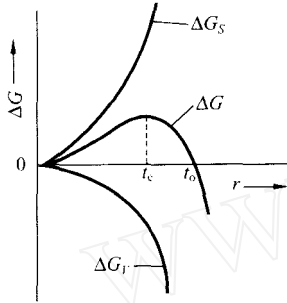


图2 体系自由能与晶核半径的关系<sup>[5]</sup>

Fig. 2 Relationship between system free energy and nuclear radius

因此,微球形晶指示相对封闭环境中体系的快速成核和短暂生长的产物。结合地质环境,微球状晶反映热液成矿作用中出现高梯度降温或降压(如沸腾作用)产生高过饱和度成核,其后在短暂封闭环境的无扰动生长的产物。同时也说明,热液成矿硫化物结晶作用除常见的在脉壁面或已成矿物晶面二维成核之外,也会以三维均匀成核方式结晶。

### 3.3 漏斗状晶和边缘凸起生长形貌

在实验合成的方铅矿、黄铁矿和自然产出的黄铁矿晶体中观测到漏斗状晶和边缘凸起生长形貌,见照片4、5、6。纳尔森提出,结晶成核之后,由于体系过饱和度较高有一个快速生长的阶段生成枝状晶,图1b,当受到物质供应的制约过饱和度降低之后,结晶作用进入稳定缓慢生长的阶段,此时晶体生长有朝向过饱和度较高或物质供应来源的方向生长的趋向,在晶体的边缘和棱角的区域容易获得晶质补给,或过饱和度稍高,由此形成漏斗状晶、晶体的环状生长,以及生长台阶的边缘突起形貌,照片4、5、6。

因此,漏斗状晶和台阶边缘突起形貌代表成核作用或台阶生长的晚期,在过饱和度降低或相对封闭晶质供应不足条件下,晶体单向朝物质供应方向生长的产物。在本次观测的自然矿物中以晶体边缘突起的不规则环状结构和台阶边棱突起为多见。证明热液成矿过程中,由于受构造条件限制,短暂出现

封闭或半封闭状态以及局部方向矿质供应,而生成晶体生长台阶的边缘突起以致漏斗状晶形貌。

### 3.4 胞状和拉长的胞状生长丘

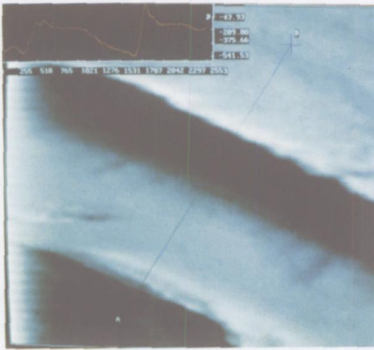
大量取自热液矿床的黄铁矿和方铅矿晶体表面,观察到胞状或拉长的胞状凸起表面,胞状丘间被沟槽隔开,晶面总体上呈台阶状展布,照片7、8。胞状生长形貌在实验和自然结晶的矿物中都很多见,总体上反映高过饱和度结晶环境;多位作者讨论了其形成的机理, Tiller (1963) 和姚连增 (1994) 指出,晶体表面的胞状生长结构与体系的过冷度(熔体中生长)或过饱和度(溶液生长)状态有关,图1c;当晶-液体系总体上处于正向温度梯度分布状态,而在固-液界面的薄层厚度内由于液层流动、杂质存在或扩散等作用发生反向温度梯度变化时,将出现复杂的或称“反常的温度梯度分布”,此时固-液界面的生长形态为胞状结构。其作用机理是在固-液界面上反向温度梯度层内由于过冷或高过饱和容易产生二维成核,在界面上生长出凸缘或小丘,它们容易朝向物质供应的方向,即垂直晶面生长,但是不能无限长大,其高度只限于过冷层之内,在长入温度等于熔点的层面时,由于生长和溶解平衡进行,而形成圆滑的胞状表面,如图1c。此外,体系中存在分配系数  $k_0 < 1$  的杂质时,也有可能形成规则的胞状生长界面。

本次研究的热液和沉积成因的硫化物矿物中,观测到了大量拉长的或不规则的胞状结构表面,大小不等(大者状如莲藕,长1230 nm,宽300 nm,照片8;小的形似豆粒,长25 nm,宽16 nm)、表面光滑,形状似纺锤形,平行排列,总体上有按台阶高低错落排布的形式。这种拉长的胞状生长形貌只见于自然矿物晶体表面,产出条件与规则胞状结构形似,其拉长的胞状形态可能代表热液成矿中,在矿液流动的动力学环境生长的产物,而胞体的大小可能与成矿溶液的过饱和度和生长速率有关。

## 4 结论和认识

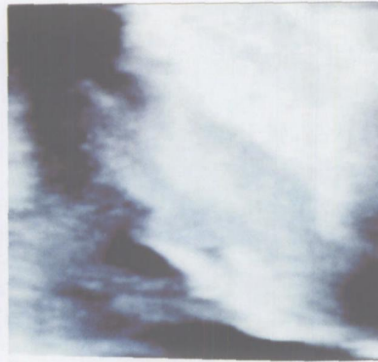
(1) 矿物晶面的台阶状生长是热液矿床矿物结晶作用基本的和常见的生长方式。实验室合成矿物的生长台阶与自然矿物相比较,具有棱角尖锐、表面光滑平整的台阶形貌,反映静态环境中具有低过饱和度、接近平衡态的晶体生长条件。

(2) 自然产出的大部分黄铁矿等硫化矿物的晶面形貌,显示出胞状和拉长的胞状结构,同时具有按



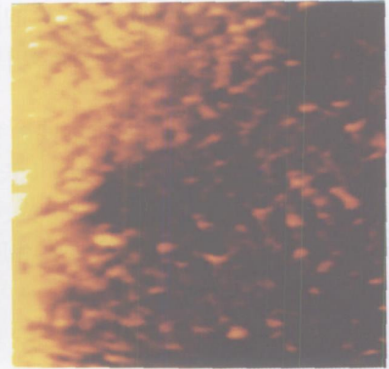
照片1 平整台阶生长形貌  
Photo 1 Level step growth micromorphology, Py{100}

实验(12号)合成黄铁矿{100}面 STM 图像,恒流,  $I_t=1.08$  nA,  $V_b=60$  mV, 扫描范围:123 nm×123 nm, ×560 000



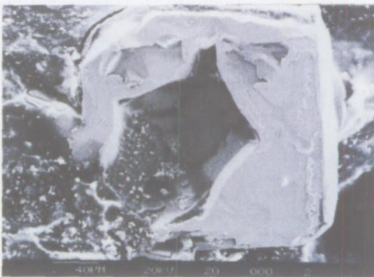
照片2 不规则台阶生长形貌  
Photo 2 Irregular step growth micromorphology, Gn {100}

柿竹园矿床,方铅矿{100}面 STM 图像,恒流,  $I_t=0.63$  nA,  $V_b=0.03$  mV, 扫描范围:239 nm×239 nm, ×280 000



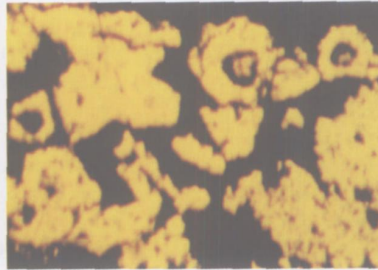
照片3 微球状晶形貌  
Photo 3 Pisolitic (spherule) crystal, Py{100}

义兴寨金矿Ⅱ<sub>1</sub>亚期块状黄铁矿{100}面 STM 图像,恒流,  $I_t=1.08$  nA,  $V_b=-50$  mV, 扫描范围:738 nm×738 nm, ×90 000



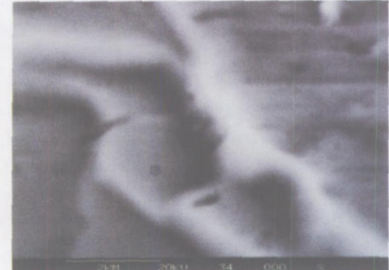
照片4 漏斗状晶

Photo 4 Funnel-shaped crystal, Gn{100}  
实验(9号)合成含银方铅矿{100}面扫描电镜二次电子图像, ×350



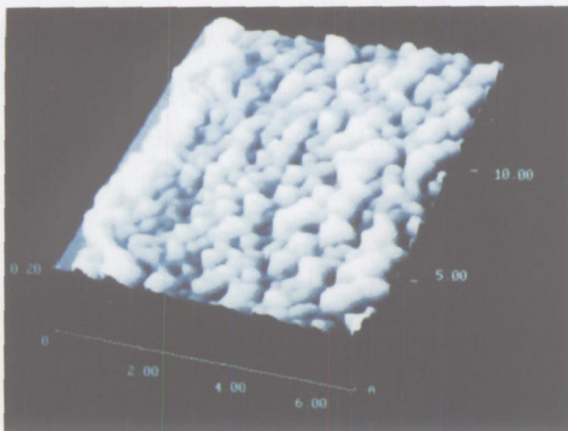
照片5 漏斗状晶

Photo 5 Py funnel-shaped crystal  
实验(10号)合成黄铁矿, 反光显微镜照片, ×250



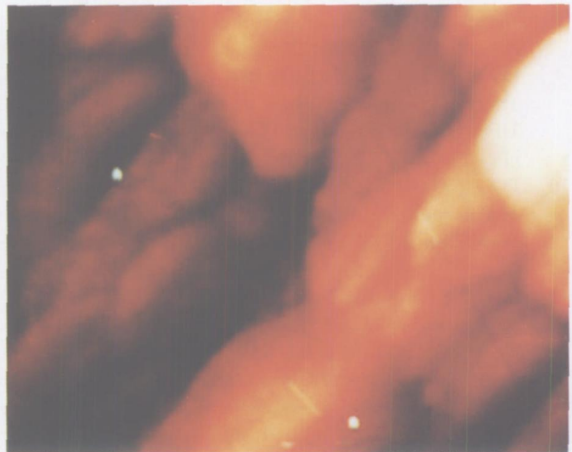
照片6 生长台阶边缘突起形貌

Photo 6 Edge rise of growth steps, Py{100}  
210 金矿黄铁矿{100}面扫描电镜背散射电子图像, ×1 500



照片7 胞状结构生长形貌  
Photo 7 Pustular-shaped (cellular) structure growth morphology, Spec {100}

义兴寨金矿Ⅲ<sub>2</sub>方铅矿{100}解理面 STM 简三维图像, 恒高,  $I_t=-1.53$  nA,  $V_b=0.064$  mV, 扫描范围:387 nm×387 nm, ×180 000



照片8 拉长的胞状(藕节状)生长形貌  
Photo 8 Stretched pustular-shaped growth hillock, Py{100}

玲珑金矿黄铁矿{100}面 STM 图像, 恒高,  $I_t=0.44$  nA,  $V_b=-85$  mV, 扫描范围:123 nm×123 nm, ×560 000

台阶方式排列的生长特征;拉长的胞状形貌反映了成矿时矿物在热液流体定向流动中结晶生长的地质环境。

(3) 观察到了热液矿床黄铁矿微球状晶,属于在三维成核的基础上经过短时间生长的产物。该样产于义兴寨金矿,成矿亚期块状黄铁矿矿石中;代表矿液由于迅速冷却,形成高过饱和度、矿质发生快速成矿反应结晶的动力学环境。

## References :

- [ 1 ] BINNING G, ROHRER H. Scanning tunneling microscopy [J]. *Surface Science*, 1983, 126:236-244.
- [ 2 ] BAI Chunli. *Scanning Tunneling Microtechnique and Its Applications*[M]. Shanghai: Shanghai Sci & Tech Publishing House, 1992:1-223 (in Chinese).
- [ 3 ] CHEN Guangyuan, SUN Daisheng. New development in genetic mineralogy and prospecting mineralogy[A]. OUYANG Ziyuan. *Review and Prospects of Mineralogy Petrology and Geochemistry for the 21st Century* [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1998:12-14 (in Chinese).
- [ 4 ] CHEN Guanyuan, LU Anhuai. Chemical inheritance of mineral typomorphism and source of gold [J]. *Earth Science Frontiers*, 1994, 1(3-4): 204-209 (in Chinese).
- [ 5 ] YAO Lianzeng. *Crystal Growth Theory* [M]. Hefei: Press of China University of Science and Technology, 1995:158-463 (in Chinese).
- [ 6 ] LIAO Libing. SPM Micromorphological study of mineral and material surfaces[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 1999, 18(2): 85-88 (in Chinese).
- [ 7 ] SHARP T G, ZHENG N J, CHANG C S, et al. Scanning tunneling microscopy studies of galena (001) cleavage surface [J]. *EOS*, 1989, 70 (43): 1394.
- [ 8 ] TOSSELL J A, VAUGHAN D J. Electronic structure and the chemical reactivity of the surface of galena [J]. *Canadian Mineral*, 1987, 25:381-392.
- [ 9 ] EGGLESTON C M, EHRHARDT J J, STUMM W. Surface structural controls on pyrite oxidation kinetics: An XPS-UPS, STM, and modeling study [J]. *American Mineralogist*, 1996, 81:1036-1056.
- [ 10 ] EGGLESTON C M, HOCELLA M F Jr. Scanning tunneling microscopy of pyrite (100): Surface structure and step reconstruction [J]. *American Mineralogist*, 1992, 77: 221-224.
- [ 11 ] EGGLESTON C M, HOCELLA M F Jr. Scanning tunneling microscopy of sulfide surface [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54:1511-1517.
- [ 12 ] LIAO Libing, MA Zhesheng, SHI Nicheng. Research on surface structures of galena and antimonite using STM[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1991, 36(8): 606-608 (in Chinese).
- [ 13 ] LIAO Libing, MA Zhesheng, SHI Nicheng. STM study of tetrahedrite and hematite crystal surface[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1992, 37(21): 1986-1989 (in Chinese).
- [ 14 ] ROSSO K M, BECKER U. The interaction of pyrite {100} surface with O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O: Fundamental oxidation mechanisms[J]. *American Mineralogist*, 1998, 84: 1549-1561.
- [ 15 ] ROSSO K M, BECKER U. Surface defects and self-diffusion on pyrite {100}: An ultra-high vacuum scanning tunneling microscopy and theoretical modeling study [J]. *American Mineralogist*, 2000, 85: 1428-1436.
- [ 16 ] EGGLESTON C M. The surface of -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (001) by scanning tunneling microscopy: Implications for interfacial electron transfer reactions [J]. *American Mineralogist*, 1998, 84:1061-1070.
- [ 17 ] PENN R L, BANFIELD J F. Morphology development and crystal growth in nanocrystalline aggregate under hydrothermal conditions: Insights from titania[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(10): 1549-1557.
- [ 18 ] YE Rong, ZHAO Lunshan, MA Zhesheng. STM study of microtopograph of pyrite and its dynamic significance of ore-formation[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1997, 16 (Suppl): 288-290 (in Chinese).
- [ 19 ] YE Rong, ZHAO Lunshan, MA Zhesheng. STM Study on Micromorphology of pyrite and dynamic significance of ore-formation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(11): 1220-1221 (in Chinese).
- [ 20 ] ZHAO Lunshan, WU Yuebin, YE Rong, et al. Study on tectonic-geochemical dynamics of ore-formation in Jiaodong auriferous area[J]. *Geoscience*, 1996, 10(2): 213-221 (in Chinese).
- [ 21 ] YE Rong, ZHAO Lunshan, SHEN Yongli, et al. Study on geological-geochemical dynamics of ore-formation of Yixing-zhai gold deposit[J]. *Geoscience*, 1997, 11(1): 58-65 (in Chinese).
- [ 22 ] ZHAO Lunshan, CHEN Yuelong, YE Rong. Synthetic experiment of gold-bearing pyrite and the ore-formation of gold in hydrothermal process[J]. *Earth Science Frontiers*, 1998, 5(2): 301-310 (in Chinese).

## 参考文献:

- [ 2 ] 白春礼. 扫描隧道显微术及其应用[M]. 上海:上海科技出版社, 1992:1-223.
- [ 3 ] 陈光远, 孙岱生. 成因矿物学找矿矿物学新进展[A]. 欧阳自远. 世纪之交矿物学岩石学地球化学的回顾与展望[M]. 北京:原子能出版社, 1998:12-14.
- [ 4 ] 陈光远, 鲁安怀. 矿物成分标型继承性与金矿矿质来源[J]. 地学前缘, 1994, 1(3-4): 204-209.
- [ 5 ] 姚连增. 晶体生长基础[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1995:158-463.
- [ 6 ] 廖立兵. 矿物及材料表面的 SPM 微形貌研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1999, 18(2): 85-88.
- [ 12 ] 廖立兵, 马喆生, 施倪承, 等. 方铅矿和辉钼矿表面结构的 STM 研究[J]. 科学通报, 1991, 36(8): 606-608.
- [ 13 ] 廖立兵, 马喆生, 施倪承, 等. 黝锡矿和赤铁矿表面的 STM 研究[J]. 科学通报, 1992, 37(21): 1986-1989.
- [ 18 ] 叶荣, 赵伦山, 马喆生. 黄铁矿微形貌的扫描隧道显微镜研究及其成矿动力学意义[J]. 岩石矿物学杂志, 1997, 16(增刊): 288-290.
- [ 19 ] 叶荣, 赵伦山, 马喆生, 等. 扫描隧道显微镜对黄铁矿表面微形貌的研究及成矿动力学意义[J]. 科学通报, 1999, 44(11): 1220-1221.
- [ 20 ] 赵伦山, 吴悦斌, 叶荣, 等. 胶东金矿构造地球化学动力学研究[J]. 现代地质, 1996, 10(2): 213-221.
- [ 21 ] 叶荣, 赵伦山, 沈镛立, 等. 义兴寨金矿成矿作用地质地球化学动力学研究[J]. 现代地质, 1997, 11(1): 58-65.
- [ 22 ] 赵伦山, 陈岳龙, 叶荣. 含金黄铁矿的模拟合成实验及热液作用中金的富集机制[J]. 地学前缘, 1998, 5(2): 301-310.