

文章编号: 1000-6524(2004)02-0167-06

小秦岭金矿含金石英脉中黄铁矿晶体的表面微形貌研究

张良钜

(桂林工学院 资源与环境工程系, 广西 桂林 541004)

摘要: 利用微分干涉显微镜、扫描电镜、透射电镜等对小秦岭金矿含金石英脉中黄铁矿晶体的表面微形貌进行了研究。黄铁矿晶体的{210}面上发育自由生长层,表明{210}面是F面,其生长机理受二维成核层生长所制约。除简单的五角十二面体外,其他形态黄铁矿晶体的{210}面上也发育有自由生长层。{210}面上的正条纹有些是由{100}面上生长层的边缘台阶在{210}面上叠堆形成,另一些正条纹则是{210}面上生长层边缘台阶堆叠的产物。透射电镜和电子衍射花样研究表明,负条纹黄铁矿晶体是由30~50 nm大小的核团经自动定向附生作用形成,每个核团不是单晶体,而是由许多早先在溶液中形成的小微晶聚合而成。这些特征表明负条纹黄铁矿晶体是在溶液过饱和度和温度梯度小的理想环境中形成,它的形成与杂质无关。PBC理论和唐纳-哈克定律能较好地解释自然界中黄铁矿晶体{100}面上普遍发育自由生长层,而{210}面上自由生长层极为罕见的原因。除日本释迦内矿区黑矿之上的浮岩凝灰岩中产生出负条纹黄铁矿晶体外,在石英脉型金矿床中也有负条纹黄铁矿晶体产出。

关键词: 含金石英脉;黄铁矿晶体;{210}面上的微形貌与负条纹;环境条件;小秦岭金矿

中图分类号: P578.2⁺92

文献标志码: A

A study of micromorphology of pyrite crystals in the auriferous quartz vein of the Xiaqingling gold deposit

ZHANG Liang_ju

(Department of Resource and Environment Engineering, Guilin Institute of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The negative striations and micromorphology of pyrite crystals on a {210} face in the auriferous quartz vein were studied by means of differential interference microscope, SEM and TEM. The {210} faces of pyrite crystals are F_faces, which have developed free growth layers. The mechanism of their crystal growth is controlled by two-dimensional nucleation and layer_by_layer growth. Both simple pentagonal dodecahedron habit and other morphology of pyrite crystals develop free growth layers on the {210} faces. Some positive striations on the {210} faces are formed by piling up of steps of growth layers on the {100} faces, and other positive striations on the {210} faces are formed by piling up of steps of growth layers on the {210} faces. Transmission electron observation reveals that crystals with negative striation are formed through auto-epitaxial settlement of block nuclei 30~50 nm in diameter on growing crystals. Electronic diffraction pattern shows that the single block nuclei consist of many minute crystallites already formed in the solution. This suggests that these crystals have been grown in a reasonable environment characterized by very high super_saturation and low gradient of temperature. Their growth is not related to impurity. Based on an analysis of PBC theory and Donnay_Hark law, we can rea-

收稿日期: 2003-10-30

基金项目: 广西自然科学基金资助项目(桂科自0229054)

作者简介: 张良钜(1949-),男,硕士,教授,矿物学专业。

sonably interpret the phenomenon why free growth layers are commonly seen on the {100} faces but are rarely developed on the {210} faces of pyrite crystals in nature. Besides occurring in the Shakanai mine of Japan, the pyrite crystals with negative striations are also developed in gold deposits of quartz_sulfide veins.

Key words: auriferous quartz vein; pyrite crystal; micromorphology and negative striations on a {210} face; environment condition; Xiaqingling gold deposit

前人曾对黄铁矿晶体形貌进行过报道(Seager, 1953)。1957年砂川一郎(Sunagawa)研究黄铁矿晶体习性变化时,首次提出负晶体(negative crystals)黄铁矿的概念,认为这种负晶体黄铁矿是在非常特殊的地质条件下形成的(Sunagawa, 1957)。1968年砂川一郎和远藤对黄铁矿和石英的晶体形态、表面微形貌进行了详细研究,明确提出负晶体是指黄铁矿晶体{210}面上的条纹垂直于{210}和{100}面的交棱方向,并认为这种条纹只出现在那些简单五角十二面体的黄铁矿晶体上(Sunagawa & Endo, 1968)。远藤和砂川一郎1973年在讨论黄铁矿晶体的负条纹概念时,明确指出:{210}和{100}面上平行[001]方向的条纹称正条纹(positive striations);{210}面上垂直[001]方向的条纹,即[120]方向上的条纹称负条纹。正、负条纹的表示如图1。他们认为{210}面上的正条纹是由{100}面上生长层的边缘台阶在{210}面上堆叠造成的,{210}面上负条纹是由{210}面上生长层的边缘台阶堆叠形成的;正条纹和负条纹黄铁矿晶体有着完全不同的成因条件,负条纹晶体是极为特殊地质条件下的产物,因而是极为罕见的,并指出负条纹的形成可能与杂质有关(Endo & Sunagawa, 1973)。1978年远藤对黄铁矿晶体的表面微形貌进行系统研究时再次强调负条纹晶体的成因意义(Endo, 1978)。1980年砂川一郎等利用近代晶体生长理论(Sunagawa, 1980)对黄铁矿晶体的{210}面进行PBC键链分析,认为{210}面是F面,指出当溶液过饱和度低时,{210}面上出现正条纹,

为S面;溶液过饱和度高时,{210}面由S面转变为F面,此时{210}面上则可能出现负条纹,因而负条纹黄铁矿晶体是在溶液过饱和度高的条件下形成的。

我国关于黄铁矿晶体表面微形貌的研究只有零星报道(张良钜, 1987; 王文魁, 1992; 潘兆榘, 1994; 叶荣等, 1997),有关负条纹黄铁矿晶体的研究还未见专门报道。笔者在前人研究的基础上对小秦岭金矿金洞岔矿区九号含金石英脉中的5个矿化阶段(张良钜, 1987)的黄铁矿晶体{210}面上的微形貌与负条纹进行了研究。该矿区的地质概况可参见文献(张良钜等, 2003)。该矿床中的九号含金石英脉内产出较多负条纹黄铁矿晶体,其中有些晶体类似砂川一郎、远藤在有关文献所报道的负条纹晶体(Sunagawa and Endo, 1968; Endo and Sunagawa, 1973; Endo, 1978)。但矿区多数负条纹晶体形态和{210}面上生长花纹远比砂川、远藤所报道的丰富,而且其成因也与其完全不同。

1 黄铁矿晶体的表面微形貌特征

根据扫描电镜、双目镜下观察及晶体测角统计(图2),矿区内黄铁矿晶体上所出现的单形有:主要单形 $a\{100\}$ 、 $e\{210\}$ 、 $o\{111\}$,次要单形 $n\{211\}$ 、 $s\{321\}$ 、 $d\{110\}$ (表1),有疑问单形 $g\{14, 12, 10\}$ 、 $u\{30, 27, 20\}$ 、 $w\{14, 14, 12\}$ 、 $f\{310\}$ 、 $m\{520\}$ 、 h

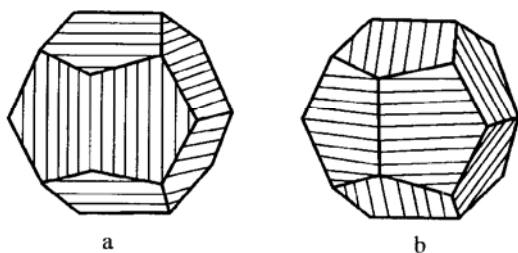


图1 黄铁矿晶体{210}面上的正条纹(a)与负条纹(b)
Fig. 1 Positive striations (a) and negative striations (b)
on {210} face

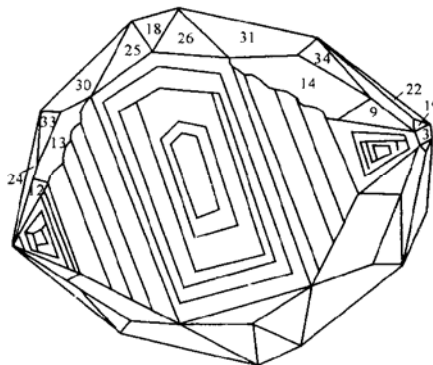


图2 黄铁矿晶体测量投影
Fig. 2 The measurement projection of a pyrite crystal

表1 黄铁矿晶体测量数据
Table 1 Measurement data of a pyrite crystal

晶面编号	晶面符号	φ	ρ
1	100	90°	90°
2	210	63°24′	90°
3	010	0°	90°
4	210	297°48′	90°
5	100	270°	90°
6	210	242°42′	90°
7	010	180°	90°
8	210	116°24′	90°
9	321	56°24′	74°36′
10	321	305°	74°36′
11	321	235°30′	74°36′
12	321	123°24′	74°36′
13	211	116°26′	65°54′
14	211	63°	65°54′
17	021	179°48′	63°42′
19	021	359°48′	63°42′
20	201	269°12′	26°54′
21	132	18°12′	57°24′
22	132	341°30′	51°24′
25	213	116°42′	36°30′
26	213	63°42′	36°30′
27	213	296°12′	36°30′
28	213	242°48′	36°30′
29	112	225°12′	36°30′
30	112	135°	36°30′
31	112	45°	36°30′
34	111	45°	54°46′

{830}。多数黄铁矿晶体是由3种主要单形 a e o 中某1种或某2种或3种单形所形成的聚形晶体。次要单形 n s 则围绕晶体{111}面分布。那些延伸性明显的黄铁矿晶体上所出现的单形有 a e o n s d 及 g u w。这种异向性明显的黄铁矿晶体反映出生长环境的异向性。有些黄铁矿晶体的{210}面上发育有丰富的生长层,在这些生长层花纹中有少数类似于 Sunagawa(1957)、Sunagawa and Endo(1968)、Endo and Sunagawa(1973)、Endo(1978)所报道的负条纹,但多数与负条纹有明显的差异,而且它们的晶体形态也不同于 Endo and Sunagawa(1973)所报道的负条纹晶体,这些晶体形貌有:①晶体习性以{210}面发育为主,{100}面发育较差,即{210} > > {111}(图3_1);②粒状黄铁矿,晶体以{210}面发育为主,{100}、{111}面发育极差(图3_2);③晶体的{100}和{210}面发育均等,即{100} \cong {210}(图3_3);④异向性明显的“双锥状”复杂形态晶体,晶体测角(图2)表明它是由{100} + {210} + {111} + {211} + {321}等5种单形构成的聚形(图3_4);⑤异向性明显的“扁舌状”复杂形态黄铁矿晶体,它是由

{100} + {210} + {111} + {211} + {110} + {321} + {14}、{12}、{10} + {30}、{27}、{20}等单形组成的聚形,其中{100}单形较发育,其次为{210}单形(图3_5);⑥{100}、{210}发育相近且异向性明显的“尖锥状”晶体(图3_6);⑦晶体的{100}面较{210}面发育,即{100} > {210}(图3_7)。

Sunagawa 和 Endo 在讨论黄铁矿晶体{210}面上生长层的有关问题时一再反复强调:只有那些简单五角十二面体习性的黄铁矿晶体上的{210}面才可能发育生长层。而事实上本矿区含金石英脉矿床的黄铁矿晶体中,不但简单五角十二面体晶体形态的{210}面上发育有自由生长层,其他晶体形态(图3_2、3、4、6、7)的{210}面上也同样发育有自由生长层。

2 黄铁矿晶体{210}面上的表面微形貌特征

矿区黄铁矿晶体{210}面上的表面微形貌主要有:

(1) 正条纹:黄铁矿晶体的{210}面上常出现平行[001]方向密而直且呈等间距分布的条纹(图3_8)。这种条纹是由{100}面上生长层的边缘台阶在{210}面上平行堆叠而成。

(2) 曲边五边形生长层:简单五角十二面体晶体习性的{201}面上发育有曲边五边形生长层,其形状受五角十二面体单形的晶面形状制约(图3_9)。{201}面上生长层形状由底部曲边五边形逐渐过渡到顶部的等腰三角形,生长层台阶平直规整。

(3) 尖舌状生长层:晶体习性{210} > > {111}。在{210}面上发育极薄的“尖舌状”生长层,生长层的边缘台阶呈不规整的波纹状圆滑曲线(图3_10)。

(4) 负条纹生长层:{210}面上发育垂直[001]方向,即[120]的条纹(负条纹)。负条纹是长方形生长层的短边台阶,台阶平直、规整(图3_11)。

(5) 正条纹区间内的梯形生长层:晶体习性{100} \cong {210}。在{210}面上发育有许多密集的正条纹,即平行[001]方向的条纹。在正条纹区间内发育有大小不等但取向一致的梯形生长层(图3_7)。正条纹与梯形生长层关系是:从{100} \rightarrow {210}面的边部,正条纹区间间隔变宽(条纹变稀),相应区间内的梯形生长层愈加密集且逐渐变大。这些梯形生长层的两平行边都与正条纹方向一致,它们是{210}面上的梯形生长层边缘台阶堆叠的产物,而不是由{100}面上生长层边缘台阶堆叠形成。

(6) 三角形生长层:晶体的{210}面上由[001]、

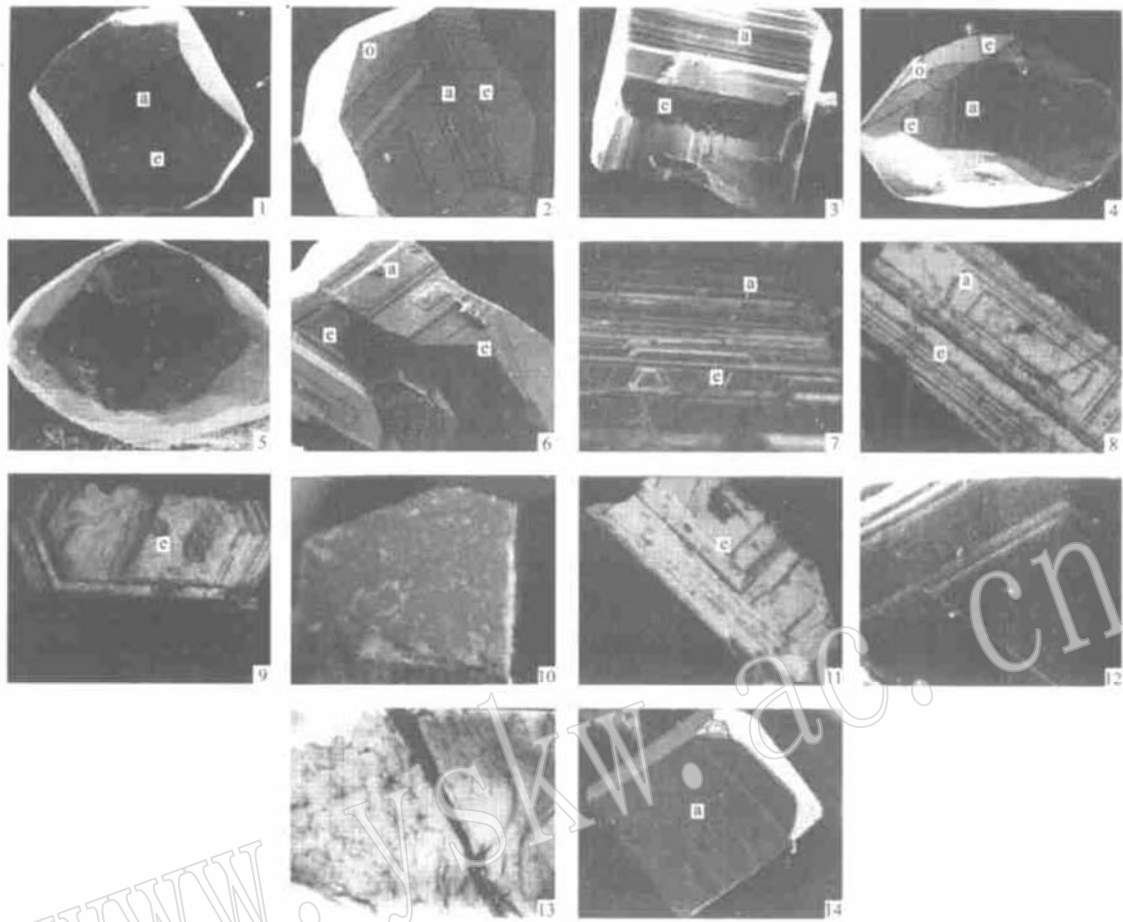


图3 黄铁矿晶体的表面微形貌照片

Fig. 3 Micromorphologic photographs of pyrite crystals

1—粒状黄铁矿晶体, $\{210\} \gg \{100\}$, $\times 90$, 扫描电镜; 2—粒状黄铁矿晶体, $\{210\} \gg \{111\} \gg \{100\}$, $\{210\}$ 面上发育有规则的梯形生长层, $\times 90$, 扫描电镜; 3—粒状黄铁矿, $\{100\} > \{210\}$, $\{210\}$ 面上发育有梯形生长层, $\times 260$, 扫描电镜; 4—异向性明显的双锥状黄铁矿晶体 $\{100\} + \{210\} + \{111\} + \{211\} + \{321\}$ 的聚形, $\{210\}$ 面上发育有不对称尖底梯形生长层, 与图2晶体相同, $\times 190$, 扫描电镜; 5—异向性明显的扁舌状黄铁矿晶体 $\{100\} + \{210\} + \{111\} + \{211\} + \{110\} + \{14, 12, 10\} + \{30, 27, 20\}$ 的聚形, $\times 80$, 扫描电镜; 6—尖锥状黄铁矿晶体, $\{100\} \approx \{210\}$, 在 $\{210\}$ 面上发育等腰三角形生长层, $\times 110$, 扫描电镜; 7—黄铁矿晶体, $\{100\} > \{210\}$, $\{210\}$ 面上正条纹区间发育有梯形生长层, $\times 100$, 微分干涉; 8— $\{210\}$ 面上的正条纹, 晶体 $\{100\} \approx \{210\}$, $\times 100$, 微分干涉; 9—简单的五角十二面体习性, $\{210\}$ 面上的曲边五边形, $\times 100$, 微分干涉; 10— $\{210\}$ 面上的尖舌状生长层, $\times 200$, 微分干涉; 11— $\{210\}$ 面上负条纹生长层, $\times 200$, 微分干涉; 12— $\{210\}$ 面上梯形生长层, 与图 3.2 晶体相同, $\times 260$, 微分干涉; 13—负条纹黄铁矿晶体呈核团生长单位取向排列, $\times 80\,000$, 透射电镜; 14—粒状黄铁矿晶体, $\{100\} \gg \{111\}$, $\{100\}$ 面上薄的生长层, $\times 80$, 扫描电镜

1—granulous pyrite crystal, $\{210\} \gg \{100\}$, $\times 90$, SEM; 2—granulous pyrite crystal, $\{210\} \gg \{111\} \gg \{100\}$, regular stepped growth layer on a $\{210\}$ face, $\times 90$, SEM; 3—granulous pyrite crystal, $\{100\} > \{210\}$, stepped growth layer on a $\{210\}$ face, $\times 260$, SEM; 4—dipyramided pyrite crystal, $\{100\} + \{210\} + \{111\} + \{211\} + \{321\}$, pointed tail stepped growth layer on a $\{210\}$ face, the same crystal as for Fig. 2, $\times 190$, SEM; 5—tongue-like pyrite crystal, $\{100\} + \{210\} + \{111\} + \{211\} + \{110\} + \{14, 12, 10\} + \{30, 27, 20\}$, $\times 80$, SEM; 6—pointed pyramid pyrite crystal, $\{100\} \approx \{210\}$, triangular growth layer on a $\{210\}$ face, $\times 110$, SEM; 7—pyrite crystal, $\{100\} > \{210\}$, stepped growth layer in the positive striation space on a $\{210\}$ face, $\times 100$, DIC; 8—positive striations on a $\{210\}$ face, $\times 100$, DIC; 9—crystal habit of simple pyritohedron, curved pentagonal growth layer on a $\{210\}$ face, $\times 100$, DIC; 10—tongue pointed growth layer on a $\{210\}$ face, $\times 200$, DIC; 11—negative striations growth layer on a $\{210\}$ face, $\times 200$, DIC; 12—stepped growth layer on a $\{210\}$ face, the same crystal as for Fig. 3.2, $\times 260$, DIC; 13—oriented block nuclei growth unit of a negative striations pyrite crystal, $\times 80\,000$, TEM; 14—granulous pyrite crystal, $\{100\} \gg \{111\}$, fine growth layer on a $\{100\}$ face, $\times 80$, SEM

$[\bar{1}21]$ 及 $[\bar{1}21]$ 方向所围成的等腰三角形生长层(图 3.6)。 $[001] \wedge [\bar{1}21] = 67^\circ$ 。三角形生长层的长边为 $[001]$ 方向, 即正条纹方向。它不是由 $\{100\}$ 面上生长

层边缘台阶叠堆形成, 而是 $\{210\}$ 面上三角形生长层长边台阶堆积的产物。

(7) 梯形生长层: 晶体的 $\{210\}$ 面上出现由 $[001]$ 、

[121]方向所围成的梯形生长层(图3_2_3_12),生长层的台阶平直规整且梯形的两条平行边与[001]方向一致。

上述矿区黄铁矿晶体{210}面上表面微形貌中只有图3_7_11两种花纹类似Endo(1978)所报道的负条纹晶体,而图3_2_3_4_6_9_10_12等7种花纹则是本矿区黄铁矿晶体{210}面上所出现的特征花纹。这些晶体的{210}面上生长层条纹除平行[001](正条纹)、垂直[001](负条纹)方向外,还可出现[121]、[120]方向的条纹。负条纹及[121]、[120]方向的条纹都是由{210}面上生长层的边缘台阶堆叠形成(图3_2_3_6_7、9_10_11_12)。 $\{210\}$ 面上的正条纹部分是 $\{100\}$ 面上生长层的边缘台阶在 $\{210\}$ 面上平行堆叠形成的(图3_8),大部分正条纹则是由 $\{210\}$ 面上生长层的长边边缘台阶堆叠而成(图3_2_3_6_7_11等)。这些特征表明 $\{210\}$ 面上生长层并不都受 $\{100\}$ 面上生长层所制约,而主要受溶液的过饱和度和生长速度所控制。 $\{210\}$ 面上生长层的形状则主要受晶体中 $\{210\}$ 面周围的单形(晶面)形状所制约,如图3_4的尖底梯形生长层形状即受其周围 $\{321\}$ 面边棱所围限。

3 黄铁矿晶体的生长环境条件讨论

矿区含金石英脉矿床中部分黄铁矿晶体的 $\{210\}$ 面上发育极丰富的生长层(图3_2_3_4_6_7_9_10_12、11_13),表明这些黄铁矿晶体的 $\{210\}$ 面主要受层生长二维成核机理所制约。根据PBC理论分析,黄铁矿晶体的 $\{100\}$ 、 $\{210\}$ 面都是F面(Miyate & Sunagawa, 1980),即晶体的 $\{100\}$ 、 $\{210\}$ 上都应发育有自由生长层。事实上,自然界中产出的黄铁矿晶体的 $\{100\}$ 面上不论成因产状如何,普遍发育有自由生长层,而 $\{210\}$ 面上出现生长层、负条纹的机率比 $\{100\}$ 面少得多。负条纹黄铁矿晶体的透射电镜研究表明(图3_13),晶体是由生长单位为30~50 nm大小的核团定向附生形成的。这种核团形态极不规则,但核团间的界线清晰,且排列有一定的取向性,每个核团间存在有微孔隙。X射线衍射花样证明每个核团并不是单晶,而是由许多不同形状的单晶粒聚合而成。这些单晶粒可能早就在溶液中形成了(Endo, 1978)。核团生长单位表明负条纹黄铁矿晶体是在溶液过饱和度高的环境中形成,这也可从同一黄铁矿晶体的 $\{100\}$ 、 $\{210\}$ 面上生长层厚度大且 $\{100\}$ 面上生长层的厚度要远比非负条纹黄铁矿晶体 $\{100\}$ 面上生长层厚度大得多的事实得到证明(图3_6)。据PBC理论并结合唐纳-哈克

定律(Miyate and Sunagawa, 1980)推断, $\{210\}$ 面上发育自由生长层、负条纹的黄铁矿晶体生长时的溶液过饱和度要比 $\{100\}$ 面上自由生长层的晶体生长时的溶液过饱和度高得多。因为黄铁矿的空间群 $Pa\bar{3}$ 在晶体结构中存在像移面a,使实际晶体结构中的面网间距减半,即 d_{100} 边为 d_{200} ,相应间距(d)从0.54 nm减半为0.27 nm,但 d_{200} 薄片仍包含有[010]、[001]、[012]3个PBC矢量方向,是F面。 $\frac{1}{2}d_{210}$ 薄片则只含有[001]1个PBC矢量方向,是S面(Miyate and Sunagawa, 1980)。由于 d_{200} 仍是F面,即使在溶液过饱和度低的条件下,黄铁矿晶体的 $\{100\}$ 面仍然发育并出现自由生长层;而 $\frac{1}{2}d_{210}$ 在溶液过饱和度低的条件下只是S面,不是F面,因此 $\{210\}$ 面在黄铁矿晶体上发育较差或根本不发育,此时 $\{210\}$ 面上不可能出现自由生长层或负条纹。矿区黄铁矿晶体形貌特征同上述解释完全吻合。矿区片麻岩、混合岩、黄铁矿化花岗伟晶岩、蚀变岩、热液期最早(第1)和最晚(第5)阶段中的黄铁矿晶体都以简单立方体或以 $\{100\}$ 面发育为主的简单晶体出现,而 $\{210\}$ 面在这些晶体上根本不发育或发育极差,但这些黄铁矿晶体的 $\{100\}$ 面上仍可发育有较薄的自由生长层(图3_14)。这些特征说明上述不同成因产状的黄铁矿晶体是在过饱和度低的环境中形成的(张良钜, 1987)。热液第2_3阶段黄铁矿晶体为 $\{210\}$ 、 $\{111\}$ 面较发育或以 $\{210\}$ 发育为主的复杂晶体形态(图3_1_2_4_6_9_10_11_12),这些晶体的 $\{100\}$ 、 $\{210\}$ 面上都发育有丰富生长层(图3_2_4_6_9、10_11)。如果同一晶体的 $\{100\}$ 、 $\{210\}$ 面上都发育有自由生长层,且其生长层厚度都大,但 $\{100\}$ 面上生长层厚度要比 $\{210\}$ 面上生长层厚度大得多(图3_6),这表明 $\{100\}$ 面上生长层是在溶液过饱和度较低时就开始发育形成,溶液过饱和度较高或高时, $\{100\}$ 面上生长层厚度相应增大,当溶液过饱和度足够高时,晶体的 $\{210\}$ 面才可能发育自由生长层。因此,黄铁矿晶体 $\{210\}$ 面上发育自由生长层、负条纹是溶液过饱和度高的重要标志。这种高饱和度的环境对成矿极为有利。在矿体中,凡是多金属硫化物(主要为方铅矿、闪锌矿等)富集地段,黄铁矿晶体形态以 $\{210\}$ 、 $\{111\}$ 面发育为主或较发育,且 $\{210\}$ 、 $\{111\}$ 面上生长层厚度大,含金性也较好。矿区黄铁矿晶体 $\{210\}$ 面上生长层另一特点是规整、平直且生长层的台间隔宽(图3_2_6_12),表明它们是在比较稳定的环境中,即在温度梯度小(生长速度慢)的条件下形成的。

综上所述, 矿区 {210} 面上生长层发育的黄铁矿晶体是在溶液过饱和度高、温度梯度小的理想环境中形成, 与杂质无关。可以有把握地认为负条纹黄铁矿晶体除日本释迦内矿区黑矿之上的浮岩凝灰岩中产出外, 在热液金矿床, 尤其是成矿溶液过饱和度高、温度梯度小的理想环境中都可能有负条纹黄铁矿晶体的产出。应特别指出, 尽管 {210}、{100} 面都是 F 面, 但自然界中黄铁矿晶体的 {210} 面上发育自由生长层的机率比 {100} 面上发育自由生长层的机率要小得多, 且发育程度也远不及 {100} 面上生长层。这主要是由于溶液达到高饱和度和温度梯度小的理想环境要比过饱和度低的非理想条件要困难得多。自然界中的黄铁矿晶体习性多为简单的立方体, 简单五角十二面体产出较少, 其中一个重要的原因是溶液要达到高过饱和度和生长速度慢的理想环境相对比较困难。

4 几点认识

小秦岭金矿金矿矿区 9 号含金石英脉中黄铁矿的 {210} 面上的微形貌与负条纹特征研究可提供如下的信息:

(1) 含金性较好的热液第 2、第 3 阶段的黄铁矿晶体以 {210} 单形为主, 而 {100}、{111} 单形较差; 热液第 1、4、5 阶段的黄铁矿晶体则具以 {100} 单形为主的简单形态。

(2) 黄铁矿晶体的 {210} 面上发育有形态丰富的微形貌, 包括自由生长层、正条纹、负条纹。{210} 面上的正条纹有些是由 {100} 面上生长层的边缘台阶在 {210} 上叠堆形成, 部分正条纹则是 {210} 面上生长层边缘台阶堆叠的产物。生长层的形态受 {210} 面周围单形所制约。生长层的规整性则与晶体生长环境的稳定性及温度梯度的大小有关。

(3) 透射电镜和电子衍射花样研究表明, 负条纹黄铁矿晶体是由 30~50 nm 大小的核团定向附生所形成的, 每个核团不是单晶体, 而是由许多原先就已在溶液中形成的小微晶聚合而成。

(4) 根据同一晶体的 {210}、{100} 面上的生长层厚度及简单立方体的 {100} 面上的生长层厚度对比以及透射电镜研究表明, 以 {210} 发育为主的复杂晶体及负条纹晶体是在溶液过饱和度高与温度梯度小(生长速度慢)的较理想环境条件下形成, 而与溶液的杂质

无关。

(5) 根据 PBC 理论及唐纳-哈克定律能较好地解释天然产出的黄铁矿晶体多具以 {100} 单形发育为主的简单立方体晶形, 而以 {210} 单形发育为主的晶体则极为少见的客观事实。因前者在溶液过饱和度较低的环境下形成, 而后者则形成于溶液过饱和度高的环境中。

(6) 负条纹黄铁矿晶体不但产出在日本释迦内矿区黑矿之上的浮岩凝灰岩中, 在热液矿床, 特别是成矿溶液过饱和度高、温度梯度小的理想环境中也可产出。

Reference

- Endo Y. 1978. Surface microtopographic study of pyrite crystals[J]. Bull. Geol. Surv. Japan, 29(11).
- Endo Y and Sunagawa I. 1973. Positive and negative striations in pyrite[J]. Amer. Miner., 58: 930~939.
- Miyate T and Sunagawa I. 1980. An Extended PBC Method: Its Application to Striations and Polar Crystal[M]. Sci. Rep. of TOHOKU Univer.
- Pan Zhaolu. 1994. Crystallography & Mineralogy (Part 2)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 4(in Chinese).
- Seager A F. 1953. The surface structure of crystals[J]. Miner. Mag., XXX(220): 11.
- Sunagawa I. 1957. Variation in crystal habit of pyrites[J]. Kept. Geol. Surv. Japan, 175: 41.
- Sunagawa I and Endo Y. 1968. Macro_ and Macro_Morphology of Quartz and Pyrite[M]. IMA_Symposium, 63~75.
- Wang Wenkui. 1992. Simple Textbook of Crystal Surveying[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2~4(in Chinese).
- Ye Rong, Zhao Lunshan, Ma Zhesheng. 1997. STM study of microtopograph of pyrite and its dynamic significance of ore_formation[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 16(supp.): 288~290(in Chinese).
- Zhang Liangju. 1987. Study on mineralogy of pyrite, iron and gold in jindongcha ore district, Xiaolinling gold deposit[D]. Wuhan: China University of Geosciences(in Chinese).
- Zhang Liangju, Lei Wei, Li Dongsheng, et al. 2003. A study of micro-morphology of quartz crystals from auriferous quartz veins in the Xiaolinling gold deposit[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 22(2): 177~180 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 潘兆楹. 1994. 结晶学与矿物学(下册)[M]. 北京:地质出版社, 4.
- 王文魁. 1992. 晶体测量学简明教程[M]. 北京:地质出版社, 2~4.
- 叶荣, 赵伦山, 马哲生. 1997. 黄铁矿微形貌的扫描显微镜隧道研究及其成矿动力学意义[J]. 岩石矿物学杂志, 16(增刊): 288~290.
- 张良钊. 1987. 小秦岭金矿金矿矿区黄铁矿、自然铁、自然金等矿物学研究[D](硕士学位论文). 武汉:中国地质大学.
- 张良钊, 雷威, 李东升, 等. 2003. 小秦岭金矿含金石英晶体微形貌研究[J]. 岩石矿物学杂志, 22(2): 177~180.