

亚微米级金矿的自动定量矿物学研究： 检测、分析、描述、定量及难浸性



Seeing beyond

亚微米级金矿的自动定量矿物学研究： 检测、分析、描述、定量及难浸性

作者： Eddy Hill 博士
Carl Zeiss Microscopy Ltd., Cambridge, UK

日期： 2019 年 7 月

引言

金矿床可能会呈现矿物学和结构上的差异，从而增加回收过程的复杂性。例如，金矿石中碳质物质的变化导致劫金，增加了工作的复杂性（Miller, Wan and Diaz. 2005）。无论是难浸金或是易浸金，其复杂的矿石性质都可以通过含金相的变化性、粒度测定法及矿石的模式矿物学加以解释（Goodall and Scales. 2007）。这三种特征通过各种机制相互作用，从而影响黄金的回收率（表 1）。现代显微技术可以承担要求严苛的精确金含量定量分析并提供其所处环境的描述。因此，经逻辑推论可知，对矿石的结构和矿物学进行持续监测有助于理解矿石的特性，识别矿物学上影响冶金回收的复杂因素。

传统上，采用光学显微镜（LM）和基于扫描电子显微镜（SEM）的自动矿物学（AM）技术来确定金矿的特征和预估回收率。尽管这些技术得到了广泛的应用，但从这些方法中所能获得的信息仍然有限。粒度和人工分析是 LM 方法中面临的主要挑战。在采用 AM 分析的情况下，无法以一致的或可量化的方式描述亚微米级的晶粒，而亚微米晶粒可能占有相当大的比例。在下文的研究中，利用自动化定量矿物学（AQM）的发展来克服亚微米颗粒所带来的问题。现在可以测量一个或多个寄主矿物中未解离亚微米（至几纳米）金相的分散情况；能够以定量且一致的方式解释纳米级金的存在和回收方面面临的矿物学障碍。定量化学分析还意味着，一次分析便可实现金矿物学、寄主矿物学、钝化、分解和劫金的诊断，无需补充化学分析。

成因	描述
金矿物学	矿物学和/或金相成分的变化
粒度	由于金相差异，使用粒度测定法需要进行磨削调整金颗粒大小，以保持解离指数
原生矿物学	脉石的矿物学变化可以引起矿床中金的构造环境的变化
钝化	金晶粒上的不溶性镀层会抑制氧化反应
分解	在含铜、锌、铅、砷、锑的金相中，这些元素也会与氧化物发生反应，从而增加了试剂消耗，导致氧化物浸出效率下降。
劫金	碳酸盐在氰化浸金的过程中可通过吸附方式将已溶解的金劫走，从而降低了碱性氰化物金的浸出率

表 1: 金矿石难浸原因 (Goodall and Scales. 2007)

方法

按照标准金相技术，将三个地矿样品制备成三个30毫米的样品盘；标记为1号样品盘、2号样品盘和3号样品盘。使用蔡司 Mineralogic Mining 对各个样品具有统计代表性的晶粒数目进行分析。这种方法可对样品进行完整的化学、矿物学分析及结构分类和定量。

Mineralogic Mining 是一种基于 SEM（图 1）的岩石学分析工具，配有多台能量色散光谱仪（EDS）。Mineralogic 利用其先进的图像处理和分析能力，对收集的 EDS 光谱进行完全去卷积和定量，在分析结束时便可提供完整而详细的输出图集。分类按顺序进行，同时兼顾样品的形态、化学和物理特征。由于测定了所分析的每个点的化学成分，Mineralogic Mining 可以在每次分析运行结束时提供所关注元素的测定和分布（特征）；无需采用电子探针分析（EMPA）等辅助技术。通过这种方式，蔡司 Mineralogic Mining 可执行真实的 AQM 分析，从而迅速对矿石的性质和难浸性的潜在原因进行评估（表 1）。

结果

三个样品盘的分析结果表明，脉石以石英、黄铁矿和云母为主（表 2）。含金相为原生金（ Au_{80-100} ）、琥珀金（ $Au_{20-80}Ag_{20-80}$ ）、银（ Ag_{80-100} ）、碲金银矿（ Ag_3AuTe_2 ）、碲银矿（ Ag_2Te ）、粒碲银矿（ $AgTe$ ）、碲金矿（ $AuTe_2$ ）以及针碲金银矿（ $(Ag,Au)Te_2$ ）。金元素在样品中的分布主要集中在金石、钙辉石和碲金银矿中（图 2）；在 2 号和 3 号样品盘中，针碲金银矿相对含金较多。各主要脉石及含金相的平均成分和比例见表 2。软件将自动计算分析交互量与两个或多个相相互作用的情况，从而生成反映取样相而非单一相的成分报告。在分析过程中会自动处理这些异常成分，并通过分类算法进行调整。例如，当碲化物小于 $1\mu m$ 且存在于另一相时，此功能尤为有用。



图 1：蔡司 EVO 扫描电子显微镜模块化 SEM 平台能够提供高分辨率的表面信息及出色的材料对比度。蔡司 EVO Mineralogic Mining 可更最大限度地实现资源回收。

重要的批量数据						
1 号样品盘						
	数量	面积百分比 %	重量百分比 %	粒度 (μm)	粒度标准差 (μm)	成分平均重量百分比 %
石英	14439	87.74	86.25	98.07	67.22	Si 57.18; O 42.8; Al 0.02;
黄铁矿	4273	3.02	5.54	12.14	38.13	S 52; Fe 43.66; Zn 4.34;
云母	3073	2.63	2.93	19.78	41.52	O 41.01; Si 25.31; Al 18.34; K 9.97; Fe 4.88; Mg 0.47; Na 0.02;
FeO	6543	0.76	1.48	6.92	16.57	Fe 69.85; O 26.59; Si 2.39; Al 1.16; Mg 0.01;
钠长石	430	1.37	1.31	61.81	57.06	O 41.79; Si 38.95; Al 11.87; Na 7.36; Ca 0.03;
钾长石	746	0.96	0.91	21.95	50.24	O 41.82; Si 27.17; Al 18.12; K 10.18; Fe 2.3; Na 0.41; Ca 0.01;
鲕绿泥石	902	0.42	0.47	12.88	30.60	O 39.39; Fe 23.01; Si 16.87; Al 13.64; Mg 7.08; Mn 0;
高岭石	124	0.44	0.43	74.47	53.23	O 44.72; Si 41.91; Al 13.37;
黄金	30	0.04	0.27	16.67	41.51	Au 100;
碲金银矿	8	<0.01	<0.01	4.25	1.92	Ag 40.29; Te 39.59; Au 20.12;
碲银矿	15	<0.01	<0.01	3.12	1.46	Ag 57.94; Te 42.06;
粒碲银矿	2	<0.01	<0.01	4.79	2.45	Te 51.85; Ag 48.15;
碲金矿	1	<0.01	<0.01	3.01	0.00	Te 60.79; Au 39.21;
2 号样品盘						
	数量	面积百分比 %	重量百分比 %	粒度 (μm)	粒度标准差 (μm)	成分平均重量百分比 %
石英	4084	71.52	65.48	70.78	50.26	Si 56.78; O 43.03; Al 0.19;
黄铁矿	5467	13.33	22.80	13.63	28.94	S 51.99; Fe 43.68; Zn 4.33;
云母	1302	7.91	8.20	44.05	54.09	O 36.17; Si 35.21; Al 12.82; Fe 11.62; K 4; Mg 0.12; Na 0.06;
钠长石	79	0.93	0.82	52.66	42.24	O 41.7; Si 39; Al 11.75; Na 7.55; Ca 0.01;
黄铜矿	1373	0.39	0.57	4.33	10.34	Cu 35.45; S 33.46; Fe 31.09;
高岭石	40	0.54	0.49	64.80	36.41	O 44.32; Si 41.55; Al 14.12;
钾长石	42	0.50	0.45	43.25	50.67	O 42.14; Si 27.53; Al 18.15; K 9.52; Fe 2.05; Na 0.61;
FeO	647	0.20	0.37	6.28	10.21	Fe 68.45; O 25.95; Si 3.07; Al 2.51; Mg 0.02;
黄金	27	0.04	0.29	10.99	33.05	Au 100;
碲金银矿	29	<0.01	0.01	5.07	5.33	Ag 42.07; Te 37.27; Au 20.66;
碲金矿	28	<0.01	0.01	6.37	5.80	Te 63.56; Au 36.44;
碲银矿	22	<0.01	<0.01	3.18	3.25	Ag 62.87; Te 37.13;
银	2	<0.01	<0.01	3.68	0.89	Ag 100;
粒碲银矿	6	<0.01	<0.01	1.79	0.72	Te 56.83; Ag 43.17;
针碲金银矿	4	<0.01	<0.01	1.97	0.63	Au 40.13; Te 40.02; Ag 19.85;
3 号样品盘						
	数量	面积百分比 %	重量百分比 %	粒度 (μm)	粒度标准差 (μm)	成分平均重量百分比 %
石英	4780	76.18	73.88	94.71	73.28	Si 57.02; O 42.96; Al 0.03;
黄铁矿	3071	4.13	7.49	11.38	33.59	S 52.06; Fe 43.65; Zn 4.3;
云母	2490	6.25	6.86	17.66	45.35	O 40.69; Si 24.32; Al 17.63; K 9.27; Fe 6.92; Mg 1.15; Na 0.01;
FeO	4045	1.47	2.79	7.21	18.25	Fe 70.24; O 26.71; Si 1.97; Al 1.08; Mg 0.01;
鲕绿泥石	947	2.05	2.25	13.99	41.83	O 38.18; Fe 24.25; Si 15.88; Al 13.27; Mg 8.42; Mn 0;
钠长石	185	2.31	2.17	79.19	72.44	O 41.68; Si 39.06; Al 11.61; Na 7.62; Ca 0.01;
钾长石	355	1.48	1.39	23.48	57.37	O 41.94; Si 27.17; Al 17.78; K 10.69; Fe 2.41; Na 0; Ca 0;
高岭石	78	1.45	1.38	94.94	79.32	O 44.89; Si 41.79; Al 13.32;
黄金	43	0.12	0.82	18.64	47.33	Au 100;
碲金银矿	9	<0.01	<0.01	3.62	3.00	Te 39.63; Ag 38.83; Au 21.54;
碲金矿	16	<0.01	<0.01	3.30	1.69	Te 61.36; Au 38.64;
碲银矿	20	<0.01	<0.01	2.09	0.92	Ag 58.89; Te 41.11;
针碲金银矿	7	<0.01	<0.01	2.94	2.51	Te 42.71; Au 34.91; Ag 22.38;
粒碲银矿	2	<0.01	<0.01	1.74	0.77	Te 54.05; Ag 45.95;

表 2: 脉石主要相和赋值相的面积百分比 %、重量百分比 %、平均粒径、成分平均重量百分比 %。

样品的模式矿物学已知，便可以评估导致难浸性的可能原因。分解导致难浸的可能性不大，因为在任何样品成分中，可能引起分解的相的总和占比不到1%。由于两种样品中碳酸盐含量都小于1%，因此劫金导致难浸的可能性也不大。含金相的粒数相对较低，说明无法对其寄主特性进行真正的评估，需要进行其他分析。

所有 AQM 分析都尝试在 2D 剖面分析的基础上对样品进行 3D 解释。为使这种体视学方法发挥效用，必须分析合理数量的晶粒。在这种情况下，所分析的晶粒数量越大，置信度越高，且能够证明分析结果在模式矿物学和相的平均成分方面具有统计代表性。但由于每个样品中每相含金晶粒数都少于 43 个，因此，这些相的体视学研究置信水平较低，且含金相矿物学测量结果可能会产生误导。需要进一步分析，验证颗粒测定法、寄主矿物学和钝化的潜在原因。没有必要为了解释存在的各个粒子而对样品进行重复分析，而且重复分析并无法改善模式矿物学或组分信息。以金矿物为重点的亮相搜索（BPS）分析允许在合理的时间内分析所有关注的晶粒，并提供更加合理的后续分析方法。最简单的形式是，在执行 BPS 的过程中，利用蔡司 Mineralogic Mining 的高级图像处理引擎区分存在的重量最轻和最重的相。仅对最重的相及其所接触的伴生矿物进行分析。这样可快速分析样品中的所有含金晶粒、获得充分的体视学信息以及详细的成分和相伴生信息。为简单起见，仅列出了 1 号样品盘的 BPS 结果（表 3）。

金的分布情况

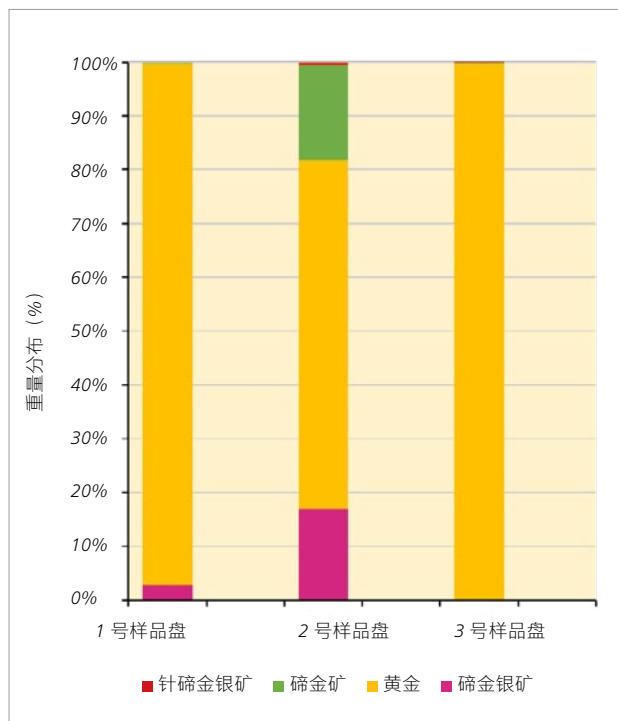


图 2：所提供的 3 个样品中所含的金以自然金、钙辉石和碲金银矿为主，在 2 号样品盘和 3 号样品盘中所占比例较小。

亮相搜索重要的批量数据				
1号样品盘				
	数量	粒度 (μm)	粒度标准差 (μm)	成分平均重量百分比 %
黄铁矿	3392	7.95	31.65	S 52.05; Fe 43.62; Zn 4.33;
石英	288	67.96	78.89	Si 56.78; O 43.1; Al 0.11;
FeO	9758	3.27	11.04	Fe 70.83; O 24.74; Si 3.39; Al 1.01; Mg 0.03;
云母	205	27.14	53.84	O 41.15; Si 26.02; Al 18.57; K 9.01; Fe 4.67; Mg 0.56; Na 0.01;
黄铜矿	1111	3.14	12.95	S 34.12; Cu 33.09; Fe 32.79;
钛铁矿	2396	2.52	8.11	Fe 35.46; O 32.59; Ti 29.76; Mn 2.19;
碳钡矿	2715	3.27	7.19	Ba 87.64; O 12.36;
黄金	311	3.24	4.87	Au 100;
碲金银矿	72	3.13	6.89	Ag 39.1; Te 38.21; Au 22.69;
碲金矿	89	4.00	7.08	Te 64.45; Au 35.55;
碲银矿	81	3.11	13.12	Ag 61.65; Te 38.35;
琥珀金	27	2.31	1.56	Au 60.26; Ag 39.74;
针碲金银矿	24	1.83	1.35	Te 47.9; Au 32.6; Ag 19.5;
粒碲银矿	11	2.12	4.16	Te 56.38; Ag 43.62;
白碲金银矿	2	2.46	0.16	Te 50.33; Au 41.42; Ag 8.24;
银	1	2.47	0.00	Ag 100;

表 3: 1号样品盘亮相搜索 (BPS) 的主要脉石相和赋值相的平均粒度、成分平均重量百分比 %。

BPS 与传统分析相比具有一定的优势。传统的 AQM 分析需要平衡好放大倍数与分析时间成本。折衷方案虽然会最大限度地降低时间成本,但通常会影响可以识别的最小粒度。当所需信息与以微米为单位测量的相的伴生矿物和解离有关时(如本例所示),则同样要注意这些更小的晶粒。对这些小晶粒的计算不应过分影响粒度测量(图 3),也不应影响相在模式矿物学方面所发挥作用的总体评估(图 4)。因此,运行 BPS 分析所节省的时间可以部分用于提高图像分辨率,以便发现和分析更小的晶粒(表 3 和图 3)。必须指出的是,BPS 分析的模式矿物学偏向于含有重矿物的晶粒,而忽略仅含有脉石相的晶粒。鉴于此,BPS 分析不会提供模式矿物学报告。

BPS 分析中含金相的平均粒度与 1 号样品盘的常规分析明显不同(表 2),但增加分析次数可以提高粒度平均测量结果和含金相寄主特性的置信度。样品中以自然金为主,占总金量的 84wt%,其次为碲金矿,占总金量的 10%(表 4)。就表面自由解离而言,两种矿物均可归类为被包裹的金(表 5),其中 66.9% 的黄金和 72% 的碲金矿无法进行加工。使问题更加复杂的是,有两种脉石作为含金矿物学中的寄主。自然金与石英有重要的伴生关系,与黄铁矿的伴生关系则相对较弱。碲化物与石英无伴生关系(或伴生关系微弱),与黄铁矿即使不完全伴生,也存在非常紧密的伴生关系,如图 5 所示。在本例中,难浸性是因结构特点或缺乏解离和寄主特性所致。虽然可以通过进一步研磨提高解离,进而提高自然金的回收率,但碲化物的回收很可能需要对寄主矿物进行焙烧,方能释放其价值。

粒度分布 (mm)

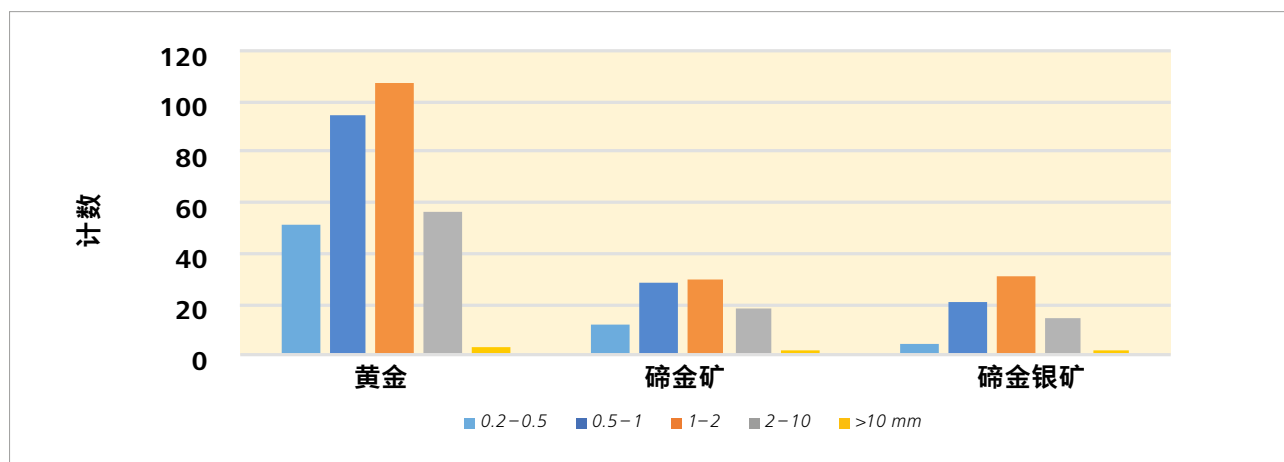


图 3: 各主要含金相各级粒度的晶粒数目。

矿物含量百分比 %

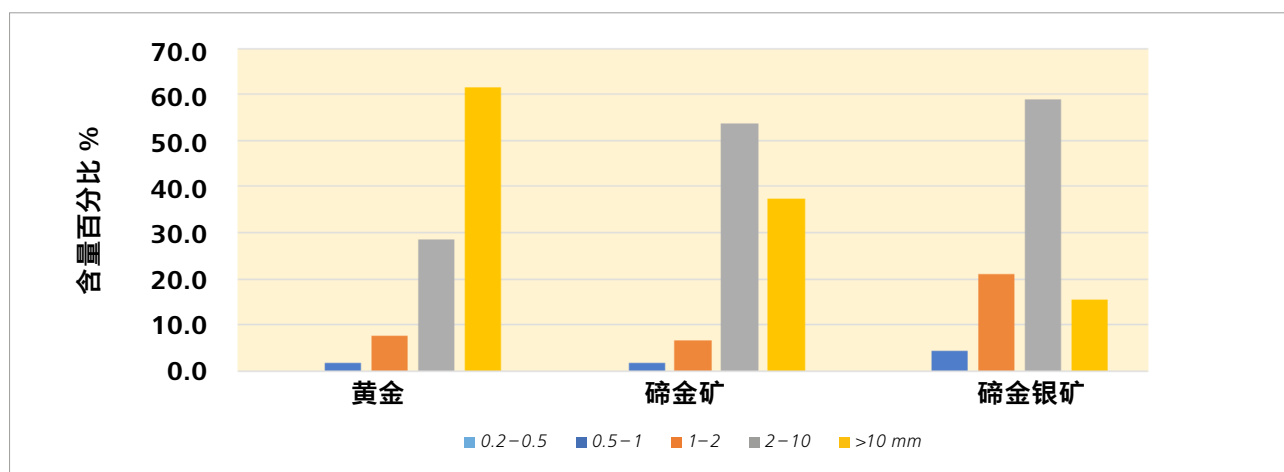


图 4: 各主要黄金矿物粒度在 0.2~0.5 μm 、0.5~1 μm 、1~2 μm 、2~10 μm 和 >10 μm 时的含量比例。

金的分布 (%)						
黄金	碲金矿	碲金银矿	琥珀金	中等品味矿石	被其它矿物包裹的金	<10%
84				10	4	2

表 4: 金在 1 号样品盘中四个主要相的分布情况。自然金的比重远远超过其他三个具有重要作用的相。黄金和碲金矿占总金含量的 94%。

自由表面解离														
	解离	中等品味矿石	被其它矿物包裹的金	<10%	<20%	<30%	<40%	<50%	<60%	<70%	<80%	<90%	<100%	100
碲金矿	27.7	0.0	72.3	72.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.7
黄金	33.1	0.0	66.9	66.9	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.8
碲金银矿	99.5	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.5

表 5: 自由表面解离。黄金和碲金矿是样品中两个主要的金元素来源，或为被包裹的金（暴露在反应中的晶粒周长小于 10%）或为完全解离（反应中的晶粒周长为 100%）。



蔡司显微镜



Carl Zeiss Microscopy GmbH
07745 Jena, Germany
microscopy@zeiss.com
www.zeiss.com/mining

卡尔蔡司（上海）管理有限公司
200131 上海，中国
E-mail: info.microscopy.cn@zeiss.com
全国免费服务热线: 4006800720

上海办: (021) 20821188
北京办: (010) 85174188
广州办: (020) 37197558
成都办: (028) 62726777

不得用于医学疗法、医药治疗或医疗诊断之证据。并非所有产品在每个国家均有出售。欲了解更多信息请联系本地蔡司代表处。
CN_42_013_301 | CZ-07-2019 | 设计、供货范围及技术更新如有变动，恕不另行通知。 | © Carl Zeiss Microscopy GmbH