

·方法与应用·

文章编号:1671-1947(2001)02-0106-05

成矿流体电导特性研究及其在金矿床的应用

施立达, 李存有

(沈阳地质矿产研究所, 辽宁 沈阳 110033)

摘要: 流体包裹体研究发现, 成矿溶液高浓度聚集区, 常是矿床的主(富)矿体赋存处。用热爆法打开包裹体提取成矿溶液, 以电导度量其相对浓度, 以地质类比法通过从已知到未知的分析, 将其结果用于成矿找矿试验。实践证明, 该方法在以下几个方面具有应用前景: (1) 查找成矿断裂, 优选最佳成矿区段; (2) 区分有无工业价值的含金石英脉; (3) 反映矿段或矿体的贫富程度; (4) 评定矿体的稳定性或矿化不均匀性; (5) 评估矿脉的剥蚀程度; (6) 矿脉深部成矿预测。

关键词: 成矿溶液; 电导度; 金矿床; 找矿试验**文献标识码:** A**中图分类号:** P574.1; P618.51

“地质流体”是当今地学前缘的热门研究对象。全球重大地质事件如火山喷发、地震、板块碰撞、造山运动、成矿作用、地幔活动等无不与地质流体有重要关联。近年来更加注重对成矿流体的研究, 如成矿流体的性质组分、流体年龄及成因、流体形成的物理化学条件、分异演化趋势等研究都有较多成果, 但对成矿流体的电导特性及其在成矿找矿方面的应用, 却少有人问津。作者在流体包裹体研究中, 受积累资料与经验的启悟, 开展了这方面探索性的试验, 从1993年起通过两轮课题研究, 对5个不同类型金矿床进行成矿溶液电导度找矿试验, 取得较好效果。与此同时, 我们还建成了室内成矿溶液电导度测试装置, 研究了影响电导度测定的各种因素, 确定了合理的最佳实验流程 and 操作方法, 能够低成本批量测试样品。本文简要介绍此项试验成果。

1 基本原理与应用范围

近代矿床学研究证实, 成矿溶液的性质、组分特征及其演化趋势对成矿作用有重要影响。它控制矿床(体)的形成与定位机制, 也与矿床成因密切相关。一般地, 成矿早期至主成矿期, 成矿溶液的浓度(盐

度)较大, 调含有较多金属离子, 易形成主(富)矿体; 到成矿晚期及成矿期后, 溶液浓度大幅度降低, 矿化减弱不利成矿。如山东招掖金成矿区, 金矿体中保存的成矿热液盐度多在11.3%~13.2%, 河南小秦岭金成矿区盐度在15.5%~19.1%, 河北金厂峪盐度在10.0%~13.0%, 均大大高出成矿期后1.9%~5.0%的盐度。我国著名的黔桂滇“金三角”区几个卡林型金矿, 主成矿期成矿溶液浓度也很高, 如高龙金矿可达31.26%, 金牙金矿在24.14%, 而到晚期浓度降到了13.0%以下, 成矿期后一般不到10%。这一规律在我国其他金矿区, 也被一些专家学者的研究成果所证实。

上述研究结果说明: 成矿溶液相对高浓度聚集区, 往往也是矿床的主矿体或富矿体的赋存处。高浓度的成矿溶液, 可以大大提高金及很多金属元素的溶解度, 是萃取矿源体(层)中 有用物质的良好矿化剂。这种含较多成矿物质的溶液, 在其物理化学条件发生变化时, 平衡(相平衡或化学平衡)被打破而凝聚成矿。有的成矿热液, 初始时的盐度(浓度)并不高, 由于成矿温压条件的变化, 发生沸腾作用, 导致成矿或形成富矿包, 这在金及一些有色金属矿床中是常见的现象。成矿溶液沸腾, 水蒸气大量逸出, 致使成矿溶液浓度(盐度)变高。这些作用显示了矿体与成矿溶液浓度之间的关系, 如果我们通过某种方法圈

收稿日期: 2000-12-06. 张哲编辑.

基金项目: 原地矿部地调局科技专题基金“成矿溶液电导度找矿试验”资助.

定出这一成矿溶液高浓度区,也就有可能找到矿体。包裹体成分分析证实,成矿溶液主要是由 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等离子组成的盐水溶液,一般以中性-弱酸性为主,是良好的导电溶液,对电导度测量很容易。电导度(G)是溶液导电能力的相对尺度,其值大表示导电能力强,反之弱。它的大小取决于溶液中的离子数、离子价及离子迁移速度。表示单位为 μS (微西),即百万分之一西门子。电导度的大小能直接反映出成矿溶液浓度的高低。用电导度场替代浓度场,进而可以电导度这一参量建立起与矿体之间的定量对应关系,故可用电导度值大小及组成的正负异常场,来表征矿体的贫富,评价矿脉的工业价值,指示找矿远景区等。这是本法的基本原理和应用依据。

任何找矿方法都不是万能的,本法的应用也有一定前提。首先是矿床(体)在成矿过程中,成矿溶液要达到一定的浓度,并发生变化(增高降低皆可),而这种变化与矿床(体)的形成与定位要有关联。从应用范围看,最适宜各类热液矿床,某些沉积矿床(如与卤水有关的密西西比式的铅锌矿床)、岩浆矿床、变质矿床也有可能适用。

2 研究方法及技术路线

如何以简便方法提取成矿溶液并显示其相对浓度,是本项目研究课题的关键:大家知道矿物包裹体可在成矿全过程中形成,它在不同成矿阶段中,能捕获封存相应的成矿流体并保存至今。因此可将包裹体内涵物视为封存下来的成矿溶液样品。我们利用已测试完的包裹体爆裂法的试样(丢弃物,包裹体已爆裂开),加定量蒸馏水,用超声波振荡器提取其内涵物,形成含金属离子的盐水溶液。它基本上代表成矿溶液组分特征并保持了相应浓度(因是定量水稀释)。然后用电导仪测定它的电导度,以电导度值来度量成矿溶液的浓度(相对量值)。从而科学简便地解决了这一关键问题。

成矿溶液电导度找矿的具体实施办法,总的原则是从已知到未知。选一个成矿地质条件基本相同的区域(如一个矿区),首先在已研究过的地质体(如矿体、矿脉等)的浅部、中部、深部及无矿、贫矿、富矿等部位分期次采集样品,分别测定电导度和含量等。目的是建立起在研究区内有工业价值矿脉(矿体)与无工业价值矿脉(矿体),贫矿、富矿和无矿等各种地质体的电导度参量标准(界线)。以此指导

对未知目标(如矿脉、矿体等)的含矿评估,确定找矿靶位。此外要注意研究电导度高值异常区与矿体的叠加关系。通常电导度异常区较矿体面积大,形成一个电导晕圈或电导增量场,致使电导度值不一定与矿含量有严格的对应关系。有的高电导度区,含矿量虽低,可能预示附近有较富矿体存在。还可利用电导度增量(变量)大小来评定矿体的稳定性。也可利用电导度值特征,查找成矿断裂,划定最佳成矿区段等。显然所选的已知地质体代表性好、研究程度高、样品采集多、地质成矿资料准确齐全,是找矿成功的重要条件。

3 成矿溶液电导度找矿试验

在三省(区)5个不同类型金矿床(大型矿床1个,中型2个,小型2个)进行了找矿试验。其中河北张全庄、辽宁沙金沟为产于深变质岩中的以石英脉为主的岩浆热液型金矿;辽宁宝国老金矿地质特征与沙金沟类似,但为韧性剪切带中的变质成因金矿;广西高龙是微细粒浸染型(卡林型)金矿,矿体分布在三叠系浊流沉积的砂泥岩中;另一个龙水金矿,矿体主要分布于大断裂带中的寒武系浅变质砂泥质岩中,属破碎带硫化物型金矿。通过对这些矿床的找矿试验研究并与其他找矿方法(如岩石地球化学与包裹体等)相配合对照,证明它可以在以下几个方面有应用前景。

3.1 查找成矿断裂,优选最佳成矿区段

在矿区里有各种断裂,成矿断裂是运移成矿溶液的通道,往往在断裂内以包裹体形式保存了残留成矿热液而非成矿断裂在电导度上有所不同。而一条长长的成矿断裂并非各处都是矿液运移的良好通道和最佳成矿区段。用电导度法能够简便快速地予以区分判定,缩小找矿范围,节省普查经费。

如河北张全庄金矿,数十条断裂中,以 F_1 、 F_2 断裂成矿条件最好,其分支断裂中充填 q_{11} 、 q_{13} 、 q_8 、 q_{48} 等含金石英脉。 q_{11} 矿脉金储量大于10t,占矿区总储量95%以上。含金最好的 F_1 断层电导度也最高,平均值(\bar{G})为160 μS (5)(5个样品平均值,下同), F_2 断层 \bar{G} 146.1 μS (3)。其他无矿断裂 \bar{G} 值均小于100 μS 。而长达4700m的 F_1 断层北西段 \bar{G} 值较低,仅81.4 μS (3),其分支派生的 q_{13} 、 q_{15} 等石英脉含金较差,仅局部可采。在 F_1 中段与 q_{11} 脉呈入字形交接处的断层带中 G 值高达476 μS ,此处正

是通过 F_1 断层向 q_{11} 主脉提供成矿热液的通道处 (包裹体热晕图证实)。

在广西龙水金矿, 龙水-三郎冲大断裂既是成矿断裂又是容矿构造。我们选 3 800 m 长的一段断裂, 在地表采石英样做找矿试验。测试结果见表 1。

表 1 龙水-三郎冲断裂地表电导度测试结果
Table 1 Testing result of conductivities on the ground along Longshui-Sanlangchong fault

区段	断裂长度	样品数	平均电导度
	/m		/μS
南段 (16 线南)	1200	5	14.5
中段 (9~16 线)	700	6	23.0
北段 (9 线北)	1900	7	12.0
地表全脉	3800	18	16.4

表 1 反映出中段 \bar{G} 值高于南北两段和地表全脉平均值, 属电导正异常区段。而中段的地下正是 1 号矿脉最有工业开采价值区, 此段金储量约占全矿 80% 以上, 南北区段基本无矿。同样在辽宁沙金沟、宝国老金矿亦有类似规律。证实成矿断裂带中电导度高值区段, 其下或附近常是主要金矿脉 (矿体) 的赋存处。

3.2 区分有无工业价值的含金石英脉

河北张全庄金矿, 矿区内有较大规模石英脉 47 条。河北第三地质队对此进行过普查勘探, 确定 q_{11} 、 q_{13} 、 q_8 、 q_{48} 等 4 条含金石英脉有工业开采价值, 并分别提交了 C+D 级储量。成矿溶液电导度测定结果证实这一结论 (见表 2)。

表 2 张全庄金矿石英脉电导度测试结果统计表
Table 2 Conductivities of quartz veins in Zhangquanzhuang gold deposit

石英脉 编号	金储量 /kg	平均电导度 /μS	统计数	备注
q_{11}	10050	173.1	67	全脉储量
q_{13}	164.49	139.1	28	浅部储量
q_8	72.25	155.8	4	浅部储量
q_{48}	27.33	136.0	4	浅部储量
q_{10}	无	67.7	3	
q_6	无	73.5	2	
q_5	无	109.3	3	
q_4	无	76.0	3	
q_{21}	无	25.2	1	
q_1	无	66.2	2	
q_{17}	无	73.7	2	
q_{25}	无	98.7	2	
q_{42}	无	74.3	3	
q_{15}	无	126	1	
$q_{断}$	无	106.2	2	

根据统计结果, 有工业价值石英脉电导度平均值 (\bar{G}) 为 161.7 μS (103), 无工业价值石英脉电导度平均值 (\bar{G}) 为 82.1 μS (24), 明显显示出有无工业价值的含金石英脉在电导度量值上的差异。对一条石英脉而言, 凡电导度平均值大于 130 μS 者均有工业价值, 电导度小于 130 μS 者无工业价值。而储量最多的 q_{11} 脉, 其电导度平均值也最高 (达 173.1 μS)。

在辽宁沙金沟金矿, 矿区有较大石英脉 22 条。1 号脉为该矿主要开采对象, 金储量占全矿 76% 以上, 其 \bar{G} 值为 45.21 μS (50), 大大高于其他各脉。其余含金石英脉 \bar{G} 值在 29.2~20 μS, 一般仅局部可采。 \bar{G} 值小于 20 μS 者绝大多数为无开采价值的石英脉。但矿区边 11 号脉例外, \bar{G} 值为 16.5 μS (5), 金储量仅次于 1 号脉, 从其构造、脉位看应属于另一金成矿体系, 不宜对比。

3.3 反映矿段或矿体的贫富程度

在已试验的 5 个金矿床中皆有明确显示。如广西高龙金矿, 经广西第二地质队勘探, 划分 3 个矿段。其中鸡公岩矿段金储量最高, 全段 \bar{G} 值也最高, 为 28.4 μS (38); 次为金龙山矿段, \bar{G} 值为 25.2 μS (6); 金龟岭矿段金储量最少 (地表一层), \bar{G} 值为 7.5 μS (3)。整个矿区 \bar{G} 值都不高, 也反映出该矿含金量较低, 平均金品位仅为 $3 \times 10^{-6} \sim 6 \times 10^{-6}$, 只能以堆浸法提金才有盈利。这一试验的意义不言而喻, 如果有几个新的矿段在勘探前进行此项工作, 对正确选区, 节省探矿费用将有很大实用意义。

又如辽宁宝国老金矿, 矿山主采 1 号脉, 从地表向下开采垂深 460 m, 分 12 个中段, 较为完整地显现出矿体在垂直方向的贫富变化特征。为检验成矿溶液电导度能否有相应反映, 在各中段采集石英样 46 个, 测试结果综合成表 3。

表 3 宝国老金矿 1 号脉中区段垂深电导度变化表
Table 3 Vertical variance of conductivities of No.1 vein in Baoguoold gold deposit

位置	地表至 4 中段	6~7 中段	8~10 中段	11~12 中段
$\bar{G}/\mu S$	67.4 (15)	18.4 (6)	33.5 (16)	21.9 (9)

上表基本上能反映出矿体在垂深方向上贫富变化与电导度 \bar{G} 值的相关性。1 号脉有两个富矿包, 分别位于 3~4 中段和 9~10 中段, 这两处都有 \bar{G} 值高的特征。6~7 中段与 11~12 中段, 矿变贫或基本无矿, \bar{G} 值亦大幅降低。其中无矿的 12 中段 \bar{G} 值仅有 12.7 μS (4), 比贫一无矿的 6~7 中段更低, 与实际

情况吻合。

3.4 评定矿体的稳定性或矿化不均匀性

我们用 C (变异系数) 表征各样品电导度值的波动程度 (离散性)。这里一个相对的量化尺度。经过 4 个矿床的计算对比, C 值可以正确反映出矿体的稳定性或矿化不均匀性。 C 值愈小变化愈少, 矿体稳定性愈高, 反之则低。配合其他资料, 可以用于成矿预测。

如沙金沟金矿 1 号矿, 其特征是脉薄 (厚度小于 1 m), 各中段金品位较低而稳定, 含矿率高 (大于 75%)。而电导度 C 值从地表到最深的 7 中段, 均在 73.7%~76.9% 的范围, 变化很小。而相邻不远地质条件类似的宝国老金矿, 1 号脉较厚 (2~4 m), 金品位变化大, 矿体贫富变化也大。电导度 C 值计算结果为: 地表~4 中段, C 值为 99.2%; 6~10 中段, 114.2%; 11~12 中段, 50.8%。其中 11~12 中段基本无矿, 金含量很低, 变化小, 故 C 值亦很小。其他中段因有富矿包存在, C 值也相应变化较大。 C 值所反映的矿体特征与实际开采情况相一致。

3.5 评估矿脉的剥蚀程度

查明矿脉剥蚀程度, 对其深部找矿评价, 估算潜在资源量有重要意义。我们发现用 C 及 \bar{G} 两个参量可以反映出矿脉剥蚀程度, 区分矿头矿尾。一般 \bar{G} 值低 C 值大是矿头的标志; \bar{G} 值高 C 值中等是主 (富) 矿体或成矿中心处; \bar{G} 值较低 C 值小是矿尾特征。这与我们在张全庄及前人在宝国老金矿用元素地球化学找矿法所判定的矿头矿尾相一致, 也与开采情况相吻合 (见表 4)。

表 4 矿脉电导参量与剥蚀程度表

Table 4 Correlation between conductivity parameter and denudation degree of ore vein

矿床名称	张全庄		宝国老	
	$\bar{G}/\mu\text{S}$	$C/\%$	$\bar{G}/\mu\text{S}$	$C/\%$
矿头	29.6	75.3	已剥蚀	
主矿体 (成矿中心)	209.3	42.8~ 47.0	33.5~ 67.4	99.2~ 114.2
矿尾	104	30.2	21.9	50.8

3.6 矿脉深部成矿预测

我们对张全庄、沙金沟、宝国老、龙水 4 个金矿的主采矿脉深部, 用成矿溶液电导度、岩石地球化学元素晕、包裹体等找矿方法结合矿山地质、采矿及前人的各种地质科研资料进行成矿预测, 取得一定效

果, 有的尚待验证。高龙金矿因当时是正在勘探而局部投产的新矿山而未作预测。

电导度成矿预测的方法及标志如下:

(1) 对比法 从张全庄金矿的各脉电导度测定结果 (见表 2) 来看, G 大于 $130 \mu\text{S}$, 为有开采价值的矿脉, 无工业价值石英脉 \bar{G} 为 $82.1 \mu\text{S}$ 。 q_{11} 号主脉深部 (中段标高 750~700 m) \bar{G} 值为 $119.3 \mu\text{S}$ (6), 接近有开采价值脉的下限而距无开采价值石英脉 \bar{G} 值 $82.1 \mu\text{S}$ 较远, 虽为矿尾但尚有一定矿化程度, 而且脉进一步延深将与 F_2 成矿断裂相交, 成矿构造条件好, F_2 的成矿热液有可能与其相叠加成矿, 故而预测该脉更深处仍将有矿。此项研究尚未完成时, 张全庄金矿传来反馈信息: 在我们的预测区内 (另一科研报告的预测区——河北省宣化县张全庄金矿边缘及深部成矿预测) 找到新矿体, 新增开采储量 840 多千克。验证了上述看法。

(2) 平均法 以预测矿脉的全脉电导度平均值 (\bar{G}) 为基准点。若在矿脉深部 G 值仍高于全脉平均值, 可能更深部仍有矿体存在。如沙金沟金矿 1 号脉 (见表 5)。

表 5 沙金沟金矿 1 号脉各中段电导度统计表

Table 5 Conductivities of No.1 vein at different levels in Shajingou gold deposit

位置	地表~1 中段	2~5 中段	6~7 中段	全脉
$\bar{G}/\mu\text{S}$	26.6 (19)	69.9 (10)	59.6 (16)	48.2 (45)

表 5 中地表~1 中段, 矿脉中贫矿较多, 局部可采; 4~5 中段为富矿体 (成矿中心), \bar{G} 值最高; 深部 6~7 中段 \bar{G} 值虽有下降, 但仍高出全脉平均电导度值 ($48.2 \mu\text{S}$) 较多, 预示其下更深部仍将有矿体存在。结合其他成矿预测的结论, 计算出 1 号脉的矿体将能延深到 12 中段深处。估算金远景储量约 1.1 t。目前得到的矿山反馈信息是, 已开拓的 8 中段见矿良好, 总的看比 7 中段还要好些, 脉南段比北段矿更好, 与报告中的预测结果一致。更深处见矿情况有待今后验证。

(3) 趋势法 如果矿脉各中段电导度 \bar{G} 值由浅向深有逐渐增大趋势, 其深部可能有矿, 反之则无。宝国老金矿 1 号脉, \bar{G} 值向深部递减 (见表 3), 到 12 中段 \bar{G} 值仅为 $12.7 \mu\text{S}$ 。因此, 推断更深部无矿。

(4) 电导参量法 可用电导度 C 值及 C 值与 \bar{G} 值相结合进行矿脉深部成矿预测。如沙金沟金矿 1 号

脉,从地表到7中段,C值变化很小(73.7%~76.9%),表明矿体稳定,延深性好,在更深处仍将矿体存在.用C值与 \bar{C} 值判断矿脉深部是矿中还是矿尾,对其深部的成矿条件及找矿远景的分析具有指导意义.宝国老金矿1号脉深部(11~12中段)的电导参量显示其为矿尾标志,加之 \bar{C} 值又远远低于全脉平均值,故判断其下可能无矿.

在4个金矿主矿脉深部成矿预测中,有3个用各项预测方法结论都完全一致,可信度较高.惟广西龙水金矿1号脉深部的成矿预测,各项预测结果不全相同,但多数结果(包括电导度法)认为其脉南西深部有隐伏矿体存在的可能,有待矿山验证.

4 结论

成矿溶液电导度找矿试验,通过两轮课题对5个不同类型的金矿试验,取得较好效果,同时建成电导

度找矿实验室.形成了一套有理论有方法有测试手段,并能实际应用的一种新的找矿方法.该法具有样品易采、用量少(小于1g)、实验装置简单、操作简便易学、样品测试效率高(40~50个/人·日)、成本低(测一个样不到5元)、适用性较广(在不同类型金矿获得多种成矿找矿信息)及易于推广使用的特点,是一种经济、简便、实用的找矿方法.试验表明,样品数量多,采用石英找矿效果较好.

限于资金和时间,我们未能对其他矿种(如Cu、Pb、Zn、W、Sn等)做找矿试验.希望今后有机会继续试验,逐步扩大其应用范围,使这一新的找矿方法在实践中不断成熟完善.

谨向提供本项试验资金的原国家黄金局、地矿部地调局以及大力协助的有关地质队、矿山等单位深表谢意.

THE ELECTRIC CONDUCTIVITY OF ORE-FORMING SOLUTION AND ITS APPLICATION TO GOLD DEPOSIT SEARCHING

SHI Li-da, LI Cun-you

(Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Shenyang 110033, China)

Abstract: By the studies of the fluid inclusion, it is found that the high concentrated areas of the ore-forming solution are generally where the main (rich) orebodies occur. Open the fluid inclusion by heat explosion, extract the ore-forming solution, measure the relative density of the ore-forming solution through its electric conductivity, and apply the results to the test of mineralization and ore-search by geological analogy. It is proved that the electric conductivity of ore-forming solution can be used to seek for ore-forming fractures, to select the best mineralization section, to distinguish industrial and non-industrial auriferous quartz veins, to reflect the rich or poor levels of orebodies, to evaluate the stability of orebodies, to judge the denuding levels of ore veins, and to prospect the mineralization in depth.

Key words: ore-forming solution; electric conductivity; test of gold deposit searching

作者简介: 施立达(1935—),男,高级工程师,1958年毕业于北京矿业学院,现主要从事矿物包裹体及金矿地质科研工作;通讯地址:沈阳市北陵大街25号,邮政编码110033.