

微量元素地质温度计

南京大学地质系

刘英俊

研究表明,矿物、矿石、岩石中微量元素的种类、丰度、分配和比值等,与温度、压力有简单的热力学关系,与其它成岩成矿的环境变量有密切的相关性,因而可以作为各种成岩成矿作用的灵敏的地球化学指示剂。

众所周知,成岩成矿的物理化学条件是综合性的,微量元素用作各种成因条件的指示剂也是多方面的。本文着重阐述微量元素作为地质温度计的可能性和应用问题。

由于温度对成岩成矿作用所起的重大影响,为了提供这种作用和变化的说明,人们曾长期探寻用各种方法来确定或推知成岩成矿的温度。对矿物、岩石和矿床形成的推定,过去主要限于地质测温法和普通矿物测温法;后者根据所谓标型矿物和矿物的标型特征判断温度,运用尤为广泛。近一、二十年来,人们又采用矿物中包裹体测温法、同位素比值测温法和实验地球化学方法等,使地质测温研究进入到一个新的发展阶段。

成岩成矿真实温度的确定是一个相当复杂而困难的问题,需要采用多方法相互对比验证。矿物中微量元素测温方法——即微量元素地质温度计,是这方面值得推广和发展的又一新研究手段。

微量元素地质温度计的主要特点

微量元素地质温度计,如同指示成岩成矿的其他物理化学条件一样,主要是利用它所具有的多方面特点。首先是微量元素在具体地质形成物中的微浓度,其含量随成岩成矿过程的温度而变化。其次是它们的地球化学特性,特别是经常受着常量元素行为的支配,不同温度条件下形成的矿物,二者的关系有显著的差异。这些都是单凭常量元素难以查觉和反映的。第三,它仅只适用于溶液体系,因之特别符合矿物中微量元素最广

泛的赋存状态——类质同象混入物形式。第四,在溶质含量足够低时具有简单的数学性质和明确的物理化学意义——置换平衡常数;此时某种微量元素的分配行为与体系中其它杂质无关,这一特点在处理复杂的天然体系时特别可贵。第五,实验证明,许多微量元素地质温度计主要受温度控制,压力只起很次要的作用,因而不进行压力校正即能有效而可靠地指示成岩成矿作用过程的温度条件和发展变化。

这方面目前运用较多的方法是:(1)单矿物中特征性微量元素的丰度;(2)岩石矿物中性质相近的元素对比值;(3)微量元素在两共存矿物间的分配系数;(4)矿物、矿石或岩石中微量元素的不同组合和丰度变化等。近年,分配系数作为微量元素地质温度计的研究最受重视,并最富有成效。它的基本原理是根据纳斯特分配定律,依此得知某微量元素在两共生矿物中分配系数的自然对数与绝对温度的倒数成直线关系(热力学证明分配系数 K_D 遵循下式关系随温度而变化: $\ln K_D = -\frac{\Delta H}{RT} + B$),从而可直接用于地质温度测定。

微量元素地质温度计在实际应用中应考虑以下因素的影响。例如所研究的矿物具有组份不均一的环带构造;与微量元素有关的常量元素的浓度变化以及由此引起的矿物结晶学的改变对微量元素浓度的影响;研究对象达到各相平衡是微量元素地质测温的重要前提;后期附加作用常不同程度地破坏原有固结平衡时微量元素的分配形式;挥发份的逸失,会影响矿物中某些微量元素的含量。这些影响的大小和造成的误差,须通过有关的研究和实验加以确定、校正。此外,不同地区微量元素的区域克拉克值有明显差异,应予足够注意。

微量元素地质温度计实例

1. 用火成岩或矿床中钛磁铁矿钛含量测温

A. F. 布丁顿等指出, 当钛过饱和晶出独立的钛铁矿时, 进入磁铁矿中的钛含量和火成岩形成温度成一定的函数关系。依所制定的图解, 当有钛铁矿共生时, 测定含钛磁铁矿中的二氧化钛含量, 查图即可得出岩石或矿床的形成温度 (图 1)。

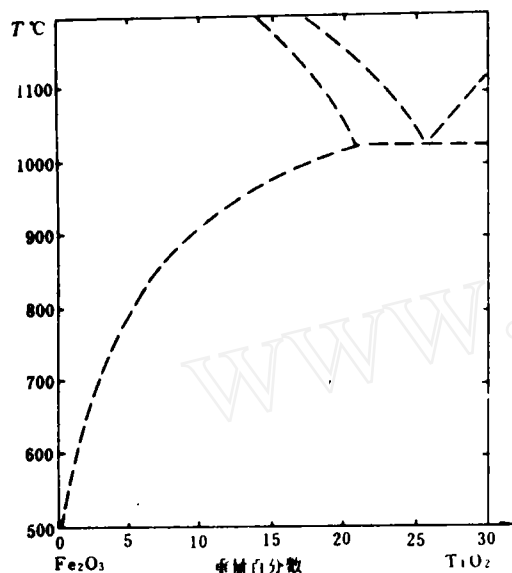


图 1 钛磁铁矿中含钛百分数与温度的关系

本方法已有较系统的实验依据, 积累了大量几乎所有岩石类型的测定资料。笔者曾用此法对国内若干典型含矿基性岩体及有关的钒钛磁铁矿矿床的形成温度进行过专门研究, 得出的温度范围为 750 ~ 960 °C, 看来这些数据是可取的。但在变质应力作用下, 钛磁铁矿也会分解其中的钛质, 形成金红石等其它钛矿物, 从而使测出的温度趋向偏低。布丁顿等认为根据岩石中伴存的钛磁铁矿和钛铁矿之间的 MnO 含量分配, 也可用于地质测温的目的。

2. 用镍在橄榄石和辉石之间的分配作为成岩温度计 T. A. 哈克利等研究了夏威夷马考甫火山熔岩流湖渐渐冷却析出的橄榄石和单斜辉石以及残余熔体 (淬火后成为玻璃质) 三种相中镍的分配, 确定了分配系数与温度间的关系。以电子探针分析方法测定三相中的镍含量, 并计算镍

在各二者之间的分配系数。分配系数的自然对数值相对于绝对温度倒数 $[(1/T) \times 1000]$ 的曲线如图 2。

图 2 中各线都是直线, 说明镍在三相中的分配服从纳斯特分配律, 而且三条线的斜率较陡, 使分配系数很适用于确定地质温度。因为橄榄石与单斜辉石的共生组合分布广泛, 所以镍在其间的分配可以作为很好的地质温度计。但是在测量较低的温度时, 直线必须外推, 自然会影响到测温的精度。在测定深成岩石时, 应注意未考虑压力的一定影响。

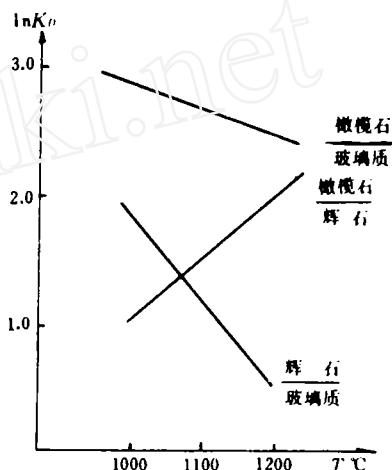


图 2 镍在橄榄石—辉石等之间分配系数的自然对数与温度的关系

近年来一些研究者对此法也作了有关的模拟实验, 结果表明在高温熔融基性岩浆中镍的分配 ($K_{Ni}^{熔/1}$) 强烈依赖于结晶时岩浆的温度, 而基性岩浆的组成变化则对之影响不大。

3. 用黑云母中钨含量作为地质温度计 B. B. 达格拉依斯基等认为黑云母中钨含量与岩石结晶作用的温度间存在一定函数关系, 而且与主要组份含量及岩石变质程度有明确依赖关系, 从而建立起了含黑云母的岩石形成的温度曲线 (图 3)。这种温度计不仅利用黑云母中钨含量, 而且也利用石榴石和黑云母中钨含量的比值。把所有分析的黑云母按 50 °C 的温度间距来划分, 得表 1。

资料表明, 黑云母形成温度越高含钨性越

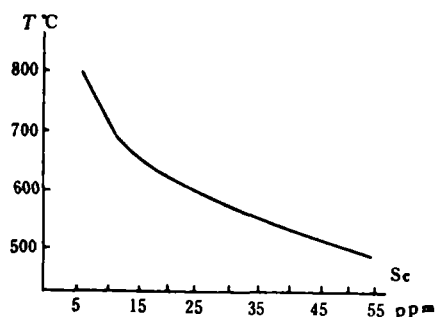


图3 根据黑云母中的钨含量测定
平均温度曲线

低。根据黑云母钨含量，对变质岩各相带的形成温度也可得到很好的确定。有人根据石榴石和黑云母中钨含量比值与镁含量比值之间成正相关并随温度而变化，也曾提出将之作为地质温度计。

4. 用长石中锶、钡的分配系数作为地质温度计 二长石温度计是研究较好的实例。在碱性长石—斜长石组合中，锶、钡以及钠、钙在二矿物中的分配系数与形成温度的关系，据T. F. 巴耳特的研究，符合纳斯特分配律测温法基本原理，并作出碱性长石和斜长石间Sr、Ba、Na、Ca的分配系数与形成温度的关系图解（图4）。

各温度间距中 Sc_{Ba} 和 $\frac{Sc_{Gr}}{Sc_{Ba}}$ 的平均值

表1

温度间距 (°C)	平均温度 (°C)	Sc _{Ba} 的变化 范围	$\bar{x}$ Sc _{Ba}	$\frac{Sc_{Gr}}{Sc_{Ba}}$ 的 变化范围	$\bar{x}$ $\frac{Sc_{Gr}}{Sc_{Ba}}$
		ppm			
500 ~ 550	525	20 ~ 77	43 ± 15	1.8 ~ 5.6	3.8 ± 1.1
550 ~ 600	575	11 ~ 46	27 ± 10	3.2 ~ 9.1	6.2 ± 1.9
600 ~ 650	625	7 ~ 62	24 ± 7	3.1 ~ 17.1	5.9 ± 1.8
650 ~ 700	675	6 ~ 28	13 ± 3	3.7 ~ 18.4	9.2 ± 2.1
700 ~ 750	725	6 ~ 13	10 ± 2	6.2 ~ 18.3	11.8 ± 4.1

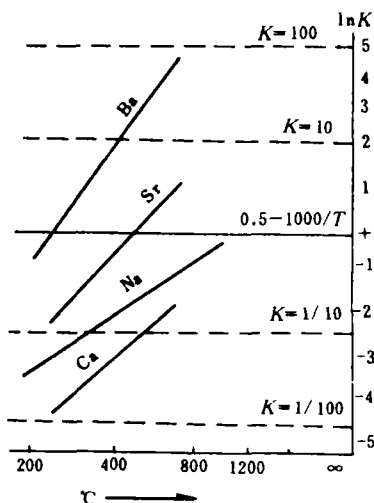


图4 碱性长石和斜长石间Sr、Ba、Na、Ca
的分配系数与形成温度的关系图解

根据图4 只要测定出这二类共生长石之间Sr、Ba的含量，算出分配系数，即可得出长石

的生成温度。实验表明，斜长石和共存的岩石基质中，Sr、Ba含量在远超过天然岩石中可达到的浓度时，它们的分配系数 $K^{斜}$ 随体系形成温度的升高而降低，因而有可能作为含斑状斜长石类岩石的成岩温度计。

5. 用黄铁矿—磁黄铁矿中镍和钴的分配系数作为地质温度计 H. И. 别兹曼等研究表明，温度增加导致镍钴在黄铁矿中的重新分配。对该二元素在黄铁矿与磁黄铁矿之间，温度为300 ~ 500 °C时的分配与温度的依赖性做了专门实验，并绘制了分配图解，实验结果与这些元素在不同成因矿床的黄铁矿与磁黄铁矿之间的分配相当符合，从而允许作为地质温度计应用。

我国近年对许多夕卡岩型铁矿中钴的分布和富集规律进行了专题研究，一系列矿区（如华北邯邢式铁矿）单矿物样的化学分析表明，矿石中伴存的黄铁矿普遍含钴甚高，而且一般早世代生成的黄铁矿照例比晚世代的黄铁矿含钴为高（前者平均含钴量0.25~0.30‰，后者仅0.1‰或更

低),这种随温度而同步增减的规律性,似也可用之指示成矿温度。

6. 用闪锌矿中分散元素 In、Cd、Tl、Ga、Ge 含量作为成矿温度计 闪锌矿是一种常用的地质温度计,除闪锌矿与黄铁矿(或黄铁矿+磁黄铁矿)共生时,根据 FeS 含量进行测温外,还可利用闪锌矿中多种分散元素的含量测定成矿温度。

从某些典型多金属矿床所积累的资料,可得出不同温度形成的闪锌矿中分散元素的大致平均含量(表2)。

由表2可见,高温最有利于铟富集,而锗、镓、铊等则趋向于在低温闪锌矿中堆积。这一规律性目前还有不同认识,因为近年也曾有人得出

相反的结果,可能表2所列的资料,对多数矿床有大致相类似的特点;某些例外的情况可能表明除温度因素外,还受区域地球化学和其它物理化学条件的影响。

7. 用自然金成色(微量杂质元素含量)作为地质温度计 银是自然金中的主要杂质元素,有的研究者将金的成色定义为 $\frac{\text{Au (重量)}}{\text{Au} + \text{Ag (重量)}} \times$

1000‰。自然金中的其它杂质含量甚微。金银比值及金的成色是金矿床成矿温度的重要标志。一般说来,深度较大、温度较高的矿床,金的成色也高,可以苏联远东地区为例(表3)。

不同温度形成的闪锌矿中分散元素的大致平均含量

表 2

温 度 范 围, °C	450 ~ 400	350 ~ 300	250 ~ 200
In, ppm	1000	100	50
温 度 范 围, °C	400 ~ 350	350 ~ 200	200 ~ 100
Ge, ppm	7	50	170
Ga, ppm	25	40	50
Tl, ppm	0.4	4.5	10

苏联远东地区不同形成温度的金矿床与金成色关系

表 3

矿 床 类 型	形成深度 (km)	形成温度 (°C)	金 成 色
区域变质阿尔卑斯型脉	7 ~ 8	350	950 ~ 850
气成热液石英—电气石建造	5 ~ 近地表	400 ~ 250	900 ~ 750
高温热液石英—少硫化物建造	4 ~ 9	360 ~ 100	900 ~ 700
中低温热液石英—硫化物建造	2 ~ 3	250 ~ 100	900 ~ 700
低温热液石英—碳酸盐建造	1	150 ~ 50	760 ~ 680
低温青盘岩—次生石英岩建造	1	150 ~ 50	650 ~ 520

同一矿床或地区,较早期的金矿化含银较低,金的成色较高。其他影响金成色的微量元素组合也有重要意义。例如含金夕卡岩矿床的自然金中特征的微量元素为 Cu、Mo、Bi、Pb、As,其形成温度较高,金的成色也高(多在900左右);低温热液矿床自然金中特征性微量元素为 Sb、Zn、Te 等,金的成色均低(常在700以下)。

其它微量元素温度指示剂

资料表明,许多稀有金属花岗伟晶岩矿床

随其形成作用的发展演化,温度趋向递降,在不同温度阶段,形成了特征性的稀有元素富集和矿化。如华南某伟晶岩矿田,从早到晚矿化顺序为: TR→Nb→Be→Li→Ta。后期 Ta/Nb 比值增大, Rb/Cs 自大变小。

国内外的研究确定,黑钨矿和锡石中经常含有 Nb、Ta,其最高含量见于高温矿床中,而成矿作用末期,随温度降低趋于减少;某些低温矿床甚至完全不含 Nb、Ta,因此可作为成矿温度指示剂。同样,黑钨矿和锡石中钽含量,也可指

示成矿温度, 它的含量随成矿温度下降而减低。

夕卡岩型磁铁矿矿床的研究得知, 其形成温度较岩浆矿床为低, 在磁铁矿中所含微量元素组合及丰度也发生较大变化。Ti、V、Cr、Ni、Sc 等不是夕卡岩型磁铁矿的标准伴生微量元素, 而是以 Mg、Mn、Zn、Co 的含量相当高为特征; 而且随温度下降, 多数微量元素有规律地减少, 明显指示磁铁矿形成温度的高低。

各类矿床中黄铁矿内硒、碲含量及其比值的研究同样表明, 随成矿温度不同而异。一般说来, 在同一矿床中, 早期至晚期黄铁矿硒碲含量有增高的趋势; 同时 S/Se、Se/Te 等比值有规律地减小。

斑岩铜矿普遍发育的典型蚀变分带, 从形成温度的角度来看, 自内带向外带是一个明显的降温过程, 开始矿化蚀变约相当于高温自变质阶段, 最后外带演变到中低温热液阶段。各蚀变带除有特征性的微量元素组合外, 值得指出的是, 在内、外带分别形成了一系列富含钾和钙的矿物, 因而 Rb 含量自内带向外带趋向降低, Sr 含量反而递增; K/Rb 比值由内向外依次减小, Ca/Sr 比值有规律性地增大。这对斑岩铜矿成矿过程中由高温向低温的演化, 起着一定的指示作用。

(上接第42页)

金属量多13%是因为采矿时把一些小矿体和表外矿采出的缘故: 品位低0.03%是贫化率所造成的正常现象。可见, 水平钻提交的工业储量可靠, 是一种有效的勘探手段。

2. 水平钻的性能: 水平钻(包括红旗—100型、KD—100型、北京—100型及我队改装的东勘—200型)是轻便钻机、钻窝小、重量轻, 两人就可以搬迁钻进。它具有有效进尺高、成本低等优点。在大水沟的成矿评价、水库山的勘探、包子铺堆积铁矿的找矿评价中都起到了迅速、有效、经济的显著效果, 对保证我队勘探任务的完成, 找矿事业的发展起到了突出的作用。

3. 经济效果显著: 由于勘探程度、网度的合理, 勘探手段的组合有效, 每米工程探获工业储量15.95吨, 每个劳动日探获工业储量2.1吨,

结 语

1. 已有资料表明, 微量元素可以作为成岩成矿的地质温度计。它具有经济、简便、快速和顺便等特点, 很有发展前景。

2. 为使成岩成矿研究从定性向定量的阶段发展, 地质测温工作是不可缺少的一个方面。鉴于这一工作的复杂性, 应发展综合测温方法, 微量元素地质温度计对其他测温方法能起良好的验证作用。

3. 现有的微量元素地质温度计, 研究还很不平衡。对已成熟的方法, 可大力进行普及推广; 对尚存在一定问题的方法, 应加强理论和实验研究, 尽快建立平均温度图表, 以供使用。

4. 微量元素包含岩石或矿床中除常量或主要元素以外的一大类化学元素, 分布十分广泛, 已积累大量研究资料, 应密切结合地质地球化学研究, 不断探讨和扩大微量元素应用于测温的可能性。

5. 就微量元素地质温度计的研究现状来看, 尚处于开始和发展阶段, 存在着一系列急待解决的研究任务。相信随着更多研究者的重视和方法的不断完善, 一定会取得更多的成果并获得广泛应用。

结 论

合理的勘探程度和网度取决于成矿规律的研究和勘探类型的正确确定。初步看出矿床规模后, 应确保首批设计矿量的提交。有效的勘探手段组合的选用要因地制宜。多快好省的地质经济效果, 来源于我们对地质矿床特征的充分研究和所控制的勘探手段性能的完全掌握, 以水平钻为主, 配合坑探沿脉勘探陡倾斜矿床的组合手段能缩短勘探周期, 降低勘探费用; 给地面地质组配备轻型钻机, 对堆积矿床的寻找将会收到良好的效果。这些就是我们对地质经济学的一点粗浅认识