

金属矿脉（体）品位收缩的成因

高旭征

（内蒙古冶金地质勘探公司）

我国找矿勘探及开采工作实践证明，一些金、铅、锌、钨、锡、钼、铌等金属矿脉（体）品位的垂直分布具收缩性质。国外一些同类矿床及铜、铀矿体（脉）亦呈同样性质。上述矿床的这一地质现象已经引起了地质工作者的注意，曾进行了描述或说明^{[1][9]}，但迄今未能查明其成因^[1]，本文拟阐明其成因。

一、金属矿脉（体）品位收缩实例

内蒙古自治区红花沟小线金矿脉发育于前震旦系花岗片麻岩中，矿脉受剪切裂隙的控制，局部膨大。矿脉中金品位愈至下部愈降低，如以第一层到第六层坑道间（每层间距为10米左右）为100，第七层到第十二层坑道间则降为55^[1]。内蒙古自治区孟恩套力盖银铅矿，铅锌矿脉发育于海西晚期斜长花岗岩体的构造裂隙中。已生产的三条铅锌矿脉，铅锌品位愈至下部愈降低（表1）^[1]。辽宁省青城子铅锌矿，铅锌矿脉（体）发育于前震旦系辽河群盖县组白云质灰岩及其与云母片岩的互层带中，受构造裂隙的控制，已生产的十二条矿脉铅品位愈至下部愈降低（表2）^[1]。江西、广东两省主要黑钨矿石英脉矿床主要发育于古生代及前期地层的变质岩类中或发育于上述岩类中的燕山期花岗岩体中，矿脉受构造裂隙的控制，黑钨矿一般富集于矿脉的中上部^①。西华山钨矿在上部中段经常较下部中段发育着富的黑钨矿，钼、锡、铋呈同样特征；上萍钨矿在倾斜方向上通过山地坑道及钻孔追索，地表下深300—400米处WO₃品位均降低（表3）；大吉山钨矿至深部WO₃品位逐渐降低^① ^[10]。湖南省瑶岗仙砂卡岩型白钨矿床为黑钨矿石英脉穿插，发育于中泥盆统变质岩及燕山期花岗岩中，WO₃品位愈至下部愈降低^② ^[10]。我国南方钽铌花岗岩矿床在垂直方向上钽、铌、锡、钨的品位变化关系为上富下贫呈同步消长关系^③。日本的铜矿床^[13]、铀矿床^[14]，秘鲁的铅锌矿脉^[5]，苏联

内蒙古自治区孟恩套力盖银铅矿铅锌品位变化
（以上层矿块为100） 表1

矿脉号	标高 (米)	品位变化	
		铅	锌
1号脉	400—300	100	100
	300—100	63	69
2号脉	380—350	100	100
	350—310	76	79
3号脉	310—200	54	60
	380—350	100	100
	350—310	55	60
	310—200	38	67(?)

① 广东、江西、湖南冶金地质勘探公司1965年资料。
② 房鉴政等1955年资料。
③ 广西冶金地质217队1972年资料。

青城子铅矿12条矿脉铅品位垂直变化(以最上中段为100)

表 2

坑口名	矿脉号	中段名	品位变化	坑口名	矿脉名	中段名	品位变化	坑口名	矿脉号	中段名	品位变化
大切坑	1号脉	上100	100	喜王坑	3号脉	-30	98	喜雀沟坑	2号脉	-135	69
		75	59		4号脉	上75	100		3号脉	-105	100
		本坑	33		上坑	95	-120		87		
		0	32		本坑	40	-135		39		
		-30	40(?)		0	31	1号脉		-30	100	
		-60	27		5号脉	-30	100		-45	93	
		-90	13		-60	65	2号脉		-30	2	
		-120	4.3		-90	59	北磊子坑		1号脉	524	100
	2号脉	0	100		-120	34	-30		2		
	-30	78	1号脉		-120	100	2号脉		11	100	
	3号脉	0	100		-150	90	30		60		
					-120	100	-60		55		

上坪钨矿钨品位垂直变化^[10]

(以地表品位为100) 表 3

中段名	WO ₃	Sn
1	100	98
2	98	95
3	80	75
4	50	40

的铅锌矿脉^{[9][11]}、钨、锡矿脉^[12]亦呈品位收缩性质。

二、化学热力学观点的考察

上述矿床实例说明,金属矿脉(体)品位在垂直方向上呈收缩性,并非矿化事件中的偶然性。该现象除与合适的控矿条件有关外,与其他成矿地质条件及金属组分之间不存在密切的关系。另一方面,可以明确的是:金、铅、锌、钨、锡、钼、铌等组成的金属矿脉(体)的品位垂直变化随其所在重力场位置增高而增高。吉布斯(J. W. Gibbs)首先注意到某组分的化学位与其所在重力场位置Z的关系^{[7][8]}。巴士(T. F. W. Barth)反复强调了地球化学过程与化学实验室或化学工厂的化学过程不同,主要在大的垂直距离内进行,从而重力场位置Z在地球化学过程中具有极重要的意义。

为使研究深入,本文中应用了作者建议的光子原理化学热力学方法^①,拟从地球化学位^[1]、地球化学位场场强^②两角度阐明金属矿脉(体)品位收缩的成因。本文应用光子原理化学热力学若干基本物理量如下:

$$\rho = \frac{M_{px} N h \nu}{c^2} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{3 M_{px} R T}{c^2} \quad (2)$$

$$M_{px} = \nu M_{ox} \quad (3)$$

① 高旭征,光子原理化学热力学基本物理量。

② 高旭征,地球化学位场。

$$p = \frac{3\nu R^2 T^2}{c^2} \quad (4)$$

式中 ρ ——惯性密度； M_{px} ——矿液分子的分子量·光； N ——Avogadro 数； h ——Planck 常数； ν ——矿液分子中所含光子的频率； c ——矿液分子中所含光子的速度； R ——气体常数； T ——绝对温度； ν ——转换数； M_{ox} ——矿液分子的分子量·氧； p ——压力

(一) 某含矿组分的地球化学位与金属矿脉(体)品位收缩的关系 地球空间中某物质系某相中某组分在一定条件下由相中逸出的能力称地球化学位^[1]。今取矿液系为例，设其为单一组分组成的、高低两浓度相相邻的理想气体的模型，并设其高浓度相的自由能 F 为矿液分子中所含光子的频率 ν 、克分子数 n 、空间坐标 (x, y, z) 的函数，则

$$dF = \left(\frac{\partial F}{\partial \nu}\right)_{n,x,y,z} d\nu + \left(\frac{\partial F}{\partial n}\right)_{\nu,x,y,z} dn + \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_{\nu,n,y,z} dx + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_{\nu,n,x,z} dy + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)_{\nu,n,x,y} dz$$

据
$$\frac{\partial F}{\partial n} = \mu^{[2]}$$

设
$$\frac{\partial F}{\partial z} = -n \frac{\rho_f}{\rho} \frac{N h \nu}{3 z}$$

据微分学可写出
$$\frac{\partial^2 F}{\partial n \partial z} = \frac{\partial^2 F}{\partial z \partial n}$$

由以上 3 式
$$\frac{\partial \mu}{\partial z} = -\frac{\partial \left(n \frac{\rho_f}{\rho} \frac{N h \nu}{3 z} \right)}{\partial n}$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial z} = -\frac{\rho_f}{\rho} \frac{N h \nu}{3} \frac{d z}{z}$$

据 (1)
$$\rho = \frac{M_{px} N h \nu}{c^2}$$

由以上两式
$$d\mu = -\frac{\rho_f c^2}{3 M_{px}} \frac{d z}{z} \quad (5)$$

式中 μ ——地球化学位； ρ_f ——重力密度

按所取模型，理想流体由其高浓度相向低浓度相扩散系其流动的一种形式，因此

$$\frac{\rho v_d^2}{2} - \rho g z + p = 0 \quad (6)$$

及
$$\rho = -\frac{2 p}{(v_d^2 - 2 g z)}$$

式中 z 为重力场位置由成矿当时地表或上覆水体表面算起^[1]。

Einstein 广义相对论指出重力质量与惯性质量等价^[6]，因文中采用一克分子物质占一单位容积论述，则其质量 m 为其密度 ρ ，如此

$$\rho_f = \rho$$

则

$$\rho_f = -\frac{2\phi}{(v_d^2 - 2gz)}$$

由(5)及上式

$$d\mu = -\left\{ -\frac{2\phi c^2}{3M_{px}(v_d^2 - 2gz)} \frac{dz}{z} \right\}$$

据

$$\rho = \frac{M_{ox}\phi^{(2)}}{RT}$$

则(6)可写为

$$\frac{M_{ox}v_d^2}{2} - M_{ox}gz + RT = 0$$

据(3)

$$M_{px} = vM_{ox}$$

于是

$$M_{px}v_d^2 - 2M_{px}gz + 2vRT = 0$$

据(4)

$$\phi = \frac{3vR^2T^2}{c^2}$$

据以上两式及前式

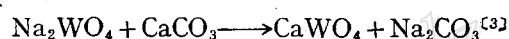
$$d\mu = -RT \frac{dz}{z}$$

积分

$$\mu = \mu_0(T) - RT \ln z \quad (7)$$

式中 v_d ——扩散速度； g ——重力加速度； $\mu_0(T)$ ——积分常数

(7)式说明了某含矿组分的地球化学位与其所在重力场位置的关系，据地球化学的物理意义可知：当某含矿组分所在重力场位置愈高，即 z 值愈小时^[1]，则该组分由其高浓度相中析出的能力亦愈大。如此即易通过某含矿组分形成某矿石矿物的能力。今以生成白钨矿(CaWO_4)为例，其化学反应为：



当含矿组分 Na_2WO_4 所在重力场位置愈高，据(7)式则其由高浓度相中析出的能力亦愈大。设其低浓度相所占空间甚小，以至可以忽略不计时，则由高浓度相中析出的 Na_2WO_4 可视为与围岩中的方解石相 CaCO_3 直接接触。由于所述反应系在两相界面上进行，则在 Na_2WO_4 相与 CaCO_3 相界面间通过上述反应生成了白钨矿，这样通过含矿组分 Na_2WO_4 形成了矿石矿物白钨矿组分。由此产生了含某金属组分的矿物在垂直方向由上至下在量上逐渐降低的现象，形成了金属矿脉(体)品位的收缩性。

(二) 某含矿组份的地球化学位场场强与金属矿脉(体)品位收缩的关系 地球空间中某物质系某相中某组分进行扩散时受到了扩散作用力，呈该性质的地球空间范围称地球化学位场或扩散作用力场。通过该定义可知，某含矿组分所受到的扩散作用力与其所在空间的位置即与其空间坐标(x, y, z)相依赖。设作用于某含矿组分力的方向由其高浓度相指向低浓度相并垂直于两相界面时，则作用于高浓度相中一克分子容积的某含矿组分向其低浓度相运动的扩散作用力称某含矿组分的地球化学场场强^①。如此

$$E = -\text{grad}\mu \quad (8)$$

① 据高旭征，“地球化学位场”。

及
$$\text{grad}\mu = \nabla\mu = \frac{\partial\mu}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial\mu}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial\mu}{\partial z} \mathbf{k} \quad (9)$$

式中 E ——地球化学位场场强

\mathbf{i} 、 \mathbf{j} 、 \mathbf{k} 各为X、Y、Z轴方向上的单位向量

设
$$\frac{\partial F}{\partial x} = -n \frac{\rho_f}{\rho} \frac{NRv}{3x} \quad \frac{\partial F}{\partial y} = -n \frac{\rho_f}{\rho} \frac{NRv}{3y}$$

同上节导出方法得

$$\frac{\partial\mu}{\partial x} = -\frac{RT}{x}$$

$$\frac{\partial\mu}{\partial y} = -\frac{RT}{y}$$

将以上两式及上节中 $\frac{\partial\mu}{\partial z} = -\frac{RT}{z}$ 代入 (9)

$$\mathbf{E} = \frac{RT}{x} \mathbf{i} + \frac{RT}{y} \mathbf{j} + \frac{RT}{z} \mathbf{k} \quad (10)$$

设某含矿组分一克分子容积中各分子受到的扩散作用力各为 F_i 时, 则该组分沿X轴方向受到的扩散作用力 NF_{ix} 所作的功的变化 dW_x , 应等于该组分沿X轴方向地球化学位的变化 $d\mu_x$, 即

$$d\mu_x = dW_x \quad \text{或} \quad d\mu_x = -NF_{ix}dx$$

设扩散作用在定温条件下进行,

则
$$-\frac{\partial\mu_x}{\partial x} = NF_{ix} \quad \text{或} \quad -\frac{\partial\mu}{\partial x} = NF_{ix}$$

同理
$$d\mu_y = -NF_{iy}dy \quad \text{或} \quad -\frac{\partial\mu}{\partial y} = NF_{iy}$$

$$d\mu_z = -NF_{iz}dz \quad \text{或} \quad -\frac{\partial\mu}{\partial z} = NF_{iz}$$

式中 F_{ix} 、 F_{iy} 、 F_{iz} 各为作用于某矿液分子的扩散作用力 F_i 在X、Y、Z轴方向上的分力或投影

据前节中
$$\frac{\partial\mu}{\partial z} = -\frac{RT}{z}$$

从而
$$\frac{RT}{z} = NF_{iz} \quad (11)$$

据 (10) 中 $\frac{RT}{z} \mathbf{k}$ 之项可知, 形成前述金属矿脉 (体) 时, 当某含矿组分愈近地表或上覆水体表面时, 因其重力场位置愈增高, 从而 z 值愈小^[1]。另一方面, 据 (11) 可知, 某含矿组分在Z轴方向上即在垂直方向上的扩散作用力 NF_{iz} 则愈增强, 因之促成了某含矿组分由其高浓度相中呈显著的析出的能力, 如此即易通过某含矿组分形成某矿石矿物的能力, 具体例如前节所述, 因此产生了金属矿脉 (体) 品位的收缩。

(三) 金属矿脉(体)品位收缩的成因 物理化学液相论中曾采用了气体或类似固体的模型, 均收到了一定的效果^[15]。本文中采用了气体模型, 它提供了数学处理的便利条件, 对阐明金属矿脉(体)品位收缩现象得到了可信的结果。如前所述 J.W.Gibbs, T.F.W.Barth 等指出了重力场位置 z 在地球化学过程中的重要性, 通过文中分析重力场位置 z 实为促成上述金属矿脉(体)品位收缩的主导因素。虽然根据地球化学位的定义及 $\mu = \mu_0(T) - RT \ln z$ 可以说明金属矿脉(体)品位收缩现象, 但是重力场位置 z 为什么有这样强烈的影响? 如前所述, 当重力场位置愈高即 z 值愈小时, 则作用于某含矿组份高浓度相中分子的扩散作用力 F_{iz} 之值亦愈增大, 这样某含矿组分在 Z 轴方向上的地球化学位场场强 $E_z = \frac{RT}{z} k = NF_{iz} k$ 从本质上反映了金属矿脉(体)品位收缩的成因。

三、深部找矿与品位收缩

如上所述, 国内外一些金、铜、铅、锌、锡、钨、钼、铌、铀等金属矿脉(体)品位在垂直方向上呈收缩性质, 它们是矿床地质现象之一。但是它们不能排斥深部找矿, 因为进行深部找矿时, 必须了解矿床或矿体在深部发育的性质和规律性, 否则便不能提高深部找矿效率。

内蒙古自治区太仆寺黑钨矿石英脉矿床发育于元古界白云鄂博群云母片岩的层间构造裂隙中, 矿脉与围岩整合。在深部由于沿层间裂隙发生了扩容现象, 使矿脉厚度加大, 遂产生了特高品位的钨矿化现象^① [4]; 青城子铅锌矿床中, 除上述12条矿脉外, 其他矿脉均不呈品位收缩现象, 曾解释为当成矿过程中, 在同一矿脉(体)内, 由于成矿裂隙发育不均匀引起^[1]。

这样在进行深部找矿时, 必须注意成矿地质条件的具体分析, 绝不能把金属矿脉(体)品位收缩现象作为规律性去对待。它们只是在特定的成矿地质条件下产生的矿床地质现象而已。以矿脉为例, 通过构造裂隙形成的控矿空间较均匀发育时, 对矿体亦将如此。因此, 通过地球化学位、地球化学位场场强角度的论证, 只是说明了后述特殊场合。

参 考 文 献

- [1] 高旭征 1977 地球化学位 地质科学 第二期
- [2] 黄子乡 1956 物理化学 高等教育出版社
- [3] 南京大学地质系编 1961 地球化学 科学出版社
- [4] 高旭征 1978 地球化学位守恒 地质科学 第一期
- [5] Dun Ham, 1953, The geology and paragenesis and reserves of the ores of lead and zinc.
- [6] Leighton, R. B., 1959, Principles of modern physics, McGraw Hill Book Company, Inc.
- [7] Barth, T. F. W., 1952, Theoretical petrology, John Wiley and Sons, Inc.
- [8] Aston, J. G., Frite, J. J., 1959, Thermodynamics and statistical thermodynamics, John Wiley and Sons, Inc.

① 高旭征, 1981, 化学位与地球化学位观点的对话, 《矿物与岩石》。

- [9] Смирнов В. И., 1965, Геология полезных ископаемых, Издательство Недр, Москва.
 [10] Быбочкин А. М., 1965, Месторождения вольфрама, Издательство Недр, Москва.
 [11] Смирнов В. И., 1957, Шесть типов первичной зональности гидротермальных рудных тел, Изв. АН СССР, Сер. Геол., 1957, №3.
 [12] Чапковский В. К., 1956, Геология оловоносных месторождений Северного Востока СССР, Госгеолтехиздат.
 [13] 官泽俊弥 1961 矿脉の下限と生成深度ニツイテ 矿山地质 10周年纪念特别号 (1951—1961)
 [14] 佐藤源郎 1961 日本のウラン资源ニツイテ 矿山地质 10周年纪念特别号 (1951—1961)

THE ORIGIN OF TENOR CONTRACTION OF METALLIC ORE VEINS OR BODIES

Gao Xuzhong

(*Metallurgical Exploration and Prospecting Company of Nei Monggol*)

Abstract

Some typical examples illustrating the tenor contraction of such metallic ore veins or bodies as Au, Pb, Zn, W, Sn, Ta and Nb have been recorded by Chinese geologists in the course of ore exploration and mining. The similar demonstrations have also been observed in Japan, Peru and the U.S.S.R. by their respective geologists. Yet its origin as a problem in the field of ore deposits remains unsolved.

In this paper, by adopting the photon-based chemical thermodynamical method proposed by the author, the gravitational field position Z related to the intensity of the diffusion force of ore fluids are proved to be the leading factor causing the tenor contraction of metallic veins or bodies. This is readily comprehended in the light of thermodynamics, through the utilization of geochemical potential expressed by $\mu = \mu_0(T) - RT \ln z$ and the strength of geochemical potential field represented by $E = -\text{grad} \mu = \frac{RT}{x} i + \frac{RT}{y} j + \frac{RT}{z} k$.

The tenor contraction of metallic veins or bodies under suitable ore-controlling structural conditions is an objective fact in the science of ore deposits, though in no case should it be regarded as a rule to deny the necessity of searching for ore at depth. The variation of the deep-seated ore-controlling structures might alter the tenor of the metallic veins or bodies. The Taipushi wolframite deposits in Nei Monggol could be taken as a convincing example. The tungsten content increases at great depth owing to the dilatation during ore deposition along the schistosity of the Proterozoic crystalline schists. There also have been observed similar phenomena in other deposits of China.