

文章编号: 1009-3850(2002)03-0045-08

岩浆熔融体性质及演化在成矿过程中的作用 ——以西藏玉龙斑岩铜(钼)矿床为例

黄 朋¹, 顾雪祥², 唐菊兴², 王立全¹

(1. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082; 2. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要: 玉龙斑岩铜(钼)矿床是亚洲最大的斑岩型铜矿床, 包含多种矿化类型, 成矿作用复杂。作为典型的斑岩型矿床, 岩浆熔融体的性质在玉龙铜矿床的形成过程中起到了至关重要的作用。本文将分别从岩浆熔融体的物理和化学性质出发, 解释玉龙矿床为何能成为玉龙成矿带中唯一一个超大型矿床的原因。在熔体演化方面, 笔者主要通过对熔体密度、粘度的计算获得有关数据, 以了解熔体运移、含矿流体分离的过程, 以解释玉龙铜矿床为何能形成如此规模的矿床。

关 键 词: 熔体演化; 粘度; 密度; 玉龙斑岩铜(钼)矿床; 西藏

中图分类号: P588.1

文献标识码: A

众所周知, 在全球已发现的铜、钼特大型矿床中, 斑岩型占了极大的比重。据统计, 世界 22 个储量大于 1000 万吨的铜矿床中, 斑岩型 12 个, 占 54%; 而钼矿, 就已知的资料来看, 特大型矿床都为斑岩型。玉龙铜(钼)矿床作为我国规模最大、特征最典型的斑岩型矿床之一, 自其发现之日起便引起了众多地质工作者的关注, 针对玉龙矿床出版发表了大量的专著和论文, 但有关玉龙岩体形成的岩浆演化及其对矿床形成所起作用的研究却相对薄弱。

1 玉龙铜矿床地质背景

玉龙斑岩铜矿床位于西藏自治区昌都地区江达县境内。矿区南北长约 2.5km, 东西宽近 2km, 面积约 5km², 区域上受北北西向断裂构造的控制, 同时又明显受到褶皱作用的影响。矿区位于杂多-芒康褶皱带中温泉大断裂西侧, 该断裂沿北北西向延伸约 200km, 对区域构造和岩浆作用起着重要的控制作用。

玉龙铜矿位于恒星错背斜(玉龙复向斜的次级背斜)的南部倾伏端, 该背斜长约 30km, 宽约 15km, 背斜轴呈与区域构造线方向一致的北北西向展布。背斜两翼大致对称, 核部为上三叠统甲丕拉组砂页岩, 两翼由上三叠统波里拉组和阿堵拉组构成。矿区内断裂规模不大, 玉龙岩体以西发育有 3 条小型逆断层, 长仅 2km, 在平面上呈向西撒开的喇叭状展布, 东面在玉龙附近收敛; 而穿切矿体的断层则规模更小, 均为成矿后的高角度正断层, 这类成矿后断层未对矿体造成大的破坏。

玉龙斑岩体以二长花岗斑岩为主, 岩体已全部矿化为斑岩型矿体。其直接围岩为甲丕拉组的砂岩、泥岩, 波里拉组的碳酸盐岩、碎屑岩, 分别矿化成角岩型和夕卡岩型矿体, 与斑岩型矿体一起共同组成玉龙斑岩铜(钼)矿床。其中, 斑岩型与夕卡岩型矿体是矿床的主体。

2 斑岩体岩浆熔融体的化学性质

岩浆岩作为岩浆冷凝后的产物,保存着岩浆除挥发份外的绝大多数成分,可从岩石的化学性特征来了解岩浆熔融体的化学性质。

玉龙斑岩岩体主要氧化物含量(表1)同世界花岗岩平均化学成分相比,平均值接近世界花岗岩的平均化学成分。成分差异表现在:SiO₂含量偏低。碱质含量,特别是K₂O含量偏高,表明岩浆可能来自地壳深处。

玉龙斑岩体微量元素含量与维若格拉多夫酸性岩值(简称维氏值)相比,玉龙岩体岩石中金属成矿元素W、Mo和Cu、Au、Ag等含量均高于维氏值(表2)。其中,Au高出维氏值数倍,W、Mo高出维氏值10倍左右,Cu、Ag高出维氏值数百倍,这为形成矿床奠定了物质基础。此外,在测定岩石成分时,烧失量较高,说明岩石中包含了较多的挥发份,这为成矿流体从岩浆中萃取成矿物质创造了条件。所以,形成玉龙岩体的岩浆在化学成分(物质组成)上富含成矿元素和挥发组分,对矿床的形成非常有利。

3 斑岩体岩浆熔融体的物理性质

3.1 岩浆密度计算

由于水是熔体中最主要的挥发份,在计算熔体密度和粘度之前,首先要知道水在熔体中的含量(溶解度)。马宏文^[2]给出了玉龙铜矿床早期岩浆阶段熔体中水的含量为8.58%(温度约为900℃,压力为2.23×10⁸Pa),我们将用它计算玉龙铜矿熔体的密度和粘度。

硅酸盐熔体密度的获得主要有两个途径^[3]:一是通过实验的方法进行硅酸盐熔体密度的测定;二是利用实验结果拟和的密度公式进行硅酸盐熔体密

度的计算。本文将采用第二种方法。目前,有多种计算硅酸盐熔体的方法,其中以Bottinga和Weill(1970)提出的用氧化物偏摩尔体积计算多组分硅酸盐体系熔体密度的方程:

ρ=ΣXiMi/ΣXiVi (1)

(式中ρ为熔体体积,Xi为氧化物i的摩尔分数,Vi为偏摩尔体积,Mi为摩尔质量)应用最广。使用该方程的前提是:偏摩尔体积与总组成无依赖关系。

Nelson和Carmichael(1979)、莫宣学(1984)用不同方法证明:XSiO₂在0.4~0.8范围内,可认为SiO₂等组分的偏摩尔体积与化学成分无关。玉龙岩体岩浆SiO₂含量平均为0.65%,符合条件。因此,我们采用式(1)计算玉龙岩体岩浆的密度,式中各参数及计算结果见表3、表4。

以上计算的是不含水的“干岩浆”密度,而自然界中的岩浆大都为含有一定数量水的“湿岩浆”。分别计算水的偏摩尔体积、分子百分数、分子量等参数^[4~6],最后通过式(1)求出“湿岩浆”的密度。其中,水的偏摩尔体积(V_{H₂O})由式(2)(Burham,1971)得出:

V_{H₂O}=10.98+0.962T+0.1005T²-0.00199T³
-P(0.530+0.2031T+0.00158T²)+P₂
(0.0780+0.01144T)-P₃(0.00396) (2)

式(2)中V_{H₂O}为cm³/mol,P为10×10⁸Pa,T为100℃。

已知玉龙铜矿床早期岩浆阶段的温度为900℃,压力为2.23×10⁸Pa,熔体含水量为8.58%(马宏文,1987)。按式(2)计算此条件下水的偏摩尔体积(V_{H₂O})为21.64cm³/mol。同时,为了解熔体中水含量对熔体密度的影响情况,我们将使用式(1)计算此条件下不同含水量的“湿岩浆”密度(表5)。

表1 玉龙铜矿床斑岩岩石化学成分(w_B/%)

Table 1 Petrochemical compositions of the porphyries from the Yulong copper deposit in Xizang (w_B/%)

样 品 号	样 品 名 称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
P1-21	二长花岗斑岩	63.42	0.34	17.45	2.54	0.08	0.79	3.24	3.71	4.4	0.29
P1-24	二长花岗斑岩	67.47	0.33	15.69	2.32	0.02	0.54	2.35	3.3	4.88	0.06
ZK1808-42	泥化矿化斑岩	63.72	0.35	17.51	2.45	0.08	0.83	3.29	3.77	4.45	0.29
ZK59-19	泥化矿化斑岩	66.4	0.38	13.18	2.71	0.059	0.62	0.49	1.61	6.97	0.18
玉龙斑岩化学成分平均值		65.25	0.35	15.96	2.51	0.06	0.7	2.34	3.1	5.18	0.21
世界花岗岩化学成分平均值*		69.21	0.41	14.41	1.98	0.12	1.15	2.19	3.48	4.23	0.3

注:表中带*号的数据来自唐仁鲤^[1],其余数据来自王成善、陈建宁、顾雪祥等(1996、1998)

表 2 玉龙铜矿床斑岩微量元素
Table 2 Trace element contents in the porphyries from the Yulong copper deposit in Xizang

样品号	样品名称	Sc	Cr	Co	Ni	Zn	Rb	Sr	Ba	Zr	Hf	Th	U	La	Ce	Nb	Sm	Eu	Tb	Yb	Ag	Mo	W	Au	Cu
P1-14	二长花岗斑岩	11.06	23	3.4	<6	201	366	259	1408	113	66	16.8	14.3	48.3	91.45	34.9	6.78	1.31	0.73	2.4	7.2	27.6	20.4	30.8	0.62
P1-16	二长花岗斑岩	4.8	15	3.2	68	342	254	305	493	118	12	36.5	5.57	45.7	103.7	42.24	7.54	1.23	0.46	1.21	12.9	7.1	13	37.3	0.22
P1-21	二长花岗斑岩	4.78	22	9.1	<6	288	173	852	752	141	10.9	28.6	2.57	66	168.4	60.98	10.38	1.48	0.44	1.84	5.5	<0.7	12.1	46.5	1.46
P1-24	二长花岗斑岩	4.75	19	2.5	67	221	189	739	1209	146	8.4	22.3	1.84	83.4	193.1	71.77	13.71	1.76	0.73	1.61	5.6	5.1	18.9	<0.1	0.41
玉龙斑岩微量元素平均值*		6.35	20	4.6	35	263	246	539	966	130	9.5	26	6.08	60.8	139.2	52.47	9.6	1.45	0.59	1.77	7.8	10	16.1	28.7	0.69
维若格拉多夫酸性岩值*		3	25	5.1	8.1	60	200	300	830	200	1	18	3.5	60	100	46	9	1.5	2.5	4	0.05	1	1.5	4.5	0

表中带*号的数据来自唐仁钊(1995),其余数据来自本项目组;质量分数: $w_B/10^{-6}$, 但 $w(\text{Au})/10^{-9}$, $w(\text{Cu})/\%$ 。

表 4 斑岩熔融体密度计算参数表
Table 4 Calculated parameters for the density of the porphyry melts from the Yulong copper deposit in Xizang

氧化物	$w_B/\%$	分子数	X_i	$X_i V_i$	M_i	$X_i M_i$	熔体 密度
SiO ₂	67.94	1130.74	76.29	2068.98	60.08	4583.50	2.41 (g/cm ³)
TiO ₂	0.42	5.26	0.35	6.85	79.90	27.97	
Al ₂ O ₃	14.66	143.78	9.7	329.12	101.96	989.01	
Fe ₂ O ₃	1.54	9.64	0.65	26.69	159.69	103.80	
FeO	1.58	21.99	1.48	17.29	71.85	106.34	
MgO	1.25	31.01	2.09	22.76	40.30	84.23	
CaO	2.14	38.16	2.57	33.90	56.08	144.13	
Na ₂ O	3.15	50.82	3.43	87.12	61.98	212.59	
K ₂ O	4.79	50.85	3.43	137.89	94.20	323.11	
合 计	97.47	1482.23	99.99	2730.60	726.04	6574.68	

表 3 氧化物偏摩尔体积
Table 3 Partial molar volumes of the oxides from the Yulong copper deposit

氧化物	a' /cm ³ ·mol ⁻¹	$b' \times 10^2$ /cm ³ ·mol ⁻¹	V_i /cm ³ ·mol ⁻¹	备 注
SiO ₂	27.33	-0.1793	27.12	中 a', b' 参数 及 V _i 计算式 来自赵海 玲 ^[6] 。计算 V _i 时 T 为 1173.2K。
TiO ₂	12.46	6.0634	19.57	
Al ₂ O ₃	27.59	5.4061	33.93	
Fe ₂ O ₃	34.79	5.3463	41.06	
FeO	6.56	4.3622	11.68	
MgO	9.61	1.089	10.89	
CaO	5.84	6.2646	13.19	
Na ₂ O	17.46	6.7659	25.40	
K ₂ O	26.76	11.459	10.20	
计算式	$V_i = a' + b' T$			

由表 5 可知,随着熔体含水量的增加,熔体密度下降。而且,当含水量达到一定程度后,密度的变化与含水量间呈线性相关。

3.2 岩浆粘度计算

对硅酸盐熔体粘度的计算也有多种方法^[7~8],其中最常用的是 Shaw (1972)提出的“阿累尼乌斯关系法”,其计算式为:

$$\ln \eta = S(104/T) - 1.50S - 8.7 \tag{3}$$

式(3)中 $\ln \eta$ 为粘度(0.1Pa·s)的自然对数, S 为阿累尼乌斯斜率, T 为绝对温度。 S 的大小与硅酸盐熔体的化学成分有关:

$$S = \sum X_i (S_i^0 X_{SiO_2}) / (1 - X_{SiO_2}) \tag{4}$$

式(4)式 X_i 为第 i 种氧化物的分子百分数(摩尔分数), X_{SiO_2} 为 SiO_2 的分子百分数。 S_i^0 为第 i 种氧化物的阿累尼乌斯截距值。

用式(3)分别计算“干”岩浆、及不同含水量的“湿”岩浆的粘度(表 5和表 6)。表 6 中数据表明,熔体的含水量对粘度影响远远大于对密度的影响。随着熔体含水量的上升,熔体粘度急剧下降,当熔体含水量达到一定比例,下降幅度减弱(图 1)。

3.3 岩浆密度、粘度的影响因素

熔体密度、粘度的影响因素主要有熔体组成、温度和压力条件。在以上 3 种影响因素中,熔体组成的变化对熔体密度和粘度影响最大。但就某一种的熔体来说,各种成分变化不大。所以,主要是挥发份

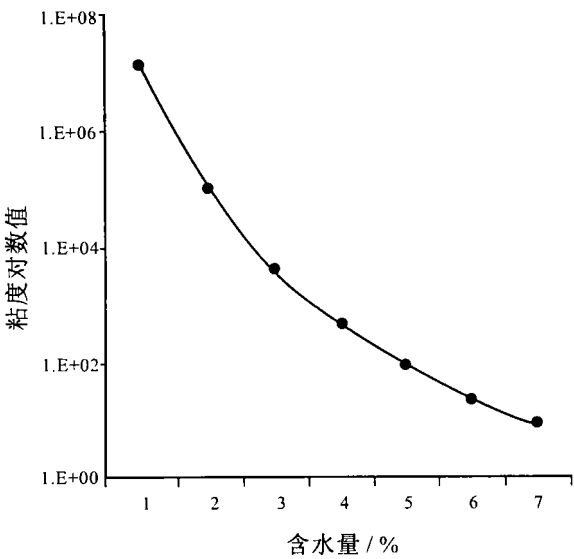


图 1 等温、等压条件下含水量与熔体粘度变化关系图
Fig.1 Plot showing the variations in viscosity as a function of water contents at constant temperatures and pressures

影响密度和粘度。水是最重要的一种挥发份,且在熔体内的含量变化很大,分子量小,仅为 18.02。因此,熔体中水含量的微小改变,就可以使摩尔分数明显变化,并最终影响熔体的密度和粘度。

熔体密度随温度和压力而发生变化,是由于流体具有压缩性和膨胀性所决定的^[9]。在假定熔体组成成分不变的前提下,我们分别计算了不同温度、压

表 5 不同含水量下花岗质熔体密度和粘度计算结果

Table 5 Calculations of the density and viscosity for the granitic melts with varying water contents

熔体含水量/ %	0	2	4	6	8	8.58	10	12
熔体密度/ g·cm ⁻³	2.41	2.32	2.24	2.17	2.11	2.09	2.05	1.99
熔体粘度/ Pa·s	1.35×10 ⁷	9.41×10 ⁴	4015.40	441.40	85.10	56.43	23.59	8.40

表 6 玉龙铜矿床斑岩熔体粘度计算参数表

Table 6 Calculated parameters for the viscosity of the porphyry melts from the Yulong copper deposit in Xizang

氧化物	w _B / %	分子数	X _i	S _i ⁰	S _i ⁰ X _{SiO₂}	X _i S _i ⁰ X _{SiO₂}
SiO ₂	67.94	1130.74	0.5772			
Al ₂ O ₃	14.66	143.78	0.0734	6.7	3.87	0.28
Fe ₂ O ₃	1.54	9.64	0.0049	3.4	1.96	0.06
FeO	1.58	21.99	0.0112			
MgO	1.25	31.01	0.0158			
CaO	2.14	38.16	0.0195	4.5	2.60	0.06
TiO ₂	0.42	5.26	0.0027			
Na ₂ O	3.15	50.82	0.0259	2.8	1.62	0.08
K ₂ O	4.79	50.85	0.0260			
H ₂ O	8.58	476.14	0.2433	2.0	1.15	0.28
合 计	97.47	1958.37				0.77

力条件下玉龙岩体岩浆的密度值(图2)。图2表明:(1)不同压力、温度条件下的熔体密度值位于一簇直线上;(2)直线间间距不等,即在温度确定的条件下,压力连续上升或下降一相等的值,熔体密度变化值不相等;(3)直线不平行,即压力升高,直线斜率减小,变得平缓,反映了随着压力的升高,温度连续上升一相等值,密度值的下降幅度减小。

为具体地了解温度对熔体粘度的影响,我们计算不同温度条件下熔体粘度的变化情况(图3)。从图3来看,在熔体组成成分不变的条件下,熔体粘度的确是随体系的温度上升而下降,下降幅度随温度的上升而减小。

上述研究结果表明,就玉龙铜矿床而言,由于其熔浆含水量大、粘度低,使之在比较宽的温度区间内粘度保持在一个较低的水平上。因此,在相对较长的时间段内(假设熔体温度下降梯度不变)玉龙熔体具有比较高的活动性,有利于熔体迁移、分离等过程的发生。另外,根据地质资料,玉龙铜矿床形成过程中发生过二次沸腾作用,而在沸腾发生前,由于熔体外冷凝壳的作用,熔体内部压力上升;从上述有关压力对粘度的影响研究结果来看,熔体粘度将进一步下降。这一方面有利于熔体破开冷凝壳,引起二次沸腾;另一方面,熔体的高活动性有利于熔体进入围岩,引起矿化蚀变,形成夕卡岩型、角岩型等矿化类型的矿体。除此之外,熔体粘度的进一步降低,还有利于物质的富集和大规模成矿流体的产生。

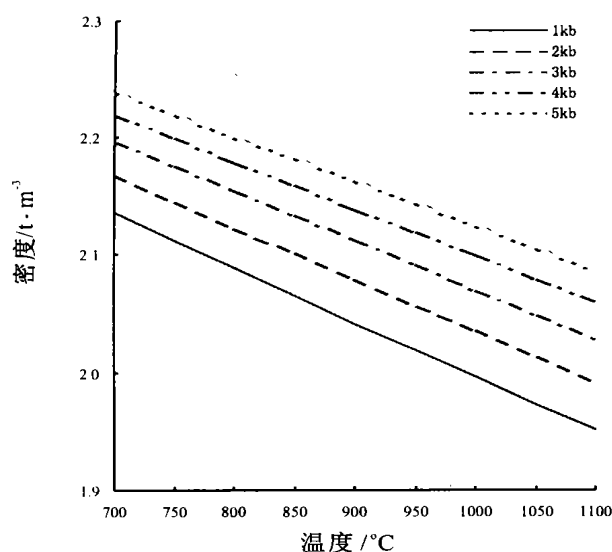


图2 不同温度、压力条件下熔体密度变化关系图

Fig. 2 Plot showing the variations in the density of the magmatic melts at different temperatures and pressures

4 不混熔流体及岩浆运动状况

4.1 不混熔流体的运动状况

熔体中存在的不混熔流体的运动状况,由方程式(5)、(6)描述:

$$\begin{aligned} j_1 &= k_{11} k x_1 / \eta_1 + k_{12} k x_2 / \eta_2 \\ j_2 &= k_{21} k x_1 / \eta_1 + k_{22} k x_2 / \eta_2 \end{aligned} \quad (5)$$

由于 k_{ij} 的不可测定性,加上 k 值和 x_i 值在不同流体、条件下的多变性,不易用方程(5)来模拟两个不混熔流体的行为。为便于理解,定义无量纲参数 G :

$$G = |f| / |f_c| \quad (6)$$

其中 f 是流体感受到的力, f_c 是能使不混熔流体在多孔介质中形成连续流动时的最小力。 G 值是方程(5)中 x_i 值大小的指标。 $G=1$ 对应于多孔介质的渗流阈值; $G<1$ 时,流体不可能流经多孔介质而被卡塞; $G>1$ 时,流体会随 G 值的不断增大最终相互贯通并流经介质。

$S=0.1$ 时(S 为流体体积/熔体和流体体积之和),不混熔流体的迁移行为如图4所示,图中的ABHCD曲线表示体积相对较小的流体在力作用下的迁移规律, J 为流体流速;曲线AHEF则是硅酸盐熔体运移特征的反映。应引起注意的是E点和C点所对应的 G 值是相同的,均为 G' 。这表明 $G>G'$ 时,不混熔流体与硅酸盐熔体具有相同的运移规律。而ABHCD和AHEF两曲线在H点对应的 G 值

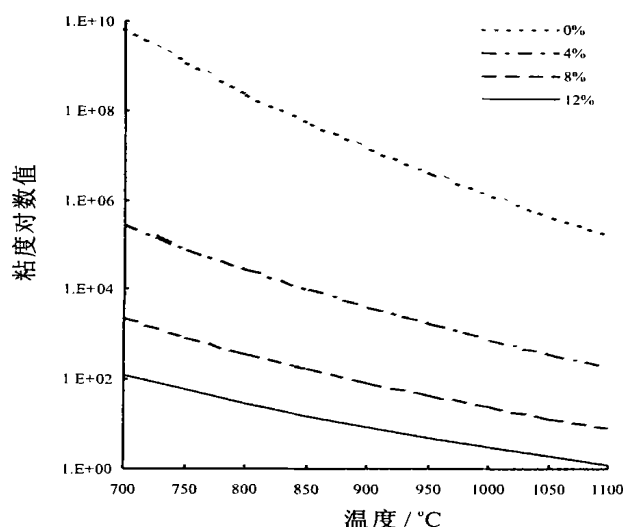


图3 不同温度、含水条件下熔体粘度变化图

Fig. 3 Plot showing the variations in the viscosity of the magmatic melts at different temperatures and water contents

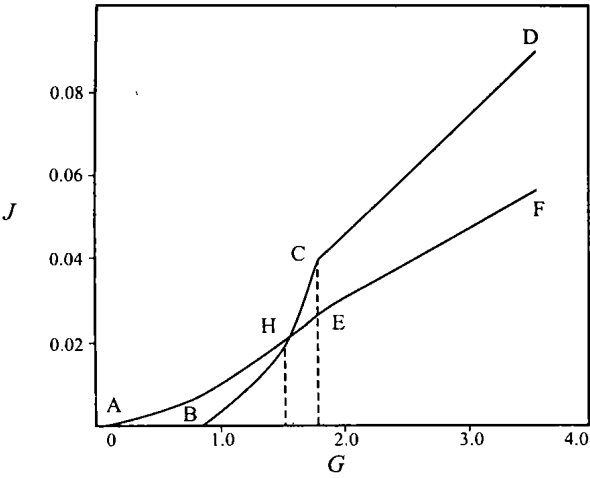


图4 长英质岩浆体系中不混熔流体(ABHCD 曲线)和耦合硅酸盐熔体(AHEF 曲线)的迁移特征(据朱永峰, 1994)

Fig. 4 Plot showing the migration of the immiscible fluids (ABHCD) in the felsic magmatic systems and coupled silicate melts (AHEF) (after Zhu Yongfeng, 1994)

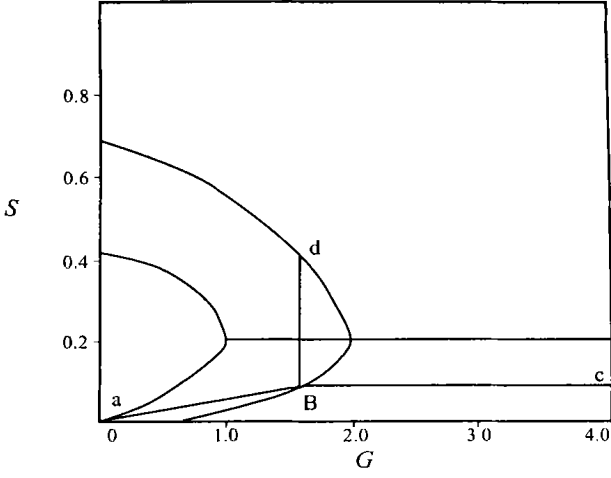


图5 长英质岩浆的演化及其中不混熔流体的运移规律(据朱永峰, 1994)

a. 代表初始状态; c, d. 分别代表不同条件下的状态
Fig. 5 Plot showing the evolution of the felsic magmas and the migration of immiscible fluids (after Zhu Yongfeng, 1994)
a. initial state; c and d. other states

记作 G_h 。 $G < G_h$ 时, 硅酸盐熔体的迁移速度远大于流体的速度; $G > G_h$ 时, 流体的迁移速度迅速增高并远远高于硅酸盐熔体的运移速度。

原始均一岩浆(熔体)演化如图 5。原始的长英质熔体在其演化的初期不含自由流体相^[10~11], 即 $S = 0$, 在图 5 中记作 a; 随着硅酸盐矿物的结晶使体系中挥发份开始局部富集并形成流体气泡, 即 S 值不断增高。同时在 G 值逐渐增大的条件下, 流体气泡开始在熔体中发生非线性的迁移。当达到 $S = 0.1$ 时, 对应的 $G = G'$, 在图 5 中记作 b。如果此时岩浆体系迅速冷却成岩, 即 G 值迅速增大, 那么, 由图 4 可知, 不混熔流体气泡的迁移速率将远大于熔体, 并最终在岩浆房顶部形成岩浆热液, 在图 5 中以 c 点表示。但如果岩浆体系演化到 b 状态后不再向上侵位, 那么体系中的硅酸盐组分不断缓慢结晶。当 $0.1 < S < 0.2$ 时, 流体在体系中仅呈气泡形式存在并可形成不连续的流体流而发生迁移; 当 $S > 0.2$ 时, 体系中的气泡可形成连续流。

玉龙铜矿床熔体水含量高(8.58%), 在相同的温度、压力条件下, 将具有更高的饱和度; 加之熔体低粘度的特点, 使大规模热水流体的产生成为可能, 从而为成矿物质的迁移创造了条件。而矿床熔体粘度低特征, 也使含矿流体气泡在熔体内迁移时所受的阻力较小。同时, 由式(6)可知, 玉龙铜矿床中的流体在相同的流体饱和度及压力条件下更容易达到流体开始运移时的临界状态($G = 1$), 因而流体 $G >$

G_h 的状态也更容易出现。将使熔体中的流体气泡形成连续流, 并脱离熔体而形成独立的成矿流体体系的可能性大大增加。

4.2 岩浆的运动状况

岩浆的运动情况是岩体成矿的重要影响因素, 通过控制成矿流体的形成和运移、围岩与岩浆的物质交换等过程制约着矿床的形成及规模^[13]。迄今已提出了几个计算岩浆上升速度的方程式, 效果比较好的是式(7):

$$v = (\rho - \rho')g \Delta X^2 / 12 \eta$$
 (7)

方程(7)中, ρ 为围岩密度, ρ' 为熔体密度, g 为重力加速度, ΔX 为裂隙的宽度(cm), η 为熔体的粘度。

就玉龙铜矿来说, 其围岩主要是砂岩和灰岩, 假设它们各占一半, 则其密度为 2.7 t/m^3 , 岩浆熔体的密度 2.09 t/m^3 , 熔体粘度 $56.43 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。由于方程(7)中 ΔX 值未知, 因此无法计算玉龙岩体岩浆上升的绝对速度。但对一确定的矿床来说, ΔX 值是一定值, 所以我们可通过计算不同密度和粘度下的熔体上升速度, 并将它们相比来获得玉龙岩体岩浆的相对上升速度。如前所述, 熔体中含水量的变化对熔体密度、粘度的影响是最大的, 所以我们比较不同含水量条件下熔体的上升速度, 反映玉龙岩体岩浆的运动情况。计算中, 我们将不含水熔体的运移速度作为基准, 把具有不同含水量熔体的运移速度分别和它相比(表 7)。由此可以看出: (1)随着熔体含水量的增加, 熔体上升速度加快; (2)长英质熔体含水量多

在6%左右,与之相比,玉龙岩体岩浆上升速度约快了10倍;(3)随着熔体含水量的增加,熔体上升速度的增加幅度降低。

以上的研究结果对玉龙铜矿床来说,一个方面解释了玉龙岩体岩浆受外界物质混染少的原因:由于上升速度快,上升过程所经历的时间短,从而减少了外界物质混染的机会;另一方面也从熔体运移状态对矿物晶体运动的影响的角度,解释了矿物浸染状构造的成因:熔体快速上升,熔体与围岩间的温度梯度保持在较高的水平,使熔体内对流加速,已结晶的矿物不容易沉淀下来,而被熔体的对流带动,均匀的分布在熔体中,最终形成浸染状构造。

4.3 成矿热流体的运动状况

流体气泡在长英质熔体中的运移规律用方程式(8)考察^[15]:

$$v = gr^2(\rho' - \rho) / 12\eta$$
 (8)

其中, v 代表气泡的上浮速度, g 为重力加速度, r 为气泡的半径, ρ' 代表熔体的密度, ρ 代表流体的密度, η 是流体饱和时熔体的粘度。

由式(8)可以看出,在流体气泡体积、密度一定的条件下,气泡上升迁移速度只与熔体密度和粘度有关。在熔体结晶早期阶段,熔体密度较大、粘度较小;其后,随着熔体挥发份的分离、温度的降低,熔体的密度逐渐降低、粘度逐渐升高,最终减缓流体气泡上升迁移的速度,不利于成矿物质的富集。

为了解流体气泡迁移过程,我们将在玉龙斑岩熔融体开始分异的早期阶段, $t=900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=2.23\times 10^8\text{ Pa}$, $\text{CH}_2\text{O}=8.58\%$ (马宏文,1987)的条件下计算不同大小气泡的上浮速度及在一定时间内的迁移距离,其它有关参数为: $\rho=0.2\text{ t/m}^3$ (唐仁鲤等,1995), $\rho'=2.09\text{ t/m}^3$, $\eta=56.43$ (表8)。从表8可以得出以

下结论:(1)气泡上升速度的增加比其半径的增加快两个数量级;(2)由于半径越大的气泡上升速度越快,因此在包裹体研究中,我们应研究半径较小的气泡,它更接近被捕获处的流体性质。

从以上的研究结果知道:半径越大的气泡,它的上浮速度也越大,会很快上浮到熔体上部聚集,或离开岩浆体系。它们如与适宜的构造、地层条件耦合,就能在有利部位成矿。形成玉龙岩体的岩浆富含水、 CO_2 等挥发份和成矿物质。而从上述的有关熔体影响因素的研究可知,高的含水量使岩浆(熔体)的粘度降低,且使温度下降时岩浆粘度上升的速度相应较小(图3),这样就使岩浆在一个比较长的时间段内保持相对比较低的粘度,为岩浆内所富含的成矿物质的迁移、富集赢得了时间;另一方面,随着熔体含水量的上升,熔体粘度急剧下降,而密度下降较慢(图2,图3),即浮力增加、阻力减小。因而使流体中体积较小的气泡也具有较大的迁移速度,既增加了流体数量又增加了成矿物质带出的数量。

5 岩浆熔融体性质与演化对成矿作用的影响

笔者根据岩石化学成分研究了玉龙铜矿床岩浆的物理性质及其影响因素,并从岩浆演化的角度解释矿床的形成,得出以下几点结论:

- (1)玉龙铜矿床岩浆富含成矿元素与挥发组分(矿化剂),为矿床的形成奠定了物质基础;
- (2)玉龙铜矿床岩浆粘度为 $56.43\text{ Pa}\cdot\text{s}$, 密度为 2.09 g/cm^3 , 为低粘度、高密度岩浆;
- (3)玉龙铜矿床的岩浆的物理、化学性质有利于成矿物质的富集和大规模成矿流体的形成;

表7 玉龙铜矿床不同含水量熔体相对于“干熔体”的上升速度

Table 7 The upward migration velocities of water-containing melts in respect to the “dry” melts from the Yulong copper deposit in Xizang

含水量/%	0	2	4	6	8	8.58	10	12
相对上升速度	1	188	5.33×10^3	5.59×10^4	3.23×10^5	5.03×10^5	1.28×10^6	3.93×10^6

表8 玉龙铜矿床斑岩熔融体中流体气泡上升速率

Table 8 The upward migration velocities of the fluid bubbles in the melts from the Yulong copper deposit in Xizang

半径 $r/\mu\text{m}$	0.1	0.5	1	5	10	50	100
上升速率 $v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2.72×10^{-13}	6.79×10^{-12}	2.72×10^{-11}	6.79×10^{-10}	2.72×10^{-9}	6.79×10^{-8}	2.72×10^{-7}
年迁移距离/m	8.58×10^{-6}	2.14×10^{-4}	8.58×10^{-4}	2.14×10^{-2}	8.58×10^{-2}	2.14	8.58

(4)由于岩浆上升速度快,所以矿床形成过程中受外界物质浸染的程度相对较少;

(5)岩浆对流快造成斑岩型矿体中浸染状构造的形成;

(6)进行流体包裹体研究时,应尽量以半径小的包裹体为对象,这样研究结果才能代表包裹体采样处流体的性质。

参考文献:

- [1] 唐仁鲤,罗怀松,等. 西藏玉龙斑岩铜(钼)矿带地质[M]. 北京:地质出版社,1995.
- [2] 马宏文. 西藏玉龙斑岩铜矿带花岗岩类与成矿[M]. 北京:中国地质大学出版社,1990.
- [3] 马昌前. 硅酸盐熔体的粘度、密度及其计算方法[J]. 地质科技情报, 1987, 6(2): 142—150.
- [4] 林景仟. 岩浆岩成因导论[M]. 北京:地质出版社,1987.
- [5] 邱家骥,等. 岩石化学[M]. 北京:地质出版社,1991.
- [6] 马宏文. 天然硅酸盐熔体中水的溶解度与结构种(Species)计算[J]. 矿物岩石, 1985, 5(3): 60—69.
- [7] 马昌前,等. 花岗岩类岩浆动力学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1994.
- [8] 朱永峰,等. 硅酸盐熔体结构学[M]. 北京:地质出版社,1996.
- [9] 赵海玲. 岩浆物理性质和流体动力学[M]. 北京:地震出版社,1995.
- [10] NICHOLIS J. A simple thermodynamic model for estimating the solubility of H₂O in magmas [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1980, 74(2): 211—220.
- [11] 朱永峰. 长英质岩浆中不混溶流体的运移机制[J]. 地学前缘, 1994, 1(3/4): 119—126.

The nature and evolution of magmatic melts in mineralization: An example from the Yulong porphyry copper (molybdenum) deposit, Xizang

HUANG Peng¹, GU Xue-xiang², TANG Ju-xing², WANG Li-quan¹

(1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China; 2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: The Yulong porphyry copper (molybdenum) deposit in Xizang is the largest one in China and even in Asia. As a representative supergiant porphyry copper deposit comprising varying mineralization types, the nature of magmatic melts may play the most important part in the mineralization of the Yulong copper deposit. The study of physical and chemical properties and evolution of the magmatic melts was made on the basis of the calculated data on the density and viscosity of the magmatic melts to explain the formation of the Yulong copper deposit. Abundant ore-forming elements and volatile components (mineralizers) in the magmas from which the Yulong copper deposit may serve as the principal sources of the ore-forming matter in the deposit. The viscosity (56.43 Pa·s) and density (2.09g/cm³) of the magmatic melts suggest a kind of low viscosity and high density of magmas. The physical and chemical properties of the magmas facilitate the enrichment of ore-forming matter and the generation of abundant mineralizing fluids.

Key words: evolution of magmatic melts; viscosity; density; Yulong porphyry copper (molybdenum) deposit; Xizang