

文章编号:0258-7106(2003)03-0301-08

金川铜镍硫化物矿床深熔-就地成矿作用过程研究^{*}

刘民武 赫 英

(西北大学大陆动力学教育部重点实验室, 西北大学地质系, 陕西 西安 710069)

摘 要 文章通过研究矿石冶炼过程中矿物种类、含量、物理化学性质、结晶形态、嵌布特征、颗粒大小和生成环境以及矿物在高温条件下的物理化学反应等,并使之与铜镍硫化物矿床特征对比,认为金川铜镍硫化物矿床深熔-就地成矿作用过程为从深部到侵位的持续熔离。岩浆上侵过程中由于高熔点富镁橄榄石及铬铁矿陆续在岩浆房侧边析出固结,使得岩浆房逐渐变小,硫化物不断富集,最终使得小岩体容大矿。

关键词 地质学 熔离 硅酸盐熔体 铜镍硫化物 冶炼 成矿作用 金川

中图分类号:P611;P617.9

文献标识码:A

迄今为止,人们普遍认为位于镁铁-超镁铁岩底部的铜镍硫化物矿石是硅酸盐侵入前、侵入期间或侵入后熔离硫化物液相结晶的结果(Craig,1979)。硅酸盐与硫化物熔体间的不混溶性质首先是通过观察矿石的冶炼过程而发现的,Vogt 1894 年正式提出了某些天然矿石的不混溶成因机制(李文渊,1996),随后又被许多人论及(Skinner et al.,1969;Naldrett,1989;汤中立等,1987;1995),但都缺乏实验证据。在金川铜镍硫化物矿石的冶炼过程中,冰镍(富镍硫化物)的生成本身就是硅酸盐熔体与铜镍硫化物熔离发展演化的后期阶段,其熔离规模(炉膛容积约 400 m³)^①及复杂程度更接近自然界中铜镍硫化物矿床的熔离,两者的熔离特征既有相似之处,又有差异。本文通过研究矿石冶炼过程中矿物种类、含量、物理化学性质、结晶形态、嵌布特征、颗粒大小和生成环境以及矿物在高温条件下的物理化学反应等,并将其与铜镍硫化物矿床特征对比,对基性-超基性岩浆与硫化物的不混溶作用过程及其形成条件得出了一些认识。

1 金川岩体地质特征

金川岩体位于阿拉善断块西南缘,南邻北祁连褶皱的河西走廊过渡带。侵入体的直接围岩为古老

变质岩系。岩体出露面积 1.34 km²,呈岩墙状,全长约 6 500 m,走向 NW,向 SW 倾斜,宽 20~530 m,总体西窄东宽,倾角变化大(30~80°),东段平缓,中、西段陡倾。金川岩体主要岩相组合见表 1。在金川岩体中,已探明 3 个有巨大工业储量的矿体,自西向东分别为 24 号、1 号和 2 号矿体。3 矿体互不相连(图 1A),产状各异。24 号和 1 号矿体在纵剖面上的共同特征是岩相呈对称分异(图 1B、1C)。2 号矿体赋存于岩体底部,岩相具垂直分带(图 1D、1E);东段各岩相呈似层状,自下而上为纯橄榄岩—二辉橄榄岩—斜长二辉橄榄岩—二辉橄榄岩;中、西段产状陡、延伸大。在图 1(B)中纯橄榄岩位于中部,其两侧依次由二辉橄榄岩过渡到边部的橄榄辉石岩。1 号矿体 14 线剖面(图 1C)的上部虽以二辉橄榄岩为主,但深部仍以纯橄榄岩占优势,纯橄榄岩两侧也过渡为二辉橄榄岩,岩体边缘亦偶见橄榄辉石岩。块状硫化物矿脉主要见于 2 号矿体中及其周边,呈不规则脉状,成群出现,膨缩变化大,长几米至 200~300 m,厚几厘米至 20 余米。

2 冶炼工艺简介^②

电炉熔炼的目的是借助造渣达到除铁、脱硫,进一步富集镍和铜及贵金属。电炉结构如图 2 所示,

^{*} 本文得到国家重点基础研究发展规划项目“大规模成矿作用与大型矿集区预测”(编号:G1999043211)和国土资源大调查项目“中国超大型铜镍铂岩浆硫化物矿床预测研究”(编号:200110200058)的资助

第一作者简介 刘民武,1965 生,男,高级工程师,主要从事地球化学研究。

收稿日期 2002-09-02;改回日期 2003-02-25。李 岩编辑。

① 金川钴镍研究所,1987. 金川镍矿工艺矿物与工艺关系。

表 1 金川岩体主要岩相组合(据甘肃地矿局第六地质队,1984)

Table 1 Rock types of Jinchuan intrusion						
成岩相	物质相	φ_B / %	橄榄石粒度 / mm	$\varphi_{\text{辉石}}$ / %	$\varphi_{\text{斜长石}}$ / %	
中细粒	含二辉橄榄岩	18.2	0.25 ~ 5	70 ~ 95	5 ~ 30	
	二辉橄榄岩	6.3		70 ~ 30	30 ~ 70	
	橄榄二辉岩	0.8		30 ~ 10	70 ~ 90	
中粗粒	含二辉橄榄岩	4.2	0.5 ~ 6	70 ~ 95	5 ~ 30	
	斜长含二辉橄榄岩	0.7		70 ~ 95	5 ~ 30	5 ~ 15
	二辉橄榄岩	45		70 ~ 30	30 ~ 70	
	斜长二辉橄榄岩	9.2		70 ~ 30	30 ~ 70	5 ~ 15
	橄榄二辉岩	7.5		30 ~ 10	70 ~ 90	
中粒	二辉岩	1	0.5 ~ 5.2	0 ~ 10	> 90	
	纯橄榄岩	5.6		75 ~ 80		

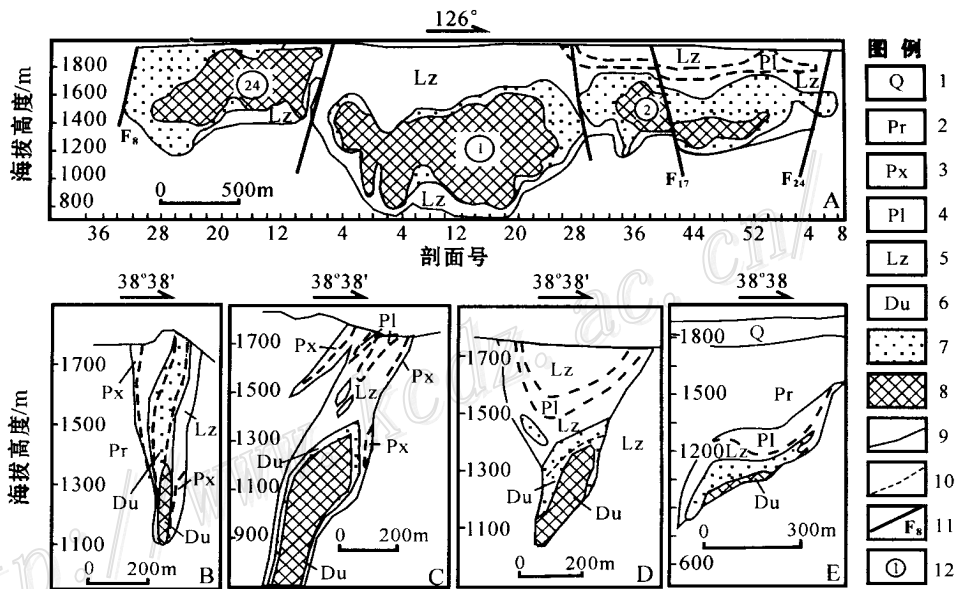


图 1 金川岩体纵剖面示意图(据解广轰等,1998)

A. 金川岩体纵剖面示意图;B. 24 号矿体 24 线纵剖面图;C. 1 号矿体 14 线纵剖面图;D. 2 号矿体 34 线纵剖面图;E. 2 号矿体 56 线纵剖面图。1—第四系;2—变质岩系;3—橄榄辉石岩;4—斜长二辉橄榄岩;5—二辉橄榄岩;6—纯橄榄岩;7—浸染状矿石;
8—海绵陨铁状矿石;9—地质界线;10—岩相界线;11—断层及编号;12—矿体编号

Fig.1 Longitudinal sections of Jinchuan intrusion(from Xie et al., 1998)

A. Longitudinal profile of Jinchuan rock body; B. Longitudinal profile along Line 24 in No. 24 orebody; C. Longitudinal profile along Line 14 in No. 1 orebody; D. Longitudinal profile along Line 34 in No. 2 orebody; E. Longitudinal profile along Line 56 in No. 2 orebody

炉内有 6 根呈直线排列的电极,炉膛尺寸为 21.5 m × 5.5 m × 4.0 m,总功率为 16 500 kVA。

将焙烧过的镍精矿(其成分 w_B 为:S 15.79%, Ni 5.72%, Cu 2.77%, Fe 30.59%, CaO 1.95%, MgO 12.94%, SiO₂ 16.80%)及适量石英、石灰石和焦粉熔剂,配比混合之后加入电炉。在电极周围形成料堆,电极输入电能使炉温升高到 1 350 ℃左右,炉内压力为一个大气压,料堆熔融后产生硅酸盐与

硫化物两个不混溶相,并发生重力分异作用。由于硅酸盐熔体密度为 $(3.1 \pm 0.1) \text{ g/cm}^3$,熔融硫化物密度为 $(4.15 \pm 0.05) \text{ g/cm}^3$,故密度较大的硫化物熔滴下沉,同时聚集生长并捕收贵金属及其他元素,在炉底部形成冰镍层,上部则形成硅酸盐相,硅酸盐相内无分层现象。本次实验主要观察炉内硅酸盐熔体与硫化物两个不混溶相因断电尚未彻底熔离时固结矿物的分布状况。

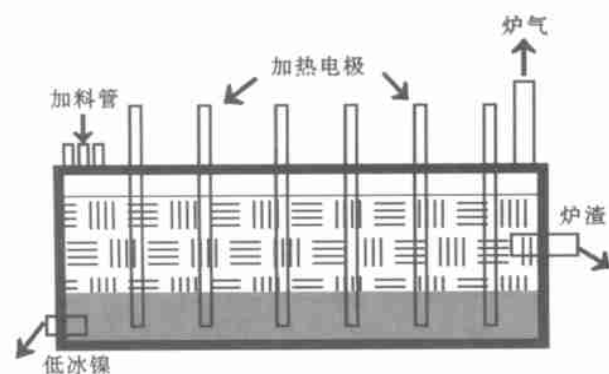


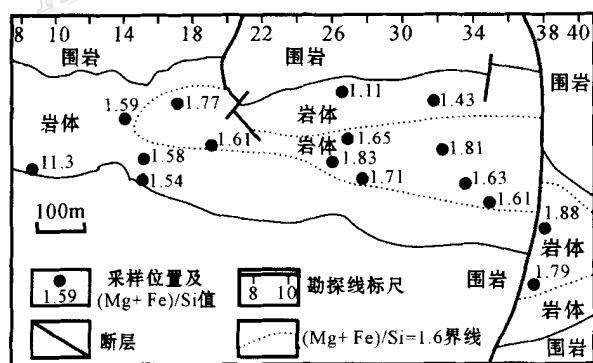
图 2 熔炼电炉示意图

Fig. 2 Sketch of an electric smelting furnace

3 硅酸盐熔体特征对比

3.1 矿物组合对比

金川岩体中细粒岩相内基性程度较高的岩相分布在中心部位,向边部基性程度依次降低。表现在矿物含量的变化上为中心和底部橄榄石含量高,向边部和上部趋于减小。各相邻岩石类型之间均呈渐变过渡关系,中粗粒岩相分布规律类似于中细粒岩相。由中粗粒岩相 $(\text{Mg} + \text{Fe})/\text{Si}$ 原子比值变化图(图 3)可以看出,中心部位数值一般较大,向边部变小,这实际上也说明了橄榄石的分布特征。在岩浆运移上升过程中,岩浆中早期形成的晶体,因流体力学作用,远离通道壁部向通道中心高速带集中。因此,在这些岩体边缘富集晚期析出的矿物,而在中部

图 3 金川岩体矿区 II-8 至 II-40 勘探线岩体 $(\text{Mg} + \text{Fe})/\text{Si}$ 原子比值变化(据杨合群, 1988)Fig. 3 $(\text{Mg} + \text{Fe})/\text{Si}$ mass number ratio of the Jinchuan deposit (from Exploration Line II-8 to II-40)

则大量集中早期结晶的矿物。说明金川岩浆侵位是由底部和中心向顶部和边部流动的,而且侵位前岩浆已有偏析现象。

冶炼熔池中熔体突然断电冰结后,因热胀冷缩使表面呈凹陷形,中心低,两侧高。从矿物成分上观察,熔体上部以辉石为主,逐渐向下变化为以橄榄石为主,而后变为纯橄榄石层(图 4,表 2)。此矿物分布特征与金川成矿岩体相似,即自上而下基性程度增加。

3.2 矿物成分特征对比

在冶炼熔炉中,低冰镍形成时炉内化学成分上的变化为铁、硫、镍含量从上到下增加, SiO_2 、 CaO 减少, MgO 变化不显著。橄榄石成分受熔体成分控制,不同部位也有差异。炉子的下部,冰镍面附近的橄榄石含铁较高,这与金川岩体中橄榄石成分变化规律相同(杨合群, 1988)。橄榄石为以 Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4 为端员的完全固溶体,其成分中每增加 10% 的镁橄榄石,结晶温度就可能提高 100℃,这是因为橄榄石结晶较早,在温度较恒定时早结晶的富含镁,晚结晶的富含铁。斜方辉石则以 MgSiO_3 - FeSiO_3 为端员形成一系列的固溶体。在高温熔体中按照硅饱

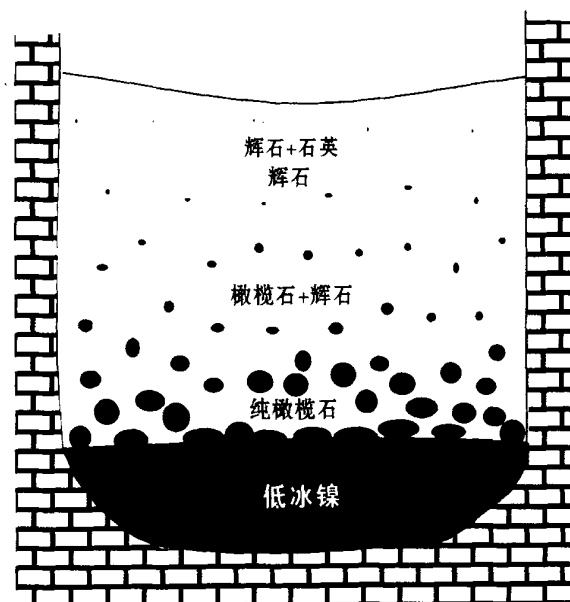


图 4 冶炼厂电炉断电后熔池中低冰镍的形成及矿物分层现象示意图(据金川钴镍研究所, 1987)●

Fig. 4 Mineral layering in furnace after unexpected power off

表 2 熔池垂直带上熔体矿物变化特征[●]

Table 2 Characteristics of minerals along the vertical section in furnace

取样高度 / mm	w(B) / %									
	辉石		橄榄石		玻璃质		硫化物		磁铁矿	
	中部	边部	中部	边部	中部	边部	中部	边部	中部	边部
1250 ~ 1110	91.30		<0.10	<0.10	6.96	9.41	0.72	5.75	0.62	0.05
1250 ~ 1110	91.99	93.24	<0.10	<0.10	6.96	5.63	0.89	0.88	1.06	0.30
950		83.91		<0.10		11.89		3.81		0.12
900	87.29	52.22	<0.10	34.83	9.66	5.95	2.02		0.08	0.07
850	70.08		20.59		5.55		3.20		0.39	
810	88.73		2.32		7.47		0.75		0.73	
725		11.64		88.81		1.25		1.54		0.56
600	19.08		66.49		2.54		2.71		2.89	
550	9.97		80.97		2.27		5.30		1.33	

表 3 熔池垂直带上熔体成分变化特点[●]

Table 3 Composition of melts along the vertical section in furnace

取样高度 / mm	层厚度 / mm	位置	w(B) / %							
			Ni	S	Fe	SiO ₂	MgO	Ca	Cr	Fe ₃ O ₄
1250 ~ 899	100 ~ 269	中部	0.22	0.40	16.50	48.00	17.90	8.48	0.16	0.30
		边部	1.19		18.32	49.80	23.18	6.54	0.15	0.13
850 ~ 809	30 ~ 149	中部	0.33	1.08	22.37	42.30	17.59	6.60	0.22	0.20
		边部	0.79		20.40	39.60	22.07	3.20	0.17	0.14
600 ~ 550	260 ~ 350	中部	1.97	2.49	27.70	32.50	20.30	3.28	0.47	0.40
		边部	1.94		26.60	30.40	21.90	2.22	0.25	1.14

和程度而形成一系列的镁铁硅酸盐,当硅饱和时形成辉石,亚饱和时形成橄榄石。由矿物种类及化学成分的分层现象可看出硅酸盐熔体熔离硫化物液相时并非处在相平衡条件下。尽管熔体为单一液相,但是成分的偏析现象是非常明显的,由表 3 可知,各种成分在垂向上的变化是不同的。

4 硫化物特征对比

金川矿体细粒岩相中硫化物比较普遍,但富集程度不高,所形成的矿体以贫矿为主,主要矿石类型为浸染状。从矿体到周围岩石,硫化物含量逐渐减少。中粒岩相纯橄岩中总是含有 8%~30%的金属硫化物,金属硫化物充填在橄榄石周围形成海绵陨铁状构造。

在电炉熔池中,硫化物的变化与金川岩体相似,由上到下逐渐增多,颗粒由小变大(图 4)。在

1200℃以上的温度情况下,Fe、Ni、Cu 的硫化物只能以 FeS (Fe,Ni)_{1-x}S 及 Cu₂S 形式出现,其余硫以蒸汽形式存在。低冰镍熔体在电炉中也是单一液相,尽管电炉内低冰镍层中含有相当数量的合金,但未发现低冰镍层内因密度不同而发生的分层现象。

实验证明,低冰镍熔体中贵金属高度富集于铜铁镍合金相中,结晶温度为 800℃,在早期析出的辉铜矿(熔点 960℃)中贵金属非常有限(表 4)。这就是为什么金川铜镍矿床中的贵金属总体上富集于

表 4 冰镍中贵金属的分布[●]

Table 4 PGE distribution in nickel matte

赋存矿物	w _B / %						
	Pt	Pd	Os	Ir	Ru	Rh	Au
六方硫镍矿	0.17	1.17	3.07	1.02	5.03	1.23	12.99
辉铜矿	0.08	0.33	9.66	1.34	0.42	0.48	2.18
铜铁镍合金	99.75	98.36	87.27	97.64	94.55	98.29	84.83

● 金川钴镍研究所,1987. 金川镍矿工艺矿物与工艺关系.

富铜的矿石中,但在有些 $w_{\text{Cu}} > w_{\text{Ni}}$ 的矿石中,贵金属含量并不随 Cu 含量的升高而增加。

5 炉结的形成与小岩体成矿

根据实验观察,熔体中 CaO 在熔池上部含量很高,而在下部变低,说明在熔体上部已形成低熔点的辉石,在底部则变成贫硅、钙,只能形成高熔点的橄榄石层(表3)。说明开放体系中岩浆结晶次序并不遵循罗森布什法则(武汉地质学院岩石教研室,1980)。

熔池熔炼过程中会出现炉结现象,炉结是液相硅酸盐熔渣中的固液相混合物在熔池周围死角处或炉壁上的结瘤。熔池两侧成分不均匀(这种不均匀是由于距电极远,受热不均匀,物料之间反应不完善所致),有的部位缺硅,而富磁铁矿及铬。低熔点化合物遵循浓度规律迅速移动,所形成的硫化物液滴下沉到底部,而在硫化物液滴上部的两侧所形成的高熔点化合物如磁铁矿及铬铁矿或方镁石-方铁矿系列的结晶相没有或很少有机会与硫化物液滴接触,边部的还原性较弱,这一部分物质可能粘在熔池壁上而形成以方镁石、铬铁矿及橄榄石为主要成分的炉结,炉结发生在熔池内的硫化物液相与硅酸盐熔体交接带以上,往往发生在死角上。炉结会减少炉膛容积,影响温度传导及成分的平衡,还可能发生堵炉。

根据以上现象可解释金川岩体的超高含硫量:岩浆房运移过程中高熔点硅酸盐矿物固结在岩浆通道上,使侵位岩浆房变小,硫化物富集。由此可推测小岩体成大矿的机制为:深部岩浆房上侵过程中由于温度及压力降低而发生硅酸盐与硫化物的熔离和高熔点富镁橄榄石及铬铁矿的结晶,致使高熔点富镁橄榄石及铬铁矿不断析出并且在岩浆房侧边固结而停止上侵,岩浆房中部岩浆继续上侵,直至岩浆房顶部温度下降到 900℃ 左右而固结形成壳层侵位。岩浆上侵过程中由于高熔点富镁橄榄石及铬铁矿在岩浆房侧边陆续析出固结,岩浆房逐渐变小,熔离出的硫化物不断富集,最终使得小岩体容大矿(图5)。

金川岩体中发现有橄榄石包含橄榄石现象,这种关系可简称为橄包橄结构。据镜下观察,被包含客体橄榄石与主体橄榄石具有统一的裂纹体系。客体橄榄石外形浑圆,其截面为圆形或椭圆形,边界光滑,粒度极小。由包含关系可确定客体橄榄石的形成

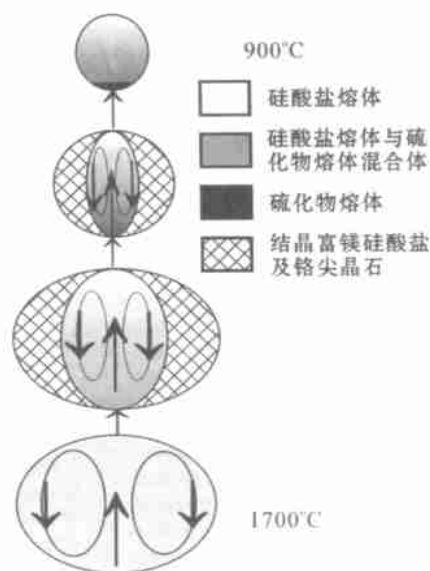


图5 金川铜镍矿床成因模式示意图

Fig.5 Genetic model of the Jinchuan nickel-copper deposit

早于主体橄榄石。橄包橄结构的主体橄榄石 Fo 值(81.89)高于客体橄榄石的 Fo 值(80.68)(杨合群,1988),这种晚形成的橄榄石比早形成的橄榄石富镁的特征用简单的结晶规律是无法解释的,笔者结合对熔池冶炼中观察到的炉结现象综合分析认为,岩浆上侵过程中由于存在温度梯度,岩浆房内局部产生了环流(图5):岩浆房边部温度较低,易析出高熔点富镁橄榄石及铬尖晶石晶体并下沉,当部分晶体随岩浆运动到中心部位时,由于温度较高,故出现熔圆现象,晶体形态为浑圆或滴状,浑圆晶体随岩浆运动,其表面继续结晶富镁橄榄石,形成现在的橄包橄结构。另外,橄榄石还可包含熔圆铬尖晶石,其形成应属同一演化机制。

6 硅酸盐熔体与硫化物熔离的控制条件

冶金中硅酸盐熔体与硫化物发生熔离作用的最佳条件为硅酸盐熔体具低熔点、低粘度、低渣量、低比重、高流动性及高的硫逸度,它由熔体化学成分控制。

6.1 硅酸度

硅酸度是指硅酸盐熔体中 SiO_2 的氧分子数与所有碱性氧化物中的氧分子数和之比(蔡树型等,1984)。表5为1200℃时不同硅酸度的熔离硫化物特征。熔炼前6只坩埚内分别加入不同硅酸度的造

表 5 不同硅酸度的熔离钨扣(硫化物)特征

Table 5 Smelting sulfides at different silicate acidities

硅酸度	$m_{\text{硫扣}}/\text{g}$	$w_{\text{B}}/\%$			m_{B}/g			原子比		
		S	Ni	Fe	S	Ni	Fe	Ni/S	Ni/Fe	(Ni+Fe)/S
3.00	14.72	21.58	55.69	22.73	3.18	8.20	3.35	1.41	2.33	2.01
2.50	13.90	24.27	52.40	23.33	3.37	7.28	3.24	1.18	2.14	1.73
2.00	13.98	23.51	56.47	20.04	3.29	7.89	2.80	1.31	2.68	1.80
1.50	12.11	20.03	63.27	11.70	2.43	7.66	1.42	1.73	5.15	2.06
1.00	10.86	21.19	73.33	5.49	2.30	7.96	0.60	1.89	12.72	2.04
0.50	9.86	21.09	75.47	3.45	2.08	7.44	0.34	1.95	20.84	2.05

渣组分及相同量的 S、Ni、Fe 及还原剂,同时保温 40 min 后冷却,敲碎坩埚,取出钨扣(硫化物相),称量,用西安地质矿产研究所测试中心 JCXA-733 型电子探针仪测定成分。本次实验证明硅酸度与硫化物的 Ni/Fe(原子比)负相关;与熔离出的金属镍量及(Ni+Fe)/S(原子比)不相关;要使硅酸盐熔体与硫化物彻底熔离,一般必须控制硅酸度值在 0.5~2.0。基性-超基性岩浆硅酸度值在 0.5~1.5 之间,恰好符合这一条件。

6.2 橄榄石粒度

晶体大小及晶核数目与晶体生长的速度和结晶能力大小的关系,可用硅酸盐熔体的结晶性质实验结果(图 6)来确定。金川岩体侵入过程中冷却速度不是恒定的,岩浆房顶部冷却较快,可能先形成辉石及中细粒橄榄石,形成“壳层”,其中硫化物比较普遍,但富集程度不高,所形成的矿体以贫矿为主。固化的顶部岩浆会阻止挥发分的继续上移,由于热胀冷缩,这部分结晶体与下部尚未结晶的深部岩浆之间会出现裂隙。因液相转变为固相有放热反应,所

以深部岩浆冷却较慢,橄榄石结晶颗粒变粗。因此,同期岩浆结晶也可能形成不同的粒度相。

再结晶是指晶体在固体状态条件下再结晶长大的现象。这种现象在金属及自然界岩石中最常见。据 Byrne(1965)的资料,再结晶温度在矿物熔点(绝对温度)的 0.53 处。按此计算,橄榄石的再结晶温度应当在 860℃(Fo)~500℃(Fa),这个温度范围与硫化物的结晶温度范围重合,硫化物结晶产生的热效应使再结晶时间更加延长,晶体颗粒更大。所以在富含硫化物熔体的岩浆中橄榄石颗粒应较粗。

6.3 贵金属富集条件

温度对贵金属的富集至关重要,贵金属钨试金实验证明,当硅酸盐熔体与硫化物呈液态不混溶时,硫化物不能与硅酸盐充分接触,因此,不能很好地富集贵金属;但当绝大部分硅酸盐熔体为固体时,硫化物也不能富集包裹在硅酸盐中的贵金属;只有当硅酸盐熔体为晶粥状态时,其间因重力分异而流动的硫化物才最易富集贵金属(蔡树型等,1984)。金川硫化物矿床中的贵金属主要富集于海绵陨铁结构的矿石中(师占义等,1973),说明金川含铜镍硫化物岩浆房中当硅酸盐熔体为液态时,就有液态硫化物在岩浆房底部,因而其中的贵金属含量较低;而结晶分异的贫矿石因形成时岩浆已基本固化,所以贵金属含量也较低。因此,金川硫化物矿床中的贵金属主要富集于海绵陨铁结构的矿石中。

7 结 论

通过观察矿石的冶炼过程和进行熔离条件实验,并与金川铜镍硫化物矿床特征对比,得到如下结论:

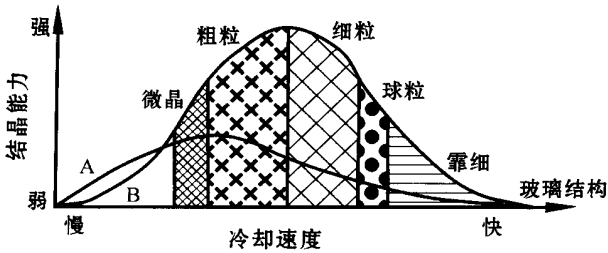


图 6 硅酸盐熔体的结晶能力与冷却速度的关系
(据金川钴镍研究所,1987) ①

Fig. 6 Relationship between crystal and speed of cooling
A—晶体生长速度曲线; B—晶核生成速度曲线
A—Curve showing speed of crystal growing; B—Curve showing speed of crystal nucleus growing

① 金川钴镍研究所, 1987. 金川镍矿工艺矿物与工艺关系.

(1) 金川铜镍硫化物矿床具不同比例的星点矿、海绵陨铁矿及块状矿,矿体结构与低冰镍熔炼中途突然断电时炉内熔体冻结的结构相似。富橄榄石硅酸盐相主要聚集于岩浆房的内部和下部,富硫化物相趋向于岩浆房的底部,说明含矿岩浆与硫化物并未彻底熔离,而是正处于熔离过程的非平衡状态,熔离程度越高,富矿在整个矿体中所占比例越高。

(2) 根据实验对比推测,小岩体成矿作用为从深部到侵位部位的连续熔离过程。深部岩浆房上侵过程中由于温度及压力降低而发生硅酸盐与硫化物的熔离和高熔点富镁橄榄石及铬铁矿的结晶,整个上侵过程中由于高熔点富镁橄榄石及铬铁矿陆续析出固结,岩浆房逐渐缩小,熔离的硫化物浓度不断增加,最终使得小岩体成大矿。

(3) 实验观察表明,基性-超基性岩浆在有足量硫和足够高的温度条件下,均可发生硅酸盐熔体与硫化物的液态不混溶现象,硅酸盐与硅酸盐熔体、硫化物与硫化物之间并无液态不混溶现象。

(4) 硫化物矿床中的贵金属分带现象与硫化物重力分异时硅酸盐熔体的结晶程度密切相关,晶粥状态的硅酸盐是金属硫化物富集贵金属的最佳时机。

(5) 橄榄石晶体粒度受冷却速率控制,影响冷却速率的因素不仅包括岩浆的上侵速率和深度,大量硫化物的存在同样使橄榄石再结晶时间延长,橄榄石粒度增大。金川岩体中橄榄石的不同粒度相除了有不同期次侵入的可能外,同期岩浆顶部快速结晶收缩在岩体中产生的裂隙及大量挥发分产生的温度场使深部岩浆冷却速率延缓,从而形成不同的粒度相也是有可能的。

References

- Byrne J G. 1965. Recovery, recrystallization and grain growth[M]. New York: Mac Millan.
- Cai S X and Huang C. 1984. Noble metal analysis[M]. Beijing: Metallurgy Pub. House. 54 ~ 55(in Chinese).
- Craig J R. 1979. Geochemical aspects of the origins of ore deposits, review of research on modern problems in geochemistry[J]. Earth Sci., 16: 225 ~ 272.
- Li W Y. 1996. Minerogenetic series and geochemistry of Cu- Ni sulfide deposits in China[M]. Xi' an: Xi' an Map Pub. House. 199(in Chinese with English abstract).
- Naldrett A J. 1989. Magmatic sulfide deposit[M]. London: Oxford Univ. Press.
- No. 6 Geological Team of Gansu Geology and Mineral Bureau. 1984. Geology of Baijiazui Cu- Ni sulfide deposit[M]. Beijing: Geol. Pub. House(in Chinese).
- Shi Z Y and Guo B B. 1973. Study of PGE in Cu- Ni sulfide deposit, their existing and distributing state[M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- Skinner B J and Peck D L. 1969. An immiscible sulfide melt from Hawaii, magmatic ore deposits[J]. Econ. Geol., (Monograph, 4): 310 ~ 322.
- Tang Z L and Li W Y. Mineralization mechanic and geological comparison of Jinchuan copper-nickel(PGE) sulfide deposit[M]. Beijing: Geol. Pub. House(in Chinese).
- Tang Z L and Ren D J. 1987. Nickel sulfide deposit types of China[J]. Acta Geologica Sinica, 61(4): 350 ~ 360.
- Xie G H, Wang Y L, Fan C Y, et al. 1998. The forming of Jinchuan ultra- mafic intrusion and huge sulfide deposits[J]. Science in China (Series D), 28 (supp.): 31 ~ 36(in Chinese).
- Wuhan College of Geology. 1980. Magmatite petrology (Vol. 1)[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 23(in Chinese).
- Yang H Q. 1988. Genesis of Jinchuan Cu- Ni sulfide deposit[D](Master's dissertation). Tutor: Qi S J and Li X Z. Xi' an: Xi' an Geology College(in Chinese).

附中文参考文献

- 蔡树型, 黄超. 1984. 贵金属分析[M]. 北京: 冶金出版社. 54 ~ 55.
- 甘肃地矿局第六地质队. 1984. 白家嘴子硫化铜镍矿床地质[M]. 北京: 地质出版社.
- 解广轰, 汪云亮, 范彩云, 等. 1998. 金川超镁铁岩侵入体及超大型硫化物矿床的成岩成矿机制[J]. 中国科学(D 辑), 28(增刊): 31 ~ 36.
- 李文渊. 1996. 中国铜镍硫化物矿床成矿系列与地球化学[M]. 西安: 西安地图出版社. 199.
- 师占义, 郭炳北. 1973. 某硫化铜镍矿床铂族矿物及其元素赋存状态和分布规律的研究[M]. 北京: 地质出版社.
- 汤中立, 李文渊. 1995. 金川铜镍硫化物(含铂) 矿床成矿模式及地质对比[M]. 北京: 地质出版社.
- 汤中立, 任端进. 1987. 中国硫化镍矿床类型[J]. 地质学报, 61(4): 350 ~ 360.
- 武汉地质学院岩石教研室. 1980. 岩浆岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社. 23.
- 杨合群. 1988. 金川硫化铜镍矿床成因[D](硕士论文). 导师: 祁思敬, 李先梓. 西安: 西安地质学院.

A Study of Deep Segregation and Ore-forming Process of Jinchuan Nickel-Copper Sulfide Deposit

Liu Minwu and He Ying

(Key Laboratory of Continental Dynamics , Department of Geology , Northwest University , Xi' an 710069 , Shaanxi , China)

Abstract

The structures of the deep segregation orebody in the Jinchuan nickel-copper sulfide deposit are similar to the congealed melt in nickel matte smelting furnace after unexpected power off . From the top to the bottom , Si content decreases in silicate facies , olivine is accumulated in the lower part , and sulfides increase in order of sparsely spotted → sparsely disseminated → densely disseminated → sideronitic → massive forms . A comparison of an orebody with the smelting melt reveals that the segregation of Jinchuan sulfides-containing magma is not complete . All this suggests that the Jinchuan nickel-copper sulfide deposit was formed by a segregation process from depth to emplacement . In the process , the magma chamber became smaller and smaller due to the crystallization of Mg rich olivine and chromite on the side of the chamber , and thereby sulfides were enriched in the middle part , forming a giant deposit in a small body .

Key words : geology , segregation , silicate melt , nickel (copper) sulfide , smelt , metallogenesis , Jinchuan .

<http://www.kcdz.ac.cn/>