

文章编号:1000-4734(2007)03-0342-09

云南金宝山含铂钯超镁铁质侵入体中 铬铁矿的成因研究

马言胜^{1,2}, 陶琰¹, 钟宏¹, 王兴阵³(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 安徽理工大学, 安徽 淮南 232001)

摘要: 位于扬子地台西缘的金宝山岩体赋存我国最大的独立铂族元素矿床, 岩体为似层状产出的小型超镁铁岩, 在时间和空间上与晚二叠纪(260 Ma)峨眉山大火成岩省相关。该岩体由单辉橄榄岩、辉橄岩及橄辉岩、辉石岩异离体组成。铬铁矿以副矿物形式出现, 从形态上可以分为三类: 包嵌于橄榄石中的自形铬铁矿、以自形或半自形体存在于辉石中铬铁矿以及环绕结构铬铁矿。其中环绕结构铬铁矿外壁浑圆, 内为棱角状, 其中心为橄榄石、辉石。本文在薄片观察的基础上, 结合电子探针研究, 认为包嵌于橄榄石中的自形铬铁矿是在岩浆早期深部岩浆房中结晶形成的; 存在于辉石中的铬铁矿则是岩浆进一步结晶演化的结果, 主要为就地结晶的产物; 在岩体形成的过程中, 作为岩体赋存空间的堆晶相与后续岩浆持续反应, 使铬铁矿不断聚集和生长, 最终形成了环绕橄榄石晶体的形态。铬铁矿的生成模式进一步说明了金宝山侵入体为一岩浆通道, 并且经历深部结晶分异演化。

关键词: 铬铁矿; 超镁铁岩; 橄榄石; 结晶作用; 金宝山; 云南**中图分类号:** P571; P578.4; P618.53 **文献标识码:** A**作者简介:** 马言胜, 男, 1979年生, 在读博士生, 地球化学专业. E-mail: maysh04@mails.gucas.ac.cn

峨眉山大火成岩省的主要产物由大陆溢流玄武岩和相关的镁铁-超镁铁侵入体组成。许多镁铁-超镁铁岩体赋存岩浆 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床, 金宝山超镁铁岩体就是其中的一个典型例子, 它赋存有我国最大的独立铂族元素矿床—金宝山铂钯矿。该矿床富 PGE 的矿石中伴有少量的硫化物。铂族元素成矿以铂钯为特征($Pd/Ir > 10$), 硫化物 Ni/Cu 比值低(0.5~5, 大多在 2 以下), 岩石稀土元素含量较高, 配分形式为轻稀土富集型, 体现镁铁质岩浆衍生产品的岩石地球化学特点^[1,2]。金宝山超镁铁岩侵入体提供了研究岩浆演化以及铂族元素富集的一个窗口^[3]。

铬铁矿通常是镁铁-超镁铁岩中最早的结晶相之一, 是研究岩石学和地球动力学的一个有效的切入点^[4-7]。对铬铁矿的研究有助于理解超镁铁质岩中岩浆硫化物矿床的起源, 如在研究加拿大肖德贝里的 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床^[8], 俄罗斯的诺里尔斯克铜镍硫化物矿床^[9]以及我国金

川的铜镍硫化物矿床^[10]等世界著名的岩浆硫化物矿床的起源时, 铬铁矿就起到了很好的指示作用。地幔橄榄岩中的铬铁矿还可以被用来识别蛇绿岩的构造环境^[5]。金宝山超镁铁质侵入体中的铬铁矿大体分为三类: 以包体形式存在于橄榄石中的自形铬铁矿, 以自形或半自形包体存在于辉石中的铬铁矿和环绕结构铬铁矿。其中环绕结构铬铁矿的直径从几毫米到几厘米不等^[3]。本文在薄片观察的基础上, 结合电子探针数据, 对金宝山含铂钯硫化物超镁铁侵入体中的铬铁矿进行了分类, 研究了其矿物化学成分变化, 初步探讨了其形成原因。

1 岩体地质背景

金宝山侵入体位于扬子地台西缘南端云南省弥渡县, 是众多镁铁-超镁铁侵入体中的一个, 在时间和空间上与晚二叠纪峨眉山大陆溢流玄武岩相关。峨眉山大陆溢流玄武岩出露面积超过 50 km², 厚度从几百米到 5000 m 不等^[11]。由于印度板块跟欧亚板块的碰撞, 火山岩系列遭到强烈的变形, 上升和侵蚀, 导致许多侵入到前寒武纪基

收稿日期: 2007-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 40573020); 中国科学院重要方向项目(KZCX3-SW-125)

底中的镁铁-超镁铁侵入体暴露出地表。在扬子地台西缘产出的这些镁铁-超镁铁侵入体主要赋存两种类型的幔源岩浆矿床(图 1)。一类是在攀枝花地区的层状辉长岩侵入体中形成了世界超大型 Fe-Ti-V 氧化物矿床,著名的有红格、白马和攀

枝花。另一类是形成了 Cu-Ni-(PGE)矿床,如杨柳坪、力马河、朱布、金山、白马寨等,其中杨柳坪、力马河和朱布是沿着南北向的断裂带出露,金山和白马寨是沿着北西向的红河断裂产出,一些学者已经做了详细的工作^[3,11-17]。

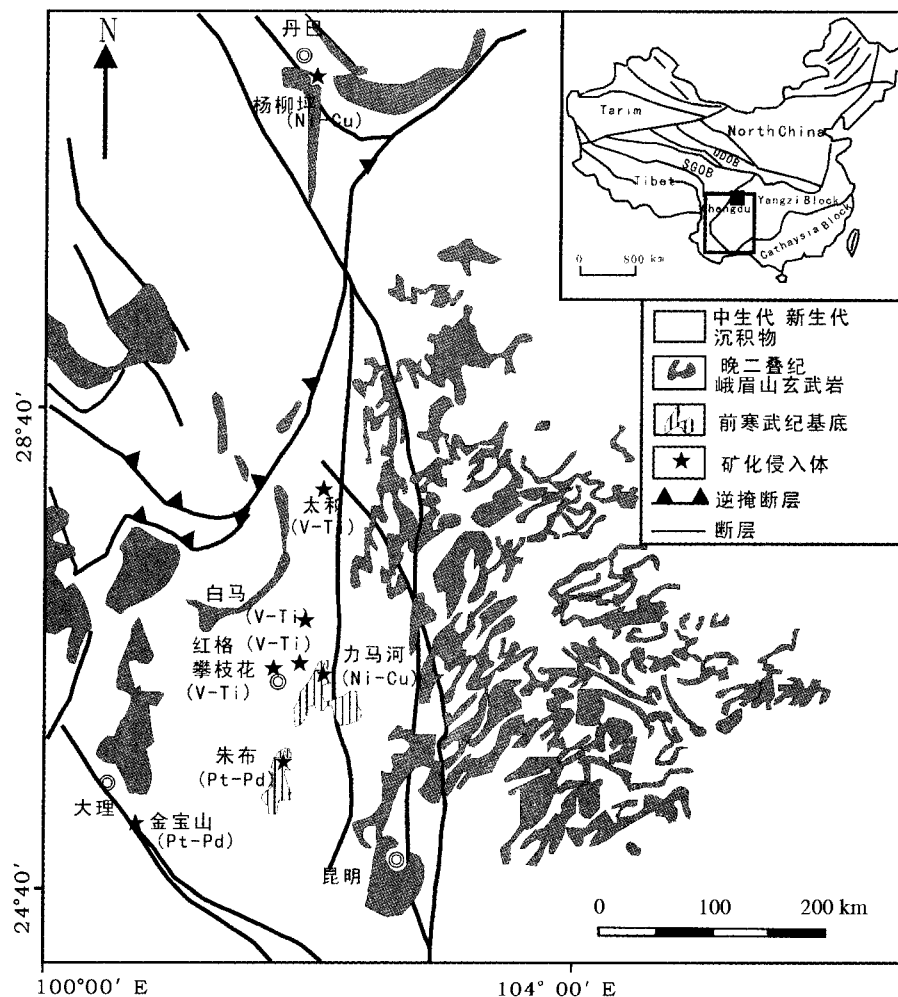


图 1 西南地区二叠纪峨眉山玄武岩及相关镁铁-超镁铁岩侵入体分布图(根据文献 [3]修改)

Fig. 1. Distributions of the Permian Emeishan continental flood basalts and associated mafic-ultramafic intrusions in SW China.

在金山地区的镁铁质岩体有 21 个,大小不一,多数规模较小,一般长 20~120 m,宽 2~6 m,厚 2~20 m。最大者长 2200 m,宽 1000 m,垂直厚度 30~60 m,最厚 178 m。它们具有成群出现的特点,在走向上呈豆荚状^[18]。金山侵入体是其中最大的超镁铁岩床,长 4760 m,宽 760~1240 m,厚 8~170 m。金山侵入体北西向倾斜,倾角为 10°~45°,赋存 Pt-Pd 硫化物矿体。矿化岩体呈似层状产出,侵入于泥盆系金山组地层中,空间展

布成两翼平缓的短轴背斜形态,礼社河(红河上游)将其分割为两部分,以北段发育较好(图 2)。在该侵入体中大约有 80 个以层状产出的 Pt-Pd 硫化物矿体。最大的矿体(121 号)产出一个侵入体的底部,约占金山侵入体总矿石储量的 43%,该矿体长度为 2125 m,宽度为 400~600 m,厚度为 4~16 m。矿石 Pt/Pd 比值为 0.4~0.9, Cu 含量为 0.03%~0.24%, Ni 含量为 0.07%~0.2%,平均为 0.17%^[18]。

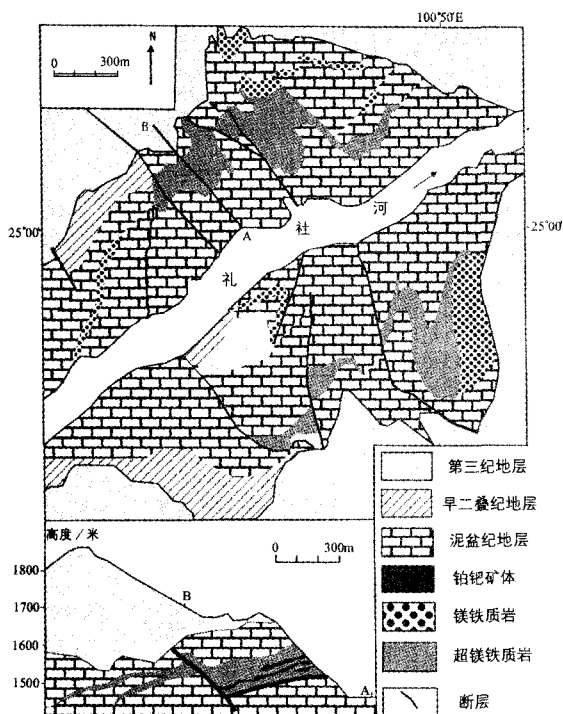


图2 金宝山地区的地质简图(根据文献[16]修改)

Fig. 2. Geological map of the Jinbaoshan area.

2 岩相学

2.1 金宝山侵入体岩相学特征

金宝山含铂钼超磁铁质岩体的岩石类型比较单一,主要为单辉橄榄岩,占岩体的92%以上,呈灰绿色或暗绿色,具变余不等粒自形至半自形粒状结构和包含结构等。岩石普遍遭受自变质作用,岩体的底部及边部可见一些小的辉橄岩、橄辉岩及辉石岩分离体。此外,在岩体边部接触带及局部地段见有片状蛇纹岩、碳酸盐化超镁铁岩、硅化碳酸盐化超镁铁岩、菱镁-白云滑石片岩、透闪石岩等超镁铁岩蚀变矿物,零星分布。各岩类间界限不清楚,呈渐变过渡关系。

该岩体中主要成岩矿物是橄榄石和辉石,次为角闪石、黑云母、斜长石。其中橄榄石呈自形-半自形粒状或浑圆溶蚀形态,颗粒大小为0.3~4 mm,大量的电子探针成分分析结果为 $Fo = 82.5 \sim 85.8$,成分变化不大,单个橄榄石内外成分变化很小,属于贵橄榄石^[1]。大多数橄榄石颗粒已经蛇纹石化。辉石呈它形不规则状,少数为半自形短柱状,粒径3~8 mm,常包含橄榄石(图3a, b和图3c)。辉石主要为普通辉石、透辉石及少量斜

方辉石。岩体的副矿物有铬铁矿、磁铁矿、钛铁矿及金属硫化物等。硫化物沿着硅酸盐颗粒的边界以填隙相或小液滴的形式聚集,并含有铂族元素矿物。硫化物主要有磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿和紫硫镍矿,铂族元素矿物主要有砷铂矿、铁铂矿、碲铂矿、硫铂矿、锡钨矿和自然铂^[16]。

2.2 金宝山侵入体中铬铁矿的矿物学特征

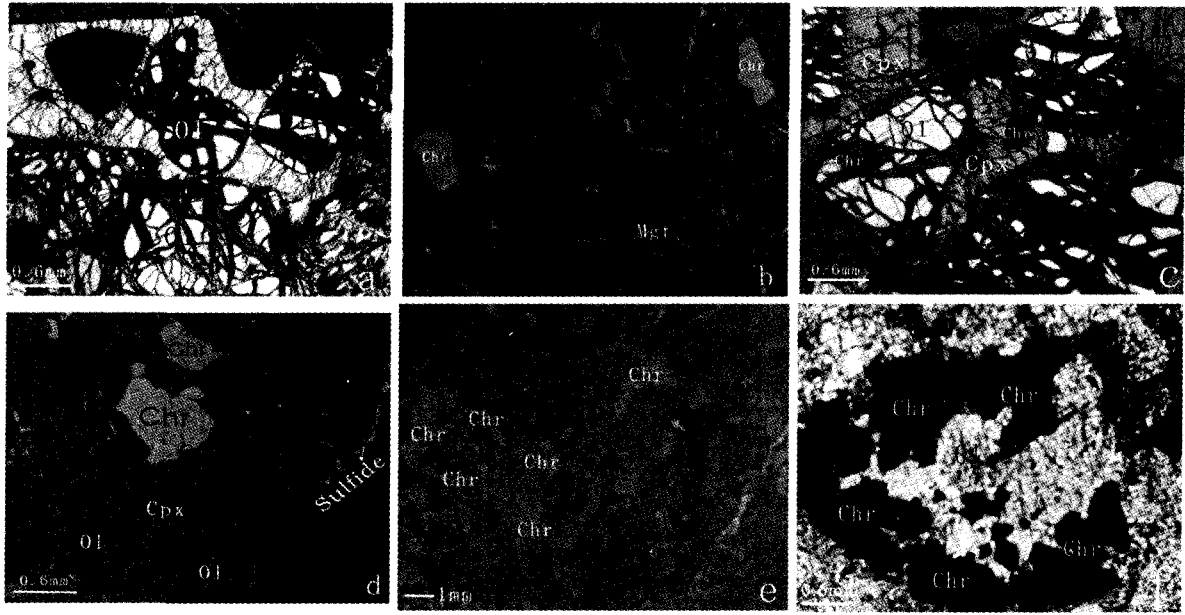
铬铁矿通常可以分为三类:包嵌于橄榄石中的自形铬铁矿(图3c),存在于辉石中的自形或半自形体铬铁矿(图3c)和环绕结构铬铁矿(图3e,图3f)。一些铬铁矿被磁铁矿部分取代,在颗粒的四周形成一个薄层的边缘。磁铁矿也沿着橄榄石和斜方辉石的裂隙以细小的矿脉的形式产出(图3b)。环绕结构铬铁矿外壁浑圆,内为棱角状,其中心为橄榄石、辉石(图3e,图3f)。

3 分析方法

测试样品采于横穿侵入体的水平坑道中,岩石类型为单辉橄榄岩,样品制成光薄片后首先在光学显微镜下进行了观察,根据镜下铬铁矿的粒径,形态及一些相关变化,区分出三种类型的铬铁矿,即以包体形式存在于橄榄石中的自形铬铁矿,存在于辉石中以自形或半自形包体存在的铬铁矿和环绕结构铬铁矿。铬铁矿的分析在美国印第安纳大学完成,电子探针分析使用的是CAMECA SX50型仪器。对矿物中主元素分析时电子束斑直径为1 μm ,加速电压为15 kV,电子束流为20 nA,计数时间为20秒/峰;进行Ni和Ti的分析时,电流为100 nA,最大计数时间是50 s,它们的检测限分别为 120×10^{-6} 和 70×10^{-6} 。原始数据处理用的是CAMECA本身带有的PAP程序。

4 分析结果

铬铁矿电子探针分析结果列于表1。可以看到,辉石中铬铁矿的成分: $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 为21.80%~36.03%, $w(\text{MgO})$ 为1.01%~10.51%, $w(\text{FeO}t)$ 为33.41%~53.92%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为10.23%~17.61%;橄榄石中包含的铬铁矿成分: $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 为36.07%~42.64%, $w(\text{MgO})$ 8.10%~12.96%, $w(\text{FeO}t)$ 为31.12%~34.81%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为12.72%~15.36%;橄榄石中铬铁矿与辉石中铬铁矿相比具有更高的 Cr_2O_3 含量,更低的FeOt含量,环绕结构铬铁矿具有比较窄的MgO和 Al_2O_3



Ol - 橄榄石, Cpx - 单斜辉石, Chr - 铬铁矿, Sulfide - 硫化物, Mgt - 磁铁矿

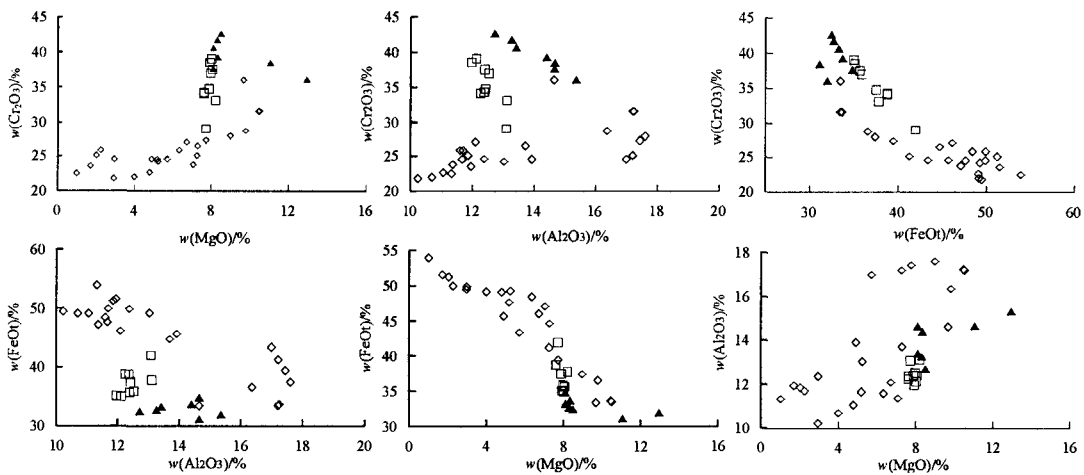
a. 辉石中包裹的自形晶橄榄石 b. 一些铬铁矿被磁铁矿部分取代, 在颗粒的四周形成一个薄层的边缘, 磁铁矿也沿着橄榄石和斜辉石的裂隙以细小的矿脉的形式产出 c. 辉石在橄榄石粒间呈它形网状分布, 铬铁矿在橄榄石、堆积斜辉石里面以包体的形式产出 d. 辉石包裹橄榄石, 在堆积斜辉石里面赋存自形铬铁矿 e. 环绕结构铬铁矿的照片(引自文献[18]) f. 环绕结构铬铁矿的透射光电子显微镜图像

图 3 金宝山超镁铁质侵入岩体中辉橄岩的实物照片及显微照片

Fig. 3. Photographs and photomicrographs of wehrlites from the Jinbaoshan ultramafic intrusion.

含量变化范围, 分别是 7.61% ~ 8.22% 和 11.97% ~ 13.12%; Cr_2O_3 的变化范围相对较大, 为 29.01% ~ 39.05%, 另外 FeOt 呈现中等程度变化, 为 34.95% ~ 41.97%。图 4 可以看出, 环绕结构铬铁矿在 $Cr_2O_3 - Al_2O_3$ 和 $Cr_2O_3 - FeOt$ 之间显示

出负相关的趋势, 辉石中的铬铁矿展示出 Cr_2O_3 与 MgO 、 Al_2O_3 之间的正相关趋势, 以及与 FeOt 之间的负相关趋势。橄榄石中的铬铁矿表现出了随着 Cr_2O_3 含量的降低, Al_2O_3 不断增高, 而 FeOt 基本上不随 Al_2O_3 含量多少变化。



▲ 橄榄石中的铬铁矿 ◇ 辉石中的铬铁矿 □ 环绕结构铬铁矿

图 4 金宝山超镁铁岩中铬铁矿的主量元素相关图

Fig. 4. Correlation relationships of major elements in chromites from the Jinbaoshan intrusion.

表1 云南金宝山超镁铁岩侵入体中有代表性的铬铁矿电子探针分析结果($w_B/\%$)

Table1. Electron microprobe analyses of representative chromite grains in the ultramafic rocks from the Jinbaoshan intrusion.

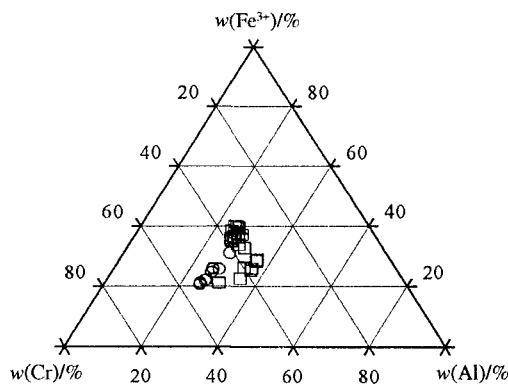
样品	PD19-19A			PD1309-2B		145-3				2H22				
	GL	HS	HS	GL	HS	HS	HS	HS	HS	KD	KD	KD	KD	KD
SiO ₂	0.04	0.03	0.02	0.02	0.07	0.05	0.03	0.05	0.05	0.04	0.07	0.03	0.06	0.03
MgO	7.10	4.78	7.06	5.38	4.00	2.95	6.72	5.19	2.97	7.63	7.61	8.06	7.88	7.97
Al ₂ O ₃	12.77	11.06	11.37	10.88	10.69	10.23	12.10	11.67	12.38	12.37	12.26	12.40	12.42	12.53
FeO	21.99	24.20	21.67	23.70	25.14	26.18	22.43	23.66	26.79	21.47	21.32	20.74	20.94	20.86
MnO	0.00	1.09	0.22	0.53	1.32	1.69	0.00	0.99	1.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TiO ₂	2.86	6.38	5.65	6.64	7.84	8.58	3.04	4.85	3.77	3.27	3.06	2.58	3.32	2.69
Cr ₂ O ₃	24.20	22.63	23.79	23.44	21.99	21.80	27.05	24.53	24.53	34.29	34.13	37.53	34.76	36.99
CaO	0.01	0.02	0.03	0.00	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
V ₂ O ₃	0.26	0.34	0.33	0.37	0.42	0.41	0.28	0.32	0.32	0.09	0.10	0.08	0.08	0.08
NiO	0.28	0.25	0.26	0.22	0.24	0.23	0.30	0.33	0.28	0.41	0.42	0.38	0.42	0.39
Fe ₂ O ₃	28.90	27.66	28.25	26.67	26.67	25.90	26.32	26.65	25.67	19.23	19.35	16.58	18.38	16.70
Total	98.38	98.45	98.65	97.83	98.37	98.04	98.28	98.24	98.18	98.80	98.31	98.39	98.27	98.23
Si	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01
Mg	2.87	1.96	2.84	2.21	1.64	1.22	2.73	2.13	1.24	3.05	3.06	3.23	3.16	3.20
Al	4.08	3.58	3.62	3.53	3.47	3.36	3.89	3.78	4.08	3.91	3.90	3.93	3.94	3.97
Fe ²⁺	4.99	5.56	4.90	5.45	5.79	6.09	5.12	5.44	6.26	4.82	4.81	4.66	4.71	4.69
Mn	0.00	0.25	0.05	0.12	0.31	0.40	0.00	0.23	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.58	1.32	1.15	1.37	1.62	1.80	0.62	1.00	0.79	0.66	0.62	0.52	0.67	0.54
Cr	5.19	4.92	5.08	5.10	4.79	4.80	5.83	5.33	5.42	7.28	7.28	7.98	7.39	7.87
Ca	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
V	0.04	0.05	0.04	0.05	0.06	0.05	0.04	0.05	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Ni	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.06	0.09	0.09	0.08	0.09	0.08
Fe ³⁺	5.90	5.72	5.74	5.52	5.53	5.43	5.40	5.51	5.40	3.88	3.93	3.35	3.72	3.38
Total	23.74	23.42	23.50	23.40	23.29	23.22	23.72	23.56	23.65	23.71	23.72	23.77	23.71	23.76
Mg [#]	36.53	26.05	36.73	28.80	22.08	16.71	34.83	28.11	16.51	38.77	38.87	40.94	40.16	40.53
Cr [#]	55.98	57.86	58.41	59.10	57.98	58.84	59.99	58.51	57.07	65.03	65.13	67.01	65.25	66.45

注: GL代表以包体形式赋存于橄榄石中的铬铁矿; HS代表赋存于辉石中的铬铁矿; KD代表环绕结构铬铁矿; Mg[#] = 100Mg/(Mg + Fe²⁺); Cr[#] = 100Cr/(Cr + Al)。

金宝山超镁铁质岩普遍遭受蚀变作用,被强烈地蛇纹石化^[2],在蛇纹石化作用过程中,一些铬铁矿的四周被磁铁矿部分取代,这种次级磁铁矿边缘和铬铁矿核部之间通过部分重新平衡也可以形成包嵌在辉石中的铬铁矿^[19]。在相对均一的铬铁矿核部的四周,磁铁矿边缘与铬铁矿核部反应产生了贫铝的含铬磁铁矿,以至铬铁矿被含铬磁铁矿逐步取代,这种平衡将导致更多的 Fe,包括 Fe³⁺ 出现在辉石中的铬铁矿中,反过来,也会导致铬铁矿结构中铬和铝的相对减少。因此,包嵌在辉石中铬铁矿的 Cr₂O₃ 与 Al₂O₃ 之间呈正相关关系(图4)。

包嵌在橄榄石中的铬铁矿和环绕结构铬铁矿在 Cr₂O₃ 和 Al₂O₃ 之间具有一种负相关关系(图4),是岩浆铬铁矿的一个特征^[19]。而包嵌在辉石中的铬铁矿具有不同于岩浆铬铁矿的特征,这在 Cr₂O₃ - Al₂O₃ 和 FeO - Al₂O₃ 图解(图4)中可以看出。这种差异可能是由两方面造成。首先,大多数辉石中的铬铁矿是以晶间相的形式存在,它们可能是从橄榄石结晶后的一些演化岩浆中结晶

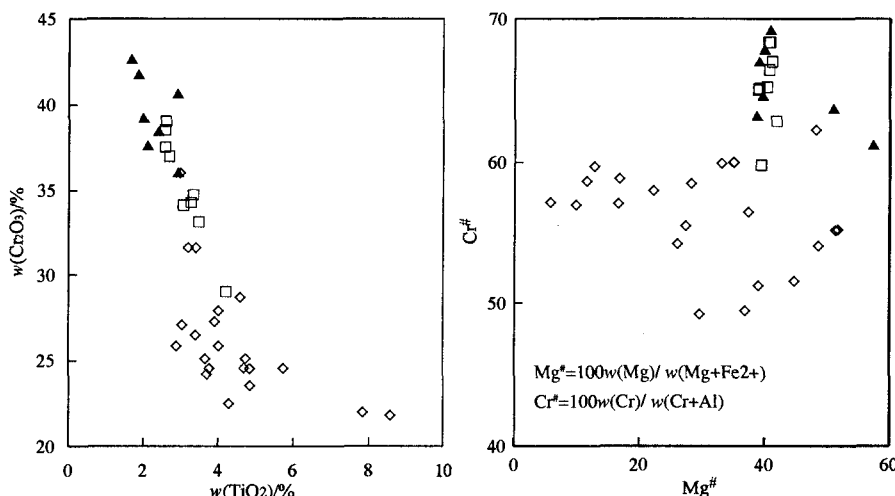
形成,并且与晶间液体相平衡,导致大多数辉石中铬铁矿的 Cr₂O₃ 含量要低于环绕结构铬铁矿和包嵌在橄榄石中铬铁矿的含量。其次,包嵌在橄榄石中的铬铁矿被封闭在橄榄石中,可以避免与正在演化的晶间液体发生反应^[20]。



▲橄榄石中铬铁矿 □辉石中的铬铁矿 ○环绕结构铬铁矿
图5 金宝山铬铁矿 Cr-Al-Fe³⁺ 图解
Fig. 5. Cr-Al-Fe³⁺ diagrams of chromites from Jinbaoshan.

Al-Cr-Fe³⁺ 三角图解(图 5)显示,铬铁矿在组成上形成一个连续体,辉石中的铬铁矿总体上显示出 Fe³⁺ 增加的趋势,其中环绕结构铬铁矿表现出 Cr 增加的趋势。金宝山铬铁矿 Mg[#] 的变化范围是 5.77 ~ 57.07, Cr[#] 的变化范围是 49.22 ~ 69.21。环绕结构铬铁矿的 Mg[#] 和 Cr[#] 变化范围要小一些, Mg[#] 为 38.77 ~ 41662, Cr[#] 为 59.78 ~

68.36。金宝山铬铁矿中 TiO₂ 含量很高,为 1.67% ~ 8658% (图 6)。这种富集 Ti 的现象不一定暗示它们结晶于一种高 Ti 的原始岩浆,因为高度分异的,捕获的堆晶硅酸盐熔体之间广泛的反应可能会与这种富集有关^[10]。环绕结构铬铁矿中 TiO₂ 变化范围是从 2.57% ~ 4.21%, NiO 为 0.35% ~ 0.51%, 平均 0.41%。



▲ 橄榄石中的铬铁矿 ◇ 辉石中的铬铁矿 □ 环绕结构铬铁矿

图 6 金宝山超镁铁质侵入体中铬铁矿的 Cr₂O₃-TiO₂ 图解和 Mg[#]-Cr[#] 图解

Fig. 6. Cr₂O₃ vs. TiO₂ and Mg[#] vs. Cr[#] diagrams of chromites from the Jinbaoshan intrusion.

5 讨论与结论

5.1 金宝山原始岩浆成分探讨

根据包嵌在橄榄石中铬铁矿和橄榄石的成分可以计算母质岩浆的组分。假定金宝山侵入体中具有最高 Cr₂O₃ 含量(42.6%)的橄榄石中包嵌的铬铁矿保留了最初的成分,具有最高 Al₂O₃ 含量(17.5%)的浸染状铬铁矿的核部代表了演化程度最高的成分,使用下面的公式可以估算跟铬铁矿平衡的熔体中的 w(Al₂O₃)^[21]:

$$w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 0.035 \times (\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{liq}}^{2.42}$$

经计算跟金宝山铬铁矿平衡的熔体中 w(Al₂O₃) 为 11.5% ~ 13.2%^[16]。橄榄石和熔体之间 Fe 和 Mg 的分配可被用来估计跟金宝山侵入体中橄榄石相平衡的熔体中 MgO / FeO 摩尔比值。Roeder 和 Emslie^[22] 推算了橄榄石和熔体之间的分配系数:

$$K_d = (\text{Fe}/\text{Mg})_{\text{OL}} / (\text{Fe}/\text{Mg})_{\text{magma}} = 0.3 \pm 0.03$$

这种关系已在实验中被证实,其中大部分铁以 Fe²⁺ 存在。用金宝山侵入体中最富 Mg 橄榄石的数据 (SiO₂ = 38.97%, MgO = 44.20%, FeO = 15.38%, Fo = 83.63) 和上面的分配系数可以估算出跟金宝山侵入体中橄榄石相平衡的熔体 MgO / FeO 摩尔比最小值为 1.53。由于橄榄石跟捕获的硅酸盐液体之间局部的重新平衡,会使得橄榄石成分富铁^[23]。陶琰等^[1] 根据岩浆演化过程反演计算得到金宝山超镁铁岩原始岩浆组成,表明为低钛拉斑玄武岩浆, w(MgO) 为 12.93%。因此金宝山侵入体中的铬铁矿可能是从低钛高镁拉斑玄武岩浆中结晶而来,这种岩浆的形成可能与裂谷作用早期的地幔热柱作用有关^[1, 16]。

5.2 铬铁矿成因初步分析

岩石中普遍可见受过熔蚀的幔源橄榄石,所以超镁铁质岩浆在侵位之前,在离地壳比较深的岩浆房内可能已经经历了一定的结晶分异作用。岩浆早期的结晶与演化作用这时已经开始,到了

侵位之后还在继续进行^[18]。岩浆早期的结晶作用表现为橄榄石的大量晶出,以及少量铬铁矿、辉石的生成。除铬铁矿外,它们都是主要造岩矿物。这种岩浆早期生成的自形铬铁矿常包裹在橄榄石中,并被岩浆携带上升,与后结晶的包嵌在辉石中的铬铁矿共同组成了岩体中的副矿物。在同一样品中,橄榄石中铬铁矿的 Cr_2O_3 含量明显高于辉石中铬铁矿的 Cr_2O_3 含量(表1),这与岩浆结晶作用中所有含铬的矿物,无论是造岩矿物还是副矿物,早期形成者往往比晚期形成者富含铬的说法是一致的^[24]。大量研究证明^[25-26],铬铁矿结晶于高温环境下(1200~1300℃),高铬环境、高水压及氧逸度变化有利于铬铁矿结晶。岩浆在经历了在深部岩浆房内早期结晶后,上升至某个特定的岩浆通道中(图7),随着物理化学条件的变化,岩浆成分发生了改变,含铬的岩浆与围岩发生反应,导致环状结构铬铁矿雏体结晶出来,作为岩体赋存空间的堆晶相与后续岩浆持续反应,使铬铁矿不断聚集和生长,最终形成了环绕橄榄石晶体的形态。

5.3 铬铁矿成因与金宝山超镁铁岩体的形成

金宝山超镁铁岩主要元素及微量元素特征均指示其中的橄榄石主要是以深部分异堆晶的形式出现,计算表明金宝山岩体原始岩浆在深部经历了12.58%的橄榄石结晶分异,侵位岩浆含橄榄石晶体35.66%,岩体由体积大的多的原始岩浆深部分异橄榄石后,由堆晶橄榄石和部分残余熔体混合形成侵位岩浆^[1]。包嵌在橄榄石中铬铁矿的存在也表明在形成侵位岩浆之前,原始岩浆在

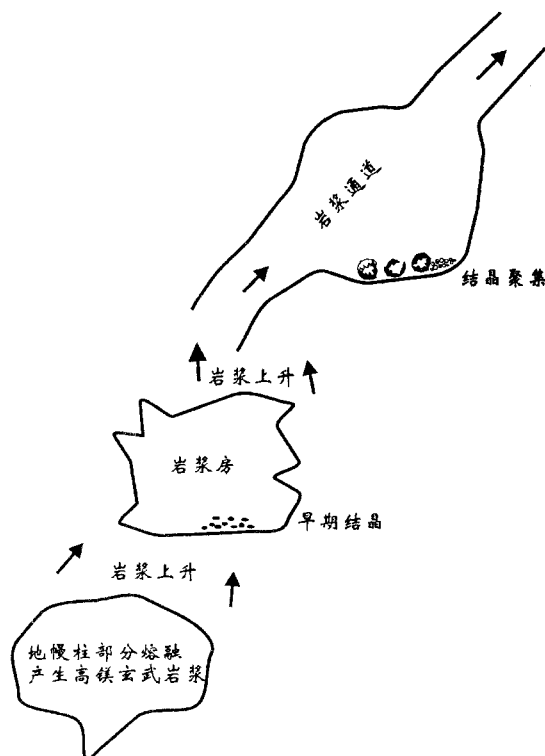


图7 金宝山超镁铁质侵入体中铬铁矿成因示意图

Fig. 7. The sketch map showing the genesis of the three types of chromite from ultramafic rocks in the Jinbaoshan intrusion.

深部已经历了的结晶分异演化。金宝山侵入体中环绕结构铬铁矿的生成模式进一步说明了金宝山侵入体为一岩浆通道,支持了前人研究得出的金宝山侵入体是一个岩浆通道的说法^[3, 16]。

致谢:在显微镜照相和作图方面分别得到付绍洪副研究员和沈能平博士的帮助,修改过程中得到了匿名审稿人的许多建设性意见,在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献:

- [1] 陶琰,高振敏,罗泰义,等.云南金宝山超镁铁岩原始岩浆成分反演[J].岩石学报,2002,18(1):70-82.
- [2] 陶琰,罗泰义,高振敏,朱丹.西南暗色岩铜镍硫化物矿化岩体与峨眉山玄武岩的关系—以云南金宝山超镁铁岩为例[J].地质论评,2004,50(1):9-15.
- [3] Tao Yan, Li Chu-si, Hu Rui-zhong, Edward M-R, Du An-dao, Zhong Hong. Petrogenesis of the Pt-Pd mineralized Jinbaoshan ultramafic intrusion in the Permian Emeishan Large Igneous Province, SW China [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2006, 153:321-337.
- [4] Irvine T N. Chromian spinel as a petrogenetic indicator: Part 2. Petrologic applications [J]. *Canadian Journal of Earth Science*, 1967, 4: 71-103.
- [5] Dick, H J B, Bullen, T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1984, 86: 54-76.
- [6] Liipo J, Vuollo J, Nykanen V, Piirainen T, Pekkarinen L, Tuokko I. Chromites from the early Proterozoic Outokumpu Jormua ophiolite belt: a comparison with chromites from Mesozoic ophiolites [J]. *Lithos*, 1995, 36: 15-27.
- [7] Barne S J, Roeder P L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks [J]. *Petrol*, 2001, 42: 2279-2302.
- [8] Zhou M F, Lightfoot P C, Keays R R, Moore M L, Morrison G G. Petrogenetic significance of chromian spinels from the Sudbury Igneous Complex, Ontario, Canada [J]. *Canadian Journal of Earth Science*, 1997, 34: 1405-1419.
- [9] Barnes S J, Kumilov V Y. Spinel and Mg-ilmenites from the Noril'sk and Talnakh intrusions and other mafic rocks of the Siberian flood basalt province [J]. *Economic Geology*, 2000, 95: 1701-1717.
- [10] Barnes S J, Tang Z-L. Chrome spinels from the Jinchuan Ni Cu sulphide deposit, Gansu Province, People's Republic of China [J]. *Economic Geology*, 1999, 94: 343-356.
- [11] Chung S L, Jahn B M. Plume lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian Triassic boundary [J]. *Geology*, 1995, 23: 889-892.
- [12] Zhong H, Zhou X-H, Zhou M-F. Platinum-group element geochemistry of the Hongge Fe-V-Ti deposit in the Pan-Xi Area, southwestern China [J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37: 226-239.
- [13] Zhong H, Yao Y, Hu S-F. Trace-element and Sr-Nd isotopic geochemistry of the PGE-bearing Hongge layered intrusion, southwestern China [J]. *International Geology Review*, 2003, 45 (4): 371-382.
- [14] Zhou M-F, Robinson P T, Leshner CM, Keays RR, Zhang CJ, Malpas. Geochemistry, petrogenesis and metallo-genesis of the Panzhuhua gabbroic layered intrusion and associated Fe Ti V oxide deposit, Sichuan Province, SW China [J]. *Petrol*, 2005, 46:2253-2280.
- [15] Song X-Y, Zhou M-F, Cao Z-M, Sun M, Wang Y-L. Ni Cu(PGE) magmatic sulphide deposits in the Yangliuping area, Permian Emeishan igneous province, SW China [J]. *Mineralium Deposita*, 2003, 38:831-843.
- [16] Wang C-Y, Zhou M-F, Zhao D. Mineral chemistry of chromite from the Permian Jinbaoshan Pt Pd-sulphide-bearing ultramafic intrusion in SW China, with petrogenetic implications [J]. *Lithos*, 2005, 83:47-66.
- [17] Wang C-Y, Zhou M-F, Keays R R. Geochemical constraints on the origin of the Permian Baimazhai mafic-ultramafic intrusion, SW China [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2006, 152: 309-321.
- [18] 杨廷祥.云南省弥渡县金宝山铂钯矿典型矿床研究报告[R].云南地矿局第三地质大队,1989.
- [19] Bliss N W, Maclean W H. The Paragenesis of zoned chromian spinel from central Manitoba [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1975, 39: 973-990.
- [20] Roeder P L, Campbell I H. The effect of postcumulus reactions on compositions of chrome spinels from the Jimber-lana Intrusion [J]. *Petrol*, 1985, 26: 763-786.
- [21] Mauler C, Maurel P. Study experimentale of the distribution of I' aluminum between bath silicate basic and spinelle chromifere. Petrogenetiques involvements; content of chromium of the spindles [J]. *Bull Mineral*, 1982, 105: 197-202.
- [22] Roeder P L, Emslie R F. Olivine liquid equilibrium [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1970, 29: 275-289.
- [23] Li C, Xu Z-B, De Waal S A, Ripley E M, Maier W D. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni Cu sulphide deposit, western China: implications for ore genesis [J]. *Mineralium Deposita*, 2004, 39:159-172.
- [24] 南京大学地质学系.地球化学(修订本)[M].北京:科学出版社,1987:232-234 页
- [25] Melchert, Crumw, Simong. Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstsn; a study of solid and fluid inclusions in Chromite [J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38(10):1419-1458.
- [26] Ballhaus C. Origin of podiform chromite deposits by magma mingling [J]. *Earth and Planet Science Letters*, 1998, 156:185-193.

GENETIC RESEARCH ON CHROMITE FROM THE Pt-Pd-BEARING ULTRAMAFIC INTRUSIONS IN JINBAOSHAN, YUNNAN

MA Yan-sheng^{1,2}, TAO Yan¹, ZHONG Hong¹, WANG Xing-zhen³

(1. *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*

3. *Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001, China.*)

Abstract: The Jinbaoshan Pt-Pd deposit, the largest independent PGE deposit in China, is hosted in an ultramafic intrusion on the western margin of the Yangtze Block. This intrusion, temporally and spatially associated with the Late Permian Emeishan Large Igneous Province (ELIP), is a sheet-like body with a thick wehrlite unit in the center and thin pyroxenite units at the margins. Chromites, which are accessory minerals in the ultramafic intrusion, can be classified as three types: occurring as inclusions in olivine; as euhedral or subhedral inclusions in clinopyroxene, and those exhibiting rounding structure. The typical characteristics of chromites with rounding structure are their smooth and rounded appearance, their inner angular shape and the occurrence of olivine or pyroxene in the center. Based on quantitative electron microprobe analysis (EMPA) as well as thin section observation, it is believed that the chromites occurring as inclusions in olivine may be formed in the deep chamber during the early stage of magma evolution; as euhedral or subhedral inclusions in clinopyroxene, mostly the products of crystallization at depth, it may be due to further magma evolution. During the formation of the Jinbaoshan intrusion, cumulus phase which acted as the host space of the intrusion interacted continuously with subsequent magma; this interaction made chromite crystals continuously accumulate and grow and eventually the chromites with rounding structure were then formed. The mechanism of formation the chromites suggested that the Jinbaoshan intrusion is a magma conduit with crystallization differentiation at depth.

Key words: chromite; ultramafic rock; olivine; fractional crystallization; Jinbaoshan, Yunnan Province