攀枝花钒钛磁铁矿矿床成因浅析*

Simple Analysis About Generation of Panzhihua Vanadic Titanomagnetite Deposit

罗小军[1] 温春齐[1] 曹志敏[2.] 霍 艳[1]

（1 成都理工大学地球科学学院，四川 成都 610059；2 青岛海洋大学，山东 青岛 266003）

Luo Xiaojun, Wen Chunqi, Cao Zhimin, Huo Yan

(1 Geoscience Faculty of Chengdu University of Technology, Chengdu 610059,Sichuan,China；
2 Ocean University of Qingdao 266003, Shandong, China)

摘 要 攀枝花钒钛磁铁矿矿床的形成并不局限于某一种成因，而是多种成矿作用综合的结果。据矿体形态、产状、矿石组构、组分及地球化学特征，将攀枝花铁矿床成岩成矿过程分为四个期次：成岩期、主成矿期、次成矿期和表生期。矿床的韵律结构特别发育，矿物的结晶与韵律结构的发育关系密切，在韵律层形成过程中，矿石矿物有早于脉石矿物也有晚于脉石矿物结晶的，因而该矿床不能单一的划为早期或晚期岩浆矿床，称之为韵律式岩浆矿床。

关键词 早期岩浆矿床 晚期岩浆矿床 韵律式岩浆矿床 钒钛磁铁矿矿床 攀枝花

沿着康滇地轴构造带，含钒钛磁铁矿的层状基性-超基性杂岩体群构成一个南北向的钒钛磁铁矿成矿带，攀枝花钒钛磁铁矿即是该矿带上的一个大型矿床。前人对该矿床的成因作了较广泛的研究，提出了多种成因类型，如晚期岩浆矿床（袁见齐等，1985）、早期岩浆矿床（卢记仁等，1988）、岩浆熔离矿床（李文臣，1992）等。作者对此不敢苟同，在对攀枝花钒钛磁铁矿朱家包包矿段进行详细野外观察和室内研究后，我们认为，攀枝花钒钛磁铁矿的形成并不局限于某一种成因，而是多种成矿作用综合的结果。

1 矿床特征

攀枝花钒钛磁铁矿矿床赋存于北东-南西向展布的辉长岩体中，矿体位于岩体中下部，呈层状、似层状，与岩体产状基本一致。矿床自北东向南西由朱家包包、尖山、兰家火山和营盘山 4 个矿段组成，其中以朱家包包铁矿床规模最大。

矿石中矿石矿物主要为钛磁铁矿、钛铁矿及少量硫化物，脉石矿物主要为硅酸盐矿物及少量磷酸盐、碳酸盐矿物等。矿石的构造主要有块状、浸染状、条带状、流层状、斑杂状构造等。据金属矿物含量又将浸染状构造分为稠密浸染状、稀疏浸染状和星散浸染状构造。条带状构造是由暗色致密块状或稠密浸染状磁铁矿（以下的磁铁矿是铁钛金属氧化矿物的总称）与浅色稀疏浸染状磁铁矿叠层形成的，总体呈明暗相间的条带。当浅色条带中长石晶体具定向性排列时，形成流层状构造。

矿石的结构主要有自形、半自形和他形晶结构、海绵陨铁结构、粒状镶嵌结构、嵌晶结构、共边结构、结状结构、反应边结构、交代结构和压碎结构。自形半自形结构：自形－半自形钛磁铁矿和钛铁矿晶粒紧密镶嵌，钛磁铁矿单颗粒（2~0.1 mm）和钛铁矿单颗粒（1~0.1 mm），占颗粒数的 90%以上。矿物间的接

* 本文得到国家自然科学基金（NSFC40072037）和国家重点基础研究发展规划项目（973-G1999043200）资助
第一作者简介 罗小军，男，1974 年生，硕士研究生，矿物学、岩石学、矿床学专业。

触界线整齐平滑，钛磁铁矿和钛铁矿集合体间隙为脉石矿物充填，部分钛磁铁矿出溶有客晶矿物钛尖晶石和镁铝尖晶石，此类矿石结构是构成致密块状矿石和稠密浸染状矿石的主体。半自形－他形晶结构：钛磁铁矿、钛铁矿呈半自形和他形晶粒状紧密镶嵌，构成粒状集合体，颗粒粒径稍小于自形晶钛磁铁矿和钛铁矿粒径。该类型是稠密浸染状矿石、流层状和条带状矿石的主体结构。他形晶结构：硅铝酸盐脉石矿物自形结晶程度高，铁钛氧化物沿脉石矿物间隙呈星散浸染状分布，这类矿石结构是星散浸染状矿石及岩浆期后形成的硫化物矿的主体。海绵陨铁结构：硅铝酸盐脉石矿物早结晶，自形程度高，铁钛氧化物以他形晶粒状集合体嵌布于脉石颗粒四周间隙，呈胶结状，这种结构主要发育在稀疏浸染状矿石中。嵌晶结构：在稠密浸染状矿石中，常见部分粒径 0.2 mm 左右的自形－半自形的钛磁铁矿镶嵌于斜长石晶粒中。

在一个矿层中，矿石的结构构造具有规律性的变化，而且矿石的结构和构造之间存在一定的对应关系。矿层底部一般为致密块状磁铁矿，铁钛氧化物含量高,矿石呈自形晶结构；往上矿石变为稠密浸染状、条带状或流层状构造，铁钛氧化物含量比块状磁铁矿低,矿石结构为自形、半自形－他形晶结构；顶部则为稀疏浸染状或星散浸染状矿石，矿石中铁钛氧化物含量很少，结构为他形晶或海绵陨铁结构。攀枝花铁矿床矿石组构的这种规律性变化是与其岩矿石的韵律特征相一致的，是其特殊的成岩成矿作用形成的必然结果。

韵律层结构发育是攀枝花钒钛磁铁矿的一个典型特征，不仅赋矿岩体存在韵律旋回（宋谢炎等，1999；钟玉芳等，1999；李德惠等，1982；朱中一，1984），而且各矿层内韵律特征也十分明显。岩矿体的韵律特征表现在主要造岩矿物的含量、岩石的色率、岩石的化学成分、结构构造等在垂向上具一定顺序的重现性。整个岩体在垂向上形成第Ⅰ级韵律旋回：底部细晶辉长岩－下部含矿层－上部辉长岩。对于含矿层，从下而上金属矿物含量逐渐降低，脉石矿物含量逐渐升高，而且其矿物成分、含量、组构等存在一定规律的重现性。据这些特征可将含矿层（矿体）自下而上分为Ⅸ、Ⅷ、Ⅶ、Ⅵ、Ⅴ、Ⅳ、Ⅲ、Ⅱ、Ⅰ9 个矿层，其中Ⅷ、Ⅵ矿层较大，品位最高。在每个矿层内部，也表现出明显的韵律特征。从各矿层底部到顶部，铁钛氧化物含量逐渐减少，硅酸盐脉石矿物及金属硫化物含量逐渐增加；矿石结构上，铁钛氧化物晶体呈自形－半自形－他形、海绵陨铁结构变化，而硅酸盐矿物呈反序的他形－半自形－自形晶变化；矿石构造上，下部为致密块状构造，中部为稠密浸染状、条带状、流层状构造，上部为稀疏浸染状、星散浸染状构造。

在矿体中，局部发育有与矿层斜交的辉长岩伟晶岩脉，金属硫化物矿脉。Ⅵ矿层顶部可见明显的脉状磁黄铁矿，局部被氧化成褐铁矿。在脉状磁黄铁矿中，磁黄铁矿呈他形晶集合体分布于自形半自形的钛铁矿晶粒四周，呈胶结状充填，形成海绵陨铁结构。

2　稀土元素特征

根据攀枝花铁矿床特征，本次对矿体围岩岩石辉长岩、钛磁铁矿矿石进行了中子活化稀土元素分析。据分析结果求得各类样品稀土元素平均值如表 1。从表 1 可看出攀枝花铁矿床形成过程，稀土元素具有明显的规律性变化（温春齐等，2002）。按稀土元素特征，可将其成岩成矿过程分为 3 个期次：成岩期（形成辉长岩体），主成矿期（岩浆期形成铁矿）和次成矿期（热液期形成硫化物矿）。主成矿期形成的铁矿石

表 1　攀枝花钒钛磁铁矿各类样品稀土元素参数平均值

类型	样数	LREE	HREE	ΣREE	L/H	LR/%	MR/%	HR/%	La/Yb	Ce/Yb	La/Sm	Eu/Sm	La_{cn}/Yb_{cn}	Ce_{cn}/Yb_{cn}	δEu	δCe
外围岩石	6	158.21	18.81	177.02	7.82	84.73	12.18	3.09	23.1	47.57	3.198	0.65	15.99	12.81	1.981	0.732
铁矿石	4	152.42	29.30	181.72	4.45	79.06	14.50	6.43	8.30	17.33	2.66	0.31	5.74	4.67	0.950	0.713
钛磁铁矿	4	15.81	3.97	19.78	3.47	74.34	17.34	8.32	9.90	13.61	3.27	0.30	6.85	3.66	0.853	0.525
黄铁矿	7	16.73	6.23	22.95	3.24	71.69	16.88	11.44	6.77	9.83	3.31	0.22	4.69	2.65	0.650	0.430
	2	1.78	1.24	3.02	1.44	57.49	26.92	15.58	2.16	2.26	1.50	0.22	1.49	0.61	0.538	0.355

注：L/H 为轻重稀土比值，LR 为轻稀土百分量，MR 为中稀土百分量，HR 为重稀土百分量。引自温春齐等，2002。

和钛磁铁矿，其稀土元素的各种计算参数及其平均值十分相近，在稀土元素配分型式图上其分布范围也相近，显示其为同一成矿期的产物。与外围辉长岩岩石的同类值相比，除中稀土、重稀土百分量平均值高于岩石外，其余均明显低于岩石；但矿层中的辉长岩却与铁矿石、钛磁铁矿的稀土元素参数值相似，显示矿

层中的岩石、铁矿石和钛磁铁矿是同期产物。热液期形成的黄铁矿与主成矿期相比，显示其为次成矿期产物（温春齐等，2002）。

3 矿物包裹体爆裂温度

本次在矿体内自下而上采集了 16 个矿物包裹体样，测得 19 个矿物包裹体爆裂温度（表 2）。据测温结果，矿物的包裹体爆裂温度明显低于卢记仁等（1988）测得的包裹体均一温度。但是，就各矿层的包裹体爆裂温度变化而言，它存在明显的韵律式变化特征。各矿层下部韵律层矿物的爆裂温度均低于上部韵律层的爆裂温度，而且各矿层间存在一个温度跃变，说明每一矿层对应着一次岩浆活动。

表 2 矿物包裹体爆裂温度

样号	样品名称	$t_{爆裂}$/℃	样号	样品名称	$t_{爆裂}$/℃
9S1	钛磁铁矿	410	6-2	钛磁铁矿	455
9-1	钛磁铁矿	680	6SS1	钛磁铁矿	520
8-1	钛磁铁矿	430	6SS1	磁黄铁矿	420
8-2	钛磁铁矿	655	6SS2	钛磁铁矿	520
8-5	钛磁铁矿	560	6SS2	磁黄铁矿	380
8-6	钛磁铁矿	545	5-1	钛磁铁矿	395
8B2	钛磁铁矿	630	5-2	钛磁铁矿	610
6-1	钛磁铁矿	450	B-02-5	黄铁矿	350

在Ⅵ矿带，磁黄铁矿包裹体爆裂温度明显低于钛磁铁矿爆裂温度。据磁黄铁矿海绵陨铁结构特征，它是由于熔离作用，后期充填于钛磁铁矿晶粒间形成的。其形成时间晚于钛磁铁矿，结晶温度低于钛磁铁矿。黄铁矿爆裂温度最低，这与它是热液期产物一致。

4 矿床成因分析

攀枝花铁矿床的成因存在多种认识，主要有晚期岩浆矿床、早期岩浆矿床及岩浆熔离矿床。这些认识都是基于某一种单一的成矿作用提出的。通过对朱家包包矿段详细的野外观察和室内分析，我们发现攀枝花铁矿床矿物的形成与岩矿体韵律的发育关系十分密切，矿体及矿层中矿石矿物均存在韵律式变化特征。根据韵律成核说及双扩散对流说，矿层中矿石矿物与脉石矿物是交替成核结晶的；从矿石组构上也反应出矿床中的矿石矿物既有早于脉石矿物结晶的，也有晚于脉石矿物结晶的，因而不能截然将矿床划定为早期或晚期岩浆矿床。

根据矿体形态、产状和矿石组构、组分及地球化学特征，我们认为矿床的形成至少经历了 3 个期，即岩浆期、热液期和表生期，其中据稀土元素特征又可将岩浆期划分为成岩期、主成矿期，因此攀枝花铁矿床的成岩-成矿过程可划分为 4 个期次：成岩期、主成矿期、次成矿期和表生期。本文主要探讨矿床中铁钛氧化物的形成机理，从而分析矿床的成因，故仅对其成岩期和生成铁钛氧化物的主成矿期进行分析。

4.1 岩期

据杨天奇等人（1988）的研究认为，在高温条件下，由于离子键性能及氧逸度因素的影响，形成攀枝花辉长岩体的原始岩浆发生液态熔离作用，岩浆中存在稳定的铁钛氧化物的熔融体与硅酸盐熔融体，因密度的差异，铁钛氧化物熔融体下沉而硅酸盐熔融体相对上浮，造成原始岩浆中两种成分的相对集中，岩浆上部形成富硅酸盐熔融体，下部形成富铁钛氧化物熔融体。随着构造活动的发生，岩浆房上部的富硅酸盐熔融体首先进入围岩，由于围岩温度很低，刚侵入的岩浆迅速冷却，在内接触带上产生结晶细小的冷凝边，形成岩体底部的细晶辉长岩；而后冷凝结晶作用自围岩底板向上推移，岩浆逐渐冷凝结晶形成上部辉长岩体。而后期构造活动使岩浆房下部的富铁钛氧化物熔融体多期次贯入辉长岩体中形成韵律式层状矿体（李文臣，1992）。

4.2 主成矿期

该期富铁钛氧化物熔融体贯入辉长岩体冷凝结晶形成铁矿，Ⅸ至Ⅰ韵律式矿层就是该期形成的。

当富铁钛氧化物熔融体贯入辉长岩体时，岩浆底部过冷却，同时岩浆中挥发组分向上运移而富集在顶部。据 E.D.Jackson (1961)、Serenson (1969)、Elsdon (1970)和 Mcdirney A.R (1979)等提出的岩浆底部结晶作

用说（李德惠等，1982），侵入辉长岩体中的富铁钛氧化物熔融体首先从底部开始结晶，在平行于岩体底板的底部岩浆层中形成一个结晶带。由于铁钛氧化物的密度大，大量铁钛氧化物便向熔融体底部扩散，而硅酸盐组分相对反向扩散，因而在底部结晶带中首先富集的是铁钛氧化物组分，形成铁钛氧化物富集而硅酸盐组分贫化的结晶带，而在该结晶带前缘则是硅酸盐组分相对富集。当结晶带中铁钛氧化物组分浓度达到过饱和时，铁钛氧化物首先开始结晶。由双扩散对流作用，铁钛氧化物组分向底部结晶带扩散富集结晶时，结晶带中的热量向结晶带外扩散，当结晶带向外扩散的热量与矿物结晶释放的热量达到平衡时，结晶带成为一个等温结晶区，结晶带顶层面就是一个等温面，这时的等温结晶区就相当于一个封闭体系，铁钛氧化物组分在封闭体系内充分结晶。这就形成了矿层底部自形－半自形致密块状磁铁矿矿石。

当结晶区内铁钛氧化物大部分已经结晶，矿物结晶释放热量不能抵偿结晶区扩散热时，结晶等温面向该结晶带前缘的富铁钛氧化物熔融体内推移，依据上述原理，在该结晶带前缘熔融体中又形成一个新的结晶区。由于底部结晶带前缘富集硅酸盐组分，因而新结晶带中以硅酸盐矿物富集为主，但是，由于富铁钛氧化物熔融体本身富含铁钛组分，因此在新结晶带中仍含大量铁钛氧化物，只是其含量低于底部结晶带。在新结晶带中就形成半自形、他形晶的铁钛金属矿物和自形晶的硅酸盐脉石矿物，并最终形成稠密浸染状、条带状或流层状矿石。随着结晶带的不断推移和金属矿物的不断结晶析出，当结晶区推进到熔融体顶部时，熔融体中金属矿物十分贫化而硅酸盐组分大量富集，这时的结晶带就是硅酸盐矿物富集带，硅酸盐矿物首先结晶，形成自形半自形晶，而金属矿物后结晶呈他形充填于自形程度高的硅酸盐矿物晶粒间，形成他形晶结构或海绵陨铁结构。基于这一成矿作用形成的一个矿层内，下部富含自形程度高的金属矿物贫硅酸盐矿物，上富硅酸盐矿物贫金属矿物，而且金属矿物呈他形，这一特征正与矿体内各矿层矿石组构、矿物含量的韵律变化特征一致。

由于岩浆从底部开始结晶，下部结晶带热能及矿物结晶释放热量向上部扩散，造成上部结晶带温度高于下部结晶带温度，这正与各矿层内钛磁铁矿包裹体爆裂温度变化规律一致。

依据上述成矿过程、各矿层矿石组构的韵律变化特征及钛磁铁矿包裹体爆裂温度的阶梯式跃变特征分析，攀枝花铁矿床中的一个矿层对应一次富铁钛氧化物熔融体贯入活动，并且一次贯入的富铁钛氧化物熔融体在结晶演化过程中遵循上述成矿作用，形成具有相似韵律特征的磁铁矿层。随着富铁钛氧化物熔融体多期多阶段的活动，成矿作用不断重复发展，最终形成规模巨大的钒钛磁铁矿床。

综上所述，根据矿石的组构变化特征及金属矿物的结晶成矿作用过程，在一个矿层内，其底部铁钛金属矿物属早期结晶形成的，而上部却又晚于脉石矿物结晶；就多个矿层而言，后期岩浆贯入形成的底部早结晶的磁铁矿，虽然在该层内属早期结晶产物，但它的形成时间却晚于先期岩浆贯入形成的晚结晶的磁铁矿；因此，基于上述特征，攀枝花钒钛磁铁矿床金属矿物的形成没有绝对的时间早晚之分。而且在Ⅵ矿带中，还发生岩浆熔离作用形成有海绵陨铁结构的磁黄铁矿。因此，不宜将攀枝花钒钛磁铁矿矿床划分为绝对的早期或晚期岩浆矿床，但也不能划为单一的岩浆熔离矿床。它是富铁钛氧化物熔融体多期次贯入，矿石矿物与脉石矿物韵律式交替成核结晶形成的，我们姑且称这种成矿作用为韵律式成矿作用，形成的矿床叫岩浆韵律式矿床。

参　考　文　献

李德惠，茅燕石. 1982. 四川攀西地区含钒钛磁铁矿层状侵入体的韵律层及形成机理[J]. 矿物岩石，1：29～40.

李文臣. 1992. 攀枝花钒钛磁铁矿矿床地质及其成因[J]. 地质与勘探，10：18～21.

卢记仁，张承信，刘玉书，等. 1988. 攀西地区钒钛磁铁矿矿床的成因类型[J]. 矿床地质，7（1）：1～13.

宋谢炎，王玉兰，张正阶，等. 1999. 层状侵入体韵律层理形成过程的定量模拟[J]. 地质学报， 73（1）：37～43.

温春齐，曹志敏，罗小军，等. 2002.攀枝花铁矿床稀土元素特征.矿床地质，21(增刊).

杨瑞英，黄忠祥，李继亮. 1985 .攀西裂谷火成岩组合的微量元素地球化学. 中国科学，(B 辑)，9：844～854.

杨天奇，姜修道. 1988. 攀枝花层状含矿岩体的新认识[J]. 长春地质学院学报， 2：125～136.

袁见齐，朱上庆，翟裕生. 1985. 矿床学[M]. 北京：地质出版社.

钟玉芳，岑 况，马 芳. 1999. 攀西层状基性－超基性岩体的韵律特征及分形研究[J]. 地质科技学报， 18（1）：33～37.

朱中一. 1984. 四川红格层状基性－超基性复合岩体的大韵律特征及其成因探讨[J]. 地球科学，24：43～53.