

山西北落峡铁矿床流体包裹体 研究与矿床成因讨论

李 宁 冯钟燕 于 方

(北京大学地质学系)

内容提要:北落峡铁矿床是太行山南段矽卡岩型铁矿成矿区域内一个比较重要的矿床。本文通过对北落峡铁矿床流体包裹体研究,讨论了该矿床成矿流体特征、性质、流体演化及铁矿床形成机制。认为成矿流体源自岩浆,流体组分以 $\text{Na-Fe-Ca-Cl-SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 为主。成矿流体温度、盐度分别高达 $540\text{--}660^\circ\text{C}$ 和 $55\text{--}66\text{wt.}\%\text{NaCl}$ 。岩浆期后流体不混溶作用是造成成矿流体高盐度的原因。由于流体温度、盐度降低以及沸腾作用导致溶液中铁溶解度急剧下降并发生磁铁矿沉淀。

主题词:北落峡 矽卡岩铁矿 流体包裹体 成矿流体 磁铁矿沉淀

太行山南段是我国重要的矽卡岩型铁矿成矿区域,主要包括邯邢地区、西安里地区和安林地区。矿化和燕山期闪长岩侵入体有关,矿床产于奥陶系灰岩和侵入体的接触带。铁矿形成与接触带及其附近发育的矽卡岩化、钠长石化和热液蚀变交代作用在空间、时间和成因上存在密切联系。矿床矿石矿物成分比较简单,主要是磁铁矿,有少量黄铁矿、黄铜矿和磁黄铁矿。北落峡铁矿床是西安里铁矿区的一个重要矿床。本文通过对该矿床流体包裹体研究,探讨成矿流体性质及成矿作用,旨在深化对这类矿床的认识。

一、一般地质概况

西安里地区属山西省平顺县。在大地构造位置上处于华北地台中部,太行山大型背斜隆起带南端西翼。矿化集中于西安里侵入体附近,有北落峡、芦沟和甘亩等十几个矽卡岩型铁矿床(点)(图1)。

西安里岩体呈岩脊产于西安里背斜核部,长 11km ,宽 $1\text{--}2\text{km}$,出露面积约 22km^2 。岩体顶盖地层多被剥蚀掉,边部与中奥陶统中厚层灰岩、泥灰岩接触。岩体由依次侵入的橄榄辉长岩、辉石闪长岩及闪长岩组成,其中之闪长岩系侵入体主体并是矿化母体。闪长岩之 Rb-Sr 年龄为 $130.2\text{Ma}^{[2]}$ 。根据岩体上覆地层厚度推测,岩浆上侵到地面下 $1.8\text{--}2.5\text{km}$,形成深度不很大。

北落峡铁矿呈带状主要分布在岩体中段西接触带。矿体产在透辉石矽卡岩中,闪长岩和中奥陶统二段中厚层灰岩、泥灰岩是矿体围岩。矿体产状受接触带产状和围岩构造形态控制。全矿区有大小矿体53个,以5号矿体规模最大。矿石矿物主要是磁铁矿,少量黄铁矿和黄铜矿。脉石矿物以透辉石和方解石为主,有少量石榴石、角闪石和绿帘石等矿物。

闪长岩在矿床附近接触带处发生大规模的长石化, 蚀变岩宽度可达 100 多米。自岩体向接触带蚀变程度逐渐增强, 原岩矿物中长石、普通角闪石、磁铁矿等被交代而逐渐消失, 取而代之的是钠长石、次透辉石、葡萄石等矿物组合。原岩结构也由半自形粒状结构变成交代残余结构直至花岗变晶结构。外观上看岩石退色现象十分明显, 由深灰色变成灰白色直至纯白色。与此同时灰岩发生矽卡岩化。透辉石矽卡岩是北落峡铁矿床的主要矽卡岩类, 北部出现石榴石矽卡岩和绿帘石岩。矽卡岩和磁铁矿体在空间上紧密共生, 透辉石、石榴石常常是矿石的脉石矿物。矽卡岩化范围比矿化范围稍大, 分带现象不明显。该矿床在空间上有闪长岩→钠长石化闪长岩→透辉石矽卡岩→矿体的分布规律。从时间上看钠长石化、矽卡岩化都出现于岩浆冷凝末期, 矿化之前。矿化过程中或稍后又有热液活动生成含钠长石角闪石脉。作者选择本矿区矿体规模最大, 蚀变岩发育的 5 号矿体进行了研究 (图 2), 下面主要从流体包裹体角度探讨该矿床成矿流体特征、性质、演化及矿床形成机理。

二、流体包裹体研究

北落峡矿床形成过程中有一主要热液活动期, 自早到晚发育了一套热液蚀变矿物, 包括成矿前的透辉石、石榴石和成矿后的绿帘石和方解石, 其生成顺序见表 1。这些矿

物包裹体很发育, 它们作为不同阶段的成矿流体样品被保存下来, 是我们了解成矿流体的物理化学性质、成矿流体演化及矿床形成机理的“窗口”^{〔2〕〔3〕}。

(一) 包裹体特征 上述矿物中都有包裹体存在, 其中以透辉石和方解石中最为丰富, 石榴石、绿帘石中的相对较少。包裹体个体大小不等, 一般 $5 \times 30 \mu\text{m}$ 。根据室温状态下包裹体相比率将上述矿物原生包裹体划分成三种类型: A 型 (液相 + 气相 + 多相固晶)、B 型 (液相 + 气相 + (小盐晶))、C 型 (气相 + 液相, 气相 $> 50\%$), 其特征见表 2。在显微镜下最引人注目的几个现象是:

1. 透辉石包裹体盐晶含量极高, 并且几乎每个包裹体中都能看到暗色子矿物。一般来讲气相占整个包裹体体积的 30% 左右, 盐晶占 30—50%, 暗色子矿物占 5—20%。包裹体内

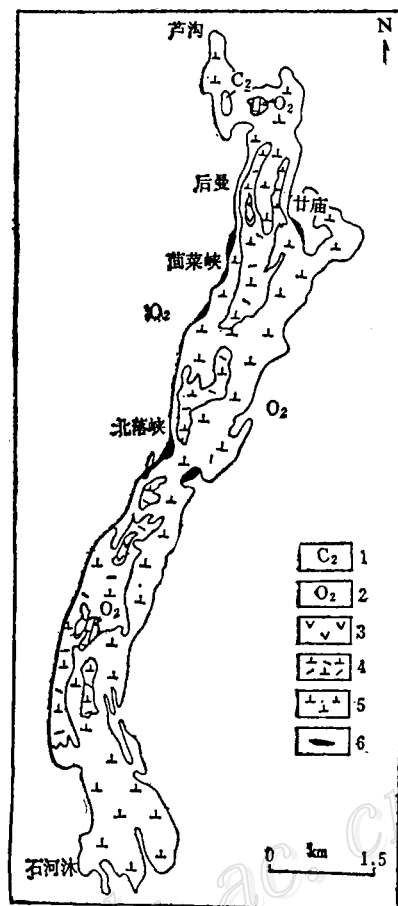


图 1 西安里地区地质略图

1—中石炭统; 2—中奥陶统灰岩; 3—橄榄辉长岩;
4—辉石闪长岩; 5—闪长岩; 6—铁矿体

Fig.1. Schematic geological map of Xianli area.
1—Middle Carboniferous; 2—Middle Ordovician
limestone; 3—Olivine gabbro; 4—Augite diorite;
5—Diorite; 6—Iron ore body.

表1 北落峡铁矿床矿物生成顺序
Table 1. Formation sequence of minerals
in the Beiluoxia iron deposit

矿物	生成顺序
钠长石	_____
透辉石	_____
石榴石	_____
磁铁矿	_____
绿帘石	_____
黄铁矿	_____
绿泥石	_____
方解石	_____

充填物过多时气泡常常被挤扁拉长。

2. B型液相+气相+(小盐晶)包裹体和C型气相包裹体共存。这种现象在和透辉石共生的方解石中最普遍。石榴石中也比较常见,加热时两者均一温度相近,均一方向相反。

3. 颈缩包裹体在透辉石、石榴石中常见到,尤其在石榴石中。

透辉石及其它矿物中丰富的子晶经偏光显微镜及扫描电镜鉴定,确认透明子矿物主要是石盐,少量钾盐、石膏,暗色子矿物是赤铁矿。北落峡铁矿床透辉石中包裹体内几乎都有暗色不透明子矿物。它们有两种晶形,一种呈六方板状;另一种呈短柱状,顶部锥形,反射

光下呈血红色。扫描电镜能谱图上显示铁峰很高,从而判断是赤铁矿,并且它是在包裹体圈闭后析出的。因为包裹体内发现的含铁矿物很少在包裹体寄主矿物中出现。它的分布范围很窄,仅仅限于高盐度透辉石包裹体中。那些包裹体都是原生包裹体,均一温度相近。

表2 北落峡铁矿床包裹体特征
Table 2. Characteristics of fluid inclusions in the Beiluoxia iron deposit

类型 特征	A. 液相+气相+多相固晶	B. 液相+气相+(小盐晶)	C. 气相包裹体
大小	一般5—30 μ m 大者30—50 μ m	一般5—30 μ m 大者30—50 μ m	一般5—30 μ m
形状	负晶形、长柱状、管状	多边形、不规则形,负晶形、椭圆形、管状	不规则形
气体百分数 ($\frac{V_{气}}{V_{总}}$ %)	20—50% 一般30—40%	10—40% 一般30%	50—95%
子矿物	子矿物复杂,多为石盐,还有钾盐、赤铁矿、石膏等子晶	常见小石盐子晶	见小石盐子晶
分布特征	是透辉石的主要包裹体类型	是方解石、绿帘石、石榴石	多集中于方解石、石榴石中
均一状态	气相最后消失,气相、固相同时消失,固相最后消失	中包裹体主要类型向液相均一	向气相均一
均一温度 ($^{\circ}$ C)	透辉石540—660	绿帘石380—440 方解石240—500 石榴石480—525	方解石240—460
盐度 (NaCl wt. %)	50—70	1.6—42	一般<0.01, 含盐晶的可达30

一般情况下,包裹体子晶是包裹体溶液处于过饱和状态而晶出,是成矿流体物质成分最直接的反映。根据包裹体子晶判断,成矿流体属NaCl-FeCl₂-H₂O体系,同时含少量CaSO₄、KCl组分。Potter等^[4]通过实验认为Na-K-Ca-Cl-Br-SO₄-H₂O体系的P-V-T-X值和有相同冷冻温度的NaCl-H₂O溶液P-V-T-X值偏离度小于 $\pm 1\%$,故作作者对包裹体的测温、测盐、测

压工作均建立在 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系基础之上, 样品平面位置见图2。

(二) 包裹体均一温度、盐度 以形态规则、分布孤立、无泄漏的各类型原生包裹体做为研究对象, 测定了北落峡矿床透辉石、绿帘石和方解石等矿物包裹体的均一温度、盐度。大部分测试工作在1350热台上完成, 少部分使用Chaixmeca冷热台完成。共取得均一温度数据150多个, 盐度数据90多个。未对均一温度进行“压力校正”, 因为前面谈到西安里侵入体侵位深度小于2.5km, 包裹体圈闭时压力不是很高。下面按照该矿床矿物形成顺序叙述各矿物包裹体测温结果。

透辉石: 北落峡矿床透辉石形成早于磁铁矿。矿物中包裹体多, 形态规则, A型: 液相+气相+多相固晶包裹体占绝大多数。表3列出了透辉石包裹体测试结果并绘制成均一温度和盐度直方图(图3)。其均一温度范围相当宽, $480-700^\circ\text{C}$, 但主要集中在 $540-660^\circ$, 盐度为50—70%; 加之包裹体内含相当多的铁子矿物, 显示出北落峡矿床成矿流体具高温、高盐度和高铁含量特征。此外由测试结果发现, 从5号矿体北部B293号样品到南部B271号样品, 尽管样品取自不同的标高, 但包裹体均一温度、盐度相近, 说明成矿流体温度和盐度梯度在水平及垂直方向上变化不大。这可能暗示成矿流体是垂直岩体接触带由岩体中部向边部运移的。

石榴石: 由于石榴石在北落峡铁矿床不很发育, 能够观测的样品不多。它们也形成于磁铁矿之前。包裹体类型较复杂, C型气相, B型气相+液相包裹体都有, 但以B型为主。从观测到的样品看, 其均一温度为 $480-525^\circ\text{C}$ (表4)。石榴石中未见含盐晶B型包裹体和A型包裹体, 温度及盐度均较透辉石为低。这些可能反映在石榴石形成阶段部分成矿流体已不

图2 5号矿体平面地质略图及样品位置

1—中奥陶统二—四段灰岩; 2—铁矿体; 3—钠长石化闪长岩, 东侧为闪长岩; 4—葡萄石化强钠长石化闪长岩; 5—强钠长石化闪长岩; 6—透辉石砂卡岩; 7—勘探线; 8—包裹体样点

Fig.2. Schematic geological map of No.5 orebody, showing sample locations.

1—2nd-4th members of Middle Ordovician limestone; 2—Iron orebody; 3—Albitized diorite; 4—Prehnitized-strong albitized diorite; 5—Strong albitized diorite; 6—Diopside skarn; 7—Exploration line; 8—inclusion sample.

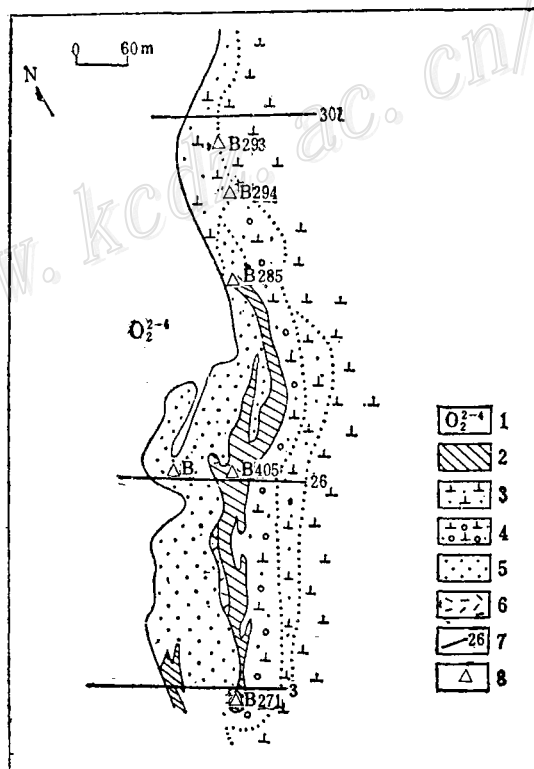


表3 透辉石包裹体测温结果

Table 3. Microthermometric data of diopside-hosted fluid inclusions

样品	位置	气相消失温度(°C)	固相消失温度(°C)	均一温度(°C)	盐度(wt. % NaCl)	平均温度(°C)	平均盐度(wt. % NaCl)
B293	18线附近 标高1510m	478	515	515	58.1	578	66
		490	622	622	71.8		
		500	584	584	66.4		
		516	591	591	67.6		
B405	26线附近 标高1510m	540	551	551	62	576	63.8
		523	602	602	69		
		爆破	550		62		
		爆破	550		62		
B285	6线附近 标高1470m	486	327	486	39.8	555	64.5
		497	550	550	62		
		500	587	587	66.9		
		506	582	582	66.1		
		523	550	550	62		
		501	577	577	65.3		
B271	3线附近 标高1505m	540	450	540	50.8	614	65.4
		540	450	540	50.8		
		545	520	545	58.8		
		592	469	592	52		
		652	535	652	61		
		652	535	652	61		
		671	520	671	58.8		
		579	579	579	65.7		
		659	659	659	77.6		
		679	579	679	66.2		
		650	535	650	61		
		617	520	617	58.6		
		未测	560		62.8		

很富盐和金属。

绿帘石：绿帘石形成时北落峡铁矿主体部分已经形成。这时圈闭的流体包裹体主要是B型气相+液相+(小盐晶)包裹体，大约有50%的包裹体在偏光镜下能看到小盐晶。包裹体形态呈管状、柱状和不规则多边形。测试结果反应在表4和图3上。其均一温度为390—440℃部分流体盐度达40wt.% NaCl，部分低于26wt.% NaCl，可能在12wt.% NaCl左右。绿帘石包裹体均一温度和盐度代表成矿后流体的温度和盐度。它的温度明显低于成矿前流体，盐度则出现分叉现象。流体盐度的不均匀性很可能反映此时有其它流体的混入。

方解石：方解石是北落峡铁矿成矿后期及成矿后最常见的脉石矿物之一。它的包裹体类型复杂，B型气相+液相+(小盐晶)、C型气相都有。形态相对规则，呈四边形、方解石负晶形、管状等。包裹体的均一温度、盐度变化范围很大。温度区段可分为三个：高温段500℃左右，中间段360—440℃，低温段240—280℃。像绿帘石一样，方解石包裹体的盐度也分为两段，一段位于35wt.% NaCl，另一段则低于26wt.% NaCl，大约是17wt.% NaCl，见表4和图

表 4 石榴石、绿帘石和方解石热台测温结果

Table 4. Microthermometric data of garnet, epidote and calcite-hosted fluid

inclusions						
样 品	矿 物	位 置	气相消失 温度(°C)	固 相 消 失 温 度(°C)	均一温度(°C)	盐度 (wt. % NaCl)
B294	石榴石	18线附近, 标高1510m	480		480	<26
			480		480	<26
			525		525	<26
			510		510	<26
	绿帘石	18线附近, 标高1510m	389	316	389	39
			424	338	424	41.5
			404	340	404	41.6
			440	343	440	41.6
			440	未测	440	
			440	未测	440	
			425		425	
			428		428	
			428		428	
			430		430	
			423		423	
			425		425	
			395		395	
	方解石	18线附近, 标高1510m	248	260	260	35.3
			254	254	254	34.9
			>350	280	>350	36.5
			450	225	450	33.2
			540	220	540	32.9
			510(两个)	285	510	36.7
			240	146	240	29.7
			353	未测	353	
			353	未测	353	
			254		254	
			442		442	
			446		446	
			370(两个)		370	
			375(4个)		375	
			347		347	
			305		305	
			280		280	

3。

上面谈到,在石榴石和方解石中常能见到C型气相包裹体和B型包裹体共存。加热时C型向气相均一,B型向液相均一,每对包裹体均一温度相近。作者测得的两对包裹体均一温度列于表5。气相和液相包裹体共存、包裹体均一温度、盐度变化范围大,这些都是沸腾包裹体的特征^[5]。这种包裹体在气、液两相不混溶情况下同时被圈闭。根据沸腾包裹体的均一温度、盐度即可求出包裹体的圈闭温度和圈闭压力。北落峡矿床部分方解石包裹体圈闭温度是327—

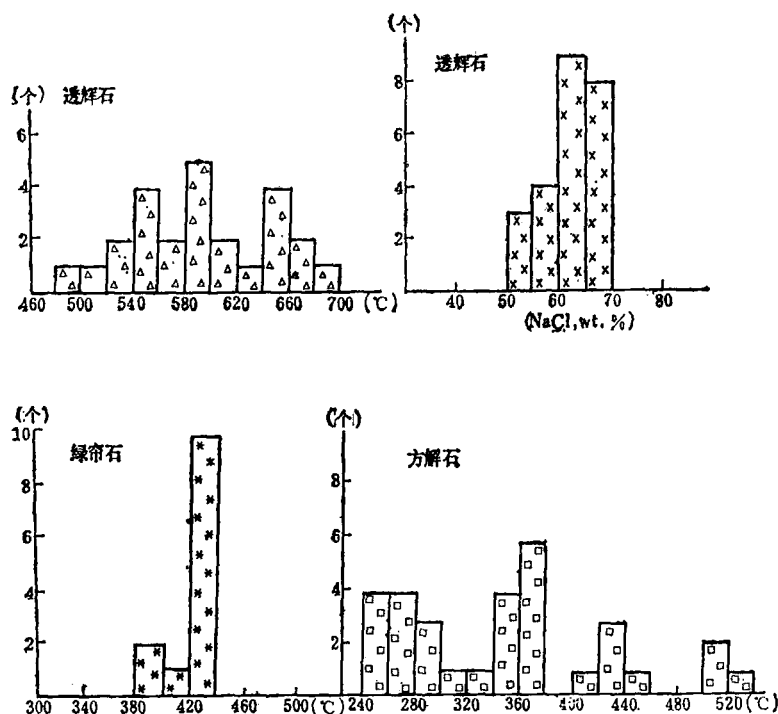


图3 透辉石包裹体均一温度、盐度, 绿帘石、方解石均一温度直方图

Fig.3. Histograms of homogenization temperatures and salinities of diopside and homogenization temperatures of epidote and calcite.

466℃。

从透辉石形成经磁铁矿阶段到绿帘石、方解石沉淀, 这是一个逐渐降温的过程, 各矿物中的包裹体真实地记录下了成矿流体温度、盐度变化情况。根据上述的测试结果可以划分出各矿物形成的温度范围: 透辉石为660—540℃, 石榴石为525—480℃, 绿帘石为440—390℃, 方解石为500—240℃, 磁铁矿晚于石榴石早于绿帘石, 所以它的沉淀温度大约在500—440℃之间(图4)。由此可见, 北落峡成矿流体温度相当高, 这么高温的流体只能来自岩浆。

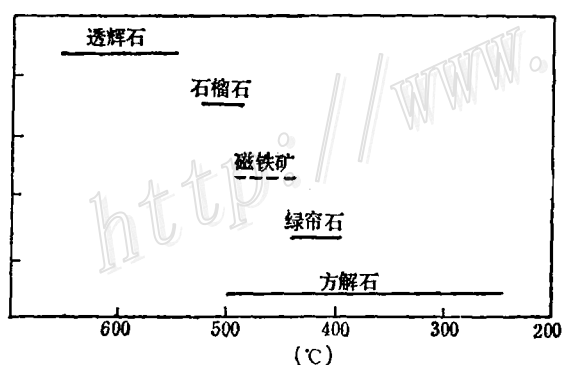


图4 北落峡铁矿几种主要矿物形成温度

Fig.4. Formation temperatures of some principal minerals in the Beiluoxia iron deposit.

透辉石、绿帘石和方解石包裹体各自形成了自己的分布区域。透辉石的包裹体位于高温、高盐

从温度-盐度关系图(图5)上能更清楚地看到流体演化特征。

度区;绿帘石和方解石的包裹体相对处于低温和中、低盐度区,反映出成矿前后流体性质的差异性,而磁铁矿的沉淀恰恰发生于这种转化阶段。绿帘石和方解石的包裹体明显分成两个温度-盐度区,反映出成矿后流体的不均匀性,这种不均匀性可能由其它来源流体的混入造成。

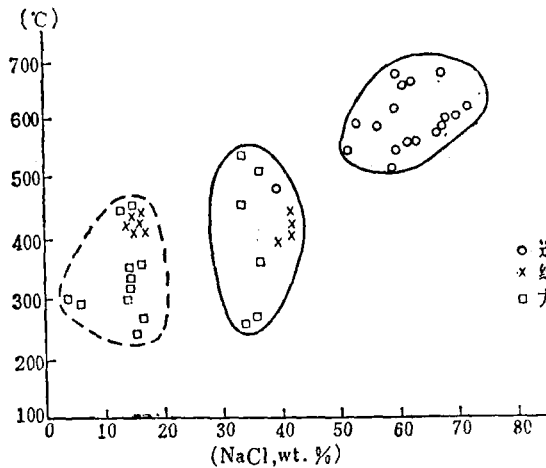


图5 几种主要矿物包裹体均一温度-盐度关系
Fig.5. Temperature-salinity variations of fluid inclusions with in some principal minerals.

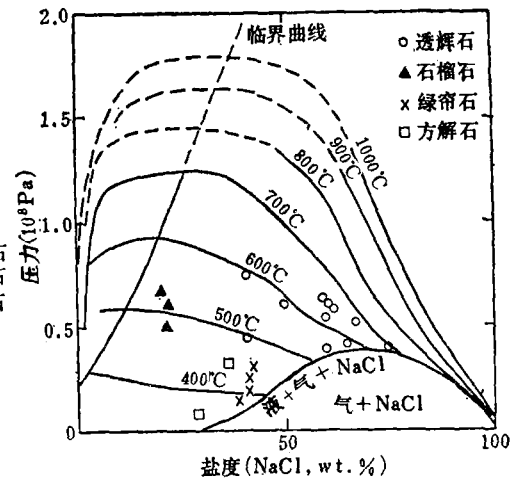


图6 北落峡矿床成矿流体平衡压力图解
Fig.6. Plots of fluid inclusion microthermometric data on Bodnar's diagram showing the balance pressures of ore-forming fluids in the Beiluo Xia iron deposit.

(三) 成矿流体的压力及沸腾现象 利用 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系的 $P-T-V-X$ 关系在得知 T 、 X 、 V 后即可求出流体的压力。Bodnar等^[6]通过人工合成石英中的流体包裹体研究了 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系在高温、高压下包裹体相体系特征。这些为我们研究北落峡矿床高温、高盐度成矿流体平衡压力提供了方便,但要求出包裹体圈闭压力一般还是很困难的,因为包裹体流体密度(或体积)不易求得。

北落峡铁矿包裹体向液相均一方式有三种:①气相最后消失;②气、固相同时消失;③固相最后消失,多数包裹体以第一种方式均一。后两种消失过程主要在透辉石包裹体中出现。不同的均一方式反映出包裹体圈闭前可能的存在状态。假设以第一种方式均一的包裹体圈闭时流体处于气-液平衡状态,以第二种方式均一的包裹体圈闭时流体处于气-液-固平衡状态,根据各矿物包裹体温度、盐度测试结果在Bodnar等^[6]的 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系共存相等温($P-X$)投影图上即可求出透辉石、石榴石、绿帘石包裹体的平衡压力或称最低压力,部分方解石包裹体的圈闭压力如表5,图6。目前还没有完整的 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系液/固相平衡实验资料,不易求出固相最后消失包裹体的平衡压力。

北落峡矿床透辉石形成的最小压力是50MPa,很接近上覆地层静岩压力。根据侵入体上覆地层厚度最大不超过2.5km,按每下降1km压力递增25MPa,则上覆地层最大静岩压力只有62.5MPa,所以透辉石形成时流体压力接近静岩压力。石榴石的形成时间和透辉石相近,但

表5 几种主要矿物形成压力(平衡压力)

Table 5. Formation pressures of some principal minerals (balance pressures)

样 品	矿 物	均一温度 (°C)	盐 度 (wt. % NaCl)	压力 (MPa)
B293	透辉石	578	66	51
B294	石榴石	500	<26	60
B294	绿帘石	423	40.9	25
B294	方解石	448	36.5	320①
		327	31	100①

①圈闭压力

它的均一温度、盐度都较透辉石的低。求出的平衡压力逾60MPa, 反映出当时成矿流体内压较高并且很可能开始出现沸腾。根据图6求得绿帘石平衡压力小于30MPa, 方解石沸腾包裹体形成压力大约为32—10MPa。即该矿床早期阶段透辉石包裹体流体平衡压力为50MPa; 石榴石阶段流体温度、盐度都降低, 平衡压力却增大, 达到60MPa。根据镜下包裹体观察当时流体可能出现沸腾。到绿帘石、方解石阶段流体压力只有20—30MPa。显然磁铁矿沉淀前后流体压力差至少有20—30MPa, 即磁铁矿是在较大压差环境下沉淀的。

流体沸腾现象: 北落峡矿床部分方解石包裹体具沸腾包裹体特征, 说明方解石形成早期

表6 包裹体液相化学成分

Table 6. Chemical composition of the liquid facies of inclusions

分析项目 样品		Na ⁺		K ⁺		Ca ²⁺		Mg ²⁺		Fe ³⁺	
		(μg/10g)	占阳离子 (mol %)	(μg/10g)	占阳离子 (mol %)	(μg/10g)	占阳离子 (mol %)	(μg/10g)	占阳离子 (mol %)	(μg/10g)	占阳离子 (mol %)
B	钠长石	26.7	69.88	16.50	25.30	0.30	0.60	1.80	4.2	0.21	0
B293	透辉石	11.89	36.62	0.54	0.70	3.43	6.34	15.17	43.66	10.19	12.68
B405	磁铁矿	4.58	27.40	0.15	0	7.65	26.03	8.16	46.58	—	0
B294	绿帘石	20.00	88.78	2.00	5.10	2.00	5.10	0.27	1.02	0.12	0
L300	方解石	47.85	60.82	2.25	1.75	41.40	30.12	6.00	7.31	0.11	0

分析项目 样品		F ⁻		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		Br ⁻		NO ₃ ⁻	
		(μg/10g)	占阴离子 (mol %)	(μg/10g)	占阴离子 (mol %)	(μg/10g)	占阴离子 (mol %)	(μg/10g)	占阴离子 (mol %)	(μg/10g)	占阴离子 (mol %)
B	钠长石	0.67	2.11	27.36	40.74	106.36	57.14	0.00	0.00	0.00	0.00
B293	透辉石	0.36	0.88	46.90	58.41	90.58	40.71	0.00	0.00	0.00	0.00
B405	磁铁矿	0.50	2.03	33.71	64.19	48.90	33.78	0.00	0.00	0.00	0.00
B294	绿帘石	5.74	14.27	52.93	70.62	31.81	15.17	0.00	0.00	0.00	0.00
L300	方解石	3.17	2.28	163.80	61.80	262.80	35.92	0.00	0.00	0.00	0.00

(中国地质科学院矿床地质研究所 程莱仙分析)

(圈闭温度较高)流体处于沸腾状态。成矿流体发生沸腾可追溯到石榴石阶段,这种认识主要源自对矿床北部芦沟地区石榴石包裹体的研究。在那儿石榴石包裹体特征和方解石的很相象。

流体发生沸腾可能和成矿物理环境由封闭体系突然转化为开放体系有关。岩体接触带或接触带附近的灰岩捕虏体部位是构造薄弱带。岩浆的上侵及冷凝收缩会使岩体上覆密闭盖层开启或产生收缩空间。在这种地质环境下流体温度、压力会迅速下降,物理化学环境变化大从而导致磁铁矿沉淀。北落峡铁矿石沉淀时流体可能自始至终处于沸腾状态。

(四)包裹体液相成分分析 除应用冷热台推定矿床成矿流体体系外,还采用化学方法分析了该区钠长石、透辉石、石榴石、磁铁矿、绿帘石和方解石包裹体液相成分(表6)。

将 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等元素换算成摩尔数,制成 Na-K-Ca 、 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 三角图(图7)能清楚地看到 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 构成流体主要离子组分。各矿物包裹体最主要的阳离子是 Na^+ ,其次是 Ca^{2+} ;最主要的阴离子是 Cl^- ,其次是 SO_4^{2-} 。所以准确地讲成矿流体属 Na^+ - Ca^{2+} - Cl^- - SO_4^{2-} - H_2O 体系。另外,包裹体液相成分化学分析对透辉石包裹体铁含量亦有显示。铁在阳离子中所占摩尔百分比近13%,而成矿后绿帘石、方解石包裹体溶液的铁含量都大大降低。

根据以上研究,北落峡铁矿成流体属以 NaCl 为主的复杂水-盐

体系,该体系中含有大量铁质。早期流体(透辉石阶段)的温度和盐度相当高,分别达到540—660℃和55—66wt.% NaCl 。以往对这种高盐度包裹体的成因讨论多集中于沸腾效应,认为沸腾会使包裹体盐度增高。但在透辉石阶段包裹体不具沸腾特征。作者认为气液两相不混溶作用是透辉石高盐度包裹体形成的主要原因。从图6看,600℃、60MPa条件下溶液位于 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系不混溶区。在这种条件下溶液会立即分离成高盐度的液相和低盐度的气相。由于这两种流体密度差异很大,气相会运移到系统的较浅部位,而液相则沿岩体外缘向下部和旁侧运移。这时由于钠长石化作用或岩浆分异作用金属会加入到体积较小但盐度颇高的流体中,从而形成该矿床高盐度、高铁的包裹体。这种情形和斑岩铜矿很相象。大量斑岩铜矿研究资料表明^[7],斑岩铜矿床矿化最好的部位是含盐晶包裹体最发育的部位。最近Whitney等^[8]做了400—700℃、100MPa条件下流体与含磁铁矿组分岩石平衡实验研究。实验资料显示出在水/岩比较小的情况下流体中可含有大量铁质,并且得出流体中铁含量最高的最佳物理化学条件是550—600℃、50—100MPa、高 NaCl 溶液。铁的溶解度最主要受溶液温度控制,实

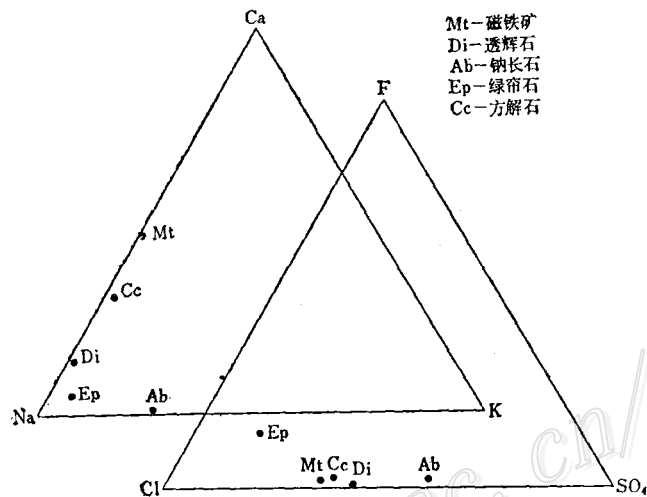


图7 包裹体化学成分三角图

Fig.7. Mole ratios of some chemical compositions of fluid inclusion leachates

验中铁在50MPa、600℃时浓度最高,可达0.25mol,而在400℃时只有0.01—0.3mol,浓度差达几十倍。这个实验从铁溶解度角度帮助我们解释了为什么只有在透辉石包裹体中出现大量含铁子矿物,因为形成北落峡铁矿流体的物化性状即是最佳含铁状态,大约600℃、50MPa和高盐度。

透辉石沉淀之后,从石榴石到早期方解石阶段可能由于压力释放致使流体发生沸腾。Drummond和Ohmoto^[9]的研究证实,400℃左右时刚开始若有5%的液相经沸腾转变为气相,溶液的pH值将上升一个数值,沉淀出绝大部分溶解的铁金属。与此同时流体温度从600℃降至400℃溶液的铁溶解度也随之降低几十倍。因此在降温和沸腾作用下磁铁矿发生大规模沉淀。

结 论

1. 北落峡矿床成矿流体属NaCl-H₂O体系,富含Fe²⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻等离子。流体的物理化学状态说明它是形成铁矿床最有利的成矿溶液。降温和沸腾是导致磁铁矿发生沉淀的最主要原因。

2. 透辉石包裹体盐度高达60wt.%NaCl,系流体气/液不混溶作用结果。流体运移方向很可能象钠长石化蚀变岩所展布的那样由中心向边部或下部进行推进。

本项研究工作得到国家教委《华北内生铜、铁、磷、钼矿床成矿条件和分布规律》重点项目科研资金资助。研究过程中又得到许多同志的支持,在此一并表示谢意。

主要参考文献

- [1] 吴利仁 1984 华东及邻区中、新生代火山岩 科学出版社
- [2] 冯钟燕、于方、魏绮英 1984 太行山北段接触交代铜矿的特征、矿液性质和起源 地质学报 第2期
- [3] Einaudi, M. T., Meinert, L. D. and Newberry, R. J., 1981, Skarn deposits, *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume, pp. 317—391.
- [4] Roedder, E. and Bodnar, R. J., 1980, Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, pp. 263—301.
- [5] Cunningham, C. G., 1978, Pressure gradients and boiling as mechanisms for localizing ore in porphyry systems. *U. S. Geol. Survey, Jour. Research.*, V. 6, pp. 745—754.
- [6] Bodnar, R. J., Burnham, C. W. and Sterner, S. M., 1985, Synthetic fluid inclusions in natural quartz. Determination of 1000°C and 1500 bars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, V. 49, pp. 1861—1873.
- [7] Nash, J. T., 1976, Fluid inclusion petrology—data from porphyry copper deposits and applications to exploration. *Geol. Survey Prof. Paper*, 907-D, 16p.
- [8] Whitney, J. A., Hemley, J. J. and Simon, F. O., 1985, The concentration of iron in chloride solutions equilibrated with synthetic granitic compositions: the sulfur-free system. *Econ. Geol.*, V. 80, pp. 444—460.
- [9] Drummond, S. E. and Ohmoto, H., 1985, Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Econ. Geol.*, V. 80, pp. 126—147.

GENESIS OF THE BEILUOXIA SKARN IRON DEPOSIT IN SHANXI PROVINCE. FLUID INCLUSION EVIDENCE

Li Ning, Feng Zhongyian and Yu Fang

(Department of Geology, Peking University, Beijing)

Abstract

The Beiluoxia skarn iron deposit in Shanxi province is a replacement product of Middle Ordovician limestone adjacent to a Mesozoic diorite phacolith. The diorite intrusion has been strongly albitized towards the orebodies. Post-magmatic hydrothermal and albitization fluids served as the main iron source for the Beiluoxia deposit. The major gangue minerals include early diopside and garnet and late epidote and calcite. Magnetite precipitated earlier than epidote but later than garnet. The fluid inclusions can be divided into three compositionally distinct groups: (A) liquid+gas+multiphase solids (540—660°C, with salinities of 50—70 NaCl wt% equiv.), (B) liquid+gas (+halite) (240—525°C, 1.6—42 NaCl wt% equiv.); (C) gas+liquid with gas phase > 50 (240—460°C). Type A mostly appears in diopside, whereas Type B and C mainly occur in calcite, garnet and epidote. All of these types of inclusions are traces of metallogenic fluids throughout the principal ore-forming process.

The fluid inclusion evidence shows that the fluids belong to the Na-Ca-Cl-SO₄ system with abundant iron in the early stage. Type A fluid, having the highest homogenization temperature and containing great amounts of Fe, Na and Cl, is considered to be the main ore-forming fluid. This is further supported by the fact that, of all inclusions, only Type A ones contain small crystals of hematite. Magnetite precipitation resulted from rapid decrease in fluid temperature. Fluid inclusions in calcite coeval with magnetite show indications of fluid boiling.