

冀南邯邢地区白涧和西石门夕卡岩型铁矿磁铁矿成因矿物学研究

张聚全^{1,2}, 李胜荣¹, 王吉中², 白明³, 卢静⁴, 魏宏飞², 聂潇¹, 刘海明¹

1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083
2. 石家庄经济学院 宝石与材料工艺学院, 河北 石家庄 050031
3. 河北地矿局 第十一地质大队, 河北 邢台 054000
4. 河北地矿局 石家庄综合地质大队, 河北 石家庄 050085

ZHANG Juquan^{1,2}, LI Shengrong¹, WANG Jizhong², BAI Ming³, LU Jing⁴, WEI Hongfei², NIE Xiao¹, LIU Haiming¹

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China
2. School of Gemology and Materials Technology, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China
3. The 11th Geological Brigade, Exploration Bureau of Geology and Mineral Resource, Xingtai 054000, China
4. Comprehensive Geological Brigade of Shijiazhuang, Exploration Bureau of Geology and Mineral Resource, Shijiazhuang 050085, China

ZHANG Juquan, LI Shengrong, WANG Jizhong, et al. The genetic mineralogical study of magnetite in Baijian and Xishimen skarn type of iron deposit, southern Hebei Province. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(3): 076-087

Abstract: By the genetic mineralogical study of compositions, thermoelectric properties, decrepitation temperature, and O isotopes of magnetite in Baijian and Xishimen skarn iron deposit, it is found that the magnetite in the ore between carbonate layers shows low Ti, Σ REE, decrepitation temperature, $\delta^{18}\text{O}$, and thermoelectric coefficients; that the magnetite in the ore of contacting belt shows an inverse characteristics. In the same time, REE in the ore between carbonate layers of Baijian and Xishimen iron deposit shows a positive abnormality, but that in the ore of contacting belt of Baijian shows a negative abnormality. The thermoelectric coefficient of the magnetite in the middle of a single ore body of Baijian iron deposit is smaller than that in the top or bottom. Based on the study above, especially, on the thermoelectric properties, the genetic and exploration model of skarn iron deposits in this region was built.

Key words: Handan-Xingtai area; skarn iron deposits; magnetite; genetic mineralogy

摘要:对邯邢地区典型夕卡岩型铁矿床白涧铁矿和西石门铁矿中不同产状的磁铁矿的成分、热电性、爆裂温度及O同位素进行了详细的成因矿物学研究。研究发现:层间矿体具有低Ti、 Σ REE、爆裂温度、 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征,热电性系数较小但变化范围大;接触带矿体为高Ti、 Σ REE、爆裂温度、 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征,热电性系数较大,变化范围小。白涧铁矿层间矿和西石门铁矿中磁铁矿的REE表现出Eu的正异常,而白涧铁矿接触带矿为负异常。白涧铁矿磁铁矿中单层矿体热电性系数具有中部小、顶底大的特征。综合磁铁矿的成因矿物学研究,以热电性的空间变化规律为基础,建立了该区夕卡岩型铁矿的成因和找矿模型。

关键词: 邯邢地区;夕卡岩型铁矿;磁铁矿;成因矿物学

中图分类号: P618.31;P611 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2013)03-0076-12

收稿日期:2013-02-20;修回日期:2013-03-30

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目(90914002);国土资源部公益性行业科研专项经费项目(200811011)

作者简介:张聚全(1983—),男,博士研究生,讲师,主要从事成因矿物学、矿床学研究。E-mail:juquan1983@163.com

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2013,20(3)

邯邢地区的夕卡岩型矿床具有品位高、规模大、易采选、成矿元素单一的特点,是我国重要的富铁矿类型。前人^[1-13]对其进行了大量的研究,对矿床的基本成矿规律、控矿因素、矿床成因有了较为全面认识。近几年,深部和外围找矿取得一些新的进展,特别是白涧铁矿深部发现了厚达 50 m 的矿体^[14],大大增加了探明储量。但是,随着矿体埋深的加大,传统地球物理的勘查方法有时很难区分岩体和矿体,找矿难度进一步加大。因此,亟需建立一个有效的成因和找矿模型。成因矿物学和找矿矿物学已被证明是一种有效的矿床成因和矿产预测的手段,特别是陈光远等^[15-16]和李胜荣等^[17-19]以黄铁矿、石英的标型特征为参数对胶东等地的金矿进行的矿物学填图,取得了丰硕成果。磁铁矿作为铁矿石中的主要矿物之一以及岩石中常见的副矿物,对于成矿和成岩作用的研究具有重要的标型意义。许国风和邵洁涟^[20]、林师整^[21]、陈光远等^[22]等对不同成因的磁铁矿进行了详细的成因矿物学研究,建立了磁铁矿的矿物标型。随着研究的深入和测试技术的发展,磁铁矿的成分标型得到了进一步的发展,研究领域从 V、Ti、Al、Mg、Mn、Ca、Si、Co、Ni 等元素,扩展到了磁铁矿中

其他微量元素,特别是稀土元素的分布特征得到了进一步的研究^[23-29]。本次研究对河北省南部邯邢地区白涧和西石门两个大型夕卡岩型铁矿中的磁铁矿进行了系统的成因矿物学研究,通过化学成分、热电系数、爆裂温度及氧同位素的研究探讨了不同产状的矿体的形成条件和形成机制的差异,并尝试建立了邯邢地区夕卡岩型铁矿的成因与找矿模型。

1 区域地质背景

本区位于赞皇隆起东南缘,区内自东向西依次发育太古宙赞皇群、元古宙长城系、古生代寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、中生代白垩系和新生代第三系地层(图 1)。岩浆活动受东西向或北西西向的隐伏基底断裂带与北北东向或南北向深大断裂交汇部位的控制^[30]。与成矿有关的岩浆岩主要为辉长岩-角闪闪长岩、闪长岩-二长岩系列的岩石^[1-2],主要分布在矿区西部和中部岩带(图 1)。岩石富 Na,多呈似层状、层状以及复杂形态的岩株产出,其与中奥陶统马家沟组、磁县组、峰峰组地层接触带及其附近为矿体的主要赋存部位^[1-2,11-13]。

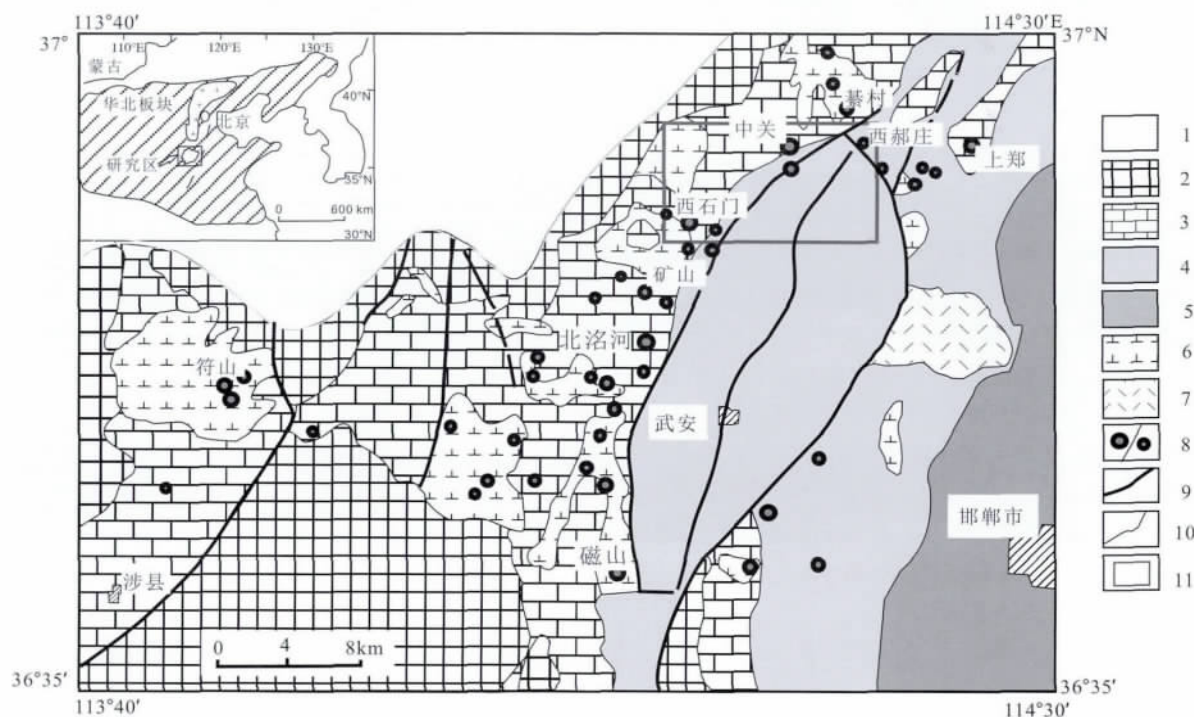


图 1 区域地质图^[7,11]

Fig. 1 Map of regional geology^[7,11]

1—前寒武纪地层;2—寒武纪—早奥陶世地层;3—中奥陶世地层;4—石炭纪—二叠纪地层;5—第三纪地层;6—闪长岩—二长岩杂岩体;7—正长岩杂岩体;8—铁矿;9—断裂;10—地层界限;11—研究区范围。

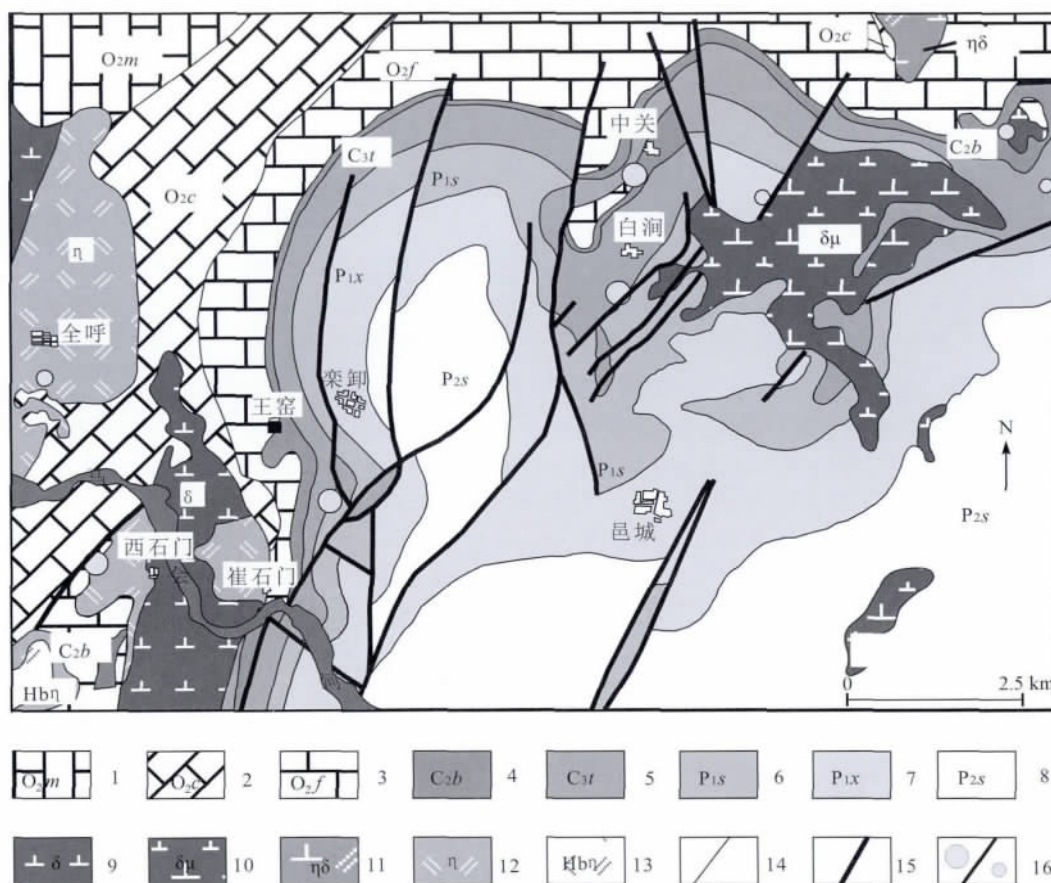


图2 西石门—白洞一带地质略图

(据河北省地矿局第十一地质大队资料^①修改)

Fig.2 Geological sketch map of Xishimen and Baijian

1—奥陶系马家沟组灰岩;2—奥陶系磁县组灰岩;3—奥陶系峰峰组灰岩;4—石炭系本溪组泥岩、页岩;5—石炭系太原组泥岩、页岩;6—二叠系山西组泥岩、页岩;7—二叠系下石盒子组泥岩、页岩;8—二叠系上石盒子组泥岩、页岩;9—闪长岩;10—闪长玢岩;11—二长闪长岩;12—二长岩;13—角闪二长岩;14—地层界限;15—断层;16—铁矿。

区内共有大小矿床百余处,矿体形态多样,矿床规模差异悬殊。多数小型矿床矿体形态复杂,产状变化较大,大型矿体一般呈平缓的似层状产出^[11]。矿化类型主要为磁铁矿,伴生的 Co、S、Cu、Ni、Se、Te、Au、Ag 等元素可以综合回收利用^[31]。围岩蚀变分带明显,从岩浆岩到碳酸盐岩一般可以分为原岩、钠长石化带、夕卡岩化带、磁铁矿体、大理岩化带、碳酸盐岩地层^[3-4,11],其中夕卡岩化带往往与磁铁矿体重叠。前人研究^[1-2]表明钠长石化的强度和规模与成矿规模呈正比。

2 矿床地质特征

2.1 白洞铁矿

白洞铁矿床为邯邢地区典型的夕卡岩型铁矿床。矿体的产出受南北向展布的中关—白洞背斜控

制(图2),矿体主要赋存于背斜东翼岩浆岩与中奥陶统灰岩接触带及其附近 300 m 范围内的灰岩中(图3)。矿体形态受接触面构造形态及灰岩层间破碎带的控制,长轴方向为 NW,长约 1 500 m,宽 800 m。与成矿有关的岩浆岩为闪长玢岩、二长岩。矿体下部的岩体广泛发育方柱石化、钠长石化、高岭土化。夕卡岩中广泛发育磁铁矿化,多数达到了工业品位,为矿体的主要组成部分。

矿石成分以磁铁矿为主,并含少量黄铁矿、黄铜矿、赤铁矿等,局部黄铁矿较多,呈脉状穿切早期形成的磁铁矿石。主要的脉石矿物为透辉石、金云母、透闪石、阳起石、蛇纹石、方解石、绿帘石等。矿石多呈细粒自形、半自形结构,条带状、块状、浸染状构

① 齐士坤. 河北省沙河市白洞铁矿区域基岩地质图. 邢台: 河北省地矿局第十一地质大队, 2008.

造,局部可见角砾状构造。

2.2 西石门铁矿

西石门铁矿是本地区已探明的最大的铁矿^[12]。矿体主要产于中奥陶统马家沟组灰岩与燕山期闪长岩、二长岩侵入体接触带或其边侧。主要控矿构造

以 NNE—NE 向褶皱为主, NNE 向断裂构造次之。矿区内已发现磁铁矿矿体 28 个, 矿体呈似层状、透镜状、囊状和不规则状等形态(图 4)。主矿体位于接触带, 矿体长 5 020 m, 厚度一般为 1.2~32.0 m, 最大厚度为 103.42 m, 平均为 15.13 m^[12]。

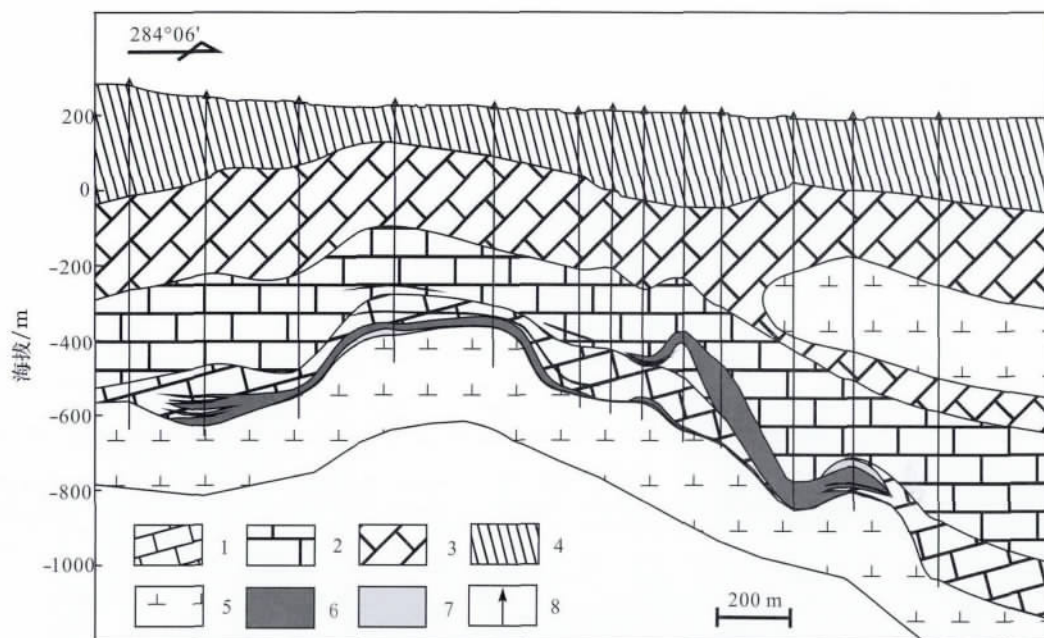


图 3 白洞铁矿第 28 线剖面图

(据河北省地矿局第十一地质大队资料修改^①)

Fig. 3 The profile map of the 28th exploration line of Baijiao iron deposit

1—奥陶系马家沟组灰岩;2—奥陶系磁县组灰岩;3—奥陶系峰峰组灰岩;4—石炭系与二叠系泥岩、页岩;5—蚀变闪长岩;6—矿体;7—夕卡岩;8—钻孔。

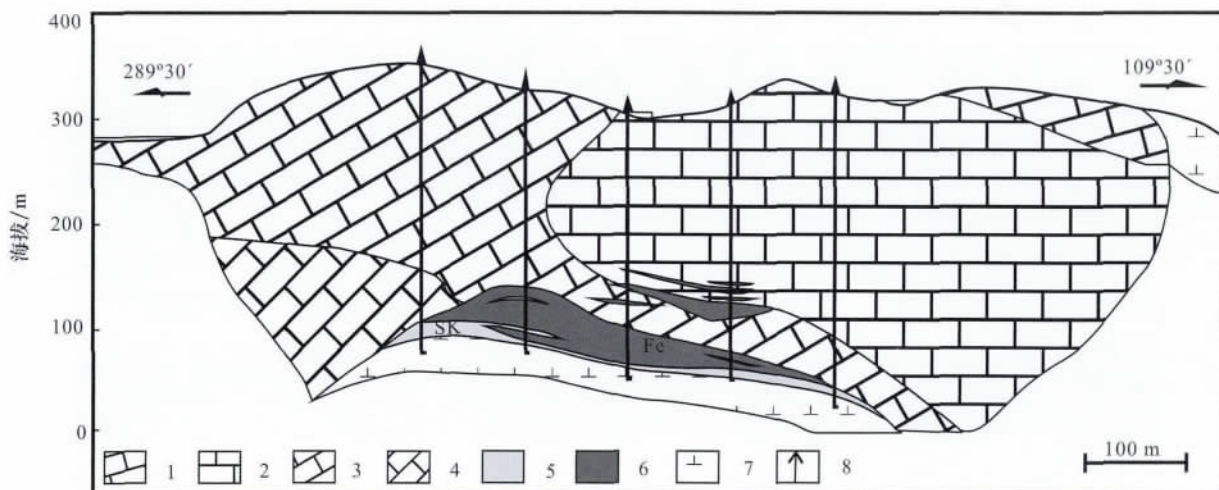


图 4 西石门铁矿 5 号勘探线剖面图

(据西石门铁矿资料修改^②)

Fig. 4 The profile map of the 5th exploration line of Xishimen iron deposit

1—奥陶系马家沟组一段灰岩;2—奥陶系马家沟组二段灰岩;3—奥陶系马家沟组三段灰岩;4—奥陶系磁县组一段灰岩;5—夕卡岩;6—矿体;7—蚀变闪长岩;8—钻孔。

① 齐士坤. 白洞铁矿区 28 线设计地质剖面图. 邢台: 河北省地矿局第十一地质大队, 2009.

② 王志国. 河北省武县西石门铁矿 V-V' 水文地质剖面图. 武安: 河北省武安县西石门铁矿, 1974.

矿石成分以磁铁矿为主,次为黄铁矿、黄铜矿、假象赤铁矿等。主要的脉石矿物为透辉石、蛇纹石、金云母、透闪石、阳起石、方解石、绿泥石、方柱石、绿帘石等,局部有石榴子石产出。矿石多呈中细粒自形-半自形结构,致密块状或块状、浸染状、条带状、土状、蜂巢状、斑杂状、角砾状及团块状构造。

3 样品特征及分析测试

3.1 样品特征

本次研究选取白洞 5 个典型钻孔岩心中不同位置的样品和西石门铁矿不同中段和钻孔的多组样品(具体样品编号参见表 1、2、3)进行了系统研究。样品构造以条带状、浸染状(图 5a、b、c)、团块状为主。主要矿石矿物为磁铁矿,粒度 0.1~0.4 mm,自形-半自形(图 5d、e、f、g、h、i),部分样品可见交代结构,为晚期赤铁矿沿磁铁矿边部交代形成(图 5g)。除磁铁矿外,常见的金属矿物为黄铁矿,其形成较晚,常呈它形

粒状,在磁铁矿间填隙产出(图 5h)。脉石矿物具有较为明显的分带性,接触带附近以透辉石为主(图 5d),离接触带较远处主要为蛇纹石、方解石等矿物(图 5e、f),过渡带常见金云母、透闪石-阳起石等矿物。

3.2 分析测试

本次工作对磁铁矿进行了微量元素、热电性、爆裂温度和氧同位素的研究。样品测试前进行了单矿物的挑纯,具体步骤如下:(1)对矿石进行了破碎、筛分;(2)根据不同测试需要对不同粒度的磁铁矿分别进行挑纯;(3)对挑纯样品用蒸馏水进行清洗和缓慢烘干。具体测试方法和条件如下。

微量元素测试选取了白洞铁矿 ZK0612 不同位置的 4 件样品和西石门铁矿的 2 件样品,测试样品的粒径为 0.154~0.2 mm。分析工作在核工业第三研究院的 Element I 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)上完成,含量 $>1 \times 10^{-6}$ 的元素分析误差 $<5\%$, $<1 \times 10^{-6}$ 的元素分析误差 $<10\%$,分析结果见表 1。

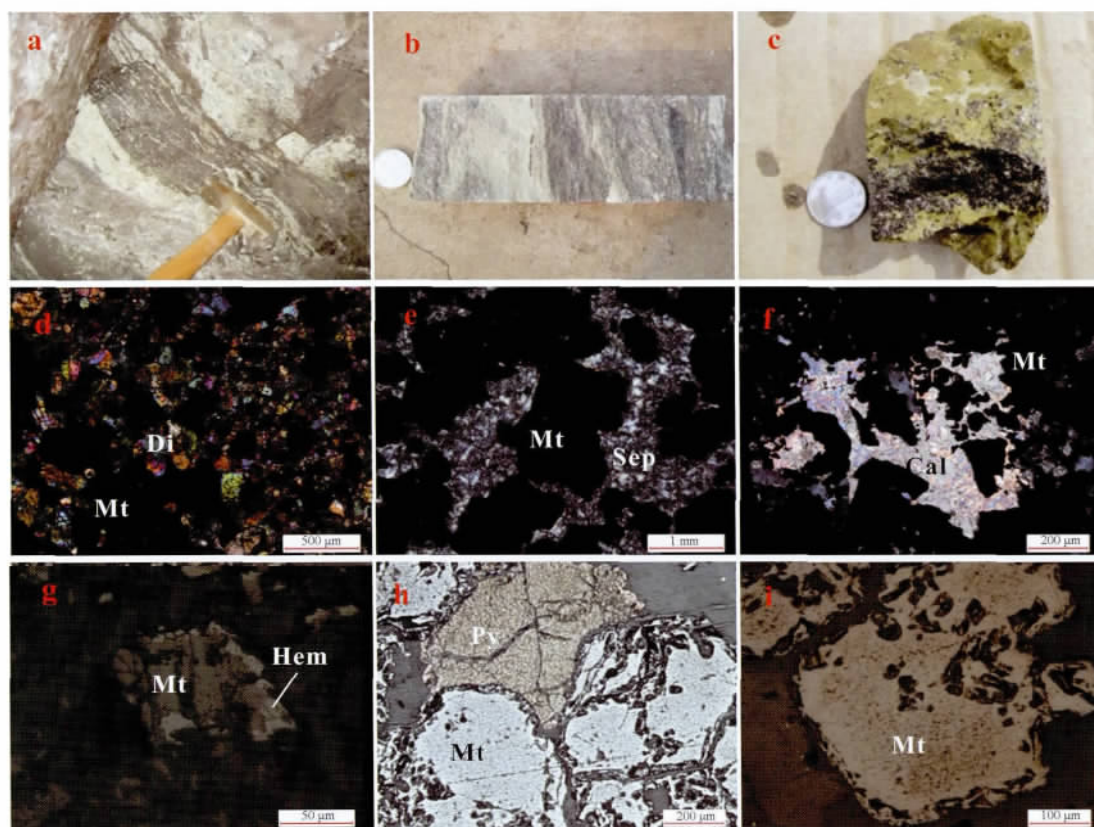


图 5 矿石的结构构造及其矿物组成

Fig. 5 The texture and coexist minerals of ores

a—西石门条带状矿石, b、c—白洞条带状矿石; d、e、f—不同产状的磁铁矿及其共生矿物(正交偏光); g、h、i—磁铁矿的结构(反射光); Di—透辉石; Mt—磁铁矿; Sep—蛇纹石; Cal—方解石; Hem—赤铁矿; Py—黄铁矿。

表 1 邯邢地区夕卡岩型铁矿磁铁矿微量元素化学成分分析

Table 1 The trace elements of magnetite from skarn iron deposits in Handan-Xingtai area

样品号	$w_b/10^{-6}$														
	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Nb	Mo
ZK0612-631	0.575	0.071	0.187	391.000	5.230	53.600	87.400	1.470	45.300	29.100	1.230	2.680	0.081	0.154	0.398
ZK0612-677.5	2.830	0.066	0.546	456.000	7.680	59.800	61.000	3.250	47.500	25.700	0.806	4.650	0.130	0.261	0.599
ZK0612-770	0.746	0.347	0.568	278.000	13.100	60.700	135.000	1.870	31.600	18.700	2.990	4.470	0.256	0.324	0.701
ZK0612-787	1.390	1.360	0.493	987.000	9.040	38.100	115.000	6.910	25.500	22.800	1.450	5.020	1.230	0.582	8.590
M89-5	1.940	0.084	0.384	402.000	8.920	49.400	12.500	3.070	174.000	18.300	1.550	10.800	0.341	0.264	0.303
b38	0.789	0.085	0.457	330.000	3.000	41.400	5.640	3.780	51.800	15.500	0.649	1.470	0.073	0.233	0.312
样品号	$w_b/10^{-6}$														
	Cd	In	Sb	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
ZK0612-631	0.061	0.024	0.136	0.039	38.000	0.086	0.105	0.011	0.043	0.019	0.013	—	0.002	0.007	0.002
ZK0612-677.5	0.045	0.026	0.268	0.064	92.500	0.223	0.293	0.030	0.184	0.028	0.031	0.013	0.002	0.035	0.004
ZK0612-770	0.037	0.012	0.088	0.090	21.400	0.538	0.733	0.077	0.286	0.053	0.009	0.063	0.007	0.036	0.013
ZK0612-787	0.057	0.021	0.193	0.045	26.100	2.780	4.110	0.436	1.600	0.265	0.044	0.307	0.041	0.207	0.049
M89-5	0.021	0.016	0.176	0.052	24.200	0.358	0.462	0.049	0.206	0.027	0.021	0.035	0.008	0.041	0.012
b38	0.031	0.028	0.079	0.033	14.200	0.095	0.131	0.012	0.047	0.006	0.003	0.002	0.001	—	0.001
样品号	$w_b/10^{-6}$														
	Er	Tm	Yb	Lu	Ta	W	Re	Tl	Pb	Bi	Th	U	Zr	Hf	Al
ZK0612-631	0.010	0.002	0.011	0.003	0.023	0.179	0.000	0.002	7.080	0.237	0.073	0.029	0.920	0.051	1 688.000
ZK0612-677.5	0.007	0.005	0.015	0.010	0.025	0.384	0.000	0.009	12.900	0.349	0.112	0.125	1.300	0.080	1 516.000
ZK0612-770	0.027	0.006	0.054	0.010	0.079	0.222	0.000	0.014	16.200	0.103	0.348	0.084	1.140	0.038	1 255.000
ZK0612-787	0.180	0.021	0.121	0.024	0.068	0.316	0.000	0.010	6.330	0.235	1.920	0.249	3.820	0.175	1 307.000
M89-5	0.040	0.011	0.082	0.015	0.069	0.113	0.000	0.008	4.740	0.042	0.220	0.029	2.270	0.106	2 763.000
b38	0.008	0.001	0.017	0.001	0.060	0.093	0.000	0.005	2.940	0.021	0.059	0.013	0.893	0.109	1 015.000
样品号	$w_b/10^{-6}$								$w_b/10^{-6}$						
	Ca	Na	Mg	Ti	Mn	ΣREE	LREE	HREE	LREE	(La/Yb) _N	δEu	δCe			
ZK0612-631	240.000	207.000	3 664.000	197.000	405.000	0.314	0.277	0.037	7.486	5.608	1.918	0.717			
ZK0612-677.5	323.000	312.000	2 550.000	349.000	227.000	0.880	0.789	0.091	8.670	10.664	4.341	0.762			
ZK0612-770	468.000	527.000	7 344.000	448.000	513.000	1.912	1.696	0.216	7.852	7.146	0.475	0.778			
ZK0612-787	3 686.000	778.000	5 569.000	2 512.000	483.000	10.185	9.235	0.950	9.721	16.480	0.470	0.823			
M89-5	540.000	271.000	1 421.000	661.000	1 327.000	1.367	1.123	0.244	4.602	3.132	2.088	0.745			
b38	438.000	292.000	7 897.000	224.000	812.000	0.325	0.294	0.031	9.484	4.008	2.113	0.812			

注:测试者为核工业第三研究院张良圣。

磁铁矿热电性测试选取了白涧和西石门不同钴孔、不同标高和产状的 46 件样品进行分析。分析样品的粒度为 0.2~0.26 mm。测试工作在中国地质大学(北京)矿物标型实验室的 BHTE-06 热电仪上对样品进行测试,活化温度 ΔT 为 49.5℃,测试精度 $\pm 1 \mu V/K$,每个样品测试 50 个值(ZK0612-621 为 7 个值)。并对测试数据进行了统计分析,结果见表 2。

本次工作选取白涧铁矿 ZK0612 不同位置的 4

件磁铁矿的样品进行热爆裂测试。选取粒度为 0.2~0.26 mm 的挑纯样品 30 mg,在中国地质科学院地质与地球物理研究所 DT-5 型矿物包裹体热爆仪进行测试,测试精度 $\pm 2^\circ C$ 。

磁铁矿氧同位素测试样品为 0.154~0.2 mm 的挑纯样品,测试工作在中国核工业第三研究院的 MAT-253 仪器上完成,采用 DZ/T 0184.13—1997 硅酸盐及氧化物矿物氧同位素组成的五氟化溴法测定,分析精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$,结果见表 3。

表 2 白洞、西石门铁矿磁铁矿热电性系数统计表

Table 2 Thermoelectric properties of magnetite from Baijian and Xishimen iron deposits

样品编号	矿体类型	热电系数范围 /($\mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$)	热电系数均值 /($\mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$)	样品编号	矿体类型	热电系数范围 /($\mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$)	热电系数均值 /($\mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$)
ZK0601-760	接触带矿	-56~-45	-53	ZK0615-660	层间矿	-64~-53	-58
ZK0601-767	接触带矿	-57~-50	-54	ZK0615-667	层间矿	-80~-52	-61
ZK0601-772	接触带矿	-56~-50	-54	ZK0615-688	层间矿	-68~-50	-60
ZK0601-776	接触带矿	-60~-50	-56	ZK0615-707	层间矿	-60~-49	-56
ZK0604-924	层间矿	-62~-53	-58	ZK0615-783	层间矿	-69~-54	-63
ZK0604-933	层间矿	-59~-54	-56	ZK0615-787	层间矿	-69~-53	-61
ZK0604-942	层间矿	-62~-54	-57	ZK0615-789	层间矿	-65~-58	-61
ZK0604-948	层间矿	-62~-54	-57	ZK0620-668	层间矿	-57~-49	-54
ZK0604-953	层间矿	-59~-52	-56	ZK0620-730	层间矿	-60~-5	-56
ZK0604-958	层间矿	-59~-47	-55	b38	层间矿	-60~-54	-57
ZK0604-962	层间矿	-54~-46	-50	b40	层间矿	-60~-54	-57
ZK0604-973	层间矿	-59~-51	-55	M80-1-5	接触带矿	-58~-50	-55
ZK0612-621	层间矿	-63~-52	-56	M89-7	接触带矿	-57~-50	-53
ZK0612-625	层间矿	-62~-48	-57	M89-3	接触带矿	-59~-50	-54
ZK0612-631	层间矿	-62~-48	-55	M89-5	接触带矿	-56~-51	-54
ZK0612-657	层间矿	-65~-51	-57	M89-6	接触带矿	-60~-51	-55
ZK0612-675	层间矿	-59~-51	-55	M89-7	接触带矿	-65~-51	-56
ZK0612-770	接触带矿	-57~-51	-55	N803-2-4	接触带矿	-63~-46	-56
ZK0612-775	接触带矿	-59~-53	-56	S401-1-5	接触带矿	-58~-51	-54
ZK0612-783	接触带矿	-58~-49	-54	S8013-1-3	接触带矿	-56~-52	-55
ZK0612-787	接触带矿	-56~-49	-53	M8013-2-4	接触带矿	-59~-50	-55
ZK0615-611	层间矿	-58~-44	-53	W-60/80-1	接触带矿	-57~-50	-54
ZK0615-646	层间矿	-61~-42	-56	ZK261-03	层间矿	-70~-60	-65

注:测试者为张聚全和魏宏飞。

表 3 邯邢地区磁铁矿氧同位素组成

Table 3 The compositions of $\delta^{18}\text{O}$ of magnetite in Handan and Xingtai area

样品号	测试对象	矿区	矿体位置	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
ZK261-04	磁铁矿	西石门	层间	5.8
W-60/80-1	磁铁矿	西石门	层间	5.5
M89-6	磁铁矿	西石门	接触带	7.2
ZK0612-666	磁铁矿	白洞	层间	5.6
ZK0612-786	磁铁矿	白洞	接触带	7.3

注:测试者为核工业第三研究院金贵善。

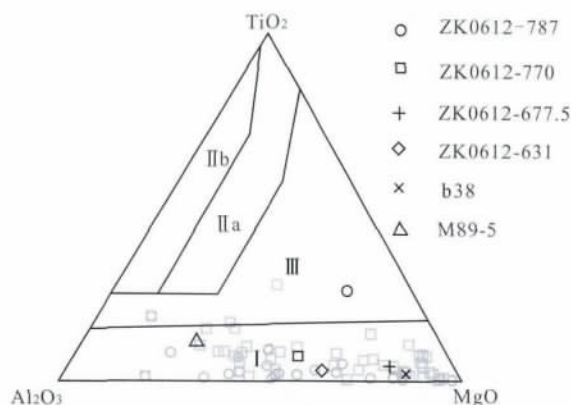
4 结果与讨论

4.1 Ti-Al-Mg-Mn-Ca-Na 的成分特征

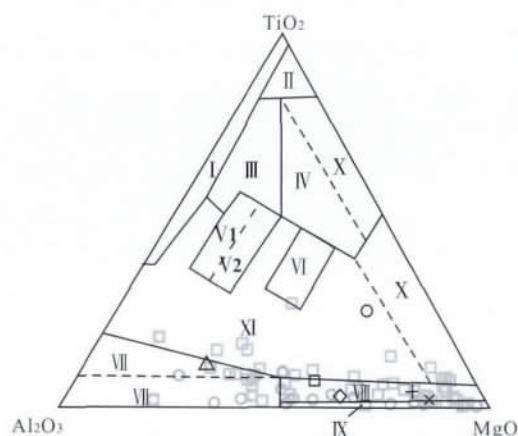
前人^[20-22,26,32]对磁铁矿中 Ti、Al、Mg、Mn、V 相对含量的成因意义进行了研究,表明不同成因的磁铁矿具有不同的成分特征。对本次测试的 6 个磁铁

矿样品以及前人^[31,33]获得的 71 个磁铁矿成分数据,进行了相应的换算和投图,结果见图 6~9。从图 6~8 可以看出,本区大部分磁铁矿落在夕卡岩型和热液型磁铁矿体的范围内,只有少数样品落入相邻的过渡区。在图 9 中,本次测试的样品主要落在夕卡岩型矿床(Skarn)区,以及与之相邻的铁氧化物铜金矿床(IOCG)、斑岩型矿床(Porphyry)投图区附近。综合上述结果表明,本区铁矿中的磁铁矿具有典型的夕卡岩型铁矿磁铁矿的成分特征,部分样品显示出从夕卡岩型矿床向热液型矿床过渡的趋势。

从表 1 可以看出,就一个矿区来看,从接触带矿到层间矿,磁铁矿中 Ca、Na 和 Ti 的含量呈减小趋势,Mg、Al 和 Mn 的含量变化不明显。白洞铁矿同一钻孔的 4 个样品从接触带到碳酸盐地层,Ti 含量分别为 $2\,512 \times 10^{-6}$ 、 448×10^{-6} 、 349×10^{-6} 、 197×10^{-6} , Na 含量分别为 778×10^{-6} 、 527×10^{-6} 、 312×10^{-6} 、 207×10^{-6} 。这表明随着与接触带距离的增大,Ti、Na

图6 磁铁矿的 $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 成因图解^[22]Fig. 6 $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ genetic diagram of magnetite^[22]

I—沉积变质-接触交代磁铁矿趋势区; II a—超基性-基性-中性岩浆磁铁矿趋势区; II b—酸性-碱性岩浆磁铁矿趋势区; 浅色方框数据来自文献[31]; 浅色圆圈数据来自文献[33]。

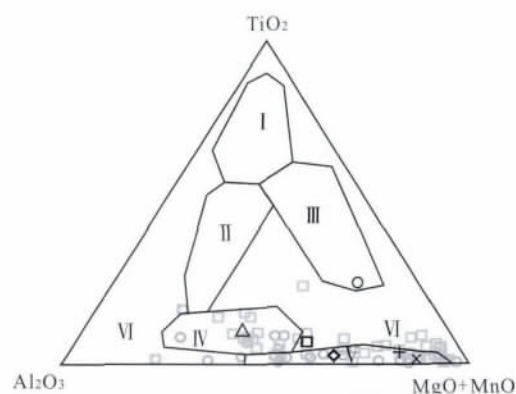
图7 磁铁矿 $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 成因图解^[21]Fig. 7 $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ genetic diagram of magnetite^[21]

I—花岗岩区(酸性岩浆岩、伟晶岩); II—玄武岩区(拉斑玄武岩等); III—辉长岩区(辉长岩、橄辉岩、二长岩斜长岩、副矿物及铁矿石); IV—橄辉岩区(橄辉岩、纯橄辉岩、辉岩、副矿物及铁矿石); V₁—角闪岩区(包括单斜辉石岩); V₂—闪长岩区; VI—金伯利岩区; VII—热液型及钙夕卡岩型(虚线以上主要为深成热液型, 以下为热液型及钙夕卡岩型); VIII—热液型, 镁夕卡岩型(深成热液型, 部分为热液交代型; 镁夕卡岩型); IX—沉积变质, 热液迭加型; X—碳酸盐岩区(靠上部者与超基性岩有关, 靠下部者与围岩交代有关); XI—过渡区。

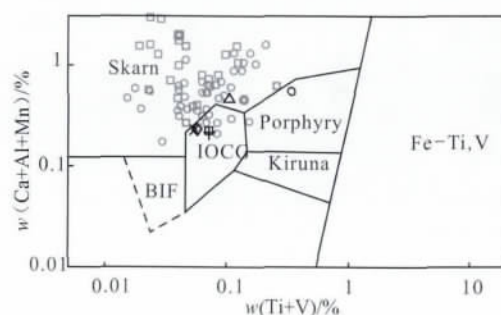
的含量明显减少。崔炳华^[34]用原子有效成键半径探讨了磁铁矿的形成温度, 发现 FeO 、 TiO_2 等有效成键半径大的组分在高温磁铁矿中含量高, 这与接触带矿体富 Ti, 层间矿体贫 Ti 的规律一致, 这也得到了岩相学研究的证实(图 5g)。这可能表明随着成矿作用的进行以及流体的运移, 氧逸度逐步升高。

4.2 微量元素特征

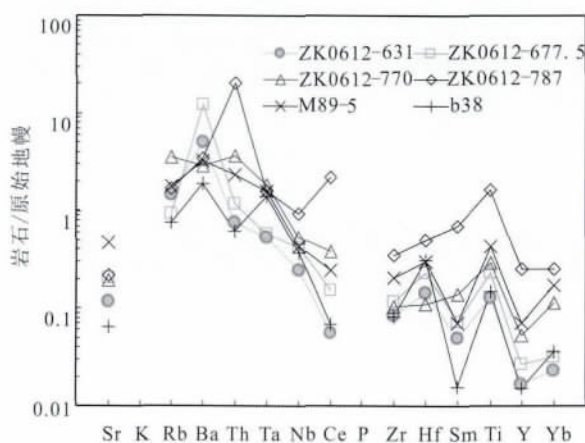
本次研究除 Ti、Al、Mg、Mn、Ca、Na 之外, 还对磁铁矿中其他 44 种微量元素进行了分析(表 1)。

图8 磁铁矿的 $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-(MgO+MnO)}$ 三角成因图解^[20]Fig. 8 $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-(MgO+MnO)}$ genetic diagram of magnetite^[20]

I—副矿物型; II—岩浆熔离钛磁铁矿型; III—火山岩型(玢岩型); IV—热液型; V—夕卡岩型; VI—沉积变质型。

图9 磁铁矿 $(\text{Ca}+\text{Al}+\text{Mn})\text{-(Ti+V)}$ 成因分类图解^[26]Fig. 9 $(\text{Ca}+\text{Al}+\text{Mn})\text{-(Ti+V)}$ genetic diagram of magnetite^[26]

IOCG—铁氧化物铜金矿床; Kiruna—瑞典基律纳磷灰石-磁铁矿矿床; BIF—条带状磁铁矿; Porphyry—斑岩型矿; Skarn—夕卡岩型矿床; Fe-Ti, V—Fe-Ti, V 矿床。

图10 磁铁矿微量元素原始地幔标准化蛛网图^[35]Fig. 10 Primitive mantle normalized trace elements distributions of magnetite^[35]

磁铁矿的微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 10)显示, 高场强元素(HFSE) Ta、Nb、Zr、Hf 表现出更

为明显的一致性,整体变化范围较小。Nielsen 等^[36-37]研究认为 Ti 与 HFSE 之间存在一个含量变化函数,磁铁矿在平衡状态下主量元素含量及物理化学条件强烈制约 Ta、Nb、Zr、Hf 等元素的含量。不同产状的磁铁矿中高场强元素与 Ti 的变化一致,呈现出从接触带到碳酸盐岩方向递减的演化规律,但其相对于 REE 的变化较小(如 Sm、Y、Yb 等元素),表明不同产状的磁铁矿为同源成矿流体不同演化阶段的产物。

4.3 稀土元素特征

对 6 个样品的 REE 进行球粒陨石标准化处理,对比前人^[38]对本区闪长岩中副矿物磁铁矿的稀土配分模式的研究,发现两者的稀土配分模式较为一致,并表现出从副矿物到接触带矿到层间矿稀土总量递减的趋势(图 11)。以上特征表明三者具有成因和演化关系。闪长岩和夕卡岩成岩早期为相对还原环境,形成的磁铁矿呈现铈的负异常;成矿流体演化后期为相对氧化环境,形成的磁铁矿铈呈正异常。成矿流体由早到晚氧逸度升高。这一结论与 Ti 含量变化以及薄片赤铁矿对磁铁矿的交代现象的指示意义一致。

4.4 热电性特征

由表 2 可以看出,本区磁铁矿样品的热电系数均值变化范围为 $-50.49 \sim -65.22 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。对白涧和西石门的不同产状的磁铁矿热电性系数进行统计,结果表明层间矿比接触带矿热电性系数小,但其变化范围大(图 12)。白涧不同钻孔中的磁铁矿样

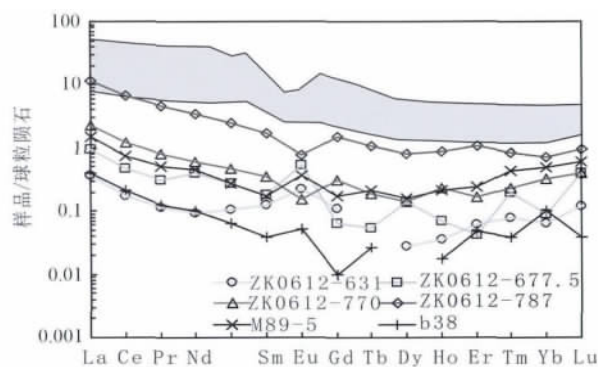


图 11 磁铁矿稀土元素球粒陨石标准化分布模式图^[35]

Fig. 11 Chondrite-normalized REE patterns of magnetite^[35]
阴影部分为邯邢地区闪长岩副矿物中磁铁矿稀土元素陨石标准化分布模式的包络线,据文献^[38]。

品的热电性特征的空间变化表明(图 13),单层矿体中部的样品热电性系数较小,向两侧逐渐增大。

磁铁矿的热电性主要与氧化系数($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$)和类质同象替代有关。理想的矿物成分($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}=2.22$)时,磁铁矿标准的热电系数(α)为 $-59 \sim -60 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,氧化系数增大,热电系数的绝对值增大^[20]。本区成矿流体以充填交代为特征,流体前锋以充填方式进入空隙,所形成的磁铁矿 Fe_2O_3 含量较高,热电性较大。因此,热电性的空间分布特征可能反映了成矿流体前锋的运移轨迹。

4.5 爆裂温度特征

白涧矿区钻孔 ZK0612 中 4 个磁铁矿样品的爆裂温度特征如图 14。结果显示层间矿体磁铁矿的爆裂温度在 400°C 以下,而接触带磁铁矿的爆裂温度在

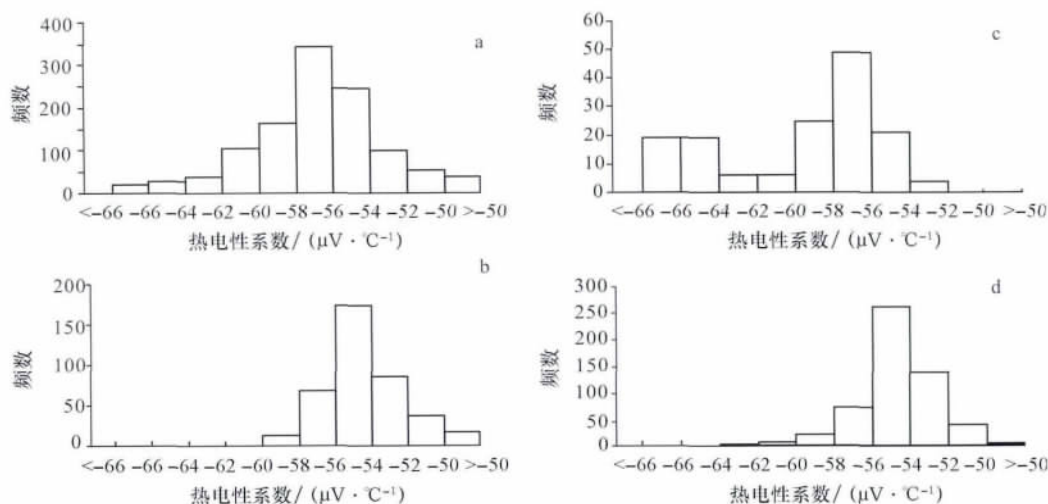


图 12 磁铁矿热电性直方图

Fig. 12 Statistical histogram of thermoelectric coefficients of magnetite
a—白涧接触带矿体;b—白涧层间矿体;c—西石门层间矿体;d—西石门接触带矿体。

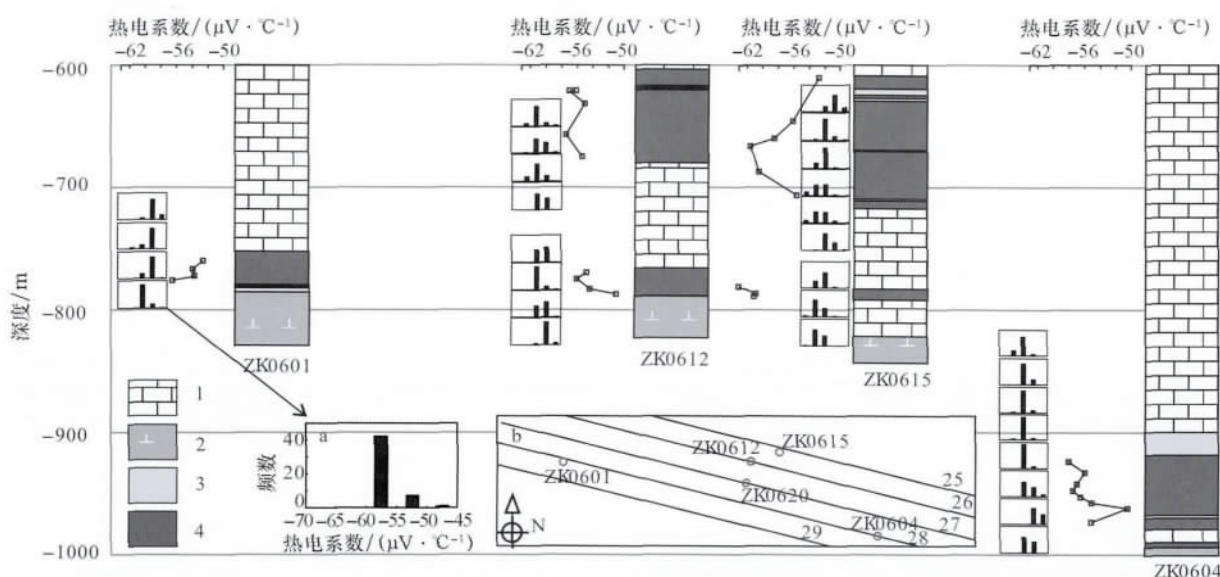


图 13 白洞磁铁矿热电性的空间变化

Fig. 13 Thermoelectric variety of magnetite in Baijiao iron deposit

1—碳酸盐岩地层;2—闪长岩;3—夕卡岩;4—矿体;a—热电性直方图;b—钻孔的空间分布。图中数字为勘探线。

500 °C 左右,反映了接触带成矿温度要大于层间矿。两者爆裂曲线也存在差异,层间矿爆裂峰较高,峰位温度低;接触带矿峰位温度高,爆裂峰不明显。

9‰)之内,表明含矿热液主要来自于岩浆。层间磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}$ 为 5.5~5.8,接触带为 7.2~7.3。由于层间矿为成矿流体充填碳酸盐建造中的膏岩层成矿的^[11,39-40],因此,这种差异可能是成矿后期有大量的建造水加入成矿流体造成的。

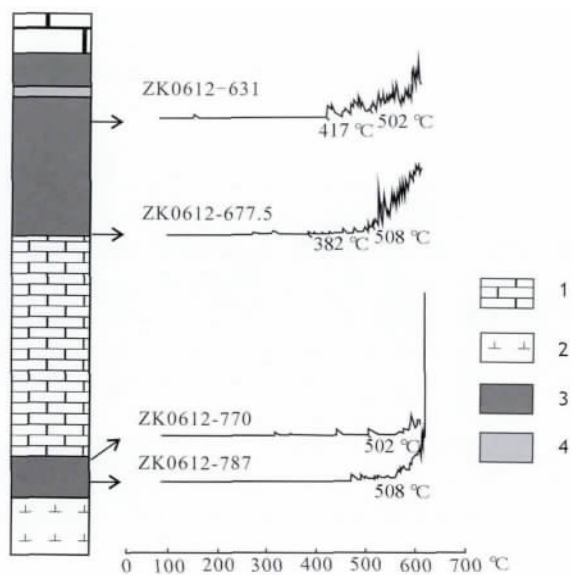


图 14 白洞磁铁矿流体包裹体爆裂温度曲线

Fig. 14 Decrepitation curves of magnetite in Baijiao iron deposit
1—中奥陶统碳酸盐岩地层;2—闪长岩;3—矿体;4—夕卡岩。测试者为中国科学院地质与地球物理研究所谢奕汉。

4.6 氧同位素特征

由表 3 可以看出,所有样品 $\delta^{18}\text{O}$ 的值为 5.5‰~7.3‰,位于岩浆水氧同位素的范围($\delta^{18}\text{O} = 5\text{‰} \sim$

5 成因与找矿模型

综上所述,邯邢地区成矿流体主要来自于岩浆,成矿流体在成矿和运移过程中成分和物理化学条件发生了明显的变化。成矿早期温度高, ΣREE 、Ti 和 Na 含量较高,氧逸度较低;成矿和运移过程中,温度逐渐降低, ΣREE 、Ti 和 Na 含量减少,氧逸度增大。这样的成矿作用过程导致磁铁矿成分和物理性质在矿体不同位置规律变化。根据磁铁矿热电性在空间上的变化规律和矿体的展布特征,我们建立了邯邢地区夕卡岩型铁矿的成因矿物学模型(图 15)。模型通过剖面上热电性的变化特征,推测了成矿流体的运动轨迹(箭头线所示),为矿床成因和成矿预测提供依据。

但是,由于成矿流体运移和成矿是在三维空间尺度进行的,建立完整的模型应当基于完整矿体的空间分布,同时还要考虑不同阶段成矿流体的叠加成矿作用。因此,进一步工作要在矿田范围内进行系统的成因矿物学填图。除热电性系数外,还要考

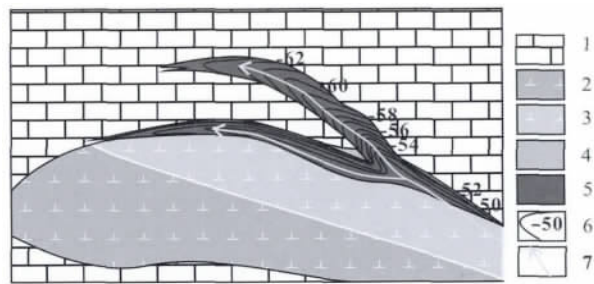


图 15 邯邢地区夕卡岩型磁铁矿床的成因与找矿模型

Fig. 15 The genetic and exploration model of skarn iron deposit in Handan and Xingtai area

1—碳酸盐岩地层;2—闪长岩;3—蚀变闪长岩;4—夕卡岩;5—矿体;6—热电性等值线及其数值(单位: $\mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$);7—成矿流体的运移方向。

虑其他标型参数,如磁铁矿的 Ti、Na 含量,其变化梯度较磁铁矿的热电性更大,有可能具有更好的成矿预测效果。前人^[30]已经尝试过运用 TiO_2 含量进行成矿流体运移轨迹的确定。

最近 Li 等^[41]及 Shen 等^[42]对本区西石门铁矿和北溟河铁矿矿石中的黄铁矿 He-Ar 同位素的研究表明,本区夕卡岩铁矿的主要成矿物质来自地壳,而与成矿相关的岩浆岩中大量继承锆石的存在也可能证明,富铁的结晶基底——赞皇群可能是重要的成矿物质来源。因此,邯邢地区的夕卡岩型铁矿的储量可能比基于钠长石化交代岩的体积估算的要大得多,具有良好的找矿前景。

相信,结合本区矿床地质和矿床成因研究,综合运用磁铁矿的物性标型、成分标型一定能够更好地建立邯邢地区夕卡岩型铁矿的成因与找矿模型,为进一步的勘探工作提供有力支撑。

感谢河北地质勘查局第十一地质大队和邯邢矿山局西石门铁矿的各位领导和技术人员在样品采集和资料收集工作中给予的大力帮助。同时感谢在测试工作中给予帮助各位老师。

参考文献

- [1] 沈保丰,陆松年,于恩泽,等. 某区磁铁矿床中钠质交代作用的特征及其找矿意义[J]. 地质科学, 1977(3): 263-274.
- [2] 沈保丰,翟安民,李增慧,等. 冀南邯邢式铁矿成矿地质条件分析[J]. 地质学报, 1981(2): 127-139.
- [3] 许晓峰. 从交代蚀变矿物标型特征研究冀南夕卡岩型铁矿床的形成[J]. 地质找矿论丛, 1986, 1(1): 50-56.
- [4] 刘英俊,李兆麟,赵梅芳,等. 华北邯邢式富铁矿形成条件的实验研究[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1982(4): 917-

927.

- [5] 牛树银,陈路,许传诗,等. 太行山地区地壳演化及成矿规律[M]. 北京:地震出版社, 1994: 181-183.
- [6] 真允庆,马丽华,李中生. 鞍山式铁矿与邯邢式铁矿的可能联系[J]. 地球科学: 武汉地质学院学报, 1984(4): 71-80.
- [7] 李黎明. 论邯邢式铁矿成矿构造控制因素[J]. 地质与勘探, 1986, 22(4): 1-11.
- [8] 冯钟燕,赖勇. 邯邢铁矿的蚀变矿化[J]. 矿床地质, 1991, 10(1): 71-80.
- [9] 董建华,陈斌,周凌. 太行山南段符山岩体的成因: 岩石学和地球化学证据[J]. 自然科学进展, 2003, 13(7): 767-774.
- [10] 彭头平,王岳军,范蔚茗,等. 南太行山闪长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及岩石成因研究[J]. 岩石学报, 2004, 20(5): 1253-1262.
- [11] 郑建民,毛景文,陈懋弘,等. 冀南邯邢—邢台地区夕卡岩铁矿的地质特征及成矿模式[J]. 地质通报, 2007, 26(2): 150-154.
- [12] 郑建民,谢桂青,刘琨,等. 河北省南部邯邢—邢台地区西石门夕卡岩型铁矿床金云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年及意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2513-2518.
- [13] 郑建民,谢桂青,陈懋弘,等. 岩体侵位机制对夕卡岩型矿床的制约: 以邯邢地区夕卡岩铁矿为例[J]. 矿床地质, 2007, 26(4): 481-486.
- [14] 孟贵祥,严加永,吕庆田,等. 邯邢式铁矿深部探测技术及综合找矿模式研究: 以河北省沙河市白洞铁矿床为例[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 493-502.
- [15] 陈光远,邵伟,孙岱生. 胶东金矿成因矿物学与找矿[M]. 重庆: 重庆出版社, 1989.
- [16] 陈光远,孙岱生,黄绍峰,等. 胶东灵山沟金矿成因矿物学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.
- [17] 李胜荣,陈光远,邵伟,等. 胶东乳山金矿双山子矿区黄铁矿环带结构的研究[J]. 矿物学报, 1994, 14(2): 152-156.
- [18] 李胜荣,陈光远,邵伟,等. 石英环带结构填图有效性研究: 以胶东乳山金矿为例[J]. 矿物学报, 1994, 14(4): 378-382.
- [19] 李胜荣,陈光远,邵伟,等. 胶东乳山金矿田成因矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [20] 徐国凤,邵洁涟. 磁铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质与勘探, 1979, 3: 30-37.
- [21] 林师整. 磁铁矿矿物化学、成因及演化的探讨[J]. 矿物学报, 1982(3): 166-174.
- [22] 陈光远,孙岱生,殷辉安. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1987: 1-874.
- [23] Schock H H. Distribution of rare-earth and other trace elements in magnetites[J]. Chemical Geology, 1979, 26(1/2): 119-133.
- [24] Frietsch D R, Perdahl J A. Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types[J]. Ore Geology Reviews, 1995, 9(6): 489-510.
- [25] Nadoll P, Koenig A E. LA-ICP-MS of magnetite: Methods and reference materials[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2011, 26(9): 1872-1877.

- [26] Dupuis C, Beaudoin G. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types[J]. Mineralium Deposita, 2011, 46(4): 319-335. doi: 10.1007/s00126-011-0334-y.
- [27] 张德贤, 戴塔根, 胡毅. 磁铁矿中微量元素的激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱分析方法探讨[J]. 岩矿测试, 2012, 31(1): 120-126.
- [28] 段超, 李延河, 袁顺达, 等. 宁芜矿集区凹山铁矿床磁铁矿元素地球化学特征及其对成矿作用的制约[J]. 岩石学报, 2012, 28(1): 243-257.
- [29] 洪为, 张作衡, 蒋宗胜, 等. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床磁铁矿和石榴石微量元素特征及其对矿床成因的制约[J]. 岩石学报, 2012, 28(7): 2089-2102.
- [30] 华北冶金地质勘探公司五一八队. 河北某地磁铁矿床控矿因素与矿床成因探讨[C]//华北富铁矿工作经验交流会议地质资料汇编. 北京: 地质出版社, 1975: 62-87.
- [31] 华北地质科学研究所, 河北地质学院. 太行山等地区邯邢式铁矿成矿规律和找矿方向[R]. 1976: 1-154.
- [32] Nadoll P. Geochemistry of Magnetite from Hydrothermal Ore Deposits and Host Rocks: Case Studies from the Proterozoic Belt Supergroup, Cu-Mo-Porphyry + Skarn and Climax-Mo Deposits in the Western United States[D]. Auckland: University of Auckland, 2009: 1-238.
- [33] 河北省地质局第十一地质大队. 河北省邯邢地区邯邢式铁矿成矿地质特征及找矿方向[R]. 1986: 1-227.
- [34] 崔炳华. 试用原子有效成键半径探讨磁铁矿的形成温度[J]. 矿物岩石, 1987, 7(2): 75-79.
- [35] 路远发. Geokit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459-464.
- [36] Nielsen R L, Beard J S. Magnetite-melt HFSE partitioning[J]. Chemical Geology, 2000, 164: 21-34.
- [37] Nielsen R L, Forsythe L M, Gallahan W E, et al. Major and trace-element magnetite-melt equilibria[J]. Chemical Geology, 1994, 117: 167-191.
- [38] 宋新宇, 冯钟燕. 太行山南段中生代侵入体微量元素地球化学及岩浆源区性质探讨[J]. 华北地质矿产杂志, 1999, 14(1): 1-17.
- [39] 蔡本俊, 李席珍, 魏寿彭, 等. 中奥陶统蒸发岩对邯邢式铁(硫)矿床的控制[J]. 矿物岩石, 1983(4): 31-44.
- [40] 蔡本俊, 李席珍, 魏寿彭, 等. 邯邢地区中奥陶统蒸发岩特征及其对内生铁(硫)矿床的控制[J]. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 1987(10): 1-84.
- [41] Li S R, Santosh M, Zhang H F, et al. Inhomogeneous lithospheric thinning in the central North China Craton: Zircon U-Pb and S-He-Ar isotopic record from magmatism and metallogeny in the Taihang Mountains[J]. Gondwana Research, 2013, 23: 141-160. doi: 10.1016/j.gr.2012.02.006.
- [42] Shen J F, Santosh M, Li S R, et al. The Beiminghe skarn iron deposit, eastern China: Geochronology, isotope geochemistry and implications for the destruction of the North China Craton[J]. Lithos, 2013, 156/157/158/159: 218-229.