

中国大陆科学钻探主孔高铁钛榴辉岩的磁性岩石学

曾庆理, 刘庆生*, 邱宁

中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

摘要: 中国大陆科学钻探 (CCSD) 主孔中 318~380 m (A)、420~470 m (B) 和 530~600 m (C) 深度分布三段高铁钛榴辉岩, 它们具有高全铁 (FeO_T) (平均 15.36%、14.09% 和 20.83%)、高 TiO_2 (平均 3.89%、3.28% 和 4.10%) 和低 SiO_2 (平均 44.64%、48.64% 和 41.10%) 含量分布特征。岩石磁性测量结果表明, A 段样品为低磁化率 (平均 $3.61 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)、低天然剩余磁化强度 (平均 $0.12 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) 和低 Q 值 (平均 8.03); B 段样品为高磁化率 (平均 $12.55 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) 和中等天然剩余磁化强度 (平均 $1.47 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) 及 Q 值 (平均 26.42); C 段样品磁化率介于 A、B 段之间 (平均 $9.73 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$), 而天然剩余磁化强度 (平均 $10.05 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 Q 值 (平均 138.571) 最大。岩石磁学和岩相学研究表明, A、B 两段样品代表了新鲜或轻度退变质榴辉岩的磁性特征, 但就研究的代表性样品的磁性岩石学特征而言, B 段样品显示的退变质程度稍高于 A 段; C 段榴辉岩样品密度最大, 主要为新鲜榴辉岩, 氧逸度明显高于 A、B 两段样品, 且存在大量出溶过程形成的以薄层结构为标志特征的赤铁矿—钛铁矿固溶体, 可能是样品高天然剩磁的主要原因。

关键词: 高铁钛榴辉岩; CCSD 主孔; 岩石磁学; 赤铁矿—钛铁矿固溶体; 磁化率。

中图分类号: P584

文章编号: 1000-2383(2009)06-0993-08

收稿日期: 2009-06-23

Magnetic Petrology of the High Fe-Ti Eclogite from the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Main Hole

ZENG Qing-li, LIU Qing-sheng*, QIU Ning

Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract The high Fe-Ti eclogites appear at the depth intervals from 318–380 m (A), 420–470 m (B) and 530–600 m (C) respectively in the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project main hole. They have high FeO_T (total Fe) abundances of average 15.36%, 14.09% and 20.83%, high TiO_2 concentration of average 3.89%, 3.28% and 4.10% and low SiO_2 contents of average 44.64%, 48.64% and 41.10%, respectively. Magnetic study of the samples shows that section A has the lowest susceptibility (average $3.61 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$), NRM (average $0.12 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) and Q -value (average 8.03); section B has the highest susceptibility (average $12.55 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$), medium NRM (average $1.47 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) and Q -value (average 26.42); section C samples has medium susceptibility (average $9.73 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) and the highest NRM (average $10.05 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) and Q -value (average 138.571). The magnetic property compared with metamorphic petrology of high Fe-Ti eclogites suggests that section A samples represent magnetic properties of the fresh or slightly retrograded eclogites; section B samples show higher metamorphic retrogression than those of section A; section C samples are fresh eclogite, whose density and oxygen fugacity are distinctly higher than those of A and B, containing a lot of hematite-ilmenite lamellar textures formed during the slowly exhumation, which can be the main contributors to the high NRM of the section C eclogite.

Key words: high Fe-Ti eclogite; CCSD main hole; rock magnetic; hematite-ilmenite solid solution; susceptibility.

位于中国中东部的大别—苏鲁超高压变质带是华北与扬子板块俯冲碰撞作用的产物, 是世界上已

知的最大超高压变质带 (Cong *et al.*, 1996), 柯石英和金刚石等超高压变质矿物的发现使其成为研究

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 40474025, 90714002).

作者简介: 曾庆理 (1984—), 男, 博士, 从事岩石磁学研究。* 通讯作者: 刘庆生, E-mail: lqs321@cug.edu.cn

大陆碰撞造山作用及地球深部动力学的理想目标(张泽明等, 2004; Liu *et al.*, 2007a, 2007b). 中国大陆科学钻探工程(CCS D)主孔位于苏鲁超高压变质带南部东海县城西南约 17 km 的毛北村附近(N34°25', E118°40'). 钻孔岩心全长 5 158 m, 主要由榴辉岩、斜长角闪岩、副片麻岩、正片麻岩及少量超基性岩组成. 超高压榴辉岩经历了岩石圈深部的地质作用与后期出露过程的降温和减压退变质作用, 导致岩石获得了与地质过程密切相关的磁性特征, 为研究地壳深部磁性结构及重现地球动力学过程奠定了基础(Liu *et al.*, 2007a, 2008, 2009). 徐海军等(2004)对 CCS D 主孔 100~2 000 m 榴辉岩的磁化率各向异性研究结果表明, 不同退变质阶段榴辉岩具有明显不同的磁性载体及磁化率各向异性. 杨涛等(2006)对比研究了 CCS D 主孔样品磁化率和磁化率测井资料, 提出蛇纹石化石榴石橄榄岩磁性最强, 不同退变质程度榴辉岩, 具有明显不同的磁性特征. Liu *et al.* (2007a)通过研究东海 ZK703 钻孔榴辉岩样品磁性岩石学特征发现, 该钻孔榴辉岩中磁性载体主要为单畴磁铁矿, 岩石磁性特征明显受到退变质作用的控制, 其中顺磁磁化率 χ_{para} 和石榴石+绿辉石含量具有很强的正相关性, 可以作为榴辉岩退变质程度的半定量指标. Liu *et al.* (2009)研究了 CCS D 主孔榴辉岩退变质过程对磁性和密度的控制作用, 结果表明, 榴辉岩的密度随着退变质程度增加而逐渐减小, 磁化率则先增大, 到强退变质达到峰值, 此后随着岩石完全退变质至角闪岩相, 磁性逐渐降低, 并提出退变质过程的矿物转换.

在 CCS D 主孔 318~380 m (A)、420~470 m (B)和 530~600 m (C)三段分布高铁钛榴辉岩, 其岩石化学特征表现为高 Fe-Ti 和低 SiO₂ 值(张泽明等, 2004; Zhang *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2007b). 本文通过对比榴辉岩样品的磁性及岩石学、矿物学特征, 讨论了它们磁性特征差异的地质成因.

1 样品磁性分析与成分测试

1.1 密度和磁性参数测量

共选取自 318~380 m (A)、420~470 m (B)和 530~600 m (C)深度三段 26 个榴辉岩样品, 其中 A 段 4 个, B 段 7 个, C 段 15 个. 磁化率(χ)、天然剩余磁化强度(NRM)和密度测量样品为直径与高均为 25 mm 的圆柱体. 磁化率测量利用捷克 AGICO 公

司生产的 KLY-3 型卡帕桥, 灵敏度为 2.5×10^{-8} SI, 精度误差 $\pm 0.1\%$. NRM 测量利用美国 DSM-2 和 SSM-2A 旋转磁力仪, 灵敏度达 10^{-11} A m². Q 值由 NRM/J_i 计算得到, J_i 为感应磁化强度($=\chi \times H$, 其中 H 为东海地区地磁场强度, $H=0.05089$ mT). 样品密度测量仪器为 LP1002 型比重仪, 精度为 $0.01 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 相对误差 $\pm 0.03\%$.

1.2 全岩主量元素化学成分分析

岩石主量元素化学成分分析采用粉末样品, 其中 A 段 3 个、B 段 5 个、C 段 4 个, 每个分析样品 500 g, 首先粗碎至 60 目, 然后再取其中 60 g 于玛瑙研钵内研磨至小于 200 目. 全岩主量元素化学成分分析在北京国家地质测试分析中心完成, 使用 X 荧光光谱法(Rigaku-3080), 分析误差 $< 0.5\%$.

2 结果

2.1 岩石磁性和密度

三段高铁钛榴辉岩的密度和磁性参数见表 1. 岩石的密度为 $2.968 \sim 3.871 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 其中 A 段为 $2.968 \sim 3.641 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (平均 $3.355 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), B 段为 $3.041 \sim 3.600 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (平均 $3.268 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), C 段为 $3.117 \sim 3.871 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (平均 $3.619 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$). 显然, C 段密度最大, A 段次之, B 段最小. 所有样品的 χ 为 $(2.22 \sim 38.32) \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, NRM 为 $(0.001 \sim 93.450) \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. 其中 A 段榴辉岩 χ 和 NRM 值分别为 $(2.96 \sim 4.82) \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均 $3.61 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(0.039 \sim 0.263) \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均 $0.12 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$; B 段分别为 $(5.04 \sim 32.08) \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均 $12.55 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(0.024 \sim 5.835) \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均 $1.47 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$; C 段为 $(2.22 \sim 38.32) \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均 $9.73 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(0.001 \sim 93.450) \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均 $10.050 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. C 段 χ 和 NRM 的变异系数分别为 117.68% 和 244.03%, B 段次之, 分别为 82.77% 和 138.31%, A 段最小, 分别为 23.91% 和 82.76%.

2.2 榴辉岩的岩石矿物学特征

高铁钛榴辉岩的岩性主要包括新鲜的金红石榴辉岩和角闪石化榴辉岩两种. 它们主要矿物组成为

表 1 岩石的密度和磁性参数

Table 1 Density and magnetic parameters of samples

样号	深度(m)	$\rho(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	$\chi(10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	$NRM(10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	$J_i(10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	Q
44	336.75	3.583	2.96	0.076	0.012	6.33
45	342.30	3.641	3.02	0.039	0.012	3.25
46	351.66	2.968	4.82	0.100	0.020	5.00
50	380.12	3.227	3.64	0.263	0.015	17.53
AVG		3.355	3.61	0.120	0.015	8.03
STD		0.316	0.863	0.099	0.004	6.459
V_c		9.43%	23.91%	82.76%	25.59%	80.47%
57	420.30	3.041	5.04	1.022	0.020	51.10
58	427.29	3.054	10.54	2.091	0.043	48.63
59	437.50	3.577	7.84	0.601	0.032	18.78
60	443.09	3.600	5.76	0.371	0.023	16.13
61	458.47	3.350	5.04	0.024	0.020	1.20
62	463.79	3.197	32.08	5.835	0.130	44.88
63	469.07	3.208	21.53	0.368	0.087	4.23
AVG		3.290	12.55	1.470	0.051	26.42
STD		0.229	10.386	2.037	0.042	21.354
V_c		6.97%	82.77%	138.31%	83.14%	80.82%
076v	532.51	3.232	22.94	0.261	0.093	2.81
078v	537.40	3.117	4.59	0.295	0.019	15.53
079v	539.95	3.609	3.49	0.012	0.014	0.86
080v	545.15	3.585	2.44	0.001	0.010	0.10
081v	550.50	3.613	2.70	0.012	0.011	1.09
082v	556.89	3.486	2.22	0.014	0.009	1.56
083v	560.00	3.871	38.32	93.450	0.155	602.90
084v	565.18	3.704	3.34	0.004	0.014	0.29
085v	569.00	3.699	4.29	4.444	0.017	261.41
086v	571.08	3.786	12.73	31.361	0.052	603.10
087v	577.90	3.742	5.36	10.553	0.022	479.68
089v	583.16	3.749	30.32	9.355	0.123	76.06
090v	587.00	3.771	7.34	0.990	0.030	33.00
091v	591.06	3.755	3.27	0.001	0.013	0.08
092v	593.63	3.570	2.64	0.001	0.011	0.09
AVG		3.619	9.73	10.050	0.040	138.571
STD		0.207	11.453	24.526	0.046	230.643
V_c		5.73%	117.68%	244.03%	117.25%	166.44%

注: χ : 磁化率; NRM : 天然剩余磁化强度; J_i : 感应磁化强度(= $\chi \times H$); Q : Koenigsberger 系数(NRM/J_i); AVG : 平均值; STD : 标准差; V_c : 变异系数(= STD/AVG).

石榴石、绿辉石、石英、金红石、磷灰石等, 后者还含有少量角闪石等退变质产物。A 段样品中石榴石含量为 35%~44%, 绿辉石含量 30%~40%, 其中 A1 样品含后成合晶 20%, 但绿辉石并没有被完全置换, 为轻度退变质榴辉岩, 其余样品为新鲜榴辉岩(徐海军等, 2004; 梁凤华等, 2005)。代表性样品显微照片(图 1a)显示, 样品中主要矿物为绿辉石、石榴石, 富含金红石; 暗色矿物为黄铁矿, 绿辉石和石榴石颗粒保存完好, 金红石新鲜无蚀变, 未见典型的退变质矿物组合, 属于新鲜榴辉岩; B 段样品中石榴石含量 45%~50%, 绿辉石含量低于 30%, 样品中普遍存在后成合晶, 含量达 2%~40%, 表明 B 段所选

样品的退变质程度相对 A 段样品稍高, 其中 B1 和 B2 样品中绿辉石完全被后成合晶置换, 为退变质榴辉岩(徐海军等, 2004; 梁凤华等, 2005), 显微照片(图 1b)可见, 绿辉石几乎完全为后成合晶取代, 石榴石被角闪石边包围, 暗色矿物为常见冠状反应边的钛磁铁矿, 属于退变质榴辉岩; C 段样品中石榴石含量为 48%~52%, 绿辉石含量为 38%~40%, 不含后成合晶, 仅 C3 和 C4 样品含少量角闪石(分别为 8%和 2%), 表明该段榴主要为新鲜榴辉岩, 只有 C3 和 C4 为轻度退变质榴辉岩(表 2), 样品显微照片表明, C 段榴辉岩样品中的暗色矿物含有大量具有精细的平行薄层出溶结构的赤铁矿-钛铁矿出溶

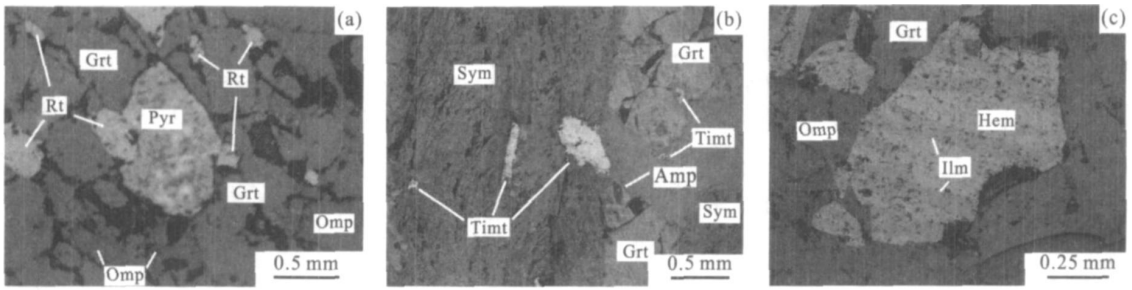


图 1 三段榴辉岩典型样品的光学显微照片(反射光)

Fig. 1 Photomicrographs of representative samples from 3 subunits respectively

a. 45 号样(342.30 m); b. 62 号样(463.97 m); c. 90 号样(587.00 m). 矿物代号: Grt. 石榴石; Hem. 赤铁矿; Ilm. 钛铁矿; Omp. 绿辉石; Pyr. 黄铁矿; Rt. 金红石; Sym. 后成合晶; Timt. 钛磁铁矿; Amp. 角闪石

表 2 代表性样品的矿物组成(%)

Table 2 Mineral assemblage of representative samples

样号	深度(m)	Grt	Omp	Phn	Qtz	Rt	Ap	Ttn	Op	Bt	Amp	Sym
A	A1	35	30	5	6	2	2					20
	A2	42	38		6	6	8					
	A3	44	40		6	8	2					
B	B1	40			15		2		3			40
	B2	40		2	20	5	3			10		20
	B3	50	30		6		66				2	
	B4	45	28				5	5				17
	B5	45	25				5	10				15
C	C1	50	38			8	4					
	C2	48	34			12	6					
	C3	50	32				4	6			8	
	C4	52	40			6					2	

注: Amp. 角闪石; Ap. 磷灰石; Bt. 黑云母; Grt. 石榴子石; Omp. 绿辉石; Op. 不透明矿物; Phn. 多硅白云母; Qtz. 石英; Rt. 金红石; Sym. 后成合晶; Ttn. 榍石.

体, 绿辉石和石榴石颗粒边界未见冠状反应边和后成合晶, 属于新鲜榴辉岩(图 1c).

全岩化学成分见表 3, A、B、C 三段榴辉岩样品全铁(Fe_{OT})含量分别为 11.65%~18.24%(平均 15.36%, 下同)、10.99%~16.64%(14.09%)、18.81%~22.34%(20.83%). TiO_2 含量分别为 1.76%~5.36%(3.89%)、2.14%~4.40%(3.28%)和 3.94%~4.44%(4.10%), SiO_2 含量分别为 40.40%~51.28%(44.64%)、42.96%~55.76%(48.64%)和 40.31%~42.32%(41.10%).

3 讨论

3.1 磁性、密度与退变质程度的关系

榴辉岩样品的 χ 、 NRM 和 Q 值之间相互关系见图 2. A、B 两段榴辉岩样品 χ 和 NRM 之间具有较好的线性正相关, 表明它们磁性矿物来源较为一

致; 而 C 段榴辉岩的 χ 与 NRM 之间关系较为复杂, 当样品 NRM 较低($< 0.02 \times 10^{-3} Am^2 \cdot kg^{-1}$)时, NRM 与 χ 之间没有明显相关性, 而当样品 NRM 较高($> 4 \times 10^{-3} Am^2 \cdot kg^{-1}$)时, NRM 与 χ 之间呈明显正相关, 说明 C 段样品的 NRM 形成过程与磁性物质与 A、B 两段存在一定差异(图 2a). 三段样品 Q 值与 χ 的关系不明显(图 2b), 而与 NRM 都具有很强的正相关关系(图 2c), 表明高铁钛榴辉岩的 Q 值主要受天然剩余磁化强度的控制, 而感应磁化强度(即磁化率)对 Q 值影响较小. A、B 两段之间相距只有 40 m(指 50 号与 57 号样品之间的距离), 且密度接近, 这可以解释 A、B 两段榴辉岩样品中磁性矿物来源较为一致, 而 B 段的 63 号样品与 C 段 76 号样品之间相距 60 余米, 且两段岩石平均密度相差 $0.329 g \cdot cm^{-3}$, 显示 C 段与 A、B 两段榴辉岩样品岩石矿物学特征的差异对磁性的控制.

Liu *et al.* (2007a, 2009) 研究表明, CCSD 主孔

表 3 代表性样品的全岩化学成分主量元素成分分析结果

Table 3 Whole rock major element compositions of representative samples

样号	深度(m)	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	FeO _T	MnO	MgO	CaO	
A	A1	337.4	51.28	1.76	15.48	3.12	8.53	11.65	0.24	5.12	8.75
	A2	342.3	40.40	4.54	13.31	3.89	12.3	16.19	0.32	6.80	11.86
	A3	352.3	42.23	5.36	14.03	4.25	13.99	18.24	0.30	6.53	10.52
B	B1	420.1	55.76	2.14	14.27	2.30	8.69	10.99	0.38	3.11	6.87
	B2	427.3	54.48	2.58	13.61	3.32	7.81	11.13	0.31	3.14	6.97
	B3	437.5	43.90	4.12	14.00	3.55	12.48	16.03	0.39	5.56	10.06
	B4	443.1	42.96	4.40	13.72	3.36	12.32	15.68	0.34	6.18	10.67
	B5	469.1	46.08	3.15	13.02	5.49	11.15	16.64	0.32	4.88	10.13
C	C1	560.1	42.32	4.00	14.52	5.84	12.97	18.81	0.27	5.78	11.94
	C2	565.2	41.37	3.94	10.51	8.17	12.66	20.83	0.27	8.15	12.60
	C3	577.9	40.31	4.44	12.18	7.90	14.44	22.34	0.28	6.94	11.68
	C4	587.2	40.41	4.01	15.23	3.91	17.42	21.33	0.26	5.86	11.55

样号	深度(m)	Na ₂ O	K ₂ O	ALK	P ₂ O ₅	H ₂ O	CO ₂	Total	Fe ³⁺ / Fe ²⁺	
A	A1	337.4	3.86	0.70	4.56	0.42	0.42	0.09	99.81	0.33
	A2	342.3	2.64	0.00	2.64	2.86	0.32	0.06	99.79	0.28
	A3	352.3	2.13	0.00	2.13	0.09	0.12	0.18	99.73	0.27
B	B1	420.1	3.52	1.01	4.53	1.07	1.34	0.09	100.62	0.24
	B2	427.3	3.89	1.52	5.41	1.47	0.52	0.12	99.84	0.38
	B3	437.5	3.28	0.00	3.28	2.44	0.24	0.09	100.23	0.26
	B4	443.1	2.73	0.04	2.77	2.51	0.78	0.12	100.24	0.25
	B5	469.1	3.26	0.00	3.26	2.02	0.70	0.14	100.34	0.44
C	C1	560.1	2.02	0.00	2.02	0.21	0.02	< 0.01	100.13	0.41
	C2	565.2	1.60	0.00	1.60	0.11	0.14	0.22	99.95	0.58
	C3	577.9	1.69	0.01	1.69	0.08	< 0.01	< 0.01	100.44	0.49
	C4	587.2	1.00	0.00	1.00	0.03	0.10	< 0.01	99.99	0.20

注: ALK 表示碱。

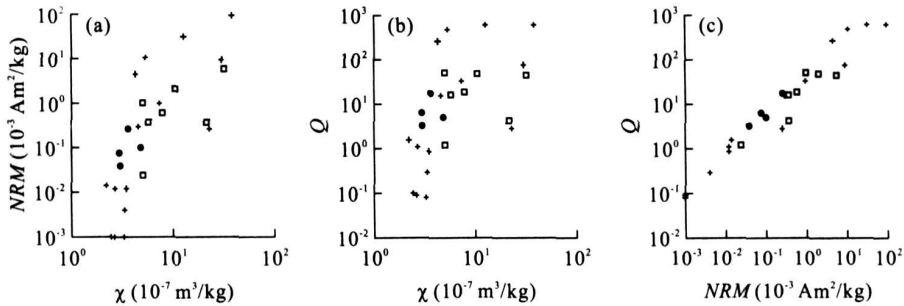


图 2 磁性参量之间相互关系散点图

Fig. 2 Scattergrams of magnetic parameters for eclogite samples

● 代表 A 段榴辉岩; □ 代表 B 段榴辉岩; + 代表 C 段榴辉岩

榴辉岩的密度与退变质程度密切相关, 随着退变质程度增加, 密度逐渐减小, 因此, 密度可以定性指示榴辉岩的退变质程度. A 段样品为新鲜及轻度退变质榴辉岩, 因此具有中等的密度. 其 χ 和 NRM 均较小, 变异系数也较小, 表明该段榴辉岩中的磁性矿物含量较少, 并且分布较为均一. B 段样品退变质程度稍高于 A 段(仅对于分析样品而言), 退变质过程中石榴石、绿辉石等被后成合晶置换, 导致样品密度降

低(表 1). 伴随此过程, 经由反应式 $Grt + Omp + SiO_2 + H_2O \rightarrow Am + Pl + Mt$ 和 $Grt + SiO_2 + H_2O \rightarrow Am + Mt$ (张泽明, 1996)生成磁铁矿, 同时金红石的钛铁矿化也会生成钛铁矿和钛磁铁矿, 他们是 B 段样品 χ 和 NRM 增强的主要原因(徐海军等, 2004, 2006; Liu *et al.*, 2007a, 2009). 这表明, B 段样品的磁性受到退变质作用的控制. C 段榴辉岩样品的平均密度高达 $3.619 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 矿物组成及含量大体

与 A 段相当,但 *NRM* 强度是三段样品中最高,磁化率也高于 A 段,因此, C 段榴辉岩样品的高磁性特征不能用退变质过程解释。

3.2 氧逸度对榴辉岩磁性的控制

氧逸度(oxygen fugacity)即有效氧分压,是控制岩石磁性的重要因素之一(Pechersky and Genshaft, 2002).为了解释 C 段榴辉岩样品的高磁性的成因及其与 A、B 段的差异,我们尝试应用岩石的氧逸度参数探讨榴辉岩的磁性变异特征.含铁岩浆结晶过程中,随着氧逸度的增加,岩石中铁钛氧化物晶体含量随之增加(Hammer, 2006).岩石中 Fe^{3+}/Fe^{2+} 比值与氧逸度密切相关,是定性衡量岩石氧逸度的重要指标(Helgason *et al.*, 1989),当岩浆氧逸度增加时, Fe^{2+} 会氧化转变为 Fe^{3+} ,导致 Fe^{3+}/Fe^{2+} 值增大。

从表 3 可以看到, A 段和 B 段榴辉岩样品的 Fe^{3+}/Fe^{2+} 值比较接近(B 段平均值 0.31, 仅比 A 段高 0.02),明显低于 C 段(平均 0.42),这表明 C 段榴辉岩的高磁性可能受到高氧逸度的控制.Zeng *et al.* (2009)认为,在 CCSD 主孔的 540~600 m 间隔的高铁—钛榴辉岩的结晶过程中,斜长石从高氧逸度的原始岩浆中的分离结晶作用导致岩浆的氧逸度进一步升高,诱发了磁铁矿和斜长石的同分离结晶作用.这种分离结晶作用还可能是该段榴辉岩全铁含量较其他两段高的原因之一.因此,在高氧逸度岩浆分异结晶过程中产生的铁钛氧化物是 C 段样品高磁性的重要物质来源。

3.3 榴辉岩的磁性与赤—钛铁矿出溶薄层结构的关系

C 段高铁—钛榴辉岩样品中广泛分布赤铁矿—钛铁矿固溶体,这些固溶体内部,存在大量平行(001)方向的薄层(Lamellare)结构(图 1c).研究表明,这种出溶薄层厚度可以从毫米级直到一个晶胞大小(梁凤华等, 2006).钛—赤铁矿薄层出溶结构在挪威 sokndal 地区中元古代火成堆积岩(McEnore *et al.*, 2000, 2001)和加拿大魁北克 Allard 湖赤铁矿化钛铁矿层(Hargraves, 1959)等地均有发现. Robinson *et al.* (2002)研究表明,具有反铁磁性赤铁矿和顺磁性钛铁矿“接触层”的岩石可以携带很强的天然剩磁,并具有赤铁矿的矫顽力及热稳定性,并可能产生明显的磁异常(McEnore *et al.*, 2001).具有薄层出溶结构的铁钛氧化物固溶体的形成需要很高的温度(760 °C)和缓慢的冷却时间(Harrison and Becker, 2001),表明 C 段样品在折返过程中经历过

一段缓慢的降温减压过程(梁凤华等, 2005),使得分异结晶过程产生的铁钛氧化物形成薄层结构的固溶体.薄层所携带的剩磁被证明是一种化学剩磁,因为薄层出溶结构在形成并冷却到 390 °C 以下时才开始具有磁性,低于赤铁矿的尼尔温度.当固溶体(001)方向平行与外磁场时,薄层所携带的剩磁最强(Robinson *et al.*, 2002).C 段样品中,固溶体颗粒随机排列,没有明显的方向性,这保证了总有一部分固溶体颗粒的(001)方向平行于外磁场,从而获得很强的剩磁.这些具有薄层磁性的固溶体可能是引起榴辉岩高天然剩余磁化强度的重要原因.含有这种固溶体的岩石,常具有超高的 *Q* 值(> 30)(McEnore *et al.*, 2000, 2001),在 C 段榴辉岩样品中,*Q* 值最高达数百,表明具有薄层结构的钛铁矿—赤铁矿固溶体对于剩余磁化强度的贡献远大于其对于磁化率的贡献,可能是 C 段高 *NRM* 的主要原因。

4 结论

通过对比中国大陆科学钻探(CCSD)主孔中三段高铁—钛榴辉岩样品的岩石磁性与岩石矿物特征,结果表明:(1)A、B 段榴辉岩样品磁性差异主要受到退变质作用的控制,是 B 段样品相对 A 段较高的磁化率、天然剩余磁化强度升高及低密度的主要因素;(2)C 段榴辉岩样品相对 A、B 段具有较高的氧逸度,导致岩浆分离结晶过程中铁钛氧化物的富集与结晶,并在降温减压过程中,形成具薄层结构的赤铁矿—钛铁矿固溶体,是 C 段样品具有高天然剩余磁化强度和 *Q* 值的主要原因.因此,我们认为 CCSD 主孔三段高铁钛榴辉岩样品的磁性变异特征与某些地质过程之间具有很好的对应关系。

致谢:感谢张泽明研究员提供岩石化学成分和矿物成分资料及关于榴辉岩退变质程度方面提出的宝贵意见,感谢评审人提出的修改意见。

References

- Cong B. L., Zhang, R. Y., Liou J. G., *et al.*, 1996. Metamorphic evolution of UHPM rocks. In: Cong, B. L., ed., Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabieshan-Sulu region of China. Science Press, China, 128–160.
- Hammer, J. E., 2006. Influence of f_{O_2} and cooling rate on the kinetics and energetics of Fe-rich basalt crystallization. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(3–4): 618–637.

- Hargraves, R. B., 1959. Magnetic anisotropy and remanent magnetism in hemo-ilmenite from ore deposits at Allard Lake, Quebec. *Journal of Geophysical Research*, 64 (10): 1565—1578.
- Harrison, R. J., Becker, U., 2001. Magnetic ordering in solid solutions. *European Mineralogical Union Notes in Mineralogy*, 3: 349—383.
- Helgason, Ö., Steinhilber, S., Møllrup, S., 1989. The ferri/ferrous ratio in basalt melts at different oxygen pressures. *Hyperfine Interactions*, 45(1—4): 7—294.
- Liang, F. H., Su, S. G., You, Z. D., et al., 2005. Retrograde metamorphism of eclogites from the main hole (0—2 000 m) of the Chinese Continental Scientific Drilling, Donghai, Jiangsu Province. *Geology in China*, 32 (2): 218—229 (in Chinese with English abstract).
- Liang, F. H., Zeng, L. S., Xu, Z. Q., et al., 2006. Nature and significance of haematite-ilmenite solid solution in 540—600 m eclogite of Chinese Continental Scientific Drilling main borehole; Implications for the exhumation of the CCSD eclogites. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7): 1905—1914 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. S., Liu, Q. S., Liu, Y. S., et al., 2008. Magnetic study of mafic granulite xenoliths from the Hannuoba basalt, North China. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, Q06008 doi: 10.1029/2008GC001952
- Liu, Q. S., Liu, Q. S., Yang, T., et al., 2009. Magnetic study of the UHP eclogites from the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project. *J. Geophys. Res.*, 114: B02106, doi: 10.1029/2008JB005917
- Liu, Q. S., Liu, Q. S., Zhang, Z. M., et al., 2007a. Magnetic properties of ultrahigh-pressure eclogites controlled by retrograde metamorphism; A case study from the ZK703 drillhole in Donghai, eastern China. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 160 (3—4): 181—191.
- Liu, Y. S., Yang, H. J., Shau, Y. H., et al., 2007b. Compositions of high Fe-Ti eclogites from the Sulu UHP metamorphic terrane, China; HFSF decoupling and protolith characteristics. *Chemical Geology*, 239(1—2): 64—82.
- McEnroe, S. A., Robinson, P., Panish, P. T., 2000. Chemical and petrographic characterization of ilmenite and magnetite in oxide-rich cumulates of the Sokndal region, Rogaland, Norway. *Norges Geologiske Vundersøkelse*, 436: 49—56.
- McEnroe, S. A., Robinson, P., Panish, P. T., 2001. Aeromagnetic anomalies, magnetic petrology, and rock magnetism of hemo-ilmenite and magnetite-rich cumulates rock from the Sokndal region, south Rogaland, Norway. *American Mineralogist*, 86: 1447—1468.
- Pechersky, D. M., Genshaft, Y. S., 2002. Petromagnetism of the continental crust: A summary of 20th century research. *Physics of the Solid Earth*, 38(1): 2—32.
- Robinson, P., Harrison, R. J., McEnroe, S. A., et al., 2002. Lamellar magnetism in the haematite-ilmenite series as an explanation for strong remanent magnetization. *Nature*, 418(6897): 517—520.
- Xu, H. J., Jin, Z. M., Ou, X. G., 2006. Lithology determination of rocks from CCSD 100—2 000 m main hole by magnetic susceptibility and density using discriminant function analysis. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(4): 513—519 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H. J., Jin, Z. M., Ou, X. G., et al., 2004. Effects of retrogression of ultrahigh-pressure eclogites on magnetic susceptibility and anisotropy. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29 (6): 674—684 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T., Liu, Q. S., Wu, Y., et al., 2006. Characteristics of magnetic susceptibility in the depth of 100—2 000 m mainhole of Chinese Continental Scientific Drilling and its geological implication. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (7): 2089—2094 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, L. S., Liang, F. H., Chen, Z. Y., et al., 2009. Metamorphic garnet pyroxenite from the 540—600 m main borehole of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) project. *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2009.02.043
- Zhang, Z. M., 1996. Disequilibrium reactions and kinetics of ultra-high pressure metamorphic rocks from the Dabie Mountains. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 21 (5): 501—507 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Xiao, Y. L., Hoefs, J., et al., 2006. Ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Chinese Continental Scientific Drilling Project; I. Petrology and geochemistry of the main hole (0—2 050 m). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 152(4): 421—441.
- Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., Liu, F. L., et al., 2004. Geochemistry of eclogites from the main hole (100—2 050 m) of the Chinese Continental Scientific Drilling. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 27—42 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 梁凤华, 苏尚国, 游振东, 等, 2005. 中国大陆科学钻探主孔 0~2 000 m 榴辉岩的退变质过程. *中国地质*, 32 (2):

218—229.

梁凤华, 曾令森, 许志琴, 等, 2006. 中国大陆科学钻探主孔 540~600 m 榴辉岩中赤铁矿—钛铁矿固溶体出溶结构的特征及对榴辉岩折返动力学过程的意义. 岩石学报, 22(7): 1905—1914.

徐海军, 金振民, 欧新功, 2006. 磁化率和密度对中国大陆科学钻探主孔 100~2 000 m 岩石类型的判别. 地球科学——中国地质大学学报, 31(4): 513—519.

徐海军, 金振民, 欧新功, 等, 2004. 超高压榴辉岩退变质作用对岩石磁化率的影响. 地球科学——中国地质大学学报, 29(6): 674—684.

杨涛, 刘庆生, 吴耀, 等, 2006. 中国大陆科学钻探(CCS D)主孔 100~2 000 m 区间磁化率的变异特征及其地质意义. 岩石学报, 22(7): 2089—2094.

张泽明, 1996. 大别山地区超高压变质岩的不平衡退变质反应及动力学. 地球科学——中国地质大学学报, 21(5): 501—507.

张泽明, 许志琴, 刘福来, 等, 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔(100~2 050 m)榴辉岩岩石化学研究. 岩石学报, 20(1): 27—42.

《地球科学——中国地质大学学报》 2010 年 第 35 卷 第 1 期 要目预告

青藏高原东北缘若尔盖盆地黄土的成因	盛海洋
青海南部早二叠世火山—沉积背景下的岩石地层序	牛志军等
南海北部秋季活体浮游有孔虫的组成与分布特征	向荣等
南海南部 50 万年以来碳酸钙和有机碳记录及其揭示的东亚夏季风演化	梅西等
江油二郎庙鱼洞子剖面飞仙关组鲕粒滩内部构成研究及意义	荣辉等
我国典型海洋型冰川区高海拔区输出水量变化对气候变暖的响应	李宗省等
南沙海域礼乐盆地油气资源潜力分析	孙龙涛等
板桥凹陷沙三段油气生成、运移和聚集数值模拟	郭小文等
油沸石形成与分布及其对优质储层的控制作用—以陕北富县探区延长组长 3 油层为例	付国民等
长江口氧化还原敏感元素的早期成岩过程	邹建军等
浙江宁波育王山山前隐伏断层勘探和新活动时代	杨晓平等