

# 太古宙高级地体的磁性岩石学研究

## ——窥探地壳深部结构及地球动力学过程的窗口

刘庆生 高山\*

(中国地质大学, 武汉 430074)

**[摘要]** 综述国际上有关太古宙高级地体磁性岩石学研究的主要成果, 侧重高级地体岩石磁性与变形、变质等级的相互关系及大陆下地壳磁化强度及其成因机制等; 提出了有关高级地体岩石磁性研究中值得注意的几个问题。

**[关键词]** 大陆下地壳, 麻粒岩相地体, 磁性岩石学

### 引言

由于构造作用, 使得深部地壳岩石出露于现今地表, 它为实验岩石地球物理学家研究地壳深部结构与物质的物理性质及其变化特征提供了一个窗口。由于岩石的物理性质是其形成时的条件及随后所有变化的函数, 并在相当大程度上以四维(空间+时间)形式决定地质过程的进程, 因此, 岩石物理性质变异特征的分析在地球科学的基础与应用研究中具有重要意义。

磁性岩石学(magnetic petrology)是传统岩石学的延伸, 它将岩石磁学与岩石学研究相结合, 为研究岩石磁化强度的形成、发育及变化提供依据。现今出露于地表的麻粒岩相地体经历了各种变质、变形过程, 其结果使得岩石中的原有矿物发生变化, 如化学过程的蚀变、出溶作用等。这些过程既对原有的造岩矿物进行改造, 产生新的次生矿物; 也有以各种温压条件下的物理改造为主的变质、变形作用, 结果导致原有磁性矿物(顺磁性与亚铁磁性矿物)沿变形方向排列, 两者均可以以磁记录的形式保存下来, 并构成了太古宙高级地体磁性岩石学研究的基础。岩石的磁学特征包含了极为丰富的地质信息, 如与顺磁性相关的(其载体以造岩矿物为主)低场磁化率及与亚铁磁性相关的磁化率和剩余磁性(其载体以含铁矿物为主)等参量, 既与岩石形成的时空演化序列相关, 也与岩石形成后演化的时序分布特征相关。因而, 分析测量岩石精细的磁学特征, 并与岩石学、矿物学、地球化学及区域地质背景相结合, 就可能反演出高级地体的形成及演化史, 为研究岩石圈深部结构及地球动力学过程提供重要的证据。

\* 1996年度国家杰出青年科学基金获得者。

国家杰出青年科学基金与国家自然科学基金和国家教委基金资助项目。

本文于1996年10月25日收到。

## 1 磁各向异性与岩石变形的相互关系

Graham 于 1954 年发表了第一篇有关磁各向异性的论文, 提出磁化率的各向异性 (anisotropy of magnetic susceptibility AMS) 是一种尚未开发的岩石组构要素。在应力作用下, 岩石内的磁性矿物定向排列、韧性变形或定向重结晶, 导致岩石产生较强的磁化率各向异性, 从而使得磁化率椭球的形状及定向 (描述磁性组构的重要参量) 成为应力作用的“显示器”。其应用效果取决于几个因素: (1) 样品的体积及磁化率的强度; (2) 样品中缺少某些特殊矿物, 如单畴的亚铁磁性矿物或电气石及富铁的方解石等; (3) 岩石中磁性矿物的优选方位。

近些年来, 磁各向异性研究的主要进展之一是将亚铁磁性组构与顺磁性组构分开进行研究。实验研究表明, 如果岩石中亚铁磁性组分含量超过 0.1%, 则岩石的高场磁化率与剩余磁性成分占主导。反之, 如果缺乏亚铁磁性矿物或顺磁性矿物含量超过 1%, 则岩石以顺磁性为主, 可用低场磁化率的各向异性研究岩石组构的分布。

Borradaile 等人利用磁各向异性原理系统研究了加拿大地区内几个出露的太古宙高级地体。如对安大略北部苏毕利尔州的一个高应变带的研究表明, 三类组构均显示了垂直地体边界南北方向的缩短及近共轴应变方向上的拉长。少量反常磁组构可能显示了晚泥盆世次水平东—西方向拉长, 并与沿边界发生的挤压位移一致。为此, 他们断定这个边界是一个与高级深成岩隆升相关的高应变带。他们还对比位于加拿大安大略州西北方向的晚太古宙 (2690Ma) 岩脉的变形史进行构造磁学研究。磁各向异性揭示出这些变形岩脉中存在隐蔽构造组构 (cryptic tectonic fabric)。Sun 等人对美国明尼苏达州东部的中部元古宙 Thomson 组多期变形地体进行磁组构与岩组综合研究, 结果认为岩石的天然剩磁 (NRM) 与非滞剩磁的各向异性 (AARM) 没有受到构造变形的影响, 而以顺磁性矿物 (尤其是绿泥石) 为载体的低场磁化率的各向异性反映了岩石的组构, 并据此推测本区南北两个变形带的首次变形同时发生。Benn 等人对加拿大魁北克地区的一个晚太古宙花岗质片麻岩地体就磁化率、磁性矿物学及磁组构之间的相互关系进行了研究。该地体位于 Abitibi 绿岩带内, 它由几套英云闪长岩、花岗闪长岩与花岗岩成分组成, 变质级为角闪岩相 (绿帘石角闪岩相到高角闪岩相)。对 87 个取样地点样品综合应用不透明矿物学 (利用反射光岩相学)、电子探针分析与扫描电子显微镜观测, 及交变场、热磁分析实验等, 结果表明, 岩石磁化率的主要贡献者除了硅酸盐矿物中的二价铁外, 主要为铁磁性的非常纯的多畴磁铁矿。所有岩石的 AMS 强度主要受矿物的成分及优选方位控制, 而不是应变或变形状态。详细的野外及室内矿物优选方位测量与 AMS 结果对比。表明  $\kappa_1$  (磁化率极大值) 与  $\kappa_3$  (磁化率的极小值) 平均主磁化率方向可以为矿物的拉伸线理与垂直面理的极提供好的估算结果。在  $\kappa_1$  方位与观测的岩石线理之间存在某种程度的矛盾可能是由: (1) 某些深成岩具有复杂的氧化矿物及结构; (2) 某些高级片麻岩中存在后期变形作用的影响。因此, 他们认为 AMS 提供了太古宙花岗质片麻岩地体间接确定岩组的可行方法。张家声与 Piper 对华北地台大同至怀安前寒武纪多期变质麻粒岩地体进行 AMS 研究的结果表明, 磁组构对于该地体的构造组构是一个灵敏指示。在该麻粒岩区, AMS 主要反映了位于外来盖层与基底之间的高变形带内的早泥盆世变形期内矿物的增长。AMS 的幅度位于 20% 与 40% 之间, 平均 28.5%。由此可以看出, 虽然太古宙高级地体通常具有较为复杂的形

成演化史,只要采用合理的研究方法,利用 AMS 原理仍然可以得到岩石变形方面的有用信息(至少在地盾区的高级地体出露区是如此)。

## 2 岩石磁性与变质级之间的相互关系

在一些变形复杂地区,现场岩层的产状测量与原始产状的判断较为困难,使得 AMS 及古地磁研究难以进行。然而,科学工作者以岩石、矿物的本征磁性特征(或岩石磁性强度参量)为基础,探讨太古宙高级地体的变质过程,取得了一些有意义的成果。

Fountain 等人通过对现今出露地表的五个大陆地壳剖面岩石的综合研究并与区域地球物理资料相结合,绘制出五个断面垂向分布柱状图。结果提出,地壳中最为显著的分层作用不是地球化学的成分,而是变质作用。Christensen 等人通过分析全球 560 条地震测深剖面及 3000 多个岩浆岩与变质岩样品高压条件下波速的测量结果也认为,从上地壳→中地壳→下地壳,岩石的变质级随着深度的增加而增加,下地壳由镁铁质到中性成分的麻粒岩相岩石组成,而中上地壳则主要为角闪岩相片麻岩与低级变质岩。

许多学者对世界上几个出露的高级地体进行系统的岩石磁学分析研究,并与变质岩石学相结合,探讨了岩石磁性参量的变异特征与变质级(或地壳视深度)的相互关系,取得了一些初步成果。Powell 于 1970 年发表的关于苏格兰 Lewisian 杂岩的研究结果,首次提出了岩石磁性与变质级之间存在着相互关系。Wasilewski 等人对意大利北部 Ivrea 地区出露的地壳剖面进行岩石磁学研究,目的是获取大陆地壳磁化强度的模型。详细的地质调查和岩石磁学分析研究结果表明,Ivrea 高级地体是一个出露很好的大陆地壳剖面,Ivrea 断面可以分成四个磁性带:代表中—上地壳的 A 层为弱磁性;靠近麻粒岩相的角闪岩相的 B 层(相当于高角闪岩相)为强磁性;往下夹有一个弱磁性的泥质岩层 C;靠近壳—幔过渡带的 D 层由斜长二辉麻粒岩、辉石、角闪石、斜长碎屑长英质岩组成,其磁性强且变化剧烈。初步研究结果认为,下地壳分布的高磁性层与区域地壳演化相关。然而 Belluso 等人对 Ivrea-Verbano 带岩石磁性研究结果认为,在该区的 Kinzigite 系中,角闪岩与镁铁质麻粒岩的磁性主要反映局部磁性特征,而不是区域变质作用的效应。Williams 等人对加拿大 Pikwitonei 麻粒岩地体的研究结果认为,岩石磁性与变质级之间没有明显的相关性。在 56 个样品中 31 个主要为顺磁性,3 个样品含有磁黄铁矿,22 个富硅质深成岩样品(占整个出露剖面 80%)具强磁性,平均磁化率  $\kappa = 10000 \times 10^{-6}$  SI,它们含有几乎纯的磁铁矿, $\kappa$  在室温至 540℃ 之间几乎不变。这与 Belluso 等人对 Ivrea 地区 Kinzigite 系岩石研究结果相似。

然而 Schlinger 对挪威 Lofoten 与 Vesteralen 地区的前寒武纪片麻岩地体研究结果,则明确揭示了岩石磁性与变质级之间的对应关系。他通过详细的野外地质调查,室内岩石和矿物分析,及磁学实验研究,得到了高级地体岩石丰富的磁学信息:麻粒岩相岩石的磁化率、天然剩磁与饱和等温剩磁值分别为角闪岩相岩石的 4.8 倍、5 倍及 5.4 倍。因此,断定该区岩石随着变质级的增加岩石磁性普遍增大。Skilbrei 等人对挪威中部 Vestranden 北部高极地体的研究结果认为,该区从角闪岩相至麻粒岩相的进变质作用导致磁化率增加,其原因是含水的铁、镁及铝硅酸盐矿物的瓦解而形成磁铁矿。Schlinger 等人对巴基斯坦北部 Kohistan 杂岩(为一条出露的年轻岛弧地壳剖面)进行了详细野外露头磁化率测量与室内样品的磁性分析,结果表明,自角闪岩相至辉石麻粒岩相的进变质作用导致磁性明显增加,并结合矿物学分析,

详细探讨了退变质作用对岩石磁性的影响,结果显示,从辉石麻粒岩相退变质到角闪岩相,导致铁-钛氧化矿物的破坏,顺磁性的硅酸盐矿物置换了铁磁性的磁铁矿,导致磁性普遍减小,如磁化率从  $8750 \times 10^{-6} \text{ SI}$   $\rightarrow$   $650 \times 10^{-6} \text{ SI}$ ,天然剩磁从  $0.45 \text{ A/m}$   $\rightarrow$   $0.003 \text{ A/m}$ ;柯尼格斯贝格比  $Q$  从  $1.28 \rightarrow 0.11$ 。Krutikhovskaya 等人依据地表岩石磁性的测量结果,编制了乌克兰地盾区磁化强度分布图,讨论了岩石的磁化强度与成分及变质级的相互关系,结果表明,乌克兰地盾区自绿片岩相  $\rightarrow$  角闪岩相  $\rightarrow$  麻粒岩相,随着变质级的增加,磁性强度与基性度呈规律性地增大。我们先后对华北地台南缘的登封至鲁山地区深地壳出露岩石、扬子地台太古宙基底崆岭群及华北地台中段五台一定州地壳断面进行系统磁学分析,并综合地震、地球化学、矿物学研究,得到了与某些国际同行相似的结果。如登封至鲁山剖面的绿片岩相(安沟群)  $\rightarrow$  角闪岩相(登封群)  $\rightarrow$  麻粒岩相(太华群),磁化率分别为 370, 428, 5 682 ( $10^{-6} \text{ SI}$ );饱和剩磁: 3.55, 4.33, 95.37 ( $\text{A/m}$ );天然剩磁: 0.25, 0.92, 173.74 ( $10^{-3} \text{ A/m}$ );下地壳麻粒岩相岩石呈明显的亚铁磁性状态。扬子地台崆岭群中的变酸性岩具有强磁性,与加拿大 Pikwitonei 麻粒岩地体结果极相似。我们的研究结果是,五台至定州地壳断面中绿片岩相(五台群)  $\rightarrow$  角闪岩相(恒山群与阜平群)  $\rightarrow$  麻粒岩相的集宁群, SIRM 的平均值分别为 4.12, 26.57, 138.42 ( $\text{A/m}$ ), 显示了岩石磁性与变质级之间明显的对应关系。

### 3 大陆下地壳的磁化强度

太古宙高级地体岩石磁学研究的主要目的之一,是为建立下地壳磁化强度模型提供直接证据。岩石学与地球物理测量相结合的成果显示,大陆下地壳以麻粒岩相为主。因此,系统分析研究现今出露地表的麻粒岩地体及麻粒岩捕虏体的磁性,是获取下地壳磁性宏观分布特征的主要手段。Hahn 等人统计了全球 27100 个基性与超基性岩石样品的感应磁化强度值为  $0.2 \sim 3.1 \text{ A/m}$ 。Shive 等人对 Kapuskasing 太古宙地体岩石磁性测量结果获得的感应磁化强度  $J_r < 1 \text{ A/m}$ ,远小于该区航磁或磁卫星长波长计算得到的下地壳的磁化强度值。根据现今出露地表的几个麻粒岩地体的磁性参量的结果可以看到,麻粒岩地体岩石磁性总的趋势为中等到强磁性,但随地点不同变化很大。控制下地壳磁性分布的几个主要因素为:(1)岩石的原始成分,如变基性岩与变泥质岩之间存在显著差异;(2)变质程度的差异;(3)有的地区存在花岗岩化程度的差异。要评价这些因素对下地壳磁性的影响程度,必须综合应用矿物学方法对岩石中铁磁性矿物的分布特征进行深入分析研究。Frost 等人对大陆下地壳岩石的磁性矿物学特征(包括热力学)进行深入研究认为,贫钛磁铁矿是下地壳岩石最主要的磁性载体。Toft 等人对来自西非金伯利亚中的下地壳麻粒岩相捕虏体(斜方辉石-石榴子石-斜长石)的鉴别结果,表明磁铁矿与自然铁是岩石中主要的磁性相。

当人们将麻粒岩地体磁化强度测量结果与磁卫星长波长磁异常计算的场源(认为位于下地壳)的磁化强度对比时发现,长波长磁异常场源的磁化强度高达  $2 \sim 6 \text{ A/m}$ 。目前人们对于某些地区大陆下地壳为一个相对高的磁性层基本趋于共识。但为了解释现今高压及高地温条件的下地壳的磁性状态,人们提出了不同的假设,概括起来有:(1)岩性因素,认为镁铁质岩的磁化强度普遍比富硅质岩高,然而 Pikwitonei 地体与扬子地台崆岭群结果与此相反;(2)变质作用与磁性之间的正相关关系,因为麻粒岩相变质作用有利于强磁性矿物(磁铁矿)的建造,然而也存在少数矛盾的例子;(3)Hopkinson 效应,即磁化率随温度升高的效应。

Schlenger 的实验结果表明,挪威 Lofoten 和 Vesteralen 地体麻粒岩的磁化率随温度升高不足 5%,因此提出下地壳中 Hopkinson 效应并不明显。然而,他提出热粘滞剩余磁性可能是下地壳磁性形成的重要因素。还有人依据上地幔顶部蛇纹石化作用会产生一些高居里点磁性组分(如铁镍合金等),其居里点可高达 1100℃,因此大陆磁性下界面可以位于上地幔,这样下地壳存在磁性层则属正常现象。压力与磁性的关系由于实验设备复杂而研究较少,原苏联科拉超深钻岩芯磁化率测量与钻孔磁测结果对比表明,两者之间非常吻合。据此认为,压力对岩石的磁性没有影响(至少对上地壳岩石是如此)。Warner 等人(1995)对来自南极大陆 McMurdo Sound 地区一套上地幔与下地壳捕虏体样品进行了系统的磁性岩石学研究,目的是依据研究结果确定下地壳与上地幔岩性条件下岩石的磁化强度,及记载岩石磁化强度的矿物学基础。研究结果,大多数捕虏体为镁铁质成分的辉石麻粒岩,少数为角闪岩,上地幔橄榄岩十分常见。辉石麻粒岩的原生矿物组合为:斜长石+钙质辉石±斜方辉石±橄榄石±钛铁矿。磁性测定结果表明,橄榄岩、辉石麻粒岩及角闪岩三类岩石平均磁化率分别为:2100, 4800, 12200 ( $10^{-6}$  SI),少数富含钛铁矿的辉石麻粒岩的天然剩磁 $>0.4$  A/m,最高达 0.9 A/m。辉石麻粒岩中存在部分熔融现象,表明它们在喷出地表期间经历了一定程度的变质反应而产生次生的角闪石、黑云母与钛磁铁矿,这些可能是部分强磁性捕虏体的主要磁性载体。

#### 4 高级地体岩石磁性研究中的几个问题

综上所述,太古宙高级地体磁性岩石学研究既可以为大陆下地壳磁性结构和磁化强度模型提供证据,又可为下地壳岩层的形成及隆升过程中经历的变质、变形提供佐证,进而为区域构造演化提供独立证据,因而引起国际同行的关注。然而,由于太古宙高级地体形成及演化过程的复杂性,使得岩石的磁学信息与地质信息之间存在复杂的不确定性。必须应用新的观念、思维与有效的分析方法,才有可能得到更趋合理的结果。概括起来,有以下几个值得注意的问题:

(1) 目前磁组构及古地磁研究主要应用在地台或地盾区深地壳出露区,这些地区相对后期构造运动较为单一(区域变形正是 AMS 研究的对象)。由于野外地质调查及地层产状要素的确定是 AMS 成功的重要基础,因此必须认真鉴别原地岩石露头的产状并采集合适的定向样品,以可靠的实验数据与第一手野外调查资料为基础,作出合理的地质解释。

(2) 高级地体(尤其是麻粒岩相)磁学研究成果的可靠性必须建立在岩石磁学、岩石学、矿物学及地球化学等学科理论的有机结合及与区域深部地质背景相结合的基础上,将微观的分析结果与宏观的地球动力学过程相结合,将岩石磁学与区域地球物理资料(尤其是航磁、磁卫星资料)相结合,才可能得出可靠的与合理的地质结果。

(3) 在探讨岩石磁性与进变质作用之间的相互关系时,退变质作用的鉴别是其中关键问题之一,目前主要结合矿物学分析的结果进行研究。有人认为退变质作用(麻粒岩相→角闪岩相)会产生细颗粒呈超顺磁状态(SPM)磁性矿物,因此利用液氮温度条件下磁滞回线分析结果有可能鉴别,这方面研究仍在探索中。

(4) 要揭示岩石矿物的磁性与变质动力学之间内在的本质联系,需注重岩性相似与变质级(或变质相)不同,及变质级相同而岩性不同的岩石之间系统地磁学、地球化学与矿物学参量的测量、分析与综合研究,鉴别两者之间相互关系存在的地质因素,为深地壳结构及地

球动力学过程解释提供依据。

**MAGNETIC PETROLOGY OF HIGH-GRADE TERRANES  
IN ARCHEAN SHIELD AREAS  
——WINDOW INTO DEEP CRUSTAL STRUCTURE AND  
GEODYNAMIC PROCESSES**

Liu Qingsheng     Gao Shan

*(China University of Geosciences, Wuhan 430074)*

**Abstract** The major results about magnetic petrology of high-grade terranes of Archean shield areas in the world are reviewed in this article, focusing on the relationship between rock magnetism and deformation, and metamorphism and intensity of magnetization of continental lower crust and its origin. The important problems about the magnetic study of rock for high-grade terranes are advanced.

**Key words** continental lower crust, granulite facies terrane, magnetic petrology

· 信 息 ·

## 国家自然科学基金委员会与联合国大学软件所签署协议

受国家自然科学基金委员会的邀请,联合国大学软件所所长 Dines Bjorner 教授于今年 6 月 9 日访问了我委员会。双方进行了亲切友好的会谈。由周炳琨副主任主持,信息科学部陈俊亮主任和 Bjorner 所长共同签署了国家自然科学基金委员会信息科学部和联合国大学软件所合作协议。

在此之前, Dines Bjorner 教授曾于今年 3 月份访问我委员会,提出希望在共同支持合作项目、人员交流及召开学术研讨会方面与我委员会进行合作,到目前为止,国家自然科学基金委员会还没有与联合国有关机构签署过协议,因此,我委员会领导和信息科学部领导都十分重视。经过近三个月的准备,这一时机终于成熟。签字仪式在我委员会举行,出席签字仪式的我方人员有:周炳琨副主任、信息科学部陈俊亮主任和有关方面的同志。

(国际合作局 白鸽 张永涛 供稿)