现 代 地 质
GEOSCIENCE
第16卷 第2期
2002年6月
Vol.16 No.2
Jun. 2002

矿物磁性与金元素富集的可能关系

邓 军[1]，王庆飞[1]，孙忠实[2]，李德胜[1]，王建平[1]，孟庆芬[1]

（1. 中国地质大学 地球科学与资源学院，北京 100083；2. 吉林大学 地球科学学院，吉林 长春 130061）

摘要：金富集机制一直为国内外学者所关注。作者认为矿石矿物的磁性特征与金富集可能有成因上的联系：（1）黄铁矿与磁黄铁矿、黄铜矿和方铅矿等相比，以极微弱的反铁磁性，不易受微弱外电和磁场的影响，在电性和晶体结构方面更具稳定性等特征，且易吸附纳米级金粒；（2）压力可使矿石矿物出现压磁效应，矿石矿物磁性矢量产生各向异性，金粒易在磁矢量加大方向发生富集；（3）颗粒细小、受多次压力作用、温度接近居里点等因素都能使矿石矿物的磁性加强，形成金富集的有利条件。

关键词：矿石矿物；磁性特征；金元素富集

中图分类号：P574 **文献标识码**：A

文章编号：1000－8527(2002)02－0177－03

0 引 言

金是一种分散元素，按粒度大小可分为明金（一般大于0.1 mm）、显微金（一般为100～0.2 μm）、次显微金（一般为0.2～0.02 μm）、超次显微金（一般在0.02 μm以下、但大于2.88×10^{-10} m，达到纳米级）[1]。地球的平均含金量仅为800×10^{-9}。金的富集机制一直为国内外学者所关注。

在内生矿化、变质矿化地质体中，含金矿物往往与含铁较高的矿物有一定的关系。在火成岩中，含金量由酸性岩、中性岩到基性岩一般有递增的趋势。变质岩中，含金高的矿物往往是磁铁矿、黑云母、辉石、角闪石。在硫化物中，含金高的矿物通常为黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿和毒砂等。在风化壳中，含金量较高的矿物常为褐铁矿、赤铁矿。这些含铁矿物含金较高，与矿物的磁性特征可能存在一定的内在关系。

1 含金矿石矿物的磁性特征

含金矿石矿物主要有黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、磁黄铁矿、赤铁矿、自然金、自然银等。按各矿物的磁性特征可分为逆磁性和反铁磁性。逆磁性是指在外磁场作用下，矿物产生附加磁矩，其方向与外磁场相反。如金、方铅矿、闪锌矿、硅、硫等磁化率为负值，介于$-0.1\times10^{-6}\sim-10\times10^{-6}$SI之间；磁化率不随温度而变化，当无外磁场时，便失去磁性。反铁磁性是指磁畴内原子间很强的负交换力，磁畴内原子磁矩排列相反，如黄铁矿、磁黄铁矿和赤铁矿等。当无外磁场时不具有磁矩，加上外磁场后，基本上不改变其反平行排列，各原子磁矩扭转角度使磁畴具有一定的磁矩，其值虽然小至10^{-5}SI级，但具有较大的矫顽磁力，故有时能获得较大的剩余磁化。当外磁场不变时，磁化强度随温度的升高（不超过居里温度）而增大[2]。

2 硫化物矿物的不同磁性特征与不同粒级金的关系

2.1 黄铁矿载纳米级金粒

硫化物矿物对金粒的吸附作用可能与外磁场的存在有一定的关系。金、铁、硫等具有磁矩相互吸引的特点，据线元电流磁场公式和无限长电流线磁场公式[3]：

$$\Delta H = I\,\Delta L/R^2 \qquad (1)$$

收稿日期：2002－03－14

基金项目：国家自然科学基金项目（40172036）；国家重点基础研究发展规划项目（1999043206）；教育部科学技术研究重点项目（01037）；高等学校骨干教师资助计划项目。

作者简介：邓 军，男，教授，博士生导师，1958年出生，构造地质学与矿床学专业，主要从事区域构造、成矿流体及成矿动力学的教学和科研工作。

$$H = 2I/R \qquad (2)$$

式中 ΔH 为磁场强度，I 为电流，ΔL 为线单元，R 为空间任意点到引长 ΔL 线元的距离。

即使黄铁矿距电流很远，但总有外磁场存在，使黄铁矿具有一定的反铁磁性。黄铁矿极微弱的反铁磁性可以吸附纳米级（10^{-9} m）的金粒，这可解释纳米级金粒常在黄铁矿颗粒表面附着的现象。

2.2 磁黄铁矿载微米级金和黄铁矿对金粒的易吸附性

微米级（10^{-6} m）金比纳米级（10^{-9} m）金粒所需载体矿物的磁性强度要大。磁性强度加大的主要原因是当反铁磁性物质的结晶格子中有系统亏损时，则可引起很强的自发磁化，如磁黄铁矿具有铁磁性物质般的磁化率和磁化强度。但在实际成矿作用中，磁黄铁矿载微米级金粒的量却没有黄铁矿载纳米级金粒的量大，这是因为二者电性参数不同所致。

从常见半导体矿物的电阻率值来看（表 1），磁黄铁矿比黄铁矿电阻率小 3 个数量级，即磁黄铁矿的导电性比黄铁矿的大。两者极化率不同，磁黄铁矿的极化率比黄铁矿的大。黄铁矿与磁黄铁矿相比，以弱导电性和弱极化率为特征保持相对稳定，不受微弱外电和磁场的影响而发生明显变化。黄铁矿的磁性稳定因素也表现在自身的晶体结构中，黄铁矿（FeS_2）属于硫化物，与方硫钴矿（CoS_2）和方硫镍矿（NiS_2）同属 NaCl 型晶格，Co^{2+}、Ni^{2+} 比 Fe^{2+} 多出一二个电子分布在 eg 轨道上，致使三者晶胞参数 a_0 值分别为 $5.41\times10^{-10}\sim5.42\times10^{-10}$ m、5.53×10^{-10} m、5.69×10^{-10} m，所以使原磁性较强的 Co^{2+}、Ni^{2+} 在黄铁矿中仅能有限地替换 Fe^{2+}，而不改变黄铁矿本身的磁性特征。另外，低温量子干涉作用也能使黄铁矿磁性稳定[4]。黄铁矿的这些稳定因素或许是其比磁黄铁矿更易吸附金粒的主要原因。

表 1 常见半导体矿物的电阻率值

Table 1 Resistance values of common semiconductor minerals

电阻率值/（Ω·m）	矿物名称
$10^{-6}\sim10^{-3}$	磁黄铁矿、磁铁矿、斑铜矿
$10^{-3}\sim10^{0}$	黄铁矿、黄铜矿、方铅矿

3 矿石磁性加强的因素与金元素富集

3.1 矿物颗粒大小与磁性特征变化

实验结果表明[2]，在给定外磁场［$H = (1.35/4\pi)\ 10^3$ A/m］的作用下，铁磁矿物的相对含量不变，则粗颗粒矿物磁化率大，包含的磁畴多，易磁化，易使金颗粒富集。但实际情况却相反，矿物颗粒越小，磁化率越小，如果颗粒直径小到 10^{-6} mm 量级时，铁磁性矿物以单畴的形式出现，这时矫顽磁力却比粗颗粒矿物增强了数倍，这种现象可以用来解释为什么喷出岩的剩余磁化强度较侵入岩的高，细粒黄铁矿的含金量则比粗粒黄铁矿的含金量高出几个数量级。

3.2 矿石磁化方向与金粒富集

当矿物颗粒受到区域应力作用时，垂直于压应力的长轴方向形成排列整齐的片理或条带状构造，同时产生压磁效应[5]，即沿片理和条带状构造方向的磁化率较垂直此方向者要强。石英脉易沿片理和条带状构造贯入，含金量高的黄铁矿和方铅矿等硫化物矿石条带也常平行于石英脉分布，随之矿石被磁化成为各向异性。至于在矿石被磁化成为各向异性时，为什么同时易使金发生富集的机理，目前并不很清楚。通过 X 射线和二色微光谱测定，磁化各向异性属两个界面间微磁结构，微磁结构内部电子向上旋转和向下旋转产生不同能量[6]或能量叠加而使磁化方向移位，同时使导电矿石矿物周围磁场力增强，金粒发生富集。

3.3 构造应力对矿石磁性的影响

实验表明[5]，当岩（矿）石受到机械力作用时产生内应力，其矫顽磁力与内应力呈正比，而矫顽磁力越大，剩余磁化强度也越强，因而在构造多期叠加部位易形成金矿。

3.4 温度对矿石磁性的影响

黄铁矿和磁黄铁矿都属反铁磁性矿物，与铁磁性矿物一样，当它们被加热时，磁化率逐渐增加，临近居里点时达极大值，然后随介质冷却而急剧下降并趋于零。黄铁矿和磁黄铁矿的磁性居里点为 300～325℃，而绝大多数大型和超大型金矿的成矿温度主要在 200～300℃之间，此温度区间恰恰是硫化物矿石矿物磁性最强的区间。

4 结语与讨论

除温度、压力和其他物理化学条件之外，矿物的磁性也可能使金元素富集。

黄铁矿与磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿等相比，在磁性、电性和晶体结构等方面更具稳定性，不易受微弱外电和磁场的影响，易吸附纳米级金粒。

压力可使矿石矿物出现压磁效应，矿石矿物磁性矢量产生各向异性，金粒易在磁矢量加大方向发

生富集。另外，细粒的、受多次压力作用的、接近居里点温度的矿石矿物均有利于金的富集。

本文仅从几个方面分析矿物的磁性特征与金元素富集的关系，这只是一次尝试性探讨，希望引起地学工作者的关注，并欢迎读者讨论与指正。有关该方面的研究工作才刚刚开始，但是，它对探讨金形成的机理和金富集的动力制约因素等问题具有较深远的意义。

参考文献：

[1] 蔡长金. 金矿物鉴定手册 [M]. 北京：原子能出版社，1993. 1—51.

[2] 罗孝宽，郭绍雍. 应用地球物理教程 [M]. 北京：地质出版社，1991. 192—204.

[3] 傅良魁. 磁电勘探法原理 [M]. 北京：地质出版社，1984. 3—5.

[4] Manyaia N, Sidis Y, Ditusa J F. Magnetoresistance from quantum interference effects in ferromagnets [J]. Nature, 2000, 404: 581—582.

[5] 董焕成. 重磁勘探教程 [M]. 北京：地质出版社，1993. 40—45.

[6] Thomas F R. A new spin on magnets [J]. Nature, 2000, 404: 556—557.

THE POSSIBLE RELATIONSHIP BETWEEN ORE MINERAL'S MAGNETIC CHARACTERISTIC AND GOLD ELEMENT ENRICHMENT

DENG Jun[1], WANG Qing-fei[1], SUN Zhong-shi[2], LI De-sheng[1], WANG Jian-ping[1], MENG Qing-fen[1]

(1. *China University of Geosciences, Beijing*, 100083, *China*; 2. *Jilin University, Changchun, Jilin* 130061, *China*)

Abstract: The mechanism of gold enrichment is concerned for a long time. This paper discusses the possible relationship between ore mineral's magnetic characteristic and gold enrichment. The main views are as follows: ①The pyrite is more stable in electric and crystal characters, and is easy to attract gold. ②The stress can affect gold enrichment, making it locate in the direction in which the magnetic vector is increased. ③The gold is easy to form on the surface of mineral or in its body when its magnetical character enhanced, which is caused by small size of the mineral and multiple compression.

Key words: ore mineral; magnetic characteristic; gold element enrichment