

油气藏全空间磁学、地球化学与矿物学结构及意义 ——检验“烟筒效应”的形成机理

刘庆生¹, 李海侠¹, 王芳¹, 田志¹, 王艾红¹, 陈龙生², 张双喜², 夏响华³, 程同锦³

(1. 中国地质大学地球物理系, 湖北武汉 430074; 2. 香港大学地球科学系, 香港;

3. 中国石油化工股份有限公司石油化探研究所, 安徽合肥 230022)

摘要: 位于松辽盆地南部某油气田边缘一个油气显示井的磁性测量结果表明, 岩石具有明显的磁性变异结构特征。以磁化率(κ)为例, 在低缓的背景磁性上主要呈现高强度与中等强度的 2 类异常: 大于 400×10^{-5} 为强磁性, $100 \times 10^{-5} \sim 150 \times 10^{-5}$ 为中等强度磁性。结合录井资料与地球化学分析解释可知, 强磁性异常主要位于取样间隔的底部干层区, 少数样品位于浅部油气显示层; 中等强度异常主要位于 2 700 m 附近的油气显示层。岩石磁性与地球化学成分对应分析表明, 油气显示层岩石的 C_1 和 C_2 成分与磁化率(κ)、饱和磁化强度(J_s)和饱和等温剩余磁化强度($SIRM$)之间呈明显的正相关, 与内禀矫顽力(H_c)为逆相关, 而干层岩石相关性不明显。矿物成分分析显示, 岩石中主要含铁矿物为磁铁矿、磁赤铁矿、赤铁矿、黄铁矿和菱铁矿。其中磁赤铁矿主要分布在具有中等磁性强度的油气显示层, 而高含量(最高含量达 12.5%)的磁铁矿主要位于底部干层。磁赤铁矿与赤铁矿、黄铁矿及菱铁矿含量之间相关特征初步表明, 自生磁赤铁矿可能主要来源于原地赤铁矿与黄铁矿。推测油气显示层岩石中磁性偏软的磁赤铁矿属于烃蚀变的产物, 为烃微渗漏效应(或烟筒效应)的全空间形成机理提供了新证据。

关键词: 烃蚀变作用; 次生磁性矿物; 岩石磁学; 地球化学; 矿物学; 油气藏。

中图分类号: P574.1; P618.130.2 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2002)05-0637-08

作者简介: 刘庆生(1947-), 男, 教授, 博士生导师, 1970 年毕业于北京地质学院地球物理勘探系, 现从事固体地球物理学的基础理论与应用研究。

0 引言

20 世纪 70 年代末, Donovan 等^[1]依据美国 Oklahoma 州 Cement 油田上方近地空间存在高频低幅度的磁异常与现代潜水面附近岩石中存在大量磁铁矿的事实首次提出, 油气藏中烃类的垂向微渗漏过程会在油气藏上方与现代潜水面之间产生地球化学还原效应(我们称之为“烟筒效应”), 将原地岩石中的高价铁还原成低价铁(磁铁矿配置的重要成分), 从而形成与油气藏分布密切相关的磁性矿物, 称为成岩作用磁铁矿(diagenetic magnetite)。同时他还根据油田地表红层发生明显的褪色作用推测, 地下烃类强微渗漏作用形成的地球化学效应可能克服地表的氧化作用达到地表。显然, 如果这一结论能够

成立并具有广泛意义, 将为地面地球化学与微磁方法寻找油气藏理论奠定基础^[2]。近 20 年来, 科研人员对许多已知油气田地表土壤、钻孔岩心和含烃岩石的综合岩石磁学与地球化学分析结果认为, 尽管烃微渗漏的机理至今尚不很清楚, 但油气藏上方岩石中广泛存在的磁学—地球化学—矿物学异常与烃类微渗漏作用之间的相互关系基本可以成立^[3~7]。如 Schumacher^[8,9]提出烃类蚀变作用在土壤与沉积物中主要的表现形式有: (1) 微生物异常; (2) 矿物变异, 如形成方解石、黄铁矿、铀、硫、铁的氧化物和硫化物; (3) 红层的漂白作用; (4) 粘土矿物的蚀变; (5) 电化学变化; (6) 放射性异常; (7) 生物地球化学和地植物异常, 并认为地表地球化学方法仍是一种有效的油气勘探方法。显然, 要提高地表油气地球化学方法的效果, 必须深入研究地表综合物化探异常与深部油气藏之间相互关系的物理化学模型^[10]。

收稿日期: 2002-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 49874026, 49374216)。

Liu 等^[11, 12]认为,“烟筒效应”的形成是一个复杂的地质—地球化学—地球物理过程,并与烃微渗漏过程密切相关。目前,涉及烃微渗漏形式的主要观点认为,油气藏中的烃类在压力、温度梯度及浮力作用下,以水为主要介质和载体,沿网状裂缝系统向上微运移(或渗漏)^[10]。关于“烟筒效应”的形成机理也仍然存在许多推测,尤其是相关的地球物理和地球化学反应仍然以多种假设为主^[13~15]。Burton 等^[14]依据实验室内模拟岩石在油气藏的地球化学背景下的蚀变作用过程为两者之间的关系提供了实验依据。然而,“烟筒效应”与油气藏之间可靠的相互关系仍需要通过大量对比研究不同地质背景和油气藏类型的已知区(包括油气区和干区),并结合实验模拟,才能加以确立^[17]。其中关键是磁性及地球化学参量变异特征的多源成因分析和鉴别。

本文依据位于松辽盆地某油气田边缘的一口油气显示井岩石的磁性、地球化学和矿物学参量的分析及其变异特征的综合研究结果,提出了“烟筒效应”全空间形成机理的新证据。

1 地质背景

本井为松辽盆地南部某油气田边缘的一口油气显示井,分析样品的深度间隔为 1 718~3 134 m,地层主要涉及上白垩统泉头组三段(K_1q^3)、二段(K_1q^2)和一段(K_1q^1),下白垩统竟楼库组(K_1d)与营城组(K_1yc),沙河子组(K_1sh)。录井解释结果显示主要有 3 个油气显示段,分别位于 K_1q^1 — K_1d (2 077.5~2 102 m)、 K_1yc (下部 2 765~2 815.5 m) 和 K_1sh (3 139~3 150 m)。岩性主要为砂岩(包括粗砂岩、细砂岩)及砂砾岩与少量泥岩。

油气化探分析解释结果提出,在分析的 73 个样品中存在 4 个油气显示段,分别位于 1 721~2 212 m, 2 440~2 484 m, 2 617~2 831 m 和 3 055~3 165 m。油气显示段之间主要为干层,其中 3 165 m 以下的底部为主要的干层。

2 研究方法

在 1 721~3 459 m 的深度区间共采集 73 个分析样品,其中油气显示层样品 20 个,干层样品 53 个,采取的主要研究步骤为:(1)应用磁性岩石学与

磁性矿物学原理,首先测量岩石的磁性参量,包括常规磁化率(κ)与磁滞回线及其参量、饱和磁化强度(J_s)、饱和等温剩磁化强度($SIRM$)和内禀矫顽力(H_c)。这些磁性参量主要反映了岩石的磁性成分、磁性强度、磁性状态及结构。如初步研究结果表明,在低温条件下(与油气藏形成条件相当)形成的次生磁性矿物的磁性偏软(即 H_c 值相对于以高温成因磁性载体为主的岩石偏小)^[18, 19];(2)选择具有典型磁性变异特征样品进行矿物学分析,包括重矿物分离与磁性矿物颗粒显微分析,获取岩石中主要含铁矿物成分、含量,并提取出可能存在特殊形貌的磁性矿物颗粒,通过电子探针与扫描电子显微分析,获得颗粒中高温微量元素的含量与表面微结构,用于定性判断它的起源及其与油气藏之间的相互关系^[20];(3)配套样品的磁学、地球化学与矿物学(本次为顶空气与吸附烃 2 类成分)参量之间的相关分析,探讨烃类蚀变作用的证据。

磁滞回线分析是用日本株式会社玉川制作所制造的 TM-VSM-2050 型振动样品磁强计完成的,仪器的最大外加场为 2.6 T,精度小于 1%,本次测量的最大场为 1.0 T。

3 结果与讨论

3.1 岩石的磁性特征

全部样品的磁性参量的统计结果示于表 1。从表中看到岩石磁性强度分布的几个特点:(1)磁性最强的岩石位于底部的第 4 干层(位于 3 179~3 495 m 的 19 个样品)。其 κ , J_s , $SIRM$ 的最大值分别高达 792×10^{-5} , 800.7 A/m 和 118.9 A/m,其中分布于该层 3 275~3 394 m 区间内的 7 个强磁性样品的 κ , J_s , $SIRM$ 平均值分别高达 533×10^{-5} , 498 A/m 和 105 A/m,其岩性主要为深灰色泥岩与粉砂岩;(2)20 个油气显示样品(主要分布于地球化学解释的 4 个油气显示层位内)为中等强度。 κ , J_s 及 $SIRM$ 平均值分别为 141×10^{-5} , 249 A/m 及 23.4 A/m;(3)第 1~3 干层岩石磁性相对较弱,以平均值为例,第 1 干层的 κ 值最低为 76×10^{-5} ,第 2 干层的 J_s 值最低为 209 A/m,第 3 干层的 $SIRM$ 值最低为 16.9 A/m。岩石磁性参量的变异系数值(V_c)用于衡量岩石磁性强度分布的均一性程度,它主要反映了岩石中磁性载体的分布特征,并在一定程度上与烃类蚀变作用的均匀程度相关,全部干层岩石的变异系数

表 1 主要代表性层位样品磁性参数的统计值

Table 1 Magnetic parameters of rocks

层位	<i>h</i> /m	$\kappa/10^{-5}$	$J_s/(A \cdot m^{-1})$	$SIRM/(A \cdot m^{-1})$	H_c/mT
全部样品(73)	1 721~3 459	152±158	252±119	26.49±28.0	26.77±14.72
		1.04	0.47	1.06	0.55
油气显示层 (20)		141±104	249±73.1	23.4±14.0	27.29±8.48
		0.74	0.29	0.60	0.31
全部干层(53)		153±174	253±132	27.67±32.6	28.26±16.38
		1.14	0.52	1.18	0.58
第 1 干层(14)	2 254~2 425	76±119	221±86.7	20.1±18.9	34.57±27.97
		1.57	0.39	0.94	0.81
第 2 干层(6)	2 496~2 585	99±16	209±27.4	17.1±2.2	17.86±3.24
		0.16	0.13	0.13	0.18
第 3 干层(12)	2 857~3 023	100±19	214±54.1	16.9±3.3	25.78±11.43
		0.19	0.25	0.20	0.44
第 4 干层(19)	3 179~3 495	231±245	319±184	44.6±47.3	25.72±6.67
		1.06	0.58	1.06	0.26

括号内的数字为参与计算的样品数。 κ 、磁化率; J_s 、饱和磁化强度; $SIRM$ 、饱和等温剩余磁化强度; H_c 、内禀矫顽力;表中磁性参数的统计值为平均值±方差与变异系数。

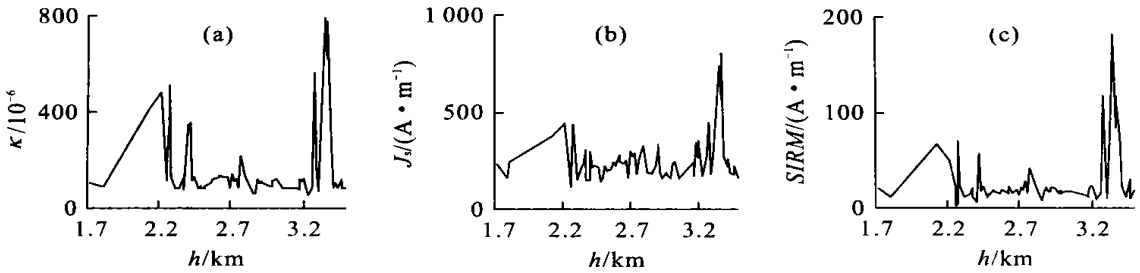


图 1 岩石磁性随深度的变化曲线

Fig. 1 Magnetism of samples changing with depth

值位于 0.52~1.18, 其中第 1, 4 干层最大, 位于 0.26~1.57, 第 2, 3 干层最小, 位于 0.13~0.44. 油气显示层为 0.31~0.74, 表明油气显示层岩石磁性分布相对较为均一. 显然, 干层岩石中磁性矿物成分相对油气显示层具有更为多源的成因, 而油气显示层中磁性矿物组分可能相对较为单一, 这是造成 2 类岩石磁性变异差异的主要原因.

κ, J_s 与 $SIRM$ 参量随深度的变化曲线示于图 1. 3 类参量均在 2 127~2 254 m 及 3 275~3 394 m 2 个区间存在明显的高强度的磁性异常, 其中后者的磁性最强. 前者位于 $K_{1q}^1-K_{1d}$ 油气显示层, 后者位于第 4 干层内. 值得注意的是, 在 2 个强磁性异常之间宽阔的低磁强度背景中的 2 700 m 附近存在一个幅度相对较小(中等强度)的局部异常, 它位于 K_{1yc} 油气显示层内. 油气藏本身属弱的反磁性物质^[2], 因此, 这一中等强度的磁性异常表明岩石中含有明显的磁性矿物. 这些磁性矿物的性质与起源, 须结合矿物学分析结果加以判断.

3. 2 地球化学成分分析

配套样品的地球化学成分随深度的变化曲线示于图 2. 其中顶空气成分主异常位于中段 2 700 m 附近, 其特点是异常分布范围宽、变化剧烈. 主异常的分布范围与该区间油气显示层(即第 3 油气显示层)基本一致. 浅部油气显示层仅有个别样品反映, 尤其是重烃成分(即 C_{2+}) 反映明显. 吸附烃成分变化曲线中, 中段的主异常有 2 个分开的高强度的峰. 此外, 在 2 200 m 附近存在一个幅度较小的局部异常(图 2b). 但 2 类烃类成分主异常的分布范围与 2 700 m 附近的油气显示层基本一致. 因此, 我们将位于中段的主要烃类异常作为重点研究对象.

3. 3 矿物学分析

重矿物分析结果表明, 样品中主要含铁矿物分别为磁铁矿(Fe_3O_4)、磁赤铁矿(γFe_2O_3)、赤铁矿(Fe_2O_3)、菱铁矿($FeCO_3$) 和黄铁矿(FeS_2). 其中赤铁矿含量最高达 28.117%, 其次磁铁矿为 12.514%, 菱铁矿为 5.853%, 而磁赤铁矿和黄铁矿

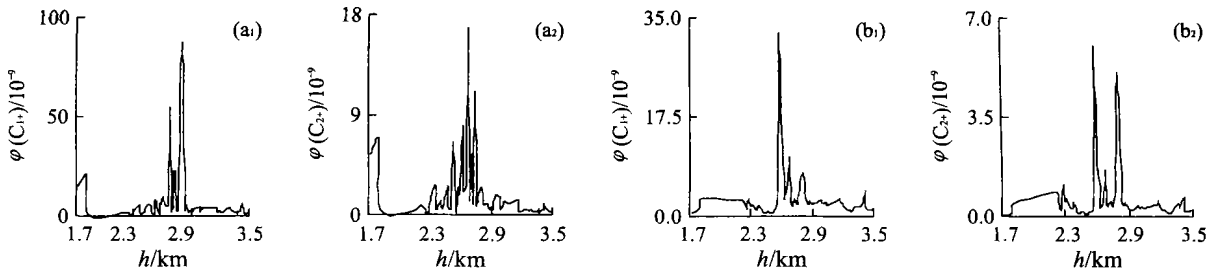


图 2 烃成分随深度变化曲线

Fig. 2 Geochemical compositions of samples changing with depth

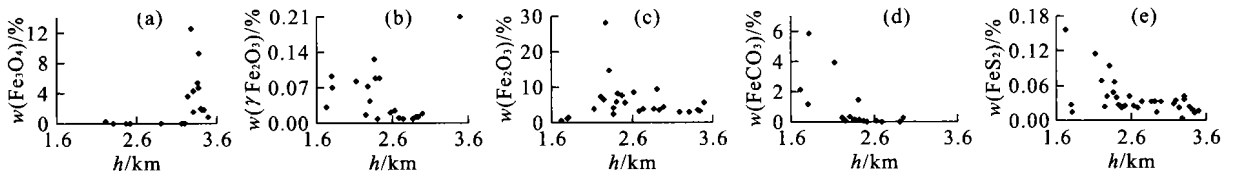
a₁, a₂. 顶空气烃成分; b₁, b₂. 吸附烃成分

图 3 含铁矿物含量随深度的变化曲线

Fig. 3 Scatter plots of iron-bearing minerals content changing with depth

a. 磁铁矿; b. 磁赤铁矿; c. 赤铁矿; d. 菱铁矿; e. 黄铁矿

含量最低, 均低于 1%。主要含铁矿物含量随深度的变化关系示于图 3。从中可以看出, 高含量磁铁矿样品主要位于底部的强磁性层内, 赤铁矿与黄铁矿广泛分布于整个取样区间。磁赤铁矿可分 2 种情况, 较高含量样品主要位于 2 200 m 附近的浅部油气显示层, 而低含量主要位于 2 700 m 附近中等磁性强度的第 3 油气显示层。几个高含量菱铁矿样品分布于浅层, 而低含量样品分布区间与磁赤铁矿相似, 即 2 500~3 000 m 区间。显然 5 种铁矿物含量随深度的分布关系的差异, 反映了岩石中含铁矿物成分的多源成因。成因矿物学研究认为, 赤铁矿是岩石中分布最为广泛的铁的氧化物^[21]。黄铁矿具有多种复杂的来源, 磁铁矿几乎全部分布在底部干层区间, 而磁赤铁矿主要分布于油气显示层。据此推测, 岩石中的赤铁矿和磁铁矿主要为油气藏形成之前原地的物质, 而磁赤铁矿可能主要为油气藏中烃类蚀变作用的产物。

3. 4 磁性、地球化学及矿物成分之间的相互关系及自生磁赤铁矿的起源

为了探讨烃类蚀变作用对岩石磁性的影响及其与“烟筒效应”形成之间的相互关系, 重点对比油气显示层和干层岩石样品的磁性、地球化学及含铁矿物成分之间的相互关系。图 4a 表明, 20 个位于油气显示层内样品的 κ , J_s 和 $SIRM$ 与烃类的 C_1 及 C_2 成分之间呈较明显的正相关, 且每种磁性参量对应

C_1 和 C_2 成分的变化关系极为相似(即散点群的平均斜率相似)。内禀矫顽力 H_c 与 C_1 和 C_2 则明显呈逆相关, 表明高烃成分岩石中磁性载体的磁性偏软(即 H_c 值偏小)。这与新疆塔里木盆地雅克拉油田工业油气井钻孔岩心的结果非常一致^[18]。而干层样品的磁性与烃成分之间关系不明显(图 4b)。

重矿物提取结果获得的 5 种含铁矿物成分中, 只有磁铁矿与磁赤铁矿属于强铁磁性矿物。2 种磁性矿物的磁性参量的理论值除居里点相差较大外(磁铁矿为 578 °C、磁赤铁矿为 675 °C), 其他磁性强度参量相似^[22]。结合图 1 与图 4, 可以初步判断位于 2 200 m 附近的较为单一的磁性异常主要由 166 号样品(深度为 2 212 m)中的磁铁矿(含量为 0.252%)和 138 号样品(深度为 2 127 m)中的磁赤铁矿(含量为 0.082%)引起; 而 3 200~3 400 m 区间的强磁性异常(底部异常)仅为磁铁矿引起, 因为该区间岩石中基本不含磁赤铁矿。而位于 2 700 m 附近具有中等强度的局部磁性异常的载体为磁赤铁矿。虽然磁赤铁矿属强磁性矿物, 但由于含量很低(小于 0.05%), 因而磁性偏低。而低缓的背景磁性载体主要为赤铁矿和黄铁矿。录井与地球化学分析解释结果表明, 底部磁性异常主要位于干层, 浅部异常段与中部异常段主要位于油气显示层。这一结果表明, 油气藏聚集过程可能同时伴随着烃类蚀变作用的发生, 并产生了明显的磁性变异结构。

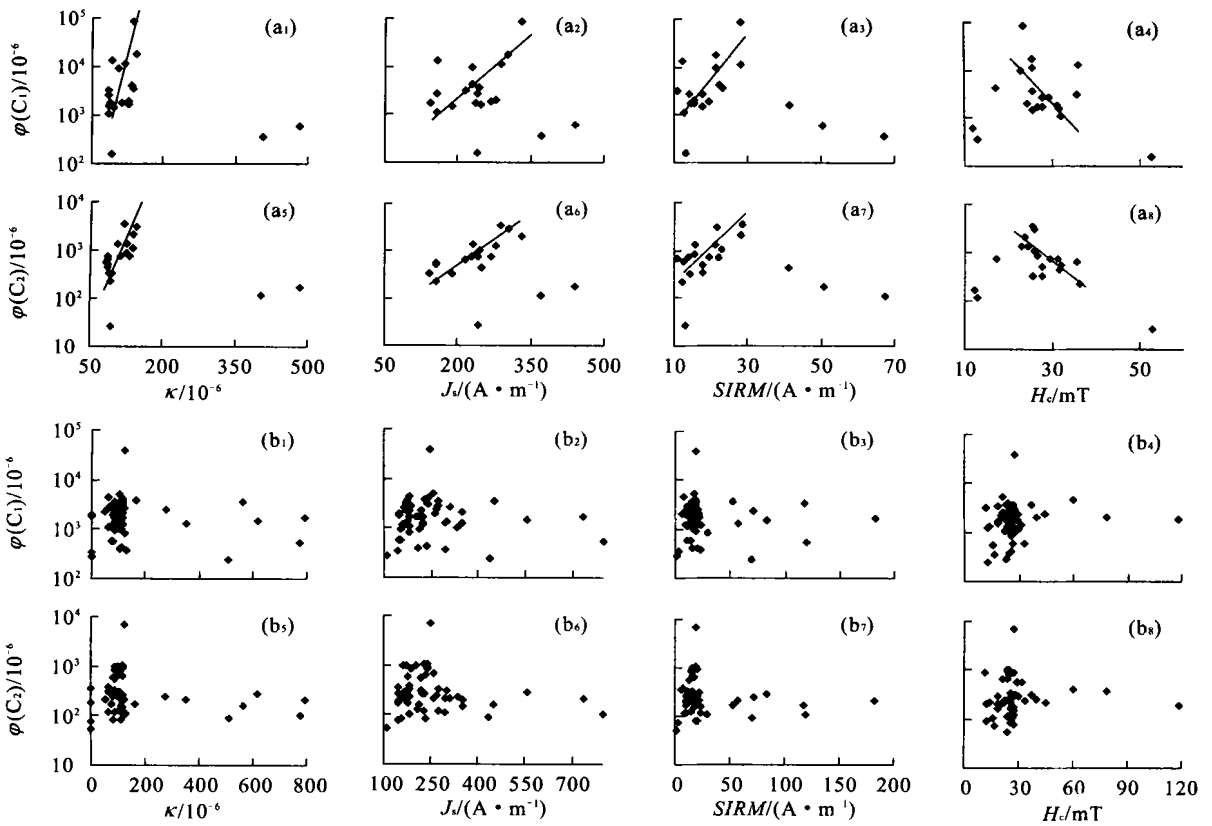


图 4 磁性参量与烃成分之间的相互关系

Fig. 4 Scatter plots of relations between magnetic parameters and hydrocarbon compositions

a₁—a₈. 全部油气显示层; b₁—b₈. 全部干层

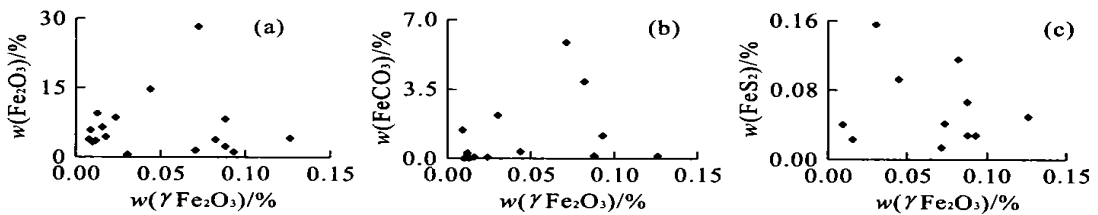


图 5 磁赤铁矿与赤铁矿 (a)、菱铁矿 (b) 及黄铁矿 (c) 含量相互关系

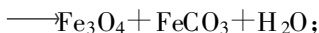
Fig. 5 Relationship of contents between maghemite and hematite (a), siderite (b) and pyrite (c)

为了定性判断次生磁赤铁矿的成因, 分别作了磁赤铁矿与主要含铁矿物之间的相互关系图(图 5). 由于主要油气显示层岩石几乎不含有磁铁矿, 且高含量磁铁矿主要位于底部的干层, 因而磁赤铁矿与磁铁矿之间不存在相互关系. 从图 5 看到, 磁赤铁矿与赤铁矿及黄铁矿之间相互关系的散点近似可分 2 群. 磁赤铁矿含量相对较高样品对应赤铁矿含量较低(图 5a), 这表明磁赤铁矿可能主要来源于赤铁矿. 低含量磁赤铁矿(小于 0.05%) 对应黄铁矿的散点集中, 而较高含量(大于 0.05%) 的散点群则分散(5c), 表明黄铁矿也可能参与磁赤铁矿的形成. 磁赤

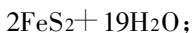
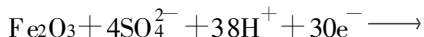
铁矿与菱铁矿相互关系不明显, 推测菱铁矿本身也可能为一中间产物^[23](图 5b). 为此我们推测, 次生磁赤铁矿形成前的原始含铁矿物应以原地赤铁矿为主, 而部分黄铁矿也可能是烃类蚀变过程的产物, 是岩石中二价铁的重要来源^[24~26]. 磁赤铁矿具有缺阳离子尖晶相的端元结构, 它与赤铁矿的化学成分相同, 而具有与磁铁矿相同的尖晶相结构^[27]. 磁赤铁矿通常不能由赤铁矿直接转换而来, 其形成过程可能经历 2 个阶段, 首先是原地赤铁矿通过还原过程(由烃微渗漏作用激发) 转换成磁铁矿, 然后再经氧化背景(可能由水或其他物质产生) 转变为磁赤铁

矿^[28]. 推测主要化学反应为:

赤铁矿转换成磁铁矿和菱铁矿:



细菌硫酸盐的还原作用转换获得黄铁矿:



黄铁矿参与形成磁铁矿:



磁铁矿经氧化作用形成磁赤铁矿



这些地球化学反应过程表明, 油气藏中烃类蚀变作用可以发生于油气赋存的全空间(三维空间)范围, 并构成了“烟筒效应”的重要组成部分。

4 结论

(1) 油气显示井岩石的磁性与地球化学成分测量结果表明, 含烃岩石中烃类的蚀变作用导致岩石磁性强度明显增加, 而矫顽力减小。岩石存在高强度、中等强度和低缓背景 3 类磁性结构特征。前者主要位于底部干层与浅部油气显示层, 中等强度主要位于中段的油气显示层, 而低缓的背景则分布整个取样区间。(2) 矿物分析表明, 岩石中主要含有磁铁矿、赤铁矿、磁赤铁矿、菱铁矿和黄铁矿 5 种类型的磁性矿物。其中赤铁矿与黄铁矿分布于整个取样区间。磁铁矿主要位于底部强磁性区间的干层, 磁赤铁矿主要位于中段和浅部油气显示层, 是中等强度磁性异常的载体。而低缓背景磁性的载体主要为赤铁矿和黄铁矿。(3) 岩石磁学、地球化学及矿物学三者之间的相互关系揭示出, 烃类蚀变作用主要形成了含量低、磁性偏软的磁赤铁矿, 它是原地赤铁矿及部分黄铁矿反应的产物。由此提出, 油气藏中烃类蚀变作用不仅发生在油气藏上方, 而且为油气藏赋存的三维空间, 是“烟筒效应”全空间形成过程的重要组成部分。

本文成果得到中国石油化工股份有限公司的部分资助。感谢美国地球微生物技术公司地球化学主管 Deet Schumacher 博士在有关烃蚀变过程方面与作者的有益讨论, 感谢华中科技大学电子科学与技术系李佐宜教授在样品磁滞回线分析与中国地质大学陶海宝高工在矿物分析研究中提供的帮助。

参考文献:

- [1] Donovan T J, Forgey R L, Roberts A A. Aeromagnetic detection of diagenetic magnetite over oil fields [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1979, 63: 245-248.
- [2] 刘庆生. 微磁方法寻找油气藏的基本原理与应用 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996.
LIU Q S. The basic principle and applications of micro-magnetic method in oil & gas exploration [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996.
- [3] Elmore R D, Cranfor L. Remanence in authigenic magnetite: testing the hydrocarbon-magnetite hypothesis [J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95(B5): 4539-4549.
- [4] Foote R S. Use of magnetic field aids oil search [J]. Oil & Gas Journal, 1994, 90: 137-140.
- [5] Reynolds R L, Fishman N S, Hudson M R. Sources of aeromagnetic anomalies over Cement oil field (Oklahoma), Simpson oil field (Alaska) and the Wyoming-Idaho-Utah thrust belt [J]. Geophysics, 1991, 56: 606-617.
- [6] Saunders D F, Burson K R. Unconventional exploration methods work in East Texas, Alabama Ferry oil field [J]. Oil & Gas Journal, 1989, 13: 108-110.
- [7] Saunders D F, Burson K R, Thompson C K. Observed relation of soil magnetic susceptibility and soil gas hydrocarbon analyses to subsurface hydrocarbon accumulation [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1991, 75: 389-408.
- [8] Schumacher D. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments [A]. In: Schumacher D, Abrams M A, eds. Hydrocarbon migration and its near-surface expression [C]. AAPG Memoir, 1996, 66: 71-89.
- [9] Schumacher D. Surface geochemical exploration for oil and gas: new life for an old technology [J]. The Leasing Edge, 2000, 3: 258-261.
- [10] Saunders D F, Burson K R, Thompson C K. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations [J]. AAPG, 1999, 83: 170-185.
- [11] Liu Q S, Cheng T J, Liu S G. Comprehensive evaluation of mechanism of "chimney effect" using principles of magnetism, geochemistry and mineralogy [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43: 743-748.
- [12] Liu Q S, Chan L S, Zhang S X, et al. A study of the relationship between authigenic magnetite and hydrocarbon migration in the Mawangmiao oil field, Jiangnan basin, Hubei Province, China [J]. Geophysics, 2003 (in press).

- [13] Cioppa M T, Symons D T A. Timing of hydrocarbon generation and migration: paleomagnetic and rock magnetic analysis of the Devonian Duvernay Formation, Alberta, Canada [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, 69—70: 387—390.
- [14] Atekwana E A, Sauck W A, Werkema D D. Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, 44: 167—180.
- [15] 刘庆生, 廖乔奇, 曲赞, 等. 非常规综合物化探方法寻找油气藏基础理论研究中的几个问题 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1999, 24(5): 613—618.
- LIU Q S, LIAO Q J, QU Z, et al. Several issues on basic theory of unconventional comprehensive geophysical and geochemical exploration methods for location of petroleum and gas reservoirs [J]. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 1999, 24(5): 613—618.
- [16] Burton E A, Machel H G, Jun Q. Thermodynamic constraints on anomalous magnetization in shallow and deep hydrocarbon seepage environments: applications of paleomagnetism to sedimentary geology [J]. *SEPM Special Publication*, 1993, 49: 193—207.
- [17] 刘庆生, 彭信海. 西藏羌塘盆地地表土壤的磁性、地球化学及矿物学特征与烃运移相互关系研究 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1996, 21(1): 221—226.
- LIU Q S, PENG X H. A research on relationship between soil magnetism, geochemical and mineralogical features and hydrocarbon migration in Qiangtang basin, Xizang [J]. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 1996, 21(1): 221—226.
- [18] Liu Q S, Liu S G, Qu Z, et al. Magnetic and mineralogical characteristics of hydrocarbon microseepage above oil/gas reservoirs of Tuoku region, northern Taim basin, China [J]. *Science in China (D)*, 1998, 41: 121—120.
- [19] Elmore R D, Engel M H, Crawford L, et al. Evidence for a relationship between hydrocarbon and authigenic magnetite [J]. *Nature*, 1987, 325: 428—430.
- [20] Liu Q S, Wu Q F, Li H X, et al. Magnetic, geochemical and mineralogical characteristics of soils in Qiangtang basin, Tibet, China: implications for prospective oil and gas lands [J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2001, 12: 155—159.
- [21] 王顺金. 矿床矿物学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989.
- WANG S J. *Deposit mineralogy* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1989.
- [22] 多尔特曼 H B. 岩石和矿物的物理性质 [M]. 蒋宏耀, 刘腾耀, 卢贤栋, 等译. 北京: 科学出版社, 1985. 104.
- Duoerteman H B. *Physical properties of rocks and minerals* [M]. Translated by JIANG H Y, LIU T Y, LU X D, et al. Beijing: Science Press, 1985. 104.
- [23] Yeremin V N, Molostovskiy E A, Pervushova Ye V, et al. Magnetic zonation of sedimentary rocks and the spatial distribution of authigenetic iron minerals in hydrocarbon halos [J]. *International Geology Review*, 1986, 28: 734—739.
- [24] Reynolds R L, Goldhaber M B, Tuttle M L. Sulfidization and magnetization above hydrocarbon reservoirs: applications of paleomagnetism to sedimentary geology [J]. *SEPM Special Publication*, 1993, 49: 167—179.
- [25] Reynolds R L, Tuttle M L, Rice C A, et al. Magnetization and geochemistry of greigite-bearing Cretaceous strata, North Slope basin, Alaska [J]. *American Journal of Science*, 1994, 294: 485—528.
- [26] Machel H G, Burton E A. Cause and spatial distribution of anomalous magnetization in hydrocarbon seepage environments [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1991, 75: 1864—1874.
- [27] Thompson R, Oldfield F. *Environmental magnetism* [M]. London: Allen & Unwin, 1986. 15.
- [28] Tite M S, Linington R E. Effect of climate on the magnetic susceptibility of soil [J]. *Nature*, 1975, 256: 565—566.

Magnetic, Geochemical and Mineralogical Structure and Significance in Complete Space of Oil and Gas Reservoir: Implications for Formation Mechanism of "Chimney Effect"

LIU Qing-sheng¹, LI Hai-xia¹, WANG Fang¹, TIAN Zhi¹, WANG Ai-hong¹, CHAN Long-Sheng², ZHANG Shuang-xi², XIA Xiang-hua³, CHENG Tong-jin³

(1. Department of Geophysics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong, Hong Kong; 3. Institute of Petroleum Geochemistry, SINOPEC, Hefei 230022, China)

Abstract: Magnetic measurements of rocks in an oil and gas-bearing well located on the margin of an oil and gas field, southern Songliao basin, show that the rocks there are characterized by the conspicuous magnetic anomalous structure. The magnetic susceptibility anomalies (κ), for example, are classified as two categories: the high intensity ($\kappa > 400 \times 10^{-5}$) and the moderate intensity ($\kappa: 100 \times 10^{-5} - 150 \times 10^{-5}$) on the low background magnetism. As shown in the interpretation of the logging references and the geochemical analysis, the strong magnetic anomaly is located mainly in the dry layer at the bottom of the sampling interstitial positions. Few samples are located in the oil and gas display layer in the shallow part of the field. The intermediate magnetic anomaly is located in the oil and gas display layer at the depth around 2 700 meters. The correlation between the magnetism and geochemical compositions shows a positive correlation between geochemical compositions C_1 , C_2 and magnetic intensities parameters (i. e. susceptibility κ , saturation magnetization J_s and saturation isothermal remnant magnetization $SIRM$), but a negative correlation between geochemical compositions C_1 , C_2 and intrinsic coercivity in the rocks of the oil and gas-bearing layers. However, these correlations are not found in dry layers. The analysis of the iron-bearing mineral compositions indicates that the major iron-bearing minerals in the rocks are magnetite, maghemite, hematite, pyrite and siderite. In particular, the maghemite distributes mainly in the oil and gas-bearing layer with the intermediate magnetic intensity. But the magnetite with the iron contents of 12.5% distributes mainly in the dry layer at the bottom. The correlations in contents between maghemite and hematite and between pyrite and siderite indicate that the authigenous maghemite may have originated largely from the autochthonous hematite and pyrite. It can be inferred that the maghemite, whose magnetic intensity is weak-inclined in the rocks of the oil and gas-bearing layer, is a product of the hydrocarbon alteration, providing us with some new evidence for the complete-space formation mechanism of the hydrocarbon micro-percolation effect (or chimney effect).

Key words: hydrocarbon alteration; secondary magnetic mineral; rock magnetism; geochemistry; mineralogy; oil and gas reservoir.