



岩(矿)石 频谱激电特征与 结构构造和 导电矿物成分

张赛珍 周季平 李英贤 吴璐苹 著

中国科学技术出版社

内 容 提 要

本书根据在宽频($2^{-16} \sim 2^{10}$ Hz)范围内对人工样品和大量天然矿(化)石的频谱激电特性的实验测定结果和相应光薄片的镜下鉴定结果,讨论了导电矿物含量、微结构构造和导电矿物成分等因素对岩(矿)石谱激电效应的影响规律和影响程度,并对每种因素的影响程度给出了量值区间。以大量实验事实论证了导电矿物成分这个因素对岩(矿)石的谱激电特性有明显作用以及其中的原由。给出了几种常见的矿(化)石的时间常数 τ 值的分布范围。文后汇集了一些有代表性的人工样品和天然矿(化)石的宽频谱激电实测曲线和相应理论模型的拟合曲线以及岩(矿)石光薄片的镜下鉴定结果,并编成图集。

频谱激电法是近年发展起来的颇有前景的电法勘探方法。但当今国内外对其物性基础尚缺乏实际研究,本书在这方面提供了较丰富的实验资料和科学论述,是一本专题著作。本书是从事矿产资源勘探,特别是从事电法勘探的科研、教学、生产工作者和大专以上学生的有价值的参考著作。

责任编辑：苏泽民 沈国峰

封面设计：赵一东

目 录

一、 引言	(1)
二、 工作方法简介	(1)
1. 实验装置和样品处理	(1)
2. 仪器性能和测试技术	(2)
三、 岩(矿)石的频谱激电特性的一般规律与 Cole-Cole 模型	(3)
1. Cole-Cole 模型	(3)
2. 一般规律	(4)
3. 数据处理的基本方法	(4)
四、 岩(矿)石的频谱激电特征与导电矿物体积含量	(5)
五、 岩(矿)石的频谱激电特征与结构构造	(9)
1. 导电矿物粒径和连通程度	(9)
2. 致密程度或矿物镶嵌紧密程度	(10)
六、 岩(矿)石频谱激电特征与导电矿物成分	(11)
1. 实际现象	(11)
2. 不同成分矿石的谱参数分布	(14)
3. 混合成分的矿石的激电相位谱特征	(16)
七、 矿物成分对 τ 值影响的原因探讨	(17)
1. 人工标本测定结果	(18)
2. 天然标本测定中的有关现象	(19)
八、 遗留问题	(20)
九、 结束语	(20)
总表 1 人工标本岩(矿)特征与谱激电结果	(22)
总表 2 各类天然矿(化)石岩(矿)特征与谱激电结果	(23)
图集——人工标本和天然矿(石)标本的频谱激电特性实测	
曲线和理论拟合曲线集	(27)
图例	(27)
人工标本	(28)
天然标本	(37)
岩(矿)石光薄片镜下照片集	(57)

一、 引 言

多年来,国内外电法工作者为了解决常规电法工作中的难题——矿与非矿异常的区分问题,对频谱激电(以下简称 SIP)法开展了一系列室内外研究,取得了一定的进展。但不同的工作者所得的结果及对结果的认识不尽一致。如 K. L. Zong 等^[1]曾认为可以根据频谱结果在复平面图上所表现的三种不同类型来划分不同蚀变带和矿化带。W. H. Pelton^[2]等认为影响频谱特性中时间常数 τ 的主要因素是岩(矿)石中导电颗粒的大小,而不是导电矿物成分,但有时能借助于导电矿物的颗粒度与矿物成分间的关联来区分某些成分。M. O. Halverson^[3]等认为参数 k (相当于柯-柯模型中 c 参数)反应了界面特性,是区分矿物成分的有效参数。

产生上述矛盾的主要原因是,人们对 SIP 法的物性基础研究不足,尤其是缺乏系统性研究。鉴此,我们曾于 1982 年,从全国各地(14 个地区)采集了大量的标本(130 余块),对它们进行了 SIP 特性的测定和研究^[4],并对其中 80 余个样品分别磨了光片和薄片,进行了镜下鉴定和对比分析,弄清楚了各种岩(矿)石的低频 SIP 特性的一般规律和影响谱特征的主要因素,特别是发现了谱参数与矿物成分有关的重要现象。但当时的研究,限于仪器(BT6)的频率范围较窄($10^{-3} \sim 10^2 \text{Hz}$),测量精度偏低,一些时间常数较大的样品,常测不到它们的相位峰值,更测不到左翼,致使难以可靠地求取谱参数,只能得出具有大小概念的相对数值。为此,为进一步证实上述结果和进一步弄清楚影响激电谱参数的因素,1988 年后,又采用英国进口的 1250 型频率特性分析仪,对 53 块采自 19 个矿区的不同矿种的天然标本和 25 块含不同导电矿物含量、粒径、形态和成分的人工样品进行了较宽频域的频谱激电特性测量,并对具有代表性的 20 余块天然标本作了切片和镜下岩矿鉴定分析,测量频率范围一般为 $2^{-12} \sim 2^{14} \text{Hz}$,对一些时间常数较大的样品,最低频率测到 2^{-16}Hz ,以保测得主要频谱特征和相对完整的频谱曲线。频率低到 2^{-16}Hz ,测一个周期就需 18.2 小时,是很不容易可靠地测得的数据,在当前国内外,也还未有过报导,因此,是一份十分难得的基础资料。

通过上述实验和研究,进一步证实了^[4]所得出的影响岩(矿)石的激电谱参数的主要因素,并从量值上指出了各种因素的可能影响程度。同时以充分的论据论证了矿物成分这个因素对谱参数的影响,给出了几种主要矿石成分的谱参数范围。下面将综合上述两期实验研究结果,但以 1988 年测试结果为主,进行讨论。文内所示的图,凡对数频率坐标以 10 为底,相位以度为单位的,则为 1982 年用 BT6 仪所测;对数频率以 2 为底,相位以毫弧度为单位的,则为 1988 年后用 1250 仪所测,以示区别。文后图集全由 1250 仪所测。

二、 工作方法简介

1. 实验装置和样品处理

采用自行设计组装的谱激电特性测试实时控制系统。主要包括:英制 1250 型或国产

BT6 型频率分析仪、微机、打印机、绘图仪和由微机控制的数据自动传输、打印、数据处理、叠代拟合、成图等硬件软件系统以及标本测试槽。

实验装置及工作线路如图 1 所示。为保证电流只能从标本通过且较均匀地通过,在测试槽壁与样品两侧接触处用绝缘泥封隔,槽内用自来水与样品两端面保持良好接触。用四极装置测量,四个电极皆用铜-硫酸铜胶体不极化电极。天然标本在测试前一般浸泡 2~3 小时。人工标本采用水泥、砂和导电矿物混合,做成固结标本。

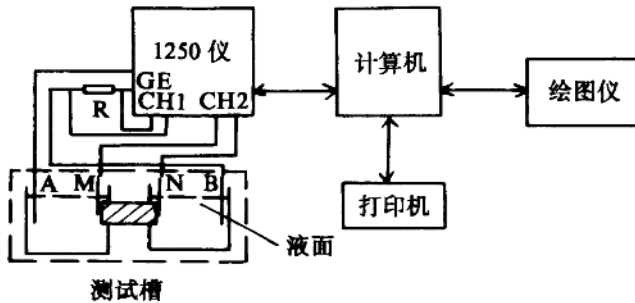


图 1 实验装置示意图

2. 仪器性能和测试技术

1250 频率特性分析仪含有频率发送器,两道频率特性测试道。频率范围 $2^{-16} \sim 2^{14} \text{Hz}$, 可发送多种波形,我们工作中主要利用其正弦信号。MN 端和串联在 AB 供电回路中的电阻 R_0 (由交流电阻箱提供) 的两端分别连到 1250 的两个接收道上,以便测试 MN 回路相对供电电流的相位移和振幅比(或虚实分量)。为使 1、2 两道有相近的测量精度,测试前,调节 R_0 大小,使其与 1Hz 时的标本的阻抗相当。后面图集中所列出的 R_0 值,基本上为 1Hz 时标本的阻抗值。通过样品的电流密度,一般保持在 $n \times 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 左右,基本上在线性激电效应范围内。

由于 1250 仪的输入阻抗较低,为检验仪器与装置的性能和控制样品的电阻在仪器允许范围内,在实测前,对不同阻抗的 RC 回路、纯水、纯泥等进行了频谱特性的测量,其结果见表 1 和图集中 S-1, S-2, S-3 号图。实验中,一般相位值和相位幅度变化都较大,因此,均方相对误差不超过 2%,绝对差不超过 2mrad,是完全允许的。这样,从已知阻容值的 RC 回路的实测结果相对其理论值偏差的计算结果(表 1)可见,直流阻值在 3000 Ω 以下,频率在 2^6Hz 以低,实测值与理论值符合得很好,均方相对误差一般不超过 2%,或绝对差不超过 2mrad。频率较高时(如 2^{10}Hz),虽均方相对误差较大,但绝对误差仍不超过 2mrad。均方相对误差大的原因是,频率高时,相位绝对值很小。所以,频率高到 2^{10}Hz 的值也是基本可靠的。因此,在实际工作中,我们尽量把样品的直流电阻控制在 3000 Ω 以下。

成图的最高频率只取到 2^{10}Hz 。图集中的纯水和纯泥的相位移皆在 0 值附近,它们的小于 2^{10}Hz 的相位谱曲线是一条平行频率轴的直线,这进一步说明了仪器和测试槽的可靠性。

表 1 不同阻容电路的实测值相对理论值的偏差

对应 图集中 S 1	阻 容				频 段 (Hz)	RMS (%)	$a \ \epsilon$ (mrad) / $R \ \epsilon \ (\%)$							
	R_0	R_1	R_2	C			2^4Hz	2^5Hz	2^6Hz	2^7Hz	2^8Hz	2^9Hz	2^{10}Hz	2^{11}Hz
	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(μF)										
φ_1	400	500	445	208	$2^{-9} \sim 2^8$	1 25%						0 31% 17 43%	0 43% 54 79%	1 74% 301 3%
φ_2	1489	1500	1500	19 7	$2^{-9} \sim 2^8$	1 19%						0 95% 18 3%	1 31% 5 0%	2 08% 158%
φ_3	1967	1966	1980	208	$2^{-9} \sim 2^7$	2 04%					0 43% 57 6%	1 04% 278%		
φ_4	2980	2974	2965	208	$2^{-10} \sim 2^6$	1 37%				1 25% 124%	1 01% 200%	0 31% 122%	1 05% 833%	
φ_5	3000	4000	4945	19 7	$2^{-8} \sim 2^7$	1 09%					1 86% 6 5%	3 72% 260%		
φ_6	2000	5000	5000	109	$2^{-9} \sim 2^3$ $2^{-9} \sim 2^8$	1 26% 8 50%	1 41% 15 6%	1 83% 40 3%	2 9% 128%	5 17% 456%	9 49% 1670%	14 9% 5260%		

注. RMS 平均均方相对误差, $a \ \epsilon$ 绝对误差, $R \ \epsilon$ 均方相对误差。

三、 岩（矿）石的频谱激电特性的一般规律与 Cole-Cole 模型

1. Cole-Cole 模型

Cole-Cole 模型^[3]的等效线路和其复阻抗的振幅相位频率特性曲线（图 2）及复阻抗的数学表达式^[2]如下：

$$Z(\omega) = Z(0) \left\{ 1 - m \left[1 - \frac{1}{1 + (\omega\tau)^c} \right] \right\} \tag{1}$$

其中
$$\tau = \chi \left[\frac{(R_a + R_b) R}{R_a + R_b + R} \right]^{1/c}$$

或
$$\tau^c = \chi^c \left[\frac{(R_a + R_b) R}{R_a + R_b + R} \right] \tag{2}$$

式中： τ ——时间常数； m ——极化率； c ——频率相关系数； χ ——与矿物的电化性能有关的参数。

图中 R_a 、 R_b 、 R 分别代表样品中未被阻断的孔隙通道的纯电阻、被阻断的孔隙通道

中溶液和导电矿物电阻以及导电矿物周围漏阻等。

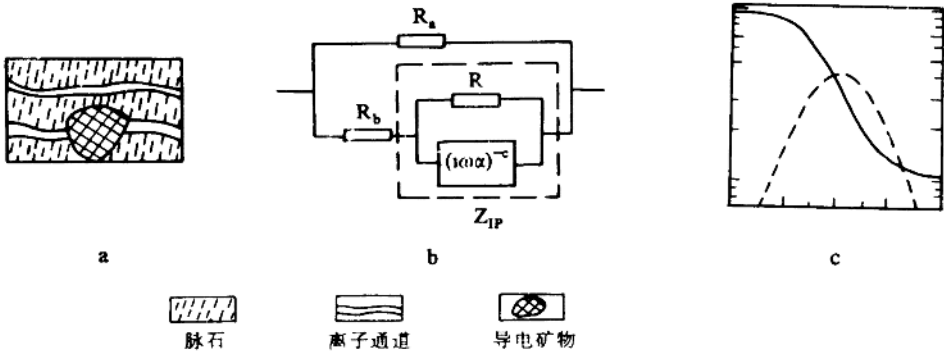


图2 Cole-Cole 模型示意

2. 一般规律

Pelton^[2]认为, Cole-Cole 模型能较好地刻划岩矿石的频谱激电特征。在我们的测试频率范围内 ($2^{-16} \sim 2^{10}$ Hz), 各类岩(矿)石复阻抗的振幅和相位都随频率有明显变化。振幅随频率增高而降低, 相位皆为负值, 其绝对值随频率升高先是上升而后逐渐降低, 中间某频点出现峰值。其变化规律十分类同于 Cole-Cole 模型所反映的标准曲线。我们曾用 Cole-Cole 模型拟合大量实测结果, 其拟合效果也较好。例: 导电矿物成分和粒径单一的人工标本的相频曲线, 都能较好地用单个 Cole-Cole 模型进行拟合 (见图集)。有些矿物成分很纯的天然标本的实例结果, 如铜峪沟 5 号石墨矿石 (图集中图 c-1) 的相频曲线与 Cole-Cole 理论模型的相频曲线重合得十分理想。对含两种导电矿物成分的混合矿石的振幅相位频率曲线, 用两个 Cole-Cole 模型拟合时拟合效果也较好。故岩(矿)石频谱激电特性的一般规律基本上符合 Cole-Cole 模型所表征的规律, 模型中的特征参数 m, τ, c 能表征岩矿石的频谱激电特征。

3. 数据处理的基本方法

据上述, 并便于与前人结果进行对比, 这里一律移用 Cole-Cole 模型作为基本模型, 对实测结果进行讨论。因为相位曲线特征更明显, 联合拟合振幅和相位曲线, 与单独拟合相位曲线的效果是一致的, 故我们主要分析相位频率特性曲线。将 (1) 式经过复数运算, 整理后, 可得相位与频率的关系式如下:

$$-\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{(\omega \tau)^c \sin \left(\frac{\pi c}{2} \right)}{L \left(\frac{1}{m} - 1 \right) + \left[1 + (\omega \tau)^c \cos \left(\frac{\pi c}{2} \right) \right]} \quad (3)$$

其中
$$L = 1 + (\omega \tau)^{2c} + (\omega \tau)^c 2 \cos \left(\frac{\pi c}{2} \right)$$

据 (3) 式, 用麦夸特法编制程序^[6]对实测相频曲线在计算机上进行叠代拟合, 求得描述岩 (矿) 石频谱进电特征的 Cole-Cole 谱参数, m (极化率), τ (时间常数), c (频率相关系数) 和组合参数 τ^c 。对人工标本, 皆用一个 Cole Cole 模型进行拟合。对天然标本, 因其成分和结构的复杂性, 大多用两个模型 (乘法组合) 进行拟合。拟合过程中, 特别考虑到初值的合理选取, 以求得拟合结果的合理性和可靠性。

m 这个参数与岩 (矿) 石的结构构造和成分的关系, 已在参考文献 [7] 中作过详细讨论。 m 值大小与矿石成分无关。 c 是与电化学反应过程有关的参数, 似能反映矿物成分, 但据参考文献 [1], 没有这种显示, 而是时间常数 τ 在这方面有较好的显示。据 (2) 式, τ (τ^c) 由 χ (χ') 和 $(\omega\chi)'$ 的放电回路电阻所组成。前者主要与矿物成分有关, 后者主要与岩 (矿) 石的结构构造和含量因素有关。因此, τ (τ^c) 具有岩 (矿) 石结构构造和导电矿物成分的综合效应, 是个综合参数。

本文将着重讨论 τ 和 c 。另外, 考虑到在复阻抗表达式中, τ 和 c 常以 τ^c 组合形式出现, 故这里也计算了 τ^c 值。

四、 岩 (矿) 石的频谱激电特征与导电矿物体积含量

主要实测结果见表 2 和文末总表及图集 (图集中 S-5, S-8, S-9, S-11, S-13, S-14)。如前所述, τ (τ^c) 是与岩 (矿) 石结构构造和矿物成分有关的综合性参数。故要弄清楚在天然条件下, τ (τ^c) 值能否反映出矿物成分来, 必须先弄清楚含量、结构构造等因素对 τ (τ^c) 值的作用程度, 下面列出了三组不同结构、各组合不同体积含量的人工标本的实测结果 (表 2)。

表 2 导电矿物含量不同的人工标本的谱激电结果

组号	标本名	导电矿物成分	导电矿物形态、分布	粒径或片厚度 (mm)	体 积 含 量 (%)	m	τ	c	τ^c	φ_m (mrad)	F_M (Hz)
1	RG15	紫铜	分散圆柱粒	1	8 2	0 285	2.78×10^{-5}	0.523	4.14×10^{-3}	54	$>2^{10}$
	RG14	紫铜	分散圆柱粒	1	15 0	0 495	8.96×10^{-5}	0.429	1.83×10^{-2}	114	$>2^{10}$
2	RG19	紫铜	分散圆柱粒	2	15 0	0 435	5.49×10^{-4}	0.553	1.57×10^{-2}	134	2^9
	RG20	紫铜	分散圆柱粒	2	28 5	0 753	1.17×10^{-3}	0.552	2.4×10^{-2}	325	2^9
3	RG1 (P)	紫铜	平行薄片	0.05	0 17	0 414	4.85×10^{-2}	0.427	3.75×10^{-1}	95	2^3
	RG18 (P)	紫铜	平行薄片	0.05	0 4	0 591	4.90×10^{-1}	0.361	7.6×10^{-1}	124	2^0

注 表中 φ_m 为最大相位值, F_M 为对应 φ_m 时的频率, RG1 (P)、RG18 (P) 中 (P) 的含义为供电电流平行片面时测, 后面同此。

表中片状构造的样品, 片的长和宽与标本的长和宽相当, 测试时供电电流方向沿片方

同。表中结果表明，镶嵌不紧的人工标本，在体积含量不高，变化 8.2% 到 28% 情况下， m 和 φ 随含量而明显上升（相对 m 变化范围只有 0~1 而言）， τ (τ') 值随 ξ_0 上升也有上升趋势，但粒状标本， τ 值增加幅度不大（相对 τ 值变化范围一般可达几个数量级而言），不超过一个数量级。 c 值与含量间没有明显的对应关系。

至于天然标本，一般在除含量外其它特征都类同的样品中，导电矿物呈星散浸染状的含量较低的样品的 τ 值比含量高的致密块状的矿石标本的 τ 值都明显地小，如表 3 和图 3 中两处不同含量的黄铁矿化样品的结果。陕西金堆城的 J_1 和 J_4 号， J_1 号含量较低， τ 值也明显较低（低 2 个级次）。浙江龙游的 II-4 与 I-1 号也是这种规律。又如总表中石墨类中含量低于 10% 的大降平 2 号，白银厂 1 号的 τ (τ') 值比含量高于 50% 的铜岭沟标本的 τ (τ') 值低几倍到一个多级次。黄铁类中含量低于 35% 的珠 1，珠 6，甲 2 号等标本的 τ 比含量高于 80% 的其它样品的 τ 值也低几倍到 2 个级次。 m 值和 c 值在总体上也有下降趋势。应指出，上述差异程度，也还包含有结构构造的作用。

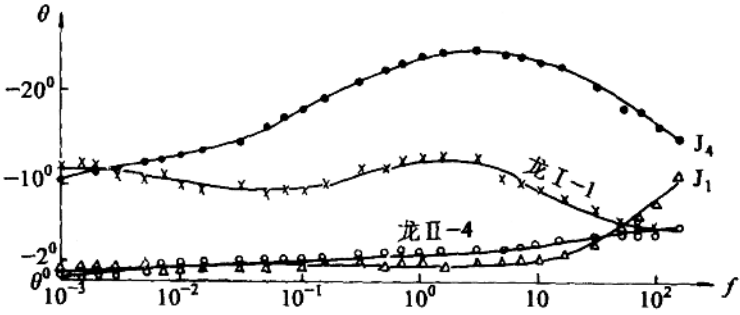


图 3 天然矿（化）石中硫化物含量不同时频谱特性的对比

表 3 两组不同黄铁矿含量的天然标本的结果

样品号	名称 (产地)	金属矿 组 分	大约体积 含量 (ξ_0)	粒径 (mm)	结构构造	τ	c	$m\%$
龙 I-1	黄铁矿石 (浙江龙游)	py	90%	0.05~2.5	致密块状，有裂隙	1.34×10	0.293	0.849
龙 II-1	黄铁矿化石 (浙江龙游)	py	15%±	0.01~0.4	细浸染成带	<1		
J_1	黄铁矿化石 (陕西金堆城)	py	<15%	0.1~0.4 0.5~2.0	星点和细脉浸染	< 10^{-1}		
J_4	含铜黄铁矿石 (陕西金堆城)	py cp	30% 1~2%	0.1~1.0 0.02~0.3	不规则浸染	7.45	0.37	0.967

但在体积含量大到一定程度后, τ 值随含量增长的趋势就不明显了。如山东福山的珠1、珠4、珠7和珠9号四块黄铁矿(化)矿石, 前两块黄铁矿含量为20%~25%, 后两块为70%左右, 其它组分和结构构造特征相仿。但四者 τ 值相近, 都为 $n \times 10^2$ 。这里 c 值没有反映出随含量高低的变化规律。见图4和表4。

岩(矿)石的结构构造不同或组分不同时, 就难以看出导电矿物含量与谱参数(τ , m , c)间的对应关系。图5和表5列举了一些实例, 江苏岔路口的岔9号黄铁矿石和江西东乡的东1号黄铁矿石, 黄铁矿体积含量(ξ_v)分别约为40%和50%, 比图4中山东福山的珠4号的高。但前两者的 τ 值反比后者明显地小(低近2~3个级次)。这主要因结构构造不同引起。图4中的珠

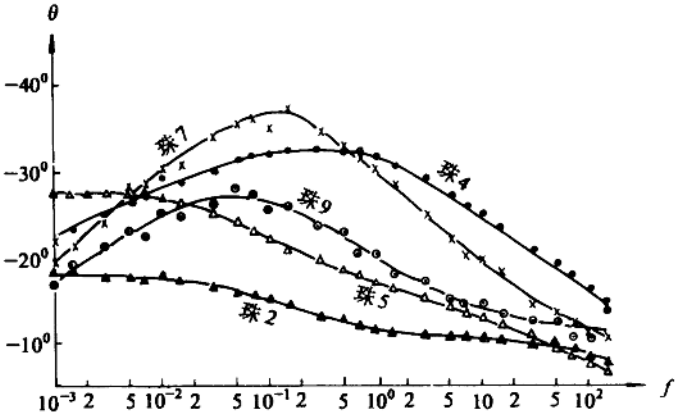


图4 山东福山地区不同导电矿物含量、不同成分的岩(矿)石的激电谱特性对比

2和珠5号的硫化物总含量(40%±)比珠7和珠9号的低, 但因硫化物组分不同, 前两者的 τ 值反而较大。在文末的总表和图集中也可找到大量这样的实例, 这里不一一列举。所以导电矿物体积含量对 τ 值的影响规律是有条件约束的。

表4 山东福山地区导电矿物含量和成分不同的各种天然岩(矿)石的谱激电结果

样品号	名 称	金属矿物 组 分	目估体积 含量 (ξ_v)	粒 径 (mm)	结 构 构 造	τ	c	$m\%$
珠4	黄铁矿矿石	py	25%	0.1~0.5	浸染, 局部条带状原岩呈 碎裂结构	3.50×10^2	0.419	0.992
珠7	黄铁矿矿石	py	70%	0.1~3	致密块状, 有碎裂	1.16×10^2	0.489	0.980
珠9	含铜黄铁矿石	py cp	70% 0.1%	0.02~3 0.03~0.2	致密块状, 也有碎裂	3.07×10^2	0.386	0.973
珠2	黄铁矿 黄铜矿矿石	py cp sp	20% 18% 2%	0.02~0.6 0.01~1.0 0.05~0.4	py 分散浸染, cp 包裹充填 于py裂隙间构成不规则的 块状或网脉状	$>10^4$		
珠5	黄铁矿 黄铜矿矿石	py cp	25% 19%	0.02~0.5 0.01~0.3	py 有碎裂, cp 充填于py 裂隙间, 但不连通	$>10^4$		

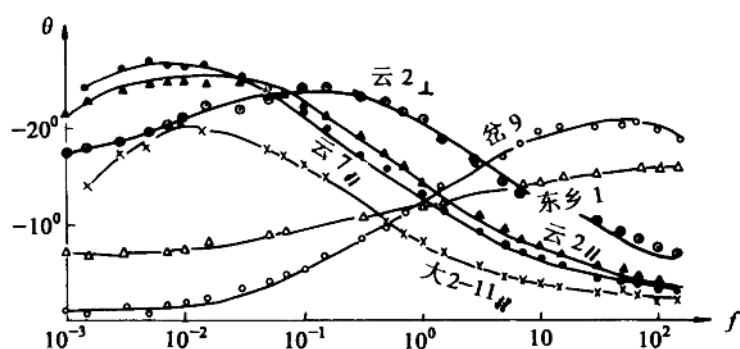


图 5 不同结构构造的岩(矿)石的谱激电特性对比

表 5 不同结构构造的岩(矿)石的谱激电结果

样品号	名 称 (产地)	金属矿 组分	目估体积 含量 (%)	粒 径 (mm)	结 构 构 造	τ	c	$m\%$
岔 9	黄铁矿矿石 (江苏岔路口)	py 褐铁矿	40% 10%	0.2~1.0	py 为粒状结构, 已部分褐 铁矿化, 粒间不紧密, 较松 散	4.54×10^2	0.467	0.885
东乡 1	黄铁矿矿石 (江西东乡)	py 褐铁矿	50% 10%	0.5~1.5	py 边部褐铁矿化, py 局部 成团块状, 大部为星散粒 状, 松散	<1		
大 2 11/	黄铁矿矿石 (广东大降坪)	py ma	45% 50%	0.1~1.0 0.2~1.0	py 粒状镶嵌结构, 粒间紧 密与脉嵌接呈带状, 部分 为浸染状继续相连通	2.86×10^2	0.655	0.986
云 2/	黄铁矿矿石 (江苏云台山)	py	40%	0.1~1.0	粒状结构, 浸染条带状构 造, 继续相连通, 裂隙稍 发育	6.73×10^2	0.417	0.96
云 2⊥	黄铁矿矿石 (江苏云台山)	py	40%	0.1~1.0	粒状结构, 浸染条带状构 造, 继续相连通, 裂隙稍 发育	1.47×10^2	0.382	0.96
云 7∥	黄铁矿矿石 (江苏云台山)	py	50%	0.5~1.0	py 呈带状分布, 继续相连 通	2.23×10^3	0.417	0.969

注 大 2 11//、云 7//、云 2//为供电电流平行脉向测, 云 2⊥为供电电流垂直脉向测。

五、 岩矿石的频谱激电特征与结构构造

1. 导电矿物粒径和连通程度 (表 6, 图集中 S-4~S-9, S-14~S-16, S-18~S-20)

过去已有不少文章^{[2][8]}讨论过 τ 值大小与粒径的关系, 其共同结论是, τ 值大小主要受粒径大小和连通程度控制, 我们人工标本的实验结果也反映了导电矿物粒径和连通程度对 τ 值有较明显的影响。如表 6 中所示四组结果。粒径变化 0.05~2mm, 其 τ (τ') 值变化 1~2 个级次, 如剔除粒径 $<0.05\text{mm}$ 的数据, 则 τ (τ') 值的变化只有 1 个多数量级左右。连通程度的影响较大, 如完全贯通的薄片状标本, 无论是平行片状或片呈网状, τ (τ') 值都较大, 即便含量很低 (见表 6), 它们比含量较高的分散粒状的成分相同的标本的 τ (τ') 值也大出 2~5 (1~3.5) 个数量级。 c 值规律不明显, 但从总体看, 随粒径增加, c 值略有下降趋势, m 值与粒径, 看不出有对应关系。电流平行片面的 τ (τ') 值比电流垂直片面的 τ (τ') 值大 1 个多级次 (近 1 个级次), 而 c 值则偏小 0.2 左右。故各向异性的标本的谱参数 (τ, c) 也明显地具各向异性。应指出, 人工标本制作时, 不易严格控制每块标本胶结紧密程度的一致性。因此, 这里难免含有胶结程度的影响。

表 6 导电矿物粒径和连通程度不同的各种人工标本的谱激电结果

组号	标本名	导电物成分	导电物形态分布	粒径或厚度 (mm)	体积含量 (%)	m	τ	c	τ'	φ_m (mrad)	F_M (Hz)
1	RG10	紫铜粒	分散圆柱粒	<0.05	8.2	0.399	9.0×10^{-6}	0.637	6.1×10^{-4}	77	$>2^{10}$
	RG15	紫铜粒	分散圆柱粒	1	8.2	0.285	2.78×10^{-5}	0.523	4.14×10^{-3}	54	$>2^{10}$
2	RG16	紫铜粒	分散圆柱粒	0.5	15	0.319	7.04×10^{-5}	0.584	3.76×10^{-3}	92	$>2^{10}$
	RG14	紫铜粒	分散圆柱粒	1	15	0.495	8.96×10^{-5}	0.429	1.83×10^{-2}	112	$>2^{10}$
	RG19	紫铜粒	分散圆柱粒	2	15	0.435	5.49×10^{-4}	0.553	1.57×10^{-2}	134	2^9
3	RG9	黄铁矿	粉粒 (分散)	0.1	23.5	0.659	2.74×10^{-4}	0.674	3.97×10^{-3}	298	2^{10}
	RG8	黄铁矿	粉粒 (分散)	0.25~0.5	23.5	0.458	7.22×10^{-4}	0.648	9.21×10^{-3}	168	2^9
	RG7	黄铁矿	粉粒 (分散)	1.0~2.0	23.5	0.455	4.98×10^{-3}	0.639	3.38×10^{-2}	156	2^5
4	RG23	紫铜	6 薄片网脉状		0.38	0.463	3.125	0.534	1.85	144	2^{-2}
	RG18 (P)	紫铜	7 平行薄片		0.4	0.591	4.90×10^{-1}	0.361	0.76	124	2^0
	RG18 (V)	紫铜	7 平行薄片		0.4	0.547	1.93×10^{-2}	0.58	0.10	198	2^4

注 RG18 (P)、RG18 (V) 分别为供电电流平行和垂直片面所测。

人工标本, 条件比较简单和理想, 实际的天然岩 (矿) 石的矿物成分和结构构造错综复杂, 它们的作用是综合性的, 粒径以外的某些其它因素常对 τ 值起更明显的作用。因此, 如不固定其它因素, 上述人工标本中或前人讨论中出现的 τ 值大小与粒径的正相关关系可以完全被破坏。如石墨或碳质, 其矿物粒径很小 ($<0.05\text{mm}$), 即使在其含量低到 10% 左右时, 石墨类 (碳) 标本的 τ 值也比黄铁矿类或铅锌类中粒径最大的标本的 τ 值, 甚至比连通程度较好的条带状天然标本的 τ 值和完全连通的片状人工标本的 τ 值都要大

出几个数量级。图 4 中也有这样实例，珠 7 号和珠 5 号样品的结构构造大致相仿，但硫化物组分不同，致使粒较细、含量又偏低的珠 5 号的 τ 值反而较大。如此种种，不胜枚举。如固定成分因素而不固定其它结构构造因素，则也难看出粒径与 τ 值大小的对应关系。在同类矿种标本中不少粒细的比粒粗的标本的 τ 值偏大或接近的现象不少。如图 5 中的岔 9 号和东乡 1 号，其中黄铁矿含量和颗粒大小都与云 2、云 7 号的相仿，但前两者的 τ 却比后两者的明显地小。再如黄铁矿类的人工标本与天然标本的结果，黄铁矿粒径最粗的人工标本的 τ 值，也远比粒径最细的天然标本的 τ 值小得多。甚至完全连通的片状人工标本的 τ 值才接近天然标本的。

在同类矿种的天然标本中，一般导电矿物粒状集合呈定向分布成脉状或条带状的，其 τ 值要较不规则分布的偏大些，特别是 AB 电极方向平行脉（条带）向测得的 τ 值，其 τ 值一般呈各向异性，电流平行脉向的 τ 值比电流垂直脉向的 τ 值大几倍（天然标本）到一个多级次（人工片状标本）。见图 5、表 6 等结果。

在我们的天然标本中，条带状或脉状标本多呈断续分布的（也是自然界中常见的）。因此，它们与粒状集合体呈不规则分布的标本的 τ 值间的差异也就几倍到一个数量级，不如片状与粒状的人工标本间的差异大。

因此，导电矿物粒径和连通程度是影响 τ (τ') 值的因素，特别是连通程度对 τ 值影响更大。但在自然条件下，它们不是唯一因素，粒径的作用常被其它因素掩盖，还有比粒径，甚至比连通程度影响更大的因素存在。

2. 致密程度或矿物镶嵌紧密程度

致密程度是很重要的影响因素。如人工标本和天然标本的 τ 值间的巨大差异就是明显例子。人工标本的胶结程度远不如天然标本。表 2 和表 6 中含黄铁矿粉粒（体积含量 23.5%）的人工标本的 τ (τ') 值只有 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ ($10^{-2} \sim 10^{-3}$)，含石墨粉（体积含量为 31.8%）的人工标本的 τ (τ') 值也只有 10^{-1} (10^{-1})。而天然标本中含量较低的黄铁矿和石墨矿标本的 τ (τ') 值分别可达 $10^{-1} \sim 10^0$ (10^{-1}) 和 10^3 ($n \times 10$)。两类致密程度的标本的 τ (τ') 值的差异达 3~4 (2) 个数量级。 τ' 值似乎在一定程度上压制了这种影响。 m 值也有 1.5~3 倍差异， c 值则未显出差异。

在同类天然标本中，一般镶嵌紧密的标本（如白银厂矿区的各类矿石标本）的 τ 值皆较大。孔洞或裂隙明显多的标本的 τ 值较致密标本的 τ 值低。如以都是团粒状结构的黄铁矿标本为例，前面讨论过的含量较高和粒径较粗的岔 9、东乡 1 号标本的 τ 值反比含量较低、粒径较小的珠 4 号等标本的 τ 值低 1~2 个级次的主要原因是，岔 9 和东乡 1 号的结构构造松散，珠 4 号等比较致密。又如总表中大降平 7 号和 3 号，两者其它条件相仿，前者多孔洞， τ (τ') 值只有 0.114 (0.315)， m 值为 0.506；而后的 τ (τ') 为 5.114 (2.0)， m 值为 0.92，又如龙 1 和龙 6 号，它们黄铁矿的粒径达数 mm，因它们的裂隙较长和较宽，其 τ (τ') 和 m 值也都比其它龙游黄铁矿石的 τ 和 m 值偏小 1 个级次左右。至于 c 值，仍看不出致密程度对它的影响。

当然，在自然条件下，不同矿石标本间的致密程度的差异，一般不会象人工标本与天然标本之间差得那样大。由自然界一般致密程度差异而引起的 τ 值间的差异，据我们大

量实测结果，也就几倍到 1 个多数量级。

但如矿物成分不同，也会出现致密标本反而比裂隙较多的标本的 τ 值低或相近的现象。如总表中十分致密的赤铁矿化磁铁矿石（铜陵 12、14 号）与裂隙较多的黄铁矿石龙 1、龙 6 号的 τ 值就十分接近。

综上所述，在同类矿种标本中，上述几种因素对 τ 值的影响程度可归纳如下（表 7）。

表 7 岩（矿）石的结构构造等因素对 τ 值的影响程度

因 素	含 量	粒 径	连 通 程 度		致 密 程 度	
因素状态	低含量变化 2~3 倍	0.1~2mm	全连通片 相对分散粒	断续脉 相对 不规则集合体	致密 相对 极疏松	常见差异程度
τ 值大致变化 范围（数量级）	0. n~1	0. n~1. 5	2~4	0. n~1. 5	2~4	0. n~1 5

故连通程度和致密程度是结构构造中比粒径影响 τ 值大的因素。但在自然界常见情况下，三者影响程度接近。

除粒径外，其它三个因素对 m 值也有明显作用^[7]。 c 值对几种因素的反映都不太敏感，但随含量下降和粒径或连通程度增大， c 值有下降趋势。对导电矿物呈定向分布的各向异性的标本，其 τ 和 c 值也有明显的各向异性。

但如矿物成分不同，则上述结构构造因素的影响规律常难以被显示。

六、 岩（矿）石频谱激电特征与导电矿物成分

1. 实际现象

如前所述，Pelon^[2]等认为，矿物成分对 τ 值没有根本影响。1982 年我们用国产 BT6 仪对大量标本测定结果，已明显反映出，含量较高的不同成分矿石的 τ 值不同，有的有较明显的差异，结构构造对 τ 值的作用并未掩盖住某些不同矿石成分间 τ 值的差异^[4]。以后进一步实验研究，再次证明了上述结论，并从量值上更明确了。

如以黄铜矿类和黄铁矿类样品的测定结果为例，图 4 中珠字号标本，是含硫化矿的样品，它们的结构构造相仿，珠 2 和珠 5 样品中的硫化物总含量较低（40%左右），珠 7、珠 9 号中的较高（70%左右），但前两者的峰值频率却低于后两者的一个半级次以上，即前两者的 τ 值反而明显高于后两者的。这里唯能解释上述矛盾现象的是，样品中的导电硫化物成分不同，前两块样品含有 18%左右的黄铜矿，而后两块样品只含微量黄铜矿。

再从采自不同矿区的大量天然样品的结果看，很有意思的是，凡是有足够铜含量（例如大于 10%）的标本（简称铜矿类标本），其 τ 值都普遍比主要含黄铁矿的岩（矿）石

(黄铁矿类)的 τ 值明显地大。文献[4]中九个矿区的黄铁矿类和五个矿区的铜矿类结果(图6、7和表8、9)以及1988年后对5个矿区的黄铜矿类和8个矿区的黄铁矿类的测定结果(见后面总表和图集)都说明了这点。

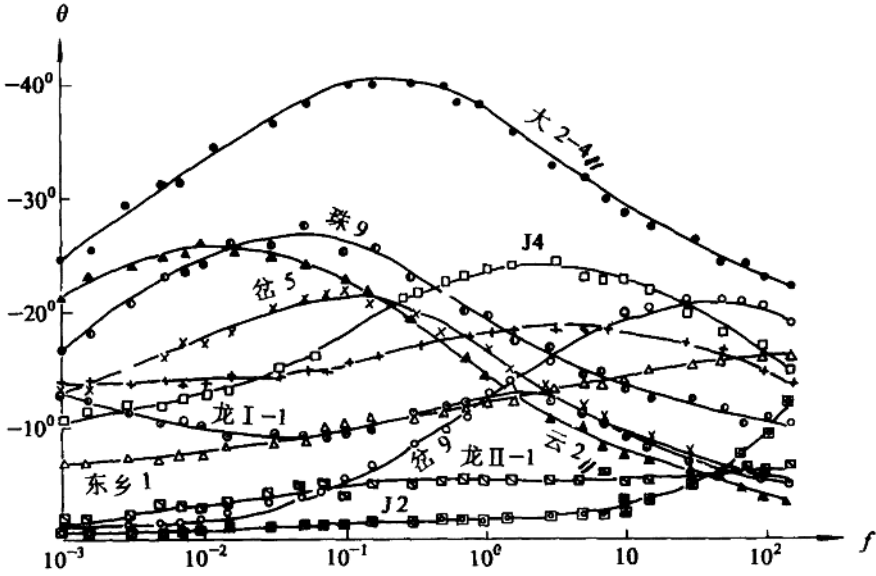


图6 各地黄铁矿(化)石激电相位谱特性

表8 各地黄铁矿(化)石的谱激电结果

样品号	名 称 (产地)	导电矿物 组分	目估体积 含量(%)	粒 径 (mm)	结 构 构 造	τ	c	$m\%$
湖1	黄铁矿矿石 (湖南)	py ma	55% 3%	0.03~2.0	粒状结构, 致密块状, py粒紧密继续相连, 裂 隙少	2.20×10^2	0.26	0.98
J ₂	黄铁矿化岩 (陕西金堆城)	py 褐铁矿	20~30%	0.1~0.4 0.5~2.0	粒状结构, 细浸染状 构造	$<10^{-1}$		
龙II-1	碎裂黄铁矿 石英 脉岩(浙江龙游)	py	20%	0.02~0.5	细粒他形结构, 脉石矿 物, 石英65% 绢云母 4%	9.56×10^{-2}	0.214	0.731
大2-4//	条带状黄铁矿矿石 (广东大降平)	py c	60% 2%	0.01~0.7	细粒分散, 呈似带状分 布, 空洞多, 继续相连	2.63×10^2	0.481	0.997
岔5	黄铁矿矿石 (江苏岔路口)	py	90%	0.1~2.0	致密块状, 但py裂隙 较发育	4.87×10	0.409	0.920

注 岔9、东乡1、云2//见表5, J₄见表3, 珠9见表4。

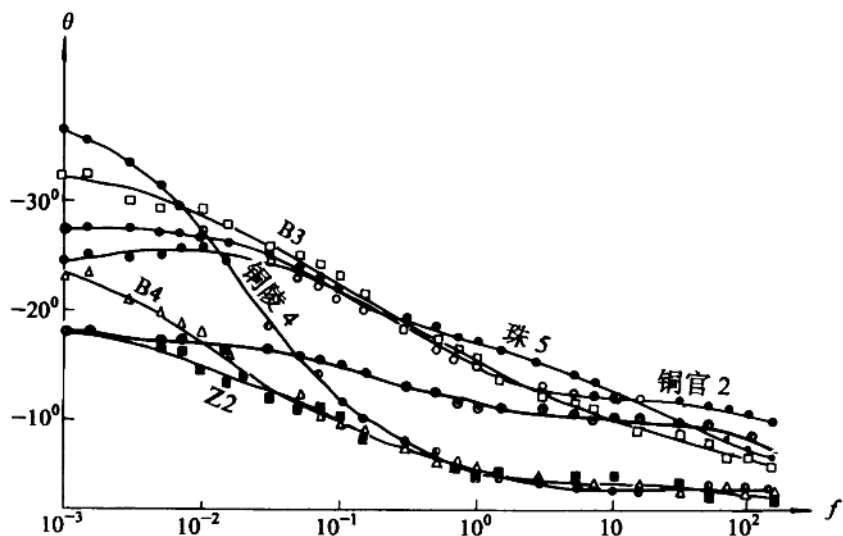


图 7 各地黄（辉）铜矿（化）石激电相位谱特性

表 9 各地黄（辉）铜矿（化）石的谱激电结果

样品号	名 称 (产地)	导电矿物 组分	目估体积 含量 (%)	粒 径 (mm)	结 构 构 造	τ	c	$m\%$
铜陵 6	黄铜矿矿石 (安徽铜陵)	cp, ph mt, sp	30%, 3% 6%, 1%	0.2~1.0 0.1~0.4 0.5~1.0 0.05±	mt, cp 密集成带, cp 充填 于 mt 裂隙间, 为粒状镶 嵌结构, 块状构造	$>10^4$		
铜陵 4	黄铁矿黄铜矿 矿石 (安徽铜陵)	py, ph cp	30%, 2% 53%	0.05~2.5 0.05~0.4 0.01~2.0	紧密镶嵌结构, 金属矿物 联通成片, 不同矿物间常 充填有褐铁矿薄膜	$>10^4$		
铜官 2	黄铜矿矿石 (安徽铜官山)	cp ph	50% 35%	2~3.0 2.0±	粒大, 部分形成连晶, 粒 间界线不清, 有些包裹辉 石, 形似筛孔	$>10^4$		
B ₃	黄铁矿黄铜矿 矿石 (甘肃白银厂)	cp py	40% 20%	0.01~2.0 0.01~1.0	粒状镶嵌结构, 浸染构造, cp 呈网脉浸染状, 并包裹 交代 py, 矿物间有褐铁矿 薄膜	$>10^4$		
B ₄	黄铜黄铁矿 矿石 (甘肃白银厂)	cp py	30% 60%	0.5~1.5	粒状镶嵌结构, 块状构造, cp、py 共生, cp 分布在 py 空隙中呈网状, 团块状, 有 褐铁矿化	$>10^4$		
Z ₂	黄铁矿辉铜矿 矿石 (陕西镇安)	cc py	20% 10%	0.02~0.5 0.02~0.5	他形晶结构, 稀疏浸染构 造			

注: 珠 2、珠 5 见表 4。