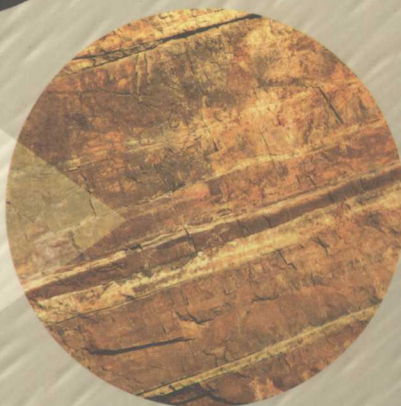
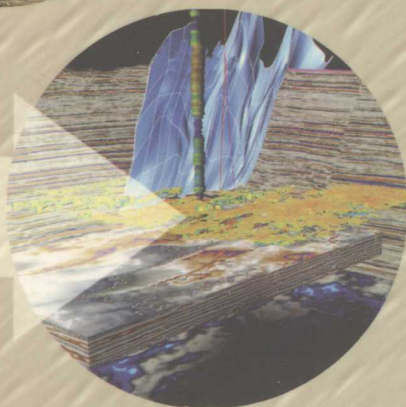
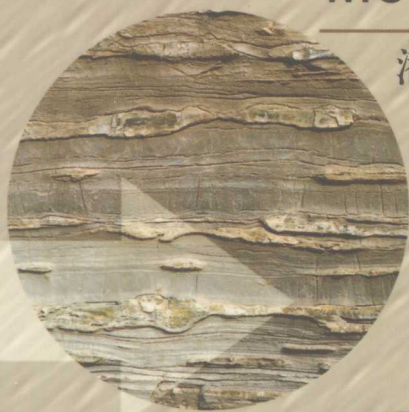


裂缝性火成岩储层

测井评价方法与应用

Log Evaluation of Fractured
Igneous Reservoirs ——
Methods and Application

潘保芝 薛林福 李舟波 吴海波 著



石油工业出版社

国家自然科学基金“九五”重大项目(49894190)资助
国家知识创新工程项目(XZCX1-Y-01)

裂缝性火成岩储层 测井评价方法与应用

潘保芝 薛林福 李舟波 吴海波 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以裂缝性火成岩储层的测井评价方法为主,叙述了各种火成岩地层的测井特征和岩性识别方法,概述了作者建立的火成岩矿物模型以及所提出的裂缝发育程度评价方法和储集参数的综合定量评价方法等内容。并对作者所开发的火成岩储层测井处理软件及其应用进行了介绍。

本书可供从事地球物理测井、石油勘探和开发的技术人员和研究人员参考,也可以作为高等院校有关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

裂缝性火成岩储层测井评价方法与应用/潘保芝等著.
北京:石油工业出版社,2003.10
ISBN 7-5021-4410-2

I. 裂…

II. 潘…

III. 火成岩-裂隙储集层-裂缝测井-基本知识

IV. P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 091339 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
河北省徐水县印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 8.25 印张 200 千字 印 1—500

2003 年 10 月北京第 1 版 2003 年 10 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-4410-2/TE.3088

定价:15.00 元

序

裂缝性火成岩可以成为良好的油气储层，这在许多国家和地区已得到证实。因此近年来火成岩油气藏成为国内外油气勘探备受关注的焦点。但由于火成岩的组成、结构及其各种勘探条件的复杂性，火成岩油气藏又是目前油气勘探的难点。目前较全面叙述火成岩勘探、开发以及评价技术的书籍相对较少。

“裂缝性火成岩储层测井评价方法与应用”一书结合国家自然科学基金“九五”重大项目“陆相油储地球物理理论及三维地质图像成图方法”和国家知识创新工程“油气勘探二次创业前导研究”中的有关火成岩储层测井评价课题的研究内容，将所开展的研究工作和取得的研究成果进行归纳总结，较为系统地阐述了火成岩的地质和测井特征、岩性识别方法、模型建立与储集参数评价、裂缝发育程度的评估等几个方面。

作者从火成岩测井评价的实际问题出发，以火成岩的矿物成分、结构特点、定量分类等理论为基础，逐步深入地分析了应用测井资料解决火成岩储层评价问题。首先根据火成岩的成分及其分类，总结出各种火成岩测井响应的特征和规律；其次讨论了火成岩的岩性识别方法，采用对应分析方法综合地分析出识别岩性的主要测井曲线以及样品与测井特征的关系，采用主成分分析和自组织神经网络方法识别火成岩的岩性。

在对裂缝发育程度的评价方面，书中阐述了利用测井曲线剩余变化的分维，消除火成岩的岩性影响，不失为定量描述裂缝发育程度的一种尝试。

书中讨论了火成岩矿物模型问题，按国际通用火成岩定量矿物分类（QAPF）准则，建立了不同火成岩类型的多矿物模型，为综合定量评价储层打下了良好基础。将火成岩的化学分析结果转换成标准矿物及含量，对于成分十分复杂的火成岩来说具有明显的实用价值，从而为确定各种矿物参数提供了实验支持。

在分析火成岩导电机理的基础上，引入了岩石微小孔隙和裂缝的表面导电性，建立饱和度方程。探讨了用测井资料解决裂缝性火成岩储层的油气判别问题。采用遗传最优化算法进行综合储集参数定量评价和处理，将矿物含量结果投影到火成岩 QAPF 分类图上进行合理的岩石定名。

书中还介绍了作者所开发的火成岩储层测井评价软件（SIMPLE），给出了上述岩性识别、裂缝带划分和储集参数综合评价等方法及软件 SIMPLE 在大庆油田的应用实例，其效果在实践中得到一定程度的检验。

本书的出版，为油气勘探工作者，尤其是测井工作者对火成岩储层的测井评价与综合解释提供了参考，期望在此基础上，火成岩的测井解释及定量评价更上一个台阶。

中国科学院院士 王光远
2003年10月20日

前 言

世界许多地区发现了含油气的火成岩, 不仅包括侵入岩和喷发岩, 也包括火山碎屑岩, 而且有些地区的火成岩储层是良好的油气产层。在美国、委内瑞拉、巴西、日本、阿根廷、利比亚、古巴、印度和其他一些国家, 在风化的侵入岩、裂缝性花岗岩、玄武岩、流纹岩或火山碎屑岩中, 获得了工业油气流 (Levorsen, 1976; Franch and Freeman, 1979; Belgasem, 1993; Monteto, 1994; Ashok Kumar, 2001)。我国华北、新疆、松辽盆地、渤海湾和辽东湾等地区也发现了火成岩油气产层。

火成岩储层岩性复杂, 依据形成环境的不同, 分为侵入岩、喷出岩和火山碎屑岩。依据酸度的差别, 分为基性岩、中性岩和酸性岩等。还可以依据系列的差别, 分为碱性系列和亚碱性系列等。如常见的亚碱性系列的喷出岩, 包括橄榄岩、玄武岩、安山岩、英安岩和流纹岩。火成岩岩石矿物成分复杂多变, 主要的矿物有斜长石、碱性长石、石英、辉石、角闪石、黑云母和白云母等, 每个矿物又有不同的变种。

火成岩地层除了岩性特别复杂外, 火成岩储层孔隙类型也复杂, 不但有孔隙型储层, 也有裂缝型储层或裂缝—孔隙型储层; 火成岩岩石往往物性差, 孔隙度和渗透率都很低。正是由于火成岩地层的岩性复杂, 孔隙结构复杂等诸多因素, 以及世界范围内火成岩油气储层相对较少, 使得火成岩的储层评价工作远不如碳酸盐岩储层多, 更不如沉积岩研究的成熟。甚至在火成岩中评价孔隙度都是很困难的。火成岩储层测井评价研究应该包括四个主要内容: 一是依据火成岩岩石测井响应特征的总结, 研究火成岩岩性的识别方法; 二是火成岩裂缝的识别以及裂缝发育程度的评价; 三是综合考虑岩性和裂缝而进行的储层参数综合评价; 四是火成岩岩石导电机制的认识, 并定量评价孔隙中含油气饱和度。

多年来国内外测井评价人员针对火成岩储层开展了积极的研究和探索, 这些研究以热干岩、热能、放射性废料处理、科学钻探等非油气勘探目的为主 (W. Scott Keys, 1979)。随着对油气资源需求的增长和火成岩油气储层的不断发现, 火成岩油气储层的测井评价研究也逐步增多。

Nelson 和 Glenn (1975) 在辉绿岩、安山岩、安粗岩中注意到高中子读数, 认为是由于热液蚀变时掺入云母和粘土矿物引起的。Kerherve (1977) 对日本的玄武岩、安山岩、流纹岩、凝灰岩和角砾岩的测井响应进行了广泛的研究。Scott Keys (1979) 介绍了正长岩、花岗岩和辉绿岩的自然伽马、中子、密度和声波响应, 并示出了热液蚀变在中子和声波测井曲线上的反映, 认为热液蚀变是裂缝的明显证据。Sanyal (1980) 等人作出了流纹岩、玄武岩和凝灰岩的自然伽马、密度、中子和声波测井的直方图和交会图。Rigby (1980) 论述了玄武岩、玄武角砾岩、安山岩和凝灰岩的裂缝识别问题, 证实中子测井的高读数是由热液蚀变引起的。Benoit (1980) 讨论了密度、中子、声波和自然伽马测井在玄武岩、流纹岩和英安凝灰岩, 以及花岗岩上的响应。

Khatchikian 和 Lesta (1973) 确定出阿根廷某盆地凝灰岩的密度、中子和声波骨架参数, 提出了一个改进的泥质砂岩方法以评价凝灰岩和凝灰质砂岩。Khatchikian (1982) 对这个盆地的两种火成岩地层层序进行了研究, 确定出了它们的测井参数, 用频率交会图、

M—N 交会图和 Z 值图辨认岩石类型, 统计出每类岩石的骨架值, 并用 GLOBAL 程序进行了处理, 同时指出, 由于火成岩的矿物结构复杂, 要确定出每类岩石的惟一骨架值是不可能的。Serra (1985) 用交会图识别岩性, 建立了由四种矿物构成的未蚀变花岗岩的矿物模型, 模型中未考虑孔隙度, 这是储层评价中不可接受的。

B. Belgasem (1993) 对利比亚某井花岗岩地层进行测井定量处理。用经验方法估计裂缝孔隙度、定性给出裂缝与花岗岩热液蚀变的关系, 建立了多个花岗岩矿物模型。但未给出任何参数和计算方法。

在国际大洋钻探计划 (ODP) 中, 美国哥伦比亚大学和英国 Leicester 大学进行了大量火成岩处理工作, 尤其是大洋岩—玄武岩地层方面的工作, 测井解释往往采用统计、神经网络等方法, 或应用斯伦贝谢公司的软件进行处理。

我国自 20 世纪 80 年代初开始见到一些准噶尔盆地火成岩测井解释的文献, 主要是用交会图识别岩性。尚林阁与潘保芝 (1986) 利用模糊聚类方法, 对花岗岩古潜山裂缝进行统计识别。衡志 (1988) 探讨了安山岩裂缝性储层的特性, 用双侧向电阻率的差异识别裂缝。欧阳健等 (1988, 1985) 对辽东湾中生代的火成岩地层的测井响应进行统计采用判别分析方法划分岩性, 采用“双矿物”模型计算孔隙度。

卞德智等 (1991) 建立了准噶尔盆地火山岩储层各类岩性测井数据库, 用模糊数学方法识别岩性。匡立春 (1990) 用交会图识别克拉玛依油田的火山角砾岩、玄武岩及流纹斑岩等三类火成岩。张国杰 (1991) 确定了岩性识别、孔隙度计算、储层性能评价及含油性评价等方法, 指出火成岩的非匀质性和孔隙—裂缝性特征, 以及蚀变作用对岩石电特征的影响使得对火成岩的评价比较困难。余芳权 (1994) 对江陵凹陷金家场新沟咀组火山岩进行了较系统的论述。范宜仁等 (1998) 给出了识别克拉玛依油田火山岩岩性和裂缝的常规测井交会图技术。郭镇彬 (1991) 对二连盆地火成岩类型鉴别的测井方法进行了探讨, 采用“双矿物”法计算孔隙度。

陆风根等 (1998) 对胜利油田临盘地区的火成岩储层进行了研究。景永奇等 (1999) 依据花岗岩潜山发育裂缝在各种常规测井曲线上的不同响应特征, 利用岩心资料和成像测井图像标定常规测井曲线, 建立裂缝指示曲线判别裂缝纵向发育带。

刘呈冰等 (1999) 提出以核磁共振、自然伽马能谱、微电阻率扫描等测井数据为基础, 以双孔隙介质模型为理论依据的识别和评价裂缝性火成岩储层的方法。刘呈冰等 (1999b) 利用成像测井、偶极横波测井等识别火成岩的裂缝段, 用核磁测井资料来评价孔隙度及流体性质。采用斯伦贝谢公司 Geoframe 中的 ELANPLUS 进行“双矿物模型”综合评价, 刘呈冰 (2000) 用多口井中的统计资料计算孔隙度等参数。但由于统计性差, 资料点分散, 限制了应用的效果。

综上所述, 已有的火成岩储层评价研究多以总结测井响应特征、岩性识别和简单的计算处理为主, 以专门研究裂缝性火成岩储层综合测井评价理论和方法的文献较少。还可以看出, 火成岩地层的测井特征往往具有地区性, 不同地区相同岩性可以有很大的差别, 这正是火成岩本身的复杂性造成的。已有的识别岩性方法多以交会图为主, 并辅以模糊聚类、判别分析等统计方法; 裂缝识别方面, 主要是分析裂缝性储层常规测井曲线的特征, 近年来以成像测井为主来识别裂缝。成像测井、核磁测井在解决火成岩方面有好的效果, 但应用尚不普遍, 大多数井中未进行测量。在定量评价方面, 已建立的有关裂缝性储层的测井解释模型都是根据某特定地区的分析资料建立的, 大多数计算公式还只是经验性的, 因地区而异。其

中双矿物和双孔隙模型是目前使用较多的体积模型和孔隙结构模型。虽然国外出现了花岗岩的多矿物模型,但不能在所有的火成岩中应用,且均未给出参数的确定方法。裂缝孔隙度主要是用双侧向测井幅度差来估计。几乎没有火成岩导电机制有关的研究。对于含油饱和度的确定,主要是依赖阿尔奇公式,缺少普遍适用的饱和度方程。

矿物成分复杂,孔隙结构复杂,低孔低渗,均为测井解释中遇到的难题,为此对火成岩储层来说已有的测井评价技术和解释方法面临着一系列的理论和数据处理方面的问题和困难,必须开展系统的研究工作,建立适当的评价理论和解释方法。火成岩储层测井评价的理论研究,不仅是传统储层测井数据处理理论和方法的补充,具有重要的理论意义,而且这一问题的解决,将直接为我国各个火成岩储层的油气勘探服务,尤其是在当前我国传统储层储量和产量严重下滑的形势下,经济意义更为明显。

裂缝性火成岩储层的测井评价研究不仅适用于我国各地区的火成岩储层,也可以应用于变质岩储层,这是由于在低孔低渗、岩性和矿物成分复杂、裂缝性等诸多方面变质岩与火成岩类似。因而不仅在油气勘探方面,而且在热干岩、热能、金属矿勘探,以及工程地质、放射性研究与工业废料处理和科学钻探等方面具有应用价值,因为上述领域具有共同的特征,即钻孔中主要面对的岩层为火成岩或变质岩地层,因此火成岩储层测井评价研究具有良好的应用前景。

目 录

第一章 火成岩地层的地质与测井特征	(1)
第一节 火成岩岩石成分与地质特征	(1)
第二节 火成岩岩石的定量分类	(5)
第三节 火成岩地层测井曲线特征	(8)
第四节 火成岩地层测井响应分析	(11)
第二章 火成岩的岩性识别方法	(19)
第一节 对应分析方法在识别岩性中的应用	(19)
第二节 主成分分析方法识别火成岩岩性	(22)
第三节 模糊聚类识别火成岩岩性	(25)
第四节 用自组织神经网络识别火成岩岩性	(27)
第三章 火成岩矿物模型及其参数确定	(32)
第一节 火成岩的矿物模型	(32)
第二节 计算矿物含量并定名	(38)
第三节 矿物参数的确定	(39)
第四章 火成岩地层裂缝发育程度评价	(43)
第一节 裂缝性火成岩地层的测井特征	(43)
第二节 综合裂缝概率法评价裂缝发育程度	(45)
第三节 利用分维定量描述裂缝的发育程度	(49)
第四节 测井曲线剩余变化的分维描述裂缝发育程度	(54)
第五章 火成岩导电机理与综合评价	(58)
第一节 火成岩孔隙结构特征与双孔隙模型	(58)
第二节 火成岩岩石孔隙表面导电机理	(62)
第三节 饱和度方程与胶结指数	(64)
第四节 用测井资料计算裂缝性储层的各种参数	(67)
第六章 遗传最优化算法综合评价火成岩储层	(72)
第一节 遗传算法实现最优化	(72)
第二节 遗传算法实现最优化测井解释	(77)
第三节 综合测井解释模型及其测井响应方程	(80)
第四节 遗传算法实现最优化测井解释程序	(84)
第七章 裂缝性火成岩储层测井评价系统	(88)
第一节 软件的主要功能	(88)
第二节 裂缝性火成岩测井处理软件说明	(91)
第八章 大庆徐家围子地区裂缝性火成岩储层测井评价	(101)
第一节 大庆徐家围子地区火成岩的地质特征	(101)
第二节 大庆徐家围子地区火成岩测井特征	(105)

第三节	大庆徐家围子地区火成岩岩性与裂缝识别.....	(108)
第四节	大庆徐家围子地区火成岩储集参数处理.....	(113)
结论		(118)
参考文献		(120)

第一章 火成岩地层的地质与测井特征

火成岩，即岩浆岩，是由岩浆凝固结而成的岩石。按其在地壳中形成的部位分为侵入岩和火山岩两大类。岩浆侵入地壳内部一定部位后凝固结的岩浆岩叫侵入岩。在地壳深部（一般限定的深度是大于 3km）形成的叫深成岩；在地壳浅部（一般限定深度是 1.5~3km）形成的叫浅成岩。在火山活动中岩浆溢出或喷出地表凝固结的岩石，叫火山岩。岩浆溢出地表的熔岩固结而成的岩石叫喷出岩；由爆发性火山活动产生的火山碎屑堆积物固结而成的岩石，叫火山碎屑岩（李亚美等，1994）。由于岩浆源（或浆源）化学性质的不同，所形成的火成岩岩石有碱性系列、亚碱性系列等，根据酸度的差别，火成岩岩石分为超基性、基性、中性和酸性岩石。

第一节 火成岩岩石成分与地质特征

一、火成岩的化学成分

地壳中的 90 种天然元素在火成岩中均已发现，但各个元素的含量却极不相同，其中最主要的是 O、Si、Al、Fe、Ca、Mg、Na、K。各种火成岩的化学成分数据（氧化物百分含量）则如图 1 所示。

从图 1 中可以看出火成岩化学成分的变化规律（邱家骧等，1996）：

(1) MgO 和 FeO 的变化趋势一致，从基性岩到酸性岩逐步减少。二者随 SiO₂ 含量的增加而急剧减少，特别是 MgO 的变化幅度更大。

(2) CaO 和 Al₂O₃ 的变化趋势基本一致，它们在 SiO₂ 含量为 45%~50% 的区段上出现峰值，当 SiO₂ 含量小于 45% 时，其含量不多，而在 SiO₂ 含量大于 50% 时，CaO 明显下降，但 Al₂O₃ 仅略有下降，曲线基本上水平延伸。

(3) Na₂O 和 K₂O 的变化趋势一致，均随着 SiO₂ 含量的增加而逐步增加。

由此可见，不同火成岩具有不同的化学成分，并在某些方面呈现有规律的变化。

二、火成岩的矿物成分

火成岩的矿物成分是火成岩分类和鉴别的主要依据（李亚美等，1994），对了解岩石的成因、形成条件、化学成分和物理性质等都有重要意义。火成岩中常见的矿物有 10 余种，主要

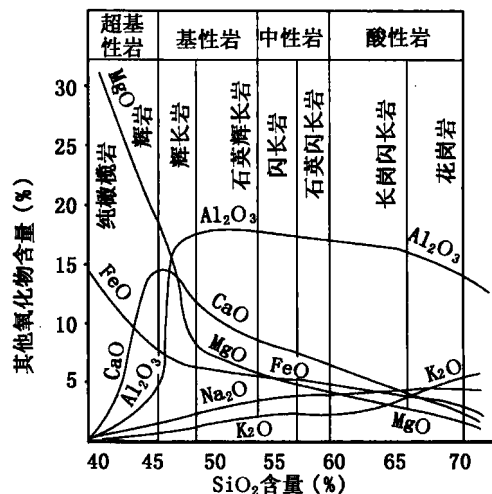


图 1 火成岩的平均化学成分

矿物平均含量见表 1。

表 1 火成岩的矿物含量

矿物	含量 (%)	矿物	含量 (%)
橄榄石	2.65	碱性石	14.85
黑云母	3.86	石英	20.40
角闪石	1.64	白云母	3.85
辉石	12.90	榍石及钛铁矿	1.45
斜长石	35.40	磁铁矿	3.15

火成岩的矿物组成取决于岩浆的化学成分和结晶环境。火成岩矿物成分与相应岩浆的化学成分之间，存在着密切的关系，也就是说，岩浆的化学成分决定了火成岩的基本矿物组成，但是矿物颗粒的大小、数量、颗粒之间的相互关系、成分以及同质多象变体等等，又随岩浆结晶条件而变化。火成岩矿物有许多变种，有高温矿物和低温矿物之分，随着内外条件（温度、压力、时间等）的改变，原生的高温矿物转变为低温矿物，如石英从高温变种（ β 石英）转变为低温变种（ α 石英），辉石从单斜辉石、斜方辉石到普通辉石。在基质和气孔内的矿物可能与岩石主体中的矿物不同，如在基质和气孔内石英为鳞石英和方石英。根据钙长石的含量（An），斜长石分为钙长石（An>90%）、培长石、拉长石、中长石、奥长石和钠长石（An<10%）。碱性长石（钾长石）可以分为透长石、正长石、微斜长石和歪长石。因此，人们鉴定和认识火成岩，通常是从研究岩石的矿物组成开始，进而推断代表相应岩浆的岩石之化学成分和结晶条件。但当岩石结晶不好时，火成岩岩石以玻璃质为主，鉴定和识别其中的矿物成分和含量是很困难的，此时需要进行化学分析，根据化学成分定名并分类（李石，王彤，1981）。

某一种特定的岩石，主要由上述矿物中的某一二种或某几种按一定的比例构成（如图 2 所示）。辉长岩（相应的喷出岩是玄武岩）由近于等量的斜长石和辉石组成，可含少量的黑云母和角闪石；当斜长石、碱性长石和石英三者含量相近时，就是花岗岩（相应的喷出岩是流纹岩）；当斜长石数量超过碱性长石和斜长石总量的 $\frac{2}{3}$ 或 $\frac{9}{10}$ ，并含有一定量的石英、角闪石和（或）黑云母时，是花岗闪长岩（相应的喷出岩为英安岩）或闪长岩（相应的喷出岩为安山岩）；如以碱性长石为主，则为正长岩（相应的喷出岩为粗面岩）。因此，随着矿物组成的变化和矿物相对含量的多寡，构成了超基性、基性、中性、酸性和碱性火成岩。

正如图 2 中曲线图域上连续弯曲的边界线所显示那样，一个岩石种类能够递变为邻近的另一类。因而所确定的岩石名称可以应用到它与邻近岩类之间的过渡带上。这就给岩石的准确定名带来了很大的困难（邱家骧，1996）。

三、火成岩的系列和酸度

以 Irvine 等（1971）、Peccerillo 等（1976）、国际地科联 IUGS（1989）划分火山岩系列

的标准,火成岩可分为碱性与亚碱性系列,亚碱性系列分为钙碱性系列和拉斑系列;碱性系列中,分为钾玄岩系列和过碱性系列。各种系列主要的岩石类型为:(1)亚碱性系列有苦橄玄武岩、玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩等;(2)碱性系列有碱玄岩、粗面玄武岩、玄武粗安岩、粗安岩、粗面岩、碱流岩等;如果把上述碱性、亚碱性火山岩的钙碱性、钾玄岩、拉斑、过碱性四个系列进行统计我国松辽盆地北部以钙碱性及钾玄武岩系列为主,尤以钙碱性系列为多;而拉斑及过碱性系列较少,其中尤以过碱性系列更少。

划分超基性、基性、中性、酸性火成岩岩石是依据岩石中的标准 SiO_2 的含量进行的。据 IUGS (1989) 提出的标准,超基性、基性、中性、酸性火成岩岩石其 SiO_2 分界线分别为 45%、52%、63%。我国南方以中基性火成岩为主,北方则以中酸性火成岩为主,松辽盆地北部火成岩以中性及酸性为主,基性少,而超基性者最少。辽河盆地中生代火成岩以中酸性为主,新生代火成岩以基性岩为主。

四、岩石类型及其矿物组成

下面以喷出岩为例,按超基性岩、基性岩、中性岩和酸性岩四种大的基本类型简单介绍主要喷出岩基本矿物组成特征,相应侵入岩的矿物组成特征可从图 2 的侵入岩与喷出岩的对应关系中获得。

1. 超基性喷出岩

超基性喷出岩,即超铁镁质喷出岩目前发现的不多,在世界上分布有限。它们富含铁镁矿物,经常与拉斑玄武岩或碱性玄武岩共生,有的呈浅成侵入体。其矿物成分主要是:橄榄石、斜方辉石和单斜辉石,含有少量的基性斜长石和角闪石;副矿物为钛铁矿、磁铁矿和磷灰石;有时在孔洞和裂缝中含有少量的方解石、方沸石等充填物。超铁镁质喷出岩的主要种类有:科马提岩、苦橄岩、麦美奇岩(玻基纯橄岩)、玻基橄辉岩和玻基辉石岩。

2. 基性喷出岩

玄武岩是主要的基性喷出岩,其主要矿物成分是斜长石和辉石,有些种属含丰富的橄榄石。次要矿物是角闪石、正长石、石英或副长石、沸石等,副矿物主要为钛、铁氧化物,如磁铁矿、钛铁矿、赤铁矿等(李石,王彤,1981)。

斜长石通常是拉长石,但在斑晶中可以是培长石,甚至钙长石;而在基质中,可以是中长石,甚至更长石。玄武岩中的辉石,从成分上来说可以分为富钙的普通辉石和贫钙的易变辉石和紫苏辉石。无论哪种玄武岩,普通辉石都是主要的辉石组分。副长石主要是霞石和白榴石,一般不超过 10%,如果副长石类矿物数量大于 10%,那就属于碱性岩类中的碱玄岩

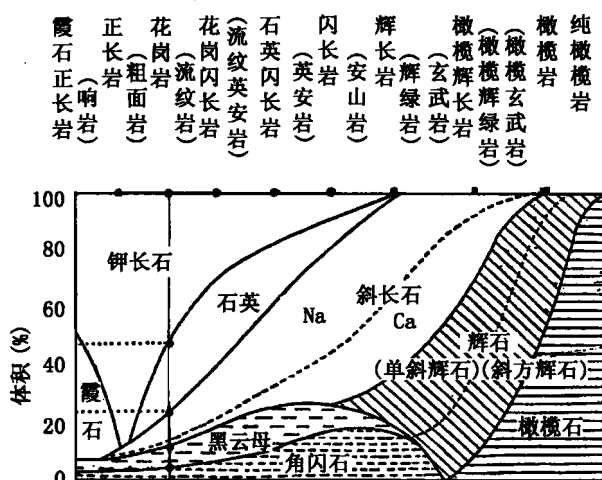


图 2 常见火成岩的主要矿物组成
(括号内岩石名称代表相应的喷出岩)

和碧玄岩。

各种玄武岩的矿物成分存在着连续的过渡，但基本上可以分为拉斑玄武岩和碱性橄榄玄武岩两大类。基性喷出岩的主要种类有：拉斑玄武岩、高铝玄武岩、碱性橄榄玄武岩、粗面玄武岩、更长玄武岩、苦橄玄武岩、粒玄武岩、细碧岩、月球玄武岩。

玄武岩中的斜长石、橄榄石、辉石等矿物在成岩后一系列外力作用下，非常不稳定，出现各种蚀变现象。如橄榄石变为伊丁石，辉石变为绿泥石，钙长石变为钠长石。

3. 中性喷出岩

中性喷出岩的矿物成分主要为斜长石或（和）碱性长石及一种或几种暗色矿物（角闪石、辉石或黑云母），有时有少量石英或副长石类矿物。根据碱性长石的多少，划分为安山岩和粗面安山岩。

斜长石是安山岩和粗面安山岩的主要矿物组分，在粗面岩中也有少量存在，它们往往呈斑晶或基质出现。碱性长石是粗面岩的主要矿物，往往作为斑晶出现，并在基质中大量存在。碱性长石主要是正长石和透长石；在一般的中性喷出岩中，不出现石英斑晶，但有时在某些偏酸性的种属中，如石英粗面岩中，可见少量的石英斑晶。辉石在中性喷出岩中较为常见，有紫苏辉石、透辉石、普通辉石和易变辉石。辉石晶体在喷出岩中很少被熔蚀；在蚀变岩中常分解为绿泥石、绿帘石和方解石的混合物。在蚀变的中性喷发岩中，角闪石，部分地或全部地变为绿泥石、假像纤闪石、方解石及金属矿物等。在安山岩和粗面安山岩中，黑云母比角闪石和辉石少见，可是在粗面岩中则较为常见。黑云母常与角闪石共生，有时和一种辉石共生。在较基性的安山岩和粗面安山岩中，橄榄石可以作为斑晶或在基质中少量存在。橄榄石常被熔蚀或被伊丁石所交代（邱家骧等，1996）。

4. 酸性喷出岩

酸性喷出岩主要矿物为石英、碱性长石及斜长石，含有少量的铁镁矿物。

石英可同时组成斑晶和基质，有时则几乎全部富存于基质内，方石英和鳞石英只在基质中出现。碱性长石主要为透长石、正长石，其次是歪长石；微斜长石只在变质流纹岩和石英角斑岩中出现。斜长石常呈斑晶出现，很少见于基质中。它通常是更一中长石，有时为钠长石。铁镁矿物以黑云母或角闪石为主，偶见透辉石（邱家骧，1996）。

蚀变作用表现为：斜长石绢云母化，钾长石高岭石化，黑云母、辉石和角闪石绿泥石化（李石，王彤，1981）。

根据石英、碱性长石和斜长石三者的含量比及暗色矿物的种属，可将酸性喷出岩划分为：碱性流纹岩、钾质流纹岩、流纹岩（又可细分为：斑流岩、霏细岩、松脂岩、珍珠岩、黑曜岩、玻基斑岩和浮岩）、英安流纹岩、流纹英安岩和石英角斑岩。

五、相与孔隙结构特征

火成岩的岩相可以分为侵入相、次火山岩相、喷溢相、爆发相和爆发沉积相等，其中喷溢相、爆发相和爆发沉积相是以火山的活动密切相关，又称为火山岩岩相。火山岩岩相剖面分布特征见图3所示（邱家骧，1996）。火山喷发常常表现出周期性的变化，即韵律。往往表现为先基性、再中性后酸性的喷出规律。如喷出以中基性熔岩为主，可以明显地分出层次，出现玄武岩安山岩互层时，一般玄武岩在下，安山岩在上，若出现熔岩和火山碎屑岩交替，则下部为熔岩，上部为火山碎屑岩。

原生孔隙的发育状况与岩浆喷发后的冷凝部位密切相关，即不同岩相带，其孔、缝的发

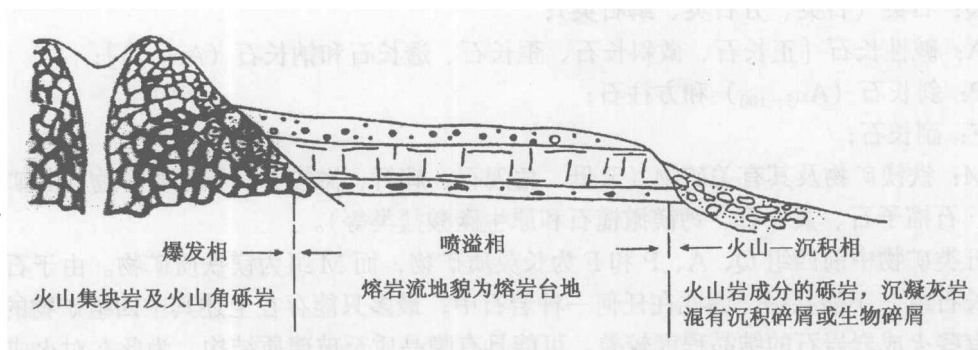


图3 火山岩相剖面分布示意图

育程度是有差异的。

(1) 爆发相：由火山口附近下落的各种形状的火山弹、火山集块、火山角砾等火山碎屑组成。角砾大小混杂，棱角未经磨损，无搬运痕迹，角砾间孔洞发育，地形上呈火山锥。

(2) 喷溢相：由火山周围的岩浆流冷凝而成的熔岩，地貌上呈熔岩台地。岩性在纵向上呈韵律层，底部见玻璃质壳，中部为块状致密层，上、下部为气孔、裂缝发育层段，顶部见自碎角砾岩。

(3) 喷发沉积相：属异地火山碎屑堆积，是火山碎屑受风力、雨水、泥石流及冰川等地质应力作用的产物。有沉凝灰岩、泥流火山角砾岩。无层理、分选磨圆差，混有一定的沉积碎屑。一般远离火山口，多在火山作用间歇期形成。

第二节 火成岩岩石的定量分类

火成岩的种类很多，但迄今对火成岩的分类还未达到完善的地步。现有的火成岩分类多半是以岩石本身所具有的特征为依据的，这些特征主要是：(1) 组成岩石的矿物成分；(2) 岩石的化学成分；(3) 岩石的结构和构造；(4) 岩石产出方式。由于本书中利用测井资料对火成岩岩石进行岩性定名，研究矿物含量以及孔隙度的确定方法，均以矿物组分的定量分析为基础，因此，本书介绍火成岩岩石的定量矿物成分分类法（QAPF 分类法）。本书作者提出用测井数据处理后获得的矿物成分及其含量依据 QAPF 分类法进行火成岩岩石分类并命名。

一、火成岩定量矿物分类

火成岩的矿物成分及其体积含量是定量矿物分类的基础。火成岩由各种造岩矿物组成，而这些造岩矿物的生成又决定于岩浆的成分和岩石形成的环境，所以矿物的种类和含量比具有很大的重要性。

火成岩定量矿物成分分类方法（QAPF 分类法）是 1989 年第 28 届地质大会上，国际地科联（IUGS）火成岩分类学分会推荐的一个火成岩分类方案。它不仅在当前国际上有一定代表性，而且也系统全面地反映了当代火成岩分类学的研究水平。火成岩命名是以下列实际矿物参数（体积百分数）相对比例来进行的，并用这些矿物的体积含量参数首先定出基本名称（孙鼎等，1985）。QAPF 分类方法将矿物分为五类：

Q: 石英 (石英、方石英、鳞石英);

A: 碱性长石 [正长石、微斜长石、歪长石、透长石和钠长石 (An_{0-5})];

P: 斜长石 (An_{5-100}) 和方柱石;

F: 副长石;

M: 铁镁矿物及其有关矿物 (云母、角闪石、辉石、橄榄石、不透明矿物、副矿物、绿帘石、石榴子石、黄长石、钙镁橄榄石和原生碳酸盐类等)。

五类矿物中前四组 Q、A、P 和 F 为长英质矿物, 而 M 组为镁铁质矿物。由于石英组 Q 与副长石组 F 不能共存, 因此在任何一种岩石中, 最多只能存在上述其中四组矿物的组合。

有些火成岩岩石的结晶程度较差, 可能具有隐晶质至玻璃质结构, 为此在对火成岩分类时, 除以其矿物成分和含量作为分类基础外, 对于颗粒过细或玻璃质的岩石, 无法确定其全部矿物成分和含量时, 地质上采用由岩石化学成分计算而得到的标准矿物 (Norm) 数量比进行划分。当采用测井资料确定矿物含量时, 则不会受上述结晶程度的限制 (J. Doventon, 1986)。

QAPF 分类方法是以实际矿物含量为基础, 首先根据暗色矿物含量 (M) 将火成岩分为两大类 (如图 4 所示)。

第一类: $M=90\% \sim 100\%$ 的超镁铁质岩石, 划分为第 16 个区, 居于双三角形图外。它根据暗色矿物橄榄石、辉石和角闪石的含量比作进一步划分。以主要铁镁矿物种属来表示, 如橄榄岩、辉石岩等。

第二类是暗色矿物含量 $M < 90\%$ 的岩石。再根据浅色矿物石英 (Q)、碱性长石 (A)、斜长石 (P) 和副长石 (F) 矿物数量比进一步进行划分。分类采用双等边三角形图解, 双三角形的四个顶角分别代表石英、碱性长石、斜长石和副长石; 由于石英和副长石类矿物不能共存, 故它们分别位于双三角形相对的两个顶端。在分类时使 $Q + A + P = 100\%$, $A + P + F = 100\%$, 再根据 Q 或 F 的百分含量和 $P/(A + P)$ 值将 QAPF 双等边三角形划分为 15 个区, 每个区即是一种岩石大类的基本名称。

图中各类岩石名称如下:

(1) 在 2、6* 及 6 区, 当含有碱性铁镁矿物时, 分别称为碱性花岗岩和碱性流纹岩、碱性石英正长岩和碱性石英粗面岩、碱性正长石和碱性粗面岩等。

(2) 在 9*、9、9'、10*、10 和 10' 区的深成岩中, 辉长岩和闪长岩的区别是根据斜长石牌号, $An > 50$ 者为辉长岩; $An < 50$ 者为闪长岩。在熔岩中, 玄武岩和安山岩之间根据 SiO_2 含量和色率来划分, 如图 4 右上角所示。

(3) 6'、7'、8'、11、12、13、14 和 15 区中, 各种含副长石岩石和副长石岩石, 以及响岩、碧玄岩和副长石等, 具体以副长石种类表示, 如含霞石正长岩、白榴石响岩、霞石碧玄岩、霞石岩和白榴石岩等。在熔岩中, 当橄榄石含量 (ol) $> 10\%$ 时, 称碧玄岩; 当橄榄石含量 $< 10\%$ 时, 称碱玄岩。

二、本书使用的矿物分类图解

值得一提的是, 上述 IUGS 火成岩矿物定量分类与我国常用的定量矿物分类方案有些不一致, 特别是在石英及长石含量的分界上有差别, 这个分类方案把一些过渡性岩石, 如二长闪长岩、石英二长岩、辉长岩、碧玄质响岩等, 均单独划分为一区而作为岩石大类名称, 显得过于繁琐, 不符合分类的一般习惯。我国火成岩研究人员通常采用的火成岩分类法以

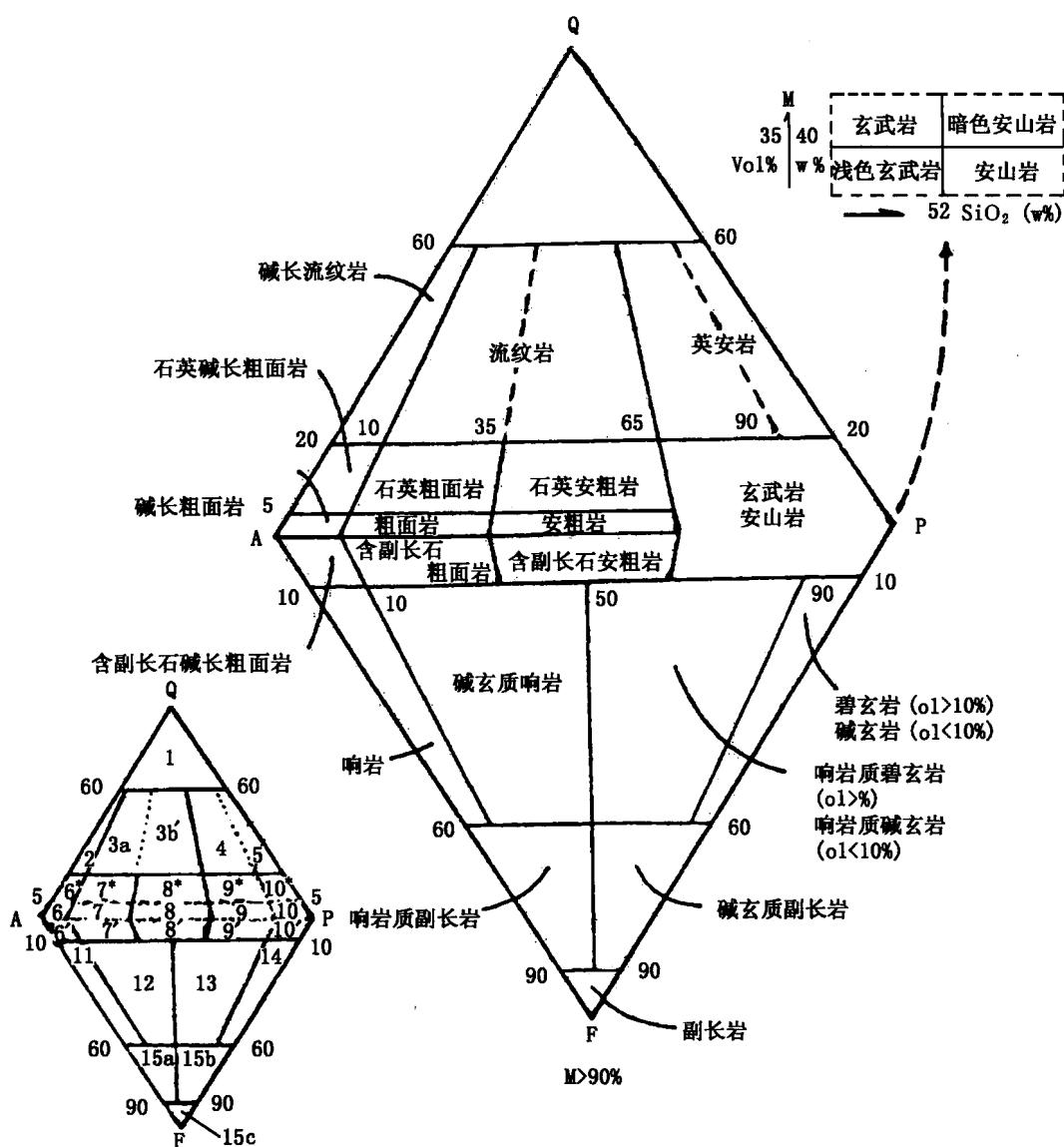


图4 IUGS火成岩QAPF分类法图解

ol—橄榄石 (olivine); w%—重量百分比

QAPF的初步分类方案为依据, 该方案如图5所示 (孙翊, 1985)。QAPF初步分类图解中, 火成岩被分为八大类。即超镁铁岩类、流纹岩类、英安岩类、粗面岩类、安山岩类、响岩类、碱玄岩类、副长岩类。

考虑到各种火成岩岩石的测井响应特征及其差别 (见本章第三节), 本书在进行定量矿物分类时, 采用的火成岩QAPF分类图见图6所示。将火成岩分为9类: 超镁铁岩类、流纹岩类、英安岩类、粗面岩类、安粗岩类、安山岩类、响岩类、碱玄岩类、副长岩类。

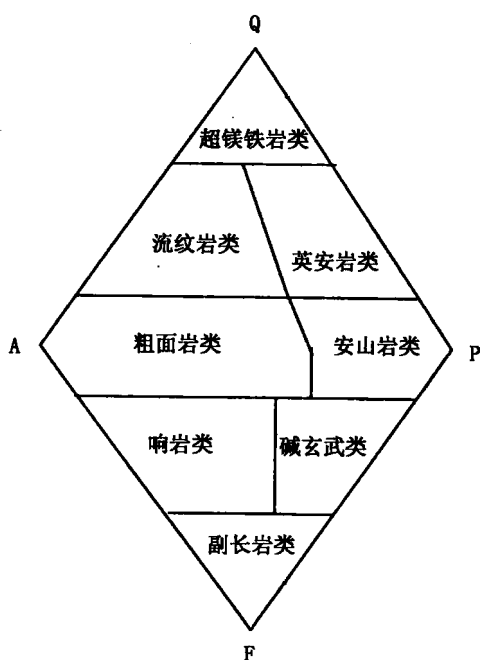


图5 火成岩 QAPF 初步分类图

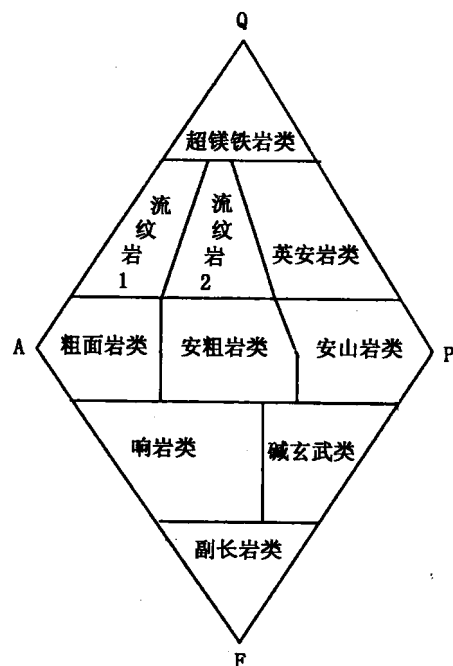


图6 本书使用的火成岩 QAPF 的初步分类图

第三节 火成岩地层测井曲线特征

在火成岩地层的勘探开发过程中，当火成岩种类较少时，一般是根据岩屑录井资料与岩心资料确定地层岩性，利用测井资料区分它们也较容易。然而，当某区域的火成岩岩性复杂，种类繁多时，有时录井资料给出的岩性不很确切，对正确划分岩性并依此分析各种岩性相应的测井特征产生了很大的影响。此时必须根据岩心或可靠的录井岩性资料了解它们的测井响应特征，为利用测井资料正确地识别火成岩的岩性打下基础。火成岩种类较多，且不同的岩石类型具有不同的测井响应特点，有时同一类型岩石在不同区域的测井响应特征也不同。

通过已有的文献可以了解国内外火成岩的测井响应特征，它们虽各有不同，但也有一定的规律。图7为我国松辽盆地北部凝灰岩地层的综合测井图。图8为我国松辽盆地北部安山岩地层的综合测井图。图9为我国松辽盆地北部流纹岩地层的综合测井图。图中，CALS为井径曲线；GR为自然伽马曲线；PE为光电吸收截面指数曲线；SFLU为球形聚焦曲线；ILD和ILM分别为深、中感应曲线；MSFL为微球形聚焦曲线；LLD，LLS分别为深、浅侧向电阻率曲线；NPHI为补偿中子曲线，单位（V/V）表示小数；RHOB为补偿密度曲线；DT为声波时差曲线；POTA、URAN、THOR为放射性钾、铀、钍曲线。

下面以我国松辽盆地北部的火成岩地层为主并结合参考文献，讨论火成岩岩石的测井响应规律并进行总结。

1. 电阻率测井

电阻率测井是沿井身测量岩石电阻率的一组方法通称。岩石电阻率单位为欧姆米。根据