

缝洞型储层 地震识别理论与方法

撒利明 姚逢昌 狄帮让 姚 姚 著

石油工业出版社

缝洞型储层地震识别理论与方法

撒利明 姚逢昌 狄帮让 姚 姚 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从碳酸盐岩缝洞型储层地层识别的难点、技术现状出发,从理论上探讨了缝洞型气藏的地质基础,进行了大量各种类型缝洞型油气藏模型的数值模拟和物理模拟及分析研究,介绍了最新的缝洞型储层识别的方法,最后给出了在我国西部地区成功识别缝洞型油气藏的实例。

本书适合从事石油天然气勘探开发工作的科研人员及大中专院校师生阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

缝洞型储层地震识别理论与方法/撒利明等著.

北京:石油工业出版社,2010.8

ISBN 978-7-5021-7746-1

I. 缝…

II. 撒…

III. 储集层-地震勘探-研究

IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 065274 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:14

字数:350 千字

定价:70.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序 一

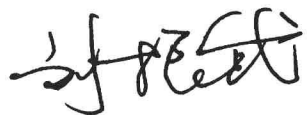
碳酸盐岩拥有丰富的油气资源,碳酸盐岩油气藏油气产量占世界总产量 60%,巨大的资源潜力和经济效益奠定了碳酸盐岩在世界油气勘探开发中的重要地位。我国碳酸盐岩分布十分广泛,但已发现的油气资源可采储量和油气产量中,碳酸盐岩只占 18%,原油产量占总产量 3%,天然气产量占总产量 27%。相对于碳酸盐岩油气资源全球的分布规律,中国碳酸盐岩油气勘探开发存在巨大的发展空间。

近年来,我国在碳酸盐岩油气勘探方面取得了很大的进展。但是,与国外相比,我国油气可采资源量和生产比重还是存在较大的差异,这既有勘探程度的因素,也有勘探难度的原因。国外多以构造圈闭为主,我国大多为大型岩性地层—复合油气藏;国外储层均质性较好,以基质孔隙为主,我国储层非均质型强,以次生孔隙为主,缝洞分布规律复杂,缝洞储层的有效预测成为制约碳酸盐岩勘探的技术瓶颈。

中国石油天然气集团公司科技发展部十分重视碳酸盐岩油气勘探技术的发展,多年来不断加强科技攻关工作,提高了碳酸盐岩油气勘探技术水平,为碳酸盐岩油气勘探的突破起到了重要的支撑作用。

本书是在中国石油天然气集团公司物探应用基础研究项目“碳酸盐岩孔洞发育区地球物理识别技术研究”成果的基础上总结提炼而成,比较系统地论述了“缝洞型储层地震识别理论与方法”。书中对涉及碳酸盐岩油气勘探的主要问题、技术难点和研究思路做了全面论述,从缝洞型储层的物理模型、正演模拟入手,对碳酸盐岩油气勘探关键技术进行了系统的研究和分析,通过实例展示了缝洞型储层地震识别方法和效果。全书内容以本项目研发的新技术成果为主,包括多波多分量地震、纵波裂缝检测、地震属性分析技术和逆散射成像等。这是一部既具有理论方法的系统性和超前性、又具有关键技术的先进性和实用性的有关缝洞型储层油气勘探的学术专著,对于提高碳酸盐岩油气地震勘探水平具有重要的理论意义和实用价值。

中国石油天然气集团公司副总工程师

 教授

序 二

21 世纪是知识经济快速发展、科学技术突飞猛进、国力竞争日趋激烈的时代,人类社会将面临新的机遇和挑战。石油与天然气是工业的血液、经济的基础。促进油气勘探科技的进步必将对新世纪社会发展与经济建设产生深远的影响,为人类的生存与发展提供更广阔的空间。

我国油气储层类型众多,从海相碳酸盐岩到陆相碎屑岩,从火山岩到变质岩无所不有。在碳酸盐岩、火山岩和基岩(包括岩浆岩、变质岩等)储层中,油气藏主要为缝洞型。即使在碎屑岩储层中,也有相当一部分油气藏为缝洞型。因此,缝洞型油气藏是我国油气勘探、开发中的一种十分重要的油气藏。越来越多的地质学家和地球物理学家们认为,目前和将来的很长一段时间内,缝洞型油气藏是我国乃至世界勘探、开发最主要的油气藏类型之一。

众所周知,地震方法在油气勘探和开发领域中发挥着重要的作用。长期以来,石油地震方法基本上以水平层状介质理论为基础。而在缝洞型油气藏的识别问题中,地震方法所面对的是复杂的非均匀介质,目前国内外所使用的缝洞型油气藏地震描述和识别技术尚未能获得理想的效果,必须发展以非均匀介质理论为基础的新的地震方法。本书针对碳酸盐岩储层的特殊性,在理论上进行了深入探讨、技术上进行了深度开发、应用上进行了系统总结,具有重要的理论意义和实用价值。

书中既有关于缝洞型油气藏地质基础的理论探讨,又有大量各种类型缝洞型油气藏模型的数值模拟和物理模拟结果及分析研究,还有最新的缝洞型储层识别方法介绍,并给出了在我国西部地区成功识别缝洞型油气藏的实例。全书理论和实际相结合、注重实际应用。内容完整,是一部重要的关于碳酸盐岩缝洞型储层识别的参考书。

中国科学院地质与地球物理研究所研究员

滕吉文 院士

前 言

缝洞型储层泛指以裂缝及洞穴为油气储集空间的储层。这类储层岩性有火山碎屑岩、岩浆岩、变质岩及碳酸盐岩,但以碳酸盐岩居多,其储集空间和渗流通道以裂缝及与其连通的溶孔、溶洞为主,此类储层通常为高渗透性储层。现有资料表明,全世界已探明的石油资源量有一半以上蕴藏在碳酸盐岩中。世界上几个盛产石油国家的石油资源均以碳酸盐岩为储层。我国的碳酸盐岩分布也十分广泛,主要分布在塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、渤海湾盆地,以及中国南方和海域的相关盆地,其最大沉积岩厚度达到 6000m,发育有四套烃源岩,即下寒武统、下志留统、上下二叠统、下三叠统。

在我国以往 50 多年的油气勘探与开发活动中,一直以陆相碎屑岩储层为主要勘探开发目标。海相碳酸盐岩储层,由于遭受剧烈的成岩作用,岩性、物性复杂多变,地表条件恶劣,一直成为地震勘探的困难地区。20 世纪 80 年代中期,我国的勘探家们将碳酸盐岩作为技术攻关的目标,为此做出了长期艰苦的努力,探索出了一些有效方法和技术,并在塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、渤海湾盆地见到了较好的效果。自那时以来,在《石油地球物理勘探》等期刊上相继报道了一些有关碳酸盐岩地区的野外地震采集方法、地震正演模拟、碳酸盐岩地震相的识别及储层预测等论文,与此同时,石油工业出版社也相继出版了几本专著,如《碳酸盐岩潜山油田开发》、《碳酸盐岩油气生成理论与实践》、《碳酸盐岩储层沉积学》等。

目前在我国已发现的油气资源可采储量及产量中,碳酸盐岩只占 18%,不论与国外同类情况相比,还是与国内拥有的碳酸盐岩资源量相比,中国的碳酸盐岩勘探与开发仍存在巨大的潜力,中国的勘探家们对碳酸盐岩油气生成的认识深度及识别技术还处在不断发展之中。中国石油天然气集团公司科技发展部长期以来非常重视碳酸盐岩油气藏勘探技术的发展,不断加大科技投入进行技术研发,取得了明显的成效。本书是在中国石油天然气集团公司科技发展部物探应用基础研究项目“碳酸盐岩孔洞发育区地球物理识别技术研究”成果基础上总结提炼而成,项目长为撒利明、姚逢昌,主要课题负责人有狄帮让、姚姚、李向阳、郑晓东、陈广坡、徐基祥、张玉清,主要研究人员有魏建新、杨志芳、李艳东、卢明辉、刘少华、宋树华、潘建国、奚先、张学强、王宏斌、李孔绸、张才、陈双全、蔡志光。

全书分五章十八节。第一章为缝洞型储层地震识别技术概述,主要介绍缝洞型储层油气成藏的主控因素、缝洞型储层识别的难点、缝洞型储层地震识别技术现状。第二章为缝洞型储层物理模拟分析,主要介绍地震物理模拟方法、溶洞型储层物理模拟及波场分析、裂缝型储层物理模拟及波场分析。第三章为缝洞型储层数值模拟研究,主要介绍地震数值模拟方法、溶洞型储层数值模拟及地震波场分析、裂缝型储层数值模拟及波场分析。第四章为缝洞型储层地震识别新方法,主要介绍多波多分量地震技术、纵波裂缝检测技术、地震属性分析技术、逆散射

成像技术。第五章为缝洞型储层地震识别应用实例,主要介绍碳酸盐岩缝洞型储层识别思路、碳酸盐岩缝洞型储层地震成像技术、碳酸盐岩缝洞型储层叠后地震描述技术、碳酸盐岩缝洞型储层叠前地震描述技术、碳酸盐岩缝洞型储层综合评价技术。

在项目研究和成书过程中,自始至终得到了中国石油天然气集团公司科技发展部领导、专家与同事的大力支持和帮助,在此一并表示诚挚的谢意!书中难免不足之处,欢迎批评指正。

目 录

第一章 缝洞型储层地震识别技术概述	(1)
第一节 缝洞型储层油气成藏富集主控因素	(1)
第二节 缝洞型储层识别主要难点	(4)
第三节 缝洞型储层地震识别技术现状	(6)
第二章 缝洞型储层物理模拟分析	(11)
第一节 地震物理模拟方法概述	(11)
第二节 溶洞型储层物理模拟及波场分析	(14)
第三节 裂缝型储层物理模拟及波场分析	(35)
第三章 缝洞型储层数值模拟研究	(46)
第一节 地震数值模拟方法概述	(46)
第二节 溶洞型储层数值模拟及波场分析	(49)
第三节 裂缝型储层数值模拟及波场分析	(84)
第四章 缝洞型储层地震识别方法	(100)
第一节 多波多分量地震技术	(100)
第二节 纵波裂缝检测技术	(109)
第三节 地震属性分析技术	(128)
第四节 逆散射成像技术	(147)
第五章 缝洞型储层地震识别应用实例	(177)
第一节 碳酸盐岩缝洞型储层识别预测思路	(177)
第二节 碳酸盐岩缝洞型储层地震成像技术	(182)
第三节 碳酸盐岩缝洞型储层叠后地震描述技术	(185)
第四节 碳酸盐岩缝洞型储层叠前地震描述技术	(193)
第五节 碳酸盐岩缝洞型储层综合评价技术	(204)
参考文献	(207)

第一章 缝洞型储层地震识别技术概述

缝洞型储层泛指以裂缝及洞穴为油气储集空间的储层。这类储层多为碳酸盐岩,其储集空间和渗流通道多以裂缝及与其连通的溶孔、溶洞为主。该类储层通常属于高渗透储层。在全球的沉积岩中,碳酸盐岩虽然约占20%,却拥有已探明油气资源量的50%以上。在目前的油气产量中,碳酸盐岩约占世界总产量的60%,在油气勘探开发中占据重要的地位。我国碳酸盐岩分布十分广泛,主要分布在塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、渤海湾盆地及南方和海域的相关盆地。在我国已发现的油气资源可采储量和油气产量中,碳酸盐岩只占可采储量的18%,原油产量的3%,天然气产量的27%。相对于全球的碳酸盐岩油气资源分布规律,我国碳酸盐岩勘探和开发存在巨大的发展潜力。

我国碳酸盐岩勘探领域主要集中在陆上中—古生界和海上古近、新近系,储层类型主要有三类:岩溶风化壳储层、礁滩相储层和白云岩储层,油气藏类型包括构造、构造—岩性/地层、岩性地层圈闭。近年来,我国在碳酸盐岩油气勘探领域取得很大的进展,但是,与国外相比,我国油气可采资源量和实际产量还存在较大的差距,这既有勘探程度的因素,也有勘探难度的原因。国外碳酸盐岩油气藏多以构造圈闭为主,我国则大多为大型岩性地层复合油气藏;国外储层均质性较好,以基质孔隙为主,我国储层非均质性强,以次生孔隙为主,缝洞分布规律复杂,缝洞储层的有效预测成为制约碳酸盐岩勘探的技术瓶颈。

第一节 缝洞型储层油气成藏富集主控因素

国内外大量的油气勘探实践证明,碳酸盐岩储层具有极强的非均质性,碳酸盐岩一般基质孔不发育,形成产能主要依靠有效发育的裂缝和溶洞。例如,轮南西地区奥陶系碳酸盐岩储层基质孔渗性很差,孔隙度范围在0.19%~8.06%,平均为1.05%,渗透率范围在0.00002~20.4mD,平均为0.652mD,储集空间类型主要是与奥陶系潜山风化壳岩溶有关的裂缝、孔洞、洞穴三大类,可分为裂缝孔洞型储层、孔洞型储层和裂缝型储层。

要有效预测缝洞型碳酸盐岩储层油气富集规律,首先要研究形成缝洞型储层的主要控制因素。储集体沉积环境决定碳酸盐岩的岩石结构和成分,影响原生孔隙发育程度,直接影响和控制岩石后期成岩作用的方向、溶解和溶蚀程度的强弱以及裂缝和次生孔隙发育的程度。成岩作用通过对储层进行一系列后期改造,控制和影响次生孔隙发育和物性变化。裂缝作用通过有效改善储集体的渗流条件,使油井获得高产、高效。可以说,低孔、低渗储集体中优质储集体的分布是沉积作用、成岩作用和断裂作用共同作用的结果,后二者显得更为重要。除此之外,缝洞充填程度也是储层发育的重要控制因素。

一、沉积成岩作用对储层的控制作用

碳酸盐岩储层的发育需具备两个最基本的条件,即能形成良好储集性能的岩石类型和有利于孔隙发育的成岩作用。不同的沉积相带沉积的岩类和微相差异较大,有利沉积相带是储层发育的基础。开阔台地相的厚层块状灰岩较易发生溶解作用,不整合面附近易发育洞穴型

岩溶储层,而半闭塞台地相的白云岩地层中则发育蜂窝状岩溶型储层。槽盆相多由非可溶岩类组成,台槽过渡带相区、开阔台地相的中心亚相、陆棚以及斜坡相带多为薄层石灰岩(可溶岩类)与泥岩、碎屑岩、泥灰岩等(非可溶岩类)互层的岩石层组,岩溶作用不发育。因此,半闭塞台地相和开阔台地相的厚层块状的石灰岩、白云岩中较易发育岩溶,其所形成的碳酸盐岩储层有风化壳岩溶型、同生期岩溶型、埋藏岩溶型、白云岩型以及裂缝型等多种类型。

例如,塔里木盆地轮古西地区中一下奥陶统鹰山组为开阔海台地相,发育有台内滩亚相和滩间海亚相。台内滩亚相属高能环境下的滩相沉积,主要为亮晶砂屑灰岩、泥晶砂屑灰岩、粉晶粒屑灰岩、泥晶粒屑灰岩、云质亮晶砂屑灰岩,岩石成分质纯,矿物成分方解石占90%以上,泥质含量少,为2%~5%,粒屑含量在50%以上,岩性硬脆,易破裂,矿物成分的化学活泼性相对较强,在古风化壳条件下,易于高速溶蚀形成大量的溶蚀孔、洞、缝并成为有效的储集空间。滩间海亚相主要为泥晶灰岩、颗粒泥晶云质(化)灰岩,与台内滩亚相沉积的岩石类型相比较,泥质含量较高,粒屑含量在50%以下,不利于岩溶、裂缝的发育。区内已获工业油流井的产层段基本上都是岩溶缝洞发育层段。因此,鹰山组开阔海台地相的台内滩亚相是有利储层发育的沉积相带。

二、潜山岩溶作用对储层的控制作用

缝洞型储层往往与后期溶蚀作用、白云石化作用有关。优质储层主要分布在长期遭受风化淋滤的古隆起及岩溶作用发育区,如轮南奥陶系潜山。其次为白云石化作用所形成的以晶间孔、溶蚀孔洞为主的白云岩内幕储层。风化壳岩溶所形成的缝洞型储层储集条件最好。如果某地区地质历史上构造作用期次多,不整合面和断裂较为发育,就具备广泛发育风化壳岩溶及缝洞型储层的地质条件。古风化壳岩溶的发育与地层岩性、地质构造、气候和水动力条件密切相关,地层岩性是基础,地质构造是条件,水动力是关键。

由于沉积环境的不同,地层岩性差异较大,其可溶性也有较大的差异。一般来说,质纯层厚的碳酸盐岩分布区有利于形成以溶蚀作用为主的岩溶地貌,而层薄及不溶物含量高的碳酸盐岩或可溶岩与非可溶岩间互分布的地区则有利于形成溶蚀—侵蚀地貌。构造运动使碳酸盐岩岩体发生破裂,是岩溶作用发生的先决条件。构造运动通过断层、构造裂缝和褶皱影响岩溶作用,大型断裂控制着区域地貌整体趋势,中小型断裂控制沟谷的发育,裂缝改善了地层的渗透性,促进地下水的渗流和溶蚀作用的发生,裂缝发育带往往在破碎的沟谷和斜坡,而裂缝不太发育的地区往往位于山峰或山梁。在可溶碳酸盐岩地区,水动力条件决定了岩溶发育的特征,大气淡水降于碳酸盐岩表面,部分沿地表由高处向低处流动,部分渗入岩层,构成表层淋滤带。渗入岩层的淡水依靠重力继续沿裂缝垂直向下渗流,构成垂直渗流带。淡水经过渗流到达潜水面,并在潜水面压差作用下沿裂缝和孔隙作水平运动,构成了地下水的潜流带。潜流带之下为区域隔水层、地下滞流带或近海域的海水—淡水混合带(James 和 Choquette, 1988)。

大量的实际资料表明,不同岩溶发育带由于水动力条件的不同,形成的储集空间类型及孔、洞和缝的大小、形态、规模和它们的组合方式差异较大。表层岩溶带岩溶形成的储集空间类型以裂缝孔洞型、洞穴型为主。渗流岩溶带由于大气淡水垂向渗流的溶解作用,发育垂向分布的落水洞、串珠状溶洞。潜流岩溶带地下水十分活跃, CaCO_3 处于不饱和状态,溶解作用强,发育大型水平溶洞(暗河),洞高可达几米至几十米,洞内通常被溶积岩全充填或半充填。由于大型溶洞的发育,溶洞的顶部、底部及四周降低了岩石的力学强度,因此,在大型溶洞的顶、底部岩溶破碎带的网状裂缝、溶蚀孔洞、溶缝都十分发育,易形成裂缝孔洞型储层。

古风化岩溶作用形成的孔、洞、缝极大地改善了碳酸盐岩储层的储渗性能,岩溶洞穴周围及主体孔、洞、缝发育带是油气的富集带,古地貌斜坡区是风化壳古岩溶储层、断裂、裂缝、溶蚀孔洞最为发育的位置。

三、古断裂及裂缝对储层的控制作用

区域构造抬升运动使地层遭受剥蚀和溶蚀,是发生潜山岩溶作用的先决条件。古断裂和裂缝为地表水和地层水对碳酸盐岩地层的渗滤和溶蚀作用提供了主要通道,日积月累,沿着断裂带发育次生孔洞和裂缝,可改善储集体的存储空间和渗流条件。构造运动和水动力条件的不同影响缝洞体系发育的规模和大小。构造运动是发生岩溶作用的重要条件,通过断层、构造裂缝和褶皱,使碳酸盐岩岩体发生破裂,地表水顺断层和裂缝体系渗流并发生溶蚀作用,形成碳酸盐岩缝洞体系,有效改善碳酸盐岩储层的品质。断裂的规模和水动力条件影响岩溶作用强烈程度和缝洞体系发育规模,大型断裂通常控制着区域地貌整体演化的趋势,中小型断裂控制沟谷的发育,裂缝改善了地层的渗透性,促进地下水的渗流和溶蚀作用的发生,裂缝发育带往往在破碎的沟谷和斜坡,而裂缝不太发育的地区往往位于山峰或山梁。例如,塔里木盆地轮古西地区奥陶系碳酸盐岩受多期构造应力的作用,形成多组相互平行、切割、交叉的断裂体系,构成网状裂缝系统,使低孔、低渗致密的碳酸盐岩发育成裂缝型有效储层。

四、缝洞充填作用对储层的控制作用

碳酸盐岩储集空间主要有孔、洞、缝三大类,缝洞的充填作用对于油气的储集空间影响很大,被充填的岩溶储集空间主要为地下河溶洞系统、岩溶管道、溶蚀构造裂隙和风化壳溶蚀节理裂隙等,岩溶缝洞的充填物可分为机械沉积充填物、塌积充填物和化学淀积充填物三大类。从充填物的结构来看,机械沉积充填物固结成岩程度低,孔隙度较大,易受后期改造;塌积充填物充填密实程度次之,充填体易产生形变;化学淀积充填物以结晶致密充填为主,在构造活动影响下,易产生裂缝,发生后期溶蚀,在一定条件下或再充填,或残留孔洞。

1. 机械沉积充填物

机械沉积充填物主要是流水带入岩溶空间、在重力作用下沉积形成的,具有冲洪积和重力分异作用产生的层理以及分选性结构特征;成分复杂,以钙泥质和碳酸盐岩角砾、岩屑为主,有的还含有岩溶系统外来岩石碎屑、泥砂、高岭土等。此类充填物常见于地下河溶洞系统以及与其相连的层间溶缝、溶蚀裂缝体系。此外,在小型的未充填溶洞底部也有少量以碳酸盐岩角砾为主的沉积物。

2. 塌积充填物

塌积充填物主要发现于厅堂式溶洞系统,因洞顶破碎带岩块垮塌而形成。岩块较大时仍残余岩层层理,垮塌体的上部多充填钙泥,下部则在钙泥中夹有大量原岩角砾。

3. 化学淀积充填物

化学淀积充填物主要形成于水流滞缓的水动力环境,由于物源条件的不同,充填物的成分不同。例如,塔里木盆地硫黄矿西一带,岩溶系统的物源区主要为志留纪泥砂岩系,硫酸盐较丰富,降水和渗滤水将硫酸盐带入岩溶空间,随水中溶解质饱和度的增大,形成方解石和石膏的沉淀充填,在洞壁边沿方解石与石膏共生,沉积体中部为质纯的石膏。随着气候变干、环境向还原状态转化,硫酸盐沉积物分异出单质硫,在后期的孔洞、溶缝中充填,形成硫黄体。在一

间房南部一带,岩溶系统受到区域性大断裂和岩浆侵入活动的影响,溶洞系统的化学淀积充填物主要是巨晶方解石,紫色萤石和冰洲石,反映了晚期地热活动的影响,多形成致密的结晶充填体。在三岔口以西山原的岩溶面,早期岩溶缝洞充填的钙泥和方解石受后期热液作用,转变为萤石、冰洲石以及淀积萤石、方铅矿等。

溶洞系统的储集空间包括溶洞主体(没有充填或半充填)、溶蚀孔洞(洞边、洞顶、洞底)、裂缝(溶蚀扩张缝和塌陷裂缝)。在溶洞系统中,以溶洞主体为主要储集空间(孔洞孔隙度100%),其次为洞顶溶蚀垮塌破碎带(孔隙度可达30%以上),洞侧溶蚀影响带与洞底溶蚀影响带的储集性能与古构造裂缝发育程度、晚期溶蚀程度和后期的充填程度有关,洞顶溶蚀垮塌破碎带受晚期塌陷作用的控制裂缝非常发育,是保存最好的储层。

五、油气成藏规律与主控因素

缝洞型碳酸盐岩储层油气成藏富集主控因素十分复杂,油气成藏规律研究通常要考虑以下几个因素:成藏时间、油气来源、流体输导体系以及成藏模式与其主控因素和油气分布的关系。例如,塔里木盆地潜山油气聚集成藏的主控因素有三个:碳酸盐岩缝、孔、洞发育带控制了圈闭的形成和流体输导通道的空间分布;潜山构造格局控制了油气运移的区域最终指向和局部取向;构造格局、流体输导体系和油气供给源三者之间的空间配置决定了油气运移路径的空间分布。

根据缝洞型碳酸盐岩储层油气成藏和富集的特点,复杂的缝洞型碳酸盐岩储层地震预测问题可以分解成几个相对单一的问题进行分析和处理。例如,利用野外露头考察和岩石样品分析标定测井曲线,定量识别缝洞型碳酸盐岩储层的岩性、物性和含油气性,缝洞体系的充填程度,定量描述缝洞储层的特征;利用井震标定来分析孔缝洞发育区地震响应特征,建立地震属性与岩石物理的联系,优选反映缝洞储层特征的地震属性和参数,奠定碳酸盐岩储层地震定量预测的基础。针对碳酸盐岩储层发育与沉积相带和岩性选择性的关系,可以引导人们利用地震相和地震属性分析预测碳酸盐岩有利沉积相带和有效储层的分布,利用地震反演识别碳酸盐岩的岩性、物性和含油气性。考虑古构造运动、古断裂体系对岩溶的作用和缝洞体系的控制,利用三维地震资料,通过恢复岩溶古地貌和精细解释断裂体系,开展古构造和断裂体系综合研究,对于宏观把握和预测岩溶发育带和缝洞储层的分布是很有益的,利用相干体、曲率体和方位 AVO 等技术可以提高裂缝的预测能力。注意到断裂和不整合面是碳酸盐岩油气运移的重要通道,断裂对缝洞储层的储集能力和渗流能力改造作用大,储层非均质性对岩性地层圈闭的控制,利用对断裂和储层非均质性敏感的地震属性,建立一套适合缝洞型碳酸盐岩油气藏研究的地球物理配套技术系列。例如,相干体和曲率体预测裂缝,分频级联地震属性预测有效储层分布。

第二节 缝洞型储层识别主要难点

缝洞型碳酸盐岩油气藏地震勘探面临的主要地质任务是:如何在岩溶作用强烈的碳酸盐岩地层中,寻找裂缝和溶洞的发育带,实现碳酸盐岩缝洞体系的定量描述和三维可视化立体雕刻,预测储层的非均质性和流体分布,评价和优选有利构造—岩性/地层圈闭,提供有利钻探目标。有效勘探缝洞型碳酸盐岩储层,我们面临两个层面的难点问题。

一、地质难点

我国碳酸盐岩地层普遍时代老,基质孔隙不发育,有效储层多为经历强烈岩溶作用形成的次生缝洞型储层。储层类型包括孔隙、孔隙—裂缝、裂缝等三类。由于碳酸盐岩历经多期岩溶改造作用,历经溶蚀、充填、再溶蚀的反复过程,使储层特征变得十分复杂。油气藏类型包括礁滩型、岩溶型和白云岩化碳酸盐岩油气藏,由于地质成因不同,储层的发育特征和分布规律不同,油气成藏规律也不同。

二、地震难点

我国碳酸盐岩地层普遍埋深大,储层非均质性严重,地震波散射强,导致深层及碳酸盐岩内幕地震反射弱。我国西部碳酸盐岩分布区面临地表条件复杂和地下构造复杂的双重困扰。勘探区地表多为沙漠、戈壁滩、黄土塬和山地,地震资料采集噪声背景大,静校正问题突出,影响地震采集资料的品质,深层地震资料分辨率和信噪比低,地震成像差,常常不能有效满足碳酸盐岩储层地震定量预测的要求。地震勘探不仅面临地表条件复杂所带来的一系列技术困惑,而且也饱受地下构造复杂带来的成像煎熬。勘探区地下构造涉及山前推覆体构造和潜山风化壳。山前推覆体构造速度建模困难,地震偏移成像难上加难;区域构造运动所形成的潜山风化壳岩溶作用强烈,发育缝洞储层体系,这类缝洞体系是我们寻找碳酸盐岩高效储层的有利目标,因此,潜山风化壳和缝洞体系的精确成像成为地震偏移处理的主要矛盾之一。同时,缝洞体系经历多期次充填和溶蚀作用,储层和非储层波阻抗差异变化规律变得复杂,非均质性强,地震内幕成像困难。碳酸盐岩岩石的速度比较大,从碎屑岩地层进入碳酸盐岩地层,地层分界面两侧波阻抗差异大,形成很强的地震反射,强反射往往淹没了下伏碳酸盐岩地层内幕的弱反射,影响储层特征的识别和检测,因此,提高碳酸盐岩内幕弱信号也是处理当中值得关注的难点之一。从地震处理的角度看,提高地震资料采集的品质,提高地震资料的信噪比和成像精度是碳酸盐岩处理的首要问题,只有在改善地震资料成像精度的前提下,提高地震分辨率和保真度处理才更有现实意义,在此基础上才能进一步开展叠前地震分析研究。因此,地震资料成像好坏成为影响地震储层预测精度的关键。

我国目前勘探的碳酸盐岩油气藏类型主要有三大类:礁滩型、岩溶型和白云岩型。由于地质成因不同,礁滩型、岩溶型和白云岩型油气藏地震响应模式不同,研究思路和预测方法也有区别。礁滩型碳酸盐岩可以根据地震响应的几何样式和古地貌特征识别,利用地震属性分析礁滩和非礁滩储层的分布,但是预测储层物性特征困难。岩溶型碳酸盐岩比较多的是从区域构造背景和岩溶风化壳的古地貌特征间接判断,利用地震属性定性研究岩溶作用的强烈程度和储层的非均质性,但储层定量描述困难。白云岩型碳酸盐岩储层地震响应特征识别困难,常常依靠反演地震速度的差异来预测。在各类碳酸盐岩储层中,以白云岩的成岩、结晶和离子交代作用更容易产生孔隙和裂缝,形成有效储层。通常白云岩速度高于石灰岩的速度,当白云岩形成高孔缝储层后,速度有时会产生较大幅度的降低,内幕形成较大的波阻抗差异,形成较强的地震反射,但是,在更多的情况下,储层和非储层的波阻抗差异是很小的,地震响应差异细微,在现有的地震分辨率条件下很难区分。对于缝洞型碳酸盐岩,由于遭受强烈的岩溶作用,缝洞体系经历多期次的充填和溶蚀,储层特征变得十分复杂,导致储层和非储层波阻抗差异小、内幕地震反射能量弱、储层定量预测难度大。无论是哪一种类型的油气藏,孔、缝、洞的识别和定量描述、流体识别和预测都是共性的难点问题。

第三节 缝洞型储层地震识别技术现状

缝洞型储层是指裂缝、孔洞、溶洞等类型的油气储层,这些裂缝和孔洞系统对致密岩层中的油气赋存和运移起重要作用,因此缝洞型储层的识别和描述在油气勘探中具有重要意义。缝洞型储层系统是多尺度的,有矿物尺度、岩石尺度、地层尺度和地质尺度的缝洞,但地震勘探目前的分辨率只能达到数十米至几米,因此除了地质尺度的大型缝洞体之外,多数单个的缝洞无法用地震勘探方法分辨和识别,但是由众多细小的缝洞组成的缝洞系统或缝洞发育带有可能被检测。所幸对油气储层而言,缝洞发育带的存在才是真正有意义的。目前常用的缝洞型储层地震识别技术包括方位各向异性缝洞检测技术、地震属性技术、缝洞型储层正演模拟技术、地震反演技术、三维可视化技术等。在实际应用中,通常是综合地质、测井、钻井、地震、开发等多方面的资料进行缝洞系统的检测和描述。本节将对以上几项缝洞型储层地震识别技术的现状作一简要介绍。

一、基于方位各向异性的缝洞型储层识别技术

基于方位各向异性的缝洞型储层识别技术的物理基础是当地下介质中存在裂缝时,地震波会出现方位各向异性的特征,即沿不同方位观测到的地震波具有不同的动力学和运动学参数。因此,根据地震波在缝洞型储层中传播时表现出的方位各向异性特征可以计算储层中裂缝的参数,包括裂缝走向和裂缝密度等。因此,方位各向异性技术主要是用于裂缝型储层的检测和描述。实际当中应用的方位各向异性裂缝检测方法包括振幅随炮检距变化(AVO)分析法、振幅随方位角变化(AVA)分析法、速度随方位角变化(VVA)分析法等。

除应用P波方位各向异性进行裂缝检测外,多波多分量地震各向异性检测与分析技术也应用到裂缝检测中,如转换波分裂裂缝检测就是一项重要的裂缝检测技术。根据转换波分裂的特点和信息,可以预测裂缝的发育方位和密度。在裂缝型油气藏中,这两个参数对提高油气采收率具有重要意义。当研究的目标层之上的盖层中存在不止一个含裂缝各向异性层时,转换波就会发生多次分裂,上覆各向异性层对下层裂缝参数的计算具有较大影响,因此必须估算并补偿快慢波分裂的时差,消去盖层各向异性的影响,以获得更准确的目标层的裂缝信息。

程冰洁等(2009)基于理论模型获得多层裂缝介质中转换波分裂的分方位数据体,分析转换波在多层裂缝各向异性介质中的分裂特征,利用极性反转法预测裂缝方位和估算快慢波时差,并通过层剥离的方法分析了该方法的计算精度。

唐建明等(2009)通过转换波三维三分量资料的处理、反演、多波属性分析及综合解释,较好地解决了川西深层致密裂缝型气藏优质储层识别、裂缝检测等问题,指出这项技术在流体性质的判别方面也具有较大的潜力。

Zhang Zhirang 等(2009)利用P波方位各向异性属性进行裂缝检测,实现了中国渤海湾地区古生界潜山油气藏的描述。Gray(2008)采用AVO属性随方位角的变化进行裂缝检测。Wang Jiushuan 等(2008)利用宽方位P波地震资料进行AVO分析,有效刻画了裂缝方位和密度。Colin(2007)利用P波反射系数随偏移距和入射角的变化确定裂缝的方位。Guan Luping 等(2006)采用AVAZ技术预测裂缝方位和裂缝密度,并将这一技术应用于塔河油田缝洞体系的描述。

二、地震属性技术

地震属性是指由叠前或叠后地震数据经过数学变换而导出的表征地震波几何形态、运动学特征、动力学特征以及各种统计特征的一些参数,地震属性技术在缝洞型碳酸盐岩储层识别与描述中具有重要作用。与缝洞型储层表征关系较密切的地震属性有振幅属性、相干体、曲率体、频率分解属性、分数维属性等。

振幅属性是刻画缝洞型储层最常用和最有效的属性之一。当缝洞系统中的充填物与围岩的波阻抗存在较大差异时,相应的地震反射会表现出强振幅的特征,故利用振幅变化特征可预测孔缝洞发育地带。闫相宾等(2007)通过分析实际地震资料以及地球物理正演模拟研究发现,洞穴型和裂缝—孔洞型储层发育区对应着地震剖面上的强反射区,而在洞穴型和裂缝—孔洞型储层不发育的地区,地层间的波阻抗差较小,反射弱。地震属性分析结果表明,洞穴型和裂缝—孔洞型储层在地震剖面上表现为强振幅、高能量、低频率、强吸收、高衰减的地震响应特征。

相干体技术是一项重要的地震属性技术,它通过计算相邻地震道波形间的相似性将三维地震数据体转换为相干数据体,突出了波形的不连续性特征,在缝洞型碳酸盐岩储层预测中具有重要作用。碳酸盐岩缝洞系统的分布和形状无章可循,当某一区域的缝洞系统比较发育时,会产生一些杂乱反射,带来相邻地震道间反射的无序性(即地震道的相异性),裂缝越发育,这种相异性越明显。因此,利用相干体属性揭示的不连续特征可以有效刻画缝洞发育带。龚洪林(2007)利用相干体技术预测塔中30井区碳酸盐岩储层的裂缝发育带,预测结果与岩心揭示的裂缝发育情况有较好的相关性。

曲率属性用来研究地层在不同压力下的变形程度,从而可以间接预测断裂和裂缝。Lisle(1994)最早指出高斯曲率和裂缝之间的相关性。曲率属性在缝洞型储层描述中具有重要作用。Barber和Marfurt(2009)应用曲率属性描述了裂缝系统,Blumentritt等(2006)利用三维体曲率属性刻画裂缝走向,同时发现曲率属性还可以指示区域构造应力场的情况。Chopra和Marfurt(2009)用曲率属性上揭示的裂缝特征制作玫瑰图,再与成像测井上得到的玫瑰图相比较,由此获得裂缝方位的估计。

频谱分解技术可以刻画碳酸盐岩储层中缝洞发育所引起的地震反射频率特征的变化,将分频技术应用于碳酸盐岩缝洞型储层的地震反射波分析,通过分析由分频技术生成的调谐体和离散频率能量体的变化特征,可以确定充填流体或气体的孔洞型储层引起的地震反射波振幅和频率的变化异常。侯海龙等(2009)采用频谱分解技术刻画了塔河油田缝洞型储层的分布。

缝洞型储层的存在会引起地震反射波波形特征的变化,因此,利用波形分类技术可以间接指示缝洞型储层的存在。许杰等(2007)从塔河油田碳酸盐岩储层的孔隙空间结构所特有的非均质性出发,根据碳酸盐岩岩溶储集体的形态、规模、组合形式、距奥陶系风化面的距离等,设计了多种碳酸盐岩缝洞型储层理论地质模型和实际地质模型,研究波形的全方位特征及合成机理,通过正演模拟,结合钻井、测井等资料,获取了塔河油田碳酸盐岩缝洞型储层发育与地震波形特征的对应关系。根据建立的碳酸盐岩储层地震识别模式,对塔河油田地震资料进行了全方位的波形特征识别与追踪,编制了研究区各类波形异常及碳酸盐岩缝洞型储层级别分类图,利用波形分析技术和钻井资料对塔河油田碳酸盐岩缝洞型储层进行了有效预测,在塔河油田实际应用中取得了良好效果。

分形的概念是由 Mandelbrot 于 1967 年在测量英国海岸线的长度时提出的。所谓分形是指物体的数目与其线性尺度之间存在着幂指数关系,分维是分形关系中的幂指数值。统计结果表明:储层构造裂缝的复杂性可以概括为具有随机表现的多尺度问题,能够用分形几何较好地表述。鲁新便等(2003)运用分形理论的变尺度分析技术研究缝洞型碳酸盐岩储层的非均质性,通过对塔河油田奥陶系岩溶缝洞型碳酸盐岩储层测井曲线的分析,提出了利用分数维指标计算岩溶缝洞型储层分维值的方法。对该地区岩溶缝洞发育的典型井段的测井数据进行了实际处理,并对岩溶缝洞发育程度定量评价进行了尝试性的解释,对分维值的高低与岩溶缝洞发育程度之间的关系进行了初步研究。

应用地震属性技术进行缝洞型储层识别时应注意的问题是:地震属性参数的异常是多解的,这些异常可能反映地层、岩性、岩相的变化,也可能反映裂缝发育带的变化,甚至是噪声引起的各类“陷阱”。同时,裂缝发育带引起的地震属性异常经常比较微弱,不仅受噪声的影响,而且其地震响应本身具有多解性。因此,利用地震资料检测裂缝发育带时必须使用地震、测井、钻井资料进行综合解释和预测,同时应特别注意发挥地震正演模拟的作用,这样才能减小地震属性多解性的影响,更好地发挥地震属性技术在缝洞型储层识别中的作用。

三、缝洞型储层正演模拟技术

正演模拟技术在缝洞型碳酸盐岩储层识别中具有重要意义,搞清地震波在缝洞型储层中传播的特征是进行缝洞型储层地震识别的基础。缝洞型储层正演模拟技术的关键是设计符合实际地质规律的缝洞体模型,并选择合适的波场正演模拟方法。

Ekanem 等(2009)利用地震物理模拟技术来研究裂隙介质中的地震波衰减各向异性。他们采用的物理模型由环氧树脂和硅橡胶的混合物组成,应用衰减随偏移距变化方法求取品质因子。研究表明:衰减从裂隙的走向开始增加,到垂向时达到最大值,这种裂隙成因衰减随方位的变化可以近似地描述为椭圆,而裂隙走向就是椭圆的轴。梁锴等(2009)从平面波理论出发,将 Aki 和 Richards 以及 Rüger 的方法进行推广,推导出两个弹性 TTI 介质密接条件下平面波反射系数及其近似式。并从位移波函数出发,利用位移连续和应力连续边界条件,建立了 TTI 介质 qP 波入射的 Zeoppritz 方程。在此基础上,利用弱各向异性近似和介质分解理论,推导了 TTI 介质 qP 波入射近似的反射系数。近似式具有明确的物理意义,它能直观地反映各向异性参数对反射系数的影响,并且精度较高。PP 反射系数近似式表明,VTI 不影响 PP 波反射系数的截距,只对梯度有直接影响;而 TTI 既影响截距,又影响梯度。刘家铎(2008)实现了不同形状、不同规模、不同组合特征的缝洞型储层的数学和物理模拟,系统研究了其地震波场特征,建立了溶洞地震反射能量与空间采样率的关系,总结了碳酸盐岩缝洞型储层的地震响应特征,为储层预测研究方法研究奠定了理论和实验基础。杜正聪等(2003)为了揭示缝洞储层的地震波场特征,首先推导出了允许介质速度有纵横向变化,对地层倾角无限制,保振幅,并可以避免层间多次波产生的变参考慢度 Rytov 近似傅立叶波场延拓算子,然后用该算子对根据某地区奥陶系储层溶蚀缝洞的地质特征所设计的四个缝洞模型进行正演和偏移,并分析了相应的波场特征。缝洞储层模型数值模拟的结果揭示了在不同情况下,单个裂缝、溶洞、缝洞带的宽度和密度的地震波场特征,得到了一些有益的结论和认识。卫平生等(2009)为得到对碳酸盐岩岩溶缝洞型储层的地震响应特征的正确认识,采用全波场波动方程数值模拟技术,对塔中地区奥陶系礁滩型、风化壳型及内幕岩溶型储层的不同形态、不同级别溶洞、不同储集类型的地震响应进行了正演模拟,建立了缝洞储层模型,为有针对性地开展缝洞储层预测奠定了基础。

四、地震反演技术

缝洞型碳酸盐岩储层通常表现为低速和低密度的特征,因此,利用地震反演技术得到速度和密度参数,可以表征缝洞型储层的分布。王建等(2002)针对中国西部某油田碳酸盐岩岩溶缝洞型储层的特殊性、复杂性和难点,应用三维可视化解释等技术对目的层段进行了精细的标定和解释,结合钻井、测井、地质分析及试油等资料,采用地震反演技术对奥陶系缝洞储层及其储集特性进行了预测和描述,探索了一条针对碳酸盐岩、玄武岩等多孔介质储层进行地震预测的方法和思路,取得了明显的效果。

五、缝洞体系三维雕刻技术

缝洞体雕刻技术是近几年在三维可视化技术基础上发展起来的一种利用地震属性技术进行缝洞体三维空间分布描述的技术。它以振幅属性为基础,综合相干体、曲率体、叠前方位各向异性等属性揭示的断裂和裂缝分布,对三维地震数据体进行雕刻、透视,有效突出与缝洞系统相关的地震信息,从而将各种地质现象直观、形象地在三维空间中显示出来,得到由断裂和裂缝沟通的缝洞单元在三维空间的展布。杨子川等(2007)在深入分析塔河油田碳酸盐岩缝洞型储层地震响应特征的基础上,运用时频分析、反射强度、波形分类等技术,对三维缝洞储集体的有效空间进行了精细刻画,并求取了缝洞体的视体积。

六、缝洞型储层综合预测

缝洞型储层的发育与构造应力、岩溶、古水系和成岩作用等地质因素密切关系,同时,测井、钻井、开发动态等信息对缝洞型储层的地震检测也有重要作用。因此,在实际应用中,必须综合利用地质、钻井、测井、非地震和开发动态等方面的多元信息,运用物理和数值模拟、地震正反演处理、属性参数检测与评价等多种地震技术进行缝洞型储层的识别和描述。

陈广坡等(2005)综合应用地震属性参数分析、古地貌恢复、应变率分析裂缝预测、井约束条件下的全三维波阻抗反演以及多参数融合储层评价等技术,提取了碳酸盐岩岩溶型储层的敏感参数,预测了裂缝发育密度。Yang Ping 等人(2007)在综合分析塔里木盆地缝洞型储层发育的构造和沉积背景基础上,综合应用古地貌分析、振幅属性和相干体属性刻画了塔中地区缝洞型储层的分布。Davis 等(2002)综合利用相干、倾角、方位角属性和三维可视化技术,建立了地震属性与沉积模式之间的关系,有效刻画了美国新墨西哥州 Vacuum 油田 San Andres 地层中碳酸盐岩缝洞型储层的分布。Dou Qifeng 和 Sun Yuefeng(2009)综合利用岩心、测井资料,结合相干、曲率属性以及基于模型约束的地震反演技术有效刻画了美国 Texas 二叠系盆地 San Andres 地层中一个复杂的古洞穴系统。Shen Feng 和 Yang Shaoguo(2003)综合利用地震和测井信息表征裂缝型储层,利用五个方位角得到的弹性阻抗信息实现地震各向异性分析和裂缝方位估算,并用正演模型加以验证。裂缝密度用拉梅常数、衰减属性和瞬时属性联合进行量化表征,这些属性与储层岩性、地震波衰减和波场干涉有关。研究表明:裂缝走向是由断裂系统决定的,裂缝高密度带与高产井密切相关。将两种独立的曲率体属性与低频谱分量幅度相结合构造了一个裂缝指示因子用于裂缝检测和表征。谢占安等(2009)通过分析碳酸盐岩储层发育成因及其地震响应特征,开展了叠前、叠后裂缝预测,通过抽取方位角道集,应用振幅随方位角的变化(AVA)预测裂缝发育的方向和厚度,应用频率衰减属性随方位角的变化预测开启裂缝的分布;利用泊松比属性预测含气缝洞的分布规律;应用构造应力场数值模拟预