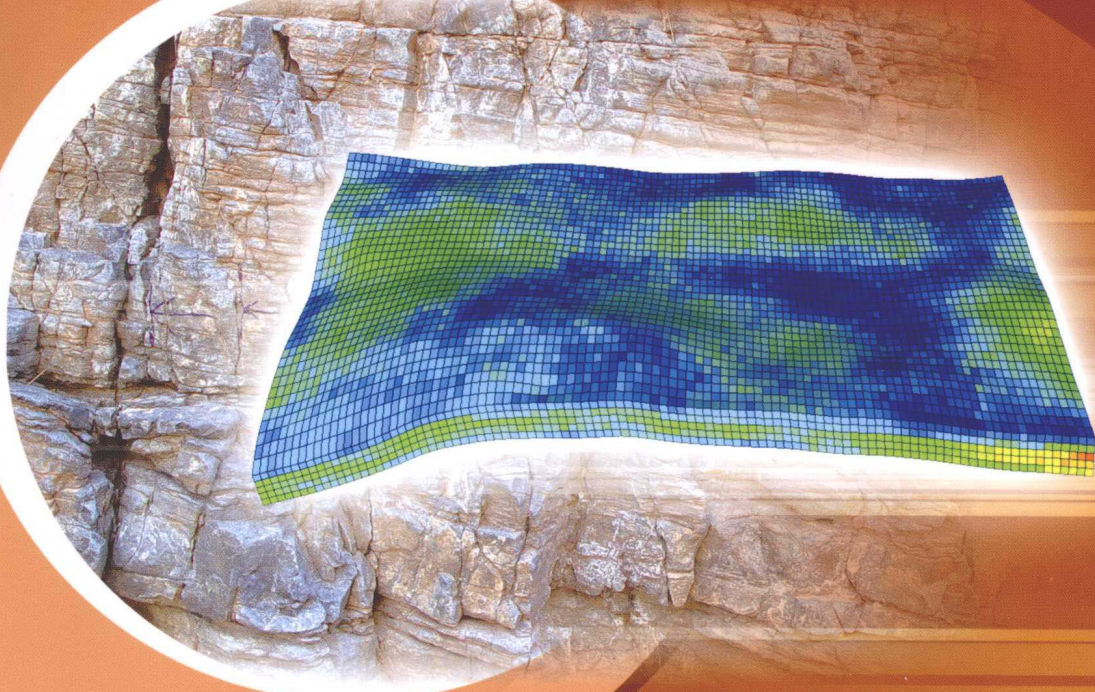


碳酸盐岩油气藏等效介质 数值模拟技术

王自明 袁迎中 蒲海洋 文光耀 庞宏伟 著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了碳酸盐岩油气藏储层地质及渗流特征、碳酸盐岩油气藏等效介质数值模拟方法适应性、碳酸盐岩油气藏等效介质数值模拟的数学模型及机理、等效介质数值模拟的裂缝—基质渗透率级差判别方法,最后给出了应用实例。

本书可供从事油气田开发的科研人员、工程技术人员以及石油院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

碳酸盐岩油气藏等效介质数值模拟技术/王自明等著.

北京:石油工业出版社,2012.8

ISBN 978-7-5021-9120-7

I. 碳…

II. 王…

III. 碳酸盐岩油气藏-等效-介质-油藏数值模拟

IV. TE344

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第159124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:<http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部:(010)64240656 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012年8月第1版 2012年8月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:12.75

字数:322千字

定价:60.00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

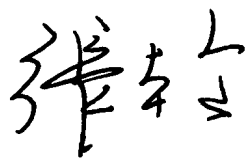
序

油气藏数值模拟技术是油气田开发核心技术之一。该技术在全面考虑油田构造、储层、油气水关系和流体性质、温度压力特征的基础上,实现了对油田生产历史、未来生产过程中各项指标的模拟再现与预测。数值模拟成果对编制油田开发方案,实现油田科学、高效开发具有重要意义。

对于占全球油气资源“半壁江山”的碳酸盐岩油气藏,如何做好数值模拟工作一直是个世界级难题。储层的储渗空间的组合和结构十分复杂,地质模型具有很大的不确定性,油藏渗流规律、生产历史也变得复杂多变,特别是对于大型的双重介质的碳酸盐岩油气藏,用常规的数值模拟方法,其运算速度极其缓慢甚至不收敛,给油田开发方案设计带来很大的困难。

近十年来,川庆钻探工程公司地质勘探开发研究院承担编制了伊朗、伊拉克、叙利亚、土库曼斯坦、哈萨克斯坦等十多个国家不同类型的碳酸盐油气田综合评价方案、开发方案和开发调整方案,其中有开发逾百年的特大型复杂多层状的双重介质碳酸盐油田、有大型的缝洞型的碳酸盐底水油田、有巨厚层状孔隙型的大型碳酸盐油田、有大型跨境的边底水碳酸盐气田和特大型碳酸盐气田,通过积极探索、勇于实践,提出了采用裂缝—基质渗透率级差判别方法,将复杂碳酸盐岩油气藏模型简化为等效裂缝单一介质模型、等效基质单一介质模型、等效双孔单渗介质模型,解决了大型复杂碳酸盐油气田的数值模拟问题,对国内外多个油气田实现了高精度的历史拟合和开发方案指标预测。

书中形成的等效介质数值模拟技术找到了一条顺利实现复杂碳酸盐岩油气藏生产历史拟合的途径,提出的裂缝—基质渗透率级差判别方法为合理简化复杂碳酸盐岩油气藏模型提供了依据,建立的等效介质数值模拟技术体系已经在国内外碳酸盐岩油气藏开发中取得了良好的应用效果并正在继续推广。我相信,该书的出版将进一步推动我国油气藏数值模拟技术的发展。



2012年8月1日

前 言

油气藏数值模拟是以渗流力学、油层物理、计算方法、计算机技术为主的多学科紧密结合的一门前沿技术。油气藏数值模拟技术自 20 世纪 50 年代问世,经历了 80 年代以来的迅速发展,已经有半个多世纪的发展历史,为研究油气藏渗流规律和编制合理的油气田开发方案做出了巨大贡献。

碳酸盐岩油气藏储量占世界油气藏总储量的一半,其储层成因多样,通常是由裂缝(洞)与基质孔隙组合而成的双(多)重介质,最大特点是岩石介质类型和流体渗流窜流规律极为复杂。传统的数值模拟通常采用双孔双渗介质模型对碳酸盐岩油气藏进行运算。但大量实践表明,对于区块大、储层介质复杂、生产史复杂的碳酸盐岩油气藏,采用传统双孔双渗模型运算极其缓慢或根本不收敛,只能视情况对数值模拟模型进行等效简化。

笔者通过大量实践认为,裂缝—基质渗透率级差水平是决定采用何种等效简化方法的主要依据,提出了等效介质数值模拟的裂缝—基质渗透率级差判别方法。按此方法,通过不同的等效途径,将双孔双渗介质模型分别等效为等效裂缝单一介质、等效基质单一介质、等效双孔单渗介质 3 种等效介质模型。

本书介绍的碳酸盐岩油气藏等效介质数值模拟技术系统地研究了不同裂缝—基质渗透率级差水平下油气藏渗(窜)流规律,忽略了次要的渗(窜)流过程,有效保留了主要的渗(窜)流过程,使数值模拟运算能顺利快速完成的同时,实现与真实渗(窜)流效果近似等同,达到了对复杂模型等效简化的目的。碳酸盐岩油气藏等效介质数值模拟技术在多个碳酸盐岩油田的数值模拟研究中取得了良好的应用效果,实现了高精度的生产历史拟合,有效地解决了大型复杂碳酸盐岩油气藏数值模拟难的问题,有力地指导了碳酸盐岩油气田开发。

本书编写过程中,得到了中国石油川庆钻探工程有限公司地质勘探开发研究院戴勇、张森林、程绪彬、吴大奎、王鸣华、赵良孝、杜尚明等领导和专家的大力支持,得到了严文德、戴岑璞、李连民等的支持和协助。同时感谢中国石油伊朗公司、中油国际叙利亚公司以及中油国际阿曼公司的大力支持。

限于作者水平,书中不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

王自明
2012 年 5 月

目 录

绪论	(1)
第一章 碳酸盐岩油气藏储层地质及渗流特征	(4)
第一节 碳酸盐岩油气藏的孔隙	(4)
第二节 碳酸盐岩油气藏的裂缝	(9)
第三节 碳酸盐岩油气藏储层类型	(14)
第四节 碳酸盐岩油气藏渗流物理特征	(16)
第二章 碳酸盐岩油气藏等效介质数值模拟方法适应性	(31)
第一节 碳酸盐岩油气藏数值模拟模型分类	(31)
第二节 碳酸盐岩油气藏连续介质模型	(33)
第三节 碳酸盐岩油气藏离散裂缝网络模型	(43)
第四节 碳酸盐岩油气藏等效介质数值模拟方法适应性	(48)
第三章 碳酸盐岩油气藏等效介质数值模拟的数学模型研究	(50)
第一节 碳酸盐岩油气藏双孔双渗数值模拟基本模型	(50)
第二节 碳酸盐岩油气藏双孔双渗数值模型的求解	(54)
第三节 碳酸盐岩油气藏双孔双渗数值模型的等效	(74)
第四章 碳酸盐岩油气藏等效介质数值模拟机理研究	(114)
第一节 机理模型的建立	(114)
第二节 单井条件下的等效机理	(117)
第三节 井网条件下的等效机理	(134)
第四节 等效介质的裂缝—基质渗透率级差判别方法	(167)
第五章 碳酸盐岩油气藏等效介质数值模拟的应用	(168)
第一节 等效双孔单渗数值模拟技术在伊朗 MIS 油田的应用	(168)
第二节 等效裂缝单一介质数值模拟技术在叙利亚 Gbeibe 油田的应用	(179)
第三节 等效基质单一介质数值模拟技术在阿曼 Daleel 油田的应用	(187)
第六章 结论与认识	(195)
参考文献	(197)

绪 论

油气藏数值模拟技术是编制油田开发方案的核心技术之一,数值模拟效果好坏往往关系到开发方案的成败。常规数值模拟方法主要适用于构造、储层介质、流体分布较简单的油气藏。对于这类油气藏,比如不带裂缝的砂岩油气藏,其油藏构造、岩石物性、孔隙结构、非渗透夹层、流体形态、性质及其与岩石的相互作用等相对较简单,在取得的参数比较可靠的前提下,数值模拟方法能比较准确地描述地层中的流体流动,历史拟合比较容易实现,对油田未来的预测也比较可靠。

除了常规油气藏之外,还存在着大量的复杂介质碳酸盐岩油气藏。目前世界上碳酸盐岩储层中的油气储量占世界油气总储量的一半左右,产量已达到总产量的60%以上。世界上著名的碳酸盐岩油气田有:沙特阿拉伯的加瓦尔、墨西哥的黄金巷、伊朗的加奇沙兰、伊拉克的基尔库克、土库曼阿姆河右岸、哈萨克斯坦滨里海等。中东地区沙特阿拉伯、阿拉伯联合酋长国、科威特、伊朗、伊拉克、叙利亚、阿曼等碳酸盐岩储层举世闻名,是当今最富集的油气资源地。我国的碳酸盐岩油气藏主要分布于四川盆地、塔里木盆地和华北地台等地区。四川地区早已发现震旦系、石炭系、二叠系、三叠系的碳酸盐岩产气层及侏罗系大安寨碳酸盐岩产油气层。塔里木盆地也陆续发现一批裂缝型和缝洞型碳酸盐岩油气藏。华北地区发现以任丘为代表的潜山型碳酸盐岩油田。近年我国在南海珠江口又发现了流花11-1礁灰岩大油田。目前,我国来自碳酸盐岩的油气储量大约30%。碳酸盐岩油气藏研究在国内外都占有重要的地位。

根据碳酸盐岩油气藏储集空间类型的不同,可将碳酸盐岩储层划分为孔隙型碳酸盐岩储层、裂缝型碳酸盐岩储层以及裂缝—孔隙型复合碳酸盐岩储层等。碳酸盐岩储层作为一种多重介质,其裂缝和基质系统的发育程度有所差异,这样就形成了具有不同渗流系统的储层,它们在油气开发过程中有不同的表现。在孔隙型储层中,油气主要储存在粒间孔隙和结构与之类似的孔洞中,流体主要通过孔喉—喉道系统渗流,孔隙的渗透率起着主要作用,裂缝渗透率影响较小,这反映出孔隙型碳酸盐岩储层具有较小的裂缝—基质渗透率级差;在纯裂缝型储层中油气主要储存在裂缝和与裂缝有关的溶解孔洞中,流体主要在裂缝系统内渗流,裂缝的渗透率起着主要作用,基质渗透率影响较小,这反映出裂缝型碳酸盐岩储层具有很大的裂缝—基质渗透率级差。裂缝—孔隙型储层是碳酸盐岩油气藏中最常见的油气产层,具有两类基本性质不同的渗流介质——裂缝系统和基质系统,它们不但渗流特性完全不同,而且在渗流过程中存在着流体交换,形成裂缝和基质两个交错的水动力场,每个水动力场有着不同的压力和流速。裂缝—孔隙型储层在不稳定试井过程中,裂缝—基质渗透率级差决定了流体从基质岩块流向裂缝系统的能力,控制着基质岩块的响应速度,也决定着过渡段所产生的时间;而在长期生产过程中,裂缝—基质渗透率级差又决定了裂缝系统和基质系统的产能以及它们在总产量中的贡献率——即裂缝—基质渗透率级差越大,裂缝系统的产能和在总产量中的贡献率越大。从以上分析可以看出,尽管这三类碳酸盐岩储集空间的结构十分复杂,千变万化,但它们都与裂缝—基质渗透率级差之间存在着紧密的关联,即渗透率级差越小,储层越体现出孔隙的特征;渗透率级差越大,储层越体现出裂缝的特征。裂缝—孔隙型储层的特点就是裂缝渗透率比孔

隙渗透率明显大,这可作为识别这种类型储层的一个主要标志。孔隙型储层的裂缝—基质渗透率级差较小或大致相近,这是与裂缝—孔隙型储层的重要差别。而纯裂缝型储层是指那些只有裂缝储油,岩块几乎无渗透能力的油层,这种油层中裂缝十分发育,裂缝—基质渗透率级差极大。

对于碳酸盐岩油气藏的数值模拟,如裂缝型碳酸盐岩油气藏,其数值模拟模型可划分为连续介质模型,离散裂缝网络模型以及混合模型。连续介质模型适用于油田规模数值模拟,忽略了岩石的离散特征,是应用最广泛的裂缝性油藏模型。离散裂缝网络模型试图从裂缝的几何形状以及流动机理上对模型进行表征和描述,可以在较小规模上描述裂缝性油藏的非均质性,适用于区域规模数值模拟,该模型还可以为连续介质提供参数,但应用起来十分复杂。从碳酸盐岩油气藏数值模拟的实用性角度来看,一般情况下不需要精确地研究流体在杂乱无章、四通八达的微观孔道中的流动,而是需要得到流体运动的宏观流动规律以指导油气田开发,因而连续介质模型对于碳酸盐岩油气藏数值模拟具有很好的适应性。

碳酸盐岩油气藏储层通常是由裂缝(洞)与基质孔隙组合而成,储层介质、流体分布十分复杂,这给数值模拟带来了极大的困难。理论上,采用连续介质模型的双孔双渗介质渗流模型是描述碳酸盐岩储层渗流方式的最佳选择。当裂缝与基质间的渗透率级差适中且网格数较少时,双孔双渗模型可以顺利实现油气藏历史拟合,但对于大量现实存在的复杂介质碳酸盐岩油气藏,储层类型多样、裂缝与基质搭配关系复杂、渗透率级差变化大、油气水关系复杂、压力分布变化大、模拟区块大、生产历史复杂,采用传统的双孔双渗介质模型进行油气藏数值模拟要么运算速度极其缓慢、拟合精度很低,要么根本不收敛,无法完成运算,导致油气藏开发指标预测失真而影响开发方案的科学性。欲实现复杂碳酸盐岩油气藏高效率、高精度的历史拟合和较准确开发指标预测,需要视油气藏具体情况对双孔双渗介质模型进行等效简化。

以碳酸盐岩油气藏储集层地质特征为基础,建立了碳酸盐岩油气藏双孔双渗介质渗流数学模型,利用全隐式方法对双孔双渗模型进行有限差分离散、线性化展开,得到了线性代数方程组。在衰竭式开采、注水开发等条件下,针对纯油藏渗流、纯气藏渗流、油气两相流、油水两相流、油气水三相流等情形,对线性方程组中系数矩阵结构及各种参数团进行分析,在不同裂缝—基质渗透率级差下,对裂缝流动项、基质流动项、裂缝—基质流体交换项等参数团进行简化,得到了与双孔双渗模型等效的双孔单渗模型、裂缝单一介质模型、基质单一介质模型的系数矩阵,并对双孔双渗模型与各种等效模型进行了数值求解及对比分析,论证了裂缝—基质渗透率级差在系数矩阵等效过程中的作用。结果表明,裂缝—基质渗透率级差是选择双孔双渗模型的各种等效模型的决定性因素,以裂缝—基质渗透率级差为基础可以将双孔双渗模型在一定条件下转化为等效裂缝单一介质模型、等效基质单一介质模型、等效双孔单渗模型等。

在碳酸盐岩油气藏数学模型研究的基础上,通过大量机理研究,进一步明确了裂缝—基质渗透率级差是选择等效介质数值模拟模型的决定性因素,提出了碳酸盐岩油气藏等效介质数值模拟的裂缝—基质渗透率级差判别方法,形成了等效介质数值模拟技术及其配套技术。在机理研究中,建立了单井条件以及井网条件(包括井网衰竭式开采与水平井注水开发)下不同的流态(涉及纯油藏渗流、纯气藏渗流、油气两相流、油水两相流、油气水三相流等情形)以及不同的原油粘度的等效介质机理模型,共进行了 650 套实例对比计算。通过考察各种模型之间的压力、气油比、含水率、采出程度等动态指标之间的差异程度来考察双孔双渗模型与相应

的等效介质模型之间的接近程度。通过大量机理研究,得出了各种等效介质模型的裂缝—基质渗透率级差判别方法,形成了等效介质数值模拟技术及其配套技术,将双孔双渗介质模型分别等效为裂缝单一介质、基质单一介质、双孔单渗介质等3种等效介质模型。研究得出的等效介质裂缝—基质渗透率级差判别方法,克服了等效介质模型选择的盲目性,使等效介质模型的选择有了科学的量化标准,能够快速实现储层类型多样、裂缝与基质搭配关系复杂、渗透率级差变化大、油气水关系复杂、压力分布变化大、模拟区块大、生产史复杂等各类碳酸盐岩油气藏的历史拟合和方案预测工作。

利用等效介质数值模拟技术及其配套技术,将复杂的碳酸盐岩油气藏数值模拟模型等效为简化实用的模型,改变了复杂碳酸盐岩油气藏数值模拟难的局面。等效介质数值模拟技术在海外多个碳酸盐岩油田得到成功应用,使一批运算极其缓慢或不收敛的碳酸盐岩油气藏实现了高精度的历史拟合和方案预测,使油田开发方案编制、井网部署、油田建产科学合理,大大提高了油田开发效率,在多个油田获得了巨大的经济效益。等效介质数值模拟技术对海内外碳酸盐岩复杂介质油气藏具有广阔的推广应用前景。

第一章 碳酸盐岩油气藏储层地质及渗流特征

碳酸盐岩储层包括石灰岩、白云岩及它们的过渡岩性如白云质灰岩、生物碎屑灰岩和鲕灰岩等。几乎所有的碳酸盐岩都可以成为油气储层。碳酸盐岩储层中的油气储量占世界油气总储量的一半,产量已达到总产量的60%以上。碳酸盐岩的储集空间类型远比砂岩丰富多样,一般除了残留的原生孔隙外,更多的是次生孔隙、孔洞和发育的裂缝。因此它们的成因、结构、大小的变化和连通分布方式多样,其储集性质及渗流特征也复杂多变。

根据碳酸盐岩油气藏储集空间类型的不同,可将碳酸盐岩储层划分为孔隙型碳酸盐岩储层,裂缝型碳酸盐岩储层以及裂缝—孔隙型复合碳酸盐岩储层等。碳酸盐岩储层作为一种多重介质,其裂缝和基质系统的发育程度具有差异,这样就形成了具有不同渗流系统相互联系、相互制约的复杂系统。从该复杂系统中找出控制碳酸盐岩油气藏油气储集和渗流的关键因素,对碳酸盐岩储层类型的判断以及等效介质数值模拟研究十分重要。

第一节 碳酸盐岩油气藏的孔隙

一、碳酸盐岩孔隙的一般特征

碳酸盐岩最常见的是主要由方解石组成的石灰岩和主要由白云石组成的白云岩。纯石灰岩(CaCO_3)的理论化学成分为 $\text{CaO}56\%$, $\text{CO}_244\%$,纯白云岩 $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ 理论化学成分为 $\text{MgO}21.7\%$, $\text{CaO}30.4\%$, $\text{CO}_247.9\%$ 。但是,自然界中的石灰岩和白云岩都不是绝对纯净的,或多或少含有一些其他化学成分。

碳酸盐岩是一种复杂的、多成因岩石类型,它们的孔隙也是如此。碳酸盐岩的复杂性主要表现在两方面——孔隙结构的复杂性和孔隙成因的复杂性。

虽然在碳酸盐岩中也可能见到与许多分选很好的砂岩相似的结构很简单的孔隙系统,但常见的却是大小、形状、连通方式都很复杂的孔隙系统。孔隙大小变化范围很广,小到直径为 $1\mu\text{m}$ 或更小,大到数十米(大型溶洞)。在同一岩组或单个手标本中,各种大小孔隙并存是非常普遍的。孔隙的形态更是千姿百态,连通方式可以是大小不同的只有喉道、渠道、裂隙的某种或它们的任意组合。

孔隙结构的复杂性是由多种因素引起的,这些因素包括碳酸盐颗粒的大小和形状变化很大,生物颗粒内部构造复杂及碳酸盐胶结物和内部沉积物对孔隙的充填的多期性和不均匀性,溶解作用等。它可以形成与沉积颗粒大小、形状极为类似的孔隙,也可以形成与沉积颗粒或成岩组构完全无关的孔隙系统。裂缝在碳酸盐岩中很常见,它们的存在本身就增加了碳酸盐岩孔隙结构的复杂性,而且可以对溶解作用产生强烈影响。

碳酸盐岩孔隙成因的复杂性包括孔隙形成时间的多期性及形成方式的多样性。从沉积前碳酸盐颗粒的形成,到沉积过程中,以及沉积后漫长的成岩后生变化过程,任一时期都可能形成如今有生产意义的孔隙。而形成和改造孔隙的各种作用更是多种多样,如骨骼碳酸盐的分

泌作用,沉积物的压实、收缩、气体溢出、生物潜穴和钻孔、岩石选择性和非选择性溶解、破裂、有机质分解等,都可能形成孔隙。

与砂岩储层相比,碳酸盐岩储层具有很多不相同的特点,原因在于它们的孔隙演化史有很大区别。两类岩石都是从原生孔隙度很高的沉积物演化而来,而且现代碳酸盐岩沉积物的孔隙度一般高于陆源碎屑砂沉积物,但是古代碳酸盐岩的孔隙通常比砂岩的孔隙少得多。因为沉积后,砂岩孔隙的改变主要受胶结作用、部分压实作用影响,一般使原生粒间孔体积减小,而孔隙性质或位置基本不变化。而在大部分碳酸盐岩中,孔隙的压实缩减相当广泛,多数或全部原生孔隙在成岩作用期间消失,新的孔隙要形成,但也会部分或全部被充填。碳酸盐岩和砂岩孔隙之间的主要区别见表 1-1。

表 1-1 砂岩与碳酸盐岩储层储集性质的比较

储集性质	砂岩储层	碳酸盐岩储层
沉积时原始孔隙度	一般 25% ~ 40%	一般 40% ~ 70%
岩石最终孔隙度	一般为原始孔隙度的 1/2 或略多	一般为原始孔隙度的很小部分或近于零
原始孔隙类型	几乎全为粒间孔	粒间孔一般较多,但粒内孔和其他孔隙也很重要
最终孔隙类型	几乎全为粒间孔	由于沉积后的改造,溶洞、裂缝发育,变化很大
影响孔渗因素	与颗粒大小和分选好坏密切相关	受颗粒大小和分选影响甚小,受次生作用影响大
影响孔隙形状因素	主要取决于颗粒形状	很复杂
成岩作用的影响	压实和胶结使原始孔隙度减少近半	很大,可使原始孔隙度完全丧失,胶结和溶解尤其重要
裂缝作用重要性	对储渗性质影响一般不大	对储渗性质尤其渗透率影响巨大
孔渗的镜下目估	半定量目估一般容易	从可半定量目估到不能,孔渗常需仪器测量
岩心分析的适应性	适于做岩心分析	对大孔洞和大裂缝而言,大直径岩心也无法评价
孔、渗相关关系	两者关系较好,与粒度、分选相关	两者关系不定,一般与粒度和分选无关
孔隙结构的均一性	在均匀砂岩中一般有很好的均一性	即使在单一岩体内变化也很大,从较好到极不均一

二、碳酸盐岩孔隙的基本类型

碳酸盐岩的孔隙类型划分方法很多,根据孔隙形成时期及其与成岩作用的关系,将其划分为原生孔隙和次生孔隙两大类。各种孔隙类型如图 1-1 所示。

1. 原生孔隙

在最后沉积作用结束时,沉积物或岩石中就已经存在的任何孔隙都称为原生孔隙,包括沉积前孔隙(即最后沉积作用之前就已经存在的孔隙)和沉积期孔隙(即最后沉积作用过程中形成的孔隙)。原生孔隙形成于碳酸盐沉积质点形成及沉积过程中。

沉积前期,从沉积物质初始形成开始,到这些物质或由这些物质形成的沉积颗粒最后沉积结束。此时间持续时间长短不定,沉积作用缓慢,并伴有对底部沉积物进行间接再冲刷过程,沉积前期可长达几千年。沉积前期形成的孔隙为沉积前孔隙,如生物骨骼个体内存在的蜂窝状孔隙、体腔孔隙、符合颗粒(团粒)内的孔隙。

沉积期包括沉积物或生物骨架在其被埋藏位置最后沉积的时期。这个时期在孔隙形成方面十分重要,但持续时间极短,形成的孔隙为沉积期孔隙。在碳酸盐岩中,沉积期孔隙主要是

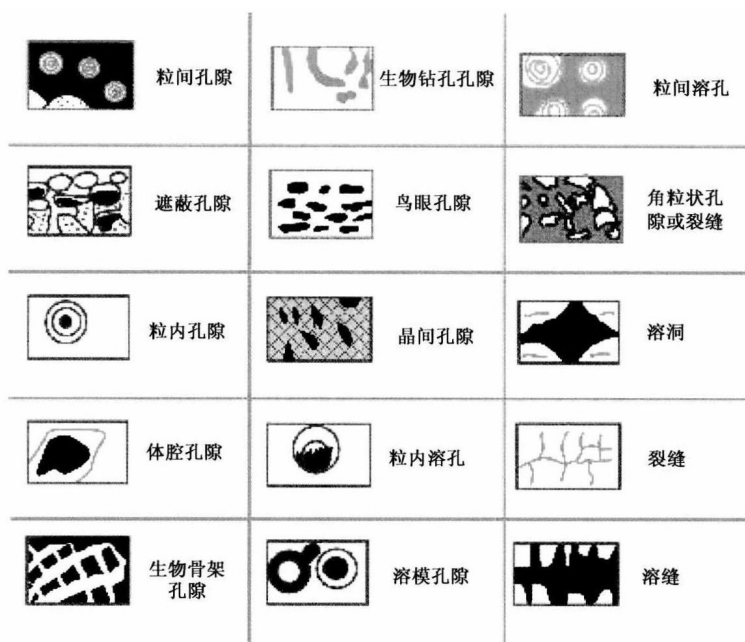


图 1-1 碳酸盐岩孔隙类型示意图(黑影部分代表孔隙)

粒间孔隙,还有生物生长的骨架孔隙;也包括在沉积界面上由于生物钻孔、溶解或其他作用形成的孔隙。

碳酸盐岩的原生孔隙有以下几种:

(1)粒间孔隙:碳酸盐岩颗粒(鲕粒、生物屑、球粒等)之间相互支架形成的孔隙。颗粒的形状、大小、圆度和分选以及堆积方式直接影响其数量和连通性,是沉积期形成的原生孔隙。颗粒越粗,分选越好,灰泥和淀晶含量越少,其孔隙度和渗透率越高。粒间孔隙多以不同程度溶解扩大或胶结物充填的形式出现,胶结物完全充填时则失去其有效性。

(2)粒内孔隙:碳酸盐岩颗粒内部的孔隙。它是在颗粒沉积前就形成的孔隙,如生物体腔孔等,个别鲕粒内部也有这种孔隙。生物灰岩常具有这种孔隙,故又称为生物体腔孔隙。要区别原生的和次生的粒内孔隙有时比较困难,但生物颗粒内的体腔孔肯定是原生的;对于溶蚀形成的粒内孔,若在大部分颗粒内发育,则多为次生的,即大气水溶蚀作用的结果;若只在少数或个别同类型颗粒中发育,则很可能是原生的。粒内孔隙的绝对孔隙度可以很高,但有效孔隙度不一定高,需有粒间孔隙或其他孔隙与之连通才比较有效。

(3)生物骨架孔隙:由原地生长的造礁生物(如珊瑚、有孔虫、海绵等)的骨架支撑所形成的孔隙。各种生物礁灰岩均有发育的生物骨架孔隙,具有很高的孔隙度和极高的渗透率是其主要特点。墨西哥的黄金巷油田即是礁灰岩,其上的阿泽尔4号井日产油曾达 3.7×10^4 t,为世界之最。

(4)晶间孔隙:碳酸盐岩矿物晶体之间的孔隙。其孔隙大小与晶体粗细、晶体均匀程度及排列方式有关。如砂糖状白云岩,由于晶粒粗而均匀且排列不规则,因而具有较高的孔隙度;而颗粒细小的灰泥灰岩,虽然也有晶间孔隙,其数量也多,绝对孔隙度也大,但由于孔径太小,

因此有效孔隙度极低。晶间孔隙可以是沉积时期形成的,但更多则是成岩后生阶段由于重结晶作用、白云岩化作用等形成的。晶间孔隙虽有较高的绝对孔隙度,但若无其他孔隙连通时,其有效孔隙度是很低的。

碳酸盐岩中的原生孔隙除了上述4种外,还有生物钻孔孔隙、鸟眼孔隙等。

2. 溶蚀形成的次生孔隙

次生孔隙又称为溶解孔隙、溶蚀孔隙,或称为溶孔,它是碳酸盐岩被地下水溶蚀的产物。碳酸盐岩由于化学稳定性较差,易受到水流溶蚀形成发育的溶蚀孔隙。溶孔的特点是形状不规则、边缘光滑、大小悬殊。溶蚀孔隙既可产生于成岩后生阶段,也可发生在沉积晚期和成岩早期。

(1)粒内溶孔和溶模孔:粒内溶孔是各种颗粒(或晶粒)内部由于选择性溶解所形成的孔隙,它常是初期溶解作用造成的。当溶解作用继续进行,粒内溶孔进一步扩大到整个颗粒或晶粒时,便称为溶模孔或印模孔。常见的有生物溶模孔、鲕溶模孔(又称为负鲕)、晶体溶模孔等,它们都承袭了生物壳体、鲕粒或晶粒的外形。

溶解作用再进一步发展,超出原来的颗粒范围,形成更大且不规则的孔隙,便是一般所称的溶孔、溶洞了。

(2)粒间溶孔:指各种颗粒之间的溶蚀孔隙,它是由胶结物或基质被溶解形成的,其溶解范围尚未显著涉及周围颗粒。若上述溶解作用显著涉及周围颗粒,便是一般的溶孔、溶洞了。各种颗粒灰岩都可形成一定的粒间溶孔,其中灰泥含量较低的颗粒灰岩在淋滤作用下较易发育粒间溶孔。

(3)其他溶孔溶洞:除上述粒内和粒间两种溶孔外,其余不受原岩组构控制,由溶解作用形成的孔隙,一般称为溶孔,其较大者也常称为溶洞。溶孔和溶洞之间并无明确的界限(有人主张溶孔与溶洞的界限定在5mm或1cm),有些溶洞可大到数米或更大。大的溶洞常发育在厚层质纯的石灰岩或白云岩中,钻遇溶洞时常出现放空、井漏、钻速加快、井漏、井喷等现象。

另外,成岩后生阶段的重结晶作用、白云岩化作用等,都可形成一些次生的晶间孔隙和溶蚀孔隙。有关碳酸盐岩的孔隙类型、形成阶段和岩石类型见表1-2。

表 1-2 碳酸盐岩孔隙类型划分

成因	孔隙类型	形成阶段				常见岩石类型
		沉积前	沉积时	成岩期	后生期	
原生孔隙	粒间孔隙		√			各种鲕粒灰岩、白云岩
	粒内孔隙	√				生物灰岩、鲕灰岩
	生物骨架孔隙	√				礁灰岩
	晶间孔隙		√	√	√	结晶白云岩、石灰岩、白云岩化灰岩
次生孔隙	粒内孔隙			√	√	各种鲕粒灰岩、白云岩, 常见如生物灰岩、鲕灰岩
	粒间孔隙			√	√	
	其他溶孔、溶洞			√	√	质纯粒粗的石灰岩、白云岩

三、碳酸盐岩孔隙发育的控制因素

碳酸盐岩孔隙发育的控制因素较多,主要的控制因素如下。

1. 原生孔隙发育的控制因素

1) 沉积环境

沉积环境,即介质的水动力条件,是影响碳酸盐岩原生孔隙发育的主要因素。碳酸盐岩原生孔隙的类型虽然多种多样,但主要的是粒间孔隙和生物骨架孔隙。这类孔隙的发育程度主要取决于粒屑的大小、分选程度、胶结物含量以及造礁生物的繁殖情况。因此,水动力能量较强的环境或有利于造礁生物繁殖的沉积环境,常常是原生孔隙型碳酸盐岩储层的分布地带,主要有台地前缘斜坡相、生物礁相、浅滩相和潮坪相等。在水动力能量低的环境里形成微晶或隐晶石灰岩,由于晶间孔隙微小,加上生物体少,不能产生较多的有机酸和 CO_2 ,因此不仅在沉积时期,就是在成岩阶段要形成较多的次生溶孔也是比较困难的。

2) 次生变化对原生孔隙的改造作用

碳酸盐岩在沉积时期所形成的原生孔隙会因其后发生的各种成岩后生作用而改变。碳酸盐岩的成岩后生作用有些有利于储层物性的改善,而有些则使储层物性变差。这取决于溶解、重结晶、交代等次生作用对原生孔隙是保留扩大还是淀积充填使之缩小及影响程度。

2. 溶蚀孔隙发育的控制因素

碳酸盐岩溶蚀孔隙的发育取决于以下三方面因素:

(1) 岩石本身的溶解性:碳酸盐岩的溶解性,在地下水一般富含 CO_2 的情况下,与岩石本身的 Ca/Mg 比值成正比,即石灰岩比白云岩易溶。在我国西南地区的试验表明:若以纯石灰的溶解度为 1,则白云岩的溶解度为 0.7 ~ 0.4。但在某些特殊情况下,当地下水富含硫酸根离子时,白云石的溶解度会大于方解石。

此外,碳酸盐岩中的不溶物(主要是粘土)含量,对其溶解度有很大影响,两者成反比关系。如四川乐山震旦系白云岩孔洞发育的层位,其不溶物含量小于 1%;而当不溶物含量超过 10% 时,很少见有大溶孔。一般厚层碳酸盐岩与颗粒较粗的碳酸盐岩易于溶蚀,而薄层碳酸盐岩与颗粒较细的碳酸盐岩不易溶解,这是因为后者粘土质不溶物含量常常较高的缘故。

总的来看,碳酸盐岩的溶解度有以下关系:石灰岩 > 白云质灰岩 > 灰质白云岩 > 白云岩 > 含泥石灰岩 > 泥灰岩。

(2) 地下水的溶解能力:由地下水的性质和运动状况决定。地下水并非纯水,其中常含有 CO_2 , H_2S , HCO_3^- , SO_3^- , O_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} 等溶质或离子,其中 CO_2 成分最普遍,其对碳酸盐岩的溶解能力也最大;反之,当水中缺少 CO_2 时,则发生碳酸盐岩的沉淀作用,析出的碳酸钙晶粒很可能堵塞孔隙、喉道使储渗能力降低。此外,地下水的溶解作用还与地下水的温度、压力有关。一般认为,地温每增加 10°C ,溶蚀程度可能增加两倍。

(3) 地貌、气候、构造因素的影响:溶蚀作用多发生在河谷、湖岸、海岸的汇水区和泄水区。这些地方地下水浸泡时间长,溶蚀作用强烈,常发育很大的溶洞暗河。

在气候上,温暖、潮湿的地区,溶蚀作用最活跃。因为这些地方的温度、湿度、降水量等条件都适于碳酸盐岩溶蚀作用的发生和进行。

从构造角度看,古风化壳地带,由于长期沉积间断,岩石出露地表遭受风化剥蚀,地下水沿断层、裂隙渗入地下,可形成规模巨大的古岩溶带。此外,在褶皱构造的向斜部位、背斜的倾末端或各类构造的交汇部位,往往由于裂缝发育、水流汇集,使得这些部位的岩溶作用比其余部位更为发育。

从岩溶发育的深度看,现代岩溶所及一般在 100 ~ 200m,甚至更浅;古近系、新近系、第四系的岩溶洞穴,其现今深度可达 1000m 左右;地质时代更老的岩溶,深度可达 2000 ~ 3000m。我国任丘油田为碳酸盐岩古潜山储层,其现今深度在 3500m 左右。

第二节 碳酸盐岩油气藏的裂缝

裂缝在碳酸盐岩储层中相当普遍。世界上许多大油气田储层都不同程度地受到裂缝的影响。图 1-2 为伊朗 Asmari 碳酸盐岩储层及其裂缝在电子显微镜下特征,显示裂缝和溶蚀孔很发育。

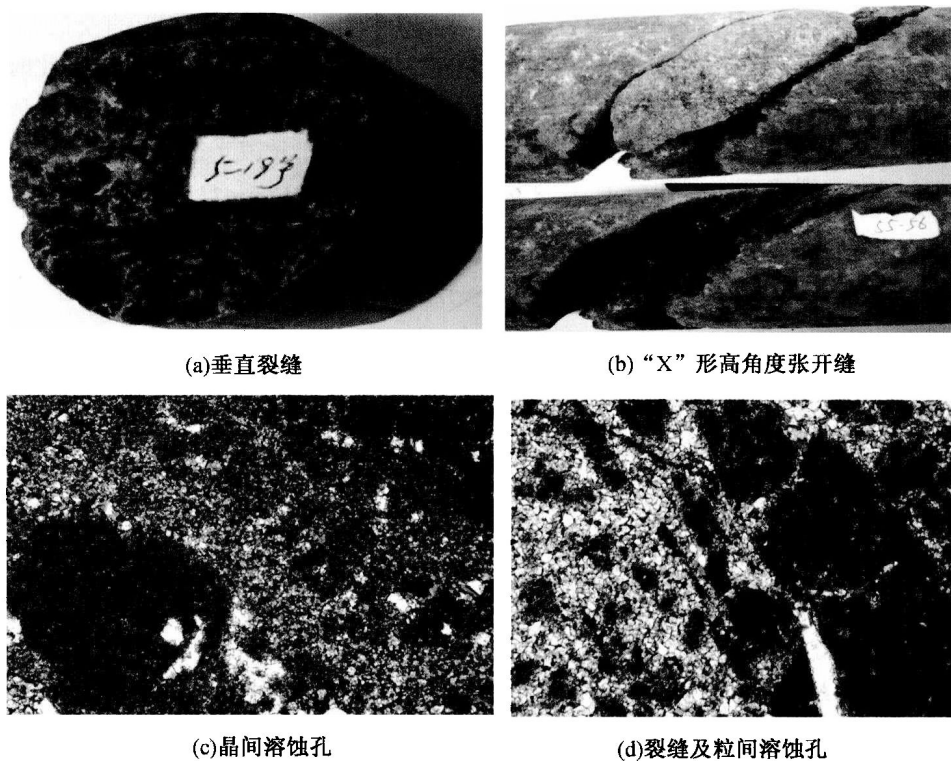


图 1-2 伊朗 Asmari 碳酸盐岩储层裂缝特征

由于碳酸盐岩的早期石化作用,裂缝作用可以在浅埋藏到深埋藏的任何阶段发生。一般裂缝作用是与断层作用、褶皱作用、差异压实作用、盐丘运动以及超压带内水力学的压裂作用有关。裂缝是碳酸盐岩的重要储集空间,并且常常是主要的渗流通道。许多毫无储渗价值可言的碳酸盐岩,只是由于裂缝发育才变得极具储渗意义。因此,对于碳酸盐岩储层来说,裂缝的重要性甚至常常超过孔隙。

另一方面,碳酸盐岩中裂缝有时会被各种矿物充填,如方解石、白云石、硬石膏、方铅矿、闪锌矿、大青石、菱锑矿、萤石等,这是裂缝中流体运动的结果。当地下断层作用和裂缝作用发育,压力降低,CO₂ 释放,就可造成广泛的方解石和白云石的沉淀,因而裂缝的充填作用造成岩石孔隙度和渗透率降低也是可能的。

一、碳酸盐岩的裂缝类型

碳酸盐岩裂缝的分类方法很多,从成因角度分析,可分为以下三类。

1. 构造裂缝

构造裂缝是指岩石受构造应力作用发生破裂形成的裂缝(图 1-3)。碳酸盐岩由于脆性强,在构造应力作用下易于形成裂缝,因此多数碳酸盐岩储层构造裂缝发育。构造裂缝的发育特点与相关应力作用下岩石发生构造变形的情况密切相关,它常常成组地出现在岩层变形单元的一定部位,具有一定的方向性,常连接成规则的网格状。依形成裂缝的应力的性质,构造缝又分为张裂缝和剪裂缝两种(图 1-4)。张裂缝是岩石的张应力超过岩石的抗张强度时岩石破裂形成的裂缝,这种裂缝多是张开的,裂缝面粗糙、无擦痕。在纵剖面上,张裂缝宽度上大下小,呈楔状,向下逐渐消失,很少穿层发育。在张应力作用下形成两组相互直交的张裂缝,但其中一组常不明显。剪裂缝是岩石中剪切应力超过岩石抗剪强度时形成的裂缝,此时常是同时形成具有一定交角的两组。在压扭应力下形成的一组呈闭合状,在张扭应力下形成的一组呈张开状,这两组裂缝常连接成规则的网格。剪裂缝的裂缝面光滑平整,切过岩石颗粒,裂缝面上还常见擦痕。裂缝垂向延伸稳定,常穿层。

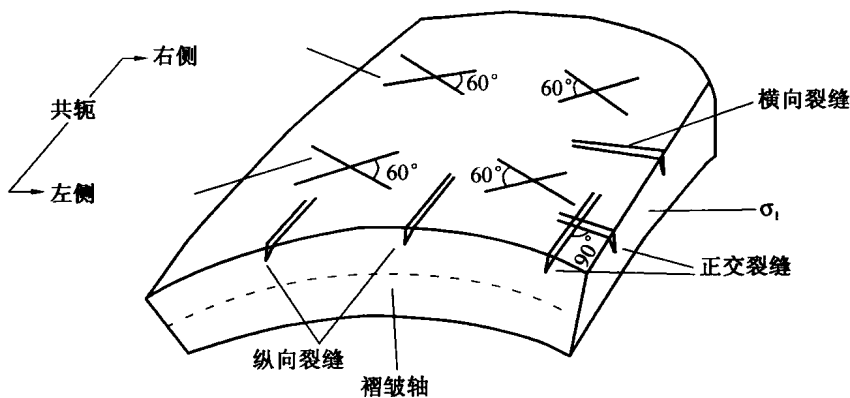


图 1-3 碳酸盐岩裂缝示意图

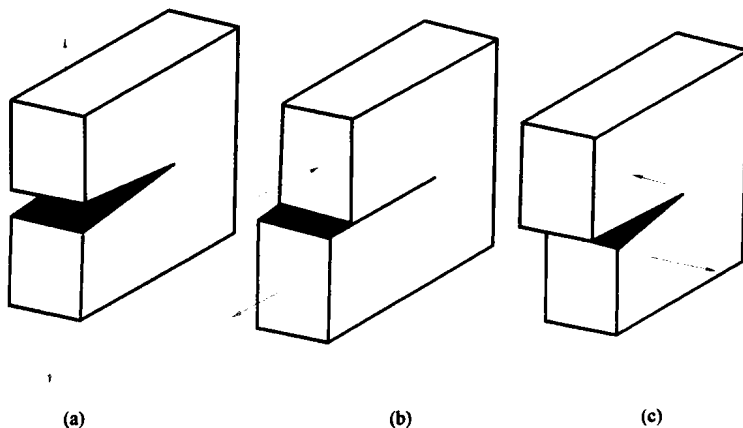


图 1-4 裂缝类型

(a) 张裂缝; (b) 剪裂缝——破裂方向与裂缝前沿平行; (c) 剪裂缝——破裂方向与裂缝前沿正交

碳酸盐岩储层中常常可以见到十分发育的复杂的构造裂缝系统,其中既有同构造期形成的,也有不同构造期形成的,都按一定规律分布,其复杂的组合可呈不规则网状。

构造裂缝是碳酸盐岩储层裂缝中的主要类型,许多溶蚀洞缝常常是在构造裂缝的基础上发生、发展形成的。

2. 成岩裂缝

在成岩阶段,由于上覆地层的压力作用以及沉积物本身的失水收缩、干裂或重结晶等作用,常可形成各种裂缝,这些裂缝都称为成岩裂缝。成岩裂缝的特点,一是分布受层理限制,不穿层,多平行于层面展布;二是缝面弯曲,形状不规则。

3. 风化淋滤裂缝

古风化壳上的碳酸盐岩,由于长期出露地表,遭受风化剥蚀和大气淡水淋滤,常形成发育的风化淋滤裂缝。此类裂缝形式多样,形状奇特,可呈漏斗状、蛇曲状、肠状、树枝状等形态,常与各种溶孔、溶洞相伴生。风化淋滤裂缝的发育分布与距风化壳界面的深度有密切关系:在风化壳顶面以下一定深度范围,裂缝十分发育;当超过一定深度,其风化裂缝大为减少;而在风化壳顶面附近,由于土壤化,裂缝多被充填。

国内目前常用的裂缝参数有以下几个:

- (1) 面密度——单位面积内所测裂缝类型的条数。
- (2) 面长度——单位面积内所测裂缝类型的累计长度。
- (3) 线密度——一切过垂直裂缝组系的单位法线长度的裂缝条数。
- (4) 面裂缝率——单位面积内张开裂缝的面积。

裂缝组是指由最大主应力(剪应力或正应力)的作用形成的一套裂缝,它有一定的方向性。统计面裂缝率时切面应与裂缝面垂直。

二、碳酸盐岩裂缝发育的控制因素

影响碳酸盐岩裂缝发育的控制因素主要有两种:岩性因素和构造因素。在剖面上,裂缝常常发育在一定层位,主要受岩性控制;在平面上,裂缝往往发育在一定的构造部位,主要受构造条件控制。此外,地下水的活跃程度和溶蚀能力也是极重要的因素。

1. 岩性因素

裂缝发育的内因主要取决于岩石的脆性。岩性不同,脆性不一样,裂缝的发育程度也不一样。脆性大的岩层裂缝发育。影响岩石脆性的因素有:岩石成分、结构,岩层厚度及其组合,白云岩化作用等。

1) 岩石成分

各类碳酸盐岩和化学岩的脆性顺序大致如下:白云岩和泥质白云岩 > 石灰岩、白云质灰岩 > 泥灰岩 > 盐岩 > 石膏。

一般来说,白云岩脆性大于石灰岩,因此白云岩中裂缝最发育。盐岩与石膏可塑性大而脆性小不易产生裂缝,因而成为油气的良好盖层或隔层。此外,泥质含量增加时,碳酸盐岩的脆性降低;而硅质含量增加时,脆性增大。

2) 岩石结构

质纯粒粗的碳酸盐岩脆性大,易产生裂缝,并且开缝较多。碳酸盐岩属离子型晶体,其晶

体内的节理面结合力弱,受力时易产生滑动,晶粒越粗,晶粒内各层面的结合力越弱,脆性越大。

3) 岩层厚度及其组合

薄层碳酸盐岩裂缝密度较大,但裂缝规模较小。厚层碳酸盐岩裂缝密度较小,但裂缝规模较大。特别是夹于厚层碳酸盐岩之间的薄层碳酸盐岩层,常常形成发育的裂缝(表 1-3)。

表 1-3 Asmari 灰岩中层厚与裂缝密度的关系(据 McQuillan,1973)

厚度,cm	裂缝密度,条/30.5m	裂缝间距,cm
15~45	62	51
47~76	36	66
76~168	25	127
168~366	20	152
366~762	14	234
762~1524	5	662

4) 白云岩化作用

白云岩化作用使石灰岩转变为白云岩,其晶粒由细变粗,这将使岩石的脆性增加,更易于形成裂缝。

2. 构造因素

影响裂缝发育的构造因素主要是作用力的强弱、性质、受力次数、变形环境和变形阶段等。一般情况下,受力强、作用力大、作用次数多的构造部位,裂缝较发育,反之则差。同一岩石在常温常压的应力环境下裂缝发育,在高温高压环境下则发育较差。在一次受力变化的后期阶段,裂缝密度大,组系多;前期阶段则相应较少。这些条件的时空配置,控制着构造裂缝的发育分布规律。

区域构造对裂缝有明显控制作用,在同一区域应力场的大地区内主要裂缝组系发育特点具有一致性。区域裂缝的发育情况受局部构造的影响较小。在局部构造上,裂缝总是发育在岩石应力最集中、变形剧烈,即岩层有最大曲率的部位。总的看来,在局部构造上裂缝主要发育在背斜的轴部、端部、翼部挠曲以及与断层有关的牵引褶皱处。在向斜(或背斜鞍部)中岩层曲率增加、产状突变部位也是裂缝发育部位。与褶皱伴生的裂缝如图 1-5 所示。一般说来,地下岩石裂缝发育规律与地面露头裂缝发育规律具有相对一致性,在一定程度上地表裂缝资料研究结果可以用来指导对地下裂缝发育情况的研究。但由于风化作用等因素的影响,地表岩石的裂缝密度及张开度比地下岩石裂缝的要大得多。

构造裂缝与断层的關系主要表现为裂缝的力学性质和相邻的断层的力学性质相近似,它们形成于同一应力场。与断层伴生的裂缝如图 1-6 所示。在邻近断层发育的裂缝中总有一组裂缝的走向与断层方向一致,并且在断层附近岩石中裂缝组系增多。羽状裂缝及在牵引褶皱上发育的张性裂缝(纵张缝、横张缝)都发育在断层附近,它们随离断层距离的逐渐增加而消失。