

裂缝性储集层研究理论与方法

——塔里木盆地碳酸盐岩储集层裂缝预测

宋惠珍 贾承造 欧阳健 等著



石油工业出版社

裂缝性储集层研究理论与方法

——塔里木盆地碳酸盐岩储集层裂缝预测

宋惠珍 贾承造 欧阳健 著
魏国齐 曾海容 黄辅容

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩储集层裂缝预测出发,以构造应力分析为基础,依据油田勘探、钻井、测井、试井、岩心裂缝等现场资料,并以岩石力学实验和数值模拟为手段,通过综合定量分析,给出了储集层裂缝定量预测模型,并对轮南奥陶系古潜山和塔中奥陶系石灰岩顶部储集层裂缝进行了预测,通过现场检验,证明本书提出的裂缝预测模型有效。

本书在建立裂缝预测模型中,重视各个交叉学科的结合点及裂缝预测模型各个环节的连接点,强调了裂缝预测模型的理论系统性、方法逻辑性和现场应用性的统一观点。可供石油科学和石油工程领域内教学与科研工作者、研究生、现场工程师及其他相关专业的专家和科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

裂缝性储集层研究理论与方法:塔里木盆地碳酸
盐岩储集层裂缝预测/宋惠珍等著.

北京:石油工业出版社,2001.8

ISBN 7-5021-3476-X

I. 裂…

II. 宋…

III. 裂缝储集层-研究-塔里木盆地

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 051272 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)

北京乘设伟业科技排版中心排版

河北省徐水县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 20 印张 510 千字 印 1—1000

2001 年 8 月北京第 1 版 2001 年 8 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3476-X/TE·2578

定价:40.00 元

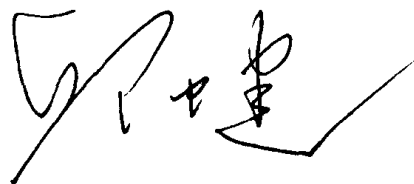
序

20 世纪 90 年代测井技术的迅速发展,大大提高了井壁附近裂缝识别能力,结合岩心裂缝观测,使井筒裂缝分析评价水平取得长足进展。但对整个储集层裂缝评价仍未解决。本文作者正是抓住了这一关键问题进行了长达十年之久的深入研究和探索,取得了极有成效的研究成果。

本专著以塔里木盆地轮南奥陶系古潜山风化壳碳酸盐岩裂缝储集层和塔中低隆中、上奥陶统石灰岩储集层裂缝估计为实例,建立了碳酸盐岩储集层构造裂缝预测模型,涵盖了储集层构造、岩心裂缝观察、岩心样品岩石力学实验、构造应力场、构造裂缝等主要研究内容,凝聚了多学科交叉研究的多项成果,凸现了交叉学科研究的新思路,形成一套裂缝预测的系统工程。这一研究思路和方法在国内外石油科学和石油工程领域尚属首次创建,即把储集层裂缝的定性描述推进到理论模型定量预测的水平,并在轮南和塔中获得了检验,为裂缝性储集层的勘探工作开辟了一条崭新的技术途径。

书中包含了许多新的中间研究成果及丰富的基础资料,既突出了以裂缝预测模型为主题的多学科研究新思路和新方法,也体现了每个学科的特点和自身的系统性,反映了多学科相互交叉和相互渗透的丰富题材和内容。它既适合于专门研究裂缝问题的专家阅读,也适合于从事边缘学科研究工作者参考。

本书不但突出了储集层裂缝预测的理论和方法,也初步建立了裂缝预测的实际操作技术,全书内容丰富,文图并茂。它的出版将会促进石油科学和石油工程技术的发展。我衷心祝贺本书的出版,并预祝它的出版将会受到石油科学和有关领域的科学工作者欢迎。



4.18.2001.

前 言

随着我国油气田勘探技术的迅速发展,不断发现裂缝性油气田,尤其是 20 世纪 80 年代末至 90 年代初期,先后在塔里木盆地轮南奥陶系古潜山和塔中奥陶系石灰岩顶部发现碳酸盐岩裂缝油气层,并确立构造裂缝为主要的油气储集空间。为此,塔里木石油勘探开发指挥部在“八五”国家重点科技攻关项目《塔里木盆地油气资源》中设立“轮南地区奥陶系碳酸盐岩储集层裂缝发育的综合定量研究”子专题。“八五”科技攻关计划完成之后,为进一步提高裂缝定量预测方法的理论水平,并同时应用于裂缝储集层预测,塔里木石油勘探开发指挥部又在“九五”国家重点科技攻关项目《塔里木盆地石油天然气勘探》中设立“塔里木盆地塔中地区碳酸盐岩储集层裂缝预测”子专题。本专著的主要内容涵盖了这两个子专题的研究成果。当然,本书也不是上述两个研究报告的累加,而是以两个研究成果为基础,从储集层裂缝系定量预测理论与方法的系统性和逻辑性考虑,对已有的研究内容做了补充和延伸,进一步对“八五”和“九五”两项研究成果从理论上加以提高。

本专著从确定性模型出发,对储集层裂缝预测的理论和进行了较为系统的探索性研究,无论从思路还是研究方法上,均区别于油田传统裂缝预测技术,研究内容涉及到若干学科和领域,可谓储集层裂缝预测的系统工程。但其核心内容是建立裂缝系预测模型,建模原则立足于现场实际资料,并从丰富现场资料抽象出概念化模型,通过实验与现场验证,上升为理论模型。由于裂缝性储集层的复杂性,决定了本书裂缝预测模型的物理特征强于数学概念,也就是模型的实用性更强于抽象性,这正是本专著裂缝预测模型研究的特色。

在完成上述两项专题研究过程中,先后有很多专家、学者、研究生和技术人员参与课题研究工作。特别是塔指勘探研究中心(原地质研究大队)测井室和塔中室给予了极大支持,为完成课题任务起到了保证作用。林纯增、关睢、李良辰、肖承文、吴远东、魏涛、吴胜和、王贵文、张永忠、刘胜、杨海军、刘云明等都直接参与完成基础资料分析工作。除此以外,直接参与本专著的理论与方法研究的专家、学者、研究生和技术人员如下:

孙君秀、任金卫、张流、刘洁、赵阿兴、兰印刚、徐鹏飞、袁岩光、王喜双、王玉玲、王春容、陈松源等人,他们在专题研究中分别承担了地质构造模型、岩石力学实验、数值模拟计算、岩心裂缝统计与分析等重要工作,做出了重要贡献,在此,作者一并致谢。

除上述直接参加本专题科技攻关工作人员以外,在执行攻关计划过程中,我所原所长马宗晋院士、副所长刘国栋教授、业务处主管负责人王连芳、塔指勘探中心主任胡云阳、王照明、“八五”和“九五”项目管理办公室负责人姚慧君、张益铄等对完成专题计划给予了极大的支持和帮助,作者们表示衷心感谢。

目 录

序

前言

第一章 裂缝性储集层	(1)
第一节 裂缝性储集层特征与分类	(1)
一、裂缝性储集层特征	(1)
二、裂缝性储集层分类	(2)
三、影响裂缝性储集层孔渗性能的因素	(10)
第二节 储集层裂缝系的概念、成因与分类	(12)
一、储集层裂缝系的概念与意义	(13)
二、储集层裂缝系的成因	(13)
三、储集层裂缝系的分类	(22)
第三节 储集层裂缝系的性质	(26)
一、单轴(重力)载荷模型的变形破裂特征	(26)
二、岩石样品在不同围压(深度)下变形破裂特征	(32)
三、储集层裂缝系的性质	(45)
第二章 裂缝性储集层岩心裂缝与岩心试件裂缝的观测与研究	(47)
第一节 碳酸盐岩储集层岩心裂缝观测与统计分析	(47)
一、岩心裂缝观测描述方法与资料处理	(47)
二、岩心裂缝几何参数及其之间相互关系	(81)
三、岩心裂缝发育程度及其有效性统计分析	(88)
第二节 岩心和岩心实验试件裂缝密度及裂缝孔隙度	(92)
一、裂缝密度及裂缝孔隙度的定义	(92)
二、裂缝体积密度及裂缝孔隙度的一个计算模型	(93)
三、岩心实验试件裂缝体积密度和裂缝孔隙度与试件应变能密度间关系的回归和相关分析	(95)
第三节 分形方法在统计岩心裂缝分布密度中的应用	(103)
一、分形方法引进岩心裂缝分布密度统计分析	(103)
二、岩心裂缝分布密度的分形统计方法	(105)
三、轮南奥陶系碳酸盐岩岩心裂缝分布密度三种统计方法结果对比	(109)
第四节 储集层裂缝发育程度与岩性、构造和深度的关系	(110)
一、裂缝发育程度与储集层岩性和岩石结构的关系	(110)
二、裂缝发育程度与构造的关系	(113)
三、裂缝发育程度与储集层埋藏深度的关系	(114)
第三章 井孔周围应力与裂缝研究	(117)
第一节 井孔稳定性分析	(117)
一、井孔周围应力状态	(117)

二、井孔失稳准则	(120)
三、井孔崩落机制	(125)
四、井孔轨迹对井孔稳定性的影响	(126)
第二节 井孔周围地应力测量与估算	(127)
一、地应力场研究现状	(127)
二、两种有效的现场地应力测量技术	(128)
三、井孔周围地应力的反演方法	(132)
第三节 逆冲断层带井孔周围地应力测井分析方法	(142)
一、逆冲断层带测井响应特征	(142)
二、利用数值分析技术计算井孔周围地应力状态	(149)
第四节 井孔裂缝观测与分析	(156)
一、井孔裂缝观测方法	(156)
二、储集层裂缝测井响应特征	(158)
三、钻井诱导裂缝的测井响应特征	(161)
四、碳酸盐岩储集层裂缝参数测井估计	(165)
第四章 构造与构造应力场	(169)
第一节 构造样式与构造应力场的概念与分类	(169)
一、构造样式的概念与分类	(169)
二、构造应力场的概念、分类与研究的意义	(170)
第二节 构造与构造应力体系之间的相互关系	(173)
一、构造样式对区域应力场作用的响应特征	(174)
二、从构造样式估计区域应力场方向	(175)
三、从构造几何形态反演区域应力场	(178)
第五章 地质构造模型与模拟构造应力场	(185)
第一节 地质构造模型的建立	(185)
一、地质构造模型的研究内容、意义与方法	(185)
二、邢台地区三维构造地质模型	(186)
三、轮南地区三维古构造地质模型	(194)
四、塔中地区三维古构造地质模型	(203)
第二节 构造应力场的数值模拟方法	(216)
一、构造应力场定量分析的数值方法概述	(217)
二、有限单元方法用于计算构造应力场的若干问题	(219)
第三节 构造应力场的几种特殊数值模拟方法	(225)
一、固体接触问题的有限单元模型	(225)
二、位错问题的有限单元模型	(232)
三、储集层古构造的组合单元模型	(236)
第六章 储集层构造裂缝的定量预测	(243)
第一节 储集层构造裂缝的定量预测方法	(243)
一、储集层潜在张裂缝(含张剪裂缝)判别准则	(243)
二、储集层潜在剪裂缝的判别准则	(248)

三、储集层潜在裂缝系的预测方法与步骤	(250)
四、储集层潜在裂缝系预测实例	(250)
第二节 储集层裂缝体积密度定量预测方法	(255)
一、储集层裂缝孔隙度的计算模型	(255)
二、储集层裂缝密度的计算模型	(258)
三、储集层裂缝体积密度预测方法	(260)
四、裂缝体积密度预测模型的优点与限制	(265)
第七章 轮南地区奥陶系灰岩储集层顶部裂缝预测与检验	(267)
第一节 轮南地区奥陶系灰岩储集层顶部古构造应力场特征	(267)
一、轮南地区古区域应力场的反演结果	(267)
二、轮南地区奥陶系潜山顶部板模型趋势面法模拟的古应力场分布特征	(268)
三、组合单元模型在轮南奥陶系灰岩储集层古应力场模拟中的应用	(268)
四、三维断层位错有限单元模型在轮南奥陶系灰岩储集层古应力场模拟中的 应用	(270)
五、轮南地区奥陶系潜山顶部应力测量结果	(274)
六、对三种模型的检验与其有效性估计	(275)
第二节 轮南地区奥陶系灰岩储集层裂缝预测及其检验	(276)
一、轮南地区奥陶系潜山顶部裂缝发育程度与方向预测	(277)
二、轮南地区奥陶系潜山顶部裂缝体积密度预测	(283)
三、两类裂缝预测模型的意义及预测结果的可对比性	(287)
第八章 塔中地区奥陶系灰岩储集层裂缝预测与检验	(288)
第一节 塔中地区奥陶系灰岩储集层古构造应力场特征	(288)
一、塔中地区奥陶系古区域应力场和局部构造应力场反演结果	(288)
二、塔中地区奥陶系灰岩储集层古构造应力场数值模拟结果	(292)
三、塔中东部奥陶系灰岩储集层古构造应力场数值模拟结果	(294)
四、塔中 45 井区奥陶系灰岩顶部古构造应力场反演结果	(296)
第二节 塔中地区奥陶系灰岩储集层裂缝定量预测与检验	(297)
一、塔中奥陶系灰岩储集层裂缝发育程度预测	(297)
二、塔中东部奥陶系灰岩储集层裂缝发育程度预测	(300)
三、塔中西部 TZ45 井区奥陶系灰岩储集层裂缝发育程度预测	(302)
四、塔中隆起奥陶系灰岩储集层裂缝方向预测	(303)
参考文献	(305)
后记	(311)

第一章 裂缝性储集层

第一节 裂缝性储集层特征与分类

一、裂缝性储集层特征

1. 储集层的基质物性特征

碳酸盐岩储集层主要是裂缝性储集层。碳酸盐岩储集层的储集岩类主要由石灰岩和白云岩及其过渡类型构成。

碳酸盐岩的结构组分包括颗粒、晶粒、泥、生物格架、胶结物等。物性分析表明,碳酸盐岩储集层具有特低基质孔隙度和特低基质渗透率。塔里木盆地内广泛发育寒武—奥陶系碳酸盐岩储集层系,塔中1井揭露寒武系765.9m,为灰色泥晶、粉晶云岩和泥质云岩,基质物性差,基质孔隙度为0.4%~0.8%,渗透率小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。轮南地区奥陶系灰岩段储集层基质孔隙度和基质渗透率都很低,对轮南1,3,5,10井该段岩性分析指出,基质孔隙度为0.62%~1.48%,渗透率小于 $0.16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其中轮南3井和轮南5井的渗透率大于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。因此,碳酸盐岩储集层的原生孔隙基本上无储集意义。除碳酸盐岩以外,还有占比例很小的其他岩类裂缝性储集层,例如,基底火成岩和变质岩古风化壳裂缝性储集层,致密砂岩、泥岩裂缝性储集层等。这类裂缝性储集层有华北盆地兴隆台地区的太古界花岗岩、中生界花岗岩角砾岩和火山喷发岩组成的风化壳储集层系,准噶尔盆地克拉玛依油田志留—泥盆系变质岩基底风化带及火烧山油田砂泥岩裂缝储集层,吐哈盆地丘陵油田中侏罗统砂岩裂缝储集层等。这些岩类裂缝性储集层的基质物性均很差。

2. 储集层的储集特征

1) 储集空间种类多样化

裂缝性储集层的储集空间远比孔隙性储集层复杂,裂缝、溶孔、溶洞、基质孔隙及其相互连通形成的网状裂缝系统为主要储集空间。

塔里木盆地轮南地区奥陶系潜山顶部碳酸盐岩储集空间主要是裂缝、溶孔、溶洞型。裂缝分布广,连通性较差,各自成为独立系统,纵向上分布范围小,主要集中在潜山顶部100m以内,裂缝具低孔隙高渗透率特点,截止到1999年12月,已获高产油气井有LN1、LN8、JF123、JF126、JF128、LN44、LN54、LN14、LN17、LG1、LG2、S46、S47、S48等14口井。塔中地区奥陶系中奥陶统灰岩储集层粒内溶孔(洞)发育,同时沿微裂缝、缝合线扩大溶蚀(洞),形成串珠状或囊状孔隙。或者说构造裂缝多数被后期溶蚀扩大,形成串珠状的裂缝—溶孔(洞)。孔隙形状不规则,主要有溶蚀缝、裂缝溶孔(洞)、缝合线溶孔等。TZ161、TZ16、TZ44、TZ24等4口井均属这类储集空间。

中东沙特阿拉伯的主要产层之一,即上侏罗统阿拉伯带裂缝性储集层以原生和次生粒间、粒内、晶间孔隙发育为主,孔隙空间主要由白云岩化和鲕粒所形成。裂缝作用相对较差。

裂缝贯穿溶洞,形成溶洞—裂缝储集空间。四川二叠系阳新统高产井中,有77%的井为

大裂缝贯穿大溶洞形成的储集空间。又如塔中 45 井裂缝、溶洞均很发育。沿石灰岩发育的不整合面形成的岩溶,在塔里木盆地轮南奥陶系潜山顶部普遍发育,具有断隆型岩溶的典型特征。LN8 井洞穴十分发育,储集层渗透率高达 $345 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,影响半径约 36m,获高产油气流。

以上所述指出,裂缝性储集层的储集空间具有多种类型,包括孔隙、裂缝、溶孔(洞)以及它们之间的相互耦合所形成的裂缝—孔隙、裂缝—溶孔(洞)、溶洞—裂缝等多种形式的储集空间。

2) 储集空间结构形态的复杂性和空间变化的突变性

裂缝性储集层储集空间具有结构形态上的复杂性和空间变化的突变性。

(1) 储集空间结构形态的复杂性。

碳酸盐岩储集层不仅有众多样式的原生孔隙结构,而且次生作用的影响很大,包括溶蚀作用、白云岩化作用、构造应力作用等。这些次生作用不但产生新的孔隙结构,即裂缝和溶孔(洞),同时还对原有孔隙结构产生重大改造。例如,白云岩化发生的差异溶蚀作用,有利于次生溶孔(洞)发育。构造应力作用形成的构造裂缝,受构造样式、区域应力、储集层岩性三个基本因素控制,不同的构造样式及不同的构造部位,即使在同一期构造应力场作用下,所产生的构造裂缝差别很大。裂缝形成后,受风化、剥蚀及溶蚀作用的改造使其更为复杂。

(2) 储集空间分布的突变性。

与碎屑岩相比,碳酸盐岩储集空间受到更为强烈的成岩作用和后期构造改造作用的影响,使储集层储集空间的分布没有连续性。在裂缝、溶孔(洞)发育区与不发育区之间往往没有过渡性。例如, LN8 井是高产油气井,其储集空间是溶蚀洞穴,但距 LN8 井 1km 的 LN34 井却为干井。这种现象在其他钻达奥陶系的井中也有类似表现。

综上所述,以碳酸盐岩储集层为代表的裂缝性储集层的储集空间具有三点特征:①储集空间往往是复合类型,即孔隙、裂缝、溶孔(洞)同时存在;②裂缝总是存在,并且起着贯穿孔隙、溶孔(洞)的作用;③储集空间结构形态复杂,尺度相差较大,空间展布不连续。

二、裂缝性储集层分类

按储集层岩性,裂缝性储集层基本上可分为三种储集层类型,即碳酸盐岩裂缝性储集层、砂泥岩裂缝性储集层及其他岩类裂缝性储集层。以下重点讨论碳酸盐岩储集层。

1. 碳酸盐岩裂缝性储集层

碳酸盐岩储集层包含两种基本类型,即石灰岩储集层和白云岩储集层。按照储集空间及其组合类型,可将碳酸盐岩储集层分为四种基本类型:

1) 孔隙型储集层

这类储集层以原生和次生粒间、粒内、晶间等孔隙发育为主,裂缝作用相对较差(西北大学地质系石油地质教研室,1979)。

(1) 原生孔隙。

碳酸盐岩中原生粒间孔隙、粒内孔隙、晶间孔隙等孔隙发育主要受岩性及沉积环境控制。常见于亮晶棘屑、藻屑灰岩、微亮晶鲕粒灰岩中,原生孔隙一般占储集空间很小,基本上无储集意义。但由于后期成岩作用,胶结物被溶蚀而形成粒间溶孔,对次生孔隙发育起决定性作用。所以近年来加强了对碳酸盐岩沉积环境和岩相古地理的研究(何远碧等,1996;徐志强,1992)。

(2) 次生孔隙(洞)。

碳酸盐岩储集层中次生孔隙(洞)往往在原生孔隙的基础上发育。以粒间溶孔、晶间溶孔、

粒内溶孔最为常见,可见溶蚀孔(洞)直径大于周围的颗粒直径。这类次生溶孔(洞)多发育在亮晶灰岩和白云岩中,是碳酸盐岩储集层中主要的孔隙(洞)型储集空间。

中东沙特阿拉伯的主要产层之一,上侏罗统阿拉伯带属于这种类型,其孔隙空间主要由白云岩化和鲕粒所形成,孔隙度可达 20% 以上,渗透率几十到几百毫达西,最高可达 $(1400 \sim 1500) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。四川川南下三叠统嘉陵江组嘉 1~嘉 2 段主要孔隙空间是藻白云岩和鲕白云岩中发育的粒间或粒内溶孔,并有裂缝发育,如沈么山气田孔隙度 5.89%~11.84%,渗透率 $2.14 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,成为工业气层。华北盆地黄骅拗陷,下第三系沙河街组的粒屑灰岩包括鲕灰岩、内碎屑灰岩和生物碎屑灰岩,原生粒间和次生粒间、粒内溶蚀孔隙起主要作用,孔隙度在 15% 以上。

塔里木盆地塔中 I 号断裂上的 TZ161 井是典型的碳酸盐岩孔隙型储集层。TZ161 井的碳酸盐岩岩性主要为亮晶藻砂屑灰岩、亮晶砂屑灰岩、亮晶生屑灰岩、亮晶砾屑灰岩和亮晶鲕粒灰岩。形成于陆棚浅滩相和斜坡相带。储集空间为粒内溶孔、粒间溶孔、晶间溶孔,岩心上表现为针孔状,孔径小于 2mm。次要储集空间为溶蚀缝合线和构造微裂缝。总孔隙度为 3%~8%,裂缝孔隙度很低($<0.2\%$)。溶蚀孔的形成受原生孔隙控制,后生溶蚀作用改善了孔隙度和渗透率。

对塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩物性分析表明,由原生孔隙和次生溶孔(洞)构成的基质孔隙度一般在 1%~4%,渗透率多小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,在有裂缝连通时,渗透率可达 $(4.7 \sim 9538.09) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (见表 1—1—1)。

表 1—1—1 塔里木盆地各地区奥陶系碳酸盐岩基质物性分布

地 区	岩 性	孔隙度 (%)			渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}$)		
		最大	最小	一般	最大	最小	一般
轮 南	砂屑灰岩与泥—粉晶灰岩	4.41	0.2	<1.0	37	<0.01	
塔 中	白 云 岩	24.24	0.44	1~3	9538.09	<0.01	0.01~2
英 买 力	生屑、藻屑灰岩与泥—粉晶灰岩	8.0	0.6	1~4	4.70	0.01	0.01~1

表 1—1—1 指出,白云岩的最大孔隙度和渗透率远高于石灰岩。但从总体上看,石灰岩和白云岩的基质物性差别不大,这是由于白云岩中容易发生差异溶蚀作用,有利于次生孔隙(洞)的发育所致(徐志强,1992;郭建华、覃汉生,1992)。

2)裂缝型储集层

储集空间以裂缝为主,孔隙和溶洞较少。由于碳酸盐岩的易裂性,裂缝储集层是碳酸盐岩中极为常见的一种储集类型。裂缝既作为主要的油气储集空间,又是储集层中油气的渗滤通道,当裂缝之间相互连通形成裂缝网络而又没被全充填时,即是良好的油气储集层。

碳酸盐岩储集层的裂缝宽度通常在 0.01~0.1mm 之间,图 1—1—1 是塔里木盆地轮南和塔中地区奥陶系碳酸盐岩储集层 5 口钻井岩心

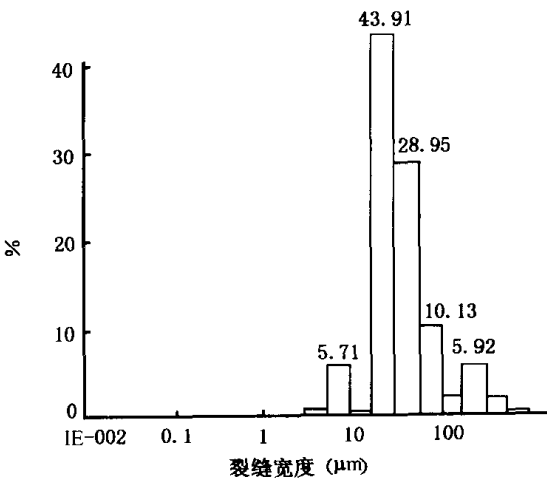


图 1—1—1 轮南和塔中地区奥陶系碳酸盐岩储集层 5 口油气井岩心裂缝宽度频率直方图

裂缝宽度频率直方图。可以看出,裂缝宽度在 $20\sim 100\mu\text{m}$ 范围内的占 84%,落在其他宽度范围的不到 20%。

储集层裂缝密度极不均匀,裂缝形态表面上看杂乱无章,没有规律性。但实际上是遵循一定的破裂机理,由不同级次的破裂组成的裂缝系统。图 1—1—2 是轮南奥陶系潜山顶部碳酸盐岩储集层 6 口钻井岩心裂缝素描图。可以看出,裂缝分布疏密差异很大。形态类似蚯蚓状。延伸长度相差较大。裂缝产状有水平缝、垂直缝、斜交缝。部分裂缝被方角石或泥质充填。

总体上看,油气储集层裂缝与断层、节理对比是微裂缝,但与镜片下观察的微裂缝对比,又是相对的宏观裂缝。从破裂机理上看,储集层裂缝系统既与宏观构造有关,如褶皱和断裂,又与微观结构有关,如岩石结晶粒度。这种裂缝对储集层内流体的储集与渗滤具有重要意义,它既能增加储集层的孔隙度和渗透率,也增强了储集层渗透率的非均质性。

3) 溶洞型储集层

储集空间以各种大小不同的溶洞为主。

溶蚀作用是在碳酸盐岩中普遍进行的一种成岩过程。但溶蚀作用既要求具有溶解条件的成岩环境,又需要先期的可渗透层,以利于溶解介质的流动。因此,溶蚀洞往往是在孔隙和裂缝的基础上发展而成,并使原储集空间进一步得到改善,即溶洞型储集空间的发育有继承性的特点。这一特性在塔里木盆地几个地区的奥陶系碳酸盐岩储集层中都存在。在轮南地区沿加里东期的张裂缝广泛发育溶蚀洞,并被方解石充填,使这些早期形成的裂缝变成无效储集空间,例如轮南 12 井(见图 1—1—3)。在钻井未进入溶洞带前,岩屑中的方解石含量可高达 50% 以上,说明其下面有溶洞存在。也有有效溶洞,例如轮南 8 井在 5230~5266m 井段,在钻井过程中放空 0.6m 和 4.8m,漏失钻井液 300 余立方米,洞径大于钻头直径。塔中 16 井 4256.74~4258.42m 井段,在钻井过程中放空 1.68m,为一大型溶洞,是主要储层空间。

4) 孔缝洞复合型储集层

这类储集层的储集空间为各种成因的孔隙裂缝、溶洞的耦合形式。

(1) 裂缝—孔隙型储集层。

储集空间为各类孔隙和裂缝。基质岩块的原生粒间和次生粒间、粒内溶蚀孔隙为主要的储集空间,裂缝除作为部分储集空间以外,主要起连通基质岩块孔隙的作用,提高储集层渗透率。这是碳酸盐岩中广泛分布的一类重要储集层。如塔里木盆地塔中地区奥陶系 TZ161 井也具有裂缝—孔隙型储集特征,粒内、粒间、晶间溶孔为其主要的储集空间外,次要储集空间为微裂缝,同时沿微裂缝、缝合线扩大溶蚀空间,形成串珠状或囊状孔—缝网络。TZ1 井 3850~3856.50m 井段发育蜂窝状溶蚀孔与不规则溶蚀缝连通的储集空间(见图 1—1—4)。轮南奥陶系潜山顶部碳酸盐岩的主要储集类型之一就是裂缝—孔隙型。如高产油气井 LN14、LN44、JF123、JF126、JF128、LN17、LN54 等井。

(2) 裂缝—溶洞型储集层。

各种大小不同的溶洞为主要储集空间,孔隙不发育,但裂缝发育。裂缝将溶洞贯穿,连成不规则的储集体。

溶洞的发育往往与沿张裂缝的扩溶有关,常沿裂缝的延伸方向及裂缝附近分布,而且与构造有关的裂缝发育带,还可以控制岩溶的分布与发育程度,这在轮南地区表现尤为明显。所以,轮南地区奥陶系古岩溶系统具有断隆型岩溶的典型特征。若沿裂缝的溶蚀洞被方解石或泥质充填,但裂缝只部分充填时,实际有效储集空间以裂缝为主。例如,轮南 10 井 5798~5801m 井段有一组高角度剪切缝切过一条斜交的方解石充填的张裂缝,剪裂缝含油(见图 1—

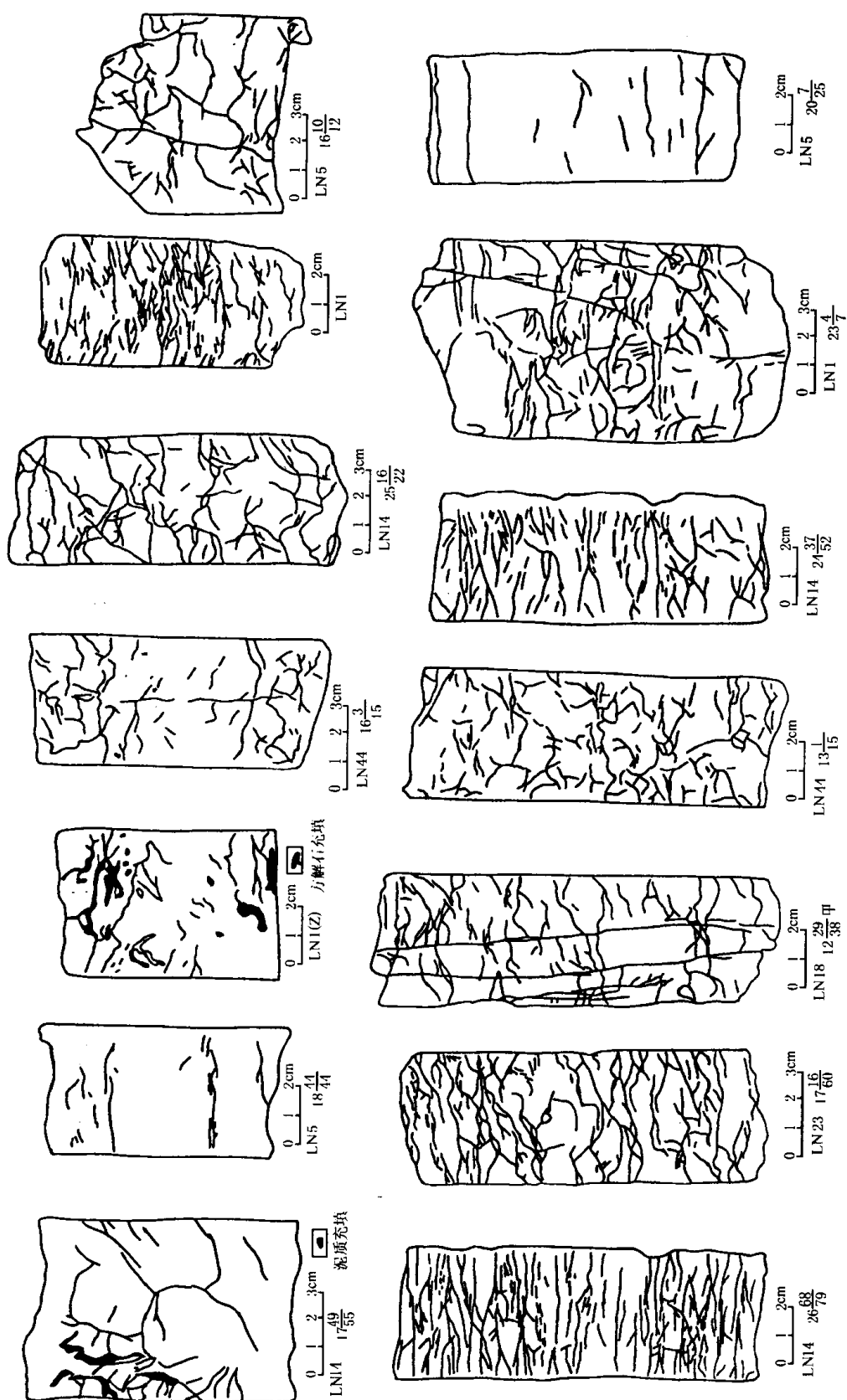


图1-1-2 轮南六口井钻井岩心裂缝分布素描图



图 1—1—3 轮南 12 井 5289.20~5294.22m 一条锯齿状张裂缝为方解石充填后被灰绿色泥质再充填

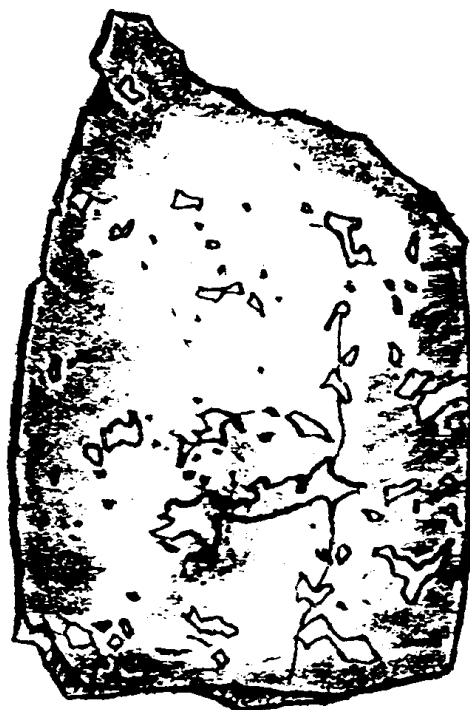


图 1—1—4 塔中 1 井 $26\frac{8}{28}$, 3850~3856.50m 井段蜂窝状溶孔与不规则溶缝连通

1—5)。塔中 16 井 4263~4253m 井段溶蚀洞穴(直径大于 1m)充当储集空间,少数微裂缝(宽度 0.1~0.2mm)相互勾通形成渗流通道。塔中 44 井 4879.02~4888.02m 井段普遍发育溶洞,洞径 5mm 左右。有少量半充填缝,沿缝发育溶洞,统计面孔率达 11%。原生粒间孔和生物体腔孔是溶洞形成的基础,裂缝起传导水的作用。四川二叠系阳新统所获得的高产井中,有 77% 的井有大裂缝和大溶洞。所以,溶蚀洞多数是沿着裂缝发育的,洞缝常常共存(王振宇等,1996;白玉雷等,1992)。



图 1—1—5 轮南 10 井 $29\frac{10}{15}$, 5798~5801m 一组高角度剪切缝切过一条斜交的方解石充填缝

以上把碳酸盐岩裂缝性储集层分为四种类型。由于碳酸盐岩易溶性和易裂性的特点,不同类型储集层之间存在相互关联的依存关系,即原生粒间孔和粒内孔是溶洞和裂缝发育的物质基础,沿先存裂缝往往发育溶洞,同样,沿溶洞周围岩石强度降低,容易产生破裂形成裂缝。所以,碳酸盐岩往往是复合型的储集空间。上述四种类型之间并非存在严格界限,如塔中 161 井既具有孔隙型储集特征,又具有裂缝—孔隙型特征。又如塔中 44 井既具有溶洞型储集特征,又具有裂缝—溶洞型特征。另一方面,我们对于复合型储集层的进一步分类,没有依据储集效率的主次关系,仅根据储集空间类型,达到分类简化的目的。

表 1—1—2 给出塔里木盆地碳酸盐岩储集层部分钻井的储集空间类型。

表 1—1—2 塔里木盆地四个油田碳酸盐岩储集空间类型

地区	井 号	层位	岩 性	储集空间类型
轮南	轮南 1 井	O ₁	石灰岩	裂缝型
	轮南 4 井	O ₁	石灰岩	裂缝型
	轮南 8 井	O ₁	石灰岩	裂缝—溶洞型
	轮南 10 井	O ₁	石灰岩	裂缝型
	轮南 11 井	O ₁	石灰岩	裂缝型
	轮南 14 井	O ₁₋₂	石灰岩	裂缝—孔隙型
	轮南 17 井	O ₁	石灰岩	裂缝—孔隙型
	解放 123 井	O ₂	石灰岩	裂缝—孔隙型
	解放 126 井	O ₂	石灰岩	裂缝—孔隙型
	解放 128 井	O ₂	石灰岩	裂缝—孔隙型
英买力	英买 1 井	O ₂	石灰岩	裂缝—溶洞型
	英买 4 井	O ₁	灰质云岩	裂缝—溶洞型
	英买 7 井	O ₁	白云岩	裂缝—孔隙型
雅克拉	沙参 2 井	Є ₃	白云岩	裂缝—孔隙型
	沙 7 井	Є ₂	白云岩	裂缝—孔隙型
	沙 4 井	Z ₂	白云岩	裂缝—孔隙型
塔中地区	塔中 1 井	O ₁	白云岩	裂缝—孔隙型
	塔中 161 井	O ₁₋₂	砂屑灰岩	孔隙型或裂缝—孔隙型
	塔中 15 井	O ₁₋₂	砂屑灰岩	裂缝型
	塔中 30 井	O ₁₋₂	生屑灰岩	裂缝—溶洞型
	塔中 16 井	O ₁₋₂	生屑灰岩	裂缝—溶洞型
	塔中 24 井	O ₁₋₂	致密灰岩	裂缝型
	塔中 44 井	O ₁₋₂	生屑灰岩	裂缝—溶洞型
	塔中 45 井	O ₁₋₂	生屑灰岩	裂缝—溶洞型

2. 砂泥岩裂缝性储集层

在中低渗透油田开发中砂泥岩储集层的裂缝作用不可忽视。吐哈盆地丘陵油田中侏罗统储集层物性以中孔、中渗为特点,同时裂缝也十分发育。储集层岩性划分为两类:(1)泥岩类包括泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩等;(2)砂岩类包括细砂岩以上的各种砂岩、砾岩及钙质砂岩。岩心观察给出钙质砂岩裂缝最发育,其次是泥质岩类,砂岩裂缝发育相对较弱。按岩

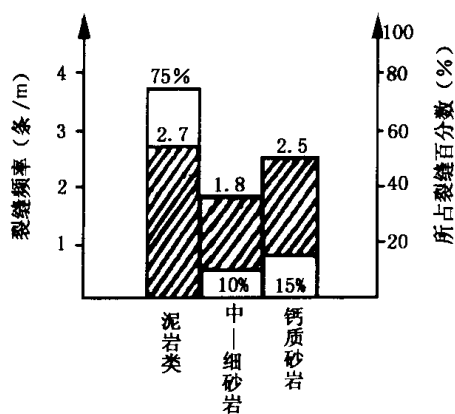


图 例 裂缝频率 (条/m)
所占裂缝百分数
(a)

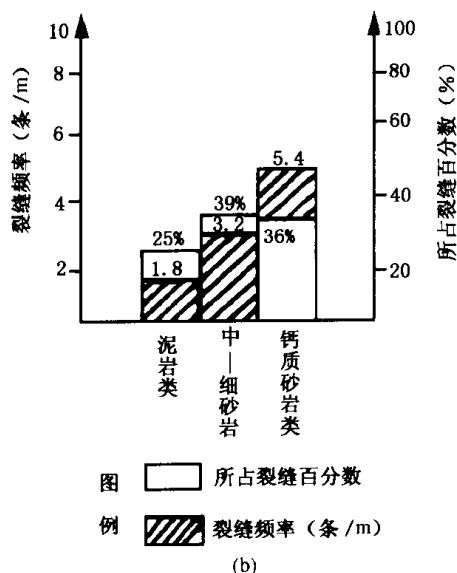


图 例 所占裂缝百分数
裂缝频率 (条/m)
(b)

图 1—1—6 丘陵油田不同岩性裂缝分布频率
(a)陵 2 井;(b)陵 4 井

性段进行裂缝频率统计,则一般砂岩(以中细砂岩为主)裂缝发育段长度占取心长度的 31%,频率为 1.6 条/m;泥岩(以粉砂质泥岩为主)裂缝段长度占取心长度的 33%,频率为 2.2 条/m;而钙质砂岩裂缝段长度占取心长度的 77%,频率为 4.3 条/m。可见裂缝集中发育在岩性致密坚硬的钙质砂岩和泥岩中(见图 1—1—6)。丘陵油田的邻区鄯善油田中侏罗统储集层,裂缝主要发育在不纯的泥质岩中。鄯 5—9 井发育高角度张性裂缝,也有剪切缝(见图 1—1—7)。

总的来说,丘陵油田和鄯善油田砂泥岩裂缝性储集层的储集空间有别于碳酸盐岩,其主要特征如下:

1) 裂缝密度小

砂泥岩裂缝发育强度通常比碳酸盐岩低。主要是砂泥岩没有碳酸盐岩致密坚硬,并且没有溶蚀作用,裂缝宽度小,长度短(见图 1—1—8)。

2) 裂缝面无位移无充填

砂泥岩储集层大多数裂缝面新鲜,无油迹和充填物,无擦痕和明显的位移。如丘陵油田陵 2 井 2630.92~2639.25m 的泥质粉砂岩井段发育垂直缝和高角度斜缝,缝面新鲜,无擦痕,无任何充填物,无位移,裂缝两侧纹层完全吻合(见图 1—1—9)。

3) 裂缝与基质孔隙之间的物性差别减小

碳酸盐岩储集层具有特低基质孔隙度和特低基质渗透率,裂缝充当储集空间和渗滤通道。砂泥岩储集层的裂缝和基质孔隙之间的物性差别缩

小,裂缝和基质孔隙均起储集和渗滤作用。

3. 其他岩类裂缝性储集层

除碳酸盐岩和砂泥岩裂缝性储集层外,其他岩类裂缝性储集层所占比例很小,但岩石类型却很多。如各种火成岩和变质岩,其中以与各种火山岩有关的裂缝性储集层及与风化壳有关的裂缝性储集层占主要地位。

1) 火山岩裂缝性储集层

火山岩储集层的岩性为安山质火山角砾岩、安山质火山角砾熔岩和安山岩。具有多种储集空间形态,如原生的粒间孔隙、晶内孔隙、晶间孔隙、气孔、溶蚀孔隙、构造裂缝、成岩裂缝等。孔隙具多次改造特点,物性变化较大。如近年来在张强凹陷发现的长北背斜油田的义县组火山岩主力储集层,即是属于这类裂缝性储集层。长北背斜油田侏罗系上统义县组上部岩性由火山角砾岩、凝灰岩夹凝灰质砂岩、砂岩组成;中部为凝灰岩、流纹岩、安山质熔岩、集块岩;下部的玄武岩系列岩石;底部由花岗质砾岩、砂砾岩、粉砂岩等组成。义县组上部构造裂缝十分

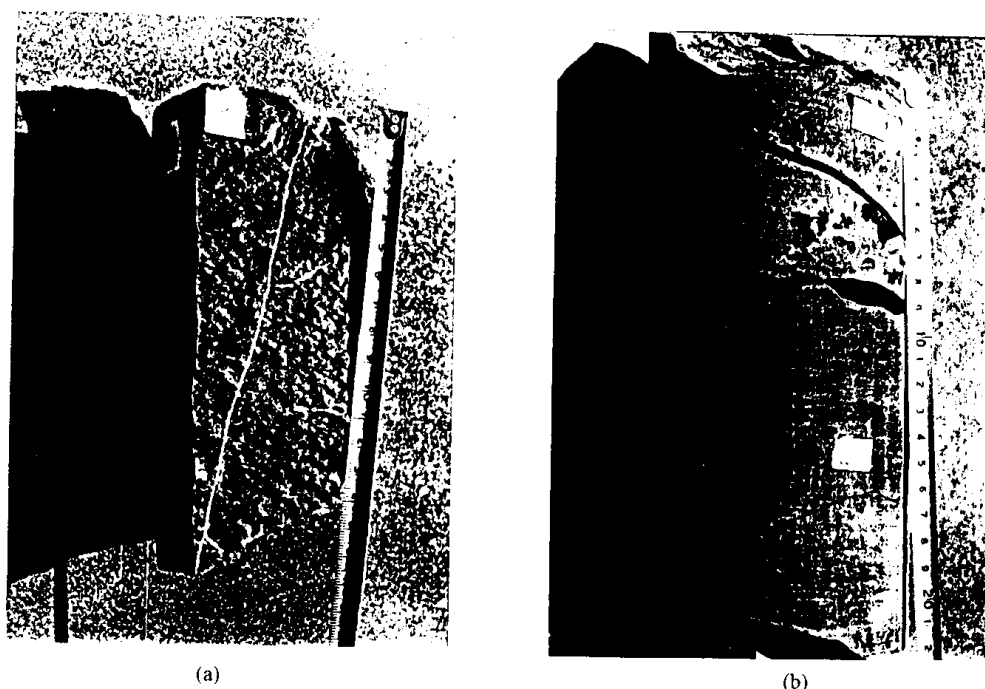


图 1—1—7 鄯 5—9 井钻井岩心裂缝图

(a)方解石充填的高角度张性缝;(b)低角度剪切缝

发育,并与气孔、基质孔隙相连通,改善了储集层渗滤性能,形成良好的储集层。

2) 基底火成岩和变质岩古风化壳裂缝性储集层

准噶尔盆地克拉玛依油田志留—泥盆系变质岩基底风化带属于这类储集层。该风化带岩性为片岩、板岩、硅质岩及砂岩等,且被火成岩侵入体贯穿。在克拉玛依—乌尔禾断裂附近,变质岩表面风化带是裂缝性储集层。华北盆地冀东油田在太古界花岗岩、中生界花岗角砾岩和火山喷发岩组成的风化壳中,发育裂缝和小晶洞,构成储集层的储集空间(西北大学地质系,1979)。这类储集层的裂缝发育丰富程度不但与构造作用有关,而且与风化作用关系十分密切,构造裂缝和非构造裂缝均很发育。

综上所述,除碳酸盐岩和砂泥岩裂缝性储集层外,在世界各地油气田勘探过程中还发现各种其他岩类裂缝性储集层。这类储集层的储集空间特征既不同于碳酸盐岩又有别于砂泥岩,其主要特征如下:

(1) 火成岩储集空间特征。

① 孔隙结构复杂。

火成岩储集层的孔隙类型多,结构复杂,非均质性极强。储集空间有孔隙、裂缝和溶洞。在孔隙储集空间中有气孔、残余气孔、晶间孔、溶蚀孔、胀裂孔等(吴胜和,熊琦华等,1998)。在裂缝储集空间中有构造裂缝、成岩裂缝(即冷凝收缩缝)、隐爆裂缝及风化裂缝。在溶洞储集空间中,溶洞沿裂缝带发育,洞径一般 10~50mm。

② 储集空间类型多。

火成岩储集空间类型有孔隙型储集层、孔隙—裂缝型储集层、裂缝型储集层及孔、缝、洞复合型储集层。

(2) 变质岩储集空间特征。

变质岩储集层的储集空间以裂缝为主,同时存在少量的溶蚀孔、溶蚀洞及微孔隙,但几乎无原生孔隙。