



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

碳酸盐岩缝洞型油藏 开发理论与方法

李阳 等著

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

碳酸盐岩缝洞型油藏 开发理论与方法

■ 李阳 等著

中国石化出版社



内 容 提 要

碳酸盐岩缝洞型油藏是以大型溶洞和裂缝为主要储集空间的特殊类型油藏,储集体分布复杂,主体缝洞介质内流体流动不符合达西渗流规律,使得该类油田无法直接借鉴碎屑岩油藏成熟的开发理论和技术。本书是缝洞型油藏开发领域的理论著作,既有缝洞型油藏储集体形成机制和流体动力学机理 2 个理论认识上的创新,也探讨了超深层缝洞储集体地球物理描述、多尺度岩溶相控缝洞储集体建模、油藏数值模拟和缝洞单元注水 4 项开发关键技术。本书适合硕士、博士研究生以及从事专业理论研究和类似油田矿场实践的学者阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论与方法/李阳等著.
—北京:中国石化出版社,2014.8
ISBN 978-7-5114-2910-0

I. ①碳… II. ①李… III. ①碳酸岩油气田-油田开发-研究 IV. ①TE344

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 180197 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092mm 毫米 16 开本 22.75 印张 529 千字

2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

定价:138.00 元

李阳等所著的《碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论与方法》是作者将 973 项目“碳酸盐岩缝洞型油藏开发基础研究”的创新性成果凝练而成的，涉及碳酸盐岩的地质、地球物理、油藏建模、数值模拟、提高采收率的最新理论成果，是目前该领域的代表著作，集中体现了该领域理论研究的现状、前沿和发展趋势。同时本书又非常注重理论的基础性、系统性和完整性，全面系统地介绍了我国碳酸盐岩缝洞型油藏开发的理论与方法的发展状况。

本书的特点可以归纳为以下几个方面：

(1) 首次完整地将现代岩溶地貌特征和缝洞发育的层次结构运用到缝洞型碳酸盐岩储层地质研究中来，揭示了缝洞型油藏储集体形成机制，建立了岩溶缝洞发育模式，有力地指导了缝洞型碳酸盐岩储层地质描述和地质建模研究。

(2) 基于岩溶储集体的地质描述，本书探讨了超深层缝洞型碳酸盐岩高精度地震勘探的方法，特别是介绍了小面元地震采集与处理、不同成因类型缝洞的地震响应特征，大大提高了缝洞储集体地震成像精度，为塔河油田高效开发提供了翔实的地球物理依据。

(3) 建立了两步法缝洞型储层地质建模方法，解决了缝洞型不连续储层地质建模难题。在此模型的基础上，以物理模拟和数学模拟的手段揭示了缝洞型介质流体流动机理，建立了数值模拟方法，为缝洞型油藏高效开发提供了流体力学依据。其中一些成果在国内外高水平期刊发表，反映了缝洞储层流动机理研究的前瞻性和创新性。

(4) 针对以塔河油田为代表的缝洞型碳酸盐岩储层储量动用程度低、产量下降快和采收率低等油藏开发难题，在上述系统理论和实验分析的基础上，对不同类型缝洞储集体进行了注水等改善开发效果的措施，取得了好的提高采收率效果，为缝洞型油藏高效开发提供了范例。

随着国内外海相碳酸盐岩油藏勘探的深入，越来越多的缝洞型碳酸盐岩油气藏被发现并投入开发，本书的出版将会在这些油气的勘探开发中发挥重要的指导作用。

韩大匡

碳酸盐岩缝洞型油藏是一种新型的油藏，是世界重要的油气勘探开发领域，也是我国近期增储上产的重要领域。塔河油田是我国发现的特大型碳酸盐岩缝洞型油藏，具有超埋深、超高温高压、原油性质复杂的特点，其储集空间主要是大型溶洞和裂缝。针对如此特殊的油藏，目前国内外还没有形成成熟的开发理论和方法。以李阳为首席科学家的项目组完成了973重大基础研究项目“碳酸盐岩缝洞型油藏开发基础研究”，形成了代表性的理论成果和方法技术。

本书由两部分核心内容组成，第一部分解决了缝洞型油藏储集体形成机制和流体流动机理两个科学认识问题，阐明了岩溶作用与缝洞系统的成因联系，建立了缝洞系统发育模式，发展了缝洞型介质物理模拟流动实验方法，揭示了缝洞型介质的单相流动、两相流动及介质间流体交换规律，建立了流体流动的复合流动模型。第二部分阐述了超深层缝洞储集体地球物理形体描述、多尺度非连续缝洞储集体建模、缝洞型油藏数值模拟和缝洞型油藏高效开发4项关键技术，以及相应的物理模拟和数学模拟技术和软件。以上成果大幅度提高了缝洞储集体识别、描述精度，建立了独具特色的离散缝洞分布三维模型，有效预测了剩余油分布，推动了塔河油田高效开发，填补了缝洞型油藏开发相关领域的空白，为保障国家能源安全、拓展海外资源领域提供了重要技术支撑。

该书既有缝洞型油藏认识机理上的创新，也有研究方法和研究技术方面的进展，是一部缝洞型油藏开发较为系统的理论专著。它对从事专业理论研究的学者具有一定的参考价值，对油田开发工作者的矿场实践具有重要指导意义。希望通过该书的出版引起更多的学者对这一领域关注，以促进我国碳酸盐岩油田开发技术的进一步发展。

罗平亚

前 言

陆相碎屑岩储层和海相碳酸盐岩储层是石油两大储层类型。中国石油工业起源于陆相碎屑岩油藏，陆相生油理论和注水开发技术在半个多世纪的石油工业快速稳定发展中发挥了重要的作用。随着“稳定东部、发展西部”能源战略的实施，勘探开发重点转向海相碳酸盐岩新领域。我国西部和南方海相地层主要为多期改造的叠合盆地的碳酸盐岩，具有埋藏深、高温高压等特点。一般的海相碳酸盐岩储层可以分为孔隙型、裂缝—孔隙型、缝洞型 3 种类型，而我国西部碳酸盐岩缝洞型油藏占有重要的比重，其复杂程度更高、勘探开发难度非常大。从全球来看，已探明的石油储量中碳酸盐岩约占 50%，产量占 60% 以上。据全国最新资源普查结果，我国海相碳酸盐岩油气总资源量大于 $300 \times 10^8 \text{t}$ 油当量，石油资源量约 $150 \times 10^8 \text{t}$ ，主要分布在塔里木和华北地区，缝洞型油藏占探明储量的三分之二，是石油工业增储上产的主要领域之一。塔河油田是我国已经发现的特大型碳酸盐岩缝洞型油藏，属于超深层、超高温高压复杂储层油藏。

碳酸盐岩孔隙型油藏开发主要采用碎屑岩油藏的开发理论与方法，裂缝—孔隙型油藏主要采用基于双重介质的开发理论与方法，但是像塔河油田这样的以大型溶洞和裂缝为主要储集空间的特殊类型油藏，投产初期，由于国内外还没有形成成熟的开发理论和方法，面临着钻井成功率低、储量动用程度低、产量递减快以及采收率低等开发难题。

缝洞型油藏开发中存在两大难点：一是缝洞发育和分布规律的认识难度大。由于经历了多期构造运动、多期岩溶叠加改造、多期成藏等过程，埋藏深，储集空间尺度差异大，储集体纵横向变化大。二是对缝洞型油藏流体流动规律的认识难度大。缝洞型油藏一般以缝洞单元为相对独立的流体储存体，单元内多种流动形式共存，介质间流体交换机理不清，流动规律复杂。

为高效开发这类油藏，迫切需要从基础研究入手，在碳酸盐岩缝洞型储集体形成机制、缝洞储集体定量描述、缝洞型油藏流体流动机理等方面进行科研攻关，建立碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论与关键技术。

在上述背景下，2006 立项开展了国家 973 重大基础研究项目“碳酸盐岩缝洞型油藏开发基础研究”，采用野外露头与油田井下类比、室内模拟与现场试验结合、宏观与微观结合等方法，开展了碳酸盐岩缝洞系统模式及成因、缝洞型储集体地球物理描述、缝洞型油藏数学表征、缝洞型油藏流体流动机理、缝洞型油藏数值模拟和缝洞型油藏高效开发等方面研究，解决了碳酸盐岩缝洞型油藏储集体形成机制和油藏流体动力学机理两个理论问题，形成了超深层缝洞储集体地球物理描述、多尺度岩溶相控缝洞储集体建模、缝洞型油藏数值模拟和缝洞型油藏高效开发 4 项关键技术。

本书是国家 973 重大基础研究项目成果的总结。全书共分 6 章,第一章碳酸盐岩缝洞储集体特征及形成机制。通过典型岩溶露头区与井下缝洞系统的精细描述和类比研究,阐述了碳酸盐岩缝洞系统发育规律、演化机理和控制机制。第二章碳酸盐岩缝洞型储集体地球物理描述。阐述了缝洞体地震正演模拟技术、超深层缝洞体地震精确成像方法和缝洞体地震识别与流体检测技术。第三章碳酸盐岩缝洞型油藏三维地质建模。论述了碳酸盐岩缝洞型油藏储集特征、缝洞单元的划分与评价和碳酸盐岩缝洞型油藏三维地质建模方法。第四章碳酸盐岩缝洞型油藏流体流动规律。根据物理模拟和理论推导,阐述了缝洞型介质单相流体流动规律、两相流体流动规律和介质间流体交换规律。第五章碳酸盐岩缝洞型油藏数值模拟。阐述了缝洞型油藏离散型模型的数值模拟方法和等效多重介质模型的数值模拟方法。第六章碳酸盐岩缝洞型油藏高效开发。阐述了缝洞型油藏的油藏工程分析方法、注水开发方法和提高采收率工艺技术。

在本书撰写过程中,感谢中国科学院郭尚平院士,中国工程院韩大匡院士、罗平亚院士、康玉柱院士、彭苏萍院士、罗治斌教授、黄素逸教授以及闫金定博士等给予的多次指导,感谢国家 973 重大基础研究项目组(“碳酸盐岩缝洞型油藏开发基础研究”)袁向春、窦之林、曲寿利、夏日元、姚军、李江龙等所有研究人员。本书成文过程中侯加根教授、金强教授、张烈辉教授、刘慧卿教授、吕爱民副教授、吴锋副教授等多次提出宝贵意见,在此对他们的大力支持和帮助一并表示感谢!

■ 第一章 碳酸盐岩缝洞储集体特征及形成机制

第一节 缝洞型油藏储集体发育特征	1
一、岩溶储集空间类型划分标准	1
二、碳酸盐岩缝洞型油藏储集体主要类型及特征	3
三、塔河油田奥陶系储集体发育条件	12
第二节 古岩溶发育演化机制	18
一、岩溶动力学原理	19
二、岩溶形成条件与控制因素	20
三、塔河地区古岩溶发育演化机制	27
第三节 塔河油田缝洞系统平面分布特征	43
一、古岩溶地貌成因组合识别方法	43
二、塔河油田主体区古岩溶地貌类型与缝洞系统分布特征	47
三、不同古岩溶地貌单元储集性能	54
第四节 塔河油田缝洞系统垂向分布特征	55
一、塔河油田主体区垂向分带类型	55
二、缝洞系统垂向分布特征	56
第五节 古岩溶缝洞系统充填物类型与充填特征	60
一、古岩溶缝洞系统充填物类型	60
二、充填空间形式与充填方式	63
三、充填程度划分	64
四、充填特征	64
第六节 典型碳酸盐岩缝洞系统发育模式	66
一、单支管道型地下河系统	68
二、管道网络型地下河系统	69
三、构造廊道型地下河系统	71
四、厅堂型洞穴系统	71
五、溶洞型洞穴系统	72
六、竖井型洞穴系统	72
七、溶蚀孔洞系统	73
八、溶蚀缝系统	74
九、礁滩溶孔型缝洞系统	75
十、白云岩孔洞型缝洞系统	76
参考文献	76

■ 第二章 碳酸盐岩缝洞型储集体地球物理描述

第一节 缝洞体地震正演模拟	78
一、缝洞体地震物理模拟	78
二、缝洞体地震数值模拟	82
第二节 缝洞体地震响应特征	87
一、单洞模型的地震响应特征	87
二、复杂洞群的地震响应特征	96
三、裂缝模型的地震响应特征	101
四、三维综合缝洞物理模型实验	108
第三节 缝洞体地震精确成像方法	109
一、偏移距平面波有限差分叠前时间偏移	110
二、角度域时移深度聚焦偏移与速度分析	113
三、提高绕射波成像分辨率的方法	118
第四节 缝洞体地震识别与流体检测	122
一、面向缝洞储集体地震预测方法	122
二、裂缝叠前方位各向异性检测理论与方法	126
三、缝洞储集体形体的综合刻画技术	130
四、缝洞储集体充填流体检测	135
第五节 缝洞体地球物理描述技术综合应用	143
一、缝洞体地球物理描述的资料适用性分析与资料采集方法	143
二、塔河油田试验区缝洞体预测	148
参考文献	158

■ 第三章 碳酸盐岩缝洞型油藏三维地质建模

第一节 碳酸盐岩缝洞储集体识别	161
一、碳酸盐岩缝洞型油藏储集空间类型	161
二、碳酸盐岩缝洞型油藏井点缝洞储集体识别	165
三、碳酸盐岩缝洞型油藏井间缝洞储集体识别	170
四、塔河4区缝洞储集体分布规律	180
第二节 缝洞单元表征	181
一、缝洞单元划分	182
二、典型缝洞单元描述	182
第三节 缝洞储集体三维建模	184
一、三维构造建模及模型网格设计	184
二、三维离散大型溶洞模型的建立	185
三、三维溶蚀孔洞模型的建立	187
四、大尺度离散裂缝模型的建立	191
五、小尺度离散裂缝网络模型的建立	193
六、碳酸盐岩缝洞型油藏三维缝洞体模型	198

第四节 碳酸盐岩缝洞型油藏属性参数建模	199
一、碳酸盐岩缝洞型油藏属性表征参数	199
二、碳酸盐岩缝洞型油藏属性参数建模方法	202
第五节 碳酸盐岩缝洞型油藏地质模型验证与应用	206
一、碳酸盐岩缝洞型油藏三维地质模型验证	206
二、碳酸盐岩缝洞型油藏地质模型应用	209
参考文献	210

■ 第四章 碳酸盐岩缝洞型油藏流体流动规律

第一节 缝洞型介质物理模拟实验设计	211
一、缝洞型油藏物理模拟基本原理及相似准则	211
二、缝洞型油藏物理模拟实验设计	214
第二节 缝洞型介质单相流体流动规律	217
一、单相流体流动实验	217
二、单相流体流动模式及转换	220
第三节 缝洞型介质两相流体流动规律	223
一、缝洞型油藏两相流体流动模式	224
二、油水两相流体流动实验	224
三、油水两相流动特征	227
第四节 缝洞型介质系统间流体流动规律	232
一、裂缝与基质间流动规律	232
二、基质与溶洞间流体流动规律	236
三、不同缝洞模式流体流动规律	239
第五节 缝洞型介质流体流动规律应用及数值实验研究	246
一、缝洞型介质流体流动机理应用	246
二、缝洞型介质流体流动规律的数值实验研究	250
参考文献	257

■ 第五章 碳酸盐岩缝洞型油藏数值模拟

第一节 缝洞型油藏数学模型	258
一、等效多重介质油藏数学模型	258
二、耦合型油藏数学模型	266
第二节 缝洞型油藏模型数值解法	268
一、等效多重介质模型数值解法	269
二、耦合型数值求解方法	276
第三节 数值模拟方法验证	286
一、等效多重介质数值计算方法验证	286
二、耦合型数值模拟方法验证	296
三、S48 缝洞单元数值模拟	299
参考文献	303

■第六章 碳酸盐岩缝洞型油藏高效开发

第一节 缝洞型油藏单井生产特征及变化规律	305
一、单井产量变化特征及预测模型	305
二、缝洞型油藏油水分布模式及含水变化规律	309
第二节 缝洞单元能量及储量动用评价	312
一、缝洞单元天然能量评价方法	312
二、缝洞单元内井间连通性评价方法	318
三、缝洞单元储量动用评价	322
第三节 缝洞型油藏数值试井模型及解释方法	325
一、三重介质数值试井	325
二、渗流—自由流耦合流动特征试井理论模型及试井分析方法	332
三、塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏测试资料的解释	334
第四节 缝洞型油藏注水开发技术	336
一、注水潜油	336
二、缝洞单元注水开发	338
三、注水开发技术的应用	339
第五节 缝洞型油藏侧钻水平井及储层改造技术	343
一、缝洞型油藏侧钻短半径水平井技术	343
二、缝洞型油藏储层改造技术	345
三、侧钻和酸压改造技术的应用效果	351

■后 记

碳酸盐岩缝洞储集体特征及形成机制

碳酸盐岩缝洞系统作为一种良好的油藏储集空间，在油气勘探开发中具有重要的地位。碳酸盐岩储层介质受原生沉积和后期改造的综合作用，尤其是后期的岩溶作用和构造作用，使储集空间的形态复杂化、组合类型多样化。古岩溶演化对油气储集空间具有控制作用，由内外动力综合作用形成类型复杂多样的缝洞系统，直接影响碳酸盐岩储层物性。构造作用不仅会改造原有储集空间，而且形成新的储集空间和连通网络，改造储层的原有孔渗特征。

我国碳酸盐岩储层介质地层年代老，经历了多期构造运动、多期岩溶叠加改造、多期成藏等过程，导致储集介质具有多重性和各向异性，储集空间类型则由孔、缝、洞等组合构成，储集空间连通性差，阐明其形成机理和分布规律十分必要。

通过典型岩溶露头区和井下缝洞系统精细地质描述和类比研究，在古构造、古地形、古气候和古水文地质条件综合分析的基础上，运用地球化学分析、古地貌恢复和地球物理探测等综合方法识别古岩溶，对宏观—微观、裸露—埋藏、溶蚀—充填的古岩溶形态进行成因组合分析，揭示了塔河油田奥陶系储集体古岩溶形成条件和发育演化特征。

第一节 缝洞型油藏储集体发育特征

由于成因、岩性、成岩后生作用、构造断裂作用、溶蚀作用等对储集空间的影响不同，碳酸盐岩储层与其它类型储层在储集空间形态、分布产状和稳定性等方面存在差异。

一、岩溶储集空间类型划分标准

碳酸盐岩中普遍发育有孔、洞、缝，由于其形成机理、形态特征、发育规模的差异较大，对油气富集与运移的贡献大小不一。但长期来，不同研究人员对岩溶储集空间的定义不同，依据岩溶学词典(袁道先, 1988)，结合油气藏特征，对缝洞型油藏各种储集空间类型采用如下界定标准。

1. 原生孔隙

原生孔隙指亮晶颗粒灰岩中颗粒之间的粒间孔和生物化石的体腔粒内孔，直径数微米至数十微米，对油气储集的意义不大。

2. 次生孔隙

次生孔隙包括晶间孔、晶间溶孔、晶内溶孔等7种类型。

①晶间孔：为晶粒之间的孔隙，形态呈多边形，直径数十微米至数百微米。

②晶间溶孔：为晶间孔溶蚀扩大而形成，直径数十微米至数百微米。



③晶内溶孔：晶粒内部溶蚀形成，直径十几至数十微米。

以上原生孔隙(粒间孔和粒内孔)和次生孔隙(晶间孔、晶间溶孔、晶内溶孔)共同构成碳酸盐岩的“基质孔隙”。我国古生代碳酸盐岩多经历了加里东期—喜山期多期强烈的成岩改造作用，基质孔隙被压实或充填较为严重，致使基质孔隙度偏低。在塔里木盆地内，奥陶系碳酸盐岩基质平均孔隙度 1.049%，孔隙度 < 1% 的概率为 62%，< 2% 的概率为 90%，而渗透率一般也 $< 1 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2$ 。

④铸模孔：为矿物晶屑或生物晶屑经选择性溶蚀形成的孔隙，主要有膏模孔、盐模孔等，长数百微米，宽数十微米，大者达数毫米。一般形成于埋藏岩溶作用期，充填程度差，发育密度较低，可成为较好的油气储集空间。

⑤粒模孔：由选择性溶蚀作用形成，砂屑颗粒被溶蚀后留下的砂屑外壳，直径数百微米。

⑥溶蚀孔：由溶蚀作用形成的较小规模的不规则孔隙，直径 0.01 ~ 2mm，肉眼能够观测到。

⑦溶蚀洞(小溶洞)：为溶蚀作用形成的较大规模的不规则孔洞，直径 2mm ~ 20cm。

3. 溶洞

参照现代岩溶划分标准，将直径大于 20cm 的洞体统称为溶洞。

塔河地区古岩溶缝洞系统钻遇率为 86.67% (古溶洞系统钻遇率为 62.22%)，古岩溶缝洞系统发育较强烈。

4. 裂缝

依据不同的分类原则和标准，裂缝可划分为不同类型，宜根据研究工作的需要合理选择，避免混淆。

(1) 按成因分类

①构造缝：指直接由构造作用形成的裂缝，包括张裂缝、剪裂缝等。工作区构造缝的形成主要有两期，早期构造缝形成于加里东—早海西期，有效性较差；晚期构造缝形成于海西—喜山期，充填程度弱，是主要的有效缝。

②溶蚀构造缝：指经历了溶蚀作用改造(扩溶和充填)的构造缝。其特点为缝面有明显的后期扩溶现象，且张开宽度大，具有方解石、钙泥质等充填或半充填现象；半充填溶缝是油气良好的渗流通道。

③成岩缝：包括干缩缝、垮塌缝、压溶缝等，均可成为油气渗流通道和储集空间。

(2) 按充填程度分类

①未充填缝：缝内充填物极少，主要为晚期构造缝和溶蚀缝。

②半充填缝：裂缝未被完全充填，尚残存有效空间。

③全充填缝：裂缝被完全充填，充填物包括钙泥质、方解石、黄铁矿等。

(3) 按产出状态与组构关系分类

①垂向缝：裂缝近垂直发育。一些是构造成因，其特点是延伸长，有时延伸长度超过 2m；一些是风化溶蚀成因，一般位于风化壳的顶部，由风化壳期岩溶作用引起的垂向劈裂及机械风化作用形成，其特点是缝面不平直，呈微波状，有时数条缝组合成一束破裂。

②斜交缝：裂缝成组交叉分布。与层面有一定交角，倾角一般 $40^\circ \sim 50^\circ$ 。以早期及晚期构造成因的“X”形剪破裂为主，缝面平直，断面有时可见擦痕和阶步。

③顺层缝：指平行层(理)面发育的裂缝。其成因一是由风化剥蚀卸载，引起地应力减小，造成地层回弹，沿地层中的原生力学薄弱带形成破裂；二是由构造应力作用，在层理、纹层面产生滑脱而形成。至于取心卸载形成的“饼裂”，大多属于非天然破裂或仅代表一定的应力环境，当其在地下天然状态下时一般不存在破裂，故不应作为裂缝看待。

④网状缝：裂缝不规则分布，无组系，发育程度较高。一类由表生期风化作用形成，如岩溶坍塌、岩溶角砾化、机械物理风化作用等；另一类为构造作用成因，发育于应力集中破碎带。由于网状缝密集发育，相互连通，且与孔洞的连通性好，对油气储集、运移的意义较大。

⑤碎裂缝：常见于岩溶角砾岩中，比网状缝更为杂乱，为构造或岩溶强烈发育的标志。

⑥枝状缝：指不规则分布的微裂缝，延伸较短，延伸长度一般1~5cm，相互不交叉。有时一端较宽，另一端较细，呈尖灭状。由埋藏期的压裂作用或溶蚀、充填作用引起的胀裂作用形成。

⑦枝状交叉缝：比枝状缝延伸稍长，延伸长度1~10cm，相互之间有一定交叉。其成因除岩溶作用与风化作用外，还有构造作用成因。

(4) 按发育规模分类

依据裂缝的隙宽、延伸长度、隙间距(发育密度)进行缝隙分级。较大级别的缝隙以渗透通道功能为主，较小级别的缝隙则以储集功能为主。

①微裂缝：隙宽数微米至0.01μm，延伸长度一般小于10cm，隙间距10cm左右。

②中等裂缝：隙宽0.01~0.10mm，延伸长度一般10~30cm，隙间距20~30cm。

③大裂缝：隙宽0.10mm至数毫米，延伸长度一般大于30cm，隙间距大于30cm。

二、碳酸盐岩缝洞型油藏储集体主要类型及特征

碳酸盐岩缝洞型油藏储集体发育具有极强的非均质性，且受后期构造运动影响。储集空间类型以构造缝和溶蚀孔、洞、缝等次生缝洞为主，储渗空间几何形态多样，大小悬殊，分布不均；孔隙空间从几微米到几十米(康志宏等，2006)，空间上具有强烈的非均质性(表1-1)，在纵、横向上的沟通程度差异大。储集空间按不同的方式及规模可组合成4种主要的储集体类型：裂缝型、裂缝—孔洞型、孔洞型及裂缝—溶洞型。不同的储集体类型具有不同的储集性能。储集体发育分布规律主要受控于地质构造和岩溶作用。

表 1-1 缝洞型油藏储层与砂岩油藏储层特征对比

	缝洞型油藏	砂岩油藏
储集空间类型	孔、隙、缝、管、洞	粒间孔隙
孔隙大小	大到数百米、小到几微米	数十微米到几微米
孔隙度	变化大，多小于3%	15%~20%，较均一
孔隙形态	规则和不规则	近等轴状
分布	顺缝、顺层、溶蚀带，不均一	层状分布
成因	构造、岩溶作用、地下热液等	原生孔隙



塔河油田奥陶系油藏是典型的缝洞型油藏，主要经历了4次构造运动、3期古岩溶作用叠加改造；具有埋深大(5300m以下)、储集体非均质性强、储集空间复杂多样、油水关系复杂的特点。油藏开发实践证实，缝洞型油藏呈现出多缝洞系统、多压力系统、多个流动单元的特征。这主要是由于不同区块岩溶和构造发育程度有较大差异，以及多期岩溶作用、构造作用的叠加所致。

塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏主要发育在以泥微晶灰岩、颗粒灰岩为主的中下奥陶统一间房组，呈巨厚块状；沿着高角度风化裂缝和构造裂缝溶蚀形成的溶洞是塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型油藏主要的储集空间，缝洞储集体分布不连续，尺度变化大。不同类型的储集空间以不同的组合方式形成了塔河油田奥陶系3类主要储集体——裂缝型储集体、裂缝—孔洞型储集体和裂缝—溶洞型储集体。单独的孔洞型储层在塔河油田极为少见，仅分布在礁灰岩地区。

1. 裂缝发育特征及成因机制

对塔河油田裂缝的研究，以塔河油田4区为例。塔河4区发育多期次、多种类型的裂缝，包括钻井诱导缝、成岩收缩缝、同沉积裂缝、构造裂缝。岩心观察发现构造裂缝是最重要、分布最广泛的一类裂缝。通过对17口井岩心的观察描述，以及对井下测井成像资料直接观测，研究区奥陶系裂缝及微裂缝密集发育，多组系交错切割，且以高角度裂缝为主，多受后期溶蚀改造而大部分充填原油，是主要的油气有效储集空间和渗流通道。

(1) 裂缝的倾角

通过岩心观察，将裂缝倾角划分为3个区间， $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 为低角度裂缝， $30^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 为中角度裂缝， $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 为高角度裂缝，塔河油田裂缝主要以高角度裂缝为主。

按照各井不同角度区间裂缝的含量(图1-1、表1-2)将塔河油田4区裂缝发育井划分为两类：

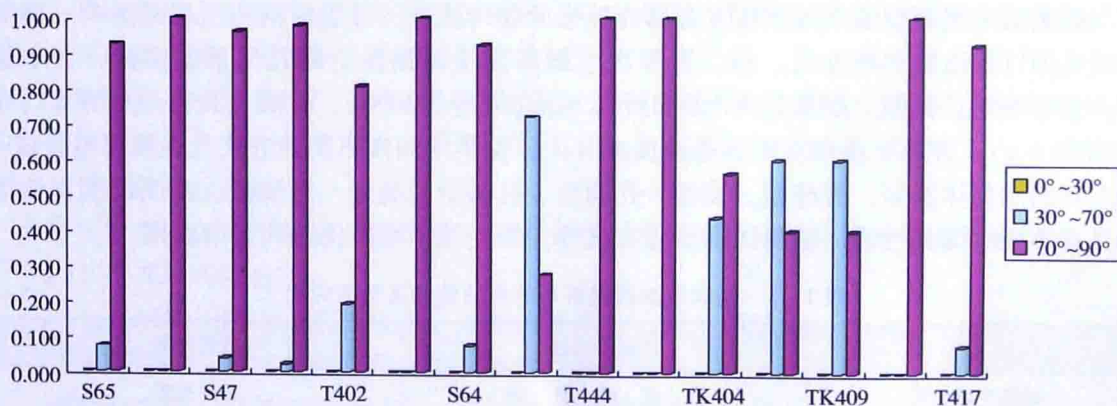


图1-1 裂缝倾角变化频率柱状图

①高角度井型：主要以高角度裂缝为主，高角度裂缝的含量在60%以上，有的甚至达到100%，代表井有：T401、T402、T415、TK406等13口井。

②中高角度井型：以中高角度裂缝为主，中角度裂缝和高角度裂缝含量相当，有的中角度裂缝含量稍多，代表井有TK407、TK409、S88井，有的高角度裂缝稍多如TK404。

表 1-2 裂缝倾角频率表

井号	0° ~ 30°	30° ~ 70°	70° ~ 90°	井号	0° ~ 30°	30° ~ 70°	70° ~ 90°
S65	0.000	0.074	0.926	T444	0.000	0.000	1.000
T415	0.000	0.000	1.000	TK406	0.000	0.000	1.000
S47	0.000	0.038	0.962	TK404	0.000	0.438	0.563
T401	0.000	0.024	0.976	TK407	0.000	0.600	0.400
T402	0.000	0.192	0.808	TK409	0.000	0.600	0.400
T403	0.000	0.000	1.000	S80	0.000	0.000	1.000
S64	0.000	0.077	0.923	T417	0.000	0.077	0.923
S88	0.000	0.722	0.278	TK427	0.056	0.333	0.611

(2) 裂缝的长度

裂缝的纵向延伸长度也是表征裂缝的一个重要参数，对油气的纵向运移具有重要的影响作用，在岩心观察过程中所观测到的裂缝长度具有一定的局限性，但是由于我们观察的裂缝大都以高角度裂缝甚至直立缝为主，所以裂缝的长度也具有比较高的可靠性，根据岩心的观察结果，依据裂缝的纵向延伸长度将裂缝划分为以下几类(见表 1-3)：

①小垂缝，长度小于 1cm，往往平行出现，直立，间距 0.8cm 左右，完全闭合，不含油，此类裂缝的研究意义不大，不具备疏导及储油能力。

表 1-3 裂缝长度变化率

井号	裂缝长度变化率/%				裂缝长度最大值/cm
	$L \leq 8\text{cm}$	$8\text{cm} < L < 13\text{cm}$	$13\text{cm} \leq L \leq 30\text{cm}$	$L > 30\text{cm}$	
S65	0.2037	0.3333	0.3704	0.0926	110
T415	0.0000	0.0000	0.3333	0.6667	120
S47	0.1154	0.3462	0.5385	0.0000	22
T401	0.0238	0.2143	0.6667	0.0952	57
T402	0.0000	0.3077	0.3077	0.3846	58
T403	0.0152	0.2424	0.6515	0.0909	162
S64	0.0000	0.2308	0.6923	0.0769	50
S88	0.1111	0.1667	0.6667	0.0556	50
T444	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	13
TK406	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	15
TK404	0.4375	0.1875	0.3750	0.0000	15
TK407	0.2000	0.0000	0.8000	0.0000	15
TK409	0.2000	0.2000	0.6000	0.0000	13
S80	0.0000	0.5556	0.3333	0.1111	70
T417	0.1923	0.3462	0.3077	0.1538	99
TK427	0.2778	0.2778	0.4444	0.0000	15

②小裂缝, $1\text{cm} < L \leq 8\text{cm}$, 此类裂缝所占比例较小, 一般不超 20% (图 1-2), 只有 TK404 井, 含量多一些, 以此类裂缝为主。

③中裂缝, $8\text{cm} < L < 13\text{cm}$, 此类裂缝所占比例稍大, 大部分井此类裂缝的含量一般在 20% ~ 40%, 应该属于次主要裂缝, 不占主导地位。

④大裂缝, $13\text{cm} \leq L \leq 30\text{cm}$, 此类裂缝所占比例最大, 加之大都是高角度裂缝, 因此此类裂缝是最重要的油气疏导通道。他们往往将缝合线等水平构造连接起来, 构成一种网状疏导体系, 后文将做重点介绍。

⑤超大裂缝, $L > 30\text{cm}$, 此类裂缝的比例较少, 往往不足 10%, 只有 T415 井超大裂缝的含量占主要地位。超大裂缝的区间较广, 从 30cm 开始, 最长可达 165cm。

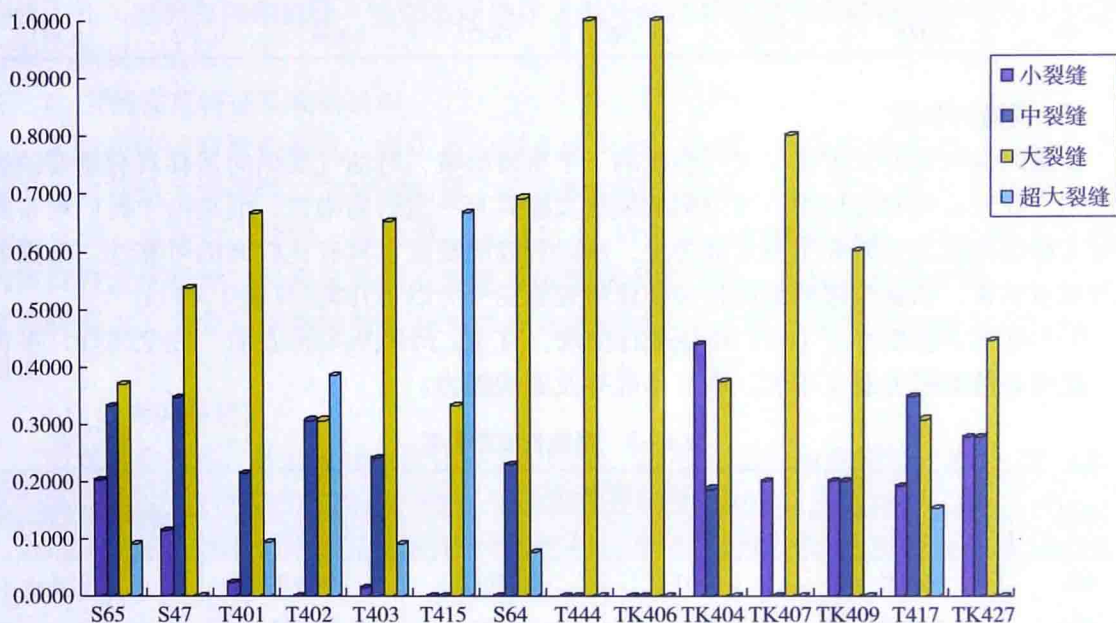


图 1-2 裂缝长度频率变化直方图

(3) 裂缝的走向

裂缝的走向在确定裂缝的发育机制及发育期次方面具有非常重要的意义, 目前在没有定向取心井的情况下, 声波电视裂缝倾向及 FMI 资料成为确定裂缝走向的主要手段。

利用在工区分布比较均匀的 20 余口井的声波电视裂缝倾向及 FMI 资料, 做出其裂缝走向玫瑰花图, 其裂缝走向基本上突出了工区内主要裂缝的发育方向 (图 1-3)。

尤其需要说明的是, TK457 井和 TK458 井, 这两口井 FMI 测量井段是水平井段, 其裂缝走向说明了横向上一个范围内裂缝发育的方向, 而不仅仅是一孔之见, 具有非常强的代表性。

由图可知裂缝的走向主要集中在北东、北东东、北西西向 3 组, 南北向有发育, 但是在各井中都不占主导地位。不同井主导裂缝的走向也不相同, TK458 井以北东东向为主, TK457 井以北东向为主。岩心观测结果与塔北地区的野外观测结果相符, 根据野外实测与地下观察的可对比性 (图 1-4)、选取井的局限性以及每口井主导裂缝的不相似性, 认为本区裂缝应该发育 3 组, 即走向为: 北东—南西、北东东—南西西、北西西—南东东向的 3 组, 次发育南北向一组。与本区断裂特征基本相符, 走向组系基本相同。