

国家自然科学基金面上项目 (编号: 41372139, 41072098)

国家科技重大专项 (编号: 2016ZX05046-003-001, 2011ZX05018-001-002)

# 非常规油气储层裂缝 识别方法与表征

■ 丁文龙 姚佳利 何建华 等编著



地质出版社

国家自然科学基金面上项目 (编号: . . . . . 098)

国家科技重大专项 (编号: 2016ZX05046-003-001, 2011ZX05018-001-002)

# 非常规油气储层裂缝 识别方法与表征

STUDY OF FRACTURE IDENTIFICATION METHODS AND  
CHARACTERISTICS ON UNCONVENTIONAL OIL AND GAS RESERVOIRS

丁文龙 姚佳利 何建华 等编著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

## 内 容 提 要

裂缝既是油气的重要储集空间类型, 又是油气渗滤的有效通道。尤其在致密砂岩、碳酸盐岩、泥页岩、火山岩、变质岩及煤层等非非常规油气储层中, 规模性发育的裂缝网络系统不仅能够大大提高低渗透性储层的渗透率, 改善储层的渗流性能, 而且还决定了储层的有效产能和后期压裂改造及油气藏开发方案设计的优化, 因此, 裂缝的研究对非常规油气的勘探与开发意义重大, 它伴随着油气勘探与开发的始终。本书通过对国内外主要的六大类非常规油气储层(致密储层)裂缝研究的最新相关理论和表征方法技术的全面系统地调研, 结合作者十多年来在非非常规油气储层裂缝研究方面的科研成果, 从不同致密储层裂缝的类型、成因机理及其发育的主控因素角度出发, 首先, 归纳总结了目前裂缝识别方法与检测技术; 其次, 建立了一套有效且完整的裂缝特征参数估算与裂缝在空间上分布预测的方法; 最后, 系统分析了地应力状态与天然裂缝发育关系及其对水力裂缝的影响和微地震压裂效果监测。为后期非常规油气储层水力压裂改造的设计与实施提供有效的指导, 以便使储层改造达到最大体积压裂效果, 尽快获得油气的高产与稳产。

本书可供从事石油地质、地球物理、石油工程等油气勘探开发理论与技术研究方面的人员参考, 也可作为有关高等院校、科研院所师生的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

非常规油气储层裂缝识别方法与表征/丁文龙等编著.  
—北京:地质出版社, 2015.12  
ISBN 978-7-116-09564-9

I. ①非… II. ①丁… III. ①油气藏-裂缝观测  
IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第321791号

Feichanggui Youqi Chuceng Liefeng Shibie Fangfa yu Biaozheng

责任编辑: 祁向雷 苗永胜 田野

责任校对: 韦海军

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路31号, 100083

电 话: (010) 66554528 (邮购部); (010) 66554692 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010) 66554686

印 刷: 北京地大天成印务有限公司

开 本: 787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>

印 张: 13.25

字 数: 320千字

版 次: 2015年12月北京第1版

印 次: 2015年12月北京第1次印刷

定 价: 68.00元

书 号: ISBN 978-7-116-09564-9

(如对本书有意见或建议, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

# 前言

裂缝性油气藏在世界石油和天然气的产量、储量中占有十分重要的地位。国内外油气勘探与开发实践表明，天然裂缝不仅是油气的主要储集空间和运移的有效渗滤通道，而且对储层的压裂改造和油藏工程方案优化设计有重要影响。特别是对于致密砂岩、碳酸盐岩、泥页岩、火山岩、变质岩、煤层等低渗透性的非常规油气储层来说，当其发育有足够的天然裂缝或岩石经压裂改造后可以产生大量裂缝系统时，这些非常规油气储层（致密储层）则完全可以成为有效的油气储层（或储集体）。大量生产实践和研究成果进一步表明，致密储层中发育的裂缝对孔隙度的贡献极小，但对储层渗透性的改善作用十分明显，储层中发育裂缝时，渗透率显著增加；如果没有裂缝对储层渗透性的有效改善，许多致密储层则难以成为有效储层。这充分显示了由于裂缝网络系统的发育，特别是晚期的“裂缝活化”致使致密储层内相对“僵滞”的油气藏重新活动形成高产油气井的作用。

国内外大量的勘探实际资料亦证实，致密储层裂缝发育程度与油气的产能大小密切相关，裂缝发育程度直接影响着非常规油气藏的品质和开采效益。一是裂缝较发育的气藏，其品质也较好；二是天然裂缝系统发育程度直接影响页岩气开采效益，裂缝或微裂缝愈发育，油气藏富集程度愈高。油气产量的高低与储层岩石内部微裂缝发育程度有关。裂缝的密度及其走向的分散性是控制非常规油气藏产能的主要地质因素，裂缝条数越多，走向越分散，油气产量越高。即油气产能在许多情况下与裂缝的发育程度呈正相关关系，表现为储层裂缝越发育，其含油气量越大，产量就越高，裂缝发育带内的油气勘探成功率也越高。非常规油气资源的可采储量最终取决于储层内的裂缝产状、密度、组合特征和张开程度。因此，那些拥有较高渗透能力或具有可改造条件的致密储层裂缝发育带是非常规油气藏勘探的首选目标。

由此可见，裂缝网络系统发育是非常规油气藏富集高产的必要条件。裂缝对储层渗流性的改善、规模性裂缝发育程度尤其是高角度缝的发育是非常规油气井高产的主要控制因素。为此，全面客观地精细表征非常规油气储层中不同规模（尺度）的裂缝发育特征及空间分布规律，一直是国内外非常规油气勘探与开发的核心内容。其主要包括对非常规油气储层裂缝识别、类型与成因研究、特征参数表征、主控因素分析、有利发育层段与分布区预测，及裂缝与后期储层压裂改造和开发方案设计的关系等方面的研究。不仅可为非常规油气资源的“甜点”评价与优选提供重要构造地质依据，而且对非常规油气藏的高效开发具有极其重要的指导作用。

本书是由国家自然科学基金面上项目、国家科技油气重大专项联合资助的研究成果，具有石油地质学、地球物理学和石油工程理论及方法技术等多学科

领域之间的交叉和应用特征。本书共包括五章：第一章绪论、第二章裂缝形成机理与主控因素、第三章裂缝识别方法、第四章裂缝发育特征与分布预测、第五章地应力及裂缝与储层水力压裂改造。其中，第一章主要介绍了非常规油气储层裂缝研究意义、非常规油气储层类型及基本特征，包括沉积相特征、岩石矿物学特征、成岩作用、储集空间类型与孔隙结构特征、储层物性与孔隙演化特征、储层非均质性、岩石力学性质、优质储层的形成条件等；第二章从不同角度对裂缝进行系统分类进行了介绍，阐述了构造缝与非构造缝的形成机理，并分析了不同类型的非常规油气致密储层发育的主要裂缝类型及其主控因素；第三章重点介绍了裂缝识别的方法和技术手段，包括传统的地质法和岩石学法、基于裂缝测井响应特征和地震属性差异分析的测井方法与地震方法、钻井和录井法、井间压力干扰试井方法；第四章包括裂缝宏观和微观特征、裂缝特征参数的计算、裂缝在纵向上和平面上的分布预测三部分；第五章主要分析了水平主应力差与天然裂缝发育关系、水平主应力差和逼近角与水力压裂裂缝发育关系、天然裂缝对诱导缝形成的控制作用、天然裂缝对水力裂缝的影响、水力压裂改造与天然裂缝和人工裂缝之间的关系等；此外，本章还介绍了水力压裂裂缝监测的微地震技术方法，对比了不同类型非常规储层压裂微地震监测在监测设计与手段、监测波形及微地震响应特征等方面的差异性。全书主要由丁文龙编写。其中，第一章第一节由丁文龙编写，第二节由何建华、李昂、蔡俊杰、张业倩、赵冬、赵威、代鹏、曹翔宇、石佳玉、焦乃林等编写；第二章和第四章由丁文龙、王濡岳、周学慧、孙雅雄编写；第三章由丁文龙、姚佳利、官美林编写；第五章由丁文龙、何建华、王兴华、尹帅编写；最后由丁文龙负责统稿。

在本书编写过程中，还有一些博士生与硕士生协助进行了相关章节的资料查阅、图件绘制、数据统计分析、表格制作等工作。同时，本书还得到了国家自然科学基金委员会、中国石油勘探开发研究院、中国石化石油勘探开发研究院、国土资源部油气资源战略研究中心、中国地质调查局油气资源调查中心、陕西延长石油（集团）有限责任公司、中国石化西北油田分公司、中国石油华北油田分公司、中国地质大学（北京）等多家企事业单位的领导和相关学者的大力支持。书中参考和吸收了国内外相关高等院校、科研院所和企事业单位的众多专家的科学研究成果，特别是中国石化石油勘探开发研究院金之钧院士等在本书的编写过程中给予了巨大鼓励和精心指导，在此一并表示衷心感谢！

最后，由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

作者

2015年10月

# 目 录

## 前 言

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 非常规油气储层裂缝研究意义 .....	1
1.1.1 裂缝是油气的主要储集空间和有效渗滤通道 .....	1
1.1.2 裂缝发育是油气高产的主要因素 .....	1
1.1.3 晚期“裂缝活化”是油气富集的关键 .....	2
1.2 非常规油气储层类型及基本特征 .....	3
1.2.1 致密砂岩储层 .....	3
1.2.2 碳酸盐岩储层 .....	14
1.2.3 泥页岩储层 .....	33
1.2.4 火山岩储层 .....	42
1.2.5 变质岩储层 .....	52
1.2.6 煤储层 .....	58
<b>2 裂缝形成机理与主控因素</b> .....	73
2.1 裂缝类型 .....	73
2.1.1 按力学性质分类 .....	74
2.1.2 按裂缝产状分类 .....	74
2.1.3 按裂缝尺度规模划分 .....	75
2.1.4 按充填程度划分 .....	76
2.1.5 按裂缝成像测井响应特征划分 .....	76
2.1.6 按成像测井影像特征划分 .....	78
2.1.7 按裂缝有效性划分 .....	78
2.1.8 按地质成因划分 .....	78
2.2 裂缝形成机理 .....	79
2.2.1 构造裂缝形成机理 .....	79
2.2.2 非构造裂缝形成机理 .....	82
2.3 储集层裂缝发育的主控因素 .....	84
2.3.1 不同类型储集层裂缝类型 .....	84
2.3.2 影响储集层裂缝发育的重要因素 .....	84
<b>3 裂缝识别方法</b> .....	91
3.1 地质法及岩石学法 .....	91



3.2	测井方法 .....	91
3.2.1	裂缝常规测井响应特征 .....	92
3.2.2	裂缝成像测井响应特征 .....	123
3.3	地震方法 .....	128
3.3.1	地震相干体技术 .....	128
3.3.2	地震属性分析技术 .....	129
3.3.3	储层裂缝地震反演技术 .....	132
3.3.4	构造曲率分析法 .....	134
3.3.5	横波分裂技术 .....	136
3.3.6	纵波裂缝检测技术 .....	138
3.3.7	分方位处理技术 .....	139
3.4	钻井和录井法 .....	140
3.5	井间压力干扰试井方法 .....	140
4	裂缝发育特征与分布预测 .....	141
4.1	裂缝宏观和微观特征 .....	141
4.1.1	宏观特征 .....	141
4.1.2	微观特征 .....	142
4.2	裂缝特征参数计算 .....	143
4.2.1	裂缝密度 .....	143
4.2.2	裂缝孔隙度估算 .....	143
4.2.3	裂缝渗透率估算 .....	147
4.2.4	裂缝张开度计算 .....	149
4.3	裂缝分布预测 .....	150
4.3.1	纵向分布预测 .....	150
4.3.2	平面分布预测 .....	152
5	地应力及裂缝与储层水力压裂改造 .....	162
5.1	水平主应力差与天然裂缝发育关系 .....	162
5.1.1	地应力场分析 .....	162
5.1.2	应力各向异性与天然裂缝发育的关系 .....	164
5.2	水平主应力差和逼近角与水力压裂裂缝发育 .....	166
5.2.1	水平主应力差与水力压裂裂缝发育 .....	166
5.2.2	逼近角与水力压裂裂缝发育 .....	168
5.3	天然裂缝对诱导缝形成的控制 .....	168
5.3.1	天然裂缝长度和走向对诱导缝转向的控制 .....	169
5.3.2	诱导缝起裂的角度对其转向的影响 .....	171

5.4 天然裂缝对水力裂缝的影响 .....	172
5.4.1 对水力裂缝起裂位置和压力的影响 .....	173
5.4.2 受天然裂缝干扰后水力裂缝形态的分析 .....	174
5.4.3 天然裂隙发育带（或小断层）在储层压裂改造中的作用 .....	175
5.5 水力压裂改造与天然裂缝和人工裂缝之间关系 .....	176
5.5.1 大型水力压裂激活原来被充填天然裂缝 .....	176
5.5.2 大型水力压裂过程中人工裂缝微地震监测 .....	177
5.6 微地震反演与压裂效果监测 .....	179
5.6.1 走时反演与压裂现场准实时监测 .....	179
5.6.2 能量反演与压裂结果的精细表征 .....	182
5.6.3 非常规储层压裂微地震监测 .....	182
参考文献 .....	185



# 1 绪 论

## 1.1 非常规油气储层裂缝研究意义

### 1.1.1 裂缝是油气的主要储集空间和有效渗滤通道

裂缝不仅是油气的主要储集空间类型，而且是油气运移的有效渗滤通道。特别是对于致密砂岩、碳酸盐岩、页岩、火山岩、变质岩、煤系岩层等低孔、低渗致密性储层来说，当其发育有足够的天然裂缝或岩石经压裂改造后可以产生大量裂缝系统时，这些非常规油气储层（致密储层）则完全可以成为有效的油气储层（或储集体），裂缝的存在既能增加油气的储集空间，又能为油气和地层水在致密储层中的运移和渗滤提供有效的通道。

### 1.1.2 裂缝发育是油气高产的主要因素

#### 1.1.2.1 裂缝与产能关系

裂缝网络系统发育是非常规（致密）油气藏高产富集的必要条件，对于非常规油气致密性储层而言，具有超低孔、渗特征，基质孔隙已基本不具备有效渗滤条件，只有经裂缝改造才能构成工业油气层和形成高产。因此，裂缝对储层渗流性的改善，是非常规油气高产的关键。规模性裂缝发育才是油气井高产的主要控制因素，裂缝发育程度尤其是高角度缝发育是非常规致密油气藏高产的关键。国内外大量的勘探实际资料表明，致密储层裂缝发育程度与产能大小密切相关。如，北美地区古生界海相页岩裂缝发育程度与总含气量和游离气量呈正相关关系（图 1.1），表现为页岩裂缝越发育，其含气量越大，产气量就越高，页岩裂缝发育带内的页岩气勘探成功率高；我国四川盆地下古生界海相富有机质页岩层中天然气有良好显示或高产气井均与裂缝发育密切相关。

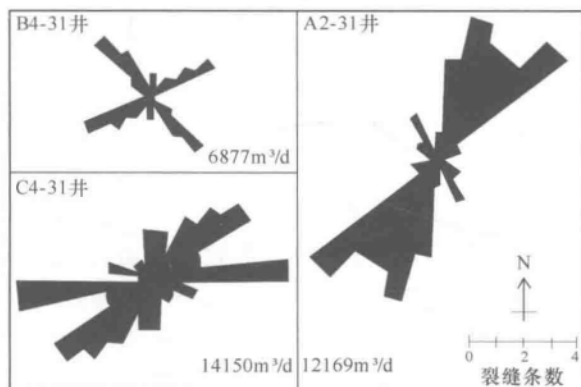


图 1.1 北美 Michigan 盆地 Antrim 页岩裂缝特征及其产气量对比图  
(据 Decker 等, 1992)

北美的页岩气勘探开发实践表明,富有机质页岩裂缝发育程度直接影响着页岩气藏的品质和开采效益。一是裂缝较发育的气藏,其品质也较好。二是天然裂缝系统发育程度直接影响页岩气开采效益,页岩裂缝或微裂缝愈发育,气藏富集程度愈高。页岩气产量高低与页岩层岩石内部微裂缝发育程度有关。裂缝的密度及其走向的分散性是控制页岩气产能的主要地质因素,裂缝条数越多,走向越分散,产气量越高(Decker等,1992)。

页岩气可采储量的大小最终取决于页岩储层内裂缝产状、密度、组合特征和张开程度。因此,那些拥有较高渗透能力或可改造条件的泥页岩裂缝发育带是页岩气藏的勘探的首选目标。那些低泊松比、高弹性模量、富含有机质的脆性页岩层段是早期寻找高产井的主要目的层。

#### 1.1.2.2 裂缝对储层渗透性的有效改善作用

天然气产能在许多情况下与裂缝的发育程度呈正相关关系,显示出了裂缝对改善致密储层渗透率的重要作用。大量生产实践和研究成果进一步表明,致密储层中发育的裂缝对孔隙度的贡献极小,但对储层渗透性的改善作用十分明显,储层中发育裂缝时,渗透率显著增加;如果没有裂缝对储层渗透性的有效改善,许多致密储层则难以成为有效储层。这充分显示了由于裂缝系统的发育,使致密储层内相对“僵滞”的油气藏重新活动形成高产。但是,致密油气藏勘探实践同时还发现,并非裂缝系统发育的部位都可以获得高产气流,只有叠合在有效圈闭上的裂缝系统才是油气高产的富集部位,这类裂缝是研究的重点(蔡希源等,2011)。对于富含有机质和高一过成熟的页岩储层,由于本身基质孔隙度和渗透率极低,多期构造运动产生的不同性质构造作用所形成的裂缝,对页岩的储集性能改善,尤其是渗透率的提高极为明显。

#### 1.1.3 晚期“裂缝活化”是油气富集的关键

晚期“裂缝活化”是油气富集的关键。致密油气储层在晚期强烈的构造挤压应力作用下,其孔隙吼道进一步缩小,储层更加致密,出现压结式结构,大批新背斜和断裂形成,早期形成的油气圈闭经历了复杂的叠加和变形改造,温度压力的变化导致地层离子浓度的变化,引发成岩后生作用异常强烈,除了早期裂缝,各种类型的新裂缝应运而生。部分断裂系统发育的地区,早期富集的油气经断裂和裂缝系统发生再次运移分配,形成次生油气藏。而在多数断裂不发育或构造抬升较弱地区,早期形成的常规油气藏,其形态也大都发生了变化。但因储层致密和超致密,就其基质孔隙度而言,已经不具备自然渗流的能力,油气不可能发生大规模的再次运移和重新聚集。在晚期构造运动中,原油气藏圈闭形态经过改造而复杂化,油气藏的储层流体处于“封存”状态(基本不能自然渗流),有的由原背斜高点变成了低点或翼部,有的油气水界面被掀斜,有的由统一油气藏被成岩作用肢解成若干储渗体,许多油气藏范围超越了现今构造圈闭,油气藏形态变得很不规则,油气圈闭由早期常规圈闭经历了强烈的改造后变得较为隐蔽,预测识别难度大幅度提高(蔡希源等,2011)。

由此可见,正是晚期强烈的构造运动一方面促使储层致密化的同时,其较强的应力作用和形成的大量断裂、裂缝系统又极强地改善了储层渗透性能,使原油气藏储层中的天然气能够“活化”而具备商业开采价值。其中,需要强调的是由于致密化有利于超高压的保存,进而使岩石骨架有效应力降低,易于形成微破裂及裂缝系统,使原已封存的油气藏

活化,恢复油气藏的渗流能力。另外,沿着晚期断裂系统,天然气发生新的运移、调整,重新富集形成次生油气藏。这些与晚期裂缝系统相关的“封存”油气藏“复活”以及天然气调整、运移、聚集作用被称之为晚期“裂缝活化”作用。因此,存在于有效圈闭中裂缝系统是天然气高产富集的部位,对于多期构造运动作用下的致密—超致密砂岩成藏来说,晚期“裂缝活化”是天然气富集的关键(蔡希源等,2011)。

## 1.2 非常规油气储层类型及基本特征

### 1.2.1 致密砂岩储层

致密砂岩储层是一种低孔、低渗的碎屑岩储层,其孔隙度一般小于12%、渗透率低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。致密砂岩储层中含有大量的石英、石英质碎屑、自生黏土等矿物。储层的致密化主要是由强烈的压实作用和胶结作用导致的。此外,储层中大量发育的自生黏土矿物使得储层微观结构更加复杂致密,当蒙脱石向伊利石、绿泥石等黏土矿物转化时,这些黏土矿物充填于砂岩孔隙和喉道中会堵塞孔喉,大大降低了渗透率。而致密储层的储集空间包括缩小粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔、晶间微孔和微裂缝等,其中微裂缝也是油气运移的通道。因此,对致密砂岩储层的沉积相特征、岩石学特征、成岩作用、储集空间类型、孔隙结构特征、储层物性特征及演化、优质储层形成条件等方面进行细致的研究,有利于掌握致密砂岩油气藏的富集规律和对油气“甜点”的勘探。

#### 1.2.1.1 沉积相特征

不同沉积环境的致密砂岩储层沉积相类型不同,我国致密砂岩储层沉积相种类多样。如鄂尔多斯盆地大牛地气田下石盒子组发育曲流河沉积相,川西须家河组须二段可划分为湖泊和三角洲两个沉积相。我国致密砂岩储层沉积相主要分为以下类型:

##### (1) 曲流河

曲流河为单河道,河道较稳定,宽深比低。侧向侵蚀和加积作用使河床向凹岸迁移,凸岸形成点沙坝或边滩。沉积物较细,一般为泥、沙沉积。因河道较为固定,其侧向迁移速度慢,故泛滥平原和点沙坝较为发育。此外,还发育河道滞留、边滩、天然堤、决口扇等微相沉积。

##### (2) 辫状河

辫状河多发育在山区或河流上游河段以及冲积扇上,多河道、多分叉和汇聚构成辫状。其主体为一套细砾岩、含砾粗砂岩或砾质粗砂岩夹细砂岩、砂质泥岩、粉砂岩所组成。辫状河具有较明显的垂向分带性和平面分区性分布特点,并明显受古地形控制,基本特点为:上游地段或坡面下部一般以发育辫状河道为主,平面上主要分布在盆地边缘的近物源区,中、下游地段或坡面上部一般以发育河道间溢岸沉积或河间沼泽微相为主,平面上主要分布在近湖盆的远物源区。按沉积特征,可分为辫状河道和泛滥平原两个亚相,前者可细分为心滩和废弃河道两微相,而后者主要由单一泥岩组成(图1.2)。

##### (3) 辫状河三角洲

辫状河三角洲是辫状水流进入稳定水体形成的粗碎屑三角洲,其发育受季节性洪水流量或山区河流流量的控制。辫状河三角洲常发育一套水下辫状河道、辫状河道、分流间

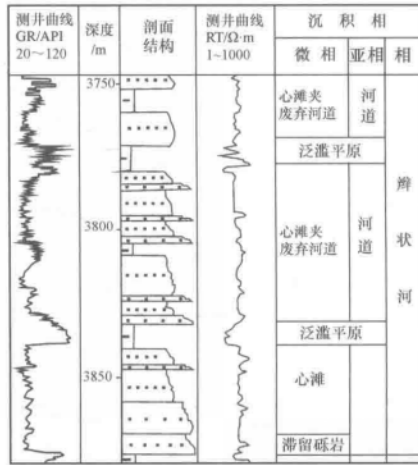


图 1.2 川西地区 JS1 井须四段辫状河剖面结构  
(据蔡希源等, 2011)

湾、河口坝等沉积微相。水下辫状河河道沉积物粒度较细，整体上向上粒度变细，单砂体厚度减薄。辫状河道沉积以粒粗、分选差为特点，具大型板状交错层理、槽状交错层理和平行层理。分流间湾以黏土沉积为主，含少量粉砂和细砂，具水平层理和透镜状层理。河口坝主要为砂岩，在垂向上一般呈下细上粗的反韵律，砂体中可见平行层理和交错层理(图 1.3)。

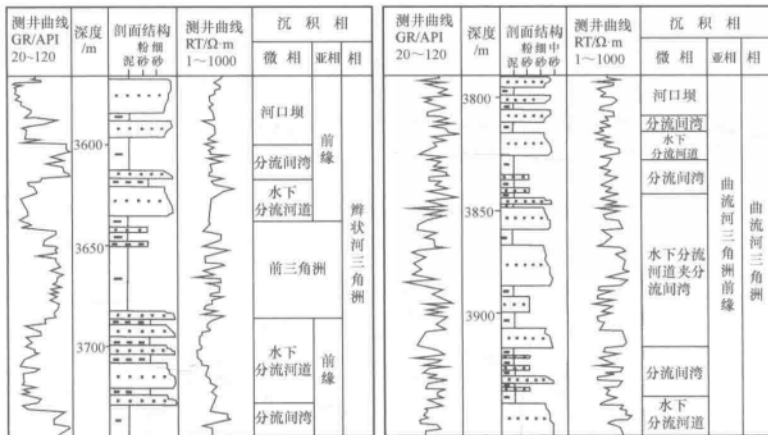


图 1.3 川西地区 CG561 井须四段辫状河三角洲、DY2 井须四段曲流河三角洲剖面结构  
(据蔡希源等, 2011)

#### (4) 曲流河三角洲

曲流河三角洲发育于河流与湖泊的过渡环境，它是在气候相对较为干旱的时期，在相对平缓的地质背景下发育的扇形沉积体，它与辫状河三角洲主要的差别在于分流河道砂体岩性较细。主要沉积微相有：分流河道边滩、河道滞留充填、河道侧翼和分流间湾。边滩岩性一般以深灰色—灰黑色中—粗粒岩屑石英砂岩，部分为含砾中—细粒岩屑砂岩，常见大型板状和槽状交错层理。河道滞留充填微相沉积物以不等粒的碎屑岩或泥质砂岩为主。

河道侧翼细砂岩、粉砂岩和泥岩组成，在垂向剖面上下部砂岩中小型波状交错层理、沙纹层理非常发育，上部泥岩则发育水平纹层。分流间湾含泥质较多，它比辫状河河间湖泊分布范围更加广阔，水体更深（图 1.3）。

### (5) 湖泊相特征

湖泊沉积体系主要指远离三角洲的常年覆水的盆地沉积环境。湖泊的水动力条件与海洋有相似之处，湖泊中也有波浪和湖流作用，且两种作用对湖泊沉积影响最大。从湖岸到湖心水动力强度逐渐减弱，相应地出现沉积物由粗到细的岩性岩相带。一般而言，湖泊无潮汐作用。根据湖泊的水深和沉积物特征可进一步划分为滨湖、浅湖、半深湖、深湖等亚相类型，而滨浅湖同样是优质砂岩储层发育的主要沉积环境。如，川西坳陷上三叠统须家河组三段、五段地层中广泛发育滨浅湖相沉积（图 1.4）。

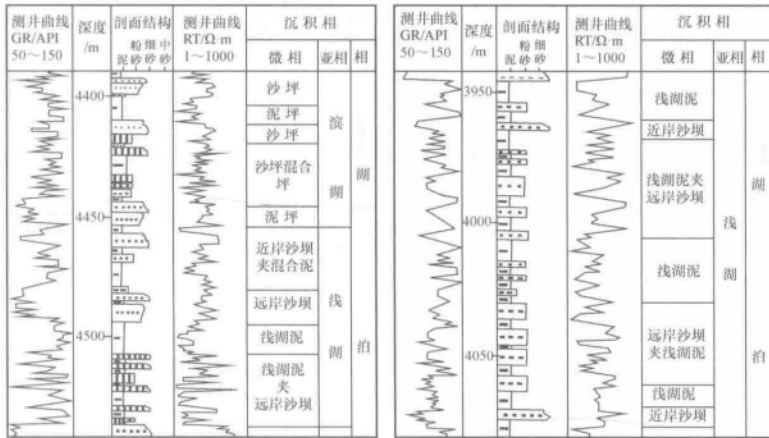


图 1.4 川西地区 L150 井须三段滨湖、浅湖及 CH100 井须三段浅—半深湖剖面结构  
(据蔡希源等, 2011)

### 1.2.1.2 岩石学特征

致密砂岩储层岩石类型以岩屑砂岩、岩屑石英砂岩、长石岩屑砂岩为主。根据不同的沉积环境以及物源供给，还可存在岩屑长石砂岩、长石石英砂岩、长石岩屑砂岩、石英砂岩和细砾岩等。此外，致密储层中还含有伊利石、绿泥石、蒙脱石、高岭石、绿蒙混层等自生黏土矿物，但含量不高。

致密砂岩中石英等稳定组分的含量与长石、岩屑等不稳定组分的比 ( $Q/F+R$ ) 决定着储层碎屑岩的成分成熟度，也决定储层的物性条件。当石英和石英碎屑含量高时，硅质的刚性提高了储层的抗压性，有利于保护粒间孔隙，形成深埋区的相对优质储层。此外，长石等不稳定矿物容易风化，产生的风化物质容易堵塞孔隙，使储集物性变差。

据岩心观察，鄂尔多斯盆地大牛地气田下石盒子组一段岩性以含砾中、粗砂岩为主，次为中、粗、细砂岩。据薄片鉴定资料，下石盒子组一段储层岩石类型主要为岩屑砂岩和岩屑石英砂岩。砂岩碎屑成分中石英含量 23%~85%，岩屑含量 15%~70%，长石含量一般小于 10%，黑云母微量，少于 1%。砂岩分选一般为中等—较好，磨圆主要为次棱角状，碎屑间颗粒支撑，点线接触。胶结类型以孔隙式为主。表 1.1 表明产能越高，砂岩粒度越粗。

表 1.1 鄂尔多斯盆地地下石盒子组一段气层岩性标准 (薄片资料)

颗粒		杂基		胶结物		颗粒	杂基	胶结物
粒级	成分	含量	分布	含量	分布			
粗粒	岩屑、岩屑石英砂岩	≤10%	孔隙、薄膜孔隙	1%~2%	孔隙	较好	高产	D28
							中高产	
中粗粒	岩屑、岩屑石英砂岩	2%~6%	孔隙、薄膜孔隙	5%~10%	孔隙	中较好	中产	D1
中细粒	岩屑石英砂岩	5%	孔隙	>10%	孔隙	中较好	低产	D10

(据吴娟娟, 2013)

### 1.2.1.3 主要成岩作用

致密砂岩储层的主要成岩作用包括压实压溶作用、胶结作用、交代作用、溶蚀作用、裂缝化作用等。其中, 压实压溶作用、胶结作用使储层更加致密, 孔渗降低; 而溶蚀作用、裂缝化作用则使储层产生孔缝, 改善了储层的物性。

#### (1) 压实压溶作用

压实作用是地层中普遍存在的一种成岩作用。在上覆水体和沉积物负荷压力下, 不断排出水分, 碎屑颗粒紧密排列, 软组分挤入颗粒, 孔隙体积缩小, 孔渗降低。压溶作用一方面使颗粒进一步紧密接触, 另一方面溶出物质沉淀充填粒间孔或为石英加大及硅质胶结提供大量硅质, 所以对储层的发育更为不利 (图 1.5)。

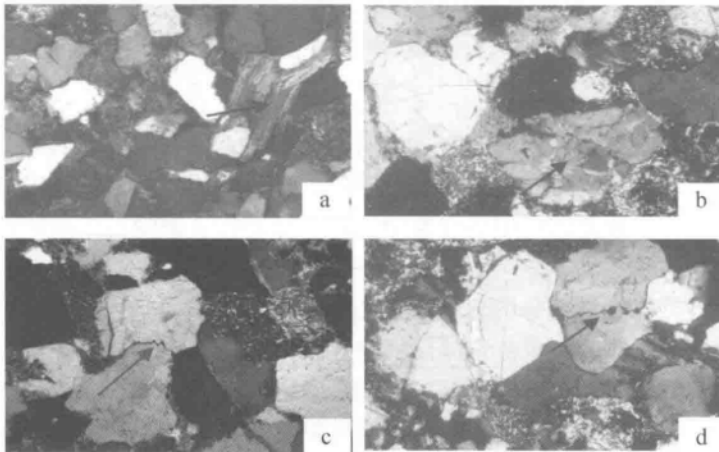


图 1.5 川西前陆盆地上三叠统须家河组储层微观特征照片

(据陈桂菊, 2007)

a—云母弯曲折断 磨 58 井 2143.7m, ×100; b—石英颗粒碎裂后被方解石充填 邛西 2 井 3784.29m, ×100;  
c—缝合线-凹凸接触 磨 58 井 2148.4m, ×100; d—缝合线接触 码 3 井 3578.9m, ×100

#### (2) 胶结作用

胶结作用是指从孔隙溶液中沉淀出矿物质 (即胶结物) 将松散的沉积物粘结成坚硬

岩石的过程，基本上是化学和生物化学作用。胶结作用包括硅质胶结、碳酸盐胶结和黏土矿物胶结等。

硅质胶结主要以两种形式产出，扫描电镜下所观察到的自生石英大部分以次生加大边形式产出，多数充填于粒间孔隙中，少量呈微晶自形石英充填于溶孔内（图 1.6a）。

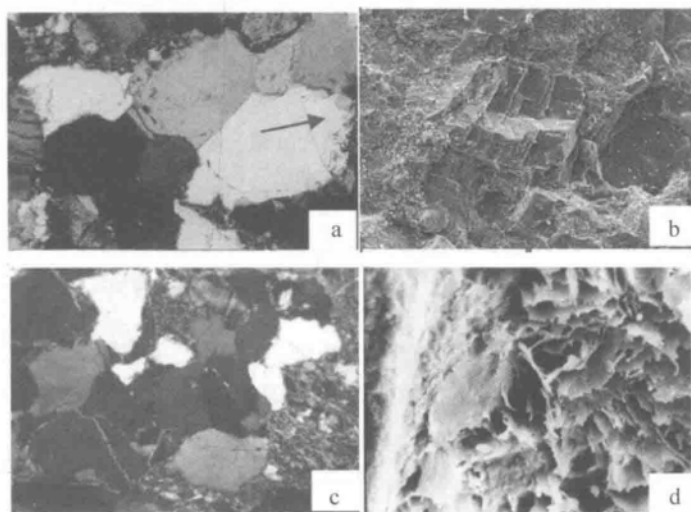


图 1.6 川西前陆盆地上三叠统须家河组储层微观特征照片  
(据陈桂菊, 2007)

a—石英自生加大 平落 2 井 3592.87m,  $\times 120$ ; b—方解石胶结 磨 53 井 2033.97m,  $\times 150$ ;  
c—伊利石环边胶结 磨 58 井 2161m,  $\times 100$ ; d—粒表片状伊利石 中 46 井 2385.67m,  $\times 3000$

碳酸盐胶结作用可分为早期碳酸盐胶结及晚期碳酸盐胶结。早期碳酸盐胶结物以泥晶及亮晶方解石为主，主要形成于沉积早期及压实作用较弱的早成岩期，早期碳酸盐胶结物多以充填原生孔隙的方式出现；晚期碳酸盐胶结物主要为亮晶方解石、铁方解石及白云石和铁白云石，可见其对硬石膏、早期碳酸盐胶结物和碎屑颗粒的强烈交代，可见较好的自形晶形（图 1.6b）。

在岩石沉积过程中和成岩作用早期，黏土矿物是以蒙脱石或蒙皂石颗粒无序分布于岩石颗粒之间的，此时的黏土矿物只是存在于砂岩孔隙部分的空间，并不侵占孔喉通道，对岩石渗透率影响不大。随着成岩作用的不断加强，黏土矿物从蒙皂石向伊利石、绿泥石转化。当黏土矿物从以蒙皂石为主转化成伊蒙混层或绿蒙混层为主时，黏土矿物产状将发生较大变化，转化成有序结构，具有基质状、网格状、紊流状等微细结构，并均匀地充填于砂岩的孔隙和孔喉之中，堵塞孔隙和孔喉，使普通砂岩演变成致密砂岩（图 1.6c, d）。

### (3) 溶蚀作用

溶蚀作用是指岩石组分与周围溶液发生反应，有物质的带入和淋出，并产生新矿物，新矿物与原岩石组分之间具有成分上的继承性。溶蚀作用的结果导致了砂岩中次生孔隙的形成。次生孔隙的形成对致密砂岩储层的储集物性的改善尤为重要。次生孔隙包括粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔、高岭石晶间孔等（图 1.7）。



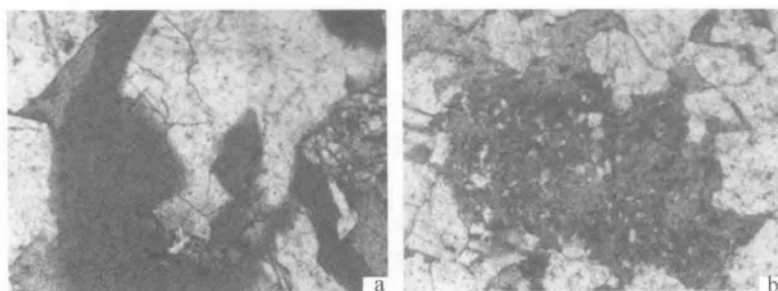


图 1.7 鄂尔多斯盆地大牛地气田储层溶蚀作用特征

(据王光强, 2010)

a—石英颗粒边缘溶蚀成港湾状,  $4 \times 10^{-}$ , 大 48, 2744.7m;

b—岩屑颗粒被溶蚀成颗粒残骸,  $4 \times 10^{-}$ , 大 21, 2495.4m

#### (4) 裂缝化作用

裂缝在控制致密砂岩储层物性上具有十分重要的作用, 在裂缝不发育的层段, 多为致密层或差储层。根据岩心裂缝观察及成像测井资料等, 裂缝可分为构造成因裂缝和非构造成因裂缝两种类型。构造成因裂缝包括张性垂直裂缝、剪切裂缝; 非构造缝包括层理缝、成岩裂缝等。裂缝产出形式多样。如垂直、斜交、网状、水平等, 其中垂直、斜交、网状裂缝的发育程度与单井天然气产能有非常密切的关系。

#### 1.2.1.4 储集空间类型

致密砂岩的储集空间包括原生孔隙、次生孔隙、微裂缝等。原生孔隙主要为原生粒间孔; 次生孔隙包括粒间溶孔、粒内溶孔、溶蚀孔、铸模孔、胶结物溶孔等; 微裂缝主要为构造缝 (表 1.2)。

表 1.2 致密砂岩储层储集空间类型划分表

孔隙类型		特征简述	形成机理	孔隙基本形状
大类	亚类			
原生孔隙	原生粒间孔	碎屑颗粒之间经机械压实和胶结作用后剩余的原生颗粒孔隙	沉积作用	三角状、多角状、不规则
	微孔隙	杂基间、黏土矿物晶间以及碎屑颗粒内、颗粒间的微孔隙		受层段控制、形状不规则
次生孔隙	粒间溶孔	原生粒间孔隙经溶蚀扩大而成	溶蚀作用	形状多样、常呈多角状、不规则状, 位于颗粒之间
	粒内溶孔	长石等矿物或碎屑内的溶蚀孔隙		形态多样, 为长石溶孔, 少量为岩屑粒内溶孔
	溶蚀孔	杂基内选择性溶解而成, 一般孔径较小, 多成微型网状或局部蜂窝状		多呈斑状分布, 孔隙细小
	铸模孔	长石等矿物或碎屑等被完全溶蚀后形成, 仍保留原来的形态		形态多样, 零星分布
	胶结物溶孔	胶结物内选择性溶解所成, 孔径一般不大		不规则网状, 多在粒内
	微裂缝		构造作用	不规则弯曲状, 切割颗粒

(据黄大志, 2009)

### (1) 原生孔隙

原生粒间孔：孔隙中基本没有或有少量填隙物，孔隙大小和分布都比较均匀，基本上反映了沉积时期粒间孔隙的大小和形状。这种孔隙的大小和分布主要受岩性及沉积相控制。

### (2) 次生孔隙

a. 粒间溶孔：粒间填隙物或颗粒边缘被溶解形成的孔隙。其特点是孔隙不受边界限制，孔隙形状多样，且不规则，在孔隙周边都不同程度地保存有溶蚀痕迹。

b. 溶蚀孔：粒间填隙物或颗粒边缘被溶蚀导致孔隙空间扩大。

c. 粒内溶孔：指碎屑颗粒内部所含可溶矿物被溶解，或沿颗粒解理等易溶部位发生溶解形成的孔隙。

d. 铸模孔：此类孔隙是指外形与原组分（如长石颗粒、生物屑）外形特征相同的孔隙，即颗粒发生完全溶解，其原先所占的空间完全变为孔隙，这类孔隙即为铸模孔，铸模孔都是次生的。铸模孔的特点是在其周缘隐见溶蚀边，且孔内颗粒残骸隐约可见。

### (3) 微裂缝

微裂缝是指由于构造变形或物理成岩作用形成的、在岩石中天然存在的小于 0.1mm 的宏观面状不连续体。

#### 1.2.1.5 孔隙结构特征

储层岩石的孔隙结构特征是指岩石所具有的孔隙和喉道的几何形状、大小、分布及其相互连通的关系。

喉道是孔隙空间中半径较小的、仅仅局限在两个颗粒之间连通孔隙的狭窄的空间部分。孔隙喉道的大小及形态主要取决于颗粒组分的接触类型和胶结类型及砂岩颗粒本身的形状、大小、圆度等。在具有不同接触类型和胶结类型的致密砂岩中常见以下 4 种孔隙喉道类型图（图 1.8），分别为：缩颈喉道（a）、片状喉道和弯片状喉道（b）、管状喉道（c）。

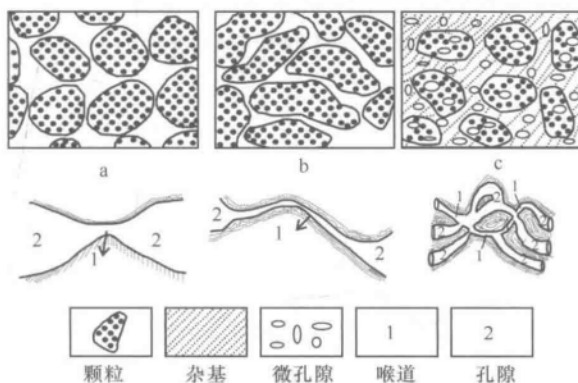


图 1.8 致密砂岩喉道类型图

（据黄大志，2009）

致密砂岩的孔隙结构可用压汞法测定，毛管压力曲线特征参数可反映储集空间的分布特征。鄂尔多斯盆地大牛地气田下石盒子组一段砂岩压力曲线分为三类。I 类毛管压力曲线表现为粗歪度，具有一个较低斜率的平台段，孔喉分选较好，排驱压力较低，一般在 0.1MPa~0.5MPa 之间，中值压力小于 3MPa，最大喉道半径大于 4 $\mu$ m，均值半径大于