



页岩气地质与勘探开发实践丛书·之四

裂缝性油气藏

FRACTURED RESERVOIRS

[英] L.Lonergan R.J.H.Jolly 主编
K.Rawnsley D.J.Sanderson

王玉满 黄金亮 董大忠 等译



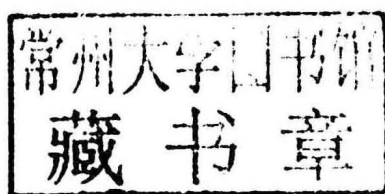
石油工业出版社

页岩气地质与勘探开发头政丛书·之四

裂缝性油气藏

[英] L. Lonergan R. J. H. Jolly 主编
K. Rawnsley D. J. Sanderson

王玉满 黄金亮 董大忠 等译



石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了裂缝性油气藏的基本特征、用中东、北非、北美等地区的实例,分析了开发过程中所涉及的主要地质问题,着重阐述了露头在裂缝性油气藏研究中的作用、地下裂缝识别和成像的最新地球物理技术以及裂缝性油气藏的数值建模技术,对我国致密油气和页岩油气勘探开发具有重要指导意义。

本书可供油气地质人员、开发人员、油藏工程人员及相关院校师生参考阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

裂缝性油气藏/(英)洛纳根 (Lonergan, L.) 等主编;王玉满等译.
北京:石油工业出版社,2015.11

(页岩气地质与勘探开发实践丛书·之四)

书名原文:Fractured Reservoirs

ISBN 978-7-5183-0882-8

I. 裂…

II. ①洛…②王…

III. 裂缝性油气藏-研究

IV. TE344

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 229325 号

Fractured Reservoirs

Edited by L. Lonergan, R. J. H. Jolly, K. Rawnsley and D. J. Sanderson

© The Geological Society of London 2007

All rights reserved.

This translation of *Fractured Reservoirs* first published in 2007 is published by arrangement with The Geological Society of London.

本书经 Geological Society of London 授权石油工业出版社有限公司翻译出版。版权所有,侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2013-4208

出版发行:石油工业出版社有限公司
(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com

编辑部:(010) 64523544

图书营销中心:(010) 64523633

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

2015年11月第1版 2015年11月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:19

字数:485千字

定价:140.00元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

《页岩气地质与勘探开发实践丛书·之四》

编 委 会

主 任：邹才能

委 员：王玉满 黄金亮 董大忠 李新景

王淑芳 管全中 张晨晨 蒲伯伶

吴 伟 冯子齐

译者前言

目前,随着全球油气资源勘探程度的提高,裂缝性油气藏已成为重要的勘探新领域,成为全球油气产量、储量的重要组成部分和增储重点领域之一。尤其是近年来北美和南美地区非常规油气、北非新兴天然气产区的开发,地质理论认识和工程技术的进步推动裂缝性油气藏快速发展,预计未来裂缝性致密油气藏将在能源供应中扮演越来越重要的角色。

我国含油气盆地拥有十分丰富的裂缝性油气藏,其中东部盆地主要为砂泥岩裂缝性油气藏,西南地区裂缝性油气藏主要聚集在碳酸盐岩中,具有非均质性严重、低渗透、油藏类型复杂等特点。裂缝发育、非均质、断层和裂缝的交互作用使得剩余油气分布复杂,开发难度加大,采收率降低。另外,我国还存在大量的泥岩裂缝性油气藏,这些都表明,我国裂缝性油气藏蕴含着巨大的调整挖潜能力。正确识别不同岩性储层裂缝发育程度是裂缝性油气藏勘探开发成功的关键,但从国内外研究现状来看,由于裂缝性油气藏储层非均匀性以及油气储存空间的复杂性,目前尚缺乏全面预测裂缝的研究方法和手段,预测及评价裂缝性油气藏仍处于探索阶段。

本书系统介绍了裂缝性油气藏的基本特征,用中东、北海、北美的生产实例分析了裂缝性油气藏开发过程中的主要地质问题,重点阐述了露头在裂缝油气藏研究中的重要作用、地下裂缝识别和成像地球物理技术以及裂缝油气藏数值模拟技术,对我国致密油气研究具有重要的参考意义和指导价值。中国石油勘探开发研究院王玉满、黄金亮、董大忠、李新景、王淑芳、管全中、张晨晨等参与本书翻译工作,董大忠、王玉满对全书作了统一的校对整理。本书可供从事致密油气、裂缝性油气藏研究的科研人员、工程技术人员及有关高校的师生学习、借鉴和参考。由于译者水平有限,译文中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

前 言

裂缝性油气藏已成为全球油气储量的重要组成部分和增储重点领域，大量剩余储量集中分布于中东地区，其中包括以裂缝流动为主的油气藏。目前，日益增长的全球天然气需求促使中东地区以外的裂缝性油气藏正发挥着越来越重要的作用，例如北美和南美地区的致密气盆地以及北非的新兴天然气产区。多数裂缝性油气藏的采收率相对较低，通常约为 20% 或更低（北海地区砂岩油气藏的采收率约为 50%）。因此，只需要小幅提高采收率，便可导致油气产量大幅增加。

裂缝性油气藏通常具有以下特征：裂缝提供渗透率，岩石基质提供主要储集空间或者岩石的固有基质孔隙度和渗透率较好，裂缝主要起提高油气藏渗透率的作用。对于油田中基质孔隙度和渗透率极低的部分区域或整个油田区（例如结晶岩），裂缝可同时提供必要的储集空间和渗透率。通常而言，裂缝性油气藏极少表现为单一类型，在相同油田的不同层位或不同地理区域，裂缝性油气藏可能具有不同的生产动态。

裂缝性油气藏的表征和建模一直被地球科学家和油藏工程师视为颇具挑战的研究内容，其中所涉及的关键问题之一即油气从岩石基质至裂缝的输导机制。此种输导机制一般极难约束，常需谨慎选择模拟方法以捕捉复杂体系内流动物理过程的范围。裂缝性油气藏开发过程中所涉及的主要地质问题通常为难以识别影响流体流动的裂缝几何形态，尤其是当裂缝网络的主要组成部分低于标准三维反射地震技术的成像分辨率时。裂缝性油气藏通常具有不同的生产特征，油田内不同井的生产速率变化较大，许多井具有较高的初始流速，但递减极快。在此种情况下，仅少数井支撑着产量，大部分井出现早期见水。此时，尽早识别和预测裂缝的作用就显得尤为重要。裂缝识别和预测的部分证据可能来源于钻井（例如钻井液漏失事件和气涌）、流动数据（例如压力恢复试井、旋转器测试数据）以及测井数据（例如成像测井和岩心）。裂缝性油气藏研究的主要目标即探寻油气藏评价阶段的裂缝识别方法，目前，已通过地震属性（例如振幅、速度、横波双折射）分析取得了部分成功，显示出极强的指向性响应。

裂缝性油气藏的另一个主要特征即具有不可预测性和极端动态特征。此类油田的管理需清晰、准确地界定其不确定性范围，最为重要的是量化与开发方案相关的不确定性，并以此为基础确定经济可行性，而非以预测性模型（下一口井的钻探结果即可能证明其不准确性）为基础确定经济可行性。与裂缝性油气藏管理相关的不确定性界定和量化问题目前已成为油气行业的研究热点，其重要性和复杂性必将持续增加。本专辑最后部分的许多实例研究说明了与裂缝几何形态和连通性相关的不确定性评估方法，以及如何将不确定性评估结果纳入油田的油藏模拟。裂缝性油气藏相关挑战的解决方案涉及地下地质学家与工程师之间的密切互动以及多种数据集与技术的综合应用。

本专辑以伦敦地质学会 2004 年 11 月举办的裂缝性油气藏石油组会议为基础，会议召集人旨在为管理裂缝性油气藏或从事裂缝性岩石研究的地质学家和工程师提供一个展示其观点和经验的研讨平台。会议上存在两个反复出现的主题，第一个主题即利用所有尺度的可用数

据（例如地震、测井、成像测井、岩心、露头、钻井以及生产数据），更好地认识裂缝网络及其对裂缝性油气藏中流体流动的影响；第二个主题即综合应用跨地球科学与工程学科的技术和 workflows。本专辑所涉及的 17 篇论文主要侧重于说明上述第一个主题。但是，本专辑最后部分的油气藏实例研究中涉及了第二个主题，将生产和钻井数据纳入油藏模型，并讨论了油气藏管理问题。

露头实例研究有助于认识油气藏中裂缝的分布和作用。本专辑第一部分的四篇论文侧重于露头实例研究，其中两篇直接与伊朗的主要地下储层相关，论述扎格罗斯山逆冲相关褶皱发育期间形成于碳酸盐岩中的裂缝系统，两篇论文均强调力学地层对裂缝系统发育的控制作用。专辑最后部分的一篇论文说明了如何应用详细的露头数据约束相同层位地下储层的裂缝模型（论文中所涉及的实例为阿曼境内下白垩统纳提赫组的石灰岩油藏）。专辑第一部分的另外两篇论文主要论述与正断层相关的裂缝作用的详细研究结果以及单一断裂带对流体流动的影响。

专辑第二部分侧重于介绍地下裂缝识别与成像的最新地球物理技术。Worthington 和 Lubbe 论述了裂缝柔量的各种现场和实验室估计值以及控制裂缝（包括断层）地震可分辨性的参数。Emsley 等论述了裂缝性碳酸盐岩油藏的实例研究，利用 VSP 处理技术缩小成像测井数据与不同品质反射地震数据之间的尺度差异。第二部分最后一篇论文论述了多轴测试系统破裂期间的声发射测量实验，以估算低渗透砂岩中裂缝生长期间的破裂作用分布、方位和类型。

专辑第三部分的论文主要涉及数值模拟和模型模拟技术。Olson 等论述了将成岩作用（例如石英胶结作用）引入地质力学模型时，模拟裂缝网络内部的流动变化。当小开度裂缝段被优先胶结时，裂缝网络内部的流动连通性显著降低。Leckenby 等论述了一系列数值模拟实验的结果，以分析各向异性裂缝几何形态对单相流瞬态压力倒数（模拟试井数据）的影响；其研究结果表明为了利用试井数据识别各向异性裂缝的几何形态，需较长的压降试井/压力恢复试井时间。Dee 等以弹性位错理论为基础，采用地质力学模拟方法，基于三维反射地震数据可识别大型断层的几何形态和滑动分布，预测小尺度断层的分布情况，并将此方法应用于拉张断块的两个油藏（北海和突尼斯）以及委内瑞拉的一个逆冲背斜油藏。专辑第三部分的最后一篇论文对利用模拟模型评估多层褶皱生长期间的裂缝发育情况进行了讨论。

专辑最后部分包括不同地理位置的 6 个油藏实例研究，其中涉及中东、北海和北美。Casabianca 等论述了 Machar 油田（英国北海地区盐底辟之上的裂缝性白垩油藏）开发团队所用的数据和不确定性评估值，以回顾油藏生产动态受产水量快速上升影响时的开发与管理策略。Rogers 等利用具有离散裂缝网络模型（经试井标定）的概念裂缝模型，开展了一系列模拟实验，研究了北海地区挪威 Valhall 白垩油田既定水驱项目的主流通道控制因素和位置的不确定性。Barr 等描述了克莱尔油田（位于西设得兰群岛英国大陆架的裂缝性砂岩油藏）在初始开发阶段（2005 年初）所选用的裂缝分析和模拟技术。此项研究以露头资料和基于钻井与地震数据的裂缝信息（包括基于四分量三维地震勘探的方位角速度信息）为基础，建立了一系列裂缝—基质流动模型，以供油藏模拟器选用。Ozkaya 和 Minton 对阿曼境内的古生界碎屑岩油藏进行了研究，研究结果表明了如何使用井筒成像资料、裸眼测井资料以及动态数据，确定单一导流断层或大型裂缝无法准确识别时的水窜风险。专辑最后部分的最后一篇文章研究了加拿大落基山脉东麓 Waterton 碳酸盐岩气藏（叠瓦状逆冲叠置体内部的背斜构造）的气井动态变化情况。研究中使用并重新解释了地球物理、构造、应力、

基质以及动态数据，建立了西 Carbondale 气藏区的流动模拟模型。研究表明，除一个区域的流动增大归因于地震尺度的主断层之外，裂缝系统并未显著影响气井的观测流动情况。

本专辑得以正式出版归功于众多同行的帮助。在此，感谢伯灵顿大厦会议厅协助组织裂缝性油气藏会议（2004 年 11 月），感谢负责会议主持的同事以及会议赞助商（Badleys 地球科学学院、BP、CGG、PGL、Roxar 以及 Shell）。感谢伦敦帝国学院的 Shashi Luther 和伦敦地质学会出版社为本专辑出版所作的贡献。最后，感谢本专辑论文的审稿专家，其中包括：D. Barr、A. Best、S. Berbauer、Boerrigter、P. Bourbiaux、D. Casabianca、C. Childs、J. Cosgrove、G. Couples、S. Dee、D. Dewhurst、M. Fischer、D. Foulon、O. Gosselin、M. Gross、T. van Heel、S. Jolley、Y. Lagalaye、E. Liu、T. MacRoberts、L. Maerten、G. Makel、T. Manzocchi、J. Muller、T. Needham、R. Nelson、K. McCaffrey、S. Raikes、P. Richard、S. Rogers、C. Sayers、Z. Shipton、R. Singleton、S. Stewart、P. Styles、R. H. Sibson、G. Tuckwell、O. Walderhaug、E. Willemse、L. Wei、M. Worthington 以及 3 名匿名审稿专家。

Lidia Lonergan

Richard Jolly

Keith Rawnsley

David Sanderson

目 录

- 1 伊朗扎格罗斯山脉褶皱相关断裂的构造和地层控制作用对储层发育的意义 (1)
Ben J. Stephenson Anton Koopman Heiko Hillgartner Harry McQuillan
Stephen Bourne Jon J. Noad Keith Rawnsley
- 2 伊朗西南部 Khaviz 背斜 Asmari 组巨型裂缝性油藏的露头实例 (24)
O. P. Wennberg M. Azizzadeh A. A. M. Aqrawi E. Blanc P. Brockbank
K. B. Lyslo N. Pickard L. D. Salem T. Svånå
- 3 断层带的瞬时渗透性与再封闭硬化现象：源自扩容性角砾岩结构的证据 (46)
N. H. Woodcock J. A. D. Dickson J. P. T. Tarasewicz
- 4 犹他州拱门国家公园转换斜坡流体输导能力分析 (59)
Atle Rotevatn Haakon Fossen Jonny Hesthammer Tor E. Aas John A. Howell
- 5 裂缝柔量的标度 (78)
M. H. Worthington R. Lubbe
- 6 利用 VSP 观测减小井震数据之间的尺度差异 (89)
S. J. Emsley P. Shiner N. Enescu A. Beccacini C. Cosma
- 7 与砂岩裂缝有关的声发射和声波速度实验室测量 (99)
W. S. Pettitt M. S. King
- 8 综合考虑成岩作用与力学因素以定量表征裂缝开度分布和裂缝模式渗透率 (106)
Jon E. Olson Stephen E. Laubach Robert H. Lander
- 9 基于离散裂缝网络试井响应模拟的裂缝诱导各向异性研究 (124)
R. J. Leckenby L. Lonergan S. F. Rogers D. J. Sanderson
- 10 基于弹性位错模拟的小尺度断层和裂缝网络特征预测 (148)
S. J. Dee G. Yielding B. Freeman D. Healy N. J. Kuszniir N. Grant P. Ellis

- 11 考虑裂缝倾角域边界的褶皱扩大与形变研究：脆性多层固体石蜡与天然样品的
屈曲实验对比 (166)
L. Bazalgette J. P. Petit
- 12 Machar 油田案例分析——裂缝性白垩油藏水驱开发 (181)
D. Casabianca R. J. H. Jolly R. Pollard
- 13 综合应用离散裂缝网络模型和非稳态压力数据测试挪威北海地区 Valhall 白垩油藏
的概念裂缝模型 (205)
S. Rogers C. Enachescu R. Trice K. Buer
- 14 西设得兰群岛克莱尔油田的开发前裂缝建模研究 (217)
David Barr Kay E. Savory Sue R. Fowler Kate Arman John P. McGarrity
- 15 阿曼北部白垩系碳酸盐岩油藏尺度裂缝非均质性的地表—地下研究 (241)
M. De Keijzer H. Hillgartner S. Al Dhahab K. Rawnsley
- 16 阿曼碎屑岩储层中裂缝带与高导流裂缝的渗流能力研究 (260)
S. I. Ozkaya K. R. Minton
- 17 加拿大西部 Waterton 致密气田泥盆系碳酸盐岩逆冲岩席褶皱带的裂缝与基质
非均质性表征 (279)
K. Rawnsley M. De Keijzer L. Wei S. Bettembourg W. Asyee
J. L. Massafferro P. Swaby D. Drysdale D. Boettcher

1 伊朗扎格罗斯山脉褶皱相关断裂的构造和地层控制作用对储层发育的意义

Ben J. Stephenson^{1,3} Anton Koopman¹ Heiko Hillgartner¹ Harry McQuillan²
Stephen Bourne¹ Jon J. Noad¹ Keith Rawnsley¹

(1. 壳牌开发与生产国际中心; 2. 新西兰尼尔森市; 3. 壳牌(加拿大)公司)

摘要: 本文将高度超过 150m 的裂缝带与顺层滑动面的最新观测结果与 Asmari 组的沉积学描述相结合, 以了解伊朗扎格罗斯山脉裂缝发育的主要控制因素。在库赫帕恩, 与褶皱相关的裂缝带平行于褶皱轴分布(北西—南东), 主要发育于背斜脊部。此类裂缝带由无应变面的褶皱作用产生, 但是在地层达到临界倾角(大约 15°)的地方, 占主导地位的成缝机制是挠褶滑动作用引起的顺层滑动; 其成因关系已经被曲率计算结果所证实。在力学地层单元 B 中, 背斜脊部的裂缝在垂向上分布范围很大(大于 150m), 这主要是因为 Asmari 组块状泥粒灰岩的岩性很均匀。根据卫星图像显示, 裂缝带呈北和东走向, 在空间上与上覆层系的滑脱褶皱作用无关, 但是反映了与断裂运动有关的深层基底再活动作用的分布式效应。裂缝带的走向限定了附近加奇萨兰超大型油田的高产区范围。邻近的库赫米希箱状褶皱由侵蚀作用形成, 翼部倾角很大(60°), 观察结果呈现出一种明显不同的变形样式, 我们认为此种褶皱代表了箱状褶皱演化过程中的不同阶段。

Asmari 组为渐新世—早中新世形成的台地型碳酸盐岩, 是伊朗最高产的油层, 通常也将其视为全球最典型的裂缝性碳酸盐岩之一, 其产油量受裂缝存在与否的强烈影响(McQuillan, 1985)。图 1-1 显示了油田和研究区的地面位置。由于扎格罗斯山脉气候干旱、植被缺乏且岩层大量出露地表, 非常适合利用露头进行裂缝研究。此外, 对于山地油气区而言, 由于技术问题, 可能很难采集到高质量的地震数据, 因此储层尺度的构造成像分辨率有限, 故而露头对比研究所起的作用进一步增大。

在公开发表的文献中, 有关扎格罗斯地区储层尺度裂缝的专门研究相对较少。McQuillan (1973) 对扎格罗斯地区众多褶皱的小尺度裂缝进行了测量, 其中包括库赫帕恩(Kuh-e Pahn)褶皱和库赫阿斯马利(Kuh-e Asmari)褶皱, 其研究表明各单层中的小尺度裂缝密度保持不变。McQuillan (1974) 利用航摄照片对库赫阿斯马利褶皱进行了详细研究, 结果表明虽然褶皱倾伏处和转折带的裂缝密度最大, 但是实际上小尺度裂缝密度并不随其在褶皱中的空间位置变化而变化。石油公司联盟(OSCO)在 20 世纪 70 年代成立了一个裂缝研究小组, 虽然他们的大部分研究成果都未公开发表, 不过 Gholipur (1994) 还是提供了这个小组绘制的一些裂缝分布图。这些分布图突出了平行于褶皱轴和垂直于褶皱轴的 I 型裂缝的重要性, 以及箱状褶皱轴部(转折带)的疏导裂缝位置模型。

Inger 等(2002)通过对法尔斯(Fars)北部的库赫梅马德(Kuh-e Meymand)和库赫塞非达(Kuh-e Sefidar)的观测, 也认为占主导地位的裂缝类型是脊部发育的平行于褶皱轴

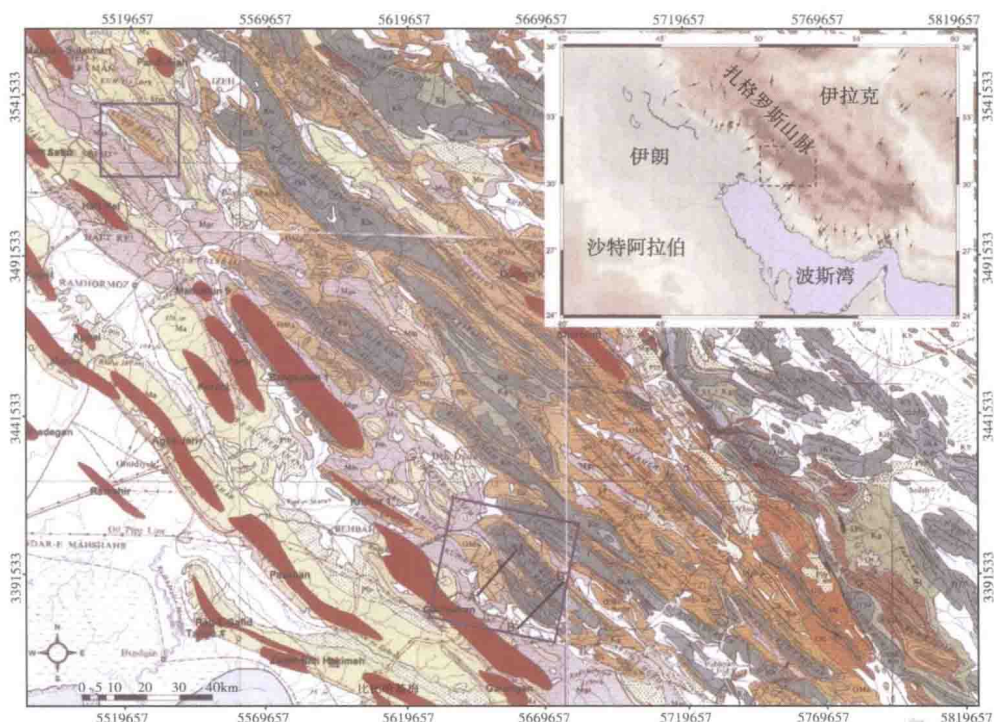


图 1-1 扎格罗斯山脉胡齐斯坦 (Khuzestan) 省区域地质图 (据 NIOC, 1978)

图中叠合了主要油田地下位置的地面投影, 用红色表示。图中绿色表示侏罗系和白垩系, 橙色表示 Asmari 组 (渐新统一下中新统), 紫色表示 Gachsaran 组 (中新统), 黄色表示 Aga Jahri 组和 Bakhtiari 组 (上中新统一第四系)。蓝色方框指示了图 1-3 和图 1-4 所示陆地卫星图像的位置。插图显示了波斯湾地区的区域位置和应力资料。短线方向指示最大水平应力方向 (据 CASMO, www-wsm.physik.uni-karlsruhe.de/pub/casmo/casmo_frame.html)

的 I 型裂缝, 以及与区域右旋剪切作用的一个分量有关的剪切裂缝。此外, 他们还区分了与褶皱前断层作用和褶皱后断层作用有关的不同裂缝。

在前人开展的与褶皱有关的破裂作用模式和机理研究中, 平行于褶皱轴和垂直于褶皱轴的 I 型裂缝通常是主要的研究内容 (Cosgrove 和 Ameen, 2000; Bazalgette, 2004)。

本文展示了基于最新卫星图像的库赫帕恩和库赫阿斯马利褶皱的空间断裂分布观测结果, 以及库赫帕恩和库赫米希 (Kuh-e Mish) 区带规模裂缝的露头观测结果, 这些裂缝可能与附近加奇萨兰 (Gachsaran) 和比比哈基梅 (Bibi Hakimeh) 超大型油田的产油裂缝类似。此外, 坦格巴什特 (Tang-e Basht) 峡谷的观测结果对所绘裂缝图的深度起到了约束作用, 该峡谷穿过库赫帕恩褶皱并与其走向相切割, 提供了唯一一条穿过弯曲褶皱脊部的横剖面。

1.1 扎格罗斯褶皱构造与类型

扎格罗斯造山带由阿拉伯板块东北缘巨厚的被动陆缘层序遭受阿尔卑斯期 (新近纪—第四纪) 褶皱作用所形成 (Colman-Sadd, 1978)。挤压变形作用从东北向西南逐渐推进, 因而变形强度相应地向西南部的美索不达米亚—阿拉伯前陆地区减弱。根据模型驱动的平衡剖面计算, 缩短量为 50~85km (Blanc 等, 2003; McQuarrie, 2004)。图 1-1 中的插图显示了根据地震震源机制和井筒测量资料推测的现今最大水平应力 ($\sigma_{H_{max}}$) 方向, 即在库赫米

希/库赫帕恩地区为北东—南西向 (CASMO, 2004)。被称为下 Mobile 群的寒武系 Hormuz 组蒸发岩是一个滑脱层, 它使基底变形作用与被称为 Competent 群的古生代和中生代厚层沉积物层序分离开来。Competent 群顶部为渐新统一下中新统 Asmari 组, 上覆中新统 Gachsaran 组, Asmari 组又被称为上 Mobile 群 (Colman-Sadd, 1978)。

扎格罗斯造山带通常被视为双倾伏同心型—圆柱状挤压褶皱作用的典型实例。在通常所说的纯褶皱带中, 滑脱褶皱具有接替式—雁列式的空间分布特征 (Price 和 Cosgrove, 1990)。最近还提出了其他一些褶皱作用机制, 包括断层传播褶皱和断弯褶皱 (Mitra, 1990; Suppe, 1983; McQuerrie, 2004)。强制褶皱作用被定义为在一个活动基底断层之上发生的褶皱作用, 用来解释平面图上与扎格罗斯褶皱有关的几何特征 (Sattarzadeh 等, 2000)。

对扎格罗斯地区的露头观测结果表明, 很多褶皱既不属于圆柱状, 也不属于同心型。研究区的背斜在几何特征上实际上接近箱状褶皱, 其特点是背斜两翼较平, 脊部相对平坦—轻微隆起 (图 1-2)。面状侧翼的范围由相对固定的膝折枢纽带之间的共轭膝折带所确定。下面将介绍与扎格罗斯地区箱状褶皱几何形态有关的构造域判别标准。

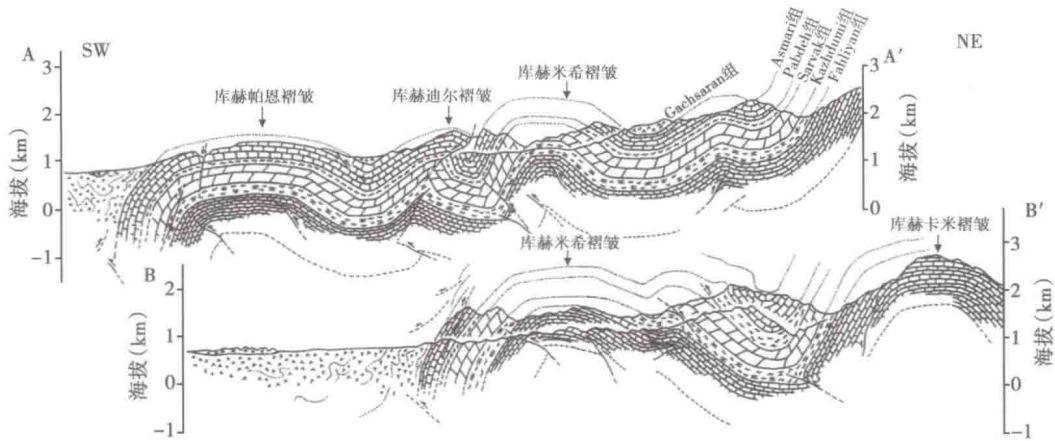


图 1-2 过库赫帕恩和库赫米希褶皱的横剖面
图中显示了褶皱类型, 剖面线的位置参见图 1-1

1.2 基于陆地卫星图像的区域基底断层走向

扎格罗斯碰撞带基底构造的走向由原来发育的各向异性构造的再活动作用所形成。现今阿拉伯板块和伊朗板块的会合与沿扎格罗斯主逆断层的右旋运动有关。在扎格罗斯及阿拉伯前陆地区, 通常可以识别出具有不同成因模式的 4 种明显的构造走向: 阿拉伯 (北南向延伸)、奥利蒂克 (Aulitic) (北东—南西向, 左旋)、厄立特里亚古海 (北西—南东向, 右旋) 以及特提斯 (东西向延伸) (Edgell, 1996)。不少作者都曾在其文章中谈到扎格罗斯地区基底走向对地质过程的影响 (Jackson, 1980; Jackson 和 Fitch, 1981; Hessami 等, 2001)。McQuillan (1985) 描述了基底构造对沉积相演化和盐栓侵位的影响。此外, McQuillan (1985) 还认为前扎格罗斯基底线性构造对比比哈基梅油田和加奇萨兰油田的产量具有控制作用。

为了确定基底构造走向可能对裂缝发育所起的作用, 对纯褶皱带中两个褶皱的卫星图像 (陆地卫星—7 TM) 进行了评价, 即图 1-1 中所示的库赫阿斯马利背斜和库赫帕恩背斜。陆地卫星资料的分辨率介于 15~60m 之间, 因此, 只有长度超过 100m 左右的线性构造才能被

检测出来，正如解释的线性构造的最小长度所显示的那样。

Asmari 组由浅灰色石灰岩组成，无植被覆盖，是扎格罗斯地区的主要储层，构成了研究区鲸背状背斜构造位置最高的一层外壳或顶面。上覆 Gachsaran 组蒸发岩作为区内 Asmari 组储层的良好盖层，通常会较好地保存于植被稀少的不毛之地，也就是背斜地表褶皱区周围的向斜区。大部分线性构造的地文学特征表现为水道，且在不同程度上受构造方向的控制。因此，有必要通过收集硬数据和近距离观测结果来对卫星图像的解释结果进行地面验证，以确认这些线性构造的成因。在库赫阿斯马利背斜，线性构造存在两个主要走向：平行于褶皱轴和垂直于褶皱轴（图 1-3）。野外测绘证实，上述两个方向的线性构造均为 I 型成因裂缝。平行于褶皱轴的裂缝组在背斜顶部中心部位最为发育，它们确定了长度在 0.1~5km 之间的不连续构造的范围。垂直于褶皱轴的裂缝组主要发育于褶皱两翼，形成的不连续构造长度在 0.1~3km 之间。根据解释结果，这两组裂缝均与阿尔卑斯期的褶皱作用有关，它们与相关褶皱的几何形态关系类似于 Stearns（1964）描述的蒙大拿地区提顿（Teton）背斜的 I 型裂缝以及 Bazalgette（2004）提出的概念几何形态。因为没有峡谷穿过库赫阿斯马利背斜，所以很难确定背斜之上这两组裂缝的深度。

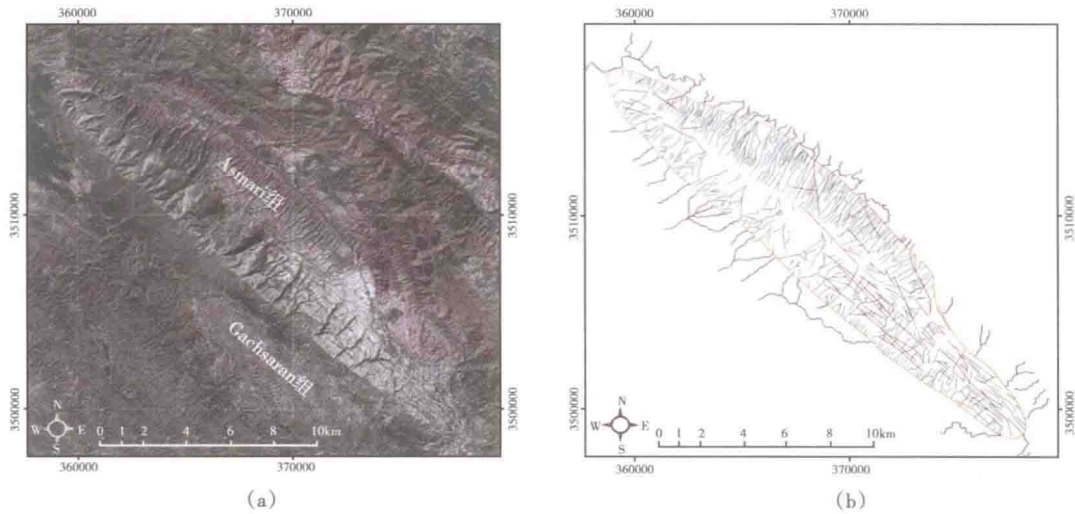


图 1-3 库赫阿斯马利背斜的陆地卫星图像 (a) 和线性构造解释结果 (b)

背斜位置参见图 1-1 西北角的方框。橙色线指示 Asmari 组和 Gachsaran 组之间的接触面位置以及背斜轮廓。红色线指示线性构造走向，这些均为构造而非水道。绿色线表示的线性构造既可以是构造，也可以是水道

将基于卫星图像解释的线性构造与 McQuillan（1974）对库赫阿斯马利背斜所做的航摄影片解释进行对比，立刻就可以发现航摄影片能够分辨更多的裂缝。但是 McQuillan（1974）提供的跨背斜不同构造域中的小尺度裂缝走向的立体投影显示存在两个方向的线性构造，与根据陆地卫星资料观测到的线性构造走向一致，在空间位置上几乎不存在差异。与 McQuillan（1974）一样，我们目前也认为上述两种走向就是扎格罗斯地区与褶皱有关的 I 型裂缝的主要走向。原生和次生裂缝组构分别平行于褶皱轴和与褶皱轴交叉分布，优先发育于大范围隆起的褶皱脊部。

根据库赫帕恩和库赫迪尔（Kuh-e Dil）背斜卫星图像所做的线性构造解释（图 1-4），也显示出同样的平行于褶皱轴和垂直于褶皱轴的两种走向的构造，其长度范围与库赫阿斯马

利背斜的解释结果具有可对比性（图 1-3）。不过它们之间的一个主要区别在于两者的主要区域走向不同，一个为南北向，另一个为东西向。因此，为了推断这些构造（图 1-4 中的紫色线性构造）的分布范围和横向连续性，对这两个背斜周围的一大片区域进行了解释，其中包括库赫米希背斜和库赫卡米（Kuh-e Khami）背斜。解释的线性构造长度通常介于 5~10km 之间，似乎与褶皱带的构造方向无关系，它们分布连续，横穿过几个相邻的褶皱轴。一些南北走向的线性构造横穿过解释区东南部的库赫米希背斜，其长度很短，分布不连续，并已得到不同位置露头观测结果的证实。根据这些构造的空间分布及其相当好的横向连续性，推测它们与构造基底或紧邻的上覆岩层中先前发育的深层各向异性构造的再活动作用有关。在较厚、具有非均匀力学性质的上覆地层层序中，这种再活动作用的应变调节向上传递，因此形成了区域规模、不同走向的裂缝网络，其在整个地区的分布范围较广。这种解释与分布式走滑模型得到的结果一致，分布式走向滑动通常会在上覆地层的上部形成相互干扰的接替式弥散性构造，构造走向既可以相同，也可以相反（Mandl, 1988; Richard, 1991; Richard 等, 1995）。

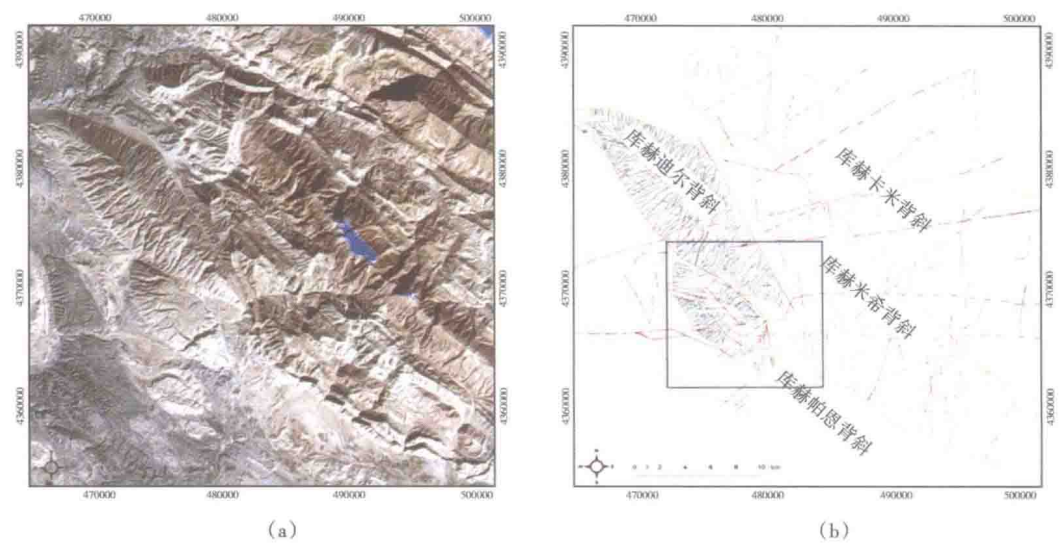


图 1-4 库赫帕恩背斜及邻近褶皱的陆地卫星图像 (a) 和线性构造解释结果 (b)
构造位置参见图 1-1 中心的方框。卫星图像中的青绿色表示积雪。橙色线为背斜轮廓线。暗红色线指示线性构造走向，这些均为构造而非水道。绿色线表示的线性构造既可以是构造，也可以是水道（为清楚起见，只显示了库赫帕恩褶皱和库赫迪尔褶皱的线性构造）。蓝色方框指示图 1-5 的位置

总的来说，扎格罗斯纯褶皱带内库赫帕恩与库赫阿斯马利背斜之间的线性构造方向对比结果说明，除了平行于褶皱轴和垂直于褶皱轴的断裂构造以外，向北和向东延伸的区域性构造对局部裂缝的发育起到了重要作用。

1.3 库赫帕恩背斜区的区域断裂构造线解释

1.3.1 高分辨率卫星图像

为了进一步调查库赫帕恩背斜的局部裂缝发育情况，采集了褶皱的高分辨率 Quickbird 卫星图像，其为 11 位记录，0.7m 分辨率，四波段彩色合成影像，航片地面覆盖范围

12.75km×12.5km。根据方向的不同，进一步细分了解释的线性构造，并采用了颜色编码。观察到的线性构造共4组，其分别优先发育于不同区域（图1-5）：

- (1) 西北部褶皱倾伏处：东西走向（红色）；
- (2) 褶皱翼部：北东—南西走向（蓝色）；
- (3) 背斜中心脊部：北西—南东走向（橙色）；
- (4) 东南部褶皱倾伏处：北北东—南南西走向（绿色）。

上述走向变化和分布部分归因于褶皱表面倾角变化产生的假象。例如，垂直于褶皱轴的水道在背斜翼部最明显，该处坡度最陡且仅部分与裂缝有关。

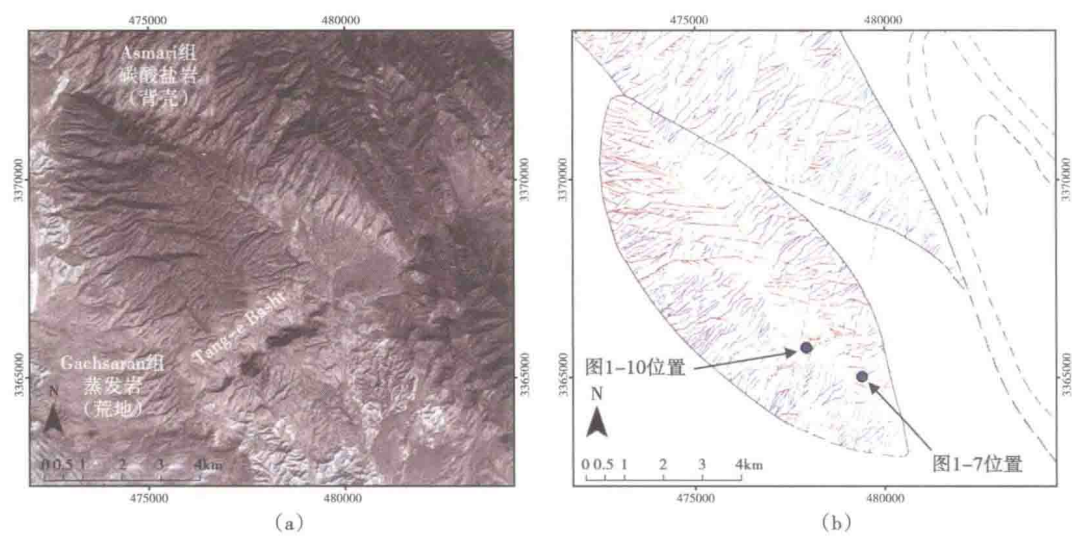


图 1-5 库赫帕恩褶皱的 Quickbird 卫星图像 (a) 和线性构造解释结果 (b)

图像分辨率为 0.7m

陆地卫星资料可分辨的不连续线性构造在 Quickbird 图像上表现为弥散性变形区，通常转换为雁列式的空间分布。例如，在陆地卫星图像上可以识别出西北部褶皱倾伏处的两个分散的东西走向线性构造，但是它们在 Quickbird 图像上却表现为间距相对较近的不连续 I 型裂缝组，并且穿过整个背斜。此外，这些横向稳定的不连续裂缝走向受到基底一条东西走向左旋扭转断层的远距离控制，该断层向上延伸，穿过多个上覆地层层序。当图像分辨率较低时，这些裂缝看上去就会合并为一个穿透构造，其中部分裂缝在横向上稳定地穿过相邻的褶皱。

1.3.2 库赫帕恩背斜的运动学模型

导致扎格罗斯地区褶皱作用的远场最大水平应力为北东—南西方向，这在整个造山带的现今应力状态中仍有所反映（图1-1）。在这个水平应力场方向下，理想化的正交平面应变椭圆及其相关的断层和裂缝方向如图1-6a所示。其中包括北西—南东走向的正断层和（或）I型裂缝（由椭圆外弧拉张作用产生）、北北东—南南西和北东东—南西西走向的（初始）横向剪切构造以及北西—南东走向的冲断层或逆断层。冲断层发育于箱状褶皱枢纽位置较远的一边，形成于褶皱发育的相对早期。在这种情况下，库赫帕恩背斜表面很多北东—南西走向的线性构造（蓝色）都可能是与褶皱作用同时期形成的 I 型裂缝，随后又由于

风化作用而更加明显。但是，此种与褶皱有关的挤压（基本上为平面应变）模型不太容易解释向北和向东延伸的区域性构造及其局部的方向偏离，这些构造在邻近的褶皱中往往横向连续。

图 1-6b 和图 1-6c 显示了两个可能的应变模型；对于构造基底中向北和向东延伸的各向异性构造，当北东—南西方向的最大水平应力方向有利于其发生再活动作用时，就会出现这两种应变模型。图 1-6b 表示一个简单的共轭剪切模型，其上覆构造呈雁列式分布；图 1-6c 显示的是拉张性接替式构造的几何形态，发育于上覆地层中，其走向介于不连续、继承性基底构造的不同走向之间。这两个模型都有效地反映了研究区的上覆地层组构。图 1-6d 将各个应变模型的要素综合起来，从而得到了一个运动学解释模型，显示的示意图与图 1-5 的高分辨率 Quickbird 解释结果相似。据推测，次生裂缝的再活动作用优先出现在与褶皱有关的应变模型中，这就解释了根据图 1-4 中陆地卫星图像解释的北西西—南东东走向线性构造（红色）和北北东—南南西走向线性构造（绿色）的发育，以及东西走向和南北走向的区域性构造（紫色）的相对缺乏。

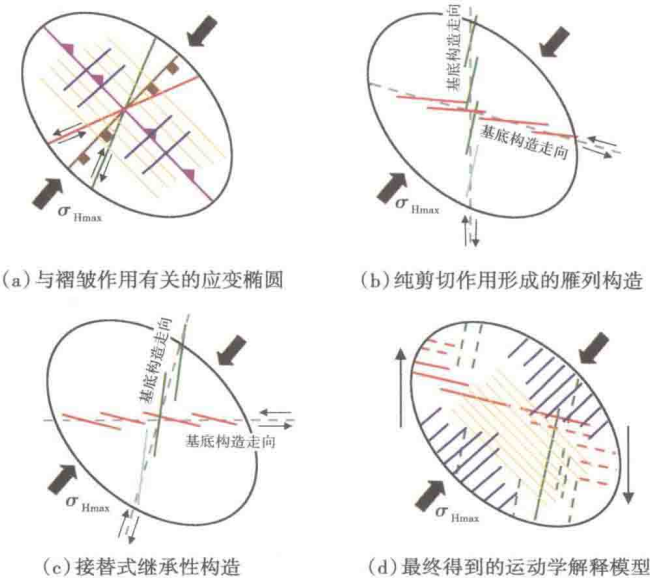


图 1-6 (a) 最大水平应力方向为北西—南东向的正交平面应变椭圆以及相关的正断层（棕色）、逆断层（紫色）和裂缝（蓝色和橙色）的方向。(b) 在纯剪切作用下，由基底断层（灰色）再活动作用所形成的呈雁列式分布的次生剪切构造（绿色和红色）。(c) 不同走向的不连续叠置基底构造之间的拉张性接替式构造。(a) 至 (c) 根据南北向和东西向基底断层再活动作用估计走向。(d) 库赫帕恩背斜线性构造（图 1-5b）解释模型，该背斜经历了具有右旋扭矩的北东—南西向挤压作用

为了获得地面控制资料，测量了库赫帕恩背斜东南倾伏处露头的裂缝方向。始终可以观察到两个裂缝方向，一个为南西西—北东东，另一个为北北东—南南西。根据图 1-7 所示的露头照片，可以证实北北东—南南西走向的 I 型裂缝往往占主导地位，裂缝间距介于 0.2~1m 之间，横向连续延伸可达数十米。向北延伸的裂缝切割第二组南西西—北东东走向的 I 型裂缝，因此形成时间更早。虽然曾经发生过再活动作用，但是任何一条北北东走向裂缝的位移（最大）只有几厘米。在这两组裂缝中均没有胶结物。在部分地方，南西西走向的裂缝组构成梯形节理，成为紧邻北北东走向裂缝组分布的正交 I 型短裂缝。