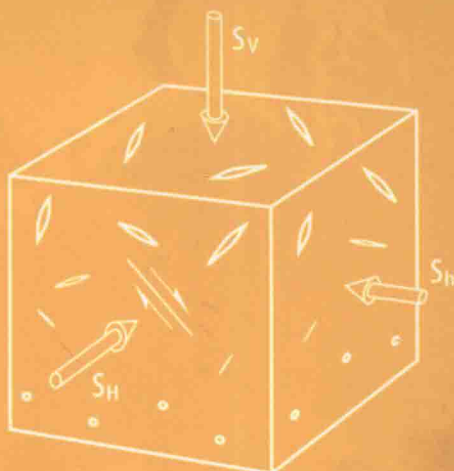


 Springer



地壳应力场

[德] 阿尔诺·赞格 著
奥韦·斯特凡松 译
田家勇 王成虎等
李方全 审校



地震出版社

地壳应力场

[德] 阿尔诺·赞格 奥韦·斯特凡松 著

田家勇 王成虎 等 译

李方全 审校

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地壳应力场/ (德) 赞格 (Zang, A.), (德) 斯特凡松 (Stephansson, O.) 著;
田家勇等译; 李方全审校 —北京: 地震出版社, 2013.10

书名原文: Stress Field of the Earth's Crust

ISBN 978-7-5028-4323-6

I. ①地… II. ①赞… ②斯… ③田… ④李… III. ①地应力场—
研究 IV. ①P315.1

中国版本图书馆CIP数据核字 (2013) 第152739号

著作权合同登记图字: 01-2012-6677

Translation from the English language edition:

Stress Field of the Earth's Crust by Arno Zang and Ove Stephansson

Copyright © 2010, Springer Netherlands

Springer Netherlands is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

地震版 XM3113

地壳应力场

[德] 阿尔诺·赞格 奥韦·斯特凡松 著

田家勇 王成虎 等 译

李方全 审校

责任编辑: 董 青

责任校对: 庞亚萍

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路9号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68455221

专业图书事业部: 68467982 68721991

<http://www.dzpress.com.cn>

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大天成印务有限公司

版 (印) 次: 2013年10月第一版 2013年10月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 385千字

印张: 24.25

印数: 0001~1000

书号: ISBN 978-7-5028-4323-6/P (5012)

定价: 98.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

中译本序一

上地壳和岩石圈是人类社会赖以生存和发展的基础，浅部地壳的岩石工程与人类的繁衍与发展历史渊源，而岩石工程的大发展是近半个世纪的国际社会快速发展和全球人口急剧膨胀所促成的。岩石工程涉及到采矿、土木、人防、铁路、公路、水力水电、防灾减灾、石油开采、固体废物处置等人类社会存在与发展的多个方面。而岩体应力和地壳应力场是这些岩石工程在设计、施工和运营过程中所需要考虑的重要参数之一。岩体应力的这种背景和特点决定其力学原理的科学性和工程应用的艺术性。因此，在岩石力学与岩石工程领域的从业人员必须强调和建立正确的岩石应力概念和工程概念，只有在此基础上，才能谈得上岩石力学学科和岩石工程的发展和创新。

由赞格博士和斯特凡松教授合著的《地壳应力场》正是突出了我们所强调的岩石力学和科学应用概念。书中介绍了地壳应力场和地应力的发展历程及各个时期所取得的成果。书中所讲述的内容广泛、涵盖了地壳应力场和地应力的各个方面。全书分为三个部分，第一部分包括第1到第5章，重点阐述了地应力研究所依据的岩石应力概念以及相关的破裂准则和地壳应力模型；第二部分包括第6到第8章，主要阐述了测试岩石应力的三类方法：物理学方法、基于钻孔的方法和基于岩芯的方法。第三部分包括第9到第11章，主要讲述了应力测试数据在区域应力场、全球应力场等地壳动力学问题研究方面的应用。

该书的作者身兼教师、科研和工程咨询等多重身份，使得书中内容丰富而又自成一体，实在是近年来难得一见的可读性很强的专业著作。而两位译者也是地应力和地壳动力学研究中的后起之秀，对原著的把握准确到位，中文版行文流畅，译文可圈可点。相信无论是本领域的科研和工程技术人员还是高校

的老师和学生，都会从本书的中本版中受益良多。

我们在感谢《地壳应力场》两位著者的同时，也要特别感谢中国地震局地壳应力研究所的两位译者在过去半年多时间内、在承担繁重的科研工作的同时加班加点突击翻译此专著。国内的同行将记住他们在推进地应力研究方面所作的贡献和努力。

冯夏庭

研究员

国际岩石力学学会主席

2013年初夏

中译本序二

地球表面变形和地壳内部的构造运动及其产生的各种地质灾害都与地壳应力作用密切相关。地壳应力状态的变化是导致断裂、褶皱乃至发生地震的最直接动因。研究地壳应力状态及其作用规律不仅对研究地球内部物理过程和探索地震地质灾害机理具有至关重要的意义，而且对能源开发、交通工程、水电工程、矿业工程、核废料处置等工程领域的岩体稳定性评价研究起着核心作用。

地应力测量理论、方法、技术及其应用等方面目前获得迅速发展，其影响也越来越广泛。为了推动地壳应力研究深入开展，加强国内外研究者的学术交流，在2010年第五届国际岩石应力研讨会之后，经国际岩石力学学会批准，成立了国际岩石力学学会地壳应力与地震专业委员会，致力于发展和改进动态地壳应力应变观测技术和方法，加强深孔地应力测量的实验研究，推进地壳应力与地震活动相关性、地震成因与岩石破裂过程的国际合作研究。

斯特凡松教授作为地壳应力与地震专业委员会的委员，积极参与专业委员会活动，于2011年受我所邀请在北京举办了“地壳应力场国际讲习班”，讲授赞格博士与他合著的《地壳应力场》专著，受到与会学员的热烈响应。书中结合著者数十年在地壳应力方面的研究成果和工程应用经验，从理论、技术、应用三个方面，系统介绍地壳应力场的相关研究，填补了目前在岩石力学原理、岩石应力测量、岩石圈应力状态等方面参考文献的空缺。为了使国内更多的从事地应力相关研究的科研人员和工程技术人员从此专著中受益，我提议将此专著翻译成中文出版。这一建议得到了两位著者的积极响应和中国地震局地壳应力研究所广大科研人员的大力支持。

我十分感谢斯特凡松教授和赞格博士多年来对地壳应力与地震专业委员会工作的大力支持和真诚帮助。同时，我还要特别感谢地壳应力研究所田家勇、王成虎这两位年轻的博士，他们在从事自己繁重的科研工作的同时，作为译者，历时一年的辛苦努力，使这本专著的中文版得以付梓面世。

谢锡仁

研究员

中国地震局地壳应力研究所 所长

国际岩石力学学会地壳应力与地震专业委员会 主任

2013年5月14日

译者的话

阿尔诺·赞格博士和奥韦·斯特凡松教授合著的《地壳应力场》一书于2010年由施普林格出版社出版。2010年8月，我们在由国际岩石力学学会（ISRM）发起的第五届岩石应力国际研讨会（中国地震局地壳应力研究所承办）上首次接触到该书。2011年10月12~14日，中国地震局地壳应力研究所邀请奥韦·斯特凡松教授来华举办“地壳应力场国际讲习班”，为来自全国的科研人员和研究生讲授了本书全部内容。该书全面介绍了有关岩石应力方面的基础理论、测试技术、数据解释，将原地应力概念术语及其来源、测量、应用与地球物理学、地质学、地质力学、地质工程学有机地结合起来，是与岩石有关的研究领域中不可多得的好书。因此，在中国地震局地壳应力研究所所长、ISRM地壳应力与地震专业委员会主任谢富仁研究员的支持和鼓励下，我们将该书翻译成中文，推荐给我国与岩石应力研究有关领域的科研技术人员。

本书的序言、前言、致谢、复制插图许可、第1章至第5章、第9章及相应的DVD视频由田家勇翻译，第6、7、8、10、11章及相应的DVD视频由王成虎翻译。译者对对方负责翻译的部分进行了互校。中国地震局地壳应力研究所李方全研究员对本书的翻译稿进行了校核。此外，王华青、邢博瑞等研究生参与了图表绘制、文本录入、视频翻译等工作。阿尔诺·赞格博士和奥韦·斯特凡松教授审核了DVD视频的英文字幕。

本书的翻译和出版得到了中国地震局地壳应力研究所、ISRM地壳应力与地震专业委员会、中国地震局地壳动力学重点

实验室的大力支持，同时也得到了施普林格出版社和地震出版社的全力帮助。在此，译者向原著者及为本书得以出版提供支持和帮助的单位和个人表示衷心感谢。

本书是在译者承担繁重科研工作的同时进行的翻译的，时间紧迫，译者水平有限，译文难免有疏漏和错误之处，敬请读者批评指正。

译者

2013年6月19日

Preface to Chinese Edition

In principle, stresses in the Earth's crust are generated from the sum of gravity and plate tectonic forces. Therefore, rock stresses will vary depending upon depth, lithology and tectonic province. In an area of plate collision, stresses in sedimentary rocks are very different from stresses recorded at a plate spreading area with hard, crystalline rocks. This book describes what rock stress is, how it is measured, estimated, and how data about rock stress are collected and visualized in data bases. The book has been written for students and practitioners in geosciences and rock engineering who needs to broaden their horizons about the stress field of the Earth's crust.

Stresses in the Earth's crust form a cornerstone of several fields of geosciences and technology – from geology and geophysics, to mining, civil and petroleum engineering and energy storage and extraction. China and other parts of the Far East have a dynamic and complicated seismotectonic settings where hazards like earthquakes, land slide, rock fall are frequent. These hazards develop when the stress state in rock and soil exceeds the strength of the geomaterials. China and the rest of the Far East makes a major development for the moment, where large civic works like dams, hydroelectric and nuclear power plants, water and traffic tunnels are constructed and large and deep mines are opened. For the proper design, construction and maintenance of these infrastructures and mines knowledge of the rock stresses is needed. Finally, the demand of energy are steadily increasing and the petroleum and energy engineers have to drill deeper for extracting oil and gas or to reach the hot groundwater to feed the electrical generators with steam. Rock stresses and their measurement are crucial for the stability of the deep drillholes. We believe the young students in China are helped in understanding the fundamentals and engineering applications of the stress field in the Earth's crust from reading this book.

The translation of the book "Stress Field of the Earth's Crust" was proposed and encouraged by Professor Furen Xie, Director General of Institute of

Crustal Dynamics, China Earthquake Administration and President of the International Society for Rock Mechanics (ISRM) Commission on Crustal Stress and Earthquake. Doctor Jiayong Tian, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration translated about the first half of the book, the references and the content of the stress movies on the DVD-ROM. Doctor Chenghu Wang from the same institute translated the second half of the book. Professor Fangquan Li from the Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration reviewed the Chinese translation. The graduate students Huangqing Wang and Borui Xing, both at the Institute of Crustal Dynamics participated in the translation work and were redrawing some of the figures. Our thank goes to the colleagues at The Institute of Crustal Dynamics. China Earthquake Administration

We acknowledge the excellent support by Senior Publishing Editor Qing Dong, Seismological Press of China given to the staff members at the Institute of Crustal Dynamics during the translation work and the support by Senior Publishing Editor Petra D. Van Steenbergen and Publishing Assistant Geosciences Hermine Vloemans Springer Science & Business Media BV at the initial phase of the arrangements of the translation work.

Ove Stephansson and Arno Zang
German Research Centre for Geosciences, GFZ
Dept. 2.6 Seismic Hazard and Stress Field
Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Germany

2013-06-18

谨以此书献给我的妻子科琳娜和我的
孩子们费利可斯、夏洛特、马莱内。同时
我还要诚挚地感谢在德国美因河畔法兰克福
歌德大学任教的我的恩师汉斯·贝克福
默和格哈德·米勒（1940～2002）。

阿尔诺·赞格

我十分感谢我的妻子阿尔穆特对我工
作的支持以及我的孩子们萨穆埃尔和内米
使我的工作和生活实现很好的平衡。

奥韦·斯特凡松

序言

《地壳应力场》这本书是在波茨坦大学地球科学和工程领域的研究生课程讲义基础之上编写的。我个人认为此书将成为研究与岩石有关的专业人士（如地球物理学家、构造地质学家、岩石力学专家以及岩土和石油工程师）的一本标准参考书，因为此书涉及到岩石的最特有的特性——初始应力条件。由于受到重力和构造力的作用，岩石一直处于天然受力状态。地壳应力会随着区域和局部而变化，从而在某些位置达到一定值，造成天然的或人为的机械破坏。事先存在的应力是岩石区别于其他材料的最主要特征，也是20世纪发展起来的“岩石力学学科”的核心研究内容。

对岩石应力的认识是理解断层作用机理和地震触发机制、设计稳定的地下洞室和多产油田、改进采矿方法和地热资源开发等工作的基础。虽然目前已有一些涉及这方面的书籍，但是还没有与像赞格和斯特凡松这本这样包罗万象的书。这本书不局限于已有岩石原地应力测量方法和全球不同应力场的详细介绍。此书首先详细透彻地讲解了应力的概念、原地应力的起源、岩石的破裂准则。前三章是岩石力学的基础，可作为岩石力学入门课程的教材。接着应力测量章节的最后三章，主要通过地球地壳、区域应力场、世界应力图、三个近期的国际野外现场科研项目（KTB、SAFOD、奥尔基洛托工程项目）来描述

原地应力剖面。这三个国际野外现场科研项目吸引了来自世界上许多国家的科学家参与，其最主要的任务之一就是确定原地应力状态。这本书系统总结了这些大项目以及零散发表在许多刊物上的成果，这些研究实例将成为地球科学研究领域的研究人员、老师和学生们宝贵的资源。

有关应力测量的章节类似于百科全书。每一种列出的方法都给予详细描述解释，还附带大量的参考文献，这样读者可以有选择地深入了解相关技术的细节。目前实用的地应力测量方法可以分为基于钻孔和基于岩芯两大类。虽然本书对水压致裂法、套芯解除法、钻孔崩落法这样通用的方法有所重点强调，但是所有方法都是平等对待的，即使这种方法很不常用。

赞格博士和斯特凡松教授作为世界原地应力研究的领军人物之一，为我们提供了这本关于地壳应力场的最为急需的书，有效地弥补了以往教科书由于受到领域限制所带来的不足。这本书将原地应力及其来源、测量、应用与地球物理学、地质学、地质力学、地质工程有机地结合起来。基于此，我诚挚地向你们推荐《地壳应力场》这本书。

贝扎雷·海姆森
美国威斯康星大学
麦迪逊，美国
2009年6月

前言

岩石应力是固体地球科学和技术研究的一个重要参数。长期地质过程，如板块构造运动，在不同机制驱动下，在地壳内产生不同种类的应力。当我们从地壳中采取原材料和通过钻孔、矿井、地下工程向地壳中存放人类改造过的物质时，这些应力就一直存在并发挥着作用。为了更好地利用和节约能源，迫切需要对地壳的应力状态有更好的理解。此书直接针对地质学、地球物理学、土木工程、采矿工程、石油工程、岩石工程领域内的研究生、教师、工程技术人员。本书主要目的是弥补目前文献在岩石力学原理(Jaeger, Cook和Zimmerman, 2007)、岩石应力测量(Amadei和Stephansson, 1997)、岩石圈应力状态(Engelder, 1993)之间的空白。

机械应力和岩石应力都是假设的术语，绝不可能直接测量得到。岩石的应力主要来源于重力和构造力作用，可以通过打孔、开槽、取芯等扰动岩石的方式推测出来。钻孔岩芯可以在实验室内通过不同的物理方法来确定应力。岩石的复杂性使我们不可能准确地确定应力张量分量的大小和方向，从而使我们不得不接受测量结果很大的变化和不确定性。岩石应力通常在连续介质力学框架下描述。为了向地球科学领域内的学生介绍本书，我们采纳弹性理论、连续介质力学、断裂力学、构造地质学、地球物理学、大地测量学、实验物理学、岩石和石油工

程等成熟学科的一些方法。

本书第一部分开始从连续介质力学角度介绍应力的物理概念，紧接着从经典理论到材料强度和现代断裂力学角度介绍了岩石的破坏，然后从材料科学和岩石工程角度介绍了岩石应力术语，最后，给出描述地壳应力大小随深度变化的简单物理模型。本书第二部分首先介绍了应力测量中的物理学方法，这些方法利用材料科学领域的标准实验物理技术确定残余应力，紧接着针对地应力测量方法。本书分为基于钻孔的技术（如套芯解除法、水压致裂法、钻孔崩落法）和基于岩芯的方法（如非弹性应变恢复法、凯瑟^①效应法）这两章分别来介绍：“区域应力数据”这一章重点论述综合应力测量策略的方方面面以及在科学深钻计划（KTB，德国）、核废料储存工程（奥尔基洛托，芬兰）和地震活动断层监测（SAFOD，美国）中的应用；在“通用应力数据”这一章主要报道应力大小剖面 and 应力方向图的一般趋势，其中应力状态尺度关系被用来建立最佳应力估算模型。最后一章依据板块构造概念，从热自平衡行星地球角度来解释欧洲和世界应力图。

基于我们的经验和在这个领域的专长撰写这本经典的黑白教科书（除了8张彩图）。结合附书后的DVD光盘，读者将会从这本书中获益良多。在书中正文边缘处注有电影符号的地方，读者可以播放DVD光盘中相应的视频文件。这些视频材料主要包括复杂科学概念的解释，复杂实验仪器或地应力野外测试装备的展示说明，以及同岩石应力研究与测量技术专家的访谈音像记录。听完和看完相关音像后，读者可以回到书中正文。但当读者在读看过程中感到困惑的时候，读者可以直接跳到每一章节最后标有“关键点”的部分，通过这部分内容读者可以回顾整个章节的主体内容。

本书中展现的内容均基于两位作者多年的研究和工作实践。

^①凯瑟，Kaiser，按照世界人名翻译大词典（新华社译名室编，中国对外翻译出版公司，1993年）应翻译为“凯泽”，本书依目前国内岩石力学领域的约定翻译为“凯瑟”。

在写作过程中，作者收集了大量相关领域的重要参考文献，试图让读者了解到有关理论、实验、现场测试、应力数据编辑与分析等方面的最新进展。尽管如此，在本书的撰写过程中，我们可能也会遗漏了一些文献，希望读者能够体谅和包涵。这本书的撰写材料可以追溯到1999年第一作者在波茨坦大学为地球科学领域的学生教授《地壳应力场》课程时的教学笔记。

阿尔诺·赞格和奥韦·斯特凡松

波茨坦

2009年5月