



中国石油大学（北京）学术专著系列

异常地层压力 分析方法与应用

Analysis Methods and Applications of
Abnormal Formation Pressures

樊洪海 著



科学出版社

异常地层压力 分析方法与应用

Analysis Methods and Applications of
Abnormal Formation Pressures

樊洪海 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以现有地层压力相关著作和文献为基础,结合笔者在长期科研实践中的部分成果编写而成。全书正文共八章,概括了地层压力分析涉及的沉积学与岩石力学基本理论;论述了异常地层孔隙压力的形成机制及利用录井、测井、地震数据计算地层孔隙压力的主要方法;探讨了地层孔隙压力的非常规确定方法和复杂地层的超压计算方法;介绍了油气井工程中的地应力、地层破裂压力、地层坍塌压力、地层漏失压力等的确定方法;分析了异常高压对油气运聚成藏及油气田开发的影响。附录部分则对笔者开发的“地层压力分析系统”软件作了简要介绍。

本书可作为从事石油工程和石油地质相关工作的科研技术人员的参考书,亦可作为相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

异常地层压力分析方法与应用=Analysis Methods and Applications of Abnormal Formation Pressures/樊洪海著. —北京:科学出版社,2016.3

ISBN 978-7-03-047764-4

I. ①异… II. ①樊… III. ①地层压力-分析方法

IV. ①TE311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 053081 号

责任编辑:万群霞 李 娟 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张:22 1/2 插页:10

字数:500 000

定价:158.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

地层压力是井身结构设计与钻井液密度程序设计的依据,地层压力预测是钻井设计的核心内容。地层压力系统预测的任何偏差都会对钻井设计与施工造成严重的影响,我国石油工业史上的钻井工程报废与井喷失控事故从本质上讲,大多与地层压力系统预测出现偏差有关,因此,准确预测地层压力系统对钻井设计至关重要。

地层压力预测工作在我国石油工业史上也经历了一些反复。在二十世纪八十年代前,原石油工业部钻井局就开始强调地层压力分析工作,并将其作为科学打探井的重要工作之一,一些专家学者开始开展地层压力监测、检测与预测工作。在此后的一段时间,钻井界认为地质学家对地层研究更为充分,因此,地层压力在钻井设计中应由地质工作者在地质录井设计中提供,钻井设计人员不再进行地层压力分析。但现在的主流观点认为,地质工作者提供地层压力并不能体现责、权、利相统一的原则。因为地质工作者认为在探井中认识地层压力出现偏差是允许的,探井时 70% 的预测精度也是可行的;而在钻井工程方面,如果出现地层压力预测的偏差,则会导致钻井工程报废或出现重大安全环境事故,这对钻井来说是绝不允许的。因此,一个负责任的钻井设计人员一定要精细分析地层压力情况,对地层压力系统做到心中有数,这样才能保证设计的井在施工中万无一失,才能保证不出现意外的井喷事故与工程报废。

中国石油大学(北京)的樊洪海教授自二十世纪九十年代初就致力于地层压力预测的研究,长期开展新疆塔里木盆地、准噶尔盆地等复杂压力系统地区的压力预测,解决了许多高难度地区的压力预测难题,为这些地区的井身结构与钻井液密度程序确定提供了依据,得到了油田现场与钻井设计、施工单位的高度评价。在长期的实践中,樊教授发明了 Fan 预测模型,形成了综合预测方法。在综合运用国内外各种先进预测模型、方法的基础上,开发了地层压力预测软件。这一软件目前已成为我国石油行业应用最普遍的软件,深受用户好评。

在此基础上,樊教授将自己多年的实践经验与研究成果,结合国内外地层压力预测的最新成果,编著成书。该书的出版对提高压力预测水平具有非常重要的作用,必将是钻井设计人员开展地层压力预测的重要参考书,可以使设计人员更深入地理解压力预测的方法、原理,从而提高压力预测的可信度与精度。同时该书也是地质研究中关心地层压力人士的重要参考书。

诚然,作为首次出版的系统性专业书籍,该书还会有不完善之处。可喜的是,樊教授仍在继续地层压力预测方面的研究,相信通过持续的钻研,一定还会有新的突破,必将不断丰富该书的内容,为地层压力预测做出新的贡献。

查永进

2015 年 6 月于北京

前 言

地层孔隙压力是地层孔隙和缝洞中的流体(水、油、气)所具有的压力。地层某处的地层孔隙压力与对应深度处的地层水静液压力不相等的情况则称为异常地层压力。地层孔隙压力是钻井工程设计与施工的必备数据,也是油气运聚成藏和油气田开发动态分析的基础资料。

有关地层异常压力的研究已有 60 余年,积累了一些成熟的理论和较好的应用方法。尤其是近 20 年来,异常高压形成机制、地层压力的计算模型和方法、基于高精度地震资料的二维/三维地层压力预测等内容有了较多的进展。同时,针对灰岩、碳酸盐岩等特殊复杂地层和多成因共同作用的异常高压计算和分析,科研工作者们进行了一些新探索。但国内常见的介绍地层压力的著作成书较早,不能有效地将地层压力理论的新方法和新进展简单明了地提供给科研技术人员。鉴于此,基于现有的异常地层压力相关著作和笔者十余年来积累的地层压力预测分析与实时监测方面的科研技术成果,吸收国内外文献中的新理论、新方法,加以系统总结和合理编排,著成本书。

全书共八章,包括地层压力分析的沉积学与岩石力学基础、异常地层压力形成机制与判别方法、地层孔隙压力的实钻数据监测方法、地层孔隙压力的测井数据检测方法、地层孔隙压力的地震数据预测方法、地层孔隙压力的其他分析方法、地层孔隙压力在油气井工程中的应用、异常高压与油气成藏及油气田开发。在内容上,本书介绍了上覆岩层压力的“线性-指数式”回归模型、地层孔隙压力测井数据检测的“简易方法”和“综合解释方法”计算模型,以及地震资料预测的“单点预测算法”和“综合预测算法”、二维/三维地层压力预测方法和剖面显示等内容,具有一定的创新性;在编排上,本书遵循概念→理论→方法→应用的逻辑顺序,注重常规方法与新方法的对比;本书以实用性为重要目标,对数据处理、计算模型、分析过程等均给出了步骤流程、操作经验和现场实例,体现了本书的特色。

在本书的成稿过程中,笔者的研究生李朝玮、牛军、邓嵩、王义顷、沈维格、刘劲歌、赖敏斌、赵国光、叶志、张洪宝、耿智、王鄂川、陈绪跃等参与了资料的收集整理和部分编写工作,编写中参考了一些前人的文献成果,在此表示感谢。

由于笔者水平有限,书中难免有不足之处,向读者表示歉意。笔者真诚希望读者对本书进行评论,并将不足之处和进一步完善的建议反馈给我们(fanh@cup.edu.cn),以便进一步修订。

樊洪海

2015 年 5 月于北京

目 录

序

前言

第 1 章 地层压力分析的沉积学与岩石力学基础	1
1.1 沉积岩的分类与形成过程	1
1.1.1 沉积岩概述	1
1.1.2 陆源碎屑岩及其成岩作用	6
1.1.3 碳酸盐岩及其成岩作用	18
1.1.4 其他沉积岩类型概述	21
1.1.5 地质时代与地层划分	26
1.2 沉积岩地层的孔渗性能与地层孔隙压力	28
1.2.1 沉积岩的孔渗性和孔缝空间特征	29
1.2.2 沉积岩地层中的孔隙流体类型	37
1.2.3 地层水的密度与静水压力计算	40
1.2.4 地层孔隙压力的状态及分类	44
1.3 沉积岩地层的力学特性与物性参数	47
1.3.1 地下岩石的有效应力定理与应力-应变关系	47
1.3.2 地层岩石的主要物性参数和常用强度参数	53
1.4 沉积岩地层的压缩性与压实函数	63
1.4.1 沉积岩的压缩性	63
1.4.2 正常沉积地层的孔隙度方程	64
1.4.3 地层沉积过程中的压实函数	67
1.5 上覆岩层压力计算	69
1.5.1 上覆岩层压力的计算公式	69
1.5.2 密度测井数据的预处理	70
1.5.3 上覆岩层压力计算实例	71
第 2 章 异常地层压力形成机制与判别方法	73
2.1 异常高压的形成机制	73
2.1.1 异常高压成因分类	73
2.1.2 符合原始沉积加载曲线的异常高压机制	77
2.1.3 符合再次加载的异常高压机制	79
2.1.4 符合卸载曲线的异常高压机制	83
2.1.5 孔隙度基本无变化的异常高压机制	90
2.2 异常高压的保持与释放及压力过渡带	91

2.2.1 异常高压的保持与释放	91
2.2.2 压力过渡带及其识别	93
2.3 异常低压形成机制	94
2.3.1 异常低压的不同形成机制	95
2.3.2 地层抬升与剥蚀作用	95
2.3.3 流体的生产	96
2.3.4 其他原因泄压	96
2.4 异常高压形成机制判别方法	98
2.4.1 岩石物性参数的传导属性和体积属性	98
2.4.2 基于沉积压实力学关系的异常高压成因分类	99
2.4.3 异常高压形成机制的判别步骤	101
2.4.4 异常高压成因的判别实例	104
2.5 地层孔隙压力确定方法研究现状与趋势	105
2.5.1 地层孔隙压力确定方法分类	105
2.5.2 传统地层孔隙压力确定方法分析评价	107
2.5.3 地层孔隙压力确定技术最新发展	108
第3章 地层孔隙压力的实钻数据监测方法	112
3.1 获取实际地层孔隙压力的方式	112
3.1.1 钻完井地层孔隙压力测试	112
3.1.2 井下压力计简介	114
3.1.3 地层压力测试解释方法	116
3.2 d_c 指数法	117
3.2.1 d_c 指数法的原理和特点	117
3.2.2 d_c 指数法监测地层孔隙压力的算法步骤	122
3.2.3 实例应用	124
3.2.4 PDC 钻头钻进时 d_c 指数法的应用	125
3.3 基于机械比能钻头磨损校正的 d_c 指数法	128
3.3.1 影响 d_c 指数法监测精度的因素	128
3.3.2 基于机械比能理论钻头磨损校正的 d_c 指数模型	130
3.3.3 利用指数法计算地层孔隙压力的技术步骤	136
3.3.4 实例应用	138
3.4 sigma 录井法	140
3.4.1 sigma 录井法原理	140
3.4.2 sigma 指数正常趋势线	142
3.4.3 sigma 指数法地层压力监测	143
3.4.4 利用 sigma 指数计算地层孔隙度	143
3.4.5 实例应用	144
3.4.6 修正的 sigma 指数法	145

3.5 标准化钻速法	146
3.5.1 标准化钻速法的基本原理	147
3.5.2 改进的标准化钻速法	150
第4章 地层孔隙压力的测井数据检测方法	152
4.1 利用测井资料确定地层孔隙压力概述	152
4.1.1 用测井资料检测地层孔隙压力的优点	152
4.1.2 正常趋势线法的基本原理及其局限性	153
4.1.3 测井资料检测地层压力新方法概述	155
4.2 基于正常压实趋势线的经验系数法和等效深度法	158
4.2.1 声波测井法	158
4.2.2 泥岩电阻率测井法	162
4.2.3 泥岩密度测井法	163
4.2.4 计算砂岩层的地层压力	164
4.3 基于正常压实趋势线的 Eaton 法	164
4.3.1 Eaton 法计算模型	164
4.3.2 趋势线的建立与指数 N 的合理确定	165
4.3.3 Eaton 法计算实例	166
4.4 利用泥岩声波速度检测地层压力的 Bowers 方法	168
4.4.1 Bowers 沉积压实加载曲线方程	168
4.4.2 Bowers 卸载曲线方程	168
4.4.3 地层孔隙压力计算	169
4.4.4 Bowers 方法模型系数的确定	169
4.4.5 Bowers 方法计算实例	169
4.5 利用声速检测欠压实泥岩异常高压的简易方法	171
4.5.1 计算模型建立	171
4.5.2 模型系数的确定方法	172
4.5.3 建立地层孔隙压力剖面的计算步骤及程序模块	173
4.5.4 方法的特点和适用范围	173
4.5.5 方法的应用实例与效果评价	173
4.6 利用多种测井资料检测地层压力的综合解释法	174
4.6.1 问题的提出	174
4.6.2 模型的理论基础	175
4.6.3 模型的建立	176
4.6.4 速度模型参数的确定方法	177
4.6.5 压力剖面建立的步骤	178
4.6.6 应用示例与方法评价	179
4.7 基于压实函数的孔隙压力检测模型	180
4.7.1 基本思路	180

4.7.2 孔隙度的确定方法——岩石物理模型	180
4.7.3 基于压实函数的方法在羊塔克地区的应用	181
4.8 其他测井数据检测地层压力的方法	186
4.8.1 Miller 波速法	186
4.8.2 Skagen 法	187
4.9 资料收集与测井数据的预处理	189
4.9.1 检测地层压力需要收集的资料	189
4.9.2 用于压力检测的测井数据的校正	189
4.9.3 测井数据过滤平滑	194
4.9.4 测井数据分层取值	194
4.9.5 泥岩测井参数的提取	197
第5章 地层孔隙压力的地震资料预测方法	199
5.1 地震资料预测地层压力概述	199
5.1.1 地震资料预测地层压力的基本概念	199
5.1.2 地震资料预测地层压力的传统方法	200
5.1.3 地震资料预测地层压力的传统方法的缺陷	201
5.1.4 提高地震资料预测地层压力精度的措施	202
5.2 层速度的合理求取方法	203
5.2.1 时深关系计算模型	203
5.2.2 层速度的合理求取方法与校正	204
5.3 单点预测模型与应用	206
5.3.1 模型简介	206
5.3.2 地层孔隙压力预测的步骤	207
5.3.3 特点与使用条件	208
5.3.4 现场应用与效果评价	208
5.4 综合预测算法与应用	210
5.4.1 问题的提出	210
5.4.2 Scott 综合算法简介	211
5.4.3 Scott 综合算法模型存在的缺陷	212
5.4.4 一种新的“综合算法”模型	214
5.5 二维/三维地震资料反演求取层速度	219
5.5.1 地震资料反演概述	219
5.5.2 常用的地震反演软件与反演流程	220
5.5.3 二维/三维地震层速度反演实例	223
5.6 二维/三维地层压力的预测方法	225
5.6.1 二维/三维地层压力预测	225
5.6.2 二维/三维地层压力可视化技术简介	227
5.6.3 二维/三维地层孔隙压力计算实例	229

5.6.4 二维/三维上覆岩层压力计算	233
5.7 影响地震资料预测地层压力的因素及对策	234
5.7.1 压力预测中速度谱受到的影响	234
5.7.2 提高预测准确性的对策	236
5.8 地震预测地层压力面临的问题与挑战	237
5.8.1 地震预测地层压力面临的主要问题	237
5.8.2 地震预测地层压力面临的挑战	239
本章附录	241
附录 5.1 Scott 综合算法求解流程	241
附录 5.2 新“综合算法”计算流程	243
第 6 章 地层孔隙压力的其他分析方法	249
6.1 人工神经网络法	249
6.1.1 人工神经网络简介	249
6.1.2 BP 神经网络的算法原理	250
6.1.3 利用 BP 神经网络预测地层孔隙压力	250
6.1.4 实例分析	252
6.2 数值计算方法	252
6.2.1 有限元法	252
6.2.2 实例分析	253
6.2.3 盆地模拟方法	253
6.3 随钻地震方法实时预测地层压力	256
6.3.1 随钻地震技术	256
6.3.2 地层压力随钻预测	258
6.3.3 实例分析	258
6.4 复杂构造区的压力估算	259
6.4.1 压力估算方法	259
6.4.2 实例分析	260
6.5 富油气盐膏层系的超压识别与预测研究概况	262
6.5.1 超压带定性识别	263
6.5.2 超压地层定量预测	264
6.6 碳酸盐岩地层的异常压力	266
6.6.1 碳酸盐岩地层的异常压力成因	266
6.6.2 碳酸盐岩地层的异常压力计算方法	266
6.7 地层孔隙压力计算的不确定性分析	268
6.7.1 地层孔隙压力计算的不确定性	268
6.7.2 降低孔隙压力不确定性措施	269
第 7 章 地层压力在油气井工程中的应用	270
7.1 地下压力概述	270

7.1.1 地层破裂压力	270
7.1.2 地层坍塌压力	271
7.1.3 地层漏失压力	271
7.2 地应力确定方法	272
7.2.1 地应力状态分类	272
7.2.2 地应力测试方法	273
7.2.3 地应力预测模式	277
7.2.4 利用测井资料建立地应力剖面	278
7.3 地层破裂压力确定方法	279
7.3.1 常用计算方法简介	279
7.3.2 地层破裂压力试验(漏失试验)法	282
7.3.3 基于地破试验数据的实用方法	283
7.4 地层坍塌压力确定方法	284
7.4.1 地层坍塌压力计算方法	284
7.4.2 岩石力学参数的确定	285
7.4.3 地层三个压力剖面实例计算	287
7.5 地层漏失压力确定方法	288
7.5.1 地层漏失压力计算方法	288
7.5.2 地层漏失压力实例计算	291
7.6 地层压力与钻完井设计	292
7.6.1 地层压力与井身结构设计	292
7.6.2 地层压力与钻井液密度设计	294
7.6.3 异常压力地层的钻完井设计	295
7.7 异常地层压力与钻井复杂情况	295
7.7.1 异常地层压力与井喷	296
7.7.2 异常地层压力与井塌	298
7.7.3 异常地层压力与井漏	300
7.7.4 海底浅层的异常压力	301
7.7.5 异常高压与控压钻井	303
7.7.6 异常低压与欠平衡钻井	305
第8章 异常高压与油气成藏及油气田开发	306
8.1 异常高压环境中有机质热演化与生烃作用	306
8.1.1 有机质演化的超压抑制作用	306
8.1.2 有机质演化中超压的其他作用	310
8.2 异常高压地层的油气运聚与成藏	311
8.2.1 异常高压与油气运聚	311
8.2.2 异常高压与油气成藏	314
8.2.3 古压力	314

8.3 油气田开发过程中的储层压力变化	316
8.3.1 目前油层压力及其分布	317
8.3.2 油层折算压力及储层压力监测方法简介	319
主要参考文献	323
附录 “地层压力分析系统”软件功能简介	330
A1 概述	330
A2 软件主要功能简介	331
A2.1 数据库及数据库管理模块	331
A2.2 上覆压力计算模块	332
A2.3 测井压力分析模块	333
A2.4 录井压力分析	337
A2.5 地震压力预测	337
A2.6 3D 压力预测	341
A2.7 三维显示	341
A2.8 坍塌压力计算模块	342
A2.9 单井剖面输出子模块	342
A2.10 帮助模块	342

彩图

第1章 地层压力分析的沉积学与岩石力学基础

地层孔隙压力(formation pore pressure)是指地层孔隙和缝洞中的流体(水、油、气)所具有的压力,在石油地质中常简称为地层压力(formation pressure)。地层压力对石油地质、油气钻井和油田开发都具有重要的意义。地层压力的产生和变化主要发生在地壳浅部的沉积岩地层,并与岩石的结构和力学特性密切相关。本章总结了沉积岩的分类与形成过程、孔缝空间形态、孔隙流体类型、地层孔隙压力的状态与分类、岩石骨架特征与压实函数等基本理论,介绍了静水压力和上覆岩层压力的计算方法,以便为后文的异常地层压力形成机制、地层压力确定方法与应用等内容奠定基础。

1.1 沉积岩的分类与形成过程

地球岩石圈主要由沉积岩、岩浆岩和变质岩三大类岩石组成,但石油与天然气的形成、运移和保存主要发生在地壳浅部的沉积岩地层,石油与天然气的勘探、钻井和开采等过程主要针对沉积岩地层,地层压力及地应力、地层破裂压力和地层坍塌压力等地下压力概念也主要与沉积岩地层相关。

沉积岩(sedimentary rock,又称水成岩)是在地表不太深的地方,母岩(岩浆岩、变质岩、先成的沉积岩)的风化产物、火山喷发物、生物残骸等经过搬运作用、沉积作用和沉积后作用形成的岩石。沉积岩广泛分布在岩石圈的上部和地壳表层部分。陆地面积的大约75%被沉积物(岩)所覆盖,平均厚度为1.8km;海底则几乎全部被沉积物(岩)所覆盖,平均厚度为1.0km。沉积岩在地壳表层的分布厚度变化很大,有的地方如某些地槽区可达几十千米,但大部分地台区则很薄,甚至没有沉积岩的分布而直接出露岩浆岩和变质岩。沉积岩中蕴藏着大量矿产资源,世界资源总储量的75%~85%是沉积和沉积变质成因的,石油、天然气、煤和油页岩等可燃性矿产及盐类矿产几乎全为沉积成因。

在地层压力研究中,了解沉积岩的类型和形成过程有助于认识岩石的孔缝空间结构和骨架力学特性,为分析异常地层压力的形成机制和分布特征、分机制建立地层孔隙压力计算模型提供参考。虽然岩浆岩和变质岩中也可能存在孔隙流体压力,但相关的研究并不成熟,故本书只对沉积岩的地层压力进行论述。

1.1.1 沉积岩概述

1.1.1.1 沉积岩的分类

在沉积学中,沉积岩的分类原则主要有成因分类和物质来源分类。按沉积作用方式不同,可将沉积岩分成碎屑岩、化学岩和生物化学岩等基本类型;按照沉积物的来源不同,分为来自地壳内部(火山碎屑岩)、内源(形成于盆地内部,内生、自生、盆内)沉积和外源

(形成于盆地外部,外生、他生、盆外、陆源)沉积。在我国地矿和石油系统中有代表性的沉积岩分类见表 1.1.1 和图 1.1.1。在沉积岩地层中,各类陆源沉积岩及内源沉积岩中的碳酸盐岩在地壳中的分布最为广泛。

表 1.1.1 沉积岩的分类(曾允孚和夏文杰,1986)

基 本 类 型						附生类型
火山碎屑岩 (按结构细分)	陆源沉积岩		内源沉积岩			附生岩
	陆源碎屑岩 (按结构细分)	泥质岩 (黏土质岩) (按成分和固结强度细分)	蒸发岩 (盐岩)	非蒸发岩	可燃性有机岩 (碳质岩)	
			(按成分细分)			
集块岩 火山角砾岩 凝灰岩	砾岩和角砾岩 砂岩 粉砂岩	高岭石黏土(岩) 蒙脱石黏土(岩) 水云母黏土(岩) 泥岩 页岩	石膏、硬石膏岩 石盐岩 钾镁盐岩	铝质岩 铁质岩 锰质岩 磷质岩 碳酸盐岩 硅质岩	煤 油页岩	铜质岩 沸石质岩 海绿石质岩 硫质岩 铀质岩

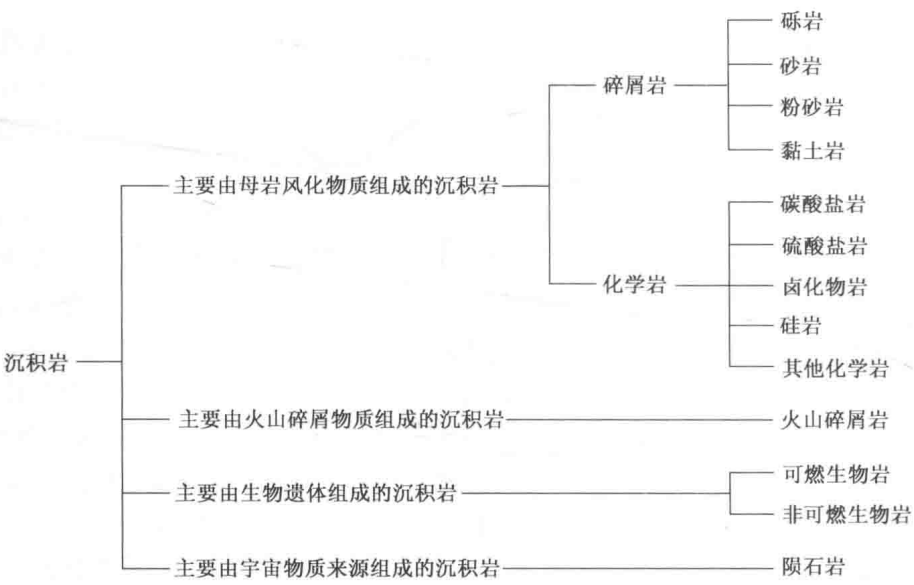


图 1.1.1 沉积岩基本类型的划分(冯增昭等,1991)

1.1.1.2 沉积岩的形成过程

沉积岩的形成一般要经过三个阶段,即原始物质的形成、原始物质的搬运与沉积作用(或沉积物的形成)、沉积物的沉积后作用(或成岩作用)。

1. 沉积岩原始物质的形成

沉积岩原始物质是形成沉积岩的物质基础,其来源有四种,即陆源物质(母岩的风化产物)、生物源物质、深源火山物质及宇宙源物质。

1) 陆源物质(母岩的风化产物)

陆源物质是陆源碎屑岩的直接来源。地壳上先形成的出露(或曾出露)的岩石叫做母

岩,包括岩浆岩(如花岗岩、花岗闪长岩等)、变质岩(如花岗片麻岩等)或先前形成的沉积岩。母岩岩石受到温度变化、水及各种酸的溶蚀作用、生物作用及各种地质营力(引起地质作用的自然力)的剥蚀作用等物理、化学和生物风化作用,逐渐遭受破坏并形成风化产物。

风化产物主要有三种类型:一是母岩的岩石或矿物等的碎屑残留物质,这类物质在初始阶段大都残留在母岩区,后来可能被各种营力搬运走,是陆源碎屑沉积岩的主要原始物质成分;二是在化学风化作用过程中新生成的矿物,如水白云母、高岭石、蒙脱石、蛋白石、铝土矿、褐铁矿等,这些物质在初始阶段也大都存在于母岩的风化带中,后来也将被各种营力搬运走;这些矿物成分是黏土岩及其他沉积岩的主要原始物质成分。碎屑残留物质和化学风化矿物可合称为陆源碎屑物质;三是母岩在化学风化作用过程中被溶解的物质成分,如Cl、Na、K、S、Ca、Mg、Si、Fe、Al、P等成分;这些成分大都呈真溶液或胶体溶液状态顺水流走,转移至远离母岩区的湖泊或海洋中后,在一定的化学条件、生物作用及水动力条件下沉积下来,再经过成岩作用形成各种类型的化学岩、生物化学岩或生物岩。

2)生物源物质

生物源物质一般构成部分内源岩。生物死亡后其遗体可以在原地堆积埋藏下来,亦可搬运到异地堆积下来,成为沉积物的一部分。生物遗体包括两部分:一是生物的硬体(生物残骸),即动物的外壳和骨骼,以及藻类植物的钙化遗体;生物的硬体成分大部分是碳酸盐质(主要是方解石和文石),少部分是磷酸盐质和硅质(蛋白石及其重结晶的玉髓、石英)。二是生物的软体部分,主要是由C、H、O、N、P、S等元素所组成的有机物;沉积岩中的有机物经过沉积期后的生物化学演化作用,形成氨基化合物、碳水化合物、类脂化合物、木质素和色素等有机化合物;这些有机化合物大部分被分解消耗掉,剩余部分分散在沉积岩中,并可能在不同的条件下分别形成石油、天然气、沥青、油页岩和煤,这是有机生油学说的基础。

3)地球深部来源的物质

地球深部来源的物质主要构成火山碎屑岩。当火山喷发时,岩浆可溢出地表冷凝成熔岩,也可爆发成火山碎屑物质喷到空中再降落地表,可以集中堆积成火山碎屑岩,也可分散掺杂于其他沉积物中。火山碎屑物质喷发的同时,还往往伴随有气热液的喷发,它们有时可成为某些沉积岩和沉积矿床(如硅、铁、有色金属)的重要物质来源。此外,深部来源的物质还包括沿断裂流出地表的热卤水。

4)宇宙来源的物质

宇宙来源的物质主要包括陨石和宇宙尘埃,数量少,主要分散在其他沉积物中。

2. 沉积岩原始物质的搬运与沉积作用

1)碎屑物质的搬运与沉积作用

碎屑物质(主要是母岩风化产物中的碎屑物质)在流体的作用下,将进入搬运状态向他处转移;在一定条件下,还会从搬运状态转变为沉积状态。沉积下来的沉积物可长期固定下来不再移动;也可能由于地壳上升、侵蚀基准面下降,使得已沉积下来的碎屑物质重新遭受剥蚀而被搬运。碎屑物质经流体搬运和沉积的方式主要有牵引流和沉积物重力流两种。搬运和沉积碎屑物质的介质或地质营力主要是流水、空气(风)及冰川。

■ (1)流水(地下水和地表的溪、河、江、湖、海等)。

■ 流水搬运碎屑物质的方式主要有两种,即推移搬运和悬浮搬运。较粗的碎屑(如砂和砾石)大都沿流水的底部移动,呈滚动或跳跃方式搬运;较细的碎屑(如粉砂和黏土)在流水中常呈悬浮状态搬运。在一定的沉积条件下,主要是当流水的动力不足以克服碎屑的重力时,处于搬运状态的碎屑物质就会沉积下来。

海洋和湖泊是陆地流水搬运碎屑物质的最终沉积场所。海、湖中的碎屑物质,除流水搬运来的以外,还有岸边及水底的破碎物质及风携、冰携、水底火山喷发的碎屑物质等。海洋和湖泊的碎屑物质在其处于最终稳定位置以前还要发生移动,即被海、湖水体搬运和再沉积。

(2)碎屑物质在空气(风)中的搬运和沉积作用。

空气(风)只能搬运碎屑物质,而不能搬运溶解物质,是干旱地区的主要营力。风在一般情况下只能搬运较细粒的碎屑物质,只有在特大风暴时才能搬运砂和砾石。空气中的悬浮载荷可做长距离搬运,在距来源地很远的大陆或海洋中沉积下来。常见的风成沉积是各种沙丘,如沙漠沙丘、滨海沙丘、滨湖沙丘、河漫沙丘和黄土等。

(3)碎屑物质在冰川中的搬运和沉积作用。

在冰河期冰川广泛分布于大陆各处,现今的冰川出现在寒冷的高纬度地区和高海拔的山区,具有巨大的搬运能力。冰川在运动过程中,不仅具有强大的侵蚀力,还能携带冰蚀作用产生的许多岩屑物质,接受周围山体因冰融风化、雪崩、泥石流等作用所造成的坠落堆积物。这些大小不等的碎屑物质统称为冰碛物,其中巨大的石块称为漂砾。它们不加分选地随着冰川的运动而位移。一般的冰川堆积物,尤其是底碛的搬运距离小,往往形成就地附近堆积的石块;而规模巨大的冰川,则可将侵蚀力强的巨大漂砾搬得很远。当冰川的冰体大量融化后,各种冰碛物就地坠落,从而形成了各类冰碛沉积物和地貌特征。

2)溶解物质的搬运与沉积作用

母岩风化产物中的溶解物质,在地表水或地下水中均呈溶解状态(胶体溶液和真溶液),随流水向内陆的盐湖及海洋中转移并最终沉淀下来。

胶体溶液是指带有电荷、大小介于 $1\sim 100\mu\text{m}$ 、多呈分子状态的胶质质点。按胶体所带电荷的不同可分为正胶体和负胶体,正胶体包括 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 CuCO_3 、 CaF_2 等,负胶体包括 PbS 、 CuS 、 S 、 Au 、 SiO_2 、 MnO_2 、 V_2O_5 、黏土质胶体、腐殖质胶体等。引起胶体质点搬运的主要因素是同种电荷的胶体质点之间的相互排斥力。假如胶体质点的电荷在某些因素的影响下中和了,它们就会因相互排斥力消失而凝聚为大的质点,并在重力的作用下迅速下沉成为胶体沉淀物。不同电性电解质的加入和不同电性胶体的相互作用是引起胶体电荷中和的主要因素;此外,水介质的pH、生物作用、水体蒸发等都会对胶体的搬运和沉积产生影响。胶体沉积物常呈钟乳状、肾状、豆状、胶冻状等,常具贝壳状断口;多为含水矿物,且含水量很不固定,其化学成分也不够固定;常具离子交换性及吸附性,也常失水干裂老化或重结晶。

■ 真溶液物质是指在溶液中呈离子状态存在的化学物质。真溶液物质的搬运及沉积作用的根本控制因素是它们的溶解度,即溶解度越大,越易搬运,越难沉积。含Fe、Mn、Si、Al等元素的物质的溶解度较小,易于沉淀,但受水介质的各种物理化学条件的影响较大。

溶解度较大的物质(如 Cl、S、Na、K、Mg 等)的搬运和沉积作用受水介质条件的影响较小,只有在干热的气候条件下,在封闭或半封闭的盆地中或者水循环受限制的潮上地带,即在蒸发的条件下,溶解度大的物质才能沉积下来。石膏、硬石膏、钠盐、钾盐、镁盐就是这样形成的。

3) 生物对母岩风化产物的搬运和沉积作用

生物在母岩风化产物的搬运和沉积过程中起着重要作用。不少沉积岩和沉积矿产的形成都与生物作用有关,或直接由生物沉积作用而形成,如碳酸盐、硅酸盐、磷酸盐、沉积铁矿、硅藻土、白垩、煤、油页岩和石油等。在各类生物中,藻类和细菌等微生物由于繁殖快、分布广、数量多、适应性强、在地质历史中出现很早,对沉积岩和沉积矿产形成作用的意义更大。

生物的搬运和沉积作用有两种方式:一是生物通过新陈代谢作用,在其生活的过程中不断地从周围介质中汲取一定物质成分,从而把一些元素富集起来。在生物的机体中,大量地集中了 C、O、N、S、P、K、F 等元素;在动物的骨骼或介壳中,特别地富集了 Ca、Mg、Si 等元素。当生物死亡后,其遗体的堆积物就可以形成特定的有机岩或有机矿产。二是由于生物作用而引起周围介质条件的改变,从而影响某些物质的搬运和沉积。例如,由生物作用排出的 CO_2 ,对碳酸盐的溶解和沉积有很大的影响;原生沉积物包含大量细菌,而细菌的生命活动改变着沉积物中介质的物理化学条件,如影响沉积物所在水体中的 NH_3 、 CO_2 、 H_2S 及有机体分解时产生的其他气体等。

4) 沉积分异作用

母岩风化产物及其他来源的沉积物,在搬运和沉积过程中会按照颗粒大小、形状、密度、矿物成分和化学成分在地表依次沉积下来,这种现象称为地表沉积分异作用。

苏联学者普斯托瓦洛夫将沉积分异作用分为机械沉积分异作用和化学沉积分异作用。机械分异见于碎屑沉积物,其主要因素是颗粒大小、形状、密度及搬运介质的性质和速度,如体积小和密度小的矿物易于搬运;片状矿物易悬浮而搬运得远些,等轴粒状者只搬运至近处;滚动搬运的颗粒圆度和球度高者易滚动而有利于搬运。

由于胶体溶液物质和真溶液物质等在溶液中的化学活性或溶解度有差异,它们在溶液中沉淀出来有一定先后顺序,原来共存于溶液中的各种成分,在其搬运和沉积作用的过程中,由于物理和化学条件的变化逐渐地发生沉积作用,并逐渐地分离出来,这就是化学沉积分异作用。

3. 沉积物的沉积后作用及其阶段的划分

母岩风化产物及其他来源的物质成分,在经过搬运和沉积作用之后变成了沉积物,这个阶段称为沉积物的形成阶段。沉积物转变为沉积岩所发生的一系列变化称为沉积物的成岩作用。沉积岩形成以后,遭受风化作用或变质作用以前的变化称为沉积岩的后生作用,可将沉积物的成岩作用和后生作用合称为沉积后作用,其上限为沉积物表面或潜水面(沉积水体-沉积物界面或风化带以下),下限为变质带顶(温度小于 220°C ,压力小于 101MPa)。

成岩作用的类型多种多样,也非常复杂。出于对沉积岩成岩作用研究的目的和采用的成岩阶段划分依据不同,人们提出了多种成岩阶段的划分方案。吕正谋(1985)基于对