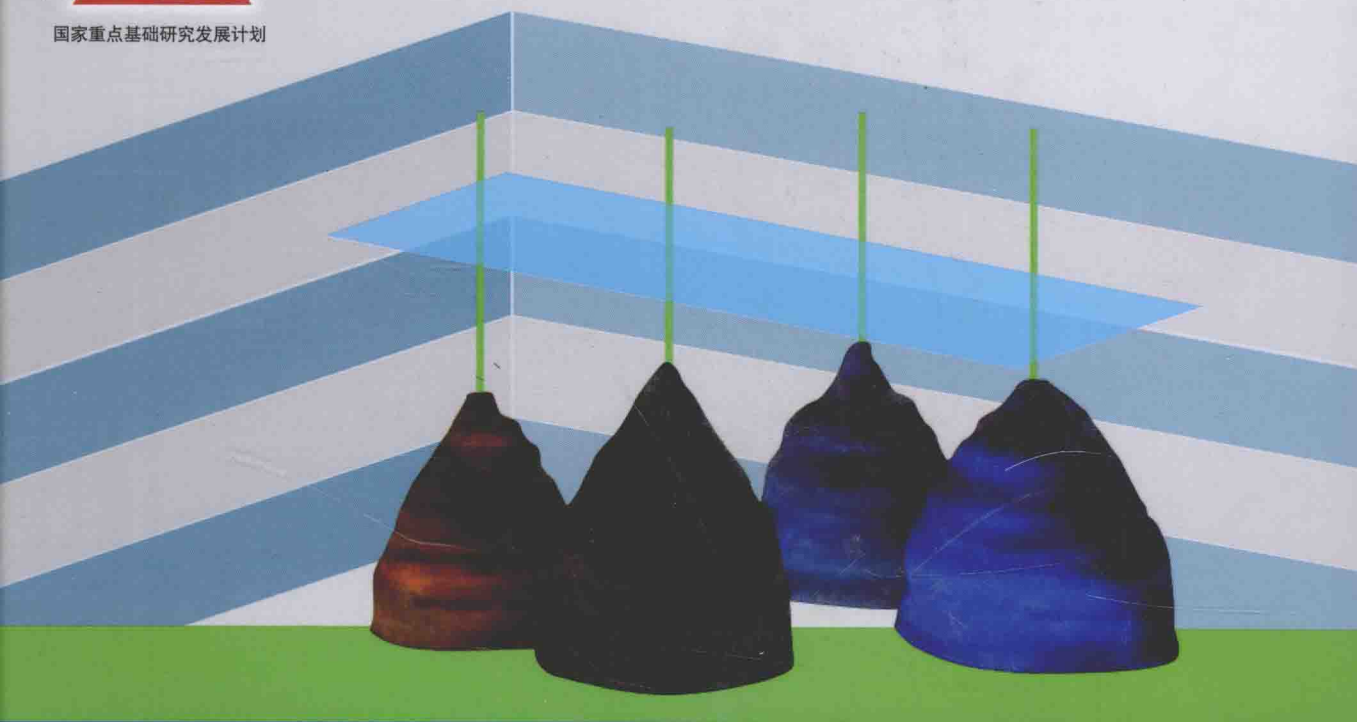




国家重点基础研究发展计划

能源储备地下库群灾变机理与防护理论研究



大型盐穴储气库群 灾变机理与防护

杨春和 周宏伟 李银平等 著



科学出版社

大型盐穴储气库群灾变机理与防护

杨春和 周宏伟 李银平等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了 973 计划项目“能源储备地下库群灾变机理与防护理论研究”的科研团队近五年的最新研究成果, 主要包括: 层状盐岩体在多相介质作用下的本构关系和变形破坏机理; 大型密集盐穴地下库群灾害激增机制与时空演化; 库群的风险评估与灾害防护理论与技术等。

本书可供盐穴地下能源储库灾害评估及防护领域的相关研究人员和技术人员参考, 也可供盐矿水溶开采设计及施工领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大型盐穴储气库群灾变机理与防护 / 杨春和等著. —北京: 科学出版社, 2014.7

ISBN 978-7-03-038501-7

I. ①大… II. ①杨… III. ①地下储气库—灾害防治 IV. ①TE972

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 205078 号

责任编辑: 吴凡洁 / 责任校对: 李 影

责任印制: 阎 磊 / 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

*

2014 年 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014 年 7 月第一次印刷 印张: 38 1/4 插页: 4

字数: 883 000

定价: 185.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



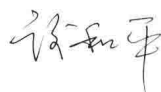
中国科学院科学出版基金资助出版

序

与海相沉积的巨厚盐丘相比，我国盐岩地层具有夹层多、埋深浅、成层分布、地质条件复杂等特点，夹层的存在增大了形成油气渗漏通道的风险，储库密集增加了单洞垮塌引发连锁性库群灾变的可能，埋深较浅加剧了地表沉陷。且这些能源地下储库又均紧邻人口稠密、经济较为发达地区，油气泄漏事故一旦发生，不但影响能源储备安全，而且危害人民的生命和财产安全。因此，我国地下能源储库群的建设与运营将面临更为复杂的科学问题和技术难题。

2008年，科学技术部启动了题为“能源储备地下库群灾变机理与防护理论研究”的973项目，杨春和研究员担任首席科学家，中国科学院武汉岩土力学研究所、中国科学院地质与地球物理研究所、中国矿业大学（北京）、清华大学、重庆大学、山东大学、解放军理工大学等10余家单位、100余位科研人员参与了项目研究。通过5年的集中攻关，项目组在层状盐岩精细探测、层状盐岩力学行为、层状盐岩储库群地表沉降与连锁破坏、层状盐岩造腔软件、层状盐岩储库风险与防护等方面取得了突出进展，《大型盐穴储气库群灾变机理与防护》系统总结了盐岩大型地下油气储库群的围岩体变形预测、孕灾机理、致灾过程、灾变调控与防护理论等方面的突出研究进展。

我深信《大型盐穴储气库群灾变机理与防护》的出版，必将为建立我国大型密集地下能源储库群灾害应急预案提供科学决策依据，为我国能源战略地下储备库的建设与运行提供关键理论，且推动我国相关研究领域的深入研究，在人才培养、团队建设以及学科水平的提升等方面发挥显著作用。



中国工程院院士、四川大学校长

2013年8月

前 言

利用深部盐岩洞穴进行能源地下储备是国际上广泛认可的能源储备方式,我国能源盐岩地下储备已成为能源战略储备的重点部署方向。由于国家能源储备的巨大需求,我国能源盐岩地下储库群正在大规模兴建,如建设中的江苏金坛盐岩储气库最终将形成由100~120个单腔组成的密集地下气库群。同时,以金坛盐矿为场址的大型地下石油储库也正在规划之中,预计该储库由50~60个单腔组成,原油储备可达300万~600万t。另外,湖北云应、河南平顶山和江苏淮安等盐矿区也已规划了大型地下油气储库群。

尽管相对于其他储存介质,盐岩能源地下储备库具有较好的安全性,但近年来,国外盐岩地下储库灾难性事故,如油气渗漏、溶腔失效和库区地表沉陷等时有发生,且事故突发性强、破坏力大,给人民生命财产安全及环境造成巨大灾难。而我国在盐岩地下储库建设方面刚刚开始,缺乏经验,特别是与国外巨厚盐丘储库相比,我国盐岩地层埋深较浅、成层分布、夹层较多,地质条件相对复杂,薄夹层的存在增大了形成油气渗漏通道的风险,储库密集增加了单洞垮塌引发连锁性库群灾变的可能,埋深较浅加剧了地表沉陷。况且,这些能源地下储库又均紧邻人口稠密、经济较为发达的地区,此类事故一旦发生,不但影响能源储备安全,而且危害人民的生命和财产安全,因此我国盐岩层中的地下储库群的建设与运营将面临更为复杂的科学问题和技术难题,急需就相关的基础科学理论进行研究并取得突破。可见,开展能源储备地下库群灾变机理与防护理论的研究,既是确保能源地下储备安全、减灾防灾以及规避选址、设计上的灾变风险的迫切需求,也是顺利实施国家能源储备的重要保障。

鉴于我国盐矿地质赋存条件的复杂性及盐矿能源地下储备库密集布置、长期运行和循环注采的特点,迫切需要在以下4个关键科学问题上开展系统深入的创新性研究:①储库地层地质成因与演化规律及精细探测理论;②多场耦合作用下储库围岩体变形破坏机理;③多场力下大型密集储库群相互作用及灾变时空过程;④大型地下储库群致灾因子与风险调控及防护理论。

为此,2008年,谢和平院士、王思敬院士、钱七虎院士、彭苏萍院士和杨春和研究员等专家联合向科学技术部建议设立973项目“能源储备地下库群灾变机理与防护理论研究”,并获得科学技术部的批准,杨春和研究员为首席科学家。中国科学院武汉岩土力学研究所、清华大学、中国矿业大学(北京)、中国科学院地质与地球物理研究所、山东大学、解放军理工大学、重庆大学等多个单位100多位科研人员依托岩土力学与工程国家重点实验室、煤炭资源与安全开采国家重点实验室、深部岩土力学与地下工程国家重点实验室等科研平台,开展了历时5年多的研究工作,主要包括:①储库地层精细探测理论与工程地质评价体系;②多场力作用下层状盐岩体的本构关系及破坏规律;③层状盐岩体中油气储库渗透灾变机理及演变;④密集储库群的破坏机理与时空演化;

⑤密集储库区地层变形机理与地面沉降预测；⑥油气储库群建腔期灾变诱发机理；⑦油气储库群运营中的灾变风险评估与调控机制；⑧油气储库群灾变防护理论。通过层状盐岩油气地下储备灾害机理、评估和防护理论研究，取得了丰硕的研究成果。理论上提出了新的适合描述多夹层盐岩的变形破损的复合本构及分数阶蠕变模型；研发了低渗测试设备、高分辨率的探测技术以及大型盐穴结构试验系统；提出了盐穴储气库灾变评估和防护理论与技术等，具有重要的学术价值和应用价值。

本书为项目研究工作的系统总结，围绕能源储备地下库群灾变机理与防护理论研究的主线，全面系统地介绍 973 团队 5 年的研究成果。全书分为 3 篇：第一篇为基本理论、试验和方法；第二篇为灾变机理、预测与监控；第三篇为灾变风险评估、规避与防护。第一篇包括 3 章，着重介绍理论和共性技术方面的突破；第二篇包括 4 章，依次介绍腔体渗漏、破坏和地面沉陷等灾害的发生机理和预测理论和技术；第三篇包括 3 章，从选址规避风险、运行风险评估以及灾害防护理论等方面进行阐述。

本书由杨春和研究员、周宏伟教授和李银平研究员负责策划和统稿，课题负责人苑春方教授、杨强教授、李晓研究员、姜德义教授、张强勇教授和方秦教授及课题部分研究骨干参与了相应章节的撰写。

衷心感谢项目专家组谢和平院士、王思敬院士、钱七虎院士、鲜学福院士、顾金才院士、周创兵教授、李文阳高工、白世伟研究员和科学技术部 973 项目咨询专家白以龙院士、叶朝辉院士、林宗坚研究员、梁文灏研究员和赵振东研究员对项目研究的关怀和指导，感谢科学技术部、教育部、中国科学院有关部门给予的指导和支持，感谢各项目参加单位及中国石油天然气股份有限公司西气东输管道分公司储气库项目部、中国石油化工股份有限公司天然气川气东送管道分公司储气库项目部等单位给予的大力支持，感谢项目全体研究人员在项目研究过程中所付出的艰苦努力，感谢其他为本项目完成和本书出版提供支持的专家和朋友。

由于作者水平有限，不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

杨春和

973 项目首席科学家

2013 年 8 月

目 录

序 前言

第一篇 基本理论、试验和方法

第 1 章 层状盐岩地层精细探测理论与方法	3
1.1 地震信号的变子波模型	3
1.1.1 地震信号的变子波模型	3
1.1.2 变子波模型中的小波分析	4
1.1.3 地震信号的变子波压缩提高分辨率方法	7
1.2 JT-MZ 井区地震资料高分辨率处理	9
参考文献	12
第 2 章 多场力作用下层状盐岩体力学行为	14
2.1 层状盐岩变形与破损物理模拟试验	14
2.1.1 试验方法研究	14
2.1.2 试验方案及设备	17
2.1.3 试验结果及分析	19
2.1.4 不同倾角下层状盐岩破坏准则	23
2.2 夹层对层状盐岩力学行为影响分析	29
2.2.1 夹层及盐岩的力学特性试验	29
2.2.2 夹层盐岩界面力学特性试验	39
2.3 层状盐岩变形与破损本构模型	47
2.3.1 互层盐岩体的 Cosserat 复合本构	47
2.3.2 复合盐岩体破损分析	49
2.3.3 层状盐岩体细观损伤本构模型	51
2.4 气固耦合作用下层状盐岩界面开裂过程研究	57
2.4.1 试验样品制备	57
2.4.2 试验设备及加载制度	58
2.4.3 裂纹扩展规律分析	59
2.4.4 裂纹扩展规律分形规律研究	67
2.4.5 两种不同岩体的对比研究	73
2.5 层状盐岩蠕变试验及本构模型	75
2.5.1 层状盐岩蠕变试验	75
2.5.2 基于分数阶导数的盐岩本构模型	86
2.6 盐岩动力学特性研究	90

2.6.1	带围压与温度加载的 SHPB 试验装置研制	90
2.6.2	围压与温度共同作用下盐岩 SHPB 试验	93
2.6.3	围压作用下盐岩 SHPB 数值模拟分析	99
2.6.4	盐岩动力强度研究	100
	参考文献	102
第 3 章	大型盐穴储气库结构模型试验	105
3.1	基于小砌块的库群破坏地质力学模型试验	105
3.1.1	相似理论	105
3.1.2	模型砌筑技术	106
3.1.3	模拟范围及相关参数的确定	107
3.1.4	相似材料的选用	108
3.1.5	模型的砌筑	109
3.1.6	量测系统	111
3.1.7	加载系统	112
3.2	基于可视化概念的库群破坏试验	113
3.2.1	模型试验可视化的概念	113
3.2.2	基于可视化模型材料的试验设计	114
3.2.3	基于模型内部结构可视转化概念的试验设计 (小比尺模型试验)	117
3.3	库群失压及破坏模拟的地质力学模型试验	126
3.3.1	试验的范围和边界条件选用	126
3.3.2	材料配制及材料力学试验	127
3.3.3	试验布置方案设计	129
3.3.4	试验的主要步骤和加载方式	130
3.4	储库介质流变相似材料的研究	132
3.4.1	模型相似材料的配比	132
3.4.2	模型相似材料的蠕变特性	134
3.5	高地应力真三维加载模型试验系统的研制	136
3.6	盐岩储气库群模型的制作方法 with 测试技术	138
3.6.1	模型制作与测试仪器埋设方法	138
3.6.2	储库套管结构的试验模拟方法	140
3.7	极端风险因素影响的储气库群运营稳定三维流变模型试验	142
3.7.1	模型试验概况	142
3.7.2	采气速率对储库运行安全稳定的影响	144
3.7.3	注气速率对储库运行安全稳定的影响	148
3.7.4	注采气压对储库运行安全稳定的影响	151
3.7.5	储气压差和洞腔间距对储库运行安全稳定的影响	152
3.8	模型试验研究结论	155
	参考文献	155

第二篇 灾变机理、预测与监控

第 4 章 储库围岩界面力学行为与渗透灾变	159
4.1 低渗透介质温度-应力-渗流三轴仪的研制	159
4.1.1 低渗仪的测试原理及关键技术	160
4.1.2 低渗透介质温度-应力-渗流耦合三轴仪组成及性能指标	162
4.1.3 低渗仪精确度及稳定性测试	164
4.2 盐岩及界面的渗透特性及细观孔隙特征试验研究	167
4.2.1 不同应力条件下盐岩渗透试验及其规律研究	167
4.2.2 界面的渗透试验及其规律分析	181
4.2.3 盐岩及界面的细观孔隙特征试验	184
4.2.4 盐岩及界面的渗透特性与细观结构相关性分析	200
4.3 盖层及夹层的密闭性研究	217
4.3.1 盖层及夹层介质渗透特性的试验研究	217
4.3.2 盖层及夹层的微细观特征试验研究	238
4.3.3 盖层及夹层的宏观地层结构对密闭性的影响	264
4.3.4 盖层及夹层的密闭性评价指标体系初探	266
4.4 盐穴储气库气体渗透模型及界面的渗透模型研究	272
4.4.1 考虑温度-应力-损伤的渗透耦合模型	272
4.4.2 界面的微裂隙-孔隙双重介质模型	276
4.4.3 储库气体渗漏规律模拟研究	283
4.4.4 储气库运行过程中气体迁移规律研究	288
4.5 盐穴储气库现场密闭性测试试验	300
4.5.1 盐穴储气库密封性能影响因素分析	300
4.5.2 现场密封性测试试验方法	303
4.5.3 气密封试验检测实例	310
参考文献	320
第 5 章 层状盐岩水溶造腔过程灾变	322
5.1 应力作用下盐岩溶解特性试验	322
5.1.1 试验情况	322
5.1.2 三轴应力条件下盐岩溶解速率变化规律	323
5.2 夹层软化试验分析及垮塌模型	325
5.2.1 夹层软化试验方案	325
5.2.2 夹层卤水浸泡软化特性	325
5.2.3 夹层卤水浸泡软化机理	326
5.2.4 夹层软化垮塌模型建立	328
5.3 夹层与流场作用特征分析	331
5.3.1 相似理论介绍	331
5.3.2 造腔过程相似模型试验	332

5.3.3	试验方案设计	333
5.3.4	相似模型试验结果及分析	334
5.4	层状盐岩溶腔形状控制	338
5.4.1	Salt Cavern Builder V1.0 软件介绍	338
5.4.2	Salt Cavern Builder V1.0 软件模拟准确性验证	339
5.5	建腔期灾变评估模型	341
5.5.1	拟建 M 井建腔模拟方案	341
5.5.2	模拟建腔参数	343
5.5.3	储库建腔期稳定性评价体系研究	344
5.5.4	评价指标权重研究	350
5.5.5	模糊综合评价模型的建立	352
	参考文献	357
第 6 章	储库稳定性及密集储库群连锁破坏	358
6.1	复杂结构的变形稳定理论及损伤演化理论	358
6.1.1	变形稳定理论	358
6.1.2	盐岩的蠕变和损伤演化理论	359
6.1.3	考虑应变强化和软化的流变本构模型	362
6.2	洞室大小及形状优化研究	373
6.2.1	基于变形稳定理论的洞室优化	373
6.2.2	时效变形	376
6.3	洞室布置方式及表面粗糙度研究	377
6.3.1	洞室布置方式	377
6.3.2	表面粗糙度	383
6.4	临界洞间距研究	385
6.5	洞室失压流变损伤过程研究	389
6.5.1	洞室失压流变分析	389
6.5.2	储气库群破损区演化规律研究	391
6.5.3	基于蠕变损伤模型的储库群稳定分析	396
6.6	模型试验与数值模拟对比研究	402
6.6.1	基于模型内部结构可视转化概念的小比尺模型试验	402
6.6.2	库群失压及破坏模拟的大比尺地质力学模型试验	407
6.7	密集储库连锁破坏研究	416
	参考文献	417
第 7 章	密集储库区地层变形与地面沉降	420
7.1	金坛储库区地质结构及泥岩夹层结构	420
7.1.1	金坛盐岩储气库区域地质概况	420
7.1.2	盐岩及夹层分布特征	421
7.1.3	泥岩夹层结构及水理性质	425

7.2 储库区地面沉降机理与影响因素分析	428
7.2.1 油气地下储库区地面沉降实例	428
7.2.2 金坛储库区地面沉降现场监测	432
7.2.3 储库区岩层移动与地表沉降数值分析	438
7.2.4 地面沉降规律及影响因素分析	444
7.3 储库区地面沉降时空动态预测模型及应用	452
7.3.1 预测模型与方法	452
7.3.2 储库区地面沉降预测实例分析	457
7.3.3 考虑时效变形的动态预测理论	459
7.3.4 不同收敛率沉降时空预计	460
7.3.5 参数 ξ 和 η 的确定	461
7.3.6 储库区地面沉降预计	462
7.3.7 预测实例——江苏金坛储气库 10 年地表移动	462
7.4 基于地面沉降的腔体变形反演模型及应用	463
7.4.1 金坛储库区 PS-InSAR 高精度地面沉降监测	464
7.4.2 单腔变形反演计算方法	465
7.4.3 腔群变形反演计算方法	466
参考文献	468

第三篇 灾变风险评估、规避与防护

第 8 章 层状盐岩储气库工程选址	471
8.1 储气库选址的地质指标	471
8.1.1 储气库选址的地质指标探讨	471
8.1.2 确定储气库选址的地质指标	472
8.2 储库区构造特征研究	474
8.3 盐岩及夹层展布特征预测	477
8.4 储气库工程地质选址综合评价	480
参考文献	483
第 9 章 油气储库群运营中的灾变风险评估	484
9.1 油气储库全寿命周期的风险因子辨识	484
9.1.1 盐岩油气储库风险事故统计分析	484
9.1.2 盐岩油气储库的风险类型	485
9.1.3 盐岩油气储库的风险辨识	486
9.2 油气储库运营期的风险故障树分析	487
9.2.1 故障树分析基本流程	487
9.2.2 风险故障树模型	488
9.2.3 风险故障树分析方法	491
9.3 油气储库运营期风险因子影响程度的模糊综合评价	494

9.3.1	模糊综合评价的基本流程	494
9.3.2	风险因子影响程度的专家调查统计	495
9.3.3	风险因子的模糊综合评价	496
9.3.4	风险因子的影响程度等级	500
9.4	油气储库运营失效风险概率的分析方法	502
9.4.1	储库片帮破坏失效风险概率分析方法	502
9.4.2	储库渗漏失效风险概率的分析方法	504
9.4.3	储气库区地表沉降失效风险概率分析方法	507
9.4.4	储库蠕变体收缩失效风险概率分析方法	511
9.5	储库群系统时变可靠性分析方法	513
9.5.1	盐岩蠕变与储库群失效	514
9.5.2	储库群系统的时变可靠性分析	516
9.5.3	储库群系统时变可靠性计算结果	518
9.6	油气储库风险分级机制与评估指标体系	524
9.6.1	油气储库风险分级机制与评估体系	524
9.6.2	不同内压下储库风险等级的变化规律	525
9.7	盐岩油气储库使用寿命的马尔可夫风险预测模型	526
9.7.1	Markov 模型的建立	527
9.7.2	油气储库使用寿命的预测方法	530
9.7.3	油气储库使用寿命的预测结论	530
	参考文献	531
第 10 章	油气储库群灾变防护	533
10.1	盐岩储气库气体泄漏分析	533
10.1.1	气体泄漏率的理论研究	533
10.1.2	盐岩储气库泄漏危险性影响因素分析	539
10.1.3	气体扩散的理论研究与数值模拟	542
10.2	储气库气体泄漏燃爆危险性分析	550
10.2.1	气体扩散的危险性分析	550
10.2.2	蒸气云爆炸事故的危险性分析	554
10.2.3	喷射火与火球事故的危险性分析	566
10.2.4	危险区域的确定	577
10.3	地下油气储库群灾变的工程防护方法	581
10.3.1	建筑物的抗爆设计原理与方法	582
10.3.2	抗爆结构体系与加固	583
10.3.3	建筑物抗爆防爆措施	588
10.3.4	建筑物关键附件的抗爆加固	590
	参考文献	593

第一篇

基本理论、试验和方法

第 1 章 层状盐岩地层精细探测理论与方法

对于建造在层状盐岩中的地下储气库而言,泥岩夹层的存在不仅增大了形成储气库渗漏通道的风险,还会增加水溶造腔的难度。利用地震反射波准确地识别泥岩夹层的存在和预测厚度对规避储气库渗漏风险、确定合理的造腔方案具有实用价值。然而,由于泥岩夹层含有大量的盐岩成分,其阻抗与盐岩相近,泥岩夹层盐岩反射系数小、反射信号弱,主频较低且往往淹没在反射信号的复合波中,难于区分。显然,提高地震信号的分辨率是解决泥岩夹层识别的关键技术。

目前的高分辨率处理方法基本上都是建立在地震褶积模型(Robinson 模型)的基础上的。然而,地层对地震波的吸收作用使地震子波发生改变,采用褶积模型描述地震反射信号存在较大误差。显然,以褶积模型为基础的高分辨率处理方法存在同样的误差问题。基于黏弹性介质假设,本书提出一种新的地震信号的变子波模型。并在此基础上,利用小波变换的信号重构技术实现地震信号的分解。根据地震传播原理提出了基于变子波压缩的高分辨率处理方法。

1.1 地震信号的变子波模型

地层介质受到应力作用产生应变时,其内部摩擦力将对应力产生吸收作用、对应变产生迟豫作用,地层介质更接近于黏弹性体。当地震子波在地层介质中传播时,其介质的吸收和迟豫作用使地震波发生衰减和延迟,即地震子波产生相应的响应,不同的地层介质产生不同的响应(Richer, 1940; Dohrin and Savit, 1988; 苑春方等, 2005)。反射地震记录是来自不同反射界面的地震子波的叠加。不同界面的反射信号,由于地震波通过的地层介质不同,地震子波也不同。因此,反射地震记录表现为子波随反射界面变化(Ziolkowski, 1991)。如果把地层的反射作为一个系统,这个系统是时变系统(Gröchening, 2000),可以用一种非平稳褶积模型描述(Margrave, 1998)。高静怀等(2009)将多层介质的地震反射信号看作由一些相对平稳的信号段组成,给出地震记录变子波模型的一种近似数学表达式。地层介质较为接近于黏弹性体,Ricker(1940)给出了在黏弹性体中地震子波的近似描述,习惯称为 Ricker 子波。Ricker 子波在不同介质的吸收和迟豫特征方面是通过子波的主频参数表现的。以下我们将不同反射界面的不同子波用不同的 Ricker 子波表示,进而建立反射信号的变子波模型。

1.1.1 地震信号的变子波模型

传统的反射地震信号模型是地震褶积模型(Robinson 模型),即反射地震信号可表示为

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} w(t-\tau)r(\tau)d\tau = w(t) * r(t) \quad (1.1)$$

式中, $w(t)$ 为地震子波; $r(t)$ 为反射系数函数; $s(t)$ 为反射地震信号; $*$ 表示褶积。这一模型建立在若干基本假设基础之上 (Yilmaz, 1987), 其中基本假设之一是: 地震子波在不同的地下介质中传播时是不变的。因此, 在不同的反射界面产生的反射信号中的地震子波也是不变的。研究表明 (Richer, 1940; Ziolkowski, 1991; 苑春方等, 2005), 地震波在不同介质中的响应是不同的 (脉冲响应), 地面接收到的地震反射信号中来自不同界面的反射波中的子波也是不同的。将地下来自不同反射界面的不同子波, 采用不同主频的 Ricker 子波描述, 那么, 地震反射信号能够表达为一种变子波模型。

假设地层岩层为黏弹性介质, 地震子波为 Richer 型变子波, 地震信号为垂直入射和反射的平面波, 忽略透射影响。当震源能量为 1 个单位时, 变子波记为

$$w_{a,b}(t) = Da^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - 2[\pi a(t-b)]^2 \right\} e^{-[\pi a(t-b)]^2} \quad (1.2)$$

式中, $D = (2\pi)^{5/4} / \sqrt{3}$ 。若地层的反射系数函数为 $r(t)$, 设 $a = f(b)$, 则地震反射信号 $s(t)$ 可表示为

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} r(b)w_{f(b),b}(t)db \quad (1.3)$$

式中, $w_{a,b}(t)$ 表示的是来自于 b 处反射界面的反射波对应的地震子波, 子波的频谱主频为 a , 以下简称子波主频。

在式 (1.3) 中, 当每一子波的主频不变时, 设 $a = a_0$, $w(t) = w_{a_0,0}(t)$, 则 $w(t-b) = w_{a_0,b}(t)$ 。因此, 式 (1.3) 可写为

$$\begin{aligned} s(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} r(b)w_{f(b),b}(t)db = \int_{-\infty}^{\infty} r(b)w_{a_0,b}(t)db \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} r(b)w(t-b)db \end{aligned} \quad (1.4)$$

式 (1.4) 变成以 $w(t)$ 为子波的地震信号褶积模型 (Robinson 模型)。

取二维函数 $R(a,b)$, 满足

$$R(a,b) = \begin{cases} r(b), & a = f(b) \\ 0, & a \neq f(b) \end{cases} \quad (1.5)$$

则式 (1.4) 可写为

$$s(t) = \int_0^{\infty} \left[\int_0^{\infty} R(a,b)w_{a,b}(t)db \right] da \quad (1.6)$$

除特别说明外, 以下将 $R(a,b)$ 也称为反射系数函数。

1.1.2 变子波模型中的小波分析

设函数 $\psi(t)$ 为

$$\psi(t) = D \left[1 - (2\pi t)^2 \right] e^{-(\pi t)^2} \quad (1.7)$$

式中, $D = (2\pi)^{5/4} / \sqrt{3}$ 。其振幅谱函数 $\hat{\psi}(\omega)$ 和相位谱函数 $\theta(\omega)$ 为