

厚表土层中井筒受力 及安全预警研究

赵光思 周国庆 周扬 著



科学出版社

厚表土层中井筒受力及 安全预警研究

赵光思 周国庆 周 扬 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一本关于厚表土层中立井井筒受力和安全预警研究的专著,介绍了作者在该领域的研究成果。全书共分六章:第一章介绍了厚表土层中立井井筒受力和安全预警研究的意义和现状;第二章围绕厚表土层中井筒结构进行弹性分析,获得了单层、双层井壁内力分布的弹性解答;第三章基于双剪统一强度理论对井壁进行塑性极限分析,获得了竖直附加力和围岩(土)压力作用下的极限荷载包络线,阐述了井筒几何特征、井壁材料特征和中间主剪应力对其塑性极限荷载的影响;第四章采用双孔部分应力解除法对井壁应力状态进行了实测研究,采用回弹法对井壁混凝土的强度特征进行实测研究,初步获得了井壁强度沿井深的变化规律;第五章基于可靠性理论,在第三、四章的基础上阐述了回弹法测试井壁强度在井壁破裂预警中的应用;第六章基于 R/S 分析法和近十年的井壁附加应变实测数据,阐述了井壁破裂预警的原理、方法和应用。

本书可作为矿山建设工程相关领域的广大科学技术人员和高校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

厚表土层中井筒受力及安全预警研究/赵光思,周国庆,周扬著. —北京:科学出版社,2015.11

ISBN 978-7-03-046328-9

I. ①厚… II. ①赵… ②周… ③周… III. ①井筒-受力性能-研究 ②井筒-安全-研究 IV. ①TD262

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 268686 号

责任编辑:周 丹 杨 琪/责任校对:胡小洁

责任印制:徐晓晨/封面设计:许 瑞

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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年11月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2015年11月第一次印刷 印张:11 1/2

字数:230 000

定价:89.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

煤炭是我国重要的一次能源，在能源结构中所占的比例达 70% 以上，是国民经济发展的动力。立井井筒作为煤炭运输的主要通道，其安全及稳定性在煤矿生产中无疑具有重要地位。多年来，我国华东地区的淮北、大屯、徐州、淮南以及兖州等矿区在厚表土层中用冻结法和钻井法施工的立井井筒相继发生了井壁破裂灾害，严重影响了矿井的正常生产，甚至引发安全事故，造成巨大的经济损失。如何定量描述井筒结构与围岩(土)的相互作用机制、确定井壁的当前应力状态、强度特征，进而实现井壁破裂灾害的有效预测预警，一直是矿井建设领域的重要研究课题。

本书是多年研究成果的总结。全书共六章，第一章简要叙述厚表土层中井壁受力与安全预警研究的重要意义和目前的研究概况；第二章针对厚表土层中井壁特征进行弹性分析，获得了不同条件下单层及双层井壁内力分布的弹性解答，利用该解答着重分析了约束内壁方法治理井壁的效果；第三章基于双剪统一强度理论对厚表土层中下部井壁进行塑性极限分析，获得了竖向荷载与围岩(土)压力作用下的极限荷载包络线，详细讨论了井筒几何特征、井壁材料特征和中间主剪应力对其塑性极限荷载的影响；第四章围绕部分应力解除法原位测试井壁应力开展了数值模拟研究，并进行了室内试验验证了该法的可行性、可靠性，采用双孔部分应力解除法对井壁应力状态进行了实测研究；采用回弹法对井壁混凝土的强度特征进行实测研究，初步获得了井壁强度沿井深的变化规律；第五章基于可靠性理论，在第三、四章的基础上阐述了回弹法测试井壁强度在井壁破裂预警中的应用；针对井壁结构受力特点，通过试验研究，建立了回弹法测试井壁强度的专用测强曲线；第六章基于 R/S 分析法和近十年的井壁附加应变现场实测数据，阐述了井壁破裂预警的原理、方法和应用。

书中的很多内容为国家自然科学基金、重点基金、中国博士后基金和大屯煤电公司科技项目的研究成果，相关研究还得到了 111 计划创新引智基地项目、中国矿业大学青年科技基金的支持，在此著者们表示感谢。

本书的工作得到大屯煤电公司、孔庄煤矿、徐庄煤矿、姚桥煤矿和龙东煤矿各级领导和工程技术人员的大力支持与帮助。2013 届研究生李隆吉完成了第五章的大部分工作。在此谨对他们的支持表示衷心感谢。

应该指出，厚表土层中的井筒安全及破裂预警问题涉及多学科、多领域，有许多理论和实际问题尚需进一步研究和完善，由于作者水平及经验有限，书中存在不足之处，恳请前辈及同仁不吝赐教。

著 者

2015 年 9 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 厚表土层中井壁受力研究意义	1
1.2 厚表土层中井壁受力研究概况	3
主要参考文献	8
第 2 章 井壁受力的弹性分析	12
2.1 单层井壁圣维南解	12
2.2 单层井壁严格解	19
2.3 双层井壁圣维南解	29
2.4 双层井壁严格解	38
2.5 小结	47
主要参考文献	48
第 3 章 井壁受力的塑性极限分析	50
3.1 概述	50
3.2 井壁混凝土材料的屈服条件	51
3.3 井壁塑性极限分析方程	52
3.4 井壁塑性极限荷载状态线	55
3.5 井壁塑性极限荷载影响因素分析	56
3.6 小结	62
第 4 章 井壁受力状态实测研究	63
4.1 井壁受力状态实测的部分应力解除法	63
4.2 井壁受力状态的双孔部分应力解除法实测	77
4.3 井壁材料强度的回弹无损检测	81
4.4 小结	84
主要参考文献	84
第 5 章 井壁强度特征演变及可靠性分析	86
5.1 井壁回弹测强及可靠性分析原理	86
5.2 不同应力状态下回弹测强的试验研究	97
5.3 回弹法测试井壁强度的实测分析	121

5.4 井壁的可靠性分析	128
5.5 小结	145
主要参考文献.....	146
第6章 井壁受力长时演变规律与安全预警研究.....	149
6.1 R/S分析法概述	149
6.2 R/S分析法原理	150
6.3 地层疏排水期间井壁附加应变动态分析	152
6.4 井壁破裂前的附加应变动态分析	167
6.5 小结	176
主要参考文献.....	177

第1章 绪 论

1.1 厚表土层中井壁受力研究意义

煤炭作为重要的一次性能源, 在我国的能源结构中所占的比例达到 70% 以上, 是国民经济发展的动力。为满足国民经济发展对煤炭资源的需求, 未来 10 年内我国东部地区将新建井筒 100 个以上, 由于大多煤系地层上覆盖有深厚的冲积表土层, 故矿井多采用立井开拓方式。井筒, 作为煤炭运输的主要通道, 其安全及稳定性在煤矿生产中无疑具有重要地位。而自 1987 年 7 月以来, 我国华东地区的淮北、大屯、徐州、淮南以及兖州等矿区在厚表土层中用冻结法和钻井法施工的立井井筒, 先后有约 110 个发生了井壁破裂灾害, 严重影响了矿井的正常生产, 甚至引发安全事故, 造成巨大的经济损失。

井壁破裂后, 相关单位科技攻关获得了井壁破裂机理, 即“竖直附加力”理论: 在特殊地层条件下, 表土含水层疏水, 造成水位下降, 含水层的有效应力增大, 土体产生固结压缩, 引起上覆土体下沉。土体在沉降过程中施加于井壁外表面一个以往从未认识到的竖直附加力。竖直附加力增长到一定值时, 混凝土井壁因不能承受巨大的竖直应力而破坏^[1]。基于对井壁破裂机理的认识, 十分有必要深入研究在复杂外荷载作用下处于厚表土层中井壁的应力状态与分布及其演变规律, 这无疑对掌握井壁安全状况和预防井壁破裂灾害有重要意义。

基于对井壁破裂机理的认识, 矿井界的专家和学者研究并实践了多种防治井壁破裂的方法, 主要有槽钢井圈套壁法、壁后注浆法、开卸压槽法、约束内壁法和地面钻孔注浆加固地层法等, 在一定时期内, 有效地满足了矿井安全和生产的需要。这些治理方法或者抵抗了、或者缓释和抑制了竖直附加力, 或者创造条件使井壁与地层尽可能同步变形来削减竖直附加力, 约束内壁法防治井壁破裂是通过改变井壁受力状态的方法, 以达到提高井壁承载能力的目的。

井壁破裂后, 随着疏排水的继续, 地层的压缩变形会不断增加, 井壁所受竖直附加力在新的应力状态下仍继续积累, 因此, 经过治理后的井壁面临着再次破裂的危险。这就需要我们深入研究井壁破裂前后的应力状态及其变化, 研究井壁首次、二次甚至多次破裂后的应力状态及其长期演变规律, 为灾害的预防和治理提供依据。

采用上述防治技术和措施进行工程设计时, 为了达到理想的治理效果, 有必要清楚井壁当前的受力状态。比如“约束内壁法”是通过增加井壁内壁的径向应

力,使得井壁由近似两向应力状态变为三向应力状态来提高井壁的承载能力,为了确定合理的设计参数,需要清楚井壁当前的应力状态及其演变规律。

“地面钻孔注浆加固地层法”由于不占用井筒提升时间,而且对缓释和抑制井壁附加力效果明显,被广泛应用于矿井治理工程,在实践中取得了良好效果。为了最大限度地消除附加力、减小井壁竖向荷载,延长一次治理的服务年限,需要在治理前确定井壁的应力状态,以避免在井筒治理过程中,发生新的安全事故,比如井壁被拉断,涌砂冒泥导致水土溃入井内的淹井事故。

矿井正常生产期间,迫切需要了解和掌握井壁的受力状态及其演变规律。只有这样,才能实时动态地掌握井筒的工作状况,使矿井的安全生产做到可控。尤其是对于即将发生破裂的井筒,掌握其应力状态,可以提前采取措施预防治理井筒,防患于未然。以免发生突发性的井壁破裂灾害,造成巨大的经济损失和恶劣的社会影响。

目前已服务多年的井筒,确定其井壁当前应力的大小,对有效控制治理过程、预测井壁破裂的时间与位置意义重大。采用目前的井壁破裂防治技术和方法,其治理过程的监控仍处于半经验阶段,缺乏科学的量化依据。

有效解决上述问题的前提是深入研究井壁受力的时空效应,深入认识与掌握井壁受力沿井深的分布以及随时间的演变规律。

研究厚表土井壁应力状态及演变规律无论是对新建井筒的设计优化,还是对已建井筒的安全状况评价均有重要意义。

井筒是煤矿安全生产的咽喉部位,本书研究成果是动态、实时掌握井筒井壁安全运营的保障,是高效、安全地进行井壁破裂灾害治理的关键。我国现有 250 多个井筒处于特殊地层条件下,预计未来 5~10 年仍将有 100 多个井筒面临井壁破裂灾害的威胁,本书研究成果可推广应用于这些井壁破裂灾害的防治中,有重要的理论与实践意义。

本书研究目的在于获得:

(1) 厚表土底部井壁进入塑性破坏时竖向应力、围压及与相关影响因素的关系;

(2) 地层疏水沉降时,厚表土井壁应力及其演变规律;

(3) 厚表土立井井壁受力长期演变规律。

本书将深入认识和掌握厚表土立井井壁的受力状态以及在复杂边界条件下的演化规律,提高对井壁受力、变形与破裂机理的认识,对厚表土井壁受力理论以及井壁破坏“竖直附加力”理论进行丰富和完善,具有重要的学术价值。同时,对越来越深的新井建设的井壁设计与施工,对现有矿井井筒破裂及再次破裂时间及部位的预测预报,对有效控制防治井壁破裂灾害的设计与施工,均有重要的实际意义。

1.2 厚表土层中井壁受力研究概况

1.2.1 厚表土井壁受力状态研究简述

1) 理论研究

自20世纪80年代后期,伴随着井壁破裂灾害的发生及破裂机理与防治技术研究的发展,矿井界的专家和学者对井壁应力开展了卓有成效的理论研究工作。

林小松^[2,3]研究了井壁在沿深度为三次多项式分布的侧压力下的轴对称应力状态,给出了这一问题的近似解析解。接着,他又针对双层复合井壁(壁间光滑接触)进行了空间轴对称应力分析,首先得到在柱面上承受沿深度线性变化的正压力的单层有限长厚壁圆筒的严格解,然后在此基础上获得了相同荷载下的两层及多层复合厚壁圆筒在相同荷载下的严格解。林小松^[4]讨论了有限长度复合厚壁圆筒井壁在沿井筒外侧线性分布荷载作用下的受力分析。

杨维好等^[5]针对井壁外荷载——竖直附加力,利用弹性理论,假设井壁与地层间无相对滑动,求解出疏水地层井筒附加力的弹性解。周国庆、程锡禄等^[6]根据模型试验结果,用空间弹性理论对承受地压、自重和竖直附加力的立井井壁应力计算问题进行了探讨,推导出近似的井壁应力计算公式。

俞万禧^[7]针对冻结施工立井井壁的特点,对双层钢筋混凝土井壁的应力进行了理论分析,得到竖直附加力及自重作用下井壁纵向应力的表达式。

王晋平^[8]考虑在负摩擦力作用下,立井的受力情况可简化为厚壁圆筒在外侧受轴对称切向荷载作用的问题,给出了立井井壁应力的解析解,得出深部井壁应力在横断面上沿径向的变化可以忽略的结论。

姚直书、李瑞君^[9]按空间轴对称问题在考虑竖直附加力条件下对井壁应力进行了理论分析和数值计算。

蒋斌松^[10~11]应用双重级数法分析了复合井壁的受力问题,给出了复合井壁在侧面任意轴对称法向及切向荷载作用下的应力解答;蒋斌松^[12]应用双重级数法对有限长立井井壁在任意轴对称法向、切向以及端部荷载共同作用下的变形问题做了研究,给出了不严格满足端部切向边界的圣维南解。

梁化强^[13]利用弹性理论将井壁受力问题处理为空间轴对称问题,对井壁在局部内压(约束内壁)作用下的受力状态进行了理论分析,给出了约束内壁前后井壁的应力解答。

苏骏^[14~15]考虑井壁与地层间的相对位移,根据桩基理论,采用广义剪切位移法,得出了井筒与地层耦合作用下附加力的理论解和井壁轴向应力的分布规律。

周扬^[16]探讨了双重级数法两类级数的完备性及其完备化方法,将有限长井壁在任意轴对称法向、切向、内部约束力及端部荷载作用下的力学问题分解为对称及反对称的两个部分,通过分别选择奇偶应力函数解决两个子问题,叠加后获得了井壁严格满足所有边界的应力解答。

综上,深厚表土立井井壁在自重、水平地压和竖直附加力等荷载作用下的应力分布理论研究工作取得了一些进展。但现有研究多是按空间轴对称问题进行的弹性分析,获得的解析解对破坏或濒临破坏的井壁并不合适。对处于复杂荷载条件下的井壁在受到因地层抬升而引起竖直向上摩擦力时的理论研究工作尚未开展。本书将在已有研究成果的基础上,基于双剪统一强度理论开展深厚表土底部井壁的塑性极限分析,寻求深厚表土井壁承载能力与相关因素的关系。

2) 数值模拟研究

杨俊杰^[17~19]运用自编有限元程序对井壁在承受均布荷载和非均布荷载条件下的应力分布和极限承载能力进行了计算分析,将非线性本构关系与适当的混凝土强度准则相结合,探索了从理论上解决混凝土井壁极限状态计算的问题。

姚直书^[20]以现场破坏的井壁为研究对象,在已知正常水平侧压力作用下,反算井壁破坏时承受的竖直附加力数值。计算结果表明,井壁破坏时的附加力随着井壁参数的变化略有不同,附加力值处于 0.1~0.128MPa 之间,通过与不施加附加力结果对比,指出附加力是导致井壁破坏的直接原因。他^[21]提出了采用双层钢板高强混凝土钻井井壁结构,并且采用有限元分析方法,研究了在不同厚径比、不同壁厚、不同混凝土抗压强度、不同钢板厚度情况下这种井壁结构的极限承载力。指出双层钢板高强混凝土复合井壁结构具有良好复合作用,这使得井壁结构承载力很高,完全可以支护深厚表土层,并根据计算结果回归得到了均匀侧压力下双层钢板高强混凝土井壁承载力的经验公式,可以优化井壁结构设计。

周国庆^[22]用有限元方法对含水层的加固参数、含水层压缩量与井壁竖直附加力及其折减率的关系进行深入研究,指出改变含水层的加固宽度和加固距离,井壁附加力及其折减率也发生相应的改变。含水层加固宽度是影响附加力及其折减率的主要因素,附加力折减与加固宽度呈线性关系,但其增长率随着加固宽度的增加而减小,其他条件不变时,含水层加固宽度绝对了加固效果。另外,其研究也指出了含水层压缩量的大小对含水层加固前后附加力的大小起着重要的作用,井壁附加力与含水层压缩量呈显著的线性关系,附加力折减率与含水层压缩量基本无关。

杨勇^[23]通过试验研究了 C80 和 C40 高强混凝土的工作性能、力学性能和耐久性试验,并采用试验得到的参数对 C80 和 C40 普通井壁进行数值模拟,计算结果表明混凝土环向应力都大于混凝土抗压强度,混凝土单轴抗压强度的大小对

井壁结构承载力影响很大,并指出 C80 钢筋井壁承载力是 C40 钢筋井壁承载力的 1.9 倍,而钢筋对井壁承载力影响较小,C80 高强高性能混凝土井壁结构具有很高的承载力,可以解决深厚表土层冻结井筒的支护难题。

吕恒林^[24]对深厚表土层中地层沉降引起的井壁破裂情况进行了弹塑性数值模拟,文中采用弹塑性三维单元进行数值分析。研究表明,提高材料强度和弹模可以明显的延缓井壁径向劈裂和竖向压碎,其中对后者的效果更为显著,在一定范围内,井壁径向劈裂和竖向压碎的时间与井壁材料的强度和弹模成非线性关系,随材料强度和弹模的增大,延缓效应逐渐减弱,在井壁设计时应该首先考虑提高混凝土标号的方法防止井壁破裂。

王衍森^[25]对钢筋混凝土井壁承载力进行了数值计算,结果表明:配筋对降低井壁脆性,提高井壁韧性效果显著,对于低强度等级的混凝土井壁,配筋对井壁承载力的提高作用明显。但是,随着混凝土强度的提高,该作用越来越不显著。外排的钢筋对井壁承载力基本没有贡献。

王建中^[26]建立了井壁的平面应变模型和广义平面应力计算模型,对混凝土分别采用过镇海公式、李慧公式、ELWI 公式等不同的应力应变关系,研究了在两种计算模型下井壁厚径比、混凝土抗压强度、竖向压力、环向配筋率等因素对井壁竖向和环向极限承载力的影响;指出钢筋对水平和竖向极限承载力的贡献非常有限;不同破坏模式和不同破坏应力状态下的井壁,不同本构方程计算得到的环向承载力均相同;并通过数值解拟合得到了形式简单且具有较高精度的极限承载力计算公式。

综上,目前大多数数值模拟工作均是研究井壁极限承载力的问题,对不同工况条件下深厚表土立井井壁应力状态及其演变规律还需进一步深入研究。本书在已有研究成果的基础上,开展厚表土井筒在地层注浆扰动条件下井壁的受力响应规律研究。

3) 物理模拟试验研究

物理模型试验是进行立井井壁受力分析的重要方法。

崔广心、周国庆^[27]在中国矿业大学地下工程实验室的大型多功能试验台上,对底含疏排水条件下的井壁受力进行了模拟试验研究,其结果首次证实了土体对井壁竖直附加力的存在,并得出了该力随矿井疏排水的变化规律以及沿井筒轴向的分布。

洪伯潜^[28]分析了不同壁后充填条件下井壁与地层之间摩阻力的大小,提出了在充分考虑井筒延深或开凿马头门安的前提下,应根据地层条件进行合理的充填段划分,并采用相应的充填材料和工艺,以减少附加力。

杨俊杰^[19]根据在两种不同荷载条件下 3 种混凝土井壁模型的破坏性能结果,

系统地分析了混凝土井壁的破坏特征、强度特征及其主要影响因素。

吕恒林^[29]利用中国矿业大学岩石力学与岩层控制实验室的大型液压压力试验机对钢筋混凝土双层整体可缩井壁结构进行了物理模拟试验研究, 得出了卸压井壁结构的力学特性。

姚直书^[30]针对地层沉降条件下煤矿立井井壁的破坏机理, 提出了一种新型可缩性钻井井壁结构, 通过模拟试验表明, 在地层沉降条件下, 这种井壁结构能随之压缩, 从而可使作用在井壁上的竖向附加力(即负摩擦力)得到相应衰减, 使井壁达到安全使用, 据此提出了可缩性钻井井壁竖向承载力的设计方法, 研究成果已在淮北矿区的4个井筒中得到了成功应用。

姚直书^[31]针对600~800m特厚表土层中冻结井筒的支护难题, 根据约束混凝土原理, 提出合理的解决途径是采用内层钢板高强钢筋混凝土复合冻结井壁结构。通过模型试验, 对该种井壁结构的应力、变形和强度特性进行深入研究, 根据理论分析和试验结果推导出该种井壁承载力的计算公式, 从而为该种井壁结构的工程应用提供设计依据。

黄伟^[32]以拟建设的山东某矿风井(钻深760m左右)为原型, 采用数值计算方法对削球式井壁底的受力机理及影响因素进行了系统研究, 得出了影响削球式井壁底受力的主要因素, 提出了改善井壁底受力状态的最佳圆心角概念, 推导出最佳圆心角与厚径比的关系式, 为今后特厚表土层钻井井壁底设计计算提供了参考依据。

由以上分析可知, 深厚表土井壁不同深度的应力状态, 尤其是井壁破裂过程的应力状态及其演变规律研究开展甚少, 这是井筒受力理论研究和指导工程实践的先决条件, 需要进一步研究。

4) 实测研究

深厚表土立井井壁应力状态的现场实测研究开展较少。魏善斌、俞万禧等^[33]采用套筒致裂法对临涣煤矿主井井壁应力进行了测试研究, 利用具有耐压橡胶套筒的圆筒千斤顶, 使垂直于井壁内表面的测试钻孔逐步施加内压至钻孔周围介质出现张性裂缝, 记录钻孔出现张性裂缝时的破裂压力, 该方法对井壁完整性影响较大, 钻孔的深度、直径等也对测试结果产生一定的影响, 从而限制了方法的推广应用。

处于深厚表土中的立井井筒, 由于工作环境限制, 测试空间较小, 连续测试的时间不允许过长, 尤其是测试钻孔不允许过深, 不得穿过内层井壁, 不破坏井壁完整性等条件的限制, 要实现井壁应力的原位测试, 用常规的应力解除法是无法实现的。为了测得井壁应力状态和分析井壁的强度储备, 从而为改善井壁受力状态和防治井壁破裂提供依据, 必须研究能够满足立井井筒工况条件的井壁应力

原位测试方法。在传统应力解除法的基础上,提出“双孔部分应力解除法”现场测试井壁应力状态的新思路,并开展数值模拟分析、室内试验和现场实测研究。

1.2.2 厚表土井壁受力演变研究简述

自1991年以来,周国庆等^[34~36]在徐州、大屯矿区十几个新建或已建立井筒中开展了大量的井壁附加应变现场实测工作,积累了井壁附加应变随时间、温度的演变情况等翔实而丰富的资料。这些实测数据既有地层长期疏水情况下井壁附加应变的演变趋势,也有井壁濒临破裂、井壁破裂后、地层注浆期间以及治理后的井壁应力应变演变数据。杨维好、黄家会等在兖州等矿区也开展了这方面的大量实测工作。这些研究工作获得了井壁受力的发展趋势,在动态控制和指导注浆加固地层治理井壁破裂工程的实施过程中发挥了重要作用,确保了井壁破裂灾害治理过程中井壁的安全。课题组的长期实测工作为系统、深入、定量研究立井井壁受力状态及其演变规律提供了宝贵的第一手资料。

井壁应变的变化是井壁受力演变的主要指标,研究井壁附加应变的变化趋势对掌握井壁受力演变规律、丰富竖直附加力理论以及预测预报井壁破裂灾害有重要理论和实践意义。近年来,对厚表土立井井壁附加应变变化的研究主要集中于防治井壁破裂工程实施期间和常规地层疏水期间,多是经验性和直观性的观察其变化趋势和大小,着重于对井壁附加应变及其增量现状的分析与综合^[37~40],并根据弹性范围、单轴或平面应力条件下井壁混凝土的应力计算,判断井壁的安全状况。已有研究很少涉及对井壁附加应变未来变化的科学推断及预测。从目前的研究方法看,尚无人使用分形理论中的R/S分析法来研究厚表土立井井壁附加应变的未来变化。

R/S分析法是英国著名的水文学家H. E. Hurst提出的^[41]。在气候、地震、大气降水、股票市场等非线性预测领域有着广泛的应用。吴鸿亮等^[42]采用R/S分析法对黑河调水及近期治理效果进行了分析,在总体趋势上取得了很好的效果,并与原时间序列结合起来互相对比验证。杨桂芳等^[43]采用R/S分析法研究了气候代用指标的可靠性和兰州地区古气候变迁的周期规律特征,为古气候重建和环境预测提供一定的依据。徐宗学等^[44],对和田河流域气温与降水量长期变化趋势及其持续性进行了分析,采用R/S分析法预测该流域气温、降水量的未来变化趋势及其持续性,取得了一定效果。黄勇等^[45]对地下水的动态变化趋势和规律进行了研究,证明了R/S分析法的应用是合理的,并定量描述了地下水动态过程的分形特征,得到了其分维数。樊毅等^[46]研究了云南干热河谷的降水变化趋势,通过1956~2000年的降水资料的分析,证明了R/S方法预测降水丰枯变化趋势是较为有效的途径。

在大量实测数据的基础上,采用 R/S 分析法研究井壁受力在地层长期疏水沉降过程中的长期演变规律。

1.2.3 厚壁圆筒的极限分析研究现状

徐栓强、俞茂宏等^[47]采用双剪统一强度准则对理想弹塑性材料的厚壁圆筒进行安定性分析,得出了厚壁圆筒加载应力、残余应力及安定极限压力的统一解析解。研究结果可适应于多种材料,能考虑材料的拉压强度差效应及中间主应力效应。根据研究结果,分析了材料的中间主应力效应和拉压强度差效应对厚壁圆筒安定极限压力的影响。结果表明,当考虑材料的拉压强度差效应及中间主应力效应时,厚壁圆筒安定极限压力将明显提高。在循环载荷作用下,厚壁筒可能在未达到极限状态的情况下破坏。

冯西桥^[48]以厚壁圆筒结构为例,研究了拉压性能不同对结构安定性的影响。王钟羨^[49]利用双剪强度理论对具有不同拉压屈服强度的厚壁筒在承受均布内压力作用时,进行了弹塑性极限分析,从提高承载力发挥材料潜能的角度与 Tresca 准则、Mises 准则和 Mohr-Coulomb 准则进行了对比分析。

马景槐^[50]运用双剪强度屈服准则对承受内压的拉压屈服强度不同材料厚壁圆筒进行极限分析,结果表明,材料拉压屈服强度的不同对结构承载能力有一定的影响。他^[51]运用莫尔屈服准则对承受内压的拉压屈服强度不同材料的厚壁圆筒进行了自增强分析,得到了依赖于材料拉压比的厚壁圆筒弹性区与塑性区中的应力分布、残余应力分布及合成应力分布。

陈爱军等^[52]从断裂力学角度,采用有限元法对带裂纹厚壁圆筒高压容器进行分析,研究了应力强度因子的计算方法,以及随裂纹深度和厚壁筒尺寸的变化规律。

冯剑军等^[53, 54]采用双剪统一强度理论,考虑材料的拉压异性和同性,研究了内压力和轴力共同作用下的厚壁圆筒结构的极限屈服问题。

现有研究大多是针对储物筒仓、工业管道、枪管炮管等厚壁圆筒结构在承受内压或周期性循环荷载作用时弹塑性分析。针对厚表土立井井壁的特殊工况条件,在复杂荷载(包括自重、附加力、温度应力、地压、地层扰动荷载等)条件下的塑性极限分析尚未开展。在已有研究成果基础上,采用双剪统一强度理论,开展厚表土层中井壁在复杂荷载作用下的塑性极限研究,为厚表土段井壁破裂灾害的预报和防治提供科学依据。

主要参考文献

- [1] 崔广心, 杨维好, 吕恒林. 深厚表土层的冻结壁和井壁[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社

- 社, 1998.
- [2] 林小松. 井壁在沿深度呈三次多项式分布的侧压力下的轴对称应力分析[J]. 湘潭矿业学院学报, 1988, 3(1): 1-11.
- [3] 林小松. 壁间光滑接触的复合井壁的空间轴对称应力分析[J]. 湘潭矿业学院学报, 1988, 3(1): 108-113.
- [4] 林小松. 有限长复合厚壁圆筒井壁的空间轴对称应力分析[J]. 煤炭学报, 1990, 15(4): 35-45.
- [5] 杨维好. 深厚表土层中井壁垂直附加力变化规律的研究[D]. 中国矿业大学, 1994.
- [6] 周国庆, 程锡禄. 特殊地层中的井壁应力计算问题[J]. 中国矿业大学学报, 1995, 24(4): 24-30.
- [7] 俞万禧. 双层钢筋混凝土井壁应力的理论分析[J]. 煤矿设计, 1995, (4): 19-22.
- [8] 王晋平. 负摩擦力作用下立井井壁应力的计算[J]. 合肥工业大学学报, 1995, 18(2): 117-121.
- [9] 姚直书, 李瑞君. 考虑竖向附加力时井壁应力计算方法[J]. 东北煤炭技术, 1997, (2): 3-6.
- [10] 蒋斌松. 复合井壁的弹性分析[J]. 煤炭学报, 1997, 22(4): 397-401.
- [11] 蒋斌松. 有限长复合井壁的轴对称变形分析[J]. 工程力学, 1998, 15(4): 89-95.
- [12] 蒋斌松. 考虑端面荷载作用时井壁轴对称变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 1(2): 184-187.
- [13] 梁化强. 约束内壁法防治厚表土井壁破裂机理及影响因素研究[D]. 中国矿业大学, 2006.
- [14] 苏骏, 程桦. 疏水沉降地层中井筒附加力理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 310-313.
- [15] 苏骏. 地层疏水沉降时井壁受力的非线性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 139-143.
- [16] 周扬等. 考虑治理荷载作用时井壁严格轴对称变形分析[J]. 岩土工程学报, 2008, (4): 170-174.
- [17] 杨俊杰. 硃井壁的应力和极限承载能力的有限元计算[J]. 淮南矿业学院学报, 1992, 12(2): 11-17.
- [18] 杨俊杰. 用结构分析方法探索井壁破坏的机理[J]. 淮南矿业学院学报, 1993, 13(4): 30-35.
- [19] 杨俊杰. 混凝土结构井壁的破坏特征和强度特征[J]. 煤炭学报, 1998, 23(3): 246-251.
- [20] 姚直书. 地层沉陷时井壁承受竖向附加力的有限元分析[J]. 阜新矿业学院学报, 1996, 15(4): 434-438.
- [21] 姚直书, 荣传新. 双层钢板高强混凝土复合井壁强度数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004, 23(3): 321-323.
- [22] 周国庆, 崔广心. 含水层加固后井壁与围岩相互作用的竖直分析[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(2): 135-139.

- [23] 杨勇. 特厚表土层冻结井壁 C80 高性能混凝土配制及其性能研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2006.
- [24] 吕恒林. 深厚表土中井壁力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1999.
- [25] 王衍森. 特厚冲积层中冻结井外壁强度增长及受力与变化规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2005.
- [26] 王建中. 高强混凝土井壁力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006.
- [27] 周国庆. 深厚表土层立井井壁受力模拟研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1989.
- [28] 洪伯潜. 钻井法凿井壁后填充对竖向附加力的影响[J]. 建井技术, 1998, 19(6): 1-6.
- [29] 吕恒林. 深厚表土中井壁的力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1999.
- [30] 姚直书, 程桦等. 地层沉降条件下可缩性钻井井壁受力机理的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 733-736.
- [31] 姚直书, 等. 深冻结井筒内层钢板高强钢筋混凝土复合井壁试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 153-160.
- [32] 黄伟等. 特厚表土层削球式井壁底的受力机理及影响因素分析[J]. 矿冶工程, 2008, 28(4): 13-16.
- [33] 魏善斌, 等. 套筒致裂井壁应力测试[J]. 建井技术, 1997, 2(2): 25-27.
- [34] 周国庆, 刘雨忠, 等. 围土注浆缓释和抑制井壁附加力效应及应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 742-745.
- [35] 中国矿业大学, 中煤集团大屯公司. 大屯矿区井筒井壁安全综合监测系统研究及应用项目鉴定材料[Z], 2005.
- [36] Zhou Guoqing, Cui Guangxin, Lü Henglin, et al. Simulation study on reinforcing overburden to prevent and cure the rupture of shaft lining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 9(1): 1-7.
- [37] 刘志强, 周国庆, 等. 立井井筒表土层注浆加固过程的控制方法及应用[J]. 煤炭学报, 2005, 30(4): 472-475.
- [38] 赵光思, 周国庆, 等. 注浆加固地层法治理井壁技术的工程应用[J]. 矿山压力与顶板管理, 2004, 21(2): 109-111.
- [39] G. Q. Zhou, G. S. Zhao, Z. Q. Liu, et al. Study on the Stratum-grouting Control According to the Evolution of Additional Strain of Shaft lining[J]. Mining Science and Technology, A. A. Balkema, 2004: 357-361.
- [40] G. S. Zhao, G. Q. Zhou, X. Y. Shang, et al. Study on the Evolution of Stress in Shaft-lining During Stratum-grouting[J]. Boundaries of Rock Mechanics, A. A. Balkema, 2008: 447-451.
- [41] 汤龙坤. 太阳黑子数时间序列的 R/S 分析[J]. 华侨大学学报, 2008, 29(4): 627-629.
- [42] 吴鸿亮, 唐德善. 基于 R/S 分析法的黑河调水及近期治理效果分析[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(8): 27-30.
- [43] 杨桂芳, 李长安, 殷鸿福. 兰州气候代用指标的 R/S 分析及其意义[Z]. 2002, 36(3): 394-396.