

深地资源开发不断“往下挖”： 复杂深地环境认知与工程 风险防控是基础

Deep-earth Resource Development Continues to "Dig Deeper":
Understanding the Complex Deep Environment and
Controlling Engineering Risks is the Foundation

供稿|纪洪广^{1,3}, 张春瑞^{1,3}, 况丹阳², 李畅² / JI Hongguang^{1,3}, ZHANG Chunrui^{1,3}, KUANG Danyang²,
LI Chang²

内 容 导 读

向地球深部探索,揭示地球起源,开发各种资源,是人类长久的梦想。然而,受技术、装备及地质条件等多种因素制约,人类向地球深部探索的能力发展缓慢。对地下开采矿山而言,井筒是整个矿山的咽喉和生命线工程。超深井建设工程是由地质、构造、工程围岩、工程结构等多种因素构成的复杂工程系统,其建设和服役涵盖勘察、设计、施工、运维等漫长的时间过程。随着深度的增加,井筒穿过的地层条件越来越复杂,高应力、高水压、高地温以及地下水中有毒离子化学腐蚀等因素对深井工程建设和生产服役安全带来诸多不利影响,导致多种工程风险。因此,探明工程区域的地质条件,采取科学的技术手段,有效规避和化解各种风险,才能确保超深井工程建设的安全性和可靠性。本文结合我国“十三五”以来金属矿超深井建设方面的工程实践,在对金属矿超深竖井工程建设内容、工艺过程及其特殊环境进行系统分析的基础上,对深井工程建设过程、服役环境及其所面临的各种关键风险进行了剖析,对超深井工程建设中的风险研究方法和控制技术研究提出了建议。

井筒是地下矿山的咽喉和生命线工程,担负着整座矿山井下作业区的提升、通风、排水、供电等工作。在矿井几十年乃至上百年的开采时间内,保证井筒工程的安全始终是矿山安全工作的重中之重。

井筒作为特殊的地下工程,其建设过程涉及勘察、规划、设计、施工及服役等诸多阶段和环节。在其服役过程中,又同时受到区域构造应力、水文地质、地层力学性能、支护结构及施工工艺等内外

作者单位: 1. 北京科技大学资源与安全工程学院深地岩体工程科学研究院, 北京 100083; 2. 山东黄金矿业(莱州)有限公司三山岛金矿, 山东 烟台 261400; 3. 矿山深井建设技术国家工程研究中心, 北京 100013

部多种因素的作用,因此,井筒越深,面临的
风险就越大^[1]。

随着金属矿向深部开采,井筒穿过地层日益增
厚,高地应力、高地温、高孔隙水压力的“三高”特
征愈发显著,地层工程响应加剧。尤其是当井筒深度
超过某一临界值后,复杂多变的深部条件导致诸多
现象和问题已经超出了人类的现有认知,突破了
现有技术的适用范围,且工程勘查、设计、施工等
方面的标准和规范尚属空白。因此,建设越来越深
的矿井,必须在理论、技术、装备、材料以及标准
规范等方面开展系统研究,不断剖析深地复杂条件
对工程建设的影响,有效利用积极有利条件,遏制
各种不利影响^[2-3]。

本文结合我国“十三五”以来金属矿超深井建设
方面的工程实践,系统分析了金属矿超深竖井工程
建设环境的特殊性及其建设程序、建设内容、工艺
过程以及相关技术与装备系统的复杂性,阐述了深
井工程建设过程、服役环境及其所面临的各种关键
风险,提出了风险防控技术发展的可能途径。

金属矿深部地层条件与深井工程系统及其相 互作用分析

精准探测与科学分析深部地层环境中地应力、

孔隙水压力、地层温度等多场、多相地质物理特征
的分布特征,科学分析并识别深部条件下井筒建设
和服役过程中存在的风险,并采取科学的方法,在
技术上和工程上彻底规避或有效降低各种工程风
险,是深地工程必须解决的重要问题,也是本研究
所要回答的主要问题和开展的重要研究工作。

图1所示为本项目组通过实测得到的山东半岛
地区深井工程区域地应力、地温、孔隙水压以及海
相离子等“多场”分布状态。

超深井建设工程则是在如此复杂的地质条件和
环境中进行的系统性地下工程。该工程系统是由地
质、构造、工程围岩、工程结构等多种因素构成,
具有因素众多、时空跨度大、结构复杂等特点。
而系统所处的深部“三高”与“多场多相”条件作用及其
相互作用构成该系统存在和演化的外部环境。

深部地层“多相”“多场”构成的水文、地质系统

地层水文地质条件是竖井工程设计、施工与长
期服役的基础环境。该条件受漫长地质演化与人为
工程活动的双重影响,具有显著的空间差异性。若
将其视为一个系统,则该系统主要由以下4个子系
统构成:①“多相”地质系统:涵盖岩性、层序、矿
物组分、力学性质及不良地质侵入等。②地下水文

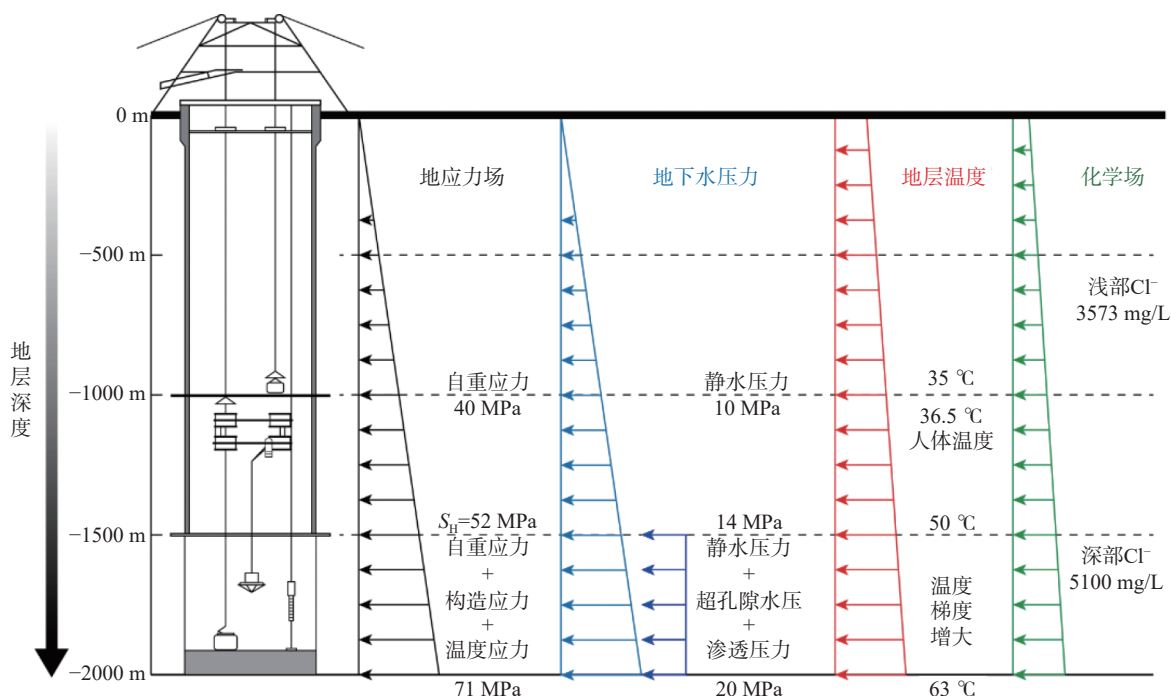


图1 金属矿深部地层“多场”状态与工程条件的复杂性 (S_H 为地应力中最大水平主应力)

系统：包含水量、水位、流向、渗透性以及赋存与承压特征等。③地质构造系统：包括断层、节理、裂隙等不同尺度的构造体系对岩体的切割作用。④“多场”耦合系统：由地应力场、温度场和化学场构成。其中，地应力场由随深度线性增加的重力应力与受构造控制的水平应力构成；温度场随深度增加（通常每千米增加约 3°C ）且受区域成矿机制影响；化学场由地层化学成分与矿井排废环境共同塑造，在滨海和西部地区尤为复杂。

对于深竖井工程而言，随着开采深度的增加，地应力水平、地温和孔隙水压力显著增高。因此，高地应力、高孔隙水压、高地温（“三高”）以及复杂多变的化学环境，共同构成了金属矿深部地层系统的典型特征，也是诱发工程风险的核心因素。

深部地层“三高”条件共同控制下的工程围岩系统

深部岩体受高地应力、高孔隙水压及高地温共同作用，处于复杂的“原位状态”。随深度增加，强压缩状态愈发显著，导致深部岩体的物理力学特性较浅部发生显著变化，表现为开挖扰动响应剧烈、围岩破坏复杂甚至呈动力冲击特征。金属矿多属脉状硬岩地层，岩体强度高、变异性大，其围岩响应差异性更突出。因此，探明深部地层“多场”分布规律与硬岩原位特征，建立相适应的设计方案与围岩控制支护方式，是保障深竖井建设安全与服役可靠的重要基础。

深部地层条件下工程建设人员、设备以及工程结构及材料系统

深竖井工程建设是在深部特殊环境中，利用特定装备与技术方案，完成开挖、围岩控制及结构制作的系统活动。相比普通地下工程，深部“三高”及复杂化学环境对人员、装备、工程设施与材料均有显著的负面影响。因此，深竖井工程技术的核心，在于探明地层环境并科学评估其利弊，进而在工程上采用相对应的技术方案与施工工艺，辅以相匹配的劳动防护与安全措施，有效规避深部条件带来的不利影响。

深部地层条件及其与深竖井工程相互作用诱发的灾害系统

竖井建设与服役均处于深部特殊环境中。高应

力、高地温、高水压及复杂化学环境彼此耦合，易引发突水淹井、片帮塌方、岩爆、腐蚀失效等深地特有灾害。深竖井工程本质上是局部开挖与邻近地层系统相互作用、协调调整的动态过程，在这一过程中，深部复杂条件下稳定与失稳因素交织，构成了工程灾害孕育演化与防控的复杂系统。

深竖井工程的技术系统和决策管理系统

如前所述，随着深度的加大，面对越来越复杂的高应力、高水压、高地温等特殊建井工程条件，要保障深井工程安全高效，首先必须通过测试分析与定量计算，探明建井工程区域内“多场”、“多相”分布规律，掌握地层条件与工程结构的相互作用机理。为此，必须建立适于深竖井工程的勘察、设计、施工、运维等技术系统，并以此为基础，进行与深竖井工程相关的设计、施工决策、工程组织、工程管理等工程活动。因此，与深竖井工程相匹配的勘察、设计、施工、运维等技术规范与标准，以及组织管理和安全法规等，共同构成一个特殊而又重要的工程技术系统。

如上所述，该复杂系统由地层地质、围岩、人机材料、技术与管理等子系统共同构成，系统结构如图2所示。

深竖井建设工程风险分析

深竖井工程是由复杂地层条件控制，集人员、装备、材料及全寿命周期于一体的工程系统。其根本特征在于：必须在深度不确定性与未知性中，做出确定性的工程决策。在深竖井工程系统中，“越来越深的深度与渐趋复杂的地层条件”是主要客观因素，而“对多场相互作用的认知与把控”则是主要主观因素。

随着深度增加，“三高”特征愈发显著，岩体力学性能与工程响应愈发剧烈，导致传统理论、规范及设计方案与实际条件失配，工程风险骤增。因此，深竖井工程实践在客观上必须研发和采用新技术、新装备，以精准掌握多场原始条件及工程扰动下的响应规律；在主观上则须理性评估现有认知与装备能力相对于实际条件的偏差。主客观的科学统一构成了深部建井技术的理论基础，而二者的矛盾则决定了工程所面临的风险与挑战。

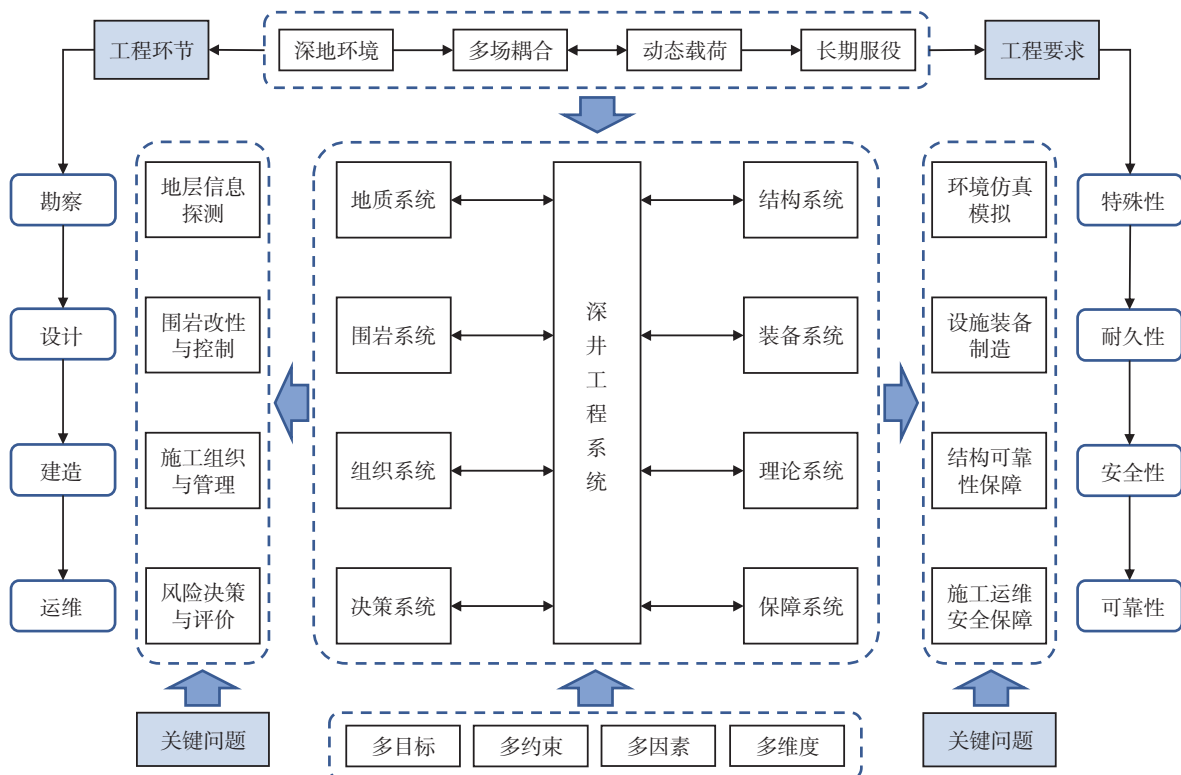


图2 深竖井工程系统结构图

基于此,承认对深部环境认知的未知性,引入不确定性理论,并运用风险决策方法采取防控措施,是深竖井工程必不可少的基础理论与关键技术。这也是深竖井工程风险设计理论与风险决策方法的核心,为进一步分析深竖井工程各阶段的具体风险奠定了理论基础。

高地应力导致的深竖井工程风险

随井筒深度增加,高地应力与深地特征愈发显著^[4-5]。在原始地应力、地质构造和开挖扰动的耦合作用下,极易诱发“局部化工程效应”^[6],在工程上表现为围岩变形大、井壁荷载异常,并引发片帮、岩爆、坍塌及井壁破裂等动力灾害。地应力越高,灾害风险越大。因此,高应力导致的动力灾害是深竖井面临的核心地质风险。科学识别与定量计算大埋深高应力下的灾害风险,并通过围岩改性、结构调整和新材料研发等手段进行工程防控,是深竖井建设必须解决的关键问题。

高水压导致的深竖井工程风险

地下水控制是深竖井建设的关键。随深度增加,孔隙水压显著升高,局部甚至存在超孔隙水

压。高水压不仅直接增加井壁荷载与施工涌水量,易引发突水淹井等严重水害;还会在围岩和结构内部形成高渗透压,导致围岩力学性能与破坏特征发生变异,恶化围岩与结构的相互作用。因此,研究高孔隙水压及高渗透压带来的工程风险并提出针对性防控措施,对深井围岩控制、保障结构可靠性及化解水害风险至关重要。

高地温导致的深竖井工程风险

高地温是深竖井工程的标志性特征。它不仅改变岩石与混凝土的微细观结构、力学性能及破裂方式,还恶化作业环境,严重危害工人健康与设备安全,降低劳动效率^[7]。高地温引发的“热害”使工程结构处于高温服役状态,导致寿命骤降,而现有规范对此尚属空白,使深井建设进入工程“无人区”^[8-10]。因此,高地温与高应力、高水压共同构成深部核心风险。科学评估预测高地温对围岩及结构材料的影响,是保障深井结构安全的突破口与关键瓶颈。

深部地层的复杂化学环境及其有害离子导致的深竖井工程风险

金属矿区,尤其是滨海区地下水富含 Cl^- 、 SO_4^{2-}

等有害离子, 极易引发复杂的化学腐蚀。 Cl^- 会诱发钢筋锈蚀与锚杆断裂, 导致混凝土保护层开裂^[11]; SO_4^{2-} 则通过生成膨胀性物质致其开裂, 二者耦合还会降低结构的抗冲击性能。当环境温度超 40°C 时, 高地温会恶化材料的电化学性质, 加速有害离子向混凝土内部的扩散与反应速率^[12-15]。这种高温与化学腐蚀的协同作用, 成倍提高了腐蚀速度, 导致深部支护结构的耐久性与寿命显著降低^[16-17], 如图 3 所示。

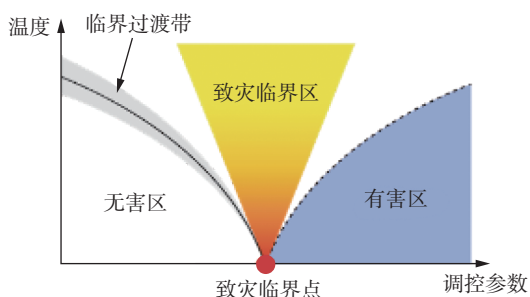


图3 高地温环境对深井工程结构及材料的性能影响与劣化作用示意图

因此, 以高地温为特征的深部地质环境改变了常规性结构、材料与装备的服役条件。必须充分考虑高地温与有害化学环境的耦合风险, 科学分析并有效控制高地温及其导致材料性能与耐久性变化, 在深地工程设技术该技术领域尚属“技术空白区”。

深部地层“多场”耦合作用导致的深竖井工程风险

深井工程处于“多场”耦合的特殊环境中。开挖等工程扰动会打破原始多场的平衡状态, 导致以地应力场为主导的应力重分布、温度场异动、能量聚集及孔隙水气等要素的系统性调整与多相耦合变化, 这种动态调整贯穿建井全过程。深部岩体对工程扰动极为敏感且变异性显著, 围岩结构及各物理场会按特有的耦联机制进行时空演化^[18]。例如, 开挖引发渗流场改变, 地下水流动带动热能迁移并向工作面扩散, 造成局部物理场异常; 温度场与渗流场的改变最终又反作用于应力场。研究表明, 许多深部工程事故正是由这种扰动诱发的多场耦合作用及其“局部化致灾效应”所导致^[19-20]。

因此, 深井工程建设必须明确“高地温+高应力+高水压+化学场”的复合条件, 定量评价围岩与材料的性能变异及服役安全性。深入探明开挖扰动下

温度场-化学场-应力场-渗流场多场耦联演化规律, 是准确掌握深竖井工程真实服役环境、开展风险评价与安全防护的核心技术途径。综上, 深度的增加使建设工程风险显著提高, 其主要风险如图 4 所示。

金属矿深部“多场”条件及其耦合作用下深井工程结构及材料服役寿命与动态分析方法

对于深地环境服役的井筒来说, 由于其所处环境具有“高地温、高地应力、高孔隙水压力、强腐蚀”的显著特征, 工程结构及其材料的劣化失效成为不可忽视的重要问题^[21-22]。

对于工程混凝土结构和材料而言, 在有害腐蚀离子侵入及高地温加速的协同作用下, 其内部发生复杂的物理、化学反应; 同时因结晶压力或生成无粘结性物质而产生微裂纹并赋存损伤, 导致混凝土密实度与抗压强度持续降低, 即发生损伤腐蚀。当外层混凝土开裂并劣化后, 深部特殊环境侵入内部钢筋, 在化学腐蚀与膨胀应力的共同作用下, 导致钢筋截面减小、强度降低, 即内部钢筋发生锈蚀。

井壁结构由外部包围的混凝土及内部的钢筋共同组成, 混凝土和钢筋相继受损, 导致结构综合承载能力持续降低, 有效断面尺寸减小, 井壁结构便面临失稳毁伤和失效的风险, 其逻辑关系如图 5 所示。

可以看出, 在井壁结构服役性能系统中, 地层环境子系统、混凝土服役子系统、钢筋服役子系统和井壁结构子系统之间相互影响, 又相互交织, 而且各要素与环节之间存在着复杂的关联关系。从宏观上对各环节的动态作用进行定量化描述, 可科学分析和预测井壁结构的腐蚀退化过程, 进而采取措施, 保证深井结构服役的安全性和可靠性。

深竖井工程结构腐蚀风险分析系统主要由地层环境、混凝土服役、钢筋服役和结构可靠度 4 个子系统构成。为此, 研究中引入了系统动力学分析方法, 构建了混凝土结构服役状态动态分析与寿命预测系统动力学模型, 如图 6 所示。

在该系统中, 将整个复杂多反馈动力系统分割为多个相互耦联的子系统进行分析、计算与仿真, 可以同时考虑在不同初始条件和时变因素作用下, 混凝土井壁结构性能的动态模拟及其可靠性动态演化趋势, 实现全寿命周期的可靠性动态分析与服役

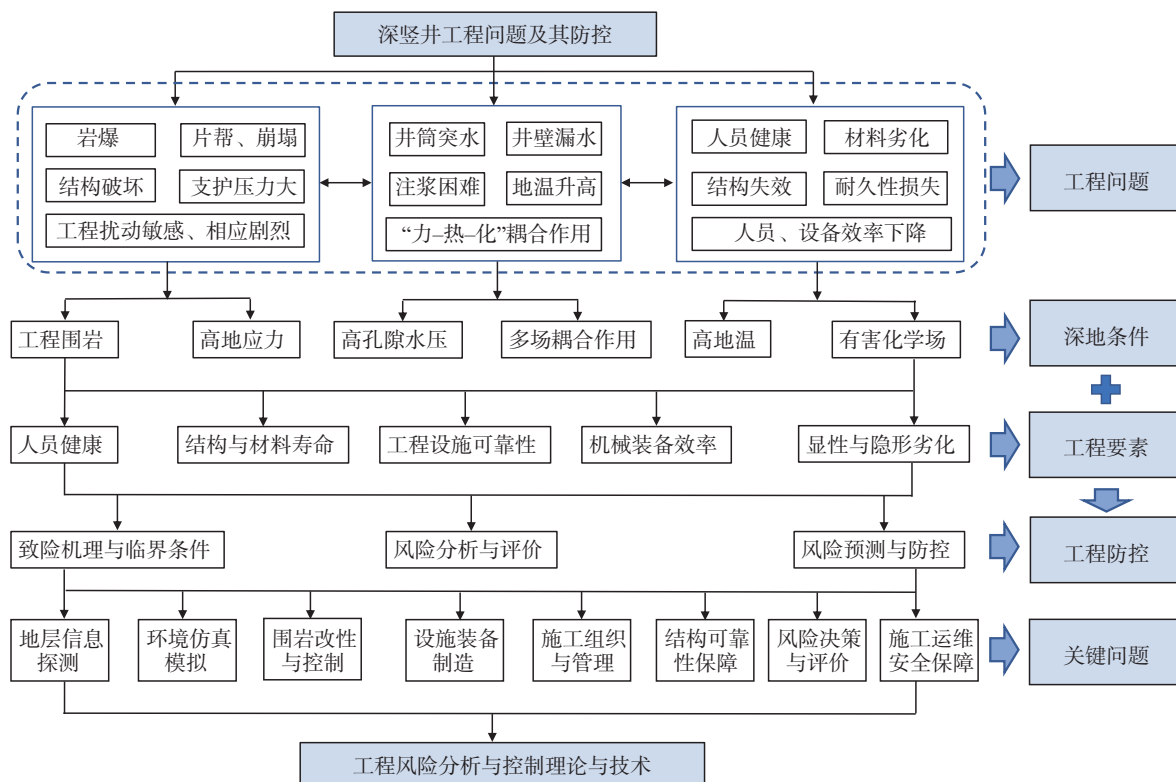


图4 深竖井工程风险分析图

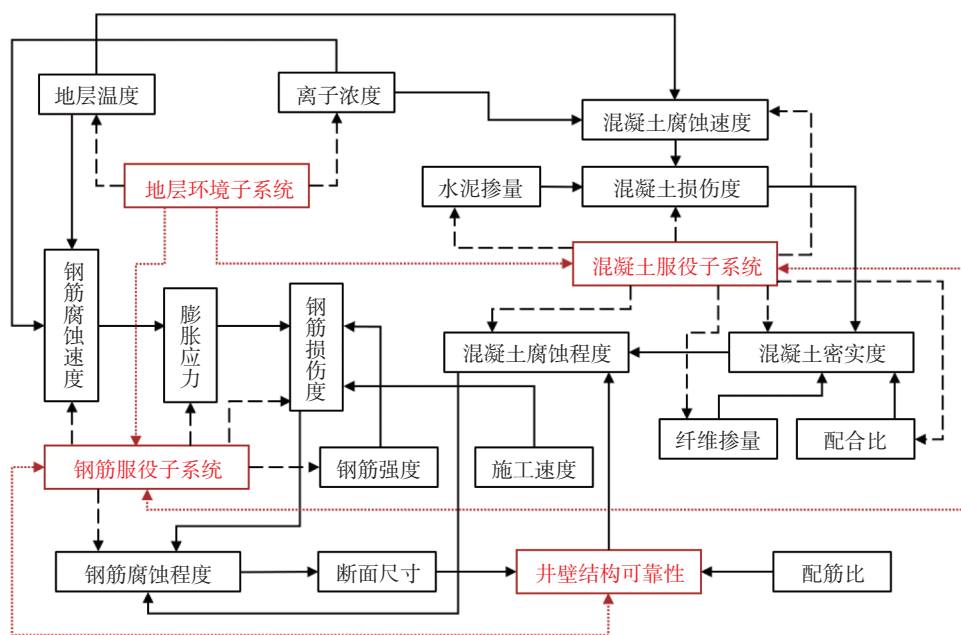


图5 深竖井井壁结构服役性能系统图（.....代表各子系统之间的连接,各系统间相互影响,---代表各子系统中包含的影响因素,——代表各因素之间的相互联系。）

寿命预测。

当然,为了准确反映实际工程的服役环境和服役性能变化规律,在系统仿真与模拟之前,必须开

展必要的现场实测或真实实验,获得各种因素的作用的基础数据和变化规律,这是模拟分析的重要前提和基础。

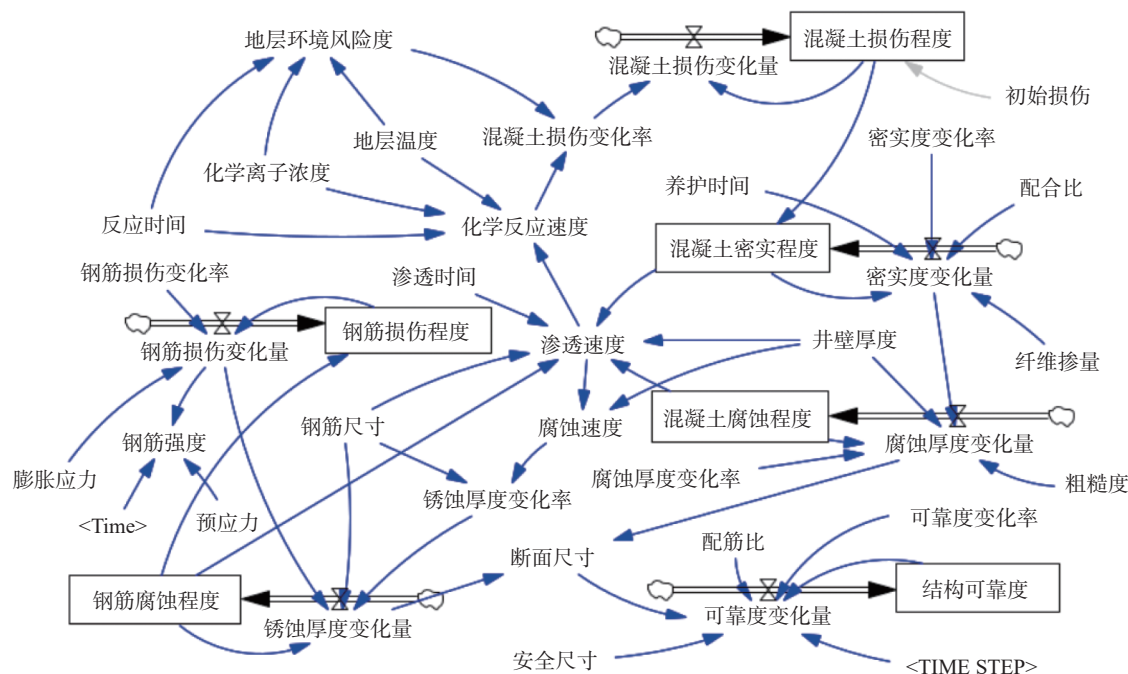


图6 井壁结构服役风险系统动力学模型 (Time 为时间变量, TIME STEP 为时间步变量)

结束语

随着深度的增加,地层条件变得越来越复杂,深地工程所面对问题也越来越多。其中存在的未知性和不确定性也越来越多,工程所面临的风险就越来越大。因此,要确保工程的可靠性和安全性,有效规避或降低各种风险,应当积极面对客观存在的复杂条件,科学分析和研究应对策略,不断研发相对应的工程技术。

(1) 发展精准探测和定量分析工程区域内的地质条件、构造环境,准确把握原始地层中地应力条件及其主导和控制下的多场的原始条件。

(2) 不断发展与深地条件相匹配的实验、分析技术,并创建相应的基础理论,科学分析、评价复杂深部条件下岩体、岩石材料、工程围岩体的原位状态、性能和工程扰动相应特征及其差异性和变异性。

(3) 不断建立和发展深部地层条件下诠释各种工程风险的致险机理、控制机制的理论和方法,确定各种工程风险的临界条件,研发相应的预测方法和防控技术。

(4) 建立和发展深地工程结构及材料的全寿命设计、时变可靠性评价理论和方法,精准把握深地工程结构在工程建设和生产服役过程中导致性能劣

化、效能降低和毁伤失效过程的内在约束条件和快慢性主控因素,控制好关键性功能参量,确保其性能可靠和服役安全。

(5) 充分考虑各种因素的时变性及其对工程系统动态作用和过程性影响。充分把握各种因素的时变规律及其对各种工程要素的单独和耦合作用,做到科学预测、定量分析工程建设和服役过程中的不同环节客观存在的各种不利因素及其对工程要素的影响,做好工程勘察、设计、施工组织、生产运维的全过程科学管理。

致谢:衷心感谢项目组全体成员的悉心指导与大力支持;同时,对审稿专家及编辑部在本文修改和发表过程中提出的宝贵意见与协助表示诚挚的谢意。

参考文献

- [1] 何江波.论工程风险的原因及其规避机制.自然辩证法研究, 2010, 26(2): 62
- [2] 高新民,殷筱.马克思主义意识论阐释的几个问题.哲学研究, 2006(11): 16
- [3] 金德民.工程项目全寿命期风险管理系统理论及集成研究[学位论文].天津:天津大学, 2004
- [4] Yin W T, Feng Z J, Zhao Y S. Effect of grain size on the mechanical behaviour of granite under high temperature and triaxial stresses.

- Rock Mech Rock Eng*, 2021, 54(2): 745
- [5] Wang Z L, Shi H, Wang J G. Mechanical behavior and damage constitutive model of granite under coupling of temperature and dynamic loading. *Rock Mech Rock Eng*, 2018, 51(10): 3045
- [6] 陈国庆, 李天斌, 何勇华, 等. 深埋硬岩隧道卸荷热-力效应及岩爆趋势分析. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(8): 1554
- [7] 何满潮, 郭平业. 深部岩体热力学效应及温控对策. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(12): 2377
- [8] 辛嵩, 王振平, 苗素军. 矿井热害防治. 北京: 煤炭工业出版社, 2011
- [9] 胡汉华. 深热矿井环境控制. 长沙: 中南大学出版社, 2009
- [10] 杨德源, 杨天鸿. 矿井热环境及其控制. 北京: 冶金工业出版社, 2009
- [11] 高萌, 刘娟红, 吴爱祥, 等. 典型氯盐环境中富水充填材料腐蚀及劣化机理. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(8): 2776
- [12] Leemann A, Loser R. Analysis of concrete in a vertical ventilation shaft exposed to sulfate-containing groundwater for 45 years. *Cem Concr Compos*, 2011, 33(1): 74
- [13] 赵峰华, 孙红福, 李文生. 煤矿酸性矿井水中有害元素的迁移特性. *煤炭学报*, 2007, 32(3): 261
- [14] 赵力, 刘娟红, 周卫金, 等. 矿井环境中混凝土材料腐蚀损伤演化与机理分析. *煤炭学报*, 2016, 41(6): 1422
- [15] 刘娟红, 卞立波, 何伟, 等. 煤矿矿井混凝土井壁腐蚀的调查与破坏机理. *煤炭学报*, 2015, 40(3): 528
- [16] 余波, 詹雷颖, 刘建波, 等. 温度和湿度对钢筋腐蚀控制模式及速率的影响. *建筑材料学报*, 2016, 19(5): 844
- [17] 甘玲. 高强耐蚀钢筋在氯盐环境下的腐蚀行为 [学位论文]. 安徽工业大学, 2017
- [18] 张少泉, 任振启, 张连城, 等. “中尺度地震预报实验场”的思路与方案——门头沟煤矿矿震的观测与应用研究. *地震学报*, 1996, 18(4): 118
- [19] 任振起, 何武学, 张连城, 等. 矿震序列特征及其与天然地震活动的相关性分析. *地震*, 1997, 17(3): 265
- [20] Fajkiewicz Z, Jakiel K. Induced gravity anomalies and seismic energy as a basis for prediction of mining tremors. *Pure Appl Geophys*, 1989, 129(3/4): 535
- [21] 李杰, 王明洋, 范鹏贤, 等. 岩体的加、卸载状态与能量的分配关系. *岩土力学*, 2012, 33(S2): 125
- [22] 陈宗基, 康文法, 黄杰藩. 岩石的封闭应力、蠕变和扩容及本构方程. *岩石力学与工程学报*, 1991(4): 299
- 基金项目:** 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项资助项目 (2024ZD1004103); 国家重点研发计划资助项目 (2016YFC0600800)。
- 作者简介:** 纪洪广 (1963—), 男, 山东省青州人, 教授, 博士生导师。1997年毕业于东北大学矿山建设工程专业, 主要从事深部岩石力学、地下工程等领域研究。国务院政府津贴专家, 国家“十三五”重点研发项目负责人。通信地址: 北京市海淀区学院路30号; E-mail: jihongguang@ces.ustb.edu.cn。