

# 工程勘察地应力测量与计算方法现状与发展建议

李奉霖<sup>1</sup>, 王汉昌<sup>2\*</sup>, 辛宗成<sup>1</sup>, 李 骞<sup>1</sup>, 易 聪<sup>1</sup>, 吴金生<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

**摘要:** 随着国家重大工程持续推进, 长大深埋隧道与深部岩体工程建设规模逐年扩大, 高地应力诱发围岩大变形、岩爆、塌方等工程灾害频发, 严重制约工程施工安全与长期运营稳定。地应力形成演化受地球深部动力、岩体自身特性与外部环境等多重因素共同控制, 获取准确地应力数据对深部岩体施工意义重大。本文系统梳理了地应力的五大主要动力成因机制, 同时分析了地质构造、地形地貌、岩体力学性质等因素对地应力空间分布的调控规律。在此基础上, 分类阐述了水力压裂法、孔壁变形法、孔底应力解除法、应力恢复法、声发射法等主流地应力测试技术, 逐一剖析各类方法的测试原理、操作流程、适用场景与优缺点; 从理论、数值、智能算法三个维度, 总结了地应力常用计算方法, 详细阐述了弹性力学经典算法、数值模拟计算方法和智能算法的基本原理和应用特点, 并探讨了不同计算方式的精度影响因素; 提出了优化测试设备、完善多场耦合下地应力计算模型、深度融合智能算法与传统方法等发展方向的建议。研究工作对工程勘察、深部岩体钻探、开采等工程具有一定的参考价值。

**关键词:** 地下工程; 地应力成因; 地应力测量; 应力计算; 长大深埋隧道; 深部岩体工程建设; 工程勘察

**中图分类号:** U45; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0001-16

## Review and development suggestion on geostress measurement and calculation methods in engineering investigation

LI Fenglin<sup>1</sup>, WANG Hanchang<sup>2\*</sup>, XIN Zongcheng<sup>1</sup>, LI Qian<sup>1</sup>, YI Cong<sup>1</sup>, WU Jinsheng<sup>2</sup>

(1. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 610072, China; 2. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

**Abstract:** With the steady advancement of major national engineering projects, the construction scale of long deeply buried tunnels and deep rock mass projects has been expanding year by year. Engineering hazards frequently occur, including large surrounding rock deformation, rock bursts and collapses induced by high geostress, which severely threaten construction safety and long-term operational stability. The formation and evolution of geostress are jointly governed by deep earth dynamics, intrinsic rock mass properties and external environmental factors. Acquiring accurate geostress data is of great significance for the construction of deep rock mass projects. This paper firstly systematically sorts out five major dynamic formation mechanisms of geostress, and analyzes the control laws of geological structures, landforms, rock mechanical properties and other factors on the spatial distribution of geostress. On this basis, mainstream geostress measurement techniques, namely hydraulic fracturing, borehole wall deformation, borehole bottom stress relief, stress recovery and acoustic emission method are classified and elaborated. The measuring principles, operational procedures, applicable conditions, advantages and limitations are discussed. Furthermore, commonly adopted geostress calculation approaches are summarized from three dimensions: theoretical analysis, numerical simulation and intelligent algorithms. The fundamental principles and application characteristics of

收稿日期: 2026-07-21; 修回日期: 2026-08-11 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.001

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD202402054)

第一作者: 李奉霖, 男, 汉族, 1991年生, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事钻探技术质量管理工作, 四川省成都市青羊区清江东路十一号, 279920572@qq.com。

通信作者: 王汉昌, 男, 汉族, 1998年生, 助理工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事深孔复杂地层钻探技术研究工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, 2315182634@qq.com。

引用格式: 李奉霖, 王汉昌, 辛宗成, 等. 工程勘察地应力测量与计算方法现状与发展建议[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 1-16.

LI Fenglin, WANG Hanchang, XIN Zongcheng, et al. Review and development suggestion on geostress measurement and calculation methods in engineering investigation[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 1-16.

classical elastic mechanics algorithms, numerical simulation methods and intelligent algorithms are illustrated in detail, and the factors affecting the calculation accuracy of different methods are investigated. Finally, suggestions are put forward in terms of upgrading testing equipment, improving multi-field coupled geostress calculation models, and realizing deep integration between intelligent algorithms and traditional methods. The presented research can provide valuable references for engineering investigation, deep rock drilling, mining and related engineering practices.

**Key words:** underground engineering; geostress formation mechanism; geostress measurement; stress calculation; long deeply buried tunnel; deep rock mass project construction; engineering investigation

## 0 引言

我国水电、交通、矿产、油气等重大地下工程建设正逐步向深部、复杂地质区域发展。川藏铁路、跨流域调水、深部矿产开采、万米深层油气勘探等重大项目中涌现出大量深埋长隧洞、深部地下厂房、超深采掘巷道等岩体工程。深部岩体普遍赋存高地应力环境,在地应力驱动下极易诱发岩爆、围岩大变形、断层滑移、洞室塌方等重大地质灾害,不仅大幅增加支护施工成本,还严重威胁施工人员生命安全与工程长期运营稳定性,地应力已然成为制约深部地下工程安全建设的核心地质控制要素。

岩体初始应力场是地球内部多重动力长期耦合演化的产物,其空间分布同时受控于深部地球动力学过程、区域构造格局、地形剥蚀、岩体自身力学属性、地下水、地温等多类复杂因素,导致不同工区不同层位的地应力大小、方向以及应力差异性存在显著的非均质特征。若无法精准获取场区地应力定量数据、厘清地应力演化与分布规律,围岩稳定性分析、支护体系设计、地质灾害预判都将失去可靠依据。因此,系统掌握成熟可靠的地应力原位测量手段,构建适配不同地质条件的地应力计算理论与方法,是深部岩体工程勘察阶段不可或缺的核心工作。现阶段学术界明确了五个核心的地应力成因机制:地幔热对流、岩体自重、板块挤压、构造运动和岩浆侵入<sup>[1-5]</sup>。地应力原位测试方面<sup>[6-8]</sup>:水力压裂法、各类应力解除法、声发射法等技术已广泛投入工程实践;地应力计算和预测理论有三个类型:基于数学建模的弹性解析、基于数值模拟<sup>[9]</sup>的预测分析和人工智能预测。但现有研究仍存在若干突出短板:(1)各类地应力测试方法的适用边界、优劣对比缺乏系统性归纳,工程选型缺少统一参考依据;(2)传统弹性计算模型简化假设过多,难以刻画多场耦合、破碎构造带内复杂应力演化规律;(3)数值模拟存在建模繁琐、计算效率与精度难以兼顾的问题,人工智能算法多停留在理论研究,与现场勘

察、数值计算融合程度不足;(4)针对超深井、高地温、高水压破碎岩体等极端工况的测试设备与耦合计算模型仍有待完善。

基于上述工程需求与研究现状,本文系统梳理地应力五大动力成因机制,全面剖析地质构造、地形地貌、岩体力学性质、地下水、温度场对地应力空间分布的调控规律;分类对比水力压裂法、孔壁变形法、孔底应力解除法、应力恢复法、声发射法等主流原位测试技术的测试原理、操作流程、适用场景与技术短板;从经典弹性解析、数值模拟、智能算法三个维度归纳地应力计算体系,分析不同计算方法的精度控制因素;最后围绕深部极端工程环境提出测试装备迭代、多场耦合计算模型完善、连续-非连续数值算法融合、智能算法工程化落地等发展建议。研究成果可为长大深埋隧道、深部矿产等工程的地应力勘察、围岩稳定性评价提供系统性理论参考与技术支撑。

## 1 地应力成因与影响因素

在地质演变过程中,由于地壳内部构造变化产生应力,该应力被称为岩体初始应力,也称原岩应力。当工程施工破坏岩体原应力结构和状态时,岩体局部会释放应力,使失衡的应力场重新达到平衡。地应力的形成原因较为复杂,通过国内外学者研究,其形成原因主要有:地幔热对流、岩体自重、板块边界受压、构造运动、岩浆的侵入以及侵蚀作用等。

### 1.1 地应力成因

#### 1.1.1 地幔热对流

地幔热对流的核心驱动力源于地球内部的热能差异:软流圈中的地幔物质在深部受热后温度升高,导致密度降低、体积膨胀,产生向上的浮力,从而形成持续上升的热物质流。当上升流抵达岩石圈底部时,受到刚性岩石圈的阻挡,无法继续向上运动,便会沿岩石圈底部向四周发生水平分流。分

流过程中,地幔物质不断向周围传递热量,自身温度逐渐降低,密度随之增大,在重力作用下形成下沉并向深部沉降,最终回到软流圈底部,补充上升流的物质来源,由此构成一个包含上升流、水平分流与下降流的完整物质循环过程,这一循环机制即为地幔热对流(如图1所示)。

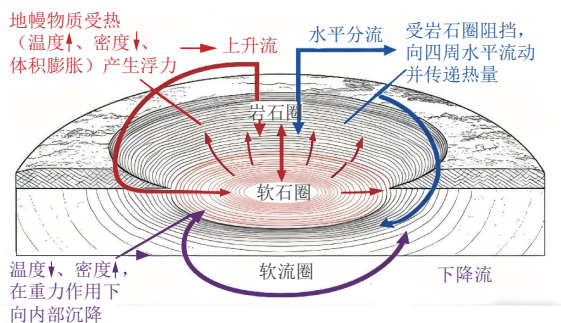


图1 地幔热对流示意

在地幔热对流的整个过程中,流动的地幔物质会对岩石圈底部施加持续的拖拽力与压力,这些应力会通过岩石圈底部逐步传递至其内部,引发岩石圈的形变、断裂或重结晶,进而重塑地壳内部的应力分布格局。大量地质观测与数值模拟研究表明,地幔热对流不仅是板块运动的重要动力来源,更是地壳内部应力场形成与演化的关键控制因素,其对流环的规模、速度与方向,直接影响着地壳应力的分布特征。因此,深入探究地幔热对流的动力学机制与时空演化规律,对于揭示地壳应力场的形成机理、理解地震与火山活动的动力背景,以及完善板块构造理论体系,均具有重要的科学意义<sup>[10-14]</sup>。

### 1.1.2 岩体自重

岩体自重应力是地应力场的重要组成部分,是影响地下工程稳定性的基础因素之一<sup>[15-18]</sup>。如图2所示,对于地下任意一点,自重应力的大小等于该点以上水平截面单位面积所承受的上覆岩体总重力。由于岩体是由固体矿物颗粒构成的骨架与骨架孔隙中的水、气共同组成的多相介质,根据物理意义的不同,自重应力可进一步划分为有效自重应力与总自重应力两类<sup>[19-20]</sup>:采用浮容重计算得到的、直接作用于岩体骨架上的应力为有效自重应力,而采用饱和容重计算得到的、包含孔隙水压力贡献的应力则为总自重应力,二者的关系满足有效应力原理,即总自重应力等于有效自重应力与孔隙水压力

之和。岩体自重应力在不同埋深、不同空间位置的规律性分布,共同构成了自重应力场,是原岩应力形成的两大核心成因之一,另一成因是构造应力。

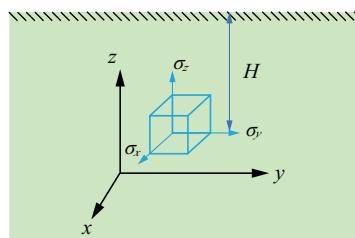


图2 岩体自重应力示意

在理想条件下,岩体垂直自重应力随埋深增加呈线性增长趋势,水平自重应力也随垂直应力同步增大。但在实际地质环境中,复杂地质过程会对垂直方向的应力分布产生显著影响,导致自重应力场偏离理想的线性分布规律,出现局部应力集中或应力降低现象,这也是深部高地应力地层地应力分布复杂多变的重要原因之一。

### 1.1.3 板块边界受压

从地壳稳定性来看,板块内部的构造活动相对微弱,地应力场分布较为稳定;而板块边界区域由于板块间的相互作用,地壳稳定性较差,地质活动频繁,是构造应力集中释放的主要区域<sup>[21-22]</sup>。以中国大陆板块为例,其构造应力场的形成直接受周边板块的共同约束:东北方向受太平洋板块的向西挤压作用,西南方向受印度洋板块的向北碰撞推挤作用,同时东南方向受菲律宾板块、西北方向受西伯利亚板块的约束作用。由于板块始终以每年几厘米的速率持续推进,板块边界处的地壳会发生持续的变形、褶皱与断裂,进而引发地应力场的动态调整与重新分布,这也是我国板块边界区域地应力异常复杂、高地应力现象频发的根本原因之一<sup>[23-26]</sup>。

### 1.1.4 构造应力

构造应力是地壳内部由构造运动作用产生的天然应力,是控制深部地应力场分布的核心因素,其形成与板块运动、地壳变形、地球自转等多种动力过程密切相关。根据成因与作用方式的不同,构造应力可划分为基本应力与附加应力两大类:基本应力主要由地球自转产生的惯性力引起,是构造应力场的基础组成部分,为后续构造变形提供初始动力;附加应力则由板块碰撞、断层活动、褶皱变形等局部构造运动直接产生,是导致区域应力场异常的

主要原因<sup>[28-30]</sup>。

大量实测与理论研究表明,在深部地层中,构造应力往往是地应力的主要来源,尤其在高构造应力区,水平构造应力的幅值显著高于垂向自重应力<sup>[31-32]</sup>,且主要由强度较高的硬质岩层承担,易在软硬岩层界面形成应力集中带。同时,构造应力的分布具有明显的深度效应:随着埋深增加,构造应力的幅值整体呈增大趋势,水平应力差(最大与最小水平主应力的差值)也随之增大,应力场的各向异性逐渐增强;在深部高应力条件下,不同方向的构造应力分量会趋于协调,应力主方向逐渐统一,形成以某一主导构造应力为核心的统一应力场。

### 1.1.5 岩浆侵入

岩浆的运动方式分为两种:一种是侵入地壳内部的断裂裂隙中缓慢冷却,形成侵入岩;另一种则是直接喷出地表,形成火山岩。在岩浆侵入或喷发的过程中,由于岩浆温度远高于围岩,侵入通道及周围会形成显著的温度梯度,随着温度的逐渐降低,岩浆会缓慢结晶、冷却并最终固结成岩<sup>[33-35]</sup>。该过程会对原岩的应力平衡状态产生强烈扰动:一方面,岩浆的侵入占据了原有岩体的空间,对围岩产生侧向挤压作用,在接触带附近形成局部应力集中;另一方面,岩浆冷却固结过程中的体积收缩,会进一步引发围岩应力的重新分布,最终导致区域应力场格局发生永久性改变。这种改变不仅会在局部形成异常高地应力区,还会通过断裂带的应力传递,影响更大范围的地应力分布特征,是深部地应力场形成与演化过程中不可忽视的重要影响因素<sup>[36-38]</sup>。

## 1.2 影响因素

### 1.2.1 地质构造对地应力影响

断裂的发育会从幅值、方位两个维度扰动局部应力场,在同一完整构造单元内部,断层、节理等结构面将岩体分割为多个独立构造块体。通常单个块体的内部地层连续性好,块体全域的地应力数值、主应力方向趋于统一;但在断层临空边、构造转折段、断裂分叉位置与断层首尾端点等构造边界,岩体完整性被构造切割破坏,极易形成应力集中带,该区域的应力大小、应力走向与块体内部基准应力存在显著差异性<sup>[39-40]</sup>。

受断层错动、地层抬升剥蚀作用影响,断面两侧会形成A、B两类差异化构造形态(如图3所示):

A型凸起构造单元受表层卸荷效应控制,岩体约束作用减弱,区域地应力整体呈衰减特征;B型凹陷夹片构造单元受两侧岩体挤压夹持,处于荷载叠加环境,产生附加构造应力,促使局部地应力显著抬升。两种构造相间排布,最终造成浅层地应力沿断裂带呈现高低应力分区交错的分布特征<sup>[42-43]</sup>。

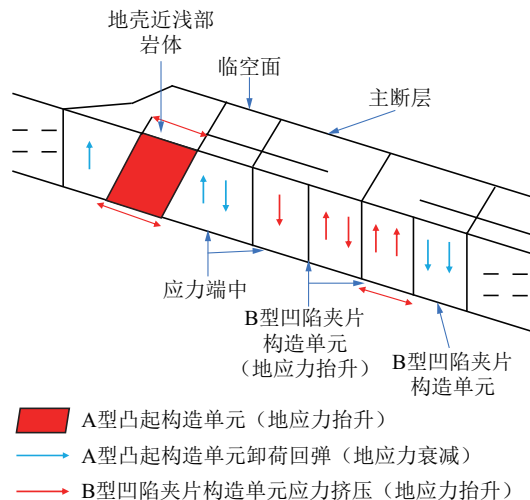


图3 断层产生构造体示意

### 1.2.2 地形地貌和剥蚀作用对地应力的影响

地形地貌的形态与演化是影响浅层地应力场分布的重要因素,由于地表形态的多样性与复杂性,不同地形条件下地应力的分布规律尚未形成普适性的统一结论,但部分典型地形的应力响应特征已形成普遍共识:在沟谷、洼地等地形区域,地应力水平通常显著高于山峰、山脊等正地形区域;而在褶皱构造中,背斜形态的应力分布具有明显的分区特征,褶皱两翼的构造挤压作用会导致应力集中、地应力增大<sup>[44-48]</sup>,而背斜核部受拉张卸荷作用影响,地应力水平反而有所降低。

地表剥蚀作用是塑造地形地貌、改造浅层地应力场的另一关键过程,其作用形式包括风化、搬运、侵蚀等(如物理化学风化、冰川刨蚀、波浪冲蚀与流水侵蚀等)。这些过程通过破坏、搬运地表凸起部分的岩体,逐步削平地表高差,进而从根本上改变岩体的应力边界条件。剥蚀作用对原岩应力场的改造主要体现在应力分量的差异化衰减上(如图4所示):上覆岩体被剥蚀移除后,岩体的垂向自重会随荷载减少而显著降低,而水平构造应力的衰减幅度则相对有限,其幅值与初始水平应力的差异较

小,这种垂向与水平应力的非同步衰减,会进一步改变区域应力场的应力比特征<sup>[49-50]</sup>。

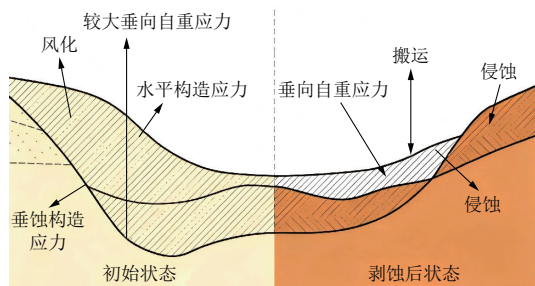


图4 剥蚀作用对地应力的影响

### 1.2.3 岩石力学性质对地应力的影响

岩体内部地应力的动态演变本质对应着弹性应变能不断集聚、阶段性释放的全过程,岩体自身的承载强度上限,会直接约束区域地应力所能达到的极值水平,由此可见岩石固有的力学特性是调控地应力发育规模的关键影响因子。早期学者<sup>[51-54]</sup>提出经典结论:地应力的峰值大小和岩石单轴抗压强度呈现正相关规律。后续科研人员依托海量实测地质数据开展统计分析,率先引入岩体弹性模量 $E$ 这一参数,定量探究岩体力学参数与地应力赋存特征的关联规律<sup>[55-58]</sup>。统计结果呈现出明确的分区特征:(1)当岩体弹性模量 $E \geq 50$  GPa时,内部地应力大多稳定在10~30 MPa的区间范围;(2)若岩体弹性模量 $E \leq 10$  GPa,其内部地应力普遍难以突破10 MPa。控制其余环境变量对比还能发现,弹性模量仅2 GPa的岩体地应力约为3 MPa,而弹性模量高达100 GPa的岩体地应力可达30 MPa。这一规律充分说明,弹性模量越高的岩体,贮存弹性应变能的能力越强,所能维持的地应力基准水平也会更高。

### 1.2.4 地下水对地应力的影响

地下水是影响岩体力学性质与地应力分布的重要环境因素,其作用机制可分为物化作用与力学作用两类,二者往往耦合发生,共同改变岩体的应力状态与力学响应特征。

地下水的物化作用主要通过潜蚀、水解、冻融循环等过程,改造岩体的原生结构与矿物组成:水岩反应会弱化裂隙面胶结物、降低岩石强度,冻融循环则会反复胀裂岩体裂隙,扩大孔隙度与连通性,最终降低岩体的完整性与承载能力<sup>[59]</sup>。地下水

对地应力的影响尤为显著,其核心机制与孔隙水压力效应直接相关。天然岩体中普遍存在裂隙、节理等孔隙结构,当孔隙被水饱和时,孔隙水压力会成为地应力测量值的重要组成部分。根据有效应力原理,岩体骨架所承受的有效应力等于总应力减去孔隙水压力,因此当区域孔隙水压力较高时,岩体的总应力(即实测地应力值)会显著升高,而骨架有效应力则相对降低。这种应力状态的改变,不仅会影响地应力的测量结果,还会通过弱化岩体强度、诱发应力集中,改变区域地应力场的分布格局<sup>[60-61]</sup>。

### 1.2.5 温度场对地应力的影响

一般情况下,岩体随埋深增加而升温,在岩体连续性约束下,热胀效应会产生附加温度应力。应力大小与埋深呈线性正相关,计算表明,常规地质条件下的温度应力约为同深度垂向自重应力的1/9,整体呈静水压力式分布,是深部地应力场的重要应力组成部分。当岩体局部出现温度异常(如岩浆侵入、工程扰动、季节性温差等)时,不均匀温度场会引发岩体的热胀冷缩,变形受周边岩体约束后会产生附加应力,导致局部应力场的大小和主方向发生改变,形成应力集中或松弛区,进而改造区域地应力的分布格局<sup>[62-69]</sup>。

## 2 地应力测量与计算

地应力测量主要通过仪器对岩体(心)进行测量,直接读出原岩应力值或换算得到岩体应力值,具体方法包括水力压裂法、孔壁变形法、孔底应力解除法、应力恢复法和声发射法等<sup>[70-73]</sup>。

### 2.1 水力压裂法

水力压裂法是当前深部岩体原位地应力测试的主流技术之一,广泛应用于采矿、隧道、水利水电及油气开发等地下工程领域<sup>[74-76]</sup>。

#### 2.1.1 基本原理

水力压裂法应用前需设定三项基础假定:被测围岩为均质、连续、各向同性的弹性介质,岩体内部流体渗流符合达西定律,钻孔轴向应力等效于上覆岩体产生的自重应力。高压注水过程中,孔壁切向应力随水压升高逐步由压应力转变为拉应力,当拉应力达到岩体抗拉强度时,孔壁发生开裂破坏。试验过程可提取破裂压力、重张压力、瞬时关闭压力等关键特征参数,结合孔隙水压力、岩体抗拉强度,即可推导计算测点最大水平主应力与最小水平主

应力;利用印模器记录孔壁裂缝方位,能够确定水平主应力的指向。若考虑岩体孔隙渗流作用,还需引入孔隙渗透弹性参数对计算公式进行修正,进一步提升计算精度。

### 2.1.2 现场测试步骤

结合单管加压系统的作业模式,标准测试流程分为七大环节:(1)座封,利用钻杆将封隔器下放至预设测试深度,注水使封隔器膨胀固定,形成密闭承压段;(2)分段加压,切换水流通道向承压段注入高压水;(3)孔壁致裂,压力升至临界值后孔壁产生裂隙,记录对应破裂压力;(4)停泵稳压,关闭供水阀门,待裂缝趋于临界闭合状态,读取瞬时关闭压力;(5)循环测试,反复完成加压、泄压操作4次及以上,保证试验数据有效性;(6)解封提钻,测试完成后释放封隔器内部压力,使其收缩复位;(7)方位测定,借助印模器与定向器记录裂缝走向,确定水平主应力方向。现场测试前还需完成钻杆密封性检查、水质过滤等准备工作,避免设备堵塞、密封失效等问题影响测试结果。

### 2.1.3 计算参数确定

试验特征参数主要依据压力-时间曲线判定:压力曲线首个峰值对应破裂压力;多次循环加压曲线的上部拐点为重张压力;压力下降段的拐点取值为瞬时关闭压力,拐点难以区分时可采用双切线法辅助判定。孔隙水压力一般等效为测点静水压力,按静水压力公式计算。岩体抗拉强度结合室内岩样试验结果取值,各项参数代入对应力学公式后,即可依次求解测点最小水平主应力、最大水平主应力。

### 2.1.4 技术优势和不足

水力压裂法的技术优势:(1)测试深度优势显著,可实现地壳数千米深度岩体的地应力测量,适配深部地下工程勘测需求;(2)计算过程无需输入岩体弹性模量、泊松比等力学参数,避免参数取值误差带来的计算偏差;(3)承压测试段长度较大,属于区段应力测试,能够弱化岩体局部非均质性对测试结果的干扰;(4)设备组装与现场操作简单,单组测试周期短,野外工程适用性强。

水力压裂法的技术不足:(1)在构造极度复杂、钻孔方向与主应力方向难以判定的区域,测试数据的工程参考价值会大幅降低;(2)测试精度存在差异,最小水平主应力的测算精度优于最大水平主应

力,在高精度应力分析场景中存在一定短板。

## 2.2 孔壁变形法

### 2.2.1 基本原理

地下岩体处于原始地应力时,内部应力与变形保持平衡状态,当通过钻孔作业将待测岩体与周边母体岩体分割脱离后,原有约束消失,测点岩体发生应力释放,并伴随弹性恢复变形<sup>[77-78]</sup>。通过精准捕捉应力解除前后岩体的应变变化量,结合岩体弹性力学参数,即可求解测点三维地应力大小与方向。该方法需要满足两项基本力学假定:(1)被测岩体视为均质、连续、各向同性的理想弹性体,满足广义胡克定律;(2)岩体加载与卸载过程的应力-应变关系保持一致,卸荷产生的弹性变形可等效还原原始应力作用下的变形状态,以此保证计算结果的有效性。

### 2.2.2 空腔包体应变计的使用过程

空腔包体应变计以空心圆筒为基体,粘贴应变花后(如图5所示),外层再次浇筑环氧树脂形成整体防护结构。现场安装需遵循标准化流程:首先沿略向上倾斜 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 的方向钻取主钻孔,该倾角便于后续清渣作业;其次在主孔孔底钻制锥形导向孔,保障后续小孔与主孔严格同心;最后钻设用于安放应变计的小型安装孔。钻孔工序完成后彻底清理孔内岩粉与碎屑,借助专用推杆将应变计送入孔底,推动定位销使内部胶液流出并填充间隙。静置24 h待胶层完全固化,方可开展后续应力解除作业。

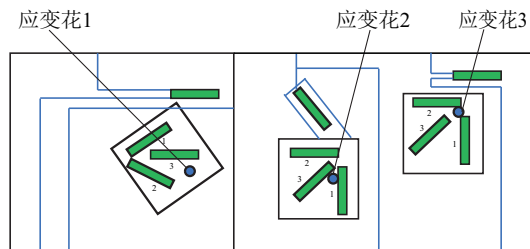


图5 空腔包体应变计应变花图示

### 2.2.3 技术优势和不足

孔壁变形法优势在于该技术依托单孔作业即可完成三维地应力测试,现场设备组装、钻孔及安装流程简便,测试效率高。同时环氧树脂粘接体系适配节理、裂隙发育的非均质岩体,适用场景广泛,是岩土工程领域常用的地应力测试手段。

不足之处在于应变计的安装质量无法在施工过程中实时检测,仅能在取心完成后进行事后核实验,若粘接不牢固将直接造成数据失效;此外,计算过程高度依赖岩体弹性参数的取值精度,参数偏差会对地应力反演结果产生一定影响。

### 2.3 孔底应力解除法

孔底应力解除法是应力解除法的常用分支,依托钻孔取心实现岩体卸荷,结合应变监测与岩体力学参数反演地应力,操作简便、适用范围较广,在深部岩体应力测试中应用广泛。

#### 2.3.1 基本原理

孔底应力解除法的核心原理为应力解除理论<sup>[79]</sup>。完整岩体在原始地应力场作用下处于应力平衡状态,通过钻机钻取平底钻孔并对孔底进行处理后,在孔底布设应变传感元件;随后继续钻进、取出孔底岩心,使被测岩体脱离周边母体约束,原有应力随之释放并产生弹性恢复变形。通过采集应力解除前后的应变数据,结合岩体弹性模量、泊松比等力学参数,依据弹性力学理论即可计算测点处的地应力大小。

#### 2.3.2 测试流程

孔底应力测量具体流程如下(图6):

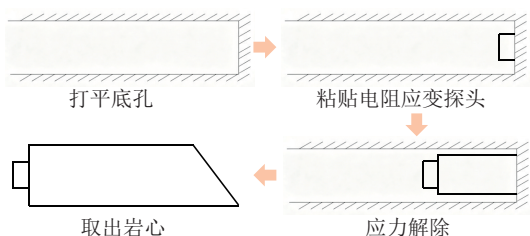


图6 测试流程

(1)使用钻机钻设平底钻孔,并对孔底进行打磨平整,保证接触面平整,为传感器布设创造条件。

(2)在平整后的孔底粘贴电阻应变花,现场可选用等角或直角两种布设形式。

(3)沿原钻孔方向继续钻进,将布设传感器的岩心完整取出,完成应力解除作业,同步记录全过程应变数值。

(4)对取出的岩心开展室内试验,测定其弹性参数。

(5)结合现场应变数据与岩心力学参数,计算测点地应力值。

#### 2.3.3 技术优势和不足

孔底应力解除法的优势:相较于孔壁变形法,该方法所需解除的岩心长度更短,对于节理、裂隙发育,完整性较差的岩体依然具备良好的适用性。整套测试流程简单,设备投入少、试验成本低,现场测试成功率较高。

孔底应力解除法的不足:受测试形式限制,孔底应变探头仅能采集平面应变信息,因此该方法仅可获取平面应力结果,无法得到岩体三维应力状态,在需要全方位地应力分析的工程场景中存在明显局限。

### 2.4 应力恢复法

应力恢复法是岩土工程中常用的地应力测试手段,依托“应力解除+加压复原”的原理开展测试,操作流程简便,可直观获取测点应力状态。

#### 2.4.1 基本原理

人工开挖形成解除槽,使槽体周边岩体发生应力释放,打破原有应力平衡;随后在槽内布设加压装置并逐级施压,逐步恢复岩体应力。当监测元件的读数回归至开挖前初始数值时,槽内压力值即等同于测点原始地应力,以此实现地应力的测定。

#### 2.4.2 测试流程

应力恢复法借助槽内加压装置对岩体进行逐级施压,测量岩体受压恢复的应力,具体测试流程如下:

(1)在待测岩体表面选定位置,于解除槽上下两侧布设监测元件,记录开挖前的初始应力数据。

(2)开挖预设解除槽,同步全程监测岩体应力、应变变化。

(3)将压力枕置入解除槽,采用水泥砂浆填充缝隙,保证传力效果。

(4)启动加压设备对压力枕加载,直至监测数据恢复至开挖前水平,停止加压并记录压力数值,该数值即为测点地应力。

#### 2.4.3 技术优势和不足

应力恢复法优势:测试过程无需计算岩体弹性模量、泊松比等力学参数,避免了参数取值带来的误差,现场可直接读取结果,整体操作简单易行。

不足之处:受施工方式限制,仅适用于浅部岩体测试;同时开挖扰动会改变岩体原有应力环境,测得结果属于二次应力,并非岩体原始地应力,数据存在一定偏差。

## 2.5 声发射法

### 2.5.1 基本原理

岩体受荷载作用时,内部积聚的弹性应变能会以弹性波形式向外释放并产生声信号;依据凯瑟效应,岩石试样再次加载时,仅当外荷载超过其历史最大应力时,才会重新出现明显的声发射活动,据此可反推岩体曾经承受的最大地应力,并结合岩心判断应力方向<sup>[80]</sup>。

### 2.5.2 测试流程

声发射法依托凯瑟效应开展地应力检测(装置如图7所示),整套室内测试流程如下:

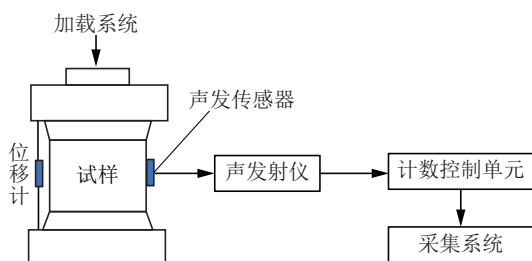


图7 声发射法测量原理

(1)试样采集与制备:从待测岩体现场钻取圆柱形岩心,按照试验标准加工为合格试样。

(2)设备安装调试:将声发射传感器固定在岩心表面,完成整套加载系统、信号采集设备的接线与调试工作。

(3)分级加载试验:通过加载装置对岩心持续施加轴向压力,同步利用仪器实时监测、记录声发射信号。

(4)数据判读:观察声发射活动变化,当信号强度突然大幅提升时,该临界点即为凯瑟效应点,对应荷载就是岩体历史所受最大地应力。

(5)应力方向判定:结合岩心现场定向数据,进一步确定测点地应力的方位。

### 2.5.3 技术优势和不足

声发射法优势:操作简便、试验成本较低,且可同步确定地应力的大小与方位,受现场复杂作业环境的干扰较小。但同时声发射法存在明显局限性:凯瑟效应在高强度脆性岩体中表现显著,对于疏松、低强度的塑性岩体识别效果较差;岩心取出后应力环境、温湿度发生改变,加之加载速率、试验围压等外界条件,都会对测试结果产生干扰,一定程度上影响测量精度。

## 2.6 地应力测试方法对比

地应力各类方法横向对比如表1所示,从表中可以看出不同方法适用场景、优劣特点等方面,在施工现场根据地应力测试方法的适用性优选高效便捷的方法进行测量。

## 3 地应力计算方法

### 3.1 基于弹性力学的经典计算方法

基于弹性力学的地应力经典计算方法,核心是利用弹性力学基本理论,结合地层地质条件与岩体力学参数,通过简化假设构建计算模型,实现地应力(主要为自重应力、构造应力)的定量计算。该方法理论基础成熟、计算过程简洁,是地应力计算的基础手段,广泛应用于浅层地层及工程初步设计阶段,但其局限性在于对复杂地质条件(如岩体非线性、多场耦合)的适配性较差,需结合工程实际进行合理简化。

#### 3.1.1 自重应力计算方法

自重应力是地应力的基础组成部分<sup>[81]</sup>,由上覆岩层自重产生,呈线性分布特征,其计算基于弹性力学中“均质、各向同性、连续介质”假设,忽略岩体孔隙压力、构造作用等附加应力,仅考虑岩层自重对下部地层的挤压作用。

对于水平地面、岩层均质且密度均匀的地层,不同深度处的自重应力可通过以下公式计算:

$$\sigma_v = \gamma H \quad (1)$$

式中: $\sigma_v$ ——深度 $H$ 处的垂直自重应力; $\gamma$ ——上覆岩层的平均重度,通常取 $20 \sim 27 \text{ kN/m}^3$ ,具体需根据岩层岩性(如砂岩、页岩、花岗岩)确定; $H$ ——计算点埋深。

当岩层存在分层特征(不同岩层重度不同)时,需采用分层叠加法计算垂直自重应力,公式如下:

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (2)$$

式中: $\gamma_i$ ——第 $i$ 层岩层的重度; $h_i$ ——第 $i$ 层岩层的厚度; $n$ ——计算深度范围内的岩层层数。

水平自重应力( $\sigma_{h_1}$ )的计算基于泊松效应,即垂直自重应力作用下岩体产生垂直压缩变形,同时伴随水平方向的侧向膨胀,受周边岩体约束形成水平自重应力,计算公式如下:

$$\sigma_{h_1} = \frac{\mu}{1 - \mu} \sigma_v \quad (3)$$

| 表 1 地应力测试方法横向对比 |                                         |                                  |                           |                                |                                  |
|-----------------|-----------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 对比维度            | 水力压裂法                                   | 孔壁变形法(空心腔体应变计)                   | 孔底应力解除法                   | 应力恢复法                          | 声发射法                             |
| 测试维度            | 二维(最大、最小水平主应力)                          | 三维地应力(完整三向主应力)                   | 仅平面二维应力                   | 二维平面应力                         | 仅历史最大主应力,可配套定向判方位                |
| 核心原理            | 向封闭钻孔段高压注水,孔壁拉裂时通过破裂、关闭压力计算水平应力         | 钻孔埋设应变计,套钻解除应力,由卸荷应变结合弹性参数反演三维应力 | 孔底粘贴应变片,钻取岩心卸荷,通过平面应变求解应力 | 开挖卸荷槽释放应力,槽内加压至监测数据复原,加压值即为地应力 | 依托凯瑟效应:岩心加载出现显著声发射时,对应荷载为历史最大地应力 |
| 适用埋深            | 超深、深部(可达数千米)                            | 中浅层、千米内钻孔                        | 浅—中深层钻孔                   | 仅地表浅部露头(数米以内)                  | 无埋深限制(取岩心室内试验)                   |
| 适用岩体条件          | 完整、较完整岩体;破碎带精度大幅下降                      | 节理、裂隙发育岩体适配性好;软硬互层均可             | 破碎、完整性差岩体,短岩心即可完成测试       | 仅完整地表岩体,开挖扰动大                  | 高强度脆性岩体最优;松软塑性岩体误差大              |
| 是否需要岩体弹性参数      | 不需要,无参数引入误差                             | 必须(弹性模量、泊松比),参数偏差影响精度            | 必须(弹性模量、泊松比)              | 不需要,直接读取压力值                    | 需要岩心室内力学标定                       |
| 现场操作难度          | 中等,单孔测试流程标准化,自动化程度高                     | 工序繁琐,应变计安装、胶固化等待 24 h 以上         | 操作简便,钻取短岩心,现场耗时短          | 开挖工作量大,人工扰动严重                  | 无需野外大型设备,仅室内试验机                  |
| 核心优势            | 测深能力行业最优;区段平均应力,弱化局部缺陷;无需岩体力学参数;野外作业效率高 | 单孔获取完整三维地应力,裂隙岩体适配性强             | 岩心短,破碎岩体功率高,设备成本低         | 原理直观,无需力学参数,数据读取简单             | 试验成本低,不受现场复杂环境干扰                 |
| 主要缺陷            | 仅能测二维应力;构造复杂区域数据可靠性低,最大水平主应力测算精度偏低      | 应变计粘接质量无法实时检测,脱粘直接报废数据           | 仅能获取平面应力,无法得到垂向应力         | 仅适用于浅露头,开挖改变原始应力场,结果存在偏差       | 仅能得到历史最大应力,无法获取当前完整三向应力;塑性岩体识别失效 |
| 典型应用场景          | 深埋隧道、水利超深勘探孔、深部油气、矿山千米钻孔                | 水电地下厂房、深埋隧道三维应力精细勘察              | 中小型浅埋隧道、矿区浅层钻孔快速测试        | 边坡、露天矿地表浅部岩体勘察                 | 深部钻孔岩心批量快速筛查、前期定性评估              |

式中: $\mu$ ——岩体的泊松比,通常取值范围为 0.2~0.4,岩体越坚硬(如花岗岩)泊松比越小,岩体越软弱(如页岩)泊松比越大。

该方法适用于浅层、岩层均质连续、无明显构造扰动的地层,如平原区浅层地质勘查、小型地下工程初步设计,计算精度可满足工程初步需求。

### 3.1.2 构造应力简化计算方法

构造应力是由地壳构造运动产生的附加应力,是深部地层、构造复杂区域地应力的主要组成部分<sup>[82-83]</sup>,其大小、方向受地质构造(如断层、褶皱)影响显著,计算难度高于自重应力。基于弹性力学的

构造应力计算,核心是通过简化构造应力分布模式,结合岩体弹性参数,实现构造应力的定量估算,常用简化方法包括平面应力法、平面应变法及应力叠加法。

(1)平面应力简化计算(适用于浅层薄岩层、构造平缓区域):假设构造应力仅作用于水平面内,垂直方向构造应力可忽略,此时水平构造应力( $\sigma_{\text{H}}、\sigma_{\text{h}}$ ,其中 $\sigma_{\text{H}}$ 为最大水平构造应力, $\sigma_{\text{h}}$ 为最小水平构造应力)可通过岩体应变观测数据结合胡克定律计算:

$$\sigma_{\text{H}} = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_{\text{H}} + \mu \epsilon_{\text{h}})$$

(4)

$$\sigma_h = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_h + \mu \epsilon_H) \quad (5)$$

式中:  $E$ ——岩体的弹性模量;  $\epsilon_H$ 、 $\epsilon_h$ ——分别为最大、最小水平方向的岩体应变(无量纲), 可通过现场应变观测获取。

(2) 平面应变简化计算(适用于深部厚岩层、构造强烈区域): 假设岩体在垂直方向无变形(平面应变状态), 构造应力同时存在水平与垂直分量, 垂直构造应力( $\sigma_v^i$ )与水平构造应力的关系如下:

$$\sigma_v^i = \mu(\sigma_H + \sigma_h) \quad (6)$$

此时, 地层总地应力为自重应力与构造应力的叠加, 即:

$$\sigma_{v总} = \sigma_v + \sigma_v^i \quad (7)$$

$$\sigma_{H总} = \sigma_{h自重} + \sigma_H \quad (8)$$

$$\sigma_{h总} = \sigma_{h自重} + \sigma_h \quad (9)$$

(3) 断层附近构造应力简化计算: 对于断层周边区域, 构造应力存在明显集中现象, 可通过断层滑动方向、断层力学性质(正断层、逆断层、平移断层)简化计算, 以逆断层为例, 断层附近最大水平构造应力计算公式如下:

$$\sigma_H = \frac{\tau_f + \sigma_v \tan \varphi}{\tan \theta} \quad (10)$$

式中:  $\tau_f$ ——接触面的抗剪强度;  $\varphi$ ——接触面的内摩擦角;  $\theta$ ——断层倾角。

### 3.1.3 优缺点与适用范围

常规地应力计算模型在实际地应力计算或预测中无需复杂设备与软件, 计算成本低、效率高, 可快速获取地应力估算值, 适用于工程初步设计、浅层地层地应力评估及复杂地应力计算的初步参考, 可结合岩体基本力学参数灵活调整, 适配不同均质地层场景。但缺点也较为明显, 模型简化假设较多, 对复杂地质条件(如破碎带、多断层叠加、深部高地应力区域)适配性差, 计算精度有限; 构造应力的简化模式难以反映实际构造运动的复杂性, 仅能实现定性或半定量估算, 无法满足高精度工程需求。

常规地应力计算模型适用范围: 主要用于浅层(埋深 < 1000 m)、岩层均质连续、构造扰动较弱的区域, 如小型地下隧道、浅层矿产勘查、工程地质初步评价等; 可作为深部复杂地层地应力计算的辅助手段, 为数值模拟、现场实测提供初始应力参数。

## 3.2 数值模拟计算方法

数值模拟计算方法是基于计算机技术与连续介质力学、离散介质力学理论, 通过构建地层力学模型, 模拟地应力的分布特征与演化规律, 实现地应力定量计算的现代化方法。该类方法突破了经典弹性力学方法的简化假设, 可考虑岩体非线性、地质构造复杂性、多场耦合等因素, 计算精度更高, 适配性更强, 已成为深部复杂地层地应力计算的主流方法, 广泛应用于各类重大地下工程、深部资源开发等场景。根据建模原理的不同, 常用数值模拟方法主要包括有限元法、离散元法及其他辅助数值方法。

### 3.2.1 有限元法(FEM)

#### 3.2.1.1 原理与计算流程

有限元法是地应力数值模拟中应用最广泛的方法, 核心原理是将复杂的地层岩体离散为有限个相互连接的单元体, 通过求解每个单元体的力学平衡方程, 进而叠加得到整个计算区域的地应力分布。有限元法在地应力计算中的标准流程主要包括五个步骤: (1) 确定计算区域与边界条件, 结合工程实际划定计算范围, 明确边界约束条件(如位移约束、应力约束)与初始条件(如初始自重应力、初始构造应力); (2) 建立几何模型, 通过 CAD、ANSYS、FLAC3D 等软件构建地层三维几何模型, 明确岩层分布、断层位置、岩性分区等地质特征; (3) 网格划分, 将几何模型离散为单元体(常用四面体、六面体单元), 根据计算精度需求调整网格密度, 地质复杂区域(如断层周边)采用加密网格, 均质区域采用稀疏网格; (4) 参数赋值与方程求解, 输入各岩层的岩体力学参数(弹性模量、泊松比、重度、内摩擦角等), 选择合适的本构模型(如弹性模型、弹塑性模型、损伤模型), 通过数值迭代求解单元体力学平衡方程, 得到计算区域内各节点的应力值; (5) 结果验证与分析, 将计算结果与现场实测数据对比, 验证模型合理性, 分析地应力分布规律、应力集中区域及影响因素。

有限元法的核心控制方程基于虚功原理推导, 对于线弹性岩体, 单元体的应力-位移关系如下:

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (11)$$

式中:  $[K]$ ——单元刚度矩阵;  $\{u\}$ ——单元节点位移向量;  $\{F\}$ ——单元节点载荷向量(包括自重载荷、构造载荷等)。

通过求解该方程,可得到单元节点位移,再通过物理方程转换为应力值:

$$\{\sigma\}=[D]\{\epsilon\} \quad (12)$$

式中: $\{\sigma\}$ ——单元应力向量; $[D]$ ——弹性矩阵; $\{\epsilon\}$ ——单元应变向量,由节点位移推导得到。

### 3.2.1.2 在地应力计算中的应用与优化

有限元法在地应力计算中的应用场景极为广泛,适用于深部高地应力、岩体非均质、多断层叠加的复杂工程场景。在实际应用中,针对不同地质条件,有限元法不断进行优化升级,主要体现在三个方面:(1)本构模型优化,突破传统弹性模型的局限,引入弹塑性本构模型(如Drucker-Prager模型、Mohr-Coulomb模型)、损伤本构模型,能够更真实地模拟高地应力作用下岩体的塑性变形与损伤演化,提高地应力计算精度;(2)多场耦合模拟优化,结合渗流力学、热力学理论,实现应力-渗流、应力-温度、应力-渗流-温度多场耦合模拟,解决地下水、高地温对深部地应力分布的影响问题;(3)网格优化与算法改进,采用自适应网格技术,根据计算过程中应力梯度自动调整网格密度,减少计算误差,同时引入并行计算算法,提高复杂大型模型的计算效率,满足深部大尺度工程地应力计算的需求。

国内外学者通过有限元法开展了大量地应力计算研究,例如,贺林林等<sup>[84]</sup>利用ANSYS软件构建深部矿井三维地质模型,模拟采动过程中地应力的重新分布,为巷道支护设计提供依据;黄超<sup>[85]</sup>采用FLAC3D软件模拟断层破碎带区域的地应力分布,分析断层活动对周边地应力的影响,为工程安全施工提供技术支撑。

### 3.2.2 离散元法(DEM)

离散元法与有限元法的核心区别在于将岩体视为由大量离散的颗粒或块体组成,而非连续介质,重点模拟块体之间的接触、滑动、碰撞等相互作用,进而求解地应力分布。该方法适用于岩体破碎、裂隙发育、非连续特征显著的地层,能够有效模拟岩体的非线性变形、块体滑移等现象,弥补了有限元法在非连续岩体地应力计算中的不足。

离散元法在地应力计算中的核心运动方程如下:

$$m_i \ddot{u}_i = \sum F_i + F_{gi} \quad (13)$$

$$I_i \ddot{\theta}_i = \sum M_i \quad (14)$$

式中: $m_i$ ——第*i*个块体的质量; $\ddot{u}_i$ ——第*i*个块体的加速度; $\sum F_i$ ——第*i*个块体受到的接触力总和; $F_{gi}$ ——第*i*个块体受到的重力; $I_i$ ——第*i*个块体的转动惯量; $\ddot{\theta}_i$ ——第*i*个块体的角加速度; $\sum M_i$ ——第*i*个块体受到的力矩总和。

离散元法的优势在于能够真实模拟非连续岩体的力学行为,尤其适用于断层破碎带、节理密集区等复杂地层的地应力计算。其局限性在于计算效率较低,对于大尺度工程模型,离散块体数量过多会显著增加计算成本,因此多用于局部复杂区域的地应力精细计算,常与有限元法结合使用(有限元法模拟整体区域,离散元法模拟局部非连续区域),实现优势互补。

### 3.2.3 其他数值方法

除有限元法、离散元法外,还有多种数值方法在地应力计算中得到应用,主要包括边界元法、有限差分法、无单元法等,各方法基于不同的建模原理,适配不同的工程场景,形成互补的数值计算体系。

(1)边界元法(Boundary Element Method, BEM):核心原理是将计算区域的边界离散为有限个边界单元,通过求解边界积分方程,得到边界上的应力与位移,进而推导整个区域的地应力分布。该方法仅需离散边界,无需离散整个计算区域,计算量远小于有限元法,适用于大尺度、均质连续地层的地应力计算。其局限性在于对非均质岩体、复杂边界条件的适配性较差,难以模拟岩体的塑性变形与损伤演化,因此在复杂地层中应用较少。

(2)有限差分法(Finite Difference Method, FDM):核心原理是将计算区域离散为规则的网格节点,通过差分方程近似替代微分方程,求解各节点的应力与位移。该方法计算流程简单、效率高,适用于规则几何形状、均质或弱非均质地层的地应力计算。常用软件包括FLAC、FLAC3D等,在地下工程地应力计算中应用广泛。其局限性在于网格形状固定,对复杂地质构造的适配性较差,网格划分不合理易导致计算误差增大。

(3)无单元法(Element-Free Method, EFM):突破了传统数值方法的网格依赖,无需划分单元,通过在计算区域内设置一系列节点,利用插值函数构建力学模型,求解地应力分布。该方法适用于岩体变形大、断裂扩展等复杂场景,如深部高地应力

作用下岩体破裂过程中的地应力演化计算,能够有效避免网格畸变导致的计算误差。其局限性在于计算精度受插值函数选择、节点分布的影响较大,计算效率低于有限元法,目前仍处于不断优化完善阶段。

### 3.3 智能算法辅助计算方法

随着人工智能技术的快速发展,智能算法与地应力计算技术深度融合,形成了智能算法辅助地应力计算方法。该类方法以现场实测数据、地质参数、数值模拟结果为基础,通过智能算法挖掘数据之间的内在关联,构建地应力预测模型,实现地应力的快速、高精度计算,尤其适用于缺乏实测数据、地质条件复杂的区域,弥补了传统计算方法的局限性,为地应力计算提供了新的思路与技术路径<sup>[86-87]</sup>。目前,在地应力计算中应用较广泛的智能算法主要包括机器学习法与深度学习法。

#### 3.3.1 机器学习法

机器学习法是通过算法让计算机从大量数据中自主学习规律,进而实现地应力预测与计算,其核心是构建输入参数与地应力值之间的映射关系,无需依赖复杂的力学模型与简化假设,适用于多因素影响下的地应力计算。在地应力计算中,常用的机器学习算法包括BP神经网络、随机森林、支持向量机、决策树等,其中BP神经网络与随机森林应用最为广泛。

(1) BP神经网络(Back Propagation Neural Network):是一种多层前馈神经网络,通过反向传播算法调整网络权重与阈值,实现输入参数与输出参数(地应力值)的精准映射。在地应力计算中,输入参数通常包括埋深、岩性参数(弹性模量、泊松比、重度)、地质构造参数(断层距离、褶皱程度)、地下水参数(孔隙压力)等,输出参数为垂直地应力、最大水平地应力、最小水平地应力。其计算流程主要包括:数据收集与预处理(筛选实测数据、剔除异常值、数据归一化)、网络结构设计(确定输入层、隐藏层、输出层节点数量)、网络训练与验证(用训练集训练网络,用测试集验证网络精度)、地应力预测计算。BP神经网络的优势在于能够处理非线性、多因素耦合的复杂问题,计算精度较高,适用于复杂地质条件下的地应力预测;局限性在于训练过程易出现过拟合、收敛速度慢等问题,需通过优化网络结构、增加数据量等方式改进。

(2)随机森林(Random Forest):是一种基于决策树的集成学习算法,通过构建多个决策树,将多个决策树的预测结果进行投票或平均,得到最终的地应力计算结果。该方法具有抗过拟合能力强、计算效率高、对缺失数据不敏感等优势,在地应力计算中,可有效处理多维度、多因素的输入数据,尤其适用于实测数据较少、地质参数复杂的场景。其核心原理是通过bootstrap抽样方法构建多个训练集,每个训练集对应一个决策树,决策树的分裂节点通过随机选择特征参数确定,最终通过集成学习降低预测误差。随机森林在地应力计算中的应用流程与BP神经网络类似,重点在于特征参数的选择与模型参数的优化(如决策树数量、节点分裂标准)。

此外,支持向量机(SVM)、决策树等机器学习算法也在地应力计算中得到应用,支持向量机适用于小样本数据的地应力预测,决策树适用于简单地质条件下的地应力快速计算,各算法根据工程场景与数据特点灵活选择。

#### 3.3.2 深度学习法

深度学习法是机器学习法的延伸,通过构建深层神经网络(如卷积神经网络、循环神经网络),能够自动提取数据的深层特征,进一步提高地应力计算的精度与泛化能力,适用于复杂地质条件、大数据量场景下的地应力计算,是近年来地应力计算领域的研究热点。

(1)卷积神经网络(CNN):主要用于处理二维图像数据,在地应力计算中,可结合地质勘探图像(如地震剖面图像、钻孔岩心图像),自动提取地质构造特征(如断层位置、裂隙分布),结合其他地质参数,构建地应力预测模型。例如,通过CNN提取地震剖面图像中的断层、岩层分布特征,将其与埋深、岩性参数结合,预测区域地应力分布,有效解决了传统方法难以量化地质构造特征的问题,提高了地应力计算的精度。

(2)循环神经网络(RNN)及长短期记忆网络(LSTM):适用于处理时序数据,在地应力计算中,可结合随钻监测数据、地应力动态演化数据,模拟地应力的时间演化规律,实现地应力的动态预测。例如,利用LSTM网络分析深部地层地应力随时间的变化趋势,结合采动、地下水开采等工程活动数据,预测地应力的变化规律,为工程安全监测与防控提供依据。

(3)深度学习与数值模拟的融合应用:将深度学习算法与有限元法、离散元法结合,利用深度学习算法优化数值模拟的参数设置(如本构模型参数、边界条件),减少数值模拟的计算成本,提高计算精度。例如,通过深度学习算法拟合数值模拟结果与现场实测数据的关系,自动优化数值模型参数,实现地应力的高效、精准计算。

深度学习法的优势在于能够自动提取数据深层特征,处理复杂非线性问题的能力更强,计算精度高于传统机器学习法;局限性在于需要大量的实测数据与计算资源,模型训练难度较大,目前仍处于工程化应用的探索阶段,主要用于科研与高精度工程地应力计算。

### 3.4 不同计算方法的精度影响因素分析

不同地应力计算方法的精度受多种因素影响,明确各因素的影响机制,能够为计算方法的优化、参数的选取提供依据,提高地应力计算精度。结合各类计算方法的特点,其精度影响因素主要包括以下几个方面。

(1)基于弹性力学的经典计算方法:精度主要受简化假设、岩体参数选取的影响。简化假设越多(如忽略孔隙压力、岩体非线性),计算误差越大;岩体参数(重度、泊松比、弹性模量)的选取与实际值偏差越大,计算精度越低。此外,地质构造复杂度也会影响计算精度,构造越复杂,经典方法的简化模式越难以适配,误差越大。

(2)数值模拟计算方法:精度影响因素较多,主要包括几何模型构建、网格划分、本构模型选择、岩体参数赋值、边界条件设置等。几何模型与实际地质条件的偏差、网格划分过粗或过密、本构模型与岩体实际力学行为不符、岩体参数赋值不准确、边界条件设置不合理,都会导致计算误差增大。其中,本构模型选择与岩体参数赋值是影响数值模拟精度的核心因素,需结合现场实测参数与试验数据合理确定。

(3)智能算法辅助计算方法:精度主要受数据质量、特征参数选择、模型结构优化的影响。数据质量越高(实测数据数量充足、无异常值),特征参数选择越合理(能够反映地应力的主要影响因素),模型结构优化越到位,计算精度越高;反之,若数据量不足、特征参数选取不合理、模型过拟合或欠拟合,会显著降低计算精度。此外,智能算法的参数

设置(如BP神经网络的隐藏层节点数量、随机森林的决策树数量)也会影响计算精度,需通过试算与优化确定最优参数。

总体而言,不同计算方法的精度影响因素各有侧重,在实际工程应用中,需结合地质条件、工程需求、数据情况,选择合适的计算方法,优化计算参数,通过现场实测或模型试验验证计算结果,确保计算精度满足工程需求。

## 4 发展方向

(1)测试技术迭代升级,适配深部与复杂岩体环境。现有地应力测试方法在超深井、强构造破碎带、高孔隙水压、高地温等极端工况下仍存在数据失真、设备失效等问题。未来应做好以下工作:①开展超深孔、长寿命地应力测试装备研发,优化水压致裂、应力解除等设备的耐压、耐高温、抗污染性能,提升深部地层的测试能力;②改良传感元件与胶结材料,攻克裂隙发育、软硬互层等非均质岩体的安装难题,提升孔壁变形、孔底应变类方法的稳定性;③发展分布式、一体化综合测试技术,将应力、应变、渗流、温度监测集成一体,实现多参数同步采集,摆脱单一参数测试的局限性;④推动井下无线传输、自动化测试技术落地,减少人工干预,降低野外作业风险与人为误差。

(2)完善多场耦合下的地应力计算理论与模型。现阶段经典弹性计算方法、常规数值模型大多忽略地下水、温度、岩体损伤、流变等因素的耦合作用,与实际地质条件偏差较大。后续重点构建应力-渗流-温度-化学-损伤多场耦合理论模型,考虑岩体非线性、流变时效、水岩作用、长期地质演化等效应,修正传统弹性力学的简化假设;针对断层、褶皱、节理密集等复杂构造,建立精细化分区计算模型,区分不同构造单元的应力传递规律;同时完善深部高地应力下岩体本构关系,优化弹塑性、蠕变、损伤本构模型,进一步缩小计算值与实际地应力的偏差。

(3)数值模拟技术精细化与算法优化。当前数值模拟普遍存在模型简化过度、网格适配性差、计算效率不足等问题。一方面发展自适应网格、变尺度耦合模拟技术,对断层、应力集中区等关键区域局部加密,全域采用粗网格,兼顾计算精度与运算效率;另一方面推进连续-非连续耦合数值方法融

合,将有限元、离散元、有限差分法优势结合,分别模拟完整岩体与破碎带、节理岩体,解决单一方法难以同时兼顾连续与非连续介质的难题。此外,引入并行计算、云计算技术,提升大尺度区域地应力场模型的运算速度,满足区域大范围应力场反演的需求。

(4)智能算法与传统技术深度融合。机器学习、深度学习目前多停留在理论研究阶段,工程落地程度较低。未来推动“实测数据+数值模拟+智能算法”一体化应用,以海量现场实测、室内试验、数值计算数据集为基础,优化BP神经网络、随机森林、CNN、LSTM等模型,建立高精度地应力预测模型;利用智能算法自动反演数值模拟参数、识别应力异常区、筛选最优本构模型,解决传统试算效率低、参数人为选取主观性强的问题;同时结合地质勘探影像、随钻数据、监测时序数据,实现地应力动态预测与演化分析,服务深部岩体钻探、矿山采动、隧道开挖等动态工程场景。

## 5 结论

本文围绕地应力成因、影响因素、现场测试技术与理论计算方法展开系统性梳理与分析,结合岩土工程理论与现有研究成果,得到主要结论如下:

(1)地应力的形成是多动力耦合作用的结果。地幔热对流为板块运动与区域应力演化提供深部动力;岩体自重是浅层地应力最基础的组成部分,应力大小随埋深呈线性变化;板块相互挤压、各类构造运动主导了区域构造应力场的格局,也是高地应力形成的核心诱因;岩浆侵入活动会强烈扰动原有应力平衡,造成局部应力集中与应力重分布,改变区域应力场形态。

(2)地质构造、地形地貌、岩体力学参数、地下水与温度场均会显著改变地应力的大小、方向与分布规律。断裂构造会造成局部应力分化,断层不同结构部位分别出现卸荷或加载效应;沟谷、背斜两翼等区域易形成应力集中,剥蚀作用会造成垂向与水平应力非同步衰减;岩体弹性模量、抗压强度与地应力量值呈正相关;孔隙水压力、温度应力会直接改变岩体有效应力状态,进一步影响应力场整体分布。

(3)主流地应力测试技术原理与适用条件差异明显。水力压裂法测深能力强、无需岩体力学参

数,适用于深部大范围地应力测量;孔壁变形法可实现单孔三维应力测试,对裂隙岩体适应性较好,但测量精度依赖岩体参数;孔底应力解除法操作简单、对破碎岩体兼容性强,仅能获取平面应力;应力恢复法原理直观、不受力学参数干扰,但仅适用于浅部工程;声发射法依靠凯瑟效应判定历史最大应力,成本低,在脆性岩体中测试效果更佳,塑性岩体应用误差较大。工程实践中需依据埋深、岩性、构造复杂程度合理选择测试方案。

(4)地应力计算方法可划分为经典弹性计算、数值模拟和智能算法三类。基于弹性力学的传统公式计算流程简单、成本低廉,适合浅层均质地层与工程初步设计,但因大量简化假设,难以适配深部、非线性及多场耦合的复杂地质条件;数值模拟方法可模拟复杂构造、岩体损伤与多场耦合问题,计算精度更高,是目前深部重大地下工程的主流计算手段;智能算法能够挖掘多因素与地应力的非线性关联,在地应力预测领域优势突出,但该类方法对实测数据数量与质量要求较高,现阶段多作为辅助手段使用。

## 参考文献:

- [1] 李荫亭.地幔对流的数值实验研究[J].地球物理学报,1986,29(2):147-157.
- [2] 相松,黄金水,吴秉乘.地幔对流构造模式及其对地球表面构造演化的启示:三维数值模拟研究[J].中国科学:地球科学,2024,54(8):2671-2688.
- [3] 刘瑞熙,李杨,张志刚,等.地幔对流对地壳二分性和地幔热-化学结构长期演化的影响:三维动力学数值模拟[J].地球物理学报,2025,68(6):2092-2111.
- [4] 傅容珊,黄建华.地球动力学基础[M].北京:地震出版社,2001.
- [5] Turcotte DL. Convection[J]. Reviews of Geophysics, 1979, 17(6):1090-1098.
- [6] 房勇,钱锋,周策,等.水平孔多参数综合测试仪器研发与应用[J].钻探工程,2024,51(1):97-105.
- [7] 张建杰,李海明.京津冀协同发展区地应力监测孔钻探施工技术[J].钻探工程,2022,49(6):48-53.
- [8] 徐铮,张化民,于好善,等.川藏铁路勘察工程的孔内试验及钻孔质量控制方案——以DZ-S-04-1号钻孔为例[J].钻探工程,2021,48(5):32-37.
- [9] 赵晖,张浩然.基于能量准则的深埋长隧洞岩爆评价及数值模拟分析[J].钻探工程,2025,52(3):55-62.
- [10] Davies G F. Mantle Convection for Geologists [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [11] Schubert G, Turcotte D L, Olson P. Mantle Convection in the Earth and Planets [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

- [12] Bercovici D. Mantle convection [J]. Encyclopedia of Solid Earth Geophysics, 2010: 827-836.
- [13] Dannberg J, et al. Understanding sub-lithospheric small-scale convection by linking models of grain size evolution, mantle convection, and seismic tomography [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2025, 26(9): e2025GC012289.
- [14] Taito H, Kameyama M, Miyagoshi T, et al. Two-dimensional numerical experiments on mantle convection with stress-history-dependent rheology: Toward self-consistent reproduction of plate tectonics [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2025, 356: 107321.
- [15] 褚吉祥, 于庆磊, 勒治华, 等. 复杂地质条件下矿区初始地应力场反演分析[J]. 黄金, 2022, 43(1): 54-58.
- [16] 司建军, 石蒙, 陈新, 等. 乌海矿区多煤层开采地应力分布规律研究[J]. 中国矿业, 2025, 34(12): 248-254.
- [17] 景锋, 盛谦, 张勇慧, 等. 中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(10): 2056-2062.
- [18] 周辉, 杨凡杰, 张传庆, 等. 考虑围压效应的大理岩弹塑性耦合力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2389-2399.
- [19] 张晓飞, 王继明, 张鹏, 等. 新疆某抽蓄电站深部岩体地应力赋存规律及地下洞室稳定性分析[J]. 地质力学学报, 2025, 31(4): 721-730.
- [20] 徐纪人, 赵志新, 石川有三. 中国大陆地壳应力场与构造运动区域特征研究[J]. 地球物理学报, 2008(3): 770-781.
- [21] 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003, 33(S1): 12-20.
- [22] 谢富仁, 崔效峰, 赵建涛, 等. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. 地球物理学报, 2004(4): 654-662.
- [23] 王琪, 张培震, 牛之俊, 等. 中国大陆现今地壳运动和构造变形[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2001, 31(7): 529-536.
- [24] 谢富仁, 陈群策, 崔效峰, 等. 中国大陆地壳应力环境基础数据库[J]. 地球物理学进展, 2007(1): 131-136.
- [25] 苏培臻, 罗艳, 赵里. 川滇地区地壳三维应力场模型的构建[J]. 地球物理学报, 2025, 68(5): 1730-1750.
- [26] 张北航, 张进, 曲军峰, 等. 阿拉善东北缘晚中生代以来陆内变形、古应力特征及构造背景[J]. 地质通报, 2021, 40(1): 110-124.
- [27] 赵劭, 游万敏, 牛运华, 等. 层状岩体对地应力场量值与方向的扰动规律研究[J/OL]. 人民长江, 1-11 [2026-06-12]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1202.TV.20251217.1652.004>.
- [28] 赖锦, 宋翔羽, 苏洋, 等. 超深层碎屑岩储层应力控储特征及成储模式——对万米深层油气勘探的启示[J/OL]. 地质论评, 1-21 [2026-09-01]. <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2026.05.021>.
- [29] 孔震, 韩飞, 朱斯陶, 等. 深井地垒构造区高应力孤立煤体冲击机理与防治研究[J]. 煤矿安全, 2026, 57(5): 61-73.
- [30] 李舰. 构造应力作用下围岩变形破坏机理及控制研究[J]. 矿业装备, 2025, (12): 24-27.
- [31] 张国强, 李海涛, 蒋贝贝, 等. 高构造应力下低渗透致密砂岩起裂特征[J/OL]. 断块油气田, 1-13 [2026-06-12]. <https://link.cnki.net/urlid/41.1219.TE.20251209.1527.002>.
- [32] 赵裕达, 张文高, 刘昊, 等. 花岗岩侵位后的热应力时空演化及其影响因素[J]. 地质力学学报, 2024, 30(1): 38-56.
- [33] 崔晓娜, 陈林. 幔源岩浆在地壳中分层侵位的控制因素: 二维热-力学模拟[J]. 岩石学报, 2024, 40(4): 1087-1101.
- [34] 蒋雨辰. 海孜井田岩浆构造演化区应力分布特征及其对瓦斯动力灾害控制作用[D]. 中国矿业大学, 2015.
- [35] 周子寒, 何川, 蒙伟, 等. 花岗质侵入岩地层隧址区的初始地应力场反演分析[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(2): 322-330.
- [36] 程旭, 陈祖安, 白武明. 地壳中岩浆沿已有断层运移的数值模拟——在长白山天池火山的应用[J]. 地球物理学报, 2014, 57(5): 1522-1533.
- [37] 杨荣超, 邹娟, 吴琳娜, 等. 火山成因断裂物理模拟研究: 对南堡凹陷断裂成因启示[J]. 地质科学, 2026, 61(2): 590-605.
- [38] 宋卫华. 煤与瓦斯突出区域预测研究[D]. 辽宁: 辽宁工程技术大学, 2004.
- [39] 卞壮. 构造应力与采动应力影响下正断层保护煤柱稳定性研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2022.
- [40] 耿永根. 东欢坨矿断层走向玫瑰花图特征分析[J]. 南方农机, 2020, 51(5): 61-63, 65.
- [41] 蒋中明, 徐卫亚, 邵建富. 基于人工神经网络的初始地应力场三维反分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(3): 52-56.
- [42] 南存全, 冯夏庭. 凹形圆弧断裂构造的简化力学模型及其解析分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 3984-3989.
- [43] 李鹏, 蔡美峰, 郭奇峰, 等. 煤矿断层错动型冲击地压研究现状与发展趋势[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(3): 1-17.
- [44] 赵劭, 钮新强, 颜天佑, 等. 考虑层状构造特征影响的岩体地应力场精细反演分析研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(6): 1239-1248.
- [45] 李小双. 露天转地下开采露天边坡稳定性与地下采场覆岩变形破坏特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [46] 王涛, 周先前, 田树斌, 等. 基于正交设计的河谷地应力场数值模拟方法及应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 831-835.
- [47] 辜明清. 岩土力学参数与地质环境[J]. 四川水力发电, 2002, 21(1): 12-14, 17.
- [48] 杨保存, 邱林. 岩体地应力及其测量方法综述[J]. 科技信息, 2009(6): 59-60, 57.
- [49] 蒋行行. 叶巴滩深切峡谷地应力场演化及分布规律研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2023.
- [50] 张元帅. 复杂构造条件下英安岩卸荷损伤演化对地下洞室稳定性影响研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [51] 张保平, 方竞, 田国荣, 等. 就地应力条件下岩石静动态力学性质的研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 396-398, 402.
- [52] 孟召平, 彭苏萍, 傅继彤. 含煤岩系岩石力学性质控制因素探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 102-106.
- [53] 任波. 水分对煤的岩石力学性质影响探讨[C]//中国力学学会2009学术大会论文集. 2009: 1-10.
- [54] 谭成轩, 孙伟峰, 孙叶, 等. 地应力测量及其地下工程应用的思考[J]. 地质学报, 2006, 80(10): 1627-1632.
- [55] 李光煜, 白世伟. 岩体应力的现场研究[J]. 岩土力学, 1979(1): 76-90.
- [56] 尚海燕, 鞠玮, 吴春龙, 等. 鄂尔多斯盆地东北缘太原组—山西组现今地应力预测及其对煤层气开发的影响效应[J]. 石油实验地质, 2026, 48(2): 493-504.
- [57] 沈书豪, 吴基文, 翟晓荣, 等. 深部地应力场下煤系岩石力学性质变化规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(6): 1200-1206.
- [58] 吕琦, 吕品, 程紫燕, 等. 基于力学时变性的页岩油藏四维地应

- 力演化规律研究[J].油气地质与采收率,2024,31(5):56-65.
- [59] 蔡杰龙,李英才,吴润康,等.富水地层TBM隧洞成型管片大面积错台与崩裂的原因及其对策[J].水利与建筑工程学报,2025,23(3):106-112.
- [60] 曾波,桂俊川,黄浩勇,等.正交各向异性页岩地层地应力精细评价方法[J].地质力学学报,2026,32(2):281-297.
- [61] 全兴华,孙峰,周斌,等.油田注水诱发应力场演化及地层活动机制研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015(1):116-121.
- [62] 曹建玲,石耀霖.地表温度年变化对地应力和地倾斜的影响[J].中国科学院研究生学报,2005,22(3):303-308.
- [63] 周家兴,王金安,李飞.深部工程岩体温度与渗流耦合作用下复杂应力场反演方法[J].工程力学,2024,41(6):188-201.
- [64] 马建军,范庆丰,刘丰军,等.饱和土热-水-力多场耦合动力响应分析[J].振动与冲击,2026,45(7):39-49.
- [65] 杨泽东.考虑温度场影响下寒区隧道围岩应力与变形特性研究[D].青岛:山东科技大学,2022.
- [66] 冉小东.高地温高地应力下岩体初始地应力场反演分析[J].建筑与装饰,2020(3):177.
- [67] 李良振.基于多条件反演深部高温地热田地应力场[D].长春:吉林大学,2020.
- [68] 王珍,袁梅,何明华,等.地应力场和地温场对型煤渗透率影响的实验研究[J].煤炭技术,2013,32(2):95-96.
- [69] 刘允芳,钟作武,汪洁.水压致裂法三维地应力测量成果计算与分析的探讨[J].岩石力学与工程学报,2002,21(6):833-838.
- [70] 杨晓斌,陈君青,张潇,等.页岩弹性参数测量方法及影响因素综述[J].石油与天然气地质,2025,46(2):630-653.
- [71] 吴培楠,张强,李亚鹏,等.应力解除法地应力测量中偏心岩心弹性模量率定解析[J].岩石力学与工程学报,2024,43(12):2956-2967.
- [72] 王连捷,孙东生,林为人,等.地应力测量的非弹性应变恢复法及应用实例[J].地球物理学报,2012,55(5):1674-1681.
- [73] 何维山,郭城.基于水力压裂法的皖南山区地应力发育特征和分布规律分析[J].绿色科技,2025,27(10):234-239.
- [74] 侯明勋,葛修润,王水林.水力压裂法地应力测量中的几个问题[J].岩土力学,2003,24(5):840-844.
- [75] 李彬刚.用水力压裂法获取煤储层地应力参数[J].煤田地质与勘探,2007,35(5):31-33.
- [76] 吴捷.水力压裂法在地应力测量中的应用[J].广东化工,2012,39(13):124-125.
- [77] 孙中想,张朝贤,侯明勋.空心包体式钻孔应力解除法数值模拟研究[J].人民黄河,2022,44(11):94-99.
- [78] 潘立宙.多触点预压式元件的钻孔变形法地应力测量[J].地球物理学报,1986(5).
- [79] 任焱,夏波,刘菲.孔底解除法在上海综合深井钻孔原地应力测量中的应用[J].华南地震,2018,38(1):71-76.
- [80] 马春德,吕志海,谭观霜.钻孔岩心声发射法在张北能源储气库地应力测量中的应用[J].矿冶工程,2023,43(5):22-25.
- [81] 刘毅,李炜.平行层状岩体的自重应力场[J].岩土力学,2001,22(1):63-66.
- [82] 陶志刚,于海军,雷啸天,等.构造应力作用下软岩隧洞大变形机理及控制技术[J].采矿与岩层控制工程学报,2025,7(5):118-131.
- [83] 高桂云,张梦云,王成虎,等.基于多源数据的滇中现代构造应力场精细化分区及应力剖面构建[J].地球物理学报,2025,68(10):3743-3765.
- [84] 贺林林,贾瑞,焦钰祺,等.基于ABAQUS的港工结构计算模型自动地应力平衡方法研究[J].水运工程,2021(11):178-185.
- [85] 黄超.断层带破碎区巷道变形破坏规律与控制分析[J].煤矿安全,2012,43(5):170-173.
- [86] 凡兴禹,王雪林.基于改进XGBoost算法的深部巷道松动圈智能预测研究[J].黄金科学技术,2024,32(1):109-122.
- [87] 马天寿,张东洋,陆灯云,等.地质力学参数智能预测技术进展与发展方向[J].石油科学通报,2024,9(3):365-382.

(编辑 王文)