基于应力解除法与快速应力边界法的含断层地应力分布规律研究*

杨宁[1,2],钟周颖[1,2],彭跃金[1,2],席世强[3],马志平[3],阚晓平[3]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
3.四川德鑫矿业资源有限公司, 四川 阿坝藏族羌族自治州 624199)

摘要:金属矿山工作面地应力分布规律对矿山安全生产至关重要。针对某锂辉石矿体含断层构造条件下的工作面地应力分布复杂难题,结合数值模拟与现场实测,探究了地应力分布规律。基于实测数据,运用快速应力边界法模拟出地下工程在真实地应力场作用下的初始状态。结果显示,各断层上盘的上部与下盘的下部存在地应力集中,而其他位置的应力分布有较好的层次性;数值模拟反演数据显示,断层两侧的地应力等值线发生突变,尤其是当断层密度较大时,地应力由7 MPa增大到20 MPa;在不含断层处,地应力实际测量结果与数值模拟分析结果较为吻合,这表明快速应力边界法能准确地反映地下岩体工程的实际地应力状态,并且可以弥补地应力实测点要避开断层等不良结构面的不足。

关键词:地应力测量;断层构造;地应力分布规律;快速应力边界法;数值模拟

中图分类号:TD311 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)06-0103-09

Study on In-Situ Stress Distribution Law of Fault-Containing Strata Based on Stress Relief Method and Rapid Stress Boundary Method

Yang Ning[1,2], *Zhong Zhouying*[1,2], *Peng Yuejin*[1,2], *Xi Shiqiang*[3], *Ma Zhiping*[3], *Kan Xiaoping*[3]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Sichuan Dexin Mining Resources Co., Ltd., Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Sichuan 624199, China)

Abstract: The distribution law of in-situ stress at working faces is crucial for the safe production of metal mines. Aiming at the complex problem of in-situ stress distribution at working faces under fault structure conditions in a spodumene ore body, the stress distribution law was explored by combining numerical simulation and field measurement. Based on measured data, the initial state of underground engineering under the real in-situ stress field was simulated using the rapid stress boundary method. The results show that stress concentration exists at the upper part of the hanging wall and the lower part of the footwall of each fault, and stress distribution at other positions presents obvious hierarchical characteristics. The inversion data of numerical simulation show that abrupt changes occur in stress contours on both sides of the faults. Specifically, the stress rises from 7 MPa to 20 MPa in areas with high fault density. The measured stress values are consistent with numerical simulation results in fault-free zones. It indicates that the rapid stress boundary method can accurately reflect the actual stress state of underground rock mass and help compensate for the limitation that measuring points must avoid adverse structural planes such as faults.

Key words: In-situ stress measurement, Fault structure, In-situ stress distribution law, Rapid stress boundary method, Numerical simulation

0 引言

地应力是导致矿山井巷及采场发生变形与失稳问题的核心因素,在高应力环境下,极易发生岩爆、采场和巷道变形破坏等灾害,对矿山的安全生产构成严重威胁[1]。地下采场布局和巷道设计等,应充

* **收稿日期**:2025-05-29
基金项目:"十四五"国家重点研发计划项目(2023YFC2907404)
作者简介:杨宁(1992—),男,宁夏中卫人,硕士,高级工程师,主要从事采矿工程技术研究工作。E-mail:34040682@qq.com
通信作者:钟周颖(1997—),男,江西宜春人,硕士,助理工程师,主要从事采矿工程技术研究工作。E-mail:2215905620@qq.com

分考虑地应力方向和大小对工程稳定性的影响[2]。因此,准确了解矿山的地应力分布规律,对确保矿山生产安全至关重要。特别是在高应力的山区矿山中,由于地形地貌的复杂性、地壳活动的频繁性以及断层破碎带的存在,矿区的地应力特征变得异常复杂且多变[3]。

在地应力理论分析中,戚蓝等[4]基于灰色系统理论,建立了跨流域引水工程区的地应力场回归模型,在实测地应力资料少的情况下,通过反演分析获得了较为准确的初始应力场分布。易达等[5]提出将遗传算法与有限元方法相结合的地应力反演方法,通过工程实例验证了该方法的合理性和有效性。在地应力实测与数值模拟分析中,李新平等[6]分析了我国 600 多组岩体地应力实测数据,绘制出水平主应力、垂直主应力及侧压力系数与埋深的关系图,结果表明,垂直主应力总体上随埋深增大而增大,并有良好的线性关系;水平主应力虽然总体上随埋深呈现线性变化,但在不同地区的同一深度有一定的差异,通过计算水平应力与垂直应力之比可知我国地下岩体侧压力系数为 0.48～2.63,该结果对工程数值分析有一定的实用价值。池建军等[7]针对天山隧道工程及两侧大范围内的围岩,建立数值模拟分析模型,采用 FLAC3D 软件开展研究,获取了研究范围内所有断层的地应力,同时与已有的实测数据对比分析,认为数值模拟可以很好弥补断层附近无实测地应力数据的缺陷。孙健等[8]利用水压致裂法对某矿山进行地应力测试,同时使用 FLAC3D 软件对矿区地应力场进行反演模拟,对地应力实测结果和模拟结果与埋深的关系进行对比分析,得到了该矿山地应力的分布规律和变化特征。余昌蔚等[9]为了维持初始应力不消失,在模型的边界上应用了面力约束条件,同时采用均质各向同性模型、均质各向异性模型和非均质模型进行验证,发现数值流行方法(NMM)在模拟初始地应力方面具有较好地运用能力。李时亮等[10]以某深埋长隧道为研究对象,统计了 17 个水压致裂地应力测试钻孔数据,并以此为基础分析了该隧道地应力分布特征,同时采用数值模拟方法反演地应力,且反演得到的地应力分布规律和量值大小均较为合理,反演结果有较高的可信度。

在金属非金属矿山开采过程中,复杂的地质条件同样会导致地应力场变化较大。基于地应力各影响因素是相互关联而非独立的理念,为获取深部断层区域的地应力场分布规律,目前构造影响下的地应力测试方法与技术常为建立“影响因素”三维数值模型,采用线性回归的方法反演断层区域的地应力场。本文采用现场地应力实测分析和三维数值模拟相结合的方法,研究锂矿山地质构造对地应力分布的影响,为该地区类似工程规划设计提供参考。

1 工程背景

某锂矿矿区岩组因岩石类型和结构的差异可细分为两个亚组。第一个岩组由中厚至巨厚层状黑云长英角岩、角闪长英角岩、灰质黑云石英角岩等组成,厚度超过 936 m。岩体呈层状-块状结构,角岩质地坚硬,天然抗压强度为 48.9～81.6 MPa,为主要的井巷围岩。第二岩组由花岗伟晶岩、花岗斑岩、钠长石化花岗岩、石英脉组成,厚 1.0～42.92 m,呈长条状、脉状产出,致密坚硬,天然抗压强度为 40.2～56.6 MPa。锂辉石矿体赋存于花岗伟晶岩脉中。

矿区内断裂构造总体较不发育,地面未见明显出露的断裂构造,但在Ⅰ号矿体 09 至 01 号勘探线之间的坑道和钻孔中发现有 4 条断层,如图 1 所示。断层走向 NW,倾向 NE,倾角 33°～75°,延展长度最长可达 174 m。虽然这 4 条断层对Ⅰ号矿体未造成明显的错动,但断层通过矿体时,使矿体及顶底板变得破碎,对矿体的安全开采和矿石的回采率有较大影响。

目前从 3 500 m 水平往上至 3 800 m 水平共掘进 7 条岩巷及区间溜井,中段高度为 50 m,7 条岩巷依次对应 3 500 m、3 550 m、3 600 m、3 650 m、3 700 m、3 750 m 及 3 800 m 7 个中段探矿工程。

2 地应力实测与数据分析

2.1 地应力测量方法与测点布置

本次地应力测量中,采用应力解除法中的孔壁应力解除方式,同时使用 CSIR 型三轴应变计作为测量工具。为精确评估矿区的原岩应力场状态,确保地应力测量工作与矿山生产互不干扰,选定了三处地应力测量点,分别位于 3 650 m 中段东六区域的 1# 和 2# 穿脉,以及东三穿脉(见图 2)。为提高测量精度,测量点避开了巷道和采场中的应力集中区域,如弯道、交叉路口和拐角等,并根据地质勘探资料,确保测量钻孔不在矿区的断层、岩石破碎带或断裂发育带附近。此外,3 个测量点之间保持至少 100 m 的水平间距,并且在垂直深度上也应有所差异[11-13]。测量点的具体位置、埋深以及钻孔参数见表 1 和图 2。表 1 中钻孔倾角、钻孔方位角、弹性模量 E 和泊松比 μ 等参数通过现场实测和取样试验得到[14]。

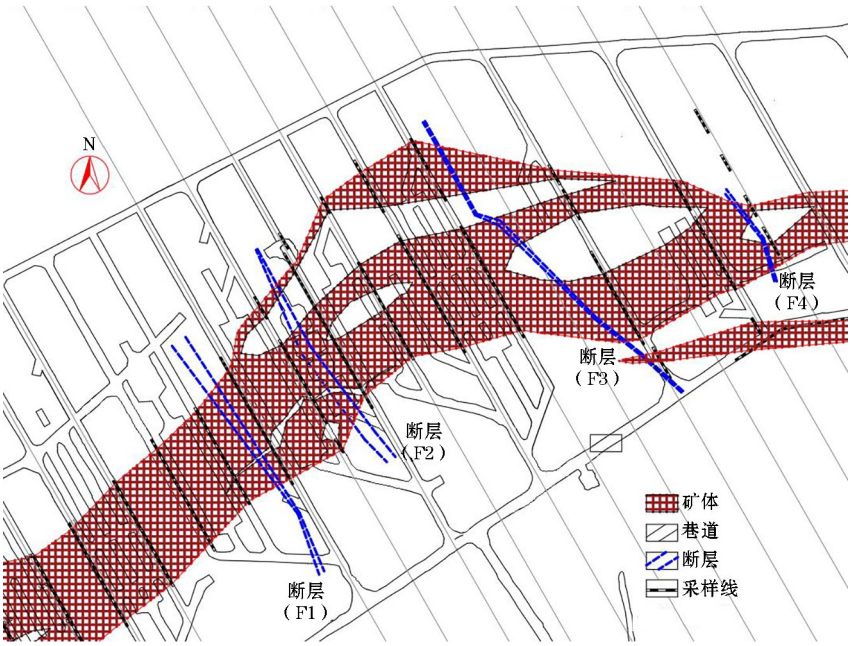


图 1 3 650 m 中段断层赋存状态

Fig.1 Occurrence state of faults at 3 650 m level

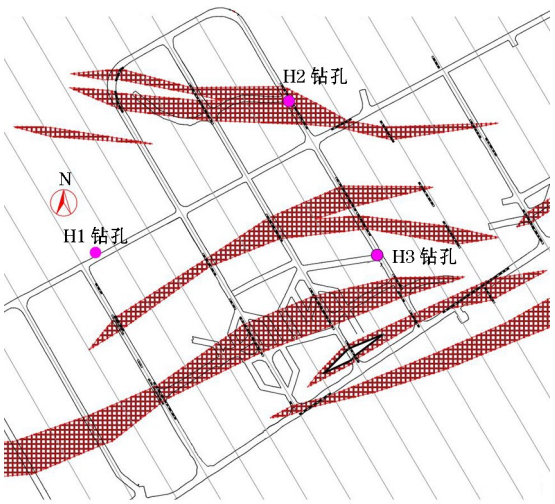


图 2 地应力测量点的布置

Fig.2 Layout of ground stress measurement points

表 1 测点布置及钻孔试件力学参数

Table 1 The arrangement of measuring points and the mechanical parameters of drilling specimens

钻孔编号	测点位置	埋深/m	钻孔倾角/(°)	钻孔方位角/(°)	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
H1	3 650 m 东六穿脉南端	102.00	−1.80	182	55 215	0.13
H2	3 650 m 东六穿脉北端	200.00	−2.50	166	23 685	0.15
H3	3 650 m 东三穿脉中部	227.00	−3.60	245	52 816	0.13

2.2 地应力测量原理

采用瑞典 LUT 地应力测定仪测量地应力状态,其测量原理是基于线弹性理论,假定孔壁岩体的变形属于线弹性变形[15]。通过应变片传感器记录测点岩体的应变情况,并结合相应测试得到岩体力学参数,即可计算出地应力的 6 个应力分量或者 3 个主应力的大小和方向。孔壁应变与岩体应力的关系见式(1)和式(2)[16-17]。测试过程中获取的应变数据见表 2。

$$
\begin{cases}
\varepsilon_1 = a_1\sigma_y + a_2\sigma_z + a_3\sigma_x \\
\varepsilon_2 = a_5\sigma_y + a_6\sigma_z + a_7\sigma_x - 4a_8\tau_{yz} \\
\varepsilon_3 = a_2\sigma_y + a_4\sigma_z + a_2\sigma_x \\
\varepsilon_4 = a_5\sigma_y + a_6\sigma_z + a_7\sigma_x + 4a_8\tau_{yz} \\
\varepsilon_5 = \dfrac{1}{4}(a_1+3a_3)\sigma_y + a_2\sigma_z + \dfrac{1}{4}(3a_1+a_3)\sigma_x + \dfrac{\sqrt{3}}{2}(a_3-a_1)\tau_{xy} \\
\varepsilon_6 = \dfrac{1}{4}(a_5+3a_7)\sigma_y + a_6\sigma_z + \dfrac{1}{4}(3a_5+a_7)\sigma_x + \dfrac{\sqrt{3}}{2}(a_7-a_5)\tau_{xy} + 2a_8\tau_{yz} - 2\sqrt{3}a_8\tau_{zx} \\
\varepsilon_7 = a_2\sigma_y + a_4\sigma_z + a_2\sigma_x \\
\varepsilon_8 = \dfrac{1}{4}(a_5+a_7)\sigma_y + a_6\sigma_z + \dfrac{1}{4}(3a_5+a_7)\sigma_x +
\end{cases}
$$

$$\begin{cases}\varepsilon_9=\dfrac{\sqrt{3}}{2}(a_7-a_5)\tau_{xy}-2a_8\tau_{yz}+2\sqrt{3}a_8\tau_{zx}\\ \varepsilon_9=\dfrac{1}{4}(a_1+3a_3)\sigma_y+a_2\sigma_z+\dfrac{1}{4}(3a_1+a_3)\sigma_x+\dfrac{\sqrt{3}}{2}(a_1-a_7)\tau_{xy}\\ \varepsilon_{10}=\dfrac{1}{4}(a_5+3a_7)\sigma_y+a_6\sigma_z+\dfrac{1}{4}(3a_5+a_7)\sigma_x+\dfrac{\sqrt{3}}{2}(a_5-a_7)\tau_{xy}+2a_8\tau_{yz}+2\sqrt{3}a_8\tau_{zx}\\ \varepsilon_{11}=a_2\sigma_y+a_4\sigma_z+a_2\sigma_x\\ \varepsilon_{12}=\dfrac{1}{4}(a_5+3a_7)\sigma_y+a_6\sigma_z+\dfrac{1}{4}(3a_5+a_7)\sigma_x+\dfrac{\sqrt{3}}{2}(a_5-a_7)\tau_{xy}-2a_8\tau_{yz}-2\sqrt{3}a_8\tau_{zx}\end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases}a_1=(3-2\mu^2)/E\\ a_2=-\mu/E\\ a_3=(1-2\mu^2)/E\\ a_4=1/E\\ a_5=(1-\mu)(3+2\mu)/2E\\ a_6=(1-\mu)/2E\\ a_7=(1-\mu)(1+2\mu)/2E\\ a_8=(1+\mu)/2E\end{cases} \tag{2}$$

式中:σ_x、σ_y、σ_z、τ_{xy}、τ_{yz}和τ_{zx}为三维应力状态的6个分量;$\varepsilon_1,\varepsilon_2,\cdots,\varepsilon_{12}$为采集得到的各通道应变数据;$a_1,a_2,\cdots,a_8$为常数,由式(2)给出;$E$为弹性模量,MPa;$\mu$为泊松比。

表2 测点应变数据

Table 2 Strain data of measuring points

测点编号	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6
H1	26	92	66	15	137	177
H2	128	415	405	31	442	42
H3	316	255	270	137	322	70
测点编号	ε_7	ε_8	ε_9	ε_{10}	ε_{11}	ε_{12}
H1	146	46	143	143	61	260
H2	446	46	−21	114	525	155
H3	46	376	102	145	105	−11

2.3 地应力测量结果分析

通过LUT-str软件计算获取研究区域的原岩应力参数,结果见表3和表4。表3的数据显示,南北向水平应力分量(σ_y)为7.36~9.08 MPa,为最大应力分量,反映出研究区域的地应力以水平构造应力为主导。3个监测点的σ_y分量均显著超过东西向水平应力分量(σ_x),揭示出矿区地应力场具有显著的各向异性特征。考虑到研究区域地处山谷,尽管3个监测点位于同一中段,但由于起伏的地形导致钻孔实际埋深存在差异。数据显示,岩体应力值与钻孔深度呈正相关关系,埋深较大的监测点处的应力值也较大。表4中三维主应力参数进一步印证了上述特征,各测点最大主应力值σ_1介于7.66~11.12 MPa之间,都超出对应埋深的自重应力。

表3 各测点应力分量测试结果

Table 3 Test results of the stress component at each measuring point

测点编号	埋深/m	σ_y/MPa(南北向)	σ_x/MPa(东西向)	σ_z/MPa
H1	102.00	7.357	1.753	2.347
H2	200.00	7.519	4.710	2.554
H3	227.00	9.080	3.186	7.964

表4 各测点三维主应力测试结果

Table 4 Test results of three-dimensional principal stress at each measuring point

测点编号	最大主应力值σ_1			中间主应力值σ_2			最小主应力值σ_3		
	大小/MPa	方位/(°)	倾角/(°)	大小/MPa	方位/(°)	倾角/(°)	大小/MPa	方位/(°)	倾角/(°)
H1	7.66	83.93	12.71	2.64	338.25	50.15	1.16	183.72	37.01
H2	10.97	233.71	20.62	2.97	132.37	27.59	0.84	355.44	54.41
H3	11.12	82.55	38.81	6.06	281.52	49.62	3.05	180.24	9.47

总体上,虽同一中段各监测点的地应力在量值和方向上存在差异,但差异较小。这说明研究区域内地应力场的空间分布具有一定的连续性,而该应力分布特征是由区域地质构造背景和地形条件导致的。

3 构造条件下地应力数值模拟方法

3.1 快速应力边界法模拟地应力场

FLAC3D是工程力学计算领域重要的三维显式有限差分软件。在FLAC3D软件中,不直接采用位移边界条件约束,而是采用速度边界条件约束,通过设定模型边界节点的速度(比如将某一方向的速度设为零)来间接实现位移边界的控制效果。由于岩体的自重应力也被当作一种力作用于模型上,因此,采用这个方法得出的地应力场,往往仅反映自重应力场的状态,而不能确切反映实际的原始地应力场。

经过对 FLAC3D 的不断研究与尝试,李仲奎等[18]提出了快速应力边界法(S-B 法),该方法直接对模型外表面施加应力边界条件,该应力可认为是模型最外层单元所受的应力 σ_Q,可转换为节点力作用在节点上,见式(3),从而模拟出地下工程在真实地应力场作用下的初始状态。这种方法相对于传统的速度控制边界条件,更能准确地反映实际的地应力状态,在进行地下工程的数值模拟时,具有较高的实用价值和准确性。

$$\sigma_Q = \sum_{i=1}^{n} F_i \tag{3}$$

式中:σ_Q 为单元表面积所受的应力;F_i 为节点 i 处的应力;n 为节点个数。

如图 3 所示,假设单元体 A 界面构成了整体模型的外围边界,而 B 界面则与模型内部的单元相互连接。在计算初始应力场平衡时,A 界面作为最外层模型边界,其面上的节点力大小与方向保持不变,这相当于施加了一个恒定的构造应力条件。与此同时,B 面作为表面单元与模型内部单元的接触面,其面上的节点力会向模型内部传递,这使得 A 面上的应力逐渐传递到模型内部,直至整个系统达到应力平衡状态。此时,获得的初始应力场可以被视为构造应力与自重应力相互叠加的结果。

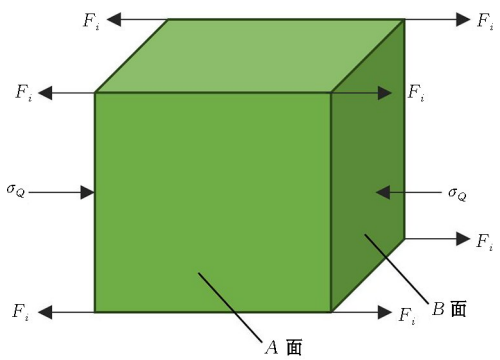


图 3 计算域边界上的单元体

Fig.3 The element body on the boundary of computational domain

3.2 “弱化赋值法”模拟断层

在 FLAC3D 中,有两种方法通常被用来模拟断层,分别是“弱化赋值法”和“接触面法”,这两种方法对参数的影响见表 5。“弱化赋值法”通过在模型中将具有实际产状的弱面区域的力学参数显著降低至远小于围岩的力学参数,以反映断层弱面的低强度与易滑动特征。“接触面法”是利用 FLAC3D 软件中的接触面功能,在给接触面赋予远比上下盘岩石低的力学性能参数的同时,使断层上下盘被接触面隔开,而不能直接接触,从而实现断层两盘的力学分离与相对位移。此外,“接触面法”不能反映断层厚度[19]。

表 5 断层建立方法的影响参数

Table 5 Influence parameters of fault establishment method

决定响应效果的影响参数	弱化赋值法	接触面法
法向刚度	无影响	影响较大
切向刚度	无影响	影响较大
内摩擦角	影响较大	影响较小
黏聚力	影响较大	影响较小
抗拉强度	影响较大	影响较小
弱面体积模量	影响较大	无影响
弱面剪切模量	影响较大	无影响

3.3 模型的建立及矿岩物理力学参数

根据矿区现有地质资料,建立了矿体、围岩、地表和断层计算力学模型(见图 4),模型长 1 170 m、宽 950 m、高度 280～825 m。为获取应力分布规律,建模的重点区域为矿体与其内部断层,因此将矿体与内部断层网格加密,模型共计 1 921 897 个单元,333 417 个节点。将上述应力实测数据导入模型内,采用快速应力边界法对模型 x 方向和 y 方向界面施加应力边界。为更好地分析矿体及周围应力分布特征,沿着矿体走向选取一典型纵剖面,在 3 650 m 中段选取矿体典型水平剖面进行分析。依据矿山工程地质条件,选用本构模型为 Mohr-Coulomb 模型。为说明快速应力边界法的适用条件,模型中建立了 4 种不同岩性的岩石模型,并建立了 4 条不同产状的断层破碎带。选取的岩体力学参数见表 6。断层破碎带的产状参数见表 7。

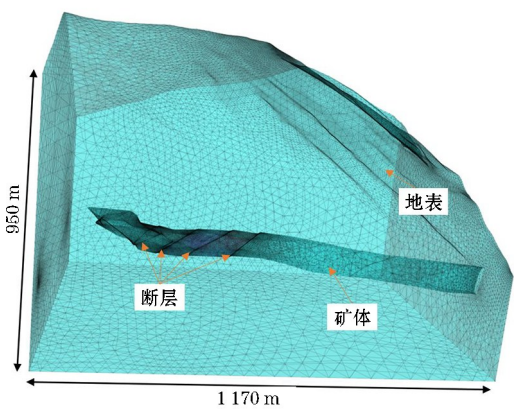


图 4 数值模型

Fig.4 Numerical model

表 6 岩石物理力学参数

Table 6 Physical and mechanical parameters of rock

岩石名称	容重/(kN·m^{-3})	抗拉强度/MPa	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
黑云石英片岩	27.00	0.83	3.15	1.98	2.27	29.95
花岗斑岩	26.00	1.31	4.23	3.04	3.46	36.18
钠长石化花岗岩	26.10	0.97	3.79	2.61	3.32	33.86
锂辉石矿体	27.20	1.40	3.77	2.26	3.24	32.25
断层破碎带	2.00	0.50	1.80	0.67	0.10	10.00

表 7 断层破碎带产状参数

Table 7 Occurrence parameters of fault fracture zones

编号	延伸长度/m	平均宽度/m	产状/(°)		
			走向	倾向	倾角
F1	127	4.5	120	30	75
F2	116	5.3	200	290	46
F3	174	1.6	192	282	33
F4	47	1.5	205	295	61

3.4 数值模拟监测方案

为获取断层周围初始平衡的应力状况,在 3 650 m 中段设 7 个监测点,监测点的布置如图 5 所示,其中监测点 1#～4# 布置在 4 条断层的下盘,以此获取断层周围的应力分布;监测点 5#～7# 布置在地应力实测点位置,以此获取实测点处应力分布的数值模拟结果。

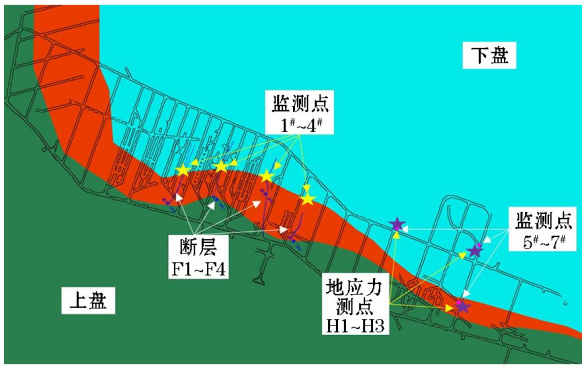


图 5 数值模拟的监测点布置

Fig.5 Monitoring point layout for numerical simulation

4 地应力数值模拟结果与分析

通过三维数值模拟分析得到地应力场分布结果,图 6 为矿体垂直应力云图与最大主应力云图,图 7 为模型纵剖面垂直应力云图与最大主应力云图,图 8 为模型平切面垂直应力云图与最大主应力云图。

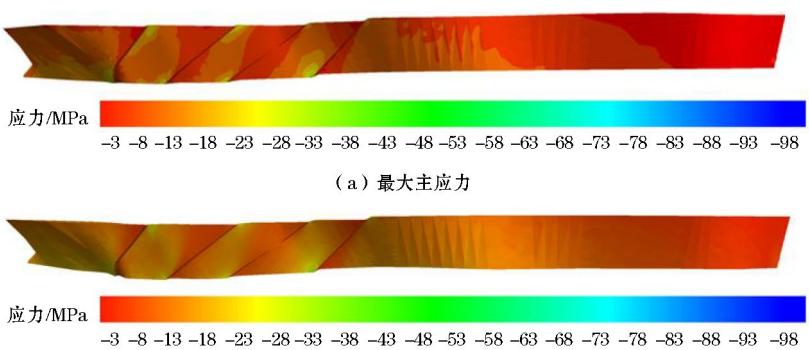


图 6 矿体应力云图

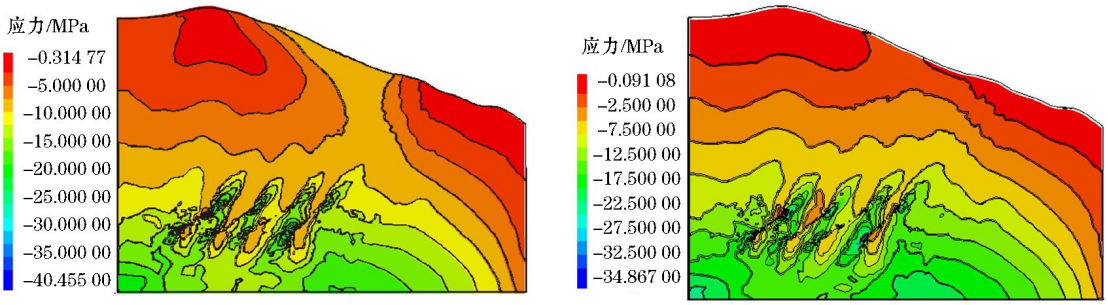
Fig.6 Stress cloud maps of ore body

从图 6 可以看出,沿矿体垂直方向的地应力变化梯度较大,大部分垂直应力为 10～15 MPa,各断层上盘的上部与下盘的下部地应力偏高,最高达到 30 MPa。总体上,沿矿体走向西侧(含断层方向)的最大主应力高于东侧(不含断层方向)最大主应力。由此可见,断层的存在会使地应力出现集中与波动,用常规的测试手段无法准确测出实际的应力分布情况。穿越断层时两侧地应力值有突变,增大幅度可达 5～10 MPa。

由图 7(a)可知,模型上部地表一段范围内主应力较低,应力值一般为 0.5～5 MPa。而模型中部的应力较大,最大达到 30 MPa,尤其是当断层密度较大时,各断层之间及断层下盘主应力会发生突变增大现象,一般由 7 MPa 增大到 20 MPa,应力突变现象较为明显。

由图 7(b)可知,模型上部垂直方向应力呈现阶梯形分布,增量约为 2 MPa,从地表的 0.5 MPa 逐渐增大到模型底部的 20 MPa。断层下盘最大主应力高于上盘最大主应力,差值达到 6～12 MPa,断层

F1 和 F4 处的应力值较高,且出现应力集中现象,应力峰值为 30 MPa。

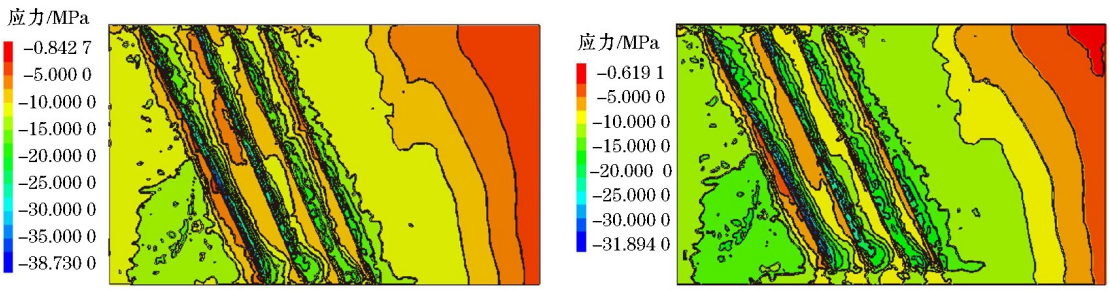


(a) 最大主应力　　(b) 垂直应力

图 7　沿矿体走向的纵剖面应力分布云图

Fig.7　Stress distribution cloud maps of longitudinal section along the strike of ore body

由图 8(a)可知,模型西侧的应力一般比东侧的应力高,西侧应力值为 10～13 MPa,东侧应力值为 5～9 MPa。与纵剖面云图类似,竖向剖面中部应力较大,且穿过断层时应力发生突变,最大突变处由 6 MPa 增大到 22 MPa,突变现象较为明显。从图 8(b)可以看出,垂直应力与最大主应力分布云图较为相似,垂直应力分布规律与最大主应力分布规律相同。



(a) 最大主应力　　(b) 垂直应力

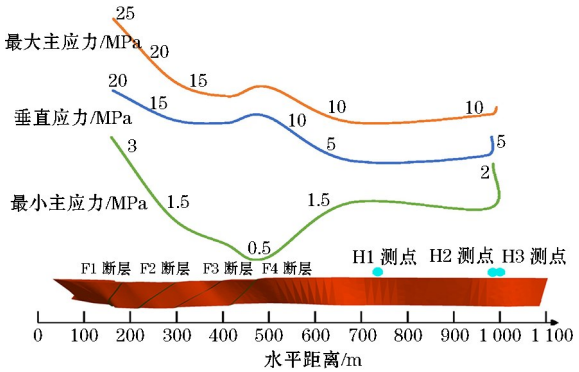
图 8　垂直矿体走向的竖向剖面应力分布云图

Fig.8　Stress distribution cloud maps of vertical section perpendicular to strike of ore body

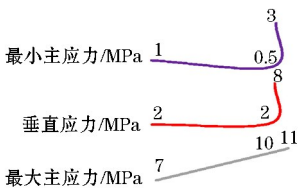
5　地应力测量值与数值模拟结果综合分析

地应力数值模拟结果与实测值等值线如图 9 所示。由图 9 可知,实测地应力与数值模拟计算结果的等值线变化趋势相似,其中数值模拟计算的 5# 测点与现场 H1 测点的最大主应力误差为 12.7%,垂直应力误差为 10.8%,最小主应力误差为 10.3%,这表明数值模拟结果与实测数据较为吻合,出现误差的主要原因为:实验室小样本与现场岩体实际力学性质存在尺度效应;本构模型存在局限性;实测点密度较小,实测方法单一等。相比地应力现场测量,数值模拟具有成本低、覆盖广、可预测复杂场景的优势,但该方法高度依赖模型准确性且验证困难,而实测数据直接可靠,但成本高、覆盖有限,二者需互补结合,即可实现高效、准确的地应力分布分析。

整体模型区域受岩体自重应力和构造应力的共同作用,轴线方向最大主应力为 10～25 MPa,垂直应力为 5～20 MPa,最小主应力为 0.5～3.0 MPa。由等值线图可知,应力受断层影响较大,一般断层附近应力由西向东降低后增大,再降低至平缓,在中部受 F2 和 F3 断层影响略微下降。再对比 H2 和 H3 测点,该测点位于同一中段水平,但埋深不同,导致 H3 测点总体应力比 H2 测点大,这也表明应力随埋深增大而增大。值得注意的是,矿体水平距离为 150～200 m,即断层 F1 和 F2 之间的岩体中最大主应力和最小主应力差值最大,即剪切应力最大,较易发生破坏,需要重点关注。



(a) 数值模拟结果



(b) 实测数据

图 9 地应力数值模拟结果与实测值等值线

Fig.9 Numerical simulation results of in-situ stress and measured value contour line

6 结论

结合数值模拟与现场实测,本文对含断层构造的某锂辉石矿体进行了地应力分布研究,得出如下主要研究结论。

(1) 基于实测数据,运用快速应力边界法(S-B法)模拟出地下工程在真实地应力场作用下的初始状态,模型中包括 4 种不同岩性的岩石和 4 条不同产状的断层破碎带。结果显示,在不含断层处,该方法地应力模拟结果与实际测量结果较为吻合。这表明该方法能比较准确地反映工程岩体的地应力状态,可以适用于含有不同规模断层和不同岩性的地层。

(2) 对比分析了"弱化赋值法"与"接触面法"两种断层数值模拟方法。这两种方法的不同之处在于破碎带区域力学参数的弱化处理,发现"接触面法"无法体现断层厚度,与现实较为不符,因此,本研究采用"弱化赋值法"模拟断层。

(3) 模型中断层两侧地应力等值线出现突变,尤其是当断层密度较大时,地应力由 7 MPa 增大到 20 MPa,突变现象较为明显。且各断层上盘的上部与下盘的下部出现地应力集中,而其他位置的应力分布有较好的层次性。

(4) 地应力数值模拟结果在不含断层处与实测值较为吻合,这验证了快速应力边界法(S-B 法)的适用性。数值模拟计算考虑了断层对地应力分布的影响,可弥补地应力实测点要避开断层等不良结构面的不足,可以较好地解决现场实测测点数量少且测量结果数据较为离散的问题。两种方法得到的地应力结果显示,在同一中段水平上,埋深对地应力的影响较大,这方面需要进一步深入研究。

参考文献(References):

[1] 沈海超,程远方,赵益忠,等.基于实测数据及数值模拟断层对地应力的影响[J].岩石力学与工程学报,2008(增刊 2):3985-3990.
Shen Haichao, Cheng Yuanfang, Zhao Yizhong, et al. Study on influence of faults on geostress by measurement data and numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(Suppl.2):3985-3990.

[2] 康红普,吴志刚,高富强,等.煤矿井下地质构造对地应力分布的影响[J].岩石力学与工程学报,2012,31(增刊 1):2674-2680.
Kang Hongpu, Wu Zhigang, Gao Fuqiang, et al. Effect of geological structures on in-situ stress distribution in underground coal mines [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Suppl.1):2674-2680.

[3] 李静,刘晨,刘惠民,等.复杂断层构造区地应力分布规律及其影响因素[J].中国矿业大学学报,2021,50(1):123-137.
Li Jing, Liu Chen, Liu Huimin, et al. Distribution and influencing factors of in-situ stress in complex fault tectonic region [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(1):123-137.

[4] 戚蓝,崔微,熊开智,等.灰色理论在地应力场分析中的应用[J].岩石力学与工程学报,2002,21(10):1547-1550.
Qi Lan, Cui Wei, Xiong Kaizhi, et al. Application of grey theory to analysis of in-situ stress field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10):1547-1550.

[5] 易达,陈胜宏,葛修润.岩体初始应力场的遗传算法与有限元联合反演法[J].岩土力学,2004,25(7):1077-1080.
Yi Da, Chen Shenghong, Ge Xiurun. A methodology combining genetic algorithm and finite element method for back analysis of initial stress field of rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7):1077-1080.

[6] 李新平,汪斌,周桂龙.我国大陆实测深部地应力分布规律研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(增刊 1):2875-2880.
Li Xinping, Wang Bin, Zhou Guilong. Research on distribution rule of geostress in deep stratum in Chinese mainland [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Suppl.1):2875-2880.

[7] 池建军,滕杰,尚彦军,等.天山深埋隧道复杂地质条件影响下地应力分布数值模拟分析对比[J].科学技术与工程,2024,24(25):10936-10945.
Chi Jianjun, Teng Jie, Shang Yanjun, et al. Numerical simulation and comparison of geostress distribution under the influence of complex geological conditions in a deep buried tunnel in Tianshan [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(25):10936-10945.

[8] 孙健,安晶,宫长亮,等.某矿山地应力测试结果及建模反演分析[J].中国矿山工程,2023,52(3):34-39.
Sun Jian, An Jing, Gong Changliang, et al. In-situ stress test results and modeling inversion analysis of a mine[J]. China Mine Engineering,2023,52(3):34-39.

[9] 余昌蔚,王媛.复杂地质条件下初始地应力场模拟的数值流形方法研究[J].河南科学,2017,35(6):918-926.
Yu Changwei, Wang Yuan. Study of numerical manifold method of simulation for in situ under complex geological conditions[J].Henan Science,2017,35(6):918-926.

[10] 李时亮,张占荣,杨闯,等.基于实测数据的长隧道地应力分布影响因素研究[J].科学技术与工程,2023,23(24):10513-10520.
Li Shiliang, Zhang Zhanrong, Yang Chuang, et al. Influencing factors of in-situ stress distribution in long tunnel based on measured data[J].Science Technology and Engineering,2023,23(24):10513-10520.

[11] 朱明德,王照亚,张月征,等.基于水压致裂法的三山岛深竖井工程区地应力测量与反演分析[J].地质力学学报,2023,29(3):430-441.
Zhu Mingde, Wang Zhaoya, Zhang Yuezheng, et al. In-situ stress measurement and inversion analysis of deep shaft engineering area of Sanshan Island based on hydraulic fracturing method[J]. Journal of Geomechanics, 2023, 29(3):430-441.

[12] Li Peng, Wu Yunquan, Cai Meifeng. Implications of in-situ stress measurement in mining engineering [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2021,833(1):012140.

[13] Congro Marcello, Zanatta Alexandre S, Nunes Karoline, et al. Determination of fault damage zones in sandstone rocks using numerical models and statistical analyses [J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2023, 36:100495.

[14] Xu Dayang, Hu Qianting, Si Hu. Measurement and inversion of the stress distribution in a coal and rock mass with a fault [J]. International Journal of Geomechanics, 2021,21(11):06021029.

[15] 刘卫东,李金鑫,孙伟,等.金川三矿区东部贫矿现场地应力测量及应力分析[J].矿冶,2020,29(5):15-20+56.
Liu Weidong, Li Jinxin, Sun Wei, et al. In situ stress measurement and stress analysis of the east lean ore in the No.3 mining area of Jinchuan[J]. Mining and Metallurgy, 2020,29(5):15-20+56.

[16] 闫振雄,王培涛.空心包体应变计地应力计算方法的探讨[J].岩石力学与工程学报,2018,37(增刊1):3568-3574.
Yan Zhenxiong, Wang Peitao. Insight into in-situ stress calculation applied in hollow inclusion measurement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018, 37(Suppl.1):3568-3574.

[17] Sun Di, Zhang Chongyuan, Zhang Shian, et al. Hydraulic fracturing in-situ stress measurements and large deformation evaluation of 1 000 m-deep soft rock roadway in Jinchuan No.2 mine, Northwestern China [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2025,58(3):2781-2801.

[18] 李仲奎,戴荣,姜逸明.FLAC3D分析中的初始应力场生成及在大型地下洞室群计算中的应用[J].岩石力学与工程学报,2002,21(增刊2):2387-2392.
Li Zhongkui, Dai Rong, Jiang Yiming. Improvement of the generation of the initial stress field by using FLAC3D and application in a huge underground cavern group[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2002,21(Suppl. 2):2387-2392.

[19] 蔡胜海.FLAC3D断层模拟中接触面法与弱化法的研究及应用[D].徐州:中国矿业大学,2016.
Cai Shenghai. Study and application of the interface and weaken method in FLAC3D fault simulation[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2016.