

程潮矿业采区溜井稳定性数值模拟研究

梁 万, 叶 超, 陈 康

(武钢资源集团程潮矿业有限公司, 湖北 鄂州 436051)

摘要: 为了深入探究程潮矿业采区溜井的稳定性及其受不同因素的影响机制, 采用三维有限差分软件 FLAC^{3D} 对溜井开挖前后的情况进行数值模拟, 重点研究溜井断面形状及尺寸、断层破碎带以及动载荷等因素, 从围岩应力分布、塑性破坏区域和岩体位移 3 个方面展开分析。结果表明: 断面形状及尺寸的差异会显著影响围岩应力分布和岩体位移, 合理的断面参数能有效降低塑性破坏风险; 断层破碎带的存在会降低溜井周围岩体的稳定性, 易导致较大范围的塑性破坏和位移; 动载荷则加剧围岩应力的波动, 不利于溜井的长期稳定。本文研究成果可为程潮矿业采区溜井的优化设计与稳定性控制, 以及类似矿山溜井工程提供参考依据。

关键词: 采区溜井; 数值模拟; 稳定性; 动载荷; FLAC^{3D}

中图分类号: TD926.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)09-0023-08

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.09.110

Numerical simulation of chute stability in Chengchao mining area

LIANG Wan, YE Chao, CHEN Kang

(Chengchao Mining Co., Ltd., WISCO Resources Group, Ezhou 436051, Hubei, China)

Abstract: In order to deeply explore the stability of the chute in Chengchao mining area and its influence mechanisms due to different factors, the three-dimensional finite difference software FLAC^{3D} is used to numerical simulation of the situation before and after the chute excavation, focusing on the shape and size of the chute section, fault fracture zone and dynamic load, and analysis is carried out from three aspects: surrounding rock stress distribution, plastic damage area and rock mass displacement. The results show that the difference in section shape and size will significantly affect the stress distribution and rock mass displacement of the surrounding rock, and reasonable section parameters can effectively reduce the risk of plastic failure. The existence of fault fracture zones will reduce the stability of the rock mass around the chute, which can easily lead to a large range of plastic failure and displacement. The dynamic load aggravates the fluctuation of the surrounding rock stress, which is not conducive to the long-term stability of the chute. The results can provide a reference for the optimal design and stability control of chutes in Chengchao mining area, as well as similar mine chute projects.

Key words: chute in mining area; numerical simulation; stability; dynamic load; FLAC^{3D}

采区溜井是矿山生产中连接采场与运输系统的关键咽喉工程, 其稳定性直接影响矿山的生产效率与作业安全。程潮矿业作为我国重要的铁矿石生产基地, 在长期运营过程中, 其采区溜井受地质条件、开采扰动及物料冲击等因素影响, 常出现围岩变形、垮塌等稳定性问题, 不仅制约了矿山的正常生产, 还可能引发安全事故。因此,

深入探究程潮矿业采区溜井稳定性的主要影响因素, 并提出针对性地优化与防控措施, 已成为保障矿山可持续发展的迫切需求。

国内外学者针对溜井稳定性已开展了大量研究。彭兆祥等^[1]通过放矿对比试验, 分析了不同断面形状(圆形、方形)对溜井围岩应力分布的影响, 结果表明, 圆形断面溜井的围岩应力集中现象

收稿日期: 2024-09-13

作者简介: 梁 万(1983—), 男, 高级工程师, 从事井建和采矿技术方面的管理工作。

相对较弱,稳定性更优;宋卫东等^[2]通过运动学理论分析,得出矿石冲击形成的两个冲击带位于井口下 2.0~5.6 m 及 26.4~38.2 m 处,试验显示破坏范围为井口下 1.95~10.20 m 及 19.4~40.2 m 处;秦秀山^[3]综合分析了地质条件、开采工艺等多因素对溜井长期稳定性的耦合作用,指出单一因素难以全面反映实际工况,需开展多因素协同研究。尽管前人在溜井断面设计、地质缺陷影响、动载荷作用等方面取得诸多成果,但在程潮矿业特定地质条件下,综合考虑断面形状及尺寸、断层破碎带、动载荷等因素对溜井稳定性的耦合影响研究仍有待深化,尤其是缺乏结合该矿实际开采工况的系统性数值模拟分析。

基于此,本文以程潮矿业采区溜井为研究对象,以数值模拟理论为基础,采用三维有限差分软件 FLAC^{3D},建立溜井开挖前后的数值模型,重点探究断面形状及尺寸、断层破碎带及动载荷对围岩应力分布、塑性破坏区域及岩体位移的影响规律,以期为其他类似地质条件下矿山溜井的工程实践提供有益参考。

1 模型建立

1.1 模拟对象的选取

程潮矿业采场的溜井主要分布在矿体中部,且东区采场溜井的破坏情况较为严重,因此模拟计算选择东区的采区溜井作为研究对象。根据工程地质资料,模型中部存在一层厚度为 1 m、倾角约为 50°的软弱夹层通过。溜井的围岩为花岗岩,断层中的充填物为蚀变砂卡岩。

1.2 模拟物理参数

在模型计算中,岩体为花岗岩,属于弹塑性

材料,采用岩石力学工程中广泛应用的摩尔-库仑本构模型;软弱夹层为闪长岩,采用应变-软化本构模型。计算过程中采用莫尔-库仑屈服准则^[4],具体如式(1)所示。

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (1)$$

式中: f_s 为判别材料是否发生剪切破坏的函数; σ_1 、 σ_3 分别为最大和最小主应力, Pa; c 为材料黏结力, N/mm²; φ 为材料摩擦角, (°)。

当 $f_s \geq 0$ 时,材料将发生剪切破坏。材料在达到屈服极限后,在恒定的应力水平下会产生塑性变形。在拉应力状态下,如果拉应力超过材料的抗拉强度,材料将发生破坏。

根据现场资料,采区溜井的围岩为花岗岩,断层填充物为蚀变砂卡岩。其力学参数如表 1 所示,模型中所采用的物理参数如表 2 所示。

1.3 模拟内容及模拟方案

模拟的主要内容: 1) 模拟断面面积相同但形状不同的溜井开挖过程,并进行计算分析; 2) 在第一步的基础上确定合理的断面形状,然后模拟该断面形状下不同尺寸的溜井开挖,并进行计算分析; 3) 在确定合理的溜井断面形状和尺寸后,模拟在该尺寸下断层及冲击载荷等因素对溜井稳定性的影响。

模拟方案: 1) 建立截面形状分别为正方形、长方形和圆形的溜井模型,模拟其分步开挖过程,计算并分析溜井围岩的应力状态、井壁塑性破坏状况及变形特征; 2) 根据上一步的模拟结果,综合分析不同截面形状溜井在开挖前后围岩的应力分布、塑性破坏区域和矢量位移变化,从而确定稳定性最佳的溜井截面形状; 3) 针对已确定截面

表 1 围岩的力学参数

岩石名称	容重/(N·m ⁻³)	弹模/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	摩擦角/(°)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
蚀变砂卡岩	27 300	1.829	0.22	1.43	27.1	17.61	1.5
花岗岩	25 220	2.036	0.27	1.61	29.6	39.77	2.3

表 2 模型围岩的力学参数

岩石名称	容重/(N·m ⁻³)	弹性体积模量/(×10 ⁹ Pa)	泊松比	黏聚力/(×10 ⁶ Pa)	内摩擦角/(°)	弹性切变模量/(×10 ⁸ Pa)	抗拉强度/(×10 ⁶ Pa)
蚀变砂卡岩	27 300	1.10	0.22	1.43	27.1	7.5	1.5
花岗岩	25 220	1.48	0.27	1.61	29.6	8.1	2.3

形状的溜井, 通过改变其尺寸, 分析其稳定性变化, 进而确定合理的截面面积; 4) 对已确定截面形状和尺寸的溜井进行再次建模, 研究破碎带及冲击载荷等因素对其结构稳定性的影响。

1.4 溜井断面形状确定

1.4.1 物理试验

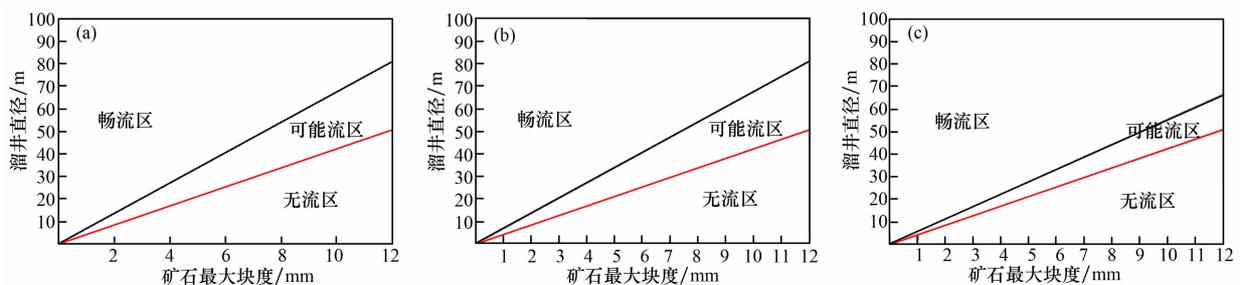
为了确定合理的断面尺寸和形状, 开展物理模拟试验, 并以漏斗口直径(或最小边长)与矿石最大块度之比(简称溜井通过系数)作为主要研究指标。试验中分别对圆形、方形和矩形断面进行放矿对比, 结果如图 1 所示。其中根据堵塞频率划分为畅通区、可能流区和无流区: 畅通区的堵塞频率为 0; 可能流区的堵塞频率范围为 0 ~ 100%; 无流区的堵塞频率为 100%。

由图 1 可知: 不同形状的漏斗口断面其通过系数存在差异, 其中圆形断面最大, 方形次之, 矩形最小。在可能流和畅流状态下, 圆形与方形断面的通过系数相差不大, 具体数据如表 3 所示。其中 K_1 为矩形断面的形状系数, 定义为矩形与方形断面通过系数的比值。矩形断面的通过系数随其长短边比例的变化而变化: 长短边比值越大, 通过系数越小; 反之, 则越大。

表 3 不同形状断面溜井的通过系数

流动类别	溜井断面形状		
	圆形	方形	矩形
可能流时	4.16	3.83	$3.83K_1$
畅流时	6.67	6.08	$6.08K_1$

由以上分析可知, 通过对 3 种井口断面形状



(a) 圆形断面; (b) 方形断面; (c) 矩形断面 (长短边比为 1.0:1.3)

图 1 不同形状的漏斗口断面与矿石最大块度的关系

表 4 围岩的力学参数

岩石名称	容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹模/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	摩擦角/($^{\circ}$)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
花岗岩	25 220	2.036	0.27	1.61	29.6	39.77	2.3

的通过系数进行比较可以确定, 为了防止发生溜井堵塞故障, 应采用圆形或方形断面。

1.4.2 数值模拟

采用软件 FLAC^{3D}对圆形和方形两种断面形状的溜井进行数值分析, 模拟对象为程潮铁矿东区的采区溜井, 其围岩力学参数如表 4 所示。建模范围: $42\text{ m}\times 24\text{ m}\times 24\text{ m}$ (高度 \times 长度 \times 宽度)。该模型仅考虑溜井井口断面形状对溜井稳定性的影响。模拟计算采用位移边界条件: 在模型上部施加 -9.5 MPa 的垂直载荷, 以模拟上部岩体的自重作用; 底部限制水平和垂直方向的移动; 模型四周施加对称应力边界条件, 竖直方向按重力梯度分布。

模型共包含 41 040 个单元体和 41 785 个节点。通过改变网格体的形状和参数, 分别建立圆形和方形断面的溜井计算模型, 两种断面面积相等, 均约为 7 m^2 。因此, 圆形井口的直径为 3 m , 方形井口的尺寸为 $2.7\text{ m}\times 2.7\text{ m}$ 。模型的网格划分如图 2 所示。

2 模拟计算结果分析

2.1 两种断面形状溜井模型的计算结果对比

2.1.1 竖直剖面应力分析

图 3 为不同断面剖面最大应力云图。由图 3 可知: 在沿溜井竖直方向的剖面上, 井壁附近和井底出现了应力集中现象, 其中最大应力均出现在井底。圆形断面井底的应力约为 17.4 MPa , 方形断面井底的应力约为 19.2 MPa , 后者比前者高出约 2.0 MPa 。两种断面形状的溜井在井壁附近均

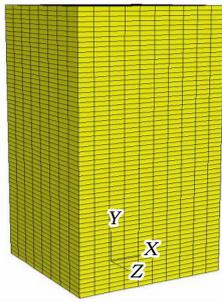


图 2 模型网格划分示意

出现应力集中，高应力区从应力集中区域向两侧逐渐减小，并在井壁处形成低应力区，但方形井壁附近的应力变化幅度更大。圆形断面溜井附近高应力区的应力约为 16 MPa，井壁处的低应力约为 12 MPa，形成的压力差为 4 MPa；而方形断面应力集中区的最大应力约为 16 MPa，井壁处的低应力约为 8 MPa，形成的压力差为 8 MPa。

2.1.2 水平剖面应力分析

图 4 为不同断面溜井剖面最大应力云图。由图 4 可知：两种断面形状的溜井在最大主应力方向均出现了应力集中现象，而在最小主应力方向形成了低应力区域。其中，圆形溜井应力集中区的最大应力约为 1.61 MPa，从应力集中中心向周围逐渐递减，应力差梯度为 1.00 MPa，呈现出一个平缓过渡的过程；方形溜井应力集中区的最大应力为 1.58 MPa，从应力集中中心到井壁，应力由高向低逐渐变化，应力差梯度为 2.00 MPa。然

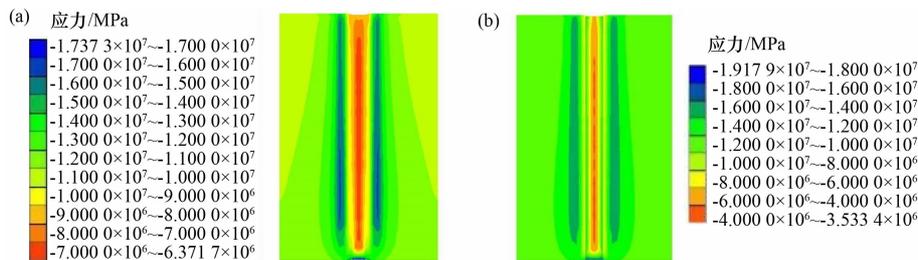
而，在方形溜井的井壁处形成了一个新的低应力中心，其应力仅为 8 MPa，与应力集中中心的压力差达到 8 MPa，且高应力区范围较大，这对井壁的稳定极为不利。

2.1.3 塑性破坏体积对比

溜井开挖后，井壁的塑性破坏主要表现为剪切破坏^[5]。经计算，圆形断面溜井井壁围岩的塑性破坏总体积为 1 075.03 m³，方形断面溜井井壁的塑性破坏体积为 1 253.36 m³，比圆形溜井多出 178.33 m³。由此可见，采用圆形断面能够有效降低应力集中程度，有利于底部漏斗结构的长期稳定，故推荐选择圆形作为溜井的断面形状。此外，圆形断面在承受较大地压方面也更具优势，进一步支持采用这种断面形式。

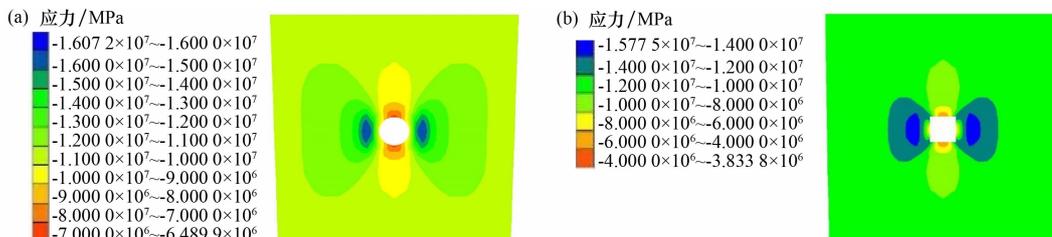
2.2 溜井断面尺寸模拟计算

在满足溜井净直径大于最大矿石块度 3~5 倍的前提下，增大溜井断面尺寸，在储矿高度相同的情况下，可以有效减少矿石冲击井壁的次数，从而避免冲击载荷对井壁造成的破坏^[6]。另一方面，从溜井稳定性、减少掘进量和支护工程量等方面考虑，溜井的断面尺寸又不宜过大。因此，在确保井壁稳定性的前提下，应尽量增大断面尺寸。使用 FLAC^{3D} 软件对不同断面尺寸的溜井进行数值模拟分析，分别建立直径为 2.5、3.0、3.5 m 的圆形溜井模型，以分析断面尺寸对稳定性的影响。模型通过改



(a) 圆形断面; (b) 方形断面

图 3 不同断面剖面最大应力云图



(a) 圆形断面; (b) 方形断面

图 4 不同断面溜井剖面最大应力云图

变溜井断面尺寸, 计算并分析开挖后的应力状态及塑性破坏情况。模型的网格划分如图 5 所示。

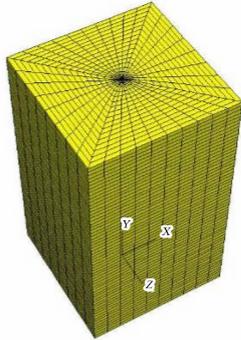


图 5 圆形溜井模型网格划分

2.2.1 竖直剖面应力分析

图 6 为不同直径溜井竖向剖面最大应力。由图 6 可知: 随着圆形溜井截面尺寸的增大, 井壁附近的应力也随之增加。截面直径为 2.5 m 的溜井, 井壁附近的最大应力约为 1.60 MPa, 井底处的最大应力为 1.66 MPa; 截面直径为 3.0 m 的溜井, 井壁附近的最大应力约为 1.66 MPa, 井底处的最大应力为 1.73 MPa; 截面直径为 3.5 m 的溜井, 井壁附近的最大应力约为 1.76 MPa, 井底处的最大应力为 1.76 MPa。由此可见, 随着井口尺寸的扩大, 井壁附近的应力逐渐增加, 应力集中现象也愈加明显。

2.2.2 水平剖面应力分析

图 7 为不同直径溜井水平剖面最大应力。由图 7 可知: 在最大主应力方向, 溜井井壁附近出

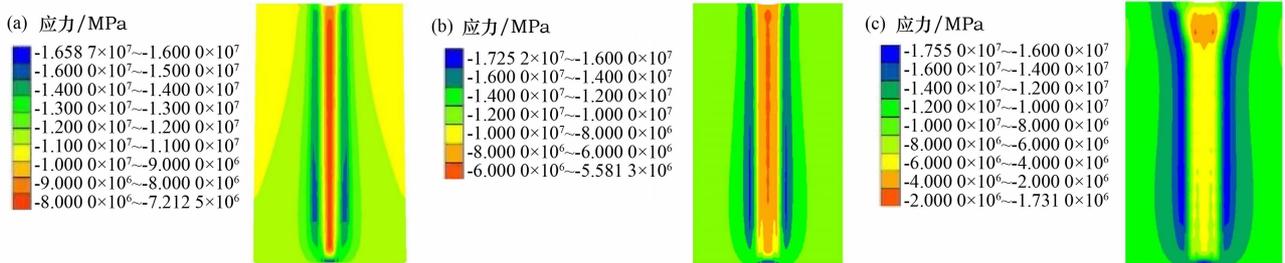
现了明显的应力集中现象; 而在最小主应力方向, 则形成了低应力区域。具体数值显示: 断面直径为 2.5 m 的溜井, 所产生的最大主应力约为 1.49 MPa; 断面直径为 3.0 m 的溜井, 所产生的最大主应力约为 1.62 MPa; 断面直径为 3.5 m 的溜井, 所产生的最大主应力约为 1.66 MPa。由此可见, 随着井口断面尺寸的增加, 最大主应力在相应方向上的数值也随之升高。

2.2.3 竖直剖面塑性破坏分析

图 8 为不同直径溜井竖直剖面塑性破坏。由图 8 可知: 塑性破坏区域在溜井两侧呈对称分布。然而, 随着溜井断面直径的不断增大, 由于卸载范围的扩展, 塑性破坏区域也呈现出逐渐增大的趋势。对于直径为 2.5、3.0 m 的溜井, 在开挖后井壁附近的塑性破坏范围约为 1.5 m; 而直径为 3.5 m 的溜井, 其开挖后的塑性破坏区范围则达到约 2.4 m。由图中还可以看出, 在上部开挖阶段, 溜井的塑性破坏范围可达 4~5 m, 这对井壁的稳定极为不利。

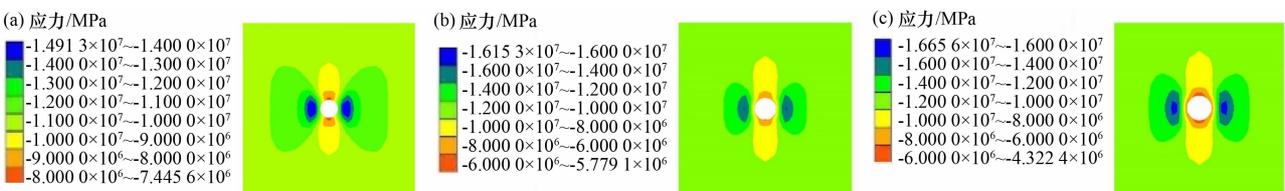
2.2.4 水平剖面塑性破坏分析

图 9 为不同直径溜井水平剖面塑性破坏。由图 9 可知: 在最大主应力方向上, 塑性破坏的范围较小; 而在最小主应力方向上, 由于受到挤压和剪切作用, 塑性破坏较为严重, 并且随着溜井断面尺寸的增大, 塑性破坏的范围也随之增加。



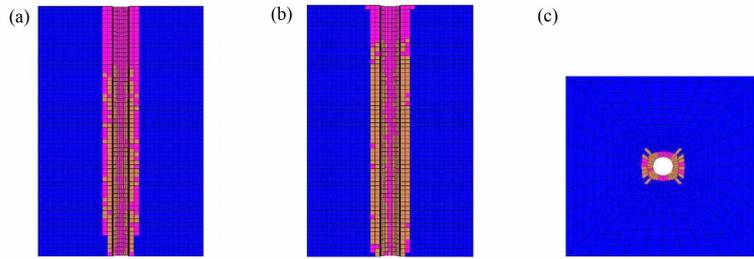
直径/m: (a) 2.5; (b) 3.0; (c) 3.5

图 6 不同直径溜井竖向剖面最大应力



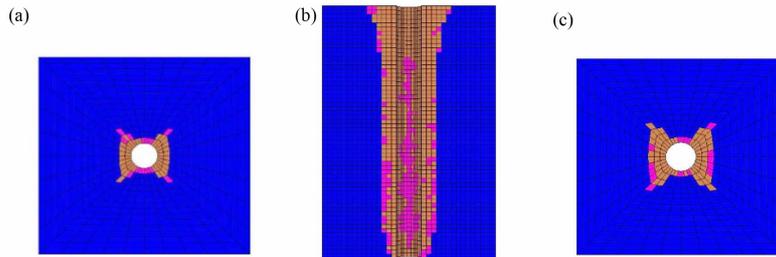
直径/m: (a) 2.5; (b) 3.0; (c) 3.5

图 7 不同直径溜井水平剖面最大应力



直径/m: (a) 2.5; (b) 3.0; (c) 3.5

图 8 不同直径溜井竖直剖面塑性破坏



直径/m: (a) 2.5; (b) 3.0; (c) 3.5

图 9 不同直径溜井水平剖面塑性破坏

2.2.5 井壁围岩塑性破坏量比较

经计算,2.5 m 直径溜井围岩的塑性破坏量为 858.21 m³,3.0 m 直径溜井的为 1 406.19 m³,3.5 m 直径的为 2 962.7 m³。从溜井围岩的塑性破坏量来看,随着断面尺寸的增大,井壁围岩的塑性破坏也趋于严重,因此可知溜井断面尺寸不宜过大。

2.3 断层破碎带对溜井稳定性的影响分析

2.3.1 模型建立

溜井穿越破碎带的模型如图 10 所示。该模型的网格共分为 3 组:蓝色为井壁围岩,红色为未受溜井影响的部分,绿色为井壁附近的断层破碎带。在对模型施加边界力时,X 方向为最大主应力方向,Y 方向为最小主应力方向。

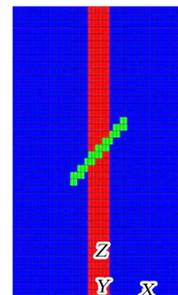


图 10 溜井穿越破碎带的模型

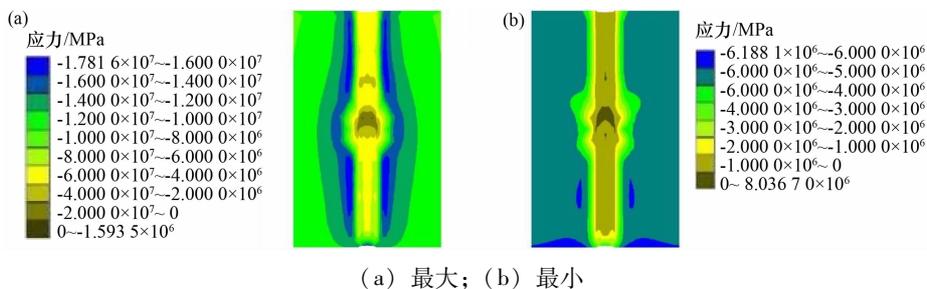
2.3.2 井壁附近应力分析

为了更清晰地说明断层对溜井井壁附近应力场分布的影响,分别截取最大主应力方向面(X=0)和最小主应力方向面(Y=0)的最大与最小应力云图,

如图 11、12 所示。由图 11、12 可知:由于断层的存在,改变了井壁附近的应力场分布,使得应力的最大值有所增加。在 X=0 面,有断层时的最大应力为 17.80 MPa,而在无断层情况下则为 17.20 MPa。另一方面,在断层处,最大主应力方向出现了 1.53 MPa 的拉应力,最小主应力方向则出现了 0.80 MPa 的拉应力,这种情况对井壁的稳定极为不利。

2.3.3 断层对井壁塑性破坏的影响分析

图 13 为井壁开挖完成后断层裂隙带附近的围



(a) 最大; (b) 最小

图 11 最大主应力方向面最大与最小应力云图

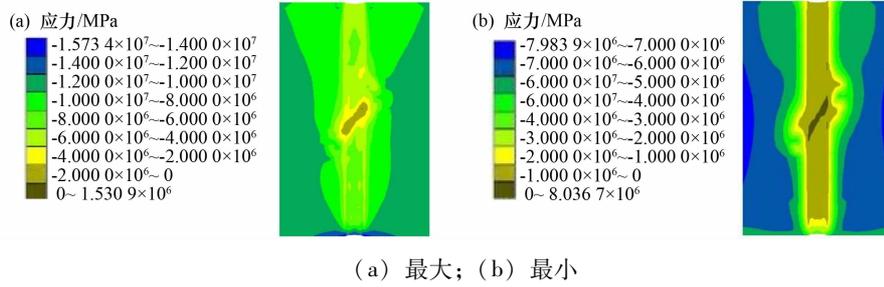


图 12 最小主应力方向面最大与最小应力云图

岩塑性破坏情况。由图 13 可知: 当溜井穿过断层时, 在主应力方向($X=0$)上, 井壁附近的塑性破坏区域一般为 1.0 ~ 1.5 m, 而在断层处则扩展到 3.0 ~ 3.5 m; 在最小应力方向($Y=0$)上, 塑性破坏区域通常为 0.5 ~ 1.0 m, 而断层处的破坏范围则达到 2.0 ~ 2.5 m。由此可见, 断层的存在对井壁稳定性的维护极为不利。该区域的围岩更容易发生破坏, 可能导致井壁片帮或垮冒现象的发生。

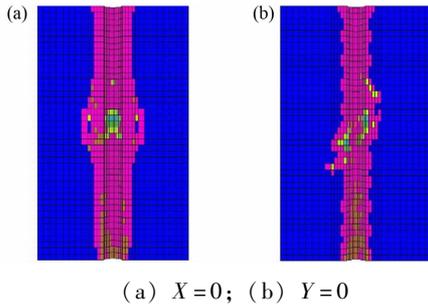


图 13 断层裂隙带附近的围岩塑性破坏剖面

2.3.4 断层处井壁矢量位移分析

图 14 为溜井开挖完成后井壁的位移矢量图。由图 14 可知: 井壁的最大位移出现在断层裂隙处。在 $Y=0$ 剖面上, 最大位移为 126 mm, 位移矢量方向指向井筒中心; 在 $Z=21$ mm 剖面上, 最大位移为 157 mm, 位移方向同样指向井筒的正中心。

2.4 溜井动载荷模拟

2.4.1 井壁应力分析

图 15 为冲击荷载作用下的应力云图。由图 15

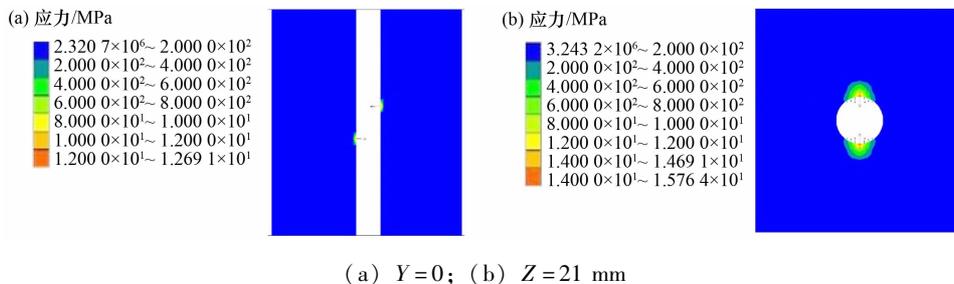


图 14 断层处井壁位移矢量

可知: 由于冲击载荷的作用, 在最大应力云图中, 冲击点处出现了低应力区域, 且在模型井口的两端, 应力分布发生了明显变化; 而在最小应力云图中, 第二个冲击点附近形成了一个高应力集中区, 冲击点本身则表现为低应力区, 且在模型下端井壁的两侧出现了两个高压区域。

2.4.2 井壁塑性破坏分析

图 16 为井壁塑性破坏剖面图。由图 16 可知: 结合前文分析可知, 在未受冲击载荷作用时, 井壁两侧的塑性破坏呈对称分布; 而在受到冲击载荷作用后, 两个冲击点处的塑性破坏区域有所扩大, 扩大范围约为 0.5 m。这表明, 在冲击载荷的作用下, 塑性破坏有逐渐增大的趋势^[7]。

2.4.3 冲击作用下井壁位移和速度分析

图 17 为冲击作用下的位移与速度分布情况。由图 17 可知: 在冲击作用点处出现了较大的位移和速度, 其方向均指向冲击速度的方向, 如图中箭头所示。其中, 最大位移为 448.5 mm, 最大速度为 38.7 m/s。

3 结 论

(1) 通过物理试验和数值模拟计算可知, 溜井宜采用圆形断面, 以有效降低井壁围岩的应力集中程度。根据溜井所处围岩的岩体性质, 对直径分别为 2.5、3.0、3.5 m 的 3 种圆形溜井进行了

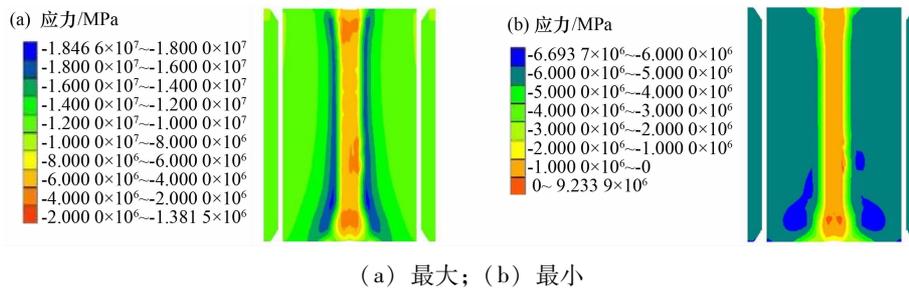


图 15 冲击荷载作用下的应力云图

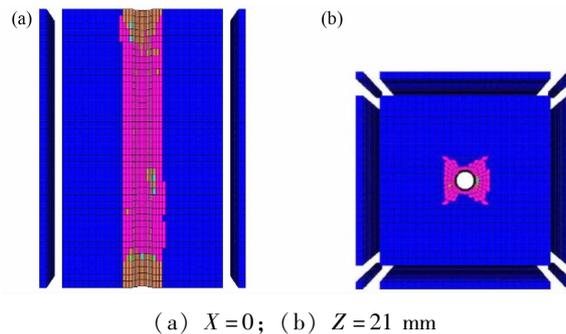


图 16 井壁塑性破坏剖面

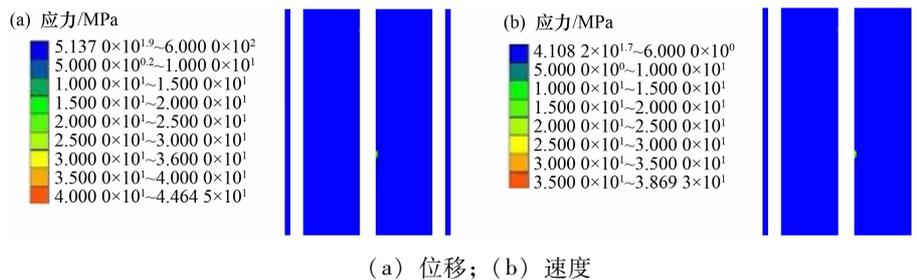


图 17 井壁位移、速度矢量

分析,结果表明,采用 3.0 m 直径更有利于生产。

(2) 当溜井穿过破碎带时,在井壁与破碎带的交汇区域出现了低应力区,甚至在最大主应力方向产生了 1.53 MPa 的拉应力,在最小主应力方向出现了 0.80 MPa 的拉应力。同时,周围围岩的塑性破坏区域明显扩大,且伴随较大的位移。由此可见,溜井设计时应尽量避开破碎带;若无法避免,应及时采取加固措施。

(3) 动载荷模拟结果显示,当矿石冲击井壁时,受冲击部位的围岩塑性破坏有进一步扩展的趋势,并形成地应力区,且冲击点处位移变化显著。因此,建议在受冲击区域进行适当加固,以防止因冲击作用导致溜井结构破坏,做到防患于未然。

参考文献:

[1] 彭兆祥,熊贤亮,向铸. 金山店铁矿采场溜井维护措

施与新建溜井设计要点[J]. 现代矿业,2022,38(9): 82-86.

[2] 宋卫东,王洪永,王欣,等. 采区溜井卸矿冲击荷载作用的理论分析与验证[J]. 岩土力学,2011,32(2): 326-332.

[3] 秦秀山. 某矿山 4# 碎矿站主溜井垮塌破坏原因分析[J]. 中国矿业,2018,27(增刊 2):241-244.

[4] 蔡晓鸿,蔡勇斌,蔡勇平. 莫尔-库仑屈服准则应力不变量及剪胀角参数表达式与应力符号约定的适配性研究[J]. 江西水利科技,2020,46(2):95-99.

[5] 柯圣安,张耀平,邹佳赞. 基于 FLAC^{3D} 的矿山溜井稳定性分析[J]. 化工矿物与加工,2019,48(8):20-22.

[6] 路增祥,马驰,殷越. 冲击磨损作用下的溜井井壁变形破坏机理[J]. 金属矿山,2018(11):37-40.

[7] 马驰,路增祥,杨宇江,等. 卸矿高度对溜井卸矿冲击夯实作用效果的影响[J]. 中国矿业,2021,30(9): 108-113.