

Doi:10.3969/j.issn.1671-4172.2020.02.005

矿岩散体成拱影响下软岩巷道变形破坏特征研究

孙金海^{1,2}, 明建^{1,2}, 毛市龙^{1,2}, 李智慧¹

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要:针对矿岩散体成拱对软岩巷道的稳定性产生影响的问题,对不同成拱结构条件下巷道变形破坏规律进行了研究。以矿山岩石力学理论为指导,对巷道稳定性受散体成拱影响的力学机理进行了理论分析。采用三维数值模拟实验方法,对不同的散体成拱的方式进行了实验研究,获得了成拱条件下软岩巷道的稳定性特征。研究表明当出现散体成拱现象时,成拱空区与巷道之间的塑形区将显著增大,从而加剧了巷道的变形破坏。

关键词:软岩巷道;矿岩拱;巷道变形机理;数值模拟

中图分类号:TD322

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2020)02-0024-06

Distortion and failure characteristics of soft rock roadway influenced by arch of ore rock

SUN Jinhai^{1,2}, MING Jian^{1,2}, MAO Shilong^{1,2}, LI Zhihui¹

(1. State Key Laboratory of High-efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of the influence of arch of ore rock on the stability of the soft rock roadway, the study on the law of deformation and failure of roadway under different arching structure conditions was carried out. With the guidance of theories of mine rock mechanics, the mechanics mechanism of the influence of ore rock arch on the stability of the soft rock roadway was analyzed. By means of the numerical simulation experiment, the stability characteristics of soft rock roadway under different arching structures were obtained. Experimental results showed that the plastic area between the goaf and the roadway increased significantly under arching structure conditions, which aggravated the deformation and failure of the roadway.

Key words: soft rock roadway; arch of ore rock; deformation mechanism of roadway; numerical simulation

在采用崩落采矿法进行开采的过程中,由于崩落矿岩为非理想的散体介质,其块度大小及分布上均存在较大的差异。当崩落矿岩散体中的大块含量高时,在采场中有时会出现散体成拱现象。当成拱空区出现后,空区周边围岩的应力重新分布,而位于采空区两侧的巷道会受到倾斜方向的作用力。随着应力转移达到二次平衡,其顶板、底板和两帮的位移大小和塑形区分布将出现相应的变化。在本研究中,散体成拱现象的出现是影响相邻巷道围岩位移

大小和塑形区分布的重要因素。

众多学者应用不同的研究方法对散体成拱的形成机理进行了研究。矿岩散体结拱效应是矿岩散体以偶然的组合表征矿岩散体流动必然的特征,块度和边界条件是引起矿岩散体结拱的主要因素^[1-2]。文献[3]提出静止散体矿岩压力属于主动压力,矿岩散体内部的最大主应力迹线偏向于重力线方向。文献[4-5]提出一组求解散体应力场和速度场的方程。文献[6]从理论角度对散体侧压系数进行了分析讨论,并提出了相应的计算公式。文献[7-8]对多尺度的散体物质相互接触形成的网络结构进行了研究。文献[9-10]运用离散元软件对筒形空间贮料卸料过程中的成拱过程和对筒形空间壁面的压力变化、分

作者简介:孙金海(1965—),男,高级实验师,主要研究方向为采矿工程与岩土工程。

通信作者:明建(1979—),男,博士,副教授/副研究员/高级工程师,主要研究方向为采矿方法和数字矿山。

布规律进行了研究。文献[11-12]修正了数值模拟中内摩擦力偏小的缺陷,改进了颗粒组构力学模型。

同时国内外学者对复杂应力场条件对软岩地下工程的影响进行了相关研究。文献[13]将室内岩石力学实验与数值模拟方法相结合,对软岩巷道非对称变形时周围岩体的位移场分布规律进行了研究。文献[14]分析了巷道非对称变形破坏的影响因素,提出软岩巷道变形的破坏过程具有阶段性。文献[15]将巷道周边非均匀作用力的分布形式分解为对称条件和非对称条件的叠加,分别采用弹性力学中拉梅解的求解方法和半逆解法进行求解,进一步获得了基尔希解的修正解。文献[16]根据软岩巷道围岩本构关系及其应力作用模式,建立了剪切错动型巷道底臆力学模型,提出了巷道底臆力源的计算方程。文献[17]对巷道围岩进行了非关联弹塑性分析,求得其应力和变形的封闭解析解,并对确定围岩破裂区和塑性区半径的解析式进行了研究。文献[18-19]对采空区侧方围岩主应力场方向的变化规律和围岩塑性区分布形态的影响机制进行了研究,并对巷道顶板稳定性影响因素进行了探讨。

本文运用了理论计算和数值模拟方法对不同成拱结构条件下巷道变形破坏规律进行了研究,通过对计算结果进行对比分析,获得了在散体成拱条件下软岩巷道的稳定性规律。

1 工程概况及理论计算方法

1.1 工程概况

本矿体为高温热液交代矽卡岩型磁铁矿床,主要赋存于假整合面、层间和接触带中,包括两个主矿体和部分零星矿体。矿体走向北北东,向西倾斜。矿体多呈透镜状和似层状,其平均厚度为31 m。该矿体采用无底柱分段崩落法开采,其矿岩赋存条件较差,是典型的软破难采矿体。本研究基于该矿体巷道围岩的应力环境,在不同成拱结构条件下,研究该类条件下巷道围岩塑性区分布,试图揭示巷道变形破坏的本质,寻求科学合理的支护对策,从而保证生产作业的正常进行。

1.2 理论计算方法

影响巷道稳定性的因素主要包括岩石的物理力学性质、节理裂隙的发育程度、爆破和空区等^[20]。空区的空间分布特征、巷道周边区域内岩石的力学参数和边界条件都会对区域中所形成的应力场的分布产生显著的影响。在本研究中,采场中散体成拱产生的空区的空间分布特征是影响相邻巷道稳定性

的重要。结合国内外学者提出的理论和经验公式,本研究主要从单一巷道的次生应力和相邻巷道的应力分布两方面进行了理论分析^[21]。

1) 巷道的次生应力

如将圆形断面巷道按平面应变问题考虑,令巷道半径为 a ,原岩的垂直应力为 p ,原岩的水平应力为 q ,侧压系数为 λ ,则 $q=\lambda p$ 。则与水平轴夹角为 θ 的径向上与巷道中心距离为 r 处围岩的径向应力 σ_r 、切向应力 σ_θ 和剪应力 $\tau_{r\theta}$ 的求解公式分别如式(1)、式(2)和式(3)所示。

$$\sigma_r =$$

$$\frac{1}{2}(p+q)\left(1-\frac{a^2}{r^2}\right)-\frac{1}{2}(p-q)\left(1-4\frac{a^2}{r^2}+3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \quad (1)$$

$$\sigma_\theta =$$

$$\frac{1}{2}(p+q)\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right)+\frac{1}{2}(p-q)\left(1+3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2}(p-q)\left(1+2\frac{a^2}{r^2}-3\frac{a^4}{r^4}\right)\sin 2\theta \quad (3)$$

2) 相邻巷道的应力分布及巷道间距的确定

从空区与巷道间矿柱的稳定性和巷道围岩应力影响带对相邻巷道的应力分布进行了理论分析。岩柱的稳定性主要与其力学性质和所承受的载荷所决定;当其承载能力低于所受载荷时,岩柱是不稳定的。组成岩柱的岩体强度、宽度、高度和构造特征决定了其强度。围岩应力影响带是巷道开掘后周围岩体的应力受到扰乱的区域。如果巷道间的应力影响带彼此重叠,但未到达相邻巷道,可进行巷道围岩应力值的叠加。在各向同性弹性岩体中,令 a 为巷道断面半径,则静水压应力场中的圆形巷道的应力影响区形状为半径等于 $6a$ 的圆;非静水压应力场中,巷道的应力影响区形状通常为长轴不大于 $12a$ 的椭圆,即巷道半径相同的两圆形巷道的间距 d 为 $6a < d < 12a$,半径不同的巷道的间距 d 为 $6A < d < 12(a+A)$ ^[22]。式中, A 和 a 分别为半径较大和半径较小的巷道半径。计算相邻非圆形巷道的间距时,可依据巷道断面形状参考上述两式进行近似计算。当岩体强度低于围岩局部的应力时,将扩展至岩体深部形成塑性变形区,其与弹性区交界处将产生应力集中。因此计算间距时,相邻巷道的应力影响带不应超过巷道塑性变形区与弹性变形区的交界。各向等压条件下,对于巷道围岩内的应力分布和塑性区半径,圆形巷道可通过解析计算求得,非圆

形巷道可采用数值计算方法获得。

2 数值模拟实验研究

2.1 实验方案与模型建立

巷道受散体成拱空区的影响程度与工程地质条件、空区的空间分布特征、岩体的力学性质等因素密切相关。为了更深入和全面地研究不同成拱条件下巷道围岩中的应力、位移的大小、方向及塑性区分布,应用FLAC^{3D}有限差分数值模拟软件,建立了相应的数值计算模型。根据理论分析的结果,本研究初步定量地确定了采场中塌落成拱的跨度为10~12 m。根据采矿设计可知采场的分段高度为12 m,进路间距为12 m。数值计算模型的高为36 m、宽为56 m、进深为20 m,本构模型为Mohr-Coulomb模型,对模型的 x 方向和 y 方向上的边界面以及 z 方向底部边界面分别施加位移约束。为了缩短计算时间,对模拟计算进行了简化。依据矿体赋存的地质特点对模型进行合理的简化处理。各部分岩体的物理力学参数根据物理力学性质指标选取。实验设计了三种实验方案,分别为未发生成拱现象、发生单侧成拱现象和发生双侧成拱现象。研究对巷道围岩中的应力、位移大小和塑形区的分布进行了监测,对比分析这些模型的受力状态和巷道的安全状态。

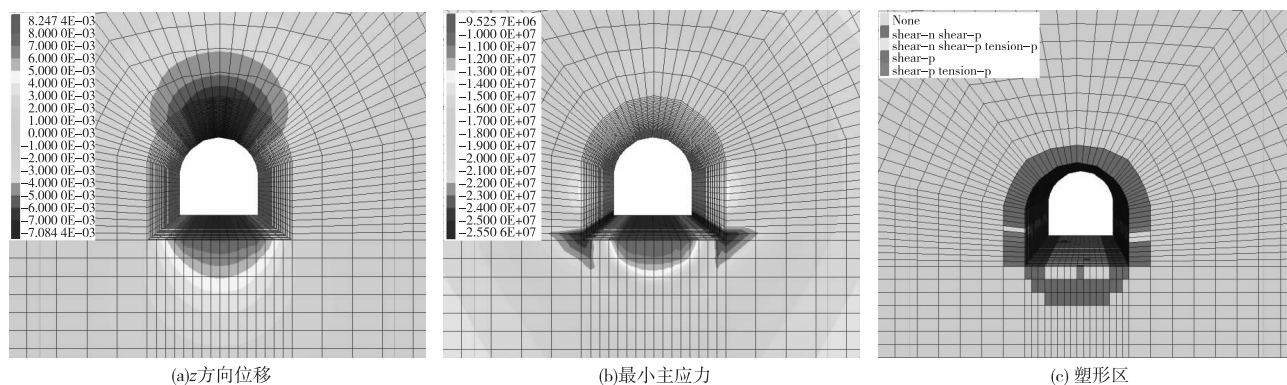


图1 无成拱现象时的应力云图

Fig. 1 The stress nephogram without arch structure

2) 发生单侧成拱现象

由图2(a)可知在 z 方向上顶板的最大位移为12.5 mm,底板的最大位移为9.5 mm。在 x 方向巷道两帮向巷道内部鼓起,靠近回采巷道空区的巷道边帮的最大位移为10.0 mm,远离回采巷道空区的巷道边帮的最大位移为20.0 mm。图2(b)中发生单侧成拱现象时巷道底角的应力逐渐转移至巷道两帮。其中,巷道的左底角处的应力集中转移到在回采巷道空区与巷道之间区域,最大应力值为25.0 MPa;

2.2 实验过程与数据分析

对模型赋值并进行初始平衡状态求解之后,将空区和巷道区域设置为空模型,对模型求解。通过使用后处理模块可输出模型内整体和某点的应力和位移变化情况,以及塑性区的分布。为了充分反映出不同类型的成拱现象对巷道围岩的受力状态和位移变化情况,选取巷道的顶板、底板和两帮的位移变化、最大主应力的分布、最小主应力的分布、塑性区大小进行比较,从而研究不同类型成拱现象对巷道的影响特征。数值模拟结果如下所示:

1) 未发生成拱现象

由图1(a)可知在 z 方向上的顶板和底板位移均呈拱形分布,距离巷道越远,拱径随之变大位移相应减小,底板及两帮向巷道内部鼓起。顶板的最大位移为7.0 mm,底板的最大位移为8.3 mm。在 x 方向巷道两帮位移均呈拱形分布,距离巷道越远,拱径随之变大位移相应减小,巷道两帮向巷道内部鼓起,巷道两帮的最大位移均为8.0 mm。图1(b)中巷道围岩中的应力主要集中在巷道的两底角,最大应力值为24.5 MPa。巷道底板中心线附近发生拉应力,最大数值为0.190 MPa。图1(c)中巷道的围岩中产生塑形区,图中蓝色和红色均为剪切破坏区。无成拱现象时的应力云图如图1所示。

在远离回采巷道空区的底角最大应力值为26.5 MPa。巷道底板中心线附近发生拉应力,最大数值为0.506 MPa。图2(c)中在成拱空区与巷道之间,产生剪切破坏。单侧成拱的塑性区面积较未成拱塑性区的面积显著增大。在成拱现象出现时,将产生相互叠加的影响范围,巷道拱角方向上的塑性区甚至会与回采巷道空区的塑性区连接形成一个整体,从而加剧了巷道侧帮的变形破坏。发生单侧成拱现象时的应力云图如图2所示。

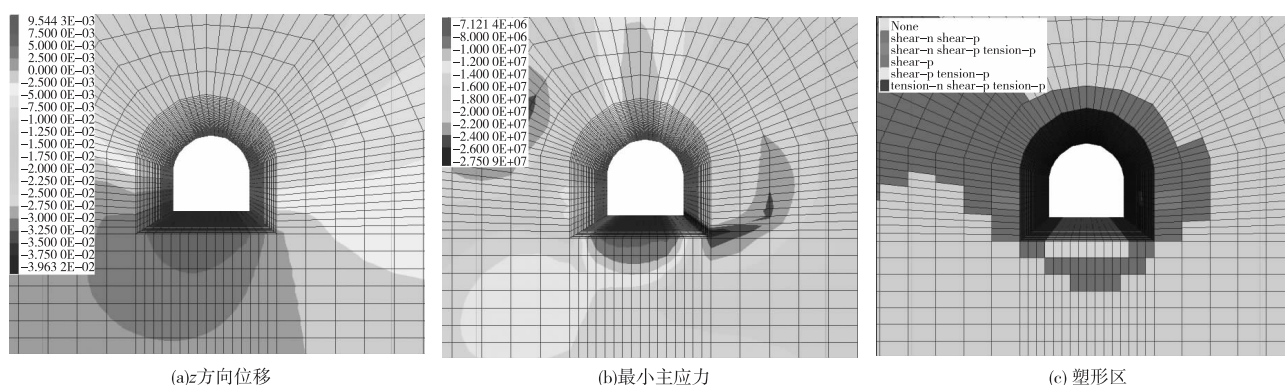


图2 单侧成拱时的应力云图

Fig. 2 The stress nephogram of the arch structure

3) 发生双侧成拱现象

由图 3(a) 可知在 z 方向上顶板的最大位移为 13.0 mm, 底板的最大位移分别为 8.0 mm。顶板位移较发生单侧成拱现象时有稍有提高, 底板位移和顶板位移较发生单侧成拱现象时没有大的变化。在 x 方向巷道两帮向巷道内部鼓起, 巷道两帮的最大位移均为 60.0 mm, 均较发生单侧成拱现象时有很

大提高。图 3(b) 中巷道底角的应力逐渐转移至巷道两帮, 其最大应力值为 27.50 MPa。巷道底板中心线附近发生拉应力, 最大数值为 0.587 MPa。图 3(c) 中双侧成拱的塑性区面积较未成拱和单侧成拱的塑性区的面积有大幅度增大, 巷道塑性区与成拱空区的塑性区连成一个整体。发生双侧成拱现象时的应力云图如图 3 所示。

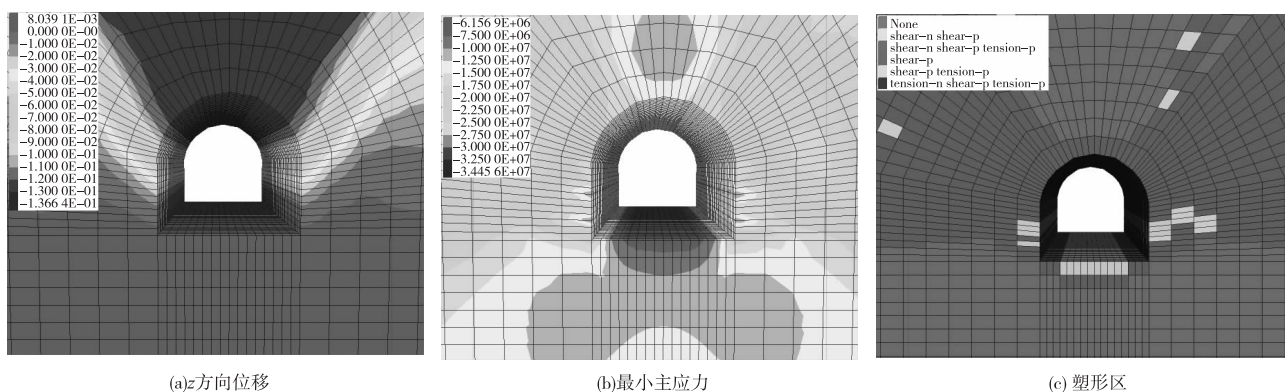


图3 双侧成拱时的应力云图

Fig. 3 The stress nephogram of arch structures

3 理论计算与数值模拟结果比较

巷道开挖后会产生应力释放, 未发生成拱现象时, 巷道的顶板和底板位移均呈拱形分布, 距离巷道越远, 拱径随之变大位移相应减小, 底板及两帮向巷道内部鼓起。不同成拱方式条件下巷道的顶板、底板和两帮的位移变化如图 4 和图 5 所示。

分析实验数据可知: 在单侧成拱和双侧成拱现象发生时 z 和 x 方向上的最大位移均大于未发生成拱现象时。其中, 发生单侧成拱现象时 x 方向上远离回采巷道空区的巷道边帮的最大位移显著大于另一帮, 而双侧成拱时的 x 方向上的两帮位移较未发生成拱现象时有大幅度增加。在单侧成拱和双侧成

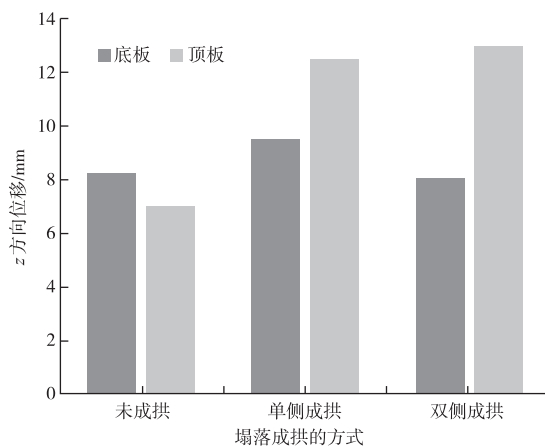


图4 巷道顶板和底板变形量

Fig. 4 The roof and floor deformation of the roadway

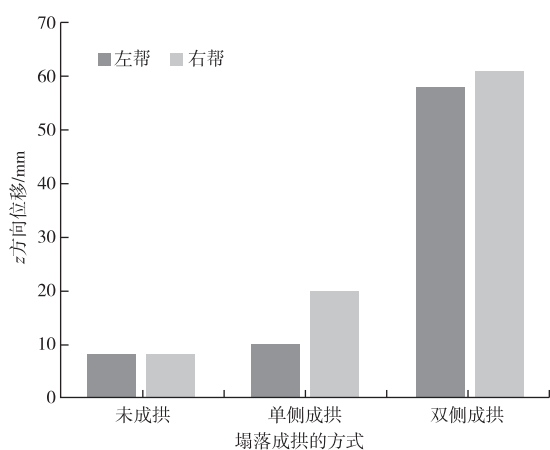


图5 巷道两帮收敛量

Fig. 5 The sidewall deformation of the roadway

拱现象发生时巷道底角的应力逐渐转移至巷道两帮。发生单侧成拱现象时,巷道的左底角处的应力集中转移到在成拱空区与巷道之间区域,而在远离回采巷道空区的底角产生最大应力值。发生双侧成拱时,最大应力值产生于成拱空区与巷道之间区域。在单侧成拱和双侧成拱现象发生时,在成拱空区与相邻巷道之间,将产生剪切破坏。双侧成拱的塑性区面积大于单侧成拱的塑性区面积,其二者则远远大于未成拱塑性区的面积。在成拱现象出现时,将产生相互叠加的影响范围,运输巷道的塑性区与成拱空区的塑性区连成一个整体,加剧了巷道侧帮的变形破坏。

4 结论

通过理论计算和数值模拟实验方法对散体成拱条件下软岩巷道围岩中的位移、应力和塑形区的变化规律进行了研究,为崩落采矿法软岩巷道的稳定性分析提供了参考。研究表明:围岩塑形区的形成和发展对巷道围岩变形破坏具有重要的影响。当出现散体成拱现象时,采场空区与相邻巷道之间,将产生剪切破坏,塑形区显著增大,并产生相互叠加的影响范围,从而加剧了巷道的变形破坏。

参考文献

- [1] 潘代威. 弓长岭东南塌陷区废石结拱条件与危害防止技术研究[D]. 沈阳:东北大学,2011.
PAN Daiwei. Study on technologies of mullock arching conditions and it's hazard prevention of the subsidence area of Gongchangling southeastern zone[D]. Shenyang: Northeastern University,2011.
- [2] 戴兴国. 贮矿空间内散体矿岩的压力理论与流动机理的研究[D]. 长沙:中南工业大学,1990.
DAI Xingguo. Loose ore and stuff pressure theory and flow

mechnism in storage space [D]. Changsha: Central South University of Technology,1990.

- [3] 戴兴国,古德生,吴爱祥. 散体矿岩静压分析与计算[J]. 中南工业大学学报,1995,26(5):584-588.
DAI Xingguo, GU Desheng, WU Aixiang. Analysis and computation of static pressure in loose ore and stuff[J]. Journal of Central South University of Technology,1995,26(5):584-588.
- [4] 王昌汉. 放矿学[M]. 北京:冶金工业出版社,1982.
WANG Changan. Ore drawing [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,1982.
- [5] 毛市龙,明建. 放矿理论与应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2019.
MAO Shilong, MING Jian. Ore drawing theory and application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2019.
- [6] 戴兴国,古德生. 散体中侧压系数的理论分析与计算[J]. 有色金属,1992,44(3):19-23.
DAI Xingguo, GU Desheng. Theoretical analysis and calculation of lateral pressure coefficient in granular materials[J]. Nonferrous Metals,1992,44(3):19-23.
- [7] 孙其诚,辛海丽,刘建国,等. 颗粒体系中的骨架及力链网络[J]. 岩土力学,2009,30(增刊1):83-87.
SUN Qicheng, XIN Haili, LIU Jianguo, et al. Skeleton and force chain network in static granular material[J]. Rock and Soil Mechanics,30(S1):83-87.
- [8] 孙其诚,金峰. 颗粒物质的多尺度结构及其研究框架[J]. 物理,2009,38(4):225-232.
SUN Qicheng, JIN Feng. The multiscale structure of granular matter and its mechanics[J]. Physics,2009,38(4):225-232.
- [9] 陈长冰. 筒仓内散体侧压力沿仓壁分布研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2006.
CHEN Changbing. Research on distribution of lateral bulk-solid pressures on silo's wall[D]. Hefei: Hefei University of Technology,2006.
- [10] 丁盛威. 基于 PFC3D 的筒仓贮料侧压力离散元分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2014.
DING Shengwei. Distinct element analysis on lateral pressure of silo based on PFC3D [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2014.
- [11] 刘克瑾,肖昭然,王世豪. 基于离散元模拟筒仓贮料卸料成拱过程及筒仓壁压力分布[J]. 农业工程学报,2018,34(20):277-285.
LIU Kejin, XIAO Zhaoran, WANG Shihao. Development of arching and silo wall pressure distribution in storage and discharging state based on discrete element analysis [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(20):277-285.
- [12] 冯永,李萌. 改进颗粒组构力学模型模拟筒仓卸粮成拱微观机理[J]. 农业工程学报,2018,34(20):286-293.
FENG Yong, LI Meng. Simulation of meso-mechanism of silo unloading grain arching based on improved particle composition mechanical model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34(20):286-293.
- [13] 何满潮,王晓义,刘文涛,等. 孔庄矿深部软岩巷道非对称变形

- 数值模拟与控制对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 673-678.
- HE Manchao, WANG Xiaoyi, LIU Wentao, et al. Numerical simulation on asymmetric deformation of deep soft rock roadway in Kongzhuang coal mine[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 673-678.
- [14] 于洋, 柏建彪, 王襄禹, 等. 软岩巷道非对称变形破坏特征及稳定性控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(3): 340-346.
- YU Yang, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, et al. Study on asymmetric distortion and failure characteristics and stability control of soft rock roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(3): 340-346.
- [15] 侯公羽, 谢冰冰, 李子祥, 等. 考虑巷道周边有非均匀作用力的基尔希解修正[J]. 金属矿山, 2018(6): 39-45.
- HOU Gongyu, XIE Bingbing, LI Zixiang, et al. Corrected solution of Kirsch under heterogeneous force around roadway[J]. Metal Mine, 2018(6): 39-45.
- [16] 文志杰, 卢建宇, 肖庆华, 等. 软岩回采巷底部破坏机制与支护技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1991-1999.
- WEN Zhijie, LU Jianyu, XIAO Qinghua, et al. Failure mechanism of floor heave and supporting technology of soft rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1991-1999.
- [17] 蒋斌松, 张强, 贺永年, 等. 深部圆形巷道破裂围岩的弹塑性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 982-986.
- JIANG Binsong, ZHANG Qiang, HE Yongnian, et al. Elastoplastic analysis of cracked surrounding rocks in deep circular openings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 982-986.
- [18] 李季, 马念杰, 丁自伟. 基于主应力方向改变的深部沿空巷道非均匀大变形机理及稳定性控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 670-676.
- LI Ji, MA Nianjie, DING Ziwei. Heterogeneous large deformation mechanism based on change of principal stress direction in deep gob side entry and control[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4): 670-676.
- [19] 马念杰, 赵希栋, 赵志强, 等. 深部采动巷道顶板稳定性分析与控制[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2287-2295.
- MA Nianjie, ZHAO Xidong, ZHAO Zhiqiang, et al. Stability analysis and control technology of mine roadway roof in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2287-2295.
- [20] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- CAI Meifeng. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [21] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- QIAN Minggao, SHI Pingwu, XU Jialin. Mining pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010.
- [22] 杨建中. 岩石力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- YANG Jianzhong. Rock mechanics[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [23] 刘鹏, 曹辉, 余斌, 等. 复杂采空区群影响下露天边坡稳定性特征及危险区划研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2019, 71(5): 28-34.
- LIU Peng, CAO Hui, YU Bin, et al. Stability characteristics and danger zone of open-pit slope under the influence of complex goaf group[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2019, 71(5): 28-34.
- [24] 刘强, 赵冉, 王平, 等. 基于微震监测技术的采空区周边巷道稳定性研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2019, 71(5): 24-27.
- LIU Qiang, ZHAO Ran, WANG Ping, et al. Stability of roadway around the goaf based on microseismic monitoring technology[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2019, 71(5): 24-27.