

某矿山深部开采岩石力学特性研究

Study on the Mechanical Property of Ore Mined at Great Depth of A Mine

龙腾(江铜集团银山矿业有限责任公司,江西 德兴 334200)

摘要:本文以某矿山深部开采为工程背景,针对可能出现的工程灾害问题,如围岩大变形、岩爆等,采用岩石力学试验方法,对矿山深部具有代表性的岩石的脆-延特性和流变特性等进行了研究,并为矿山深部开采过程中围岩变形控制等提出了科学合理的建议。

关键词:深部开采;力学试验;脆-延特性;流变特性

中图分类号: TD325 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2021)05-0023-04

Abstract: Engineering disasters may occur in the deep mining of mines, such as great distortion of wall rocks, rockburst, etc. In this paper, rock mechanical tests are carried out to analyze the brittle-ductile and rheological properties of the representative ore mined at the great depth of a mine. Meanwhile, reasonable suggestions are proposed on the control of wall rock distortion during deep mining.

Key words: deep mining; mechanical test; brittle-ductile properties; rheological properties

1 前言

某矿山首期开采设计最低标高为-658 m,已进入深部开采,二期回采深度更是达到-1 000 m以下。随着采深的不断加大,灾害事故的发生变得更加显著,如矿震的增加,矿岩的持续大变形和流变的明显增强,甚至特定条件下的岩爆等都是深部安全开采的巨大威胁^[1-5],因此,有必要对矿山深部岩石力学特性进行深入系统的研究,这对矿山安全、合理、高效地开采具有十分重要的意义,同时可为类似深井矿山开采提供借鉴参考。

2 工程背景

某矿山开采方式为地下开采,根据矿体开采技术条件,设计两种采矿方法对矿体进行开采,即分段空场嗣后充填法和浅孔留矿法。分段空场嗣后充填法针对厚大矿体开采,矿块垂直走向布置,不留间柱,先采矿柱后采矿房,中深孔爆破。回采结束后,采空区采用全尾砂非胶结充填。

根据工程地质调查,矿区的主要岩体为千枚岩和英安斑岩。千枚岩是低级的变质岩石,常为细粒鳞片变晶结构,一般表现为脆性,其破坏模式的特殊性体现在岩石内在结构发生了破坏,而岩体材料自

身并未破坏。千枚岩的破坏形式如图1和图2所示。千枚岩是矿区最主要岩体,其分布最广,属于半坚硬岩组,完整性较好,整体稳固性一般。英安斑岩,属于坚硬岩组,完整性较好,整体稳固性较好。

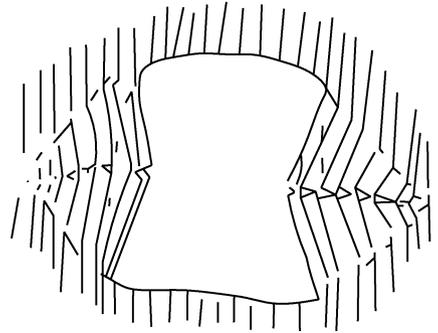


图1 巷道围岩溃屈破坏示意图

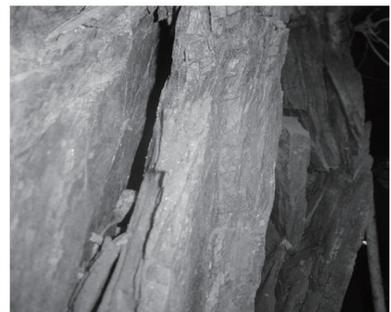


图2 巷道围岩溃屈破坏现场实际图

3 深部岩石的脆-延特性

深部开采的环境基本上可概括为“三高一扰动”,在这样的开采条件下对岩石峰后强度的研究就显得尤为重要,在高地应力的载荷条件下岩石表

[作者简介] 龙腾(1973-),男,江西抚州人,工程师,从事建筑技术、工程管理、工程造价等工作。

[引用格式] 龙腾,陈仁财,周国平.某矿山深部开采岩石力学特性研究[J].中国矿山工程,2021,50(5):23-26.

现为延性的概率增大,在发生破坏时的不能恢复的形变量一般也明显增大。与浅部开采时岩石的脆性力学响应显著不同的是,深部开采岩石可能出现延性的力学行为,由浅入深大致经历脆性、脆-延性、延性和高温蠕变几个变形阶段。随着围压的增加,岩石峰后从应变软化特性转化为理想塑性,继而转化为应变硬化特性^[6]。使应力-应变曲线峰后表现为理想塑性的围压值,一般称为脆-延转换围压。

本文主要选取了矿山具有代表的岩样(千枚岩和英安斑岩),进行论述和分析。在不同围压下绢云母化千枚岩的全应力-应变曲线如图3所示。在围压分别为10 MPa和20 MPa时,应力降越来越小,延性特性更加明显。当围压增至30 MPa时,全应力-应变曲线峰值后几乎没有出现应力降,峰后段应力-应变曲线呈水平状态,其切线斜率趋向于零,全应力-应变曲线整体符合岩石应变软化转化的临界曲线的特点。因此可以认为当围压为30 MPa时,绢云母类岩石即可认为达到临界围压状态。

在不同围压下,硅化千枚岩应力快速大幅度减小,减小值基本上和峰值应力相当,表现出显著的脆性。在围压升高的过程中,峰后的应力的降低幅度也逐渐变小,应变曲线趋于水平。在围压升高为30 MPa时,峰后的应力降低值较小,峰后曲线基本上接近水平,展现出显著的延性,故硅化千枚岩的临界围压可确定为30 MPa。

在不同围压下英安斑岩的全应力-应变曲线如图5所示。与绢云母化千枚岩和硅化千枚岩不同的是,英安斑岩在围压为30 MPa时,仍出现了显著的应力大幅度降低,展现出明显的脆性,因此,可推知强度较大的英安斑岩的临界围压远大于30 MPa。

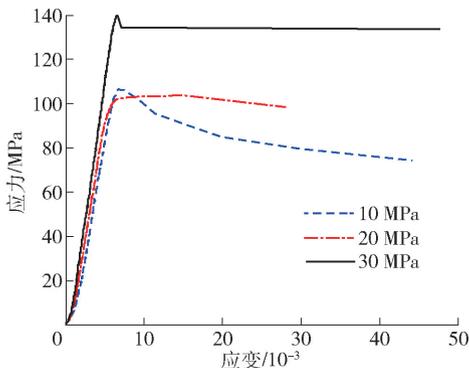


图3 不同围压下绢云母千枚岩的应力-应变曲线

目前学者关于转换压力与单轴抗压强度之间的关系有多种表述,如在肖树芳等所著的《岩体力学》一书^[7]中指出,转换围压大致为 $(1/3 \sim 2/3)\sigma_c$ 。杨

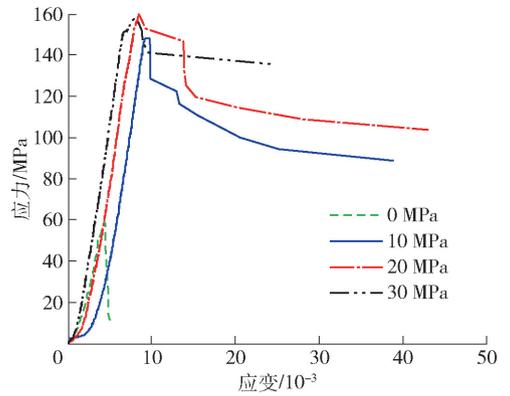


图4 不同围压硅化千枚岩的应力-应变曲线

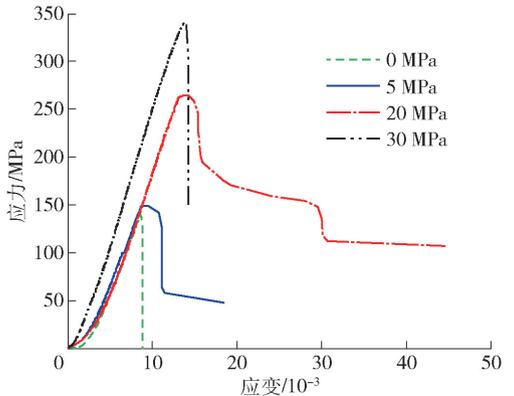


图5 不同围压下英安斑岩的应力-应变曲线

圣奇等^[8]指出粗粒大理岩的转换围压大致为 $0.47\sigma_c$ 。徐松林等^[9]提出了大理岩的转换围压约为 $(0.85 \sim 1.0)\sigma_c$,将上述比例关系加以概括得到岩石的转换围压大致为 $(0.33 \sim 1.0)\sigma_c$ 。Singh J.等人所著的《Strength of Rocks at Depth (in Rock at Great Depth)》一书中所提到的,一般可以将岩石脆性-延性转化的临界围压条件写成以下形式 $\sigma_{30} = \frac{1}{\eta}\sigma_c$,其中 η 为 $0.25 \sim 1.25$ 。最终得出岩石的转换围压为 $(0.33 \sim 4)\sigma_c$ 。对于绢云母千枚岩来说,岩石的转换围压取 $(1 \sim 1.5)\sigma_c$;硅化千枚岩的临界围压为 $0.8\sigma_c$;英安斑岩的转换围压取 $0.6\sigma_c$ 。

根据单轴试验结果,绢云母千枚岩的平均抗压强度约为18 MPa;硅化千枚岩的平均抗压强度约为50 MPa;英安斑岩的单轴抗压强度约为140 MPa。根据应力-应变曲线的变化规律可推知:绢云母千枚岩、硅化千枚岩和英安斑岩的临界围压分别为20~30 MPa,32~48 MPa和84 MPa。

将临界围压值代入地应力的拟合式 $\sigma_{h,max} = -2.037 + 0.0316H$,即可得到各岩性的临界深度。通过计算得到:绢云母千枚岩、硅化千枚岩和英安斑岩

的临界深度分别为 698 ~ 1 014 m、1 077 ~ 1 584 m 和 2 700 m。

矿区分布范围较广的绢云母千枚岩脆-延性转化的临界标高约为 - 698 ~ - 1 014 m, 因此在一期技改工程设计最低标高 - 658 m 范围内, 作为围岩的绢云母千枚岩不会发生明显的脆-延转化, 岩体暂不会出现较大的塑性软化特性。而深部硅化千枚岩的脆-延转化标高在 - 1 077 ~ - 1 584 m, 说明开采深度达到 1 500 m 以后, 围岩可能出现延性破坏, 影响围岩的承载能力。少量的英安斑岩直至 2 700 m 以下才有可能表现出塑性软化的大变形特征。

4 岩石的蠕变特征

蠕变是在应力保持恒定的情况下, 随着时间的增加, 变形也跟着增加的现象。岩石的蠕变有两种基本形式, 第一种形式称为稳定蠕变, 蠕变速率随时间增加逐步减小最后趋于零, 变形则趋于一个稳定值。第二种形式称为不稳定蠕变, 岩石变形随时间逐渐增大直至破坏, 不能趋近于某一稳定值。不稳定蠕变根据蠕变速率的不同, 其蠕变变形过程分为三个阶段: 第一蠕变阶段可定义为初始蠕变阶段或者减速蠕变阶段, 在时间增加的过程中蠕变速率不断减小; 第二蠕变阶段可定义为等速蠕变阶段, 蠕变速率基本上保持恒定; 第三蠕变阶段可定义为加速蠕变阶段, 蠕变速率大幅度增大直至试样破坏^[10]。对于本次试验的试件, 主要对其减速蠕变阶段及稳态蠕变阶段进行分析。

通过岩石力学室内试验获得了 11 个岩石试样在不同应力水平下的蠕变曲线。由于篇幅限制, 本文仅给出 R11 试件的蠕变曲线、应变率曲线和轴向应变变化情况表, 具体情况见表 1, 其他试件的不再赘述。

由图 6 可知, 对于同一试件, 在低应力水平时, 岩石蠕变应变很小, 后续在应力增大的过程中, 轴向蠕变应变表现出不断增加的态势。此外, 在应力增大的过程中, 压力稳定的状况下, 蠕变的增加量也表现出不断增加的态势。

对不同试件的蠕变曲线进行拟合, 并对拟合的公式求导, 进而可得到每个试件在各级荷载稳压加载下的应变速率曲线。由图 7 可知, 试件在试验中均出现了减速蠕变和稳态蠕变阶段。通过观察各个试件的轴向应变率曲线, 发现强度较低的试件减速蠕变的经历的时间较短, 强度较高的试件减速蠕变

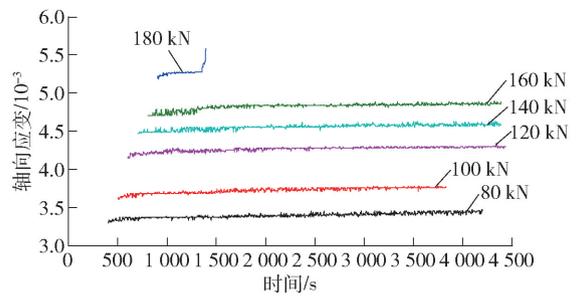


图 6 R11 试件不同应力水平蠕变曲线

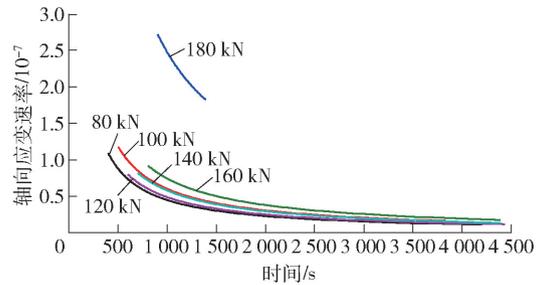


图 7 R11 试件不同应力水平应变率曲线

的时间则相对更长, 说明强度高的岩石的蠕变现象更为明显。

将试件在各循环加载过程中形成的应变定义为加载瞬时应变; 将试件在各循环稳压阶段形成的应变定义为蠕变应变增量; 将在同一应力水平下蠕变应变增量与加载瞬时应变的比值定义为蠕变应变增加率。三者的计算公式分别为

$$\Delta \varepsilon_l = \frac{u_{sl} - u_{el}}{h} \quad (1)$$

$$\Delta \varepsilon_c = \frac{u_{sc} - u_{ec}}{h} \quad (2)$$

$$u = \frac{\Delta \varepsilon_c}{\Delta \varepsilon_l} \quad (3)$$

式中, $\Delta \varepsilon_l$ 为加载瞬时应变, $\Delta \varepsilon_c$ 为蠕变应变增量, u 为蠕变应变增加率; u_{sl} 为初始加压时的变形, u_{el} 为加压结束时的变形; u_{sc} 为初始蠕变时的变形, u_{ec} 为蠕变结束时的变形; h 为试件的高度。

在不同级别的应力荷载下, 虽然岩石试样的蠕变应变增加率变化幅度较大, 但岩石不同试样的蠕变应变增加率基本上限定在 1% ~ 6%, 即使是呈现出加速蠕变的岩样 R5 和岩样 R11 在加速蠕变阶段的蠕变应变增加率也仅为 7.16% 和 7.34%。由此可推断, 矿山在标高 - 1 100 m 以下的岩石虽出现了蠕变变形的特征, 但从蠕变应变增加率可推知, 在高围压条件下, 深部岩石的蠕变性质仅是略微呈现, 实际上并不具备高速蠕变的态势。

表1 R11 试件在不同荷载下轴向应变变化情况

项目	80 kN	100 kN	120 kN	140 kN	160 kN	180 kN	均值
$\Delta \varepsilon_l$	0.003 30	0.003 63	0.004 15	0.004 47	0.004 70	0.005 20	-
$\Delta \varepsilon_c / \%$	0.015 4	0.014 4	0.015 4	0.010 6	0.018 2	0.013 7	0.014 6
u	4.65%	3.97%	3.70%	2.36%	3.88%	7.34%	4.32%

5 结论

本文采用岩石力学试验的方法,对某矿山深部岩石脆-延转化特性和蠕变变形进行了研究,形成的结论与建议如下:

(1)在一期技改工程设计最低标高-658 m 范围内,作为围岩的绢云母千枚岩不会发生明显的脆-延转化,岩体暂不会出现较大的塑性软化特性。而深部硅化千枚岩在开采深度达到1 500 m 以后可能出现延性破坏,影响围岩的承载能力。少量的英安斑岩直至2 700 m 以下才有可能表现出塑性软化的大变形特性。

(2)同一深度岩石在高应力下蠕变变形较低应力水平更为明显;不同深度的岩石试样在同一应力水平下,深部试样较浅部试样蠕变变形更为明显。试样在不同的外荷载条件下其蠕变应变的增加率均保持在一个较低的范围,故一期技改设计范围内深部岩石蠕变变形不明显,不会产生强流变特性。

(3)巷道及硐室的长轴线方向与最大主应力方向应尽可能呈小角度相交,对采场结构参数和开采顺序进行优化,合理布置巷道及硐室的位置,从时间、空间和强度三个维度上减小开采扰动对巷道围岩的破坏作用。

(4)采用“临时支护-卸压-高强度支护”的巷道围岩强化原则,以及“注、锚、喷、架”一体化支护技术,既可有效控制围岩发生大变形和岩爆,也可保障支护系统的长期效能。

(5)适时构建多源信息综合监测分析预警系统,保障深部开采的安全。

[参考文献]

- [1] 蔡美峰. 深部开采围岩稳定性与岩层控制关键理论和技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(3): 5-13.
- [2] 谢和平, 高明忠, 付成行, 等. 深部不同深度岩石脆延转化力化学行为研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 701-715.
- [3] 何满潮. 深部建井力学研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 726-746.
- [4] 刘育明, 马俊生, 郭雷, 等. 国外深井充填法矿山开采技术综述[J]. 中国矿山工程, 2018, 47(6): 1-6.
- [5] 张少杰, 张爱民, 马俊生, 等. 深井硬岩矿山岩爆防治技术综述[J]. 中国矿山工程, 2018, 47(6): 12-18.
- [6] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. 力学进展, 2005(1): 91-99.
- [7] 肖树芳, 杨淑碧, 仵磊, 等. 岩体力学[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- [8] 杨圣奇, 苏承东, 徐卫亚. 大理岩常规三轴压缩下强度和变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2005(3): 475-478.
- [9] 徐松林, 吴文, 王广印, 等. 大理岩等围压三轴压缩全过程研究 I: 三轴压缩全过程和峰前、峰后卸围压全过程实验[J]. 岩石力学与工程学报, 2001(6): 763-767.
- [10] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.