

动力扰动下深部巷道围岩的力学响应及控制*

胡毅夫** 聂 峥 邓丽凡 汪业青
(中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083)

摘要:为了研究动力扰动下原岩垂直应力、侧压力系数大小,以及扰动峰值强度对深部巷道围岩稳定性的影响,采用有限差分数值计算软件 FLAC3D 对动力扰动下深部巷道围岩力学响应进行数值分析,并结合冬瓜山矿山深部出矿巷道实际情况及现有支护方案,进行支护设计优化。研究表明:在动力扰动作用下,巷道围岩位移和塑性区都随原岩垂直应力、侧压力系数增大而增大;扰动峰值强度 ≤ 20 MPa 时,巷道围岩位移和塑性区增大幅度较小,扰动峰值强度 > 20 MPa 时,巷道围岩位移和塑性区大幅度增大。故在较高的扰动强度和静应力作用下,巷道围岩更容易发生失稳破坏。在冬瓜山铜矿出矿巷道现有支护基础上,进行支护优化,得出最佳方案,即喷层厚度为 150mm,混凝土强度等级为 C20,优化后巷道围岩位移和塑性区大大降低。

关键词:深部巷道;动力扰动;数值模拟;力学响应;围岩控制

中图分类号:TD323 文献标识码:A doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2016.02.021

Mechanical Response and Control of Surrounding Rock in Deep Tunnel under Dynamic Disturbance*

HU Yifu** NIE Zheng DENG Lifan WANG Yeqing

(School of Resources & Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083)

Abstract: The aim is to study the influence of the stability of surrounding rock with different vertical stresses, lateral pressure coefficients and peak value of dynamic stresses under dynamic disturbance. By using an explicit finite difference program FLAC3D to study mechanical response of surrounding rock under dynamic disturbance, and combined with the practical situation of the Ore-drawing Roadway and supporting scheme in Dongguashan Copper Mine, the support optimization scheme is put forward. The results show that both the displacement and plastic zone increase significantly with the increase of the lateral pressure coefficients and vertical stresses under the influence of dynamic disturbance; when the peak value is less than 20 MPa, the displacement and plastic zones increase a little, but the peak value is more than 20 MPa, the displacement and plastic zones increase dramatically. So at a higher dynamic stress and vertical stresses, the surrounding rock is easily damaged. Based on the actual situation of Dongguashan Copper Mine's supporting scheme, the displacement and plastic zone of surrounding rock is reduced greatly after choosing the best support optimization solution, namely the spray layer thickness is 150 mm, strength grade of concrete is C20.

Key words: deep tunnel; dynamic disturbance; numerical simulation; mechanical response; surrounding rock control

1 引言

随着矿产资源需求量的不断增加和浅部资源的消耗,矿井开采正经历由浅到深、由简单到复杂的过程。进入深部开采后,岩体将处于较高的初始应力状态,同时还受到开挖爆破、机械振动等引起的动力扰动的作用,即岩体处在“高应力+动力扰动”^[1-4]这种复杂受力状态下,出现了很多与浅部不同的新现象,如由浅部的脆性力学响应转化为深部的潜在的延性行为力学响应、巷道围岩变形量大、破坏具有

区域性等^[5-7]。因此研究深部岩石在“高应力+动力扰动”这种复杂受力状态下的力学特性,一方面有助于预测和防治深部工程灾害,有助于矿山的安全开采;另一方面,也有助于解释深部岩石的基本力学特性。

有不少专家学者就动力扰动对巷道围岩稳定性的影响进行了研究,国外,Andrieux 等^[8]研究了深部矿柱受压炸爆破作用的力学特性,Diederichs 等^[9]研究了深部硬岩巷道开挖过程中围岩的裂纹发育和扩展机理;国内,温颖远等^[10]研究了软煤和硬煤层在动力扰动下巷道围岩的力学响应;宋希贤等^[11]利用 RFPA^{2D}-Dynamic 数值软件,探索了动力扰动下深部巷道围岩稳定的控制方法;李夕兵等^[12]运用颗粒流软件 PFC2D 对动载荷作用下高应

2015-09-01 收稿,2015-09-29 接受,2016-04-25 网络发表

* 湖南省自然科学基金(14JJ4003)资助

** 通讯作者,E-mail:121422838@qq.com

力巷道的稳定性进行数值计算,探讨扰动应力波强度的变化对巷道围岩稳定性的影响。

以上研究只是从单个方面分析了动力扰动对巷道围岩稳定性的力学响应,但是从动力扰动的强度、原岩垂直应力大小和侧压力系数三方面研究扰动对巷道围岩稳定性的影响规律的研究不多。本文以冬瓜山铜矿深部出矿巷道为例,采用有限差分数值计算软件 FLAC3D 对动力扰动下巷道围岩力学响应进行数值分析,探讨巷道失稳与原岩垂直应力、侧压力系数大小、动态扰动应力波强度的关系,并进行支护设计优化,以为矿山安全生产提供一定的参考依据。

2 冬瓜山铜矿深部开采概况

冬瓜山铜矿是狮子山矿田中的大型深埋铜矿,赋存于黄龙组-船山组地层中,标高为 -670 ~ -1000 m,毗邻老鸦岭铜矿及大团山铜矿,矿床南段共有矿体 138 个,其中主矿体一个,约占铜矿总储量的 99%。主矿体长约 1180 m,宽约 500 m,厚度为 1.13 ~ 100 m,平均厚度为 34.16 m,采用阶段空场嗣后充填法开采,垂直矿体划分盘区,盘区沿长轴划分出长 80 m、宽 18 m 的采场,采场依次作为开采区和矿柱,充填完成后再进行二步骤回采^[13]。在采场开采过程中爆破震动、机械振动等对底部出矿巷道产生动力作用,因此出矿巷道围岩在承受着原岩应力作用的同时,还受到了来自开采产生的动力作用,这是出矿巷道围岩失稳破坏的重要原因。

3 数值计算模型和方案

3.1 数值模型

根据冬瓜山铜矿的具体地质条件,采用有限差分数值计算软件 FLAC3D 建模。三维模型外型尺寸为 30 × 4 × 30 m,巷道为半圆直拱形式,跨度为 4 m,墙高为 2 m,拱半径为 2 m。巷道位于模型中心,计算模型的物理力学参数见表 1。岩体采用理想弹塑性模型,屈服准则采用 Mohr-Coulomb 强度准则^[14]。岩体开挖时爆破动力、地震波等类似动力扰动在数值计算时可取载荷波形中为谐波的一段^[15]。采用正弦式应力波时程曲线 $P(t)$,如图 1 所示,根据现场监测主频取 $\omega = 100$ Hz。模型选用 FLAC3D 内置静态(黏性)边界条件^[16]来吸收边界上的入射波。在模拟中,选用瑞利阻尼形式,按经验方法选取阻尼比参数 0.005,中心频率用模型在无阻尼下的自振频率代替,其值为 19.92 Hz。

表 1 模型的物理力学特性参数

密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	黏结力 /MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	抗拉强度 /MPa
2846	10.52	4.69	4.81	36.6	1.31

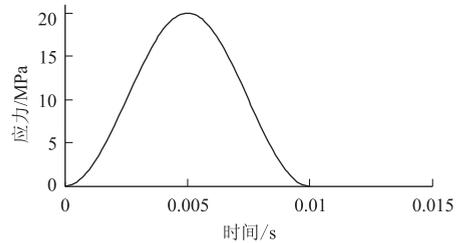


图 1 应力波时程曲线 ($P_{\max} = 20$ MPa)

3.2 模拟方案确定

为了研究巷道稳定情况与原岩垂直应力、侧压力系数、动态扰动应力波强度的关系,原岩垂直应力 P 分别取 10 MPa、15 MPa、20 MPa、25 MPa、30 MPa,动态扰动应力波强度 P_{\max} 分别取 0 MPa(未施加动载荷)、10 MPa、20 MPa、30 MPa、40 MPa,侧压力系数 K 分别取 0.5、0.75、1、1.25、1.5、1.75、2、2.25,计算模型示意图见图 2。模拟分 3 步计算:1)模型施加上述静应力算至平衡,得到原岩应力场;2)开挖巷道并算至平衡后得到围岩应力重分布状态;3)在模型边界施加动载荷。设置阻尼参数和动力计算时步,开启分析计算程序进行计算,计算时间取 0.04 s(计算表明 0.04 s 后巷道动力响应已经基本完成)。

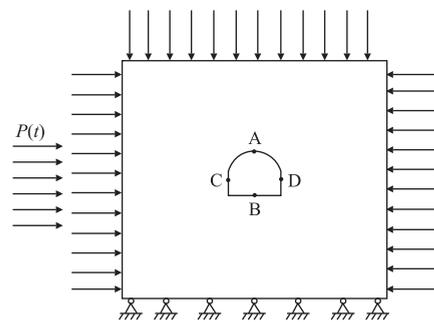


图 2 数值计算模型

4 模拟结果与分析

各监测点震动速度一时程曲线如图 3 所示,以原岩应力为 15 MPa,侧压力系数 K 为 1.25,扰动峰值为 20 MPa 为例。从图中可以看出,C 点的振动速度最大,而且增加速度最快。振动速度越大,对围岩的挤压拉伸作用越强,围岩越容易发生破坏,对于临空面巷道围岩,更加容易发生屈服破坏;此外由于入射波一侧临空面处质点振动速度的突然增大,也是

导致深部巷道围岩发生岩爆的一个主要原因。

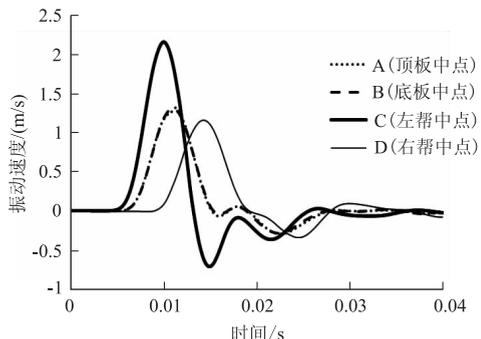


图3 各监测点震动速度-时程曲线

4.1 侧压力系数对巷道稳定性的影响

在进行不同侧压力系数下的巷道围岩力学特性分析时,假定动载荷由围岩左侧水平输入,由图3可知,C点振动速度最大,所以选择巷道围岩左帮中心水平位移以及塑性区进行监测,并将监测结果绘图,以原岩应力为15 MPa、扰动峰值为20 MPa为例。

4.1.1 对巷道围岩位移的影响

图4为位移随侧压力系数的变化规律。从图中可以看出,巷道破坏与侧压力系数有关。在动力扰动作用下,随着构造应力系数的增大,左帮中点位移也增大。构造应力系数相同时,动态扰动的施加使巷道围岩左帮中心水平位移显著增加,如 $K=0.5$,未施加扰动时的位移为2.3 mm,施加扰动后的位移增加到8.9 mm。所以巷道围岩在动力扰动作用下的位移更大,更加容易发生失稳破坏,应采取相应的支护措施。

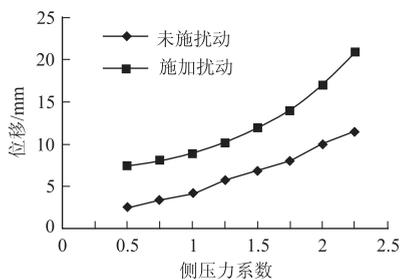


图4 位移随侧压力系数变化关系

4.1.2 对巷道围岩塑性区的影响

图5为不同侧压力系数下扰动前后巷道围岩塑性区变化关系,图6为不同侧压力系数下巷道围岩塑性区分布情况,因篇幅限制仅给出侧压力系数为0.5和2.25的塑性区分布图。从图中可以看出,随着侧压力系数的增加,塑性区也在增加,且动力扰动的施加使得巷道围岩塑性区较无扰动作用时显著增多。从图中还可以看出,增多的区域主要是在左帮,

其次是巷道顶板以及底板附近,右帮几乎无变化,说明塑性区的变化与扰动源位置有关,相应位置应加强支护。

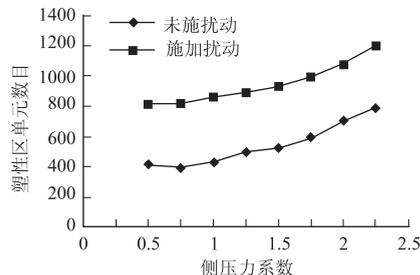


图5 不同侧压力系数下巷道围岩塑性区变化

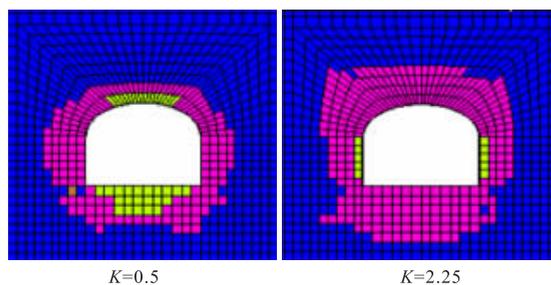


图6 不同侧压力系数下巷道围岩塑性区分布

4.2 扰动峰值强度对巷道稳定性的影响

为了分析不同扰动峰值应力对巷道围岩稳定性的影响,以原岩垂直应力为15 MPa,侧压力系数为1.25为例,扰动峰值应力分别取0 MPa(未施加动荷载)、10 MPa、20 MPa、30 MPa、40 MPa五种情况进行分析,对巷道围岩左帮中心水平位移以及塑性区进行监测,并将监测结果绘图。

4.2.1 对巷道围岩位移的影响

图7为位移随扰动峰值的变化规律。从图中可以看出,巷道破坏与扰动强度峰值有关。随着扰动峰值强度的增大,左帮中心位移也随之增大。扰动峰值强度 $P_{max} \leq 20$ MPa 时,左帮中心位移虽有增大,但增幅不大,而扰动峰值强度 $P_{max} > 20$ MPa 时,左帮中心位移增大幅度较大。所以在较高动力扰动作用下,如爆破作用,巷道围岩可达到极高拉应力状

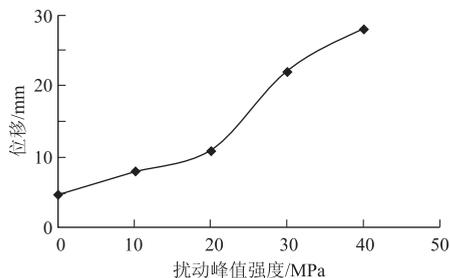


图7 不同扰动峰值下位移变化规律

态,一旦岩体中的拉应力大于围岩极限抗拉强度时,导致巷道围岩拉伸破坏,会显著增加巷道围岩失稳的几率。

4.2.2 对巷道围岩塑性区的影响

图8为不同扰动峰值下巷道围岩塑性区分布图。随着动力扰动峰值的增大,巷道围岩塑性区区域不断增加。当扰动峰值强度 $P_{max} \leq 20$ MPa 时,巷道围岩塑性区区域虽有增大,但增幅不大,而 $P_{max} > 20$ MPa 时,巷道围岩塑性区区域显著增大。从图中还可以看出,增多的区域主要是在左帮,其次是巷道顶板以及底板附近,右帮最小,说明动力扰动对左帮影响最大,巷道开挖后,应力波的传播被隔断,动力扰动作用对巷道右帮围岩的影响较小。

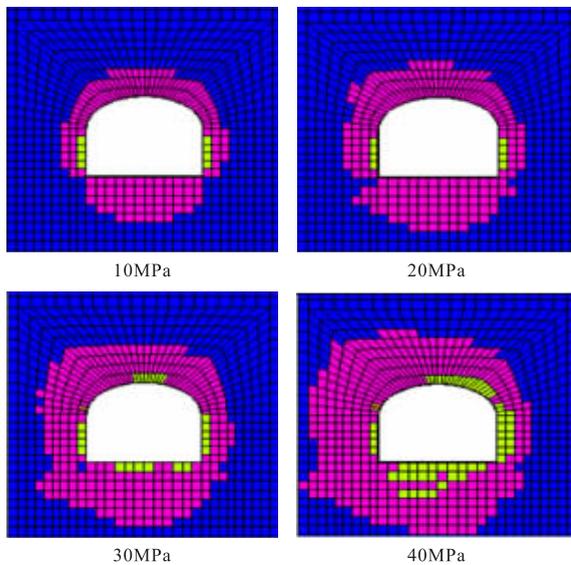


图8 不同扰动峰值下的巷道围岩塑性区分布

4.3 原岩应力对巷道稳定性的影响

为分析不同原岩垂直应力对巷道围岩稳定性的影响,以侧压力系数为 1.25,扰动峰值为 20 MPa,原岩垂直应力分别取 10 MPa、15 MPa、20 MPa、25 MPa、30 MPa 五种情况进行分析,选择巷道围岩左帮中心水平位移以及塑性区进行监测,并将监测结果绘图。

4.3.1 对巷道围岩位移的影响

图9为位移随原岩垂直应力的变化规律。从图可以看出,巷道失稳与原岩应力大小有关。在扰动强度峰值为 20 MPa 和侧压力系数 $K = 1.25$ 的情况下,左帮中心水平位移随原岩应力的增大而增大。在原岩垂直应力为 10 MPa 时,左帮中心水平位移为 8.2 mm;在原岩垂直应力为 15 MPa 时,左帮中心水

平位移增加到 10.9 mm;在原岩垂直应力为 30 MPa 时,左帮中心水平位移增加到 23.5 mm。所以在高原岩应力下,动力扰动作用下巷道围岩极易发生破坏,在“高应力+动力扰动”这种复杂条件下应加强支护。

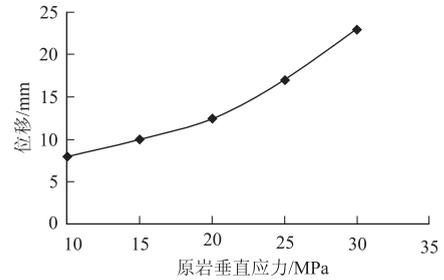


图9 位移随原岩垂直应力的变化规律

4.3.2 对巷道围岩塑性区的影响

图10为不同原岩垂直应力下巷道围岩塑性区数目变化图。从图中可以看出,随着原岩应力的增大,塑性区数目不断增多,即巷道周边围岩破坏越严重,应及时采取支护措施。

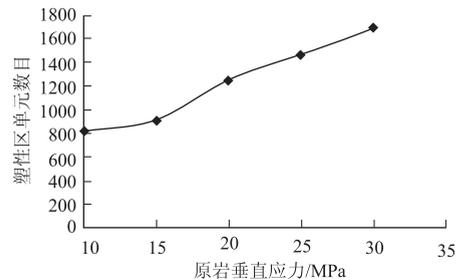


图10 围岩塑性区数目与原岩垂直应力的变化

5 围岩控制研究

经现场调查发现,冬瓜山铜矿出矿巷道支护效果并不好,图11为现有支护下出矿巷道围岩破坏情况,为保证矿山安全生产,有必要进行支护优化。根据北京有色冶金设计研究院进行的冬瓜山铜矿原岩应力测试结果,采用-730 m 水平处的原岩应力,垂直应力为 13.84 MPa,水平应力为 16.47 MPa,侧压



图11 出矿巷道围岩支护及其破坏

力系数为 1.2。根据文献[15]提供的计算方法,参照冬瓜山铜矿爆破设计侧边孔设计参数,可取扰动峰值为 30 MPa,根据前文数值模拟的结果,得到垂直应力为 15 MPa、侧压力系数为 1.25、扰动峰值为 20 MPa 左帮中心水平的位移和塑性区情况,为接下来的支护模拟提供便利。为保证工程安全,并充分考虑节约工程投资,在冬瓜山铜矿现有的支护基础上,通过改变混凝土厚度和强度,组成若干组候选支护方案,如表 2 所示。用 FLAC3D 对这些支护方案进行数值模拟分析,选出安全、经济、可行的支护参数,然后进行不同喷层厚度和强度等级数值分析,选择巷道围岩左帮中心水平位移、拱顶竖向位移以及塑性区进行监测,并将监测结果绘图。

表 2 支护设计方案

支护方案	混凝土喷层厚度/mm	混凝土强度等级	位移/mm
无支护 1	—	—	23.7
现有支护方案 2	100	C20	17.2
支护方案 3	100	C25	15.5
支护方案 4	150	C20	8.93
支护方案 5	150	C25	7.2

图 12 为方案 2(现有支护方案)和方案 4 在动力扰动下的塑性区分布图。从表 2 中可以看出,支护结构的存在都使监测点位移大大减小,且方案 4 为优选方案。在相同侧压力系数和动力扰动下,方案 4 时位移为 8.93 mm,现有支护(方案 2)时位移为 17.2 mm,降低了 8.27 mm;方案 5 时位移为 7.2 mm,与方案 4 相比只降低了 1.73 mm,说明效果不是很明显。从图 11 中可以看出,方案 4 使巷道围岩塑性区显著减小,说明支护起到了很好的作用。所以在现有支护基础上,考虑经济因素,方案 4 最佳,即喷层厚度 150 mm,混凝土强度等级 C20。

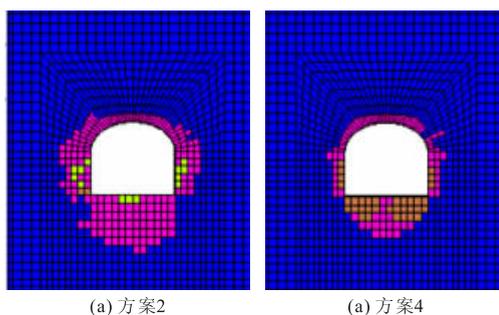


图 12 不同方案下塑性区分布

6 结论

采用有限差分数值计算软件 FLAC3D 对动力扰动下巷道围岩力学响应进行了研究,分析了不同原岩应力、侧压力系数和扰动峰值强度对巷道围岩位移、塑性区的影响,并结合冬瓜山铜矿出矿巷道实际情况,进行了支护设计优化。研究表明:

1) 巷道失稳破坏与侧压力系数密切相关。在动力扰动作用下,随着侧压力系数的增大,巷道围岩位移和塑性区显著增大,即巷道稳定性越来越差,应及时采取支护措施。

2) 扰动峰值强度对巷道稳定性有较大影响。当扰动峰值强度 $P_{\max} \leq 20$ MPa 时,巷道围岩位移和塑性区虽有增大,但增大幅度不大,而扰动峰值强度 $P_{\max} > 20$ MPa 时,巷道围岩位移和塑性区增大幅度较大。所以在较高的扰动峰值强度作用下,巷道围岩更容易发生失稳破坏。

3) 巷道失稳与原岩垂直应力大小有关。在动力扰动下,巷道围岩位移和塑性区随原岩垂直应力的增大而增大,所以在高静应力下,动力扰动作用下巷道围岩极易发生破坏,在“高应力+动力扰动”这种复杂条件下应加强支护。

4) 对冬瓜山铜矿出矿巷道现场调查发现,现有支护参数及支护方法效果不佳,出现巷道破坏严重现象,从而进行了支护优化设计。在现有支护基础上,调整喷层厚度和混凝土强度,经数值分析,得出方案 4 最佳,即喷层厚度 150 mm,混凝土强度等级 C20。调整后的支护方法有效控制了巷道围岩的变形,有利于保证矿山的安全施工和生产。

参考文献

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
- [2] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学及工程灾害控制研究[J]. 煤矿支护,2007,(3),1-14.
- [3] 中国岩石力学与工程学会. 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集[C]. 北京,科学出版社,2004:88-94.
- [4] 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,2005,35(1):91-99.
- [5] 蔡美峰,冀东,郭奇峰,等. 基于地应力现场实测与开采扰动能量积聚理论的岩爆预测研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(10):1973-1980.
- [6] 周小平,钱七虎. 深埋巷道分区破裂化机制[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(5):877-885.

- [7] 李术才,王汉鹏,钱七虎,等. 深部巷道围岩分区破裂化现象现场监测研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(8):1545-1553
- [8] ANDRIEUX P, HADJIGEORGIOU J. The destressability index methodology For the assessment of the likelihood of success of a large-scale confined Distress blast in an underground mine Pillar[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(3):407-421.
- [9] DIEDERIEHS M S, KAISER P K, EBERHARDT E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunneling and the influence of near-face stress rotation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5):785-812.
- [10] 温颖远, 牟宗龙, 易恩兵, 等. 动力扰动下不同硬度煤层巷道围岩响应特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(4):555-559.
- [11] 宋希贤, 左宇军, 王宪. 动力扰动下深部巷道卸压孔与锚杆联合支护的数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(9):3158-3165.
- [12] 李夕兵, 廖九波, 赵国彦, 等. 动力扰动下高应力巷道围岩动态响应规律[J]. 科技导报, 2012, 30(22):48-54.
- [13] 唐礼忠, 潘长良, 杨承祥, 等. 冬瓜山铜矿微震监测系统及其应用研究[J]. 金属矿山, 2006, (10):41-45.
- [14] Itasca Consulting Group, Inc. . FLAC3D user's guide(Version 2.1) [R]. [S. 1]:Itasca Consulting Group, Inc. ,2002.
- [15] 龙源, 冯长根, 徐全军, 等. 爆破地震波在岩石介质中传播特性与数值计算研究[J]. 工程爆破, 2000, 6(3):1-7.
- [16] LYSMER J, KUHLEMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. Journal of Engineering Mechanics-asce, 1969, 95(3):759-877.

(上接第311页)

- [23] KRISHNA M S, NAIDU S A, SUBBIAH C V, et al. Sources, distribution and preservation of organic matter in a tropical estuary (Godavari, India)[J]. 2015, 38(3):1032-1047.
- [24] MEYERS P A, ISHIWATARI R. Lacustrine organic geochemistry-an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments[J]. Organic Geochemistry, 1993, 20(7):867-900.
- [25] ZHANG S, LU X X, SUN H, et al. Geochemical characteristics and fluxes of organic carbon in a human-disturbed mountainous river (the Luodingjiang River) of the Zhujiang (Pearl River), China[J]. The Science of the Total Environment, 2009, 407(2):815-825.
- [26] MEYERS P A. Preservation of elemental and isotopic sources identification of sedimentary organic matter[J]. Chemical Geology, 1994, 114(3-4):289-302.
- [27] 俞汉青. 巢湖水资源开发问题的探讨[J]. 自然资源, 1992, 6:26-31.
- [28] 王秀君, 房传苓, 于志同, 等. 新疆博斯腾湖水体颗粒和溶解有机碳的季节变化及其来源初探[J]. 湖泊科学, 2014, 26(4):552-558.
- [29] 邢建伟, 线薇薇, 绳秀珍. 2012年夏季长江口颗粒有机碳、氮分布特征及其来源[J]. 环境科学, 2014, 35(7):2520-2527.
- [30] 安徽省环境监测中心站. 安徽省环境状况公报(2014年)[EB/OL]. 2015-6-12. <http://www.ahemc.gov.cn/show.aspx?MenuID=004001&ID=26325>.
- [31] LUDWIG W, PROBST J L, KEMPE S. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(1):23-41.
- [32] SCHLUNZ B, SCHNEIDER R R. Transport of terrestrial organic carbon to the oceans by rivers: re-estimating flux- and burial rates[J]. International Journal of Earth Sciences, 2000, 88(4):599-606.
- [33] 周志华, 刘丛强, 李军, 等. 巢湖沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 记录的生态环境演化过程[J]. 环境科学, 2007, 28(6):1338-1343.
- [34] 王丽芳, 熊永强, 吴丰昌, 等. 巢湖富营养化的沉积记录: 结合态脂肪酸及其单体碳同位素特征[J]. 地球与环境, 2010, 38(4):393-401.