

基于 Mathew 与数值模拟法的采场结构参数优化及稳定性研究

周科平, 苟国刚, 罗佳, 林阳帆

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 为了确定合理的采场结构参数, 针对单一应用 Mathew 或者数值模拟法的不足, 本文将这两种方法结合起来, 通过工程地质调查结果确定出 Mathew 法中稳定性系数 N , 结合稳定性图表 $N-S$ 之间的关系确定出形状系数 S ; 同时, 参考类似矿山的采场结构参数, 提出几种具有相同形状系数的采场结构参数方案, 并对每种方案进行数值模拟。通过对各方案中应力、位移、塑形破坏区体积的分析, 确定出合理的采场结构参数。结合具体工程实例, 对现场实验结果进行分析表明, 将两种方法结合所确定出的采场结构参数对矿山生产实践具有一定的指导意义。

关键词 采场结构参数; Mathew 法; 采场形状系数; 数值模拟

中图分类号 TD853

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.30.005

Optimization of Structural Parameters and Stability of Stope Based on Mathew Method and Numerical Simulation Method

ZHOU Keping, GOU Guogang, LUO Jia, LIN Yangfan

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract The Mathew method and numerical simulation method were combined to determine the reasonable structural parameters of the stope in consideration of the deficiencies of the single application of Mathew method or numerical simulation method. The shape factor S could be determined through the identification of stability coefficient N combing the relationship between N and S in the stability chart. Furthermore, several programs of stope with the same shape factor S were put forward. The determination of reasonable stope structure parameters were made through the analysis of stress, displacement and shape of failure zone volume in different programs with numerical simulation of different program. This technology is proved to be of great instructive significance to mines in terms of the determination of reasonable stope structural parameters by the specific applications and analysis of site industrial test results.

Keywords structural parameters of the stope; Mathew; stope shape coefficient; numerical simulation method

0 引言

采场结构参数是地下采场连续回采稳定性的重要影响因素之一, 不同的地质条件下具有不同的最优结构参数^[1,2]。采矿方案设计时, 矿柱尺寸设计过大, 矿房跨度过小, 则回收率低, 矿石损失量大; 而矿柱尺寸过小时, 生产成本增加, 矿房的稳定性低, 发生大规模地压活动的概率加大, 导致安全生产得不到保障^[3]。因此, 通过优化采场结构参数, 可以实现矿山开采效益最大化。已有研究人员应用 Mathew 法对采场尺寸进行优化或对采场顶板稳定性进行研究^[4-9]。但这些研究

仅应用 Mathew 法或者数值模拟法确定采场结构参数, 很少将这 2 种方法合理的结合起来进行综合应用。Mathew 法是一种基于岩石分类系统, 通过大量矿山生产实践总结出的图表法^[10], 并不能严密的评判特定暴露面积的稳定性。而数值模拟法则是一种理论严密, 能够准确模拟材料变形的模拟方法^[11,12]。由此可见, 单一的 Mathew 法或者数值模拟法很难确定出相对合理的采场结构参数。因此, 本文将这 2 种方法结合起来, 对云南某矿山的采场结构参数进行优化以及对采场稳定性进行研究。

收稿日期: 2013-06-20; 修回日期: 2013-08-29

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAB14B01)

作者简介: 周科平, 教授, 研究方向为深部采矿、矿山岩石力学与工程, 电子信箱: kpzhou@vip.163.com

1 Mathew 法

1.1 Mathew 法简介

Mathew 法的全称为 Mathew 稳定图表法, 该法以挪威岩土工程所巴顿等 1974 年提出的岩体隧道开挖质量分类法^[13] (NGI 法) 为基础发展而来, 实质是以岩体的稳定性指数 N 和采场的形状系数 S 之间的关系而确定出的一个稳定性图表^[14]。该法有 2 种应用: ① 根据相关公式计算出岩体的稳定性指数 N , 在综合考虑矿山开拓和采准工程的基础上初步确定采场结构参数并计算出采场暴露面积的形状系数 S , 将 N 和 S 投影到 Mathew 稳定性图标上, 从而初步判断采场的稳定性; ② 根据岩体稳定性指数 N 在稳定性图标上求出相对稳定的采场形状系数 S , 在初步选定采场某一结构参数后即可确定其他结构参数与暴露面积。Mathew 稳定性图表如图 1 所示。

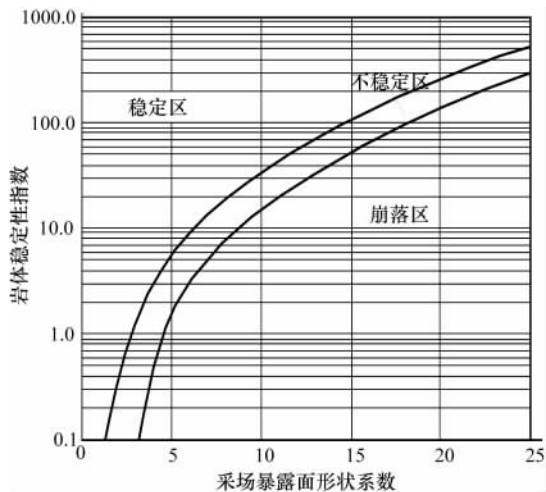


图 1 Mathew 稳定性图表

Fig. 1 Mathew stability graph

1.2 Mathew 法相关参数的确定

在 Mathew 法中, 稳定性指数 N 的计算公式为

$$N=QABC \quad (1)$$

式中, Q 为岩体质量指数; A 为应力系数; B 为岩体缺陷方位修正系数; C 为设计采场暴露面方位修正系数。

式(1)中的岩体质量指数 Q 为

$$Q=RJ_nJ_r/(J_aJ_wS_f) \quad (2)$$

式中, R 为岩体质量指标; J_n 为节理组数; J_r 为节理粗糙度; J_a 为节理蚀变、充填及胶结程度; J_w 为节理裂隙水折减系数; S_f 为应力折减系数^[15]。

为了更加准确地反应作用在采场暴露面上的应力, 用应力系数 A 代替应力折减系数 S_f 。 A 的计算公式为

$$A = \begin{cases} 0 & \sigma_c/\sigma_1 < 2 \\ 0.1\sigma_c/\sigma_1 & 2 \leq \sigma_c/\sigma_1 \leq 10 \\ 1 & \sigma_c/\sigma_1 > 10 \end{cases} \quad (3)$$

其中, σ_c 为完整岩石的单轴抗压强度, MPa; σ_1 为与暴露面方

向平行的采矿诱导应力, MPa。

为了确定 B , 应综合考虑关键节理与采场的倾向相对差别以及走向差别。在实际应用中, 当主节理与暴露面夹角为 10° 、 20° 、 30° 、 45° 、 60° 时, 系数 B 依次取 0.2、0.3、0.35、0.4、0.8^[13]。

设计采场暴露面方位修正系数 C 按照以下情况确定:

- (1) 当暴露面为水平时, $C=1$;
- (2) 当设计的暴露面与水平面的夹角为 α 时,

$$C=8-6\cos\alpha \quad (4)$$

采场形状系数 S 能够综合反映采场的形状和尺寸。井下任何的暴露面均可近似认为是一个长方形, 即可以定义采场形状系数 S 为

$$S = \frac{LL_1}{2(L+L_1)} \quad (5)$$

式中, L 为暴露面宽度, m; L_1 为暴露面长度, m。

当 L_1/L 大于 4:1 时, S 基本保持不变。即此时暴露面宽度 L 对暴露面的稳定性起主要作用。

2 工程实例

2.1 概况

云南某矿山 I-1 矿体主要赋存于北东向突起顶部正接触带上的矽卡岩硫化矿, 分为锡、铜共生硫化矿及单铜硫化矿 2 类。该矿段被划分为 3 个大的盘区, 分别为南盘区、北盘区和中盘区。北盘区和中盘区基本开采完毕, 现在正在对南盘区进行回采。但是应用北盘区和中盘区的空场法结构参数时, 很难满足矿山生产。在开采过程中, 要对顶板进行大量支护, 同时, 也需要在采场中留下不规则的矿柱。为了解决少支护和少留矿柱的问题, 该矿山与中南大学合作开展了南盘区矿房结构参数优化和稳定性分析的相关研究。南盘区具体工程地质条件如下。

南盘区矿体走向东西, 倾向北, 局部向西侧伏, 平均倾角 14° 。矿体厚度 2~30m, 平均 12m。赋存标高为 1646~1730m, 矿体中等稳固, 普氏系数 $f=6\sim 8$, 近矿围岩节理发育、局部破碎。矿体顶板为大理岩, $f=6\sim 8$, 中等稳固。底板为花岗岩, 返矿部位为半风化花岗岩, $f < 6$, 不稳固。其余为块状花岗岩, $f=6\sim 8$, 中等稳固。

2.2 Mathew 法确定采场暴露面积

根据矿山工程地质调查的结果以及矿体赋存的实际情况, 计算中 R 取值为 80, J_n 为 5, J_r 为 3, J_a 、 J_w 、 S_f 、 A 都为 1, B 为 0.2^[14]。由式(1)~式(4)可以得到采场暴露面方位修正系数 C 为 2.18, 岩体质量指数 Q 为 48, 稳定性指数 N 为 20.93。结合图 1, 由稳定性指数 N 查出采场形状系数 S 为 7.6。然后再结合类似矿山矿房结构尺寸, 由式(5)得出矿房尺寸: 采场沿走向长度为 40m 时, 计算出倾向长度为 24m, 采场长宽比为 1.7, 此时的暴露面积为 960m²; 在采场沿走向长度为 50m 时, 计算沿倾向长度为 20m, 长宽比为 2.5, 此时暴露面积为 1000m²。



2.3 FLAC3D 软件模拟

2.3.1 建立模型、定义模型材料属性

根据该矿山矿体的赋存特点,采用FLAC3D建立模型,模型尺寸大小为1500m×960m×1000m。模型上边界距离地表700m,模型范围内施加自重载荷,且在模型上边界施加700m厚岩层的自重应力;网格采用六面体单元,并采用Mohr-Coulomb准则来确定开采的应力位移、可能出现的破坏范围以及采场顶板与矿柱的塑性屈服状态^[11-16]。

由2.2中所确定的采场结构参数及暴露面积,拟采用的模拟方案和模拟参数如表1和表2所示。

表1 采场结构参数

Table 1 Structural parameters of the stope

方案编号	形状系数	长宽比	走向长度/m	倾向长度/m	采场高度/m	矿柱宽度/m	暴露面积/m ²
方案1	7.6	1.7	40	24	30	4	960
方案2	7.6	1.7	40	24	30	5	960
方案3	7.6	1.7	40	24	30	6	960
方案4	7.6	2.5	50	20	30	4	1000
方案5	7.6	2.5	50	20	30	5	1000
方案6	7.6	2.5	50	20	30	6	1000

表2 FLAC3D 各岩层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of each stratum in FLAC3D

岩性	密度/(g·cm ⁻³)	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
上盘大理岩	2.68	55.52	7.05	0.26	4.7	3.8	37
硫化矿	4.05	57.78	10.00	0.34	3.2	4.0	43
下盘花岗岩	2.61	72.06	6.50	0.38	3.0	2.4	48

2.3.2 数值模拟结果分析

(1) 应力场分析。

应力场的分析主要从矿柱所受的压应力和顶板所受的拉应力进行分析,矿柱最大压应力和顶板最大拉应力见图2和图3。

由图2、图3可知,采场开挖后采场应力重新分布,6种方案中矿柱处出现应力集中,采场顶板出现应力释放;当长宽比一定时,矿柱处压应力随矿柱宽度增加而逐渐减小,但局部有所上升,而采场顶板处拉应力基本不变;当矿柱宽度一定时,长宽比越大,矿柱处压应力越小,而采场顶板拉应力基本相等;当矿柱宽为4m时,方案1和方案4中矿柱中所出现最大压应力,相差22.97MPa。

(2) 位移场分析。

位移场的变化是衡量结构稳定性与否的重要指标^[7],模拟出的顶、底板最大垂直位移见图4。

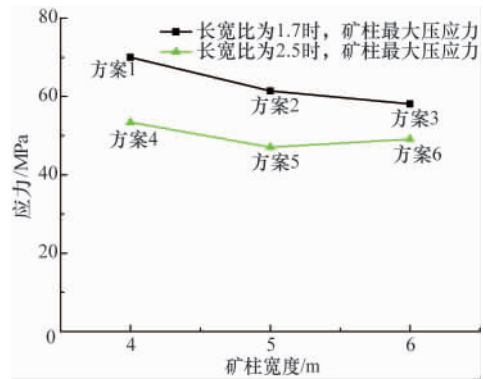


图2 采场矿柱最大垂直压应力

Fig. 2 Maximum vertical compressive stress of the pillar in the stope

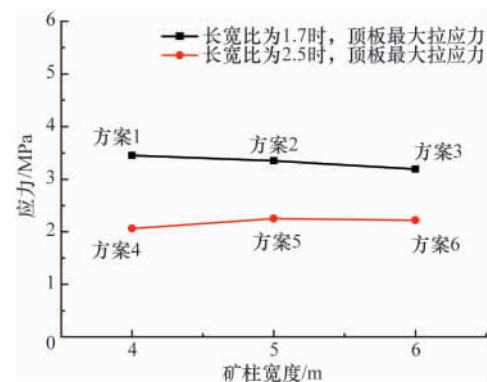


图3 采场顶板最大垂直拉应力

Fig. 3 Maximum vertical tensile stress of the roof in the stope

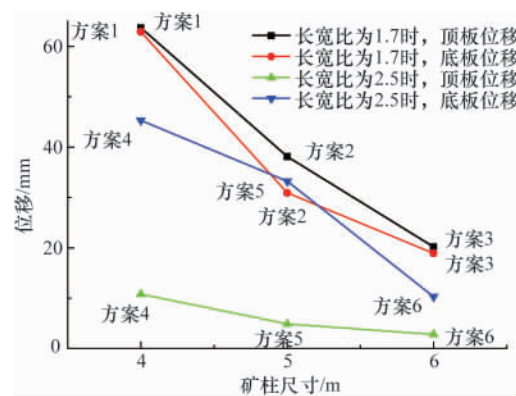


图4 采场顶底板最大垂直位移

Fig. 4 Maximum vertical displacement of the roof and floor in the stope

由图4可知,采场开挖后采场应力重新分布,当长宽比一定时,采场顶板下沉位移与底板上鼓位移极逐渐变小;长宽比越大,采场顶板下沉位移与底板上鼓位移变化越大,变化幅度大于43mm;当矿柱宽度一定时,长宽比为1.7时,采场

顶板下沉位移和底板上鼓位移基本相等,而长宽比为 2.5 时的底板上鼓位移远远大于顶板下沉位移;矿柱宽度为 6m 时,相同长宽比所对应的顶底板位移基本相等。总体而言,当矿柱宽度一定时,长宽比越大,所对应的顶、底板位移越小。

(3) 塑性区分析。

由图 5 可知,采场开挖后采场应力重新分布,当长宽比一定时,采场中塑性破坏区体积随着矿柱宽度增加逐渐减小;当矿柱宽度一定时,长宽比越大,矿房矿柱中塑性破坏区体积越小;长宽比为 1.7 矿柱宽度为 4m 时,塑性破坏区体积最大,最大值为 110.3m^3 ;长宽比为 2.5 且矿柱宽度为 6 时,塑性破坏区体积最小,最小值为 2.8m^3 。

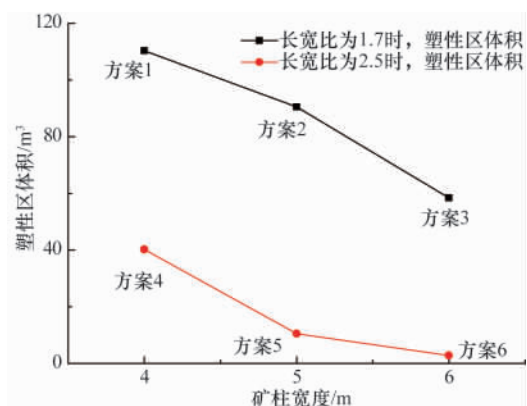


图 5 采场顶板和矿柱塑性区体积

Fig. 5 Volume of the plastic zone in roof and pillar

2.3.3 方案选择

(1) 由图 2~图 5 可知,矿柱宽度相同时,采场的长宽比越大,矿柱处的压应力、位移、塑性区体积越小,采场顶板处的拉应力变化不大;采场的长宽比一定时,随着矿柱的宽度越大,矿柱处的压应力、位移、塑性区体积越小。

(2) 在满足矿柱所受的最大压应力小于其抗压强度 (57.78MPa) 的条件下,方案 4、5、6 均符合条件,各方案中矿柱所受最大压应力分别为 53.43 、 47.03 、 49.1MPa 。

(3) 在满足采场顶板所受最大拉应力小于其抗拉强度 (3.2MPa) 的条件下,方案 3、4、5、6 均符合条件,其所受最大拉应力分别为 3.19 、 2.06 、 2.25 、 2.22MPa 。

(4) 方案 1 到方案 6 中塑性区体积分别为 110.3 、 90.5 、 58.4 、 40.2 、 10.5 、 2.8m^3 ,同时考虑顶底板的最大位移量,因此,尽可能的选择方案 5 和方案 6。

(5) 在矿柱和顶板稳定、安全的条件下,要满足回收率最大的要求。矿房尺寸越大,矿柱尺寸越小,采场的回收率越大^[9]。因此,尽可能选择方案 4 和方案 5。

综合以上分析,在考虑矿柱、顶板最大应力、顶底板的位移量、塑性区体积和采场回收率,最终确定方案 5 为最优方案。方案 5 的具体结构参数为矿房长 50m,宽 20m,长宽比为 2.5,矿柱宽为 5m,稳定性系数 7.6,暴露面积为 1000m^2 。

2.3.4 试验效果

在南盘区布置相邻采区 1、采区 2,采区沿矿体走向(南北向)布置,长 200m,宽 50m,高度等于矿体厚度;采场长为采区长度 50m,采场宽度为 20m,间柱为 5m。根据现场试验,采场部分区域有冒落现象,通过锚杆对采场进行局部护顶,采场顶板能够维持较长的稳定。采用优化后的采场结构参数后,采场日生产能力由 180t/d 提高至 240t/d ,生产能力大幅提高。

3 结论

综合应用 Mathew 法和数值模拟法 2 种方法,同时参考类似矿山的采场结构参数,提出几种具有相同形状的参数方案,并对每种方案进行模拟和分析,确定出合理的采场结构参数。结合具体工程实例,对云南某矿山的采场结构参数进行优化以及对采场稳定性进行研究,得到以下结论。

(1) 采场开挖后采场顶板和矿柱应力重新分布,顶板下沉和底板上鼓释放应力,而矿柱处则出现应力集中区域。因此,应对应力集中区域进行必要的支护和安全监测。

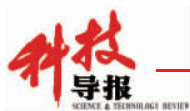
(2) 矿柱宽度一定时,采场的长宽比越大,采场越稳定,反之越不稳定;当采场的长宽比一定时,矿柱宽度越大,采场越稳定,反之则越不稳定。

(3) 通过现场试验,采场顶板局部出现冒落现象,因此,应对计算出来的最优采场结构参数乘以一定的安全系数进行必要的修正。

(4) 通过现场实验证明,运用 Mathew 法确定采场形状系数,再通过 FLAC3D 对相同形状系数下不同结构参数的采场进行数值模拟,最终选择出最优的采场结构参数方案,对矿山的实际生产具有重要的指导意义。

参考文献 (References)

- [1] 卢萍. 深部采场结构参数及回采顺序优化研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
Lu Ping. Optimization of deep stope structure parameters and mining sequence [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [2] 卢超波, 吴明丽. 充马矿倾斜厚矿体采场顶底柱厚度数值模拟研究 [J]. 现代矿业, 2010, 497(9): 12-14.
Lu Chaobo, Wu Mingli. Morden Mining, 2010, 497(9): 12-14.
- [3] 甯瑜琳. 深部缓倾斜薄矿体采场结构参数优化及采动沉陷特性研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2011.
Ning Yulin. Research on optimization of stope parameters of deep gently inclined thin orebody and mining subsidence characteristics [D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [4] 龚孔成, 贾明涛, 李响. 基于 Mathews 方法的矿岩可崩性研究 [J]. 江苏冶金, 2008, 9(4): 30-33.
Gong Kongcheng, Jia Mingtao, Li Xiang. Jiangsu Metallurgy, 2008, 9(4): 30-33.
- [5] Mawdesley C, Trueman R, Whiten W J. Extending the Mathews stability graph for open-stope design [J]. Mining Technology, 2001, 110(1): 27-39.
- [6] 郭然, 于润沧, 张文荣. Mathew 法在采矿方法设计中的应用 [J]. 金属矿山, 1999(9): 22-25.
Guo Ran, Yu Runcang, Zhang Wenrong. Metal Mine, 1999(9): 22-25.



- [7] 徐坤明, 程永民, 姜丽颖, 等. 用 Mathew 法确定侯庄矿区矿房的结构参数[J]. 冶金矿山设计与建设, 2001, 3(33): 1-3.
Xu Kunming, Cheng Yongmin, Jiang Liying, et al. Metal Mine Design and Construction, 2001, 3(33): 1-3.
- [8] 尚精华, 万国春. Mathew 法在矿房结构参数设计中的应用[J]. 采矿技术, 2009, 9(2): 5-7.
Shang Jinghua, Wan Guochun. Mining Technology, 2009, 9(2): 5-7.
- [9] 李爱兵. 缓倾斜层状矿体崩落步距的 Mathews 稳定图方法研究 [J]. 中国矿业, 2007, 16(2): 67-69.
Li Aibing. China Mining Magazine, 2007, 16(2): 67-69.
- [10] 武崇福, 刘东彦, 方志. FLAC3D 在采空区稳定性分析中的应用[J]. 河南理工大学学报, 2007, 26(2): 135-140.
Wu Chongfu, Liu Dongyan, Fang Zhi. Journal of Henan Polytechnic University, 2007, 26(2): 135-140.
- [11] 陈敏华, 陈增新, 张长生. FLAC 在基坑开挖分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 1437-1440.
Chen Minhua, Chen Zengxin, Zhang Changsheng. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 1437-1440.
- [12] 叶海旺, 常剑, 周磊. 基于 FLAC3D 的采场结构参数优化[J]. 金属矿山, 2010(12): 6-8.
Ye Haiwang, Chang Jian, Zhou Lei. Metal Mine, 2010(12): 6-8.
- [13] 潘启樵, 徐庆. 地下工程岩体稳定性分类现状及其发展[J]. 冶金安全, 1980(6): 42-46.
Pan Qiqiao, Xu Qing. Metallurgical Safety, 1980(6): 42-46.
- [14] 特鲁曼, 莫德利, 哈里斯, 等. 应用 Mathews 方法进行空场采矿法设计的经验[J]. 国外金属矿山, 2002, 27(1): 24-30.
Trueman R, Modley C, Harries N, et al. Foreign Metal Mining Magazine, 2002, 27(1): 24-30.
- [15] 李文刚. 国内外几种围岩分类法在天生桥工程中的应用 [J]. 水利水电技术, 1986(8): 5-12.
Li Wengang. Water Resources and Hydropower Engineering, 1986(8): 5-12.
- [16] 林景. 缓倾斜矿体采空区稳定性模拟研究[J]. 矿业工程, 2010, 8(1): 17-20.
Lin Jing. Mining Engineering, 2010, 8(1): 17-20.
- [17] 叶加冕, 蒋京名, 王李管, 等. 采场结构参数优化的数值模拟研究[J]. 中国矿业, 2010, 19(3): 61-65.
Ye Jiamian, Jiang Jingming, Wang Liguang, et al. China Mining Magazine, 2010, 19(3): 61-65.
- [18] 刘晓明, 罗周全, 张保, 等. 上向分层回采采场稳定性数值模拟研究 [J]. 矿冶工程, 2009, 29(4): 10-13.
Liu Xiaoming, Luo Zhouquan, Zhang Bao, et al. Mining and Metallurgical Engineering, 2009, 29(4): 10-13.
- [19] 陈庆发, 周科平, 胡建华, 等. 碎裂矿段开采与空区处理协同研究[J]. 中南大学学报, 2010, 41(2): 728-735.
Chen Qingfa, Zhou Keping, Hu Jianhua, et al. Journal of Central South University, 2010, 41(2): 728-735.
- [20] 杨官涛, 李夕兵, 程刚. 地下采场结构参数数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2006, 26(5): 28-32.
Yang Guantao, Li Xibing, Cheng Gang. Mining and Metallurgical Engineering, 2006, 26(5): 28-32.
- [21] 韩志型, 王宁. 急倾斜厚矿体无间柱上向水平分层充填法采场结构参数的研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 367-370.
Han Zhixing, Wang Ning. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 367-370.
- [22] 彭苏萍, 孙连英, 马春丽. 地下开采岩体变形综合分析方法及其应用 [J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(1): 80-83.
Peng Suping, Sun Lianying, Ma Chunli. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(1): 80-83.

(编辑 季超)

· 学术动态 ·



2013 年诺贝尔化学奖揭晓

2013 年 10 月 9 日, 2013 年诺贝尔化学奖揭晓。美国科学家 Martin Karplus、Michael Levitt、Arieh Warshel 因“为复杂化学系统创立了多尺度模型”而获得 2013 年诺贝尔化学奖。

20 世纪 70 年代, Martin Karplus、Michael Levitt、Arieh Warshel 为研发了解和预测化学过程的强有力的计算机程序奠定了基础。此前, 化学家在研究中只能在牛顿经典物理学与量子物理学两者之间选其一。经典物理学的优势在于计算简便, 可适用于大分子模型, 劣势则在于无法模拟化学反应过程; 量子物理学因需要庞大的计算能力, 而不能应用于小分子。这 3 位获奖者取两者之精华, 设计出了适用于经典物理学和量子物理学的方法。

详见科学网 <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2013/10/283563.shtm>。