

凡口铅锌矿多通道微震监测系统及其应用研究

李庶林^{1,2}, 尹贤刚¹, 郑文达³, Cezar Trifu⁴

(1. 长沙矿山研究院 岩体力学研究所, 湖南 长沙 410012; 2. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005;
3. 凡口铅锌矿, 广东 韶关 512325; 4. ESG, Kingston, Canada)

摘要: 微震监测技术是深部矿床地压监测的重要手段。简要概括了凡口铅锌矿深部矿床赋存条件、地压特征、地压灾害以及建立微震监测系统的必要性; 对建立的 16 通道微震监测系统的组成、监测系统的性能、微震监测范围进行了详细介绍; 通过对传感器布置优化分析, 绘出传感器布置的一个优化分析结果的震源定位等值线实例图。采用人工放炮产生的震源对微震监测系统的震源定位性能进行测试, 绘出测试结果和系统监测定位图, 并比较实际测量和系统监测分析结果, 两者结果对比表明, 在传感器阵列内的震源定位误差不大于 5 m 时, 监测系统对震源具有较高的定位精度。采用该套系统对深部采区的大爆破余震进行监测发现, 余震事件大多发生在数分钟之内, 这表明目前采区围岩的稳定性较好。

关键词: 采矿工程; 深部矿床; 微震监测; 震源定位; 余震

中图分类号: TD 35

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)12 - 2048 - 06

RESEARCH OF MULTI-CHANNEL MICROSEISMIC MONITORING SYSTEM AND ITS APPLICATION TO FANKOU LEAD-ZINC MINE

LI Shu-lin^{1, 2}, YIN Xian-gang¹, ZHENG Wen-da³, Cezar Trifu⁴

(1. *Institute of Rock Mechanics, Changsha Institute of Mining Research, Changsha 410012, China;*
2. *School of Architectural and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;*
3. *Fankou Lead-zinc Mine, Shaoguan 512325, China;* 4. *ESG, Kingston, Canada*)

Abstract: Microseismic monitoring technique is a main means of ground pressure monitoring for deep mines. The occurrence, the ground pressure characteristics and hazards of deep orebody at Fankou mine are summarized briefly. The composition and performance of 16-channel microseismic monitoring system established recently in the mine and the monitoring area are introduced in detail. Optimal analysis of layout of sensors gives the optimized results of sensors positions presented through an isogram of the source location. Source location errors are tested through artificial blasts. The test data and the monitoring source location figure are presented. The tested results are compared with those of theoretical results determined by the monitoring system. The compared results show a smaller locating error of less than 5 meters within sensors array and the perfect source locating performance of the system. Large blasts aftershocks in deep mining area are monitored by this system. The results show that all monitored aftershocks occur in a few minutes after blasts, which means rock mass surrounding the mining area has a good stability condition at present.

Key words: mining engineering; deep mine; microseismic monitoring; source location; aftershock

收稿日期: 2004 - 06 - 18; **修回日期:** 2004 - 08 - 16

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目(2001BA609A - 09 - 02)

作者简介: 李庶林(1963 -), 男, 博士, 1985年毕业于江西理工大学, 现任教授, 主要从事声发射与微地震监测技术、岩石力学和地压等方面的教学与研究工作。E-mail: shulin.li@163.com。

1 引言

深埋矿床的一个主要特点就是高地应力作用, 深埋矿床开采的关键技术问题之一即是高地应力环境诱致的地压问题, 包括采场地压和井巷地压问题, 难采难支护、甚至诱发岩爆和矿震等动力地质灾害已成为深部、高应力矿床开采的基本地压特征。微震监测技术作为一种先进的和行之有效的地压监测手段, 在国外的深井矿山和高地应力矿山的地压安全监测中得到了广泛的应用, 已成为深部地压研究和地压管理的一个基本手段, 如南非约翰内斯堡地区的深井金矿区、加拿大安大略省萨德伯里盆地的金属矿区、美国爱达荷州北部的科达伦多金属矿区和澳大利亚西部的金矿开采区的深井矿山和高应力矿山都普遍采用了微震监测技术来监测深部矿床开采地压问题^[1~3]。

近年来, 我国一批金属矿山相继跨入深部开采的行列, 一些矿山的开采深度已接近或超过 1 000 m, 如红透山铜矿的开拓深度已达 1 337 m、采矿深度达 1 137 m, 冬瓜山铜矿的开拓深度达 1 070 m, 凡口铅锌矿的开拓深度达 906 m^[4]。这些矿山的深部建设工程和采矿工程中, 深部地压大、冒顶片帮多, 支护量大、成本大大提高, 地压事故增多, 个别矿山如红透山铜矿在深部采矿过程中还出现过中等程度的岩爆、矿震和采场大脱盘等严重的地压问题。有鉴于国外深井矿山开采中的地压问题, 并结合我国深井矿山生产建设中面临的地压难题, 国家在“十五”科技攻关计划中列专项对深部地压灾害的微震监测技术进行了研究。本项研究已于近期通过了国家科技部组织的专家验收, 所建立的 16 通道全数字型微震监测系统也已正式投入使用。本文为对该项研究前期研究成果的一个基本介绍。

2 凡口铅锌矿深部矿床地压特征

凡口铅锌矿位于广东省韶关市境内, 为我国著名的地下开采的金属矿山。该矿山开采技术、开采设备先进, 机械化程度高。企业经济效益好, 矿山生产还可服务 25 a 以上。该矿由浅部采区和深部采区组成, 浅部采区分为金星岭和狮岭两个采区, 深部采区位于狮岭采区的下部, 于 20 世纪 90 年代初期进行规划建设, 2002 年开始试采。在狮岭采区, 浅部采区的主矿体赋存于 F3 主控断层的上盘, 深部

采区的主矿体赋存于 F3 断层的下盘, 埋深 580~880 m 之间。矿体以块状产出, 上、下盘围岩均为灰岩。

凡口铅锌矿深部工程的基建施工表明, 与浅部相比, 深部井巷中的地压大, 巷道冒顶片帮明显增多, 大冒顶现象时有发生, 支护工程量增加, 特别是一些混凝土发碇支护也产生了较严重的破坏, 而不得不重新采用钢筋混凝土浇注支护, 支护成本大大增加。对深部地压的前期研究表明深部地应力具有典型的构造应力特征, 最大水平应力大于垂直应力, 水平地应力与垂直地应力的比值为 1.2~1.7, 实测最大主应力达 31.2 MPa^[5]。已完成的研究表明: 深部矿、岩石较脆, 平均声传播速度达 5 699 m/s, 矿岩石都具有发生岩爆的倾向性^[6~7]。这些均体现出典型的深井开采的地压特点^[8]。

凡口铅锌矿上部矿体已采充区形成了达数百万立方米的大体积充填体, 在深部开采时这个大体积充填体自身的稳定性及其对深部矿体开采的力学作用和影响; 特别是上部矿体位于 F3 断层之上盘、深部矿体位于 F3 断层之下盘, F3 断层对上下盘矿体开采的影响、F3 断层下盘围岩的稳定性等, 都是矿山生产过程中必需研究的重大地压问题。同时, 国内深井矿山(如红透山铜矿等)在开采过程中所暴露的较严重的动力地压问题, 都是凡口铅锌矿在深部开采中值得借鉴的。因此, 为保证矿山深部矿体的安全生产, 必须对深部采区的地压问题进行深入的研究, 采用先进的地压监测手段进行地压监测, 以掌握 F3 控矿断层的稳定性, 减轻和防止深井地压危害特别是预防可能的采场的大冒落、岩爆或矿震灾害的发生。

3 多通道微震监测系统

3.1 多通道微震监测系统简介

一套微震监测系统的建立, 必须考虑以下几方面的因素^[9]: (1) 微震监测的对象; (2) 监测范围; (3) 监测对象的客观环境背景; (4) 监测应达到的目标; (5) 对监测系统的投资。在充分考虑上述因素的基础上, 考虑凡口铅锌矿深部开采方案和开采计划、深部矿体的赋存条件, 确定采用 16 通道全数字型微震监测系统, 对-500 m 以下矿体和-650 m 以上、狮岭北的主采矿体开采采场进行微震监测。本套微震监测系统总体上由地表监测站、井下数据转换站和传感器三个部分组成, 如图 1 所示。微地

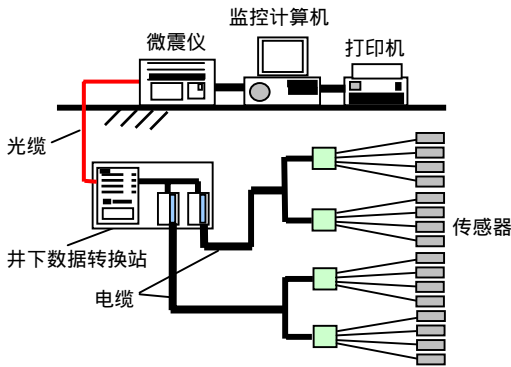


图 1 微震监测系统组成图

Fig.1 Diagram of microseismic monitoring system

震信号由传感器采集并进行信号的前置放大，经由信号电缆传至井下数据交换中心，经 A/D 转换后的数字信号和光信号再经由光缆传至地表监测站内的微地震数据采集仪，然后由与地震数据采集仪相连接的计算机进行实时监控显示，并进行各种分析。地表监测站如图 2 所示。

3.2 传感器布置的优化

在确定的通道数和传感器使用个数的前提下，为充分发挥监测系统的作用，就要合理地传感器进行空间布置与分配，以期在满足微震监测工程技术指标的条件下，使传感器阵列的监测范围最大，充分发挥监测系统的作用。同时，在这个监测范围内的主要监测技术指标(如定位精度)不得低于工程



图 2 地表监测站

Fig.2 Surface monitoring station

所需的指标。按照研究确定对震源定位误差不大于 10 m 的技术指标要求，建立被测区域的物理模型，利用对被测区域内的声传波速度的率定值，对 16 个传感器阵列内的监测范围进行理论模拟分析，并在模拟过程中不断调整传感器的位置，以使对监测范围内的震源定位精度满足技术要求，并使监测范围达到最大值。通过数值模拟优化后确定 16 个传感器分别布置在 -500, -550, -600, -650 m 中段采区，每个中段各 4 个。16 个传感器阵列覆盖的监测范围达 300 m×300 m×300 m(长×宽×高)，对这个区域内的中部厚大矿体中的微震事件的定位误差控制在 10 m 以内。图 3 所示为优化分析后得到的 -550 m 中段传感器位置和定位误差优化等值线图。

3.3 微震监测系统的功能

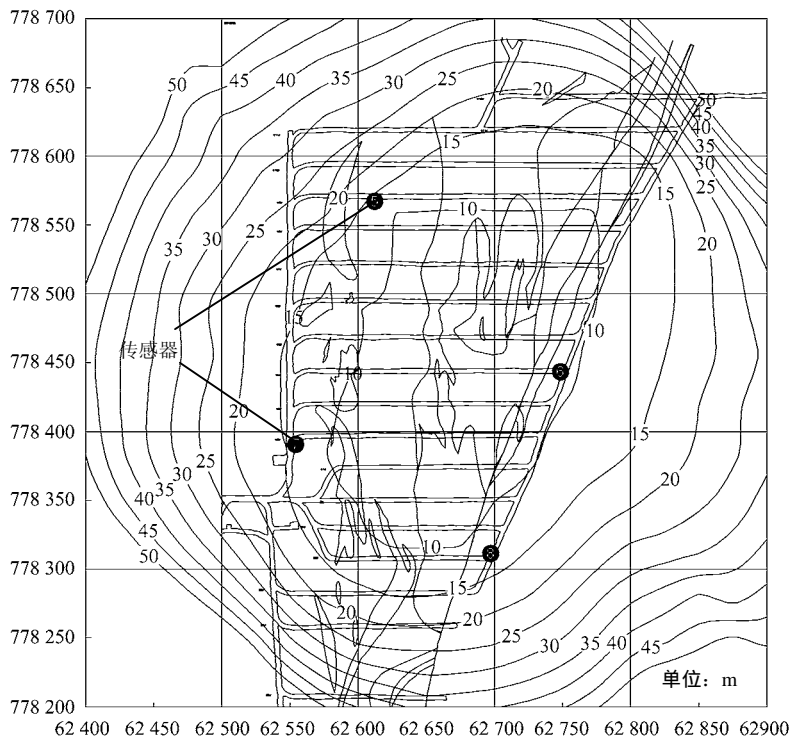


图 3 -550 m 中段传感器位置和定位误差优化等值线图

Fig.3 Optimal sensors locations and contour lines of locating error at -550 m level

本套监测系统为全数字型宽频带、全波采集监测系统，频率响应范围为几个赫兹到 5 000 Hz，可进行全天候实时监测；系统配置有可视化监测分析软件，建有三维旋转立体模型，可实时显示微震事件的空间位置，给出事件的空间坐标值，对微震事件进行在线精确定位分析；系统软件可实现对微震事件的震级、地震矩、释放应力值等多指标的计算分析，还可进行谱分析，获得多种震源参数值等。系统可测震级范围为里氏 -5.0~4.0 级^[10]。

4 定位误差分析

4.1 震源定位误差分析方法

地震事件的空间定位是矿山微地震监测的主要技术指标，是矿山地震活动监测研究的第一步，也是检测和评价一套微震检测系统应用性能的一项重要指标。地震监测定位方法较多，对应有多种震源定位误差分析方法。本研究采用高桥法(Geiger's method)分析地震空间定位误差，其方法是从一个初始试验解通过迭代计算而获得其最终的数值解。在每步迭代中，基于最小平方技术计算出一个修正矢量($\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t$)，并加到前一次的解中形成一个新的解。不断进行这种计算，直到修正矢量满足一个预先设定的误差判据。误差的分析采用时间残值的平方和的均方根表示为

$$E = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{oi} - T_{ci})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中： N 为观察到的到时个数， T_{oi} 为观察到的第 i 个传感器的到时或走时， T_{ci} 为第 i 个传感器的计算到时或走时。

在计算每个网格点的误差之后，误差实际上就被映射在三维空间上，这个空间被称为误差空间。理论上，最小的误差空间即为真实事件定位的最佳估计值。

4.2 系统定位误差的检测

为了解系统对微震事件的空间定位精度，可对系统进行实际的测试，以比较实际测量的震源位置与系统监测分析获得的震源位置之间的误差。测试方法是采用人工产生震源，测量人员实地测出震中的空间位置坐标，根据微震系统的监测结果分析计算出系统的定位坐标，再对比实测和监测分析的坐标即可得出本监测系统对震源的定位误差。

人工震源点选在 -550 m 中段，选择 2 个点，1

个点选择在传感器阵列范围内的 $N_7^{\#}$ 穿脉巷，1 个点选择在传感器阵列范围之外的 $S_3^{\#}$ 穿脉巷，通过人工放炮，产生 2 次震源，测量人员现场测定并记录放炮点的空间位置坐标；微震系统监测人员在地表进行监测，获取震源产生的波形图，通过软件实时分析来获得震源的空间位置坐标。对 $N_7^{\#}$ 穿脉巷内的震源进行定位的传感器个数为 16 个，对 $S_3^{\#}$ 穿脉巷内的震源进行定位的传感器个数为 14 个，其中有 2 个传感器因干扰其结果不理想，在分析时不予考虑。两者的结果比较见表 1。从人工震源定位检测的结果，可知系统对震源的定位准确性较高，误差小，特别是在传感器分布的阵列之内，实测结果与微震监测系统监测分析的结果相接近，其误差值不大于 5 m。图 4 所示为 $N_7^{\#}$ 穿脉巷内人工震源产生的地震波形，图 5 所示为对 2 个震源点的空间定位的可视化图。

表 1 人工震源定位结果分析

Table 1 Locating results of artificial seismic sources

测点	实测坐标 /m	系统监测坐标 /m	误差 /m	震级 /级	传感器数 /个	弹性波速 /($m \cdot s^{-1}$)
$N_7^{\#}$ 穿脉巷	N 2 778 523.19	N 2 778 523.7	—	—	—	—
	E 462 626.74	E 462 627.7	2.40	-2.6	16	5 700
	H -548.29	H -552.8	—	—	—	—
$S_3^{\#}$ 穿脉巷	N 2 778 281.95	N 2 778 283.0	—	—	—	—
	E 462 562.04	E 462 556.3	4.15	-2.7	14	5 700
	H -547.60	H -554.0	—	—	—	—

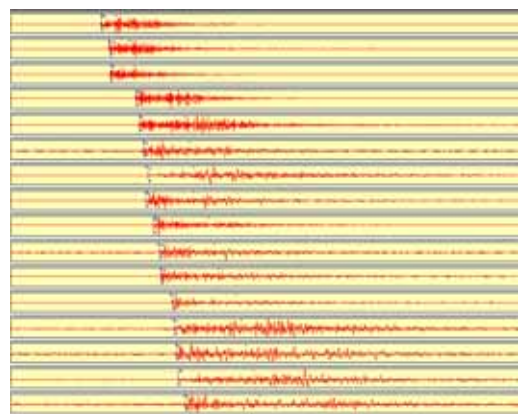


图 4 $N_7^{\#}$ 穿脉人工震源波形图

Fig.4 Artificial microseismic records in cross-cut $N_7^{\#}$

5 大爆破余震监测应用

国内外已有的生产经验和研究表明，岩爆发生最频繁的时间是工作面爆破后的 2 h 之内，在这个

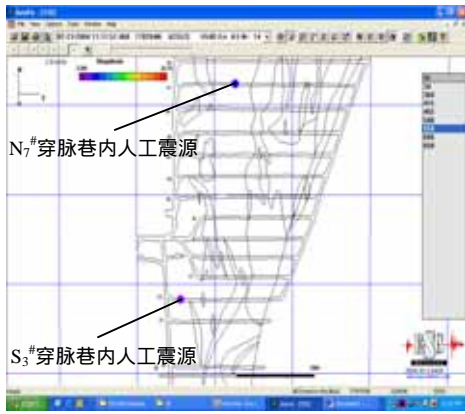


图5 人工震源定位图

Fig.5 Artificial source locations

时间段内岩爆的发生次数比其他时间段 2 h 内发生岩爆的次数高出数倍到数十倍；统计研究还表明，爆破与微震之间也存在一定的关系，南非深部金矿开采研究表明，在爆破后的 2 h 之内，微震事件发生频繁，这之后则迅速减少。因此，对爆破后的余震进行监测，对于了解采场围岩的稳定性、防止重大灾害的发生有重要的作用。

采用本系统，对凡口铅锌矿深部采区大爆破后的余震进行了多次监测。图 6 所示为一次典型的大爆破和发生的一次余震事件的空间定位图，图 7 所示为此次余震事件的波形图。该次余震的震级为 -3.7，发生时间在大爆破后 191.4 s。监测结果表明，深部采场大爆破后的余震不多，所发生的余震事件也在爆破后的几分钟内产生，未发生半小时后的微震事件。说明目前深部采场围岩的稳定性较好，发生在半小时后的大震事件的可能性不大。

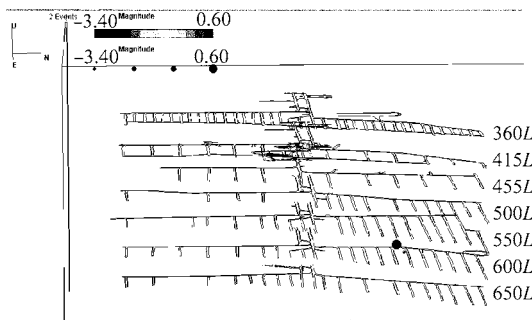


图6 大爆破和余震事件空间定位图

Fig.6 Spatial locations for a large blast and its aftershock

6 结 语

本研究建立起来的 16 通道微震监测系统的技术性能、系统监测的技术指标等已达到国际领先水平，采用人工震源对系统的监测效果进行的测试结

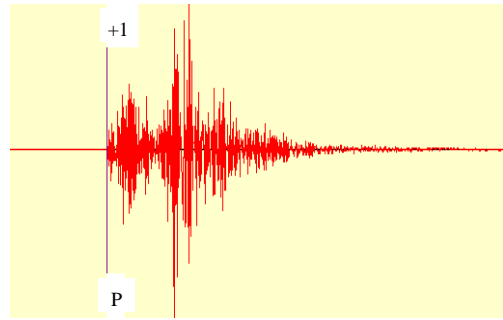


图7 余震波形图

Fig.7 Aftershock wave

果表明在传感器阵列范围内的震源定位误差不大于 5 m，该项指标已经大大优于研究时确定的对震源误差不大于 10 m 的要求。采用本套监测系统，对深部采区的大爆破余震进行了初步的监测应用研究，并取得较好的监测效果。根据本系统铺设光缆的传输能力、系统的硬件环境等，可在现有的基础上根据凡口铅锌矿深部生产的需要将本套系统从 16 个通道扩充到 32, 48 或 64 个通道数。作为国家“十五”科技攻关项目，本研究已通过国家科技部组织的专家验收。本监测系统运行正常，各项技术性能达到了研究的预期目标。该系统的建成，将对凡口铅锌矿深部采区的地压监测、生产安全管理、可能的井下灾害的安全救助等提供基本技术手段。充分利用本监测系统的监测数据，进行进一步的深入研究，对凡口铅锌矿深部矿床开采中的防灾减灾和安全生产将起到积极的作用。本套微震监测系统为我国矿山行业第一套多通道、全数字型微震监测系统，它的正式投入使用也标志着我国矿山地压灾害的监测实现了全天候、数字化、信息化和自动化，它将会有力地推动我国深井矿山地压监测技术和安全管理水平的发展。

致谢 本研究得到东北大学王泳嘉教授的亲临指导和帮助，参加本项目研究的人员还有：杨念哥、许毓海、黄沛生、杜向红、张杰、Ian Leslie 等，在此表示衷心感谢！

参考文献(References) :

- [1] Potvin Y, Hudyma M R. Seismic monitoring in highly mechanized hard rock mines in Canada and Australia[A]. In: Rock Burst and Seismicity in Mines[C]. Johannesburg: SAIMM, 2001. 267 - 280.
- [2] Morrison D M, Macdonald P. Rockbursts at Inco mines[A]. In: Fairhurst ed. Rock Burst and Seismicity in Mines[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1990. 263 - 267.
- [3] Green R W E. Instrumentation networks for observation of

- mine-induced seismicity[A]. In: Rockburst and Seismicity in Mines[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1990. 165 - 169.
- [4] 李庶林. 深井硬岩岩爆倾向性与岩层控制技术研究[博士学位论文][D]. 沈阳: 东北大学, 2000.(Li Shulin. Study on rock burst proneness and strata control technology for deep mines with hard rock[Ph. D. Thesis][D]. Shenyang: Northeastern University, 2000.(in Chinese))
- [5] 李庶林, 杨念哥. 凡口铅锌矿深部矿床地应力测试[J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(4): 15 - 17.(Li Shulin, Yang Niange. Ground stress measurement for deep orebody of Fankou mine[J]. Mining Research and Development, 2003, 23(4): 15 - 17.(in Chinese))
- [6] 李庶林, 冯夏庭, 王泳嘉, 等. 深井硬岩岩爆倾向性评价[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2001, 22(1): 61 - 63.(Li Shulin, Feng Xiating, Wang Yongjia, et al. Evaluation of rock burst proneness in a deep hard rock mine[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2001, 22(1): 61 - 63.(in Chinese))
- [7] 王春来, 徐必根, 李庶林. 凡口铅锌矿深部岩体声波测试研究[J]. 采矿技术, 2003, 3(1): 41 - 42.(Wang Chunlai, Xu Bigen, Li Shulin. Sound wave measurement of rock mass for Fankou deep orebody[J]. Chinese Mining Technology, 2003, 3(1): 41 - 42.(in Chinese))
- [8] Gibowicz S J, Kijko A. An Introduction to Mining Seismology[M]. San Diego: Academic Press, 1994.
- [9] Blake W. Design considerations for seismic monitoring systems[A]. In: Rockbursts and Seismicity in Mines[C]. Johannesburg: SAIMM, 1984. 79 - 82.
- [10] ESG Co.. ESG Solutions-user's Guide[M]. Kingston: [s. n.], 2002.

关于开展纪念中国岩石力学与工程学会成立 20 周年有关活动的通知

中国岩石力学与工程学会各专业委员会、工作委员会、各地方学会、分会及学会各位专家、学者们:

中国岩石力学与工程学会是在已故的陈宗基先生倡导下,通过岩石力学界众多专家、学者的共同努力,经中国科协批准,于 1985 年 6 月 25 日正式成立。20 年来,学会在上级主管部门中国科协和学会各届理事会的领导下,规模由小变大,能力由弱变强,得到全面发展。在推进学科发展、队伍建设和保证工程建设的经济与安全等诸多方面都发挥了积极作用,在国内外产生了重要影响,学术地位日益提高。为了纪念学会成立 20 周年,经理事长办公会议研究,决定开展以下几项活动。

一、出版《回顾与展望》——纪念学会成立 20 周年

(一)、邀请学会的老前辈、老专家撰写回忆录,以回顾学会创立初期、情景、学会发展过程、如何为国民经济建设服务以及某一具体工作和某项活动等。

(二)、各专业委员会撰写本专业发展状况

希望学会各部门安排一人撰写纪念活动的材料,每篇文章的字数原则上不超过 5 000 字。并将撰写文稿于 2005 年 6 月 20 日前寄学会秘书处(100029,北京 9825 信箱,中国岩石力学与工程学会)。

二、结合 2005 年 11 月在杭州召开的《边坡、基坑与地下工程新技术、新方法研讨会》,开展学会成立 20 周年的纪念活动。表彰先进集体、先进个人,发放《回顾与展望》纪念册,并请老、中、青代表在会上作有关纪念报告。

三、开展表彰先进集体、先进个人活动

(一)、先进集体的评先方法

1. 时间范围: 1999 年 - 2005 年(即第四届以来);
2. 参加评选部门: 和专业和委员会、工作委员会、各地方学会及分会;
3. 申报方式: 各有关部门均申报。申请书中应说明各自工作业绩,对学会工作及学科发展的贡献、对国民经济建设的贡献;内容应实事求是、重点突出,有一定的数字依据(文字限制在 4 000~5 000 字)。

(二)、先进个人的评选方法

1. 评选标准: 热爱祖国,热爱岩石力学与工程事业,热心学会工作,具有创新、求实协作的科学精神和突出的工作成绩。

2. 时间范围: 1999 年 - 2005 年

3. 推荐办法: 各地方学会、分会及各专业委员会和教委、青委各推荐 1 人。推荐书中需附一份被推荐人的业绩材料,并附有各部门研究意见(加盖公章)及被推荐人的照片若干。

(三)、所有推荐先进的材料在 2005 年 6 月 20 日前寄学会秘书处。

中国岩石力学与工程学会
2005 年 5 月 11 日