

露天转地下开采地表沉陷预计及安全性分析

王新民, 柯愈贤, 胡威, 鄢德波

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 为了最大限度地开采地下资源并保证地表建构筑物的安全, 运用 MIDAS/GTS (岩土与隧道分析系统) 建立三维模型, 对新桥矿露天转地下开采诱发的地表沉降和移动进行数值模拟研究。结果表明, 露天转地下开采影响范围内最大变形值: 地表倾斜、曲率及水平变形最大值分别为 0.640mm/m、 $0.012 \times 10^{-3}/m$ 和 0.503mm/m, 低于工程范围内建(构)筑物保护等级对应的允许变形值, 露天转地下开采不会诱发危及民居等地面建(构)筑物稳定性的移动和变形, 为矿山地表沉降预测和安全分析提供了理论依据。

关键词 露天转地下; 地表沉降; MIDAS/GTS 软件; 地表变形值

中图分类号 TD853

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.25.002

Prediction and Safety Analysis for Ground Subsidence of Transition from Open Pit to Underground Mining

WANG Xinmin, KE Yuxian, HU Wei, YAN Debo

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

Abstract In order to maximize mining the underground resources and ensure the safety of the buildings and structures located in ground, the ground subsidence and movement induced by transition from open pit to underground mining of Xinqiao Mine was studied based on a three-dimensional model established by MIDAS/GTS. Analyse results showed that the largest value of surface tilt, curvature and horizontal deformation are 0.640mm/m, $0.012 \times 10^{-3}/m$ and 0.503mm/m, which lower than the structures and buildings objects protection level and the allowable deformation value corresponding. The ground subsidence and movement induced by transition from open pit to underground mining will don't endanger the buildings and structures located in ground, which provide a theoretical basis for prediction and safety analysis of Xinqiao Mine's ground subsidence.

Keywords transition from open pit to underground mining; ground movement; MIDAS/GTS software; values of deformation

0 引言

矿山开采活动破坏了岩体内部原有的力学平衡状态, 使原有岩层发生变形、位移, 破坏其完整性。当矿体的开采规模超过一定范围, 起始于采场附近的破坏和移动将会扩展到地表, 形成地表沉陷^[1-2]。为了最大限度地回收地下矿产资源并确保地表建(构)筑物的安全, 必须对地下开采引起的地表沉陷预测。目前, 国内外广泛使用的地表沉陷预计方法有概率积分法、典型曲线法和剖面函数法等^[3-4]。但由于矿体赋存条

件复杂各异, 岩层的变形特征差异较大, 现有的理论都具有一定的局限性, 不能完全解释岩层移动与地面沉陷机理和预测变形值^[5]。然而随着计算机和软件技术的发展, 数值分析不断创新, 各类数值分析软件运用于对地表沉降的分析中, 如 FLAC, ANSYS, SAP84, MIDAS 等^[6-8]。其中, MIDAS 是一种较好地应用于三维情况下开采沉陷有限元系统, 为预测地表沉降及沉降值提供了有利的工具。鉴于此, 笔者运用大型有限元非线性分析软件 MIDAS/GTS 分不同工况建立三维有限元数

收稿日期: 2012-06-12; 修回日期: 2012-07-20

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2008BAB32B03)

作者简介: 王新民, 教授, 研究方向为采矿与充填技术, 电子邮箱: wxm1958@126.com

值模型,对新桥矿露天转地下规模化开采引起的地表沉陷进行分析。

1 工程概况

新桥矿是一座露天地下联合开采的矿山,由于露天转地下开采范围内矿体属典型的“三下”资源,随着露天转入地下开采范围扩展,部分地段深入地表铁路、公路、民居房等重要建(构)筑物下方,对其安全性影响不容忽视。因此必须分析地下开采对地表建(构)筑物稳定性的影响,将地下开采活动对地表重要建(构)筑物的影响控制在允许范围内。

新桥矿露天转地下开采范围为-330—-156m 水平之间的矿体,主要开采对象为 1# 矿体。矿体似层状,走向北东,倾向北西,平均厚度 27m,平均倾角 45°;矿体顶板主要为大理岩化灰岩、大理岩,局部为闪长岩、闪长玢岩等;矿体底板主要为石英砂岩,少部分为粉砂岩(含泥质),开采范围内岩层分布见图 1。露天坑下留设 24m 境界顶柱,露天转地下采用两步骤回采的上向水平分层充填采矿法,圈定的地表移动带范围内地表重要建(构)筑物分布于矿体上盘的 3#—17# 勘探线之间。

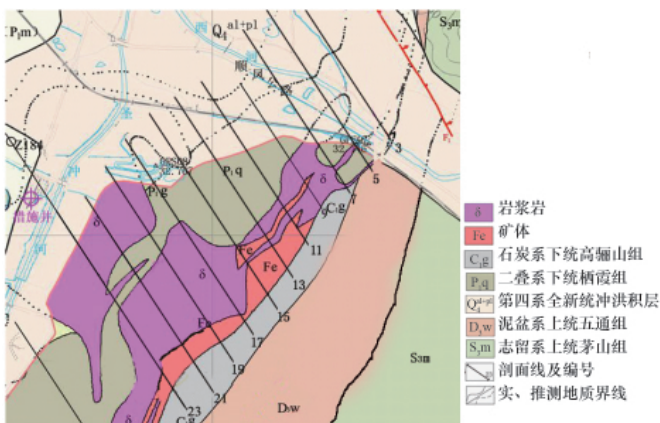


图 1 开采范围内矿岩层分布示意

Fig. 1 The schematic diagram of the distribution of ore and rock layers in the mining area

2 模型的建立

2.1 基本假设和前提

鉴于地下开采技术条件复杂多变,为便于建模和分析计算,需做出如下假设:(1) 矿岩体假设为理想弹塑性体,在屈服点以后,随着塑性流动,材料强度和体积无改变;(2) 矿体和围岩为局部均质、各向同性的材料,塑性流动不改变材料各向同性;(3) 考虑到岩石的脆性,分析中涉及到的所有物理量均与时间无关;(4) 不考虑应变硬化(或软化);(5) 根据弹塑性力学理论,开挖后应力变化的影响范围为所开挖范围的 3—5 倍,为了满足计算需要和保证计算精度,本次计算采用的模型尺寸取为所开采范围的 3—5 倍;(6) 模型底面为全约

束,侧面只可以在竖直方向上有变形;(7) 考虑到有限元程序的局限性,假设场地内无构造活动的影响,原岩地应力为大地静力场型,各岩层之间为整合接触,岩层内部为连续介质,模型中不考虑地下水活动的影响;(8) 计算选定的载荷将不随单元方向变化而改变,始终保持它们的最初的方向,表面载荷作用在变形单元表面法向,且可被用来模拟“跟随”力,大小就是上覆表土层的重量。

2.2 三维模型的建立

开采后走向方向将能达到充分采动,且露天转地下开采地表移动带范围内需保护建(构)筑物全部分布于矿体上盘的 3#—17# 勘探线之间,为了尽可能地保护上部建筑安全,充分利用矿产资源,根据上述原则和矿体赋存的实际情况以及规划的开采状况,利用 MIDAS/GTS 有限元分析软件以各勘探线剖面图为基础建立了三维数值模型,见图 2。计算采用的模型尺寸取为所开采范围的 3—5 倍,模型取长×宽×高为 1850m×1745m×1000m,共划分 529458 个单元,94781 个节点。应力场初始化时,模型的上边界地面为自由边界,模型的前后、左右边界均施加水平法向约束,底边界均施加固定约束。

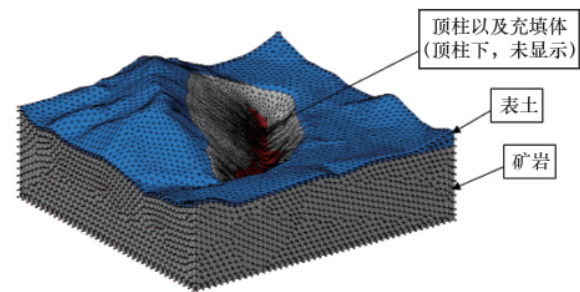


图 2 MIDAS/GTS 三维数值模型

Fig. 2 Three-dimensional model established by MIDAS/GTS

2.3 矿岩及充填体力学参数

模拟计算采用弹塑性模型,选用由 Mohr-Coulomb 和 Mises 屈服准则推广而来的 Druck-Prager 强度屈服准则^[9-11],在岩石、土壤的有限元分析中采用 DP 准则可以获得精确的结果。结合矿山实际情况,模拟过程中矿岩力学参数见表 1。

2.4 数值模拟结果

矿山开采并充填后,由于开采扰动以及充填体的物理力学性质较原有岩石差,引起岩移并波及地表,因此将会在开采矿体上部地表形成一个较开采面积大得多的地表移动盆地^[12]。因此,数值模拟分别计算出各勘探线开采前后地表各点的竖向与水平位移值,然后根据各点的竖向位移差值和水平位移差值分别计算地表的倾斜、曲率和水平变形值^[13-14]。

地表倾斜变形是指相邻点在竖直方向的相对移动量与两相邻点间水平距离的比值,它反映了盆地沿某一方向的坡度,是引起位于其范围内的建(构)筑物产生歪斜的主要原因。地表倾斜值为

表 1 矿岩与充填体的物理力学参数表

Table 1 Mechanical property parameters of ore rocks and filling body

类别	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	抗拉强度 /MPa	抗压强度 /MPa	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
上盘围岩(大理岩化灰岩、大理岩)	25	0.141	1.06	42	1.06	15.4	2700
下盘围岩(石英砂岩)	42	0.142	1.47	44	1.82	25.6	2700
矿体(黄铁矿)	18	0.141	1.31	45	1.31	16.9	3830
矿柱充填体	0.615	0.28	0.35	46.5	0.14(28d)	1.04	2000
矿房充填体	0.615	0.30	0.06	53.1	0.02(28d)	0.2	1800
黏土	10	0.3	0.02	16	0.002	0.02	1900
混凝土	30	0.2	3.8	55	2.4	45	2500

注:表中数据均为平均值。

Note: Values in the table are means.

$$i_n = \frac{S_{n+1} - S_n}{L_{n-n+1}} \quad (1)$$

式中, i_n 为地表点 n 的倾斜值, mm/m; S_n 为地表点 n 的下沉值, mm; L_{n-n+1} 分别为地表点 n 与点 $n+1$ 的水平距离, m。

曲率变形是两相邻线段的倾斜差与两线段中间点的水平距离的比值, 表示地表倾斜的变化程度, 它反映观测断面上的弯曲程度。曲率变形使地表由原来的平面变成曲面, 是建(构)筑物产生附加的弯矩和剪力致使建(构)筑物出现裂缝的关键指标。地表曲率值为

$$K_n = \frac{i_{n-1} - i_n}{0.5 \times (L_{n-1-n} + L_{n-n+1})} \quad (2)$$

式中, K_n 为地表点 n 的曲率值, mm/m²。

水平变形是相邻两点的水平移动差值与两点间水平距离的比值, 反映相邻两测点间单位长度的水平移动差值。水平变形对建(构)筑物产生拉伸或压缩变形, 导致建(构)筑物产生裂缝, 是引起建(构)筑物破坏的重要因素。地表水平变

形值为

$$\varepsilon_n = \frac{H_{n+1} - H_n}{L_{n-n+1}} \quad (3)$$

式中, ε_n 为地表点 n 点水平移变形值, mm/m; H_n 为地表点 n 的水平位移值, mm。

由于勘探线所表示的矿体情况, 最接近实际情况, 为了使结果更为准确, 选取 3#—17# 勘探线作为研究对象, 然后通过 MIDAS/GTS“剖断面”命令, 截取各勘探线模拟位移分析图(图 3 和图 4 分别为 14# 勘探线垂直方向(y)和水平方向(x)位移等值图, 图中黑色线框内为开采后的充填区域), 然后通过“提取结果”命令可得各勘探线地表各节点沉降值和水平位移值, 再通过以上计算公式可得各节点的移动与变形结果。3#—17# 勘探线地表移动与变形最大值汇总于表 2, 图 5 和图 6 分别为 9# 和 14# 勘探线的移动与变形曲线。

通过以上数值模拟分析得出的新桥矿露天转地下开采影响范围内最大变形值: 地表倾斜 i 、曲率 K 及水平变形 ε 最

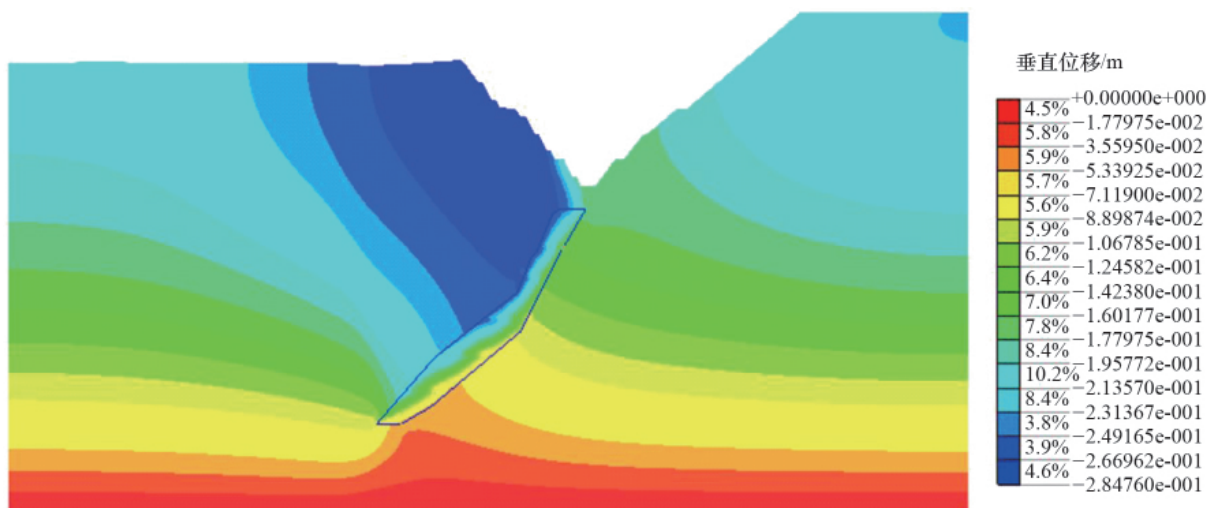


图 3 14# 勘探线垂直方向位移等值图

Fig. 3 Displacement countour map of vertical direction of No. 14 exploration line

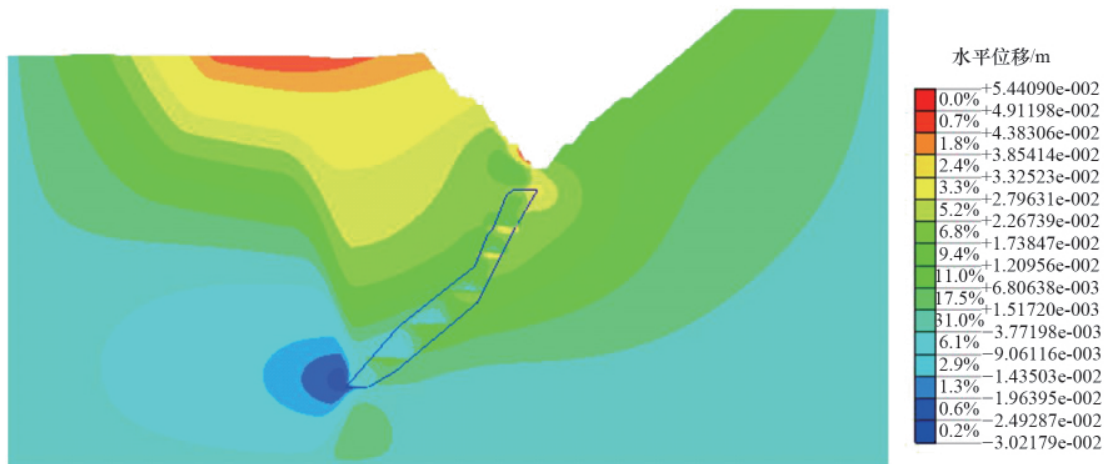


图 4 14# 勘探线水平方向位移等值图

Fig. 4 Displacement countour map of horigontal direction of No.14 exploration line

表 2 3#—17# 勘探线地表移动与变形最大值结果

Table 2 Maximum values of ground movement and deformation of No. 3 to No. 17 exploration lines

勘探线	沉降值 /mm	水平位移值/mm	倾斜值 / $(\text{mm}\cdot\text{m}^{-1})$	曲率值 / $(10^{-3}\cdot\text{m}^{-1})$	水平变形 / $(\text{mm}\cdot\text{m}^{-1})$
3#	31.9	10.78	0.165	0.002	0.093
5#	16.6	5.99	0.069	0.001	0.042
7#	26.2	10.67	0.107	0.001	0.071
8#	25.4	7.29	0.061	0.001	0.058
9#	36.8	13.19	0.084	0.001	0.072
10#	134.1	54.96	0.245	0.003	0.172
11#	197.4	76.92	0.336	0.004	0.325
12#	223.9	108.54	0.245	0.012	0.495
13#	232.2	55.20	0.245	0.003	0.200
14#	251.0	118.48	0.491	0.008	0.380
15#	276.5	122.73	0.640	0.010	0.503
16#	162.1	91.04	0.353	0.011	0.377
17#	114.6	69.9	0.281	0.006	0.284
最大值	276.5	122.7	0.640	0.012	0.503

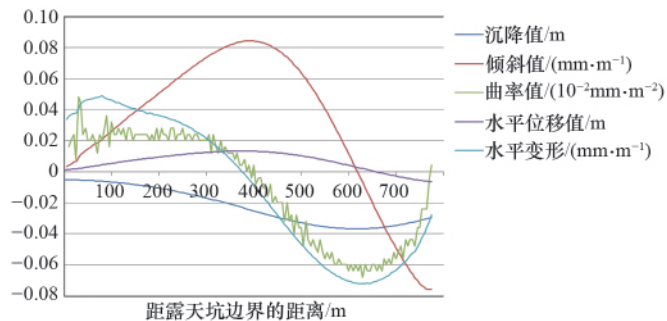


图 5 9# 勘探线地表移动与变形曲线

Fig. 5 Curves of ground movement and deformation of No. 9 exploration line

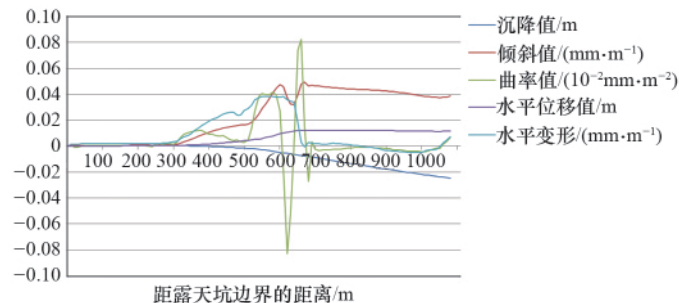


图 6 14# 勘探线地表移动与变形曲线

Fig. 6 Curves of ground movement and deformation of No.14 exploration line

大值分别为 0.640mm/m、 $0.012\times 10^{-3}/\text{m}$ 和 0.503mm/m。

3 安全性分析

3.1 建(构)筑物保护等级与安全评判标准

矿山影响范围内民居大部分为砖混结构、公路为县级公路、铁路属于支线铁路,综合国内外各类金属矿山以及煤矿建构筑物保护等级划分的标准和经验,可以确定新桥矿露天转地下开采影响范围内构筑物保护等级为Ⅲ级,其允许变形值为倾斜 i ,曲率 K 和水平变形 ε 分别为 10mm/m、 $0.24\times 10^{-3}/\text{m}$,6mm/m^[5]。

3.2 安全性分析结果

通过以上数值模拟分析得出的新桥矿露天转地下开采影响范围内最大变形值,地表倾斜 i ,曲率 K 及水平变形 ε 最大值分别为 0.640mm/m、 $0.012\times 10^{-3}/\text{m}$ 和 0.503mm/m,远低于Ⅲ级保护的允许变形值(甚至小于最高级Ⅰ级保护标准),说明露天转地下开采不会对地表建构筑物造成破坏。

4 结论

运用 MIDAS/GTS 建立新桥矿露天转地下开采三维模型,

对露天转地开采诱发的地表变形进行了数值模拟,以分析露天转地下开采活动对地表建(构)筑物的安全性影响。

(1) MIDAS/GTS 数值模拟得到新桥矿露天转地下开采诱发的地表倾斜 i 、曲率 K 及水平变形 ε 最大值分别为 0.640mm/m、 $0.012 \times 10^{-3}/m$ 和 0.503mm/m。

(2) 确定了新桥矿露天转地下开采影响范围内地表建构筑物保护等级为Ⅲ级,允许变形值为倾斜 i 、曲率 K 和水平变形 ε 分别为 10mm/m、 $0.24 \times 10^{-3}/m$ 、6mm/m。

(3) 数值模拟计算的地表变形值都未超过Ⅲ级保护的允许变形值(甚至远小于最高级Ⅰ级保护标准),露天转地下开采不会诱发危及地面建(构)筑物稳定性的移动和变形,为矿山地表沉降预测和安全分析提供了理论依据。

参考文献 (References)

- [1] 何国清, 杨伦, 凌赓娣, 等. 矿山开采沉陷学 [M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1994: 3-5.
He Guoqing, Yang Lun, Ling Gendi, et al. Mining subsidence [M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 1994: 3-5.
- [2] 徐永圻. 采矿学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 98-99.
Xu Yongqi. Mining [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003: 98-99.
- [3] 陈雨, 张振文, 张彦敏. 基于概率积分法的地面沉陷灾害预测[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(S1): 143-145.
Chen Yu, Zhang Zhenwen, Zhang Yanmin. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(S1): 143-145.
- [4] 郑彬, 郭文兵, 桑培森, 等. 我国开采沉陷动态过程的研究现状与展望[J]. 现代矿业, 2009, 25(3): 11-14.
Zhen Bin, Guo Wenbing, Sang Peimiao, et al. Modern Mining, 2009, 25(3): 11-14.
- [5] 穆伟刚, 孙世国, 冯少杰. 地下开采诱发地表沉降预测方法的研究[J]. 金属矿山, 2010(10): 10-12.
Mu Weigang, Sun Shiguo, Feng Shaojie. Metal Mine, 2010(10): 10-12.
- [6] 孙晓光, 周华强, 王光伟, 等. 固体废物膏体充填岩层控制的数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(1): 117-121, 126.
Sun Xiaoguang, Zhou Huaqiang, Wang Guangwei, et al. Journal of

- Mining & Safety Engineering, 2007, 24(1): 117-121, 126.
- [7] 孙超, 薄景山, 刘红帅, 等. 采空区地表沉降影响因素研究 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39(3): 498-502.
Sun Chao, Bo Jingshan, Liu Hongshuai, et al. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009, 39(3): 498-502.
- [8] 乔志春, 夏军武, 郭广礼, 等. 老采空区上方大型工业建筑抗变形措施研究[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(6): 593-596.
Qiao Zhichun, Xia Junwu, Guo Guangli, et al. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(6): 593-596.
- [9] 周先贵, 曹金国. 岩土力学数值方法研究进展[J]. 建筑技术开发, 2002, 29(8): 15-18.
Zhou Xiangui, Cao Jinguo. Building Technique Development, 2002, 29(8): 15-18.
- [10] 张练, 丁秀丽, 付敬. 清江水布垭地下厂房围岩稳定三维分析[J]. 岩土力学, 2003, 10(24): 254-258.
Zhang Lian, Ding Xiuli, Fu Jing. Rock and Soil Mechanics, 2003, 10(24): 254-258.
- [11] 张成良, 侯克鹏, 李克钢, 等. 开采引起上覆公路地表沉降与变形的数值分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(S1): 635-639.
Zhang Chengliang, Hou Kepeng, Li Kegang, et al. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S1): 635-639.
- [12] 王鸿, 张弥, 常怀民. 采空区地表移动盆地对埋地管道的影响分析[J]. 石油工程建设, 2008, 34(2): 23-26.
Wang Hong, Zhang Mi, Chang Huaimin. China Petroleum Pipeline Engineering, 2008, 34(2): 23-26.
- [13] Hu J, Yan X, Zhou K. Study on the deformation and safety in the process of shallow buried tunnel construction [C]//Proceedings of the 2009 International Conference on Engineering Computation. Washington DC: IEEE Computer Society, 2009: 123-126.
- [14] Hu J. Calculation of the limiting deformation in stopping and filling by the finite element method and its influence upon the volumn[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2001, 26(2): 47-50.
- [15] 于广明, 杨伦, 王忠林. 砖石结构建筑物破坏等级划分方法新探[J]. 阜新矿业学院学报: 自然科学版, 1993, 12(2): 41-45
Yu Guangmin, Yang Lun, Wang Zhonglin. Journal of Fuxin Mining Institution: Natural Science Edition, 1993, 12(2): 41-45.

(责任编辑 吴晓丽)

· 科学共同体介绍 ·

中国内燃机学会

中国内燃机学会 (Chinese Society for Internal Combustion Engines) 是中国科协于 1981 年 3 月批准成立的。它是全国内燃机科技工作者自愿组成的非营利的学术性的法人社会团体, 是中国科学技术协会的组成部分。张逢时、史绍熙、何光远、李守仁等历任学会理事长。

中国内燃机学会是跨部门、跨行业、跨地区、横向联系非常广泛的群众性科技团体, 其横向联系的有关行业达 14 个。学会目前拥有会员 15000 余名, 遍及全国 28

个省、市自治区和直辖市, 其中有 18 个省、市成立了内燃机学会; 学会下设 9 个分会和一个编辑委员会。

中国内燃机学会 1982 年 4 月加入国际内燃机学会 (CIMAC), 使中国成为国际内燃机学会的会员国。国际内燃机学会每隔 3 年组织召开一届国际内燃机会议, 目前已举办至 26 届。学会曾于 1989 年 6 月在天津承办“第 18 届国际内燃机会议”, 于 1999 年在上海举办了“西玛克日”、“国际内燃机学术研讨会”和“国际内燃机展览

会”; 并将于 2013 年 5 月在上海承办“第 27 届国际内燃机会议”。

中国内燃机学会在内燃机界每年评选表彰一次“突出贡献奖”和“史绍熙人才奖”; 每届理事会任期内评选、表彰一次“杰出成就奖”。学会组织出版《内燃机学报》、《内燃机工程》、《内燃机》等学术刊物。

中国内燃机学会现任第七届理事会 (2010.10—2015.10) 理事长为张小虞, 秘书长为阳树毅。

(责任编辑 秦政)