

深部主溜井垮塌的有限元分析及实测验证

罗周全, 贾楠, 谢承煜, 谭浪浪

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 针对某地下金属矿山深部主溜井垮塌破坏的工程实际, 运用非线性有限元分析软件 Midas/GTS, 对该主溜井破坏情况进行数值分析; 根据溜井及巷道位置关系建立有限元分析模型, 进行计算并做二维剖切; 根据其最大位移、等效塑性应变及应力特征, 初步确定溜井主要垮塌标高范围为-455~-464m, 主要垮塌区域为溜井西北部, 井壁最大位移大于 10m, 围岩最大压应力达 41.750MPa。在此基础上, 采用空区三维激光探测系统 (CMS), 对垮塌主溜井进行三维激光探测; 运用 Surpac 软件获取的探测数据, 建立溜井垮塌区三维可视化模型, 获取垮塌区三维空间信息; 根据横剖面的垮塌面积和偏离中心线最大垮塌距离, 精确确定溜井主要垮塌标高范围为-457~-463m, 水平最大垮塌面积 92.92m², 主要垮塌方向为北偏西 28°, 最大长轴 14.5m, 最小短轴 8.1m, 垮塌总体积 1035m³。综合分析表明, 有限元分析的溜井垮塌情况与实测结果基本一致, 两者相互补充验证, 可准确确定主溜井受力及垮塌破坏状况, 为深部主溜井修复方案的合理制订奠定基础。

关键词 深部主溜井; 主溜井垮塌; 有限元分析; CMS 实测

中图分类号 X936

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.23.003

Finite Element Analysis and Measured Validation of Deep Main Ore Pass Collapse

LUO Zhouquan, JIA Nan, XIE Chengyu, TAN Langlang

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

Abstract According to the engineering practice of deep main ore pass collapse in an underground metal mine, finite element analysis method was used to analysis the damage situation of this main ore pass. The serious collapsed range was determined from -455 to -464m level preliminarily, in which the maximum displacement of the shaft wall is more than 10m. The main collapse area is in the northwest of the main ore pass, and the maximum compressive stress is 41.750MPa. On this basis, the real three-dimensional data of collapse area was achieved by CMS detection and three-dimensional visual model of the deep main ore pass collapse area. It was determined that, the main collapsed ranges from -457 to -463m level, and the horizontal maximum collapse area is 92.92m², with main direction of collapse 28° north by west. The major axis is 14.5m, and the minor is 8.1m. The total collapse volume is 1035m³. Comprehensive analysis showed, the finite element analysis result is basically anastomosed with the measured result, and both of the methods verified and complemented mutually. The stress collapse damage of main ore pass is determined accurately and it establishes a firm foundation for formulating a reasonable restoration scheme of deep main ore pass.

Keywords deep main ore pass; main ore pass collapse; finite element analysis; CMS measurement

0 引言

地下金属矿山开采中主溜井是最重要的矿石运输工程之一^[1], 负责矿石的集储和转运, 其稳定通畅与否不仅影响矿山生产的正常进行, 对整个溜破系统的影响也不容忽视^[2,3]。主溜井由于溜放矿石的冲击磨损等因素易发生变形垮塌破坏^[4], 准确掌握主溜井垮塌状况是合理制订修复方案的重要

前提。目前, 研究溜井破坏变形问题的方法主要有理论解析法^[5]、试验法^[6]、数值模拟分析方法^[7], 但存在的问题是预测的变形精度均不理想。在数值分析的基础上, 运用 CMS 实测验证数值分析结果, 可以获取精确的溜井垮塌区域三维信息。

深部 5# 溜井是某地下金属矿山的主运矿溜井之一, 井筒标高 -360~-650m, 高 290m, 主要承担着 -400、-455、-500m 3

收稿日期: 2013-05-02; 修回日期: 2013-07-05

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目 (2012BAK09B05)

作者简介: 罗周全, 教授, 研究方向为采矿及矿山安全数字化理论与技术, 电子信箱: lzq505@hotmail.com

个中段的运输任务及矿石储存。该溜井因中段不断倒矿冲击井筒壁而严重受损,局部发生较大规模片帮垮落,大量垮塌废石落入溜井内,严重影响了-500m水平以上放矿工作。

为准确分析该金属矿山深部主溜井在生产过程中发生垮塌破坏的状况,运用有限元分析软件 Midas/GTS 对主溜井产生的破坏和垮塌范围进行有限元分析,并使用空区三维激光探测系统 (Cavity Monitoring System,CMS)^[8-10] 实施三维探测,采用 Surpac 软件建立实际溜井垮塌三维模型^[11,12],两者相互结合、补充,准确分析主溜井垮塌实际状况,为深部主溜井垮塌分析及修复提供有益借鉴和技术支持。

1 溜井垮塌有限元分析

1.1 分析模型构建

Midas/GTS 是具有强大前后处理功能的非线性三维有限元分析软件^[13,14],广泛应用于岩体、建筑物稳定性、破坏情况等方面的研究。为有效掌握溜井破坏情况,运用 Midas/GTS 对 5# 主溜井垮塌进行数值分析。

溜井和巷道位置之间的相互关系及所建立的有限元分析模型如图 1 所示。矿岩密度为 $3.1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,弹性模量为 37.7 GPa,泊松比为 0.24,抗压强度为 5.1MPa,抗拉强度为 0.12 MPa,黏聚力为 16.01MPa,内摩擦角为 46.5° 。模型两侧采用法向变形约束条件,底部则采用全约束条件,数值分析中采用弹塑性本构模型和 Drucker-Prager 屈服准则^[15],初始应力由现场测得的原岩应力反演生成^[16,17]。



(a) -455m 中段溜井和巷道位置 (a) -455m middle part ubiety of roadway and ore pass
(b) 有限元分析模型 (b) Finite element analysis model

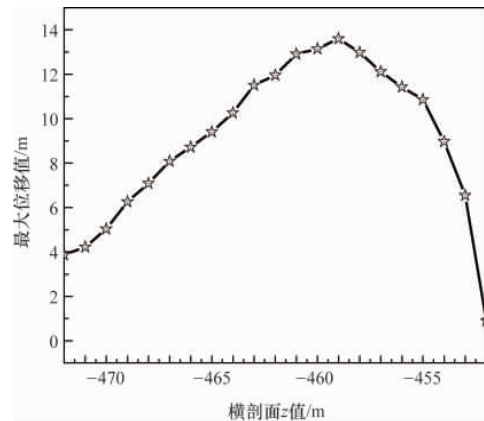
图 1 巷道和溜井位置关系及有限元分析模型

Fig. 1 Ubiety and finite element analysis model of roadway and ore pass

1.2 溜井垮塌模拟分析

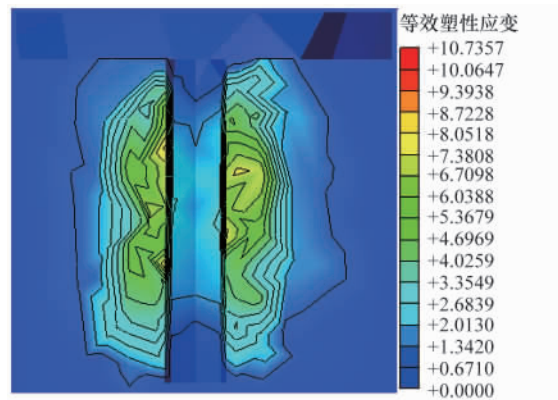
通过模拟计算,对三维模型在 z 方向上垮塌区域进行二维剖切,获取其开挖及放矿冲击后-451~-473m 标高内每隔 1m 生成的横剖面井壁最大位移值,图 2 是最大位移变化趋势及溜井纵剖面等效塑性应变。

从图 2(a)所示的井壁最大位移值可以看出,由-452m 标高处开始向下,位移值呈不规则上升趋势,至-459m 处达到最大值 13.599m,垮塌较为严重区域主要在-455~-464m 标高范围内,位移大于 10m。由图 2(b)所示的等效塑性应变纵剖面图也验证了主要垮塌范围的正确性。



(a) 井壁最大位移

(a) Maximum displacement of shaft wall



(b) 等效塑性应变

(b) Equivalent plastic strain

图 2 最大位移值及等效塑性应变

Fig. 2 Maximum displacement and equivalent plastic strain

图 3 为最大位移水平面即 $z=-459\text{m}$ 标高处横剖面位移云图。溜井在开挖时,周围岩石受到开挖扰动,且放矿工作中井壁受到矿岩的冲击载荷,导致井壁的变形破坏。从图 3 可以看出,溜井垮塌区的最大位移主要分布在北西方向,由图 3(a)可见,溜井垮塌区最大位移量在溜井北侧,最大位移分量为 13.596m。图 4 所示为 $z=-459\text{m}$ 标高处围岩最小、最大应力特征。由图 4 可以看出,最大位移横剖面上最小主应力为 5.255~6.924MPa,最大主应力为 36.416~41.750MPa,溜井井壁均出现了较大范围的应力集中现象,溜井北侧应力集中最为明显,导致原溜井稳定性差,致使溜井大面积垮塌。

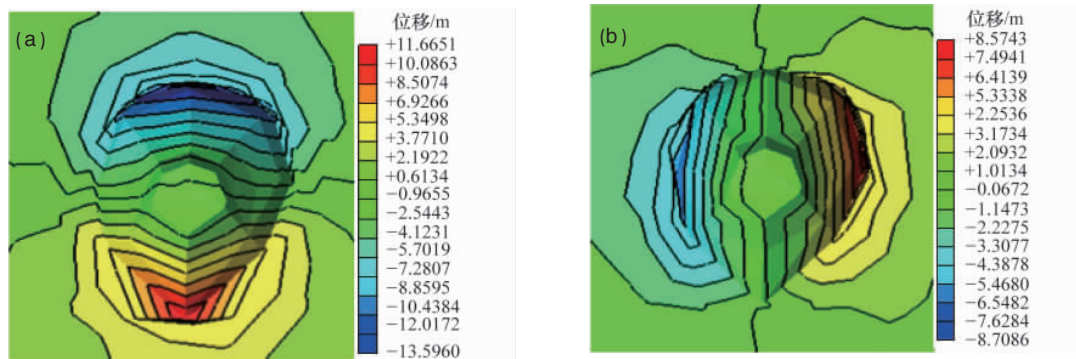


图3 x方向(a)和y方向(b)溜井位移云图

Fig. 3 Displacement of ore pass in x (a) and y (b) direction

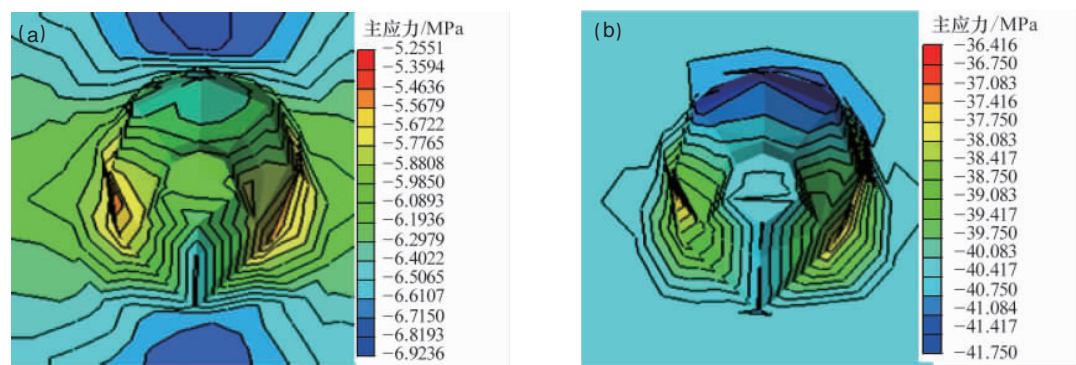


图4 最小(a)和最大(b)溜井主应力云图(z=-459m)

Fig. 4 Minimum (a) and Maximum (b) principal stress nephogram of ore pass (z=-459m)

2 溜井垮塌 CMS 三维可视化实验验证

2.1 垮塌区三维实测模型建立

应用空区激光探测系统(CMS),在-455m中段卸矿硐室处进行溜井垮塌区三维探测;运用 Surpac 软件获取的三维探测数据,建立垮塌区三维模型。建立溜井垮塌前模型并与实测垮塌模型进行复合后,形成溜井垮塌区的三维探测模型如图5所示。

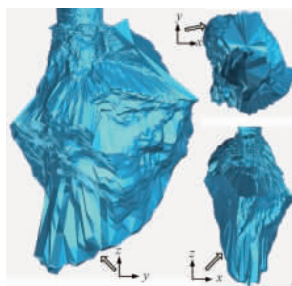


图5 垮塌区探测模型三视角显示

Fig. 5 Three-dimensional analysis of collapse area detecting model

对所建立模型进行横向和纵向剖切,首先沿溜井三维模型从-451~-473m标高,每隔1m生成一个横剖面,计算各横剖面面积与最大宽度值,并将生成的剖面与溜井垮塌前设计边界进行对比;然后结合探测溜井垮塌区位置,每隔1m生成一个溜井垮塌区纵剖面,同样以生成的溜井垮塌区纵剖面与

溜井垮塌前的设计边界进行对比。

2.2 溜井垮塌区域分析

根据剖切生成的横切面,对各个横剖面的垮塌面积、偏离中心线最大垮塌距离进行统计,其溜井垮塌区各横剖面面积变化趋势、溜井垮塌区各横剖面偏离中心线最大垮塌距离变化见表1。

表1 垮塌区横剖面面积与偏离中心线最大垮塌距离 (剖面间隔为1m)

Table 1 Cross section area and deviation distance of collapse area (septum of section is 1m)

横剖面 z 值/m	剖面面积/m ²	偏离距离/m	横剖面 z 值/m	剖面面积/m ²	偏离距离/m
-452	2.26	2.02	-463	71.53	8.16
-453	16.12	5.29	-464	61.45	7.44
-454	30.09	6.69	-465	52.09	6.94
-455	41.53	7.78	-466	45.86	6.55
-456	54.07	8.11	-467	40.17	6.18
-457	69.58	8.51	-468	33.39	5.60
-458	88.17	9.01	-469	28.34	5.12
-459	92.92	9.37	-470	22.55	4.41
-460	90.94	9.05	-471	13.90	3.94
-461	88.30	8.97	-472	10.49	3.74
-462	80.48	8.42	-473	0.54	—

由表 1 可知,CMS 探测结果与数值分析结果非常相近相似,垮塌断面由-452m 标高开始向下逐渐增大,到-459m 标高后开始变小,垮塌范围最严重的情况发生在-457~-463m,垮塌断面面积均超过了 69.5m²,且垮塌形状不规则,偏离原设计溜井中心线垮塌距离大于 8m,垮塌偏离距离和垮塌面积最大发生在-459m 处。

图 6 为溜井最大垮塌横剖面及最大垮塌纵剖面示意图。

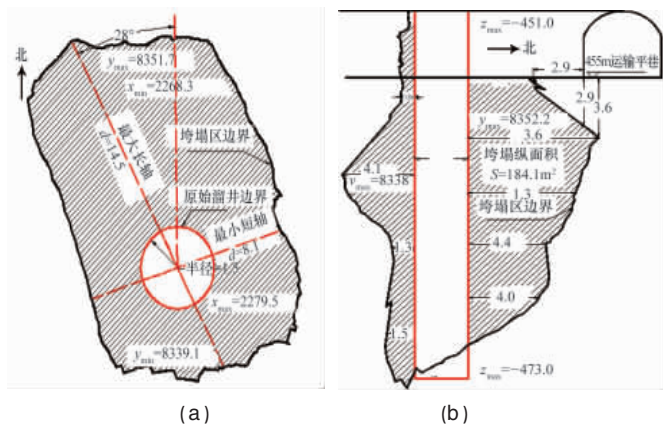


图 6 溜井最大垮塌横(a)、纵(b)剖面(单位:m)

Fig. 6 Maximum collapse cross (a) and longitudinal (b) section of ore pass (unit: m)

由最大垮塌横剖面可以看出,在标高为-459m 的位置,垮塌的面积最大,经计算垮塌面积为 92.92m²(扣除设计直径 3m 的溜井断面面积),主要垮塌方向为北偏西 28°,其最大的垮塌距离高达 13.52m,最小垮塌距离为 8.14m。

同理,在所有的纵剖面中,位于 $x=2274.47\text{m}$ 的位置,垮塌后纵断面最大达 184.1m²,距离井筒边缘最大宽度达 7m。由溜井最大垮塌纵剖面可以看出,垮塌范围距-455m 运输平巷底板的距离只有 2.9m,而最远的垮塌处距-455m 运输平巷底板的垂直厚度也只有 3.6m,且延伸到了运输平巷的水平 0.8m,这影响了-455m 运输平巷的稳定性及人员安全,因此需尽快对该段溜井进行修复。

运用所建立三维模型计算获得溜井在-451~-473m 标高段垮塌体积为 1035m³。

2.3 数值分析与实测结果对比

图 7 为 5# 主溜井垮塌区各横剖面上偏离原溜井设计中心线的三维模拟值与实际探测值对比图。

由图 7 可知,5# 主溜井垮塌区横剖面偏离溜井设计中心线距离探测值与有限元分析值基本吻合,结合图 2、图 3 综合分析,有限元分析结果可较真实地反映溜井断面的垮塌状况。对比两种方法,CMS 实测结果可以更直观地给出垮塌区的三维信息(如垮塌三维空间形态及体积等),而有限元分析可以有效获取 CMS 探测所不能得到的溜井受力状态信息,两者进行了很好地相互补充和验证。

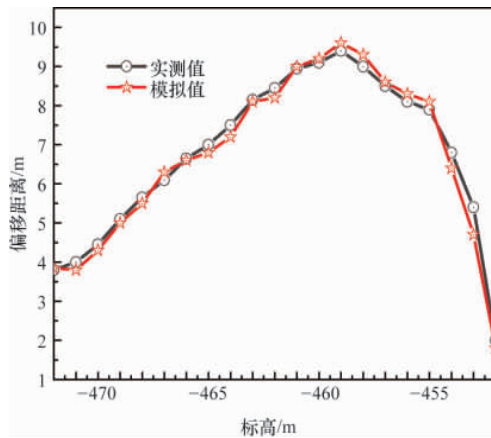


图 7 有限元分析及三维探测偏离距离对比

Fig. 7 Contrast diagram between finite element analysis and 3-D detection of collapse area

3 结论

(1) 运用有限元分析方法对主溜井垮塌破坏进行数值分析,初步确定主要垮塌标高范围在-455~-464m,井壁最大位移大于 10m,西北部为溜井主要垮塌区域,围岩最大压应力达 41.750MPa,应力集中现象致使溜井大面积垮塌。

(2) 采用 CMS 对垮塌主溜井进行实测验证,建立了直观的溜井垮塌三维可视化模型,精确定溜井主要垮塌标高范围为-457~-463m,最大垮塌横剖面面积为 92.92m²,最大长轴 14.5m,最小短轴 8.1m,研究范围内垮塌体积为 1035m³。

(3) 两种方法分析得出的溜井主要垮塌范围、垮塌形态等结果基本一致,CMS 实测结果可以直观地给出垮塌区的三维信息,而数值分析可以有效分析 CMS 探测不到的溜井受力等信息,两者很好地相互补充验证,从而为更准确地获取溜井垮塌破坏状况,合理制订修复方案奠定坚实基础。

参考文献 (References)

[1] 明世祥. 地下金属矿山主溜井变形破坏机理分析 [J]. 金属矿山, 2004, 1(15): 5-8.
Ming Shixiang. Metal Mine, 2004, 1(15): 5-8.

[2] 吕向东. 高深直溜井结构优化与应用技术研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2002: 2-7.
Lü Xiangdong. High-deep chute construction optimize and application technique research [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2002: 2-7.

[3] 康武雄. 锰钢板在矿山溜井支护中的应用效果[J]. 甘肃冶金, 2011, 33(6): 38-42.
Kang Wuxiong. Gansu Metallurgy, 2011, 33(6): 38-42.

[4] 高永涛, 王金安, 宋卫东, 等. 一种治理主溜井特大塌方的新方法——托斗法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 540-542.
Gao Yongtao, Wang Jinan, Song Weidong, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 540-542.

- [5] 琚宜文, 刘宏伟, 王桂梁, 等. 卸压套壁法加固井壁的力学机制与工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 773-777.
Ju Yiwen, Liu Hongwei, Wang Guiliang, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 773-777.
- [6] Badr A, Ashraf A F, Platten A K. Statistical variations in impact resistance of polypropylene fibre-reinforced concrete [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(11): 1909-1916.
- [7] Yang R S, Jiang L L, Guo D M. Numerical simulation on pass choking-up treatment adopting blasting method [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2009, 18(2): 167-170.
- [8] Jarosz A, Shepherd L. Application of cavity monitoring system for the control of dilution and ore loss in open stopes [C]//11th International Congress of ISM. Cracow, Poland, 2000: 155-164.
- [9] Lupton J D. Cavity monitoring system and slope analysis [C]// International MassMin 2004 Conference, Santiago, Chile, August 22-25, 2004: 56-62.
- [10] Sagawa Y, Yamatomi J. Slope design in the Hishikari Gold Mine, Japan, by using numerical analysis[C]// Handley M, Stacey D. 10th Congress of the ISRM. Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003, 2: 995-1000.
- [11] Liu X, Luo Z, Yang B, et al. Visible calculation of mining index based on slope 3D surveying and block modeling [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(2): 139-144.
- [12] Zimmerman R W. Coupling in poroelasticity and thermoelasticity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(1): 79-87.
- [13] 王新民, 柯愈贤, 胡威露, 等. 露天转地下开采地表沉陷预计及安全性分析[J]. 科技导报, 2012, 30(25): 27-30.
Wang Xinmin, Ke Yuxian, Hu Weilu, et al. Science & Technology Review, 2012, 30(25): 27-30.
- [14] 刘红帅, 年廷凯, 万少石. 三维边坡稳定性分析中的边界约束效应[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, 40(3): 639-672.
Liu Hongshuai, Nian Tingkai, Wan Shaoshi. Effect of boundary constraint condition on the stability analysis of 3D slope [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2010, 40(3): 639-672.
- [15] Saada Z, Maghous S, Gamier D. Stability analysis of rock slopes subjected to seepage forces using the modified Hoek-Brown criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 55: 45-54.
- [16] 谢承煜, 罗周全, 贾楠, 等. 缓斜极厚矿体开采安全切顶厚度研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(2): 278-284.
Xie Chengyu, Luo Zhouquan, Jia Nan, et al. Safety roof cutting thickness in mining gently inclined and extremely thick ore body[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(2): 278-284.
- [17] Ramulu M, Chakraborty A K, Sitharam T G. Damage assessment of basaltic rock mass due to repeated blasting [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2009, 24(2): 208-221.

(责任编辑 侯澄芝)

·学术动态·



中国科协 2012 年度事业发展统计公报: 组织建设

截止 2012 年底, 各级科协组织 3181 个, 中国科协所属全国学会 181 个、委托管理学会 17 个, 各省级科协所属省级学会 3828 个。

各级科协从业人员 38780 人; 全国学会从业人员 3219 人, 其中, 中国科协所属全国学会从业人员 3041 人; 省级学会从业人员 16029 人。

全国学会个人会员 433 万人; 省级学会个人会员 644 万人。

全国学会团体会员 52724 个; 省级学会团体会员 186065 个。

中国科协基层组织 61004 个。其中, 企业科协 20968 个, 个人会员 345 万人; 高等院校科协 574 个, 个人会员 41 万人; 街道科协 (社区科协) 8235 个, 个人会员 57 万人; 乡镇科协 31227 个, 个人会员 211 万人。

高新技术开发区企业科协组织 603 个, 占企业科协总数的 3%; 技术经济开发区企业科协组织 766 个, 占 4%。

农村专业技术协会 113068 个, 个人会员 1468 万人。其中, 在民政部门注册的农技协 29669 个, 占农技协总数的 26%。

截止 2012 年底, 在基层直接为公众提供科普服务的专兼职科普工作者 43.6 万人。

详情见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/14908615.html>。