

# 金属矿床地下自动开采的前沿技术及其发展途径

李仲学,李翠平,刘双跃

(北京科技大学土木与环境工程学院,北京 100083)

[摘要] 通过总结和分析国外有关金属矿床地下无人开采或自动开采技术研究、开发、应用等方面的进展情况,对金属矿床地下自动开采关键前沿技术及其在我国的发展途径提出一些思考。

[关键词] 金属矿床;自动采矿;无人采矿;无人矿山

[中图分类号] TD803 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)11-0016-05

为了社会经济的可持续发展,大力提升生产力水平,高效开发利用矿产资源,全面保障生产安全,努力实现零环境影响已经成为矿业界新世纪的奋斗目标。“无人矿山”就是矿业科技工作者和矿山管理工作者的美好憧憬之一<sup>[1]</sup>。人们希望未来能够在井下安全场所或地面遥控采矿设备,乃至全面采用无人操作的智能设备进行井下开采,使地下采矿“无人化”,逐步实现“无人矿山”。

实际上,作为金属矿床无人开采技术核心之一的无轨设备自动采矿技术,引入采矿工程实践已有20年的历史。若考虑到地下轨道运输设备自动化技术的应用,金属矿床的地下自动开采技术早在20世纪70年代初便开始逐步发展。

## 1 地下自动采矿技术的进展

自20世纪80年代中后期开始,加拿大诺兰达(Noranda)技术中心基于蒙特利尔大学实验室的原型设计,开始自动采矿技术的研究与开发,为金属矿床地下开采研制了多种自动化设备,包括LHD(铲运机)和卡车的光学导航系统、LHD遥控辅助装载系统、LHD自动行走系统等<sup>[2]</sup>。这些技术及系统最初于20世纪90年代中期通过STAS公司在Noranda的Bell Allard矿和Brunswick矿的矿石铲装过程中推广应用,前者由自动采矿技术实现的矿石产量曾一度达到70%,而后者曾一度达到80%<sup>[3]</sup>。2001

年,Noranda还在Brunswick矿的部分采场运输卡车上试用了自动采矿系统SIAM,取得了理想效果<sup>[4]</sup>。Noranda的自动采矿技术及系统可以在不同的采矿条件下独立运用,也可以用于中央集群多车遥控系统,较好地适应了Noranda多个矿山开采、不同生产规模和复杂矿体条件的实际需要。

20世纪90年代初,芬兰赫尔辛基理工大学以产学研合作的方式,通过了为期5年的“智能矿山技术”计划,开展自动采矿技术研究。内容包括全矿范围的信息与数据采集技术、高速双向实时监控通信技术、计算机化信息管理与生产计划控技术、自动采矿与设备遥控技术,以及这些技术系统与公共信息网络的通信接口技术。该研究计划的有关成果在为期3年的后续“智能矿山”实施计划及奥托昆普(Outokumpu Oy)公司凯米(Kemi)铬矿的设计及生产中得到应用<sup>[5,6]</sup>。

1994年,澳大利亚联邦科学和工业研究组织(CSIRO)启动了采矿机器人研究项目,开展用于矿山采掘及装运作业的复杂传感系统和高级遥控系统的研究。CSIRO研发了用于索斗铲“巡航”操作的回转辅助(DSA)系统和用于索斗铲精确卸载的数字地表模型(DTM);还开发了用于地下开采的LHD自动控制系统。其技术成果已由卡特彼勒(Caterpillar)进行商业化,形成了MINEGEMTM系统,装备有该技术的LHD称为Smart Loader<sup>[7,8]</sup>。

[收稿日期] 2006-10-09;修回日期 2006-12-11

[作者简介] 李仲学(1957-),男,吉林德惠市人,博士,北京科技大学土木与环境工程学院教授,博士生导师,E-mail:zxli@pagschl.ustb.edu.cn

1996年,加拿大英柯(Inco,国际镍业公司)、芬兰汤姆洛克(Tamrock)和挪威太诺(Dyno)合作发起了一个采矿自动化计划(MAP),投资2 270万美元,开发、示范自动采矿技术并使其商业化,目的是有效地开发深部的或难采的矿产资源,减少交接班及进出矿井等无效工时,提高劳动生产率,降低作业成本,保障矿工安全。该计划得到了加拿大自然资源部采矿与矿物科学实验室(CANMET - MMSL)的支持,获得350万美元的配套经费并由实验室负责项目管理。专家们研究了在矿井缺氧条件下柴油机的工况、排污、井下爆破和柴油机废气对无人采矿作业的影响,无人矿井气候条件及其对红外遥控设备生产率的影响,以及围岩对采矿的响应机理等问题<sup>[9, 10]</sup>。

Inco进一步研发了高级通信系统、采矿设备定位与导航系统、机器人掘进与回采、高级工艺与监控等方面的自动采矿新技术,包括井下LHD、凿岩台车等机动设备的遥控技术,并在Stobie矿和Creighton矿进行应用,成为地下采矿自动化的先驱<sup>[11, 12]</sup>。该公司应用离散事件仿真技术及QUEST仿真系统研究了在给定运输方式下遥控LHD的运行速度及控制策略对LHD生产率的影响,考虑了LHD过程参数包括装载时间、卸载时间、重车运行速度、空车运行速度、LHD满载系数等,分析了遥控操作员同时操控的LHD台数、采场运输距离、操作员素质等因素对LHD的空闲及等待时间和生产率的影响<sup>[13]</sup>;应用离散事件仿真技术及WITNESS仿真系统研究了自动采矿工艺模型中的穿爆系统<sup>[14]</sup>;还与劳伦森(Laurentian)大学合作,应用Auto Mod仿真系统研究了采矿方法与遥控设备之间的相互作用关系,包括穿孔、爆破和装载等工序与开采顺序之间的相互影响<sup>[15]</sup>。

Inco还与其他有关机构合作,于2000年开始了一个井下爆破自动装药项目(ELAP)的研究与开发工作,系统原型已于2002年通过井下工业试验,有关技术正在进一步完善中<sup>[16, 17]</sup>。

瑞典卢基矿业公司(LKAB)的基律纳矿(Kiruna)早在20世纪70年代初期便开始实施轨道运输的自动控制技术,自90年代后期又陆续采用了遥控凿岩台车和遥控LHD技术<sup>[18, 19]</sup>。

南非德比尔斯(De Beers)的芬齐(Finsch)金刚石矿也成功地应用了自动采矿技术<sup>[20]</sup>。该矿在2000年露天开采转地下开采的工程设计中,投资2 000万美元采用了山特维克之汤姆洛克(Sandvik Tamrock)的自动采矿技术系统,包括自动卡车运输

系统的设计、建设、设备购置和安装。该矿采用崩落法放矿、LHD和卡车联合装运系统,其中卡车系统由地面遥控,通过无线射频系统(MineLan)与矿井主干通信网连接。卡车自动控制系统的采用,使井下卡车运行速度和设备生产率得以提高;地表操作员能够同时操控多台卡车,使井下人员的数量显著减少,从而极大地改善了矿山安全生产状况、提高了劳动生产率。目前Sandvik Tamrock正在Finsch矿实施LHD自动系统,计划投资4 100万美元。

在美国,卡内基梅隆大学在美国宇航局(NASA)和乔伊的资助下,对地下煤矿连续采煤机的自动定位与导航技术进行了研究,开发出了可供商业化的研究成果<sup>[21]</sup>;科罗拉多大学研究了井下矿石爆堆的体视成像模型,以便有效地控制LHD自动装载<sup>[22]</sup>。

此外,在加拿大萨斯喀彻温省,铀矿通过遥控作业使矿工免受辐射;在澳大利亚的艾萨山矿和南非的一些深部开采矿井,矿山通过遥控作业使矿工免受深井高温和潮湿空气侵害;在智利,国家铜业公司(Codelco)的埃尔特尼恩特矿通过遥控作业使矿工免受岩爆威胁<sup>[23]</sup>。

在中国,梅山铁矿等企业已经考虑采用遥控凿岩台车,使设备操作员摆脱穿孔作业过程中产生的高强度噪音危害。

古德生、云庆夏、王运敏等在阐述金属矿床地下开采科学技术发展的趋势时认为,无人采矿将是21世纪中国采矿工艺技术发展的若干重要领域之一<sup>[24~26]</sup>。

国家科学技术部已将地下无人采矿技术及相关装备列为“十一五”期间“八六三”计划首批启动专题课题的研究方向及内容之一,进一步明示了无人采矿技术在我国发展的趋势。

## 2 地下自动采矿的前沿技术

目前,国内外无人采矿技术仍处于“无人矿山”的初级阶段。在此阶段,无人采矿的核心技术仍然是自动采矿技术,主要包括数据采集与监视控制(SCADA)、采矿设备遥控和数字通信等关键技术,而采矿工艺设计及巷道布置形式尚无明显突破,井下无人设备的维护、意外事件的处理、地表遥控人员与地下作业人员的交互等问题都迫切需要进一步研究。未来新一代高级无人采矿技术还必将涉及到采矿工艺形式及生产过程自身的变革,采矿设计、采场参数、井巷布置、巷道数量及几何尺寸、采掘及落矿方式、井下气候以及井下设备参数、灵敏度和可靠性

等问题都需要进一步探索。

信息及通信技术的进步,必将推动无人采矿技术从现行的以传统采矿工艺自动化为核心的自动采矿或遥控采矿,向以先进传感器及检测监控系统、智能采矿设备、高速数字通信网络、新型采矿工艺过程等集成化为主要技术特征的“无人矿山”发展。因此,金属矿床地下无人开采或自动开采的前沿技术主要包括以下4个方面。

### 2.1 先进传感及检测监控技术

井下环境要素诸如温度、湿度、空气组分、采场地压、巷道围岩变形等变量的检测监控技术及仪器;矿岩爆堆的块度及其分布、有用矿物品位及其分布等参数的即时分析技术及方法;基于井下环境的空间距离识别、定位及导航技术,诸如埋线导航系统、无源光导系统、有源光导系统、墙壁跟踪系统、惯性导航技术及装备,都是智能采矿设备运行及工艺过程控制的前提条件。因此,发展地下自动采矿需要研究与开发相应的先进传感技术及检测监控技术。

### 2.2 采矿设备遥控及智能化技术

井下凿岩台车、铲运机、卡车等地下采矿主体设备的自动化程度是地下自动采矿水平的重要标志之一,通过不断提高采矿设备的自动化水平,可以减少井下作业人员的数量、消除井下人员运输等无效工时、避免井下人员职业健康与安全危害,提高设备及劳动生产率。因此,发展地下自动采矿需要研究与开发凿岩台车、铲运机、卡车等设备在采场的置位、定位和在穿孔、爆破、铲装、运输、卸载等生产工艺环节中的作业遥控与智能控制技术,以及井下采矿设备工况的智能监测技术、故障预防技术、失效安全技术等。

### 2.3 高速数字通信网络技术

井下通信条件与地面通信条件差异很大,主要问题有:井下物理环境恶劣,黑暗、潮湿、腐蚀性强,自然破坏因素多、概率大;井下通信设施布设空间有限;普遍存在无线通信屏障。一般而言,现有的井下通信基础设施参差不齐,且从总体上看技术水平比较落后,难以满足自动采矿技术发展的需要。因此发展地下自动采矿需要研究适于井下通信的高速数字通信网络技术,其主要技术要求包括:**a.** 要能够同时满足井下与地面通信的需要和井下采区之间通信的需求,要考虑带宽的自动调节以适应井下采区、采场或作业场所数量经常增减对带宽再分配的需求,要在考虑井下应用环境的同时采纳工业标准或地面标准以降低井下通信设施成本;**b.** 要能够实现 PLC

之间的通信、PLC 与自动设备之间的通信、视频图像的通信、局域网通信、有线电话通信,以及无线语音、视频和自动设备控制信号通信;**c.** 要适应井下通信网络随着开采进行而物理延伸的需要,考虑即插即用;**d.** 要考虑井下通信技术规范化及标准化,利于推广应用;**e.** 通信物理设施及通信效果对井下环境的敏感度要低。

### 2.4 地下自动采矿新工艺技术

采矿工艺技术的发展与采矿装备技术水平密切相关,高新技术的发展必将促进采矿工艺技术的创新。譬如,无底柱分段崩落采矿工艺是为了适应特定的井下围岩条件而产生的,但是采矿设备技术水平的提高,极大地推进了该采矿法的发展及其适应范围。因此,采矿自动控制水平的提高必将进一步促进采矿工艺及生产过程自身的变革,采矿规划及设计、井巷布置、采场参数包括段高及进路间距、巷道数量及几何尺寸、采掘及落矿方式等工艺技术都将随着采矿装备水平的提高而不断发展,井下气候条件与通风、供电、压气、照明等辅助设施相关的技术、设计、安装及运行管理等问题都需要进一步探索。

## 3 地下自动采矿技术的发展途径

无人采矿或无人矿山的实现将是一个漫长的演变过程,但作为发展无人采矿或无人矿山的基础技术——自动采矿技术,在国外的的发展已经有 20 余年的历史。随着我国信息技术水平的不断提高、生产安全标准的日益加强和矿产资源开采条件的渐趋恶化,发展自动采矿技术已经提上了我国矿产资源开发利用科学研究及技术开发工作的日程。国家科学技术部在“十一五”期间“八六三”计划首批启动的专题课题指南中,将无人采矿技术及相关装备的研究列为探索导向类和目标导向类课题的主要研究方向及内容之一,标志着我国自动采矿技术的发展有了一个良好的开端。

研究与发展自动采矿技术乃至进一步发展无人矿山,需要在以下几方面协同开展工作。

### 3.1 政府支持相关的基础与应用基础研究

国家科学技术部已经通过“八六三”计划启动了无人采矿技术的探索 and 开发,其他有关政府部门或机构,譬如国家教育部和国家自然科学基金委员会等也应在有关的科研发展计划中对发展自动采矿技术予以考虑,大力支持高等学校和科研机构开展基础研究和应用基础研究,以形成一个在自动采矿

基础研究、应用基础研究及跨学科交叉研究方面具有原始创新及技术原型开发能力的支撑体系。

### 3.2 企业主导相关的技术创新

有关矿产资源开发利用的国有大型科技型企业(相关的科研院所等)与国有大型生产型企业要密切合作,在实施国家中长期科技发展规划、建设有关矿产资源开发领域的国家工程实验室或工程(技术研究)中心及行业工程中心等国家技术开发基地的过程中,把地下自动采矿技术作为主要的技术发展方向之一,根据矿山企业科技发展、矿产资源开发利用及矿产品市场竞争的需求,针对适当的矿床开采条件,积极引进、开发与应用国外先进的自动采矿技术与装备,通过工业试验和生产实践,实施模拟创新与集成创新,进而有效地发展企业在自动采矿技术领域的自主创新能力。

### 3.3 高校建设相关的学科及人才保障体系

高等学校特别是科学研究能力较强的研究型大学,要加强自动采矿学科体系的建设,在实施国家中长期科技发展规划、建设有关矿产资源开发领域的国家重点实验室及部门实验室等国家研究实验基地的过程中,把地下自动采矿工艺及理论作为主要的学科发展方向之一,加强产学研合作,大力推进学科交叉,通过建立先进的学科体系及有效的学术管理机制、实施教授治学,发展有利于提高原始创新能力的人才培养体系,培育具有交叉学科学术能力、适应自动采矿科学技术发展的人才队伍。

### 3.4 重视学科间的交叉融合

自动采矿技术具有高度学科交叉性质,涉及自动化技术、机器人技术、传感技术、通信技术、机械制造技术、采矿工艺技术等学科领域,在自动采矿技术的研究与开发过程中,要重视学科交叉,关注自动采矿与连续采矿、数字矿山等研究方向间的关系。

### 3.5 开发应用系统仿真技术

自动采矿工艺是一个高度复杂的系统,相应的试验设施建设难度大、重复试验性差、成本高,在自动采矿工艺及技术的研究与开发过程中,应该积极开发和应用系统仿真技术。运用仿真技术及模型系统,通过多方案模拟分析,有效地研究典型自动采矿工艺系统的采场规划及设计、巷道布置、设备选择、工艺过程等有关参数及其对自动采矿工艺系统效能及效率的影响,逼真地展现典型地下自动采矿工艺系统的动态过程,直观地考察其运行状况。基于离散事件仿真方法的系统工艺过程仿真技术和基于三

维可视化仿真方法的系统时空动态仿真技术将是研究和发展自动采矿技术特别是研究自动采矿工艺系统的重要技术手段。

## 4 结语

金属矿床的无人开采技术特别是自动开采技术在工业及矿业发达国家譬如加拿大、澳大利亚、瑞典等的发展已经有 20 余年的历史,相关技术及装备已经商业化(如 Automine<sup>TM</sup>, MINEGEM<sup>TM</sup>, MineLan<sup>TM</sup>, SIAMnet, Telemining<sup>TM</sup>等),产品的应用越来越广泛;一些相关的矿山规划设计及开采工艺系统仿真软件产品(如 Datamine, MineSight<sup>®</sup>, Surpac 等)也已开始进入中国市场。

笔者总结了国外无人采矿技术的发展状况;论述了自动采矿的关键前沿技术,包括先进传感及检测监控技术、采矿设备遥控及智能化技术、高速数字通信网络技术、地下自动采矿新工艺技术;并给出了关于我国自动采矿技术发展途径的若干思考,包括政府大力支持高等学校和科研机构开展以原始创新为主要目的的自动采矿基础与应用基础研究、大型企业积极主导以引进消化吸收再创新和集成创新为主要目的的自动采矿技术创新、高等学校加强建设以原始创新和人才保障为主要目的的自动采矿学科及人才培养体系、以及在发展自动采矿技术过程中注重学科交叉和运用系统仿真研究方法等。

## 参考文献

- [1] CIM. Careers in the natural resource industry: minerals, mining, materials and metallurgy [OL]. <http://www.cim.org/minerals/careers.cfm>, July 16, 2003
- [2] Scoble M, Daneshmend L. Mine of the year 2020: technology and human resources [J]. CIM Bulletin, 1998, 91(1016): 51~60
- [3] Noranda. Noranda and STAS launch SIAMtec, a limited partnership to market Noranda's mining automation technologies [OL]. <http://www2.ccnmatthews.cew/scripts/ccn-release.pl/2002/04/23/noranda.html>
- [4] Atlas Copco. Good results with teleremote [J]. Mining & Construction, 2003, (2): 6~7
- [5] Pukkila J, Sarkka P. Intelligent mine technology program and its implementation [A]. Mass Min 2000, Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series No 7 [C], 2000
- [6] Sarkka P, Liimatainen J, Pukkila J. Intelligent mine implementation—realization of a vision [J]. CIM Bulletin, 2000, 93(1042): 85~88
- [7] CSIRO. Mining robotics project [OL]. <http://www.csiro.au/csiro/content/standard/ps1kk.html>, April 10, 2006
- [8] Caterpillar. MINEGEM<sup>TM</sup> system automates underground loaders

- [OL]. Press Releases, <http://www.cat.com/cda/layout? m = 82580&x = 7>, May 25, 2005
- [9] Baiden G, Strom R, Preston C. Mining automation program [J]. CIM Bulletin, 1997, 90(1006): 71 ~ 77
- [10] Natural Resources Canada. Mining automation program [OL]. [http://www.nrcan.gc.ca/ms/prod-serv/map\\_e.htm](http://www.nrcan.gc.ca/ms/prod-serv/map_e.htm), April 20, 2006
- [11] Shuey S. Mining technology for the 21st century; Inco digs deep in Sudbury [J]. Engineering & Mining Journal, 1999, 200(4): 18 ~ 24
- [12] Poole R, Golde P, Baiden G. Remote operation from surface of Tamrock Data Solo drills at Inco's Stobie mine [J]. CIM Bulletin, 1996, 89(996): 47 ~ 50
- [13] Runciman N. A preliminary study of tramming speeds in multiple teleoperated load-haul-dump scenarios using QUEST [A]. Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference [C]. 2001, 1084 ~ 1089
- [14] Runciman N, Vegenas N, Baiden G. Evaluation of underground development mining systems using discrete-event simulation [J]. Simulation, 1999, 72(1): 4 ~ 11
- [15] Vagenas N, Scoble M, Corkal T, et al. Simulation of teleremote mining systems [J]. CIM Bulletin, 2000, 93(1037): 61 ~ 64
- [16] Young A. Project designed to reduce risk to miners [J]. Engineering Dimensions, 2002, 23(2): 20 ~ 21
- [17] Precarn. Safe mine blasting [OL]. [http://www.precarn.ca/preincorp/nationalresearch/phase3/prjBTousVSKsD\\_en.html](http://www.precarn.ca/preincorp/nationalresearch/phase3/prjBTousVSKsD_en.html).
- [18] DeGaspari J. Armchair mining [J]. Mechanical Engineering, 2003, 125(5): 42
- [19] Appelgren J. Remote control and navigation systems [J]. Mining & Construction, 2003, (2): 16 ~ 19
- [20] Anon. Finsch leads the way in automated mining [J]. Mining Review Africa, 2005, (6): 32 ~ 36
- [21] Stentz A, Ollis M, Scheclings. Position measurement for automated mining machinery [A]. Proceedings of the 1999 International Conference on Field and Service Robotics [C]. 1999; 299 ~ 304
- [22] Steele J, Debrunner, Uincent T, et al. Developing stereovision and 3D modeling for LHD automation [A]. 6th International Symposium on Mine Mechanization and Automation [C]. South African Institute of Mining and Metallurgy, 2001, 209 ~ 215
- [23] Golde P. Implementation of drill teleoperation in mine automation [D]. Montreal; McGill University, 1997
- [24] 古德生. 地下金属矿采矿科学技术的发展趋势 [J]. 黄金, 2004, 25(1): 18 ~ 22
- [25] 云庆夏, 陈永锋, 卢才武. 采矿系统工程的现状与发展 [J]. 中国矿业, 2004, 13(2): 1 ~ 6
- [26] 王运敏. 冶金矿山采矿技术的发展趋势及科技发展战略 [J]. 金属矿山, 2006, (1): 19 ~ 25, 60

## Frontiers in Personless Mining and Avenues of Their Advancement in China

Li Zhongxue, Li Cuiping, Liu Shuangyue

(College of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

**[Abstract]** With the rapid social and economic development in China, technology innovations in the extraction and utilization of mineral resources are demanded to address the problems associated with larger mining depth and other adverse conditions confronted by the mining industries, increase the efficiency of extracting mineral resources, and safeguard the safety and health of mining workers. To this end, the Chinese Ministry of Science and Technology (MOST) has launched a series of research directions through the 863 Program aimed at frontiers in the subject of personless mining to enhance technology innovations in personless mining and provide the mining industries with a fresh perspective to personless mining. In response to the MOST initiative, this paper presents a brief review on the development of automated mining technologies in the industrialized nations such as Canada, Australia, Finland and Sweden, outlines the major technological issues on the frontiers of automated mining, and proposes some avenues of advancing technology innovations in automated mining in China.

**[Key words]** hard-rock mining; automated mining; personless mining; personless mine