



地下开采现代技术

DIXIAKAICAI
XIANDAIJISHU
LILUNYUSHIJIAN

理论与实践

煤炭科学研究总院北京开采研究所

煤炭工业出版社

地下开采现代技术理论与实践

煤炭科学研究总院北京开采研究所

煤炭工业出版社

内 容 简 介

本书内容包括:研究综述,高产高效开采技术、工艺与装备,矿山压力理论与岩层控制技术,特殊采煤方法与矿区减沉技术,煤巷锚杆支护成套技术,液压支架技术与工作面支护设备,地下开采测控与自动化技术,矿用化工材料与油品,典型工程实例以及新理论、新方法、新技术在地下开采工程领域的应用与展望等十部分。这些都是作者们在各自研究领域所取得的成果精选,资料新颖、内容丰富,基本上反映了我国当前地下开采技术与工程研究的状况与水平。特别是涉及当前地下开采现代技术理论与矿山岩石力学一些热门课题及技术难点的研究,具有较高的实用价值。从书中丰富的内容,可以清楚地看到未来地下开采现代技术研究与发展趋势。

本书适合于煤炭、矿山、地下工程界广大工程技术与科研人员及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下开采现代技术理论与实践/煤炭科学研究总院北京开采研究所. —北京:煤炭工业出版社, 2002

ISBN 7-5020-2160-4

I. 地… II. 煤… III. 煤矿开采: 地下开采
IV. TD823

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 028039 号

地下开采现代技术理论与实践

煤炭科学研究总院北京开采研究所

责任编辑:李振祥

煤炭工业出版社 出版发行

(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

开本 $889 \times 1194 \text{mm}^{1/16}$ 印张 $42^{1/4}$

字数 1220 千字 印数 1—2,100

2002 年 6 月第 1 版 2002 年 6 月第 1 次印刷

社内编号 4931 定价 98.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

谨以此书纪念煤炭科学研究总院
北京开采研究所建所 45 周年！

顾 问：范维唐 潘惠正 张声涛 仲惟林
 牛锡倬 邢福康 史元伟 焦传武
 徐道伦 石文波 黄尚智 刘玉堂
 叶道一 樊运策

组织委员会：

主 任：刘建华
副主任：康立军 李凤明 姚建国 邹正立
委 员：康红普 鞠文君 林崇德 闫少宏
 齐庆新 王国法 王恩鹏 陈 钢
 张华兴 胡炳南 张 良 曹铁生
 李效甫 郁纪东 郝秀玲

编辑委员会：

主 任：康立军
副主任：李凤明 姚建国 邹正立 耿德庸
委 员：刘崇佑 安 丹 康红普 齐庆新
 王国法 张华兴 李首滨 朱艳芝
 刘 霞

执行主编：姚建国 邹正立 耿德庸

与时俱进 开拓创新

(代前言)

在全党、全国人民迎接党的十六大召开的前夕，在中国加入 WTO 的第一年，煤炭科学研究总院北京开采研究所迎来了 45 周年所庆。

45 年来，在各级领导的关怀下，经在开采所先后工作过的 630 多名“开采人”的努力拼搏，北京开采所不断发展壮大，目前拥有采矿、巷道、支架、特殊采煤与矿区环保、中德合资天玛电液控制系统公司 5 个专业研究室（公司），101 名员工，4 名博士生导师，9 名研究员，49 名高级工程师、博士（后）及双硕士 14 人、硕士 38 人。拥有 1000 多台各类先进的科学仪器和实验装置，其中包括具有 20 世纪 90 年代先进水平的电子显微镜、电磁成像系统、地质雷达、数字地震仪、水压致裂地应力测量装置、巷道围岩强度测定装置、测量岩土体应力和位移的各类矿压和岩移测量仪器、光纤纤维钻孔窥视仪、钻孔电视等。具备研究开发煤炭地下开采技术和工艺、矿山压力与岩层控制、开采沉陷与地面保护、回采工作面与巷道支护、矿用监测仪表与计算机应用、综采工作面综合监测系统及液压支架电液控制系统的能力。已成为能承担国家科技攻关项目和能够解决煤炭生产中重大技术难题，在国内外享有盛誉的专业科技开发机构。

开采所建所 45 年来，始终致力于地下开采现代技术的创新与实践，共完成国家、省部级科研项目 500 多项，其中 196 项获得国家或省部级科技进步奖。我们与国内煤炭企业合作，攻克了坚硬厚顶板和坚硬厚煤层条件下的顶板控制这一世界性技术难题，率先在国内试验成功综采放顶煤开采方法，开创并发展了我国矿山大面积采动影响理论与特殊开采技术这一全新边缘交叉学科，开拓并在逐步完善煤巷锚杆支护成套技术，首次提出煤矿采场围岩优化控制科学体系，长期坚持理论与实践紧密结合并以现场研究为主的研究方法，在综采工作面矿山压力和液压支架与围岩相互作用的研究方面在国内处于领先地位。研制开发的液压支架、单体液压支柱、铰接顶梁分别占全国总产量的 50%、90% 和 100%。研制开发的综采工作面综合监测系统及液压支架电液控制系统已成功应用于兖州、潞安、铁法、开滦等矿区。为使科研成果尽快转化为生产力，近 5 年来，平均每年完成技术服务及技术咨询、技术开发项目 100 多项。

45 年来，开采所始终坚持以人为本的管理理念，鼓励研究人员崇尚实践、培养实事求是的严谨学风，在科技创新与实践增长才干。因此，多年来我所人才辈出，其中有中国工程院首批院士范维唐、刘天泉院士，有全国劳模、部级劳模，有专业技术拔尖人才，有孙越崎奖、茅以升奖获得者，并且还还为各级领导及管理部门输送了 20 多位优秀领导干部。如今在我所地下开采科技创新与科技经营中挑大梁的更是一批年富力强的年轻的技术人员。

北京开采所已于 2001 年整体转制组建为天地科技股份有限公司开采所事业部，随着

科技改革的深化、体制的转换，我们紧紧围绕“创业、创新、创收”中心内容开展工作，提出“立足煤炭行业，以技术带动工程承包和高新技术产品产业化建设，通过扩大国际合作做大市场”的发展战略。2000年，开采所投资1100万元并技术总承包陕西彬县下沟煤矿，将原年产45万t的中小型矿井改造成年产90万t的现代化矿井。完成了潞安矿务局锚杆支护示范工程项目并扩展到晋城矿务局。完成兖矿集团兴隆庄煤矿600万t综放工作面设备配套及技术研究项目以及抚顺石油一厂、抚顺发电厂地基治理工程、长江三峡链子崖危岩体治理重大工程等。

本书收集的102篇论文从一个侧面展示了近年来地下开采现代技术理论与实践方面所取得的成就。它也是一个论坛，表达了作者们对在新的世纪里在地下开采领域应如何开拓和发展的宝贵意见和想法。不言而喻，它的出版对推动我国地下开采技术的发展会起到一定的作用。

本书的内容相当丰富。它既涉及地下开采学科及技术发展趋势，也有高产高效安全生产的技术理论与应用实例；既有岩层控制、岩石性质和岩体稳定性理论以及实验研究方面的新成果，也有测试技术和试验方法方面的新进展。综采放顶煤开采技术、工作面液压支架技术与支护设备的新进展、特殊开采技术及矿区环境保护、煤巷锚杆支护成套技术等方面的论文在本书中占有相当大的比重。煤矿地下开采现代化的目的是自动化，有关液压支架电液控制技术及世界上首例综放液压支架电液控制系统、综采工作面综合智能监测系统在书中自然会占有一定的篇幅。

从书中可以看出，中青年作者占有很大的比例。它显示开采所一大批年青的从事地下开采现代技术理论与实践的科技工作者已经茁壮成长起来。这是十分可喜的事情，也是我们的希望之所在。

展望未来，可以毫不夸张地说，21世纪地下开采学科与技术发展的重点应该在中国。我们一定要抓住这个历史良机，在地下开采领域内努力地、迅速地赶超国际先进水平，勇攀科学技术高峰，为四化服务，为祖国争光！这正是摆在我们每一位“开采人”面前光荣和艰巨的任务。

煤炭科学研究总院北京开采研究所所长
天地科技股份有限公司开采所事业部总经理

刘建华

2002年5月1日

序

科学技术是第一生产力，科技发展是经济发展的决定性因素，科学技术的快速发展并向现实生产力的转化，已成为现代生产力中最活跃的因素和最主要的推动力量。特别是 20 世纪 90 年代以来，世界进入了科学技术更加迅速发展和转化为社会生产力的速度越来越快的时代。进入新世纪后，全世界的煤炭工业正面临着能源市场激烈竞争和全球环境日益恶化的双重压力，同时我国煤炭工业还经受着由传统的计划经济向社会主义市场经济过渡的考验。在这样的形势下，不仅企业优胜劣汰的机制越来越明显，整个行业都将受到严峻的挑战。当前是我国煤炭工业实现经济体制与经济增长方式两个根本性转变、摆脱困境、步入市场经济良性循环轨道的关键时期，我们必须依靠科技进步，促进煤炭工业走上可持续发展的道路，迎接面临的各種挑战。

煤炭科学研究总院北京开采研究所是从事煤矿地下开采现代技术理论与实践的专业科技开发机构，建所已 45 周年了。45 年来，无论是在煤炭工业发展顺利的条件下，还是在煤炭工业十分困难的情况下，开采所的科技工作都取得了较好的成绩。一是科研工作取得较多成果，促进了我国煤炭行业地下开采技术与装备的发展。二是科研攻关和技术创新能力不断增强，综采放顶煤技术、煤巷锚杆支护成套技术、特殊开采及矿区环境保护技术、液压支架与控制技术、岩层控制技术 etc 地下开采关键技术都取得突破性进展，为改善我国煤炭工业在生产、效率、安全和装备等方面相对落后的局面创造了条件。三是一批科研成果的推广和应用，给一些煤矿企业带来了较好的经济效益。在积极探索中国特色的煤炭企业科技发展模式方面也有新的进展。例如，积极参与兖矿集团国家技术创新项目“年产 600 万 t 综放工作面设备配套与技术研究”及“高效集约化综放开采及关键装备”的研究与实施，为探索“兖矿模式”作出了贡献。又如，与陕西省彬县合作探索地方煤矿技术改造的道路，在陕西省国有地方煤矿实现了“三个第一”，即第一个采用综合机械化放顶煤开采技术，第一个采用综合机械化掘进技术，第一个采用全煤巷锚杆支护技术，为地方中小型煤矿的升级改造做了很好的示范和探讨，从而共同创出了用较少的增量激活较大存量、投资少、见效快、效益高的“彬县模式”。

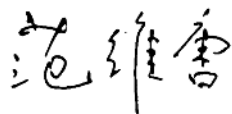
在庆祝开采所建所 45 周年之际，先后在开采所工作过的同仁们以“地下开采现代技术理论与实践”为主题，撰写了涵盖煤炭地下开采各专业分支领域和学科的 100 余篇论文，本着“百花齐放，百家争鸣”的方针，畅所欲言，各抒己见，回顾开采所的科技发展历程，共同研讨新世纪地下开采现代技术发展的趋势，启迪我们的思维，开拓我们的思路，瞄准方向，突出重点，有所为和有所不为，集中力量研究解决一大批煤炭工业地下开采中的重大和关键技术问题，大幅度提高对煤炭工业的科技贡献率。

在总结煤矿地下开采学科与技术发展趋势时，要特别关注地下开采领域两个带全局

性的发展趋势：地下开采各分支的相互融合，地下开采学科与其他学科的相互渗透和交叉融合。本书的内容较好地体现了这种发展趋势。

作为一名曾在开采所工作过的“开采人”，由衷地祝贺开采所45年来成长、发展所取得的成绩。愿《地下开采现代技术理论与实践》的面世，对煤炭界、采矿界的广大干部和科技人员有所裨益。

中国工程院院士
中国煤炭工业协会会长

A handwritten signature in black ink, reading '范维雪' (Fan Weixue) in a cursive style.

2002年5月1日

目 录

第一篇 研究综述

岩土与采矿工程中的耦合方法及其在中国的应用	刘天泉	姚建国	张玉卓	(3)
坚硬厚顶板和坚硬厚煤层条件下的顶板控制机理与实践			牛锡倬	(11)
关于特殊采煤技术创新持续发展的思考			仲惟林	(22)
条带法开采实施建筑物保护的实践与认识		焦传武	仲惟林	耿德庸 (27)
综放开采技术 20 年的回顾与展望			樊运策	(34)
我国煤矿液压支架发展的回顾与展望			赵衡山	(39)
学科交叉视野中的地下开采现代技术理论与矿山岩石力学			姚建国	(43)
世界煤炭科技发展趋势引发的思考			石文波	(54)
矿用油品的开发与应用		刘建华	韩国强	(59)
矿区减沉技术应用现状及发展趋势		李凤明	李金柱	谭勇强 (68)
采矿环境力学与清洁开采技术			姚建国	(75)
试论中国煤炭工业可持续发展			范韶刚	(80)
面向 21 世纪开采技术创新方向探讨			李全生	(87)
“三下”采煤技术的若干新进展及其特点			康永华	(95)
矿山综合物探技术应用的回顾与展望			孙洪星	(103)
从若干科研成果的回顾看开采所在煤炭工业发展进程中的作用			崔德仁	(112)

第二篇 高产高效开采技术、工艺与装备

我国厚煤层综放开采技术现状		闫少宏	(121)
高效综采与液压支架技术的发展		王国法	(132)
我国综放开采回采率现状及提高回采率途径研究		贾光胜	樊运策 (144)
年产 1000 万 t 综放工作面设备配套技术研究		毛德兵	范韶刚 樊运策 (154)
年产 600 万 t 综放工作面液压支架与配套技术研究		王恩鹏	曾明胜 (160)
年产 600 万 t 综放工作面工艺观测及分析		陈 兵	邢世军 樊运策 (165)
综放开采工作面主要安全问题及其防治			解兴智 (170)
综放开采顶煤破坏程度指标的分析研究		韩海潮	毛德兵 闫少宏 (175)
葛泉矿极复杂条件压煤安全高效综采工艺研究		朱泽虎	康红普等 (179)
用于薄煤层自动化开采的刨煤机系统			李效甫 (184)
综放工作面液压支架综合防尘技术研究		张广军	王一飞 (187)
提高支架移架速度措施综述			王 勇 (195)

第三篇 矿山压力理论与岩层控制技术

论长壁工作面岩层运动与控制力学系统		史元伟	(203)
综放开采顶煤力学特性及其对支架载荷影响研究		康立军	朱德仁 林崇德 蔡嘉芳 (217)

综放工作面矿压显现与支架工作阻力确定的理论与应用	闫少宏 (224)
长壁回采工作面底板应力变化的模型模拟试验研究	刘修源 (230)
破碎煤岩体化学加固成套技术与工程应用	杨景贺 宁 宇 魏景云 李纪青 (239)
冲击地压理论与技术	齐庆新 毛德兵 康立军 韩海潮 王永秀 (245)
冲击地压预测、预报与防治的进展	王淑坤 (253)
煤岩冲击倾向性及其评价方法	毛德兵 齐庆新 王淑坤 李纪青 (259)

第四篇 特殊采煤方法与矿区减沉技术

条带开采技术的新进展	张华兴 (267)
华北型煤田底板突水研究回顾与展望	陈 钢 牛和平 宋孝平 谭勇强 (272)
煤矿充填开采技术	胡炳南 (277)
灰岩岩溶水体下近距离煤层的开采	文学宽 (282)
矿区就地重建抗变形结构房屋技术现状及发展	万秀芳 (286)
覆岩破坏探测技术的新进展	申宝宏 许延春 吴继忠 李增良 (291)
浅部工作面松散含水层出水评价与预测	许延春 (296)
连续采煤技术研究及在特殊采掘中的应用前景	胡炳南 (302)
承压水上间歇开采与协调开采底板采动影响规律的研究	刘鸿泉 (309)
大屯矿区 7005 综采放顶煤工作面地表沉陷规律	徐乃忠 (316)
基于 GIS 的水体下采煤可视化预测方法的研究	刘鸿泉 康永华 孙洪星 (322)
承压水开采引起地面沉降的数学模型	张刚艳 (330)
采动后村庄建筑物纠倾的几项新技术	徐法奎 (335)
倾斜仪系统及测斜技术在煤矿的应用	徐法奎 (339)

第五篇 煤巷锚杆支护成套技术

回采巷道锚杆支护技术的现状与发展趋势	康红普 (345)
矿用 W 型钢带的应用及发展趋势	王金华 孟金锁 鲍海山 (353)
煤巷锚杆支护机理探讨	康红普 王泽进 (358)
困难条件下煤巷锚杆支护原理与应用	林崇德 (369)
煤巷锚杆支护监测仪器与技术	鞠文君 蔡嘉芳 丁 辉 (369)
锚杆支护动态信息设计法在潞安矿区的应用	贾金河 康红普 衣宪章 (374)
锚索与注浆联合加固技术在煤矿大巷加固中的应用	林 健 刘玉堂 (380)
水压致裂应力测量在矿山中的应用	颜立新 吴志刚 郑书兵 (386)
小孔径树脂锚索的支护原理与应用	王兴库 杨跃翔 郑书兵 (391)
沿空掘巷锚杆支护参数优化研究	汪占领 林 健 (395)
树脂锚固剂在我国煤矿中的应用与发展	韩国强 万长征 吕华文 (399)
有限差分程序及其在锚杆支护设计中的应用	郑书兵 鞠文君 王兴库 (405)
相似材料模型技术及其应用	蔡嘉芳 鞠文君 (410)
煤柱稳定性及锚杆加固效果的三维数值模拟研究	杨跃翔 康红普 张玉卓 (416)

第六篇 液压支架技术与工作面支护设备

液压支架研制和应用 32 年	黄尚智 (423)
液压支架优化设计理论和方法	王国法 (429)

大采高压液压支架技术的研究	孙守山 王国防 朱 军	(440)
大倾角综采模式端头液压支架的研制与应用	邱开坤 曾明胜 周邦远 伍厚荣	(450)
薄煤层液压支架与刨煤机综采	邱开坤 曾明胜 周明昌 袁途明	(455)
综放工作面液压支架的正确使用与维护	朱荣辉	(458)
中置式放顶煤端头支架的研制与应用	张银亮 王同川 孟二存	(464)
液压支架变量化、参数化、可视化动态分析	杜忠孝	(468)
液压支架千斤顶参数化设计研究	华 辉	(476)
关于液压支架计算机辅助设计的思考	孟二存 张银亮 王彪谋 陈学敏	(480)
综放工作面输送机电机布置型式分析	胡万昌 曾明胜	(484)
新标准下的液压支架掩护梁、前后连杆受力分析	杜忠孝 曾明胜	(487)
液压支架运动仿真研究	徐亚军 王国防 廖道真 张丽芳	(492)
KC 型滑杆式放顶煤悬移支架的研究与应用	邹正立 樊运策 姚建国	(497)
DWH 型水介质单体液压支柱的研制	冯立友 吕东林 孟传明	(506)
DJB 型金属顶梁的研制与应用	周俊良 李忠元	(510)
单体支柱表面高耐蚀镀层的研究	吕东林	(515)

第七篇 地下开采测控与自动化技术

液压支架电液控制系统及其应用	张 良 李首滨	(523)
我国液压支架控制系统发展历程及前景	曹铁生	(531)
综采工作面综合监测系统的开发与应用	李首滨 张 良 李奎来	(538)
综采工作面生产自动化的实现途径	张守祥 李首滨 张 良	(547)
刨煤机工作面液压支架电液控制系统的研究	韩 伟	(552)
工控组态软件在综采工作面自动化系统中的应用	张秀萍 李首滨 张 良	(558)

第八篇 矿用化工材料与油品

粉煤灰硅酸盐胶凝材料的研究与开发	李纪青 秘洁芳	(565)
乳化油、水基液在煤矿中的开发与应用	赵秀琴 韩 勇	(573)

第九篇 典型工程实例

长江三峡链子崖危岩体煤层采空区的治理	宁 宇 文学宽	(583)
抚顺石油一厂厂区综合治理	张华兴 谭勇强 徐法奎	(590)
陕西彬县下沟煤矿采煤方法改造与相关技术研究	刘建华 闫少宏 富 强	(596)
综采放顶煤成套设备首次出口土耳其及技术服务工程	陈 钢 王德元 樊运策	(602)

第十篇 新理论、新方法、新技术在地下开采 工程领域的应用与展望

软计算及其混合方法在采矿工程中的应用与展望	姚建国	(609)
直接单轴拉伸条件下煤的弹脆塑性分析	齐庆新 毛德兵 范韶刚 大久保诚介	(617)
南根技术在煤矿区土地复垦中的应用试验研究	郝纪东	(624)
ANN 与 GIS 耦合技术及其在采矿工程中的应用前景	陈佩佩	(631)
振弦式系列传感器的开发研制与工程应用	齐庆新 宋维尧 康立军 杨景贺等	(636)
一种新型放顶煤支架——全掩护尾梁高位、中位、低位放顶煤液压支架	黄尚智	(643)

一种新的液压支架稳定机构——伸缩杆稳定机构 黄尚智 (646)

支架设计制造中应用可靠性技术方法初探 王彪谋 (649)

45 号钢正火组织空蚀微观磨损特性研究 王义民 韩 勇 刘俊英 (656)

第一篇

研究综述

岩土与采矿工程中的耦合方法及其在中国的应用

刘天泉 姚建国 张玉卓

摘 要 简述岩土与采矿工程中固液、固气耦合力学发展的工程背景与学科基础；固—液—气耦合方法及其发展概况；岩土与采矿工程中固—液—气耦合方法在中国应用研究的若干新进展；展望了耦合方法在岩土与采矿工程中应用前景。

1 岩土与采矿工程耦合力学发展的工程背景与学科基础

处于同一系统中的任何两个或两个以上的组分之间都是相互作用和彼此影响的，这就是耦合现象和问题。耦合过程可定义为：若干事件同时发生并相互作用。例如，建筑工程中高层结构与风的作用，航天、海洋、铁路中的高速运输系统，车辆引起的桥梁颤振、流体引起的管道振动、液体引起的储液容器的振颤等，都存在耦合现象和问题。处于同一环境中的地下岩土体及其内的液、气、热等物质，在外力作用下，地下岩土体的变形和液、气、热流的运动下，也必然会产生相互作用和彼此影响。煤矿的冲击地压、煤与瓦斯突出、底板大突水、井壁破坏、边坡稳定及地表大面积沉陷等地下岩土工程中，都存在不同的耦合现象和问题。

人类进入 21 世纪，在工程发展上具有两大显著特点：①工程规模日益扩大，重大工程项目日渐增多，因此进行工程结构分析时必须计及结构物所在环境介质（如地基与基础）对结构分析的耦合效应，以及产生的对工程设计的影响；②人类向海洋、地下、太空发展是 21 世纪科技与建设发展的重要标志，它们与地面构筑物不同的特征是结构周围存在明显的环境介质（水域、岩土体、大气层），结构与环境介质的耦合分析将成为工程分析与设计必不可少的组成部分。

现代化经济发展另一个显著特点是高科技产业在国民经济中占有越来越重要的位置，信息、控制、光纤、超导、核能、新材料等工业的发展提出了一系列力学学科与其他物理科学（如热、声、电、磁、光、核）间耦合的课题，它们的研究与发展将为许多高新技术产业提供必需的理论与技术基础。流固耦合分析、结构与介质耦合分析以及力学与其他学科耦合分析构成耦合力学的主要组成部分。

从力学观点看，固液、固气耦合力学是固体力学与流体力学交叉而生成的一个新的学科分支，是研究变形固体在流场作用下的各种行为及固体位移对流场影响这两者交叉作用的科学。换言之，耦合问题的特点就是两相介质之间的交互作用，即变形固体在流场作用下会产生变形或运动，而变形或运动又反过来影响流场，从而改变流体载荷的分布和大小。正是这种相互作用将在不同条件下产生种种流固耦合现象。

显然，对岩土工程中的固液、固气耦合现象来说，耦合作为一种共同的研究方法，具有重要的普遍意义，是当今渗流力学、岩土工程力学和计算力学研究和发展的方向。在当前的地下岩土工程中，

编者注：1999 年 10 月由刘天泉院士发起并组织的《国际岩土、采矿与石油工程中固—液—气耦合作用学术研讨会》在海南三亚举行，这是刘天泉院士生前组织的最后一个重要国际学术会，对推动我国岩土与采矿领域耦合作用研究起了重要作用。此文是刘天泉院士、姚建国、张玉卓研究员应邀为国际学术研讨会撰写的主题报告，刘天泉院士因健康原因未能出席会议。刘天泉院士在开采所工作 30 余年，为开采所的成长、发展及我国煤矿开采科学技术的发展作出了重要贡献，特发表此文，寄托我们对刘天泉院士的怀念。

它所辐射的科学与技术问题主要有:

(1) 采矿工程。由于地下水流入矿井采区引起的地层沉降;裂隙岩层和煤层中瓦斯的排入;流体运动对露天矿边坡稳定性的影响;矿区水资源保护等。

(2) 石油工程。自然裂隙油层模拟;与应力有关的岩体渗透率与孔隙率;孔隙弹性体中油井的稳定性;生产出砂与孔隙塑性岩石力学;泥质岩石稳定与岩石物理性质的关系等。

(3) 土木工程。孔隙裂隙体中的土壤固结问题;抽排地下水引起的地表沉降;隧道稳定与渗流和岩体变形的关系;部分饱和填体的多相流问题等。

(4) 环境工程。孔隙裂隙岩体中污染的传播问题;污染物控制系统中的岩石力学问题;地下核废料处理中的热力学孔隙弹性分析;裂隙岩体井附近污染物的处理等。

总之,耦合力学是研究力学学科的不同分支间及力学与其他学科间耦合问题以及由此而引起的一系列特殊物理现象,数学上的共同特征是不同的类型、不同变量数学方程间耦联,是在现有各学科研究基础上深入发展的一门新的学科分支。耦合力学的研究是典型的学科交叉与相互渗透的产物,显然这一学科本身就表明为研究与探讨不同分析对象间的耦合作用,必须做到相关学科分支间的相互交叉与结合,它将涉及结构力学、岩土力学、流体力学、气体力学、生物力学和热、电、磁、声、地质、海洋、大气等以及各有关工程学科。这对推动学科发展以及派生新的学科分支将起到十分重要的促进作用。

本文仅就岩土及采矿工程的固液、固气耦合力学的若干主要方面及在中国的研究应用进展、发展前景等分别加以介绍和阐述。

2 岩土工程中固—液—气耦合研究的方法及其发展概况

2.1 耦合理论发展——从孔隙弹性理论到孔隙裂隙弹性理论

岩土工程中固—液—气耦合理论的研究,早期主要是针对土体。土是由固、液、气三相组合而成。其中以散体状态存在的颗粒构成了固相骨架。三相除了要遵循各相自身运动与变形的本构定律外,还在静力学与运动学等方面存在着强烈的相互作用及物理状态上的相交换效应,从而使各种场变量交互耦合,使得相关的边值问题的基本控制方程高度非线性化。

半个世纪前,Biot (1941)就提出了孔隙弹性理论^[1],他对由弹性或粘弹性骨架及可压缩或不可压缩流体所组成的各向同性或各向异性饱和多孔介质建立了准静态三维固结理论,并进行了求解,进而考虑惯性效应研究了饱和流体孔隙介质中弹性波与声的传播理论^[2]。这一系列深邃的理论研究奠定了这一力学分支的基础,其中采用了骨架为线性体、孔隙水流动处于层流状态及小应变与小位移的基本假定。自Biot首次提出孔隙弹性理论至今50多年的研究历史中,饱和多孔介质力学不仅引起了数理力学工作者的极大兴趣,也得到了工程界的高度重视,从而在许多方面取得了很大的进展,各种研究思路相互渗透,所考虑的影响因素日趋全面,求解能力与工程应用范围也日益广泛,包括一些复杂的耦合问题,并已广泛扩展到可变形孔隙介质中流体的微观机理。

众所周知,岩体与土体不同,它不是散粒体而是由被裂隙切割的岩块所组成,对于岩体这类既有孔隙又含裂隙的复杂系统,孔隙弹性理论的应用遇到了挑战。

双重孔隙介质的概念是为研究流体在裂缝性非均匀多孔介质中的流动而于1960年由Barenblatt首先提出的^[3]。认为裂缝性多孔介质的每一代表性体积单元中,同时存在裂缝孔隙和基质孔隙,并且认为裂缝是流体的主要流动通道,其孔隙度小而渗透性高;基质孔隙是流体的主要储存空间,孔隙度高而渗透性低,一般说来,裂缝与基质孔隙之间存在流体交换。双重孔隙介质理论是借助于连续介质理论的研究方法和成果,研究裂缝性介质最成功的典范之一。1963年经Warren和Boot改进后首先应用于石油工程^[4]。以此为标志,开始了双重孔隙介质理论及其应用的研究。那时的模型还只是研究流体在刚性不变形的多孔介质中的流动。作为研究裂隙性孔隙介质中流体流动与固体骨架变形作用的双重孔