

国家自然科学基金资助项目40372123、40772192

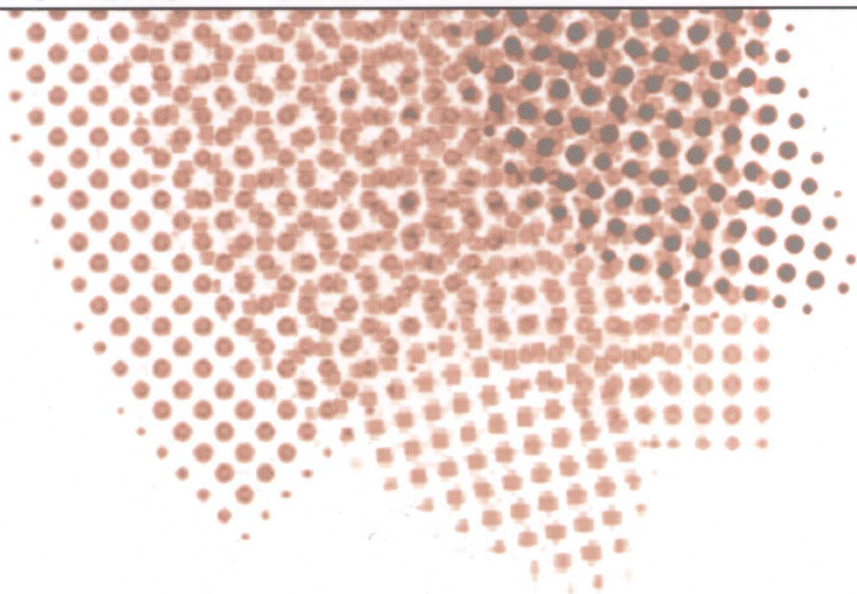
教育部新世纪优秀人才支持计划项目资助NCET-04-0486

江苏省青蓝工程、“333”工程资助

采掘溃砂机理与预防

CAIJUE KUI SHA JILI YU YUFANG

隋旺华 董青红 蔡光桃 杨伟峰 杭 远 等著



地质出版社

国家自然科学基金资助项目 40372123、40772192
教育部新世纪优秀人才支持计划项目资助 NCET-04-0486
江苏省青蓝工程、“333”工程资助

采掘溃砂机理与预防

隋旺华 董青红 蔡光桃 杨伟峰
杭 远 张改玲 郑 磊 杜 永
蔡 荣 陈德俊 赵庆杰 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

溃砂或水砂突涌是近松散含水层采掘中常见的矿井地质灾害,因其形成机理、影响因素和防治方法的特殊性,应作为一种独立的矿井地质灾害种类来对待。本书系统总结了近十年来在松散含水层下采掘溃砂或水砂突涌机理与防治方面的理论成果和实践经验。

本书以水土(岩)相互作用理论为基础,以工程地质模型的理念和地学信息技术为平台,从近松散含水层、薄基岩条件下开采水砂突涌的工程地质模式、影响水砂突涌的地质因素和采矿因素入手,以现场实测、工程地质力学模型和离心模型实验等为主要手段,研究采动影响下煤层上覆岩体、松散含水层和隔水层的渗透变形,孔隙水压力变化规律及水砂突涌机制,获得了不同岩性和粒度成分的风化带的抗渗透变形特征、近松散层采动裂缝贯通引起的水砂突涌临界水力坡度、近松散层开采时覆岩破坏特征、水砂突涌的孔隙水压力变化及前兆特征,提出了不发生溃砂的安全水头高度的概念和评价计算方法,对底部粘土层的保护作用进行了分析和研究并取得新的认识。针对松散层底部含水层的水文地质结构及其人为改变特点,开发了难疏放的松散含水层水位疏降技术,提出了防治水砂突涌的地质工程措施和安全技术措施;建立了开采上限工程地质辅助决策方法,并成功应用于近松散层煤层开采上限决策中。本书提出的近松散层采煤水砂突涌机制、预防、治理与安全评价的系统理论和技术,对于濒临枯竭矿山的挖潜改造、煤炭资源的充分利用,以及近松散含水层的安全开采具有重要的参考价值。

本书可供从事矿井地质、水文地质与工程地质、矿山安全和地下工程等方面的科研和工程技术人员及相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

采掘溃砂机理与预防 / 隋旺华等著. —北京:
地质出版社, 2008. 12

ISBN 978 - 7 - 116 - 05839 - 2

I. 采… II. 隋… III. 疏松地层—煤矿开采—矿山防水
IV. TD745

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 144875 号

责任编辑: 杨友爱 杨惠敏

责任校对: 王素荣

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话: (010) 82324519 (办公室); 82324538 (总编室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010) 82310759

印 刷: 北京地大彩印厂

开 本: 787mm × 1092mm^{1/16}

印 张: 16.75

字 数: 380 千字

印 数: 1—1500 册

版 次: 2008 年 12 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价: 80.00 元

书 号: ISBN 978 - 7 - 116 - 05839 - 2

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

献 给

母校中国矿业大学百年校庆

(1909—2009)

**TO THE 100TH ANNIVERSARY OF
CHINA UNIVERSITY OF MINING
AND TECHNOLOGY**

(1909—2009)

Project 40372123 and 40772192 Supported by National Natural Science Foundation of China
Supported by Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-04-0486)
Supported by “Qinglan Project” and “333 Project” of Jiangsu Province, China

Quicksand Hazards in Underground Coal Mines: Mechanism and Prevention

Sui Wanghua, Dong Qinghong, Cai Guangtao, Yang Weifeng,
Hang Yuan, Zhang Gailing, Zheng Lei, Du Yong,
Cai Rong, Chen Dejun, Zhao Qingjie

**Geological Publishing House
Beijing**

前 言

能源是我国可持续发展需要解决的首要瓶颈问题。煤炭在我国一次能源结构中占据主导地位，目前占全部能耗的 68.8%，预计 2020 年仍将占到 60% 左右，这种格局在 21 世纪前半叶不会发生实质性变化。煤炭工业又是一个高风险的行业，煤炭百万吨死亡率居高不下，重特大事故频繁发生，复杂的地质条件是造成灾害性事故的根本原因。随着开采深度的加大或者矿井进入衰退期，地质条件变得越来越复杂，同时，由于开采技术的变革与进步，开采对地质环境的扰动和破坏也愈加强烈，由此引起的矿山安全问题日益突出。

为了缓解能源短缺、更多地回收煤炭资源，华东、华北和西北地区的许多煤矿开展了提高开采上限的试验和开采实践。近年来，这些矿区的开采上限提高的程度，以及由此产生的水文地质与工程地质问题的复杂性，都是国内外采矿界所罕见的。由于这些煤矿煤层上覆岩层厚度较小（大部分为 0~60 m），事实上形成了在传统意义上的防砂煤岩柱内的开采，采煤工作面时刻面临着溃砂或水砂突涌的威胁。溃砂或水砂突涌事故轻者冲垮工作面、淹没设备、增加矿井排水负担，严重者造成人员伤亡和淹井，全国已经发生数十起近松散层开采上部含水层造成的水砂突涌和淹井事故，造成重大经济损失，严重威胁矿工生命安全。溃砂或水砂突涌灾害作为一种近松散层采掘产生的矿井地质灾害，其形成机理和影响因素与一般意义上的矿井突水灾害显然是不同的，应该作为一种独立的矿井灾害种类来对待。对于溃砂或水砂突涌的评价、预测和防治方法，传统的理论方法和安全规程已经很难适应，由此提出了一系列新的研究课题，例如，如何正确评判溃砂或水砂突涌的可能性，如何估算突砂量的大小，以及如何针对水砂突涌的先决条件进行采前人工干预，采取必要的安全措施阻止溃砂事故的发生等等，都亟待解决。目前，对于水砂突涌这种特殊的矿井地质灾害还缺乏深入的理论研究和经济合理的防治技术对策。

从上世纪 80 年代初期狄乾生教授提出建立“煤矿工程地质学”新学科起，在狄老师的带领和指导下，中国矿业大学煤矿工程地质研究所一直致力于将工程地质学的基本理论和方法应用于解决与矿井安全密切相关的一系列工程地质问题，例如，开采岩层移动、开采沉陷土体变形、煤矿立井井筒破坏防治、矿井水害防治、煤矿采空区建筑地基稳定性研究等等。工程地质学与采矿工程、开采沉陷、水文地质等相结合在解决开采覆岩破坏预测、防水（防砂）煤岩柱留设等方面逐步显示出学科优势和强大的生命力，在兖州、济宁等矿区的多个煤矿确定了科学合理的开采上限，解放了大量的煤炭资源，获得了显著的经济效益和社会效益。有关方法已编入新规程“煤矿防治水规定”中。

在解决实际问题的同时，在开采上限、开采覆岩破坏，以及近松散层采掘中的一些科学问题也逐渐清晰，通过认真分析和提炼，先后申请并获准一些基金课题的支持，它们是：江苏省“333”工程资助项目“提高开采上限的数字工程地质决策模型研究”（编号：01021，2001 年至 2003 年）、国家自然科学基金资助项目“近松散层采煤水砂突涌机制及开采上限决策模型研究”（批准号：40372123，2004 年至 2006 年）、教育部新世纪优秀人

才支持计划资助项目“采动影响下覆岩（土）渗透变形的水动力学研究”（批准号：NCET-04-0486，2004年至2007年）。这些课题分别从不同的方面研究了与水砂突涌机理和防治有关的科学问题，这些课题还为我所指导的几位博士和硕士的研究工作提供了支持，在董青红、杨伟峰、杭远、蔡光桃、郑磊、蔡荣、曾兵、杨毅、杜永和满海英等的辛勤工作下，大大促进了有关问题的解决。溃砂或水砂突涌灾害防治问题又是一个实践性很强的课题，理论研究的成果要经得起实践的检验。值得庆幸的是研究工作始终得到了济宁矿业集团、大统矿业集团、宏河矿业集团、兖州矿业集团等单位的有关领导和技术人员的大力支持和帮助，先后合作完成了以下科研项目：GIS工程地质决策模型研究与应用、近松散层采煤水砂突涌防治与安全性研究、太平煤矿厚松散含水层疏放水条件下开采上限工程地质研究等。这些项目实施中由于采用了新的理论指导，突破了传统的概念，与类似水文地质工程地质条件下的矿区相比，开采上限取得重要突破，在保障安全生产的条件下回收了大量呆滞的煤炭资源。

本专著共分为七章。第一章绪论由隋旺华编写，主要介绍矿井采掘溃砂或水砂突涌灾害研究的意义、国内外现状、研究的内容和技术路线等；第二章是开采覆岩工程地质模型，由隋旺华和郑磊编写，主要介绍开采覆岩破坏研究工程地质模型的基本理念和初步实现的开采覆岩工程地质模型可视化方法及成果；第三章是近松散层开采覆岩破坏特征与规律，由隋旺华和蔡荣编写，通过分析有关矿区的实测资料、工程地质力学模型实验等对不同开采方法的近松散层开采覆岩破坏规律进行了研究和总结；第四章是水砂突涌临界水力坡度及安全水头，由隋旺华、蔡光桃、杜永、张改玲和蔡荣编写，包括采动裂缝带水砂突涌临界水力坡度实验、水砂突涌安全水头、煤系强风化带渗透特性和抗渗透能力实验和底部粘土层防溃砂作用研究；第五章为水砂突涌孔隙水压力变化，由董青红和隋旺华编写；第六章水砂突涌工程地质模式及开采上限决策，由隋旺华和董青红编写，包括水砂突涌工程地质模式、开采上限工程地质决策方法等；第七章介绍了一个应用实例，即山东太平煤矿采用疏放水技术预防近松散层水砂突涌的实践，由隋旺华、杨伟峰、杭远、张改玲、董青红、陈德俊和赵庆杰编写。全书经参编人员审阅后，最后由隋旺华统编定稿。

在有关项目的研究中，得到中国矿业大学教授狄乾生的悉心指导，其中不少内容是狄教授有关学术思想的细化和延伸。中国矿业大学教授郑世书、李宾亭、姜振泉、李文平、杨兰和、周圣武和孙亚军等在课题和研究过程中也都给予了热情的指导。中国科学院院士宋振琪，中国工程院院士卢耀如，已故中国工程院院士刘天泉、胡海涛，中国科学院地质与地球物理研究所研究员许兵，煤炭科学研究总院西安研究院研究员虎维岳，中国矿业大学（北京）教授武强，中国石油大学（北京）教授康永尚，安徽理工大学教授吴基文、胡友彪，山东科技大学教授郭嘉维、张文泉、翟德元，山东煤炭学会总工程师于仁运，肥城矿业集团总工程师张希平，兖州矿业集团煤业集团总工程师倪兴华等专家学者在相关项目的论证和评审中给予了大力支持和帮助，并进一步促进了对近松散层采掘中科学问题的提炼。参加有关项目研究的人员还有济宁矿业集团总工程师徐振和、太平煤矿总工程师齐胜春等，大统矿业集团董事长刘佩成、总裁郭永泉、总工程师刘东升和矿长郭典伟等，宏河矿业集团董事长马亿刚和总工程师马福祥等，在此对以上单位和个人，一并表示衷心的感谢！作者在研究和写作过程中参考和引用了相关学者及技术人员的文献和资料，这些文献和资料是本书的重要背景，书后的参考文献中列出了所引文献，并在引用处进行了标

注，在此谨向原作者表示衷心的感谢，如有引述不当或疏忽之处，也请原作者谅解。

安全为天。矿山企业在提高资源回收率 and 经济效益的时候，一定要把安全生产放在首要位置。作为采矿工程的先导和眼睛，地质工作者首先要获得可靠的第一手地质资料，研究者也要把结论和成果奠定在科学可靠的第一手资料的基础上。因此，正确认识所涉及的地质体的性质及其赋存的地质环境对于得出科学可靠的结论至关重要。让我们共同努力，达到安全与效益的共赢。

关于近松散层采掘溃砂或水砂突涌的研究，本书的成果仅仅算是起步，还有许多问题需要研究，正确的理论指导和足够的实践检验是这项研究赖以前进的动力。我们在研究和实践过程中，也常常感觉到巨大的压力和困难，这压力与困难不仅来自科学攀登的艰辛，更来自对矿工安全内心期盼的责任感，如履薄冰，如临深渊。正像法国著名的物理学家 G. 李普曼所说：“人的生命是短暂的，而事业的进展则十分缓慢。”我们真诚地期待着各位专家学者和从事矿井地质第一线工作的技术人员多提宝贵意见，共同促进煤矿工程地质学科的发展。

联系方式：江苏省徐州市中国矿业大学资源与地球科学学院煤矿工程地质研究所隋旺华，邮政编码：221008，E-mail: suiwanghua@263.net。

隋旺华

2008 年春节于徐州完成初稿，2008 年 8 月定稿

目 次

前言

1 绪论	(1)
1.1 研究意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(2)
1.3 主要内容	(4)
1.4 技术路线与研究方案	(5)
2 开采覆岩工程地质模型	(7)
2.1 工程地质模型	(7)
2.2 开采覆岩工程地质模型可视化	(11)
3 近松散层开采覆岩破坏特征	(42)
3.1 煤系风化带岩体的工程地质特征	(42)
3.2 覆岩破坏工程地质力学模型实验	(49)
3.3 近松散层开采覆岩破坏实测	(73)
4 水砂突涌临界水力坡度及安全水头	(82)
4.1 采动裂缝带上覆松散层水砂突涌临界水力坡度实验	(82)
4.2 土的渗透稳定性及水砂突涌安全水头	(106)
4.3 煤系强风化带渗透特性和抗渗透能力实验	(116)
4.4 底部粘土层防溃砂保护作用	(131)
5 水砂突涌孔隙水压力变化	(141)
5.1 离心模拟实验	(141)
5.2 采动水压力监测及突砂模拟实验	(145)
6 采掘溃砂工程地质模式及开采上限决策	(162)
6.1 溃砂或水砂突涌工程地质模式	(162)
6.2 开采上限工程地质决策方法	(165)
7 实例：厚松散含水层下疏降水与厚煤层安全开采	(190)
7.1 概况	(190)
7.2 矿井水文地质工程地质条件	(197)
7.3 疏放水设计及效果分析	(205)
7.4 松散层底部含水层水位疏降数值模拟	(225)
参考文献	(242)
英文摘要	(249)
作者简介	(252)
索引	(254)

Contents

Preface

1 Introduction	(1)
1.1 Significance	(1)
1.2 Research status at home and abroad	(2)
1.3 Main content	(4)
1.4 Technology roadmap and research program	(5)
2 An Engineering geological model for coal mining overburden	(7)
2.1 Engineering geological model	(7)
2.2 Visualization of engineering geological model for coal mining overburden	(11)
3 Overburden failures due to mining adjacent to unconsolidated formations	(42)
3.1 Engineering geological conditions of weathered rock mass in coal-measures	(42)
3.2 Results of geomechanical model tests	(49)
3.3 Measurement results	(73)
4 Critical percolation gradient and safety water head of quicksand	(82)
4.1 An experiment for the critical percolation gradient through mining fissures	(82)
4.2 Percolation stability and safety water head of quicksand	(106)
4.3 Permeability of deeply weathered zone in coal-measures	(116)
4.4 Protect function of bottom clay layers against quicksand	(131)
5 Pore water variations during quicksand	(141)
5.1 Results from centrifuge model tests	(141)
5.2 Results from quicksand model tests	(145)
6 Engineering geological models for quicksand and decision for the upper mining limit	(162)
6.1 Engineering geological models for quicksand	(162)
6.2 Approach to engineering geological decision for the upper mining limit	(165)
7 A case study: Thick coal seam mining under dewatered middle abundance aquifers	(190)
7.1 Introduction	(190)
7.2 Hydrogeological and engineering geological conditions	(197)
7.3 Design and effect of dewatering	(205)
7.4 Numerical simulation of dewatering the bottom aquifers	(225)
References	(242)
Abstract	(249)
Contributors	(252)
Index	(254)

1 绪 论

近松散层开采的研究和实践已经解放了大量的呆滞煤炭资源,但仍然面临提高煤炭企业经济效益、安全生产和环境保护的多重压力。采掘溃砂或水砂突涌是近松散层采掘时含砂量较高的水砂混合流体溃入井下工作面并造成财产损失及人员伤亡的一种矿井地质灾害。解决采掘溃砂或水砂突涌防治这一难题应考虑的科学问题包括水砂突涌机制、采动影响下上覆岩(土)渗透变形水动力学特征、开采上限工程地质决策模型等。当前,在技术层面上要抓紧开发溃砂或水砂突涌自动监测和预报系统,完善主动应对水砂突涌的工程措施和开采技术措施,为煤炭工业的科学发展和安全生产服务。

1.1 研究意义

能源是我国可持续发展需要解决的首要瓶颈问题^[1~3]。煤炭在我国一次能源结构中占据主导地位,目前占全部能耗的68.8%,预计2020年仍将占到60%左右,这种格局在21世纪前半叶不会发生实质性变化。煤炭工业又是一个高风险的行业,煤炭百万吨死亡率居高不下、重特重大事故频繁发生,其中复杂的地质条件是造成灾害性事故的根本原因。

煤层开采引起上覆岩土体应力重新分布,使上覆岩土层(包括含水层、隔水层)产生位移、变形、破坏和渗流变化等一系列工程地质作用过程。在水体下(包括地表水体和含水层下)采煤时,科学合理地设计开采上限,防止突水溃砂,对保护矿工生命安全和国家财产具有重大的意义。华东、华北和西北地区的许多煤矿开展了提高开采上限的试验和开采实践。近年来,开采上限提高的程度以及由此产生的水文地质工程地质问题的复杂性,都为国内外采矿界所罕见。

溃砂或水砂突涌是近松散层采掘时含砂量较高的水砂混合流体溃入井下工作面并造成财产损失及人员伤亡的一种矿井地质灾害。溃砂或水砂突涌产生的机理和影响因素与一般意义上的矿井水害不同,应作为一种独立的矿井地质灾害种类来对待,对于它的评价、预测、预防和治理方法,用传统的理论方法、规程已经很难适应。溃砂或水砂突涌灾害机制与预防研究的重要意义表现在以下几个方面:

(1) 提高煤炭资源回采率是缓解能源紧张的迫切要求

我国水体下压煤量巨大,仅苏鲁豫皖煤矿留设的松散层防水煤岩柱就有50亿t之多。矿井生产初期一般都避开水体下开采的问题,但是我国人口众多、煤炭需求量大,为了缓解能源紧张,最大限度地提高煤炭资源回采率,就成为刻不容缓的任务。我国东部矿井在进入深部开采的同时,更要对矿井上部开采水平的水体下、建筑物下和铁路下等“三下”压煤进行开采,这对提高煤矿的生产效率,促进煤炭生产高产高效,回收矿井建设成本,具有重要的意义。

(2) 煤炭企业面临着挖潜改造提高效益和安全生产的双重压力

靠近松散层的煤层上覆基岩厚度小(大部分为0~60 m,一般仅有0~30 m),时刻

面临着水砂突涌的威胁。突水、涌砂事故轻者冲垮工作面、淹没设备、增加矿井排水负担,严重者造成人员伤亡、淹井,全国已经发生数十起近松散层开采上部含水层造成的水砂突涌和淹井事故,造成重大经济损失,严重威胁矿工生命安全。例如 2002 年 10 月山东兖州横河煤矿提高开采上限发生的突砂事故、皖北祁东煤矿 2001 年 11 月 24 日的淹井事故都造成了重大损失和严重的社会影响。因此,研究水砂突涌机制,对减少和防止生命和财产的损失具有重要的意义。

(3) 合理确定开采上限、预防溃砂或水砂突涌也是保护地质环境和地下水资源的需求

我国水资源分布不平衡,华东、华北、西北等煤炭基地的地下水资源尤其宝贵。靠近松散含水层开采会造成大量地下水流入矿井,而这部分水被污染后又作为矿井废水排出、流失,每年流失量将以数亿立方米计^[4]。因此,在做好“保水采煤”,提出相应开采及工程措施方面,溃砂或水砂突涌的研究也是十分重要的。

(4) 传统规范、规程难以适用近松散含水层下开采上限确定

靠近松散层浅部采煤时,由于覆岩结构、力学性质、含水条件等与正常条件下的开采有很大不同,采用传统的规范、规程确定开采上限的方法已经难以适用,而全国在近松散含水层下已经进行的大量开采实践还缺乏系统的研究、归纳和总结。这就要求我们以新方法、新思路对此类地质采矿条件下突水、突砂机制和开采上限确定的方法进行系统研究。

(5) 近松散层开采溃砂或水砂突涌机制与防治研究具有重要的学术价值和广阔的应用前景

近松散层开采水砂突涌机制与防治研究将拓宽工程地质学科的研究领域,促进工程地质、水文地质、采矿工程、开采沉陷学科的交叉渗透,促进形成新的学科生长点;同时,水砂突涌过程中的可测变化因素(应变、应力、孔隙水压力)的变化规律及突涌前兆研究,为发展产业化的水砂突涌自动监测预报技术将奠定理论基础,同时为防治溃砂或水砂突涌地质工程措施(例如疏降含水层水位、注浆改造等)的选择提供依据;最终为解放大量呆滞煤炭资源提供科学理论和技术依据。

1.2 国内外研究现状

(1) 水土(岩)耦合理论

开采溃砂或水砂突涌是一个非常复杂的耦合问题,包括渗流场、应力场、应变场、温度场等多种物理化学场的复杂耦合。目前正迅速发展的耦合理论和技术对解决此类问题具有明显的优势。水土(岩)耦合理论最早被用于解决土的固结问题,自比奥^[5]发表固结理论起,半个多世纪以来,复杂的材料模式和本构关系被不断引入,在解决实际问题中起到了重要的作用。双重孔隙介质(dual-porosity)概念最早由 Barenblatt 等提出,并用于研究裂隙-孔隙介质的渗流^[6]。经过一定的简化以后,该理论被用于石油工业中^[7]。耦合双重介质孔隙弹性理论由 Aifantis 提出^[8],将固体变形对裂隙孔隙介质中渗流的影响结合在一起考虑。此后,双重孔隙弹性理论被广泛地扩展到多相流、热孔隙弹塑性、非线性流动以及各项工程中。双重孔隙弹性理论在英国、美国、加拿大、澳大利亚和其他许多国家得到广泛的承认,特别在石油、地下水、环境工程等领域被广泛应用。该理论由刘天泉院士

和白矛引入中国采动岩体变形渗流研究中^[9],并在三亚组织了相关的国际会议,展示了国内外岩石力学、采矿工程、石油工程、土木工程、环境工程领域在水土(岩)耦合作用理论研究和应用的进展^[10]。水土(岩)耦合理论的发展为溃砂或水砂突涌研究提供了理论基础和思路。

(2) 近松散含水层下开采实践

50多年来,我国在水体下采煤方面进行了大量的研究和实践,积累了丰富的经验,国家煤炭工业局于2000年修订了建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程^[11],在覆岩破坏研究等相关领域取得了一批重要的理论和实践成果^[12~16],各类地表水体下的开采实践为近松散层下开采溃砂或水砂突涌预测研究提供了有益的启示^[17~22]。松散含水层下采煤是水体下采煤的重要方面,近年来华东、华北、西北等地的许多煤矿,开采上限不断提高,已经在不同矿区、不同富水程度的松散层下进行了煤层开采^[23~40]。我国水体下采煤和近年逐步增多的近松散含水层下开采实践,在不同地质采矿条件下近松散层开采中积累了丰富的开采上限、覆岩破坏、水害、水砂突涌的资料,是构筑溃砂或水砂突涌灾害工程地质模型的重要基础。

(3) 新理论与新技术应用

自1980年以来,针对松散含水层下采煤开展了大量的专题研究,各种新理论和新技术被广泛应用于导水裂缝带探测和预测中。理论方面有系统理论方法、神经网络、模糊数学等^[41~43];探测技术方面有微震监测、钻孔电视、地质雷达、井下测井、相似材料模拟、离心模拟、数值模拟、电法和地震勘探等^[44~47]。煤矿底板突水研究中的优势面理论和智能监测技术成果也提供了有益的参考^[48~51]。现代非线性理论、地球探测信息技术、实验技术等为水下采煤溃砂或水砂突涌研究提供了有益启示和技术手段。

(4) 工程地质模型及空间数据管理系统

溃砂或水砂突涌机制研究的目的是为确定科学安全的开采上限服务。开采上限的决策是一个典型的工程地质决策问题,工程地质模型的思维方式为其提供了一个有力的解决工具。

工程地质模型是中国科学院孙玉科、许兵教授于1996年、1997年提出的工程地质新概念^[52~54],其主旨是将工程涉及的“关键要素按真实的状态,巧妙地用图形表现出来”,是“对工程地质条件作一浓缩”。这一模型具有两类属性:一是自然属性,即地质体的存在是客观的;二是认识属性,这与人们对工程地质问题的认识水平有关。建立模型的过程应在提高认识水平的基础上充分认清其自然属性。孙玉科^[55]等将工程地质模型用于中国露天矿边坡稳定性研究,取得了丰硕的成果。自20世纪50年代CAD和GIS在加拿大和美国开始发展至今,人们对三维空间数据的管理与应用的能力和手段已经大大加强。1990年以来,三维地质模型的研究在地质勘探、水文地质学、工程地质学、岩石力学^[56~63]等领域都有了长足的进展。1998年“数字地球”概念的提出指明了地质领域信息化研究的方向。我国石油系统较早地提出了三维地质模型的概念,用于地震勘探的数据解释。蒋晗实现了复杂地貌地形的三维地形数字模型和三维地质体剖面生成^[64]。柴贺军等建立了岩体结构的三维可视化模型,为地质工程的设计施工提供了模型资料和地质依据,为专业人员对工程地质问题的正确判断提供综合信息。刘大安、杨志法等^[65]建立了综合地质信息系统(SGIS)并将其应用到大型水电船闸边坡的监控与信息化施工决策。王常明、陈剑

平、肖树芳、陈昌彦等在不连续面预测及边坡工程地质信息可视化方面进行了卓有成效的工作^[66-67]。工程地质模型的理念以及空间数据管理系统为溃砂或水砂突涌研究工作提供了思维方法和有力的工具。

(5) 研究与实践中仍存在的主要问题

①对近松散层开采水砂突涌的机理亟待进一步深入研究。一方面,对覆岩破坏规律的认识人们还习惯于在岩层厚度较大情况下获得的经验,以往对覆岩破坏规律性的认识大都是在覆岩厚度比较大(一般大于导水裂缝带发育高度)、结构相对完整的情况下获得的,显然,它不适应近松散层覆岩(包括风化岩体)的结构与性质,覆岩破坏的形式、范围都会发生变化,传统的研究也没有把覆岩变形破坏与此种条件下的渗透变形、水砂突涌综合考虑并作为耦合问题研究;另一方面,采矿实践也已证明,由于缺乏对此类地质条件下水砂突涌机制的研究,传统规范方法已经不能恰当地指导此类地质条件下开采上限的确定。实际中,不少矿井开采上限已经大大突破了规程的限制,例如兖州的杨庄煤矿、枣庄的柴里煤矿、淮北的芦岭煤矿和百善煤矿等,但是也有矿井虽然符合规程规定的留设防水煤岩柱高度的要求仍然发生突水甚至淹井事故,例如皖北祁东煤矿,在留设防水煤岩柱高度大于规程要求的情况下,于2001年11月24日仍发生了1500 m³/h的涌水淹井事故^[68]。

②开采上限决策仍停留在定性分析与经验类比阶段。经验类比方法的基础是在试采区打一定数量的钻孔实测覆岩破坏高度,找出其与岩性、采高等的经验关系,用于新采区或者新矿区的覆岩破坏高度预测,留设一定的安全保护层后,确定开采上限。经验类比法在解决以往较深部开采时起到了重要作用,但是由于开采上限的提高,近风化带和风化带覆岩性质变化较大,难以再在采前获得覆岩破坏的确切垮落带、导水裂缝带数据。因此,以工程地质学、水文地质学和岩土力学为基础的系统分析方法,近年来已经被较多的研究者引入到覆岩破坏的预测中^[16]。预测、预防和治理溃砂或水砂突涌、较为准确地进行开采上限设计,需要涉及多种综合因素的评价分析,如地质条件、水文地质条件、工程地质条件、采矿方法、顶板管理方法等。如何在机理研究的基础上建立水砂突涌及开采上限决策模型,做到信息化和实时决策,工程地质模型的理念和空间数据管理方法无疑是一条有效的途径,可以充分运用模型的动态信息采集、管理、分析、模拟和预测功能,实现对煤层采动效应的模拟,预测水砂突涌的危险性,实现开采上限的快速实时分析决策。

1.3 主要内容

近松散层采掘溃砂或水砂突涌机理和防治研究的总体目标是:深入研究靠近松散含水层、薄基岩条件下采煤时覆岩(土)破坏机理和水砂突涌机制,考虑影响覆岩变形破坏、水砂突涌的各种工程地质与地质环境要素,建立相应的工程地质决策模型,充分利用模型的动态信息采集、管理、分析、模拟与预测功能,为发展近松散层采煤的实时监测系统和实现开采上限的快速实时分析、决策以及防治溃砂或水砂突涌地质工程措施的辅助决策奠定理论基础。具体研究内容有:

(1) 水砂突涌机制

煤系风化带岩体覆岩结构、岩体力学性质、水文地质条件研究。重点研究煤系风化带岩体的物质组成、岩体结构、强度、变形性质,以及岩体渗透特性与物质组成和岩体结构

的关系,获得不同工程地质类型的覆岩及风化带岩体天然状态下水文地质工程地质特征,特别是渗透性变化规律,作为研究采动影响下不同变形条件的覆岩渗透特征变化的基础。

松散层的水文地质条件与工程地质性质研究。重点研究松散含水层、隔水层的物质组成、渗透特性、高压作用下的力学性质、应力历史、不同粒度成分的松散层在不同压力变形条件下的渗透性质变化等。

采动影响下覆岩(土)渗透变形的水动力学研究。包括采动影响下覆岩渗透特性、受采动破坏岩体和风化破碎岩体以及靠近风化带的松散层发生水砂突涌的临界水力坡度和抗渗透变形能力的研究,获得采动覆岩应力、变形、破坏和覆岩渗透特性、抗渗透变形能力之间的关系。

溃砂或水砂突涌工程地质模式及机理研究。对全国主要煤矿提高开采上限的溃砂或水砂突涌灾害进行调查,研究,概化水砂突涌的地质模式及工程地质作用过程。在松散层内和基岩风化带内进行应力监测和孔隙水压力监测,采用地面钻孔、井下钻孔、地球物理探测等多种综合手段确定覆岩破坏状况及其随着采动的变化。采用大型工程地质力学模型试验模拟薄覆岩采动变形破坏机理及上覆土层变形破坏机理,并模拟不同工程地质条件和采矿条件对覆岩(土)破坏和水砂突涌的控制,采用离心模型和突砂模型实验模拟土体含水层与隔水层内孔隙水压力变化规律及溃砂或水砂突涌前兆。

开采上限工程地质决策模型的研究。在溃砂或水砂突涌模式、机制研究的基础上,重点研究工程地质模型的要素构成、信息组织与处理技术、信息更新、预测及实测反馈、可视化及工程地质分析技术。

(2) 溃砂或水砂突涌防治的地质工程措施

为了保证安全生产和最大限度地回收煤炭资源,各种主动的地质工程措施被越来越多的煤炭企业所重视和采取。

疏降松散层底部含水层中的地下水位是常用的措施之一,在舒兰、淮北、淮南和兖州等矿区一般采取地面深井抽水、井下钻孔放水、地面直通放水钻孔疏降、巷道疏干或多种方式配合使用。疏降过程中如何有效地控制溃砂以及如何确定疏降程度是需要重点探索的问题。在采煤工作面使用双抗网防砂,已经在淮北矿区、兖州矿区近松散层开采的煤矿中得到很好的应用,不失为一种有效的防溃砂措施。

条带开采、房柱开采等不完全开采措施或者井下充填技术,无疑是减少顶板覆岩以及上部土层中隔水层和含水层破坏的重要措施,在技术经济比较合理的条件下应该尽量推广应用。

(3) 溃砂或水砂突涌监测预报技术基础

对靠近松散含水层开采覆岩变形、破坏、土体含水层和隔水层各种可测因素变化规律的研究,获取溃砂或水砂突涌的前兆信息及其变化,是目前国内外尚未解决的难题,应当引起研究者和煤炭企业的高度重视。建立实用的预测模型,以尽快形成溃砂或水砂突涌自动监测预报系统,为开采决策提供可靠的依据。

1.4 技术路线与研究方案

近松散层采掘溃砂或水砂突涌机理和防治研究的总体技术路线是以水土(岩)相互

作用理论为指导,以工程地质模型的理念和地学信息技术为平台,综合采用工程地质学、水文地质学、岩土力学、开采沉陷学、采矿工程学的研究方法和试验测试手段,从近松散含水层、薄基岩条件下开采水砂突涌的工程地质模式、影响水砂突涌的基本地质因素、采矿因素入手,以现场实测、工程地质力学模型实验、离心模型实验技术为主要手段,以研究采动影响下上覆岩体、松散含、隔水层的渗透变形以及异常孔隙水压力和其他敏感信息或信息集合变化规律为核心和突破口,研究水砂突涌机制及其预测模型,最终建立开采上限决策模型和地质工程辅助决策系统,并应用于近松散层开采溃砂或水砂突涌防治实践。

采用传统工程地质方法和现代地球信息技术相结合、定性和定量相结合、野外和室内相结合的研究方法。具体方案如下:

①从松散层下采煤溃砂或水砂突涌第一性工程地质资料的获得及规律性分析入手,对华东、华北、西北地区松散含水层下开采的矿井进行系统调研,重点调研与水砂突涌有关的岩土工程地质条件、水文地质条件、覆岩变形破坏状况、水砂突涌的过程、防治水砂突涌的工程措施等,在此基础上通过分析归纳出近松散层开采水砂突涌的工程地质模式及其与地质采矿要素的关系。

②重点选择兖州和济宁矿区靠近松散层开采的工作面为地质原型,对近松散层开采水砂突涌和相关工程地质、水文地质及地质环境因素进行对比研究。采取岩土样进行基本物理水理力学性质试验、渗透变形试验。在采煤工作面(或模型)上覆基岩、松散含水层和隔水层中埋设压力和孔隙水压力传感器,监测采动影响下应力和孔隙水压力的变化,为捕捉突涌前兆敏感信息和建立采动溃砂或水砂突涌预测模型提供基础数据。

③在概化的水砂突涌工程地质作用模式和现场实测研究的基础上,采用大型工程地质力学模型实验模拟采动影响下覆岩变形破坏特征、上覆土层变形破坏特征、采动应力与岩体渗透变形及水砂突涌的关系,利用模型实验比较方便模拟不同工程水文地质条件的便利,分别模拟不同岩层工程地质组合、不同岩体结构、不同结构面特征影响下的水砂突涌机理。试验中采用微型传感器测定模型不同部分(覆岩、土层)的应力、应变、孔隙水压力变化。采用离心模型和水砂突涌实验重点研究上覆含隔水层中孔隙水压力随着开采发生的变化和溃砂或水砂突涌时孔隙水压力等信息的变化规律,确定预测模型的敏感信息或信息集合。

④定性模型与定量模型相结合,采用可靠度方法、人工神经网络和 GIS 多元信息拟合方法等,建立反映溃砂或水砂突涌机制的开采上限工程地质决策模型。

2 开采覆岩工程地质模型

工程地质工作在煤矿设计、建井和开采过程中非常重要，但是煤田地质和工程地质勘探的大量资料往往不能表达为设计人员和生产人员所需要的形式，制约了工程地质成果的应用。工程地质模型概念的提出为这一问题提供了解决途径。工程地质模型是包括工程地质单元、岩体结构、地质构造、水文地质结构、地应力、不良地质现象等地质环境和工程条件在内的综合模型。煤矿工程地质模型可以按工程应用目的分类，例如巷道工程地质模型、开采工程地质模型等；也可按模型研究的深入程度和进展阶段分为预测模型、过程模型和结果模型。模型可以用一系列图表或数字化形式表示，可以根据需要建立二维或三维模型。本章以山东济宁太平煤矿厚松散含水层确定开采上限的工程地质研究为例，初步实现了对影响确定开采上限的建模要素的提取、各建模要素空间形态的三维描述和可视化，为开采覆岩破坏预测特别是对垮落带和导水裂缝带在时空上的发育演化的预测、动态模拟和显示奠定了基础。

2.1 工程地质模型

2.1.1 工程地质模型产生的学术背景^[52~55,69]

所谓模型，就是根据实物、设计图或构想，按比例（有的不一定按比例）、形态或主要特征（或者说要素）做成相似的物体或图示，用以展现、揭示或阐明一类事物和问题。

工程地质模型这一术语，最早在1983年由孙玉科、姚宝魁教授共同撰写的《我国岩质边坡变形破坏的主要地质模式》一文^[69]中提出，当时为了解决边坡变形破坏的边界条件问题，提出了“地质模型”的概念。近些年来，许多工程地质学文章中使用“模型”这一术语，有的称“地质模型”，也有的称“工程地质模型”。许兵教授在《论工程地质模型》^[54]一文中认为称“工程地质模型”为宜，并对工程地质模型的含义作了简要说明，指出：工程地质模型就是依据工程性状，将重要的工程地质条件，按实际状态，简明醒目地用图形表示出来，简言之，即为工程与地质条件相互依存的图示。

工程地质模型概念的提出，使以地质为基础、地质与工程紧密结合的工程地质力学学术思想真正落到实处，也是岩体结构控制论^[70]的具体化与发展。工程地质模型的产生，是工程地质条件研究深化的表现，是工程实践发展的客观需要，成为工程地质学的一个重要的发展趋势。工程地质模型是后续研究的基础，通过与模型论和高新技术相结合，为工程地质问题的解决提供了一种新的方法。

2.1.2 工程地质模型的含义和性质^[52~55]

工程地质模型，实质上是在已定的工程前提下，对工程地质条件做一浓缩，标明工程