“十三五”国家重点出版物出版规划项目

岩石力学与工程研究著作丛书

坚硬顶板岩层控制

◎于 斌 霍丙杰 著

科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
岩石力学与工程研究著作丛书

坚硬顶板岩层控制

于 斌 霍丙杰 著

国家重点研发计划项目(2016YFC0600700)
国家自然科学基金项目(51504127)

安徽理工大学 藏書 图書馆

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书针对多年来大同矿区坚硬顶板特厚煤层开采理论与实践研究成果，进行系统的总结分析、归纳、整理和提升。内容涉及坚硬顶板大空间采场覆岩结构失稳理论、覆岩运动实测技术及大空间采场坚硬顶板控制技术等方面，主要包括大空间采场及远近场概念、区域地质动力环境评估、坚硬顶板分类方法、大空间采场坚硬顶板运动与覆岩结构失稳的力学特征、岩层破裂演化实测技术、坚硬顶板大空间采场矿压显现规律及坚硬顶板远近场控制技术等。

本书可供采矿工程、安全工程相关专业的科研院所研究人员、工程技术人员以及高等院校学生阅读及参考。

图书在版编目(CIP)数据

坚硬顶板岩层控制/于斌，霍丙杰著. —北京：科学出版社，2019.1
（岩石力学与工程研究著作丛书）
“十三五”国家重点出版物出版规划项目
ISBN 978-7-03-059775-5

Ⅰ.①坚… Ⅱ.①于…②霍… Ⅲ.①特厚煤层-煤矿开采-坚硬顶板-顶板岩层-岩层控制-研究 Ⅳ.①TD327.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 277144 号

责任编辑：牛宇锋 乔丽维 / 责任校对：王萌萌
责任印制：师艳茹 / 封面设计：陈 敬

科学出版社出版
北京东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com
北京通州皇家印刷厂 印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2019 年 1 月第 一 版 开本：720×1000 1/16
2019 年 1 月第一次印刷 印张：31 1/4 图版：16
字数：606 000
定价：238.00 元
（如有印装质量问题，我社负责调换）

《岩石力学与工程研究著作丛书》编委会

名誉主编： 孙　钧　王思敬　钱七虎　谢和平

主　　编： 冯夏庭　何满潮

副 主 编： 康红普　李术才　潘一山　殷跃平　周创兵

秘 书 长： 黄理兴　刘宝莉

编　　委：（按姓氏汉语拼音顺序排列）

蔡美峰　曹　洪　陈卫忠　陈云敏　陈志龙
邓建辉　杜时贵　杜修力　范秋雁　冯夏庭
高文学　郭熙灵　何昌荣　何满潮　黄宏伟
黄理兴　蒋宇静　焦玉勇　金丰年　景海河
鞠　杨　康红普　李　宁　李　晓　李海波
李建林　李世海　李术才　李夕兵　李小春
李新平　廖红建　刘宝莉　刘大安　刘汉东
刘汉龙　刘泉声　吕爱钟　潘一山　戚承志
任辉启　佘诗刚　盛　谦　施　斌　宋胜武
谭卓英　唐春安　汪小刚　王　驹　王　媛
王金安　王明洋　王旭东　王学潮　王义峰
王芝银　邬爱清　谢富仁　谢雄耀　徐卫亚
薛　强　杨　强　杨更社　杨光华　殷跃平
岳中琦　张金良　张强勇　赵　文　赵阳升
郑　宏　郑炳旭　周创兵　朱合华　朱万成

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

随着西部大开发等相关战略的实施，国家重大基础设施建设正以前所未有的速度在全国展开：在建、拟建水电工程达 30 多项，大多以地下硐室（群）为其主要水工建筑物，如龙滩、小湾、三板溪、水布垭、虎跳峡、向家坝等水电站，其中白鹤滩水电站的地下厂房高达 90m、宽达 35m、长 400 多米；锦屏二级水电站 4 条引水隧道，单洞长 16.67km，最大埋深 2525m，是世界上埋深与规模均为最大的水工引水隧洞；规划中的南水北调西线工程的隧洞埋深大多在 400～900m，最大埋深 1150m。矿产资源与石油开采向深部延伸，许多矿山采深已达 1200m 以上。高应力的作用使得地下工程冲击地压显现剧烈，岩爆危险性增加，巷（隧）道变形速度加快、持续时间长。城镇建设与地下空间开发、高速公路与高速铁路建设日新月异。海洋工程（如深海石油与矿产资源的开发等）也出现方兴未艾的发展势头。能源地下储存、高放核废物的深地质处置、天然气水合物的勘探与安全开采、CO_2 地下隔离等已引起高度重视，有的已列入国家发展规划。这些工程建设提出了许多前所未有的岩石力学前沿课题和亟待解决的工程技术难题。例如，深部高应力下地下工程安全性评价与设计优化问题，高山峡谷地区高陡边坡的稳定性问题，地下油气储库、高放核废物深地质处置库以及地下 CO_2 隔离层的安全性问题，深部岩体的分区碎裂化的演化机制与规律，等等。这些难题的解决迫切需要岩石力学理论的发展与相关技术的突破。

近几年来，863 计划、973 计划、“十一五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大研究计划以及人才和面上项目、中国科学院知识创新工程项目、教育部重点（重大）与人才项目等，对攻克上述科学与工程技术难题陆续给予了有力资助，并针对重大工程在设计和施工过程中遇到的技术难题组织了一些专项科研，吸收国内外的优势力量进行攻关。在各方面的支持下，这些课题已经取得了很多很好的研究成果，并在国家重点工程建设中发挥了重要的作用。目前组织国内同行将上述领域所研究的成果进行系统的总结，并出版《岩石力学与工程研究著作丛书》，值得钦佩、支持与鼓励。

该丛书涉及近几年来我国围绕岩石力学学科的国际前沿、国家重大工程建设中所遇到的工程技术难题的攻克等方面所取得的主要创新性研究成果，包括深部及其复杂条件下的岩体力学的室内、原位实验方法和技术，考虑复杂条件与过程（如高应力、高渗透压、高应变速率、温度-水流-应力-化学耦合）的岩体力学特性、变形破裂过程规律及其数学模型、分析方法与理论，地质超前预报方法与技术，工程

地质灾害预测预报与防治措施，断续节理岩体的加固止裂机理与设计方法，灾害环境下重大工程的安全性，岩石工程实时监测技术与应用，岩石工程施工过程仿真、动态反馈分析与设计优化，典型与特殊岩石工程（海底隧道、深埋长隧洞、高陡边坡、膨胀岩工程等）超规范的设计与实践实例，等等。

岩石力学是一门应用性很强的学科。岩石力学课题来自于工程建设，岩石力学理论以解决复杂的岩石工程技术难题为生命力，在工程实践中检验、完善和发展。该丛书较好地体现了这一岩石力学学科的属性与特色。

我深信《岩石力学与工程研究著作丛书》的出版，必将推动我国岩石力学与工程研究工作的深入开展，在人才培养、岩石工程建设难题的攻克以及推动技术进步方面发挥显著的作用。

钱七虎

2007 年 12 月 8 日

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

近20年来，随着我国许多举世瞩目的岩石工程不断兴建，岩石力学与工程学科各领域的理论研究和工程实践得到较广泛的发展，科研水平与工程技术能力得到大幅度提高，在岩石力学与工程基本特性、理论与建模、智能分析与计算、设计与虚拟仿真、施工控制与信息化、测试与监测、灾害性防治、工程建设与环境协调等诸多学科方向与领域都取得了辉煌成绩。特别是解决岩石工程建设中的关键性复杂技术疑难问题的方法，973计划、863计划、国家自然科学基金等重大、重点课题研究成果，为我国岩石力学与工程学科的发展发挥了重大的推动作用。

应科学出版社诚邀，由国际岩石力学学会副主席、岩土力学与工程国家重点实验室主任冯夏庭教授和黄理兴研究员策划，先后在武汉市与葫芦岛市召开《岩石力学与工程研究著作丛书》编写研讨会，组织我国岩石力学工程界的精英参与本丛书的撰写，以反映我国近期在岩石力学与工程研究领域取得的最新成果。本丛书内容涵盖岩石力学与工程的理论研究、试验方法、实验技术、计算仿真、工程实践等各个方面。

本丛书编委会编委由75位来自全国水利水电、煤炭石油、能源矿山、铁道交通、资源环境、市镇建设、国防科研等领域大专院校、工矿企业等单位与部门的岩石力学与工程界精英组成。编委会负责选题的审查，科学出版社负责稿件的审定与出版。

在本丛书的策划、组织与出版过程中，得到各专著作者与编委的积极响应；得到各界领导的关怀与支持，特别是中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎院士为丛书作序；中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭教授、黄理兴研究员与科学出版社刘宝莉编辑做了许多烦琐而有成效的工作，在此一并表示感谢。

“21世纪岩土力学与工程研究中心在中国”，这一理念已得到世人的共识。我们生长在这个年代里，感到无限的幸福与骄傲，同时我们也感觉到肩上的责任重大。我们组织编写这套丛书，希望能真实反映我国岩石力学与工程的现状与成果，希望对读者有所帮助，希望能为我国岩石力学学科发展与工程建设贡献一份力量。

《岩石力学与工程研究著作丛书》

编辑委员会

2007年11月28日

前　言

我国煤炭资源已探明储量中厚煤层储量占44%，每年井工开采的厚煤层产量占煤炭总产量的45%以上。从1982年开始研究引进厚煤层综放开采技术，经历了探索、逐渐成熟、技术成熟和推广、革新四个阶段，在大量的科研攻关和工业实践的基础上，逐步形成了厚及特厚煤层开采技术体系。随着开采煤层厚度的不断增加，开采后的巨大空间对矿井安全的影响越来越大，尤以坚硬岩层煤系地层更为显著。我国煤矿1/3的煤层赋存有坚硬顶板，且分布在50%以上的矿区，如大同、义马、新疆等矿区，其中大同矿区最为典型。

大同是我国最重要的煤炭城市之一，煤炭开采的历史有1500多年，清末开始形成规模开采，20世纪50年代末，大同市煤炭产量突破1000万t。伴随能源基地的建设和煤炭产业的快速发展，大同市煤炭企业也走过辉煌的历史。大同煤矿集团有限责任公司（简称大同煤矿集团）一直是全国最大的煤炭生产企业之一，2016年在世界500强企业中位列第322位，至2016年底累计生产原煤27亿t，为国家经济的发展做出巨大贡献。大同矿区作为我国主要的优质动力煤生产基地，承担着巨大的社会责任。其赋存的煤炭具有低灰、低硫、高热值属性，成为世界煤产品的名牌，是我国华北、华东、东北、东南等地区大型热电厂的首选动力用煤，在我国国民经济发展中占有重要的地位。大同矿区赋存的煤层为侏罗系和石炭-二叠系双系煤层，侏罗系煤炭资源已趋于枯竭，目前石炭-二叠系是大同矿区的主采煤层，赋存有厚度在15m以上的特厚煤层，覆岩中含有多层坚硬顶板，多为整体性强的厚砂岩、砾岩，层理节理均不发育，性质坚硬，坚固性系数 $f \geqslant 8$，导致顶板管理、开采装备配套、矿压显现、瓦斯防治等方面的一系列技术难题，严重制约了煤炭资源的安全、高效、高资源回收率开采，也严重影响了企业的可持续发展。因此，如何安全、高效地开采石炭系坚硬顶板特厚煤层资源对我国煤炭工业的持续、稳定发展有重大意义。多年来，大同煤矿集团经过和国内外高等院校、科研机构的产学研合作，在坚硬顶板特厚煤层（14～20m）大采高综放安全高效开采工艺、装备、顶板控制理论与技术方面取得了重大突破，丰富和发展了厚及特厚煤层开采理论与技术，相关项目获得了国家科技进步一等奖。

坚硬顶板特厚煤层采场采动空间大、覆岩运动范围广，形成大空间采场，采场矿压显现更为强烈、岩层控制更为困难。岩层控制是矿压控制的根本，其核心内容包括覆岩结构、岩移观测和控制技术。其中，岩移观测是覆岩结构研究和岩层控制技术实施的基础。采矿现场面向的是原位状态的煤岩，为非均质的条件，与实验室

给定的条件差异较大，地质条件和岩石力学性质又随着采掘活动不断变化而变化，加剧了覆岩结构特征研究、岩层运动特征监测的难度。实验室研究结果与实际现场发生的结果一般都相差甚远，因此进行岩层特性及其运动规律的连续监测很有必要。

作者根据大同矿区石炭系特厚煤层多年的工程实践与系统研究，明确定义了大空间采场及远近场的概念；构建了坚硬顶板大空间采场覆岩大结构模型，提出了大结构失稳理论；科学地揭示了特厚煤层采场远近场坚硬顶板破断对矿压显现及动压灾害的控制作用，合理地解释了大同矿区石炭系坚硬顶板特厚煤层采场具有大小周期来压、强矿压显现、矿压显现影响范围广等特殊矿压的现象；创立了大空间采场坚硬顶板的远近场协同控制技术。全书共 12 章：第 1 章主要给出大空间采场及远近场概念，阐述坚硬顶板开采特征和岩层控制理论研究现状；第 2 章主要分析特厚煤层开采的特点及大同矿区石炭系煤层的赋存条件；第 3 章介绍大同矿区石炭系坚硬顶板特厚煤层开采技术；第 4 章提出区域地质动力环境评估的一种方法；第 5 章探讨坚硬顶板的模糊综合分类方法；第 6 章主要论述大空间采场坚硬顶板结构特征、力学特征及其运动特征；第 7 章介绍岩层破裂演化常规实测技术，并系统阐述采动覆岩井上下联动“三位一体”综合观测方法；第 8 章研究大空间采场坚硬顶板矿压显现规律；第 9 章探讨大空间采场坚硬顶板煤柱力学特征；第 10 章和第 11 章分别论述大空间采场坚硬顶板的井上下、远近场控制技术；第 12 章系统阐述坚硬顶板岩层控制理论与技术的科学意义。

感谢中国矿业大学、辽宁工程技术大学、煤炭科学研究总院等科研院校给予的帮助和支持；感谢大同煤矿集团相关工程技术人员给予的帮助和支持。

由于能力和时间有限，书中难免存在不足之处，敬请广大读者批评指正。

于　斌

2018 年 5 月于大同

目　录

《岩石力学与工程研究著作丛书》序
《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话
前言
第 1 章　绪论 …… 1
1.1　煤矿开采的顶板问题 …… 1
1.2　坚硬顶板煤层开采特征 …… 2
1.3　岩层控制理论研究现状 …… 6
1.3.1　大空间采场矿压研究现状 …… 6
1.3.2　采场覆岩结构演化研究现状 …… 7
1.3.3　采场顶板结构稳定性研究现状 …… 12
1.3.4　坚硬顶板控制理论与技术研究现状 …… 13
1.4　大空间采场坚硬顶板岩层控制研究思路 …… 14
1.4.1　大空间采场及远近场概念 …… 14
1.4.2　研究思路 …… 16
参考文献 …… 18
第 2 章　大同矿区坚硬顶板特厚煤层开采条件 …… 22
2.1　特厚煤层开采特征 …… 22
2.2　特厚煤层上覆侏罗系煤层开采现状 …… 23
2.2.1　大同矿区开发历史 …… 23
2.2.2　侏罗系煤层赋存条件 …… 24
2.2.3　侏罗系煤层开采特征 …… 24
2.3　石炭系坚硬顶板特厚煤层赋存条件 …… 27
2.3.1　地质条件 …… 27
2.3.2　煤层赋存条件 …… 29
2.3.3　顶底板岩性 …… 32
2.3.4　瓦斯、煤尘和煤的自燃特征 …… 32
2.4　石炭系煤岩物理力学特征 …… 34
2.4.1　实验室煤岩物理力学参数测试方法与结果 …… 34
2.4.2　煤岩比表面积测试 …… 37
2.4.3　煤岩 XRD 测试 …… 40

2.4.4 煤岩全元素测试 …… 42
2.5 石炭系特厚煤层主要开采矿井概况 …… 44
2.5.1 同忻煤矿概况 …… 44
2.5.2 塔山煤矿概况 …… 46
参考文献 …… 47
第3章 大同矿区石炭系坚硬顶板特厚煤层开采技术 …… 49
3.1 坚硬顶板特厚煤层采煤方法选择 …… 49
3.2 采煤方法与回采工艺 …… 50
3.2.1 工作面巷道布置与参数 …… 50
3.2.2 回采工艺参数 …… 51
3.2.3 劳动组织与技术经济指标 …… 53
3.3 工作面开采装备选型 …… 56
3.3.1 工作面开采装备选型研究 …… 56
3.3.2 采煤机选型 …… 56
3.3.3 工作面前、后刮板输送机选型 …… 57
3.3.4 液压支架选型 …… 59
3.4 工作面安全高效开采技术 …… 62
3.4.1 大采高综放工作面顶板管理技术 …… 62
3.4.2 工作面过火成岩墙安全技术 …… 63
3.4.3 提高顶煤回收率技术 …… 64
参考文献 …… 67
第4章 区域地质动力环境评估 …… 69
4.1 大同矿区区域地质构造特征分析 …… 69
4.1.1 区域地质构造背景 …… 69
4.1.2 构造演化对含煤盆地的影响 …… 71
4.2 区域地质构造运动特征分析 …… 72
4.2.1 华北地区及边界的相对运动 …… 72
4.2.2 大同地区新构造运动 …… 74
4.3 区域应力特征分析 …… 75
4.3.1 区域构造应力场特征 …… 75
4.3.2 大同矿区现今构造应力场特征 …… 77
4.3.3 大同矿区地应力测量 …… 78
4.4 大同矿区典型矿井岩体应力状态分析 …… 83
4.4.1 同忻煤矿岩体应力状态分析 …… 83
4.4.2 忻州窑煤矿岩体应力状态分析 …… 86

4.5　大同矿区典型矿井地质动力环境评估 …… 92
4.5.1　矿井地质动力环境分析 …… 92
4.5.2　同忻煤矿地质动力环境评估 …… 93
4.5.3　忻州窑煤矿地质动力环境评估 …… 97
4.6　地质条件对矿井动力灾害的控制作用 …… 101
参考文献 …… 102
第5章　坚硬顶板分类方法研究 …… 104
5.1　国内外顶板分类方法概述 …… 104
5.2　矿压显现强度与影响因素定量关系数值模拟研究 …… 107
5.2.1　数值计算模型的建立 …… 107
5.2.2　不同煤岩属性的矿压显现特征 …… 108
5.3　坚硬顶板分类指标的确定 …… 111
5.4　基于层次分析和模糊综合评判的坚硬顶板分类研究 …… 112
5.4.1　层次分析法和模糊综合评判的数学原理 …… 112
5.4.2　坚硬顶板的模糊综合分类方法 …… 113
参考文献 …… 115
第6章　大空间采场坚硬顶板运动与力学特征 …… 118
6.1　坚硬顶板特厚煤层工作面关键层判定及破断特征 …… 118
6.1.1　覆岩关键层判定理论 …… 118
6.1.2　同忻煤矿 3-5# 煤层覆岩关键层判定结果 …… 120
6.1.3　同忻煤矿 3-5# 煤层覆岩关键层破断分析 …… 124
6.2　坚硬顶板特厚煤层采场结构模型 …… 133
6.2.1　多层坚硬顶板覆岩大结构形成机理 …… 133
6.2.2　多层坚硬顶板覆岩大结构形成过程 …… 135
6.3　大空间采场坚硬顶板运动特征的相似模拟研究 …… 136
6.3.1　相似材料模拟试验内容 …… 136
6.3.2　相似材料模拟试验及观测系统 …… 137
6.3.3　相似材料模拟试验模型设计与制作 …… 139
6.3.4　相似材料模拟试验过程及结果分析 …… 142
6.4　大空间采场坚硬顶板结构模型现场探测 …… 154
6.4.1　特厚煤层综放采场覆岩运动特征的钻孔电视探测 …… 154
6.4.2　工作面覆岩结构 EH-4 物理探测 …… 161
6.4.3　基于微地震监测技术的特厚煤层综放面围岩运动规律研究 …… 165
6.5　大空间采场坚硬顶板大结构力学特征 …… 190
6.5.1　坚硬顶板大结构力学模型 …… 190

6.5.2 柱壳结构模型和力学模型研究 …… 192
6.5.3 柱壳结构稳定性分析 …… 193
6.5.4 应用实例 …… 194
参考文献 …… 195
第 7 章 岩层破裂演化实测方法与技术 …… 198
7.1 概述 …… 198
7.2 钻孔冲洗液法与应用 …… 199
7.2.1 方法原理 …… 199
7.2.2 工程应用实例 …… 200
7.3 孔间电磁波 CT 测试岩体破裂演化原理与应用 …… 204
7.3.1 电磁波 CT 技术 …… 204
7.3.2 钻孔电磁波 CT 技术的原理和方法 …… 205
7.3.3 井间电磁波 CT 探测的岩溶特征工程应用 …… 206
7.4 覆岩破断微震监测技术 …… 209
7.4.1 微震监测技术 …… 209
7.4.2 由采矿活动导致微震的力学机理及分类 …… 210
7.4.3 煤柱两侧覆岩空间破裂与采动应力场关系的微震分析 …… 210
7.4.4 采空区覆岩高位裂隙体特征微震监测案例 …… 212
7.5 采动覆岩井上下联动“三位一体”综合观测方法 …… 216
7.5.1 方法原理 …… 216
7.5.2 采动覆岩内部岩移的监测仪器及软件系统 …… 216
7.5.3 “三位一体”综合观测方法应用 …… 217
7.6 实验室覆岩采动裂隙放射性测量系统与方法 …… 221
7.6.1 氡气工程领域应用分析 …… 221
7.6.2 氡气地表探测覆岩采动裂隙综合试验系统 …… 222
7.6.3 综合试验系统应用案例 …… 224
7.7 巷道围岩裂隙探测技术 …… 227
7.7.1 数字钻孔摄像法松动圈测试 …… 227
7.7.2 地质雷达法松动圈测试 …… 230
7.7.3 大同矿区“双系”煤巷围岩松动圈测试 …… 232
参考文献 …… 239
第 8 章 大空间采场坚硬顶板矿压显现规律 …… 241
8.1 大结构对采场矿压显现的影响 …… 241
8.2 大同矿区石炭系特厚煤层采场矿压显现规律 …… 244
8.2.1 塔山煤矿石炭系特厚煤层采场矿压显现规律 …… 244

8.2.2 同忻煤矿石炭系特厚煤层采场矿压显现规律 …… 250
8.3 特厚煤层回采巷道矿压监测分析 …… 266
8.3.1 矿压监测内容及方案 …… 266
8.3.2 顶板离层监测数据分析 …… 270
8.3.3 锚杆(索)应力监测数据分析 …… 273
8.3.4 钻孔应力监测数据分析 …… 275
8.4 大同矿区双系煤层开采矿压相互影响 …… 277
8.4.1 煤柱对下覆煤层开采的影响 …… 277
8.4.2 工程条件 …… 278
8.4.3 多层叠加煤柱覆岩结构特征 …… 278
8.4.4 “倒梯形孤岛覆岩结构”对石炭系煤层应力场影响分析 …… 281
8.4.5 “倒梯形孤岛覆岩结构”对石炭系矿压影响的微震监测研究 …… 284
参考文献 …… 285
第9章 大空间采场坚硬顶板煤柱力学特征 …… 288
9.1 掘巷前采场煤岩体力学特征分析 …… 288
9.1.1 弧三角形关键块的结构参数 …… 289
9.1.2 掘巷前三角块受力分析 …… 290
9.1.3 掘巷前三角块下部煤体受力分析 …… 293
9.2 小煤柱护巷围岩力学模型 …… 296
9.2.1 沿空掘巷顶板力学模型 …… 297
9.2.2 沿空掘巷实体煤帮力学模型 …… 299
9.2.3 沿空掘巷煤柱帮力学模型 …… 302
9.2.4 沿空掘巷底板力学模型 …… 304
9.3 煤柱力学特征数值模拟研究 …… 307
9.3.1 数值模拟条件与几何模型的建立 …… 307
9.3.2 掘巷前煤柱应力分布规律研究 …… 311
9.3.3 掘巷后煤柱应力分布规律研究 …… 312
9.3.4 采动后煤柱应力分布规律研究 …… 318
9.4 沿空掘巷端部结构及渗透特征研究 …… 325
9.4.1 工作面概况 …… 325
9.4.2 掘巷前 8206 工作面端部覆岩结构及小煤柱侧裂隙场分布 …… 326
9.4.3 小煤柱渗透特征研究 …… 334
9.4.4 小煤柱渗透特性系数 …… 353
9.5 大空间采场小煤柱护巷安全保障关键技术体系 …… 355
参考文献 …… 363

第 10 章 大空间采场井下近场坚硬顶板弱化技术 …… 365
10.1 井下近场坚硬顶板水压致裂控制技术 …… 365
10.2 水压致裂基本原理 …… 367
10.2.1 孔壁应力理论分析 …… 367
10.2.2 水压致裂力学机理 …… 369
10.3 大同矿区井下近场坚硬顶板水压致裂工艺技术 …… 371
10.3.1 水压致裂顶板弱化参数 …… 371
10.3.2 水压致裂设备与注水工艺过程 …… 374
10.3.3 水压致裂技术实施方案 …… 376
10.4 水压致裂效果数值模拟分析 …… 386
10.5 井下近场楔形槽爆破预裂坚硬顶板技术 …… 391
10.5.1 顶板预裂爆破方案 …… 391
10.5.2 爆破参数确定 …… 393
10.5.3 爆破参数验算 …… 395
10.5.4 爆破工艺参数及施工 …… 398
10.5.5 顶板预裂爆破效果数值模拟分析 …… 398
10.6 井下近场承压爆破技术 …… 399
10.6.1 承压爆破技术特点 …… 399
10.6.2 钻孔内承压传爆介质的承压预裂性能 …… 400
10.6.3 钻孔承压爆破应力传播及裂隙扩展规律 …… 407
10.6.4 坚硬顶板承压爆破参数确定 …… 417
10.6.5 坚硬煤岩深孔充水承压爆破工程实践 …… 418
10.7 煤层注水防治强矿压技术与效果分析 …… 424
10.7.1 同忻煤矿特厚煤层注水技术 …… 424
10.7.2 煤层注水效果分析 …… 425
参考文献 …… 427
第 11 章 大空间采场远场地面压裂高位坚硬岩层技术 …… 429
11.1 远场地面压裂弱化高位坚硬岩层技术 …… 429
11.2 远场地面压裂技术的试验与理论分析 …… 430
11.2.1 裂缝扩展规律的相似模型试验 …… 430
11.2.2 水压裂缝在坚硬顶板的扩展规律 …… 431
11.3 水压裂缝对坚硬岩层失稳破断的影响 …… 433
11.4 大同矿区塔山煤矿远场地面压裂高位坚硬岩层试验 …… 434
11.4.1 工程背景 …… 434
11.4.2 压裂工艺 …… 435

11.4.3　压裂参数与装备 …… 436
11.5　远场地面压裂效果分析 …… 438
11.5.1　压裂效果微地震监测解释原理 …… 438
11.5.2　监测方法 …… 442
11.5.3　速度模型建立 …… 442
11.5.4　监测设计 …… 445
11.5.5　监测成果与解释 …… 446
11.5.6　压裂结果分析 …… 449
11.6　开采保护层的远近场坚硬顶板协同控制技术 …… 449
11.6.1　保护层和被保护层工作面开采顺序和布置参数 …… 449
11.6.2　保护层 8101 工作面煤层赋存特征 …… 450
11.6.3　塔山煤矿 3-5# 煤层被保护层 8108 工作面开采特征 …… 452
11.6.4　保护层开采对下覆 3-5# 煤层覆岩运动影响研究 …… 454
11.6.5　工作面矿压显现规律实测 …… 458
参考文献 …… 474
第 12 章　坚硬顶板岩层控制理论与技术的科学意义 …… 476
12.1　坚硬顶板岩层控制理论与技术体系 …… 476
12.2　科学意义 …… 477
12.2.1　坚硬顶板岩层控制理论的科学意义 …… 477
12.2.2　岩移实测技术的科学意义 …… 479
12.2.3　坚硬顶板控制技术的科学意义 …… 479
12.3　展望 …… 480
图版

第1章 绪 论

1.1 煤矿开采的顶板问题

煤炭被称为全世界工业的粮食，是使用最广泛的化石能源之一。我国目前的能源消费中煤炭是主体能源，在一次能源消费结构中占60%以上。在未来相当长时期内，煤炭作为我国主体能源的地位不会改变。煤炭工业是关系国家经济命脉和能源安全的重要基础产业[1-3]。我国是世界煤炭生产大国，近几年年均煤炭产量约37亿t，约占世界总产量的48%。

我国煤炭产量的90%以上来自于井工开采，顶板灾害是井工矿开采的主要灾害之一[4,5]。伴随煤炭产量的大幅跃升，我国煤矿事故起数和死亡率均大幅下降，安全生产状况有了明显改善，但与国际先进采煤国家相比，我国煤矿的事故率尤其是顶板事故率仍较高。顶板事故是指在煤矿井下生产过程中，顶板意外垮落造成的人员伤亡、设备损毁、生产终止等事故，是煤矿事故中的主要类型之一，也是影响煤矿安全生产的重要因素。顶板事故相对于煤矿瓦斯爆炸、透水等事故而言，虽然每次死亡人数比较少，但其事故发生频率高，事故总量大，且事故总体死亡人数也比较高(图1.1)[6]，给煤炭行业安全生产带来巨大的危害，其死亡人数占煤矿事故总死亡人数的40%左右，以2014年为例，全国煤矿事故总共发生509起、死亡931

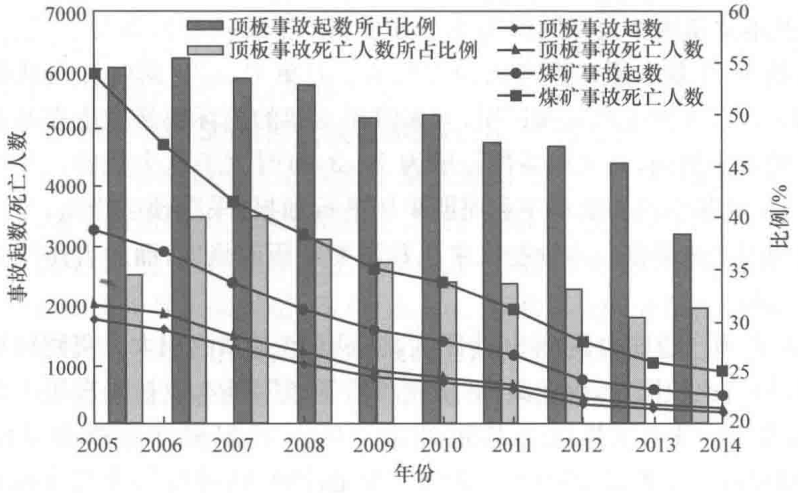


图1.1 近年来煤矿顶板事故统计情况