

# 煤矿绿色开采

许家林 主编

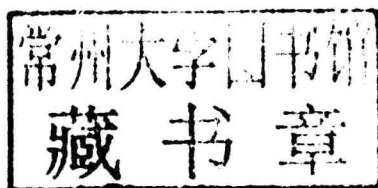
GREEN MINING OF COAL MINE

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

# 煤矿绿色开采

许家林 主编



中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书系统阐述了煤矿绿色开采的概念、内涵、理论基础和技术体系,内容包括:煤炭资源绿色开采的概念与内涵、采动覆岩破坏规律与地表沉陷理论、减沉开采技术、煤与瓦斯共采技术、保水开采技术、矸石减排技术等。

本书可作为采矿工程专业的教材使用,也可供采矿工程及相关专业的研究人员、生产技术人员、煤矿管理人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

煤矿绿色开采/许家林主编. —徐州:中国矿业大学出版社, 2011. 5

ISBN 978 - 7 - 5646- 0918 -4

I. ①煤… II. ①许… III. ①煤矿开采—环境保护技术—高等学校—教材 IV. ①TD82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 254616 号

书 名 煤矿绿色开采  
主 编 许家林  
责任编辑 姜 华 王江涛  
责任校对 何晓惠  
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮政编码 221008),  
营销热线 (0516)83885307 83884995  
出版服务 (0516)83885767 83884920  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司  
开 本 787×1092 1/16 印张 19.25 字数 480 千字  
版次印次 2011 年 5 月第 1 版 2011 年 5 月第 1 次印刷  
定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

# 前 言

煤炭资源开采引发了一系列采动损害与环境问题,如开采沉陷破坏土地与地面建筑物、采动破坏水资源与突水灾害、采动瓦斯灾害与瓦斯排放污染大气、矸石排放与矸石山危害等问题。随着我国煤炭开采规模的不断增大,上述采动损害与环境问题日益严重。为了科学解决煤炭资源开采中的采动损害与环境问题,中国工程院院士钱鸣高教授在21世纪初提出了煤矿绿色开采理念。煤矿绿色开采以及相应的绿色开采技术,在基本概念上是从广义资源的角度来认识和对待煤、瓦斯、水、土地、矸石等一切可以利用的各种资源;基本出发点是从开采的角度防止或尽可能减轻开采煤炭对环境和其他资源的不良影响;基本手段是控制或利用采动岩层破断运动;目标是在获得经济效益的同时,取得最佳的环境效益和社会效益。煤炭资源开采引发的一系列采动损害与环境问题都与采动岩层破断运动有关,采动岩层破断运动过程中的应力与裂隙演化规律、岩层移动与地表沉陷规律、水与瓦斯在采动岩层中的运移规律等是煤矿绿色开采的重要理论基础。煤矿绿色开采技术体系主要包括:减沉开采技术、保水开采技术、煤与瓦斯共采技术、矸石减排技术等内容。绿色开采理念提出后,得到了学术界和煤炭企业的积极响应,经过10余年的研究,我国煤矿绿色开采技术得到了大力发展。

编写本书的主要目的是对我国煤矿绿色开采研究的有关进展进行总结,介绍绿色开采的理论、技术与工程实践及有待深入研究的问题,为研究工作者和工程技术人员提供参考和借鉴,促进我国煤矿绿色开采技术发展和进步;同时本书可作为采矿工程专业的教材,进一步丰富和拓展采矿工程专业学生的专业知识,增强采矿工程专业学生解决煤矿开采中与采动损害和环境问题相关工程实际问题的能力。在本书编写中力求遵循理论与工程实践相结合的原则,按照“工程问题—理论基础—技术方法—工程实例”的逻辑编写各章节内容。

本书由许家林任主编,具体编写分工如下:第一章,许家林;第二章,许家林、朱卫兵、李兴尚;第三章,许家林;第四章,许家林、胡国忠、屈庆栋、吴仁伦;第五章,许家林、朱卫兵;第六章,郑爱华、许家林。

本书的编写得到了中国工程院院士钱鸣高教授的指导和肯定,在此表示最诚挚的感谢!

本书内容以编者从事绿色开采研究所取得的成果为基础,同时引用了同行的部分研究成果,并在书中相关内容处予以注明。在此,对本书中所引用文献资料的所有作者表示衷心感谢!

由于编者水平所限,书中难免存在不足之处,恳请读者指正。

编 者

2010年10月

# 目 录

<b>第一章 绿色开采的概念与技术框架</b> .....	1
第一节 绿色开采的概念.....	1
第二节 绿色开采的理论基础.....	7
第三节 绿色开采的技术框架 .....	15
参考文献 .....	18
<b>第二章 减沉开采技术</b> .....	19
第一节 开采引起的地表沉陷规律 .....	19
第二节 开采沉陷对地面建筑物的影响 .....	51
第三节 减少开采沉陷影响的技术措施 .....	57
第四节 条带开采技术 .....	73
第五节 充填开采技术 .....	87
第六节 部分充填开采技术.....	120
参考文献.....	129
<b>第三章 保水开采技术</b> .....	131
第一节 保水开采的概念.....	131
第二节 开采引起的岩层导水裂隙演化规律.....	133
第三节 水体下保水采煤技术.....	141
第四节 承压含水层上保水采煤技术.....	173
第五节 矿井水的资源化利用.....	184
参考文献 .....	195
<b>第四章 煤与瓦斯共采技术</b> .....	197
第一节 煤与瓦斯共采的概念.....	197
第二节 开采引起的瓦斯卸压运移规律.....	207
第三节 采前瓦斯抽采技术.....	218
第四节 采动卸压瓦斯抽采技术.....	227
第五节 老采空区瓦斯抽采技术.....	247
第六节 瓦斯综合利用技术.....	256
参考文献.....	267

<b>第五章 矸石减排技术</b> .....	269
第一节 煤巷布置取代岩巷布置.....	269
第二节 矸石井下处理技术.....	272
第三节 煤矸石的综合利用.....	281
参考文献.....	284
<b>第六章 绿色开采的经济评价</b> .....	285
第一节 科学采矿视角下的完全成本体系.....	285
第二节 绿色开采的经济评价方法.....	290
参考文献.....	300

# 第一章 绿色开采的概念与技术框架

## 第一节 绿色开采的概念

### 一、煤炭资源开发的重要性

#### 1. 我国煤炭资源储量与分布特点

我国的煤炭资源比较丰富,探明储量占全国化石能源探明储量的94%。根据第三次全国煤田预测资料,除台湾省外,我国垂深2 000 m以浅的煤炭资源总量为55 697.49亿t,其中煤炭探明保有资源量为10 176.45亿t。截至2006年末,我国煤炭剩余经济可采储量为1 186亿t,占世界煤炭总可采储量的12.6%,仅次于美国和俄罗斯,排名第三。

我国煤炭资源分布广泛,含煤总面积达60多万平方公里,占国土面积的6%,并呈现以下四个分布特点:①总体呈现北多南少、西多东少的特点;②煤炭资源开发与地区的经济发展程度呈逆向分布;③煤炭资源与水资源呈逆向分布;④煤层埋藏比较深,适合露天开采的比较少。

#### 2. 我国煤炭资源开发与利用状况

新中国成立以来,我国煤炭工业取得了巨大发展,煤矿生产长期呈增长态势,煤炭产量在一次能源产量中所占比重一直在70%以上,居于绝对主导地位。2003~2009年,我国的煤炭产量出现了大幅增长,由2003年的17.22亿t增加到2009年的31.6亿t,年均增长2.4亿t。见表1-1。

表 1-1 2002~2009年中国煤炭产量及增长率

年份/年	煤炭产量/亿 t	增长率/%
2002	14.55	—
2003	17.22	18.35
2004	19.92	15.68
2005	22.05	10.69
2006	23.73	7.62
2007	25.23	6.32
2008	27.16	7.65
2009	31.60	16.35

#### 3. 煤炭在我国能源中的地位

制约我国经济发展的“瓶颈”是能源。我国煤炭资源丰富,是经济发展中最可靠的能源

保障。目前,我国是世界上第一煤炭生产大国,也是世界上第一煤炭消费大国,煤炭消费量在我国能源消费总量中的比重一直高达 70% 左右。2004~2009 年我国煤炭产量占世界煤炭总产量的比重见表 1-2,2009 年我国主要能源消费结构见图 1-1。

表 1-2 2004~2009 年我国煤炭产量占世界煤炭总产量的比重

年 份	2004	2005	2006	2007	2008	2009
世界煤炭产量/亿 t	46.338	49.340	53.698	63.95	67.74	69.41
中国煤炭产量/亿 t	19.92	22.05	23.73	25.23	27.16	31.60
中国占世界比重/%	43.0	44.7	44.2	39.5	40.1	45.6

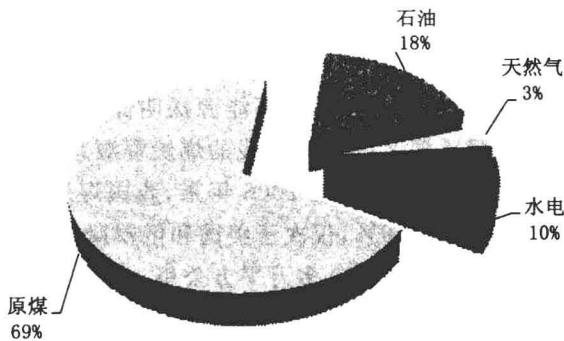


图 1-1 2009 年我国主要能源消费结构示意图

据有关机构预测,到 2050 年,我国煤炭消费在能源消费中的比重仍会占 50% 左右。

## 二、煤炭开采引起的采动损害与环境问题

### 1. 开采沉陷破坏土地与地面建筑物

地下煤炭大面积开采导致地表沉陷,从而严重破坏土地资源。在地下潜水位较高的矿区(如华东矿区),地表沉陷会引起塌陷区积水,淹没土地资源[见图 1-2(a)]。在地下潜水位较低或干旱半干旱矿区(如华北、西北矿区),尽管地表沉陷不会引起塌陷区积水,但会引起

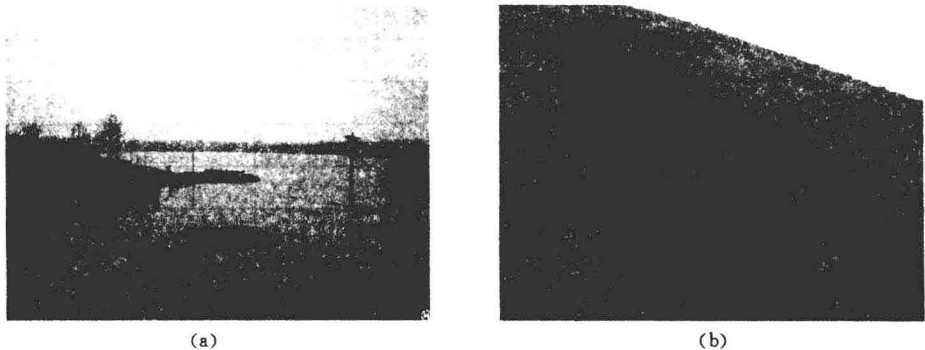


图 1-2 开采沉陷破坏土地资源的照片

(a) 地表沉陷引起积水淹没土地;(b) 地表裂缝与水土流失引起土地沙漠化



土地裂缝、水土流失与沙漠化,破坏土地资源[见图 1-2(b)]。我国因采煤区地表沉陷造成的土地破坏总量约为 40 万 ha 以上,开采万吨原煤造成土地塌陷面积平均达 0.20~0.33 ha,每年因采煤破坏的土地以 3 万~4 万 ha 的速度递增。这一问题在粮食和煤炭复合主产区显得尤为突出。

以山西省为例,山西省煤炭资源丰富,含煤面积达 6.18 万 km<sup>2</sup>,约占全省总面积 40%,遍布全省 11 个地(市)的 91 个县区,目前煤炭保有储量 3 899.18 亿 t,位居全国第三位。山西省原煤产量一直在不断增加,采煤造成的采空区及地面塌陷面积也在不断增加。2000~2007 年每开采万吨原煤造成土地塌陷面积平均达 1.1 ha。截至 2007 年,山西省采空区面积已占全省面积的 6%,开采沉陷引起的土地破坏问题已经相当严重。图 1-3 为山西省 1999~2007 年累计采煤沉陷面积。

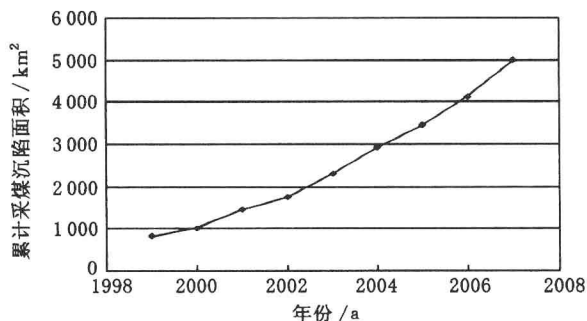


图 1-3 山西省 1999~2007 年累计采煤沉陷面积

地下煤炭大面积开采导致地表沉陷会严重破坏地面建筑物,见图 1-4。这一问题在村镇密集的华东矿区显得尤为突出。据不完全统计,我国建筑物下压煤量达 87.6 亿 t。人口密集、工业发达的河北、河南、山东、山西、辽宁、黑龙江、陕西、安徽、江苏九省各自的建筑物下压煤量均超过亿吨,九省建筑物下压煤总量达 50.92 亿 t,占全国建筑物下压煤总量的 60%。同时,建筑物下压煤开采已成为许多矿区面临的主要问题,特别是一些老矿区,煤炭资源正在逐步枯竭,矿井储量逐渐减少,剩余储量 50% 以上属于建筑物下压煤,资源枯竭与经济发展之间的矛盾日益突出。根据华东某矿区统计结果,村庄稠密的平原矿区每采出 1 000 万 t 煤炭需迁移约 2 000 人,采煤塌陷土地破坏赔偿费及村庄搬迁费呈逐年递增趋势。随着国民经济的快速增长、人民生活水平的逐渐提高,农村居民住房条件得到明显改善,由此搬迁费用的增长越发加快,使得煤炭生产企业负担逐年加重。以华东某矿区



图 1-4 开采沉陷破坏地面建筑物的照片

为例,2001年13个村庄因采煤塌陷被迫搬迁,共计1412户、5535人迁徙,搬迁费用达5.0亿元以上。

## 2. 煤矿突水灾害与水资源破坏

煤矿突水灾害是矿山建设和生产过程中的主要安全灾害之一。长期以来,煤矿突水带来的人身伤亡和经济损失极为惨重。在我国煤矿重特大事故中,突水事故在死亡人数和发生次数方面,仅列瓦斯事故之后,居第2位,但给矿井造成的直接经济损失一直位于第1位。据统计,在过去的20多年中,我国有250多对矿井被水淹没,经济损失高达350多亿元。近年来,随着科学技术的进步,煤矿建设和生产过程中的装备、工艺和技术都有了很大的提高,但煤矿突水事故仍频繁发生。特别是2000年以来,煤矿水害事故又呈现上升趋势。据统计,从2000年到2006年,我国煤矿共发生重特大突水事故435起,死亡及失踪2199人。

煤矿开采过程中破坏了地下含水层原始径流,大量排出地下水,造成区域含水层水位下降,形成大规模地下水降落漏斗,直接影响到区域水文条件。开采产生的地表变形往往影响到地表水体(河流、湖泊、井泉等),从而使部分沟泉水量减少甚至干涸,影响当地居民正常的生产生活,进而影响区域植被生长,甚至出现土地沙漠化。这一问题在我国西部缺水地区显得尤为突出。

以大柳塔煤矿为例,大柳塔煤矿井田内的母河沟泉域在大柳塔煤矿开发前的平均流量为 $5961\text{ m}^3/\text{d}$ ,但到2002年2月,由于开采对第四系含水层的破坏和疏排,母河沟泉域流量只有 $1680\text{ m}^3/\text{d}$ ,泉流量衰减72%。位于泉域内的双沟流量由原来的 $7344\text{ m}^3/\text{d}$ 变为完全干涸,原来可以灌溉600亩农田,现已无法灌溉,沟头的杨树大片死亡。

以山西省为例,山西省通过对5403个煤矿排水量的统计,平均开采1t煤炭,矿井排水0.87t,使本来缺水的山西省环境受到进一步破坏。例如晋祠泉在1954年的流量为 $2\text{ m}^3/\text{min}$ ,由于晋祠泉域内西山煤田的大规模开采,泉水流量逐渐减少,于1994年5月断流。由于煤矿开采破坏地下水而引起当地居民失去饮用水源的情况在媒体上也时有报道。据统计,山西省每年采煤破坏地下水4.2亿 $\text{m}^3$ ,导致井水位下降或断流共计3218个,影响水利工程433处、水库40座、输水管道793890m,造成1678个村庄、812715口人、108241头牲畜饮水困难。

目前,我国每年采煤破坏排放地下水约60亿 $\text{m}^3$ ,只有25%的矿井水得到利用。

## 3. 煤矿瓦斯灾害与瓦斯排放污染大气

瓦斯爆炸、煤与瓦斯突出一直是我国煤矿面临的重大灾害。45户国家重点监控的国有煤矿企业中高瓦斯及煤与瓦斯突出矿井占56.4%,煤与瓦斯突出矿井占34.2%。2000年以来,我国先后发生一次突出煤岩量超过1000t的特大型煤与瓦斯突出事故8次,发生一次死亡百人以上的特别重大瓦斯爆炸事故8次。以2008年为例,全国发生煤矿瓦斯事故182起,死亡778人,分别占煤矿事故总发生次数和总死亡人数的9.6%和24.2%。

与此同时,因煤炭开采而排放到大气中的瓦斯还加剧了地球温室效应,造成严重的环境破坏。因为瓦斯的主要成分是甲烷,而甲烷是一种具有强烈温室效应的气体,它产生的温室效应比二氧化碳大21倍以上。据不完全统计,我国煤矿每年向大气排放瓦斯达到100亿~190亿 $\text{m}^3$ 。

煤矿瓦斯是一种清洁能源,1 $\text{m}^3$ 纯甲烷的发热量为35.9MJ,相当于1.2kg标准煤的发热量。我国煤层气(瓦斯)资源丰富,埋深2000m以上煤田范围内拥有的煤层气资源量

为 32 万亿~35 万亿  $\text{m}^3$ ，居世界第 2 位，与陆上常规天然气资源量相当，是全国天然气总储量的 51.94%。2008 年，全国瓦斯抽采及利用量分别为 53 亿  $\text{m}^3$  和 16 亿  $\text{m}^3$ ，全国煤矿瓦斯排放量约为 200 亿  $\text{m}^3$ ，平均瓦斯抽采率为 26.5%，瓦斯抽采量和抽采率仍有相当的潜力。由于我国煤层赋存条件的特殊性，目前单纯采用采前地面钻井煤层气开发的方法还不能有效地解决煤矿生产中的瓦斯问题，必须采用井下和井上相结合的方法，通过多种技术途径，综合解决煤矿瓦斯问题，同时实现高效洁净能源的利用，保护人类环境。

#### 4. 煤矸石露天排放问题

煤矸石作为煤炭开采与加工过程中的一种含碳量低、灰分高的固体废物，每年排放量占当年煤炭产量的 10%~15%。据初步统计，我国国有煤矿现有煤矸石堆积而成的矸石山 1 600 余座，2001~2008 年间我国平均每年排放煤矸石约 3.0 亿 t，历年堆积量已达 60 亿 t，占地 70 000 ha 左右，至今仍以每年超过 3.0 亿 t 的速度继续增加，压占土地面积 300~400 ha 以上。以山西省为例，煤矸石堆积量高达 10 多亿吨，形成了 300 多座矸石山；近几年来，随着煤炭生产的高速增长，每年新增煤矸石 8 000 万 t 左右。

煤矸石大量堆积，除了占用大量土地，侵蚀大片良田外，煤矸石风化后的扬尘还危及周边环境，特别是煤矸石中所含的硫化物在风化或遭受淋溶之后，严重污染大气、土壤和地下水源；矸石山被风吹、日晒、雨淋，经过空气和水的综合作用，发生一系列物理、化学和生物变化，更加重了大气、土壤和水体的污染。而且矸石山长期堆存很容易自燃，释放大量有害有毒气体，使矿区附近草木枯萎，居民的呼吸道疾病和癌症发病率升高。矸石山尤其是自燃矸石山极易发生滑坡和喷爆，引发地质灾害，酿成重大灾害，造成人员伤亡，毁坏财产和地面设施。见图 1-5。

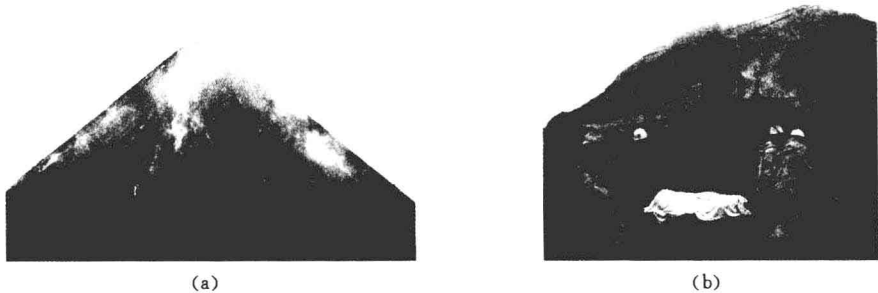


图 1-5 矸石山照片

(a) 矸石山自燃；(b) 矸石山滑坡

煤矸石山引发灾害的实际案例有许多，例如：① 1966 年，英国南威尔士阿邦芳的 1 座高达 60 m 的矸石山滑塌，11 万  $\text{m}^3$  的矸石垮塌下来，导致 100 多人丧生。造成这次事故的原因是矸石堆在 1 个矿泉上，使矸石山内水量达到饱和，降低了矸石山的稳定性。② 2005 年 5 月 15 日，平煤集团四矿矸石山爆炸后发生塌方，煤灰和矸石从数十米高处喷涌而下，致使 100 m 外 18 间民房不同程度地受损，造成 8 人遇难。16 日凌晨 1 时，矸石山中部又突然发生热气煤尘（碎矸石）喷出，致使 115 名抢险救灾人员受伤。③ 2006 年 6 月 16 日，盘江煤电集团老屋基矸石电厂发生矸石山垮塌事故，造成 3 人死亡，3 人下落不明。

### 三、绿色开采的概念

综上所述,煤炭开采造成的环境破坏是非常严重的,大大超出了矿区环境容量,也就是说,我国煤炭开采是以牺牲环境为代价的。而煤炭作为我国主要能源的状况在短期内难以改变,为了避免煤炭开采对矿区环境的继续破坏,国家和煤炭行业必须考虑煤炭资源与环境协调开采问题,转变煤炭开采理念,依靠技术进步,将煤炭生产活动对自然资源和生态环境的影响降至最低程度。为此,钱鸣高院士于 21 世纪初提出了煤矿绿色开采的理念。

煤矿绿色开采是指考虑环境与资源保护的煤炭开采方法。具体来说,煤矿绿色开采以及相应的绿色开采技术,在基本概念上是从广义资源的角度认识和对待煤、瓦斯、水、土地、矸石等一切可以利用的资源;基本出发点是从开采的角度防止或尽可能减轻开采煤炭对环境和其他资源的不良影响;基本手段是控制或利用采动岩层破断运动;目标是取得经济效益的同时,实现最佳的环境效益和社会效益。

煤矿绿色开采具有以下三个方面的内涵与特点:

#### (1) 对原有矿井废弃(或有害)物观念的转变

从广义资源的角度来说,在矿区范围内的煤炭、地下水、瓦斯、土地、煤矸石、矿井地热以及煤层附近的其他矿床都是宝贵的资源,都应该作为矿区的开发对象而加以利用。而传统煤炭开采中仅将煤炭作为资源对待,其他的并没有作为资源来对待,有的甚至作为有害物来对待。

原来对矿井瓦斯的定义是:矿井中主要以甲烷为主的有害气体。事实上,瓦斯是清洁能源,1 m<sup>3</sup> 瓦斯可发电 3~3.5 kW·h。

原来对矿井水文地质类型的定义是:根据矿井水文地质条件、涌水量、水害情况和防治水难易程度等划分类型。这个定义是将矿井水作为水害来对待的。事实上,在防治地下水的同时可将矿井水资源加以利用。

矸石是开采产生的固体废弃物,但也可作为塌陷地的复垦材料、采空区充填骨料以及制砖材料等。

#### (2) 从源头上采取措施减轻开采对环境的破坏

从煤炭开采的角度采取措施,即从源头消除或减少采矿对环境的破坏,而不是先破坏后治理,这符合循环经济原则。如通过采矿方法的改变和调整来实现地下水资源的保护、减缓地表沉陷以及减少瓦斯和矸石的排放等。

#### (3) 基于采动岩层破断运动规律

岩层运动不仅对矿山压力造成影响,而且煤层开采后引起的岩层“变形—破断—移动”是造成一系列采动损害与环境问题的根源。岩体不破坏,水与瓦斯流动、地表沉陷与土地破坏等环境问题都不会发生。因此,绿色开采的基本手段是控制岩层运动,防止和减少采动对环境的不良影响。

绿色开采的提出得到了学术界和煤炭行业的积极响应,经过 10 余年的研究和发展,我国在煤与瓦斯共采技术、充填减沉开采技术、保水开采技术等方面得到了大力发展,取得了显著的成效,促进了我国煤炭工业的健康持续发展。同时,绿色开采技术也得到了国际采矿学术界的高度评价,如国际著名采矿专家 A. K. Ghose 专门对绿色开采作出评价,并建议将

“Green Mining”作为现代采矿科学的新词汇<sup>①</sup>,他认为:“……绿色开采……对煤矿开采及其对环境的多种影响的整体认识引入一个统一的概念。……中国专家在绿色开采技术方面的创新性发展是基于‘关键层’理论的。……这些技术为减少采矿对环境的破坏提供了方向,有望改变煤矿开采作为环境掠夺者的面容。……”

绿色开采是绿色矿山建设的基础。绿色开采的提出是实现我国煤炭资源科学开采的必然要求,符合科学采矿的三原则要求,即安全原则、环保原则、经济原则。绿色开采的提出也符合我国煤炭循环经济的发展要求,满足循环经济的“3R”原则,即减量化原则(reducing)、再利用原则(reusing)、资源化原则(recycling)。图 1-6 所示的煤炭循环经济技术途径流程图,体现了绿色开采符合循环经济“3R”原则的要求。

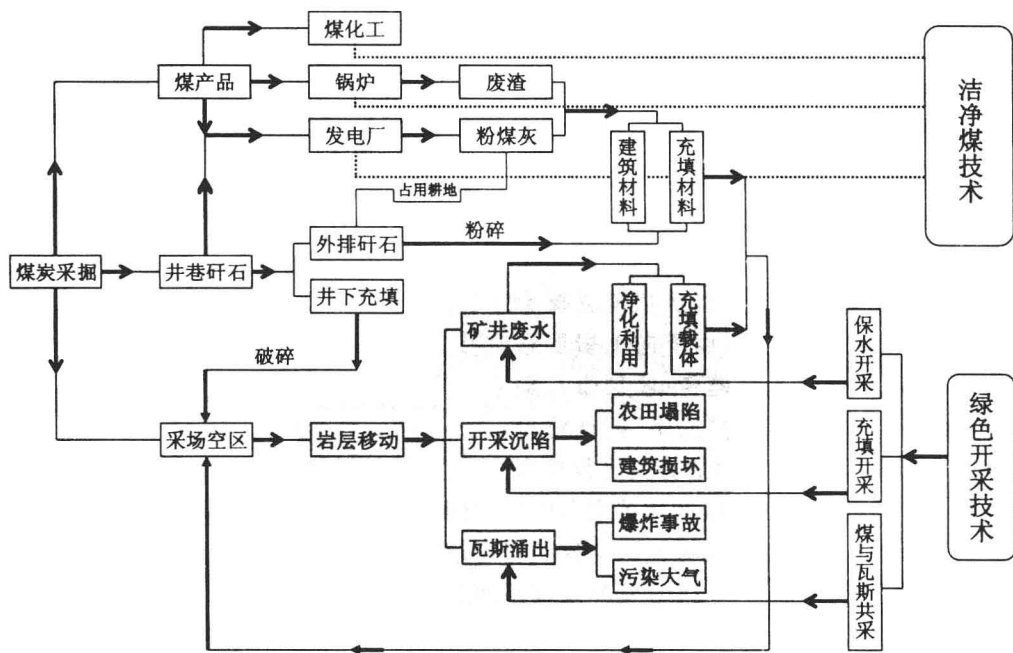


图 1-6 煤炭循环经济技术途径流程图

## 第二节 绿色开采的理论基础

煤炭资源开发引起的一系列采动损害和环境问题都与岩层破坏与运动有关,因此,采动岩层破断规律是绿色开采的主要理论基础。具体包括:① 采动岩层裂隙演化规律;② 采动岩体应力场分布规律;③ 开采对岩层与地表移动的影响规律;④ 水与瓦斯在裂隙岩体中的渗流规律。为了解决上述与环境相关的理论问题,提出了岩层控制的关键层理论,为煤炭绿色开采研究提供了理论基础。

<sup>①</sup> A. K. Ghose; Green mining—a unifying concept for mining industry. Journal of Mines, Metals & Fuels, 2004 年第 12 期, 第 393 页。

## 一、采动岩层破断的基本规律

煤层开采后,岩层移动是如何由下往上发展直至地表的?岩层移动过程中内部岩体的采动应力、采动裂隙和采动变形是如何分布的?

经过前人的长期不懈努力,目前对上述问题已有总体概貌的解答。但由于在煤层开采过程中地质条件的复杂多变,仍然存在诸多有待进一步研究的问题。

例如,采矿工作者基本掌握了对回采工作面生产和支护影响较大的下部岩层的移动规律。同时针对岩层移动特征,就采场矿压显现的解释与控制提出了多种假说和理论,其中有代表性的有:压力拱假说、悬臂梁假说、预成裂隙假说、铰接岩块假说、砌体梁理论、传递岩梁假说等。以钱鸣高院士为首的科研群体提出的砌体梁理论,为采场矿压显现的科学解释、预测预报和控制提供了理论基础,形成了矿山压力及其控制的完备理论体系。对整个上覆岩层直至地表的整体运动规律也提出了如图 1-7 所示的“横三区”、“竖三带”认识,即沿工作面推进方向上覆岩层分别经历煤壁支撑影响区、离层区和重新压实区,由下向上岩层移动分为垮落带(冒落带)、裂缝带(断裂带)、整体弯曲下沉带。采动岩层的“三带”特征将直接影响到水与瓦斯的运移特征(有关顶板导水裂隙发育规律的内容将在后续的相关章节中作详细介绍)。

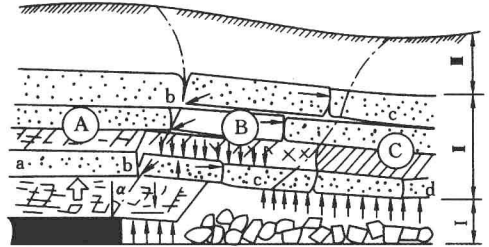


图 1-7 上覆岩层移动的  
“横三区”与“竖三带”

- A——煤壁支撑影响区(a—b); B——离层区(b—c);  
C——重新压实区(c—d);  $\alpha$ ——支撑影响角;  
I——垮落带; II——裂缝带; III——弯曲下沉带

煤层开采后顶板破坏并向采空区垮落的岩层范围称为垮落带。垮落带一般是由直接顶垮落后形成的,其高度通常为 2~3 倍的煤层采高。根据垮落岩块的破坏和堆积状况,垮落带分为不规则垮落带和规则垮落带。在不规则垮落带内,岩层完全失去原有的层位,呈杂乱堆积状;而规则垮落带内的岩块堆积排列较整齐。垮落后的直接顶岩层的碎胀系数一般可达 1.3~1.5。这时垮落带内岩块间的间隙较大,连通性好,矿井水、水砂和泥浆容易通过。垮落带内岩块重新压实之后的碎胀系数一般为 1.05~1.10。

垮落带上方的岩层产生裂缝或断裂,破断岩块间存在水平力的传递作用并保持其原有层状的岩层范围称为裂缝带(断裂带)。裂缝带中的岩层能够导水,我国习惯上将其称为导水裂隙带。对于坚硬顶板,导水裂隙带高度一般为 18~28 倍采高;对于软弱顶板,导水裂隙带高度一般为 9~12 倍采高。

“三带”的空间轮廓形状主要与开采煤层的倾角有关(见图 1-8)。对于近水平煤层、倾斜煤层( $0^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$ ),垮落带呈中间较低两端较高的枕形轮廓;裂缝带呈中间较低两端较高的马鞍形。对于倾角较小的急倾斜煤层( $36^\circ \leq \alpha \leq 54^\circ$ ),垮落带的轮廓形状上下不对称,上方略大于下方;裂缝带呈上大下小的不对称形状,上部的轮廓大致呈抛物线状,马鞍形消失或残留不明显。对倾角较大的急倾斜煤层( $\alpha = 55^\circ \sim 90^\circ$ ),垮落带和裂缝带都呈耳形或上大下小的不对称拱形。

再如,根据岩层移动研究成果提出如图 1-9 所示的采动岩层移动破坏概貌。长壁采煤

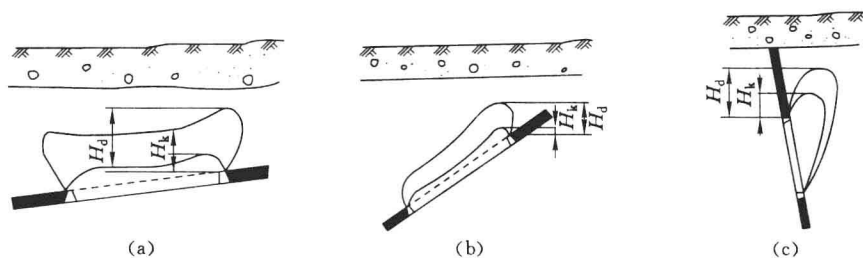


图 1-8 垮落带、裂缝带的空间轮廓

(a)  $0^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$  煤层; (b)  $36^\circ \leq \alpha \leq 54^\circ$  煤层; (c)  $\alpha = 55^\circ \sim 90^\circ$  煤层

工作面从开切眼开始采煤后,随着工作面不断推进,直接顶跨度逐渐增加并发生初次垮落。随着工作面继续推进,采空区的直接顶将不断地垮落。直接顶之上的第一层关键层(老顶或称基本顶)则先以两端固支梁(板)弯曲的形式沿层面的法线方向移动、弯曲,进而产生断裂和下沉。当采空区范围很大时,由下而上的岩层移动逐渐发展到地表,在地表形成一个比井下开采范围大的下沉盆地。

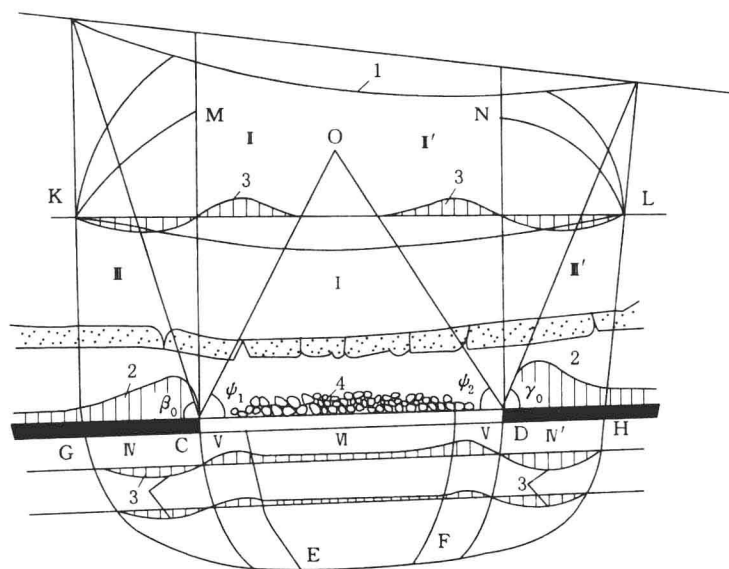


图 1-9 开采引起的采动岩层移动破坏概貌

1——地表下沉曲线;2——支承压力分布曲线;3——沿层面法向岩石变形曲线;4——垮落带  
 I——充分采动区;II, II'——最大弯曲区;III, III'——顶板压缩区;IV, IV'——底板压缩区;  
 V, V'——底板不均匀隆起区;VI——底板均匀隆起区

无论在岩层移动期间,还是在岩层移动结束后,由于采空区上方岩层悬顶的存在和形成力学结构过程中的运动,采空区上方一部分岩层重量将由工作面前方和采空区周围的未采煤体承担,从而引起采空区周围岩体内的应力重新分布,在煤体内形成应力增高区(支承压力区)、应力降低区(卸压区)和原岩应力区。

如图 1-9 所示,根据岩层移动的形式、变形特性和引起移动的原因,在移动过程终止后

的顶板岩层内,可划分成充分采动区Ⅰ、最大弯曲区Ⅱ和Ⅱ'以及顶板压缩Ⅲ和Ⅲ',在底板岩层中可划分成底板压缩区Ⅳ和Ⅳ'、底板不均匀隆起区Ⅴ和Ⅴ'以及底板均匀隆起区Ⅵ。

充分采动区 COD 位于采空区中部上方,该区内的岩层垮落与沉降已趋于停止,但范围仍随开采范围的扩大而不断扩大。岩层移动过程结束后,区内上部下沉的岩层仍平行于它的原始层位,层内各点的移动向量与煤层法线方向大体一致,在同一层内的移动向量彼此相等,达到该地质条件和开采技术条件下的最大程度。随着采空区范围扩大,各点的移动量不会增加。

充分采动区顶点 O 的位置取决于煤层埋藏深度和采空区的尺寸。开采范围有限,采空区尺寸较小时,上覆岩层内充分采动区的范围小,充分采动区顶点的位置就低;相反情况下,若开采范围较大,而煤层埋藏深度相对较浅时,充分采动区的范围就大,充分采动区顶点就会超出地表,使地表在一定范围内都达到充分采动。

顶板压缩区位于实体煤上方 CMKG 和 DNLH 范围内。煤体内的支承压力按照衰减和扩展的规律,不仅在煤层底板岩层中传播,而且也在顶板岩层中一定范围内传播,在顶板岩层中同样形成应力增高区、应力降低区和原岩应力区。顶板压缩区就是受顶板支承压力作用而形成的。位于支承压力区内的煤体和岩层因压力增高而产生一定的垂直压缩变形,相当于受高应力压缩后煤体和岩层变薄。而下部煤体和岩层变薄将导致上部岩层沉降,因此,在支承压力影响范围内,自地表以下的各岩层均表现出不同程度的下沉变形。上部岩层的下沉值是自身的压缩量和其下各岩层压缩量的叠加。所以,在支承压力增高影响区,距地表愈近,其下沉值也就愈大。

在充分采动区Ⅰ和顶板压缩区Ⅲ、Ⅲ'之间是最大弯曲区Ⅱ和Ⅱ',此范围内岩层向下弯曲的程度最大。又由于岩层弯曲的原因,在岩层内产生沿层面方向的拉伸和压缩变形。又由于岩石的抗压强度大于抗拉强度,岩层层面上将出现较多的拉伸裂隙,甚至使整层岩层断裂。

煤层底板岩层内的应力也随岩层移动破坏发生相应变化。未采煤体下方支承压力区内的岩石受到压缩,形成底板压缩区Ⅳ和Ⅳ'。

在应力降低区范围内,应力最低点位于采空区边界处附近,朝采空区中间方向,应力逐渐恢复。当采空区的范围足够大和岩层移动过程结束后,应力又接近于原岩应力  $\gamma H$ 。由于卸压结果,原来受支承压力压缩的岩层体积发生膨胀,同时,还要受水平方向的压缩,这将导致采空区底板岩层中出现底鼓区,即底板不均匀隆起区Ⅴ和底板均匀隆起区Ⅵ。

## 二、岩层控制关键层理论的基本原理

### 1. 关键层理论的学术思想

20 世纪 90 年代中期,随着对岩层控制科学研究的不断深入以及为了解决采动对环境的影响,相关研究逐步涉及岩层控制中更为广泛的问题,主要是开采引起岩体裂隙场的改变以及更准确地描述开采对地表沉陷的影响。显然,岩体中部分厚硬岩层在覆岩移动中起控制作用。为此,在已有采场老顶岩层砌体梁理论和“板”结构模型基础上,钱鸣高院士领导的科研团队进一步提出了岩层控制的关键层理论,目的是为了研究覆岩中厚硬岩层对层状矿体开采过程中的矿山压力和采动对环境的影响。关键层理论的主要学术思想是:以关键层作为岩层运动研究的主体,用力学方法求解岩体内部在采动后的应力场和裂隙场的改变。



由此对采场矿压、开采沉陷、采动岩体中水与瓦斯运移有统一的认识和完整的力学描述,关键层理论为其后提出的煤矿绿色开采研究提供了新的理论基础,已被学术界和工程界普遍接受和广泛应用。

由于成岩时间及矿物成分不同,煤系地层形成了厚度不等、强度不同的多层岩层。实践表明,其中一层至数层厚硬岩层在岩层移动中起主要的控制作用,这种对岩体活动全部或局部起控制作用的岩层称为关键层。关键层判别的主要依据是其变形和破断特征,即在关键层破断时,其上部全部岩层或局部岩层的下沉变形是相互一致的,前者称为岩层活动的主关键层,后者称为亚关键层。也就是说,关键层的断裂将导致全部或相当部分的上覆岩层产生整体运动。覆岩中的亚关键层可能不止一层,而主关键层只有一层。关键层运动上可影响至地表,下可影响至回采工作面。一般来说,关键层即为主承载层,在破断前可以“板”(或简化为“梁”)结构的形式承受上部岩层的部分重量,断裂后则可形成砌体梁结构,其结构形态即是岩层移动的形态。为了弄清开采时由下向上传递岩层移动的动态过程,并对岩层移动过程中形成的采场矿压显现、煤岩体中水与瓦斯的流动和地表沉陷等状态的变化进行有效监测与控制,关键在于弄清关键层的变形破断及其运动规律以及在运动过程中与软岩层间的相互耦合作用关系。

岩层控制的关键层理论为采动岩层移动破坏规律的深入研究提供了强有力的理论和思想工具。关键层理论学术思想的创新主要体现在以下两个方面:一是将采动覆岩作为统一的研究整体,避免了以往各学科相对分割的研究状况,实现了采场矿压、开采沉陷、采动岩体中水与瓦斯运移等方面研究的有机统一;二是抓住了岩层运动的主要矛盾,突出了重点,避免了传统学科中对岩层进行统计均化的不足。

## 2. 覆岩关键层位置的判别方法

如何判别覆岩中的关键层位置是关键层理论的核心问题。由关键层的定义可知,判别覆岩中的关键层位置实则为判别采后上下位硬岩层的破断顺序。基于对关键层上载荷特征及其对关键层破断顺序影响的认识,建立了判别覆岩关键层位置的方法。

第一步,按刚度原则,即覆岩关键层的抗弯曲变形能力大于其下部岩层,其变形与下部岩层是不协调的,其载荷不需要下部硬岩层承担,因此按照硬岩层承担载荷计算方法,由下往上确定覆岩中的坚硬岩层位置。具体方法为:

先确定煤层上方第 1 层硬岩,然后,从第 1 层硬岩( $i=1$ )开始向上逐层计算

$E_{m+1}h_{m+1}^2 \sum_{i=1}^m h_i \gamma_i$  值及  $\gamma_{m+1} \sum_{i=1}^m E_i h_i^3$  值,当满足式(1-1)时则不再向上计算:

$$E_{m+1}h_{m+1}^2 \sum_{i=1}^m h_i \gamma_i < \gamma_{m+1} \sum_{i=1}^m E_i h_i^3 \quad (1-1)$$

从第 1 层硬岩层( $i=1$ )往上,第  $m+1$  层岩层为第 2 层硬岩层,第 1 层硬岩层( $i=1$ )与第 2 层硬岩层( $i=m+1$ )间共有  $m-1$  层岩层组成软岩层组。式(1-1)中, $E_i$ 、 $h_i$ 、 $\gamma_i$ 分别为各岩层刚度、分层厚度及容重。

从第 2 层硬岩层开始,按照上述方法确定第 3 层硬岩层的位置及相应软岩层组。以此类推,直到确定出最上一层硬岩层(设为第  $n$  层硬岩层)。

第二步,按强度原则,即覆岩关键层破断距大于其下部硬岩层,因此按硬岩层破断距计算方法逐层计算各硬岩层的破断步距。具体方法为: