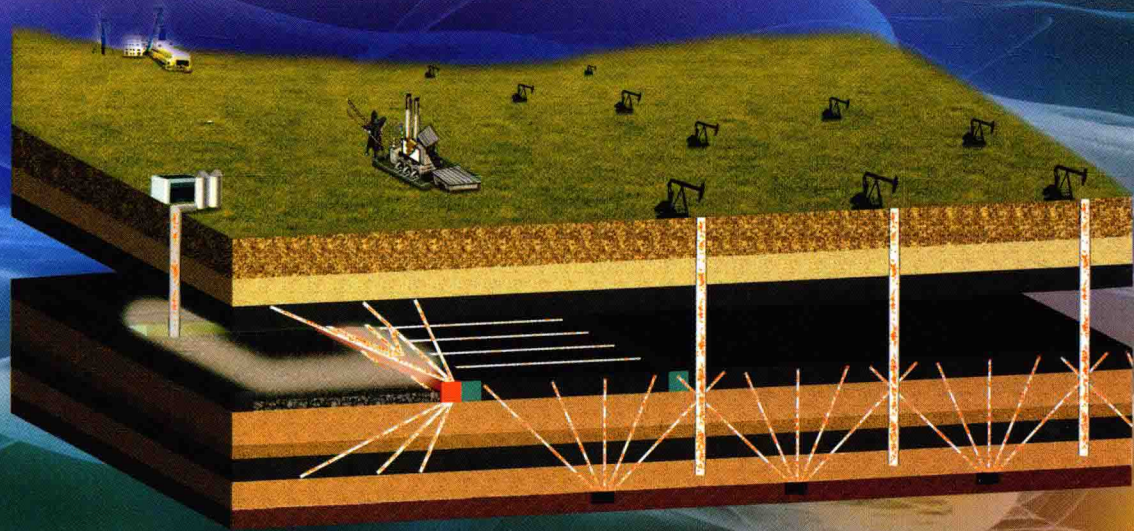


高等教育“十二五”规划教材

煤与瓦斯共采

Mei Yu Wasi Gongcai

袁 亮 主编



中国矿业大学出版社

TD82
YL

高等教育“十二五”规划教材

煤与瓦斯共采

袁亮 主编

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是高等教育“十二五”规划教材。煤与瓦斯共采是采矿工程和安全科学与工程的综合性学科,目前和今后相当长的时期主要服务于煤炭安全开采、瓦斯(煤层气)资源的开发与利用和环境保护。煤与瓦斯共采以矿山岩石力学和渗流力学为基础,与矿业工程、安全工程、抽采工艺理论和实践相结合,是具有一定特色的基础理论学科与工程技术学科互相交叉的独立分支学科。

全书共分九章,主要内容包括绪论、煤与瓦斯共采基础理论、煤与瓦斯共采设计原则、巷道法煤与瓦斯共采、无煤柱煤与瓦斯共采、地面钻井法煤与瓦斯共采、瓦斯抽采系统、煤矿瓦斯利用、煤与瓦斯共采成本和效益分析等。

本书可供煤炭高等院校采矿工程、安全工程等相关专业师生作为教材使用,亦可供从事煤炭工业的科研、设计、管理及工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

煤与瓦斯共采 / 袁亮主编. — 徐州: 中国矿业大学出版社, 2016.12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3095 - 9

I. ①煤… II. ①袁… III. ①煤矿开采—高等学校—教材②煤矿—瓦斯抽放—高等学校—教材 IV. ①TD82②TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第099776号

书 名 煤与瓦斯共采
主 编 袁 亮
责任编辑 于广云 马跃龙 杨 廷
责任校对 孙 景
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 邮编 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 江苏淮阴新华印刷厂
开 本 787×1092 1/16 印张 20.25 字数 499千字
版次印次 2016年12月第1版 2016年12月第1次印刷
定 价 36.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

《煤与瓦斯共采》编撰审人员名单

主 编 袁 亮

主 审 周世宁、俞启香、张国枢

第一章 刘泽功、薛俊华、林柏泉、许家林

第二章 袁 亮、郭 华、刘泽功、张 农、薛俊华、许家林、
柏发松、罗新荣、杨 科、赵毅鑫

第三章 张 农、夏抗生、林柏泉、薛 生、华心祝、杨 科、
王 凯

第四章 袁 亮、方良才、程远平、石必明、林柏泉、华心祝、
张士环、杨 科

第五章 袁 亮、张 农、唐永志、刘泽功、秦永洋、薛俊华、
林柏泉、蔡 峰

第六章 周福宝、李 平、刘泽功、周德昶、石必明、蔡 峰

第七章 林柏泉、李 平、石必明、王 凯、陈学习

第八章 周福宝、金学玉、罗新荣、袁树杰、陈本良

第九章 程远平、张 农、薛俊华、许家林、刘泽功、华心祝

前 言

我国煤层成煤后大都经历了复杂的地质构造运动,80%以上煤层具有构造煤发育、低透气性、高瓦斯和高地应力等特点。目前,在我国105个煤矿区中,有58个高瓦斯突出矿区,占全国煤矿区的55%,储存着我国60%以上的煤层气资源,承担着国家70%以上的煤炭生产任务。低透气性高瓦斯煤层安全开采难题一直没有彻底解决,传统的瓦斯治理技术已经不能满足现阶段煤炭安全高效开采的要求。瓦斯抽采浓度低,利用率低,65%以上的抽采瓦斯直接排放,既污染环境,又造成优质能源浪费。

1996年以来,淮南矿区煤矿瓦斯防治研究团队针对低透气性高瓦斯煤层群赋存条件,采用了煤矿原位(1:1)测试、物理模拟、数值模拟等“三位一体”研究方法,系统开展了首采层应力场、裂隙场和瓦斯场的演化规律研究,建立了煤与瓦斯共采覆岩卸压、渗透率分布及卸压瓦斯运移三个基本规律模型,提出了煤与瓦斯共采“高位环形体”理论,实现了应力场、裂隙场、瓦斯场定量描述,为矿井瓦斯抽采提供了新的理论基础和设计原则。研究成果得到了国内外采矿、安全学术界及煤炭企业普遍认可,目前已在全国全面推广应用,覆盖产能已占煤炭产能的一半。为了便于采矿工程、安全工程等煤矿主体专业本科、研究生学习煤与瓦斯共采知识,编写了本教材。该教材阐述了煤与瓦斯共采基础理论、方法与技术,全面反映了煤与瓦斯共采研究所取得的成果,并列举了我国典型矿区成功案例,力求做到科学性、系统性与深入浅出。

本书为高等教育“十二五”国家级规划教材,由安徽理工大学牵头,袁亮院士任主编,组织中国矿业大学、煤矿瓦斯治理国家工程研究中心、中国矿业大学(北京)等单位共同编写。在编写过程中,特邀中国矿业大学周世宁院士、俞启香教授、中国矿业大学(北京)王家臣教授、安徽理工大学张国枢教授、孟祥瑞教授、辽宁工程技术大学梁冰教授、西安科技大学李树刚教授等进行了全面评审,提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。感谢陈本良工程师、马衍坤博士等在文字编排、图形绘制方面所作的大量工作。

煤与瓦斯共采在长期研究和实践中,得到了钱鸣高、周世宁、谢和平、彭苏萍等院士和专家的指导和支持,本书的出版也得到了中国矿业大学出版社的大力支持和帮助,在此表示一并感谢!

由于编写人员水平及时间限制,缺点和错误在所难免,恳切希望读者批评指正。

编 者

2016年2月

符号说明

- A——截面面积,煤的灰分。
- B——等效孔隙流体压力(Biot)系数。
- C——气体浓度。
- D——扩散系数。
- E——弹性模量,变形模量,表面吸附势阱深度。
- F——力。
- G——煤炭储量。
- H——深度,高度,厚度,阻力,压力。
- K——曲率,集中系数,渗透率,碎胀系数,不协同系数,孔板流量系数,富裕系数。
- L——长度。
- M——厚度,分子量,水分含量。
- P——载荷,应力,流体压力,工作压力,气体密度。
- Q——流量,含量。
- R——抗压强度,有效影响半径,普适气体常数。
- S——气、水饱和度。
- T——温度。
- V——体积,吸附量,流速。
- W——瓦斯含量,位移量,下沉量。
- X——气体浓度。
- a*——渗透指数,吸附常数。
- b*——吸附常数。
- d*——天,直径。
- h*——厚度,宽度。
- i*——倾斜变形,真空度,序号。
- l*——长度。
- m*——厚度。
- n*——班制。
- q*——载荷,瓦斯涌出量,抽采量。
- r*——半径,转速。
- s*——比表面积。
- t*——时间,温度。
- u*——位移。

- v ——速度。
- w ——宽度。
- x ——管道瓦斯浓度。
- Δh ——压差。
- Δp ——压差。
- Δk ——粗糙度。
- ν_0 ——气体运动黏度。
- α ——倾角, 钻孔瓦斯流量衰减系数。
- β ——倾角。
- γ ——倾角, 体积力, 流体的运动黏滞系数, 密度, 容重。
- δ ——倾角, 管路壁厚。
- ϵ ——应变, 体积应变。
- η ——流体的动力黏度, 工作效率, 预抽时间差异系数, 瓦斯抽采率。
- θ ——角度, 有效表面孔隙率。
- λ ——煤层透气性系数, 气体分子的平均自由程。
- μ ——泊松比, 水平移动距离, 渗流速度。
- π ——煤的孔隙率。
- ρ ——煤的孔隙率, 煤体密度。
- σ ——应力, 抗拉强度, 地层压力, 有效应力, 容许压力。
- τ ——抗剪强度, 曲折因子。
- φ ——孔隙率。
- ψ ——移动角。
- ω ——下沉量。

前言	1
第一章 绪论	1
第一节 煤与瓦斯共采的基本概念	1
第二节 我国煤与瓦斯共采模式	3
第三节 煤与瓦斯共采历史沿革	9
第四节 煤与瓦斯共采研究方法	12
第五节 煤与瓦斯共采研究和发展方向	13
思考题	14
参考文献	14
第二章 煤与瓦斯共采基础理论	17
第一节 煤岩结构与力学特征	17
第二节 岩层移动与应力分布特征	29
第三节 煤层瓦斯赋存与流动理论	38
第四节 采动煤岩体“O”形圈理论	49
第五节 煤与瓦斯共采“高位环形体”理论	58
思考题	86
参考文献	86
第三章 煤与瓦斯共采设计原则	88
第一节 矿井设计原则	88
第二节 采区设计原则	96
第三节 工作面设计原则	103
思考题	110
参考文献	110
第四章 巷道法煤与瓦斯共采	112
第一节 巷道法煤与瓦斯共采模式	112

第二节	首采层瓦斯抽采	114
第三节	卸压层瓦斯抽采	131
第四节	瓦斯抽采专用巷道施工与维护	147
	思考题	154
	参考文献	154
第五章	无煤柱煤与瓦斯共采	156
第一节	沿空留巷围岩控制原理	156
第二节	沿空留巷围岩控制技术	163
第三节	无煤柱瓦斯抽采方法	171
第四节	无煤柱开采安全保障体系	176
	思考题	181
	参考文献	182
第六章	地面钻井法煤与瓦斯共采	183
第一节	地面钻井预抽煤层气技术	183
第二节	地面钻井卸压瓦斯抽采技术	195
第三节	“三区联动”立体化抽采瓦斯技术	206
	思考题	210
	参考文献	211
第七章	瓦斯抽采系统	213
第一节	矿井瓦斯抽采系统建立	213
第二节	瓦斯抽采系统选型	216
第三节	瓦斯抽采钻孔与施工	227
第四节	瓦斯抽采系统监测监控	245
第五节	瓦斯抽采达标	250
第六节	瓦斯抽采管理	256
	思考题	262
	参考文献	263
第八章	煤矿瓦斯利用	264
第一节	煤矿瓦斯气源分类	264
第二节	瓦斯安全输送与预处理技术	265
第三节	低浓度瓦斯富集及综合利用	277
第四节	高浓度瓦斯的资源化利用	285
第五节	瓦斯发电余热制冷技术	292

思考题.....	297
参考文献.....	297
第九章 煤与瓦斯共采成本和效益分析.....	299
第一节 煤与瓦斯共采成本分析.....	299
第二节 瓦斯抽采利用效益分析.....	306
思考题.....	310
参考文献.....	311

第一章 绪 论

第一节 煤与瓦斯共采的基本概念

一、煤与瓦斯共采的概念

煤炭是我国主体能源,在我国一次性能源消费结构中,煤炭占66%左右,预计到2050年前后仍将占50%左右^[1]。煤层瓦斯是指储存在煤层中以甲烷为主要成分、以吸附在煤基质颗粒表面为主、部分游离于煤孔隙中或溶解于煤层水中的烃类气体,是煤的伴生矿产资源,属非常规天然气,又称煤层气。煤层瓦斯不仅是煤矿重大瓦斯灾害源和大气污染源,更是一种不可再生的清洁资源。煤与瓦斯共采就是一种把煤炭和瓦斯都作为资源开采的方法,采用煤矿瓦斯抽采或煤层气开采的形式,实现瓦斯抽采量最大化,从而达到分阶段或同阶段对煤炭与瓦斯(煤层气)都作为资源开发利用的目的^[2]。

从煤与瓦斯两种资源开采的先后顺序,可将煤与瓦斯共采分为以下3种方式^[3]:

(1) 先采瓦斯后采煤。原始煤体中,煤层瓦斯赋存于煤层、围岩组成的多孔介质中,吸附瓦斯量通常占80%~90%,游离瓦斯量占10%~20%。根据《煤矿瓦斯抽采达标暂行规定》第二条和第七条规定,高瓦斯及煤与瓦斯突出矿井必须“先抽后采”,瓦斯抽采达标以后才允许采煤^[4]。

先采瓦斯后采煤一般在煤层渗透率较高、煤层埋藏较浅的矿区应用。抽采瓦斯的主要方法包括地面垂直钻井预抽瓦斯、地面定向长钻孔预抽瓦斯、煤矿井下顺层钻孔预抽瓦斯、顶底板穿层钻孔预抽瓦斯等。

(2) 煤与瓦斯同采。煤层开采将破坏原岩应力场的平衡,引起岩层移动和围岩应力重新分布,形成卸压区和增压区,导致裂隙的产生、闭合和扩展。在增压区,增压产生新裂隙,裂隙闭合,透气性降低,部分瓦斯由游离状态转化为吸附状态;在卸压区,裂隙张开、扩展,透气性提高,瓦斯解吸,卸压瓦斯沿采动裂隙运移和汇集,形成瓦斯富集区。煤与瓦斯同采就是充分利用采煤过程中应力场、裂隙场演化对瓦斯的卸压增透作用及卸压瓦斯储运规律,建立采煤和采瓦斯两个完整的生产系统,把煤炭和瓦斯都作为资源开采的一种科学采矿方法。

煤与瓦斯同采一般应用在渗透率较低的高瓦斯和煤与瓦斯突出煤层群条件,以抽采卸压瓦斯为目的,消除煤与瓦斯突出危险。抽采瓦斯方法主要包括煤矿井下巷道法抽采、无煤柱钻孔法抽采和地面钻井法抽采。煤与瓦斯同采的技术原理如图1-1-1所示^[5,6]。

(3) 先采煤后采瓦斯。对于非煤与瓦斯突出和邻近层瓦斯含量高的瓦斯煤层,常常采用先采煤后采瓦斯的方法进行煤与瓦斯共采,在采煤工作面或采区结束后,对采空区进行抽采,抽采方法主要有利用已有巷道(钻孔)抽采、密闭墙内接管抽采和地面钻孔抽采等。

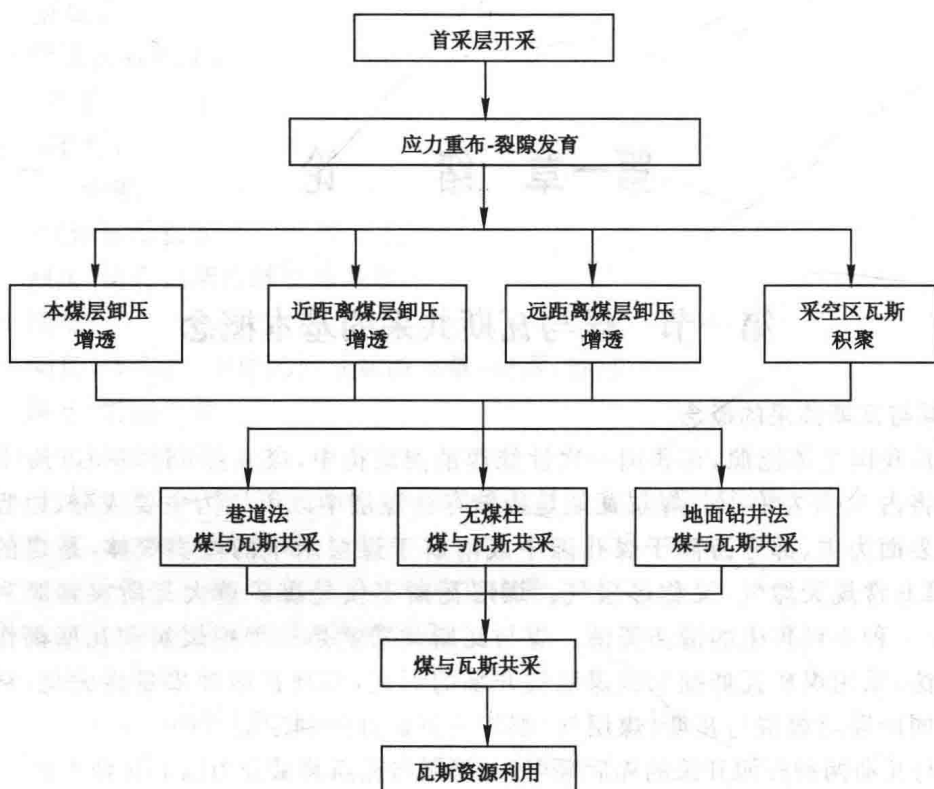


图 1-1-1 煤与瓦斯同采的技术原理

二、煤与瓦斯共采的理念

煤与瓦斯具有伴生、同储的资源特性,将固态与气态两种资源分采时,不可避免地会产生相互影响。低渗透率高瓦斯煤层群开采煤炭和瓦斯两种资源时,如果直接抽采瓦斯资源,由于煤层渗透率低,会造成瓦斯抽采困难,难以消除煤与瓦斯突出危险;如果直接开采煤炭资源,由于未降低煤层瓦斯含量,可能造成煤与瓦斯突出或瓦斯爆炸^[7-9]。

煤炭开采与瓦斯抽采除了相互影响及制约外,还可相互促进。煤与瓦斯共采将原来独立的煤炭开采和瓦斯抽采活动有机地结合在一起。煤炭开采引起了煤层运动和应力重新分布,促使了瓦斯的解吸与流动,为瓦斯抽采创造了有利条件,同时矿井的采掘系统、通风系统为瓦斯抽采提供了可以操作的空间。反过来,高效的瓦斯抽采降低了采场空间的瓦斯浓度和煤层的瓦斯含量,可有效防止瓦斯灾害的发生,保障和促进煤炭的安全高效开采^[10]。煤与瓦斯共采是将煤炭开采与瓦斯抽采综合为一体的资源协调开发模式,是采煤与采气两个系统的有机结合。同时,煤与瓦斯的高效共采可以提供优质的清洁能源,对抽采瓦斯的充分利用,还可以直接减少温室效应气体的排放。煤与瓦斯共采的理念如图 1-1-2 所示。

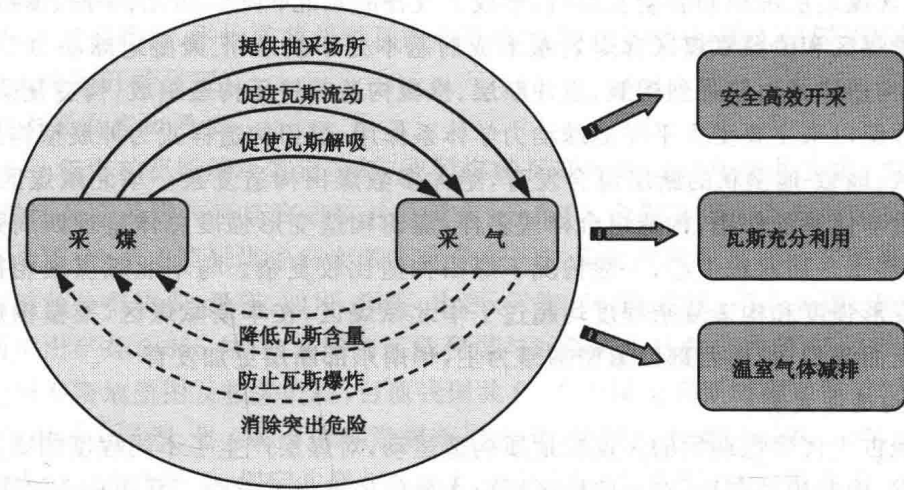


图 1-1-2 煤与瓦斯共采理念

第二节 我国煤与瓦斯共采模式

一、我国煤与瓦斯资源赋存特点

(一) 煤炭埋藏深

我国煤炭资源储量在埋深为 600 m 以浅、600~1 000 m、1 000~1 500 m、1 500~2 000 m 的占比分别为 26.8%、20%、25.1%、28.1%；我国瓦斯地质资源量在埋深为 1 000 m 以浅、1 000~1 500 m 和 1 500~2 000 m 的占比分别为 38.8%、28.8% 和 32.4%。埋深在 1 000 m 以浅的煤炭和煤层瓦斯资源量分别为 2.95 万亿 t、142 709 亿 m³，占到煤炭资源总量的 53%、61.2%^[11]。

我国煤炭资源多以薄及中厚煤层为主，巨厚煤层很少，可做露天开采的储量甚微，仅占总储量的 7%，主要分布在内蒙古、新疆和云南。因此，我国 90% 以上的煤层为井工开采。

我国煤矿开采深度平均每年增加 10~30 m，目前大中型煤矿的平均开采深度已超过 600 m，多数矿井迅速进入深部开采阶段。东北及中东部地区的多数矿井开采历史长，开采深度相对较大。据统计，我国已有淮南、平顶山和峰峰等 43 个矿区的超过 300 座矿井的开采深度在 600 m 以上，其中近 200 座矿井开采深度超过 800 m；目前，千米深井已达 47 座，平均深度为 1 086 m，最大开采深度已达到 1 501 m^[12]。

伴随开采深度的增大，煤层地应力和瓦斯压力不断增加，高瓦斯和煤与瓦斯突出开采条件不断增加，采煤和采瓦斯井巷工程布置和维护难度增大，煤层渗透率降低，瓦斯抽采难度增大，安全威胁严重。

(二) 地质构造复杂

地质构造是影响煤与瓦斯共采的关键因素之一。我国位于亚洲大陆东南部，在现代版块构造格局中属欧亚板块与太平洋—菲律宾板块和印度板块拼合部，煤田构造复杂。中国大陆由于受到古亚洲、特提斯和太平洋三大地球动力学体制的控制，形成了准格尔—松辽块体、塔里木块体、华北块体、华南块体和青藏块体等五大块体。我国各煤盆地在经历了盆地

基底形成、含煤地层沉积和后期变形后,形成了现在的东北、华北、西北、华南、滇藏五个赋煤区。西北赋煤区和滇藏赋煤区含煤岩系形成后基本处于挤压-汇聚型地球动力学体系作用之下,煤田构造样式由较强烈褶皱、逆冲断层、推覆构造等挤压构造组成,构造复杂。东北赋煤区自三叠纪以来主要受太平洋地球动力学体系作用,煤田构造样式为伸展型构造,宽缓褶皱与阶梯状、地堑-地垒状的断层组合发育,绝大多数煤田构造复杂。华北赋煤区受到过三大地球动力学体系的作用,构造组合样式多样,煤田构造变形强度总体呈现四周强、中心弱的特点,除鄂尔多斯盆地中心,一般情况下煤田构造比较复杂。与华北赋煤区相比,华南赋煤区构造变形强度和构造复杂程度均超过了华北赋煤区,在华南赋煤区,推覆构造、滑脱构造更加广泛而强烈;华南西部以紧密褶皱为主,华南东部断层更加发育^[13]。

(三) 构造煤发育

我国晚古生代聚煤期后的多期次地质构造运动,对煤层产生了不同程度的破坏作用;由于成煤在先,构造运动在后,在一些地区形成大量的构造煤或软煤。我国构造煤主要发育在豫西~两淮、太行山以东以及西南和东北的大部分地区。构造煤赋存地区的煤层气地质资源量为 7.87 亿 m^3 ,可采资源量为 2.35 亿 m^3 ,分别占全国煤层气地质资源总量和可采资源总量的 21%和 12%^[11]。

这些煤层的原生结构遭到强烈破坏,煤层破碎、揉皱,煤层渗透性变差,渗透率常为 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ mD ($1 \text{ mD} = 10^{-15} \text{ m}^2$) 以下,给煤层气抽采和煤炭安全开采造成极大困难。目前,构造煤发育区的煤层气资源只能依靠采煤过程中的矿井抽采,地面井技术对此尚不成熟,难以进行低成本开发,此类煤层赋存条件的地面煤层气开采仍是世界性技术难题。

(四) 煤层透气性低

煤层透气性系数是表示瓦斯在煤层中流动难易程度的物理量。目前我国使用煤(岩)层的透气性系数单位为 $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,其物理意义为瓦斯(在 0°C 、动力黏度为 $1.08 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)压力梯度为 1 MPa/m 的情况下,通过断面为 1 m^2 的煤(岩)层的流速为 1 m/d 时的煤(岩)层透气性系数。渗透率是表征多孔介质的物理量,单位是 m^2 ,国际上通用的单位是 D(达西)($1 \text{ D} = 1000 \text{ mD} = 1 \mu\text{m}^2$)。对于瓦斯, $1 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 相当于 0.025 mD 。

我国煤层渗透率普遍较低^[11],典型煤矿区煤层渗透率除晋城矿区和华晋焦煤公司等部分矿区大于 0.1 mD 外,其他矿区均小于 0.1 mD ,普遍在 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ mD}$ 之间。我国煤层渗透率偏低是困扰瓦斯地面开发和井下预抽的主要因素。对于透气性低的煤层,必须在卸压的情况下或人工增大透气性系数后,才能抽出瓦斯。

(五) 煤层瓦斯含量高

我国煤层大多含瓦斯量较高。据《1:200 万中国煤层瓦斯地质图》对全国 105 个煤矿区的调查结果,全国含气量 $10 \text{ m}^3/\text{t}$ 以上的矿区有 43 个,占 41%; $8 \sim 10 \text{ m}^3/\text{t}$ 含气量矿区 29 个,占 28%; $6 \sim 8 \text{ m}^3/\text{t}$ 含气量矿区 19 个,占 18%; $4 \sim 6 \text{ m}^3/\text{t}$ 含气量矿区 14 个,占 13%;其中,煤与瓦斯突出矿区 79 个^[14]。

由于我国煤田构造演化和煤层瓦斯生成与保存条件变化大,煤中瓦斯含量在空间上存在较大差异。矿区瓦斯赋存总体上表现为南高北低、东高西低的趋势。东北地区平均矿井相对瓦斯涌出量为 $14.53 \text{ m}^3/\text{t}$,矿井普遍进入深部开采,以地应力为主导的瓦斯动力灾害较为严重;西北地区平均矿井相对瓦斯涌出量为 $4.5 \text{ m}^3/\text{t}$,瓦斯灾害危险程度相对较小,特别是新疆地区瓦斯灾害近年来才开始显现;中东部华北板块地区平均矿井相对瓦斯涌出量

为 $8.425 \text{ m}^3/\text{t}$, 煤层逐渐进入深部开采, 瓦斯灾害相对严重; 西南和江南扬子板块地区地质构造复杂, 瓦斯灾害严重, 平均矿井相对瓦斯涌出量为 $19.89 \text{ m}^3/\text{t}$, 进入深部开采后突出-冲击地压复合型灾害开始呈现。

(六) 煤与瓦斯突出严重

根据 2012 年煤矿瓦斯等级鉴定资料, 我国煤矿瓦斯等级以瓦斯矿井为主, 主要呈现两大特点: 一是高瓦斯及煤与瓦斯突出矿井数量多、分布广, 全国 3 284 个高瓦斯及煤与瓦斯突出矿井在全国 26 个主要采煤省份大多都有分布。二是西南和中东部地区的高瓦斯和煤与瓦斯突出矿井分布较多, 贵州、四川、湖南、山西、云南、江西、重庆、河南 8 省(市)有高瓦斯和煤与瓦斯突出矿井 2 865 处, 占全国高瓦斯和煤与瓦斯突出矿井总数的 87.2%^[15]。

依据全国瓦斯地质图及相关资料, 目前我国共有 79 个煤与瓦斯突出矿区。对于受构造挤压、剪切作用极为强烈, III、IV、V 类构造煤普遍发育, 且厚度占煤层厚度一半以上或成层发育的突出煤层的构造单元, 划定为煤与瓦斯严重突出区, 如莱巩、登封等煤田(矿区)的突出煤层; 除此之外的煤田(矿区)突出煤层, 划定为煤与瓦斯突出区, 如阳泉、晋城等煤田(矿区)。

根据 2010 年统计数据, 全国高瓦斯和煤与瓦斯突出矿井原煤产量为 $10.56 \times 10^8 \text{ t}$, 占全国煤炭产量的 1/3。国有重点煤矿中, 高瓦斯和煤与瓦斯突出矿井数量占 49.8%, 煤炭产量占国有重点煤矿总产量的 42%; 其中突出矿井 235 处, 占总数的 19.3%, 煤炭产量占全国的 11.8%。45 户安全重点监控企业中, 高瓦斯、煤与瓦斯突出矿井数量和产量分别占 60.2%、60.6%。

综上所述, 我国煤层成煤后大都经历了复杂的地质构造运动, 80% 以上煤层具有构造煤发育、低透气性、高瓦斯和高地应力等特点。目前, 在我国 105 个煤矿区中, 有 58 个高瓦斯突出矿区, 占全国煤矿区的 55%, 储存着我国 60% 以上的煤层气资源, 承担着国家 70% 以上的煤炭生产任务, 但瓦斯灾害也比较严重。随着我国煤矿开采范围的扩大、开采强度和深度的增加, 高瓦斯矿井将越来越多, 瓦斯对煤矿安全生产的威胁也会越来越大, 严重制约着煤矿的安全生产和煤炭工业的安全发展。

二、煤与瓦斯共采模式

抚顺、阳泉、晋城、淮南矿区分别代表了我国瓦斯抽采不同时期和不同赋存条件下煤与瓦斯共采模式, 均是基于我国煤层瓦斯赋存特征研发出的较为实用的煤与瓦斯共采技术。

(一) 抚顺模式^[16,17]

抚顺模式是指以高透气性高瓦斯特厚煤层为赋存条件的煤与瓦斯共采技术。

抚顺煤田主采煤层是世界罕见的单一特厚煤层, 煤层的最大厚度为 130 m(煤田西部), 最薄为 8 m(东部), 平均厚度 50 m, 自上而下分为 4 个自然分层。该煤层节理发育, 孔隙率较大(8.19%~17.32%), 透气性很好(0.25~3.6 mD)。煤田成煤期较晚、埋藏较浅、变质程度较低, 但瓦斯含量高, 为罕见的高富集煤层气田, 历年矿井瓦斯等级鉴定的瓦斯相对涌出量均在 $40 \text{ m}^3/\text{t}$ 以上。

抚顺煤矿开采历史悠久, 1952 年龙凤矿在我国首次实施井下钻孔预抽本煤层瓦斯, 获得成功。抚顺煤矿的成功经验迅速在煤炭行业内传播, 具有广泛的参考价值。

针对特厚煤层分层综放开采方法和煤层自然发火严重的特性, 抚顺煤矿科学地实施了综放工作面采空区瓦斯控制抽采、采煤工作面合理通风和采空区防火措施相结合的综合技

术,一并解决了瓦斯问题和自然发火问题。瓦斯抽采方法主要有底板巷道穿层钻孔区域预抽、边抽边掘、两平巷采前预抽、边抽边采(顶板巷道、引巷、埋管)、旧区密闭抽采和地面钻井水力压裂预抽瓦斯等。

随着开采深度的增加,抚顺模式遇到深部开采动力灾害防治难题。自20世纪90年代以来,老虎台煤矿冲击地压频发,灾害越来越严重,给矿井安全生产带来极大困难。

(二) 天府模式^[18,19]

天府模式是指以急倾斜高瓦斯突出煤层群为赋存条件的煤与瓦斯共采技术。

天府煤田属二叠纪乐平煤系,分南、北及杨柳坝三个井口,位于观音峡背斜的南段,背斜为一长条带,背斜东翼构造复杂,受一组断层所破坏,无开采价值;背斜西翼构造简单,产状稳定,煤层倾角为 $60^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 。

煤层分布在煤系第一组和第三组内。第三组自上而下为一号、二号、……、六号层;第二组不含煤;第一组自上而下为七号、八号、九号、十号层。在南井有6层可采或局部可采,即二号、三号、五号、六号、七号、九号层。北井只有3层可采,即三号、五号、九号层,其中九号层为中厚煤层,厚度稳定,煤质也好,储量占全矿一半以上。

矿井属于煤与瓦斯突出矿井,生产水平南井绝对瓦斯涌出量为 $26\sim 35\text{ m}^3/\text{min}$,相对瓦斯涌出量为 $48\sim 54\text{ m}^3/\text{t}$ 。全矿共发生煤与瓦斯突出59次,其中南井39次,九号层突出27次,最大强度达5270 t。该煤层同时具有自燃及煤尘爆炸危险。在+110 m水平断层附近的七号煤层也发生过突出。

20世纪70年代中期,该矿与中国矿业大学及煤炭科学研究总院重庆分院合作,开展了天府煤矿急倾斜远距离保护层开采防治瓦斯工作。该项目对保护层开采后煤层瓦斯压力、瓦斯流量、瓦斯抽采效果、煤层透气性系数、煤层温度、煤层变形以及煤层应力进行了系统全面的考察。通过本次研究试验,搞清楚了保护层开采技术的基本原理,即在保护层的采动作用下,引起地应力降低、煤层发生膨胀变形、透气性系数增大及瓦斯流量增大等变化规律,为以后保护层开采技术的推广应用奠定了理论和实践基础。

(三) 阳泉模式^[20,21]

阳泉模式是指首采层为无突出危险煤层,采空区和邻近层瓦斯涌出量高的煤层群赋存条件下的煤与瓦斯共采技术。

阳泉矿区位于山西省沁水盆地东北部,矿区内断层不发育,含煤地层为石炭-二叠系的太原组和山西组;煤层发育,共有16层煤,主要可采煤层有3、12、15号煤层,6、8、9号煤层局部可采。煤层厚度平均 $1.01\sim 5.20\text{ m}$,太原组15煤层最厚,达 $10\sim 11.26\text{ m}$ 。煤种主要为无烟煤,煤结构完整,裂隙较发育,以小型裂隙和微裂隙为主。煤层瓦斯含量 $5\sim 30\text{ m}^3/\text{t}$,煤层渗透率为 $(0.5\sim 6.7)\times 10^{-3}\text{ mD}$ 。

结合主采煤层层位,可将含煤地层分为3个瓦斯储集层段:以3号煤层为主的上储集层段、以12号煤层为主的中储集层段和以15号煤层为主的下储集层段。3号煤层和12号煤层瓦斯压力大,瓦斯含量高。15号煤层瓦斯压力小,瓦斯含量低,没有突出危险性,可以作为保护层首先开采,但由于其厚度大,采煤过程中瓦斯涌出量非常大。

1957年,阳泉四矿采用穿层钻孔抽放上邻近层瓦斯的实验在我国首先获得成功,解决了煤层群开采中首采工作面瓦斯涌出量大的问题。此后又试验成功顶板收集瓦斯巷(高抽巷)抽放上邻近层瓦斯,抽放率达 $60\%\sim 70\%$ 。到了20世纪60年代以后,邻近层卸压瓦斯

抽放技术在我国得到了广泛的推广应用。

阳泉矿区由于 15 号煤层厚度大,邻近层较多,受采动影响较大,因而工作面瓦斯涌出量大。从工作面风排瓦斯角度出发,工作面除了施工进风巷和回风巷外,同时施工一条内错尾巷或者是外错尾巷,形成“U+I”型或“U+L”型“一进两回”的通风方式,保证一定的风排瓦斯量。尾巷布置方式在煤层浅部开采时起到了良好的瓦斯治理效果,并在全国许多矿区得到推广;但随着开采深度增加,瓦斯涌出量随之增大,专用排瓦斯巷在排放瓦斯时浓度不附空,尾巷内高浓度瓦斯形成了一个移动的瓦斯库,吸取 2009 年山西焦煤集团屯兰煤矿专用排瓦斯巷“2·22”爆炸事故、2013 阳泉寺家庄煤业“1·17”较大瓦斯爆炸事故教训,《煤矿安全规程》(2016 版)要求严禁使用专用排瓦斯巷。

随着开采深度的增加,阳泉矿区首采层逐渐升级为煤与瓦斯突出煤层,瓦斯治理面临严峻考验,瓦斯事故呈增长态势。阳泉模式今后将面临新的瓦斯治理难题。

(四) 晋城模式^[21]

晋城模式是指高透气性高瓦斯原生结构煤层赋存条件下煤与瓦斯共采技术。

晋城矿区井田内含煤地层为石炭二叠系,主采 3、9、15 号煤层,煤厚分别为 6.0 m、1.4 m、2.5 m。煤层瓦斯含量由上至下依次为 12 m³/t、17 m³/t、20 m³/t,必须先抽后采。煤体结构简单,主要为原生-碎裂结构煤,煤质坚硬;宏观、微观裂隙较发育,连通性中等;煤中孔隙以小孔、中孔为主,孔隙间联通性较好;煤储层非均质性明显,渗透率测值相差较大,测值区间为 0.004~3.98 mD,均值为 0.764 mD,相对于全国煤储层渗透率测值而言,渗透率中等偏高;盆地内现代地应力作用较弱,煤岩层处于拉张应力场中。

基于较高渗透率硬煤层原生结构煤发育的煤与瓦斯赋存特点,晋煤于 2008 年提出了“三区联动立体抽采模式”。其主要特点在于将煤矿区划分为煤炭生产规划区、煤炭开拓准备区与煤炭生产区三个区间,并结合三区时空区域特点,提出相应的瓦斯抽采技术。煤炭生产区即煤炭生产矿井现有生产区域,煤炭开拓准备区是煤炭生产矿井近期(一般为 3~5 年)内即将进行回采的区域,而煤炭生产规划区的煤炭资源一般在 5~10 年甚至更长时间以后进行回采作业,有充分的地面钻井预抽时间。在生产规划区,大力发展高效低成本的以排水降压为原理的地面预抽技术;开拓准备区主要采用煤层气地面与井下联合抽采技术、区域递进式抽采技术、条带迈步式抽采技术等;煤炭生产区主要利用井下瓦斯抽采技术,包括边抽边掘、采空区抽采、本煤层钻孔抽采及采动区地面抽采技术。

晋煤“三区联动立体抽采模式”的主要特点是先采气后采煤,通过井上下联合抽采,实现煤与煤层气的协调开发,该模式适用于地质构造条件相对简单、煤层具有较高渗透率且煤质较硬、地势平缓的区域。

随着开采深度的增加,晋城矿区首采层开采同样面临着升级为煤与瓦斯突出煤层的威胁。从目前晋城矿区瓦斯抽采现状来看,晋煤“三区联动”煤与瓦斯共采模式仍处于起步阶段,地面煤层气开采和矿井瓦斯治理没有真正联动、协调起来,地面抽采未有效解决井下首采层为煤与瓦斯突出煤层的采掘难题。另外,晋城矿区应逐步淘汰“U+L”、“U+I”等两进两回的采空区通风方式,彻底消除采空区瓦斯爆炸隐患(如寺河矿 2006 年 2 月 1 日发生尾巷瓦斯爆炸事故),积极推广无煤柱沿空留巷“Y”型通风煤与瓦斯共采技术。

(五) 淮南模式^[21-25]

淮南模式是指低透气高瓦斯煤层群复杂地质条件下的煤与瓦斯共采技术。