

国家重点基础研究计划（973计划）项目（2015CB251600）资助
国家自然科学基金项目（51264035、51504182）资助

低透气性煤层外错高抽巷 卸压瓦斯抽采技术研究

Study on the Pressure-relief Gas Extration Technique in
Low-air-permeability Coal Seam by the Lateral High Drainage Roadway

王红胜 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

非外借

国家重点基础研究计划(973 计划)项目(2015CB251600)资助

国家自然科学基金项目(51264035、51504182)资助

低透气性煤层外错高抽巷卸压 瓦斯抽采技术研究

王红胜 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书以李雅庄煤矿低透气性煤层为研究对象,以提高采场覆岩卸压瓦斯抽采效果和解决采煤工作面隅角瓦斯超限难题为切入点,综合采用理论分析、物理模拟、数值模拟、实验室实验、工业性试验等研究方法,对低透气性煤层外错高抽巷卸压瓦斯抽采技术展开了系统的研究。首先,建立外错高抽巷围岩结构力学模型,提出了采用外错高抽巷抽采相邻两区段工作面覆岩采动卸压瓦斯方法。其次,基于采场覆岩采动裂隙及应力分布特征,确定外错高抽巷布置参数及高位钻孔终孔布置合理参数。最后,基于高位钻孔测斜结果,提出了高位钻孔角度补偿纠偏方法,提高了高位钻孔卸压瓦斯抽采效果。研究成果为低透气性煤层安全高效开采提供理论指导与技术支持。

本书可供从事煤矿地下开采、卸压瓦斯抽采、煤矿井下灾害防治及相关领域科研人员和工程技术人员参考使用,亦可作为普通高校研究生和高年级本科生参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

低透气性煤层外错高抽巷卸压瓦斯抽采技术研究/
王红胜著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2017. 5

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3273 - 1

I. ①低… II. ①王… III. ①煤矿—瓦斯抽放—研究
IV. ①TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 237238 号

书 名 低透气性煤层外错高抽巷卸压瓦斯抽采技术研究

著 者 王红胜

责任编辑 潘俊成 孙建波

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 江苏凤凰数码印务有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 10.25 字数 312 千字

版次印次 2017 年 5 月第 1 版 2017 年 5 月第 1 次印刷

定 价 40.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

李雅庄煤矿为霍州煤电集团唯一的低透气性高瓦斯矿井,工作面回采前,采用了本煤层瓦斯抽采技术,但因煤层透气性低,抽采效果不佳,导致了工作面回采过程中上隅角瓦斯易超限,给工作面安全高效回采埋下了重大隐患。工作面回采后,采场上覆岩层会发生运移和破断,覆岩层内将产生大量裂隙,这些裂隙是瓦斯储存、流动的場所和通道。受采动影响,煤层卸压后大量瓦斯沿顶板裂隙进入裂隙带,如果将抽采钻孔或高抽巷布置在裂隙带内将有效提高卸压瓦斯抽采效果,避免工作面隅角瓦斯超限。因此,开展低透气性煤层外错高抽巷卸压瓦斯抽采技术研究,准确掌握覆岩采动裂隙分布特征,合理确定外错高抽巷和抽采钻孔参数成为低透气性煤层外错高抽巷卸压瓦斯抽采的关键。因此,本书以李雅庄煤矿低透气性煤层为研究对象,以提高采场覆岩卸压瓦斯抽采效果和解决采煤工作面隅角瓦斯超限难题为切入点,综合采用理论分析、物理模拟、数值模拟、实验室实验、工业性试验等研究方法,对低透气性煤层外错高抽巷卸压瓦斯抽采技术展开了系统的研究。

首先,提出了外错高抽巷布置方式及其内涵。对于上、下相邻区段工作面,外错上区段工作面布置顶板走向高抽巷,前期在高抽巷内布置高位钻孔抽采上区段工作面覆岩采动卸压瓦斯,后期采用高抽巷抽采下区段工作面覆岩采动卸压瓦斯;高抽巷可服务于上、下区段两个工作面卸压瓦斯抽采,有效解决了相邻两工作面上隅角瓦斯超限难题和实现了高抽巷“一巷两用”。其次,提出了外错高抽巷高位钻孔卸压瓦斯抽采技术。基于分析采场覆岩采动裂隙及应力分布特征,提出了在外错高抽巷内采用高位钻孔抽采上区段工作面覆岩采动卸压瓦斯技术,确定了高位钻孔合理终孔位置,解决了工作面上隅角瓦斯超限难题,保障了工作面安全高效开采。最后,提出了钻孔角度补偿纠偏方法及纠偏效果评价方法。为解决高位钻孔钻进过程中的偏斜难题,采用钻孔测斜仪测出钻孔偏斜角度,然后在钻孔施工过程中对钻孔设计角度进行相反方向的角度补偿,当纠偏角度较小时,纠偏后钻孔轨迹与钻孔设计轨迹的偏斜在可接受范围内,纠偏精度能满足要求。对钻孔纠偏效果进行了评价,提出了纠偏效果评价指标 k ,当钻孔实际轨迹接近其设计轨迹时, k 值就越小,表明钻孔纠偏效果越好。该方法基本解决了钻孔偏斜问题,提高了高位钻孔卸压瓦斯抽采效果。

全书共9章。第1章介绍了本书的研究背景、意义和国内外研究现状,提出了本书的研究内容与方法。第2章建立了外错高抽巷围岩结构力学模型,提出了外错高抽巷“一巷两用”的布置方法。第3章分析了采场覆岩破断特征与采动裂隙动态演化规律,掌握了采场覆岩采动裂隙演化过程时空关系和工作面上端头覆岩采动裂隙“分区”分布特征,初步确定了高位钻孔终孔布置层位。第4章对高抽巷布置方式及布置层位进行了优化分析,确定了高抽巷合理布置方式、高抽巷合理外错距离与垂直布置层位。第5章分析了外错高抽巷高位钻孔卸压瓦斯运移规律,得到了采场覆岩卸压瓦斯运移规律,初步确定了高位钻孔终孔布置层位。第6章采用钻孔窥视技术分析了采场覆岩采动裂隙分布特征,并在外错高抽巷内布

置高位钻孔进行卸压瓦斯抽采试验,基于抽采效果确定了高位钻孔终孔合理位置。第7章开展了高位钻孔测斜分析,基于钻孔测斜结果,提出了角度补偿纠偏方法及纠偏效果评价指标,确定了钻孔合理纠偏技术方案。第8章开展了外错高抽巷高位钻孔卸压瓦斯抽采工业性试验分析。第9章对本书所做的工作进行了总结。

本书在成书过程中,参阅了大量国内外相关专业文献,给予了作者很大启发,在此谨向文献作者表示诚挚感谢。本著作是在西安科技大学李树刚教授悉心指导下完成的,在此谨向李树刚教授致以崇高敬意和诚挚感谢。感谢中国矿业大学张东升教授、西安科技大学伍永平教授、来兴平教授给予的关心与支持。感谢课题组马立强教授、王旭锋教授、范钢伟副教授、张天军教授、许满贵教授、林海飞副教授、董国伟副教授、刘浪副教授给予的帮助。感谢霍州煤电集团张小康副总工程师对作者在霍州煤电挂职锻炼期间给予的关心与支持。感谢霍州煤电集团李雅庄煤矿解俊祥矿长、樊启文总工程师、王永奎副总工程师、杨康峰副总工程师以及其他工程技术人员在我挂职锻炼期间和工业性试验过程中给予的大力支持。感谢郭正超、双海清、由临东、杜政贤、李森林、李斌等研究生参与部分研究工作。

卸压抽采技术是提高低透气性煤层瓦斯抽采效果的有效途径之一,本书基于霍州煤电集团李雅庄煤矿开采技术地质条件,提出了外错高抽巷卸压瓦斯抽采技术并开展了相关工作,由于作者水平所限,书中难免存在疏漏或谬误之处,恳请专家及读者批评指正。

作 者

2016年9月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究的目的及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本书主要研究内容、研究方法及技术路线	11
1.4 本书研究目标及创新点	13
2 外错高抽巷“一巷两用”布置方式的提出	15
2.1 2-603 工作面概况	15
2.2 2-603 工作面抽采效果	18
2.3 外错高抽巷“一巷两用”布置方式的提出	20
2.4 本章小结	21
3 采场覆岩破断特征与采动裂隙动态演化规律分析	23
3.1 煤岩基础力学参数测试	23
3.2 “二带”高度理论计算分析	25
3.3 覆岩采动裂隙动态演化规律 UDEC ^{2D} 数值模拟分析	30
3.4 覆岩采动裂隙动态演化规律 RFPA ^{2D} 数值模拟分析	44
3.5 覆岩采动裂隙动态演化规律相似材料模拟分析	54
3.6 本章小结	59
4 高抽巷布置方式及合理层位的确定	61
4.1 高抽巷布置方式的确定	61
4.2 外错高抽巷合理层位的确定	65
4.3 本章小结	71
5 外错高抽巷高位钻孔卸压瓦斯运移规律分析	73
5.1 FLUENT 简介	73
5.2 模型的建立	75
5.3 模拟结果及分析	78
5.4 本章小结	108

6	外错高抽巷高位钻孔终孔合理位置的确定	110
6.1	覆岩采动裂隙带高度现场探测分析	110
6.2	不同终孔位置试验钻孔抽采效果分析	116
6.3	不同终孔位置试验钻孔探测分析	121
6.4	本章小结	124
7	外错高抽巷高位钻孔测斜与纠偏分析	125
7.1	测斜与纠偏的目的	125
7.2	钻孔测斜仪	125
7.3	角度补偿纠偏方法及效果评价	128
7.4	原设计钻孔测斜分析	129
7.5	钻孔纠偏及分析	135
7.6	本章小结	141
8	外错高抽巷高位钻孔卸压瓦斯抽采工业性试验分析	142
8.1	外错高抽巷围岩变形监测	142
8.2	外错高抽巷抽采系统	143
8.3	高位钻孔抽采效果	144
8.4	本章小结	149
9	主要结论	150
	参考文献	153

1 绪 论

1.1 研究的目及意义

我国是世界上煤层瓦斯储量最丰富的国家之一,瓦斯是一种可燃气体,其高热、清洁和环保性等优点是其他能源所无法比拟的^[1]。但部分矿井没有充分抽采利用瓦斯,常造成矿井事故发生,尤其是一些重特大事故。新中国成立以来,全国煤矿共发生 24 起一次死亡百人以上特别重大事故,共死亡 3 840 人;其中瓦斯事故 21 起,死亡 3 437 人。虽然近些年瓦斯事故整体有所减少,但死亡人数仍然很多,瓦斯治理形势依然严峻^[2-5]。20 世纪 50 年代我国开始高透气性煤层瓦斯抽采技术研究,但与美国、俄罗斯、澳大利亚等国煤层瓦斯赋存相比,我国煤层瓦斯赋存总体表现为低渗、低压、低饱和度且地层能量普遍不足等特点。95% 以上的高瓦斯和突出矿井开采煤层属于低透气性煤层,透气性系数只有 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ md 数量级,瓦斯抽采半径小,瓦斯抽采浓度低,造成抽采率低下^[6-8]。因此,提高低透气性煤层瓦斯抽采效果,降低煤层瓦斯含量和压力,达到减少或避免瓦斯灾害事故的发生。

长期工程实践表明,增加低透气性煤层的透气性是治理这类煤层瓦斯的关键。工作面回采后,受采动影响,一方面采场上覆岩层会发生运移和破断,覆岩层内将产生大量采动裂隙;另一方面采场覆岩裂隙区域的透气性增加了几百倍,此时是瓦斯抽采的最佳时机^[9-10]。这些采动裂隙是瓦斯储存、流动的場所和通道,煤层卸压后,大量瓦斯沿顶板裂隙进入裂隙带,若将抽采钻孔或巷道布置在裂隙带内,则将有效提高卸压瓦斯抽采效果,避免工作面上隅角瓦斯超限。目前,卸压瓦斯抽采方法主要有巷道抽采和钻孔抽采。钻孔抽采具有钻孔布置灵活、施工简单、见效快等优点,被广泛应用于低透气性煤层瓦斯抽采中。高抽巷具有抽采时间长、抽采半径大、抽采效果显著等优点,也被广泛应用。合理的高抽巷层位及钻孔终孔位置决定了卸压瓦斯抽采效果,但确定高抽巷层位及钻孔终孔位置要考虑岩层岩性、采动影响强弱程度、覆岩采动裂隙发育程度及分布特征等因素影响,若高抽巷层位及钻孔终孔位置不合理,则形成抽采盲区,降低抽采效果,易致使工作面上隅角瓦斯超限。因此,如何将高抽巷抽采技术和钻孔抽采技术相结合,提高卸压瓦斯抽采效果,同时也提高高抽巷利用效率,成为急需解决的问题^[11-13]。

李雅庄煤矿为霍州煤电集团唯一的低透气性高瓦斯矿井,目前六采区正在回采 2 煤层,工作面回采前,在上下顺槽内向煤层布置顺层平行钻孔预抽煤层瓦斯,预抽时间约为 2 a。由于煤层透气性低,顺层平行钻孔预抽效果差,导致回采过程中工作面上隅角瓦斯易超限,给工作面安全高效回采埋下严重隐患。为解决上隅角瓦斯超限难题和提高高抽巷利用效率,本书提出了相邻两工作面共用高抽巷卸压瓦斯抽采技术,对覆岩采动裂隙发育特征、高抽巷合理层位、抽采钻孔终孔位置及钻孔测斜与纠偏等关键问题进行系统分析,以便解决相

邻两工作面上隅角瓦斯超限难题,实现高抽巷的“一巷两用”。因此,开展低透气性煤层外错高抽巷卸压瓦斯抽采技术研究,准确掌握采场覆岩采动裂隙分布特征,合理确定外错高抽巷和抽采钻孔参数,避免相邻两工作面上隅角瓦斯超限事故,保障李雅庄煤矿低透气性煤层安全高效开采;也为类似地质条件矿井推广应用卸压瓦斯抽采技术,实现一巷多用等都具有重要的理论意义和实践价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 覆岩采动裂隙动态分布规律研究现状

对于覆岩采动裂隙动态分布规律的研究,国外的 M. Karmis、G. J. Hasenfus、M. Bai 和 V. Palchik 等认为长壁开采覆岩存在三个不同的移动带^[14-17]。刘天泉院士等对我国煤矿开采覆岩破坏与导水裂隙分布作了大量的实测和理论研究,对采场上覆岩层移动破断与采动裂隙分布规律提出了“横三区”、“竖三带”的总体认识,即沿工作面推进方向覆岩将分别经历煤壁支承影响区、离层区、重新压实区,由下往上岩层移动分为垮落带、断裂带、整体弯曲下沉带;得出计算导水裂隙带高度的经验公式,并指导了许多煤矿的水体下采煤试验^[18-19]。随着覆岩离层区充填减沉技术在我国煤矿的应用,国内许多学者对覆岩离层进行了多方面的研究^[20-21]。

由于对岩层内部移动的动态过程难以清楚地了解,因而难以掌握岩层采动裂隙动态发育规律,这显然不能更好地适应煤矿绿色开采实践的需求。为了解决岩层控制中更为广泛的问题,钱鸣高院士等于 1996 年提出了岩层控制的关键层理论,它为深入研究岩层内部移动的动态过程和岩层采动裂隙动态分布规律提供了强有力的理论工具^[22-25]。关键层理论的基本学术思想为: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,其中一层至数层厚硬岩层在岩层移动中起主要控制作用,将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协调一致的,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。为了弄清开采时由下往上传递的岩层移动动态过程,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。

基于关键层理论,对覆岩采动裂隙的动态分布规律进行了深入研究,有关研究成果归纳总结如下:

(1) 岩层移动过程中的离层主要出现在各关键层下,覆岩离层最大发育高度止于覆岩主关键层。当相邻两关键层复合破断时,尽管上部关键层的厚度与硬度比下部关键层大,其下部也不会出现离层。

(2) 沿工作面推进方向,关键层下离层动态分布呈现两阶段发展规律:即关键层初次破断前,随着工作面推进,离层量不断增大,最大离层位于采空区中部。关键层初次破断后,关键层在采空区中部离层趋于压实,而在采空区两侧仍各自保持一个离层区。工作面侧的离

层区是随着工作面开采而不断前移的,工作面侧离层区最大宽度及高度仅为关键层初次破断前的 $1/3 \sim 1/4$ 。从平面看,在采空区四周存在一沿层面横向连通的离层发育区,称之为采动裂隙“O”形圈。沿顶板高度方向,随工作面推进离层呈跳跃式由下往上发展。

(3) 贯通的竖向破断裂隙是水与瓦斯涌入工作面的通道,故也称其为“导水、导气”裂隙。“导水、导气”裂隙仅在覆岩一定高度范围内发育,其最大发育高度与采高及岩性有关。对“导气”裂隙发育动态过程的研究表明,在开采初期,下位关键层的破断运动对“导气”裂隙从下往上发展的动态过程起控制作用,导气裂隙高度由下往上发展是非匀速的,随关键层的破断而突变。当采空区面积达一定值后,“导气”裂隙的分布也同样呈“O”形特征,它是正常回采期间邻近层卸压瓦斯流向采空区的主要通道。

长期研究结果表明^[23],岩石在长期的地应力的作用下,往往产生裂隙而出现碎裂或变形。人们对岩石变形或破裂的研究已积累了丰富的资料,也有了较系统的认识。20 世纪 60 年代以来,国外一些学者对自然界岩石的形变与实验岩石的形变、对宏观构造与微观构造之间的联系做了大量的研究工作,取得了一系列的实验数据。近年来,我国学者也从不同的角度着手对岩石形变及其力学性质加以鉴定,并在工程地质、地震地质等方面进行了大量的实地测量和实验研究。

近年来,一些学者应用分形理论对煤(岩)体的裂隙面粗糙度、裂隙分布的复杂程度及裂隙分布与煤(岩)体的某些力学相关关系进行了较深入的研究^[26],但是多以研究小尺度的煤(岩)样和大尺度的断层体系为主,很少涉及中等尺度下采场、巷道裂隙的分布状况。

顶板覆岩受采动影响,对岩层裂隙的演化过程的研究经历了很长一段时间。随着近 20 年岩石断裂力学的发展,岩石研究的测试手段和测试技术提高,同时岩石受力分析的大型计算模拟软件的研制成功,对岩体中的连续节理裂隙可模拟为裂纹,对受力岩体过程分析不再是简化为完全的均匀体,而作为有众多不连续裂纹分割的裂隙体。运用断裂力学理论,可以分析岩体中节理裂隙的起裂、扩展、贯通以及岩体局部破坏的时空演化过程,从而揭示岩体整体失稳的破坏机制^[27]。通常情况下,岩石裂隙由起始扩展到失稳扩展,直到最终破坏的演化过程中,同时存在着损伤与断裂两种缺陷的积累和发展,岩体中分布原生裂隙的缺陷对新生裂隙的演化扩展有很大影响。岩体的破坏与失稳,总是伴随原有裂隙、结构面的演化、发展和贯通,同时还会在岩体内部弱面上产生新裂隙。

对因环境条件逐渐恶化致使岩体中裂隙随时间不断蠕变、演化,进而产生宏观断裂及扩展,最终导致岩体由局部破坏发展到整体失稳^[28]。Griffith 运用能量平衡原理对脆性材料进行了断裂强度分析,Griffith 理论虽然是 70 多年前建立起来的理论,但目前还是断裂理论的基础,该理论认为固体的破坏是裂纹扩展的结果,而裂纹扩展的条件^[29]是由裂纹扩展时所释放出的弹性应变能和形成新表面所吸收的表面能之间的失稳现象所引起的。由于裂纹的形状、大小和方向各不相同,所以裂纹边缘上的应力集中也各不相同;当外力恒定时,各裂纹引起的应力集中的数量也各不相同;当其中应力达到材料的临界值,裂纹就开始扩展,同时释放出应变能;当释放出来的弹性应变能大于形成新表面所需要的表面能时就会导致岩体的突然破坏^[30-31]。

钱鸣高、缪协兴提出了煤层开采后上覆岩层中会形成两类裂隙^[22]:一类是离层裂隙,是随岩层下沉在层与层之间出现的沿层面裂隙,它使煤层产生膨胀变形而使瓦斯卸压;另一类裂隙为竖向裂隙,是随岩层下沉破断形成的穿层裂隙,它是沟通上、下岩层间瓦斯以及水的

通道。《开采解放层的认识与实践》总结了保护层分带规律,提出沿走向可以分为4个带:正常压力带、集中应力带、卸压带和应力恢复带;在研究残余瓦斯压力与层间瓦斯排放问题时,在垂直方向上也分了3带:大裂隙带、裂隙带、弹塑性变形带。利用相似材料模型实验,研究了煤层开采后上覆岩层中的裂隙分布,并且用离层率 f 指标来定量研究离层裂隙的发育程度,它反映了单位厚度岩层内离层裂隙的高度。测定上、下岩层的下沉量和岩层层间距求得离层率。

2000年,李树刚等通过相似模拟实验分析了采动后覆岩关键层活动特征对裂隙带分布形态的影响,首次提出了上覆岩层中破断裂隙和离层裂隙贯通后在空间形成椭抛带分布特征^[32-33]。

2003年,程远平、俞启香、袁亮等运用数值模拟和现场试验相结合的研究方法,研究上覆远程卸压岩体移动和裂隙分布以及远程卸压瓦斯的渗流流动特性,提出了符合远程卸压瓦斯流动特性的远程瓦斯抽采方法^[34]。

2004年,石必明、俞启香、周世宁等通过对缓倾斜煤层保护层开采远距离煤岩破裂变形的研究,得出覆岩垮落及裂隙演化规律^[35]。刘泽功研究了受采动影响采场覆岩裂隙的时空演化机理^[36]。结果表明,采场覆岩在采动过程中,岩层之间产生不一致性的连续变形,这种岩层间的不协调变形将形成岩层移动中的各种裂隙分布。受采影响覆岩的变形是由下至上逐层递进发展的,所以也会产生短期的离层。覆岩中的离层和纵向破断裂隙存在着张开和闭合,从产生、发展到最终闭合是一个动态演化过程。模拟试验研究发现,对于处在采空区的不同空间位置的上覆岩层,其裂隙演化过程所经历的时间周期完全不同,在采空区上下风巷、工作面上方和开切眼区域,顶板岩层中裂隙充分发育后将可以保持相当长的时间周期。

2005年,石必明、俞启香基于相似材料模型试验,首次应用非接触式数字近景摄影技术研究远距离保护层开采过程中覆岩微变形移动特性,得出在远距离保护层开采时,被保护层位于弯曲下沉带内,它在一定范围内发生膨胀变形,引起煤层透气性增大^[37]。

1.2.2 采动卸压瓦斯运移规律研究现状

国内外煤层气抽采方法分为采前预抽与采后卸压抽采两类。煤(岩)体的裂隙构成瓦斯流动通道,它对瓦斯抽出率起决定作用。煤层开采时岩层移动形成的采动裂隙导致煤层瓦斯卸压并形成卸压瓦斯的流动通道,煤层气透气性显著增大。卸压瓦斯运移与采动裂隙场的动态分布特征有着紧密的关系。

近年来,采动卸压瓦斯运移与储集规律研究主要集中在以下三个方面。

(1) 瓦斯动力弥散规律研究

对于瓦斯动力弥散规律的研究,多数学者将瓦斯在采空区冒落带中的运移规律视为瓦斯在多孔介质中的动力弥散过程。章梦涛等人所著的《煤岩流体力学》对瓦斯在采空区的动力弥散方程进行了推导,介绍了流体动力弥散方程在一些特殊情况下的解析解,并给出了一些具体实例以说明其用处^[38]。蒋曙光、张人伟将瓦斯、空气混合气体在采空区中的流动视为在多孔介质中的渗流,应用多孔介质流体动力学理论建立了综放采场三维渗流场的数学模型,采用上浮加权多单元均衡法对气体流动模型进行了数值解算^[39]。丁广骧、柏发松考虑因瓦斯—空气混合气体密度的不均匀及重力作用下的上浮因素,建立了三维采空区内变密度混合气非线性渗流及扩散运动的基本方程组,并应用 Galerkin 有限元法和上浮加权技

术对该方程组的相容耦合方程组进行了求解^[40]。随后,丁广襄以理论流体力学、传质学、多孔介质流体动力学等基本理论,结合矿井大气、瓦斯流动的特殊性,较详细地介绍了矿井大气以及采空区瓦斯的流动^[41]。梁栋、黄元平分析了采动空间空隙介质的特性以及瓦斯在其中的运动特征,提出了采动空间瓦斯运移的双重介质模型^[42],之后,梁栋与吴强对该模型进行了完善,并针对具体实例进行了求解^[43]。李宗翔、孙广义等人将采空区冒落区看作是非均质变渗透系数的耦合流场,用 Kozery 理论描述了采空区渗透性系数与岩石冒落碎胀系数的关系,用有限元数值模拟方法求解了采空区风流移动,结合图形技术和具体算例,求解了综放工作面采空区三维流场瓦斯涌出扩散方程^[44-46]。刘卫群等人应用随机理论及破碎岩体气体的渗流理论和数值分析方法建立了给定条件下采空区渗流分析模型,得到采空区渗流场与瓦斯浓度分布特征^[47-48]。胡千庭、兰泽全等人通过数值模拟对采空区瓦斯的流动规律及浓度分布规律进行了数值模拟^[49-50]。鹿存荣、杨胜强等人通过引进 Ergun 单相流半经验非线性渗流公式,结合连续性方程、动量方程、瓦斯动力弥散方程,建立了采空区流场的渗流模型,模拟预测并分析了采空区的风流速度场及瓦斯浓度场^[51]。

(2) 瓦斯升浮—扩散规律研究

对于此方面的研究,学者们主要是分析煤层采动后,上覆岩层所形成的裂隙形态,进而分析其中瓦斯的运移规律。

近年来的研究表明,综放开采后上覆岩层所形成的形态并非传统意义上的“三带”特征,而是随着工作面的推进裂隙分布特征亦随之变化。钱鸣高、许家林基于关键层理论,应用模型实验、图像分析、离散元模拟等方法,提出煤层采动后上覆岩层采动裂隙呈两阶段发展规律并形成“O”形圈分布特征,将其用于指导淮北桃园矿、芦岭矿卸压瓦斯抽放钻孔布置,取得了显著效果^[22,52-53]。之后,刘泽功、叶建设基于煤层采动后上覆岩层所形成的“O”形圈分布特征,探讨了采空区顶板瓦斯抽放巷道的布置原则,并应用流场理论分析了实施顶板抽放瓦斯技术前后采空区等处瓦斯流场的分布特征^[54-56]。林柏泉等人通过单元法实验,初步研究了开采过程中卸压瓦斯储集与采场围岩裂隙的动态演化过程之间的关系^[57]。李树刚在采动裂隙椭抛带的基础上,应用环境流体力学和气体输运原理,通过瓦斯在裂隙带升浮的控制微分方程组(包括连续方程、动量方程、含有物守恒方程和状态方程并服从相似假定和卷吸假定)计算,得到了瓦斯沿流程上升与源点距离的关系,从而阐述了卸压瓦斯在椭抛带中的升浮—扩散运移理论,并提出了几种抽采卸压瓦斯方法^[58]。之后,李树刚、林海飞等基于岩层控制关键层理论,建立了考虑采高及第一亚关键层与煤层顶板间距的采动裂隙椭抛带动态演化数学模型,运用环境流体力学、传质学、渗流力学、采动岩体力学等理论,得到采动煤体应力与卸压瓦斯渗流、纵向破断裂隙区瓦斯升浮以及横向离层裂隙区瓦斯扩散等方程,构建出椭抛带中卸压瓦斯渗流—升浮—扩散综合控制模型^[59]。

(3) 卸压煤层瓦斯运移规律研究

在国内,梁冰、章梦涛提出将瓦斯流动看作可变形固体骨架中可压缩流体的流动,得到了采动影响下煤岩层瓦斯流动的耦合数学模型,并研究了松藻打通二矿 7 号煤层开采对邻近层卸压后瓦斯向开采层采空区流动状况^[60]。孙培德基于煤岩介质变形与煤层气越流之间存在着相互作用,提出了双煤层气越流的固气耦合数学模型,并通过实测和数值模拟验证了该理论是符合实际生产的^[61-62]。梁运培运用达西定律、理想气体状态方程以及连续性方程等,建立和求解了邻近层卸压瓦斯越流的动力学模型,分析了邻近层卸压瓦斯的越流规

律,并在阳泉一矿采用岩石水平长钻孔进行了邻近层瓦斯的抽采工作^[63-64]。程远平、俞启香等人运用数值模拟和现场试验相结合的研究方法,研究了上覆远程卸压岩体移动和裂隙分布以及远程卸压瓦斯的渗流流动特性,提出了符合远程卸压瓦斯流动特性的远程瓦斯抽采方法^[65-66]。林海飞在分析采动裂隙带中卸压瓦斯来源及流态的基础上,运用多孔介质流体力学、渗流力学等理论建立了瓦斯运移数学模型,并分析了卸压瓦斯运移与采动裂隙动态演化关系^[67]。刘洪永、程远平用动量守恒方程(平衡方程)、质量守恒方程(连续性方程)、几何方程(应变—位移方程)和本构方程(应力—应变方程)描述采动变形和位移场,用瓦斯流动连续性方程、瓦斯运动控制方程、煤层瓦斯状态方程和瓦斯含量方程来描述卸压瓦斯流动,建立了煤岩体变形与卸压瓦斯流动气固耦合动力学模型^[68]。

1.2.3 裂隙带高度探测方法研究现状

现场实测是确定裂隙带的主要途径,其他的方法都是辅助手段。为了验证现场实测的结果,可以与物理模拟或者数值模拟的结果相比较,以减少误差。目前,现场实测法主要有注水试验法、高密度电阻率法、超声成像法、声波 CT 层析成像法、钻孔窥视技术等。

(1) 注水试验法

注水试验法是采用钻孔双端封堵测漏装置探测两带高度的一种较新的探测方法。它既可以在井下采区附近巷道或硐室内向采煤工作面采空区上方打小口仰孔探测,也可以在观测煤层上方已掘进的专用巷道内布置下垂孔进行探测。

(2) 高密度电阻率法

高密度电阻率法的理论基础是岩石电阻率差异。对于地下一定的岩体,采动以前电阻率是一个定值;采动以后,由于岩石垮落,改变了原生结构构造,同时温度和湿度也发生变化,从而电阻率发生了变化。因此测量同一岩体在不同时间内的电阻率变化,就可能判断岩体的形变过程,确定煤层顶板裂隙带高度。

(3) 超声成像法

超声成像法是使用超声成像数控测井仪对钻孔进行扫描,获得的孔壁图像和曲线直接显示和反映了覆岩破坏和裂隙发育情况,并可以判断裂隙带发育高度。

(4) 声波 CT 层析成像法

声波 CT 层析成像法技术是用人工激发的声波,通过被检测介质的传播,利用传感器接收探测数据,依据一定的物理和数学关系反演物体内部物理量的分布,最后得到清晰的、不重叠的分布图像。由于岩石的声波波速与岩石的物理力学性质有显著的相关性,声波波速与岩石的抗压强度成正比,波速增高,岩体强度增加,岩体完整性好;波速降低,岩体完整性降低。因此,将声波走时层析成像的波速切面与地质剖面进行对比,可得探测结果。

(5) 微地震法

当地下岩石由于人为因素或自然因素发生破裂、移动时,会产生一种微弱的地震波向周围传播,利用在空间上不同方位设置的微地震传感器,以记录这些微地震波的到达时间、传播方向等信息,然后通过有关计算方法确定岩石破裂点(面),即震源的空间位置。根据震源的空间位置和频度,确定覆岩裂隙带高度。

(6) 钻孔窥视技术

钻孔窥视仪可以直接观测到钻孔内部结构,通过已有的巷道向指定方向打钻孔,探测时

将探头伸入被测钻孔内,孔内形态可以通过显示器观测,并以图片或录像的形式记录下来。通过探杆刻度计量钻孔深度,推算观测点位置,从而得出覆岩裂隙带高度。

1.2.4 高抽巷研究现状

高位抽放巷是指在开采煤层顶部处于采动影响形成的采动裂隙带内挖掘专用抽采巷道,分为倾向高抽巷和走向高抽巷。其原理就是在煤层开采后,覆岩的裂隙及离层的分布状态对瓦斯的流动产生重大影响,根据采动裂隙椭抛带中瓦斯运移的形态,即升浮—扩散理论,得知离层裂隙既是瓦斯积聚的空间,也是瓦斯流动的通道。将高抽巷置于采动裂隙带,当采动导致覆岩变形垮落后,邻近层及围岩内的原有瓦斯平衡被破坏,由此解吸出的瓦斯沿采动裂隙向采空区流动。高抽巷通过抽采采空区顶板裂隙及垮落带内积存的高体积分数瓦斯,切断上邻近层的瓦斯涌向工作面通道,对采空区下部瓦斯起到拉动作用,从而减少工作面瓦斯涌出,以防瓦斯超限。

在理论研究方面,高抽巷的研究主要针对高抽巷布置方式及巷道参数的优化以及抽采负压、抽采量等参数的设置。肖峻峰、刘如铁、许福利等在理论分析计算的基础上,针对特定地区,采用非线性大变形程序数值模拟了采空区顶板覆岩应力分布和裂隙演化规律及 Fluent 软件对采用走向高抽巷抽采瓦斯系统进行了数值模拟分析,确定了走向高抽巷采空区顶板裂隙带高度以及距回风巷水平投影^[69-71]。李文权依据工作面开采后采空区上覆岩层形成的“O”形圈,通过在采煤工作面顶板中合理地布置走向钻孔和开掘高抽巷,配合老塘埋管,对采空区瓦斯进行联合抽放,成功解决了高瓦斯工作面风排瓦斯能力不足和工作面上隅角瓦斯超限的问题^[72]。郑艳飞等对阳泉三矿的走向高抽巷抽采技术进行了研究,得出了该技术的优缺点及适用条件,为工作面的安全生产提供了技术保障^[73]。

李迎超、张英华等通过 Fluent 软件模拟了不同空间布置参数条件下的高抽巷抽放效果,研究了高抽巷空间布置参数与高抽巷瓦斯抽放效果之间的关系^[74]。李月奎进行了低透气性煤层利用倾向高抽巷抽放邻近层瓦斯的研究,指出倾斜高抽巷具有瓦斯抽放量大、抽出率较高的优点^[75]。郑艳飞等采用安全学的基本原理及方法,对倾斜高抽巷的布置参数进行了分析,得出了倾斜高抽巷的合理参数,为工作面的安全生产提供了技术保障^[76]。杨宏民等针对采煤工作面初采期瓦斯涌出异常、邻近层瓦斯涌出量大的问题,采用伪倾斜后高抽巷配合走向高抽巷的技术,对其抽采技术机理和抽采效果进行了研究,结果表明:伪倾斜后高抽巷能成功解决初采期瓦斯不均涌出和频繁超限的难题^[77]。

贾天让、谢劲松等针对“三软”煤层高瓦斯综采面高抽巷瓦斯抽放技术进行了研究,解决了“三软”厚煤层综采面过高瓦斯区瓦斯超限的问题,并指出“高抽巷”能否取得较好的抽放效果,关键是抽放巷道一定要处于采动裂隙带内^[78-79]。崔永杰、郭有慧等对采用后伪高抽巷治理瓦斯效果进行了研究,实践证明该技术可减短初采期时间,降低工作面的供风量和风排瓦斯量,有效解决综采工作面初采瓦斯超限的问题^[80-81]。近几年来,有关学者从不同的角度对高抽巷治理瓦斯进行了研究,樊玉安、何重伦等以建新煤矿 1115 高位巷为例,分析研究了其“一巷两用”的实施与效果^[82];颜智、李树清等提出了 3 种巷道的“一巷两用”瓦斯抽采技术,从理论和操作上对这些技术进行了可行性分析,并探讨了钻场布置和钻孔设计、施工的技术要点^[83];李晓华、韩真理等在松河矿井 1031 工作面顶板上方布置高位巷,从高位巷内向下施工穿层钻孔,在掘进前预抽掘进条带瓦斯,利用高位巷在工作面回采时抽采采空

区上部卸压瓦斯^[84];石开阳在盛远煤矿 31106 工作面顶板上方布置高位巷,从高位巷内向下施工穿层钻孔,在掘进前预抽掘进条带瓦斯,利用高位巷在工作面回采时抽采空区上部卸压瓦斯^[85]。

以上有关高抽巷的研究涉及了高抽巷的抽采理论、高抽巷空间布置参数、高抽巷抽采流量参数等方面,但主要是从高抽巷抽采的某一个侧重点进行了分析研究,缺少对影响高抽巷抽采的主要因素(包括高抽巷布置的空间层位参数与高抽巷抽采的流量参数以及高抽巷不同的垮落特性条件等)有机结合起来进行较全面的分析研究,对于复杂多变的现场实际情况来说,缺乏一定的系统性;“一巷两用”技术拓宽了巷道的用途或延长了服务时间,在保证瓦斯抽采效果的情况下,降低了生产成本。然而,目前对“一巷两用”抽采技术还有待进一步研究。

1.2.5 钻孔测斜技术发展现状

所谓钻孔测斜技术,就是采用某种测量方法和仪器相结合,测量钻孔轴线在地下空间的坐标位置。现代钻孔测斜技术是通过测量钻孔测点的顶角、方位角、工具面向角和孔深,经过计算可知测点的空间坐标,经过多点测量,从而得到所打钻孔的轨迹,以便及时纠偏,缩小钻孔预定轨迹和实际轨迹的误差。钻孔顶角和方位角是检测各种岩土工程施工钻孔质量两个不可缺少的重要指标,而完成这两个重要指标的测量就要依靠各种类型的钻孔测斜仪。测量钻孔顶角的基本技术原理是采用地球重力场表面水平和垂直原理,测量钻孔方位角基本技术原理是通过测量地磁场的变化方位^[86-89]。

(1) 国外钻孔测斜技术发展现状^[86-89]

最初生产的测斜仪多采用灵敏度和精度较高的石英晶体加速度计来测量顶角,采用线绕磁通门来测量方位角。现代测斜技术是国外在 20 世纪 80 年代发展起来的,与传统测斜仪器相比,测量精度和灵敏度上都有很大提高。该技术也被应用于航天航空导航系统,其测量精度高,但价格昂贵,更主要的是其抗震性能差、体积较大,使其在小直径钻孔测斜仪中的应用受到很多限制。而磁通门结构复杂,不适合小型化和高可靠性的要求。

近年来,采用半导体传感器替代传统机械传感器是技术发展的方向。自上世纪末,美国 NATIONAL 半导体公司采用半导体技术实现重力加速度和方位角测量。步入 21 世纪后,随着传感器技术的飞速发展,美国霍尼韦尔公司和芬兰 VTI 公司也先后开发了新的单轴、多轴半导体芯片传感器,从结构、性能上都优于加速度计或磁通门,成为国外先进国家测斜仪器开发中传感器的首选产品。新的半导体传感器大大减小了体积,提高了测量稳定性和可靠性,特别是突出的抗机械冲击性能,从而推动了该技术向随钻测量方向的拓展。

由于石油深井及煤炭开采定向钻进技术的发展,国外先进国家的随钻测量技术发展很快,技术也较国内要成熟。有的项目经过长期研究,已经成为商业产品。测斜仪产品仍以有线随钻和无线泥浆压力脉冲测斜仪产品最为成熟。数据传输是随钻测斜的又一技术关键。由于绝缘条件、钻杆连接结构、使用中强大的机械冲击、长时间持续供电等限制,多年来人们进行了大量的试验和研究,在使用泥浆传输近 20 年后,最近人们又开发了钻杆电磁传输、光纤传输、密封有线传输、地电传输等技术方法。通过大量使用和不断完善改进,钻杆电磁传输方法和密封有线传输方法得到推广使用。法国 Geoservice 等公司为了满足欠平衡钻井施工的需要,开发出了电磁波无线随钻测量系统。澳大利亚 AMT 公司也开发研制了

DDM-MECCA 钻孔定向随钻监测系统,采用钻杆密封结构实现有线数据传输,国内已有该产品。

(2) 国内钻孔测斜技术发展现状^[86-89]

新中国成立初期,随着地质勘探事业的发展和对钻孔孔斜质量要求的提高,我国先后从苏联等国家引进了几台环测钻孔测斜仪和陀螺定向测斜仪,这为我国测斜技术的发展和测斜仪器的自行研制起了积极的推动作用。1959 年我国的第一家地质仪器设备厂上海地质仪器厂建立,随后很多钻孔测斜仪在该厂研制和生产。20 世纪 70 年代至 80 年代中期,北京地质仪器厂、西安石油勘探仪器厂、辽宁冶金机械仪器厂和牡丹江石油机械仪表厂等单位共同改进研制各类钻孔测斜仪达 70 余种。1991 年地矿部探矿工艺研究所成功研制了 CQ—1 型磁球单点定向测斜仪,该仪器采用自行研制的液浮式磁球顶角方位传感器取代传统罗盘,在精度、量程、防振性能上都有极大提高。1994 年该所采用压电陀螺传感器、地面定向法和电子跟踪测量三者相结合的测斜技术方法又成功研制出 YT—1 型压电陀螺测斜仪,在国内外都是首例。1997 年该所又将高新 CCD 摄像和磁球测角单元结合,成功研制 CQ 型光电多点连续测斜仪。同年,地矿部勘探技术研究所采用加速度计、磁通门和铁钢管等新技术生产了我国第一台有线随钻测斜仪。

步入 21 世纪后,随着材料、传感器、集成电路、计算机等高新科技产业的发展,我国测斜技术研究和发展的又进入一个新阶段。光纤陀螺、激光陀螺、高精度压电陀螺、光纤加速度计、膜电位传感器及其他高精度集成芯片传感器在钻孔测斜仪中的应用,使钻孔测斜仪的精度、可靠性和耐用性又得到进一步提高。另外,随着传感器及所用原件体积的减小,钻孔测斜仪也设计得愈来愈轻巧而便于携带和井下作业。目前,测斜仪产品也处于不断更新中,各研究机构和生产厂家犹如雨后春笋,竞争日趋激烈。中煤科工集团西安研究院有限公司研制并生产测斜仪也有多年历史,目前新产品 YHQ—X 型全方位钻孔测斜仪具有测量范围广、精度高等特点。中冶集团武汉勘察研究院相继研制了适合小口径的高精度 CX 系列数字测斜仪,可适应不同作业要求。北京航天万新科技有限公司以及北京通联四方科技有限公司也研制出 LX 系列连续测斜仪、固定测斜仪、LDM 有线随钻测斜定向系统等产品。上海地学仪器研究所研制的 JJX 系列高精度测斜仪可广泛应用于工程、水文测井及油田、煤田、地质等测井领域,研制生产的 ITL—50A 陀螺测斜仪和 KXP—LS 型轻便数字测斜仪具有操作简单方便、体积小、重量轻、测量准确等特点。地科院探矿工艺研究所研制的 CE 型存储式磁敏测斜仪采用大容量数据存储和低功耗设计,无缆自动存储式测量工艺,具有良好的性价比,具有精度高、重复性好、性能稳定、操作简便可靠的优点,为非磁性地区钻孔轨迹测量提供了先进的测量仪器和工艺方法;DTT 型动力调谐陀螺钻孔测斜仪具有直径小、性价比高、无须孔口定位的特点,成功解决了磁干扰钻孔轨迹测量的难题,消除了以往机械陀螺的漂移大、存在累计误差的问题。

上述可知,随着勘探事业的飞速发展以及对钻孔测斜质量的需求,我国钻孔测斜技术的发展也有了很大提高,测斜仪器方面的研究有的已达到或接近国际先进水平。

1.2.6 钻孔纠偏技术发展现状

由于地质因素及钻探工艺因素影响会造成钻孔弯曲,使钻孔偏离原来设计的顶角与方位角,给施工带来困难,降低钻探效率,易诱发孔内事故,歪曲矿体形态与产状,影响勘探结

果的准确程度。目前,煤矿为了使钻孔不弯曲,一般采用水平定向钻进技术。

水平定向钻进技术(Horizontal Directional drilling, HDD),是指利用钻孔自然弯曲规律(钻孔中弯曲的因素包括地质、技术和工艺等)或采用专用工具使近水平钻孔轨迹按设计要求延伸钻进至预定目标的一种钻探方法,即有目的地将钻孔轴线由弯变直或由直变弯^[90-91]。

煤矿井下水平定向钻进技术根据所用钻具类型和钻进方式的不同主要分为两种:一种是采用孔口回转钻进方式的稳定组合钻具定向技术,其钻具主要由钻头、稳定器和钻杆按照不同的组合形式连接组成;另一种是以孔底马达为动力,采用带弯接头的螺杆钻具定向技术,其钻具主要由靠高压冲洗液为传递介质的孔底马达、不同形式的造斜件(弯外管或弯接头)等部件组成,可以较灵活地满足不同定向钻进施工的需求^[27]。此技术多应用于煤矿水平定向长孔抽采瓦斯。

(1) 国外煤矿井下水平定向钻进技术发展现状

HDD 技术起步于 20 世纪 60~70 年代的美、英、澳等西方工业发达国家,1957 年英国率先开始研制和试验定向钻孔设备^[92],1964 年美国将水平定向钻孔设备与技术应用于煤矿井下,并随后完成孔深 635 m 的水平定向孔。70 年代初,美国、日本、澳大利亚等发达国家把 HDD 技术广泛应用于煤矿地质勘探、瓦斯抽采、矿山水灾、采空区治理以及工民建筑等工程中,使其转入生产实用阶段,并收到了良好的效果。到 80 年代末,美国采用回转钻进的方法完成了孔深 1 230 m 的水平定向孔。90 年代,HDD 技术迅猛发展,美国使用螺杆钻具和定向钻进监测仪器在煤矿井下钻成 1 432.56 m 的瓦斯抽采孔。2002 年澳大利亚采用孔底马达和无线导向工具,完成钻孔深度为 1 761 m 的地质勘探孔,并在井下煤层厚度大、煤质较硬的稳定地层实现了多数钻孔深度达 1 000 m 以上的钻孔佳绩(且主孔中钻有分支孔)。

从整体上看,国外煤矿井下钻机在整机设计及零部件的选用方面较国内钻机先进,其性能可靠,功能完善。另外,发达国家的先进千米钻机多采用以孔底马达为动力的螺杆钻具,并配备精密的随钻测量仪器,使钻机具备了钻进能力强(大于 1 000 m)、定向精度高的优势。

(2) 国内煤矿井下水平定向钻进技术发展现状

我国煤矿井下水平定向钻进技术于 20 世纪 90 年代初开始研究,并在短期内取得迅猛发展。1993 年煤科总院西安分院进行了煤炭行业重点项目“煤矿井下定向分支孔钻进技术”的试验研究,并在大同矿务局四台矿施工勘探地质的近水平钻孔,采用以孔底稳定组合钻具为主,局部孔段使用国产的螺杆钻具纠斜钻进的方法,使孔深达到了 301.5 m^[93-94]。当时,由于受到国内孔底马达、测斜仪器等制造技术落后的限制,西安分院在一段时间内放弃了用孔底马达实施定向钻进的技术途径。随之倡导并积极推进以稳定组合钻具为定向手段的煤矿井下近水平定向钻进技术的发展,并取得了很好的效果,分别于 1999 年、2000 年和 2002 年完成 603 m、721 m 和 865 m 的煤矿井下近水平定向钻孔,创造了当时国内煤矿井下定向钻孔施工的最高纪录^[95]。这一期间,鉴于国外采用孔底马达进行定向钻孔施工的成功应用,国内一些煤矿企业也先后从美国、澳大利亚等国进口了数台千米定向钻机,但由于这些钻机大部分不适应我国煤矿的复杂地质条件,致使成孔率非常低,且经常发生掉钻、卡钻等孔内事故。