

国家自然科学基金项目 (51604091) 资助
河南省高等学校青年骨干教师项目 (2017GGJS153) 资助
河南省科技创新团队项目 (16IRTSTHN013) 资助
河南省高等学校重点科研项目 (17A440002、18A440010) 资助
河南理工大学 (15025、D2017001) 资助
河南省 (2310723、182102310743) 资助

高压水载荷下

煤体变形特性及瓦斯渗流规律

田坤云 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

目(51604091)资助

骨干教师项目(2017GGJS153)资助

河南省科技创新团队项目(16IRTSTHN013)资助

河南省高等学校重点科研项目(17A440002、18A440010)资助

河南工程学院博士基金项目(D2015025、D2017001)资助

河南省科技攻关计划项目(182102310723,182102310743)资助

高压水载荷下煤体变形特性及 瓦斯渗流规律

田坤云 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书设计并改装了高压水载荷下瓦斯渗流实验装置;分析了两种典型原煤煤样试件的破裂过程、水压临界条件以及高压水加载前后的瓦斯渗流规律;采用该试验装置得出压裂过程中煤样试件的裂隙起裂、延展与加载轴压、围压的关系;设计了穿层钻孔的压裂方案,并在两个煤矿进行了现场试验考察;提出了对松软煤层的坚硬顶板进行压裂以达到对该煤层卸压增透的目的,现场结果表明“松软煤层顶板致裂”能大幅增加松软煤层的渗透率,大大提高瓦斯抽放效果。

图书在版编目(CIP)数据

高压水载荷下煤体变形特性及瓦斯渗流规律/田坤

云著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2018. 3

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3923 - 5

I. ①高… II. ①田… III. ①承压水—作用—矿层—
瓦斯渗透—研究 IV. ①TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第045971号

书 名 高压水载荷下煤体变形特性及瓦斯渗流规律

著 者 田坤云

责任编辑 杨 洋

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 11.75 字数 300 千字

版次印次 2018 年 3 月第 1 版 2018 年 3 月第 1 次印刷

定 价 45.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

瓦斯灾害是煤矿的主要灾害之一,是重特大瓦斯事故的最大杀手,煤矿开采(掘进)之前进行充分抽采是有效降低瓦斯事故的最根本措施。而我国煤与瓦斯突出及高瓦斯矿井所开采煤层的透气性系数都特别低,95%以上属于低透气性煤层,比美国相比,其透气性系数至少低2~3个数量级,透气性系数只有 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ mD,即 $0.04 \sim 0.004 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,属难以抽采煤层。且随着开采深度每年以10~12 m的速度递增,突出矿井的数量也呈增加趋势。因此,瓦斯抽采最大的瓶颈就是煤层增透,水力压裂作为一项卸压增透措施在许多煤矿中得到了广泛应用,其效果与煤体在高压水作用下自身的物理、力学响应特征密切相关。为了有效提高“卸压增透”的成功率,最大程度地降低煤层瓦斯压力和瓦斯含量,在实验室进行水力压裂实验具有很大的意义。

在前人研究的基础上,本书设计与改装了高压水载荷下瓦斯渗流实验装置;采用“二次成型法”成功制取了松软易破碎煤体的原煤样试件;对两种典型原煤煤样试件高压水载荷下的破裂过程及压裂前后的渗透率进行了实验研究,分析了两种原煤煤样试件(原生结构煤及构造软煤)的水压致裂过程、水压临界条件(试件起裂压力及完全破裂压力)以及高压水加载前后的瓦斯渗流规律;采用该装置模拟得出压裂过程中煤样试件的裂隙发展、延展与加载轴压、围压的关系;设计了钻孔压裂方案并在淮北矿业(集团)有限责任公司临涣煤矿和义煤集团新安煤矿进行了现场试验研究,采用压裂后钻孔的瓦斯自然流量、衰减系数、瓦斯抽采浓度及瓦斯流量考察了压裂效果。现场试验结果表明,穿层钻孔压裂对松软煤层而言卸压增透效果甚微,甚至高压水抑制瓦斯的运移,成为了瓦斯解吸的阻力。针对这一问题提出了对松软煤层的顶板压裂以达到对该煤层卸压增透的目的,结果表明“松软煤层顶板致裂”能大幅增加松软煤层的渗透率,大大提高瓦斯抽放效果。

本书主要研究内容包括如下几方面:

(1) 针对现有的瓦斯渗流实验设备不能进行高压水加载这一缺陷,设计与改装了“高压水载荷下瓦斯渗流实验装置”,该装置由煤样试件密封系统(夹持

器)、三轴应力加载及伺服控制系统、模拟钻孔与水力压裂控制系统、瓦斯气体接入系统、气体流量采集系统、自动监测与数据采集分析系统等六个部分组成;该设备能够在实验室模拟煤样试件的水力压裂过程同时考察其压裂增透效果——渗透率变化。

(2) 型煤的加工过程中,煤样原有的孔隙及裂隙结构遭到了破坏,甚至煤样的原有裂隙会由于型煤成型过程中的压实而消失,因而型煤与原煤在结构特征上存在很大差异,很难真实反映煤体的实际特征。在瓦斯渗透性实验研究中,型煤只能研究其大致的变化规律;在煤样试件高压水载荷下的压裂实验中,型煤也不能相对较真实地反映压裂的效果,为了更加精确地反映不同煤体的瓦斯渗透规律及压裂过程前后渗透率的变化规律,应采用更能真实反映煤体特征的原煤煤样作为研究对象。针对松软易破碎煤体原煤煤样较难制作这一难题,本书研究并提出了原煤煤样制作的“二次成型”法。

(3) 利用自行设计、改装的高压水载荷下煤样瓦斯渗流实验装置对不同矿井的两种典型原煤煤样在高压水、变轴压及围压综合作用下的破裂过程进行了模拟实验,得出了两种原煤煤样的裂隙产生、扩张、衍生及发展随水压加载时间的变化规律;同时考察了两种煤样的起裂压力与所加载轴压、围压的关系,即煤样破裂的水压临界条件(包括煤样的起裂压力与完全破裂压力);考察了两种原煤煤样在高压水加载前后的渗透特性变化规律,比较了煤样试件在水压加载前与水压加载后渗透率的大小变化并分析了影响渗透率变化的因素。

(4) 从煤层的裂隙特征及其力学性质着手,分析了煤层裂隙对水力压裂的控制并对高压注水时煤层的起裂过程进行了探讨;综合分析了注水钻孔周围的应力状态,并对压裂时垂直裂缝与水平裂缝的起裂判据进行了定量计算,给出了垂直与水平裂缝的起裂压力计算公式;分析了两种主要类型裂缝的延展方向,指出水力压裂时,裂缝总是沿煤层最大主应力的方向扩展和延伸,并定量计算了裂缝扩展所需的最小注水压力;使用自行设计、改装的高压水载荷下三轴应力渗流装置对轴压、围压变化条件下煤体试件裂缝生成和延展进行了实验,进一步验证了压裂裂缝总是沿着最大主应力的方向扩展和延伸这一观点。

(5) 编制了压裂钻孔的压裂方案并在临涣煤矿和新安煤矿进行了现场试验,包括压裂孔的设计、压裂设备的安装调试以及压裂钻孔的施工,重点突出了压裂孔的封孔工艺——带压封孔、压裂的工作程序以及压裂后的安全防护措施;对裂钻孔进行现场压裂后,提出了压裂效果的考核指标,包括自然瓦斯流量、瓦斯流量衰减系数、钻孔抽采流量及浓度,并使用瞬变电磁仪考察了水力压

裂的影响半径;通过现场效果考察,得出软煤层施工钻孔进行水力压裂增透是不可行的,在工程实践中验证了“硬煤可压、软煤不可压”的结论;针对软煤不可压这一定论,提出了转移压裂对象即采取“坚硬顶板压裂”来解决松软煤层卸压增透的这一难题,并且从理论上对“坚硬顶板压裂”的卸压增透机理进行了分析。

作 者
2017 年 12 月

目 录

1	绪论	1
1.1	课题提出的意义	1
1.2	国内外研究现状及存在问题	3
1.3	研究内容及研究方法	8
1.4	技术路线	9
1.5	创新点	11
2	高压水载荷下瓦斯渗流实验装置的设计与改装	12
2.1	功能用途简介和理论基础	12
2.2	实验装置的系统组成	13
2.3	实验装置的各部分简介	15
2.4	本章小结	23
3	目标矿区确定及原煤煤样的制作	25
3.1	煤体的结构类型	25
3.2	目标矿区和煤层的确定	26
3.3	煤体原始煤样采集及试件制作	34
3.4	本章小结	40
4	高压水作用下煤体破裂过程及瓦斯渗流特性实验研究	41
4.1	实验方案及步骤	41
4.2	水压加载前煤样渗透特性实验	46
4.3	高压水载荷下不同类型煤体的破碎过程	48
4.4	高压水载荷前后煤样渗透率变化规律	57
4.5	本章小结	61
5	高压水与应力综合作用下煤体变形与破坏特征研究	63
5.1	煤层赋存特征及水压致裂机理	63
5.2	压裂过程中煤体起裂与延展特征	69
5.3	轴压、围压变化条件下煤体裂缝生成和延展实验	73
5.4	本章小结	76

6	煤岩体水力压裂工艺与施工组织	78
6.1	压裂方式选择	78
6.2	压裂前施工参数确定	80
6.3	压裂组织与实施	81
6.4	安全防护措施	83
7	顶板水力压裂卸压增透机理与技术工艺	85
7.1	顶板水力压裂卸压增透机理	85
7.2	顶板水力压裂治理瓦斯技术方案	94
7.3	顶板水力压裂设备选型与配套	97
8	顶板水力压裂技术在临涣煤矿的应用	102
8.1	矿井及试验区域瓦斯地质概况	102
8.2	压裂方案设计	105
8.3	压裂实施	117
8.4	压裂效果考察	122
8.5	本章小结	134
9	顶板水力压裂技术在新安矿的应用	136
9.1	矿井概况	136
9.2	14170 工作面试验情况	138
9.3	14200 工作面试验情况	147
9.4	14230 工作面试验情况	160
9.5	本章小结	165
10	结论与展望	167
10.1	主要结论	167
10.2	展望	167
	参考文献	169

1 绪 论

1.1 课题提出的意义

目前我国能源消费结构中,煤炭占有十分重要的地位,国民经济的增长及社会的发展及煤炭资源的开发和利用紧密联系。新中国成立 60 多年来,煤炭在所有一次能源消耗中所占的比例一直一维持在 70% 左右,在我国的能源结构中一直遥遥领先,具有不容忽视的作用。我国能源结构的特点是“富煤、贫油、少气(天然气)”,而且业内有关专家预测,今后相当长的一段时期,煤炭在我国能源消耗结构中仍然会占据最主要的地位。有关资料显示,到 21 世纪 20 年代,国内煤炭消费占一次能源消耗的比例大约 63%,即使到 21 世纪中期,煤炭所占的比例仍将在 50% 以上^[1-2]。

不断增大的煤炭需求量导致我国绝大部分的矿井已经进入了深度开采,有关资料显示,目前我国煤矿开采的深度平均已经达到 540 m,并且开采深度在不断往下延伸,且延伸速度较快(平均 10~12 m),开采历史较长矿井的开采深度已经下延至 800 m 左右,并且目前开采深度超过 1 000 m 的矿井已经出现(已有二十多对)。煤矿采掘强度越来越大,与此同时,煤炭的安全、高效、绿色生产受瓦斯问题制约的严重性越来越明显^[3-4]。煤矿井下常见的瓦斯灾害主要包括:瓦斯(CH_4)爆炸、煤与瓦斯(CH_4 或者 CO_2)突出、瓦斯(CH_4)燃烧以及瓦斯窒息。其中,煤与瓦斯突出一直是困扰煤矿安全生产的头等难题。对煤层进行瓦斯抽放可以在很大程度上降低煤层原始瓦斯含量与压力,进而能减小甚至消除各种瓦斯灾害的潜在威胁,保证煤矿安全、高效生产。

同时,瓦斯是一种洁净能源,其主要成分是甲烷(CH_4),在我国的储量非常丰富,总储量达 $30 \times 10^{12} \sim 35 \times 10^{12} \text{ m}^3$,甲烷的发热量一般为 37.25 MJ/m^3 ^[5-9],对其进行合理地开发利用,有利于能源结构的改善,同时抽采瓦斯还能改善煤矿的安全条件,充分利用瓦斯也是解决大气污染、实施环境保护的重要举措^[10]。近年来,我国瓦斯开发利用和瓦斯减排也对瓦斯抽采提出了更高的技术要求。但是有关资料显示,在对所有进行瓦斯抽放的矿井进行统计后发现,我国本煤层的平均瓦斯抽采率在 10% 以下,而其他先进国家的平均抽采率则为 30%。因此在瓦斯抽采方面我们还有很大的差距。其客观原因是:我国煤与瓦斯突出及高瓦斯矿井所开采煤层的透气性系数都特别低,95% 以上属于低透气性煤层,与美国相比,其透气性系数至少低 2~3 个数量级^[11-12],透气性系数只有 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ mD}$,即 $0.04 \sim 0.004 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,属难以抽采煤层^[13-15]。且随着开采深度每年以 10~12 m 的速度递增,突出矿井的数量也呈增加趋势,特别是在河南的平顶山、焦作、鹤壁、郑州、义马及天府、松藻、淮南、徐州等矿区,煤与瓦斯突出灾害已成为制约煤矿安全生产的头等难题。

防治煤与瓦斯突出技术措施包括区域防突与局部防突。区域防突又主要包括开采保护

层和煤层瓦斯预抽两种^[16]。区域防突中的开采保护层技术措施能有效地增加被保护层内瓦斯的释放量,从而大大降低了被保护层的突出危险性,是效果较好的技术措施。但是,目前很多突出矿井具有开采价值的煤层只有一个,保护层开采的条件不具备,这种情况下对煤层瓦斯进行抽放便成了防治瓦斯灾害的最根本措施。通过对煤层瓦斯抽放,可以在采掘作业进行前很大程度上将煤层的原始瓦斯含量(瓦斯压力)较大幅度降低,进而大大减小甚至消除煤与瓦斯突出发生的可能性,同时矿井开采期间其瓦斯涌出量也会减少。但是,随着煤矿开采深度的不断增加,煤层瓦斯渗透率则呈明显降低趋势,这在很大程度上制约了煤层瓦斯预抽的效果。

因此,如何增加煤体的瓦斯渗透性,有效提高其瓦斯抽采率,是当前煤矿瓦斯灾害治理工程的关键,同时也是亟待解决的科学难题^[17]。

为使低透气性煤层的瓦斯抽放效果得到大幅提高,目前采取的主要措施包括增加钻孔的布置密度、延长瓦斯的抽采时间。除此之外,必须对煤层采取各种形式的“增透技术”使煤层内部的原有裂隙网络互相沟通或使新的裂隙网络产生,大幅提高煤体内部裂隙的密度及范围,进而提高煤层的透气性系数,最终使得煤层瓦斯抽采效果明显提高^[18]。根据国内外试验研究情况,现阶段煤层增透的主要技术方法有:突出煤层深钻孔、深孔预裂爆破、水力压裂增透、高压水射流扩孔增透、水力割缝增透等^[19-20]。其中,通过实施高压水力压裂对煤(岩)层进行“卸压增透”已经作为一项主要措施被广泛应用于煤矿瓦斯灾害治理工作中,并在一定的地质和开采条件下取得了比较明显的效果^[21-24]。

水力压裂的原理是将大量高压液体注入压裂对象内部,迫使其破裂形成垂直或平行压裂对象的裂缝;还可在高压液体中加入支撑剂,使支撑剂充满裂隙以防止压裂过程新生的裂缝重新闭合^[25-27]。水力压裂技术首先被应用在石油工业中并取得了非常显著的增透效果,使得采油量提高百分之几十甚至几十倍。因此,近年来国内外都在尝试将水力压裂技术应用于高瓦斯、低透气性本煤层的卸压增透和瓦斯抽放中。然而,尽管针对煤体和油层进行水力压裂的原理是相同的,但通常由于煤层结构复杂、煤质酥松、压裂的方向不能很好地得到控制、高压液体中的支撑剂易于镶嵌入煤体内,且高压液体进入煤体后不易排除等诸多不利因素的存在,因而在技术和实际操作工艺上比油层的压裂更加复杂。现场大量试验研究表明,不同矿区、不同煤层、不同地质条件下水力压裂的效果差别很大。效果好的条件下,水力压裂后煤层透气性系数可成百上千倍地提高,效果差的其瓦斯渗透性则几乎没有任何变化或变化微乎其微^[28-29]。

煤炭科学研究总院沈阳分院先后在湖南、阳泉和抚顺等地区进行了大量的水力压裂煤体现场实践,多数钻孔效果不理想,只有少数钻孔效果较好;河南省煤层气开发利用有限公司以河南省多个矿区的高瓦斯低透气煤层为研究对象,应用井下定向压裂增透成套技术,在平顶山、鹤壁、焦作等矿区开展了 130 多次的现场实验。应用结果表明,该技术对提高煤层低透气性、增大瓦斯抽采量、降低煤与瓦斯突出危险性、改善工作面作业环境效果显著,为单一低渗煤层的区域瓦斯治理和煤层气开发开创了一条新的途径^[27]。

水力压裂虽然能够实现较大范围的煤体卸压,同时也存在着一定的缺陷和不足,极大地制约了该技术的大范围推广应用。主要表现为:① 高压水的作用在局部范围会遗留下高应力集中带,造成新的安全隐患;② 受到煤层结构复杂、煤体松软破碎、局部断裂构造带等因素的影响,常导致煤岩的可压裂性难以把握,而且压裂方向也不易控制;③ 在地应力、构造

应力、采掘应力交叉作用的区域,压裂过程中裂隙生成和裂隙延展的机制更加复杂、难度进一步增大,而且压裂方向更加不易控制;④ 压裂液浸入煤体后不易排除,且受高压水作用生成的煤岩层裂隙在较短时间内会再次闭合。由此发现,实施定向水力压裂技术与工艺的成败与目标区域煤岩层的地质特征密切相关。因而,明确煤岩层的地质特征,并在此基础上有针对性地进一步研制开发合理、可行的配套技术、工艺与装备,是切实改善定向水力压裂卸压增透效果、提高本煤层瓦斯抽采率,最终实现预防煤与瓦斯突出灾害的有效途径。

综上所述,通过钻孔高压水对煤(岩)体实施水力压裂是一种理论上可行、实践中可以操作的“卸压增透”和瓦斯灾害治理技术措施,其效果则与煤(岩)体在高压水作用下自身的物理、力学响应特征密切相关。为了减少前期不必要的工程投资、降低技术工艺实施过程中的盲目性和不确定性,有效提高对煤(岩)层实施水力压裂“卸压增透”的成功率和本煤层瓦斯抽采效果,最大限度地降低煤层瓦斯压力和瓦斯含量,切实确保煤矿安全生产长期性和连续性,在实验室系统地开展“高压水压载荷下煤体变形特性及瓦斯渗流规律研究”具有非常显著的理论价值和现实意义,同时能给煤矿企业带来一定的经济、社会以及环境效益。

(1) 经济效益

① 通过实验室分析获取不同煤体的物理、力学属性、水力压裂过程中煤体的变形、破碎过程以及裂隙延展,为井下实施本煤层、顺煤层或顶底板围岩水力压裂“卸压增透”技术措施提供比较明确的指导,极大地降低由于盲目实施井下作业造成的工程施工、材料、人力及生产延误等方面的经济损失。

② 由于提高了井下水力压裂技术措施的成功率,改善了“卸压增透”效果,本煤层瓦斯抽采率和抽采量可得到有效提高,瓦斯治理工作更具可靠性和高效性,以往瓦斯治理措施中不必要的开拓工程量和人员管理上的无谓消耗大大减少,煤矿生产效率最终得以提高。

③ 可切实促进抽采、利用增加的煤层瓦斯(即煤层气)这种新型、洁净能源能给煤矿企业带来可观的经济效益。

(2) 社会效益

我国高瓦斯、低透气性煤矿分布广泛,防治煤与瓦斯突出等矿井瓦斯灾害的任务非常艰巨。由于许多矿井为单一煤层开采,不具备开采保护层后抽采卸压瓦斯的条件。因此,预抽本煤层瓦斯成为采掘作业之前必须执行的区域防突技术措施。通过实施有效的本煤层、顺煤层或顶底板围岩水力压裂,增加煤层瓦斯透气性和瓦斯抽放量,可极大地降低煤层瓦斯含量和瓦斯压力,减小煤矿发生瓦斯灾害的频率、降低强度和减少伤亡人数,改善煤矿企业生产条件恶劣和危险性高的不良社会印象,为建设和谐、平安矿山贡献力量。

(3) 环境效益

通过提高煤层的瓦斯渗透性,增加本煤层瓦斯抽放量,减少煤矿瓦斯排空量,可大大减小甲烷这种温室气体对臭氧层的破坏,有效保护环境。

1.2 国内外研究现状及存在问题

1.2.1 煤层增透技术研究现状

目前我国开采的煤矿大多数为高瓦斯(煤与瓦斯突出)低透气性矿井。为了提高这些矿

井的瓦斯抽放效果(主要是瓦斯抽放量及抽放浓度)目前主要采取的措施包括提高钻孔的密度及延长瓦斯抽放的时间,但是在有些矿区效果甚微。因此,在技术上还必须采取各种形式的“煤层增透”技术措施来解决这一难题,“煤层增透”技术措施可以在很大程度上增加煤体裂隙或者是使煤体内部的原生裂隙较好地沟通以更好地为瓦斯的流动提供通道,各种形式的“煤层增透”技术措施可以从根本上使煤层的透气性系数提高,最终提高了本煤层的瓦斯抽放效果^[28-31]。对于透气性特别低难以进行抽采的煤层而言,必须采取多种形式的技术手段对煤层进行卸压增透,使煤层内部的原生裂隙网络间互相有效地沟通或者是产生新的裂隙网络^[33-35]。国内外的很多矿井已经展开了各种形式的“煤层增透”技术措施的现场试验研究,根据现场应用情况来看,效果比较明显的技术措施主要有:保护层开采、突出煤层深钻孔、水力压裂、深孔预裂爆破、高压水射流扩孔、水力割缝等^[37-42]。

在突出矿井开采煤层群时,应优先选择开采保护层防治突出措施。原始煤层透气性主要由煤层孔隙裂隙结构决定,然而在开采过程中其主要受到地质条件及开采引起的应力场的影响^[43-44]。研究表明^[45-50],开采保护层能使被保护煤层卸压,增大煤层的透气性,在开采保护层的同时进行卸压瓦斯抽放,可大幅降低被保护煤层的瓦斯压力,减少煤层瓦斯含量,有效预防和控制瓦斯突出。

但是,由于我国大多数煤田煤层赋存差异较大,许多矿区的突出煤层不存在保护层可采或者保护层开采厚度较薄不具备开采经济价值,导致保护层开采条件差,工程投入巨大,应用效果得不到保证从而无法采取保护层开采这一区域防突技术措施。突出煤层深钻孔的方法在松软煤层成孔过程中往往会出现塌孔、喷孔和夹钻等现象,而导致钻孔长度难以保证,而达不到理想的抽采效果^[51];深孔爆破虽然能够使原始煤体松动从而达到提高煤层透气性的目的,但在应用于突出煤层时往往会诱发突出灾害的发生,成为突出发生的导火线^[52-55];高压水力割缝技术,割缝增透技术工程量大,难以达到大面积增加煤层透气性的目的^[57-57];水力挤出、水力冲孔、水力冲刷等比较适用于煤体应力集中带以外的卸压带^[58-61];煤层注水措施的注水压力和注水量有限,难以开启新生裂缝或使原生裂缝有效扩展、延伸、沟通^[62-63]。

1.2.2 水力压裂机理

水力压裂的理论基础即压裂机理主要包括压裂裂缝的起裂和延伸两大部分。

(1) 裂缝起裂机理

裂缝的起裂受到诸多因素的控制,一般可以通过实验来确定,研究表明:裂缝的起裂取决于压裂钻孔所处的应力状态、压裂液的泵注速度和岩石的非均质性。不同的压裂孔方式和不同的泵注流量下孔壁裂缝的起裂模式也不一样^[64-66]。

(2) 裂缝的延展机理

压裂裂缝延展方面则主要依据线弹性力学的理论知识来进行分析计算和模拟。石油井水力压裂方面的研究结果表明这种分析结果与油田实际情况存在较大的差异,现有的裂缝延展模型中忽略了裂缝端部机制,主要包括裂缝端处的压裂液滞后、岩石非弹性应变及端部变形膨胀与时间效应的关系。

水力压裂机理方面的研究目前较欠缺,尽管还存在很多有待研究的问题,但已有的研究成果仍为煤层钻孔注水压裂研究提供了一套可行的技术思路。

1.2.3 水力压裂技术研究现状

自 1947 年水力压裂技术在美国堪萨斯州试验成功至今为止已经经过了将近半个多世纪的发展,作为油气井增产增注的主要技术措施已经广泛用于低渗透油气田的开发中^[68-69]。目前,水力压裂方面的研究大多数局限在石油、油气藏、煤层气藏以及地热井资源的开发开采中,且主要在现场应用于扩展压裂对象的裂隙,大多数局限在地面井条件下^[70]。地面钻井压裂采气工艺的主要目的是改善煤层已有裂隙的导流能力,压开、支撑更多的裂缝,尽量使得煤层中的裂缝有效沟通,为压力的传播和气体的流动提供更多的通道,进而达到瓦斯气体从煤体内有效地解吸和产出。煤层气开采在我国山西等地区实现了商业化并取得了一定的经济效益,推动了煤层气行业的快速发展。

但是,地面开发局限于原生结构煤体,松软煤体压裂后裂缝重新闭合的情况较多,裂隙的导通能力初期较大,后期逐渐衰减,抽采率随之降低,抽采周期长,一般长达 5~8 年的时间,导致了抽采的成本增加,同时也难以满足煤矿瓦斯区域治理的快速抽采要求,在很大程度上制约着煤炭企业的正常接替;而采气周期相对较短的水平分支井、长羽状井尽管能在较短时间有效抽采煤层内的瓦斯,但是一次性投入较高,钻井地质与施工要求较苛刻,局限性大,因此在煤矿难以普遍推广^[71-72]。

有关水力压裂技术应用于本煤层瓦斯抽放增加煤层透气性,提高瓦斯抽放效果的课题。苏联 20 世纪 60 年代就开始在卡拉甘达和顿巴斯两个矿区的 15 对矿井尝试井下水力压裂试验研究^[73-74];我国二十世纪五六十年代煤科总院沈阳分院在阳泉、红卫、抚顺、焦作、鹤岗等矿区就进行过试验研究并取得了一些进展性的成果^[75-78],但是由于当时水力加载设备泵注压力小,泵注流量低,难以满足压裂的要求,而且压裂后煤体裂缝重新闭合问题也难以解决,因此压裂效果不是很明显。近年来,河南省煤层气开发利用有限公司应用井下定向压裂增透成套技术,在河南主要的高瓦斯矿区进行了百余次的现场实验,取得了较好的卸压增透效果^[79-80]。但是水力压裂理论方面进展一直滞后,采用水力压裂措施增加煤层的渗透率机理研究方面尚不深入,比如裂隙产生的位置及其延伸的方向、压裂裂隙扩展机理。

目前有关水力压裂技术理论方面的研究主要包括水力压裂方案设计、压裂液及支撑剂的选择、水力压裂裂缝的监测监控方法、水力压裂模型及压裂控制软件开发等^[81]。

(1) 压裂技术及压裂裂缝控制技术

水力压裂技术方面的研究主要是开展了重复多次压裂技术。它能有效地改造失效井并且能使产量处于经济生产线以下的压裂井产量大增。美国等许多国家在重复压裂技术的理论研究、工艺实施以及现场实践应用等方面做了大量工作并取得了较理想的效果。许多产气井重复压裂达 4 次以上,最终成功率达到 70%~80%,取得了较为可观的经济效益^[82-83]。我国胜利油田、大庆油田、长庆油田、玉门油田等也在现场进行了重复压裂试验并取得了一些成功的经验和认识。但是压裂过程中也发现了不少难以解决的问题,如重复压裂的造缝机理、新缝开裂的可能性及裂缝开裂的条件等。

裂缝控制技术方面主要包括裂缝宽度及高度的控制两个方面。

在裂缝宽度控制上主要研究并发展了缝端脱砂压裂技术,即在一定裂缝的端部形成砂堵,阻碍裂缝继续向前延伸、扩展,同时以一定的流量继续泵注高砂比的压裂液从而迫使裂缝膨胀变宽,从而裂缝导流能力大大增加^[84]。

缝高控制技术主要针对油层极薄的井田或者是弱应力阻挡层,防止因为压裂的作用而使压裂产生的裂缝穿透生产层而进入阻挡层^[85]。

(2) 压裂液和支撑剂研究

目前国内外采用的压裂液大多数为水基压裂液(占90%以上)以及泡沫压裂液(约占10%),使用石油基压裂液的情况极少。目前已经研制出的几种新型压裂液主要有水基胍胶压裂液、高温油基压裂液、聚合物乳化压裂液、速溶式压裂液、延缓交联压裂液、二氧化碳泡沫压裂液等。

支撑剂的研究主要侧重系列化方向发展,包括高强度支撑剂系列(以石英砂为主),中等强度支撑剂系列(以树脂包层石英砂系列为主)。

(3) 压裂裂缝监测方法

测量压裂后裂缝的几何形态是压裂措施的一项重要技术工作,为了获得比较精确的裂缝形态,工程技术人员大多数采用几种检测方法进行广泛比较,同时使用多种不同的方法来增加解释的精确度。目前在裂缝高度检测技术上,主要采取放射性同位素示踪法以及井温方法;在裂缝方位以及宽度检测方面,首先采用电视测量法获得较为清晰的井壁图像,然后再根据图像来确定裂缝方位及宽度。

(4) 水力压裂优化设计

从20世纪80年代中后期开始,水力压裂优化设计工作开始进行,主要包括裂缝长度以及裂缝导流能力的预测、压裂参数及数学模型设计。

在裂缝长度和裂缝导流能力预测方面,首先利用油藏导流动态来模拟和预测不同的裂缝长度及裂缝导流能力有望达到的油气量产能。用所测得的数据建起裂缝缝长与油气净收益之间的关系。计算出达到不同缝长和导流能力所投入的费用,尽可能地提高经济回收总额。

压裂参数设计方面,主要在实验室进行模拟实验来确定优化设计相关的关键参数。比如支撑裂缝的几何形态以及导流能力、岩石力学性质以及压裂孔地应力分布、压裂液的黏度大小和滤失性强弱、前置液及支撑剂的浓度、压裂液的排量及施工压力等的确定方法。

在压裂数学模型的设计方面,发展并应用了水力压裂的三维数学模型。过去简单的二维模型已经事先人为设定了压裂裂缝的高度,在压裂过程中并假定裂缝的高度保持不变,但是在实际压裂过程中,裂缝的高度与长度是同时变化的,缝高大小不可能保持不变,于是后期发展了模拟三维模型,可以利用简化的三维裂缝模型来模拟计算压裂裂缝在三个不同方向上的扩展、延伸^[88-88]。

(5) 水力压裂增透造缝机理

水力压裂的理论基础即压裂机理,主要包括压裂裂缝的起裂和延伸两大部分。

① 裂缝起裂机理。裂缝的起裂受到诸多因素的控制,一般可以通过实验来确定,研究表明:裂缝的起裂取决于压裂钻孔所处的应力状态、压裂液的泵注速度和岩石的非均质性。不同的压裂孔方式和泵注流量下,孔壁裂缝的起裂模式也不一样。

② 裂缝的延展机理。压裂裂缝延展方面则主要依据线弹性力学的理论知识来进行分析计算和模拟。石油井水力压裂方面的研究表明这种分析结果与油田实际情况存在较大的差异,现有的裂缝延展模型中忽略了裂缝端部机制,主要包括裂缝端处的压裂液滞后、岩石非弹性应变及端部变形膨胀与时间效应的关系。

水力压裂机理方面的研究目前较欠缺,尽管还存在很多有待研究的问题,但已有的研究成果仍为煤层钻孔注水压裂研究提供了一套可行的技术思路。

1.2.4 煤层水力压裂技术存在的主要问题

大量的理论研究和现场实践证明,对煤层采取水力压裂措施的效果不仅与压裂技术工艺和压裂方式有关,在很大程度上还与待压裂区域的煤层自身是否具有可压裂性密切相关,即在钻孔高压水作用下,煤体能否出现有利于其瓦斯渗透性升高的变形和裂隙变化,产生的变形和裂隙是否具有比较广的延展范围并保持比较长久的持续时间等。目前煤层水力压裂技术和工艺之所以在不少矿区、煤层没有取得比较理想的效果,主要原因在于预先对不同压裂对象(煤体或岩体)的可压裂特性不明确所致。如果不因地制宜充分考虑井下不同的实际条件,仅仅一味地效仿或照搬以往成功案例的办法和经验,往往存在很大的盲目性和不确定性,严重影响水力压裂技术和工艺的实施效果,甚至导致最终的失败。

经过比较系统、全面的调研和分析,可知目前在执行煤层水力压裂技术过程中主要存在以下几个方面的问题,这些问题严重影响和制约了该项“卸压增透”措施的效果和推广应用范围。

(1) 前期投入大,成功率难以保证,预期效果不明确,煤矿决策者持怀疑、审慎态度。

直接在井下实施煤层水力压裂技术措施,不仅所需的装备和材料比较昂贵,而且施工工程量较大,前期投入较高。如果没有较高的成功率和明确的压裂效果提供保障,一旦压裂失败或效果不理想,势必造成不可挽回的直接和间接经济损失,延误宝贵的生产时间。受此影响,煤矿决策者更倾向于选择维持现状。

(2) 对目标煤层在高压水作用下的可压裂性或可压裂程度不明确,直接导致了该项“卸压增透”技术工艺执行结果的低效甚至是失败。

① 松软煤体如构造煤在钻孔高压水作用下是否发生塑性的膨胀变形;能否产生裂隙并进一步延展;产生塑性膨胀变形后是否会堵塞高压水渗流的通道并造成局部应力集中隐患等。在实施井下水力压裂之前均不明确。

② 在不同的矿区、矿井、采区甚至不同工作面,不同破坏类型的煤体在钻孔高压水压作用下,其变形(脆性变形、塑性变形)特征、裂隙生成及延展特征通常具有比较大的差异性。当以上特性未考察清楚时,盲目地采用同一种工艺进行水力压裂,不仅难以掌握压裂点生成裂隙的性质,更无法预料和控制裂隙扩展、延伸的方向和范围。

③ 由于不同类型煤层物理及力学特性的差异,对其实现水力压裂时有效裂隙扩展所需的水压和流量也必然不同。如果对此方面的特征不清楚,不仅对煤岩开始生成裂隙的临界水压条件无法把握,也不能通过合理控制注水量使裂隙得到更加充分的扩展。因此,同样难以取得最理想的水力压裂效果^[89-90]。

(3) 目前常用的顺层钻孔压裂和穿层钻孔压裂工艺,其前提都需预先施工完成一定规格煤层钻孔。经过大量的实践考察和分析认为有以下几方面制约了实施效果:

① 在松软破碎的高瓦斯突出煤层(或煤层段)施工钻孔,发生顶钻、卡钻、喷孔的频率非常高,不但钻孔施工难度增加、工期延长,而且施工人员需要直接面对着具有高瓦斯突出危险性的煤体(或穿层钻孔),在短兵相接的条件下作业,给水力压裂的安全实施提出了更高要求。

② 对于松软低渗煤层,无论本煤层钻孔还是穿层钻孔煤层段实施水力压裂,都存在高压水在煤层钻孔里极易与软煤结合形成煤泥(浆)导致塌孔;高压水作用于钻孔四周松软煤体时更多造成其塑性变形,从而导致煤体被进一步压实;即使水力压裂措施在松软煤体里具有一定的卸压增透作用,其有效作用半径也很小,通常不会超过 1.0 m,而且由于“软煤”的流变性,在很短时间内即恢复原状等现象。因此,对于松软破碎的高瓦斯突出煤层,单独对煤层进行注水压裂,其增透效果是非常有限的。

③ 钻孔不易维护,有效利用率低。尤其对松软煤层具有强度低、易破碎的特点,即使已经施工好的钻孔,受地应力、构造应力、采掘应力等因素的影响,在短时间内会出现坍塌、压实、闭合等情况,以至于执行后续的水力压裂或其他卸压措施时,原先的煤层钻孔已经严重变形甚至不存在了。

④ 由于不同类型煤岩其物理和力学特性的差异,对其实现水力压裂和有效裂隙扩展所需的水压和流量也必然不同。如果对此方面的特征不清楚,不仅对煤岩开始生成裂隙的临界水压条件无法把握,也不能通过合理控制注水量使裂隙得到更加充分的扩展。因此,同样难以取得最理想的水力压裂效果。

(4) 总体缺乏对煤体水力压裂之后持续时间和持续效果的系统考察和分析。

大量的现场实践证明,受区域地应力的影响,松软煤体在经过水力压裂后生成和扩展的微小裂隙通常仅能维持较短的时间。即使比较坚硬,发生脆性变形的煤在压裂完成后具有比较明显的“卸压增透”效果,同样不能持续很长时间,通常也表现为不同程度的衰减。由于预先没有研究并掌握这个衰减过程的定量曲线,目前尚不能有针对性地对煤岩体在合理的时间实施二次甚至多次水力压裂,以持久地维持比较理想的“卸压增透”效果,切实保证本煤层瓦斯运移的连续性和稳定性。

1.3 研究内容及研究方法

1.3.1 主要研究内容

通过实施水力压裂对煤层进行“卸压增透”,可以有效提高本煤层瓦斯抽采率、降低瓦斯含量及压力。本书针对水力压裂技术措施的成败(效果)与煤体自身物理特性密切相关的大量理论、实践经验,拟通过设计、改装物理模拟实验系统来研究高压水压及地应力综合作用下不同破坏类型煤层的瓦斯渗透变化特性、膨胀塑性变形特征;考察综合作用条件下煤体破碎生成裂隙的过程和水压临界条件;分析高压水载荷条件下煤体水平与垂直裂缝起裂的判据,延展变化特征及其范围。取得的预期成果可望对煤矿实际条件下实施煤体顺层、穿层及顶(底)板水力压裂提供比较明确的依据,以期取得更加理想的“卸压增透”和本煤层瓦斯抽采效果。主要研究内容如下:

(1) 高压水载荷下煤样瓦斯渗流实验装置的设计与改装

① 煤样试件密封系统(夹持器);

② 三轴应力加载及伺服控制系统;

③ 瓦斯气体接入系统;

④ 气体渗流系统;

- ⑤ 模拟钻孔与水力压裂控制系统;
- ⑥ 瓦斯流量监测系统;
- ⑦ 自动监测与数据采集系统。
- (2) 目标矿区的确定及原煤煤样的制作
 - ① 煤体结构分类;
 - ② 目标矿区煤层基本参数测试分析;
 - ③ 孔隙率与煤体坚固性系数关系分析;
 - ④ 松软易破碎煤体原始煤样采集及试件制作工艺。
- (3) 高压水作用下煤体破裂过程及瓦斯渗流特性实验研究
 - ① 试件加载轴压与围压关系分析;
 - ② 煤样试件渗透性实验室测定方法确定;
 - ③ 实验方案的确定;
 - ④ 高压水加载前煤样渗透性实验;
 - ⑤ 高压水作用下原生结构煤(硬煤)的破碎过程及水压临界条件研究;
 - ⑥ 高压水作用下构造煤(软煤)的破碎过程及水压临界条件研究;
 - ⑦ 高压水加载前后原生结构煤(硬煤)瓦斯渗透特性变化规律实验研究;
 - ⑧ 高压水加载前后构造煤(软煤)瓦斯渗透特性变化规律实验研究。
- (4) 高压水与应力综合作用下煤体变形与破坏特征实验研究
 - ① 高压水与应力综合作用下水平、垂直裂缝的起裂判据;
 - ② 高压水与应力综合作用下水平、垂直裂缝的延展特征;
 - ③ 轴压一定变围压条件下煤体裂隙生产和延展;
 - ④ 围压一定变轴压条件下煤体裂隙生产和延展。
- (5) 水力压裂现场验证
 - ① 压裂方案设计;
 - ② 压裂实施与压裂效果对比;
 - ③ 压裂效果的考察;
 - ④ 水力压裂存在的问题以及煤层顶板压裂卸压增透机理。

1.3.2 研究方法

采用理论分析、实验模拟以及现场试验相结合的方法进行研究。充分地调研当前国内外实施井下顺煤层、穿煤层和顶底板围岩水力压裂采取的技术工艺及其地质条件;以高瓦斯、低透气性矿区为主要研究基地,选取并采集不同类型且具有代表性的煤层制作煤样试件;在此基础上应用设计、改装的煤钻孔水力压裂物理模拟实验系统,对预定研究内容和相关参数进行深入的研究和考察;通过将实验分析结果与现场实际水力压裂的过程和效果对比验证,进一步优化、完善“高压水压载荷下煤体变形特性及瓦斯渗流规律研究”研究结论。

1.4 技术路线

课题的技术路线如图 1-1 所示。