

# 煤层气开采技术现状分析

薛志亮

中联煤层气(山西)有限责任公司晋太分公司 山西 晋城 048000

**摘要:**煤层气开采技术对能源开发意义重大。本文先阐述其开采原理与主流技术分类,分析当前钻完井、增产改造、排采管理等技术发展现状,指出面临储层适应性、技术自身科学与工程、成本与效率等核心问题。进而提出破解储层难题、攻克技术挑战、解决成本效率问题的对策,为煤层气高效开发提供理论支撑与实践参考,推动行业技术进步与可持续发展。

**关键词:**煤层气开采;技术现状;核心问题;对策;可持续发展

引言:在全球能源需求持续增长与能源结构转型的背景下,煤层气作为一种清洁、高效的非常规天然气资源,其开发利用受到广泛关注。我国煤层气资源丰富,分布广泛,具有巨大的开发潜力。然而,煤层气开采面临诸多技术挑战,如储层条件复杂、技术适配难度大、成本较高等。深入分析煤层气开采技术现状,剖析面临的核心问题,并提出针对性对策,对提升我国煤层气开发水平、保障能源安全具有重要意义。

## 1 煤层气开采核心原理与技术分类

### 1.1 基础开采原理

煤层气开采的核心逻辑建立在对甲烷赋存状态的精准认知之上。在煤层这一特殊地质环境中,甲烷主要以吸附态存在于煤基质表面,存在少量游离态气体分布于煤层孔隙与裂隙之中。二者处于动态平衡状态,共同受控于储层压力、温度以及煤基质吸附能力等关键因素。当实施开采作业时,通过特定的技术手段降低储层压力,原有平衡状态被打破<sup>[1]</sup>。依据热力学与吸附理论,随着压力下降,煤基质对甲烷的吸附能力减弱,吸附态甲烷逐渐解吸,转化为游离态气体。游离态气体在压力梯度驱动下,经由煤层裂隙网络向开采井筒运移,最终通过井筒产出至地面,实现煤层气的商业开发。这一过程的关键影响因素包含三方面。储层压力是驱动气体解吸与运移的动力源,压力降幅直接影响解吸速率与运移效率。煤层渗透性决定气体在煤层中的流动能力,高渗透煤层有利于气体快速运移,而低渗透煤层则需通过技术改造提升渗透性。一般来说,渗透率大于0.1mD的煤层属于中高渗透煤层,气体运移相对容易,而渗透率低于0.01mD的煤层,气体运移极为困难。煤基质吸附能力反映煤层对甲烷的束缚强度,吸附能力越强,解吸难度越大,需更显著的降压幅度或更长的排采时间,不同变质程度的煤吸附能力差异明显,无烟煤的吸附能力通常是褐煤的2-3倍。

1.2 主流技术分类框架根据工程实施场景差异,煤层气开发技术体系可划分为地面开发与井下抽采两大路径。地面开发通过钻井建立人工通道,采用水力压裂等手段改造储层,形成具有高导流能力的渗流通道,适用于埋深小于2000米的中高渗透煤层。井下抽采技术则依托煤矿开采巷道系统,通过布置本煤层或邻近层抽采钻孔,在采掘活动影响前预先降低瓦斯压力,属于煤矿安全生产的配套技术措施。从功能属性维度划分,技术体系包含三个核心模块:钻完井技术涵盖井位部署、井身结构设计及完井方式选择,需综合考虑地质构造特征与开发方案要求;增产改造技术以水力压裂为主体,通过多级压裂、暂堵转向压裂等工艺实现裂缝网络扩展,配套的智能完井系统可实现生产动态调控;排采管理制度涉及压力管理策略制定、设备选型匹配及生产参数优化,其核心在于维持储层压力平稳下降,避免因降压速率失控导致煤粉运移或水合物堵塞。

## 2 当前主流开采技术发展现状

### 2.1 钻完井技术体系

定向钻井技术领域,定向羽状水平井技术凭借独特设计实现对煤层的高效穿切。该技术通过精确控制钻头轨迹,使井眼呈羽状分布于煤层中,极大增加泄流面积,提升单井产量。这一技术突破了传统直井开采范围有限的局限,在煤层赋存条件适宜区域展现出显著优势。完井工艺创新方面,裸眼洞穴完井、直井与水平井多级压裂完井等技术得到广泛应用。裸眼洞穴完井通过在煤层段形成较大洞穴,增强气体渗流通道;直井与水平井多级压裂完井则利用多级压裂工艺,在井筒周围形成复杂裂缝网络,提高改造体积,促进气体解吸与运移。多分支井技术通过在主井筒上钻出多个分支井眼,诱导复杂微裂缝发育,有效提升排采能力。然而,该技术面临井壁稳定性优化难题。由于分支井眼的存在,井壁受力复

杂,易发生坍塌等事故,需通过优化钻井液性能、加强井壁支撑等措施加以解决。

## 2.2 增产改造核心技术

压裂工艺持续发展,形成水力压裂、超临界二氧化碳压裂、液氮与氮气复合压裂等多种技术类型<sup>[2]</sup>。水力压裂通过高压注入水基或化学压裂液,形成裂缝网络;超临界二氧化碳压裂利用超临界二氧化碳的特殊性质,实现高效携砂与裂缝扩展;液氮与氮气复合压裂则结合两者优势,提升压裂效果。配套工具不断升级,桥塞涵盖可溶式与生物降解型,减少后期作业工序;RFID智能滑套实现远程精准控制,提升压裂作业效率;纳米材料增强封隔器凭借优异密封性能,保障压裂施工安全。压裂液体持续优化,活性水压裂液成本低、易配制;气体与泡沫压裂液具有低伤害、强携砂能力;纳米复配清洁压裂液则在降低对煤层伤害的同时,提升压裂效果。物理增透技术中,等离子脉冲增透技术利用高压冲击波改善煤层渗透性。该技术通过产生瞬时高压,使煤层孔隙结构发生改变,增加气体渗流通道,提升煤层气解吸与运移效率。

## 2.3 排采与管理技术进步

智能排采系统结合参数监测与自动调控功能,实现精准控压与煤粉管理。通过实时监测井底流压、产气量等参数,系统自动调整排采速度,避免因排采过快导致煤粉堵塞井筒,保障生产连续稳定。远程管理平台集成ICV控制阀与RFID技术,构建远程专家决策系统。该系统可实时获取生产数据,专家依据数据远程制定生产策略,实现生产过程的高效管理。监测技术支撑方面,微地震监测用于裂缝扩展追踪。该技术通过捕捉压裂过程中产生的微地震信号,反演裂缝扩展形态与方向,为后续压裂设计提供依据。然而,当前信号处理精度有待提升,以更准确反映裂缝动态。目前微地震监测的信号处理精度可达10-20米,若能提升至5-10米,将更准确反映裂缝动态。

## 2.4 综合开发技术探索

井上下联合抽采模式整合地面与井下技术优势,通过地面钻井与井下抽采系统协同作业,提升资源回收效率。该模式可充分利用不同开采场景的特点,结合地质条件动态适配,实现煤层气的最大化开发。多气合采技术探索煤层气与页岩气、致密气的共采技术路径。由于这三种气体赋存条件与开采方式存在相似性,通过技术集成与优化,可实现资源的高效利用与开采成本降低。“采气固碳”技术利用超临界二氧化碳压裂实现气体开采与碳封存协同。在压裂过程中注入超临界二氧化碳,依托储

层空间特性优化注入参数,既可提升压裂效果,又可将二氧化碳封存于煤层中,实现减排与资源开发的双赢。

## 3 煤层气开采技术面临的核心问题

### 3.1 储层适应性难题

煤层气储层地质条件复杂多样,给开采技术适配带来巨大挑战。多期构造运动使得煤层经历了复杂的构造变形过程,导致煤层厚度变化大、断层与褶皱发育,非均质性显著增强。这种强非均质性表现为煤层物性参数在空间上的剧烈变化,不同区域的渗透率、孔隙度等参数差异明显,使得单一开采技术难以在全区有效应用,技术适配难度大幅增加<sup>[3]</sup>。低渗透储层开发是煤层气开采面临的另一大瓶颈。低渗透煤层普遍具有“三低一高”特性,即低渗透率、低孔隙度、低含气饱和度与高应力。这些特性相互交织,严重制约了煤层气的解吸、扩散与渗流过程。在增产改造过程中,由于渗透率低,压裂液难以有效进入煤层深部,形成的裂缝网络规模有限,改造体积较小,导致增产效果不理想,难以实现经济高效开发。

### 3.2 技术本身的科学与工程挑战

裂缝扩展控制是煤层气压裂改造中的关键难题。煤层中天然裂隙广泛发育,这些天然裂隙的存在使得压裂裂缝的扩展路径变得极为复杂。在压裂过程中,裂缝不仅会沿着人工压裂方向扩展,还会受到天然裂隙的影响而发生分支、转向等现象,导致裂缝形态难以精准预测。这不仅影响了压裂改造体积,还可能引发井间干扰等问题,降低开发效果。地应力评估偏差对煤层气开采技术设计产生重要影响。煤层的非均质性使得地应力在空间上的分布极不均匀,现有地应力测量方法在复杂煤层中的测量误差较大。不准确的地应力数据会导致压裂设计不合理,如压裂方向选择错误、施工压力设定不当等,进而影响压裂效果与开采安全。支撑剂效能不足也是制约煤层气开发的重要因素。煤层质地相对塑软,在压裂过程中,支撑剂易嵌入煤基质中,导致裂缝宽度减小,长期导流能力降低。这不仅缩短了压裂有效期,还增加了后续重复压裂等作业的成本与难度。特殊压裂液在复杂储层中的流动与作用机理尚不明确。随着技术的不断发展,各种新型压裂液不断涌现,但这些特殊压裂液在低渗透、非均质煤层中的流动规律、吸附损失、对煤层物性的影响等作用机制仍缺乏深入研究,限制了大规模应用与优化。

### 3.3 技术应用成本与效率问题

高端技术应用成本居高不下是当前煤层气开发面临的重要问题。多分支井、智能排采装备等高端技术虽然具有显著优势,但其研发、制造与维护成本高昂,导致

整体开发成本增加。在目前煤层气价格水平下,高成本使得部分项目经济效益不佳,制约了技术的推广应用。部分工艺自动化程度不足影响了规模化开发效果。在煤层气开采过程中,一些关键工艺环节仍依赖人工操作,自动化水平较低<sup>[4]</sup>。这不仅导致作业效率低下,还增加了人为因素对生产过程的影响,降低了生产稳定性与安全性,难以满足大规模开发的需求。

#### 4 煤层气开采技术问题的核心对策

##### 4.1 破解储层适应性难题的对策

针对煤层气储层非均质性强、地质条件复杂的特性,需构建多维度地质模型实现储层精准表征。通过整合成像测井数据与岩心分析结果,细化储层渗透率、孔隙度等关键参数的空间分布规律,为后续开发方案提供基础依据。在技术方案制定层面,需根据储层非均质特征设计差异化钻完井与压裂工艺,例如针对厚煤层采用水平井多级压裂,对薄煤层实施体积压裂与暂堵转向压裂组合技术,提升工程措施与地质条件的适配性。对于低渗透储层,需重点突破复合增透技术瓶颈,通过纳米材料携砂、多级脉冲压裂等物理手段与化学溶蚀剂协同作用,构建多尺度渗流通道,有效改善储层渗透率。

##### 4.2 攻克技术本身科学与工程挑战的对策

裂缝扩展精准调控是提升改造体积的关键,需发展自适应压裂技术体系,集成微地震监测、光纤传感等实时反馈手段,动态调整压裂液排量、砂比等参数,实现裂缝网络的最优扩展。地应力场精准评估方面,应融合声发射监测、水力压裂测试等多源数据,建立考虑构造应力叠加效应的预测修正模型,为压裂设计提供可靠依据。针对软煤层支撑剂嵌入问题,需研发高强度陶瓷支撑剂与表面改性技术,通过优化颗粒级配与铺砂浓度,形成稳定的渗流骨架。特殊压裂液作用机理研究需结合室内流动实验与现场试验数据,明确低伤害、高效携砂、耐高温耐压等特性指标,指导新型压裂液体系研发。

4.3 解决成本与效率问题的对策 技术成本优化可推动核心装备国产化。加大对钻井设备、压裂装备等核心装备

的研发投入,突破关键技术瓶颈,实现装备自主生产。简化高端技术工艺流程,降低技术复杂度,减少设备维护与运行成本,从而降低整体应用成本<sup>[5]</sup>。提升作业效率要推广自动化作业系统。在钻井、压裂、排采等关键环节引入自动化设备与智能控制系统,实现生产过程自动化操作与远程监控。构建一体化施工管理流程,加强各环节协同配合,减少作业等待时间,提高生产效率。资源综合利用可通过多气共采等模式实现。探索煤层气与页岩气、致密气等非常规天然气共采技术路径,利用不同气体赋存条件相似性,实现资源高效利用。通过多气共采提升单井收益,分摊技术成本,提高项目经济效益。同时深化“采气固碳”等环境友好型技术应用,推动煤层气绿色开发。

#### 结束语

煤层气开采技术的进步是推动产业发展的核心动力。当前技术体系在钻完井、增产改造和智能排采等方面已取得实质性突破,但储层适应性与工程成本问题依然突出。通过加强地质精准表征、发展自适应压裂技术、推动装备国产化与自动化升级,有望持续提升单井产量与开发效益。进一步深化多气合采、采气固碳等综合开发模式,将促进煤层气资源在能源保障和绿色低碳转型中发挥更重要作用。

#### 参考文献

- [1]李昔遥,祖近轩,张治仓,等.大佛寺煤矿煤层气开采现状及技术应用[J].中国资源综合利用,2022,40(6):30-32.
- [2]李志斌.煤层气勘探开发工艺技术难点与对策[J].石油工程建设,2024,46(11):153-155.
- [3]降文萍,柴建禄,张群,等.基于煤层气与煤炭协调开发的地面抽采工程部署关键技术进展[J].煤炭科学技术,2022,50(12):50-61.
- [4]郭亚军.浅谈煤层气开采工艺现状及发展策略[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(14):143-145.
- [5]孔令强,张倬华,郝炆.鄂尔多斯东缘煤层气水平井钻完井技术优化探讨[J].石油和化工设备,2023,26(5):97-99.