

# 低浓度煤层气资源利用现状及效益探究

丁 辉 卜祥坤 (山东省微山湖矿业集团有限公司, 山东 济宁 277600)

**摘要:** 本文系统分析了低浓度煤层气资源的利用现状, 重点探讨了发电技术、浓缩技术、燃烧技术和矿井乏风技术四种主要利用方式的技术特点与应用进展。分析发现, 低浓度煤层气发电技术能有效解决浓度不稳定问题; 浓缩技术主要通过变压吸附和低温液化分离将低浓度气体转化为高价值燃料; 燃烧技术解决了直接排放造成的资源浪费; 矿井乏风技术解决了极低浓度煤层气的利用难题。低浓度煤层气的科学开发利用在减少大气污染物排放、创造经济价值和提高煤矿安全水平等方面均具有显著成效, 实现了“变害为利、变废为宝”的目标。

**关键词:** 低浓度煤层; 资源利用; 经济效益; 经济价值

中图分类号: TE99 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 012-0016-03

## Research on the Utilization Status and Benefits of Low-Concentration Coalbed Methane Resources

Ding Hui, Bu Xiangkun (Shandong Weishanhu Mining Group Co., Ltd. Jining Shandong 277600, China)

**Abstract:** This paper analyzes the utilization status of low concentration coalbed methane resources, focusing on the characteristics and application progress of power generation technology, concentration technology, combustion technology and mine exhaust technology. It is found that low concentration coal bed methane power generation technology can effectively solve the problem of concentration instability. The concentration technology mainly converts low concentration gas into high value fuel through pressure swing adsorption and low temperature liquefaction separation. Combustion technology solves the waste of resources caused by direct emission; Mine exhaust technology solves the problem of utilization of very low concentration coalbed methane. The scientific development and utilization of low concentration gas has achieved remarkable results in reducing the emission of air pollutants, creating economic value and improving the safety level of coal mines.

**Keywords:** Low-concentration coalbed methane; Resource utilization; Economic benefits; Economic value

煤层气是蕴藏于煤层中的一种非常规天然气资源, 主要成分为甲烷( $\text{CH}_4$ ), 被誉为“21世纪的清洁能源”。低浓度煤层气, 特指甲烷浓度在5%~16%之间的煤层气资源, 长期以来因安全隐患和利用难度大而被直接排放, 造成能源浪费和环境污染。随着全球能源格局变化和环保要求提高, 低浓度煤层气的开发利用已成为国内外研究的热点问题。

我国是世界上煤层气资源最丰富的国家之一, 据地质调查数据显示, 全国42个主要含煤盆地2100m以浅的煤层气地质资源量达37.03万亿立方米, 其中具有开发价值的约为4万亿立方米。然而, 由于技术和经济等因素的限制, 我国低浓度煤层气的利用率较低, 大量资源被浪费。2023年统计数据局发布数据显示, 全国煤层气开采量为117.7亿立方米, 但利用量仅为52亿立方米, 利用率仅为40%, 远低于发达国家水平。

“十三五”期间, 国家将节能减排作为重要发展战略, 煤层气作为清洁能源被纳入国家能源发展规划。2024年《国家发展改革委等部门关于加强煤炭清洁高效利用的意见》的颁布, 为低浓度煤层气的开发利用提供了政策支持。在此背景下, 低浓度煤层气发电技

术、浓缩技术、燃烧技术以及矿井乏风技术等多种利用方式得到快速发展, 形成一系列具有自主知识产权的技术成果。

### 1 低浓度煤层气资源利用现状

#### 1.1 低浓度煤层气发电技术

低浓度煤层气发电技术是目前应用最为广泛的煤层气利用形式, 其技术已相对成熟完善。作为一种清洁能源利用方式, 低浓度煤层气发电能有效解决煤矿安全生产与能源利用的双重问题。通常, 低浓度煤层气的甲烷含量在5%~16%之间, 由于其浓度不稳定, 发电系统需要特殊设计以适应这一特性。目前主要采用内燃机组发电技术, 通过自动调节混合气体的比例, 解决了气体浓度波动造成的发动机不稳定等安全问题。

在发电效率方面, 每立方米甲烷理论上可产生3.1~3.4千瓦时的电力, 实际工程应用中, 考虑到能量转换效率约为10%左右, 则每3m<sup>3</sup>煤层气可发电1千瓦时。随着技术的不断改进, 低浓度煤层气发电系统的安全性和稳定性得到显著提高。值得注意的是, 低浓度煤层气从抽采到输送再到利用的全过程均存在安全隐患。特别是在输送环节, 管道中的低浓度煤层气极易引发爆炸事故。因此, 我国已建立较为完善的输

送安全保障体系，包括压力监测、浓度检测和自动报警装置等，为煤层气发电提供了必要的安全保障。低浓度煤层气发电已成为煤矿企业实现能源综合利用、创造经济效益的重要途径。

### 1.2 低浓度煤层气浓缩技术

低浓度煤层气浓缩技术是将浓度较低的煤层气提纯为高浓度气体的一种重要处理方法，主要包括变压吸附浓缩和低温液化分离两种技术路线。这些技术的发展为低浓度煤层气的高效利用提供了技术支撑，使其转化为更高价值的能源资源成为可能。

变压吸附（PSA）技术是目前应用较为广泛的一种浓缩方法，其基本原理是利用不同气体在多孔吸附剂上的吸附特性差异，在加压和减压的循环过程中实现对甲烷的选择性富集。该技术对于浓度在6%~30%的低浓度煤层气处理效果较好，工艺流程相对简单，运行维护成本较低。在实际应用中，变压吸附系统通常采用多塔并联运行的方式，以确保连续生产高纯度甲烷气体。

低温液化分离技术则是采用气体在不同温度下液化点的差异来实现分离，通过氮气膨胀制冷循环和低温精馏的方式进行操作。该技术能够将低浓度煤层气中的甲烷富集到90%以上，杂质含量低于5%，处理后的气体可直接用作高品质的民用燃料或化工原料。低温液化技术工艺流程较为复杂，能耗相对较高，但分离效果更为理想，特别适合于规模化生产和商业化应用。随着科技的进步，新型浓缩技术也在不断涌现，如膜分离技术、物理吸收法等，进一步拓展了低浓度煤层气浓缩的技术路线。尤其是针对大流量低浓度煤层气，通过浓缩技术处理后可生产出SNG（合成天然气），其热值可达到4000m<sup>3</sup>，大大提高了煤层气的利用价值。

### 1.3 低浓度煤层气燃烧技术

低浓度煤层气燃烧技术是一种直接将煤层气作为燃料进行燃烧利用的方法，主要适用于无法进行集中收集或经济价值不足以支撑浓缩处理的煤层气资源。该技术的基本原理是通过特殊设计的燃烧器，在确保安全稳定的条件下，实现低浓度煤层气的有效燃烧，从而获取热能并减少甲烷直接排放对环境的影响。

针对低浓度煤层气的燃烧特性，已经开发出多种专用燃烧设备，主要包括湿式阻火器和干式阻火器两种类型。湿式阻火器采用水封原理，通过在气体通道中设置水层来防止回火；而干式阻火器则利用多孔金属网或蜂窝陶瓷等材料形成的热量吸收层来阻断火焰传播。这些技术的应用有效解决了低浓度煤层气燃烧过程中的安全问题，为其广泛利用创造了条件。

在实际应用中，低浓度煤层气燃烧技术主要用于锅炉供热、工业窑炉和民用采暖等领域。特别是对于煤矿开采过程中不可避免产生的大量低浓度煤层气，通过燃烧技术处理后可以有效减少直接排放量，避免资源浪费。从环境效益角度看，煤层气的主要成分甲烷是一种强效温室气体，其温室效应是CO<sub>2</sub>的21倍，通过燃烧将其转化为CO<sub>2</sub>，可以显著降低温室效应影响，有利于保护大气环境。

### 1.4 矿井乏风技术

矿井乏风技术是针对极低浓度煤层气资源的一种创新利用方式，主要处理对象为矿井乏风瓦斯（Ventilation Air Methane，简称VAM）。矿井乏风是指煤矿通风系统排出的含甲烷浓度低于0.75%的通风气体，虽然浓度极低，但由于风量巨大，我国每年通过乏风排入大气的甲烷总量约为 $1 \times 10^{10} \sim 1.5 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，若不加处理直接排放，会造成能源浪费，还会加剧温室效应。

由于矿井乏风中甲烷浓度过低，传统的分离提纯方法能耗远高于所获能量，经济性较差；同时，这种浓度的甲烷又无法直接燃烧，因此长期以来只能空排。针对该难题，国内研究机构开发了煤矿乏风甲烷氧化装置，该装置采用热氧化原理，突破了低浓度甲烷利用的技术瓶颈。矿井乏风甲烷氧化装置主要由氧化床和控制系统两部分组成。氧化床部分包括外壳体、蜂窝储热陶瓷、电加热器、内置换热器及相关管路；控制系统则由控制单元、温度传感器、甲烷浓度传感器和电动阀门等组成。其工作原理是首先利用少量电能加热启动至甲烷氧化反应温度，随后停止电加热，依靠乏风中甲烷的持续氧化反应释放热能，实现自持运行。这一过程将甲烷转化为二氧化碳，同时产生的热能可用于供热或发电。该技术在可利用乏风浓度、氧化控制和热量利用等方面均取得了突破性进展，为煤矿企业提供了一种环保高效的矿井乏风处理方案。尤其该技术已通过工业性试验验证，在工艺流程和氧化技术方面有重要创新，对于推进国家“节能减排”战略具有重大的现实意义。

## 2 低浓度煤层气资源的效益分析

### 2.1 环保效益

低浓度煤层气资源的利用具有显著的环保效益，主要体现在减少温室气体排放、降低大气污染物排放以及保护生态环境三个方面。从温室气体减排角度看，煤层气的主要成分甲烷是一种强效温室气体，其温室效应是CO<sub>2</sub>的21倍。通过对低浓度煤层气的有效捕集和利用，可以显著降低甲烷直接排放到大气中的数量，从而减缓全球气候变化进程。

从大气污染物排放角度分析,低浓度煤层气中硫含量极低,虽然在燃烧过程中会产生少量的氮氧化物,但与传统煤炭燃烧相比,各类污染物的排放量大幅降低。据统计,我国每年煤矿开采过程中约有  $1.7 \times 10^9 \text{ m}^3$  的煤层气排放,若对这些煤层气进行有效捕集和利用,每年可减少约  $6.79 \times 10^9 \text{ kg}$  的  $\text{CO}_2$  排放量,减少约  $7.64 \times 10^8 \text{ kg}$  的  $\text{SO}_2$  排放量,以及减少约  $1.95 \times 10^{10} \text{ kg}$  的烟尘排放。这些数据充分说明了低浓度煤层气利用对改善空气质量的积极贡献。此外,低浓度煤层气的利用还能有效降低煤炭在开采、加工和运输过程中排放的各类污染物,进一步减轻对生态环境的压力。

从能源系统整体角度看,低浓度煤层气的利用代表一种清洁能源生产和消费模式,符合国家能源结构调整和绿色发展战略的要求。通过技术创新和系统集成,实现对这一资源的高效利用,可以创造经济价值,更能产生长期的环境效益,是实现煤炭行业可持续发展的重要途径。

## 2.2 经济效益

低浓度煤层气资源的开发利用具有显著的环保价值,也蕴含着巨大的经济潜力。从能源转化效率来看,低浓度煤层气的主要成分甲烷是一种优质能源载体,每立方米  $\text{CH}_4$  在理想条件下可产生 3.1~3.4 千瓦时的电力,具有较高的能量密度和经济价值。根据能源转换规律,这一数据意味着煤层气资源可转化为多种高附加值的能源产品和服务。

从宏观经济角度分析,我国煤炭开采过程中每年产生的纯甲烷约为  $1.4 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,其中  $4.4 \times 10^9 \text{ m}^3$  的煤层气若用于发电,可产生  $1.4 \times 10^{10} \text{ kWh}$  的电力,相当于建立一个资产规模近百亿元的产业。这一巨大的产业规模能够直接创造经济效益,还能通过产业链延伸创造大量就业机会,对促进区域经济发展和提高居民收入水平具有积极作用。

在低碳经济背景下,低浓度煤层气的开发利用还具有额外的经济价值。特别是在热电冷联产系统中,通过多级能量梯级利用,能源综合效率显著提高,同时可纳入碳交易市场获取额外收益。这种商业模式提高了能源利用效率,还实现了环境效益与经济效益的有机结合。具体到矿井乏风瓦斯的利用方面,其经济效益同样可观。我国每年通过乏风排放的  $\text{CH}_4$  约为  $1.3 \times 10^9 \sim 1.7 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,若采用热逆流氧化技术进行处理,可以减少大量温室气体排放,还能回收利用其中的能量。据实际案例统计,每年处理  $1.81 \times 10^9 \text{ m}^3$  矿井乏风可生产约  $2.7 \times 10^7 \text{ kWh}$  电力,按照每千瓦时电价 0.4 元计算,年发电收入可达 150 万元。

从投资回报角度看,低浓度煤层气利用项目前期

虽需一定资本投入,但回收期较短。考虑到项目的全生命周期,多数煤层气开发项目能在 2~3 年内实现盈亏平衡并开始产生稳定收益。

## 2.3 社会效益

低浓度煤层气资源的开发利用在社会层面产生了多方位的积极影响,主要体现在提升煤矿安全水平、促进能源安全与转型、创造就业机会以及推动技术创新等方面。从安全生产角度看,煤层气是煤矿安全生产的主要隐患之一,通过科学合理抽采和利用低浓度煤层气,可显著降低煤矿瓦斯事故发生率,保障矿工生命安全。随着煤层气开发技术的改进和完善,煤矿安全状况得到明显改善,社会效益十分显著。

在能源安全与转型方面,低浓度煤层气的开发利用为我国能源供应增添了新的来源,有效缓解了能源供需矛盾。随着国家能源结构调整步伐加快,低浓度煤层气作为清洁能源的一种,其开发利用符合国家可持续发展战略,对优化能源结构、促进能源多元化发展具有重要意义。通过政策引导和市场机制,低浓度煤层气开发已形成一定产业规模,成为煤炭开采地区经济转型的重要支撑。

在就业创造方面,低浓度煤层气资源的开发形成了一条完整的产业链,包括气源勘探、开采工程、输送管网建设、终端利用设备制造以及相关服务业等,每个环节都需要大量专业技术人员和管理人员,提供了大量就业岗位。在技术创新层面,低浓度煤层气开发利用技术的研究与应用促进了多学科交叉融合和技术进步,已取得多项自主知识产权和技术突破,推动了相关产业的技术升级,提升了国家整体科技创新能力。

## 3 结论

未来,应进一步加强核心技术研发,完善产业链条,构建市场化运营机制,推动低浓度煤层气资源利用进入规模化、产业化发展阶段,为我国能源转型和生态文明建设做出更大贡献。

### 参考文献:

- [1] 席国君,刘子涵,雷广平. FeTPPs-CuBTC 协同强化低浓度煤层气吸附分离 [J]. 化工学报,2022,73(9): 3940-3949.
- [2] 徐汉城,李广学,张陈. 低浓度煤层气变压吸附制甲烷研究进展 [J]. 现代化工,2023,43(9):57-60.

### 作者简介:

丁辉 (1982—),男,汉族,山东微山人,大专,助理工程师,研究方向:煤炭工程。

卜祥坤 (1984—),男,汉族,山东微山人,本科,助理工程师,研究方向:煤炭工程。