

微波加热技术开采煤层气发展前景分析

田立贞（华阳新材料科技集团有限公司一矿，山西 阳泉 045000）

摘要：作为“双碳”目标的主战场，能源产业的减碳、降碳是我国“双碳”工作的重点方向。由于我国以煤为主的能源禀赋现状，在保障能源安全的基础上，降低煤炭消费总量及其消费过程中的碳排放强度是实现“双碳”目标的必然选择。当前，“双碳”目标已对矿山行业整体技术布局和攻关方向提出全新的要求，矿山行业比过去任何时候都更加需要科技创新，清洁低碳利用、煤层气开发利用（瓦斯抽采利用）、矿区生态修复+碳汇等绿色低碳科技创新攻关脱颖而出。我国煤储层普遍都具备“高储低渗”的地质特性，煤层气储量丰富但工业开发困难。微波加热因加热速率高、选择性加热、环保等特点被认为是一种极具发展前景的储层促解增透新方法。微波加热促解增透技术属于新兴研究领域，探讨微波辐射作用下低渗透储层煤层气解吸渗流规律以及煤层气运移采出研究具有重要意义。

关键词：双碳；煤层气开发利用；微波加热

1 前言

煤层气（瓦斯）是储存于地下煤层的伴生矿产资源，主要由甲烷经类气体组成，属于清洁高效的非常规气体能源。据统计，中国埋深 2000m 以内的浅层煤层气资源总量约为 30 万亿 m^3 ，煤层气可采的资源量为 12.5 万亿 m^3 ，约占世界煤层气资源总量的 13.7%，位居世界第 3 位，如图 1 所示。

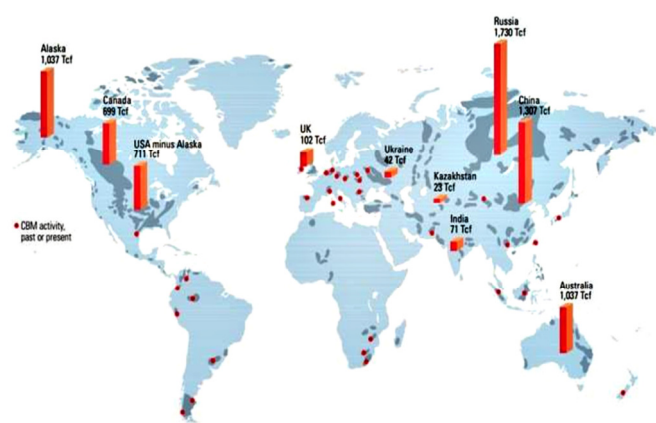


图 1 全球煤层气储量

我国的能源结构不但可以利用煤层气资源的开发来优化，并且煤矿生产过程中的温室气体排放量和瓦斯灾害，也可以利用此来减少。我国富集煤层气矿区普遍具有“三高三低”的特点，即煤层气贮存量高、煤层气吸附能力高、煤层可塑性高、煤层气储存渗透率低、煤层气压力低和煤层常规破裂条件下裂隙占比低。因此，在“三高三低”的储存条件下，必须考虑低渗透储层煤层气藏的强化抽采。

2 微波注热抽采煤层气的可行性

热刺激策略已被一些研究人员作为一种通过提高地层温度来提高采收率的办法。石油领域是最早提出注热开采这一概念的领域。

在石油领域，一方面全球日益高涨的能源需求，迫使稠油开采变得愈发重要；另一方面则是因为轻质油资源日渐枯竭。注热开采指的是，因为稠油的粘度较高，而为了使稠油粘度降低，石油领域通过向储层注热，进而实现开采的一种采开放式。注热开采法已经在石油领域得到了普遍的研究和商业上的应用。

其中，蒸汽驱替法（Steam Flooding）、蒸汽吞吐法（Cyclic Steam Stimulation）和蒸汽辅助重力泄油法（Steam Assisted Gravity Drainage）三种方法，是比较常用的主要注热开采方法。

蒸汽驱替法指的是通过向注气井里注入热蒸汽，从生产井抽采原油的一种抽采方法，可以实现边注热边抽采。

蒸汽吞吐法，则是抽采井和注气井为同一个井，热蒸汽注入钻井内，数日后需要关闭钻井，等数日后再開井采油，当产油量降低到一定水平后，再注入热蒸汽，屡次反复。

而蒸汽辅助重力泄油法则是在储层中布置水平钻井，注气井位于抽采井的上方，热蒸汽通过注气井注入，由于原油受热后黏度会降低，利用这一特性，再依靠重力的作用，使得原油向下流入抽采井，此方法具有较好的抽采效率。

近年来学者们提出向煤层注入过热蒸汽或热水方法以达到煤层气增产目的，国内专家学者基于热—

水-力学模型发现热注入可以大大提高煤的渗透率；Salmachi and Haghighi 研究表明，注入热水可以使天然气产量提高 58%。然而热水的注入或者过热蒸汽会造成煤体含水量增加，易形成水锁、孔隙堵塞，从而阻碍煤层气的发掘。

微波注热低渗透煤储层可快速有效的提高煤层温度，促进煤层气解吸，增加气体活性，加热不均匀产生的温差热应力会促使孔裂隙扩展并诱发新生孔裂隙，煤层渗透性增强，同时，微波加热可有效解除水锁效应。由此可见，微波具有较高的煤层气强化抽采潜力。为实现煤层气微波注热增产的工程应用，深入研究微波辐射加热下煤层气解吸运移机制，为微波加热开采煤层气提供理论基础与技术支持。

3 微波加热对瓦斯吸附解吸的影响研究

微波加热过程中，由于温度的提高，煤体瓦斯的吸附能力必然会被影响。一般来讲，矿物成分、挥发分、变质程度、温度、水分、压力、孔隙结构等因素都会影响到煤体的瓦斯吸附能力。是以温度定然能够直接或间接的影响煤体的瓦斯吸附能力。而很多学者也相继验证了温度对煤体瓦斯吸附能力的影响这一课题。既然煤体的气体吸附能力能被温度所影响，自然其气体的解吸能力也必然会被温度影响。

一般来说，温度越高，煤体的气体解吸量就越多，见图 2。

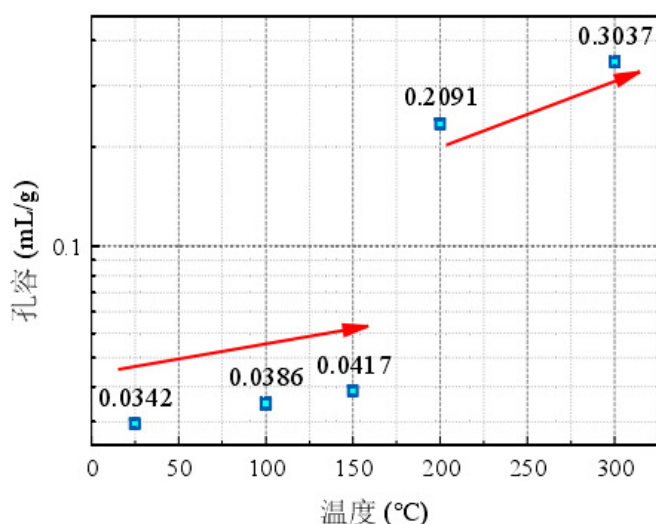


图 2 微波加热温度对孔容的影响

依图所示，微波加热温度同样对煤样的比表面积具有比较大的影响。通过图片可以看到，当微波加热温度低于 150℃时，和原始煤样相比，比表面积随孔

径的变化关系是一致的。换种方式来讲，如果微波加热温度不超过 150℃，煤样的比表面积与孔径的关系看上去简直是没有变化的。虽然经过了微波处理以后，这是煤样的孔隙连通性变差了，但是煤体孔隙空间也没发生什么本质变化。这也再度证明了当微波加热的温度低于 150℃时，只是因为煤基质受热膨胀挤压孔隙空间才引起的孔隙连通性变差。而当微波加热温度达到 200℃时，煤样比表面积随孔径的变化曲线开始发生变化。煤样在经过 200℃的高温处理后，其比表面积在所有孔径与原始煤样相比，均增大了。

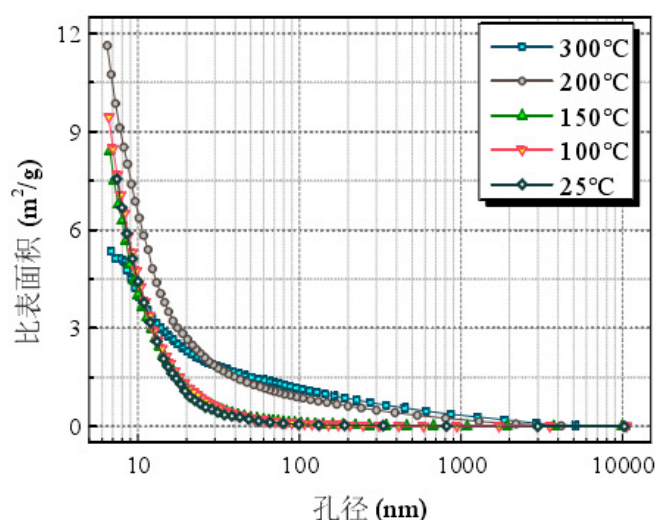


图 3 微波加热温度对煤样比表面积的影响

由此得知，在微波加热温度低于 200℃时，煤样的总比表面积是随着处理的温度提高而增大。而当微波加热温度高达 300℃时，比表面积随孔径的关系再次发生变化。与微波加热温度为 200℃的煤样相比，两者以孔径 30nm 分为两部分：孔径大于 30nm 时，经过 300℃处理的煤样的比表面积要大于经过 200℃处理的煤样；孔径小于 30nm 时，经过 300℃处理的煤样的比表面积要小于 200℃处理的煤样。这意味着，当微波加热温度达到 300℃时，小于 30nm 的孔隙大幅减少。这也导致煤样经过 300℃处理后总比表面积大幅减少。

4 微波注热增透煤层瓦斯抽采应用前景

微波注热辅助抽采已经在石油领域得到了较为普遍的研究和应用。早在 1985 年，利用电磁波加热储层辅助开采石油的这一构想，就已经被国外学者提出了。这种方法主要设想通过将电磁波导入石油储层，利用电磁加热提高重油的流动能力，从而实现石油的

原位开采。

1986年,国外专家学者依据这个构想在AsphalyRidge油田开展了相关现场试验。在3周内从 25m^3 的原油储层中回采了35%的石油,该构想的可行性首次被证实。在这以后,开展相关实验研究的研究者如雨后春笋。从这些研究工作中可以发现,微波可以利用钻井天线导入地层,进而径直对地层实施加热。而对于煤体而言,温度的升高必然催使瓦斯解吸,微波加热一是能够促进煤体破裂形成更多的渗流空间,二还能够加快瓦斯的解吸。从这两方面原因来说,微波加热能够有效促进煤层瓦斯抽采。而且,对于微波加热这种方法,其不必要借力其他媒介就可以实现煤层的原位加热。以是,微波注热增透煤层瓦斯抽采的这种瓦斯增透方法应该是极具潜力的。对于煤层瓦斯抽采,我们通常可以分为地面抽采和井下抽采。

5 微波注热增透煤层瓦斯抽采应用实例分析

华阳一矿81403综采工作面是12#层煤的主采工作面,15#层煤相对地质条件复杂,但该工作面赋存比较稳定,工作面走向长度945m,倾斜长度180m,煤层最大厚度为2.5m,最小厚度为1.6m,平均厚度为2.0m。该工作面为单斜构造,在掘进过程中发现有局部向、背斜构造,并有两处挠曲构造存在。工作面直接顶平均厚度为7m的石灰岩,较为坚硬,不易垮落,偶尔伴有黑色泥岩伪顶,最大厚度不足1m,距离下覆临近煤层15#煤最大距离为26.4m,最小距离为14.2m,平均距离为16.3m。伴随工作面的逐渐推进,采空区上覆岩层发生垮落,在采空区后部逐渐形成了一个压实的区域,在此区域内,应力逐渐趋于稳定状态,不同方向的裂隙也逐渐的闭合,良好的瓦斯流动通道也随之关闭,原有卸压效果逐渐消失,新的吸附形式生成,此区域的透气性相对较低。

针对其瓦斯赋存高,吸附能力强的特点,可以采取微波加热的方式对此区域进行增透,从而降低高浓瓦斯流动的范围。根据设计整个工作面在开采前都布置有预抽钻孔,根据顺层钻孔设计规范和本矿抽采经验,钻孔间距为3m。81403综采工作面进风巷顺层钻孔从2019年1月开始施工,共施工钻孔310个,实际钻孔施工长度34100m,工作面开采2019年7月,共预抽6个月,抽采时间内共抽放瓦斯167.4万 m^3 。回风巷道钻孔从2019年1月开始施工,到工作面开采共预抽了6个月,共施工钻孔312个,实际钻孔施工长度24960m,抽采时间内共抽采瓦斯90.1万 m^3 ,

瓦斯抽采率为61.8%,达到了抽采达标的规定(图4)。

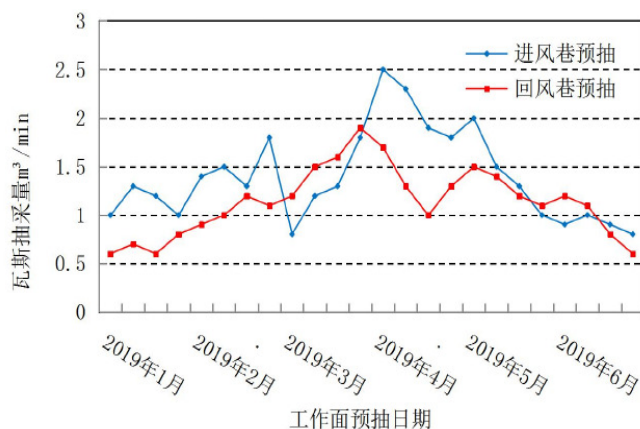


图4 工作面预抽钻孔抽采量变化曲线

参考文献:

- [1] 中国矿产资源报告(2020)[M]. 北京:地质出版社,2021.
- [2] 徐亮. 新中国成立70年煤炭建设发展综述[J]. 中国煤炭,2019,45(08):5-8,35.
- [3] 2020~2025年中国新能源行业全景调研与发展战略研究咨询报告[M]. 北京:中研普华新能源,2020.
- [4] 徐亮. 新时期煤炭建设行业转型发展战略研究[J]. 煤炭工程,2018(06):1-7.
- [5] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等. 我国煤与瓦斯共采:理论、技术与工程[J]. 煤炭学报,2014,39(08):1391-1397.
- [6] 刘见中,孙海涛,等. 雷毅煤矿区煤层气开发利用新技术现状及发展趋势[J]. 煤炭学报,2020,45(04):258-267.
- [7] 刘见中,沈春明,雷毅,等. 煤矿区煤层气与煤炭协调开发模式与评价方法[J]. 煤炭学报,2017(05):1221-1229.
- [8] Sun Hai-tao,Zhao Xu-sheng,Li Ri-hu,et al.E mission reduction technology and application research of surface borehole methane drainage in coal mining-influenced region[J].Environmental earthsciences,2017,76(09).
- [9] 洪溢都. 微波辐射下煤体的温升特性及孔隙结构改性增渗研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2017.
- [10] 王云刚. 受载煤体变形破裂微波辐射规律及其机理的基础研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2008.
- [11] 王晴东. 基于多物理场的褐煤微波热解制气特性及机理研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2016.