

# 煤储层孔-裂隙非均质性及其地质影响因素研究进展

刘大锰 李振涛 蔡益栋

(中国地质大学(北京)能源学院 北京 100083)

**摘要:** 煤储层孔-裂隙是煤层气吸附、运移和赋存的重要空间,其非均质性对煤层气勘探选区和合理开发具有重要意义。从煤储层孔-裂隙分类方法、定量表征技术、非均质性分布规律以及地质控制因素等方面进行分析,总结了国内外煤储层孔-裂隙非均质性及地质控制研究的最新进展。研究结果表明:孔-裂隙的分类方案具有多样性,但以尺度和机理分类为主,尺度与机理结合的分类方法深化了对煤层气赋存和运移机理的理解,孔-裂隙非均质性的表征技术呈现精细化、定量化和超微观化特征,结合其他学科综合分析,是国际上煤储层孔-裂隙研究方法的重要发展趋势;煤储层孔-裂隙非均质性主要受控于煤变质作用、沉积环境、构造演化、岩浆活动及其相互的叠合作用。综合多种常规与非常规表征技术对煤储层孔-裂隙非均质性进行系统化、精细化、超微观化的定量表征,并探寻煤储层孔-裂隙非均质性的地质成因规律,将是今后该研究领域的发展趋势。

**关键词:** 煤储层; 孔-裂隙; 非均质性; 地质控制

**中图分类号:** P618 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2015)02-0010-06

## Study progress on pore-crack heterogeneity and geological influence factors of coal reservoir

LIU Da-meng, LI Zhen-tao, CAI Yi-dong

(School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** The pore-crack of the coal reservoir was an important space of the coalbed methane adsorption, migration and enrichment and the heterogeneity would have important significances to the coalbed methane exploration zone selected and the rational development. From the coal reservoir pore-crack classification method, quantitative characterization technology, heterogeneity distribution law, geological control factor and other aspects, the paper analyzed and summarized the new progress of the coal reservoir pore-crack heterogeneity and geological control study at home and abroad. The study results showed that the pore-crack classification plan would have diversity, but mainly based on the dimension and mechanism classification, a dimension and mechanism combined classification method deepened the understanding of the coalbed methane storage and migration. The pore-crack heterogeneity characterization technology would have refined, quantitative and ultra-micro features and would be an important development tendency of the coal reservoir pore-crack study method in the world in combination with other subject comprehensive analysis. The coal reservoir pore-crack heterogeneity was mainly controlled by the coal metamorphism role, sedimentary environment, tectonic evolution, magmatic activity and other mutual superposition role. The synthesized multi normal and abnormal characterization technologies were applied to the systematic, refined and ultra micro quantitative characterization on the coal reservoir pore-crack heterogeneity. The geological formation law of the coal reservoir pore-crack heterogeneity was searched and would be a development tendency of the late study area.

**Key words:** coal reservoir; pore-crack; heterogeneity; geological control

## 0 引言

我国煤层气储层普遍具有高非均质性特点,宏

观上表现为较高的层间非均质性、平面非均质性和层内非均质性,微观上表现为复杂的孔-裂隙系统非均质性<sup>[1-4]</sup>,进而直接影响煤层含气性、渗透性、

收稿日期: 2014-10-18; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2015.02.003

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05034-001); 国家自然科学基金资助项目(U1262104)

作者简介: 刘大锰(1965—),男,湖南桃源人,教授,博士生导师,博士。Tel: 010-82322322, E-mail: dmliu@cugb.edu.cn

引用格式: 刘大锰,李振涛,蔡益栋.煤储层孔-裂隙非均质性及其地质影响因素研究进展[J].煤炭科学技术,2015,43(2):10-15.

LIU Da-meng, LI Zhen-tao, CAI Yi-dong. Study progress on pore-crack heterogeneity and geological influence factors of coal reservoir [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 10-15.

应力响应、渗流动力以及煤层气可采性<sup>[3,5-9]</sup>。近年来,国内外学者利用低温液氮/ $\text{CO}_2$ 吸附法<sup>[10-12]</sup>、压汞法<sup>[13-16]</sup>、小角度 X 射线散射法(SAXS)<sup>[7,17-18]</sup>、小角度中子散射法(SANS)<sup>[19-20]</sup>、显微光度计<sup>[21]</sup>、扫描电镜<sup>[22-23]</sup>、核磁共振<sup>[24-26]</sup>以及 CT 扫描技术<sup>[27]</sup>等对煤储层孔-裂隙系统的表面形貌、结构特征以及分形特征等进行研究,在煤储层孔-裂隙系统表征和非均质性评价等方面取得显著成果。鉴于此,笔者在总结国内外研究资料的基础上,探索了煤储层孔-裂隙系统的分类、定量表征方法、非均质性特征及其地质影响因素,进一步深入认识煤储层特征,为煤层气开发选区和合理开发方案制定等提供参考。

## 1 煤储层孔-裂隙系统分类

煤储层具有由孔隙、裂隙组成的“双重孔隙”结构,其中基质孔隙为煤层气赋存空间,宏观裂隙则是煤层气运移通道,而显微裂隙是沟通孔隙与宏观裂隙的桥梁<sup>[28-29]</sup>。国外学者基于不同的研究目的和方法,对煤储层孔-裂隙进行了系统分类。目前,霍多特<sup>[30]</sup>的十进制分类系统(微孔 $<10\text{ nm}$ ;小孔 $10\sim100\text{ nm}$ ;中孔 $100\sim1\,000\text{ nm}$ ;大孔 $>1\,000\text{ nm}$ )在国内应用较为广泛,而国际上则常用 IUPAC<sup>[31]</sup>的分类方案(微孔 $<2\text{ nm}$ ;中孔 $2\sim50\text{ nm}$ ;大孔 $>50\text{ nm}$ )。

国内学者对煤储层孔-裂隙系统也提出了各自的分类方案。傅雪海等<sup>[32]</sup>根据压汞测试数据,通过对比孔容与孔径结构的分形特征,将煤孔隙划分为扩散孔隙( $<65\text{ nm}$ )和渗透孔隙( $>65\text{ nm}$ )2类。桑树勋等<sup>[33]</sup>根据孔隙固气作用机理将煤孔隙分为吸收孔隙( $<2\text{ nm}$ )、吸附孔隙( $2\sim10\text{ nm}$ )、凝聚-吸附孔隙( $10\sim100\text{ nm}$ )和渗流孔隙( $>100\text{ nm}$ )。据宜文等<sup>[34]</sup>将不同类型构造煤纳米孔隙分为极微孔( $<2.5\text{ nm}$ )、亚微孔( $2.5\sim5\text{ nm}$ )、微孔( $5\sim15\text{ nm}$ )和过渡孔( $15\sim100\text{ nm}$ )。苏现波等<sup>[35]</sup>根据形态与组合关系将煤中裂隙分为17型,并分析了各类裂隙的具体特征。文献[4,12-15,21]基于对华北重点矿区煤储层孔-裂隙系统的研究,结合国内外学者的分类方法,提出了超微孔( $<2\text{ nm}$ )、微孔( $2\sim10\text{ nm}$ )、小孔( $10\sim100\text{ nm}$ )、中孔( $100\sim1\,000\text{ nm}$ )、大孔( $1\,000\sim10\,000\text{ nm}$ )和微裂隙( $>10\,000\text{ nm}$ )的分类方案,其中将孔径小于 $100\text{ nm}$ 的孔隙归为吸附孔隙,孔径大于 $100\text{ nm}$ 的孔隙归为渗流孔隙,而微裂隙是指宽度为微米级的裂隙,分为A型(宽度 $\geq 5\text{ }\mu\text{m}$ 且长度 $\geq 10\text{ mm}$ ,连续性好,延伸远)、B型(宽度 $\geq 5\text{ }\mu\text{m}$ 且长

度 $<10\text{ mm}$ ,类似树枝状裂隙的主干部分)、C型(宽度 $<5\text{ }\mu\text{m}$ 且长度 $\geq 300\text{ }\mu\text{m}$ ,较细,延伸远)和D型(宽度 $<5\text{ }\mu\text{m}$ 且长度 $<300\text{ }\mu\text{m}$ ,方向性和连通性较差)。总体上,煤储层孔-裂隙系统分类受到表征方法和研究目的影响,分类差异较大,还没形成一个普适性的分类方案。随着新技术在煤储层孔-裂隙系统表征中的综合应用,孔-裂隙系统分类将会逐渐完善(图1),对煤储层孔-裂隙的认识进一步深入,推动煤储层研究的发展。

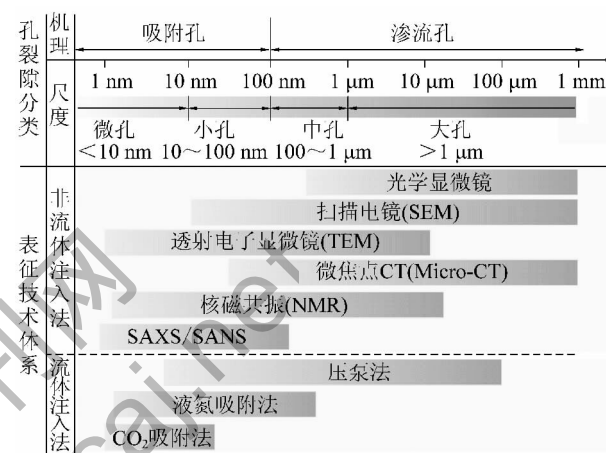


图1 煤储层孔-裂隙系统分类及表征技术体系

## 2 孔-裂隙系统表征及非均质性分布规律

与常规天然气储层相比,煤储层具有低孔、低渗、低压和高非均质性的“三低一高”的特点,使煤储层的评价和预测更加困难,导致煤层气排采和生产过程中存在渗透率变化较大、气产量不稳定等问题<sup>[4]</sup>。因此,煤储层孔-裂隙系统定量表征和非均质性研究越来越受到国内外学者的重视。

### 2.1 孔-裂隙系统定量表征方法

Clarkson 等<sup>[11]</sup>和姚艳斌等<sup>[10,13]</sup>采用低温氮吸附法和压汞法对煤储层孔隙结构进行了定量表征,前者探讨了比表面积、孔体积与吸附能力的关系,而后者则基于不同的数学模型,对吸附孔和渗流孔的分形特征进行了研究,并进一步分析其与煤层气吸附、储集和渗流的关系。Nakagawa 等<sup>[17]</sup>、Okolo 等<sup>[18]</sup>和 Sakurovs 等<sup>[20]</sup>采用 SAXS 和 SANS 技术分别对煤储层不同尺度孔隙的分形特征和孔径分布进行了定量表征。近年来,大量的无损检测手段开始应用于煤储层孔-裂隙表征,取得了较好的应用效果。Yao 等<sup>[36]</sup>采用 X-CT 技术对我国不同煤阶煤储层孔-裂隙非均质性进行了定量表征。胡志明

等<sup>[37]</sup>和杨正明等<sup>[38]</sup>首次将低场核磁共振技术和恒速压汞技术应用于低渗透油气储层研究。Yao等<sup>[4,27]</sup>利用常规压汞分析和恒速压汞分析结果验证了低场核磁共振技术在煤储层孔-裂隙研究中的适用性,通过对系列煤储层的核磁共振 $T_2$ 谱的分析,建立了煤储层孔-裂隙核磁共振定量表征新技术。由于受不同技术对不同孔径段孔-裂隙表征准确度的限制,多种表征技术结合使连续、准确表征整个孔-裂隙成为可能。姚艳斌等<sup>[4]</sup>在对华北重点矿区煤储层孔-裂隙研究过程中利用低温氮吸附法、压汞法和显微光度计法分别对煤储层吸附孔、渗流孔和微裂隙进行表征,实现了对煤储层孔-裂隙半定量-量化的综合描述。

总的来看,煤储层孔-裂隙定量表征技术研究进展迅速,主要体现在以下3个方面:①综合利用多种表征技术对煤储层孔-裂隙进行系统的精细化的定量评价;②结合其他学科知识,提高定量表征技术在煤储层孔-裂隙表征过程中的精确性;③建立更加精细化、量化、实用性更强的煤储层孔-裂隙高新表征技术。

## 2.2 孔-裂隙非均质性分布规律

煤储层孔-裂隙非均质性在一定程度上影响煤储层宏观非均质性,进而影响煤层气储集、渗流和产出等性能<sup>[4]</sup>。近年来,煤储层孔-裂隙非均质性研究较为活跃,主要体现在煤储层孔隙度、孔隙结构、孔径分布以及裂隙等在平面和纵向上的分布规律。张尚虎等<sup>[9]</sup>和许浩等<sup>[39]</sup>分别对沁水盆地高煤阶煤储层的孔隙度和孔隙结构进行了分析,前者发现不同的成煤环境形成不同的孔隙度和孔隙配置,进而导致煤储层孔隙系统纵向及横向上的差异发育,后者则提出4种不同的孔隙系统模型,并探讨了其对应的煤储层物性特征。文献[4,15]利用分形维数对华北重点煤层气区煤储层孔-裂隙非均质性进行研究,并进一步分析其随煤变质程度、物质组成和孔隙结构的变化规律。姚艳斌等<sup>[21]</sup>利用显微光度计对华北重点矿区煤储层的各类微裂隙进行了分类统计,结合煤岩学分析发现,煤岩组分在垂向和横向上的差异直接导致微裂隙发育的非均质性,从而影响煤储层渗透率的空间变化。范俊佳等<sup>[40]</sup>对淮北煤田和沁水盆地不同变质变形程度煤进行孔隙度和孔隙结构研究发现,不同变质变形煤储层孔隙度变化较大,其中低变质强变形的煤储层孔隙度较高,煤储层孔-裂隙非均质性与煤层气可

采性存在相关性。

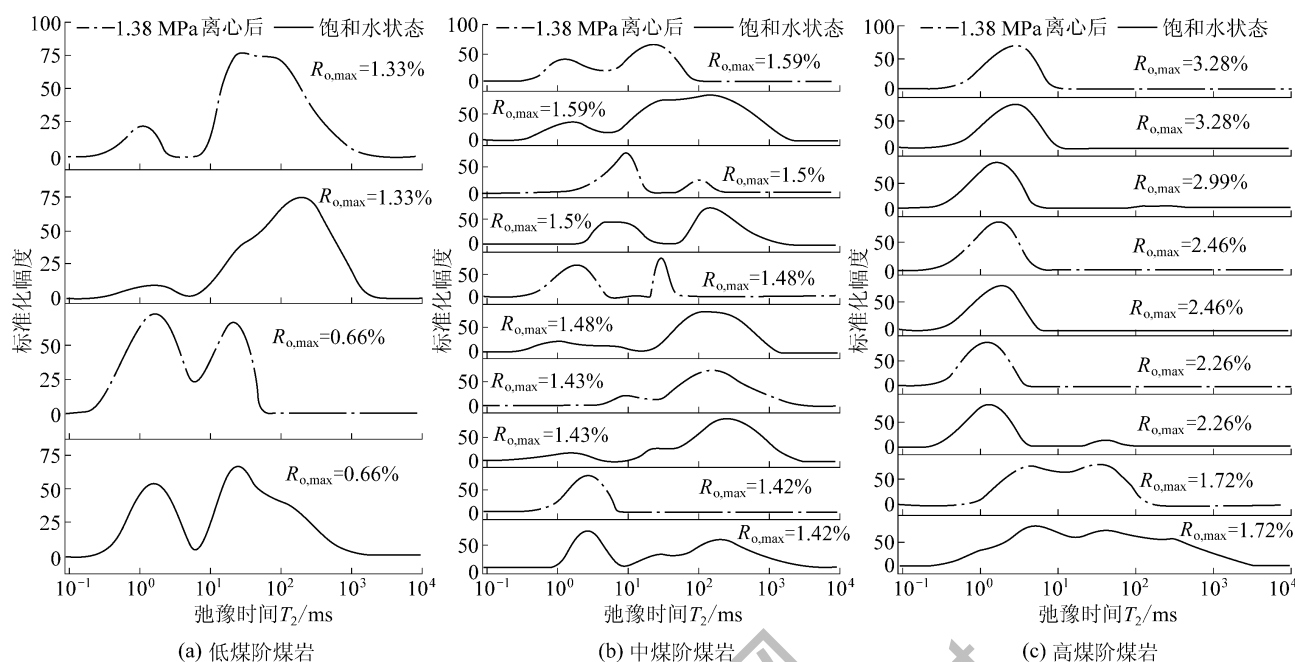
总体上,煤储层孔-裂隙非均质性分布规律研究主要集中在平面分布规律上,对纵向非均质性分布规律研究相对较少。因此,加强煤储层孔-裂隙非均质性纵向分布规律研究将是今后研究的重点。同时,探索煤储层孔-裂隙非均质性分布规律的动态变化对于预测煤层气可采性以及制定合理的开发方案具有重要作用。

## 3 孔-裂隙非均质性主控地质因素

煤储层非均质性受多种因素的控制,如沉积作用、成岩作用和构造演化等<sup>[41-42]</sup>。通过对我国重点含煤盆地煤储层孔-裂隙非均质性分析,将煤储层孔-裂隙非均质性主控地质因素概括为煤变质作用、沉积环境、构造演化以及岩浆活动等4个方面。

### 3.1 煤变质作用

煤变质作用类型和程度是煤储层孔-裂隙形成和发育极其重要的影响因素。我国不同煤阶煤的变质作用类型不同,中低阶煤大多以深成变质作用为主,而高阶煤则是在深成变质的基础上,经多期次和多热源变质作用叠加形成<sup>[3,16]</sup>。煤变质作用对煤储层孔隙度、孔隙结构及配置关系有重要影响。刘大锰等<sup>[43]</sup>和赵兴龙等<sup>[44]</sup>研究发现煤储层孔隙度随煤阶的增高呈现高-低-高的变化规律,并且热成因孔的存在是煤在高变质阶段孔隙度增高的主要原因。低变质阶段,煤的结构疏松,煤储层各孔径阶段孔隙分布均匀,原生大孔隙较为发育;到中变质阶段,煤储层孔径分布以微孔和大孔为主,而中孔比例较低;随着变质程度进一步增加,高阶煤储层微孔占大多数,而中、大孔占10%左右<sup>[45-46]</sup>。蔡益栋等<sup>[26]</sup>通过对不同煤阶煤的核磁共振 $T_2$ 谱研究发现:低阶煤多呈大中小孔三峰分布,中阶煤呈大中小孔三峰或大中孔双峰,高阶煤以小孔单峰分布为主(图2)。方爱民等<sup>[47]</sup>认为煤变质作用不仅能使煤中原生孔隙发生变化,而且还能通过改变煤储层的力学性质,间接地对构造裂隙的发育产生影响。含煤盆地煤阶分布规律在一定程度上控制着煤储层孔-裂隙发育及其非均质性特性,如鄂尔多斯盆地东缘煤储层孔隙度及孔隙结构的发育特征受由北向南、由盆缘向盆内煤阶变化的控制,形成了不同的孔-裂隙非均质性分布规律<sup>[48]</sup>。

图 2 不同煤阶煤岩饱和水及离心后  $T_2$  谱特征<sup>[26]</sup>

### 3.2 沉积环境

沉积环境通过对煤显微组成的控制进而影响煤储层孔-裂隙非均质性。针对我国复杂的成煤环境,通常选用镜质体反射率、C 含量(可燃基)、灰分含量、矿物含量、凝胶化指数(GI)、植物保存指数(TPI)、镜情比(V/I)和森林指数(W)等参数对煤形成环境进行分析<sup>[16]</sup>。杨起等<sup>[16]</sup>和胡宝林<sup>[49]</sup>将煤相类型分为干燥泥炭沼泽相、森林泥炭沼泽相、活水泥炭沼泽相和开阔水体相 4 类。聚煤盆地煤相的剧烈频繁变迁导致了煤储层孔-裂隙横向及纵向上差异发育,由此形成了孔-裂隙强烈的非均质性。例如我国沁水盆地孔隙结构、物性相对较好的煤大多形成于活水泥炭沼泽相和森林泥炭沼泽相,而孔隙结构一般、物性中等和最差的煤则大多形成于干燥泥炭沼泽相;北部阳泉-寿阳煤储层显微裂隙总体上要比中部和南部更为发育,但显微裂隙具有强烈的非均质性<sup>[9,39]</sup>。另外,沉积环境也影响煤储层灰分含量及矿物组成,从而影响煤储层孔-裂隙非均质性。对于华北地区煤储层来说,矿物充填作用可能对煤孔隙发育产生了重要影响,一些矿物通过矿化作用充填了部分孔隙,使得煤储层孔隙度降低<sup>[40]</sup>。姚艳斌等<sup>[4]</sup>基于分形维数与煤的灰分关系,指出孔结构的分形维数与灰分呈弱-中等的线性正相关,并且由于矿物充填煤的微孔,导致孔隙结构非均质性增强,分形维数增高。

### 3.3 构造演化

我国含煤盆地大多经历了复杂的构造演化史,煤储层结构受到不同程度的改造,构造变形导致煤的孔隙结构更为复杂<sup>[50-51]</sup>。在构造应力作用下,原生结构煤孔隙结构甚至化学成分发生明显变化,形成构造煤,不同构造变形条件下的构造煤孔-裂隙表现出明显的差异演化特征<sup>[34,52]</sup>。王向浩等<sup>[53]</sup>对构造煤和原生结构煤的孔隙结构分析发现,构造煤平均孔容具有微孔 $\approx$ 小孔 $>$ 中孔的分布特征,原生结构煤却呈中孔 $>$ 小孔 $\approx$ 微孔的规律,而且构造煤微孔-中孔范围内各孔径段孔容以及相应的孔比表面积均大于原生结构煤数十倍。据宜文等<sup>[34]</sup>对不同变形系列构造煤的纳米孔隙研究发现,随着构造变形增强,煤储层孔隙结构以微孔和亚微孔为主,并出现极微孔,连通性较差。张晓辉等<sup>[54]</sup>基于渭北韩城矿区不同类型构造煤低温氮吸附试验,采用分形 FHH 方法定量表征了构造变形对煤纳米孔隙结构的影响程度,发现构造变形越强,孔隙分形维数越大,孔隙结构越复杂,非均质性越强。构造应力场及内部应力分布差异会导致煤储层孔-裂隙出现明显的差异。构造变形引起煤储层孔隙结构变化,变形机制的不同导致孔隙结构产生差异,从而影响煤储层孔-裂隙非均质性演化<sup>[50-51]</sup>。

### 3.4 岩浆活动

岩浆活动对煤储层孔-裂隙非均质性的影响主要表现为:①随着岩浆侵入煤层,岩浆热使煤的物质

组成和结构发生变化,煤中大量的挥发分排出,在煤储层中留下大量热变质气孔,与正常热变质煤的气孔不同,该类气孔多成爆炸状,常成群、成排、定向分布,也有一些气孔呈蜂窝状分布,孔隙结构较复杂,方向性较差<sup>[3-4,55]</sup>;②岩浆热使煤阶增高,发生接触热变质,从而改变煤储层孔隙大小和孔径结构。由于岩浆侵入类型和煤储层距岩体的距离不同(图3)<sup>[4]</sup>,煤储层孔隙特征的变化也不同,如淮北煤田受岩浆侵入影响,当 $R_{o,max} < 2.1\%$ 时,侵入对煤孔隙的改造较弱,靠近岩体的煤储层孔隙发育较好,但线性变化规律不明显;当 $R_{o,max}$ 在 $2.1\% \sim 4.2\%$ 时,越靠近岩体,孔隙发育较好,线性变化规律明显;当 $R_{o,max} > 4.2\%$ 时,岩浆侵入会显著降低煤储层的孔隙<sup>[4]</sup>;③岩浆侵入引起的高温-冷却过程使煤储层形成大量的次生裂隙,但岩浆侵入对煤储层微裂隙发育的直接影响较小,主要受岩浆侵入引起的热液活动、构造及水文地质条件控制。

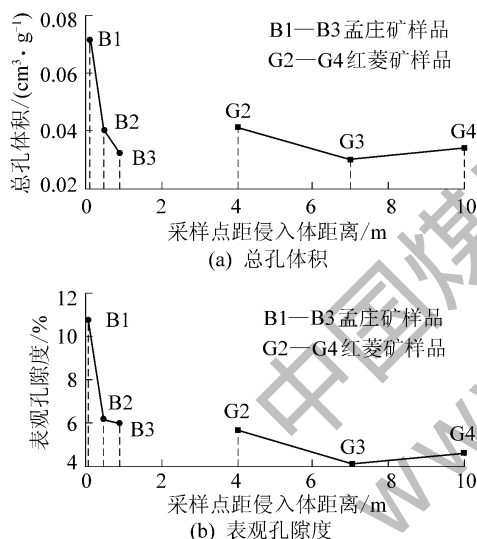


图3 岩浆侵入体距离与煤总孔体积和表观孔隙度的关系

## 4 结 语

近年来,国内外对煤储层孔-裂隙定量表征及非均质性研究较为重视,并取得了显著成果。基于不同的研究目的和表征方法,煤储层孔-裂隙分类方案差异较大,随着煤储层孔-裂隙表征更加准确和精细,其分类逐渐完善。综合利用多种表征技术对煤储层孔-裂隙进行系统的精细化的定量评价,结合其他学科知识,提高定量表征技术在煤储层孔-裂隙表征过程中的精确度以及建立更加精细化、量化、实用性的煤储层孔-裂隙高新表征技术

将成为今后该领域的主要发展趋势。煤储层孔-裂隙非均质性的地质控制因素主要包括煤变质作用、沉积环境、构造演化以及岩浆活动等4个方面,但孔-裂隙非均质性的变化则受多因素综合控制。我国煤储层具有高非均质性的特点,加强煤储层孔-裂隙非均质性研究,可进一步为煤层气勘探开发选区提供有力的技术支撑。

## 参考文献:

- [1] 刘大锰,李俊乾.我国煤层气分布赋存主控地质因素与富集模式[J].煤炭科学技术,2014,42(6):19-34.
- [2] YAO Yan-bin, LIU Da-meng, CAI Yi-dong, et al. Advanced characterization of pores and fractures in coals by nuclear magnetic resonance and X-ray computed tomography [J]. Science China Earth Science, 2010, 53: 854-862.
- [3] 杨起,汤达祯.华北煤变质作用对煤含气量和渗透率的影响[J].地球科学,2000,25(3):273-277.
- [4] 姚艳斌,刘大锰.煤储层精细定量表征与综合评价模型[M].北京:地质出版社,2013.
- [5] 刘大锰,姚艳斌,蔡益栋,等.煤层气储层地质与动态评价研究进展[J].煤炭科学技术,2010,38(11):10-16.
- [6] LIU Da-meng, YAO Yan-bin, TANG Da-zhen, et al. Coal reservoir characteristics and coalbed methane resource assessment in Huainan and Huaibei Coal Fields, Southern North China [J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 79: 97-112.
- [7] CAI Yi-dong, LIU Da-meng, PAN Zhe-jun, et al. Pore structure and its impact on  $\text{CH}_4$  adsorption capacity and flow capability of bituminous and subbituminous coals from northeast China [J]. Fuel, 2013, 103: 258-268.
- [8] 秦勇,袁亮,胡千庭,等.我国煤层气勘探与开发技术现状及发展方向[J].煤炭科学技术,2012,40(10):1-6.
- [9] 张尚虎,汤达祯,王明寿.沁水盆地煤储层孔隙差异发育主控因素[J].天然气工业,2005,25(1):37-40.
- [10] YAO Yan-bin, LIU Da-meng, TANG Da-zhen, et al. Fractal characterization of adsorption-pores of coals from North China: an investigation on  $\text{CH}_4$  adsorption capacity of coals [J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 73: 27-42.
- [11] Clarkson C R, Bustin R M. The effect of pore structure and gas pressure upon the transport properties of coal: a laboratory and modeling study. 1: Isotherms and pore volume distributions [J]. Fuel, 1999, 78: 1333-1344.
- [12] 姚艳斌,刘大锰.煤储层孔隙系统发育特征与煤层气可采性研究[J].煤炭科学技术,2006,34(3):64-68.
- [13] YAO Yan-bin, LIU Da-meng, TANG Da-zhen, et al. Fractal characterization of seepage-pores of coals from China: an investigation on permeability of coals [J]. Computers & Geosciences, 2009, 35: 1159-1166.
- [14] 刘大锰,姚艳斌,刘志华,等.华北安鹤煤田煤储层特征与煤层气有利区分布[J].现代地质,2008,22(5):787-193.

- [15] 姚艳斌,刘大锰,汤达祯,等.华北地区煤层气储集性能与产出性能研究[J].石油勘探与开发,2007,34(6):664-668.
- [16] 杨起,刘大锰,黄文辉,等.中国西北煤层气地质与资源综合评价[M].北京:地质出版社,2005.
- [17] Nakagawa T,Komaki I,Sakawa M *et al.* Small angle X-ray scattering study on change of fractal property of witbank coal with heat treatment [J].Fuel,2000,79:1341-1346.
- [18] Okolo G N,Eversen R C,Neomagus H W *et al.* Comparing the porosity and surface areas of coal as measured by gas adsorption,mercury intrusion and SAXS techniques [J].Fuel,2014 <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.046>.
- [19] Radlinski A P,Mastalerz M,Hinde A L *et al.* Application of SAXS and SANS in evaluation of porosity,pore size distribution and surface area of coal [J].International Journal of Coal Geology,2004,59:245-271.
- [20] Sakurovs R,He Li-lin,Melnichenko Y B *et al.* Pore size distribution and accessible pore size distribution in bituminous coals [J].International Journal of Coal Geology,2012,100:51-64.
- [21] 姚艳斌,刘大锰,汤达祯,等.沁水盆地煤储层微裂隙发育的煤岩学控制机理[J].中国矿业大学学报,2010,39(1):6-12.
- [22] 张素新,肖红艳.煤储层中微孔隙和微裂隙的扫描电镜研究[J].电子显微学报,2000,19(4):531-532.
- [23] 张慧,王晓刚,闫争荣,等.煤中显微裂隙的成因类型及其研究意义[J].岩石矿物学杂志,2002,21(3):278-284.
- [24] YAO Yan-bin,LIU Da-meng,CHE Yao *et al.* Petrophysical characterization of coals by low-field nuclear magnetic resonance (NMR) [J].Fuel,2010,89:1371-1380.
- [25] CAI Yi-dong,LIU Da-meng,PAN Zhe-jun *et al.* Petrophysical characterization of Chinese coal cores with heat treatment by nuclear magnetic resonance [J].Fuel,2013,108:292-302.
- [26] 蔡益栋,刘大锰,姚艳斌,等.温度控制下的煤层气储层物性动态演化研究[J].地学前缘,2014,21(1):240-248.
- [27] YAO Yan-bin,LIU Da-meng. Comparison of low-field nmr and mercury intrusion porosimetry in characterizing pore size distributions of coals [J].Fuel,2012,95:152-158.
- [28] Shi J Q,Durucan S. Gas storage and flow in coalbed reservoirs: implementation of a bidisperse pore model for gas diffusion in a coal matrix [J].SPE Reservoir Evaluation & Engineering,2005:175-189.
- [29] 傅雪海,秦勇,薛秀谦,等.煤储层孔-裂隙系统分形研究[J].中国矿业大学学报,2001,30(3):225-228.
- [30] 霍多特.煤与瓦斯突出[M].宋世钊,王佑安,译.北京:中国工业出版社,1996.
- [31] IUPAC. Manual of symbols and terminology [J].Pure and Applied Chemistry,1972,31:578.
- [32] 傅雪海,秦勇,张万红,等.基于煤层气运移的煤孔隙分形分类及自然分类研究[J].科学通报,2005,50(S1):51-55.
- [33] 桑树勋,朱焱铭,张时音,等.煤吸附气体的固气作用机理(1)[J].天然气工业,2005,25(1):13-15.
- [34] 据宜文,姜波,侯泉林,等.华北南部构造煤纳米级孔隙结构演化特征及作用机理[J].地质学报,2005,79(2):269-285.
- [35] 苏现波,冯艳丽,陈江峰.煤中裂隙的分类[J].煤田地质与勘探,2002,30(4):21-24.
- [36] YAO Yan-bin,LIU Da-meng,CHE Yao *et al.* Non-destructive characterization of coal samples from China using microfocus X-ray computed tomography [J].International Journal of Coal Geology,2009,80:113-123.
- [37] 胡志明,把智波,熊伟.低渗透油层微观孔隙结构分析[J].大庆石油学院学报,2006,30(3):51-53.
- [38] 杨正明,张英芝,郝明强,等.低渗透油田储层综合评价方法[J].石油学报,2006,27(2):64-67.
- [39] 许浩,张尚虎,冷雪,等.沁水盆地煤储层孔隙系统模型与物性分析[J].科学通报,2005,10(S1):45-50.
- [40] 范俊佳,据宜文,侯泉林,等.不同变质变形煤储层孔隙特征与煤层气可采性[J].地学前缘,2010,17(5):325-335.
- [41] 秦勇,汤达祯,刘大锰,等.煤储层开发动态地质评价理论与技术进展[J].煤炭科学技术,2014,42(1):80-88.
- [42] 李梦溪,李仰民,谷文彬,等.沁水盆地煤储层非均质性控制因素研究[J].内蒙古石油化工,2009(16):17-20.
- [43] 刘大锰,姚艳斌,蔡益栋,等.华北石炭-二叠系煤的孔渗特征及主控因素[J].现代地质,2010,24(6):1198-1203.
- [44] 赵兴龙,汤达祯,许浩,等.煤变质作用对煤储层孔隙系统发育的影响[J].煤炭学报,2010,35(9):1506-1511.
- [45] 陈鹏.中国煤炭性质、分类和利用[M].北京:化学工业出版社,2001.
- [46] 汪雷,汤达祯,许浩,等.基于液氮吸附实验探讨煤变质作用对煤微孔的影响[J].煤炭科学技术,2014,42(S0):256-260.
- [47] 方爱民,侯泉林,雷家锦,等.煤变质作用对煤层气赋存和富集的控制:以沁水盆地为例[J].高校地质学报,2003,9(3):378-384.
- [48] 张松航.鄂尔多斯盆地东缘煤层气储层物性研究[D].北京:中国地质大学(北京),2008.
- [49] 胡宝林.鄂尔多斯盆地煤层气储层特征及综合评价[D].北京:中国地质大学(北京),2003.
- [50] 屈争辉,姜波,汪吉林,等.构造煤结构演化及其应力-应变环境[J].高校地质学报,2012,18(3):453-459.
- [51] JU Yi-wen,JIANG Bo,HOU Quan-lin *et al.* Relationship between nano-scale deformation of coal structure and metamorphic-deformed environments [J].Chinese Science Bulletin,2005,50(16):1784-1795.
- [52] HOU Quan-lin,LI Hui-jun,FAN Jun-jia *et al.* Structure and coalbed methane occurrence in tectonically deformed coals [J].Science China Earth Science,2012,55:1755-1763.
- [53] 王向浩,王延斌,高莎莎,等.构造煤与原生结构煤的孔隙结构及吸附性差异[J].高校地质学报,2012,18(3):528-532.
- [54] 张晓辉,要惠芳,李伟,等.韩城矿区构造煤纳米级孔隙结构的分形特征[J].煤田地质与勘探,2014,42(5):4-8.
- [55] 蒋静宇,程远平.淮北矿区岩浆岩侵入对煤储层微孔隙特征的影响[J].煤炭学报,2012,37(4):634-640.