

论不同构造煤类型煤层气开发

李辛子¹⁾, 王赛英¹⁾, 吴群²⁾

1) 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京, 100083;

2) 中国石化华东分公司, 南京, 210036

内容提要:我国构造煤类型多,分布广泛,蕴含的煤层气资源量大,探明率低,开发难度大。本文在野外和实验室综合研究基础上,提出适合于煤层气资源开发的“描述+成因”的构造煤分类方案,按照固结类型将构造煤划分为未固结构造煤、固结构造煤两大类,及其对应的碎散煤、脆性煤和韧性煤3个系列,各种类型的构造煤依照形状或特殊结构构造进一步加以描述区分。不同类型的构造煤组合具有较明显的横向和垂向含气分带性特征,形成典型的构造非均质性煤层气藏。我国低煤阶构造煤和中高煤阶构造煤的发育情况与区域大地构造发生和演变具有相关性。构造煤煤层气开发更加强调系统论思想和配套技术集成开发,根据构造煤发育强度及赋存状态的差异,开发对象包括煤层、顶底板和夹矸(薄夹层)等含煤岩系;根据不同的开发对象,应有针对性地选用包括增温驱气等系统配套技术进行勘探开发。

关键词:构造煤;煤层气;非均质性;开发;系统分析

通常依据煤体结构将煤岩划分为原生结构煤和非原生结构煤,后者主要指构造煤。这种划分类似于构造地质学意义上原岩和构造岩的分类。本文将构造煤定义为因构造作用改变原生煤体结构及物性特征,并使煤中的水、气等流体赋存行为发生相应改变的煤的构造岩类产物。目前我国煤层气勘探开发主要分布在构造作用程度较强的2000m以浅的沉积盆地边缘,或推滑覆构造带上,煤层在这些地质部位易发生构造变形变质,从而普遍形成不同程度的构造煤。深入研究不同类型的构造煤及其含气性和渗透性分布特征,对指导煤层气的勘探开发具有理论和实际意义。

1 构造煤类型

通过煤矿井调研和野外观察发现,构造环境和构造作用强弱不同的构造煤变形变质程度有较大差异,对于总体呈弱能干的构造煤而言一般有两种表现,其一为未固结的粉状煤,手捏可碎,另一类为固结的块状煤,致密坚实,岩石物理强度已非手捏可以测试。研究表明,影响煤体结构变化的因素包括煤岩组分、煤化程度等内生因素,以及构造变形变质发

生的温度、压力、流体及时间等外生因素。这些因素综合作用效果复杂,需要进一步分析研究(李康和钟大赉,1992;章梦涛等,1995;张玉贵等,2005;张子敏,2009)。煤在这些外生因素作用下,易于发生变形变质响应,不同煤岩组分的响应程度不一致,从而形成多种类型的构造煤。根据现代构造地质学理论,上述野外观察的构造煤仅是未固结的和固结的两类不同构造岩的表现实例,至于适合煤层气勘探开发的完整的构造煤系列的分类则需要系统的研究。

1.1 构造煤成因分类

本文根据煤的特殊物理化学性质(张玉贵等,2005;杨金和等,2007;谢克昌,2002;赵跃民,2004),在野外观察和实验室研究基础上,参考传统构造煤使用习惯(曹运兴等,1996;韩德馨等,1996;侯泉林和张子敏,1990;姜波和琚宜文,2004;琚宜文等,2005;王恩营等,2009)和构造岩命名方案(刘德良等,2009;朱志澄等,2008),提出按照构造煤固结类型划分为未固结构造煤和固结构造煤两大类的方案(表1),以适合于煤层气勘探开发。

(1)未固结构造煤表现为碎散煤系列,根据碎

注:本文为中国石油化工股份有限公司科技开发部科研项目“煤层气国内外对比研究及数据库建设”的成果。

收稿日期:2012-10-09;改回日期:2013-02-06;责任编辑:黄敏。

作者简介:李辛子,男,1972年生。2004年获北京大学构造地质学硕士学位。高级工程师,主要从事煤层气选区与勘探部署研究。通讯地址:100083,北京市海淀区学院路31号;Email:lixinzi@pku.org.cn。

片或碎粒粒径划分为碎块煤、碎片煤、碎粉煤、软泥煤。

(2) 固结构造煤按照是否发生重胶结等作用划分为脆性煤(碎裂煤)和韧性煤两个系列,依照基质比例进一步细分命名;其中,脆性煤(碎裂煤)包括初碎裂煤、碎裂煤、碎粒煤、超碎粒煤,韧性煤系列主要为胶结煤。

1.2 “描述+成因”分类

在上述命名基础上,辅以碎片和碎粒的形状或特征结构构造进一步加以描述。可用以描述的形状包括鳞片状、透镜状、角砾状、(不规则)粒状、团块状、蜂窝状、网络状等,特征结构构造包括揉皱状、叶理状、凝胶状、流线状、眼球状等。

例如,可以将构造煤命名为透镜状碎块煤、鳞片状碎块煤、鳞片状碎裂煤、凝胶状超碎裂煤,眼球状准塑性胶结煤等。

2 构造煤煤层气分布特征

构造煤发育区是煤层气吸附—解吸行为最活跃和煤层气藏平衡状态最易被破坏的部位之一,每次构造运动均形成一幅煤层气吸附—解吸和扩散动力学图景。构造煤发育程度不同,导致空间上构造煤组合不同,其含气性和渗透性的变化也有差别,因此,在地质单元体内形成了因不同构造煤类型而区分的煤层气分布的分带性(Cao Yunxing, et al., 2003; Hou Quanlin, et al., 2012; Li Huoyin, et al., 2003)。我国含煤地层大多经历过多期次多动力源的构造作用,构造煤含气动力学具有叠加改造的复杂非线性特征。

2.1 构造煤发育程度

根据构造煤发育程度的初步研究表明:①弱作用构造煤(包括碎块煤、初碎裂煤等),宏观和微观观察均可发现大体保留原生煤体结构特征,裂隙系

统相对发育,渗透性能有所改善,如果封盖条件好,气体则较易富集成藏,如果封盖条件变差,则易于逸散降低含气性。②强构造作用环境的温度较高、压力较大,流体和时间作用关系复杂,一般形成软泥煤、超碎粒煤和胶结煤等。这类构造煤基质颗粒小,比表面大,吸附气体容量大,但原生孔隙—裂隙双重结构被破坏,其中,未固结煤发育非常密集的充填了基质的次生孔隙—裂隙,固结煤新生了紧密压实且断续不相连通的面理,均导致渗透率甚低,煤层气难以开发。③中等作用构造煤包括碎片煤、碎粉煤、碎裂煤、碎粒煤等,其含气性和渗透性变化介于强、弱构造煤之间。

值得注意的是,煤体结构的变化将引起含气性的变化,含气性的变化亦在一定程度上作用于煤体结构的变化。煤岩体吸附甲烷产生膨胀变形,强度变低,解吸甲烷产生收缩变形。这主要原因是吸附甲烷使煤岩表面能降低和部分甲烷气体分子对煤岩微裂隙有楔开作用,从而使煤岩微裂隙扩张的结果,并且这种作用随甲烷气体压力增高和吸附性增强而增大,最终导致构造煤裂隙密集发育和具有较高含气量。甲烷解吸过程基本是吸附过程的逆过程,该过程伴随的收缩变形并不按照吸附过程的原轨迹返回,说明有一部分的不可逆变形存在(何学秋等, 2003)。

2.2 煤层气藏非均质性

构造煤是煤储层强烈非均质性的表现(李辛子等, 2009)。在一个构造带上,不同构造煤类型的组合出现,其含气性和渗透性表现在空间上具有明显的分带性,在不同构造带上构造煤煤层气藏的分带性更为明显。

在一个简单的碎裂岩系列的顺煤层滑动(断层或褶皱)发育模型描述中,上、下部位为原生结构煤,中间夹着构造煤,原生结构煤和构造煤具有不同的含气性、渗透率,而构造煤内部组合亦有差别,从初碎裂煤到碎裂煤、碎粒煤,破碎越严重,裂隙越密集,颗粒越细小,甲烷吸附容量越大,渗透性越差。在切煤层断层模型中,煤层气藏成了开放系统,如果断层封闭性能不良,则断层附近的含气量显著降低,加剧气藏非均质性变化。

2.3 我国构造煤煤层气藏分布

我国不同煤阶的煤层气藏具有较明显的时代和地域特征,概括来说,这与构造煤的发育程度有一定的对应关系。①低煤阶构造煤煤层气藏主要分布于准噶尔盆地南缘、鄂尔多斯盆地西缘等前陆盆地,这

表1 构造煤分类简表

Table 1 Scheme for subdivision of tectonic coal systematic

未固结构造煤		固结构造煤			
固结程度		碎散煤系列	脆性煤系列	韧性煤系列	基质比例 (%)
碎片或碎粒 粒径(mm)	>10	碎块煤	初碎裂煤	胶结煤	0~10
	2~10	碎片煤	碎裂煤		10~50
	2~0.1	碎粉煤	碎粒煤		50~90
	<0.1	软泥煤	超碎粒煤		90~100

些煤层主要在侏罗纪、白垩纪、第三纪形成,经历构造期次较少,活动较弱,构造煤发育程度和煤层气藏非均质性相对弱些,胶结煤、超碎裂煤等强构造煤较少见,保存条件对气藏的形成显得较为重要。②中高煤阶构造煤煤层气藏主要分布于华南推滑覆带、南华北、滇东黔西、川南黔北等含气盆地群中,这些煤层主要在石炭纪、二叠纪、三叠纪形成,经历构造期次多,活动较强,构造煤发育程度和煤层气藏非均质性强,是煤层气勘探的难点,同时,一旦开发技术突破,又是重要资源潜力区。

不同煤化作用的煤对构造应力响应的研究表明(曹代勇等,2006;曹运兴等,1996;张玉贵等,2005),构造应力可以提高煤演化的速率,被视为煤化作用的“催化剂”。构造煤是在构造作用下而发生裂解、聚合、异构、芳构、分子重排等多种化学—物理反应的过程,有机质向两个方向变化,一方面聚合形成更大的高芳构化的大分子结构,另一方面则形成低分子化合物和气态烃,有利于促进构造煤煤层气的形成与富集。所以,在区域上低煤阶构造煤发育的不同部位,由于构造分异作用有可能在局部出现中高煤阶构造煤及其相应的煤层气富集区。

3 讨论

我国构造煤发育区煤层气的开发实践和煤矿区瓦斯防治经验表明,构造煤煤层气藏开发的特点是强调系统论思想和配套技术集成开发,包括煤层气开发对象不仅关注于煤层,还应研究含煤岩系的顶底板和夹矸,开发技术针对不同系列的构造煤组合应综合优选和研发不同的技术。构造煤煤层气开发的难点是技术集成度高,经济成本和风险挑战也高。

3.1 糜棱煤辨析

文献中糜棱煤的概念出现过两种含义:第一种是将糜棱煤描述为“煤极易捻碎成粉末或粉尘,主要粒径在1mm以下”(焦作矿业学院瓦斯地质研究所)(韩德馨,1996;据宜文等,2005);第二种描述是“致密坚实、发育S—C组构(候泉林和张子敏,1990;王恩营等,2009)、重胶结、波状消光或新矿物形成(韩德馨,1996)”。

不难发现,为了不混淆概念,本文在划分方案中没有使用传统糜棱煤概念,而提出了新的命名方案。①建议使用碎粉煤和软泥煤代替第一种糜棱煤的描述,并将之归列于未固结构造煤中的碎散煤系列。碎粉煤、软泥煤与煤矿生产中使用的粉煤、软煤等描述相近,易于接受。②对于第二种糜棱煤的描述发

现,本文综合野外和显微镜下研究成果,提出使用胶结煤来描述固结构造煤中的韧性煤系列,其主要特征是致密固结,有重胶结作用,这也符合当代国际上将糜棱岩作为坚硬构造岩的概念。

进一步的研究表明,由于煤层处于浅地壳构造层次,与中等地壳层次的地质环境相比,其温度低、压力小、含水量偏高,所以,一般成煤地质条件下极少见高基质比例中普遍重胶结的韧性煤系列,故除了特殊要求,通常不做细分,可以冠以准塑性胶结煤以示区别,或者辅以描述性的形状和结构构造命名为宜。

作为固结的煤岩,除了胶结煤外,还有超碎粒煤等。它们的主要区别是:胶结煤是韧性剪切作用的产物,具有固态流变、S—C组构、眼球构造、基质中发生重胶结作用等特征;超碎裂煤是脆性构造作用的产物,基质没有或很少有重胶结现象。但两者亦有联系,如刘俊来在沁水盆地高温高压试验变形煤的研究表明(刘俊来等,2005),煤岩在温度200~300℃,围压200~300MPa条件下,由脆性向韧性的转变,伴随着煤岩流变机制变化,并形成相应的变形构造组合。在韧性流动条件下,煤岩的变形则以镜质体或惰质体的塑性流动为主,发育波状消光、揉流褶皱、细粒化等变形构造与微构造型式。随着温度和压力的增加,惰质体组分与温压条件的共同变化制约着煤岩样品变形机制规律的变化。晶质塑性变形主要发育于惰质体组分内,而镜质体组分则仅仅保存了微弱的(或无)晶质塑性变形作用的迹象。温度和压力的变化还控制着惰质体组分变形机制的演变。

3.2 煤层气开发对象

3.2.1 原生结构煤—弱构造煤

在原生结构煤、弱构造煤(包括初碎裂煤、碎裂煤等)中,煤层是储层开发的对象,适宜使用常规开发技术。

3.2.2 未固结构造煤

对于未固结煤(包括碎片煤、碎粉煤、软泥煤等),由于煤粉、煤泥堵塞孔隙、裂缝以及开采仪器设备,造成采气效率低下,事故频发,因此,该类构造煤储层不适宜直接开发,需要重新考虑开发对象。主要思路是将煤层、顶底板、夹矸等含煤岩系视作一个系统,综合考虑。

(1)分析各个可能开发的目标层厚度。如果未固结煤厚度小,其上下方原生结构煤及弱构造煤的厚度大,则应避免未固结构造煤,直接开发其上下方

的原生结构煤。

(2)如果未固结煤厚度大,破碎强,其顶底板又是粉砂岩、非含水层的碳酸盐岩、页岩等岩层,则可以将顶底板作为开发对象,压裂顶底板间接开发煤层气资源。这种开发方式的机理是煤层气通过压降解吸,沿压裂裂缝经顶底板通往井筒,由于没有对构造煤直接压裂,所以在一定程度上解决了细小煤粒和基质堵塞的问题。另外,这种方法在煤矿生产上已被过去的高位钻孔抽放瓦斯、解放层开采治理瓦斯、采动区地面钻孔抽放瓦斯、裸眼洞穴法完井等瓦斯治理方法直接或间接证实(陈美英和王庆伟,2009;苏现波等,1998)。

(3)如果夹矸岩性为钙质、硅质、粉砂质岩、碳酸盐岩等,有一定厚度和延伸规模(薄夹层),则可以研究以夹矸为对象进行开发的可行性。因为煤层生成的气体除了自储及经顶底板、断层等排泄外,还可以储集在夹矸中。研究表明,具有孔隙相对发育的夹矸往往成为游离态煤层气的富集部位,另外,在未固结的构造煤中,夹矸因其力学强度相对较高而成为较稳定的结构体,如果对夹矸施工采气,它还可以起到过滤筛的作用,解决部分煤粒和基质堵塞的问题。所以,夹矸在构造煤煤层气开发中是不能忽视的对象,宜通过地震、钻探等手段查明夹矸岩性、厚度、含气性、孔隙度、渗透率等分布特征,为开发论证提供基础资料。

以顶底板和夹矸为开发对象的煤层气开发思路也符合多煤层多资源合采开发的方法,但是这种开发工艺涉及不同力学性质载体和薄层问题,施工和控制难度大,技术复杂,需要在详细的地质地球物理研究基础上,利用先进的计算机建模技术和遥感导向技术精确控制,开展精细的先导性工程工艺研究,精心设计和施工才能取得成功。这对经济高效开发煤层气的理念带来挑战。

3.2.3 固结构造煤

由于固结煤,尤其是强构造固结煤(包括碎粒煤、超碎粒煤、胶结煤等)的煤岩体具有一定的刚性力学强度,为了解决低渗透率问题,在加强储层保护的同时,扩大井筒与煤接触的有效采气空间,宜选用欠平衡钻进多分支井技术等,并直接对构造煤层实施分段精细压裂造缝,增加砂粒等支撑剂。

3.3 配套技术集成开发

除了上述提及的固结构造煤选用的配套技术实例外,我们尝试提出一种增温驱气法的开发概念模型来进一步说明配套技术集成开发在构造煤煤层气

开发中的重要意义。其原理是在增温条件下煤层气容易从煤层中解吸出来(曾社教等,2009),从而可以考虑利用煤层气开发技术与煤炭增温解吸效应相结合,对煤层实施增温驱气开发。

我们的思路是在小范围内通过增温井有控制地在煤层中燃烧气化煤,使其生成足够的热量和以 CO_2 为主的气体,这些热量部分通过辐射、传导使煤层增温,另外,燃烧生成的气体也是热量的载体,通过气体扩散,使热量传送到远处煤层,增加煤层气的增温解吸范围;同时,由于燃烧的气体成分以 CO_2 为主,根据煤层吸附 CO_2 强于 CH_4 的理论,尚可通过气体置换反应置换出煤层中吸附能力较弱的 CH_4 ,从而提高煤层气开采效率。从煤层燃烧形成的热洞穴考虑,因热胀冷缩形成的裂缝和洞穴形成的应力场改变,将引起一定范围的渗透率变化,最终有利于提高煤层气产能。

这种概念模型的优点是集成多种技术以煤增温制气进而驱气,在构造煤煤层气开发中是一种新的技术思路,具有一定的研发前景。但是,存在的主要问题是控制煤炭燃烧面积和生成的气体主要为 CO_2 ,而非有毒害的 CO 、 NO_x 、 H_2S 等气体。解决这个问题,需要研究增温井的煤岩煤质等地质选址条件,避开高含硫、含水煤层等风险;另外需要探索研究增温井地下破碎煤粒及控气燃烧技术瓶颈。这项开发技术,由于技术集成度高,风险亦高,初试阶段应慎用。

4 结论

(1)本文提出新的“描述+成因”构造煤命名方案,将构造煤分成未固结构造煤和固结构造煤,其中,未固结构造煤根据碎片或碎粒大小的固结程度划分成碎散煤系列,固结构造煤划分为脆性煤系列和韧性煤系列,并依照基质含量进一步细分;在此基础上,3个系列的构造煤尚可辅以形状和结构构造描述命名。在讨论野外和实验室成果的基础上,通过韧性煤系列研究提出了胶结煤的概念。

(2)不同的构造煤组合加剧了煤层气分布的非均质性,使得构造煤发育区煤层气藏结构和变化最为复杂。我国低煤阶构造煤和中高煤阶构造煤的发育情况与区域大地构造发生和演变具有相关性。

(3)加强含煤岩系综合研究,煤层、顶底板、夹矸(薄夹层)均有可能成为煤层气开发的目标对象。不同类型的构造煤煤层气开发技术不同,遵循由易到难的规律,尽量选用适宜的配套开发技术,另外,

构造煤层气的开发应重视新理论和新技术的创新研究。

参 考 文 献 / References

- 曹代勇,李小明,张守仁. 2006. 构造应力对煤化作用的影响——应力降解机制与应力缩聚机制. 中国科学(D辑), (1):59~68.
- 曹运兴,张玉贵,李凯琦,侯泉林,郭德勇. 1996. 构造煤的动力变质作用及其演化规律. 煤田地质与勘探, (4):15~18.
- 陈美英,王庆伟. 2009. 煤层气地面开发非常规模型设计及应用. 中国煤层气, (4):28~33.
- 韩德馨. 1996. 中国煤岩学. 徐州:中国矿业大学出版社,83~86.
- 何学秋,王恩元,聂百胜,刘明举,张力. 2003. 煤岩流变电磁动力学. 北京:科学出版社,28~72.
- 侯泉林,张子敏. 1990. 关于“糜棱煤”概念之探讨. 焦作矿业学院学报, (2):21~26.
- 姜波,据宜文. 2004. 构造煤结构及其储层物性特征. 天然气工业, (5):27~29.
- 据宜文,姜波,王桂樑,侯泉林. 2005. 构造煤结构及储层物性. 徐州:中国矿业大学出版社,22~40.
- 李康,钟大赟. 1992. 煤岩的显微构造特征及其与瓦斯突出的关系——以南桐鱼田堡煤矿为例. 地质学报, (2):148~157.
- 李辛子,颜保亮,关达,陈纯芳,王立志. 2009. 煤层气非均质分布特征及富集规律探讨. 见:傅雪海,秦勇,等. 主编. 煤层气储层与开发工程研究进展(上). 徐州:中国矿业大学出版社,338~348.
- 刘德良,沈修志,陈江峰,叶尚夫. 2009. 地球与类地行星构造地质学. 合肥:中国科学技术大学出版社,62~95.
- 刘俊来,杨光,马瑞. 2005. 高温高压实验变形煤流动的宏观与微观

- 力学表现. 科学通报, (S1):56~63.
- 苏现波,汤友谊,盛建海. 1998. 河南省煤层气开发工艺初探. 焦作工学院学报, (6):406~408.
- 王恩营,刘明举,魏建平. 2009. 构造煤成因—结构—构造分类新方案. 煤炭学报, (5):656~660.
- 谢克昌. 2002. 煤的结构与反应性. 北京:科学出版社,1~92.
- 杨金和,陈文敏,段云龙. 2004. 煤炭化验手册. 北京:煤炭工业出版社,759~779.
- 曾社教,马东民,王鹏刚. 2009. 温度变化对煤层气解吸效果的影响. 西安科技大学学报, (4):449~453.
- 章梦涛,潘一山,梁冰,王来贵. 1995. 煤岩流体力学. 北京:科学出版社,138~166.
- 张玉贵,张子敏,谢克昌. 2005. 煤演化过程中力化学作用与构造煤结构. 河南理工大学学报(自然科学版), (2):95~99.
- 张子敏. 2009. 瓦斯地质学. 徐州:中国矿业大学出版社,167~239.
- 赵跃民. 2004. 煤炭资源综合利用手册. 北京:科学出版社,17~23.
- 朱志澄,曾佐勋,樊光明. 2008. 构造地质学(第三版). 武汉:中国地质大学出版社,210~226.
- Cao Yunxing, Davis A, Liu Xianwei, Liu Ruixuin, Zhang Yugui. 2003. The influence of tectonic deformation on some geochemical properties of coals: A possible indicator of outburst potential. Int. J. Coal Geol., 53: 69~79.
- Hou Quanlin, Li Huijun, Fan Junjia, Ju Yiwen, Wang Tiankai, Li Xiaoshi, Wu Yudong. 2012. Structure and coalbed methane occurrence in tectonically deformed coals. Sci. China (Earth Sci.), 55(11): 1755~1763.
- Li Huoyin, Ogawa Yujiro, Shimada Sohei. 2003. Mechanism of methane flow through sheared coals and its role on methane recovery. Fuel, 82: 1271~1279.

Scheme for Subdivision of Tectonic Coal Systematics: Implications for Coalbed Methane Development

LI Xinzi¹⁾, WANG Saiying¹⁾, WU Qun²⁾

1) *Petroleum E & P Research Institute, SINOPEC, Beijing, 100083*; 2) *East Branch, SINOPEC, Nanjing, 210036*

Abstract: The geotectonic framework of coal has become highly complicated owing to superimposition and reworking by multiperiodic tectonism in China. On the basis of a series of characteristics, such as geotectonics, coal geology, coalbed methane geology, rheology, a new classification of tectonic coal has been established. There are two evidently types of tectonic coal systematics, i. e. unconsolidated coal rock and consolidated coal rock, the former named dispersed coal series, the latter may be subdivided into cataclastic coal series and mylonitic coal series. Furthermore, the series may be subdivided into several subtypes, according to the size of coal fragment and particle diameter and the content of matrix. Meanwhile, an examination of CBM from the inside outward tectonic coal shows that equilibrium of adsorption and desorption of CBM has been broken by tectonic force during crucial tectonic periods, thus tectonic coal petrotectonic assemblages are characterized by great intense heterogeneity CBM reservoir. Therefore new methods such as refracturing, multilateral well, heating drive gas technology(UCG), and roof and locked middlings stimulating have been proposed so as to deal with the variety and complicated geological problems of the CBM development.

Key words: tectonic coal systematic; coalbed methane; heterogeneity; development; system analysis