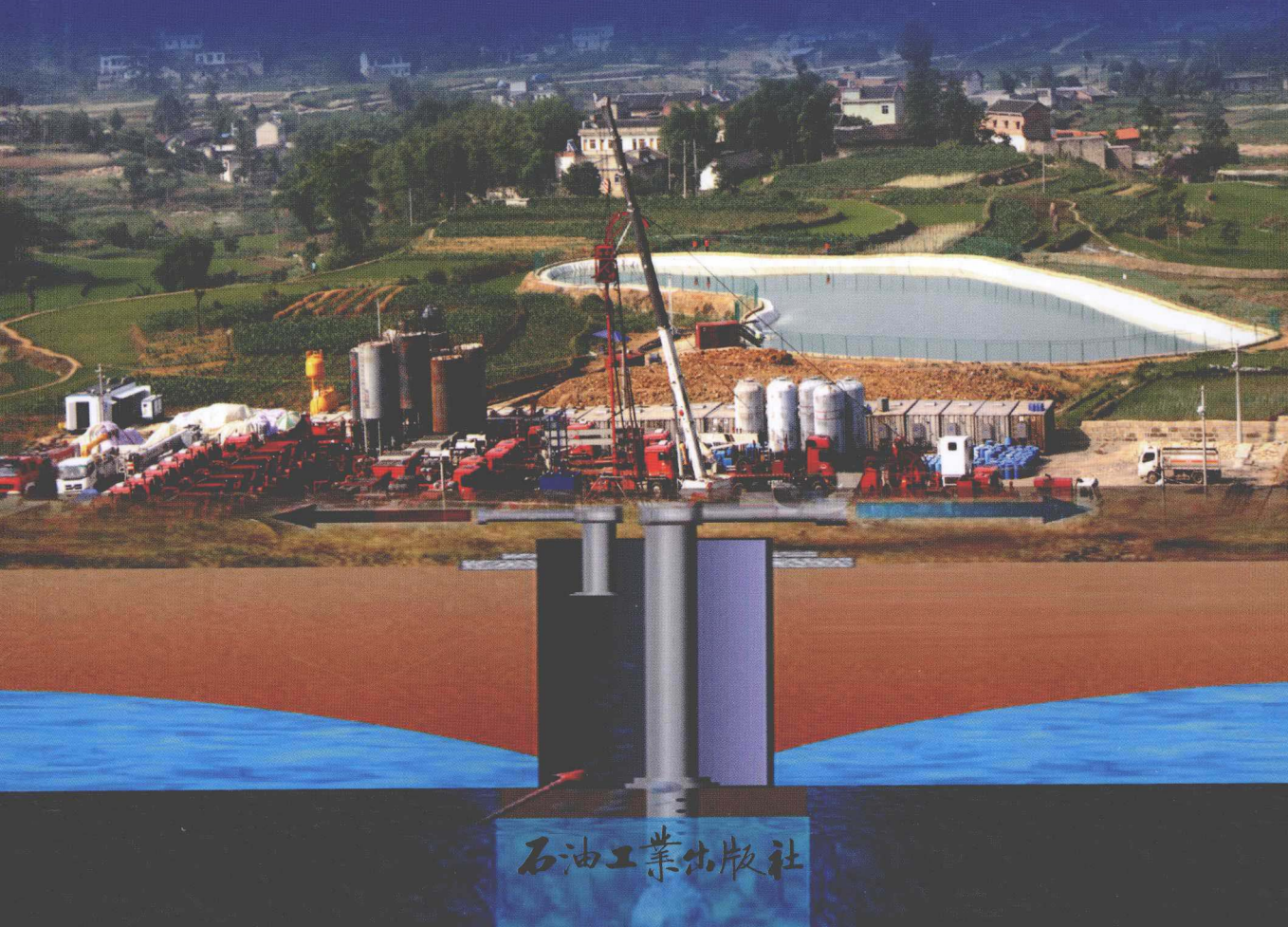




MEICENGQI YALIE JISHU JI YINGYONG

煤层气压裂技术及应用

伊向艺 雷 群 丁云宏 主编
卢 渊 管保山 张 浩



石油工业出版社

内 容 提 要

本书共分六章,从煤层气储层特征评价入手,结合韩城煤层气储层实例,描述了煤层气藏非常规的工程地质特征;针对煤层气藏具有裂缝系统和大的比表面积特征,对压裂过程中可能产生的煤层气藏损害进行评价;阐述了煤层气储层压裂液体系;以煤层水力压裂理论为基础,探讨煤层分层压裂工艺、液态 CO₂ 压裂、低伤害高效压裂等工艺技术;对连续油管压裂工艺在煤层的适应性进行了研究;展望了煤层气压裂新技术发展趋势及应用。

本书可供从事煤层开发、煤层施工等方面的研究生和科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤层气压裂技术及应用/伊向艺等主编.
北京:石油工业出版社,2012.3

ISBN 978-7-5021-8775-0

I. 煤…

II. 伊…

III. 煤层-地下气化煤气-气体压裂

IV. P618.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 225129 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64251362 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 3 月第 1 版 2012 年 3 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:14

字数:338 千字

定价:42.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《煤层气压裂技术及应用》

编 委 会

主 编：	伊向艺	雷 群	丁云宏		
	卢 渊	管保山	张 浩		
编 委：	李成勇	李永寿	刘 云	杨 智	宋 佳
	王 洋	熊 佩	梁 利	刘 萍	王 欣
	王丽伟	邱晓惠	刘玉婷	崔伟香	王海燕
	薛延萍	齐晓明	李 沁	李月丽	问晓勇
	周 珺	李凤颖	解 慧	姬 伟	余继平
	张 志	李润松	张 晖	李 莹	邱小龙
	吴元琴	汪道兵	冯旭东		

序

随着常规油气资源量的日益减少,作为清洁能源之一的煤层气,其勘探开发越来越受到重视。全球埋深浅于 2000m 的煤层气资源约为 $240 \times 10^{12} \text{m}^3$,中国埋深浅于 2000m 的煤层气资源量超过 $36 \times 10^{12} \text{m}^3$,位于俄罗斯和加拿大之后,居世界第三。中国地面煤层气开发从无到有,2005 年实现了零的突破,2007 年为 $3.2 \times 10^8 \text{m}^3$,2008 年突破 $5 \times 10^8 \text{m}^3$,2009 年中国煤层气年产量已达 $7 \times 10^8 \text{m}^3$ 。截至 2010 年底,全国共钻煤层气井 5400 多口,探明煤层气地质储量 $2900 \times 10^8 \text{m}^3$,累建年产能超过 $30 \times 10^8 \text{m}^3$ (地面抽采),实现年产量 $15 \times 10^8 \text{m}^3$,商品气量 $11.8 \times 10^8 \text{m}^3$ 。近年来中国煤层气的勘探开发呈现出了欣欣向荣的局面,中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团公司、中联煤层气有限责任公司(以下分别简称中石油、中石化、中联煤)和一些地方煤层气公司均在加大对煤层气资源的开发力度。由于煤岩气藏属于超低孔超低渗气藏范畴,煤层气藏具有独特的成藏机制,其煤岩割理、裂隙系统发育且产出机理复杂,要达到高效及经济开发的目的必须借助于压裂增产措施。良好的压裂设计和规范的现场施工作业是煤层气藏压裂成功的前提,也是决定煤岩气藏经济开发的关键。因此,加大对煤层气压裂技术的研究已成为提高煤层气产量的重要举措。

本书以目前国内外对煤岩储层工程地质特征认识、压裂过程中煤岩储层的伤害机理、新型的煤层气井压裂应用技术研究等为基础,借鉴煤田地质学、非常规天然气勘探开发等理论和方法,在依托山西沁水盆地煤层气直井开发示范工程以及鄂尔多斯盆地石炭—二叠系煤层气勘探开发示范工程的基础上,通过对煤岩储层的描述、煤层伤害机理实验分析、国内外压裂液体系的调研、压裂施工工艺的综述等,系统地总结了煤岩储层地质特征和压裂技术。本书详细研究了与煤岩气藏压裂相关的工程地质特征,提出了煤岩气藏伤害机理的评价方法,描述了适用于煤岩储层的压裂液体系,综述了煤层压裂技术及施工工艺,并对煤岩气藏压裂技术发展进行了展望。

本书的作者大都具有煤层气藏开发理论研究和压裂施工现场试验的经历,具有理论和实践结合的优势。该书依托“大型油气田及煤层气开发(2008ZX05037)”国家重大专项中的“煤层气完井与高效增产技术及装备研制—煤层气藏低伤害高效能压裂液”课题,通过实验和现场的结合、理论和实际的结合,系统地提出了煤层气压裂技术理论和现场施工工艺,为我国“十二五”煤层气的勘探与开发奠定了理论和初步实践基础。该书是目前对煤层气压裂工艺介绍较为全面的一本专著,特向广大研究者推荐。



2011 年 1 月

前 言

在新一轮大规模投资推动下,新能源产业借势崛起,我国煤层气产业迎来发展机遇。我国将煤层气开发经过“十一五”能源发展规划资助后,煤层气资源的利用得到了长足的进步。目前中国煤层气资源开发利用力度距目标还有一定差距,此前,中国预计在2015年产量达 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$,2020年产量达 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。煤层气距离成为天然气供应的主力气源,还有很长的一段路要走。

煤层气资源开发的大力发展,一方面需要国家鼓励政策的出台和地方政府协助支持,另一方面,煤岩气藏属于超低孔超低渗非常规气藏范畴,要达到高效及经济开发的目标必须进行压裂增产措施。然而,围绕煤岩气藏低伤害高效能压裂技术的实施,在基础理论和现场实践环节的许多工作需要系统地总结。

《煤层气压裂技术及应用》一书是笔者在参加“大型油气田及煤层气开发(2008ZX05037)”国家重大专项“煤层气完井与高效增产技术及装备研制—煤层气藏低伤害高效能压裂液”课题完成中不断积累、研究后编写而成。全书共分6章。第一章为煤层气储层特征评价,描述了煤岩气藏非常规的工程地质特征;第二章为煤层气损害评价技术,系统介绍了煤岩气藏的损害评价技术;第三章为煤层压裂液,阐述了煤岩储层压裂液体系;第四章为煤层水力压裂技术,综述了水力压裂技术和工艺在煤层气压裂中的应用;第五章为连续油管压裂工艺研究,对连续油管压裂技术在煤层的适应性以及煤层气井压裂中的应用进行了阐述;第六章为煤层气压裂技术展望,对煤层压裂液技术的发展趋势进行展望,并对新型压裂工艺技术进行了介绍。

煤层气压裂技术及应用涉及到多学科、多专业,包括地质、钻井、采气和增产作业过程等,是一项理论和实际结合的系统工程。本书依靠现场研究人员和高校研究人员组合的研究团队,在借鉴国内外煤层气压裂理论和实践的基础上,结合自身应用基础研究及现场技术应用经历,完成了书稿的编写和审定。在书稿的完成过程中,得到成都理工大学能源学院和“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室及中国石油天然气集团公司科学技术研究院廊坊分院的大力支持。

由于笔者水平所限,如有错误和不妥之处,敬请批评指正。

编 者

2011年1月

目 录

第一章 煤层气储层特征评价	(1)
第一节 煤层的组分特征	(1)
第二节 煤的结构	(16)
第三节 煤层的孔隙结构	(19)
第四节 煤层特殊物性特征	(29)
第五节 煤层压力及岩石力学特征	(40)
第六节 国内外典型煤层特征	(47)
参考文献	(50)
第二章 煤层气损害评价技术	(51)
第一节 煤层的敏感性因素分析	(51)
第二节 入井液体系对煤层的潜在损害分析	(60)
第三节 煤层应力敏感损害评价	(64)
第四节 煤层气的敏感性损害评价	(74)
第五节 煤层气吸附损害	(92)
第六节 煤层气损害评价技术体系	(95)
参考文献	(96)
第三章 煤层压裂液	(98)
第一节 适应煤层的压裂液体系研究	(99)
第二节 煤层压裂液体系	(104)
参考文献	(122)
第四章 煤层水力压裂技术	(124)
第一节 煤层气井完井工艺方法	(124)
第二节 煤层水力压裂基础理论	(129)
第三节 煤层水力压裂技术	(145)
第四节 煤层水力压裂工艺	(148)
第五节 煤层水力压裂裂缝监测技术	(156)
第六节 煤层水力压裂应用实例	(163)
参考文献	(175)

第五章 煤层连续油管压裂技术 (178)

 第一节 连续油管技术简介 (178)

 第二节 连续油管压裂技术特征 (182)

 第三节 连续油管压裂技术对煤层的适应性 (190)

 第四节 连续油管压裂技术在煤层气井压裂中的应用 (192)

 参考文献 (195)

第六章 煤层气压裂技术展望 (197)

 第一节 煤层压裂流体发展展望 (197)

 第二节 新型的压裂后评估技术发展 (200)

 第三节 新型的压裂技术展望 (205)

 参考文献 (210)

第一章 煤层气储层特征评价

煤岩储层(煤层)是一类由高分子有机化合物与矿物组成的混合物,主要以有机物为主。对煤层气而言,它既是气源岩,又是储集岩。煤层作为自生自储型的非常规储气层,与常规的储层有许多不同之处,它不像常规天然气那样需要有大规模的运移和聚集过程才能成藏,其气体主要以吸附状态赋存于煤层中。煤层具有极其发育的微孔系统和裂缝系统、大的内表面积、较强的吸附能力,由于这一系列独特的物理化学性质和特殊的岩石力学性质,使煤层气在储气机理、孔渗性能、气井的产气机理和产量动态等方面与常规天然气有明显的区别,并表现出鲜明的特征。只有在充分认识这些储层特征的基础上,采用不同于常规油气工业的理论和技術,才能正确评价和有效开发煤层气藏。

本章主要从煤岩组分特征、煤结构、煤层孔隙结构特征、煤的润湿性及其吸附性和煤层压力特征几方面并结合韩城矿区煤层气储层实例来阐述煤储层特征。韩城矿区内含煤层数多达13层,其编号自上而下分别为山西组的1[#]上、1[#]、2[#]、3[#]、4[#],太原组5[#]、6[#]、7[#]、8[#]、9[#]、10[#]、11[#]等。其中3[#]、11[#]煤层分布较普遍,为全矿区主要开采煤层,5[#]煤层分布于燎原井田和象山井田,2[#]煤层主要分布于北区和马家沟井田。

第一节 煤层的组分特征

煤的热演化实质是那些参与成煤的有机质在煤化作用过程中不断发生着物理、化学变化,这种变化的结果导致某些有机组分的演化、消失,并形成油、气等一些热演化物。通过对煤元素组成、化学组成、变质程度等特征的研究,能很好地探讨煤的演化生烃机理。

一、煤的成分

要了解煤的成分特征,首先就要了解煤的分类。由于研究对象、方法和研究程度的不同,各种方案在分类界线、精细程度和命名方面都有所差异。表1-1是国外主要的煤岩分类,这个分类的依据主要是岩石结构的差异。

表 1-1 国外主要煤岩分类系统一览表(据张群,1999)

Stopes 分类	ASTM 分类		蒂循—矿务局分类		Diessel 分类	前苏联分类	Gammeron 分类	
镜煤 丝炭 亮煤 暗煤	条带 状煤	镜煤 暗煤 丝炭	条带 状煤	半亮煤 半暗煤 暗淡煤	光亮煤 条状带亮煤 条状带煤 条状带暗煤 暗淡煤 纤维状煤	光亮煤 半亮煤 半暗煤 暗淡煤	岩石 类型	镜煤 丝炭 亮亮煤 暗亮煤 暗煤
	非条带 状煤		非条带 状煤				煤类 型	光亮煤 半亮煤 半暗煤 暗淡煤

在我国,最新的煤炭分类于 2009 年经国务院批准,由中国煤炭工业协会发布,于 2011 年 1 月 1 日开始实施。新制定的中国煤炭分类国家标准,首先根据煤的煤化程度,将所有煤分为褐煤、烟煤和无烟煤。对于褐煤和无烟煤,再分别按其煤化程度和工业利用的特点分为 2 个和 3 个小类。烟煤部分按挥发分大于 10%~20%、大于 20%~28%、大于 28%~37% 和大于 37% 的 4 个阶段分为低、中、中高及高挥发分烟煤。关于烟煤粘结性,则按粘结指数 G 区分:0~50 为不粘结和微粘结煤,50~65 为中等偏强粘结煤,大于 65 则为强粘结煤。对于强粘结煤,又把其中胶质层最大厚度 y 值大于 25mm 或奥亚膨胀度 b 大于 150% (对于挥发分大于 28% 的烟煤,奥亚膨胀度 b 大于 220%) 的煤定为特强粘结煤。这样,在烟煤部分,可分为 24 个单元,并用相应的数码表示。编号的十位数中,1~4 代表煤的煤化程度,编号的个位数中,1~6 表示煤的粘结性。在这 24 个单元中,再按同类煤性质基本相似,不同煤性质有较大差异的分类原则将部分单元合并为 12 个类别。在煤类的命名上,考虑到新旧分类的延续性和习惯叫法,仍保留气煤、肥煤、焦煤、瘦煤、贫煤、弱粘煤、不粘煤和长焰煤 8 个煤类。为使同一类煤性质基本一致,新的煤炭分类国家标准增加了 4 个过渡性煤类:贫瘦煤、1/2 中粘煤、1/3 焦煤和气肥煤。贫瘦煤是指粘结性较差的瘦煤,以区别于典型的瘦煤。1/2 中粘煤是由原分类中一部分粘结性较好的弱粘煤和一部分粘结性较差的飞焦煤和肥气煤组成。1/3 焦煤是由原分类中一部分粘结性较好的肥气煤和肥焦煤组成,这类煤是焦煤、肥煤和气煤中间的过渡煤类,也具有这 3 类煤的一部分性质,但结焦性较好是公认的。气肥煤在原分类中属肥煤大类,但定的结焦性比典型肥煤要差得多,故新的煤炭分类国家标准将它单独列为一类。这样就克服类原分类方案中同类煤性质差异较大的缺陷。如气煤一号和肥气煤二号在性质上有明显差异,将它们分为同一类别很不合理。新的分类国家标准将这些具有过渡性质的煤单独列为一类,从而有利于煤的合理使用。

1. 元素分析

煤的元素组成是研究煤的变质程度,计算煤的发热量,估算煤的干馏产物的重要指标,也是工业中以煤作燃料时进行热量计算的基础。煤中除无机矿物质和水分以外,其余都是有机质。由于组成煤的基本结构单元是以碳为骨架的多聚芳香环系统,在芳香环周围有碳、

氢、氧及少量的氮和硫等原子组成的侧链和官能团,如羧基($-\text{COOH}$)、羟基($-\text{OH}$)和甲氧基($-\text{OCH}_3$)。这说明煤中有机质主要由碳、氢、氧和氮、硫等元素组成。因此煤的元素分析主要是分析氧、碳、氢、硫、氮等元素成分。各种煤所含的主要元素组成见表 1-2。

表 1-2 煤的元素组成

组成	泥炭	褐煤	烟煤	无烟煤
C, %	60 ~ 70	70 ~ 80	80 ~ 90	90 ~ 98
H, %	5 ~ 6	5 ~ 6	4 ~ 5	1 ~ 3
O, %	25 ~ 35	15 ~ 25	5 ~ 15	1 ~ 3

碳是煤中最主要的可燃元素,也是煤中最基本的成分,其含量约占 40% ~ 85%。1kg 碳完全燃烧生成二氧化碳,能放出约 32825.56kJ 热量;1kg 碳不完全燃烧生成一氧化碳,只能放出约 9258.06kJ 的热量。碳的燃烧特点是不易着火,燃烧缓慢,火焰短,煤的碳化程度越深,即含碳量越多,则着火和燃烧越困难。氢是煤中单位发热量最高的元素,但含量不多,约占 3% ~ 6%;氢极容易燃烧,且燃烧速度快。氧是煤中的杂质,不能产生热量。由于氧的存在,使得煤中可燃元素的含量相对降低。煤中的氧有两部分,一部分是游离的氧,它能助燃;另一部分以化合物状态存在,不能助燃。煤中的硫由有机硫、硫化铁和硫酸盐中的硫三部分组成。前两种硫可以燃烧,构成所谓的挥发硫或可燃硫,后一种硫不能燃烧,将其并入灰分,硫是煤中的有害元素。氮、磷是煤中的杂质,其含量很少,对煤的燃烧影响不大。这些元素随着煤化程度的增加而有规律的变化(图 1-1)。

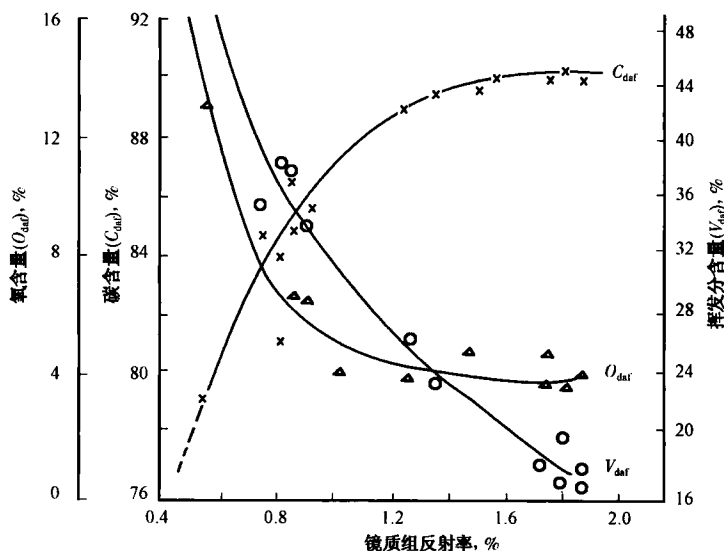


图 1-1 C、O、V 演化曲线(据李明潮等,1996)

由图可看出随着煤化程度增高,碳元素含量增多,呈对数曲线特征。
碳含量和镜质组反射率之间有以下关系:

$$C = 20\lg R_o + 85 \quad (r = 0.978) \quad (1-1)$$

式中 C ——碳含量,%;
 R_o ——镜质组反射率[指镜质组(在绿光中)的反射光强度对垂直入射光强度的百分比,反映煤的成熟度],%;
 r ——相关关系系数。

随着煤化程度增高,氢含量缓慢降低,氧含量降低。由此可见,煤化过程中含氧官能团脱落和芳环层逐步增大,氧被脱落而降低。

美国材料试验协会(ASTM)提供了标准方法来确定各元素含量。该方法中碳、氢元素的含量由原料完全燃烧时释放的气体产物所决定,总的硫、氮、灰质的含量则由所有原料单独计算所确定出来。由于氧元素缺乏合适的测试方法,所以其在煤中的百分含量由100%减去其它元素百分含量的总和获得。但由于煤中粘土、页岩、碳酸盐杂质生成结合水导致氢、氧元素损失了一部分而未得到校正,故这种方法会产生一个小的误差。

针对韩城矿区2[#]、3[#]、5[#]、11[#]煤层煤样做元素分析,并与我国其它地区煤层元素含量对比见表1-3。

表 1-3 我国部分地区煤层元素分析成果表

采样地点	碳含量(C_{daf}), %	氢含量(H_{daf}), %	氮含量(N_{daf}), %	氧含量(O_{daf}), %
淮南	85.55	5.16	4.56	7.48
淮北	88.29	4.62	1.41	5.05
新疆塔什	78.83	6.14	1.24	13.27
合山	33.45	1.97	0.64	4.64
晋城	77.73	2.33	0.99	1.11
韩城	80.06 ~ 92.16	4.08 ~ 4.40	<1.5	2.10 ~ 2.70

2. 组分分析

煤是一种极复杂的可燃有机岩,煤田通常通过工业分析方法,用煤的水分、灰分、挥发分和固定碳四大组来描述煤的化学组成。水分和灰分是无机组分,固定碳的多少取决于煤的芳香核的缩合程度,挥发分随着煤化程度的增高,呈有规律地降低。通常煤的水分、灰分、挥发分是直接测出的,而固定碳是用差减法计算出来的。

水分含量影响天然气的吸附能力,水分含量的测定主要包括通氮干燥法、甲苯蒸馏法两种。通氮干燥法是称取一定量的空气干燥煤样,置于105~110℃的干燥箱中,在干燥氮气流中干燥到质量恒定,然后根据煤样的质量损失计算出水分的百分含量。甲苯蒸馏法则是称取一定量的空气干燥煤样于圆底烧瓶中,加入甲苯共同煮沸。分馏出的液体收集在水分测定管中并分层,量出水的体积。以水的质量占煤样质量的百分数作为水分含量。

煤中灰分的测定方法,包括缓慢灰化法和快速灰化法。缓慢灰化法为仲裁法,快速灰化法可作为例常分析方法。缓慢灰化法是指称取一定量的空气干燥煤样,放入马弗炉中,以一定的速度加热到 $815 \pm 10^\circ\text{C}$,灰化并灼烧到质量恒定。以残留物的质量占煤样质量的百分数作为灰分产率。快速灰化法又包括 A 法和 B 法。A 法是将装有煤样的灰皿放在预先加热至 $815 \pm 10^\circ\text{C}$ 的灰分快速测定仪的传送带上,煤样自动送入仪器内完全灰化,然后送出,以残留物的质量占煤样质量的百分数作为灰分产率;B 法则是将装有煤样的灰皿由炉外逐渐送入预先加热至 $815 \pm 10^\circ\text{C}$ 的马弗炉中灰化,并灼烧至质量恒定,以残留物的质量占煤样质量的百分数作为灰分产率。灰分的测定还有再现性和重复性的要求。

挥发分的测定是称取一定量的空气干燥煤样,放在带盖的瓷坩埚中,在 $900 \pm 10^\circ\text{C}$ 温度下,隔绝空气加热 7min,以减少的质量占煤样质量的百分数,减去该煤样的水分含量 (M_{ad}) 作为挥发产率。

煤中去掉水分、灰分、挥发分,剩下的就是固定碳。煤的固定碳与挥发分一样,也是表征煤的变质程度的一个指标,随变质程度的增高而增高。所以一些国家以固定碳作为煤分类的一个指标。固定碳是煤的发热量的重要来源,所以有的国家以固定碳作为煤发热量计算的主要参数。固定碳计算公式如下:

$$(FC)_{\text{ad}} = 100 - (M_{\text{ad}} + A_{\text{ad}} + V_{\text{ad}}) \quad (1-2)$$

当分析煤样中碳酸盐 CO_2 含量为 2% ~ 12% 时,有:

$$(FC)_{\text{ad}} = 100 - (M_{\text{ad}} - A_{\text{ad}} + V_{\text{ad}}) - X_{\text{ad(煤)}} \quad (1-3)$$

当分析煤样中碳酸盐 CO_2 含量大于 12% 时,有:

$$(FC)_{\text{ad}} = 100 - (M_{\text{ad}} + A_{\text{ad}} + V_{\text{ad}}) - [X_{\text{ad(煤)}} - X_{\text{ad(焦渣)}}] \quad (1-4)$$

式(1-2)至式(1-4)中, $(FC)_{\text{ad}}$ 代表分析煤样的固定碳,%; M_{ad} 代表分析煤样的水分,%; A_{ad} 代表分析煤样的灰分,%; V_{ad} 代表分析煤样的挥发分,%; $X_{\text{ad(煤)}}$ 代表分析煤样中碳酸盐 CO_2 含量,%; $X_{\text{ad(焦渣)}}$ 代表焦渣中 CO_2 占煤中的含量,%;

其中煤的灰分是评价煤质的最重要指标。煤的灰分是指煤中的所有可燃物质完全燃烧,煤中矿物质在一定的温度下产生分解、化合等复杂反应后剩下的残渣。煤灰分不是煤中原有成分,而是矿物质燃烧后形成的新物质,其含量通常低于矿物质的含量。我国通常把煤的灰分分成 5 个等级(表 1-4)。

表 1-4 我国煤岩灰分等级划分

灰分产率, %	< 10	10 ~ 15	15 ~ 25	25 ~ 40	> 40
等级	特低灰煤	低灰煤	中灰岩	富灰煤	高灰煤

煤的灰分产率和有机质含量直接受控于煤岩类型和煤岩成分。富矿物暗煤灰分产率最高,其次为矿物充填的丝炭,但丝炭的灰分变化较大,再次为亮煤,镜煤的灰分产率最低。一

般情况下,镜煤的灰分产率小于1%,亮煤的灰分产率小于10%,暗煤的灰分产率大于25%。煤的成因是控制煤中灰分产率及有机质含量的根本原因。成煤环境不同,造成煤层之间以及同一煤层不同区域之间的灰分产率的差异。通常废弃碎屑体系沼泽成煤的灰分产率最低,活动碎屑体系沼泽成煤的灰分产率中等,海相泥炭坪成煤的灰分产率则较高。

据此次的煤的工业分析资料,矿区煤质特征如表1-5所示。垂向上,3[#]、5[#]煤层平均灰分最低,11[#]煤层平均灰分最高。除5[#]煤层外,各层均具有自上而下挥发分产率降低的规律;横向上,各煤层灰分变化情况是,北区各煤层平均灰分均低于南区相应煤层。而挥发分变化情况是,南区各煤层的平均挥发分产率均低于北区相应煤层。

表 1-5 韩城矿区煤岩煤质特征一览表

煤层 编号	工业分析,%			煤岩类型	$R_{\max}$ %
	M_{ad}	A_d	V_{da} (精煤)		
3 [#]	0.92	18.15	15.28	以光亮煤为主,灰分产率小于45%	1.856
5 [#]	0.996	21.73	15.31	以光亮煤为主,灰分产率大于50%	1.925
11 [#]	0.73	22.14	14.99	以半亮—半暗煤为主,灰分产率大于65%	1.858

3. 煤岩显微特征

煤岩显微组分是指在显微镜下可辨认观察到的煤的最小有机颗粒。由于它们来自不同地区的植被,所以有着不同的光学特性和化学成分。显微煤岩类型是煤的显微组分及矿物的天然组合,不同的显微煤岩类型反映出煤的地质成因、煤相、成煤原始物质和煤的化学工艺性质的差别。因此,进行显微煤岩类型分析对研究煤的聚积方式、煤相变化、煤层对比以及评价煤岩储层都有实际意义。

我国的《显微煤岩类型分类》国家标准中显微组分划分为三大类:镜质组、壳质组、惰质组(表1-6)。组分名称是由它们的来源、外形或反应性决定的。国际上显微煤岩类型划分也按照显微组分组成及其含量分成七类显微煤岩类型组与单、双和三组分三大类。

表 1-6 显微煤岩类型分类(GB/T 15589—1995)

显微煤岩类型		显微组分组的体积百分含量
单组份	微镜煤 微壳煤 微惰煤	镜质组 > 95% 壳质组 > 95% 惰质组 > 95%
双组份	微亮煤 微暗煤 微镜惰煤	镜质组 + 壳质组 > 95% 惰质组 + 壳质组 > 95% 镜质组 + 惰质组 > 95%
三组分	微三合煤	镜质组 + 壳质组 + 惰质组 > 95%

(1)镜质组由植物残体受凝胶化作用而形成。一般情况下,镜煤组是煤的显微组分中最丰富的,且也是最均匀的。美国的煤通常含有多达80%的镜煤组,这就是使煤普遍看起来有

黑色的光泽的主要因素。它的含氧量比壳质组的高,能产生烃类气体,但是只能产少量的油。镜煤组包含更多的直链碳群组。镜煤组是最容易形成煤中割理系统的显微组分。

(2)壳质组是由植物残体中的类脂物质经沥青化作用形成的,主要来自孢子、花粉、树脂、油脂分泌物、藻类、脂肪、细菌蛋白质和蜡。因此,它包含有树脂体、藻质体和角质体这三种显微组分。壳质组显微组分的化学结构中含有大量的氢和脂肪族,许多挥发组分(包括煤层气)都是在煤进行煤化作用时由壳质组所排放的,这些显微组分有生产烃类气体和石油的潜力。

(3)惰质组是由丝炭化作用形成的。惰质组与其他组分相比含碳较多,它的取名是因为它缺少化学反应。惰质组只产生少量的挥发物。此外,这些组分几乎没有可能产生碳氢化物。惰质组是最坚硬的组分,它看起来如同一个明亮的凸头有着光滑的表面。如果煤的惰质组含量高,则不利于形成割理系统。

煤岩组成在成煤第一阶段,即经生物化学作用后,已基本稳定下来;在成煤第二阶段,即经物理化学作用,各煤岩成分又经受了不同程度的变化。惰质组组分在泥炭化阶段就发生了剧烈的变化,在以后的煤化阶段中变化很少;壳质组组分由于对生物化学作用稳定,所以在泥炭化阶段变化很少,只有深度变质作用时变化才较大;唯有镜质组组分在整个成煤过程中都是比较有规律地渐进变化。

显微组分组可以进一步细分成许多亚类,其具体分类方案可以参照表 1-7。

表 1-7 煤储层显微组分分类方案(烟煤)

显微组分组	显微组分	显微组分压裂
镜质组	结构镜质体	结构镜质体Ⅰ、结构镜质体Ⅱ
	无结构镜质体	基质镜质体、均质镜质体、团块镜质体、胶质镜质体
	镜屑体(碎屑镜质体)	—
惰质组	丝质体	火焚丝质体、氧化丝质体
	菌类体	真菌菌类体、树脂菌类体
	半丝质体、粗粒体、微粒体、惰屑体	—
壳质组	孢子体	(厚壁、薄壁):大孢子体、小孢子体
	角质体	薄壁角质体、厚壁角质体
	树脂体	凝胶树脂体(均匀、不均匀)
	藻类体	结构藻类体、层状藻类体
	荧光体、木栓质体、沥青质体、渗出沥青体、碎屑壳质体(壳屑体)	—

通常煤的各种有机显微组分分布范围的显著差异,表明了其原始成煤物质的沉积环境有显著的不同。而不同的煤岩显微组分含量对煤的物理、化学性质均有显著的影响。

如惰质组高的煤,其挥发分低、含碳量高、粘结性差、焦油产率低,而镜质组高的炼焦煤,其粘结性好、发热量高、含氧量较低。

煤岩显微组分的化学组成随煤化程度、还原程度的不同而有所不同,即便在同一煤内,镜质组、壳质组和惰质组的性质也各不相同。镜质组的特点是碳含量中等,氧含量高,芳香族成分含量较高。随着煤阶的增高,镜质组的碳含量增加,氧含量下降,氢含量在低煤阶时大致相同,从中等煤阶烟煤开始,突然减少。壳质组的特点是有较高的氢含量和脂肪族成分。惰质组的特点是碳含量高,

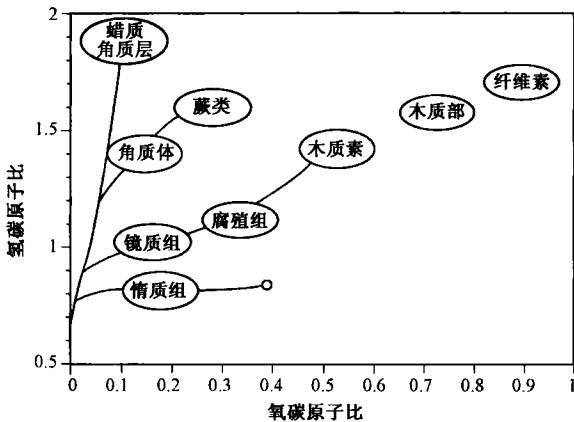


图 1-2 Krevelen 修正图

氢含量低,它的芳构化程度比镜质组高。随煤化程度的提高,各显微组分之间的差别逐渐减少,显微组分都趋向于同样的化学结构。在含碳超过 94% 以后它们就无法区分了。随着沉积和地球化学反应的发生,挥发性物质含有更多氢和氧。Krevelen 绘制了氢碳原子比与氧碳原子比的比较图,如图 1-2 所示。图中解释了煤的显微组分的趋向性,指出这 3 个组分最终将趋于一个共同的成分。

图 1-2 可以认为成熟度是表示煤分子结构的氢碳原子比的另一种方式。在很大程度上,氢碳比反应了煤化阶段时煤产生煤层气的能力。因此,从另一角度解释图 1-2,壳质组对煤层气的产生作用最大,惰质组则对煤层气的产生作用较小。

由图 1-3 可看出,壳质组和镜质组有着同样的成分,在元素分析中含碳量大约为 89%。在含碳 94% 的时候,这 3 个显微组分几乎无法区分;它们的反射率很相似,含碳约为 95%。此后官能群组较弱的链接已经被打破,形成了挥发物,并且这个结构降低了芳香族稠环的稳定链接,换用了一种更加有序的方式排列结构。煤的物理和化学性质因此发生了相应的变化。

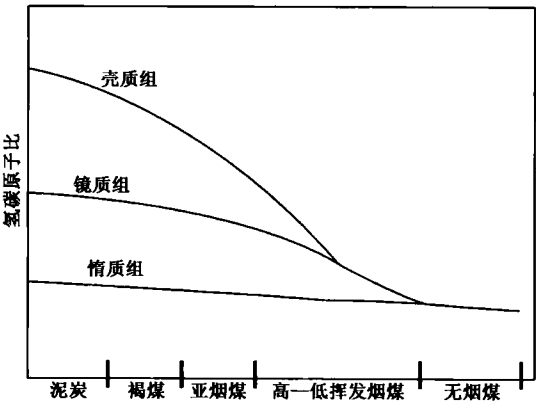


图 1-3 煤显微组分的趋同现象

韩城矿区太原组煤的显微组分以镜质组为主,惰性组次之,壳质组含量极少,矿物成分中黄铁矿含量较高。山西组煤的显微组分同样以镜质组为主,但矿物组分中黄铁矿含量较少,而石英、粘土等矿物含量高。矿区不同煤层和不同区域的显微组分存在一定差异,总结如表 1-8 所示。纵观南区各煤

层,镜质组含量以3[#]煤层最高,次为5[#]煤层,11[#]煤层相对最低;相反,丝质体含量11[#]煤层最高。纵观北区各煤层,镜质组含量以3[#]煤层最高,次为2[#]煤层,11[#]煤层相对最低。

表 1-8 韩城矿区煤岩微观特征

	2 [#] 煤层	3 [#] 煤层	5 [#] 煤层	11 [#] 煤层
南区	—	镜质组平均含量 87.01% ; 惰性组平均含量 7.25% ;无 壳质组分;含少量碎屑丝质 体、粗粒体;有粘土矿物 充填	镜质组平均含量 83% ;惰性 组平均含量 7.1% ;碎屑丝 质体极少;有粘土矿物充填	镜质组平均含量 78.10% ;惰性 组平均含量 10.75% ;丝质体含 量最高;粘土矿物含量少
北区	镜质组平均含量 84.85% ;惰 性 组 平均含量 4.74% ; 有粘土矿物充填	镜质组平均含量 85.19% ; 惰性组平均含量 3.3% ;无 壳质组分;含少量碎屑丝质 体、粗粒体和极少壳质组; 方解石含量高	—	镜质组平均含量 80.51% ;惰性 组平均含量 7.19% ;有粘土矿 物充填,黄铁矿分布

从南北区对比来看,各煤层均由镜质组和惰性组组成。其中以镜质组为主要成分,含有极少量的壳质组和粗粒体。壳质组含量极低与本区煤层有机显微组分处于中高煤级演化阶段,壳质组分解消失有一定的关系。从3[#]和11[#]煤层来看,3[#]煤层在南区的镜质组平均含量略高于北区,相反丝质体含量略高于北区。11[#]煤层正好相反,镜质组平均含量为北区高南区低,丝质体为南区高北区低。

4. 煤岩宏观特征

煤的宏观描述是详细研究煤的物质组成及其在垂向和横向上变化的先导、基础性工作,在煤的成因研究、煤炭资源勘探、煤质评价及煤成烃评价等方面具有重要意义。国内外从煤岩学角度对煤进行划分的方案很多。

宏观的方法主要是利用煤的物理性质的不同,如颜色、光泽、硬度、密度的不同,划分出煤的宏观煤岩成分和宏观煤岩类型。从分类的级别来看,一种是一级划分系统,如岩石类型或相对平均光泽类型;另一种是两级划分系统,即把煤先划分出煤岩成分,再根据其组合特征划分出煤类型。宏观煤岩成分主要是指用肉眼可以分辨出来的煤的基本组成单位。通过肉眼观察煤岩基本单位的亮度或暗度,对煤成分的分类如下:镜煤、丝炭、亮煤、暗煤。镜煤和丝炭是简单的煤岩成分,而亮煤和暗煤是复杂的煤岩成分。

镜煤主要由镜质组组成,显微组分中惰质组和壳质组的含量很少,这些都是煤中常见的光亮条带和暗淡条带。镜煤易碎,易形成割理,裂缝常充填其间。在煤层气生产过程中,镜煤产量状况最好,镜煤是煤层气生产中最重要煤岩成分。尽管含有光亮成分,亮煤却不如镜煤亮。亮煤含的镜质组更少,惰质组和壳质组的含量很大。惰质组的存在会阻止形成地层裂缝,且惰质组较硬并不易破碎。暗煤是一种暗淡的煤岩成分,它含有更多

的显微成分,惰质组的含量比镜煤和亮煤都要高。暗煤坚硬,不易形成裂缝,所以易于形成小煤块(而不是煤的微粒),从煤层中分离出来。丝炭与炭类似,呈纤维状,柔软易碎,丝炭是煤层气生产中最不重要的煤岩成分。显然,煤岩成分对煤层气生产有效性的影响主要取决于易于区分的镜质组集中的光亮条带。

在我国,著名专家张群推荐采用煤岩成分—宏观煤岩类型两级划分的宏观煤岩分类系统,主要是依据总体相对光泽强度和光亮成分含量将宏观煤岩类型划分为4种,即光亮煤、半亮煤、半暗煤和暗淡煤,分类方案详见表1-9。

表 1-9 宏观煤岩类型分类

宏观煤岩类型	分类指标	
	总体相对光泽强度	光亮成分含量, %
光亮煤	最强	>80
半亮煤	较强	50 ~ 80
半暗煤	较弱	20 ~ 50
暗淡煤	最弱	≤20

光亮煤主要由镜质条带、镜质线理及光泽较强而近似于镜质的亮煤质条带所组成,其新鲜断面总的平均光泽强度接近于镜质条带的光泽强度。煤层中矿物质含量少,较轻、较脆和易碎,新鲜断面常呈贝壳状断口及眼球状断口,内生裂缝发育。光亮煤是强覆水低水位泥炭沼泽中的生物残体充分凝胶化的产物演变形成。

半光亮煤主要是由亮质条带组成,夹有较多的镜质条带、线理和透镜体,并夹有较少的暗质的、丝炭的及矿物质的线理和透镜体。半光亮煤的新鲜断面的总平均光泽强度介于镜质条带和丝炭之间,而且较亮。半光亮煤较轻、性较脆,以平坦状和阶梯状断口为主,内生裂缝较发育,是典型滞水或周期性典型滞水低水位泥炭沼泽形成的产物。

半暗煤主要由亮质条带和暗质条带组成,含有少量镜质的、丝炭的和矿物质的线理或透镜体。总的来说,半暗煤的平均光泽强度介于镜煤与丝炭之间,偏暗。与半亮煤相比,半暗煤的光泽更弱、颜色更浅,硬度和密度则较大,以平坦状、参差状断口为主,内生裂缝不太发育,其形成时的泥炭沼泽具有较强的水动力条件,能搬运较多悬浮的矿物质。

暗淡煤主要由暗质条带及丝炭条带或透镜体组成,常有较多的矿物质混入,有时可见少量镜质的和亮质的线理及透镜体,新鲜断面上的总光泽强度也暗淡无光,或仅微弱反光,使煤层中反光最弱的部分,常为更浅的灰色到灰白色,且为致密块状,密度、韧性大,坚硬难碎,断口粗糙或呈尖菱角状,无内生裂缝。暗淡煤反映成煤期的泥炭沼泽水动力强,有较充足的氧气和矿物质,喜氧细菌活跃,成煤原始物质料在遭受生物凝胶化作用的同时还遭受了一定程度的氧化作用。

上述4种煤依其组成物质的种类、形态、大小、分布等结构和构造特征,可进一步划分为5种不同的亚型:(1)似均一状结构;(2)条带状结构;(3)透镜状结构;(4)线理状结构;