



华北板块构造煤 分布及成因机制

王恩营 易伟欣 李云波 著



科学出版社

华北板块构造煤 分布及成因机制

张厚福 曹瑞瑞 李立群 编

地质出版社

华北板块构造煤分布及成因机制

王恩营 易伟欣 李云波 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以华北板块瓦斯地质条件为背景,深入研究了构造煤的成因、结构和构造特征,提出了构造煤分类新方案;阐述了构造煤的物性特征、吸附/解吸特征及构造煤的探测、测井曲线解译等;通过构造煤层域分布规律及区域分布规律的研究,提出了构造煤分布的控制模式:即构造煤的层域分布主要受煤厚控制,区域分布主要受构造控制;构造煤的主要分布区也是煤与瓦斯突出危险性较大的区域。

全书共9章,包括构造煤特征及分类、构造煤地球物理特征及判识、构造煤吸附/解吸特征、华北板块构造煤形成的区域地质背景、华北板块构造煤分布规律、挤压作用背景下构造煤的成因机理及控制模式、伸展作用背景下构造煤的成因机理及控制模式、构造作用及演化对构造煤形成的控制、构造煤在煤与瓦斯突出预测中的应用。

本书可供瓦斯地质、煤层气地质、煤田地质和矿井地质等相关领域的科研和生产人员参考,也可作为高等院校师生参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

华北板块构造煤分布及成因机制/王恩营,易伟欣,李云波著. —北京:科学出版社,2015.9

ISBN 978-7-03-045822-3

I. ①华… II. ①王… ②易… ③李… III. ①华北板块-板块构造-煤层-地理分布-研究②华北板块-板块构造-煤层-矿床成因-研究 IV. ①P618.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第228957号

责任编辑:王 运 韩 鹏/责任校对:张小霞

责任印制:徐晓晨/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年9月第一次印刷 印张:12 1/2 插页:4

字数:300 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

构造煤是原生结构煤在构造应力作用下形成的，与各种地质构造相伴生，通过研究构造煤分布规律及构造对构造煤形成的控制机理，可以进一步丰富瓦斯地质理论，指导煤矿有效地开展煤与瓦斯突出预测与防治。

按照综合假说的观点，煤与瓦斯突出是一种动力现象，是地应力、瓦斯压力和煤的物理力学性质综合作用的结果。大量的煤与瓦斯突出事例说明，几乎所有发生煤与瓦斯突出的煤层都发育有一定厚度的构造煤。构造煤对煤与瓦斯突出的控制作用主要表现在构造煤空隙度大、瓦斯吸附能力强、渗透性差、应力敏感性强等。如果将煤与瓦斯突出当做一个力学过程来考察，那么必然有一个作用在构造煤上的动力，同时煤体也会产生阻力。当阻力大于动力时，突出就被有效地遏止，而当阻力小于动力时，突出就不可避免地发生了。因此，在煤岩层和瓦斯组成的力学系统中，构造煤起到了非常重要的作用。

构造煤是煤矿瓦斯灾害治理的不利因素。构造煤强度小，容易破碎，钻孔深孔卸压抽采施工、封孔困难，而且容易塌孔；矿井采掘过程中，构造煤瓦斯放散速度快，工作面落煤时瞬时瓦斯浓度大，容易造成瓦斯超限；构造煤渗透率比原生结构煤要小得多，常在 $(10^{-1} \sim 10^{-3}) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下，使煤层在原始状态下瓦斯抽放十分困难，抽放负压大、抽放量小、抽放浓度低、利用难度大等。但掌握构造煤的特点，又可以提高瓦斯治理的有效性。研究表明，一方面，构造煤的透气性随着压力的降低急剧增大，如具有土状结构的高分散相糜棱煤，在载压作用下很容易被压成煤砖，煤砖在外压力（200MPa）卸去4~5min内自行破坏，构造煤的这一特点为煤层卸压增透提供了可能；另一方面，构造煤的高孔隙度和对压力的敏感性又为煤层高压注水提供了有利条件，煤层高压注水不仅可以达到防生的作用，而且提高了煤的强度，减小了突出危险性。

构造煤的发育对煤层气开发也是一个不利因素。近几年，我国煤层气的勘探、开发和前缘科学研究不断取得新的进展，构造煤的低透气性则成为制约煤层气工业发展的关键因素之一。从总体上来说，构造煤的透气性显著低于原生结构煤，不利于煤层气的开发，但在构造煤发育地区也存在某些有利条件。首先，在构造煤发育背景下存在煤层构造破坏适中的地带，割理较发育、孔容较大、含气量及渗透率较高；其次，存在采用某些接触或非接触式增产新方法的可能性，如电磁辐射法、钻孔微爆破预裂法等，某些方法已在矿井瓦斯抽放中试用，取得了一定效果。因此，开展构造煤形成的构造控制机理的研究可为煤层气勘探开发提供重要的理论基础。

构造煤成因研究是构造煤研究中的一个薄弱环节，已有的研究主要在构造与构造煤关系方面作了一些有益的探索，但要准确地评价构造对构造煤形成的控制，指导煤矿瓦斯灾害预测与防治和煤层气勘探开发，尚存在一些重要的理论问题亟待解决。例如：褶皱与构造煤关系的研究表明，在褶皱构造发育区往往构造煤具有区域分布的特点，有时褶皱转折

端比翼部构造煤更发育，但也多见翼部比转折端更发育，对这种相反现象的解释，仁者见仁，智者见智，往往强调某一方面的作用，而忽视其他因素，难以取得学术界的认同，也很难指导生产实践；在断层与构造煤关系的研究中，一般认为切层断层是造成构造煤局部分布或沿断层条带状分布的主控因素，但对断层两盘构造煤形成的差异性缺乏研究。事实上，断层两盘构造煤的发育程度存在很大的差异，煤与瓦斯突出往往发生在断层的上盘，突出的强度也比下盘大；构造煤的形成同构造一样，也经历了印支、燕山和喜马拉雅等不同期次、不同性质、不同规模的挤压、剪切和伸展等作用的叠加改造，不仅形成了复杂的构造景观，也使煤结构发生强烈改造，形成了构造煤广泛发育等。

本书是在作者李云波硕士论文和王恩营博士论文基础上进一步研究而完成的，撰写过程中，尽可能利用最新的生产与科研资料。全书共9章，由河南理工大学王恩营、易伟欣、李云波共同撰写，具体章节分工：前言、第六章、第七章、第八章由王恩营撰写；第四章、第五章、第九章由易伟欣撰写；第一章、第二章、第三章由李云波撰写。全书由王恩营统一审核、定稿。

本书撰写过程中参考了大量国内外文献资料，借此机会对这些文献的作者表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者予以指正。

作 者

2015年7月

目 录

前言

第一章 构造煤特征及分类	1
第一节 构造煤结构特征	1
一、构造煤的宏观结构特征	1
二、构造煤的微观结构特征	2
三、构造煤的超微观结构特征	2
四、构造煤的分子化学结构特征	3
五、构造煤的孔隙结构与渗透性	8
六、构造煤结构的分形特征	12
第二节 构造煤的瓦斯地质特征及力学性质	13
一、构造煤的瓦斯吸附特征	13
二、构造煤的瓦斯参数特征	14
三、构造煤的力学性质特征	15
第三节 构造煤分类	15
一、构造煤分类的意义	15
二、构造煤分类的历史沿革	16
三、构造煤分类中存在的主要问题	18
四、构造煤分类的原则和依据	19
五、构造煤分类新方案	19
参考文献	23
第二章 构造煤地球物理特征及判识	26
第一节 构造煤的波速特征	26
第二节 构造煤的电磁波特征	28
第三节 构造煤测井曲线判识方法	29
一、测井曲线预测宿南向斜构造煤	29
二、测井曲线预测潞安矿区常村矿构造煤	31
参考文献	33
第三章 构造煤吸附/解吸特征	35
第一节 概述	35
第二节 构造煤吸附/解吸特征	37

一、不同粒度构造煤瓦斯解吸初速度特征	38
二、不同吸附平衡压力构造煤瓦斯解吸初速度特征	44
第三节 构造煤瓦斯解吸初期模型及解吸全过程模型	49
一、构造煤瓦斯解吸初期模型	49
二、构造煤瓦斯解吸全过程模型	51
参考文献	52
第四章 华北板块构造煤形成的区域地质背景	54
第一节 华北板块构造演化及分区	54
一、前中生代华北板块的形成与演化	54
二、中生代构造运动	57
三、华北板块大地构造分区	58
第二节 华北板块晚古生代含煤地层沉积建造演化及分区	64
一、沉积建造演化	64
二、沉积建造分区	67
参考文献	69
第五章 华北板块构造煤分布规律	70
第一节 构造煤区域分布规律	70
一、华北板块南带（南缘）构造煤分布规律	71
二、华北板块北带（北缘）构造煤分布规律	85
三、华北板块中带构造煤分布规律	89
四、构造煤区域分布的大地构造控制	102
第二节 构造煤层域分布规律及含煤建造控制	103
一、构造煤层域分布规律	104
二、构造煤层域分布的含煤建造控制	104
参考文献	111
第六章 挤压作用背景下构造煤的成因机理及控制模式	115
第一节 挤压作用背景下构造煤形成的一般规律	115
第二节 纵弯褶皱作用下构造煤的成因机理及控制模式	116
一、概述	116
二、纵弯褶皱作用下构造煤形成的动力学和运动学分析	117
三、纵弯褶皱作用中构造煤成因演化模式	120
第三节 逆冲断层作用下构造煤的成因机理及控制模式	121
一、概述	121
二、逆冲断层作用下构造煤的成因机理及控制模式	123
三、逆冲推覆构造作用下构造煤的成因机理	128
第四节 重力滑动构造作用下构造煤的成因机理及控制模式	130

一、重力滑动构造的一般特点	130
二、煤层中重力滑动构造的形成机理	131
三、重力滑动构造对构造煤的控制	134
第五节 平移断层作用下构造煤的成因机理及控制模式	136
一、平移断层形成时的动力学和运动学分析	136
二、平移断层形成前后应力比较分析	138
三、平移断层两盘构造（煤）变形分析	139
参考文献	140
第七章 伸展作用背景下构造煤的成因机理及控制模式	142
第一节 伸展作用背景下构造煤形成的一般规律	142
第二节 正断层作用下构造煤的成因机理及控制模式	142
一、概述	142
二、正断层形成时的动力学和运动学分析	145
三、正断层形成前后应力比较分析	147
四、正断层两盘构造（煤）变形分析	149
五、小型重力滑动构造及其对构造煤的控制	150
六、张性正断层及其对构造煤的控制	152
参考文献	153
第八章 构造作用及演化对构造煤形成的控制	154
第一节 构造作用对构造煤形成的控制	154
第二节 构造演化对构造煤形成的控制	156
一、北东—北北东向断裂对构造煤形成的控制	157
二、北西向断裂对构造煤形成的控制	157
三、东西向断裂对构造煤形成的控制	157
参考文献	159
第九章 构造煤在煤与瓦斯突出预测中的应用	160
第一节 煤与瓦斯突出机理	160
一、概述	160
二、煤与瓦斯突出机理研究阶段	161
三、“能量”假说和“应力分布不均匀”假说	165
四、煤与瓦斯突出的发展过程	168
五、构造煤控制煤与瓦斯突出机理分析	169
第二节 煤与瓦斯突出预测	169
一、煤层突出预测的依据	169
二、煤与瓦斯突出区域预测的依据	170
三、工作面突出预测的依据	172

第三节 构造煤分布规律对煤与瓦斯突出的控制	177
一、构造煤区域分布规律对煤与瓦斯突出的控制	177
二、构造煤层域分布规律对煤与瓦斯突出的控制	178
第四节 主要构造类型对煤与瓦斯突出的控制	179
一、褶皱构造对煤与瓦斯突出的控制	179
二、断裂构造对煤与瓦斯突出的控制	179
三、推覆构造和重力滑动构造对煤与瓦斯突出的控制	180
第五节 典型矿区构造煤对煤与瓦斯突出的控制	181
一、淮南潘谢矿区构造煤对煤与瓦斯突出的控制	181
二、平顶山矿区构造煤对煤与瓦斯突出的控制	181
三、焦作矿区构造煤对煤与瓦斯突出的控制	185
四、鹤壁矿区构造煤对煤与瓦斯突出的控制	187
参考文献	189

图版

第一章 构造煤特征及分类

第一节 构造煤结构特征

构造煤结构即煤层各组成部分的颗粒大小、形态特征及其相互关系,是构造煤研究的一个重要内容。构造煤结构常常最直观地展现在人们面前,在构造煤研究的各项内容中,研究程度相对较高,许多认识已渐趋一致,主要研究工作向更深层次发展。从研究尺度上来说,可分为宏观结构、微观结构、超微观结构和分子结构等^①。

一、构造煤的宏观结构特征

构造煤的宏观结构特征是指在肉眼条件下可以鉴别的特征,包括微裂隙、微褶皱、显微组分破碎和位移、构造滑面与塑性流变现象等。依据煤体的破坏程度或破碎后的粒度大小以及变形性质,一般可分为碎裂结构、碎粒结构、粉粒结构和糜棱结构4种类型(徐耀琦等,1980;琚宜文等,2004;Zhang et al., 2004)。前3种类型属于脆性变形的结果,其对应的煤体结构大体上相当于Ⅱ类煤、Ⅲ类煤和Ⅳ~Ⅴ类煤,是人们对构造煤结构的最初认识,主要是借鉴构造岩的分类方法提出来的。糜棱结构属于韧性变形的结果,20世纪70年代以后,国际构造岩的研究有了新的发展,特别是1981年在美国加州召开的“糜棱岩类岩石的意义和成因”会议之后,构造岩通常被划分为两大系列,即脆性系列和韧性系列。稍后糜棱煤的概念也被提了出来(侯泉林、张子敏,1990),开始,一般认为糜棱煤是破碎程度最严重的煤(仍属于脆性变形序列的范畴),但随着研究的不断深入,逐渐认识到是韧性变形的结果,与脆性变形构造煤形成的岩石力学条件有根本的区别。

根据研究,脆性变形的构造煤演化过程一般是:原生结构煤—碎裂煤—碎粒煤—碎粉煤,是煤层在挤压应力作用下破碎的结果(苏现波等,2003)。宏观上突出的特点是具有压碎结构,张裂作用占主导地位,破碎的煤体不论粒度大小均呈球粒状、棱角状或次棱角状,没有定向构造(图版I.1)。随着破碎煤体粒度减小,煤的强度越来越小,光泽越来越暗淡,煤体中大型不规则滑面越来越多,而且滑面上具有大量擦痕。

糜棱煤是煤层在韧性条件下剪切变形的结果,其演化过程一般是:原生结构煤—褶皱煤—揉皱煤—糜棱煤。宏观上突出的特点是,具有团块构造和揉皱结构,光泽暗淡,致密性脆,强度较大,不易捏碎,蠕变或韧性变形特征明显(图版I.3~I.5)。随着煤类的

^① 曹运兴. 1999. 构造煤的动力变质作用及其灾害性. 北京:北京大学.

提高,煤的强度没有明显的减小,只是发生了强烈的塑性变形,变形形成的流动构造越来越明显,且纹理越来越细等。

章云根(2005)对淮南矿区煤层变形的研究表明,煤层的层间揉皱十分明显,原生条带状结构难于辨认,出现不同程度的褶皱,类型繁多,有直立、倾伏、倒转甚至平卧等多种形式,多数褶皱界面已不是原来的层理面,而常呈一层极薄的光亮镜面——构造镜面,褶皱之间交切关系也很复杂,有的同斜排列,有的排列无一定规律性,矿区内下石盒子组下部4-1煤、5-2煤局部、上部8煤、11-2煤及上石盒子组下部13-1煤大部分具有此特征。事实上煤的宏观韧性变形特征——不对称紧闭小褶皱是一种十分普遍的现象,有的是原生面理发生褶皱,有的是次生面理发生褶皱,当褶皱复杂时,鉴别褶皱面是原生面理还是次生面理是困难的。

二、构造煤的微观结构特征

微观结构特征是指在光学显微镜下可以鉴别的特征,与构造煤的宏观结构特征对比,除了可以看到宏观上能够看到的特征之外,还可以看到煤的异向光性紊乱及波状消光现象等。

脆性变形构造煤的微观结构特征主要表现为:原生结构、构造已被破坏,破碎角砾有较大的位移,煤的异向光性已不一致。破碎的角砾一般呈棱角状、次棱角状、次圆状,杂乱分布,破裂间隙较大。随着破碎程度的增大,角砾的磨圆度增大,残斑减少,角砾大小逐渐趋于等粒状,重胶结和压结现象明显(图版I.1~I.2),煤的异向光性更加紊乱。

韧性变形构造煤的微观结构特征主要表现为:煤体在构造应力作用下发生强烈的塑性形变,显微揉皱、流纹等形变构造发育,显微组分均被揉皱,伴有较密集的裂隙;煤体基本上未破碎为分散的角砾,各种显微组分相互强烈地糅合在一起,极不规则;煤的显微组分受揉皱和破碎的双重影响,破碎的角砾多被磨碎成“眼球状”,并依一定应力方向均匀排列;破裂间隙较小,混入物极少,常有蠕变、重胶结、波状消光现象或新矿物的形成;煤的异向光性紊乱。

三、构造煤的超微观结构特征

超微观结构特征是指在电子显微镜下可以观察到的特征,除了可以看到宏观、微观上能够看到的特征之外,还可以看到脆性变形煤中的网状结构、粉粒状结构及韧性变形煤中的核幔构造、不对称眼球状构造等。我国最早用扫描电镜研究构造煤显微结构而见诸文献的是徐跃奇等(1980),其后,有许多学者也做了这方面的研究(蔡顺益,1986;吴俊,1987;陈善庆,1989;李康、钟大赉,1992;郝吉生等,2000)。

脆性变形煤超微观尺度上主要可以看到角砾状构造煤中的微裂隙(同透镜状构造煤中的微裂隙)和粉粒状构造煤中的碎裂煤粒。

碎裂煤粒主要由基质和碎斑两部分组成。基质是由微米级(1~50 μm)的煤岩微角砾组成,平均直径一般为10~15 μm ,最大可达100 μm ,杂乱堆积,微角砾之间是不规则的

裂隙和空隙（图版Ⅱ.2 ~Ⅱ.4、图版Ⅲ.2、图版Ⅲ.4、图版Ⅳ.1、图版Ⅳ.2、图版Ⅴ.3 ~Ⅴ.6）。基质微角砾常沿煤岩裂隙呈带状分布，其周围则为变动较弱的碎斑煤岩。值得注意的是，基质粒径在靠近碎斑边缘要比远离碎斑部位的小，这说明碎粒作用自两相邻碎斑接触处开始，由此向外扩展，应力在碎斑接触处集中，变形相对最强。这些变形特征与地壳浅部产出的长英质岩中断层岩的形变特征十分相似。分析认为，碎裂构造煤中大量的粒间隙（表面积占10%以上）和孔隙相互连通，有利于瓦斯逸散。

糜棱煤的超微观结构特征主要是具有韧性变形的特征，煤岩物质定向排列而出现面理构造、核幔构造、不对称眼球状构造、残余斑晶、压力影构造、石香肠构造和基质的流动构造等，但煤岩是一种凝胶体，很难辨别晶内变形现象。糜棱煤中的面理构造（纹带状构造或流劈理）是最常见的一种构造现象，由残斑和基质两部分组成。残斑是一些较硬的煤岩碎块、黄铁矿晶粒等，组成不对称的眼球状构造；残斑周缘是基质，它由粒径更细小（ $<1\mu\text{m}$ ）的塑性流动的煤岩微粒组成，环绕残斑周缘流动，微观波状，在眼球状构造两端形成由残斑细碎粒组成的不对称的尾部，尾部收敛方向平行于面理，根据尾部特征，可示出剪切指向。

与碎裂煤的形成条件不同，糜棱煤是煤岩遭受剪切变形而发生固态塑性流变的结果，是在低应变速率或温度、围压较大的条件下形成的。其特点是：原生结构煤的结构构造大部分已消失，代之以新生的面理构造，面理之间不仅被紧密压实封闭，且断续不相连通，面理间隙和煤岩孔隙连通性差，不利于瓦斯排放。

四、构造煤的分子化学结构特征

构造煤的分子结构特征主要包括镜质组反射率特征、电子顺磁共振特征、X射线衍射特征、核磁共振特征和红外光谱特征等。

（一）镜质组反射率特征

镜质组反射率不仅被广泛地用作表示煤化程度的指标，也是反映煤结构的参数（Levine and Davis, 1984；张亚云, 1990）。与原生结构煤相比，构造煤的 R_{max}° 、 R_{min}° 和 $R_{\text{max}}^{\circ} - R_{\text{min}}^{\circ}$ 都明显增大，说明构造煤形成过程中发生了动力变质作用（胡宝林等, 1995）。

根据张玉贵等（1997）对平顶山、豫西和豫北三个典型的构造单元二₁煤层构造煤和原生结构煤镜质组反射率测定（表1-1），构造煤的 R_{max}° 比原生结构煤平均要大0.558%， R_{min}° 平均要大0.124%， $R_{\text{max}}^{\circ} - R_{\text{min}}^{\circ}$ 平均要大0.434%。说明构造煤稠环上侧链脱落，碳原子数增多，煤分子量增大，芳香环石墨层的聚合作用在最小挤压应力方向上优先形成；另外，构造应力还会使煤岩组分尤其是镜质组分各部位的光性方位产生一定的偏移，因此，构造煤中也可观察到波状消光现象（Zhang et al., 2004）。

表 1-1 构造煤与原生结构煤镜质组反射率（据张玉贵等，1999）

单位：%

位置	煤样类型	最大反射率 $R_{\max}^o$	最小反射率 $R_{\min}^o$	双反射率 $R_{\max}^o - R_{\min}^o$
平 顶 山 矿 区	十矿原生结构煤	1.014	0.809	0.205
	十矿构造煤	1.335	0.856	0.479
	五矿原生结构煤	1.002	0.811	0.191
	五矿构造煤	1.334	0.847	0.487
	大庄矿原生结构煤	1.025	0.816	0.209
	大庄矿构造煤	1.349	0.832	0.517
豫西荥 巩煤田	大峪沟矿原生结构煤	3.696	1.643	2.053
	大峪沟矿构造煤	4.951	2.040	2.911
豫 北 太 行 山 东 麓 煤 田	焦作冯营矿原生结构煤	3.10	2.02	1.08
	焦作冯营矿构造煤	3.65	1.19	2.46
	焦作九里山矿原生结构煤	3.32	2.31	1.01
	焦作九里山矿构造煤	4.02	1.12	2.90
	焦作韩王矿原生结构煤	3.19	2.48	0.71
	焦作韩王矿构造煤	3.61	1.50	2.11
	鹤壁六矿原生结构煤	1.99	1.01	0.98
	鹤壁六矿构造煤	2.38	0.92	1.46
	安阳大众矿原生结构煤	2.46	2.03	0.43
	安阳大众矿构造煤	2.76	0.83	1.93

(二) 电子顺磁共振特征

电子顺磁共振（简称 EPR）现象产生于被测物质具有未成对的自由电子。电子除了有绕核的轨道运动外，还有一种自旋运动，轨道运动产生轨道角动量和轨道磁矩，自旋运动产生自旋角动量和自旋磁矩。若分子中所有轨道都被自旋方向相反的配对电子充满，则它们的自旋磁矩就完全抵消，称这种分子是逆磁性，如果分子轨道中存在未成对电子，则称这种分子是顺磁性。顺磁共振现象就是未成对电子以一定频率绕轴自旋，并由此产生自旋磁矩，在频率适当的电磁发射形成的外加高频磁场中，改变磁矩方向发生共振吸收，获得电子顺磁共振波谱讯号，据此按一定的公式计算，可求得样品的顺磁中心浓度值。顺磁中心浓度是衡量物质顺磁性的一个指标，单位是 10^{18} spins/g，用 N_g 表示。

电子顺磁共振测试结果表明，煤具有顺磁性。当烷烃碎片从煤结构分子上断裂下来，烷烃碎片与煤分子各有一个不配对电子，即自由电子，这种不配对的化学键是煤分子尺度上的变形，可看作是煤分子尺度上的“显微断裂”，具有自由电子的碎片就是自由基，它与煤的变质程度和构造应力的破坏等有关。

1982 年，苏联学者 B. B. 别柯别夫发现顿巴斯矿区构造煤的 EPR 信号强于非构造煤；1990 年，袁崇孚等研究南桐煤层时发现煤的破坏程度与顺磁中心浓度有较好的正相关

关系；唐修义^①（1990）对淮南、淮北矿区构造煤和非构造煤的自由基浓度进行了测定，前者是后者的一倍多；郭德勇和韩德馨（1999）对平顶山煤层的自由基浓度进行了研究，构造煤的 N_g 值都高于对应同一点原生结构煤，二者变化基本是同步的（表 1-2）。

表 1-2 构造煤的顺磁共振特征和反射率测试结果（据郭德勇等，1999）

矿别	煤层	煤体结构	$R_{\max}^o/\%$	$N_g/$ (10^{18} spings/g)	矿别	煤层	煤体结构	$R_{\max}^o/\%$	$N_g/$ (10^{18} spings/g)	
五矿 ⁺	丁	非构造煤	0.87	63.334	十矿 ⁺	丁	非构造煤	1.06	64.706	
		构造煤	0.98	83.981			构造煤	1.12	82.365	
	戊	非构造煤	0.81	52.968		戊	非构造煤	1.09	100.254	
		构造煤	0.90	99.962			构造煤	1.13	134.128	
	己	非构造煤	0.94	114.585		己	非构造煤	0.89	61.999	
		构造煤	0.96	123.385			构造煤	0.97	79.606	
四矿 ⁺	丁	非构造煤	0.96	67.818	八矿 ⁺	丁	非构造煤	0.87	64.262	
		构造煤	1.01	90.516			构造煤	0.90	89.161	
	戊	非构造煤	0.97	71.158		戊	非构造煤	0.84	94.228	
		构造煤	0.98	92.872			构造煤	0.89	97.865	
	己	非构造煤	0.85	81.404		己	非构造煤	1.08	112.563	
		构造煤	0.90	129.983			构造煤	1.16	126.448	
一矿 ⁺	丁	非构造煤	0.89	81.318						
		构造煤	0.99	98.711						
	戊	非构造煤	0.89	86.195						
		构造煤	1.06	93.588						
	己	非构造煤	0.92	57.764						
		构造煤	0.98	96.519						

（三）X 射线衍射特征

X 射线衍射法是岩矿鉴定的重要方法，它是利用 X 射线透过晶体内部点阵时发生衍射来得到晶体内部结构信息。煤是一种成分、结构非常复杂且不均一、包括多种有机物、无机物的混合物。在煤的形成过程中，泥炭经历了成岩作用和变质作用，在煤中存在着类似的晶体物质，且煤变质程度越高，其晶体结构越发育。

煤主要由煤芳核组成，每一个芳核由大约 5~6 层单层的芳香层叠加而成，芳核的层片堆积厚度用 L_c 表示，层片直径分别用 L_a 和 L_b 表示（ $L_a = L_b$ ）。随着煤变质程度的增高， L_a 、 L_b 和 L_c 值有增加的趋势，而 $d(002)$ 值（面网间距）有降低的趋势。可以根据测定的煤芳核及其面网间距的大小来判断煤的变质程度。由于构造煤经历动力变质作用

① 唐修义. 1990. 地勘过程煤与瓦斯突出预测方法和指标研究.

后,煤化程度略有提高,因此,其X射线衍射特征也随构造煤发育程度的提高而提高(陈昌国等,1997;韩同春、袁崇孚,1995;钟玲文等,2004),主要表现为 L_a 、 L_b 和 L_c 值有增加的趋势,而 $d(002)$ 值(面网间距)有降低的趋势等(表1-3)。从表中可以看出,构造煤的面网间距总是小于原生结构煤,构造煤 L_a/L_c 大部分小于1,与判别式 L_a/L_c 小于1为构造动力变质较为接近。

表 1-3 构造煤与原生结构煤 XRD 参数对照 (据蒋建平等, 2001)

矿名	煤样类型	$d(002)$ /nm	L_c /nm	$d(101)$ /nm	L_a /nm	ΔL_c /nm	L_a/L_c
焦作 冯营矿	原生结构煤(无烟煤)	0.3592	2.0233	0.2249	2.3923	0.3528	1.1824
	构造煤	0.3536	2.3761	0.2137	1.9173		0.8069
焦作 九里山矿	原生结构煤(无烟煤)	0.3547	2.9086	0.2345	3.1782	17.7036	1.0927
	构造煤	0.3318	20.6122	0.2132	18.5023		0.8815
焦作 韩王矿	原生结构煤(无烟煤)	0.3536	1.8635	0.2099	2.3754	0.0770	1.2747
	构造煤	0.3511	1.9405	0.2061	1.8636		0.9604
鹤壁 六矿	原生结构煤(贫煤)	0.3598	2.1150	0.2152	2.7920	0.2132	1.3201
	构造煤	0.3573	2.3282	0.2133	2.0979		0.9011
安阳 大众矿	原生结构煤(瘦煤)	0.3523	2.1197	0.2025	3.0080	0.7560	1.4203
	构造煤	0.3514	2.8757	0.2558	2.5341		0.8812

注:石墨的 $d(002)$ 为0.3345nm,纤维素的 $d(002)$ 为0.3975nm,而煤介于两者之间(蒋建平等,2001)。

(四) 构造煤红外光谱特征

红外光谱法是研究有机化合物性质和结构的一种有效的方法,很早就被运用于煤的研究(Cannon and Sutherland, 1945; 库哈连柯、钱秉钧, 1961; Millais and Murchiso, 1969; 陈德玉等, 1977; 王骊等, 1987)。20世纪70年代,以傅里叶变换红外光谱(FT-IR)为代表的干涉型红外光谱仪的出现,以及之后电子计算机技术的发展,大大提高了红外光谱的分析能力,从而扩大了红外光谱方法的应用领域(林林等, 1991)。随着科学技术的不断发展,傅里叶变换红外光谱技术被广泛用于煤结构的研究,其中最为主要的是运用于煤显微组分的化学结构研究(刘大锰等, 1998; Bustin and Guo, 1999; 王延斌、韩德馨, 1999),同时随着红外光谱应用等技术的进一步发展,在煤的其他方面也取得了较好的运用。

针对构造煤的红外光谱研究起步较晚,早期主要在研究煤与瓦斯突出煤体中有所涉及,徐龙君等(1999)认为突出区煤大分子的红外光谱中存在 2920cm^{-1} 吸收峰,突出区煤的芳氢多于脂氢,平均多核芳环数为5~6个,平均有20~23个原子。张守仁^①(2001)通过对“构造-热变煤”的FT-IR测试分析认为,在强烈的剪切作用下,煤的大分子结构择优排列,构造应力促使煤中的氢发生化学转移,结果使稳定的芳香烃含量增加,芳香度增大,而脂肪烃含量相对减少,芳香碳网在强烈剪切作用下,平行于应力方向

^① 张守仁. 2001. 造山带外缘煤的演化特征研究及其应用. 北京: 中国矿业大学(北京).

择优生长,在垂直应力方向则优先拼叠。李小明等(2005)通过原生结构煤与构造煤分子结构对比也得出类似的结论。

据宜文等(2005)根据不同破坏程度构造煤的傅里叶红外光谱特征研究,建立了构造煤红外光谱吸收峰的归属和构造煤红外光谱参数,探讨了不同变质环境下不同变形类型构造煤分子结构演化特征,将结构的变化与应力效应联系起来。屈争辉^①(2010)、李明^②(2013)进一步进行了不同变质和变形类型构造煤的 FT-IR 测试,探讨了不同变形作用(脆性碎裂变形、韧性变形以及剪切变形)在不同变质程度煤的构造演化中的影响机理。高飞^③(2011)进行了断层附近煤样的 FT-IR 测试,结果显示顺层断层峰位由两侧向断层处发生蓝移,断层附近的煤样发生了力化学缩聚作用,通过切层断层附近原生结构煤与构造煤的对比,说明了构造煤相对于原生结构煤具有超前演化的特征,同时进一步证明了李小明等的观点。李小诗等(2011, 2012)通过研究不同变形机制的构造煤大分子结构随变形变质程度的变化特征,认为芳族结构和脂族结构基本呈现互补式的演化,不同变形机制的构造变形作用可以引起构造煤大分子结构的变化。脆性变形作用主要将机械能转换成(摩擦)热能,导致部分脂肪类官能团和烷烃支链等侧链小分子断裂脱落,促进了降解作用的发生。韧性变形煤通过大分子结构单元位错的增加积累转换成应变能,在缓慢的变形过程中使部分降解的小分子逐步缩聚成芳环,促进缩聚作用的进行。

(五) 构造煤核磁共振特征

核磁共振(NMR)分析方法早在1955年就开始用于煤的研究。70年代中后期,由于脉冲傅里叶变换 NMR 仪的出现,以及高功率法耦、交叉极化(Cross Polarization, CP)和魔角旋转(Magic Angle Spinning, MAS)等技术的开发,煤¹³C NMR 谱得以实现,并很快受到有机地球化学界的重视(黄第藩等,1995),核磁共振技术可以在原子水平上获得分子结构的信息(Slitcher, 1983),成为研究煤和干酪根等固体难溶有机物分子结构的有利工具之一。煤的 NMR 研究不仅可以得到煤中有机碳、氢、氧官能团结构的多种信息,而且具有较好的定量性。因此 NMR 技术被广泛地应用于各种固体化石能源的研究并取得了一系列重要成果,极大地深化了人们对煤、干酪根的结构、性质和演化特征的认识(姜波等,1998b; 屈争辉^①, 2010)。

姜波和秦勇(1998a, 1999)首先将¹³C NMR 技术应用于变形煤结构的研究,填补了这一研究领域的空白。同时结合 XRD 和 EPR 测试构造煤的化学结构,探讨了构造煤镜质组反射率演化的地化机理,说明了镜质组反射率的光性异常是构造煤化学结构演化在物理光学性质上的具体体现(姜波等,2009)。据宜文等(2005)通过不同类型构造煤的¹³C NMR 高分辨谱的拟合和峰的解叠,指出构造煤 NMR 参数的变化从某种程度上反映了构造煤结构成分的应力效应,探讨了不同变质环境下不同构造变形对构造煤结构演化的过程。屈争辉^①(2010)在前人研究基础上,对6个不同变形类型焦煤样进行了¹³C NMR 谱测

① 屈争辉. 2010. 构造煤结构及其对瓦斯特性的控制机理研究. 徐州: 中国矿业大学.

② 李明. 2013. 构造煤结构演化及成因机制. 徐州: 中国矿业大学.

③ 高飞. 2011. 构造煤微观结构与甲烷吸附相关性研究. 焦作: 河南理工大学.