

● 国家自然科学基金项目 (40372075, 40872105) 资助

大别山北麓 杨山煤系 高煤级煤的 变形变质作用研究

曹代勇 李小明 占文锋 张守仁 著

地质出版社

国家自然科学基金项目(40372075,40872105)资助

大别山北麓杨山煤系高煤级煤的 变形变质作用研究

曹代勇 李小明 占文锋 张守仁 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

大别山北麓晚古生代杨山煤系以强变形高煤级为特征。作者在详细研究区域地质背景条件的基础上,运用多种方法手段对杨山煤系煤的变形变质作用进行了系统深入的研究,划分了特殊地质环境下高煤级煤的变形变质类型,提出了应力降解机制和应力缩聚机制,揭示了煤化作用与构造-热作用之间的能量和物质交换过程。研究内容涉及煤化作用因素、煤岩变形机制、构造地球化学等煤地质学领域和构造动力学领域的一系列基本问题。

本书可供从事煤田地质、煤层气地质、瓦斯地质、构造地质、地球化学等科研和生产人员参考,也可作为相关高等学校科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大别山北麓杨山煤系高煤级煤的变形变质作用研究/
曹代勇等著. —北京:地质出版社,2012. 2
ISBN 978-7-116-07557-3

I. ①大… II. ①曹… III. ①煤田地质—煤变质—研
究 IV. ①P618. 110. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 003238 号

Dabieshan Beilu Yangshan Meixi Gaomeijimei de Bianxing Bianzhi Zuoyong Yanjiu

责任编辑:李丛蔚

责任校对:黄苏晔

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324565(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京天成印务有限责任公司

开 本:787mm×1092mm^{1/16}

印 张:12

字 数:290 千字

印 数:1—600 册

版 次:2012 年 2 月北京第 1 版

印 次:2012 年 2 月北京第 1 次印刷

定 价:38.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-07557-3

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

煤是一种对温度、压力等地质环境因素特别敏感的有机岩,煤化作用实质上是煤与外界进行能量和物质交换的过程。地质历史演化过程中的各种构造-热事件必然导致煤发生一系列物理、化学、结构和构造变化,煤中有机组分和无机组分在各种地质营力作用下发生迁移、分异和改造。相对于沉积盆地而言,造山带具有更为复杂和强烈的地质演化历史,分布于造山带内或前陆地区的煤通常以强变形、高煤级、物理性质和化学成分复杂为特征。近年来,前陆盆地、逆冲推覆构造带等构造活动区的煤化作用研究成果,揭示了构造-热事件对煤变形变质过程的显著控制,表现在煤组分、结构和构造变化以及元素迁移和聚散方面,从而影响煤层现今赋存状况、煤化程度和煤质特征,在一定程度上决定了煤炭资源的开发利用价值。

大别造山带北麓北淮阳地区分布一套以粗碎屑岩沉积为主的含煤地层,习称杨山煤系。20世纪80年代以来,随着秦岭-大别造山带研究热潮的兴起,杨山煤系也随之引起地质界的重视,在地层划分、沉积盆地类型、聚煤作用、构造变形等研究方面取得长足的进展。认识到北淮阳地区的上古生界为活动大陆边缘陆缘海环境沉积,晚古生代以来经历了由弧后裂陷盆地至前陆盆地的反转及多期构造-热事件,导致杨山煤系煤层厚度变化频繁、形态复杂、煤级高,具有明显不同于板内(华北地区)相近时代煤层的特殊性。

杨山煤系位处大别造山带前陆,中国东部南、北大陆自晚古生代以来的相互作用等构造-热事件,必然在煤形态和物质成分变化方面留下深刻的烙印,使之成为研究煤化作用进程,尤其是高煤级煤演化机理的理想场所。本书作者长期从事煤田地质和构造地质方面的研究工作,在国家自然科学基金“造山带中有机质演化特征及其大陆动力学意义”(49872067)、“大别山北麓杨山煤系高煤级煤的变形变质作用及其对造山进程的响应”(40372075)和“煤化作用与构造-热事件的耦合效应及其资源环境意义”(40872105)的支持下,对包括杨山煤系在内的煤的变形变质作用开展了系统深入的研究,本专著即为上述基金研究成果的重要内容。

全书共分10章:第一章,绪论;第二章详细论述了北淮阳地区地质背景和杨山煤系基本特征;第三章采用野外地质调查与室内测试分析相结合的方法,论述了杨山煤系晚古生代以来的构造几何学、运动学和动力学特征;第四章通过有机质反演、黏土矿物X射线衍射分析、磷灰石裂变径迹分析、包裹体测温等多种方法分析了本区古地温,恢

复了大别造山带北麓地区石炭纪以来的构造-热史;第五章从宏观、微观不同尺度揭示了杨山煤系煤所具有的独特的变形特征;第六章在详细观察各类显微组分,系统测定(变)镜质体反射率的基础上,划分了高煤级煤的变形变质类型,揭示其与地质环境条件之间的相关性;第七章研究了北淮阳地区高煤级煤的化学结构演化特征及其影响因素,总结了不同变形变质类型煤间存在的差异及其对地质环境条件的响应;第八章对比分析了不同变形变质类型煤的主要常量元素、微量元素及其稀土元素的质量分数,以此阐明构造应力和岩浆热对煤中不同元素迁移的差异影响;第九章从煤化作用与外界的能量和物质交换两个方面探讨了煤化作用与构造-热事件耦合机制,提出了构造应力影响煤化作用的两种基本机制——应力降解和应力缩聚;第十章,主要结论和讨论。

本书前言由曹代勇撰写,第一章由曹代勇、李小明和张守仁撰写,第二章由占文峰和曹代勇撰写,第三章由张守仁和占文峰撰写,第四章由李小明和张守仁撰写,第五章由曹代勇和李小明撰写,第六章由李小明和张守仁撰写,第七章由曹代勇和李小明撰写,第八章由李小明撰写,第九章由曹代勇撰写,第十章由曹代勇、李小明、占文峰、张守仁撰写。

课题研究得到了中国矿业大学(北京)的[韩德馨]院士、任德贻教授、金奎励教授、张鹏飞教授和彭苏萍院士的关心与指导,中国矿业大学(北京)唐跃刚教授、胡社荣教授、邵龙义教授、代世峰教授、刘钦甫教授、孟召平教授、李贤庆教授,中国石油大学(北京)钟宁宁教授,中国地质大学(北京)马文璞教授、刘文灿教授、唐书恒教授、汤达祯教授、黄文辉教授,中国科学院研究生院候泉林教授、琚宜文教授,中国矿业大学(徐州)秦勇教授、姜波教授、朱炎铭教授等许多专家和同行对研究工作提出了宝贵的意见;感谢中国矿业大学(北京)地测学院艾天杰高级工程师、侯慧敏高级实验师和代纪民技师在样品制备和实验过程中给予了帮助,在此,表示衷心的感谢!

现场调查和收集资料得到中国煤炭地质总局第一勘探局、河南省商城县杨山煤矿等单位和技术人员的支持和帮助。测试分析工作在煤炭资源与安全开采国家重点实验室、北京大学分析测试中心、中国科学院生物物理研究所、中国石油勘探开发研究院测试中心、北京化工大学、中国地质大学、核工业北京地质研究院分析测试研究中心等单位进行,实验工作得到上述单位专家和实验技术人员的大力帮助。

借本书出版之际,作者感谢曾给予支持和帮助的所有单位和同志!

由于作者水平有限,加之研究区地质条件的复杂性,书中不当之处恳请读者不吝指教。

著 者

2011 年 11 月

目 录

前言

1 绪论	(1)
1.1 研究意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(1)
1.3 目前研究中存在的主要问题	(6)
1.4 研究目标和研究内容	(7)
1.5 研究方案和样品的采集	(8)
1.6 主要研究成果	(9)
2 区域地质特征	(12)
2.1 区域构造格局和构造变形	(12)
2.2 地层单元	(18)
2.3 大别造山带北麓侵入岩	(23)
2.4 晚古生代以来沉积盆地性质	(24)
2.5 煤层发育与分布	(26)
3 杨山煤系构造变形与成因分析	(29)
3.1 杨山煤系煤层后期改造特征	(29)
3.2 古构造应力场分析	(30)
3.3 显微构造分析	(37)
3.4 岩组分析	(46)
4 石炭纪以来大别造山带北麓地区构造-热史研究	(52)
4.1 有机质反演古地温	(52)
4.2 黏土矿物 X 射线衍射分析	(57)
4.3 磷灰石裂变径迹分析	(62)
4.4 包裹体测温	(67)
4.5 极低级变质作用阶段古地温研究方法对比	(74)
4.6 石炭纪以来大别造山带北麓地区构造-热史	(75)
5 高煤级煤的变形特征	(78)
5.1 煤的构造变形与构造煤	(78)
5.2 高煤级煤宏观变形特征及类型	(80)
5.3 高煤级煤的微观变形特征及类型	(83)
5.4 高煤级煤的显微裂隙特征	(85)

5.5	高煤级煤的变形特征	(91)
6	高煤级煤的光学特征	(95)
6.1	大别山北麓高煤级煤	(95)
6.2	有机显微组分特征	(96)
6.3	镜质体反射率	(100)
6.4	大别山北麓高煤级煤变形变质类型划分	(107)
7	高煤级煤的结构特征	(109)
7.1	X 射线衍射分析	(109)
7.2	电子顺磁共振分析 (EPR)	(116)
7.3	显微傅立叶变换红外分析 (Micro - FTIR)	(124)
7.4	高分辨率透射电镜分析	(130)
8	高煤级煤的元素分布特征	(134)
8.1	研究背景	(134)
8.2	高煤级煤矿物学特征	(135)
8.3	大别山北麓高煤级煤的常量元素分布特征	(137)
8.4	大别山北麓高煤级煤的微量元素分布特征	(146)
8.5	大别山北麓高煤级煤的稀土元素分布特征	(155)
9	构造-热作用与煤化作用的耦合机制	(161)
9.1	煤化作用过程	(161)
9.2	能量交换	(163)
9.3	物质交换	(171)
10	主要结论	(175)
	参考文献	(178)

1 绪 论

1.1 研究意义

煤是一种对温度、压力、流体等地质环境因素特别敏感的有机岩 (Teichmüller et al., 1966; Stach et al., 1982), 煤化作用实质上是煤与外界进行物质和能量交换的一个开放系统 (Cao et al., 2006)。煤化作用系统依赖与外界环境进行能量和物质交换以及内部耗散过程来维持自身的运动状态和时空结构, 煤化作用动力学过程中地质环境因素导致煤的物质组成和结构的变化使系统总熵变为负值, 向更有序方向 (增碳和石墨化) 发展。近年来, 前陆盆地、逆冲推覆构造带等构造活动区的煤化作用研究成果, 揭示了构造-热事件对煤变形变质过程的显著控制, 表现在煤组分、结构和构造变化以及元素迁移和聚散方面 (曹代勇等, 2000, 2002; Brateka et al., 2002; Murray et al., 2004; Amijaya et al., 2006; Cao et al., 2006; 张守仁等, 2001; 李小明, 2007; Ju et al., 2008; 张玉贵等, 2008), 从而影响煤层的现今赋存状况、煤化程度和煤质特征, 在一定程度上决定了煤炭资源的开发利用价值。上述研究成果促进了人们对煤化作用进程本质性的思考, 提出了煤化作用与构造-热事件耦合效应的新课题 (曹代勇等, 2009)。这一问题的研究, 对于揭示煤化作用实质与控制因素、深化对盆地动力学过程的认识、科学地评价和开发煤炭及煤系伴生资源、防治环境破坏和瓦斯灾害等问题, 具有重要的理论意义和实际应用价值。

中国东部的大别造山带是一个典型的大陆碰撞造山带 (李曙光, 2009; 1997), 北淮阳地区晚古生代地层由下部海陆交互相含煤建造和上部含碳酸盐建造组成 (陈刚等, 2003), 经历了不同程度的构造变形和区域变质作用, 大部分处于极低变质阶段, 局部达到低变质绿片岩相, 其中煤从高阶烟煤至半石墨阶段, 是研究煤化作用与构造-热事件耦合效应的理想场所。

本书研究涉及煤化作用因素、高煤级煤演化机理、动力变质作用、煤岩和有机岩变形机制、北淮阳地区晚古生代以来的大地构造环境以及大别造山带构造-热演化史等煤田地质学和大陆动力学领域的一系列基础问题。上述科学问题的研究进展, 对于揭示煤化作用进程中煤与外界的能量和物质交换机理、探讨高煤级煤演化途径及其控制因素、恢复北淮阳乃至大别造山带晚古生代以来的演化历史均具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 有关煤化作用与构造-热事件的耦合研究

煤化作用系统作为远离平衡态的复杂的和非线性的开放系统, 与构造-热事件耦合效应

主要表现为煤与外界(地质环境)的能量(热、压力、应力)和物质的交换作用(Cao et al., 2006; 曹代勇等, 2009)

能量包括热能(力)和机械能(力)两大类。热力(温度)作用是煤化作用的主导因素,随煤级的增高,煤的基本结构单元均呈规律性的演进,而岩浆热、构造(摩擦)热等异常热能的作用也会导致煤化作用的加速(Teichmüller et al., 1966; Stach et al., 1982)。动力变质现象早已被人们所认识,但对其作用机理一直存在争议(England et al., 1986; Ross et al., 1997; Wilks et al., 1993; Cao et al., 2000; 曹代勇等, 2002)。近年来的研究发现,动力变形不仅仅是一种物理机械作用,而且也起着某种地球化学作用,即力学化学作用,可以促进煤的大分子结构的变化(刘文汇等, 2000; 张玉贵, 2006)。进一步研究表明,机械能(力)包括静水压力和构造应力两类,两者对煤化作用进程的影响不同,前者常常仅使煤层发生脱水、压实作用等物理变化,而不改变煤的化学结构;后者对物理煤化作用和化学煤化作用均具有促进作用(Cao et al., 2007)。许多学者采用煤镜质体反射率光性组构分析、X射线衍射(XRD)、傅立叶红外光谱(FTIR)、岩石热解(Rock-eval)、电子顺磁共振光谱(EPR)和核磁共振光谱(NMR)等方法对构造煤大分子网络结构进行了分析(Ross et al., 1997; 曹代勇等, 2005; 李小明等, 2009; 琚宜文, 2004)。结果表明,构造变形煤具有较大的反射率和双反射率、较大的芳核结构和较高的自由基浓度、脂族吸收峰弱而芳核吸收峰强、热解生烃潜力相对较低、构造变形煤含有较低的甲基及亚甲基成分,使构造煤的脂肪碳减少,芳香碳增高,烷基侧链脱落成烃,反映了应力尤其是剪切应力引起的煤结构裂解、聚合、异构、芳构等多种化学效应。本书第一作者以上述研究成果为依据,提出应力降解机制和应力缩聚机制(Cao et al., 2007),强调构造应力在煤化作用中的“催化”意义。

煤化作用的进程也是一个煤与外界进行物质交换的过程。在热力和应力作用下,有机质热降解和机械降解产物,如小分子量的烃类等以气、液等形式溢出煤体,同时煤与围岩之间还可能通过元素扩散、吸附、络合、固溶等形式进行物质交换,导致煤中元素组成发生变化(吴俊, 2004; Ward, 2002; Alsaab et al., 2008)。近年来,煤地球化学研究取得了明显进展,但研究成果偏重于煤中元素的沉积成因。事实上,煤化作用进程中的构造-热事件将促使煤体与环境之间的物质交换,不同程度地改造煤的原生地球化学特征。正如任德贻教授在《煤的微量元素地球化学》(2006)中所指出的:“煤作为有机岩,在其形成的各个阶段,对于微生物、沉积环境、温度、压力和热液等作用的影响十分敏感,会发生相应的变化并留下痕迹。煤的地球化学特征及其时空变化,理应反映出聚煤盆地和区域构造演化乃至不同矿产共生组合的许多有益信息。但由于地质作用的长期性、复杂性,加之我们综合研究的不足,这方面知之甚少”。构造地球化学的研究进展为揭示煤化作用中元素迁移行为提供了启示和可资借鉴的研究途径。

1.2.2 大别造山带构造演化

大别造山带经历了复杂的演化历史。尽管把大别造山带看做华北地块与扬子地块碰撞产物已渐成共识,但对于大别地块是否为一古老演化史的中间地块、大别山的主体部分是扬子大陆板块基底还是中朝大陆板块基底、两个大陆板块中哪个是仰冲板块、地缝合线的位置以及碰撞对接方式和机理等问题仍有许多争议。含超高压矿物的榴辉岩的发现为大别群的

演化历史研究提供了新证据,证明了陆壳俯冲的存在,但对榴辉岩成因、 $p-T-t$ 轨迹和折返机理等仍有待深入研究(刘德良等,1990;王国灿等,1998)。

不同研究者应用不同的方法对北淮阳构造带的变形机制及变形期次作了大量的研究(刘文灿等,1997;王果胜等,2001;王伟等,2005;占文峰,2005),尽管研究结果不尽一致。但总的来说,其主要经历了以海西期及印支期的北东—南西向挤压为主,到晚燕山期以北东—南西向的拉张为主的变化。

关于华北与扬子两陆块的对接时代(即大别褶皱带的闭合时间)的争议主要集中在两种意见上:一种认为中国东部南北大陆的碰撞发生在中、晚泥盆世以前(许志琴等,1988;曹高社等,2003),主要有沉积、构造及同位素等方面的证据;另一种意见认为发生在晚三叠世(马文璞,1991;李曙光等,2001),这种观点除得到古地磁测定的支持外,还得到新同位素地质成果的证实。分歧的实质是秦岭古生代后期的构造事件究竟是代表大陆碰撞后的陆内俯冲,还是大陆碰撞过程的继续。

北淮阳地质构造以断裂为主,褶皱次之,断裂又以北西西向为主,它是本区最基本的构造形迹。而起控制作用的主要断裂有三条,即信阳—舒城断裂、桐柏—磨子潭断裂、确山—肥中断裂。这些断裂均被不同的学者认定为华北与华南地块的界线和碰撞缝合线。一些学者从磨子潭—晓天断裂形成时代及其断层的性质方面说明其不具有缝合线的性质,认为其形成于燕山晚期,是一条叠加浒湾—卢镇关剪切带之上的左行平移性质的倾向北及北西的高角度正断层等(王伟等,2005)。一些学者则通过对年代学及古生物学等方面的研究认为,信阳—舒城断裂为碰撞缝合带,如颜怀学等(1988)在北淮阳地区杨山组底部砾岩中采获了华北型石炭纪叶肢介(*Protomonocrina* sp.),索书田等(1993)通过岩石学方面的证据,证明古缝合线位于大别地块的北缘,沿八里畈—磨子潭—晓天一线展布。赵宗举等(2004)通过地球物理解释研究,赵志根(1999)则通过稀土元素的研究,认为肥中断裂为华北陆壳型基底与其过渡壳基底的大致分界。

大别造山带及其北麓北淮阳地区的自石炭纪以来的隆升显示出差异隆升的特点,北淮阳区隆升幅度小,总隆升幅度约 10km;大别造山带隆升幅度大,最大隆升幅度一般大于 15km。前者主体隆升发生在中侏罗世末(约 150Ma)之前,后者主体隆升发生在中侏罗世末(约 150Ma)之后(马昌前等,1995;杨坤光等,1999)。

大别山腹地在三叠纪末期曾经发生过强烈的高压变质作用。三叠纪形成的高压—超高压变质带,经折返抬升,至晚侏罗世或之前已经到达地表。大别群在 130Ma 左右又受到很强的变质,其变质程度达到角闪岩相;大别山北部的变质复理石推覆体(主要包括佛子岭群和卢镇关群),其时代主要为震旦纪—早古生代—泥盆纪。变质作用主要为角闪岩相—绿片岩相(陈廷愚等,1991;王道轩等,2001)。

北淮阳现存的构造样式主要以中生代的滑脱—逆冲推覆构造为特征。北淮阳带的逆冲—推覆构造成因存在多种解释:①因华北陆块向南俯冲形成的前陆褶冲带(陈刚等,2003;周建波等,2001);②向南逆冲的推覆体的一部分(郭华等,2002);③华北板块向南逆冲过程中形成的反向冲断构造(郝杰等,1988;徐树桐等,1992);④向造山带南、北两侧(前陆)方向逆冲推覆的结果,总体构造不对称的扇状逆冲推覆构造格局(索书田等,1993)。

1.2.3 大别山北麓石炭系

大别山北麓石炭系是北京地质学院 1959 ~ 1961 年在商城、固始地区进行 1:20 万区域地质调查时发现的。聂宗笙(1964)论述了它的层序、时代和对比,刘印环和王德有根据 20 世纪 70 年代该区第二次区域地质调查所获得的资料,在生物地层学方面作了进一步的补充。在苏仙石、金寨地区作了 1:50 万的区域地质调查,对该区地层、构造等方面进行了详尽研究。许多学者还对大别山北麓石炭系进行了专门的研究(马文璞,1991;李宝芳等,2000;赵志根,1999;王世峰,2002;金福全,1995;陆光森等,1987;张惠良等,1999)。

大别山北麓石炭系的分布范围自西向东依次存在于罗山凉亭(溧港西北)、光山百步岗(马畈东南)、商城、金寨皂河、五峰尖和三仙山,延伸长度近 200km。商城金寨皂河地区是大别山北麓石炭系最大的一片连续露头,面积约 500km²,中间被中生代商城岩体隔开,与上覆的侏罗系红层呈角度不整合接触,与下伏的更老地层目前还没有发现可靠的非断裂接触。前人所创石炭系的建组剖面全部集中在商城岩体以东,其他部分的石炭系研究程度相对较低。

张守仁(2001)在其博士学位论文中总结了近年来商城-金寨皂河地区的工作:①本区石炭系发育齐全,可分为 5 个组:下统杨山组、中统道人冲组和胡油坊组、上统杨小庄组和双石头组。②石炭系总体上为一套海陆交互相的碎屑岩系,厚度超过 3500m,中统下部含有丰富的双壳类、珊瑚、头足类等海相动物化石。③石炭系的区域走向为北西向至近南北向,与秦岭-大别褶皱带的延展方向不一致。构造上总体呈一复式向斜,轴部为商城岩体占据,石炭系总的层序是从东西两侧向中部变新。④石炭系目前的分布状况是印支-燕山期大规模逆冲推覆改造的结果,使片岩从南面掩覆其上,并产生一系列的推覆体群。在叠瓦扇前缘,多处可见到石炭系,甚至更老的片岩逆冲在侏罗纪红层之上。⑤区内燕山中一晚期岩浆岩体发育,在杨山矿区北部,岩浆岩体侵入煤系和煤层,多呈小型岩体形式产出,局部顺煤层或炭质泥岩侵入,并造成煤层局部缺失或形成天然焦。⑥杨山组煤现今变质程度较高,排除天然焦的影响,各局部可采煤层精煤的无水无灰基氢元素平均含量为 2.13% ~ 2.16%,平均挥发份产率为 4.60% ~ 6.99%,煤级主要在高阶无烟煤阶段。据煤岩鉴定结果,镜质体多色性和光学各向异性特征明显,可见镶嵌结构产出。

1.2.4 有机质演化特征

迄今为止,前人已对富集型有机质(煤)和分散有机质(干酪根)的演化过程做了大量的研究工作,包括显微岩石学研究、结构研究以及有机地化的研究等,而且也取得了较一致的认识。有机质演化,实质上就是一个富炭、去氢、脱氧的过程,有机质分子由小到大、由无序向有序转化的过程。低、中级演化阶段的有机质由含各种侧链的缩聚芳核组成,是一种长程无序而短程有序的非晶态物质。随着演化程度的升高,一方面侧链和官能团依据键能的大小相继裂解析出,形成各种烃类;另一方面,通过芳构化和缩聚作用实现分子重排、密集、有序畴增大,最终向具有三维结构的石墨方向演变。有机质在演化过程中,温度已被普遍认为是影响有机质成分、结构变化的主要因素,已经提出多种镜质体反射率(VR)与温度和受热

时间关系的数学模型和理论图解(Stach et al., 1982)。压力在有机质演化中的意义尚存在争议,通常认为围压延缓有机质的化学反应速度,而定向压力(构造应力)促进有机质结构变化,高压(尤其是剪切应力)是石墨化作用的必要条件(Stach et al., 1982;杨起等,1996; Ross et al., 1997;张守仁等,2002)。近年来,随着新仪器、新方法的不断应用以及有机质高温高压实验研究,对有机质的演化过程也有了突飞猛进的认识,有人认为有机质演化具有阶段性和波折性特点,提出低级演化阶段以芳构化作用为主、中级演化阶段以环聚合作用为主、高级演化阶段以拼叠作用为主和石墨化作用 4 个阶段的观点(秦勇,1994;杨起等,1996);也有人强调构造应力尤其是剪切应力在有机质演化中的重要作用,认为有机质演化的途径之一,是在应力集中作用下出现局部石墨化,类似矿物晶格位错,局部石墨化逐渐扩展进而促进有机质结构由无序向有序转变的(曹代勇等,1994,2006);也有人认为温度与应力均可促使有机质的演化程度增高,只是演化路径不同,热演化模式是:受热→侧链热解脱落→芳核增生,构造演化模式是:应力→迫使芳核增生→增芳趋势导致脱链→芳核增生(曹运兴等,1996)。

1.2.5 高煤级煤的研究

1.2.5.1 高煤级煤显微岩石学研究

在高煤级煤的显微组分研究方面,仅在少数文献中附带提及。对高煤级煤显微组分的划分和命名,沿用“国际硬煤显微组分分类方案”,识别出的显微组分的种类远少于中煤级煤。秦勇(1994)在对我国高煤级煤显微岩石学特征比较深入研究的基础上,做了卓有成效的工作,提出了比较完善的中国高煤级煤显微组分分类方案。它是建立在成因基础上的比较实用的分类方案,同时建立了中国高煤级煤显微岩石学评价的系统方法。

在高煤级煤显微光学性质方面的研究成果较多。Alpern 等(1970)提出三大显微组分反射率的演化模式,指出反射率演化速率的顺序为壳质组 > 镜质组 > 惰质组,且在高煤级煤阶段其反射率之间的关系发生了根本性的变化;Cook 等(1972)年首次发现较高煤级煤中镜质组的二轴光性,从而深化了煤地质工作者对显微光学性质的认识;Ragot(1977)首次描述了最小镜质体反射率 $R_{\min}$ 发生倒转的现象,修正了对“镜质体反射率在煤化过程中持续增大”传统认识,也为科学划分煤化作用阶段及认识高煤级阶段煤化作用的实质提供了新的思路和依据;Teichmüller(1982)对德国明斯特 1 号孔等的研究发现,在镜质体反射率 $R_{o,\max}$ 为 4.0% 之后, $R_{o,\min}$ 的离散性明显增强,而且在构造剪切带附近,镜质体光学各向异性突然增强;肖贤明(1989)首次提出煤中光学各向异性组分的地质成因分类,这是对较高煤级煤中显微组分成因及煤化作用实质认识的重要进展,标志着国内对较高煤级煤显微岩石学的研究已达到了一个新的高度。

1.2.5.2 高煤级煤结构研究

煤结构包括物理结构和化学结构两个方面,物理结构主要是研究煤的孔隙(空间)结构,而化学结构主要涉及有机大分子结构。

国内学者以煤矿安全及煤层气研究为目的,自 20 世纪 70 年代后期以来,开展了一系列

针对煤的孔隙的研究。自 20 世纪 80 年代以来,国外研究者对煤的孔隙也开展了进一步的工作(Lorenz et al., 2003)。上述研究主要针对对低、中煤级煤。秦勇(1994)专门针对高煤级煤的孔隙(空间)特征进行了研究,认为高煤级煤的空间结构的演化具有阶跃性和阶段性。但是,对于温度、压力等地质因素在高煤级阶段孔隙的演化过程中所起的作用仍不清楚,有待进一步研究。

煤中有机质的化学结构具有高度不均一性。各国研究者提出了种种假说或模式(Oberlin et al., 1983; Marzec, 1986),这些模式主要是根据物理方法(如 XRD)得出的研究成果。

国内外一些学者用 X 射线衍射方法对煤进行研究,在煤结构分析方面取得了明显的进展(翁成敏等, 1981; Deurbergue et al., 1987; 姜波等, 1998; 蒋建平等, 2001)。曲星武等(1980)首次将 XRD 方法引入煤结构的研究领域,他们研究了天然煤化系列及高温高压食盐系列样的 BSU 特征,得出了许多极有意义的结论,其中某些实验结果(如用 La/Lc 判别煤的变质作用类型等)至今仍被广泛引用。秦勇(1994)针对高煤级煤的化学结构应用 XRD 及 TEM 作了专门的研究,指出高煤级煤的化学结构演化极富规律性,揭示了高煤级煤演化的特有机制——拼叠作用。

1.3 目前研究中存在的主要问题

煤化作用是煤田地质学学科的主要内容之一,研究成果浩如烟海。然而,国内外近年来的研究进展对煤化作用的经典认识提出了挑战,促使人们对煤化作用的实质进行深入思考,以更开阔的思路去理解煤化作用进程及其产物。

杨山煤系位处大别造山带前陆,中国东部南、北大陆自晚古生代以来的相互作用等构造-热事件,必然在煤形态和物质成分变化方面留下深刻的烙印,使之成为研究煤化作用进程、尤其是高煤级煤演化机理的理想场所。然而,相对于杨山煤系的地层、沉积和构造研究进展而言,煤变形变质及煤化作用研究却较薄弱,主要难点体现在以下方面:

1) 杨山煤系煤的演化程度极高, $R_{o,max}$ 普遍大于 4%, 最高超过 8%, 各采样点煤镜质体反射率存在较大差异,其数值变化并不完全与煤系埋深或燕山期岩体有关,显示出杨山煤系高煤级煤化作用因素的多样性和复杂性。

2) 杨山煤系煤的变形复杂、类型丰富、光学各向异性显著、化学结构特殊,具有叠加变形变质特征,与构造环境具有相关性。但是,相对于构造岩石学而言,以煤为代表的有机岩变形机制、尤其是韧性变形的实质及其控制因素研究还十分薄弱。

3) 大别山造山带北麓晚古生代以来经历了多次复杂的构造-热作用历史,然而,北淮阳地区晚古生代地层保存不全,缺失中生代早期地层记录,导致杨山煤系沉积-沉降史推测结果存在很大差异,高煤级煤的变形变质演化与造山作用耦合的形式和特征尚不清楚。

4) 当前对煤化作用的研究主要集中在煤化作用影响因素、煤大分子结构的演变和煤化程度增加及其煤结构构造变化等方面,尚未从煤化作用与外界的能量与物质交换机理和过程角度开展研究,从而阻碍了对煤化作用的全面深入认识。

5) 相对于压力和应力影响煤变形变质研究热点而言,煤化作用进程中煤与外界的物质交换效应研究是一个薄弱环节,煤质或煤地球化学研究主要从成煤环境入手,忽视了煤化作

用进程中构造-热作用对煤中元素迁移富集的影响,导致煤质(尤其是煤中微量元素)特征研究的不完整性。此项工作的难点之一是如何恢复煤中元素分布的沉积面貌,为揭示煤化作用进程中元素迁移提供前提条件。

1.4 研究目标和研究内容

1.4.1 研究目标

以煤对地质环境条件的敏感性为依据,深入研究大别山前陆北淮阳地区晚古生代杨山煤系高煤级煤的演化进程,从宏观、微观和有机大分子等层次剖析不同变形变质类型煤的成分、结构特征,着重筛分影响煤化作用的应力因素和热力因素,揭示煤化作用高级阶段演化途径和演化机理。

以煤化作用进程与地质环境的耦合效应为切入点,从系统动力学角度探讨煤化作用进程中煤与外界(地质环境)的能量和物质交换机理,深化对煤化作用实质及其影响因素的认识;深入研究影响煤中无机元素赋存的各种地质因素,着重识别和评价煤化作用进程中岩浆热、构造应力、地质流体等因素的影响,丰富对煤中有益伴生元素和有害元素的分布及迁移富集规律的研究内容,为全面评价煤炭资源价值和煤加工利用环境影响提供科学依据。

1.4.2 主要研究内容

(1) 杨山煤系高煤级煤变形变质作用的地质背景研究

在系统整理和深入消化北淮阳地区晚古生代地层、沉积、构造等方面现有研究成果的基础上,通过重点剖面的详细调查、着重剖析地质构造的多期活动性和盆地反转过程。此项工作拟从两方面展开:

成煤原生条件研究。采用煤相分析、沉积地球化学分析的原理和方法,研究主要煤层的形成条件和聚煤规律,为探讨煤化作用进程中构造-热事件对煤无机元素迁移富集的影响提供基础。

成煤期后构造-热事件研究。采用煤田地质学和构造地质学的理论和技术,通过现场调查、测试分析等方法,研究含煤岩系和煤层构造变形特征,恢复变形史,AFT 温度-年代热史模拟,力图恢复成煤期后构造-热作用历史,对煤化作用因素在时-空演化框架内予以标定。

(2) 高煤级煤变形变质类型与动力变质作用研究

以煤岩变形特征、组分变形、光学特性、有机大分子结构、有机化学成分等综合特征为依据,划分煤的变形变质类型,查明不同类型煤的平面分布规律,研究高煤级煤演化与岩浆活动、区域性断裂和构造变形等地质环境因素的相关关系。

从变形机制和构造环境指相意义角度,进行构造煤的结构与成因综合分类,从大分子结构尺度,揭示有机组分脆性变形与韧性变形的实质,从温度和地层压力(静压力)等煤化作用因素中筛分出构造应力因素(尤其是剪应力因素)的影响,揭示动力(应力)变质作用的表

象和机理。

(3) 煤化作用与外界的能量和物质交换机制研究

以煤化作用因素和构造作用与煤化作用关系的现有研究进展为基础,采用煤岩学和构造岩石学的研究方法,着重研究构造应力对有机大分子结构演化的影响,籍以完善有机大分子演化模式。

以主要煤层的原生沉积差异和构造-热事件恢复为基础,采用地球化学分析方法,查明煤中常量元素、微量元素及稀土元素的分布特征,力图从煤的无机组分分布特征中,识别和筛分出煤化作用进程中的叠加影响,以初步阐明煤化作用进程中煤与外界的物质交换方式和规律性。

(4) 煤化作用与构造-热事件的耦合效应研究

依据上述基础研究和实验测试成果,构筑煤化作用演化动力学模型。阐明煤化作用与外界进行能量和物质交换的机理及表现形式,建立煤化作用动力学过程及其与地质环境的耦合机制。

1.5 研究方案和样品的采集

1.5.1 技术路线

遵循充分收集利用已有研究成果→重点地区地质调查→系统采集分析样品→有针对性的室内测试→综合分析的研究流程,以造山带前陆复杂地质环境中煤化作用及其影响因素筛分研究为主线,从煤田地质学和煤岩学、构造地质学和构造岩石学、有机地球化学等多学科角度展开综合研究。

1.5.2 研究方法

1) 地质调查。系统收集大别造山带尤其是北淮阳地区有关构造、地层、岩石和沉积矿产等方面的资料和专题研究成果,在深入消化的基础上,选择代表性剖面,运用煤田地质学和构造地质学的野外工作方法,研究杨山煤系煤层宏观结构构造特征和赋存状况,实测解析应变标志物以恢复变形史和古构造应力场、分析地层结构以恢复埋藏史,系统采集供测试分析的煤标本和岩石标本。

2) 煤岩学和有机岩石学方法。制作煤光片,采用光学显微镜进行组分鉴定和定量统计,观察显微构造现象,研究有机组成和赋存状况;采用荧光显微镜进行构造裂隙的统计分析;采用显微镜光度计测定反射率及其各向异性;取得反映有机组分变形变质特征的光性参数。

3) 有机地化方法。有机组分的分离提取单组分,采用 X 射线衍射、高分辨透射电镜、岩石热解、显微富里叶红外光谱、电子顺磁共振光谱等分析测试手段,从整体和微区不同尺度研究有机组分成分和结构特征,获取反映煤岩变形变质的成分和化学结构参数。

4) 无机地化方法。采用 X 射线衍射测定煤中矿物组成, X 射线荧光光谱分析煤中常量

元素氧化物质量分数,高分辨率电感耦合等离子体质谱测定煤样的微量元素和稀土元素质量分数;研究煤中无机元素的分布特征、迁移和富集规律。

5) 矿物温压计和应力计方法。采用有机质反演古地温、X 射线衍射测定伊利石结晶度等结构参数,流体包裹体成分和测温与测压,超微构造分析古应力估算;裂变径迹(AFT)年龄测定等,恢复煤化作用阶段的古地温地压条件。

6) 数据处理和数值分析方法。采用聚类分析、多元回归分析等方法,从统计意义上建立煤岩化学组成和结构参数与温、压、应力应变等地质环境要素的非线性相关关系,揭示煤化作用与构造-热事件的时-空耦合关系。

7) 综合分析方法。对比分析上述研究结果,建立煤化作用系统动力学模型,探讨和分析煤化作用进程中系统(煤)与外界(地质环境因素)的能量和物质交换机理。

1.5.3 野外地质调查及样品采集

本次研究的野外地质调查采用了观察点(非重点区域)与剖面(重点区域)相结合的方法,在大别山北麓实测了 20 条剖面,采样近 200 个,基本上覆盖了东起安徽省金寨县全军,西至河南省商城县歪庙、南界河南省商城县苏仙石、北至河南固始县杨山煤矿的上古生界分布区域(图 1.1)。

针对石炭纪煤层所经历的复杂构造-热演化特征,系统采集了 3 类煤样,以进行对比研究:一是采集受构造作用强烈影响(如断裂附近)的样品,二是受异常热影响(如侵入体附近)的样品,三是仅受到区域变质作用影响的样品。其中,采自河南省商城县西部马鞍山地区的煤样,位于 SN 向强烈剪切应变带内,受构造应力强烈影响,后文(第六章)称之为构造-热变煤;采自商城县东部皮冲地区燕山期花岗岩侵入体旁侧的煤样,受岩浆热影响,称之为岩浆热变质煤;采自远离断裂和岩体的其他地区的小煤矿煤样,主要反映区域变质作用,称为区域变质煤。仔细观察描述了样品的宏观特征,取得了准确的第一手资料。

1.6 主要研究成果

本书依据煤田地质学、煤岩学、构造地质学、构造岩石学、地球化学等基础理论和方法,对杨山煤系高煤级煤的变形变质作用及其对地质环境条件的响应进行了较为系统和全面的研究,取得以下主要成果:

(1) 揭示了杨山煤系高煤级煤的特殊性

由于所处特殊地质环境,大别山北麓地区含煤岩系具有特殊的沉积、构造环境,煤的成分、结构也具有独特的特点,本书称其为特殊环境高煤级煤。从成因及形成机制的角度,将杨山煤系高煤级煤划分为:构造-热变质煤(定向压力及岩浆热影响)、岩浆热变质煤(岩浆热辅以一定定向压力影响)和区域变质煤(区域热影响)三大类,这 3 种变形变质类型煤在光学性质、成分、结构和构造特征方面均具有各自的特点。

(2) 深化了对构造-热作用下煤中有机组分和有机结构演变规律的认识

本文通过 XRD、EPR、Micro-FTIR、HTEM 等实验,探讨了构造-热作用促使煤芳环结构

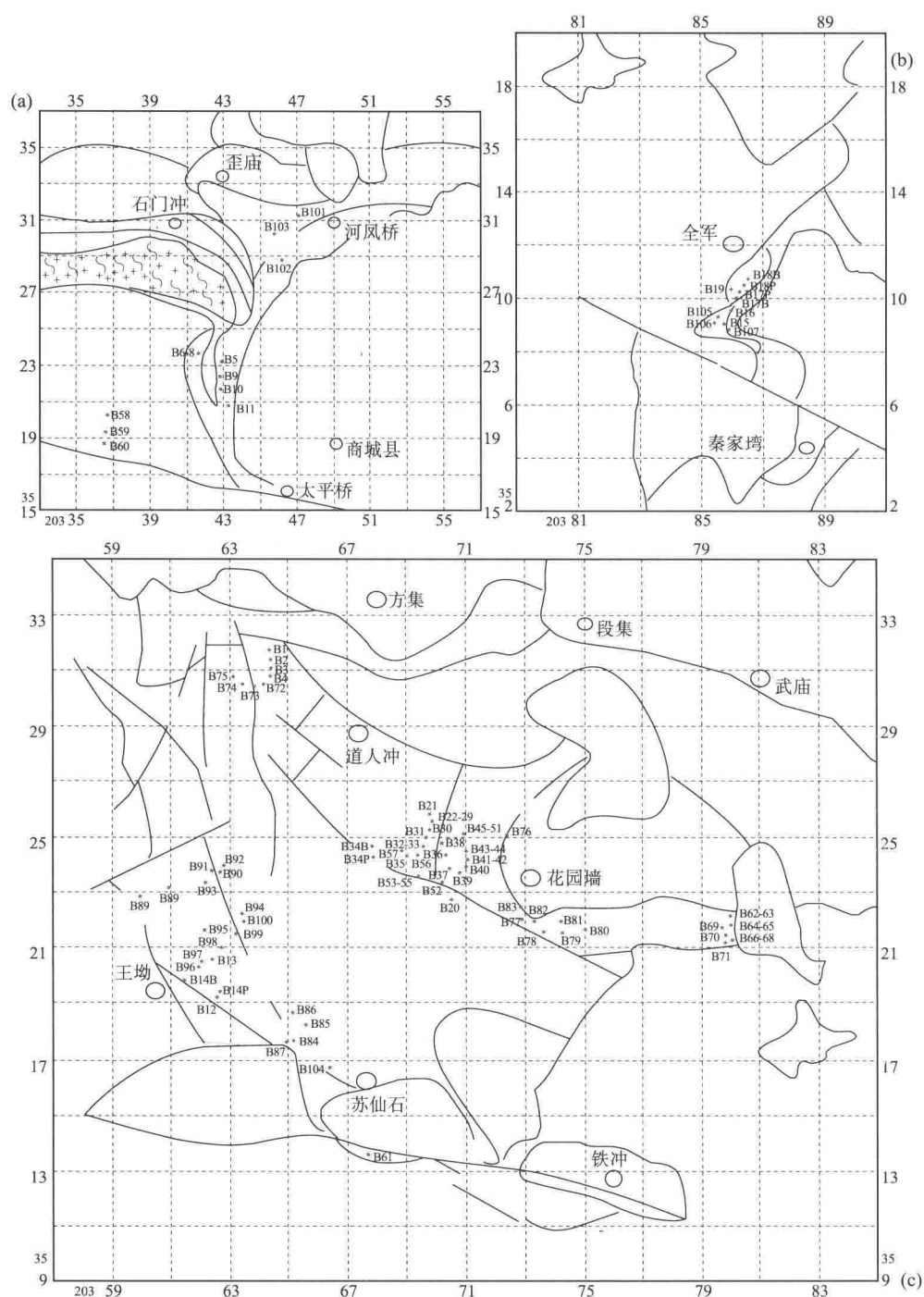


图 1.1 样品点分布图
(a) 商城岩体东; (b) 安徽全军; (c) 商城岩体西

上的侧链、官能团等分解能较低的化学键断裂,降解为分子量较小的自由基团,以流体有机质形式(烃类)逸出,而煤芳环叠片通过旋转、位移、趋于平行定向排列使秩理化程度不断提