

MICROPETROLOGY AND STRUCTURAL
EVOLUTION OF HIGH-RANK COALS IN P. R. CHINA

中国高煤级煤的 显微岩石学特征及结构演化

〔煤炭高校优秀青年教师科研基金部分资助项目〕

秦 勇 著



中国矿业大学出版社

P 618.112.1

2-926

中国高煤级煤的显微岩石学特征及结构演化

(煤炭高校优秀青年教师科研基金部分资助项目)

秦 勇 著

中国矿业大学出版社

825439

**MICROPETROLOGY AND STRUCTURAL
EVOLUTION OF HIGH-RANK COALS IN P. R. CHI**

Dr. QIN YONG

China University of Mining & Technology Press

(苏)新登字第 010 号

中国高煤级煤的显微岩石学特征及结构演化

秦 勇 著

责任编辑 王景华

中国矿业大学出版社出版发行

新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 13.75 插页 20 字数 335 千字

1994 年 5 月第一版 1994 年 5 月第一次印刷

印数:1~2000 册

ISBN 7 - 81040 - 259 - 5

P · 11

定价:18.00 元

内 容 提 要

作者以中国 20 余个高煤级煤典型矿区的样品及地质背景为基础,综合运用显微术及地球化学方法,研究了高煤级煤的显微岩石学特征及结构演化。提出了中国高煤级煤显微组分的划分命名系统,建立了新的显微组分;揭示了高煤级煤显微组分反射率的演化途径,讨论了其地质影响因素;探讨了高煤级煤物理结构及化学结构演化的阶跃性、差异性及其机理,提出了差异煤化作用的概念;提出并探讨了高煤级煤演化的特有机制——拼叠作用的概念、方式、演化路线及机理;建立了高煤级煤演化阶段的划分系统;探讨了高煤级煤孔径结构自然分类等相关问题。

本书为煤田地质及石油天然气地质科学研究者全面了解中国高煤级煤岩石学特征和大分子结构特征的演化及其成因提供了较为丰富的信息,对煤化学化工界合理利用我国高煤级煤资源及采矿工程界评价高煤级煤矿井煤与瓦斯突出倾向性也具一定参考价值。

关键词:高煤级煤 显微岩石学 煤结构 阶跃性 差异煤化作用 演化机理

ABSTRACT

Based on the samples and their geological settings from more than twenty coal districts in P. R. china, the author has made an investigation on the micropetrology and structural evolution of high-rank coals comprehensively with the methods of micrometry and geochemistry. The scheme of the nomenclature and classification of high-rank coal macerals, in which some new macerals or submacerals were included, was suggested; the developed ways of the reflectance of the macerals and some geological factors were further discussed; the "jumped" and "differential" characteristics of the evolution of the physical and chemical structures of the macerals and its mechanism were explored, and the notion on the differential coalification was advanced; the concept, pattern, path and essence of the making—up and its special mechanism for the evolution of high-rank coals were gone further into; the developed stages of high-rank coals was divided; and the natural classification of pore structure were inquired, and so on.

Key words: high-rank coal, micropetrology, coal structure, coalification jump and stage, differential coalification, coalificational mechanism

序

煤炭在我国一次能源结构中占76.2%，在现代化建设中居重要地位。据预测，在世界能源结构中，煤炭所占的比例亦将有所增加。深入研究煤的组成、结构和性质，不仅是煤炭科学发展的需要，亦是发展煤炭深度加工和寻求煤炭合理利用新途径的关键所在。

高煤级烟煤和无烟煤在我国煤炭储量中占有重要位置，在华南更占煤炭储量的一半以上。它们形成于特定的地质背景，其变质作用的成因和演化历来为广大地质工作者所关注，其用途亦有待于拓宽。

秦勇博士的《中国高煤级煤的显微岩石学特征及结构演化》专著问世，是十分有意义的。它是国内综合阐明高煤级煤显微岩石学特征、物理结构和化学结构演化的第一本专著。这本专著的基础是他的博士学位论文。我带着浓厚的兴趣阅读了经他认真整理和修改后的论文，他卓著的创新探索精神、艰苦细致的工作、严谨的科学作风，使他的论文取得了一系列十分引人注目的成果，使我受益匪浅。本书揭示了高煤级煤显微组分反射率的演化规律，提出了高煤级煤光性演化经历了三个阶段的新观点，对影响显微组分反射率地域分布和层域分布的地质因素进行了有益的探讨。高煤级煤的物理结构和化学结构演化，也是国际煤炭科学研究中的热门课题，作者根据翔实的资料提出了高煤级煤的结构演化具有明显的阶跃性和阶段性、拼叠作用是高煤级煤结构演化的特有机制的新论点。作者关于静压力对煤化作用的影响、关于高煤级煤显微组分的命名分类、关于高煤级煤煤化作用阶段的划分以及关于高煤级煤演化的差异煤化作用等论述亦很有特色。本书对各种新技术的方法也做了详细的介绍。

高煤级煤的岩石学研究和结构研究在地质应用和工业应用中有着广阔的发展前景。我深信，这本内容丰富的专著的出版，定会给广大煤地质工作者、煤化学工作者及各方面感兴趣的读者带来新的知识、新的启示，为不断发展的我国煤炭科学贡献一份力量。

任德昭

1994年4月10日

前 言

我国是高煤级煤资源大国,据有关资料统计:在我国煤炭的储量构成和产量构成中,高煤级煤分别约占四分之一和五分之一。我国也是高煤级煤资源的利用大国,除了将高煤级煤用做主要能源之外,还对高煤级煤的综合利用进行了一定规模的开发研究,将其用来生产碳素、石墨、活性炭、分子筛、合成氨、合成天然气等工业产品。最近几年,我国煤化工研究者已成功地进行了高煤级煤的间接液化试验。我国高煤级煤煤层中蕴藏着丰富的煤层气体。这些气体,一方面对煤矿的安全生产构成极大危害,另一方面又是一种宝贵的自然资源,在非常规天然气资源构成中居主要地位,受到能源界和化工界的日益重视。有鉴于此,研究高煤级煤的物质组成和结构特征,全面查明它们的演化趋势和规律,对合理开发利用我国丰富的高煤级煤资源、煤层气资源以及预测矿井中煤与瓦斯突出倾向性来说,均是至关重要的。在此项工作中,高煤级煤显微岩石学和大分子结构化学的研究正在、并将会发挥越来越重要的作用。

在我国,研究高煤级煤具有良好的天然条件。首先,我国高煤级煤的煤级系列连续齐全,从低级无烟煤、经中~高级无烟煤向石墨方向逐渐过渡,这为研究高煤级煤的演化提供了首要基础。其次,我国高煤级煤产出的地质背景复杂,不但煤化作用古地热场、古压力场、成炭环境及沉积组合多种多样,而且在从古生代至中生代的各含煤层位中均有高煤级煤分布,堪称研究高煤级煤形成演化地质机理的天然实验室。这些得天独厚的地质条件,是祖国这块古老土地厚赠我们中国煤科学工作者及全人类的天然遗产。

我国对高煤级煤的研究工作可上溯至本世纪30年代。我国老一辈著名地质学家谢家荣先生的《Microstructure of some Chinese anthracite》(1933)一文,拉开了中国高煤级煤显微岩石学研究的序幕。从那时起至今,经过我国几代煤科学工作者的不懈努力,使研究所需的技术手段和知识储备逐步丰富和完善,为本书作者首次全面、系统和深入地探讨中国高煤级煤的岩石学特征及结构演化奠定了坚实的理论和实践基础。与此同时,国外科学工作者也在高煤级煤研究领域内进行了长期的探索,分别在高煤级煤的物理性质、显微组成特征、化学结构以及研究方法等方面取得了卓有成效的研究成果。国外同行的成果,无疑地也为本书作者提供了宝贵的启示,使作者能够从岩石学和地球化学的角度以及从宏观、微观、超微乃至大分子结构的不同观察尺度完成对高煤级煤的综合研究。

作者的高煤级煤研究生涯始于1987年,经过长达6年的艰辛探索,于1992年底完成了有关的实验分析及本书初稿写作。在此期间,我的导师、著名沉积学家刘焕杰教授、著名煤岩学家金奎励教授和著名古生物学家何锡麟教授都对笔者给予了悉心指导;著名煤岩学家任德貽教授从选题至写作的各个阶段都提出了许多宝贵的具体建议,并欣然为本书作序;老一辈煤田地质学家、知名学者韩德馨教授、杨起教授以及煤岩学界、能源地质界和有机地

球化学界的著名专家学者王洁教授、唐修义教授、赵师庆教授、刘德汉研究员、张秀仪教授级高工、孙达三教授级高工、陈佩元教授级高工、邵震杰教授、王桂梁教授、陆国桢教授、许云秋教授、王绍章教授、张爱云教授、潘治贵教授、冯增昭教授、王英华教授、陈家良副教授及众多同行对研究工作也给予了热情鼓励,并从学术、资料、样品及文稿评审等方面给予作者以极大指导和帮助;曹作华工程师在实验、数据处理以及文稿整理等方面也给予了全力支持;野外工作得到了国内有关煤田地质勘探部门及煤矿生产单位的大力协助。应特别提及的是,中国矿业大学出版社副总编王劲松副编审亲自做本书责任编辑,为本书的正式出版付出了辛勤劳动。得到了如此众多的专家同行们的指导、帮助、支持与鼓励,笔者是十分幸运的。借本书正式出版之际,谨向他们致以深深的谢意!

尽管本书尚有某些不尽人意之处,但出于对能源地质事业的挚爱,作为对高煤级煤数年研究成果的总结以及作为对祖国培育的回报,作者仍愿意将本书奉献给祖国、奉献给尊敬的老一辈煤科学工作者以及所有有志于能源事业的同行。

作 者

1994年4月于徐州

MICROPETROLOGY AND STRUCTURAL EVOLUTION OF HIGH-RANK COALS IN P. R. CHINA

(Detailed Abstract)

An investigation has been made on the micropetrology and structural evolution of high-rank coals comprehensively with the methods of micrometry and geochemistry, based on the samples and their geological setting from more than twenty coal districts in P. R. China.

1. Systematical method for the evaluation of high-rank coal micropetrology

The Scheme of the Nomenclature and Classification of Chinese High-rank Coal Macerals, in which the stages of the coalification was emphasized in combination with the origin and the optical properties of the macerals, was established, and the macerals were classified into three evolving stages and three maceral groups.

A new maceral, meta-secondinite, which includes all the submacerals formed during the coalification, was suggested. The traditional concepts of "micrinite" and "exudatinitite" were emended, and the formulation of "rank macrinite" and "rank fusinite" was cast aside.

2. Developing pathes of the reflectance of high-rank coal macerals

There existed six remarkably developing parts during the evolution of high-rank coal reflectance. Based on those, three main coalification stages, successively named as meta-exinitic, meta-vitrinitic and meta-inertinitic ones, were distinguished. The coalification of high-rank coals started at desmocollinite maximum reflectance ($DC R_{\text{omax}}$) 2.1%, and ended at 10.5% $DC R_{\text{omax}}$.

The reflectance of the macerals was influenced distinctly by the region and stratigraphic horizon in which the seams occurred, the type of maceral, and the microenvironments in which the macerals existed. The facts that the inversion of the barkinite R_{omax} moved up at 4.0% $DC R_{\text{omax}}$ and that the inversion of macrinite R_{omax} occurred at 8.0% $DC R_{\text{omax}}$ were revealed. The 10.5% $DC R_{\text{omax}}$ is not the end of the coalification to meta-inertinitite. There was the equivalent between every pair of the corresponding reflectance parameters of (meta-) telocollinite and (meta-) desmocollinite.

3. Jumps and stages of the evolution of the spatial (physical) and chemical structures for the high-rank coals.

There occurred six jumps of the development of the coal structures, which led to three stages and five substages during the coalification. Basing upon those, the authors recommended the Scheme of the Classification of the Coalification Stages for Chinese High-rank Coals.

The stages were controlled by the mechanism of the development of coal molecular structures, and the jumps implied the significant transformation of the mechanism. The aromatization dominated during the coalification of hypha-anthracite, the ring condensation dur-

ing meso-anthracite, and the making-up during meta-anthracite.

4. Differential coalification of high-rank coals

The evolution of high-rank coals were associated closely with the paleogeothermal history, the coal reducibility and the coal-forming plants, that is to say, it was controled by the condiones of peat-forming and coalificational environments. The effect of the differences among the peat-forming envircnments on the evolution exsited obviously in the hypo-anthracite, and that among the coalificational enviroments became increassingly distinct to the meso-anthracite and ocured notably in the meta-anthracite.

The coals formed under hyper- or super-paleogeothermal fieldes, those with strong reducibility and the macerals with rich lipid compounds showed the advanced thrend of evolution. The development of the coalification wouldn't be impeded by the static pressure (buried effect derived from the overlying sediments) in nature, by contrast, might be promoted. The remarkblly differencial evolution between the same type of the macerals in the same sample was resulted in due to the differences between the stress and /or the geochemical micro-enviroments in which the macerals ocured.

5. Making up :a special mechanism of the coalification of high-rank coals

The making-up acted extensively on the coals of the post-hypo-anthracite stage, and turned into the primary mechanism for the development of the basic structural units (BSU) of the hyper-anthracite. There exsited three models of the making-up, namely, linkup, makeup and pileup, which played an important role respectively in the different stages of the development of high-rank coals.

The making-up might be brought off by way of the depolymerization-making-up, which might be underway under the pressure, specially tectonic stress, and might be also significantly promoted by the paleogeothermal flows. Consequently, the making-up is a dynamochemical function.

6. On some relative aspects

There exsited widespreadly the "coalification inequilibrium" in Chineses high-rank coals, which was brought out by the hyper- or super-paleogeothermal fields that the coals had undergone. The condiones in which the inversion of the minimum reflectance of the macerals (R_{omin}) took place must be that the BSU stacked height developed to a minimum and the R_{omax} in itself to more than 6%. The Classification of the Pore Diameter of High-rank Coals was suggested. The contents of the organic elements and the volatile yield of coal mightn't be appropriate to being used as the rank parameters for the high-rank coals because they were affected largely by the regions and horizones in which the coals ocured, and, by contrast, the maximum reflectance of the (meta-) vitrinite could be a excellant one. The parameters on the anisotropy of the (meta-) vitrinite reflectance could be taken as the quanlitative indicators of the coal seam strain, but some further investigation in theroy would need still to be made on whether or not they could be considered as the quantitative ones.



作者简介

秦勇,男,博士,副教授。

祖籍四川省忠县,1957年6月生于湖北省长阳县。1974年3月高中毕业后下乡插队,1975年11月进入地质勘探队工作;1978年3月进焦作矿业学院地质系学习,1982年元月分配到大同矿务局从事矿井地质工作;1983年8月考入中国矿业学院北京研究生部,师从金奎励教授研读煤岩学及煤的有机地球化学,1986年7月取得硕士学位;1989年9月师从刘焕杰教授研读煤岩学、煤的地球化学及现代沉积学,并于1993年元月获得博士学位。

自1986年以来,作者先后参加或主持了煤田地质和石油天然气地质方面的10余个科研项目的工作。

目 次

序	任德貽
前 言	(Ⅲ)
第一章 研究基础	(1)
第一节 文献综述	(1)
一 高煤级煤	(1)
二 高煤级煤显微岩石学研究	(2)
三 高煤级煤结构研究	(4)
第二节 高煤级煤研究中有待探讨的主要问题	(9)
第三节 研究方法	(10)
一 样品的采集	(10)
二 样品的分选和处理	(11)
三 测试的方法和条件	(12)
第四节 样品及其地质背景	(13)
一 样品产出的地质背景	(13)
二 系列样品的基本性质	(15)
第二章 高煤级煤的显微岩石学特征	(18)
第一节 高煤级煤的显微组分	(18)
一 概述	(18)
二 高煤级煤中的原有显微组分	(19)
三 高煤级煤中的新生显微组分	(22)
四 高煤级腐泥煤的岩石学特征	(23)
五 煤基石墨的显微组成	(24)
第二节 高煤级煤显微组分反射率的分布及演化	(25)
一 显微组分反射率演化的总趋势	(25)
二 显微组分反射率的地域分布	(32)
三 显微组分反射率的层域分布	(34)
四 同样品中相同显微组分的反射率分布	(36)
第三节 讨论	(36)
一 高煤级煤显微岩石学特征的演化	(37)
二 高煤级煤显微组分的划分与命名	(40)
第四节 小结	(45)

第三章 高煤级煤的结构特征	(48)
第一节 高煤级煤的空间结构——汞置换法研究	(48)
一 高煤级煤孔径结构的自然分类	(48)
二 高煤级煤空间结构的分布特征及动态规律	(54)
三 讨论	(62)
四 小结	(69)
第二节 高煤级煤的化学结构——透射电子显微术研究	(70)
一 暗场成像的原理和方法	(70)
二 高煤级煤—石墨系列的微结构特征和演化	(72)
三 讨论	(81)
四 小结	(83)
第三节 高煤级煤的化学结构——X射线衍射术研究	(85)
一 高煤级煤缩聚芳香稠环基本结构单元的“晶化”历程	(85)
二 讨论	(91)
三 小结	(93)
第四节 高煤级煤的化学结构——统计结构分析及电子顺磁共振波谱研究	(94)
一 高煤级煤有机组成及统计结构的演化	(94)
二 电子顺磁共振波谱的煤结构信息	(100)
三 小结	(108)
第四章 高煤级煤的煤化作用	(110)
第一节 高煤级煤演化的阶跃性和阶段性	(110)
一 高煤级煤演化的阶跃性特征	(110)
二 高煤级煤阶段性演化的机理——兼论“拼叠作用”	(111)
三 有关演化特征的进一步讨论	(116)
四 我国高煤级煤的煤化作用阶段	(118)
第二节 高煤级煤的差异煤化作用	(119)
一 概念、物质表征和地质因素	(119)
二 差异煤化作用与其物质基础	(121)
三 差异煤化作用与其体现条件	(127)
四 再论差异煤化作用——煤化作用微环境与有机质的差异演化	(129)
第三节 小结	(135)
第五章 总 结	(138)
图版说明及图版	(143)
参考文献	(193)

CONTENTS

Preface	(1)
Chapter 1 Foundation of research	(1)
Section 1 Review of previous research works	(1)
Section 2 Principal aspects to be further investigated on high-rank coals	(9)
Section 3 Methods and procedure	(10)
Section 4 Samples and their geological setting	(13)
Chapter 2 Micropetrology of high-rank coals	(18)
Section 1 Macerals in high-rank coals	(18)
Section 2 Distribution and evolution of reflectance of high-rank coal macerals ...	(25)
Section 3 Discussion	(36)
Section 4 Conclusions	(45)
Chapter 3 Structure of high-rank coals	(48)
Section 1 Spatial structure of high-rank coals: Research with mercury prosimetry	(48)
Section 2 Chemical structure of high-rank coals: I . Research with transmission electron microscopy	(70)
Section 3 Chemical structure of high-rank coals: II . Research with X-ray diffractometry	(85)
Section 4 Chemical structure of high-rank coals: III . Statistical constitution analysis and research with electron paramagnetic resonance	(94)
Chapter 4 Coalification of high-rank coals	(110)
Section 1 Jumps and stages of high-rank coal evolution	(110)
Section 2 Differential coalification of high-rank coals	(119)
Section 3 Conclusions	(135)
Chapter 5 Summary	(138)
Plates and their explanation	(143)
References	(193)

第一章 研究基础

第一节 文献综述

一 高煤级煤

高煤级煤(high rank coal)也称做高煤阶煤,处于煤化系列中的高级演化阶段。在国际标准化组织标准草案(ISO/DIS 7401/1)中,将高煤级煤定义为无烟煤(anthracite)。因此,确定高煤级煤在煤化系列中位置的关键在于如何看待无烟煤的下限。

目前,已有的煤分类大致可纳入两大类:一类是以应用为目的的工业分类,普遍采用某些化学指标作为分类标准,其中许多分类已应用了显微组分组成及镜质体反射率等煤岩参数作为划分标准;另一类是以地质研究为主要目的的成因分类,分类方案中以煤化作用阶段作为主线,毫无例外地采用了镜质体反射率作为其主要划分参数。本书以煤化作用这条主线贯穿始终,故将镜质组反射率作为其主要参数来讨论无烟煤的下限。

国内外某些以镜质体反射率划分无烟煤煤化阶段的分类方案如表 1-1 所示。

表 1-1 国内外某些无烟煤煤化阶段划分方案对比

前 苏 联				美 国				中 国		前西德		国际煤岩学委员会	
ГОСТ(1976)		可燃矿产研究所(1974)		ASTM(1977)		丁大川(1979)		西安煤研所(1979)		DIN(1982)		Alpern(1989)	
阶 段	R_{omax} (%)	阶 段	R_{omax} (%)	阶 段	R_{omax} (%)	阶 段	R_{omax} (%)	阶 段	R_{omax} (%)	阶 段	R_{omax} (%)	阶 段	R_{omax} (%)
X II	2.50	无烟煤	2.00	半无烟煤	2.2	半无烟煤	2.0	IX	2.5	无烟煤	2.8	低级无烟煤	2.0
X III	3.40			无烟煤	2.8	无烟煤	2.5	X	4.0	超无烟煤	4.0	中级无烟煤	3.0
X IV	4.40			超无烟煤	6.0	超无烟煤	6.0	X I	6.0			高级无烟煤	4.5
X V	5.50												

注:①表中 R_{omax} 均为镜质体反射率在相应煤化阶段的下限值。

②分类方案分别引自米罗诺夫(1982)、周师庸(1985)、Clarence(1979)、Teichmüller(1982)、煤炭部西安地质勘探研究所(1979)及 Alpern(1989)。

从表中可以总结出如下两个特点:

- ① 无烟煤(包括半无烟煤)的下限在镜质体 $R_{\text{omax}} 2.0\% \sim 2.8\%$ 之间。
- ② 无烟煤煤化阶段可以进一步进行亚分,但各方案对于亚阶段数目及划分界限的看法有所不同。

根据上述分类现状,结合本人以成因研究为主的特点,此处将“高煤级煤”定义为泛指镜质体 $R_{\text{max}} > 2.0\%$ 的煤,包括目前我国煤田地质界惯称的贫烟、无烟煤和超无烟煤。关于中国高煤级煤煤化阶段的下限及亚分,笔者将在本书有关章节中详细展开讨论。

二 高煤级煤显微岩石学研究

(一) 欧美地区

在高煤级煤显微组分方面,可资查阅的欧美资料寥寥无几,仅在少数文献中附带提及。Teichmüller(1982)、Hamilton(1986)、Gabzdyl(1987)等分别曾发表过德国、澳大利亚、波兰等国高煤级煤显微组分的图版,并且将已无烟煤化(anthracitized)的壳质组分称之为“变壳质组”(meta-exinite)。但是,他们对高煤级煤显微组分的划分命名,仍是沿用“国际硬煤显微组分分类方案”,且识别出的显微组分的种类远少于中煤级煤。

然而,欧美学者在高煤级煤显微光学性质方面却做了大量的、卓有成效的工作。Alpern(1970)较为系统地描述了煤化作用过程中各种显微组分反射率的演化趋势及其相互关系,发现在镜质体 R_0 1.5%和4.5%附近,壳质组 R_0 分别超过了镜质组和火焚丝质体,在镜质体 R_0 5.0%左右壳质组超过了镜质组。Ragot(1977)研究了高煤级阶段镜质组 R_{min} 的演化特征,首次描述了镜质体 R_{min} 在 R_{max} 6.5%左右发生倒转的现象(Teichmüller, 1982)。Teichmüller(1982)对德国明斯特1号孔等的研究发现,在镜质体 R_{max} 4.0%之后, R_{min} 的离散性明显地增强,而且在构造的剪切带附近,镜质组光学各向异性突然增强。Smith(1980)、Hacquebard(1989)、Bustin(1990)以及 van Krevelen(1981)等对于高煤级煤显微组分反射率也做过一定的工作。

自70年代以来,欧美学者较为广泛地研究了镜质组的二轴光性特征,从而为煤岩学的基础理论研究及其应用开辟了一个崭新的方向(Cook等, 1972; Stone, 1979; Hower, 1981; Ting, 1979; Bustin, 1986, 1989; Lyons, 1985; Levine, 1989)。

(二) 前苏联

Сарбеева等(1968)系统研究了顿涅茨煤田和库兹涅茨煤田镜质体、丝质体、半镜质体及类脂组分反射率的煤化趋势,并依据资料给出了反射率的演化模式(顾寿昌, 1987)。

Тягуб等(1988)对顿涅茨无烟煤的还原程度评价准则进行了研究,分析了各种还原程度无烟煤的物质组成及电阻率、反射率和显微硬度(H_v),认为镜质组反射率各向异性指数(A_R)和煤中黄铁矿是评价无烟煤还原程度的可靠标志。Вырвин(1967)、Еремин(1979, 1983)、Коткин(1986)等也分别采用 A_R 、 H_v 等煤岩学标志对无烟煤的还原性进行过研究。

叶廖明(1984)指出,无烟煤的光学特征取决于显微镜类型、光的偏振程度、样品种类和研究结果的整理方法,并系统地列举了测定反射率各向异性的公式以及在各种测试条件下反射率和各向异性指标的换算关系。

Кизильштейн等(1982, 1983, 1985)利用离子浸蚀法处理煤光片表面,在顿涅茨等煤田高煤级煤中发现了大量用常规光学方法观察不到的植物残余组织,鉴定了成煤植物种属,论证了菌类体的真菌成因,再造了泥炭化阶段的条件,并预测了无烟煤煤岩学方法在工业应用中的前景。

Volkova等(1989)综合运用有机岩石学方法和煤化学方法,对顿涅茨煤田高煤级煤及其共生岩石中分散有机质进行了对比研究,得出了许多有意义的结论。例如:在镜质组中, Δ