

文章编号: 0253 - 9993 (2005) 04 - 0502 - 05

# 我国西部弱还原程度煤分布及煤质特征研究

白向飞, 李文华, 陈文敏, 马伟伟

(煤炭科学研究总院 北京煤化工研究分院, 北京 100013)

**摘 要:** 以详实的原始测试数据为资料, 分析了我国西部弱还原程度煤的煤岩、煤质总体特征。研究表明, 与同变质程度的其它地区煤相比, 西北侏罗纪弱还原程度煤中惰质组及过渡组分含量较高, 导致其挥发分产率较低, 氢含量低、氧含量相对较高, 黏结性较弱, 煤种以不黏煤和弱黏煤为主。沉积环境的弱还原程度主要对中低变质程度烟煤的性质有明显影响。

**关键词:** 煤; 还原程度; 变质程度; 煤岩组成

**中图分类号:** P571 **文献标识码:** A

## Study on distribution and characteristics of coals with weak reductive degree in West China

BAI Xiang-fei, LI Wen-hua, CHEN Wen-min, MA Wei-wei

(Beijing Research Institute of Coal Chemistry, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Based on the systematical measured data, the general characteristics on coal petrology and properties of weak reductive coals from Northwest China were discussed. The results showed that there are usually relatively higher content of fusinite and semifusinite in Jurassic coals from Northwest China compared with the coals with same rank from other districts. This results in there are relatively lower volatile matter and hydrogen content, but the oxygen content is higher in these coals. In according to Chinese national standard GB5751 - 1986 "Classification of Chinese coals", most of coals from Northwest China are classified as non-caking coal or weak-caking coal. The reductive degree is more important for bituminous coals with lower to medium rank.

**Key words:** coal; reductive degree; metamorphic degree; macerals

从成因角度分析, 煤的性质主要取决于其变质程度及煤岩组成。有些情况下, 特别是评价某些煤阶相同、煤岩组成相近的煤之间性质差异时, 常引入“还原程度”的概念<sup>[1-3]</sup>。虽然这一概念在揭示煤质异常的内在原因等方面很有意义, 但目前对还原程度的认识还不很清晰, 其涵义较窄, 应用面也相对局限。而在我国西北地区, 储量丰富的侏罗纪煤中惰质组含量普遍较高, 与其成因上的弱还原性关系密切。因此, 深入研究煤还原程度的内涵及西部弱还原程度煤煤质特征, 对于我国西部煤炭资源开发利用有非常重要的意义。

国外高惰质组煤主要分布于澳大利亚、印度等国的一些二叠纪地层中, 称为“冈瓦纳煤”<sup>[4]</sup>, 但其在成煤时代、煤阶、矿物分布等方面与我国西部侏罗纪煤有很大差异。而在国内, 西北地区煤炭资源是近十几年才开始大规模开发的, 煤炭资源开发历史短造成了对弱还原程度煤煤质研究不足, 在很大程度上影响了对西北地区煤炭热转化特性的客观评价。本文以《中国煤种资源数据库》中全国各地不同矿区 2 000 余

收稿日期: 2004-12-16

作者简介: 白向飞 (1970-), 男, 山西孝义人, 高级工程师。Tel: 010-84262971, E-mail: bxf1970@sina.com

煤层煤样分析数据为基础, 引用文献 [3] 中煤炭分类所用的 400 余个煤样数据以及 1995 年我国 2 700 余个商品煤样数据, 统计、计算了我国不同成煤时代、不同变质程度煤的煤岩组成、挥发分产率、元素组成等煤质指标, 初步总结了我国弱还原程度煤的地理、地质分布及煤质特征, 分析了还原程度对煤质的影响。

## 1 我国弱还原程度煤的地理及地质分布

我国西北地区分布有数量众多的侏罗纪煤田 (图 1), 这些煤田大多规模较大, 其中部分煤田已成为或即将成为我国重要的煤炭开发基地, 如神府 - 东胜、宁东、吐哈、华亭、靖远煤田, 等等。同时, 华北地区北部的大同、宣化煤田等在煤田地质特征上与西北各煤田相似。上述各煤田形成于早 - 中侏罗世, 聚煤盆地以一系列地质上互有联系、但相互独立的陆相断陷盆地和坳陷盆地为主<sup>[5]</sup>。泥炭沼泽以中高位沼泽为主, 这导致了西北地区煤沉积环境总体上具有较弱的还原程度, 煤中惰质组及过渡组分含量较高。同时, 这些煤田煤变质程度大多较低, 低变质程度和弱还原程度共同决定了西北地区煤独特的煤质特征, 其煤质牌号以不黏煤和弱黏煤为主。

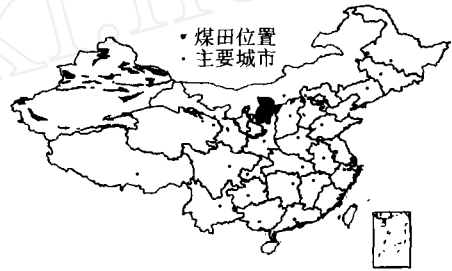


图 1 我国弱还原程度煤的地理分布

Fig. 1 Geographical distribution of weakly reductive coal fields in China

## 2 我国弱还原程度煤煤质特征

### 2.1 煤岩特征

图 2 表明, 我国西部侏罗纪 ( $J_{1-2}$ ) 煤最主要的煤岩特征在于其中惰质组含量高, 这是其弱还原程度的最直接体现。统计表明, 绝大多数西北侏罗纪煤中惰质组含量在 35% 以上, 个别煤层可达 70% 以上。在表征煤岩组成的三角相图中 (图 2), 弱还原程度煤大多分布在远离壳质组端元的底边上, 同时比正常还原程度煤更靠近惰质组端元。而强还原程度 (主要形成于晚石炭世  $C_3$  及华南晚二叠世  $P_2$ ) 煤则远离惰质组端元, 更接近壳质组端元。

前人在研究还原程度对煤性质的影响时, 更多地关注煤中不同类型镜质组的含量及性质, 而对煤中惰质组及过渡组分性质研究不足。西北地区煤炭资源的大规模开发, 给煤还原程度的研究提出了新的课题, 传统的“还原程度”概念应该进一步拓宽。深入研究沉积环境的弱还原程度对煤中惰质组及过渡组分组成、结构和性质的影响, 是客观评价西部煤热转化特性必须进行的基础工作。同时, 西北地区弱还原程度煤中过渡组分含量较高, 而目前对半丝质体与半镜质组的鉴定主观性强, 与煤岩组分热转化性质差异之间联系较弱。在对西北弱还原程度煤热转化特性的研究中, 对过渡组分的“活性”评价没有充分的科学依据, 如何客观地评价煤中过渡组分性质, 是今后西部煤合理利用必须解决的一个基本科学问题。

### 2.2 煤种

由于煤岩组成的特殊性, 西北地区各煤田煤种以弱黏煤和不黏煤为主。从表 1 可见, 西北地区大多数煤镜质组反射率介于 0.5% ~ 0.8%, 处于长焰煤 (如神府 - 东胜煤) 到气煤 (如大同煤及部分新疆煤) 变质阶段。但由于煤中惰质组含量高, 一方面导致煤挥发分产率降低, 另一方面, 降低了某些较高变质程度煤 ( $R_{\max}^0 = 0.7\% \sim 0.8\%$ ) 的黏结性, 使得西北地区大多数煤挥发分产率 ( $V_{\text{daf}}$ ) 在 30% ~ 37%, 黏结

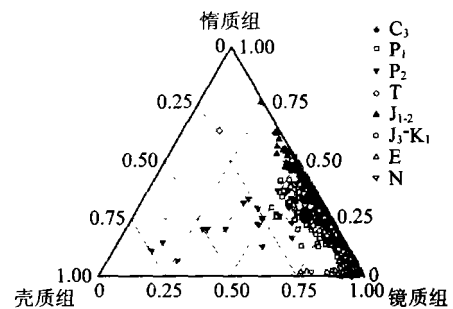


图 2 我国不同还原程度煤煤岩组成总体特征

Fig. 2 The maceral composition of Chinese coals with various reductive degree

指数  $<30$ , 按 GB5751 - 1986 《中国煤炭分类》, 属于不黏煤或弱黏煤。

表 1 中各煤样变质程度相近, 兖州等煤样氢含量和挥发分产率高, 黏结性强, 是典型的强还原程度煤; 梅河等煤样氢含量和挥发分产率中等, 具有正常的还原程度; 西北地区各煤样挥发分产率和氢含量较低, 惰质组含量高, 属弱还原程度煤。传统的观点认为, 不黏煤及弱黏煤在成煤初期遭受了一定程度的氧化<sup>[6]</sup>。从煤成因的角度分析, 大多数不黏煤和弱黏煤是在弱还原环境下形成的。泥炭堆积过程中, 一方面经常性的森林火灾造成煤中火焚丝质体含量较高, 另一方面, 由于成煤期泥炭沼泽主要为中高位沼泽, 覆水程度低, 处于泥炭化阶段的植物遗体常出露地表, 使之不断地交替经受还原—氧化—还原作用, 形成较多的过渡组分, 特别是半丝质体。因此, 虽然西北地区不黏煤、弱黏煤变质程度与长焰煤或气煤相当, 但其挥发分产率较低, 黏结性较弱, 煤种归属显著区别于同变质程度的其它地区煤。

表 1 我国部分不同还原程度煤煤种变化及煤岩煤质特征

Table 1 The rank, classification and maceral composition of coals with various reductive degree in China

煤种	煤田	时代	$R_{\max}^0$ /%	煤岩组成的体积比 /%			$V_{\text{daf}}$ /%	$w(\text{H}_{\text{daf}})$ /%	黏结 指数	煤种	样品 个
				镜质组	惰质组	壳质组					
弱还原 程度煤	神府	$J_{1-2}$	0.51	52.97	45.96	1.07	36.87	4.51	0	BN	25
	灵武	$J_{1-2}$	0.58	56.43	41.63	1.95	34.24	4.45	0	BN	2
	乌鲁木齐	$J_{1-2}$	0.72	61.32	35.34	3.34	35.77	5.86	17	BN	2
	大同	$J_{1-2}$	0.81	56.21	41.89	1.90	29.98	4.96	20	RN	10
中等还原 程度煤	梅河	E	0.52	98.19	0.46	1.35	45.10	5.79	-	CY	2
	营城	$J_3 - K_1$	0.59	96.70	1.10	2.20	37.62	5.29	-	CY	3
	双鸭山	$J_3 - K_1$	0.73	90.00	0.63	9.38	40.34	6.23	-	QM	1
	蛟河	$J_3 - K_1$	0.76	94.93	1.24	3.83	38.86	5.51	-	QM	1
强还原程度煤	兖州唐村	$C_3$	0.59	79.86	16.26	3.89	45.20	6.06	83	QM	1
	新汶	$C_3$	0.72	75.07	18.87	6.06	41.80	5.83	88	QM, QF	3
	水城大河边	$P_2$	0.79	48.49	24.11	27.01	42.50	5.83	78	QM	2

注: 资料来源 我国煤种资源数据库; 陈鹏. 中国煤炭性质、分类和利用. 2002

### 2.3 化学组成

图 3 为我国不同时代煤煤质指标随变质程度加深的变化趋势。可见, 在低变质烟煤 ( $R_{\max}^0 = 0.5\% \sim 0.8\%$ ) 阶段, 煤中挥发分产率、氢含量、氧含量等指标与镜质组反射率相关性较差, 这主要是由于煤还原程度的差异造成的。与同变质程度的较强还原程度煤 (主要形成于华北晚石炭世  $C_3$  及华南晚二叠世  $P_2$ ) 和中等还原程度煤 (主要形成于华北早二叠世  $P_1$  及东北晚侏罗 - 早白垩世  $J_3 - K_1$ ) 相比, 我国西部弱还原程度煤最显著的煤质特征在于挥发分产率较低。在元素组成方面, 弱还原程度煤氢含量较低, 而氧含量较高, 碳含量略高于中等还原程度煤。到中变质烟煤 ( $R_{\max}^0 > 1.5$ ) 以上阶段, 还原程度对煤性质的影响逐渐减弱, 变质程度成为影响煤性质的主导因素。还原程度对煤性质的影响主要体现在低变质烟煤阶段。需要指出的是, 我国西北地区广大侏罗纪煤田煤中氧含量较高, 受变质程度、煤岩组成和还原程度多重因素控制, 对弱还原程度煤中氧赋存形态有必要进行深入研究。

同时, 由于弱还原程度煤成煤泥炭沼泽主要为中高位沼泽, 沼泽补水主要依靠大气降水, 碎屑物质供应不足, 因此, 总体上弱还原程度煤灰分产率和硫分含量均较低 (表 2)。这种低灰特性导致弱还原程度煤大多具有较高的发热量 ( $Q_{\text{net, ar}}$ ), 而其较低的矿物含量在很大程度上导致煤中有害元素含量总体上较低<sup>[7]</sup>。但另一方面, 富硅贫铝的伊利石黏土矿物对微量元素的富集作用要强于相对富铝的高岭石黏土矿物<sup>[7]</sup>, 而西北各侏罗纪煤田成煤期的古气候特征和弱还原程度明显有利于伊利石的形成<sup>[8,9]</sup>。对于煤中有害元素分布与其弱还原程度之间的关系尚需进行深入研究。

除相对富硅而贫铝外, 伊利石中还含较多的 K, Mg, Na, Ca 等碱金属和碱土金属元素, 而高岭石中

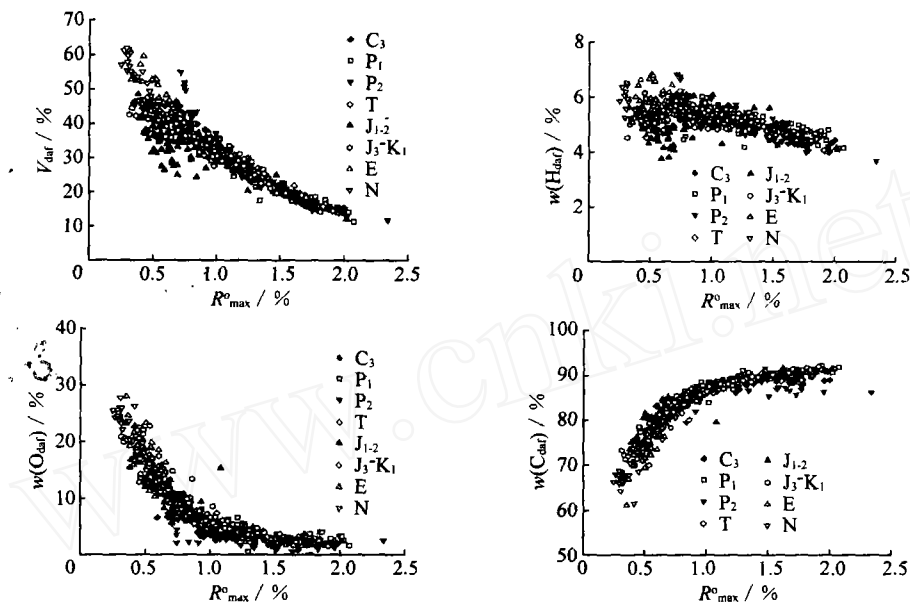


图 3 不同还原程度煤中挥发分产率及元素组成变化趋势

Fig. 3 The volatile yields and elemental components of coals with various reductive degree

这些元素含量很低<sup>[7]</sup>。上述因素导致我国西北弱还原程度煤煤灰成分中  $SO_2$  含量较高而  $Al_2O_3$  含量较低，同时  $K_2O$ 、 $Na_2O$  等碱性成分含量相对较高。另一方面，由于煤中同生黏土矿物含量较低，后生成因方解石含量相对较高，其分布以充填裂隙状为主，使得弱还原程度煤煤灰成分中  $CaO$  含量较高且波动较大、虽然煤中硫分较低，由于  $CaO$  的固硫作用，导致煤灰中  $SO_3$  含量也较高（表 2）。

表 2 我国西北弱还原程度煤平均灰分、硫分及灰成分特征

Table 2 The ash yields, sulfur content and ash composition of weakly reductive coals from West China %

产地	工业分析		灰成分组成								
	$A_d$	$S_{1,d}$	$w(SiO_2)$	$w(Al_2O_3)$	$w(Fe_2O_3)$	$w(TiO_2)$	$w(CaO)$	$w(MgO)$	$w(SO_3)$	$w(K_2O)$	$w(Na_2O)$
神府	7.06	0.42	56.26	13.47	10.69	0.55	8.37	1.52	2.92	1.57	2.04
哈密	5.82	0.37	21.38	13.89	19.02	0.61	26.50	3.72	11.51	0.23	1.28
华亭	14.08	0.42	57.41	18.19	17.73	0.61	2.05	1.72	1.37	-	-
彬长	26.20	0.65	51.00	26.45	4.49	0.94	6.94	2.69	3.42	0.61	0.43
靖远	10.10	0.36	31.99	14.53	19.24	0.77	19.50	4.29	5.93	0.42	0.90
窑街	11.50	0.59	38.21	18.96	10.69	1.02	14.25	8.02	6.56	0.37	0.53
乌鲁木齐	16.04	0.75	51.67	21.05	7.83	1.01	5.29	3.91	3.62	1.61	0.87
宣化	14.28	0.31	50.00	19.14	8.78	0.93	11.57	3.34	2.08	0.74	0.61
大同	8.60	0.61	53.57	18.30	15.68	0.79	4.28	2.54	1.97	1.08	0.36

注：资料来源于我国煤种资源数据库及我国煤质资料汇编，商品煤样。

### 2.4 弱还原程度煤的煤质表征

全硫含量 ( $S_{1,d}$ )、黏结指数及灰成分指数 ( $Fe_2O_3 + CaO + MgO$ ) 常用来表征强还原程度煤煤质特征，但是这些宏观指标用于表征低变质的弱还原程度煤并不适合。我国西部弱还原程度煤大多变质程度较低，黏结性本身较弱，用黏结性指标难以表征不同弱还原程度煤之间的差异。同时，西部早 - 中侏罗世煤中含有较多的后生成因的方解石，使得煤灰中  $CaO$  含量与煤还原程度之间无任何关系；煤中菱铁矿和硫铁矿共同决定了煤灰中  $Fe_2O_3$  含量高低，与还原程度强弱无关。因此，必须构建新的宏观煤质指标来表征西部煤的弱还原程度特征。

在亚微观层次上,煤岩组分性质受变质程度和还原程度双重因素控制,在低变质、弱还原程度煤中,这一点显得更为突出.沉积环境的还原程度在很大程度上决定了煤岩组成,但相同煤岩组分的性质并不均一.必须深入研究还原程度对煤中惰质组及过渡组分分布和性质的影响,构建新的煤岩学指标从亚微观尺度上表征弱还原程度煤的性质.

目前对煤分子结构的研究主要是针对镜质组进行的,而我国西北弱还原程度煤中惰质组含量高.各种煤岩组分在 H/C原子比、O/C原子比、芳碳率等分子结构参数及芳构化程度等方面均有明显差异<sup>[10,11]</sup>.深入研究惰质组及过渡组分分子结构特征是弱还原程度煤性质表征必须开展的基础工作.

### 3 结 论

(1) 我国不同还原程度煤地理、地质分布特征显著.总的来说,储量丰富的西北早-中侏罗世煤层具有较弱的还原程度.

(2) 受煤聚集环境及成煤时代的影响,我国弱还原程度煤变质程度较低,同时煤中惰质组和过渡组分含量较高,煤种以不黏煤和弱黏煤为主.弱还原程度煤的挥发分产率和氢含量较低,而氧含量普遍较高.同时,弱还原程度煤灰分产率和硫含量普遍较低,灰成分中  $\text{SiO}_2$  含量高,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较低,同时  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  等碱性成分含量较高.

(3) 弱还原程度对低变质烟煤 ( $R_{\text{max}}^0 = 0.5\% \sim 0.8\%$ ) 的性质有显著影响.低变质阶段煤挥发分产率及元素组成与镜质组反射率相关性较差,主要是由于还原程度不同造成的.

(4) 目前对弱还原程度煤宏观煤质特征、亚微观组成、大分子微观结构及相互间内在联系认识不足,深入研究惰质组及过渡组分性质有助于对弱还原程度煤的科学表征,有利于深化对煤还原程度的认识.

### 参考文献:

- [1] 赵师庆.实用煤岩学 [M].北京:地质出版社,1991.
- [2] 戴和武,孙达三.华东太原统和山西统煤层的煤质特征及化学介质的影响 [J].地质论评,1964,23(1):23~27.
- [3] 陈鹏.中国煤炭性质、分类和利用 [M].北京:化学工业出版社,2001.
- [4] Stach E, Macrowsky M - Th, Teichmuller M, et al, Stach's textbook of coal petrology [M]. Berlin: Gebruder Borntraeger, 1982 177~197.
- [5] 毛节华,许惠龙.中国煤炭资源预测与评价 [M].北京:科学出版社,1999.
- [6] 陈文敏,张自邵.煤化学基础 [M].北京:煤炭工业出版社,1990.
- [7] 白向飞.中国煤中微量元素的分布赋存特征及其迁移规律试验研究 [D].北京:煤炭科学研究总院,2003.
- [8] 韩德馨.中国煤岩学 [M].徐州:中国矿业大学出版社,1997.67~78.
- [9] 中国科学院地球化学研究所.高等地球化学 [M].北京:科学出版社,2000.293~298.
- [10] 李文华.东胜-神府煤的煤质特征与转化特性(兼论中国动力煤的岩相特征) [D].北京:煤炭科学研究总院,2001.
- [11] 罗隽飞.煤的大分子结构研究——煤中惰质组结构研究及煤中氧的赋存形态 [D].北京:煤炭科学研究总院,2002.