

文章编号: 1001-1986(2011)02-0001-06

煤工业分析指标与测井参数的相关性及其模型

孟召平^{1,2}, 朱绍军^{1,3}, 贾立龙¹, 申恒明¹

- (1. 中国矿业大学地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;
2. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002;
3. 河南省煤田地质局一队, 河南 新郑 451150)

摘要: 以河南新郑矿区赵家寨井田为依托, 通过试验和统计分析, 建立了煤的工业分析指标与测井参数的相关关系及模型, 揭示了煤质测井响应机制。研究表明, 煤的工业分析指标与其测井参数之间存在明显的相关性, 表现为: 原煤水分含量与密度和视电阻率之间呈负相关关系, 与自然电位和自然伽马呈正相关关系; 灰分与密度和自然伽马以及自然电位呈正相关关系, 与视电阻率呈负相关关系; 原煤挥发分与视电阻率和密度呈负相关关系, 挥发分与自然电位和自然伽马呈正相关关系。研究结果还显示, 煤质指标与测井参数之间的相关性是由煤中有机质和无机质含量、性质和结构以及煤化作用等因素所决定的。分别建立了用测井曲线预测原煤工业分析指标的多元统计模型, 在煤炭与煤层气勘探开发中, 可以用测井曲线预测原煤工业分析指标。

关键词: 测井曲线; 煤质特征; 工业分析; 预测模型; 控制机理

中图分类号: P618.11 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2011.02.001

Relationship between approximate analysis of coal and log parameters and its models

MENG Zhaoping^{1,2}, ZHU Shaojun^{1,3}, JIA Lilong¹, SHEN Hengming¹

- (1. College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. The First Team of Coal Geology Bureau of Henan Province, Xinzheng 451150, China)

Abstract: The main indicator of raw coal quality evaluation is approximate analysis. Based on Zhaojiazhai coal field of Xinzheng mine area in Henan province, through the testing and statistical analysis, the relationship between coal approximate analysis and log parameters and its models have been established, and the logging response mechanism of coal quality was studied. The results show that between approximate analysis and log parameters exists an obvious correlation. There is the negative correlation between the moisture content of raw coal and the apparent resistivity and density, and the positive correlation between the moisture content of raw coal and the natural potential and natural gamma. The ash content of raw coal has a positive correlation with density, natural gamma and natural potential respectively, and a negative correlation with apparent resistivity. There is a negative correlation between the volatile of raw coal and apparent resistivity and density, and a positive correlation between the volatile of raw coal and natural potential and natural gamma. The correlation between the coal quality indicators and the log parameters is determined by the content of organic matter and inorganic matter in coal, the coal property, the coal structure, the coalification and other factors. The multi-statistical models were established respectively through logging curves predicting parameters for approximate analysis. In the process of exploring coal and coal bed methane, the purpose of predicting the parameters for approximate analysis can be realized by using logging curves.

Key words: logging curves; coal quality; approximate analysis; forecasting models; controlling mechanism

收稿日期: 2010-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(40772100, 41030422); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB209405); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20100023110003); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室课题(SKLCRSM10806)

作者简介: 孟召平(1963—), 男, 湖南汨罗人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事矿井工程地质和煤层气地质方面的研究。

煤的化学组成大致可以分为有机质和无机质两大部分,且以有机质为主体。煤中的有机质主要由碳、氢、氧、氮、硫等元素组成;煤中的无机质包括水分和矿物质。煤的工业分析是评价煤质的主要指标。煤的工业分析包括灰分、水分、挥发分和固定碳。水分和灰分除说明煤中无机质部分外,还可以由此近似地求出有机质含量;挥发分和固定碳可初步表明煤中有机质的性质。所以,研究煤工业分析是确定煤的性质和种类的基础。

煤工业分析通常可由煤样实验室分析、测井体积模型法和概率模型法来确定^[1-10]。以往,煤工业分析主要由煤样实验室分析获得。测井体积模型法是利用孔隙度测井(如密度、声波等)建立响应方程组,采用最优化等方法来求解获得。在采用体积模型时把煤层体积分成纯煤(包括固定碳和挥发分)、灰分(包括泥质和其它矿物)和水分(孔隙中充满的水)3部分,利用体积模型计算的煤的碳、灰、水是地下原始状态,碳为煤层中的有机质,灰为煤层中的矿物质,水为煤层裂缝中的自由水和基质孔隙中的束缚水之和。由于煤的组成成分比较复杂,简化的模型与实际情况存在一定的差异,并且在体积模型中没有考虑煤层吸附气所引起的测井响应值的变化,因此体积模型预测精度受到限制。概率统计分析法就是把岩性、物性和测井参数当作随机变量,从概率论角度出发,对这些变量进行统计分析,进而从大量有代表性的实际资料(样本)的统计中得到相应的数学表达式。由于煤样的实验分析和测井参数的结合,使得预测模型和结果更接近客观实际。

近些年来,国内外学者在应用地球物理测井预测煤岩煤质参数及煤储层参数方面,主要是用密度、自然伽马和视电阻率等测井参数,辅以声波、自然电位、井径等参数,取得了显著的进展和成效^[1-10],

如侯俊胜^[9-10]基于概率统计模型和神经网络模型对煤层气储层的含气量、基质孔隙度和裂缝孔隙度等参数进行了分析与评价。高绪晨^[11-12]、李纪森^[13]和葛祥^[14]用测井方法预测煤工业分析指标和煤储层参数,给出了相关计算模型,对煤储层的灰分、含气量和渗透率等参数进行了解释分析。过去,主要侧重识别方法和单因素统计模型的研究,由于各种测井信息间的组合方式以及各种测井曲线反映煤层煤质参数的灵敏度不同,因此用单一测井曲线建立的统计模型与实际存在一定的偏差,应用效果受到限制。本文从煤层煤质特征分析入手,以河南新郑矿区赵家寨井田为依托,通过实验和统计分析,揭示煤工业分析指标的测井响应机制,建立煤工业分析指标与测井参数之间相关关系和多元统计预测模型,并对模型进行误差分析和应用结果对比分析,反映用多测井曲线综合预测煤工业分析指标的应用效果较好。

1 研究区煤层煤质特征

1.1 研究区地质概况

研究区——河南豫西新密煤田新郑矿区赵家寨井田,为年产煤炭 300 万 t/a 的大型现代化矿井,井田面积 50 km²,二叠系下统山西组二₁煤为主采煤层。勘探阶段共施工各类钻孔 99 个,均进行了常规煤田地球物理测井,其中只有部分钻孔进行了煤工业分析。本区二₁煤层赋存深度一般为 232~872.75 m,平均 383.16 m,煤层厚度 0~21.75 m,平均 5.50 m,以厚煤层(>3.5 m)和中厚煤层(1.31~3.5 m)为主;受构造应力作用,煤体结构主要为碎粒煤和糜棱煤。在测井曲线上,煤层的电性特征和放射性特征较为明显,视电阻率和声波时差曲线呈明显高幅值反映;自然电位曲线反映不明显;自然伽马和密度曲线呈明显的低幅值反映(图 1)。

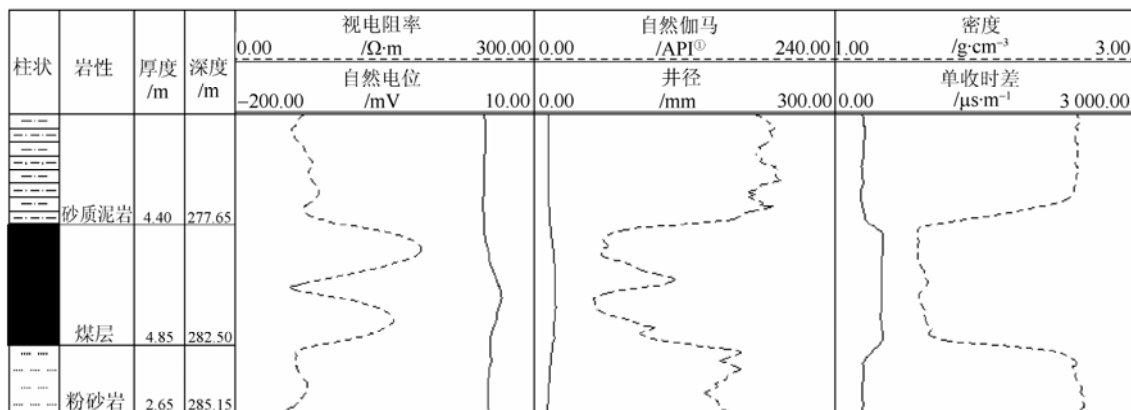


图1 研究区0651号钻孔测井曲线特征图

Fig. 1 Logging curves of borehole 0651

注:图中 API(Activity Performing Inspection)为美国石油学会自然伽马测井的计数率单位。

1.2 研究区煤层煤质特征

本区二₁煤以低灰、特低硫、低磷、高发热量贫煤为主,其次为瘦煤和无烟煤。根据本区二₁煤工业分析实验,原煤灰分一般为14.16%~16.12%,水分为0.99%~1.99%,挥发分为10.55%~17.51%。从贫瘦煤、贫煤到无烟煤,随着变质程度的提高,除水分变化不明显外,灰分和挥发分呈逐渐递减趋势(表1)。

表1 二₁煤工业分析一览表
Table 1 List of approximate analysis of coal seam II₁

煤类	M_{ad}	A_d	V_{daf}
贫瘦煤	0.84~1.11 0.99(3)	12.41~18.13 16.12(3)	16.25~19.29 17.51(3)
贫煤	0.42~2.05 0.94(89)	9.21~26.98 14.56(89)	10.72~18.31 14.56(89)
无烟煤	0.68~1.67 1.09(14)	8.59~19.28 14.16(14)	7.85~12.35 10.55(14)

注:表中数据表示最小~最大值/平均值。

2 煤工业分析指标与测井参数相关性及其控制机理

煤工业分析中的水分与煤储层基质中吸附水相对应。因为煤层中自由水和一小部分束缚水在工业分析的制样中已蒸发掉。工业分析的灰分是煤在燃烧时由矿物质氧化分解而来的,在这一过程中有一小部分变成气体逸散了,因此,灰分产率小于矿物质含量。工业分析中的挥发分和固定碳,则对应于煤层中的有机质,挥发分为有机质中高温下可挥发部分,而固定碳则是有机质中不挥发部分。

按照煤的工业分析分类,煤由水分、灰分、挥发分和固定碳4部分组成。在研究区内煤储层的地球物理性质及测井参数幅值变化和基本形态特征分析的基础上,在1~50的煤层测井曲线上,按1 m或0.5 m的间隔采集1组测井响应值。模拟测井资料采集视电阻率、自然伽马和伽马伽马3种测井参数;数字测井采集电阻率、密度(伽马伽马)、自然伽马和声波时差4种参数。对测井数据的处理包括钻探取样深度与测井深度的校正和对测井响应值的归一化处理。

归一化处理计算公式为:

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

式中 X 为原始数据; X' 为预处理后的数据; X_{\max} 、 X_{\min} 为剔除风氧化带后测井参数的最大值和最小值。

2.1 煤的工业分析指标与测井参数的关系

2.1.1 水分与测井参数的相关关系

煤层中的水分主要有外在水、内在水和结晶水。外在水又称自由水;结晶水是可以忽略不计的;内在水是在沉积过程中吸附在泥质颗粒表面的水分,这

种水分不能自由移动,也没有自由离子存在,这种水的导电方式主要是泥质颗粒附加导电的特性。煤质测试所获得的水分数据是指煤储层的全水分,它包括外在水和内在水分。这就说明煤层中水的存在使煤层的导电性变好,使煤层的视电阻率相对变小。

研究区煤层的全水分数据与其相应的视电阻率、自然电位、自然伽马和密度之间的统计分析表明,视电阻率、自然电位、自然伽马和密度与煤中水分存在相关性(图2),即随着煤中水分的增加,煤中自然电位和自然伽马值相应增高;而视电阻率和密度相应减小。煤层中的水分主要是煤基质中的束缚水,它主要吸附在泥质矿物颗粒的表面。所以,煤中水分含量的增加,意味着其吸附母质—泥质含量的相应增加。由于泥质矿物颗粒甚微,比表面积大,吸附能力强,它不仅能吸附水分,而且能吸附离子和放射性元素。因此,当煤中水分含量提高时,煤层的放射性相应增强,煤中自然电位相应增高。

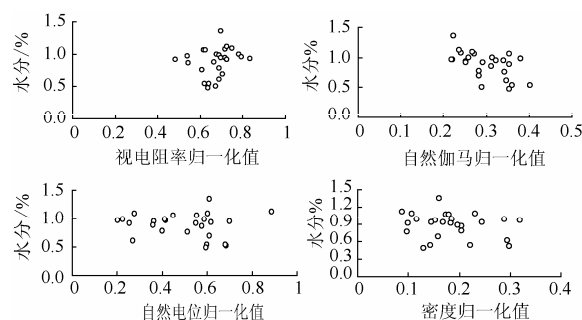


图2 煤中水分与其测井参数相关关系图

Fig. 2 Correlation between the coal moisture and its logging parameters

2.1.2 灰分与测井参数的相关关系

煤工业分析的灰分指标与测井参数间具有明显的相关关系(图3)。统计表明,煤中灰分与密度和自然伽马以及自然电位分别呈正相关关系;而与视电阻率呈负相关关系。灰分与视电阻率、自然电位、自然伽马和密度之间,以灰分与密度和自然伽马的相关关系为最好,其次为视电阻率和自然电位。

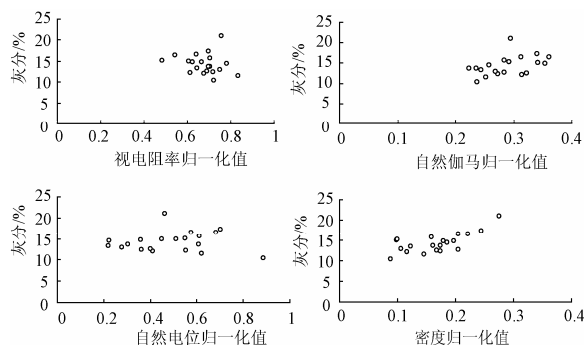


图3 煤中灰分与其测井参数相关关系图

Fig. 3 Correlation between coal ash and its logging parameters

一般来说,褐煤和烟煤的视电阻率是随着灰分(主要是粘土类矿物)的增高而降低的,无烟煤的视电阻率是随着灰分的增高而增高的。本区煤层大部分是烟煤,少部分为无烟煤。灰分化验结果显示, SiO_2 和 CaO 超过50%。灰分含量的高低,反映了煤中无机成分的多少。灰分对煤的导电性影响很大,一般情况下,吸湿的矿物杂质(湿灰分)的电阻率低于烟煤中有机质的电阻率;而高于无烟煤中有机质的电阻率。因此,当灰分增加时,烟煤的电阻率随之降低,自然电位相应增大;而无烟煤则相反^[15-18]。自然伽马测井反映煤层中放射性元素的多少,而沉积岩中放射性元素的多少主要取决于沉积过程中来自岩浆岩放射性颗粒的多少,沉积过程中泥质颗粒的比表面积大,吸附能力强,颗粒细,沉积时间长,有充分的时间让放射性元素随泥质颗粒一起沉积下来。灰分增加,吸附在矿物杂质微粒表面的放射性元素含量增加,所以,自然伽马测井与灰分含量呈现正相关关系。由于矿物杂质的密度一般高于有机质的密度,所以煤的密度随灰分增大而增大。

2.1.3 挥发分与测井参数的相关关系

挥发分是煤层有机质中可挥发部分,是表征煤变质程度的良好指标。研究区原煤挥发分与测井参数之间亦具有明显的相关性(图4):挥发分与视电阻率和密度呈负相关关系,即随着挥发分的逐渐增加,视电阻率和密度均呈逐渐降低的变化趋势;而挥发分与自然电位和自然伽马之间则呈正相关关系。

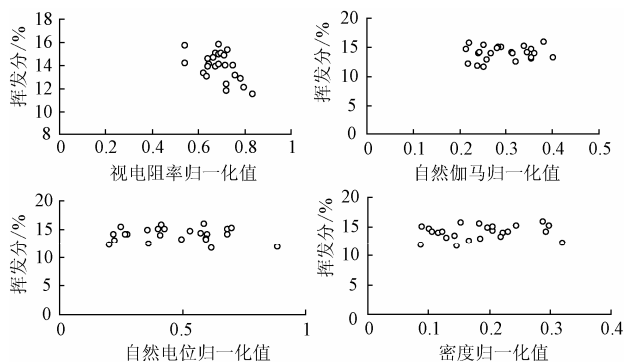


图4 煤中挥发分与其测井参数相关关系图

Fig. 4 Correlation between volatile and its logging parameters

煤存在离子导电性和电子导电性,在烟煤阶段,以离子导电性为主,一般随煤变质程度的提高,离子导电性逐渐减弱。因此,当挥发分降低时,随着煤层煤化程度的提高,其离子导电性变弱,所以挥发分与电阻率呈负相关关系。当挥发分降低时,煤化程度提高,密度随之增大。煤中自然电位的产生,不仅由于煤中有机物质的氧化还原作用,而且也是煤中硫化物(特别是黄铁矿)氧化作用的结果,当挥

发分降低而煤级提高时,煤中发生氧化作用使硫化物减少,因此造成煤自然电位的降低,反之亦然。

2.2 煤的工业分析与测井参数相关性的控制机理

煤质指标与测井参数之间的相关性决定于煤本身的特性,即煤的导电性、密度、放射性和自然电位等特性。煤质特征是由组成煤的物质(有机质和无机质)成分的含量和性质以及结构所控制,同时受成煤原始物质、聚煤环境和煤化作用以及风化作用等因素影响。

煤和其他岩石、矿物一样,也是一种导体。在自然条件下,煤的电阻率受煤的变质程度、煤岩成分、矿物质含量和分布、煤的构造以及水分和孔隙度等因素的影响。煤的电阻率决定于它的变质程度,并与其煤岩成分、矿物杂质含量、水分含量以及孔隙度有关。按不同变质程度,低灰分腐植煤的电阻率一般为:褐煤 $50\sim 200\ \Omega\cdot\text{m}$ (低碳化的褐煤)到 $200\sim 4\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ (高碳化的褐煤);烟煤 $4\ 000\sim 5\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ (长焰煤、气煤)到 $1\ 000\sim 100\ \Omega\cdot\text{m}$ (瘦煤、贫煤);无烟煤 $80\sim 1\ \Omega\cdot\text{m}$ (低变质无烟煤)到 $1\sim 0.001\ \Omega\cdot\text{m}$ (高变质无烟煤)。煤存在着离子导电性和半导体性质的电子导电性。低碳化的褐煤,由于它疏松孔隙度大,含有较多的水分和溶于水中的大量的腐植酸根离子,因此其电阻率低,为较好的离子导体。随着变质程度的加深,水分和腐植酸含量显著减小,离子导电性急剧下降,这是高碳化褐煤和烟煤电阻率增高的原因。变质加深达到无烟煤(特别是高变质无烟煤)程度,有机质分子高度聚合,由于煤的分子结构的改变,趋于有规则的平行排列,但尚未形成如石墨那样的晶格。石墨属于电子导体,无烟煤接近于石墨的特性,因此成为半导体性质的电子导电物质。当烟煤变为无烟煤,其电阻率急剧下降,高变质无烟煤的电阻率接近于零。灰分(矿物杂质)对煤的导电性影响很大。一般情况下,吸湿的矿物杂质(湿灰分)的电阻率低于烟煤中有机质的电阻率,而高于无烟煤中有机质的电阻率。当灰分增加时,烟煤电阻率随之降低;而无烟煤则随之增加。水分的增加,使褐煤和烟煤的电阻率降低,导电性变好。受风化而吸湿的褐煤或烟煤,其电阻率低于未被风化的。由于各种煤岩成分的孔隙、裂隙的发育程度不同——丝炭最甚,镜煤其次,亮煤更次,而暗煤最差。因此,对于同种牌号的褐煤或烟煤,其电阻率是光亮型煤最小,半亮型煤其次,半暗型煤较大,暗淡型煤最大。

由于煤的化学成分主要是由C、H、O三种元素组成的碳氢高分子化合物,因此,它具有较低的基质密度,因而密度测井曲线上,煤层通常有比较

低的体积密度值。同时,由于 C、H、O 所组成的化合物较其他矿物平均原子序数小,煤的岩性密度也较砂岩、泥岩及碳酸盐岩的岩性密度低。煤的密度与其变质程度有关,随变质的加深,其密度逐渐增加。一般而言,褐煤的密度为 $1.05\sim 1.2\text{ g/cm}^3$;烟煤为 $1.2\sim 1.3\text{ g/cm}^3$;无烟煤为 $1.3\sim 1.6\text{ g/cm}^3$ 。煤的密度受灰分影响较大,随灰分增大而增高。同一变质程度的煤、同种煤岩类型,煤的密度与其灰分存在明显的关系,因此可通过测定煤层的密度计算煤的灰分含量。煤的密度还与煤的水分和煤岩成分有关。水分增加,煤的密度降低。在同一变质程度的煤中,煤岩成分不同,密度也不同,即暗煤最大,亮煤次之,镜煤更次,而丝炭最小。

煤的有机质和无机质都不是放射物质。在成煤过程中,外来矿物质决定煤的天然放射性,由于这部分在煤成分中仅占一小部分,所以,通常煤层比以粘土矿物为主的泥岩的自然伽马数值低。但是煤层确实还存在着微弱的伽马射线强度,这是由成煤沉积环境中伴生沉积的放射性元素或成煤之后次生放射性元素沉积所致。煤层中放射性元素(主要为铀元素)的分布,一般与煤的有机质成分,腐植酸含量无关,而与煤的灰分有较密切的关系。灰分增加,煤的放射性含量也增高。煤的伽马射线强度正比于煤的灰分,由此可根据煤层的伽马强度来计算煤的灰分。

由于煤的分子结构相对松散,加之煤层内部条带状、片状、层状等结构的影响,使得声波在煤层中具有较低的传播速度,在声波测井曲线中体现为时差值较高。

3 基于测井曲线的煤质指标预测的多元回归模型

在以上各煤质指标与其相应测井响应参数相关分析研究的基础上,选择相关性密切的参数进行多元回归分析,建立了煤层水分、灰分和挥发分的预测方程^[18]。

a. 原煤水分预测方程

$$M_{\text{ad}} = 1.4655 - 0.5827 \times DEN - 2.1115 \times GR + 0.2319 \times \rho_s \quad (2)$$

式中 M_{ad} 为原煤水分,%; DEN 为密度的归一化值; GR 为自然伽马的归一化值; ρ_s 为视电阻率的归一化值。

b. 原煤灰分预测方程

$$A_d = 13.9074 + 19.2062 \times DEN + 10.0964 \times GR - 8.8721 \times \rho_s \quad (3)$$

式中 A_d 为原煤灰分, %。

c. 原煤挥发分预测方程

$$V_{\text{daf}} = 20.6837 + 4.2708 \times U_{\text{zw}} - 10.1238 \times \rho_s - 1.1552 \times DEN \quad (4)$$

式中 V_{daf} 为原煤挥发分,%; U_{zw} 为自然电位的归一化值。

式(2)、式(3)和式(4)的相关系数 R 分别为 0.58、0.75、0.60,用 F 函数对所建立的预测方程进行检验,给定置信水平 $\alpha=0.05$,对于式(2),自变量个数 $n=3$,样本数 $N=24$,查 F 函数分布表知: $F_{\alpha}(n, N-n-1)=F_{0.05}(3, 20)=3.1$,因 F 统计量 3.4429 大于 3.1,故式(2)有效;对于式(3),自变量个数 $n=3$,样本数 $N=20$,查 F 函数表知: $F_{\alpha}(n, N-n-1)=F_{0.05}(3, 16)=3.24$,F 统计量为 6.8834 大于 3.24,故式(3)有效;对于式(4), $n=3$,样本数 $N=24$,查 F 函数分布表知: $F_{\alpha}(n, N-n-1)=F_{0.05}(3, 20)=3.1$,因 F 统计量 3.443 大于 3.1,故式(4)同样有效。

为了进一步检验模型预测结果的可靠性,用多项式回归模型对新郑矿区赵家寨井田原煤水分、灰分和挥发分进行预测分析和检验,预测结果如表 2、表 3、表 4 所示。根据模型预测值与实测值及其误差对比分析可以看出,去除非值点,应用多项式回归模型预测煤工业分析指标误差相对较小,说明建立的测井曲线多项式回归模型对于研究区煤工业分析指标预测是有效的。

表 2 煤水分检验样本预测误差统计表
Table 2 Error statistics of moisture prediction with the tested samples

孔号	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	自然伽马 /API	视电阻率 / $\Omega \cdot \text{m}$	水分实测值 /%	水分预测值 /%	绝对误差	相对误差/%
0853	0.197 0	0.354 2	0.667 2	0.88	0.76	-0.12	-13.64
0950	0.294 4	0.346 4	0.689 9	0.61	0.72	0.11	18.03
1251	0.088 4	0.237 7	0.724 0	1.12	1.08	-0.04	-3.57
1353	0.183 1	0.253 0	0.725 6	0.92	0.99	0.07	7.61
1451	0.160 9	0.224 0	0.697 7	1.35	1.06	-0.29	-21.48
1453	0.222 1	0.361 2	0.642 5	0.54	0.72	0.18	33.33

表 3 煤灰分检验样本预测误差统计表
Table 3 Error statistics of ash prediction with the tested samples

孔号	密度 /g · cm ⁻³	自然伽马 /API	视电阻率 /Ω · m	灰分实测值 /%	灰分预测值 /%	绝对误差	相对误差/%
0853	0.197 0	0.354 2	0.667 2	14.83	15.35	0.52	3.51
1251	0.088 4	0.237 7	0.724 0	10.40	11.58	1.18	11.35
1254	0.123 3	0.243 9	0.647 2	13.38	13.00	-0.38	-2.84
1451	0.160 9	0.224 0	0.697 7	13.69	13.07	-0.62	-4.53
1453	0.222 1	0.361 2	0.642 5	16.54	16.12	-0.42	-2.54

注：表中灰分为湿灰分。

表 4 煤挥发分检验样本预测误差统计表
Table 4 Error statistics of volatile prediction with the tested samples

孔号	密度 /g · cm ⁻³	视电阻率 /Ω · m	自然电位 /API	挥发分实测值 /%	挥发分预测值 /%	绝对误差	相对误差 /%
1254	0.123 3	0.647 2	0.219 7	14.05	14.93	0.88	6.26
1255	0.089 7	0.710 7	0.426 6	14.86	15.21	0.35	2.36
1352	0.129 8	0.636 4	0.595 8	13.07	16.64	3.57	27.31
1353	0.183 1	0.725 6	0.253 0	15.38	14.21	-1.17	-7.61
1453	0.222 1	0.642 5	0.682 2	13.93	16.84	2.91	20.89
1651	0.219 3	0.757 5	0.500 0	13.17	14.90	1.73	13.14

4 结 论

a. 研究区煤质以低灰、特低硫、低磷和高发热量贫煤为主，其次为瘦煤和无烟煤；煤层发育稳定，结构简单；煤层属中高阻，视电阻率曲线中高异常；密度小，人工伽马曲线呈高异常，自然伽马曲线低异常。

b. 通过对二₁煤层煤质与测井曲线分析，发现煤的工业分析指标与其测井参数之间存在明显的相关性：原煤水分含量与密度和视电阻率之间呈负相关关系，其与自然电位和自然伽马呈正相关关系；灰分与密度和自然伽马以及自然电位呈正相关关系，其与视电阻率呈负相关关系；原煤挥发分与视电阻率和密度之间呈负相关关系，挥发分与自然电位和自然伽马之间呈正相关关系。

c. 煤质指标与测井参数之间的相关性决定于煤本身特性，即煤的导电性、密度、放射性和自然电位等特性。煤质特征是由组成煤的物质(有机质和无机质)成分的含量和性质以及结构所控制，同时受成煤原始物质、聚煤环境和煤化作用以及风化作用等因素影响。

d. 分别建立了用测井曲线预测原煤工业分析指标的多元统计模型。通过实际样本检验后发现，该模型相关系数高，F 函数检验可行，预测结果与实际相吻合，从而说明，在煤炭与煤层气勘探开发中，可以应用测井曲线预测原煤工业分析指标。

参考文献

[1] 孙文涛,方正. 我国煤田物探技术的回顾与展望[J]. 地球物理

学报, 1997, 40(增刊): 362-367.

- [2] 李舟波,楚泽涵. 中国测井学研究现状与发展趋向[J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊): 333-343.
- [3] 潘和平. 煤层气储层测井评价[J]. 天然气工业, 2005, 25(3): 48-51.
- [4] 刘蔚,诸葛月英,朱宇清,等. 大宁—吉县地区煤层气测井综合研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 45-47.
- [5] SCHOLLES P L. Coalbed methane application of wireline logs, hydrocarbons from coal[J]. AAPG, 1993, 38: 287-302.
- [6] 宋振岭. 应用测井资料分析煤质[J]. 河南地质, 1989, 7(4): 64-68.
- [7] 樊钧,李建林,潘建西. 府谷煤田测井曲线估算煤质灰分的探讨[J]. 陕西地质, 1991, 9(1): 50-55.
- [8] 赵忠孝. 用电阻率和自然伽马测井曲线的组合计算煤层灰分[J]. 煤质技术, 2005(3): 60-61.
- [9] 侯俊胜,尉中良. 自组织神经网络在测井资料解释中的应用[J]. 测井技术, 1996, 20(3): 197-200.
- [10] 侯俊胜. 煤层气储层测井评价方法及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [11] 高绪晨,张炳,姜法. 煤层工业分析、吸附等温线和含气量的测井解释[J]. 测井技术, 1999, 23(2): 108-111.
- [12] 高绪晨,张春才,段铁梁. 煤层气测井资料解释初探[J]. 中国煤田地质, 2003, 15(4): 54-57.
- [13] 李纪森. 煤层气测井技术与解释分析[J]. 测井技术, 1999, 23(2): 103-107.
- [14] 葛祥,李涛. 煤层物性测井评价方法初探[J]. 测井技术, 2003, 27(2): 129-131.
- [15] 中国矿业学院物探教研室. 中国煤田地理物理勘探[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1985: 68-86.
- [16] 黄智辉,陈曜岑. 煤田地球物理测井[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989.
- [17] 刘家瑾,陆国纯. 煤田测井资料数字处理[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991.
- [18] 孟召平,田永东,李国富. 煤层气开发地质学理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.