

测井技术在皖北祁东矿岩石力学性质评价分析中的应用

王 轩,肖玉林,张平松

(安徽理工大学 地球与环境学院,安徽 淮南 232001)

摘 要: 岩石力学性质与测井曲线参数之间具有相关性,可利用单因素及复合因素求取岩石力学弹性参数,为矿井开采技术措施的制定提供参考。结合皖北祁东矿勘探测井曲线分别求取岩石弹性模量、泊松比以及抗拉强度,结果表明,利用测井曲线求得的岩石弹性模量和泊松比与实验室测试值具有一定的比例关系,从而实现了利用测井曲线求取岩石弹性模量和泊松比;同时,根据视电阻率测井曲线、伽马伽马测井曲线和自然伽马测井曲线与岩石抗拉强度的相关性构建复合参数,利用复合参数计算的岩石抗拉强度与实验室测试值具有高度相关性,为巷道支护及工作面回采提供了理论依据。

关键词: 岩石力学性质;测井曲线;复合参数;评价

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)02-0030-06

Application of Logging Technology in Evaluation and Analysis of Rock Mechanical Properties in Qidong Mine in Northern Anhui

Wang Xuan, Xiao Yulin, Zhang Pingsong

(School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: Since logging curve parameters have correlation with rock mechanical properties, rock elastic parameters can be obtained by using single and composite factors to provide reference for mining technology and measures. In this paper rock elastic modulus, Poisson's ratio and tensile strength were respectively gained on the basis of logging curve in prospecting Qidong mining area in northern Anhui. The results show that there is certain proportional relationship between rock elastic modulus and Poisson's ratio based on logging curves and measured value in laboratory, thus making it possible to get rock elastic modulus and Poisson's ratio by using logging curves. Besides, composite parameters can be constructed according to the interrelationship between apparent resistivity logging curve, artificial gamma logging curve, natural gamma logging curve and rock tensile strength, and the rock tensile strength computed by composite parameters is significantly correlated with the laboratory measured value, thus providing theoretical basis for roadway support and face mining.

Key words: mechanical properties of rock; logging technology; complex parameters; evaluation

岩石力学参数是进行矿井开采的重要参考,一般是指岩石的弹性参数(如弹性模量、剪切模量、体积弹性模量与泊松比等)和强度参数(如单轴抗压强度、岩石抗剪强度、岩石抗拉强度、内聚力和内摩擦角等)。目前

收稿日期:2014-07-07

基金项目:安徽省国土资源科技项目(2012-K-07)

作者简介:王 轩(1989—),男,河南安阳人,硕士研究生,主要从事工程与环境物探方面的研究。

E-mail:qulanzhai@126.com

张平松(1971—),男,教授,博士,主要从事地质工程、地球物理探查技术方面的教学与研究工作,本文通信作者。

E-mail:pszhang71@163.com

岩石力学参数的获得方法主要有两种:一是在实验室对岩样进行实测,二是用地球物理测井资料确定岩石力学参数^[1-2]。与实验室实测相比,测井资料中蕴藏着丰富的地质信息^[3],利用地球物理测井资料确定岩石力学参数具有成本低、信息量大等优点,补充了钻井取芯的不足。由于测井曲线资料蕴含着丰富的地层信息,在煤矿的开采设计过程中,测井资料可以为各煤层顶底板强度特征提供有价值的资料,并可以借助测井资料降低煤层勘探和矿山开发的成本与风险。近年来,利用测井资料开展对岩石力学性质的研究,逐渐被人们所认识与重视,杨宽等^[4]利用子波逼近法和相似相关法,根据声波测井曲线获得的纵波、横波和密度资料,计算岩石的弹性模量,为煤矿生产和建设提供了有用的岩石物理力学参数。王敏生等^[5]在室内测定岩石声波速度、可钻性、硬度、单轴抗压强度试验的基础上,利用回归分析方法,建立了利用测井声波速度预测地层岩石机械破碎性能参数的数学模型,但必须已知岩性剖面,才能获得较高精度的地层岩石工程力学特性参数。杨秀娟等^[6]根据声波测井曲线提取纵、横波参数,结合密度测井,得出岩石力学参数计算公式,为岩石力学特性及地应力场的研究提供了一种可行方法。况雨春等^[7]以测井声波、密度、伽马值等数据为主,在单轴抗压强度解释结果的基础上,结合围压下砂岩力学性质实验以及砂岩孔隙度变化实验结果,建立了一种基于测井资料的三轴抗压强度解释模型。

以往的研究都是在已知声波测井资料的基础上,利用回归分析方法,构建数学物理模型,从而求得岩石的力学特征参数,存在两方面的不足:其一,必须拥有声波测井曲线;其二,所拟合的回归方程相关度较低,对实际生产指导意义有限。本文吸取前人研究方法的长处,在没有声波测井曲线资料的前提下,利用已知的测井资料,求解岩石的弹性参数、强度参数,进一步丰富勘探成果资料,为矿井安全生产提供依据。

1 岩石弹性参数求取

根据弹性波理论,岩石的弹性参数和岩石密度、声波在其中的传播速度有密切关系。利用声波测井测量地层纵波速度和横波速度,再用岩石的弹性力学物理性质计算其他各种参数^[8-9]。岩石的弹性模量、泊松比计算公式如下:

$$E = \frac{\rho(3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2)}{3\Delta t_s^2 \cdot \Delta t_p^2}; \quad (1)$$

$$\nu = \frac{0.5\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2}. \quad (2)$$

其中: E —岩石弹性模量, GPa; ν —泊松比; ρ —岩石密度, kg/m^3 ; Δt_s —横波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$; Δt_p —纵波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$ 。

岩石的纵波时差测井参数在常规测井中容易获得,横波时差参数常常根据如下经验公式获得^[10-12]:

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t_p}{\left[1 - 1.15 \frac{(1/\rho) + (1/\rho)^3}{e^{1/\rho}}\right]^{1.5}}. \quad (3)$$

选取矿上勘探区中 22-23-B₁, 22-23-B₂ 和 23-24₄ 钻孔 17 块岩石标本研究,提取各岩石标本对应的采样区段的纵波时差曲线,求取其平均值;然后根据公式(3)求出其横波时差均值,利用公式(1)、(2)求取各标本对应的弹性模量和泊松比,结果如表 1 所示。

由表 1 可见,根据声波时差测井曲线和标本密度求出的弹性模量与实验室测试求得的弹性模量虽然有较大差距,但两者的线性相关系数为 0.77(图 1(a)),可以依据该系数对测井曲线所求得的弹性模量进行修正,使其更接近实验室所求得的弹性模量;而利用测井曲线求得的泊松比和实验室测试所得泊松比相差略大,其线性相关系数 0.71,且测井求得的泊松比与实验室实测泊松比比值为 1.567,经该系数校正后两者具有相似的曲线形态(图 1(b))。因此,对于钻孔声波时差测井资料,可以直接求取其测井曲线特征值,根据理论公式计算其弹性参数,提高成果资料的利用率。

表 1 利用测井曲线求取弹性力学参数

Tab. 1 Calculating elastic mechanical parameters by using logging curve

编号	岩性	纵波均值 /($\mu\text{s/m}$)	横波均值 /($\mu\text{s/m}$)	弹性模量 /GPa	测井弹性模量 /GPa	泊松比	测井泊松比
1	细砂岩	233.930	409.315	37	30.24	0.15	0.257
	粉砂岩	254.448	454.608	24	25.47	0.17	0.272
	细砂岩	276.130	497.280	34	21.59	0.15	0.277
	细砂岩	239.272	435.858	23	28.69	0.19	0.284
2	细砂岩	342.870	621.116	32	13.99	0.14	0.281
	粉砂岩	263.476	480.173	17	23.66	0.19	0.285
	细砂岩	281.750	511.571	33	20.71	0.16	0.282
	粉砂岩	277.888	498.119	24	21.34	0.17	0.274
	细砂岩	285.291	513.777	27	20.23	0.13	0.277
	铝土泥岩	219.587	384.992	20	34.31	0.22	0.259
3	细砂岩	285.823	508.903	30	20.20	0.13	0.270
	泥岩	315.809	577.721	16	16.45	0.22	0.287
	细砂岩	230.235	402.688	45	31.23	0.14	0.257
	粉砂岩	295.725	536.204	18	18.80	0.18	0.281
	细砂岩	235.325	415.469	31	29.84	0.11	0.264
	粉砂岩	276.109	496.908	15	21.60	0.20	0.277
	细砂岩	231.006	423.799	32	30.73	0.18	0.289

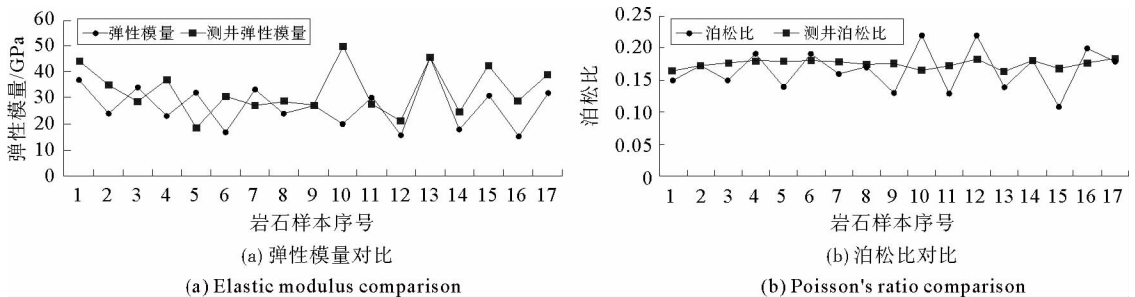


图 1 测井曲线预算与实测结果对比

Fig. 1 Contrast between calculation and lab test Poisson's ratio

2 岩石抗拉强度预测

2.1 单因素求取岩石抗拉强度

所谓单因素分析,即研究过程中假定其他因素对岩石强度的影响一定,而只考虑目标因素对岩石抗拉强度的影响,分析其与岩石抗拉强度的相关关系。岩石的抗拉强度是岩石力学中的一个重要指标,因其值远低于抗压强度,故在较小力的作用下岩石便会被拉伸破坏,对煤矿开采、巷道支护等都有着重要意义^[13]。目前,岩石抗拉强度通常采用劈裂法、现场水压致裂法、应力解除法等获得。这种通过采样在实验室内获得的抗拉强度无法模拟真实的地层情况,测井曲线可以解决这个问题。

单因素求取法即以岩石的抗拉强度为因变量,以不同的测井曲线为自变量,构建两者之间的相关关系。选择对因变量关系明显的自变量,从而建立它们之间的线性方程。选取该矿三采区六个钻孔,用基于 Auto-

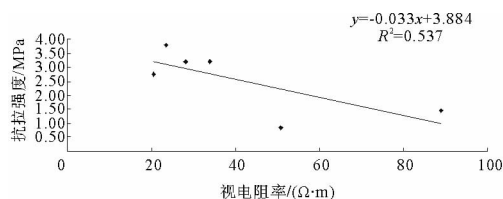
CAD开发的提取软件分别提取各钻孔伽马伽马、自然伽马、视电阻率和自然电位测井曲线在7-1煤底板处的均值,结果如表2所示。

表 2 7-1 煤层底板岩石常规测井曲线均值

Tab. 2 7-1 coal floor rock average conventional logging curve

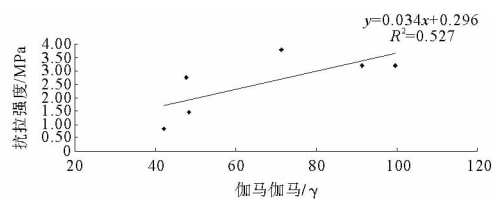
钻孔	抗拉强度/MPa	视电阻率/($\Omega \cdot m$)	伽马伽马/ γ	自然伽马/ γ	自然电位/mV
27-28-2	2.76	20.641	47.607	24.041	3.827
27-28-3	3.22	33.970	99.653	20.966	26.079
27-28-4	3.22	28.203	91.371	16.067	1.599
28-3	0.85	50.782	42.097	22.728	-1.261
29-4	3.79	23.368	71.299	36.512	-5.126
30-3	1.46	88.816	48.294	14.001	2.792

根据实验室获得的抗拉强度,分别拟合其线性关系,如图2。从图中可以看出抗拉强度与视电阻率、伽马伽马的相关性最好,其相关系数分别为0.732和0.725。自然伽马与其相关性次之,自然电位与其相关性最差。因此,利用拟合的单因素相关性公式即可对不同钻孔对应层位岩石的抗拉强度进行计算。



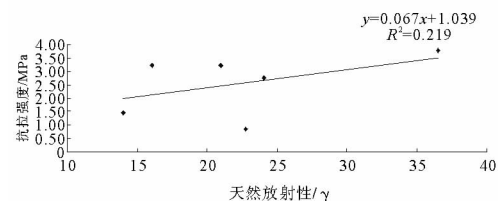
(a) 岩石抗拉强度与视电阻率

(a) Relationship between tensile strength and rock resistivity



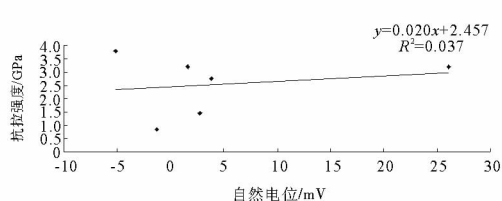
(b) 岩石抗拉强度与伽马伽马

(b) Relationship between tensile strength and artificial gamma



(c) 岩石抗拉强度与自然伽马

(c) Relationship between tensile strength and natural gamma



(d) 岩石抗拉强度与自然电位

(d) Relationship between tensile strength and natural potential

图 2 岩石抗拉强度与测井曲线相关关系

Fig. 2 Relationship between logging curve and rock tensile strength

2.2 利用复合参数求取岩石抗拉强度

岩石由于其本身物理性质和所处环境的不同,对视电阻率、伽马伽马、自然伽马曲线等必然有一个综合响应。据此,研究抗拉强度与三条测井曲线综合响应的相关关系。由单因素相关性可以看出,岩层的抗拉强度与视电阻率曲线呈负相关,与伽马伽马、自然伽马正相关,因此设复合参数为 $F = \ln(GG) \cdot \ln(GR) / \ln R$,讨论岩石抗拉强度与复合参数 F 的相关关系。通过各钻孔的复合参数得出抗拉强度与复合参数的相关关系为 $y = 1.103x - 1.478$,其相关系数 $R = 0.873$ (图3),明显高于利用单因素求出的相关系数,因而更适合用于岩石抗拉强度的分析。

根据拟合的岩石抗拉强度与复合参数的线性关系 $y = 1.103x - 1.478$, 结合三采区 15 个钻孔的测井曲线参数值可求出 7-1 煤层底板岩石的抗拉强度, 获得三采区 7-1 煤底板岩石抗拉强度的分布特征(图 4)。可以看出, 采区范围内局部岩石抗拉强度较低, 应进一步验证。该数据可为巷道支护及工作面回采提供参考。

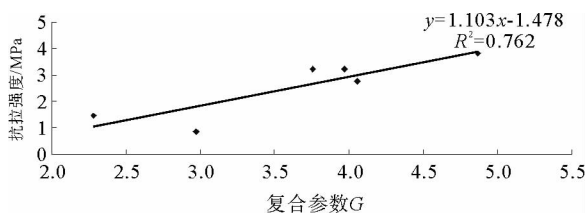


图 3 复合参数与岩石抗拉强度关系图

Fig. 3 Composite parameters and rock tensile strength diagram

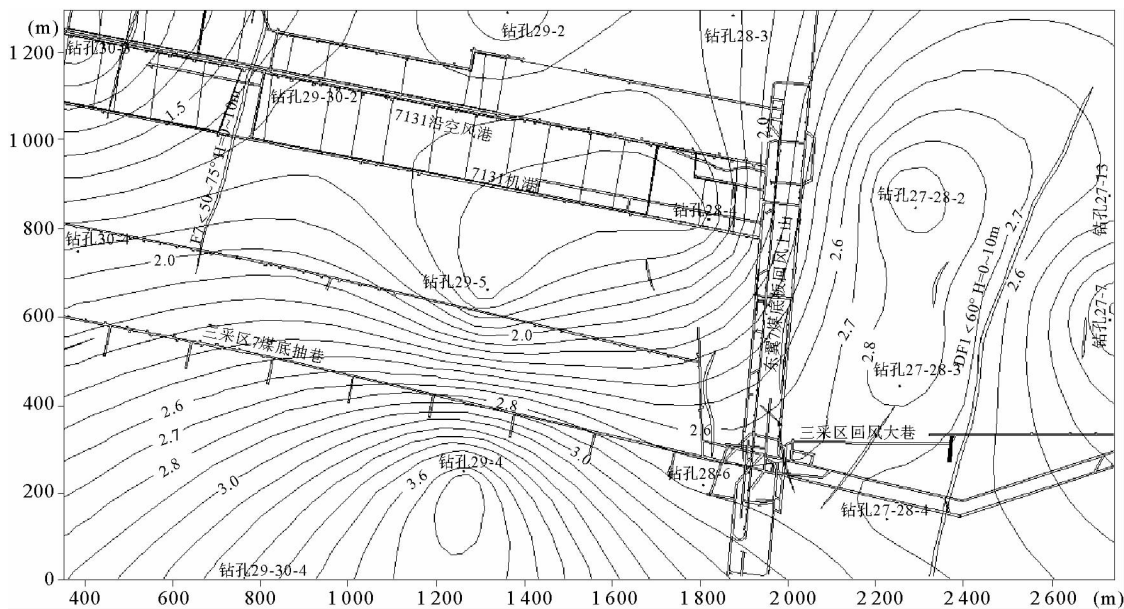


图 4 7-1 煤层底板岩石抗拉强度分布图

Fig. 4 7-1 coal floor rock tensile strength distribution

3 结论

1) 利用声波时差测井曲线可以很好地求得岩石的弹性参数(弹性模量、泊松比), 与传统方法求取的弹性参数与测井曲线线性关系相比, 经本文所提出的校正系数校正之后, 与实验室试验求取的岩石力学参数具有高度的相关性。

2) 岩石的抗拉强度与钻孔视电阻率测井曲线、伽马伽马测井曲线具有高度相关的线性关系, 与自然伽马测井曲线相关性次之, 与自然电位测井曲线的相关性最差。运用复合参数求取岩石的抗拉强度, 其相关性更好, 所获得的采区岩石抗拉强度分区对煤矿的安全生产更具有指导意义。

参考文献:

[1] 吴华. 地层条件下岩石力学特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2010: 2.
 [2] 王丽忱. 页岩气藏岩石力学性质的测井评价方法与应用[D]. 北京: 中国地质大学, 2013: 6-7.
 [3] 余继峰, 付文钊, 袁学旭, 等. 测井沉积学研究进展[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2010, 29(6): 1-8.
 Yu Jifeng, Fu Wenzhao, Yuan Xuexu, et al. Research progress of logging sedimentology[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 29(6): 1-8.
 [4] 杨宽, 王伟平, 祖庆夕. 测井方法测定含煤地层的岩石弹性参数[J]. 地球物理学报, 1990, 33(5): 593-602.
 Yang Kuan, Wang Weiping, Zu Qingxi. Determination of rock elastic parameters of coal bearing formations with well logging [J]. Acta Geophysica Sinica, 1990, 33(5): 593-602.
 [5] 王敏生, 李祖奎. 测井声波预测岩石力学特性的研究与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(1): 74-78.
 Wang Minsheng, Li Zukui. Research & application on prediction of rock mechanics parameters based on acoustic log data [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(1): 74-78.

- [6] 杨秀娟,张敏,闫相祯.基于声波测井信息的岩石弹性力学参数研究[J].石油地质与工程,2008,22(4):39-42.
Yang Xiujuan,Zhang Min,Yan Xiangzhen. Study on acoustic logging-based rock elasticity parameters[J]. Petroleum Geology and Engineering,2008,22(4):39-42.
- [7] 况雨春,王亚萍,刘艳君,等.基于测井数据的砂岩三轴抗压强度预测模型[J].西南石油大学学报:自然科学版,2011,33(2):161-164.
Kuang Yuchun,Wang Yaping,Liu Yanjun,et al. Modeling on triaxial compressive strength of sandstone based on well-logging data[J]. Journal of Southwest Petroleum University:Science & Technology Edition,2011,33(2):161-164.
- [8] 刘卫国,韩登宇,苗文韬,等.利用地球物理测井数据计算新疆托克逊县白嘴山地区岩石力学参数的方法探讨[J].铀矿地质,2013,29(5):310-312.
Liu Weiguo,Han Dengyu,Miao Wentao,et al. Discussion on the calculation of mechanical parameters of rocks with geophysical logging data in Baizuishan Region,Tuokexun,Xinjiang[J]. Uranium Geology,2013,29(5):310-312.
- [9] 张清慧,李行船,薛世东.致密砂岩储层泊松比的精确计算[J].山东理工大学学报:自然科学版,2010,24(1):54-57.
Zhang Qinghui,Li Xingchuan,Xue Shidong. Accurate calculation of Poisson ratio for compacted sandrock[J]. Journal of Shandong University of Technology:Natural Science Edition,2010,24(1):54-57.
- [10] 归榕,万永平.基于常规测井数据计算储层岩石力学参数:以鄂尔多斯盆地上古生界为例[J].地质力学学报,2012,18(4):418-423.
Gui Rong,Wan Yongping. Rock mechanics parameter calculation based on conventional logging data:A case study of upper paleozoic in ordos basin[J]. Journal of Geomechanics,2012,18(4):418-423.
- [11] 刘高波,冯文光,陶晓红,等.常规测井资料与FMI相结合计算地应力[J].物探化探计算技术,2007,29(3):200-204.
Liu Gaobo,Feng Wenguang,Tao Xiaohong,et al. The calculation of formation stress by conventional well logging and FMI logging Data[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration,2007,29(3):200-204.
- [12] 王利娟,刘向君,韩林,等.基于声波时差的弹性模量、泊松比实验研究[J].西南石油大学学报,2007,29(1):19-21.
Wang Lijuan,Liu Xiangjun,Han Lin,et al. The experimental study of elastic modulus and poisson ratio based on the sonic time difference[J]. Journal of Southwest Petroleum University,2007,29(1):19-21.
- [13] 颜玉定,廖远群,吴景浓,等.围岩条件下岩石的抗拉强度[J].华南地震,1991,11(2):1-11.
Yan Yuding,Liao Yuanqun,Wu Jingnong,et al. Tension resistant strength of rock under confining pressure[J]. South China Journal of Seismology,1991,11(2):1-11.

(责任编辑:吕海亮)