

文章编号: 0253-3782(2001)05-0541-07

岩石综合物性差异与变化的特征^{*}

于 萍¹⁾ 冯永革²⁾ 赵鸿儒²⁾

1) 中国长沙 410001 湖南省地震局

2) 中国北京 100871 北京大学地球物理系

摘要 从岩石物性与化学元素原子结构的关系出发,从密度、弹性、电性和放射性等诸方面,论述了岩石综合物性差异与变化的特征;并结合实例,得出岩石综合物性参数发生变化反映了组成岩石的原子、分子、矿物和结构发生了变化,且各参数之间具有某种相关性的结果.

关键词 岩石综合物性参数 弹性 密度 电阻率 放射性 相关性

中图分类号: P584 **文献标识码:** A

引言

地球介质除地球表面的气体、液体外就是组成球体的固体介质,研究它们有着重要的意义.通常,地球物理工作者研究的重点问题之一是固体介质的岩石等.岩石综合物性测定(赵鸿儒等,1996;郭佑民等,1989)认为,组成岩石的最小单元是其化学元素的原子,而由不同元素的原子、分子、晶体矿物组成各种岩石土体.各种元素的物理性质特征主要由其元素原子及其结构所控制,矿物结晶主要由其原子堆积密度和结构控制矿物的综合物性特征.岩石主要由其组成的矿物及结构控制该岩石综合物性特征,或者说岩石综合物性特征是由组成该岩石的矿物、分子、原子、杂质及其结构的函数.换句话说,岩石综合物性特征参数发生变化则是组成岩石的原子、分子、矿物、杂质及其结构发生了变化.从而可知,促使岩石综合物性参数变化的原因,可以是岩石内部组份结构的改变和孔隙、裂隙及充填物的改变,也可以是外部条件,如:温度、压力、湿度、风化等的改变,或者二者皆有之.这一重要结果已被大量的实验观测结果所证实.例如,岩石在高温高压下弹性、电性、电磁性等实验,但多是单项物性特征研究实验.图 1 给出了岩石物性与化学元素原子结构的关系(Дортман, 1976).

由图 1 可以看出,原子外层电子轨道的电子决定着元素的化学性、光学性、热学性、顺磁性、电性,原子内层电子轨道的电子决定着元素的铁磁性,原子的原子核决定着放射性,原子的原子核和外层轨道的电子决定着元素的弹性和密度.由此可以得出,岩石综合物性与元素的原子结构有着密切的关系.

1 岩石的弹性与岩石综合物性

本文仅以弹性、密度、电性和放射性来简单说明其变化规律.就弹性而言,可用与之

^{*} 2001-05-11 收到初稿,2001-08-10 收到修改稿并决定采用.

相关的纵波波速、横波波速、密度、弹性模量等描述，其中尤以纵、横波波速最为常用。从微观角度看，化学元素中弹性的纵波波速(v_p)、密度(σ)与元素原子结构的关系如图 2 所示(赵鸿儒等, 1996)。

由图 2 可以看出，在门捷列耶夫元素周期表中，每一周期的前半部分元素随原子量 m_a (或原子序数 z) 的增大，纵波波速 v_p 、密度 σ 增大，原子半径 R_a 减小；而后半部分元素随 m_a (或 z) 的增大， v_p 、 σ 减小， R_a 增大。从第二周期到第六周期随 m_a (或 z) 的增大， v_p 的峰

值依次减小， σ 的峰值依次增大。其它如横波波速、导电性、硬度、溶化温度等亦有类似变化规律。

元素的密度与其原子半径 R_a 的关系可分为 3 类：密度与原子半径关系明显，即随原子半径的减小而密度增大者，称之为 s_p 型元素；密度与原子量有明显关系者，即密度的变化主要依赖于原子量 m_a 变化的元素称之为 d 型元素；介于两者之间，且在元素周期表中相互接近，密度与原子半径和原子量的关系大致相同者称之为 s_p -d 型元素。

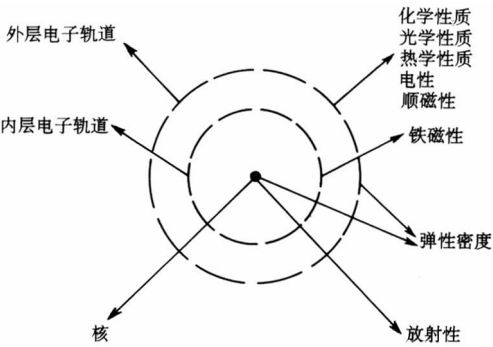


图 1 岩石物性与化学元素原子结构关系示意图

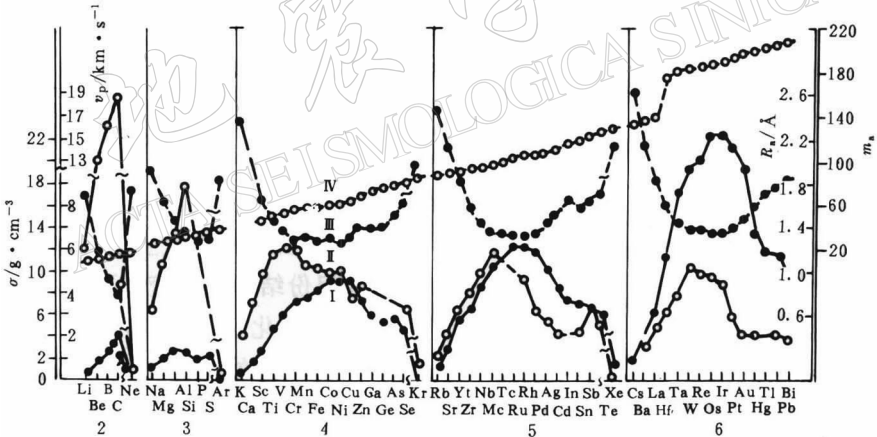


图 2 物性和元素原子结构特征(根据 H. Б. Дортман 和 М. Ш. Магиду)

I. 密度, II. 纵波传播速度, III. 原子半径, IV. 相对原子量;
2~6 为门捷列耶夫元素周期表中的周期

由图 3(赵鸿儒等, 1996)可以看出，对于原子较大的 s_p 型结构元素，其纵波波速随原子半径减小时，波速增加，而弹性参数与原子量的关系则是次要的。对于原子较小的 d 型元素，其纵波波速随原子量的增加而减小。中间状态的 s_p -d 型结构的元素，其波速既与原子半径有关，也与原子量有关。从宏观角度看，造岩矿物和金属矿物的纵波速度与密度间的相互关系如图 4(赵鸿儒等, 1996)所示。图 4 中左半部曲线主要是由 s_p 型结构元素组成的造岩矿物，这些矿物的弹性波波速 v_p 与密度 σ 的关系主要与原子半径有关，后者很大程度上决定了原子在结晶中的堆积密度和结构；右半部曲线主要是由 d 型结构元素组成的金

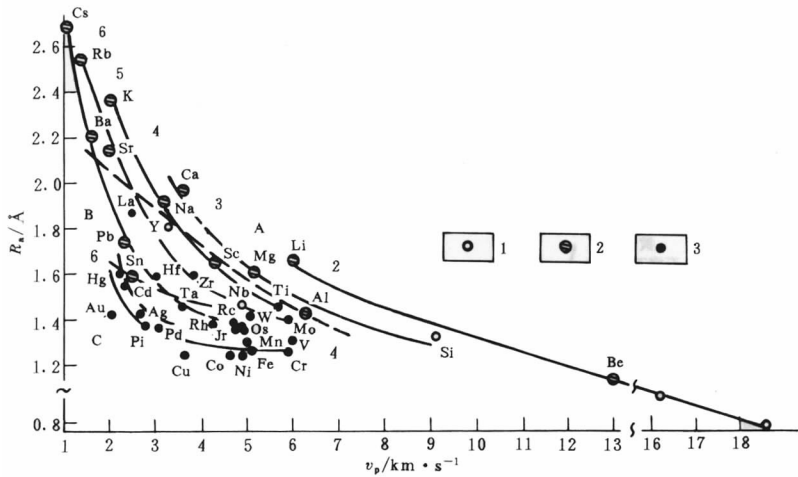


图 3 元素中纵波速度与其原子半径的关系

1. s_p 型电子壳层结构的金属；2. s_p 型非金属；3. d 型电子壳层结构金属；

A, B, C 相应为 s_p 、 d 和 s_p - d 型金属的分布区. 2~6 为门捷列耶夫元素周期表中的周期

属矿物与自然金属. 该类物质的相对原子量对物性参数的影响是主要的. 此类矿物当密度 σ 增加时, 其弹性波波速 v_p 降低. 由上述曲线可看出, 岩石、矿物中的 v_p 约在 2 000 ~ 18 000 m/s 间变化. 自然金属中波速最低, 铝硅酸盐类矿物及无铁氧化物中波速较高. 金刚石中弹性波波速最高. 由图 4 的纵波波速与岩石矿物金属的密度关系曲线还可得到如下的拟合经验关系式:

I 类
$$v_p = v_{p0} \exp[0.5(\sigma - 2.6)] + 0.2(20 - \bar{m}_a]$$

($v_{p0} = 5.75 \text{ km/s}$, \bar{m}_a 为平均原子量)

II 类
$$v_p = 3.6/(\sigma - 1)$$

由此可得出, 对于 I 类物质, 弹性纵波波速与密度间的关系式是指数函数方程式, 而对于 II 类物质, 它是双曲函数方程式. 地震学研究中, 地震波在均匀各向同性完全弹性介质中传播的波速 v_p , v_s 根据虎克定律可近似表示为

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\sigma}} \quad v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}}$$

式中, λ 为拉梅常数, μ 为剪切模量, σ 为介质密度. 由此可知, v_p , v_s 是由组成其介质的弹性模量和密度所控制. 当波传播至介质波阻抗(介质密度与速度的乘积)有变化的界面(体)时, 波会发生反射、折射、透射等现象, 形成反射、折射、透射、衍射等多种震相, 从而给研究者带来许多有关岩土体的物性信息. 究其原因, 波阻抗的变化, 实际上主要反映了介质内部元素的原子结构、杂质等变化.

例如, 赵鸿儒等(1986)可述: 在水与酒精(化学纯)的液体混合实验中, 当在室温 11 ℃ 下, 把 $v_p = 1\,473.3 \text{ m/s}$ 的水和 $v_p = 1\,251.2 \text{ m/s}$ 的酒精($\text{C}_5\text{H}_5\text{OH}$)按照 3 : 1、2 : 1、1 : 1 的比例混合时, 其混合液体的纵波波速分别为 1 636.6 m/s、1 632.5 m/s 和 1 630.3 m/s. 它们均比水和酒精的原液波速高. 这一现象反映了介质分子结构的变化, 即介质物理化学性质发生了变化.

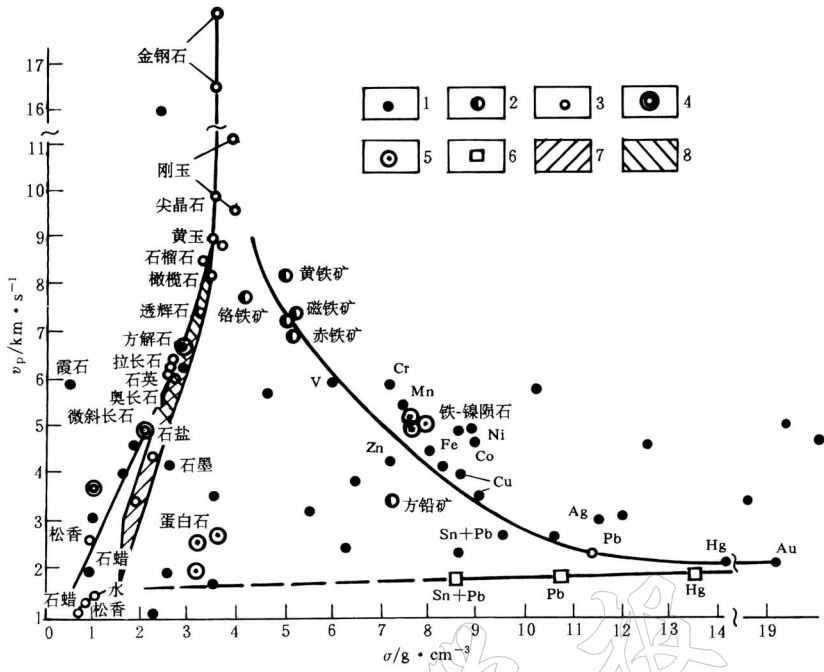


图 4 纵波传播速度与岩石、矿物、金属密度的关系

结晶键型的矿物：1. 金属型(自然的及提纯的)；2. 共价金属型；3. 纯化合物型，稀有分散元素；
4. 离子型；5. 陨石；6. 液态物质；7. 沉积岩和新相喷发岩；8. 侵入岩、古相喷发岩及变质岩

近年来高温高压实验技术的发展使得对岩石、矿物的物性研究有了进一步的发展. 高温高压实验研究是进行地球深部研究的最直接的手段之一(宋茂双等, 1996). 宋茂双等(1996)在 0.2~5.0 GPa 和室温至 1 400 ℃温压范围内, 测量了上地幔主要造岩矿物橄榄石等在大洋地温梯度和大陆地温梯度下的纵波速度. 结果表明, 在较低压力下, 矿物受到破裂、压实和重结晶作用的影响而导致其测得的波速值明显偏低, 可以通过较高压力下的波速测量值外推获得低压下的波速值. 在不同地温梯度下随着深度的增大, 地幔矿物的波速逐渐增加. 压力是影响波速变化的最主要因素, 温度的升高不改变波速升高的总体趋势, 但在较大的深度下温度对波速的影响明显增强, 主要地幔矿物在一定深度范围内出现局部波速降低的现象, 与矿物相变、软化及熔融作用有关. 以上实验结果表明了温度、压力作为外部因素对岩石、矿物物性的影响.

2 岩石的电性与岩石综合物性

就电性而言, 岩石土体的电性中最有意义和常用到的是电阻率(也可用电导率表示)、介电常数、自然电位、自然极化和激发极化以及压电效应等参数. 这里仅以电阻率为例. 化学元素的电阻率在门捷列耶夫元素周期表中分布情况如图 5(Дортман, 1976)所示.

由图 5 可以看出, 每一周期开始的元素, 其原子外层电子轨道未被电子占满时, 元素的电阻率低, 具有良导电性的特点; 而周期末尾的元素, 由于占满原子外层电子轨道的电子活动性差, 从而元素具有高电阻率的半导体或电介质的特征. 其它电性参数亦有类似周期性的变化.

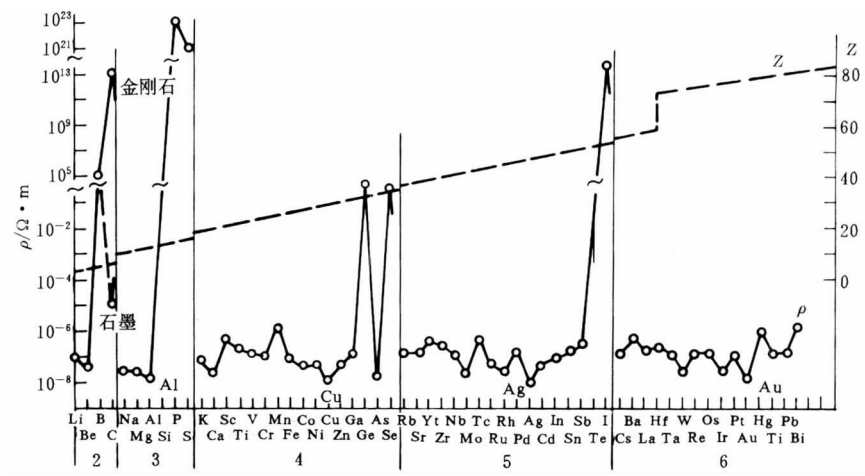


图 5 化学元素的电阻率

2~6 为门捷列耶夫元素周期表中的周期，Z 为元素的原子序数(质子个数)

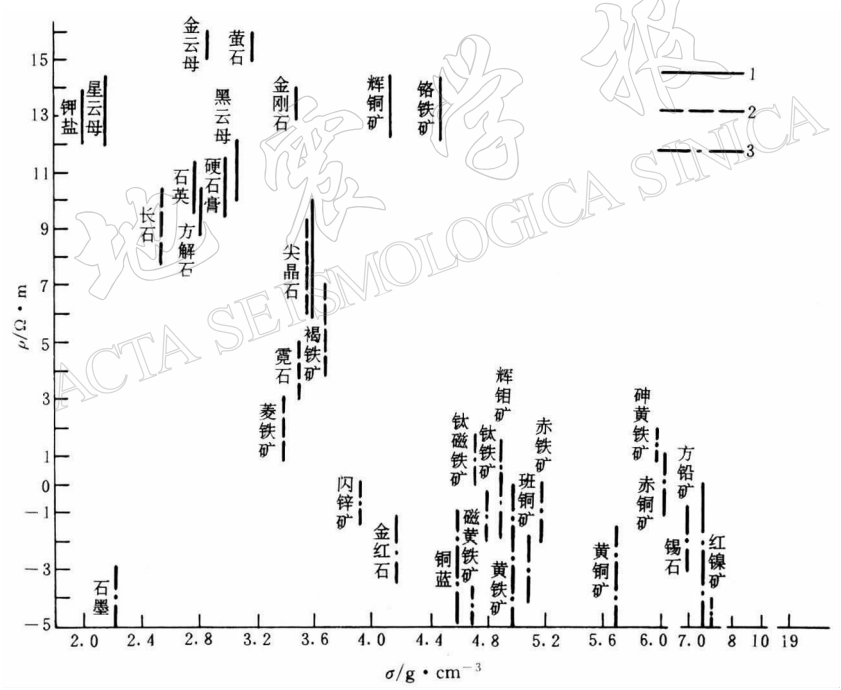


图 6 矿物的电阻率和密度

1. 电介质；2. 半导体；3. 电子导体. 结晶化学键型：1 和 2 为共价型和离子型；3 为金属型、离子-金属型和共价金属型

从宏观看，岩石矿物密度与电阻率关系可用图 6(Дортман, 1976)描述. 由图 6 可看出，密度大的矿物由于其结晶键为金属型、离子-金属型和共价-金属型的缘故，其电阻率低、导电性高. 中等密度矿物的电阻率既可能很高，如：典型的共价化合物；也可能很低，如：混合型键的矿物. 密度较低的具有离子键或共价键的矿物，其电阻率很高.

研究表明,由矿物组成的岩石,其电性特征也同样主要受组成该岩石的矿物特征、结构以及杂质等所制约.例如,当电磁波在传播中遇有介电常数、电导率变化异常的界面(体)时与地震波类似,同样也发生反射、折射、透射现象.岩石中的电流和电压,遇有电导率等变化异常的界面(体)时也有某些变化现象.近年来陈峰等在单轴压力下岩石电阻率变化方面作了大量的实验研究,得出了一些很有意义的结果(陈峰等,2000).郑海飞等(1997)还对 0.001 mol 的 NaCl 溶液的高压电导率进行了测定.结果表明,在不同的压力范围内,电导率与压力的关系非常不同,并明显表现出不连续现象.

3 岩石的放射性与岩石综合物性

就放射性而言,研究表明,火成岩放射性最强,沉积岩最弱,变质岩居于二者之间.岩石土体的天然放射性主要取决于岩石和矿物中有无大量轻、重元素的不稳定同位素.其变化规律与元素分布间也存在着某些周期性的关系.地球物理学中最常用到的放射性探测方法主要有 γ 法和中子法等.例如,在新疆某地区测井记录曲线上,当遇有声波测井曲线低、中子测井曲线高时,被认为此区域对应着含油砂层.同时还对应着自然电位测井曲线、 γ 测井曲线也低的现象.而在同一井中泥岩层(无油层)就无此现象.这都可以说明岩石综合物性参数变化对应着岩石组份、结构及杂质等亦不同的事实.再如,姚秀云等利用大庆古龙地区砂岩层岩芯实测资料,对孔隙度 φ 与深度 z 、孔隙度与渗透率 k 的关系进行定量分析,得出了一些可为直接找油、找矿和岩性勘探提供重要依据的相关性经验公式(姚秀云等,1989):

粉砂岩	$\varphi=35.73-0.0107z$	$\varphi=1.67(\ln k)^{0.5548}$
含泥粉砂岩	$\varphi=36.13-0.0119z$	$\varphi=1.3(\ln k)^{0.589}$
砂岩	$\varphi=38.25-0.0123z$	$\varphi=1.83(\ln k)^{0.566}$
含泥砂岩	$\varphi=40.08-0.0135z$	$\varphi=0.81(\ln k)^{0.824}$
含钙细砂岩	$\varphi=33.8-0.011z$	
正常压实泥岩	$\varphi=42.9543 \exp(-3 \times 10^{-4} z)$	
欠压实泥岩	$\varphi=135.7+0.1558z+(-4 \times 10^{-5})z^2$	
泥岩孔隙度与渗透率关系	$k=12.76 \times 10^{-4} \varphi^{8.18}$	

另外,姚秀云等(1989)、赵鸿儒等(1986)、于淑筠等(1989)还通过大量物理模型试验,对不同含水量 F (无量纲量,百分比)及含油量 G (无量纲量,百分比)的模型中各物性参数进行定量分析,得到了含水量与密度 σ 、纵波波速 v_p 、电阻率 ρ 之间,含油量与密度、纵波波速、电阻率之间,以及纵波波速与电阻率之间的一些相关性经验公式:

含水量与密度	$\sigma=1.68+2.02F$	0.9969 (相关系数,下同)
含水量与纵波速	$v_p=2279.2-2237.6F$	0.98989
含水量与电阻率	$\rho=80.86-304.47F$	0.892
纵波速与电阻率	$\rho=-237.12+0.14v_p$	0.932
含油量与密度	$\rho=1.68+1.93G$	0.9939
含油量与纵波速	$v_p=2255.1-1843.8G$	0.8801
含油量与电阻率	$\rho=-14200.9+218946.8G$	0.8133

4 结论

综上所述,通过某些岩石综合物性测定实验研究表明,当岩石综合物性参数变化时,对应的岩石土体与未变化前的原岩石土体是不一样的。换句话说,不同条件下岩石土体组分、结构、杂质和外部条件(如:温度、压力、湿度等)若有变化时,与之对应的所有物性参数均应有变化,且各参数之间具有某些相关性,但是变化量是不一样的,有的参数变化较明显,有的很微弱,甚至不易观察到。而前述的波速变化所反映的波阻抗的变化、电磁波变化所反映的介电常数和电阻率的变化等,仅是反映事物的某个侧面而已。这一结论是本文想要说明的主要问题。

参 考 文 献

- 陈峰,廖春庭,安金珍,等. 2000. 原始电阻率各向异性岩石的电阻率变化各向异性实验研究[A]. 见:中国地球物理学会编. 中国地球物理学会年刊[C]. 武汉:中国地质大学出版社, 155
- 郭佑民,赵鸿儒,邓国祥,等. 1989. 研究岩岩综合物性测定的必要性和可能性的初步探讨[J]. 地球物理学进展, **4**(1): 17~20
- 宋茂双,谢鸿森,郑海飞,等. 1996. 高温高压下主要上地幔矿物的波速测量及地质意义[J]. 中国科学, D 辑, **26** (2): 173~178
- 姚秀云,张凤莲,赵鸿儒. 1989. 岩石物性综合测定——砂、泥岩孔隙度与渗透率的定量研究[J]. 石油地球物理勘探, **24**(5): 533~541
- 于淑筠,曹其平,赵鸿儒. 1989. 利用介质的物理参数判断其含油性的实验[J]. 石油地球物理勘探, **24**(6): 717~722
- 赵鸿儒,郭铁栓,徐子君,等. 1996. 工程多波地震勘探[M]. 北京:地震出版社, 265
- 赵鸿儒,唐文榜,郭铁栓编著. 1986. 超声地震模型试验技术及应用[M]. 北京:石油工业出版社, 372
- 郑海飞,谢鸿森,徐有生,等. 1997. 0.001 mol NaCl 溶液的高压电导率测定[J]. 科学通报, **42**(14): 1 545~1 547
- Дортман Н Б 主编. 1976; 蒋宏耀等译. 1985. 岩石和矿物的物理性质[M]. 北京:科学出版社, 367

CHARACTERISTICS BETWEEN THE DIFFERENCE AND CHANGE IN THE COMPREHENSIVE PHYSICAL PROPERTIES OF ROCKS

Yu Ping¹⁾ Feng Yongge²⁾ Zhao Hongru²⁾

1) Seismological Bureau of Hunan Province, Changsha 410001, China

2) Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: Based on the relationship between rock physical properties and atomic structures of chemical elements, this paper discusses the characteristics between the difference and change in the comprehensive physical properties of rocks, such as density, elasticity, electrical property and radioactivity, etc. The examples in this paper show that the change of the comprehensive physical parameters of rocks reflects the change of atoms, molecules, minerals and their constitutions in rocks, and there are some correlations between these parameters.

Key words: comprehensive physical properties of rocks; elasticity; density; resistivity; radioactivity; correlativity