

文章编号: 1001-4888(2018)03-0385-10

人工砂岩物理力学性质的实验研究^{*}

赵阳, 周宏伟, 钟江城

(中国矿业大学(北京), 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 在 40MPa 的成型压力下, 选用环氧树脂作为粘结剂, 采用不同配比的石英砂、粘土为材料制作了 37 个直径 25mm、高度 50mm 的泥质人工砂岩。通过声波测量实验与单轴压缩实验得到其力学性质: 人工砂岩的动静弹性模量测量结果均随粘土质量分数的增加而降低, 其中动态弹性模量的测量结果相对较高。通过 CT 扫描实验得到其结构性质: 人工砂岩中石英砂与粘土分布均匀, 石英砂颗粒作为岩体的骨架结构, 粒间存在丰富的孔隙空间, 粘土则以填充的形式分布在粒间孔隙中。当粘土质量分数大于 10% 时, 部分粘土将代替石英砂成为岩样骨架的一部分。通过覆压渗透实验得到其孔隙及渗透性质: 人工砂岩渗透性质近似满足 Poiseuille 等效管道渗流模型。孔隙度及渗透率均与粘土质量分数呈负相关, 其中孔隙度与粘土质量分数符合线性关系, 渗透率与粘土质量分数满足负指数关系。

关键词: 人工砂岩; 配比实验; 弹性模量; CT 扫描; 孔隙渗透

中图分类号: TU45

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-121

0 引言

随着矿产资源、页岩气、砂岩气开采的不断增加, 工程灾害也日趋增多, 岩石力学问题已成为国内外学者研究的热点^[1]。岩石的基本力学性能(变形特征、破坏特征、强度特性等)及一些基本的物理力学参数(弹性模量、泊松比等)也与工程密切相关, 对施工的规划实施具有十分重要的参考作用^[2]。相比于天然岩体的随机性、复杂性、唯一性、昂贵性, 人工岩样具有物性稳定、实验重复性与对比性强、价格低廉等优点。唐仁骥等^[3]对人工岩样中使用不同胶结剂的影响进行了实验, 认为树脂材料与磷酸铝作为胶结剂的效果较好。韩学辉等^[4]实验测量了疏松泥质人工砂岩的物理性质, 发现人工岩样与同类天然岩样在孔隙结构特征上接近。谢和平、鞠杨等^[5,6]在研究中运用 3D 打印技术制作人造岩样, 实现了岩体复杂结构与应力场的可视化。

现有人工岩样的制作大多通过对混合材料的胶结来实现。研究该制作方法下不同材料配比的人工砂岩性质, 有利于对工程中天然岩石复杂情况的模拟与还原。本文使用环氧树脂高压胶结的方法制作了一批致密低渗的人工泥质砂岩, 并通过声速测量实验与单轴压缩实验、CT 扫描实验、覆压渗透实验得到了人工岩样在力学、结构、孔隙渗透等方面的性质。

1 人工岩样制作

天然砂岩中的成分复杂, 其中石英砂粒与粘土是较为主要的组成成分。石英砂作为岩样的骨架, 占

^{*} 收稿日期: 2017-06-04; 修回日期: 2017-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(51674266); 国家重点研发计划(2016YFC0600704)

通讯作者: 周宏伟(1965—), 男, 教授, 博导。主要从事工程力学与岩石力学方面的教学与研究工作。

Email: zhw@cumt.edu.cn

岩样体积的大部分,其性质很大程度上影响着人工岩样整体的性质。粘土的性质在工程中同样具有重要的作用,较为常见的粘土有蒙脱石粘土、伊利石粘土等。因此选取不同配比的石英砂与粘土作为主要材料进行人工砂岩的制作,主要控制的变量为石英砂、粘土、粘结剂的质量以及压制的应力。本文以石英砂、粘土为主要材料,环氧树脂为粘结剂(环氧树脂加 593 号固化剂),在充分搅拌均匀后通过模具加压 40MPa 制作了两种石英砂粒径范围、三种粘土类型、六种粘土质量分数以及一个不含粘土的人工岩样共 37 种。所制人工岩样直径 25mm,高约 50mm,两种石英砂颗粒粒径范围为 100~200 目(75~150 μm)与 70~140 目(106~212 μm);粘土选取了蒙脱石、伊利石、蒙脱石与伊利石质量一比一混合三种;粘土质量分数为石英砂与粘土总质量的 5%,10%,15%,20%,25%,30%共六档^[7]。图 1 所示为经切割磨平加工后得到的人工岩样。



图 1 人工岩样

Fig. 1 Artificial rock samples

2 实验与讨论

2.1 力学性质

弹性模量是岩石的主要力学参数之一,由单轴压缩实验得到的为静态模量,由声波测量得到的为动态模量。波速测量法是测量岩石动态力学参数的一种有效方法^[8-10],声波在不同材料配比的人工砂岩中的传播速度不同,根据牛顿运动定律和线弹性理论可以导出岩石的动态弹性力学参数与纵横波速之间的关系:

$$E = \frac{\rho v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2)}{v_p^2 - v_s^2} \quad (1)$$

$$V = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (2)$$

式中, E 为弹性模量(GPa); ρ 为岩样密度(kg/m^3); v_s 为横波速度(km/s); v_p 为纵波速度(km/s); ν 为泊松比。

所制人工砂岩的压制应力均为 40MPa,不同岩样之间的力学性质的差异在于石英砂与粘土的不同配比。为了得到配比对人工砂岩力学性质的影响,使用声波测量法、单轴压缩法对石英砂粒径 100~200 目、粘土为蒙脱石的六个人工岩样先后进行了动静态力学参数的测量。声波实验过程中仅使用了加持器材,未对岩样施加应力。单轴压缩实验中采用粘贴应变片的方法测量应变,测量结果如表 1 所示,分析实验数据可以得到:声波法测量得到的动态弹性模量大于单轴法测量得到的静态弹性模量。随着人工砂岩中粘土成分质量分数的增加,岩样的动态与静态弹性模量降低,动态与静态泊松比减小,单轴抗压强度增大。说明不同石英砂粘土配比的人工砂岩,在粘土质量分数不大于 30%时,粘土质量分数越大,弹性模量越低,泊松比越小,单轴抗压强度越大(粘土质量分数 10%的数据离散由二次加工造成的高度损失导致)。对于混合材料整体的弹性模量,数值较低的材料的质量分数的增加会使得整体数值降低,对于本文人工砂岩,粘土的弹性模量小于石英砂,故随着粘土质量分数的增加,岩样整体的弹性模量应该下降的实验结果是可靠的。

表 1 声波实验与单轴实验数据对比

Tab. 1 Data compare between acoustic experiment and uniaxial experiment

粘土质量 分数/%	单轴实验 E /GPa	声波测量 E /GPa	单轴实验 泊松比	声波测量 泊松比	单轴抗压 强度/MPa
5	6.933	8.415	0.265	0.299	17.033
10	4.113	8.031	0.227	0.257	34.704
15	1.84	6.415	0.113	0.179	21.114
20	1.07	4.955	0.183	0.115	24.985
25	0.989	4.489	0.171	0.118	24.831
30	0.597	3.705	0.107	0.082	28.285

2.2 结构性质

为了得到人工砂岩的结构性质,使用中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室的工业 CT 实验系统(图 2)进行了 CT 扫描实验。

CT 实验通过 X 射线在穿过岩样时产生的强度衰减来得到岩样内部的信息。衰减的程度可以用由材料本身属性确定的线性衰减系数 μ 来表示^[11]：

$$\mu = \rho(a + \frac{bZ^{3.8}}{X_E^{3.2}}) \quad (3)$$

式中, ρ 为材料密度; X_E 为 X 射线参量; Z 为等效原子序数; a 为 Klein-Nishina 系数; b 为常数。对于不同石英砂粘土配比的岩样,由式(3)可知影响其线性衰减系数的主要参数为密度。对 μ 进行放大处理得到 CT 数 N_{CT} 为：

$$N_{CT} = \frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \times 1000 \quad (4)$$

式中, μ 为被检测材料对 X 射线的线性衰减系数; μ_w 为水对 X 射线的线性衰减系数。由式(4)线性衰减系数与 CT 数线性相关,并结合式(3)材料密度与线性衰减系数线性相关,能够得到 CT 数与材料密度存在线性关系：

$$N_{CT} = f(\mu(\rho)) = \frac{a + \frac{bZ^{3.8}}{X_E^{3.2}}}{\rho_w(a_w + \frac{b_w Z_w^{3.8}}{X_{E_w}^{3.2}})} \rho - 1000 \quad (5)$$

通过以待定系数 C_1 、 C_2 代替变量密度以外的其他非变量的方法将式(5)化简为：

$$N_{CT} = C_1 \rho + C_2 \quad (6)$$

进一步将 CT 数的数值区间线性投影到二进制下 8 位(十进制下为 0~255)的灰度区间,得到灰度值 G 与密度的关系与式(6)同形：

$$G = C_3 \rho + C_4 \quad (7)$$

根据式(6)、式(7)可知 CT 数与灰度值均可通过密度的线性映射表示。总结式(3)~(7)可以得到密度、CT 数与灰度值之间可以相互线性表示,其关系能够由图 3 说明:对于一定的密度范围,CT 扫描能够得到与密度线性相关的 CT 数范围,通过再次线性映射可以得到灰度值范围。因此最终得到的灰度图像像素点的灰度值与该像素区域的密度存在线性关系,即灰度值的大小能够反映岩样局部密度的高低,CT 扫描得到的灰度分布图像能够说明岩样内部石英砂与粘土的分布情况。

不同材料配比所制人工岩样具有不同的密度,图 4 所示为人工岩样密度与粘土质量分数之间的关

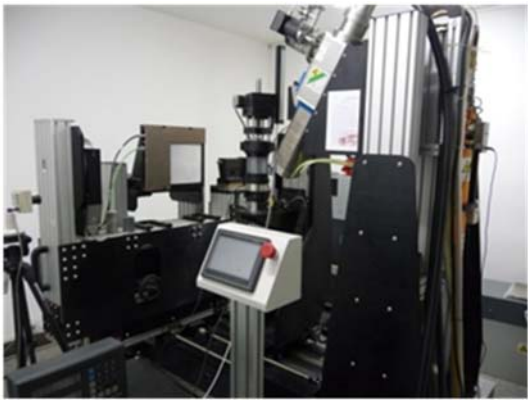


图 2 工业 CT 实验系统

Fig. 2 Industrial CT experiment system

系,由图可以得到:粘土质量分数越高,岩样的密度越大,整体上密度与粘土质量分数表现出线性相关的特征。根据人工岩样的配比情况选取了五个配比差异较大的岩样进行 CT 扫描实验,其部分参数如表 2 所示(M 代表蒙脱石粘土、Y 代表伊利石粘土、C 代表较粗粒径石英砂)。

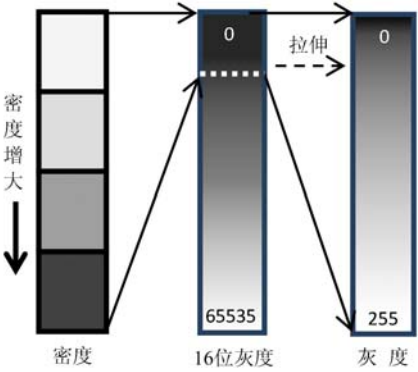


图 3 密度-CT 数-灰度值关系示意图
Fig. 3 Relationship of density-CT number-grey value

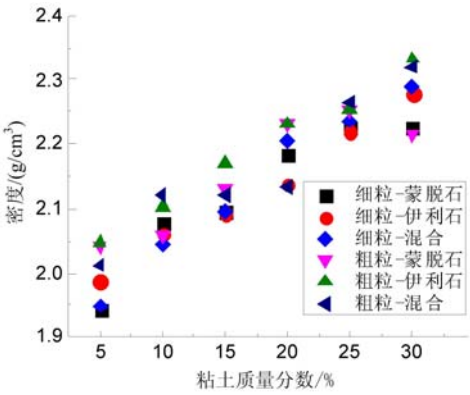


图 4 粘土质量分数与密度
Fig. 4 The relationship between clay mass fraction and density

表 2 CT 实验岩样配比情况
Tab. 2 Ratio of sample in CT experiment

岩样名称	石英砂目数	粘土类型	粘土质量分数/%	密度/(g/cm³)	孔隙度/%
C0	70~140	无	0	2.00	24.65
M5	100~200	蒙脱石	5	1.94	20.05
CY5	70~140	伊利石	5	2.05	16.94
M30	100~200	蒙脱石	30	2.23	5.66
CY30	70~140	伊利石	30	2.33	5.01

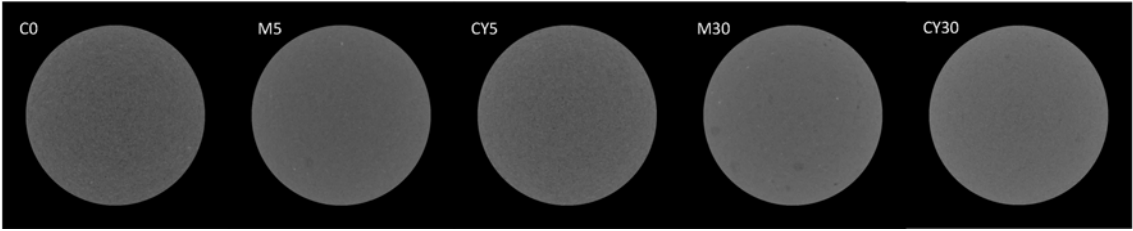


图 5 五个岩样 CT 灰度截面图像
Fig. 5 CT gray cross section image of 5 samples

图 5 为五个岩样横截面的 CT 扫描图像,图像尺寸为 1010×1010 pixel,视窗大小为 28mm,像素分辨率为 $27.77 \mu\text{m}$ 。灰度图像中无明显黑点,说明岩样内部不存在较大的缺陷。根据于庆磊等^[12]的研究可知,CT 扫描结果的灰度图像存在灰度值向截面中心减小的梯度分布现象,为了降低影响,裁掉了灰度值偏高的截面外围与灰度值偏低的截面中心,保留了偏中部的内径 400 个像素外径 600 个像素的圆环。按照上述处理方法得到五个岩样的灰度直方图如图 6 所示。由图得到灰度值随粘土质量分数的增加而增大的结果,与理论推导结果相符。灰度分布直方图为对称的单峰,说明截面范围内石英砂与粘土混合均匀,各处岩样密度基本一致,能够将石英砂与粘土的混合体视为一种材料。随机选取岩样上中下三处截面的 CT 扫描结果,根据图 7 所示的灰度分布情况可知,岩样不同位置截面的灰度分布情况几乎一致。岩样不同部位的密度分布情况几乎不存在差异,充分说明了岩样内部结构的均匀性。

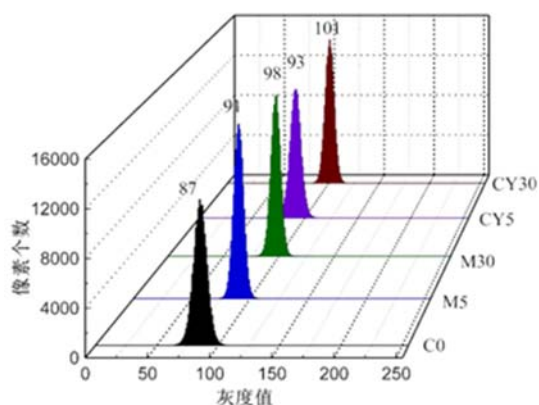


图6 CT图像灰度值分布直方图

Fig. 6 CT image grey value distribution histogram

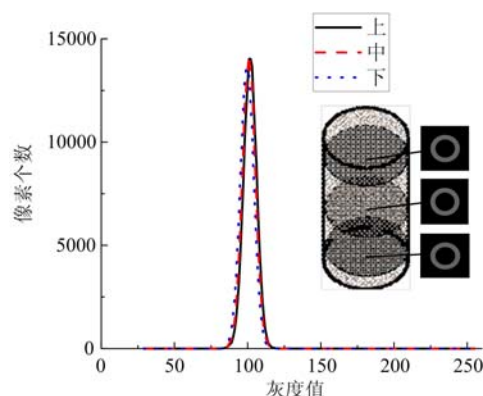


图7 岩样上中下三个截面灰度分布示意图

Fig. 7 Gray value distribution diagram of three section

由于灰度图像内各处的差异较小,为了更清晰地得到岩样内部结构信息,需要对图像灰度进行三值化处理。设像素 i 对应的灰度值为 G_i 、密度为 ρ_i ,假定材料在无细观尺度孔隙度时的灰度值为 G_r 、密度为 ρ_r ,那么像素点 i 对应区域的孔隙度可以表示为:

$$\varphi_i = 1 - \frac{\rho_i}{\rho_r} \quad (8)$$

已知岩样竖向几乎不存在差异,那么单个截面的孔隙度即可代表岩样整体的孔隙度。对于具有 n 个像素的截面,其截面孔隙度可以表示为:

$$\varphi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i \quad (9)$$

联立式(7)~(9)得到孔隙度与灰度值的关系为:

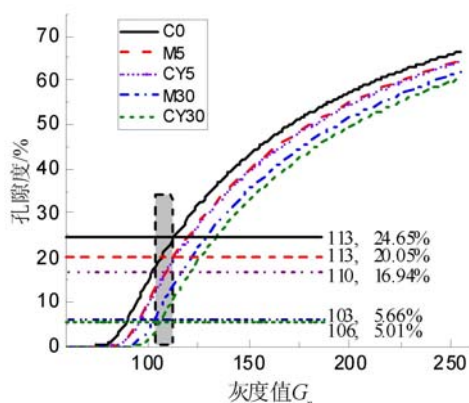
$$\varphi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[1 - \frac{C_3 G_i + C_4}{C_3 G_r + C_4} \right] \quad (10)$$

由图4所示映射关系可知,灰度值255对应截面内密度的最大值,灰度值为0时则认为像素点对应区域的密度为0,从而得到 $C_4 = 0$,则式(10)可以简化为:

$$\varphi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[1 - \frac{G_i}{G_r} \right] \quad (11)$$

由式(11)可以根据岩样实际的孔隙度反推出不含细观尺度孔隙的像素点对应的灰度值阈值。图8为岩样整体孔隙度与阈值 G_r 的关系,灰色区域即为求得的灰度值阈值 G_r 的范围。

将灰度图像以灰度直方图峰值与图8中所求得的灰度阈值为划分点进行三值化(0,100,255)处理得到图9所示的灰度图像。由三值化后的灰度分布图像可以得到:粘土质量分数越大,CT图像的整体灰度值越大,代表无细观尺度孔隙的白色(255)像素点越多,代表密度较低的黑色(含孔隙)像素点越少。结合表1中岩样的孔隙度数据,不含粘土的岩样C0具有24.65%的孔隙度,粘土质量分数30%的M30与CY30则仅有5.66%与5.01%的孔隙度。能够说明岩样中石英砂颗粒作为骨架结构,粒间存在丰富的孔隙空间,而粘土主要起填充结构间隙的作用。随着粘土质量分数的增

图8 像素点无孔隙灰度阈值 G_r 与整体孔隙度关系Fig. 8 Relationship between gray value threshold G_r of pixels without pore and the overall porosity

加,岩样中石英砂骨料形成的粒间空间被粘土填充使得孔隙度减少,密度增加,灰度值增大。

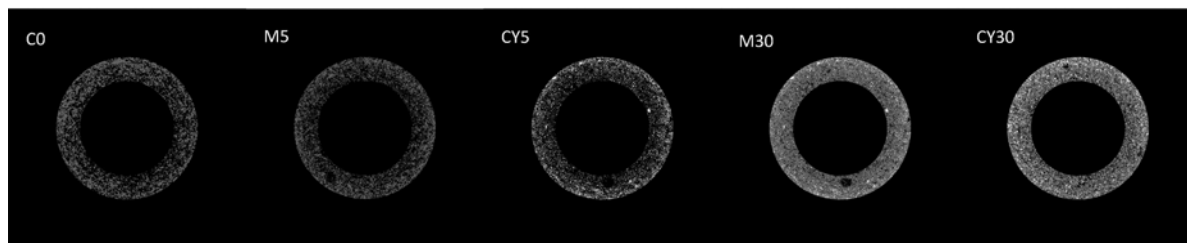


图 9 岩样三值化灰度图

Fig. 9 Three threshold grayscale of samples contain different clay

2.3 孔隙与渗透性质

孔隙度与渗透率是砂岩的两个重要物理性质,能够表征岩体的物质结构特性与作为流体渗流介质的渗透特性。孔隙度与渗透率的测量选用四川大学的 AP608 覆压渗透仪(图 10),该仪器利用波义耳定理测量岩样的固体体积从而计算孔隙度,利用非稳态压力脉冲衰减技术进行渗透率的测量。



图 10 AP608 覆压渗透仪

Fig. 10 Overburden pressure permeameter AP608

对于人工砂岩,其总体积为石英砂体积、粘土体积、粘结剂体积、孔隙体积之和。依据式(12)波义耳定理,通过测量在参考室中具有定体积与压强的气体在连通岩样所在容器(岩心杯)时的压力变化,代入式(13)得到岩体中的固体骨料体积。再代入人工测量的岩样表观体积并根据式(14)得到孔隙度:

$$P_a V_a = P_b V_b \quad (12)$$

$$V_g = (1 - \frac{P_1}{P_2}) V_{ref} + V_m \quad (13)$$

$$\varphi = 1 - \frac{V_g}{V_{dl}} = 1 - \frac{\sum V_{gi}}{V_{dl}} = 1 - \frac{1}{V_{dl}} \sum \frac{M_{gi}}{\rho_i} \quad (14)$$

式(13)、(14)中 P_1 为参考室压力(MPa); V_{ref} 为参考室的体积(m^3); P_2 为实验气体扩散到岩心杯的压力(MPa); V_m 为岩心杯体积(m^3); V_g 为岩样固体颗粒体积(m^3); V_{dl} 为人工测量得到的岩样表观总体积(m^3); φ 为孔隙度。另一方面,由于人工岩样配比材料参数已知,可以利用式(14)及仪器测量得到的孔隙度反推出石英砂、粘土以及粘结剂的体积分数,结果如表 3 所示。

人工砂岩中粘土的体积分数与粘土所占的质量分数相近,随着粘土所占质量分数由 5% 增加至 30%,其占岩样整体的体积分数也近似等差地从 4% 左右增长到 25% 左右。然而石英砂的体积分数与质量分数的变化程度不同,仅有 10% 左右小幅度的降低。随着粘土配比的等量增加,石英砂体积分数并不是等量减小。粘土质量分数由 5% 增加至 10% 时,石英的体积分数仅有小幅度的变化;粘土质量分数由 10% 增加至 15% 或继续增加时,石英砂的体积分数则出现了较大幅度的减小。说明粘土成分有两种存在形式:存在于孔隙中或者代替部分石英砂成为骨架一部分。当粘土质量分数小于 10% 时,可认为粘土仅存在于孔隙之中;大于 10% 时认为粘土开始逐步成为岩样骨架的一部分。

利用覆压渗透仪非稳态压力脉冲衰减技术对岩样进行了在 10MPa(1500psi)围压下渗透率的测量。图 11 所示为岩样渗透率与孔隙度的关系。人工岩样可以分为粒径较大的 70~140 目与粒径较小的 100~200 目两组。图中数据表明两种采用不同粒径石英砂的岩样的渗透率与孔隙度关系曲线有着明显的区别。说明岩样的孔隙度渗透率与岩样的石英砂粒径有关:在孔隙度相同的条件下石英砂粒径大的岩样具有更大的孔隙尺寸,从而具有更大的渗透率,即 70~140 目岩样相比 100~200 目的岩样在相同的孔隙度条件下具有更大的渗透率。

表 3 不同配比人工砂岩的材料体积分数
Tab. 3 Material volume fraction of different ratio of artificial sandstone

石英砂 粒径	粘土 质量 分数	石英 体积 分数	蒙脱石 粘土体 积分数	粘结剂 体积 分数	石英 体积 分数	伊利石 粘土体 积分数	粘结剂 体积 分数	石英 体积 分数	混合粘 土体积 分数	粘结剂 体积 分数
100~200 目 细粒	0.05	0.659	0.041	0.099	0.674	0.034	0.086	0.662	0.037	0.084
	0.10	0.668	0.088	0.089	0.663	0.071	0.091	0.657	0.078	0.087
	0.15	0.629	0.131	0.101	0.636	0.108	0.098	0.636	0.120	0.084
	0.20	0.624	0.184	0.081	0.611	0.147	0.085	0.630	0.169	0.104
	0.25	0.608	0.239	0.085	0.595	0.191	0.089	0.599	0.214	0.100
	0.30	0.557	0.281	0.105	0.546	0.225	0.116	0.572	0.263	0.101
70~140 目 粗粒	0.05	0.693	0.043	0.098	0.695	0.035	0.100	0.683	0.038	0.077
	0.10	0.662	0.087	0.087	0.676	0.072	0.097	0.682	0.081	0.093
	0.15	0.647	0.135	0.083	0.659	0.112	0.108	0.644	0.122	0.098
	0.20	0.638	0.188	0.084	0.638	0.154	0.101	0.609	0.163	0.103
	0.25	0.604	0.237	0.092	0.604	0.194	0.106	0.607	0.217	0.099
	0.30	0.554	0.279	0.120	0.583	0.241	0.126	0.580	0.266	0.112

对于孔隙介质渗流,达西定律的基本方程为:

$$Q = \frac{K\pi R^2 \Delta P}{\mu L} \tag{15}$$

Poiseuille 等效管道渗流模型中流量可以表示为:

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{\pi r_i^4 \Delta P}{8\mu L} \tag{16}$$

式(15)、(16)中 Q 为流量, m^3/s ; r_i 为毛细管半径, m ; μ 为流体粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; R 为岩样半径, m ; ΔP 为两端压力差, MPa ; L 为岩样高度, m 。若假定毛细管个数为 n ,联立 Poiseuille 方程与达西定律公式得到^[13]:

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{\pi r_i^4 \Delta P}{8\mu L} = \frac{K\pi R^2 \Delta P}{\mu L} \tag{17}$$

$$K = \frac{1}{8R^2} \sum_{i=1}^n r_i^4 \tag{18}$$

由式(18)可以推断出孔隙等效半径的大小对岩样孔渗特性影响较大且关系复杂^[14]。对于均匀结构的人工岩样,岩样的孔隙度在 Poiseuille 模型中可以表示为:

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^n \pi r_i^2 L}{\pi R^2 L} = \frac{1}{R^2} \sum_{i=1}^n r_i^2 \tag{19}$$

结合式(18)、(19)等效管道渗流模型中渗透率与孔隙度的关系能够统一表示为:

$$K = g(n, R) \varphi^A \tag{20}$$

式中, R 为岩样半径,可以认为是不变量; n 为等效通道个数,由岩样内部石英砂与粘土的结构性质可知粘土质量分数的增加主要引起等效孔径的减小而不改变孔径个数,可以认为 n 为不变量; A 为待定系数,特别地,假定岩样中所有等效管道的半径相同时有 $A=2$ 。图 11 中对两种粒径石英砂岩样的渗透率孔隙度散点拟合结果符合幂律函数,与式(20)的形式相近,说明人工砂岩的渗透特性近似满足等效管道渗流模型。

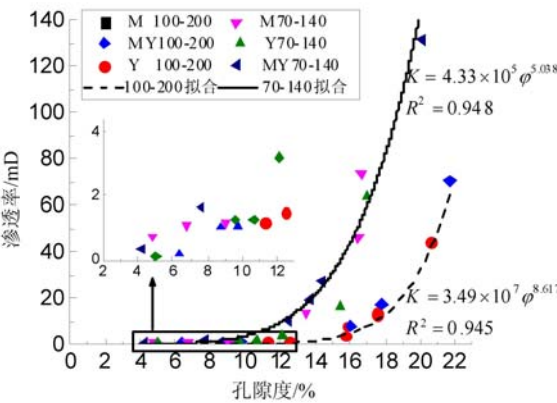


图 11 渗透率与孔隙度
Fig. 11 Permeability and porosity

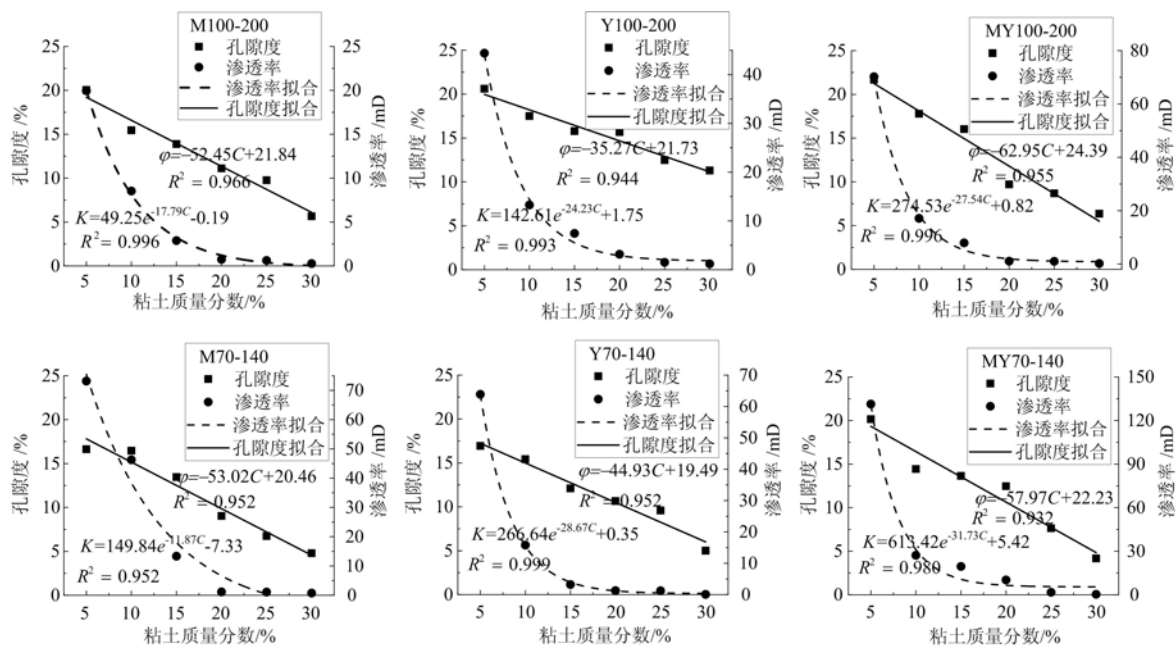


图12 粘土质量分数与孔隙度及渗透率关系

Fig. 12 Relationship between clay mass fraction and porosity or permeability

图12所示为粘土质量分数与人工岩样孔隙度、渗透率的关系。整体上孔隙度、渗透率均与粘土质量分数呈负相关。分别对孔隙度与渗透率关于粘土质量分数进行函数拟合,根据拟合方程以及较高的拟合相关系数可知:孔隙度与粘土质量分数满足线性方程,这一结果与式(14)中孔隙度与质量配比的关系相同;渗透率与粘土质量分数满足负指数函数。

2.4 与天然砂岩的相似性

天然砂岩中矿物类型丰富,石英含量较低且分布形式复杂,本文的人工砂岩的组成成分主要为均匀混合的石英砂与粘土,虽然通过人为控制可以使人工砂岩在物理力学性质上接近天然砂岩,依然有难以克服的差异:人工砂岩受力固结成型的应力与时间均远小于天然岩石,内部材料的紧密程度不如天然砂岩,且天然砂岩中各种矿物类型极其丰富,其内部的孔隙结构,裂隙与微裂隙都是无法人为控制的。同一地点取得的天然砂岩在同一实验条件下可能得到不同的实验结果,这也是使用人工砂岩代替天然砂岩实验的优势所在。制作人工砂岩时应注意对不同岩样间变量的控制以突出研究重点,同时还应尽量保证人工砂岩与天然砂岩在物理力学性质上保持一致。经实验测量得到人工砂岩密度范围为 $1.94 \sim 2.33 \text{ g/cm}^3$,孔隙度的范围为 $4.18\% \sim 21.07\%$,渗透率的范围是 $0.053 \sim 131.35 \text{ mD}$,单轴抗压强度范围为 $17.03 \sim 34.70 \text{ MPa}$,弹性模量范围为 $0.597 \sim 6.933 \text{ GPa}$ 。文献[15-18]的研究显示,一些工程中的天然砂岩的密度范围为 $2.3 \sim 2.6 \text{ g/cm}^3$,孔隙度范围为 $6.00\% \sim 18.54\%$,渗透率范围为 $0.303 \sim 51.8 \text{ mD}$,单轴抗压强度为 $20 \sim 50 \text{ MPa}$,弹性模量为 $12.79 \sim 32.55 \text{ GPa}$ 。数据对比表明所制人工砂岩与天然砂岩多种性质相近,使用该批人工砂岩进行实验研究具有可行性。

3 结论

通过环氧树脂胶结压制方法制作了不同石英砂粘土配比的人工砂岩,并针对其力学性质、结构性质以及孔隙渗透性质进行了声波测量、单轴压缩、CT扫描、负压渗透实验,得到了以下结论:

(1) 声波实验测量得到的弹性模量大于单轴压缩实验。随着人工砂岩粘土质量分数的增加,其动态与静态弹性模量以及泊松比均表现为降低,单轴抗压强度则表现为增加。人工砂岩与工程中的天然砂岩多种性质相近,室内实验具有可行性。

(2) CT扫描结果表明人工岩样中石英砂与粘土分布均匀,粘土质量分数大的岩样整体灰度值较高,密度较大。人工岩样中石英砂颗粒作为骨架结构,粒间存在丰富的孔隙空间。粘土质量分数小于

10%时,粘土主要起填充结构间隙的作用,可以认为仅存在于孔隙中。随着粘土质量分数增加至10%及以上,部分粘土将代替石英砂成为岩样骨架的一部分。

(3) 人工砂岩的气体渗透性质近似满足 Poiseuille 等效管道渗流模型。人工砂岩的孔隙度与渗透率均与粘土质量分数呈负相关,拟合结果显示:孔隙度与粘土质量分数满足线性函数关系,渗透率与粘土质量分数满足负指数函数关系。

参考文献:

- [1] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(1):91—99 (ZHOU Hongwei, XIE Heping, ZUO Jianping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1):91—99 (in Chinese))
- [2] 周宏伟, 谢和平, 左建平, 等. 赋存深度对岩石力学参数影响的实验研究[J]. 科学通报, 2010, 55(34):3276—3284 (ZHOU Hongwei, XIE Heping, ZUO Jianping, et al. Experimental study of the effect of depth on mechanical parameters of rock[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(34):3276—3284 (in Chinese))
- [3] 唐仁骐, 曾玉华, 姚凤英. HNT 人造岩样的制作和研究[J]. 石油钻采工艺, 1998, 20(1):98—102 (TANG Renqi, ZENG Yuhua, YAO Fengying. The manufacture and study of HNT artificial rock sample[J]. Oil Drilling and Production Technology, 1998, 20(1):98—102 (in Chinese))
- [4] 韩学辉, 杨龙, 侯庆宇, 等. 一种分散泥质胶结疏松砂岩的人工岩样制作新方法[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6):2944—2949 (HAN Xuehui, YANG Long, HOU Qingyu, et al. A new method for making artificial rock of unconsolidated sandstone cemented by dispersed shale[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(6):2944—2949 (in Chinese))
- [5] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11):2161—2178 (XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11):2161—2178 (in Chinese))
- [6] 鞠杨, 谢和平, 郑泽民, 等. 基于 3D 打印技术的岩体复杂结构与应力场的可视化方法[J]. 科学通报, 2014, 59(32):3109—3119 (JU Yang, XIE Heping, ZHENG Zeming, et al. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(32):3109—3119 (in Chinese))
- [7] 于淼. CO₂ 驱油后的流体—岩石相互作用研究—以松辽盆地南部为例(博士学位论文)[D]. 吉林大学, 2015 (YU Miao. A study on fluid-rock interaction after CO₂ flooding in oilfields-example from Southern Songliao Basin (Ph.D. Thesis)[D]. Jilin University, 2015(in Chinese))
- [8] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 饱水度对砂岩纵波波速及强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8):1625—1631 (DENG Huafeng, YUAN Xianfan, LI Jianlin, et al. Experimental research on influence of saturation degree on sandstone longitudinal wave velocity and strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8):1625—1631 (in Chinese))
- [9] 刘向君, 刘洪, 徐晓雷, 等. 低孔低渗砂岩加载条件下的声波传播特性实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3):560—567 (LIU Xiangjun, LIU Hong, XU Xiaolei, et al. Experimental research on acoustic wave propagation characteristic of low porosity and permeability sandstone under loading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3):560—567 (in Chinese))
- [10] 俞然刚, 田勇. 砂岩岩石力学参数各向异性研究[J]. 实验力学, 2013, 28(3):368—375 (YU Rangang, TIAN Yong. On the rock mechanics parameters anisotropy of sandstone[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(3):368—375 (in Chinese))
- [11] 王宇, 李晓, 阙介民, 等. 基于 CT 图像灰度水平的孔隙率计算及应用[J]. 水利学报, 2015, 46(3):357—365 (WANG Yu, LI Xiao, QUE Jiemin, et al. A porosity calculation method based on CT images and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(3):357—365 (in Chinese))
- [12] 于庆磊, 杨天鸿, 唐世斌, 等. 基于 CT 的准脆性材料三维结构重建及应用研究[J]. 工程力学, 2015, 32(11):51—62 (YU Qinglei, YANG Tianhong, TANG Shibin, et al. The 3D reconstruction method for quasi-brittle material structure and application[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(11):51—62 (in Chinese))
- [13] 宋延杰, 王鹤, 唐晓敏, 等. 基于水流与电流流动相似性的泥质岩石油水相对渗透率与电阻率关系[J]. 测井技

- 术, 2015, 39(5):543—549 (SONG Yanjie, WANG He, TANG Xiaomin, et al. Relationship between oil-water relative permeability and resistivity of shaly rock based on the similarity between water flow and electric current [J]. Well Logging Technology, 2015, 39(5):543—549 (in Chinese))
- [14] 孙军杰, 田文通, 刘琨, 等. 基于 Poiseuille 定律的土体渗透系数估算模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1):150—161 (SUN Junjie, TIAN Wentong, LIU Kun, et al. Estimation model of soil permeability coefficient based on Poiseuille's law[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(1):150—161 (in Chinese))
- [15] 李正伟. 干热岩裂隙流—传热试验及储层模拟评价研究(博士学位论文)[D]. 吉林大学, 2016 (LI Zhengwei. Research on hot dry rock fracture seepage heat transfer experiment and reservoir modeling evaluation(Ph. D. Thesis)[D]. Jilin University, 2016 (in Chinese))
- [16] 刘岩. 鄂尔多斯盆地南部镇泾油田长 8 段储层特征研究(硕士学位论文)[D]. 四川:成都理工大学, 2008 (LIU Yan. Research on the reservoir characteristics of the Chang-8 member of the Yanchang formation in Zhenjing oilfield, Ordos Basin(M. S. Thesis)[D]. Sichuan: Chengdu University of Technology, 2008 (in Chinese))
- [17] 孙致学. 裂缝性油藏中高含水期开发技术研究—以火烧山油田 H_2 层为例(博士学位论文)[D]. 四川:成都理工大学, 2008 (SUN Zhixue. The study of development technology on naturally fractured reservoir in high watercut- H_2 formation of Huoshaoshan oilfield as example (Ph. D. Thesis) [D]. Sichuan: Chengdu University of Technology, 2008 (in Chinese))
- [18] 曹运江. 含软岩高边坡稳定性的系统工程地质研究—以岷江紫坪铺水利枢纽工程为例(博士学位论文)[D]. 四川:成都理工大学, 2006 (CAO Yunjiang. Systematic engineering geological study on the stability of high slope with soft rock-Taking the Zipingpu water conservancy project in Minjiang River as a case(Ph. D. Thesis)[D]. Sichuan: Chengdu University of Technology, 2006 (in Chinese))

Experimental study of physical and mechanical properties of artificial sandstone

ZHAO Yang, ZHOU Hong-wei, ZHONG Jiang-cheng

(China University of Mining and Technology, School of Mechanics and Civil Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: Under the 40MPa forming pressure, 37 artificial argillaceous sandstone samples with 25mm diameter and 50mm height were fabricated, by selecting epoxy resin as binder and adopting quartz sand and clay with different proportions as materials. Its mechanical properties were obtained through sound speed measurement experiment and uniaxial compression experiment. All measured results of dynamic and static elastic modulus of artificial sandstone decrease with the increase of clay mass fraction, among which, the measured results of dynamic modulus of elasticity are relatively higher. Its structure properties were obtained by CT scanning experiment. The distribution of quartz sand and clay is uniform in artificial sandstone. As skeleton structure of rock mass, there is plenty of pore space between quartz sand grain, while clay is distributed in intergranular pore in the form of filling. When the clay mass fraction is greater than 10%, partial clay could replace quartz sand as part of rock skeleton. The porosity and permeability were obtained by overpressure permeation experiment. An seepage model of artificial sandstone approximately satisfies Poiseuille equivalent pipe seepage model. In addition, the porosity and permeability of artificial sandstone are all negatively correlated with clay mass fraction, among which, the porosity and clay mass fraction accord with linear relation, permeability and clay mass fraction satisfy negative exponential relation.

Keywords: artificial sandstone; experiment on material ratio; elastic modulus; CT scanning; porosity and permeability