

高温脱水石膏岩物理力学效应的试验研究

苏承东^{1,2}, 韦四江^{1,2}, 许崇帮³, 苏发强^{1,2}

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南 焦作 454003;
3. 交通运输部公路科学研究所, 北京 100088)

摘要: 为了探讨高温脱水对天然石膏岩物理力学效应的影响, 将天然石膏岩在高温 220 °C 控制脱水时间制取含不同结晶水石膏岩试样, 分别对石膏岩试样进行扫描电镜、超声波测试和常规三轴压缩试验, 分析高温脱水时间对石膏岩微观结构、孔隙率、纵波波速、三轴抗压强度, 弹性模量、峰值应变、黏结力和内摩擦角的影响。结果表明: 高温作用对石膏的作用是极其复杂物理化学过程, 高温脱水对石膏岩具有明显弱化作用, 随着高温脱水时间的增加, 石膏岩内部晶体结构和形状逐渐发生变化, 试样内部微裂纹、微孔洞的数量逐渐增多, 导致其物理力学性能不断劣化; 在高温 220 °C 石膏岩脱水量、视密度和孔隙率与脱水时间呈非线性关系, 在 0~6 h 以内裂解脱水速率较快, 在 6~24 h 范围内脱水速率有所减缓。高温脱水后石膏试样纵波波速均有不同程度降低, 在 0~6 h 以内损伤因子随孔隙率增加而单调降低, 两者大致呈线性关系, 超过 6 h 以后脱水石膏岩损伤因子变化不大; 石膏岩三轴压缩全程的变形特征受围压和高温脱水时间的共同影响, 脱水时间 0~4 h 对石膏岩试样变形参数的影响远大于对围压的影响, 超过 4 h 以后脱水时间、围压对石膏岩弹性模量和变形模量的影响不大, 随着围压与脱水时间的增加脆性减弱塑性增强; 石膏岩试样三轴峰值强度随围压增大而单调增加, 符合 Coulomb 强度准则。高温脱水对石膏岩具有明显弱化作用, 扣除围压影响后石膏岩材料强度与脱水时间呈负相关; 石膏岩试样破坏形态与围压高低没有直接关系, 脱水时间越长破坏形态越复杂。

关键词: 岩石力学; 石膏岩; 高温脱水; 二水石膏; 三轴压缩; 物理力学效应

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2019)02 - 0254 - 13

Experimental study on physico-mechanical effects of high temperature dehydrated gypsum rock

SU Chengdong^{1,2}, WEI Sijiang^{1,2}, XU Chongbang³, SU Faqiang^{1,2}

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China;
2. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety, Henan Province, Jiaozuo, Henan 454003, China;
3. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to investigate the effect of high temperature dehydration on physical and mechanical properties of natural gypsum rock, standard rock samples contained different crystal water were prepared at 220 °C within a certain time and tested with scanning electron microscope, ultrasonic wave and conventional triaxial compression. The influence of the dehydration time on physical and mechanical behaviors of gypsum rock, including microstructure, porosity, longitudinal wave velocity, conventional triaxial compressive strength, elastic modulus, peak strain, cohesion and friction angle, was analyzed. The results are showed as follows. High temperature effect

收稿日期: 2018 - 09 - 25; **修回日期:** 2018 - 11 - 01

基金项目: 河南省教育厅自然科学研究计划项目(2010A44002); 河南省科技攻关项目(182102210317); 国家自然科学基金资助项目(51278233)

Supported by the Henan Provincial Department of Education Natural Science Research Project(Grant No. 2010A44002), Henan Science and Technology Project(Grant No.182102210317) and National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51278233)

作者简介: 苏承东(1961 -), 男, 1987年毕业于焦作矿业学院采矿工程专业, 现为教授级高级工程师, 主要从事采矿工程和岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: sucd@hpu.edu.cn. 通讯作者: 韦四江(1977 -), 男, 博士, 现任副教授。E-mail: jzitwsj@126.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1129

on gypsum rock is an extreme complex physical and chemical process. Gypsum rock can be obviously weakened by high temperature dehydration. With increasing the dehydration time, the crystal structure and shape of gypsum rock change gradually and the numbers of micro-cracks and micro-voids increase gradually, which leads to the deterioration of the physical and mechanical properties of gypsum rock. The dehydration amount, the apparent density and the porosity are nonlinear with the dehydration time. The dehydration rate of gypsum rock is larger within 6 hours while decreases within 6 to 24 hours. P-wave velocity of gypsum samples decreases to some extent due to high temperature dehydration. The damage factor decreases linearly with the porosity within 6 hours but changes little after 6 hours. The deformation characteristics of gypsum rock under triaxial compression are influenced by the confining pressure and the high temperature dehydration time. The influence of the dehydration time on the deformation parameters of gypsum rock samples including the elastic modulus and the deformation modulus is far greater than that on the confining pressure within 4 hours, but the confining pressure has little influence on the elastic modulus and the deformation modulus. With increasing the confining pressure and the dehydration time, the brittleness of the specimens decreases but the plasticity increases. Triaxial peak strength of the samples increases monotonously with the confining pressure, which accords with Coulomb strength criterion. The strength of gypsum rock material is negatively correlated with the dehydration time without considering the influence of the confining pressure. The failure mode of gypsum rock samples has no direct relationship with the confining pressure and is more complex with longer dehydration time.

Key words: rock mechanics; gypsum rock; high temperature dehydration; dihydrate gypsum; triaxial compression; physico-mechanical effect

1 引言

随着国内基础建设的发展,对能源需求量日益增加,核能开发利用将是今后能源发展的方向之一,而核能废料的处理通常采用盐矿给水溶开采法造库深埋地质处置^[1-4]。而我国盐矿多为层状盐岩构造,赋存条件较为复杂,一般单层厚度薄、常含难溶或不溶夹层(硬石膏、泥岩等),硬石膏与其他岩石在力学性质上存在较大差别^[5]。天然硬石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)属于中等强度类岩石,且风化速度快,遇水易潮解,与高温又会脱水等特性。

由于地质处置的核废料在地下埋置若干年后仍然具有一定放射性,同时产生相当高的热量,使得腔库围岩温度升高。据资料^[6-7]显示,在地下 1 000 m 深处,一定核废料处置量的情况下,由于核废料放射所产生的热量,使得核废料处置库腔库围岩的温度可高达 165 °C 左右。而天然硬石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)当温度高于 163 °C 将部分或全部脱水,脱水后石膏其物理力学性质将发生较大变化,盐腔夹层石膏脱水其力学性质劣化,有可能导致核能废料储存库围岩稳定性和密闭性,造成核能废料污染源泄露对地下环境的损坏。因此,关于核能废料储存库围岩硬石膏脱水后力学性质的研究是亟待解决的科研课

题,这对于分析岩盐储存库的稳定性和密闭性至关重要。

国内有关岩盐和夹层石膏岩的物理力学性质进行了一些研究,并取得有价值的研究成果。例如:姜德义等^[8-9]对泥质硬石膏夹层进行了不同浸泡时间下的单轴压缩和巴西劈裂软化试验研究,发现其力学强度随卤水浸泡时间劣化明显,单轴抗压强度、弹性模量、和抗拉强度与浸泡时间呈负相关。高红波等^[10-11]对石膏岩夹层在不同温度与含 Cl^- 盐溶液长时间共同作用下的力学特性进行了研究,结果表明随温度升高、盐溶液浓度增大、浸泡时间的延长,石膏岩抗压(拉)强度、黏聚力与内摩擦角均呈降低趋势;郭印同等^[12-13]对硬石膏进行了不同围压下的常规三轴试验,结果发现在围压超过 10 MPa 时硬石膏表现出明显的塑性流动特性,且峰值应变、弹性模量与围压良好正相关性;李亚等^[14]对石膏岩进行不同次数干湿循环后进行单轴压缩试验,结果表明吸水率、孔隙度、单轴抗压强度和弹性模量与干湿循环次数呈对数函数形式。任松等^[15]对石膏岩进行了不同浸水软化试验,结果表明随着浸泡时间的增长石膏岩的单轴抗压强度、抗剪强度和弹性模量呈负指数下降趋势,而泊松比在一定条件下呈线性增加趋势;刘伟等^[16]对含界面盐岩分别从微观和宏观方面对其变形与破损特性开展研究,盐岩

与夹层界面处颗粒结合紧密、相互嵌合，胶结良好，为储库密闭性提供有利条件，而裂纹起裂机制和渗透通道形成是界面的细观结构特性及其应力状态共同影响的结果。

尽管上述学者对岩盐和夹层石膏岩力学性质进行了一系列研究和探讨，而高温脱水对石膏岩物理力学性质影响的研究成果比较匮乏。鉴于此，本文以河南某石膏矿天然石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)为研究对象，拟定在高温 220 °C 控制脱水时间制成含不同结晶水石膏岩试样，分别对试样进行扫描电镜、超声波测试和常规三轴压缩试验。分析高温脱水对石膏岩的视密度、孔隙率、纵波波速、三轴抗压强度、弹性模量、变形模量、峰值应变、黏聚力和内摩擦角等参数的影响。研究结果可作为岩盐储存库运行期间稳定性分析提供参考依据。

2 试样特征及试验方法

2.1 试样制备与特征

石膏岩块取自某石膏矿，埋深 300 m 左右，温度 25 °C。在室内沿垂直层理密集布孔钻取岩芯，加工时采用自来水冷却。制成直径为 50 mm，高度为 100 mm 标准试样，试样两端面平行度控制在 ± 0.02 mm，满足测定方法^[17]的要求。石膏岩块编号分别为 A, B, C, D 和 E。高温脱水前筛选出 25 个试样的自然密度在 2.24~2.37 g/cm^3 范围内，平均值为 2.33 g/cm^3 ，离散系数为 0.91%。

2.2 矿物分析

天然石膏岩矿物成分采用 D8 - ADVNCE 型 X 射线衍射仪进行测试，测试时取自然石膏岩制成粒度小于 44 微米(350 目)样品。取样品约 1 g 插入衍射仪样品台，均匀分布并用玻璃压平压实，按 X 射线衍射仪操作程序做好准备工作。打开 X 射线衍射仪应用软件，设置合适的衍射条件及参数，开始样品测试。表 1 列出石膏岩试样 X 射线衍射测试结果，图 1 给出历经原始石膏岩试样 X 射线衍射图谱。从表 1 和图 1 可以看出：石膏岩试样矿物主要成分为二水石膏(95%)和石英(5%)。

2.3 高温脱水处理

高温脱水采用 KSW - 5D - 12 型高温箱式电阻炉和电炉温度控制器。该设备可以自动控温、升温，硅炭棒加热，高性能纤维保温。为了制取不同含结晶水的石膏岩试样，首先将 E 组 5 个试样以 10 °C/min 的速度加温至 220 °C，间隔一定时间称其质量，经历 15 h 后两次称重差值不超过 0.2 g，认为试样内部

表 1 石膏试样 X 射线衍射分析结果

Table 1 X ray diffraction test results of samples

矿物成分(分子式)	含量/%
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	95
SiO_2	5

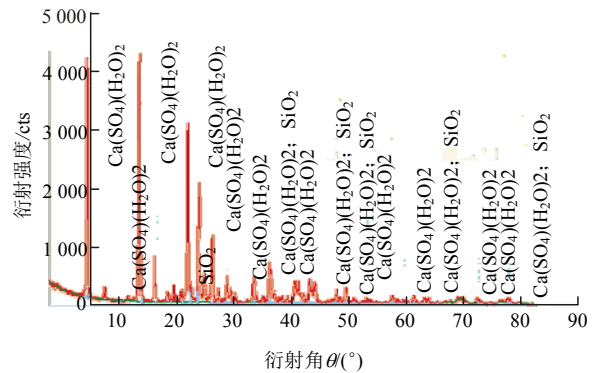


图 1 石膏试样 X 射线衍射图谱

Fig.1 X-ray diffraction pattern of gypsum samples

结晶水完全脱水，E 组试样平均脱水量与时间的关系见下文。

作为对比，A 组作为天然石膏岩自然状态，其余 B, C 和 D 组 15 个试样放入箱式电阻炉内，仍以 10 °C/min 的速度加温至 220 °C 温度间。依据 E 组试样平均脱水量与时间的关系来确定每组试样的脱水时间，B, C 和 D 组试样脱水时间分别在 2, 4 和 6 h，每组试样到达设定时间取出试样放入干燥器内自然冷却至室温，称重后装入密封塑料袋装以免脱水试样再次吸水，制成不同含结晶水的石膏岩试样，见图 2。从图 2 可以看出，天然状态二水石膏 A 组试样为深灰色，经历 220 °C 高温脱水后的 B, C, D 和 E 组 20 个试样表观颜色有所变浅，均为浅灰色，

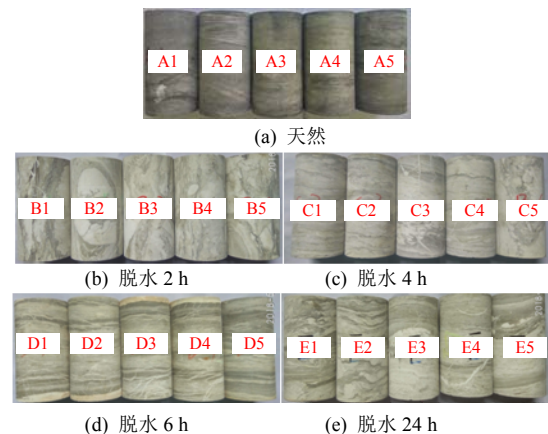


图 2 高温脱水前后石膏试样

Fig.2 Gypsum samples before and after high temperature dehydrations

试样表面依旧平整，无明显龟裂裂纹，沉积层理清晰可见。

2.4 试验方法

高温脱水前、后采用 UTA - 2000A 型超声监测分析仪对试样进行纵波波速测试，采用频率为 35 kHz 的普通传感器，采样频率为 10 MHz，采样精度为 0.1 μs，为了避免声波信号衰减，在传感器与试样之间采用黄油作为耦合剂，并用适当加紧力保证传感器与试样之间良好接触。在 RMT - 150B 型电液伺服试验系统上进行常规三轴压缩试验，围压分别设定为 1, 2, 3, 4 和 5 MPa，用 5 mm(或 50 mm)位移计测量轴向压缩变形，1 000 kN 载荷传感器测量轴向力。首先采用力控制模式，以静水平应力同步施加轴压、围压至预定值，而后系统自动切换成轴向位移控制模式，以 0.002~0.1 mm/s 加载速率均匀加载至试样完全破坏为止，试验过程中实时显示自动采集载荷与变形。

3 物理效应分析

天然石膏岩(CaSO₄·2H₂O)又称二水石膏、水石膏或软石膏，主要成分 CaO(32.6%)，SO₃(46.5%)，H₂O(20.9%)，为单斜晶系，Ca²⁺联结 SO₄²⁻四面体构成双层的结构层，而 H₂O 分子则分布于双层结构之间(见图 3^[18])。高温脱水时，首先在水分子同 Ca²⁺联结 SO₄²⁻离子之间结合力比较弱的部位发生裂解，然后从结晶格子中脱去水分变成半水石膏或无水石膏。

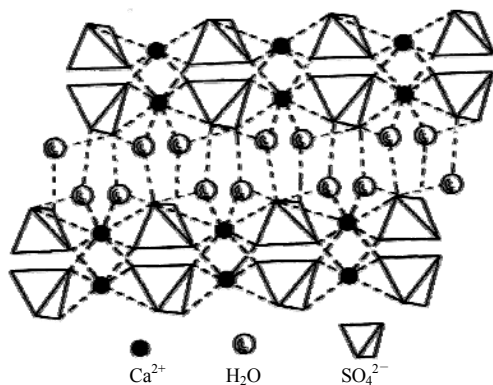


图 3 石膏晶体结构^[18]

Fig.3 Structure of gypsum crystal^[18]

天然石膏试样在 220 °C 高温条件下结晶水发生裂解不断脱出蒸发，从而引起物理参数发生变化，表 2 给出天然石膏岩脱水前后物理参数测试结果。表中，*T*，*W* 和 *η* 分别为高温脱水时间、脱水量和新增孔隙率；*V_q*，*V_h*，*ρ_q* 和 *ρ_h* 分别为脱水前后纵波波速和视密度。

表 2 天然石膏岩脱水前后物理参数测试结果

Table 2 physical parameter test results of natural gypsum rock before and after dehydration

No.	<i>T</i> /h	<i>W</i> /g	<i>η</i> %	<i>V_q</i> /(m·s ⁻¹)	<i>V_h</i> /(m·s ⁻¹)	<i>ρ_q</i> /(g·cm ⁻³)	<i>ρ_h</i> /(g·cm ⁻³)
A1	0	0.00	0.00	4 469	4 469	2.328	2.328
A2	0	0.00	0.00	4 599	4 599	2.326	2.326
A3	0	0.00	0.00	4 523	4 523	2.334	2.334
A4	0	0.00	0.00	4 378	4 378	2.331	2.331
A5	0	0.00	0.00	4 591	4 591	2.332	2.332
均值	0	0.00	0.00	4 512	4 512	2.330	2.330
B1	2	24.74	12.79	4 562	3 158	2.339	2.213
B2	2	35.71	18.60	4 569	3 281	2.359	2.174
B3	2	25.51	12.99	4 630	3 546	2.346	2.217
B4	2	31.55	16.07	4 652	3 290	2.335	2.175
B5	2	30.72	15.74	4 624	3 270	2.346	2.189
均值	2	29.65	15.24	4 607	3 309	2.345	2.194
C1	4	55.65	28.67	4 597	1 670	2.317	2.031
C2	4	59.83	30.47	4 405	1 718	2.312	2.009
C3	4	64.97	33.15	4 579	2 151	2.322	1.992
C4	4	54.57	27.80	4 523	1 983	2.319	2.042
C5	4	60.13	30.85	4 553	1 939	2.322	2.014
均值	4	59.03	30.19	4 532	1 892	2.319	2.018
D1	6	70.80	35.84	4 615	1 671	2.281	1.924
D2	6	78.19	39.70	4 419	1 524	2.305	1.908
D3	6	78.55	39.85	4 309	1 277	2.311	1.914
D4	6	84.60	43.70	4 462	1 548	2.364	1.928
D5	6	76.34	38.84	4 390	1 538	2.320	1.933
均值	6	77.70	39.59	4 439	1 512	2.316	1.921
E1	24	89.55	46.72	4 519	1 175	2.372	1.906
E2	24	81.37	41.59	4 656	1 214	2.321	1.906
E3	24	81.49	42.61	4 509	1 304	2.363	1.938
E4	24	81.68	41.60	4 505	1 171	2.317	1.902
E5	24	80.19	41.80	4 267	1 226	2.340	1.931
均值	24	82.86	42.72	4 491	1 218	2.343	1.917

3.1 脱水特征

图 4 给出 E 组石膏试样在 220 °C 高温脱水量测试结果，需要说明的是图中孔隙率是试样高温脱水量折算出新增孔隙率，不含试样的原始孔隙率。从图 4 可以看出，在高温 220 °C 石膏岩脱水量(孔隙率)与时间呈非线性关系。在 0~6 h 以内脱水速率较快，脱水量(孔隙率)与时间大致呈线性关系，在 6~24 h 范围内结晶水裂解脱水速率有所减缓，曲线偏离直线。超过 24 h 以后试样质量基本恒定，也就是说天然石膏的结晶水已基本全部脱完，曲线呈现水平直线。

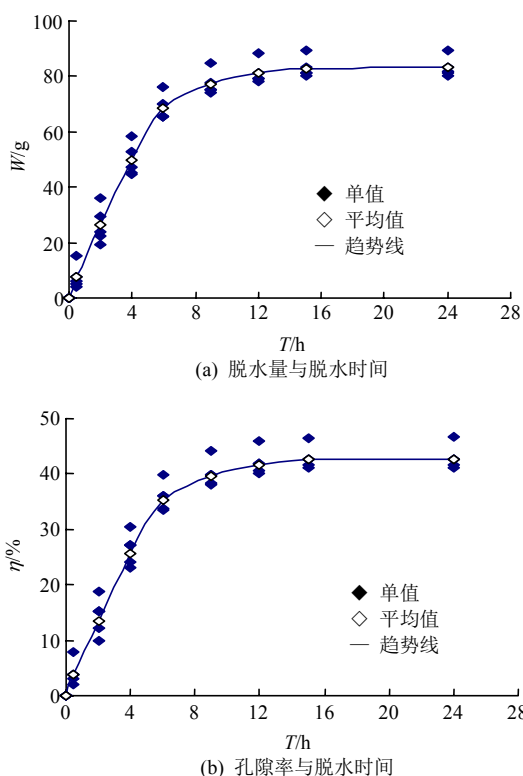


图4 高温石膏脱水量、孔隙率与脱水时间的关系(220 °C)
Fig.4 Relationships between the dehydration and the porosity of high temperature gypsum with the dewatering time when temperature is 220 °C

3.2 视密度与孔隙率特征

视密度与孔隙率是岩石主要物理参数之一，视密度是指含孔隙在内单位体积试样的质量，孔隙率是指试样内含孔隙体积与试样总体积的比值。由于天然石膏岩试样高温脱水后质量减少孔隙增加，其视密度与孔隙率将会发生变化。图5为高温脱水前后石膏岩试样视密度与孔隙率测定结果。

为便于比较，表2给出25个石膏岩试样脱水前视密度分布在2.281~2.372 g/cm³，平均值为2.330 g/cm³，离散系数为0.91%；从图5(a)可以看出：经历220 °C高温脱水期间，在0~6 h以内的视密度随脱水时间增加而单调降低，两者大致呈线性关系。在6~15 h范围内视密度变化趋于平缓，15~24 h曲线近似水平。与脱水前均值相比，经历2, 4, 6和24 h脱水后石膏岩试样的视密度分别为2.194, 2.018, 1.921和1.917 g/cm³，平均视密度降幅分别为6.5%, 13.0%, 17.1%和18.2%。

从图5(b)可以看出：高温脱水后试样孔隙率与脱水时间呈非线性。经历0~6 h以内脱水后试样的孔隙率随脱水时间增加而单调增加，两者大致呈线性关系，在6~24 h范围内孔隙率变化趋于平缓。

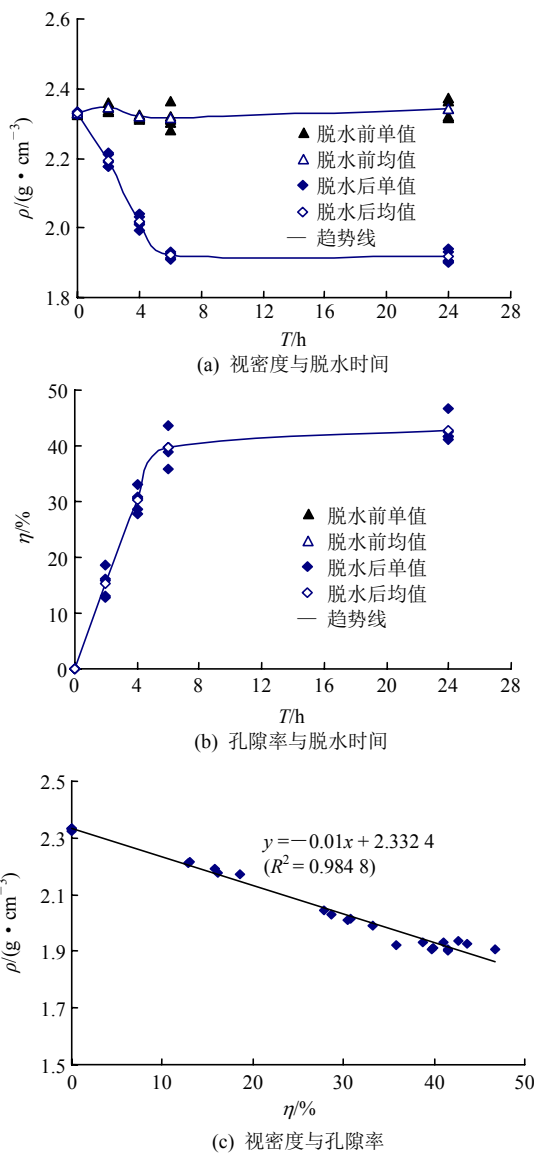


图5 高温脱水前后试样视密度与孔隙率测定结果
Fig.5 Determination of the apparent density and the porosity before and after high temperature dehydration

与脱水前均值相比，经历2, 4, 6和24 h脱水后石膏岩试样的新增孔隙率分别为15.2%, 30.2%, 39.6%和42.7%。

从图5(c)可以看出，高温脱水后试样视密度与新增孔隙率具有良好线性负相关。分析后不难发现高温脱水石膏岩试样的视密度、孔隙率与脱水时间呈非线性关系，在0~6 h以内视密度随脱水时间增加而减小，而孔隙率则随脱水时间的增加而增加，超过6 h以后试样视密度、孔隙率趋于恒定，视密度与孔隙率呈良好线性负相关。

3.3 波速特征

超声纵波波速能够反映岩石试样内部孔隙、裂隙等密实程度。图6给出了石膏岩脱水前后试样纵波波速测试对比结果，图中同时也显示了25个试样

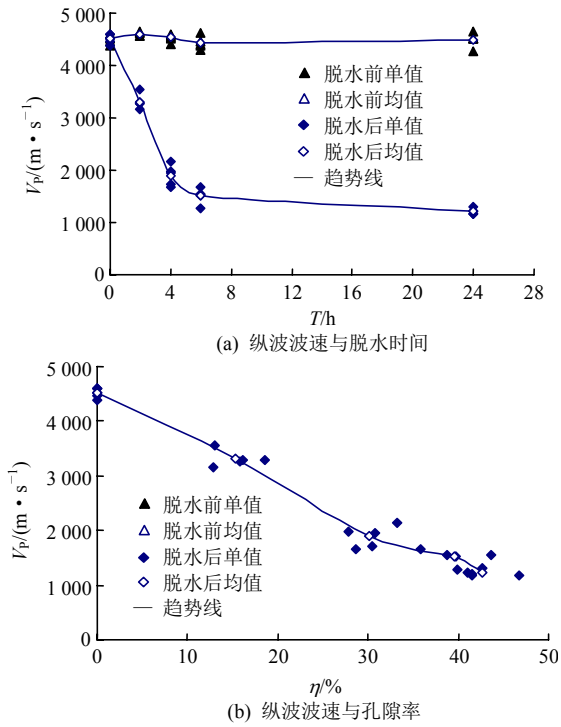


图 6 高温脱水前后试样纵波波速测试对比结果

Fig.6 Comparison of the longitudinal wave velocity before and after high temperature dehydration

脱水前的纵波波速在 4 267~4 656 m/s，平均值为 4 516 m/s，离散系数为 1.85%。

从图 6(a)可以看出，高温脱水后石膏试样纵波波速均有不同程度降低，在 0~6 h 以内纵波波速随脱水时间增加而单调降低，两者大致呈线性关系。在 6~24 h 试样的纵波波速变化区域平缓。经历 2, 4, 6 和 24 h 脱水后石膏岩试样的平均纵波波速分别降为 3 309, 1 892, 1 512 和 1 218 m/s。与脱水前平均值相比，纵波波速降幅分别为 28.2%，58.2%，65.9%和 72.9%。

图 6(b)显示经历 220 °C 不同脱水时间后试样纵波波速与孔隙率的关系，就两者变化趋势而言，纵波波速随新增孔隙率增加而降低。表明石膏岩试样高温脱水后试样质量减少孔隙率增加，传播特性受孔隙影响导致纵波波速降低。

试样内部由于受热不同矿物膨胀不协调造成内部产生微观裂纹，同时结晶水受热后发生裂解使得试样内部的结构状况、材料性能发生相应物理力学变化，试样中将产生分布复杂裂隙和缺陷。超声波在传播过程中遇到裂隙和缺陷时要经过折射、绕射等现象，波导性减弱和能量衰减增加导致纵波波速降低。高温脱水后试样纵波波速与力学性能有密切关系，纵波波速也能间接反映高温脱水后试样力学劣化特征。本文以纵波波速定义高温脱水对石膏岩

试样的损伤因子 D ：

$$D = 1 - \left(\frac{V_{PT}}{V_P} \right)^2 \quad (1)$$

式中： V_P 和 V_{PT} 分别为高温脱水前、后石膏试样纵波波速。图 7 中给出了高温脱水后石膏试样损伤因子 D 变化特征。

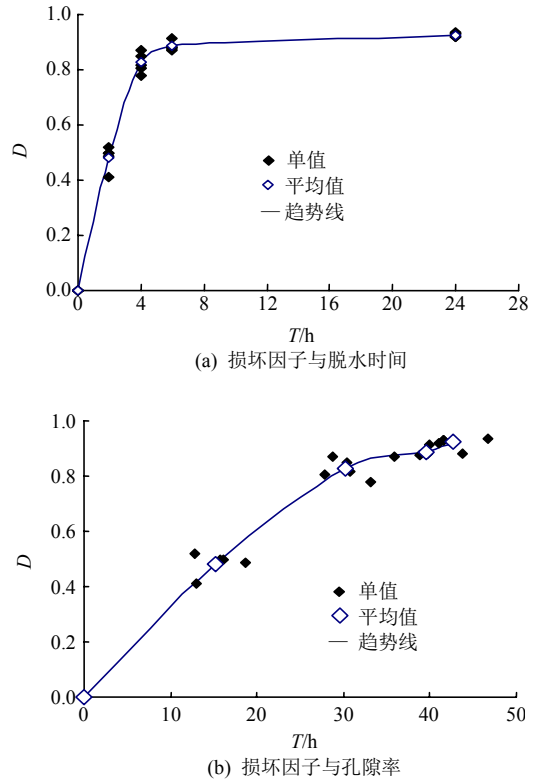


图 7 高温脱水石膏岩试样损伤因子变化特征

Fig.7 Variation of the damage factor of high temperature dehydrated gypsum rock samples

对比图 5(b)，7(a)可以看出，高温脱水后试样损伤因子、新增孔隙率与脱水时间的变化趋势基本一致，石膏岩损伤因子随脱水时间增加逐渐变大，在 0~4 h 以内损伤因子随脱水时间延长而增加，两者大致呈线性关系，在 4~6 h 试样的损伤因子变化区域平缓，在 6~24 h 试样的损伤因子变化区域平缓。经历 2, 4, 6 和 24 h 脱水后石膏岩试样的损伤因子分别增加为 0.48, 0.82, 0.82 和 0.88。

从图 7(b)可以看出：在 0~6 h 以内损伤因子随孔隙率增加而单调降低，两者大致呈线性关系，在脱水时间超过 6 h 以后损伤因子随孔隙率增加而变化不大。石膏岩高温脱水后时间越长，试样内部结晶水脱水量增加，视密度降低，新增孔隙率增加，传播特征减弱，劣化越严重。

4 力学效应分析

天然石膏岩试样在 220 °C 高温脱水后分子结构和孔隙率发生变化，必然引起力学参数发生变化，表 3 给出天然石膏岩脱水前后三轴压缩试验结果。

表 3 石膏岩脱水前后三轴试验结果

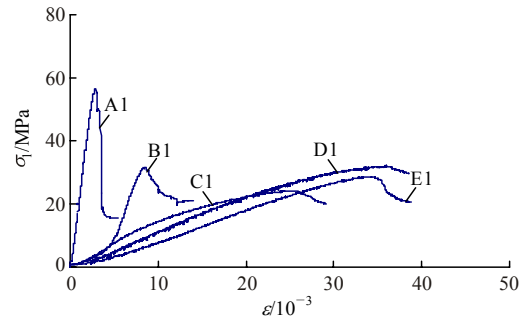
Table 3 Triaxial test results of gypsum rock before and after dehydration

No.	T/h	σ_3 /MPa	σ_1 /MPa	E_T /GPa	E_{50} /GPa	$\varepsilon_0/10^{-3}$	c /MPa	$\varphi(^{\circ})$
A1	0	1	56.75	23.54	22.01	2.90		
A2	0	2	63.74	28.21	25.24	2.88		
A3	0	3	69.63	21.74	13.96	5.30	13.12	38.1
A4	0	4	67.77	26.70	25.25	3.00		
A5	0	5	75.81	24.85	27.47	3.69		
B1	2	1	31.47	7.77	3.22	8.49		
B2	2	2	35.30	10.05	9.90	5.25		
B3	2	3	40.88	7.71	6.45	8.12	7.12	36.1
B4	2	4	43.54	6.39	8.27	7.78		
B5	2	5	46.68	7.67	7.04	10.22		
C1	4	1	24.16	1.20	1.57	24.16		
C2	4	2	27.86	1.70	2.04	21.00		
C3	4	3	30.69	1.60	2.20	33.62	4.77	37.7
C4	4	4	36.02	1.57	1.94	31.41		
C5	4	5	40.85	1.16	1.56	40.72		
D1	6	1	32.06	1.04	1.17	35.95		
D2	6	2	36.29	1.11	1.29	29.61		
D3	6	3	41.49	1.19	1.34	37.85	4.31	48.2
D4	6	4	53.86	1.48	1.45	44.17		
D5	6	5	57.50	1.43	1.62	45.55		
E1	24	1	28.67	1.07	0.94	34.93		
E2	24	2	32.56	1.25	1.35	34.29		
E3	24	3	38.39	1.14	1.29	40.75	3.71	48.3
E4	24	4	44.10	1.24	1.20	43.57		
E5	24	5	57.42	1.35	1.45	45.78		

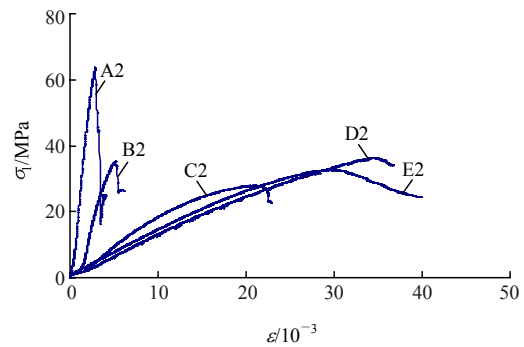
表 3 中， σ_3 ， σ_1 ， E_T ， E_{50} 和 ε_0 分别为围压、峰值强度、弹性模量、变形模量和极限应变值； c ， φ 分别为石膏岩强度参数(黏聚力和内摩擦角)。需要说明的是弹性模量取峰值强度 30%~70% 近似直线段的斜率，变形模量取峰值强度 50% 与原点连线的斜率，极限应变取试样达到峰值强度对应的轴向应变值，石膏岩材料强度参数是 5 个试样在不同围压试验回归结果。

4.1 变形特征

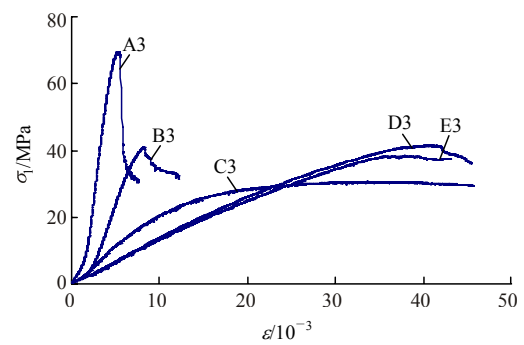
图 8 给出了天然和高温脱水前后石膏岩试样常规三轴压缩试验过程的应力 - 应变曲线。从图 8 可以看出：天然石膏受高温脱水时间的影响，在相同围压作用下变形特征存在较大差异。石膏岩试样内结晶水受热裂解脱水，试样内部孔隙增加承载结构刚度降低，压缩变形将相应增大。整个压缩过程中产生弹塑性变形，变形包含裂隙、空隙的闭合、颗粒间滑移和材料弹性变形 3 个部分。加载初期非线性



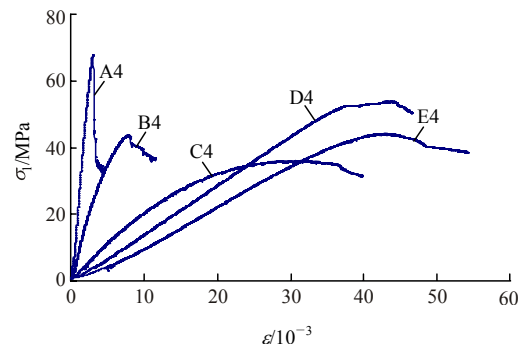
(a) $\sigma_3 = 1$ MPa



(b) $\sigma_3 = 2$ MPa



(c) $\sigma_3 = 3$ MPa



(d) $\sigma_3 = 4$ MPa

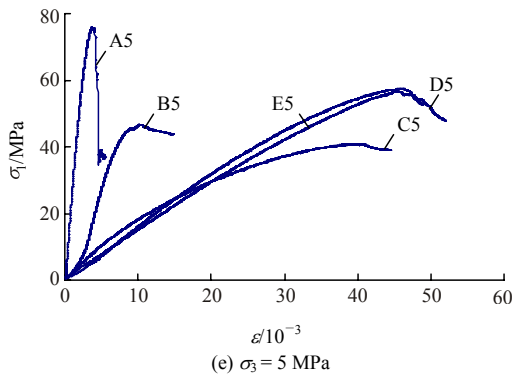


图 8 高温脱水前后石膏岩三轴压缩全程应力 - 应变曲线

Fig.8 Complete stress-strain curves of gypsum triaxial compression before and after high temperature dehydration

性变形裂隙闭合占主要成分，加载中期主要由颗粒间滑移和材料弹性变形，后期线性主要屈服和塑性变形构成，当然经历高温脱水后试样承载结构刚度降低也会引起颗粒间滑移增大。

从图 8 可以看出：天然石膏岩除 A3 试样在围压 3 MPa 作用下压密阶段较为明显外，其余 A 组 4 个试样分别在围压 1~5 MPa 作用下的变形特征大致相同，峰值前均表现出良好线性特征，具有明显峰值点，峰值后应力跌落迅速，表现出其脆性特征，当应力跌落到一定程度趋于平缓，均有明显残余强度。

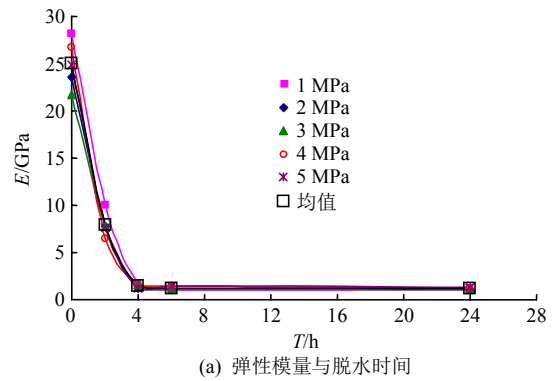
与天然石膏岩相比，高温脱水 2 h 后的 B1~B5 试样脱水量在 24.7~35.7 g，平均值为 29.6 g，新增孔隙率在 12.8%~18.6%，平均值为 15.2%。5 个试样分别在围压 1~5 MPa 作用下变形特征差异较大，在较低围压 1 MPa 作用压密阶段表现尤为明显，峰值后应力跌落迅速，仍表现出脆性特征。在较高围压作用下压密特征变得不明显，随着围压的增加峰值后应力跌落变缓，但是仍表明脆性特征。

高温脱水 4 h 后的 C1~C5 试样脱水量在 43.0~55.7 g，平均值为 50.2 g，孔隙率增加到 21.9%~28.7%，平均值为 25.7% 时。5 个试样分别在围压 1~5 MPa 作用下弹性与屈服阶段分界点变得不明显，屈服阶段明显变长，当围压为 3 MPa 时出现明显屈服平台，见图 8(c)中 C3 试样。也就是说在峰值附近承载能力大致保持恒定，而变形持续增加，表现出其明显塑性特征。

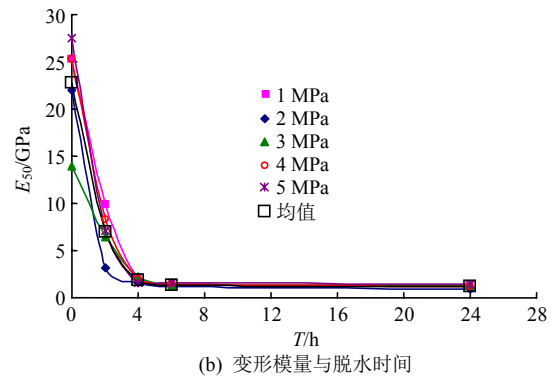
高温脱水 6~24 h 后的 D1~D5 和 E1~E5 试样平均脱水量在 77.7~82.9 g 范围内，平均孔隙率增加到 39.6%~42.7%，D1~D5 和 E1~E5 试样分别在围压 1~5 MPa 作用下的变形特征大致相当，见

图 8(d)和(e)，峰值后应力跌落变缓，塑性特征明显增强。上述分析得出石膏岩三轴压缩全程的变形特征受围压和高温脱水时间的共同影响，全程应力 - 应变曲线变形特征存在较大差异，随着围压与脱水时间的增加脆性减弱塑性增强。

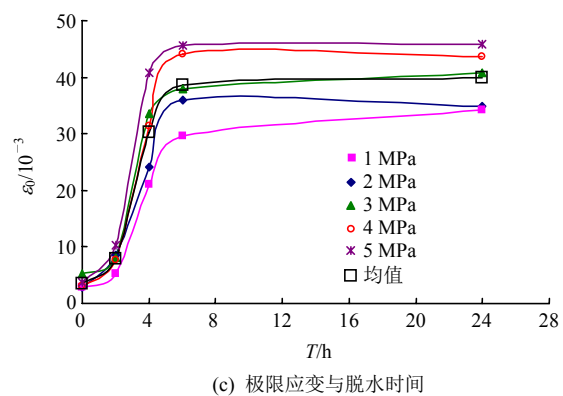
图 9 给出了高温脱水前后石膏岩试样三轴压缩变形参数与脱水时间的关系。从图 9 不难看出，高温脱水对石膏岩变形参数的影响远大于围压的影响，若忽略围压对石膏岩变形参数的影响因数的话，图中用空心正方形给出高温脱水后石膏岩变形参数平均值与脱水时间的关系。



(a) 弹性模量与脱水时间



(b) 变形模量与脱水时间



(c) 极限应变与脱水时间

图 9 高温脱水前后石膏岩三轴压缩变形参数与脱水时间的关系

Fig.9 Relationships between triaxial compression deformation parameters and the dehydration time of gypsum rock before and after high temperature dehydration

从图 9(a), (b)显示出在高温 220 °C 条件下脱水 0~4 h 石膏岩试样弹性模量和变形模量降低较快, 在高温脱水 2, 4 h 后, 弹性模量从天然石膏的 25.0 GPa 分别降低到 7.92 和 1.45 GPa, 降幅分别为 68.3% 和 94.2%, 变形模量从 22.79 GPa 分别降低到 6.98 和 1.86 GPa, 降幅分别为 69.4% 和 91.8%。在 4~6 h 范围高温脱水对石膏岩弹性模量和变形模量的影响不大, 脱水时间超过 6 h 以后石膏岩弹性模量和变形模量均趋于稳定曲线呈水平。

从图 9(c)显示高温 220 °C 条件下脱水 2 h 试样峰值应变增加了 2.24 倍, 经历 4~6 h 范围脱水对峰值应变影响较大, 分别从自然状态下的 3.55‰ 分别增加到 30.18‰ 和 38.63‰, 分别增加了 8.49 和 10.87 倍。脱水时间超过 6 h 以后石膏岩试样的峰值应变趋于稳定, 平均值略有增加曲线趋于平缓, 峰值变形随围压的升高而增加。表明天然石膏岩高温脱水后孔隙率增加, 在围压作用下试样孔隙得以闭合, 围压越高孔隙闭合程度越好, 其弹性模量、变形模量和极限应变均有所增加, 脱水时间 0~4 h 对石膏岩试样变形参数的影响远大于对围压的影响, 超过 4 h 以后脱水时间、围压对石膏岩弹性模量和变形模量的影响不大, 但围压对峰值应变影响显著。

4.2 强度特征

图 10 给出了石膏岩高温脱水时间(0, 2, 4, 6, 24 h)后, 在不同围压(1, 2, 3, 4 和 5 MPa)条件下三轴压缩峰值强度与围压的关系。从表 4 和图 10 中可以看出: 天然石膏岩和高温脱水后石膏岩试样三轴峰值强度随围压增大而单调增加, 符合 Coulomb 强度准则。

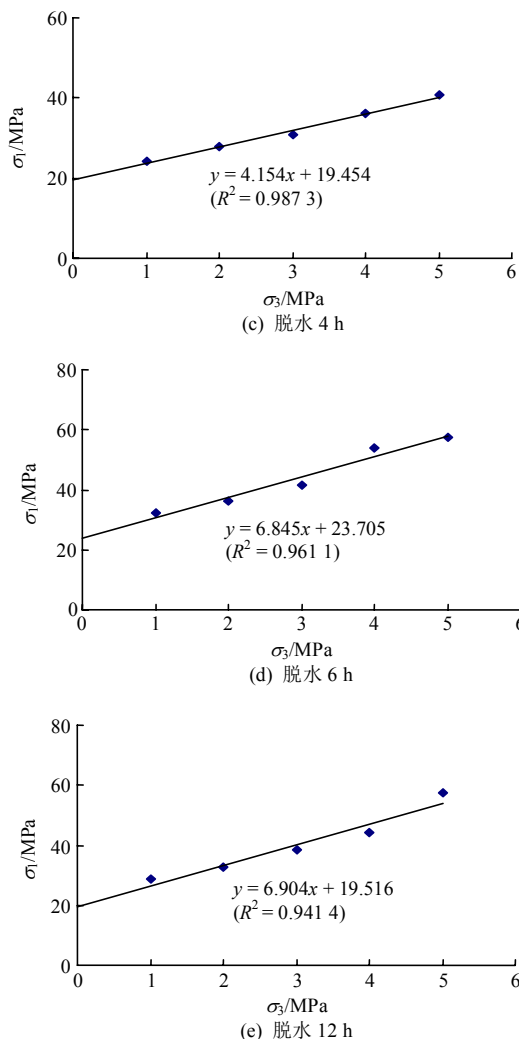
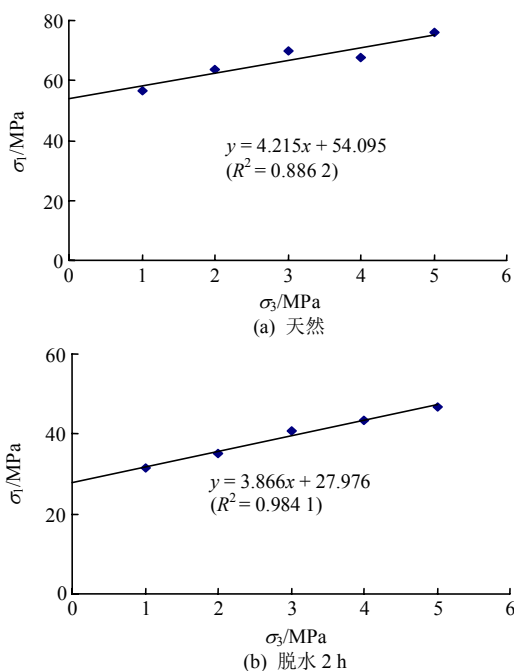


图 10 高温脱水前后石膏岩三轴压缩强度曲线

Fig.10 Triaxial compression strength curves of gypsum rock before and after high temperature dehydration

依据 Coulomb 强度准则:

$$\sigma_1 = k\sigma_3 + Q \tag{2}$$

式中: σ_1 为峰值强度; Q, k 均为材料强度参数, 其值与材料的内摩擦角 φ 与黏聚力 c 的关系为

$$\varphi = \arcsin(k - 1) / (k + 1) \tag{3}$$

$$c = Q(1 - \sin \varphi) / (2 \cos \varphi) \tag{4}$$

按式(2)回归得到石膏岩的强度准则, 见表 4。

从表 3 和图 10 中可以看出, 在高温 220 °C 脱水后石膏岩的围压影响系数大致为 3.866~6.904, 脱水时间 4 h 以内对石膏岩围压影响系数的影响不大, 其值与天然石膏岩大致相当, 脱水时间超过 4 h 后围压影响系数达到 6.9 左右, 其值明显增高。依据试验结果拟合相关性来看, 天然石膏岩的相关系数明显偏低外, 其余 4 组高温脱水后石膏岩试验结果的相关系数均在 0.94 以上, 表明高温脱水后石膏岩试

表 4 高温脱水前后石膏岩的强度准则

Table 4 Strength criteria of gypsum rock before and after high temperature dehydration

T/h	$\sigma_1 = K\sigma_3 + Q$	R^2
0	$\sigma_1 = 4.215\sigma_3 + 54.10$	0.886
2	$\sigma_1 = 3.866\sigma_3 + 27.98$	0.984
4	$\sigma_1 = 4.154\sigma_3 + 19.45$	0.987
6	$\sigma_1 = 6.845\sigma_3 + 23.71$	0.961
24	$\sigma_1 = 6.904\sigma_3 + 19.52$	0.941

样三轴压缩峰值强度与围压具有良好相关性。

按式(3), (4)计算出高温脱水后石膏岩试样的黏聚力 c 和内摩擦角 φ , 见表 3。图 11 给出石膏岩试样的黏聚力、内摩擦角与脱水时间的关系。从图 11 中可以看出, 在高温 220 °C 脱水 4 h 以内对石膏岩试样的内摩擦角的影响很小, 波动幅度在 5.3% 以内, 在高温脱水时间从 4 h 增加到 6 h 内摩擦角大幅增加, 与天然石膏岩相比增幅达到 26.42%, 继续增加脱水时间到 24 h 时内摩擦角稍有增加。

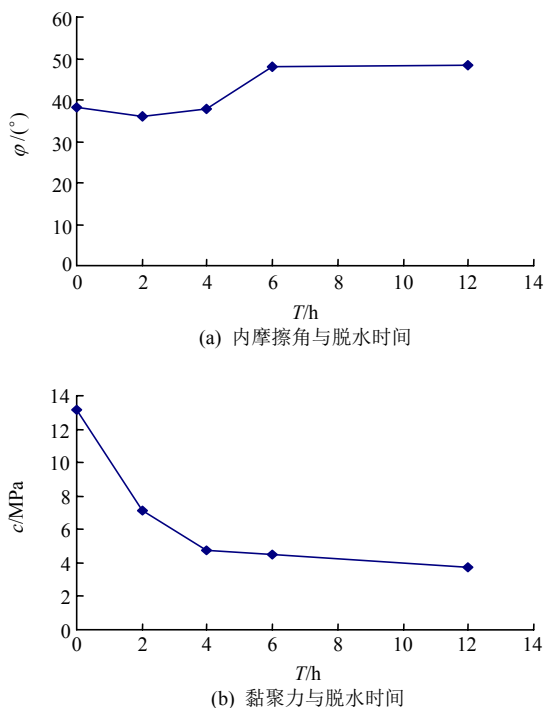


图 11 石膏岩试样黏聚力、内摩擦角与脱水时间的关系

Fig.11 Relationships between the cohesive force, the internal friction angle and the dewatering time of gypsum rock samples

高温脱水对石膏岩试的黏结力的影响显著, 脱水 0~4 h 范围对石膏岩试的黏结力尤为明显, 在脱水时间 4~12 h 范围对黏结力的影响有所减缓。与

天然石膏岩相比, 高温 220 °C 条件下分别经历 2, 4, 6 和 24 h 脱水后石膏岩的黏聚力分别降幅为 46.1%, 63.9%, 65.7%和 71.9%。表明高温脱水后石膏岩试样的黏聚力持续降低, 而内摩擦角具有阶段性增加。式(2)中的 Q 可以理解为完整石膏岩试样单轴压缩试验呈剪切破坏时峰值强度, 可以作为石膏材料强度来看待。而单轴压缩时试样并非单一剪切破坏, 多数为剪张复合破坏形式, 实际强度低于材料强度, 也就是说 Q 不可能从单一试样得到, 必须通过多个试样进行不同围压下三轴压缩强度回归分析得到^[19]。三轴压缩峰值强度 σ_1 扣除围压影响之后就可以得到高温脱水后石膏岩材料强度 Q :

$$Q = \sigma_1 - k\sigma_3 \tag{5}$$

式中: k 为高温脱水后石膏岩试样三轴压缩峰值强度回归的围压影响系数, 依据式(4)可计算出脱水后石膏岩材料强度。

图 12 给出高温脱水后扣除围压影响石膏岩材料强度与脱水时间的关系。从图 12(a)中可以看出, 由于石膏岩自身非均质性, 试验数据有些离散, 但 1~5 MPa 围压下测得石膏岩材料强度与脱水时间

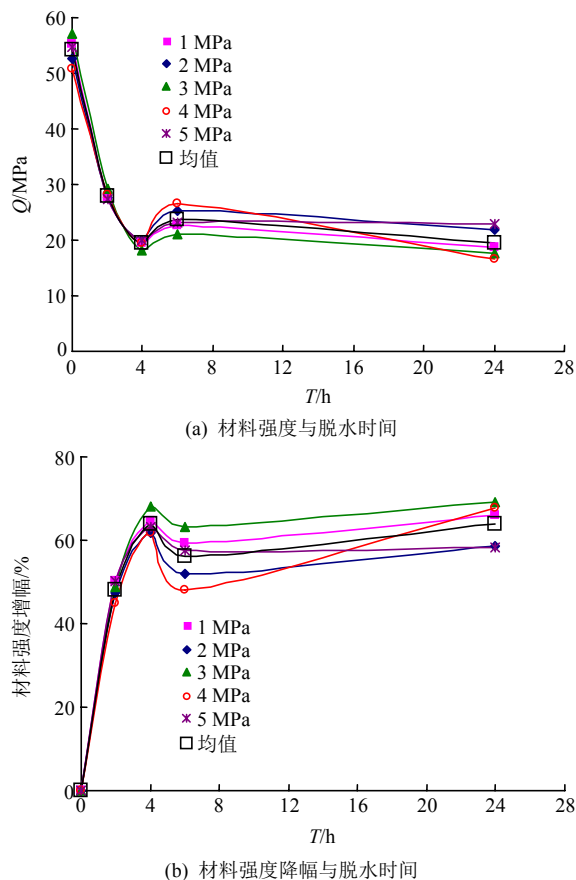


图 12 石膏岩试样材料强度与脱水时间的关系

Fig.12 Relationships between the strength of gypsum rock samples and the dehydration time

变化趋势基本一致。天然石膏岩平均材料强度为 54.10 MPa，在高温 220 °C 条件下脱水 2, 4, 6 和 24 h 后石膏岩试样平均材料强度分别降低为 27, 19.45, 23.71 和 19.52 MPa。高温脱水对石膏岩具有明显弱化作用，扣除围压影响后试石膏岩试样材料强度与脱水时间呈负相关。不过当脱水时间在 0~4 h 以内对材料强度急剧降低，脱水时间在 4~24 h 对石膏岩材料强度与强度弱化程度减缓。与天然石膏岩试验值相比，高温脱水 2, 4, 6 和 24 h 高温脱水后，石膏岩的材料强度平均降幅为 42.22%，63.96%，55.97%和 63.89%。

4.3 破坏特征

高温脱水后石膏岩试样三轴压缩的破坏形态，见图 13。从图 13 可以看出：石膏岩试样破坏形态与围压高低没有直接关系，而与脱水时间有关，脱水时间越长破坏形态越复杂。高温 220 °C 脱水 2 h 的 B 组试样与 A 组天然试样破坏特征大致相同，多数试样呈剪切或剪张性破坏，剪切面始于试样端面边缘处呈典型对角剪切破坏(如 A1 和 B2 试样)，部分试样起裂于试样端部呈张性破坏(如 A3 和 A5 试样)，不过整个破坏面在水平面的投影覆盖整个试样的截面。个别试样出现也会 2 个剪切面呈 Y 型剪张性破坏(如 B3~B5 试样)，主控剪切破裂面有细粉状物质，具有明显摩擦痕迹，而张性破裂面新鲜。

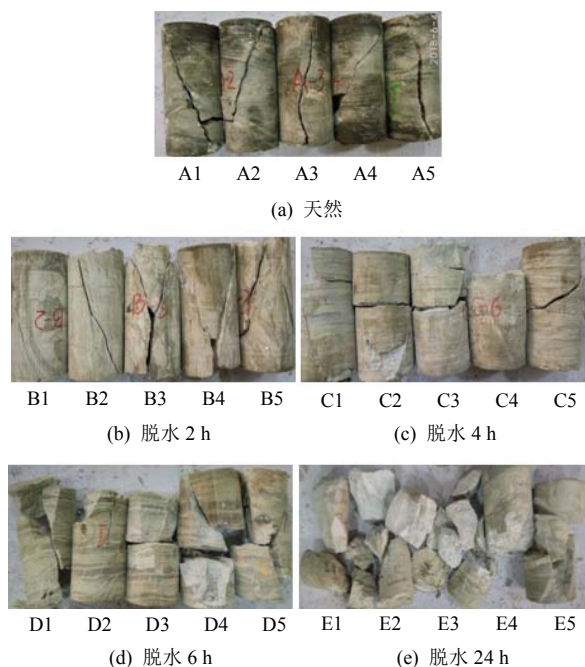


图 13 高温脱水后石膏岩试样三轴压缩破坏形态
Fig.13 Triaxial compression failure pattern of gypsum rock samples after high temperature dehydration

脱水时间 4~24 h 范围内的石膏岩 C~E 组试

样破坏特征与 A 和 B 组明显不同，多数试样除局部呈剪切破坏外，还会出现与加载方向垂直的水平断裂面。这可以解释为 C~E 组经历高温脱水较长，石膏岩试样孔隙率达到 25.7%~42.7%，在三轴压缩条件下试样破坏时产生较大弹性和塑性变形，一旦应力超过峰值后试验结束轴向载荷卸载，部分材料强度较高没有屈服破坏材料出现弹性恢复，恢复变形超过材料的极限拉应变，导致试样出现与加载方向垂直的水平张性断裂面(如 C2, D4 和 E5 试样)。

5 讨论

从上述研究结果可以看出，高温脱水对天然石膏岩物理力学性能均有一定的劣化作用，为了揭示高温脱水对石膏岩的劣化机制，本文借助 FEI Quanta 250 FEG-SEM 扫描电镜设备，获得了 220 °C 脱水 2, 4, 6 和 24 h 后石膏岩的 SEM 图，见图 14。

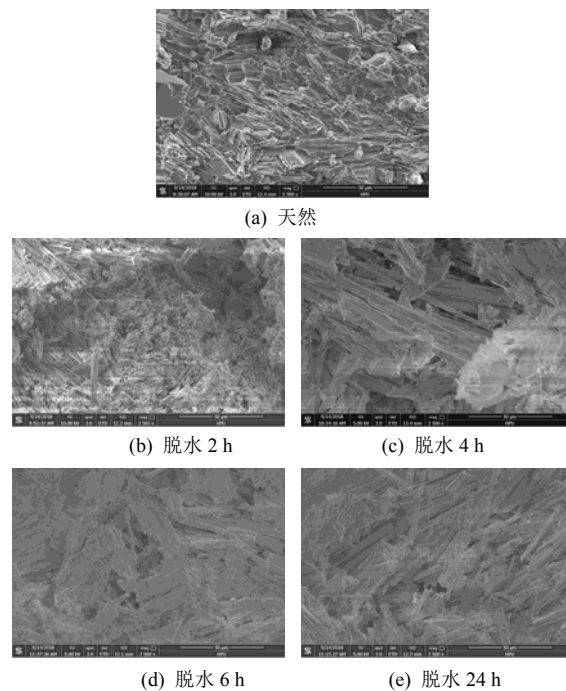


图 14 高温脱水前后石膏岩 SEM 图(3 000×)
Fig.14 SEM maps of gypsum rock before and after high temperature dehydration(3 000×)

从图 14 可以看出：于天然石膏岩内部结构均质紧凑，颗粒致密，很难发现微裂纹和孔洞，晶体断口光滑平整，棱角锋利明显，局部呈块状和片状，见图 14(a)。经历高温 2 h 脱水后试样内部微观颗粒结构发生明显变化，表面开始形成疏松的团絮状结构，部分颗粒开始变得松散，晶体断口模糊，局部呈棱柱状晶体出现，微孔隙开始出现，见图 14(b)。

当经历高温 4 h 脱水后试样内部松散颗粒数量明显增多, 局部出现明显裂隙, 絮状结构消失, 晶体断模糊, 呈针状条纹, 有少量排列无序棱柱状晶体, 见图 14(c)。经历高温 6 h 脱水后试样内部微裂隙在高温脱水的作用下不断扩展、贯通, 局部形成更大空洞, 不断削弱晶体间的黏结, 见图 14(d)。当经历高温 24 h 脱水后试样内部产生大量排列无序棱柱状晶体, 晶体间均分布微裂纹, 部分晶体出现了折断现象, 断口清晰可见, 微孔洞数量明显增多, 见图 14(e)。

上述微观结构分析表明, 高温作用对石膏的作用是极其复杂物理化学过程, 天然石膏中的结晶水至少有 2 种结合状态的水, 即结构水和沸石水所组成^[20]。二水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)在一定温度加热过程中, 石膏晶体将会吸热克服范德华力, 断开共价键, CaSO_4 分子力减弱, 从而使结构水脱离主晶结构逐步转变为半水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$)时脱出的水, 而沸石水则保留在半水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$)中, 只有当继续加热到一定温度值和时间, 半水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$)才能完全转变成无水石膏(CaSO_4), 脱水后原来晶体水所在的位置将会出现空缺, 文中采用脱去的微观结晶水来表征试样的宏观裂隙, 虽然不太准确, 但是在一定程度能够表征石膏岩脱水后内部宏观裂隙特征。随着高温脱水时间的增加, 石膏岩内部晶体结构和形状逐渐发生变化, 试样内部微裂纹、微孔洞的数量逐渐增多, 随着裂纹的扩展和贯通, 裂缝的宽度、长度和覆盖范围逐渐增大, 宏观损伤不断发展, 导致其物理力学性能不断劣化。

6 结 论

基于天然石膏岩在高温 220 °C 脱水后进行扫描电镜、超声波测试和三轴压缩试验, 分析高温后脱水时间对石膏岩微观结构、孔隙率、纵波波速、三轴抗压强度, 弹性模量、峰值应变、黏结力和内摩擦角的影响, 得出以下几点主要结论:

(1) 高温作用对石膏的作用是极其复杂物理化学过程, 高温脱水对石膏岩具有明显弱化作用, 随着高温脱水时间的增加, 石膏岩内部晶体结构和形状逐渐发生变化, 试样内部微裂纹、微孔洞的数量逐渐增多, 导致其物理力学性能不断劣化。

(2) 在高温 220 °C 石膏岩脱水量、视密度和孔隙率与脱水时间呈非线性关系, 在 0~6 h 以内脱水

速率较快影响显著, 在 6~24 h 范围内结晶水裂解脱水速率有所减缓。

(3) 高温脱水后石膏试样纵波波速均有不同程度降低, 在 0~6 h 以内损伤因子随孔隙率增加而单调降低, 两者大致呈线性关系, 在脱水时间超过 6 h 以后损伤因子随孔隙率增加而变化不大。

(4) 石膏岩三轴压缩全程的变形特征受围压和高温脱水时间的共同影响, 脱水时间 0~4 h 对石膏岩试样变形参数的影响远大于对围压的影响, 超过 4 h 以后脱水时间、围压对石膏岩弹性模量和变形模量的影响不大, 但围压对峰值应变影响显著, 随着围压与脱水时间的增加脆性减弱塑性增强。

(5) 石膏岩试样三轴峰值强度随围压增大而单调增加, 符合 Coulomb 强度准则。高温脱水对石膏岩具有明显弱化作用, 扣除围压影响后试石膏岩材料强度与脱水时间呈负相关。

(6) 石膏岩试样破坏形态与围压高低没有直接关系, 脱水时间越长破坏形态越复杂。

参考文献(References):

- [1] 杨春和, 梁卫国, 魏东吼. 中国盐岩能源地下储存可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4 409 - 4 417.(YANG Chunhe, LIANG Weiguo, WEI Donghou. Investigation on possibility of energystorage in salt rock in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4 409 - 4 417.(in Chinese))
- [2] 杨春和, 李银平, 屈丹安, 等. 层状盐岩力学特性研究进展[J]. 力学进展, 2008, 38(4): 484 - 494.(YANG Chunhe, LI Yinping, QU Dan'an, et al. Advances in researches of the mechanical behaviors of bedded salt Rocks[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(4): 484 - 494.(in Chinese))
- [3] 梁卫国, 杨春和, 赵阳升. 层状盐岩储气库物理力学特性与极限运行压力[J]. 岩石力学与工程学报 2008, 27(1): 22 - 27.(LIANG Weiguo, YANG Chunhe, ZHAO Yangsheng. Physico-mechanical properties and limit operation pressure of gas deposit in bedded salt Rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 22 - 27.(in Chinese))
- [4] 孟 涛, 梁卫国, 代进州. 盐岩水平溶腔储库可用性的数值模拟研究[J]. 矿业研究与开发, 2013, (4): 10 - 15.(MENG Tao, LIANG Weiguo, DAI Jinzhou. Numerical simulation study on the usability of horizontal storage cavern[J]. Mining Research and Development, 2013, (4): 10 - 15.(in Chinese))
- [5] 刘沐宇, 徐长佑. 硬石膏的流变特性及其长期强度的确定[J]. 中国矿业, 2000, 9(2): 53 - 55.(LIU Muyu, XU Changyou. Rheological properties of anhydrite and determination of its long-time strength[J].

- China Mining Magazine, 2000, 9(2): 53 - 55.(in Chinese))
- [6] SOPPE W J, DONKER H, GARCIA C A, et al. Radiation-induced stored energy in salt rock[J]. Journal of Nuclear Materials, 1994, 217: 1 - 31.
- [7] 梁卫国, 赵阳升, 徐素国. 240 °C内盐岩物理力学特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2 365 - 2 369.(LIANG Weiguo, ZHAO Yangsheng, XU Suguo. Testing study on physical and mechanical properties of heated salt rock within 240 °C[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2 365 - 2 369.(in Chinese))
- [8] 姜德义, 张军伟, 陈 结, 等. 岩盐储库建腔期难溶夹层的软化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 865 - 873.(JIANG Deyi, ZHANG Junwei, CHEN Jie, et al. Research on softening law of insoluble interlayer during salt cavern building[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 865 - 873.(in Chinese))
- [9] 姜德义, 任 涛, 陈 结, 等. 含软弱夹层盐岩型盐力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1 797 - 1 803.(JIANG Deyi, REN Tao, CHEN Jie, et al. Experimental study of mechanical characteristics of molded salt rock with weak interlayer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1 797 - 1 803.(in Chinese))
- [10] 高红波, 梁卫国, 杨晓琴, 等. 高温盐溶液浸泡作用下石膏岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 935 - 943.(GAO Hongbo, LIANG Weiguo, YANG Xiaoqin, et al. Experimental study of mechanical property of gypsum rock soaked in hot saturated brine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 935 - 943.(in Chinese))
- [11] 梁卫国, 张传达, 高红波, 等. 盐水浸泡作用下石膏岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1 156 - 1 163.(LIANG Weiguo, ZHANG Chuanda, GAO Hongbo, et al. Experimental study of mechanical properties of gypsum saturated in brine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1 156 - 1 163.(in Chinese))
- [12] 郭印同, 杨春和. 硬石膏常规三轴压缩下强度和变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 31(6): 1 776 - 1 780.(GUO Yintong, YANG Chunhe. Experimental investigation on strength and deformation properties of anhydrite under conventional triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 31(6): 1 776 - 1 780.(in Chinese))
- [13] 郭印同, 赵克烈, 孙冠华, 等. 周期荷载下盐岩的疲劳变形及损伤特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1 353 - 1 359.(GUO Yintong, ZHAO Kelie, SUN Guanhua, et al. Experimental study of fatigue deformation and damage characteristics of salt Rock under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1 353 - 1 359.(in Chinese))
- [14] 李 亚, 余宏明, 李 科, 等. 干湿循环作用下石膏岩劣化效应的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(3): 63 - 66.(LI Ya, YU Hongming, LI Ke, et al. Laboratory study on degradation of gypsum rock with dry-wet cycles[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(3): 63 - 66.(in Chinese))
- [15] 任 松, 邓高岭, 吴建勋, 等. 石膏岩淡水浸泡软化试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 943 - 950.(REN Song, DENG Gaoling, WU Jianxun, et al. Immersion tests on gypsum Rocks using fresh water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 943 - 950.(in Chinese))
- [16] 刘 伟, 李银平, 霍永胜, 等. 盐岩地下储库围岩界面变形与破坏特性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1 621 - 1 627.(LIU Wei, LI Yinping, HUO Yongsheng, et al. Analysis of deformation and fracture characteristics of wall Rock interface of underground storage caverns in salt Rock formation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1 621 - 1 627.(in Chinese))
- [17] 中华人民共和国煤炭工业部. 煤与岩石物理力学性质测定方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 1988: 32 - 33.(Coal Industry Ministry of the People's Republic of China. Measuring methods of physico-mechanical properties for coal and rock[M]. Beijing: Standards Press of China, 1988: 32 - 33.(in Chinese))
- [18] 陈 平. 结晶矿物学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 162 - 163.(CHEN Ping. Crystalline mineralogy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 162 - 163.(in Chinese))
- [19] 尤明庆. 岩石试样的杨氏模量与围压的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 53 - 60.(YOU Mingqing. Effect of confining pressure on the Young's modulus of rock specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 53 - 60.(in Chinese))
- [20] 赵云龙, 徐洛屹. 石膏应用技术问答[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2016: 1 - 5.(ZHAO Yunlong, XU Luoyi. Technical question and answers of gypsum application[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2016: 1 - 5.(in Chinese))