松软砂岩型铀矿床相似材料配比试验研究

宋丽霞，张德全，李 秦，张煜晖，秦旭忠，谢国森

（核工业北京化工冶金研究院，北京 101149）

摘要：针对松软砂岩型铀矿床在常规开采过程中存在巷道稳定性差、难以成型的问题，开展巷道开挖支护相似材料配比试验。以细砂、重晶石粉、膨润土、425 普通硅酸盐水泥为原料，采用正交试验方法，获得了不同配比条件下相似材料的单轴抗压强度、密度、单轴抗拉强度等物理力学参数。研究表明，与矿岩物理力学参数接近的相似材料配比为：灰砂质量比为 1∶8，m（重晶石粉）∶m（砂）为 20%，m（膨润土）∶m（砂）为 8%，细砂粒径 −2.00 mm；得到的相似材料的关键指标（密度、单轴抗压强度和单轴抗拉强度）与矿岩比较接近，误差均在 7% 之内。相似材料配比试验结果能够满足相似模拟试验要求，研制的松软砂岩相似材料可为开展巷道开挖与支护相似模拟试验提供参考。

关键词：松软砂岩型铀矿床；正交试验；相似材料配比

中图分类号：TD868 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-8063(2023)02-0020-06

DOI：10.13426/j.cnki.yky.2022.10.06

部分松软砂岩铀矿床可采用地浸方式进行开采[1]；但大量松软砂岩铀矿床受赋存条件的限制，无法采用地浸方法进行开采，采用常规地下开采是进行松软砂岩开采的有效解决方案之一[2]。松软砂岩属于软岩的一种，矿岩具有松软、散、硬度小的特点，采用常规地下开采工艺面临的首要问题是巷道稳定性差、难以成型[3]。

在不具备现场试验的条件下，可通过开展巷道开拓和支护的相似模拟试验，来研究巷道开挖过程围岩的稳定性。相似材料配比试验是开展巷道开拓相似模拟试验的基础。前人针对石灰岩、泥岩开展了有关相似材料力学性能影响因素的研究[4-5]；针对大型工程模型，开展了相似材料配比的相关试验研究[6]；针对弱膨胀性泥岩，采用正交试验设计，在实验室内开展了泥岩相似模拟材料配比研究[7]130；研究水泥石膏相似材料，得到水泥石膏材料的相似材料密度、抗压强度和抗拉强度等指标[8]89-90。

针对松软砂岩铀矿床，尚未开展类似研究。因此，笔者根据某松软砂岩铀矿床矿岩的物理力学参数，通过正交设计，开展了松软砂岩相似材料配比试验，测试了不同配比方案相似材料力学参数，旨在得到与矿岩密度、单轴抗压强度和单轴抗拉强度比较接近的相似配比材料，为开展巷道稳定性相似模拟试验奠定研究基础。

1 相似材料配比试验设计

1.1 试验方案设计

总体试验方案设计见图 1。

1.2 试验内容

针对松软砂岩的不同配比相似材料，主要进行了单轴抗压试验、自由膨胀率试验、巴西劈裂试验、孔隙率测试试验和密度测试试验。

2 相似材料选取

某铀矿床的矿岩岩性主要以泥岩、泥质砂岩或砂质泥岩为主，矿岩的主要物理参数：密度 2.05 kg/m^3，单轴抗压强度 2 MPa，单轴抗拉强度 0.25 MPa，泊松比 0.26，孔隙率 33.8%。对矿岩样品进行 X 射线衍射试验，采用半定量分析方法，得出矿岩样品中的膨胀性矿物含量在 6%～10%。

收稿日期：2022-10-18

第一作者简介：宋丽霞（1983—），女，山西运城人，硕士，高级工程师，主要从事铀矿开采相关科研和设计工作。

通信作者简介：张德全（1987—），男，河南商丘人，硕士，高级工程师，主要从事铀矿开采相关科研和设计工作。

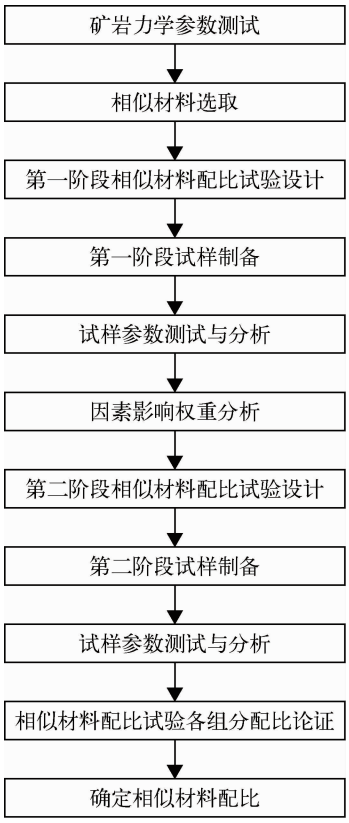


图 1　相似材料配比试验总体方案

Fig. 1　The overall scheme of similar material ratio test

对于开展巷道相似模拟试验而言，最关键的物理力学参数为密度、单轴抗压强度和单轴抗拉强度。对于砂岩一般选择细砂作为细颗粒，水泥或石膏作为胶结材料，用重晶石粉调节密度，用膨胀性材料来调节膨胀性[8]5-6。本次相似材料配比试验选取细砂、重晶石粉、膨润土和 425 普通硅酸盐水泥作为相似材料配比试验的原料，以正交试验方法进行不同材料的配比研究；对不同配比方案的相似材料，开展单轴抗拉强度、单轴抗压强度、密度、泊松比等物理力学参数测试。

3　第一阶段相似材料配比试验

3.1　试验设计

“灰”指 425 普通硅酸盐水泥，“砂”指细砂、重晶石粉、膨润土按比例混合后的混合体；水的质量为试件总质量的 20％左右。第一阶段相似材料配比试验各组分配比见表 1。依据正交试验设计方法，相似材料配比试验选择粒径、m(重晶石粉)∶m(砂)、m(膨润土)∶m(砂)、灰砂质量比 4 个因素，每个因素分为 3 个水平。相似材料配比试验的分组方案见表 2。

表 1　松软砂岩相似材料各组分质量配比

Table 1　The mass ratio of components in similar material ratio test

序号	细砂粒径/mm	m(重晶石粉)∶m(砂)/％	m(膨润土)∶m(砂)/％	灰砂质量比
1	1.25	5	3	1∶5
2	1.50	10	5	1∶10
3	2.00	15	10	1∶15

表 2　正交试验各组分配比分组

Table 2　The grouping of components ratio in orthogonal test

水平试验	细砂粒径 1.25 mm			细砂粒径 1.50 mm			细砂粒径 2.00 mm		
	m(重晶石粉)∶m(砂)/％	m(膨润土)∶m(砂)/％	灰砂质量比	m(重晶石粉)∶m(砂)/％	m(膨润土)∶m(砂)/％	灰砂质量比	m(重晶石粉)∶m(砂)/％	m(膨润土)∶m(砂)/％	灰砂质量比
1	5	3	1∶5	10	10	1∶5	15	5	1∶5
2	10	5	1∶10	15	3	1∶10	5	10	1∶10
3	15	10	1∶15	5	5	1∶15	10	3	1∶15

3.2 试验测试与加载

3.2.1 单轴抗压试验

将试样制成 ϕ50 mm×100 mm 的圆柱形试件(图 2)。在 YAW-100D 小型试验机上开展单轴抗压试验,加载速率为 2 mm/min。

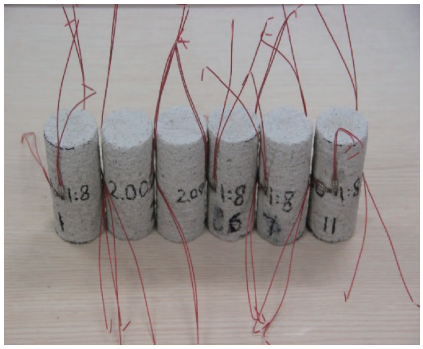


图 2 相似材料试件

Fig. 2 The specimen of similar material

3.2.2 巴西劈裂试验

将试样制成 ϕ50 mm×50 mm 的圆柱形试件,置于劈裂夹具上,在 YAW-100D 小型试验机进行巴西劈裂试验(图 3),获得相似材料单轴抗拉强度,加载速率为 2 mm/min。

3.2.3 孔隙率和密度测试

由于相似配比材料的强度较低,且含有膨胀性黏土矿物,测试发现当灰砂质量比小于 1∶10 后,试件在浸水过程中易崩解,无法直接获得试件孔隙率数据,因此采用研磨-烘干间接法进行孔隙率测试,采用量积法进行密度测试。



图 3 巴西劈裂试验加载图

Fig. 3 The loading diagram of Brazil splitting test

3.2.4 自由膨胀率测试

当灰砂质量比为 1∶10 和 1∶15 时,在膨胀性试验测试中发现矿岩易崩解,无法基于自由膨胀率试验直接测定矿岩膨胀性指标。综合分析后,拟在第二阶段试验中采用 X 射线衍射试验测定矿岩中的膨胀性矿物成分含量。

3.2.5 试验结果

9 组试样的试验结果见表 3。

表 3 第一阶段相似材料配比试验结果

Table 3 The results of the first stage similar material ratio test

水平试验	细砂粒径 1.25 mm						
	灰砂质量比	m(重晶石粉)∶m(砂)/%	m(膨润土)∶m(砂)/%	单轴抗压强度/MPa	单轴抗拉强度/MPa	密度/(kg·m^{-3})	孔隙率/%
1	1∶5	5	3	5.73	0.56	1 852.1	31.31
2	1∶10	10	5	1.65	0.15	1 741.3	38.92
3	1∶15	15	10	0.25	0.04	1 580.9	40.79
水平试验	细砂粒径 1.50 mm						
	灰砂质量比	m(重晶石粉)∶m(砂)/%	m(膨润土)∶m(砂)/%	单轴抗压强度/MPa	单轴抗拉强度/MPa	密度/(kg·m^{-3})	孔隙率/%
1	1∶5	10	10	4.39	0.38	1 788.5	37.87
2	1∶10	15	3	1.51	0.20	1 817.0	32.50
3	1∶15	5	5	0.50	0.09	1 661.3	33.45
水平试验	细砂粒径 2.00 mm						
	灰砂质量比	m(重晶石粉)∶m(砂)/%	m(膨润土)∶m(砂)/%	单轴抗压强度/MPa	单轴抗拉强度/MPa	密度/(kg·m^{-3})	孔隙率/%
1	1∶5	15	5	4.02	0.35	1 865.9	36.39
2	1∶10	5	10	1.60	0.15	1 675.4	45.73
3	1∶15	10	3	0.80	0.13	1 897.6	35.54

3.3　因素影响权重分析

正交试验数据处理采用极差分析法。R 表示极差，为每种试验因素不同水平试验数据的最大值与最小值的差。R 越大表明该试验因素越重要，对试验判别指标影响越显著[7]132。

首先计算 4 个因素在 3 个水平（按从小到大排列）下的单轴抗压强度、单轴抗拉强度、密度和孔隙率的加权和。加权和（K_{ij}）表示第 i 个因素在第 j 个水平下某个物理力学参数所获得的 3 个试验结果的平均值。以粒径第 2 水平（1.50 mm）为例，粒径 1.50 mm 对应的单轴抗压强度分别为 4.39、1.51、0.5 MPa，计算其平均值，得到粒径第 2 水平的加权平均值（2.13 MPa）列于表 4。依此类推，单轴抗拉强度、密度和孔隙率的加权平均值计算结果列于表 5～表 7。最终求出 4 个因素 3 个水平的极差，从而得出各因素对相似材料物理力学参数的影响权重。

表 4　相似材料单轴抗压强度极差分析

Table 4　The range analysis of uniaxial compressive strength of similar materials

水平数	单轴抗压强度/MPa			
	细砂粒径	灰砂质量比	m(重晶石粉)：m(砂)	m(膨润土)：m(砂)
1	2.54	4.71	2.61	2.68
2	2.13	1.59	2.28	2.06
3	2.14	0.52	1.93	2.08
R	0.41	4.19	0.68	0.62

表 5　相似材料单轴抗拉强度极差分析

Table 5　The range analysis of uniaxial tensile strength of similar materials

水平数	单轴抗拉强度/MPa			
	细砂粒径	灰砂质量比	m(重晶石粉)：m(砂)	m(膨润土)：m(砂)
1	0.25	0.43	0.27	0.30
2	0.22	0.17	0.22	0.20
3	0.21	0.09	0.20	0.19
R	0.04	0.34	0.07	0.11

表 6　相似材料密度极差分析

Table 6　The density range analysis of similar materials

水平数	密度/(kg·m^{-3})			
	细砂粒径	灰砂质量比	m(重晶石粉)：m(砂)	m(膨润土)：m(砂)
1	1 724.75	1 835.49	1 729.58	1 855.57
2	1 755.59	1 744.53	1 809.11	1 756.17
3	1 812.98	1 713.29	1 754.62	1 681.57
R	88.23	122.20	79.53	174.00

表 7　相似材料孔隙率极差分析

Table 7　The porosity range analysis of similar materials

水平数	孔隙率/%			
	细砂粒径	灰砂质量比	m(重晶石粉)：m(砂)	m(膨润土)：m(砂)
1	37.01	35.19	36.83	33.12
2	34.61	39.05	37.44	36.25
3	39.22	36.59	36.56	41.46
R	4.61	3.86	0.88	8.34

由表 4～表 7 可看出：1）对相似材料单轴抗压强度而言，影响权重从大到小为灰砂质量比、m(重晶石粉)：m(砂)、m(膨润土)：m(砂)、粒径；2）对相似材料单轴抗拉强度而言，影响权重从大到小为灰砂质量比、m(膨润土)：m(砂)、m(重晶石粉)：m(砂)、粒径；3）对相似材料密度而言，影响权重从大到小为 m(膨润土)：m(砂)、灰砂质量比、粒径、m(重晶石粉)：m(砂)；4）对相似材料孔隙率而言，影响权重从大到小为 m(膨润土)：m(砂)、粒径、灰砂质量比、m(重晶石粉)：m(砂)。

第一批相似模型试件极差分析，粒径 2.00 mm 水平的孔隙率为 34.61%，接近矿岩孔隙率（33.8%）。因此第二批次相似材料配比试验选择粒径为 2.00 mm 的细砂作为骨料。根据单轴抗压强度结果，灰砂质量比 1∶5、1∶10 对应的单轴抗压强度分别为 4.71 和 1.59 MPa，而矿岩的抗压强度参考值（2 MPa）介于二者之间。因此，第二批次相似材料配比试验中灰砂质量比为 1∶8。抗拉强度与单轴抗压强度的规律相似。

4　第二阶段相似材料配比试验

4.1　试验方案设计

根据第一批相似模型试件的试验数据，第二

批相似材料配比试验选择粒径为 2.00 mm 的细砂作为骨料，灰砂质量比为 1∶8。m(重晶石粉)∶m(砂)选择 15%、20%、25% 3 个水平，m(膨润土)∶m(砂)选择 6%、8%、10% 3 个水平。开展全面试验，分组方案见表 8。

表 8 第二批相似材料配比试验各组分配比分组

Table 8 The grouping of components ratio in the second stage similar material ratio test

序号	细砂粒径/mm	m(重晶石粉)∶m(砂)/%	m(膨润土)∶m(砂)/%	灰砂质量比
1	2.00	15	6	1∶8
2	2.00	15	8	1∶8
3	2.00	15	10	1∶8
4	2.00	20	6	1∶8
5	2.00	20	8	1∶8
6	2.00	20	10	1∶8
7	2.00	25	6	1∶8
8	2.00	25	8	1∶8
9	2.00	25	10	1∶8

4.2 第二阶段相似材料配比试验结果

不同配比相似材料的强度和泊松比离散性相对较小，因此分别用密度和孔隙率作为选择指标。第二阶段相似材料配比试验结果见表 9。

表 9 第二阶段相似材料配比试验结果

Table 9 The results of the second stage similar material ratio test

序号	单轴抗压强度/MPa	密度/(kg·m^{-3})	单轴抗拉强度/MPa	孔隙率/%
1	2.07	1 915.41	0.19	38.40
2	2.12	1 875.95	0.22	38.52
3	2.20	1 844.91	0.19	39.33
4	2.10	1 939.45	0.22	39.89
5	2.14	1 908.28	0.26	39.85
6	2.25	1 894.17	0.21	40.20
7	2.25	1 943.15	0.20	40.25
8	2.15	1 938.78	0.21	41.45
9	2.11	1 920.22	0.19	41.83

由表 9 可看出，孔隙率受 m(膨润土)∶m(砂)影响规律明显，结合 X 射线试验结果，m(膨润土)∶m(砂)以 8%为宜，对应的第二批试验试件编号为 2、5、8。以密度为参考值，优选 5 号和 8 号。编号为 5 试件的孔隙率(39.85%)比编号为 8 试件的孔隙率(41.45%)更接近矿岩的孔隙率。

综合分析确定最终相似材料配比为：灰砂质量比为 1∶8，m(重晶石粉)∶m(砂)为 20%，m(膨润土)∶m(砂)为 8%，细砂粒径 2.00 mm。

5 试验结果分析

相似材料配比试验所获得的关键物理力学参数与矿岩对比见表 10。可以看出，两者的关键物理力学参数——单轴抗压强度、单轴抗拉强度和密度的误差均在 7%之内。相似材料配比试验获得的配比参数可以满足下一步松软砂岩型铀矿床巷道开挖与支护相似模拟试验的需要。

表 10 相似材料关键物理力学参数对比

Table 10 The comparison of key physical and mechanical parameters of the similar materials

项目	单轴抗压强度/MPa	密度/(kg·m^{-3})	单轴抗拉强度/MPa
相似材料	2.14	1 908.28	0.26
矿岩	2.00	2 050.00	0.25
误差/%	7.00	6.91	4.00

6 结论

依据松软砂岩铀矿的矿岩特点，通过 4 因素 3 水平正交试验，最终获得灰砂比为 1∶8、m(重晶石粉)∶m(砂)为 20%、m(膨润土)∶m(砂)为 8%、细砂粒径 2.00 mm 的相似材料，其关键物理力学参数与松软砂岩型铀矿床的矿岩接近，误差均在 7%之内。研制的松软砂岩相似材料可为开展巷道开挖与支护相似模拟试验提供依据。

参考文献：

[1] 阙为民，王海峰，田时丰，等. 我国地浸采铀研究现状与发展[J]. 铀矿冶，2005，24(3)：113-117.

[2] 宋丽霞，吴德波，陈梅芳，等. 砂岩型铀矿特点与采矿方法研究[J]. 企业导报，2015(14)：4+82.

[3] 张煜晖，张德全，寇子顺. 砂岩铀矿床钻孔水力冲采模拟试验研究[J]. 铀矿冶，2018，37(4)：227-246.

[4] 赵明生，康强，王园园. 石灰岩相似材料力学性能试验研究[J]. 矿业研究与开发，2022，42(4)：85-88.

[5] 刘伊帅，李昌进，李廷春，等. 泥岩相似材料力学性能影响因素的试验研究[J]. 矿业研究与开发，2020，40(6)：80-84.

[6] 李光，马凤山，郭捷，等. 大尺寸工程模型试验中的相似材料配比试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2020，41(11)：1653-1660.

[7] 王君顺. 基于正交设计的弱膨胀性泥岩相似材料配比试验研究[J]. 甘肃科学学报，2022，31(4)：130-136.

[8] 肖杰，刘保国. 水泥石膏相似材料配比试验研究[J]. 岩土工程技术，2015，29(2)：65-68＋108.

Experiment Study on Similar Material Ratio for a Soft Sandstone-type Uranium Deposit

SONG Lixia, ZHANG Dequan, LI Qin, ZHANG Yuhui, QIN Xvzhong, XIE Guosen

(Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: Aiming at the problems of poor roadway stability and difficulty in forming in the conventional mining process of soft sandstone-type uranium deposit, the similar simulation test were carried out. The fine sand, the barite powder, the swelling soil and the 425 normal portland cement were selected as the raw materials. The similar material tests with different material ratios were carried out by the orthogonal experiment. Finally, the similar materials close to the physical and mechanical parameters of the ore rock were obtained. The similar material ratio is as follows: the mass ratio of lime to sand is 1∶8, the m(barite powder)∶m(sand) is 20%, the m(bentonite)∶m(sand) is 8%, and the particle size of fine sand is less than 2.00 mm. The key factors of similar materials such as the density, the compressive strength and the tensile strength are close to the ore rock. The error rates are controlled within 7%. The results of the similar material ratio can meet the requirements of the similar simulation test. The soft sandstone similar material obtained in this test can provide basic material for similar simulation test of the roadway excavation and support.

Key words: soft sandstone-type uranium deposit; orthogonal test; the similar material ratio