

引文格式:韩聪,王汉鹏,张冰,等.地下储气库衬砌低渗材料研制与气密封效果研究[J].建筑科学与工程学报,2025,42(4):105-114.  
HAN Cong, WANG Hanpeng, ZHANG Bing, et al. Development of low-permeability materials for underground gas storage lining and research on gas sealing effect[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(4): 105-114.

DOI:10.19815/j.jace.2023.11033

# 地下储气库衬砌低渗材料研制与气密封效果研究

韩聪<sup>1,2</sup>,王汉鹏<sup>1,2</sup>,张冰<sup>1,2</sup>,邢文彬<sup>1,2</sup>,王粟<sup>1,2</sup>,蔡恒<sup>1,2</sup>,于欣平<sup>1,2</sup>

(1. 山东大学 隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室,山东 济南 250002;

2. 山东大学 齐鲁交通学院,山东 济南 250002)

**摘要:**针对废弃煤矿地下空间用于压缩空气储库存在的围岩及衬砌密封性不足问题,以石英砂、重晶石粉、铁精粉为骨料,硫铝酸盐水泥为黏结剂,配制出新型水泥基超低渗材料。设计并开展了测定材料物理力学性能的三因素三水平正交试验。为验证新型水泥基材料的密封性能,采用连续-非连续数值计算方法对大安山地下储气库巷道进行衬砌密封效果模拟。结果表明:试样的单轴抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量随硫铝酸盐水泥含量的增加而显著增大,随骨料级配孔隙率和水泥外加剂掺量的增加而降低;渗透性随硫铝酸盐水泥含量的增加而显著降低,随骨料级配孔隙率的增加而显著升高,随水泥添加剂掺量的增加而略有降低;新型水泥基超低渗材料可用于储气洞室的喷射混凝土层或灌浆层,渗透率低至 $1.06 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ ,性能优于P12级抗渗混凝土;在混凝土衬砌基础上增加厚度为0.1 m的水泥基超低渗材料可有效降低储气洞室空气泄漏率,具备良好的密封性能,单次循环空气泄漏率仅为0.84%。

**关键词:**地下储气库;超低渗材料;衬砌;气密封效果;正交试验

中图分类号:TU57

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2025)04-0105-10

## Development of low-permeability materials for underground gas storage lining and research on gas sealing effect

HAN Cong<sup>1,2</sup>, WANG Hanpeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Bing<sup>1,2</sup>, XING Wenbin<sup>1,2</sup>, WANG Su<sup>1,2</sup>,  
CAI Heng<sup>1,2</sup>, YU Xinping<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory for Tunnel Engineering, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China;

2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of insufficient sealing of surrounding rock and lining in the underground space of the abandoned coal mine used for compressed air storage, a new type of cement-based ultra-low-permeability material was prepared using quartz sand, barite powder, and iron concentrate powder as aggregates, and sulfoaluminate cement as binder. A three factor three-level orthogonal test was designed to determine the physical and mechanical properties of materials. In order to verify the sealing performance of the new cementitious materials, continuous-discontinuous numerical calculations were carried out to simulate the sealing effect of the lining of underground gas storage tunnel in Da'an mountain. The results show that the

uniaxial compressive strength, split tensile strength and modulus of elasticity of the specimen increase significantly with the increase of the content of sulfoaluminate cement, and decrease with the increase of the porosity of aggregate grading and the dosage of cement additives. The permeability is significantly reduced with the increase of sulphuraluminate cement content, and significantly elevated with the increase of aggregate grading porosity, and slightly increased with the increase of cement additives dosage. The new type of cement-based ultra-low-permeability material can be used in the shotcrete or grout layer of gas storage chambers, with a permeability as low as  $1.06 \times 10^{-19} \text{ m}^2$  and better performance than P12 grade impermeable concrete. The numerical calculation results show that adding a cement-based ultra-low-permeability material with a thickness of 0.1 m on the concrete lining can effectively reduce the air leakage rate of the gas storage chamber, with good sealing performance, and a single cycle air leakage rate of only 0.84%.

**Key words:** underground gas storage; ultra-low-permeability material; lining; gas sealing effect; orthogonal test

**Author resume:** WANG Hanpeng(1978-), male, PhD, professor, E-mail: whp@sdu.edu.cn.

# 0 引 言

随着国家能源结构快速向清洁能源转型,压缩空气储能技术(CAES)得到快速发展和推广应用。这项技术以压缩空气为能量载体实现电能与压力势能间相互转化,达成能量存储与跨时空转移利用,可在一定程度上克服新能源发电随机性强和调度性差的不足<sup>[1-5]</sup>。地下盐穴、矿井巷道等可作为大规模压缩空气储能的地下储气库,盐岩溶腔因其极低的渗透率和良好的蠕变特性被视为理想的储气库<sup>[6-8]</sup>。然而,中国陆上风能光能丰富的“三北”地区缺少该类地质构造<sup>[9]</sup>。与此同时,由于使用寿命到期或安全、环境问题等原因,中国存在大量具有良好稳定性的废弃矿井,预计到 2030 年数量将达 15 000 处<sup>[10-11]</sup>。将废弃矿井改造成地下压气储能库,既有利于矿井地下空间再利用,又可实现长期储能,必将成为压缩空气储能未来发展的趋势<sup>[12-15]</sup>。

CAES 储气库承受内部高压气体反复作用,当存在压差时会产生向周围岩体渗流扩散的现象,造成气体泄漏,密闭性能是储气库的关键指标<sup>[16-17]</sup>。相关研究表明 CAES 电站单次注采运行期间空气泄漏率须小于 1%,泄漏率超出允许值将会产生巨大的额外成本<sup>[18-20]</sup>。Zhuang 等<sup>[21]</sup>分析了无衬砌硐室中高压气体密封情况,结果表明无衬砌硬岩洞室不适合直接用于储存高压气体。Kim 等<sup>[22-23]</sup>研究认为,影响储气库长期气密性的关键因素是混凝土内衬和围岩的渗透性,尽量控制开挖损伤区的范围和施作密封内衬可大幅降低储气库的漏气率。叶斌

等<sup>[24]</sup>研究了储气硐室的气密性能,发现空气泄漏主要与混凝土衬砌的渗透率以及硐室形状有关。由于废弃巷道在开挖时存在不同程度的损伤,经过多年运行后衬砌支护体系力学性能具有不确定性,因此,废弃巷道需要增加衬砌层及密封层以保证储气库在高压气体循环动态荷载作用下的气密性。早期的研究人员采用钢板作为密封结构,成本较高且不利于洞内施工。近年来,日本、韩国和中国学者论证了高分子材料作为密封层的可行性及力学、气密特性,然而高分子材料仍然存在长期老化和价格较高等问题<sup>[23,25-27]</sup>。混凝土等无机材料具有耐久性好,自身性质稳定的特点,但是普通混凝土渗透性较大。Ye 等<sup>[28]</sup>对水泥基材料密封层在 CAES 储气库运行工况下的气密性能开展了试验研究,分析了多次加热-冷却循环对砂浆试样透气性、孔隙度和微观结构的影响规律。Cheng 等<sup>[29]</sup>通过试验研究发现,硅灰代替部分水泥可显著降低砂浆样品的透气性,延长养护龄期和提高围压可降低加热/冷却循环对透气性的影响。Ye 等<sup>[30]</sup>的解析计算结果表明:当储气压力在 5~8 MPa 且混凝土衬砌渗透率小于  $6.36 \times 10^{-18} \text{ m}^2$  时,储气库单日漏气率小于 1%。随着衬砌透气性增加,漏气量呈线性增加,增加混凝土衬砌厚度可以增强储气库的密封效果。综上,研发具备超低渗透性、早强特性的新型水泥基密封材料,分析其作为密封层的硐室空气泄漏演化规律及密封性能,对于 CAES 储气库建设具有巨大的社会和经济效益。

本文以提高 CAES 硐室密封性能为目的,研发

新型水泥基超低渗衬砌密封材料,通过室内正交试验测试各因素对其物理力学性能的影响规律,并采用连续-非连续单元法(CDEM)结合实际工程验证其密封性能,评价衬砌密封材料在压缩空气储能硐室内应用的可行性。

# 1 新型水泥基超低渗材料制备

## 1.1 正交试验

影响材料渗透特性的主要因素为骨料颗粒级配和水泥性能。选取石英砂、铁精粉、重晶石粉作为骨料,为保证骨料粒径与强度、渗透性等物理力学性质相适应,且易填充密实,铁精粉和重晶石粉粒径均选用 200 目,石英砂选用 18~35、35~60、18~60 目作为材料级配变量。选择渗透性更低的硫铝酸盐特种水泥作为材料间的黏结剂。掺入不同比例的水泥添加剂以提高早期强度。采用正交试验探究新型水泥基密封材料的力学性能和渗透性变化规律,将硫铝酸盐水泥含量、水泥添加剂含量与骨料级配作为影响因素,以调整材料的物理力学性质。

正交试验的每个影响因素选取 3 个水平,如表 1 所示。在各组配比中,为确保混合料有一致的黏稠程度,降低骨料及水含量带来的材料差异,铁精粉、重晶石粉、石英砂质量均设置为 200 g,用水量设置为硫铝酸盐水泥含量的 105%。采用电动夯实机将试样振动压实成型后,在 20 ℃、相对湿度 60% 的恒温恒湿箱中进行养护。

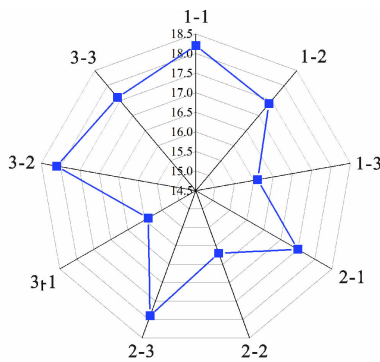
表 1 密封材料  $L_9(3^3)$  正交试验方案

Table 1  $L_9(3^3)$  orthogonal test scheme of sealing materials

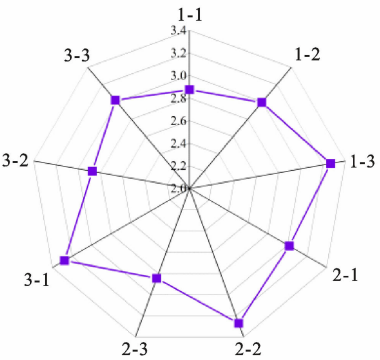
试验组号	试样编号	硫铝酸盐水泥 质量/g	水泥添加剂 质量/g	石英砂级配
1	1-1	90	0	18~35 目
	1-2	90	2	35~60 目
	1-3	90	4	18~60 目
2	2-1	120	0	35~60 目
	2-2	120	2	18~60 目
	2-3	120	4	18~35 目
3	3-1	150	0	18~60 目
	3-2	150	2	18~35 目
	3-3	150	4	35~60 目

## 1.2 密实度检测

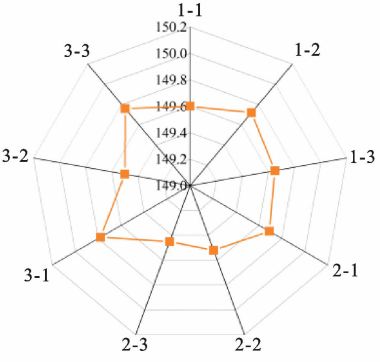
为避免试样制作过程中因振动压实不充分而导致其内部存在孔洞,对试验结果的准确度造成影响,使用 ZBL-U5200 非金属超声波检测仪对试样进行密实度检测<sup>[31]</sup>。图 1 为试样声波测试所得的声时、声速和波幅分布曲线,声时分布范围为 16~18  $\mu\text{s}$ ,



(a) 声时分布曲线(单位:μs)



(b) 声速分布曲线(单位:km·s<sup>-1</sup>)



(c) 波幅分布曲线(单位:dB)

图 1 试样声波测试结果

Fig. 1 Results of sonic wave tests

声速分布范围为 2.8~3.3  $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,振幅分布范围为 149~150 dB,3 组试样的波幅较为一致,可认为 3 组试样的振实度较为均匀,内部不存在较大孔洞,满足试验要求。

# 2 超低渗材料敏感度分析

## 2.1 超低渗材料强度试验

采用电子万能试验机测定新型衬砌密封材料的单轴抗压强度、劈裂抗拉强度及弹性模量,结果见表 2。试验结果显示,3 组试样的强度整体呈上升趋势,但各项指标均小于混凝土,与砂浆相近。原因在于,水灰比、粗骨料粒径及成分是影响混凝土强度的

表 2 试样强度试验结果

Table 2 Results of specimen strength test				
试验组号	试样编号	单轴抗压强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
1	1-1	5.380	0.798	0.669
	1-2	5.905	0.849	0.764
	1-3	7.056	0.957	0.867
2	2-1	7.992	1.039	0.868
	2-2	9.128	1.136	0.960
	2-3	6.964	0.948	0.785
3	3-1	14.484	1.544	1.239
	3-2	8.338	1.069	0.939
	3-3	8.747	1.104	1.098

重要因素。本材料是基于模型相似材料制备工艺改进,原材料没有石子等大粒径粗骨料且水灰比为 1.05,导致材料试样强度偏低,但试样 3-1 的单轴抗压强度仍达到了 14.48 MPa,劈裂抗拉强度为 1.544 MPa,满足储气库密封层承载要求。此外,粗骨料粒径及水灰比对混凝土弹性模量同样有重要影响,混凝土的弹性模量随粗骨料粒径的增大而增大,随水灰比的增大而减小<sup>[32]</sup>。在两因素影响下,本材料的弹性模量普遍较低,变形能力更强,有助于抵抗开裂。

试样单轴抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量的极差分析结果见表 3,其中因素 1~3 分别代表硫铝酸盐水泥含量、骨料级配与水泥添加剂含量。3 种影响因素的极差由大到小依次为硫铝酸盐水泥含量、骨料级配、水泥添加剂含量。可以看出,硫铝酸盐水泥含量是影响试样强度的主要控制因素。

表 3 强度极差分析结果

Table 3 Range analysis results of strength					
指标	影响因素	水平 1	水平 2	水平 3	极差
单轴抗压强度/MPa	硫铝酸盐水泥含量	6.114	8.005	10.523	4.409
	骨料级配	6.894	7.548	10.223	3.329
	水泥添加剂含量	9.285	7.790	7.589	1.495
劈裂抗拉强度/MPa	硫铝酸盐水泥含量	0.868	1.041	1.239	0.371
	骨料级配	1.212	0.998	0.938	0.274
	水泥添加剂含量	1.127	1.018	1.003	0.125
弹性模量/GPa	硫铝酸盐水泥含量	0.773	0.871	1.092	0.319
	骨料级配	0.798	0.910	1.029	0.231
	水泥添加剂含量	0.925	0.888	0.837	0.088

硫铝酸盐水泥含量、骨料级配与水泥添加剂 3 个因素与材料单轴抗压强度、劈裂抗拉强度及弹性模量均呈线性关系(图 2),满足线性回归分析关于线性趋势关系的要求。分析发现:试样的单轴抗压

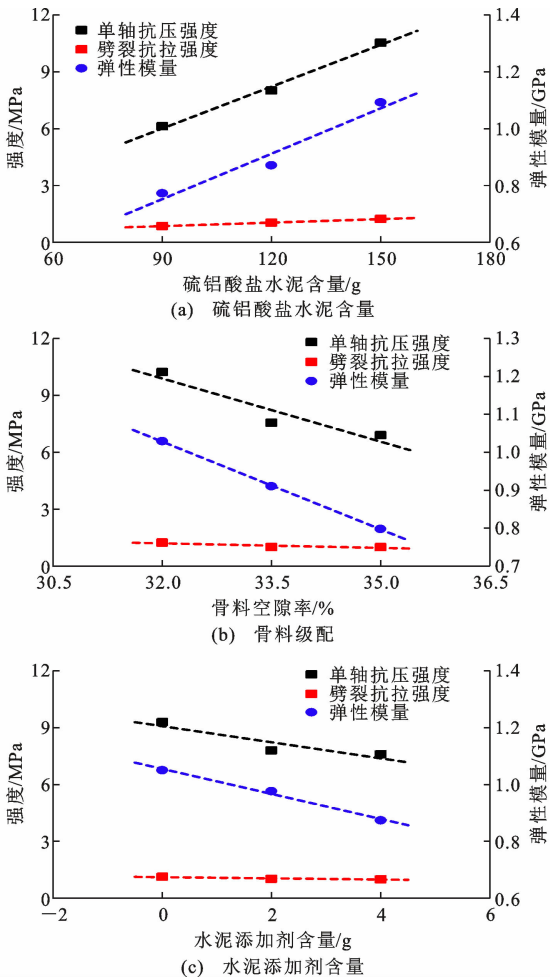


图 2 各因素对试件强度的影响规律

Fig. 2 Influence law of each factor on strength of specimen

强度、劈裂抗拉强度以及弹性模量与特种水泥含量呈现明显正相关关系,与骨料孔隙度呈明显负相关关系,这是由于骨料间相互接触面积随孔隙度的减小而增大,骨料颗粒接触更为紧密,水泥的胶结作用增强,单轴抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量也随之增大;试样的单轴抗压强度以及弹性模量与水泥添加剂含量呈负相关关系,但骨料级配与水泥添加剂作为影响单轴抗压强度和弹性模量的次要因素,其影响程度较小。

2.2 超低渗材料渗透试验

2.2.1 试验装置及方法

采用三轴耦合渗流试验系统测试新型衬砌密封材料的渗透性质<sup>[33]</sup>。三轴耦合渗流试验系统(图 3)主要由高压伺服加载卸载系统、三轴渗流夹持器、渗流控制系统、恒温控制系统、数据采集监测系统组成。

采用瞬态法进行新型衬砌密封材料的渗透率测定。瞬态法的测试原理是将气体充入试样后至平衡状态时,在试样一端部施加瞬态冲击压力使得试样

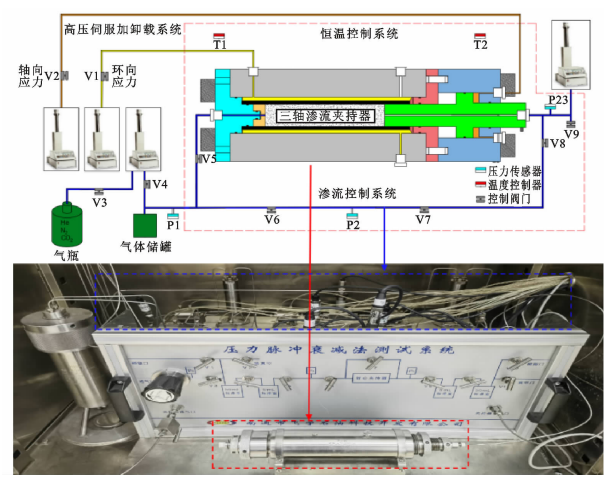


图 3 三轴耦合渗流试验系统原理及实物图

Fig. 3 Principle and diagram of triaxial coupled seepage test system

内部处于压差状态,此时试样上游气体与下游气体压力随之发生变化。当试件内部气压再次处于动态平衡状态时,可以通过测量气体压力随时间的变化曲线来计算试件的渗透率。将试样装入三轴渗流夹持器后,利用高压伺服加卸载系统分别对试件施加 10 MPa 的轴向应力和环向应力,随后向系统注入气体,并关闭上下游气体入口阀。试验过程中,数据采集监测系统同步采集试样的上下游气体压力,最终由式(1)计算得到试样的渗透率。

$$\left. \begin{aligned} P_{up}(t) - P_{dn}(t) &= [P_{up}(t_0) - P_{dn}(t_0)] e^{-\alpha t} \\ \alpha &= (kA/\mu\beta L)(1/V_{up} + 1/V_{dn}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $k$  为新型材料试样气体渗透率; $P_{up}(t)$ 、 $P_{dn}(t)$  分别为在  $t$  时刻上、下游的压力; $P_{up}(t_0)$ 、 $P_{dn}(t_0)$  分别为在  $t_0$  时刻上、下游的初始压力; $\alpha$  为  $P_{up}(t)$  与  $P_{dn}(t)$  的压力差随时间变化的半对数曲线斜率; $A$ 、 $L$  分别为试样的横截面面积与长度; $\mu$ 、 $\beta$  分别为气体的动态黏度和压缩性系数; $V_{up}$ 、 $V_{dn}$  分别为渗流系统上、下游的计算体积。

2.2.2 试验结果

渗透率试验结果及变化趋势如图 4 所示,试样的渗透率在  $1.06 \times 10^{-19} \sim 658.21 \times 10^{-19} \text{ m}^2$  范围内变化。将图 4 与表 2 对照分析发现,随着硫铝酸盐水泥含量、骨料级配与水泥添加剂含量的变化,3 组试样的强度与渗透率的变化趋势明显相反,且同组内试样的单轴抗压强度越大,其渗透率越低。试样渗透率存在随硫铝酸盐水泥含量的增加明显降低的趋势,其中试样 3-1 的渗透率处于最低水平,为  $1.06 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ ,其性能优于渗透率约为  $1.176 \times 10^{-18} \text{ m}^2$  的 P12 级抗渗混凝土。

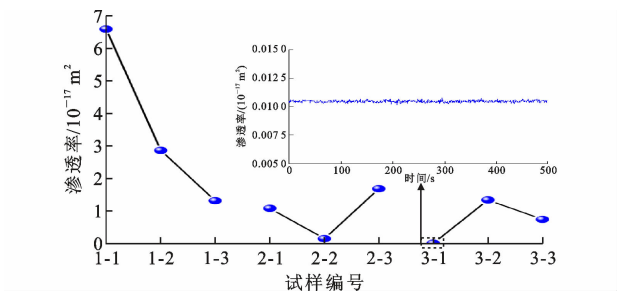


图 4 渗透率测试结果及变化趋势

Fig. 4 Penetration test results and variation trends

试样渗透率的极差分析结果如表 4 所示,渗透率与各因素的关系如图 5 所示。与强度试验结果相同,硫铝酸盐水泥含量和骨料级配对试样渗透率的影响明显高于水泥添加剂含量,是试样渗透率的主要控制因素。试样的渗透率与硫铝酸盐水泥含量呈负线性相关,渗透率随硫铝酸盐水泥含量的增大而显著降低;随骨料级配孔隙率的增大而显著增大,这是因为骨料级配结构合理度较弱,骨料颗粒间孔隙较大,结构紧密性不足导致空气的渗透率增大。此外,试样的渗透率与水泥添加剂含量同样呈负相关线性关系,水泥添加剂作为次要控制因素,其含量对渗透率的影响较小。

表 4 渗透率极差分析结果

Table 4 Range analysis results of permeability

影响因素	渗透率 $k/10^{-17} \text{ m}^2$			
	水平 1	水平 2	水平 3	极差
硫铝酸盐水泥含量	3.584	0.969	0.694	3.261
骨料级配	3.199	1.558	0.490	2.709
水泥添加剂含量	2.557	1.446	1.244	1.313

3 地下储气库衬砌气密封效果模拟

3.1 工程概况

中国拟建的大安山压缩空气储能电站利用煤矿废弃巷道作为储气空间,压缩空气储存空间  $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,最高运行压力 10 MPa。储气库布置于大安山煤矿 +800 m 高程的底板水平运输巷道内,巷道顶部埋深约 200 m。巷道围岩大部分为玄武岩,致密、坚硬,抗压强度为 147~294 MPa,整体稳定性较好。巷道顶底板由泥岩、粉砂岩等软岩构成,且大部分巷道为裸巷,仅有管缝式锚杆支护。基于上述情况,亟需研究储气库围岩及衬砌在经受充放气循环荷载作用下的密封性能是否满足运行要求,并验证新型水泥基低渗材料的性能。

3.2 渗流计算原理

采用基于拉格朗日方程的 CDEM 开展数值模



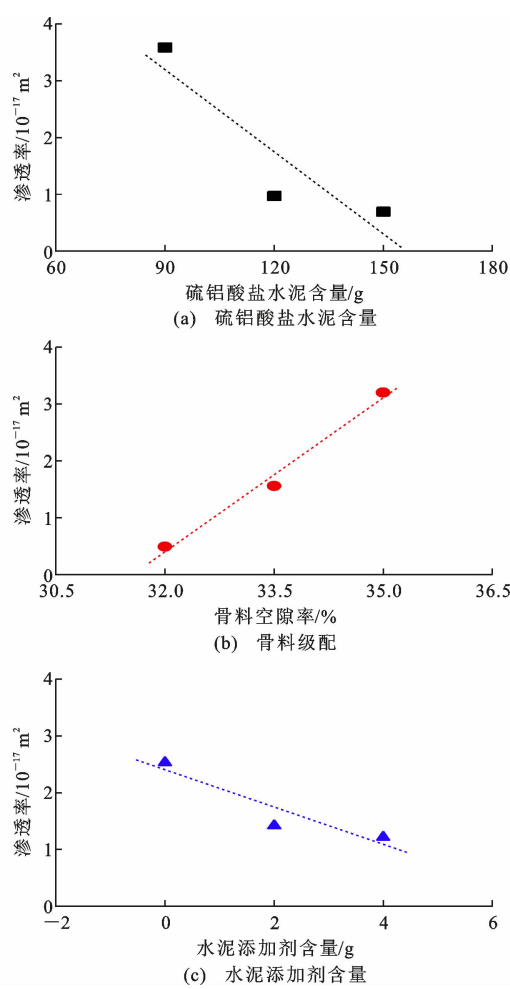


图5 各因素对试件渗透率的影响规律  
Fig.5 Influence law of each factor on permeability of specimen

拟分析。CDEM 数值分析方法能够模拟材料弹塑性变形阶段以及材料裂隙产生、扩张直至贯通的全过程,同时可以实现应力与渗流的交互耦合,适用于模拟多场耦合作用下材料的渐进演化过程。该方法将有限元与离散元相结合,利用块体表征材料的连续特性(如弹性、塑性等)、块体间界面表征材料的非连续特性(如断裂、滑移)以及块体边界及内部断裂,模拟静载、动载下材料的弹塑性变形、裂纹萌生、扩展和贯通直至破碎后散体的一系列渐进破坏过程。

向储库硐室内注入高压空气时,随着库内气压不断上升,气压作为外力作用在节点处并与地应力场耦合。气体在块体孔隙介质中流动发生渗流,衬砌及密封层因为自身收缩及压力作用易发生开裂,形成裂隙渗流。因此,CDEM 的孔隙-裂隙渗流模拟应遵循以下假设:①介质孔隙中的渗流视为孔隙渗流,且遵循达西定律;②裂缝或节理间渗流视为裂隙渗流,且遵循立方定律。孔隙-裂隙耦合计算设计思

路如图 6 所示。CDEM 中岩石的渗流场和应力场是相互耦合的。孔隙、裂隙间的渗透压力影响块体单元的应力,而单元应力又反作用于孔隙结构与裂隙开度从而改变岩体的渗透性。固体单元变形带动孔隙、裂隙共同改变,依据块体节点处渗流压力迭代计算节点总压力。

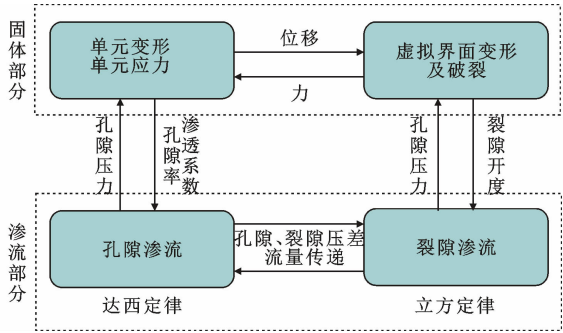


图6 孔隙-裂隙耦合计算设计思路  
Fig.6 Designation for coupling calculation of pores and cracks

3.3 数值模型及计算参数

依据储气库所在巷道地质条件建立数值计算模型,如图 7 所示,模型尺寸为 50 m×50 m,储气库硐室洞径为 5.0 m,混凝土衬砌厚度为 40 cm。对储气库周围围岩区域进行精细化处理,随着远离硐室剩余围岩的网格尺寸逐渐增大。对模型左右及下边界施加位移约束,上边界施加应力约束,模拟废弃巷道真实应力场。大安山储气库拟采用 C30 混凝土作为巷道衬砌材料,C30 混凝土一般抗渗等级为 P6,渗透率约为  $7.920 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 。根据地质勘探结果确定围岩、衬砌等材料的物理力学参数,见表 5 和表 6。

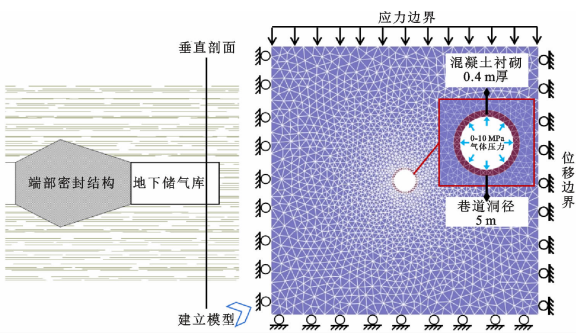


图7 数值计算模型与网格划分  
Fig.7 Numerical calculation model and grid division

3.4 储气库气体渗漏演化特性分析

首先按照实际地应力水平计算得到储气库围岩初始应力场,当初始应力场平衡后,开启孔隙-裂隙耦合计算模块,在储气库内施加随时间变化的气体

表 5 块体单元模型计算参数

Table 5 Calculation parameters of block element model

参数	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$	黏聚力 $c/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	抗拉强度 $\text{MPa}$
洞室围岩	3.2	30	0.12	5	40	26
C30 混凝土	2.3	10	0.25	5	35	3

表 6 虚拟界面单元模型计算参数

Table 6 Calculation parameters of virtual interface element model

参数	法向刚度 $K_n/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	切向刚度 $K_s/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	黏聚力 $c/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	抗拉强度 $\text{MPa}$
围岩界面	50	50	10	40	20
混凝土界面	20	20	5	35	2

压力边界。以单次注采周期加载工况进行模拟:首先将空气以恒定速率持续 8.0 h 注入储气洞室,当洞室压力达到 10 MPa 时停止注气,高压气体在洞室内储存 4.0 h;随后以恒定速率持续放气 4 h;最后储气洞室持续 8 h 处于低压阶段。

图 8 为本文模拟的一个注采循环下洞室内气压变化趋势及计算结果与文献[17]现场试验数据的对比。气压整体变化趋势基本一致,仅在高压储气阶段略有不同,这是因为现场洞室混凝土衬砌外增加了密封层结构,而本文中计算工况仅使用 C30 混凝土进行密封,密封性能稍差,使得高压储气阶段洞室内气体压力下降较多。

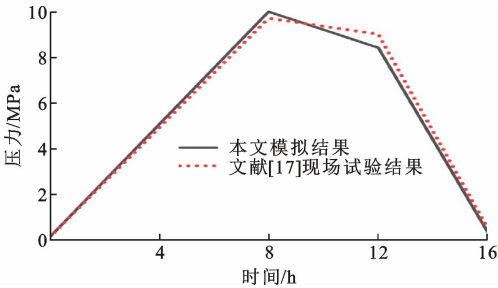


图 8 单次注采循环下洞室内气压变化  
Fig. 8 Air pressure variation in chamber under a single injection cycle

洞室表面气体流速如图 9 所示,当储气库内气压最高时,气体流速达到最大。这是由于在气压最高时衬砌与围岩的孔隙、裂隙扩张至最大,气体渗流通道增加,从而使得洞室表面气体流速加快,空气泄露速率与洞室表面气体流速呈正相关。为了表征单次注采过程中储气库的密封性,引入空气泄漏百分率,其定义为运行周期内泄漏空气的质量与注入空气的总质量之比。模拟工况下单日气体泄漏量约为 24.492 kg,经计算其空气泄漏率约为 12.54%,无法满足单次运行空气泄漏率小于 1%的密封性要求。因此,仅依靠混凝土衬砌无法满足地下压缩空气储能电站的密封要求。

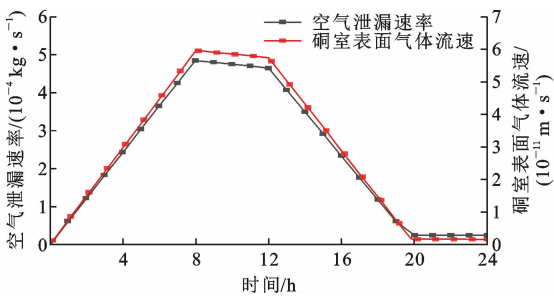


图 9 单次注采循环下洞室内空气泄露速率及表面气体流速变化趋势

Fig. 9 Variation trends of air leakage rates and surface gas flow rates in chamber under a single injection cycle

3.5 新型材料内衬洞室密封性能验证

为了验证新型衬砌密封材料的密封性能,在 CDEM 数值模型的洞室混凝土衬砌内层增设厚度为 0.1 m 的新型衬砌密封材料,如图 10 所示。衬砌密封材料参数根据前述试验数据分别选取 1-1、2-2、3-1 三组试样进行密封性能对比验证,3 组试样的渗透率处于不同数量级,渗流模块主要参数见表 7。

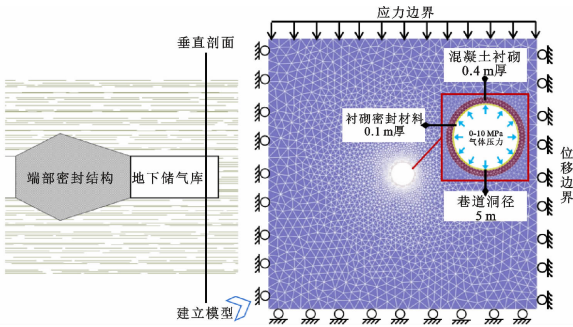


图 10 增设新型密封材料时的数值计算模型及网格划分  
Fig. 10 Numerical calculation model and grid division when adding new sealing materials

增设衬砌密封材料后,洞室表面气体流速如图 11 所示,单次注采运行期间洞室表面气体流速相差 1~2 个数量级,密封材料渗透率越大,洞室表面气体流速越高,储气库对高压气体的密封性能越差。当衬砌密封材料的渗透率为  $1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$  时,单日

表 7 数值模拟渗透参数

Table 7 Numerical simulation permeability parameters

渗透参数		数值
流体密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )		1.29
孔隙率/%	硐室围岩	7.5
	C30 混凝土	40
	密封材料	32.89、34.18、35.04
渗透率/ $\text{m}^2$	硐室围岩	$1.8 \times 10^{-17}$
	C30 混凝土	$7.9 \times 10^{-17}$
	密封材料	$1.06 \times 10^{-19}$ 、 $1.46 \times 10^{-18}$ 、 $6.58 \times 10^{-17}$

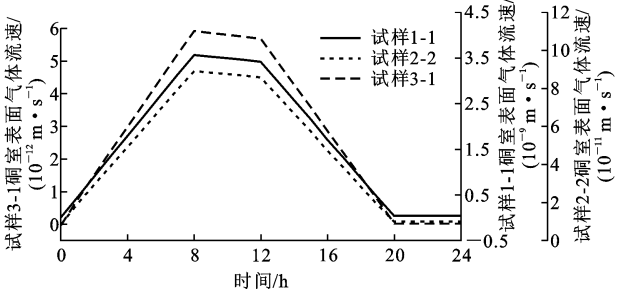


图 11 3 种不同材料硐室表面气体流速对比  
Fig. 11 Comparison of gas flow rates on surface of chambers with three materials

内空气泄漏速率如图 12 所示。当采用试样 3-1 作为密封材料时,单日气体泄漏量为 1.68 kg, 经计算其空气泄漏率约为 0.84%, 满足单次运行空气渗透率小于 1% 的要求。

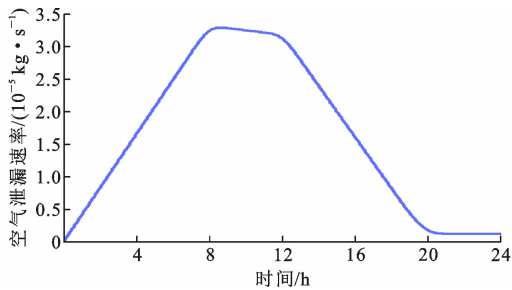


图 12 试样 3-1 作为密封材料时储气库的空气泄漏速率  
Fig. 12 Air leakage rate of gas storage when sample 3-1 being used as sealing material

4 结 语

(1)以硫铝酸盐水泥含量、骨料级配、水泥外加剂含量为影响因素,设计开展了三因素三水平正交试验,测定了试样的单轴抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量及渗透性等物理力学性能。结果表明,硫铝酸盐水泥含量是影响材料性能的主控因素,单轴抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量随水泥含量的

增加而显著增大,渗透性随水泥含量的增加而显著降低,同时较小的骨料级配孔隙率可有效降低材料的渗透率。

(2)以 18~60 目的石英砂、200 目的重晶石粉、200 目的铁精粉为骨料,硫铝酸盐水泥为黏结剂,质量比为 2 : 2 : 2 : 1.5,配制出新型水泥基超低渗材料,渗透率低至  $1.06 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ ,性能优于 P12 级抗渗混凝土。该材料可用于废弃矿井巷道的基层处理及密封层,提升储气硐室的密封性能。后续将从提升材料抗裂性能及强度方面进一步研究改进,最大限度发挥材料效能。

(3)结合拟建的大安山压缩空气储能电站工程,利用 CDEM 开展了材料密封性能数值模拟验证。在常规混凝土衬砌层基础上增设厚度为 0.1 m、渗透率为  $1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$  的新型水泥基密封材料后,储气硐室单次运行空气泄漏率从 12.54% 降至 0.84%,满足密封性能要求,从理论上证明压气储能内衬硐室使用水泥基材料密封是可行的,其施工效率高、成本低,值得深入研究并推广应用。

参考文献:  
References:

[1] 陈海生,李泓,马文涛,等. 2021 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(3): 1052-1076.  
CHEN Haisheng, LI Hong, MA Wentao, et al. Research progress of energy storage technology in China in 2021[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(3): 1052-1076.  
[2] 陈海生,刘畅,徐玉杰,等. 储能在碳达峰碳中和目标下的战略地位和作用[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1477-1485.  
CHEN Haisheng, LIU Chang, XU Yujie, et al. The strategic position and role of energy storage under the goal of carbon peak and carbon neutrality[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1477-1485.  
[3] KAISER F, WINDE F, ERASMUS E. Storing energy in disused underground mine voids: comparing pumped water-and compressed air-based technologies[J]. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 2018, 9(3): 177-197.  
[4] MAHLIA T M I, SAKTISAHDAN T J, JANNIFAR A, et al. A review of available methods and development on energy storage; technology update[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014,



- 33: 532-545.
- [5] YU Q H, WANG Q C, TAN X, et al. A review of compressed-air energy storage[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2019, 11(4): 042702.
- [6] 陈卫忠,谭贤君,伍国军,等. 含夹层盐岩储气库气体渗透规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(7): 1297-1304.
- CHEN Weizhong, TAN Xianjun, WU Guojun, et al. Research on gas seepage law in laminated salt rock gas storage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(7): 1297-1304.
- [7] WANG S, WANG H P, ZHU H Y, et al. Long-term stability analysis of pillars in salt cavern storage based on the salt rock dilatancy boundary evaluation method[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2023, 41(6): 3349-3358.
- [8] WANG S, WANG H P, WU Z D, et al. Physical simulation technologies and testing system for cavern shape control from single-well solution mining in rock salt[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(12): 125101.
- [9] 金维平,彭益成. 硬岩地区压缩空气储能工程地下储气洞室选址方法研究[J]. *电力与能源*, 2017, 38(1): 63-67.
- JIN Weiping, PENG Yicheng. Underground gas storage cavern location method for compressed air energy storage engineering in hard rock area[J]. *Power & Energy*, 2017, 38(1): 63-67.
- [10] 谢和平,高明忠,刘见中,等. 煤矿地下空间容量估算及开发利用研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(6): 1487-1503.
- XIE Heping, GAO Mingzhong, LIU Jianzhong, et al. Research on exploitation and volume estimation of underground space in coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6): 1487-1503.
- [11] 袁 亮. 我国煤炭资源高效回收及节能战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- YUAN Liang. Strategic studies of high-efficient and energy-effective coal extractions in China[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [12] 杜俊生,陈 结,姜德义,等. 中国废弃煤矿压气蓄能潜力与初步可行性研究[J]. *工程科学与技术*, 2023, 55(1): 253-264.
- DU Junsheng, CHEN Jie, JIANG Deyi, et al. Study on the potential and pre-feasibility of compressed air energy storage of abandoned coal mines in China[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2023, 55(1): 253-264.
- [13] 赵同彬,刘淑敏,马洪岭,等. 废弃煤矿压缩空气储能研究现状与发展趋势[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(10): 163-176.
- ZHAO Tongbin, LIU Shumin, MA Hongling, et al. Research status and development trend of compressed air energy storage in abandoned coal mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(10): 163-176.
- [14] 霍 冉,徐向阳,姜耀东. 国外废弃矿井可再生能源开发利用现状及展望[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(10): 267-273.
- HUO Ran, XU Xiangyang, JIANG Yaodong. Status and prospect on development and utilization of renewable energy in abandoned mines abroad[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(10): 267-273.
- [15] CHEN J, LIU W, JIANG D Y, et al. Preliminary investigation on the feasibility of a clean CAES system coupled with wind and solar energy in China[J]. *Energy*, 2017, 127: 462-478.
- [16] 蒋中明,秦双专,唐 栋. 压气储能地下储气库围岩累积损伤特性数值研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(2): 230-238.
- JIANG Zhongming, QIN Shuangzhuan, TANG Dong. Numerical study on accumulative damage characteristics of underground rock caverns for compressed air energy storage[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(2): 230-238.
- [17] 蒋中明,李 鹏,赵海斌,等. 压气储能浅埋地下储气库性能试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(1): 235-241, 252.
- JIANG Zhongming, LI Peng, ZHAO Haibin, et al. Experimental study on performance of shallow rock cavern for compressed air energy storage[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(1): 235-241, 252.
- [18] 夏才初,徐英俊,王辰霖,等. 基于非稳态渗流过程的压气储能洞室空气渗漏率计算[J]. *岩土力学*, 2021, 42(7): 1765-1773, 1793.
- XIA Caichu, XU Yingjun, WANG Chenlin, et al. Calculation of air leakage rate in lined cavern for compressed air energy storage based on unsteady seepage process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(7): 1765-1773, 1793.
- [19] RUTQVIST J, KIM H M, RYU D W, et al. Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 52: 71-81.
- [20] ALLEN R D, DOHERTY T J, KANNBERG L D.

- Summary of selected compressed air energy storage studies[R]. Springfield: Pacific Northwest Laboratory, 1985.
- [21] ZHUANG X Y, HUANG R Q, LIANG C, et al. A coupled thermo-hydro-mechanical model of jointed hard rock for compressed air energy storage[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 2014(1): 179169.
- [22] KIM H M, RUTQVIST J, JEONG J H, et al. Characterizing excavation damaged zone and stability of pressurized lined rock caverns for underground compressed air energy storage[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(5): 1113-1124.
- [23] KIM H M, RUTQVIST J, RYU D W, et al. Exploring the concept of compressed air energy storage (CAES) in lined rock caverns at shallow depth: a modeling study of air tightness and energy balance [J]. *Applied Energy*, 2012, 92: 653-667.
- [24] 叶 斌,程子睿,彭益成. 压气储能洞室气密性影响因素分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(10): 1526-1532.
- YE Bin, CHENG Zirui, PENG Yicheng. Analysis of influence factors on air tightness of underground cavern for compressed air energy storage[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(10): 1526-1532.
- [25] QIN S K, XIA C C, ZHOU S W. Air tightness of compressed air storage energy caverns with polymer sealing layer subjected to various air pressures[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(8): 2105-2116.
- [26] 周 瑜,夏才初,周舒威,等. 压气储能内衬洞室高分子密封层的气密与力学特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(12): 2685-2696.
- ZHOU Yu, XIA Caichu, ZHOU Shuwei, et al. Air tightness and mechanical characteristics of polymeric seals in lined rock caverns(LRCs) for compressed air energy storage(CAES)[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(12): 2685-2696.
- [27] ZHOU Y, XIA C, ZHANG P, et al. Air leakage from an underground lined rock cavern for compressed air energy storage through a rubber seal[C]// ISRM. *Proceedings of 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics*. Montreal: International Society for Rock Mechanics, 2015: 1-15.
- [28] YE B, CHENG Z R, NI X Q. Effects of multiple heating-cooling cycles on the permeability and microstructure of a mortar[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 176: 156-164.
- [29] CHENG Z R, YE B, NI X Q, et al. Exploration of factors reducing the effect of heating/cooling cycles on the gas permeability of a mortar[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(11): 04019251.
- [30] YE B, CHENG Z R, YE W M, et al. An analytical solution for analyzing the sealing-efficiency of compressed air energy storage Caverns[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23(5): 2025-2035.
- [31] HOU W T, WANG H P, YUAN L, et al. Experimental research into the effect of gas pressure, particle size and nozzle area on initial gas-release energy during gas desorption[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(2): 253-263.
- [32] 李朋辉. 谈影响普通混凝土弹性模量的因素[J]. *广东建材*, 2018, 34(8): 5-6.
- LI Penghui. On the factors affecting the elastic modulus of ordinary concrete[J]. *Guangdong Building Materials*, 2018, 34(8): 5-6.
- [33] WANG Y S, WANG H P, LIN C J, et al. A convenient and practical triaxial coupled seepage testing apparatus for deep buried coal[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(7): 075101.