

高内气压作用下岩石破裂特性研究

刘少华^{1,2}, 夏才初^{1,2}, 徐英俊³, 徐晨^{1,2}

(1. 宁波大学 岩石力学研究所, 宁波 浙江 315000; 2. 宁波大学 宁波市能源地下结构重点实验室, 宁波 浙江 315000;
3. 南方电网能源发展研究院有限责任公司, 广东 广州 510700)

摘要: 在压气储能岩石内衬洞室中, 岩石的环向抗拉强度是计算洞室极限承载能力和长期稳定性的重要参数。而现有的岩石抗拉强度测量方法, 是通过直接拉伸试验或间接拉伸试验, 如巴西劈裂、点载荷弯曲法等, 不能真实反映岩石在高内气压作用下环向受力的情况。基于此, 提出了一种新的测量方法: 通过向打孔岩样中注入高压空气, 得到岩石破裂压力, 考虑岩石孔隙应力, 提出了岩石抗拉强度的计算公式。在试验中, 改变充气速率和岩石温度, 得到了岩石破裂压力与充气速率是负相关关系, 与温度是正相关关系。通过循环充放气试验, 得到了在循环次数 n 较小时 ($n \leq 100$), 岩石破裂压力与循环次数是正相关关系。这些试验结果可以指导压气储能岩石内衬洞室的设计计算, 有利于压气储能技术的推广应用, 具有重要的工程应用价值。

关键词: 压气储能; 破裂压力; 抗拉强度; 孔隙应力

中图分类号: TU 93+1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2025)11-3431-10

Burst characteristics of rock under a high internal air pressure

LIU Shao-hua^{1,2}, XIA Cai-chu^{1,2}, XU Ying-jun³, XU Chen^{1,2}

(1. Institute of Rock Mechanics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315000, China;
2. Ningbo Key Laboratory of Energy Geostucture, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315000, China;
3. Energy Development Research Institute Co., Ltd., CSG, Guangzhou, Guangdong 510700, China)

Abstract: In rock-lined caverns with compressed air energy storage (CAES), the hoop tensile strength of rock is an important parameter for calculating the ultimate bearing capacity and long-term stability of the cavern. The existing methods for measuring the tensile strength of rock are direct tensile tests or indirect tensile tests, such as Brazilian splitting and point load bending tests, which cannot truly reflect the circumferential stress of rock under high internal air pressure. Based on this, a new measurement method is proposed. By injecting high-pressure air into the drilled rock sample, the rock burst pressure is obtained. Then a calculation formula for the rock tensile strength is proposed considering the rock pore stress. In the experiments, the inflation rate and the temperature are changed, and it is found that the rock burst pressure is negatively correlated with the inflation rate and positively correlated with the temperature. It is found that when the number of cycles is relatively small ($n \leq 100$), the rock burst pressure is positively correlated with the number of cycles. The results can guide the design and calculation of rock-lined caverns for CAES, which is conducive to the promotion and application of CAES technology and has important engineering application value.

Keywords: compressed air energy storage; burst pressure; tensile strength; pore stress

1 引言

“双碳”战略提出后, 我国近年来风电、光伏发电量得到快速增长^[1]。因自然环境限制, 这类可再生能源存在间歇性、波动性等缺点, 会对电网的

稳定运行带来巨大冲击^[2]。因此, 需要采取大规模储能技术。目前, 大规模能源存储方式有抽水蓄能和压缩空气储能等。抽水蓄能自然选址条件高, 要求水资源丰富, 不适用于我国风电、光伏资源丰富, 但是缺水的西北地区^[3]。压气储能技术是将无法利

收稿日期: 2024-11-28

录用日期: 2025-04-29

基金项目: 国家重点研发计划政府间重点专项 (No. 2024YFE0105800); 国家自然科学基金 (No. U23B20145, No. 52278402); 中国电建集团核心攻关项目 (No. DJ-HXGG-2023-09)。

This work was supported by the National Key Research and Development Program, Intergovernmental Key Special Project (2024YFE0105800), the National Natural Science Foundation of China (U23B20145, 52278402) and the Core Research Project of China Electric Construction Group (DJ-HXGG-2023-09).

第一作者简介: 刘少华, 男, 1994年生, 博士研究生, 主要从事高内压地下洞室方面的研究。E-mail: nblsh1995@126.com

通讯作者: 夏才初, 男, 1963年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道与地下工程方面的研究。E-mail: tjxiacbb@126.com

用的风电和光伏电以高压空气能的形式储存在地下构造物中,对地形和水文条件要求不高^[4]。因此,压气储能技术在这一地区具有巨大的发展潜力。

地下储气构造物是压气储能电站重要的组成部分和选址的关键因素。典型的压气储能地下储气构造物有:已开采完的储气、储油地质构造^[5],地下含水层^[6],盐穴^[7-8],废弃矿井^[9],人工开挖的地下岩石洞室^[10-12]等。前 4 种属于特殊的地质构造,在风能、太阳能丰富的地方不一定存在。因此,人工开挖的岩石洞室便成为这些地方最有可能选择的地下储气方案。

人工开挖的岩石洞室由内到外一般由密封层、混凝土衬砌、围岩体组成^[13]。密封层用来保障洞室的气密性,主要由围岩去承受大部分荷载。在围岩极限承载能力和长期稳定性计算中,岩石的抗拉强度是一个重要参数。例如,徐英俊等^[14]基于极限分析上限定理计算压气储能洞室隆起破坏时,假设岩体服从 Hock-Brown 准则。而岩石抗拉强度就是 Hock-Brown 中一个关键参数;蒋中等^[15]在做压气储能围岩累计损伤特性研究时,岩石抗拉强度是其建立三维累积损伤数值模型的重要参数。很多学者^[16-18]在采用数值分析软件,如 Abqus、Flac^{3D} 等,对压气储能地下洞室进行应力-应变分析时,岩石抗拉强度也是必须要考虑的。而现有的岩石抗拉强度测量方法,是通过直接拉伸试验^[19-20]或间接拉伸试验,如巴西劈裂^[21-22]、点载荷弯曲法^[23-24]等,不能真实反映岩石在高内气压作用下环向受力的情况。

基于此,提出了一种新的岩石抗拉强度测量方法:通过向打孔岩样中注入高压空气,得到岩石破裂压力,考虑岩石孔隙应力,提出了岩石抗拉强度的计算公式。在试验过程中,考虑了多种工况,对充气速率、温度、循环充放气次数等参数进行了研究。研究成果可以指导压气储能岩石内衬洞室的设计计算,具有重要的工程应用价值。

2 试验方法

2.1 测试材料

本试验青砂岩样本取自于中国四川省自贡市。该地区地质构造简单,岩层产状平缓。岩样取自自贡市东南约 100 km 一处岩基上,埋深较浅,地层岩性主要为奥陶系中下统粉砂岩、石英砂岩、粉砂质泥岩,灰白色,细粒-微晶结构,中-薄层状构造。青砂岩主要由石英、碳酸盐矿物、泥质等组成,属中硬岩。表 1 给出了青砂岩岩样的物理力学参数。

表 1 砂岩的物理力学参数

弹性模量 / GPa	密度 / (kg · m ⁻³)	抗压强度 / MPa	泊松比	黏聚力 / MPa	内摩擦角 / (°)
8.3	2 356	60.8	0.28	1.5	45

2.2 岩样制备

采用较低速率从砂岩岩块中取芯,制备直径为 50 mm 的圆柱形岩芯,然后切割成 100 mm 的长度。在取芯完成后,采用金刚石平面磨床仔细研磨样品的两端,使表面不规则度小于 0.02 mm,这一步骤对于确保后期空气劈裂试验的密封性十分重要。采用直径为 10 mm 的金属钻头在岩样中心打孔,孔洞深度为 55 mm。所制备岩样如图 1 所示。

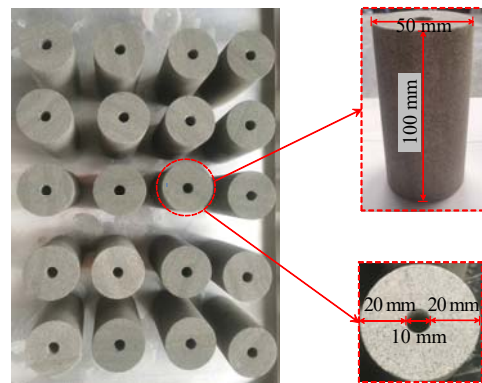


图 1 打孔岩样

Fig.1 Drilled rock sample

为了排除岩样中水分的影响,在试验前把岩样放入 110 °C 的烤箱中烘干 24 h,后取出放入干燥器内冷却至室温,如图 2 所示。



图 2 烘干岩样

Fig.2 Drying rock samples

2.3 试验过程

本试验采用上海曲晨机电生产的 QW-200 全无油空压机,通过分级压缩最高可将空气压力加压到

15 MPa。空压机设置有控制阀，可以自动调节气体充放气速率。轴压采用长春新试验机厂生产的万能试验机施加。假设地应力大小为 3.89 MPa，为模拟地应力同时密封岩样，需要将轴压控制为 7.64 kN。采用绍兴华脉仪器制造生产的电热鼓风机控制环境温度，该鼓风机最高可将岩样加热到 200 °C。

岩样空气劈裂试验分 3 步进行。第 1 步，在岩样侧表面处粘贴应变片 1 和应变片 2。两个应变片位于岩样横截面十字交叉位置，距离岩样顶面 10 mm，如图 3 所示。本试验所采用应变片为耐高温温度自补偿应变片，在使用过程中无需温度补偿。第 2 步，为保证试验过程中的密封性，在岩样和金属圆柱之间涂抹耐高温软胶，将金属圆柱与岩样拼接起来，如图 4 所示，图中， F 为轴压， w 为孔洞直径， h 为孔洞深度。该金属圆柱在试验过程中主要起传递轴压和输送空气的作用。第 3 步，待耐高温软胶硬化后，将岩样放入鼓风机中，施加轴压并保持稳定。将应变片连接数据采集仪，打开空压机输送空气。试验过程中应随时观察并记录空气压力和岩样应变的变化，如图 5 所示。



图 3 贴应变片
Fig.3 Attaching strain gauges

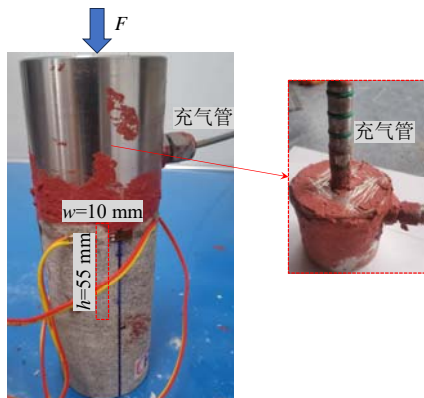


图 4 拼接岩样
Fig.4 Splicing rock samples

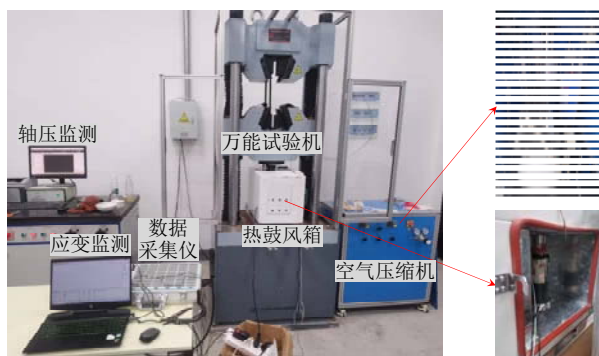


图 5 数据测量
Fig.5 Data measurement

3 试验结果

3.1 极限破裂压力试验

图 6 为岩石破裂压力与充气速率关系图。由图可知，充气速率可以明显影响岩石的破裂压力，两者为负相关关系。充气太快会产生气体的动力冲击效应，不利于岩石真实抗拉强度的测量，而充气太慢会降低试验效率，同时对岩样的密封性要求较高。因此，后续试验过程为控制充气速率这一变量，统一采用 1 MPa/min 的充气速率。

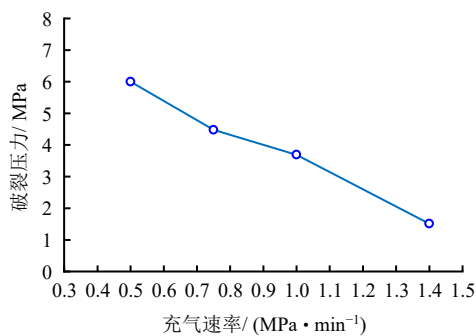


图 6 破裂压力与充气速率关系图
Fig.6 Relationship between burst pressure and inflation rate

图 7 为岩石破裂压力与温度关系图。由图 7 可知，岩石破裂压力随温度的升高总体上是上升的趋势。在 30~120 °C 范围内，岩石破裂压力随温度升高呈现“上升-下降”跳跃式的变化。原因是岩石温度升高幅度较小时，其力学性质没有太大变化，因此破裂压力变化不大。而在岩石温度 ≥ 120 °C 后，岩石破裂压力随温度升高呈现线性上升趋势，这说明较高的环境温度对于岩石抗裂是有利的。

图 8 为岩石分别在 35、60、90、120、150、200 °C 条件下应变变化曲线图。由图 8 可知，整个试验过

程岩石应变变化分为 3 个阶段，分别为施加轴压、升温 and 充气阶段。在施加轴压时，岩石受到压力，产生较小的拉应变，后保持稳定，如图 8(a)所示；升温阶段时，由于温度应力的影响，岩石随温度的升高产生较大的拉应变，两者几乎呈线性关系；充气阶段时，岩石拉应变随空气压力的增高逐渐增大，最后会出现应变激增后快速下降的情况，表明岩石在这一时刻发生破裂。岩石破裂后，气体泄露，空气压力和岩石应变急速下降。从岩石应变变化曲线中可以看出，岩石温度应力产生拉应变要远大于空气压力产生的拉应变。

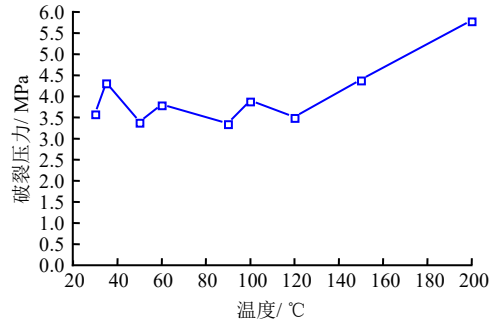
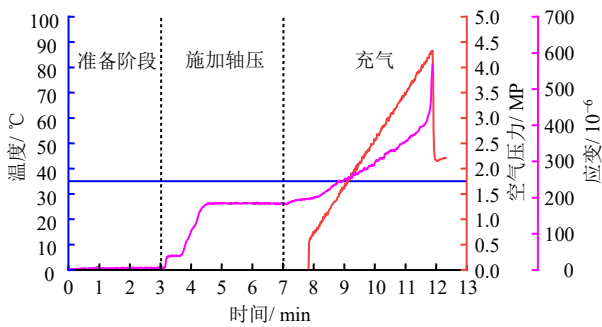
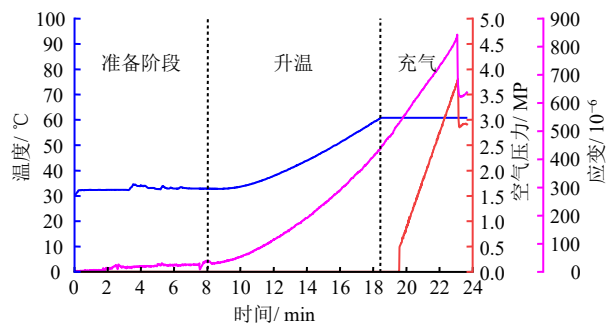


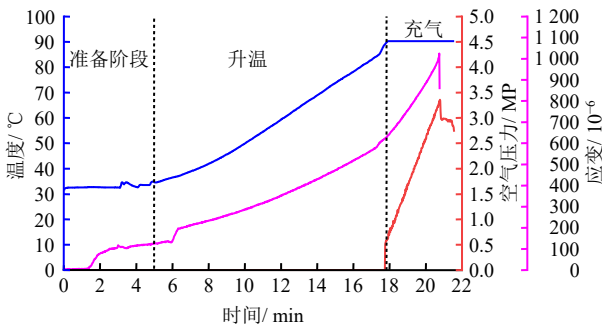
图 7 破裂压力与温度关系图
Fig.7 Relationship between burst pressure and temperature



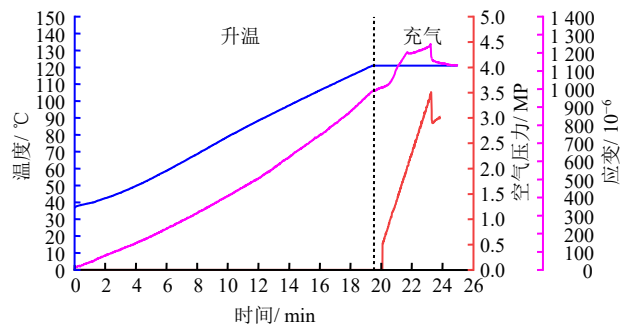
(a) 岩石温度为 35 °C



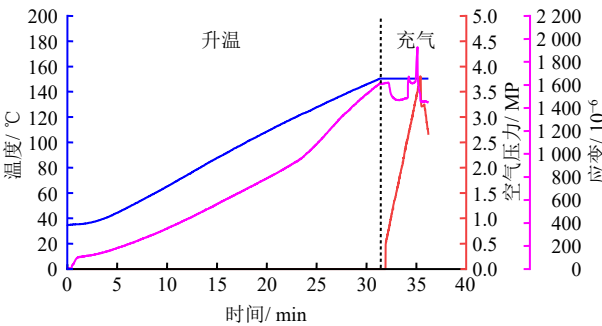
(b) 岩石温度为 60 °C



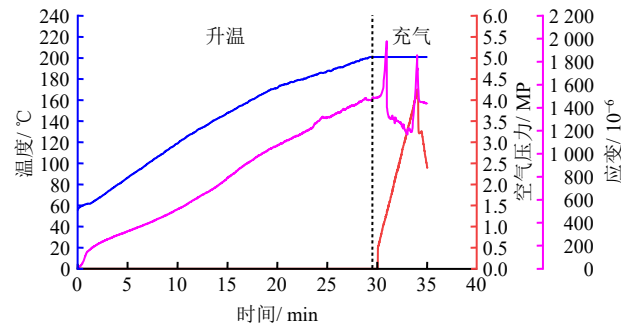
(c) 岩石温度为 90 °C



(d) 岩石温度为 120 °C



(e) 岩石温度为 150 °C



(f) 岩石温度为 200 °C

图 8 不同温度条件下岩石应变变化曲线图

Fig.8 Rock strain change curves under different temperature conditions

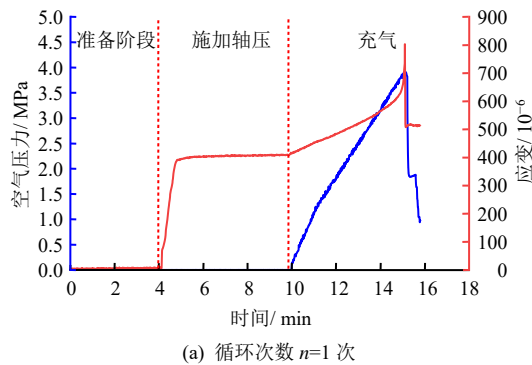
3.2 35 °C条件下循环充放气试验

压气储能电站往往采用一天一个充放气循环的运行模式，围岩会受到周期性的加卸载空气内压。为研究岩石在循环气压作用下的破裂压力和应变变化情况，设置了表 2 所示的试验工况。在岩石循环充放气试验中，充气速率为 1 MPa/min，排气速率

表 2 循环充放气试验

Table 2 Cyclic inflation and deflation tests

岩样编号	温度 / °C	空气压力 / MPa	循环次数 <i>n</i> / 次
1	35	0.0~6.0	1
2	35	0.0~3.0~0.5~3.0~0.5	10
3	35	0.0~3.0~0.5~3.0~0.5	30
4	35	0.0~3.0~0.5~3.0~0.5	100



为 5 MPa/min，循环上限压力为破裂压力的 80%，下限压力为破裂压力的 10%。

图 9 为 35 °C条件下岩石应变和空气压力变化曲线图。由图可知，整个试验过程可分为准备阶段、施加轴压和循环充放气阶段。在试验准备阶段时，岩石拉应变保持为 0；后施加轴压，在压力作用下，岩石出现了较小的拉应变，后保持稳定；循环充放气阶段时，岩石拉应变和空气压力出现几乎同步的“上升—下降—上升”现象，在最后阶段，岩石拉应变出现激增后急速下降，表明岩石破裂。由图 9(d) 可以看出，在循环充放气时，岩石的最大空气压力始终保持为 3 MPa，而岩石的最大拉应变随循环充放气次数的增多呈现下降趋势。

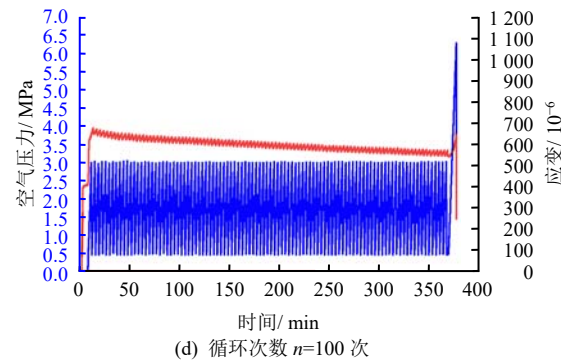
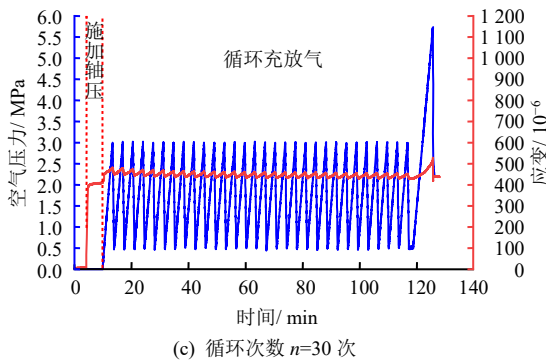
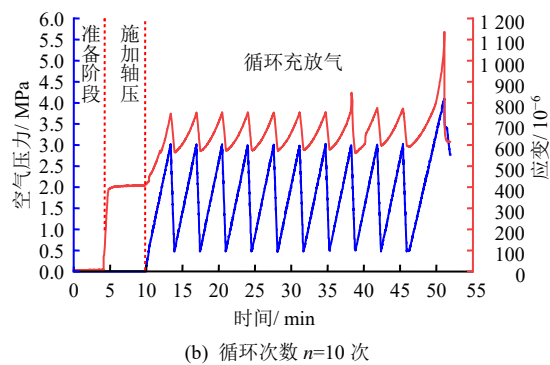


图 9 35 °C条件下岩石应变和空气压力变化曲线图

Fig.9 Change curves of rock strain and air pressure at 35 °C

3.3 60 °C条件下循环充放气试验

压气储能洞室充放气时，洞室内温度的变化与空气压力密切相关。由文献[25]的研究可知，充气到 10 MPa 时，洞内空气温度最高可达 65 °C。由于洞室密封层和混凝土衬砌的隔热效应，围岩的温度会稍微降低，在 45~60 °C 之间。

温度对岩石的力学性质有着重要影响，为研究岩石在 60 °C 时，循环气压作用下的空气压力和应变变化情况，设置了表 3 所示的试验工况。岩石温度

控制为 60 °C，充气速率为 1 MPa/min，排气速率为

表 3 循环充放气试验

Table 3 Cyclic inflation and deflation tests

岩样编号	温度 / °C	空气压力 / MPa	循环次数 <i>n</i> / 次
5	60	0.0~6.0	1
6	60	0.0~3.0~0.5~3.0~0.5	10
7	60	0.0~3.0~0.5~3.0~0.5	30
8	60	0.0~3.0~0.5~3.0~0.5	100

5 MPa/min, 循环上限压力为破裂压力的 80%, 下限压力为破裂压力的 10%, 分别进行了 1、10、30、100 次循环充放气。

图 10 为 60 °C 条件下岩石应变和空气压力变化图。由图 10 可知, 与 35 °C 条件下循环充放气试验结果相同, 整个试验过程可分为准备阶段、施加轴压和循环充放气阶段, 与 35 °C 条件下岩石应变变化情况类似。对比图 10(b)和图 9(d)可知, 60 °C 条件下岩石的最大拉应变在循环充放气次数较少时就出现下降趋势, 而 35 °C 条件下只要在循环次数较多时才会出现。

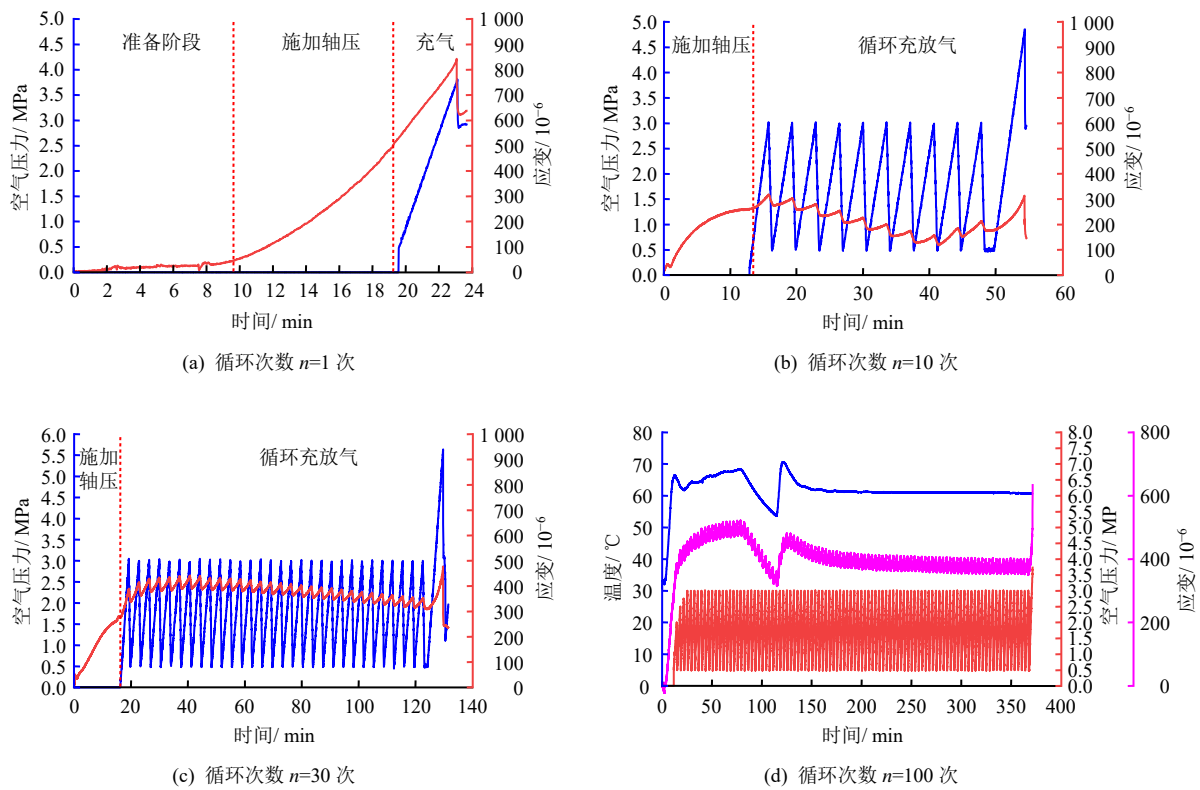


图 10 60 °C 条件下岩石应变和空气压力变化图
Fig.10 Change curves of rock strain and air pressure at 60 °C

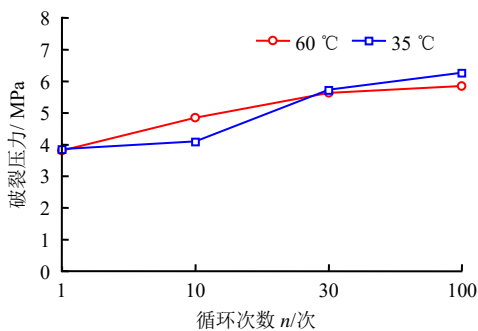


图 11 破裂压力与循环次数关系图
Fig.11 Relationships between burst pressure and cycle number of inflation and deflation

如图 10(d)所示, 循环充放气时, 岩石温度在 100 min 附近出现了一段波动, 岩石拉应变同步出现“下降—上升”的变化。这表明岩石拉应变对温度的变化十分敏感。在压气储能岩石内衬洞室设计中, 温度应力对围岩的影响不可忽略。

图 11 给出了在 35 °C、60 °C 条件下岩石破裂压力与循环次数的关系图。由图 11 可知, 在循环充放气次数 $n \leq 100$ 次条件下, 岩石破裂压力与循环次数是正相关关系。原因是在循环次数较小时, 岩石在空气压力作用下, 孔隙率增大, 导致应力分布到更大的孔隙空间上使得孔隙应力减小, 从而增大了岩

石的破裂压力。

4 讨论分析

4.1 基本理论

打孔岩样在承受内部空气压力和轴向荷载时, 破坏从岩样孔壁开始, 形成张拉破裂平面, 岩样裂为两半, 如图 12 所示。

小孔扩张的厚壁圆筒理论^[26]建立了此种受力条件下的空心圆柱力学模型, 如图 13 所示, 并给出了从圆柱体中心到空心圆柱周边的径向应力 σ_r 、切向应力 σ_θ 和轴向应力 σ_z 的分布规律, 如下式所示:



图 12 破裂岩样
Fig.12 Fractured rock sample

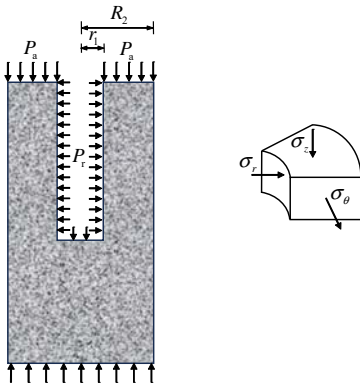


图 13 空心圆柱力学模型
Fig.13 Hollow cylinder mechanical model

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 P_r}{R_2^2 - r_1^2} \left(\frac{R_2^2}{r^2} - 1 \right) \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{r_1^2 P_r}{R_2^2 - r_1^2} \left(\frac{R_2^2}{r^2} + 1 \right) \quad (2)$$

$$\sigma_z = P_a \quad (3)$$

式中： σ_r 为径向应力； σ_θ 为切向应力； σ_z 为轴向应力； P_r 为孔内气体压力； r 为到圆柱体中心的距离； P_a 为轴向压力； r_1 为岩样内孔半径； R_2 为岩样外半径。当岩样充气破裂时，可计算得到内孔壁（ $r=r_1$ ）的主应力为

$$\sigma_1 = \sigma_r = P_r \quad (4)$$

$$\sigma_2 = \sigma_z = P_a \quad (5)$$

$$\sigma_3 = \sigma_\theta = \sigma_T = P_r \frac{R_2^2 + r_1^2}{R_2^2 - r_1^2} \quad (6)$$

式中： σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一主应力、第二主应力、第三主应力； σ_T 为岩石的环向抗拉强度。在得到空心圆柱岩样的破裂压力后，由式（6）可计算得到岩石的环向抗拉强度 σ_T 。该方法在水压致裂试验中被广泛应用^[27-28]。

但压气储能洞室是以空气为介质，不同于液体，其渗透性更强。岩体本身是一种多孔裂隙介质，在高压气体作用下，其孔隙应力会对裂缝扩展起到重要作用。因此，在以气体为介质的空心圆柱破裂试验中，应该考虑孔隙应力 p_0 的作用，如下式所示：

$$\sigma_\theta = \sigma_T + p_0 \quad (7)$$

$$\sigma_T = P_r \frac{R_2^2 + r_1^2}{R_2^2 - r_1^2} - p_0 \quad (8)$$

4.2 验证 1

在 COMSOL Multiphysics 中建立多裂隙的三维空心圆柱模型，如图 14 所示。模型中裂隙位置遵循均匀随机分布函数，大小遵循幂律分布函数，方向遵循 Fisher 分布函数。取裂隙数量为 20 条，裂隙长度为 5~20 mm，裂缝走向控制为 60°，倾角为 10°。



图 14 多裂隙三维模型
Fig.14 Multi-fissures 3D model

高压气体在岩石裂隙中的快速流动可以用 Brinkman 方程^[29]描述，其控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon_p) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = Q_m \quad (9)$$

$$\frac{\rho}{\epsilon_p} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\frac{1}{\epsilon_p} \left\{ u(\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T) - \frac{2}{3} u(\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} \right\} \right] - \left(u \kappa^{-1} + \frac{Q_m}{\epsilon_p^2} \right) \mathbf{v} + \mathbf{F} \quad (10)$$

式中： ρ 为流体密度； ϵ_p 为孔隙率； \mathbf{v} 为速度矢量； \mathbf{I} 为二阶单位张量； Q_m 为质量源项； t 为时间； p 为流体压力； u 为流体的动力黏度； κ 为多孔介质的渗透率； \mathbf{F} 为力项。

模型计算参数取值如表 4 所示。内孔壁设置入口压力边界为 4 MPa，圆柱外壁设置出口压力边界

为 0 MPa, 可计算得到模型裂隙压应力分布图, 如图 15 所示。

表 4 计算参数
Table 4 Calculation parameters

气体密度 / (kg · m ⁻³)	孔隙率	动力黏度 / (Pa · s)	渗透率 / μm ²
1.20	0.25	1.8 × 10 ⁻⁶	1.0 × 10 ⁻⁴

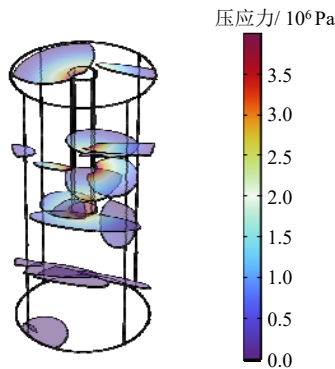


图 15 裂隙压应力分布图
Fig.15 Compressive stress distribution of fissures

由图 15 可知, 圆孔与裂隙接触位置都出现了较高的空气压力, 这表明孔隙应力是裂缝发展的重要驱动力。

4.2 验证 2

文献[27]进行了空心圆柱体的液压致裂试验, 采用水作为施压介质, 得到了岩石破裂压力与充水速率关系, 如图 16 所示。

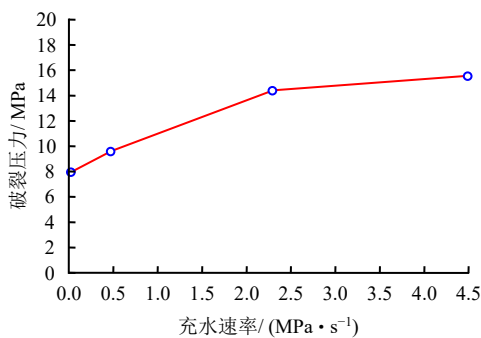


图 16 破裂压力与充水速率关系图
Fig.16 Relationship between burst pressure and water filling rate

由图 16 可知, 岩石破裂压力与充水速率是正相关关系, 该试验结果可以用式(6)很好的进行解释。充水速率增大时, 破裂压力增大, 因此计算得到的岩石抗拉强度增大, 如下式所示:

$$\uparrow \sigma_T = \uparrow P_r \frac{R_2^2 + r_1^2}{R_2^2 - r_1^2} \quad (11)$$

采用空气作为介质得到的岩石破裂压力与充气速率是负相关关系, 如图 6 所示。该试验结果与式(6)相悖, 但式(8)却可以合理地解释。充气速率增大时, 孔隙应力 p_0 增大, 破裂压力减小, 因此计算得到的岩石抗拉强度减小, 见下式:

$$\downarrow \sigma_T = \downarrow P_r \frac{R_2^2 + r_1^2}{R_2^2 - r_1^2} - p_0 \uparrow \quad (12)$$

这说明在以气体为介质的空心圆柱破裂试验中, 应该考虑孔隙应力 p_0 的作用, 式(8)建立的岩石抗拉强度计算公式是合理的。

5 结 论

针对现有岩石抗拉强度测量方法无法真实反映岩石在高内气压作用下环向受力的问题, 提出了一种新的测量方法。通过向打孔岩样注入高压空气, 考虑多种工况, 进行了多组试验, 并进行了理论研究, 主要结论如下:

- (1) 提出了一种新的岩石环向抗拉强度的测量方法。通过向打孔岩样中注入高压空气, 得到岩石破裂压力, 考虑岩石孔隙应力, 提出了岩石抗拉强度的计算公式。
- (2) 空心岩石圆柱体采用气体作为介质时, 岩石破裂压力与充气速率是负相关关系。岩石破裂压力随温度升高而增大, 这种现象在岩石温度 ≥ 120 °C 时更为明显。
- (3) 空心岩石圆柱体因温度应力产生的拉应变要远大于空气压力产生的拉应变, 压气储能洞室设计计算时应考虑温度应力对围岩产生的不利影响。

参 考 文 献

[1] 余国, 姜学峰, 戴家权, 等. “双碳”目标下中国能源发展与能源安全若干问题思考[J]. 国际石油经济, 2021, 29(11): 1-8.
YU Guo, JIANG Xue-feng, DAI Jia-quan, et al. Reflections on several issues of China's energy development and energy security under the “dual carbon” goal[J]. *International Petroleum Economics*, 2021, 29(11): 1-8.

[2] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.

- ZHANG Li-ying, YE Ting-lu, XIN Yao-zhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. **Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering**, 2010, 30(25): 1-9.
- [3] MELIKOGLU M. Pumped hydroelectric energy storage: analyzing global development and assessing potential applications in Turkey based on Vision 2023 hydroelectricity wind and solar energy targets[J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017, 72: 146-153.
- [4] VENKATARAMANI G, PARANKUSAM P, RAMALINGAM V, et al. A review on compressed air energy storage—a pathway for smart grid and polygeneration[J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2016, 62: 895-907.
- [5] GIRAMONTI A J, LESSARD R D, BLECHER W A, et al. Conceptual design of compressed air energy storage electric power systems[J]. **Applied Energy**, 1978, 4(4): 231-249.
- [6] MATOS C R, CARNEIRO J F, SILVA P P. Overview of large-scale underground energy storage technologies for integration of renewable energies and criteria for reservoir identification[J]. **Journal of Energy Storage**, 2019, 21: 241-258.
- [7] LI Z Z, SUO J J, FAN J Y, et al. Damage evolution of rock salt under multilevel amplitude creep-fatigue loading with acoustic emission monitoring[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2023, 164: 105346.
- [8] HAN Y, MA H L, YANG C H, et al. The mechanical behavior of rock salt under different confining pressure unloading rates during compressed air energy storage (CAES)[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2021, 196: 107676.
- [9] XU Y J, ZHOU S W, XIA C C, et al. Three-dimensional thermo-mechanical analysis of abandoned mine drifts for underground compressed air energy storage: a comparative study of two constructions and plugging schemes[J]. **Journal of Energy Storage**, 2021, 39: 102696.
- [10] 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.
- [11] 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: 1113-1124.
- [12] 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.
- [13] 张国华, 相月, 王薪锦, 等. 压气储能地下内衬储气库结构荷载分担解析解及影响因素分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2024, 43(增刊 2): 1-18.
- ZHANG Guo-hua, XIANG Yue, WANG Xin-jin, et al. Analytical solution and influencing factors of load sharing of underground lined gas storage for compressed gas energy storage[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2024, 43(Suppl.2): 1-18.
- [14] 徐英俊, 夏才初, 周舒威, 等. 基于极限分析上限定理的压气储能洞室抗隆起破坏准则[J]. **岩石力学与工程学报**, 2022, 41(10): 1971-1980.
- XU Ying-jun, XIA Cai-chu, ZHOU Shu-wei, et al. Anti-uplift failure criterion for compressed air energy storage caverns based on upper limit theorem of limit analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2022, 41(10): 1971-1980.
- [15] 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 Zhong-ming, QIN Shuang-zhuan, TANG Dong. Numerical study on cumulative damage characteristics of surrounding rock of compressed gas energy storage underground gas storage[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(2): 230-238.
- [16] 夏才初, 张平阳, 周舒威, 等. 大规模压气储能洞室稳定性和洞周应变分析[J]. **岩土力学**, 2014, 35(5): 1391-1398.
- XIA Cai-chu, ZHANG Ping-yang, ZHOU Shu-wei, et al. Stability and perimeter strain analysis of large-scale compressed air energy storage caverns[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(5): 1391-1398.
- [17] 蒋中明, 刘澧源, 赵海斌, 等. 地下储气库热力耦合数值分析动态边界条件研究[J]. **岩土力学**, 2019, 40(3): 1149-1157.

- JIANG Zhong-ming, LIU Li-yuan, ZHAO Hai-bin, et al. Study on dynamic boundary conditions of thermal-mechanical coupling numerical analysis of underground gas storage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(3): 1149-1157.
- [18] 鲁青云, 徐英俊, 夏才初, 等. 纤维增强柔性混凝土压气储能地下洞室力学响应研究[J]. **岩土力学**, 2024, 45(12): 3566-3575.
- LU Qing-yun, XU Ying-jun, XIA Cai-chu, et al. Mechanical response of fiber reinforced flexible concrete for compressed air energy storage underground caverns[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(12): 3566-3575.
- [19] OBERT L, WINDES S L, DUV ALL W I. Standardized tests for determining the physical properties of mine rock[R]. [S. l.]: Bureau of Mines, 1946.
- [20] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T 5368—2007 水电水利工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. DL/T 5368—2007 Code for rock tests of hydroelectric and water conservancy engineering[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. GB/T 50266—2013 Standard for tests method of engineering rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [22] 中华人民共和国水利部. SL/T 264—2020 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL/T 264—2020 Code for rock tests in water and hydropower projects[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2020.
- [23] 陈津民. 弯曲法测岩石抗拉强度[J]. **工程地质学报**, 2008, 16(增刊 1): 317-319.
- CHEN Jin-min. Measurement of rock tensile strength by bending method[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2008, 16(Suppl.1): 317-319.
- [24] 吕爱钟, 王浩宇, 蔡辉. 弯曲试验确定岩石单轴抗拉强度的新方法[J]. **地下空间与工程学报**, 2018, 14(6): 1452-1457.
- LÜ Ai-zhong, WANG Hao-yu, CAI Hui. A new method for determining the uniaxial tensile strength of rock by bending test[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2018, 14(6): 1452-1457.
- [25] 夏才初, 秦世康, 赵海鸥, 等. 循环热力作用下压气储能洞室钢衬的疲劳耐久性[J]. **同济大学学报(自然科学版)**, 2023, 51(10): 1564-1573.
- XIA Cai-chu, QIN Shi-kang, ZHAO Hai-ou, et al. Fatigue durability of steel lining of compressed gas energy storage cavern under cyclic thermal action[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science Edition)**, 2023, 51(10): 1564-1573.
- [26] YU Hai-sui. 岩土介质小孔扩展理论[M]. 周国庆, 赵光思, 梁恒昌, 等译. 北京: 科学出版社, 2013.
- YU Hai-sui. Theory of small pore expansion in rock and soil media[M]. Translated by ZHOU Guo-qing, ZHAO Guang-si, LIANG Heng-chang, et al. Beijing: Science Press, 2013.
- [27] CHANG C, JO Y, OH Y, et al. Hydraulic fracturing in situ stress estimations in a potential geothermal site, Seokmo Island, South Korea[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2014, 47: 1793-1808.
- [28] HAIMSON B C, CORNET F H. ISRM suggested methods for rock stress estimation—part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(7-8): 1011-1020.
- [29] 李东印, 许灿荣, 熊祖强. 采煤工作面瓦斯流动模型及 COMSOL 数值解算[J]. **煤炭学报**, 2012, 37(6): 967-971.
- LI Dong-yin, XU Can-rong, XIONG Zu-qiang. Gas flow model in coal mining face and COMSOL numerical solution[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(6): 967-971.