

引用格式:张超,杨帆,段品佳,等.超低温下饱和及干燥岩石抗拉强度试验研究[J].工业建筑,2026,56(3):244-252. ZHANG Chao, YANG Fan, DUAN Pinjia, et al. Experimental Research on the Tensile Strength of Saturated and Dry Rocks at Ultra-Low Temperatures[J]. Industrial Construction, 2026, 56(3): 244-252 (in Chinese). DOI: 10. 3724/j. gyjzG23061404

超低温下饱和及干燥岩石抗拉强度试验研究*

张超¹ 杨帆¹ 段品佳¹ 郝志斌² 李扬²

(1. 中海石油气电集团有限责任公司, 北京 100028; 2. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 武汉 430068)

摘要 为研究超低温下饱和及干燥的花岗岩及大理岩的张拉力学特性,采用自制超低温环境力学加载试验装置,进行花岗岩和大理岩在超低温作用下(-90,-120,-165℃)的巴西劈裂试验。研究表明:粗粒花岗岩在超低温环境下岩石抗拉强度随温度降低而增大,但增长速率逐渐放缓;而细粒花岗岩在-165℃下强度有弱化趋势但仍高于室温状态。与常温相比,超低温环境下岩石裂纹除贯穿裂纹外还伴随着次生裂纹,饱水试件底部还会出现三角区破坏。岩石张拉破坏过程中的峰值能率,其变化与峰值强度相似,二者之间存在较强的相关性。旨在研究超低温环境下岩石的张拉破坏性能,由试验获得的力-热耦合作用下的岩石性能演变规律,对设计洞穴式液化天然气(LNG)储罐具有一定的工程意义。

关键词 超低温;岩石力学;洞穴式 LNG 储罐;巴西劈裂

Experimental Research on the Tensile Strength of Saturated and Dry Rocks at Ultra-Low Temperatures

ZHANG Chao¹ YANG Fan¹ DUAN Pinjia¹ HAO Zhibin² LI Yang²

(1. CNOOC Gas & Power Group Ltd., Beijing 100028, China;

2. School of Civil Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: To explore the tensile mechanical properties of saturated and dry granite and marble at ultra-low temperatures, this study employed a specifically designed mechanical loading apparatus in an ultra-low temperature environment. Brazilian split tests were conducted on granite and marble at temperatures of -90 °C, -120 °C, and -165 °C. The results indicated that the tensile strength of coarse-grained granite continuously increased as the temperature decreased under ultra-low temperature conditions, albeit at a decelerating rate. Fine-grained granite exhibited a weakening trend at -165 °C but remained higher than at ambient temperature. Compared with ambient conditions, rock fractures in ultra-low temperature environments not only demonstrated through-going cracks but also featured persistent cracks. Moreover, water-saturated specimens exhibited triangular zone failure at the base. The peak energy dissipation rate during the process of rock tensile failure showed a similar trend to the peak strength, with a strong correlation between the two. This study aims to examine the tensile failure performance of rocks in ultra-low temperature environments and the changes in patterns of rock properties under the coupling of force and temperature, offering engineering insights for the design of cavern-type liquefied natural gas (LNG) storage tanks.

Keywords: ultra-low temperature; rock mechanics; cavern-type LNG storage tank; Brazilian split

* 集团公司“十四五”重大科技项目(KJZX-2022-12-XNY-0803)。

第一作者:张超,博士,工程师,主要从事液化天然气存储转运技术与应用研究。

电子信箱:zhangchao5@cnooc.com.cn

收稿日期:2023-06-14

0 引言

当前世界天然气市场呈现前所未有的不确定性和波动性^[1],地下液化天然气储气库在整个天然气市场调度中扮演着重要的角色,是战略储备的首选^[2-4]。地下液化天然气(LNG)储罐具有低风险、强抗震/风能力和低建库成本的优势,能有效发挥季节性调峰功能^[5]。地下 LNG 储库服役环境温度在 -165°C 左右,对地下岩体要求较高,因此在超低温环境下进行岩石力学性能测试具有重要的理论和实际意义。

近年来,众多学者开展了低温下岩石力学性质的研究。王建国等^[6]对比了 -15°C 和 25°C 下花岗岩动力学特性的应变效率,研究结果表明:饱水冻结的花岗岩具有更高的强度峰值,饱水冻结花岗岩破坏时需要更多的冲击应变率,但峰值应变减小。徐光苗等^[7],唐明明等^[8],Matsunaga 等^[9]通过研究对砂岩、花岗岩在不同温度下的抗压和抗拉强度,发现岩石的抗压强度随温度降低而增大,而干燥状态下岩石抗拉强度基本保持不变。Han 等^[10]进行了低温液氮作用下页岩的力学性能研究,发现页岩在超低温环境下岩石脆性显著增强。赵波^[11]对液氮超低温下不同饱和度致密砂岩的力学特性研究发现,在超低温环境下致密砂岩的宏观力学性能参数(包括抗压强度、抗拉强度和弹性模量)随饱和度的增加呈先减小、再增加、最后减小的趋势。Zhang 等^[12]表明液氮冻结对提高煤的力学强度具有积极作用,即在液氮冻结作用下,煤的单轴抗压强度和弹性模量均随含水饱和度的增加和液氮冻结时间的延长而增加。此外,液氮冻结时间越长,加载煤保持弹性阶段的时间越长。另一方面,其他学者研究了冻融循环对岩石力学性能的劣化作用。岩石在冻融循环过程中的结构损伤程度与岩石种类、粒径大小、含水饱和度和孔隙度、以及循环次数等因素有关^[13-16]。

在低温冻结条件下岩石力学性能的研究,存在不同研究的限定条件不一致导致研究结论也不同的问题。抗拉强度是评估岩石张拉性能的重要指标,然而岩石的抗拉强度通常明显小于其抗压强度^[17],特别是在洞穴式 LNG 储库等工程中,需特别注意其在服役过程中由张拉应力产生的结构损伤。然而,由于试验条件等限制,超低温下(-90°C 以下)岩石抗拉性能的研究相对较少。基于此,本文借助自行研发的超低温深冷-加载设备,进一步开展超低温下岩石的抗拉性能研究,以期增加对超低温条件下岩石

抗拉性能的认识,并为洞穴式 LNG 储库等设计提供可靠的性能参数,为工程设计提供重要的数据支撑。

1 试验概况

1.1 试件制备及前期处理

试样选取的粗粒花岗岩产自岳阳市汨罗市黄柏镇团山县,细粒花岗岩产自福建省长泰县,大理岩产自广西贺州,根据 SL/T 264—2020《水利水电工程岩石试验规程》^[18],直径 50 mm、高径比为 0.5 的圆盘试样(图 1)取自同一岩心均质性较好的岩块。精细打磨后试件尺寸误差控制在 $\pm 0.3\text{ mm}$ 以内,两端不平行度误差不大于 0.05 mm ,表面无缺陷、无裂纹与刮痕。试件编号采用 GF(C)D(S)-X,MD(S)-X,其中 G(granite)表示花岗岩,M(marble)表示大理岩;F(fine)表示细粒,C(course)表示粗粒;D(dry)表示干燥条件,S(saturated)表示饱和条件;X 表示不同工况下的试样编号。通过 X 射线荧光光谱分析得岩石各矿物组成成分,具体如表 1 所示。

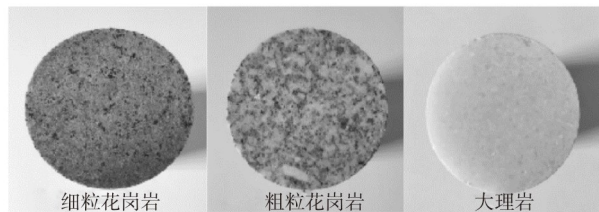


图 1 巴西劈裂圆盘试样

Fig. 1 Brazilian splitting disc specimens

表 1 岩石矿物成分质量分数

Table 1 Mass fractions of rock minerals compositions					%
岩石类型	石英	白云母	斜长石	钠长石	方解石
细粒花岗岩	14.50	—	27.03	58.47	—
粗粒花岗岩	23.16	18.45	28.02	30.37	—
大理岩	—	—	—	—	100

根据 SL/T 264—2020 的规定,试验前对试样进行饱水和干燥处理。干燥处理:将试件置于温度为 105°C 的干燥烘箱中进行干燥,间隔 24 h 放入干燥器中冷却至室温后称量。饱水处理:将试件饱水置于饱水容器中,水面高于试件,进行真空抽气。直至无气泡溢出为止,总抽气时间超过 4 h,经真空抽气后,试件放置于原容器中,在大气压下静置 4 h 后,取出试件并沾去表面水分,进行称量。当上述饱和及干燥后的试件质量达到稳定状态(两次称量结果相差不超过 0.1%),判定试件的干燥和饱水过

程完成,否则继续循环上述操作。

1.2 试验装置及试验流程

图2为自行设计的降温+加载装置,通过控制液氮输入总量及速率,可实现试验温度 $20\sim-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的自由调控。在试验过程中通过间歇性通入液氮使箱内降温速率稳定在 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,采用预埋PT100铂热电阻来监测岩石的内部温度,因热电偶预埋在监测试件内部,故热电偶返回的数据为岩石内部的实际温度,为再次保证试件温度的稳定,排除由温差引起的温度应力,当降温箱内岩石内部温度达到指定温度后,继续保温 $30\text{ min}^{[19]}$ 。

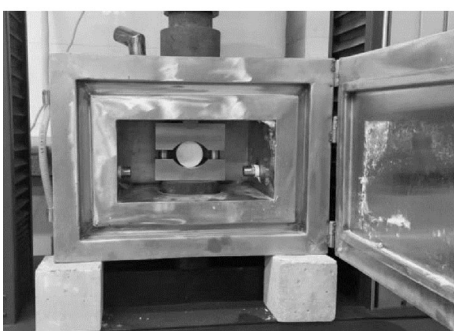
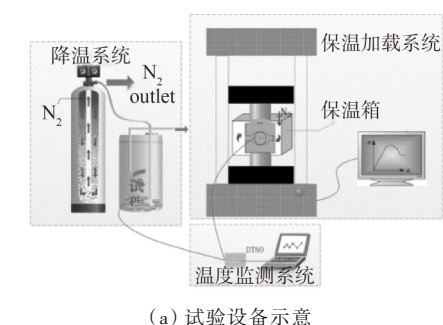


图2 试验装置
Fig.2 Test setup

降温完成后,即刻将试样移至压力机配套的专用保温箱[图2(c)],该保温箱采用304不锈钢双层结构,夹层填充特制保温材料,确保试验过程

中保温效果符合规定。为保证试件受冷均匀,箱内设有3个液氮喷口并持续通入液氮,采用热电偶监测箱内环境温度,并根据实际温度波动控制液氮进出速率,以确保在加载时试件处于指定的温度状态。试件转移约需 10 s ,由于时间较短,对试件内部温度影响可忽略。试验压力机采用的仪器设备为美国MTS工业系统(中国)有限公司生产的微机控制电子万能试验机(CMT5105),最大荷载量程为 $\pm 100\text{ kN}$,试验力和变形测量分辨率均为较大测量值的 $1/500000$,试验力和变形的精度能够保证在示值的 $\pm 0.5\%$ 以内。试验采取位移加载控制,以 $0.1\text{ mm}/\text{min}$ 的速率施加劈裂荷载至试件破坏。为了有效地降低个别试件的误差对最终结果的影响,试验设计时选择3个试件为一组,并取其平均值作为最终的试验结果,试验流程详见图3。

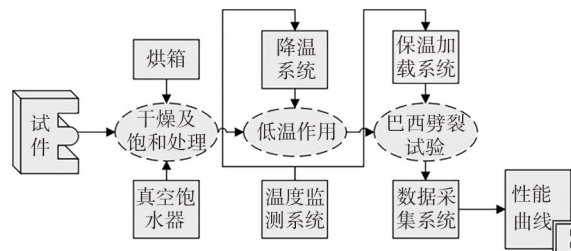


Fig.3 Flow chart of tensile tests at ultra-low temperatures

2 试验分析

2.1 试件宏观破坏特征

根据图4显示,不同工况下的岩石巴西劈裂破坏形式在超低温作用下呈现一些显著特征,试件表面未见明显的龟裂、破损或缺角等现象,且试件表面颜色未见明显差异。尽管在不同温度和饱和度条件下,各种岩石展现出一定的破坏形态差异,但主要破坏模式仍然为张拉破坏模式。综合蔡正宇等的研究^[20]以及试验结果得出以下结论:温度高于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,花岗岩试件裂缝主要沿径向扩展,没有明显的次级裂缝,断面无明显擦痕;当温度在 $-40\sim-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,除了径向分布的主裂缝外,试件端部会产生一系列次级裂缝,岩石破坏时伴随着颗粒剥落;温度降至 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时,花岗岩的破坏形态与试件的饱水状态及组成结构密切相关。饱和细粒花岗岩试件的破坏形态较为复杂,包括宽度较大的主裂缝、次级裂缝以及端部明显的三角破坏区域。相比之下干燥花岗岩试件虽有上述裂纹发展趋势,但破坏程度较小。这是因为饱和试件在超低温环境下,

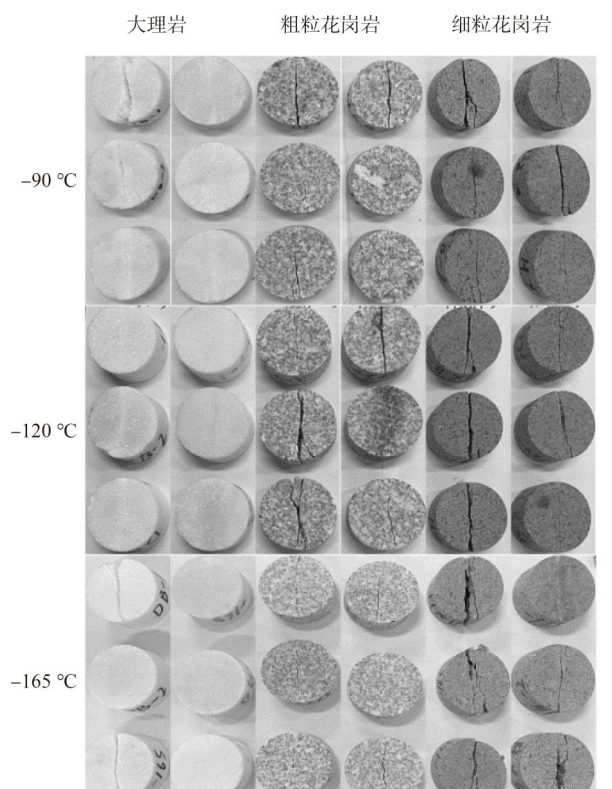


图4 试件破坏形式

Fig. 4 Specimen failure modes

岩石内部孔隙水的冻结增强了岩石内部微裂纹之间的黏结作用,提高了岩石整体强度。因此在岩石受到夹具传递的竖向荷载时,在端部产生了应力集中现象,应力集中加剧了岩石主裂缝附近的局部破坏。

2.2 岩石抗拉强度

试验采取国际岩石力学学会标准推荐的巴西劈裂试验方法,选取上下两端带弧度的圆盘夹具,该方法稳定性较强^[21],加载及受力示意如图5所示。

由弹性力学理论,圆盘试件在受到集中荷载 P

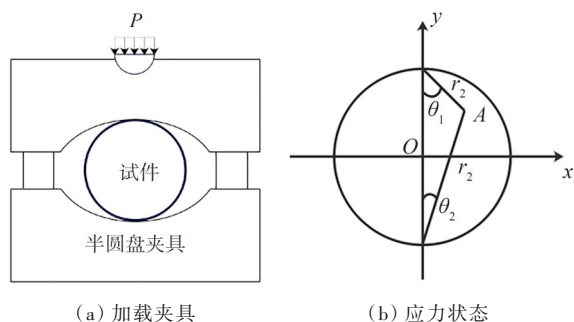


图5 巴西劈裂加载及受力示意

Fig. 5 Schematic diagram of loading and stress in the Brazilian splitting test

的作用,式(1)为圆盘试件任意一点 A 的应力状态^[22]。

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi t} \left(\frac{\sin^2 \theta_1 \cos \theta_1}{r_1} + \frac{\sin^2 \theta_2 \cos \theta_2}{r_2} \right) - \frac{2P}{\pi D t} \quad (1a)$$

$$\sigma_y = \frac{2P}{\pi t} \left(\frac{\cos^3 \theta_1}{r_1} + \frac{\sin^3 \theta_2}{r_2} \right) - \frac{2P}{\pi D t} \quad (1b)$$

$$\tau_{xy} = \frac{2P}{\pi t} \left(\frac{\cos^2 \theta_1 \sin \theta_1}{r_1} + \frac{\cos^2 \theta_2 \sin \theta_2}{r_2} \right) \quad (1c)$$

式中: σ_x 、 σ_y 和 τ_{xy} 为试样某点上的正应力和切应力, MPa; D 为试件的直径, mm; t 为试件的厚度, mm; θ_1 和 θ_2 为该点到加载点的连线与劈裂面的夹角; r_1 和 r_2 为该点到加载点的距离。

在试件中心 O 点处, $r_1=r_2$, $\theta_1=\theta_2$ 。故式(1)可简化为:

$$\sigma_x = -\frac{2P}{\pi D t} \quad (2a)$$

$$\sigma_y = \frac{6P}{\pi D t} \quad (2b)$$

$$\tau_{xy} = 0 \quad (2c)$$

由式(2)可知,在巴西劈裂试验中,圆盘中心处受到的压应力为拉应力的3倍,但通常认为岩石劈裂破坏主要由拉应力引起,当劈裂试验中起主导作用的拉应力达到破坏值,岩石随即破坏,即由式(2)计算岩石的抗拉强度。

表2为低温下岩石抗拉强度测试结果。可见,对于细粒干燥花岗岩(GFD),温度从 -90°C 到 -120°C 时,抗拉强度平均增加 15.36%。然而,在 -165°C 时,抗拉强度为 13.64 MPa,较 -120°C 下降了 12.02%。细粒饱和花岗岩(GFS)的平均抗拉强度在3个温度下分别为 15.88, 19.60, 18.77 MPa,变化范围分别为 +23.48% 和 -4.23%。相比之下,粗粒花岗岩在干燥或饱和条件下,随着温度降低,抗拉强度未呈现下降趋势。综上所述,低温环境下 (-90°C , -120°C , -165°C), 岩石抗拉强度的变化不是持续单调递增。这之前 Aoki 等^[23] 和 Inada 等^[24] 的观察结果不同,他们认为在低温环境下,花岗岩的抗拉、抗压强度随温度降低而增大。

岩石抗拉强度在低温环境下的变化可能受到岩石本身颗粒粒径收缩和岩石内部孔隙水冻结的共同影响。以下是两种可能的推测:推测一,通过利用偏光显微针对花岗岩进行观察,发现细粒花岗岩内部结构颗粒较小且排列紧密,在超低温环境

下,岩石颗粒持续收缩,导致了颗粒分离和新裂纹的出现。因此,-165℃时,细粒花岗岩在饱和状态下的抗拉强度较-120℃有所降低。推测二,在-120℃时,饱和岩石粒径与孔隙冰已冻结成一个密实的整体,研究表明,当温度低于-120℃时,孔隙冰会发生晶型转变^[23],导致体积收缩。温度持续下降至-165℃,冰体继续收缩,会影响之前密实结构的

完整性,从而使抗拉强度较-120℃时降低。然而,与常温相比,岩石内部整体密实度提高,因此仍然高于常温状态下的抗拉强度。对于粗粒花岗岩,其内部颗粒较大,孔隙较多。在超低温环境下,颗粒收缩使得岩石内部排列更加紧密,较大孔隙内的水分在超低温环境中冻结使岩石孔隙率减小,导致整体抗拉性能增强。

表2 抗拉强度计算结果
Table 2 Calculation results of tensile strength

样品编号	温度/℃	抗拉强度/ MPa	均值抗拉 强度/MPa	变化幅度/%	样品编号	温度/℃	抗拉强度/ MPa	均值抗拉 强度/MPa	变化幅度/%
GFD-1	-90	13.44	13.44	—	GFS-1	-90	17.37	15.88	—
GFD-2	-90	13.84			GFS-2	-90	15.89		
GFD-3	-90	13.05			GFS-3	-90	14.38		
GFD-1	-120	15.36	15.51	15.36	GFS-1	-120	19.71	19.60	23.48
GFD-2	-120	15.66			GFS-2	-120	19.49		
GFD-3	-120	12.38			GFS-3	-120	15.41		
GFD-1	-165	12.48	13.64	-12.02	GFS-1	-165	18.80	18.77	-4.23
GFD-2	-165	13.29			GFS-2	-165	18.64		
GFD-3	-165	15.16			GFS-3	-165	18.88		
GCD-1	-90	12.96	12.65	—	GCS-1	-90	16.89	16.93	—
GCD-2	-90	12.52			GCS-2	-90	17.53		
GCD-3	-90	12.48			GCS-3	-90	16.29		
GCD-1	-120	12.77	12.76	0.87	GCS-1	-120	16.22	18.68	88.07
GCD-2	-120	12.65			GCS-2	-120	18.69		
GCD-3	-120	12.67			GCS-3	-120	18.66		
GCD-1	-165	14.65	14.62	14.55	GCS-1	-165	18.15	19.17	2.61
GCD-2	-165	14.62			GCS-2	-165	16.67		
GCD-3	-165	14.59			GCS-3	-165	22.67		
MD-1	-90	3.14	3.77	—	MS-1	-90	3.94	4.05	—
MD-2	-90	4.41			MS-2	-90	3.98		
MD-3	-90	3.77			MS-3	-90	4.23		
MD-1	-120	5.16	4.12	9.09	MS-1	-120	4.76	4.68	15.58
MD-2	-120	3.77			MS-2	-120	4.67		
MD-3	-120	3.43			MS-3	-120	4.61		
MD-1	-165	4.42	4.15	15.36	MS-1	-165	6.77	6.85	46.23
MD-2	-165	3.96			MS-2	-165	6.86		
MD-3	-165	4.08			MS-3	-165	6.92		

蔡正宇等的试验结果^[20]表明:温度对岩石抗拉强度的影响显著,在室温25℃时,饱和试件的抗拉强度低于干燥试件,但在-25~-40℃之间,存在一个温度临界值,饱和试件的平均抗拉强度开始超过干燥试件。随着温度的降低,岩石抗拉强度整体呈上升趋势。由于文献[20]与本试验选用了岩性相似的粗粒花岗岩作为试验对象,故将文献[20]中关于试件在25~-60℃的抗拉强度值与本试验在超低温(-90℃以下)得到的试

件抗拉强度值同时列出以形成比较。最终给出25~-165℃干燥及饱和状态下粗粒花岗岩抗拉强度的变化情况,见表3。将上述不同温度下粗粒花岗岩的抗拉强度绘制于图6,并得到其拟合关系式为:

$$y_{\text{饱和}} = 3.42 \times 10^{-6}x + 5.34 \times 10^{-4}x^3 - 0.06x + 8.54 \quad (3a)$$

$$y_{\text{干燥}} = -22.20 \times 10^{-6}x - 6.04 \times 10^{-4}x^3 - 0.063x + 10.23 \quad (3b)$$

表 3 干燥及饱和粗粒花岗岩在不同温度下的抗拉强度

Table 3 Tensile strength of dry and saturated coarse-grained granite at different temperatures									MPa
状态	25 °C	0 °C	-20 °C	-40 °C	-50 °C	-60 °C	-90 °C	-120 °C	-165 °C
饱和	7.26	8.06	10.76	12.36	12.55	13.36	16.93	18.68	19.17
干燥	8.54	9.69	11.04	12.13	12.48	12.56	12.65	12.76	14.62

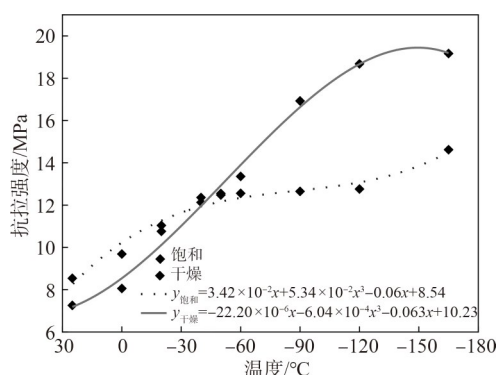


图 6 抗拉强度与温度的关系

Fig. 6 Relationship between tensile strength and temperature

式中: x 为试件内部温度, °C; y 为抗拉强度, MPa。

式(3)的决定系数 R^2 分别为 0.991 和 0.972, 表明所做的拟合较为精确。由于选取试件尺寸及同种试件的岩性基本相同, 测试显示的岩石极限强度变化趋势能够表征岩石抗拉强度的变化趋势。对

于粗粒花岗岩, 不论是饱和或者干燥状态的抗拉强度都随温度降低而增大, 这与以往的研究结论基本一致。

2.3 荷载-位移曲线

不同温度条件下岩石巴西劈裂试验的荷载-位移曲线见图 7, 其中横坐标为竖向位移, 纵坐标为压缩荷载。与常温工况相似, 曲线整体可分为 3 个阶段: 1) 压密阶段, 试件在压力机夹具内被夹紧, 试件内部原生裂隙被压实, 曲线呈上凹型。2) 弹性阶段, 随着压力逐渐增加, 原生裂隙被压实后, 试件进入弹性阶段, 曲线逐渐转变成直线或近似直线, 此阶段直线的斜率最大, 试件的劈裂模量最大。3) 破坏阶段, 当荷载临近极限荷载, 试件突然发生破坏, 荷载大幅跌落, 曲线进入峰后跌落阶段, 呈现明显的荷载突降现象, 整个过程表现为显著的脆性破坏。

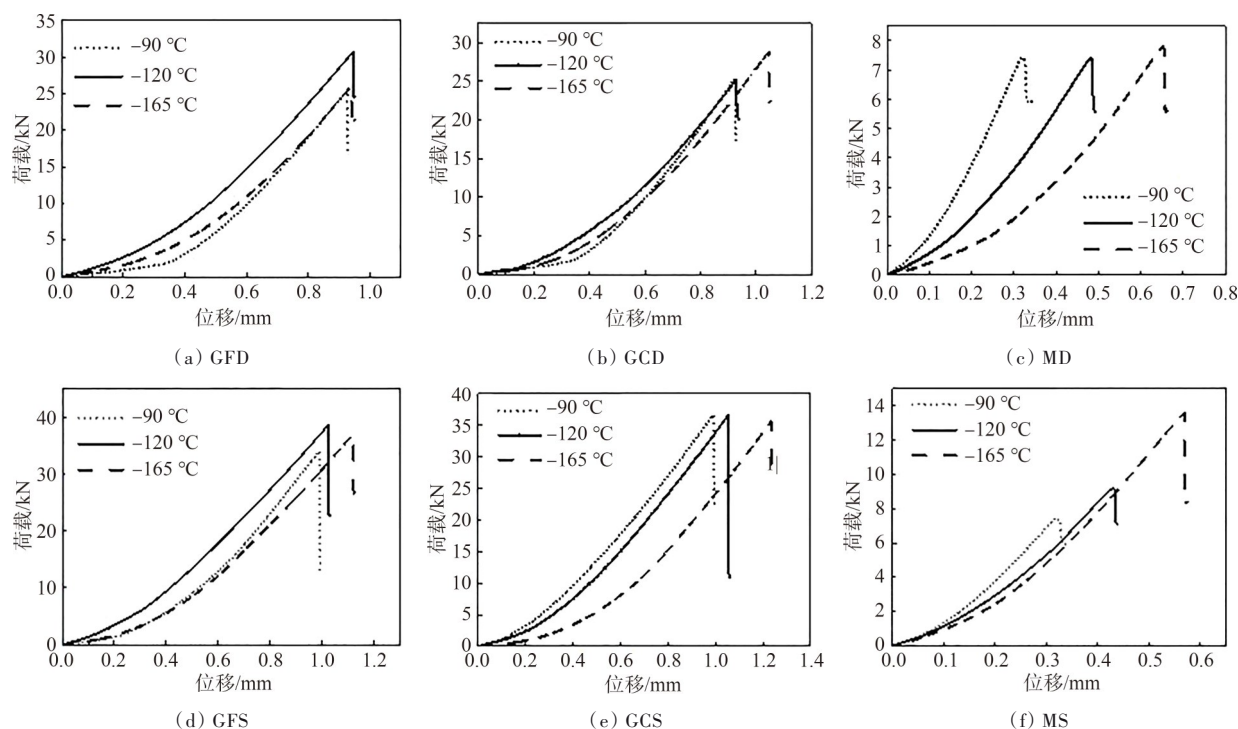


图 7 不同温度下岩石荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of rocks at different temperatures

不同工况下试件的荷载-位移曲线也存在差异。整体上看, 粗粒花岗岩的压实阶段持续时间较

长, 这是因为粗粒花岗岩内部孔隙及颗粒组成较大, 导致在压实阶段受到应力时发生较细粒花岗岩

大的弹性和塑性变形,在压实阶段需要更大的变形才能达到平衡状态。饱和状态下的花岗岩和大理岩达到破裂极限时的位移在 $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下最大, $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 次之, $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时最小。因此,此类条件下岩石的变形是否符合洞穴式LNG储罐在正常服役时($-165\text{ }^{\circ}\text{C}$)的变形要求还需进一步研究。

2.4 峰值能率与抗拉强度的关系

岩石在受力变形破坏的整个过程中,能量变化是一个伴随能量积累状态的失稳现象。岩石的受力变形破坏是能量耗散和能量释放综合作用的结果^[25]。因此,岩石破坏过程中吸收的能量也是评价岩石力学性能的良好指标。在本试验中,假设不存在热交换,试验机对试样连续做功,试样在荷载作用下不断积累能量。因此,通过图形面积积分法,岩石在变形破坏过程中的总输入能可由压力机提供的荷载-位移曲线确定,即荷载-位移曲线与坐标轴所围成的面积。

图8为吸收能量的计算示意,根据积分定义,将荷载-位移曲线分成若干微元矩形,并求出所有微元矩形的面积和,即:

$$S \approx \sum_{i=1}^n \Delta S_i \approx \sum_{i=1}^n P(u_i) \Delta u_i \quad (4)$$

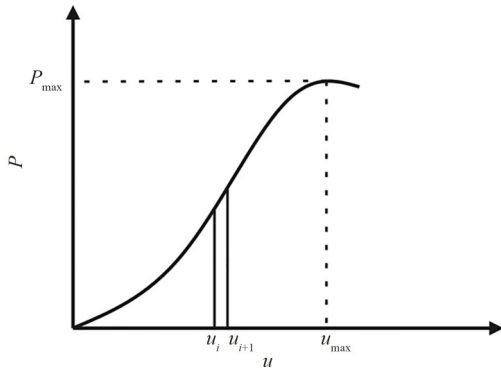


图8 吸收能的计算

Fig. 8 Calculation of absorbed energy

故可以求得在整个加载过程中,岩石破坏所吸收的能量为:

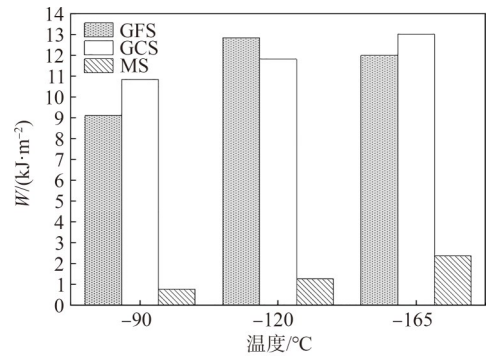
$$W_i = \lim_{\Delta u \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n P(u_i) \Delta u_i = \int_0^{u_{\max}} P_i du_i \quad (5)$$

式中: u_i 为荷载为 P_i 时对应的位移,mm; $u_{\max}$ 为加载至峰值荷载点 $P_{\max}$ 时加载方向的位移,mm。

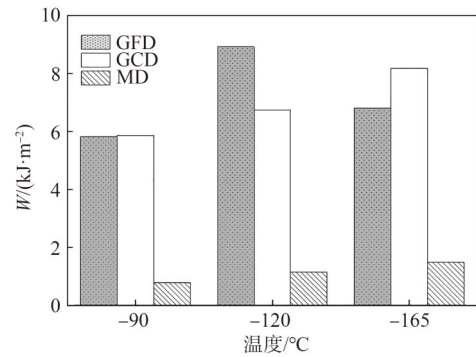
为排除试样尺度产生的差异,采用单位破裂面积积累的能量——能率 $W(\text{J}/\text{m}^2)$,表征岩石吸收能量的能力,其计算式为:

$$W = \frac{1}{Dt} \sum_{i=1}^n W_i \quad (6)$$

通过式(6)计算得到超低温环境下饱和及干燥试样的峰值能率如图9所示。在饱和条件下,温度从 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,细粒花岗岩的峰值能率先增大后减小,粗粒花岗岩及大理岩仍保持峰值能率随温度降低而增大的趋势。综合细粒花岗岩的孔隙粒径及孔隙度分析,饱和细粒花岗岩在 $-120\sim -165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,孔隙水凝结成冰时体积增大和岩石粒径在低温下收缩的相互作用可能对岩体本身结构造成了不可逆的损伤,因此在峰值能率方面出现了折减。



(a) 饱和状态下



(b) 干燥状态下

图9 岩石峰值能率

Fig. 9 Peak energy rates of rocks

岩石的峰值能率与抗拉强度变化相似,随着抗拉强度增大,岩石的峰值能率也逐渐增大。试件的抗拉强度与峰值能率之间存在一定的正相关关系。对花岗岩的峰值能率与抗拉强度数据进行拟合,拟合结果如图10所示。可见,粗粒和细粒花岗岩在饱和或干燥条件下,抗拉强度与峰值能率呈正相关,即岩样的抗拉强度越高,使岩样发生劈裂破坏时所需的能量就越多,反之,抗拉强度越小,岩样破坏时吸收的能量就越少。

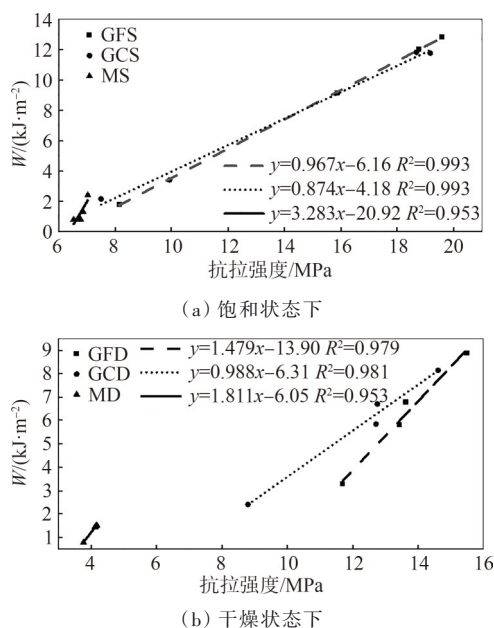


图10 岩石抗拉强度与峰值能率关系

Fig. 10 Relationship between rock tensile strength and peak energy rate

2.5 扫描电镜分析

通过微观电镜扫描试验测试了常温、-120℃和-165℃发生劈裂破坏后的试样,其内部的颗粒和微裂缝的形态及结构如图11所示。可见,花岗岩试件在常温下结构较为完整。对于常温下细粒花岗岩试件的微观结构[图11(a)],其切片表面相对光滑,结构质地均匀,颗粒排列紧密,颗粒胶结处未出现明显裂纹;粗粒花岗岩试件[图11(d)]则相对复杂,试件内部可能存在较为松散的结构,其表面显现出部分原生裂纹,这些裂纹可能是试件制备时产生的,也可能是切片取样时对样品结构整体造成的损伤。经-120℃超低温冻后细粒花岗岩[图11(b)],颗粒间微裂纹较常温相比逐渐增多且较为明显,但未出现明显孔隙结构破坏特征,结构依靠内部胶结物冻结可能会增强岩石内部黏聚力,岩石内部颗粒遇冷收缩,减小了孔隙体积,提高了整体结构的密实度。经-165℃超低温冻结的细粒花岗岩[图11(c)]晶体间的裂纹有扩张趋势,晶体表面能够清楚发现短小的穿晶裂纹;由于岩石内部孔隙水的过冻结,颗粒间的胶结物呈松散状态,放大至1000倍可发现胶结物结构排列整齐呈阶梯状,但结构中出现大量孔洞,极大影响了岩石在超低温下的力学性能。

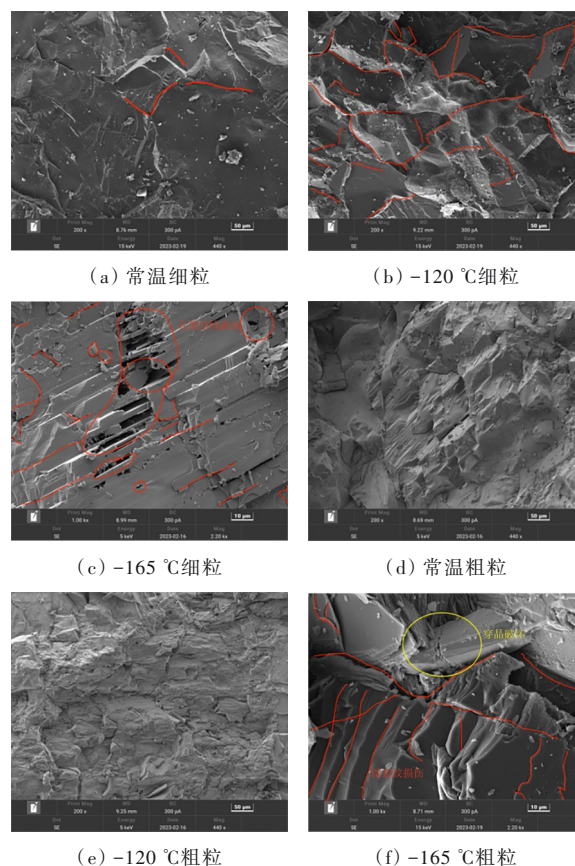


图11 不同温度作用的花岗岩电镜扫描图

Fig. 11 SEM images of granite subjected to different temperatures

3 结论

1)通过分析岩石劈裂破坏的宏观特征可以观察到,随着温度越低,岩石劈裂破坏模式变得更为复杂,在-20℃之前,试件的裂缝主要沿径向扩展,没有明显的次裂缝,断面无明显擦痕;而在-40~-60℃时,试件除了径向分布的主裂缝之外,在端部会产生系列次裂缝,伴随着岩石颗粒剥落;当温度降至-90℃之后,岩石破坏不仅有裂缝宽度较大的主裂缝和次裂缝,试样端部出现明显三角破坏区域,试件破坏时主裂缝周围有岩石颗粒剥落。

2)在超低温环境下,岩石抗拉强度并非随温度的降低而增大,岩石的抗拉强度在力与温度耦合作用下受到岩石的种类、粒径大小、结构组成以及饱和度等因素影响。

3)在常温时,粗粒花岗岩在饱和条件下的平均抗拉强度小于干燥条件。在-25~-40℃之间,出现一个温度临界值,此时饱和试件的平均抗拉强度超过干燥试件,随着温度的降低,岩石平均抗拉强度呈上升趋势。对于细粒花岗岩,其干燥或饱和条件下的抗拉强度并非随温度降低持续增加,其抗拉强

度在 $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时相比 $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有所减少。经过电镜扫描试验分析这是 $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时岩石内部损伤造成的。

4)超低温环境下,岩石在饱水和干燥状态下的峰值能率与抗拉强度呈线性关系,表明抗拉强度越高,岩石破坏时所需的能量越大。

参 考 文 献

- [1] 白桦. 国际天然气市场格局进入深度调整期[J]. 中国石化, 2022(10): 80-83.
- [2] 马新华, 窦立荣, 王红岩, 等. 天然气驱动可持续发展的未来:第28届世界天然气大会综述[J]. 天然气工业, 2022, 42(7): 1-6.
- [3] 铁宇, 金龙文, 丁斌. 从国际实践看天然气是实现碳中和的关键[J]. 煤气与热力, 2022, 42(8): 43-46.
- [4] 肖立. 大型LNG地下储罐受力变形试验及模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊1): 63-70.
- [5] 李国永, 徐波, 王瑞华, 等. 我国天然气地下储气库布局建议[J]. 中国矿业, 2021, 30(11): 7-12.
- [6] 王建国, 雷振, 杨阳, 等. 饱水冻结花岗岩动态力学性状的应变率效应[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(5): 1292-1297.
- [7] 徐光苗, 刘泉声, 彭万巍, 等. 低温作用下岩石基本力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(12): 2502-2508.
- [8] 唐明明, 王芝银, 孙毅力, 等. 低温条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 787-794.
- [9] MATSUNAGA I, KURIYAGAWA M, KINOSHITA N, et al. Mechanical properties of rock at cryogenic temperatures fundamental studies on liquefied natural gas storage in rock caverns (1st Report)[J]. Journal of the Mining and Metallurgical Institute of Japan, 1981, 97: 431-436.
- [10] HAN S, QI C, YUAN F Y, et al. Experimental study on brittle response of shale to cryogenic fluid nitrogen treatment[J], Journal of Petroleum Science, Engineering, 2020, 194: 107463.
- [11] 赵波. 超低温环境下致密岩石孔隙力学特性研究及应用[D]. 北京:中国石油大学(北京), 2019.
- [12] ZHANG D C, LU G J, WU J, et al. Effects of ultra-low temperature and water saturation on the mechanical properties of sandstone[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56: 3377-3397.
- [13] HUANG L H, LI B, WANG B, et al. Study on mechanical properties and energy evolution of coal under liquid nitrogen freezing[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 282: 109158.
- [14] 黄路云, 李占省, 冒海军, 等. 液氮循环冷冻对岩石力学性能强度影响试验研究[J]. 土工基础, 2021, 35(5): 628-634.
- [15] 李宇白, 翟越, 李艳, 等. 冻融循环后砂岩抗冲击力学特性及数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(5): 1580-1587.
- [16] 孟凡东, 翟越, 李宇白, 等. 冻融循环作用后砂岩的动态抗拉性能及能量演化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2445-2453.
- [17] 沈明荣, 陈建峰. 岩体力学[M]. 上海:同济大学出版社, 2015.
- [18] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程岩石试验规程:SL/T 264—2020[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2020.
- [19] MARDOUKHI A, MARDOUKHI Y, HOKKA M. et al. Effects of test temperature and low temperature thermal cycling on the dynamic tensile strength of granitic rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(2): 443-454.
- [20] 蔡正宇, 张帆. 实时低温条件下花岗岩巴西劈裂试验[J]. 中国科技论文, 2022, 17(7): 789-794.
- [21] 王春权, 王成虎, 江英豪, 等. 基于不同岩石抗拉强度值确定最大水平主应力的对比分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(1): 41-47.
- [22] 郑伟, 程炯, 黎冰. 改进圆盘试验方法分析与抗拉强度公式的修正[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(4): 1104-1110.
- [23] AOKI K, HIBIYA K, YOSHIDA T, et al. Storage of refrigerated liquefied gases in rock caverns: characteristics of rock under very low temperatures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1990, 5(4): 319-325.
- [24] INADA Y, YOKOTA K. Some studies of low temperature rock strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1984, 21(3): 145-153.
- [25] 张志镇. 岩石变形破坏过程中的能量演化机制[D]. 徐州:中国矿业大学, 2013.