

DOI: 10.11779/CJGE20220981

# 冲击荷载作用下冻土劈裂拉伸破坏特性试验研究

马冬冬<sup>1,2,3,4</sup>, 汪鑫鹏<sup>2,3</sup>, 张文璞<sup>2,3</sup>, 马芹永<sup>1,2,3</sup>, 周志伟<sup>4</sup>, 张蓉蓉<sup>1,2,3</sup>

(1. 安徽理工大学矿山地下工程教育部工程研究中心, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001;

3. 安徽理工大学省部共建深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001; 4. 中国科学院西北生态环境资源研究院

冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 冻土的动力拉伸强度和破坏特性在涉及冻土工程高效破碎和安全稳定性分析领域具有重要的参考价值。为研究负温和加载率对冻土动态拉伸性能的影响, 利用铝质分离式 Hopkinson 压杆试验系统开展了冻土的动态巴西圆盘劈裂试验, 结合高速摄像系统, 分析了温度和加载率对冻土动态拉伸强度、能量耗散和破坏模式的影响, 探讨了冻土巴西圆盘的劈裂破坏机理及动态拉伸强度的影响因素。结果表明: 冲击荷载作用下, 冻结黏土和冻结砂土巴西圆盘试样均遵循中心起裂的破坏模式, 试件破坏为沿轴向相对完整的两半; 随着冲击气压的增加, 两种冻土的加载率均呈线性增大; 两种冻土达到动态拉伸峰值应力所需的时间在 92~242  $\mu\text{s}$  范围内; 两种冻土的动力拉伸强度均存在明显的温度效应和加载率效应, 动态拉伸强度随温度的降低和加载率的增加而增大; 不同负温条件下两种冻土的吸收能与动态拉伸强度均存在较好的线性关系; 冲击气压的增加会导致冻土试样的破坏程度加剧, 高剪切应力引起的三角破碎区面积逐渐增大。

**关键词:** 冻土; 动态拉伸强度; 负温; 加载率; 破坏模式

中图分类号: TU445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)07-1533-07

**作者简介:** 马冬冬(1991—), 男, 博士, 副教授, 主要从事冻土力学与本构关系方面的研究工作。E-mail: dongdonm@126.com。

## Experimental study on splitting tensile failure characteristics of frozen soils under impact loads

MA Dongdong<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Xinpeng<sup>2,3</sup>, ZHANG Wenpu<sup>2,3</sup>, MA Qinyong<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Zhiwei<sup>4</sup>, ZHANG Rongrong<sup>1,2,3</sup>

(1. Engineering Research Center of Underground Mine Construction, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology,

Huainan 232001, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001,

China; 3. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mine, Anhui University of Science

and Technology, Huainan 232001, China; 4. State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering, Northwest Institute of Eco-environment

and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The dynamic tensile strength and failure characteristics of frozen soils have important reference value in the field of efficient crushing and safety stability analysis of frozen soil projects. To study the effects of negative temperature and loading rate on the dynamic tensile properties of the frozen soils, the aluminum split Hopkinson pressure bar system is employed to conduct the dynamic Brazilian disc splitting test of frozen soil. In addition, by using the high-speed camera system, the influences of temperature and loading rate on the dynamic tensile strength, energy dissipation and failure mode of the frozen soils are analyzed. Finally, the splitting failure mechanism of the Brazilian disc and the influencing factors of dynamic tensile strength of the frozen soils are discussed. The results indicate that under the dynamic loads, the Brazilian disc specimens of frozen clay and frozen sand follow the central initiation failure mode, and the specimens are split into two relatively intact halves along the axial direction. With the increase of the impact pressure, the loading rate of two frozen soil types increases linearly, and the duration required for reaching the dynamic tensile peak stress for them is in the range of 92~242  $\mu\text{s}$ . The dynamic tensile strength of the frozen soils shows the obvious temperature effects and loading rate effects, and its values increase with the decrease of the temperature and the increase of the loading rate. There is a good linear relationship between the absorbed energy and the dynamic tensile strength of the

基金项目: 冻土工程国家重点实验室开放基金项目 (SKLFSE202004);  
安徽省高等学校自然科学研究重点项目 (KJ2020A0296); 安徽省博士  
后基金项目 (2021B556)

收稿日期: 2022-08-10

frozen soils under various negative temperature conditions. With the increase of the impact pressure, the damage degree of the frozen soil specimens is aggravated, and the triangular fracture zone area caused by high shear stress gradually increases.

**Key words:** frozen soil; dynamic tensile strength; negative temperature; loading rate; failure mode

## 0 引言

中国是世界第三冻土大国,随着“一带一路”倡议的实施,以川藏铁路、青藏高原公路、银西高铁等为代表的国家级寒区工程项目全面上马<sup>[1]</sup>,爆破作为一种重要的冻土开挖方法得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>,此外,中国西部寒区地震活动极为频繁,在项目建设和后期服役过程中,必须考虑地震荷载作用下工程的稳定性<sup>[3]</sup>。因此,开展冲击荷载作用下冻土的力学响应和破坏机理研究,对提高冻土开挖破碎效率,确保工程稳定具有重要的理论和实践意义。

作为一种典型的四相复合材料,冻土具有明显的低温脆性特征,其静态抗压和抗拉强度比在 3.1~12.1 内<sup>[4]</sup>。彭万巍<sup>[5]</sup>指出,冻土的抗拉强度是冻土工程设计的重要参数,且具有明显的温度和加载率敏感性<sup>[6]</sup>,然而,相较于抗压强度,冻土抗拉强度和破坏特性的研究相对较少。张勇敢等<sup>[7]</sup>发现冻结膨胀土的抗拉强度随加载速率的增加和温度的降低而增大。

理论分析表明,应力波作用下冻土会产生以拉伸裂纹为主的破坏模式,在冻土爆破损伤范围计算和地震荷载作用下寒区路基稳定性分析等领域,冻土的动态拉伸强度是不可忽略的重要力学参数。高应变率范围内,通常采用分离式 Hopkinson 压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)研究冻土的动态力学响应特征,目前主要侧重于冻土的动态压缩特性和本构关系<sup>[8-9]</sup>,但对冻土动态劈裂拉伸性能和破坏机理的研究较为缺乏。目前,关于煤、岩石和水泥基等工程材料劈裂拉伸特性的研究已取得丰硕成果。赵毅鑫等<sup>[10]</sup>开展了煤试样的巴西圆盘静态劈裂和冲击加载试验,发现煤的动态拉伸强度约为静态的 2.14~3.26 倍。杨仁树等<sup>[11]</sup>对比分析了 3 种岩石的动态拉伸响应特征,并借助超高速数字图像系统研究了岩石试样的表面应变场和拉伸破坏过程,发现不同类型岩石的动态拉伸强度均表现出明显的加载率效应。

基于此,本文以施工中常见的冻结黏土和冻结砂土为研究对象,利用铝质 SHPB 系统开展了不同负温和冲击气压下冻土的劈裂拉伸试验,系统地研究了温度和加载率对两种冻土动态拉伸强度、能量耗散和破坏模式的影响,探讨了冻土巴西圆盘的劈裂破坏机理及动态拉伸强度的影响因素;借助高速摄像系统,研究了冲击荷载作用下冻土试样裂纹起裂、扩展和破坏过程,研究结果可为寒区冻土工程高效破碎和稳定性

分析提供理论和试验依据。

## 1 冻土动态劈裂拉伸试验

### 1.1 巴西圆盘冻土试样制备

本次试验用原状黏土和砂土分别取自安徽淮南某地基基础和煤矿风井,原状黏土和砂土的含水率分别为 20.1%, 15.2%。采用重塑土进行试验,重塑后黏土的塑限和液限分别为 18.6%, 45.2%, 塑性指数为 26.6, 干密度为 1.72 g/cm<sup>3</sup>, 颗粒级配见表 1; 砂土的干密度为 1.65 g/cm<sup>3</sup>, 颗粒级配见表 2。冻土试样的制备过程如下: 首先, 将原状土置于 105℃ 的烘干箱内烘 24 h 以上; 其次, 将干土碾碎并过 2 mm 的筛网, 按照原状含水率将所需的蒸馏水分多次加入干土中并拌和均匀, 静置 24 h; 再次, 取一定质量的土样放入内径 37 mm、高度 18.5 mm 的不锈钢模具中并一次性击实, 经抹平和脱模后, 制备出待冻结的巴西圆盘试样; 然后, 将试样放入 -30℃ 的低温箱中冻结 24 h, 再放入试验所需温度 (-10℃、-15℃、-20℃ 和 -25℃) 的低温箱中冻结 24 h 以上; 最后, 开展动态劈裂拉伸试验。

表 1 黏土颗粒级配

Table 1 Grain-size distribution of clay

粒径/mm	0~0.075	0.075~0.45	0.45~1	1~1.6	1.6~2
百分比/%	51.33	19.72	12.02	11.48	5.45

表 2 砂土颗粒级配

Table 2 Grain-size distribution of sand

粒径/mm	0~0.075	0.075~0.45	0.45~1	1~1.6	1.6~2
百分比/%	0.8	32.29	49.54	13.23	4.14

### 1.2 SHPB 系统和冲击气压的确定

采用直径 37 mm 的铝质 SHPB 系统开展冻土的动力巴西圆盘试验, 由发射控制系统、撞击杆、波形整形器、入射杆、透射杆、吸收杆、数据采集系统和高速摄像系统组成。撞击杆、入射杆、透射杆和吸收杆的长度分别为 600, 2000, 2000, 1000 mm; 铝杆材料参数: 密度为 2700 kg/m<sup>3</sup>, 弹性模量为 70 GPa, 纵波波速为 5090 m/s; 波形整形器为直径 12 mm、高 1 mm 的紫铜片。采用高速摄像系统观测冻土试样裂纹起裂、扩展和破坏的全过程, 摄像帧频率设置为 10000 fps, 即每 100 μs 拍摄一张图片。采用外部电信号触发高速摄像系统的方法, 当入射杆上的电阻应变片采集入射波信号后, 应变片将入射波信号转换为电压信号,

再经过超动态应变仪将信号传递到高速摄像机的外部接口, 即可触发高速摄像机开始工作, 从而实现记录试件破坏全过程的目的。

在 SHPB 劈裂拉伸试验中, 当裂纹从巴西圆盘中心处萌生并沿加载方向扩展, 即试样产生平行于冲击方向的主裂纹, 且沿加载轴方向劈裂为两部分时, 试验结果是有效的<sup>[12]</sup>。因此, 开展了不同冲击气压下两种冻土的动态巴西圆盘预试验, 结果表明, 当冲击气压过大时, 冻土试样会出现压缩破坏模式, 与劈裂拉伸破坏特征不符, 最终确定冻结黏土和冻结砂土的最大冲击气压分别为 0.15, 0.13 MPa。

基于一维应力波理论和应力均匀性假设, 试样两端荷载  $P$  和中心处拉伸应力  $\sigma_t$  分别为<sup>[13]</sup>

$$P(t) = AE\varepsilon_t, \quad (1)$$

$$\sigma_t(t) = \frac{2P(t)}{\pi D_s B} \quad (2)$$

式中:  $A$  和  $E$  分别为杆的横截面面积和弹性模量;  $\varepsilon$  为应变;  $D_s$  和  $B$  分别为试样的直径和厚度。

### 1.3 加载率的确定方法

加载率可通过拉伸应力历史确定, 图 1 为 0.13 MPa 冲击气压下  $-15^\circ\text{C}$  冻结砂土的拉伸应力时程曲线, 将峰值应力前近似线性变化曲线段的斜率定义为加载率。

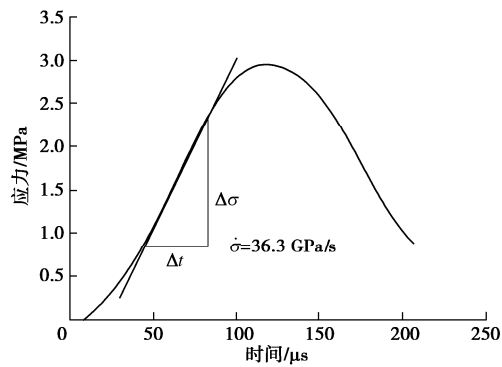


图 1 动态劈裂拉伸试验中加载率的确定方法

Fig. 1 Determination method of loading rate in dynamic splitting tensile tests

### 1.4 冻土动态劈裂拉伸能量耗散计算方法

SHPB 试验中应力波传播时携带的能量为<sup>[14]</sup>

$$W_i(t) = AEC_b \int \varepsilon_i^2(t) dt \quad (i = I, R, T) \quad (3)$$

式中:  $W_I$ ,  $W_R$  和  $W_T$  分别为入射波、反射波和透射波携带的能量;  $C_b$  为杆的弹性波波速;  $\varepsilon_I(t)$ ,  $\varepsilon_R(t)$ ,  $\varepsilon_T(t)$  分别为入射波、反射波和透射波的应变。

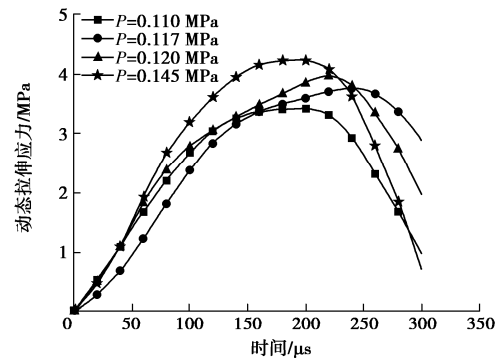
假设杆件与试样间接触面的能量损耗可忽略不计, 试样在破坏过程中所吸收的能量  $U$  为

$$U = W_I - W_R - W_T \quad (4)$$

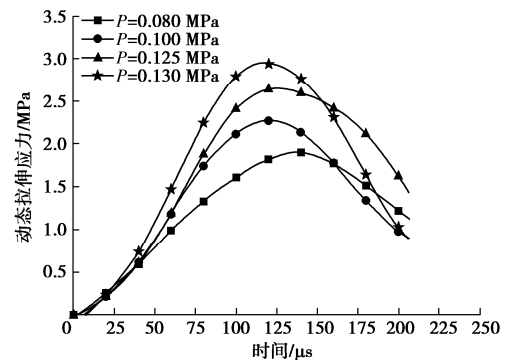
## 2 冻土动态劈裂拉伸试验结果与分析

### 2.1 冻土动态拉伸应力-时间曲线分析

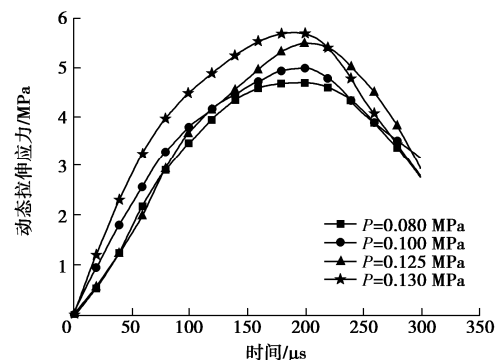
图 2 为不同负温下, 冻结黏土和冻结砂土的动态拉伸应力-时间曲线。相同负温下, 两种类型冻土的动



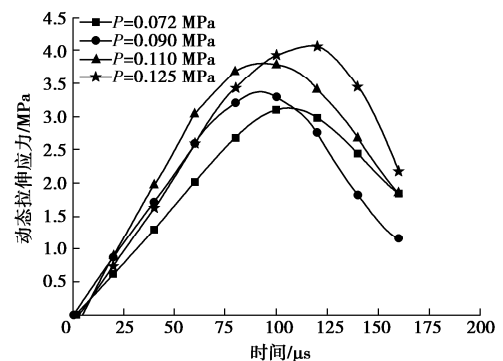
(a) 冻结黏土,  $-15^\circ\text{C}$



(b) 冻结砂土,  $-15^\circ\text{C}$



(c) 冻结黏土,  $-25^\circ\text{C}$



(d) 冻结砂土,  $-25^\circ\text{C}$

图 2 冻土动态拉伸应力-时间曲线

Fig. 2 Dynamic tensile stress-time curves of frozen soils

态拉伸峰值应力均随冲击气压的增加而增大;动态冲击加载过程中,冻结黏土试样达到峰值应力所需的时间在 189~242  $\mu\text{s}$  内,而冻结砂土为 92~139  $\mu\text{s}$ 。研究表明,巴西圆盘试样达到峰值应力时其中心位置会出现拉伸裂纹<sup>[15]</sup>,因此,本次试验条件下,冻结砂土试样发生拉伸破坏所需的时间少于冻结黏土,两种冻土试样的拉伸破坏过程将在后续部分进一步分析。

## 2.2 冻土动态拉伸强度的加载率效应和温度效应

不同温度下冻土加载率和冲击气压的关系见图 3。可以看出,随着冲击气压的增加,冻土的加载率呈线性增大;冲击气压相同时,随着温度的降低,冻土的脆性增强,加载率增大。例如,0.12 MPa 冲击气压时,冻结黏土和冻结砂土试样在-10℃时的加载率分别为 19.5, 25.5 GPa/s,而-15℃, -20℃和-25℃时冻结黏土的加载率分别为 27.2, 32.4, 44.3 GPa/s,增幅依次为 139%, 166%, 227%;-15℃, -20℃和-25℃时冻结砂土的加载率分别为 31.2, 34.4, 45.5 GPa/s,增幅依次为 122%, 134%, 178%。

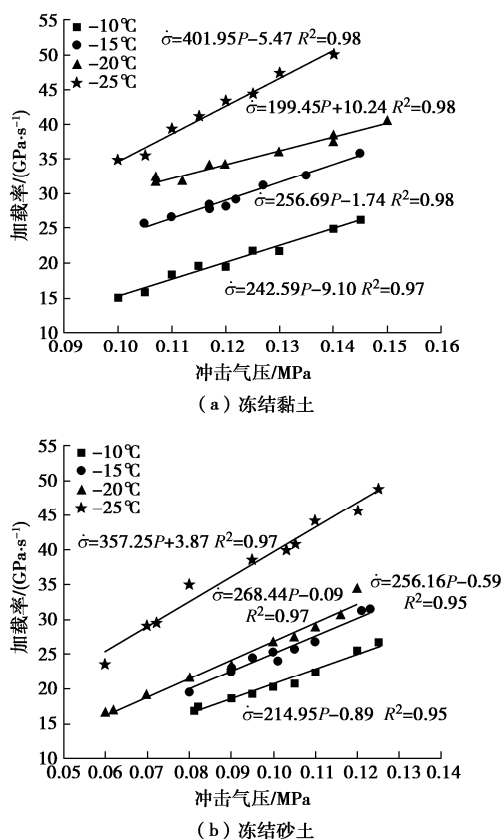


图 3 冻土加载率和冲击气压的关系

Fig. 3 Relationship between loading rate of frozen soils and impact pressure

冻土动态拉伸强度和加载率之间的关系见图 4,二者呈现较好的正相关性。不同负温下,冻结黏土和冻结砂土动态拉伸强度均随加载率的增加而增大,表现出明显的加载率增强效应,且两种冻土的强度增幅受到负温的影响。本次试验条件下,当加载率从 20.4

GPa/s 增加到 30.5 GPa/s 时, -10℃、-15℃和-20℃时对于冻结砂土动态拉伸强度分别提高了 18%, 10%, 7%;当加载率从 34.8 GPa/s 增加到 48.7 GPa/s 时, -20℃的冻结黏土和冻结砂土动态拉伸强度分别提高了 31%, 19%。

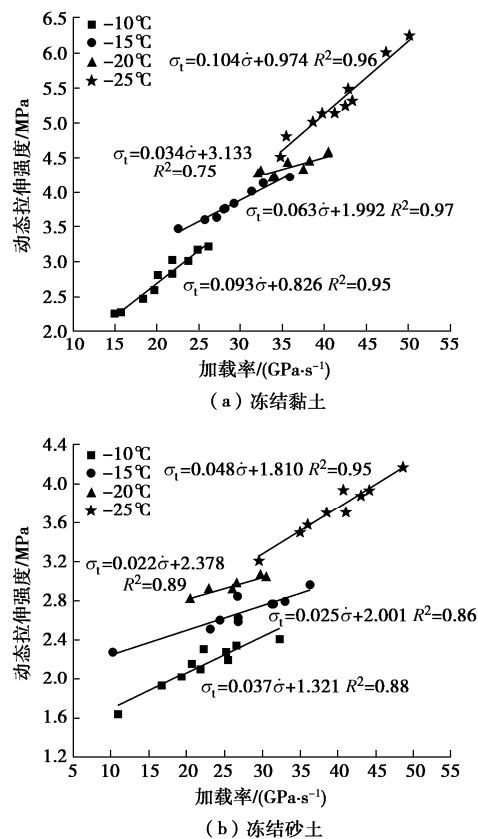


图 4 冻土动态拉伸强度和加载率的关系

Fig. 4 Relationship between dynamic tensile strength and loading rate of frozen soils

图 4 可知,相同加载率范围内,冻土动态拉伸强度随温度的降低而提高。在此,尝试从冻土四相组成的角度出发,分析冻土巴西圆盘劈裂破坏机理及动态拉伸强度的影响因素,见图 5。Zhou 等<sup>[16]</sup>研究了冻土抗拉强度的产生机制,认为冻土的抗拉强度主要受有效含冰量、冰颗粒抗拉强度和土颗粒与冰水混合物之间胶结力等因素的影响,并分析了不同温度范围内各因素对冻土抗拉强度的贡献占比。冲击荷载作用下,冻土巴西圆盘试样共存在 3 种颗粒破坏模式:土颗粒与冰颗粒间的胶结面破坏、土颗粒间的胶结面破坏和冰颗粒破坏。其中,土颗粒之间的胶结力对冻土抗拉强度的贡献很小,可忽略不计。

分析认为,随着温度的降低,冻土内有效含冰量、冰的抗拉强度以及土颗粒与冰水混合物之间的胶结力均逐渐增加,因此,冰颗粒和土颗粒与冰颗粒间的胶结面达到破坏状态所需的能量增加,宏观上表现为冻土动态拉伸强度增大。



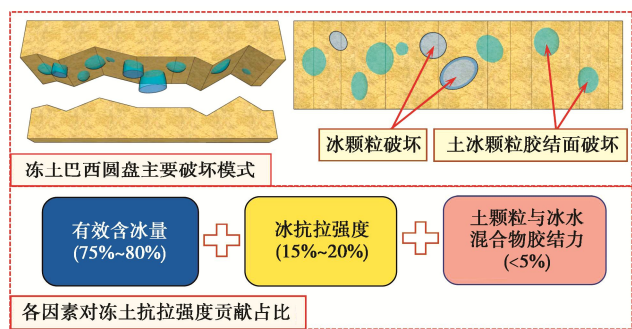


图 5 冻土巴西圆盘劈裂破坏机理及动态拉伸强度的影响因素

Fig. 5 Splitting failure mechanism of Brazilian disc and influencing factors of dynamic tensile strength of frozen soil

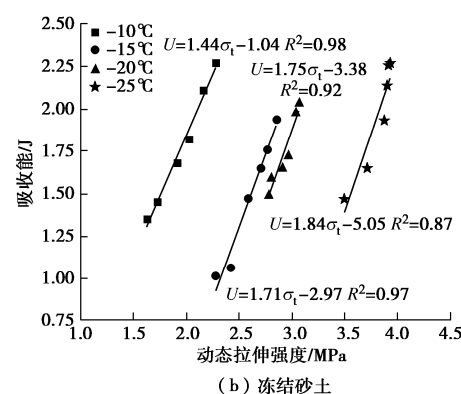
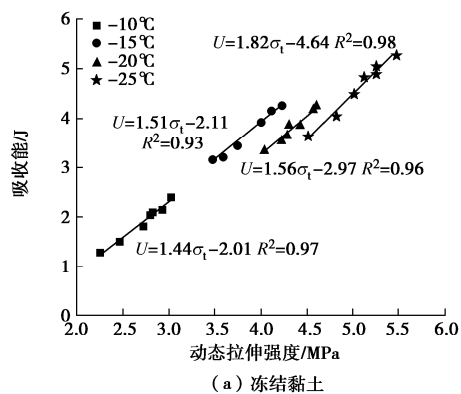


图 6 冻土动态拉伸强度与吸收能关系

Fig. 6 Relationship between dynamic tensile strength and absorption energy of frozen soils

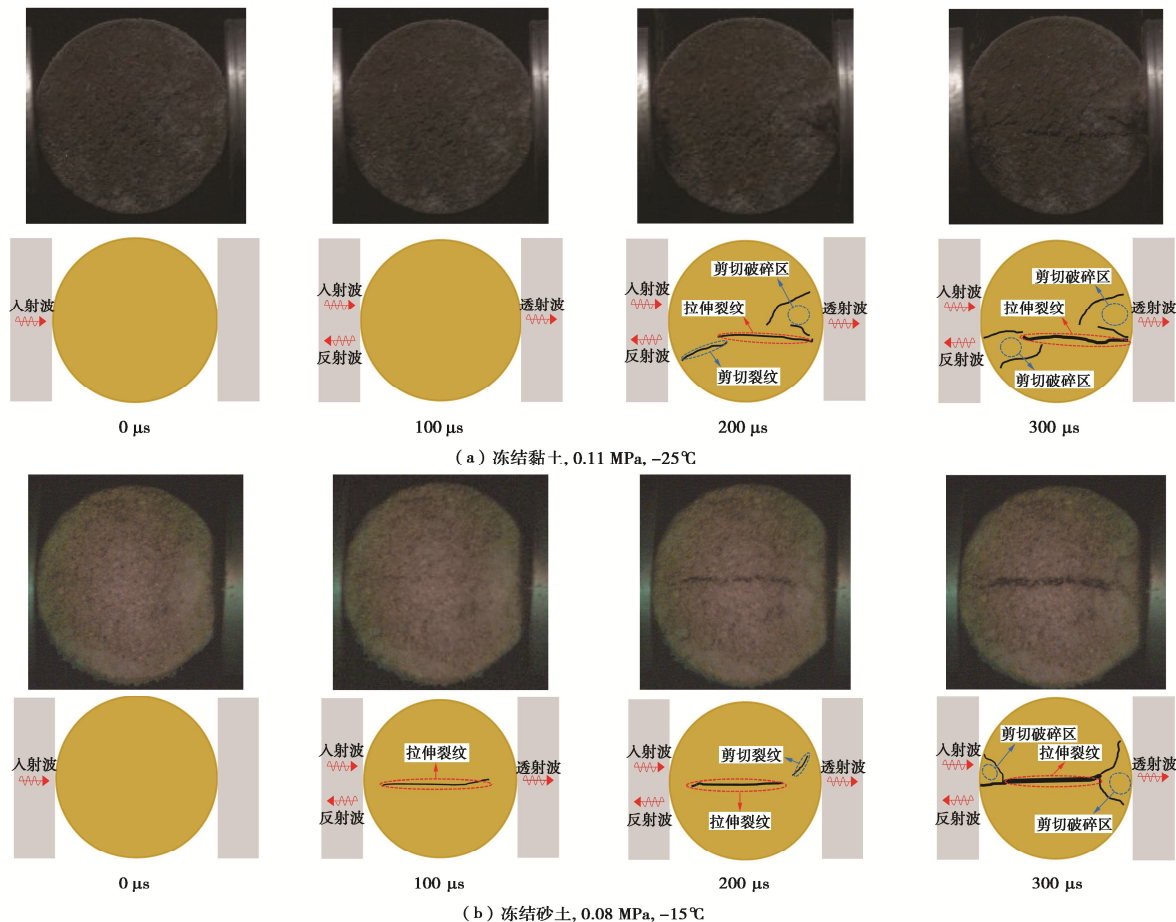










图 7 冻土试样动态劈裂拉伸破坏过程

Fig. 7 Dynamic splitting tensile failure process of frozen soil specimens

表 3 冻土试样劈裂破坏模式  
Table 3 Splitting failure modes of frozen soil specimens

土质类型	温度/℃	冲击气压/MPa			
		0.10	0.11	0.12	0.13
冻结黏土	-15				
冻结砂土	-10				

始出现拉伸裂纹，随着拉伸应力的增大，裂纹沿加载方向迅速向试样两端扩展，并形成导致试样破坏的拉伸裂缝，与此同时，在试样和杆件的接触位置的剪切应力逐渐增加，损伤累积并最终形成由高剪切应力引起的三角破碎区。因此，冻土动态巴西圆盘劈裂试验的破坏形态满足中心起裂的破坏方式。

应力逐渐增加，损伤累积并最终形成由高剪切应力引起的三角破碎区。因此，冻土动态巴西圆盘劈裂试验的破坏形态满足中心起裂的破坏方式。

当加载时间为 100 μs 时，冻结黏土试样中心位置并未出现拉伸裂纹，而冻结砂土试样可观察到明显的拉伸裂纹，说明本次试验条件下，冻结黏土试样的起裂时间要晚于冻结砂土，该现象与动态拉伸应力-时间曲线中峰值应力对应起裂时间的规律相符。

表 3 为相同负温条件下，不同冲击气压时冻结黏土和冻结砂土的最终劈裂破坏模式。温度相同时，随着冲击气压增加，冻结黏土和冻结砂土试样的破坏程度随之加剧，表现为局部三角破碎区面积增大，且在本次试验条件下，冻结砂土试样的破碎区更为明显。在此，尝试从试样破坏的角度分析冻土动态拉伸强度存在加载率增强效应的内在机理，通过以上分析可知，冻土的加载率随冲击气压的增加而增大，在低冲击气压条件下，冻土内部微裂纹逐渐汇聚，并最终贯通形成宏观裂纹，导致试件破坏为沿轴向相对完整的两半，随着冲击气压的增大，试件会产生更多的裂纹分叉，即局部三角破碎区面积增加，此过程需要吸收更多的能量，在宏观上表现为拉伸强度增大。

3 结 论

开展了不同负温和加载率下冻结黏土和冻结砂土的动态巴西圆盘劈裂试验，从力学和能量耗散的角度

分析了冻土的劈裂拉伸性能，借助高速摄像系统研究了冻土的动态劈裂拉伸破坏特性，得到以下两点结论。

(1) 随着冲击气压的增加，冻土的加载率呈线性增大，两种冻土的动态拉伸强度均随加载率的增加和温度的降低逐渐增大；不同负温条件下，冻土试样的吸收能与动态拉伸强度均呈正线性相关。

(2) 本次试验条件下，冻结砂土巴西圆盘试样达到动态拉伸峰值应力所需的时间要早于冻结黏土；冻土试样的初始裂纹出现在圆盘中心位置，且冻结黏土的裂纹出现时间要晚于冻结砂土，此后裂纹逐渐沿加载方向扩展并形成拉伸裂缝，与此同时，在试样和杆件的接触位置会形成由高剪切应力引起的三角破碎区；随着冲击气压的增加，巴西圆盘冻土试样的破坏程度加剧，三角破碎区面积增大。

参考文献：

[1] 薛翊国, 孔凡猛, 杨为民, 等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 445-468. (XUE Yiguo, KONG Fanmeng, YANG Weimin, et al. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along Sichuan-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 445-468. (in Chinese))

[2] 胡英国, 吴新霞, 赵 根, 等. 严寒条件下岩体开挖爆破振动安全控制特性研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 2139-2146. (HU Yingguo, WU Xinxia, ZHAO Gen, et al. Investigation of safety control for rock blasting excavation under cold condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 2139-2146. (in Chinese))

[3] 张熙胤, 于生生, 王万平, 等. 多年冻土区铁路桥梁高承台桩基础地震破坏机理及易损性研究[J]. 土木工程学报,

- 2022, **55**(7): 77-89. (ZHANG Xiyin, YU Shengsheng, WANG Wanping, et al. Seismic failure mechanism and fragility of pile foundation with elevated cap of railway bridge in permafrost region[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, **55**(7): 77-89. (in Chinese))
- [4] 马芹永. 人工冻土单轴抗拉、抗压强度的试验研究[J]. 岩土力学, 1996, **17**(3): 76-81. (MA Qinyong. Tensile strength, uniaxial compressive strength test on artificially frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, **17**(3): 76-81. (in Chinese))
- [5] 彭万巍. 冻结黄土抗拉强度与应变率和温度的关系[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(3): 31-33. (PENG Wanwei. Tensile strength of frozen loess varying with strain rate and temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(3): 31-33. (in Chinese))
- [6] 陈有亮, 王 明, 徐 珊, 等. 上海人工冻结软黏土抗压抗拉强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(7): 1046-1051. (CHEN Youliang, WANG Ming, XU Shan, et al. Tensile and compressive strength tests on artificial frozen soft clay in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(7): 1046-1051. (in Chinese))
- [7] 张勇敢, 鲁 洋, 刘斯宏, 等. 基于巴西劈裂试验的冻结膨胀土拉伸特性研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(11): 2046-2054. (ZHANG Yonggan, LU Yang, LIU Sihong, et al. Experimental study on tensile strength of frozen expansive soils based on Brazilian splitting tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(11): 2046-2054. (in Chinese))
- [8] 马冬冬, 马芹永, 黄 坤, 等. 动静组合加载下不同负温人工冻结粉质黏土强度和变形特性分析[J]. 振动与冲击, 2022, **41**(1): 154-160. (MA Dongdong, MA Qinyong, HUANG Kun, et al. Strength of artificially frozen silty clay with different negative temperatures under dynamic and static combined loading and deformation characteristic analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, **41**(1): 154-160. (in Chinese))
- [9] ZHU Z W, JIA J X, ZHANG F L. A damage and elastic-viscoplastic constitutive model of frozen soil under uniaxial impact loading and its numerical implementation[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, **175**: 103081.
- [10] 赵毅鑫, 肖 汉, 黄亚琼. 霍普金森杆冲击加载煤样巴西圆盘劈裂试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(2): 286-291. (ZHAO Yixin, XIAO Han, HUANG Yaqiong. Dynamic split tensile test of Brazilian disc of coal with split Hopkinson pressure bar loading[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(2): 286-291. (in Chinese))
- [11] 杨仁树, 李炜煜, 李永亮, 等. 3种岩石动态拉伸力学性能试验与对比分析[J]. 煤炭学报, 2020, **45**(9): 3107-3118. (YANG Renshu, LI Weiyu, LI Yongliang, et al. Comparative analysis on dynamic tensile mechanical properties of three kinds of rocks[J]. Journal of China Coal Society, 2020, **45**(9): 3107-3118. (in Chinese))
- [12] XIA K W, YAO W. Dynamic rock tests using split Hopkinson (Kolsky) bar system—A review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015, **7**(1): 27-59.
- [13] DAI F, XIA K W. Loading rate dependence of tensile strength anisotropy of barre granite[J]. Pure and Applied Geophysics, 2010, **167**(11): 1419-1432.
- [14] 平 琦, 马芹永, 袁 璞. 岩石试件 SHPB 劈裂拉伸试验中能量耗散分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, **30**(3): 401-407. (PING Qi, MA Qinyong, YUAN Pu. Energy dissipation analysis of stone specimens in SHPB tensile test[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, **30**(3): 401-407. (in Chinese))
- [15] PEI P D, DAI F, LIU Y, et al. Dynamic tensile behavior of rocks under static pre-tension using the flattened Brazilian disc method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, **126**: 104208.
- [16] ZHOU G Q, HU K, ZHAO X D, et al. Laboratory investigation on tensile strength characteristics of warm frozen soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, **13**: 81-90.