

原创技术策源地

单轴冲击荷载下冻土能量耗散特性试验研究

Experimental Study on Energy Dissipation Characteristics of Frozen Soil Under
Uniaxial Impact Loading

刘天乐, 张恒, 吴飞岐, 刘乘兵(中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院, 北京 100083)

摘要:为研究应变率和含水率对冻土能量耗散的影响,通过 $\phi 50$ mm分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar)动力学试验,综合研究了不同冲击速度(4~10 m/s)、不同含水率条件(9%~18%)下冻结黏土的能量耗散特性。试验结果表明:(1)从耗散能的角度将冻土破坏吸能过程分为3个阶段:缓慢增长、快速增长和趋于稳定阶段;耗散能、反射能和透射能与入射能间呈一次函数正相关($R^2 > 0.94$),且入射能、反射能、透射能和耗散能与平均应变率间也存在线性正相关关系($R^2 > 0.87$);随含水率增加,能量反射系数、能量透射系数和能量耗散系数分别呈先递减后增加、先递增后减少和先递增后减少趋势。研究成果为冻土区爆破工程施工提供借鉴参考。

关键词:冻结黏土;霍普金森压杆;含水率;平均应变率;能量耗散特性

中图分类号: TD985 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)02-0001-06

Abstract: In order to study the effects of strain rate and water content on energy dissipation of frozen clay, the energy dissipation characteristics of frozen clay under different impact velocities (4~10 m/s) and different water content conditions (9%~18%) were investigated comprehensively by means of $\phi 50$ mm Split Hopkinson Pressure Bar kinetic test. The test results show that: (1) from the perspective of dissipation energy, the energy absorption process of frozen clay damage is divided into three stages: slow growth, rapid growth and stabilization; there is a positive primary function correlation between dissipation energy, reflected energy and transmissive energy and incident energy ($R^2 > 0.94$), and there is also a linear positive correlation between incident energy, reflected energy, transmissive energy and dissipation energy and average strain rate ($R^2 > 0.87$); with As the water content increased, the energy reflection coefficient, energy transmission coefficient and energy dissipation coefficient showed decreasing and then increasing, increasing and then decreasing trends, respectively. The results of the study provide reference for the construction of blasting projects in permafrost areas.

Key words: frozen clay; Hopkinson pressure rod; water content; average strain rate; energy dissipation characteristics

1 前言

随着社会经济的发展、国防建设的需要,以及“西部大开发”和“一带一路”发展战略的实施,我国冻土区的工程建设日渐增多,例如水利工程、矿山及能源工程、铁路工程等随之兴起^[1]。此外,利用人工冻结凿井技术开展深部矿井和进行地下工程时,也会涉及到隧道掘进等一系列复杂问题。在冲击荷载作用下冻土内部裂纹不断发育扩展至贯通破坏,

这一过程必然伴随的能量的转化,研究冻土在动荷载作用下能量耗散规律有利于提高爆破能量的利用率,起到节约成本的作用。

冻土是温度低于 0°C 且被冰晶颗粒胶结的特殊岩土,是由固体土颗粒、冰晶体、水以及气体组成的典型四相非均质材料。温度、含水率以及外部应力等影响冻土中的冰的含量和分布,进而影响冻土能量耗散规律。目前,国内外学者研究冻土能量耗散的成果较多。如 Yang Yugu 等^[2]利用伺服控制 MTS810 设备探讨冻结粉土应变能耗散与释放的传递过程,基于能量耗散和能量释放原理建立了冻土破坏行为分析框架及强度准则。Baoyuan Wang 等^[3]对根河粉质黏土进行不同温度下单轴压缩试验,认为随着温度降低,试样破坏前吸收的弹性应变能和耗散的塑性应变能呈非线性增加。Yuanming

[作者简介] 刘天乐(2000—),男,河北邯郸人,硕士,主要从事煤岩动力灾害防治等方面的研究工作。

[基金项目] 中国矿业大学(北京)大学生创新性实验计划项目(202212035)

[引用格式] 刘天乐,张恒,吴飞岐,等. 单轴冲击荷载下冻土能量耗散特性试验研究[J]. 中国矿山工程,2023,52(2):1-6.

Lai 等^[4]对冻结盐渍砂土进行了三轴压缩试验,并基于能量耗散理论结合非关联流动法则,建立了冻结盐渍砂土双屈服面旋转硬化模型。陈斌等^[5]采用分离式霍普金森杆装置进行不同冲击气压和不同含水率冻土的组合体冲击压缩试验,探讨了混凝土-冻土组合体能量耗散规律,认为试样含水率超过冻土饱和含水率后组合体的吸收能减少。Qinyong Ma 等^[6]采用分离式霍普金森杆研究不同冻土类型、冻结温度对能量吸收率的影响,认为冻结温度与能量吸收率呈负相关,且冻土类型也会导致能量吸收率的差异。并对预裂冻土进行单轴冲击压缩试验,研究了预制裂隙对冻土能量耗散和分形维数的影响^[7]。上官志浩^[8]采用分离式霍普金森杆对预制孔洞冻土进行冲击加载,分析了预制孔洞直径对试样能量耗散效率的影响,并基于能量角度构建了描述孔洞缺陷冻土试样的本构模型。Tiantian Fu 等^[9]利用分离式霍普金森压杆分析了冲击荷载下冻结砂土的能量耗散特性,认为能量耗散密度与入射能量呈线性关系,表现出显著的速率依赖性。

前人研究成果无疑为冻土工程提供了理论依据和科学基础,然而对于不同含水率冻土在动载荷作用下的能量耗散研究仍十分有限。为进一步探讨应变率和含水率对冻土能量耗散特性的影响,基于前人研究的基础上,采用分离式霍普金森杆试验装置对冻结白黏土开展冲击试验,分析冻土能量演化特征,以为冻土工程建设提供一定的指导作用。

2 SHPB 试验系统及冻土试样制备

2.1 试验试样制备

试验土样取自石家庄某矿白黏土,土样化学成分检验结果见表 1。冻土试样的制备过程如下:将土样置于 105 ~ 110 °C 温度下烘干 24 h 以上,放入干燥器中冷却至室温;将干土粉碎过 2 mm 筛网,按照实验设计含水率将所需蒸馏水分多次加入,充分搅拌后密封处理静置 24 h;按照《土工实验方法标准》,取一定质量的土样均分 3 次放入内径 39 mm,高度 11 mm 的不锈钢模具中一次性击实,脱模后在待冻结的土样上涂上凡士林,达到抑制水分蒸发效果;将制备好的土样密封,在 -10 °C 的低温箱中冻结 24 h 后开展单轴动态冲击试验^[10]。

表 1 土样化学成分

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	烧失量
52.6%	31.6%	1.29%	1.68%	1.23%	5.65%

2.2 SHPB 试验装置及基本原理

利用分离式霍普金森杆开展冻土试样进行单轴冲击压缩试验,试验装置如图 1 所示。其中撞击杆长度为 0.8 m,入射杆、透射杆和吸收杆长度分别为 3.0 m、2.5 m 和 1.0 m,直径为 50 mm。杆件材料均为 7A04(因冻土试样属于软介质,采用铝杆可以得到较好的数据采集效果),密度为 2 700 kg/m³,纵波波速为 5 163 m/s,弹性模量为 720 GPa,采用 LK2107 超动态应变仪进行数据采集。

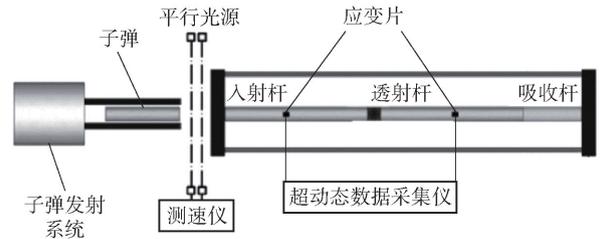


图 1 霍普金森杆试验装置

SHPB 试验应满足两个基本假定:杆件上的应力波始终为一维应力波,且传播方向为单向,避免波形弥散效应影响试验结果;应力波传播过程中满足均匀性假设,沿试样长度截面的应力、应变均匀分布。典型冻土试样两端应力结果如图 2 所示,入射应变与反射应变相加得到的曲线与透射应变曲线基本重合,表明试验过程中冻土试样两端受力基本相等,可认为满足应力平衡条件。

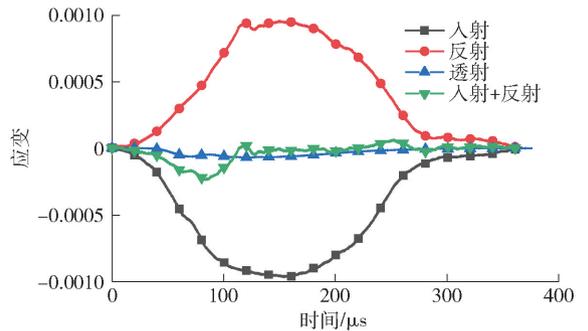


图 2 冻土动态应力平衡检验

采用三波法进行冻土试样数据处理^[11],在霍普金森杆试验从开始加载到卸载的过程中,试件所受入射能 $w_i(t)$ 、透射能 $w_t(t)$ 和反射能 $w_r(t)$ 通过下式计算^[12]:

$$W_i(t) = AEC_0 \int_0^t \varepsilon_i^2(t) dt \quad (1)$$

$$W_r(t) = AEC_0 \int_0^t \varepsilon_r^2(t) dt \quad (2)$$

$$W_i(t) = AEC_0 \int_0^t \varepsilon_i^2(t) dt \quad (3)$$

其中, A 为弹性杆件截面面积, E 为杆件弹性模量 C_0 为杆件纵波波。

试验中撞击杆产生的入射能部分能量沿弹性杆释放,部分能量用于冻土试样的变形和破坏。在冻土的霍普金森杆实验中,总耗散能绝大部分用于试样的塑性变形、裂纹生成和扩展以及断裂面的产生,破碎飞出产生的动能所占比例较小,可忽略不计。若忽略冻土试样与杆件间的摩擦耗能以及破坏产生的电磁能、声能等,根据能量守恒原理,则可以认为冲击作用下试样的耗散能 $w_s(t)$ 为入射能与反射能、透射能的差值,有:

$$w_s(t) = w_i(t) - [w_r(t) + w_t(t)] \quad (4)$$

2.3 试验方案

在 SHPB 试验中以子弹冲击速度(4 ~ 10 m/s)和冻土含水率(9% ~ 18%)作为变量,共进行 16 组动态冲击试验。冲击前在冻土试样及杆件端面涂抹凡士林,可减小端面的摩擦效应。并确保透射杆与入射杆同心对正,无反射波产生,保证应力波在杆件与试样间正常传播^[13]。

3 冻土动态冲击试验结果及分析

3.1 冻土 SHPB 试验能量历程分析

不同含水率、平均应变率条件下冻土能量历程曲线规律基本相同,选取代表性能量时程进行分析。图 3 所示为含水率 9%、平均应变率为 400 s⁻¹ 的冻土 SHPB 能量时程曲线。

因冻土属于低波阻抗材料,大部分入射能转换为反射能,反射能所占比例达 90% 以上,而透射能和耗散能所占比例较少。在 0 ~ 50 μs 入射能、反射能和透射能增长较为缓慢,50 ~ 250 μs 内入射能、反射能和耗散能快速增长,但耗散能增速较低,透射能无明显增加,在 250 μs 之后,入射能、反射能和透射

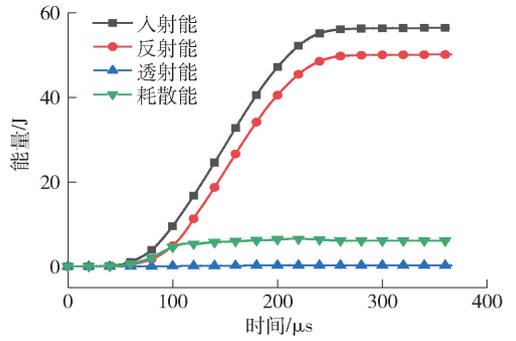


图3 冻土能量历程曲线

能逐渐趋于稳定^[14]。从耗散能的角度将冻土试样的破坏吸能过程分为 3 个阶段:

(1) 第一阶段: 0 ~ 50 μs 内, 在上升沿应力波作用下冻土试样被压缩, 此时处于弹性变形阶段, 此阶段内吸收的能量以弹性能的方式储存在试样内部, 耗散能增加缓慢。

(2) 第二阶段: 50 ~ 150 μs 内, 由于冻土试样与杆件之间波阻抗不匹配, 冻土试样入射端产生大量反射能, 并有一小部分应力波透过冻土试样形成透射能。应力波在入射杆、冻土试样以及透射杆间来回传播, 各能量得到补充, 因此在 SHPB 能量历程中呈现增长趋势。因冻土试样抗压强度小于应力波强度, 其内部会产生损伤演化和积累, 导致原生裂隙扩展并且产生新的裂纹和孔隙, 耗散能表现出快速增长趋势。其中入射能和反射能增长趋势近似相等, 耗散能增长趋势远低于入射能和反射能, 而透射能因透过冻土试样的能量较少所以无明显增加。

(3) 第三阶段: 150 ~ 250 μs 内, 该阶段内冻土试样裂纹贯通形成破坏, 同时由于内部储存的弹性能释放, 耗散能增长趋势逐渐趋于稳定。

3.2 反射能、透射能和耗散能与入射能关系

对表 2 中入射能、反射能、透射能以及耗散能进行拟合, 各能量之间的关系如图 4 所示。结果表明

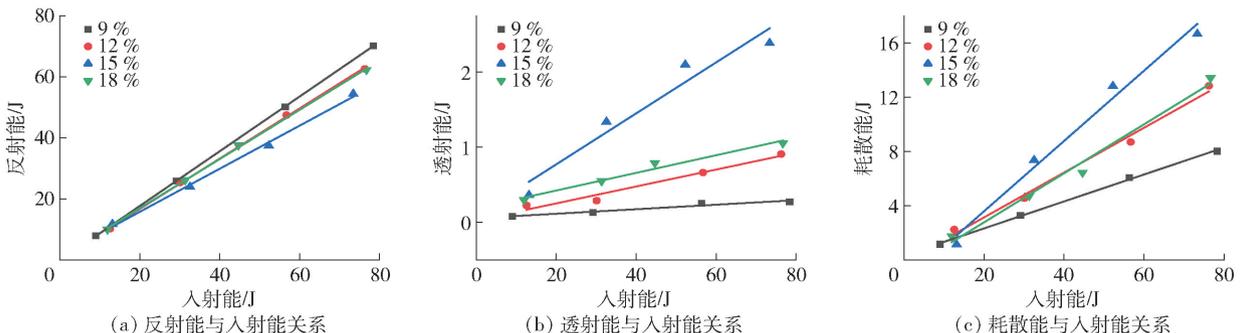


图4 反射能、透射能和耗散能与入射能关系

冻土试样反射能和透射能、耗散能与入射能均呈现一次函数正相关关系,这表明随着入射能的增加有更多的能量被反射、透射和吸收。为进一步研究各能量间的关系,利用反射、透射和耗散能量与入射能的比值来分析能量耗散特性,能量反射系数 R 、能量透射系数 T 和能量耗散系数 D 由下式计算:

$$T = \frac{W_t}{W_i} \quad (5)$$

$$R = \frac{W_r}{W_i} \quad (6)$$

$$D = \frac{W_s}{W_i} \quad (7)$$

表2 冻土动态冲击能量计算结果

编号	含水率/ %	平均应变 率/s ⁻¹	入射能/ J	反射能/ J	透射能/ J	耗散能/ J	能量反射 系数	能量透射 系数	能量耗散 系数
BN-9-1	9	146	9.022	7.806	0.078	1.138	0.865	0.009	0.126
BN-9-2	9	282	29.154	25.769	0.129	3.256	0.884	0.004	0.111
BN-9-3	9	400	56.343	50.043	0.251	6.049	0.888	0.004	0.107
BN-9-4	9	530	78.327	70.061	0.271	7.995	0.894	0.003	0.102
BN-12-1	12	176	12.572	10.129	0.223	2.220	0.805	0.018	0.177
BN-12-2	12	230	30.076	25.263	0.287	4.526	0.840	0.010	0.150
BN-12-3	12	476	56.673	47.340	0.660	8.673	0.835	0.012	0.153
BN-12-4	12	500	76.203	62.481	0.907	12.815	0.820	0.012	0.168
BN-15-1	15	202	13.170	11.684	0.361	1.125	0.887	0.027	0.085
BN-15-2	15	272	32.541	23.862	1.337	7.342	0.733	0.041	0.226
BN-15-3	15	395	52.238	37.342	2.098	12.798	0.714	0.040	0.245
BN-15-4	15	545	73.327	54.299	2.384	16.644	0.741	0.033	0.227
BN-18-1	18	180	13.170	11.684	0.361	1.125	0.830	0.025	0.145
BN-18-2	18	226	32.541	23.862	1.337	7.342	0.832	0.017	0.150
BN-18-3	18	308	52.238	37.342	2.098	12.798	0.839	0.018	0.144
BN-18-4	18	443	73.327	54.299	2.384	16.644	0.811	0.014	0.175

备注:BN代表白黏土;中间的数字代表含水率;右边的数字代表第几组。例如BN-9-1表示第一组含水率为9%的白黏土。

表3 各含水率一次函数拟合结果

含水率	反射能			透射能			耗散能		
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
9	0.898	-0.367	0.999	0.003	0.052	0.952	0.099	0.315	0.999
12	0.823	0.168	0.999	0.011	0.025	0.969	0.165	-0.193	0.991
15	0.707	1.531	0.996	0.034	0.091	0.941	0.259	-1.622	0.985
18	0.807	0.682	0.999	0.012	0.187	0.974	0.181	-0.869	0.987

3.3 含水率对冻土试样能量耗散特性的影响

根据表2能量系数数据,得到含水率对冻土试样能量反射系数的影响如图5(a)所示,可以发现反射系数高于0.70,表明应力波携带的能量大部分以反射能形式耗散。当含水率低于15%时能量反射系数总体上呈递减趋势,原因可能在于冻土试样内部存在一定的微裂隙和孔洞,在低温条件下水分子进入缺陷中试样内部结构更加致密^[15]。含水率高于15%时呈现增长趋势,分析认为:一方面含水率的增大导致冻土试样波阻抗减小,由一维应力波理论可知反射系数绝对值不断增大;另一方面,应变片所测到的应力波信号实际上是波在冻土试样中多次

透、反射后的结果,由于水分对冻土试样抗变形能力的弱化作用,多次透反射过程中有更多的裂纹产生导致反射面增多,更多的应力波能量以反射波形式回到入射杆中^[16]。

由图5(b)可以看出,冻土试样的能量透射系数整体上呈现先增加后减少趋势,与能量反射系数呈相反的趋势,原因已在能量反射系数内容解释,此处不再赘述。

冻土试样能量耗散系数随含水率变化如图5(c),其中含水率为15%、平均应变率为176 s⁻¹试样能量耗散系数表现异常,原因可能在于冻土制备时未充分压密导致波阻抗减小。平均应变率高于

176 s⁻¹的试样能量耗散系数在含水率低于15%时,冰胶结作用增强,试样产生的新裂纹比原生裂隙吸收更多能量,能量耗散系数逐渐增加。含水率高于15%时呈减少趋势,分析认为含水率高于15%时,

冻结形成的冰晶破坏土颗粒间连结作用,进而促进冻土内部裂纹的扩展和发育,对试样孔隙造成的损伤随之增大,试样吸收较少的能量就发生破坏^[17]。

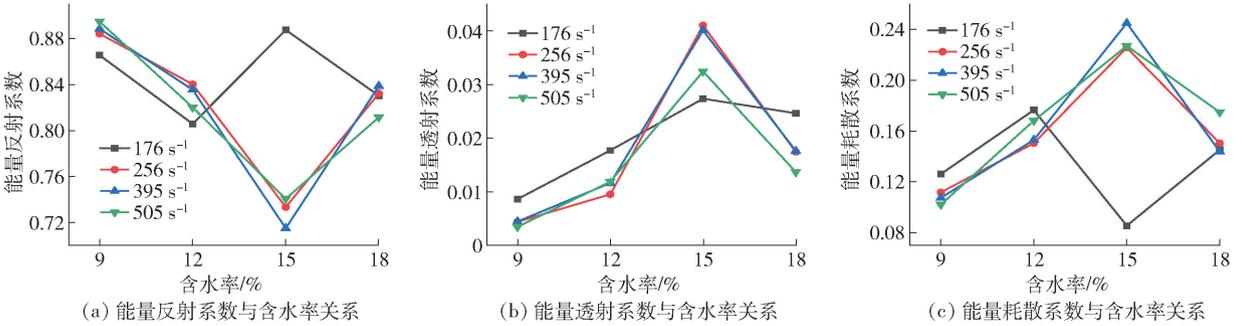


图5 能量系数与含水率关系

3.4 平均应变率对冻土试样能量耗散的影响

从图6中可以发现,随着平均应变率增加,入射能、反射能、透射能和耗散能均与平均应变率表现出一函数关系。以BN-9-1为例,当平均应变率由146 s⁻¹增至545 s⁻¹时,入射能由7.022 J增至78.327 J,反射能由7.806 J增至70.061 J,透射能由0.078 J增至0.271 J,耗散能由1.138 J增至7.995 J,增幅分别为1115.5%、897.5%、347.4%、

702.5%,入射能的增长速度及增幅最大,透射能量变化幅度最小。试样微裂隙产生和扩展的程度可以通过耗散能来体现,在平均应变率较低时,冻土试样主要以内部裂纹、缺陷发育为主的吸收耗能。随着平均应变率增加,耗散能也逐渐增加,冻土试样原生裂隙扩展、发育并产生新的裂纹、孔隙。冻土试样受原始缺陷与新生裂纹相互影响,内部结构更容易发生断裂破坏,导致破坏程度逐渐增加^[18]。

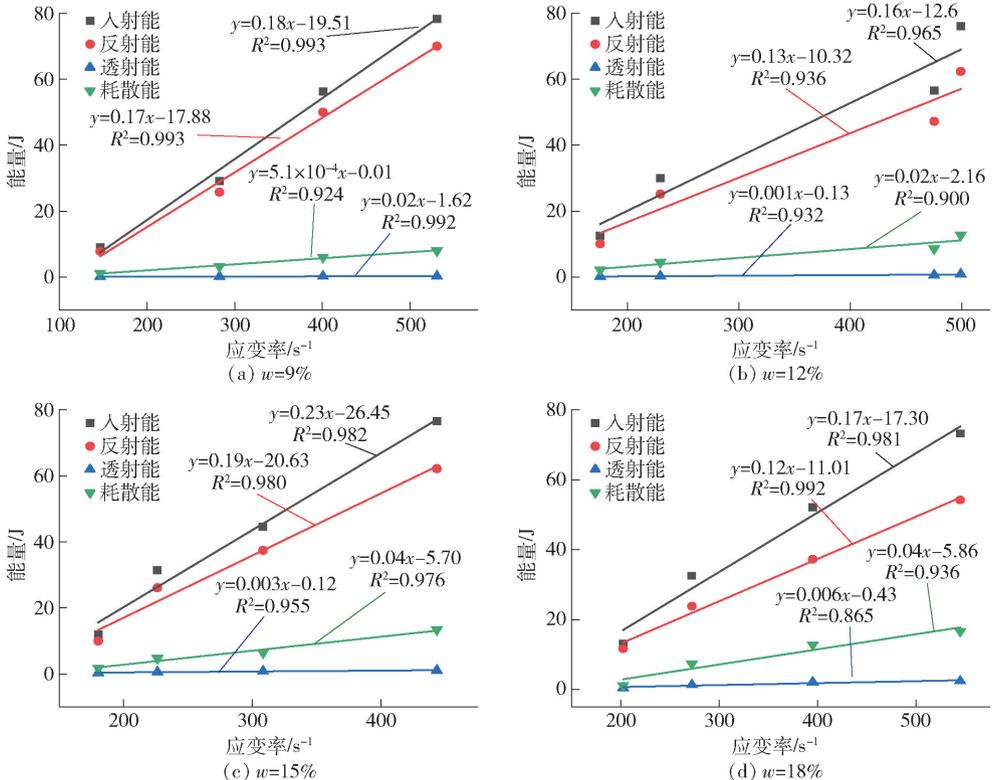


图6 平均应变率与各能量关系

4 结论

对冻结白黏土进行了不同平均应变率、含水率的动态冲击压缩试验,基于能量守恒原理分析了平均应变率、含水率对冻土试样能量耗散特性的影响,主要结论如下:

(1)冻土破坏吸能过程分为3个阶段:0~50 μs ,试样吸收的能量以弹性能方式储存在试样内部,耗散能缓慢增加;50~150 μs ,试样内部原生裂隙扩展并且产生新的裂纹和孔隙,耗散能表现出较快增加趋势;150~250 μs 试样弹性能释放,耗散能增长趋势逐渐趋于稳定。

(2)反射能、透射能和耗散能与入射能间呈现一次函数正相关,且随平均应变率增加,入射能、反射能、透射能和耗散能表现出线性增长趋势。

(3)冻结白黏土含水率低于15%时,能量反射系数呈递减趋势,能量透射系数和能量耗散系数呈增加趋势;含水率高于15%时,能量反射系数呈增加趋势,能量透射系数和能量耗散系数呈减少趋势。

[参考文献]

- [1] 牛亚强. 冻结粉质黏土静动力学性质的试验研究与本构模拟[D]. 兰州:兰州交通大学, 2018.
- [2] YUGUI Yugui, GAO FENG, CHENG Hongmei, et al. Energy dissipation and failure criterion of artificial frozen soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 129: 137-144.
- [3] WANG Baoxuan, WANG Yubing, FAN Ccaixia, et al. Energy distribution and evolution of frozen silty clay at subzero temperatures under compressive loading [J]. Transportation Geotechnics, 2021, 31: 100656.
- [4] LAI Yuanming, LIAO Mengke, HU Kai. A constitutive model of frozen saline sandy soil based on energy dissipation theory[J]. International Journal of Plasticity, 2016, 78: 84-113.
- [5] 陈斌, 马芹永. 冲击荷载下混凝土-冻土组合体吸能特性及破坏形态试验与分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(29): 278-282.
- [6] MA Qinyong, MA Dongdong, YUAN Pu, et al. Energy Absorption Characteristics of Frozen Soil Based on SHPB Test [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018: 1-9.
- [7] MA Qinyong, HUANG Kun, MA Dongdong. Energy absorption characteristics and theoretical analysis of frozen clay with pre-existing cracks under uniaxial compressive impact load[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 182: 103206.
- [8] 上官志浩. 冲击荷载下含预制孔洞冻土的数值模拟及能量耗散特性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2021.
- [9] FU Tiantian, ZHU Zhiwu, CAO Chenxu. Simulating the dynamic behavior and energy consumption characteristics of frozen sandy soil under impact loading [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 166: 102821.
- [10] 蔡天宇. 单轴与主动围压作用下冻土动态力学性能分析[J]. 福建建材, 2022, (7): 20-23, 33.
- [11] 王梦想, 汪海波, 宗琦. 冲击荷载作用下煤矿泥岩能量耗散试验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1716-1725.
- [12] 方士正, 杨仁树, 李炜煜, 等. 非静水压条件下深部岩石能量耗散规律及破坏特征试验研究[J]. 煤炭科学技术: 1-13[2023-03-01].
- [13] 解北京, 栾铮, 陈冬新, 等. 不同长径比煤样动力学特征及本构模型[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(2): 190-201.
- [14] 马冬冬. 动静组合加载下人工冻土动态力学特性及本构模型研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2018.
- [15] 郭世儒. 高应变率下煤系砂岩力学性能及能量耗散规律研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2017.
- [16] 王智德, 李杰, 武海港, 等. 不同高应变率冲击荷载作用下混凝土试样的能量耗散分析[J]. 计算力学学报: 1-9[2023-03-01].
- [17] 金解放, 王杰, 郭钟群, 等. 围压对红砂岩应力波传播特性的影响[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 435-444.
- [18] 戚少先. 不同含水率冻融循环岩石类材料力学性能试验研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2022.