

高寒地区厚煤层上冻土体冻融循环后破坏特征研究*

李辉¹, 陈勇升^{2,3,4}, 李鑫林^{2,3,4}, 许金梦⁵, 温佳民²

(1.中国中煤能源集团有限公司, 北京 100120;

2.中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083;

3.厚煤层绿色智能开采教育部工程研究中心, 北京 100083;

4.中国矿业大学(北京)内蒙古研究院, 内蒙古 鄂尔多斯市 017000;

5.中国煤炭开发有限责任公司, 北京 100011)

摘要:为了揭示高寒地区厚煤层上冻土体冻融循环破坏特征,以高寒地区厚煤层上冻土体为研究对象,采用电液伺服岩石单轴实验机进行岩石力学试验,利用非金属超声波检测仪测试人工试件波速,得到了在不同含水量下冻融循环次数对于冻土体结构、峰值强度、弹性模量以及裂隙发育的影响特征。研究表明,随着冻融循环次数增加,一定含水率条件下的人工冻土试件的峰值强度-冻融循环次数和弹性模量-冻融循环次数的拟合函数关系曲线均为“开口向下”的抛物线,弹性模量以及峰值强度的降幅取决于应变累积速度以及损伤发展速度;随着冻融循环次数增加,人工冻土试件的波速逐渐减小,即内部孔隙、裂隙发育状况良好。从细观力学角度分析,历经数次冻融循环后,冻土渗透系数逐渐增大,水分迁移速度加快,冻胀力作用效果明显,细颗粒土逐渐被压实,同时产生大量的新生微裂隙,孔隙率逐渐增大。

关键词:冻融循环;厚煤层;冻土体;孔隙率;冻胀力

中图分类号:TD315;TU445

文献标识码:A

文章编号:1005-2763(2024)03-0114-07

0 引言

近年来在西部煤层资源中,青藏高原等地多年冻土区下贮藏的厚煤层资源开采成为亟待解决的难题。中国的多年冻土区面积约占我国国土面积的22.4%,主要分布于高纬度的东北地区及中、低纬度的西北青藏高原,以青海木里煤田多年冻土区为例,天然气水合物及矿产资源的储存量较为丰富,但是冻土层特殊的物理力学特性在煤炭开采的过程中必然会产生影响,因此,在高原山地气候区进行地下工程活动面临的问题更加复杂。

最早对冻土进行力学特性的研究是从上世纪

30年代起源于苏联,以 Vyalov 和 Tsytovich 为首的一批冻土力学研究学者逐渐开展了冻土的物理力学性质研究^[1]。Chaichanavong^[2]通过三轴试验首次得出冻土的动强度随荷载振动次数的增大呈非线性减小的规律。Fremond 等^[3]建立了冻土导热系数模型,分析了冻土不同介质类型对冻结温度和融化温度的影响并对冻土的热力学性质进行了初步描述。在此基础上,Vinson 等^[4]通过循环加载试验探究了冻土的温度、围压大小对冻土力学参数的影响。Anderslan 等^[5]进行恒应力幅值动荷载试验及恒应变速率等幅动应变振动试验,发现了冻土变形时间效应具有非线性特性。Tsytovich 等^[6]研究了温度对冻土载荷强度的影响,得出抗剪强度会随着温度在不同范围内的升高而有所减小。Chamberlain 等^[7]发现冻土强度与围压大小正相关,在屈服阶段其强度开始减小,而围压继续增大使其强度随之增加的三阶段理论。Akagawa 等^[8]巧妙使用哑铃型试样研究了特定温度范围内的抗拉强度试验,结果发现试验数据具有较大的离散性,并无一定的规律性。

上世纪70年代,为解决青藏铁路与公路段的冻土相关问题,国内大量学者对冻土的物理力学性质开展了系统性研究。令锋等^[9]发现冻土的应力-应变曲线在结构中为阶梯形,故在应力升高时冻土产生了不可逆的破坏。柴振乾等^[10]通过对冻结后的土体进行单轴、三轴压缩试验,对人工冻土的抗压强度和剪切强度等进行分析,通过对温度和冻土力学性质的影响进行研究,将冻土的应力-应变关系和

* 收稿日期:2023-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51974320,51934008,52121003);中央高校基本业务费(2023YQTD02)。

作者简介:李辉(1969—),男,内蒙古赤峰人,博士,高级工程师,主要从事采矿管理技术工作,E-mail:lihui@263.net。

结冰温度作为参数进行分析,得出当导热系数较大时,冻结设计要充分考虑导热系数。

朱元林等^[11]提出了不同温度和应变率下粉土和砂土单轴极限抗压强度的数学模型,并探究出冻结体的初始切线模量几乎与应变速率无关,50%的强度模量与应变速率密切相关。栗晓林等^[12]发现冻土试件随加载速率的增大,破坏应变及破坏时间均减少,负温变化的影响不太明显。

工程实践方面,吴紫汪等^[13]在现场试验中,测量了青藏高原冻土的承载能力,从而形成了其与土壤温度的定量关系公式。刘波等^[14]通过声发射技术研究了砂质泥岩在正冻过程以及不同温度下(常温及负温)单轴试验中的声发射特征变化,对于研究岩石在不同温度下力学性质变化的根本原因以及裂隙损伤发育特征有一定参考意义。文献^[15]介绍了抗剪强度、拉伸强度和断裂特征均不同的冻土和蠕变试验在某些地区的典型区域的取样研究,同时在进行强度蠕变试验后提出了冻土承载力和强度的确定方法^[15]。闫冰^[16]通过对冻土的弹性模量和冻土强度相关性分析,发现温度、变形频率和变形幅度对永久冻土弹性模量和强度的影响大于约束压力等其他因素的影响。江帆^[17]对冻土剪切强度的试验方法进行了归纳与总结并研究了每种试验方法的原理以及相关特点,该研究结果为后续冻土抗剪试验研究提供了重要参考。宋朝阳等^[18]发现同一水平面上的土壤内聚性与内摩擦角和土壤温度呈负线性相关;另一方面,在相同温度下,不同层位的内聚性和内摩擦角之间没有线性相关。

从上述研究中可以发现,关于多年冻土的国内外研究成果主要集中在温度、冻融循环及加载速率等外部环境下对冻土力学强度参数的影响规律。实际煤矿开采过程中,冻土对于上覆岩层移动、变形和破坏特征的影响机理尚不清楚,多年冻土层对工作面的安全生产有何影响,冻土层破断引起的地表沉降及生态系统破坏之后的植被修复问题等都是高寒矿区多年冻土层条件下煤炭开采亟待研究和解决的重大科学技术问题,而关于高寒地区冻土体冻融循环破坏特征差异性研究更是少之又少。本文以高寒地区厚煤层上冻土体为研究对象,进行岩石力学试验,得出高寒地区厚煤层上覆冻土体破坏特征,以期高寒地区煤层开采后的覆岩运移规律提供参考。

1 冻土力学特性试验研究

1.1 矿区概况

木里煤田江仓矿区位于青藏高原,第四系地层为多年冻土层,且厚度变化较大,约为30~80 m。受气候条件影响,地表多年冻土层在相应时间周期内会发生冻融循环更替现象。本区气候属于干燥的大陆性气候,地势高,气候低,四季不分明,昼夜温差大,年平均气温在0℃以下,月最高平均气温19℃,月最低平均气温-19℃,最高温24℃,最低温-34℃。

根据广义冻土力学分类,由于冻融循环引起的土力学性质变化属于冻融作用的范畴。当土体温度降至凝固点以下时,原有孔隙和裂隙水中的一部分固结成冰,而未冻水在温度及水势梯度作用下发生迁移,土体发生膨胀,称为冻胀现象;而温度上升,冻土融化,原有水分相继排出,土体下沉,称为融沉现象。经历数次冻融作用,土体产生不均匀变形并丧失承载能力,导致地表建筑物破坏,统称为冻害。因此,采用理论分析与实验室试验相结合的方法,制作与多年冻土区成分相似的标准冻土试件,并且在数次冻融循环作用后测定其单轴抗压强度,进而分析土体弹性模量和应力-应变关系等变化规律。

1.2 试验仪器

相关试验仪器设备包括电液伺服岩石单轴试验机、非金属超声波检测仪、可控温度冰柜、物理恒温箱、电子天平等;人工制备的冻土试件均在电液伺服岩石单轴试验机的加载系统作用下完成单轴压缩试验。为减小室温环境对试件的影响,确保试验所得数据的准确性,加载速率均采用10 mm/min。

1.3 冻土试件制备

江仓矿区所在区域多年冻土层土颗粒骨架主要为砾石、亚砂土,含水(冰)率为16%~30%;选取亚黏土及沙子作为骨料,石膏、石灰作为胶结料,亚黏土:沙子:石膏:石灰比例约为1:1:0.2:0.1,考虑冻融循环过程及试件加载过程中水分迁移对力学性质的影响,设置25%含水梯度。具体制作步骤如下。

(1) 将土壤样品过筛,放置于干燥器中48 h;在不吸水的平盘中,分别加入两种不同含水配比所需的水量,延顺时针方向倒置于土样中并搅拌均匀。

(2) 圆柱型试件标准尺寸为:直径50 mm,高度100 mm;将宽高比为1:2的模具内壁高度等分为4层,每铺一层土样后,人工将其压实至标记高度。

(3) 静置72 h,待试件成型后,拆除模具。

(4) 调节物理恒温箱温度为0℃,将试件放置

其中再次静置 48 h,用修土刀修正试件两端面,确保平行度小于 5 mm。

(5) 利用游标卡尺测量人工试件的直径和高度并记录数据。

根据《工程岩体试验方法标准》(GBT 50266—2013),冻结及融化时间均为 4 h,冻融循环 5 次为基本单位;考虑时间因素,现将冻结及融化时间均调整为 2 h,即完成一次冻融循环时长为 4 h。冻结人工试件前 24 h 将可控温度冰柜调至-30 ℃,并保持恒定;将试件从恒温箱中取出放入冰柜进行冷冻处理,2 h 后从冰柜中取出再次放入恒温箱中 2 h,完成一次循环,往复进行,直到完成指定的冻融循环次数。

设置冻融循环次数分别为 0 次(对照组),10 次,15 次,20 次和 25 次,按照冻融循环次数将试件分为 5 组,每组各 3 个,分别进行编号,冻融循环 0 次组(A01、A02、A03)、10 次组(A101、A102、A103)、15 次组(A151、A152、A153)、20 次组(A201、A202、A203)、25 次组(A251、A252、A253);含水率为 25%。

1.4 试验方法及步骤

测试单轴抗压强度前,需将试件从恒温箱中取出,并使用游标卡尺测量冻融循环后人工试件的直径和高度,与冻融循环之前的人工冻土试件进行对比,避免因冻融损伤造成不均匀变形,对后续试验产生不良影响。然后,利用非金属超声波检测仪测试对照组及试验组试件修正波速,进而分析内部裂隙发育及演化扩展状况,具体试验步骤如下。

(1) 设置试验参数及属性,包括试件尺寸、加载控制方式、加载速率及图像类型等。

(2) 将人工冻土试件放置于电液伺服岩石单轴试验机下方载物台中心。

(3) 开启单轴压力机,手动调节加载板,使其与试件端面平行接触,受力对中,以 10 mm/min 的速率施加外载荷,直到试件完全破坏,并记录力和位移的变化全过程。

(4) 根据单轴压缩试验产生的应力-应变曲线,分别计算得到各个含水率及不同冻融循环次数下的单轴抗压强度及弹性模量。每个条件下做 3 次重复试验,减小试验误差。

2 试验数据整理及结果分析

2.1 力学特征

将整理好的测试数据及计算数据分类汇总,展示 25%含水率及不同冻融次数条件下的单轴抗压

强度及弹性模量,结果见表 1。

表 1 25%含水率单轴抗压试验结果

冻融循环次数	温度/℃	单轴抗压强度/MPa			弹性模量/MPa		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
0	-30	7.06	6.79	6.93	232.91	227.52	230.22
10	-30	6.55	5.39	5.97	186.96	183.52	185.24
15	-30	5.12	4.53	4.83	161.78	145.26	153.52
20	-30	4.77	4.42	4.60	123.75	122.07	122.91
25	-30	3.65	2.92	3.29	106.42	97.47	101.95

根据表 1 绘制出人工冻土试件单轴抗压强度随冻融循环次数的变化散点图,并进行函数拟合,如图 1 所示。

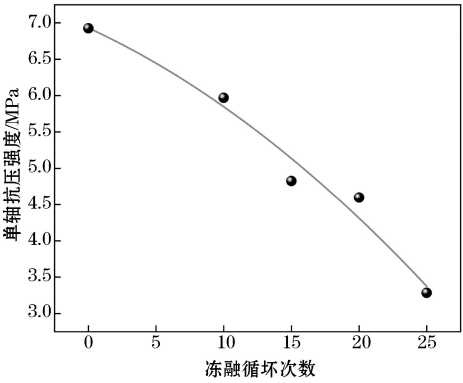


图 1 单轴抗压强度随冻融循环次数的变化情况

随着冻融循环次数以 5 的倍数增加,历经相同外载荷作用后的人工冻土试件的单轴抗压强度逐渐降低,且峰值强度与冻融循环次数呈现“开口向下”的二次函数曲线关系,相对于对照组,冻土试件的峰值强度在历经 10 次、15 次、20 次及 25 次冻融循环后分别降低了 13.9%、30.3%、33.6%及 52.5%,试件峰值强度与冻融循环次数的拟合函数关系式如下:

$$\sigma_{25} = -0.0023 n^2 - 0.0857 n + 6.9306 \quad (1)$$

式中, σ_{25} 为单轴抗压强度,MPa; n 为冻融循环次数;拟合相关度 $R^2 = 0.9481$,即在同一加载速率条件下,经过相同外载荷作用,式(1)能够反映人工冻土试件单轴抗压强度 σ_{25} 随冻融循环次数 n 的变化规律。

根据表 1 绘制出人工冻土试件弹性模量随冻融循环次数的变化散点图,并进行函数拟合,如图 2 所示。

随着冻融循环次数以 5 的倍数增加,历经相同外载荷作用后的人工冻土试件的弹性模量逐渐降低,且弹性模量与冻融循环次数呈现“开口向下”的二次函数曲线关系,相对于对照组,冻土试件的弹性模量在历经 10 次、15 次、20 次及 25 次冻融循环后

分别降低了 19.5%、33.3%、46.6% 及 55.7%, 试件弹性模量与冻融循环次数的拟合函数关系式如下:

$$E_{25} = -0.017 n^2 - 4.857 n + 231.347 \quad (2)$$

式中, E_{25} 为弹性模量, MPa; n 为冻融循环次数; 拟合相关度 $R^2 = 0.9909$, 即在同一加载速率条件下, 经过相同外载荷作用, 式(2)能够反映人工冻土试件弹性模量 E_{25} 随冻融循环次数 n 的变化规律。

将冻融循环次数分别代入拟合函数公式(1)和公式(2)中, 得出单轴抗压强度及弹性模量对应理论值, 结合试验值绘制柱状图, 如图 3 所示。

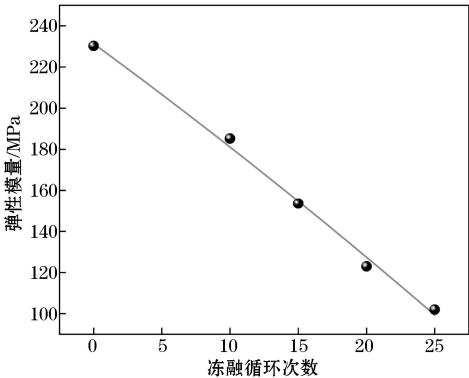
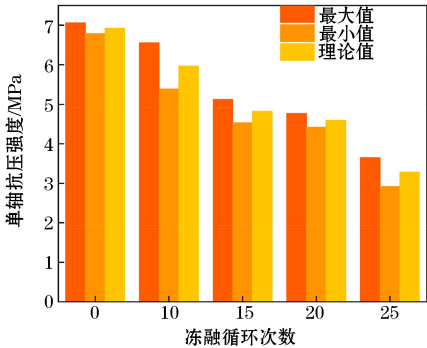
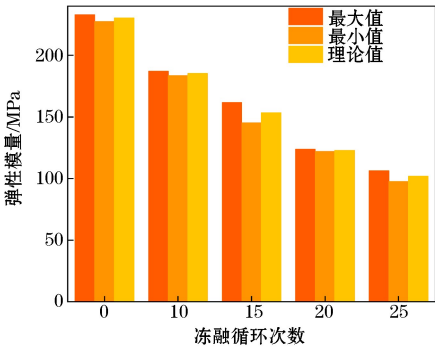


图 2 弹性模量对应拟合函数



(a) 单轴抗压强度损失累积



(b) 弹性模量损失累积

图 3 25% 含水率单轴抗压强度、弹性模量试验结果与理论值对应损失累积

冻土试件的弹性模量相比单轴抗压强度在历经 10 次、15 次、20 次、25 次冻融循环后, 下降幅度分别高 5.7, 3, 13, 3.2 个百分点。人工冻土试件的冻融损伤程度取决于初始含水率及水分迁移速度^[19], 含水率 25% 的冻土试件在冻融循环过程中产生的冻胀力来源可分为两部分: 一部分等效为含水率小的冻土试件在冻融循环过程中产生的冻胀力; 另一部分则由外界迁移而来的水分冻结体积膨胀所产生, 即未冻水含量影响冻胀力的大小, 进而影响冻融损伤发展速度。

现有研究表明, 人工试件冻胀力大小与未冻水含量呈正相关^[20]; 在 -30℃ 环境中经历数次冻融循环, 含水率为 25% 的冻土试件容易产生更大的冻胀力, 峰值强度下降速率大于弹性模量损失率, 即应变累积速度小于损伤发展速度, 故弹性模量的降幅高于峰值强度的降幅。

2.2 冻融损伤对超声波速的影响

利用非金属超声波检测仪测试历经不同冻融循环次数的人工冻土试件波速, 分析试件内部冻融损伤裂隙的发育情况。双探头试触, 仪器设备调零, 双探头涂抹凡士林耦合剂再与试件连接, 采样数据及波形在示波器中显示, 调节图像类似“正弦波”形, 存储相关数据。测试结果见表 2。采样原理如式(3)所示:

$$V_d = \frac{h}{t} \quad (3)$$

式中, V_d 为冻土试件波速, km/s; h 为试件的高度, m; t 为超声波激发至接受的时间间隔, μs 。

表 2 超声波测试结果

试件编号	测距/m	声时/ μs	修正后波速/(km/s)	平均值/(km/s)
A01	0.1	157	0.641	0.655
A02	0.1	156	0.642	
A03	0.1	147	0.682	
A101	0.1	167	0.598	0.604
A102	0.1	166	0.602	
A103	0.1	163	0.613	
A151	0.1	190	0.526	0.544
A152	0.1	188	0.531	
A153	0.1	173	0.576	
A201	0.1	217	0.461	0.480
A202	0.1	206	0.484	
A203	0.1	202	0.495	
A251	0.1	602	0.166	0.228
A252	0.1	458	0.218	
A253	0.1	332	0.301	

人工冻土试件超声波速受自身因素的影响, 例

如密度、孔隙率、渗透系数等,还需考虑外在环境的作用,数次冻融循环作用会改变试件的物理力学性质,进而影响超声波速,随着冻融循环次数增加,试件超声波波速逐渐降低,如图 4 所示。

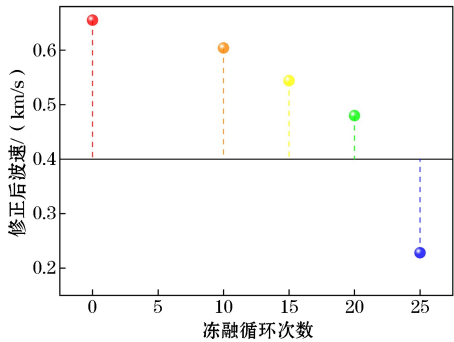


图 4 冻融循环次数对应超声波波速

现有研究表明,在冻融循环过程中,人工冻土试件的孔隙比逐渐减小,而渗透系数逐渐增大;历经多次重复冻融作用,试件内部产生大量微裂隙,甚至在土体结构发生破坏后形成大孔隙,细颗粒土逐渐减少,故孔隙、裂隙所占体积增加;另一方面,试件固体部分实体积增加速度快于次生裂隙及孔隙,即冻融循环对于土体具有同压密类似的效果^[20]。随着冻

融循环次数增加孔隙率逐渐增大,渗透系数增大,水分迁移速度加快,引起冻胀力变化及试件总体积发生改变,导致试件内部结构发生改变,形成局部不连续界面,声波在传递过程中遇到结构弱面发生反射、折射的概率增大,甚至会造成能量耗散,因此超声波波速随着孔隙率或者渗透率的增大而减小,即随着冻融循环次数增加而减小。

2.3 破坏形态

冻土体受到反复冻融的影响,在循环荷载的作用下,土体内局部出现疲劳损伤现象。冻结时,未冻水经内部裂隙向已冻区迁移^[20],并产生冻胀力,裂隙端部应力集中,当冻胀力超过材料的抗拉强度时,裂隙端部会产生新生微裂纹。融缩时,未冻水继续发生迁移,经孔隙、裂隙向外溢出,并带走少量细颗粒土。历经数次冻融循环,局部区域微裂纹不断萌生、发育、扩展直至贯通成为新生裂隙,从而影响土体结构和力学性质。人工冻土试件的单轴压缩应力-应变曲线与普通脆性岩石试样基本一致,历经 5 个阶段。以 25%含水率的人工冻土试件为例,分别经过 0 次、10 次、15 次、20 次、25 次冻融循环作用,并进行单轴压缩试验,破坏特征如图 5 所示。

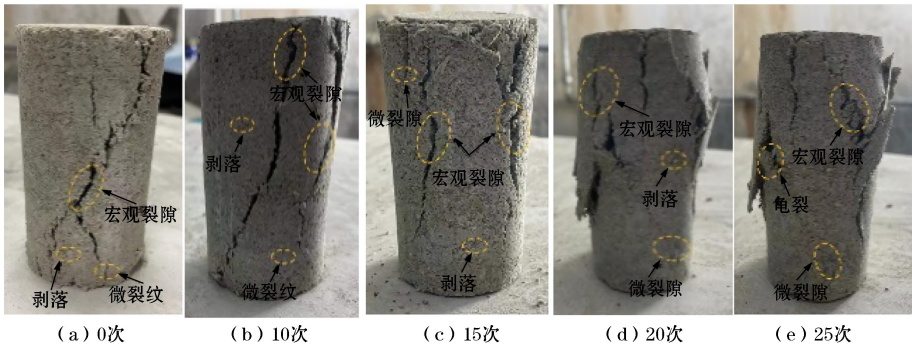


图 5 冻融循环次数对应局部损伤及破坏特征

(1) 0 次冻融循环—单轴压缩。原始裂隙压密闭合阶段,试件内部未冻水平衡状态失稳,继续向外迁移,局部区域原始裂隙压密逐渐闭合,试件体积逐渐减小;弹性阶段,试件体积继续减小,端部未出现肉眼可见的细微裂纹;弹塑性过渡阶段,随着应变不断增加,试件体积由减小转为增加,体积逐渐膨胀,端部出现零星剥落,阶段后期,试件端部底部出现数条微裂纹并不断向上延伸;塑性阶段,试件体积膨胀加速,端部出现随机剥落,裂纹扩展深入并与内部原始裂隙贯通,形成贯通裂纹,卸压后,试件仍存在一定的承载能力,裂纹宽度继续增加;破坏阶段,

在试件端部形成一条贯通的新生裂隙,宽度为 3~5 mm。

(2) 10 次冻融循环—单轴压缩。裂隙压密阶段,试件体积逐渐减小,阶段持续时间减少;弹性阶段,试件体积进一步减小,试件端部出现圆点状剥落;弹塑性过渡阶段,试件体积逐渐膨胀,端部表面随机圆点状剥落继续,下部两个位置相继出现微裂纹,并逐渐发展为微裂纹丛集;塑性阶段,试件体积继续膨胀,端面下部内部区域出现应力集中,微裂纹丛集具有一定张开度,与内部裂隙贯通,向端面上部延伸;破坏阶段,沿着试件端部形成两条完全贯通的

纵向裂隙,裂隙宽度约为4~5 mm,沿主裂隙走向,伴有少量的次生微裂纹。

(3) 15次冻融循环—单轴压缩。裂隙压密阶段,此阶段持续时间增加;弹性阶段,试件体积继续减小,端面随机圆点状剥落继续,此阶段持续时间增加;弹塑性过渡阶段,试件体积膨胀明显,端部表面圆点状剥落的数量及范围显著扩大,端面上部出现沿圆周环绕的微裂纹,并在局部发育成为微裂纹丛集;塑性阶段,两条裂纹近似平行向端面下部延伸,并与内部裂隙贯通,未出现偏转、分叉现象;破坏阶段,两条贯通的新生裂隙继续向底部扩展,上部宽度约为4~6 mm,中下部宽度仅有0.5~1 mm。

(4) 20次冻融循环—单轴压缩。裂隙压密阶段及弹性阶段作用时间明显增加;弹塑性过渡阶段,圆点状剥落的数量及范围继续扩大,但是增幅减缓,端面上部出现大量微裂纹,随着试件体积快速膨胀,逐渐发育为微裂纹丛集向端面中部延伸;塑性阶段,试件中部形成应力集中,多数裂纹与内部原始裂隙贯通后停止向下延伸,少数裂纹继续向端面下部延伸,与原始裂隙贯通后形成纵向裂隙,主裂隙宽度约为4~6 mm;破坏阶段,主裂隙数量增加为3条,试件破坏逐渐发展为脆性破坏与黏性破坏。

(5) 25次冻融循环—单轴压缩。破坏效果与20次冻融循环作用类似,在弹塑性过渡阶段,试件端面不再出现剥落现象,而是局部表面龟裂、呈块状切落;塑性阶段后期出现类似扩容及应变软化现象;破坏阶段,呈现明显的压裂破坏特征。

经过冻融循环荷载与单轴压缩外载荷双重作用,不同冻融循环次数作用下的人工冻土试件破坏特征具有相似性,即颗粒状剥落与微裂纹局部演化,而且具有分区特性,应力集中区产生微裂纹并向四周扩展,过渡区微裂纹偏转、分叉形成丛集,而未损伤区应力均匀分布,未出现明显破坏迹象。由于存在温度梯度差异,试件端面对温度变化具有敏感性,而内部冻土体受温度影响存在滞后性。经过数次冻融循环,水冰相变产生的冻胀力超过表面抗拉强度,因此表面土体结构疏松。单轴压缩过程中,端面最先发生剥落,并在顶底部产生微裂纹,微裂纹逐渐向内发育并与原始裂隙贯通,形成新生裂隙,沿最大主应力方向贯穿整个试件,试件破坏过程始终由表及里,由外向内。

3 结论

(1) 随着冻融循环次数增加,冻土土体结构发生改变,一定含水率条件下的人工冻土试件的峰值强度以及弹性模量均减小,峰值强度—冻融循环次数拟合函数关系曲线为“开口向下”的抛物线;同样,弹性模量—冻融循环次数拟合函数关系曲线为“开口向下”的抛物线。弹性模量以及峰值强度的降幅取决于应变累积速度以及损伤发展速度。

(2) 利用非金属超声波检测仪测试人工冻土试件波速,随着冻融循环次数增加,人工试件的波速逐渐减小,即内部孔隙、裂隙发育状况良好。

(3) 从细观力学角度考虑,冻融循环是土体不断产生微损伤并自行修复从而引起土体结构发生改变的复杂过程。历经数次冻融循环,冻土渗透系数逐渐增大,水分迁移速度加快,冻胀力作用效果明显,细颗粒土逐渐被压实,同时产生大量的新生微裂隙,孔隙率逐渐增大。

参考文献(References):

- [1] 李宁,程国栋,徐学祖,等.冻土力学的研究进展与思考[J].力学进展,2001,31(1):95-102.
- [2] CHAICHANAVONG T. Dynamic properties of ice and frozen clay under cyclic triaxial loading conditions [D]. Ann Arbor: Michigan State University,1976.
- [3] FREMOND M, MIKKOLA M. Thermo-mechanical modelling of freezing soil [C]. Rottendam: A. A. Balkema,1991.
- [4] VINSON T S, CZAJKOWSKI R L, CHAICHANAVONG T. Behavior of frozen clays under cyclic axial loading [J]. Journal of Geotechnical,1978,104(7):779-800.
- [5] ANDERSLAND O B, AINOURI I. Time-Dependent Strength Behavior of Frozen Soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96 (4): 1249-1265.
- [6] TSYTOVICH N A, SUMGIN M I. Principles of mechanics of frozen ground[R]. Hanover: Cold Regions Research and Engineering Lab,1959.
- [7] CHAMBERLAIN E, GROVES C, PERHAM J. The mechanical behavior of frozenearth materials under high pressure triaxial test conditions [J]. Geotechnique,1992,22(3):469-483.
- [8] AKAGAWA S, NISHISATO K. Tensile strength of frozen soil in the temperature range of the frozen fringe [J]. Cold Regions Science & Technology,2009,57(1):13-22.
- [9] 令锋,吴紫汪,朱元林,等.冻土应力—应变曲线的分形逼近[J].中国科学(D辑:地球科学),1999(增刊1):15-20.

[10] 柴振乾,杨明红,李昆.平凉安家庄矿人工冻土力学性能试验分析[J].煤炭技术,2015,34(9):97-99.

[11] ZHU Y L, CARBEE D L. Uniaxial compressive strength of frozen silt under constant deformation rates [J]. Cold Regions Science and Technology,1984,9(1):3-15.

[12] 栗晓林,王红坚,牛永红.不同加载速率下冻结黏土的强度及破坏特性[J].岩土工程学报,2017,39(12):2335-2340.

[13] 吴紫汪,刘永智,谢先德.冻土承载力原位试验研究[M].北京:科学出版社,1983:21-56.

[14] 张功,刘波,马永君,等.砂质泥岩人工冻结力学特性的单轴声发射研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(3):699-707.

[15] 朱元林.我国冻土强度与蠕变研究[J].冰川冻土,1988(3):332-337.

[16] 闫冰.冻土力学性质影响因素的显著性分析[J].科技风,2017(10):249.

[17] 江帆.冻土抗剪强度测试方法的分析[J].四川建材,2015,41(1):200-201.

[18] 宋朝阳,刘志强,谭杰,等.深厚冲积层人工冻土力学性能试验研究[J].煤炭工程,2018,50(9):107-111.

[19] 刘泉声,黄诗冰,康永水,等.裂隙岩体冻融损伤研究进展与思考[J].岩石力学与工程学报,2015,34(3):452-471.

[20] 齐吉琳,马巍.冻土的力学性质及研究现状[J].岩土力学,2010,31(1):133-143.

Study on the Failure Characteristics of Frozen Soil After Freeze-Thaw Cycle on Thick Coal Seam in High Cold Area

LI Hui¹, CHEN Yongsheng^{2,3,4}, LI Xinlin^{2,3,4}, XU Jinmeng⁵, WEN Jiamin²

(1.China Coal Energy Group Co., Ltd., Beijing 100120, China;

2.College of Energy and Mining, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

3.Engineering Research Center of Green and Intelligent Mining for Thick Coal Seam,
Ministry of Education, Beijing 100083, China;

4.Inner Mongolia Research Institute, China University of Mining and
Technology-Beijing, Ordos, Inner Mongolia 017000, China;

5.China National Coal Development Co., Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: In order to reveal the failure characteristics of frozen soil after freeze-thaw cycle on thick coal seam in high-altitude and cold region, taking the frozen soil body on the thick coal seam in high cold area as the research object, electro-hydraulic servo rock uniaxial experimental machine was used to carry out the rock mechanics experiments. The influence characteristics of freeze-thaw cycles on the structure, peak strength, elastic modulus, and crack development of frozen soil body were obtained by a non-metallic ultrasonic detector to test the wave velocity of artificial specimens with different water contents. It is concluded that under a certain water content condition, as the number of freeze-thaw cycles increases, the fitting function curves of the peak strength and freeze-thaw cycle number, as well as the elastic modulus and freeze-thaw cycle number of artificially frozen soil specimens are both parabolas with an opening downward. The decrease in elastic modulus and peak strength depends on the rate of strain accumulation and damage development. As the number of freeze-thaw cycles increases, the wave velocity of artificially frozen soil specimens gradually decreases, indicating good development of internal pores and cracks. From the perspective of micromechanics, after several freeze-thaw cycles, the permeability coefficient of frozen soil gradually increases, the speed of water migration accelerates, and the effect of frost heave force is obvious. Fine grained soil is gradually compacted, while a large number of new-born micro cracks are generated, and the porosity gradually increases.

Key words: Freeze-thaw cycle, Thick coal seam, Frozen soil body, Porosity, Frost heave force