



循环荷载下道路应急抢通聚氨酯材料的力学特性

许晓亮^{1,2}, 廖文杰¹, 徐家鹏¹, 李蓓¹, 谭仪忠²

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 陆军工程大学 爆炸冲击
防灾减灾全国重点实验室, 南京 210007)

摘要: 聚氨酯发泡材料以其快速膨胀、高强、轻质及憎水等特点, 在水毁道路等的临时抢通中有着重要的工程应用价值。为了研究车辆循环荷载作用下换填临时路基的聚氨酯材料力学性能, 分别对聚氨酯试样进行轴向循环加卸载压缩试验及切向循环剪切试验, 分析聚氨酯试样在不同加载频率和加载范围下的应力-应变变化规律及宏观破坏特征。结果表明: 聚氨酯试样的应变随轴向加载频率先增后减, 随轴向应力加载上限值持续增大(可达到7%~8%); 轴向应力加载引起的最大应变增量是加载频率相应值的4倍, 对试样应变的影响更为显著; 切向循环加卸载下, 试样主要以沿胶结面的压剪破坏和沿竖向裂隙-胶结面处的拉剪破坏为主, 切向力加载范围的增大会引起试样变形的明显增加(最大应变达5%~6%), 最终出现沿胶结面的压剪破坏; 增加一定的轴向力(不宜超过单轴抗压强度的90%)能更好地压实聚氨酯材料, 进而改善其抗剪性能, 在工程应用中, 应当尽量避免轴向(法向)力较小或无加载时让聚氨酯材料处于循环剪切受力状态。

关键词: 道路工程; 聚氨酯材料; 应急抢险; 循环加卸载; 力学特性

中图分类号: U414 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Mechanical characteristics of polyurethane materials for emergency road recovery under cyclic loading

XU Xiaoliang^{1,2}, LIAO Wenjie¹, XU Jiapeng¹, LI Bei¹, TAN Yizhong²

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, P. R. China)

Abstract: Polyurethane foam material, with its rapid expansion, high strength, lightweight, and water-repellent characteristics, has significant engineering value in temporary repair works such as emergency road clearance after water damage. To study the mechanical characteristics of polyurethane materials for subgrade under cyclic loading, axial cyclic loading and unloading compression test, and tangential cyclic shear test were carried out on polyurethane samples containing interface, and the change rule of stress-strain law and macro and

收稿日期: 2024-10-07

基金项目: 湖北省交通运输厅科技项目(20221164)

作者简介: 许晓亮(1989-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程可靠性分析及库岸边坡灾害防治研究, E-mail: sichuan106@ctgu.edu.cn。

谭仪忠(通信作者), 男, 博士, 副教授, E-mail: tanyizhong@163.com。

Received: 2024-10-07

Foundation item: Scientific Research Project of Department of Transport of Hubei Province (No. 20221164)

Author brief: XU Xiaoliang (1989-), PhD, associate professor, main research interests: reliability analysis of geotechnical engineering and disaster prevention and control of reservoir bank slope, E-mail: sichuan106@ctgu.edu.cn.

TAN Yizhong (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: tanyizhong@163.com.

micro damage characteristics of polyurethane samples were analyzed under different loading frequencies and loading ranges. The results show that: The strain of polyurethane samples increases and then decreases with the frequency of axial loading, and continuously increases with the upper limit of axial stress loading (up to 7%-8%); the maximum strain increment induced by axial stress loading is four times the corresponding value for the loading frequency, which has a more significant effect on the sample strain; under axial cyclic loading and unloading, the sample is mainly subjected to compression-shear damage along the cemented surface and tensile-shear damage along the vertical fissure-cohesive surface, the increase in the loading range of the tangential force causes a significant increase in the deformation of sample (up to 5%-6%), and eventually compression-shear damage along the cemented surface occurs; increase a certain amount of axial force (should not exceed 90% of the uniaxial compressive strength) can be better compaction of polyurethane materials, which can improve its shear performance, in engineering applications, it is advisable to avoid placing polyurethane materials in a cyclic shear stress state when the axial force is small or there is no loading.

Keywords: road engineering; polyurethane materials; emergency rush repair; cyclic loading and unloading; mechanical characteristics

聚氨酯作为一种新型、多功能材料,具有优异的耐候性^[1]、耐磨性和耐腐蚀性^[2],同时还具有较好的黏结性和可塑性^[3],相比于沥青、水泥等传统材料,聚氨酯还具有轻质、早强、抗老化能力强以及快速固结的性能,通常被用在高等级公路路面^[4-6]、机场路面^[7]及隧道围岩固结灌浆中^[8]。且聚氨酯材料由于弹性模量较低、塑性较强,具有缓解冲击力^[9]的能力,可应用于无缝伸缩缝中^[10]。此外,聚氨酯材料以其优异的密封性和耐腐蚀性^[11],能够有效防止地下水渗漏,延长道路的使用寿命,在被用作道路防水材料的同时,还被广泛用于桥梁、隧道、地下排水管道等道路工程中的防水处理^[12-14]。

聚氨酯材料同样广泛用于路面开裂修复^[15-16],以提高路面的平整度和耐久性。魏同军等^[17]研制出了聚氨酯增韧环氧树脂,提高了沥青混凝土的裂缝修复效果,提升了路面的耐久性能;陈杨杰等^[18]研究的聚氨酯增韧改性环氧树脂能对裂缝进行快速修补,抗拉强度达到了 49.9 MPa,断裂伸长率达到 140%;Li 等^[19]研制出氯丁橡胶/聚氨酯(CR/PU)复合改性沥青密封胶,用 CR/PU 密封胶修复后的路面在数月通车后没有出现明显裂缝及修补失效;Xu 等^[20]研制的聚氨酯改性环氧树脂路面密封胶(ERPS)可以用来解决传统道路密封胶的界面黏结失效问题,修复好的裂缝在最不利情况下可恢复原路面 68% 的强度。

聚氨酯材料已被广泛运用于道路工程中,但当公路等交通基础设施因山洪、地震等自然灾害出现冲毁、塌陷时,为了抢险救灾需要车辆快速通行,亟需研究相应的道路应急抢通技术。考虑到聚氨酯材料发泡速度快、体积膨胀率高,且强度良好、价格较低的优点,开展公路快速抢通的聚氨酯换填材料

研究有着重要的工程意义。作为抢通后的抢险救灾临时道路,路面在短期内会频繁受到来往车辆的荷载作用,因此,道路抢通换填材料在循环荷载作用下的力学性能是保证道路抢通工作安全性的重要因素。但目前关于聚氨酯材料的研究主要集中在材料自身性质和静载条件下的力学特性,在循环作用下的疲劳力学特性仍有待进一步的认知。

笔者通过聚氨酯材料的轴向循环加卸载试验和切向循环剪切试验,研究不同荷载大小和荷载频率下聚氨酯发泡材料的力学性能响应规律,分析相应的变形破坏特征。

1 试验概况

1.1 试验材料介绍

试验所用聚氨酯材料由多异氰酸酯、扩链剂、催化剂 3 种成分组成,如图 1 所示。其中多异氰酸酯为聚氨酯材料发泡过程中的主要成分;扩链剂的作用主要是与线型聚合物链上的官能团反应而使分子链扩展、分子量增大,试验所采用的扩链剂为聚醚、液体胺类扩链剂;催化剂作用是加速聚氨酯反应的速度,还会对聚氨酯的膨胀度以及性能有影响,试验所用催化剂为碳酸氢钠液体。

试样制备时,按照多异氰酸酯:扩链剂:催化剂

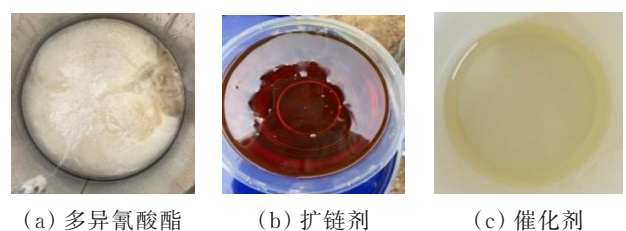


图 1 聚氨酯发泡主要材料

Fig.1 Main materials for polyurethane foaming

=10:9.6:0.36 的比例进行混合搅拌。在室温(25~30℃)下先将催化剂加入多异氰酸酯中,充分搅拌 30 s,再向混合物中加入扩链剂,再次充分搅拌 30 s后倒入模具,发生明显化学反应,释放大量反应热与二氧化碳,并由液体转变为固体。此时聚氨酯材料质地较软,温度较高,不断有气体排出;在 5~6 min后,材料表面温度降低,逐渐硬实且不再有气体排出,静置养护 30 min 后达到最大抗压强度的 60%~70% 左右,静置养护 90 min 后强度基本稳定。试样制备具体过程如图 2 所示。

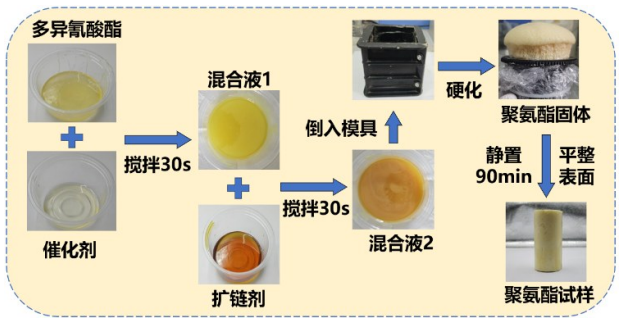


图 2 聚氨酯发泡过程
Fig.2 Polyurethane foaming process

1.2 聚氨酯材料的基本物理力学性质

发泡后的聚氨酯材料内部存在较多疏水基团,使其具有憎水性。表层易燃但在表层碳化后不会燃烧到材料内部,且在涂抹复配胺类阻燃剂后表面不会发生燃烧。聚氨酯材料的平均发泡率为 392.65%,在实际工程应用中可以通过现场勘测需要填补的体积,计算出需要聚氨酯发泡材料的质量,根据各组分配比确定所需要的原材料质量。

聚氨酯材料的力学性能主要与养护温度、材料密度相关。控制试样密度在 0.2~0.25 g/cm³之间,对不同养护温度下的聚氨酯试样进行单轴抗压试验,结果如图 3 所示。由图 3 可见,试样的单轴抗压强度大致稳定在 3.1~3.2 MPa 附近。在 40℃ 的温度下进行养护的聚氨酯试样强度最佳且塑性性能最好,在养护温度上升至 60℃ 后材料会有明显软化,产生更大的变形。考虑到山洪急流等水毁道路临时抢通问题主要出现在夏秋雨季期间,相应的平均气温多在 25~35℃,结合试验的可操作性,选取 30℃ 为聚氨酯试样的养护温度。

在养护温度为 30℃ 的条件下对不同密度的聚氨酯试样进行单轴抗压试验,结果如图 4 所示。聚氨酯发泡材料是一种多孔材料,在发泡过程中会生成二氧化碳并产生气泡填充在聚氨酯材料中,二氧化碳气泡的不均匀分布会导致材料的密度具有较大的差异,即使表观密度接近,其强度也会存在差异。由图 4 可见,聚氨酯的单轴抗压强度整体上随

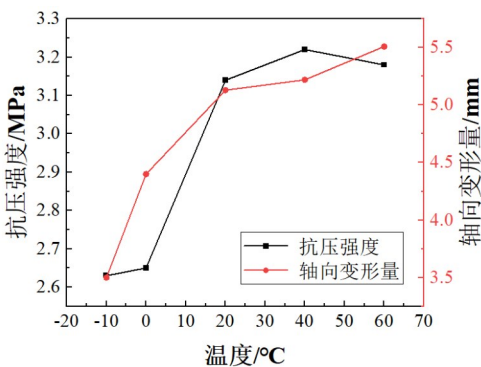


图 3 不同温度下聚氨酯抗压强度-轴向变形量
Fig.3 Compressive strength-axial deformation of polyurethane at different temperatures

密度的增大而增大。故将后续试验中,统一控制聚氨酯试样的密度在 0.23~0.25 g/cm³ 之间,以减小其离散性。

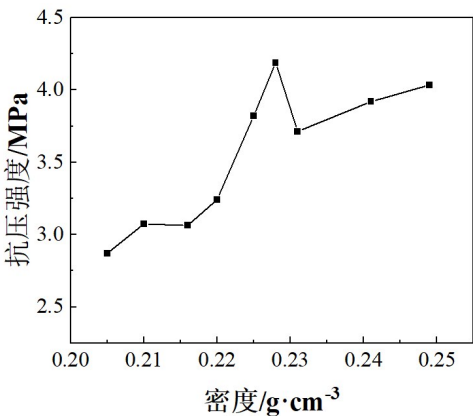


图 4 不同密度聚氨酯单轴抗压强度
Fig.4 Uniaxial compressive strength of polyurethane of different densities

聚氨酯材料的各项物理力学性质如表 1 所示。

表 1 聚氨酯材料的物理力学性质
Table 1 Physical and mechanical properties of polyurethane materials

密度/ (g/cm ³)	平均发 泡率/%	发泡完成 时间/min	抗压强 度/MPa	憎水性	阻燃性
0.23~0.25	392.65	90	3.1~3.2	✓	✓

1.3 试样制作

所用试样为 100 mm×100 mm×100 mm 的方形试样,养护温度为 30℃,密度控制在 0.23~0.25 g/cm³ 之间。在没有约束的情况下,发泡完成后材料形状不规则,为了减小每个试样之间存在的离散性,将相同重量的原料放入尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 立方体模具中制作成型,切割掉发泡后多余的部分,使用砂纸将其顶部及底部打磨平整。

研究的聚氨酯发泡材料主要运用在道路应急

抢通中,在实际运用时聚氨酯材料从发泡到完成时间仅在 2 h 内,并且受施工设备的影响,聚氨酯抢修路面一般采用分层填筑的方式,先后填筑的材料之间会存在明显的胶结面,而路面上下两层间的胶结面会对路面的力学性能造成明显的弱化效应。基于此,分两步制样,先制作一个 100 mm×100 mm×50 mm 的长方体试样,再在此部分的基础上进一步浇筑,制成一个完整的 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试样(如图 5 所示),两层试样制作时间间隔不超过 10 min,尽可能模拟实际工程中的浇筑过程。

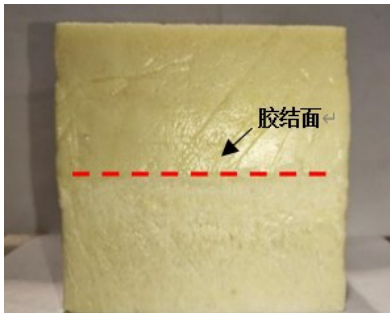


图 5 含胶结面的立方体试样
Fig.5 Cubic sample with interface

1.4 试验方法及过程

车辆运行过程中,路面会因车辆的竖向荷载而产生竖向变形,也会因挤压、摩擦而产生横向变形,因此,试验将从轴向力和切向力两方面研究聚氨酯材料在循环作用下的力学特性。轴向循环加卸载试验与切向循环剪切试验均采用 KYZW-50D 型岩石动剪耦合试验系统(如图 6 所示)。



图 6 KYZW-50D 型岩石动剪耦合试验系统
Fig.6 KYZW-50D Rock Dynamic Shear Coupling System

轴向循环加载试验在轴向对试样施加不同频率、波形为正弦波的压力,对试样进行循环压缩(加载路径如图 7(a)所示)。在试验前对 3 个含有胶结面的试样进行单轴压缩试验,得到的强度平均值为 3.12 MPa,选取 0.5 MPa 为最低加载量值,在不同幅值下进行轴向循环加卸载试验,试验参数如表 2 所示。

表 2 轴向循环加载试验参数表

Table 2 Sample parameters for axial cyclic loading and unloading tests

试样编号	频率/Hz	振幅/MPa	应力加载范围/MPa
1	0.1	0.75	0.5~2.0
2	0.1	0.10	0.5~2.5
3	0.1	1.25	0.5~3.0
4	0.2	0.75	0.5~2.0
5	0.2	0.10	0.5~2.5
6	0.2	1.25	0.5~3.0
7	0.5	0.75	0.5~2.0
8	0.5	0.10	0.5~2.5
9	0.5	1.25	0.5~3.0

切向循环剪切试验在不同的轴向力作用下对试样施加波形为正弦波的切向力(加载路径如图 7(b)所示)。在试验前用该仪器对含胶结面试样在 3 种不同轴向力下进行直剪试验,按照 200~600 kPa 的通行车辆荷载考虑,设置试验轴向力为 2、4、6 kN,得到试样的平均剪切强度为 1.1~1.3 MPa,选取 0.3 MPa 为最小切向力加载值,在不同幅值下进行切向循环加卸载直剪试验,试验参数如表 3 所示。

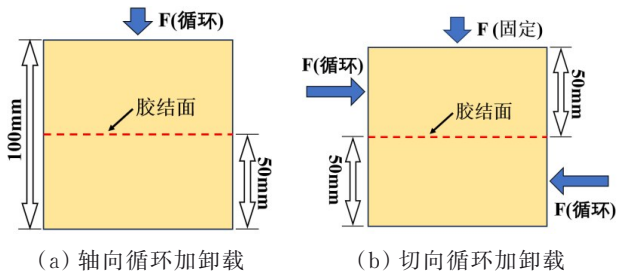


图 7 试样加载示意图

Fig.7 Loading schematic

表 3 切向循环加卸载试验试样参数表

Table3 Sample parameters for tangential cyclic loading and unloading tests

试样编号	轴向力/ kN	应力下限 比/%	应力上限 比/%	应力加载范 围/MPa
1	2	25.0	50.0	0.3~0.6
2	2	25.0	66.7	0.3~0.8
3	2	50.0	66.7	0.6~0.8
4	4	25.0	50	0.3~0.6
5	4	25.0	66.7	0.3~0.8
6	4	50.0	66.7	0.6~0.8
7	6	25.0	50	0.3~0.6
8	6	25.0	66.7	0.3~0.8
9	6	50.0	66.7	0.6~0.8

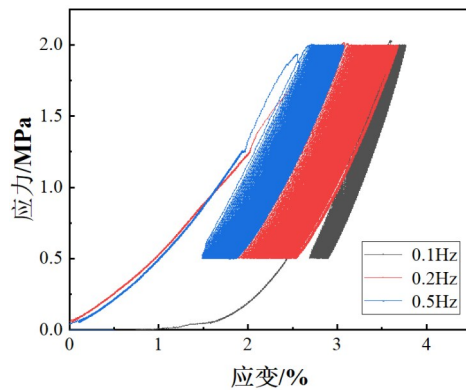
试件在经过一定次数的循环加载后,若未能完成规定的加载次数而发生破坏,则认为该种情况下

对于试件属于不利条件,记录下循环加载次数;若试件能够在 500 次循环加载中不发生破坏,则记录下 500 次循环加载过程中应力正弦波波峰与波谷对应的变形值。

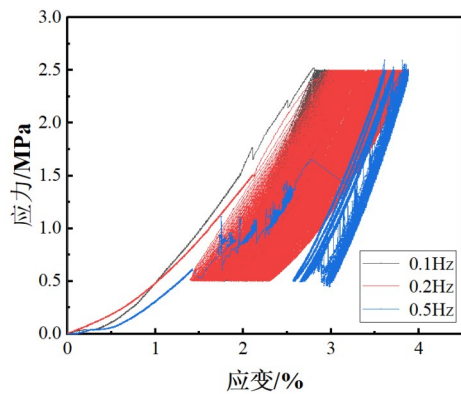
2 试验结果分析

2.1 轴向循环加载试验结果分析

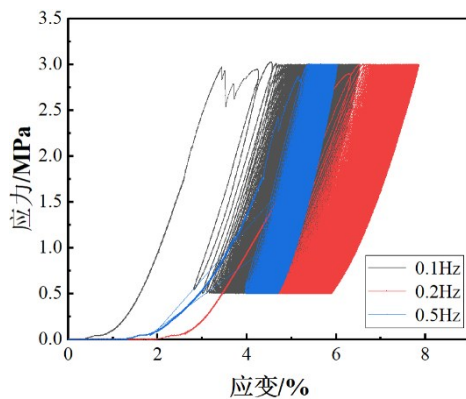
轴向循环加卸载试验过程中聚氨酯试样的轴向应力-应变曲线如图 8 所示,试验中的 9 种试样均完成 500 次循环。



(a) 应力加载范围 0.5~2.0 MPa



(b) 应力加载范围 0.5~2.5 MPa



(c) 应力加载范围 0.5~3.0 MPa

图 8 轴向循环加卸载试验应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curve of axial cyclic loading and unloading test

从图 8 可以看出,当聚氨酯试样的轴向应力加载至上限值后,卸载时的曲线与加载曲线不重合,且始终低于加载曲线,这是由于试样在循环加载过程中会同时产生弹性变形和塑性变形,其中弹性变形会因轴向力的卸载而恢复,塑性变形则会存留。在此过程中试样被压密,可恢复的弹性变形减小,塑性变形增加,试样整体变形增加,应力-应变曲线向右发生偏移。

图 9、图 10 给出了试样在不同应力加载范围和不同加载频率下的变形量。在 3 种应力加载范围下,加载频率对试样变形影响均呈现出“先增后减”的规律,即加载频率较低(0.1 Hz)时对应的变形较小,加载频率达到 0.2 Hz 时变形量相对较大,而更高的加载频率(0.5 Hz)对应的变形则为三者之间最小。在 0.5~2.0 MPa 应力加载范围,0.1、0.2、0.5 Hz 三种频率下试样相较于前一频率的应变变化分别为 17.66%、-18.51%;0.5~2.5 MPa 和 0.5~3.0 MPa 应力加载范围下,试样相较于前一频率变形量分别变化了 12.8%、-16.2% 和 19.89%、-23.21%。

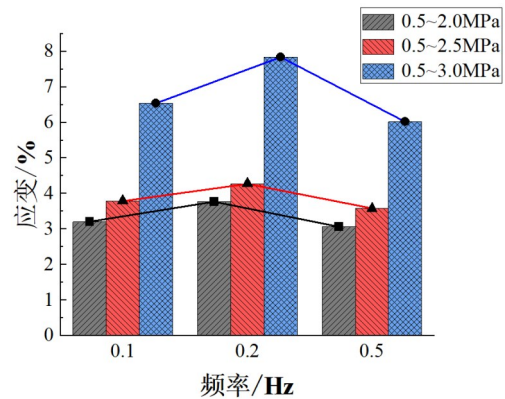


图 9 试样在不同加载频率下的应变

Fig.9 Deformation under different frequencies

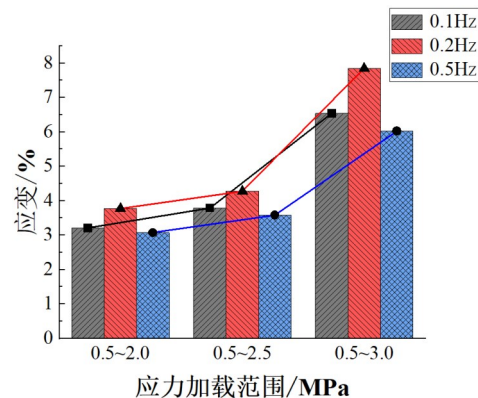


图 10 试样在不同应力加载范围下的应变

Fig.10 Deformation under different stress loading range

进一步分析出现上述变形规律的原因认为:1)在加卸载频率较低时,试样内部原生裂隙及新生裂

隙的发展速度较缓慢,且大部分变形由可恢复的弹性变形组成;在卸载阶段,这种变形逐渐恢复,因此循环过程中不可逆的塑性变形较少;2)随着加卸载频率的增加,试样内部裂隙迅速扩展,不可逆的塑性变形开始占据主导地位,而弹性变形未能及时恢复,导致循环期间产生较大的塑性变形;3)而当循环过程中加卸载速率增加到一个临界值时,聚氨酯试样在循环初期即压密阶段内部裂隙被迅速压密闭合,随后的弹性变形阶段在卸载时响应速度更快,导致循环期间试样更加致密,整体强度得到提升,从而产生更小的变形。

结合图9和图10可见,在3种加载频率下,应力加载范围对试样变形影响显著,随着应力加载幅值的增大,试样变形相应明显增加。如在0.1 Hz加载频率下,0.5~2.0 MPa、0.5~2.5 MPa、0.5~3.0 MPa三种不同应力加载范围大小的试样变形量相较于前一种应力加载范围分别增加了18.29%、75.56%;0.2 Hz和0.5 Hz加载频率下,试样相较于前一种应力加载范围变形量分别增加了13.45%、83.33%和26.37%、55.10%。

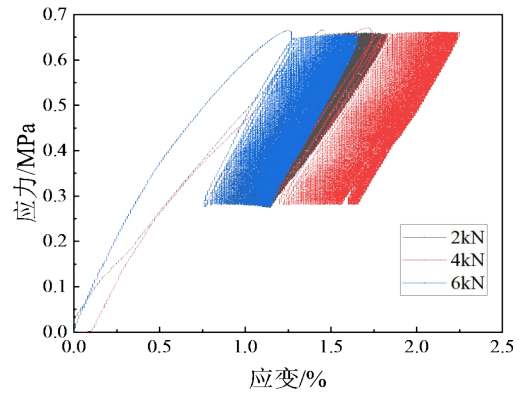
进一步分析发现,试样在应力加载范围为0.5~3.0 MPa时的应变远大于在0.5~2.0 MPa及0.5~2.5 MPa时的应变。因此可以判断,当循环加载应力的上限值超过了某一值(约为试样单轴抗压强度的90%)时,试样由弹性阶段和压密阶段快速进入塑性变形阶段,变形不再保持缓慢增长,而进入快速增长状态。

对两种不同影响因素进行对比,在应力加载范围增大时,聚氨酯试样的应变增长最大可达到83.33%,而在加载频率变化时,聚氨酯试样的应变增长最大为23.21%,这说明应力加载幅值对聚氨酯试样变形的影响明显更大,也说明聚氨酯材料在应对不同加载频率时稳定性较好,不会因频率突然增大而产生较大变形。

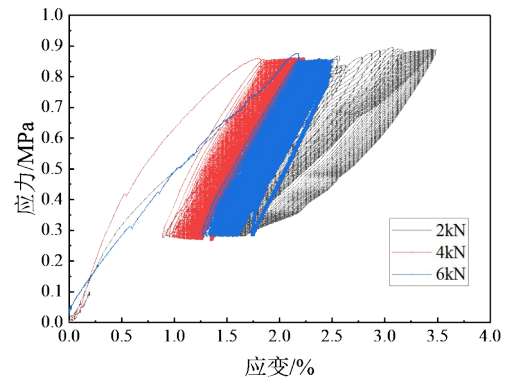
2.2 循环剪切试验结果分析

图11为轴向力分别为2、4、6 kN条件下聚氨酯试样的切向循环剪切试验的应力-应变曲线。在切向力0.3~0.8 MPa、轴向力2 kN的情况下,试样循环76次后发生破坏;在切向力0.6~0.8 MPa、轴向力2 kN的情况下,试样循环79次后发生破坏,其余试样均完成500次循环。

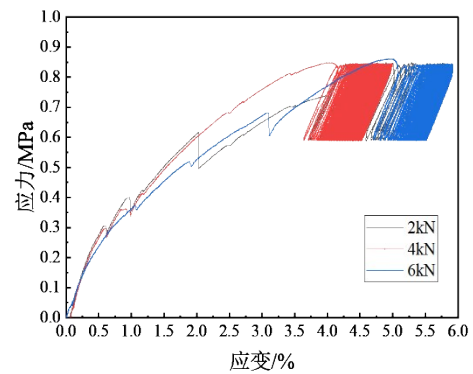
由图11可知,聚氨酯试样在轴向力以及切向循环荷载作用下的应力-应变曲线在向右发生偏移,说明试样在循环剪切过程中发生了剪切压缩变形,但没有出现应力突变,即试样在试验过程中没有发生大的形变。在相同轴向力作用下,试验初期的应力-



(a) 切向0.3~0.6 MPa



(b) 切向0.3~0.8 MPa



(c) 切向0.6~0.8 MPa

图11 切向循环剪切试验应力-应变曲线

Fig.11 Stress-strain curves for tangential cyclic shear tests

剪切应变曲线更为倾斜,试样变形较大,随着循环次数的增加,聚氨酯试样的剪切曲线由疏变密并逐渐重合,即曲线卸载段变形量也逐渐减小,这是由于聚氨酯试件的内部泡孔在剪切过程中发生了变形压缩,逐渐密实,力学性质趋于稳定。

图12为聚氨酯试样在不同轴向力作用下的最终切向应变。结合图11和图12可以发现,在轴向力较小(2 kN)时,当切向力加载范围较大(0.3~0.6 MPa、0.3~0.8 MPa)时试样会出现破坏,而在较大的轴向力(4、6 kN)下,试样的压实程度更好,胶结面处的摩擦力更大,试样经过循环剪切后未破坏,且试样变形随着轴向力增大而变小。可见增加

一定的轴向力能更好压实聚氨酯材料,进而能改善其抗剪性能。

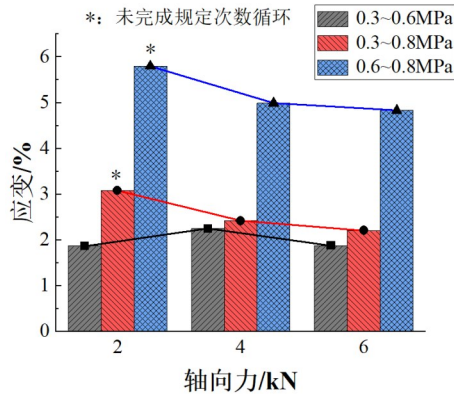


图 12 不同轴向力下试样最终切向应变

Fig.12 Final tangential strain under different axial forces

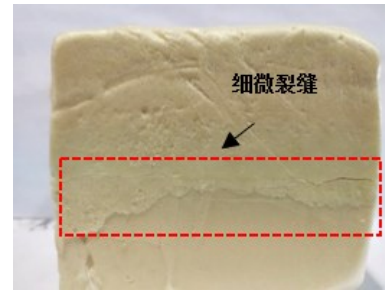
在切向力加载范围为 0.3~0.6 MPa 时,3 种轴向力作用下的聚氨酯试样切向应变均较小;当切向力加载范围增大时,3 种轴向力作用下试样的变形均出现了增加,且切向力加载幅值越大,试样的变形更大,说明剪切力大小对聚氨酯材料的变形影响更大。在工程应用中,应当尽量避免轴向(法向)力较小甚至无加载时让聚氨酯材料处于循环或往复的剪切工作状态。

2.3 破坏形态分析

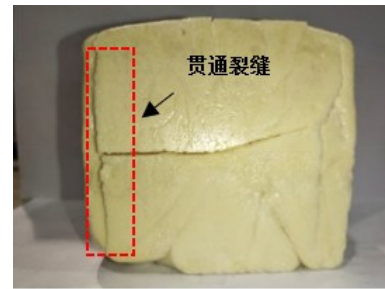
图 13 为聚氨酯试样分别在 0.5~2.0 MPa、0.5~2.5 MPa、0.5~3.0 MPa 三种荷载下进行轴向循环加卸载试验 500 次循环后的变形破坏状态,其加载频率均为 0.2 Hz。当轴向荷载为 0.5~2.0 MPa 时,试样在循环压缩过程中未出现明显破坏及较大变形,下部被压密,高度变小,且在中部出现了明显的鼓胀。同时试样胶结面部位出现了细微裂缝,这是由于胶结面处无法完全黏结,存在大量微小裂隙,在循环压缩过程中试样受压后会产生侧向应力,出现剪切变形趋势,当胶结面的黏结力小于侧向应力时,胶结面处存在的微小裂隙会进一步因压剪作用而扩展产生裂缝。

当荷载增加到 0.5~2.5 MPa 时,试样胶结面处裂缝增大,且靠近试样边缘处出现张性裂缝并向上下扩展,同时与胶结面处裂缝贯通,呈现出拉剪破坏的特点。这是由于试样在循环受压过程中两侧无约束,表层材料发泡过程中空气接触更为充分,具有更为显著的脆性特点,受压时产生了张拉劈裂破坏,而试样胶结面处存在微小裂隙,仍以剪切破坏为主。图中试样虽出现了明显裂隙,但破坏保持了一定的整体性,未出现严重分离,仍具有一定的残余强度。

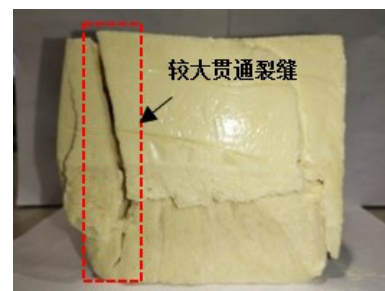
当荷载增加到 0.5~3.0 MPa 后,试样仍出现较



(a) 0.5~2.0 MPa 应力



(b) 0.5~2.5 MPa 应力



(c) 0.5~3.0 MPa 应力

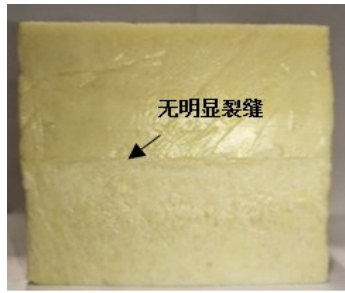
图 13 0.2 Hz 频率下试样轴向循环加卸载后破坏情况

Fig.13 Damage of samples after axial cyclic loading and unloading under 0.2 Hz frequency

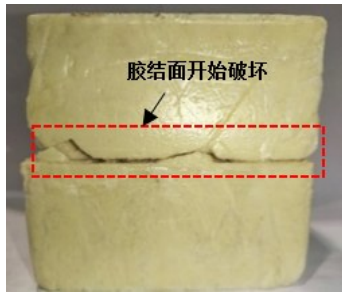
大的竖向劈裂贯通裂缝和沿胶结面处的剪切裂缝,呈现出拉剪破坏的特点。但相对 0.5~2.5 MPa 的应力范围,此时试样裂隙开度和数量更大,破坏程度更为明显。在出现较大裂缝后,随着荷载的循环,试样还会产生轻微回弹,表明破坏后试样剩余的部分还存有一定的弹性,没有立刻失去全部承载能力。

图 14 为聚氨酯试样在不同切向力作用下的循环剪切试验后的破坏情况,其轴向力作用均为 4 kN。可以看出,试样的破坏基本都是沿着胶结面展开的。循环荷载为 0.3~0.6 MPa 时试样胶结面处无明显破坏,而试样上下部分受力处发生变形,说明聚氨酯试样的塑性较好,可承受较小切向力作用下的循环剪切;循环荷载增加到 0.3~0.8 MPa 后试样开始产生破坏,并沿着胶结面处剪断;循环荷载达到 0.3~0.8 MPa 后胶结面处出现明显锯齿状裂缝且试样表面发生脱落,这是由于在切向力增大时胶结面处的微小裂隙向不同方向扩展,产生了张拉

破坏,同时胶结面发生剪切破坏,形成锯齿状裂缝。



(a) 切向 0.3~0.6 MPa



(b) 切向 0.3~0.8 MPa



(c) 切向 0.6~0.8 MPa

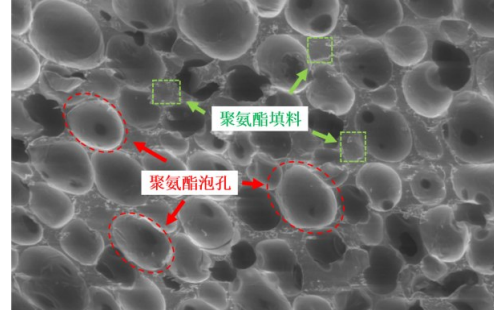
图 14 4 kN 轴向力作用下试样切向循环架卸载后破坏情况

Fig.14 Damage of samples after tangential cyclic loading and unloading under 4 kN axial force

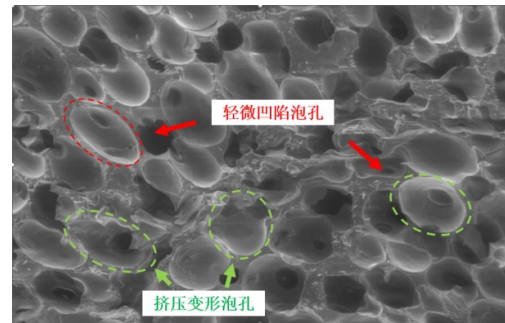
结合轴向和切向循环加卸载应力-应变曲线及宏观破坏特征发现,所有试样均完成了 500 次轴向循环加卸载试验,表明聚氨酯材料在轴向力作用下的抗疲劳特性较好,其内部泡孔结构的可压密性保证了材料的强度在多次循环后不会发生太大变化,且在破坏后仍具有部分承载能力,在工程应用中的安全性有所保证。在切向循环剪切试验中,除在轴向力 2 kN、切向力较大的情况下提前发生破坏外,增大轴向力后试样均完成 500 次循环,表明聚氨酯材料在切向力较大的情况下需要较大的轴向力压密才能进一步提升其抗剪性能。而在道路抢通后的应急车辆通行中,车辆对聚氨酯换填材料施加的法向力一般会大于水平力,这可为聚氨酯材料提供相对更符合其动力学特性的工程应用场景。

2.4 聚氨酯发泡材料微观特征分析

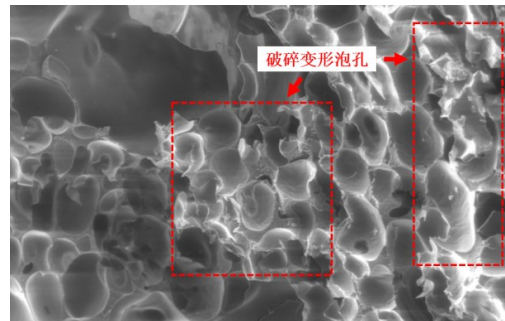
借助 SEM 扫描电子显微镜,分别对进行轴向循环加卸载试验前后的聚氨酯试样进行扫描,放大 200 倍,如图 15 所示。



(a) 聚氨酯试样微观形态



(b) 单个泡孔受压状态



(c) 泡孔群受压状态

图 15 聚氨酯试样微观形态

Fig.15 Micro-morphology of polyurethane samples

从图 15(a)可以看出,聚氨酯试样在成型后内部由大小不一的泡孔组成,泡孔形状多为椭球状及圆球状,表面光滑,相互之间紧密相连,泡孔与泡孔之间的空隙由聚氨酯填料填充。泡孔内部留存有发泡时产生的二氧化碳气体,且在发泡完成后的聚氨酯材料中体积占比较大,故聚氨酯材料密度较小。材料内部的主要支撑结构为泡孔孔壁与空隙中的聚氨酯填料,在受力后泡孔会被压缩,二氧化碳气体排出。

试样受压后,泡孔会相互挤压变形,出现轻微凹陷,不再呈现圆球状或椭球状。此时泡孔中的部分气体被排出,泡孔排布更为密实,见图 15(b)。当

继续加载时,大量泡孔在压力作用下继续发生形变,产生明显凹陷直至被挤压破坏,大部分气体被排出,此时构成泡孔壁的组分与空隙处的聚氨酯填料充分接触(图 15(c)),材料的密实度提升,此时为聚氨酯试样的“压密阶段”,试样的强度将会持续增加。当聚氨酯填料达到最大的承载能力并发生破碎,试样出现峰值强度,随位移继续增加,试样开始不断产生裂缝,直至完全破坏。

3 结论

通过进行轴向循环加卸载试验以及切向循环加卸载直剪试验对聚氨酯的抗疲劳特性进行研究,得出以下结论:

1) 聚氨酯试样的轴向应变随轴向加载频率先增后减,而随轴向应力加载范围持续增大,轴向应力范围对试样应变的影响较加载频率更为显著,当加载应力超过单轴抗压强度的 90% 时,试样的变形进入快速增长状态,最大轴向应变可达 7%~8%。

2) 轴向力较大时试样的压实度较高,胶结面处摩擦力更大,在循环剪切中不易产生较大变形,且切向力加载范围下限值的增大会引起试样变形的明显增加,最大切向应变可达 5%~6%。工程中适当增加聚氨酯材料的轴向受力(不宜超过单轴抗压强度的 90%)会增强其抗剪性能,或应避免在轴向力较小时让聚氨酯材料处于循环剪切状态。

3) 轴向循环荷载作用下,聚氨酯试样胶结面处先产生微小压剪裂隙,并随轴向力增加出现沿胶结面的压剪破坏,后发展为沿两侧竖向裂隙-胶结面处的拉剪破坏;在切向循环剪切荷载下,随着加载范围的增大试样主要出现沿胶结面的压剪破坏。

参考文献

- [1] 董晶亮, 卢普光, 丁杨, 等. 屋面保温隔热材料耐候性试验设计[J]. 塑料, 2019, 48(4): 115-117, 121.
DONG J L, LU P G, DING Y, et al. Weather resistance test design and research of roof insulation materials [J]. Plastics, 2019, 48(4): 115-117, 121. (in Chinese)
- [2] 江小浦, 胡书可. 高性能水性聚氨酯涂料的发展及改性研究[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 296-302.
JIANG X P, HU S K. Development and modification of high performance waterborne polyurethane coatings [J]. Surface Technology, 2020, 49(11): 296-302. (in Chinese)
- [3] 向臻. 动态二硫键与氢键协同作用的多功能聚氨酯脲的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
XIANG Z. Study on multifunctional polyurethane urea with synergistic effect of dynamic disulfide bond and

hydrogen bond [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese)

- [4] CHEN J, YIN X J, WANG H, et al. Evaluation of durability and functional performance of porous polyurethane mixture in porous pavement [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188: 12-19.
- [5] 郭桂宏, 丛林, 杨帆, 等. 聚氨酯材料在路面工程中的应用进展[J]. 公路交通科技, 2020, 37(6): 1-10.
GUO G H, CONG L, YANG F, et al. Application progress of polyurethane material in pavement engineering [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(6): 1-10. (in Chinese)
- [6] XIA C Y. Discussion on repair method of concrete highway pavement [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 321/322/323/324: 209-212.
- [7] 高屹. 机场道面快速抢修试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
GAO Y. Experimental study on rapid repair of airport pavement [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [8] 陶伟明, 卢春房, 叶长文, 等. 聚氨酯复合注浆材料浆液扩散特性及应用研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(7): 1-9.
TAO W M, LU C F, YE C W, et al. Study on grout diffusion characteristics and application of polyurethane composite grouting materials [J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(7): 1-9. (in Chinese)
- [9] 郭豪, 贾非, 陈琰霏, 等. 应变速率对硬质聚氨酯准静态拉伸行为的影响[J]. 材料导报, 2022, 36(5): 216-219.
GUO H, JIA F, CHEN Y F, et al. Effect of strain rate on quasi-static tensile behavior of rigid polyurethane [J]. Materials Reports, 2022, 36(5): 216-219. (in Chinese)
- [10] 李岩, 李文, 张华建, 等. 桥梁无缝伸缩缝用改性聚氨酯研发及足尺试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(11): 3853-3865.
LI Y, LI W, ZHANG H J, et al. Development and full-scale tests of modified polyurethane-based seamless expansion joints for bridge [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(11): 3853-3865. (in Chinese)
- [11] CHEN B, XIONG W T, ZHOU C L, et al. Anti-fouling and anti-corrosion polyurethane acrylate coatings with excellent adhesion prepared by photosensitive bio-based tannic acid and perfluorinated chain extender for PCBs protection [J]. Progress in Organic Coatings, 2024, 189: 108319.
- [12] 金鑫, 郭乃胜, 尤占平, 等. 聚氨酯改性沥青研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2019, 33(21): 3686-3694.
JIN X, GUO N S, YOU Z P, et al. Research and development trends of polyurethane modified asphalt [J]. Materials Reports, 2019, 33(21): 3686-3694. (in Chinese)
- [13] 谢康, 苏谦, 陈晓斌, 等. 无砟轨道聚氨酯碎石防水联结层单元模型试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(8):

- 2308-2317.
- XIE K, SU Q, CHEN X B, et al. Element model test on polyurethane crushed stone waterproof bonding layer of ballastless track [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(8): 2308-2317. (in Chinese)
- [14] 赖振峰, 王万金, 夏义兵, 等. 高强度聚氨酯防水涂料在城际铁路桥面防水工程中的应用研究[J]. *中国建筑防水*, 2016(2): 28-30.
- LAI Z F, WANG W J, XIA Y B, et al. Application research of high-strength polyurethane waterproofing coating in waterproofing engineering of intercity railway bridge deck [J]. *China Building Waterproofing*, 2016(2): 28-30. (in Chinese)
- [15] 温宇彤, 徐玲琳, 谢明君, 等. PU-SBS 复合改性沥青的高温性能试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(6): 162-169.
- WEN Y T, XU L L, XIE M J, et al. Experimental study on high temperature performance of PU-SBS composite modified asphalt [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(6): 162-169. (in Chinese)
- [16] AL-KAHTANI M S M, ZHU H, IBRAHIM Y E, et al. Study on the mechanical properties of polyurethane-cement mortar containing nanosilica: RSM and machine learning approach [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(24): 13348.
- [17] 魏同军, 李涛, 朱孔法, 等. 聚氨酯增韧环氧树脂裂缝修补材料性能研究[J]. *热固性树脂*, 2023, 38(6): 9-15.
- WEI T J, LI T, ZHU K F, et al. Performance of polyurethane toughened epoxy resin crack repair materials [J]. *Thermosetting Resin*, 2023, 38(6): 9-15. (in Chinese)
- [18] 陈杨杰, 张雄飞, 卢小莲, 等. 混凝土裂缝修补材料环氧树脂的聚氨酯增韧改性研究[J]. *公路交通科技*, 2019, 36(9): 24-30.
- CHEN Y J, ZHANG X F, LU X L, et al. Study on toughness modification of epoxy resin by polyurethane for crack repair in concrete [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2019, 36(9): 24-30. (in Chinese)
- [19] LI K N, YAN X L, AI T, et al. Study on properties and application of chloroprene rubber/polyurethane modified asphalt sealant [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 406: 133177.
- [20] XU J Y, MA B, LIU F S, et al. Study of the bonding performance and application of an epoxy resin pavement sealant [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2023, 35(7): 04023183.
- (编辑 XXX)