

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201704021

剪切疲劳荷载下无砟轨道灌缝胶低温粘附特性

薛恒潇, 谭忆秋

(哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090)

摘 要: 为研究无砟轨道聚氨酯灌缝胶在剪切疲劳荷载下粘附性能发展规律,依据灌缝胶工况开发了剪切疲劳试验及低温粘附特性直接拉伸试验,对经不同次数剪切疲劳加载的粘附性试件进行直接低温拉伸试验,分析剪切疲劳前后不同灌缝胶最大拉力、破坏位移指标的变化规律,及拉力-位移曲线的发展特性. 结果表明:对未经疲劳加载的灌缝胶,材料异氰酸酯指数 R 与粘附强度呈正相关,与粘附抗变形能力呈负相关;疲劳加载后, R 与材料抗疲劳性能呈负相关;疲劳加载初期, R 较小的灌缝胶因体系内链段取向而出现粘附性能提高、离散性变大现象;疲劳加载过程中,由于材料内部介质不连续导致最大拉力指标稳定性优于破坏位移;随剪切疲劳加载次数增加,材料内部损伤累积破坏了粘附整体性,使失效模式由脆性破坏趋向于韧性破坏;基于试验结果,推荐抗剪切疲劳性能较好灌缝胶 R 宜在 1.7~2.5 之间.

关键词: 无砟轨道;聚氨酯灌缝胶;低温粘附性能;剪切疲劳试验;指标分析

中图分类号: U216.42 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)03-0033-06

Low-temperature adhesive properties of sealant applied in ballastless track under shear fatigue loading

XUE Hengxiao, TAN Yiqiu

(School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To research the adhesive properties of polyurethane sealant under shear fatigue loading, a test method for evaluating the adhesive properties of sealants was developed based on the in-situ working condition. Direct tension tests at low temperature were conducted on the samples subjected to various shear fatigue cycles, the effects of various sealants on the maximum tensile force, failure displacement and force-displacement curves were analyzed and compared between experienced and un-experienced shear fatigue loading. The results show that the isocyanate index R of the samples un-experienced shear fatigue loading presents the positive correlation with bonding strength, and negative correlation with deformation resistivity. However, the R value presents a negative correlation with fatigue resistivity of sealants for the samples experienced shear fatigue loading. The adhesive properties and discreteness of sealants were improved due to chain orientation within sealants at the initial period of fatigue cycles. During the fatigue cycles, the stability of maximum force index is superior to the failure displacement due to the discontinuous medium of sealant body. As the increase of fatigue cycles, the accumulation of damage breaks the integrality of the bonding interface, which leads to the change of failure mode from brittle failure to ductile failure. Based on the test results, the sealants with R values between 1.7~2.5 could present better shear fatigue resistance performances.

Keywords: ballastless track; polyurethane sealant; adhesive property at low temperature; shear fatigue test; index analysis

在无砟轨道防水体系中,底座板接缝防水是其重中之重. 不良的接缝防水将导致底座板边及其内部钢筋的锈蚀^[1]. 目前,灌缝是最为常见底座板接缝防水处置方式,而双组份聚氨酯灌缝胶以其快速施工、造价低廉等优势受到了最为广泛的关注. 由于无砟轨道养护难度大,施工条件苛刻,相关行业规

范对无砟轨道防水体系使用寿命提出了 10 a 的要求. 在影响灌缝胶耐久性的各项外部工况中,由列车振动引发的剪切疲劳荷载是重要因素之一^[2]. 据无砟轨道养护经验及相关研究成果可知,低温条件下的粘附性失效是灌缝胶的主要失效形式^[3]. 因此,系统深入地研究剪切疲劳作用下无砟轨道灌缝胶低温粘附性能发展规律具有重要的现实意义.

中国现行的无砟轨道灌缝胶粘附性能评价方法是参照文献[4]中的定伸粘结性试验进行,但该方法未能充分考虑灌缝胶真实工况. 在粘附性试验方法研究中,文献[5]所述 bond test 是基于直接拉伸

收稿日期: 2017-04-06
基金项目: 国家杰出青年科学基金 (51225803)
作者简介: 薛恒潇(1988—),男,博士研究生;
谭忆秋(1968—),女,教授,博士生导师
通信作者: 谭忆秋, yiqiutan@163.com

加载的道路灌缝胶粘附性的标准评价方法. 表面能作为表征材料粘附性能的经典指标, 是材料在粘附形成新界面过程中所释放的能量^[6]. 目前, 接触角法是最为成熟的表面能测试方法, 文献[7]使用接触角法测量了道路灌缝胶与不同基片材料间的兼容能力. 起泡试验方法通过在防护罩面材料与基片粘附界面间注入酒精, 测量罩面层剥离起泡高度及泡内压强等指标表征罩面层粘附性能^[8]. 文献[9]将起泡试验引入道路灌缝胶粘附性能评价领域. 此外, 文献[10]使用沥青混凝土切割试块模拟真实路面裂缝, 并对试件进行直接拉伸加载. 基于上述不同试验方法比较, 直接拉伸试验方式可以更为真实地模拟灌缝胶在自然环境下的受力状态, 且试验精度高, 稳定性好, 操作简便.

对于剪切疲劳试验方法的研究, 文献[11]基于剪切单搭接拉伸疲劳试验测定了车用结构胶接头等在不同应力水平下的疲劳寿命. 此外, 双搭接、阶梯搭接等形式接头试件均在剪切疲劳研究领域有过应用经历^[12-13]. 在沥青胶浆抗剪切疲劳性能研究领域, 动态剪切流变仪(DSR)是经典的试验方法, 该方法通过对沥青施加往复剪切荷载, 直接测量材料相位角、模量等指标^[14]. 在文献[15-16]的研究中, 使用集料制成平行板替代原有平行板与沥青接触, 用以评价沥青与集料粘附界面的抗剪切特性. 文献[17]对注浆材料进行了轴向加载, 研究了材料疲劳性能及微观结构演化. 文献[18]依据刚柔复合式路面层间界面受力状态, 设计了剪切疲劳测试装置. 基于疲劳加载方法分析可知, 依据研究材料的受力特性开发疲劳加载试验方法是较为广泛使用的研究手段.

综上所述, 本文基于自主研发的灌缝胶低温性能测定仪(LTTT)研究了寒区常用无砟轨道聚氨酯灌缝胶粘附性能; 设计开发剪切疲劳加载夹具, 对灌缝胶粘附性试件进行不同次数的剪切疲劳加载; 并对比分析了剪切疲劳前后不同低温拉伸试验评价指标的发展特性.

1 试验方法

1.1 灌缝胶低温粘附性能试验

无砟轨道灌缝胶粘附性试验采用自主研发灌缝胶低温性能测定仪(LTTT)(见图1)进行加载. 设备最大位移为 100 mm, 精度为 ± 0.5 mm; 最大拉力为 2 000 N, 精度为 ± 2 N; 控温范围为 $-35 \sim 60$ $^{\circ}\text{C}$, 精度为 ± 0.5 $^{\circ}\text{C}$; 加载速率为 3 ~ 300 mm/h, 精度为 ± 1 mm/h. LTTT 配有 3 套独立加载单元, 可同时对 3 组试件进行加载, 提高试验效率的同时也保证了试验加载环境的稳定. 为验证 3 组加载单元平行

性, 选用质地较软的道路沥青基灌缝胶 H 在相同流程下制备试件, 并于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 环境下以 100 mm/h 的速率在 3 组加载单元上同时进行试验, 所测平行性验证试验拉伸曲线如图 2 所示.



图 1 灌缝胶低温性能测定仪(LTTT)

Fig.1 Low temperature tensile tester (LTTT)

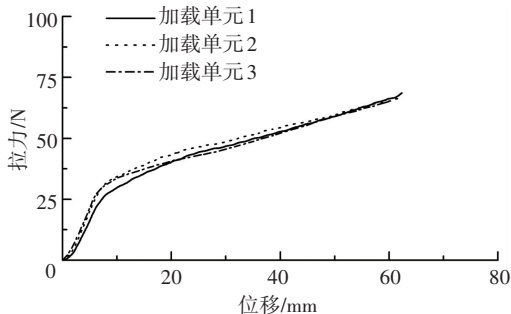


图 2 加载单元平行性验证

Fig.2 Parallelism validation on various loading systems

在无砟轨道灌缝胶服役工况下, 与其接触的混凝土板切割缝壁大部分为石料切面, 其成分以 SiO_2 为主. 为联系真实缝壁接触条件, 并兼顾试验稳定性, 排除基片材料表面变异性干扰, 本文基片选择高纯度石英切片, 其表面 SiO_2 含量为 99.49 %. 此外, 灌缝胶在底座板接缝的灌注深度为 20 mm, 由此确定粘附性试件深度为 20 mm. 由于所开发试验旨在研究灌缝胶粘附特性, 为兼顾考虑试验过程中灌缝胶自身变形及试件制备质量, 确定试件灌缝胶层宽度为 5 mm, 试件失效效果如图 3(a) 所示. 为保证试件发生粘附性失效, 在一侧石英基片粘附表面喷涂 20 mm $\times$ 10 mm 的预先脱粘区, 如图 3(b) 所示.

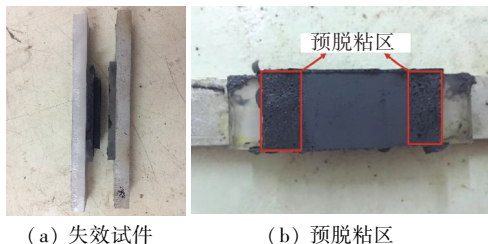


图 3 聚氨酯灌缝胶粘附性失效试件及预脱粘区

Fig.3 Failure samples and pre-failure samples with polyurethane sealant

参考我国最北方交通枢纽哈尔滨 1 月份日均最低气温, 选定 -25 $^{\circ}\text{C}$ 为本文标准试验温度. 另外, 鉴于水泥混凝土由温度及干缩引发收缩速率过低, 难

以在室内条件下模拟真实工况参数,基于早期经验积累^[19],选定加载速率为 100 mm/h.

1.2 灌缝胶剪切疲劳试验方法

列车振动对灌缝胶造成的剪切荷载主要源于轨道不平顺、车轮轮扁、轨道板接缝处刚度不均匀等因素引发的轮轨激励.但相关研究结果表明,列车振动荷载可简化为轮组对下方基础结构作用^[20].由此算得下方结构层对列车振动的动态响应频率为

$$f = n \frac{v}{L} \quad (1)$$

式中: f 为有效振动频率, n 为单节车厢轮组数量, v 为列车运行速度, L 为单节车厢长度.

依据式(1),在列车运行速度为 300 km/h,单节车厢长度为 25 m,每节车厢配备 2 轮组的条件下,算得灌缝胶所受剪切疲劳荷载频率为 6.6 Hz.此外,依据底座板等结构对列车动载响应的实测结果及数学仿真分析成果可知,底座板在列车作用下振幅在 0.3~1.0 mm 之间^[21-22].综合上述灌缝胶工况分析,本文基于万能试验机(MTS)开发了灌缝胶剪切疲劳加载夹具(如图 4 所示),并选定剪切疲劳加载方式为位移控制模式.在创造最不利加载环境的考量下,合理提高室内试验加载强度,将剪切疲劳加载频率选定为 10 Hz,振幅选定为 1 mm.剪切疲劳加载次数分别为 7.2×10^4 、 $2 \times 7.2 \times 10^4$ 、 $3 \times 7.2 \times 10^4$ 、 $4 \times 7.2 \times 10^4$ 、 $5 \times 7.2 \times 10^4$.

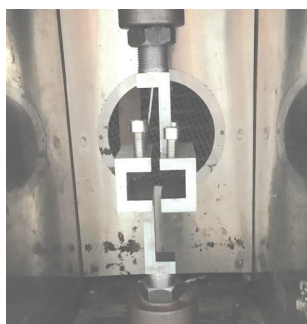


图4 剪切疲劳加载试验夹具

Fig.4 Fixture of shear fatigue test

2 试验结果及分析

试验选用 4 种寒区无砟轨道常用双组份聚氨酯灌缝胶,分别为 NI、SE、WQ、SY. 所选试验材料性能均满足高速铁路无砟轨道嵌缝材料暂行技术条例要求,4 种材料 R 值分别为 3.5、2.8、2.5、1.7.

2.1 剪切疲劳加载前灌缝胶粘附特性分析

对未经剪切疲劳加载的 4 种聚氨酯灌缝胶(NI、SE、WQ、SY)在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下以 100 mm/h 进行加载. 每种试验材料均制备 3 组平行试件,并分别置于 LTTT 内 3 组加载单元上同时加载,以确保

试验环境稳定. 为准确量化试验结果,选取了最大拉力与破坏位移指标表征材料粘附特性. 其中,最大拉力指试验所测拉力-位移曲线的拉力峰值,表征灌缝胶粘附强度;破坏位移指最大拉力点处对应位移量,表征灌缝胶粘附抗形变性能. 试验所测不同材料(NI、SE、WQ、SY)平均最大拉力分别为 837.06、529.96、314.84、178.34 N,对应破坏位移分别为 5.81、18.03、19.09、25.25 mm. 为进一步直观对比不同材料粘附特性差异,图 5 为不同材料代表性试件所测拉力-位移曲线.

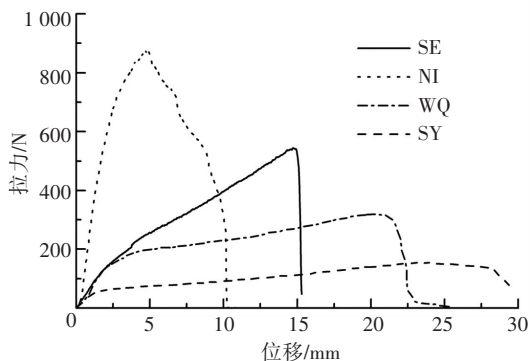


图5 不同材料拉伸曲线对比

Fig.5 Tension curves for various sealants

图 5 所示数据及材料自身 R 值分析可知, R 值与灌缝胶粘附强度呈正相关,与粘附抗变形能力呈负相关. 这是由于聚氨酯材料的微相分离特性,微观尺度上材料由软段、硬段、及过渡区域组成. 软段主要影响材料粘韧性,极性较弱;硬段主要影响材料弹性及模量,极性较强. R 值较大的聚氨酯硬段含量较高、极性大,以致粘附强度较大. 且试验所选材料 R 值最大可达 3.5,在聚氨酯体系中存在过量—NCO,降低了体系黏度,使聚氨酯与基片材料浸润性得到提高^[23].

此外,分析图 5 曲线可发现,不同材料的拉力-位移曲线在试验初期均有近似线性增长阶段,在拉力水平到达一定阶段后,上升速率逐渐放缓. 这是由于拉伸过程中材料内部应力累积与松弛竞争机制所致, R 值越大的聚氨酯灌缝胶,该松弛现象越不明显. 这也证明 R 值较大的材料,所形成聚氨酯硬段含量较高,材料弹性行为体现越明显. 且硬段含量的增加也提高了体系内交结点密度,进一步增强了材料的宏观弹性^[24].

2.2 剪切疲劳加载后聚氨酯灌缝胶粘附特性发展规律

2.2.1 最大拉力残留率

最大拉力残留率 η_1 为剪切疲劳加载前后灌缝胶拉伸试验所测最大拉力比值,用以横向比较不同灌缝胶经剪切疲劳加载后的界面强度发展情况; n 为疲劳加载次数. 试验所测 4 种灌缝胶最大拉力残留率在不同剪切疲劳加载次数下的发展规律如图 6 所示.

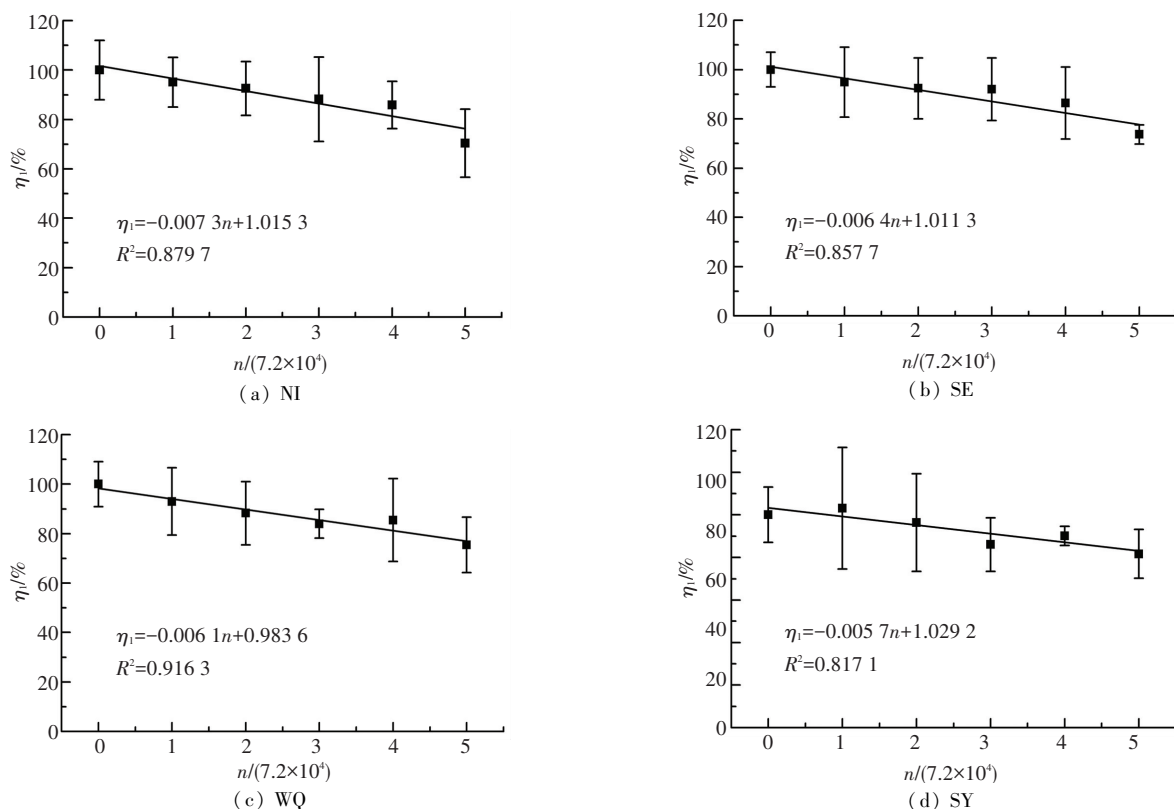


图 6 不同灌缝胶最大拉力残留率

Fig.6 Maximum residual rate for various sealants

如图 6 所示,不同灌缝胶经疲劳加载后,最大拉力均呈整体衰减趋势。经 5 个疲劳加载周期后,NI、SE、WQ、及 SY 的最大拉力残留率分别为 70.4%、73.7%、75.4%、81.7%。结合灌缝胶 R 值可知, R 值越大的灌缝胶,经剪切疲劳加载后,最大拉力残留率越低。这是由于 R 值较大聚氨酯内硬段比重较大,宏观上表现为材料弹性组分较高,在剪切疲劳荷载作用下更易产生损伤。此外,SY 在剪切疲劳加载初期,最大拉力值小幅提升。分析原因是由于 R 值最小的 SY 分子量相对较小,体系内对分子链段限制较弱。剪切疲劳作用下,体系内无定型链段发生取向,导致材料粘附性提高。但随着加载次数提高,内部损伤逐渐积累,在此竞争机制下,粘附强度整体下降,同时也表现为 SY 在 4 种材料中离散性最强。

2.2.2 破坏位移残留率

破坏位移残留率 η_d 为剪切疲劳加载前后灌缝胶拉伸试验所测破坏位移比值,用以横向比较不同灌缝胶经剪切疲劳加载后的粘附抗变形能力发展情况。试验所测 4 种灌缝胶破坏位移残留率在不同剪切疲劳加载次数下的发展规律如图 7 所示。

图 7 中,剪切疲劳荷载作用下,不同灌缝胶的破坏位移均呈整体下降趋势。经 5 个疲劳加载周期后,NI、SE、WQ、及 SY 的破坏位移残留率分别为 67.2%、74.3%、77.3%、89.9%。由此可知, R 值越大

的灌缝胶,经剪切疲劳加载后,破坏位移残留率越低。结合图 3 数据分析可知, R 值越大的灌缝胶,最大拉力与破坏位移指标均衰减较快,由此可知其抗剪切疲劳性能越差。此外,与图 6(d) 所示数据对比可发现,SY 的破坏位移在剪切初期也出现上升现象,且离散性更大, R^2 仅为 0.226 5。这也验证了剪切疲劳作用下,体系无定型链段发生取向。

对比图 6、7 数据可以发现,最大拉力指标的平均变异系数(COV)为 13.9%,破坏位移指标的 COV 为 22.0%,说明破坏位移指标离散性明显高于最大拉力指标。这是由于聚氨酯灌缝胶内气泡及软硬段的随机排布,导致材料内部介质不连续。在剪切疲劳荷载作用下,不连续位置较易出现应力集中现象,并进一步演化为宏观损伤。这种损伤的发生位置具有随机性,并因此导致破坏位移指标离散性偏大。

2.2.3 拉力-位移曲线特性发展趋势

通过对比拉力-位移曲线发展趋势,分析剪切疲劳加载前后粘附特性变化。以灌缝胶 SE 为例,其经剪切疲劳加载 0、1、3、5 个周期后的拉伸曲线形式如图 8 所示。图 8 中,在疲劳加载前,SE 的粘附性失效接近于脆性断裂,表现为在拉伸曲线到达峰值后拉力迅速下降。但经疲劳加载后,拉伸曲线下降段位移变长,且随疲劳次数增加,这一现象更加显著。这是由于随着疲劳加载次数累积,材料内部微裂纹

逐渐发展,并逐渐破坏材料粘附整体性. 在室内试验中,由于粘附整体性在疲劳加载下破坏,局部的脱粘失效难以立刻发展至整体粘附界面的失效. 结合图 6~8 所示数据分析可知,对于 R 值较大的聚氨酯灌缝胶,其在剪切疲劳荷载作用下性能衰减较快,且

即便未失去粘附强度的灌缝胶,也可能存在整体性破坏,从而失去防水效果的现象. 但 R 值过小的聚氨酯灌缝胶,则容易发生与两侧缝壁粘附强度不足的问题. 因此,基于本文试验结果,推荐抗剪切疲劳性能较好的聚氨酯灌缝胶 R 值宜在 1.7~2.5 之间.

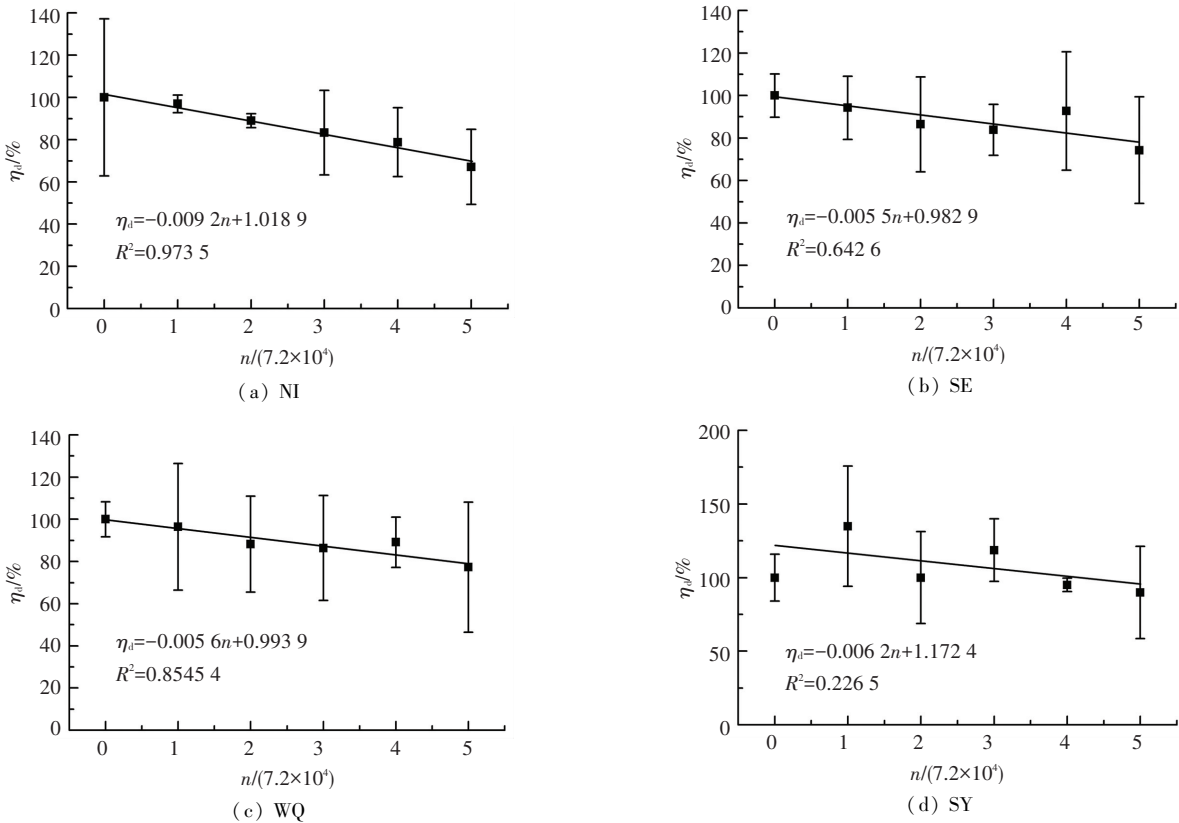


图 7 不同灌缝胶破坏位移残留率

Fig.7 Residual rates of failure displacement for various sealants

现粘附性能小幅提高、离散性变大现象,从试验角度验证了体系内无定型链段在疲劳荷载作用下发生取向;剪切疲劳加载期间,材料内部介质不连续导致最大拉力指标稳定性优于破坏位移.

3)不同剪切疲劳加载后粘附性试验拉伸曲线对比表明,损伤的累积破坏了粘附整体性,导致灌缝胶粘附抗形变能力降低,且破坏形式由脆性破坏趋向于韧性破坏;基于直接拉伸试验结果,推荐抗剪切疲劳性能较好的无砟轨道灌缝胶 R 值宜在 1.7~2.5 之间.

4)试验结果分析表明,所开发试验方法可量化的区分不同无砟轨道灌缝胶粘附性能差异,以及剪切疲劳荷载作用下不同灌缝胶粘附性能发展特性. 但剪切疲劳荷载作用下,材料微观疲劳机理与宏观力学行为发展特性的联系,尚需进一步研究.

参考文献

[1] 潘赏. 高速铁路桥梁用聚氨酯防水体系的研究[D].北京:北京化工大学, 2010.

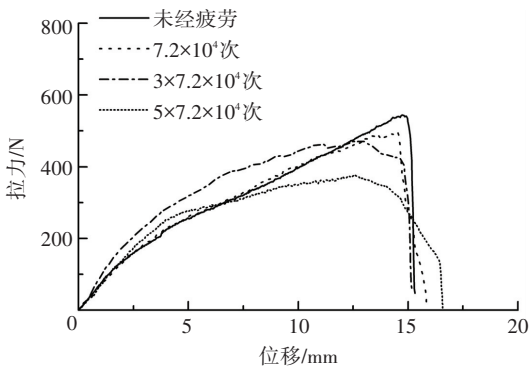


图 8 不同疲劳加载次数下 SE 拉伸曲线对比

Fig.8 Tension curves of SE sealant for various fatigue loading cycles

3 结 论

1)对于未经剪切疲劳加载的聚氨酯灌缝胶, R 值与粘附强度呈正相关,与粘附抗形变性能呈负相关. 剪切疲劳加载后, R 值较大的灌缝胶性能衰减更为显著.

2)剪切疲劳初期, R 值较小的聚氨酯灌缝胶出

- PAN Shang. Study of polyurethane waterproofing system used in high-speed railway bridge [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010.
- [2] 刘林芽, 吕锐, 刘海龙. 无砟轨道垂向高频振动响应分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(6): 1-6.
LIU Linya, LV Rui, LIU Hailong. Vertical high frequency vibration response analysis of ballastless track [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(6): 1-6.
- [3] MITCHELL M R, LINK R E, AL-QADI I L, et al. Development of a crack sealant adhesion test (CSADT) specification for hot-poured bituminous sealants[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2011, 39(2): 103108. DOI: 10.1520/JTE103108.
- [4] 建筑密封材料试验方法: GB/T 13477.10—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
Test method for building sealant: GB/T 13477.10—2002[S]. Beijing: China Standards Press, 2002.
- [5] Standard test methods for sealants and fillers, hot applied, for joints and cracks in asphaltic and Portland cement concrete pavements; ASTM D5329—09—2009[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2009.
- [6] 王晖, 顾幅华, 邱冠周. 接触角法测量高分子材料的表面能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(5): 942-947.
WANG Hui, GU Guohua, QIU Guanzhou. Evaluation of surface free energy of polymers by contact angle goniometry[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2006, 37(5): 942-947.
- [7] SAWALHA M, OZER H, AL-QADI I L, et al. Development of a modified adhesion test for hot-poured asphalt crack sealants[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2017, 2612: 85-95. DOI: 10.3141/2612-10.
- [8] DANNENBERG H. Measurement of adhesion by a blister method [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1958, 5(14): 125-134. DOI: 10.1002/app.1961.070051401
- [9] FINI E, ABULEBDEH T. Bonding property of bituminous crack sealants in the presence of water [J]. American Journal of Engineering & Applied Sciences, 2011, 4(1): 124-129.
- [10] 雷学通. 道路灌缝材料低温粘附性试验方法和影响因素研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
LEI Xuetong. A new test method and influence factors for low-temperature adhesive performance of crack sealant [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [11] 王华锋, 王宏雁, 陈君毅. 胶接、胶焊与点焊接头剪切拉伸疲劳行为[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(3): 421-426.
WANG Huafeng, WANG Hongyan, CHEN Junyi. Shear tension fatigue behavior of bonded joint, weld bonded joint and spot-welded joint [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(3): 421-426.
- [12] ZHANG Y, VASSILOPOULOS A P, KELLER T. Stiffness degradation and fatigue life prediction of adhesively-bonded joints for fiber-reinforced polymer composites[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(10/11): 1813-1820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.02.007>.
- [13] 冯胜, 程燕平, 赵亚丽, 等. 线性疲劳损伤累积理论的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(5): 608-610. DOI: 10.3321/j.issn:0367-6234.2003.05.024.
FENG Sheng, CHENG Yanping, ZHAO Yali, et al. Linear fatigue damage cumulation theory [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(5): 608-610.
- [14] SHAN L, TIAN S, HE H, et al. Internal crack growth of asphalt binders during shear fatigue process [J]. Fuel, 2016, 189: 293-300. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.10.094.
- [15] CHO D W, BAHIA H U. Effects of aggregate surface and water on rheology of asphalt films [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2007, 1998(1): 10-17. DOI: 10.3141/1998-02.
- [16] CHO D W, KIM K K, LEE M J. Chemical model to explain asphalt binder and asphalt-aggregate interface behaviors [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2009, 37(1): 45-53. DOI: 10.1139/L09-163.
- [17] 高翔, 魏亚, 王复明, 等. 聚氨酯注浆材料在循环压缩加载下疲劳性能与微观结构演化 [J]. 复合材料学报, 2017, 34(3): 550-556. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20160426.001.
GAO Xiang, WEI Ya, WANG Fuming, et al. Fatigue resistant and microstructure evolution of polyurethane grout materials under uniaxial compression [J]. Acta Material Compositae Sinica, 2017, 34(3): 550-556. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20160426.001.
- [18] 李盛, 刘朝晖, 李宇峙, 等. 刚柔复合式路面层间界面剪切疲劳试验研究 [J]. 土木工程学报, 2013, 23(7): 151-156. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2013.07.010.
LI Sheng, LIU Zhaoxue, LI Yuzhi, et al. Experimental study on interlaminar shear fatigue of rigid-flexible composite pavement [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 23(7): 151-156. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2013.07.010.
- [19] 薛恒潇. 灌缝胶拉伸设备改进及低温性能评价研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
XUE Hengxiao. Research on crack sealant stretching tester improvement and performance evaluation in low temperature [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [20] YANG X, LIU X, ZHOU S, et al. Vertical random vibration analysis of track-subgrade coupled system in high speed railway with pseudoexcitation method [J]. Shock and Vibration, 2016, 2016(24): 1-12. DOI: 10.1155/2016/7064297.
- [21] 程俊杰. 土质路基 CRTS I 型板式无砟轨道垂向动力学分析及参数研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2012.
CHENG Junjie. Vertical dynamics analysis and parameter study of CRTS I slab ballasted track on soil formation [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2012.
- [22] 向俊, 赫丹, 曾京. 高速列车作用下不同类型无砟轨道振动响应分析 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(16): 29-35. DOI: 10.3901/JME.2010.16.029.
XIANG Jun, HE Dan, ZENG Jing. Investigation on dynamic responses of different type ballastless tracks under high-speed train [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 46(16): 29-35. DOI: 10.3901/JME.2010.16.029.
- [23] 马洪涛. 双组分聚氨酯密封胶的制备及性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
MA Hongtao. Study on preparation and performance of two-component polyurethane sealant [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [24] 张蕾. 双组分聚氨酯密封胶的制备及性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
ZHANG Lei. Research on preparation and performance of two-component polyurethane sealant [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.