平覆型聚脲止水涂层变形特性及其与混凝土的粘接性能研究*

沈　屹[1]，胡彧元[2]，刘佳文[1]，冯　超[2]，诸裕良[1]，侯利军[1]
（1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院，江苏 南京 210098；2. 中交水运规划设计院有限公司，北京 100007）

摘要：船闸等水工建筑物结构缝防渗漏是关系结构安全运行的重要问题，涂敷聚脲表层止水是近年来结构缝渗漏防治的有效方法之一。针对平覆型聚脲涂层结构缝止水防护体系，通过结构缝试件张开变形试验，研究表层聚脲止水的变形以及聚脲与混凝土的粘接性能，分析试件破坏模式、荷载-变形行为、应变分布规律及界面粘接特性。结果表明，所有试件都表现为聚脲涂层拉伸破坏，没有发生界面开裂和脱粘破坏；相对湿度、粘接长度对聚脲表层止水的变形和峰值粘接应力影响较小，而随着聚脲厚度增大，变形和峰值粘接应力相应提高；粘接区聚脲涂层变形主要集中在加载端部 40 mm 范围内，50～100 mm 粘接长度即可保障界面粘接可靠。

关键词：结构缝；聚脲涂层；相对湿度；变形；破坏模式；界面粘接
中图分类号：U641.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0120-09

Deformation behavior of flat-covering polyurea water-stopping coating and its bonding performance with concrete

SHEN Yi[1], HU Yuyuan[2], LIU Jiawen[1], FENG Chao[2], ZHU Yuliang[1], HOU Lijun[1]
(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Seepage prevention of structural joints in hydraulic structures such as ship locks is a crucial issue related to the safe operation of structures. Surface water-stopping with polyurea coating has emerged as one of the effective methods for seepage control of structural joints in recent years. Focusing on the water-stopping protection system of flat-covering polyurea coating for structural joints, we investigate the deformation of the surface polyurea water-stopping and the bonding performance between polyurea and concrete through opening deformation tests of structural joint specimens, and analyze the failure modes of the specimens, load-deformation behavior, strain distribution law, and interfacial bonding characteristics in detail. The results show that all specimens show tensile failure of the polyurea coating without interfacial cracking or debonding phenomena. Relative humidity and bond length have little effect on the deformation and peak bond stress of the surface polyurea water stop, while the deformation and peak bonding stress increase correspondingly with the increase of polyurea thickness. The deformation of the polyurea coating in the bonding area is mainly concentrated within the range of 40 mm at the loading end, and a bonding length of 50−100 mm can ensure reliable interfacial bonding.

Keywords: structural joint; polyurea coating; relative humidity; deformation; failure mode; interface bond

收稿日期：2025-11-26　　**录用日期：**2025-12-29
***基金项目：**国家重点研发计划项目(2023YFC3206104)；江苏省水利科技项目(2025011)
作者简介：沈屹(2001—)，男，硕士研究生，研究方向为水运工程结构。
通信作者：侯利军(1981—)，男，博士，教授，研究方向为水运工程结构。E-mail:hlj2932@hhu.edu.cn

水运工程

结构缝是为防止和减轻水工混凝土结构因温度变化、地基沉降等引起破坏而设置的重要构造措施。对于船闸等水工建筑物而言，常年遭受水压作用，结构缝的止水和防渗漏对结构安全运行十分重要[1-2]。但是，由施工不当及运行过程中结构位移等造成的止水带损伤及其与混凝土界面裂隙、脱空等问题[3-4]，常导致结构缝发生渗漏水，而且埋置于混凝土中的铜片止水带、橡胶止水带难以有效修复，极大影响结构服役安全。

在实际工程中，水工建筑物结构缝的止水常面临系统复杂、水流窜流等挑战。在葛洲坝船闸结构缝渗漏水处理中，采用增设表面止水并结合灌注水溶性聚氨酯等堵灌结合的方法进行处治[5-6]。然而，该方法在结构缝开合频繁的工况下，止水易失效，防护效果较差，往往需要后续持续监测与反复维护。与传统灌堵结合、铜片止水带、橡胶止水带等止水方式不同，聚脲弹性体是一种高效防水、防渗的高性能防护材料[7-8]。该材料可涂敷于结构缝两侧混凝土表面，有效阻止结构缝渗漏水，是近年来在大坝等水工结构常用的一种结构缝渗漏水防护修复方法[9-10]，其防渗效果和变形适应能力显著优于传统橡胶盖板。目前，许多大坝采用聚脲涂层进行大坝上游面结构缝的表层止水防渗，如小湾、锦屏等高拱坝、纳子峡水电站堆石坝等，防渗漏效果良好[11]。

近年来，针对聚脲涂层防渗、裂缝防渗修复和结构缝变形适应能力等开展了大量研究，如李建波等[12]研究聚脲涂层对裂缝的抗水压修复能力，结果表明厚度 4 mm 的聚脲涂层可满足 5 mm 宽的裂缝在 300 m 水头作用下的抗渗要求；杨伟才等[13]通过研究得出，双峰构造形式的聚脲涂层对结构缝或裂缝瞬时张开的适应能力要优于平覆型涂层，可作为高震区拱坝横缝止水结构形式；徐耀等[14]通过试验得出，聚脲涂敷型止水结构的反复变形能力远优于铜片止水，采用该止水形式可有效避免地震作用下反复变形引发的渗漏问题；严良平等[15]通过研究得出，聚脲涂层与沥青混凝土面板的粘接强度与温度线性相关，环境温度越低，粘接强度越高。同时，凸起型 SR 填料复合聚脲涂层具有优良的变形适应能力，通过 SR 填料断面调整可适应不同变形要求。

聚脲涂层在作为结构缝表层止水时，是通过与混凝土的界面粘接保障与结构协同变形，达到防护目标。在聚脲表层止水应用中，聚脲涂层与混凝土的粘接长度一般均设置为 200 mm。但混凝土表面相对湿度和状态与工程环境条件相关，相对湿度、涂层厚度对粘接性能影响尚不清晰，粘接长度是否都需要 200 mm，均有必要进行研究。本文通过表面涂敷聚脲的混凝土棱柱块模拟混凝土结构缝表层止水结构，研究结构缝张开变形下混凝土表面相对湿度、粘接长度和涂层厚度对粘接性能、结构缝填充区拉伸变形的影响规律，探究合理的聚脲涂层粘接长度，为聚脲涂层表层止水设计与施工提供支撑。

1　试验概况

1.1　试验材料

本文试验采用强度等级为 C30 的普通混凝土，混凝土的质量配合比为 $m_{水泥}:m_{水}:m_{粉煤灰}:m_{河沙}:m_{碎石}$ = 360:205.2:20:640:1 165。混凝土制备的原材料分别采用 P·O 42.5 水泥、粒径为 20～40 mm 的碎石、细度模数为 3.1 的河砂以及自来水。混凝土强度实测值为 45.4 MPa，劈拉强度为 3.82 MPa。本文试验采用单组分 SK(F)型手刮聚脲，其性能参数见表 1。

表 1　SK（F）聚脲性能参数

Tab. 1　Performance parameters of SK(F) polyurea

密度/（g·cm^{-3}）	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	撕裂强度/（kN·m^{-1}）	硬度（邵氏 A）
1.1	25.7	200	90	85

1.2　试件制备

本文试验试件模拟混凝土结构缝连接区段，由断面为边长 100 mm 正方形的 2 个混凝土棱柱块组成，表层通过宽度为 50 mm 的聚脲涂层连接。2 个混凝土块体之间的缝宽 20 mm，在混凝土端部设置边长 30 mm 的倒角，结构缝上部布置直径 25 mm

的橡胶棒，倒角区填充 SR 型塑性填料，整个填充区宽度为 80 mm。试件形式见图 1。

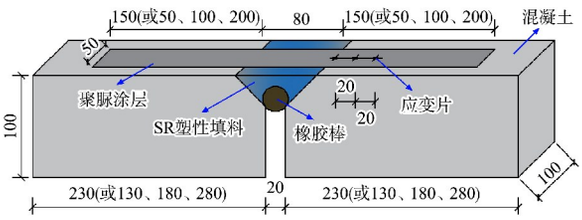


图 1　结构缝连接区段试件形式(单位：mm)

Fig. 1　Specimen configuration at structural joint connection section(unit：mm)

试件参数包括粘接长度、相对湿度、聚脲涂层厚度，参数配置情况见表 2。其中，粘接长度为 50、100、150 和 200 mm；相对湿度为 0%(干燥)、25%、50%、75%和饱和面干(简写为 Bg)；聚脲涂层设计厚度为 2 和 4 mm。干燥是指长期在室内干燥环境；不同相对湿度是在涂界面剂前以湿度养护箱对试件养护 2 d 予以控制；饱和面干状态是先行在水中浸泡 2 d，然后在涂界面剂前提前取出并风干 4~5 h，达到面干状态。

表 2　试件参数

Tab. 2　Specimen parameters

系列	粘接长度/mm	相对湿度/%	聚脲涂层设计厚度/mm	聚脲涂层实测厚度/mm	聚脲涂层厚度标准差/mm
L50-Bg-t2	50	饱和面干	2	2. 66~3. 04	0. 16
L100/200-R0/25/50/75/Bg-t2	100、200	0(干燥)、25、50、75、饱和面干	2	2. 52~3. 10	0. 16
L150-Bg-t2	150	饱和面干	2	2. 72~2. 92	0. 16
L100-Bg-t4	100	饱和面干	4	4. 54~5. 01	0. 15

在试件处理和聚脲涂敷过程中，首先进行混凝土表面打磨平整；其次进行结构缝试件装配，填充 SR 型塑性填料并整平；然后分层涂敷聚脲涂层，待上一层聚脲表干后，涂敷下一层，每层厚度 0. 6~0. 8 mm；最后待涂敷达到设计厚度，在常温室内硬化约 30 d 后，开展相关试验。待聚脲硬化后，采用超声波测厚仪测定聚脲涂层厚度。在试样表面均匀选取距试样边缘大于 5 mm 的 10 个测量点，测点处均匀涂抹超声波耦合剂，将探头贴紧涂层表面测量厚度值。不同类型试件的聚脲涂层实际厚度分别为 2. 52 ~ 3. 10 mm 与 4. 54 ~ 5. 01 mm，略大于设计厚度。其中，第一类试件的厚度平均值为 2. 86 mm，最小和最大值分别为 2. 52 和 3. 10 mm，标准差为 0. 16 mm；第二类试件的厚度平均值为 4. 74 mm，最小与最大值分别为 4. 54 和 5. 01 mm，标准差为 0. 15 mm。两组数据的标准差均较小，表明涂层厚度分布均较为均匀，工艺控制良好。

1. 3　试验装置

试验加载装置见图 2。该试验装置主要通过千斤顶顶托试验框架端部，通过螺杆和端板带动结构缝试件的一侧混凝土块运动，而另一侧混凝土块被约束固定，以模拟结构缝张开变形。在千斤顶的顶部连接荷载传感器，实时监测试验过程拉伸荷载。在固定侧和移动侧混凝土块体左右对称布置 2 个拉线位移计，以测量整体张开变形。此外，在移动侧混凝土块上的聚脲表层布置应变片，监测结构缝张开过程中聚脲涂层的表面应变变化。

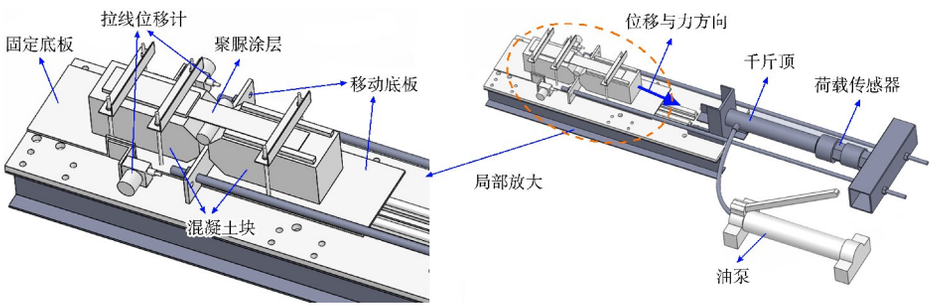


图 2　试验加载装置

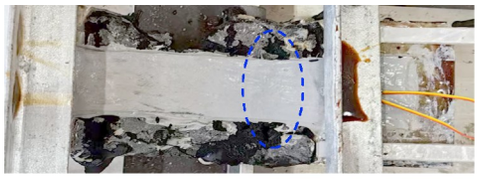
Fig. 2　Test loading device

2　试验结果与讨论

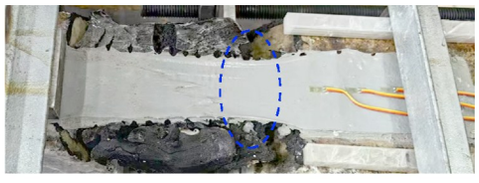
2.1　破坏模式

所有试件均发生结构缝填充区段聚脲涂层拉伸破坏，并未出现界面开裂和脱粘现象。试件的粘接长度和界面相对湿度对试件破坏形态基本没有影响，即使粘接长度仅有 50 mm，粘接区自由端并未发生任何界面滑移和裂缝。可见，在结构缝张开变形作用下，50 mm 的粘接长度即可保证聚脲与混凝土粘接可靠，无脱粘风险。

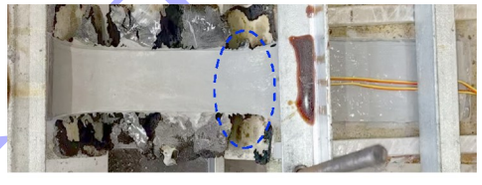
不同类型试件在聚脲涂层极限拉伸破坏前的变形形态见图 3(圈内为最终破坏断面位置)。可以看出，尽管结构缝填充区长度相同，但该区段聚脲涂层的极限变形形态不尽相同，如 L150-Bg-t2、L200-Bg-t4、L100-25-t2、L100-75-t2 试件呈现两端宽、中间窄的形态，L100-Bg-t2、L200-Bg-t2 试件在临近端部区域较窄。这主要是由于该区段企口内嵌 SR 型塑性填料，表面整平处理精度控制较难，而涂敷在 SR 型塑性填料上面的聚脲涂层厚度仅为 2 mm，较小的误差则会极大影响聚脲涂层的拉伸应力均匀状态，引起局部截面应力集中，从而导致变形不均匀和形态各异。75% 相对湿度下同参数试件的极限变形形态见图 4。可以看出，不同相对湿度的同参数试件，也表现出变形离散现象，左侧试件的变形能力和变形均匀性要明显优于右侧试件。此外，在拉伸变形过程中，部分试件出现侧边局部撕裂现象，形成薄弱缺口，进而引发该断面的最终撕裂破坏。这是由于该断面厚度在整个宽度范围内不均匀，或是边缘有多余涂敷的流挂薄层，难以与主涂敷层的变形与应力协调，而发生较早的局部撕裂。但当聚脲涂层厚度增大为 4.5~5.0 mm 时(如 L200-Bg-t4 试件)，由于表面平整误差的影响相对减小，该区段聚脲涂层的拉伸变形形态更为均匀。因此，当聚脲涂层用于结构缝表层止水时，为了减小下部 SR 型塑性填料平整度的影响，建议聚脲涂层厚度不小于 4 mm，以保证足够的变形协调和适应能力。



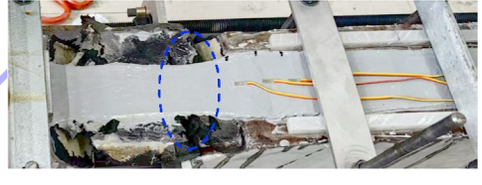
a) L50-Bg-t2试件



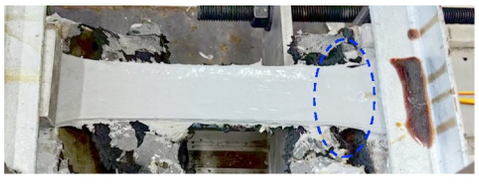
b) L100-Bg-t2试件



c) L150-Bg-t2试件



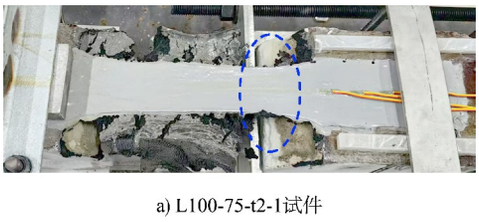
d) L200-Bg-t2试件



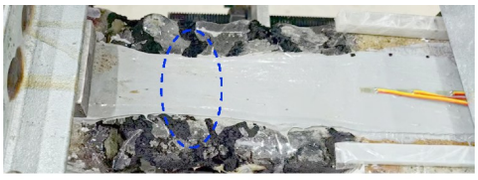
e) L200-Bg-t4试件

图 3　饱和面干试件在聚脲涂层拉伸破坏前的极限变形状态

Fig. 3　Ultimate deformation state of saturated surface-dry specimen prior to tensile failure of polyurea coating



a) L100-75-t2-1试件



b) L100-75-t2-2试件

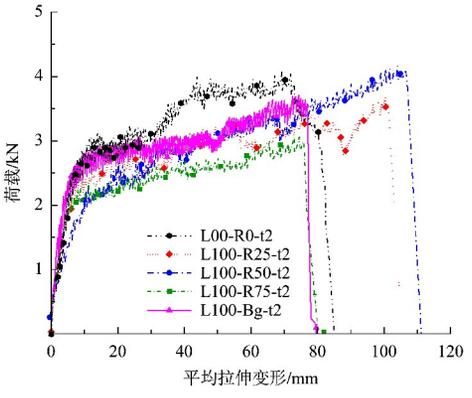
图 4　75%相对湿度下同参数试件的极限变形形态

Fig. 4　Ultimate deformation state of specimens with identical parameters under 75% relative humidity

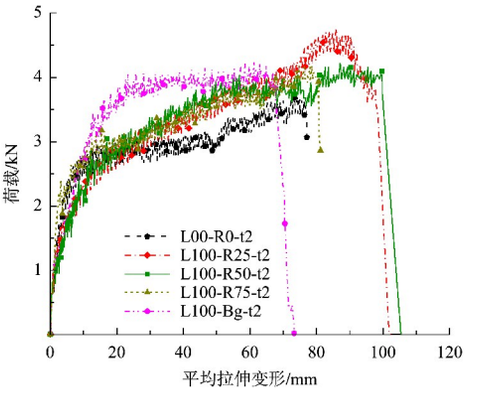
2.2　荷载-变形行为

不同类型试件的荷载-变形曲线见图 5。曲线基本可以分为 3 个阶段，即弹性段、屈服段和硬化段。在加载初期，变形较小，荷载基本呈线性增长；随着荷载逐渐增大，变形增长加快，呈显著非线性特征，并逐渐达到聚脲材料的屈服点；屈服后聚脲材料的模量显著下降，变形快速增长，荷载增长缓慢，表现出显著的变形硬化特征。

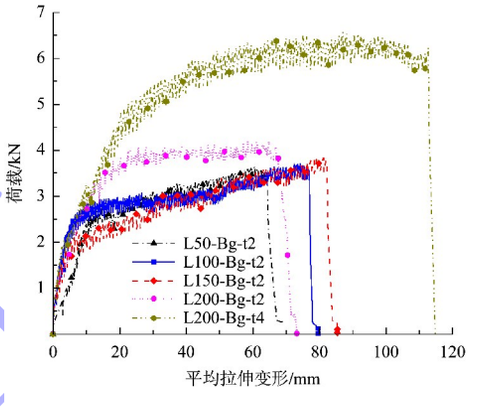
在不同相对湿度即 0%、25%、50%、75%、饱和面干以及不同粘接长度即 50、100、150、200 mm 条件下，图 5 的荷载-变形曲线的 3 个阶段形态基本一致，弹性段斜率、屈服点位置及硬化段趋势均未表现出系统性差异。然而，涂层厚度的影响较为显著。由图 5c) 可知，当聚脲涂层厚度从 2.5～3.1 mm 增加至 4.5～5.0 mm 时，如 L200-Bg-t2 与 L200-Bg-t4 试件对比，整个荷载-变形曲线明显上移。具体表现为：弹性段的斜率变化较小，表明厚度对刚度影响较小；屈服段延迟，达到屈服所需的荷载和变形均增加；在硬化段，试件能承受更大的变形，极限变形能力显著增强。



a) 不同湿度且粘接长度为100 mm



b) 不同湿度且粘接长度为200 mm



c) 不同粘接长度和厚度

图 5　结构缝张开作用下试件的荷载-变形曲线

Fig. 5　Load-deformation curves of specimen under structural joint opening action

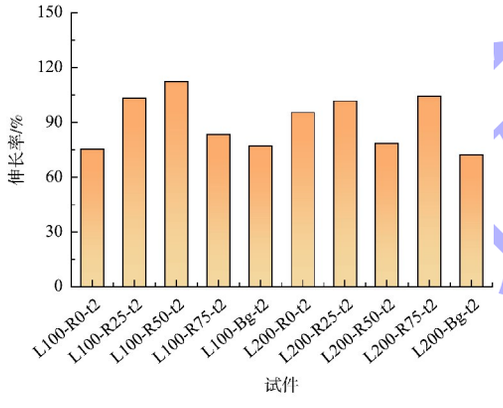
从图 5 还可以发现，在相近聚脲厚度 2.5～3.1 mm 下，粘接长度 50～200 mm 试件的峰值荷载在 3.61 ～4.15 kN，不同界面相对湿度试件的峰值荷载为 3.04 ～4.58 kN。尽管峰值荷载在一定范围之间变化，但最终并未发生界面脱粘，因此该峰值荷载的小幅变化主要由于聚脲涂敷厚度控制不均，而与粘接长度和界面湿度变化无关。不同试件的聚脲涂层拉伸变形在 64.1 ～106.2 mm，有着较大幅度的变异。事实上，聚脲拉伸变形能力与其破坏形态相关，由于结构缝内填 SR 型塑性填料的平整度控制不够精确，涂层厚度误差导致变形能力相差较大。

此外，由图 5c) 可知，当聚脲涂层厚度从 2.5～3.1 mm 增至 4.5～5.0 mm，峰值荷载基本成比例提高，如 L200-Bg-t4 试件的峰值荷载约为 L200-Bg-t2 试件的 1.55 倍。同时，其拉伸变形能力也显著高

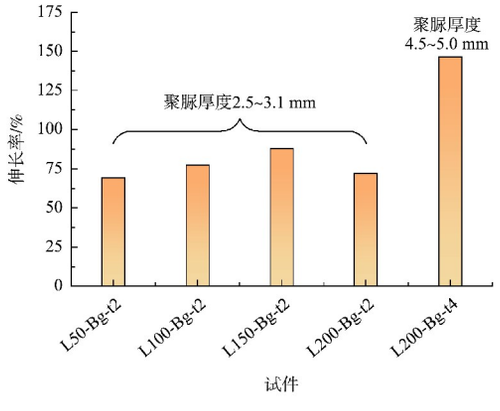
于涂层较薄的试件，同等 SR 型塑性填料平整度下，涂层厚度较大时涂层厚度的误差比率减小，对该区段聚脲涂层的变形能力影响降低。

2.3　结构缝聚脲涂层止水拉伸变形行为

如前所述，加载过程中粘接区界面粘接完好，并未发生界面脱粘。因此，所测变形可以作为结构缝填充区聚脲涂层止水的拉伸变形。不同类型试件该区段聚脲涂层止水的伸长率见图 6。可以看出，不同类型试件的平均伸长率在 75%～112%，有着较大的离散性。这主要是由于 SR 塑性填料平整度不足，导致聚脲涂层厚度不均，厚度较薄的部位局部变形大，而较厚部位变形小，从而最终的整体伸长率有较大差异。因此，建议在涂敷聚脲涂层前，应尽可能将 SR 型塑性填料处理平整，同时涂敷厚度也要严格控制，保证结构缝表层聚脲止水的变形均匀。



a) 不同相对湿度试件



b) 不同粘接长度试件

图 6　结构缝填充区聚脲涂层止水的极限拉伸变形

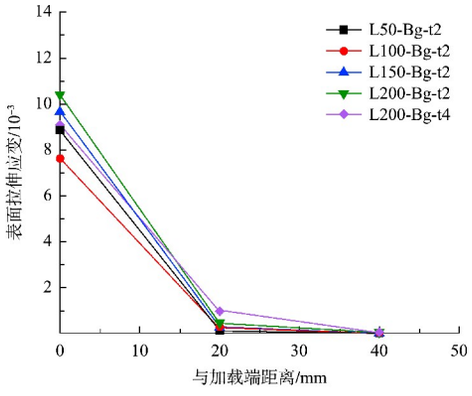
Fig. 6　Ultimate tensile deformation of polyurea water-stopping coating in structural joint filler regions

值得注意的是，由图 6b)可知，涂敷厚度 4.5～5.0 mm 聚脲涂层的试件结构缝自由区的平均伸长率达 146%，远高于 2.5～3.1 mm 厚涂层试件的平均伸长率，前者为后者的 1.68 倍。这主要是由于较大的厚度可减小微孔、针孔等内部缺陷，且厚度的增加有助于减小 SR 型塑性填料表面平整度的不利影响，应力分布更为均匀。其次，材料厚度增加可吸收更大的变形能，在拉伸破坏之前能够承受更大的变形。因此，建议用于混凝土结构缝的聚脲涂敷厚度不小于 4 mm。

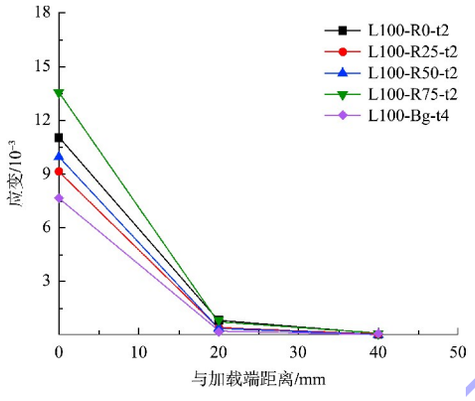
2.4　粘接区聚脲涂层表面拉伸应变

在试件遭受结构缝张开作用及界面剪切应力作用下，粘接区的聚脲涂层也产生不同程度的拉伸变形。不同试件粘接区聚脲表层拉伸应变随距加载段距离的变化见图 7。可以看出，在粘接区加载端位置，聚脲的表面拉伸应变很大，大多试件该位置处的应变片在加载后期被拉断破坏，其实际变形仍被低估。但是随着与加载端距离的增大，表面拉伸应变急剧下降，在距 20 mm 处拉伸应变降至 190×10^{-6}～982×10^{-6}。特别在距加载端 40 mm 处，表面拉伸应变进一步降为 6×10^{-6}～110×10^{-6}，甚至对于聚脲厚度为 4.5～5.0 mm 的试件，该位置处的表面拉伸变形也仅为 42×10^{-6}。这也表明，聚脲-混凝土粘接区的界面粘接应力传递范围至多在距加载端 40 mm 范围内，即有效粘接长度基本为 40 mm。因此，从该角度来看，50 mm 粘接长度即可满足 4.5 mm 厚度聚脲涂层的界面粘接，但在水工建筑物结构缝聚脲表层止水体系中，聚脲与混凝土的粘接长度通常取 200 mm，可能过于保守。若考虑粘接的离散和施工质量等因素，界面粘接长度可保守取 100～150 mm，可较好地节约聚脲材料，并仍有较大的粘接冗余度。

此外，混凝土表面的相对湿度对界面应力传递范围影响较小。无论是表面干燥、湿度 75%或是饱和面干工况，粘接区聚脲表面应变变化规律相同，且应变传递范围基本都在距加载端 40 mm 范围内。也就是说，在常规相对湿度条件下的表干混凝土界面，即可进行界面粘接剂和聚脲涂层施工，可保证足够的界面粘接能力。



a) 不同粘接长度试件



b) 不同相对湿度试件

图 7　粘接区聚脲涂层表面拉伸应变

Fig. 7　Tensile strain of polyurea coating surface in bonding zone

2.5　峰值界面粘接应力

名义界面粘接应力可表征为峰值荷载与粘接区面积的比值，即：

$$f_{tu}=\frac{P_{tu}}{bl} \tag{1}$$

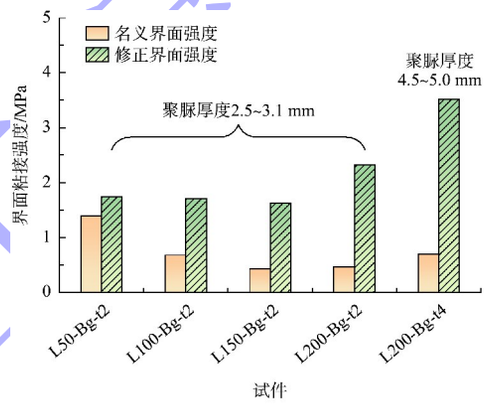
式中：f_{tu} 为峰值界面粘接应力；P_{tu} 为峰值荷载；b 为粘接宽度；l 为粘接长度。

对于本文试验的粘接试件而言，聚脲涂层的有效粘接长度 l_e 约为 40 mm，故其有效峰值粘接应力可进一步表示为：

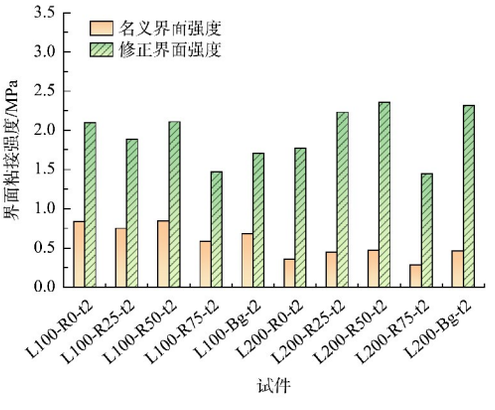
$$f_{tu}=\frac{P_{tu}}{bl_e} \tag{2}$$

式中：l_e 为有效粘接长度。

不同试件的峰值界面粘接应力见图 8。可以看出，随着粘接长度从 50 mm 增大至 200 mm，名义峰值粘接应力从 1.39 MPa 降至 0.48 MPa，有效峰值粘接应力为 1.64～2.32 MPa。这主要是由于名义粘接强度以粘接界面总面积计算，其随粘接长度减小而线性减小，而有效粘接应力仅考虑 40 mm 的有效粘接长度。对于不同相对湿度试件，相对湿度对界面粘接强度影响不大，100 和 200 mm 粘接长度试件的名义峰值粘接应力基本为 0.59～0.84 MPa 和 0.28～0.46 MPa，而有效峰值粘接应力高达 1.44～2.36 MPa，与峰值荷载直接相关。此外，随着聚脲厚度从 2.5～3.1 mm 增至 4.5～5.0 mm，有效峰值界面粘接应力进一步增大为 3.51 MPa，提高幅度达 56%。



a) 不同粘接长度试件



b) 不同相对湿度试件

图 8　试件的峰值界面粘接应力

Fig. 8　Peak interface bond stress of specimens

值得注意的是，本文粘接试验均发生聚脲材料拉伸破坏，界面脱粘并未发生，因此有效峰值界面粘接应力尚未达到聚脲-混凝土界面粘接强度。本文试验的混凝土立方体抗压强度为 45.4 MPa，劈拉强度为 3.82 MPa，略高于有效峰值粘接应力，

而在距加载端 20 mm 范围内，界面粘接应力可能会高于劈拉强度。但在拉伸荷载作用下，界面处于受剪状态，主要传递剪切应力，混凝土的劈拉强度不起控制作用，故没有发生混凝土剥落破坏。可见，拉伸荷载下聚脲-混凝土的界面粘接具有较好的可靠性，一般不会发生界面脱粘或者混凝土剥落。

3　结论

1）所有试件均发生结构缝填充区聚脲涂层的拉伸破坏，界面粘接区未发生界面裂缝与脱粘现象。混凝土表面相对湿度和粘接长度对混凝土-聚脲的粘接性能基本没有影响，粘接长度 50～100 mm 即可保证结构缝张开变形作用下聚脲涂层止水的界面粘接。

2）试件荷载-变形曲线表现出典型的弹性段、屈服段和硬化段的 3 段式特征。随着聚脲涂层厚度的增大，荷载基本呈线性增大，且结构缝填充区聚脲止水的变形能力也较薄涂层更佳。

3）结构缝张开变形作用下，粘接区聚脲涂层的表面拉伸应变随距加载端距离增大而急剧减小，主要变形集中在距端部 20 mm 范围内，而在距 40 mm 位置处，表面拉伸应变仅在 100×10^{-6} 之内，仅有微小变形。

4）聚脲-混凝土粘接应力建议采用有效粘接区内的界面有效粘接应力进行表征，该粘接应力可达 3.51 MPa，基本与混凝土抗拉强度相当，界面脱粘基本不会发生。

5）试件结构缝填充区聚脲涂层止水的伸长率为 75%～112%，该离散性主要由于施工时 SR 型塑性填料平整度和聚脲厚度均匀性控制不足，但其变形能力仍可满足一般水工建筑物结构段伸缩变形要求。

参考文献：

[1] 贾金生, 郝巨涛, 吕小彬, 等. 高混凝土面板堆石坝周边缝新型止水[J]. 水利学报, 2001, 1(2): 35-38.
JIA J S, HAO J T, LYU X B, et al. New type of waterstop for perimetric joints of high CFRD[J]. Journal of hydraulic engineering, 2001, 1(2): 35-38.

[2] 谭鹏. 高水头船闸结构缝渗漏处理技术[J]. 中国水运, 2019(19): 100-101.
TAN P. Treatment technology for structural joint leakage of high head ship lock [J]. China water transport, 2019(19): 100-101.

[3] 王国秉, 鲁一晖, 戴正, 等. 红石水电站尾水平台结构缝渗漏止水处理[J]. 水利水运科学研究, 1998(S1): 31-34.
WANG G B, LU Y H, DAI Z, et al. Seepage patching of expansion cracks in the tailwater platform of Hongshi Hydropower Station[J]. Hydro-science and engineering, 1998(S1): 31-34.

[4] 黄会宝, 沈定斌, 罗正英, 等. 铜街子水电站大坝廊道结构缝漏水分析与治理[J]. 大坝与安全, 2012(4): 50-54.
HUANG H B, SHEN D B, LUO Z Y, et al. Analysis on seepage from structural joints of the gallery of Tongjiezi dam and its treatment [J]. Dam & safety, 2012 (4): 50-54.

[5] 张勇. 葛洲坝 1 号船闸结构缝漏水处理工程实践[J]. 水运工程, 2001(5): 58-61.
ZHANG Y. Engineering practice of leakage treatment for the structural joint of Gezhouba No. 1 shiplock [J]. Port & waterway engineering, 2001(5): 58-61.

[6] 刘振嘉. 葛洲坝船闸水工建筑物运行维护管理实践[J]. 水运工程, 2020(2): 9-13.
LIU Z J. Management Practice for operation and maintenance of hydraulic structures of Gezhoubaship lock[J]. Port & waterway engineering, 2020(2): 9-13.

[7] GUO H, GUO W G, AMIRKHIZI A V, et al. Experimental investigation and modeling of mechanical behaviors of polyurea over wide ranges of strain rates and temperatures[J]. Polymer testing, 2016, 53: 234-244.

[8] 李炳奇, 刘小楠, 李云途. 水工结构聚脲防渗涂层的力学性能与寿命预测研究[J]. 水利学报, 2020, 51(3): 268-275.
LI B Q, LIU X N, LI Y T. Study on durability and life prediction of polyurea composite anti-seepage coatings[J].

水运工程

Journal of hydraulic engineering, 2020, 51(3): 268-275.

[9] 孙志恒, 李季, 费新峰, 等. 寒冷地区混凝土面板接缝表层平覆型柔性止水结构[J]. 水力发电, 2019, 45(5): 50-53.
SUN Z H, LI J, FEI X F, et al. A flexible flat-coating anti-water seepage structure for concrete face joints in cold area[J]. Water power, 2019, 45(5): 50-53.

[10] 孙志恒, 邱祥兴, 张军. 面板坝接缝新型防护盖板止水结构试验[J]. 水力发电, 2013, 39(10): 93-96.
SUN Z H, QIU X X, ZHANG J. Experimental study on a new waterproof sheet in CFRD's joints [J]. Water power, 2013, 39(10): 93-96.

[11] 颜再荣, 邓汉鹏, 胡奇斌, 等. 聚脲材料在高坝建设及除险加固中的应用[J]. 水利水电技术, 2013, 44(6): 62-64.
YAN Z R, DENG H P, HU Q B, et al. Application of Polyurea Material to risk-elimination and strengthening of high dam construction [J]. Water resources and hydropower engineering, 2013, 44(6): 62-64.

[12] 李建波, 李炳奇, 杨洁. 坝面防渗聚脲弹性体涂层性能试验研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(5): 187-191.
LI J B, LI B Q, YANG J. Experimental study of spray polyurea elastomer on dam face seepage engineering[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2014, 33 (5): 187-191.

[13] 杨伟才, 孙志恒. 高拱坝迎水面聚脲涂层防渗结构动力变形性能试验研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(12): 100-104.
YANG W C, SUN Z H. Experimental study on dynamic deformation behavior of polyurea coating anti-seepage structure for upstream face of high arch dam[J]. Water resources and hydropower engineering, 2016, 47 (12): 100-104.

[14] 徐耀, 鲜世雄, 何旭升, 等. 阿尔塔什高混凝土面板堆石坝止水结构抗震性能研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(S1): 98-103.
XU Y, XIAN S X, HE X S, et al. Study on seismic performance of water-stop structure for high concrete face rockfill dam of Altash water control project [J]. Water resources and hydropower engineering, 2018, 49(S1): 98-103.

[15] 严良平, 李学强, 孙志恒, 等. 水工沥青混凝土面板与混凝土建筑物接头新型止水结构研究[J]. 水力发电, 2022, 48(10): 53-57, 63.
YAN L P, LI X Q, SUN Z H, et al. Study on new water stop structure of joint between hydraulic asphalt concrete slab and concrete building [J]. Water power, 2022, 48(10): 53-57, 63.

(本文编辑 王璁)

(上接第 119 页)

[7] 张利鹏. 高水头船闸水流三维数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
ZHANG L P. The 3D numerical simulation study on the turbulent flow of high head lock [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008.

[8] 张文传, 蒋筱民, 童迪, 等. 高水头船闸双层输水系统数值计算[J]. 水运工程, 2024(1): 90-96, 104.
ZHANG W C, JIANG X M, TONG D, et al. Numerical calculation on double layer filling-emptying system of high-head ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2024(1): 90-96, 104.

[9] 邹静, 张勇, 马希钦, 等. 高水头船闸大型船舶导航墙停泊条件研究[J]. 水运工程, 2024(7): 179-184, 216.
ZOU J, ZHANG Y, MA X Q, et al. Mooring conditions of navigation walls of large ships in high head locks[J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 179-184, 216.

[10] 船闸总体设计规范: JTJ 305—2025[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2025.
Code for overall design of navigation locks: JTJ 305-2025[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2025.

[11] 船闸水工建筑物设计规范: JTJ 307—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
Code for design of hydraulic structures of shiplocks: JTJ 307-2001[S]. Beijing: China Communications Press, 2002.

(本文编辑 王璁)