

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.01.019

腐蚀老化对聚乙烯丙纶卷材搭接区 抗拉性能的影响

刘晓庆¹, 王海彦², 李君君³, 孔超^{4,5}, 任松波^{4,5}, 刘传涛⁶

(1. 石家庄铁道大学 四方学院, 河北 石家庄 051132; 2. 南京工业大学 交通运输工程学院, 江苏 南京 211816;
3. 石家庄铁路职业技术学院, 河北 石家庄 050041; 4. 西南科技大学 土木工程与建筑学院,
四川 绵阳 621010; 5. 西南科技大学 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室,
四川 绵阳 621010; 6. 中铁十八局集团建筑安装工程有限公司, 天津 300308)

摘要: 针对腐蚀环境下聚乙烯丙纶防水层搭接薄弱区所存在的抗力性能退化问题, 本文开展了聚乙烯丙纶卷材单片及搭接试件的人工加速腐蚀与静力拉伸试验, 基于材料力学与损伤力学基本原理, 分析了腐蚀老化作用对搭接区黏结强度、有效变形及抗拉能力的影响, 并构建了考虑搭接尺寸、工艺以及环境氧化侵蚀综合作用的聚乙烯丙纶防水卷材搭接区的有效变形计算模型。研究结果表明: 腐蚀对聚乙烯丙纶搭接试件抗拉性能的影响远大于单片试件; 腐蚀持续时间越长, 试件搭接区黏结强度退化越显著; 腐蚀引起搭接区黏结强度退化, 造成其抗拉承载能力退化, 引起其有效伸长率降低, 最大降幅可达 75%; 通过对比理论与试验值发现, 预测模型能够实现搭接区有效伸长率的精确预测。

关键词: 搭接薄弱区; 腐蚀老化作用; 黏结强度; 抗拉能力; 有效伸长率

中图分类号: TU57+.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2021)01-0136-07

Effect of corrosion aging on the tensile properties of the lap zone of polyethylene polypropylene fiber

LIU Xiaoqing¹, WANG Haiyan², LI Junjun³, KONG Chao^{4,5}, REN Songbo^{4,5}, LIU Chuantao⁶

(1. Sifang College, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 051132, China; 2. School of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 3. Shijiazhuang Institute of Railway Technology, Shijiazhuang 050041, China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 5. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 6. China Railway 18th Bureau Group construction and installation Engineering Co., LTD, Tianjin 300308, China)

Abstract: Aiming at the degradation of the resistance performance of the polyethylene polypropylene fiber waterproof layer in the weak area of the lap in the corrosive environment, the artificial accelerated corrosion and static tensile tests of the polyethylene polypropylene fiber sheet and the lap specimen are carried out. Based on the basic principles of material mechanics and damage mechanics, the influence is analyzed of corrosion and aging on the bonding strength, effective deformation and tensile capacity of the overlap zone, with the effective deformation calculation model for the polyethylene polypropylene fiber waterproofing membrane lap area considering the combined effect of lap size, process and environmental oxidation and erosion constructed. The re-

收稿日期: 2020-02-26; 网络出版日期: 2020-09-22

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20200922.0904.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51708467); 河北省科技厅重点研发计划自筹课题资助项目(17275509); 河北省人才培养工程经费资助科研项目(A2017002037)

第一作者: 刘晓庆, 女, 硕士, 讲师, 研究方向为工程结构稳定性。E-mail: lijunjun8206@sina.com

通信作者: 王海彦, 男, 博士, 教授, 研究方向为隧道近接施工技术学与力学行为。E-mail: wanghy@njtech.edu.cn

search results show that the impact of corrosion on the tensile properties of the polyethylene polypropylene fiber lapped specimen is much greater than that of the single-piece specimen; the longer the corrosion duration, the more significant the bond strength degradation in the lap area of the specimen; corrosion causes degradation of the bonding strength of the lap area, resulting in degradation of its tensile load-bearing capacity and a decrease in its effective elongation, with a maximum decrease of 75%; by comparing theoretical and experimental values, it is found that the prediction model can accurately predict the effective elongation of the overlap zone.

Key words: the weak overlap; corrosion aging; bonding strength; tensile capacity; effective elongation

聚乙烯丙纶卷材作为一种高性能防水材料,具有质量轻、韧性好、造价低以及施工便捷等优点,因此被广泛应用于工程建设的各类防渗领域。然而,该材料在长期服役过程中,环境与服役荷载的综合作用往往使其出现不同程度的老化问题。调查表明^[1-3],丙纶防水卷材服役期内的老化现象十分严重,尤其是搭接部位常常未达到设计年限,就已出现老化破损现象,从而大大降低甚至完全丧失防渗功能。不同的服役环境,防水卷材防渗能力退化速率大不相同,据调查,聚乙烯丙纶卷材搭接区在腐蚀环境(尤其是强氧化腐蚀环境)下的抗渗能力仅能维持1年左右^[4]。老化后的防水卷材不仅丧失其主要的防渗能力,同时也会出现抗力、抗变形能力及局部韧性的退化,因此在较低水压力下,老化作用既可加速防渗材料微裂纹形成与扩展,又能加速其抗渗能力丧失^[5-7]。搭接部位由于形状改变,易引起应力集中;加之胶结材料自身抗腐蚀能力较差,致使其成为服役过程中整个防渗体系的薄弱区域^[6-9]。针对该问题,文献^[10-12]采用各类探测技术对不同腐蚀环境与水力梯度下的搭接区与非搭接区的渗透速率进行测试对比,结果发现,在同等腐蚀环境与水力梯度下,非搭接区的抗渗能力远大于搭接区。文献^[13]对废液积液池渗漏点进行了统计,发现90%以上渗漏点出现在搭接部位,且随服役期延长,搭接部位的漏点增多。由此可见,在腐蚀环境的长期侵蚀下,丙纶卷材搭接区更易老化,老化程度越严重,低应力下该部位更易失效,抗渗能力丧失的风险也就越大。

在腐蚀介质的长期作用下,聚乙烯丙纶防水层搭接区域会出现大量微观损伤缺陷。持续发展的损伤缺陷能够加速防水层的性能退化,使其首先成为抗力薄弱区,即使在低应力下也极易出现局部受拉开裂,乃至滑脱,引发渗漏事故,因此,丙纶材料搭接区腐蚀老化后的抗拉性能将直接影响其抗渗可靠性。目前,针对聚乙烯丙纶卷材搭接部位的腐蚀老化以及老化后的抗力性能研究鲜见报到,而关于既有老化损伤聚乙烯丙纶材料拉伸失效机理的研究尚不多见,且多为定性分析^[4,6,7,11]。为厘清腐蚀老化

与丙纶搭接区抗拉性能的关系,本文围绕老化损伤劣化聚乙烯丙纶材料抗拉性能退化问题,开展不同腐蚀老化程度聚乙烯丙纶搭接试件的拉伸试验,研究腐蚀老化对聚乙烯丙纶卷材(搭接区)抗拉性能的影响,以期为在役聚乙烯丙纶防渗结构的剩余寿命预测与优化设计提供理论支撑。

1 试验操作

1.1 腐蚀试验

本研究试验材料均选用聚乙烯丙纶防水复合卷材(厚度为0.6 mm),单片与搭接试件为条状,尺寸分别为50 mm×200 mm、50 mm×300 mm,如图1(a)、(b)所示。搭接试件采用水泥胶胶结,水泥胶按体积比1:10:3(801胶:水泥:水)配置,搭接连接长度为100 mm,如图1(c)所示,搭接区表面采用聚氨酯(0.1 mm)涂层保护。

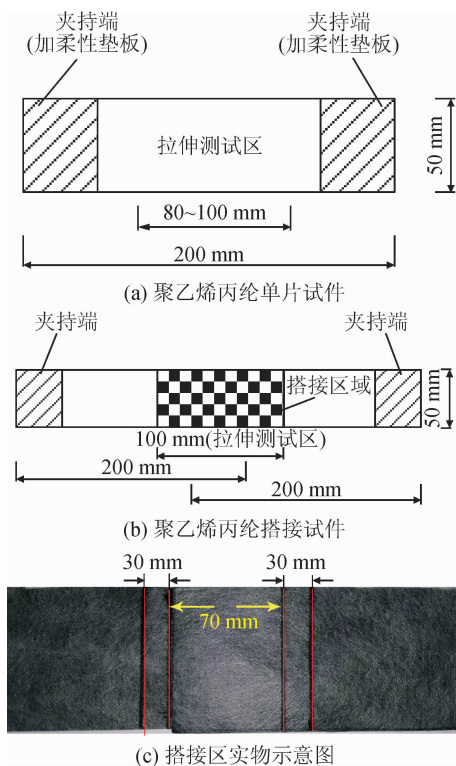


图1 聚乙烯丙纶防水复合卷材搭接试件
Fig. 1 Lap joint of polyethylene polypropylene fiber

所有试件的腐蚀老化试验根据《高分子防水卷材耐化学液体(包括水)》(GB/T328.16-2007)^[14]和《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》(GB/T10125-2012)^[15]执行,采用室内加速腐蚀箱进行人工加速老化处理。腐蚀溶液采用质量分数为 3% 的 NaCl 溶液与体积浓度为 0.5mol/L 的稀硝酸混合配置。腐蚀箱内温度设置为 $42\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 $80\%\pm 10\%$,采用周期浸润喷淋方式加速老化,喷淋时间与间歇时间均为 6 小时,以 24 小时为单位。老化龄期分别设置为 6 天、12 天、18 天、24 天、30 天以及 36 天,对应实际服役时间分别为 1 a、2 a、4 a、8 a、16 a、32 a。腐蚀试验所得到的典型老化搭接试件如图 2 所示。图 2 中“BL”为丙纶拼音首字母缩写,首个数字为腐蚀龄期,其次为平行试件代号,如“BL-1-1”代表丙纶材料第一腐蚀龄期下的第一块平行搭接试件。

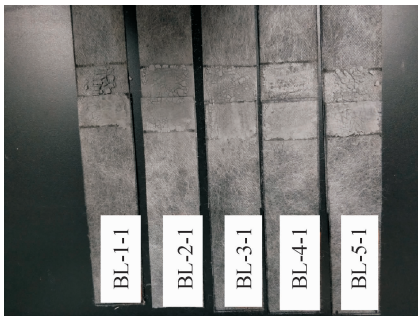


图 2 腐蚀后水泥胶搭接层

Fig. 2 The cement bond layer after corrosion

1.2 拉伸试验

在对聚乙烯丙纶卷材试件进行拉伸试验过程中,考虑到该材料延性显著,因此,为了准确测量其拉伸过程中的应力应变状态,所有试件拉伸过程均采用应变加载控制。拉伸试验设备选用 WDW-20 型土工布综合强力机,如图 3 所示,试验过程参考《建筑防水卷材试验方法 第 9 部分 高分子防水卷材拉伸试验》(GB/T328.9-2007)^[16]相关规定,加载速率为 $200\pm 50\text{ mm/min}$ 。

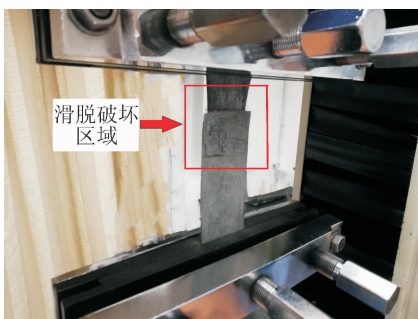


图 3 试片破损示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the damaged specimen

2 试验结果分析

通过对未腐蚀与各腐蚀龄期聚乙烯丙纶试件进行静力拉伸试验,获得其应力(荷载)应变(位移)数据,以及各种破坏形式的断裂试件。

图 4 为未腐蚀的单片和搭接试件的静力拉伸试验结果。

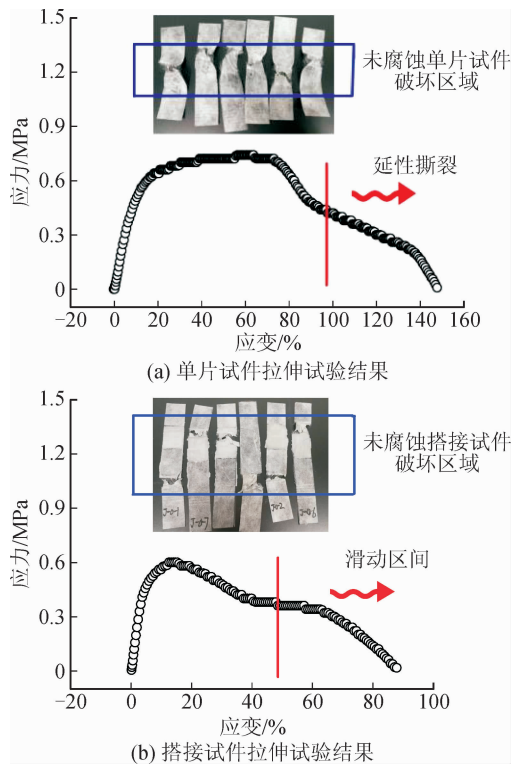


图 4 未经腐蚀老化处理单片与搭接试件拉伸试验结果

Fig. 4 Test results of the lap joint and single specimen without corrosion

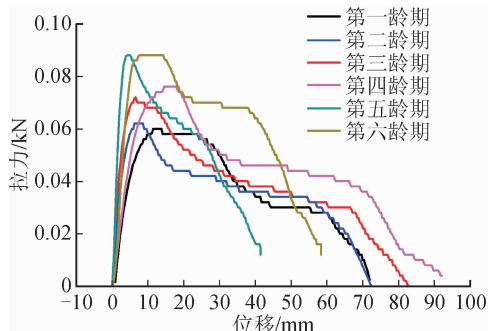
由图 4(a)可见,单片试件具有较为完整且连续的结构特征,应力应变曲线饱满,当应力大于其强度极限时,延性撕裂较为明显。

图 4(b)为未腐蚀搭接试件静力拉伸试验结果。由于搭接薄弱区改变了材料自身连续性,即使试件有效搭接长度内存在黏结性能显著的胶结剂,其延性仍将大幅度退化,极限强度处于低应变区域,且试件能达到的有效变形大大下降。由此可见,搭接区域是导致聚乙烯丙纶防渗体系提前失效的薄弱点,是防渗设计应重点考虑的关键区域。

各腐蚀老化龄期搭接试件静力拉伸荷载位移曲线与试件破坏状态如图 5 所示。

由图 5(a)可见,随着腐蚀龄期和试件老化程度增加,试件极限强度逐渐降低(破强力下降最大幅度可达 75%),有效伸长率逐渐减小(下降最大幅度可达 87%),即试件的抗拉承载与抗变形能力随着腐

蚀作用逐渐下降。



(a) 各龄期搭接试件拉力与位移曲线



(b) 各龄期搭接试件断裂形貌示意图

图5 卷材搭接试件拉力-位移曲线与断裂形貌示意图
Fig. 5 Schematic diagram of tension displacement curve and fracture morphology of the lap joint

由图5(b)可见,各腐蚀老化龄期试件的断裂位置均位于搭接区端口,且随着老化龄期增长,搭接区伸长能力先增强后降低,而搭接面相对滑移程度逐渐显著。其原因可解释为:腐蚀初期,片材自身老化程度强于搭接部位,老化后片材强度退化,延性增强,与此同时搭接部位受老化作用影响不大,因此,外力作用下搭接部位几何突变引起的应力集中是引起试件断裂失效的主要原因;随着老化龄期增加,试件搭接部位侵蚀严重,层间黏结能力大幅度退化,虽然此时片材自身也已出现严重老化,但与搭接区层间黏结强度退化幅度相比,可忽略不计,此时由于试件搭接段黏结能力丧失,导致片材层间滑移开裂,直至破坏失效。

3 腐蚀试件搭接区有效伸长率计算模型

对于搭接材料而言,有效伸长率是准确描述其黏结区变形抗力的重要指标^[17-18]。聚乙烯丙纶卷材试件经腐蚀老化处理后,搭接部位黏结强度大幅度降低。在试件拉伸过程中,试验测量位移值包括两部分:其一为材料本身发生的弹性变形(本研究涉及材料以弹性变形为主);其二为搭接层剪切滑移。因此,本研究所有试件的有效伸长率可通过下式求得:

$$\eta = \Delta l / l = (l - l_0 - l') / l \quad (1)$$

式中: η 为各腐蚀龄期搭接试件的有效伸长率,%; l 为试件伸长后的总长度,mm; l_0 为试件初始长度,mm; l' 为滑移区域以外的伸长量,mm。

利用式(1)计算得到各腐蚀龄期搭接试件的有效伸长率,如表1所示。

表1 各腐蚀龄期搭接试件有效伸长率与抗力水平
Tab. 1 Effective elongation and resistance level for the lap joint at different corrosion times

T/d	试件编号	η /%	η 的方差	F/kN	F的方差
6	BL-1-1	67		23.1	
	BL-1-2	65	32.6	26.4	3.7
	BL-1-3	54		21.8	
12	BL-2-1	56		16.1	
	BL-2-2	53	69	18.3	3.1
	BL-2-3	72		20.4	
18	BL-3-1	57		15.5	
	BL-3-2	72	38	15.1	0.1
	BL-3-3	63		14.7	
24	BL-4-1	36		15.2	
	BL-4-2	32	20	13.6	8.9
	BL-4-3	43		8.2	
30	BL-5-1	29		9.0	
	BL-5-2	24	4.2	5.3	2.2
	BL-5-3	26		7.4	
36	BL-6-1	14		6.9	
	BL-6-2	17	6	6.3	0.56
	BL-6-3	11		5.1	

注:T为腐蚀龄期;F为材料试验破强力。

表1中给出的同组试验结果存在一定的离散性,其原因可从两方面进行解释:一方面,同组试件的纤维空间分布和试件内部应力存在夹角,夹角越大,试件抗力和延伸能力越差;另一方面,搭接区域水泥胶结层厚度薄,统一的加工厚度很难保障,这也将引起试验结果的差异。对比不同龄期试件的试验数据可以发现,同组试件的抗力和延伸能力基本上处于相同水平;随着腐蚀龄期的增加,搭接试件的破强力和有效伸长率均呈递减趋势,试验结果的递变规律较明显。

拉伸试件的搭接面积均为 0.005 m^2 ,假设试件搭接过程中施工引起的误差忽略不计,以未经老化处理搭接试件破强力为标定值,利用最小二乘法可

拟合建立腐蚀老化作用下聚乙烯丙纶搭接区极限荷载退化模型:

$$F_T = \lambda F_0^{(1-1/T)} \quad (2)$$

式中: F_T 为经腐蚀老化处理 T 天的搭接试件极限荷载, 即试验测量的破强力, kN; F_0 标定为未经腐蚀老化处理的搭接试件极限荷载, kN; T 为腐蚀老化龄期, 天; λ 为腐蚀环境影响因子, 本研究只考虑强氧化剂腐蚀老化, 取 $\lambda = 1$, 其他腐蚀环境影响因子可根据腐蚀试验结果测定。

实际工程中, 防水卷材作为一种弹性材料, 其防渗功能丧失是由初始微裂缝不断扩展引起的, 而初始微裂缝萌生与扩展主要集中在其弹性变形阶段, 基于文献[19], 通过对防水卷材的静力响应参量进行类比分析, 建立持续拉伸作用下防水卷材伸长率 (η') 与断裂强度 (σ) 的关系式:

$$\eta' = \beta(\sigma/E) = \beta(F_T/E) \quad (3)$$

式中: E 为卷材搭接部位变形模量, MPa, 即静力拉伸应力应变曲线弹性阶段的斜率; β 为搭接工艺影响系数, 受搭接胶结剂、搭结长度以及施工工艺的影响, 可通过试验方法测定。本研究通过试验方法测定各腐蚀龄期搭接试件的 β 值, 如表 2 所示。

表 2 各腐蚀龄期聚乙烯丙纶卷材搭接试件 β 值

Tab. 2 β of the lap joint of polyethylene polypropylene fiber at different corrosion times

T/d	β 值
6	0.85
12	0.72
18	0.67
24	0.63
30	0.61
36	0.58

由表 2 可知, 老化龄期越长, 试件搭接工艺影响系数 β 值越小, 且减小幅度逐渐降低。这可能是搭接区黏结层受腐蚀作用影响, 黏结能力逐渐丧失所致。但随着腐蚀作用加强, 黏结层发生氧化作用, 形成钝化层, 阻止腐蚀介质入侵, 降低了侵蚀速率, 因此, 随着腐蚀作用的持续, 钝化层搭接区的黏结机能退化速率逐渐减缓。

综上所述, 作为聚乙烯丙纶防水层薄弱部位的搭接区域, 其有效变形能力是决定其抗力性能的重要因素, 联立式(1)、式(2)与式(3), 得到考虑搭接尺寸、工艺以及环境氧化侵蚀综合作用的聚乙烯丙纶防水卷材搭接区有效伸长率计算模型:

$$\eta'' = \beta(\lambda F_0^{(1-1/T)}/E) - l'/l \quad (4)$$

其中, l' 可通过测量非搭接段伸长量来确定。

将不同腐蚀老化龄期丙纶搭接试件静力拉伸试验结果代入式(1)和式(4), 其与实测值对比结果如表 3 所示。

表 3 各腐蚀龄期试件搭接区有效伸长率理论值与试验值对比结果

Tab. 3 Comparative result between theoretical and experimental values of effective elongation belonging to the overlapped area of specimen at different corrosion times

搭接试件编号	有效伸长率/%		
	试验值	式(1)计算值	式(4)计算值
BL-1-1	67	42(-25)	66(-1)
BL-1-2	65	53(-12)	63(-2)
BL-1-3	54	38(-16)	52(-2)
BL-2-1	56	41(-15)	53(-3)
BL-2-2	53	49(-4)	51(-2)
BL-2-3	72	57(-15)	71(-1)
BL-3-1	57	50(-7)	59(+2)
BL-3-2	72	61(-12)	72(-1)
BL-3-3	63	45(-18)	64(+1)
BL-4-1	36	22(-14)	34(-2)
BL-4-2	32	20(-12)	31(-1)
BL-4-3	43	28(-15)	42(-1)
BL-5-1	29	23(-6)	32(+3)
BL-5-2	24	21(-3)	23(-1)
BL-5-3	26	13(-13)	27(+1)
BL-6-1	14	15(+1)	13(-1)
BL-6-2	17	10(-7)	15(-2)
BL-6-3	11	19(+8)	12(+1)

注:“()”内数值表示相应计算值与试验测量值之间的误差。

由表 3 对比结果可见, 由于本文所提出的有效伸长率计算模型是依据各龄期材料及黏结层老化定量设定修正参数, 故能有效弥补传统方法对龄期累积辨识度差的短板。另外, 理论计算结果与试验结果的误差与材料自身纤维空间分布、水泥胶黏结层厚度等因素相关, 而本研究考虑了聚乙烯防水卷材搭接尺寸、施工工艺以及环境氧化腐蚀等因素, 所以大大降低了不同腐蚀程度卷材搭接区的有效变形结果预测误差。

由此可见, 本文所建立的丙纶防水卷材搭接区有效伸长率计算模型可精确计算不同荷载、不同服

役环境下聚乙烯丙纶防水卷材搭接层的有效伸长量,再结合对应设计指标,可精确预测其可靠程度,为服役阶段丙纶防水材料的合理有效使用提供理论指导。

4 结 论

1) 对于聚乙烯丙纶搭接试件,由于搭接薄弱区改变了材料自身连续性,受拉过程易引起应力集中,从而造成过早破坏,且断裂位置集中于搭接端口部位。

2) 腐蚀初期,试件母材老化速率突出,试件破坏多由搭接部位应力集中造成;腐蚀中后期,搭接区黏结层老化严重,试件破坏多为剪切力作用下黏结层滑脱所致。

3) 腐蚀老化后,聚乙烯丙纶搭接试件破强力随老化龄期增加而降低,且降低幅度逐渐减小;老化后搭接试件抗变形能力受搭接尺寸、工艺以及环境氧化侵蚀的综合影响,老化侵蚀时间越长,试件有效抗变形能力越差,使用功能有效性越低。

4) 搭接试件黏结层在腐蚀氧化过程中逐渐形成的钝化层可有效阻止腐蚀介质的持续侵入,从而降低腐蚀作用的进一步侵蚀,减缓搭接区黏结机能的退化速率。

考虑搭接尺寸、工艺以及环境氧化侵蚀等因素,构建了聚乙烯丙纶防水卷材搭接区有效伸长率计算模型。通过理论与试验结果对比,验证了该计算模型能够精确预测腐蚀作用下聚乙烯丙纶防水卷材搭接区的有效伸长率,可为在役聚乙烯丙纶防渗结构的剩余寿命预测与优化设计提供理论支撑。

参考文献:

[1] 董林伟,江玉生,杨志勇,等. 隧道管片接缝密封垫防水机理及试验研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(3):469-474.

DONG Linwei, JIANG Yusheng, YANG Zhiyong, et al. Experimental study and water-resistant mechanism of gaskets in joints of tunnel segments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(3): 469-474.

[2] 尚建丽,米钰. EPDM防水卷材耐久性的热老化及动力学预测[J]. 土木建筑与环境工程,2011,33(5):157-162.

SHANG Jianli, MI Yu. Application of thermal aging and kinetics to predict the durability of EPDM waterproofing membrane[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(5):157-162.

[3] 李志成,马晖,胡洪尧,等. 重庆江北机场 APM 地下通

道的防水技术及渗漏处理措施[J]. 民航学报,2017,1(1):25-30.

LI Zhicheng, MA Hui, HU Hongyao, et al. Waterproof technology and leakage treatment measures for APM underground passage of Chongqing Jiangbei Airport[J]. Journal of Civil Aviation, 2017, 1(1):25-30.

[4] 陈杰. 铁路土工合成材料耐久性能试验研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2017.

CHEN Jie. Experimental study on durability of railway geosynthetics [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2017.

[5] 陆佩佩,倪自丰,陈国美,等. SBF氧化降解对辐照交联GO/VE/UHMWPE复合材料结构和力学性能的影响[J]. 塑料工业,2018,46(10):119-122.

LU Peipei, NI Zifeng, CHEN Guomei, et al. Study on effect of oxidative degradation of SBF on structure and mechanical properties of radiation cross-linked GO/VE/UHMWPE composites [J]. China Plastics Industry, 2018, 46(10):119-122.

[6] 代军,晏华,郭骏骏,等. 结晶度对聚乙烯热氧老化特性的影响[J]. 材料研究学报,2017,31(1):41-48.

DAI Jun, YAN Hua, GUO Junjun, et al. Effects of crystallinity on degradation properties of polyethylene by thermo-oxidation aging[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2017, 31(1): 41-48.

[7] 吴波,成薇,温浩宇. 氧化诱导时间对高密度聚乙烯热氧老化特性的影响[J]. 中国塑料,2019,33(4):22-25,88.

WU Bo, CHENG Wei, WEN Haoyu. Effects of oxidation induction time on thermo-oxidation aging performance of high-density polyethylene[J]. China Plastics, 2019, 33(4): 22-25, 88.

[8] REANO A F, GUINAULT A, RICHAUD E, et al. Polyethylene loss of ductility during oxidation: effect of initial molar mass distribution[J]. Polymer Degradation and Stability, 2018, 149(3): 78-84.

[9] POTEKAEV A I, LYSAK I A, MALINOVSKAYA T D, et al. The effect of microwave radiation on the supramolecular structure of polypropylene fiber materials[J]. Russian Physics Journal, 2016, 58(12): 1741-1746.

[10] 陈亚宇,杨家良,冯子亮,等. 基于光纤微弯损耗的垃圾填埋场渗漏定位研究[J]. 环境工程,2016(12):108-112.

CHEN Yayu, YANG Jialiang, FENG Ziliang, et al. Research of leakage positioning method of landfill based on optical fiber microbend loss[J]. Environmental Engineering, 2016 (12):108-112.

[11] 玄立恒,张玉波. 高寒地带大坡度瓦屋面工程防水设计与施工[J]. 中国建筑防水,2015,10(23):41-44.

- XUAN Liheng, ZHANG Yubo. Waterproofing design and construction of steep slope tile roof engineering in frigid zone[J]. China Building Waterproofing, 2015, 10(23): 41-44.
- [12] 岑威钧, 温朗昇, 和浩楠. 水库工程防渗土工膜的强度、渗漏与稳定若干关键问题[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(6): 1183-1192.
- CEN Weijun, WEN Langsheng, HE Haonan. Strength, leakage and stability problems of impermeable geomembrane for reservoir project[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(6): 1183-1192.
- [13] 刘宁, GEUTEBRÜCK Ernst, RAMSEY Boyd. 防渗膜集成永久性渗漏监控系统的定位[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 3320-3326.
- LIU Ning, GEUTEBRÜCK E, RAMSEY B. Leak location using permanent leak detection system for HDPE geomembrane[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(5): 3320-3326.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 建筑防水卷材试验方法 第 16 部分 高分子防水卷材 耐化学液体(包括水): GB/T 328.16-2007[S]. 河北: 中国标准出版社, 2007.
- [15] 中国国家标准化管理委员会, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验: GB/T 10125-2012[S]. 河北: 中国标准出版社, 2012.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 建筑防水卷材试验方法 第 9 部分 高分子防水卷材 拉伸试验: GB/T 328.9-2007[S]. 河北: 中国标准出版社, 2007.
- [17] 邓耀华, 陈嘉源, 刘夏丽, 等. 柔性材料加工变形影响因素提取层次分析方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(11): 161-169.
- DENG Yaohua, CHEN Jiayuan, LIU Xiali, et al. Study of deformation factors extracting on flexible material machining by analytical hierarchy process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(11): 161-169.
- [18] CHEN Jinbao, NIE Hong. Overloading of landing based on the deformation of the lunar lander[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21(1): 43-47.
- [19] 余春春. 持续荷载作用下防水卷材拉伸性能的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.
- YU Chunchun. Study on tension behavior of waterproofing under sustained load[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009.

(责任编辑 周 蓓)