

局部腐蚀对多孔结构力学性能的影响

邹俊岭¹ 邓庆田^{1,2} 李新波^{1,2} 宋学力^{1,2}

(1. 长安大学理学院, 西安 710064)

(2. 西安市结构损伤数字化检测技术重点实验室, 西安 710064)

摘要: 采取液滴法引入二氯甲烷溶液作为腐蚀介质,基于不同孔隙率的正四边形、正六边形和内凹形结构,分析了不同腐蚀周期和区域对聚乳酸(Polylactic Acid, PLA)多孔结构力学性能的影响,并结合有限元仿真结果进行对比分析。结果表明,内凹形多孔结构板受腐蚀周期的影响最小,其余两种结构受其影响有赖于孔隙率的大小;孔隙率72%的正六边形结构单胞元腐蚀缺陷承载能力最弱,内凹形结构的承载能力最强;孔隙率54%的正四边形结构受单胞元腐蚀影响最大;正六边形结构单胞元扩大区域腐蚀相比单胞元腐蚀承载能力较弱,正四边形结构单胞元扩大区域腐蚀相比单胞元腐蚀承载能力较强。

关键词: 腐蚀; 二氯甲烷溶液; 聚乳酸多孔结构; 力学性能

中图分类号: TB24 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.03.001

0 引言

多孔结构具有优异的缓冲吸能、吸声、隔热、低密度和比刚度大等性能^[1-2],广泛应用于航空航天、船舶、医疗器械等领域^[3]。已有很多学者对多孔结构孔隙率、材料厚度、疲劳裂纹萌生和扩展^[4]进行了大量的研究,并总结了其压缩性能^[5]、剪切性能^[6]、拉伸性能^[7]的变化规律。在多孔结构腐蚀损伤方面,孔蚀是普遍存在的一种腐蚀损伤形式,尤其在湿度大、易腐蚀的环境下,较长时间的使用导致表面磨损,有一定的剥落,易产生腐蚀现象^[8],不仅影响结构外观,还会导致结构截面减小、材料力学性能发生变化,严重影响其使用效能。因此,研究多孔结构在化学因素作用下的孔蚀损伤有着非常重要的意义。

近些年,国内外许多研究者从不同的角度对腐蚀损伤进行分析研究。JIN等^[9]提供一种使用二氯甲烷降低熔融沉积成型零件中聚乳酸(Polylactic Acid, PLA)零件表面粗糙度的方法;AO等^[10]研究了不锈钢纤维多孔材料在硫酸、盐酸中的腐蚀类型、腐蚀行为和腐蚀机制,并讨论了介质浓度、纤维丝径、孔隙度对其腐蚀行为的影响;蒋稳等^[11]探讨了腐蚀液配方的改变对多孔阵列结构形貌的影响;ZHANG等^[12]研究了多孔金属流动分布器在腐蚀环境下性能的稳定性;妙远洋等^[13]根据点蚀基本原理,建立了一种点蚀损伤

弹性模量计算模型,并通过拉伸试验验证了模型的准确性;马剑军等^[14]基于腐蚀疲劳中力学-电化学交互作用过程的能量转换,建立E690高强钢的腐蚀疲劳裂纹扩展速率理论模型,并通过腐蚀疲劳裂纹扩展试验验证该理论模型的准确性;李嘉栋等^[15]总结与讨论了弹性应力、塑性应力以及残余应力对不锈钢点蚀及腐蚀开裂行为的影响规律;TOKUDA等^[16]在MgCl₂浸泡试验中,研究了外加应力对敏化304不锈钢点蚀的影响。

本文通过SolidWorks软件构建正四边形、正六边形和内凹形3种不同孔隙率的模型,并使用3D打印机熔融沉积成型进行模型制备,采取液滴法引入二氯甲烷溶液作为腐蚀介质,对比试验和Abaqus软件仿真结果,分析了不同腐蚀周期和区域对平面多孔结构板力学性能的影响。

1 试验研究

1.1 试验设计

试验采用正四边形、正六边形和内凹形3类平面多孔结构板,按照类别不同设计了9种孔隙率模型,制备了45个试件,研究不同腐蚀周期和区域对平面多孔结构板力学性能的影响。结构基本尺寸为120 mm×74 mm×10 mm,局部腐蚀位置如图1所示(白色标注为腐蚀位置)。图1中前3列基本模型为孔隙率分别为

收稿日期: 2023-06-28 修回日期: 2023-07-24

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院NSAF联合基金项目(U1930204)

作者简介: 邹俊岭,女,1998年生,河南驻马店人,硕士研究生;主要研究方向为多孔材料和结构力学性能;E-mail:2022112042@chd.edu.cn。

邓庆田(通信作者),男,1980年生,陕西咸阳人,博士,副教授;主要研究方向为多孔材料和结构力学性能、损伤检测结构;E-mail:dengqt@chd.edu.cn。

引用格式: 邹俊岭,邓庆田,李新波,等.局部腐蚀对多孔结构力学性能的影响[J].机械强度,2025,47(3):1-10.

ZOU Junling, DENG Qingtian, LI Xinbo, et al. Effect of local corrosion on mechanical properties of the porous structure[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(3): 1-10.

72%、63%和54%的单元腐蚀,第4列为孔隙率54%的单元扩大区域腐蚀。

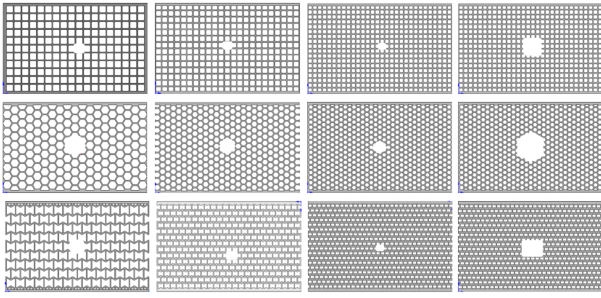


图1 平面多孔结构板局部腐蚀位置

Fig. 1 Localized corrosion location of planar porous structural plates

为方便试验测试,对试件进行编号如表1所示。例如H-1-f-2由4项组成,表示孔隙率72%、单元腐蚀、2周期的正六边形结构。

表1 试件编号

Tab. 1 Number of specimens

类别 Category	孔隙率 Porosity	腐蚀区域 Corrosion area	周期 Period
正四边形 Regular quadrilateral(Q)	72%(1)	单元 Unit cell(f)	0, 1, 2, 3
正六边形 Regular hexagonal(H)	63%(2)	扩大区域 Expanded area(j)	
内凹形 Concave shape(C)	54%(3)		

1.2 模型制备

采用SolidWorks软件构建模型,表2所示为建立的9种模型的几何参数。使用3D打印机进行模型制备,打印速度为30 mm/s。3D打印用材为聚乳酸,密度为1.25 g/cm³。

表2 基本模型的几何参数

Tab. 2 Geometric parameters of basic models

孔隙率 Porosity/%	Q	H	C	
	$\beta = 90^\circ$	$\beta = 120^\circ$	$\beta = 60^\circ$	
	L_1/mm	L_1/mm	L_1/mm	L_2/mm
72	5.4	3.6	8	2
63	3.2	2.4	4.8	1.2
54	3	1.8	3.12	0.8

2 试验测试

2.1 腐蚀试验

腐蚀介质采用密度为1.325 g/cm³的二氯甲烷溶液,采取液滴法^[17]引入腐蚀介质。在试件预设腐蚀部位上方定量点滴,腐蚀溶液以24 h时间间隔滴注在试

件表面上。腐蚀溶液的容量与试件表面积的比率在20~200 mL/cm²范围内^[18],每次滴取1.5 mL二氯甲烷溶液覆盖在单元表面上,滴取3 mL在扩大区域,如图1所示。未腐蚀状态设定为0周期,腐蚀溶液作用7天为一个周期,采用电子显微镜观察腐蚀位置结构变化,如图2所示(以孔隙率为54%的内凹形结构为例)。试验过程中,采用滴管滴液,如图3所示。考虑到腐蚀介质的环境要求,试件在密封状态存放,如图4所示。试验过程产生的二氯甲烷废液装入密封容器,交由化学实验室统一收集处理。

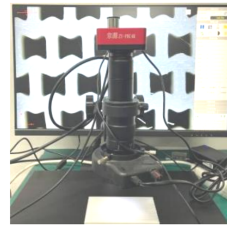


图2 显微镜装置

Fig. 2 Microscope device



图3 滴管

Fig. 3 Dropper

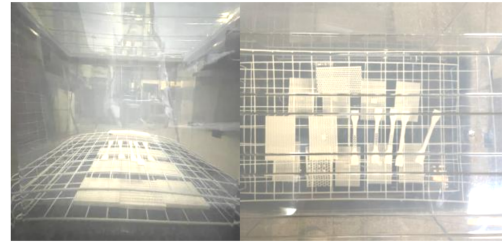


图4 密封存放装置

Fig. 4 Sealed storage device

件微观变化如表3所示,除了进行单元腐蚀损伤外,选取孔隙率为54%的试件开展扩大区域腐蚀。结果表明,随着周期增加,试件表面损伤逐渐明显,到第3周期时,试件底部受腐蚀损伤的影响形成一个局部密实体,腐蚀损伤程度关系:孔隙率72%<孔隙率63%<孔隙率54%。

2.2 压缩试验

采用微机控制电子万能试验机完成准静态压缩试验,压缩试验加载方式采用位移控制,加载速度为1 mm/min,下压位移为30 mm,加载装置如图5所示(以孔隙率为54%的内凹形结构为例),试验过程中采用高分辨照相机对试件的破坏过程进行记录。

选取孔隙率为72%的单元腐蚀进行分析,正四边形结构的变形情况如表4所示。0周期初始,失稳从底部第2层开始,第2轮失稳发生在底部第3层,整体失稳趋势向左;第1周期第1轮失稳层与0周期相同,第2轮失稳发生在腐蚀位置所在层,随着腐蚀周期加长,失稳趋势向右,其原因是受到腐蚀位置的影响(腐蚀位置靠中心轴右侧)。

表 3 部分显微镜观测图

Tab. 3 Pictures of partial microscopic observations

孔隙率-腐蚀区域-结构类别 Porosity-corrosion area-structure class	0 周期 0 period	第 1 周期 1st period	第 2 周期 2nd period	第 3 周期 3rd period
72%-f-H				
63%-f-H				
54%-f-H				
54%-j-H				
72%-f-C				
63%-f-C				
54%-f-C				
54%-j-C				

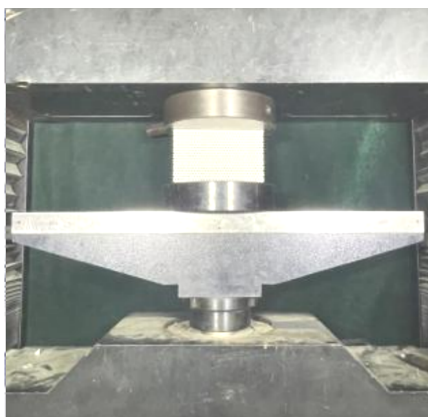


图 5 加载装置

Fig. 5 Loading device

分析不同腐蚀周期正六边形结构破坏过程,如表 5 所示。结果表明,初始变形从斜对角线开始,随着下压位移的增加,逐渐呈现出“X”形破坏模式;0 周期结构有轻微的失稳屈曲现象,第 1 周期至第 3 周期内未出现屈曲,说明腐蚀损伤位置的存在为结构提供了一定缓冲作用,消除了结构的失稳现象,随着腐蚀周期的持续,缓冲作用逐渐明显。

表 4 不同腐蚀周期正四边形结构破坏过程

Tab. 4 Failure process of the regular quadrilateral structure in different corrosion periods

周期 Period	孔隙率 72% Porosity 72%			
0				
1				
2				
3				

表 5 不同腐蚀周期正六边形结构破坏过程

Tab. 5 Failure process of the regular hexagonal structure in different corrosion periods

周期 Period	孔隙率 72% Porosity 72%			
0				
1				
2				
3				

内凹形结构压缩变形情况如表 6 所示,未腐蚀试件初始变形在中心层两侧,腐蚀试件的变形从腐蚀损伤位置开始。结果表明,0 周期初始变形在上、下边缘第 2、第 3 层处,并向两边扩散,逐渐由两端向内收缩;第 1 周期至第 3 周期初始变形从腐蚀损伤位置开始,随下压位移的增加,变形由中间向两端延伸。

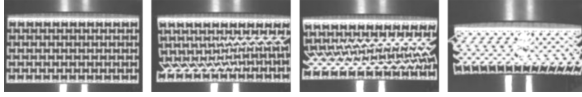
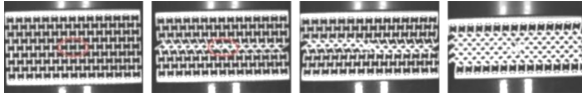
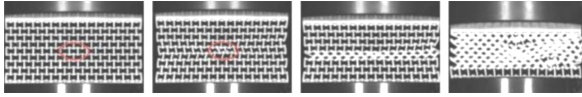
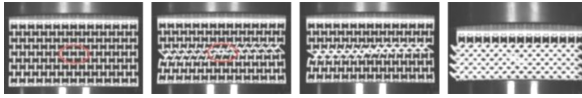
2.3 结果分析

为验证腐蚀结果的可靠性,试验选取孔隙率为 72% 的正六边形结构进行了两组重复试验。如图 6 所示,选取下压位移为 15 mm 的数据分析,结果表明,每个周期内的两组试验误差在 5% 以内。

在正六边形结构两次重复试验的基础上,对其他类型结构进行腐蚀试验测试,试验载荷-位移关系曲线如图 7~图 10 所示。准静态载荷作用下,平面多孔结构板的载荷-位移曲线大致分为 3 个阶段:弹性阶段、屈服平台阶段以及密实阶段。正四边形结构腐蚀前后载荷-位移曲线如图 7 所示。由图 7 可知,加载初期载

表6 不同腐蚀周期内凹形结构破坏过程

Tab. 6 Failure process of the concave structure in different corrosion periods

周期 Period	孔隙率 72% Porosity 72%
0	
1	
2	
3	

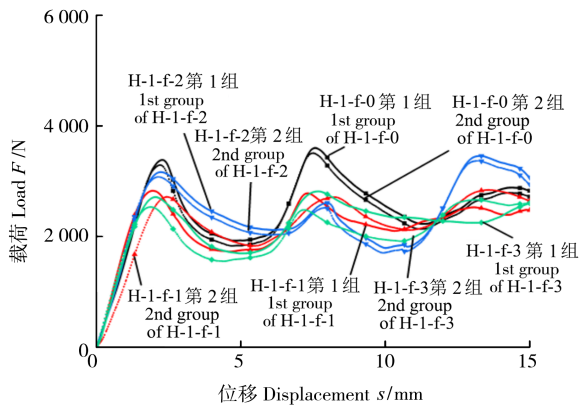
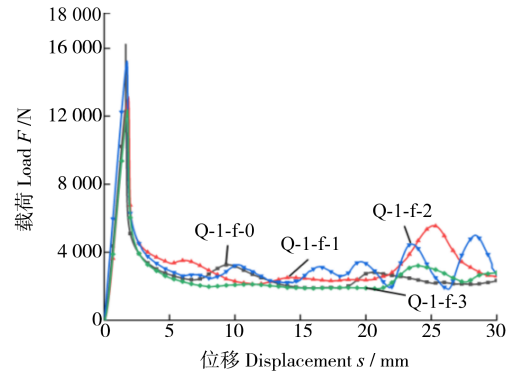


图6 两组重复试验的载荷-位移曲线

荷-位移曲线成线性增加,达到峰值载荷后,曲线急剧下降再缓慢增加,0周期产生的峰值力最大,第2周期产生的峰值力大于第1周期和第3周期。如图7(a)所示,第1周期和第3周期的弹性阶段曲线斜率比0周期小,第2周期曲线的斜率较大。这表明,第2周期时腐蚀损伤效果不稳定,导致试件刚度加强,第3周期时达到稳定状态,试件刚度退化。

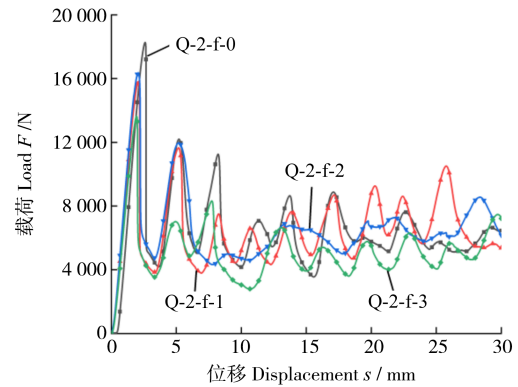
如图8(a)、图8(b)所示,正六边形结构在弹性阶段时,0周期的峰值力大于其他周期,第2周期的峰值力大于第1周期。当结构孔隙率由54%增加到63%时,对应0、1、2、3周期的承载能力分别下降了约39.5%、53.6%、37.4%、47.5%;当孔隙率由63%增加到72%时,对应0、1、2、3周期的承载能力分别下降了约58.5%、56.9%、53%、59.2%。结果表明,提高结构孔隙率,试件的承载能力降低,产生的原因为多孔结构板密实度越高,承载能力越大。

如图9(a)所示,孔隙率为72%的内凹形结构,在0周期的峰值力比第1周期增加了约6.4%,比第2周期



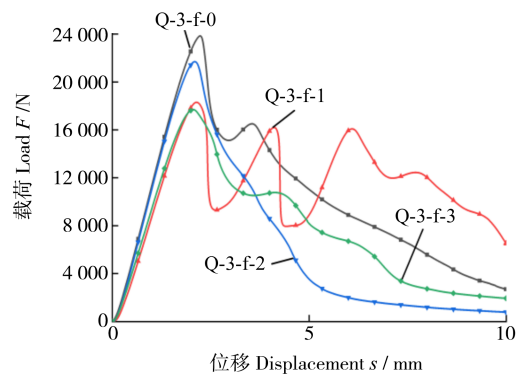
(a) 孔隙率72%

(a) Porosity 72%



(b) 孔隙率63%

(b) Porosity 63%



(c) 孔隙率54%

(c) Porosity 54%

图7 不同周期的正四边形结构腐蚀前后载荷-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of the regular quadrilateral structure before and after corrosion in different periods

增加了约10.4%,比第3周期增加了约11.1%。随后,峰值急剧减小为一个平台力,到达平台阶段时0周期平台力均高于其他周期,当位移达到27 mm时,结构达到致密化阶段。如图9(b)所示,孔隙率为63%,弹性阶段0周期所产生的峰值力比第1周期减少了约12.8%,比第2周期增加了约30.8%,比第3周期增加了约25.9%。如图9(c)所示,孔隙率为54%时,结构密实,承载能力增强,易产生失稳现象。

孔隙率为54%的结构在试验加载过程中,存在屈曲失稳现象,下压位移达到10 mm时趋于稳定。其中,

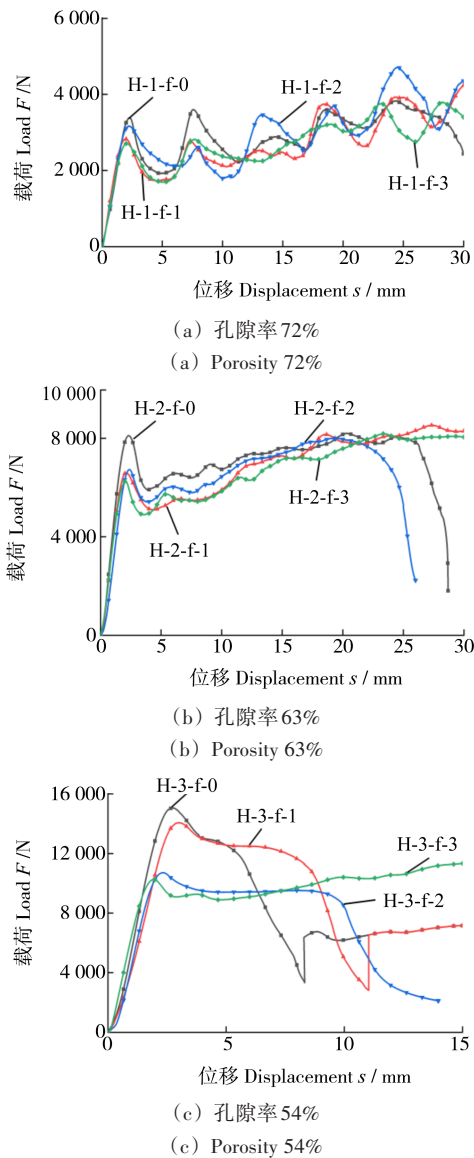


图 8 不同周期的正六边形结构腐蚀前后载荷-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of the regular hexagonal structure before and after corrosion in different periods

正四边形结构如图 10(a)所示,承载能力关系为0周期>第3周期>第2周期>第1周期,表明扩大区域腐蚀加强了试件表面的密实程度;与第1周期相比,随着周期的持续,提高了正四边形结构的承载能力。正六边形结构如图 10(b)所示,在弹性阶段,第1周期和第3周期曲线斜率重合,表明这两个周期在弹性阶段的变形能力相同。内凹形结构如图 10(c)所示,在弹性阶段,承载能力关系为第3周期<第2周期<第1周期<0周期,腐蚀周期越长,承载能力越低,表明内凹形结构扩大区域腐蚀没有产生密实现象,腐蚀缺陷的存在降低了结构的承载能力。

结构最大载荷数值如表 7 所示,孔隙率为 72% 时,0 周期至第 3 周期承载能力分别降低了约 22.6%、25.6% 和 2.2%;孔隙率为 63% 时,0 周期至第 3 周期承载能力分别降低了约 25.4%、24.4% 和 20.6%;孔

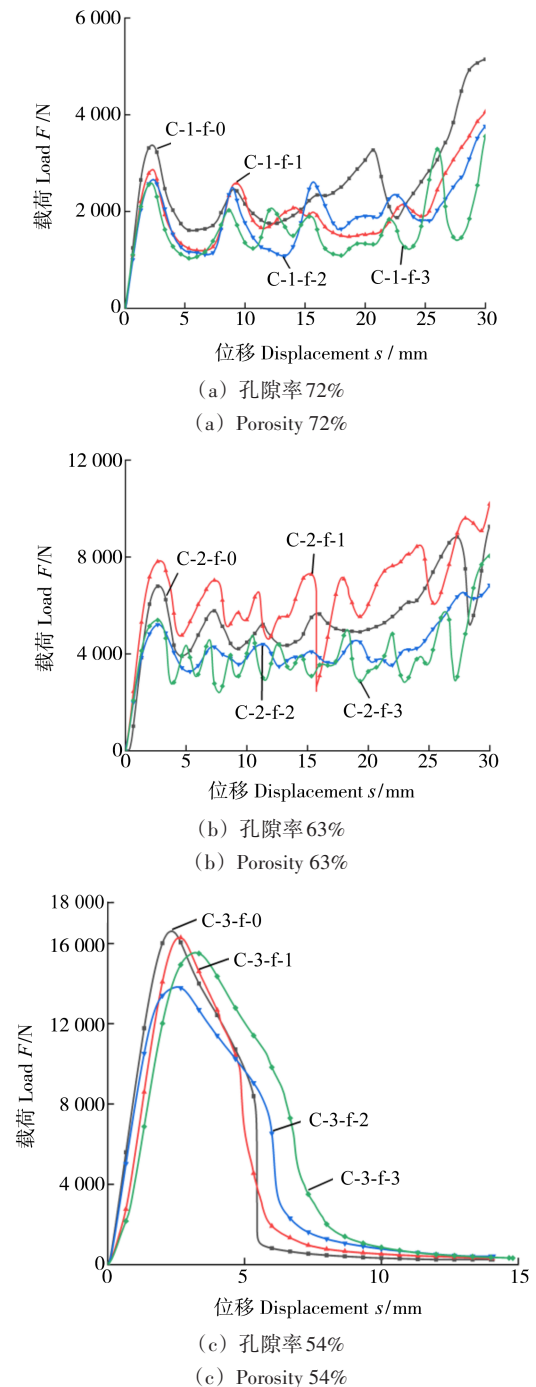
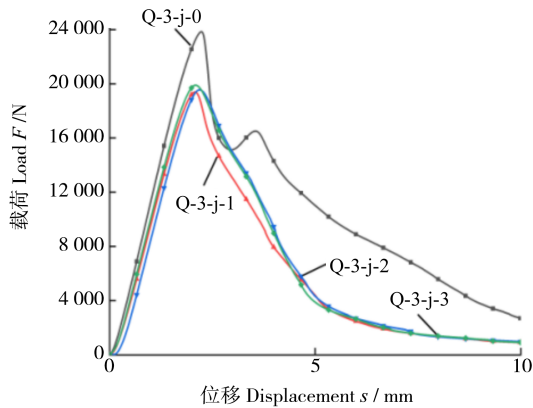


图 9 不同周期的内凹形结构腐蚀前后载荷-位移曲线

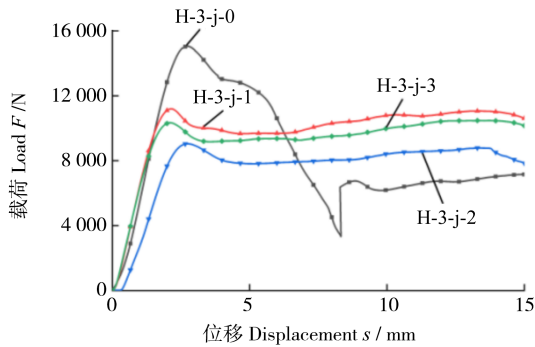
Fig. 9 Load-displacement curves of the concave structure before and after corrosion in different periods

隙率为 54% 时,单胞元腐蚀 0 周期至第 3 周期分别降低了约 25.6%、12.9%、6.6%,此时扩大区域腐蚀 0 周期至第 3 周期承载能力分别降低了约 16.4%、22.5%、21.7%。分析单胞元腐蚀与扩大区域腐蚀承载能力的差异,发现正四边形结构在第 1 周期和第 3 周期内,前者的峰值力比后者分别减少了约 5.7% 和 11.1%,在第 2 周期内前者的峰值力比后者增加了约 9.7%;正六边形结构在第 1、2、3 周期内前者的承载能力比后者分别增加了约 25%、18.9%、12.4%;内凹形结构同

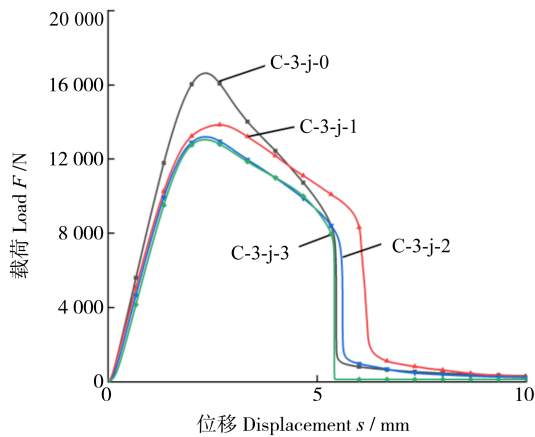
样分别增加了约18.1%、4.5%、19.2%。



(a) 孔隙率54%正四边形
(a) Porosity 54% regular quadrilateral



(b) 孔隙率54%正六边形
(b) Porosity 54% regular hexagonal



(c) 孔隙率54%内凹形
(c) Porosity 54% concave

图10 不同周期局部扩大腐蚀前后载荷-位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curves before and after localized expansion corrosion in different periods

结果表明,孔隙率为72%时,正六边形结构单元腐蚀缺陷承载能力最弱,内凹形结构的承载能力最强;孔隙率为63%和54%时,正四边形结构受腐蚀影响最大,正六边形结构扩大区域腐蚀承载能力最弱,内凹形结构扩大区域腐蚀承载能力最强;在外界腐蚀条件作用下,平面多孔结构板为正六边形的拓扑结构承载能力最弱。

表7 结构最大载荷

Tab. 7 Maximum load of structure

周期 Period	孔隙率 Porosity/%	最大载荷 Maximum load /N		
		Q	H	C
0	72	16 000.20	3 420.42	3 298.54
	63	18 270.30	8 210.07	6 809.87
	54	23 810.12	13 548.03	16 597.83
1	72	13 154.60	2 820.47	2 796.67
	63	15 816.02	6 510.40	7 810.22
	54	18 310.31	14 000.10	16 298.56
2	72	15 245.02	3 170.62	2 590.84
	63	16 366.32	6 700.34	5 210.53
	54	21 510.11	10 700.71	13 797.98
3	72	12 386.04	2 550.11	2 560.69
	63	13 632.33	6 210.54	5 409.44
	54	17 710.20	11 800.02	15 501.21

3 有限元仿真

3.1 仿真模拟

运用Abaqus软件对不同孔隙率及周期的多孔结构板腐蚀状态和准静态压缩进行模拟^[19-20],引入文献[21]的方法进行腐蚀仿真模拟。

腐蚀状态是通过对应相应腐蚀位置减小区域板厚、弹性模量和表面载荷实现的,表面载荷施加在单单元及其扩大区域的外表面和内壁,材料对应的腐蚀性能如表8所示。

表8 孔隙率72%的腐蚀参数

Tab. 8 Corrosion parameter with a porosity of 72%

周期 Period	模型编号 Model number	腐蚀板厚 Corrosion plate thickness/mm	弹性模量 Modulus of elasticity/MPa	屈服应力 Yield stress/MPa	表面载荷 Surface load/MPa
0	—	—	1 800	40	—
1	Q-1-f-1	0.30			
	H-1-f-1	0.40	1 200	26	6.50
	C-1-f-1	0.30			
2	Q-1-f-2	0.35			
	H-1-f-2	0.45	800	17	13
3	C-1-f-2	0.40			
	Q-1-f-3	0.40			
	H-1-f-3	0.50	500	11	19.50
	C-1-f-3	0.45			

腐蚀仿真在部件模块下,将实体转换为壳部件,运用拆分面命令进入草图分区,画出腐蚀区域,采用偏移面命令选择已拆分的腐蚀区域,偏移距离为腐蚀缺陷大小,删除面命令将试件腐蚀区域表面删除。

在属性模块下,创建腐蚀作用区域和未腐蚀作用区域材料的属性,并指派到具体的截面位置,属性定义如图 11 所示(以孔隙率为 72% 的正六边形结构为例)。装配后,将腐蚀位置的作用定义为表面载荷,边界条件为底端固定端约束,试件内部约束为位移转角,网格采用尺寸为 1 mm 的六面体单元进行划分。腐蚀计算完成后,将 . odb 格式文件导入新的工况进行压缩试验。

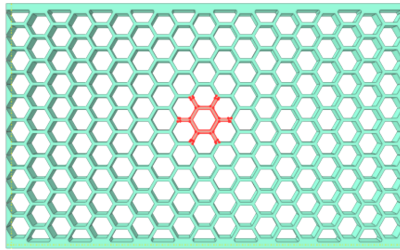


图 11 定义属性

Fig. 11 Defined attribute

准静态压缩试验,导入试件并创建压板,压板是直径为 150 mm 离散刚体,压板属性为惯性作用。将压板与试件装配如图 12 所示,分析步设置为动力显式,相互作用中添加通用接触和刚体约束。上部刚性板采用 1 mm/min 的竖直恒速,下部刚性板为固定端约束,压缩过程中相互接触采用一般接触罚来模拟,切向行为的摩擦因数设为 0.3,并选用硬接触作为法向行为,压板和试件网格采用尺寸为 1 mm 的六面体单元进行划分。

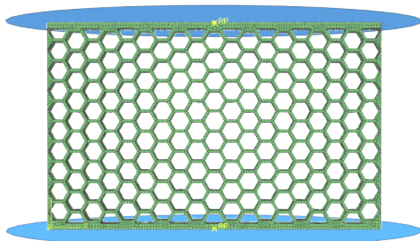


图 12 试件装配

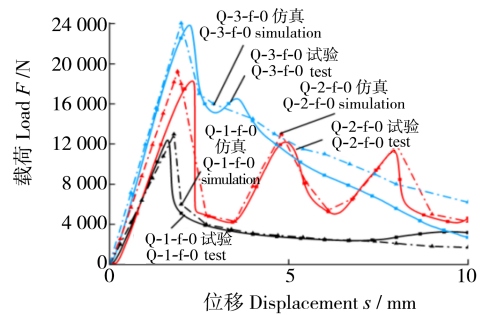
Fig. 12 Specimens assembly

通过有限元后处理分析获得不同平面多孔结构板的变形及应力分布,如表 9 所示。孔隙率为 72% 时,正四边形结构在 0 周期最大变形发生在顶部压头与低端压头横向作用最边缘,并由两边向中间递减;在第 1 周期,试件整体的变形趋势主要集中在中间区域,腐蚀位置应力较小;在第 2 周期,试件变形比第 1 周期明显减弱。相对于未腐蚀状态下,腐蚀周期的存在使其变形较为明显。

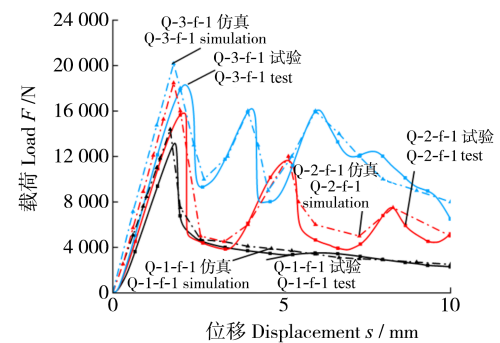
3.2 结果验证

为方便观察试验与仿真结果,选取下压位移为 10 mm 的数据分析。对比分析部分试件载荷-位移曲

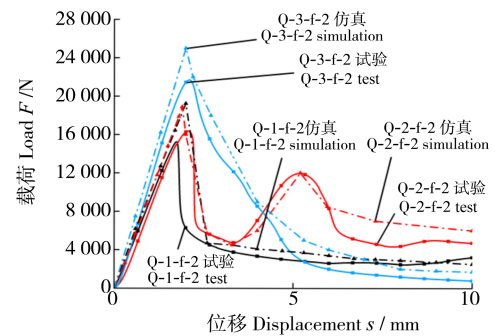
线试验与仿真结果,如图 13、图 14 所示。结果显示,曲线在达到塑性变形前后显示出差异;0 周期结构曲线最高;随着腐蚀程度的加深曲线逐渐下降;同一类型结构曲线趋势一致;腐蚀影响结构的承载能力;随着腐蚀程度加深,结构的最大承载力降低。结构达到塑性阶段后,变形趋势基本相同,这说明腐蚀产生的影响不再发挥作用。整体曲线的有限元仿真结果比试验结果偏大,结果存在误差的主要原因有以下几个方面:①未腐蚀状态下,试件准静态压缩过程中有轻微



(a) 0 周期
(a) 0 period



(b) 第 1 周期
(b) 1st period



(c) 第 2 周期
(c) 2nd period

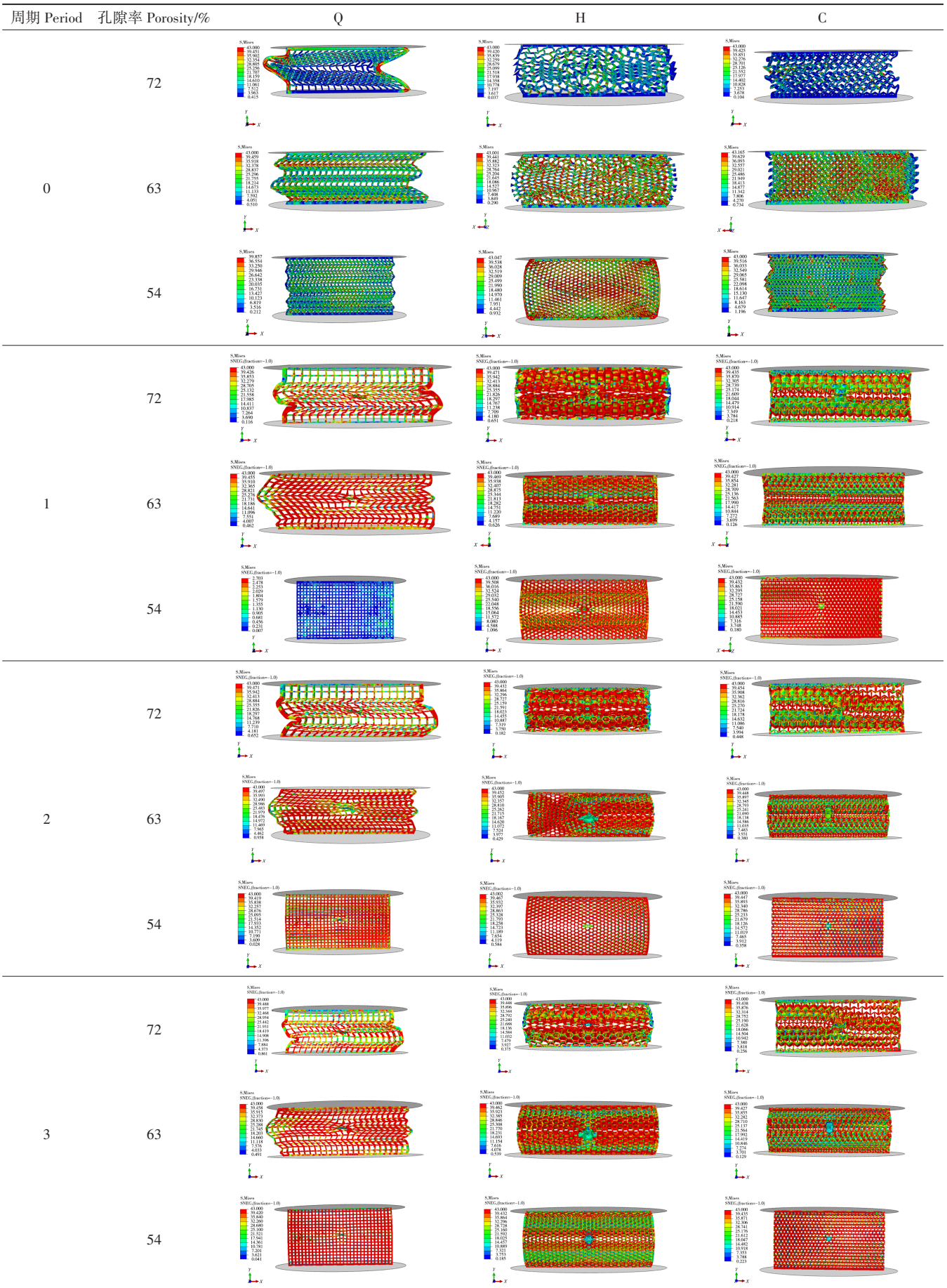
图 13 不同孔隙率正四边形结构拟合载荷-位移曲线

Fig. 13 Fitting load-displacement curves of the regular quadrilateral structure with different porosities

的屈曲未考虑进仿真;②腐蚀试验时,不同腐蚀周期模拟的腐蚀环境存在一定差异;③腐蚀区域板厚逐渐减小过程未考虑。

表9 平面多孔结构板腐蚀前后应力分布

Tab. 9 Stress distribution of planar porous structural plates before and after corrosion



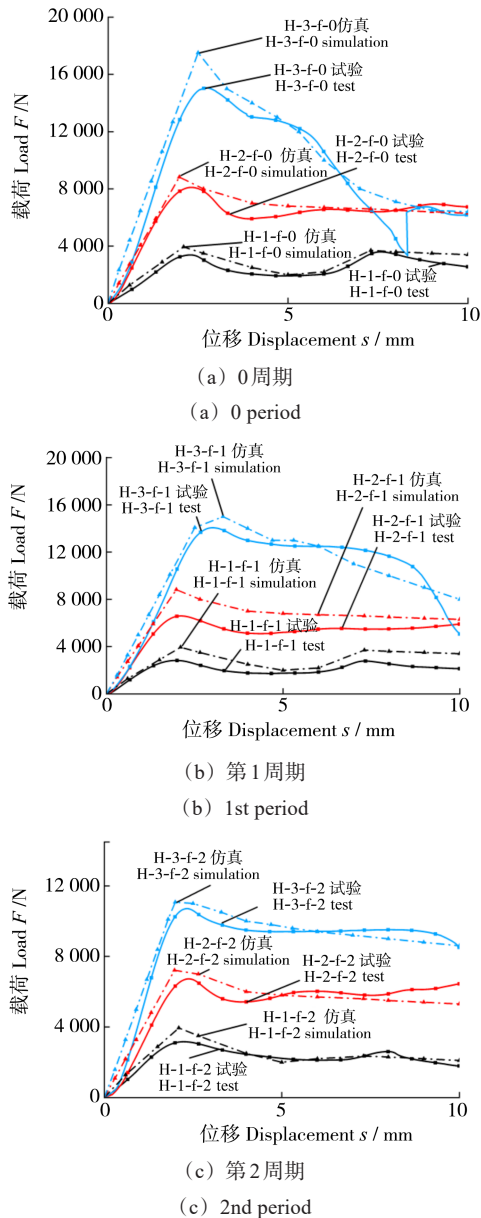


图 14 不同孔隙率正六边形结构拟合载荷-位移曲线

Fig. 14 Fitting load-displacement curves of the regular hexagonal structure with different porosities

4 结论

以不同孔隙率的正四边形、正六边形和内凹形多孔结构板为研究对象,采取液滴法引入二氯甲烷溶液作为腐蚀介质,分析了不同腐蚀周期和区域对聚乳酸多孔结构力学性能的影响规律,通过试验和有限元仿真得出结论如下:

1) 内凹形结构受腐蚀周期的影响最小,正四边形和正六边形结构受腐蚀周期的影响有赖于孔隙率的大小。

2) 孔隙率 72% 正六边形结构单胞元腐蚀缺陷承载能力最弱,内凹形结构的承载能力最强;孔隙率 54% 正四边形结构受单胞元腐蚀影响最大,内凹形结构影响最小,其中正六边形结构单胞元扩大区域腐蚀承载能力相比单胞元腐蚀更弱,正四边形结构单胞元扩大

区域腐蚀承载能力相比单胞元腐蚀较强。

3) 随着孔隙率的增加,正四边形结构承载能力受腐蚀周期的影响逐渐增加,正六边形结构承载能力受腐蚀周期的影响逐渐减小。

参考文献 (References)

- [1] 付君健,徐勇,周祥曼,等. 基于联合仿真的曲面共形多孔结构拓扑优化方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(9): 2781-2790.
FU Junjian, XU Yong, ZHOU Xiangman, et al. Topological optimization method for conformal cellular structures on surfaces based on co-simulation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(9): 2781-2790. (In Chinese)
- [2] 胡传丰,任靖雯,胡慧,等. 基于等几何分析的参数多孔结构拓扑优化[J]. 吉林大学学报(理学版), 2021, 59(1): 65-76.
HU Chuanfeng, REN Jingwen, HU Hui, et al. Topology optimization for parametric porous structure based on iso-geometric analysis [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2021, 59 (1): 65-76. (In Chinese)
- [3] WANG B, YANG M S, ZHANG D Y, et al. Alternative approach for imperfection-tolerant design optimization of stiffened cylindrical shells via energy barrier method[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 172: 108838.
- [4] NEČEMER B, KRAMBERGER J, VUHERER T, et al. Fatigue crack initiation and propagation in reentrant auxetic cellular structures[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 126: 241-247.
- [5] 张冬云,胡松涛,陈润平,等. 3D 打印 Ti6Al4V 多孔材料压缩性能[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(11): 1275-1283.
ZHANG Dongyun, HU Songtao, CHEN Runping, et al. Compressive properties of 3D printed Ti6Al4V porous materials[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47 (11): 1275-1283. (In Chinese)
- [6] 王炳琛,刘玲. 电热效应对碳纳米管修饰碳纤维复合材料剪切性能的影响[J]. 复合材料科学与工程, 2021(3): 82-87.
WANG Bingchen, LIU Ling. Influence of electrothermal effect on the shear properties of carbon nanotube modified carbon fibrous composites [J]. Composites Science and Engineering, 2021 (3): 82-87. (In Chinese)
- [7] 张兰,王翔,刘军,等. 3D 打印钛合金骨小梁多孔结构的拉伸性能[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(22): 3498-3503.
ZHANG Lan, WANG Xiang, LIU Jun, et al. Tensile properties of three-dimensional printed porous titanium alloy trabecular bone [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2020, 24 (22): 3498-3503. (In Chinese)
- [8] 王岐山,何川,陈旭. 金属工程材料腐蚀疲劳行为研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(1): 218-226.
WANG Qishan, HE Chuan, CHEN Xu. Research progress of corrosion fatigue behavior of metal engineering materials [J]. Materials Reports, 2023, 37(1): 218-226. (In Chinese)
- [9] JIN Y F, WAN Y, LIU Z Q. Surface polish of PLA parts in FDM using dichloromethane vapour [C]. MATEC Web of Conferences, 2017, 95: 05001.
- [10] AO Q B, TANG H P, WANG J Z, et al. Corrosion behavior of

- sintered 316L stainless steel fibre porous felt [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(10):2344-2348.
- [11] 蒋稳, 邹宇, 伍建春, 等. 腐蚀液配方对刻蚀高阻硅多孔阵列结构形貌影响的研究[J]. *功能材料*, 2013, 44(15):2222-2226.
JIANG Wen, ZOU Yu, WU Jianchun, et al. Effects of solution composition on morphology of macropore arrays etched by electrochemical etching on high ρ n-Si [J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44(15):2222-2226. (In Chinese)
- [12] ZHANG Y H, TAO Y K, SHAO J. Application of porous materials for the flow field in polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 492:229664.
- [13] 妙远洋, 吕胜利. 航空铝合金力学与电化学耦合点蚀损伤模型研究[J]. *固体力学学报*, 2019, 40(2):137-146.
MIAO Yuanyang, LÜ Shengli. Micromechanics-based modeling of pitting corrosion damage in aero aluminum alloy [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2019, 40(2):137-146. (In Chinese)
- [14] 马剑军, 刘肖, 王恒. 力学-电化学交互作用下 E690 钢的腐蚀疲劳裂纹扩展速率理论模型 [J]. *机械工程材料*, 2022, 46(6):57-63.
MA Jianjun, LIU Xiao, WANG Heng. Corrosion fatigue crack growth rate theoretical model of E690 steel under mechanics-electrochemistry interaction [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2022, 46(6):57-63. (In Chinese)
- [15] 李嘉栋, 陈超, 张世贵, 等. 不同应力条件下不锈钢局部腐蚀行为的研究进展 [J]. *表面技术*, 2021, 50(3):101-115.
LI Jiadong, CHEN Chao, ZHANG Shigui, et al. Research progress on localized corrosion behavior of stainless steel under different stress conditions [J]. *Surface Technology*, 2021, 50(3):101-115. (In Chinese)
- [16] TOKUDA S, MUTO I, SUGAWARA Y, et al. Pit initiation on sensitized Type 304 stainless steel under applied stress: correlation of stress, Cr-depletion, and inclusion dissolution [J]. *Corrosion Science*, 2020, 167:108506.
- [17] YANG Z Y, ZANG L L, DOU T W, et al. Asymmetric cellulose/carbon nanotubes membrane with interconnected pores fabricated by droplet method for solar-driven interfacial evaporation and desalination [J]. *Membranes*, 2022, 12(4):369.
- [18] 李久青, 杜翠薇. 腐蚀试验方法及监测技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2007: 72-74.
LI Jiuqing, DU Cuiwei. *Corrosion test method and monitoring technology* [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2007: 72-74. (In Chinese)
- [19] BHAGWAT Y, NAYAK G, PANDIT P, et al. Corrosion analysis of RCC beam using simplified FEM model [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, 1084(1):012072.
- [20] 邹斌. 基于 ABAQUS 软件的管道外防腐涂层修复技术综合性能分析 [J]. *材料保护*, 2020, 53(10):20-24.
ZOU Bin. Comprehensive performance analysis of pipeline external coating repair technology based on ABAQUS software [J]. *Materials Protection*, 2020, 53(10):20-24. (In Chinese)
- [21] XU L Y, CHENG Y F. Development of a finite element model for simulation and prediction of mechano-electrochemical effect of pipeline corrosion [J]. *Corrosion Science*, 2013, 73:150-160.

Effect of local corrosion on mechanical properties of the porous structure

ZOU Junling¹ DENG Qingtian^{1,2} LI Xinbo^{1,2} SONG Xueli^{1,2}

(1. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

(2. Xi'an Key Laboratory for Digital Detection Technology of Structural Damage, Xi'an 710064, China)

Abstract: Dichloromethane solution was introduced as the corrosion medium by the liquid drop method. Based on the regular quadrilateral, regular hexagon and concave structures with different porosities, the effects of different corrosion cycles and areas on the porous structural mechanical properties of polylactic acid (PLA) were analyzed by comparing with the finite element simulation results. The results show that concave porous structure plate is the least affected by the corrosion cycle, while the other two structures are affected by it depending on the size of the porosity. The hexagonal structure with a porosity of 72% has the weakest corrosion defect bearing capacity, while the concave structure has the strongest bearing capacity. The regular quadrilateral structure with a porosity of 54% is most affected by the single cell corrosion. The corrosion bearing capacity of the expanded area of a single cell in a regular hexagonal structure is weaker than that of a single cell, while the corrosion bearing capacity of the expanded area of a single cell in a regular quadrilateral structure is stronger than that of a single cell.

Key words: Corrosion; Dichloromethane solution; Polylactic acid porous structure; Mechanical property

Corresponding author: DENG Qingtian, E-mail: dengqt@chd.edu.cn

Fund: National Natural Science Foundation of China-China Academy of Engineering Physics NSAF Joint Fund (U1930204)

Received: 2023-06-28 Revised: 2023-07-24