

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.02.005

波浪荷载下海工混凝土涂层界面气泡 初始损伤演化规律

常留红^{1,2}, 郑景琦^{1,2}, 孙文硕³, 李 飘^{1,2}

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 中国电建水电八局有限公司科研设计院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 波浪荷载下海工混凝土涂层界面气泡初始损伤演化是涂层发生力学剥蚀的主要形式之一。基于内聚力行为接触属性模拟方法, 建立考虑气泡初始损伤半径及间距的弹塑性涂层初始损伤数值模型, 分析气泡初始损伤半径、间距对演化的影响, 探讨混凝土涂层界面气泡初始损伤演化规律。结果表明: 波浪荷载作用下, 单气泡初始损伤应力应变随半径增大而增大, 并沿半径方向向外逐渐减小; 气泡间存在汇聚现象, 当两气泡间距大于 11 倍气泡半径时, 气泡初始损伤相互作用微弱。

关键词: 涂层界面; 波浪荷载; 气泡; 初始损伤; 损伤演化

中图分类号: P731.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2022)02-0176-09

Initial damage evolution law of bubbles at the interface of marine concrete coating under wave load

CHANG Liuhong^{1,2}, ZHENG Jingqi^{1,2}, SUN Wenshuo³, LI Piao^{1,2}

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. Science Research & Design Institute, Sinohydro Bureau 8 Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: The initial damage evolution of bubbles at the interface of marine concrete coating under wave load is one of the main forms of mechanical denudation coating. Based on the contact attribute simulation method for cohesion behavior, an elastic-plastic coating initial damage numerical model considering the initial bubble damage radius and spacing is established, with the effects of bubble initial damage half diameter and spacing on the evolution analyzed. Thus, the initial damage evolution law of bubbles at the interface of concrete coating is discussed. The results show that the initial damage stress and strain of single bubble increase with the increase of radius and gradually decrease outward along the radius under wave load. There is a convergence phenomenon between bubbles. When the distance between two bubbles is greater than 11 times that of bubble radius, the initial damage interaction of bubbles will be weak.

Key words: coating interface; wave load; air bubbles; initial damage; damage evolution

海工混凝土结构在施工过程中其表面会随机形成空洞等微缺陷, 造成涂层基体表面粗糙, 加之涂层在涂装过程中会出现厚度不一及粘合不连续等问题, 使得海工混凝土涂层界面不可避免的产生初始损伤。研究表明, 涂层失效一般起源于这些缺陷^[1]。

同时, 海工混凝土涂层表面的波浪荷载加剧了混凝土涂层界面初始损伤扩展演化, 促使涂层在化学腐蚀前就已发生力学剥蚀而失效^[2], 进而造成海工混凝土结构物出现损伤, 缩短其使用寿命。可见, 海工混凝土涂层在波浪荷载下的初始损伤演化是涂层防

收稿日期: 2021-05-16; 网络出版日期: 2022-03-23

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20220322.1225.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51809022); 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30703)

通信作者: 常留红, 女, 博士, 副教授, 研究方向为水工结构及其水动力特性。E-mail: claire886@163.com

腐性能劣化的主要原因。

大小不一、间距不等的气泡初始损伤是海工混凝土涂层界面初始损伤的主要形式之一,气泡初始损伤尺度(大小、间距)与其波浪荷载下动力响应状况密切相关。而气泡初始损伤动力响应会影响涂层与基体的粘结力,使得气泡初始损伤随动力响应的变化逐渐扩展,最终导致涂层从混凝土基体上剥落或涂层表面出现裂纹和孔洞等。因此,界面气泡初始损伤大小及间距对涂层初始损伤演化有决定性作用。

国内外学者利用高精度仪器如扫描电声显微镜(SAEM)^[3]、超声显微镜(SAM)^[4]等,对初始损伤在涂层内部的尺度等开展了大量损伤观测。荷载作用下涂层初始损伤尺度对演化过程影响的实时测量,则采用数字图像(DIC)^[5]、PTIR-MIR^[6]、X射线光电子能谱分析技术(XPS)^[7]、原子力显微镜(AFM)^[8]、透射电子显微镜(TEM)^[9]等技术,观察涂层初始损伤演化情况,进而判断涂层力学性能。

在此基础上,众多学者针对初始损伤大小和间距等尺度因素对涂层界面初始损伤演化的影响开展了相当多的数值模拟研究。Liu等^[10]采用有限元法计算了环氧涂层/金属基体界面气泡在静水压力(HP)以及交变静水压力(AHP)作用下周围的应力,认为HP会促进涂层的破坏,但不能机械破坏界面,而AHP可以提供界面气泡的拉应力,加速涂层的剥离。基于Abaqus有限元软件,王鲁斌^[11]通过建立涂层三维模型,分析了硅灰石制备涂层大气孔和二维孔隙的尺寸、位置关系对孔隙周边应力的影响规律。周盼等^[12]模拟涂层与基体粘结界面的损伤萌生和脱粘发展的过程,发现损伤萌生与脱粘发生的临界过载趋于一个极限值,且该值与初始脱粘面积无关。白清顺等^[13]开展了涂层基底界面水平微裂纹的CVD金刚石涂层单向拉伸有限元仿真,研究了微裂纹缺陷在CVD金刚石涂层中的扩展规律,揭示了CVD金刚石涂层的脱落机理。包亦望等^[14]针对陶瓷涂层初始残余应力及其尺寸效应开展研究,建立了不同尺寸和形状的涂层样品中残余应力之间的关系,分析了涂层厚度及其变形后的曲率对残余应力的影响。陈延红等^[15-16]将损伤变量引入涂层本构模型中,建立了反映微结构变化累计效应的宏观力学本构模型,分析了涂层厚度等对涂层系统应力分布、损伤演化、承载能力等的影响。刘扬等^[17]采用内聚力模型和热生长氧化层(TGO)非均匀增长子程序,模拟了在热循环载荷作用下热障涂层(TBC)内部应力演化规律和开裂行为。

目前,气泡及裂缝等界面初始损伤对涂层损伤脱粘影响的研究较为丰富,但鲜有波浪荷载作用下界面气泡初始损伤对海工混凝土涂层损伤影响研究。因此,基于有限元软件建立弹塑性涂层初始损伤内聚力模型,考虑气泡不同半径和间距,研究波浪周期性冲击荷载下弹塑性涂层气泡初始损伤演化规律。

1 弹塑性涂层初始损伤内聚力模型

在国内外现行混凝土涂层体系中,环氧涂层体系以良好的耐候性、耐磨性、防污性以及极低的表面能得到了广泛应用。因此,以环氧涂层为研究对象,建立弹塑性环氧涂层初始损伤内聚力模型。

1.1 内聚力模型参数

选取C45强度混凝土作为基体材料,根据《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010),确定C45混凝土弹性模量 E_c 为 3.35×10^4 MPa,Poisson比 V_c 为0.2,环氧树脂作为涂层材料,弹性模量 E 为 1×10^3 MPa,Poisson比 V 为0.38^[18]。

涂层界面的内聚力即混凝土涂层界面的粘结力,其属性难以直接获取,根据内聚力接触属性的应力应变解耦关系以位移与应变的关系推算:

$$\epsilon_n = \frac{\delta_n}{T_0}, \epsilon_s = \frac{\delta_s}{T_0}, \epsilon_t = \frac{\delta_t}{T_0} \quad (1)$$

$$K_{nn} = \frac{E_{nn}}{T_0}, K_{ss} = \frac{E_{ss}}{T_0}, K_{tt} = \frac{E_{tt}}{T_0}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_s \\ \sigma_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{nn} & & \\ & E_{ss} & \\ & & E_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_n \\ \epsilon_s \\ \epsilon_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & & \\ & K_{ss} & \\ & & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: ϵ_n 、 ϵ_s 和 ϵ_t 分别为法向和两个切向的应变值; δ_n 、 δ_s 和 δ_t 分别为法向和两个切向的位移值; T_0 为内聚力单元初始厚度; K_{nn} 、 K_{ss} 和 K_{tt} 分别为法向和两个切向的刚度; E_{nn} 、 E_{ss} 和 E_{tt} 分别为法向和两个切向的弹性模量; σ_n 、 σ_s 和 σ_t 分别为法向和两个切向的应力值。

以I型裂纹对应的张开正应力拉伸分离曲线为例,可通过实验测得剥离强度 $N_{\max}$ 为4.16 MPa、界面层厚度 T_t 为0.25 mm。图1为拉伸分离曲线, $N_{\max}$ 为界面内聚强度, δ_n^0 为内聚力单元达到初始损伤状态所对应的分离位移, δ_n^f 为界面分层失效时的开裂位移,曲线所围面积表示界面完全失效时所释放的能量。

$$\epsilon_n^0 = \frac{N_{\max}}{E} \quad (4)$$

$$\delta_n^0 = T_t \cdot \epsilon_n^0 \quad (5)$$

式中: ϵ_n^0 为内聚力单元达到初始损伤状态所对应的分离应变;其它与上文相同。

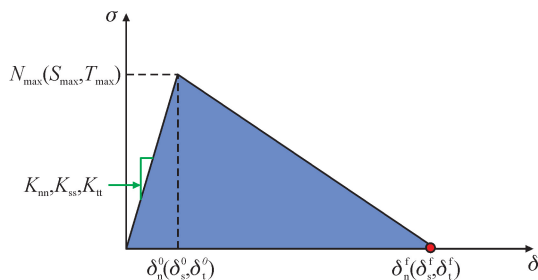


图1 拉伸分离曲线

Fig. 1 Tensile separation curve

根据混凝土涂层界面的真实物理厚度、损伤起始应变以及损伤起始位移与涂层弹性模量和剥离强度的关系,由式(4)~(5),可进一步得到刚度与弹性模量之间的关系:

$$E_{nn} = K_{nn} \cdot h_{eff} = \frac{E \cdot h_{eff}}{T_t} \quad (6)$$

式中: h_{eff} 为内聚力单元有效厚度,一般取 0.001;其它与上文相同。

由式(6)计算可得 $E_{nn}=4.16 \text{ MPa}$,同理 E_{ss} 、 E_{tt} 都为 4.16 MPa 。

1.2 内聚力模型建立及网格划分

模型分为混凝土和涂层两部分,通过设置混凝土涂层接触属性模拟界面粘结作用。根据《色漆和清漆 拉开法附着力实验:GB/T5210—2006》和 ASTM-D4541 的附着力测试相关规定,涂层厚度设置为 1.58 mm 。

采用拓扑结构对涂层部件进行网格划分,并在气泡周围加密网格,采用扫掠划分方式对混凝土部件 X、Y、Z 三个方向上依次施加网格渐变以确保计算收敛,网格划分见图 2。混凝土和涂层部件均采用八节点六面体缩减单元(C3D8R)。

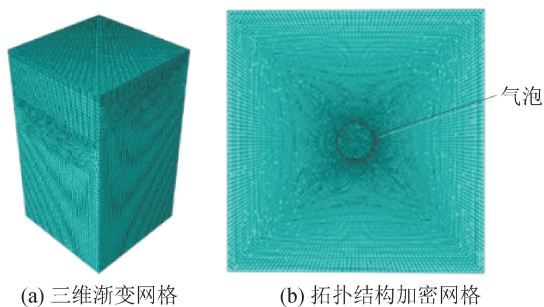


图2 网格划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of grid generation

由于混凝土涂层界面气泡大小各异,形态万千,因此对气泡尺寸、形状进行简化。同时为更好地研

究气泡初始损伤演化规律,对气泡尺寸进行放大,建立气泡半径为 2 mm 、 4 mm 、 6 mm 以及 8 mm 的圆形气泡简化模型^[10]。

1.3 涂层荷载工况

海工混凝土涂层表面波浪周期性冲击荷载加剧了混凝土涂层界面气泡初始损伤扩展,故基于前期研究成果,选择近岸墩柱结构物最不利波浪荷载作为涂层荷载^[19],以压强的形式作用于涂层表面。由于实际波浪荷载经过漫长时间作用影响涂层,在不改变涂层破坏机理的情况下,通过等比例加大原荷载数值的方法,将原荷载放大至 700 倍进行加速模拟。原荷载波浪周期为 4 s ,波高为 1 m ,波长为 9 m ,压强随时间变化曲线见图 3。

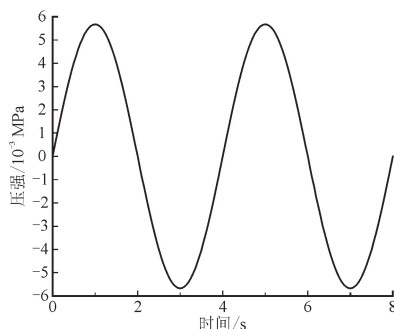


图3 压强时间变化曲线

Fig. 3 Pressure versus time curve

在波浪荷载作用下气泡初始损伤动力响应呈正相关性变化,加载时应力应变增大,卸载时应力应变减小。涂层界面的压应力不能促进界面气泡初始损伤演化,故通过分析界面最大拉应力时刻气泡的应力应变、脱粘面积以及张开量研究气泡半径以及间距对损伤扩展演化过程的影响^[10]。

1.4 环氧涂层应力-应变曲线验证

根据文献[18]中涂层的真实应力应变数据,开展单轴压缩模拟,验证结果见图 4,与文献[18]中数据基本吻合。

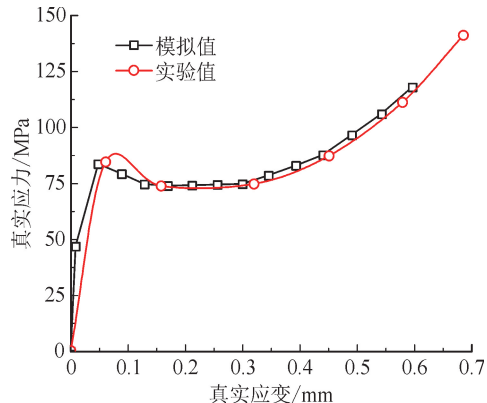


图4 弹塑性应力应变曲线

Fig. 4 Verification diagram of elastoplastic stress-strain curve

2 气泡初始损伤演化规律

在海工混凝土涂层涂装过程中,存在涂层固化厚度不均、混凝土表面处理不当以及温差等问题,导致混凝土涂层界面产生初始损伤。以最常见的气泡初始损伤为研究对象^[20],将气泡型初始损伤引入内聚力模型中,研究不同半径和间距下气泡初始损伤扩展演化规律。

2.1 气泡半径对初始损伤演化的影响

混凝土涂层界面气泡初始损伤大小各异,由此

产生的面积差异会导致气泡初始损伤动力响应大小不同,进而影响初始损伤扩展速率。将气泡半径作为气泡面积大小的代表指标,对不同半径的气泡初始损伤($R=2\text{ mm}$ 、 4 mm 、 6 mm 、 8 mm)开展演化研究。

2.1.1 不同气泡半径下涂层界面应力应变

建立四种不同气泡初始损伤半径的弹塑性涂层气泡初始损伤内聚力模型,研究气泡初始损伤应力应变响应状况。不同半径的界面气泡初始损伤涂层应力应变分布见图5和图6。

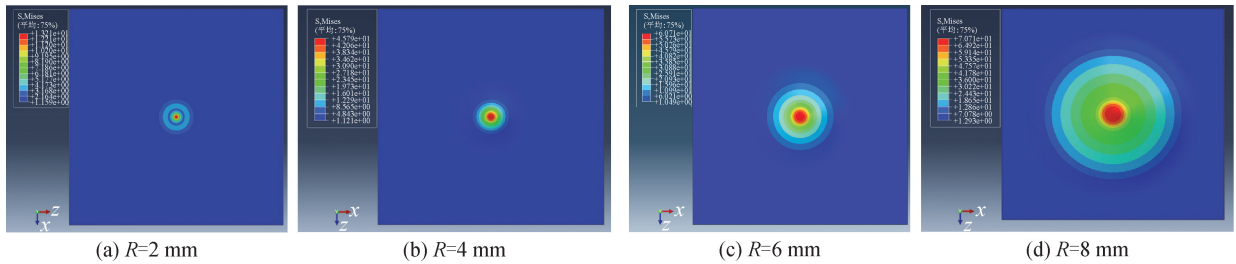


图5 不同气泡半径下应力演化云图

Fig. 5 Nephogram of stress evolution under different bubble radii

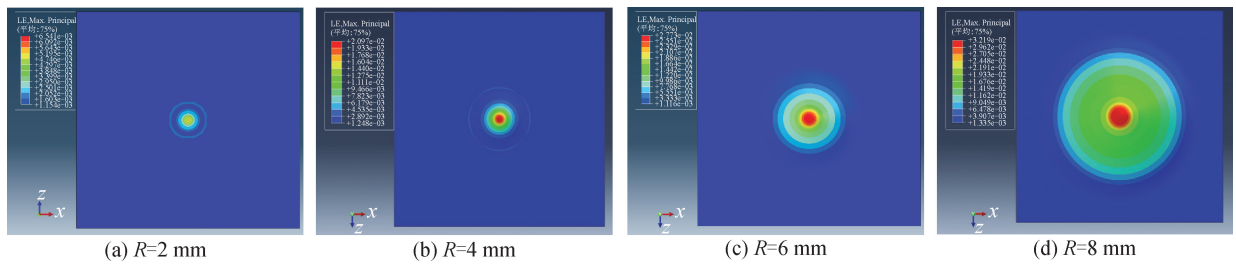


图6 不同气泡半径下应变演化云图

Fig. 6 Nephogram of strain evolution under different bubble radii

可见,在波浪荷载作用下,不同半径的气泡初始损伤应力应变分布都依气泡形状向外扩展,且沿半径方向往外逐渐减小。气泡初始损伤区域涂层混凝土未粘结,导致应力应变在气泡初始损伤中心区域集中。涂层与混凝土接触面积随气泡半径增大而减小,使得气泡初始损伤影响面积增大,应力应变愈加向气泡初始损伤中心区域集中,导致气泡初始损伤扩展演化加速。

在应力应变分布特征变化的同时,应力应变最大值也随着气泡半径的变化而变化。涂层气泡半径对应力应变最大值的影响见图7。

图7表明,在波浪荷载作用下,涂层界面应力应变最大值随气泡半径增大而增大,但增大速率不断减小。气泡初始损伤半径为 2 mm 时,涂层应力较小,尚处于弹性阶段,远未达到涂层屈服应力,但随着气泡初始损伤半径不断增大,涂层应力逐渐接近屈服应力,应力增大速率也逐渐减缓。

在波浪荷载作用下,混凝土涂层界面最先在气泡初始损伤周围出现演化,初始损伤扩展规律与初始损伤物理形态之间存在较大相关性,气泡初始损伤半径对演化有显著影响。为进一步研究气泡初始损伤半径对演化规律的影响,通过比较历经加速损伤荷载作用相同周期数的涂层张开量及脱粘面积来衡量不同气泡初始损伤半径下涂层脱粘速率的差异。

2.1.2 不同气泡半径下涂层界面张开量

涂层张开量的变化是分析混凝土涂层界面损伤扩展演化的主要依据。在荷载作用下,有无初始损伤涂层界面的张开量存在较大差异,故进一步研究气泡半径对涂层张开量的影响。图8为不同半径气泡初始损伤涂层界面张开量云图。

由图8可见,在波浪荷载作用下,涂层张开量主要集中于气泡初始损伤中心区域,按照气泡形状向外扩展,且张开区域随着气泡初始损伤半径增加而增大。

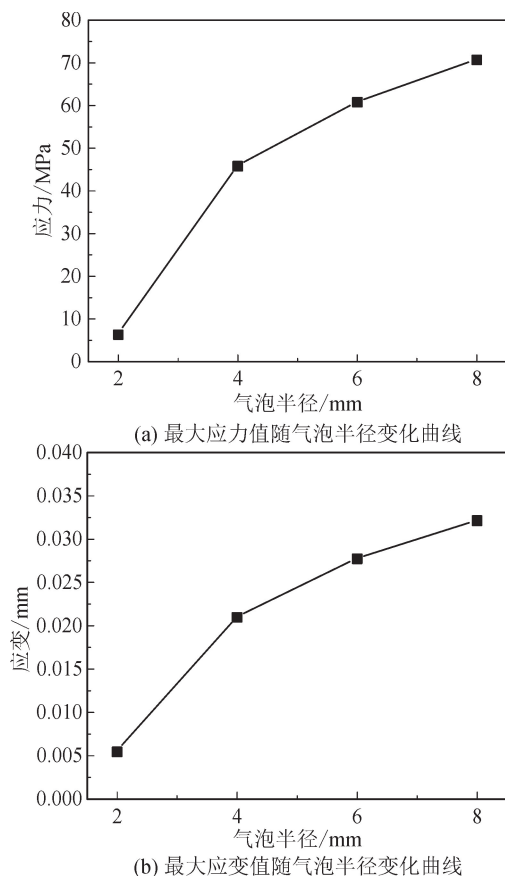


图 7 不同气泡半径下应力最大值和应变最大值变化曲线
Fig. 7 Curve of maximum stress and maximum strain under different bubble radiuses

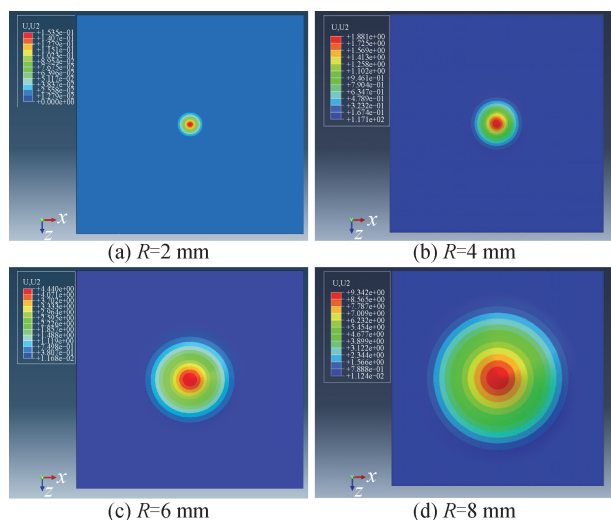


图 8 不同气泡半径下涂层界面张开量云图
Fig. 8 Nephogram of coating interface opening under different bubble radiuses

根据涂层应力应变云图和张开量云图的对称分布特征,过粘结界面气泡初始损伤圆心取直线(中线),分析该直线路径上涂层张开量和接触状态,不同半径气泡初始损伤涂层界面中线张开量分布见图 9。

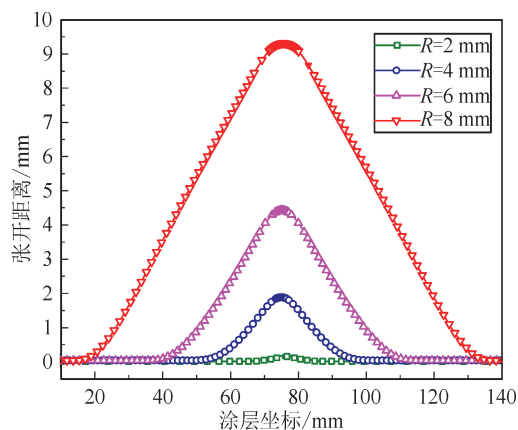


图 9 不同气泡半径下涂层界面中线张开量分布曲线
Fig. 9 Distribution curve of central line opening of coating interface under different bubble radiuses

图 9 表明,涂层张开量以气泡初始损伤圆心为中心呈对称分布,其最大值随气泡初始损伤半径增加而增大。

2.1.3 不同气泡半径下涂层脱粘面积

脱粘为涂层失效最常见的一种形式,表现为涂层与混凝土表面发生脱离。分析涂层应力应变分布特征和涂层张开量,认为波浪荷载作用下气泡初始损伤演化形式为脱粘失效。图 10 为不同半径气泡初始损伤脱粘面积变化曲线,可见,脱粘面积随气泡半径增加而增大,且增大速率也逐渐增加。

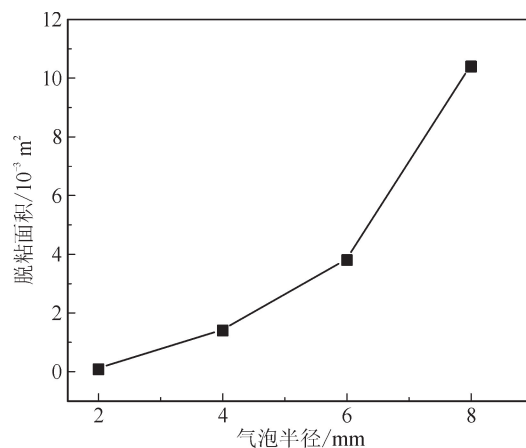


图 10 不同气泡半径下涂层脱粘面积
Fig. 10 Debonding area of coating under different bubble radiuses

2.2 气泡间距对初始损伤演化的影响

诸多学者的研究表明:初始损伤间距对损伤演化有明显影响,较近的间距对损伤演化有促进作用^[21]。为研究气泡初始损伤间距对损伤演化的影响,将间距定义为与气泡半径相关的物理量,以整数倍 2 mm 半径的间距($L=1R, 2R, 3R, \dots$)为变量,基于控制单一变量的分析方法,建立气泡半径为

2 mm 时两气泡不同间距的弹塑性涂层初始损伤内聚力模型。

2.2.1 不同气泡间距下涂层界面应力应变

根据损伤力学理论可知,在实际的涂层初始损伤演化过程中,通常会出现初始损伤的聚合,因此模拟不同间距气泡初始损伤演化过程,分析界面涂层应力应变分布状况。

由图 11 可知,在波浪荷载作用下,两气泡初始损伤应力同时向气泡外部区域扩展,在两气泡初始损伤圆心连线附近区域存在应力集中现象,使得垂直于气泡圆心连线方向的涂层应力较小。气泡初始损伤间距大小决定了涂层应力集中程度,间距越小越容易发生汇聚现象。

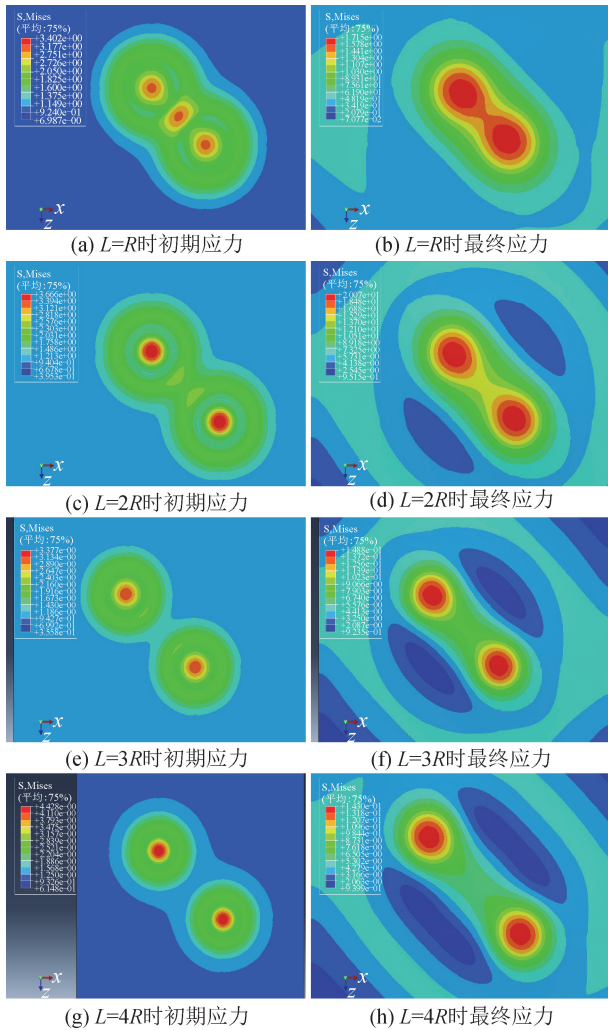


图 11 不同气泡间距下涂层界面应力演化云图
Fig. 11 Nephogram of stress evolution of coating interface under different bubble spacings

图 12 表明,在波浪荷载作用下,应变从气泡初始损伤向两气泡中心区域扩展,间距越小最终应变越集中。进一步增加气泡间距,模拟气泡初始损伤演化过程,从而确定气泡相互影响的临界间距,给工

程实际应用提供理论依据,不同间距下涂层界面中线中点应力应变最大值见图 13。

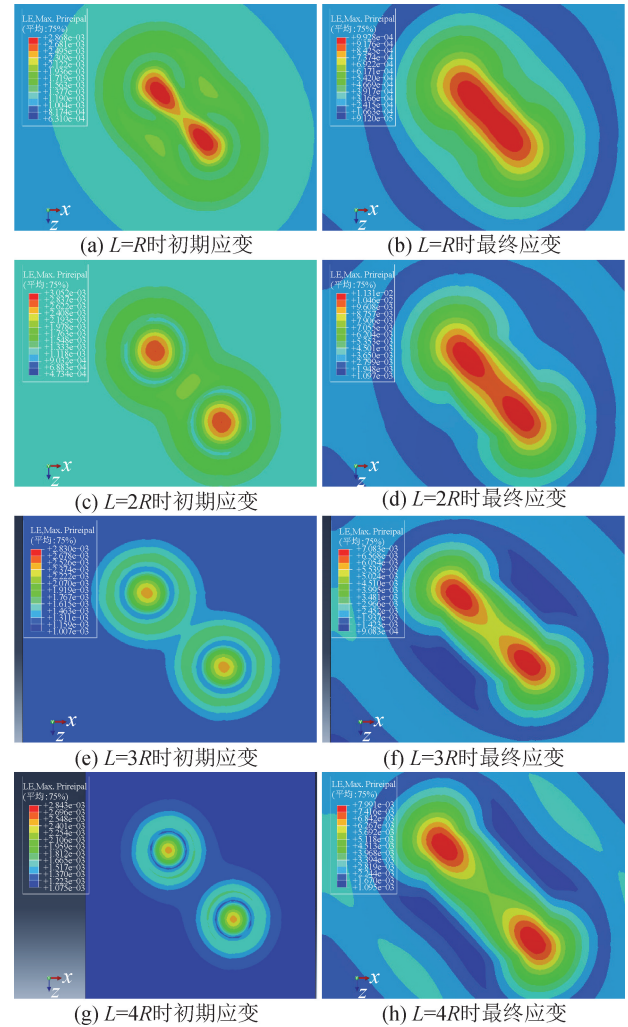


图 12 不同气泡间距下涂层界面应变演化云图
Fig. 12 Nephogram of strain evolution of coating interface under different bubble spacings

由图 13 可见,界面涂层应力应变最大值与气泡初始损伤间距的关系可以分为三个阶段:当气泡间距小于 $3R$ 时应力应变最大值随间距增加快速减小;随后中点位置应力应变最大值不断减小且变化趋势缓慢;当气泡初始损伤间距为 $11R$ 时,应力应变最大值突然接近于零。这三个阶段分别代表气泡初始损伤相距较近时应力集中阶段、气泡初始损伤间相互影响不断减弱阶段和间距足够远的无影响阶段。间距为 $11R$ 时的中点位置应力应变最大值分别为 1.638MPa 和 $1.57 \times 10^{-3}\text{mm}$,气泡间相互影响已经较小,故初步判定临界间距为 $11R$ 。

2.2.2 不同气泡间距下涂层界面张开量

分析不同气泡初始损伤间距下界面涂层张开量,进一步确定气泡初始损伤相互影响的临界间距,不同气泡初始损伤间距下界面涂层张开量云图见图 14。

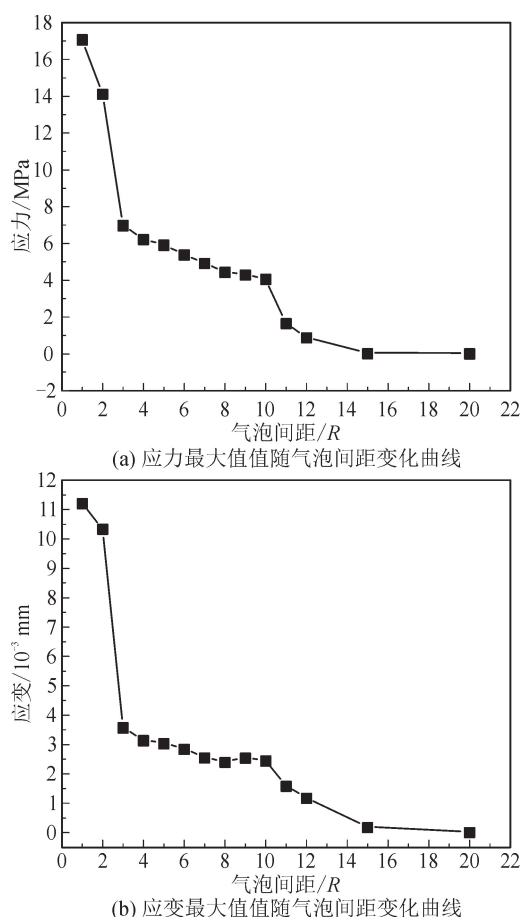


图 13 不同气泡间距下涂层界面中点应力应变最大值
Fig. 13 Maximum stress and strain at the midpoint of coating interface under different bubble spacings

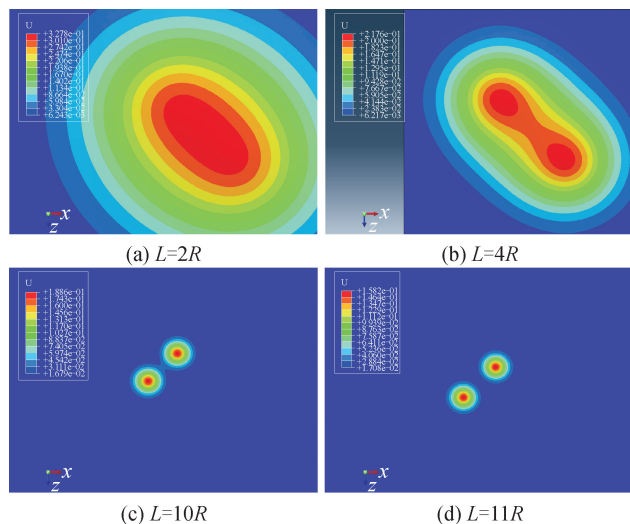


图 14 不同气泡间距下涂层界面张开量云图
Fig. 14 Nephogram of coating interface opening under different bubble spacings

根据应力应变与间距关系的三个阶段,结合图 14 可知两气泡张开量首先在连线区域周围汇聚,随后在垂直于连线方向上逐渐扩展,最后汇聚成椭圆形脱粘区域,且脱粘区域存在向圆形发展的趋势。

图 15 表明,当气泡间距小于 $2R$ 时,气泡间应力集中区域已完全脱粘,涂层张开量(3.24 mm)与单气泡涂层张开量(0.153 mm)相比较。随着间距不断增大,曲线呈现双峰形态,气泡中间区域涂层张开量不断减小,相互影响持续减弱,同时气泡张开量峰值和张开量等值面面积也不断减小。间距达到 $11R$ 后,中间区域涂层最小张开量仅为 0.087 mm。随着间距继续增大,中间区域涂层张开量逐渐减少至 0,气泡涂层张开量峰值和张开量等值面面积基本保持恒定,此时气泡间距达到临界,间距对涂层张开量不存在影响。故认为两气泡初始损伤间距达到 $11R$ 时,涂层气泡初始损伤演化将不再产生汇聚现象。

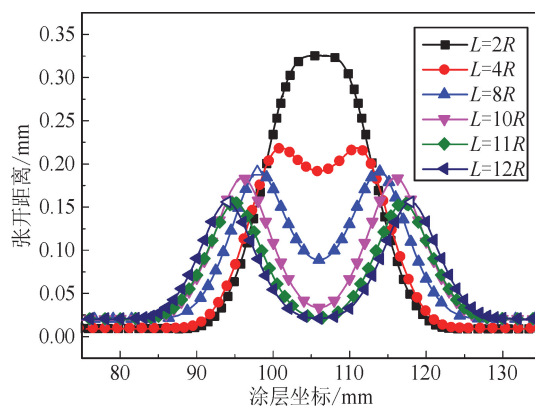


图 15 不同气泡间距下的涂层界面张开量分布曲线
Fig. 15 Distribution curve of the opening of coating interface at different bubble spacings

2.2.3 不同气泡间距下涂层脱粘面积

进一步分析不同气泡初始损伤间距界面涂层涂层脱粘面积,揭示不同间距下涂层脱粘损伤规律,不同气泡初始损伤间距界面涂层涂层脱粘面积见图 16。

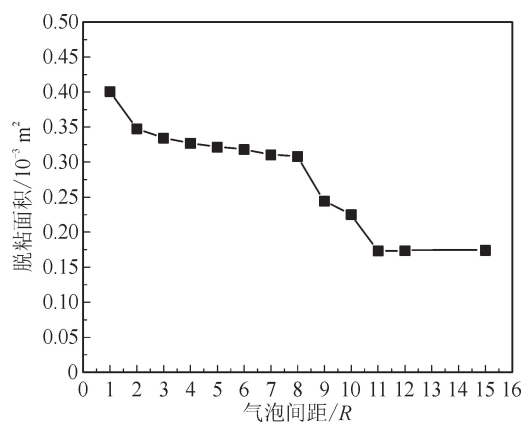


图 16 不同气泡间距下脱粘面积
Fig. 16 Debonding area under different bubble spacings

图 16 表明,当气泡初始损伤间距为 R 时,涂层

脱粘面积最大,随后逐渐减小。当间距在 11R、12R 和 15R 时,涂层脱粘面积分别为 $1.731 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 、 $1.732 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 、 $1.74 \times 10^{-4} \text{ m}^2$,与两倍单个气泡的涂层脱粘面积 $0.85 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 接近,此时气泡初始损伤相互作用微弱,涂层脱粘面积基本保持恒定。

3 结 论

基于弹塑性涂层初始损伤内聚力模型,研究了波浪荷载作用下,气泡半径、间距对初始损伤演化规律的影响,得出以下主要结论。

1) 海工混凝土涂层界面初始损伤仅在混凝土涂层界面中发生扩展演化,即涂层与混凝土之间发生脱粘损伤,脱粘面积随着气泡半径增大而增大,且增大速率逐渐增加。

2) 单气泡初始损伤应力应变分布特征基本相同,界面涂层应力应变随气泡初始损伤半径增加而增大,沿气泡半径向外逐渐减小。

3) 在波浪荷载作用下,气泡初始损伤间存在汇聚现象,且气泡半径增加会加剧初始损伤演化速率。当气泡初始损伤间距超出 11 倍气泡半径时,气泡间相互作用微弱,不再出现汇聚现象。

参考文献:

- [1] LIU Ying, WANG Jiangwei, LIU Li, et al. Study of the failure mechanism of an epoxy coating system under high hydrostatic pressure[J]. Corrosion Science, 2013, 74: 59-70.
- [2] TIAN Wenliang, MENG Fandi, LIU Li, et al. The failure behaviour of a commercial highly pigmented epoxy coating under marine alternating hydrostatic pressure[J]. Progress in Organic Coatings, 2015, 82: 101-112.
- [3] 王玉琼,李梦珂,张天民,等. ZnO 纳米线基 MWNTs/PVDF 复合热电材料的制备及特性研究[J]. 中国科学(化学),2014,44(10):1609-1617.
WANG Yuqiong, LI Mengke, ZHANG Tianmin, et al. Fabrication and properties of ZnO nanowire based MWNTs/PVDF composite thermoelectric materials[J]. SCIENTIA SINICA Chimica, 2014, 44 (10): 1609-1617.
- [4] 林祺. 涂层性能的超声无损检测与表征技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2015.
LIN Qi. Research on ultrasonic nondestructive testing and characterization of coating properties[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [5] EBERL C, GIANOLA D S, HEMKER K J. Mechanical characterization of coatings using microbeam bending and digital image correlation techniques[J]. Experimental Mechanics, 2010, 50(1): 85-97.
- [6] 张军瑞. 高性能透明聚氨酯涂层的制备、结构与性能关系研究[D]. 广州:华南理工大学,2013.
ZHANG Junrui. Preparation of high performance transparent polyurethane coatings and the relationship between structure and properties[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [7] 张红,牛冬梅,吕路,等. 2,7-二辛基[1]苯并噻吩并[3,2-b]苯并噻吩/Ni(100)的界面能级结构随薄膜厚度的演化[J]. 物理学报,2016,65(4):307-315.
ZHANG Hong, NIU Dongmei, LÜ Lu, et al. Thickness-dependent electronic structure of the interface of 2,7-dioctyl[1]benzothieno[3,2-b][1] benzothiophene/Ni(100)[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(4): 307-315.
- [8] 黄高山,梅永丰. 纳米薄膜及相应三维结构的构建、特性及应用[J]. 中国科学(技术科学),2016,46(2):142-165.
HUANG Gaoshan, MEI Yongfeng. Nanomembranes and corresponding three-dimensional structures: fabrications, properties and applications [J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2016, 46(2): 142-165.
- [9] 李柱柏,张雪峰,李永峰,等. 纳米复合磁体的界面结构、交换耦合和反磁化的研究进展[J]. 功能材料,2016,47(2):2024-2030,2035.
LI Zhubai, ZHANG Xuefeng, LI Yongfeng, et al. Research progress on the interface structure, exchange coupling and magnetization reversal in nanocomposite magnets[J]. Journal of Functional Materials, 2016, 47 (2): 2024-2030, 2035.
- [10] LIU Rui, LIU Li, TIAN Wenliang, et al. Finite element analysis of effect of interfacial bubbles on performance of epoxy coatings under alternating hydrostatic pressure[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 64(5): 233-240.
- [11] 王鲁斌. 等离子喷涂涂层微观损伤机理的研究[D]. 上海:华东理工大学,2013.
WANG Lubin. Study on the microscopic damage mechanism of plasma sprayed coatings[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013.
- [12] 周盼,方成培,王桂林,等. 基于复杂应力状态内聚力模型的固体火箭发动机粘接界面脱粘分析[J]. 固体火箭技术,2020,43(5):554-559.
ZHOU Pan, FANG Chengpei, WANG Guilin, et al. Debonding analysis of adhesive interface in SRM based on complex stress-state cohesive zone model[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2020, 43 (5): 554-559.
- [13] 白清顺,张亚博,王永旭,等. 微裂纹缺陷对 CVD 金刚石涂层微刀具损伤失效的影响研究[J]. 表面技术,

- 2021, 50(2): 355-362.
- BAI Qingshun, ZHANG Yabo, WANG Yongxu, et al. Effect of micro-crack defects on damage and failure of CVD diamond coating micro-tools [J]. Surface Technology, 2021, 50(2): 355-362.
- [14] 包亦望, 马德隆. 陶瓷涂层的残余应力评价及其尺寸效应[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(8): 1033-1038.
- BAO Yiwang, MA Delong. Evaluation of residual stress in ceramic coatings and its size effects[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(8): 1033-1038.
- [15] 陈延红. 基于连续损伤力学的车身涂层损伤模拟研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2012.
- CHEN Yanhong. Damage analysis of automotive coatings based on countinuum damage mechanics[D]. Jilin: Jilin University, 2012.
- [16] CHEN Yanhong, ZHUANG Weimin, WANG Shiwen, et al. Investigation of FE model size definition for surface coating application[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(5): 860-867.
- [17] 刘扬, 全昌彪, 杨晓光, 等. TGO 非均匀增长对热障涂层应力演化和破坏机理的影响[J]. 航空动力学报, 2020, 35(6): 1140-1148.
- LIU Yang, QUAN Changbiao, YANG Xiaoguang, et al. Effect of non-uniform growth of TGO on stress development and failure mechanism of thermal barrier coatings[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(6): 1140-1148.
- [18] TAMRAKAR S, GANESH R, SOCKALINGAM S, et al. Experimental investigation of strain rate and temperature dependent response of an epoxy resin undergoing large deformation[J]. Journal of Dynamic Behavior of Materials, 2018, 4(1): 114-128.
- [19] 常留红, 徐斌, 孙文硕, 等. 墩柱结构波浪冲击压力分布特征及应力谱分析[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2021, 36(2): 163-172.
- CHANG Liuhong, XU Bin, SUN Wenshuo, et al. Analysis of wave impact pressure distribution and stress spectrum in the splash zone of offshore pier columns[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2021, 36(2): 163-172.
- [20] CHEVALIER J, MORELLE X P, BAILLY C, et al. Micro-mechanics based pressure dependent failure model for highly cross-linked epoxy resins[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 158: 1-12.
- [21] 王鲁斌, 王卫泽, 陈雨帆, 等. 硅灰石涂层开裂的原位观察及粉末粒度对其断裂的影响[J]. 焊接学报, 2014, 35(3): 57-60, 116.
- WANG Lubin, WANG Weize, CHEN Yufan, et al. In-situ observation of cracking in wollastonite coatings and effect of powder size on fracture[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(3): 57-60, 116.

(责任编辑 王绪迪)