

海上风力机橡胶及泡沫铝材料防护装置性能研究

岳新智¹, 韩志伟², 李春¹, 赵鑫磊¹

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海电气风电集团股份有限公司, 上海 200233)

摘要:为研究不同本构橡胶与泡沫铝材料用于海上风力机防护装置的抗撞能力,基于非线性动力学理论,采用LS-DYNA软件模拟吃水量5 000 t船舶低速撞击装配主体材料分别为Ogden橡胶、Mooney-Rivlin橡胶及Aluminum foam泡沫铝防护装置的4 MW单立柱三桩基础海上风力机过程,对接触力、撞深、能量耗散、损伤及塔顶运动进行分析。结果表明:Aluminum foam较Ogden与Mooney-Rivlin材料防护装置可降低最大接触力与最大撞深,其疏松多孔结构可吸收大量能量且降低反弹动能;在Aluminum foam材料保护下风力机塔架塑性变形与塔顶正向位移更小,安全性更高。

关键词:海上风力机;碰撞;防护装置;泡沫铝;橡胶;本构模型

中图分类号:TK83 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.05.016

[引用本文格式]岳新智,韩志伟,李春,等.海上风力机橡胶及泡沫铝材料防护装置性能研究[J].热能动力工程,2022,37(5):115-123. YUE Xin-zhi, HAN Zhi-wei, LI Chun, et al. Study on performance of rubber and aluminum foam protective device for offshore wind turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(5):115-123.

Study on Performance of Rubber and Aluminum Foam Protective Device for Offshore Wind Turbine

YUE Xin-zhi¹, HAN Zhi-wei², LI Chun¹, ZHAO Xin-lei¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code:200093; 2. Shanghai Electric Wind Power Group Co., Ltd. Shanghai, China, Post Code:200233)

Abstract: In order to study the anti-collision ability of different constitutive rubber and aluminum foam materials used in offshore wind turbine protective device, based on nonlinear dynamics theory, a 4 MW single-column tripod foundation offshore wind turbine assembled with protective devices made from Ogden, Mooney-Rivlin and aluminum foam body materials in 5 000 t draft weight ship's low speed impact process was simulated by the LS-DYNA software, to analyze the contact force, impact depth, energy dissipation, damage and tower top motion. The results show that the maximum contact force and maximum impact depth of aluminum foam can be reduced compared with Ogden and Mooney-Rivlin material protective devices. Due to the loose and porous structure of aluminum foam, a large amount of energy can be absorbed and the rebound kinetic energy can be reduced. Under the protection of aluminum foam material, the plastic deformation of tower and the impact displacement of the tower top are smaller and the safety is higher.

Key words: offshore wind turbines, collision, protective device, aluminum foam, rubber, constitutive model

收稿日期:2021-08-18; 修订日期:2021-09-08

基金项目:国家自然科学基金(51976131, 52006148);上海市“科技创新行动计划”地方院校能力建设项目(19060502200)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51976131, 52006148); Shanghai University Science and Technology Innovation Action Plan Local University Capacity Building Project(19060502200)

作者简介:岳新智(1997-),男,河北任丘人,上海理工大学硕士研究生。

通讯作者:李春(1963-),男,北京人,上海理工大学教授。

引 言

面临社会发展与环境保护的矛盾,风能作为一种分布广泛且取之不竭的清洁能源受到广泛关注并迅速发展^[1-2]。2020 年上半年我国风电新增并网装机 1 100 余万千瓦,累计并网 2.81 亿千瓦^[3]。预计 2030 年我国风电、太阳能发电总装机容量将达到 12 亿千瓦以上^[4]。海上风电场大多靠近航道,随交通密度日益增大,海上风力机受船舶撞击概率极大提升。此外,由于驳船停泊不当导致的意外事故时有发生,易造成重大损失甚至导致人员伤亡^[5-6]。据统计,2019 年海上风电场发生船舶安全事故 245 起,高风险潜在事故占比 33.3%^[7]。

国内外诸多学者开展了关于海上结构受船舶碰撞问题的相关研究。Wang 等人^[8]采用有限元方法研究设有防撞装置桥墩分别受载重吨位 52 300, 50 000 及 5 000 t 船舶碰撞时各部分结构能量变化与响应,研究发现,防护装置可吸收大部分内能,桥墩及船艏吸能较少,防护装置可有效保护桥墩与船舶。Zhou 等人^[9]设计了一种复合多层阵列结构,通过试验及有限元模拟研究该结构在低速度、大质量载荷作用下的冲击响应和耗能机理,结果表明,受落锤冲击时冲击能主要转化为直接耗散的内能,剩余部分为由结构释放的可恢复弹性应变能。Ren 等人^[10]提出了一种新型概念钢球壳的 OWT 防护装置,包含球壳和棱柱型的环形泡沫铝垫,该装置能有效降低顶部结构的动力响应,平滑接触力,大部分船舶碰撞能量被自身结构的塑性变形所吸收。Yan 等人^[11]提出了一种模块化的桥墩保护装置,以防止泥石流冲击桥墩,并基于已验证的有限元模型研究了材料和几何参数对模块化保护装置性能的影响。与金属相比,橡胶材料应力应变关系具有较强非线性,随着应变能密度函数模型理论研究发展迅速,应用范围越广,选择合适的本构模型越发重要^[12]。

上述文献主要针对低碳钢与 Mooney-Rivlin 本构橡胶材料防护装置防护性能进行研究。近年来,泡沫铝作为一种吸能、耐腐蚀、耐高温且重量较轻的新型工程材料备受青睐。文献^[13]将泡沫铝用于

汽车保险杠,建立不同密度材料模型,验证了其用于汽车保险杠的优秀潜力。Deshpande 等人^[14]研究泡沫铝应变率效应发现,泡沫的动态特性与准静态特性十分相似。Byakova 等人^[15]研究了泡沫铝在中等冲击速度时的高应变率压缩行为,揭示其在共晶区开裂条件下的动态响应差异。

本文采用 ANSYS/LS-DYNA 提供的超弹性不可压缩 Mooney-Rivlin 和 Ogden 橡胶本构模型及 Aluminum foam 泡沫铝本构模型,研究 3 种不同材料本构模型对防护装置抗撞性能的影响,为防护装置设计与选择提供参考。

1 材料本构

橡胶材料由长链、大分子和网状交联结构构成,具有粘弹性,受预应力作用后出现材料软化行为。因此,采用 ANSYS/LS-DYNA 对 Mooney-Rivlin 与 Ogden 这两种橡胶材料本构模型进行研究,并对比分析两种材料用于防护装置后的抗撞性能。

此外,泡沫铝是以少量铝或铝合金金属骨架及气泡组成的新型工程材料,具有轻质、吸能、耐腐蚀及耐高温等优点,由于海上风力机-船舶碰撞模拟对计算资源的要求,故选取 Deshpande 和 Fleck 提出的内部分布大量孔洞吸能效果较优的闭孔泡沫铝本构模型^[16]。

1.1 Mooney-Rivlin

Mooney-Rivlin 本构模型在中小应变状态下超弹性特性较优。其分解应变能密度计算式为^[17]:

$$W = f(I_1 - 3, I_2 - 3) + g(J - 1) \quad (1)$$

式中: W —应变能密度; J —橡胶变形前后体积比。

应变能密度函数 W 为 I_1 、 I_2 、 I_3 的函数, I_1 、 I_2 、 I_3 计算式为:

$$\begin{cases} I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \\ I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_i —变形张量不变量; λ_i —伸长比, ($i = 1, 2, 3$)。

令多项式阶数为 1, $g = \sum 1/D_i (J - 1)^2$, 由泰勒公式展开,得 Mooney-Rivlin 形式:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + (1/D)(J - 1)^2 \quad (3)$$

式中: D_i 决定材料的压缩性; C_{10} 、 C_{01} —材料常数^[18-19]。

Mooney-Rivlin 本构参数如表 1 所示。

表 1 Mooney-Rivlin 本构参数

Tab.1 Constitutive parameters of Mooney-Rivlin

参数	数值
$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1 180
泊松比 ν	0.499 5
C_{10}	5.5E+05
C_{01}	1.7E+05

1.2 Ogden

Ogden 模型以主伸长 λ_i 为自变量,新应变能函数^[20]为:

$$W = \sum_{n=1}^N (\mu_n/\alpha_n) [J^{-\alpha_n/3} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n})] - 3 + 4.5K(J^{1/3} - 1)^2 \quad (4)$$

式中: K —初始体积模量; μ_n 、 α_n —材料常数。

对于不可压缩橡胶材料, $J = 1$, 则:

$$W = \sum_{n=1}^N (\mu_n/\alpha_n) [(\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n}) - 3] \quad (5)$$

较 Mooney-Rivlin 模型, Ogden 模型形式更简洁, 在纯剪切、单轴拉伸及等比双轴拉伸实验中验证。其具有较高准确性^[21]。

有限变形立方单元材料单轴变形如图 1 所示。变形模式为:

$$x_1 = \lambda X_1; x_2 = \mu X_2; x_3 = \mu X_3 \quad (6)$$

主伸长 $\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = \lambda_3 = \mu$, 应变不变量分别为:

$$I_1 = \lambda^2 + 2\mu^2; I_2 = 2\lambda^2\mu^2 + \mu^4; I_3 = \lambda^2\mu^4 \quad (7)$$

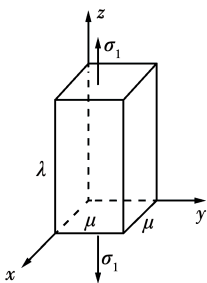


图 1 单轴变形图

Fig.1 Uniaxial deformation diagram

本构关系式及分量形式为:

$$\begin{cases} \sigma = -p\mathbf{I} + 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \mathbf{B} - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \mathbf{B}^{-1} \\ \sigma_1 = -p + 2\lambda^2 W_1 - 2\lambda^{-2} W_2 \\ \sigma_2 = \sigma_3 = -p + 2\mu^2 W_1 - 2\mu^{-2} W_2 \end{cases} \quad (8)$$

$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 不可压缩条件 $J = \lambda\mu^2 = 1$, 则拉伸应力 σ_1 表示为:

$$\sigma_1 = 2(\lambda^2 - \lambda^{-1})(W_1 + \lambda^{-1}W_2) \quad (9)$$

基于 Ogden 模型的单轴拉伸应力为:

$$\sigma = \sum_{n=1}^N \mu_n (\lambda^{\alpha_n - 1} - \lambda^{-1 - \alpha_n/2}) \quad (10)$$

Ogden 模型材料参数如表 2 所示。

表 2 Ogden 模型本构参数

Tab.2 Constitutive parameters of Ogden model

参数	数值
μ_1/MPa	3.000 71
α_1	0.719 155
μ_2/MPa	0.102 6
α_2	-4.771

1.3 泡沫铝材料

Aluminum foam 材料受压塌陷时存在体积变化, 其屈服函数包含流体静力学项, Deshpande^[14] 基于连续各向同性假设提出本构模型, 屈服函数 Φ 定义为:

$$\Phi = \hat{\sigma} - Y \leq 0 \quad (11)$$

$$Y = \sigma_p + R(\hat{\varepsilon}) \quad (12)$$

$$\hat{\sigma}^2 = ([1/(1 + (\alpha/3)^2)]) [\sigma_e^2 + \alpha^2 \sigma_m^2] \quad (13)$$

$$\alpha^2 = 4.5(1 - 2v^p)/(1 + v^p) \quad (14)$$

式中: $\hat{\sigma}$ —等效应力; Y —屈服应力; $R(\hat{\varepsilon})$ —应变硬化; $\hat{\varepsilon}$ —等效应变; σ_e —Von Mises 等效应力; σ_m —平均应力; α —屈服平台形状参数; v^p —塑性收缩系数。

2002 年 Hanssen 等人^[22] 提出硬化模型, 密度变化式为:

$$\sigma = \sigma_p + \gamma(e/e_D) - \alpha_2 \ln[1 - (e/e_D)^\beta] \quad (15)$$

式中: $\sigma_p, \alpha_2, \gamma, \beta$ 及 e_D —材料参数; e —工程应变。

材料特性 $\sigma_p, \alpha_2, \gamma$ 和 β 可表示为泡沫密度的函数:

$$[\sigma_p, \alpha_2, \gamma, 1/\beta] = C_0 + C_1 (\rho_f/\rho_{f0})^n \quad (16)$$

式中:若塑性收缩系数值为零, C_0, C_1 及 n —常数; $\varepsilon_D = 1 - \rho_f/\rho_{f0}$ —压实应变; ρ_{f0} —基础材料密度; ρ_f —泡沫密度。

硬化模型中采用真实应变,其由等效应变决定,屈服应力为:

$$Y = \sigma_p + R(\hat{\varepsilon}) = \sigma_p + \gamma(\hat{\varepsilon}/\varepsilon_D) - \alpha_2 \ln[1 - (\hat{\varepsilon}/\varepsilon_D)^\beta] \quad (17)$$

等效应变为:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1 + (\alpha/3)^2}{\alpha} \cdot \frac{|\varepsilon_m|}{\sqrt{1 + (\alpha/3)^2 - \chi^2}} = \frac{\sqrt{1 + (\alpha/3)^2}}{\alpha} \cdot \frac{|\varepsilon_m|}{\sqrt{1 - (1 + (\alpha/3)^2)(\chi^*)^2}} \quad (18)$$

应变路径参数 $\chi^* = \varepsilon_e/\hat{\varepsilon}$ 及无量纲应力状态参数 $\chi = \sigma_e/\hat{\sigma}$ 关系为:

$$\chi^* = \frac{\varepsilon_e}{\hat{\varepsilon}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\alpha/3)^2}} \cdot \frac{\sigma_e}{\hat{\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\alpha/3)^2}} \chi \quad (19)$$

Deshpande^[14]使用应力路径参数 χ ,以说明应力路径对应变硬化的影响。基体密度与泡沫密度相同时,压实应变 ε_D 即可定义为应变极限,此时 $\varepsilon_m = -\ln(\rho_f/\rho_{f0})$, 压实应变下的等效应变 ε_D 由载荷确定,比例应变式为:

$$\varepsilon_D = -\frac{1 + (\alpha/3)^2}{\alpha \sqrt{1 + (\alpha/3)^2 - \chi^2}} \ln(\rho_f/\rho_{f0}) \quad (20)$$

$\chi=1$ 时, $\varepsilon_D = -(9 + 3/\alpha^2) \ln(\rho_f/\rho_{f0})$, Alumin foam 材料参数值均可表示为密度函数,本构模型式为:

$$\Phi = \hat{\sigma} - Y = \frac{(\sigma_e^2 + \alpha^2 \sigma_m^2)}{[1 + (\alpha/3)^2]} - \left\{ \sigma_p + \gamma \frac{\hat{\varepsilon}}{\varepsilon_D} - \alpha_2 \ln\left(1 - \left(\frac{\hat{\varepsilon}}{\varepsilon_D}\right)^\beta\right) \right\} \leq 0 \quad (21)$$

表 3 为 Deshpande-Fleck 本构模型参数, E 为弹

性模量, ρ 为密度, γ 为屈服应力。

表 3 Deshpande-Fleck 本构模型参数

Tab.3 Constitutive parameters of Deshpande-Fleck

参数	数值
σ_{pl}/MPa	0.6
ν	0.3
E/MPa	370
$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	178
γ/MPa	3.23
ε_D	1.8
α	2.119
α_2/MPa	6.2
β	4.23
体积应变	0.01

2 理论基础

2.1 控制方程

船舶撞击海上风力机为瞬态物理过程,运动微分方程^[23]为:

$$M \dot{a}_n + C v_n + K d_n = F_n^{\text{ext}} \quad (22)$$

式中: M —结构质量矩阵; C —结构阻尼矩阵; K —结构刚度矩阵; F_n^{ext} —外加载荷阵列; a_n, v_n 及 d_n —时间步处于 n 时的结构加速度、速度及位移。

2.2 接触算法

碰撞过程主要涉及 ANSYS/LS - DYNA 中节点约束法、对称罚函数法及分配参数法 3 种算法^[24]。

接触摩擦力为:

$$F_f = \mu |f_s| \quad (23)$$

式中: μ —摩擦系数; f_s —一节点法向接触力。

μ 计算式为:

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d) e^{-w|v|} \quad (24)$$

式中: μ_s —静摩擦系数; μ_d —动摩擦系数; w —衰减系数; v —接触面间相对速度。

3 有限元模型

3.1 单立柱三桩基础与船舶

基于文献[25]设计 4 MW 单立柱三桩基础海上风力机,其结构主要包含叶片、轮毂、机舱、电气系

统、塔身及使其固定于海底的单立柱三桩基础,基础结构由立柱、斜撑、横撑与钢柱构成,桩体埋入海底 50 m。单立柱三桩基础尺寸如表 4 所示。

表 4 单立柱三桩基础尺寸参数

Tab. 4 Parameters of single-column tripod support structure

结构	外径/m	壁厚/mm
立柱	40 ~ 58	50 ~ 80
钢管柱	27	35 ~ 40
横撑	14 ~ 19	28 ~ 35
斜撑	22 ~ 30	35 ~ 55

船舶选用船艏为前倾型的实用散货船,包括船艏在内的碰撞区与船身、船尾构成的非碰撞区,主要参数如表 5 所示。

表 5 船舶主要参数

Tab. 5 Principal dimensions of ship

参数	数值
总长/m	108
型宽/m	17
型深/m	8
吃水/m	4.2
自重/t	5 000

对单立柱三桩基础与船舶建立模型,划分网格,如图 2 所示。海上风力机基础桩柱、船舶船尾与船中等非碰撞区域网格为 0.6 m,塔架上下部分网格尺寸为 0.4 m,风力机基础碰撞主体区域与船艏网格尺寸加密,为 0.2 m。

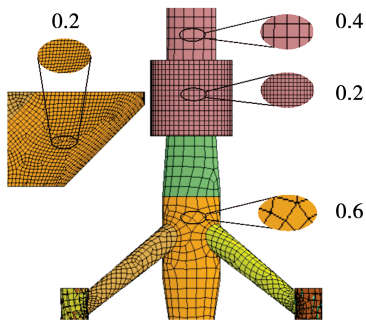


图 2 船舶与风力机基础模型(m)

Fig. 2 Finite element of ship and tripod support structure(m)

3.2 防护装置

防护装置由两层圆环构成,内层防护主体材料厚 1.4 m,外层为厚 0.05 m 的钢壳,高 7.5 m。对其进行网格划分,尺寸为 0.2 m,有限元模型如图 3 所示。

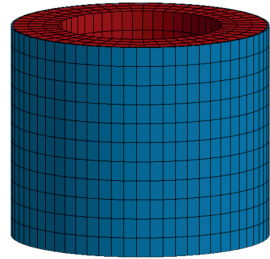


图 3 防护装置有限元模型

Fig. 3 Finite element model of protection device

3.3 碰撞设置

模拟吃水量为 5 000 t 的船舶,以 2 m/s 的速度低速撞击风力机。为有效模拟碰撞过程,设置风力机与船舶初始间距为 0.6 m。

船艏与防护装置间采用 LS-DYNA 软件提供的自动单面接触算法,防护钢壳与主体材料间则采用自动面面接触算法,动、静摩擦系数分别取 0.2 与 0.9,衰减系数 w 为 0。

为准确监测模拟过程中能量变化,除动能、内能外,滑移能、阻尼能与网格沙漏能亦计算于能量平衡中。除此以外,由于船舶与风力机会受海水作用,采用附加质量法简化海水作用力,取正撞附加质量系数为 5%^[26]。

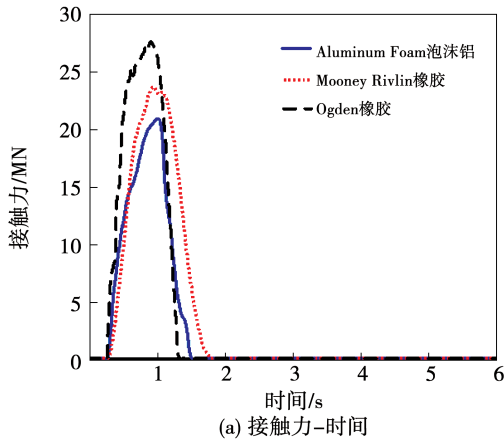
4 计算结果及分析

4.1 接触力及撞深

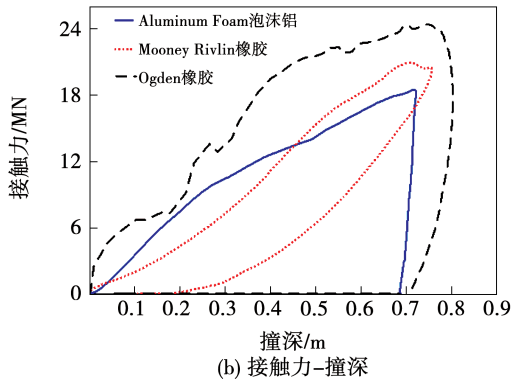
接触力是判断装置防护性能的重要指标,亦可反映风力机受撞后的损伤程度。

如图 4(a) 所示,碰撞过程中接触力变化剧烈,在 Ogden 橡胶、Mooney-Rivlin 橡胶及泡沫铝材料保护下风力机分别于 0.9, 1.08 及 1.02 s 遭受最大接触力 23.9, 20.1 和 18.1 MN。较 Ogden 与 Mooney-Rivlin 两种橡胶本构装置,泡沫铝材料使接触力下降 32.04% 与 11.05%。随船舶动能被风力机及防护装置吸收,接触力快速下降至零。

如图 4(b)所示,由于防护装置变形程度随撞深不断增大,接触力不断随撞深非线性增大直至船舶动能耗尽,随后快速降至零。在不同撞深处,接触力出现卸载现象,对应防护装置部分防护功能失效。



(a) 接触力-时间



(b) 接触力-撞深

图 4 接触力响应曲线

Fig.4 Contact force response curve

泡沫铝材料可有效降低最大接触力与船舶撞深,数据如表 6 所示。

表 6 最大接触力及撞深统计

Tab.6 Maximum contact force and depth of impact

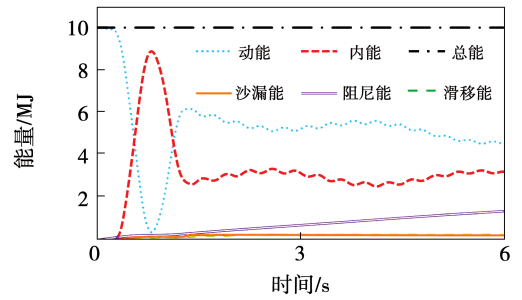
参数	本构模型		
	Ogden	Mooney-Rivlin	Aluminum foam
最大接触力/MN	23.9	20.1	18.1
最大撞深/m	0.802	0.755	0.721

4.2 能量耗散

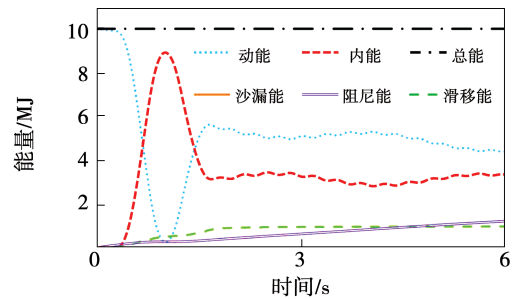
模拟船舶碰撞风力机基础过程中,船舶初始动能即为总能转化为风力机、船舶、防护装置的内能、动能与阻尼能,求解过程中网格变形积累沙漏能、接触产生滑移能,图 5 为 3 种本构材料防护装置保护

下对应的系统能量曲线。

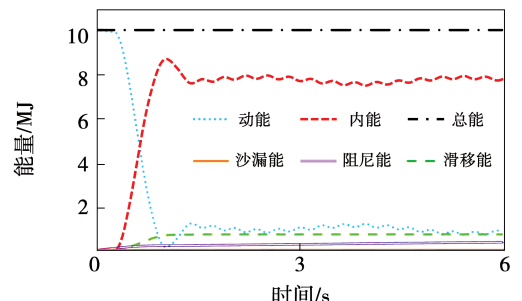
初始阶段系统动能基本维持不变,碰撞发生后迅速降低至最低值,系统内能与之相反迅速升至最高值。船舶撞深达最深即系统动能最低值与内能最高值时刻后,船舶与风力机开始分离,风力机由于惯性往复运动,系统动能与内能相互转化,同时在阻尼作用下自由衰减运动。



(a) Ogden



(b) Mooney-Rivlin



(c) Aluminum foam

图 5 系统能量曲线

Fig.5 Energy curve of system

在防护装置保护下动能曲线降至最低点但随后反弹。在 Ogden 与 Mooney-Rivlin 防护装置保护下动能分别升至 6.14 和 5.64 MJ,而 Aluminum foam 材料保护下反弹动能最高值仅为 1.27 MJ,较 Ogden 与 Mooney-Rivlin 分别降低 79.3% 与 77%。

3 种材料防护装置内能变化曲线如图 6 所示。3 种材料防护装置中钢壳吸能趋势相似且占比较

低, Ogden、Mooney-Rivlin 及 Aluminum foam 材料受船舶撞击后防护装置迅速吸能, 内能最高值分别为 2.90, 2.88 及 6.84 MJ, Aluminum foam 材料吸能远高于 Ogden 与 Mooney-Rivlin 橡胶本构材料。Aluminum foam 材料由于其疏松多孔的泡沫型结构吸能达峰值后基本稳定; 而 Ogden 与 Mooney-Rivlin 两种橡胶材料具有的超弹性作用导致其能量迅速向风力机基础与船舶耗散, 内能达峰值后迅速下降。

风力机基础受冲击部分应力应变进行分析。图 7 为风力机基础受撞部分应力应变曲线。

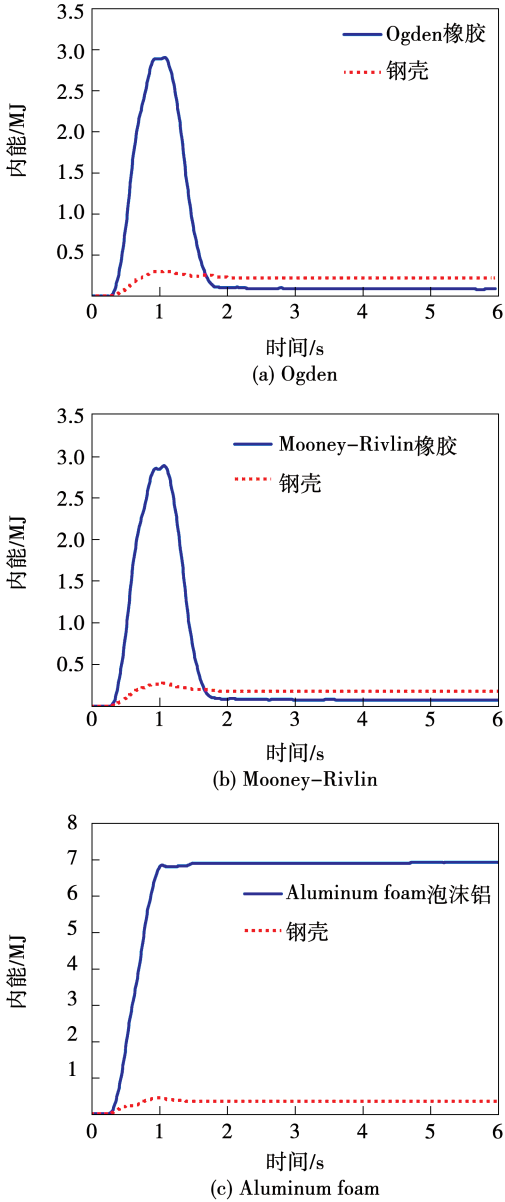


图 6 防护装置内能变化

Fig. 6 Internal energy curve of protection device

4.3 应力应变

为进一步探究不同材料防护装置防护性能, 对

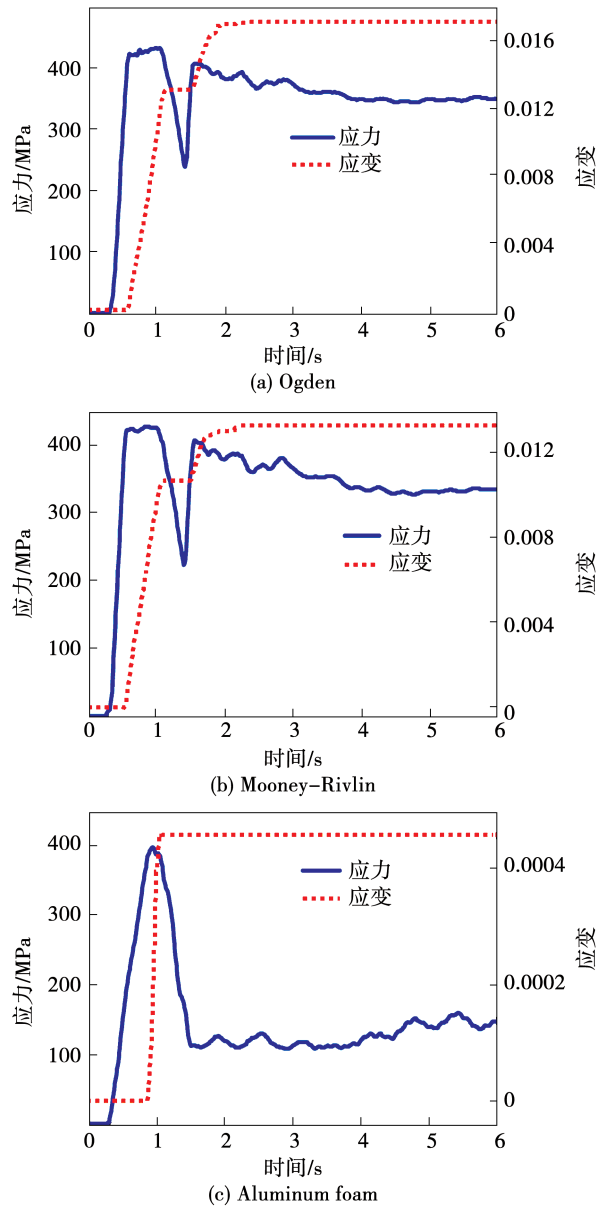


图 7 风力机基础受撞部分应力应变曲线
Fig. 7 Stress-strain curve of impact part of wind turbine foundation

碰撞刚开始的时候, 风力机基础应力迅速上升, 在 Aluminum foam 材料塑性变形的保护下, 应力到达最高点后迅速降低, 且维持在在低点附近波动; 而两种橡胶材料保护下, 应力达到最高点后下降, 并于 1.4 s 左右达到最低, 但橡胶材料超弹性导致的变形使之再度产生较大上升, 1.6 s 后开始缓慢下降。

Ogden、Mooney-Rivlin 及 Aluminum foam 材料防

护装置保护下风力机基础受撞部分塑性应变最高值分别为 0.017, 0.013 和 0.000 46, 与橡胶材料相比, Aluminum foam 材料特殊结构可有效降低风力机基础的塑性变形。

4.4 塔顶运动

风力机受撞后塔顶产生位移随后做自由衰减运动,图 8、图 9 分别为 Ogden、Mooney-Rivlin 及 Aluminum foam 保护下塔顶正向位移及加速度曲线。3 种材料保护下加速度范围均未超过 6 m/s^2 , 位移最大值分别为 1.53, 1.26 和 0.9 m, 对于风力机塔顶 Aluminum foam 材料防护装置更具有安全性。

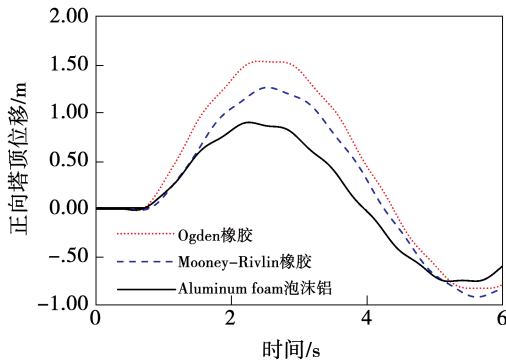


图 8 塔顶正向位移曲线

Fig. 8 Impact displacement curve of tower top

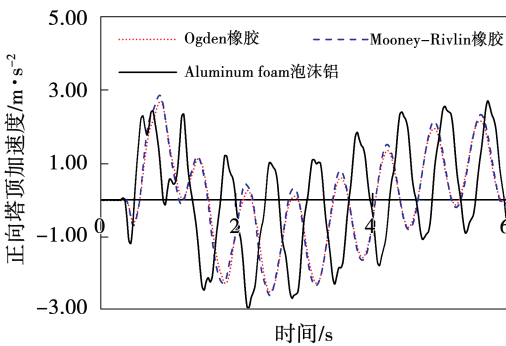


图 9 塔顶加速度曲线

Fig. 9 Acceleration curve of tower top

5 结 论

基于非线性动力学理论,采用 LS-DYNA 模拟船舶低速撞击海上风力机过程,分析 Ogden 与 Mooney-Rivlin 本构橡胶及泡沫铝材料用于防护抗撞性能得出结论:

(1) 泡沫铝较 Ogden 橡胶与 Mooney-Rivlin 橡胶材料防护装置分别使最大接触力降低 32.04% 与 11.05%, 最大撞深降低 10.10% 与 4.50%。在不同撞深处,由于防护装置部分失效,接触力出现卸载现象。

(2) 撞击发生后动能迅速降低至最低值,但随后出现反弹,Ogden 与 Mooney-Rivlin 防护装置由于橡胶超弹性作用动能反弹较高,而泡沫铝疏松多孔的结构可吸收大量能量且反弹动能较前两者分别降低 79.3% 与 77%。

(3) 与橡胶材料相比,泡沫铝材料特殊结构可有效降低风力机基础的塑性应变。

(4) 较两种橡胶材料,泡沫铝材料防护装置保护风力机塔顶撞向位移更小,安全性更高。

参考文献:

[1] DING Yi, SHAO Chang-zheng, YAN Jin-yue, et al. Economical flexibility options for integrating fluctuating wind energy in power systems; the case of China [J]. Applied Energy, 2018, 228: 426-436.

[2] FENG Yi, LIN He-yun, HO S L, et al. Overview of wind power generation in China: status and development [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 50: 847-858.

[3] 国家能源局. 国家能源局关于 2020 年度全国可再生能源电力发展监测评价结果的通报 [EB/OL]. (2021-06-20) [2020-07-17]. http://www.nea.gov.cn/2020-02/28/c_138827910.htm.

National Energy Administration. Notice of the National Energy Administration on the Monitoring and Evaluation Results of the Development of Renewable Energy Power in the Country in 2020 [EB/OL]. (2021-06-20) [2021-07-17]. http://www.nea.gov.cn/2020-02/28/c_138827910.htm.

[4] 新华网. 习近平在气候雄心峰会上的讲话 [EB/OL]. (2020-12-12) [2021-07-16]. http://www.xinhuanet.com/2020-12/12/c_1126853600.htm.

Xinhuanet. Xi Jinping at the Climate Ambition Summit [EB/OL]. (2020-12-12) [2021-07-16]. http://www.xinhuanet.com/2020-12/12/c_1126853600.htm.

[5] 韩志伟, 李春, 周红杰, 等. 海上风力机基础防护装置在船舶碰撞下的动态响应研究 [J]. 机械强度, 2020, 42(1): 21-28.

HAN Zhi-wei, LI Chun, ZHOU Hong-jie, et al. Research on dynamic response with crashworthy devices of offshore wind turbine

- foundation to ship impact [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2020, 42(1): 21–28.
- [6] DAI Li-juan, EHLERS S, RAUSAND M, et al. Risk of collision between service vessels and offshore wind turbines [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2013, 109: 18–31.
- [7] Global Offshore Wind Healthy and Safety Organisation, G + 2019 Incident Data Report [R/OL] (2020–07) [2021–07]. https://www.gplus-offshorewind.com/_data/assets/pdf_file/0004/752863/PDF-G-2019-incident-report.pdf.
- [8] WANG J J, SONG Y C, WANG W, et al. Evaluation of flexible floating anti-collision device subjected to ship impact using finite-element method [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 178: 321–330.
- [9] ZHOU Xiao-song, MEI Zhi-yuan, ZHANG Yan-bing. Low-velocity impact response and energy dissipation mechanism of composite multilayer array structures-experimental and finite element analysis [J]. *Composite Structures*, 2018, 197: 89–105.
- [10] REN Nian-xin, OU Jin-ping. A crashworthy device against ship-OWT collision and its protection effects on the tower of offshore wind farms [J]. *Chinese Ocean Engineering*, 2009, 23(4): 594–602.
- [11] YAN, HE, WANG, et al. Design and optimization of a protective device for bridge piers against debris flow impact [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79: 3321–3335.
- [12] 黄建龙, 解广娟, 刘正伟. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析 [J]. *橡胶工业*, 2008, 55(8): 467–470.
- HUANG Jian-long, XIE Guang-juan, LIU Zheng-wei. Finite element analysis of hyperelastic rubber materials based on Mooney-Rivlin model and Yeoh model [J]. *Rubber Industry*, 2008, 55(8): 467–470.
- [13] 刘春盟. 泡沫铝吸能特性及其在汽车保险杠中的应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- LIU Chun-meng. Research on energy-absorption ability of foam aluminum and its application in automotive bumper [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [14] DESHPANDE V S, FLECK N A. High strain rate compressive behaviour of aluminum alloy foams [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24(3): 277–298.
- [15] BYAKOVA O V, STEPANOV G V, VLASOV V E, et al. Characterization of Aluminum Foam Impact Response [J]. *Strength of Materials*, 2019, 51(5): 726–734.
- [16] REYES A, HOPPERSTAD O S, BERSTAD T, et al. Constitutive modeling of aluminum foam including fracture and statistical variation of density [J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2003, 22(6): 815–835.
- [17] 姚艳春, 王国权, 赵 诚, 等. 基于 Mooney-Rivlin 本构模型橡胶防尘罩的非线性有限元分析 [J]. *北京信息科技大学学报*, 2013, 28(4): 52–56.
- YAO Yan-chun, WANG Guo-quan, ZHAO Cheng, et al. Nonlinear finite element analysis of rubber dust cover based on Mooney-Rivlin constitutive model [J]. *Journal of Beijing Information Science and Technology University*, 2013, 28(4): 52–56.
- [18] ERIKSSON A, NORDMARK A. Non-unique response of Mooney-Rivlin model in bi-axial membrane stress [J]. *Computers & Structures*, 2014, 144: 12–22.
- [19] SSOMARTHNA H M, RAMAN S N, MOHOTTI D, et al. Hyper-viscoelastic constitutive models for predicting the material behavior of polyurethane under varying strain rates and uniaxial tensile loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 236: 117417–117432.
- [20] OGDEN R. Non-linear elastic deformations [M]. New York: Dover, 1997.
- [21] NEDJAR B. On constitutive models of finite elasticity with possible zero apparent Poisson's ratio [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2016, 91: 72–77.
- [22] HANSEN A G, HOPPERSTAD O S, LANGSETH M, et al. Validation of constitutive models applicable to aluminum foams [J]. *Internal Journal of Mechanical Science*, 2002, 44(2): 359–406.
- [23] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析 [M]. 北京: 科学技术出版社, 2005.
- BAI Jin-ze. Basic theory and example analysis of LS-DYNA3D [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [24] WU S. A variational principle for dynamic contact with large deformation [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2009, 198(21–26): 2009–2015.
- [25] HAO E T, LIU C G. Evaluation and comparison of anti-impact performance to offshore wind turbine foundations; monopile, tripod, and jacket [J]. *Ocean Engineering*, 2017, 130: 218–227.
- [26] 王自力, 蒋志勇, 顾永宁. 船舶碰撞数值仿真的附加质量模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22(4): 321–326.
- WANG Zi-li, JIANG Zhi-yong, GU Yong-ning, et al. Additional mass model for numerical simulation of ship collision [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(4): 321–326.