

文章编号:1007-9629(2023)04-0412-07

海上风电钢管桩石墨烯增强保护层的力学性能

许 亮*, 刘军升

(浙江华东工程咨询有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要:为了改善海上风电浪溅区钢管桩保护层的力学性能,设计了一种石墨烯光敏复合增强纤维高性能树脂复合带作为保护层的中间层,采用损伤理论并考虑冲击荷载和温度荷载的影响,建立了数值模型以研究该保护层的力学性能,并与中间层为环氧玻璃钢的保护层的力学性能进行了对比.结果表明:在相同冲击荷载作用下,石墨烯光敏复合增强纤维高性能树脂复合带发生损伤的临界荷载超过环氧玻璃钢的 1.5 倍;在相同温度下,石墨烯光敏复合增强纤维高性能树脂复合带中间层下面的剪切应力不到环氧玻璃钢中间层的 1/10.

关键词:海上风电;石墨烯光敏复合增强纤维高性能树脂复合带;环氧玻璃钢;力学性能

中图分类号:P752

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.04.011

Mechanical Properties of Graphene Reinforced Protective Layer of Steel Pipe Pile in Offshore Wind Farm

XU Liang*, LIU Junsheng

(Zhejiang Huadong Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: In order to improve the mechanical properties of the protective layer of steel pipe pile at the splash zone in offshore wind farm, a graphene photosensitive composite reinforced fiber high performance resin composite tape was designed as the intermediate layer of the protective layer. Based on the damage theory and considering the effects of impact load and temperature load, a numerical model was established to study the mechanical properties of the protective layer. The mechanical properties of the middle layer using graphene photosensitive composite reinforced fiber high performance resin composite tape were compared with those of the middle layer using epoxy fiber reinforced plastics. The results show that under the same impact load, the critical load of damage of graphene photosensitive composite reinforced fiber high performance resin composite tape is 1.5 times higher than that of epoxy fiber reinforced plastics. While at the same temperature, the shear stress on the lower surface of the middle layer using graphene photosensitive composite reinforced fiber high performance resin composite tape is 1/10 lower than that on the lower surface of the middle layer using epoxy fiber reinforced plastics.

Key words: offshore wind power; graphene photosensitive composite reinforced fiber high performance resin composite tape; epoxy fiber reinforced plastics; mechanical property

大直径单桩基础因具有传力简单高效、抗弯剪性能优良、施工条件较为便捷等优点,逐渐成为运用最广泛的海上风电基础选型^[1-3].在浪花飞溅区,海水膜润湿时间长、干湿交替频率快、海盐离子大量积

聚^[4-6],同时飞溅的海浪粒子冲击和海风循环等使得该区域供氧充分,是造成钢管桩表面腐蚀速度加快的重要因素^[7-9].此外,飞溅海水中的气泡会冲击破坏桩体表面,使得该部分的保护层逐渐变薄,削弱保护

收稿日期:2022-03-23; 修订日期:2022-04-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(5217912)

第一作者(通讯作者):许 亮(1986—),男,浙江杭州人,浙江华东工程咨询有限公司高级工程师,学士. E-mail:xu_l2@hdec.com

层对钢管桩的保护作用,因而钢管桩极易产生腐蚀,腐蚀严重时将会直接缩短整个工程结构的使用寿命^[10-11]。

目前钢管桩防腐设计基本采用油漆厂家提供的配套工艺,而在运输和打桩过程中无法避免桩体表面油漆涂层磕碰造成的损坏,后期需要花费大量的人力、物力进行油漆涂层的修复和维护,因此对钢管桩保护层的研究具有重要的工程意义。具有高稳定性和优秀力学性能的钢管桩保护层不仅可以提升钢管桩的服役年限,还可以大大降低其维修保养频率和费用。

在钢结构保护层的力学性能研究方面,郝负洪等^[12-13]利用自动球压冲击仪研究了钢结构聚氨酯保护层与氟碳保护层在冲击荷载下的损伤行为,并对高低温循环及紫外老化作用下钢结构保护层的基本力学性能开展试验研究。刘明维等^[14]通过室内冲蚀模型试验,研究了含沙水流冲蚀下环氧沥青保护层表面的冲蚀特性,并基于试验结果改进了现有的冲蚀损伤公式。Li等^[15]利用原位拉伸试验研究了循环温度荷载作用下铬保护层和钢材基体间的剪切应力分布规律,结果显示升高温度对铬保护层与钢材基体界面的极限剪切强度有显著的削弱作用。目前,对于保护层力学性能的研究多以试验为主,且抗冲击性能的研究对象多为聚氨酯保护层,对于增强纤维高性能树脂复合带和环氧玻璃钢作为中间层的保护层力学性能的数值模拟研究尚未见报道。

本文设计了一种石墨烯光敏复合增强纤维高性能树脂(下文简称为增强纤维高性能树脂)复合带作为保护层的中间层,用基于损伤理论建立的数值模型研究了冲击荷载和温度荷载作用下该保护层的力学性能,并与中间层为环氧玻璃钢的保护层的力学性能进行了对比分析。

1 增强纤维高性能树脂保护层的组成

环氧玻璃钢是以环氧树脂为基料,玻璃纤维及其制品为增强材料制成的复合材料,因其质轻、高强、易于成型等优点而成为应用广泛的钢结构保护层^[16]。虽然通过玻璃纤维可以增强涂层的刚度和强度,但其耐磨性一般较差,一旦表面的富树脂层被磨蚀而露出纤维,其渗透性就会迅速增大,既破坏纤维与树脂黏合的整体性,又进一步促进保护层的磨蚀。本文所设计的增强纤维高性能树脂保护层由黏结层(无溶剂柔性环氧底胶)、中间层(增强纤维高性能树脂复合带)和表面层(光敏胶-石墨烯改性丙烯酸酯结构型胶黏剂)组成,如图1所示。高强度光敏胶在一定波长的紫外光照射下,几秒钟内便可以与基材之

间形成牢固的黏结,其优越的黏结性能适用于增强纤维预浸料与钢及各种有色金属的黏结。通过高强度光敏胶的黏结,保护层具有较高的稳定性,能长期承受高温高湿环境的影响,−30~80℃冷热循环50 h后仍然保持高强度和韧性。增强纤维高性能树脂复合带是由透明的增强纤维织物在真空条件下浸润高性能的光敏树脂,再经过覆膜、冷却、挤压、收卷等工序形成的预浸带,机械强度高、抗划伤性能好、不易碎裂,冲击韧性高达250 kJ/m²,其性能优于环氧玻璃钢,是环氧玻璃钢的良好替代品。

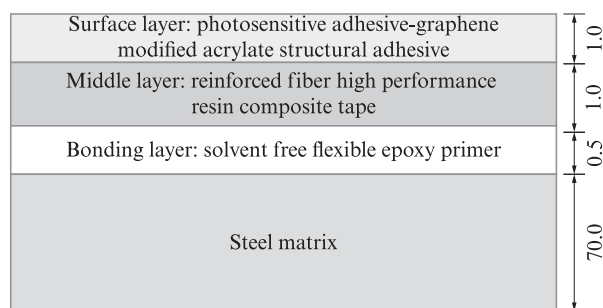


图1 保护层的组成

Fig. 1 Components of protective layer(size:mm)

2 考虑冲击荷载和温度荷载作用的损伤理论及计算模型

2.1 损伤理论

利用损伤理论分析材料在冲击荷载作用下的破坏情况,材料的受力平衡方程如式(1)所示。

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = -\mathbf{F} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为位移矢量; $\boldsymbol{\sigma}$ 为总应力张量,在无外部应力时为弹性应力张量($\boldsymbol{\sigma}_e$); $\mathbf{F}$ 为所受外力; ρ 为材料的真密度。

根据广义胡克定律得到如式(2)所示的 $\boldsymbol{\sigma}_e$ 与应变张量的关系。

$$\boldsymbol{\sigma}_e = \mathbf{C}:(\boldsymbol{\epsilon} - \boldsymbol{\epsilon}_{in}) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{C}$ 为四阶弹性张量; $\boldsymbol{\epsilon}$ 为总应变张量; $\boldsymbol{\epsilon}_{in}$ 为非弹性应变张量,在考虑热应变时,按式(3)取值。

$$\boldsymbol{\epsilon}_{in} = \boldsymbol{\epsilon}_{th} = \alpha(T_m - T_r)\mathbf{I} \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\epsilon}_{in}$ 为热应变张量; α 为材料的热膨胀系数; T_m 为材料的温度; T_r 为参考温度; $\mathbf{I}$ 为单位张量。在考虑损伤的情况下,包含材料的非线性变形特性的 $\boldsymbol{\epsilon}$ 与 $\mathbf{u}$ 的关系如式(4)所示。

$$\boldsymbol{\epsilon} = \frac{1}{2}[(\nabla \mathbf{u})^T + \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \nabla \mathbf{u}] \quad (4)$$

采用标量损伤理论计算损伤因子,定义如式(5)所示的荷载方程。

$$f = \epsilon_{eq} - \kappa \quad (5)$$

式中: f 为无量纲参数; ϵ_{eq} 为等效应变; κ 为变形过程中的最大应变; κ 的变化速率为 $\dot{\kappa}$; f 和 $\dot{\kappa}$ 需满足 $f \leq 0$, $\dot{\kappa} \geq 0$, $\dot{\kappa}f = 0$.

在只考虑受拉损伤的情况下, 按式(6)计算等效应变.

$$\epsilon_{eq} = \begin{cases} \frac{\sigma_{p1}}{E}, & \sigma_{p1} > 0 \\ 0, & \sigma_{p1} \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: σ_{p1} 为最大主应力; E 为材料的弹性模量.

当 κ 超过材料的极限拉应变(ϵ_0)时, 根据线性应变软化准则, 损伤因子(D)按式(7)进行计算.

$$D = \left(1 - \frac{\epsilon_0}{\kappa}\right) \left(\frac{\epsilon_f}{\epsilon_f - \epsilon_0}\right) \quad (7)$$

式中: ϵ_f 为与材料损伤特性有关的中间变量. 当 κ 超过 ϵ_0 时, $D=0$. 损伤时的 ϵ_0 按式(8)进行计算.

$$\epsilon_0 = \frac{\sigma_{ts}}{E} \quad (8)$$

式中: σ_{ts} 为材料的抗拉强度.

ϵ_f 按式(9)进行计算.

$$\epsilon_f = \frac{2G_f}{\sigma_{ts}h} + \frac{\epsilon_0}{2} \quad (9)$$

式中: G_f 为材料单位面积的断裂能; h 为材料断裂的特征尺寸, 按网格单元尺寸取值. 损伤后材料应力(σ_d)按式(10)进行计算.

$$\sigma_d = (1 - D)\sigma \quad (10)$$

固体传热的控制方程如式(11)所示.

$$\rho C_p \frac{\partial T_m}{\partial t} - \nabla \cdot \lambda \nabla T_m = Q \quad (11)$$

式中: ρ 为材料的真密度; C_p 为定压比热容; λ 为热导率; Q 为热源项.

2.2 计算模型

数值模型的建立按旋转对称体进行, 图2为数值模型的设置.

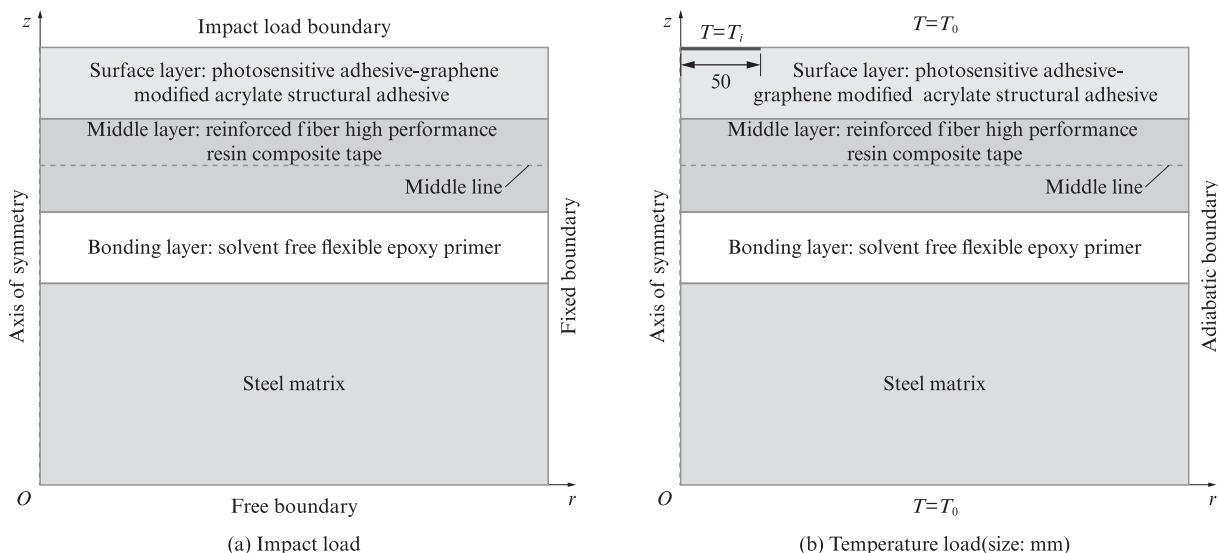


图2 数值模型的设置

Fig. 2 Setup of the numerical model

由图2(a)可见: 模型左侧为对称轴, 下表面为自由边界, 右侧为固定约束边界条件, 上表面为冲击荷载边界条件. 所施加的冲击荷载沿径向的分布为式(12)所示的高斯脉冲函数.

$$p(r) = p_m \exp\left[-\frac{(r-r_0)^2}{2s^2}\right] \quad (12)$$

式中: $p(r)$ 为径向某水平坐标为 r 时的冲击荷载; p_m 为冲击荷载中心处的幅值; r 为冲击荷载沿径向的水平坐标; r_0 为冲击荷载中心的水平坐标; s 为决定冲击荷载宽度的标准差. 在 $p_m=1.0$ MPa, $s=5$ mm 时, 冲击荷载沿径向的分布情况如图3所示.

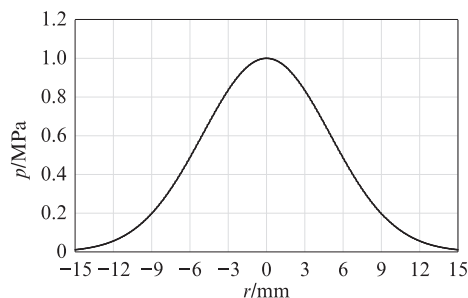


图3 冲击荷载沿径向的分布情况

Fig. 3 Radial distribution of impact load

由图2(b)可见: 模型右侧的固定约束边界条件为绝热状态, 在进行温度荷载分析时, 在模型对称轴

周围 50 mm 范围内施加局部高温以模拟浪溅区温度分布不均的情况,施加温度 T_i 取 5~30 ℃,模型初始温度设置为 $T_0=20$ ℃.

模型为规则的长方形,因此采用四边形结构化网格,可减少网格数量,提高计算效率.网格划分示意图见图 4.

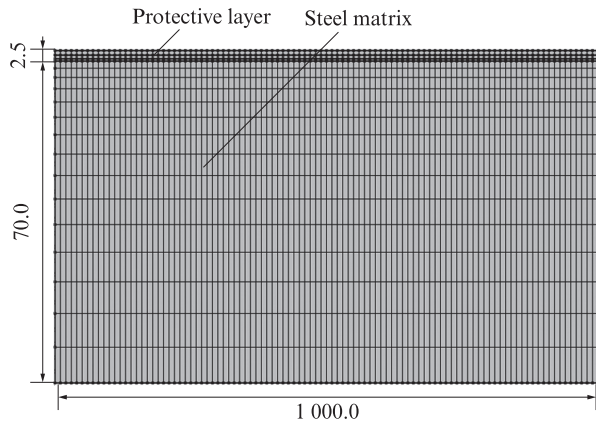


图4 网格划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of meshing (size:mm)

本文对中间层分别采用增强纤维高性能树脂复合带和环氧玻璃钢时的力学性能差异进行对比,材料参数见表 1.

3 冲击荷载作用下保护层的力学性能

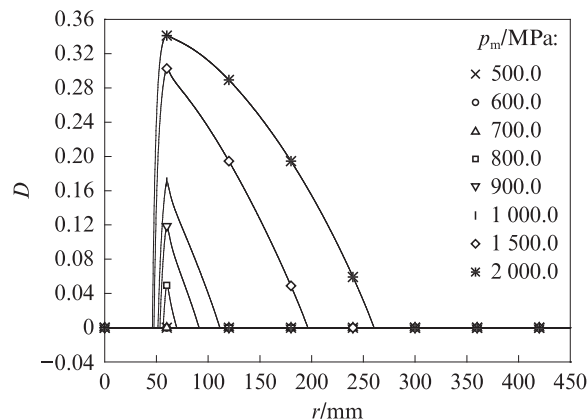
增强纤维高性能树脂复合带和环氧玻璃钢分别作为保护层的中间层时,式(12)中的 p_m 取 500.0~2 000.0 MPa, $s=20$,取距对称轴 450 mm 范围内的模型进行分析,不同冲击荷载作用下中间层中线处的损伤因子如图 5 所示.

由图 5 可见:在同一 p_m 作用下,环氧玻璃钢中从中线处开始的损伤范围远大于增强纤维高性能树脂复合带中的损伤范围;随 p_m 增大,环氧玻璃钢的损伤程度发展较为快速,在 $p_m < 500.0$ MPa 时便已开始出现损伤,而增强纤维高性能树脂复合带中在 $p_m = 700.0$ MPa 时才开始出现损伤,表明增强纤维高性能树脂复合带的防冲击性能优于环氧玻璃钢.

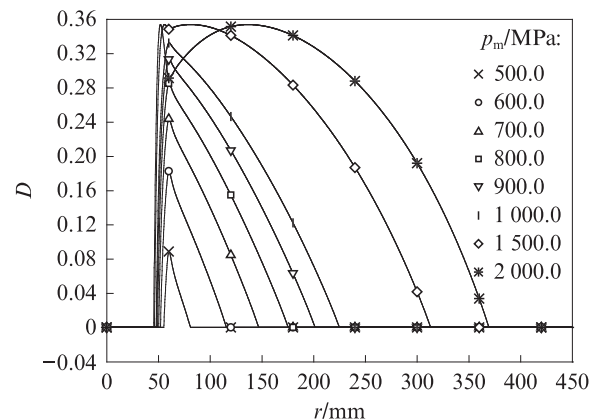
表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

Parameter	Bonding layer	Surface layer	Middle layer		
			Reinforced fiber high performance resin composite tape	Epoxy fiber reinforced plastics	Steel matrix
Density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 450	1 250	3 000	2 500	7 850
Elastic modulus/GPa	3	12	45	72	206
Poisson's ratio	0.30	0.30	0.25	0.22	0.30
Coefficient of thermal expansion/ K^{-1}	6.0×10^{-5}	3.3×10^{-5}	2.0×10^{-5}	4.8×10^{-4}	1.2×10^{-5}
Tensile strength/MPa			350.0	200.0	
Fracture energy/($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$)			120	24	
Thermal conductivity/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0.3	0.2	0.8	1.0	44.5
Specific heat capacity/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	1 000	1 465	850	800	475



(a) Reinforced fiber high performance resin composite tape



(b) Epoxy fiber reinforced plastics

图5 不同冲击荷载作用下中间层中线处的损伤因子

Fig. 5 Damage factors at the middle line of the middle layer under various impact loads

增强纤维高性能树脂复合带和环氧玻璃钢分别作为保护层的中间层时,在 p_m 为800.0、1 000.0、2 000.0 MPa时,中间层中的损伤区域分布如图6所示.由图6可见:随 p_m 增加,在冲击荷载较大的、靠近对称轴的区域无损伤发生;随 p_m 增加,损伤区域的右边缘逐渐向右扩展,而损伤区域的左边缘几乎没有变化;在3种 p_m 作用下,环氧玻璃钢中的损

伤范围明显大于增强纤维高性能树脂复合带中的损伤范围;当 p_m 为800.0和1 000.0 MPa时,增强纤维高性能树脂复合带中的损伤程度和范围均小于环氧玻璃钢;在 p_m 达到2 000.0 MPa的过程中,环氧玻璃钢中损伤范围的宽度超过300 mm,而增强纤维高性能树脂复合带中损伤范围的宽度仅为200 mm.

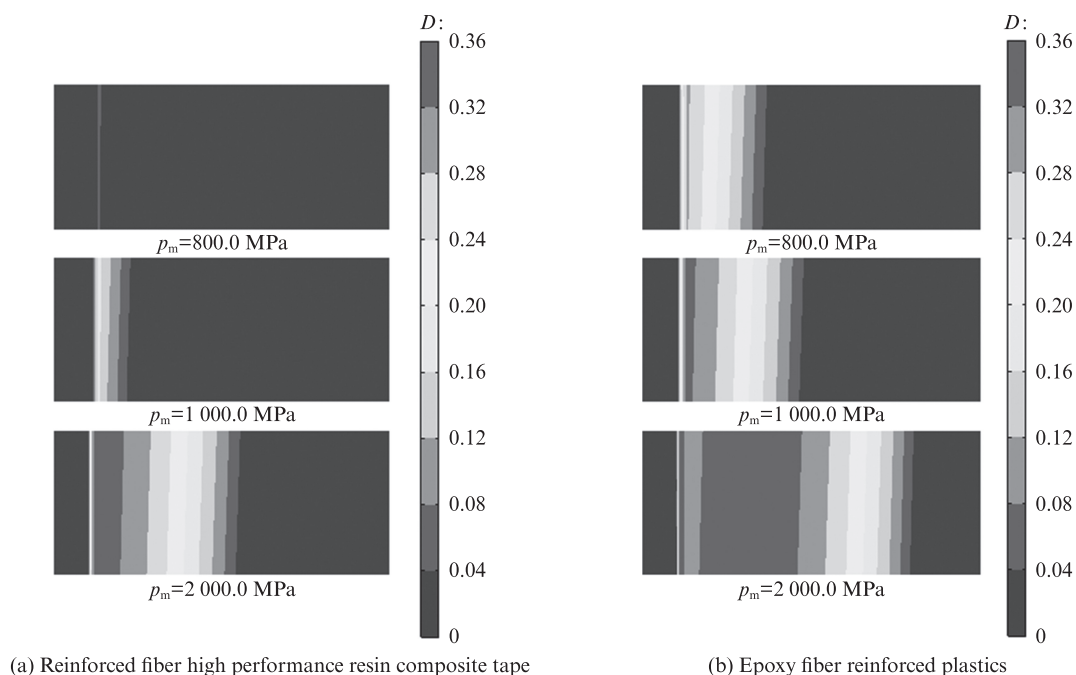


图6 中间层中的损伤区域分布
Fig. 6 Damage area distributions in the middle layer

增强纤维高性能树脂复合带和环氧玻璃钢下表面的剪切应力分布情况类似,以图7所示增强纤维高性能树脂复合带下表面的剪切应力分布为例,由图7可见,两种中间层材料的下表面剪切应力都达到了设计值10.0 MPa,这是因为防护材料与基体间的黏结力主要取决于所使用的底胶,当黏结层使用相同

材料时,防护材料产生滑移的情况不会得到改善.

综上所述,增强纤维高性能树脂复合带的抗拉强度与钢材相近,冲击韧性是传统材料的4~5倍,在钢材外形成一种高强度的约束及阻隔防护,在冲击荷载作用下,增强纤维高性能树脂复合带具有比环氧玻璃钢更高的抗冲击性能,可有效抵御施工期间的撞击作用和长期工作时海水的冲击作用.

4 温度荷载作用下保护层的力学性能

增强纤维高性能树脂复合带和环氧玻璃钢分别作为保护层的中间层时,在距离数值模型中心50 mm处施加温度为 T_i 的边界条件, T_i 的取值范围为5~30℃.图8为不同温度作用下中间层下表面的剪切应力分布.界面胶可提供的黏结力一般在10.0 MPa左右,因此中间层的设计黏结强度为10.0 MPa.由图8可见:当温度从5℃变化到30℃时,增强纤维高性能树脂复合带的黏结力始终小于10.0 MPa;当环氧玻璃钢中的温度差达到20℃时,其下表面的最大剪切应力已达到10.8 MPa,超过设计黏结强度;增强纤维

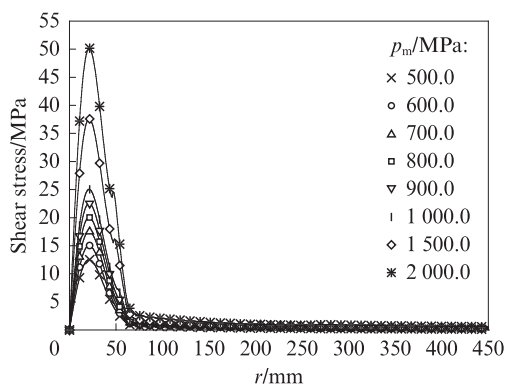


图7 增强纤维高性能树脂复合带下表面的剪切应力分布
Fig. 7 Shear stress distributions on the lower surface of reinforced fiber high performance resin composite tapes

高性能树脂复合带的热膨胀系数与基体钢材接近,而环氧玻璃钢的热膨胀系数远大于基体钢材,因此

在相同温度下,环氧玻璃钢下表面的剪切应力远大于增强纤维高性能树脂复合带下表面的剪切应力。

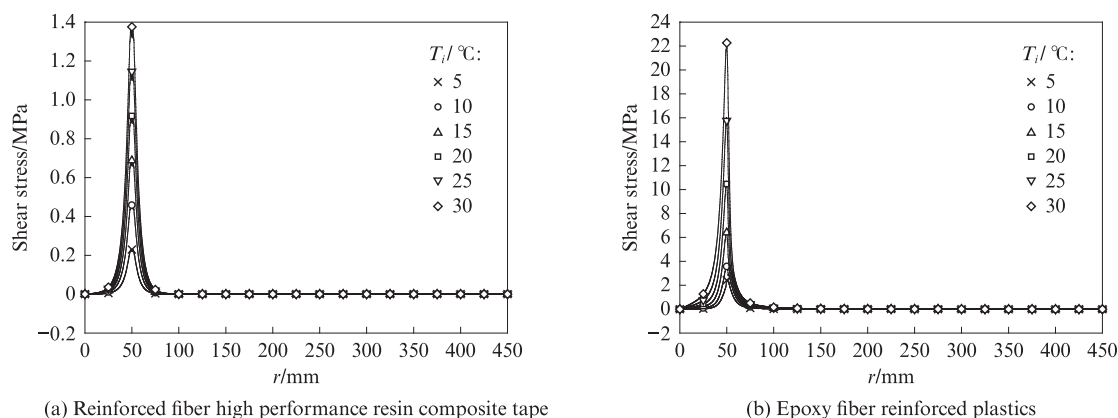


图8 不同温度作用下中间层下表面的剪切应力分布
Fig. 8 Shear stress distributions on the lower surface of the middle layer at various temperatures

当中间层局部温度在5~30 °C变化时,不同温度作用下环氧玻璃钢中的损伤区域分布如图9所示,此时增强纤维高性能树脂复合带没有发生损伤。由图9

可见,环氧玻璃钢在5 °C时就已发生损伤,因此在长期反复温度应力作用下,环氧玻璃钢比增强纤维高性能树脂复合带更容易发生破坏脱落。

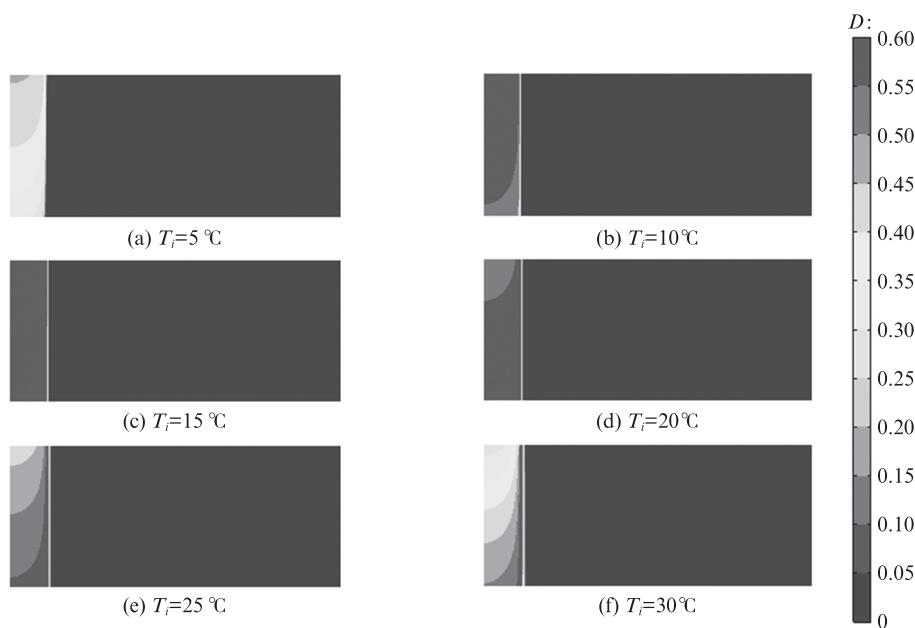


图9 不同温度作用下环氧玻璃钢中的损伤区域分布
Fig. 9 Damage area distributions in epoxy fiber reinforced plastics at various temperatures

中间层材料在温度变化时本身会发生热胀冷缩,环氧玻璃钢的膨胀率(或收缩率)远大于基体钢材,在交变温度下易引起界面剥离,造成保护层失效。若所处的环境温度交变幅度较大,温度交变频率较高,保护层的失效就会加快。增强纤维高性能树脂复合带的热胀系数与基体钢材处于相同的数量级,比环氧玻璃钢低一个数量级,在温度荷载作用下可以与钢管桩本体产生协调变形,从而保障了其对整个保护层的有效约束。

5 结论

(1)增强纤维高性能树脂复合带的力学性能优于环氧玻璃钢。在相同冲击荷载作用下,前者发生损伤的临界荷载超过后者的1.5倍以上,表明前者的防冲击性能优于后者。

(2)在相同冲击荷载作用下,增强纤维高性能树脂复合带和环氧玻璃钢在下表面产生的剪切应力相当,因此在黏结层使用相同材料时,增强纤维高性能

树脂复合带并不会改善防护层的抗滑移性能,若要改善防护层的抗滑移性能,还需对黏结层材料开展进一步的研究.

(3)增强纤维高性能树脂复合带抵抗温度应力的性能优于环氧玻璃钢.在相同温度下,前者下表面的剪切应力不到后者的1/10,在反复温度应力作用下,环氧玻璃钢更容易发生破坏脱落.

参考文献:

- [1] 程永舟,姜松,吕行,等.波流共同作用下大直径圆柱局部冲刷试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(3):606-616. CHENG Yongzhou, JIANG Song, LÜ Xing, et al. Experimental study of local scour around a large-diameter vertical cylinder in combined waves and current[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(3): 606-616. (in Chinese)
- [2] 黄维平,刘建军,赵战华.海上风电基础结构研究现状及发展趋势[J].海洋工程,2009,27(2):130-134. HUANG Weiping, LIU Jianjun, ZHAO Zhanhua. The state of the art of study on offshore wind turbine structures and its development[J]. The Ocean Engineering, 2009, 27(2):130-134. (in Chinese)
- [3] 张强林,吴衍剑,张祥龙.海上风电超大直径单桩基础水平位移计算影响因素研究[J].水电与新能源,2021,35(12):54-56,63. ZHANG Qianglin, WU Yanjian, ZHANG Xianglong. On the influencing factors of horizontal displacement calculation of super-large diameter mono-pile foundation for offshore wind turbine[J]. Hydropower and New Energy, 2021, 35(12): 54-56, 63. (in Chinese)
- [4] 刘奇东,刘荣桂,姜慧,等.海洋干湿交替区混凝土结构的人工气候模拟加速试验设计[J].混凝土,2013(11):50-52,67. LIU Qidong, LIU Ronggui, JIANG Hui, et al. Artificial climate simulation acceleration test design of concrete structure in wet-dry cycling zone of marine environmen[J]. Concrete, 2013(11): 50-52, 67. (in Chinese)
- [5] 蔡荣,杨绿峰,余波.海洋潮汐浪溅区混凝土表面氯离子浓度的改进计算模型[J].土木与环境工程学报,2019,41(4):122-129. CAI Rong, YANG Lüfeng, YU Bo. Improved model for surface chloride concentration of concrete in marine tidal and splash zones [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(4): 122-129. (in Chinese)
- [6] 黄彦良,余秀明,郑琨,等. AISI4135钢在浪溅区的润湿特征及规律[J].中国腐蚀与防护学报,2015,35(5):474-478. HUANG Yanliang, YU Xiuming, ZHENG Min, et al. Wetting characteristics and regularity of AISI4135 steel in marine splash zone[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2015, 35(5): 474-478. (in Chinese)
- [7] 苏昕,刘思国,刘岳鑫,等.在役钢管桩浪溅区腐蚀损伤补强加固方法探讨[J].中国港湾建设,2018,38(3):43-45,61. SU Xin, LIU Siguo, LIU Yuexin, et al. Discussion on the reinforcement method for corrosion damage in splash zone of steel pipe pile in service[J]. China Harbour Engineering, 2018, 38(3): 43-45, 61. (in Chinese)
- [8] 常留红,徐斌,孙文硕,等.波浪作用下墩柱结构物涂层界面气泡演化规律[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):425-432,440. CHANG Liuhong, XU Bin, SUN Wenshuo, et al. Bubble evolution at the interface of pier structure coating under wave action [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(5):425-432, 440. (in Chinese)
- [9] 侯保荣.海洋钢结构浪花飞溅区腐蚀控制技术[M].北京:科学出版社,2011. HOU Baorong. Corrosion control technology in spray splash zone of offshore steel structure[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [10] 王恒,苏波泳,曹宇鹏,等.模拟浪溅区波浪冲击动态应变检测装置设计[J].中国测试,2015,41(9):75-78. WANG Heng, SU Boyong, CAO Yupeng, et al. Design of dynamic strain detection device for simulation of wave impact in splash zones[J]. China Measurement and Test, 2015, 41(9): 75-78. (in Chinese)
- [11] 刘斌,李瑛,林海潮,等.防腐涂层失效行为研究进展[J].腐蚀科学与防护技术,2001,13(5):305-307. LIU Bin, LI Ying, LIN Haichao, et al. Progress in study on degradation of anti-corrosion coatings[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2001, 13(5):305-307. (in Chinese)
- [12] 郝负洪,田旭乐,韩燕,等.冲击荷载作用下钢结构表面涂层的接触损伤[J].建筑材料学报,2020,23(3):707-712. HAO Yunhong, TIAN Xule, HAN Yan, et al. Contact damage of steel structure coatings under impact loading[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3):707-712. (in Chinese)
- [13] 郝负洪,宣姣羽,马思哈,等.区域特殊环境对钢结构涂层基本力学性能影响[J].建筑材料学报,2021,24(4):794-799. HAO Yunhong, XUAN Jiaoyu, MA Sihan, et al. Influence of regional special environment on the basic mechanical properties of steel structure coating[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):794-799. (in Chinese)
- [14] 刘明维,曾丽琴,余杰,等.内河码头钢构件防腐涂层冲蚀特性及损伤模型[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(10):115-122. LIU Mingwei, ZENG Liqin, YU Jie, et al. Erosion characteristics and damage model of anti-corrosion coating on steel-structure in inland river wharf[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(10):115-122. (in Chinese)
- [15] LI X L, ZANG Y, LIAN Y, et al. An interface shear damage model of chromium coating/steel substrate under thermal erosion load[J]. Defence Technology, 2021, 17(2):405-415.
- [16] 张寒露,范育京,唐聿明,等.不同腐蚀环境中几种典型涂层在玻璃钢表面的附着力研究[J].腐蚀科学与防护技术,2016,28(5):443-448. ZHANG Hanlu, FAN Yujing, TANG Yuming, et al. Adhesion between FRP and several typical coatings in different corrosive environments[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2016, 28(5):443-448. (in Chinese)