

FRP 绿色建筑附属部品部件数值模拟

闵红光¹, 陶宇², 林忠良¹

(1. 中冶建筑研究总院(深圳)有限公司, 广东 深圳 518055;

2. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055)

摘要: FRP(纤维增强复合材料)是一种新型绿色建筑材料,具有强度高、质量轻、耐腐蚀性强等特点,在建筑工程中得到广泛应用。通过对 FRP 空调支架和防护栏杆进行有限元分析,研究 FRP 空调支架的疲劳性能,分析 FRP 防护栏杆的抗冲击性能。结果表明,FRP 空调支架具有良好的耐疲劳性能,螺栓孔位置是影响 FRP 空调支架疲劳寿命的薄弱处;FRP 防护栏杆具有良好的抗冲击性能,且在撞击后栏杆能够较快速地恢复形状。因此,FRP 绿色建筑附属部品部件具有良好的力学性能和耐久性能,能够满足恶劣环境下工程使用要求,对 FRP 绿色建筑材料的推广应用具有重要意义。

关键词: 绿色建筑材料; FRP(纤维增强复合材料)绿色建筑附属部品部件; 有限元分析; 力学性能

中图分类号: TU502 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)19-0278-06

随着中国社会的发展和进步,绿色建筑行业迎来了蓬勃的发展趋势,人们的环保意识越来越强,也越来越重视环保,并对国内的建筑行业提出了更高的要求;建筑行业要将绿色建筑材料应用到新时期下的建筑工程中。在传统的建筑工程中,建筑资源的过度消耗不但产生了很多建筑垃圾,还造成了环境污染,给人们的生产和生活带来了影响。

纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)是以纤维作为增强体,以树脂作为基体,经拉挤、缠绕、模压等成型工艺胶结而成的一种新型高性能复合材料^[1-6]。FRP 作为绿色建筑材料,具有强度高、质量轻、耐腐蚀性强的优势^[7-11],因此,FRP 绿色建筑附属部品部件在建筑工程中具有极高的推广价值和应用前景。

一般情况下,空调外机是通过空调支架固定在外墙上,因此作为空调外机的承载结构,空调支架的承载能力、可靠性和耐疲劳性就显得尤为重要,否则容易造成安全事故。目前,国内主要的空调支架和防护栏杆多采用金属结构,空调支架一般是焊接型材三角支架结构。然而金属结构在沿海地区、高湿度或者腐蚀性海洋环境中,其使用寿命会大大缩短,而且不可预期。FRP 因其具有绝佳的绝缘性、耐腐蚀性及抗疲劳性,同时兼具高强度、低密度

等优越性能,因此,在结构强度、防腐性能或可靠性要求较高的场合,FRP 空调支架和 FRP 防护栏杆^[12]的优势性能会更加凸显。

本文以 FRP 空调支架和防护栏杆为例,研究 FRP 空调支架的疲劳性能,分析 FRP 防护栏杆的抗冲击性能,考察 FRP 绿色建筑附属部品部件的可靠性能,以期为 FRP 绿色建筑材料在建筑工程中的推广应用提供依据。

1 FRP 空调支架有限元分析

利用 ABAQUS 软件,对 FRP 空调支架进行数值模拟,主要考察空调支架的疲劳性能。FRP 空调支架的尺寸如图 1 所示。

1.1 FRP 空调支架有限元模型建立

固定空调支架所用的螺栓均为复合材料螺栓,螺栓的一端通过化学植筋的方法植入墙体,另一端通过螺纹紧固空调支架。空调支架采用 4 节点减缩积分壳单元 S4R,与墙体植筋连接的螺栓采用 8 节点六面体单元 C3D8R。空调支架与螺栓之间采用面面硬接触,切向设置为库仑摩擦类型的罚函数,摩擦系数为 0.3,螺栓与墙体之间的浆体填充简化处理后采用绑定接触实现,空调自重引起的竖向压力直接施加在空调支架的水平杆面上。空调支架模型的弹性模量为 32 GPa,泊松比为 0.32,材料特性为线弹

收稿日期: 2024-05-21

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2019B111107002);中冶建筑研究总院有限公司重大课题(JAA2018Kj01)

作者简介: 闵红光(1984—),男,河南驻马店人,博士(后),高级工程师,研究方向为绿色建筑材料与结构耐久性;陶宇(1989—),男,辽宁营口人,博士研究生,工程师,研究方向为组合结构;林忠良(1998—),男,江西赣州人,硕士,助理工程师,研究方向为组合结构。

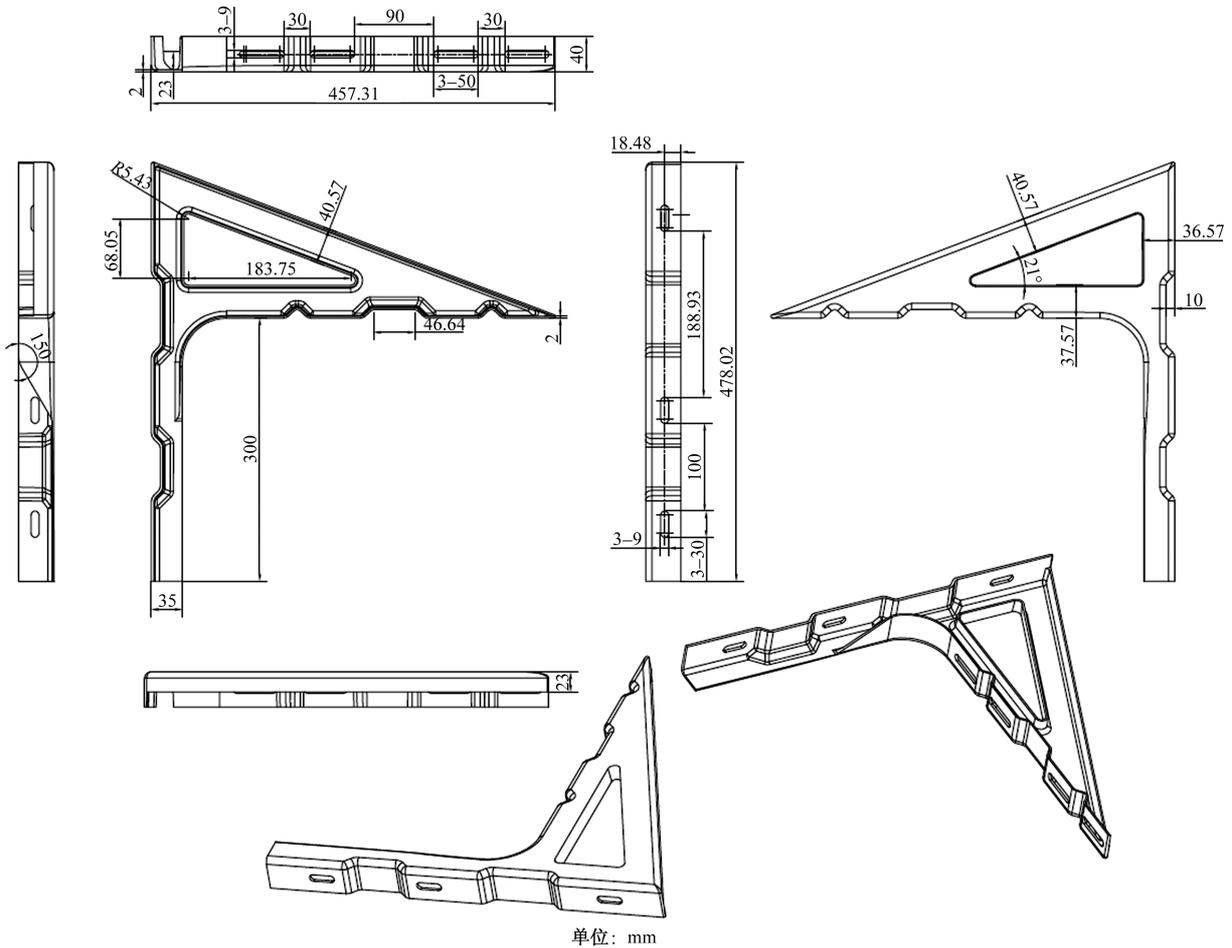


图 1 FRP 空调支架尺寸

性材料,容重为 $1\ 800\ \text{kg}/\text{m}^3$,空调支架的单支质量为 $0.5\ \text{kg}$ 。FRP 空调支架模型如图 2 所示。

值得注意的是,接触类型的选择是否恰当直接关系到模拟质量的好坏,尤其是螺栓与支架之间。预判 FRP 空调支架模型的结构会发生较大变形,由于空调支架模型单元类型是壳单元,在结构产生大变形时容易产生负体积、负内能量的现象。FRP 复合材料材质不是很软,且单元网格的形状不是很粗糙,因此沙漏控制 TYPE 类型选择 4、5、6 均能得到同样的结果,故本模型沙漏控制选择 TYPE5。

1.2 FRP 空调支架疲劳寿命分析

采用 ABAQUS 和 fe-safe 软件对空调支架的疲劳寿命进行分析计算,通过输入弹性模量和抗拉极限等参数计算得到 S-N(应力-寿命)曲线,模拟计算后得到的空调支架疲劳寿命云图,如图 3 所示。

通过疲劳寿命程序计算发现,螺栓孔位置是影响 FRP 空调支架疲劳寿命的薄弱处。当循环次数为 46 080 次时,螺栓孔处的复合材料发生了疲劳破坏,其他位置处均完好,且螺栓也未发生破坏,当循

环次数为 1×10^7 次以上时,认为 FRP 空调支架可以永久使用,如图 4 所示。因此,在进行 FRP 空调支架设计时需要对接螺栓孔处进行加厚处理,保证螺栓孔处的材料不产生受拉破坏。

1.3 FRP 空调支架应力分析

为了分析在空调振动过程中空调支架的受力情况,需要对空调支架的应力云图(图 5)进行分析,以期找出空调支架的受力薄弱位置。

由图 5 可知,在 3 个螺栓孔附近支架材料的应力相对较大,同时也发现在空调支架折角处也有应力相对较大的现象,表明在循环荷载作用下,上述位置容易发生疲劳破坏,尤其是第 2 个螺栓孔位置。为了充分利用 FRP 材料的优越性能,需要对薄弱点处进行特殊处理,以保证 FRP 空调支架的整体使用寿命。

2 FRP 防护栏杆有限元分析

利用 ABAQUS 软件,对住宅建筑阳台的 FRP 防护栏杆进行数值模拟,主要考察防护栏杆的抗冲击性能。FRP 防护栏杆的尺寸如图 6 所示。



图 2 FRP 空调支架模型

2.1 FRP 防护栏杆有限元模型建立

防护栏杆采用 4 节点减缩积分壳单元 S4R 进行模拟建模,防护栏杆的边界条件与实际工况相符,底部和左右边部均采用固接边界条件,限制 3 个方向的转动和平动,上部临空端为自由边界条件。防护栏杆材料模型参数取与空调支架材料相同的实测值,即弹性模量为 32 GPa,泊松比为 0.32,材料特性为线弹性材料,容重为 1 800 kg/m³。用于模拟冲击的施力物体则采用与成年男子质量相符的块体代替,块体采用 8 节点六面体单元 C3D8R。为了保证计算精度,对模型网格尺寸进行控制,防护栏杆模型的网格单元数量为 21 185 个,结点总数为 20 839 个。根据栏杆部位的不同,设置了 3 种壳单元厚度尺寸,防护栏杆的竖向接地主杆厚度为 4 mm,竖向未接地杆厚度为 2 mm,水平杆厚度为 3 mm。FRP 防护栏杆模型如图 7 所示。

预判 FRP 防护栏杆模型的结构会发生大变形、大位移,并且需要模拟出冲击过程中物体与栏杆之间的接触力,由于防护栏杆模型单元类型是壳单元,故本模型沙漏控制选择 TYPE5,与 1.1 节空调支架模型沙漏控制保持一致。



图 3 FRP 空调支架疲劳寿命云图

2.2 FRP 防护栏杆冲击性能分析

在冲击载荷作用下,当防护栏杆与冲击物(人体)接触时,涉及冲击物、接触过程、被冲击物等问题的描述,因此冲击模型可以按不同角度进行分类。从冲击过程看,冲击损伤数值模型应包含冲击

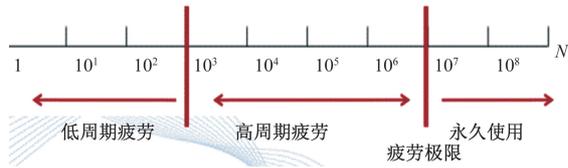


图 4 FRP 空调支架疲劳极限分类界限

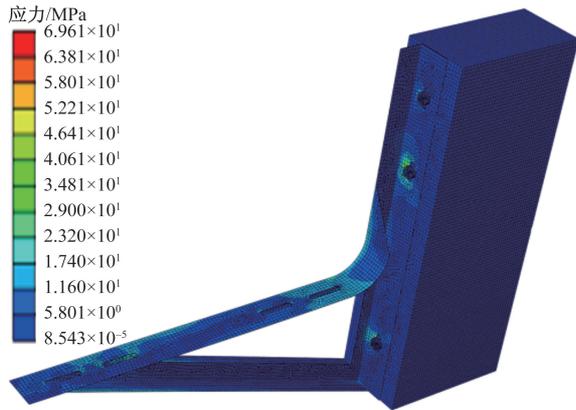


图 5 FRP 空调支架应力云图

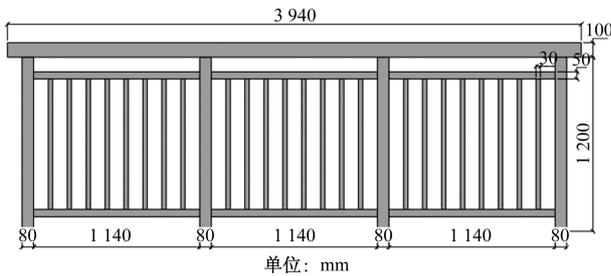
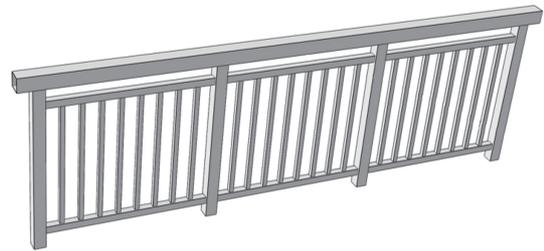


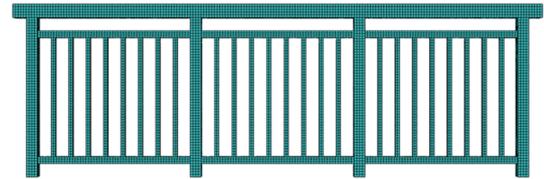
图 6 FRP 防护栏杆尺寸

载荷、冲击物模型、接触过程描述等,每个要素都可以有不同的处理方法^[13-14]。本文采用将冲击能量转化为质量速度关系,通过改变冲击物的质量和冲击速度的搭配来实现冲击能量影响的方法,对 FRP 防护栏杆进行冲击损伤的数值模拟研究。由于在低速冲击试验中人体骨骼刚度要大于复合材料板厚度方向上的刚度,在冲击过程中认为人体骨骼不发生变形。同时考虑到冲击物的柔性会大大增加数值模型的计算成本,所以在目前的数值计算模型中一般将冲击物等效看作不变形的刚体,通过赋予集中质量来模拟冲击物的作用^[13]。

在冲击过程模型中,以质量速度作为输入的模式可以得到较为准确的分层面积;在材料退化模型方面,由 Puck 准则判定损伤起始,基于能量释放率的逐渐退化模型更为准确,所以在本文中采用上述模型来对人体冲击 FRP 防护栏杆进行仿真模拟,由于缺少剪切非线性参数,研究中采用线性本构关系



(a) 三维模型示意图



(b) 有限元模型网格图



(c) 有限元模型边界条件

图 7 FRP 防护栏杆模型

进行模拟^[14]。模型采用显示动力类型进行运算,同时几何非线性分析设置为打开状态。冲击物质量假定为 100 kg,并以 2 倍人体平均奔跑速度 6 m/s 作为参照进行设置。

FRP 防护栏杆冲击过程应力云图如图 8 所示,发现防护栏杆上部水平杆的左右端部应力值较大,达到了 400 MPa,说明此处为防护栏杆冲击过程中的薄弱点,需要进行必要的加固处理。在撞击点处的应力也达到了 400 MPa,且管体本身变形较大。水平杆的上端面向外隆起幅值达到 4 mm 左右,撞击点处管体内凹。

为了较好地评估 FRP 防护栏杆抗冲击性能,利用 FRP 防护栏杆在人体撞击过程中栏杆的变形特点,计算出水平位移云图(图 9),图中显示撞击点处水平位移最大,达到 140 mm,撞击点左右两侧的位移逐渐减小,这与撞击的客观规律相符合。由于防护栏杆左右两端和下部边界均为固接形式,因此,越靠近此边界水平位移值越小。

通过分析撞击点处管体外壁的水平位移监测数据(图 10)可知,冲击物与防护栏杆的接触时间为 0.08 s,在撞击的一瞬间,防护栏杆的水平位移急剧



图8 FRP防护栏杆冲击过程应力云图



图9 FRP防护栏杆冲击过程水平位移云图

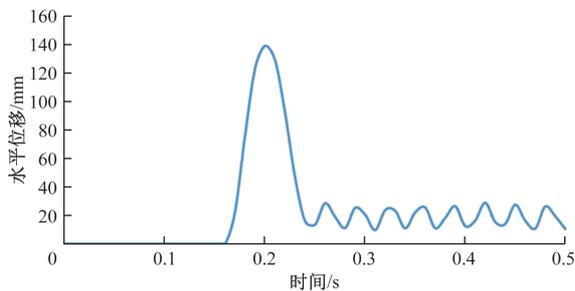


图10 FRP防护栏杆撞击点处管体水平位移曲线

增加至 140 mm;在冲击物与防护栏杆脱离撞击后,撞击点处的管体产生了若干个振动波,振幅峰值较小。由此说明,在以 2 倍成年男子(100 kg)奔跑速度撞击防护栏杆的过程中,FRP 防护栏杆的抗冲击变形能力较好,且在撞击后栏杆能够较快速地恢复形状,即使有一定的水平变形,但变形幅值较小,满足继续使用的要求。

3 典型实例

FRP 空调支架采用纤维增强环氧树脂预浸料一体模压成型,兼顾了力学性能、耐腐蚀、高可靠性、低成本等优势,解决了恶劣环境下高可靠性及耐久性的问题,对此类应用场景产品的使用性能起到了极大的提升作用,同时适合批量化生产,应用前景广泛。

2022 年 1—10 月,FRP 空调支架(图 11)在深圳前海某大楼进行工程应用示范,在示范应用期间,FRP 空调支架整体性能良好,为 FRP 绿色建筑



图11 FRP空调支架应用示范

附属部品部件在滨海高温、高湿、高盐雾环境下的推广应用提供了示范案例。研究表明^[15],FRP 防护栏杆在桥梁人行道栏杆中具有良好的工程应用效果,对于腐蚀介质环境桥梁及后期维修养护较难或成本较高的桥梁,这种新型栏杆具有明显的技术、经济优势。

4 结论

利用有限元模拟,对 FRP 空调支架的疲劳性能和 FRP 防护栏杆的冲击性能进行了分析,在此基础上进行了工程应用示范,得到以下主要结论。

(1)FRP 空调支架螺栓孔位置是影响其疲劳寿命的薄弱处,故在进行 FRP 空调支架设计时需要对其螺栓孔处进行加厚处理,保证螺栓孔处的材料不产生受拉破坏,以保证 FRP 空调支架的整体使用寿命。

(2)FRP 防护栏杆的抗冲击变形能力较好,且在撞击后栏杆能够较快速地恢复形状,水平变形幅值较小,满足工程使用要求。

(3)FRP 绿色建筑附属部品部件具有强度高、质量轻、耐腐蚀、耐疲劳、抗冲击的优良性能,在高温、高湿、高盐雾环境中使用时具有良好的可靠性,并可以有效延长结构的使用寿命。

参考文献

- [1] 李恒,康海波,秘金卫,等. 玻璃纤维增强聚合物腰梁受

- 力性能试验与有限元模拟[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 6148-6158.
- [2] 王浩, 杨宇轩, 曾旭明, 等. 纤维增强材料在城市给排水管道修复中的应用[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(26): 11071-11080.
- [3] 闫清峰, 张纪刚. 纤维增强复合材料在土木工程中的应用与发展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36): 15314-15322.
- [4] 陈朝晖, 罗绮雯. 考虑界面黏结滑移的玻璃纤维增强复合材料-混凝土组合梁力学性能数值分析[J]. 工业建筑, 2019, 49(9): 64-69.
- [5] 李奔奔, 李鹏举, 詹瑒. 纤维增强复合材料约束海水海砂混凝土方柱极限应力及极限应变计算方法分析[J]. 复合材料科学与工程, 2022(2): 52-55.
- [6] 吴智深, 汪昕, 吴刚. FRP 增强工程结构体系[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [7] 于冬雪, 于化杰, 黎红兵, 等. FRP 建筑材料的结构性能及应用综述[J]. 材料导报, 2021, 35(S2): 660-668.
- [8] RAJAK D K, PAGAR D D, MENEZES P L, et al. Fiber-reinforced polymer composites: manufacturing, properties, and applications[J]. *Polymers*, 2019, 11: 1668.
- [9] 邹镛. 复合材料 FRP 作为绿色建筑材料的应用探究[J]. 四川建材, 2022, 48(7): 18-19, 39.
- [10] 潘晓兰, 刘笑强, 郑志. 纤维布加固填充墙钢筋混凝土框架的抗震性能水准研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(24): 10459-10468.
- [11] 董志强, 吴刚. FRP 筋增强混凝土结构耐久性能研究进展[J]. 土木工程学报, 2019, 52(10): 1-19, 29.
- [12] 冯鹏, 齐玉军, 叶列平, 等. GFRP 栏杆的受力性能及其结构安全性研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010(6): 48-54.
- [13] 张嘉睿. 复合材料 T 型长桁边缘冲击损伤数值仿真与试验验证[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [14] 张嘉睿, 吴富强, 姚卫星. 复合材料冲击损伤数值仿真模型评估[J]. 航空工程进展, 2019, 10(6): 767-779.
- [15] 崔学常, 张锡祥, 巫祖烈. FRP 桥梁人行道栏杆工程应用效果研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(3): 22-26, 46.

Numerical Simulation on FRP Green Building Accessory Components

MIN Hongguang¹, TAO Yu², LIN Zhongliang¹

(1. Central Research Institute of Building and Construction(Shenzhen) Co. Ltd. MCC Group, Shenzhen 518055, Guangdong, China;
2. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology(Shenzhen), Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: FRP(fiber reinforced polymer) is a new type of green building material with high strength, light weight, and strong corrosion resistance, which has been widely used in construction engineering. The fatigue performance of FRP air conditioning brackets is studied through finite element analysis, and the impact resistance of FRP protective railings is analyzed. The results show that the FRP air conditioning brackets have good fatigue resistance, and the bolt hole position is the weak point that affects the fatigue life of the FRP air conditioning bracket; FRP protective railings have good impact resistance and can quickly restore shape after impact. Therefore, FRP green building accessory components have good mechanical and durability properties, which can meet the requirements of engineering use in harsh environments. It is of great significance for the promotion and application of FRP green building materials.

Keywords: green building materials; FRP(fiber reinforced polymer) green building accessory components; finite element analysis; mechanical property