

实体封装式光伏路面层间剥离破坏力学机制研究

何肖斌

(福州市公路事业发展中心,福建 福州 350108)

摘要:针对实体封装式光伏路面层间剥离破坏模式,采用有限元分析方法建立三维有限元模型,开展不同加载条件和不同黏结尺寸的实体封装式光伏路面板块受力分析,研究揭示实体封装式光伏路面结构层间剥离破坏模式机制和关键影响因素,并提出优化设计建议。结果显示:由于层间界面黏聚力与封装材料的差异,实体封装式光伏路面结构易发生层间剥离损伤,黏结层所在位置高度越接近荷载作用面,越容易发生层间黏结失效的分层破坏;建议在保证发电功能前提下,降低黏结层高度位置和黏结面积,采用铆钉技术,有利于提高结构寿命。

关键词:光伏路面;装配式;层间破坏;黏结层;数值仿真

中图分类号:U416.216

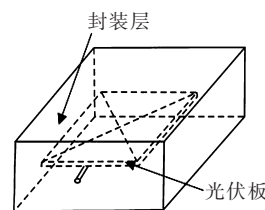
文献标志码:A

0 引言

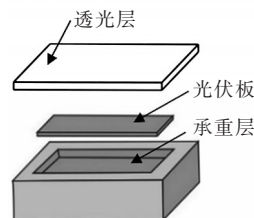
自2006年由美国Scott Brusaw提出太阳能道路这一概念以来,世界各国积极开展装配式光伏路面的应用研究,各国研究人员提出了多种装配式光伏路面结构模型^[1-3]。与普通水泥混凝土路面和沥青路面相比,装配式光伏路面不仅需要满足发电功能,还需要满足传统道路的所有功能,保障行车安全的同时还需要兼顾经济性和耐久性。由于车辆荷载和环境因素的多样性和复杂性,需要对装配式光伏路面结构破坏机制和设计理论进一步深入研究。

装配式光伏路面最基本的结构组成为3层,上层表面透明层,中层太阳能电池板,下层基础结构层。目前主要装配式光伏路面结构分为实体封装式光伏路面结构[图1(a)]和空心板式光伏路面结构[图1(b)]。实体封装式光伏路面板块是将太阳能电池板完全封装在表面透明层材料以内,与外界空气和水等小分子隔绝,表面透明层材料与基础为同种材料或材料间黏结性能较好的两种材料^[4]。

实体封装式光伏路面板块和空心式光伏路面板块最本质的区别就是其太阳能电池板参与到荷载传递过程中,作为荷载传递的过渡,如果发生较大变形



(a) 实体封装式光伏路面板块模型



(b) 空心板式光伏路面板块模型

图1 光伏路面结构理论模型示意图

或荷载过大,将造成硅片的断裂或压碎,导致板块光电转换功能失效,在光伏阵列当中若是串联电路,还将导致整串电路的失效。因此一方面对太阳能电池板及内部电子元件的可变形能力具有较高的要求,另一方面需要上部的结构具有一定的荷载扩散能力,以防止在车辆荷载作用下,对于内部的太阳能电池板产生不可逆的破坏^[5-7]。

各类型装配式光伏路面的设计寿命均超过10

收稿日期:2022-10-12(修改稿)

基金项目:福建省交通运输科技项目(编号:201824)

作者简介:何肖斌,男,大学本科,高级工程师.E-mail:hxb77@126.com

年,然而在实际运营过程中却因为电路系统问题、排水、剥离、开裂和内部水气无法排出等问题,导致实际运营效果和使用寿命远远达不到预期效果。

基于此,本文设计一种新型实体封装式光伏路面结构,由表层耐磨层、中层光伏电池板和下部承重层组成。通过有限元分析方法,建立三维有限元模型,对实体封装式光伏路面层间黏结行为、界面分离发展过程和影响因素进行分析。通过分析力学破坏机制和影响因素,以期为装配式光伏路面结构选型和结构优化提供参考。

1 实体封装式光伏路面分层剥离失效力学机制

1.1 分层剥离破坏原理与损伤形式

实体封装式光伏路面板块属于复合材料层合板结构,这种结构可以充分利用不同材料的优势共同承担外部荷载,一般由多个单层板通过黏结形成整体结构。

复合材料层合板受力通常有沿厚度方向的拉应力或层间界面内的剪切应力,而随着荷载的增大或循环作用,将使局部分层发生扩张,最终造成完全的分层,这本质上是由于材料的断裂,是一种典型的裂纹扩展,应采用断裂力学分析。复合材料一般采用断裂韧度 G 表示结构抵抗分层扩展的能力,而有限元分析可以进行较为准确的数值模拟。

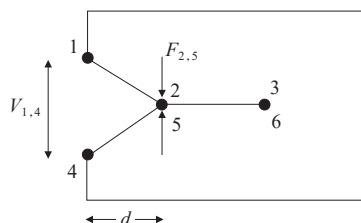
因此,对于实体封装式光伏路面这种复合材料层合板结构,尤其是其典型破坏形式中存在层间分离的模式,对实体封装式光伏路面层间黏结行为和层间界面分离的过程发展进行研究,可为光伏路面结构优化设计提供支持。

1.2 分层剥离损伤数值模拟理论

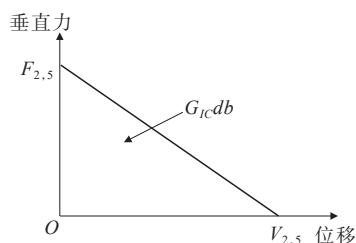
目前复合材料层合板结构分层理论的数值模拟方法主要包括:虚拟裂纹张合技术(VCCT)、内聚力单元模型和扩展有限元法(XFEM)。

(1) 虚拟裂纹张合技术(VCCT)

VCCT方法基于线弹性断裂力学,假设裂纹扩展的能量与裂纹闭合的能量相等。其优点是能够计算裂尖应变能释放率。缺点是具有较强的网格依赖性,且分层扩展的界面相对固定。其理论模型如图2所示^[8]。



(a) 裂纹扩展示意图



(b) 裂纹扩展节点力与位移关系曲线

图2 VCCT方法裂纹扩展理论图示

图2(a)的能量释放率为 G_I , 2、5节点分离需要的能量释放率为 G_{IC} , 裂纹扩展的准则是 $G_I > G_{IC}$, 即:

$$\frac{G_I}{G_{IC}} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{1,4} F_{2,5}}{b d} \right) \frac{1}{G_{IC}} \geq 1 \quad (1)$$

式中: $V_{1,4}$ 表示1、4节点间的垂直位移; $F_{2,5}$ 表示2、5节点间的垂直力; b 和 d 表示裂纹尖端的宽度与长度。

(2) 内聚力单元模型方法

内聚力单元模型方法基于损伤力学理论^[9], 可对复合材料层合板结构中分层损伤的发起和扩展进行模拟, 是目前最常用的方法。其原理是将层间黏结失效等效为内聚力单元的渐进失效现象, 将层间界面处的拉力与位移建立联系, 以此关系进行建模, 模拟复合材料的分层损伤。内聚力单元模型一般采用双线性理论模型, 如图3所示。

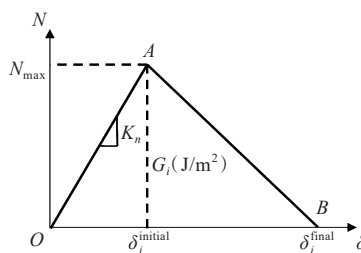


图3 内聚力单元双线性本构模型

图3中: OA段内聚力单元处于弹性阶段, 无损伤发生, 卸载后无刚度损失, 此时内聚力单元的初始刚度为 K_n , 弹性阶段遵循胡克定律。AB段为分层损伤失效全过程的3个阶段, 即损伤发起、演化和完全失效, A点处的坐标值, 即为损伤发起时的受力和变形

值,此时损伤变量达到1,内聚力单元的受力最大达到 N_{\max} ,变形达到损伤起始变形 $\delta_i^{\text{initial}}$ 。AB段内聚力单元的刚度也发生损失,剩余刚度为O到AB段间任意点连线的斜率,记为 K_i 。当损伤演化至B点,内聚力单元发生完全失效,即断裂,此时内聚力单元受力达到0,位移达到 δ_i^{final} 。三角形OAB的面积即为断裂韧度 G_i 。

(3) 扩展有限元法(XFEM)

XFEM方法中,裂纹可以向任意方向扩展,扩展过程中不用重新划分网格。其单元内任意点的位移由式(2)表示^[10]:

$$u_{\text{xfem}}(x) = \sum_{j=1}^n N_j(x) u_j + \sum_{h=1}^{m_h} [N_h H(x) - H(x_b)] a_h + \sum_{k=1}^{m_i} N_k(x) \left[\sum_{l=1}^4 [F_l(x) - F_l(x_k)] b_k^l \right] \quad (2)$$

式中: n 、 m_h 、 m_i 分别为单元、增强、裂尖增强的节点数; u_j 、 a_h 、 b_k^l 分别为节点、增强节点、裂尖增强节点的自由度向量; N_j 为形函数; $H(x)$ 分别取1、-1; $F_l(x)$ 为裂尖增强函数值。

VCCT方法基于线弹性断裂力学,虽然能够计算尖端应变能释放率,但对网格有较强的依赖性。内聚力单元法可以模拟复合材料层合板结构中分层损伤的演变,而XFEM方法主要针对不连续力学问题采用水平集等跟踪裂缝位置及其扩展,但采用Abaqus计算时,计算成本相对较高。鉴于本次设计的实体封装式光伏路面板块属于复合材料层合板结构,其典型破坏形式就是层间剥离,因此采用内聚力单元模型方法模拟光伏板的层间接触。

2 实体封装式光伏路面有限元建模

2.1 研究方案

本文主要通过Abaqus有限元软件建立三维有限元模型对装配式实体封装式光伏路面结构的层间分离机制进行深入研究。通过改变荷载位置和黏结层高度,观察黏结面损伤演化云图和最大分层损伤度来揭示装配式实体封装光伏路面板的分层剥离机制,以期为实体封装式光伏路面设计和选型提供指导,布载位置见图4,具体工况见表1。

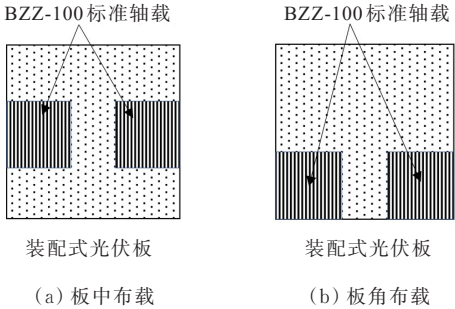


图4 布载位置

表1 实体封装式光伏路面计算工况

工况	布载位置	黏结面与板底距离/cm
1	板中	1,2,3,4,5,6,7,8,9
2	板角	1,2,3,4,5,6,7,8,9

2.2 三维有限元建模假设

实体几何模型基本假定如下:

- (1) 装配式光伏路面板块与基层及地基之间的层间接触以及装配式光伏路面复合结构中的层间接触均为完全接触。
- (2) 令路面层下方结构层为等效弹性基础。
- (3) 各层实体单元为连续、均匀、各向同性的线弹性体,除层间接触使用内聚力单元,采用损伤本构,其余部分均使用线弹性本构。
- (4) 地基地面施加全约束,四周施加法向位移约束,路面层四周无特殊说明则视为自由边,板底无脱空。
- (5) 分析单块板时不考虑相邻多块板间的传荷作用。
- (6) 不计自重。

根据收敛性分析结果,地基深度取5 m,地基朝四周各延伸0.25 m,BZZ-100标准轴载模型等效为两个长19.2 cm(行车方向)和宽18.6 cm(垂直行车方向)的双轮矩形垂直均布荷载,荷载大小为0.7 MPa,水平摩擦系数取0.5。双轮荷载中心间距为31.4 cm,总宽50.0 cm。主要力学响应分析指标为黏结面损伤度,故实体单元均采用C3D8R单元,黏结层部件采用COH3D8单元,网格尺寸取1 cm。

2.3 模型参数

实体封装式光伏路面结构自上而下分别为装配式光伏板、基层和路基,考虑光伏路面板块刚度,光伏板块整体厚度取10 cm,分为耐磨层和承重层两部分。有限元模型见图5,其尺寸和材料参数见表2、3。

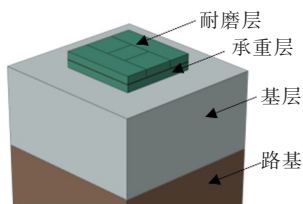


图 5 实体封装式光伏路面有限元模型

表 2 实体封装式光伏路面结构有限元模型尺寸

结构层		长/cm	宽/cm	高/cm
光伏板块	耐磨层	50	50	1~9
	承重层	50	50	9~1
	基层	100	100	50
	路基	100	100	500

表 3 实体封装式光伏路面有限元模型材料参数

结构层	材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比
耐磨层	PMMA	1 190	3 000	0.30
承重层	双酚 F 型环氧树脂	1 200	3 000	0.37
基层	水泥稳定碎石	2 300	29 000	0.15
路基	土基	1 800	200	0.30

实体封装式光伏路面板块模型采用 Abaqus 内聚力单元的损伤失效指标 I_{DF} 表征板块黏结层间分离损伤的程度即分层损伤度。其原理是将层间黏结失效等效为内聚力单元的渐进失效现象,将层间界面处的拉力与位移建立联系,以此关系进行建模,模拟复合材料的分层损伤。

Abaqus 中可通过 COH3D8 单元模拟胶合层,损伤准则采用二次名义应力准则,当各方向的名义应变比的平方和等于 1 时,损伤开始:

$$\left\{ \frac{\langle \sigma_n \rangle}{N_{\max}} \right\}^2 + \left\{ \frac{\sigma_s}{S_{\max}} \right\}^2 + \left\{ \frac{\sigma_t}{T_{\max}} \right\}^2 = 1 \quad (3)$$

根据图 3, σ_n 、 σ_s 、 σ_t 分别是名义方向主应力、第一方向名义剪应力和第二方向名义剪应力,该准则考虑各个方向的损伤,计算相对可靠。

经过测试,双酚 A 型环氧树脂最优固化掺量时黏结强度达到 3.62 MPa,胶合层的参数取值见表 4。

表 4 太阳能电池板黏结层参数

损伤/MPa			损伤演化 破坏位移/mm
σ_n	σ_s	σ_t	
3.62	5	5	0.12

层间分离损伤失效全过程分为 3 个阶段,即损伤发起、演化和完全失效,当损伤程度变量 I_{DF} 达到 1 时,为损伤发起阶段,此时内聚力单元的受力最大达到 N_{\max} ,变形达到损伤起始变形 $\delta_i^{\text{initial}}$ 。

3 面板层间分离损伤机制研究

3.1 板中荷载黏结层高度对黏结层失效的影响

考虑黏结层位置距板底高度对黏结界面失效的影响时,采用 50 cm 黏结面边长,即板块上下层完全被太阳能电池板黏结面分隔的情况。

分析在标准轴载及其滑动摩擦力作用下,观察荷载作用于板中位置处的板块黏结面损伤度随黏结层高度 1~9 cm 的变化规律,结果见图 6。

从图 6 可以看到:

(1) 荷载作用于板边中部时,黏结面越高即越接近荷载作用面,则分层损伤度最大值越大,越容易发生层间分离。

当荷载作用于板边中部时,随着黏结面由低到高越接近荷载作用面,黏结面的分层损伤度越大,当其达到 1 的时候,该处位置黏结失效,发生脱黏,当黏结面所在位置距板底高度小于等于 30 mm 时,最大分层损伤度均小于 0.8,此时竖直和水平车辆荷载作用暂不能使黏结面产生损伤,当黏结面所在位置距板底高度大于 30 mm 时,黏结面最大分层损伤度大于 0.8 且呈现越接近荷载作用面,最大值越大的现象。

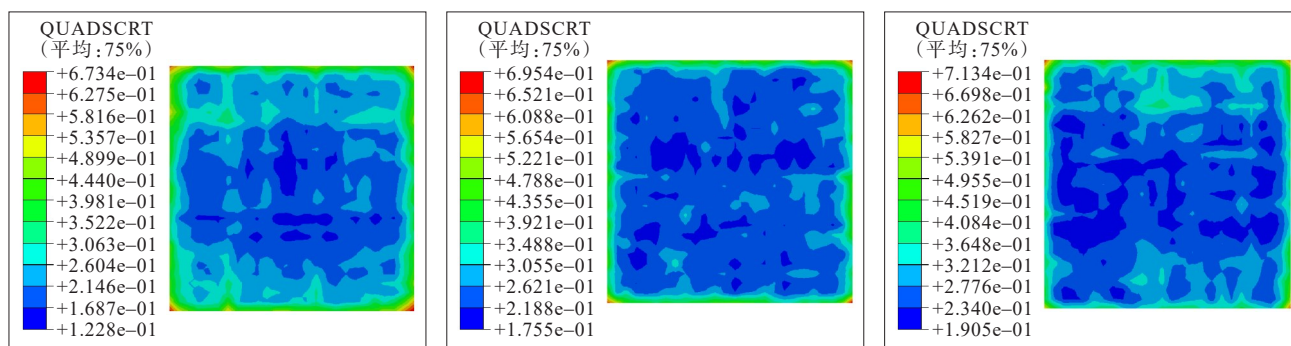
(2) 黏结面在板角和板边位置分层损伤度远大于板内,角部为层间分离的起始位置。说明在黏结面的板角和板边,在车辆荷载作用下会率先失效,层间界面分离损伤的发展趋势是由角及边,由外至内,最终形成完整的层间分离。

3.2 板角荷载黏结层高度对黏结层失效的影响

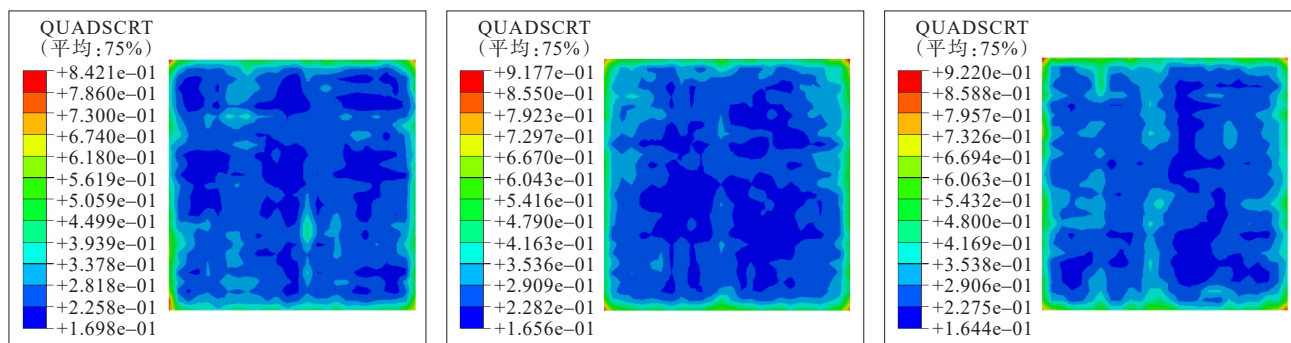
将标准轴载作用在板角处,考虑滑动摩擦的影响,分析荷载在板角处时,不同黏结层高度下,黏结层的损伤演化,其分层损伤度云图见图 7。

从图 7 可以得出:

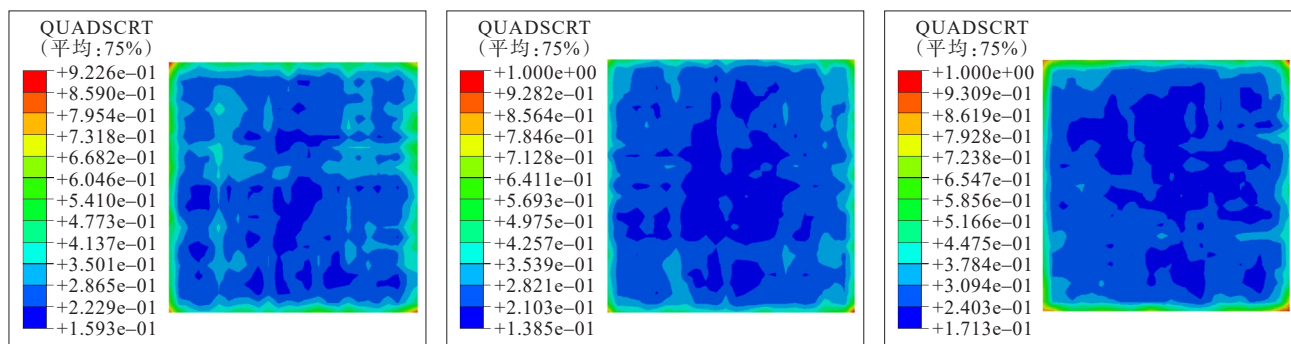
(1) 当荷载作用于板角时,同样表现出黏结面越接近荷载作用面,分层损伤度最大值越大,越容易发生层间分离。且根据分层损伤度最大值达到 1 的云图数量大于荷载作用于板边中部时的云图数量,表



(a) 黏结面距板底高度分别为 1 cm、2 cm、3 cm



(b) 黏结面距板底高度分别为 4 cm、5 cm、6 cm



(c) 黏结面距板底高度分别为 7 cm、8 cm、9 cm

图6 荷载作用于板边中部时黏结面分层损伤度云图

明荷载作用于板角对层间分离损伤更不利,为最不利荷位。

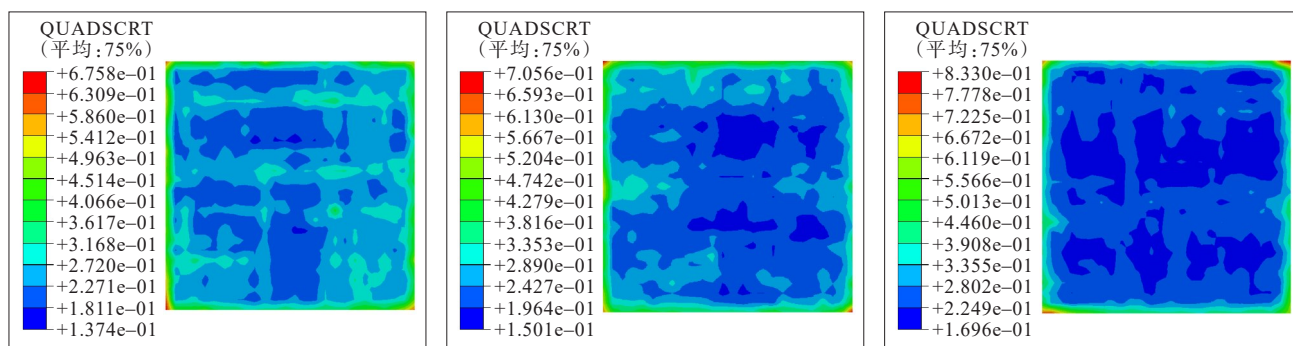
当荷载作用于板角时,随着黏结面由低到高越接近荷载作用面,呈现出黏结面最大分层损伤度越大,这与荷载作用于板边中部时的趋势相同,说明黏结面所在位置与损伤程度有关,且黏结面越接近荷载作用面,损伤越容易发生。而与之不同的是,当荷载作用于板角时,只有黏结面所在位置距板底高度为 10 mm 与 20 mm 时,黏结面最大分层损伤度小于 0.8,当黏结面所在位置距板底高度大于 20 mm 时,其分层损伤度均大于 0.8,且在距板底高度大于等于 50

mm 时,均出现了最大分层损伤度达到 1,当分层损伤度达到 1 的时候,该处黏结位置失效,发生脱黏。

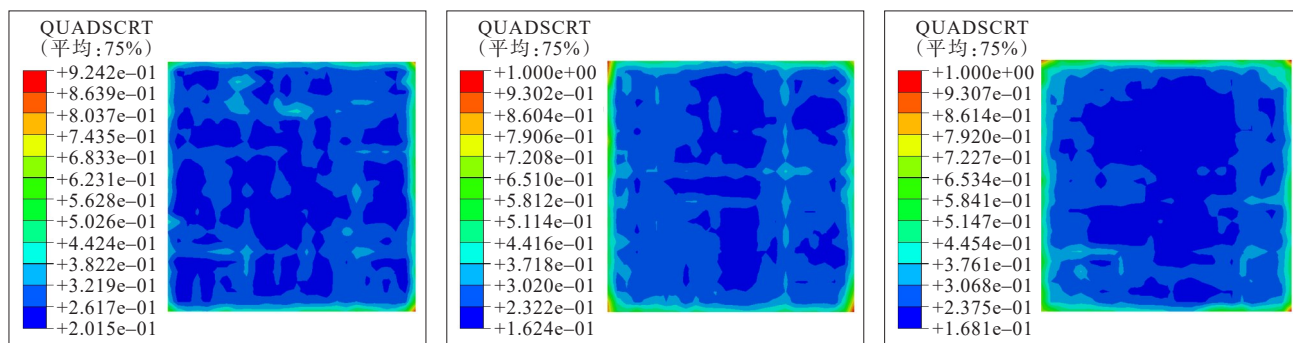
(2) 荷载作用于板角时,黏结面角部及边缘的分层损伤度同样远大于内部,这说明在黏结面的板角和板边,在车辆荷载作用下会率先失效,层间界面分离损伤的发展趋势同样是由角及边,由外至内,最终形成完整的层间分离,但不同的是,当荷载作用于板角时会更容易发生层间分离损伤。

3.3 不同荷位对黏结层最大损伤度的影响

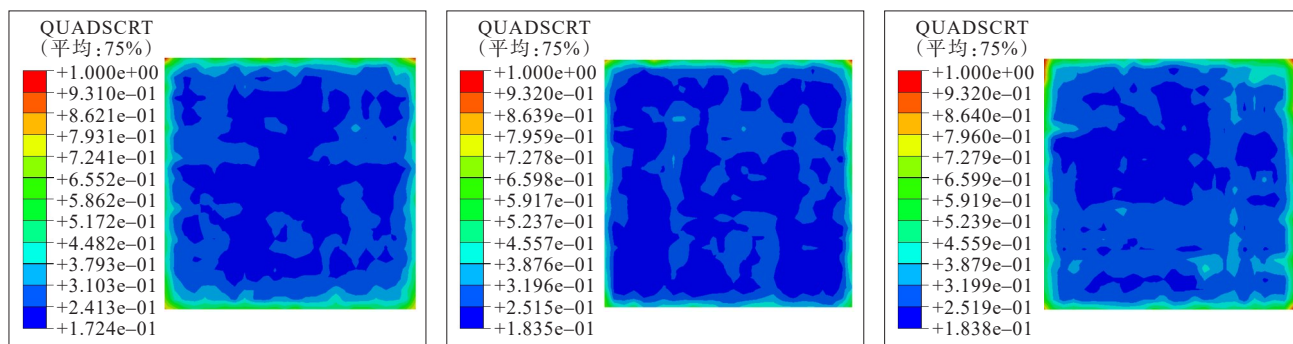
通过分层损伤度云图绘制路面板黏结面最大分层损伤度随着黏结面所在位置距板底高度的增加变



(a) 黏结面距板底高度分别为 1 cm、2 cm、3 cm



(b) 黏结面距板底高度分别为 4 cm、5 cm、6 cm



(c) 黏结面距板底高度分别为 7 cm、8 cm、9 cm

图 7 荷载作用于板角时黏结面分层损伤度云图

化曲线,结果见图 8。

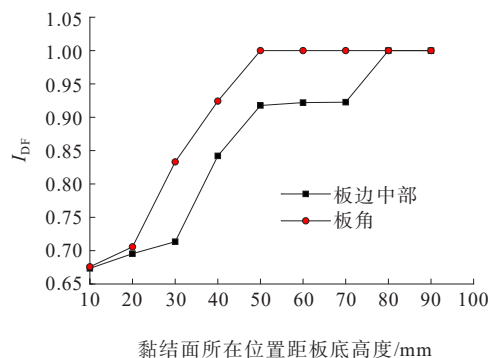


图 8 黏结面所在位置不同高度最大分层损伤度

从图 8 可以得出:

(1) 为防止层间分离损伤的发生,太阳能电池板上透明层厚度应尽可能小,设计时应控制黏结面高度为 20 mm。

当双轮轴载作用于板边中部时,实体封装式光伏路面板块黏结面最大分层损伤度呈现随着黏结面所在位置距板底高度的增加而增加的趋势;且当黏结面所在位置距板底高度为 80 mm 时,最大分层损伤度达到 1,当黏结面所在位置距板底高度小于 80 mm 时,最大分层损伤度变化率变大,更趋近于黏结面失效。结合云图可知,当黏结面所在位置距板底

高度增加时,黏结面越接近荷载作用面,荷载对该界面的影响随着距离的接近而呈现放大的趋势,此时层间黏结失效效应愈发显著。

当荷载作用于板角时,随着黏结面所在位置距板底高度的增加,实体封装式光伏路面板块黏结面的最大分层损伤度逐渐增大,当黏结面所在位置距板底高度为 50 mm 时,最大分层损伤度达到 1,当黏结面所在位置距板底高度小于 50 mm 时,黏结面最大分层损伤度在相同高度位置情况下,均大于荷载作用于板边中部时的最大分层损伤度,且同样呈现出变化率变大的现象,这表明,对于黏结面的层间分离损伤,荷载作用于板角为最不利荷位,且失效效应同样与黏结面所在位置距板底高度正相关。这是因为层间黏结失效效应的发起位置是板角,当荷载作用于板角时,荷载更接近板角,荷载对板角黏结界面的影响要大于荷载作用于板边中部时对黏结界面的影响。

3.4 参数敏感性分析

为了系统对比结构、材料和荷载对实体封装式光伏路面分层剥离失效影响的敏感性,基于建立的三维实体封装式光伏路面有限元模型,从各参数对实体封装式光伏路面最大分层损伤度的影响敏感性角度进行分析。

敏感性观测对象是实体封装式光伏板块的最大分层损伤度,表 5 和图 9 给出了主要参数和敏感等级,其中对最大分层剥离损伤影响(某工况与基准工况损伤度之差的绝对值占基准工况的比率)超过 40% 的参数等级为Ⅲ,影响最为显著,影响在 20%~40% 的参数为Ⅱ级,影响较为显著,影响在 20% 以下的参数为Ⅰ级,影响较低。

表 5 实体封装光伏板分层剥离损伤参数敏感分析结果

项目	黏结面 高度/cm	黏结面 边长/m	耐磨层弹性 模量/GPa	承重层弹性 模量/GPa	荷载作 用位置
取值区间	1~9	0.3~0.5	2.5~4.0	2.5~4.0	板中/板角
基准值	2	0.5	3	3	板中
影响/%	49	183	27	31	10
等级	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ

敏感性分析结果显示:黏结面边长和黏结面高度参数对实体封装式光伏板最大分层剥离损伤度影响最为显著,承重层和耐磨层弹性模量次之,荷载位

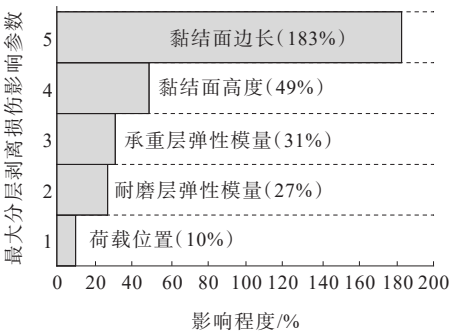


图 9 最大分层损伤度

置影响较低。其中黏结面边长与高度与最大分层损伤度呈负相关,在设计中应进行控制。

4 剥离机制分析与设计优化

4.1 层间剥离损伤机制分析

研究认为层间剥离的主要机制是黏接面局部脱黏及扩展。数值模拟结果表明,黏结面是实体封装式光伏路面板块的薄弱面,易发生由板角位置发起的层间分离损伤,由于水平薄弱层的存在,实体封装式光伏板块在板角和边缘处易发生剥离损伤,并且这种损伤是不可恢复的,一旦发生,将沿着板角和板边向内部扩展,最终导致透光层和承重层完全剥离。

由图 6~9 可知:实体封装式的分层剥离损伤主要与黏结面边长、黏结面高度、承重层弹性模量、耐磨层弹性模量和荷载作用位置等相关。黏结层所在位置高度越接近荷载作用面越容易发生层间黏结失效的剥离损伤破坏,损伤通常由板角发起,沿着板边向内部扩散,在设计时应该从减小板的尺寸,增加板厚,热压成型以及对板角进行铆钉加固等几个方面优化设计。

现通过试验对实体封装式光伏路面板块的层间剥离损伤机制进一步说明。采用改性双酚 F 型环氧树脂 AB 组分和半柔性单晶硅太阳能电池板和 PMMA 板进行实体封装式光伏路面板块的制备,材料参数见表 6。

表 6 改性双酚 F 型环氧树脂 AB 组分参数

组分	密度/(g·cm ⁻³)	黏度/(mPa·s)
A 组分	1.120	1 400~1 600
B 组分	0.985	40~60

改性双酚 F 型环氧树脂固化物常温 25℃ 下的物理性能如表 7 所示。

表 7 改性双酚 F 型环氧树脂固化物物理性能

邵氏硬度		抗压强度	断裂伸长率
72 h	15 d	(15 d)/MPa	(15 d)/%
D68-70	D72-75	40	>6

将制备完成后的实体封装式光伏路面板块试件经车辆反复碾压后发生了由板角发起的层间剥离损伤,具体表现如图 10 所示。

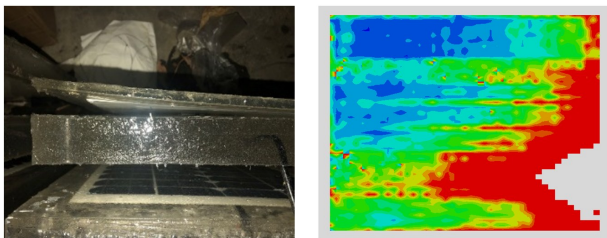


图 10 实体封装式光伏路面层间剥离损伤对比

试验结果与数值模拟结果基本一致,黏结面是板块的薄弱面,层间剥离是由板角位置发起的,这与复合材料板的受力特性相关。虽然 PMMA 板和环氧树脂承重层对水平向强度有增强作用,但是在厚度方向,各层材料之间的联系没有完全连续的单种材料整体形式强,在层间界面的力学性能最差。在其黏结面处还容易存在内部缺陷、黏结不完全、各层板初始变形等不利因素,造成结构的层间界面出现薄弱点,在层间应力较大时会引发损伤和损伤扩散,从而形成由板角发起的层间剥离。

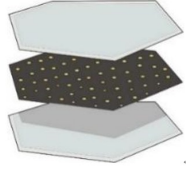

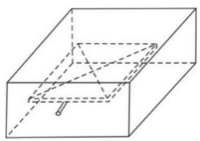

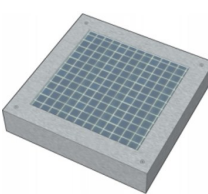
4.2 设计应用

实践显示,实体封装式光伏路面结构根据施工方法的不同又分为预制装配与现场封装两种形式,前者类似于混凝土砌块路面,后者类似于现浇混凝土路面。实体封装式光伏路面板块代表案例与结构组成如表 8 所示。

数值分析显示:实体封装式光伏路面最典型的是层间界面的分离和剥落,黏结面高度位置与荷载作用位置对层间失效有显著影响。

研究显示,荷载作用于板边中部时,黏结面越高即越接近荷载作用面,则分层损伤度最大值越大,越容易发生层间分离。当局部损伤发生后,其他位置需要承担比原先更大的荷载,将会发展为沿局部损

表 8 实体封装式光伏路面板块代表案例与结构组成

研究人员	结构组成
Brusaw ^[11]	①表面层:钢化玻璃 ②中间层:太阳能电池板 ③固定方式:螺栓固定 
Jiang 等 ^[12]	①表面层:透明混凝土 ②中间层:多晶硅太阳能电池板 ③固定方式:铣削后加铺,用特殊胶水黏连 
李子豪 ^[13]	①表面层:透明混凝土 ②中间层:太阳能电池板 ③固定方式:表面层材料完全封装电池板 
Ma 等 ^[14]	①表面层:钢化玻璃 ②中间层:EVA/PVB 箔片+太阳能电池板 ③固定方式:黏结 
福州大学 ^[15]	①表面加固层:金属外框 ②表面层:树脂混凝土 ③中间层:太阳能电池板 ④下层:树脂混凝土 ⑤阻尼垫层:沥青混合料 ⑥固定方式:螺栓 

伤扩展的更大损伤,最终表现为整体层间的界面分离。

板块黏结面的分层损伤度分布,在板角和板边的数值要远大于板内,这说明在黏结面的板角和板边,在车辆荷载作用下会率先失效,层间界面分离损伤的发展趋势是由角及边,由外至内,最终形成完整的层间分离。建议在结构设计时,采用铆钉加固,变截面和异形平面改变角和边的不利受力状态。

荷载作用于板角对层间分离损伤更不利,为最不利荷位。针对此种情况,在考虑板块布置位置时,尽量让车辆的行驶轮迹线以板中为主,避开板角,或者采用横向较大尺寸的设计。

在实体封装式光伏路面板块的结构设计中,在确保发电功能前提下,可降低黏结层高度位置并保留更多电池板边缘宽度以减小黏结面面积占比,更有利于提高结构寿命。基于理论分析可知,为防止

层间分离损伤的发生,对太阳能电池板上方透明层厚度要进行设计控制,一般控制耐磨层高度为20 mm。当光伏板块尺寸为 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}\times 0.1\text{ m}$ 时,黏结层高度距荷载面0.02 m,可达到最优设计。

5 结论

(1) 实体封装式光伏路面板块中黏结层所在位置高度越接近荷载作用面、黏结面面积占比越大,越容易发生层间黏结失效的分层破坏。且对于该损伤的最不利荷位是板角。

(2) 实体封装式光伏路面板块层间黏结失效的发起位置是板角,随后由起点向周边扩散,这与复合材料层合板结构分层理论一致,当局部损伤发生后,层间发生应力重分布,并由裂纹尖端开始扩展。

(3) 建议在实体封装式光伏路面板块的结构设计中,在保证发电功能前提下,尽可能降低黏结层高度位置并保留更多电池板边缘宽度以减小黏结面面积占比,更有利于提高结构寿命。

(4) 荷载作用于板角对层间分离损伤更不利,为最不利荷位。黏结面在板角和板边位置分层损伤度远大于板内,角部为层间分离的起始位置。针对此种情况,在考虑板块布置位置时,尽量让车辆的行驶轮迹线以板中为主,避开板角,或者采用横向较大尺寸设计、采用铆钉加固等技术加强。

参考文献:

- [1] 李虹玮.轻载型光伏路面结构与性能研究[D].福州:福州大学,2020.
- [2] MA T, YANG H X, GU W B, et al. Development of walkable photovoltaic floor tiles used for pavement[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 183: 764-771.
- [3] 张宏超,李武.用于制备太阳能光伏发电路面透光抗滑磨耗层的混合料及其应用:中国,201710065704.0[P],2018-05-11.
- [4] Wattway. Technical datasheet[EB/OL]. (2017-04-10).
- [5] 岑晏青,查旭东,蒋海峰,等.一种带追踪系统的微阵列光伏电池组太阳能路面:CN207720077U[P]. 2018-08-10.
- [6] 吴少鹏,陈明宇,韩君.沥青路面太阳能集热技术研究进展[J].公路交通科技,2010,27(3):17-22.
- [7] 胡恒武,查旭东,岑晏青,等.太阳能路面研究现状及展望[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(1):16-29.
- [8] 曹思婷,王静.浅谈复合材料层合板低速冲击分层损伤发展趋势[J].冶金与材料,2021,41(5):139-140.
- [9] 汪晨.复合材料层合结构损伤失效的有限元模拟研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.
- [10] LIU G Y, BAO H C, TANG K L. Damage prediction in notched fiber-reinforced composite laminates[J]. Composite Interfaces, 2017, 24(3): 279-290.
- [11] BELYTCHKO T, BLACK T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 45(5): 601-620.
- [12] JIANG H, CEN Y, ZHA X, et al. Current situation and development trend of solar pavement technology[C]// Science and Engineering Research Center. Proceedings of 2018 2nd International Conference on Energy and Power Engineering(EPE 2018).DEStech Publications,2018:10-16.
- [13] 李子豪.基于透明树脂混凝土的太阳能路面材料与模型制备及性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2018.
- [14] MA T, YANG H X, GU W B, et al. Development of walkable photovoltaic floor tiles used for pavement[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 183: 764-771.
- [15] 胡昌斌,何肖斌.框架板式阻尼装配光伏路面结构:中国, CN115467210A[P].2022-12-13.