

光伏组件运输包装的设计和有限元分析

刘 恋¹, 卢立新^{1,2}

(1. 江南大学, 无锡 214122; 2. 中国包装总公司 食品包装技术与安全重点实验室, 无锡 214122)

摘要: 针对目前铝合金边框光伏组件的运输包装中存在的不足, 以规格为 1665 mm×1000 mm×50 mm 的组件为例, 综合考虑了客户要求、产品特性、包装成本、包装效率和产品保护性等因素, 设计了一种更为合理的运输包装方案。在方案的内包装中, 设计了一种用于固定和分隔组件的塑料围框。利用 ANSYS Workbench 软件, 参考 ISTA 3E 实验中的底楞跌落试验, 进行了围框和组件的瞬态响应有限元分析。结果显示, 围框能够维持包装的稳定性和安全性。

关键词: 光伏组件; 包装方案; 围框; 有限元分析

中图分类号: TB485.1; TB482.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)19-0130-04

Transport Package Design and FEA of PV Module

LIU Lian¹, LU Li-xin^{1,2}

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Key Laboratory of Food Packaging Technology and Safety, Wuxi 214122, China)

Abstract: The shortages of current transport package of aluminum framed PV module were put forward. A more reasonable PV modules' transport package scheme was designed considering client demand, product feature, package cost, packaging efficiency, protectiveness, and so on, which was explained with example of 1665 mm×991 mm×50 mm module. A plastic frame was designed for interior package to hold and separate modules. According to the principles of rotational edge drop test of ISTA 3E, the transient response of the frame and module was analyzed by FEA method using ANSYS Workbench. The result showed that the plastic frame can maintain stable and safe of the package.

Key words: PV module; packaging solution; frame; finite element analysis

光伏组件是光电能量转换的中间设备, 主要由钢化玻璃、硅片、封装材料、铝合金边框和接线盒等组成, 脆值很大, 其对包装的最大要求是防止组件之间的摩擦^[1]。此外, 包装方案在正式投入使用之前, 企业通常根据 GB/T 4857. 22—1988 或者 ISTA 3E 文件, 进行托盘单元货物的稳定性试验, 并评估包装方案的可行性。而如何固定和隔开组件是维持组件托盘包装稳定性的关键所在。

针对无铝合金边框的光伏薄膜, 姚永根等人^[2]设计了一种运输包装方案, 其内包装采用 EVA 固定卡槽, 并对卡槽进行有限元分析, 结果显示卡槽结构满足强度要求。外包装配以胶合板箱, 但整体包装成本

偏高。针对带有铝框结构的光伏组件, 已有很多内包装固定用的包装塑料件投入使用。Martin Flossmann^[3], Joachim Haberlein^[4-5]和王斌^[6]等人设计了不同结构的用于光伏组件包装的塑料固定件。组件属于大型平板类产品, 通常在包装中的放置方式只有平放和立放 2 种, 但是, 固定件主要用于组件平放时的包装方案中, 并且组件平放方式容易使最下层组件遭到损坏。

对于有框光伏组件, 立放的放置方式更有利于减少组件的损坏率。笔者以 1665 mm×1000 mm×50 mm 规格的光伏组件为例, 进行运输包装设计。该组件单片质量约为 20 kg, 客户要求托盘装载数量为 21 片。

收稿日期: 2012-06-13

作者简介: 刘恋(1987—), 男, 四川万源人, 江南大学硕士生, 主攻运输包装。

通讯作者: 卢立新(1966—), 男, 江苏宜兴人, 博士, 江南大学教授、博士生导师, 主要从事包装动力学与包装材料等的研究。

1 内包装设计

组件采用立放装箱姿态,而立放姿态的设计关键在于提高组件的整体包装稳定性。如何固定和分隔组件是必须解决的问题。同时,内包装要求快捷的装箱过程和减少包装人员的劳动强度。包装材料中,塑料具有质量轻、性能好、加工方便和可循环使用等优点,能够较好满足内包装的相关要求。鉴于上述优点,选用常用硬质塑料 PP 作为内包装材料。根据实际情况,设计的围框结构见图 1。图 1 只是原理性结

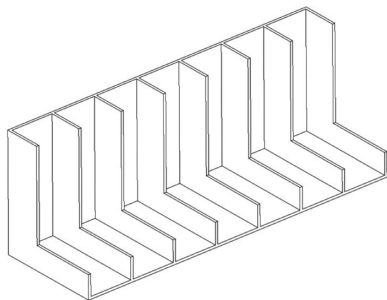


图 1 围框的简化结构

Fig. 1 The simplified structure of the plastic frame

构,略去的具体结构细节并不会减少保护产品的功能。在进行组件装箱之前,多片围框和托盘预先固定在一起,并对称放置于托盘两端。不多于 2 名的操作人员便可以完成整个包装过程,装箱方便快捷。装箱时,只需提升组件至围框顶部,然后将组件放置在围框的隔板中间,该方法极大地减少了组件被提升的高度,有效降低了包装人员的劳动强度。

2 围框的有限元分析

围框不仅是维持包装稳定性的关键部件,更是能够防止包装单元在严酷运输工况遭受破坏的关键包装件。储运过程中,包装单元的倾斜、跌落或者振动使组件与围框之间存在相互作用。该相互作用使围框的隔板发生一定的变形,变形量过大将不能维持组件立放姿态而使组件整体坍塌。可见,隔板的变形量是其维持包装稳定性的关键指标。

ISTA 3E 试验流程中,其中一个环节是对托盘包装单元进行底楞跌落试验。托盘包装单元置于水平的混凝土地面上,托盘底部一边垫在距离地面高 h 为

100 mm 高的支撑物上,抬高另一边至地面 200 mm 后放开,任其自由跌落,见图 2。特别地,由于组件在

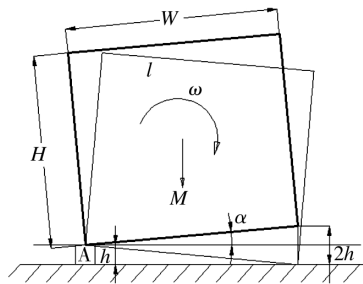


图 2 ISTA 3E 中的底楞跌落试验

Fig. 2 Rotational edge drop test of ISTA 3E

包装内部沿托盘短边方向排列,长边的底楞跌落试验对包装的稳定性要求最高。可见,该试验环节是考验围框维持包装稳定性的最严酷环节。基于该环节,通过有限元软件,分析在底楞跌落冲击时围框隔板的变形量,评价围框是否能够维持包装的稳定性。以 ANSYS Workbench^[8] 软件中的 transient structural (ANSYS)瞬态分析模块对围框进行有限元分析。

2.1 触地临界条件分析

第 1 步,计算触地瞬间托盘包装具有的初始冲击角速度 ω 。托盘包装单元长边底楞跌落的初始和结束姿态见图 2。为便于计算,将包装整体看作是均质的刚性物体,质心位于几何中心。在整个跌落过程中,托盘单元只以支撑物处的底楞为轴作旋转运动,并且假定托盘的强度和刚度满足该试验要求。

由能量守恒定理^[9]可得:

$$\frac{1}{2} J_a \omega^2 = m_1 g \cdot$$

$$\left[\frac{h}{2} + \frac{H}{2} \cos a - \left(\frac{H}{2} - \frac{W}{2} \tan a \right) \cos a \right]$$

其中: J_a 为包装单元绕着楞 A 的转动惯量; ω 为包装触地瞬间的冲击角速度; W 为包装单元宽度; H 为包装单元高度; m_1 为包装单元总质量; h 为底楞跌落试验支撑物高度; a 为托盘短边与水平地面的夹角; g 为重力加速度。

将上式化简,得初始冲击角速度:

$$\omega = \frac{\sqrt{6gh}}{\sqrt{W^2 + H^2}}$$

$W=1100$ mm, $H=1000$ mm, $h=100$ mm, $g=9.8$ m/s², 带入得 $\omega=1.63$ rad/s。

第2步,计算触地瞬间单片组件的等效初始速度和角速度。取托盘上的任一组件,其距离旋转轴距离为 l 。见图3,计算触地瞬间具有的动能 T :

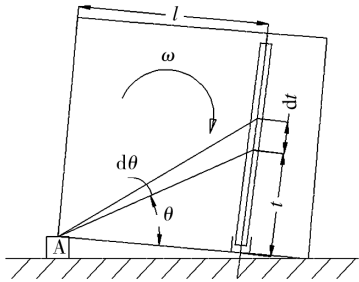


图3 任一组件触地瞬间的简化分析模型

Fig. 3 The simplified analysis model at the touchdown moment

$$T = \int_0^H \frac{1}{2} \omega^2 (l^2 + t^2) \rho dt$$

可得:

$$T = \frac{1}{2} (\rho H) (\omega l)^2 + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{3} (\rho H) H^2 \right] \omega^2$$

即:

$$T = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} J_b \omega^2$$

其中: ρ 为组件单位长度密度; m 为单片质量; v 为组件沿托盘平面法向的平动速度; J_b 为组件绕其底部的转动惯量。

可见,组件的动能与距离 l 成正比关系,并且该动能可以等效为组件具有沿托盘法向的平动速度 v 和角速度 ω 。由此可知,包装单元触地瞬间,最外侧的那片组件动能最大,该处的隔板受到的冲击最为严重。包装单元触地瞬间,每片组件角速度 ω 相同,组件之间法向相对位移为0,有限元分析时,可以忽略其他组件对最外侧组件的叠加影响。平动速度 v 随着 l 的增大而增大,而组件的平动主要对围框底部产生作用,但对隔板无作用,即其他组件对最外侧组件无叠加影响。

只取最外侧组件和其相互配合的围框进行有限元分析,以此分析隔板的变形量,不仅正确可行,而且可以降低计算机求解时间。另外,围框在托盘对称放置,组件插入围框的隔板之间。组件和围框的有限元模型为对称结构,可以只建立1/2模型进行分析。

2.2 有限元分析模型

组件和围框的1/2模型见图4。考虑托盘的刚

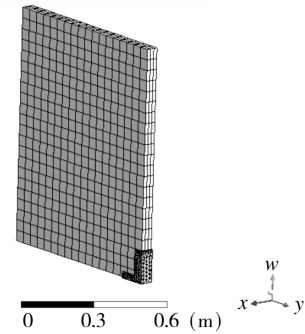


图4 组件和围框的有限元模型

Fig. 4 FEM model of the module and frame

度,围框底部添加弹性支撑约束。模型整体的对称面添加无滑动约束,组件与围框的接触方式为摩擦接触。另外,组件脆值很大,底楞跌落试验不会损坏组件,Workbench软件中可对围框进行求解。与瞬态分析相关的输入值有PP弹性模量为1.1 GPa,拉伸屈服强度30 MPa,密度1.1 g/cm³,泊松比为0.3,模型求解时间为10 ms,初始速度 v 为1.79 m/s,初始角速度 ω 为1.63 rad/s,重力场方向 α 为5.22°,具体施加方式见图5。

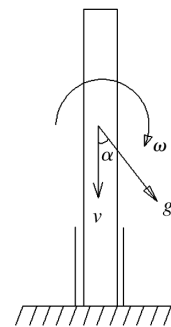


图5 初始条件施加位置

Fig. 5 The position for setting initial conditions

2.3 有限元结果分析

围框的等效应力-时间历程曲线见图6,由图6可知,组件冲击开始时,围框的等效应力急剧增加到最大值后又急剧下降。下降到一定值后,围框等效应力成波动趋势,然后平缓减少,曲线最后趋于稳定,冲击结束。冲击结束时围框的等效应力并不为0,其原因是组件跌落的结束姿态是倾斜于围框中,围框与组件的相互作用力使围框立于托盘之上而不倾倒。当时间为0.9 ms时,围框的等效应力最大,其值为13.8 MPa,远远小于PP塑料的拉伸屈服强度。可见,整个冲击过程围框不会发生损坏。

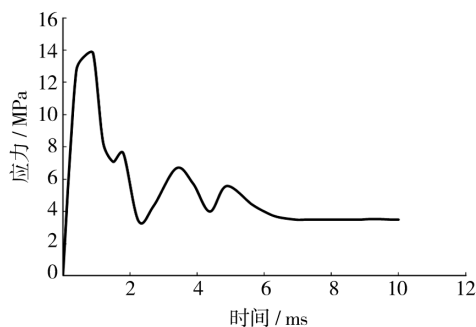


图6 等效应力时间历程曲线

Fig. 6 Equivalent stress-time curve

围框的变形云图见图7,处于组件倾斜方向的隔

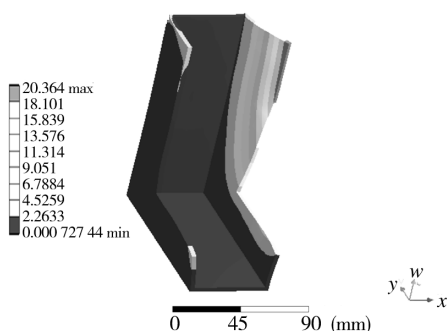


图7 围框最大位移云图

Fig. 7 The maximum displacement contour of the plastic frame

板发生大面积的变形。组件的倾斜方向如图中 Z 向,若该方向隔板的根部变形过大,组件将越过隔板而倾倒。以距离隔板根部10 mm处 Z 方向的变形量为基准,该变形量最大值约为5.3 mm,不足以使组件越过隔板而倾倒,故能够很好维持包装单元的稳定性。

3 外包装和辅助包装

出于成本考虑,外包装选用瓦楞纸箱即可。在受到外界冲击时,瓦楞纸箱可以作为缓冲结构,为内部组件的提供保护。顶部组件之间可以通过瓦楞纸板隔开,防止组件之间的摩擦。还可以使用打包带对整体进行捆绑,进一步增强包装的稳定性和安全性。

4 结论

综合考虑产品特性、流通环境和成本要求等因素,给出了一套完整的组件包装方案,具有一定的应用价值。通过对关键包装件的有限元分析,结果显示围

框能够有效地固定组件,提高了包装的整体稳定性。

参考文献:

- [1] 陈满儒,薛伟静,董殿明. 太阳能电池板的包装解决方案[J]. 包装工程,2010,31(9):71-95
CHEN Man-ru, XUE Wei-jing, DONG Dian-ming. Packaging Solution to Solar Panel[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(9): 71-95.
- [2] 姚永根,陈满儒. 光伏电池包装箱结构设计及托盘强度分析[J]. 包装工程,2010,31(23):60-63.
YAO Yong-gen, CHEN Man-ru. Structural Design of Packaging Case for Solar Cells and Strength Analysis of Pallet [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(23): 60-63.
- [3] 陈满儒,马卫静,李强. 太阳能电池板的运输包装设计[J]. 包装工程,2010,31(19):46-49.
CHEN Man-ru, MA Wei-jing, LI Qiang. Transport Packaging Design for Solar Panels[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 46-49.
- [4] M FLOSSMANN, DARMSTADT. Holding System for Horizontally or Vertically Stacking Framed Photovoltaic or Solar Thermal Flat Modules; US, 2011/0220598A1 [P]. 2011.
- [5] Joachim HAEGERLEIN. Holder and Modular Stacking System for Safely Storing and/or Transporting Frameless PV Modules or other Flat Cuboidal Bodies; US, 2011/0108498 A1 [P]. 2011.
- [6] Joachim HABERLEIN. Module Plug-in Apparatus and Method for Safe and Secure Storage of Horizontally Stacked Photovoltaic Modules During Transport; US, 2006/0005875 A1 [P]. 2006.
- [7] 王斌. 一种包装组件: 中国, 201338799Y [P]. 2009.
WANG Bin. A Packaging PV Module; CN, 201338799Y [P]. 2009.
- [8] International Safe Transit Association. 2009. <http://www.ista.org/>
- [9] 浦广益. ANSYS Workbench 12 基础教程与实例分析 [M]. 北京: 中国水利出版社, 2010.
PU Guang-yi. Basic Courses and Examples' Analysis of ANSYS Workbench 12 [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010.
- [9] HIBBELER R C. 工程力学-动力学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
HIBBELER R C. Engineering Mechanics-Dynamics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.