

木托盘 RFID 标签安装方式有限元分析及试验研究

唐英*, 毛讯辉, 孙汝

(北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

摘要: **目的** 采用仿真和试验手段并用的方法, 研究 RFID 标签在木质平托盘上的适用安装方式及其对使用性能的影响。**方法** 进行 Ansys 有限元仿真, 分析木质平托盘承载和冲击试验中采用螺钉紧固及黏结剂粘贴方式安装的 RFID 标签所受应力。作为对比, 在实验室进行实物试验, 测量 RFID 标签表面应力, 并测试标签读写性能。**结果** 在托盘承载和冲击试验中, 从 RFID 标签各构件及标签连接件的受力分析看, 2 种安装方式下的 RFID 标签均未出现脱落和物理性损坏。冲击试验后的 RFID 标签能够通过读写功能测试。有限元仿真与实物试验的应力分析结果相互吻合, 验证了结果的正确性。**结论** RFID 标签采用螺钉紧固和黏结剂粘贴的安装方式都能满足使用要求, 且螺钉连接的耐用性更好。研究结果为 RFID 标签在木质平托盘的安装方式选择提供了理论依据。

关键词: RFID 标签; 木托盘; 安装; 应力分析; RFID 读写试验

中图分类号: TB482.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)07-0166-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.07.021

Finite Element Analysis and Experimental Research on Installation Methods of RFID Tags on Wooden Pallets

TANG Ying*, MAO Xunhui, SUN Ru

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to study the installation method of RFID tags on wooden flat pallets and its influence on the performance of the tags by the means of simulation and experimental methods. By Ansys FEM simulation, stresses on the RFID tags which were installed on the wooden flat pallets by screw fastening and by adhesive bonding were analyzed while the pallets were subject to the loading and impacting tests. As a comparison, surface stresses on RFID tags and their Read/Write functions were measured and tested by experiments in lab. Seen from the stress analysis results about RFID tag's components and the fastening screw/ adhesive binder, the RFID tags under both installation methods had not fallen off or physically damaged. And the RFID tags kept their Read/Write functions. Stress analysis results obtained by FEM simulation and by experimental tests were consistent with each other. Thus, the correctness of these results was verified. It is illustrated that both screw fastening and adhesive bonding can meet the need of installing RFID tags on pallets. Screw fastening shows better durability. The result provides theoretical support for the selection of the installation method of RFID tags in wooden flat pallets.

KEY WORDS: RFID tag; wooden pallet; installation; stress analysis; RFID read-write test

我国正处于传统物流转型升级到智慧物流的关键时期^[1]。托盘作为全面连接物流资源的基础设备,

托盘的智能化发展是推动智慧物流的重要支撑^[2]。结合 RFID 应用的智能托盘实现托盘数据、物流数据和

收稿日期: 2023-09-01

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB1712902)

*通信作者

货物数据关联, 是物流可视化的基础^[3]。

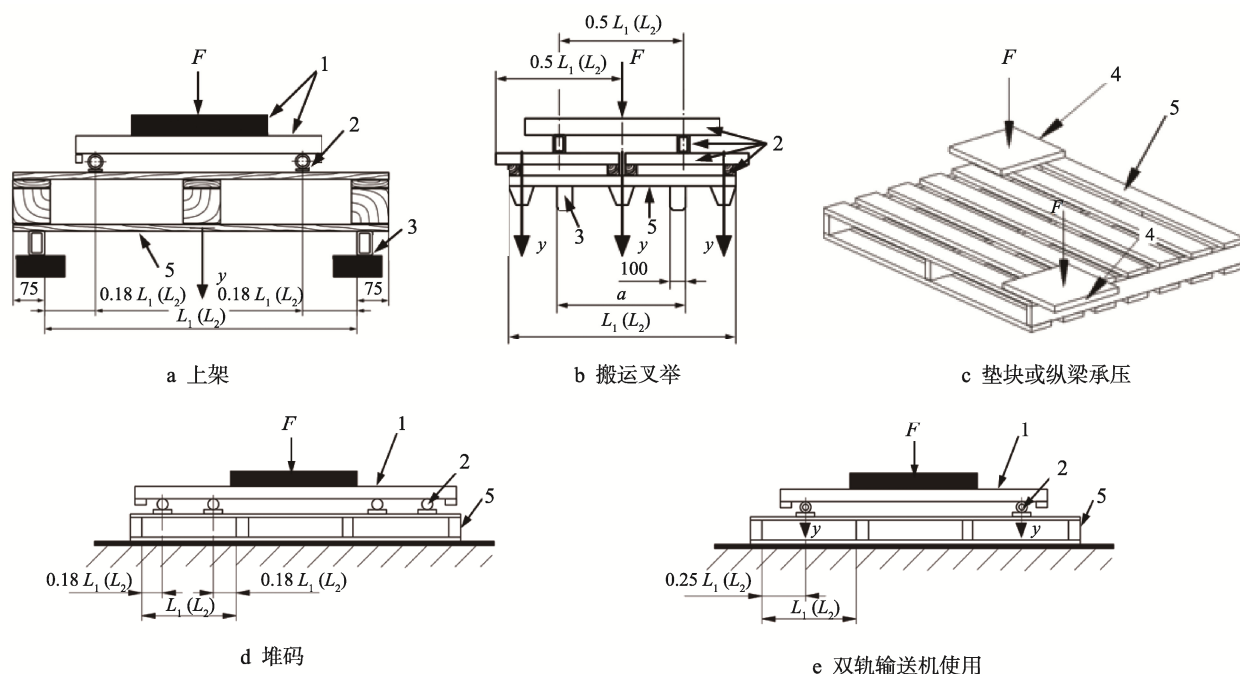
围绕 RFID 智能托盘研发的研究很多。郭凯等^[4]研究提高托盘 RFID 芯片读写成功率的方法。许明等^[5]研究基于 RFID 标签的托盘序列化和数字化管理。Zhong 等^[6]研究 RFID 托盘的仓储管理。Specter 等^[7]研究采用有源 RFID 对托盘进行实时监控、跟踪和追溯。迄今研究多集中在 RFID 托盘结构、识别率或管理应用等方面。未有涉及托盘上 RFID 标签安装问题。

市场上的智能托盘产品多采用粘贴、紧固和嵌入等方式安装 RFID 标签。塑料托盘常预留安装孔嵌入标签。木托盘多用紧固件紧固或黏结剂粘贴的方式安装标签。安装方式选择多凭经验或互相借鉴, 缺少理论依据。为此, 本文并用仿真和实验手段, 通过 RFID 标签受力分析和读写性能测试, 研究标签安装方式的

适用性。考虑到我国木托盘应用占比超过 80% 具有绝对优势, 本研究以木质平托盘的 RFID 标签安装为对象进行。

1 托盘使用工况分析

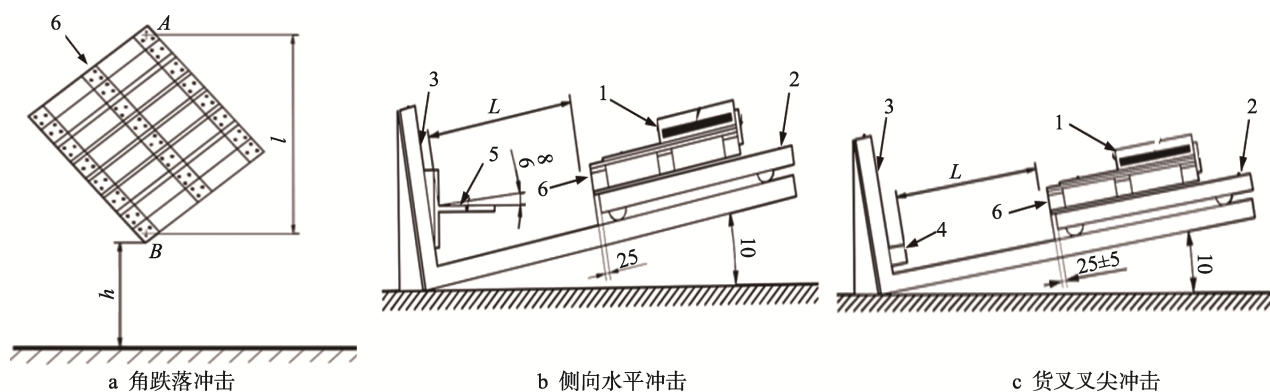
RFID 标签安装性能受托盘使用工况影响。GB/T 4996—2014《联运通用平托盘 试验方法》按托盘承载搬运作业, 将托盘正常使用工况分为上架、叉车等搬运叉举、垫块或纵梁承压、堆码以及上双轨输送机上使用, 见图 1。图中 y 为挠度, F 为施加载荷。考虑到托盘在使用过程中不可避免会受到各种冲击, 按照托盘受冲击部位分为角跌落冲击、侧向水平冲击和货叉叉尖冲击, 见图 2。



1.加载板; 2.加载杠; 3.支座; 4.加载头; 5.托盘。

图 1 托盘承载工况试验简图

Fig.1 Test diagrams of pallets under load conditions



1.负载; 2.台车; 3.冲击台及挡板; 4.撞击条; 5.冲击挡块; 6.托盘。

图 2 托盘冲击工况下的试验简图

Fig.2 Test diagrams of pallets under impact conditions

2 有限元模型建立

2.1 托盘模型建立

依据 GB/T 31148—2022《木质平托盘 通用技术要求》的规定,木质平托盘各构件参数及数量如表 1 所示。托盘总体尺寸为 1 200 mm×1 000 mm×156 mm。木质构件材料选择花旗松。花旗松^[8]的性能参数:密度为 590 kg/m³,弹性模量 $E_x=16\,400$ MPa、 $E_y=900$ MPa、 $E_z=1\,300$ MPa,泊松比 $\sigma_{xy}=0.37$ 、 $\sigma_{yz}=0.63$ 、 $\sigma_{zx}=0.42$,剪切弹性模量 $G_{xy}=1\,180$ MPa、 $G_{yz}=79$ MPa、 $G_{xz}=910$ MPa。使用 Solidworks 软件对托盘进行 3D 建模,见图 3。为简化模型,删除了托盘钉,各木质构件间接触为绑定^[9]。有限元仿真分析时采用默认尺寸对托盘进行自由网格划分,共划分 38 062 个节点,11 587 个单元。

表 1 托盘构件参数

Tab.1 Parameters of wooden pallet components

名称	数量	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm
顶铺板	11	1 000	90	20
纵梁板	3	1 200	90	23
垫块(中)	3	120	90	90
垫块(两侧)	6	160	90	90
底铺板	3	1 200	90	23

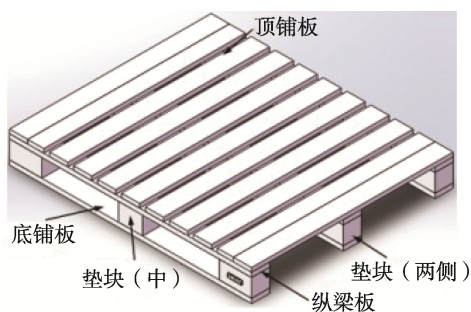


图 3 托盘 3D 模型
Fig.3 3D model of pallet

2.2 RFID 标签模型建立

智能托盘常用的超高频 RFID 标签中,PCB 标签因具有更好的抗氧化、耐高温及抗冲击性能并且生产成本较低而被使用广泛。如图 4 所示,PCB 抗金属标签一般采用多层 FR₄ 材料通过热层压的方式一次压铸成型,天线通过铝箔或铜箔蚀刻制成,芯片焊接在天线上并用环氧树脂灌封保护^[10]。

建立 RFID 标签 3D 模型见图 5,尺寸为 70 mm×20 mm×4 mm。FR₄ 封装材料简化为两层结构,尺寸为 70 mm×20 mm×2 mm,材料密度为 1 800 kg/m³,弹性模量为 11.1 GPa,泊松比为 0.28,屈服强度为 340 MPa^[11]。天线简化成空心方框,与其余各部分间接

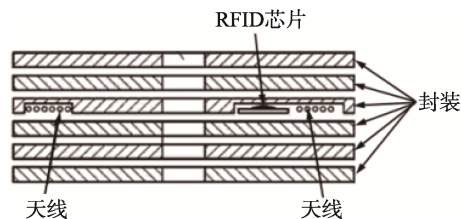


图 4 RFID 标签截面结构剖视图
Fig.4 Cross-sectional structure of RFID tag

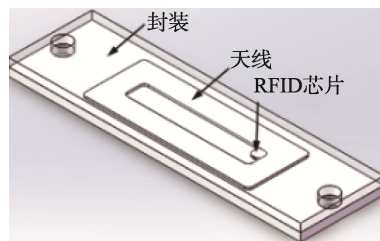


图 5 RFID 标签 3D 模型
Fig.5 3D model of RFID tag

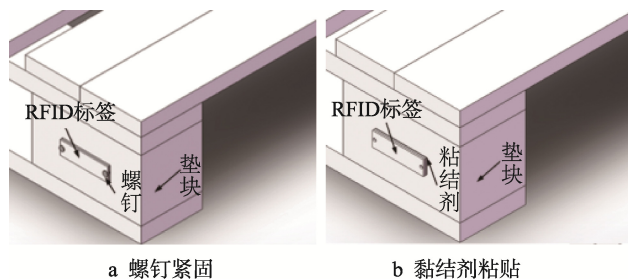
触设置为绑定。天线外圈尺寸为 40 mm×15 mm×1 mm,内圈尺寸为 30 mm×5 mm×1 mm。材料选择铝箔,密度为 2 700 kg/m³,弹性模量为 70 GPa,泊松比为 0.33,屈服强度为 40 MPa,极限强度为 90 MPa。RFID 芯片封装材料环氧树脂,尺寸为 2.5 mm×2.5 mm×1 mm,材料密度为 1 600 kg/m³,弹性模量为 1 GPa,泊松比为 0.38,屈服强度为 70 MPa^[12]。

标签两端预留螺钉安装孔,根据需要用螺钉或黏结剂安装。有限元分析模型中,采用六面体为主、四面体为辅的网格划分方法。网格尺寸选取时,通过不断加密网格,当加密后的模型最大应力和加密前相差小于 5%,则选用此网格尺寸。最终确定 RFID 标签封装材料的网格尺寸为 1 mm,天线的网格尺寸为 0.25 mm,芯片的网格尺寸为 0.25 mm。

2.3 RFID 标签安装及模型建立

智能托盘产品上 RFID 标签多安装在托盘垫块立面上,且安装部位多有开槽结构保护 RFID 标签。为减小模型复杂度并提高计算效率,图 3 建模时进行简化,去除垫块表面 RFID 安装槽。

采用螺钉安装 RFID 标签(见图 6a)时,螺钉简化为光滑平头圆柱。螺钉规格为 M 3×10。螺钉的光滑平头圆柱与托盘木质构件以及 RFID 标签接触设置为摩擦,通过设置摩擦因数产生的摩擦力模拟握钉力。其静摩擦因数为 0.53,动摩擦因数为 0.2^[8];螺钉与标签接触为摩擦,其静摩擦因数为 0.6,动摩擦因数为 0.4^[13];标签与托盘木质构件接触为摩擦,其静摩擦因数为 0.68,动摩擦因数为 0.45^[13]。螺钉材料为钢材,密度为 7 850 kg/m³,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,极限强度标准值为 375 MPa。通过不断加密网格,确定螺钉网格尺寸为 1 mm。



a 螺钉紧固

b 黏结剂粘贴

图 6 RFID 标签安装建模

Fig.6 Installation modeling of RFID tag

采用黏结剂安装 RFID 标签 (见图 6b) 时, 黏结剂与标签、黏结剂与托盘木质构件接触均为绑定。黏结剂选择热熔胶, 其材料与 RFID 芯片封装材料相同。依据 GB/T 4996—2014 的规定, 托盘试验在环境温度 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 范围内进行。此时黏结剂黏结强度主要以剪切强度、拉伸强度和剥离强度为主。三者与被粘物厚度成正比, 根据其关系曲线^[14-15]与标签厚度得到剪切、拉伸和剥离强度分别为 24.25、37.63 和 72.93 MPa。本文取其中最小值剪切强度作为判断黏结剂失效的黏结强度为 24.25 MPa。仿真结果中黏结剂所受最大剪切应力与该黏结强度值进行比较, 判断标签是否脱落。黏结剂整体尺寸为 70 mm×20 mm×1 mm, 通过不断加密网格, 确定网格尺寸为 0.25 mm。

3 有限元仿真及试验结果分析

有限元仿真分析时, 通过用螺钉和黏结剂的受力超过各自极限强度和黏结强度来判断标签脱落, 通过标签封装及天线的受力超过各自的屈服强度来判断标签物理性损坏。其中, RFID 芯片环氧树脂封装

对芯片具有保护、支撑和散热作用, 通过封装受力超过其屈服强度判断芯片的失效情况^[11]。有限元仿真分析无法判断标签读写功能异常。在实物对比试验中, 直接观察标签与托盘的脱离和损坏现象, 使用手持终端测试标签读写功能。

3.1 RFID 标签受力的有限元仿真分析

仿真依据 GB/T 4996—2014 中规定各个工况的试验方法和步骤进行。由于篇幅所限, 选择上架和角跌落 2 种工况说明有限元仿真分析的过程和结果。图 7 是上架有限元仿真模型。通过在加载杠施加载荷模拟托盘载货, 施加载荷 1 000 kg。支座模拟储存托盘的货架, 接触设置为固定约束。仿真可得到托盘、标签以及连接件的等效应力云图和剪切应力云图。这里首先展示螺钉紧固和黏结剂粘贴的标签各构件等效应力云图结果, 见图 8 和图 9。图 10 是角跌落有限元仿真模型。试验时将托盘按对角线方向提升至离地面 0.5 m。结果见图 11 和图 12。

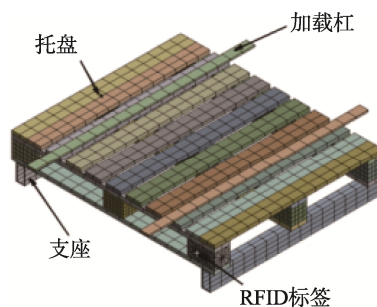


图 7 上架有限元仿真模型

Fig.7 FEM simulation model of shelf storage

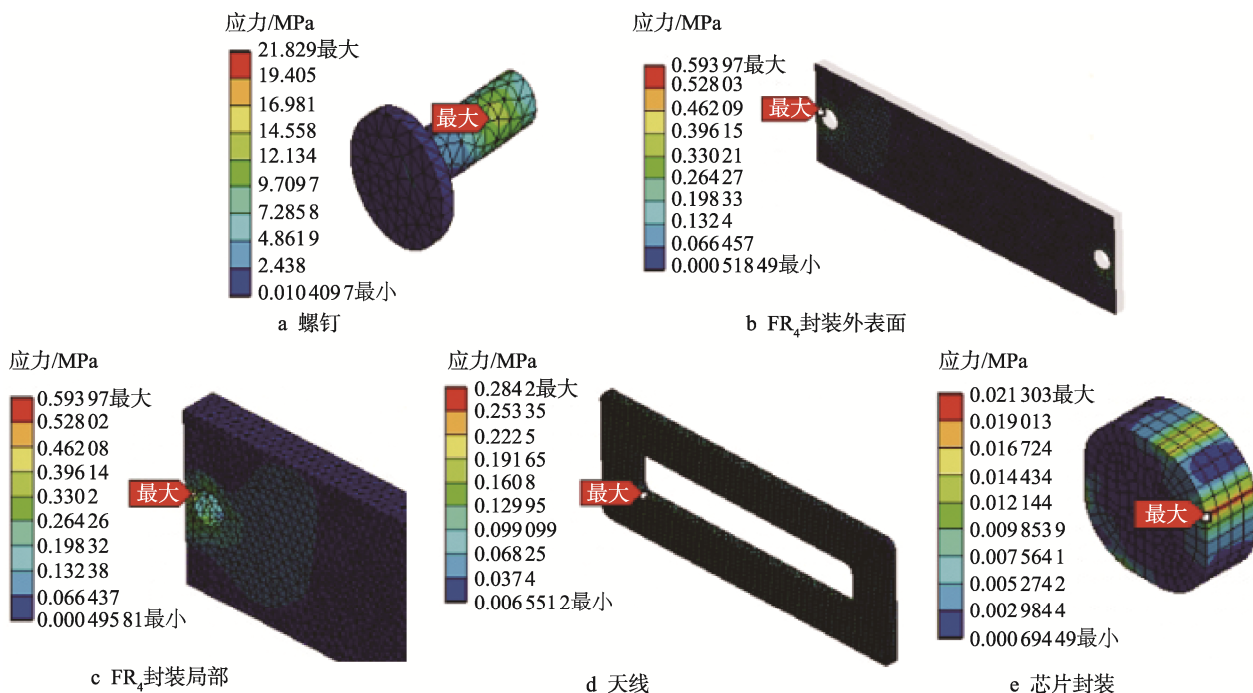


图 8 上架时 RFID 标签采用螺钉安装时的等效应力云图

Fig.8 Equivalent stress diagram of RFID tag when it is mounted with screws during shelf storage

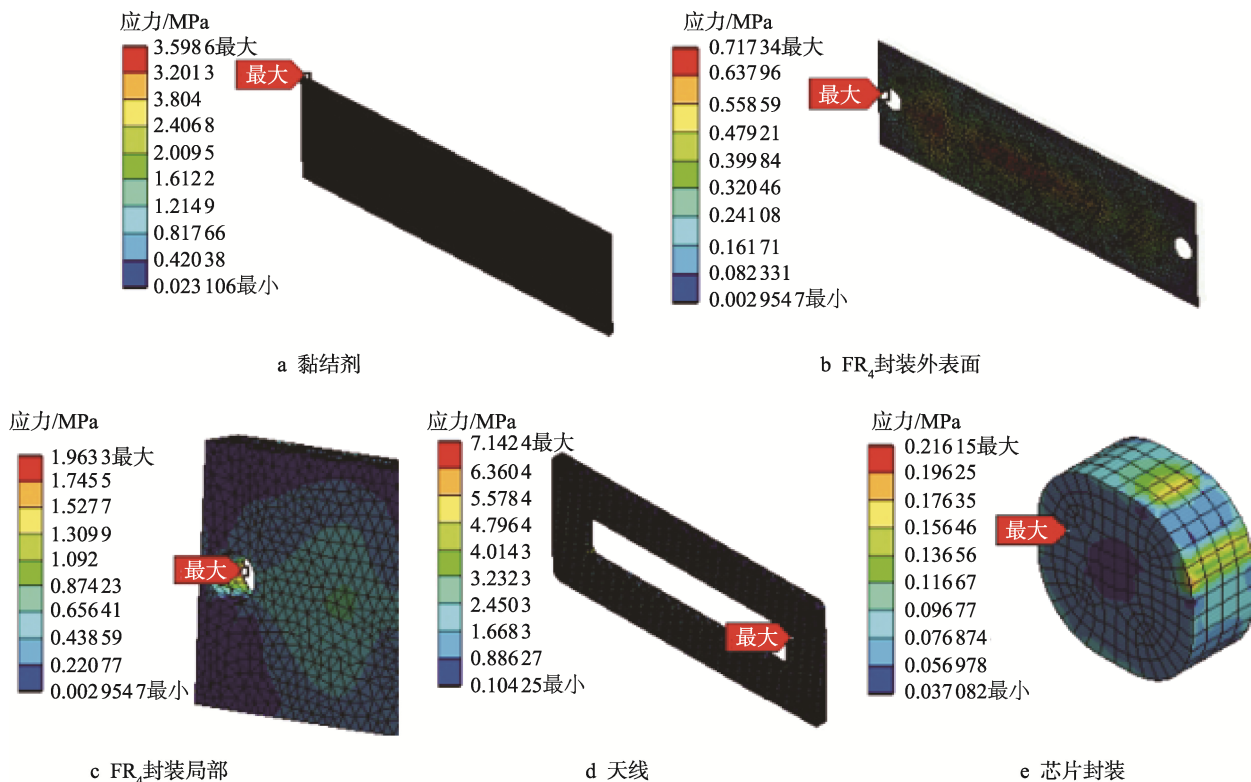


图9 上架时 RFID 标签采用黏结剂粘贴时的等效应力云图
Fig.9 Equivalent stress diagram of RFID tag stuck with adhesive during shelf storage

从图 8~12 可知,等效应力云图能反映 2 种工况中连接件及 RFID 标签各构件上产生的应力集中区域及最大应力值。在此基础上,汇总图 1 和图 2 所有承载和冲击工况下仿真试验中 RFID 标签各构件及连接件上的等效应力最大值,结果如表 2 所示。需要说明的是,在本研究的所有冲击试验中,RFID 标签均布置在最靠近托盘受冲击点的垫块外立面上。RFID 标签离冲击点越近越容易受损。

由表 2 可以看出,所有试验中作为连接件的螺钉所承受的最大等效应力未超过其极限强度,说明 RFID 标签采用螺钉紧固安装方式时所有试验中均未从托盘脱落。同时,所有试验中的 FR₄ 封装材料、芯片环氧树脂封装材料以及采用螺钉安装方式时 RFID 标签中的天线,所受等效应力均小于各自屈服强度,说明均未产生塑性变形。不过,在角跌落试验中,采用黏结剂粘贴安装的 RFID 标签中的天线所受等效应力超过其屈服强度但并未超过其极限强度,说明天线发生了塑性变形但未断裂。

对比表 2 的数值还可以看出,在冲击工况中,天线和芯片在 RFID 标签采用黏结剂粘贴安装时所受等效应力均大于 RFID 标签采用螺钉安装方式时所受等效应力;并且采用黏结剂安装时还出现天线产生塑性变形的情况。说明采用黏结剂安装时 RFID 标签各构件更易产生物理性损坏。而且,冲击试验时标签封装和天线所受等效应力均远大于承载工况所受等效

应力,说明冲击工况比承载工况更容易导致 RFID 标签物理性损坏或脱落。

同时,通过有限元分析也能够得到各工况试验下 RFID 标签黏结剂所受剪切应力云图,其中托盘上架和角跌落试验中的结果如图 13 所示。汇总所有工况中黏结剂所受剪切应力最大值见表 3。

从表 3 可看出,所有试验中黏结剂所受最大剪切应力均未超过其黏结强度,说明 RFID 标签均未从托盘脱落。结合表 2 汇总结果可知,2 种安装方式的 RFID 标签均不会从托盘脱落,但冲击工况中采用黏结剂安装时 RFID 标签各构件易产生物理性损坏,螺钉紧固安装方式的耐用性更好。

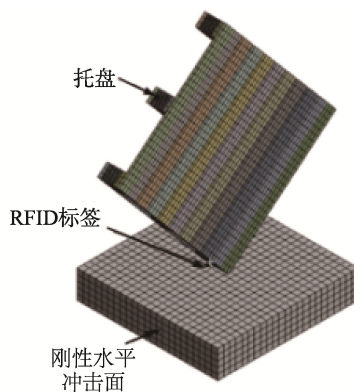


图10 角跌落有限元仿真模型
Fig.10 FEM simulation model of angular drop

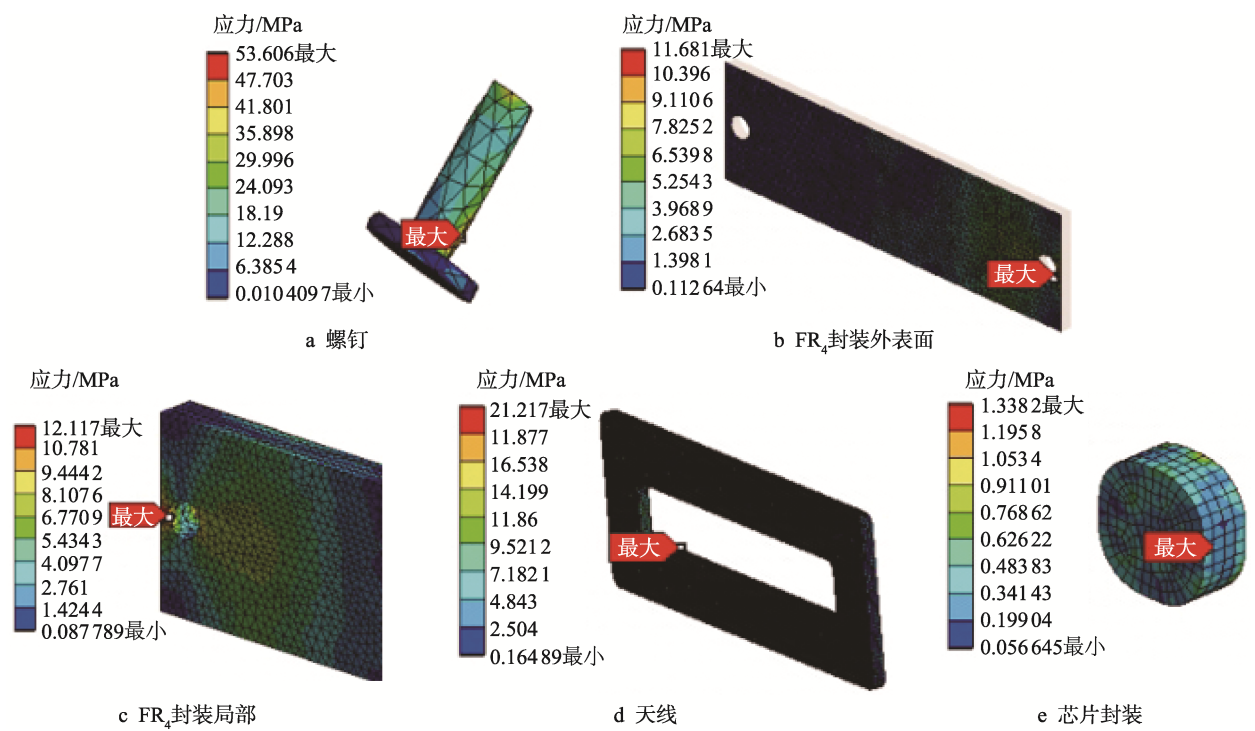


图 11 角跌落时 RFID 标签采用螺钉安装时的等效应力云图
Fig.11 Equivalent stress diagram of RFID tag when it is installed with screws under angular drop

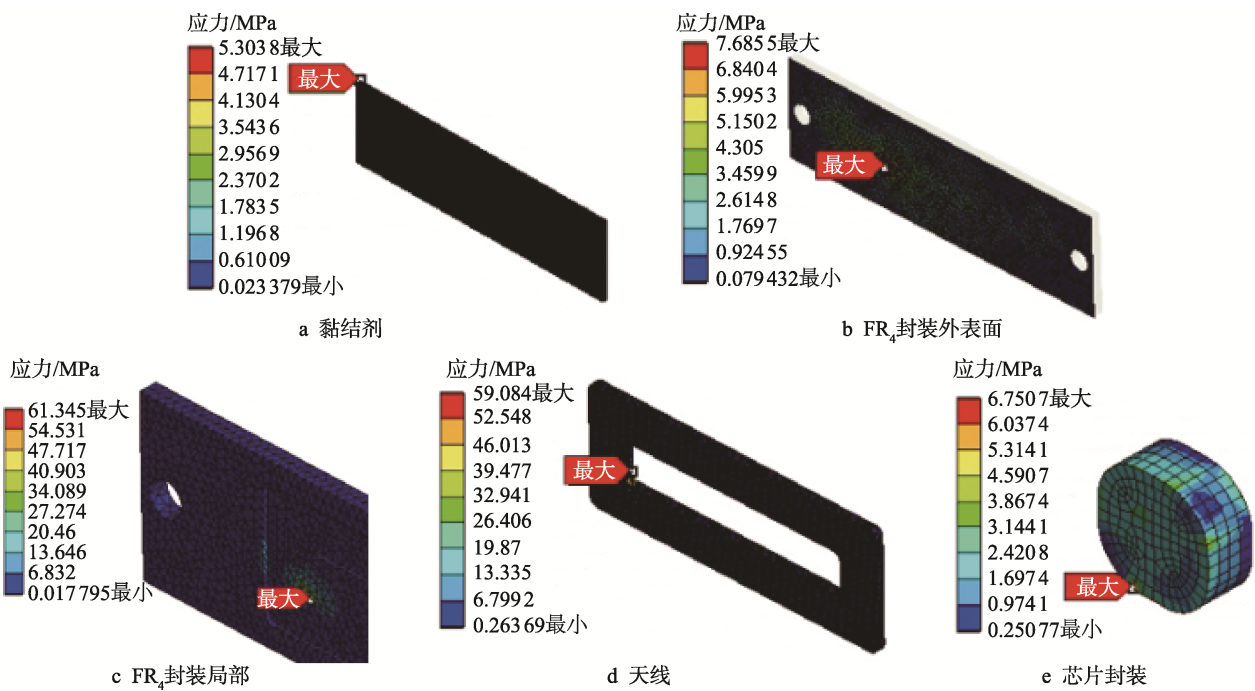


图 12 角跌落时 RFID 标签采用黏结剂粘贴时的等效应力云图
Fig.12 Equivalent stress diagram of RFID tag when it is stuck with adhesive under angular drop

3.2 RFID 标签受力的实物试验

依据 GB/T 4995—2014 进行冲击试验的现场见图 14。其中,角跌落冲击试验使用吊具提升托盘进行试验见图 14a,冲击试验均在冲击试验台上进行见图 14b。试验前将平面尺寸为 25 mm×5 mm 的应变片粘贴在 RFID

标签外表面中心位置。试验中使用动态应变仪采集 RFID 标签表面应力。应变片为霍丁格必凯(苏州)电子测量技术有限公司的单直片型号应变片,动态应变仪为协力科技开发有限公司的 XL2102A 型号产品。对比应变片测量和有限元仿真的标签外表面应力结果可知,两者相符时,说明 3.1 节中的有限元仿真分析结果是可信的。

表 2 RFID 标签各部所受等效应力最大值的仿真结果
Tab.2 Simulation results of the maximum equivalent stress on each part of RFID tag MPa

试验项目	螺钉紧固				黏结剂粘贴			
	螺钉	FR ₄ 封装	天线	芯片封装	黏结剂	FR ₄ 封装	天线	芯片封装
上架	21.83	0.59	0.28	0.02	3.60	1.96	7.14	0.22
叉举	85.34	0.95	0.42	0.03	3.87	2.21	8.24	0.32
承压	17.25	0.74	0.97	0.21	6.54	5.24	9.43	0.74
堆码	23.04	0.48	0.25	0.03	4.63	3.35	9.14	0.30
双轨输送	74.25	2.27	0.47	0.09	5.12	1.83	7.74	0.24
角跌落	53.61	12.12	21.22	1.34	5.30	61.35	59.08	6.76
水平冲击	165.24	43.63	16.36	1.42	8.27	46.52	38.54	2.84
叉尖冲击顶铺板	61.35	11.14	11.46	0.87	8.79	60.83	36.27	3.63
叉尖冲击垫块	135.03	39.24	17.26	1.67	7.58	51.24	30.04	2.54

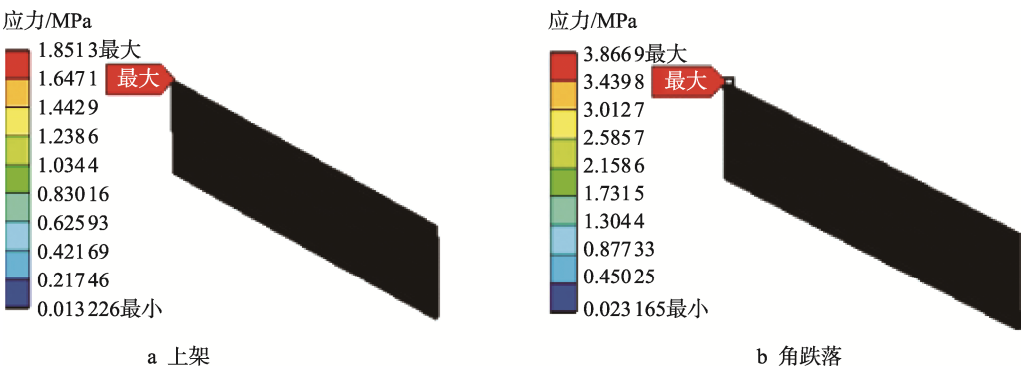


图 13 上架和角跌落时黏结剂剪切应力云图
Fig.13 Diagram of shear stress of adhesive during shelf storage and under angular drop

表 3 黏结剂所受剪切应力最大值的仿真结果
Tab.3 Simulation results of maximum shear stress on adhesive

试验项目	应力/MPa
上架	1.85
叉举	2.13
承压	6.21
堆码	3.76
双轨输送	3.45
角跌落	3.87
水平冲击	7.25
冲击顶铺板	6.04
冲击垫块	5.86



图 14 试验现场及关键设备
Fig.14 Test site and key equipment

在上述各项冲击试验中通过直接观察看到，RFID 标签均未从托盘脱离，标签外观也未发现物理损坏痕迹。这与 3.1 节中的有限元仿真分析的结果一致。为方便受力对比分析，将各项冲击试验中由动态应变仪测得和有限元仿真得到的 RFID 标签 FR₄封装外表面应力变化曲线合并绘制在一个图中，如图 15 所示。可以看出，试验曲线和仿真曲线从变化规律上有较好的吻合度。从曲线获得表面应力最大值并汇总于表 4。计算求得仿真和试验中的表面应力最大值的最大相对误差为 20.47%。仿真与试验结果在误差允许范围内具有一定的可信度，相互验证了结果的正确性。在图 14 和表 4 中仿真结果最大值均小于试验结果，可以考虑是因有限元模型简化造成。例如，RFID 标签模型中层压封装材料 FR₄简化为上下两层结构且设置为绑定，托盘模型中删除了托盘钉且各木质构件间接触设置为绑定等，这样的简化会有利于 RFID 标签以及托盘的强度和稳定性的增加，从而减小应力。

3.3 RFID 标签读写功能试验

本研究采用 CHAINWAY 公司的 C72 型号手持终端产品测试标签的读写功能。具体过程：在进行 3.2 节中的各项冲击试验之前，用手持终端向标签中写入编码；待冲击试验结束后，再用手持终端读取标签的编码数据。对比写入和读出的编码数据的一致性，判断标签读写功能是否正常。

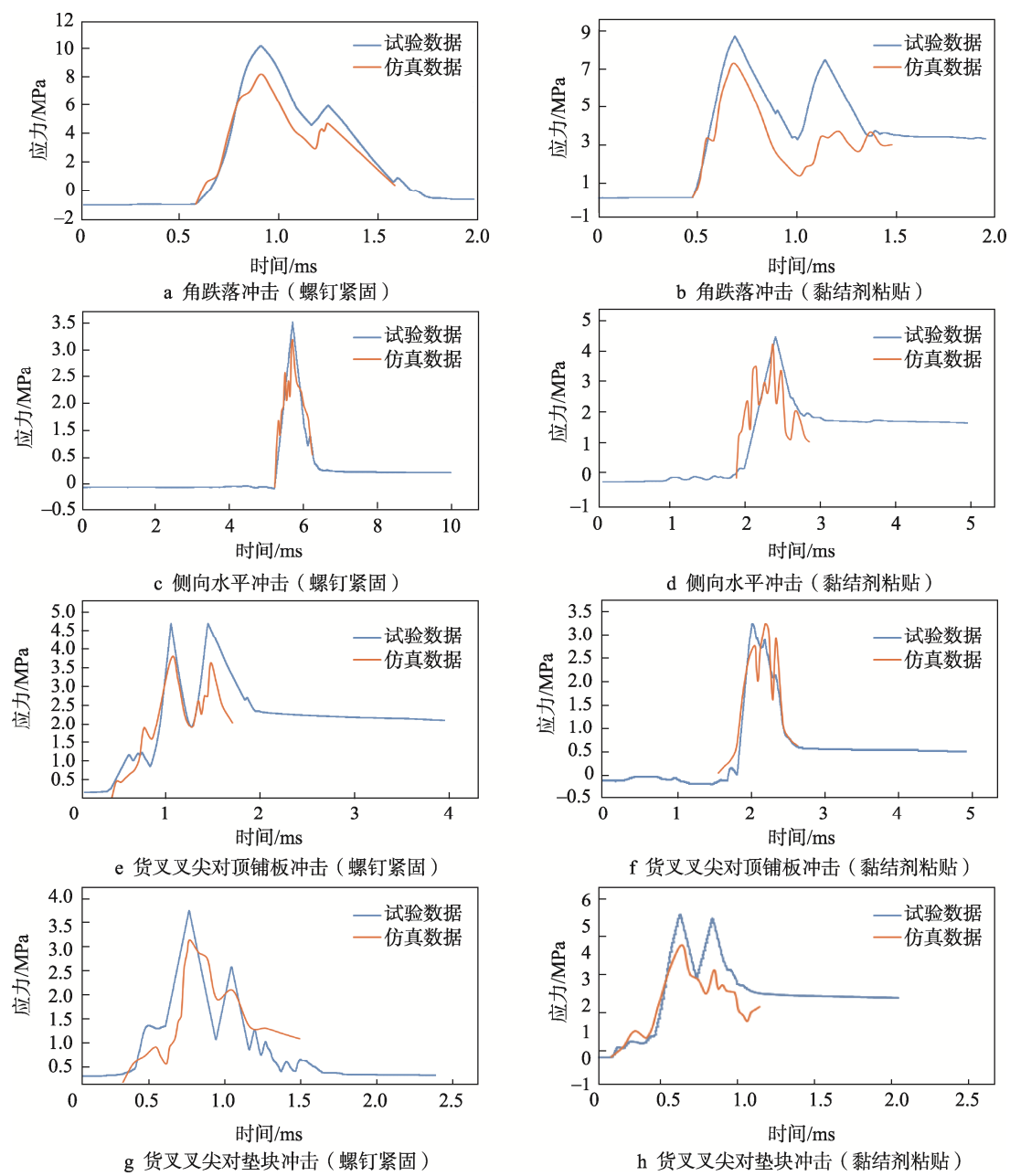


图 15 冲击试验标签表面应力曲线对比
Fig.15 Contrast diagram of surface stress curve of impact test label

表 4 RFID 标签表面应力最大值的仿真与试验结果
Tab.4 Maximum surface stress of RFID tag obtained in simulation and test

试验项目	螺钉安装/MPa			黏结剂安装/MPa		
	仿真结果	试验结果	相对误差/%	仿真结果	试验结果	相对误差/%
角跌落冲击	10.21	11.90	14.20	7.69	8.68	11.41
侧向水平冲击	3.23	3.41	5.28	4.52	4.60	1.74
货叉叉尖冲击顶铺板	3.95	4.46	11.43	3.25	3.40	4.41
货叉叉尖冲击垫块	3.51	3.79	7.39	4.39	5.52	20.47

图 16 所示为各次托盘冲击试验完成后,手持终端从 RFID 标签读取的编码数据:(8003)06900001000013230000000001。与预先写入的编码数据一致。所有标签均通过了读写功能测试。从 RFID 标签

读写功能试验也可以看出,虽然 RFID 标签受力的仿真分析结果显示,角跌落试验中标签天线发生了塑性变形,但因为天线没有折断,标签仍能进行正常的读写工作。

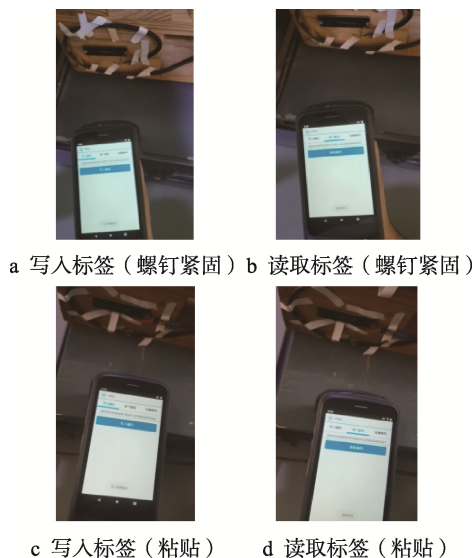


图 16 RFID 标签读写性能测试
Fig.16 Read/write test of RFID tag

4 结语

本文研究 RFID 标签在木质平托盘上的适用安装方式及其对使用性能的影响,采用 Ansys 有限元仿真与实物试验的手段,分析了木质平托盘在进行各承载试验和冲击试验时托盘上安装的 RFID 标签各构件与标签安装用连接件的受力情况。力学分析的结果表明,螺钉紧固和黏结剂粘贴这 2 种安装方式下的 RFID 标签均不会出现脱落和物理性损坏。RFID 标签读写功能试验表明,各项试验后 RFID 标签读写功能正常。由此可以得出结论,在木制平托盘上 RFID 标签采用螺钉紧固和黏结剂粘贴的安装方式都能满足使用要求。考虑到托盘角跌落冲击造成粘贴安装的 RFID 标签天线出现了塑性变形的现象,对比而言,螺钉连接的耐用性更好。本文的力学分析结果为 RFID 标签在木质平托盘的安装方式选择提供了理论依据。

参考文献:

- [1] HU H. Exploration of Fruits and Vegetable Distribution in Chongqing Based on the Intelligent Logistics Model[J]. Academic Journal of Business & Management, 2023, 5(14): 9-14.
- [2] MICHEL R. Voice Efficiency Meets Smart Pallet Builds[J]. Modern Materials Handling, 2022, 77(2): 54-55.
- [3] WU C H, TSANG Y P, LEE C K, et al. A Blockchain-IoT Platform for the Smart Pallet Pooling Management[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(18): 6310.
- [4] 郭凯, 胡安琪. 提升件烟托盘 RFID 芯片读写成功率的技术方案研究[J]. 物流技术与应用, 2021, 26(10): 182-186.
- [5] 许明, 董静, 徐艳秋. 基于 RFID 技术的智能物流托盘开发与应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(13): 156-157.
- [6] XU M, DONG J, XU Y Q. Development and Application of Intelligent Logistics Pallet Based on RFID Technology[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2021(13): 156-157.
- [7] ZHONG L G, FENG H Y, LIU M. Development of RFID Cigarette Pallet Warehouse System[J]. Advanced Materials Research, 2013, 2450: 712-715.
- [8] SPECTER P S. Monitor Products with Active RFID Pallet[J]. Modern Materials Handling, 2019, 74(4): 14.
- [9] 唐英, 李阳, 凌鉴, 等. 木质平托盘抗冲击性能有限元分析及试验研究[J]. 包装工程, 2022, 43(13): 124-134.
- [10] TANG Y, LI Y, LING J, et al. Finite Element Analysis and Experimental Study on the Performance of Resistance to Impact of Wooden Flat Pallets[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(13): 124-134.
- [11] 葛笑, 沈丹丹, 何小云, 等. 木托盘有限元分析自动化[J]. 包装工程, 2020, 41(5): 158-164.
- [12] GE X, SHEN D D, HE X Y, et al. Finite Element Analysis Automation of Wooden Pallets[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(5): 158-164.
- [13] PEKGOR M, ARABLOUEI R, NIKZAD M, et al. Displacement Estimation Using 3D-Printed RFID Arrays for Structural Health Monitoring[J]. Sensors, 2022, 22(22): 8811.
- [14] QIN D, XIAO Y, LIANG K. Characterization of A Novel FR4/AlN Printed Circuit Board of High Thermal Conductivity[J]. Advances in Materials, 2018, 7(2): 26-33.
- [15] 田青, 魏晓慧, 王优, 等. SiO₂ 包裹纳米 Cu 粒子/环氧树脂复合材料及其在芯片封装领域的应用[J]. 现代制造工程, 2020(5): 85-91.
- [16] TIAN Q, WEI X H, WANG Y, et al. Heat Dissipation Composites Prepared by SiO₂ Coated Cu Nanoparticles[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(5): 85-91.
- [17] 王尚东. 摩擦力矩负载模拟器摩擦性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [18] WANG S D. Research ON THE Friction Performance of Friction Torque Load Simulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [19] 潘现路. 金属铝/ABS 塑料复合用热熔胶的制备与性能研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2017.
- [20] PAN X L. Preparation and Characteristic of Hot Melt Adhesives for Metal-to-ABS Plastic Bonding[D]. Shanghai: East China Insititute of Techn, 2017.
- [21] 靳洪飞, 李文风, 孙达, 等. 增粘树脂对 EVA 热熔胶性能的影响[J]. 合成材料老化与应用, 2021, 50(3): 21-24.
- [22] JIN H F, LI W F, SUN D, et al. Effect of Different Tackifying Resins on Properties of EVA Hot Melt Adhesive[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2021, 50(3): 21-24.