

结构设计制造

钢化玻璃运输包装设计与有限元分析

李琛, 牛美亮, 赵玉松
(东北林业大学, 哈尔滨 150040)

摘要: **目的** 以钢化玻璃为研究对象, 设计安全合理的运输包装, 并对其保护性能进行有限元分析。**方法** 选择包装材料, 设计运输包装各组件的结构及尺寸, 利用 Pro/E 建立运输包装模型, 利用 Ansys Workbench 模型进行静态堆码载荷仿真分析、模态仿真分析、随机振动仿真分析。**结果** 通过静态堆码仿真得到等效应力最大值发生在松木托盘处, 为 0.506 MPa, 远小于松木的屈服极限 (10.47 MPa); 等效应变最大值为 0.0044, 换算成包装件变形为 2.31 mm, 小于包装件允许变形量为 4.2 mm; 模态仿真分析得到包装件的工作频率为 42.2, 44.8, 51.2, 52.6, 69.5, 69.8 Hz, 避开了汽车公路运输车的共振频率 2 Hz 和 10 Hz; 在随机振动仿真分析中, 包装件在 y 方向位移为 0.037 mm, 远小于包装件允许变形量。**结论** 通过仿真分析可以判定所设计的钢化玻璃运输包装方案合理, 能够在运输过程中有效保护钢化玻璃的安全。

关键词: 钢化玻璃; 运输包装设计; Pro/E; Ansys Workbench

中图分类号: TB482.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)15-0113-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.15.017

Transportation Package Design and Finite Element Analysis of Tempered Glass

LI Chen, NIU Mei-liang, ZHAO Yu-song
(Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

ABSTRACT: The work aims to design safe and reasonable transportation package, and conduct the finite element analysis on its protection performance, with tempered glass as the research object. Packaging materials were chosen to design the structure and size of each component of the transportation package. Pro/E was used to establish the transportation package model. The static stacking load simulation analysis, modal simulation analysis and random vibration simulation analysis were carried out with the Ansys Workbench model. The maximum equivalent stress resulting from the static stacking simulation occurred at the pine pallet, and it was 0.506 MPa and far less than the yield limit (10.47 MPa) of pine. The maximum equivalent strain was 0.0044, which was 2.31 mm converted into package deformation, and it was less than the allowable package deformation value (4.2 mm). The modal simulation analysis showed that the operating frequency of the package was 42.2, 44.8, 51.2, 52.6, 69.5 and 69.8 Hz, which avoided the resonance frequency (2 Hz and 10 Hz) of the automobile on road. In the random vibration simulation analysis, the displacement of the package in the y direction was 0.037 mm, which was much smaller than the allowable package deformation value. Through simulation analysis, it can be determined that the designed transportation package scheme of the tempered glass is reasonable, which can effectively protect the tempered glass during transportation.

KEY WORDS: tempered glass; transportation package design; Pro/E; Ansys Workbench

钢化玻璃是指玻璃经强化处理, 在表面上形成压应力层, 从而具有良好力学性能和耐热震性能的

玻璃^[1], 其广泛应用于建筑、汽车、生产等领域。钢化玻璃的强度比普通玻璃高但也更脆, 硬物敲击边角

收稿日期: 2018-3-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (2572018BL07); 哈尔滨市应用技术与开发项目 (2015RQXJ037); 东北林业大学 2016 年度专业建设项目

作者简介: 李琛 (1979—), 女, 博士, 东北林业大学副教授, 主要研究方向为运输包装技术。

能轻易破坏整块玻璃,因此在流通过程中,容易受到外界的冲击发生破碎,导致运输成本和破碎率居高不下,据统计在我国钢化玻璃运输成本可达40%,破损率可达8%^[2-4],因此,优化钢化玻璃运输包装设计成为亟待解决的问题。

目前钢化玻璃的运输包装形式包括:木箱包装、钢木箱包装、玻璃裸装以及钢架支撑。木箱包装是比较原始的一种形式,玻璃与玻璃之间用秸秆或者泡沫进行缓冲。采用木材和钉子制做外箱,成本较低,制作简单^[5-6]。其缺点在于:制造木箱时,锤子的力度和角度、木材节子的位置、外界环境等都会对木箱强度造成一定的影响;装卸过程中因木条断裂等突发状况的对玻璃造成的伤害很大;消耗大量木材,重复利用率低;对出口产品的木箱必须经过高温、熏蒸或防腐剂处理,提高了包装成本。钢木箱包装是利用矩形钢连接成骨架,在6个面上加上胶合板,最后用螺栓加以固定。外箱整洁美观,可喷涂印刷,具有良好的堆栈性能,坚固耐用,并且为出口免检产品^[7-8],但是,其包装箱质量较大,不方便拆卸,一次性使用成本较高,并且受潮后内部玻璃容易发生霉变。玻璃裸装指不用包装箱等其他包装容器,四角用缓冲材料包裹,将几片玻璃直接利用打包带捆扎的包装形式^[9]。不用钉子和包装材料,降低包装成本,但是破损率很高,不适合长距离运输。钢架支撑使用钢材制成“L”型集装架、“A”型集装架、“H”型集装架,运输过程中对玻璃提供支撑保护。这种形式仅适合少量产品的运输,主要在生产厂内或者短途运输中使用^[9-10]。综上所述,我国钢化玻璃的运输包装形式比较落后,破损率较高,浪费木材资源。采用其他包装材料替代或减少木材使用,同时提高保护性能降低破损率是十分必要的。

该设计采用3A型瓦楞纸板制做外箱,底部木质托盘提高承载能力,钢带捆扎固定的运输包装结构^[11]。这种纸木混合包装形式主要优势在于:相比一些全木箱、钢木箱包装,减少木材使用,重量减轻,降低制造成本和物流成本;包装件的组装过程不需要焊接和钉接,简化组装工序;瓦楞纸板做外围,印刷适应性好,可展示必要的产品信息和运输标识;3A型瓦楞纸板,材料强度高,且可回收利用;缓冲材料采用生物质材料聚氨酯泡沫,其生产和回收利用过程减少环境污染。该设计采用理论计算与仿真分析相结合的方式,检验运输包装设计的合理性与安全性。

1 运输包装设计

运输包装设计包括缓冲材料尺寸和结构设计,外包装箱尺寸和结构设计,其理论计算过程内容繁杂,基于篇幅限制,在此仅列出衬垫和纸箱的结构尺寸^[12]。

1.1 运输包装箱材料

研究对象为平面钢化玻璃尺寸为590 mm×430 mm×10 mm,每箱11片,总质量为64 kg。选择缓冲材料为密度0.03 g/cm³聚氨酯泡沫,托盘为松木,3A楞瓦楞纸板作为纸箱底板、侧板和上盖,打包带为镀锌钢带。

2.2 缓冲衬垫设计

缓冲衬垫由上部护角、护边衬垫和底部护角组成。

2.2.1 上部护角设计

上部护角Ⅰ尺寸460 mm×60 mm×20 mm,上部护角Ⅱ尺寸460 mm×60 mm×40 mm,倒角角度为60°,倒角边长度为3 mm,共11个模切位置。上部护角Ⅰ和上部护角Ⅱ通过热粘合进行组合,以确保在运动中玻璃边角不会因为互相接触而破损。上部护角Ⅰ和上部护角Ⅱ组合后,见图1。

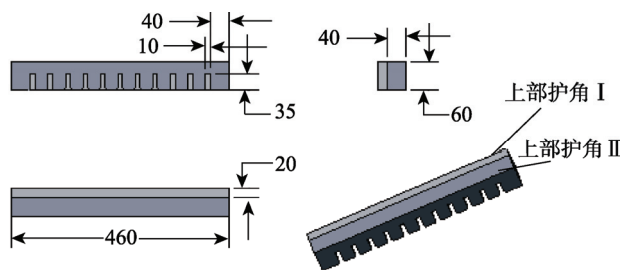


图1 上部护角三视图

Fig.1 Upper corner three-view drawing

2.2.2 护边衬垫设计

护边衬垫尺寸为460 mm×60 mm×80 mm,由于模切机的模切深度在40 mm左右,因此护边衬垫用厚度为40 mm的2层聚氨酯泡沫热粘合组成,倒角角度为60°,倒角边长度为3 mm,共11个模切位置,其结构见图2。护边衬垫使玻璃在运输过程中保持平衡状态,防止玻璃倾斜,同时它是上盖和玻璃之间的缓冲垫,将外力均匀分布在玻璃上,防止受力集中造成玻璃破损。

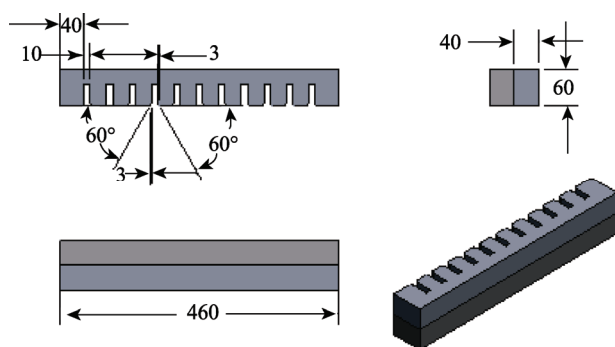


图2 上部护边三视图

Fig.2 Upper guard three-view drawing

2.2.3 底部护角设计

- 1) 底部护角 I 厚度为 40 mm，作为底边缓冲装置的最外面护边，以隔离瓦楞纸箱侧板和玻璃。
- 2) 底部护角 II 尺寸为 460 mm×120 mm×20 mm，作为缓冲装置背面。
- 3) 底部护角 III 厚度为 27 mm，作为底边缓冲装置的玻璃之间的间隔。玻璃之间如果不隔开的话，容易发生玻璃粘连，造成对商品的伤害。
- 4) 底部护角 IV 尺寸为 460 mm×25 mm×90 mm，作为缓冲装置底面。

底部护角由底部护角 I、护角 II、护角 III 和护角 IV 热粘结组合，其结构见图 3。在粘结的过程中护角 I 与护角 III、护角 III 与护角 III 之间的空隙都是 10 mm，既保证玻璃能低阻力地放入，又能起到固定位置的作用。

2.3 瓦楞纸箱设计

瓦楞纸箱上盖尺寸为 735 mm×535 mm×82.5 mm，上盖成型采用钉合方式，U 型镀锌钢钉，斜向钉合，钉数定为 2 个，钉宽约 35 mm，脚长选择 16 mm 规格，钉距 40 mm，距两端 25 mm，上盖结构见图 4。

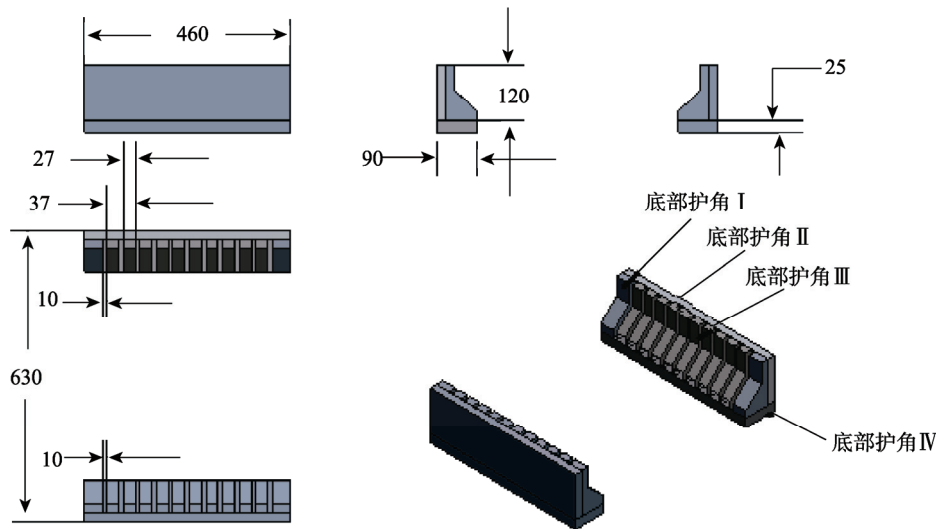


图 3 底部护角三视图
Fig.3 Bottom corner three-view drawing

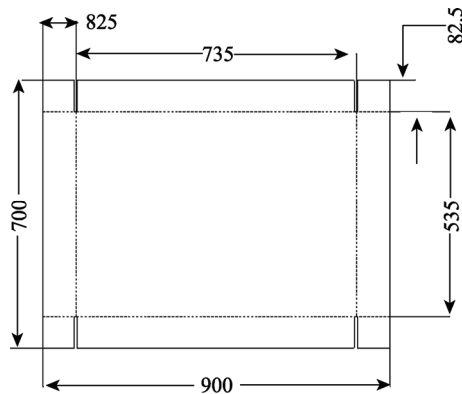


图 4 瓦楞纸箱上盖板结构
Fig.4 Structure of corrugated box upper cover plate

瓦楞纸箱侧板采用二页式，侧板尺寸为 645 mm×475 mm×505 mm，瓦楞纸箱侧板结构见图 5。侧板采用钉合方式，采用 U 型镀锌钢钉，斜向钉合，钉数定为 7 个，钉宽约 35 mm，脚长选择 16 mm 规格，钉距 70 mm，距两端 40 mm。

底拖主要承载部件是托盘，托盘与缓冲衬垫之间放置一层 3A 瓦楞纸板，保证运输过程中整体结构稳定。为了使过渡平缓，底托尺寸为 630 mm×460 mm×20 mm。

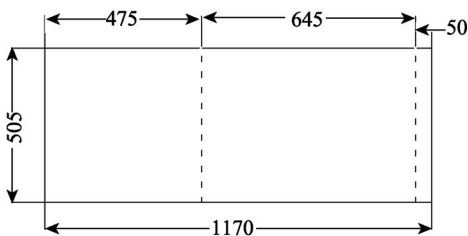


图 5 瓦楞纸箱侧板结构
Fig.5 Structure of corrugated box side plate

2.4 托盘设计

托盘材质为松木，松木的密度为 500 kg/m³，按国标规定作熏蒸防腐处理。

1) 托盘面板。面板直接承重，它连接纵梁板，该设计使用 15 mm 厚度松木板材，每根松木尺寸为 460 mm×70 mm×15 mm，每隔 10 mm 排列一根，共使用 8 根构成托盘的主要承载面。

2) 纵梁板与连接板。其主要作用是连接底墩与面板，在纵梁板与底墩的连接处，两端处钉 3 颗钉，呈三角形，中间处钉 2 颗钉，纵梁板与底墩、连接板与底墩连接处都要按此要求进行钉合。纵梁板和连接板的尺寸都为 700 mm×50 mm×15 mm，纵梁板和

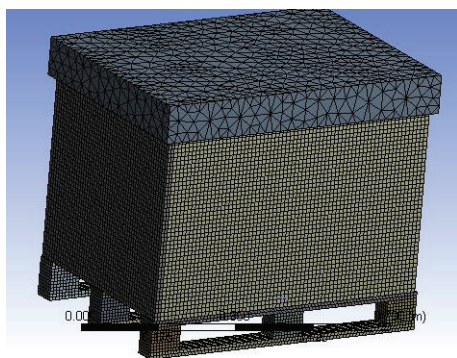


图 9 导入模型网格划分
Fig.9 Import model meshing

力为:

$$P = \frac{F}{S} = 3418.9 \text{ Pa} \quad (1)$$

式中: P 为应力 (Pa); F 为压力 (N); S 为包装件受压面积 (m^2)。

利用 Ansys Workbench 软件自动建立接触对, 玻璃与玻璃之间使用 bonded 的接触方式, 平板玻璃与缓冲材料之间设置为 frictional, 摩擦因数为 0.2, 缓冲材料与瓦楞纸箱之间设置为 frictionless 的接触方式。仿真得到最大应力为 507 kPa, 由文献知松木的屈服极限为 10.47 MPa, 可见底层托盘能够满足运输要求。

2) 等效应变分析。仿真得到最大应变为 0.0044, 单个包装件的在载荷时的许用位移是其高的 0.8%, 即为 4.2 mm, 结果为 $0.0044 \times 525 = 2.31 \text{ mm}$, 小于许用要求, 满足条件。

3) 总变形分析, 显示产品的总变形, 见图 10, 其最大变形量约为 0.13 mm。由上述计算知, 小于聚氨酯泡沫许用位移, 因此设计是安全的。

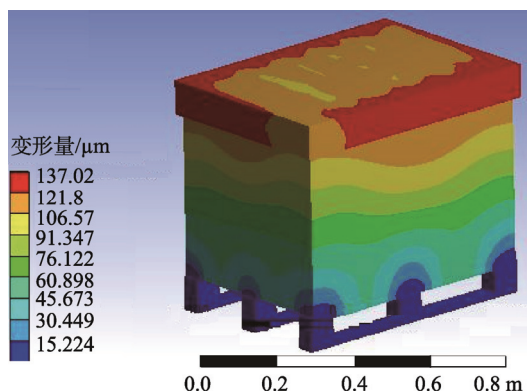


图 10 总变形
Fig.10 Total deformation

3.4 模态仿真分析

在包装件与平面接触的 3 个底面的设置为 fixed support, 限制底面在 x, y, z 的位移, 点击 Apply 添加。设置包装件顶面为 displacement, 设置 x, y, z 限制为

0, Free, 0, 点击 Solve 求解。模拟分析得 6 个频率, 42.2, 44.8, 51.2, 52.6, 69.5, 69.8 Hz。汽车公路运输在 2 Hz 和 10 Hz 处为共振频率, 产生破损的几率最高, 此包装件避开该共振频率, 因此包装件是安全的。

3.5 随机振动仿真分析

在运输时外部激励频率在 100 Hz 内, 冲击加速度在 20 m/s^2 内, 输入从模态分析中得到固有频率和振型, 点击 Solve 进行求解。包装件在 y 方向位移云图, 见图 11, 位移为 0.037 mm, 远小于理论值 4.2 mm, 因此产品是安全的。

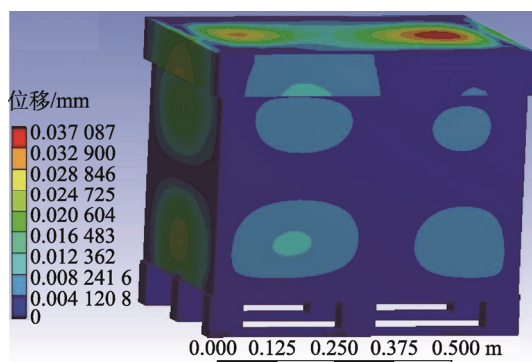


图 11 y 方向位移云图
Fig.11 y direction displacement nephogram

4 结语

对钢化玻璃进行运输包装设计, 采用聚氨酯泡沫作为缓冲衬垫, 3A 型瓦楞纸板做外箱, 松木托盘提高承载能力, 钢带捆扎固定的运输包装结构。该运输包装设计与现有包装形式相比具有质量更轻、环境友好和保护性得到提高等优点。利用 Pro/E 建立运输包装模型, 利用 Ansys Workbench 对所设计的运输包装进行静态堆码、模态和随机振动进行仿真分析。通过仿真分析判定所设计的钢化玻璃的运输包装满足堆码、模态和随机振动的要求, 运输包装设计合理, 能够在运输过程中有效保护钢化玻璃的安全。从仿真分析也可以看出该设计存在一定的保守性, 在实际应用中可根据流通环境要求, 适当对缓冲材料及包装箱材料进行调整, 使其达到运输过程中的保护性要求, 同时降低运输包装成本。

参考文献:

- [1] 刘志海, 胡桂萍. 钢化玻璃发展现状及趋势[J]. 玻璃, 2004, 173(2): 49—52.
LIU Zhi-hai, HU Gui-ping. The Present Situation and Development Trend of Tempered Glass[J]. Glass, 2004, 173(2): 49—52.
- [2] 庞淑芳. 玻璃发霉与防霉探究[J]. 轻工科技, 2013,

- 177(8): 41—42.
PANG Shu-fang. Discussion on Glass Weathering and Weathering Prevention[J]. Light Industry Science and Technology, 2013, 177(8): 41—42.
- [3] 陈晓艳. 防止彩晶钢化玻璃发霉的包装方式探讨[J]. 玻璃, 2013, 262(7): 28—30.
CHEN Xiao-yan. Study on the Packaging Ways for Preventing Color Crystal Tempered Glass from Weathering[J]. Glass, 2013, 262(7): 28—30.
- [4] 何建辉. 钢化玻璃在建筑上的应用[J]. 玻璃, 2012, 255(12): 46—49.
HE Jian-hui. Application of Thermal Tempered Glass on Buildings[J]. Glass, 2012, 255(12): 46—49.
- [5] 刘凤亭, 朱花玲. 新型塑木复合材料在玻璃包装上的应用[J]. 玻璃, 2006, 33(4): 34—39.
LIU Feng-ting, ZHU Hua-ling. Application of New Plastic-wood Composite to Glass Package[J]. Glass, 2006, 33(4): 34—39.
- [6] 郝建秀, 王伟宏. 木塑复合材料在建筑模板中的应用[J]. 森林工程, 2016, 32(3): 43—47.
HAO Jian-xiu, WANG Hong-wei. Application of Wood Plastic Composite in Construction Formwork[J]. Forest Engineering, 2016, 32(3): 43—47.
- [7] 徐美君. 平板玻璃包装与物流功效[J]. 国外建材科技, 2008, 29(4): 4—8.
XU Mei-jun. Flat Glass Packing and Logistics Efficiency[J]. Science and Technology of Overseas Building Materials, 2008, 29(4): 4—8.
- [8] 董慧慧. 平板玻璃用钢制包装箱设计及研制[D]. 天津: 天津大学, 2012.
DONG Hui-hui. Design and Development of Steel Packing Box for Flat Glass[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [9] 于雪斐, 史建伟. 木(竹)基复合材料替代传统玻璃包装材料的探讨[J]. 中国人造板, 2010, 17(6): 1—4.
YU Xue-fei, SHI Jian-wei. Feasibility Study of Wood/Bamboo Matrix Composites to Replace Solid Wood as Flat Glass Transporting Packaging Materials[J]. China Wood-based Panels, 2010, 17(6): 1—4.
- [10] 陆新宗, 肖生苓, 王全亮, 等. 漆酶对杨木纸浆模塑包装材料抗张性能的影响[J]. 森林工程, 2018, 34(2): 1—6.
LU Xin-zong, XIAO Sheng-ling, WANG Quan-liang, et al. Modification of Poplar Pulp Molded Packing Material Tensile Properties with Laccase[J]. Forest Engineering, 2018, 34(2): 1—6.
- [11] 李慧亮, 张广文. 七层瓦楞纸箱结构优化研究[J]. 包装工程, 2014, 35(11): 23—27.
LI Hui-liang, ZHANG Guang-wen. Structure Optimization of Seven Corrugated Boxes[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(11): 23—27.
- [12] 彭国勋. 运输包装[M]. 北京: 印刷工业出版社, 1999.
PENG Guo-xun. Transport Packaging[M]. Beijing: Printing Industry Press, 1999.
- [13] 蔡丽娜, 王玉龙, 徐洁, 等. 框架木箱有限元受力分析[J]. 包装工程, 2010, 31(17): 13—15.
CAI Li-na, WANG Yu-long, XU Jie, et al. Finite Element Analysis to Stress of Wooden Framed Box[J]. Packaging Engineering, 2010, 35(17): 13—15.
- [14] 崔小龙. 某型机电包装箱静态力学性能分析及结构优化[D]. 南京: 南京林业大学, 2014.
CUI Xiao-long. Static and Dynamic Mechanical Performance Analysis and Structural Optimization of an Electromechanical Packaging[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014.
- [15] 宋日恒, 张治国. 基于 ANSYS 的笔记本电脑包装件跌落仿真研究[J]. 浙江科技学院学报, 2009, 21(4): 333—335.
SONG Ri-heng, ZHANG Zhi-guo. Simulation on Laptop Package Dropping by Using ANSYS Software[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2009, 21(4): 333—335.
- [16] 黄宝仙. 基于 ANSYS 的机电包装箱力学性能分析及结构优化[D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
HUANG Bao-xian. Analysis of Mechanical Properties and Structural Optimization of Electromechanical Packaging Box Based on ANSYS[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.
- [17] 张菊飞. 基于 ANSYS Workbench 的商用汽车暖风机的物流运输包装设计与研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2013.
ZHANG Ju-fei. The Design and Research of Logistics Transport Packaging for Commercial Vehicle Fan Heater Based on ANSYS Workbench[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2013.
- [18] 李兵, 何正嘉. ANSYS Workbench 设计、仿真与优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
LI Bing, HE Zheng-jia. ANSYS Workbench Design, Simulation and Optimization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.