

## 复合材料包装箱保温功能设计及验证

赵志颖<sup>1,2</sup>, 陈平<sup>3</sup>, 鹏飞<sup>2</sup>, 上官锦虹<sup>2</sup>, 武星<sup>2</sup>, 朱述席<sup>2</sup>, 刘雷<sup>2</sup>

(1.北京理工大学 材料学院, 北京 100081; 2.北京玻璃钢院复合材料有限公司, 北京 102101;

3.海装北京局驻北京地区第一军事代表室, 北京 100076)

**摘要:** **目的** 为满足包装箱保温功能技术要求, 探究包装箱保温层厚度设计方案。**方法** 基于低导热系数聚氨酯保温材料, 通过傅里叶定律及安全系数理论分析确定包装箱保温层厚度, 再对实物包装箱按照 GJB 150.4.A—2009《军用装备实验室环境试验方法》进行高低温试验并验证。**结果** 在高低温试验中, 当箱内温度为 22.2 °C, 箱外温度为 40 °C 时, 4 h 后箱内最高温度可达 29.2 °C; 当箱内温度为 25.5 °C, 箱外温度为 -30 °C 时, 4 h 后箱内最低温度降至 2 °C。通过分析, 得出箱体内部温度与时间以及箱体温差之间的关系, 箱体外部升温 1 °C 时, 箱体内部升温速率为 0.037~0.1 °C/h; 箱体外部降温 1 °C 时, 降温速率为 0.07~0.094 °C/h。**结论** 该设计方案能满足包装箱保温功能技术要求。

**关键词:** 复合材料; 包装箱; 保温

**中图分类号:** TB482.2; TB484.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)03-0159-05

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.03.022

## Design and Verification of Composite Thermal Insulation Storage Containers

ZHAO Zhi-ying<sup>1,2</sup>, CHEN Ping<sup>3</sup>, PENG Fei<sup>2</sup>, SHANGGUAN Jin-hong<sup>2</sup>, WU Xing<sup>2</sup>, ZHU Shu-xi<sup>2</sup>, LIU Lei<sup>2</sup>

(1.School of Materials Science & Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2.Beijing Composite Materials Co., Ltd., Beijing 102101, China; 3.First Military Representative Office of Beijing Bureau of Naval Armament in Beijing Region, Beijing 100076, China)

**ABSTRACT:** The work aims to explore the design scheme of the thickness of the thermal insulation layer of the storage containers to meet the technical requirements on the thermal insulation function of the storage containers. Based on the polyurethane heat preservation materials of low heat conductivity coefficient and according to Fourier's law and theoretical analysis of safety factor, the storage container's thickness of the insulation layer was determined. Then high and low temperature tests for verification were carried out on the storage containers in accordance with the laboratory equipment environmental test method (GJB 150.4.A—2009). In the high and low temperature test, the monitoring results of the internal sensor of the storage containers were as follows: when the temperature was 22.2 °C in the containers and 40 °C outside the containers, the maximum temperature in the containers could reach 29.2 °C after 4 h; when the temperature was 25.5 °C in the containers and -30 °C outside the containers, the lowest temperature in the containers was as low as 2 °C after 4 h; through analysis, the relationship between the internal temperature of the containers and the time and the temperature difference of the containers was: when the temperature of the outside of the containers was raised by 1 °C, the rate of temperature rise inside the containers was 0.037-0.1 °C/h; when the external temperature of the cabinet was reduced by 1 °C, the cooling rate was 0.07-0.094 °C/h. The designing scheme proposed meets the technical requirements on

收稿日期: 2020-06-26

作者简介: 赵志颖(1987—)女, 博士, 工程师, 主要研究方向为军用树脂基复合材料方面的制品结构功能设计和工艺设计。

thermal insulation function of the storage containers.

**KEY WORDS:** composite materials; thermal insulation storage containers; Insulation

近年来,为了提高军用装备产品的防护需求,如轻质、耐腐蚀、防静电、耐霉菌、高强、抗跌落、使用寿命长等方面,采用复合材料包装箱逐步替代了传统的木质、金属包装箱<sup>[1-4]</sup>。目前,国外最突出的复合材料发射及贮运一体化的包装箱有:法国“飞鱼”MM40反舰导弹用的复合材料贮存发射箱、美国“捕鲸叉”导弹贮存发射箱等<sup>[5]</sup>。国内对复合材料包装箱研究逐步增多,如大型密封航天器、鱼雷等军用配套复合材料包装箱<sup>[6-8]</sup>。当前,研究者们对包装箱的承力,密封等结构设计和仿真计算等方面的研究较多<sup>[9-15]</sup>,针对具备保温功能的复合材料包装箱研究得较少,文中拟针对箱体内部恒温环境有特殊要求的包装箱进行设计及验证,为复合材料包装箱的设计及使用提出新的方向。

## 1 复合材料保温包装箱技术要求

某军用产品提出了复合材料贮运箱功能需求,见表1。其中复合材料保温包装箱装配军用产品的运输工况为:复合材料保温包装箱及内装产品放入空调车内,空调车提供恒温( $20\pm 5$ )℃的环境,如遇到紧急事故,空调失灵,复合保温包装箱需要为内装产品在短时间内提供相对稳定的温度环境。

表1 复合材料保温包装箱技术要求  
Tab.1 Technical requirements for composite thermal insulation storage containers

项目	技术要求
保温功能要求	箱内温度( $20\pm 5$ )℃,箱外40℃,4h箱内温度变化不超10℃;箱内( $25\pm 5$ )℃,箱外-30℃,4h箱内温度不超25℃
内装物质量及材质	640 kg, 钢质
包装箱质量	400 kg
吊装、叉装	箱体满足装载后吊装安全性

## 2 箱体设计

### 2.1 结构设计

根据保温包装箱内装物的尺寸及箱体距离内装物的安全距离,尽可能设计最稳定、最小尺寸、最轻的箱体结构。保温包装箱剖面示意图1。

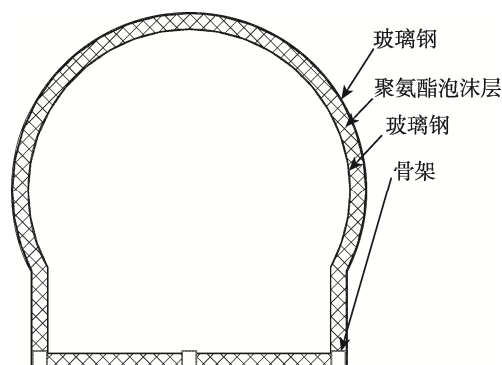


图1 保温包装箱剖面示意  
Fig.1 Schematic diagram of thermal insulation storage container profile

### 2.2 保温层厚度设计

保温包装箱采用轻质“玻璃钢+聚氨酯泡沫层+玻璃钢”的复合材料夹芯结构,玻璃钢可为包装箱提供结构强度及刚度,其导热系数约为 $0.4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,属于低导热系数材料,可为保温箱提供一定保温功能,因此复合材料夹芯结构的保温功能优于等厚芯材的保温功能。该产品在设计过程中进行模型简化,计算以聚氨酯泡沫层构成的包装箱保温层厚度,然后按照此厚度设计并生产保温包装箱。箱体内部装物为钢质材料,质量为640 kg,聚氨酯泡沫层的质量为40 kg,箱体外形尺寸为 $2300 \text{ mm}\times 1100 \text{ mm}\times 1100 \text{ mm}$ 。该产品的包装箱结构材料性能见表2。

表2 包装箱结构材料参数  
Tab.2 Material parameters of packing box

材料名称	导热系数/ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	比热容/ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
玻璃钢	0.4	0.535	1.69
聚氨酯	0.026	2.4	57
钢	17	0.46	7.9

该型号包装箱内军用产品通过对流换热和导热等2种方式与外界进行热量传递,当空调车内的空调失灵后,车内空气及箱内空气均处于稳定状态,对流换热对热传递影响远远小于导热,可忽略不计,为此,在热量传递分析过程中以导热过程为主。

傅里叶定律见式(1)。

$$q = -\lambda A \frac{d\theta}{dx} \quad (1)$$

式中: $\theta$ 为某点的温度(℃); $x$ 为厚度方向某点

的坐标 (m); 负号为传热方向与温度梯度方向相反;  $\lambda$  为导热系数 (W/(m·K))。

箱体内装物为钢质材料, 质量为 640 kg, 聚氨酯泡沫层质量为 40 kg, 箱内温度为 20 °C, 箱外温度为 40 °C, 4 h 箱内温度变化不超过 10 °C。分析计算箱体及其内装物的热量变化, 见式 (2)。

$$\Delta Q = c_1 m_1 \Delta \theta_1 + c_2 m_2 \Delta \theta_2 = -4.864 \text{ MJ} \quad (2)$$

式中:  $\Delta Q$  为保温层放出的热量;  $c_1$  为钢材的比热容为 0.46 kJ/(kg·K);  $m_1$  为产品质量;  $c_2$  为聚氨酯泡沫的比热容,  $c_2=2.4$  kJ/(kg·K);  $m_2$  为聚氨酯泡沫质量;  $\Delta \theta_1$  为产品温度变化 (10 °C);  $\Delta \theta_2$  为聚氨酯泡沫温度变化。

根据傅里叶定律式 (1) 计算  $t=0$  s 及经过 4 h 后 ( $t=14400$  s) 后, 通过箱体内外温度梯度, 见式 (3)。

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{t=0} = \frac{20-40}{\sigma} \quad (3)$$

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{t=14400} = \frac{30-40}{\sigma} \quad (4)$$

式中:  $t$  为时间 (s); 根据傅里叶定律, 建立式 (5), 对其进行积分后得出式 (6)。

$$\frac{dQ}{dt} = A\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad (5)$$

$$Q = \int_0^{14400} A\lambda \frac{d\theta}{dx} dt = -A\lambda \frac{10}{\sigma} \cdot 14400 \quad (6)$$

式中:  $A = 2\pi(r^2 + rh) = 11 \text{ m}^2$

根据能量守恒  $Q = \Delta Q$ , 计算得  $\sigma = 8.5 \text{ mm}$ 。

## 2.3 保温包装箱试验验证

考虑到箱体内外需要安装钢质结构部件及加工一些孔洞安装接插件, 并且箱体保温层在成型过程中会引入微缺陷, 影响保温功能, 因此设计箱体聚氨酯

保温层时留有一定安全系数, 厚度取 50 mm。复合材料保温包装箱采用“5 mm 玻璃纤维复合材料+50 mm 聚氨酯泡沫层+3 mm 玻璃纤维复合材料”结构, 内装物在箱体内放置状态见图 2。

按照 GJB 150.3.A—2009《军用装备实验室环境试验方法 第三部分高温试验》要求进行试验验证。高温试验条件: 箱体外部温度为 40 °C, 箱内为 22.2 °C, 试验测试温差为 17.8 °C, 在箱体内部布置传感器进行检测, 箱内各监测点温度随时间变化关系见图 3。

箱内各检测点传感器平均升温速率见表 3。4 h 箱体内部最高温度升温至 29.2 °C, 满足复合材料保温包装箱高温环境下保温要求。其中, 41#, 46# 的升温速率分别为 1.775, 1.725 °C/h; 43#, 42# 升温速率分别为 1.275, 1.025 °C/h; 45#, 48# 升温速率分别为 1.1, 1.025 °C/h; 39#, 44# 升温速率分别为 0.75, 0.825 °C/h。

结合表 3、图 2—3 可知, 41#, 46# 传感器安装位置为钢质部件所在区域, 此处保温层厚度较薄, 保温能力最差, 所以升温速率最高; 43# 传感器安装位置为 3 个较小接插件安装位置, 此处保温层开孔位较多, 对保温功能有很大影响; 42# 传感器所在位置为取气阀安装位置, 此处有一个较大孔位, 因此 43# 传感器安装位置保温能力低于 42# 传感器安装位置保温能力, 43# 传感器处升温速率高于 42# 传感器处升温速率; 45#, 48# 传感器安装位置为箱体内部后支撑托两侧区域, 离箱体口框位置较近, 容易传递热量; 39#, 44# 传感器安装位置为箱体底部区域, 偏离箱体口框位置, 47# 传感器安装位置为箱体前支撑托底部区域, 器安装位置处保温能力 < 43#, 42# 传感器安装位置处保温能力 < 45#, 48# 传感器安装位置处保温能力 <

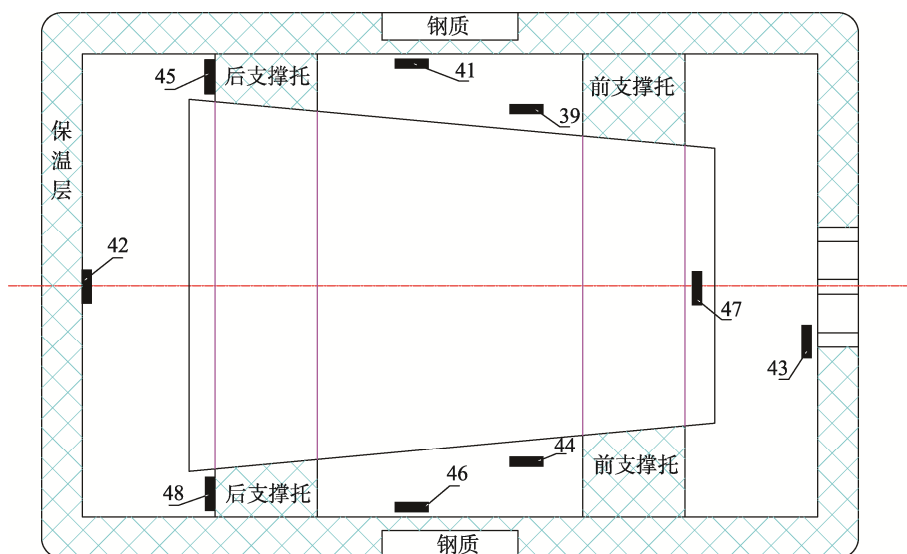


图 2 箱体内装物及内部传感器位置

Fig.2 Schematic diagram of the contents of the containers and the position of the internal sensors

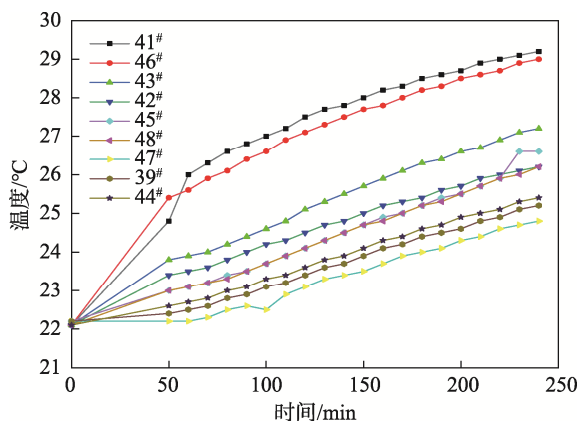


图3 高温试验各传感器测试温度与时间关系曲线  
Fig.3 Relationship between test temperature and time of each sensor in high temperature test

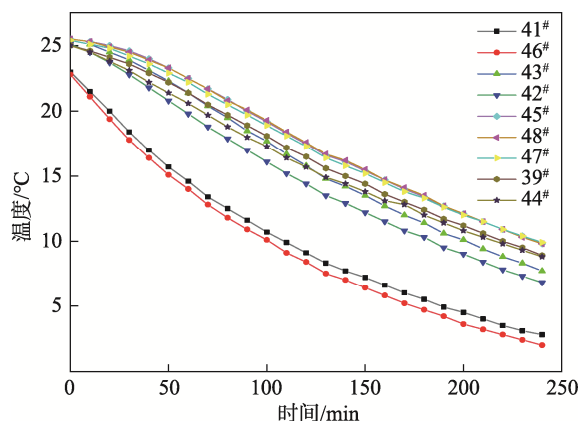


图4 低温试验各传感器测试温度与时间关系曲线  
Fig.4 Temperature and time curve of each sensor in low temperature test

表3 各检测点传感器平均升温速率统计  
Tab.3 Average heating rate of sensors at each detection point

编号	4 h 箱内温差/°C	箱内速率/(°C·h <sup>-1</sup> )	
		箱外升温 17.8 °C	箱外温升 1 °C
41#	7.1	1.775	0.1
46#	6.9	1.725	0.097
43#	5.1	1.275	0.072
42#	4.1	1.025	0.058
45#	4.4	1.1	0.062
48#	4.1	1.025	0.058
47#	2.6	0.65	0.037
39#	3	0.75	0.042
44#	3.3	0.825	0.046

注：箱体内部、外升温前温度为 22.2 °C，箱外升温 40 °C，保温 4 h。

表4 各检测点传感器平均降温速率统计  
Tab.4 Average cooling rate of sensors at each detection point

编号	箱内温差/°C	箱内降温速率/(°C·h <sup>-1</sup> )	
		箱外降温 55.5 °C	箱外降温 1 °C
41#	20.2	5.05	0.091
46#	20.8	5.2	0.094
43#	17.7	4.425	0.08
42#	18.3	4.575	0.082
45#	15.7	3.925	0.071
48#	15.7	3.925	0.071
47#	15.5	3.875	0.07
39#	16.1	4.025	0.073
44#	16.2	4.05	0.073

注：箱体内部、外升温前温度为 25.5 °C，箱外降温 40 °C，保温 4 h。

39#，44# < 47#传感器安装位置处保温能力。外部温升 1 °C，内部温升速率最大为 0.1 °C/h，47#传感器安装位置为箱体前支撑底部区域处，升温速率最小为 0.037 °C/h。

按照 GJB 150.4. A—2009《军用装备实验室环境试验方法 第三部分低温试验》要求进行试验验证。降温试验条件：箱体内部温度为 25.5 °C，箱外为-30 °C，试验测试温差为 55.5 °C，在箱体内部布置传感器进行检测，箱内各监测点温度随时间变化关系见图 4。

由图 4 可以推出箱内各检测点传感器平均升温速率，见表 4。4 h 箱体内部降温，最低温度为 2 °C，满足复合材料保温包装箱低温环境下保温要求。其中 41#，46#的降温速率分别为 5.05，5.2 °C/h，43#，42#降温速率分别为 4.425，4.575 °C/h，45#，48#降温速率分别为 3.925，3.925 °C/h，39#，44#降温速率分别为 4.025，4.05 °C/h，47#降温速率为 3.85 °C/h。

箱内各监测点温降随时间变化趋势和高温试验一致。再次验证传感器安装位置处保温能力从小到大依次为 41#，46#；43#，42#；45#，48#；39#，44#；47#。外部温度下降 1 °C，内部 41#，46#温降速率最大为 0.094 °C/h，47#降温速率最小为 0.070 °C/h。

结合表 3—4 数据分析可知，箱外升温或降温，箱内的温度变化速率略有偏差。41#、46#传感器安装位置为箱体钢质部件区域外部温升、温降最大，温升速率、温降速率≤0.1 °C/h。

### 3 结语

根据傅里叶定律设计的箱体保温层厚度为 13 mm，考虑到安全系数需达到 3 倍以上，则确定实物保温层厚度为 50 mm，并对复合材料包装箱保温功能进行高低温试验验证。通过计算得出，箱体外部升

温 1 °C 时, 箱体内部升温速率 0.037~0.1 °C/h; 箱体外部降温 1 °C 时, 降温速率为 0.07~0.094 °C/h; 箱外升温或降温, 箱内的温度变化速率略有偏差, 箱外升温/降温 1 °C, 箱内最大升温/降温速率 ≤ 0.1 °C/h, 满足复合材料包装箱保温功能要求。

#### 参考文献:

- [1] 谭艳. 国内外弹药包装材料的研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(S1): 375—377.  
TAN Yan. Research Progress on Ammunition Package Worldwide[J]. Materials Reports, 2013, 27(S1): 375—377.
- [2] 湛利华, 关成龙, 黄诚, 等. 航天低温复合材料贮箱国内外研究现状分析[J]. 航空制造技术, 2019, 62(16): 79—87.  
ZHAN Li-hua, GUAN Cheng-long, HUANG Cheng, et al. Analysis of Research Status of Composite Cryotank for Space[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(16): 79—87.
- [3] 王一临. 军用包装与武器装备的环境适应性[J]. 装备环境工程, 2004, 1(1): 51—54.  
WANG Yi-lin. Military Packaging and Environmental Adaptability of Weapons[J]. Equipment Environmental Engineering, 2004, 1(1): 51—54.
- [4] 马桃林, 余晕, 欧冠男. 包装技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009: 3—8.  
MA Tao-lin, YU Yun, OU Guan-nan. Package Technology[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009: 3—8.
- [5] 陈玉辉, 柴朋军, 邢会霞, 等. 复合材料弹头及部段包装箱的设计研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2020(5): 34—36.  
CHEN Yu-hui, CHAI Peng-jun, XING Hui-xia, et al. Design of Missile Packing Box[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2020(5): 34—36.
- [6] 康宝臣, 郭志军, 薛贵林. 大型密封包装箱复合结构设计及优化分析[J]. 数字海洋与水下攻防, 2018, 1(2): 63—68.  
KANG Bao-chen, GUO Zhi-jun, XUE Gui-lin. Composite Structural Design and Optimization Analysis of Large Sealed Packing Box[J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2018, 1(2): 63—68.
- [7] 蔡建, 詹永富, 胡秉飞. 复合材料密封包装容器干燥控湿设计研究[J]. 包装工程, 2014, 35(3): 112—116.  
CAI Jian, ZHAN Yong-fu, HU Bing-fei. Moisture-proof and Humidity-control Design of Sealed Composite Packages[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3): 112—116.
- [8] 董晓锋. 玻璃纤维增强复合材料包装箱优化设计研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2017: 1—48.  
DONG Xiao-feng. Optimization Design of Glass Fiber Reinforced Composite Packaging-box[D]. Ningbo: Ningbo University, 2017: 1—48.
- [9] 肖加余, 曾竞成, 张成安. 薄壁加筋复合材料特种包装箱体的结构设计[J]. 玻璃钢/复合材料, 2002(6): 33—44.  
XIAO Jia-yu, ZENG Jing-cheng, ZHANG Cheng-an. Structure Design of Composite Package Case with Thin Wall and Rib[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2002(6): 33—44.
- [10] 严君, 杨世文. 基于 Optistruct 的碳纤维复合材料包装箱结构优化设计[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012(2): 12—16.  
YAN Jun, YANG Shi-wen. Structure Design of Carbon Fiber Composite Package-case Based on Optistruct Optimization Technology[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2012(2): 12—16.
- [11] CHEN Yi-yan, DONG Ju-can, TONG Zhao-jie, et al. Flexural Behavior of Composite Box Girders with Corrugated Steel Webs and Trusses[J]. Engineering Structures, 2020, 209: 110275.
- [12] 周维, 黄美平, 罗俊杰, 等. 新型玻璃钢包装箱设计与制造[J]. 包装工程, 2004, 25(4): 51—52.  
ZHOU Wei, HUANG Mei-ping, LUO Jun-jie, et al. The Design and Preparation of the New Type GFRP Packaging Box[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(4): 51—52.
- [13] ZHU Ying-Jie, WANG Jia-Ji, XIN Nie, et al. Structural Performance of Slabs in Composite Box Girder Considering Compressive Membrane Action[J]. Engineering Structures, 2020, 212: 110457.
- [14] MAIGACA L, YAR U M. Hybrid Vibration Control of a Flexible Composite Box Cross-sectional Manipulator with Piezoelectric Actuators[J]. Composites Part B, 2019, 176: 107278.
- [15] JING Tang, XIAO Chen, KE Yang. Evaluating Structural Failure of Load-Carrying Composite Box Beams with Different Geometries and Load Conditions[J]. Applied Composite Materials, 2019, 26(4): 1151—1161.