

木材及人造板对火烧环境下复合运输包装容器 隔热性能影响的比较研究

吴松, 马红, 毛勇建, 胡宇鹏, 周本权

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: **目的** 比较易于获取的天然(毛白杨、水杉)和人工木材(中纤板、刨花板)用于复合运输包装容器设计时在火烧环境下的隔热性能。**方法** 设计由钢质外容器、木材夹层、钢质内容器组成的典型运输容器模拟试验件,开展了平均温度约为 800 °C、持续时间约为 30 min 的野外油池火烧试验,测试了试验件内外温度及木材炭化情况。**结果** 4 种木材的隔热效果由优到劣依次为毛白杨、中纤板、刨花板、水杉;4 种木材在厚度小于 120 mm 时隔热效果差异较大,厚度达到 120 mm 及以上时差异减小,并均能在火烧环境下将内部容器的温度保持在 100 °C 左右及以下。**结论** 4 种木材中,毛白杨隔热效果最优,中纤板次之,然后是刨花板,最后是水杉。本文研究结果为放射性物品复合运输容器隔热设计提供了参考。

关键词: 放射性物品; 运输包装容器; 耐热试验; 木材; 隔热

中图分类号: TB485.3; V416.5; X45 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)13-0292-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.13.035

Comparative Study on Effects of Wood and Wood-based Panel on Thermal Insulation of Composite Transport Packaging Containers under Fire Environment

WU Song, MA Hong, MAO Yong-jian, HU Yu-peng, ZHOU Ben-quan

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: The work aims to compare the thermal insulation of natural (*Populus tomentosa*, *Metasequoia glyptostroboides*) and artificial (MDF and particleboard) woods that are easy to obtain and can be used in the design of composite transport packaging containers under fire environment. A typical transport container simulation test piece consisting of a steel outer container, a wood interlayer and a steel inner container was designed. The field oil pool fire test with an average temperature of about 800 °C and duration of about 30 min was carried out. The temperature inside and outside the test piece and the wood carbonization were tested. The thermal insulation effects of the four kinds of wood were: *Populus tomentosa*, MDF, particleboard, *metasequoia glyptostroboides* from superior to inferior. When the thickness of the four kinds of wood was less than 120 mm, the difference of thermal insulation effect was large, and when the thickness reached 120 mm or more, the difference was reduced, and all of them could keep the temperature of the inner container at about 100 °C or below under the fire environment. Among the four kinds of wood, *Populus tomentosa* has the best thermal insulation effect, followed by MDF, particleboard, and finally *Metasequoia glyptostroboides*. The results

收稿日期: 2022-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(51706213)

作者简介: 吴松(1986—), 男, 硕士。

通信作者: 毛勇建(1976—), 男, 博士。

of this study provide a reference for the thermal insulation design of radioactive composite transport containers.

KEY WORDS: radioactive material; composite transport packaging containers; heat resistance test; wood; thermal insulation

放射性物品在运输过程中可能遭遇跌落、撞击、火烧等严酷的事故场景, 为此国内外标准^[1-2]都明确要求放射性物品运输容器必须通过正常运输和运输事故条件的自由下落、耐热等试验考核。其中, 运输事故条件下力学试验主要包括自由下落试验I(9 m 跌落)、自由下落试验II(1 m 穿刺)、自由下落试验III(9 m 压碎), 事故条件下耐热试验是指 30 min、800 °C 火烧试验。这些试验考核项目对运输容器的缓冲和隔热性能提出了很高的要求。

木材是一种既能够缓冲又能够隔热的天然材料, 在放射性物品运输容器制造中得到了广泛的应用。邢攸冬等^[3]分析了乏燃料运输容器减震器填充木材、聚氨酯泡沫和蜂窝铝的性能优劣。钟卫洲等^[4]详研究了云杉、毛白杨、中纤板和刨花板的抗冲击性能, 以及获得这些性能参数的试验设计、数值计算方法和理论分析等。国外学者 Musolff 等^[5]、Ammerman 等^[6]、Neumann 等^[7]对木材在运输容器中的抗冲击应用和进行了相关的试验, 并对试验结果进行了分析及确认。Huang 等^[8]对火烧环境下包装箱中木材的传热性能、热解性能进行了理论分析和数值模拟。郭春秋等^[9]从设计、加工、试验和数值模拟等方面介绍了木材在新燃料运输容器制造中的应用。Bang 等^[10]介绍了巴尔杉木在船用放射性材料运输包装箱中的应用, 利用该木材作为主要防护材料的包装箱在经历跌落及火烧试验后, 检测表明内容器未发生泄漏, 防护效果良好。

木材的种类、构型和尺寸的确定是相关运输容器设计的重要内容^[11-16]。然而, 在公开发表的文献中, 很少对木材选用进行对比分析, 仅有 Andersen 等^[11]对红木(Redwood)、巴尔杉木(Balsa Wood)、胶合板(Plywood)等材料的单位体积吸能和吸热指标进行了对比分析, 最终选择了红木作为某运输容器的主要防护材料。但由于木材资源的地域性特征, 这些研究对象和结果并不能适用于所有国家。其他绝大多数文献都基于既定的木材种类、构型和尺寸, 通过试验或数值模拟的方法, 对其缓冲、隔热效果进行验证。本文立足国内易获取的且基本热学性能参数与早期使用的云杉^[8,14-15]类似的 2 种天然木材和 2 种人工木材, 即毛白杨、水杉、中纤板、刨花板, 设计加工了典型的钢-木-钢容器模拟试验件, 通过野外油池火烧试验对其隔热效果进行了对比研究。与此对应, 钟卫洲等^[4]也对上述 4 种木材的缓冲性能进行了对比研究。因此, 本文研究结果配合钟卫洲等^[4]的研究结果, 可为国内相关运输容器的木材选型及构型、尺寸设计提供重要参考。

1 试验材料与试验件

1.1 试验材料简介

试验材料包括 2 类共 4 种木材, 其中天然木材为毛白杨(Populus Tomentosa Carrière)、水杉(Metasequoia Glyptostroboides)2 种, 产地为绵阳市平武县, 胸径小于 0.4 m; 人工木材为中纤板、刨花板 2 种, 产地绵阳市平武县。由于含水率对木材质量、传热性能、热解性能等均有较大影响, 因此对所用的 4 种木材进行了含水率、密度和导热系数(瞬态平面热源技术, TPS)的测试, 结果见表 1。

表 1 4 种木材的含水率测试结果
Tab.1 Test results of moisture content in the four woods

代号	木材	平均含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)
M	毛白杨	14.6	0.544	0.28
S	水杉	15.5	0.344	0.32
Z	中纤板	8	0.672	0.15
B	刨花板	8.6	0.68	0.24

1.2 试验件描述

试验件结构如图 1 所示, 由钢质外容器、木材夹层和钢质内容器组成。外容器材质为耐火钢, 壁厚为 5 mm, 下端盖与侧壁焊接, 上端盖与侧壁螺接, 尺寸为 φ220 mm×400 mm、φ340 mm×400 mm、φ500 mm×600 mm 等 3 种规格。侧壁木材夹层均分 3 层布置, 均为顺纹方向, 两端均分 4 层布置, 其中 2 种天然木材的顺纹方向沿试验件轴向, 2 种人工木材的顺面方向沿试验件轴向。内容器为外形尺寸 φ100 mm×150 mm、壁厚 5 mm 的空心圆柱形钢制容器。试验件技术状态见表 2。

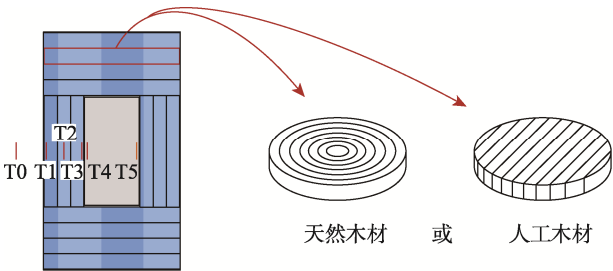


图 1 试验件结构
Fig.1 Structure diagram of test piece

表 2 试验件技术状态
Tab.2 Technical conditions of test piece

试件编号	外容器 尺寸/mm	侧壁木材 厚度/mm	内容器 尺寸/mm	木材种类
M1	φ220×400	60	φ100×150	毛白杨
M2	φ340×400	120	φ100×150	毛白杨
M3	φ500×600	200	φ100×150	毛白杨
S1	φ220×400	60	φ100×150	水杉
S2	φ340×400	120	φ100×150	水杉
S3	φ500×600	200	φ100×150	水杉
Z1	φ220×400	60	φ100×150	中纤板
Z2	φ340×400	120	φ100×150	中纤板
Z3	φ500×600	200	φ100×150	中纤板
B1	φ220×400	60	φ100×150	刨花板
B2	φ340×400	120	φ100×150	刨花板
B3	φ500×600	200	φ100×150	刨花板

2 试验系统与方法

2.1 火烧试验系统

火烧试验系统主要由 10 m 油池、供油管道、止回阀、电动调节阀及控制系统、油泵、储油罐、液位传感器及测试系统等组成，如图 2 所示。

油池由耐热钢板制作而成，分为内圈油池和外圈冷却水池。试验前，先在内圈油池内注入一定高度的水，再注入适量的燃料（煤油）。同时，还需在外圈冷却水池中注入适量的水，以避免试验过程中火焰高温导致钢油池变形。油池液位通过水井下的液位传感器感知，通过电缆将信号传输至上位机控制程序，实时判断煤油燃烧速率和剩余燃烧时间，从而控制油泵和电动调节阀向油池中补充适量煤油，以确保加载时间在 30 min 左右。

温度测点布局示意图见图 1，各测点具体位置及测试传感器见表 3。其中，T0—T4 由 K 型热电偶测

量，测点 T5 由温度试纸测量，通过试验后拆解试验件，根据其颜色直接读取其最高值。试验时 K 型热电偶、数据采集器、上位机及测试软件等组成温度测试系统，持续记录相应测点温度数据。

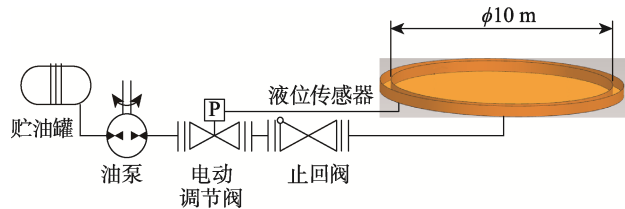


图 2 火烧试验系统示意图
Fig.2 Diagram of fire test system

表 3 温度测点位置
Tab.3 Positions of temperature measurement points

序号	位置	备注
T0	外容器表面外 100 mm 处	K 型热电偶
T1	最外层木材	K 型热电偶
T2	中间层木材	K 型热电偶
T3	最内层木材	K 型热电偶
T4	内容器内壁面	K 型热电偶
T5	内容器外壁面	温度试纸

2.2 试验方法

试验件放置在由耐热钢制成的托架上，试验件分横放和竖放 2 种姿态，试验时确保火焰对试验件充分包覆，如图 3 所示。根据表 3 中测点安排，试验中采用电测法对每个试验件内外部测试了 T0—T4 这 5 个测点的温度时间历程曲线。考虑到横放试验件迎火面与背火面温度环境有一定差异，为确保横放试验件之间状态一致，并与竖放试验件温度测试结果具有可比性，横放试验件统一放置温度测试点在其侧面。试验后，对各试验件进行了分解，读取了 T5 测点温度试纸示值，测试了木材夹层（上端面第 2 层木材的上表面）的炭化厚度。

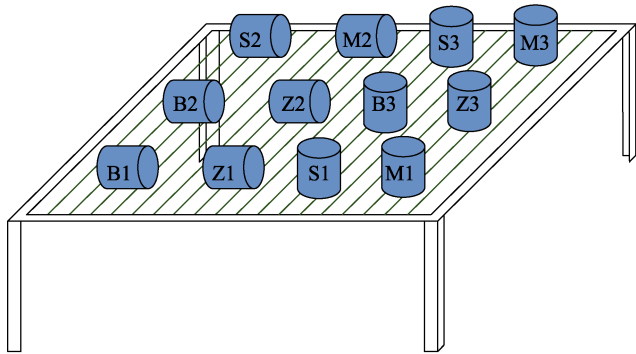
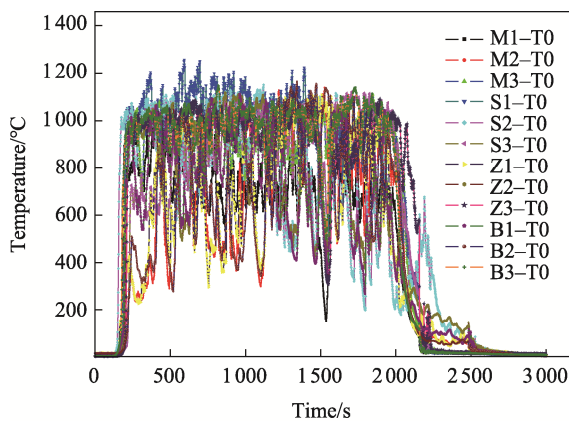


图 3 试验件放置示意图与火焰包覆情况
Fig.3 Diagram of test piece setup and photo of flame wrapping

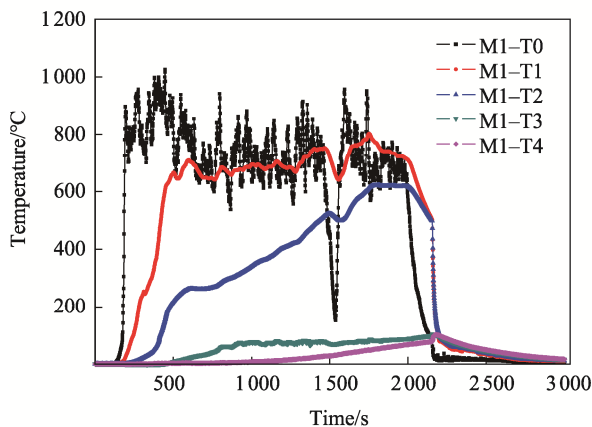
3 试验结果与分析

3.1 温度测试结果

图 4a 给出了各试验件的加载温度, 即附近空气中 T0 测点的温度。由图 4a 可见, 火烧加载温度在 400~1 200 °C 内波动, 其中多数时间的温度为 600~1 000 °C。加载时间为 30 min 左右, 30 min 内的平均温度和最高温度见表 4。由表 4 可见, 12 个试验件的 T0 测点平均温度具有一定分散性, 但最高温度更趋于一致。



a 试验件附近空气温度 (T0测点)



b 试验件M1内外温度 (T0—T4测点)

图 4 部分温度测试曲线
Fig.4 Some temperature test curves

图 4b 给出了试验件内外部的温度测试曲线。由图 4b 可见, 从 T0 到 T4 测点, 即由外到内, 被测点的最高响应温度依次降低。

验件内部测点 T1—T5 的最高温度见表 5 和图 5a—c。由表 5、图 5a—c 可见, 由热电偶测得的 T4 和由温度试纸测得的 T5 数值吻合较好; 每个试验件从 T1 到 T4 都具有有明显的降低的趋势; 对于“1”型试验件 (侧壁木材夹层厚度为 60 mm), 毛白杨 (M1)

降低最快, 其次是中纤板 (Z1) 和刨花板 (B1), 最后是水杉 (S1); 对于“2”型和“3”型试验件, 由于木材夹层较厚, 到 T3、T4 测点位置, 最高温度已经降低至一定水平, 彼此间差别不大。

表 4 各试验件 T0 测点的平均温度和最高温度
Tab.4 Mean and maximum temperature at T0 point of each test piece

编号	平均温度/°C	最高温度/°C
M1	723.0	1 024.9
M2	741.7	1 139.7
M3	951.5	1 111.8
S1	1 013.3	1 257.2
S2	788.4	1 151.3
S3	916.2	1 122.9
Z1	747.8	1 113.2
Z2	808.2	1 119.3
Z3	957.6	1 117.2
B1	766.7	1 112.9
B2	737.6	1 166.0
B3	986.2	1 148.7

图 5d 整理了不同种类、不同厚度木材夹层情况下内容器内表面 (即 T4 测点) 的最高温度。很明显, 对“1”型试验件 (即木材夹层厚度为 60 mm), 4 种木材隔热效果差异非常显著: 装填毛白杨 (M1) 的内容器最高温度最低, 为 102.1 °C; 中纤板 (Z1) 次之, 为 139.1 °C; 其次为刨花板 (B1), 温度为 201.9 °C; 最后为水杉 (S1), 温度为 279.6 °C。木材夹层增厚至 120 mm (即“2”型)、200 mm (即“3”型) 以后, 隔热效果均表现较好 (100 °C 左右及以下) 且差异较小 (20 °C 以内), 但彼此间的隔热性能优劣顺序依然不变。由上述结果还可看出, 由于 4 种木材隔热效果差异比较明显, 所以试验件外界环境温度 (即 T0 测点) 平均值的分散性未对隔热效果造成影响。

3.2 木材夹层炭化情况

图 6 给出了试验后各试验件上端面第 2 层木材的上表面炭化情况照片, 表 6 给出了炭化厚度测试结果。由图 6 和表 6 可见, 横放试验件由于温度环境不对称 (迎火面燃烧不充分、温度低, 背火面燃烧充分、温度高), 木材炭化也不对称, 竖放试验件温度环境基本对称, 故木材炭化也基本对称。在相同条件下, 4 种木材中, 毛白杨炭化最薄, 中纤板次之, 刨花板第三, 水杉最厚。

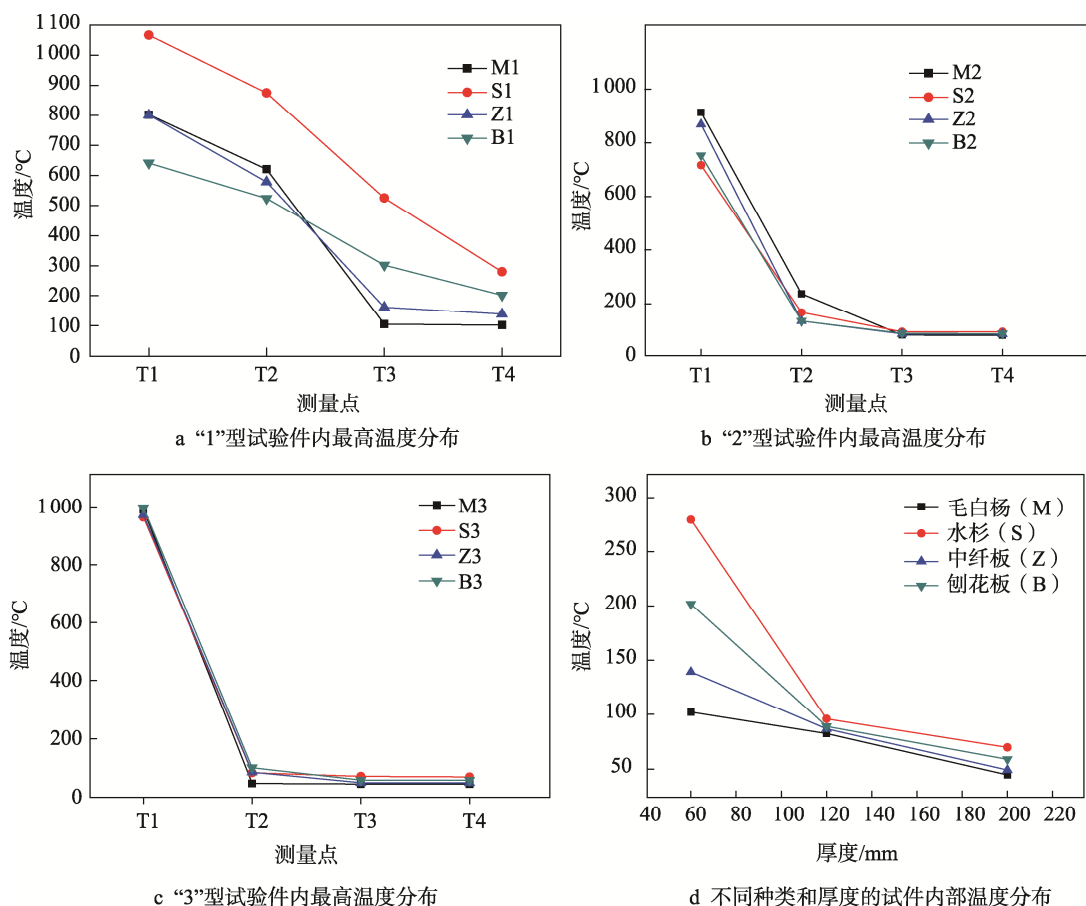


图 5 试验件内的最高温度分布
Fig.5 Maximum temperature distribution in test piece

表 5 在试件中测得的温度最高值
Tab.5 Measured maximum temperature in test piece

°C

试验件编号	T1 (热电偶)	T2 (热电偶)	T3 (热电偶)	T4 (热电偶)	T5 (温度试纸)
M1	802.4	620.9	105.3	102.1	99 ~ 104
M2	912.9	236.9	83.6	82.5	82 ~ 88
M3	990.4	47.2	45.1	44.8	<77
S1	1 066.8	874.8	525.1	279.6	260 ~ 280
S2	716.3	167.4	95.7	95.8	93 ~ 99
S3	964.1	83.4	71.6	69.9	<77
Z1	800.8	578.8	161.4	139.1	138-143
Z2	868.4	135.3	88.2	86.7	82 ~ 88
Z3	972.6	85.8	49.7	49.2	<77
B1	641.3	523.9	301.9	201.9	
B2	752.7	135.5	90.0	89.0	88 ~ 93
B3	997.3	100.7	59.0	59.0	<77

炭化是木材热解吸热的重要阶段和重要表象。尽管炭化阶段是放热反应，但整个热解（包括之前的干燥阶段和预炭化阶段）是大量吸热的过程。在外界持续加热的情况下，外层木材逐渐热解，反应界面逐渐

由外向内推进，最终形成了 2 个完全不同的区域：炭化区域和未炭化区域。因此，在火烧过程中，木材夹层中的炭化、未炭化分界面，正是此时高低温区域的分界面。最终的炭化厚度则反映了曾经经历过高温的



图 6 试验后各试验件顶盖下第 2 层木材表面炭化情况照片
Fig.6 Photos on carbonizations of wood on the 2nd layer under the coping of every test piece after test

表 6 各试验件顶盖下第 2 层木材表面炭化厚度 Tab.6 Carbonization depth of the wood on the 2 nd layer under the coping of every test piece after test	
编号	炭化厚度/mm
M1	1.5 ~ 3.0
M2	2.5
M3	1.5
S1	5.5
S2	2.5 ~ 11.0
S3	3.5 ~ 4.5
Z1	2.5 ~ 8.0
Z2	2.5 ~ 7.0
Z3	2.5 ~ 3.0
B1	3.0 ~ 11.0
B2	2.5 ~ 10.0
B3	2.5 ~ 3.5

厚度。炭化越浅,说明高温区域越靠外,隔热效果越好,反之亦然。由此可见,上述木材夹层炭化厚度测试结果与 3.1 节温度测试结果是吻合的。综合温度测试结果和炭化厚度测试结果,可以明确 4 种木材隔热

效果从优到劣排序为毛白杨、中纤板、刨花板、水杉。

4 结语

将毛白杨、水杉 2 种天然木材和中纤板、刨花板 2 种人工木材填充入不同规格的运输容器模拟试验件,并进行了温度约 800 ℃、时长约 30 min 的野外油池火烧试验。通过对比试验件内部温度分布和炭化厚度进行综合分析,可得出明确结论:

- 1) 4 种木材中,毛白杨隔热效果最优,中纤板次之,然后是刨花板,最后是水杉。
- 2) 厚度小于 120 mm 时,4 种木材隔热效果差异较大;厚度达 120 mm 及以上,隔热性能差异较小,均能在火烧环境下将内部容器温度保持在 100 ℃左右及以下。

综合本文数据和结论,结合文献[4]所述缓冲性能研究结果,可为放射性运输容器缓冲隔热设计中的木材选型、构型及尺寸设计等提供参考。

参考文献:

[1] GB 11806—2019, 放射性物品安全运输规程[S].
GB 11806—2019, Regulations for the Safe Transport of

- Radioactive Material[S].
- [2] SSR—6, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials[S].
- [3] 邢攸冬, 杨思一, 安钰坤, 等. 核乏燃料运输容器减震器填充材料研究进展[J]. 包装工程, 2019, 40(21): 111-117.
- XING You-dong, YANG Si-yi, AN Yu-kun, et al. Research Progress in Impact Limiter Filling Materials for Nuclear Spent Fuel Transport Casks[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(21): 111-117.
- [4] 钟卫洲, 谢若泽, 何丽灵. 木质材料缓冲性能与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- ZHONG Wei-zhou, XIE Ruo-ze, HE Li-ling. Cushioning Performance and Application of Wood Materials[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [5] MUSOLFF A, QUERCITTI T K, MULLE R, et al. Experimental Testing of Impact Limiters for RAM Packages Under Drop Test Conditions[J]. Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material, 2014, 25(3): 133-138.
- [6] AMMERMAN D J. Spent Fuel Transportation Risk Assessment: Cask Impact Analyses[J]. Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material, 2013, 24(3): 121-127.
- [7] NEUMANN M, HERTER J, DROSTE B O, et al. Compressive Behaviour of Axially Loaded Spruce Wood under Large Deformations at Different Strain Rates[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2011, 69(3): 345-357.
- [8] HUANG Peng, HAO Zhi-ming, LI Wei-fen. Thermal Response Simulations of the Packing Container in Fire Environment Using the Finite Element Method[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2013, 33: 247-252.
- [9] 郭春秋, 邹佳讯, 衣大勇, 等. 新燃料元件运输容器热工安全分析及试验验证[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(11): 1992-1997.
- GUO Chun-qiu, ZOU Jia-xun, YI Da-yong, et al. Thermal Safety Analysis and Experimental Validation of New Fuel Element Transportation Container[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(11): 1992-1997.
- [10] BANG K, LEE J, SEO C, et al. Comparison of the Thermal Performance of Damaged and Intact Shock Absorber[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2013, 135: 051601.
- [11] ANDERSEN J A. Plutonium Accident Resistant Container Project[R]. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 2011.
- [12] 殷勇, 李其朋, 马庆俊. 高燃耗乏燃料运输容器结构设计研究[J]. 核科学与工程, 2017, 37(2): 308-313.
- YIN Yong, LI Qi-peng, MA Qing-jun. Study on the Structural Design of High Burnup Spent Fuel Transport Cask[J]. Nuclear Science and Engineering, 2017, 37(2): 308-313.
- [13] 汪军, 王志豪, 衣大勇, 等. YG-1 型运输容器跌落分析与结构优化[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(10): 1853-1858.
- WANG Jun, WANG Zhi-hao, YI Da-yong, et al. Dropping Analysis and Structure Optimization of YG-1 Cask[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(10): 1853-1858.
- [14] 陈治江, 蔡吉庆, 张志强, 等. TC-I型放射性材料运输容器的设计[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 6-9.
- CHEN Zhi-jiang, CAI Ji-qing, ZHANG Zhi-qiang, et al. Design of TC-I Radioactive Material Transport Container[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 6-9.
- [15] ZHONG W, RUSINEK A, JANKOWIAK T, et al. Experimental and Numerical Investigation on Compression Orthotropic Properties of Spruce Wood in Axial and Transverse Loading Directions[J]. Engineering Transactions, 2014, 62: 381-401.
- [16] 周本权, 李明海, 陈均, 等. 火灾环境下密封容器内木材热解试验研究[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(S1): 139-141.
- ZHOU Ben-quan, LI Ming-hai, CHEN Jun, et al. Experimental Study on Pyrolysis of Wood in Sealed Container under Fire Environment[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(S1): 139-141.

责任编辑: 曾钰婵