

船舶及海洋工程装备

舰船舱室火灾对邻舱温度影响试验研究

沈永福¹, 王志浩^{1*}, 熊言义², 赵永涛¹

(1.海军研究院, 北京 100072; 2.中国船舶集团有限公司第七一三研究所, 郑州 450052)

摘要: **目的** 研究舰船舱室起火后对舱室及相关邻舱温度的影响。**方法** 通过建立尺寸均为 2.4 m×2.4 m×2.4 m 的火灾发生舱室、水平相邻舱室、竖直相邻舱室 3 个舱室, 并设计不同工况下典型油池火灾场景的火灾试验, 测量 3 个舱室 36 个特征位置点的温度变化曲线, 揭示舰船舱室起火对邻舱温度变化的趋势和规律。**结果** 通过对比水平邻舱和竖直邻舱的温度, 当火源位于舱室中间时, 竖直邻舱的温升快于水平邻舱, 由于燃烧产生的烟气聚集在舱室顶部, 舱室顶部的热传递效应更加明显, 竖直邻舱温升更快。当火源位置靠近水平邻舱时, 水平邻舱较竖直邻舱温度上升快, 但当火焰熄灭后, 水平邻舱温度迅速下降, 竖直邻舱由于燃烧结束后仍有大量高温烟气聚集, 温度下降缓慢。**结论** 当舰船发生火灾导致舱室的温度不断升高时, 对水平相邻舱室和竖直相邻舱室温度的影响较为显著。随着油池火源面积不断增大, 火灾发生舱的温度不断增加, 对相邻舱室的热传导效应更加明显, 温度上升速率更快。由于燃烧产生的高温烟气大量悬浮在火灾发生舱室顶部, 造成竖直相邻舱室的温度要高于水平相邻舱室。

关键词: 舰船舱室; 油池火灾; 相邻舱室; 热传导; 高温烟气; 温升

中图分类号: U674.7

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)05-0103-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.05.014

Experimental Study on Temperature Impact of Ship Compartment Fires on Adjacent Compartments

SHEN Yongfu¹, WANG Zhihao^{1*}, XIONG Yanyi², ZHAO Yongtao¹

(1. Naval Research Institute, Beijing 100072, China; 2. No. 713 Research Institute of CSSC, Zhengzhou 450052, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate impacts of ship compartment fires on temperature of adjacent compartments. Three 2.4 m×2.4 m×2.4 m compartments (fire source, horizontally adjacent, and vertically adjacent) were constructed for fire tests with various pool fire scenarios in typical operating conditions. Temperature variations at 36 characteristic positions were measured to reveal the trend and pattern of temperature changes in adjacent compartments caused by ship compartment fires. By comparing the temperatures of the horizontal and vertical adjacent compartments, it was found that when fire originated centrally, the vertical compartment experienced a faster temperature rise than the horizontal one due to ceiling smoke accumulation enhancing heat transfer. Proximity to horizontal compartments caused a faster initial temperature increase there, though post-extinction cooling occurred faster than that in smoke-filled vertical compartments. However, in the vertical adjacent com-

收稿日期: 2025-02-23; 修订日期: 2025-03-30

Received: 2025-02-23; Revised: 2025-03-30

基金项目: 国家自然科学基金 (12372368)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (12372368)

引文格式: 沈永福, 王志浩, 熊言义, 等. 舰船舱室火灾对邻舱温度影响试验研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(5): 103-110.

SHEN Yongfu, WANG Zhihao, XIONG Yanyi, et al. Experimental Study on Temperature Impact of Ship Compartment Fires on Adjacent Compartments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(5): 103-110.

*通信作者 (Corresponding author)

partments, there was still a large amount of high-temperature smoke accumulated after the combustion, so the temperature dropped slowly. In conclusion, when a fire occurs to a ship and causes the compartment temperature to keep rising, its impact on the temperature of the horizontally adjacent compartments and the vertically adjacent compartments is relatively significant. As the fire area in the pool keeps rising, the temperature in the fire compartment keeps rising, and the heat conduction effect on adjacent compartments becomes more obvious, with a faster rate of temperature rise. Due to the fact that a large amount of high-temperature smoke produced by combustion is suspended at the ceiling of the compartment of fire, the temperature of the vertically adjacent compartments is higher than that of the horizontally adjacent compartments.

KEY WORDS: ship compartments; pool fire; adjacent compartments; heat conduction; high-temperature smoke; temperature rise

由于舰船携带大量燃油、弹药和其他易燃易爆物品,且舱室空间相对狭小、结构特殊、环境密闭,火灾作为舰船事故的最大威胁,一旦发生,若不能及时扑灭,便会造成严重后果^[1-2]。二战时,美军多艘航母因火灾事故造成巨大损失^[3]。因此,国外学者对舰船舱室火灾开展了大量的仿真和试验研究。Jansson等^[4]研究了顶部开口舱室的火灾特性。Cooper等^[5]针对具有不同几何形状的舱室进行了火灾热量研究,发现有60%~90%的热量被舱壁吸收。当舱室具有较大的宽高比且顶棚较为水平时,舱壁接受的热量较少;当舱室宽高比较小且顶棚形状不规则时,舱壁接收的热量较多。Gottuk等^[6]通过实验研究了全尺寸舱室回燃现象,探讨了回燃的主控参数。Rocket等^[7]对美国海军舰船火灾增长模型和烟气蔓延模型进行了研究和评价。同时美军制定了水面舰艇防火的相关标准^[8],明确了火灾分级标准和推进剂、爆炸物等可燃物的燃烧特性,以及舱室的火灾动力学。国内对于舱室火灾研究起步相对较晚,自20世纪90年代起开始研究舰船火灾安全^[9],特别是对于单舱室火灾的仿真和实验研究取得了不少成果^[10-15],为开展多舱室火灾研究奠定了一定基础。薛寒寒等^[16]研究了舰船狭长空间内电缆发生火灾后的热流场特性规律,建立了适用于狭长空间的火灾计算数学物理模型。徐昊等^[17]利用Pyrosim软件设计了一个单层多舱室平台,分别定性和定量地分析了火灾烟气的蔓延规律,并将火灾划分为4个等级,为判断火灾蔓延的路径和灭火救援提供了依据。朱小俊等^[18]针对火灾对本舱室及舱壁的温度分布开展了试验模拟研究。张光辉等^[19]则针对舰船火灾中起火舱室对相邻舱室的传热过程及邻舱的温度分布问题,采用数值模拟方法,分析了水平和竖直方向邻舱传热过程。张玲玲等^[20]通过火灾动力学模拟模型软件进行了计算机物理建模与仿真再现邻舱火灾场景,获得了被研究弹药舱内各温度探测器测点处相应参数的实时数据和变化特性,同时通过计算及仿真的形式再现了导弹意外点火的火灾场景,掌握并研究了弹药舱导弹意外点火火灾的特性规律。在试验研究方面,魏小栋等^[21]用实验方法研究了高大空间内高闪点喷气燃料的燃烧特性,重点考察了火源面积和燃烧

时间对周围温度场的影响,以及对周围的辐射强度。苏石川等^[22-23]基于FDS软件,采用大涡模拟技术对船舶机舱火灾进行了温度场分布仿真研究,并实验研究了不同初始氧气浓度下封闭空间内的柴油池火,分析了不同初始氧气浓度下封闭舱室内部的温度场和速度场的变化,获取了油池火燃烧和舱内环境参数变化的耦合规律。张光辉等^[24]通过ISO 9705试验平台,研究了小尺寸船舶燃油火灾的热释放速率、温度、热辐射强度,试验结果可用于大面积油池燃烧所产生的热释放率理论推算。

综上所述,目前对舰船舱室油池火灾的研究涉及较少,对相关邻近舱室的温度变化规律和特性分析仍需进一步完善。为探究舰船舱室油池火灾对邻舱温度的影响规律,本文通过设计不同工况下油池火灾场景试验,并通过测量舱室特征位置点的温度变化,分析起火面积和起火位置对邻舱温度的影响规律,试验结果对舰船火灾预防和消防灭火具有重要意义。

1 试验

1.1 方法

试验参考《美国舰艇技术手册》^[8]第555章第一卷水面舰艇防火标准,搭建了同尺寸的3个舱室,单个试验方舱的尺寸为2.4 m×2.4 m×2.4 m。试验方舱为单层钢制舱壁结构,材料为Q235,相邻舱室间舱壁厚度为8 mm。为了保证燃烧的持续性,避免因为氧气不足而导致火焰熄灭,在火灾试验中,在火灾本舱底部预留可调节面积大小的开口,使少量空气进入火灾本舱,保证火源的持续燃烧。同时,在顶部后方同样预留有面积可以调整的排烟口,舱门上预留有0.5 m×0.5 m的观察窗口,用于观察发生火灾时舱室的内部场景,并对火灾发展过程进行录像。水平邻舱和上方邻舱均为带舱门的密闭舱室,舱室结构及尺寸如图1所示,试验舱室现场如图2所示。

本试验主要考虑液压油火灾,采用真实可燃物进行点火,试验选取舰艇液压系统常用的HM-46抗磨型液压油^[25]。试验时,在火盆中倒入高度为10 mm的液压油,并倒入少许正庚烷引燃,模拟舱室内液压

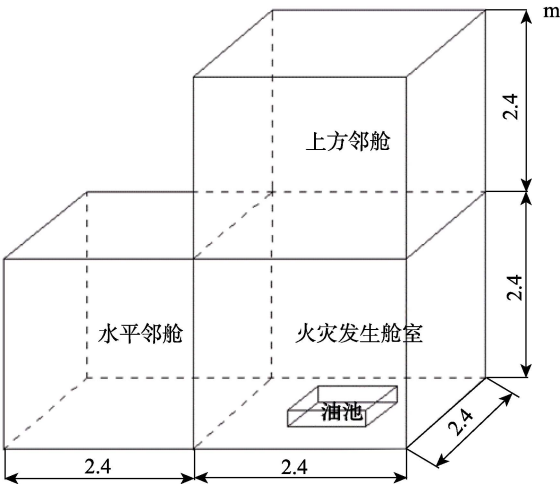


图 1 舱室结构及尺寸
Fig.1 Structure and dimension of compartment



图 2 试验舱室现场
Fig.2 Layout of experimental compartments

油池火的起火过程。为模拟不同起火面积, 设计不同的火盆尺寸, 分别为 0.5 m×0.5 m×0.1 m、1.0 m×1.0 m×0.1 m 及 1.5 m×1.5 m×0.1 m, 具体火盆实物如图 3 所示。

1.2 试验方案

为获取不同因素影响下舱室及邻舱内的实时温



图 3 0.5 m×0.5 m×0.1 m 火盆实物
Fig.3 Physical image of a 0.5 m×0.5 m×0.1 m fire basin

度数据, 参照 GB/T 31593.4《消防安全工程 第 4 部分 设定火灾场景和设定火灾的选择》相关要求, 以不同火源位置和起火面积作为试验变量条件, 设计 5 种试验工况, 具体试验内容及工况见表 1。其中, 起火位置具体如图 4 所示。

表 1 试验工况 Tab.1 Operating conditions of test				
试验 工况	起火 面积/m ²	火源 体积/L	起火位置	备注
1	0.25	2.5	中间位置	对应图 4 中位置①
2	0.25	2.5	靠近水平 邻舱	对应图 4 中位置②
3	0.25	2.5	放置角落	对应图 4 中位置③
4	1.0	10	中间位置	对应图 4 中位置①
5	2.25	18.8	中间位置	对应图 4 中位置①

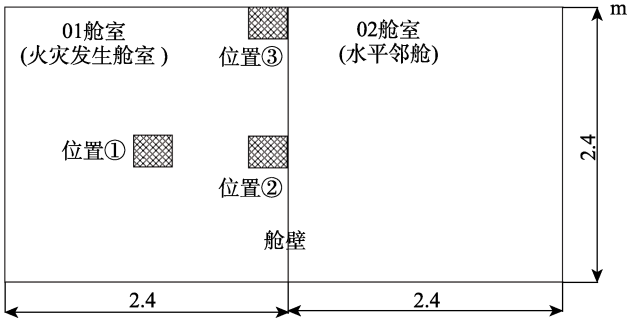


图 4 起火位置
Fig.4 Fire origin location

1.3 测试方案

本次试验需测量发生火灾时舱室和邻舱内的温度, 试验测试设备主要包括热电偶, 温度数据采集系统。其中, 热电偶为裸头镍铬-镍硅热电偶 (K 形), 如图 5 所示, 测温范围为 0~1 200 ℃。温度数据采集系统为 DAQ6510, 采样频率为 1 Hz。



图 5 热电偶实物
Fig.5 Physical image of thermocouple

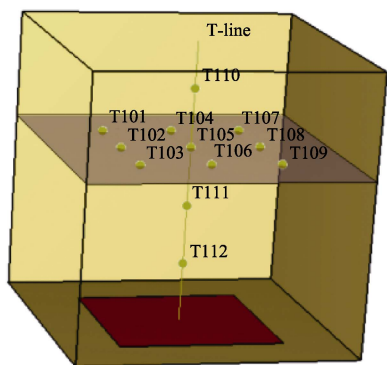
各舱室分别布置了 12 个温度测点, 每个舱室均采用“温度面”“温度树”的方式布置, 3 个试验舱共布置 36 个热电偶, 如图 6 所示。为方便区分不同舱室, 将 3 个舱室分别编号为 01、02、03 舱室。其中, 01 舱室为火灾发生舱室, 02 舱室为水平邻舱, 03 舱室为竖直邻舱。在 01 舱室 T101~T109 两两相隔 0.6 m 均匀布置测点, 在高度 $z=1.5$ m 的面上形成“温度面”, 中心线上相距 0.5 m 布置一个温度测点 T110~T112, 形成“温度树”。同理, 02 舱室 T201~T209 在 $x=0.2$ m 位置处形成“温度面”, 高 1.8 m 位置处中心线布置“温度树”。03 舱室 T301~T309 在 $z=0.2$ m

位置处形成“温度面”, 舱室竖直中心线上布置“温度树”。

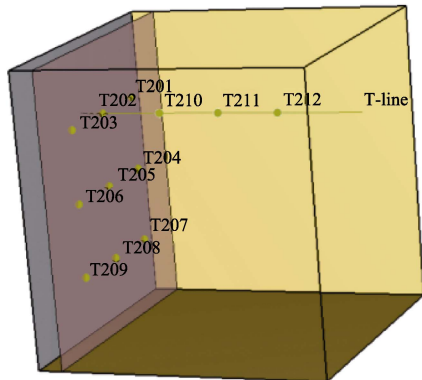
2 结果及分析

2.1 试验现象及结果

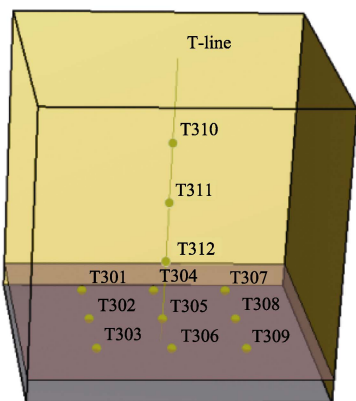
本文选取典型工况 1、2 和 5 进行重点分析和讨论。工况 1 试验于上午 9:26 开始点火, 9:37 火焰熄灭, 火焰持续时间约 11 min。试验点火后及稳定燃烧时的火焰如图 7 所示, 由于液压油燃点较高, 刚开始点火后主要为正庚烷在燃烧, 烟雾较小, 一小



a 01舱室



b 02舱室



c 03舱室



图 6 舱室温度测点布置

Fig.6 Layout of temperature measurement points in compartment: a) 01 compartment; b) 02 compartment; c) 03 compartment



图 7 工况 1 温度燃烧阶段
Fig.7 Temperature combustion phase of operating condition 1

段时间后, 液压油开始燃烧并伴随大量黑烟。由试验数据可以看出, 01 舱室内火焰温度峰值可达 693 ℃ 左右, T112 测点的温度最高, 该测点布置在火盆中心正上方 0.5 m 的位置, 舱室内除了火焰正上方温度测点外, 其他位置无明火火焰, 测得温度为 300 ℃。水平相邻舱室 02 舱室中 T201~T209 等 9 个距离舱壁较近的温度测点温升较高, 可达到 55 ℃。

工况 2 试验于 14: 34 开始点火, 14: 45 火焰熄灭, 火焰持续时间约 11 min。由 3 个舱室内 36 个温度测点数据可以看出, 火盆火焰高度较低, 未接触到高度为 1.5 m 的“温度面”, 因此在液压油持续燃烧期间, T101~T112 温度测点为 220~290 ℃, 表明该工况下液压油火灾时, 舱室内的平均温度可达 220 ℃ 以上。火焰熄灭后, 舱室内温度开始快速下降, 经过 5 min 左右, 01 舱内温度下降到 90 ℃ 左右, 随后开始缓慢下降。由于火盆靠近水平邻舱舱壁, 工况 2 的 02 舱室温度高于 03 舱室, 02 舱室温度可达 63~112 ℃, 而 03 舱室测点温度只能升高到 68~77 ℃。其中, 02 舱室内 T208 测点温度最高, 可达 112 ℃。该测点位置是与火盆距离最近的测点, 位于距离舱壁



图 8 工况 2 燃烧初期
Fig.8 Initial combustion phase of operating condition 2

0.2 m、距底部 0.6 m 的位置处。
工况 5 试验于 9: 38 开始点火, 10: 01 火焰完全熄灭, 火焰持续时间 23 min。火源面积增加后, 燃烧持续时间增长, 大火持续约 18 min, 随后火势变小, 5 min 后火焰完全熄灭, 随后温度下降至 200 ℃ 左右。01 舱内温度可达 450~800 ℃, 其中 T112 位置处温度最高, 可达 917 ℃。随着火源面积增大, 水平邻舱和竖直邻舱温度更高, 且高温持续时间更长, 02 舱室内温度可达到 134~180 ℃。竖直邻舱 03 舱室的温度也高于 02 舱室, 试验测得的温度在 160~215 ℃。



图 9 工况 5 稳定燃烧阶段
Fig.9 Stable combustion phase of operating condition 5

表 2 汇总了各工况点火试验时火灾发生舱室各温度测点的温度范围以及水平邻舱、竖直邻舱在开展点火后各测点的温度范围。

2.2 温度-时间试验结果分析

工况 1 中, 3 个舱室最高温度测点的数据对比如图 10 所示。由曲线可知, 火焰点燃后, 01 舱室布置在火源中心正上方的 T112 传感器温度最高。前期曲线逐步上升, 随着火焰逐步变大, 明火包围传感器, 温度振荡幅度变大。03 舱室内温度相比于 02 舱室内温升更快, 测点温度可达 65 ℃ 以上。这是由于燃烧产生的烟气聚集在 01 舱室顶部, 舱室顶部热传递效应更加明显, 顶部舱室温升更快。

工况 2 中, 3 个舱室最高温度测点的数据对比如图 11 所示。由曲线可知, 由于火源紧邻水平 02 邻舱, 在液压油持续燃烧阶段, 02 舱室内温度上升较快。当火焰熄灭后, 02 舱室内温度迅速下降, 而 03 舱室内温度下降相对缓慢, 由于燃烧结束后仍有少量高温烟气聚集在 01 舱室顶部。

表 2 试验数据汇总
Tab.2 Summary of test data

试验工况	01 舱室测点温度主要分布区间/℃	火灾发生舱室测点最高温度/℃	火源持续时间/min	02 舱温度范围/℃	03 舱温度范围/℃
1	240~693	693	11	40~55	55~66
2	220~297	297	11	63~112	68~77
3	150~233	233	10	50~84	65~74
4	350~915	915	13	70~85	85~110
5	450~917	917	21	134~180	160~215

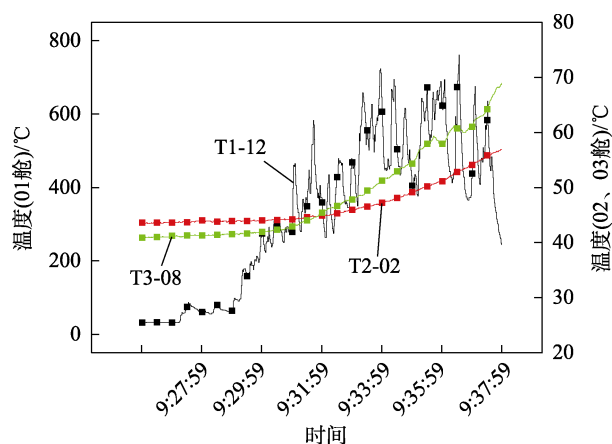


图 10 工况 1 最高温度-时间曲线

Fig.10 Peak temperature-time curve for operating condition 1

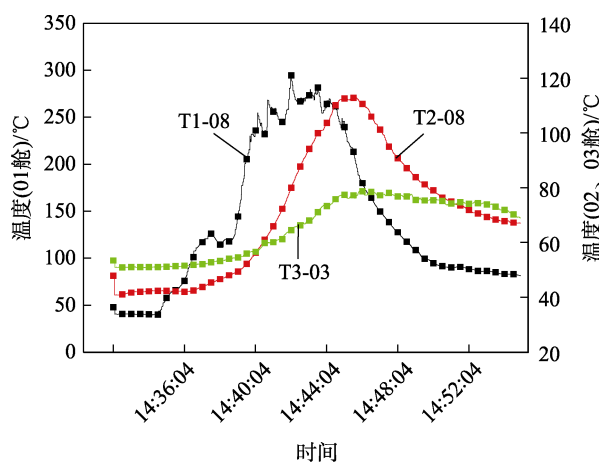


图 11 工况 2 最高温度-时间曲线

Fig.11 Peak temperature-time curve for operating condition 2

工况 3 中, 3 个舱室最高温度测点的数据对比如图 12 所示。该曲线与工况 2 类似, 在持续燃烧阶段, 02 舱室内部分测点温度上升较快。当火焰熄灭后, 温度迅速下降, 03 舱室内温度下降相对缓慢, 并且最高温度逐渐超过 02 舱室。

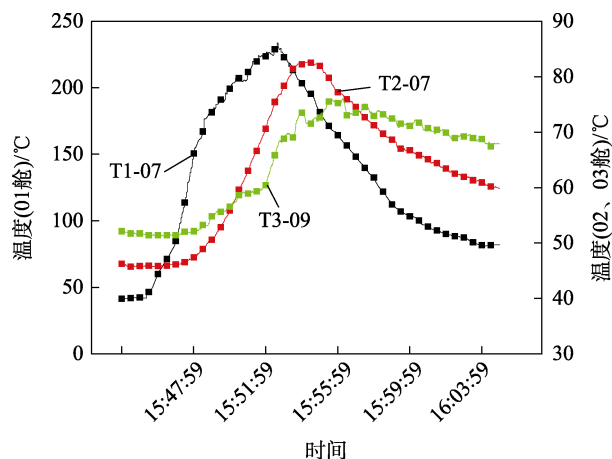


图 12 工况 3 最高温度-时间曲线

Fig.12 Peak temperature-time curve for operating condition 3

工况 4 中, 3 个舱室最高温度测点的数据对比如图 13 所示。由曲线可知, 当火源面积增大, 01 舱室的相同传感器 T112 测得峰值为 915 °C。同时, 水平邻舱和竖直邻舱温度上升更加明显, 且高温持续时间更长。02 舱室内最高温为 85 °C, 而 03 舱室的最高温度为 110 °C, 与工况 1 的试验结果一致。

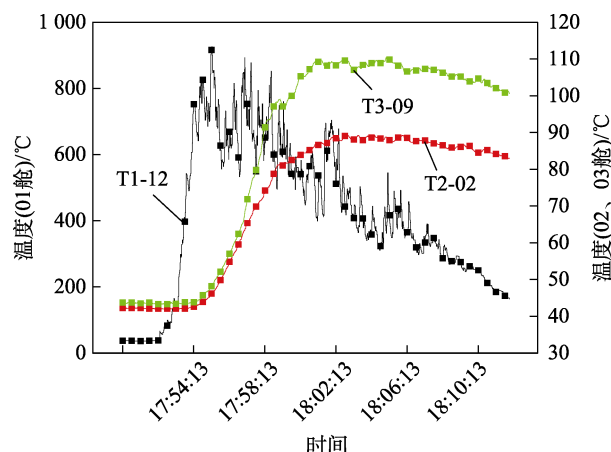


图 13 工况 4 最高温度-时间曲线

Fig.13 Peak temperature-time curve for operating condition 4

工况 5 中, 3 个舱室最高温度测点的数据对比如图 14 所示。由曲线可知, 当火源面积增大, 01 舱室的相同传感器 T112 测得的温度峰值为 917 °C, 略高于工况 4 的温度峰值。火源面积增加后, 燃烧持续时间增长, 大火持续约 18 min, 使 02 舱室内最高温为 180 °C, 03 舱室的最高温度为 215 °C, 较工况 4 的温度峰值有较大提升。

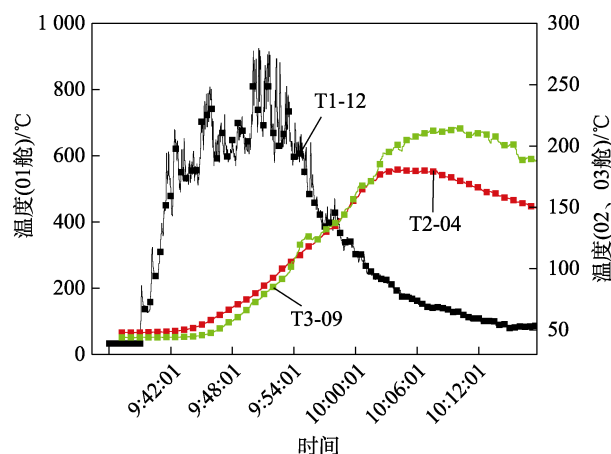


图 14 工况 5 最高温度-时间曲线

Fig.14 Peak temperature-time curve for operating condition 5

通过对比工况 1、2、3 的温度数据和温度-时间曲线可知, 3 种工况的火源持续时间相当, 水平 02 邻舱和竖直 03 邻舱温度的温度水平相当。试验证明, 火灾发生舱中火源位置对邻舱温度场的影响较小, 对温度变化规律的影响较大, 越靠近水平邻舱, 温度变

化越快。

通过对比工况 1、4、5 的温度数据和温度-时间曲线可知,随着火源面积不断增大,水平 02 邻舱和竖直 03 邻舱的温度也随着火源面积增大而增加。试验证明,火灾发生舱中火源面积对邻舱温度有较大影响,随着火源面积增大,温度变化越快。

通过对比水平邻舱和竖直邻舱的温度,当火源位于舱室中间时,竖直邻舱温升快于水平邻舱。由于燃烧产生的烟气聚集在舱室顶部,舱室顶部的热传递效应更加明显,竖直舱室的温升更快,该结论与《美国舰艇技术手册》结论一致。当火源位置靠近水平邻舱时,水平邻舱较竖直邻舱温度上升较快,但当火焰熄灭后,水平邻舱温度迅速下降,竖直邻舱由于燃烧结束后仍有大量高温烟气聚集,温度下降缓慢。

3 结论

本文通过建立尺寸均为 2.4 m×2.4 m×2.4 m 的火灾发生舱室、水平相邻舱室和竖直相邻舱室 3 个舱室,研究了舰船舱室起火后对邻舱温度的影响,分析了起火面积和起火位置对邻舱温度的影响规律,得出如下主要结论。

1) 随着火灾发生舱的起火面积不断增大,火灾燃烧持续时间逐渐变长,舱室温度峰值变大,对水平和竖直邻舱的温度影响逐渐显著。

2) 通过试验验证可知,由于燃烧产生的烟气聚集在火灾发生舱室顶部,舱室顶部的热传递效应更加明显,顶部舱室温升更快,竖直邻舱温升高于水平邻舱,与美标准一致。

3) 随着起火位置变化,当起火位置位于舱室中间时,竖直邻舱温升快于水平邻舱;当起火位置靠近水平邻舱时,水平邻舱较竖直邻舱温度上升较快,但当火焰熄灭后,水平邻舱温度迅速下降,竖直邻舱由于顶部高温烟气聚焦,温度下降缓慢。

此次试验结论对于提高舰船的通风和隔离设计水平,以及使用过程中防火和消防决策产生重大影响,后期需要对高温烟气扩散和辐射强度加强理论分析和仿真计算,用于修正舰船防火设计中的不足之处。

参考文献:

- [1] 陆守香,陈潇,吴晓伟.舰船消防安全工程研究现状[J].中国舰船研究,2017,12(5):1-12.
LU S X, CHEN X, WU X W. Research Status of Warship Fire Safety Engineering[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(5): 1-12.
- [2] 汪行,刘锋.舰船火灾和爆炸等危险源的危险评估技术研究[J].舰船科学技术,2019,41(8):181-183.
WANG X, LIU F. Research on Risk Assessment Tech-

nology for Hazard Sources such as Ship Fire and Explosion[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(8): 181-183.

- [3] 刘鹏翔,王兵.美国航母火灾历史及启示[J].舰船科学技术,2010,32(9):133-139.
LIU P X, WANG B. History of US Aircraft Carriers Fires and Its Revelation[J]. Ship Science and Technology, 2010, 32(9): 133-139.
- [4] JANSSON R, ONNERMARK B, HALVARSSON K. Fire in a Roof-Ventilated Room[R]. Stockholm: National Defence Research Institute, 1986.
- [5] COOPER L Y, STROUP D W. Thermal Response of Unconfined Ceilings above Growing Fires and the Importance of Convective Heat Transfer[J]. Journal of Heat Transfer, 1987, 109(1): 172-178.
- [6] GOTTUK D T, PEATROSS M J, FARLEY J P, et al. The Development and Mitigation of Backdraft: A Real-Scale Shipboard Study[J]. Fire Safety Journal, 1999, 33(4): 261-282.
- [7] U S Department of Commerce National Bureau of Standards. Fire Growth in Combat Ships: NBSIR 86-3451[S]. Washinton: Department of Commerce National Bureau of Standards, 1986.
- [8] U S Department of the Navy. Naval Ships' Technical Manual, Chapter 555, Volume 1, Surface Ship Firefighting: S9086-S3-STM-010[S]. Washinton: Department of the Navy, 2006.
- [9] 陈国庆,陆守香.船舶火灾安全工程研究现状[J].消防技术与产品信息,2004,17(8):21-24.
CHEN G Q, LU S X. The Present Situation of Study for Fire Safety Engineering of Ships and Boats[J]. Fire Technique and Products Information, 2004, 17(8): 21-24.
- [10] 陈利源,刘燕红,刘伯运,等.顶部开口舱室火灾特性的数值模拟研究[J].四川兵工学报,2015,36(4):139-143.
CHEN L Y, LIU Y H, LIU B Y, et al. Numerical Analysis of Fire Characteristics in Ship Cabin with Ceiling Vent[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015, 36(4): 139-143.
- [11] 华敏,殷志平,潘仁明.单室火灾的燃烧特性[J].南京工业大学学报(自然科学版),2012,34(2):133-137.
HUA M, YIN Z P, PAN R M. Combustion Characteristics for Single Room Fire[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 34(2): 133-137.
- [12] 邹高万.船舶机舱火灾热流场特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2005.
ZOU G W. Study on Characteristics of Heat Flow Field in Ship Engine Room Fire[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
- [13] 陈兵.船舶顶部开口舱室油池火灾模拟实验研究[D].合肥:中国科学技术大学,2011.
CHEN B. Experimental Study on Fire Simulation of Oil Pool in Open Cabin at the Top of Ship[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011.

- [14] 陈潇. 顶部开口腔室水平开口流动行为与火行为耦合特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
CHEN X. Study on Coupling Characteristics of Flow Behavior and Fire Behavior in Horizontal Opening of Top Opening Chamber[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [15] LI J M, ZHANG J Q, LI Q, et al. Combustion Phenomena of Pool Fire in a Ceiling Vent Compartment: The Vent Right above the Fire Source[J]. *Procedia Engineering*, 2018, 211: 358-364.
- [16] 薛寒寒, 熊言义, 姬翔, 等. 舰船狭长空间电缆火灾热流场特性数值研究[J]. *舰船科学技术*, 2021, 43(3): 111-115.
XUE H H, XIONG Y Y, JI X, et al. Numerical Research on Thermal Flow Field Characteristics of Cable Fires in Ship's Long-Narrow Space[J]. *Ship Science and Technology*, 2021, 43(3): 111-115.
- [17] 徐昊, 袁伟, 俞孟蓰. 船舶舱室火灾危险等级实时分类研究[J]. *舰船科学技术*, 2020, 42(19): 72-77.
XU H, YUAN W, YU M H. Real-Time Classification of Fire Hazard Levels in Ship Cabins[J]. *Ship Science and Technology*, 2020, 42(19): 72-77.
- [18] 朱小俊, 仲晨华, 杨志青, 等. 船舶火灾防火设计中舱室及舱壁温度分布试验模拟研究[J]. *中国造船*, 2012, 53(4): 59-67.
ZHU X J, ZHONG C H, YANG Z Q, et al. Research of Temperature Prediction in Steel Cabin Fire with Simulation and Experiment for Ship Fireproof Design[J]. *Shipbuilding of China*, 2012, 53(4): 59-67.
- [19] 张光辉, 夏子潮, 晁小雨, 等. 舰船起火舱室对邻舱的传热数值模拟[J]. *船海工程*, 2017, 46(3): 6-10.
ZHANG G H, XIA Z C, CHAO X Y, et al. Simulation of Heat Transfer of the Fire Compartment to the Adjacent Cabin in Ship[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2017, 46(3): 6-10.
- [20] 张玲玲, 王凯, 张宏. 邻舱火灾对弹药舱温度特性影响的数值研究[J]. *舰船科学技术*, 2018, 40(9): 148-153.
ZHANG L L, WANG K, ZHANG H. The Numerical Analysis of the Effect on the Temperature Characteristics of the Ammunition Cabin when the Adjoin-Cabin Have a Fire[J]. *Ship Science and Technology*, 2018, 40(9): 148-153.
- [21] 魏小栋, 王艳真, 万新斌. 船用高闪点喷气燃料池火灾实验分析[J]. *船海工程*, 2024, 53(2): 96-101.
WEI X D, WANG Y Z, WAN X B. Experimental Study on Pool Fire of Marine Jet Fuel with High Flash Point[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2024, 53(2): 96-101.
- [22] 苏石川, 王亮, 聂宇宏, 等. 某船舶机舱火灾发展过程的数值模拟与策略分析[J]. *消防科学与技术*, 2009, 28(1): 15-19.
SU S C, WANG L, NIE Y H, et al. Numerical Simulation and Strategy Analysis of Fire Development Process in a Certain Ship Engine-Room[J]. *Fire Science and Technology*, 2009, 28(1): 15-19.
- [23] 苏石川, 崔海滨, 王亮, 等. 不同氧浓度船舶机舱油池火灾热流场特性[J]. *消防科学与技术*, 2019, 38(1): 57-61.
SU S C, CUI H B, WANG L, et al. Thermal Flow Field Characteristics of Ship Engine Oil Pool Fire under Different Oxygen Concentrations[J]. *Fire Science and Technology*, 2019, 38(1): 57-61.
- [24] 张光辉, 浦金云, 杨占青, 等. 船舶燃油火灾特性参数试验研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2016, 37(1): 65-70.
ZHANG G H, PU J Y, YANG Z Q, et al. The Characteristic Parameters of Ship Oil Fires[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(1): 65-70.
- [25] 张文田, 陈波水, 王建华, 等. 舰船液压系统用油现状及发展方向[J]. *后勤工程学院学报*, 2007, 23(2): 45-48.
ZHANG W T, CHEN B S, WANG J H, et al. Current Situation and Development Trend of Lubricating Oils for Naval Hydraulic System[J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2007, 23(2): 45-48.