

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.03.009

围护结构材料对防火型家用救生舱 绝热性能的影响分析

周年勇,段 锋,徐慕豪,王庆荣,郭 强

(常州大学 石油工程学院,江苏 常州 213164)

摘要:火灾发生后,室内处于高温状态,救生舱主要通过良好的隔热性能和适宜的制冷系统来满足高层被困人员的生存环境需求。建立了防火型家用救生舱围护结构的数值模型,计算分析了有/无相变填充层下围护结构的绝热性能,并且优化了含相变填充层的舱体围护结构。结果表明:针对防火型家用救生舱的隔热结构,加设相变填充层能够有效降低围护结构的整体厚度,且无需配置相关制冷设施,提高了救生舱的有效容积;另外,优化含相变填充层的舱体围护结构时,不仅需要考虑舱内温度,还要考虑多重绝热结构下每种保温材料的适用温度。

关键词:家用救生舱;防火;相变储热;绝热性能

中图分类号:X 932

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2020)03-0063-08

Effect of Enclosure Structure Material on Thermal Insulation Performance of Fireproof Home Rescue Cabin

ZHOU Nianying, DUAN Feng, XU Muhao, WANG Qingrong, GUO Qiang

(School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: After the fire, the room is in a very high temperature state. Good thermal insulation and suitable refrigeration system are used to maintain the living environment of the trapped persons in the Fireproof Home Rescue Cabin. In this paper, a numerical model of enclosure structure with Fireproof Home Rescue Cabin is established, and the thermal insulation performance of the enclosure structure with/without phase change thermal storage is calculated and analyzed. Finally, the enclosure structure of cabin with phase change thermal storage was optimized. The research results show that adding phase change thermal storage can effectively reduce the overall thickness of the cabin thermal insulation structure, and it does not need to configure refrigeration system, the effective volume of cabin is

收稿日期:2019-12-26。

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20180960)。

作者简介:周年勇(1986—),男,江苏盐城人,博士,讲师。E-mail:zhounianying@cczu.edu.cn

引用本文:周年勇,段锋,徐慕豪,等. 围护结构材料对防火型家用救生舱绝热性能的影响分析[J]. 常州大学学报(自然科学版),2020,32(3):63-70.

increased. In addition, the optimization of cabin enclosure structure with phase change filling layer needs to consider not only the temperature in the cabin, but also the suitable temperature of each insulation material under multiple insulating structure.

Key words: home rescue cabin; fireproof; phase change thermal storage; thermal insulation performance

防火型家用救生舱的主要功能是在高层火灾时,给高层住户提供一个安全可靠的空间等待救援。目前,对于高层火灾救援的措施比较单一,基本依赖消防系统,群众自救的方式很少。因此,高层火灾救援问题引起了国内外的广泛关注。为了解决这一问题,美国研发设计了摩天大楼逃生轮^[1],德国发明了一种新型逃生电梯,日本设计的一种不锈钢制作的螺旋形室外楼梯,丹麦研发了商务楼梯滑动鞋安全系统等^[2]。

目前国内外对于救生舱的研究,主要分为井下可移动式救生舱与家用救生舱两个方面。赵焕娟^[3]计算了作用载荷下救生舱体的冲击响应,提出一种符合井下爆炸流场冲击的可移动式救生舱结构,并讨论了救生舱的安全性。曾伟^[4]通过对国内外关于矿用救生舱标准的调研分析,总结并提出了中国矿用移动式救生舱应具备的功能及特点,并对中国矿用移动式救生舱的行业标准提出了比较具体的要求。汪声等^[5]通过分析国外现有矿用救生舱产品,提出救生舱内各种安全设施的设计原理和功能介绍,为中国矿井救生舱的生产提供了参数依据和理论指导。程健维等^[6]借鉴发达国家在矿用救生舱的设计与研发方面的经验,初步探讨中国矿井救生舱设计,如动力设计、灾害抗击设计、生命维持系统设计(如食品能力供应、供氧、温度调节、排泄物处理等)、生命保障与应急系统的整体框架及应注意的问题^[7-8]。杨大明^[9]调研了各主要产煤国如南非、美国、加拿大、澳大利亚等对井下避难的不同要求,总结了各国在紧急避难中所积累的成功经验,敦促中国煤矿企业和管理部门认真分析和借鉴。刘恩海等^[10]设计了一种在密闭空间内可移动式应急救生舱环境控制系统。此外,王勇等^[11]研究了适用于火灾条件下的新型类三角型安全避难舱。梁敏等^[12]基于国内外物联网技术,提出将传感器与需要监测的设备、环境及人员相整合,通过分析处理数据,实现井下实时避灾指导。张海涛等^[13]研究一种家用救生舱,舱体设为三层,外层为抗暴抗压层,中间为隔热绝缘层,内层为舱内装饰层。

国内对于救生舱的研究热点主要在于制定救生舱行业制造标准,介绍救生舱的设计理念,而较少地探究材料对于救生舱性能的影响,本文着重分析不同的结构形式对舱体耐高温性能的影响,为防火型家用救生舱的优化设计研究提供理论基础。

1 防火型家用救生舱舱体物理模型

在充分调研国内外研究成果的基础上,考虑救生舱在高层住宅内部的安放位置,要求救生舱简洁、轻便,且应保障生存舱人均有效容积为 0.8 m^3 。防火型家用救生舱额定人数为 3 人,经校核计算研究,救生舱的外形尺寸为 $2\,220 \text{ mm} \times 728 \text{ mm} \times 1\,916 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高),如图 1 所示。根据不同的功能,家用救生舱划分为 2 个区域,分别是用于存放贵重物品的保险柜及用于人员避险的生存舱,其中生存舱内还应设有制冷系统、供氧系统、一氧化碳和二氧化碳净化系统。

对于家用救生舱,舱内温度控制在 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右即可满足避险人员的生存需求,考虑人员负荷与舱外高温结构负荷,需对舱内进行温湿度调节。家用救生舱的使用频率较低,考虑长期的维护成本,宜采用相变储能进行温度调节。本文为了优化防火型家用救生舱的围护结构,添加相变材料,通过计算相变吸热层的厚度,改善救生舱舱壁的厚度,从而达到简洁、轻便、保温绝热的性能良好且舱体的构成材料环保节能、经济适用的研究目标。

如图 2 所示,家用救生舱采用多层绝热设计,其结构材料的特性参数见表 1。

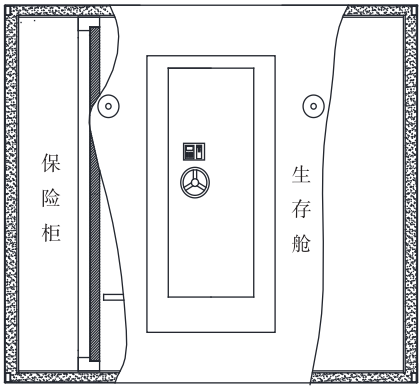
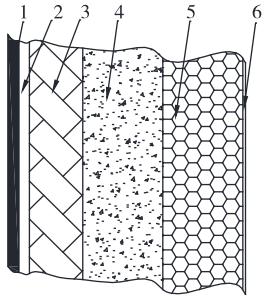


图 1 家用救生舱结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of Home Rescue Cabin



说明:1—高温防火涂层;2—结构用钛合金钢板;3—1050 型纳米微孔隔热板;4—950 型纳米微孔隔热板;5—相变材料填充层;6—内饰木板。

图 2 家用救生舱舱体围护结构图

Fig.2 Cabin building envelope of Home Rescue Cabin

家用救生舱的绝热结构最高使用温度不低于 1 000 ℃,且具有阻燃、导热系数低、密度小、可塑性的特点。目前纳米微孔隔热材料是隔热性能最好的高温隔热材料,其隔热性能比传统纤维类的隔热材料要好 3~4 倍。型号 NIP-1050 与 NIP-950 的纳米微孔隔热板能够较好地满足家用救生舱的设计需求,其中 NIP-1050 型的保温材料能够承受不低于 1 000 ℃的高温,但是导热系数相对较大;NIP-950 型的保温材料具有较小的导热系数,但是不能承受 800 ℃以上的高温。

对于相变材料填充层,选取德国著名公司 RUBITHERM 的 OP28E 产品,其具有凝固和熔融范围小、相变潜热高且相变体积膨胀小的特点,具体物性参数见表 2。

2 控制方程及边界条件

本文采用 ANSYS FLUENT 17.0 对舱体的结构模型展开数值分析,下面介绍本文所涉及的控制方程及相关边界条件。

2.1 控制方程

对于结构用钛合金钢板、纳米微孔隔热板及内饰板等非相变层,导热方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda (\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2})$$
 (1)

对于相变材料层,导热方程为

$$\rho \frac{\partial H}{\partial \tau} = \lambda (\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2})$$
 (2)

表 1 结构材料特性参数

Table 1 The characteristic parameters of structural material

材料	密度/ (kg · m ⁻³)	比热容/ (J · (kg · K) ⁻¹)	导热系数/ (W · (m · K) ⁻¹)
涂层	600	800	0.1(800 ℃)
钛合金	4 850	544.25	7.44(800 ℃)
内饰木板	700	2310	0.173(35 ℃)

表 2 相变材料的性能参数表

Table 2 Performance parameters of phase change materials

性能参数	指标
熔融范围/℃	27~29
凝固范围/℃	29~27
储热容量±7.5%/(kJ · kg ⁻¹)	245
比热容/(J · (kg · K) ⁻¹)	2 000
固体密度(15 ℃)/(kg · m ⁻³)	880
液体密度(40 ℃)/(kg · m ⁻³)	770
热导率(两相)/(W · (m · K) ⁻¹)	0.2

说明:因实物在相变时存在区间温度,为了便于计算,选取相变点 27 ℃作为计算温度。

式中: H 为相变材料的焓值(J/m^3),可按式(3)计算

$$H = \int_{T_0}^{T_s} c_{p,s} dT + \int_{T_s}^{T_l} c_{p,ph} dT + \int_{T_l}^T c_{p,l} dT \quad (3)$$

式中: T_0 为初始温度, K; T_s, T_l 为相变材料完全为固体、液体时的温度, K; $c_{p,s}, c_{p,ph}, c_{p,l}$ 为相变材料固相、两相及液相时的热容, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$; T 为 τ 时刻相变材料的温度, K。

2.2 边界条件

火灾温度和持续时间是火灾的重要指标。如图3所示,周年勇等^[15]通过对比现有实验火灾温升曲线,提出使用国际标准(ISO834)的标准火灾温升曲线代替实际火灾曲线,不仅能够给救生舱的设计提供足够的余量,且简化了救生舱的设计条件。另外,家用救生舱 1.5 h 的设计时间,不仅考虑了民用建筑的火灾持续时间,还综合了城市消防的救援能力^[16-17]。

考虑普通家庭火灾的持续时间,并结合城市消防救援能力,对家用救生舱的性能提出了以下要求:能够承受最高温度 1 000 $^{\circ}\text{C}$,置于火灾中燃烧时间不少于 1.5 h(标准火灾升温曲线 0~90 min 内),期间舱内温度应不高于 35 $^{\circ}\text{C}$ ^[18-19]。由于一般家用救生舱的额定救援人数为 3 人,避险期间,舱内人员大多时间处于静坐,发热量可以按照 120 W 计算,于是得到人员总负荷为 360 W,另外考虑其他设备发热 100 W,考虑一定余量,救生舱内的综合热负荷为 500 W。

舱外壁面的边界条件为^[14]

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_w = h_w(t_w - t_f) \quad (4)$$

舱内壁面的边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_i = C \quad (5)$$

式中: t_f 为 τ 时刻舱外环境温度, $t_f = 345 \lg(8\tau + 1) + 20$, ISO834 标准火灾温升曲线, K; t_w 为救生舱外壁面温度, K; h_w 为火灾下的壁面综合对流换热系数,取 46 $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$; C 为舱内综合热负荷折算后的当量热流密度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

3 结果分析与讨论

当不采用相变材料填充层时,家用救生舱的多重绝热舱体结构存在最优厚度及配比,具体如 Case0 所示, NIP-1050 板厚 20 mm, NIP-950 板厚 45 mm。为了进一步优化舱体结构,减少生存舱内的制冷设备占用空间,在上述两种隔热材料的基础上,增加了相变材料,根据不同材料的组合分布,模拟了 24 种工况,通过对舱内温度是否符合人员生存条件的筛选,选取了 5 种工况进行分析,见表 3。

3.1 无相变填充下围护结构的传热分析

由图 4 和图 5 可知,火灾 1.5 h 后, Case0 舱外高温涂层的温度已经达到 1 271.9 K, NIP-1050 板的温度达到了 1 183.3 K, NIP-950 板的温度达到了 946.3 K, 救生舱内饰板的温度达到了 309.6 K, 满足

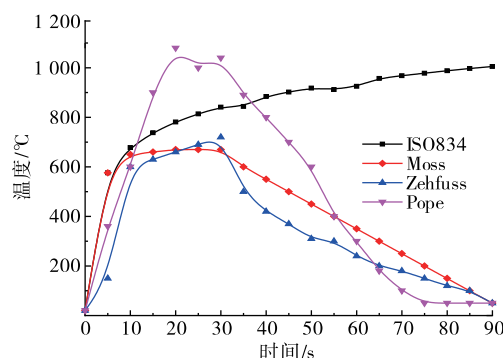


图3 标准升温曲线与实验升温曲线

Fig.3 Standard heating curve and the experimental temperature curve

内部人员生存。由此可得结论当 NIP-1050 厚度为 20 mm,NIP-950 厚度为 45 mm,总壁厚为 80 mm 时,能够满足家庭火灾 1.5 h 的高温绝热需求。对于家用救生舱而言,火灾 1.5 h 内,虽然计算结构负荷几乎为零,但是舱内还有其他热负荷,如人员负荷、设备负荷以及净化药剂的化学负荷等,因此,舱内仍需要配备制冷系统,或者储备一定的化学冰袋等。制冷设施的存在不仅仅占用了舱内的宝贵空间,还带来了大量的维护成本,下面展开含有相变填充层舱体围护结构的讨论。

表 3 舱体仿真计算载荷工况表

Table 3 Table of cabin simulation calculation load condition

工况	厚度/mm					
	涂层	钛合金	NIP-1050	NIP-950	相变	内饰
Case0	6	4	20	45	0	5
Case1	6	4	15	25	15	5
Case2	6	4	15	25	10	5
Case3	6	4	10	25	10	5
Case4	6	4	15	20	10	5
Case5	6	4	15	15	10	5

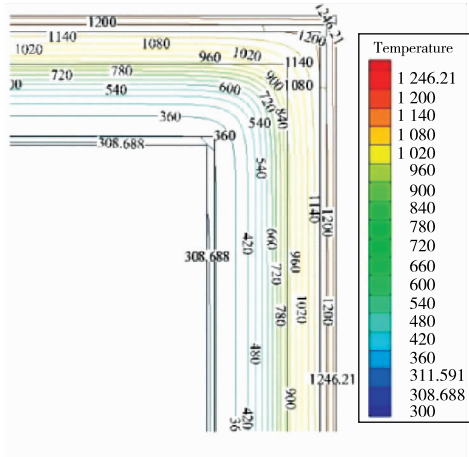


图 4 火灾 1.5 h 救生舱结构局部温度场云图 (Case0)

Fig.4 The local temperature nephogram of rescue cabin when the fire broke out 1.5 h (Case0)

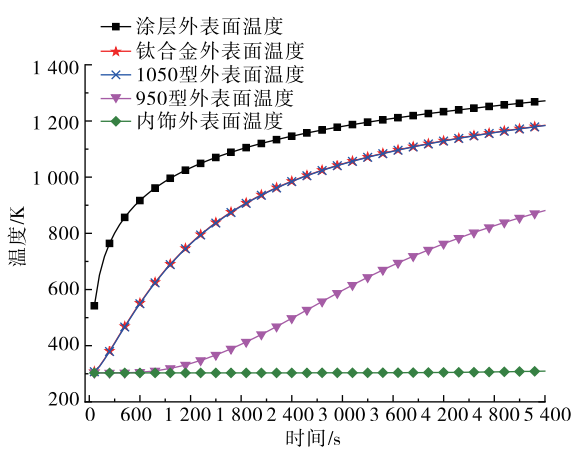


图 5 多层绝热保温边界温度随时间变化曲线 (Case0)

Fig.5 Curve of temperature variation over time at multi-layer insulation boundary (Case0)

3.2 含相变填充层围护结构的传热分析

Case1 在 Case0 的基础上,将 NIP-1050 板厚度降低到 15 mm,NIP-950 板厚度降低到 25 mm,并加设 15 mm 的相变填充层,总结构厚度比 Case0 降低了 10 mm。另外,为了简化计算,将舱内的人员、设备等热负荷折算成当量热流密度添加在内饰表面。15 mm 的相变填充层,不仅要克服舱外火灾的高温结构负荷,还要克服舱内的热负荷,计算结果分析如下。

由图 6 和图 7 可知,火灾 1 h 后,救生舱内壁温度维持在 300 K,救生舱整个内壁形成一道冷板,舱内人员散热量通过辐射与自然对流的方式向救生舱内部相变储热层导热,从而维持救生舱内温度不高于 35 ℃;火灾 1.5 h 后,救生舱内壁温度仍然保持 300 K 不变,舱内各状态点温度与之前保持一致,只是相变储热层的有效厚度发生改变。图 6 是火灾 1.5 h 救生舱局部放大温度场云图,从图中可以看出,救生舱边角处升温较大,另外火灾 1.5 h 后,剩余有效相变储热层厚度约占整体的 80%。火灾 1.5 h 后,涂层表面温度、1050 型与 950 型纳米微孔隔热板的外表面的温度升高曲线基本保持一致,由于相变层在吸热过程中,具有消耗自身潜热,保持温度不变的特性,既使得室外热量无法传递到救生舱内,又使

得舱内人员散热量不断通过内壁导入储热层。综上,仿真结果表明,舱体结构总厚度为 70 mm,同时添加 15 mm 相变储热层的设计方案完全满足救生舱的设计要求,且具有较大的设计余量,下面进一步优化救生舱的围护结构。

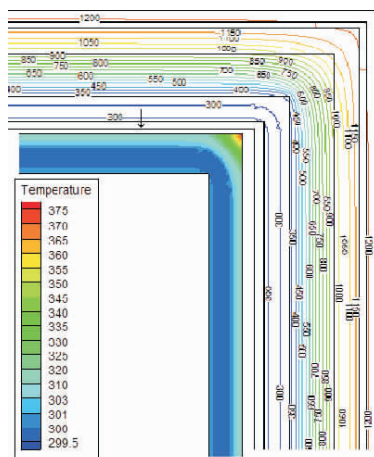


图 6 火灾 1.5 h 救生舱局部放大温度场云图 (Case1)

Fig.6 The local temperature nephogram of rescue cabin when the fire broke out 1.5 h (Case1)

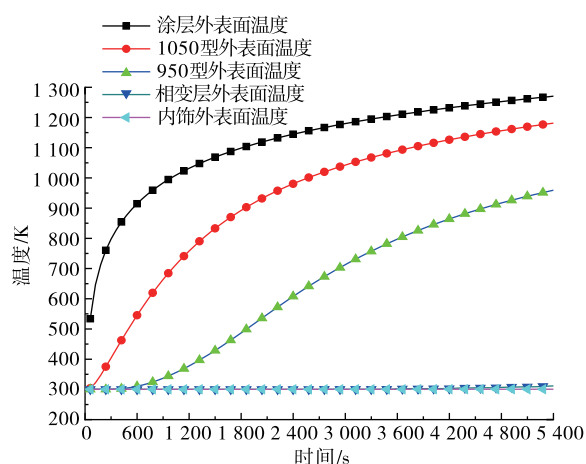


图 7 多层绝热保温边界温度随时间变化曲线 (Case1)

Fig.7 Standard heating curve and the experimental temperature curve (Case1)

3.3 不同厚度下舱体围护结构的传热性能对比

在保障舱内温度满足避险需求的基础上,进一步优化救生舱围护结构的厚度,提高舱内的有效容积,考虑结构强度的需求,只对绝热材料 NIP-1050, NIP-950 及相变层的厚度进行优化,具体对比结果如下。

由图 8 可知,火灾 1.5 h 后,Case5 结构厚度为 55 mm,其 10 mm 的相变层已经完全溶化,舱内壁均温已经上升至 332 K,超过不高于 35 °C 的设计要求。Case2, Case3, Case4 的涂层表面温度、NIP-1050 板外表面温度升高曲线基本保持一致,舱内壁温度都可以维持在 300 K,满足避险人员的生存需求。另外,对于 Case2, Case4 的 NIP-950 板外平均温度在 950 K 左右,而 Case3 却达到 1 043 K,接近 NIP-950 板的最高 1 073 K 的使用温度,且通过局部放大云图可知,其边角处的温度已经达到 1 130.72 K。对于绝热材料而言,一旦温度超过最高工作温度,其导热系数会急速增大,保温性能急剧下降,故 Case3 也无法满足救生舱围护结构绝热性能要求。对比 Case2, Case4 的结构参数可知, NIP-950 的板厚进一步降低了 5 mm,计算结果显示两者都能够满足救生舱的设计需求,其中 Case2 在火灾 1.5 h 后,未溶化的相变材料占比约为 50%,而 Case4 只有 20%,考虑实际加工过程中接触缝隙,选择余量较大的 Case2 作为最佳设计工况。Case2 的总体围护结构厚度为 65 mm,其中抵御 1 000 °C 高温的 NIP-1050 板厚为 15 mm,中间隔热层厚度 NIP-950 板厚为 25 mm,相变填充层厚度为 10 mm,相比无相变层的 Case0,总体厚度降低了 15 mm,且省去了舱内其他制冷设施。

由图 8 可知,火灾 1.5 h 后,Case5 结构厚度为 55 mm,其 10 mm 的相变层已经完全溶化,舱内壁均温已经上升至 332 K,超过不高于 35 °C 的设计要求。Case2, Case3, Case4 的涂层表面温度、NIP-1050 板外表面温度升高曲线基本保持一致,舱内壁温度都可以维持在 300 K,满足避险人员的生存需求。另外,对于 Case2, Case4 的 NIP-950 板外平均温度在 950 K 左右,而 Case3 却达到 1 043 K,接近 NIP-950 板的最高 1 073 K 的使用温度,且通过局部放大云图可知,其边角处的温度已经达到 1 130.72 K。对于绝热材料而言,一旦温度超过最高工作温度,其导热系数会急速增大,保温性能急剧下降,故 Case3 也无法满足救生舱围护结构绝热性能要求。对比 Case2, Case4 的结构参数可知, NIP-950 的板厚进一步降低了 5 mm,计算结果显示两者都能够满足救生舱的设计需求,其中 Case2 在火灾 1.5 h 后,未溶化的相

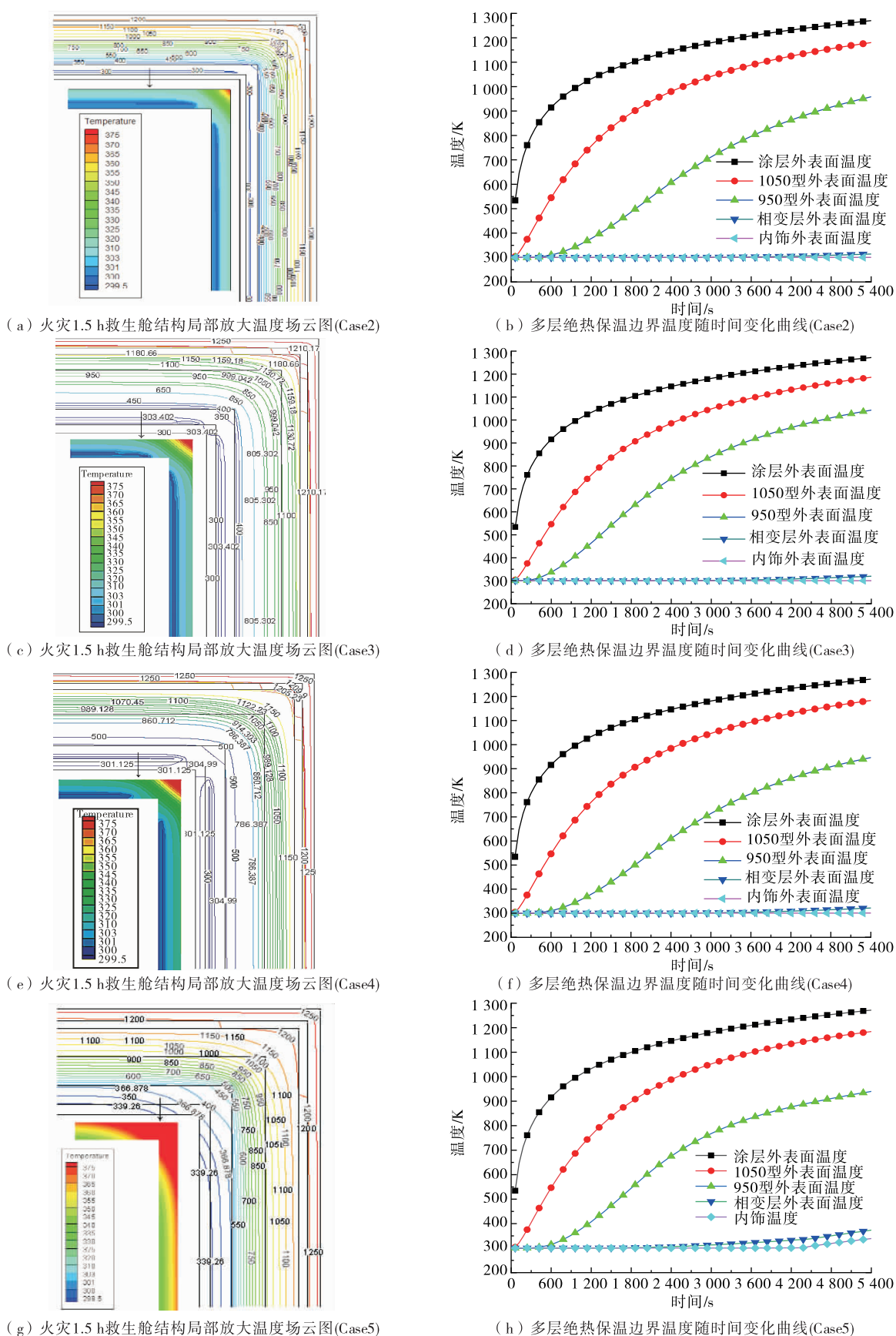


图8 不同材料厚度下舱体围护结构的温度分布云图及边界温度变化曲线

Fig.8 The temperature distribution and boundary temperature change of cabin envelope structure with different material thickness

变材料占比约为 50%,而 Case4 只有 20%,考虑实际加工过程中接触缝隙,选择余量较大的 Case2 作为最佳设计工况。Case2 的总体围护结构厚度为 65 mm,其中抵御 1 000℃ 高温的 NIP-1050 板厚为 15 mm,中间隔热层厚度 NIP-950 板厚为 25 mm,相变填充层厚度为 10 mm,相比无相变层的 Case0,总体厚度降低了 15 mm,且省去了舱内其他制冷设施。

4 结 论

针对防火型家用救生舱的隔热结构,加设相变填充层能够有效降低围护结构的整体厚度,且救生舱内无需配置相关制冷设施,提高了救生舱的有效容积。优化含相变填充层的舱体围护结构时,不仅需要考虑舱内温度,还要考虑多重绝热结构下每种保温材料的适用温度。对于防火型家用救生舱的围护结构,考虑安全性及设计余量等因素,建议采用 Case2 的多重围护结构配比:总体厚度为 65 mm,抵御 1 000℃ 高温的 NIP-1050 板厚为 15 mm,中间隔热层厚度 NIP-950 板厚为 25 mm,相变填充层厚度为 10 mm。

参考文献:

- [1]张琨,王辉.高层建筑安全逃生装置应用现状研究[J].施工技术,2017,46(13):31-35,127.
- [2]杨先碧.六大创意新技术:高楼火灾逃生保护伞[J].发明与创新,2011(1):38-39.
- [3]赵焕娟.井下瓦斯爆炸特性及救生舱舱体优化研究[D].北京:北京理工大学,2015.
- [4]曾伟.煤矿移动式避难舱标准的研究[C]//第4届全国煤炭工业生产一线青年技术创新交流表彰暨第十一届全国煤炭青年科技奖颁奖大会及研讨会.北京:中国科学技术出版社,2009:98-102.
- [5]汪声,金龙哲,栗婧.国外矿用应急救援舱技术现状[J].中国安全生产科学技术,2010,6(4):119-123.
- [6]程健维,杨胜强,程涛.国外矿井救生舱研究现状及问题分析[J].煤炭科学技术,2010,38(11):93-96.
- [7]RAJASEKHAR B, LORK C, YUEN C. How many watts: a data driven approach to aggregated residential air-conditioning load forecasting[C]//IEEE International Conference on Pervasive Computing & Communications Workshops. London: IEEE, 2017.
- [8]ZHANG Q, QI H, ZHAO G. Performance simulation of evacuation procedures in post-crash aircraft fires[J]. Journal of Aircraft, 2014, 51(3):945-955.
- [9]杨大明.主要产煤国井下避难手段[J].劳动保护,2010(8):24-26.
- [10]刘恩海,周前,石卫光,等.矿用救生舱生存环境控制系统研究[J].工业安全与环保,2017,43(9):95-97.
- [11]王勇.安全避难装置舱体结构的热防护性能分析[J].青岛科技大学学报(自然科学版),2018,39(6):87-91.
- [12]梁敏,邵晨霞.基于物联网技术的矿井避难设施设计探讨[J].煤炭工程,2016,48(4):16-18.
- [13]张海涛,朱卓楷,姚亮.一种家用救生舱:CN203139446U[P].2013-08-21.
- [14]闫全英,被动式相变房间传热性能的数值模拟[J].新型建筑材料,2015,42(4):22-25.
- [15]周年勇,陈梦梦,王露,等.防火型家用救生舱舱体热环境与结构优化研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(12):186-192.
- [16]MALENDOWSKI M, GLEMA A. Development and implementation of coupling method for CFD-FEM analyses of steel structures in natural fire[J]. Procedia Engineering, 2017, 172(3):692-700.
- [17]MOSS P J, DHAKAL R P, BONG M W. Design of steel portal frame buildings for fire safety[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(5):1216-1224.
- [18]YANG J, YANG L, WEI J. Study on open-cycle carbon dioxide refrigerator for movable mine refuge chamber[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 52(2):304-312.
- [19]WU B, LEI B, ZHOU C. Experimental study of phase change material's application in refuge chamber of coal mine [J]. Procedia Engineering, 2012, 45(1):936-941.

(责任编辑:殷丽莉)