

文章编号: 1671-6612 (2022) 06-882-08

海上升压站围护结构保温隔热评价

缪智昕

(上海勘测设计研究院有限公司 上海 200434)

【摘要】 为了解海上升压站围护结构的传热特点,从海上升压站平直舱壁和瓦楞板舱壁的传热比较、主体围护结构结露验算、主体围护结构隔热分析等三个方面进行了探讨。结果表明,相同室内外温差下瓦楞板舱壁的传热量比相同防火等级的平直舱壁的传热量大而热流密度较小、内表面最低温度更低而内表面最高温度较高;在满足房间的防火等级要求下,在渤海区域尽量不用H120级防火舱壁,如若使用应增加保温层;根据GB 50176-2016《民用建筑热工设计规范》,在东海、黄海和渤海区域使用A0级舱壁和A60级舱壁不会有结露风险,在我国渤海、东海、黄海,A0级甲板、A60级甲板、H120级甲板内表面均无结露风险;应尽量使用淡色舱壁和甲板以利于节能。

【关键词】 海上升压站;围护结构;保温隔热

中图分类号 TU831 文献标识码 A

Evaluation on Thermal Insulation of Enclosure Structure of Offshore Substation

Miao Zhixin

(Shanghai investigation and design research institute Co., Ltd, Shanghai, 200434)

【Abstract】 In order to understand the heat transfer characteristics of the enclosure structure of offshore booster station, this paper discusses the heat transfer comparison between flat bulkhead and corrugated bulkhead of offshore booster station, dew condensation checking calculation of main enclosure structure and heat insulation analysis of main enclosure structure. The results show that under the same indoor and outdoor temperature difference, the heat transfer of corrugated bulkhead is greater than that of straight bulkhead with the same fire rating, the heat flux is smaller, the lowest temperature on the inner surface is lower, and the highest temperature on the inner surface is higher; Under the condition of meeting the fire rating requirements of the room, H120 fire bulkhead shall not be used in Bohai area as far as possible. If it is used, thermal insulation layer shall be added; There is no risk of condensation when A0 and A60 bulkheads are used in the East China Sea, Yellow Sea and Bohai Sea; In the Bohai Sea, East China Sea and Yellow Sea, there is no risk of condensation on the inner surface of A0 deck, A60 deck and H120 deck; Light colored bulkheads and decks shall be used as far as possible to facilitate energy conservation.

【Keywords】 Offshore Substation; Enclosure Structure; Insulation

0 引言

同陆上建筑一样,室内外空气温差通过海上升压站围护结构的传热损失占空调系统能耗的很大部分,因此海上升压站外围护结构的传热特性对暖通设备合理选型和设计方案有很大影响。

GB/T 13409-92《船舶起居处所空气调节与通风设计参数和计算方法》针对船舶平板结构的传热

给出了具体的计算参数及方法,并给出了几种特殊隔热结构形式的传热系数取值^[1]。

《船舶设计实用手册冷藏通风分册》介绍了船舶围壁传热系数的简化算法,该算法是将带有梁(扶强材)的甲板或垂直舱壁看成是带有肋片的传热面来计算其传热系数,并在船舶围护结构隔热结构时将空气层中的对流换热简化成已知对流换热

系数的边界条件，同时忽略空气的热阻^[2]。

李伟光^[3]等人针对采用数值模拟软件对几种复杂船舶围壁进行稳态传热计算，并将计算所得围壁传热系数与相关标准提供的计算值进行对比，结果表明，采用数值方法计算得到的复杂船舶围壁传热系数与相关标准提供的参考值相比差异很大；计算结果也表明空气层厚度对船舶甲板围壁的传热系数影响较大，而对垂直围壁的传热系数影响较小。

海上升压站各舱室外维护结构多为波浪形式的舱壁，其传热计算较为复杂，通常需要借助计算机模拟进行计算，而围护结构隔热性能的好坏关系到各舱室冷、热负荷计算，最终影响空调设备的选型及系统设计。通过本课题的研究，为海上升压站典型设备舱室维护结构保温隔热设计提供一定参考。

1 海上升压站围护结构

目前海上升压站外围护结构舱壁有 A0 级、A60 级和 H120 级三种类型，如图 1~图 3 所示。

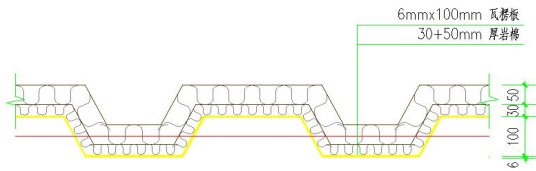


图 1 A0 级外墙防火绝缘及隔热详图

Fig.1 Details of fire insulation and heat insulation of class A0 exterior wall

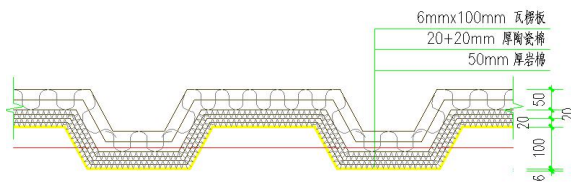


图 2 A60 级外墙防火绝缘及隔热详图

Fig.2 Details of fire insulation and heat insulation of class A60 exterior wall

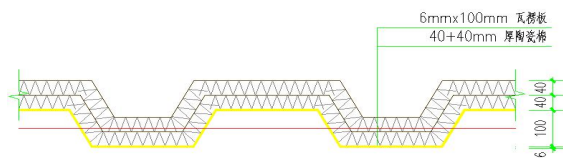


图 3 H120 级外墙防火绝缘及隔热详图

Fig.3 Details of fire insulation and heat insulation of class H120 exterior wall

A0 级外墙由室外到室内依次为 6mm 厚钢制瓦楞板、80mm 厚岩棉组成，A60 级外墙由室外到室

内依次为 6mm 厚钢制瓦楞板、40mm 厚陶瓷棉、50mm 厚岩棉组成，H120 级外墙由室外到室内依次为 6mm 厚钢制瓦楞板、80mm 厚陶瓷棉组成。

海上升压站甲板亦有 A0 级、A60 级和 H120 级三种类型，如图 4~图 6 所示。A0 级暴露甲板由室外到室内依次为 8mm 厚甲板、80mm 厚岩棉组成，A60 级暴露甲板由室外到室内依次为 8mm 厚甲板、40mm 厚陶瓷棉、50mm 厚岩棉组成，H120 级暴露甲板由室外到室内依次为 8mm 厚甲板、80mm 厚陶瓷棉组成。

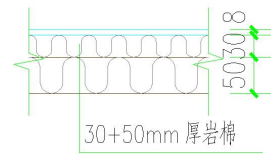


图 4 A0 级暴露甲板防火绝缘及隔热详图

Fig.4 Fire insulation and heat insulation details of A0 exposed deck

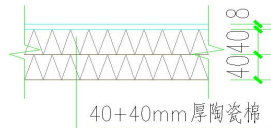


图 5 A60 级暴露甲板防火绝缘及隔热详图

Fig.5 Fire insulation and heat insulation details of A60 exposed deck

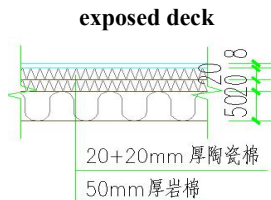


图 6 H120 级暴露甲板防火绝缘及隔热详图

Fig.6 Fire insulation and heat insulation details of H120 exposed deck

2 控制方程

当热物性参数 λ 、 ρ 和 c 均为常数且无内热源时，导热微分方程^[4]简化为：

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \quad (1)$$

因此，在稳态传热时，可将式 (1) 进一步简化为：

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

通常，围护结构传热计算中室内空气温度 t_i 和室外空气温度 t_o ，内外壁表面换热系数可以通过规范查到，因此，该传热过程满足第三类边界条件，可表示为：

$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = h(t_w - t_f) \quad (3)$$

式 (3) 中， t_w 为换热表面壁面温度； t_f 为周围流体的温度； n 为换热表面的外法线。

3 海上升压站平直舱壁和瓦楞板舱壁传热分析

3.1 数值模型验证

对于平直围护结构而言，其传热系数应按下式计算^[2]：

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \sum \frac{\delta}{\alpha_\lambda \cdot \lambda} + \frac{1}{\alpha_w}} \quad (4)$$

式中： K 为围护结构的传热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ； α_n 为围护结构的内表面换热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ； α_w 为围护结构的外表面换热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ； δ 为围护结构各层材料厚度， m ； λ 为围护结构各层材料导热系数， $W/(m \cdot K)$ ； α_λ 为材料导热系数修正系数，见表 2。

海上升压站围护结构各层材料的热工参数如表 1 所示。保温材料的修正系数如表 2 所示。

表 1 材料热工参数

参数	瓦楞板、甲板	岩棉	陶瓷棉
密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	7850	100	170
比热/ ($J/(kg \cdot K)$)	480	1220	1340
热导率/ ($W/(m \cdot K)$)	58.2	0.039	0.058
蓄热系数/ ($W/(m^2 \cdot K)$)	126	0.588	0.98

表 2 保温材料导热修正系数

Table 2 Thermal conductivity correction coefficient of thermal insulation materials

材料	使用部位	严寒和寒冷地区	夏热冬冷地区	夏热冬暖地区
岩棉	室外	1.1	1.2	1.3
	室内	1.05	1.15	1.25
陶瓷棉	室外	1.1	1.2	1.3
	室内	1.05	1.15	1.25

下面首先进行平直舱壁传热系数 Fluent 软件模拟值和理论计算值的对比验证，验证过程不考虑保温材料的导热修正系数。GB/T 13409-92《船舶起居处所空气调节与通风设计参数和计算方法》给出了围护结构的内表面换热系数为 $8W/(m^2 \cdot K)$ ，围护结构的外表面换热系数为 $80W/(m^2 \cdot K)$ ，所建立物理模型宽度 $1.1m$ ，左右边界均为绝热边界。边界条件如表 3 所示。

表 3 Fluent 模拟边界条件^[1]

参数	边界条件值
室内空气温度 ($^{\circ}C$)	27
室外空气温度 ($^{\circ}C$)	35
围护结构的内表面换热系数 $W/(m^2 \cdot K)$	8
围护结构的外表面换热系数 $W/(m^2 \cdot K)$	80

通过 ICEM 软件建立不同舱壁模型并进行网格划分，分别针对网格尺寸分别为 $0.1mm$ 、 $0.5mm$ 和 $1mm$ 时进行网格划分和计算。设 T_1 和 T_2 分别为较大网格和较小网格时计算得的某点的温度， T 为计算体的平均温度。当满足以下条件时，认为网格的独立性成立，可以使用其中较大网格计算。否则需要进一步细化网格。

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_j \left(\frac{T_1 - T_2}{T} \right)^2} < 0.01 \quad (5)$$

以 A0 级平直舱壁为例，当网格大小分别为 $0.1mm$ 、 $0.5mm$ 、 $1mm$ 时，网格分别约为 947.19 万个、38.30 万个、9.68 万个，A0 级平直舱壁的温度分布如图 7、图 8、图 9 所示。结果表明，网格大小分别为 $0.1mm$ 、 $0.5mm$ 、 $1mm$ 时的温度分布计算结果一致。

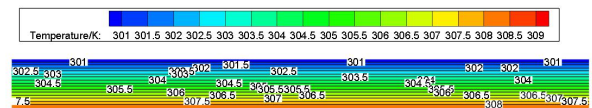


图 7 0.1mm 网格大小时 A0 级平直舱壁温度分布

Fig.7 Temperature distribution of A0 straight bulkhead with 0.1mm grid size

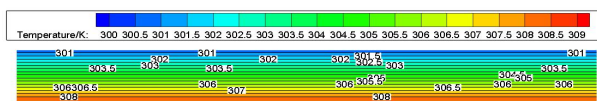


图 8 0.5mm 网格大小时 A0 级平直舱壁温度分布

Fig.8 Temperature distribution of A0 straight bulkhead with 0.5mm grid size

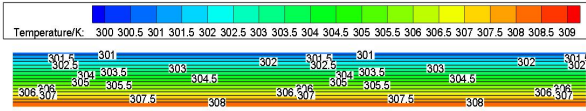


图 9 1mm 网格大小 A0 级平直舱壁温度分布

Fig.9 Temperature distribution of A0 straight bulkhead with 1mm grid size

通过对本项目情况进行网格独立性分析后，网格尺寸确定为 1mm，网格总数约为 9.68 万（A0 级平直舱壁）、10.9 万（A60 级平直舱壁）和 9.68 万（H120 级平直舱壁）。

表 4 平直舱壁传热系数

Table 4 Heat transfer coefficient of straight bulkhead

防火等级	理论值 (W/(m ² ·K))	模拟值 (W/(m ² ·K))
A0 (6mm 钢围壁、80mm 岩棉)	$\frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{1}{80} + \frac{0.006}{58.2} + \frac{0.08}{0.039}} = 0.45685$	0.45685
A60 (6mm 钢围壁、40mm 陶瓷棉、50mm 岩棉)	$\frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{1}{80} + \frac{0.006}{58.2} + \frac{0.04}{0.058} + \frac{0.05}{0.039}} = 0.47409$	0.47409
H120 (6mm 钢围壁、80mm 陶瓷棉)	$\frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{1}{80} + \frac{0.006}{58.2} + \frac{0.08}{0.058}} = 0.65923$	0.65923

3.2 平直舱壁和瓦楞板舱壁传热分析

下面进行比较平直舱壁和瓦楞板舱壁的传热分析，此过程亦不考虑保温材料的导热修正系数。A0 级平直舱壁和瓦楞板舱壁温度云图分别如图 10、图 11 所示，A60 级平直舱壁和瓦楞板舱壁温度云图分别如图 12、图 13 所示，H120 级平直舱壁和瓦楞板舱壁温度云图分别如图 14、图 15 所示。

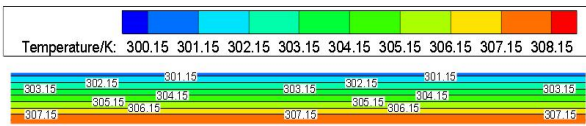


图 10 A0 级平直舱壁温度云图

Fig.10 Temperature nephogram of A0 straight bulkhead

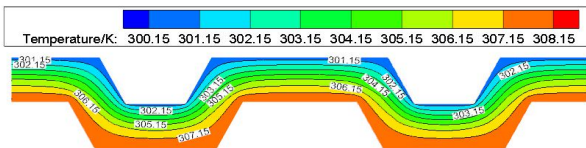


图 11 A0 级瓦楞板舱壁温度云图

Fig.11 Temperature nephogram of A0 corrugated bulkhead

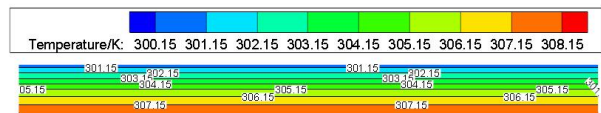


图 12 A60 级平直舱壁温度云图

Fig.12 Temperature nephogram of A60 straight bulkhead

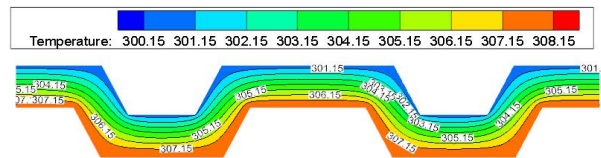


图 13 A60 级瓦楞板舱壁温度云图

Fig.13 Temperature nephogram of A60 corrugated bulkhead

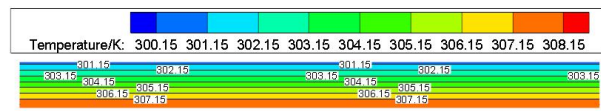


图 14 H120 级平直舱壁温度云图

Fig.14 Temperature nephogram of H120 straight bulkhead

求解过程是利用分离求解器以求解压力耦合方程组的半隐式方法 (SIMPLE) 进行迭代计算求解。求解时，求解器设为稳态分析，以二阶迎风格式计算，能量残差收敛标准设为 10⁻¹⁶，其他变量残差收敛标准设为 10⁻¹⁰。数值仿真以 ANSYS Fluent 18.0 作为通用 CFD 求解器。

平直舱壁传热系数模拟值和理论值如表 4 所示。从表 4 中可以看出，所建立的海上升压站围护结构 Fluent 模型的模拟值与理论值十分吻合，说明所建立的模型是可靠的。

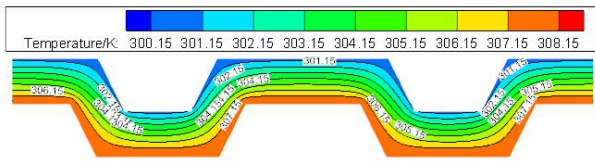


图 15 H120 级瓦楞板舱壁温度云图

Fig.15 Temperature nephogram of H120 corrugated bulkhead

比较平直舱壁和瓦楞板舱壁的温度云图可以发现，平直舱壁的传热是一维传热，而瓦楞板舱壁因为其波浪形的构造，其传热为二维传热，因此其内表面温度凹陷处较高。平直舱壁和瓦楞板舱壁的传热量和热流密度如图 16 所示（Fluent 软件在默认输出换热量大小时，按照 Z 方向高度为 1m 来处理）。

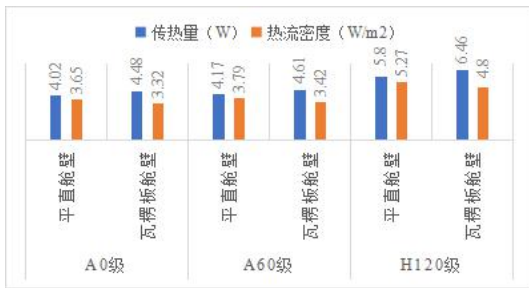


图 16 平直舱壁和瓦楞板舱壁传热量和热流密度

Fig.16 Heat transfer and heat flux density of straight bulkhead and corrugated bulkhead

由于瓦楞板舱壁波浪形的构造使得其比相同宽度的平直舱壁面积要大，导致传热面积增加，因此从图 16 中可以看出瓦楞板舱壁的传热量均比相同防火等级的平直舱壁的传热量大；而平直舱壁的热流密度比相同防火等级的瓦楞板舱壁的热流密度大，原因在于瓦楞板舱壁波浪形构造使得其在折弯处的厚度增大，导致瓦楞板舱壁的热流密度更小，但折弯处厚度的增大对传热量的影响没有面积增大对传热量的影响大，因此尽管瓦楞板舱壁的热流密度减小了，但传热量比平直舱壁的传热量大。

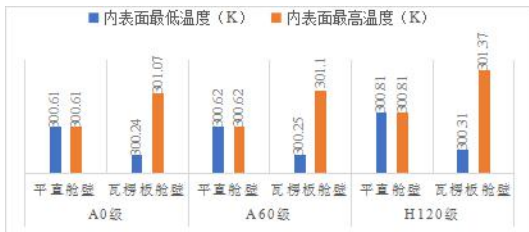


图 17 平直舱壁和瓦楞板舱壁内表面最低温度和最高温度

Fig.17 Minimum and maximum temperature of inner surface of straight bulkhead and corrugated plate bulkhead

平直舱壁和瓦楞板舱壁内表面最低温度和最高温度如图 17 所示。从图 17 可以看出，瓦楞板舱壁的内表面最低温度比相同防火等级的平直舱壁的内表面最低温度低，瓦楞板舱壁的内表面最高温度比相同防火等级的平直舱壁的内表面最高温度大。

4 海上升压站主体围护结构结露验算

冬季围护结构内表面温度过低，人体向外辐射热过多，会产生不舒适感，内表面结露可导致耗热量增大和使围护结构易于损坏。参照 GB 50176-2016《民用建筑热工设计规范》第 7.2.1 条规定：冬季室外计算温度低于 0.9℃时，应对围护结构进行内表面结露验算^[5]。根据表 5^[1-6]中国各海区的空气室外计算参数，东海、黄海和渤海区域需进行围护结构内表面结露验算。

表 5 中国各海区的空气室外计算参数表

Table 5 Outdoor calculation parameters of air in various sea areas of China

海区	季节	温度/℃	相对湿度/%
渤海	夏季	32	80
	冬季	-18	—
东海/黄海	夏季	32	80
	冬季	-10	50
南海	夏季	35	70
	冬季	5	75

参照 GB 50176-2016《民用建筑热工设计规范》第 7.2.1 条规定，结露验算的室内空气温度供暖房间取 18℃，非供暖房间取 12℃，考虑到海上比陆上更为潮湿，室内空气相对湿度取 70%，验算过程考虑保温材料的导热修正系数，平直舱壁可以用公式直接验算且在海上升压站中不常用，而瓦楞板舱壁的二维传热使得其难以利用公式进行验算，因此结露验算针对瓦楞板舱壁利用 Fluent 模拟软件进行。结露验算 Fluent 模拟边界条件如表 6 所示。

表 6 结露验算 Fluent 模拟边界条件

Table 6 Boundary conditions of fluent simulation for condensation checking calculation

参数	边界条件值	
室内空气温度 (℃)	供暖房间	18
	非供暖房间	12
室外空气温度 (℃)	东海/黄海	-10
	渤海	-18
围护结构的内表面换热系数 W/(m²·K)	8	
围护结构的外表面换热系数 W/(m²·K)	80	

查焓湿图，温度 18℃，相对湿度 70%时，露点温度为 12.3℃；温度 12℃，相对湿度 70%时，露点温度为 6.6℃。A0 级舱壁、A60 级舱壁、H120 级舱壁的结露验算表如表 7 所示。

表 7 舱壁结露验算表

Table 7 Checking calculation of condensation in bulkhead

区域	舱壁类型	露点温度 (°C)	内表面最低温度 (°C)
渤海	A0 级舱壁 供暖房间	12.3	13.72
	非供暖房间	6.6	8.43
	A60 级舱壁 供暖房间	12.3	13.58
	非供暖房间	6.6	8.32
	H120 级舱壁 供暖房间	12.3	12.32
	非供暖房间	6.6	7.26
东海/ 黄海	A0 级舱壁 供暖房间	12.3	14.44
	非供暖房间	6.6	9.2
东海/ 黄海	A60 级舱壁 供暖房间	12.3	14.33
	非供暖房间	6.6	9.12
	H120 级舱壁 供暖房间	12.3	13.29
	非供暖房间	6.6	8.3

从表 7 舱壁结露验算表中可以看出 H120 级舱壁在渤海区域的供暖房间运用的内表面最低温度为 12.32℃，非常接近室内的露点温度 12.3℃，内表面极有可能会结露，其温度云图如图 18 所示，有可能发生结露的部位位于内表面向室外突出部位的转折处，此处内表面温度最低。因此在满足房间的防火等级要求下，尽量不用 H120 级防火舱壁，如若使用应增加保温层。A0 级舱壁和 A60 级舱壁在东海、黄海和渤海区域无论在供暖房间和非供暖房间使用，均不会有结露风险。

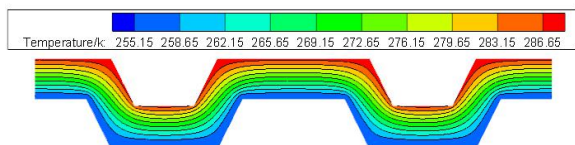


图 18 H120 级防火舱壁温度云图

Fig.18 Temperature cloud diagram of H120 fire bulkhead

下面利用公式进行 A0 级甲板、A60 级甲板、H120 级甲板的结露验算。

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \sum \frac{\delta}{\alpha_\lambda \cdot \lambda} + \frac{1}{\alpha_w}} \quad (6)$$

$$q = K(t_i - t_o) \quad (7)$$

$$q = \alpha_n(t_i - t_{wn}) \quad (8)$$

对于平直甲板，由式 (6) ~ (8) 可得甲板内表面温度 t_{wn} : $t_{wn} = t_i - \frac{K(t_i - t_o)}{\alpha_n}$ ， q 为热流密度， t_i 为室内计算温度， t_o 为室外计算温度。理论计算结果如表 8 所示。

表 8 甲板结露验算表

Table 8 Checking calculation of deck condensation

海区	防火等级	甲板传热系数 W/(m ² ·K)	内表面温度 (°C)	
			供暖房间 (18℃, 70%) 露点温度 12.3℃	非供暖房间 (12℃, 70%) 露点温度 6.6℃
东海/ 黄海	A0	0.52	16.18	10.57
	A60	0.54	16.11	10.52
渤海	H120	0.75	15.38	9.94
	A0	0.48	15.85	10.21
渤海	A60	0.50	15.77	10.14
	H120	0.69	14.90	9.42

从表 8 中可以看出，在我国渤海、东海、黄海，A0 级甲板、A60 级甲板、H120 级甲板内表面温度均高于室内露点温度，甲板内表面均无结露风险。

5 海上升压站主体围护结构隔热评价

有两个因素会造成室内外的传热：一是太阳辐射，二是室外和室内空气的温度差。太阳辐射对建筑物有两种类型的作用：一种是太阳辐射通过玻璃窗直接进入室内，无论冬季或夏季，室内总是可以得到太阳辐射造成的热量；另一种是外墙或屋顶在太阳的照射下提高了外表面的温度。夏季，由于室外空气温度高于室内，热量从室外通过外墙或屋顶传向室内，当外表面受到太阳照射时，温度更高，使室外向室内的传热量增加，我国南方地区夏季屋面外表面综合温度会达到 60℃ 以上，西外墙外表面温度达 50℃ 以上，使得围护结构内表面平均辐射温度大大超过人体热舒适辐射温度，直接影响室内热环境的好坏和建筑能耗的大小。GB/T 13409-92《船舶起居处所空气调节与通风设计参数

和计算方法》给出了舱外计算当量空气温度，如表 9 所示。

表 9 舱外当量空气温度

		舱外当量空气 温度, °C (舱 外设计空气温 度 35°C)	舱外当量空气 温度, °C (舱外 设计空气温度 32°C)
日晒表面	淡色	47	45
	深色	67	57
甲板	淡色	45	42
	深色	50	45
舱壁(日晒、日 阴面平均计算)	淡色	45	42
	深色	50	45

建筑外围护结构防热能力越强,室外综合热作用对室内热环境影响越小,不易造成室内过热。围护结构内表面温度是衡量围护结构隔热水平的重要指标,参照 GB 50176-2016《民用建筑热工设计规范》第 6.1.1 条规定,在给定两侧空气温度及变化规律的情况下,轻质围护结构 ($D < 2.5$) 外墙内表面最高温度应比室内空气温度低 3°C,屋面内表面最高温度应比室内空气设计温度低 3.5°C;重质围护结构 ($D \geq 2.5$) 外墙内表面最高温度应比室内空气温度小 2°C,屋面内表面最高温度应比室内空气设计温度低 2.5°C。A0 级舱壁、A60 级舱壁、H120 级舱壁的热惰性指标分别为 1.219、1.443、1.365, A0 级甲板、A60 级甲板、H120 级甲板的热惰性指标分别为 1.224、1.447、1.369,故海上升压站外围护结构的内表面最高温度限值按轻质围护结构考虑。利用 Fluent 针对 A0 级舱壁、A60 级舱壁、H120 级舱壁及 A0 级甲板、A60 级甲板、H120 级甲板进行隔热分析,模拟时需考虑保温材料的修正系数。边界条件如表 10 所示。

表 10 Fluent 模拟边界条件

参数	边界条件值
室内空气温度 (°C)	27
室外当量空气温 度 (°C)	东海、黄海、渤海 南海 42/45 45/50
围护结构的内表面换热系数 $W/(m^2 \cdot K)$	8
围护结构的内表面换热系数 $W/(m^2 \cdot K)$	80

A0 级舱壁、A60 级舱壁、H120 级舱壁及进行隔热分析模拟结果如表 11 所示。

表 11 舱壁隔热分析

防火等级	地区	室外空气 当量温度 (°C)	内表面 最高温 度 (°C)	与室内设 计温度差 值 (°C)
A0	严寒和寒 冷地区	42	28.78	1.78
	夏热冬冷 地区	45	29.14	2.14
	夏热冬冷 地区	42	28.91	1.91
	夏热冬冷 地区	45	29.29	2.29
	夏热冬暖 地区	45	29.43	2.43
	夏热冬暖 地区	50	30.10	3.1
A60	严寒和寒 冷地区	42	28.84	1.84
	严寒和寒 冷地区	45	29.21	2.21
	夏热冬冷 地区	42	28.97	1.97
	夏热冬冷 地区	45	29.36	2.36
	夏热冬暖 地区	45	29.50	2.5
	夏热冬暖 地区	50	30.20	3.2
H120	严寒和寒 冷地区	42	29.37	2.37
	严寒和寒 冷地区	45	29.84	2.84
	夏热冬冷 地区	42	29.52	2.52
	夏热冬冷 地区	45	30.03	3.03
	夏热冬暖 地区	45	30.20	3.2
	夏热冬暖 地区	50	31.09	4.09

从表 11 中可以看出,淡色舱壁内表面最高温度比深色舱壁的内表面最高温度要低,设计时应尽量使用淡色舱壁以利于节能;在夏热冬暖地区使用 A0 级舱壁、A60 级深色舱壁,外围护结构内表面最高温度均超过室内设计温度 3°C;在夏热冬暖地区使用深色、淡色 H120 级舱壁和在夏热冬冷地区使用深色 H120 级舱壁,外围护结构内表面最高温度超过室内设计温度 3°C。外围护结构内表面最高温度超过室内设计温度 3°C 会使舒适性房间舒适性较差,不利于空调整能,设计时应考虑增加保温层厚度。

A0 级暴露甲板、A60 级暴露甲板、H120 级暴露甲板的隔热分析采用理论分析,由式 (7)~(8) 可得甲板的内表面温度,结果如表 12 所示。从表 12 可知;淡色甲板内表面最高温度比深色甲板的内表面最高温度要低,设计时应尽量使用淡色甲板以利于节能;A0 级暴露甲板、A60 级暴露甲板、H120 级暴露甲板在不同使用工况下内表面温度均不超过室内设计温度 3.5°C,满足 GB 50176-2016《民用建筑热工设计规范》的隔热设计标准。

表12 甲板隔热分析

Table 12 Deck insulation analysis

防火等级	地区	甲板传热系数	室外空气当量温度(°C)	内表面温度(°C)
A0	严寒和寒冷地区	0.48	45	28.08
			57	28.79
	夏热冬冷地区	0.52	45	28.17
			57	28.95
	夏热冬暖地区	0.56	47	28.41
			67	29.81
A60	严寒和寒冷地区	0.50	45	28.12
			57	28.86
	夏热冬冷地区	0.54	45	28.21
			57	29.02
	夏热冬暖地区	0.58	47	28.46
			67	29.92
H120	严寒和寒冷地区	0.69	45	28.55
			57	29.58
	夏热冬冷地区	0.75	45	28.68
			57	29.80
	夏热冬暖地区	0.81	47	29.01
			67	31.03

6 结论

本文从紧凑型海上升压站平直舱壁和瓦楞板舱壁的传热比较、主体围护结构结露验算、主体围护结构隔热分析等三个方面进行了探讨,有如下结论:

(1) 相同室内外温差下瓦楞板舱壁的传热量比相同防火等级的平直舱壁的传热量大;而平直舱壁的热流密度比相同防火等级的瓦楞板舱壁的热流密度大,原因在于瓦楞板舱壁波浪形构造使得其在折弯处的厚度增大,导致瓦楞板舱壁的热流密度更小,但折弯处厚度的增大对传热量的影响没有面积增大对传热量的影响大,因此尽管瓦楞板舱壁的热流密度减小了,但传热量比平直舱壁的传热量大。

(2) 相同室内外温差下,瓦楞板舱壁的内表面最低温度比相同防火等级的平直舱壁的内表面最低温度低,瓦楞板舱壁的内表面最高温度比相同防火等级的平直舱壁的内表面最高温度大。

(3) H120级舱壁在渤海区域的供暖房间运用的内表面最低温度为12.32°C,非常接近室内的露

点温度12.3°C,内表面极有可能会结露,有可能发生结露的部位位于内表面向室外突出部位的转折处,此处内表面温度最低。因此在满足房间的防火等级要求下,在渤海区域尽量不用H120级防火舱壁,如若使用应增加保温层。在东海、黄海和渤海区域无论在供暖房间和非供暖房间使用A0级舱壁和A60级舱壁,均不会有结露风险。

(4) 在我国渤海、东海、黄海,A0级甲板、A60级甲板、H120级甲板内表面温度均高于室内露点温度,甲板内表面均无结露风险。

(5) 淡色舱壁内表面最高温度比深色舱壁的内表面最高温度要低,设计时应尽量使用淡色舱壁以利于节能;在夏热冬暖地区即南海地区使用A0级舱壁、A60级深色舱壁,外围护结构内表面最高温度均超过室内设计温度3°C;在夏热冬暖地区使用深色、淡色H120级舱壁和在夏热冬冷地区使用深色H120级舱壁,外围护结构内表面最高温度超过室内设计温度3°C。外围护结构内表面最高温度超过室内设计温度3°C会使舒适性房间舒适性较差,不利于空调整能,设计时应考虑增加保温层厚度。

(6) 淡色甲板内表面最高温度比深色甲板的内表面最高温度要低,设计时应尽量使用淡色甲板,以利于节能;A0级暴露甲板、A60级暴露甲板、H120级暴露甲板在不同使用工况下内表面温度均不超过室内设计温度3.5°C,满足GB 50176-2016《民用建筑热工设计规范》的隔热设计标准。

参考文献:

- [1] 施鼎岳.船舶起居处所空气调节与通风设计参数和计算方法[M].北京:国家技术监督局,1992.
- [2] 全国勘察设计注册公用设备工程师暖通空调专业考试复习教材[M].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [3] 李伟光,李安邦,徐新华,等.复杂船舶围壁传热系数取值探讨[J].中国舰船研究,2014,9(2):78-83.
- [4] 杨世铭,陶文铨.传热学(第4版)[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [5] GB50176-2016,民用建筑热工设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [6] 中国海洋石油总公司企业标准.海上平台采暖通风空调冷库系统设计方法[M].北京:中国海洋石油总公司,2016.