

相变防护服的数值研究^{*}

叶 宏, 张云鹏, 葛新石

(中国科学技术大学热科学与能源工程系, 安徽合肥 230027)

摘要:利用简化传热模型, 以皮肤表面温度为参考, 研究了相变防护服在 0℃ 海水及火场两种极端条件下的防护性能与相变材料的潜热、熔点及厚度的关系. 研究发现相变防护服在极端温度条件下具有良好的防护性能, 可大大延长相关人员的作业时间; 所选相变材料的熔点和潜热对相变防护服的性能有重要影响, 潜热大且熔点高的相变材料的防护性能好; 在重量允许的范围内相变防护服的性能随厚度的增加有明显提高.

关键词:相变材料; 相变防护服; 海水; 火场

中图分类号: TS101.3⁺4

文献标识码: A

0 引言

固液相变材料是近年来获得广泛应用的一种贮能材料. 它利用材料在相变时吸热或放热来贮存或释放热能^[1], 这种材料的能量贮存密度相对于显热贮热较高, 所用装置简单、体积小、设计灵活、不需要进行控制, 因而使用方便. 另外, 相变过程近似恒温, 可以控制体系的温度.

20 世纪 70 年代末, 美国航空航天局(NASA)空间研究所完成了一个项目^[2], 该项目利用相变胶囊编织成的纺织品具有温度调节功能, 并申请了专利. 该研究的最初目的是为了更好地了解宇航员和珍贵设备, 使其在太空热环境的影响下温度不至于发生急剧变化. 近几十年来, 各国研究人员先后采用多种工艺路线开发可调节温度的纺织品, 已经取得了相当大的进展. 国内的研究起步较晚, 目前离工业化生产还有很大距离.

作者利用一种简化模型, 以皮肤表面温度为参考, 讨论了被动式相变防护服在低温海水和火场两种极端条件下的防护性能与所选相变材料的熔点、相变温度、相变潜热及相变织物厚度之间的关系.

1 数理模型

为方便起见, 将人体假想为一长圆柱体, 忽略两端的传热, 在该圆柱体的周壁上包覆相变材料, 即相变防护服, 相变材料通常选用石蜡, 这是由于石蜡具有很多的优点, 如过冷度很

* 收稿日期: 2004-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(50402009)及安徽省自然科学基金(050440201)资助项目.

万方数据

作者简介: 叶宏, 1973 年生, 博士/副教授. 研究方向: 工程热物理. E-mail: hye@ustc.edu.cn

小、无毒、种类多等。如图1所示,其中环境分别取0℃的海水及火场。基于该模型作以下假设:(I)人体内部温度恒为36℃;(II)相变材料层与皮肤紧密接触,接触热阻可忽略;(III)导热只在径向发生;(IV)皮肤及相变材料的物性参数为常数。由此,人体皮肤层热传导方程及边界条件如下:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_a r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho_a \frac{\partial H}{\partial t}, \quad r_i < r < r_m \quad (1)$$

$$T|_{r=r_i} = 36 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2)$$

$$T|_{r=r_m-} = T|_{r=r_m+}, \quad (3)$$

k_a 、 ρ_a 与 c_{pa} 分别代表皮肤的导热系数、密度及定压比热容; r_i 和 r_m 分别代表皮肤层内表面及外表面到模型中心的距离。

相变材料层的控制方程采用焓法模型^[4], 方程及边界条件如下:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_b r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho_b \frac{\partial H}{\partial t}, \quad r_m < r < r_o, \quad (4)$$

$$-k_b \frac{\partial T}{\partial r} = h(T - T_\infty), \quad (5a)$$

$$-k_b \frac{\partial T}{\partial r} = h(T - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_s^4). \quad (5b)$$

k_b 、 ρ_b 与 c_{pb} 分别代表相变材料的导热系数、密度及定压比热; r_o 代表相变材料外表面到模型中心的距离; h 代表相变材料外表面与外界环境之间的对流换热系数;(5a)为模型处于海水中的边界条件,(5b)是模型处于火场中的边界条件。

方程(4)中的温度和焓值的关系如下:

$$T = \begin{cases} H|_{c_{ps}}, H < H_s \\ \frac{H + (T_f - d)Q_l/2d}{c_{ps} + Q_l/2d}, H_s < H < H_l \\ T_f + 2d + \frac{H - H_l}{c_{pl}}, H > H_l \end{cases} \quad (6)$$

$$H_s = c_{ps}(T_f - d), H_l = c_{pl}(T_f + d) + Q_l. \quad (7)$$

T_f /℃为相变温度, d /℃为相变半径, Q_l / (kJ · kg⁻¹) 为相变潜热, H_s / (kJ · kg⁻¹) 固相饱和焓, H_l / (kJ/kg⁻¹) 为液相饱和焓。

环境参数取法如下:

(I) 在火场中对流换热系数 h 一般在 5~25 (W · m⁻² · K⁻¹) 之间^[5], 计算时取为 20 (W · m⁻² · K⁻¹); 火场空气温度在几十度到上千度之间^[4], 由于人体一般不会直接接触火焰, 因此取热空气的温度为 200℃, 辐射体温度取为 150℃, 假设火场中辐射体为黑体。

(II) 在海水中时, 根据传热学经验公式

$$\overline{Nu}_D = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (10^{-5} < Ra_D < 10^{12}) \quad (8)^{[6]}$$

万方数据

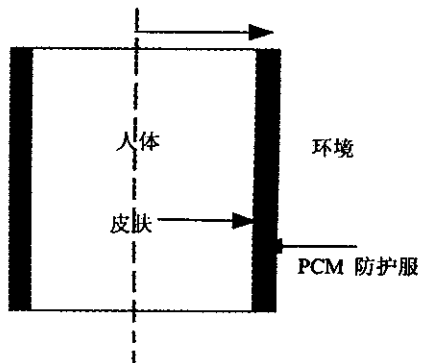


图1 人体在相变防护服的保护下与环境换热的简化模型

Fig.1 The simplified model for analyzing the heat transfer between the human body and the environment under the protect of phase change protective clothing

及相应的海水热物性参数^[7],经计算得到对流换热系数为 $31.2 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$. 随季节、区域及深度的不同,海水温度最低可达 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,计算时取为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

为研究相变材料的各种参数对防护服性能的影响,各种参数的取值如下:

(I) 相变材料的厚度取 1 mm 和 2 mm 两个值.

(II) 相变材料的熔点:根据人体温度变化范围,在火场中取 $32.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $36.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $40.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 三个值;在海水中取 $21.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $28.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $32.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 三个值^[1].

(III) 相变潜热 Q_l 取 80 kJ/kg 、 120 kJ/kg 、 160 kJ/kg 及 0 (即非相变材料)四个值,之所以考虑潜热的变化主要是为了研究相变防护服中相变材料含量对其性能的影响.

2 计算结果及分析

2.1 相变潜热对体表温度的影响

图 2、图 3 和图 4 分别给出了在火场环境中皮肤表面温度的变化与相变潜热的关系,相应相变材料的熔点分别为 $32.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $36.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $40.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. 比较计算结果可以看出,在相变材料熔点确定的情况下,皮肤表面升高到一定温度,如 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所需要的时间随相变潜热的增加而得到相应的延长,而延长的程度则随相变材料熔点的提高而增加. 如熔点为 $32.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,皮肤表面温度在采用潜热为 160 kJ/kg 的相变防护服时比非相变防护服达到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时所需的时间延长了约 40 s ,而当熔点提高到 $36.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $40.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,相应的延长时间分别增至约 100 s 和 200 s ,后者相当于将作业人员在火场滞留时间提高了一倍.

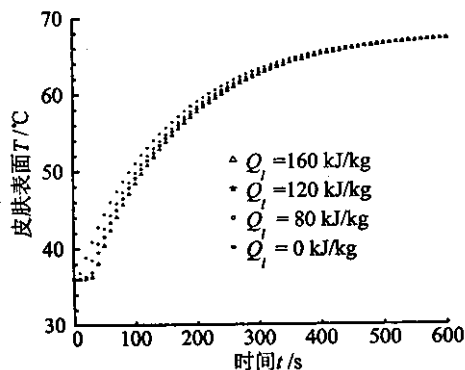


图 2 相变材料熔点为 $32.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在火场环境中皮肤表面温度的变化与相变潜热的关系

Fig. 2 The variation of the skin surface temperature with the change of the latent heat when the PCM melting point is $32.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the fire environment

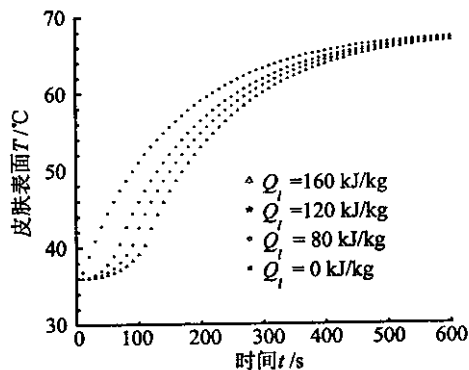


图 3 相变材料熔点为 $36.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在火场环境中皮肤表面温度的变化与相变潜热的关系

Fig. 3 The variation of the skin surface temperature with the change of the latent heat when the PCM melting point of the is $36.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the fire environment

图 5、图 6 和图 7 则分别给出了在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 海水环境中皮肤表面温度的变化与相变潜热的关系,相应相变材料的熔点分别为 $21.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $28.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $32.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. 由计算结果可以看出,随着相变熔点的增高,潜热的影响逐步显著,如在 600 s 时,皮肤表面温度在采用潜热为 160 kJ/kg 的相变防护服时比非相变防护服分别高 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$,皮肤表面温度降至一定

温度所需的时间也大大延长.

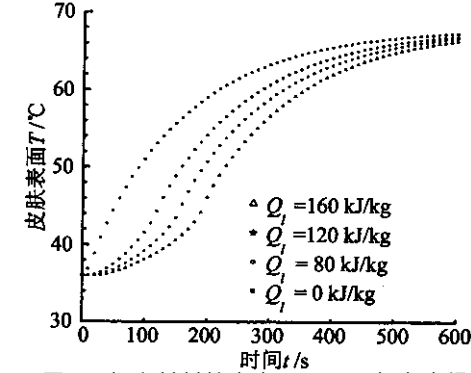


图 4 相变材料熔点为 40.2 °C 时,在火场环境中皮肤表面温度的变化与相变潜热的关系

Fig. 4 The variation of the skin surface temperature with the change of the latent heat when the PCM melting point is 40.2 °C in the fire environment

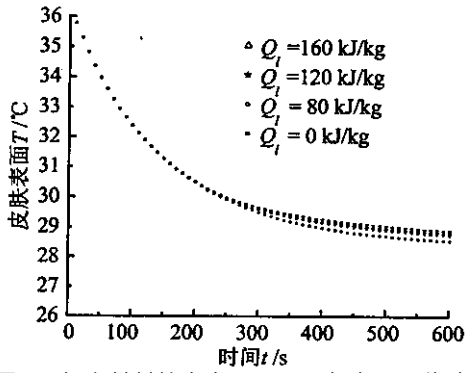


图 5 相变材料熔点为 21.7 °C 时,在 0 °C 海水环境中皮肤表面温度的变化与相变潜热的关系

Fig. 5 The variation of the skin surface temperature with the change of the latent heat when the PCM melting point is 21.7 °C in the 0 °C sea water environment

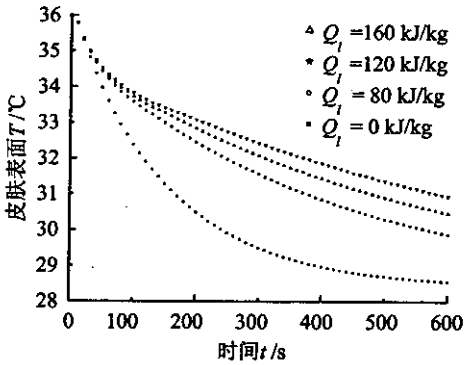


图 6 相变材料熔点为 28.2 °C 时,在 0 °C 海水环境中皮肤表面温度的变化与相变潜热的关系

Fig. 6 The variation of the skin surface temperature with the change of the latent heat when the PCM melting point is 28.2 °C in the 0 °C sea water environment

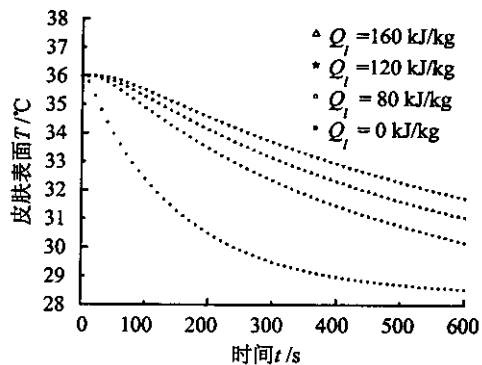


图 7 相变材料熔点为 32.6 °C 时,在 0 °C 海水环境中皮肤表面温度的变化与相变潜热的关系

Fig. 7 The variation of the skin surface temperature with the change of the latent heat when the PCM melting point is 32.6 °C in the 0 °C sea water environment

2.2 相变材料熔点对体表温度的影响

由上节的讨论可知,相变材料的熔点的选择对相变防护服的性能具有重要的影响,尤其是对相变潜热作用的发挥影响很大,为进一步探讨相变熔点的影响,本节给出了在其他参数相同的情况下,相变材料的熔点对皮肤表面温度的影响.图 8 给出的是在火场环境中皮肤表面温度的变化与相变材料熔点的关系.图 9 给出的是在 0 °C 海水环境中皮肤表面温度的变化与相变材料熔点的关系.由图 8 可以看出,熔点的变化对皮肤表面温度升高的影响在 600 s 以内具有明显差别,较高的熔点对应着较低的升温速率,如在 200 s 时皮肤表面之间的温差均达 5 °C 左右.同样,由图 9 可看出,在海水环境中,熔点也具有显著的影响,采用熔点为

32.6 °C 的相变材料比熔点为 21.7 °C 的相变材料在 600 s 时皮肤表面温度要高 2 °C 左右, 由

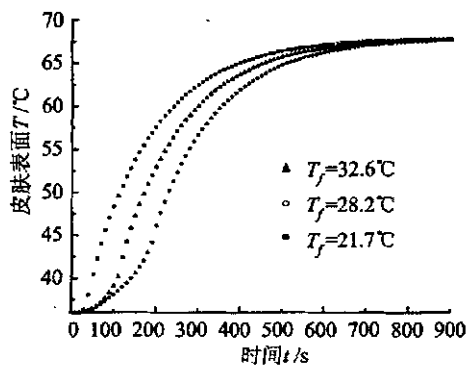


图 8 在火场环境中皮肤表面温度的变化与相变材料熔点的关系

Fig. 8 The variation of the skin surface temperature with the change of the PCM melting point in the fire environment

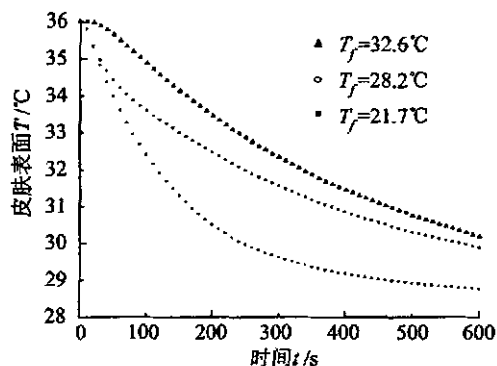


图 9 在 0 °C 海水环境中皮肤表面温度的变化与相变材料熔点的关系

Fig. 9 The variation of the skin surface temperature with the change of the PCM melting point in the 0 °C sea water environment

以上结果可见,无论是在海水中还是在火场中,较高的相变熔点均意味着更好的防护性能。

2.3 相变材料厚度对体表温度的影响

相变材料厚度的影响较为直观,很明显,较厚的防护服也就意味着较好的防护性能,但同时也意味着防护服质量的增加。图10和11分别给出了在火场环境和0°C海水环境中相

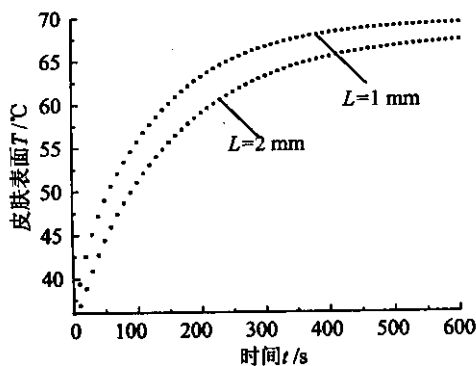


图 10 在火场环境中皮肤表面温度的变化与相变防护服厚度的关系

Fig. 10 The variation of the skin surface temperature with the change of the PCM protective clothing thickness in fire environment

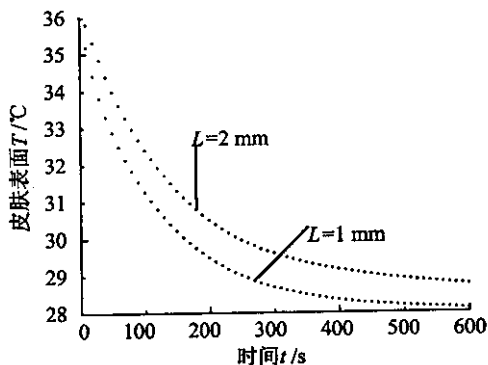


图 11 在 0 °C 海水环境中皮肤表面温度的变化与相变防护服厚度的关系

Fig. 11 The variation of the surface skin temperature with the change of the PCM protective clothing thickness

变防护服的厚度对皮肤表面温度变化的影响。所得结果与预期一致,厚度的增加对防护服性能具有较为显著的提高。

3 结论

为研究相变防护服在海水和火场两种极端条件下的防护性能,作者建立了简化的传热模型,以皮肤表面温度为参考,研究了相变材料的潜热、熔点及厚度等参数对相变防护服性

能的影响,得出以下结论:(Ⅰ)相变材料用于极端条件下的温度防护具有很高的应用价值,可大大延长皮肤表面达到危险温度的时间,即可延长相关人员在极端环境下的作业时间;(Ⅱ)所选相变材料的熔点及相变潜热对防护效果有重要影响,具体来说就是相变潜热越大越好,相变熔点则以高为宜,而且熔点较高的相变材料更有利于潜热效应的发挥;(Ⅲ)在重量允许的范围内,防护服厚度的增加可显著提高防护性能。

参 考 文 献

- [1] 张寅平,胡汉平,孔祥东. 相变贮能-原理与应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1996.
- [2] David P, Yvonne G Bryant. Protective Clothing Containing Encapsulated Phase Change Materials [J]. Advances in Heat and Mass Transfer, HTD-Vol. 362/BED-Vol. 40, 1999.
- [3] Linda G Hayes. Fabric with Micro Encapsulated Phase Change [J]. Advances in Bioheat and Mass Transfer, HTD-Vol. 268, 1993.
- [4] 叶宏,何汉峰,葛新石等. 利用焓法和有效热容法对定形相变材料熔解过程分析的比较[J]. 太阳能学报, 2004, 25(4).
- [5] 范维澄,王清安等. 火灾学简明教程[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1995.
- [6] [美]弗兰克 P 英克鲁佩勒,戴维 P 戴威特著,葛新石等译. 传热的基本原理[M]. 合肥:安徽教育出版社,1985.
- [7] 孙湘平. 中国的海洋[M]. 上海:商务印书馆出版社,1995.

Numerical Investigation of Phase Change Protective Clothing

YE Hong, ZHANG Yun-peng, GE Xin-shi

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, USTC, Hefei 230026, China)

Abstract: With the skin surface temperature as reference, a simplified heat transfer model was set up to investigate the relationship between the performance of the phase change protective clothing and the latent heat, melting point and thickness of PCM layer in two extreme environments: 0 °C sea water and fire. It is found that the phase change protective clothing has excellent protective performance in both environments, significantly prolonging the the time of operation by the wearer. The melting point and latent heat of the selected PCM have important influences on the performance of the protective clothing. With the weight below the permitted limitation, the performance can be improved with the increase of the PCM thickness.

Key words: PCM; phase change protective clothing; sea water; fire environment