

我国现行救生舱内环境温湿度设计 标准合理性探讨

代圣军¹, 郝小礼^{1,2*}, 王海桥^{1,2}, 刘何清^{1,2}

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;
2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要:救生舱内环境温湿度控制标准是救生舱设计、运行的关键参数之一,其高低不仅关系到人体在舱内的安全生存时间,同时会影响到救生舱的制造和运行成本。为探讨我国现行救生舱温湿度标准的合理性,建立了人体在救生舱内生存的热反应模型,并利用人工环境舱实测数据对模型进行了验证。利用该数学模型,分析了我国现行的2种救生舱温湿度标准的合理性,分析结果表明,这2种温湿度标准都不太合理,需要进一步提出合理的温湿度标准。研究还发现,体感温度不太适合于作为救生舱内热湿环境评价标准,不宜作为救生舱内温湿度标准的定量指标。

关键词:救生舱;人体热反应;热环境;标准;温度

中图分类号:TD77 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2016)04-0070-06

Rationality of the existing temperature and humidity standard for indoor thermal environment design of refuge chamber in China

DAI Shengjun¹, HAO Xiaoli^{1,2}, WANG Haiqiao^{1,2}, LIU Heqing^{1,2}

(1. School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201; China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The indoor temperature and humidity standard is one of the important parameters for design and operation of refuge chamber, which has effect on the maximum safety exposure time of refugee in refuge chamber, as well as the manufacture and running costs. To investigate the rationality of the existing indoor thermal environment standard of refuge chamber in China, a thermal response model of human in refuge chamber is developed and validated by the observed data. With the mathematic model, the rationality of the two existing temperature and humidity standards for refuge chamber in China has been analyzed. The investigated result shows that neither of the two existing standards is rational, and more reasonable standard should be proposed. It finds that the apparent temperature, which is adopted by the existing standard, is not suitable for assessing the thermal environment in refuge chamber and should not be adopted in the new standard.

Key words: refuge chamber; human heat response; thermal environment; standard; temperature

救生舱舱内环境温、湿度设计标准是救生舱设计开发的关键参数之一,它不仅关系到救生舱能否实现要求的安全防护时间,同时也是救生舱空气调节系统热、湿负荷计算的重要依据。舱内温、湿度设计得太高,势必会导致避难人员在舱内因过热而造成二次伤害,甚至是引起生命危险,这样救生舱就不能起到应有保护作用,或者是达不到要求的保护时间。而另一方面,如果舱内温、湿度设计得太低,虽然对避难人员

的生存不会造成影响,但却会使得更多的舱外热量传入舱内,增加舱内空调负荷^[1],从而要求救生舱需要蓄积更多的冷量,这一方面会增大救生舱的体积,减少有效使用空间,同时又会增加救生舱的生产和运行成本.实际上,太低的舱内温湿度也是没有必要的.所以,合理地确定救生舱内环境温湿度参数,是救生舱设计的一个关键问题.

从安全和经济2个方面来考虑,救生舱温湿度设计标准应该是在保证避难人员安全生存时间的前提下,尽可能地提高舱内温湿度,从而最大限度地减少蓄冷量,降低救生舱成本.目前,在我国,有2份文献对救生舱舱内环境温湿度设计标准做出过明确规定.一份文献是《煤矿井下紧急避险系统建设管理暂行规定》^[2],根据该规定要求:舱内温度不能高于35℃,相对湿度不超过85%.另一份文献是《煤矿可移动式硬体救生舱通用技术条件》^[3],根据该标准,救生舱应具有温湿度调节系统,且舱内体感温度应不能高于35℃.这2份文献对舱内空气温湿度环境要求是不一致的,这会使得设计人员在救生舱设计时,不知道以那个数据为准.另外,这2个温湿度设计标准哪个更合理,是否有其科学依据,都是需要研究探讨的问题.

本文试图通过利用人体在高温、高湿环境下的热反应模型,探究现有救生舱温湿度设计标准的合理性.分析在现有温湿度设计标准下,能否实现要求的额定防护时间,或者在保证要求的额定防护时间下,能否进一步提高舱内环境温湿度.研究的目的是为救生舱研发提供设计参考,为相关标准制定提供科学依据.

1 数学模型

1.1 人体热反应模型

人体与其所处的环境之间时刻在进行着热、湿交换,而热湿交换的大小满足人体热平衡方程.根据人体热平衡关系,在某一热湿环境下,人体需要通过汗液蒸发散失的热量可用下式计算:

$$E_{\text{req}} = M - W - C_{\text{res}} - C - R - dS_{\text{eq}} \quad (1)$$

式中, E_{req} :人体通过汗液蒸发散失的热量, W/m^2 ; M :人体的新陈代谢率, W/m^2 ; W :人体对外所做的机械功, W/m^2 ; C_{res} :人体的呼吸对流散热量, W/m^2 ; E_{res} :人体的呼吸蒸发散热量, W/m^2 ; C :人体通过皮肤与环境的对流换热量, W/m^2 ; R :人体通过皮肤与环境的辐射换热量, W/m^2 ; dS_{eq} :人体蓄热率, W/m^2 .

在式(1)中,人体代谢率 M 与年龄、性别、身高、体重、运动量、身体状态、精神状况等多种因素有关,ISO8996给出了人体代谢率的估算与测量方法^[5].人体的对外做功效率很低,一般不超过5%~10%,很多情况下,人体的机械功效率接近于0^[6],即 W 可以忽略不计.式(1)中其余各项可分别用式(2)~式(6)确定:

$$E_{\text{res}} = 0.00127M(59.34 + 0.53t_a - 11.63P_a); \quad (2)$$

$$C_{\text{res}} = 0.00152M(28.56 - 0.885t_a + 0.641P_a); \quad (3)$$

$$C = h_{\text{cdyn}} \times f_{\text{cl}} \times (t_{\text{cl}} - t_a); \quad (4)$$

$$R = h_r \times f_{\text{cl}} \times (t_{\text{cl}} - t_r); \quad (5)$$

$$dS_{\text{eq}} = c_{\text{sp}}(t_{\text{cr,eq},i} - t_{\text{cr,eq},i-1})(1 - \alpha). \quad (6)$$

式中, t_a :环境空气干球温度, $^{\circ}\text{C}$; t_r :环境平均辐射温度, $^{\circ}\text{C}$; t_{cl} :衣服表面温度, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{cr,eq}}$:人体平衡核心温度, $^{\circ}\text{C}$; P_a :空气中水蒸气分压力,kPa; h_{cdyn} :衣服表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; h_r :衣服表面的辐射换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; f_{cl} :人体着衣面积系数; c_{sp} :人体比热,通常为3470 J/(kg· $^{\circ}\text{C}$); α :人体皮肤组织占总组织的比重.

式(1)~式(6)概述了人体热反应模型,详细介绍及相关参数确定请参考文献[4-10].当已知了人体的代谢率、着衣状况、所处的环境参数等条件,即可利用式(1)~式(6)给出的人体热反应模型,模拟计算出人体皮肤温度、核心温度、直肠温度、皮肤湿度、失水量等人体参数随时间的变化规律.

1.2 人体生理耐受指标与最大允许暴露时间

人体在热环境中最大允许暴露时间的计算是基于2个生理耐受指标,即最大直肠温度和最大失水量.根据世界卫生组织的建议^[11],直肠温度可以作为人体在高强度热环境中允许暴露时间的判断依据,当人

体在某一热环境中暴露时,如果其直肠温度超过 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$,人体需要停止在当前热环境中的暴露,否则可能会出现热损害.所以,将人体直肠温度达到 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为最大允许暴露时间的一个判断依据.医学研究发现,当人体失水率达到其体重的 3% 时,人体心率会上升,出汗蒸发散热的机制会受到抑制.所以,3% 的失水率被认为是高温环境下作业人员的最大安全失水率.在 4~8 h 的持续暴露过程中,如果人体能够得到充分地补水,人体复水率的平均值为 60%,绝大多数人体复水率可以达到 40%.所以,对于普通个体,最大允许暴露时间应按最大失水量为其体重的 7.5% 作为判断依据,而为了保护绝大多数个体(95%)的安全,最大允许暴露时间应按最大失水量为其体重的 5% 计算,而当人体不能补水时,则按最大失水率为 3% 计算.

1.3 舱内平均辐射温度

舱内环境平均辐射温度是影响舱内热应力的主要因素,其大小与舱内壁温度密切相关,对于封闭的舱内空间环境,可以认为环境辐射温度近似等于舱内壁温度的平均值.对于稳态传热过程,舱内壁温度的计算公式为

$$t_r = t_a + \frac{t_o - t_a}{h_i} K \quad (7)$$

式中, t_o :救生舱外环境温度, $^{\circ}\text{C}$; h_i :舱壁内表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; K :舱壁的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.舱壁传热数 K 可由下式计算:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{h_o}} \quad (8)$$

式中, h_o :舱壁外表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; δ_j 为舱壁第 j 层材料的厚度, m ; λ_j 为舱壁第 j 层材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

2 模型验证

为了验证模型的准确性,搭建了一套人工环境模拟装置,该装置的核心是人工环境舱,如图 1 所示.环境舱长 4.2 m,宽 3.0 m,高 2.6 m,采用不锈钢板焊接而成.环境舱配有完善的温湿度调节装置,舱内干球温度可在 $-15 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内调节,相对湿度在 30%~95% 范围内调节,温度波动范围为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度波动范围为 $\pm 2\%$.从在校大学生中选取 12 名志愿者进行测试实验,测试者的平均年龄为 22 ± 2 岁,平均身高为 $1.73 \pm 0.09\text{ m}$,平均体重为 $68.7 \pm 14.8\text{ kg}$,所有测试者身体健康,状态良好.实验环境温度为 $34 \sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 60%~80%.通过测量受试者核心温度、环境温湿度和生存时间等实验数据,共获得 161 个样本数据.实验中,用电子体温计测量受试者的口腔温度,再在口腔温度的基础上增加 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为直肠温度.利用前面介绍的人体热反应模型,编写 MATLAB 仿真程序,模拟人体在相同的环境温湿度下,生存相同时间所达到的直肠温度,模拟结果与实测结果对比如图 2 所示.在模拟过程中,环境辐射温度近似与环境干球温度相同,实测环境风速为 0.15 m/s ,人体在舱内静坐,代谢率按 $60\text{ W}/\text{m}^2$ 计算^[5],人体着衣为长裤、长袖,衣服热阻按 0.6 clo 计算^[12],人体皮肤表面积根据受试者的身高、体重利用文献^[13]给出的中国人体表面积计算公式计算.从图 2 可以看出,实验结果与模拟结果具有很好的一致性,大多数数据点都落在 95% 的



图 1 人工环境舱及温湿度调节装置

95% 的置信区间.实验中,用电子体温计测量受试者的口腔温度,再在口腔温度的基础上增加 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为直肠温度.利用前面介绍的人体热反应模型,编写 MATLAB 仿真程序,模拟人体在相同的环境温湿度下,生存相同时间所达到的直肠温度,模拟结果与实测结果对比如图 2 所示.在模拟过程中,环境辐射温度近似与环境干球温度相同,实测环境风速为 0.15 m/s ,人体在舱内静坐,代谢率按 $60\text{ W}/\text{m}^2$ 计算^[5],人体着衣为长裤、长袖,衣服热阻按 0.6 clo 计算^[12],人体皮肤表面积根据受试者的身高、体重利用文献^[13]给出的中国人体表面积计算公式计算.从图 2 可以看出,实验结果与模拟结果具有很好的一致性,大多数数据点都落在 95% 的

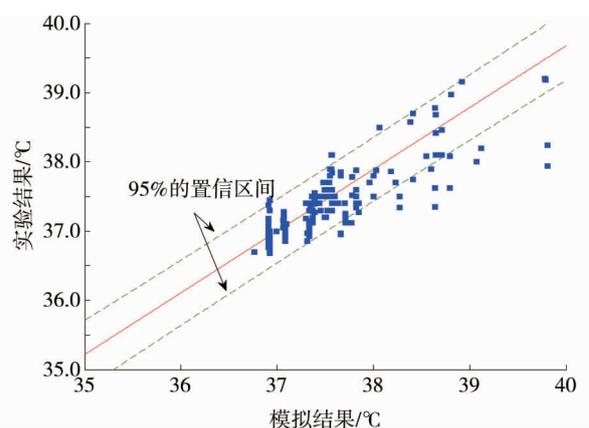


图 2 人体核心体温模拟结果与实验结果比较

置信区间内,说明本文采用的人体热反应模型是较准确的.从图2中也可发现,有部分结果出现了一定的偏差,尤其是核心体温较高时.出现这种差异,可能与实验个体本身的个体差异有关系.

3 现有救生舱温湿度标准的合理性

根据救生舱标准要求,救生舱额定防护时间不应低于96 h,并且需要有不低于1.1的安全系数^[3],因此,救生舱设计安全防护时间不应低于106 h.也就是在提供足够的水、食物、可供呼吸的空气条件下,在外界温度持续保持55℃的条件下,避难人员需要在舱内安全生存106 h而不出现二次伤害.因此,救生舱对舱内环境温湿度必须有一定的要求,否则,将因为人体在舱内过热而导致热疾病的发生,甚至是死亡.目前,我国关于救生舱内环境温湿度设计标准有2种:一种是干球温度35℃,相对湿度85%(以下简称标准一);另一种是体感温度35℃(以下简称标准二).这2个舱内温湿度设计标准是否合理?能否达到要求的防护时间?这些都是需要进一步探讨的问题.下面,利用前面给出的人体热反应模型,通过模拟的方法,研究2种标准的合理性问题.

3.1 计算条件

计算人体条件采用平均成年男子的数据,根据文献[14],中国成年男子平均身高为1.678 m,平均体重为59 kg,人体着装为矿工服装,即薄裤与有袖上衣,服装热阻为0.6 clo,人体表面积仍然按文献[13]提供的计算公式计算.人体在救生舱内的运动状态为静坐休息,根据ISO8996^[4],人体在舒适环境下静坐休息时的代谢率为55 W/m²,人体在高温条件下生存时,由于心率增加和排汗,人体代谢率值最高可增加5~10 W/m².根据文献[15]的研究结果,人体在焦虑的心情下,其代谢率会有22%的增加.因此,考虑到救生舱内的高温环境,且当灾害发生时人体处于高度紧张与焦虑的状态,所以,人体代谢率按80 W/m²计算.认为救生舱内储备了足够的饮水,人体失水能够得到及时补充,避难人员为不具有热适应性个体.救生舱外温度持续保持55℃,舱壁传热系数根据文献[16]的测试结果,取1.5 W/(m²·K),舱壁内表面对流换热系数按8.7 W/(m²·K)^[17].舱内风流速度按0.15 m/s计算.

3.2 标准一的合理性

标准一要求救生舱内空气温度不超过35℃,相对湿度不超过85%^[2].利用本文的数学模型,模拟人体在干球温度35℃、相对湿度85%的救生舱环境中生存时直肠温度和连续8 h失水量随生存时间的变化,分别如图3和图4所示.从图3可以看出,随着暴露时间的增加,人体直肠温度不断升高,升温的幅度随暴露时间增加而减小.在标准一规定温湿度条件下,人体直肠温度很快就达到了安全生存的最高直肠温度,满足最高直肠温度要求的最大暴露时间为45 min.图4显示了人体连续8 h失水量随暴露时间的变化规律,从图中可以看出,人体连续8 h失水量随暴露时间增加先增大,后减小.在第285 min时,人体失水量达到了安全生存的最大失水量.也就是说,在标准一的条件下,满足最大人体失水量要求的最大暴露时间为285 min.因此,综合直肠温度和失水量2个指标,人体能够安全生存的最大暴露时间为45 min.可见,采用标准一所规定的舱内环境温湿度标准,难以保证人体在救生舱内安全生存到要求的防护时间.

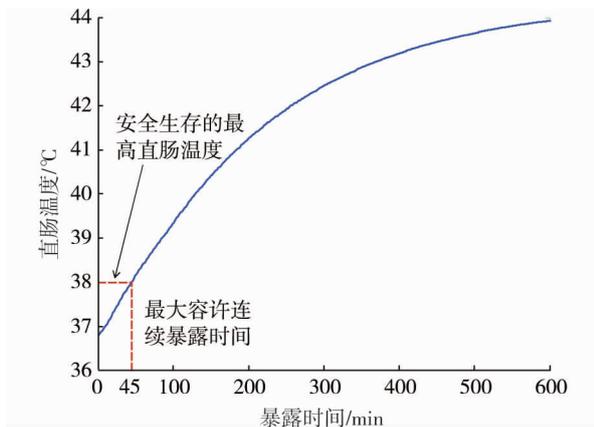


图3 标准一规定条件下人体直肠温度随暴露时间的变化

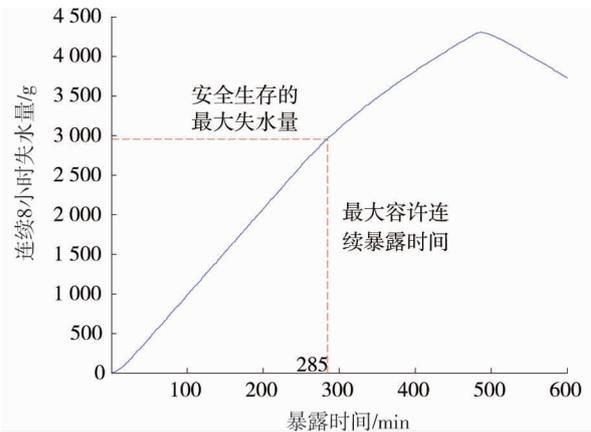


图4 标准一规定条件下人体连续8小时失水量随暴露时间的变化

3.3 标准二的合理性

标准二要求救生舱内体感温度不高于 35 ℃,且给出了利用干球温度和相对湿度计算体感温度的公式^[3],利用该公式,计算了体感温度为 35 ℃的温湿度组合,当相对湿度为 60%,65%,70%,75%,80%,85%,90%,95%,100%时,极限温度分别为 31.0,30.5,30.0,29.5,29.1,28.7,28.4,28.1,27.8 ℃.为了分析标准二的合理性,利用本文的人体热反应模型,计算 9 种温湿度组合情况,人体直肠温度和连续 8 h 失水量随暴露时间的变化规律,研究发现,在这 9 种温湿度组合条件下,人体直肠温度和失水量变化是基本一致的,为了节省篇幅,仅给出了相对湿度为 85%,干球温度为 28.7 ℃条件下的计算结果,如图 5 和图 6 所示.从图 5 可以看出,尽管刚开始人体直肠温度稍有增加,但达到一定时间后,人体直肠温度保持稳定,在体感温度 35 ℃的条件下,人体直肠温度基本维持在 37.1~37.2 ℃之间,随着暴露时间的延长,人体直肠温度也不会超过 38 ℃.图 6 表明,刚开始人体连续 8 h 失水量随暴露时间的增加而增大,经过一段时间后,人体失水量也维持在一个稳定值,且人体失水量没有超过安全生存的最大失水量.计算结果表明,在体感温度 35 ℃的条件下,人体能够安全生存到要求的防护时间.从这一点看,标准二比标准一要合理一些.

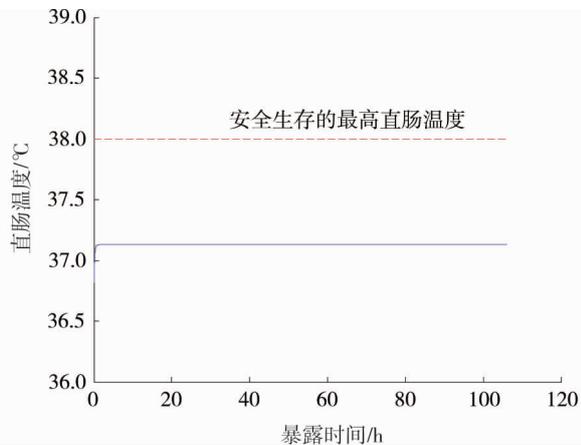


图5 标准二规定条件下人体直肠温度随暴露时间的变化

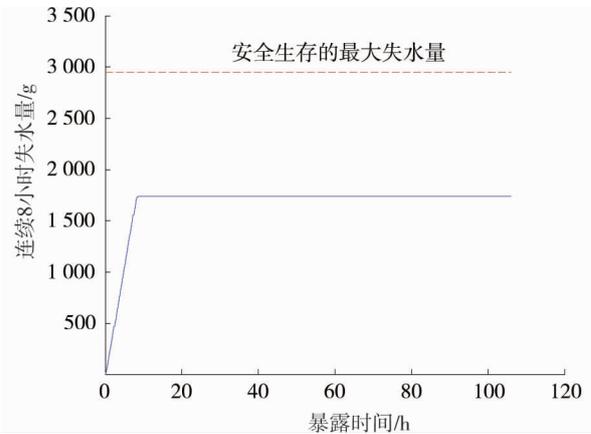


图6 标准二规定条件下人体连续 8 h 失水量随暴露时间的变化

进一步研究发现,在同样的相对湿度下,进一步提高干球温度,人体同样能够达到救生舱要求的安全防护时间,这表明,标准二所要求的舱内环境温湿度标准偏向保守.当然,更低的温湿度标准,对人体生存安全不存在问题,如果将舱内温湿度设定在人体舒适度范围,人体感觉更舒适.但问题是,更低的温湿度标准就要求更多的冷量储存,需要更大的救生舱体积和制造、运行成本.所以,救生舱温湿度标准应当是在保证人体安全生存时间要求的前提下,尽量提高舱内温度.因此,存在一个温度极限,当温度超过这个极限时,人体安全生存时间就无法保证.通过本文的数学模型,计算得到了相同相对湿度下,舱内容许的极限温度,计算结果见表 1.在同样的相对湿度下,标准二所要求的温度标准比极限温度低 0.6~2.9 ℃,且相对湿度越低,二者相差越大.

表 2 满足救生舱安全生存要求的舱内极限温度

相对湿度/%	极限温度/℃	对应体感温度/℃
60	33.9	41.9
65	33.0	41.4
70	32.3	41.3
75	31.5	40.7
80	30.8	40.2
85	30.2	39.8
90	29.6	39.2
95	29.0	38.4
100	28.4	37.2

为了探讨采用体感温度作为救生舱内热环境评价指标的合理性,表 1 中同时给出了相应的体感温度,从表 1 可以看出,计算得到的体感温度均高于 35 ℃,这也说明了标准二制定的温湿度标准偏保守.同时,从表 1 可以发现,尽管表中给出的温、湿度组合对人体的热反应是相似的,人体在这些环境中能够安全生存的时间是相同的,但其对应的体感温度却变化很大,大约相差了 5 ℃.这说明,采用体感温度作为救生舱内热环境评价指标是不合适的.根据文献^[18],体感温度最早为评价人体对室外气候条件热感觉而研发的,体感温度计算公式是在一系列假设条件下,拟合计算得到的.在拟合计算中,人体代谢率是按人体以 1.4 m/s 的速度行走时的代谢率,即 180 W/m²,环境辐射温度认为是与环境空气温度相等,环境风速为

1.32 m/s.从这些假定条件可以看出,体感温度的计算条件与救生舱的实际条件有比较大的差别,人体在救生舱内的代谢率远远低于体感温度的计算条件,舱内风速也远远小于1.32 m/s.另外,由于较高的舱外空气温度,舱内环境辐射温度要比舱内空气温度高4~5℃,这也与体感温度的计算条件是不相符.由此可见,采用体感温度作为评价救生舱内热湿环境是不太合适的.

4 结论

1)以干球温度35℃,相对湿度85%作为舱内环境温湿度标准难以满足救生舱的安全防护时间要求.

2)以体感温度35℃作为舱内环境温湿度标准虽然能够满足救生舱的安全防护时间要求,但该标准偏保守,在保证人体安全生存的前提下,舱内温湿度标准还可以进一步提高.

3)体感温度不太适合于作为救生舱内热湿环境评价标准,不宜作为救生舱温湿度标准的定量指标.

4)我国现行救生舱内环境温湿度标准都不是很合理,需要在研究人体对高温高湿环境热反应的基础上,进一步提出合理的温湿度标准,在满足救生和安全防护要求的前提下,尽可能降低救生舱生产、运行成本.

参考文献:

- [1] 杨艺,金龙哲,栗婧,等.救生舱高温环境的传热研究[J].中国安全科学学报,2012,22(12):138-143.
- [2] 国家安全生产监督管理总局.煤矿井下紧急避险系统建设管理暂行规定[OL]. http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/Contents/Channel_5330/2011/0127/122344/files_founder_2002223012/2644518578.doc.
- [3] 国家安全生产监督管理总局.煤矿可移动式硬体救生舱通用技术条件[S].北京:国家安全生产监督管理总局,2011,9.
- [4] ISO7399: 2004. Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain[S]. 2004.
- [5] ISO8996: 2004. Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic heat production[S]. 2004.
- [6] ASHRAE. ASHRAE Handbook - Fundamentals [M]. Atlanta GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air - Conditioning Engineers, 2005.
- [7] Parsons K C, Havenith G, Holmer I, et al. The Effects of Wind and Human Movement on the Heat and Vapour Transfer Properties of Clothing [J]. The Annals of Occupational Hygiene, 1999,43(5):347-352.
- [8] Mehnert P, Malchaire J, Kampmann B, et al. Prediction of the average skin temperature in warm and hot environments [J]. European Journal of Applied Physiology, 2000,82:52-60.
- [9] Malchaire J, Piette A, Kampmann B, et al. Development and Validation of the Predicted Heat Strain Model[J]. The Annals of Occupational Hygiene, 2001,45(2):123-135.
- [10] Havenith G, Holme I, Den Hartog E A, et al. Clothing Evaporative Heat Resistance: Proposal for Improved Representation in Standards and Models[J]. The Annals of Occupational Hygiene, 1999,43(5):339-346.
- [11] WHO. Health factors involved in working under conditions of heat stress[R].Geneva, Switzerland, 1969.
- [12] 朱颖心.建筑环境学[M].北京:中国建筑工业出版社,2010:319-320.
- [13] 胡咏梅,武晓洛,胡志红.关于中国人体表面积公式的研究[J].生理学报,1999,51(1):45-48.
- [14] GB10000: 1988.中国成年人尺寸[S]. 1988.
- [15] Whithehorn J C, Helge Lundholm M D, Gardner G E. The metabolic rate in emotional moods induced by suggestion in hypnosis[J]. The American Journal of Psychiatry, 1930,86(4):661-666.
- [16] 汪声,金龙哲,栗婧.矿用救生舱热环境分析[J].煤炭学报,2011,36(9):1524-1527.
- [17] GB50736: 2012 民用建筑采暖通风与空气调节设计规范[S].2012.
- [18] Steadman R G. The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science[J]. Journal of Applied Meteorology, 1979,18:861-873.