方舱传热试验方法研究

冯树兴，王朔，岳巍强，谭国斌
（军事交通运输研究所，天津 300161）

摘要：阐述了方舱传热系数的意义，介绍了美国材料与试验学会标准ASTM E 1925《刚性壁再配置结构的工程和设计标准规范》和GJB 2093《军用方舱通用试验方法》中方舱传热试验方法，从传热学理论和实际试验2方面对方舱传热试验进行了研究。结果表明，按照GJB 2093中热电偶的布置要求，在舱内整个立体空间内并不能真正达到温度均衡；在一定的温度范围内，温度的变化对传热系数的影响并不太大。

关键词：方舱；传热试验；传热系数
中图分类号：U169.41　　**文献标识码：**A
文章编号：1672－9242(2011)04－0109－03

Research on Heat Transfer Test Method of Shelter

FENG Shu-xing, *WANG Shuo*, *YUE Wei-qiang*, *TAN Guo-bin*
(General Logistician Institute of Military Transportation, Tianjin 300161, China)

Abstract: The meaning of heat transfer coefficient of shelter was explained. The heat transfer test methods in ASTM E 1925 "Specification for Engineering and Design Criteria for Rigid Wall Relocatable Structures" and GJB 2093 "General test methods for military shelter" were introduced. The heat transfer in shelter was tested and analyzed. The results showed that according to GJB 2093, the temperature in the whole interspace of the shelter can't really achieve equilibrium; in definite temperature range, the change of temperature has little influence on heat transfer coefficient.

Key words: shelter; heat transfer test; heat transfer coefficient

方舱野外工作环境条件恶劣、气候多样，使方舱内保持温和舒适的温度，是仪器设备和人员正常工作的需要。除了在方舱内增加空调设备外增强方舱自身的保温性能也非常重要。方舱传热系数是表征方舱保温性能优劣的参数，也是GJB 2093《军用方舱通用试验方法》中的一项重要的试验项目。传热系数是一种热物性参数，其单位为W/(m²·℃)，即在单位温差下方舱单位表面积所散发的热量称为传热系数。由此可知，方舱传热系数越小，表示方舱的热损失越小，保温性能就越好。

1 传热试验标准

美军在1985年颁布的标准MIL-STD-907B《方

收稿日期：2011-01-18
作者简介：冯树兴(1966—)，男，天津人，高级工程师，主要从事装备试验检测研究。

舱工程和设计标准,扩展舱和不可扩展舱》中规定了传热系数试验的详细方法。1992年美军废除了该标准,方舱试验执行美国材料与试验学会标准ASTM E 1925《刚性壁再配置结构的工程和设计标准规范》。该标准中规定的传热系数试验方法与MIL-STD-907B中比较,没有太大差别,仅在舱内热电偶布置上对ISO标准硬壁结构舱和非ISO标准硬壁结构舱有所区分,其他内容则完全相同。

GJB 2093《军用方舱通用试验方法》制定时,参照了MIL-STD-907B,在传热试验上,试验方法与MIL-STD-907B大致相同。

2 传热试验方法

2.1 美军传热试验方法[1—2]

美国军标中传热试验规定:方舱竖直放于低温室里,低温室温保持-32 ℃,方舱内部温度保持23 ℃。低温室的容积应足够大。方舱各面板与临近的低温室墙面距离应大于等于60.96 cm。低温室内和方舱内均应保持空气自由流通,方舱四周风速均匀且方舱表面最大流速不超过2.235 m/s。所有测试仪器应满足MIL-STD-45662的要求。低温室温度测量时距每个角件15.24 cm处放置一热电偶,距每面墙和顶板的中心位置放置一热电偶。方舱内部温度用16个热电偶测量,热电偶距每面舱板表面15.24 cm,热电偶应加以遮挡,避免热源直接辐射,热电偶布置如图1所示。

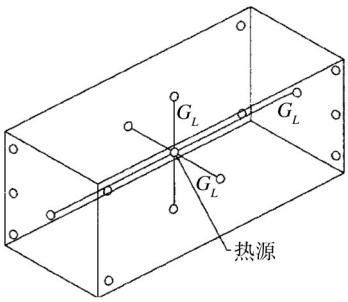

图1 MIL-STD-907B热电偶布置

Fig. 1 Thermocouple locations in MIL-STD-907B

舱内使用具有足够功率的电阻热源加热,以保证舱内外温差不低于55 ℃。加热器应能提供360°放射状散热,四周带有可调百叶窗、顶部带有散热天窗的加热器是提供均衡热量的首选。可使用风扇使舱内温度均衡,要确保每2个热电偶之间温差不超过2.8 ℃。另外,加热器电阻元件应与方舱表面完全隔离。舱内任意2个热电偶之间读数差保持在2.8 ℃之内,同时舱外平均温度保持在-32 ℃ ± 2.8 ℃,稳定30 min,然后每隔15 min记录一次热电偶读数。温度条件保持稳定后,舱内设备的电功率也要每隔15 min记录一次,在此期间,舱内所有设备要持续运行,并且不能改变其电功率。记录4组功率数据,允许变化范围为5%。方舱传热系数U用舱内外平均温度、功率消耗量和方舱名义内表面积来计算。

$$U = \frac{\text{总功率消耗}}{\text{名义内表面积} \times \text{温度差}}$$

计算得到的4组传热系数值再平均,用来确定最终总的传热系数。

2.2 我军传热试验方法[3]

GJB 2093中规定:方舱外表面距离试验室内壁不应小于600 mm,试验室温度为-32 ℃,方舱内部温度为23 ℃。方舱内外各设置6个热电偶温度计,布置如图2所示。

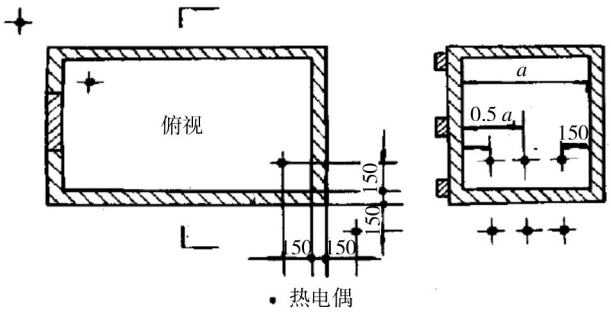

图2 GJB 2093热电偶布置

Fig. 2 Thermocouple locations in GJB 2093

舱面上最大允许流速为2.2 m/s。试验时,在30 min内,在方舱内外温度差不小于55 ℃情况下,方舱内(外)任意2个温度传感器间的读数之差不大于2 ℃,舱内电器总功率(含电加热器、电风扇等)的变化值不大于 ± 2.5%时,即认为达到平衡状态,然后每隔15 min记录一组数据,共记录4组,包括各传感器温度读数、电器总功耗等。方舱传热系数K用舱内、外平均温度、功率消耗量和方舱名义内表面积来计算。

$$K = \frac{\text{总功率消耗}}{\text{名义内表面积} \times \text{温度差}}$$

计算得到的4组传热系数值再平均，用来确定最终总的传热系数。

3 传热试验方法研究

3.1 舱内测温点布置

通过对GJB 2093和美国材料与试验学会标准ASTM E 1925传热试验方法比较可以看出，在试验方法、传热系数计算公式和一些基本试验参数的设置上，2个标准大致相同，只是在热电偶布置位置和舱内外传感器间温差的要求上有所区别，ASTM E 1925中舱内温度由16个热电偶测量，测温点多，并考虑了整个立体空间分布；GJB 2093中舱内温度由6个热电偶测量，仅考虑了对角分布。在实际试验过程中发现，尽管通过调整热源和风扇的位置，可以使热电偶温差达到标准要求，但当某个热电偶位置稍有改变时，则该热电偶与其它热电偶间温差又会明显增大。由此可见，按照GJB 2093中热电偶的布置要求，在舱内整个立体空间内，并未真正达到温度均衡。因此，尽管ASTM E 1925规定每2个热电偶之间允许温差为2.8 ℃，比GJB 2093中规定的2 ℃要高，但综合衡量，ASTM E 1925由于考虑了整个立体空间分布，对舱内温度均匀性要求更高，测量出的数值也更能真实反映舱内温度。

3.2 舱内外温度设置

在舱内外温度设置上，GJB 2093借鉴了美国军标的要求，2个标准均要求低温室温保持在−32℃，方舱内部温度保持在23℃。为了了解不同温度条件下方舱传热系数的差别，对2台某型方舱在3种温差下，各测量了7组数据，见表1，2。

由传热学理论可知[4]，对于平壁传热，传热过程包括串联着的3个环节：1）从热流体到壁面高温侧的热量传递；2）从壁面高温侧到壁面低温侧的热量传递，即通过平壁的导热；3）从壁面低温侧到冷流体的热量传递。总传热系数K：

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_2}} \tag{1}$$

表1　方舱1试验结果

Table 1　The test result of shelter 1

温差/℃	舱外温度/℃	舱内温度/℃	传热系数	与−32 ℃（舱内），23 ℃（舱外）温差的差值
40	−10	30	3.66	0.33
40	−20	20	3.38	0.05
50	−20	30	3.51	0.18
50	−25	25	3.4	0.07
55	−25	30	3.45	0.12
55	−32	23	3.33	0.00
55	−40	15	3.29	−0.04

表2　方舱2试验结果

Table 2　The test result of shelter 2

温差/℃	舱外温度/℃	舱内温度/℃	传热系数	与−32 ℃（舱内），23 ℃（舱外）温差的差值
40	−10	30	4.56	0.30
40	−20	20	4.05	−0.21
50	−20	30	4.37	0.11
50	−25	25	4.01	−0.25
55	−25	30	4.08	−0.18
55	−32	23	4.26	0.00
55	−40	15	4.31	0.05

式中：h_1，h_2为舱内、舱外表面传热系数；λ_i为方舱舱壁各层材料的导热系数；δ_i为方舱舱壁各层材料的厚度。试验证明，导热系数对温度有依变关系，即：

$$\lambda_i = \lambda_0(1+bt) \tag{2}$$

式中：λ_0为某基准条件下的导热系数；b为常数；t为材料的算术平均温度，$t=(t_1+t_2)/2$，其中t_1，t_2分别为材料两外表面温度。表面传热系数h是一个多变量的复杂函数，可以证明，与λ一样，h对温度同样具有依变关系，随温度上升而增大。在不考虑其他因素的情况下，根据导热系数和放热系数随温度而变的性质，通过式（1）—（2）可以得出：在舱外温度不变的情况下，当舱内温度升高时，由于h_1和λ增大导致传热系数增大；在舱内温度不变的情况下，当舱外温度升高时，由于λ和h_2增大导致传热系数增大；当舱内、外温度同时升高时，则由于h_1，λ和h_2增大导致传热系数增大。

（下转第116页）

[2] MARCUS M, KLAUS D. On the Explosive Properties of 1H-benzotriazole and 1H-1, 2, 3-triazole[J]. Tetrahedron Letters, 2007, 48(7): 1233—1235.

[3] MARTINA C, SVATOPLUK Z. Study of Initiation Reactivity of Some Plastic Explosives by Vacuum Stability Test and Non-isothermal Differential Thermal Analysis[J]. Thermochimica Acta, 2007, 460(1—2): 67—76.

[4] 高大元,董海山,李海涛,等. 炸药热分解动力学研究及其应用[J]. 含能材料,2004,12(A01):307—310.

[5] 陈集,朱鹏飞. 仪器分析教程[M]. 北京:化学工业出版社,2010.

[6] 刘子如. 含能材料热分析[M]. 北京:国防工业出版社,2008.

[7] SAJKIEWICZ P, CARPANETO L, WASIAK A. Application of the Ozawa Model to Non-isothermal Crystallization of Poly(ethylene terephthalate)[J]. Polymer, 2001, 42(12): 5365—5370.

[8] BIANCHI O, OLIVERA R V B, FIORIO R, et al.Assessment of Avrami, Ozawa and Avrami-Ozawa Equations for Determination of EVA Crosslinking Kinetics from DSC Measurements[J]. Polymer Testing, 2008, 27(6): 722—729.

[9] 楚士晋. 炸药热分析[M]. 北京:科学出版社,1994.

(上接第111页)

由表1的测量数据也可以看出,当舱内温度相同时,舱外温度越高,传热系数越大;当舱外温度相同时,舱内温度越高,则传热系数越大;而温差相同时,则表现出舱内、外温度均较高时,传热系数较大。这与理论得出的结论完全一致。

表2的测量数据则没有完全体现出上述性质,事实上,导热系数 λ 与表面传热系数 h 虽然对温度有依变关系,但温度并不是影响导热系数与表面传热系数的唯一因素,尤其是表面传热系数的大小,与对流传热过程中的许多因素有关[4],它不仅取决于流体的密度、导热系数、动力黏度、比定压热容等流体自身的物性,而且还与换热表面的形状、大小、布置以及流体的流速有密切关系。基于此,在ASTM E 1925和GJB 2093中均对方舱外表面与试验室内壁的距离以及方舱表面上最大允许流速等作出了明确规定。

与标准规定的-32 ℃和23 ℃条件下测得的传热系数相比,除舱外温度为-10 ℃的一组结果之外,其余几组温度条件下测得的结果与其相差并不太大,最大为0.25,最小仅为0.04。可见,在一定的温度范围内,温度的变化对传热系数的影响并不明显。

4 结语

目前军用方舱传热试验方法中规定的舱内外温度是根据美国军标传热试验方法确定的,对我军方舱类装备的实际使用没有明确的指导意义,我军装备低温极限工作温度大多为-41 ℃。另外,根据GJB 898A《工作舱(室)温度环境的通用医学要求评价》,冬季舱(室)内舒适适中级最低有效温度为16 ℃。因此,建议方舱传热试验可参考以上温度要求,舱内外温差依然保持为55 ℃,舱外温度取整为-40 ℃,舱内温度取整为15 ℃,在这样温度条件下得出的试验结果,对将来方舱类装备舱内配置加热设备具有更加直观的指导意义。此外,试验中发现,舱内温度的均匀性与加热器和风扇的摆放位置密切相关,而加热器和风扇的摆放位置又由热电偶数量及位置直接决定,按照GJB 2093中6个热电偶的布置要求,不能真实反映舱内温度场的分布,而舱内温度不均匀,则直接影响传热系数测量结果的准确程度。因此,有必要适当增加测温点,并在测温点的布置上,考虑舱内整个立体空间分布,保证舱内温度分布的均匀性,从而提高传热系数测量结果的准确程度,更真实地反映方舱的保温性能。

参考文献:

[1] MIL-STD-907B, Engineering and Design Criteria for Shelters, Expandable and Non-expandable[S].

[2] ASTM E 1925, Specification for Engineering and Design Criteria for Rigid Wall Relocatable Structures[S].

[3] GJB 2093,军用方舱通用试验方法[S].

[4] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M].北京:高等教育出版社,2006:12—15.