

温度环境试验中试件温度稳定时间估算方法

罗群生, 史光梅, 陈均, 鲁亮, 李明海

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 研究了温度环境试验中试件温度稳定时间的估算方法。以非稳态传热学理论为基础, 分别用集中参数法和有限元法计算、分析试件的温度稳定时间。给出了集中参数法确定试件温度稳定时间的计算公式, 确定了集中参数法的适用范围。研究了试件外表面与试验介质之间的传热系数确定方法, 考虑风速、试件外形和试验介质性质对传热的影响。将集中参数法与有限元法计算、分析结果进行比较, 相符性较好。

关键词: 温度环境试验; 试件温度稳定时间; 集中参数法; 有限元法; 结果比较

中图分类号: TJ91⁺0.63; V216.5⁺3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)06-0117-06

Estimation Method of Specimen Temperature Stabilization Time in Temperature Environmental Test

LUO Qun-sheng, SHI Guang-mei, CHEN Jun, LU Liang, LI Ming-hai

(Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Based on transient heat transfer theory, temperature stabilization time was analyzed by lumped parameter method and finite element method respectively. The calculation formula of lumped parameter method and its application limitation was put forward. Considering the effect of wind speed, sample medium, and outer surface, the method to determine the heat transfer coefficient between sample medium and outer surface was studied. The results of lumped parameter method were compared with that of finite element method, and it was founded that they are consistent with each other.

Key words: temperature environmental test; specimen temperature stabilization time; lumped parameter method; finite element method; comparison of results

对于产品的高温、低温、温度冲击环境试验, 通常都需要确定试件的温度暴露时间, 而试件的温度暴露时间往往与试件温度稳定时间直接相关。GJB 150.1A—2009《军用装备实验室环境试验方法 通用要求》规定: 试件工作时, 除另有规定外, 当试件中具有最大温度滞后效应的功能部件的温度变化率不大

于 2.0 °C/h 时, 则认为试件达到了工作时的温度稳定; 试件不工作时, 除另有规定外, 当试件中具有最大温度滞后效应的功能部件温度达到试验温度时, 则认为试件达到了不工作时的温度稳定。这就要求在温度试验时测出试件中具有最大温度滞后效应的功能部件的温度-时间关系曲线, 以此判断试件是否

收稿日期: 2012-08-19

作者简介: 罗群生(1955—), 男, 四川剑阁人, 研究员, 主要研究方向为装备环境试验与传热分析等。

达到温度稳定。试件温度测量需要布置温度传感器,通常要对试件进行补加工,从而破坏试件结构。然而,实际温度试验往往不允许对试件进行补加工,不可能通过实测试件温度来确定试件温度稳定时间。因此,有必要采用传热分析方法,确定温度试验中试件温度稳定时间。

以非稳态传热学理论为基础,圆柱形结构件为研究对象,分别用集中参数法和有限元法计算分析试件温度与试验温度达到规定温度允差的稳定时间,并将计算分析结果进行比较。

1 试件传热模型

1.1 导热微分方程和定解条件

要计算分析试件的温度场,首先必须知道试件的导热微分方程和其定解条件。利用能量守恒定律和数学物理方法,可以得到非稳态、具有内热源试件内部导热微分方程^[1],见式(1)。

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

式中: T 为热力学温度分布函数, $T=T(x,y,z,\tau)$,K; τ 为时间,s; λ 为微元材料的导热系数,W/(m·K); c 为微元材料单位质量定压热容,J/(kg·K); ρ 为微元物质的密度,kg/m³; q_v 为微元单位体积的热生成率,W/m³。

从式(1)可知,发生导热过程的试件内任意一点的温度随时间和空间的变化取决于试件各部分材料的导热系数、比热容、密度和热生成率。

求解试件的导热微分方程,需要知道试件的定解条件,即几何条件(试件的形状和线性尺寸)、物理条件(试件各部分材料的物性参数 λ , c , ρ 及内热源的分布规律)、初始条件(初始瞬间产品内温度分布的规律)和边界条件。

在试件结构形状和材料确定的情况下,求解试件温度场导热微分方程的几何条件和物理条件就确定了。如果知道试件的初始温度(通常经过标准大气条件下预处理,试件初始温度为已知恒定值),则试件的初始条件也就确定了。

试件外表面与试验箱内空气之间通过对流和辐射方式进行热交换,属于第三类边界条件,换热规律

表达式见式(2)。

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = \alpha(T_w - T_f) + \varepsilon\sigma_0\varphi(T_w^4 - T_f^4) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{n}$ 为试件外表面法向的单位矢量; α 为试件外表面与试验箱内空气之间的对流传热系数,W/(m²·K); T_w 为试件外表面的热力学温度,K; T_f 为试验箱内空气热力学温度,K; ε 为系统黑度,亦称辐射系数; σ_0 为波尔兹曼常数,其值为 5.67×10^{-8} W/(m²·K⁴); φ 为辐射角系数,亦称为形状因子。

式(2)实质上是能量守恒定律在试件表面上的特殊表达式。

1.2 集中参数法求解试件温度场^[2]

设有一任意形状的试件,其体积为 V ,表面积为 A ,并具有均匀的初始温度 T_0 。在初始时刻,突然将它置于温度恒定为 T_f 的温度试验箱内。设 $T_0 > T_f$,试件与试验箱内空气间的表面传热系数 h 及试件的物性参数均保持常数。对于该问题,当试件内部的导热热阻远小于其表面的传热热阻时,任何时刻试件内部的温度都趋于一致,以致于可以认为整个试件在同一瞬间均处于同一温度下。这时所求解的温度仅是时间 τ 的一元函数,与空间坐标无关,可认为该试件原来连续分布的质量与热容汇集到一点上,只有一个温度值。这种情况下,就可以用忽略物体内部导热热阻的简化分析方法——集中参数法(Lumped Parameter Method)求解试件的温度场。

非稳态、具有内热源的导热微分方程式式(1)适用于本问题。

由于试件内部的热阻可以忽略,温度与空间坐标无关,所以式(1)中温度的二阶导数项为0。于是,式(1)简化成为:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{q_v}{c\rho} \quad (3)$$

式(3)中 q_v 应看成是广义热源。

因为 $T > T_f$,试件被冷却,试件失去热量,故 q_v 应为负值。试件失去的热量通过试件外表面传递到试件周围的空气中,见式(4)。

$$-q_v V = Ah(T - T_f) \quad (4)$$

式中: h 为试件外表面与试件周围空气之间的导热系数,包含对流传热系数 α 和辐射传热系数 h_r ,其中 h_r 由式(2)确定。 $T=T_w$,即认为试件内温度

处处相等。

将式(4)确定的 q_v 代入式(2),有:

$$\rho c V \frac{dT}{d\tau} = -hA(T - T_f) \quad (5)$$

式(5)就是适用于本问题的导热微分方程式。引入过余温度 $\theta = T - T_f$,则式(5)变为:

$$\rho c V \frac{d\theta}{d\tau} = -hA\theta \quad (6)$$

以过余温度表示的导热微分方程式初始条件见式(7)。

$$\theta_0 = T_0 - T_f \quad (7)$$

对式(6)分离变量,得:

$$\frac{d\theta}{\theta} = -\frac{hA}{\rho c V} d\tau \quad (8)$$

将式(8)对 τ 从0到 τ 积分,见式(9)。

$$\begin{aligned} \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{d\theta}{\theta} &= -\int_0^{\tau} \frac{hA}{\rho c V} d\tau \\ \ln \frac{\theta}{\theta_0} &= -\frac{hA}{\rho c V} \tau \\ \frac{\theta}{\theta_0} &= \frac{T - T_f}{T_0 - T_f} = \exp\left(-\frac{hA}{\rho c V} \tau\right) \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)描述出试件温度随时间的变化关系,虽然是由试件被冷却的情况导出的,但同样适用于被加热的情况。在式(9)的指数函数中, $hA/(\rho c V)$ 具有与 $1/\tau$ 相同的量纲。如果时间 $\tau = \rho c V/(hA)$,则有

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{T - T_f}{T_0 - T_f} = \exp(-1) = 0.368 = 36.8\%$$

$\rho c V/(hA)$ 称为时间常数(time constant),记为 τ_c 。当 $\tau = \tau_c$ 时,试件的温度降低到了初始过余温度值的36.8%。从物理意义上来说,试件对试验箱内空气温度变化反应的快慢取决于自身的热容 $\rho c V$ 及表面换热条件 hA 。试件热容越大,温度变化越慢;表面换热条件越好(hA 越大),单位时间内传递的热量越多,则越能使试件温度迅速接近试验温度。试件时间常数反映了这两种影响的综合结果。

式(9)中, V/A 具有长度的量纲,若定义:

$$l_c = \frac{V}{A} \quad (10)$$

则式(9)右端的指数项可做变化,见式(11)。

$$\frac{hA}{\rho c V} \tau = \frac{hl_c}{\lambda} \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\tau}{l_c^2} = \frac{hl_c}{\lambda} \frac{a\tau}{l_c^2} = Bi \cdot Fo \quad (11)$$

式中:在一定条件下, a 为常数, $a = \frac{\lambda}{\rho c}$; Bi 是以 l_c

为特征长度的毕渥数; Fo 是以 l_c 为特征长度的傅立叶数。这样,式(9)又可以表示成为:

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \exp(-Bi \cdot Fo) \quad (12)$$

试件的 Bi 具有试件内部单位导热面积上导热热阻与单位表面上换热热阻(即外部热阻)之比的意义。 Bi 越小,意味着内部热阻越小或外部热阻越大,这时采用集中参数法分析的结果越接近实际情况。对于一般试验,当计算精度要求不是很高时,若试件的 Bi 满足:

$$Bi = \frac{hl_c}{\lambda} \leq 0.1 \quad (13)$$

可以用集中参数法求解试件的温度场。

1.3 有限元法求解试件温度场^[3]

对于形状比较复杂的试件,用解析法难以求解出温度试验时试件的非稳态温度场,而用有限元法就比较容易求解。因为有限元方法具有功能强、精度高、适用面广的特点,可以用不同形状、不同大小和不同类型的单元来描述任意形状的变形体,适用于任意边界条件。

在有限元热分析系统中,热传递温度场控制方程见式(14)。

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (14)$$

式中: $[C]$ 为比热矩阵; $\{\dot{T}\}$ 为节点温度的时间导数; $\{T\}$ 为节点温度向量; $[K]$ 为有效传导矩阵; $\{Q\}$ 为有效的节点热流率向量。

式(14)加上边界条件和初始条件,就可以求出温度试验时试件温度场的有限元近似解。

文中采用ANSYS有限元程序对试件温度场进行分析。经过建立试件的几何模型、输入材料物性参数(λ, c, ρ)划分单元、输入初始条件和边界条件(确定边界对流传热系数、试验箱内空气温度、试件系统黑度、辐射角系数)等,就可以计算出温度试验各个时刻的温度场,得出所需的物理量。

2 计算分析实例

2.1 试件技术状态

计算实例为圆柱形装药结构件,其外形尺寸取

$\phi 410 \text{ mm} \times 1480 \text{ mm}$, 壁厚 9 mm, 前端板厚 10 mm, 后端板厚 30 mm, 总质量 500 kg, 装药质量 289 kg。计算模型材料物性参数见表 1。

表 1 计算实例材料物性参数

Table 1 The material properties of calculation example

部件(材料)名称	$\lambda / (\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	$c / (\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
外壳(钢)	65	460	7800
炸药	0.6	1021	1600

系统黑度为 0.9, 辐射角系数为 1。试件初始温度为 20 °C, 试验温度为高温 60 °C、低温 -55 °C。试验箱内风速为 1.7 m/s。求解试件在高温、低温条件下的温度稳定时间, 即试件温度与试验温度相差 2 °C 的时间。

2.2 集中参数法估算试件温度稳定时间

高、低温试验时, 试件外表面与试验箱空气之间以强迫对流和辐射的方式交换热量。忽略试件托架对传热的影响, 并将试件外表面简化为横圆柱形。

当 $4000 < Re < 40\,000$ 时, 试件外表面与试验箱内空气之间的强迫对流换热服从公式^[4]:

$$\alpha = \frac{0.174\lambda}{d} Re^{0.618} \quad (15)$$

当 $40\,000 < Re < 400\,000$ 时, 试件外表面与试验箱内空气之间的强迫对流换热服从公式^[3]:

$$\alpha = \frac{0.0239\lambda}{d} Re^{0.805} \quad (16)$$

式中: α 为对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; λ 为空气的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; d 为定型尺寸(试件直径), m; Re 为雷诺数, $Re = v_r d / \nu$, v_r 为绕流过试件的空气流速, m/s, ν 为空气的运动黏度, m^2/s 。

取 $d=0.41 \text{ m}$, $v_r=1.7 \text{ m/s}$, 高温试验时取 40 °C 为定性温度, 低温试验时取 -40 °C 为定性温度, 相应空气运动黏度为 $16.96 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $10.04 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 导热系数为 $0.0276 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $0.0212 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

根据上述数据, 可得高温试验时试件雷诺数:

$$Re = 1.7 \times 0.41 / (16.96 \times 10^{-6}) = 41\,096;$$

低温试验时, 试件的雷诺数:

$$Re = 1.7 \times 0.41 / (10.04 \times 10^{-6}) = 69\,422。$$

无论高温试验还是低温试验, 均满足式(16)成立的前提条件。由此可知, 对于高温试验:

$$\alpha = \frac{0.0239 \times 0.0276}{0.41} \times 41\,096^{0.805} =$$

$$8.33 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

对于低温试验:

$$\alpha = \frac{0.0239 \times 0.0212}{0.41} \times 69\,422^{0.805} =$$

$$9.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

从式(2)可得辐射传热系数:

$$h_r = 4\varepsilon_s \sigma_0 T_m^3$$

由此可得高温试验和低温试验的辐射传热系数分别为 $6.26 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 和 $2.58 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。则高温试验试件与试验箱空气的传热系数:

$$h = 8.33 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) + 6.26 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) = 14.59 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})。$$

低温试验试件与试验箱空气的传热系数:

$$h = 9.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) + 2.58 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) = 12.34 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})。$$

高温试验时试件时间常数:

$$\tau_c = (m_1 c_1 + m_2 c_2) / (hA) = (211 \times 460 + 289 \times 1021) / (14.59 \times 2.17) = 12\,385 \text{ s}。$$

低温试验时试件时间常数:

$$\tau_c = (m_1 c_1 + m_2 c_2) / (hA) = (211 \times 460 + 289 \times 1021) / (12.34 \times 2.17) = 14\,643 \text{ s}。$$

选取试件外壳的导热系数, 对于高温试验, 计算得到试件的 $Bi=0.02$; 对于低温试验, 计算得到试件的 $Bi=0.017$ 。计算结果均满足式(13)要求, 可以用集中参数法计算稳定时间。

分别取试件温度 58 °C 和 -53 °C (即试件温度与试验温度相差 2 °C, 达到试验温度允差范围), 计算高温试验和低温试验的试件温度稳定时间。从式(9)可得: 试件高温试验稳定时间 $\tau = 37\,102 \text{ s} = 10.31 \text{ h}$; 试件低温试验稳定时间 $\tau = 53\,071 \text{ s} = 14.74 \text{ h}$ 。

2.3 有限元法估算试件温度稳定时间

取试件表面温度与试验箱温度的平均值作为试件的定性温度, 利用式(15)、式(16), 确定定性温度与试件表面对流传热系数之间的关系, 见表 2。

试件与试验箱壁之间存在辐射传热, 设箱壁温度与试验箱内空气温度相等, 试件发出的热量被周围空气吸收, 因此试件与试验箱构成的辐射系统角系数为 1。由于试件的表面积远远小于试验箱内壁

表2 试件表面对流传热系数与定性温度的关系

Table 2 Relationship between specimen surface convective heat transfer coefficient and qualitative temperature

$\theta/^\circ\text{C}$	-55	-20	0	20	40	60
$\alpha/(\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1})$	9.89	8.63	8.97	8.60	8.33	8.15

面积,因此可以认为系统黑度即为试件表面黑度,取值为0.9。辐射源的温度为试验箱内空气热力学温度 T_i 。

设将初始温度为20℃的试件分别置于高温60℃和低温-55℃的试验箱内,用上述条件建立试件的有限元模型,如图1所示。用ANSYS程序计算出高温试验和低温试验试件温度随时间的变化曲线和温度云图,如图2—图7所示。



图1 试件有限元模型

Fig. 1 Finite element model of the specimen

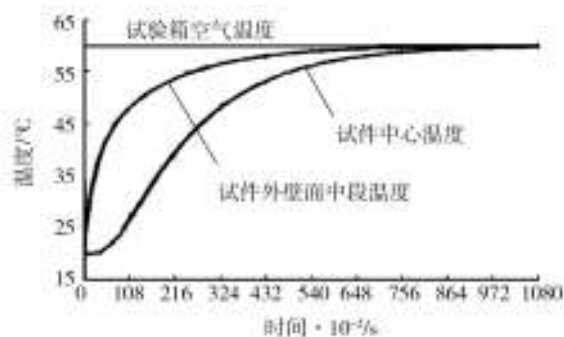


图2 60℃高温试验试件温度随时间变化曲线

Fig. 2 The time-temperature history curve of the specimen in high temperature (60 °C) test

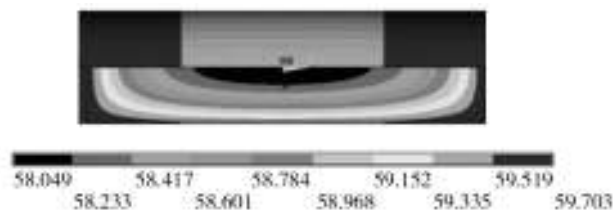


图3 60℃高温试验10.4 h试件温度云图

Fig. 3 Temperature contours of the specimen in high temperature (60 °C) test at 10.4 h

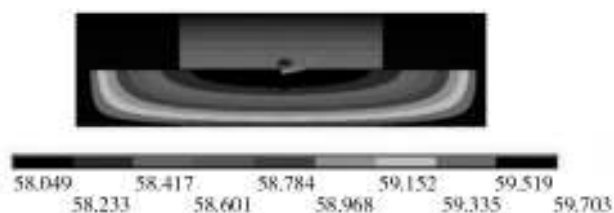


图4 60℃高温试验18.6 h试件温度云图

Fig. 4 Temperature contours of the specimen in high temperature (60 °C) test at 18.6 h

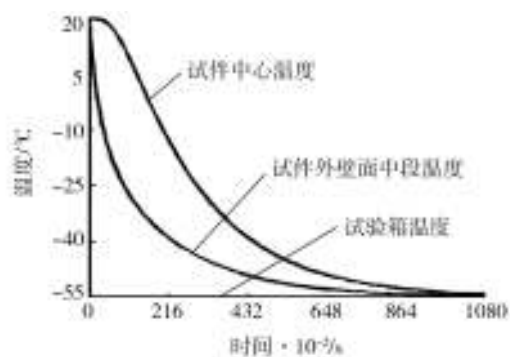


图5 -55℃低温试验试件温度随时间变化曲线

Fig. 5 Time-temperature history curve of the specimen in low temperature (-55 °C) test

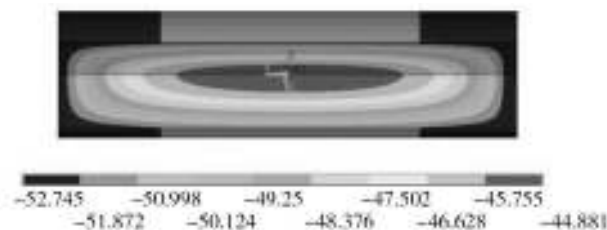


图6 -55℃低温试验14.7 h试件温度云图

Fig. 6 Temperature contours of the specimen in low temperature (-55 °C) test at 14.7 h

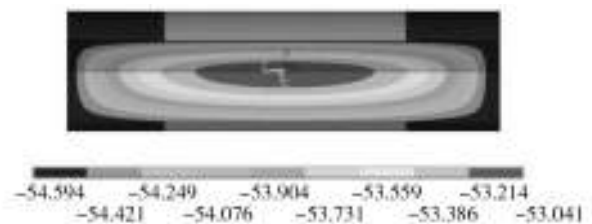


图7 -55℃低温试验24.4 h试件温度云图

Fig. 7 Temperature contours of the specimen in low temperature (-55 °C) test at 24.4 h

从计算结果可以判断,60℃高温试验,试件温度稳定时间为18.6 h;-55℃低温试验,试件温度稳定时间为24.4 h。

2.4 集中参数法和有限元法估算差异

从上节分析结果可知,用两种方法计算的试件温度稳定时间有所差异:60℃高温试验,分别为10.3 h和18.6 h;-55℃低温试验,分别为14.74 h和24.4 h。

造成差异的原因,主要是使用集中参数法假设试件内部的导热热阻远小于其表面的换热热阻,任何时候试件内部的温度趋于一致,以至于可以认为整个固体在同一瞬间处于同一温度下。实际上,试件内部的炸药是非金属材料,其导热热阻与试件表面的换热热阻相比,还是比较大的,试件内部从里到外的温度总是有所差异。对流传热表面传热系数的计算误差往往较大,相差20%~25%是很正常的;同时,集中参数法分析方法简单,对于许多工程问题,可以得出有用的结果。

从上述有限元分析结果可知,当高温试验时间为10.3 h时,试件中最高与最低温度之差为7.6℃,对于60℃高温试验而言,其差异为12.7%;当低温试验时间为14.7 h时,试件中最高与最低温度之差为7.9℃,对于-55℃低温试验而言,其差异为14.3%。从工程上讲,集中参数法计算产生的这个差异是可以接受的,但从计算精度而言,有限元法计算出的试件温度稳定时间更准确些。

GJB 150.1A—2009 规定:试件不工作时,除另有规定外,当试件中具有最大温度滞后效应的功能部件温度达到试验温度时,则认为试件达到了不工作时的温度稳定。本试件中心无疑是具有最大温度滞后效应的部位,中心温度达到试验温度,从理论上讲需用无穷大时间。这个规定从工程上讲是否合理姑且不论,试验人员总希望试件温度稳定时与试验箱温差尽可能小,以至于可以忽略。鉴于此,用集中参数法计算试件温度稳定时间时,需考虑由于试件内部有较大热阻,中心温度变化实际滞后于外壳的因素,不采用试件温度与试验温度相差2℃作为试件温度稳定的判据,而采用试件温度尽可能与试验温度接近作为试件温度稳定的判据。例如,使用集中参数法,如果采用试件温度与试验温度相差0.2℃作

为试件温度稳定的判据,计算出的高温试验和低温试验试件温度稳定时间分别为18.2 h和24.1 h,与用有限元法分析时采用试件中心处温度与试验温度相差2℃作为试件温度稳定判据得出的试件温度稳定时间分别为18.6 h和24.4 h相符程度较为理想。

实际试验时,在试件外表面布置了温度传感器,测出的温度-时间曲线与用有限元法计算的结果相符程度较好,各个时刻温度相差不超过1℃,证明有限元法分析结果是正确可信的。

3 结论和建议

通过对集中参数法和有限元法分析计算试件的温度稳定时间得出的结果进行分析比较,可以得出如下结论:1) 在温度环境试验中,不宜对试件温度进行直接测量时,在满足式(13)的前提条件下,可用集中参数法估算试件的温度稳定时间,但应采用试件温度尽可能与试验温度接近(如相差0.2℃)作为试件温度稳定的判据;2) 根据工程研究需要使用有限元法,可以比较准确地分析估算出温度试验中试件的温度稳定时间;3) 无论是集中参数法还是有限元法计算温度试验试件的温度稳定时间,均需利用传热学理论准确确定试件表面的传热系数。

对于温度试验,如果因不能补加工导致无法直接测量试件某处温度,可根据工程需要,用有限元法或集中参数法计算出试件温度分布。试验时,在试件上允许位置布置温度传感器,将实测温度数据与计算分析得到的温度数据进行比较,从而确定试件温度稳定时间。

参考文献:

- [1] B n 伊萨琴科. 传热学[M]. 王丰,冀守礼,周筠清,等译. 北京:高等教育出版社,1987.
- [2] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 第四版. 北京:高等教育出版社,2006.
- [3] 张国智,胡仁喜,陈继刚,等. ANSYS 10.0热力学有限元分析实例指导教程[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [4] 张正荣. 传热学[M]. 第一版. 北京:高等教育出版社,1982.