

文章编号: 1007-7294(2025)05-0755-12

## 考虑温度和应力影响的有机玻璃 加速蠕变试验方法

陈 薇<sup>1,2</sup>, 万正权<sup>1,2</sup>, 屈 平<sup>1,2</sup>, 张爱锋<sup>1,2</sup>, 侯春明<sup>1,2</sup>, 张 浩<sup>1</sup>

(1. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082; 2. 深海技术科学太湖实验室, 江苏 无锡 214082)

**摘要:** 本文提出一种基于有机玻璃温度-应力敏感性的耐压结构加速蠕变试验方法。引入温度的影响函数, 提出修正的陈化理论蠕变本构方程; 开展不同温度及应力水平下的单轴压缩蠕变试验, 采用分步拟合法得到有机玻璃的蠕变本构关系; 通过有限元蠕变分析得到不同温度、压力下观察窗蠕变行为的换算关系, 提出升温升压条件下的观察窗模型加速蠕变试验方法, 并完成试验结果与计算结果的对比分析。研究表明: 有机玻璃单轴压缩蠕变行为对于应力的敏感度与温度相关; 不同温度、压力下的观察窗蠕变变形换算系数的有限元解与直接计算值存在差异; 观察窗模型试验结果与有限元蠕变分析结果吻合良好。本文得到的蠕变本构关系能较好地描述有机玻璃在一定温度、应力范围内的单轴压缩蠕变规律, 相应的有限元蠕变分析也能较好地模拟观察窗结构的蠕变行为, 算例得到观察窗蠕变位移在 25 °C、26.6 MPa 和 3 °C、20 MPa 两个工况之间的换算系数为 12.2, 该系数可为加速蠕变试验提供依据。

**关键词:** 蠕变试验; 蠕变本构方程; 有机玻璃; 深海装备; 耐压结构

**中图分类号:** U674.941 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.05.008

## Accelerated creep test method of PMMA considering the influence of temperature and stress

CHEN Wei<sup>1,2</sup>, WAN Zheng-quan<sup>1,2</sup>, QU Ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Ai-feng<sup>1,2</sup>, HOU Chun-ming<sup>1,2</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>

(1. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China; 2. Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science, Wuxi 214082, China)

**Abstract:** An accelerated creep test method for deep-sea equipment viewport window was proposed in this paper based on the sensitivity of PMMA (Polymethyl methacrylate) to temperature and stress. A modified creep constitutive equation based on aging theory was proposed by introducing the influence function of temperature. The uniaxial compressive creep tests at different temperature and stress levels were carried out, and the creep constitutive relation of PMMA was obtained by stepwise fitting method. The conversion relationship of the creep behavior of the viewport under different temperatures and pressures was obtained by the finite element creep analysis. The accelerated creep test method of the viewport model under the condition of raised temperature and increased pressure was proposed, and the comparison between the test results and the calculated results was completed. It is shown that the stress sensitivity of the uniaxial compressive creep behavior of PMMA is related to temperature. The finite element solution of the conversion coefficient of viewport's creep deformation under different temperatures and pressures is different from the calculated

收稿日期: 2024-11-20

基金项目: 中国科学院冷泉装置前期关键技术攻关项目(LQ-GJ-02)

作者简介: 陈 薇(1993-), 女, 硕士, 工程师, E-mail: chenwei12312@163.com。

value. The results of the viewport model are in good agreement with those of finite element creep analysis. In conclusion, in a certain temperature and stress range, the creep constitutive relation of PMMA obtained in this paper can well describe the law of uniaxial compressive creep behavior, and that of the viewport can be well simulated by the finite element creep analysis. The calculation results show that the conversion coefficient of viewport's creep displacements between conditions of 25 °C & 26.6 MPa and 3 °C & 20 MPa is 12.2, and this coefficient can provide a basis for the accelerated creep test.

**Key words:** creep test; creep constitutive equation; PMMA; deep-sea equipment; pressure structure

## 0 引言

深远海的开发对深海装备技术提出了由短时到长期的发展需求<sup>[1]</sup>,而有机玻璃作为载人潜水器观察窗常用材料,以其优越的光学性能和良好的力学性能,在深海装备观察窗、大通透光潜器等方面有着较为广泛的应用<sup>[2]</sup>,在深海环境模拟装置视镜等方面也有一定的应用前景<sup>[3]</sup>。与此同时,有机玻璃的室温蠕变等典型粘弹性特性又对结构在长期服役工况下的结构设计、寿命预测和试验考核等方面提出了技术挑战<sup>[4]</sup>。20 世纪 Stachiw 博士团队<sup>[5-7]</sup>对不同尺寸的观察窗在 18.3 °C~23.9 °C 温度范围内开展了长达 1000 小时的保压试验,试验压力最大可达 137.9 MPa,积累的大量数据和现象为深潜器观察窗的设计与应用提供了重要支撑。但由于长时间模型试验通常面临着时间、经济成本高的问题,近年来国内关于有机玻璃耐压结构的试验研究中仅少数试验的保压超过 100 小时<sup>[8]</sup>,其余试验则多以深潜器等短期作业装备为应用目标,以单次承载强度试验或短期保压考核试验的形式开展<sup>[9-13]</sup>,未能探索到更长期的蠕变现象。在有机玻璃材料蠕变研究方面,超过 800 小时的试样级长期蠕变试验研究占比较小<sup>[14-15]</sup>,现有研究基于有机玻璃的时间-温度-应力等效特性,采用不超过 24 小时的蠕变试验,通过曲线叠合的方式可得到更长时间的蠕变曲线<sup>[11,16-19]</sup>,研究结果也进一步验证了时间、温度和应力对有机玻璃蠕变行为的影响性,但现有研究主要针对有机玻璃的拉伸蠕变特性,其应用在以压缩应力状态为主的深海装备耐压结构上的适用性还有待验证。与此同时,深海装备长期化的发展趋势同样对有机玻璃的试验研究提出了更长期的需求,因此关于加速试验方法的研究急需开展。

本文针对深海装备耐压结构用有机玻璃材料,开展不同温度、应力水平下的单轴压缩蠕变试验,基于陈化理论蠕变本构模型,提出考虑温度和应力影响的修正函数,采用分步拟合的方法对有机玻璃蠕变本构关系的各参数进行确定,通过有限元蠕变计算方法模拟观察窗结构在升温升压条件下的加速蠕变行为,并与等比观察窗模型的试验结果进行对比分析。研究显示,本文得到的蠕变本构关系能较准确地模拟有机玻璃结构的蠕变行为,有机玻璃的蠕变行为受温度和应力的影响,因此可通过升温升压的形式对深海装备观察窗的蠕变试验进行定量加速,该研究可为有机玻璃结构在一定温度、应力范围内的加速蠕变试验设计提供数据支撑。

## 1 蠕变本构方程

### 1.1 基于陈化理论的蠕变本构方程

对于有机玻璃的压缩蠕变行为,可参考金属蠕变采用陈化理论蠕变本构方程<sup>[20]</sup>进行描述:

$$\varepsilon_c = A\sigma^n t^m \quad (1)$$

式中,  $\varepsilon_c$  为蠕变应变,  $\sigma$  为应力,  $t$  为蠕变时间,  $A$ 、 $n$ 、 $m$  为由蠕变试验确定的材料常数。

引入温度的独立影响函数后可构造满足 WLF 时温等效公式的方程<sup>[21]</sup>:

$$\varepsilon_c = B\sigma^n t^m \cdot e^{\frac{-m(p-T)}{T+q}} \quad (2)$$

式中,  $T$  为试验温度,  $T_0$  为参考温度,  $B$ 、 $n$ 、 $m$ 、 $p$ 、 $q$  均为可由蠕变试验得到的材料常数。

温度不变时,式(2)即可退化至式(1)。

## 1.2 修正的蠕变本构方程

前期对有机玻璃开展单轴压缩蠕变试验研究时发现,采用式(1)对单一温度水平、不同应力水平的试验数据进行拟合,其应力指数  $n$  的拟合值在不同温度组之间存在明显差异(见后文表3)。这说明有机玻璃在不同温度环境下对应力水平的敏感度明显不同,采用恒定的常数  $n$  将难以准确描述多温度水平的有机玻璃蠕变发展规律。

因此假设有机玻璃蠕变本构方程中的应力指数与温度呈线性关系为

$$n = rT + s \quad (3)$$

式中,  $T$  为试验温度,  $r$ 、 $s$  为材料参数,可由蠕变试验得到。

一定时间内,有机玻璃在室温高压状态下的压缩蠕变行为仍可由陈化理论蠕变本构方程描述:

$$\varepsilon_c = A\sigma^{rT+s}t^m \quad (4)$$

引入温度的影响函数  $h(T)$ ,

$$\varepsilon_c = A\sigma^{rT+s}t^m \cdot h(T) \quad (5)$$

蠕变期间,若外加应力  $\sigma$  不变,对应的蠕变柔量可用下式表达:

$$D = A\sigma^{rT+s-1}t^m \cdot h(T) \quad (6)$$

式中,  $D$  为蠕变柔量。

两边取 10 的对数

$$\lg D = \lg A + (rT + s - 1)\lg \sigma + m\lg t + \lg h(T) \quad (7)$$

因此,外加应力一定时,蠕变柔量的对数可表示为时间对数与温度的函数,

$$\lg D = G(\lg t, T) \quad (8)$$

根据有机玻璃的时温等效性,  $T$  温度的蠕变柔量曲线可沿横坐标(时间的对数坐标轴)向左平移  $\lg a_T$  的距离,与参考温度  $T_0$  时的蠕变柔量曲线重合,即式(8)可表示为

$$G(\lg t, T_0) = G(\lg t + \lg a_T, T) \quad (9)$$

式中,  $\lg a_T$  为移位因子,  $T_0$  为参考温度。

联立式(7)和式(9)可得时温等效关系:

$$\lg h(T_0) + rT_0 \lg \sigma = m \lg a_T + \lg h(T) + rT \lg \sigma \quad (10)$$

整理可得

$$\lg a_T = \frac{\lg [h(T_0)/h(T)] + r(T_0 - T)\lg \sigma}{m} \quad (11)$$

已知 WLF 时温等效方程<sup>[22]</sup> 如下:

$$\lg a_T = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + T - T_0} \quad (12)$$

该方程可用自由体积理论<sup>[22]</sup> 表示为

$$\lg a_T = \lg e(1/f - 1/f_0) \quad (13)$$

其中,

$$f = f_0 + \omega_T(T - T_0) \quad (14)$$

式中,  $f$  为自由体积分数,  $f_0$  为材料在参考温度  $T_0$  时的自由体积分数,  $\omega_T$  为自由体积分数的热膨胀分数。

将式(14)代入式(13),得

$$\lg a_T = \lg e \cdot \left[ \frac{1}{f_0 + \omega_T(T - T_0)} - \frac{1}{f_0} \right] \quad (15)$$

联立式(11)和式(15)可得

$$\lg [h(T_0)/h(T)] + r(T_0 - T) \lg \sigma = \lg e \cdot m \left[ \frac{1}{f_0 + \omega_T(T - T_0)} - \frac{1}{f_0} \right] \quad (16)$$

等号两边取 10 的指数后, 整理可得

$$h(T_0)/h(T) \cdot \sigma^{r(T_0 - T)} = e^{\frac{m}{f_0 + \omega_T(T - T_0)}} \Big/ e^{\frac{m}{f_0}} \quad (17)$$

显然可建立一个满足式(17)的函数, 即

$$h(T) = C_4 e^{\frac{-m}{f_0 + \omega_T(T - T_0)}} \cdot \sigma^{r(T - T_0)} \quad (18)$$

式中,  $C_4$  为常数。

将式(18)代入式(5), 可得满足 WLF 公式的修正陈化理论方程如下:

$$\begin{aligned} \varepsilon_c &= C_4 \cdot A \sigma^{rT+s} t^m \cdot e^{\frac{-m}{f_0 + \omega_T(T - T_0)}} \cdot \sigma^{r(T - T_0)} \\ &= C_4 \cdot A \sigma^{2rT+s-rT_0} t^m \cdot e^{\frac{-m}{f_0 + \omega_T(T - T_0)}} \end{aligned} \quad (19)$$

将式(19)作为拟合方程时, 系数  $C_4$ 、 $A$ 、 $r$ 、 $s$ 、 $m$ 、 $f_0$ 、 $\omega_T$  均作为材料常数, 整理可得

$$\varepsilon_c = B \sigma^{aT+b} t^m \cdot e^{\frac{-m/p}{T+q/p-T_0}} \quad (20)$$

式中,  $T$  为试验温度,  $T_0$  为参考温度;  $B$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $m$ 、 $p$ 、 $q$  均为材料常数, 由蠕变试验得到。

## 2 单轴压缩蠕变试验

### 2.1 试验方法

试验以满足 ASME PVOH-1 标准的国产深海装备用耐压有机玻璃(下文简称耐压有机玻璃)作为研究对象, 将 2000 m 工作潜深深海装备的观察窗作为目标应用背景, 观察窗主要设计尺寸见后文图 4(a), 通过有限元静力学计算得到的工作压力下观察窗结构内部应力范围在 0~45 MPa 之间, 因此综合考虑试验的测量精度和环境温度及蠕变试验压力筒的试验温度能力, 设计了 20 MPa、30 MPa、40 MPa 三个应力水平下以及 3 °C、15 °C、20 °C 和 40 °C 四个温度水平的单轴压缩蠕变试验, 共计 12 组组合, 每组被测试样不低于 2 件, 每件试样保压时间不低于 24 小时, 试验数据分析分四个温度试验组进行。

本文采用的压缩蠕变试样在 ASTM D695 和 ASME PVHO-1 标准优选建议的尺寸基础上, 扩大至直径 25 mm 和长度 50 mm(图 1)。

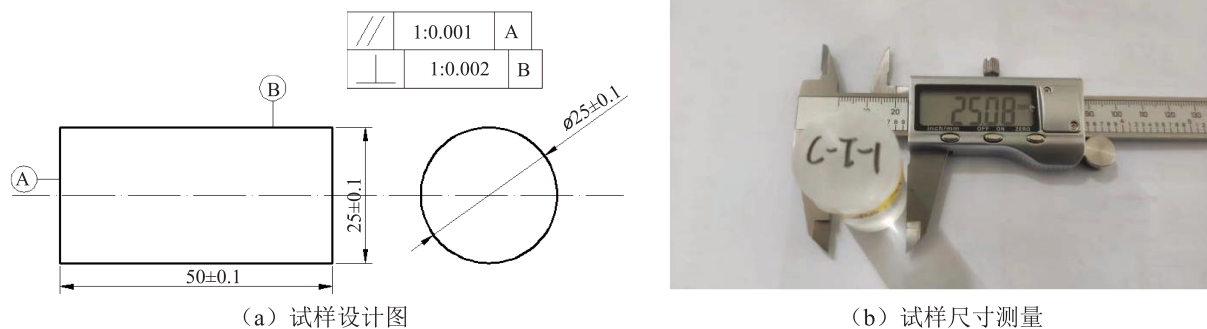


图 1 压缩蠕变试验试样

Fig.1 Compressive creep test specimen

试验在中国船舶科学研究中心试验室的高低温压缩应力松弛蠕变试验机上进行, 数据采集系统为试验机内置的测量控制系统。试验时通过温度箱控制试验温度恒定, 然后将试样安装在蠕变试验机上进行加压, 利用引伸计记录试样变形随时间的变化, 试验结束后分别对每件试样绘制蠕变-时间曲线。

### 2.2 蠕变-时间曲线

为保证不同温度试验组的试验数据权重相近,需在每个温度、应力水平下选择一条完整、有效的蠕变-时间曲线及其测试数据用于耐压有机玻璃蠕变本构关系的拟合,所选曲线数据点统计见表 1,相应的蠕变-时间曲线见图 3 中的黑色实线。

表 1 不同应力、温度水平的蠕变-时间曲线数据量统计

Tab.1 Quantities of creep time curve data at different stress and temperature levels

	3 °C	15 °C	25 °C	40 °C
20 MPa	317	316	317	317
30 MPa	377	317	317	316
40 MPa	378	378	378	317

## 3 蠕变本构关系拟合

### 3.1 分步拟合方法

由于式(20)中包含的参数较多,现提出一种基于 matlab 内置拟合工具箱 cftool 的分步非线性拟合方法,具体步骤如下:

(1) 采用公式(1)分别对不同温度试验组进行拟合得到参数  $A$ 、 $n$ 、 $m$  的拟合值,记作  $A_{Ii}$ 、 $n_{Ii}$ 、 $m_i(i=1,2,3,4)$ ,其中  $n = aT + b$ ,  $A = B \cdot e^{\frac{-m/p}{T+q/p-T_0}}$ ;

(2) 求得参数  $m_i$  的平均值  $m = \sum m_i / \sum i$ ;

(3) 将  $m$  代回第一步,拟合得到本轮参数  $A$ 、 $n$  的拟合值,记作  $A_{IIi}$ 、 $n_{IIi}(i=1,2,3,4)$ ;

(4) 采用公式  $A = B \cdot e^{\frac{-m/p}{T+q/p-T_0}}$ ,对  $A_{IIi}$  拟合得到参数  $B$ 、 $C$ 、 $D$  的拟合值,其中  $C = -m/p$ ,  $D = q/p - T_0$ ;

(5) 将  $m$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  代回第一步,得到本轮参数  $n$  的拟合值  $n_{IIIi}(i=1,2,3,4)$ ;

(6) 采用公式  $n = aT + b$ ,拟合  $n_{IIIi}$  得到参数  $a$ 、 $b$  的拟合值;

(7) 由此建立包含参数  $B$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $m$ 、 $C$ 、 $D$  的蠕变本构关系拟合式;

(8) 根据原数据的自变量  $\sigma$ 、 $t$ 、 $T$  经拟合式计算得到相应的拟合值;

(9) 采用下式计算得到原数据试验值与拟合值的相关系数  $r$  及拟合优度  $r^2$ :

$$r(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}[X]} \sqrt{\text{Var}[Y]}} \tag{21}$$

分步拟合流程图见图 2。

### 3.2 拟合过程及结果

按 3.1 节所述步骤对蠕变-时间曲线进行拟合:

(1) 采用公式  $\varepsilon_c = A\sigma^n t^m$  分别对四个温度试验组进行拟合,得到  $A_{Ii}$ 、 $n_{Ii}$ 、 $m_i(i=1,2,3,4)$  的值,见表 2;

(2) 按如下公式求得参数  $m_i$  的平均值  $m$ :

$$m = \sum m_i / \sum i = 0.2383 \tag{22}$$

(3) 将  $m=0.2383$  代回第一步,拟合值见表 3;

(4) 采用公式  $A = B \cdot e^{\frac{-m/p}{T+q/p-T_0}}$ ,对  $A_{IIi}$  拟合得到参数  $B$ 、 $C$ 、 $D$  的拟合值(表 4);

(5) 将  $B$ 、 $C$ 、 $D$  代回第一步,得到本轮参数  $n$  的拟合值  $n_{IIIi}(i=1,2,3,4)$ ,见表 5;

(6) 采用公式  $n = aT + b$ ,对  $n_{IIIi}$  拟合得到参数  $a$ 、 $b$  的拟合值见表 6;

(7) 由此建立包含参数  $B$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $m$ 、 $C$ 、 $D$  的蠕变本构关系拟合式:

$$\varepsilon_c = 3.304 \times 10^{-18} \sigma^{-2.0658 \times 10^{-2} \times T - 4.2116} t^{0.2383} e^{\frac{18.900}{T+293.9}} \tag{23}$$

式中,  $T$  为温度,单位为 K;  $t$  为时间,单位为 h;  $\varepsilon_c$  为蠕变应变(%).

上式仅为基于唯象理论的拟合公式,部分方程不具备真实的物理意义。公式适用于应力大于17 MPa、温度在3 °C~40 °C 范围的耐压有机玻璃单轴蠕变行为的描述,对于应力小于17 MPa 的范围,该公式可能出现温度下降速率反而升高的情况,理论上不符合客观现象。但由于应力水平较低时,蠕变应变很小,所以本文认为低应力水平时温度对蠕变的影响可近似忽略。

(8) 根据原数据的自变量  $\sigma$ 、 $t$ 、 $T$ ,按拟合式计算得到相应的拟合值,见图3中虚线;

(9) 采用式(21)计算得到试验值与拟合值的相关系数  $r=0.9895$  及拟合优度  $r^2=0.9791$ 。

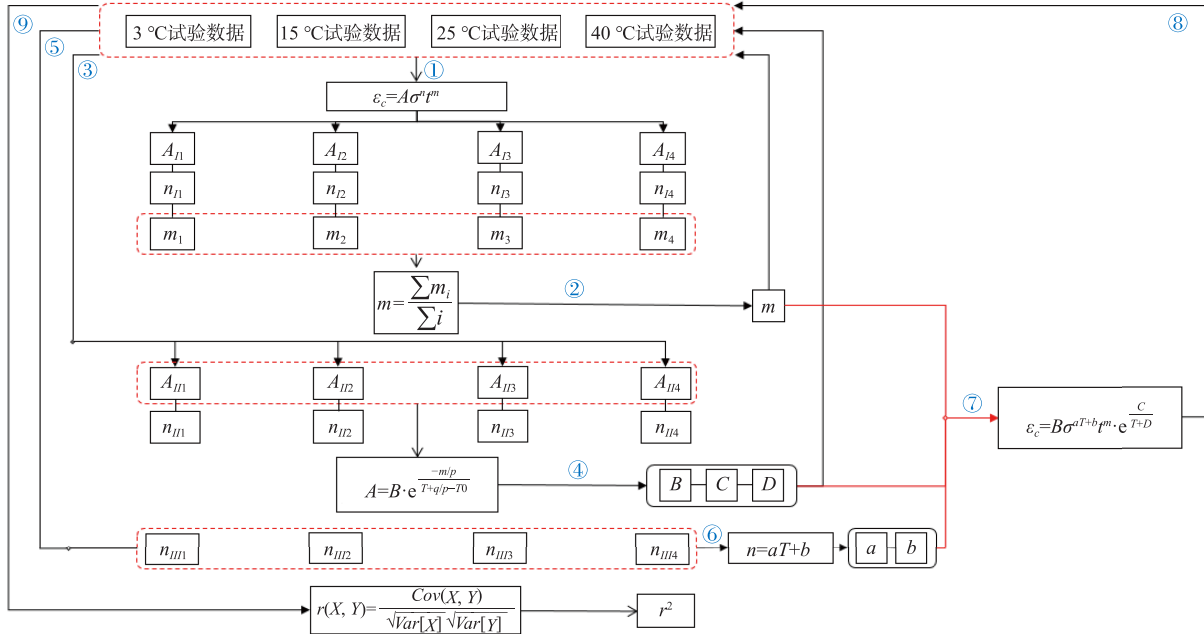


图2 基于 cftool 的分步拟合流程

Fig.2 Stepwise fitting process based on cftool of MATLAB

表2 步骤一拟合结果

Tab.2 Fitting results of Step 1

温度	$A_{i1}$	$n_{i1}$	$m_{i1}$	$r^2$
276.15K	0.000 873 2	1.509	0.2110	0.9850
288.15K	0.000 449 6	1.726	0.2301	0.9881
298.15K	0.000 253 3	1.914	0.2334	0.9905
313.15K	5.6550E-05	2.427	0.2788	0.9908

表3 步骤三拟合结果

Tab.3 Fitting results of Step 3

温度	$A_{ii1}$	$n_{ii1}$	$m$	$r^2$
276.15 K	0.000 819 9	1.506	0.2383	0.9826
288.15 K	0.000 440 2	1.726	0.2383	0.9880
298.15 K	0.000 251 8	1.912	0.2383	0.9905
313.15 K	6.3300E-05	2.424	0.2383	0.9880

表5 步骤五拟合结果

Tab.5 Fitting results of Step 5

温度	$B$	$C$	$D$	$n_{ii1}$	$m$	$r^2$
276.15K	3.304E-18	1.8900E4	2.9390E2	1.503	0.2383	0.9826
288.15K	3.304E-18	1.8900E4	2.9390E2	1.741	0.2383	0.9880
298.15K	3.304E-18	1.8900E4	2.9390E2	1.923	0.2383	0.9905
313.15K	3.304E-18	1.8900E4	2.9390E2	2.272	0.2383	0.9880

表4 步骤四拟合结果

Tab.4 Fitting results of Step 4

拟合参数	$B$	$C$	$D$	$r^2$
拟合值	3.304E-18	1.8900E4	2.9390E2	0.9910

表6 步骤六拟合结果

Tab.6 Fitting results of Step 6

拟合参数	$a$	$b$	$r^2$
拟合值	2.0658E-2	-4.2116	0.9971

### 3.3 拟合曲线对比

图3为根据拟合结果绘制的蠕变曲线拟合值与试验值的对比曲线,其中红色虚线为拟合曲线。可以看到,拟合曲线趋势与试验值一致,

数值较为接近,由此可认为式(23)在 3 °C~40 °C 范围内,能较好地描述耐压有机玻璃单轴压缩蠕变行为的发展规律。

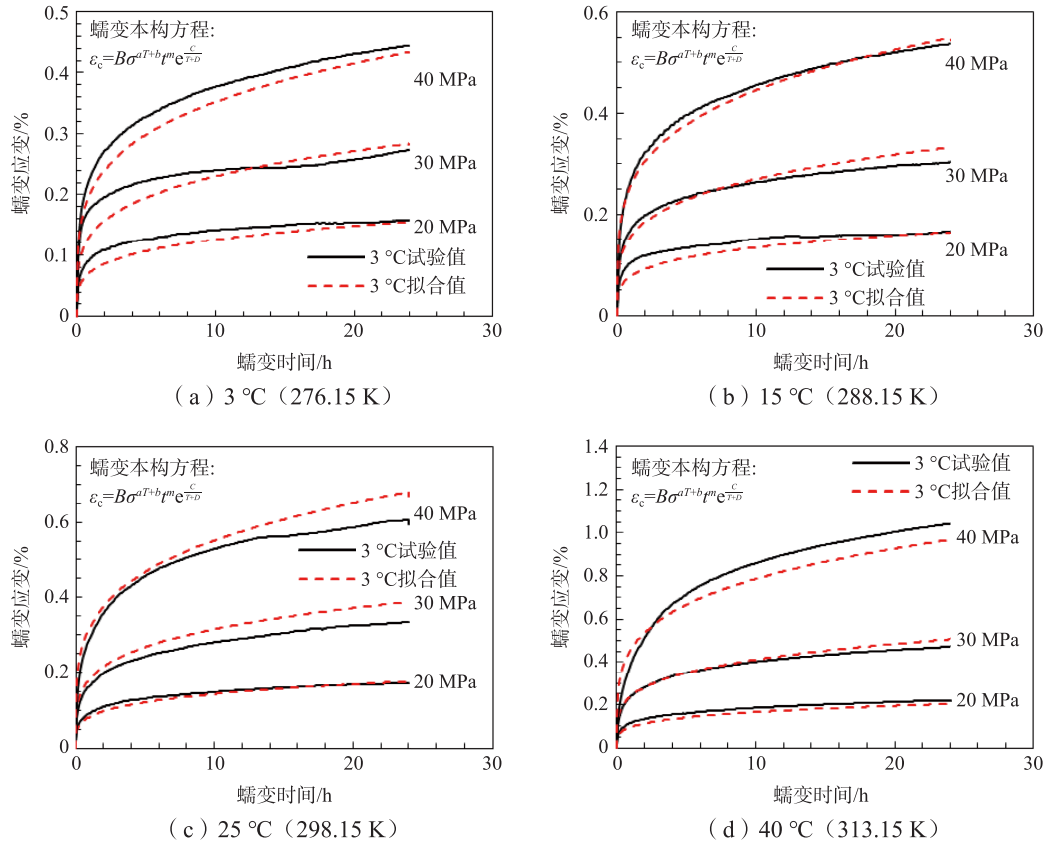


图 3 拟合值与试验值对比曲线  
Fig.3 Comparison between the fitting values and the test values

## 4 观察窗结构蠕变有限元计算

### 4.1 观察窗模型

在单轴压缩蠕变本构关系研究的基础上,进一步探究不同温度、压力下观察窗结构蠕变的换算关系。首先定义参照组的载荷条件为 3 °C(海水温度)和 20 MPa(工作潜深海水压力),对照组载荷条件为 25 °C、26.6 MPa。根据本构关系式(23)可计算得到单轴应力状态下,25 °C、26.6 MPa 时的蠕变速率大约相当于 3 °C、20 MPa 时的 17.7 倍。

可根据观察窗模型及试验工装的设计参数(图 4)和装配形式建立相应的有限元模型,分别建立两个有限元模型,其中模型一的载荷条件为 3 °C、20 MPa,模型二为 25 °C、26.6 MPa。

锥台形观察窗为轴对称结构,可在 ANSYS 中建立轴对称二维模型(图 4-d)以减少计算量。采用 plane182 单元,网格尺寸为 5 mm;在观察窗上表面施加均布压力载荷;对工装的下端面施加固定约束;采用 TARGE169 和 CONTA172 单元分别建立窗玻璃与窗座、窗座与试验工装的接触对;窗座选用 316 不锈钢,杨氏模量为 200 GPa,观察窗为耐压有机玻璃,其材料属性、蠕变本构方程以及 ANSYS 参数设置如表 7 所示,其中杨氏模量由单轴压缩蠕变试验的线弹性加载阶段实测得到。本算例为恒温状态,当采用 ANSYS 内置的 TBOPT=6 本构方程形式<sup>[23]</sup>时,可将温度直接代入式(23)后按式(24)进行整理并求出参数  $C_1 \sim C_3$ ,参数  $C_4$  作缺省处理;最后设置大变形静力分析求解。

$$\epsilon_c = C_1 \sigma^{C_2} t^{C_3+1} e^{C_4/T} / (C_3 + 1) \tag{24}$$

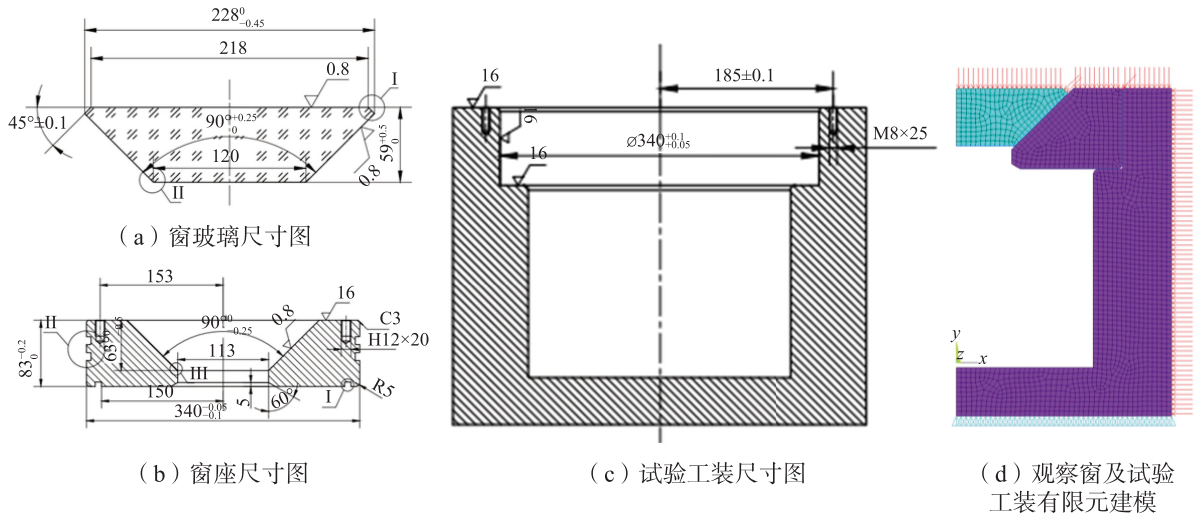


图4 观察窗模型及试验工装

Fig.4 Viewport model and test equipment

表7 观察窗蠕变分析所需的相关输入

Tab.7 Main inputs of the creep analysis of viewport models

编号	温度/℃	杨氏模量/MPa	蠕变本构方程	ANSYS参数设置			蠕变时间/h
				C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	
模型一	3	3201	$\epsilon_c(t, \sigma) = 8.2807 \times 10^{-6} \sigma^{-1.4931} \cdot t^{0.2383}$	1.9733E-6	1.4931	-0.7617	8760
模型二	25	2839	$\epsilon_c(t, \sigma) = 2.4155 \times 10^{-6} \sigma^{-1.9476} \cdot t^{0.2383}$	5.7562E-7	1.9476	-0.7617	720

4.2 计算结果

根据计算结果分别提取观察窗高压面中心的径向应变值和低压面中心节点的轴向位移, 计算求得保压期间高压面中心的径向应变值增量和低压面中心节点的轴向位移增量, 由此可绘制观察窗在不同温度、压力下蠕变时的径向蠕变应变增量-时间曲线和轴向位移增量-时间曲线, 同时将模型二(25℃、26.6 MPa)的蠕变曲线沿时间轴拉伸 17.7 倍作出对应的 3℃、20 MPa 等效蠕变曲线(图 5、图 6)。由图可知: (1)将模型二径向蠕变应变增量曲线沿时间轴拉伸 17.7 倍得到的 3℃、20 MPa 等效径向蠕变应变增量曲线与模型一(3℃、20 MPa)直接计算得到的径向蠕变应变增量曲线重合度较高; (2)但将模型二轴向位移增量曲线沿时间轴拉伸 17.7 倍得到的 3℃、20 MPa 等效轴向位移增量曲线与模型一直接计算得到的轴向位移增量曲线并未重合, 通过作图法可测得两条曲线的换算倍率约为 12.2, 低于由本构关系式直接计算得到的换算倍率值。

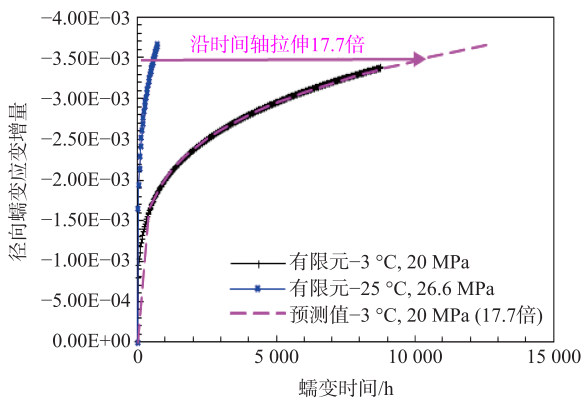


图5 径向应变增量-时间曲线

Fig.5 Radial strain increment-time curve

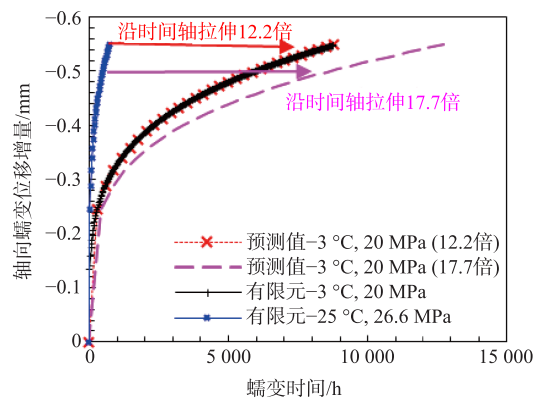


图6 轴向位移增量-时间曲线

Fig.6 Axial displacement increment-time curve

分析原因有：(1)观察窗高压面中心径向应变增量表征的是该节点的蠕变变形，该点在蠕变过程中的应力水平变化较小，可近似地由单轴压缩蠕变的本构关系式进行估算；(2)而低压面中心节点的轴向位移增量表征的是整体变形，由于窗玻璃结构内部存在应力分布，各节点的应力水平有所不同，相应地各节点蠕变应变对温度的敏感程度也有所不同，故整体变形的换算倍率低于单轴状态的计算值。

## 5 观察窗模型加速试验验证

为考核观察窗模型在 3℃、20 MPa 下保压 1 年(365 天)的长期服役能力，并验证蠕变本构关系的准确性，本文以升温升压的加速形式开展了观察窗模型的考核试验，试验温度为 25℃、试验压力为 26.6 MPa。加速换算系数选取本构关系式换算倍率 17.7 和有限元模拟换算倍率 12.2 中的较小值，由此计算得到考核试验时间应不低于 29.9 天。

试验在中国船舶科学研究中心试验室进行，观察窗模型贴片方案见图 7，贴片并完成密封后放入蠕变试验系统内承受静水外压(图 8)，压力、应变数据均由 UCAM 数字测量系统采集。

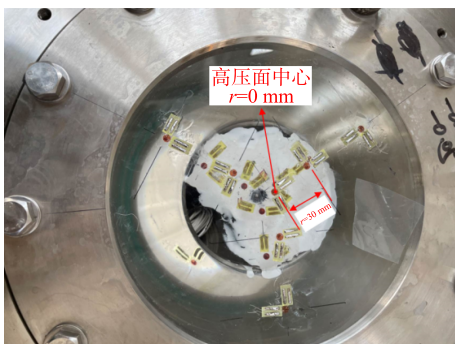


图 7 窗玻璃应变片布置图

Fig.7 Arrangement of strain gauges on the viewport



图 8 观察窗模型出筒

Fig.8 Viewport model being lifted out of the pressure vessel

### 5.1 试验结果

试验压力时间历程见图 9，试验共计保压超 30 天，其中试验开始保压的前三天由于设备影响存在压力持续下降的情况，后续试验过程均通过定期增压的方式保障试验进行，整个保压过程的试验压力经加权平均计算为 26.6 MPa。

试验后的观察窗模型见图 10，经试验过程中和试验结束后的检验，观察窗模型及试验工装未出现泄漏和破坏现象，窗玻璃上未发现肉眼可见的变形和缺陷，但小端面圆周处出现部分密封胶挤入锥面的情况，说明窗玻璃近小端面的锥面与窗座锥面未完全贴合，这是由试样的制造公差导致的，但并未影响结构的密封性能。

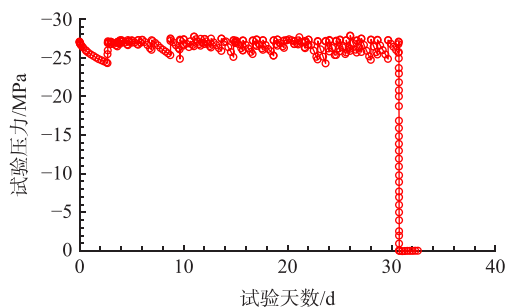


图 9 试验压力时间历程

Fig.9 Pressure history of creep test

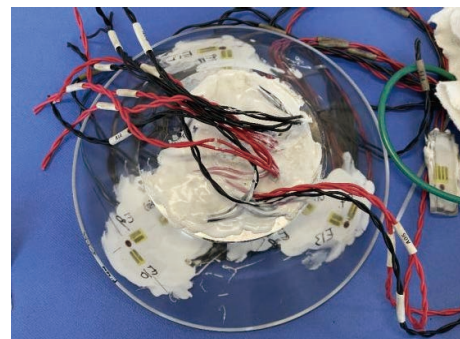


图 10 试验后的观察窗模型

Fig.10 Viewport model after test

5.2 与有限元结果对比

分别提取试验模型主要测点位置及对应的有限元模型节点结果, 绘制对比曲线, 如图 11 和图 12 所示。

由图可知, 模型各点应变的有限元计算值与试验值趋势基本一致(试验值在保载阶段的第一个波谷是试验压力下降导致的), 两者在数值上存在一定误差, 推测原因为: 本文开展的单轴压缩蠕变试验时长为 24 小时, 由此得到的材料蠕变本构关系侧重于描述蠕变第一阶段, 对于长期蠕变规律的描述则存在一定误差, 采用该蠕变本构关系进行蠕变有限元分析将同样导致误差, 且该误差可能随时间的增长而有所增加。

表 8 为图 11、图 12 中的有限元计算值与试验测试值在不同保压时刻的误差统计。该误差随着时间的增加普遍存在上升趋势, 但未超过 15%; 除 0 时刻由于试验压力实测为 27.2 MPa, 高于有限元计算压力, 导致该时刻部分测点的误差为负值以外, 其余时刻各节点计算值相较于试验实测值的误差均为正, 即计算得到的变形量普遍大于实测变形量。

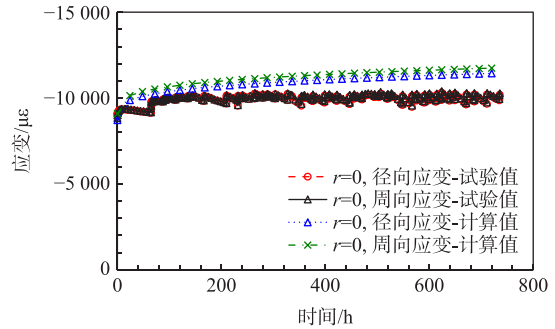


图 11 保载阶段, 观察窗高压面中心的应变对比曲线

Fig.11 Comparison of the strain curves at the center of the high pressure surface of the viewport during the pressure holding stage

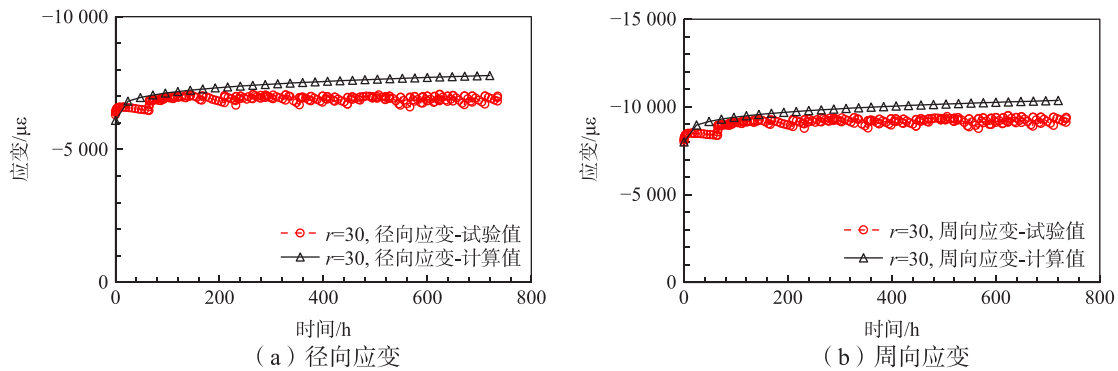


图 12 保载阶段, 观察窗高压面  $r=30$  点的应变对比曲线

Fig.12 Comparison of the strain curves at  $r=30$  points of the high pressure surface of the viewport during the pressure holding stage

表 8 有限元计算值与试验值误差统计表

Tab.8 Errors between finite element calculation and test

有限元计算 时刻/h	试验测试 时刻/h	误差/%			
		$r=0$ mm, 径向应变	$r=30$ mm, 径向应变	$r=0$ mm, 周向应变	$r=30$ mm, 周向应变
1E-08	0.00	-2.91%	-3.28%	2.72%	-0.07%
72	71.68	4.73%	3.07%	7.26%	4.08%
96	94.68	3.97%	2.52%	6.47%	3.27%
120	114.68	4.35%	2.98%	6.99%	3.68%
240	238.68	7.94%	6.66%	10.54%	6.79%
480	477.36	10.13%	9.09%	12.08%	8.59%
600	599.97	11.15%	10.04%	13.28%	9.33%

## 6 结 论

本文针对耐压有机玻璃开展了单轴压缩蠕变本构关系的理论推导和试验研究, 基于有限元分析提出了观察窗结构的加速蠕变试验方法, 并通过模型试验进行了有限元解与试验值的对比分析。研究主要得到以下结论:

(1) 有机玻璃单轴压缩蠕变行为对于应力的敏感度与温度相关, 采用本文提出的蠕变本构方程和分步拟合法对试样试验数据进行分析, 拟合优度为 0.9791。说明该本构方程能较好地描述有机玻璃在一定温度、应力范围内的单轴压缩蠕变规律;

(2) 通过有限元蠕变分析得到 25 °C、26.6 MPa 下观察窗结构的轴向位移增量曲线与 3 °C、20 MPa 下的轴向位移增量曲线两者间的换算系数为 12.2, 基于该倍率可定量地提出观察窗模型的加速蠕变试验温度、压力与相应的试验时间方案。

(3) 观察窗模型通过了升温升压条件下的加速蠕变试验考核, 且试验结果与有限元分析结果误差不超过 15%, 较好地验证了本文有机玻璃本构关系在进行结构有限元蠕变分析时的准确性。

本文对观察窗的蠕变应变预测计算值略大于实测值, 偏大的预测值更能保证材料和结构的安全余量, 因此在工程应用中是有利的。该研究可为深海装备观察窗等有机玻璃耐压结构的蠕变研究和长期服役能力考核提供理论与数据支撑。

## 参 考 文 献:

- [1] 吴有生, 司马灿, 朱 忠, 等. 海洋装备技术的重点发展方向[J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 20–35.  
Wu Y S, Sima C, Zhu Z, et al. Key development directions of marine science and technology[J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(2): 20–35. (in Chinese)
- [2] 徐芭南, 胡 震, 叶 聪, 等. 载人深潜技术与应用的现状和展望[J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 36–48.  
Xu Q N, Hu Z, Ye C, et al. Present situation and prospect of deep-sea manned submersible technology and its application[J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(2): 36–48. (in Chinese)
- [3] 吴国庆, 郑庆新, 陈 伟, 等. 一种适用于高压舱观察窗玻璃的水射流清洗装置: 202211517034.9[P]. 2023-04-18.  
Wu G Q, Zheng Q X, Chen W, et al. A water jet cleaning device suitable for observation window glass of the high-pressure chamber: 202211517034.9[P]. 2023-04-18. (in Chinese)
- [4] 杨 锐, 马英杰. 深潜装备用关键材料现状与展望[J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 145–156.  
Yang R, Ma Y J. Status and prospect of key materials for deep submergence facilities[J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(2): 145–156. (in Chinese)
- [5] Stachiw J D. Conical acrylic windows under long-term hydrostatic pressure of 20, 000 psi[J]. Journal of Engineering for Industry, 1970, 92(1): 237–256.
- [6] Stachiw J D. Conical acrylic windows under long-term hydrostatic pressure of 5000 psi[J]. Journal of Engineering for Industry, 1972, 94(3): 843–848.
- [7] Stachiw J D. Conical acrylic windows under long-term hydrostatic pressure of 10, 000 psi[J]. Journal of Engineering for Industry, 1972, 94(4): 1053–1059.
- [8] 陈 薇. 深海空间站观察窗蠕变特性研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2019.  
Chen W. Study on the creep characteristics of deep-sea space station viewport[D]. Beijing: China Ship Research Institute, 2019. (in Chinese)
- [9] 刘道启, 胡 勇, 王 芳, 等. 载人深潜器观察窗的力学性能[J]. 船舶力学, 2010, 14(7): 782–788.  
Liu D Q, Hu Y, Wang F, et al. Mechanics analysis on deep-sea human occupied vehicle's view-port windows[J]. Journal of Ship Mechanics, 2010, 14(7): 782–788. (in Chinese)
- [10] 施东春. 深海潜水器观察窗结构设计研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2014.

- Shi D C. Research on structural design for deep-sea submersible view port windows[D]. Beijing China Ship Research Institute, 2014. (in Chinese)
- [11] 周 凡. 有机玻璃在液闪中的蠕变行为及耐压球壳稳定性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.  
Zhou F. Research on the creep behavior of PMMA immersed in liquid scintilla and stability of spherical pressure[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [12] 林江萍. 观光潜水器亚克力耐压圆柱壳极限强度研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.  
Lin J P. Research on ultimate strength of PMMA pressure cylindrical shell of tourist submarine[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [13] 高成君, 姜 磊, 刘 帅, 等. 大尺寸球冠形观察窗的结构强度研究[J]. 中国造船, 2022, 63(6): 152–160.  
Gao C J, Jiang L, Liu S, et al. Study on structural strength of large-size spherical sector window[J]. Shipbuilding of China, 2022, 63(6): 152–160. (in Chinese)
- [14] 张志林. 飞机座舱透明件设计理论及应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.  
Zhang Z L. Design theory and application for transparency of aircraft canopy and windshield[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)
- [15] 陈 薇, 屈 平, 张爱锋. 基于压缩蠕变试验的观察窗蠕变特性研究[J]. 船舶力学, 2021, 25(1): 73–79.  
Chen W, Qu P, Zhang A F. Study on viewport creep characteristics based on compression creep test[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(1): 73–79. (in Chinese)
- [16] 李之达, 张 通, 黄 豪. PMMA 一维蠕变的实验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2004, 28(1): 5–7, 25.  
Li Z D, Zhang T, Huang H. An experimental research on single dimension creep of PMMA[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2004, 28(1): 5–7, 25. (in Chinese)
- [17] 陈建桥, 李铁萍, 李之达, 等. 有机玻璃本构关系的试验研究[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(3): 371–374.  
Chen J Q, Li T P, Li Z D, et al. Experimental research on the constitutive relationship of PMMA[J]. Mechanical Science and Technology, 2006, 25(3): 371–374. (in Chinese)
- [18] 王初红, 罗文波, 赵荣国, 等. 非线性粘弹性高分子材料长期蠕变行为的加速测试技术[J]. 高分子材料科学与工程, 2007, 23(2): 218–221, 226.  
Wang C H, Luo W B, Zhao R G, et al. An accelerated test technique for long-term creep behavior of nonlinear viscoelastic polymer[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2007, 23(2): 218–221, 226. (in Chinese)
- [19] 刘 伟, 高宗战, 刘永寿, 等. 航空 MDYB-3 定向有机玻璃蠕变行为温度效应试验研究[J]. 材料工程, 2009(7): 47–49, 82.  
Liu W, Gao Z Z, Liu Y S, et al. Experimental study of creep behaviors of MDYB-3 PMMA under different temperatures[J]. Journal of Materials Engineering, 2009(7): 47–49, 82. (in Chinese)
- [20] 穆霞英. 蠕变力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.  
Mu X Y. Creep mechanics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1990. (in Chinese)
- [21] 陈 薇, 屈 平, 淡振华, 等. 深海装备耐压结构用有机玻璃的蠕变时温等效特性[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(17): 49–55.  
Chen W, Qu P, Dan Z H, et al. Time-temperature equivalent characteristics of creep of PMMA for pressure structures in deep-sea equipment[J]. Ship Science and Technology, 2024, 46(17): 49–55. (in Chinese)
- [22] Williams M L, Landel R F, Ferry J D. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids[J]. Journal of the American Chemical Society, 1955, 77: 3701–3707.
- [23] 张洪伟, 高相胜, 张庆余. ANSYS 非线性有限元分析及范例应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.  
Zhang H W, Gao X S, Zhang Q Y. ANSYS nonlinear finite element analysis method and example application[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2013. (in Chinese)