

温度-应力耦合下聚四氟乙烯压缩蠕变行为及本构描述*

CREEP BEHAVIOR AND CONSTITUTIVE DESCRIPTION OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE UNDER TEMPERATURE-STRESS COUPLING

王靖惠**^{1,2} 李吉康^{1,2} 刘争***^{1,2} 陈旭^{1,2,3}

(1. 天津大学 化工学院, 天津 300354)

(2. 天津市化工安全与装备技术重点实验室, 天津 300354)

(3. 天津大学 浙江研究院, 宁波 315000)

WANG JingHui^{1,2} LI JiKang^{1,2} LIU Zheng^{1,2} CHEN Xu^{1,2,3}

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

(2. Tianjin Key Laboratory of Chemical Process Safety and Equipment Technology, Tianjin 300354, China)

(3. Zhejiang Institute of Tianjin University, Ningbo 315000, China)

摘要 聚四氟乙烯(Polytetrafluoroethylene, PTFE)具有耐高低温、耐化学腐蚀和高热稳定性等优点,已成为工业领域中不可或缺的密封材料,其压缩性能对密封结构的安全服役至关重要。通过对PTFE开展压缩试验和压缩蠕变试验,研究PTFE在不同温度下的压缩性能,探究应力、温度对蠕变行为的耦合影响规律。研究表明,PTFE的压缩屈服强度和压缩模量随温度的升高而降低。压缩蠕变性能受到温度和应力的耦合影响,在相同温度下,随着应力的增加,PTFE的瞬时应变和蠕变速率增加。在相同应力下,随着温度的增加,压缩模量降低,分子能量和自由体积增大,从而PTFE的瞬时应变和蠕变量增大,总应变也增大。最后,采用Burgers模型、Findley模型和时间硬化模型对PTFE在不同加载工况下的蠕变行为进行了分析,发现Burgers模型和Findley模型可以较好地描述PTFE在不同温度下的蠕变行为。本研究可以为PTFE压缩蠕变性能的密封结构设计及工程应用提供理论指导和数据支撑。

关键词 聚四氟乙烯 压缩蠕变试验 温度-应力耦合 本构模型

中图分类号 TQ325.4

Abstract Polytetrafluoroethylene (PTFE) has the advantages of high and low temperature resistance, chemical corrosion resistance and high thermal stability, and has become an indispensable sealing material in the industrial field. Its compression performance is crucial to the safe service of the sealing structure. By carrying out the compression experiments and compression creep experiments on PTFE, the compression properties of PTFE at different temperatures were studied, and the coupling effect of stress and temperature on creep behavior was explored. The results show that the compressive yield strength and compressive modulus of PTFE decrease with the increase of temperature. The compression creep performance is influenced by the coupling of temperature and stress. At the same temperature, the instantaneous strain and creep rate of PTFE increase with the increase of stress. Under the same stress, as the temperature increases, the compressive modulus decreases, the molecular energy and free volume increase, resulting in an increase in the instantaneous strain and creep of PTFE, and an increase in the total strain. Finally, the Burgers model, Findley model, and Time-Hardening model were used to analyze the creep behavior of PTFE under different loading conditions. It was found that the Burgers model and Findley model can better describe the creep behavior of PTFE at different temperatures. This study can provide theoretical guidance and data support for the design and engineering application of sealing structures that consider the compressive creep performance of PTFE.

Key words Polytetrafluoroethylene; Compression creep test; Temperature-stress coupling; Constitutive model

Corresponding author: LIU Zheng, E-mail: zliucare@tju.edu.cn

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No.12202305, 12011540001, 11772219).

Manuscript received 20230209, in revised form 20230531.

*20230209收到初稿,20230531收到修改稿。国家自然科学基金项目(12202305,12011540001,11772219)资助。

**王靖惠,女,2000年生,河南安阳人,汉族,天津大学化工学院硕士研究生,主要研究方向为复合材料力学性能研究、结构完整性评价。

***刘争(通信作者),男,1990年生,江苏徐州人,汉族,天津大学助理研究员,博士,主要研究方向为断裂力学及承压设备结构完整性评价。

0 引言

随着我国综合国力显著提升,国民经济不断增强,高分子材料的生产规模迅速扩大,应用领域不断拓展。聚四氟乙烯(Polytetrafluoroethylene,PTFE)作为典型的高分子材料,具有摩擦因数低、耐腐蚀性能强以及化学性能稳定等优点^[13-7],广泛应用于航空航天、化工、石油、机械等行业^[2-3]。PTFE作为密封部件^[4-6],需要在应力和温度的共同作用下保持良好的尺寸稳定性和负载能力,但作为典型的黏弹性材料,在长时间载荷作用下会不可避免地产生蠕变变形,进而会造成尺寸和形态的变化。PTFE的蠕变行为可能会导致结构的功能失效,极大地威胁了设备的安全,限制了其进一步应用。

因此,对PTFE基本力学性能和蠕变特性的研究日益深入。张静静等^[7]发现不同的加工工艺会导致PTFE材料结晶度存在差异,从而影响材料的力学性能。李奔等^[8]发现了单向拉伸处理会使材料出现微纤和孔隙,且随着拉伸长度的增加,材料的密封性能更好。蒋雨江等^[9-10]研究了拉伸处理对PTFE的力学性能、摩擦学性能和热稳定性的影响。郑依铭等^[11]在温度200~260℃下对PTFE进行梯度拉伸蠕变试验,发现蠕变主要的形变是由分子重排引起的。卢堃^[12]研究了PTFE在不同温度下的拉伸蠕变性能,发现在不同温度下,蠕变占比随平均应力的增加呈上升趋势;确定蠕变变形方程,并结合数值积分方法对蠕变变形做出预测。唐雅斐^[13]对PTFE进行了短期拉伸蠕变试验,评价了不同取向的拉伸蠕变性能,同时对蠕变数据得到的曲线进行不同函数的拟合分析,在一定程度上解释滤料的热动力学蠕变机理,即蠕变量和施加的载荷和时间有关。

从上述文献中可以看出,学者的关注点为大多为研究PTFE材料的拉伸蠕变行为,对于压缩蠕变行为的研究较少。雷森等^[14]研究了常温 and 高温下PTFE的压缩蠕变性能,并对所得压缩蠕变性能数据进行非线性拟合分析。HOSSAIN BHUIYAN M M等^[15]的研究结果表明,压力水平和温度是影响PTFE密封性的重要因素。裴景克等^[16]通过研究温度、载荷对压缩蠕变行为的影响,发现随温度或应力增大,压缩应变增大。需要指出的是,温度、载荷耦合对PTFE材料压缩蠕变行为的影响规律在现阶段的研究不够全面和深入。

另一方面,针对蠕变行为,国内外学者提出了多种蠕变模型。CARVALHO P R P等^[17]基于数值模拟,提出了基于热力学的大应变黏弹性-黏塑性模型以更好地表征PTFE的压缩蠕变和松弛行为。魏轩^[18]^[29-50]对聚

氨酯泡沫塑料压缩蠕变特性进行了研究,发现Burgers模型和时间强化模型分别适用于描述常温和高温定载荷下的蠕变特征。邓双全等^[19]对EVA填充材料的短期拉伸蠕变特性进行研究,发现Burgers模型在短期蠕变行为的模拟上效果良好,Findley模型则在长期蠕变行为的模拟上具有更佳的表现。张永祥^[20]通过试验研究,发现在蠕变时间较长的情况下,时间硬化模型能较好地描述环氧树脂的蠕变行为。李茂东等^[21]对PE100管材在不同应力条件下的常温蠕变行为进行研究,发现Findley模型对高应力下的蠕变行为有较好的拟合效果。ADIBEIG M R等^[22]通过用广义时间硬化模型、Burgers模型、修正Burgers模型模拟聚甲基丙烯酸甲酯在不同条件下的蠕变行为,发现广义时间硬化模型能较好地预测较高应力水平下的蠕变行为,修正Burgers模型在整个外加载荷和温度范围内与试验数据具有很好的一致性。由此可见,Burgers模型、Findley模型、时间硬化模型在聚合物蠕变行为的本构描述中具有较好的应用背景,但鲜有文章对温度、应力耦合下的PTFE材料压缩蠕变本构模型进行分析研究。

本文基于PTFE材料,通过压缩及压缩蠕变试验,研究应力、温度对PTFE的压缩蠕变行为的耦合影响。考察Burgers模型、Findley模型和时间硬化模型描述PTFE压缩蠕变行为在不同加载工况下的适用性,为准确分析PTFE的失效行为提供理论指导。

1 试验

1.1 材料

本研究采用的PTFE原材料为浙江巨化公司生产的G-90中粗料,其物理性质参数如表1所示。通过粉末冶金模压法进行压制,单位压力为30 MPa,保压时间为5 min,烧结保温12 h,温度385℃,PTFE材料如图1所示。

表1 G-90中粗料物理性质参数
Tab. 1 Physical property parameters of G-90

物理性质参数 Physical property parameter				
分子式 Molecular formula	密度 Density ρ / (kg/m ³)	熔点 Melting point T_m / $^{\circ}$ C	相对分子质量 Relative molecular mass	粒径 Particle size a / μ m
(C ₂ F ₄) _n	2 200	327	100.01	60~100

1.2 试验设备及过程

压缩及压缩蠕变试验参照国家标准GB/T 1041—2008^[23]进行,压缩试样的尺寸为10 mm×10 mm×4 mm,压缩蠕变试样的尺寸为6 mm×6 mm×6 mm。压缩以及压缩蠕变试验在MTS370.02型电液压伺服疲劳试验机(图2)上开展。



图1 PTFE 材料
Fig. 1 Raw material of PTFE

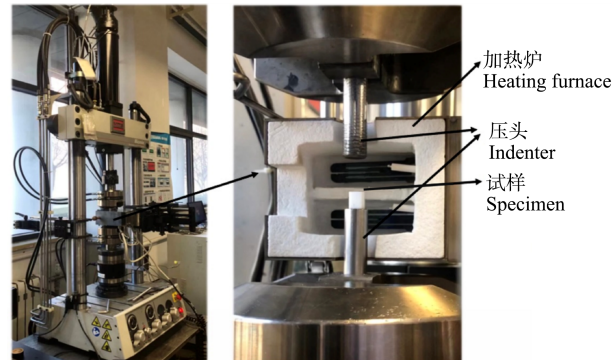


图2 试验仪器及设备
Fig. 2 Experiment instruments and equipment

1. 2. 1 压缩试验

本研究首先开展不同温度下的压缩试验。分别选取 25 ℃(室温)、50 ℃、100 ℃、150 ℃共 4 个温度水平,每个温度重复 3 次试验。每个温度取 3 组试验数据的平均值绘制应力-应变曲线。

1. 2. 2 压缩蠕变试验

压缩蠕变试验在不同的温度下开展,温度是蠕变试验的重要参数,过高的温度会导致材料失效机制变化。由动态热机械试验测得 PTFE 的玻璃化转变温度为 157 ℃,温度高于玻璃化转变温度材料性质转为黏流态不属于本研究的范畴。因此分别选取 25 ℃(室温)、50 ℃、75 ℃、100 ℃、125 ℃、150 ℃共 6 个温度水平,选择 10 MPa、20 MPa、30 MPa 共 3 个应力水平。压缩蠕变试验的时长为 1 h。

1. 3 压缩及蠕变结果分析

1. 3. 1 温度对 PTFE 材料压缩性能的影响

不同温度下材料的压缩应力-应变曲线如图 3 所示。压缩前后试样的宏观示意图如图 4 所示。根据试验结果得到不同温度下 PTFE 的压缩模量和压缩屈服强度如表 2 所示。

从图 3 可以看出,压缩曲线呈现 3 个阶段。在压缩初始弹性阶段,应力随应变呈现线性增长。所有温度条件下,在应变达到 3% 左右进入第 II 阶段即弱线性强化阶段,这个阶段中在较小的应力增长范围内应变急速增大,且温度越高,应变增速越快,材料开始塑性屈

服后产生的变形不可恢复。随后,应力的上升进入第 III 阶段即幂强化阶段,应力大范围增长而应变变化范围较小,开始塑性压实,直至试验应力到达 200 MPa 后手动停止试验。从图 4 可以看出,压缩试样破坏时呈内凹状,并且温度越高,PTFE 软化程度越大,压缩应变增加,试样受压变薄,透明度增加。

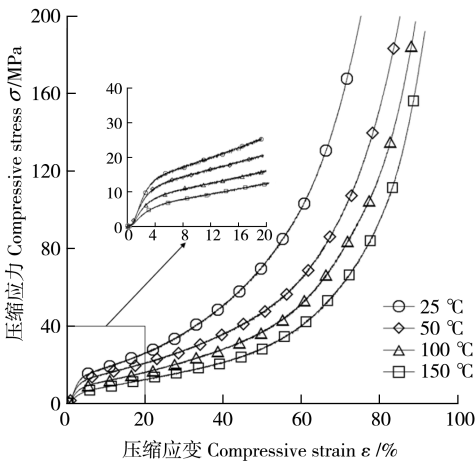


图3 PTFE 不同温度下的压缩应力-应变曲线
Fig. 3 Compressive stress-strain curves of PTFE at different temperatures

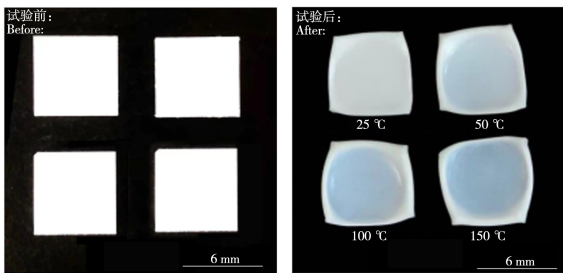


图4 压缩试样宏观形貌
Fig. 4 Macroscopic morphology of compressed specimen

表 2 试样压缩屈服强度、压缩模量与温度的关系
Tab. 2 Compressive elastic modulus and ultimate strength of specimens at different temperatures

温度 Temperature $T/^\circ\text{C}$	压缩屈服强度 Compressive ultimate strength σ_y/MPa	压缩模量 Compressive elastic modulus E_g/MPa
25	10.67	473.96
50	7.47	387.67
100	5.12	291.56
150	4.46	203.75
200	2.98	98.10

由表 2 可以看出,随着温度升高,PTFE 的压缩屈服强度、压缩模量都明显下降。25 ℃时,压缩屈服强度为 10.67 MPa,压缩模量为 473.96 MPa;200 ℃时,压缩屈服强度降低为 2.98 MPa,压缩模量降低为 98.10 MPa,相比 25 ℃时分别降低了 72.1%、79.3%。

在 25~150 ℃范围内时,试验温度小于玻璃化转变温度,压缩过程主要是聚合物分子中键长、键角的运

动引起的。在相同应力条件下,随着温度的升高,材料的应变增大,PTFE有一定的软化,这是因为随着温度升高,分子的运动能量增加,分子位错运动的阻力减小,分子间相互作用力降低,压缩强度下降。升温导致的分子间距离增大,材料过度软化使材料变形能

力增大,导致压缩模量显著下降,表现为外观变软、性能下降。

1.3.2 应力对PTFE材料压缩蠕变的影响

PTFE在不同应力下的蠕变曲线如图5所示,不同应力下的压缩蠕变试样宏观形貌如图6所示。

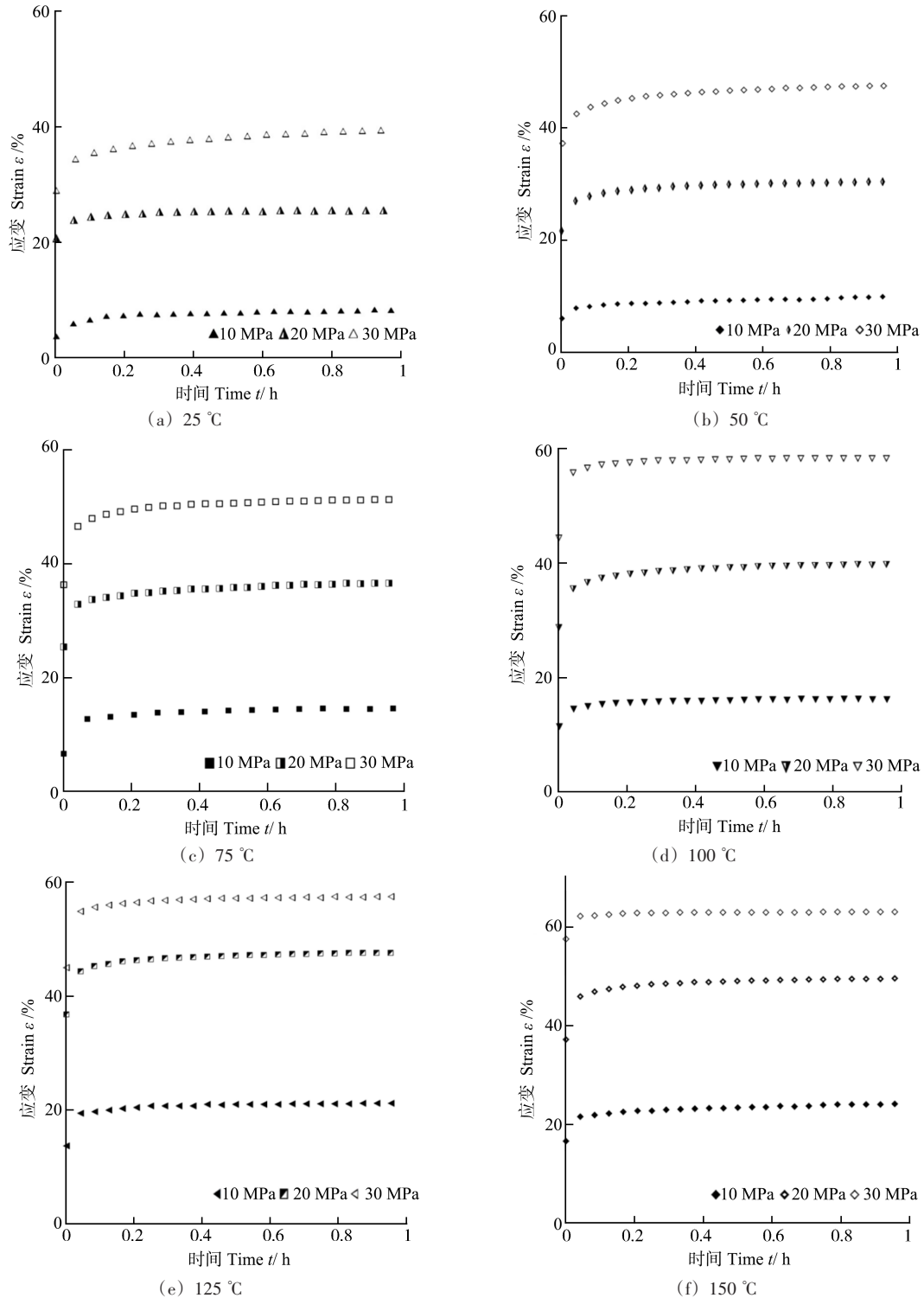


图5 不同温度和应力下的蠕变曲线

Fig. 5 Creep curves under different stresses and temperatures

从图5可以看出,PTFE材料在不同温度和应力下的应变-时间曲线表现出相同的趋势,只有第Ⅰ阶段和第Ⅱ阶段两个蠕变阶段。在相同温度条件下,随着载

荷的增加,瞬时应变明显增大,第Ⅱ阶段稳态蠕变速率也有增大的趋势。以25 °C[图5(a)]为例,载荷为10 MPa时,瞬时应变为3.34%,稳态蠕变速率为

0.864%/h, 1 h 后稳态应变为 8.45%; 当载荷增至 30 MPa 时, 瞬时应变为 24.86%, 稳态蠕变速率为 3.276%/h, 稳态应变值为 39.55%, 与 10 MPa 时相比分别增加了 6.44、3.68、2.79 倍。在低温度水平 (25 °C) 下, 蠕变曲线存在明显的第 I 阶段, 且稳态蠕变速率较高, 不同应力水平下的稳态蠕变速率差别较大; 随着温度的升高, 不同应力水平下的瞬时应变增加, 蠕变第 I 阶段持续时间明显缩短, 应力水平对稳态蠕变速率的影响减小。从图 6 可以看出, 在相同温度 (25 °C) 下, 随着应力的增加, 压缩蠕变试样承压面面积增大, 对应于应变-时间曲线 [图 5(a)], 在相同温度条件下, 随着应力的增加, 瞬时应变和稳态蠕变速率增大, 从而表现出试样横截面面积增加, 蠕变变形增加。

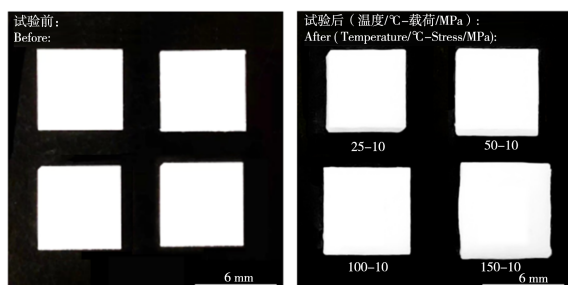


图 6 不同载荷下压缩蠕变试样宏观形貌

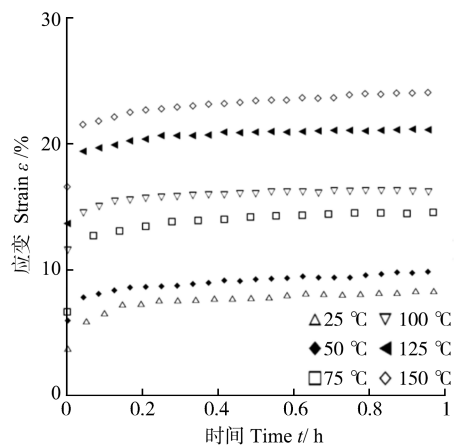
Fig. 6 Macroscopic morphology of compressed creep specimen under different loads

PTFE 的玻璃化转变温度 T_g 为 157 °C, 试验温度小于 T_g , 聚合物中的非晶相结构处于玻璃态, 链段运动处于冻结状态, 主要发生的是键长、键角的状态变化, 具有可回复性^{[24]88-92}。外加载荷有助于降低分子运动的位垒, 缩短分子运动的松弛时间, 从而使那些在低应力作用下本来不可能实现的分子运动在大应力作用下得以实现。同时, PTFE 分子结构为螺旋型, 分子之间容易滑移^{[1]3-7}, 在较低的应力下, 蠕变行为进行得很慢^[25]。随着应力的增加, 非晶区的分子链容易产生滑移, 导致蠕变明显增大。应力进一步增加, 一部分键裂解所需的能量被抵消, 且晶相结构的结晶晶格在外应力的作用下也发生滑移产生塑性变形, 因此, PTFE 的蠕变量随着应力的升高而增大, 蠕变速率和总应变也随之增加。

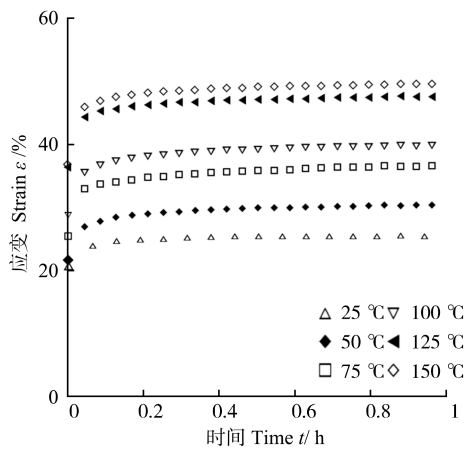
1.3.3 温度对 PTFE 材料压缩蠕变的影响

PTFE 在不同温度下的蠕变曲线如图 7 所示, 瞬时应变和总应变随温度的变化曲线如图 8 所示, 不同温度下的压缩蠕变试样宏观如图 9 所示。

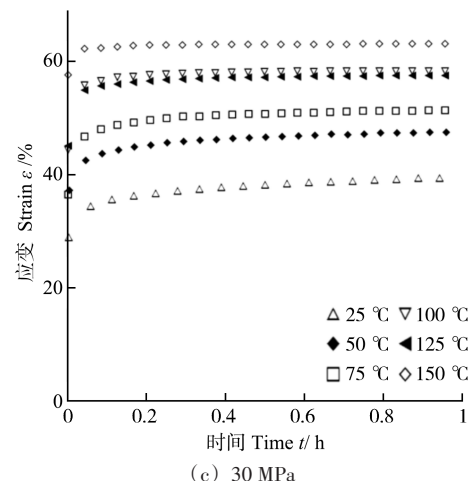
从图 7 可以看出, 三种应力不同温度条件下, 蠕变曲线均只有蠕变过程的前两个阶段, 初始时应变速率



(a) 10 MPa



(b) 20 MPa



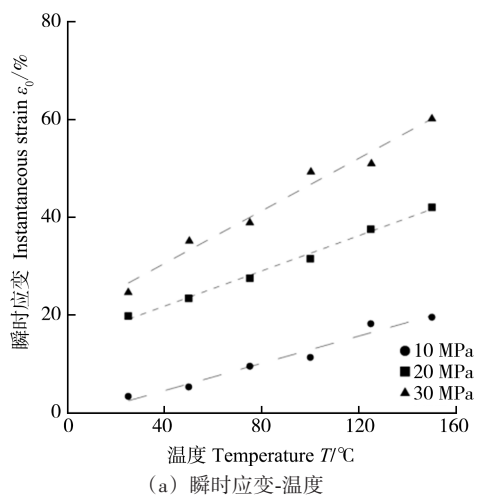
(c) 30 MPa

图 7 不同载荷和温度下的蠕变曲线

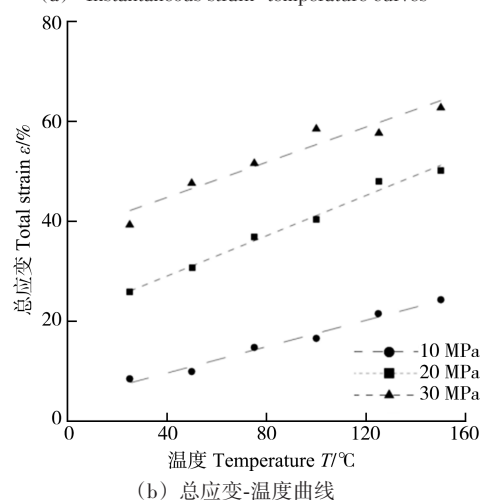
Fig. 7 Creep curves under different temperature and loads

较大, 随后应变速率迅速衰减。通过图 8 可以看出, 在相同载荷作用下, 随着温度的增加, 瞬时应变和总应变有明显增大的趋势。且载荷越大, 瞬时应变增大的趋势越明显 [即图 8(a) 曲线斜率越大]。从图 9 可以看出, 同一载荷 (10 MPa) 下, 随着温度的增加, 压缩蠕变试样承压面面积增大, 且相对于同一温度不同应力下面积增大程度更大。对应于应变-时间曲线、[图 7(a)], 在相同应力条件下, 随着温度的增加, 瞬时

应变和总应变增大,且温度越高,软化程度增加,试样变形程度加大。



(a) Instantaneous strain-temperature curves



(b) Total strain-temperature curves

图 8 相同载荷下瞬时应变-温度和总应变-温度曲线

Fig. 8 Instantaneous strain-temperature curves and total strain-temperature curves under the same load

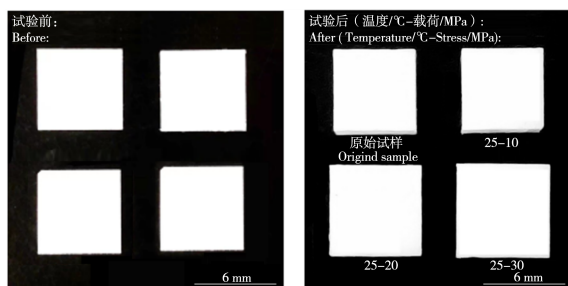


图 9 不同温度下压缩蠕变试样宏观形貌

Fig. 9 Macroscopic morphology of compressed creep specimen under different temperatures

在低应力水平(10 MPa)下,蠕变曲线存在明显的第 I 阶段,且稳态蠕变速率较高,分别在 75 °C、125 °C 下蠕变速率存在阶跃变化,不同温度下的蠕变响应差别较大,且 50 ~75 °C 和 100 ~125 °C 瞬时应变存在明显跃升;在中等应力水平下,不同温度水平下瞬时应变较低应力水平明显提高;在高应力水平下,不同温度下的

蠕变响应差别减小,温度水平对稳态蠕变速率的影响甚微,且温度越高,蠕变响应越早进入蠕变第 II 阶段。

在玻璃化转变温度以下时,高分子聚合物非晶相结构的链段运动被冻结,但许多诸如键长、键角等小尺寸单元在较小能量下被激发而产生自由运动^[26]。随着温度的升高,PTFE 分子热运动活跃,能量和自由体积增大,会导致分子链各运动单元的松弛时间缩短,分子运动加快。且温度升高,材料硬度降低,PTFE 的蠕变量因此随着温度的升高而增大^{[24]90-91},总应变也随之增大。如 10 MPa 应力下,25 °C 下瞬时应变和总应变分别为 3.34% 和 8.45%,150 °C 下瞬时应变和总应变分别为 19.63% 和 39.55%,相对于 25 °C 下分别增加了 4.87 倍、3.68 倍。

2 本构模型

2.1 不同本构模型的拟合

2.1.1 Burgers 模型

高聚物蠕变涉及分子运动能量和运动状态的改变,以及晶相与非晶相分子运动行为的差异,并且同时包括了普弹、高弹、黏滞三种力学状态的变化,这使得蠕变机理十分复杂,用弹簧和黏壶的四元件模型构成 Burgers 模型^{[18]32-33},如图 10 所示。

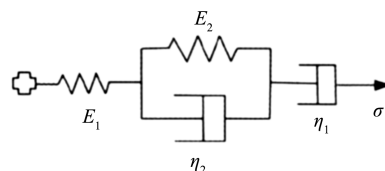


图 10 Burgers 模型

Fig. 10 Burgers model

Burgers 模型表达式为

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} t + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t} \right) \right] \quad (1)$$

式中, $\varepsilon(t)$ 为真实应变; σ_0 为应力水平; t 为应力加载时间; E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 为模型参数; e 为自然常数。

外力加载时,第一部分的理想弹簧部分 E_1 瞬时响应;应力持续加载,第二部分中理想黏壶部分 η_2 逐渐响应;第三部分的理想黏壶 η_1 反映了材料稳态蠕变阶段产生的黏性流动。

利用 Matlab 软件的非线性拟合功能,将 18 组数据按照同温度不同应力进行分组,分别进行拟合计算,得到各组的本构模型参数如表 3 所示。各参数随温度的变化关系如图 11 所示。

Burgers 模型的 4 个参数中, E_1 越大,瞬态蠕变起点值越小,材料抗变形能力越强,弹性变形卸载后能够全部恢复。 E_2 越大,材料在瞬态蠕变阶段蠕变变形范

围越小, η_2 越大, 材料在瞬态蠕变阶段蠕变曲线越平坦。 η_1 反映了材料稳态蠕变阶段产生的黏性流动不可恢复的特征。 η_1 越大, 材料在稳态蠕变阶段曲线斜率越小, 该材料抗变形能力越强^[27]。从图 11 可以看出, 随着温度的升高, Burgers 模型的 4 个参数都呈现一个降低的趋势, 证明温度越高, PTFE 的抗蠕变性能越差。

表 3 PTFE 蠕变 Burgers 模型参数
Tab. 3 Burgers creep model parameters of PTFE

$T/^{\circ}\text{C}$	$E_1/(10^5\text{ MPa})$	$E_2/(10^6\text{ MPa})$	$\eta_1/(10^7\text{ MPa}\cdot\text{h})$	$\eta_2/(10^5\text{ MPa}\cdot\text{h})$
25	9.713 0	4.865 6	4.696 4	7.188 3
50	8.494 8	4.088 8	1.852 2	1.127 0
75	7.723 7	3.031 1	1.807 0	0.478 9
100	6.438 4	3.216 3	1.149 5	0.402 4
125	5.985 4	3.195 2	1.079 0	0.321 4
150	5.542 9	2.500 5	0.956 2	0.027 9

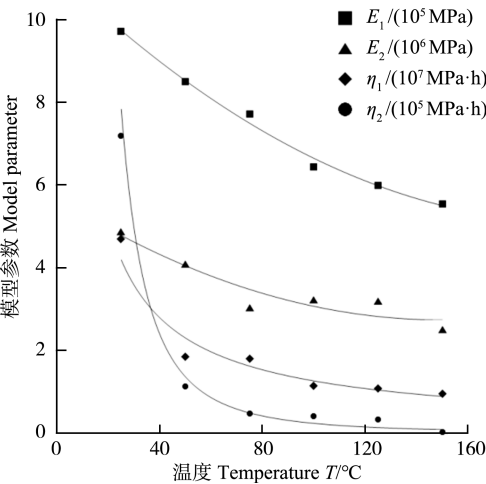


图 11 Burgers 模型参数-温度曲线

Fig. 11 Burgers model parameter-temperature curve

2. 1. 2 Findley 幂律模型

Findley 模型于 20 世纪 50 年代提出时, 被用以描述聚合物的变形, 后被应用于描述材料蠕变性能^[28-29]。该模型形式简单、参数数量较少, 但是在对复合材料蠕变行为进行拟合时常常可以得到理想的效果, 在较长的时间段内较准确描述出复合材料蠕变行为^[30]。模型表达式为

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + at^b \tag{2}$$

式中, $\varepsilon(t)$ 为真实应变; ε_0 为瞬时应变; t 为应力加载时间; a 、 b 为材料常数。

该模型表明蠕变应变随时间呈指数关系增长。利用 Matlab 软件的非线性拟合功能, 将 Findley 模型编入软件, 对不同试验条件下的压缩蠕变数据进行拟合, 得到不同条件下 Findley 幂律模型中各个参数。

2. 1. 3 时间硬化模型

时间硬化理论认为, 蠕变过程的蠕变速率与变形量无关, 随着时间延长、温度升高而降低, 出现材料硬化现象^{[18]46-50}。而且高分子材料蠕变行为更适合采用时间硬化模型描述。模型表达式为

$$\dot{\varepsilon}(t) = C_1\sigma_0^{C_2}t^{C_3}e^{-\frac{C_4}{T}} \tag{3}$$

式中, $\dot{\varepsilon}$ 为蠕变速率; σ_0 为应力水平; t 为应力加载时间; C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 为材料常数。

利用 Matlab 软件的非线性拟合功能将 18 组数据同时进行拟合计算, 得到拟合函数为

$$\dot{\varepsilon} = 7.66^{-6}\sigma^{0.36}t^{0.89}e^{\frac{61}{T}} \tag{4}$$

2. 2 本构模型对比

由第 2. 1 节中得到的各本构模型对试验数据拟合求相关系数如表 4 所示。时间硬化模型的相关系数为 0. 267 相对较低, 表明不适用于描述 PTFE 材料在不同温度和应力下的蠕变行为。将 Burgers 模型和 Findley 模型的 ε - t 关系式与试验结果对比, 如图 12 所示。

表 4 三种模型的相关性系数

Tab. 4 Correlation coefficients of the three models

$T/^{\circ}\text{C}$	σ/MPa	时间硬化 Time hardening	Findley 模型 Findley model	Burgers 模型 Burgers model
25	10	0.267	0.931	
	20		0.881	0.951 1
	30		0.988	
50	10		0.979	
	20		0.959	0.945 7
	30		0.968	
75	10		0.957	
	20		0.977	0.979 0
	30		0.949	
100	10		0.912	
	20		0.965	0.983 9
	30		0.869	
125	10		0.965	
	20		0.965	0.975 5
	30		0.947	
150	10		0.99	
	20		0.94	0.930 8
	30		0.946	

由表 4、图 12 可以看出, Burgers 模型与 Findley 模型拟合得到的蠕变曲线与试验数据的吻合程度较高。每个图中的局部放大图显示了蠕变前期 3 min 的对比。在蠕变前期, Findley 模型与试验结果之间的偏差较大, Burgers 模型与试验数据吻合较好。温度在 75~

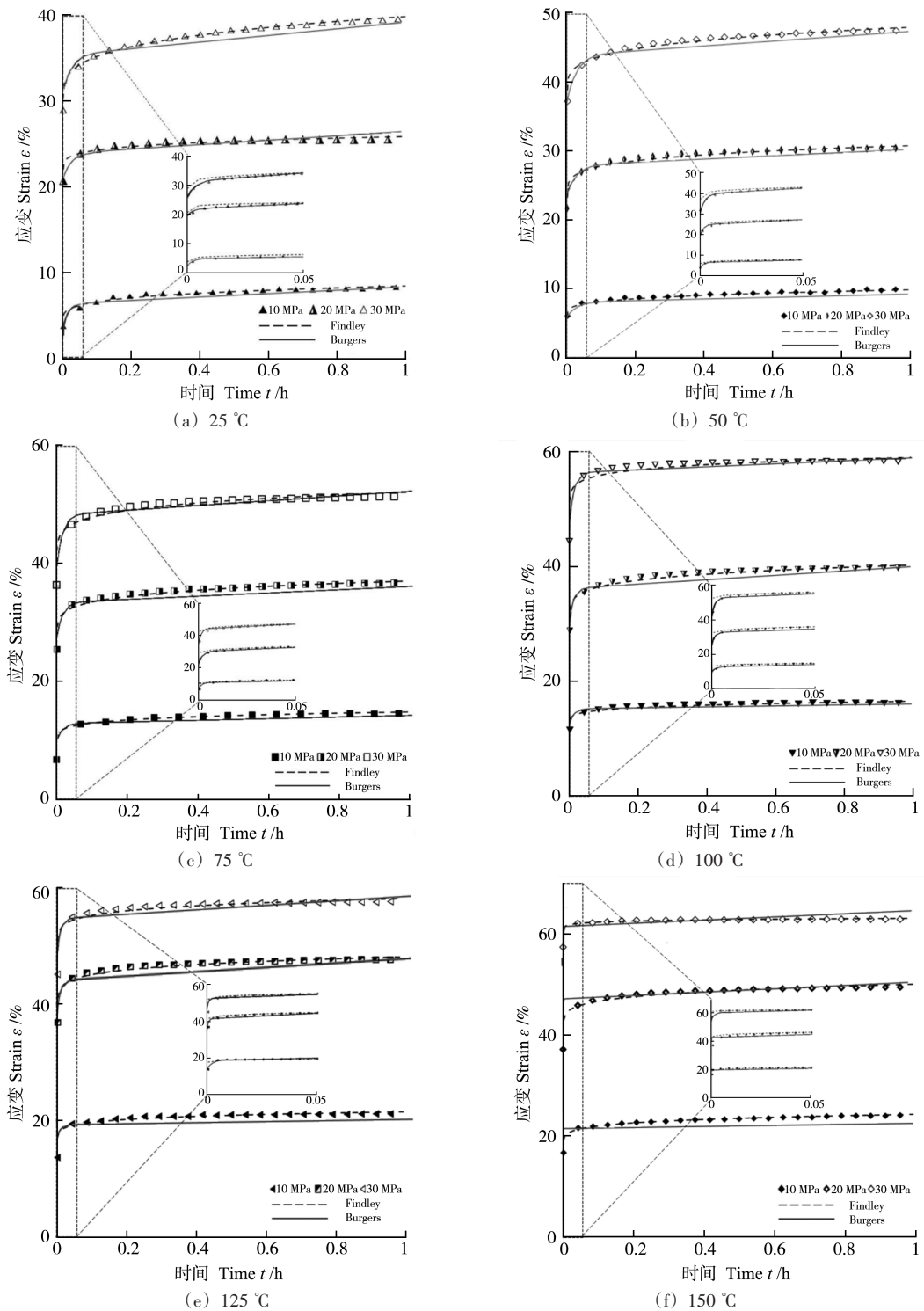


图12 理论计算结果与试验结果对比

Fig. 12 Comparisons between the theoretical calculations and experiments

125 °C范围内,蠕变曲线变化趋势更接近于Burgers模型。而在150 °C时,在10 MPa、20 MPa和30 MPa应力下,Burgers模型的最大误差分别为27.24%,17.5%和8.3%,而Findley模型误差分别为7.5%,4.7%和3.2%。因此,当温度接近玻璃化转变温度时,即温度相对高时,应力对蠕变的影响系数变小,Findley模型拟合效果更好。

综上所述,温度在75~125 °C范围内,Burgers模型相对于Findley模型能够更好地描述PTFE的蠕变行为;在温度接近或高于150 °C时,Findley模型拟合效果更好。

3 结论

本文系统地研究了不同温度及应力下PTFE材料的压缩及蠕变行为,揭示了温度及应力对PTFE材料

压缩蠕变性能的影响规律。同时,分析了Burgers模型、Findley模型和时间硬化模型在不同温度下的适用性。获得的主要结论如下:

1) 压缩曲线呈现3个阶段。压缩初始弹性阶段,在应变达到3%进入弱线性强化阶段,应力快速上升期进入幂强化阶段。随着温度的增加,PTFE的弹性模量和压缩屈服强度降低。

2) 压缩蠕变性能受到温度和应力的耦合影响。相同温度下,随着应力的增加,PTFE的蠕变量随之增大,瞬时应变和蠕变速率也增加。相同应力下,随着温度增加,分子能量和自由体积增大,PTFE的蠕变量随之增大,总应变也增大。

3) 温度在75~125℃范围内,Burgers模型相对于Findley模型能够更好地描述PTFE的蠕变行为。温度高于150℃时,Findley模型的拟合效果更佳。

参考文献(References)

- [1] 陈碧波. 聚四氟乙烯蠕变性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007: 3-7.
CHEN BiBo. Study on creep properties of polytetrafluoroethylene [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007: 3-7 (In Chinese).
- [2] 钱知勉. 聚四氟乙烯塑料的实用性[J]. 有机氟工业, 2003(1): 10-20.
QIAN ZhiMian. Practical usage of PTFE plastics[J]. Organo-Fluorine Industry, 2003(1): 10-20 (In Chinese).
- [3] 陈仪庄. 聚四氟乙烯的生产和应用近况[J]. 上海化工, 1995, 20(4): 25-28.
CHEN YiZhuang. Recent development of production and application of polytetrafluoroethylene[J]. Shanghai Chemical Industry, 1995, 20(4): 25-28 (In Chinese).
- [4] 黄丽, 孙正滨. PTFE复合材料力学与摩擦性能的研究[J]. 复合材料学报, 2000, 17(4): 54-57.
HUANG Li, SUN ZhengBin. Study on frictional and mechanical performance of PTFE nanocomposites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(4): 54-57 (In Chinese).
- [5] 石安富, 龚云表. 工程塑料手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003: 676-698.
SHI AnFu, GONG YunBiao. Handbook of engineering plastics [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2003: 676-698 (In Chinese).
- [6] 何燕. 聚四氟乙烯的生产应用与市场[J]. 四川化工与腐蚀控制, 2003(1): 34-41.
HE Yan. Production, application and market of polytetrafluoroethylene[J]. Sichuan Chemical Industry and Corrosion Control, 2003(1): 34-41 (In Chinese).
- [7] 张静静, 刘泊天, 高鸿, 等. 航天领域常用聚四氟乙烯性能试验研究[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(6): 638-641.
ZHANG JingJing, LIU BoTian, GAO Hong, et al. Test study of the properties of PTFE in aerospace applications[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2015, 32(6): 638-641 (In Chinese).
- [8] 李奔, 朱光明, 李素琴. 拉伸工艺对聚四氟乙烯结构和性能的影响[J]. 中国塑料, 2020, 34(1): 1-5.
LI Ben, ZHU GuangMing, LI SuQin. Effect of stretching process on structure and properties of polytetrafluoroethylene[J]. China Plastics, 2020, 34(1): 1-5 (In Chinese).
- [9] 蒋雨江. 聚四氟乙烯油封唇片材料的制备与性能研究[D]. 成都: 西华大学, 2023: 14-35.
JIANG YuJiang. Study on preparation and properties of PTFE oil seal lip material [D]. Chengdu: Xihua University, 2023: 14-35 (In Chinese).
- [10] 张宇. 拉应力下PTFE的结构、性能及其柔性导电材料的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2020: 1-119.
ZHANG Yu. Study on the structure and properties of PTFE under tensile stress and its flexible conductive materials [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2020: 1-119 (In Chinese).
- [11] 郑依铭, 吴海波. 聚四氟乙烯滤料的高温蠕变行为与抗蠕变研究[J]. 毛纺科技, 2022, 50(1): 1-6.
ZHENG YiMing, WU HaiBo. High temperature creep behavior and anti-creep treatment of PTFE filter[J]. Wool Textile Journal, 2022, 50(1): 1-6 (In Chinese).
- [12] 卢堃. 聚四氟乙烯衬里管的变形与失效分析[D]. 天津: 河北工业大学, 2022: 23-48.
LU Kun. Deformation and failure analysis of PTFE lined pipe [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2022: 23-48 (In Chinese).
- [13] 唐雅斐. 缝合前后高温滤料的性能测试与评价[D]. 上海: 东华大学, 2022: 19-27.
TANG YaFei. Performance test and evaluation of high temperature filter media before and after sewing [D]. Shanghai: Donghua University, 2022: 19-27 (In Chinese).
- [14] 雷森, 周健, 李孟茹, 等. 聚四氟乙烯压缩蠕变行为测试与表征[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(6): 118-124.
LEI Miao, ZHOU Jian, LI MengRu, et al. Testing and characterization of compressive creep behavior in polytetrafluoroethylene [J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(6): 118-124 (In Chinese).
- [15] HOSSAIN BHUIYAN M M, SAKIB A N, CORRAL A B, et al. Investigating the influence of operating variables on sealing performance of a V-ring seal stack in the oil and gas industry for enhanced environmental and operational performance [J]. Polymer Testing, 2024, 131: 108346.
- [16] 裴景克, 李文泽, 龚鹏剑, 等. 温度-应力耦合条件下聚四氟乙烯的压缩蠕变行为与寿命预测[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(8): 122-129.
PEI JingKe, LI WenZe, GONG PengJian, et al. Compression creep behavior and life prediction of polytetrafluoroethylene under temperature-stress coupling condition [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(8): 122-129 (In Chinese).

- [17] CARVALHO P R P, CODA H B, SANCHES R A K. A large strain thermodynamically-based viscoelastic-viscoplastic model with application to finite element analysis of polytetrafluoroethylene (PTFE) [J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2023, 97: 104850.
- [18] 魏 轩. 聚氨酯泡沫材料高温蠕变及应力松弛特性的试验研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016: 29-50.
- WEI Xuan. Experimental study on creep and stress relaxation characteristics of polyurethane foam at high temperature [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016: 29-50 (In Chinese).
- [19] 邓双全, 蔡绪福. EVA 粉体高填充电缆材料蠕变性能及其数学模型拟合 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2014, 46(6): 164-172.
- DENG ShuangQuan, CAI XuFu. Creep and mathematics model fitting of EVA cable highly filled with powder [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2014, 46(6): 164-172 (In Chinese).
- [20] 张永祥. 环氧树脂胶黏剂粘接结构性能的试验和理论研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2014: 10-19.
- ZHANG YongXiang. Experimental and theoretical study on bonding structure and properties of epoxy resin adhesive [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014: 10-19 (In Chinese).
- [21] 李茂东, 李 彦, 杨 波, 等. PE100 燃气管材的非线性蠕变行为及其本构模型研究 [J]. *中国塑料*, 2021, 35(11): 91-96.
- LI MaoDong, LI Yan, YANG Bo, et al. Characterization and constitutive modelling of nonlinear creep of PE100 grade gas pipe material [J]. *China Plastics*, 2021, 35(11): 91-96 (In Chinese).
- [22] ADIBEIG M R, HASSANIFARD S, VAKILI-TAHAMI F. Optimum creep lifetime of polymethyl methacrylate (PMMA) tube using rheological creep constitutive models based on experimental data [J]. *Polymer Testing*, 2019, 75: 107-116.
- [23] 全国塑料标准化技术委员会. 塑料-压缩性能的测定: GB/T 1041—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 2-7.
- National Technical Committee for Plastics Standardization. Plastics-determination of compressive properties: GB/T 1041—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 2-7 (In Chinese).
- [24] 叶素娟, 禹 权, 李国一, 等. 密封用 PTFE 复合材料的压缩蠕变性能 [J]. *工程塑料应用*, 2019, 47(2): 88-92.
- YE SuJuan, YU Quan, LI GuoYi, et al. Research on compressive creep properties of PTFE composites used for sealing [J]. *Engineering Plastics Application*, 2019, 47(2): 88-92 (In Chinese).
- [25] 汪 萍. 聚四氟乙烯的烧结工艺技术 [J]. *工程塑料应用*, 2001, 29(3): 19-21.
- WANG Ping. PTFE sintering technology [J]. *Engineering Plastics Application*, 2001, 29(3): 19-21 (In Chinese).
- [26] PEGORETTI A, KOLARIK J, PERONI C, et al. Recycled poly(ethylene terephthalate)/layered silicate nanocomposites: morphology and tensile mechanical properties [J]. *Polymer*, 2004, 45(8): 2751-2759.
- [27] 王 维, 逯 峙, 谷万铎. 铝电解碳素阴极材料在高温和电解状态下的蠕变模型 [J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(9): 2339-2344.
- WANG Wei, LU Zhi, GU WanDuo. Creep model of carbon-based cathode materials for aluminum electrolysis under high temperature and electrolysis conditions [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(9): 2339-2344 (In Chinese).
- [28] 杜虎虎. 木粉/HDPE 复合材料地板蠕变特性的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013: 46-52.
- DU HuHu. Research on creep characteristics of wood flour/HDPE composite floor [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013: 46-52 (In Chinese).
- [29] FINDLEY B W N, LAI J S, ONARANA K. Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials: with an introduction to linear viscoelasticity [M]. New York: Dover Publications, 1989: 50-107.
- [30] 高洪梅, 刘汉龙, 刘金元. EPS 颗粒轻质混合土蠕变特性试验研究 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(4): 402-406.
- GAO HongMei, LIU HanLong, LIU JinYuan. Creep behaviors of lightweight EPS treated soil [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2010, 38(4): 402-406 (In Chinese).