

环氧树脂胶湿热与室温环境下的蠕变行为研究^{*}

INVESTIGATION ON EPOXY CREEP BEHAVIORS AT AMBIENT AND HYGROTHERMAL ENVIRONMENT

张 军^{**} 张永祥 杨 军

(郑州大学 化工与能源学院, 郑州 450001)

ZHANG Jun ZHANG YongXiang YANG Jun

(School of Chemical Engineering & Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

摘要 环氧树脂胶在长期载荷作用下将产生蠕变变形,尤其是在湿热环境中蠕变现象更加明显,不利于工程的推广应用。采用 CARE 多功能拉伸试验机对湿热以及室温环境下的环氧树脂胶试件,进行了 5 MPa、10 MPa、15 MPa、17.5 MPa 定载荷蠕变实验,对比了湿热与室温状态下胶体蠕变行为。实验结果表明湿热环境对胶体蠕变性能影响显著,且这种影响随着应力的增大被逐步扩大。采用 Kelvin 模型与三参数时间硬化模型对环氧树脂胶在不同环境下的蠕变行为进行了分析,发现三参数时间硬化模型能够更好地描述湿热与室温环境下此种材料的蠕变行为,为环氧树脂胶的蠕变特性研究提供了一种简单有效的分析方式。

关键词 环氧树脂胶 时间硬化模型 湿热 蠕变

中图分类号 TQ436.9 TB302.3

Abstract The epoxy adhesive under long-term loading will generate creep deformation, which is obvious in hygrothermal environment, and it is not conducive to engineering application. The creep tests under constant loading of epoxy adhesive were conducted in this paper, which stresses were 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa, 17.5 MPa, at room and hygrothermal environment using CARE multifunctional tensile testing machine and the creep behaviors of epoxy adhesive at ambient and hygrothermal environment were compared. As shown by the experimental results, the hygrothermal environment had a significant effect on the creep properties of epoxy, and this effect increased with the stress varied. Meanwhile the creep behaviors of epoxy adhesive were analyzed using the Kelvin model and the three-parameters time hardening model. It was found that the creep behavior of this materials at ambient and hygrothermal environment could be described by using the three-parameters time-hardening model.

Key words Epoxy; Time-hardening model; Hygrothermal environment; Creep

Corresponding author: ZHANG Jun, E-mail: Zhang_jun@zhu.edu.cn, Tel: +86-371-67781219

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 10972200, 11172270).

Manuscript received 20130103, in revised form 20130508

引言

环氧树脂胶粘剂是一类由环氧树脂基料、固化剂、稀释剂、促进剂和填料配制而成的工程胶粘剂。由于其粘接性能好、价格低廉、粘接工艺简便,近些年被广泛应用于家电、汽车、医疗、水利交通、电子电器和宇航工业等领域^[1-2]。环氧树脂胶在长期负载的情况下,往往产生蠕变。蠕变将导致粘接结构的缓慢变形,随着时间的积累,最终导致粘接结构失去原有形态而丧失功能。尤其在湿热环境中长期负载情况下,环氧树脂胶的蠕变现象更加明显。工程领域环氧树脂胶的粘接结构经常会在不同工作环境以及长期负载下使用,因此研究不同环境下环氧树脂胶的蠕变特性具有重要的

理论意义和工程应用价值^[3-4]。

针对不同材料蠕变行为,国内外提出了多种蠕变模型,包括 Kelvin 模型、Burgers 模型、Boltzmann 模型等^[5-9]。Findley W N 等^[10]对 24℃ 下聚乙烯氯化物 Geon 404,恒定应力下,7 200 s 时间内的蠕变行为进行了研究,并提出了一种基于 Boltzmann 模型的线性蠕变模型。熊良宵等^[11]对绿叶岩双轴压缩蠕变特性进行研究,发现非定常 Burgers 模型更适用于描述定载荷下硬岩的黏弹性蠕变特征。张伍连等^[12]利用德国多动能 Zwick/Roell Z020 拉伸仪,获得了织物 9000s 蠕变曲线,同时采用广义三参数、五参数与七参数的 Kelvin-Voigt 蠕变方程研究其蠕变行为。发现参数越多,模型越接近实际材料。Hackney S A 等^[13]采用

^{*} 20130103 收到初稿, 20130508 收到修改稿, 国家自然科学基金项目 10972200, 11172270) 资助。

^{**} 张 军, 1967 年 8 月生, 黑龙江大庆人, 汉族, 郑州大学教授, 研究方向为粘接结构的可靠性。

CSM 压痕仪,对 Sn-C/PVDF 纳米复合材料,在 15 mN、20 mN 载荷下,20 s 内的蠕变行为进行了研究,发现基于 Kelvin-voigt 模型的修正模型能够更好地描述这种材料的蠕变行为。Abuzeid O M^[14]建立了基于 Kelvin 模型线性粘弹性接触蠕变模型,可以用于研究机械零件互联中不规则接触面的蠕变行为。

以 Kelvin 模型为基础,进行不同程度变形以及修正的蠕变模型应用较广。但在研究中发现,对于环氧树脂胶,单一 Kelvin 模型与实际材料的蠕变表现相差较大,应使用多个单元组合的方式描述材料的实际蠕变。而且随着 Kelvin 单元模型的增多,越能够准确地描述材料的蠕变行为。罗迎社等^[15]采用 Eplexor 500N 动态热分析仪,对 E44 型环氧树脂胶 20℃、30℃、40℃ 环境,15 MPa 应力状态下,蠕变时间为 7 200 s 的蠕变行为进行实验分析时,发现 20℃ 时标准线性体模型(一个弹簧串联一个 Kelvin-Voigt 模型)5 500 s 后与实验曲线有了明显的差别。闵召辉等^[16]研究中发现采用八个单元并联的模型可以达到理想效果。单元模型越多,模型就越复杂,所需确定的参数也就越多,这不利于工程实践的应用与推广,因此找到一种更为简单有效的数学模型描述环氧树脂胶的蠕变特性十分必要。

本文采用 E-44/EP-1 环氧树脂胶,利用凯尔多功能拉伸试验机,完成了湿热以及室温环境下环氧树脂胶的定载荷蠕变特性实验。利用基于时间硬化的蠕变模型,同时考虑到环氧树脂胶随时间硬化的效果,用三个参数描述其蠕变行为。拟合获得三参数时间硬化蠕变模型与 Kelvin 模型的蠕变特性参数,并通过与实验结果对比,研究分析了环氧树脂胶湿热与室温状态下的蠕变行为。

1 蠕变实验

1.1 试件制作

实验采用德益公司生产的环氧树脂胶,型号为 E-44/EP-1,由环氧树脂胶 A 和固化剂 B 两部分组成,适用于 -60℃ 至 120℃,玻璃化转变温度 150℃。试件制作时采用注射仪器将 A、B 组份按体积比 1:1 比例混合,并搅拌均匀。采用聚四氟乙烯制成模具,胶体调和均匀后浇注至模具中,并放置于 LD-42 离心机中高速离心 15 分钟,转速设定为 4 000 r/min,以减少混合过程中产生的气泡,试件固化 24 小时后除掉模具。试件和结构尺寸如图 1a、图 1b 所示(试件尺寸标准参照 GB/T 11546.1-2008、GB/T 6397-1986)。

1.2 实验方法及过程

蠕变试验选择 CARE 公司的微型单轴拉伸蠕变试验机,如图 2 所示。试验机的级别为 0.5,相对误差小

于 0.5%,位移分辨率是 0.25 μm。实验测试软件为 CARE Test Studio,可以即时获取实验数据,方便实验数据的采集以及处理。夹具采用非自锁夹具(参照 GB/T 1546.1-2008),梯形钢块作为夹头,夹头内置 V 型槽,槽内有防滑斜纹。加持过程中夹头夹持至试件宽平行部分与过渡部分间,减小宽平行部分对实验结果产生影响。本实验分为湿热环境与室温环境,其中湿热环境为 70 kPa,115℃,相对湿度 100% 的试验箱,试件放入湿热环境箱 3 小时后取出。湿热后的试件和室温环境的试件,分别在试验机上进行蠕变测试。事先实验已确定室温时环氧树脂胶的屈服极限为 $\sigma_{\max} = 35.8$ MPa,因此,本次蠕变实验的载荷采用低于这种环氧树脂胶的屈服极限,分别为 5 MPa、10 MPa、15 MPa、17.5 MPa。室温与湿热环境下将试件载荷由 0 加载至设定值后,保持恒定 7 200 s,每组试件重复 5 次。

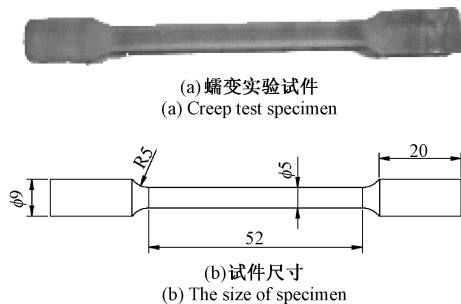


图 1 蠕变实验试件

Fig. 1 The creep test specimen



图 2 CARE 拉伸试验机

Fig. 2 CARE tensile testing machine

2 蠕变模型

2.1 基于时间硬化的蠕变模型

何平笙等^[17]^[66-70]认为许多高聚物的蠕变应变与时间的双对数成一条直线,这表明应变的时间响应一般可以表示为幂指数形式,这里采用一种相近的蠕变模型—三参数时间硬化模型(Time hardening model),其微分形式为

$$\dot{\bar{\varepsilon}}^{cr} = A \tilde{q}^n t^m \tag{1}$$

其中, $\dot{\bar{\varepsilon}}^{cr}$ —单轴等效蠕变应变速率; $\tilde{q}$ —等效单轴偏应力, MPa;
 t —时间, s;
 A, n, m 分别为常数项, 用于表征该材料的蠕变特性^[18]。

对式(1)积分, 即可以得到表征蠕变应变与时间和等效应力之间的关系式。

$$\bar{\varepsilon}^{cr} = \frac{A}{1+m} \tilde{q}^n t^{m+1} \tag{2}$$

其中, $n > 0, 0 \geq m > -1$ 。

2.2 Kelvin 蠕变模型

Kelvin 模型(图 3)可以简单描述为由一个虎克弹簧(弹性模量为 E)和一个牛顿流体(黏度为 η)并联组成。

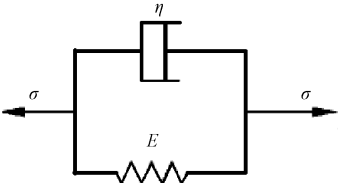


图 3 Kelvin 模型
Fig. 3 The Kelvin model

当受外力作用时, 由于牛顿流体的粘滞作用, 弹簧被缓慢拉开, 表明变形推迟发生, 达到平衡变形需要一定的时间。由模型可知, 当受外力作用时, 弹簧和牛顿流体的变形量相同, 即 $\varepsilon = \varepsilon_{ela.} = \varepsilon_{plas.}$, 外力由弹簧和牛顿流体共同承担, 故

$$\sigma(t) = \sigma_{ela.} + \sigma_{plas.} = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \tag{3}$$

其中, E —弹性模量, MPa;

ε —应变;

η —牛顿流体黏度, MPa·s;

定载荷蠕变时, 应力为恒定, 故 $\sigma(t) = \sigma_0$, 因此

$$\frac{\sigma_0}{E} = \varepsilon + \frac{\eta}{E} \frac{d\varepsilon}{dt} \tag{4}$$

解此一阶常微分方程, 可以得到

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} (1 - e^{-\frac{E}{\eta}t}) \tag{5}$$

此式即描述了恒温、恒应力下材料蠕变的变化规律^{[17]66-70}。

3 结果分析

3.1 实验结果分析

实验加载过程分为两个阶段, 第一阶段是加载阶段, 载荷由 0 加载至设定值; 第二阶段是载荷保持阶

段。根据实验结果, 可以得到湿热与室温下, 环氧树脂胶位移随时间的变化规律, 如图 4 所示。

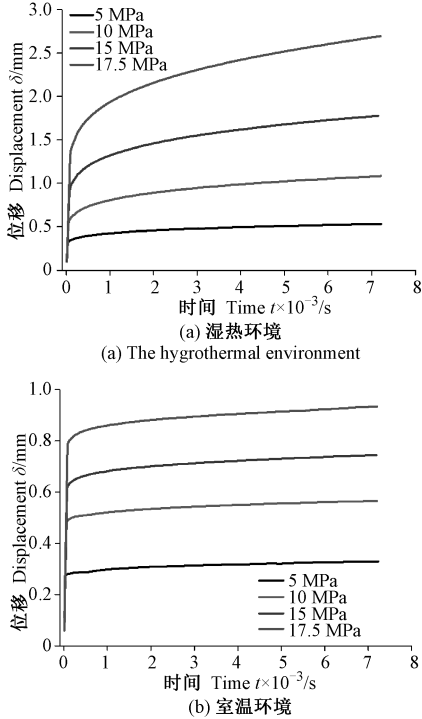


图 4 不同应力状态下环氧树脂位移—时间曲线
Fig. 4 The displacement-time curves of epoxy under different stresses

从图 4 中可以发现, 湿热状态下环氧树脂胶的蠕变在载荷保持阶段开始后在较长的一段时间内仍保持较高的增长速率, 而室温状态下的蠕变则很快进入稳定阶段。

图 5 为湿热与室温状态环氧树脂胶蠕变阶段应变量随应力的变化规律, 可以发现, 相同应力时, 湿热后环氧树脂胶的蠕变应变大于室温状态。应力为 5 MPa 时, 湿热后的试件应变是胶体室温应变的 3.96 倍。应力为 17.5 MPa 时, 湿热后试件的应变达到室温应变的 9.50 倍。说明湿热环境对胶体蠕变性能的影响显著, 而且这种影响随着应力的增大被逐步扩大。

3.2 蠕变模型特性参数获取

3.2.1 三参数时间硬化模型蠕变特性参数获取

三参数时间硬化蠕变模型需要确定的特性参数分别为 A, n, m 。特性参数的获得需对式(2)两侧取对数, 得到

$$\ln(\varepsilon) = \ln\left(\frac{A}{1+m} q^n\right) + (1+m)\ln(t) \tag{6}$$

由于蠕变试验载荷恒定且同应力下 A, n, m 为常数, 则 $\ln\left(\frac{A}{1+m} q^n\right) = \text{Constant}$, 因此式(6)是关于 $\ln(t)$ 的一次线性函数, 拟合实验数据, 可以获得斜率 $1+m$ 以及相应截距 $\ln\left(\frac{A}{1+m} q^n\right)$, 如图 6 所示。

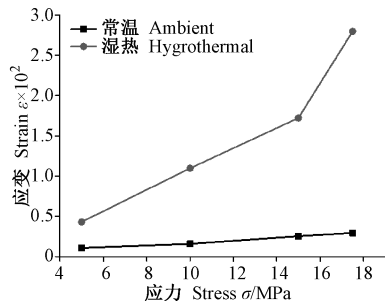
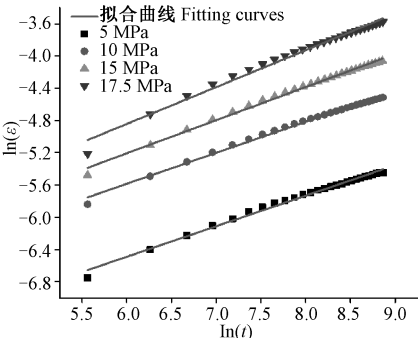
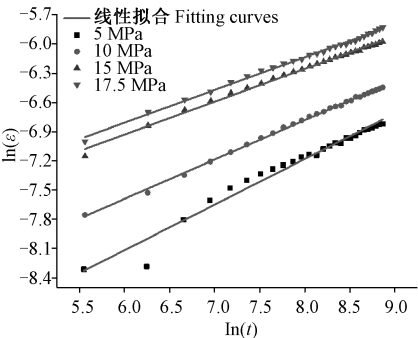


图5 室温与湿热环境下环氧树脂的蠕变应变-应力曲线

Fig. 5 The creep strain-stress curves of epoxy at ambient and hygrothermal environment



(a) 湿热环境
(a) The hygrothermal environment



(b) 室温环境
(b) The ambient environment

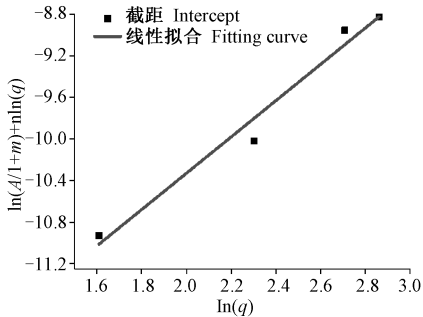
图6 胶体蠕变应变 ε 与时间 t 分别取对数后线性拟合结果

Fig. 6 The results of linear fitting between creep strain and time after taking logarithm

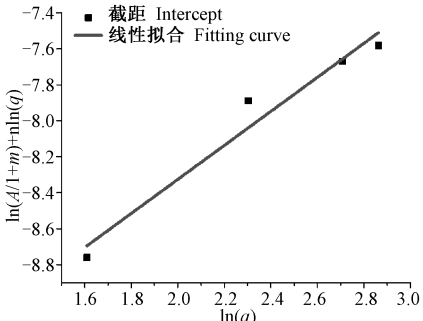
对于不同应力状态下,截距 $\ln\left(\frac{A}{1+m}q^n\right)$ 是一个关于应力 q 的函数,截距可以写为

$$I_t = \ln\left(\frac{A}{1+m}\right) + n\ln(q) \tag{7}$$

根据图6拟合获得的截距 $\ln\left(\frac{A}{1+m}q^n\right)$ 进行关于应力 q 线性拟合,得到的斜率即为 n 值,如图7所示。并利用上述过程获得的 n 值、不同状态下的 m 值以及相应的截距 $\ln\left(\frac{A}{1+m}q^n\right)$,从而可以得到不同状态下相应的 A 的值。



(a) 湿热环境
(a) The hygrothermal environment



(b) 室温环境

图7 截距与应力取对数后线性拟合结果

Fig. 7 The results of linear fitting between intercept and stress after taking logarithm

根据上述结果,即可得到室温与湿热下不同应力状态时 ε - t 关系式,如表1所示。

表1 室温与湿热环境下时间硬化模型蠕变 ε - t 关系式
Tab. 1 The relationship of ε - t in the time hardening model at ambient and hygrothermal environment

应力状态	湿热—蠕变 ε - t 关系式
Stress state	The relationship of ε - t at hygrothermal environment
5 MPa	$\varepsilon(t) = \frac{1.2979 \times 10^{-5}}{1 - 0.62143} \times 5^{0.94489} \times t^{1 - 0.62143}$
10 MPa	$\varepsilon(t) = \frac{1.63411 \times 10^{-5}}{1 - 0.61578} \times 10^{0.94489} \times t^{1 - 0.61578}$
15 MPa	$\varepsilon(t) = \frac{1.48262 \times 10^{-5}}{1 - 0.58928} \times 15^{0.94489} \times t^{1 - 0.58928}$
17.5 MPa	$\varepsilon(t) = \frac{1.55686 \times 10^{-5}}{1 - 0.54335} \times 17.5^{0.94489} \times t^{1 - 0.54335}$
应力状态	室温—蠕变 ε - t 关系式
Stress state	The relationship of ε - t at ambient environment
5 MPa	$\varepsilon(t) = \frac{5.06 \times 10^{-7}}{1 - 0.53114} \times 5^{1.74487} \times t^{1 - 0.53114}$
10 MPa	$\varepsilon(t) = \frac{3.24 \times 10^{-7}}{1 - 0.59519} \times 10^{1.74487} \times t^{1 - 0.59519}$
15 MPa	$\varepsilon(t) = \frac{3.86 \times 10^{-7}}{1 - 0.66225} \times 15^{1.74487} \times t^{1 - 0.66225}$
17.5 MPa	$\varepsilon(t) = \frac{3.35 \times 10^{-7}}{1 - 0.66343} \times 17.5^{1.74487} \times t^{1 - 0.66343}$

从表1可以看出,室温状态下基于时间硬化蠕变模型参数 A 远小于湿热状态下,相差达到两个数量级。参数 n 湿热状态下为 0.944 89, m 值随应力逐渐

增大,室温状态 n 下为 1.744 87, m 值随应力逐渐减小。 A 值的大小直接影响相应状态下的应变变化量大小。 n 值的大小表明应力对蠕变应变变化量影响的程度,该值越大,应力对结果的影响比重就越大。 m 值是时间的幂指数, m 值在两种状态下趋势不同说明,随着时间的变化,在湿热过程中时间的影响是逐渐增大的,而在室温状态下 t 的影响比重逐渐减小。

3.2.2 Kelvin 模型蠕变特性参数获取

对湿热与室温状态下的蠕变曲线按照式(5)拟合,可以得到湿热与室温环境中不同应力下 ε - t 关系式,如表 2 所示。

表 2 湿热与室温状态下 Kelvin 模型 ε - t 关系式

Tab.2 The relationship of ε - t in the Kelvin model at ambient and hygrothermal environment

应力状态	湿热—蠕变 ε - t 关系式
Stress state	The relationship of ε - t at hygrothermal environment
5 MPa	$\varepsilon(t) = \frac{5}{1\,215.70} \times (1 - e^{-\frac{1\,215.70t}{1.878\,1 \times 10^6}})$
10 MPa	$\varepsilon(t) = \frac{10}{962.72} \times (1 - e^{-\frac{962.72t}{1.547\,9 \times 10^6}})$
15 MPa	$\varepsilon(t) = \frac{15}{911.38} \times (1 - e^{-\frac{911.38t}{1.603\,1 \times 10^6}})$
17.5 MPa	$\varepsilon(t) = \frac{17.5}{646.95} \times (1 - e^{-\frac{646.95t}{1.259\,8 \times 10^6}})$
应力状态	室温—蠕变 ε - t 关系式
Stress state	The relationship of ε - t at ambient environment
5 MPa	$\varepsilon(t) = \frac{5}{4\,702.80} \times (1 - e^{-\frac{4\,702.80t}{9.462\,4 \times 10^6}})$
10 MPa	$\varepsilon(t) = \frac{10}{6\,570.24} \times (1 - e^{-\frac{6\,570.24t}{1.220\,8 \times 10^7}})$
15 MPa	$\varepsilon(t) = \frac{15}{6\,376.36} \times (1 - e^{-\frac{6\,376.36t}{8.762\,3 \times 10^6}})$
17.5 MPa	$\varepsilon(t) = \frac{17.5}{6\,547.46} \times (1 - e^{-\frac{6\,547.46t}{9.355\,6 \times 10^6}})$

3.3 基于时间硬化的蠕变模型、Kelvin 模型与实验结果对比

表 1 与表 2 中已经得到基于时间硬化的蠕变模型与 Kelvin 模型的 ε - t 关系式,与试验结果对比,如图 8 所示。

从图 8 中可以发现,Kelvin 模型在蠕变开始阶段保持一个较高的蠕变增长速率,但很快进入平缓阶段,而时间硬化模型在整个过程中均保持一定的蠕变增长率。湿热与室温状态下胶体的蠕变曲线变化趋势更接近于时间硬化模型。蠕变开始阶段 Kelvin 模型与实验结果之间的偏差较大,湿热状态下误差均值为 43.9%,室温状态下误差均值达到 50.2%。低应力状态下,时间硬化模型与 Kelvin 模型近似,均接近实际结果。但随着应力的增大,Kelvin 模型与实验结果的偏差也逐渐增大,室温状态下最为显著,此时随着应力

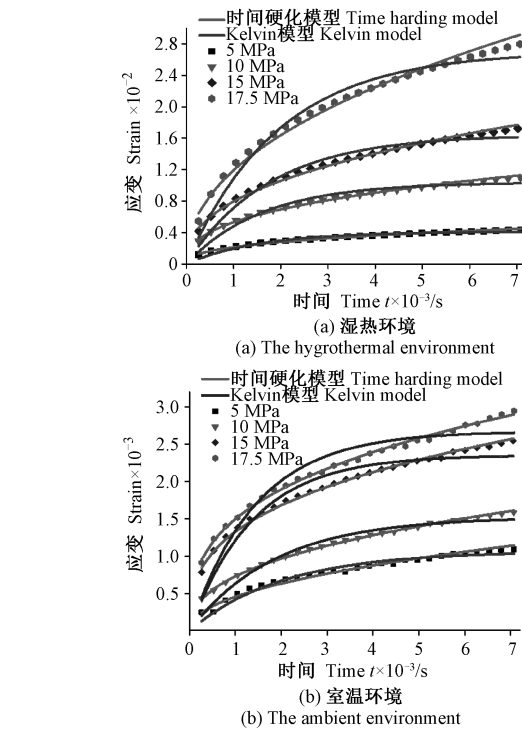


图 8 理论计算结果与实验结果对比
Fig.8 The comparison between the theoretical calculations and experiments

变化 Kelvin 模型的误差依次为 5.5%、6.3%、7.9%、10.2%。室温与湿热状态下,时间硬化模型的误差均小于 Kelvin 模型。以 17.5 MPa 时为例,常温与湿热状态下,Kelvin 模型的误差达到最大,分别为 10.2% 与 5.9%,对应时间硬化模型误差仅为 1.7% 与 4.2%。综上所述,时间硬化模型相对于 Kelvin 模型能够更好的描述室温与湿热状态下环氧树脂胶的蠕变行为。

4 总结

本文通过实验对比研究了湿热后与室温环境中环氧树脂胶试件在不同定载荷下的蠕变行为。实验结果显示,湿热环境对胶体蠕变性能的影响显著,而且这种影响随着应力的增大被逐步扩大。应力为 5 MPa 时,湿热后的试件蠕变应变是胶体室温应变的 3.96 倍。应力为 17.5 MPa 时,湿热后试件的蠕变应变达到室温应变的 9.50 倍。同时获得了三参数时间硬化模型与 Kelvin 模型的蠕变特性参数,并与实验结果对比。湿热后与常温环境,三参数时间硬化模型均能够很好的与实际材料吻合。对比发现室温状态下 Kelvin 模型与实验结果之间的误差大于湿热状态下。低应力状态下,Kelvin 模型与三参数时间硬化模型均接近环氧树脂胶的蠕变曲线。随着应力的增大,Kelvin 模型与实验曲线之间的误差逐渐增大;而三参数时间硬化模型仍能够很好的与实验曲线吻合。相较于 Kelvin 蠕

变模型,三参数时间硬化的蠕变模型简单,参数确定方便,更加适合于环氧树脂胶,也为环氧树脂胶的蠕变特性研究提供了一种简单有效的分析方式。

参考文献 (References)

- [1] 蔡永源,李 彤,孔 莹,等. 环氧树脂胶粘剂应用进展[J]. 化工新型材料,2005(11):20-23.
CAI YongYuan, LI Tong, KONG Ying, et al. Progress of application of epoxy resin adhesive [J]. New Chemical Materials, 2005(11): 20-23(In Chinese).
- [2] 刘金刚. 高性能环氧树脂电子封装材料的研究与发展现状[J]. 精细与专用化学品,2005(23):8-15.
LIU JinGang. Research and development of high performance epoxy molding compounds [J]. Fine and Specialty Chemicals, 2005(23):8-15(In Chinese).
- [3] 李 卉. 室温固化环氧树脂胶黏剂流变性能研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2012;1-18.
LI Hui. Research on rheological properties of room-temperature curing epoxy adhesive [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2012; 1-18(In Chinese).
- [4] 张 进. 环氧树脂工业的现状与发展建议[J]. 化学工业与工程技术,2005(01):38-41.
ZHANG Jin. Present situation and developing advice for epoxy resin industry [J]. Journal of Chemical Industry & Engineering, 2005(01): 38-41(In Chinese).
- [5] 付凯敏,黄晓明. 基于 ABAQUS 的修正 Burgers 蠕变模型二次开发[J]. 公路工程,2008(03):132-137.
FU KaiMin, HUANG XiaoMing. The secondary development of modified burgers creep model based on ABAQUS general software [J]. Highway Engineering, 2008(03): 132-137(In Chinese).
- [6] 毛雪平,刘宗德,杨 昆,等. 基于时间硬化理论的蠕变损伤计算模型[J]. 机械强度,2004(01):105-108.
MAO XuePing, LIU ZongDe, YANG Kun, et al. Creep damage calculation model based on time-harden theory [J]. Journal of Mechanical Strength, 2004(01): 105-108(In Chinese).
- [7] Gao L L, Chen X, Gao H, et al. Description of nonlinear viscoelastic behavior and creep-rupture time of anisotropic conductive film[J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2010. 527(20): 5115-5121.
- [8] Lou Y C, Schapery R A. Viscoelastic characterization of a nonlinear fiber-reinforced plastic [J]. Journal of Composite Materials, 1971, 5: 208-234.
- [9] Lai J S, Findley W N. Prediction of Uniaxial Stress Relaxation from Creep of Nonlinear Viscoelastic Material. Trans [J]. Soc. Rheol, 1968(12): 243-257.
- [10] Onaran K, Findley W N. Combined Stress-Creep Experiments on a Nonlinear Viscoelastic Material to Determine the Kernel Functions for a Multiple Integral Representation of Creep [J]. Trans. Soc. Rheol., 1865(9): 99-327.
- [11] 熊良宵,杨林德,张 尧. 岩石的非定常 Burgers 模型[J]. 中南大学学报:自然科学版,2010(02):679-684.
XIONG LiangXiao, YANG LinDe, ZHANG Yao. Non-stationary Burgers model for rock [J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2010(02):679-684(In Chinese).
- [12] 张伍连,丁 辛,杨旭东. 机织建筑膜材料的广义 Kelvin-Voigt 蠕变模型[J]. 天津工业大学学报,2011(04):19-22.
ZHANG WuLian, DING Xin, YANG XuDong. General Kelvin-voigt creep model of fabric architectural membrane [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2011(04):19-22(In Chinese).
- [13] Hackney S A, Aifantis K E, Tangtrakarn A. Using the Kelvin-Voigt model for nanoindentation creep in Sn-C/PVDF nanocomposites [J]. Materials Science and Technology, 2012, 28(9-10): 1161-1166.
- [14] Abuzeid O M. A linear viscoelastic creep-contact model of a flat fractal surface: Kelvin-Voigt medium[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2004, 56(6): 334-340.
- [15] 李 卉,罗迎社,谢建军,等. 室温固化环氧树脂胶黏剂蠕变性能研究[A]. 第十一届全国流变学学术会议论文集[C],中国河北廊坊,2012:286-289.
LI Hui, LUO YingShe, XIE JianJun, et al. Research on creep properties of room-temperature curing epoxy adhesive [A]. Rheology of the Eleventh National Conference Proceedings [C]. China Hebei Langfang, 2012: 286-289(In Chinese).
- [16] 闵召辉,黄 卫. 环氧树脂沥青的粘弹性能研究[J]. 石油沥青, 2005(02):10-14.
MIN ZhaoHui, HUANG Wei. Study on Viscoelasticity Behaviors of Epoxy Resin Asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 2005(02): 10-14(In Chinese).
- [17] 何平笙. 高聚物的力学性能[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2008;66-70.
HE PingSheng. Mechanical properties of polymers [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2008: 66-70(In Chinese).
- [18] 刘 展,祖景平,钱英莉. ABAQUS6.6 基础教程与实例详解 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2008;223-224.
LIU Zhan, ZU JingPing, QIAN YingLi. Basic tutorial and examples of ABAQUS6.6 [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2008: 223-224(In Chinese).