

聚甲基丙烯酸酰胺泡沫压缩失效寿命预测及模型验证

孟豪宇 陈博 宋江 孙超明 闫承磊 安昕 张涛

Compression failure life prediction and verification of polymethacrylimide foam

MENG Haoyu, CHEN Bo, SONG Jiang, SUN Chaoming, YAN Chenglei, AN Xin, ZHANG Tao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220314.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

重组竹顺纹受压蠕变性能及预测模型

Creep performance and prediction model of bamboo scrimber under compression

复合材料学报. 2021, 38(3): 944–952 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200615.002>

基于分数阶黏弹性模型的木塑复合材料蠕变/回复性能分析

Creep/recovery behavior analysis of wood-plastic composites based on fractional order viscoelastic model

复合材料学报. 2020, 37(8): 2055–2064 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191230.002>

聚甲基丙烯酸酰胺泡沫夹层结构全生命周期的关键技术研究进展

Progress on study of key technologies for polymethacrylimide foam core sandwich lifecycle

复合材料学报. 2020, 37(8): 1805–1822 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200512.002>

应力水平和纤维角度对CGF/PP复合材料蠕变行为的影响及其Burgers模型参数的数值预测

Effects of stress levels and fiber orientations on creep behavior of CGF/PP composite and numerical prediction of Burgers model parameters

复合材料学报. 2019, 36(5): 1216–1225 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180725.003>

考虑界面效应的GFRP复合材料蠕变模型

Creep model of GFRP composites considering interface effect

复合材料学报. 2021, 38(11): 3682–3692 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210119.001>

木塑复合材料蠕变特性及预测方法的研究进展

State-of-the-art of the creep characteristics of wood-plastic composite and its prediction methods

复合材料学报. 2021, 38(6): 1734–1753 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210302.005>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220314.003

聚甲基丙烯酸酞亚胺泡沫压缩失效寿命预测
及模型验证



分享本文

孟豪宇, 陈博, 宋江, 孙超明*, 闫承磊, 安昕, 张涛

(北京玻璃钢复合材料有限公司, 北京 102101)

摘要: 聚甲基丙烯酸酞亚胺 (PMI) 泡沫因其性能优越, 在航空航天领域广泛应用。本文主要针对 PMI 泡沫在弹筒适配器领域的功能特性开展研究, 主要研究了其在常温条件下的压缩蠕变特性。依据使用工况及高分子材料的蠕变特性, 采用“时间强化”模型设计实验, 分别对密度为 0.075 g/cm³ 和 0.110 g/cm³ 的 PMI 泡沫进行了为期 180 天的常温压缩蠕变实验。通过对实验数据分析、拟合, 预测了两种不同密度的 PMI 泡沫常温、1 250 N 条件下的压缩蠕变寿命, 密度 0.075 g/cm³ PMI 泡沫压缩蠕变失效寿命约为 11 年; 而密度 0.110 g/cm³ PMI 泡沫约为 53 年, 同时对模型的可靠性进行了验证分析。

关键词: PMI 泡沫; 压缩蠕变; 蠕变模型; 恒定载荷; 寿命

中图分类号: TQ32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)02-1218-11

Compression failure life prediction and verification of polymethacrylimide foam

MENG Haoyu, CHEN Bo, SONG Jiang, SUN Chaoming*, YAN Chenglei, AN Xin, ZHANG Tao

(Beijing Composite Materials CO., LTD., Beijing 102101, China)

Abstract: Polymethacrylate imide (PMI) foam is widely used in aerospace field because of its superior performance. This paper mainly studies the functional characteristics of PMI foam in the field of cartridge adapter, and mainly studies its compression creep characteristics at room temperature. According to the working conditions and creep characteristics of polymer materials, the "time strengthening" model was adopted to design experiments, and the PMI foam with densities of 0.075 g/cm³ and 0.110 g/cm³ were respectively tested for 180 days under normal temperature compression creep. By analyzing and fitting the experimental data, the compression creep life of two PMI foam with different densities at room temperature and 1 250 N was predicted. The compression creep failure life of PMI foam with density of 0.075 g/cm³ is about 11 years. The density of 0.110 g/cm³ PMI foam is about 53 years, and the reliability of the model is verified and analyzed.

Keywords: PMI foam; compression creep; creep model; constant load; life

随着世界强国军备竞争的激烈, 对尖端武器装备的功能集成度提出了更加苛刻的要求, 现有的复合材料体系已难以满足装备发展的要求, 需探索开拓新型轻质高能的材料体系^[1-5]。适配器作为导弹弹射系统中的重要组成部分, 在运输及发射中不仅要满足缓冲吸能的功能, 同时还要保证导弹发射时的发射稳定。传统的适配器主体材料通常由可压缩橡胶材料与金属材料组成, 但随着装备功能集成度的提高, 该类型的适配器已不能

满足新型适配器的发展需求^[6-8]。

泡沫类材料因其密度低、比强度高, 具有吸收冲击载荷的能力, 在适配器领域应用广泛。常见的泡沫类材料有聚苯乙烯 (PS) 泡沫、聚氨酯 (PU) 泡沫、聚氯乙烯 (PVC) 泡沫及聚甲基丙烯酸酞亚胺 (PMI) 泡沫等。PMI 泡沫作为一种轻质、性能优异的闭孔材料, 具有优异的耐高温性能, 热变形温度在 180℃ 以上, 同时作为高闭孔率硬质泡沫具有卓越的化学及结构稳定性, 可通过热成

收稿日期: 2022-01-13; 修回日期: 2022-02-15; 录用日期: 2022-03-03; 网络首发时间: 2022-03-16 10:17:32

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220314.003>

通信作者: 孙超明, 硕士, 教授级高工, 研究方向为树脂基功能复合材料 E-mail: sunchm@sinomatech.com

引用格式: 孟豪宇, 陈博, 宋江, 等. 聚甲基丙烯酸酞亚胺泡沫压缩失效寿命预测及模型验证 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(2): 1218-1228.

MENG Haoyu, CHEN Bo, SONG Jiang, et al. Compression failure life prediction and verification of polymethacrylimide foam[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(2): 1218-1228(in Chinese).

型及机械加工二次成型，广泛应用于航空、航天及海洋等国防尖端科技领域^[9-13]。

目前关于 PMI 泡沫成型工艺、力学性能及成型后夹层性能等方面的研究较多，但缺少 PMI 泡沫压缩失效寿命等方面的研究^[14-19]。PMI 泡沫作为适配器主体材料，在随弹体贮存时，长期处于受压状态，同时在发射时要保持导弹的发射精度，因此要求适配器在长期受压条件下不能发生较大蠕变，鉴于此工作条件，遂展开本文研究内容。本文根据高分子材料的蠕变特性，设计实验工装，进行 PMI 泡沫常温压缩蠕变实验，系统的研究了 PMI 泡沫蠕变规律；选择合适的压缩蠕变模型，确定了模型参数，并对特定条件下的压缩失效寿命进行了预测及验证。

1 PMI 泡沫压缩蠕变模型选择及失效寿命预测方法

1.1 PMI 泡沫压缩蠕变模型选择

目前关于高分子材料蠕变规律研究的模型较多，如热量法、应变能密度法和幂律法等^[20-24]，热量法中主要以时温叠加 (TIS) 及分级等温法 (SIM) 为主。Jadaan 等^[25]曾提出一种“时间强化”模型，属于时温叠加法的一种，该模型形式简单、参数较少，同时可以反映泡沫材料在特定条件下蠕变过程与应力、温度及时间的相关性。PMI 泡沫属于热塑性高分子材料，并且本实验仅涉及室温下的压缩蠕变，因此采用该模型有利于科学合理的进行 PMI 泡沫蠕变行为的研究。

“时间强化”模型公式如下：

$$\varepsilon_{cr} = c_1 \sigma^{c_2} t^{c_3} e^{-c_4/T}$$
 (1)

其中： ε_{cr} 表示蠕变速率； σ 表示加载应力； c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 表示蠕变模型中的系数，均为常数，可通过对蠕变实验曲线拟合来确定数值； T 表示绝对温度^[26]； t 表示蠕变时间。

对式 (1) 积分得到：

$$\varepsilon = A_1 \sigma^{A_2} t^{A_3} e^{-A_4/T}$$
 (2)

式中： A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 均为常数； ε 表示蠕变量；当温度一定时，温度 T 为恒定值，对式 (2) 进一步整理得到：

$$\varepsilon = A_0 \sigma^{A_2} t^{A_3}$$
 (3)

式中： $A_0 = A_1 e^{-A_4/T}$ ，仅与温度有关，温度恒定时同为常数。

当压力恒定时，式 (3) 可转化成如下形式：

$$\varepsilon = A t^{A_3}$$
 (4)

根据式 (3) 得 $A = A_0 \sigma^{A_2}$ ，与压力及温度有关，当压力和温度恒定时 A 为定值。

综上，以式 (4) 作为常温压缩蠕变曲线拟合模型，展开 PMI 泡沫压缩蠕变实验的研究。

1.2 PMI 泡沫失效寿命推测方法

泡沫失效判定：PMI 泡沫试样的高度为 40 mm，当其在一定载荷下的蠕变量达到 0.4 mm(1%)，判定 PMI 泡沫失效。

通过下式进行寿命预测：

$$\Delta \varepsilon_0 = A t^{A_3}$$
 (5)

式中， $\Delta \varepsilon_0$ 为失效判定依据。

由蠕变模型式 (2) 得出：

$$A = A_1 \sigma^{A_2} e^{-A_4/T}$$
 (6)

由式 (6) 取对数推出下式：

$$\lg A = \lg \left(A_1 e^{-\frac{A_4}{T}} \right) + \frac{A_2}{2.303} \lg \sigma$$
 (7)

由式 (7) 可以得出，蠕变模型 $\varepsilon = A t^{A_3}$ 中参数 A 与应力大小线性相关；蠕变参数 A_3 为常数，与应力无关。

2 实验

2.1 实验工装及原理

实验工装如图 1 所示，上、下压板固定弹簧，弹簧通过压缩将力传递到下压板及试样上。下压板有固定测试孔，将数显深度千分表深入孔内进行高度尺寸的测量。

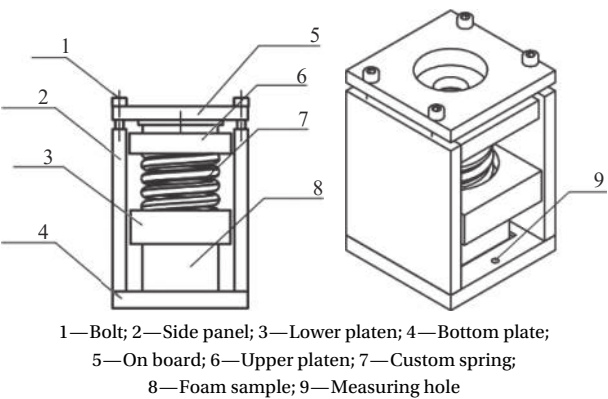


图 1 加载工装示意图
Fig. 1 Schematic diagram of loading tooling

试样加载过程如下：由电子力能测试仪 (DNS700，长春机械科学研究院有限公司)，载荷 0~100 kN，加载指定载荷，压缩工装及试样，此时工装上板、弹簧、上压板、下压板、试样及底板承受的载荷均为指定载荷；对称锁紧上板螺栓，直至测试仪示数为 0 N，即完成载荷的转移，试样承受的载荷即为指定加载载荷。

2.2 原材料及实验要求

密度为 0.075 g/cm³ 和 0.110 g/cm³ 的 PMI 泡沫 (浙江中科恒泰新材料科技有限公司); 两种密度的泡沫试样尺寸均为 50 mm×50 mm×40 mm, 试样数量各 25 件。

实验要求: A、B 两种泡沫采用相同的实验环境, 温度为恒温 30℃(恒温烘箱), 载荷为 937.5 N、1 250 N、1 562.5 N、1 875 N, 每组载荷下分别有 5 个试样。

编号说明: 密度为 0.075 g/cm³ 和 0.110 g/cm³ PMI 泡沫分别用 A 和 B 表示。密度为 0.075 g/cm³ PMI 泡沫, 载荷 937.5 N 下, 第一个试样用 A-1-1 进行表示, 第二个用 A-1-2 表示; 载荷 1 250 N 下, 第一个试样用 A-2-1 表示, 第二个用 A-2-2 表示, 其他试样以此类推, 详见表 1。

2.3 实验过程

根据 2.1 实验部分完成对试样的加载 (本实验所使用的弹簧的弹性模量 E 为 350 N/mm)。

将加载完成的工装及试样放入恒温烘箱 (DHG-9003, 上海一恒科学仪器有限公司) 中, 设定烘箱温度为 30℃, 首次测量时保温 120 min 后通过测量孔测量试样高度并进行记录; 后续按照一定时间间隔进行试样高度测量并完成记录。

表 1 聚甲基丙烯酸酯亚胺 (PMI) 泡沫编号

Table 1 Number of polymethacrylimide (PMI) foams

Specimen number	Density/(g·cm ⁻³)	Load/N
A-1	0.075	937.5
A-2	0.075	1 250.0
A-3	0.075	1 562.5
A-4	0.075	1 875.0
B-1	0.110	937.5
B-2	0.110	1 250.0
B-3	0.110	1 562.5
B-4	0.110	1 875.0

3 实验结果及分析

3.1 实验结果

为了直观地反映 PMI 泡沫的蠕变情况, 通过下式将蠕变变量的变化转换为蠕变应变:

$$\varepsilon = \frac{H_t - H_0}{40}$$

(8)

式中: H_0 为未加载荷之前下压板与上压板之间的高度; H_t 为加载过程中变化之后的测量高度, 40 表示试样的原始高度 40 mm。

同时由于实验数据量较大, 遂取每组载荷下的蠕变平均值记录于表 2 及表 3 中。将表中数据绘图, 得到密度为 0.075 g/cm³ 和 0.110 g/cm³ PMI 泡沫的压缩蠕变曲线, 如图 2 和图 3 所示。

由图 2 及图 3 可知, 两种 PMI 泡沫在常温长期受压条件下有着相同的蠕变规律, 在受载初期

表 2 不同载荷及时间下 0.075 g/cm³ PMI 泡沫蠕变应变

Table 2 Creep strain of 0.075 g/cm³ PMI foams under different loads and time

Time/h	A-1	A-2	A-3	A-4
0	0	0	0	0
168	0.000450	0.000630	0.000985	0.001260
336	0.000845	0.001160	0.001770	0.002330
720	0.001170	0.001580	0.002470	0.002900
1 440	0.001480	0.002040	0.003060	0.003670
2 160	0.001690	0.002310	0.003460	0.004170
2 880	0.001840	0.002510	0.003860	0.004670
3 600	0.001980	0.002650	0.004240	0.005060
4 320	0.002120	0.002800	0.004450	0.005480

表 3 不同载荷及时间下 0.110 g/cm³ PMI 泡沫蠕变应变

Table 3 Creep strain of 0.110 g/cm³ PMI foams under different loads and time

Time/h	B-1	B-2	B-3	B-4
0	0	0	0	0
168	0.000310	0.000462	0.000602	0.000833
336	0.000523	0.000710	0.000919	0.001273
720	0.000751	0.000908	0.001393	0.001747
1 440	0.001046	0.001191	0.001586	0.002079
2 160	0.001118	0.001302	0.001747	0.002357
2 880	0.001282	0.001402	0.001989	0.002669
3 600	0.001420	0.001518	0.002190	0.002893
4 320	0.001565	0.001616	0.002290	0.003094

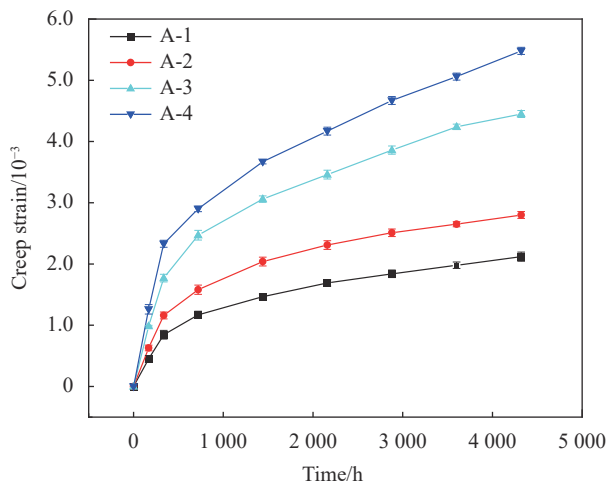


图2 0.075 g/cm³ PMI 泡沫在不同载荷下的蠕变曲线

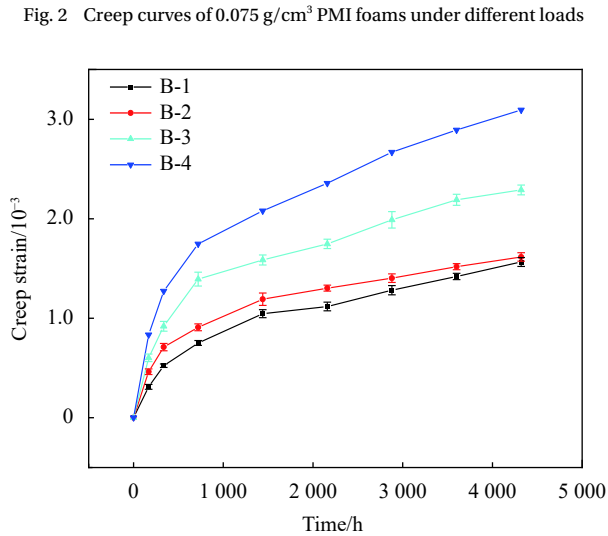


图3 0.110 g/cm³ PMI 泡沫在不同载荷下的蠕变曲线

Fig. 3 Creep curves of 0.110 g/cm³ PMI foams under different loads

外力作用下泡沫蠕变应变较大；随着时间的延长，PMI 泡沫缓慢蠕变，蠕变曲线渐趋于平缓。对于同密度试样，载荷增大、时间越长，蠕变应变越大；对比不同密度试样，在相同载荷下，密度为 0.110 g/cm³ PMI 泡沫的蠕变应变更小，耐蠕变性更好。其主要原因为密度越大，泡沫本体内部泡孔更加致密，结构强度更高。

3.2 PMI 泡沫常温压缩蠕变模型

3.2.1 0.075 g/cm³ PMI 泡沫恒温压缩蠕变模型

依据实验得到的时间蠕变数据(表 2)，通过式 (4) 进行处理，并对数据进行非线性拟合，得到拟合后的曲线及参数，如图 4 和表 4 所示。

由图 4 可得，式 (4) 中蠕变模型参数 A、A₃ 分别对应图 4 曲线模型中的参数 a、b，并将其汇于表 4 中。通过表 4 中参数可知，拟合系数 R² 均高

于 0.97，验证了通过式 (4) 对数据进行拟合较合理，拟合效果较好，说明选用“时间强化”模型适合本实验，能够反映 PMI 泡沫恒温压缩蠕变特性。

3.2.2 0.110 g/cm³ PMI 泡沫恒温压缩蠕变模型

同 3.2.1 根据实验数据，通过式 (4) 对数据进行非线性拟合，得到拟合后的曲线及参数，如图 5 和表 5 所示。

由表 5 得出，拟合系数 R² 同样都高于 0.97，说明模型的匹配性及可靠性较好，能够反映真实工况下的泡沫蠕变行为，可以利用该模型进行后续相关内容的研究。

3.3 PMI 泡沫不同载荷下常温蠕变寿命预测及模型验证

3.3.1 PMI 泡沫不同载荷常温蠕变寿命预测

PMI 泡沫在实验过程中由于高分子材料蠕变特性，作用在其上的载荷会随着材料蠕变而变小。在进行寿命预测时，需对加载载荷进行矫正，但 PMI 泡沫在相对短时间内的蠕变应变较小，故可将矫正后的载荷作为初始载荷。

实际载荷：

$$\sigma = \sigma_0 - \Delta LE \tag{9}$$

式中：σ 为近似应力；σ₀ 为原始加载应力；ΔL 表示最终蠕变量；E 表示弹簧弹性模量。

通过式 (9) 分别对密度为 0.075 g/cm³ 和 0.110 g/cm³ PMI 泡沫在不同载荷下的剩余载荷进行计算，进一步得到剩余应力，计算结果如表 6 和表 7 所示。

由 1.2 中可知，lgA 与 lgσ 线性相关。结合表 4、表 5 中模型参数 A 及表 6、表 7 中的剩余应力，通过式 (7)，得到两种密度 PMI 泡沫在不同载荷下所对应的 lgA-lgσ 线性拟合曲线，如图 6 所示。

由图 6 得出，参数 A 与应力 σ 的对应关系如下：

密度 0.075 g/cm³ PMI 泡沫：

$$\lg A = -3.4478 + 1.4341 \lg \sigma \tag{10}$$

密度 0.110 g/cm³ PMI 泡沫：

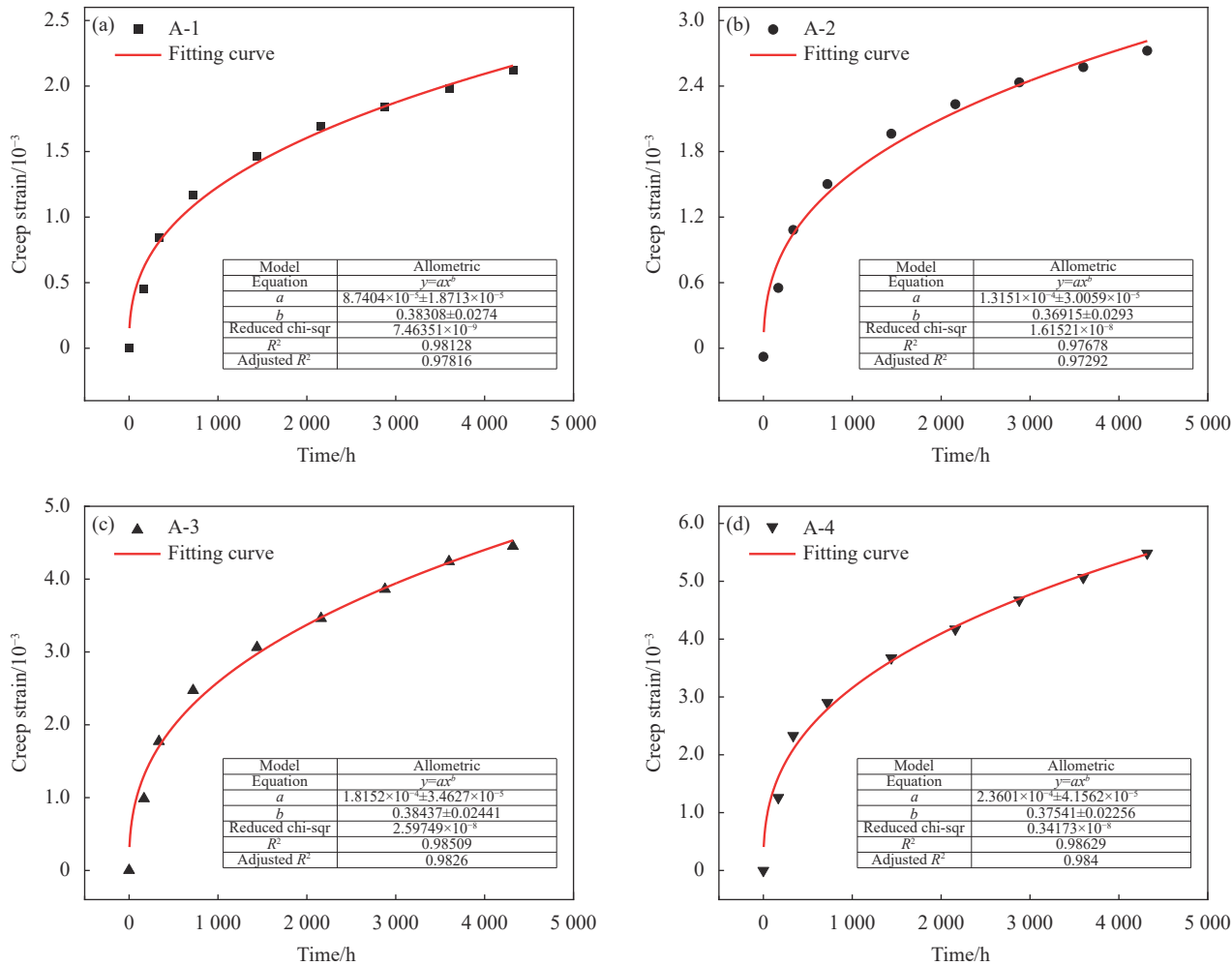
$$\lg A = -3.6067 + 1.65183 \lg \sigma \tag{11}$$

(1) 0.075 g/cm³ PMI 泡沫常温负载压缩蠕变寿命预测

设定任意初始载荷，如 1 250 N，对应的应力 σ 为 0.5 MPa，由式 (10) 得出此应力对应的 A¹²⁵⁰ = 0.000131974。

$$A_3^{1250} = 0.3780025$$

由以上模型参数 A、A₃，得到在常温载荷 1 250 N 下的蠕变方程如下：



R^2 —Fitting coefficient; a —Multiple; b —Index

图4 0.075 g/cm³ PMI 泡沫在不同时间及载荷下的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of 0.075 g/cm³ PMI foams at different time and loads

表4 0.075 g/cm³ PMI 泡沫不同载荷下拟合模型参数

Table 4 Fitting model parameters of 0.075 g/cm³ PMI foams under different loads

Sample	Model parameters		
	A	A_3	R^2
A-1	8.74×10^{-5}	0.38308	0.97667
A-2	1.32×10^{-4}	0.36915	0.98022
A-3	1.82×10^{-4}	0.38437	0.99314
A-4	2.36×10^{-4}	0.37541	0.98273

$\varepsilon = 0.000131974t^{0.3780025}$

由压缩判定失效准则 $\Delta\varepsilon_0 \geq 1\%$ 代入方程，得出 $t=94\,001.289\text{h}$ ，约为11年。综上，在室温1 250 N 载荷条件下，密度为 0.075 g/cm³ PMI 泡沫常温压缩蠕变失效寿命预测约为11年。

(2) 0.110 g/cm³ PMI 泡沫常温负载压缩蠕变寿命预测

同上，设定初始载荷1 250N，应力 σ 为0.5MPa，

由式 (11) 得出此应力对应的 $A^{1250}=0.00007872$ 。

$A_3^{1250} = 0.3712775$

得出在常温载荷1 250 N 下的蠕变方程如下：

$\varepsilon = 0.00007872t^{0.3712775}$

同样根据压缩失效判定准则： $\Delta\varepsilon_0 \geq 1\%$ ，得出 $t=464\,174.755\text{h}$ ，约为53年。因此，在常温1 250 N 载荷条件下，0.110 g/cm³ PMI 泡沫压缩蠕变失效寿命预测约为53年。

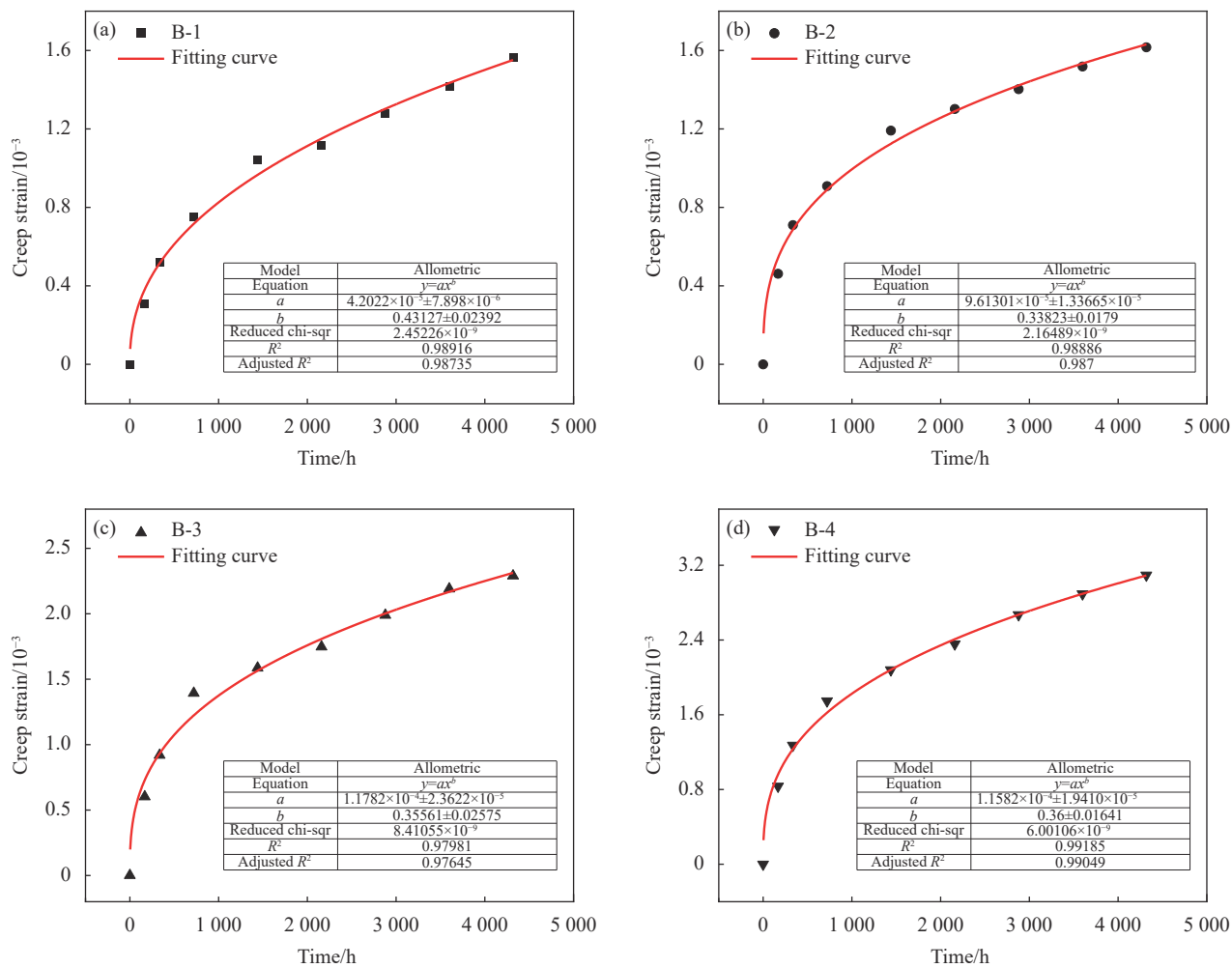


图5 0.110 g/cm³ PMI 泡沫在不同时间及载荷下的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of 0.110 g/cm³ PMI foams at different time and loads

表 5 0.110 g/cm³ PMI 泡沫不同载荷下拟合模型参数

Sample	Model parameters		
	A	A_3	R^2
B-1	4.20×10^{-5}	0.43127	0.98916
B-2	9.61×10^{-5}	0.33823	0.98860
B-3	1.18×10^{-4}	0.35561	0.97981
B-4	1.52×10^{-4}	0.36000	0.99185

表 6 0.075 g/cm³ PMI 泡沫在不同载荷下的剩余载荷

Sample	Initial load/N	Average creep/mm	Residual load/N	Residual stress/MPa
A-1	937.5	0.002120	936.864	0.374746
A-2	1 250.0	0.002800	1 249.160	0.499664
A-3	1 562.5	0.004450	1 561.165	0.624466
A-4	1 875.0	0.005480	1 873.356	0.749342

综上所述，在同样的使用环境下，密度为 0.075 g/cm³ 的 PMI 泡沫压缩蠕变寿命要远远低于密度为 0.110 g/cm³。究其原因主要为 PMI 泡沫为

闭孔泡沫，泡沫的刚度完全来自孔棱；同时其成型后孔面为固体结构，这些孔面会增加泡沫的刚度；因此，泡沫结构强度与密度、均一性等因素

表 7 0.110 g/cm³ PMI 泡沫在不同载荷下的剩余载荷

Table 7 Residual load of 0.110 g/cm³ PMI foams under different loads

Sample	Initial load/N	Average creep/mm	Residual load/N	Residual stress/MPa
B-1	937.5	0.062608	936.952	0.374781
B-2	1 250.0	0.064634	1 249.434	0.499774
B-3	1 562.5	0.091596	1 561.699	0.624680
B-4	1 875.0	0.123757	1 873.917	0.749567

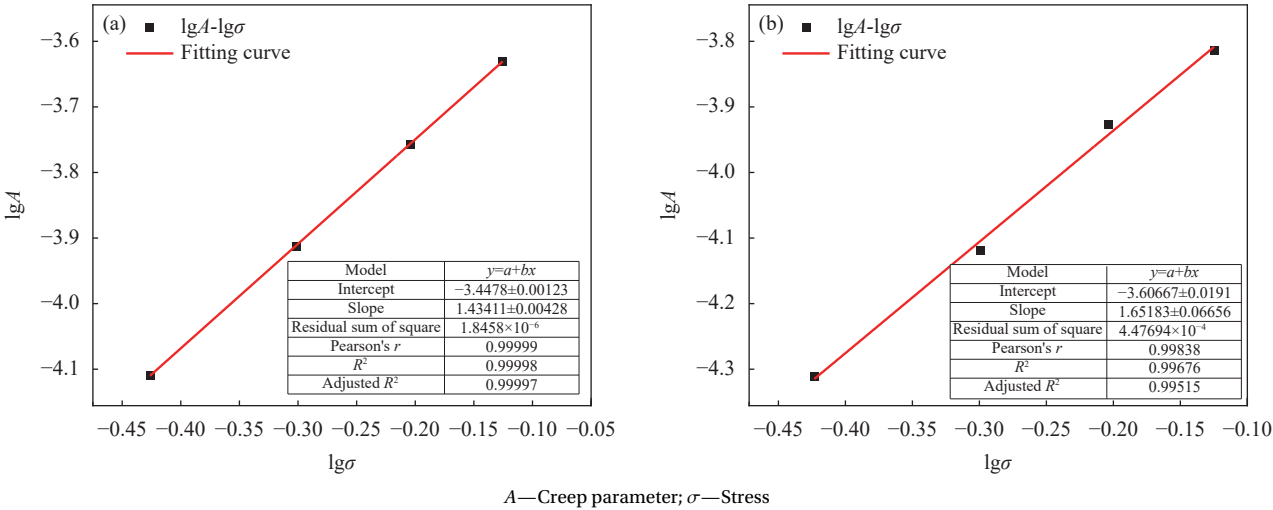


图 6 两种密度 PMI 泡沫在不同载荷下所对应的 $\lg A$ - $\lg \sigma$ 线性拟合曲线

Fig. 6 $\lg A$ - $\lg \sigma$ linear fitting curves of two densities of PMI foams under different loads

密不可分。PMI 泡沫结构由材料及孔泡内部气体组成，密度越小其泡孔体积越大，孔面越少，进一步表现为泡沫的结构强度越低。

3.3.2 常温蠕变模型验证

依据 3.3.1 式 (10)、式 (11) 及蠕变方程参数，可得到不同载荷下的蠕变寿命预测方程。

以下验证在常温负载条件下，PMI 泡沫蠕变行为是否符合蠕变模型。选取密度为 0.075 g/cm³ PMI 泡沫，载荷 1 562.5 N，常温受压蠕变时间为 2 880 h、4 320 h，分别依据蠕变模型计算其理论蠕变量。

由 $\sigma = 0.625$ MPa，代入式 (11) 推出 $\lg A^{1562.5} = -3.741$ ， $A=0.000181748$ 。此条件下的蠕变方程如下：
 $\varepsilon = 0.000181748t^{0.3780025}$

当 $t=2\ 880$ h，理论蠕变应变 $\varepsilon_{2880}=0.003691$ ；实际蠕变应变为 0.003860，与理论的偏差率为 4.58%；当 $t=4\ 320$ h 时，理论蠕变 $\varepsilon_{4320}=0.004302$ ，实际蠕变应变为 0.004450，与理论的偏差率为 3.43%；偏差率均小于 5%，证明该蠕变模型可靠，可以反映 PMI 泡沫的常温压缩蠕变规律。

4 结论

结合高分子材料的蠕变特性，设计工装并选取适用于聚甲基丙烯酸酯亚胺 (PMI) 泡沫压缩的蠕

变模型展开实验。依据实验数据，对常温特定载荷下的 PMI 泡沫失效寿命进行了预测，同时对模型的可靠性进行了验证分析，得到以下结论：

(1) 选用“时间强化”模型作为 PMI 泡沫的蠕变模型，符合材料的蠕变特性，可以反映 PMI 泡沫的压缩蠕变行为；

(2) 对密度为 0.075 g/cm³ 和 0.110 g/cm³ PMI 泡沫进行常温指定载荷 180 天蠕变实验，并通过拟合得到模型参数。由蠕变模型对相同条件下 (常温、1 250 N) 两种泡沫的压缩蠕变寿命进行了预测，密度 0.075 g/cm³ PMI 泡沫压缩蠕变失效寿命约为 11 年；而密度 0.110 g/cm³ PMI 泡沫约为 53 年；

(3) 通过蠕变模型计算出密度为 0.075 g/cm³ PMI 泡沫在不同时间下的理论蠕变量；并与实际蠕变量进行对比，偏差率小于 5%，说明选用的蠕变模型合理有效。

参考文献：

[1] 胡培, 陈志东, 薛元德, 等. 泡沫夹层结构的模压共固化成型工艺及参数选定[J]. 工程塑料应用, 2007(8): 25-28.
HU Pei, CHEN Zhidong, XUE Yuande, et al. Pressmolding co-curing processing method and specification determination offoamcored sandwich structure[J]. Engineering Plastics Application, 2007(8): 25-28(in Chinese).
[2] 刘燕青, 黄安民, 刘婷, 等. 聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫塑料的制备

及研究现状[J]. *塑料科技*, 2012(6): 86-90.

LIU Yanqing, HUANG Anmin, LIU Ting, et al. Research situation of polymethacrylimide foam plastics and its preparation[J]. *Plastics Science and Technology*, 2012(6): 86-90(in Chinese).

[3] SEIBERT H F. Applications for PMI foams in aerospace sandwich structures[J]. *Reinforced Plastics*, 2006, 50(1): 44-48.

[4] SERVATY S, GEYER W, RAU N, et al. Method for producing block-shaped polymethacrylimide foamed materials: WO, WO2000063280 A1[P]. 2003-12-30.

[5] RAMAKRISHNAN K R, GUERARD S, MAHEO L, et al. A new method for the study of parabolic impact of foam-core sandwich panels[J]. *Composites*, 2019, 167: 717-727.

[6] GUEDES, MIRANDA R. A systematic methodology for creep master curve construction using the stepped isostress method (SSM): A numerical assessment[J]. *Mechanics of Time-dependent Materials*, 2018, 22: 79-93.

[7] ZHONG J, YANG C, MA W, et al. Long-term creep behavior prediction of polymethacrylimide foams using artificial neural networks[J]. *Polymer Testing*, 2020, 93: 43-53.

[8] ZHOU H, LIU R, HU Y, et al. Quasi-static compressive strength of polymethacrylimide foam-filled square carbon fiber reinforced composite honeycombs[J]. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2020, 0(0): 1-17.

[9] 李涛, 陈蔚, 成理, 等. 泡沫夹层结构复合材料的应用与发展[J]. *科技创新导报*, 2009(14): 9-11.

LI Tao, CHEN Wei, CHENG Li, et al. Development and application of foam sandwich structural composites[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2009(14): 9-11(in Chinese).

[10] SIIVOLA J T, MINAKUCHI S, TAKEDA N. Effect of temperature and humidity conditions on polymethacrylimide (PMI) foam core material and indentation response of its sandwich structures[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2015, 17(4): 149-155.

[11] 陈吉平, 毛敏梁, 郑义珠, 等. 湿热环境下的PMI泡沫材料压缩蠕变特性[J]. *工程塑料应用*, 2020, 48(2): 75-80.

CHEN Jiping, MAO Minliang, ZHENG Yizhu, et al. Compressive creep properties of PMI foam in hydrothermal condition[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(2): 75-80(in Chinese).

[12] 刘浩, 韩常玉, 董丽松. 闭孔泡沫塑料结构与性能研究进展[J]. *高分子通报*, 2008(3): 31-44.

LIU Hao, HAN Changyu, DONG Lisong. Research progress in structure-properties relationships of closed cell polymer foams[J]. *Chinese Polymer Bulletin*, 2008(3): 31-44(in Chinese).

[13] 毛敏梁, 彭昆, 郑翻番, 等. 聚甲基丙烯酸酰胺(PMI)泡沫夹芯复合材料的滚筒剥离性能研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2017(11): 62-65.

MAO Minliang, PENG Kun, ZHENG Fanfan, et al. The study of peel strength of PMI foam sandwich structure composites[J]. *Composite Science and Engineering*, 2017(11): 62-65(in Chinese).

[14] 米星宇, 张广成, 张乐, 等. 硬质泡沫塑料耐热性测试方法研究[J]. *工程塑料应用*, 2012, 40(8): 74-79.

MI Xingyu, ZHANG Guangcheng, ZHANG Le, et al. Heat resistance testing methods of rigid foam plastics[J]. *Engineering Plastics Application*, 2012, 40(8): 74-79(in Chinese).

[15] GNIP I Y, VAITKUS S, KERULIS V, et al. Analytical description of the creep of expanded polystyrene (EPS) under long-term compressive loading[J]. *Polymer Testing*, 2011, 30(5): 493-500.

[16] 贾思宜, 王莹, 成艳娜. PMI泡沫真空辅助热成型工艺及其生产应用研究[J]. *科技创新导报*, 2020, 17(508): 124-126.

JIA Siyi, WANG Ying, CHENG Yanna. Research on PMI foam vacuum-assisted thermo forming process and its production application[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2020, 17(508): 124-126(in Chinese).

[17] 刘永涛, 杨杰, 刘新东. 夹层结构用泡沫芯材的耐水性能[J]. *工程塑料应用*, 2018, 46(4): 108-112.

LIU Yongtao, YANG Jie, LIU Xindong. Water durability of foam core used in sandwich structure[J]. *Engineering Plastics Application*, 2018, 46(4): 108-112(in Chinese).

[18] 曾泽群, 吴锦裕, 向辉, 等. 吸湿行为对PMI泡沫性能及应用的影响[J]. *中国塑料*, 2021, 35(11): 64-70.

ZENG Zequn, WU Jinyu, XIANG Hui, et al. Effect of hygroscopic behavior on properties and applications of PMI foam[J]. *China Plastics*, 2021, 35(11): 64-70(in Chinese).

[19] SEIBERT H F. PMI foam cores find further applications[J]. *Reinforced Plastics*, 2000, 44(1): 36-38.

[20] FENG J, CHUHAN Z, GANG W, et al. Creep modeling in excavation analysis of a high rock slope[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(9): 849-857.

[21] CHEN S M, GAO H L, SUN X H, et al. Superior biomimetic nacreous bulk nanocomposites by a multiscale soft-rigid dual-network interfacial design strategy[J]. *Matter*, 2019, 1(2): 412-427.

[22] BOZORG-HADDAD A, ISKANDER M. Predicting compressive creep behavior of virgin HDPE using thermal acceleration[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, 23(8): 1154-1162.

[23] YANG Y, LIU J, XIN L U, et al. Study of manufacturing pressure effect on bonding quality of polymethacrylimide (PMI) foams/high temperature cured carbon fiber sandwich composites structure[J]. *Hi-Tech Fiber & Application*, 2012, 37(1): 14-21.

[24] 王凯, 贺强. 聚甲基丙烯酸酰胺泡沫夹层结构全生命周期的关键技术研究进展[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(8): 1805-1822.

WANG Kai, HE Qiang. Progress on study of key technologies for polymethacrylimide foam core sandwich lifecycle[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(8): 1805-1822(in Chinese).

[25] JADAAN O M, POWERS L M, GYEKENYESI J P. Creep life prediction of ceramic components subjected to transient tensile and compressive stress states[C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1997: 235-278.

[26] MAHMUD H A, RADUE M S, CHINKANJANAROT S, et al. Multiscale modeling of carbon fiber-graphene nanoplatelet-epoxy hybrid composites using a reactive force field[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 172: 628-635.

附表 1 0.075 g/cm³ PMI 泡沫 937.5 N 下的原始蠕变数据

Table 1 Raw creep data at 937.5 N for 0.075 g/cm³ PM foams

附:

937.5 N A-1										
Time/h	A-1-1	A-1-2	A-1-3	A-1-4	A-1-5	Average	Standard deviation			
0	0	0	0	0	0	0	0			
168	4.424×10 ⁻⁴	5.273×10 ⁻⁴	4.429×10 ⁻⁴	3.701×10 ⁻⁴	4.597×10 ⁻⁴	4.500×10 ⁻⁴	5.37377×10 ⁻⁵			
336	7.615×10 ⁻⁴	9.527×10 ⁻⁴	8.121×10 ⁻⁴	8.430×10 ⁻⁴	8.739×10 ⁻⁴	8.450×10 ⁻⁴	7.11871×10 ⁻⁵			
720	1.182×10 ⁻³	1.064×10 ⁻³	1.209×10 ⁻³	1.222×10 ⁻³	1.164×10 ⁻³	1.170×10 ⁻³	5.93328×10 ⁻⁵			
1 440	1.521×10 ⁻³	1.484×10 ⁻³	1.496×10 ⁻³	1.419×10 ⁻³	1.421×10 ⁻³	1.466×10 ⁻³	4.51352×10 ⁻⁵			
2 160	1.722×10 ⁻³	1.749×10 ⁻³	1.621×10 ⁻³	1.689×10 ⁻³	1.661×10 ⁻³	1.690×10 ⁻³	5.15228×10 ⁻⁵			
2 880	1.894×10 ⁻³	1.891×10 ⁻³	1.852×10 ⁻³	1.912×10 ⁻³	1.793×10 ⁻³	1.840×10 ⁻³	6.19126×10 ⁻⁵			
3 600	1.958×10 ⁻³	1.947×10 ⁻³	1.905×10 ⁻³	1.961×10 ⁻³	1.993×10 ⁻³	1.980×10 ⁻³	5.23068×10 ⁻⁵			
4 320	2.181×10 ⁻³	2.169×10 ⁻³	2.059×10 ⁻³	2.050×10 ⁻³	2.134×10 ⁻³	2.120×10 ⁻³	7.39034×10 ⁻⁵			

附表 2 0.075 g/cm³ PMI 泡沫 1 250 N 下的原始蠕变数据

Table 2 Raw creep data at 1 250 N for 0.075 g/cm³ PM foams

1 250 N A-2										
Time/h	A-2-1	A-2-2	A-2-3	A-2-4	A-2-5	Average	Standard deviation			
0	0	0	0	0	0	0	0			
168	6.256×10 ⁻⁴	6.496×10 ⁻⁴	5.677×10 ⁻⁴	7.090×10 ⁻⁴	6.133×10 ⁻⁴	6.3000×10 ⁻⁴	4.59295×10 ⁻⁵			
336	1.163×10 ⁻³	1.066×10 ⁻³	1.196×10 ⁻³	1.169×10 ⁻³	1.205×10 ⁻³	1.1600×10 ⁻³	5.55218×10 ⁻⁵			
720	1.661×10 ⁻³	1.479×10 ⁻³	1.518×10 ⁻³	1.634×10 ⁻³	1.606×10 ⁻³	1.5800×10 ⁻³	7.50528×10 ⁻⁵			
1 440	2.090×10 ⁻³	1.967×10 ⁻³	1.960×10 ⁻³	2.129×10 ⁻³	2.062×10 ⁻³	2.0400×10 ⁻³	7.21544×10 ⁻⁵			
2 160	2.228×10 ⁻³	2.401×10 ⁻³	2.316×10 ⁻³	2.246×10 ⁻³	2.355×10 ⁻³	2.3100×10 ⁻³	7.0908×10 ⁻⁵			
2 880	2.612×10 ⁻³	2.605×10 ⁻³	2.465×10 ⁻³	2.436×10 ⁻³	2.517×10 ⁻³	2.5100×10 ⁻³	6.24109×10 ⁻⁵			
3 600	2.651×10 ⁻³	2.601×10 ⁻³	2.711×10 ⁻³	2.681×10 ⁻³	2.611×10 ⁻³	2.6500×10 ⁻³	4.12774×10 ⁻⁵			
4 320	2.884×10 ⁻³	2.795×10 ⁻³	2.791×10 ⁻³	2.718×10 ⁻³	2.823×10 ⁻³	2.8000×10 ⁻³	5.59259×10 ⁻⁵			

附表 3 0.075 g/cm³ PMI 泡沫 1 562.5 N 下的原始蠕变数据

Table 3 Raw creep data at 1 562.5 N for 0.075 g/cm³ PM foams

1 562.5 N A-3										
Time/h	A-3-1	A-3-2	A-3-3	A-3-4	A-3-5	Average	Standard deviation			
0	0	0	0	0	0	0	0			
168	9.885×10 ⁻⁴	9.658×10 ⁻⁴	9.939×10 ⁻⁴	1.001×10 ⁻³	9.770×10 ⁻⁴	9.8525×10 ⁻⁴	1.30012×10 ⁻⁵			
336	1.714×10 ⁻³	1.866×10 ⁻³	1.768×10 ⁻³	1.681×10 ⁻³	1.806×10 ⁻³	1.7700×10 ⁻³	6.22678×10 ⁻⁵			
720	2.542×10 ⁻³	2.499×10 ⁻³	2.359×10 ⁻³	2.538×10 ⁻³	2.399×10 ⁻³	2.4700×10 ⁻³	7.93209×10 ⁻⁵			
1 440	3.119×10 ⁻³	3.089×10 ⁻³	2.985×10 ⁻³	3.064×10 ⁻³	3.051×10 ⁻³	3.0600×10 ⁻³	5.23312×10 ⁻⁵			
2 160	3.387×10 ⁻³	3.554×10 ⁻³	3.383×10 ⁻³	3.511×10 ⁻³	3.487×10 ⁻³	3.4600×10 ⁻³	7.18199×10 ⁻⁵			
2 880	3.869×10 ⁻³	3.900×10 ⁻³	3.950×10 ⁻³	3.764×10 ⁻³	3.807×10 ⁻³	3.8600×10 ⁻³	6.63517×10 ⁻⁵			
3 600	4.304×10 ⁻³	4.217×10 ⁻³	4.226×10 ⁻³	4.182×10 ⁻³	4.277×10 ⁻³	4.2400×10 ⁻³	4.40416×10 ⁻⁵			
4 320	4.438×10 ⁻³	4.402×10 ⁻³	4.391×10 ⁻³	4.488×10 ⁻³	4.521×10 ⁻³	4.4500×10 ⁻³	5.73864×10 ⁻⁵			

附表 4 0.075 g/cm³ PMI 泡沫 1 875 N 下的原始蠕变数据
Table 4 Raw creep data at 1 875 N for 0.075 g/cm³ PM foams

1 875 N A-4										
Time/h	A-4-1	A-4-2	A-4-3	A-4-4	A-4-5	Average	Standard deviation			
0	0	0	0	0	0	0	0			
168	1.351×10 ⁻³	1.148×10 ⁻³	1.199×10 ⁻³	1.297×10 ⁻³	1.310×10 ⁻³	1.2600×10 ⁻³	7.68545×10 ⁻⁵			
336	2.284×10 ⁻³	2.406×10 ⁻³	2.352×10 ⁻³	2.359×10 ⁻³	2.263×10 ⁻³	2.3300×10 ⁻³	5.68626×10 ⁻⁵			
720	2.970×10 ⁻³	2.940×10 ⁻³	2.843×10 ⁻³	2.894×10 ⁻³	2.877×10 ⁻³	2.9000×10 ⁻³	4.43074×10 ⁻⁵			
1 440	3.684×10 ⁻³	3.712×10 ⁻³	3.684×10 ⁻³	3.679×10 ⁻³	3.620×10 ⁻³	3.6700×10 ⁻³	3.52068×10 ⁻⁵			
2 160	4.208×10 ⁻³	4.187×10 ⁻³	4.170×10 ⁻³	4.168×10 ⁻³	4.051×10 ⁻³	4.1700×10 ⁻³	6.4584×10 ⁻⁵			
2 880	4.751×10 ⁻³	4.724×10 ⁻³	4.573×10 ⁻³	4.632×10 ⁻³	4.675×10 ⁻³	4.6700×10 ⁻³	6.41633×10 ⁻⁵			
3 600	5.069×10 ⁻³	5.024×10 ⁻³	5.026×10 ⁻³	5.014×10 ⁻³	5.163×10 ⁻³	5.0600×10 ⁻³	5.62556×10 ⁻⁵			
4 320	5.564×10 ⁻³	5.495×10 ⁻³	5.423×10 ⁻³	5.412×10 ⁻³	5.514×10 ⁻³	5.4800×10 ⁻³	5.7797×10 ⁻⁵			

附表 5 0.110 g/cm³ PMI 泡沫 937.5 N 下的原始蠕变数据
Table 5 Raw creep data at 937.5 N for 0.110 g/cm³ PM foams

937.5 N B-1										
Time/h	B-1-1	B-1-2	B-1-3	B-1-4	B-1-5	Average	Standard deviation			
0	0	0	0	0	0	0	0			
168	2.719×10 ⁻⁴	3.078×10 ⁻⁴	2.975×10 ⁻⁴	3.152×10 ⁻⁴	3.441×10 ⁻⁴	3.100×10 ⁻⁴	2.41577×10 ⁻⁵			
336	5.172×10 ⁻⁴	5.464×10 ⁻⁴	4.942×10 ⁻⁴	5.322×10 ⁻⁴	5.262×10 ⁻⁴	5.226×10 ⁻⁴	1.72182×10 ⁻⁵			
720	7.362×10 ⁻⁴	7.429×10 ⁻⁴	7.623×10 ⁻⁴	7.967×10 ⁻⁴	7.251×10 ⁻⁴	7.511×10 ⁻⁴	2.44488×10 ⁻⁵			
1 440	1.023×10 ⁻³	1.052×10 ⁻³	9.846×10 ⁻⁴	1.035×10 ⁻³	1.103×10 ⁻³	1.046×10 ⁻³	3.99378×10 ⁻⁵			
2 160	1.148×10 ⁻³	1.028×10 ⁻³	1.150×10 ⁻³	1.133×10 ⁻³	1.098×10 ⁻³	1.118×10 ⁻³	4.32668×10 ⁻⁵			
2 880	1.273×10 ⁻³	1.218×10 ⁻³	1.331×10 ⁻³	1.291×10 ⁻³	1.260×10 ⁻³	1.2818×10 ⁻³	4.66899×10 ⁻⁵			
3 600	1.465×10 ⁻³	1.406×10 ⁻³	1.419×10 ⁻³	1.351×10 ⁻³	1.388×10 ⁻³	1.4195×10 ⁻³	3.15663×10 ⁻⁵			
4 320	1.548×10 ⁻³	1.505×10 ⁻³	1.530×10 ⁻³	1.566×10 ⁻³	1.643×10 ⁻³	1.5652×10 ⁻³	4.43016×10 ⁻⁵			

附表 6 0.110 g/cm³ PMI 泡沫 1 250 N 下的原始蠕变数据
Table 6 Raw creep data at 1 250 N for 0.110 g/cm³ PM foams

1 250 N B-2										
Time/h	B-2-1	B-2-2	B-2-3	B-2-4	B-2-5	Average	Standard deviation			
168	4.440×10 ⁻⁴	4.155×10 ⁻⁴	4.530×10 ⁻⁴	4.640×10 ⁻⁴	4.951×10 ⁻⁴	4.6174×10 ⁻⁴	2.83385×10 ⁻⁵			
336	7.088×10 ⁻⁴	6.458×10 ⁻⁴	7.549×10 ⁻⁴	6.954×10 ⁻⁴	7.143×10 ⁻⁴	7.0990×10 ⁻⁴	3.67417×10 ⁻⁵			
720	9.516×10 ⁻⁴	9.496×10 ⁻⁴	8.479×10 ⁻⁴	8.738×10 ⁻⁴	9.094×10 ⁻⁴	9.0820×10 ⁻⁴	3.44979×10 ⁻⁵			
1 440	1.111×10 ⁻³	1.137×10 ⁻³	1.274×10 ⁻³	1.163×10 ⁻³	1.214×10 ⁻³	1.1912×10 ⁻³	6.19729×10 ⁻⁵			
2 160	1.280×10 ⁻³	1.294×10 ⁻³	1.309×10 ⁻³	1.310×10 ⁻³	1.246×10 ⁻³	1.3021×10 ⁻³	3.00445×10 ⁻⁵			
2 880	1.367×10 ⁻³	1.407×10 ⁻³	1.344×10 ⁻³	1.470×10 ⁻³	1.429×10 ⁻³	1.4024×10 ⁻³	4.32054×10 ⁻⁵			
3 600	1.508×10 ⁻³	1.513×10 ⁻³	1.541×10 ⁻³	1.464×10 ⁻³	1.551×10 ⁻³	1.5182×10 ⁻³	3.093×10 ⁻⁵			
4 320	1.612×10 ⁻³	1.547×10 ⁻³	1.593×10 ⁻³	1.660×10 ⁻³	1.625×10 ⁻³	1.6158×10 ⁻³	4.213×10 ⁻⁵			

附表 7 0.110 g/cm³ PMI 泡沫 1 562.5 N 下的原始蠕变数据
Table 7 Raw creep data at 1 562.5 N for 0.110 g/cm³ PM foams

1 562.5 N B-3												
Time/h	B-3-1		B-3-2		B-3-3		B-3-4		B-3-5		Average	Standard deviation
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
168	5.970×10 ⁻⁴	6.100×10 ⁻⁴	5.388×10 ⁻⁴	5.559×10 ⁻⁴	5.727×10 ⁻⁴	5.900×10 ⁻⁴	6.370×10 ⁻⁴	6.220×10 ⁻⁴	6.540×10 ⁻⁴	6.406×10 ⁻⁴	6.0180×10 ⁻⁴	3.80626×10 ⁻⁵
336	9.096×10 ⁻⁴	9.160×10 ⁻⁴	9.722×10 ⁻⁴	9.774×10 ⁻⁴	8.867×10 ⁻⁴	9.029×10 ⁻⁴	9.562×10 ⁻⁴	9.699×10 ⁻⁴	8.603×10 ⁻⁴	8.378×10 ⁻⁴	9.1890×10 ⁻⁴	4.90381×10 ⁻⁵
720	1.343×10 ⁻³	1.366×10 ⁻³	1.305×10 ⁻³	1.285×10 ⁻³	1.458×10 ⁻³	1.506×10 ⁻³	1.429×10 ⁻³	1.440×10 ⁻³	1.408×10 ⁻³	1.389×10 ⁻³	1.3928×10 ⁻³	6.94786×10 ⁻⁵
1 440	1.542×10 ⁻³	1.560×10 ⁻³	1.619×10 ⁻³	1.620×10 ⁻³	1.500×10 ⁻³	1.525×10 ⁻³	1.637×10 ⁻³	1.646×10 ⁻³	1.594×10 ⁻³	1.614×10 ⁻³	1.5856×10 ⁻³	5.06425×10 ⁻⁵
2 160	1.743×10 ⁻³	1.767×10 ⁻³	1.772×10 ⁻³	1.788×10 ⁻³	1.814×10 ⁻³	1.794×10 ⁻³	1.675×10 ⁻³	1.694×10 ⁻³	1.710×10 ⁻³	1.716×10 ⁻³	1.7472×10 ⁻³	4.6906×10 ⁻⁵
2 880	1.931×10 ⁻³	1.940×10 ⁻³	1.899×10 ⁻³	1.912×10 ⁻³	2.137×10 ⁻³	2.107×10 ⁻³	1.985×10 ⁻³	2.055×10 ⁻³	1.955×10 ⁻³	1.968×10 ⁻³	1.9888×10 ⁻³	8.27045×10 ⁻⁵
3 600	2.170×10 ⁻³	2.180×10 ⁻³	2.204×10 ⁻³	2.265×10 ⁻³	2.087×10 ⁻³	2.117×10 ⁻³	2.232×10 ⁻³	2.248×10 ⁻³	2.191×10 ⁻³	2.207×10 ⁻³	2.1901×10 ⁻³	5.54246×10 ⁻⁵
4 320	2.350×10 ⁻³	2.347×10 ⁻³	2.243×10 ⁻³	2.255×10 ⁻³	2.336×10 ⁻³	2.326×10 ⁻³	2.235×10 ⁻³	2.219×10 ⁻³	2.290×10 ⁻³	2.300×10 ⁻³	2.2899×10 ⁻³	4.92773×10 ⁻⁵

附表 8 0.110 g/cm³ PMI 泡沫 1 875 N 下的原始蠕变数据
Table 8 Raw creep data at 1 875 N for 0.110 g/cm³ PM foams

1 875 N B-4												
Time/h	B-4-1		B-4-2		B-4-3		B-4-4		B-4-5		Average	Standard deviation
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
168	8.670×10 ⁻⁴	8.509×10 ⁻⁴	8.197×10 ⁻⁴	7.913×10 ⁻⁴	8.320×10 ⁻⁴	8.450×10 ⁻⁴	8.946×10 ⁻⁴	9.063×10 ⁻⁴	7.724×10 ⁻⁴	7.548×10 ⁻⁴	8.3340×10 ⁻⁴	4.99941×10 ⁻⁵
336	1.282×10 ⁻³	1.273×10 ⁻³	1.335×10 ⁻³	1.345×10 ⁻³	1.209×10 ⁻³	1.235×10 ⁻³	1.326×10 ⁻³	1.311×10 ⁻³	1.219×10 ⁻³	1.194×10 ⁻³	1.2727×10 ⁻³	5.58339×10 ⁻⁵
720	1.666×10 ⁻³	1.671×10 ⁻³	1.850×10 ⁻³	1.840×10 ⁻³	1.642×10 ⁻³	1.647×10 ⁻³	1.745×10 ⁻³	1.756×10 ⁻³	1.830×10 ⁻³	1.819×10 ⁻³	1.7466×10 ⁻³	8.49306×10 ⁻⁵
1 440	2.098×10 ⁻³	2.097×10 ⁻³	2.004×10 ⁻³	1.989×10 ⁻³	2.098×10 ⁻³	2.100×10 ⁻³	2.105×10 ⁻³	2.100×10 ⁻³	2.101×10 ⁻³	2.103×10 ⁻³	2.0799×10 ⁻³	4.38799×10 ⁻⁵
2 160	2.310×10 ⁻³	2.343×10 ⁻³	2.417×10 ⁻³	2.431×10 ⁻³	2.302×10 ⁻³	2.289×10 ⁻³	2.357×10 ⁻³	2.357×10 ⁻³	2.377×10 ⁻³	2.370×10 ⁻³	2.3570×10 ⁻³	4.74077×10 ⁻⁵
2 880	2.669×10 ⁻³	2.656×10 ⁻³	2.732×10 ⁻³	2.689×10 ⁻³	2.740×10 ⁻³	2.758×10 ⁻³	2.654×10 ⁻³	2.627×10 ⁻³	2.601×10 ⁻³	2.567×10 ⁻³	2.6692×10 ⁻³	6.18096×10 ⁻⁵
3 600	2.834×10 ⁻³	2.870×10 ⁻³	2.869×10 ⁻³	2.869×10 ⁻³	2.889×10 ⁻³	2.896×10 ⁻³	2.901×10 ⁻³	2.914×10 ⁻³	2.943×10 ⁻³	2.939×10 ⁻³	2.8925×10 ⁻³	3.38566×10 ⁻⁵
4 320	3.161×10 ⁻³	3.164×10 ⁻³	3.067×10 ⁻³	3.091×10 ⁻³	3.100×10 ⁻³	3.124×10 ⁻³	2.946×10 ⁻³	2.994×10 ⁻³	3.133×10 ⁻³	3.158×10 ⁻³	3.0939×10 ⁻³	7.34251×10 ⁻⁵