

文章编号:1001-4888(2018)03-0377-08

## 火焰复合层对化学交联聚乙烯 发泡材料力学性能的影响<sup>\*</sup>

张伯琴<sup>1</sup>, 孟积兴<sup>1,2,3</sup>, 张俊平<sup>1</sup>, 龙国荣<sup>3</sup>, 胥明<sup>1,2</sup>

(1. 东南大学土木工程学院, 南京 210096; 2. 江苏省工程力学分析重点实验室, 东南大学, 南京 210096;

3. 泰山体育产业集团国家体育用品工程技术研究中心, 德州 253600)

**摘要:** 化学交联聚乙烯发泡材料(Cross-linked polyethylene, XPE)具有优异的物理、化学与力学性能,被广泛应用于工业领域。本文通过对不同层数的 XPE 发泡材料进行加载—卸载试验与压缩循环试验,得到不同层数 XPE 发泡材料的应力—应变曲线,获得了弹性区与平台区分界点的应力与应变、平台区与强化区应力的数量关系。通过计算得出应力—应变环的面积,发现其能量耗散能力随加载次数增加呈现下降趋势。结果表明,单层 XPE 发泡材料的弹性区与平台区弹性极限应变、临界应力强度和应力环面积等性质与多层材料相比差别显著,而多层材料间力学性能的差异微小。这些特征表明,火焰复合层自身具有较大的刚度并对发泡材料孔壁有较强的约束,改善了 XPE 发泡材料的刚度、弹性模量及耗能能力等。

**关键词:** XPE 发泡材料; 火焰复合层; 加载—卸载试验; 应力—应变曲线; 弹塑性行为

**中图分类号:** O344.3

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7520/1001-4888-16-240

### 0 引言

从 20 世纪后期起,发泡材料由于其优越的物理、化学与力学性能,受到学术界与工业界的广泛关注,并在消能减振、防撞缓冲等领域有了较为广阔的应用。一种新型的发泡材料:化学交联聚乙烯发泡材料(Cross-linked polyethylene, XPE)则由于其独特的性能优势,如比模量高、比弹性大、容重小等,广泛应用于汽车、建筑、航空航天、体育器材、食品加工等工业领域<sup>[1-3]</sup>。

长期以来,对泡沫塑料的研究主要集中于材料胞体的几何特点对发泡材料整体性能的影响<sup>[4,5]</sup>,针对不同材料、不同发泡工艺生产的发泡材料的简化有限元模拟方法<sup>[6]</sup>,发泡倍率、添加剂、温度等因素对发泡材料力学性能的影响<sup>[7]</sup>,以及发泡材料在受到外力时的力学行为与力学性能变化<sup>[8]</sup>。此外,发泡材料在不同工况下的能量吸收与阻尼特性也是国内外研究的焦点<sup>[9]</sup>。

在工业生产中,由单层 XPE 发泡材料复合得到的多层发泡材料有着广泛应用。将多份单层的 XPE 发泡材料以火焰烧结工艺复合,复合温度约为 500~600℃,然后空冷,此时复合界面将会形成一层厚度约为 1mm、刚度较高的火焰复合层。火焰复合层对泡沫材料力学性能的影响至今仍不清晰。为此,本文从多层 XPE 发泡材料的加载—卸载试验与压缩循环试验出发,研究了不同层数的 XPE 发泡材料的力学性能差异,并依据试验现象,提出火焰复合层影响发泡材料力学性能的机制。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-11-09; 修回日期: 2017-03-03

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(11402053),江苏省自然科学基金项目(BK20140618)及中央高校基本科研业务费专项资金资助

**通讯作者:** 孟积兴(1981—),男,博士,讲师。主要研究领域:材料冲击动力学。Email: jxmeng@seu.edu.cn

## 1 试验设计

### 1.1 试验材料与仪器

试验采用发泡倍率为 6 倍的 XPE 发泡材料,材料由泰山体育产业集团提供。试验材料有单层、双层、三层 XPE 发泡材料,平均厚度分别为 5.55mm、10.55mm、15.50mm(如图 1(a))。材料样品为矩形,平面尺寸为 30mm×30mm(图 1(b))。试验仪器为 Instron3367 型电子万能材料试验机。

单层材料与双层、三层 XPE 发泡材料在结构上最大的不同点在于是否具有火焰复合层。双层材料、三层材料在生产过程中,需要对原有的单层材料顶面与底面进行一次火焰复合。这样生产出的双层、三层 XPE 发泡材料中间有经过烧结处理的火焰复合层,这是单层材料所不具有的,样品结构示意图如图 2。

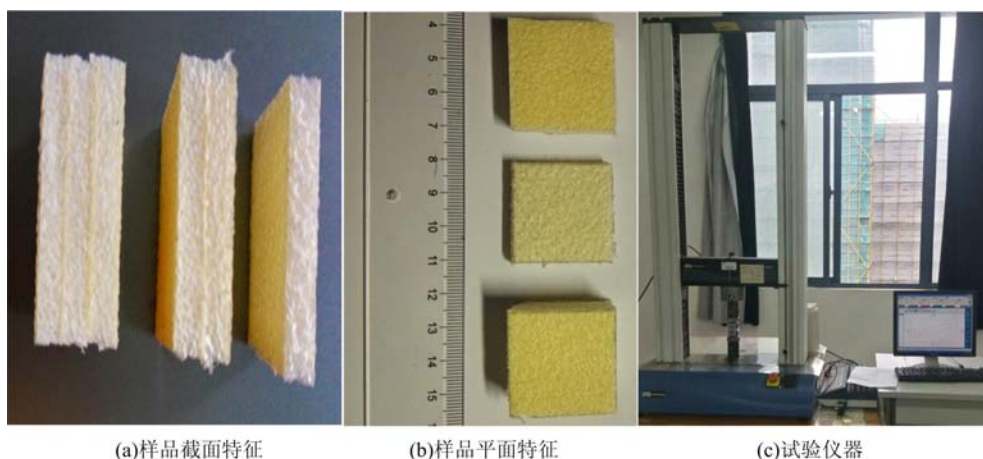


图 1 试验材料与试验仪器

Fig. 1 Testing sample and equipment

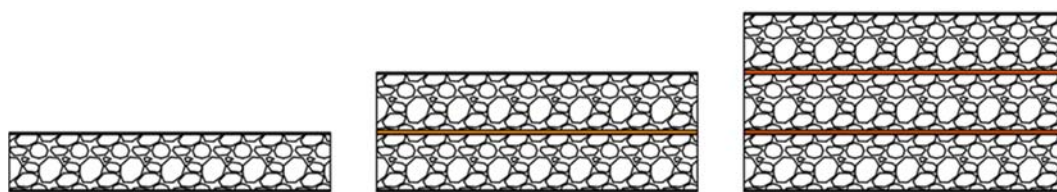


图 2 试验样品火焰复合层示意图(红色夹层为火焰复合层)

Fig. 2 Schematic diagram of flame lamination foam(red interlayers are flame lamination layer)

### 1.2 试验方案

XPE 发泡材料应力—应变特征试验以 Gibson 等人总结的系列试验做参考<sup>[10]</sup>,在室温环境进行不同复合层材料的加载—卸载压缩试验。试验以应变为控制加载变量,设定最大应变为 60%,加载速率为 0.6%(s),这样得到的应力—应变曲线是工程应用中最关注的,也能充分体现弹性区与平台区的细节。不同层数的 XPE 发泡材料样品分别开展 3 组以上试验。

XPE 发泡材料的加载—卸载循环试验,仍以应变为控制加载变量,试验设定最大应变至 80%,加载速率加快为 1.2%(s),以观察强化区的特征并较完整地体现材料耗能能力。不同层数的材料样品各选 2 个,每个样品经历 3 次加载—卸载过程。

### 1.3 试验数据处理标准与方法

#### 1.3.1 临界应力与临界应变

在加载—卸载试验中,试样发生屈服而应力首次出现下降前的最大应力位置为上屈服点,该点可作为线弹性区与平台区的分界点<sup>[10]</sup>。对试验获得的应力—应变数据进行 3 次平滑处理,再做曲线微分,可获得试验应力—应变曲线中的上屈服点。以该点应变为临界应变  $\epsilon_{ys}$ ,以该点应力为临界应力  $\sigma_{ys}$ (见

图 3(a)(b))。

1.3.2 残余应变

残余应变指在不受外部荷载时物体结构内部存在的非零的应变<sup>[11]</sup>。取卸载曲线与横轴的交点,以该点应变为此次试验的材料残余应变  $\epsilon_{re}$ (见图 3(a))。

1.3.3 能量耗散变化率

计算材料应力—应变曲线包络的面积可得到该加载—卸载试验中应变环面积  $S$ 。以应变环面积  $S$  表征 XPE 发泡材料的耗能能力<sup>[10]</sup>。

在压缩循环试验中,取单个样本,进行多次连续的反复加载卸载试验,将每轮加载卸载的应力—应变数据作曲线,并计算该样本每一次循环过程的应力环面积  $S$ ,即单位体积材料能量耗散值。用上一次加载—卸载过程得到的应变环面积  $S_i$  减去本次加载—卸载过程得到的应变环面积  $S_{i+1}$ ,该差值除以  $S_i$ ,可得到应变环面积关于循环次数的变化率  $\frac{S_i - S_{i+1}}{S_i}$ ,看作能量耗散的变化率。我们采用 Gibson 描述泡沫材料应力—应变曲线的函数(Function describing the stress-strain curve)拟合第三次加载—卸载过程的加载曲线,并观察临界应力、临界应变关于加载—卸载次数的变化情况。

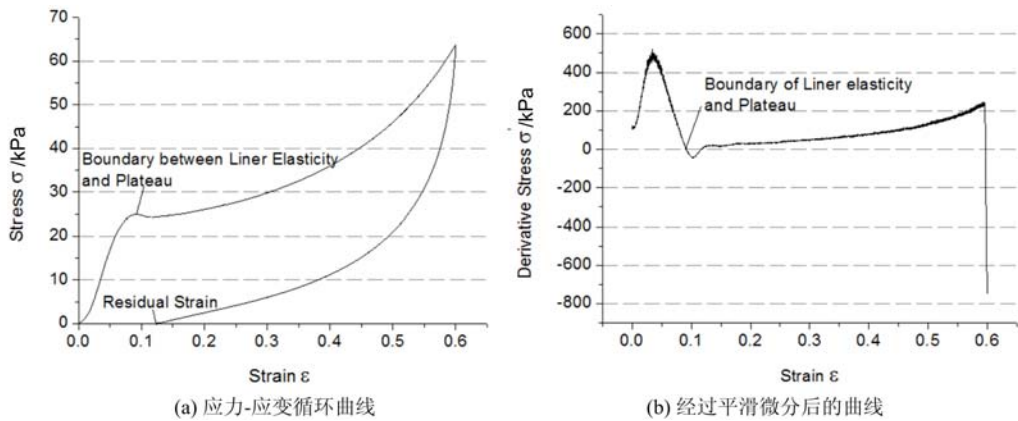


图 3 应力—应变循环曲线与加载屈服曲线

Fig. 3 Stress-strain circle curve and compression yield curve

2 试验结果与现象分析

2.1 加载—卸载压缩试验结果与现象分析

在加载—卸载压缩试验中,不同层数的材料在弹性模量  $E$ 、弹性极限应变  $\epsilon_{ys}$ 、临界应力强度  $\sigma_{ys}$  等性质上有显著差异,但是单层与多层材料之间的力学性能变化远大于多层材料之间的性能差异(见表 1)。我们可以通过火焰复合层的特殊性质阐释这几组试验现象。

表 1 加载—卸载试验的数据

Tab. 1 Results of loading-unloading tests

|        | 临界应变<br>$\epsilon_{ys}$ | 临界应力<br>$\sigma_{ys}/\text{kPa}$ | 弹性模量<br>$E/\text{kPa}$ | 最大应力<br>$\sigma_{90\%}/\text{kPa}$ | 残余应变<br>$\epsilon_{re}$ | 应变环面积<br>$S/(\text{kJ}/\text{m}^3)$ |
|--------|-------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| 单层试件均值 | 0.159                   | 19.0                             | 122.8                  | 43.5                               | 0.119                   | 8.95                                |
| 单层标准差  | 0.008                   | 1.572                            | 7.27                   | 0.489                              | 0.006                   | 0.127                               |
| 双层试件均值 | 0.097                   | 25.2                             | 263.3                  | 64.4                               | 0.123                   | 13.2                                |
| 双层标准差  | 0.009                   | 0.990                            | 32.7                   | 1.96                               | 0.002                   | 0.48                                |
| 三层试件均值 | 0.084                   | 25.4                             | 288.8                  | 68.1                               | 0.118                   | 14.0                                |
| 三层标准差  | 0.002                   | 0.500                            | 21.98                  | 1.46                               | 0.002                   | 0.219                               |

### 2.1.1 弹性模量 $E$

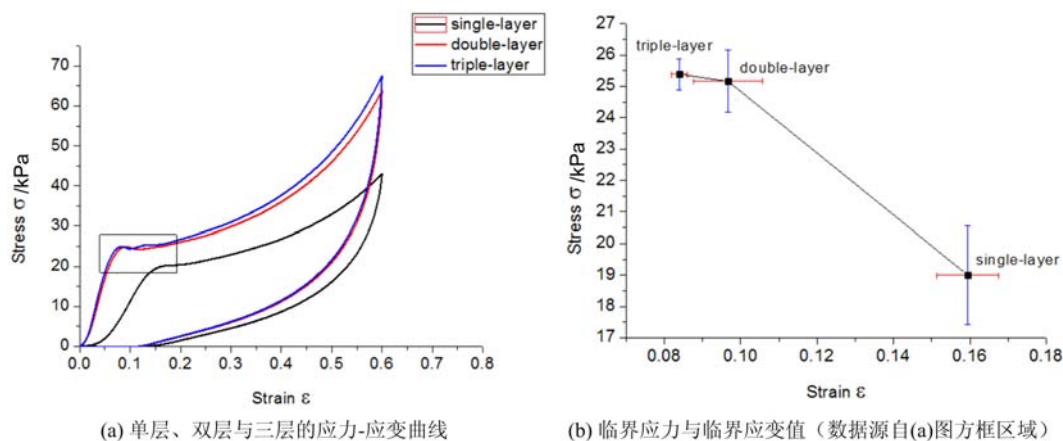
拟合单层、双层与三层材料在弹性阶段的应力—应变曲线并计算斜率,获得弹性阶段的弹性模量  $E$ ,结果显示单层材料的模量值约为双层与三层材料的一半(见表 1 与图 4(a))。单层与多层泡沫材料之间弹性模量的显著差异与火焰复合层相关。

火焰复合层属于烧结层,烧结硬化后弹性模量大于泡孔区域,火焰复合层与泡孔一起提高了整个复合材料的弹性模量。此外,火焰复合层与发泡材料孔壁之间的约束加强了孔壁的抗压能力,宏观上提高了孔壁的弹性模量。

### 2.1.2 临界应力 $\sigma_{yl}$ 与临界应变 $\epsilon_{yl}$

双层材料与三层材料的临界应力  $\sigma_{yl}$  很接近,而单层材料的临界应力仅相当于双层材料临界应力的 80%(图 4(b))。与单层材料相比,双层与三层材料在弹性区段的强度更大。单层材料的临界应变  $\epsilon_{yl}$  比多层材料大 50%,即单层材料的弹性段对应的应变区间更大(图 4(b))。

火焰复合层对临界应力与临界应变的影响机制分别为:(1)夹层约束孔壁,在经受同样的应变时,多层材料的孔壁更容易在缺陷处或几何不规则处出现应力集中现象,造成应变相等的情况下多层发泡材料孔壁上的最大应力比单层发泡材料更大。(2)多层材料可近似为由单层材料与火焰复合层构成的。当保持同等应力时,多层发泡材料孔壁上出现塑性区所需的最小应变比单层材料小,造成多层 XPE 发泡材料的临界应变  $\epsilon_{yl}$  比单层材料小。



(a) 单层、双层与三层的应力-应变曲线

(b) 临界应力与临界应变值(数据源自(a)图方框区域)

图 4 XPE 发泡材料应力—应变曲线随层数增加的变化趋势图

Fig. 4 Evolvement of stress-strain curve with the increase of layers

### 2.1.3 平台区与强化区的应力 $\sigma$ 和残余应变 $\epsilon_r$

在平台区,控制应变相同,单层材料对应的应力  $\sigma$  显著小于双层与三层材料。且随着应变的增加,不同层数的材料间应力上的差距将扩大,在应变达到 60% 时单层材料压应力相当于多层材料的 2/3(见表 1 与图 4(a))。由于火焰复合层施加给发泡材料孔壁更强的抗转与抗侧移约束,因此减少了孔壁与棱的计算长度,提高了微观尺度上的孔壁失稳强度与弹性模量。此外,火焰复合层的材料屈服强度比泡沫孔壁更强。这些因素宏观上提高了发泡材料在平台区与强化区的应力。

在压缩结束后,可以发现三种材料受压后的残余应变  $\epsilon_r$  基本相同。这表明火焰复合层对 XPE 泡沫材料层的初始缺陷(由发泡过程中的发泡剂配置、设备的温度、机械设备性能等因素决定)<sup>[12]</sup> 影响不大。

### 2.1.4 耗能能力变化特征

加载—卸载压缩试验中,单层材料应力—应变曲线得到的应变环面积  $S$  约相当于多层应变环面积的 2/3。微观角度上,泡沫材料的耗能能力来源于在特定的应力集中区域产生的塑性铰<sup>[10]</sup>。被火焰复合层约束的孔壁,其塑性铰的极限弯矩较大,在同样的一次加载—卸载过程中,其消耗的能量更大。因此在宏观上,我们会发现双层材料与三层材料的应变环面积比单层材料更大,即多层泡沫材料耗能能力显著优于单层材料。

进一步的结果显示双层与三层 XPE 发泡材料试样的应力—应变曲线较为接近。弹性模量、临界应力与临界应变、强化阶段应变与残余应力、耗能能力等性能保持相同变化趋势且差别不大。

以上现象表明,火焰复合层的有无对 XPE 发泡材料力学性质有重要影响,而火焰复合层的数量多少对材料特征性能的影响相对较弱。

2.2 加载—卸载循环试验结果与现象分析

通过对样品开展多次反复加载—卸载压缩试验构成加载—卸载循环试验。结果显示随着反复加载次数的增加,加载曲线有所下降。特别值得关注的是单层材料与双层材料在应力环面积(图 5(a)(b)(c))、面积下降率 $\frac{S_i - S_{i+1}}{S_i}$ ,即耗能能力变化率方面有显著差异(见表 2)。这种差异在双层与三层之间则小得多。

表 2 加载—卸载循环试验的数据结果  
Tab. 2 Results of cyclic load-unload compression test

|         | 首次循环面积<br>$S_1 / (\text{kJ}/\text{m}^3)$ | 二次循环面积<br>$S_2 / (\text{kJ}/\text{m}^3)$ | 三次循环面积<br>$S_3 / (\text{kJ}/\text{m}^3)$ | 二次下降率<br>$\frac{S_2 - S_1}{S_1}$ | 三次下降率<br>$\frac{S_3 - S_2}{S_2}$ |
|---------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 单层试件均值  | 11.64                                    | 5.62                                     | 4.87                                     | 0.517                            | 0.134                            |
| 单层数据标准差 | 0.89                                     | 0.32                                     | 0.27                                     | 0.0095                           | 0.0025                           |
| 双层试件均值  | 22.84                                    | 10.65                                    | 9.13                                     | 0.534                            | 0.143                            |
| 双层数据标准差 | 0.86                                     | 0.63                                     | 0.57                                     | 0.01                             | 0.0025                           |
| 三层试件均值  | 26.27                                    | 11.81                                    | 10.10                                    | 0.550                            | 0.145                            |
| 三层数据标准差 | 0.14                                     | 0.074                                    | 0.047                                    | 0.0005                           | 0.0015                           |

2.2.1 循环压缩次数对应力—应变曲线特征的影响

为描述泡沫材料的力学性能,Gibson 提出用分段模型描述材料的应力—应变曲线<sup>[10]</sup>:

$$\begin{aligned} \text{初始线弹性阶段: } \sigma &= E\epsilon & (\sigma < \sigma_{\text{yd}}) \\ \text{平台阶段: } \sigma &= \sigma_{\text{yd}} + h\epsilon & (\epsilon_{\text{yield}} \leq \epsilon \leq \epsilon_D(1 - D^{-\frac{1}{m}}) + \epsilon_e) \\ \text{压实强化阶段: } \sigma &= \sigma_{\text{yd}} \frac{1}{D} \left( \frac{\epsilon_D}{\epsilon_D - \epsilon} \right)^m & (\epsilon > \epsilon_D(1 - D^{-1/m}) + \epsilon_e) \end{aligned}$$

其中, $\sigma_{\text{yd}}$ 为材料屈服强度; $\epsilon_e$ 为平台区与强化区分界应变,计算公式为 $1 - 0.3 \times \frac{\rho^*}{\rho_s}$ ,其中 $\rho^*$ 为发泡材料密度; $\rho_s$ 为基材密度<sup>[10]</sup>; $\epsilon_D$ 为发泡材料的极限应变,计算公式为 $1 - 1.4 \times \frac{\rho^*}{\rho_s}$ <sup>[10]</sup>;  $h$ 为平台阶段弹性常数; $D$ 为强化系数参数,对聚乙烯发泡材料取 1; $M$ 为独立参量,通常取 1<sup>[10]</sup>。

如图 5 所示,两次压缩循环后,第三次压缩过程时样品内部的初始缺陷对试验结果的影响大大减轻,材料性能趋于稳定<sup>[10]</sup>。应用 Gibson 描述闭孔发泡材料的本构关系方程分段拟合各层材料的第三次循环过程加载阶段的应力—应变曲线,对加载—卸载试验分析的结论进行检验。

结果显示,经过三次循环以后,在线弹性阶段单层泡沫材料的弹性模量仍约为双层、三层泡沫材料的弹性模量的一半(见表 3)。而在平台阶段,单层材料的  $h$ 、 $\sigma_{\text{yd}}$  等力学性能特征与双层、三层材料有明显差距。进一步分析多层材料之间的差异,发现变化仍然不大。因此可以认为火焰复合层可以强化泡沫材料,但多层材料之间差异较小。该拟合结果与上一节加载—卸载压缩试验的分析结果相统一,消除了初始缺陷等偶然因素对分析结果的影响。

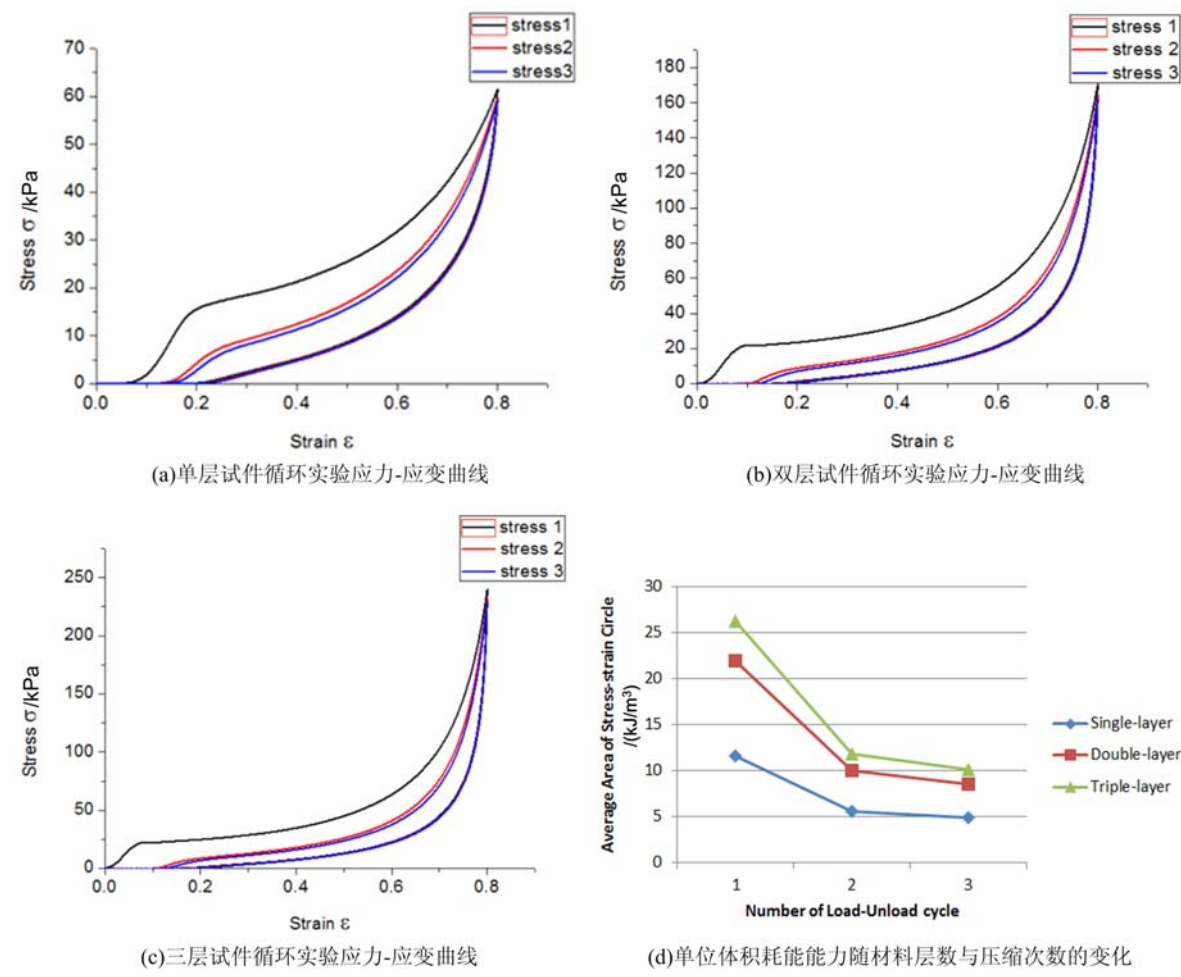


图 5 单层、双层与三层试样循环三次压缩的应力—应变曲线及单位体积耗能能力变化图  
Fig. 5 Stress-strain curves of one, two and three layers specimens and the change of energy dissipation capacity

表 3 Gibson 模型拟合第三次压缩循环的应力—应变曲线得到的参数  
Tab. 3 Parameters from fitting the stress-strain curve of the third load process

| 试样种类 | $E/\text{kPa}$ | $h$  | $\sigma_{yd}/\text{kPa}$ | $\epsilon_D$ |
|------|----------------|------|--------------------------|--------------|
| 单层   | 55.9           | 33.5 | 7.62                     | 0.91         |
| 双层   | 96.7           | 46.2 | 10.9                     | 0.85         |
| 三层   | 98.1           | 50.3 | 11.6                     | 0.83         |

2.2.2 循环压缩次数对耗能能力的影响

在加载—卸载循环试验中,泡沫材料耗能能力在首次与第二次加载—卸载循环时对比,呈现快速下降特征。双层材料与三层材料的应力环面积随着加载次数的增加而减少,这一趋势比单层材料更加剧烈(图 5(d)),面积下降率 $\frac{S_i - S_{i+1}}{S_i}$ 数值更大,即能量耗散能力降低更快。而泡沫材料耗能能力在第三次加载—卸载循环后呈现稳定特征。

以上特征需要从材料内部缺陷与结构强化角度来解释。材料在反复荷载作用下耗能能力的降低最重要的是火焰复合层的存在使界面受力时局部微裂纹迅速增加,造成该界面力学性能劣化;Baltenneck 等<sup>[13]</sup>提出的拉伸疲劳动力学模型中,微裂纹的增加率与该区域的最大应力成正比;Lisa 等<sup>[14]</sup>研究聚乙烯材料破坏与疲劳性能时,最大应力同失效循环数呈强烈反相关,某处应力越大,该处的力学性能在经受循环荷载时退化得越快。火焰复合层的存在使得多层 XPE 发泡材料出现局部应力集中,孔壁上的最

大应力上升,更快地产生更多微裂纹,进而加剧材料耗能性能的劣化幅度。因此,多层材料在经受反复荷载时,耗能性能退化得比单层 XPE 发泡材料更迅速。

### 3 结语

本文开展了单层、双层与三层 XPE 发泡材料加载—卸载压缩试验与压缩循环试验,并将试验结果用 Gibson 的本构关系模型拟合,获得如下结论:

(1) 单层 XPE 发泡材料与多层材料相比,在弹性模量  $E$ 、弹性极限应变  $\epsilon_{ys}$ 、临界应力强度  $\sigma_{ys}$  等性质上有显著差异,数值偏低。

(2) 双层 XPE 发泡材料与三层材料之间力学性能的差异相对较小。

(3) 火焰复合层强化了材料的模量,增强了单位体积的耗能能力。火焰复合层的影响主要体现在自身较大的抗压刚度、抗转刚度及对其连接的孔壁的约束上,增大孔壁抗压能力的同时加剧了火焰层附近孔壁部位的应力集中行为。本文对火焰复合层对多层泡沫材料力学性能影响的研究可以为工业生产中泡沫材料及相关产品设计与制造提供理论支持。

### 参考文献:

- [1] 卢子兴,王仁,黄筑平,等. 泡沫塑料力学性能研究综述[J]. 力学进展, 1996, 26(3):306—323 (LU Zixing, WANG Ren, HUANG Zhuping, et al. A review of studies on the mechanical properties of foam plastics, advanced in mechanics[J]. 1996, 26(3):306—323 (in Chinese))
- [2] Wang J, Wang H, Chen X, et al. Experimental and numerical study of the elastic properties of PMI foams[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(10):2688—2695.
- [3] Sciamanna V, Nait-Ali B, Gonon M. Mechanical properties and thermal conductivity of porous alumina ceramics obtained from particle stabilized foams[J]. Ceramics International, 2015, 41(2):2599—2606.
- [4] Ashby M F. Plastic deformation of cellular materials[M]. Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Oxford: Elsevier, 2008:7068—7071.
- [5] Alkhader M, Vural M. Mechanical response of cellular solids: Role of cellular topology and microstructural irregularity[J]. International Journal of Engineering Science, 2008, 46(10):1035—1051.
- [6] Sabuwala T, Gioia G. Skeleton-and-bubble model of polyether-polyurethane elastic open-cell foams for finite element analysis at large deformations[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2013, 61:886—911.
- [7] Moghaddam T B, Soltani M, Karim M R. Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test[J]. Materials and Design, 2014, 53:317—324.
- [8] Gonga L, Kyriakides S, Triantafyllidis N. On the stability of Kelvin cell foams under compressive loads[J]. Journal of the Mechanics and Physics of solids, 2005, 53:771—794.
- [9] Chou C, Zhao Y, Lim G, et al. Comparative analysis of different energy absorbing materials for interior head impact[C]. International Congress & Exposition, 1995.
- [10] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solid structure and properties[M]. Cambridge University Press, 1997.
- [11] 韩海潮. 生物组织中的残余应变[J]. 力学进展, 1994, 24(1):123—131 (HAN Haichao. The residual strain in living tissues[J]. Advanced in Mechanics, 1994, 24(1):123—131 (in Chinese))
- [12] Alin C M. TT-IRT hybrid testing method applied in the study of PE 80 polyethylene behaviour in the presence of simulated imperfection[C]. 5th Int. Conference Structural Integrity of Welded Structures (ISCS2007), Timisoara, Romania, 2007.
- [13] Baltenneck F, Trotignon J P, Verdu J. Kinetics of fatigue failure of polystyrene [J]. Polymer Engineering & Science, 2010, 37(10):1740—1747.
- [14] Lisa A P. Deformation, yielding, fracture and fatigue behavior of conventional and highly cross-linked ultra high molecular weight polyethylene[J]. Biomaterials, 2005, 26:905—915.

## On the Effect of Flame Lamination Layers on Mechanical properties of Chemical XPE Foam

ZHANG Bo-qin<sup>1</sup>, MENG Ji-xing<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Jun-ping<sup>1</sup>, LONG Guo-rong<sup>3</sup>, XU Ming<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Engineering Mechanics, Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 3. National Sports Engineering Technology Research Center, Taishan Sports Industry Company, Dezhou 253600, Shandong, China)

**Abstract:** Cross-linked polyethylene (XPE) foam has excellent physical, chemical and mechanical properties, and has been widely used in industrial fields. Through loading-unloading experiment and compression cyclic experiment for XPE foam with different layers, its stress-strain curve, stress and strain at elastic region and platform separation boundary point and quantitative relationship between stress in platform and strengthening zone were obtained, respectively. By calculating, the area of stress-strain ring was obtained, it reveals that the energy dissipation capacity presents a downward trend with the increase of loading times. Results show that by comparing with XPE foam with multiple layers, the single layer XPE foam presents significant differences in following aspects: elastic zone and platform area elastic ultimate strain, the critical stress intensity and stress ring area and other properties. However, the mechanical properties of multiple layers material are very small. These characteristics indicate that flame lamination layer has large stiffness and has strong constraint on the hole wall of foamed material are improves the stiffness, modulus of elasticity and energy dissipation capacity of XPE foam material.

**Keywords:** cross-linked polyethylene foam(XPE foam); flame lamination layer; loading and unloading experiment; stress-strain curve; elasto-plastic behavior