复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第29卷 第4期 8月 2012年
Vol. 29 No. 4 August 2012

文章编号：1000-3851(2012)04-0224-07

# 泡沫铝-环氧树脂互穿相复合材料压缩力学性能

余 为，李慧剑*，赵 钊，梁 希
（燕山大学 建筑工程与力学学院 工程力学系，秦皇岛 066004）

**摘 要：** 通过一系列准静态压缩实验研究了纯泡沫铝、纯环氧树脂及三种不同体积分数的空心玻璃微珠(HGB)泡沫铝-环氧树脂互穿相复合材料(IPC)等五种材料压缩的变形过程和破坏形貌，分析了其破坏机制，并对三种IPC进行了应力松弛实验。通过绘制应力-应变曲线，分析了其变化规律，得出了有效弹性模量、屈服极限等力学性能及能量吸收特性。结果表明：三种IPC的有效弹性模量、屈服极限及比强度、比刚度均较纯泡沫铝有较大的提高，泡沫铝-环氧树脂的单位体积吸能率最大，且吸能率随空心玻璃微珠体积分数的增加而减小。泡沫铝-环氧树脂IPC有效弹性模量的预测结果与实验值较为符合。应力松弛率随空心玻璃微珠体积分数增加而增大。

**关键词：** 互穿相复合材料(IPC)；压缩实验；力学性能；能量吸收；应力松弛

**中图分类号：** TB333 **文献标志码：** A

## Compressive mechanical properties of foam aluminum - epoxy interpenetrating phase composites

YU Wei, LI Huijian*, ZHAO Zhao, LIANG Xi
(Department of Engineering Mechanics, College of Civil Engineering & Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** A series of quasi - static compressive experiments of pure foam aluminum, pure epoxy and foam aluminum -epoxy interpenetrating phase composites (IPC) with three kinds of volume fraction of hollow glass bead (HGB) are conducted. The stress relaxation experiments of the three IPC are performed. The deformation process and damage morphology are observed, and their failure mechanisms are analyzed. The stress - strain curves are plotted. Their change rules are discussed. The effective elastic modulus, yield limit and energy absorbing are provided. It is found that the three kinds of IPC all have better mechanical properties than pure foam aluminum. Their specific stiffness and specific strength are more than that of pure foam aluminum. The unit volume energy absorption of foam aluminum - epoxy is the maximum, and it decreases with the increase of HGB's volume fraction. A good agreement between theoretical and experimental result is found. It is also found that the stress relaxation rate is increases with the increase of HGB's volume fraction.

**Keywords:** interpenetrating phase composites; compressive experiment; mechanical properties; energy absorbing; stress relaxation

超轻多孔材料具有质轻、吸能减震、高比强度及热绝缘等优点，已经越来越多地应用于航空航天、高速列车、轮船、机械、建筑及军事等领域[1]。随着科技的发展，工程实际中对轻质、高强、高韧性且兼具一定功能的结构和功能双重性能材料的需求越来越迫切，除了对现有材料进行优化设计之外，也需要研究发展更新颖的材料。传统的复合材料是由基体添加一种或多种强化材料(如，长纤维、晶须、颗粒、微珠等等)复合而成的具有分散、嵌入成分的非均匀材料，如纤维增强复合材料、颗粒复合材料、功能材料等复合材料已经在某些结构上得到应用，但这类增强材料在基体中的集中度和两种材料的相互内部连接程度方面均存在局限性。近年来，一种称为互穿相复合材料(IPC)的新材料引起了研究者的关注。IPC是多相材料，其组成部分在其内部呈三维空间尺度方向的连续，并以拓扑的形

**收到初稿日期：** 2011-08-14；**收到修改稿日期：** 2011-10-29；**网络出版时间：** 2012-03-12 15:42:01
**网络出版地址：** www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20120312.1542.006.html
**基金项目：** 河北省自然科学基金(E2011203230)；河北省高等学校科学研究计划项目(2010166)
**通讯作者：** 李慧剑，教授，主要研究方向为材料断裂与损伤，多孔材料力学性能与结构设计 E-mail：ysulhj@163.com

式遍及整个结构，也就是说，基体材料和增强材料这两种独立的成分具有开孔的微结构，且各自在三维空间尺度上贯穿于所有的微结构。因此，IPC 与传统的复合材料完全不同，它的每一种成分在宏观尺度上都体现出其自身的性质，比如一种成分具有强度和韧性，另一种成分则可能增强其刚度、热稳定性、隔声性或电绝缘性等性能。根据实际的需要，选择合适的基体和增强材料就可以得到设计所需的既满足一定力学性能又具有一定功能的结构功能双重材料。根据不同尺度的贯穿性，IPC 可分为分子型和微观型两种。国内外学者研究较多的被称为 IPN(Interpenetrating network)的树脂互穿复合材料即属于分子型，而金属-陶瓷 IPC 则属于微观型。金属-陶瓷 IPC 在宏观尺度上的响应可以更好地处理残余应力问题，金属材料中的拉伸残余应力和陶瓷材料中的压缩残余应力共同作用后可以延迟裂纹的发展，从而增强了 IPC 的强度。在微观型 IPC 材料的研究方面，Breslin 等[2]发现了以连续陶瓷为三维连通骨架结构的连续陶瓷基复合材料(Co-continuous ceramic composites，简称 C4 材料)，并用液相位移反应法概括了铝-氧化铝 IPC 的制备情况，这种 IPC 呈现出优异的质量密度、热传导性和热膨胀系数，而其刚度和断裂韧度并无明显降低。Zhou 等[3]研究了 $Al_2O_3$ - TiC - Al 复合的 IPC 的断裂情况，观察了其断裂形态。王守仁等[4]研究了陶瓷增强 Al - Mg 合金复合材料的磨损情况，提出了磨损模型，实验结果与模型符合得较好。赵龙志等[5]研究了界面过渡层对 SiC - Al 复合材料性能的影响，发现界面过渡层降低了复合材料中的残余应力，改善了界面的结合效果，从而提高了复合材料的压缩性能。洪长青等[6]研究了 $TiB_2$ - Cu 基发汗陶瓷复合材料的抗烧蚀行为，发现该材料具有良好的抗热冲击性能。陈维平等[7]对连续陶瓷基复合材料的研究情况进行了综述，并讨论了其发展趋势。

在树脂中填充空心玻璃微珠(HGB)复合形成的复合泡沫塑料是一种新型的复合材料。有研究表明[8-9]，HGB 的填入可降低材料的密度，提高其比强度，增强其韧性和吸能效率等性能，但大量添加 HGB 会使材料的强度急剧下降，因此，若将复合泡沫与多孔金属再进行复合则有可能得到更理想的材料。已经有研究发现，金属泡沫与纯树脂互穿复合而得的 IPC 可有效提高材料的力学性能。Tilbrook 等[10]研究了铝-环氧树脂复合材料的力学性能及疲劳特性，发现 IPC 材料的疲劳特性更优异。冯西桥等[11]对贯穿多相复合材料的有效弹性和塑性性能进行了研究。于英华等[12-13]研究了泡沫铝-高分子复合材料的制备及性能，发现其压缩、抗冲击和阻尼性能等均得以提高。金明江等[14]制备了铝- PC 树脂-铝合金叠层复合材料，研究了其弯曲、冲击和阻尼性能。Liu 和 Gong[15]研究了金属-聚合物 IPC 的静态压缩和能量吸收性能，发现铝-环氧树脂是文中的三种材料中吸能性能相对较好的一种。齐明思等[16]通过数值模拟方法研究了铝-聚氨酯复合材料结构的缓冲性能，发现该复合结构具有良好的缓冲性能，且可承受较大的冲击载荷。Jhaver 和 Tippur[17]制备了两种不同体积分数的 HGB 和环氧树脂形成的复合泡沫与铝复合而得的 IPC 材料，研究了其有效弹性模量、屈服应力，发现其性能比纯复合泡沫更好。可见，关于泡沫铝-环氧树脂及泡沫铝-复合泡沫的研究文献较少，其理论方面的成果也与实验结果还有一定的差异，需要通过更多的实验研究其基本力学性能、动态特性、黏弹性等性能。本文作者通过一系列实验，对泡沫铝-环氧树脂及泡沫铝-复合泡沫 IPC 的有效弹性模量、屈服极限及应力松弛等方面进行了探索研究。

## 1　实验部分

### 1.1　实验材料

泡沫铝为北京金艾伯特泡沫金属有限公司生产的开孔泡沫铝板，密度为 0.8 g/cm$^3$，主孔径为 1.5 mm，孔隙率达到 72%，通孔率在 90%以上。环氧树脂为双酚- A 型环氧树脂 E44，固化剂为聚酰胺活性固化剂 651#，均由廊坊诺尔信化工有限公司生产。HGB 由秦皇岛玻璃微珠有限公司生产，直径为 40～80 μm，平均直径为 50 μm。增塑剂为邻苯二甲酸二丁酯，消泡剂为二甲基硅油。

### 1.2　复合材料的制备

首先将泡沫铝板加工成直径为 28.5 mm，高为 30 mm 的圆柱体，将加工好的泡沫铝试件放入水中煮沸 30 min，使加工过程中残留在孔隙中的杂质得以全部排除，取出泡沫铝试件控去水分，并晾晒数天，确保其中的水分全部蒸发。然后，分别用两个塑料杯盛一定量的环氧树脂和固化剂，放入数控恒温水浴锅中加热一段时间，以降低其黏稠度。为了

使环氧树脂能充分地浸透到泡沫铝中，需要向环氧树脂中分别加入增塑剂和消泡剂，本实验中设计其体积比分别为环氧树脂的 5%和 2%，随后搅拌约 30 min，待环氧树脂中气泡充分排出，变成清澈且流动性好的液体时，将加热好的与环氧树脂等量的固化剂倒入其中，并迅速进行搅拌。将搅拌均匀的混合液体倒入直径为 29 mm 的圆柱形塑料模具中，最后将加工好的泡沫铝试件缓缓推入模具，使溶液完全渗透到泡沫铝中，同时浇注三个纯环氧树脂试件。在室温下固化 24 h 后，破坏模具，取出试件，将试件两端多余的环氧树脂除去，再将试件两端在砂纸上打磨处理平整，以符合实验要求，将处理好的试件编号称重，分组备用。图 1 为纯泡沫铝及泡沫铝-环氧树脂互穿相复合材料压缩试件及破坏形貌。其中图 1(a)所示为实验用的四种试件，分别为纯泡沫铝、泡沫铝-环氧树脂以及填充 HGB 体积分数分别为 10%和 20%的泡沫铝-复合泡沫。

### 1.3　压缩实验

将准备好的试件在室温下进行压缩实验，实验仪器为长春科新试验仪器有限公司生产的 WDW3100 微控电子万能试验机，加载速率 1 mm/min，所有实验数据均由电脑自动采集。

## 2　结果与讨论

### 2.1　破坏形貌分析

由图 1(b)可见，试件在压缩过程中均出现先腰鼓状，然后破坏的情况，其主要是由压头与上下表面的摩擦所致。实验过程中，材料具有较大的压缩量，呈现出塑性材料的特性，但材料破坏时则呈现出脆性材料的规律，其原因是泡沫铝-环氧树脂和泡沫铝-复合泡沫都是典型的 IPC 材料，兼具两种组分的性能，复合后可使各组分的原有性能得到发挥，可见此类组分材料进行复合后，可互取其优势，使复合材料的性能得以提高。

### 2.2　力学性能分析

图 2 为纯泡沫铝及三种 IPC 材料压缩过程的应力-应变曲线。从图 2(a)中可看出，除在压缩初始时非常微小的非线性段外，纯泡沫铝压缩时呈现出一般的三阶段规律，即弹性阶段、平台阶段和密实阶段。第一阶段大约在 5%应变时结束，而第二阶段大约持续到 30%应变时才结束。由图 2(b)可见，泡沫铝中填充环氧树脂或复合泡沫所得的 IPC 的应力-应变曲线仍然呈现出三阶段的变化规律，但与纯泡沫铝的规律不同，IPC 的第二阶段不是平台阶段，而是直接进入密实阶段，或者称为强化阶

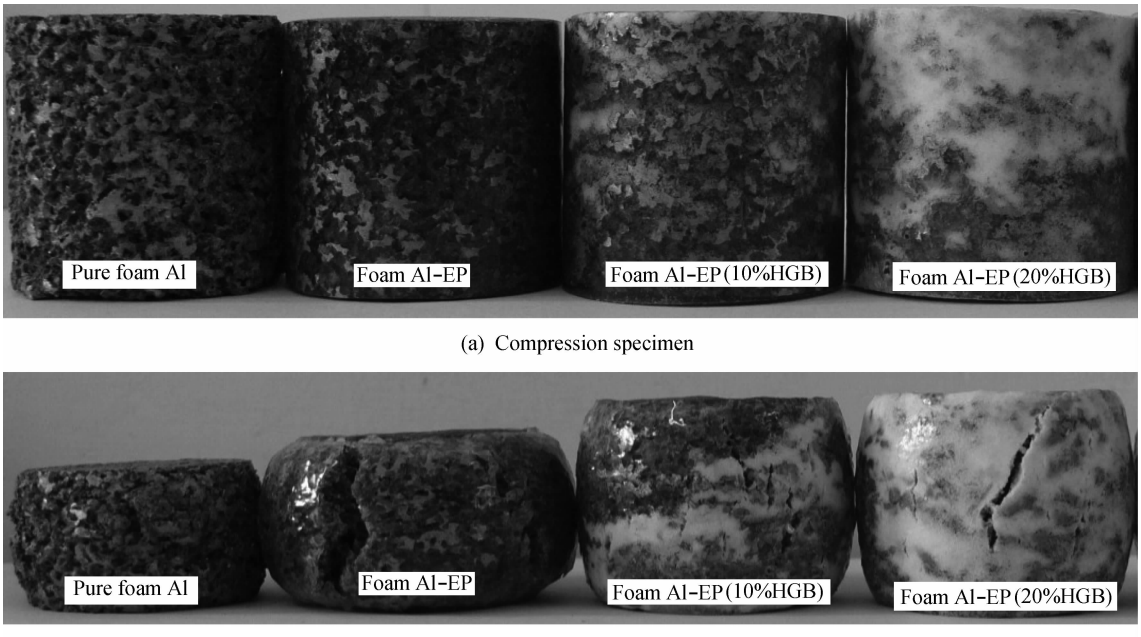


图 1　纯泡沫铝及泡沫铝-环氧树脂互穿相复合材料(IPC)的压缩试件及破坏形貌

Fig. 1　Compression specimen and their damage morphologies of the pure foam Al and foam Al - epoxy interpentrating phase composites (EP IPC)

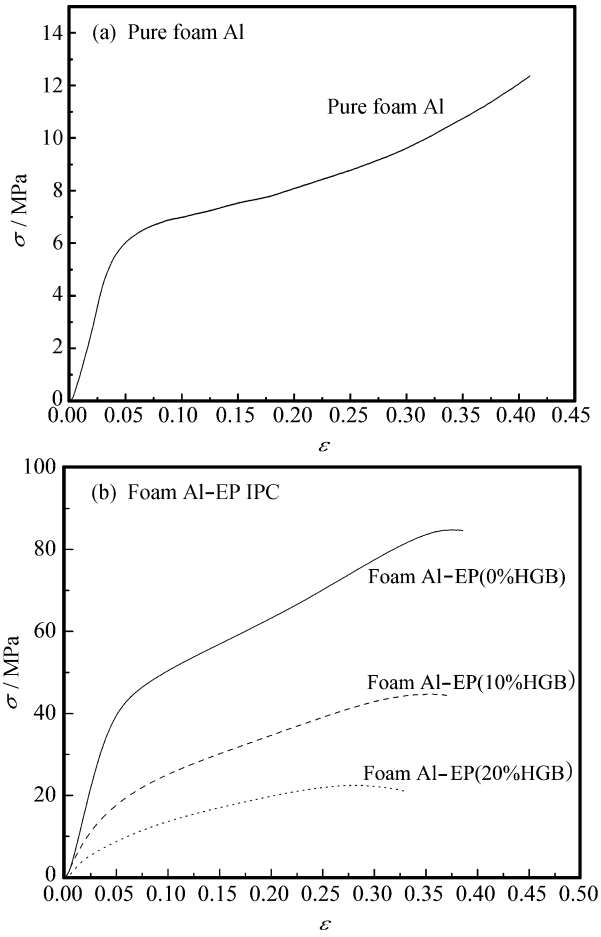


图 2　纯泡沫铝和三种泡沫铝-环氧树脂互穿相复合材料的压缩应力-应变曲线

Fig. 2　Stress - strain curves of pure foam Al and foam Al - EP interpenetrating phase composites

段，在邻近破坏前又出现极小的应力减少阶段，最后材料破坏。同时，从图 2(b)中还可明显看出，随着复合泡沫中填充的 HGB 体积分数的增加，复合材料的力学性能降低。对比两图则可明显地看出，三种复合材料的力学性能均较纯泡沫铝的有一定幅度的提高。

表 1 为包括纯环氧树脂在内的五种材料的力学性能数据。可见，纯环氧树脂的屈服极限和弹性模量最大，纯泡沫铝的最小。三种 IPC 材料的各项力学性能均随 HGB 体积分数的增加而降低。未填充 HGB 的泡沫铝-环氧树脂的力学性能较其他两种 IPC 的更大，较纯环氧树脂的稍小，但比纯泡沫铝的力学性能高出许多，说明其具有一定的强度；其弹性模量和比刚度较环氧树脂稍小，则可说明其具有一定的刚度而又较环氧树脂更具韧性，即说明它兼具泡沫铝和环氧树脂两种材料各自的性能。其他两种 IPC 的力学性能较未填充 HGB 的泡沫铝-环氧树脂的更低，但均比纯泡沫铝有一定程度的提高，其比刚度和比强度也都更大。由此可见，采用泡沫铝与环氧树脂复合可得到满足更多实际所需性能的 IPC 材料，并可根据实际需要，填充适当的 HGB 等填料，可使此类复合材料的使用范围得以大幅扩大。

## 2.3　能量吸收分析

根据实验所得应力-应变曲线，可进一步计算材料的压缩能量吸收情况。按传统公式计算，则得到应变 ε 时每单位体积吸收的能量为

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon)\,\mathrm{d}\varepsilon \tag{1}$$

采用此式可以得到以上五种材料的能量吸收情况，其中纯环氧树脂和纯泡沫铝以平台阶段结束点作为吸能的计算节点，其它三种材料没有平台阶段，以破坏前的最大应力点作为计算节点。图 3 为五种材料的能量吸收情况。可见，未填充 HGB 的泡沫铝与环氧树脂复合后，吸能能力明显提升，甚至大于纯泡沫铝与纯环氧树脂各自单独压缩时吸能的总和，结合前面的力学性能分析，可以认为未填充 HGB 的泡沫铝-环氧树脂 IPC 是一种较好的结构功能双重材料。另外，添加玻璃微珠的泡沫铝-复合泡沫材料的吸能率随玻璃微珠体积分数增加而减弱，即其吸能特性稍差。

**表 1　五种材料力学性能**

**Table 1　Mechanical properties of the five kinds of materials**

| Materials | Density/ ($g \cdot cm^{-3}$) | Elastic modulus/MPa | Yield limit/MPa | Specific stiffness/ ($N \cdot m \cdot g^{-1}$) | Specific strength/ ($N \cdot m \cdot g^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Epoxy(EP) | 1.11 | 1180 | 66.2 | 1063 | 59.6 |
| Pure foam Al | 0.78 | 169 | 5.8 | 215 | 7.5 |
| Foam Al/EP(0%HGB) | 1.51 | 1002 | 42.7 | 663 | 28.2 |
| Foam Al/EP(10%HGB) | 1.49 | 411 | 19.8 | 276 | 13.3 |
| Foam Al/EP(20%HGB) | 1.41 | 363 | 11.5 | 258 | 8.2 |

HGB—Hollow glass bead.

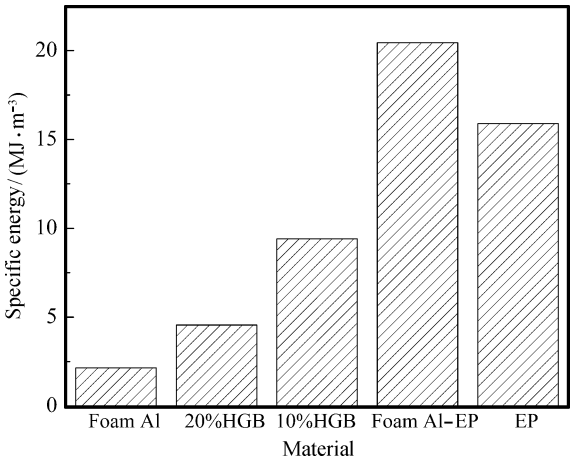


图 3　五种树料单位体积吸能

Fig. 3　Unit volume energy absorbing of five materials

## 3　有效弹性模量分析

为了方便计算上述 IPC 复合材料胞元的有效弹性模量，将泡沫铝简化为规则的网络交织相的胞元，其空隙间则填满环氧树脂，如图 4 所示，令此胞元的各边长均为单位长度 1，图中 $a$、$b$、$c$ 为铝材料尺寸与单位长度的比值。将此胞元分解为并联的四个子胞元，每一个子胞元由一种组分相或由两个组分相串联而成，然后利用等应力假设计算各个子胞元的弹性模量，再根据等应变假设得到胞元整体的有效弹性模量。假设泡沫铝各网络结构的截面尺寸相同，即 $a=b=c$，进而按串并联理论可得整体材料的有效弹性模量为

$$E=a^2E_1+(1-a)^2E_2+2a(1-a)\left[\frac{a}{E_1}+\frac{1-a}{E_2}\right]^{-1} \tag{2}$$

式中：$E$ 为复合材料的有效弹性模量；$E_1$ 为泡沫铝弹性模量；$E_2$ 为作为填充相的环氧树脂或复合泡沫的弹性模量。此式由文献[13]得出，该文中利用所得的理论值乘以泡沫铝的体积分数作为最终的复合材料的有效弹性模量，使得理论结果的误差大幅度减小。

根据以上模型可得到铝的体积分数为

$$f=3a^2-2a^3 \tag{3}$$

根据本实验所用的泡沫铝试件可测得铝的体积分数为 71%，则可由式(3)算得 $a=0.356$，代入式(2)可得理论结果，与实验结果有较大误差。出现误差的主要原因在于理想的井架结构与实际材料分布情况不一致，实际材料大小不均，且还存在大量的斜条纹，只有部分材料在压缩过程中是有效的

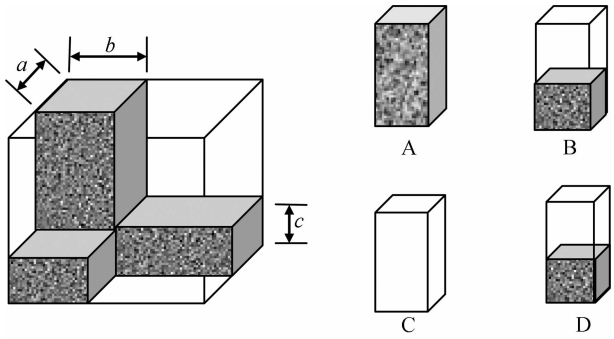


图 4　泡沫铝-环氧树脂胞元

Fig. 4　Foam aluminum - epoxy cell

承载材料，因此提出对参数 $a$ 进行修正的方法，计算出纯泡沫铝材料中的有效承载的体积分数。引入修正系数 $k$，令泡沫铝中的有效材料尺度为 $ka$，即泡沫铝的实际体积分数不变，只是有效承载的体积分数更少，且填充材料的体积分数也不变，再次利用串并联理论，可得泡沫铝复合材料的有效弹性模量的预测公式为

$$E=(ka)^2E_1+(1-a)^2E_2+2ka(1-a)(1-a+ka)^2\times\left[\frac{ka}{E_1}+\frac{1-a}{E_2}\right]^{-1}+2a(1-k)(1-a)^2E_2 \tag{4}$$

上式中的 $k$ 值可由实验结合理论分析得到，此时令式(2)中的 $E_2=0$ 的值等于纯泡沫铝压缩的有效弹性模量值，即

$$(ka)^2E_1=0.169\ \text{GPa} \tag{5}$$

则，可得 $k=0.138$。将 $k$ 值代入式(4)，再一次计算泡沫铝-环氧树脂的弹性模量，得 $E=1.0143$ GPa，与实验结果对比，其误差仅为 1.2%，可见该公式是可行的。

## 4　应力松弛分析

实验发现含不同配比 HGB 的 IPC 试件均出现了应力松弛现象，本实验中记录了材料压缩量为 8 mm时，实验停止后 100 s 内的试验力，得到应力松弛曲线如图 5(a)所示。将松弛后的应力除以其初始的最大应力进行无量纲化处理后可得剩余应力的百分比值随时间的变化关系曲线如图 5(b)所示，据此可看出各试件的松弛率。

由图 5(a)可见，三种材料均表现出明显的应力松弛现象，应力松弛趋势大致相同，开始时应力减小得比较迅速，应力松弛较快，随着时间的变化，应力松弛减缓，并且强度越高的材料相同时间内松弛掉的应力越多。由图 5(b)可看出，不含 HGB、含 HGB 体积分数为 10%和 20%的泡沫铝-环氧树

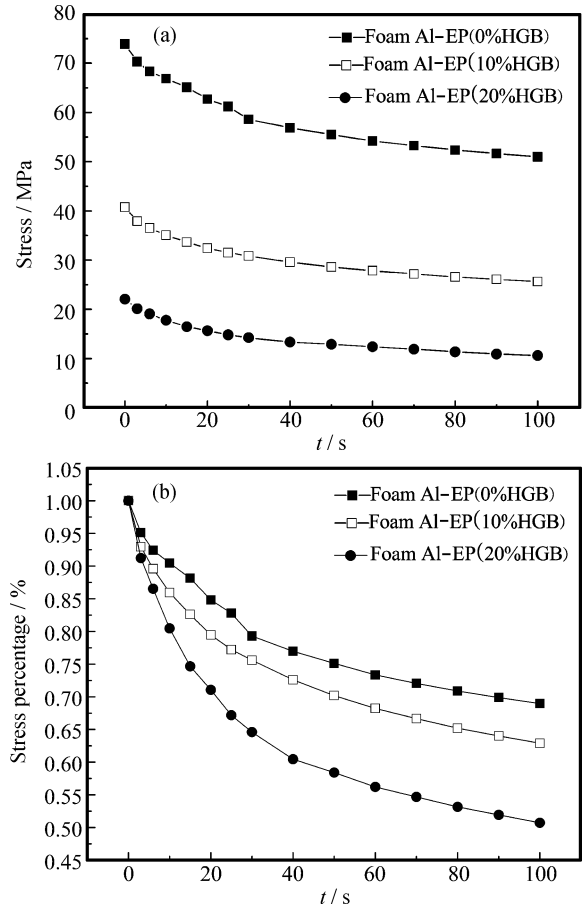


图 5　应力松弛及应力松弛百分比曲线

Fig. 5　Curves of stress relaxation and their percentage of stress relaxation

脂材料应力松弛程度分别为 31%、37% 和 49%。由此可见，随着复合材料中所含 HGB 体积分数的增加，复合材料在相同时间内的应力松弛程度增大，说明材料具有更加明显的黏弹性性能及塑性卸载能力。

## 5　结　论

（1）三种泡沫铝-环氧树脂互穿相复合材料(IPC)的有效弹性模量和屈服极限比纯环氧树脂的小，但均比纯泡沫铝有一定幅度的提高，其力学性能随着空心玻璃微珠(HGB)体积分数的增加而减小。实验结果与理论预测结果较为符合。

（2）通过对五种材料的强度、刚度、比强度、比刚度等力学性能的对比分析，发现未填充 HGB 的泡沫铝-环氧树脂 IPC 的各项力学性能较纯环氧树脂稍低，但较纯泡沫铝大许多，并且其单位体积吸能率高于纯环氧树脂和纯泡沫铝吸能率之和。

（3）三种泡沫铝-环氧树脂 IPC 均发生了明显的应力松弛现象，且应力松弛率随着材料中 HGB 体积分数的增加而增大，表现出更明显的黏弹性与塑性卸载能力。

## 参考文献：


[1]　卢天健，何德坪，陈常青，等. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用 [J]. 力学进展，2006，36(4)：517-535.
Lu Tianjian，He Deping，Chen Changqing，et al. The multi-functionality of ultra-light porous metals and their applications [J]. Advances in Mechanics，2006，36(4)：517-535.

[2]　Breslin M C，Ringnalda J，Xu L，et al. Processing，microstructure，and properties of co-continuous alumina-aluminum composites [J]. Materials Science and Engineering A，1995，195：113-119.

[3]　Zhou W，Hu W B，Zhang D. Metal-matrix interpenetrating phase composite and its in situ fracture observation [J]. Materials Letters，1999，40(4)：156-160.

[4]　王守仁，耿浩然，张景春，等. 三维网络结构增强复合材料磨损模型的研究 [J]. 摩擦学学报，2006，26(5)：456-460.
Wang Shouren，Geng Haoran，Zhang Jingchun，et al. A model of the abrasive wear of composites reinforced by three-dimensinonal network structure [J]. Tribology，2006，26(5)：456-460.

[5]　赵龙志，曹小明，田　冲，等. 界面过渡层对 SiC/Al 双连续相复合材料性能的影响 [J]. 材料工程，2006(增刊 1)：55—61.
Zhao Longzhi，Cao Xiaoming，Tian Chong，et al. Effect of casting temperature on mechanical properties of SiC foam/particle/Al hybrid composites [J]. Materail Engineering，2006 (S1)：55-61.

[6]　洪长青，韩杰才，张幸红，等. 双连续 $TiB_2$-Cu 基发汗陶瓷复合材料抗烧蚀行为 [J]. 稀有金属材料与工程，2007，36(3)：546-549.
Hong Changqing，Han Jiecai，Zhang Xinghong，et al. Ablation-resistance behavior of sweat cooling $TiB_2$-Cu matrix interpenetrating phase composites [J]. Rare Metal Materials and Engineering，2007，36(3)：546-549.

[7]　陈维平，黄　丹，何曾先，等. 连续陶瓷基复合材料的研究现状及发展趋势 [J]. 硅酸盐通报，2008，27(2)：307-311.
Chen Weiping，Huang Dan，He Cengxian，et al. Research and development perspective of co-continuous ceramic composites [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society，2008，27(2)：307-311.

[8]　卢子兴，邹　波，李忠明，等. 空心微珠填充聚氨酯泡沫塑料的力学性能 [J]. 复合材料学报，2008，25(6)：175-180.
Lu Zixing，Zou Bo，Li Zhongming，et al. Mechanical properties of polyurethane foams filled by micro-spheres[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2008，25(6)：175-180.

[9]　余　为，李慧剑，何长军，等. 空心玻璃微珠填充环氧树脂复合材料力学性能 [J]. 复合材料学报，2010，27(4)：189-194.

Yu Wei, Li Huijian, He Changjun, et al. The mechanical properties of epoxy resin filled with hollow galss bead [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(4): 189-194.

[10] Tilbrook M T, Moon R J, Hoffman M. On the mechanical properties of alumina - epoxy composites with an interpenetrating network structure [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 393(1/2): 170-178.

[11] Feng X Q, Tian Z, Liu Y H, et al. Effective elastic and plastic properties of interpenetrating multiphase composites [J]. Applied Composite Materials, 2004, 11(1): 33-35.

[12] 于英华，梁　冰，张建华. 泡沫铝基高分子复合材料制备及其性能 [J]. 辽宁工程技术大学学报，2005，24(6)：903-905.
Yu Yinghua, Liang Bing, Zhang Jianhua. Preparation and properties of foamed Al matrix compound material with high molecular material [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(6): 903-905.

[13] 于英华，梁　冰. 基于网络交织复合材料预测泡沫铝/环氧树脂复合材料的有效弹性模量 [J]. 机械工程材料，2008，32(11)：90-92.
Yu Yinghua, Liang Bing. Calculation of effective elastic modulus of foamed aluminum/epoxy resin composite based on IPC material [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008, 32(11): 90-92.

[14] 金明江，赵玉涛，戴起勋，等. 泡沫铝/PC 树脂/铝合金叠层复合材料的制备与性能研究 [J]. 材料科学与工程学报，2005，23(4)：585-588.
Jin Mingjiang, Zhao Yutao, Dai Qixun, et al. Study on fabrication and properties of Al foams/PC resin/Al alloy laminated composites [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2005, 23(4): 585-588.

[15] Liu Y, Gong X L. Compressive behavior and energy absorption of metal porous polymer composite with interpenetrating network structure [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(S): 439-443.

[16] 齐明思，张晋宁，杨　卫，等. 泡沫铝-聚氨酯复合结构的缓冲性能研究 [J]. 包装工程，2010，31(19)：6-9.
Qi Mingsi, Zhang Jinning, Yang Wei, et al. Research on shock cushioning performance of foamed aluminium polyurethane composite structure [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 6-9.

[17] Jhaver R, Tippur H. Processing, compression response and finite element modeling of syntactic foam based interpenetrating phase comprosite (IPC) [J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 499(1/2): 507-517.