http://pmse.scu.edu.cn

闭孔率及密度对聚氨酯弹性体泡沫力学性能及吸能性的影响

赵志颖，江 皓，李晓东，苏 醒，吴晓霞，张旭东，邹美帅
(北京理工大学 材料学院，北京 100081)

摘要：聚氨酯弹性体泡沫同时具备泡沫类及弹性体类材料性能，可作为高效的减振吸能材料应用于防撞击装备领域。文中制备了不同闭孔率及密度的聚氨酯弹性体泡沫，通过红外光谱分析、扫描电镜及应变率为1000～4000 s^{-1} 的压缩性能测试等，探索了材料密度、泡孔结构、应变率对应力-应变曲线及吸能性的影响。发现聚氨酯弹性体泡沫的应力及单位体积吸能量随着密度、应变率及闭孔率的增加而增加。通过研究任意给定加载速率条件下闭孔率高的聚氨酯弹性体泡沫的能量吸收图，描述了不同密度材料在压缩冲击载荷下的特性，表明了在给定的加载条件下最优吸能聚氨酯弹性体泡沫密度为400 kg/m^3。其研究对于深入理解不同微观结构及密度的聚氨酯弹性体泡沫的吸能机理及应变率依赖性行为有重要意义，对聚氨酯弹性体泡沫作为优越的抗冲击吸能材料的实际工程应用提供了理论支持。

关键词：聚氨酯弹性体泡沫；闭孔率；应变率；能量吸收
中图分类号：TQ328.3 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555(2023)12-0035-10

吸能材料在碰撞或爆炸过程中会发生塑性溃变而快速地吸收冲击能量，减缓撞击物的撞击速度，从而最大限度地降低被撞物的损伤。泡沫类是常见的吸能材料之一，主要分为金属泡沫材料及高聚物泡沫材料。泡沫类材料在受到严苛冲击加载后，通过细胞壁屈曲，溃缩损伤吸收能量[1,2]。金属泡沫具有良好的安全防护效果，然而其发生塑性变形，压实后不可被重复利用[3~6]。聚氨酯弹性体泡沫属于高聚物泡沫类，既具备泡沫类材料性能，又具备弹性体类材料性能[7~10]。弹性体材料可通过分子链解缠、断裂及裂纹扩展等形式将机械能转换为内能耗散掉[11]，卸载后可大部分恢复原状态，因此其在抗多次冲击后仍具有较好的安全防护性能[12,13]。

泡沫类制品的力学性能和泡孔结构存在一定的关联性，在受力过程中，材料内部泡孔会发生变形。目前，关于硬质聚氨酯泡沫、聚丙烯泡沫、聚氯乙烯泡沫等在各种冲击载荷下的力学性能研究较多，而密度和应变率是控制泡沫材料力学性能和能量吸收的关键参数[11,14,15]。Saha等[16]研究了聚氯乙烯泡沫和硬质聚氨酯泡沫在准静态和动态加载条件下的峰值应力和能量吸收，发现峰值应力及能量吸收强烈依赖于应变率、密度、微观结构。Xiao等[17]对硬质聚氨酯泡沫进行了一系列准静态和动态加载试验，发现硬质聚氨酯泡沫的静态压缩行为取决于密度和应变率，而其动态压缩行为显著依赖于密度，可见密度是影响其能量吸收性能的重要因素。

目前，针对不同闭孔率的聚氨酯弹性体泡沫在不同应变率下的力学性能及吸能性影响因素研究较少，制约了其在缓冲吸能方面的应用。在实际工程应用中，有必要选择合适密度的聚氨酯弹性体泡沫，以获得最佳的缓冲性能和能量吸收能力。基于上述问题，本文制备了不同闭孔率及密度的聚氨酯弹性体泡沫，该材料在动态载荷下具有轻质和高韧性的性能，并进行了室温条件下的动态压缩实验，研究不同微观结构及密度的聚氨酯弹性体泡沫的吸能机理及应变率依赖性，对聚氨酯弹性体泡沫作为优越的抗冲击吸能材料的实际工程应用提供理论支持。

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2023.0197
收稿日期：2023-04-04
通讯联系人：江皓，主要从事功能高分子材料及生物纳米材料方向的研究，E-mail: jiangh@bit.edu.cn;
邹美帅，主要从事复杂环境高性能聚氨酯减振降噪材料方向的研究，E-mail: zoums@bit.edu.cn

1 实验部分

1.1 原料与试剂

聚四氢呋喃醚二醇(PTMEG):M_n=1000,2000,万华化学集团有限公司;聚氧化丙烯三醇(EP330):M_n=5000,山东蓝星东大有限公司;4,4'-二苯基甲烷-二异氰酸酯(MDI):工业级,万华化学集团有限公司;1,4-丁二醇(BDO):分析纯,购自上海麦克林生化科技有限公司;双(二甲氨基乙基)醚(BDMAEE):分析纯,购自畔创新材料(上海)有限公司;二月桂酸二丁基锡(T12):分析纯,购自上海麦克林生化科技有限公司;匀泡剂AK7703、开孔剂M9956:分析纯,购自江苏美思德化学股份有限公司;发泡剂去离子水:自制。

1.2 制备过程

1.2.1 原料脱水:本文所制备的聚氨酯弹性体泡沫样品中,由于水是一种发泡剂和扩链剂,由于水的羟值较高,因此在本实验中需对原料的含水量进行控制,对聚醚多元醇EP330、聚四氢呋喃醚(PTMEG1000,PTMEG2000)、BDO等进行脱水预处理。在105～110 ℃温度范围及真空度低于0.01 MPa条件下脱水2 h,通过全自动微量水分测定仪测定样品中的水残留量,达到1×10^{-4}到2×10^{-4}间即满足脱水要求。

1.2.2 聚氨酯弹性体泡沫的制备:聚醚多元醇PTMEG、扩链剂BDO、催化剂(有机金属锡类T12凝胶催化剂)、匀泡剂AK7703/开孔剂M9956(通过调

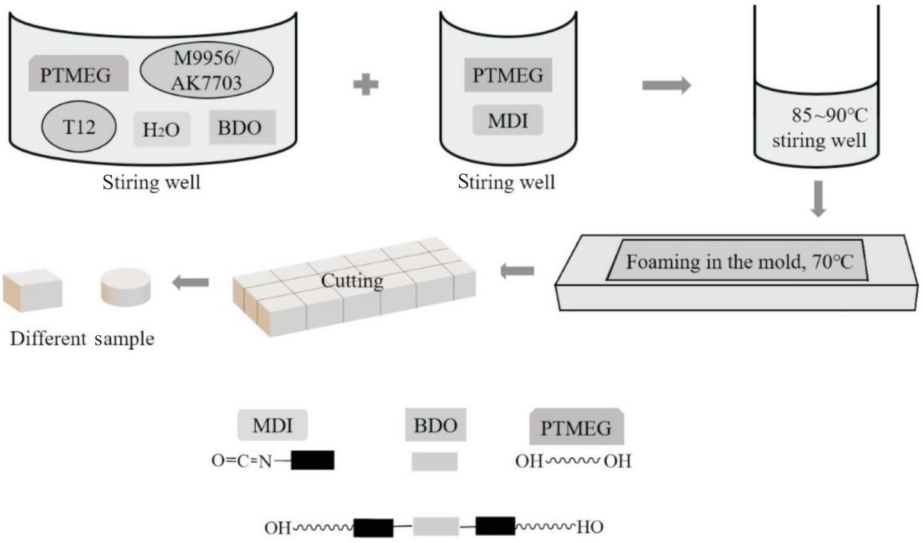


Fig. 1 Preparation of PUEF

Tab. 1 Synthetic formula of PUEF with M9956

Sample	Density/(kg·m^{-3})	w(MDI)/%	w(PTMEG1000)/%	w(PTMEG2000)/%	w(EP330)/%	w(BDO)/%	w(M9956)/%
400M	400	25.00	30.00	25.50	15.00	3.60	0.60
600M	600	24.36	29.49	26.15	15.54	3.70	0.54
800M	800	23.68	28.95	26.84	16.16	3.79	0.44

Tab. 2 Synthetic formula of PUEF with AK7703

Sample	Density/(kg·m^{-3})	w(MDI)/%	w(PTMEG1000)/%	w(PTMEG2000)/%	w(EP330)/%	w(BDO)/%	w(AK7703)/%
400A	400	25.00	30.00	25.50	15.00	3.60	0.60
600A	600	24.36	29.49	26.15	15.54	3.70	0.54
800A	800	23.68	28.95	26.84	16.16	3.79	0.44

节匀泡剂及开孔剂的用量控制弹性体泡沫的闭孔率)、发泡剂水按一定比例混合均匀,得到A组分;在装有温度计、搅拌桨的三口烧瓶中加入计量好的聚醚多元醇及MDI,在N_2保护氛围中升温至85～90 ℃,搅拌反应4 h,得到所需的预聚体B。

将A料、B料混合并搅拌均匀,然后真空除泡,浇注到涂有脱模剂的平板模具中,于70 ℃放置24 h,然后在(23±2) ℃放置7 d,得到聚氨酯弹性体泡沫,其制备过程如Fig.1所示。利用激光切割机制作试验样品,以确保几何尺寸的精度。本文使用密度为800 kg/m^3,600 kg/m^{3}及400 kg/m^{3}的试样,聚氨酯弹性体泡沫的合成配方如Tab.1及Tab.2所示。

1.3　测试与表征

1.3.1　*红外光谱分析*:采用IRAffinity-1S型傅里叶红外光谱仪(日本岛津公司),扫描范围为500～4000 cm^{-1},扫描次数为10次,分辨率为0.5 cm^{-1}。

1.3.2　*闭孔体积百分率测试*:依据国标GB/T 10799-2008《硬质泡沫塑料闭孔体积百分数测定》进行泡沫闭孔率测试。将所得每种聚氨酯硬质泡沫制成2个25 mm ×25 mm × 25 mm的正方体,使用3H-2000TD-K全自动真密度仪(贝士德科技有限公司)进行测试,取2次数据平均值。

1.3.3　*形貌表征、粒径分析*:使用场发射扫描电子显微镜(FESEM S4800,瑞士Mettler Toledo)观察原始样品的形貌。样品被切割成碎片,然后溅射镀金以进行SEM观察,扫描电镜加速电压为5.0 kV,通过ImageJ分析软件分析表面形貌图像以获得泡孔直径。

1.3.4　*动态力学性能试验*:采用一种被广泛应用于泡沫材料动力特性研究的霍普金森压杆(SHPB)装置完成动态压缩试验,如Fig.2所示。安装在入射杆和传输杆上的应变记录仪存储材料的应变历史,使用以下方法转换成应力-应变曲线[18]

$$\dot{\varepsilon} = -\frac{2C_0}{l_s}\varepsilon_r \tag{1}$$

$$\varepsilon = \int_0^t \dot{\varepsilon}\,\mathrm{d}t = \int_0^t \frac{2c_0}{l_s}\varepsilon_r \mathrm{d}t \tag{2}$$

$$\sigma = \frac{A_0}{A_s}E\varepsilon_t \tag{3}$$

式中:l_s和A_s——分别为原始样本长度和截面积;E,

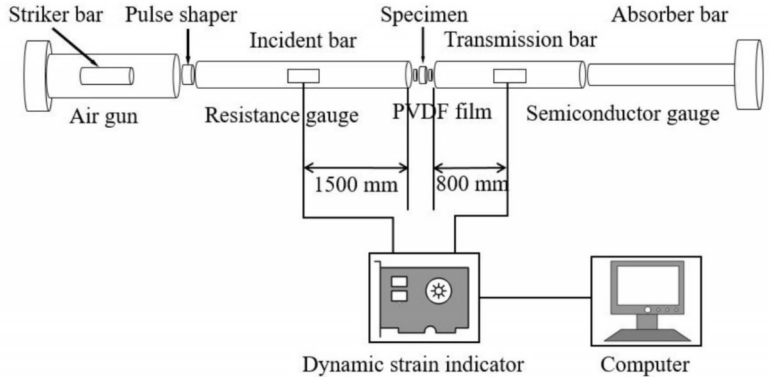


Fig. 2 SHPB experimental device[19]

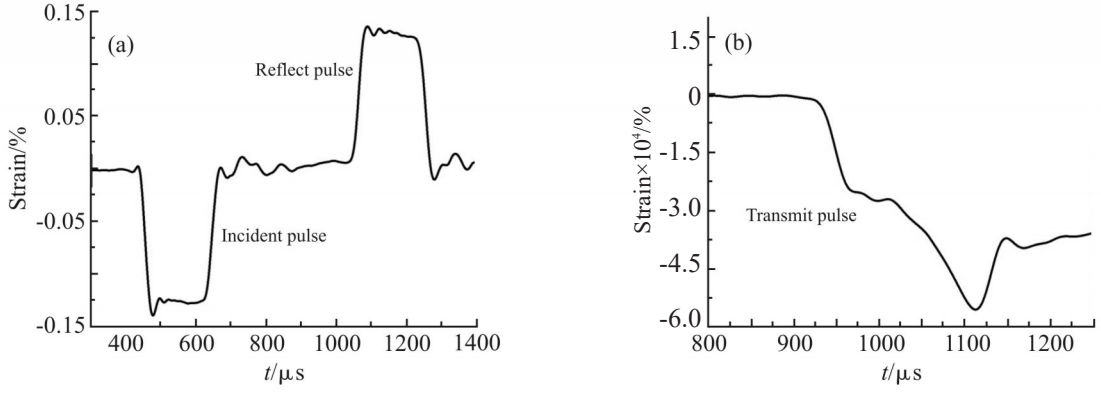


Fig. 3 Typical PUEF waveforms in SHPB experiments
(a): incident and reflected waves; (b): transmitted waves

C_0和A_0——分别为杆件的弹性模量、弹性波速和横截面面积；ε_r和ε_t——分别为杆面反射和传输的应变信号。

撞击杆、入射杆和透射杆的直径为50 mm，入射杆和传动杆的长度为3000 mm，击球杆的长度为1000 mm。棒材由铝制成，其密度和弹性模量分别为2.7×10^3 kg/m^{3}和73 GPa，试样尺寸为Φ16 mm×5 mm。

Fig.3描述了密度为400 kg/m^{3}的微孔聚氨酯弹性体在2500 s^{-1}应变速率下记录的原始波形，入射波、反射波、透射波波形清晰完整，证明SHPB实验装置能够很好地测试微孔聚氨酯弹性体泡沫的动态压缩性能。

2 结果与讨论

2.1 不同闭孔率聚氨酯弹性体泡沫红外分析

红外光谱除了可以确定物质的结构外，对其中的氢键结构也非常敏感，在研究聚氨酯体系中的氢键化作用力及微相结构方面应用广泛[20]。在聚氨酯弹性体中，氢键作用力普遍存在，形成的物理交联网络对聚氨酯弹性体的力学性能具有有效的增强作用。

红外光谱可以分析材料的构成基团。不同闭孔率及密度的聚氨酯弹性体泡沫红外谱图见Fig.4，由于基础配方一致，材料红外基团重合度高，可以清楚地看到，—NCO在2270 cm^{-1}处的特征吸收峰和—OH在3480 cm^{-1}处的特征吸收峰均消失，而在3320 cm^{-1}左右处和1729 cm^{-1}左右处分别出现了—NH和—CO的伸缩振动特征吸收峰，表明—NCO与—OH反应生成了氨基甲酸酯[21]，成功地合成了聚氨酯材料。

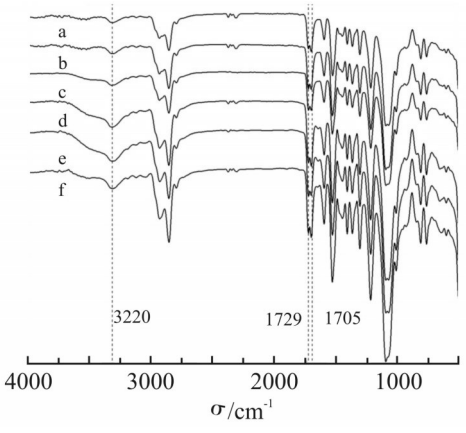


Fig. 4 Infrared spectra of PUEFs
(a): 400A; (b): 600A; (c): 800A; (d): 400M; (e): 600M; (f): 800M

聚氨酯弹性体材料硬链段聚集成有序的硬段相区，而软链段聚集成无定形区域。在聚氨酯聚合物体系中N—H中的活泼氢与C=O中的氧会形成氢键，这种氢键的强弱直接影响到硬段有序结构的强弱。游离态氨酯氨基的红外吸收峰归属于3445～3450 cm^{-1}，发生氢键作用后移到3315～3340 cm^{-1}[22]，聚氨酯弹性体泡沫的红外光谱图显示氢键化的—NH基吸收峰出现在3320 cm^{-1}附近。另外，可以观察到聚氨酯弹性体泡沫在1660～1760 cm^{-1}存在多重谱带。氨酯羰基形成氢键有3种状态，其中1690～1709 cm^{-1}归属于有序的氨酯羰基氢键，1710～1724 cm^{-1}归属于无序的氨酯羰基氢键，1725～1740 cm^{-1}归属于游离的氨酯羰基[20,22,23]。在红外光谱图中出现有序的氨酯羰基氢键的峰值1705 cm^{-1}及游离的氨酯羰基的峰值1729 cm^{-1}，表明聚氨酯弹性体泡沫中形成了微相分离结构。

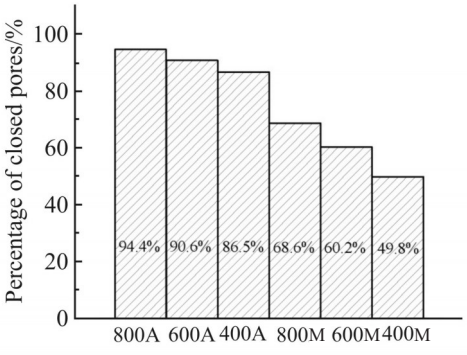


Fig. 5 Closed porosity of PUEFs

2.2 闭孔体积百分率

对聚氨酯弹性体泡沫进行闭孔体积百分率测试，数据详见Fig.5。相同密度下，加入匀泡剂AK7703的试样比加入开孔剂M9956的试样闭孔率高，加入适量的匀泡剂AK7703/开孔剂M9956，密度越大，闭孔率越高。

泡沫的稳定性主要取决于泡沫表面能状态，在发泡反应过程中，随着泡沫的生成，液体的表面积增大，体系的能量也增加。而体系的自发过程总是趋向于较低的表面能状态。气泡表面自由能(F)与表面张力(γ)及气泡的总表面积(A)之间存在如下关系

$$\Delta F = \gamma \times \Delta A \tag{4}$$

小气泡相对大气泡的形成需要更多的自由能，因此泡沫体系中总是存在着气泡破裂或小气泡并成大气泡的趋势。

匀泡剂AK7703及开孔剂M9956均是有机硅化合物系列表面活性剂，匀泡剂AK7703能有效地降

低体系的表面张力以促使成核作用,减少溶解与分散的气体之间的压差,从而减小了相邻气泡的压力差,缩小了气泡变大的趋势,使泡沫体系稳定。泡沫开孔剂M9956在发泡过程中,吸附在气泡的表面,降低了气泡的表面张力。随着凝胶和发泡的进行,在合适的条件下气体冲破壁膜,泡沫孔壁破裂,从而达到开孔的目的,提高聚氨酯泡沫的开孔率,同时使所制得的泡沫具有规则、均匀的泡孔结构。另外,聚氨酯弹性体泡沫密度越高,聚氨酯基体相对越多,气泡相对减少,气泡间由小泡变大泡的几率变小,不容易破裂,因此聚氨酯弹性体泡沫的闭孔率随密度的增加而增加。

2.3　泡孔形貌及粒径分析

聚氨酯弹性体泡沫通过扫描电镜放大后,其形貌如Fig.6所示。将显微照片导入Image J分析软件获得了图中泡孔的尺寸,其粒径分布如Fig.7所示。研究发现随着聚氨酯弹性体泡沫密度的增加,泡孔直径变小,泡孔壁膜变厚。出现这一现象的主要原因是聚氨酯弹性体泡沫试样是通过向封闭模具分别注入单位体积为800 kg/m^3,600 kg/m^{3}及400 kg/m^{3}的物料,由于模具空间一定,注入原材料越多,试样密度越大,发泡倍率变小,胞孔壁膜厚度越来越大,引入匀泡剂AK7703及开孔剂M9956的相同密度聚氨酯弹性体泡沫粒径大小及分布近似。

2.4　动态压缩试验

聚氨酯弹性体泡沫作为抗冲击材料被推广应用,会面临着高速碰撞冲击工况,为此针对高应变条件下的动态压缩性能是本文研究的重点。研究针对不同密度及闭孔率的聚氨酯弹性体泡沫在不同高应变率条件下进行SHPB动态压缩试验,试验结果详见Fig.8所示。

聚氨酯弹性体泡沫表现明显的应变率效应,应力随应变率的增加而显著增加。这主要与聚氨酯的软、硬段微相分离结构相关。在加载条件下,聚

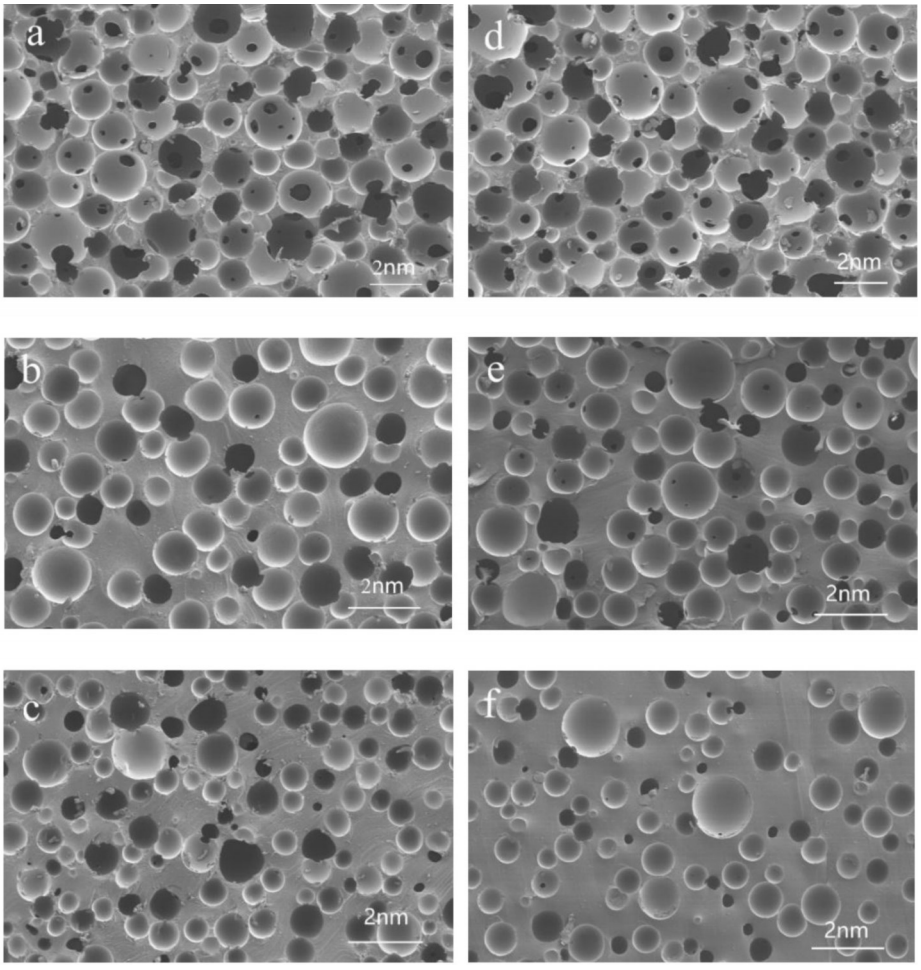


Fig. 6 SEM images of PUEFs
(a): 400M; (b): 600M; (c): 800M; (d): 400A; (e): 600A; (f): 800A

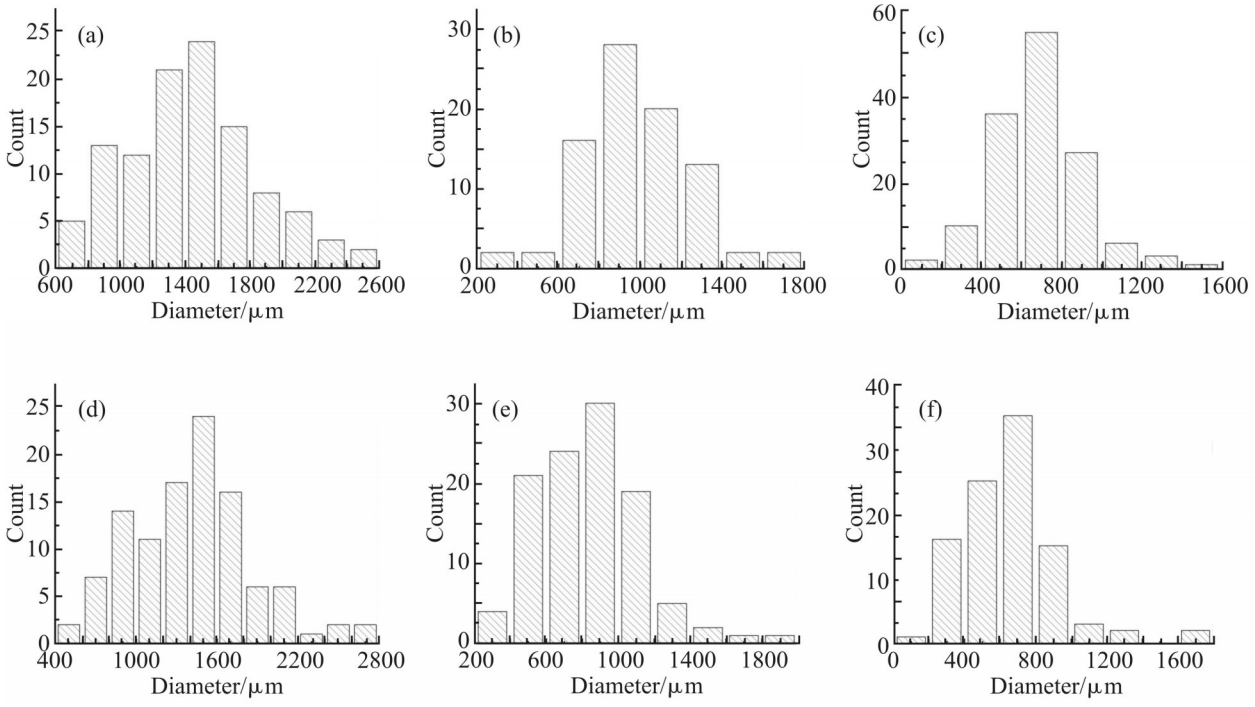


Fig. 7 Distribution of PUEF cell diameter
(a): 400M; (b): 600M; (c): 800M; (d): 400A; (e): 600A; (f): 800A

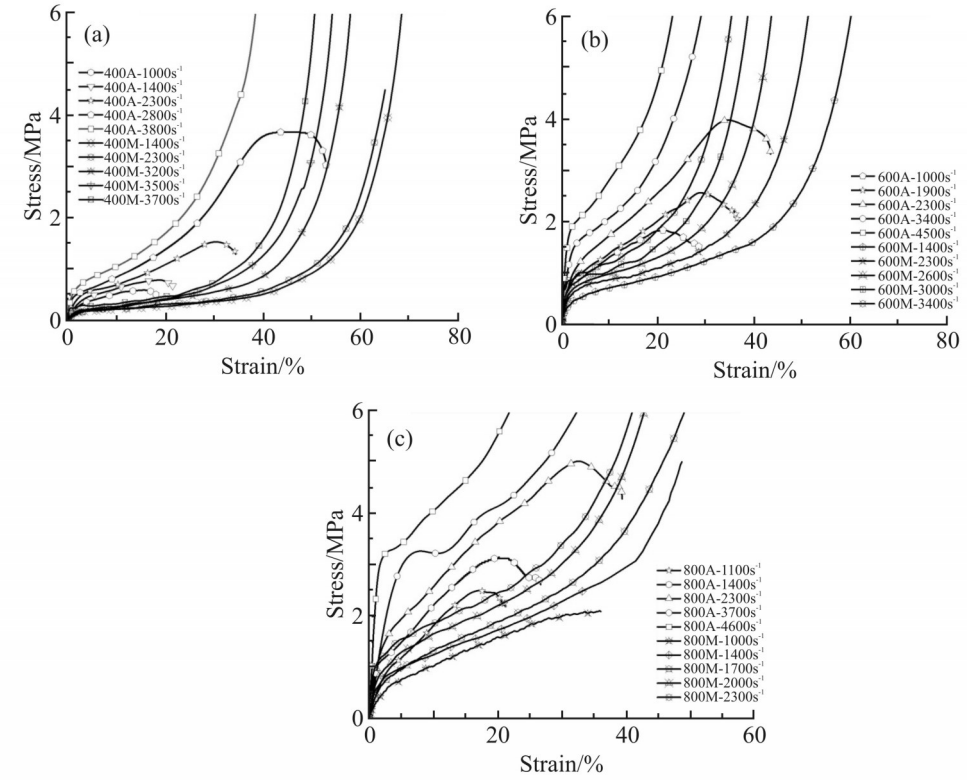


Fig. 8 Stress-strain curves of PUEF at different high strain rates
(a): 400 kg/m^3; (b): 600 kg/m^3; (c): 800 kg/m^3

氨酯弹性体泡沫中的软段相可被视为弹性“弹簧”，表现为超弹行为，分子链硬段可被视为相对较短的“刚性单元”，表现为与速率和时间相关的弹塑性行为[22]，为此，聚氨酯弹性体的非线性应力-应变行为表现出很强的滞后性、应变率依赖性。

聚氨酯弹性体泡沫压缩过程和其他泡沫类材料受压变形类似[22]，泡孔变形过程分为3个阶段：(1)初始线性弹性响应阶段；(2)大变形的平台坍塌变形阶段；(3)致密化阶段，如Fig.9所示。首先是泡孔结构发生变形，产生应力集中，随着载荷的增大，孔壁发生弯曲，弹性体分子链受力解缠、断裂，导致孔壁出现裂纹，孔洞坍塌，随后坍塌沿层状扩展，发生逐层坍塌变形，最终整个试样被压实。

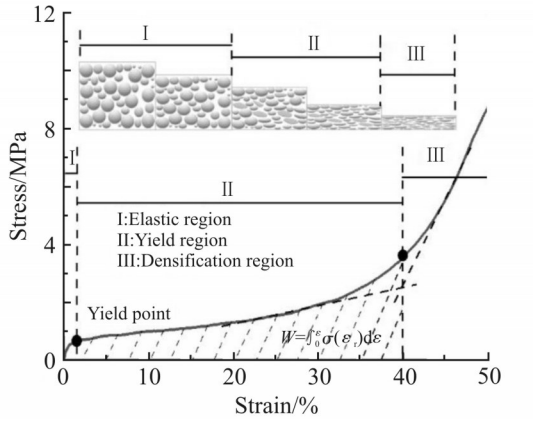


Fig. 9 Stress-strain curve of PUEF with the density of 600 kg/m^3 at the strain rate of 2300 s^{-1}

弹性阶段变形发生在很小的区域内，其应变小于0.05，此阶段的应力-应变曲线可近似为一条直线，聚氨酯弹性体泡沫基体材料受外力后表现弹性行为，孔壁弹性体分子链受力解缠，机械能转换为内能耗散掉，在此阶段弹性体泡沫的孔隙形状还未发生明显变化，孔壁也还未屈曲。

平台段的应变达到0.05以上，这一阶段主要表现为泡孔结构被压垮至屈服，弹性体分子链受力解缠、断裂，导致孔壁出现裂纹，薄弱孔壁处容易产生应力集中，形成变形带，变形带不断发展并逐层坍塌，微观变形不规则，是孔壁的弯曲和折叠共同作用的结果。正是因为聚氨酯弹性体泡沫材料受到外界冲击时易发生变形，应力能够保持在较低的水平，才能有效地吸收外界的冲击能量转变为结构中泡孔的塑性变形坍塌及基体材料分子链蠕动等各种形式耗散掉。

致密化阶段是当应变达到一定程度时，试件的孔壁全部都挤压在了一起，由于构成孔壁的基材本身受到压缩，使得应力急剧上升。

相同应变率下，不同密度的聚氨酯弹性体泡沫应力随密度的增加而显著增加，而平台阶段的应变逐渐减小，如Fig.10所示。其原因是随着密度增加，泡孔与基体的比例逐渐减小，即泡孔相对变少，基体相对变多，承载能力变强，各阶段应力值增加。曲线的平台阶段主要是泡孔受力逐级溃缩引起的，泡孔越多，平台段越长。因此，在相同应变率条件下，承载能力与密度成正比，而应变与密度成反比。

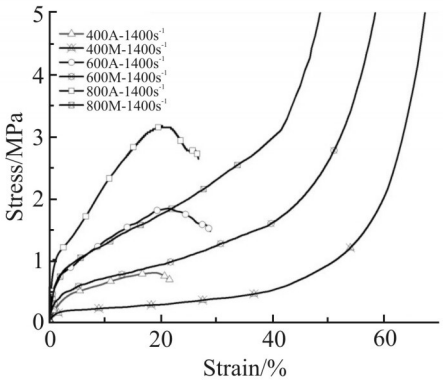


Fig. 10 Compression stress-strain curves of PUEF with different closed porosity and density at the same strain rate

聚氨酯弹性体泡沫在受力时，材料内部的泡孔会变形。显然，泡孔结构，即开/闭孔形式、泡孔大小等，是影响弹性体泡沫变形的重要参数。闭孔率不一致的相同密度弹性体泡沫，泡孔的直径及壁厚相当，主要是开/闭孔形式对力学性能产生影响。当应变率相同时，开孔结构承受应力小于闭孔结构承受应力，其原因是开孔结构泡沫具有互连的泡孔，而闭孔泡沫的泡孔被孔壁互相隔离。根据Gibson和Ashby提出的开闭孔结构模型[24, 25]，开孔结构泡沫材料的变形模式与受外力后孔棱的弯曲变形有关，而对于闭孔泡沫材料的变形模式，除了孔棱的弯曲变形外，还需要考虑孔壁模的应力及孔穴内气体压缩的两方面影响，因此开孔聚氨酯弹性体泡沫承力能力小于闭孔聚氨酯弹性体泡沫。

应变率是由SHPB装置设定的冲击力给定的，冲击力越大，应变率越大。随着动态压缩的持续进行，试样吸收冲击能，SHPB装置冲击杆的冲击速度逐渐减小，对试样的冲击力逐渐减小。在相同应变率条件下，闭孔结构承力能力比开孔结构承力能力强，Fig.10中闭孔结构聚氨酯弹性体泡沫的变形量小于开孔结构的变形量，主要是闭孔结构试样达到致密化阶段前已经将冲击能消耗掉，SHPB装置冲击杆没有足够的冲击力使其继续变形。

2.5 能量吸收评价

根据聚氨酯弹性体泡沫的应力-应变曲线可知，弹性区域吸收了非常少的能量，因为该区域相对较小（小于5%）。在平台阶段吸收的能量最多，在此阶段泡孔发生变形，从而以几乎恒定的速度吸收更多的冲击能量。因此，抗冲击材料的平台区域面积是能量吸收的重要因素。单位体积吸收的能量[17]如式(5)所示

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon \tag{5}$$

式中：ε——应变；$\sigma(\varepsilon)$——应力-应变曲线。以ε=0.15为例，计算不同密度及闭孔率的聚氨酯弹性体泡沫在不同应变率下的单位体积吸收的能量，如Fig.11所示。聚氨酯弹性体泡沫吸收的总能量随着应变率的增大呈增加趋势。在压缩过程中，弹性阶段微孔聚氨酯吸收能量较小，吸收能量的主要阶段是应力-应变曲线的屈服平台段。在ε=0.15时，各试样的平台应力如Fig.12所示。当变形量一致时，屈服平台应力随应变率的增加而增加，导致吸能量随应变率的增加而增加，屈服平台应力越大，吸能量越大。

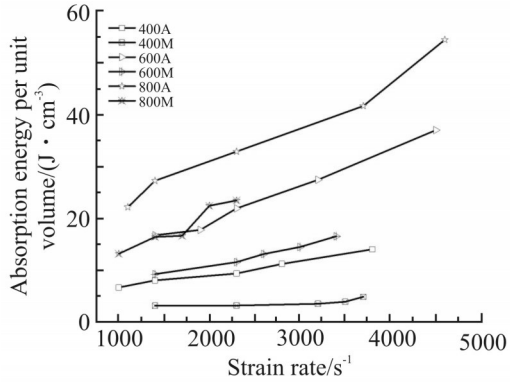


Fig. 11 Energy-absorption of PUEFs when ε=0.15

另外，单位体积吸能量也随着密度的增大呈增加趋势，随着聚氨酯弹性体泡沫密度的增加，承力能力增强，导致吸能量增加。当应变率相同时，相同密度不同闭孔率的聚氨酯弹性体泡沫，闭孔率高的聚氨酯泡沫吸能量高，这是由于开孔结构承受应力小于闭孔结构引起的。

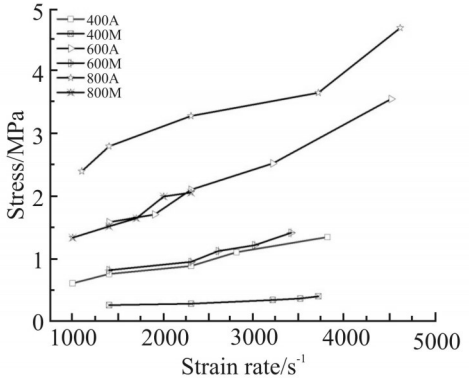


Fig. 12 Stress of PUEFs when ε=0.15

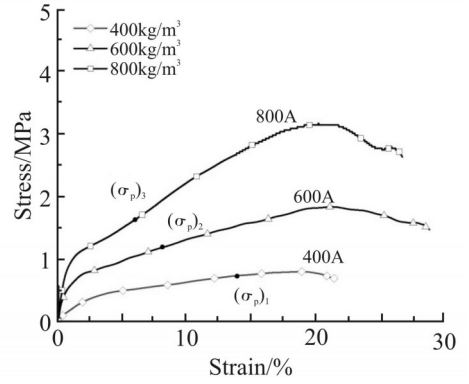


Fig. 13 Peak stress with different densities added with AK7703 when absorbing the same amount of energy

2.6 用于确定泡沫能量吸收图的分析模型

通过上述研究发现闭孔率及密度高聚氨酯弹性体泡沫吸能性好。聚氨酯弹性体泡沫作为包装防

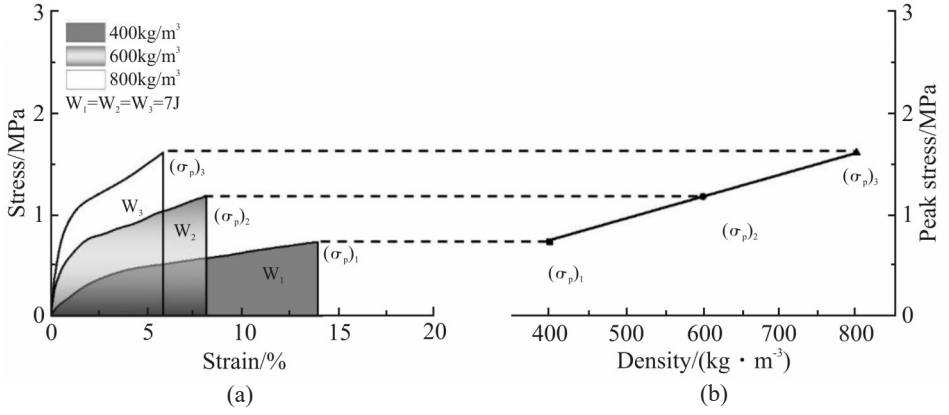


Fig. 14 Energy-absorption diagram of PUEFs with different densities added with AK7703
(a): detailed stress–strain curves; (b): peak stress variation depending on density

护工程用吸能材料应用的目的是耗散冲击过程中的动能,同时将冲击力(或加速度)保持在某个限制(临界值)以下。对于每种应用工况,都可以找到具有最佳密度值的聚氨酯弹性体泡沫。如果密度太低,则在所有能量消散之前就到达了致密区,并且冲击力(或加速度)依然较大,无法达到防护吸能目的;如果密度太大,则在吸收足够的能量之前,应力就超过了临界值,材料压缩应变仅部分利用,材料利用率下降[15]。

表征材料的能量吸收能力可以用单位体积吸能量定义,如式(5)。任意选取加载速率为7 m/s条件下,针对加入匀泡剂的所有密度试样,选取相同的能量值7 J,对应应力-应变曲线中的点$(\sigma_p)_1$,$(\sigma_p)_2$和$(\sigma_p)_3$,如Fig.13所示,上述点称为峰值应力,Fig.14显示了这些峰值应力随密度的变化以及存在的最佳泡沫密度。在吸收能量W_1之前,最低密度400 kg/m^{3}聚氨酯弹性体泡沫会产生$(\sigma_p)_1$=0.734 MPa的峰值应力;中等密度为600 kg/m^{3}的聚氨酯弹性体泡沫吸收相同的能量W_2时,会产生峰值应力值$(\sigma_p)_2$=1.177 MPa;最高密度800kg/m^{3}聚氨酯弹性体泡沫吸收相同能量W_3会产生峰值应力$(\sigma_p)_3$=1.611 MPa。说明该工况下最优吸能弹性体泡沫密度为400 kg/m^3。

3　结论

聚氨酯弹性体泡沫是优越的吸能材料,本文通过添加匀泡剂及开孔剂,制备了不同微观结构及密度的聚氨酯弹性体泡沫。通过红外分析发现制备的聚氨酯弹性体泡沫基体由于氢键化作用力形成微相分离结构。经动态压缩试验发现应力及单位体积吸能量随应变率、密度和闭孔率的增加而显著增大,密度增加,泡孔壁厚逐渐增加,承力能力增强;基体微相分离导致材料具有应变率效应;闭孔结构相对开孔结构多了孔壁膜及气体承力两因素,其承力能力大于开孔聚氨酯弹性体泡沫。通过绘制加入匀泡剂、闭孔率高的3种密度聚氨酯弹性体泡沫材料的动态压缩能量吸收图,发现在加载速率为7 m/s、吸能量为7 J的条件下,最优吸能弹性体泡沫密度为400 kg/m^3。

本研究对聚氨酯弹性体泡沫作为优越的抗冲击吸能材料的实际工程应用选型提供了重要的理论支持,进一步可针对聚氨酯弹性体泡沫用于碰撞、爆炸、弹道冲击等特殊领域用防护装备的设计及应用进行研究。

参考文献:

[1] Gupta N, Shunmugasamy V C. High strain rate compressive response of syntactic foams: trends in mechanical properties and failure mechanisms[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 7596-7605.

[2] Bisht A, Gangil B, Patel V K. Physico-compression, sliding wear and energy absorption properties of Zn/Mg infiltrated closed cell aluminum foam[J]. Materials Research Express, 2019, 6: 106583.

[3] Liang X, Luo, H, Mu Y, *et al*. Quasi- static and dynamic compression of aluminum foam at different temperatures[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28: 4952-4963.

[4] Hamidi Ghaleh Jigh B, Hosseini-Toudeshky H, Farsi M A. Low cycle fatigue analyses of open- celled aluminum foam under compression- compression loading using experimental and microstructure finite element analysis[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 797: 231-236.

[5] Al Osman O, Alkhader M, Abuzaid W. Dynamic compressive response of coated open-cell aluminum foam[C]//2022 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). Dubai, United Arab Emirates: IEEE, 2022.

[6] Belda R, Palomar M, Marco M, *et al*. Open cell polyurethane foam compression failure characterization and its relationship to morphometry[J]. Materials Science and Engineering C, 2021, 120: 111754.

[7] 刘长伟, 史颖, 马驰,等. 异氰酸酯硬段对聚氨酯结构及性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程,2021, 37(3): 79-84.
Liu C W, Shi Y, Ma C, *et al*. Effect of isocyanate hard segment on structure and property of polyurethane[J].Polymer Materials Science & Engineering,2021, 37(3): 79-84.

[8] 张阳, 周雨琪, 段文鹏,等. 硬段结构对含二硫键自修复聚氨酯性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程,2023,39(4):8-16.
Zhang Y, Zhou Y Q, Duan W P, *et al*. Effect of hard segment structure on properties of self- Healable polyurethane containing disulfide bonds[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023,39(4):8-16.

[9] 李芝华, 张译丹, 沈玉婷,等. 氟硅烷改性聚丁二烯型聚氨酯水声透声橡胶的制备与性能[J]. 高分子材料科学与工程,2021, 37(12): 9-16.
Li Z H, Zhang Y D, Shen Y T, *et al*. Preparation and properties of underwater acoustically transparent polybutadiene- based polyurethane modified by fluorosilicone[J].Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(12): 9-16.

[10] 张长川, 王伟烽, 陈蓉,等. 纳米SiO_2改性双组分水性聚氨酯的制备及性能[J]. 高分子材料科学与工程,2019, 35(8): 12-21.
Zhang C C, Wang W F, Chen R, *et al*. Synthesis and properties of nano- silica modified two- component waterborne polyurethane [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(8): 12-21.

[11] Fan J T, Weerheijm J, Sluys L J. High- strain- rate tensile

mechanical response of a polyurethane elastomeric material[J]. Polymer, 2015, 65: 72-80.

[12] Yi J, Boyce M C, Lee G F, *et al*. Large deformation rate-dependent stress-strain behavior of polyurea and polyurethanes [J]. Polymer, 2006, 47: 319-329.

[13] Cho H, Mayer S, Pöselt E, *et al*. Deformation mechanisms of thermoplastic elastomers: stress-strain behavior and constitutive modeling[J]. Polymer, 2017, 128: 87-99.

[14] Prisacariu C, Buckley C P, Caraculacu A A. Mechanical response of dibenzyl-based polyurethanes with diol chain extension[J]. Polymer, 2005, 46: 3884-3894.

[15] Linul E, Şerban D A, Marsavina L, *et al*. Assessment of collapse diagrams of rigid polyurethane foams under dynamic loading conditions[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2017, 17: 457-466.

[16] Saha M C, Mahfuz H, Chakravarty U K, *et al*. Effect of density, microstructure, and strain rate on compression behavior of polymeric foams[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 406: 328-336.

[17] Xiao Y, Yin J, Zhang X, *et al*. Mechanical performance and cushioning energy absorption characteristics of rigid polyurethane foam at low and high strain rates[J]. Polymer Testing, 2022, 109:107531.

[18] Naik N K, Shankar P J, Kavala V R, *et al*. High strain rate mechanical behavior of epoxy under compressive loading: experimental and modeling studies[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 846-854.

[19] Zhao Z, Li X, Jiang H, *et al*. Study on the mechanical properties and energy absorbing capability of polyurethane microcellular elastomers under different compressive strain rates[J]. Polymers, 2023, 15:778.

[20] Yang S, Du X, Du Z, *et al*. Robust, stretchable and photothermal self-healing polyurethane elastomer based on furan-modified polydopamine nanoparticles[J]. Polymer, 2020, 190:122219.

[21] Wang D, Li X, Ge M, *et al*. Synthesis and research of basalt microfiber-reinforced polyurethane elastomer composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139:e52440.

[22] Yilgör I, Yilgör E, Wilkes G L. Critical parameters in designing segmented polyurethanes and their effect on morphology and properties: a comprehensive review[J]. Polymer ,2015,58: A1-A36.

[23] Luo N, Wang D N, Ying S K. Hydrogen-bonding properties of segmented polyether poly(urethane urea) copolymer[J]. Macromolecules, 1997, 30: 4405-4409.

[24] 穆永亮. 闭孔泡沫铝压缩吸能性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
Mu Y L. Compressive behavior and energy absorption of closed-cell aluminum foam[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.

[25] Kornievsky A, Nasedkin A. Numerical investigation of mechanical properties of foams modeled by regular Gibson-Ashby lattices with different internal structures[J]. Materialia, 2022, 26: 101563.

Effects of Closed Porosity and Density on Mechanical Properties and Energy Absorption of Polyurethane Elastomer Foam

Zhiying Zhao, Hao Jiang, Xiaodong Li, Xing Su, Xiaoxia Wu, Xudong Zhang, Meishuai Zou
(*School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

ABSTRACT: The polyurethane elastomer foam (PUEF) has the properties of both foam and elastomer materials, so it can be used as efficient absorption material in the field of anti-impact equipment. In this study, PUEF with different closed porosity and density was prepared. The effects of material density, cell structure and strain rate on stress-strain curve and energy absorption were explored through FT-IR, SEM, compression test with the strain rate of 1000~4000 s^{-1}, etc. It is found that the stress and absorbed energy per unit volume of PUEF increase with the increasing of density, strain rate and closed porosity. By studying the energy absorption diagram of PUEF with high closed porosity under any given loading rate, the characteristics of materials with different densities under compression load were described, and it is shown that the best density of PUEF with energy absorption is 400 kg/m^3 under given loading conditions. This study could help to deeply understand the energy-absorbing mechanism and strain rate-dependent behavior of PUEF with different microstructures and densities, and also provides theoretical support for the selection of PUEF as excellent impact-resistant and energy-absorbing material in practical engineering applications.

Keywords: polyurethane elastomer foam; closed porosity; strain rate; energy absorption