

超越密实化应变: 多胞材料能量吸收性能的综合评价

王惠添, 殷莎*

北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191

* 联系人, E-mail: shayin@buaa.edu.cn

2025-07-05 收稿, 2025-09-28 修回, 2025-09-29 接受, 2025-09-30 网络版发表

国家自然科学基金(12172025)资助

摘要 多胞固体材料因其优异的能量吸收特性, 被广泛应用于缓冲、防护与冲击载荷管理等工程领域. 随着增材制造技术的发展, 各类含复杂微结构的多胞超材料或超结构可以被任意设计并制造出来, 然而如何对其能量吸收能力进行准确评价, 是微结构优化设计及材料优选的关键前提. 本文首先梳理了多胞材料在准静态压缩条件下的典型响应模式, 并系统回顾了现有以密实化应变为核心的吸能评价方法及其适用性问题. 进一步地, 引入能量吸收图、吸能效率与理想度等工具, 从应力维度补充能量吸收行为的描述, 建立起一个面向全过程、适用于多种响应形态的多维度吸能性能评价体系. 其中, 能量吸收图可用于在样本较少时对比不同结构在各应力阈值下的吸能表现; 比能量吸收结合理想度及结构的最大吸能效率, 可用于在大规模结构数据中综合判断其吸能能力. 该评价体系兼顾能量吸收总量与应力水平控制的双重需求, 适用于结构横向比较、设计优化及复杂响应判别. 本文研究结果可为轻质多胞材料在工程防护领域的优化设计及性能评价提供参考.

关键词 多胞材料, 能量吸收, 密实化应变, 压缩力学行为, 评价方法

多胞固体材料(cellular solid materials, 简称多胞材料)在受压变形过程中通常具有优异的能量吸收能力, 广泛应用于防护、缓冲和撞击能量管理等工程领域. 多胞材料在压缩过程中会经历三个典型变形阶段^[1], 包括: (1) 线性阶段: 此阶段多胞材料中的微结构主要产生弹性变形, 应力-应变曲线展现出良好的线性; (2) 平台阶段: 当达到一个临界载荷时, 多胞材料中的微结构出现失效, 如弹性体泡沫中胞壁的弹性屈曲、金属泡沫中的塑性坍塌等, 应力-应变曲线会在很大的应变范围内维持在一个较为恒定的水平; (3) 密实化阶段: 当变形进一步发展, 会转变为胞壁结构间的相互挤压及母体材料本身的变形, 应力-应变曲线急剧上升, 呈陡峭上扬趋势. 这一典型变形模式不仅使材料能够在较大变形范围内有效耗散外部能量, 同时控制作用力峰值, 从而在撞击等工况下对被保护体提供防护^[2].

基于该三阶段响应模型, 目前能量吸收性能的主流评价方法普遍采用平台阶段结束所对应的应变, 即“密实化应变”(densification strain, 也被称为压实应变、致密化应变)作为结构有效吸能终点, 通过应力-应变曲线下包络的面积来计算单位体积或单位质量的能量吸收值(如specific energy absorption, SEA). 该方法因其简洁明了而被广泛应用, 尤其适用于具有标准三阶段响应的材料. 然而, 在增材制造等技术推动下, 多胞材料结构设计策略日益多样, 越来越多的多胞结构在压缩过程中呈现出显著应力硬化、阶梯式等非标准响应形式, 其响应曲线甚至可以被按需定制. 因此, 以往的密实化应变的选取方法不再清晰, 对其物理含义的理解需要更加明确, 否则会显著影响SEA等指标的客观评价^[3].

因此, 有必要对当前以密实化应变为核心的评价

引用格式: 王惠添, 殷莎. 超越密实化应变: 多胞材料能量吸收性能的综合评价. 科学通报, 2026, 71: 355–369

Wang H, Yin S. Beyond densification strain: a comprehensive evaluation of energy absorption in cellular materials (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 355–369, doi: 10.1360/CSB-2025-5202

方法进行系统梳理,并探索更加全面、适用于更广泛响应类型的能量吸收性能评价体系。值得注意的是,目前关于结构能量吸收性能的评价方法众多,不同研究通常基于特定的响应模式或结构类型提出各自的评价方式,这在一定程度上限制了不同结果的可比性与研究成果的推广应用。基于这一现状,本文首先总结了多胞材料在准静态压缩条件下的四种典型力学响应,为后续评价方法的讨论提供基础;接着系统回顾分析了当前各类密实化应变判定方法并指出其中的适用性与局限;随后介绍了能量吸收图及两个无量纲性能指标——吸能效率和理想度,以补充传统单一指标评价方式的不足,提升横向对比的合理性。通过整合上述方法与工具,本文构建了一个涵盖全过程信息、包含多维度指标的综合能量吸收评价体系,为多胞材料的结构设计性能筛选提供更加科学的分析框架与决策依据。

1 多胞材料的常见准静态压缩力学响应

要构建一个合理的能量吸收评价体系,首先需要理解多胞材料在压缩过程中的实际力学响应。不同的微结构设计带来了丰富而多样的应力-应变曲线特征,这直接影响了能量吸收过程的形态与效率。根据多胞材料在准静态压缩工况下的应力-应变曲线的形式,其力学响应可以归纳分为以下几种类型。

(1) 标准型。材料的应力-应变曲线具有明显的线性阶段、平台阶段和密实化阶段,在平台阶段应力水平较为稳定,平台应力接近恒定或略有升降,最终平台阶段和密实化阶段的分界清晰(图1(a))。具有此种力学响应的多是变形稳定、相对密度较小的均匀多胞材料,如低密度的弯曲主导金属格栅(lattice)材料^[4,5]、低密度聚合物泡沫材料^[6]、圆管自锁结构^[7]、低密度的轻木材料^[8]等。

(2) 硬化型。硬化型的典型应力应变曲线如图1(b)

所示,其整体趋势与传统的三阶段形式接近,但是在平台阶段(尤其是阶段末尾)会表现出应变硬化,应力会持续上升进入密实化阶段,平台阶段和密实化阶段没有清晰的分界点而是退化为一个过渡区域。多数的多胞材料都会表现出一定的硬化型特征,但过渡区域较小,如泡沫材料^[9-12]、杆格栅材料^[13]、生物多胞材料^[14]等。部分材料如相对密度较大的泡沫材料、多相格栅材料^[15]等,平台阶段硬化明显,过渡区域较大。

(3) 平台波动型。部分材料在平台段不具备平稳的平台应力,取而代之,应力会出现明显的上下波动。有的材料是在线性阶段结束达到初始强度后发生明显的应力下降从而表现出应变软化(图1(c)),这通常是由于材料中的主要承力结构发生了失效,如圆管结构^[16,17]及承受面外载荷的蜂窝^[18-20]的胞壁屈曲,拉伸主导杆格栅结构的杆件屈曲等。有的材料在平台阶段还会出现持续的应力波动,对应于材料内部结构的逐级失效^[21]。

(4) 阶梯型。当材料中具有不同的微结构或具有不同的密度分布时,材料在受载过程中就会出现以结构强度由弱至强失效的趋势,从而在应力应变曲线上展现出两个甚至多个平台段,由低到高依次排列的形式,形状就像阶梯一样(图1(d))。此类型的多胞材料包括功能梯度泡沫材料^[22]、多相格栅材料^[23,24]、多阶段变形的蜂窝材料^[25,26]等。当阶梯的级数较多且每级的平台段都不足够明显时,材料的应力-应变曲线可能表现出梯度上升的态势^[27],从而基本脱离典型的三阶段形式。

上述四类力学响应清晰展示了多胞材料压缩响应的多样性,结构的实际响应还可能是以上四种基本类型的组合,而这正是目前能量吸收性能评价方法面临挑战的根源。尤其是在平台阶段和密实化阶段分界模糊的材料中,传统的以密实化应变为核心的评价方法往往难以准确反映材料的实际有效吸能能力。为此,有

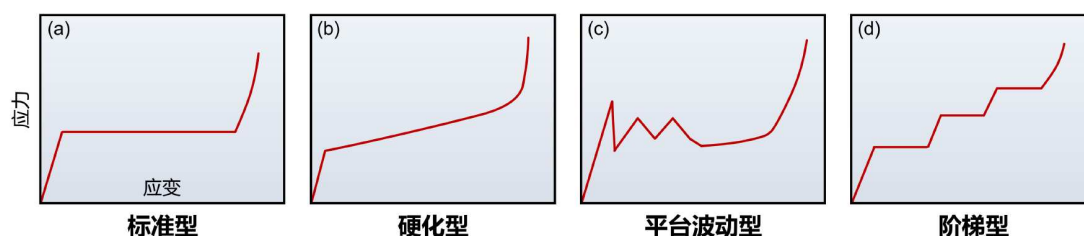


图1 (网络版彩色)四种典型的多胞材料准静态压缩力学响应。(a) 标准型; (b) 硬化型; (c) 平台波动型; (d) 阶梯型

Figure 1 (Color online) Four types of typical quasi-static compressive responses of cellular materials. (a) Standard type; (b) hardening type; (c) fluctuating plateau type; (d) stepped type

必要对主流的密实化应变判定方法进行系统梳理,并分析其不同力学响应条件下的适用性与局限性。

2 以密实化应变为核心的能量吸收评价方法

2.1 多胞材料密实化应变的定义

当多胞材料发生密实化后,材料的应力水平会急剧上升,此时尽管材料在力的作用下依然会变形,碰撞能量仍然在被耗散,但过高的应力可能会造成被保护的物体发生破坏,此时可以认为多胞材料已经失去了保护作用,这个现象被叫做多胞材料的“触底(bottom out)”。为了便于量化,基于多胞材料三阶段的变形模式,定义平台阶段结束时对应的名义应变为“密实化应变”。由于多数情况下,多胞材料在线弹性阶段的恢复弹性变形能相较于平台阶段的变形能小得多,因此多胞材料的比体积能量吸收(单位体积的能量吸收能力)可以近似看作材料压缩应力-应变曲线从0应变到密实化应变 ε_D 所包络的面积,即定义为

$$\bar{W} = \int_0^{\varepsilon_D} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (1)$$

需要指出的是,目前在多胞材料研究中“密实化应变”的定义尚不统一,在文献中存在一定歧义。Li等人^[6]曾指出很多研究中将“密实化应变”和“密实化的起始应变”(onset strain of densification)这两个概念混淆,并认为平台段结束对应的应变为“密实化的起始应变”,此时多胞材料的压缩应力开始升高,并最终达到一个极限,到达极限后的压缩相当于对多胞材料的母体材料的压缩,此时应力-应变曲线的斜率接近于母体材料的弹性模量,而这个极限对应的应变则应该被称为“密实化应变”,代表多胞材料被完全压缩密实时的应变。这种分歧在领域内的经典文献中也有所体现,Ashby等人^[1]在其经典专著*Cellular Solids: Structure and Properties*中定义密实化应变为密实化阶段的极限应变,在另一部被广泛引用的著作*Metal Foams: A Design Guide*^[28]中,则将密实化应变明确定义为平台段结束对应的应变。本文为避免歧义,并结合目前术语的使用情况考虑,统一定义“密实化应变”为多胞材料应力-应变响应中平台阶段的终点、密实化阶段的起始点。该定义与目前多数工程研究中的实际使用保持一致。

从式(1)可以看出,密实化应变的选取将直接影响材料能量吸收能力的大小。在此基础上,衍生了目前常用的用于评价材料能量吸收能力优劣的指标,其中具

有代表性的就是比质量能量吸收(SEA,根据其英文specific energy absorption也可简称为比吸能),定义为单位质量的多胞材料在密实化前吸收的能量,即

$$SEA = \frac{W}{m} = \frac{V \int_0^{\varepsilon_D} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{m}, \quad (2)$$

其中, V 和 m 分别是多胞材料的体积和质量。

需要特别指出的是,尽管比质量能量吸收(单位J/g)和比体积能量吸收(单位J/cm³)在定义上都可以归类为“比吸能”,但在绝大多数研究中,SEA都用于表示比质量能量吸收。为了避免混淆,本文中SEA专用于表示比质量能量吸收,而比体积能量吸收在文中记为 $\bar{W}$ 。在工程应用中,不同使用场景对两类“比吸能”的关注重点有所不同:当应用场景对吸能材料的体积较为敏感,即需要在有限空间内实现高能量耗散时,比体积能量吸收 $\bar{W}$ 更为重要;当更关注结构的轻量化效果时,比质量能量吸收SEA则是更直接的评价指标。两者满足关系:

$$SEA = \bar{W} / \rho, \quad (3)$$

其中, ρ 代表多胞材料的等效密度。这也意味着,当比较的两种或多种材料等效密度相同时,SEA与 $\bar{W}$ 得到的性能排序结果将保持一致。

密实化应变的选取只有在材料的力学响应属于标准化三阶段型时才几乎没有疑议,而对于其他大部分的响应类型来说,其选取是模糊的。已有的研究中存在许多密实化应变的选取方法,而使用不同的选取方法最终得到的材料能量吸收能力可能具有显著的差异,因此有必要对密实化应变的选取方法做一个总结梳理,并且讨论其各自的合理性。以下将介绍目前文献中出现的密实化应变选取方法并做出简要的评述。

2.2 密实化应变的选取方法

(1) 根据实验结果反推。多胞材料在受压变形过程中,其相对密度持续增加。在任一名义应变 ε_m 下,材料的瞬时相对密度(instantaneous relative density) $\bar{\rho}_m$ 与当前应变 ε_m 之间满足关系:

$$\varepsilon_m = 1 - \frac{\bar{\rho}_0}{\bar{\rho}_m} = 1 - \frac{1}{\bar{\rho}_m} \left(\frac{\rho_0}{\rho_s} \right), \quad (4)$$

其中, $\bar{\rho}_0$ 表示多胞材料的初始相对密度, ρ_0 表示多胞材料的初始等效密度, ρ_s 为多胞材料母体材料的密度。

Maiti等人^[10]提出,多胞材料在被压缩至临界瞬时相对密度 $\bar{\rho}^*$ 时开始发生密实化,即密实化应变 ε_D 满足

如下经验公式:

$$\varepsilon_D = 1 - \frac{1}{\bar{\rho}^*} \left(\frac{\rho_0}{\rho_s} \right). \quad (5)$$

这一临界瞬时相对密度 $\bar{\rho}^*$ 对于同一类多孔材料是近似相同的,可以从实验总结得出.通过观察不同初始相对密度的同一类多孔材料的压缩试验结果,可以发现当该类多孔材料的初始相对密度高于某一临界值时,其压缩应力-应变曲线不再具有明显的平台段,即只发生密实化阶段的变形,因此可以将该临界值视为此类材料的临界瞬时相对密度 $\bar{\rho}^*$.以泡沫材料为例,他们提出弹性泡沫的临界瞬时相对密度约为0.33,而塑性泡沫约为0.5^[10].根据该临界瞬时相对密度及材料的初始相对密度,就可以通过式(5)计算得到一类多孔材料的密实化应变.这种方法具有较清晰的判据,但是密实化应变的确定需要基于大量的实验数据,尤其是在针对新结构的多孔材料的研究中,难以确认某一种结构的密实化应变而做大量不同相对密度的实验,因此在实际研究中采用得较少.

(2) 应力-应变曲线出现上扬的拐点.由于在密实化阶段材料的应力会出现明显而快速的上升,因此在一些研究中会直接将密实化应变定义为应力-应变曲线“明显上升”^[8]或“陡峭上升”^[29]前对应的应变.然而,曲线的上扬在什么程度可以达到“显著”“陡峭”,并不具备明确的判定标准,因此这种选取方法存在一定的主观性.在一些研究中,作者对选取准则做出进一步的限定或数学化的表达,如Vural等人^[30,31]选用应力-应变曲线开始出现显著上扬前的局部极小值作为密实化阶段的起始点,但其本质依然是凭借主观选取曲线的显著上升点.

(3) 应力-应变曲线平台阶段切线与密实化段的切线交点.部分研究中^[32,33]选取平台阶段应力-应变曲线的切线(或渐近线)和密实化阶段曲线的切线(或渐近线)两者的交点所对应的应变作为密实化应变.由于切线(或渐近线)的选取并不具备标准,尤其在密实化阶段应力-应变曲线通常呈现出斜率连续变化的趋势,因此切线(或渐近线)的位置即使稍微变动,也会对最终密实化应变的值产生较大的影响.

(4) 最大吸能效率所对应的应变.吸能效率最初作为评价泡沫材料能量吸收能力的指标之一被提出^[11,12,34],其定义为材料在变形至应变 ε_m 时的变形能,与同等最大应力水平的理想泡沫材料(压缩应力恒定,变形应变范围为0~1的材料,应力-应变曲线为一条水

平线段)完全变形后所能吸收的能量的比值,即

$$\eta = \frac{\int_0^{\varepsilon_m} \sigma d\varepsilon}{\sigma_m(\varepsilon_m)}, \quad (6)$$

其中, $\sigma_m(\varepsilon_m)$ 代表应变范围 $[0, \varepsilon_m]$ 内的最大应力(以下简称 σ_m).由于多孔材料在达到密实化之前通常都保持着较平稳的平台应力,在平台阶段材料的吸能效率会持续上升.而当其达到最大值开始下降时,意味着应力上涨的速率超过了进一步变形所额外吸收的能量,材料的吸能“性价比”开始下降,因此可以将吸能效率达到最大值时视作材料开始发生密实化.

图2(a)展示了使用最大吸能效率确定压实应变及确定比能量吸收值的示意图. Li等人^[6]使用最大吸能效率方法分别计算了几种聚合物泡沫的密实化应变,发现利用此种方法对标准三阶段型和硬化型力学响应的多孔材料都能给出一致且合理的值.与主观判断选取应力上扬点或切线交点法相比,基于最大吸能效率法得到的密实化应变通常略小,但更具重复性与客观性.

能量效率法有定义清晰的计算方法,同时具备明确的物理意义,是目前多孔材料中使用最多的密实化应变选取标准,被广泛运用在格栅材料^[36]、蜂窝材料^[20]、生物多孔材料^[37]等各种形式多孔材料的研究中.但值得注意的是,在不少研究中^[38-40]吸能效率的定义式将式(6)中的分母部分写为 $\sigma(\varepsilon_m)$,即应变为 ε_m 时对应的应力大小而非此前的最大应力.当材料的力学响应是标准三阶段型和硬化型时,利用两种方法计算得到的吸能效率基本没有区别,但当材料的响应为平台波动型时可能会出现明显的不同.对比两种定义,可以发现使用变形过程的最大应力作为分母更加符合能量吸收材料提供应力保护的物理意义,因此本文认为式(6)所定义的吸能效率及相应计算得到的密实化应变更加合理.

2.3 密实化应变的局限性

尽管目前已有较为公认的密实化应变选取方法,但随着能量吸收结构设计策略的多样化,依赖密实化应变来定义材料的能量吸收能力逐渐显示出局限性.例如,在多相格栅结构的相关研究中^[4,15,23,35],由于力学性能较弱的基体相通常较早发生屈曲等大变形,而增强相在较大应变下才开始显著吸能.其代表性应力应变曲线和对应的吸能效率-应变曲线如图2(b)所示^[35],基于最大吸能效率所确定的密实化应变(ε_1)往往早于

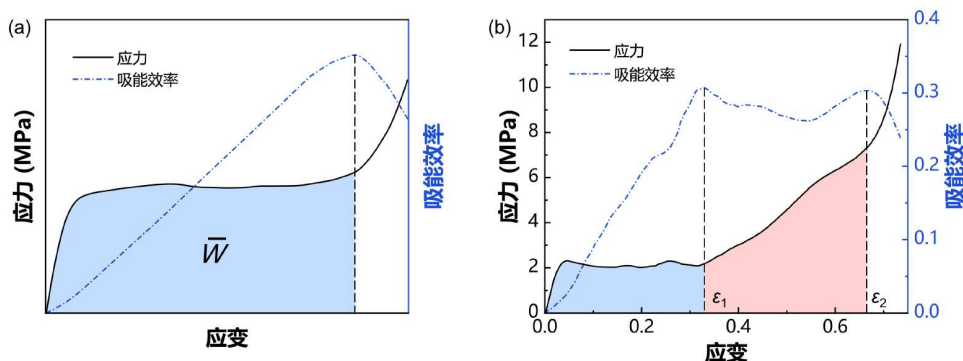


图 2 (网络版彩色)(a) 利用最大吸能效率选取密实化应变; (b) 比较基于吸能效率最大点与最后局部极值点对应应变的能量吸收评估结果^[35]
Figure 2 (Color online) (a) Determination of densification strain based on maximum energy absorption efficiency; (b) comparison of energy absorption evaluations based on the strain corresponding to the maximum energy absorption efficiency and the last local extremum point^[35]

增强相的显著变形阶段, 从而无法覆盖多相作用带来的额外能量吸收. 类似的问题也出现在具有阶梯型力学响应的结构中, 此类材料的吸能效率-应变曲线会出现多个局部峰值, 而全局的最大值并不一定总出现在最后一个局部峰值处. 此时, 如果仅依据最大吸能效率确定密实化应变, 可能会忽略后续阶段的能量贡献.

为应对上述问题, 部分研究者尝试修正最大吸能效率的选取原则, 如图2(b)中选取吸能效率-应变曲线的最后一个峰值对应的应变(ϵ_2)作为密实化应变^[35], 部分研究也会选择吸能效率-应变曲线最后一次出现斜率骤降前的应变作为密实化应变^[23,41,42]. 然而, 这类方法虽然在一定程度上扩展了密实化应变的适用性, 却也削弱了“最大吸能效率”本身所具备的清晰物理意义与数学定义, 使得密实化应变的选取重新引入了较强的主观判断成分.

另一些研究中则直接在对不同结构的能量吸收性能时, 按照统一的终止应变计算能量吸收总量. 所选取的应变值的大小各异, 从较小的0.3^[43]到中等的0.5^[44,45]再到较大的0.7^[46]均能找到案例. 选取应变值的依据也并不统一, 如Zhang等人^[19]在对多层级自相似铝蜂窝面外压缩性能的研究中, 采用名义应变0.6作为终止应变, 从实验曲线上看结构此时明显处于平台阶段; Zhu等人^[46]在金属自锁管吸能结构的研究中, 以0.7作为计算能量吸收性能的终止应变, 该应变对应的应力已经产生了明显的上升. 此外, 如果该终止应变选取得过小, 可能会夸大结构初始强度对材料整体能量吸收能力的影响.

从能量吸收行为的物理本质出发, 应变本身并不决定结构的能量吸收能力. 在实际受载过程中, 结构的

变形不会因达到某一固定应变而自动终止, 其能否有效吸收外部能量, 取决于在加载过程中的应力响应: 要么材料完整地耗散了施加的能量; 要么其反作用力超过了被防护目标所能承受的限值, 导致保护的失效. 因此, 决定结构有效能量吸收能力计算区间的标尺应该是应力而非应变.

在标准三阶段响应的多胞材料中, 之所以以密实化应变为终点计算能量吸收值能较好地反映多胞材料的吸能性能, 根本原因在于平台阶段结束后, 应力迅速上升, 极易超过系统所能承受的安全应力范围; 同时, 此时应力-应变曲线斜率较大, 在材料达到应力阈值前增加的能量吸收对应的面积相对较小, 因此即使略去这部分, 也不会对整体能量吸收能力的判断产生显著偏差. 然而, 当结构响应出现应力硬化、平台阶段与密实化阶段界限模糊, 或者密实化阶段应力上升速率不再剧烈时, 达到应力阈值前的能量吸收总量将对结果造成显著影响, 这种评价方法就不能准确对材料的能量吸收能力做出预估了.

基于上述分析, 以密实化应变为预设终点的吸能性能评价方法在复杂力学响应下难以正确反映结构的真实能量吸收能力, 其局限性根源在于评价方式对应力维度的忽视. 因此, 将应力因素显式引入能量吸收评价体系, 在评价中同时考虑应力水平与能量吸收值, 对于建立更加科学、具备工程适应性的评价体系具有重要意义.

3 引入应力维度的能量吸收性能综合评价方法

上述的分析指出, 以密实化应变为终点计算能量

吸收的评价方法虽然具备简便性和可比性,但在面对复杂变形响应的多胞材料时存在显著局限.然而,在当前大量研究中,由密实化应变计算的SEA指标仍被作为评估材料能量吸收能力的主要甚至唯一标准.这种做法虽便于量化比较,但也掩盖了一个关键问题:为实现较高SEA所付出的应力代价未被纳入考虑.因此,本文尝试在传统评价视角的基础上引入应力维度作为补充,建立更具物理意义和工程可比性的能量吸收性能评价体系.

3.1 利用能量吸收图表征全过程能量吸收

Ashby等人^[1,10]在对泡沫材料的研究中提出了使用能量吸收图(energy-absorption diagrams)来评价泡沫材料的能量吸收能力.能量吸收图以材料变形过程中的应力作为横坐标,该应力对应的比体积能量吸收值作为纵坐标.能量吸收图中的应力和能量吸收还可以用母体材料的弹性模量 E_s 进行标准化,从而提高能量吸收图对不同母体材料结构的适应性.之所以选用应力和能量作为能量吸收图的两个维度,是因为材料用作能量吸收用途时必须至少考虑的两点核心要素:对于所施加的能量,材料要能够在其有效变形范围内将其耗散;在变形过程中,材料的反力不能过大使得内部的被保护物破坏.通过从能量-应力两个维度构建的能量吸收图,可以较全面地评判该材料是否能够胜任某一特定的能量吸收任务.

能量吸收图的一个重要用途是为给定的能量吸收场景从一类多胞材料中选择出最合适材料.如果将不同相对密度的同一类多胞材料(指结构和变形模式均相同,如塑性坍塌为主导变形模式的闭孔泡沫材料)的能量图曲线放在一起,如图3所示的聚甲基丙烯酸酯(PMI)泡沫能量吸收图^[1],以某一特定应力做一条竖直线,该竖直线会与这一系列曲线相交,在所有交点中可以找到最高的一个,意味着在该应力阈值下,可以明确找到一个特定相对密度的多胞材料具备该类材料中最高能量吸收潜力.同理,以某一能量值做一条水平线,这条水平线会与这一系列曲线存在一个对应峰值应力最小的交点,意味着当需要吸收特定量的能量时,总能找到一个特定相对密度的多胞材料,能够以最小的应力水平将这些能量吸收.如果为这一系列曲线画一条包络线,包络线以下的区域能够找到特定相对密度的材料达到这一吸能要求,而包络线以上的区域则超出了这类材料的能量吸收能力.

使用能量吸收图来评判多胞材料的能量吸收能力最大的好处是其直观地给出了材料在变形全过程的能量吸收能力,这为更合理地评价不同材料的能量吸收能力提供了一个有效的途径. Koohbor等人^[27]在对具有梯度密度的泡沫材料的能量吸收能力研究中,通过能量吸收图对比了沿厚度密度梯度变化的泡沫材料和同等密度的均匀泡沫材料的能量吸收能力.如图4所示,两者的能量-应力曲线存在一个交点,将两者能量吸收性能优劣划分为两个区域:在应力阈值范围低于交点对应的应力时,均匀泡沫性能优于梯度泡沫,而当应力

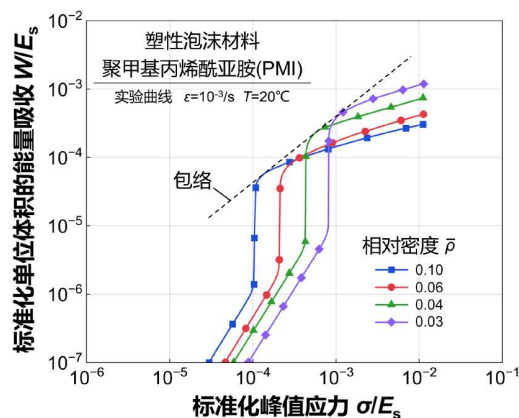


图3 (网络版彩色)不同相对密度的PMI泡沫的能量吸收图^[1]

Figure 3 (Color online) Energy absorption diagram of PMI foams with a variety of relative densities^[1]

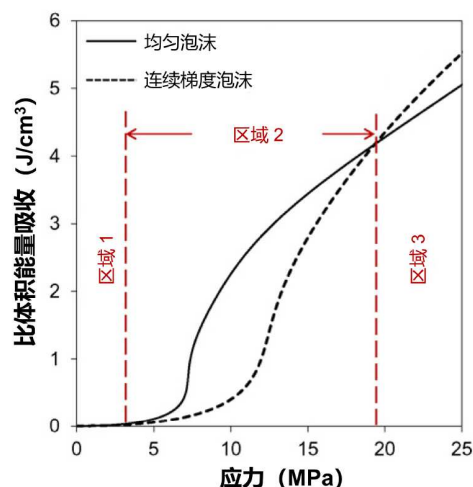


图4 (网络版彩色)利用能量吸收图对比均匀泡沫与连续梯度泡沫的能量吸收能力^[27]

Figure 4 (Color online) Comparing energy absorption capacity between uniform and continuously graded foams using energy absorption diagram^[27]

范围超过焦点对应的应力时, 梯度泡沫的性能优于梯度泡沫. Rahman等人^[47]在梯度蜂窝结构面内压缩实验中也观察到了类似的交叉趋势. 这类结果表明, 结构能量吸收性能的优劣并非固定, 而是与使用时所承受的应力水平密切相关, 而这种变化趋势正是传统依赖单值指标的评价体系所难以揭示的.

此外, 由于能量吸收图是采用应力而非应变作为评价标尺之一, 有时甚至会得到与采用密实化应变计算材料的性能完全相反的结论. 图5(a)展示了某研究^[48]中两种杆格栅结构A与结构B(原文中对应结构编号分别为NPR与TBD)在准静态压缩下的应力-应变响应, 两者采用相同的母体材料, 具有相近的相对密度和质量, 在准静态压缩下均展现出三阶段较为清晰的硬化型力学响应. 依据最大吸能效率法确定密实化应变并据此计算能量吸收值, 结构B的能量吸收性能略优于结构A, 这是原文献所给出的结论. 然而, 当把相同数据绘制为能量吸收图(图5(b))后会发现, 在整个应力范围内, 结构A的能量-应力曲线均在结构B之上, 这意味着在同等应力阈值下, 结构A具有更高的能量吸收潜力, 或在吸收相同量的能量时产生更低的应力水平. 根据这一评价方法, 结构A在该实验所包含的应力范围内都优于结构B, 结论与传统方法正好相反. 这一结果表明, 将材料能量吸收能力简化为一个基于终点截断的指标可能导致性能评估失真. 相比之下, 能量吸收图提供了不依赖任意终止点、同时考察能量承载能力与应力水平的连续视角, 能够更全面地反映材料的能量吸收本质.

尽管能量吸收图可在全过程范围内直观呈现不同结构在各应力水平下的能量吸收能力, 但其作为图示工具, 在进行大规模结构比较或性能筛选时存在一定局限. 特别是当对比对象数量较多时, 判断的效率不高. 这也在一定程度上解释了为何该工具在相关研究中并未得到广泛应用. 因此, 在评价体系中仍有必要引入可直接比较、同时能够反应应力维度的数值型指标.

3.2 无量纲能量吸收性能指标: 吸能效率、理想度

重新审视“密实化应变”之所以被广泛接受并作为能量吸收性能评价的关键参数, 其根本原因在于: 应变作为一个无量纲量, 具有良好的普适性与可比性. 无论材料类型或结构形式如何, 均可以定义其应变响应过程, 并据此划分不同的变形阶段, 从而构建相对统一的性能评价体系. 这一特性也启示我们, 在拓展现有能量吸收评价体系时, 应优先考虑引入同样易于定义、物理意义明确且便于比较的无量纲参数^[49].

基于上述考虑, 本文引入两个无量纲参数: 吸能效率 η 和理想度(ideality) I , 从应力维度刻画能量吸收能力, 并与表征能量吸收总量的指标(如SEA)协同使用, 以构建包含多维度的综合能量吸收评价体系. 由于接下来的视角将不从密实化应变出发, 因此重新定义任意应变 ε_m 下的SEA为

$$SEA(\varepsilon_m) = \frac{V \int_0^{\varepsilon_m} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{m}. \quad (7)$$

在2.2节中已经展开叙述了吸能效率的定义. 图6(a)直观展示了吸能效率定义的几何意义, 其数值的大小

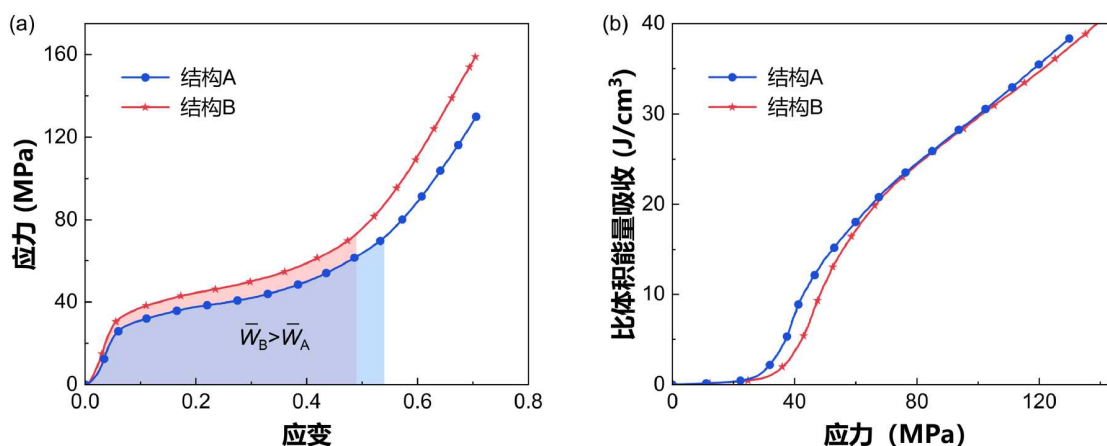


图5 (网络版彩色)两种不同的能量吸收能力评价方法对比. (a) 利用密实化应变对应的能量吸收值评价^[48], (b) 利用能量吸收图评价
Figure 5 (Color online) Comparison of two different evaluation methods for energy absorption capacity. (a) Evaluation based on energy absorbed up to the densification strain^[48], (b) evaluation using energy absorption diagrams

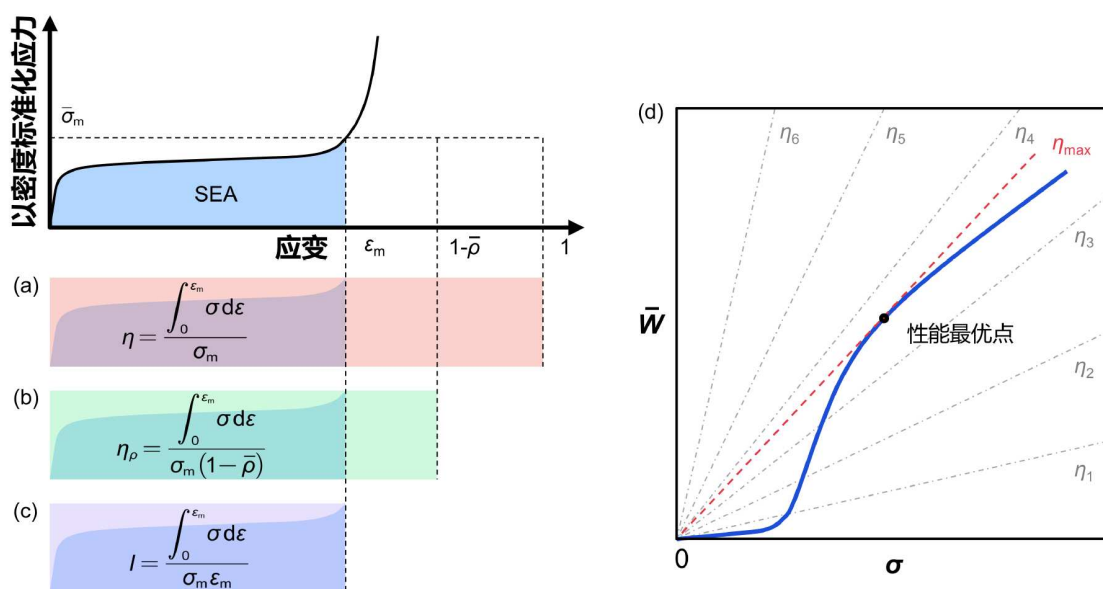


图6 (网络版彩色)吸能效率(a)、修正吸能效率(b)及理想度(c)等参数的几何意义。(d) 能量吸收图框架下吸能效率的物理意义
Figure 6 (Color online) The geometric meaning of (a) energy absorption efficiency, (b) the modified energy absorption efficiency, and (c) ideality. (d) The physical meaning of energy absorption efficiency within the framework of energy-absorption diagrams

为曲线下包络的面积与底为1、高为 σ_m 的矩形面积之比。吸能效率的物理意义还可以放在能量吸收图的框架下更清晰地阐明。如图6(d)所示,在以比体积能量吸收为纵轴、最大应力为横轴的二维坐标空间中,吸能效率代表某一点与原点连线的斜率。由此,能量-应力空间可以被多条过原点的直线划分成若干区域,其中吸能效率越大的区域越靠近能量-应力二维空间的左侧,表明材料能够以更小的应力代价实现能量耗散,这直观地体现了具有较大吸能效率的材料在应力维度的优势。当给出材料的能量-应力曲线时,过原点向曲线做切线,该切线对应的斜率即为这个材料的最大吸能效率,而切点即为该材料考虑应力维度的能量吸收效率最优点。从这个角度出发,吸能效率的大小能够直接反映材料能量吸收性能在应力维度上的优劣。然而,目前多数研究仅将吸能效率视作确定密实化应变的辅助参数,而对最大吸能效率数值本身的关注不足,其中的一个原因在于其数值的绝对大小不适合用于材料之间的横向对比。图7(a)展示了部分多胞材料的最大吸能效率随其相对密度的分布^[4,22,35,47,50-64],可以发现当相对密度增大时,其最大吸能效率的上限有逐渐下降的趋势。这是因为低相对密度的材料会在更大的应变范围内保持平稳的应力,在计算吸能效率时具有天然的优势。这就使得不同相对密度的结构在对比最大吸能效率

率的绝对数值大小时不能直接反映它们在同类材料中的性能优劣。为了将相对密度对最大吸能效率的影响刨除,可以对最大吸能效率做一个简单的修正,定义修正吸能效率为

$$\eta_{\rho} = \frac{\int_0^{\varepsilon_m} \sigma d\varepsilon}{\sigma_m(\varepsilon_m)(1-\bar{\rho}_0)} \quad (8)$$

从物理含义上来讲,对于一个初始相对密度为 $\bar{\rho}_0$ 的多胞材料,其可能发生非密实化变形的应变最大不会超过其空隙率 $(1-\bar{\rho}_0)$,即将其材料内部的空隙全部挤压闭合时的应变^[1,2]。修正吸能效率也可以被理解为多胞材料的能量吸收值与同等相对密度下的理想多胞材料所能吸收的能量之间的比值,其几何意义如图6(b)所示。图7(b)给出了多胞材料的最大修正吸能效率随相对密度的分布,可以发现刨除相对密度的影响后,最大吸能效率的上限处在相近的水平。修正后的最大吸能效率能够量化评价某一多胞材料从应力维度适用于能量吸收用途的程度。但需要特别注意的是,对于相对密度较大的材料,由于其平台阶段已不明显,结构的应力-应变曲线会接近为一条斜率逐渐上升的平滑曲线,此时最大吸能效率对应的应变甚至会高于其空隙率,若依然使用修正会放大其最大吸能效率。综合考虑下,该修正应尽量运用在相对密度小于0.4的情况。

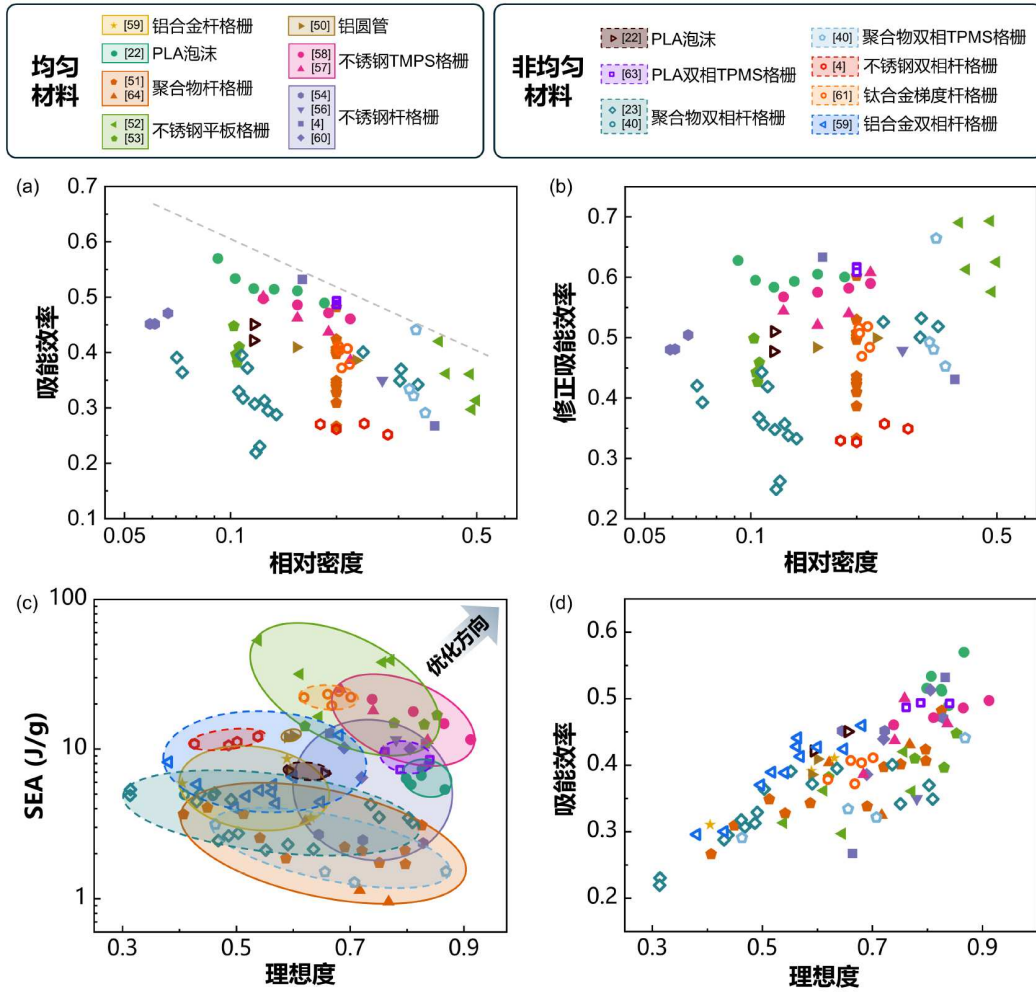


图 7 (网络版彩色)多种多胞材料的吸能效率(a)及修正吸能效率(b)随相对密度的分布; 多胞材料在比质量能量吸收(SEA)-理想度参数空间中的分布情况(c)及理想度与吸能效率之间的分布关系(d). 图例中标号为数据来源参考文献编号

Figure 7 (Color online) Distributions of various cellular materials: (a) energy absorption efficiency and (b) modified energy absorption efficiency with respect to relative density; (c) positioning of cellular materials in the specific energy absorption (SEA)-ideality parameter space and (d) distribution relationship between ideality and energy absorption efficiency. Numbers in the legend indicate reference sources

为了便于横向对比, 可以借助另一个物理意义及数值的大小更明确的参数理想度 I . 理想度 I 是多胞材料变形至 ε_m 时所吸收的能量与能产生同等最大应力 σ_m 的恒应力理想吸能材料变形至 ε_m 所吸收能量的比值^[11,12,34], 即

$$I = \frac{\bar{W}(\varepsilon_m)}{\sigma_m \cdot \varepsilon_m} = \frac{\int_0^{\varepsilon_m} \sigma d\varepsilon}{\sigma_m \varepsilon_m}. \quad (9)$$

从几何意义上看, 理想度 I 描述了应力-应变曲线在某一特定应变下与理想化的矩形吸能响应的形状偏离程度, 曲线越趋近于该矩形, 理想度越接近1(图6(c)). 式(9)还可以变换成如下形式:

$$I = \frac{\int_0^{\varepsilon_m} A \sigma d\varepsilon / \varepsilon_m}{A \sigma_m} = \frac{\bar{P}(\varepsilon_m)}{P_{\max}(\varepsilon_m)}, \quad (10)$$

其中, $\bar{P}(\varepsilon_m)$ 代表结构变形至 ε_m 过程中的平均反力, $P_{\max}(\varepsilon_m)$ 则代表变形至 ε_m 过程中的峰值力. 该形式定义的参数在一些研究中也被称为压溃力效率(crushing force efficiency, CFE)^[16,19,65], 与理想度本质上是同一个参数. 式(10)的定义更直观地描述了理想度的物理意义, 理想度越高表示应力响应越平稳, 结构在实际应用中越能有效避免过载引发的保护失效. 理想度是变形过程中的瞬时指标, 与SEA类似都需要明确计算的终止点. 应力-应变曲线上的任意一点均可生成一对理想

度和SEA值,表征该工况下的能量吸收总量与应力水平,两者结合实现能量-应力维度下对变形过程中任意工况的能量吸收性能表征。

为了说明理想度与SEA的协同评价意义,图7(c)汇总了多篇文献中不同结构的准静态压缩实验数据。其中若文献中明确给出了SEA的计算区间,则采用其所给出的终止应变对应的SEA并据此确定理想度;若原文未说明终点选取方式,则统一按照最大吸能效率对应应变为终点,计算对应的SEA与理想度。从图中可以观察到,在同一类结构中SEA与理想度之间大多存在一定程度的负相关趋势,反映出能量吸收总量的提升通常伴随着应力均匀性的下降。对比非均匀结构和均匀结构的数值分布,可以发现非均匀结构的理想度的整体水平低于均匀结构,这说明非均匀结构中更易出现“高吸能-高应力”的代价型提升SEA的现象,可能违背能量吸收材料提供应力保护的基本要求。SEA-理想度分布图可用于综合对比材料的能量吸收性能。对于SEA相近的材料,理想度较高(图7(c)右侧)者具有更优的应力控制能力;对于理想度相近的材料,SEA较大(图7(c)上方)者可吸收更多能量。因此,在以提升能量吸收性能为目标的结构设计中,右上区域应作为优化方向。

吸能效率与理想度在数学形式上较为接近,但二者在物理意义及评价视角上存在显著差异。首先,对吸能效率来说,其全局最大值具有明确物理意义,在引入相对密度的修正后,最大吸能效率数值的绝对大小可以量化反映材料从应力维度适用于能量吸收场景的程度,从而成为一个独立的全局性指标。相比之下,理想度在加载过程中虽然也可能出现全局最大值,其对应的应变往往小于最大吸能效率对应的应变,但这一点所代表的工况并不具备明确的实际应用价值^[10]。另一方面,将图7(c)中的数据点对应的理想度与吸能效率之间的分布关系绘制为图7(d),可以发现理想度与吸能效率之间大致呈现线性的正相关关系(该结论仅限选取的应变大于最大吸能效率对应的应变时),表明理想度在此区间可以部分体现吸能效率的数值大小,相比之下理想度具有更加直观的数值范围和物理意义。因此,理想度更适合作为阶段性瞬时指标,来描述任意应变终点下的应力均匀性,并与SEA搭配构成能量-应力二维的评价框架。

根据所收集的材料性能分布,材料的最大修正吸能效率与理想度由卓越到差被大致划分为6个等级,对

应的数值划分如表1所示,以辅助研究人员快速判断材料能量吸收性能的优劣。需要指出的是,在理想度的定义框架下,理想度为0.5等价于理想线弹性结构(恒定刚度弹簧)在给定应力水平下的吸能效率。因而,当某一结构的理想度低于0.5,意味着其单位应力所吸收的能量不及线弹性响应,表明其吸能性能存在明显缺陷。应当说明的是,本划分为基于本文所收集数据的经验性分段,仅作为快速性能评估的参考,并不构成通用标准。未来,随着更大规模、更加完备的数据库的建立,可从统计学角度对区间划分进行更精确的修正与完善。

3.3 多胞材料能量吸收能力的综合评价体系

借助以上引入应力维度的能量吸收评价工具,可以构建一个面向多胞材料不同力学响应特征的多维度能量吸收性能综合评价体系。

首先,当对比的结构数量较少时,推荐使用能量吸收图进行全过程能量吸收性能分析。能量吸收图能够清晰展示不同结构在不同应力阈值下的能量吸收总量,评价结论直观且物理意义明确,特别适用于揭示非标准响应结构的变形阶段特征与性能优势。

其次,在面对样本数量较多的情况下,为实现可量化且公平的横向性能比较,应联合使用SEA(或比体积能量吸收)、最大吸能效率与理想度来共同表征材料的能量吸收能力。三者分别从吸能总量、效率最优性与应力均衡性三个角度全面评价结构性能,适用于结构筛选、数据库构建与工程应用中的性能判别。

对于SEA的计算终点选取,本文建议优先采用最大吸能效率对应的应变作为计算终点,此时所评估的是结构在能量-应力二维框架下最高效工况的能量吸收性能。对于某些在最大吸能效率之后仍具有显著能量耗散能力的结构,可将SEA的计算终点适当延后,以

表 1 最大修正吸能效率 η_{p_max} 与理想度 I 参数在不同区间范围内的性能等级划分

Table 1 Performance level classification of modified energy absorption efficiency (η_{p_max}) and ideality parameter (I) across different ranges

性能级别	最大修正吸能效率 η_{p_max}	理想度 I
卓越	$\eta_{p_max} \geq 0.65$	$0.9 \leq I < 1.0$
优秀	$0.55 \leq \eta_{p_max} < 0.65$	$0.8 \leq I < 0.9$
标准	$0.45 \leq \eta_{p_max} < 0.55$	$0.7 \leq I < 0.8$
一般	$0.35 \leq \eta_{p_max} < 0.45$	$0.6 \leq I < 0.7$
较差	$0.25 \leq \eta_{p_max} < 0.35$	$0.5 \leq I < 0.6$
差	$\eta_{p_max} < 0.25$	$I < 0.5$

更全面反映结构的吸能总量. 此时, 建议研究者明确说明终点选取的具体判据或原则, 以确保评价结果的透明性与可复现性. 但为了避免“高吸能-高应力”现象的出现, 所选取的SEA对应的理想度 I 建议不小于0.5. 无论选取何种终点, 都应同时给出该终点下的理想度和结构的最大吸能效率, 以辅助判断SEA值的有效性与合理性, 避免对吸能性能产生误导性解读. 需要强调的是, 在本体系中, 应变只是一个计算标尺, 而非评价的逻辑起点. 因此, 计算终止点并非唯一, 研究人员可在合理的区间内选取若干个具有代表性的点并映射于SEA-理想度图中, 来反映材料在不同工况下的能量吸收表现, 并通过更大层面的材料横向对比来评判工况是否高效. 为了清晰展示该评价体系的适用性及其对传统方法局限性的改进, 表2总结了利用本文提出的体系评价多胞材料能量吸收性能的具体步骤和相应的评价效果, 并与基于密实化应变的评价方法进行了对比.

该综合评价体系能够为多胞材料的横向性能比较、响应合理性判断及结构优化设计提供更具物理意义和可操作性的评价依据. 通过多指标协同, 不仅可提升评价的准确性与公平性, 也更契合吸能结构在实际应用中对吸能总量与应力保护的双重需求.

值得指出的是, 近年来已有学者提出了针对吸能结构的多指标评价体系. 如Yu等人^[3,17,49]针对圆管结构构建的包含EEA (effective energy absorption)、IPCF (initial peak crush force)、ULC (undulation of load-carry capacity)等指标在内的综合评价体系, 并指出此类方法同样可以推广至多胞结构的分析. 这类探索为多维度评价提供了重要参考, 也为本研究的体系构建奠定了基础. 在此基础上, 本文提出的评价体系与现有方法相比, 差异化优势主要体现在以下几个方面.

(1) 超越密实化应变的能量-应力框架. 以往能量吸收性能的评价大多以密实化应变为关键节点. 尽管密实化应变在本质上考虑了应力因素, 但由于表述方式源于“应变”角度, 往往使应力维度的考量被弱化. 上

述所提及的EEA等指标在多个方面具有重要意义, 但其计算仍然依赖于对密实化应变的预先界定. 新评价体系的核心在于构建能量-应力二维框架, 不再将密实化应变作为评价的前提或核心, 而是将应变仅作为计算过程中的标尺. 通过这一转变, 能量吸收行为能够直接在“能量总量-应力水平”的坐标空间中刻画, 从而更清晰地揭示能量承载能力与应力代价之间的关系.

(2) 指标的系统化与互补化. 以往能量吸收图、最大吸能效率、理想度等指标往往孤立使用, 未形成体系化认知. 本体系在能量-应力二维框架下将其统一纳入, 实现了全过程对比(能量吸收图)、应力适用性判据(最大吸能效率), 以及应力均匀性衡量(理想度)的互补结合.

(3) 对多胞材料的普适性和工程适用性. 多胞材料种类繁多, 本文所提出的评价体系在指标选择上突出整体性能, 弱化对局部响应的刻画或对特定材料属性的限制, 从而更适合于不同响应模式和材料体系下的统一评价. 这种普适性使本体系能够支撑跨结构、跨材料的横向比较与工程应用中的快速筛选.

近年来仍然陆续有新的能量吸收性能评价指标被提出, 为从不同角度刻画能量吸收行为提供了更多可能. 未来的研究有必要对新旧指标的适用性进行定量评估, 以进一步完善并拓展多胞材料能量吸收性能的综合评价体系.

4 结论

本文围绕多胞材料在准静态压缩工况下的能量吸收性能评价问题, 系统梳理了现有主流评价方法的适用性与局限, 并引入应力维度的补充工具, 构建了一个面向不同结构响应特征的多维度综合评价体系. 主要结论如下:

以密实化应变为终点计算SEA并据此评价结构能量吸收能力的方法, 仅适用于具有典型三阶段响应特征的多胞材料. 对于平台阶段与密实化阶段分界不

表 2 本文评价体系与基于密实化应变的评价方法的对比

Table 2 Comparison of the evaluation steps between the proposed framework and the conventional method based on densification strain

	本文评价体系	基于密实化应变的评价方法
评价步骤	利用能量吸收图进行小样本性能对比; 计算最大吸能效率; 基于最大吸能效率计算SEA, 并计算对应理想度; 选取其他代表性点, 计算对应SEA及理想度, 作为结构的其他工况点; 利用SEA-理想度图将结构所有工况点与其他材料横向对比性能	根据应力-应变曲线选取密实化应变; 由密实化应变计算SEA等性能指标; 通过对比SEA等指标的数值大小判断性能优劣
评价效果	实现全过程、多工况的性能表征; 同时表征能量总量与应力水平; 以应力为导向, 不依赖密实化应变的选取	仅体现单一工况性能; 侧重能量总量, 对应力水平的反映不足; 依赖密实化应变的确定

明确的结构,这一方法的适用性显著下降,可能引入误判,建议结合能量吸收图对全过程吸能行为进行辅助分析。

能量吸收图可作为结构横向对比的重要辅助工具,适用于揭示材料在不同应力阈值下的吸能能力,有助于识别传统单点评价方法在非标准响应结构中的失效与局限。

SEA、最大吸能效率 η 与理想度 I 三者应协同使用作为量化指标:建议优先以最大吸能效率对应应变为终点计算SEA,并同时给出该点的理想度和结构的最大吸能效率,三者联合可从吸能总量、应力适用性与应力均衡性多个维度全面表征结构性能。

本文提出的评价体系具有良好的适用性与工程价值,可为多胞材料的性能筛选、横向比较与设计优化提供科学依据,并为后续构建更广泛适用的吸能性能标准体系奠定基础。需要说明的是,本文提出的评价体

系主要针对准静态压缩工况构建,所采用的指标均基于准静态响应定义。考虑到能量吸收材料在工程中常服役于碰撞、冲击等动态环境,而材料的应变率敏感性、惯性效应等可能导致其力学响应与准静态行为存在显著差异,吸能效率、理想度等指标在动态载荷下的适用性仍需进一步验证。未来研究应系统开展动态压缩实验,结合数值模拟与理论分析,量化速率敏感性对理想度、吸能效率等指标的影响,以拓展本评价体系在动态工况下的适用性与可靠性。

随着结构功能集成与制造技术的不断发展,未来多胞材料的形貌将更加复杂,响应行为也将更为多样。借助增材制造技术,可实现结构尺度、形状与材料分布的多层次自由设计;而人工智能方法的引入,则有望实现基于多维评价指标的结构性能预测与智能化反向设计。结合本文所提出的评价体系,这些新兴技术将在能量吸收结构设计与性能优化中发挥更大潜力。

参考文献

- Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solids: Structure and Properties. Cambridge: Cambridge University Press, 1997
- Yu T X, Lu G X, Zhang X. Energy Absorption: Mechanical Behavior and Plasticity Analysis of Structures and Materials (in Chinese). Beijing: Science Press, 2019 [余同希, 卢国兴, 张雄. 能量吸收: 结构与材料的力学行为和塑性分析. 北京: 科学出版社, 2019]
- Yu T X. Impact energy absorbing devices based upon the plastic deformation of metallic elements (in Chinese). Adv Mech, 1986, 16: 28–39 [余同希. 利用金属塑性变形原理的碰撞能量吸收装置. 力学进展, 1986, 16: 28–39]
- Yin S, Guo W, Wang H, et al. Strong and tough bioinspired additive-manufactured dual-phase mechanical metamaterial composites. J Mech Phys Solids, 2021, 149: 104341
- Wang Z, Cao X, Yang H, et al. Additively-manufactured 3D truss-lattice materials for enhanced mechanical performance and tunable anisotropy: simulations & experiments. Thin-Walled Struct, 2023, 183: 110439
- Li Q M, Magkiriadis I, Harrigan J J. Compressive strain at the onset of densification of cellular solids. J Cell Plasts, 2006, 42: 371–392
- Chen Z, Wu Q, Yang H, et al. A periodic dissipative system with self-locking capacity. Int J Impact Eng, 2022, 166: 104233
- Koohbor B, Mallon S, Kidane A, et al. The deformation and failure response of closed-cell PMDI foams subjected to dynamic impact loading. Polym Testing, 2015, 44: 112–124
- Avalle M, Belingardi G, Montanini R. Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram. Int J Impact Eng, 2001, 25: 455–472
- Maiti S K, Gibson L J, Ashby M F. Deformation and energy absorption diagrams for cellular solids. Acta Metall, 1984, 32: 1963–1975
- Gruenbaum G, Miltz J. Static versus dynamic evaluation of cushioning properties of plastic foams. J Appl Polym Sci, 1983, 28: 135–143
- Miltz J, Gruenbaum G. Evaluation of cushioning properties of plastic foams from compressive measurements. Polym Eng Sci, 1981, 21: 1010–1014
- Meza L R, Das S, Greer J R. Strong, lightweight, and recoverable three-dimensional ceramic nanolattices. Science, 2014, 345: 1322–1326
- Chen Y, Zhang K, Yuan F, et al. Properties of two-variety natural luffa sponge columns as potential mattress filling materials. Materials, 2018, 11: 541
- Guo W, Huang Y, Ritchie R O, et al. Dissipative dual-phase mechanical metamaterial composites via architectural design. Extreme Mech Lett, 2021, 48: 101442
- Zhang W, Yu T X, Xu J. Uncover the underlying mechanisms of topology and structural hierarchy in energy absorption performances of bamboo-inspired tubular honeycomb. Extreme Mech Lett, 2022, 52: 101640
- Li Z, Yu T X, Wan L, et al. Non-dimensional parameters governing the crashworthy performance of tubes with complex cross-sections. Int J Mech Sci, 2024, 278: 109476

- 18 Sherman J, Zhang W, Xu J. Energy absorption performance of bio-inspired honeycombs: numerical and theoretical analysis. *Acta Mech Solid Sin*, 2021, 34: 884–894
- 19 Zhang W, Yin S, Yu T X, et al. Crushing resistance and energy absorption of pomelo peel inspired hierarchical honeycomb. *Int J Impact Eng*, 2019, 125: 163–172
- 20 Yin S, Wang H, Hu J, et al. Fabrication and anti-crushing performance of hollow honeytubes. *Compos Part B-Eng*, 2019, 179: 107522
- 21 Heintl P, Körner C, Singer R F. Selective electron beam melting of cellular titanium: mechanical properties. *Adv Eng Mater*, 2008, 10: 882–888
- 22 Duan Y, Zhao X, Du B, et al. Quasi-static compressive behavior and constitutive model of graded foams. *Int J Mech Sci*, 2020, 177: 105603
- 23 Bian Y, Wang R, Yang F, et al. Mechanical properties of internally hierarchical multiphase lattices inspired by precipitation strengthening mechanisms. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023, 15: 15928–15937
- 24 Liu C, Pham M. Spatially programmable architected materials inspired by the metallurgical phase engineering. *Adv Mater*, 2024, 36: e2305846
- 25 Lu H, Wang X, Chen T. Design and quasi-static responses of a hierarchical negative Poisson's ratio structure with three plateau stages and three-step deformation. *Composite Struct*, 2022, 291: 115591
- 26 Chen Y, Huang H, Deng X. In-plane impact characteristics of auxetic rotating triangular honeycomb inspired by a rotating rigid structure. *Adv Eng Mater*, 2024, 26: 2301943
- 27 Koohbor B, Kidane A. Design optimization of continuously and discretely graded foam materials for efficient energy absorption. *Mater Des*, 2016, 102: 151–161
- 28 Ashby M F, Evans A G, Fleck N A, et al. *Metal Foams: A Design Guide*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000
- 29 Weaire D, Fortes M A. Stress and strain in liquid and solid foams. *Adv Phys*, 1994, 43: 685–738
- 30 Vural M, Ravichandran G. Failure mode transition and energy dissipation in naturally occurring composites. *Compos Part B-Eng*, 2004, 35: 639–646
- 31 Vural M, Ravichandran G. Dynamic response and energy dissipation characteristics of balsa wood: experiment and analysis. *Int J Solids Struct*, 2003, 40: 2147–2170
- 32 Paul A, Ramamurty U. Strain rate sensitivity of a closed-cell aluminum foam. *Mater Sci Eng-A*, 2000, 281: 1–7
- 33 Nieh T G, Higashi K, Wadsworth J. Effect of cell morphology on the compressive properties of open-cell aluminum foams. *Mater Sci Eng-A*, 2000, 283: 105–110
- 34 Miltz J, Ramon O. Energy absorption characteristics of polymeric foams used as cushioning materials. *Polym Eng Sci*, 1990, 30: 129–133
- 35 Cheng Q, Yin J, Wen J, et al. Deformation control and energy absorption enhancement by hierarchical dual-phase design. *Int J Mech Sci*, 2025, 294: 110257
- 36 Shinde M, Ramirez-Chavez I E, Potts A, et al. A critical assessment of the onset strain of densification in the evaluation of energy absorption for additively manufactured cellular materials. *Manufacturing Lett*, 2024, 41: 708–719
- 37 Yin S, Wang H, Li J, et al. Light but tough bio-inherited materials: luffa sponge based nickel-plated composites. *J Mech Behav BioMed Mater*, 2019, 94: 10–18
- 38 Bohara R P, Linforth S, Nguyen T, et al. Anti-blast and -impact performances of auxetic structures: a review of structures, materials, methods, and fabrications. *Eng Struct*, 2023, 276: 115377
- 39 Sun Y, Amirrasouli B, Razavi S B, et al. The variation in elastic modulus throughout the compression of foam materials. *Acta Mater*, 2016, 110: 161–174
- 40 Xu J, Wu Y, Wang L, et al. Compressive properties of hollow lattice truss reinforced honeycombs (Honeytubes) by additive manufacturing: patterning and tube alignment effects. *Mater Des*, 2018, 156: 446–457
- 41 Tian Y, Wang H, Chen Z, et al. Design principles for dual-phase lattice cylindrical tubes with excellent energy absorption capability. *Composite Struct*, 2025, 359: 119015
- 42 Bogahawaththa M, Mohotti D, Hazell P J, et al. Effect of fractal dimension on mechanical behaviour and energy absorption of Menger sponge-inspired fractal structures. *Thin-Walled Struct*, 2025, 206: 112704
- 43 Zhang P, Yu P, Zhang R, et al. Grid octet truss lattice materials for energy absorption. *Int J Mech Sci*, 2023, 259: 108616
- 44 Zhao M, Li X, Yan X, et al. Machine learning accelerated design of lattice metamaterials for customizable energy absorption. *Thin-Walled Struct*, 2025, 208: 112845
- 45 Gradinger R, Rammerstorfer F G. On the influence of meso-inhomogeneities on the crush worthiness of metal foams. *Acta Mater*, 1998, 47: 143–148
- 46 Zhu N, Xu Y, Wang X, et al. Plastically isotropic mechanical metamaterials with discrete assemblies. *Adv Funct Mater*, 2025, 35: 2424390
- 47 Rahman O, Koohbor B. Optimization of energy absorption performance of polymer honeycombs by density gradation. *Compos Part C-Open Access*, 2020, 3: 100052
- 48 Ren Y, Nie Y, Ran W, et al. Mechanical properties and energy absorption of soft-hard dual phase lattice structures manufactured via selective laser

- p melting.
- [Met Mater Int](#)
- , 2023, 30: 303–314
- 49 Xiang Y, Wang M, Yu T, et al. Key performance indicators of tubes and foam-filled tubes used as energy absorbers. [Int J Appl Mech](#), 2015, 07: 1550060
 - 50 Zhang X, Zhang H. Energy absorption limit of plates in thin-walled structures under compression. [Int J Impact Eng](#), 2013, 57: 81–98
 - 51 Chen L, Chen T, Feng S, et al. Self-similar nesting strategy enables lattices achieve dual energy-absorbing plateaus. [Int J Mech Sci](#), 2024, 276: 109445
 - 52 Guo H, Zhang J. Performance-oriented and deformation-constrained dual-topology metamaterial with high-stress uniformity and extraordinary plastic property. [Adv Mater](#), 2024, 37: e2412064
 - 53 Lei M, Wang P, Hong Y, et al. Additively-manufactured node-reinforced plate lattices with superior energy absorption. [Mech Adv Mater Struct](#), 2024, 1–14
 - 54 Xiao L, Xu X, Feng G, et al. Compressive performance and energy absorption of additively manufactured metallic hybrid lattice structures. [Int J Mech Sci](#), 2022, 219: 107093
 - 55 Liu X, Wang Y, Liu X, et al. Synergetic control mechanism for enhancing energy-absorption of 3D-printed lattice structures. [Int J Mech Sci](#), 2024, 262: 108711
 - 56 Tancogne-Dejean T, Spierings A B, Mohr D. Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading. [Acta Mater](#), 2016, 116: 14–28
 - 57 Fu J, Ding J, Qu S, et al. Improved light-weighting potential of SS316L triply periodic minimal surface shell lattices by micro laser powder bed fusion. [Mater Des](#), 2022, 222: 111018
 - 58 Novak N, Al-Ketan O, Krstulović-Opara L, et al. Quasi-static and dynamic compressive behaviour of sheet TPMS cellular structures. [Composite Struct](#), 2021, 266: 113801
 - 59 Lei H, Li C, Zhang X, et al. Deformation behavior of heterogeneous multi-morphology lattice core hybrid structures. [Additive Manufacturing](#), 2021, 37: 101674
 - 60 Sun Z, Hua T, Zhang J, et al. Crushing patterns and energy absorption characteristics of additively manufactured metallic lattices subjected to different loading directions. [Composite Struct](#), 2025, 357: 118953
 - 61 Xiao L, Song W. Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: experiments. [Int J Impact Eng](#), 2018, 111: 255–272
 - 62 Choy S Y, Sun C N, Leong K F, et al. Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting. [Mater Des](#), 2017, 131: 112–120
 - 63 Gao T, Liu K, Wang X, et al. Multi-level mechanism of biomimetic TPMS hybridizations with tailorable global homogeneity and heterogeneity. [Extreme Mech Lett](#), 2024, 68: 102136
 - 64 Zhao M, Cui J, Chen L, et al. Enhanced mechanical properties and energy absorption of lattice metamaterials inspired by crystal imperfections. [Composite Struct](#), 2025, 356: 118894
 - 65 Ha N S, Lee T U, Tran D T, et al. Efficient energy absorption of bio-inspired bi-directional gradient hierarchical multi-cell structure. [Int J Mech Sci](#), 2024, 278: 109492

Summary for “超越密实化应变: 多胞材料能量吸收性能的综合评价”

Beyond densification strain: a comprehensive evaluation of energy absorption in cellular materials

Huitian Wang & Sha Yin*

School of Aeronautic Science & Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

* Corresponding author, E-mail: shayin@buaa.edu.cn

Cellular solid materials, renowned for their exceptional energy dissipation capacity, are extensively employed in cushioning, impact protection, and crash load management. With the advent of additive manufacturing, it has become possible to freely design and fabricate architected materials and cellular metamaterials featuring intricate microstructures and tunable mechanical responses. However, accurately evaluating their energy absorption performance remains a critical challenge for microstructure optimization and material selection. This paper first summarizes the typical quasi-static compressive response patterns exhibited by cellular materials, including both standard and non-standard deformation behaviors. It then critically reviews the prevalent evaluation approach based on densification strain, where the specific energy absorption (SEA) is calculated by integrating the stress-strain curve up to the assumed end of the plateau stage. While this method is effective for materials exhibiting clear three-stage responses, it becomes less reliable when the boundary between the plateau and densification stages becomes ambiguous, or when alternative mechanical responses such as stress hardening or multistep deformation occur. In such cases, SEA values can become highly sensitive to the selected endpoint, reducing their comparability and physical meaning. To address these limitations, this paper introduces a multi-dimensional evaluation framework that augments conventional SEA with stress-informed metrics: the energy absorption diagram, energy absorption efficiency (η), and the ideality (I). The energy absorption diagram, plotting absorbed energy against stress, provides an intuitive visualization of energy capacity across different stress thresholds. It is especially useful when comparing a small number of samples, particularly those with non-standard deformation responses. It allows for detailed, stage-specific evaluation of energy absorption behavior. For larger-scale screening and quantitative comparison, the framework emphasizes three scalar indicators: SEA, representing the magnitude of absorbed energy; the maximum energy absorption efficiency, reflecting peak energy conversion efficiency; and the ideality, quantifying stress uniformity and stability. These indicators collectively capture the magnitude, efficiency, and load regularity of energy absorption, offering a more complete and physically meaningful evaluation of structural performance. The proposed framework strikes a balance between two key goals in energy-absorbing material evaluation: achieving high energy absorption and ensuring effective stress control. It is well-suited for comparing different structures, guiding design optimization, and identifying performance bottlenecks in materials with complex mechanical responses. To ensure consistency and comparability, this paper also offers guidance on standardizing the calculation of SEA. It is recommended to use the strain corresponding to the point of maximum energy absorption efficiency, as this represents the optimal trade-off between energy absorbed and stress applied, and is widely adopted in existing studies. If substantial energy absorption persists beyond this point, the endpoint can be extended with appropriate justification. Crucially, both the ideality at the chosen endpoint and the structure's maximum energy absorption efficiency should always accompany the reported SEA value to enable transparent and reproducible evaluations. In conclusion, the proposed framework combines process-level tools (energy absorption diagram) and scalar indicators (SEA, η , I) to enable a comprehensive evaluation of cellular materials' energy absorption performance. It accommodates both detailed comparative analysis and efficient large-scale screening, effectively addressing the dual objectives of maximizing energy absorption while maintaining stress control. This provides a solid foundation for performance-driven design and selection of cellular structures, especially as advanced manufacturing techniques continue to broaden the design space. Looking ahead, integrating this framework with AI-assisted modeling and data-driven optimization could further advance intelligent and adaptive structural design.

cellular materials, energy absorption, densification strain, compression behavior, evaluation method

doi: [10.1360/CSB-2025-5202](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5202)